



การศึกษาพฤติกรรมการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ขึ้นกับเวลาของดินเหนียวอ่อนทะเล
ภายใต้ภาระความร้อน: กรณีศึกษาดินเหนียวปากพั่ง
Investigation of Undrained Time Dependent Behaviour of Soft Marine
Clay Under Thermal Loading: Case Study of Pakpanang Clay

พิมพ์ปราชญ์ พันธุ์วิศวกาญจน์
Pimparch Phanvisavakarn

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การศึกษาพฤติกรรมการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ขึ้นกับเวลาของดินเหนียวอ่อนทะเล
ภายใต้ภาระความร้อน: กรณีศึกษาดินเหนียวปากพั่ง
Investigation of Undrained Time Dependent Behaviour of Soft Marine
Clay Under Thermal Loading: Case Study of Pakpanang Clay

พิมพ์ปราชญ์ พันธุ์วิศวกาญจน์
Pimparch Phanvisavakarn

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพฤติกรรมการเลียนแบบไม่ระบายน้ำที่ขึ้นกับเวลาของดินเหนียวอ่อนทะเลภายใต้ภาวะความร้อน: กรณีศึกษาดินเหนียวปากพนัง
ผู้เขียน	นางสาวพิมพ์ปราชญ์ พันธุ์วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนูญ ชูอุปการ)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรเกษม จงประดิษฐ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธนิต เถลิงยานนท์)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธนกร ชมภูรัตน์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนูญ ชูอุปการ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธนกร ชมภูรัตน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....
(ศาสตราจารย์ ดร. ดำรงค์ดี ฟ่างรุ่งแสง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วน
ช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนินท์ ชูบุอุปการ)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....
(นางสาวพิมพ์ปราชญ์ พันธุ์วิศวกาญจน์)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....
(นางสาวพิมพ์ปราชญ์ พันธุ์วิศวกาญจน์)
นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพฤติกรรมการเผื่อนแบบไม่ระบายน้ำที่ขึ้นกับเวลาของดินเหนียวอ่อนทะเลภายใต้ภาวะความร้อน: กรณีศึกษาดินเหนียวปากพนัง
ผู้เขียน	นางสาวพิมพ์ปราชญ์ พันธุ์วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

พื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราชตั้งอยู่บริเวณปากแม่น้ำใกล้ทะเลฝั่งตะออกของภาคใต้ ซึ่งเป็นที่ราบลุ่มอันเกิดจากการตกตะกอนทับถมกันของดินเหนียว ปัจจุบันกลายเป็นเมืองที่มีการพัฒนาทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว จะเห็นได้จากการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นในทศวรรษที่ผ่านมา และโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต ซึ่งจะมีพลังงานความร้อนจากอุตสาหกรรมต่างๆถ่ายเทลงสู่ดินบริเวณรอบองค์อาคาร ดังนั้นการศึกษาถึงพฤติกรรมการทรุดตัวของดินเหนียว ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่แปรผันไปตามอัตรา (Rate dependent) มีความสำคัญมากในงานทางวิศวกรรม ซึ่งนำไปสู่การศึกษาเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างฐานรากอาคารและโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ รวมไปถึงวิธีการการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนในอนาคต

การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมด้านวิศวกรรมของดินเนื่องด้วยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อความแข็งแรงของดินโดยเฉพาะอย่างยิ่งดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดินเหนียวเป็นดินเม็ดละเอียด มีความเชื่อมแน่น และมีคุณสมบัติทางด้านประจุไฟฟ้า มีโมเลกุลของน้ำยึดเกาะอยู่ล้อมอนุภาคเม็ดดิน จึงทำให้มีดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูง และมีความสามารถในการระบายน้ำที่ต่ำ ดังนั้นพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวจะมีพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาหรือความหนืดของดิน การส่งผ่านความร้อนลงสู่ดินมีผลต่อน้ำในมวลดิน ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของดิน เนื่องจากดินเหนียวมีความสามารถในการระบายน้ำที่ช้ากว่าการนำความร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมความเค้น ความเครียด และกำลังของดินเหนียวอ่อนปากพนัง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราการเผื่อน โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำ และเผื่อนแบบไม่ระบายน้ำ ให้ความร้อนในเงื่อนไขไม่ระบายน้ำ (undrained heat) ที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน 0.02% 0.075% 1.0% และ 6.0% ต่อหน้าที่ ตามลำดับ ในตอนท้ายของงานวิจัยนี้จะได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด และกำลังรับแรงเผื่อนของดินเหนียวอ่อนปากพนังที่ทำการให้ความร้อนในเงื่อนไขระบายน้ำ (drained heat) และในเงื่อนไขไม่ระบายน้ำ รวมทั้งทำการเปรียบเทียบกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

จากผลการทดสอบพบว่าดินเหนียวปากพนังจัดเป็นดินเหนียวอินทรีย์ ที่มีความเป็นพลาสติกสูง (Organic clay, OH) และอุณหภูมิส่งผลต่อค่าขีดพิกต์พลาสติกและค่าขีดจำกัดเหลวของดินเหนียวปากพนัง โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าขีดจำกัดเหลวลดลงอย่างเห็นได้ชัด อุณหภูมิที่

สูงขึ้นส่งผลต่อการลดลงของน้ำหนักมวลดินและอินทรีย์วัตถุในมวลดิน ซึ่งไม่ได้เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างโมเลกุลของดินแต่อย่างใด

อัตราความเครียดส่งผลต่อพฤติกรรมการรับกำลังของดินเหนียวปากพั้ง เมื่ออัตราความเครียดสูง ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินสูงขึ้นในทุกๆสถานะการอัดแน่นเกินตัว โดยความร้อนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินที่อัตราการเฉือนช้ามากกว่าอัตราการเฉือนเร็ว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการระบายแรงดันน้ำออกจากมวลดิน หากให้ความร้อนโดยให้แรงดันน้ำสามารถระบายออกได้ จะทำให้มวลดินมีสามารถรับแรงเฉือนได้มากกว่าการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แต่หากการนำความร้อนได้เร็วกว่าความสามารถในการระบายน้ำออกจากมวลดิน ส่งผลให้มวลดินมีความแข็งแรงลดลง การให้ความร้อนทำให้ดินถึงจุดวิบัติเร็วขึ้น ซึ่งเร็วกว่าการทดสอบโดยการให้ความร้อนแบบระบายน้ำเล็กน้อย อัตราความเครียดและอุณหภูมิมีผลต่อสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวิบัติ (pore pressure parameter at failure, A_f) ที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่ำมากกว่าที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวสูง และพบว่าการทดสอบแบบให้ความร้อนแบบระบายน้ำให้แนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์ของความดันน้ำที่จุดวิบัติสูงกว่าการทดสอบแบบให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ และการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้อุณหภูมียังส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่จุดวิบัติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ การทดสอบที่อุณหภูมิสูง ในเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบระบายน้ำ ให้ขอบเขตสถานะ (state boundary) กว้างที่สุด ค่าความชันของเส้นสถานะวิกฤติของการทดสอบแบบให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ มีค่าต่ำกว่าการทดสอบแบบให้ความร้อนแบบระบายน้ำ และการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

คำหลัก : ดินเหนียวปากพั้ง, เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน, อัตราความเครียด, อุณหภูมิ, ให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ

Thesis Title	Investigation of Undrained Time Dependent Behaviour of Soft Marine Clay Under Thermal Loading: Case study of Pakphanang Clay
Author	Miss. Pimparch Phanvisavakarn
Major Program	Civil Engineering
Academic Year	2017

Abstract

Pakphanang, Nakhon Si Thammarat province is located in the eastern coast of the southern of Thailand. The lowland plain is formed by deposition of soft marine clay. The past decade to the present, the city is the one of the rapid development. There are a large number of the constructions, houses, Industrial plants and nuclear power plants that could happen in the future. The heat from industries is transferred to the soil surrounding the building. Consequently, engineer must clearly understand the rate-dependent behavior of clay that is very important to predict soil behavior and design structure.

Changes in soil engineering behavior because of the changing temperature affect the strength of clay. Clay is fine grain soil, cohesive, electrostatic attraction, double layer adsorb clay particle that relate to high plasticity and low permeability. Thus, shear strength behavior of clay depends on time-dependent behavior or viscosity of soil. Heat conduction causes pore water that is important to affect strength of clay. Since the permeability of clay is lower than its conductivity. Accordingly, this study focuses on investigating the time-dependent undrained shear behavior of marine clay under both thermal and mechanical loading. Isotropic consolidated undrained triaxial compression tests with controlled temperature and strained rates are carried out for this purpose. The shearing temperatures were 45 and 60 degrees Celsius in undrained heating condition. Shear rates were 0.02%, 0.075%, 1.0%, and 6.0% per minute. Soil behavior in term of the effect of the overconsolidation ratios (OCR) were 1, 2, 4 and 8 are also investigated. At the end of this paper, we will present a comparative study of the relationship between stress and strain, shear strength of soft clay at high temperature (drained heating and undrained heating) and room temperature.

The test results were indicated that the Pakphanung marine clay is classified in high plasticity Organic clay, OH. Heat affects decreasing of plastic index

and liquid limit. Noticeably, the higher the temperature, the lower the liquid limit, soil mass and also organic matter. Anyway, it did not affect molecular structure.

The strain rates affect undrained shear behavior, showed that high strain rate, high shear strength for any OCR. Heat is a factor that stimulates the strength of Pakphanung clay, especially, in low strain rate. It depends on the ability to drain excess water from the soil mass. The drained heating causes the higher shear strength than the non-heating test. On the other hand, the heat conductivity is faster than the ability to drain excess pore pressure built by undrained heat, the soil strength will decrease. Heating causes the soil reaches the point of failure slightly faster than drained heating test. Stress and thermal affect the water pressure coefficient at the failure point (A_f) at low OCR, which is higher than high OCR. The drained heating test showed higher A_f than undrained heat test and room temperature test. Moreover, the temperature also contributes to the modulus of elasticity at the point of failure. Clearly, increase the modulus of elasticity secant. Drained heating tests give the highest state boundary. The slope of the critical state of undrained heat is lower than the drained heating and non-heating.

Keywords : Pakphanang clay, Triaxial apparatus, strain rate, Temperature, Undrained heating

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนของบุคคลหลายท่าน ท่านแรกคือผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูอุปการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักเป็นอย่างยิ่งและท่านต่อมาคือ รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความความรู้ คำปรึกษา รวมทั้งชี้แนะแนวทางให้กับผู้วิจัยตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เถลิษยานนท์ และรองศาสตราจารย์ ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยชิ้นนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยเพื่อทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยผ่านมาด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณบริษัทพันธิวิศวกรรม คอนซัลแตนท์ กรุ๊ป ที่ให้การสนับสนุนในการเก็บตัวอย่างดินทดสอบ ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี สำหรับความอนุเคราะห์น้ำยาพาราผสมในการผลิตปลอกยาง

ขอขอบคุณน้องวัชรระ ศรีสะกุล ที่ให้คำปรึกษาเรื่องเครื่องมือทดสอบ รวมทั้งเทคนิควิธีการต่างๆ ขอขอบคุณพี่ชลดา กาญจนกุล ที่คอยให้คำปรึกษาเรื่องการส่งผลงานวิจัย ขอขอบคุณน้องๆ ในคณะฯ ได้แก่ น้องภานุพงศ์ ทุ่มทวน น้องธนพจน์ จิรณานวงศ์ และน้องวรเทพ แซ่ล่ง ที่ให้คำปรึกษาต่างๆ ขอขอบคุณพี่สุพิศ นนทะสร และน้องจิราพร ยวงโย สำหรับคำแนะนำในการทำเอกสาร ขอขอบคุณเพื่อนแก้ม กรทิพย์ อีววังโส ที่ช่วยกันผ่านอุปสรรคต่างๆในการเรียนกันมาไม่น้อย ขอขอบคุณแจ๊ค เกรียงพล วรสิทธิเศรษฐ์ สำหรับความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่างๆ ความห่วงใย กำลังใจที่ดี และคอยอยู่เคียงข้างเสมอมา ขอขอบคุณทุกความรักที่ทำให้มีความหวัง ขอขอบคุณน้ำใจจากเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกท่าน และขอขอบพระคุณเจ้าของเอกสารและงานวิจัยทุกท่าน ที่ผู้ศึกษาค้นคว้าได้นำมาอ้างอิงในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้เขียนมีวันนี้ได้เนื่องจากกำลังใจจากครอบครัว โดยเฉพาะคุณแม่ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา คอยสนับสนุนเวลา คอยเป็นเบื้องหลังในการส่งเสริมผู้เขียน ผู้เขียนจะขอระลึกถึงบุญคุณของบุคคลทุกท่านตลอดไป

พิมพ์ปราชญ์ พันธิวิศวกรรม

สารบัญ

บทคัดย่อ.....	(5)
Abstract	(7)
กิตติกรรมประกาศ.....	(9)
สารบัญตาราง.....	(12)
สารบัญรูปภาพ.....	(14)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สภาพทางธรณีวิทยา	4
2.2 ประเภทของดิน	7
2.3 ชนิดของแร่ดินเหนียว	9
2.4 คุณสมบัติทางกายภาพดิน	12
2.5 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน	21
2.6 การทดสอบแรงอัดสามแกนและการแปลงผล	33
2.7 ทฤษฎีสถานะวิกฤต	37
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	72
3.1 การเก็บตัวอย่างดินและวิธีการเก็บตัวอย่างทดสอบ	72
3.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	75
3.3 การวิเคราะห์และการสรุปผล	86
บทที่ 4 ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	87
4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวปากพั้ง	87
4.2 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง	99
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	171
5.1 ผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวปากพั้ง	171
5.2 ผลของอัตราความเครียดต่อกำลังของดินเหนียวปากพั้ง	171
5.3 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังของดินเหนียวปากพั้ง	172
5.4 ผลของอุณหภูมิและอัตราความเครียดต่อค่าพารามิเตอร์และขอบเขตสถานะในทฤษฎี สถานะวิกฤต	172
5.5 ข้อเสนอแนะ	173
บรรณานุกรม.....	174
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ	181

ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดสอบแรงอัดสามแกน.....	198
ภาคผนวก ค รูปตัวอย่างดินหลังการทดสอบแรงอัดสามแกน.....	231
ภาคผนวก ง การเผยแพร่วิทยานิพนธ์.....	234
ประวัติผู้เขียน.....	243

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวปากพนัง	6
ตารางที่ 2.2	สภาพดินเหนียว	8
ตารางที่ 2.3	ความถ่วงจำเพาะของดินประเภทต่างๆ	14
ตารางที่ 2.4	การอธิบายค่าดัชนีพลาสติก	15
ตารางที่ 2.5	การจำแนกชนิดดินเหนียวโดยใช้ค่าแอกทิวิตี้	15
ตารางที่ 2.6	การอธิบายค่าดัชนีความเหลว	15
ตารางที่ 2.7	การจำแนกชนิดดินเหนียวตามค่าความไวตัว	16
ตารางที่ 2.8	การนำความร้อนของแร่ต่างๆ	20
ตารางที่ 2.9	พารามิเตอร์ของสมการ SHANSEP ของดินแต่ละชนิด	25
ตารางที่ 2.10	ค่าทั่วไปของโมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับดินเหนียว	28
ตารางที่ 2.11	ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวิกฤติของดินชนิดต่าง	29
ตารางที่ 2.12	ค่าความหนืดของน้ำกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	48
ตารางที่ 2.13	การจำแนกดินอินทรีย์ตามปริมาณอินทรีย์วัตถุ	54
ตารางที่ 2.14	คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอินทรีย์	55
ตารางที่ 2.15	ผลการวิจัยที่ผ่านมา	71
ตารางที่ 3.1	การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี	75
ตารางที่ 3.2	การทดสอบหาลักษณะองค์ประกอบทางเคมี	76
ตารางที่ 3.3	จำนวนตัวอย่างการทดสอบแรงอัดสามแกน	80
ตารางที่ 3.4	ค่าแรงดันสำหรับการอัดตัวคายน้ำ	82
ตารางที่ 3.5	เงื่อนไขต่างๆ ของตัวอย่างที่ต้องทดสอบ	84
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปากพนัง (วัชระ 2560)	88
ตารางที่ 4.2	คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนัง	95
ตารางที่ 4.3	คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนัง (อัครเดช 2552)	97
ตารางที่ 4.4	คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง	101
ตารางที่ 4.5	ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด	104
ตารางที่ 4.6	ความชันของเส้นแนวโน้มเชิงเส้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับอัตราความเครียด	105
ตารางที่ 4.7	ความชันของอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับอุณหภูมิ	110
ตารางที่ 4.8	ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินของดินสภาวะอัดแน่นเกินตัวปกติ	126
ตารางที่ 4.9	ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินของดินสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2	127
ตารางที่ 4.10	ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินของดินสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4	128
ตารางที่ 4.11	ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินของดินสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 8	129
ตารางที่ 4.12	ค่าสัมประสิทธิ์ของความดันน้ำที่จุดวิกฤติของดินเหนียวปากพนัง	138

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 4.13 ความชันของเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวิบัติ (วัชระ 2560)	138
ตารางที่ 4.14 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำภายใต้อุณหภูมิต่ำ 30 องศาเซลเซียส	141
ตารางที่ 4.15 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำภายใต้อุณหภูมิต่ำ 45 องศาเซลเซียส	141
ตารางที่ 4.16 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำภายใต้อุณหภูมิต่ำ 60 องศาเซลเซียส	142
ตารางที่ 4.17 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทานอร์เมลไลซ์ และอัตราการอัดแน่นเกินตัว ที่อุณหภูมิต่ำ 30 องศาเซลเซียส	144
ตารางที่ 4.18 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทานอร์เมลไลซ์ และอัตราการอัดแน่นเกินตัว ที่อุณหภูมิต่ำ 45 องศาเซลเซียส	144
ตารางที่ 4.19 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทานอร์เมลไลซ์ และอัตราการอัดแน่นเกินตัว ที่อุณหภูมิต่ำ 60 องศาเซลเซียส	144
ตารางที่ 4.20 ความเครียดแนวแกนที่จุดวิบัติของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยไม่ระบายน้ำ	145
ตารางที่ 4.21 ความเครียดแนวแกนที่จุดวิบัติของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยระบายน้ำ	146
ตารางที่ 4.22 โมดูลัสยืดหยุ่นที่จุดวิบัติของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยไม่ระบายน้ำ	147
ตารางที่ 4.23 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่จุดวิบัติของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยระบายน้ำ	147
ตารางที่ 4.24 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยไม่ระบายน้ำ	148
ตารางที่ 4.25 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ที่ครั้งหนึ่งของกำลังสูงสุด ของการทดสอบแบบให้ความร้อน โดยระบายน้ำ	149
ตารางที่ 4.26 ค่าโมดูลัสเริ่มต้นของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยไม่ระบายน้ำ	150
ตารางที่ 4.27 ความชันของเส้นสถานะวิกฤติที่อุณหภูมิต่ำและอัตราความเครียดต่างกัน	168
ตารางที่ 4.28 ความชันของเส้นฮอฟสตีฟที่อุณหภูมิต่ำและอัตราความเครียดต่างกัน	168
ตารางที่ 4.29 ค่าพารามิเตอร์ในสถานะวิกฤติของดินเหนียวปากพั้ง	170

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	ชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ เมื่อ 6000 ปีที่แล้วเทียบกับปัจจุบัน	5
รูปที่ 2.2	อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช	5
รูปที่ 2.3	ลักษณะชั้นดินบริเวณชายฝั่งตะวันออก จ.นครศรีธรรมราช	6
รูปที่ 2.4	โครงสร้างการรวมตัวของอนุภาคดินเหนียว	9
รูปที่ 2.5	แผนภูมิพลาสติกซีดีแสดงชนิดของแร่ดินเหนียว	11
รูปที่ 2.6	ลักษณะโครงสร้างการจับตัวของผลึกแร่ธาตุในแร่ดินเหนียว	12
รูปที่ 2.7	ขีดจำกัดความชื้นเหลว	34
รูปที่ 2.8	การยึดเกาะของโมเลกุลน้ำรอบอนุภาคดินเหนียว	18
รูปที่ 2.9	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการนำความร้อนของดิน	20
รูปที่ 2.10	การตอบสนองของดินต่อการรับแรงเฉือน	22
รูปที่ 2.11	ผลของค่าอัตราส่วนการคายน้ำต่อการรับแรงเฉือน	23
รูปที่ 2.12	ผลของเงื่อนไขการระบายน้ำต่อการตอบสนองต่อแรงเฉือนของดิน	23
รูปที่ 2.13	ขอบเขตความเค้นเฉือนสูงสุดของดินจากแรงยึดเหนี่ยวภายใน	24
รูปที่ 2.14	ความสัมพันธ์ระหว่าง S_u/σ'_{vo} กับค่า OCR	26
รูปที่ 2.15	โมดูลัสเริ่มต้น โมดูลัสสัมผัส และโมดูลัสซีแคนต์	27
รูปที่ 2.16	การยุบตัวระยะที่สอง	32
รูปที่ 2.17	เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน	34
รูปที่ 2.18	ทางเดินของความเค้น	35
รูปที่ 2.19	ทางเดินของความเค้นของดินที่อัดแน่นเกินตัว	36
รูปที่ 2.20	พื้นผิวขอบสถานะ	37
รูปที่ 2.21	เส้นอัตราตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทาง	39
รูปที่ 2.22	เส้นสถานะวิกฤต	40
รูปที่ 2.23	วิถีความเค้นแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวประเภทต่างๆ	41
รูปที่ 2.24	พื้นที่ผิวครากของดินเหนียว	42
รูปที่ 2.25	การจับคู่พารามิเตอร์อัตราตัวคายน้ำ	43
รูปที่ 2.26	แสดงองค์ประกอบของโมเลกุลน้ำ	46
รูปที่ 2.27	พันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลน้ำ	46
รูปที่ 2.28	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	47
รูปที่ 2.29	ความสัมพันธ์ของความสามารถในการไหลซึมและค่าความพรุน	49
รูปที่ 2.30	การไหลนิวโตเนียนและการไหลไมนิวโตเนียน	50
รูปที่ 2.31	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	50
รูปที่ 2.32	การเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับอุณหภูมิของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ค่า OCR = 1, 2 และ 4	52

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 2.33	ภาพถ่าย SEM ของดินเหนียวอินทรีย์ที่มีอินทรีย์สาร	55
รูปที่ 2.34	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ทำการนอร์เมิลไลซ์ของดินอินทรีย์	55
รูปที่ 2.35	แนวโน้มความเค้นเบี่ยงเบนและแนวโน้มของแรงดันน้ำส่วนเกิน	56
รูปที่ 2.36	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงยึดเหนี่ยวที่ทำนอร์เมิลไลซ์และค่าปริมาณอินทรีย์สาร	57
รูปที่ 2.37	ความสัมพันธ์ของความเค้น - ความเครียด	58
รูปที่ 2.38	ผลกระทบของอัตราความเครียดต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ	58
รูปที่ 2.39	ความสัมพันธ์ระหว่างการค่าความเค้นเบี่ยงเบนประสิทธิผลกับความเครียดแนวแกน	59
รูปที่ 2.40	พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียว	60
รูปที่ 2.41	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินทราย	60
รูปที่ 2.42	ผลการทดสอบในดิน NC clay (Quinn 2013)	61
รูปที่ 2.43	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนกับอัตราความเครียดของดินเหนียวปากพั่ง	62
รูปที่ 2.44	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราความเครียดของดินเหนียวปากพั่ง	62
รูปที่ 2.45	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับอัตราความเครียด ที่อัตราการอัดแน่น เกินตัวต่างๆ	63
รูปที่ 2.46	ผลการทดสอบด้วยการเฉือนเร็วของ Moritz (1995)	65
รูปที่ 2.47	ผลการทดสอบด้วยการเฉือนช้าของ Moritz (1995)	65
รูปที่ 2.48	(ก) แสดงค่าความเค้นเบี่ยงเบน (ข) ค่าโมดูลัสซีแคนต์	66
รูปที่ 2.49	ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนที่สภาวะอัดแน่นปกติ	67
รูปที่ 2.50	ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนที่สภาวะอัดแน่นเกินตัว	67
รูปที่ 2.51	ผลการทดสอบกำลังอัดสามแกนตัวอย่างสภาพอัดแน่นปกติ	68
รูปที่ 2.52	ผลการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวอ่อน (Abuel-Naga et al. 2006)	69
รูปที่ 2.53	ผลการทดสอบของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	70
รูปที่ 2.54	เส้นทางความเค้นของของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	70
รูปที่ 3.1	แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	73
รูปที่ 3.2	(ก) แสดงการเก็บตัวอย่างดินเหนียวปากพั่ง (ข) แสดงการเก็บดินในกระบอกบาง (ค) แสดงการเก็บรักษาก้อนตัวอย่างดินเพื่อรอทำการทดสอบ	74
รูปที่ 3.3	(ก) แสดงตัวอย่างดินในวงแหวนบีบรัด (ข) แสดงการนำตัวอย่างไปให้ความร้อน (ค) แสดง การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ	79
รูปที่ 3.4	แบบเซลล์สามแกนที่ปรับปรุงใหม่ (วัชระ 2560)	80
รูปที่ 3.5	รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบแรงอัดสามแกน (วัชระ 2560)	81
รูปที่ 3.6	(ก) แสดงการติดตั้งตัวอย่างบนฐานเซลล์ (ข) แสดงการสวมปลอกยาง (ค) แสดงการใส่ยาง รัดทั้งหัวและท้าย (ง) แสดงการประกอบตัวเครื่องพร้อมทำการทดสอบ	85

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.1	ผลเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของดินเหนียวปากพั้ง.....	89
รูปที่ 4.2	โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวปากพั้งที่มาตราส่วน.....	90
รูปที่ 4.3	ผลการศึกษาคุณสมบัติความเป็นผลึกของดินเหนียวที่ความลึก 4 เมตร.....	91
รูปที่ 4.4	ผลการศึกษาคุณสมบัติความเป็นผลึกของดินเหนียวที่ความลึก 8 เมตร.....	92
รูปที่ 4.5	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมวลดินกับอุณหภูมิ.....	93
รูปที่ 4.6	แนวโน้มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่อุณหภูมิต่างๆ.....	94
รูปที่ 4.7	ผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าขีดจำกัดอัตราเปอร์ริค.....	97
รูปที่ 4.8	แผนภูมิพลาสติกซิตีของดินเหนียวปากพั้ง.....	98
รูปที่ 4.9	การทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดินที่อุณหภูมิต่างๆ.....	99
รูปที่ 4.10	เส้นโค้งการอัดตัวคายนํ้าของตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ.....	101
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนํ้าและความดัน ที่ตัวอย่างดินอุณหภูมิ ต่างๆ.....	102
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและความดัน ที่ตัวอย่างดินอุณหภูมิต่างๆ	103
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำนอร์เมลไลซ์กับอัตราความเครียด ที่ อัตราการอัดแน่นเกินตัวต่างๆ.....	106
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำนอร์เมลไลซ์ด้วยค่าความเค้น ประสิทธิผลก่อนเลื่อนตัวอย่างกับอุณหภูมิ ที่ OCR=1.....	108
รูปที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำนอร์เมลไลซ์ด้วยค่าความเค้น ประสิทธิผลก่อนเลื่อนตัวอย่างกับอุณหภูมิ ที่ OCR=2.....	109
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำนอร์เมลไลซ์ด้วยค่าความเค้น ประสิทธิผลก่อนเลื่อนตัวอย่างกับอุณหภูมิ ที่ OCR=4.....	109
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำนอร์เมลไลซ์ด้วยค่าความเค้น ประสิทธิผลก่อนเลื่อนตัวอย่างกับอุณหภูมิ ที่ OCR=8.....	110
รูปที่ 4.18	การเปรียบเทียบอัตราความเครียดที่ความเค้นประสิทธิผลใดๆที่ได้จากทดสอบอัดตัวคายนํ้า แบบ 1 มิติ (ศิริพร 2556).....	111
รูปที่ 4.19	ผลของแรงดันนํ้าส่วนเกินที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการให้ความร้อน.....	112
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำนอร์เมลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิ แตกต่างกันและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันนํ้าส่วนเกินกับอัตราความเครียดที่อัตรา ความเครียด 0.02%ต่อนาที.....	115
รูปที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำนอร์เมลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิ แตกต่างกันและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันนํ้าส่วนเกินกับอัตราความเครียดที่อัตรา ความเครียด 0.075%ต่อนาที.....	118

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำนอร์มัลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิแตกต่างกันและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราความเครียดที่อัตราความเครียด 1.0% ต่อหน้าที่	121
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำนอร์มัลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิแตกต่างกันและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราความเครียดที่อัตราความเครียด 6.0% ต่อหน้าที่	124
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการนอร์มัลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิห้อง	126
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการนอร์มัลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	127
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการนอร์มัลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	128
รูปที่ 4.27 รูปตัวอย่างดิน NC clay หลังการเฉือนที่อัตราความเครียดต่ำ	129
รูปที่ 4.28 รูปตัวอย่างดิน NC clay หลังการเฉือนที่อัตราความเครียดสูง	130
รูปที่ 4.29 รูปตัวอย่างดิน OC clay หลังการเฉือนที่อัตราความเครียดต่ำ	130
รูปที่ 4.30 รูปตัวอย่างดิน OC clay หลังการเฉือนที่อัตราความเครียดสูง	130
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันน้ำกับอัตราความเครียดตามแนวแกนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน อัตราความเครียด 0.02% ต่อหน้าที่	134
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันน้ำกับอัตราความเครียดตามแนวแกนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน อัตราความเครียด 0.075% ต่อหน้าที่	135
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันน้ำกับอัตราความเครียดตามแนวแกนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน อัตราความเครียด 1.0% ต่อหน้าที่	136
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันน้ำกับอัตราความเครียดตามแนวแกนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน อัตราความเครียด 6.0% ต่อหน้าที่	137
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวิกฤตกับอัตราความเครียด	140
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนที่ทำนอร์มัลไลซ์และอัตราการอัดแน่นเกินตัว ..	143
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดของดินเหนียวปากพังกทดสอบที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส	148
รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์กับค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดของดินเหนียวปากพังกทดสอบที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส	149
รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นกับค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดของดินเหนียวปากพังกทดสอบที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส	150
รูปที่ 4.40 เส้นทางความเค้นของตัวอย่างดิน ที่อัตราความเครียด 0.02% ต่อหน้าที่	152
รูปที่ 4.41 เส้นทางความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 0.02% ต่อหน้าที่	153

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.42	เส้นทางความเค้นของตัวอย่างดิน ที่อัตราความเครียด 0.075% ต่ออนาที	155
รูปที่ 4.43	เส้นทางความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 0.075% ต่ออนาที	156
รูปที่ 4.44	เส้นทางความเค้นของตัวอย่างดิน ที่อัตราความเครียด 1.0% ต่ออนาที	157
รูปที่ 4.45	เส้นทางความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 1.0% ต่ออนาที	158
รูปที่ 4.46	เส้นทางความเค้นของตัวอย่างดิน ที่อัตราความเครียด 6.0% ต่ออนาที	160
รูปที่ 4.47	เส้นทางความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 6.0% ต่ออนาที	161
รูปที่ 4.48	ขอบเขตสถานะของการทดสอบในเงื่อนไขการให้ความร้อนต่างกัน ที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.075% ต่ออนาที	162
รูปที่ 4.49	เส้นทางความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 0.02% มม. ต่ออนาที	164
รูปที่ 4.50	เส้นทางความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 0.075% มม. ต่ออนาที	165
รูปที่ 4.51	เส้นทางความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 1.0% มม. ต่ออนาที	166
รูปที่ 4.52	เส้นทางความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 6.0% มม. ต่ออนาที	167
รูปที่ 4.53	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนที่ทำงานอร์เมิลไลซ์และอัตราความเครียด	170

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศไทยเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เห็นได้จากการการเพิ่มขึ้นของเขตเศรษฐกิจ โรงงานอุตสาหกรรม และ โรงไฟฟ้า ซึ่งมักตั้งอยู่ในพื้นที่ตัวเมืองและรอบตัวเมืองหรือพื้นที่ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นบริเวณปากแม่น้ำ และที่ราบลุ่มอันเกิดจากการตกตะกอนทับถมกันของดินเหนียว ซึ่งประสบปัญหาการทรุดตัวของดินสูง ส่งผลต่อเสถียรภาพของโครงสร้างอาคารในระยะยาว ดังในบริเวณอำเภอปากพอง จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นหนึ่งในพื้นที่ที่ประสบปัญหาดังกล่าว จากการสำรวจพบว่าสภาพสิ่งก่อสร้างบริเวณอำเภอปากพองมักพบปัญหาการทรุดตัวของโครงสร้าง ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างอาคารหรือถนน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยของพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงสู่ดิน อันเกิดจากอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ โรงงานอบแห้งยางพาราดิบ และ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต อาจนำมาซึ่งปัญหาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมด้านวิศวกรรมของดินเนื่องด้วยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่อความแข็งแรงของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินเหนียวอ่อน ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายในชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในบริเวณพื้นที่ดังกล่าว

ดินเหนียวปากพอง เกิดจากการพัดพามาสะสมตัวในบริเวณชายฝั่งทะเล ต่อมาเกิดการตกตะกอน และการทับถมของดินเหนียวในน้ำทะเล (marine deposits) มีความหนาประมาณ 15 ถึง 20 เมตร (อภิชัย 2546) จากการศึกษาของอัครเดช (2552) พบว่าดินเหนียวอ่อนปากพองมีค่ารับกำลังได้น้อยและมีการยุบตัวสูง จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวปากพอง พบว่ามีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นดินที่มีความไวตัว (sensitivity) ดินประเภทนี้มีการสูญเสียกำลังต้านทานแรงเฉือน (shear strength) อย่างมากเมื่อถูกรบกวน และมีการยุบตัวที่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจถึงผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของดินเหนียวปากพอง

ที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายท่านทำการศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียด (strain rate) ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินเหนียว ผลการศึกษาพบว่า การปรับเปลี่ยนอัตราความเครียดจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรง โดยที่ระดับอัตราความเครียดสูงสุด ดินเหนียวจะมีกำลังรับแรงเฉือนได้สูงสุด (Vaid and Campanella 1977) เป็นไปในทิศทางเดียวกับศึกษาดินเหนียวปากพอง (ศิริพร 2556) และต่อมาได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมของดิน ซึ่งยังคงมีข้อถกเถียงกันในเรื่องของผลของอุณหภูมิที่มีต่อการรับแรงของดินเหนียว เนื่องจากผู้วิจัยหลายท่านได้พบว่า ความร้อนจะทำให้ดินเหนียวมีความแข็งแรงลดลง ได้แก่ การศึกษาของ Murayama (1969) Sherif and Burrous (1969) Lovisa

Moritz (1995) Mitchell (1964) และ Hueckel and Baldi (1990) แต่ในอีกมุมหนึ่งได้มีนักวิจัยอีกหลายท่านด้วยกันที่ได้ผลการทดสอบในทางตรงกันข้าม ได้แก่ ผลการทดสอบของ Laguros (1969) Houston et al. (1985) Tanaka et al. (1997) Abuel-Naga et al. (2006) Trani et al. (2008) และวัชระ ศรีสะเกษ (2560) ซึ่งได้ทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำโดยให้ความร้อนแบบระบายน้ำกลับพบว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบน หรือค่ากำลังการรับแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กล่าวคือ การให้ความร้อนจะทำให้ดินเหนียวมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนั่นเอง ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับปัจจัยของพฤติกรรมของแรงดันน้ำส่วนเกิน (excess pore pressure) อันเป็นผลมาจากความหนืด (viscosity) และการระบายน้ำ สรุปได้ว่าที่ผ่านมาการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจน โดยเฉพาะผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวอินทรีย์ (organic clay)

ดังนั้นการศึกษานี้เป็นการศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดและอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมด้านกำลัง (shear strength) แรงดันน้ำส่วนเกิน และลักษณะวิถีความเค้น (stress path) ของดินเหนียวปากพนัง รวมทั้งผลกระทบของอัตราการอัดแน่นเกินตัว โดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำที่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในเซลล์ ภายใต้เงื่อนไขของการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียว เมื่อมีอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง นำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ความร้อนร่วมกับวิธี prefabricated vertical drain (PVD) ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใต้เงื่อนไขการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ

1.2.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำ (pore water pressure) ภายใต้อัตราความเครียด และอุณหภูมิที่แตกต่างกันในเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ

1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมรับน้ำหนักแบบขึ้นกับอัตราความเครียดของดินเหนียวอ่อนภายใต้ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ตัวอย่างดินที่นำมาศึกษาเป็นดินเหนียวอ่อนแบบไม่ถูกรบกวนโดยมีอัตราการอัดแน่นเกินตัวปกติ ซึ่งอยู่ในช่วงระดับความลึกที่ประมาณ 4 ถึง 12 เมตร หรือถึงชั้นดินเหนียวแข็งจะถูกเก็บในบริเวณ อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช

1.3.2 ทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างดินเหนียวปากพนังตามมาตรฐาน ASTM

1.3.3 ทำการทดสอบหาผลกระทบของอัตราความเครียดและอุณหภูมิ โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ และทำการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ ที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส ทำการเฉือนด้วยอัตราความเครียดคงที่ (constant strain rate) 4 อัตราความเครียด

คือ 0.02 0.075 1.0 และ 6.0 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที และใช้ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว (OCR) 4 ค่า คือ 1 2 4 และ 8

1.3.4 นำผลการทดสอบที่อุณหภูมิต้อง (ศิริพร 2556) และที่อุณหภูมิสูงโดยการให้ความร้อนแบบระบายน้ำ (วัชระ 2560) มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในข้อ 1.3.3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อเข้าใจพฤติกรรมของกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบขึ้นกับอัตราความเครียดของดินเหนียวโดยมีปัจจัยเรื่องความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง

1.4.2 เพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ทางกำลังของดินเหนียวภายใต้ภาวะความร้อนและอัตราความเครียด

1.4.3 สามารถประยุกต์ใช้ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบทางวิศวกรรมธรณี และการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ความร้อนร่วมกับวิธี prefabricated vertical drain (PVD)

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราความเครียดต่อพฤติกรรมพฤติกรรมการเคลื่อนไหวแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปากพั้ง โดยการศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย สภาพทางธรณีวิทยา ลักษณะของชั้นดินเหนียวปากพั้ง คุณสมบัติดัชนี คุณสมบัติทางวิศวกรรม การทดสอบแรงอัดสามแกน ทฤษฎีสถานะวิกฤติ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สภาพทางธรณีวิทยา

จากข้อมูลสภาพทางธรณีวิทยาและลักษณะของชั้นดินบริเวณภาคใต้ พบว่าภาคใต้มีลักษณะแหลมยื่นออกไปในทะเล ด้านตะวันออกติดกับอ่าวไทย ส่วนด้านตะวันตกติดทะเลอันดามัน การเปลี่ยนแปลงทางธรณีของชายฝั่งทางภาคใต้เริ่มในช่วงระยะเวลาประมาณ 10,000 ปีที่แล้ว โดยคาบสมุทรทางใต้ได้มีการตัวยกตัวเอียงไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ทำให้ชายฝั่งทะเลด้านทิศตะวันออกยกตัวขึ้นและชายฝั่งด้านตะวันตกจมลง ประกอบกับการลดลงของระดับน้ำทะเลฝั่งทะเลตะวันออกที่เคยจมอยู่ใต้น้ำถูกยกขึ้นสูงกว่าระดับน้ำทะเล เกิดเป็นที่ราบกว้างชายฝั่งที่มีระดับต่ำกว่าที่ราบเดิมและเกิดเป็นบันไดชายฝั่ง (marine terrace) ขึ้นใหม่ ซึ่งแนวชายฝั่งทะเลบริเวณนี้จะมีลักษณะค่อนข้างราบเรียบ นอกจากนี้การยกตัวของแผ่นดินทำให้แม่น้ำต้องมีการปรับการไหลและการกัดเซาะ โดยลำน้ำจะกัดเซาะบริเวณกลางและปลายน้ำให้ลึกลงไป ทำให้มีบันไดริมแม่น้ำ (river terrace) ใหม่เกิดขึ้น สภาพภูมิประเทศในบริเวณนี้จึงมีการกัดเซาะในลักษณะของตัวยู (u-shape) จากรูปที่ 2.1 แสดงบริเวณที่เคยเป็นชายฝั่งทะเลในอดีตเทียบกับปัจจุบันในบริเวณภาคใต้ให้เห็นอย่างชัดเจน ในตัวอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ตั้งอยู่ตามแนวสันทรายเก่า และอยู่ห่างจากสันทรายริมทะเลปัจจุบันประมาณ 20 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังมีร่องรอยของการเกิดแอ่งน้ำหลังสันทรายเก่า (Lagoon) ทำให้เห็นเป็นแนวยาวในบริเวณด้านทิศตะวันตกของตัวเมือง (อภิชัย 2546)

ลุ่มน้ำปากพั้ง ตั้งอยู่ทางตอนใต้ของจังหวัดนครศรีธรรมราช ครอบคลุมพื้นที่รวม 13 อำเภอ คือ พื้นที่ทั้งหมดของอำเภอปากพั้ง อำเภอเชียรใหญ่ อำเภอหัวไทร อำเภอเฉลิมพระเกียรติ อำเภอชะอวด อำเภอร่อนพิบูลย์ อำเภอจุฬาภรณ์ พื้นที่บางส่วนของอำเภอลานสกา อำเภอพระพรหม และอำเภอเมืองนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช รวมทั้งพื้นที่บางส่วนของอำเภอกวนขนุน อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง และอำเภอระโนด จังหวัดสงขลา บริเวณที่ราบชายฝั่งตะวันออกชั้นดินส่วนใหญ่จะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน ในบริเวณที่เป็นชายหาดเก่าอาจจะมีชั้นทรายทับถมอยู่ข้างบน ในบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช จะมีชั้นทรายและทรายเป็นดินสลับอยู่ในชั้นล่าง ชั้นดินเหล่านี้เกิดจากการสะสมของตะกอนแม่น้ำก่อนที่ชายฝั่งจะถอยร่นออกไป การก่อตัวของชายหาดใหม่เกิดจากก่อตัวเป็นแหลมยื่นออกไปปิดชายฝั่งเดิม ทำให้แนวชายฝั่งใหม่จะไม่มีตะกอนแม่น้ำทับถมอยู่ข้างล่าง ดังในรูปที่ 2.2 แสดงบริเวณอำเภอปากพั้ง จังหวัดนครศรีธรรมราช ดินเหนียวบริเวณนี้เรียกว่า ดินเหนียวปากพั้ง ซึ่งเกิดจากการพัดพามาสะสมตัวในบริเวณชายฝั่งทะเล ต่อมาเกิดการตกตะกอน และการทับถมของดินเหนียวในน้ำทะเล (marine deposits) มีความ

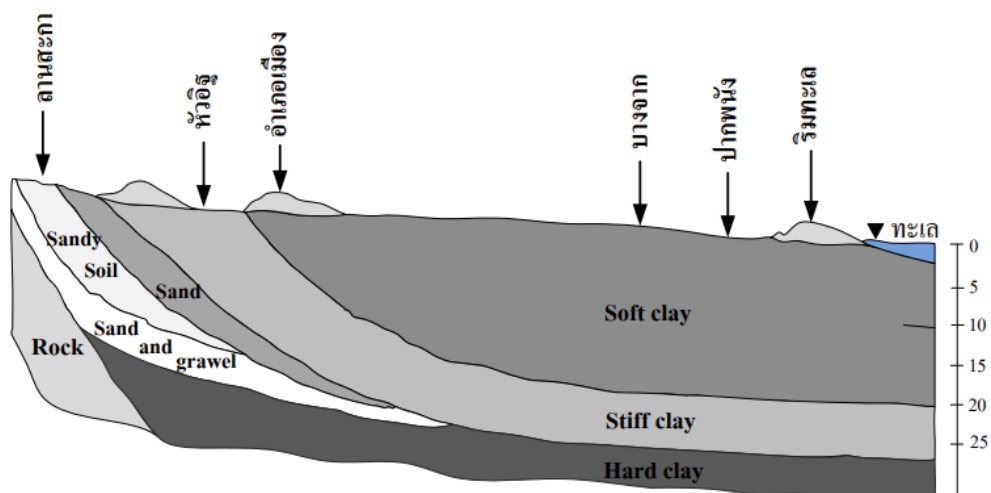
หนาประมาณ 15 ถึง 20 เมตร ถัดจากความลึก 20 เมตรลงไป เป็นชั้นดินเหนียวแข็ง (stiff clay) และแข็งมาก (hard clay) ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.3 พบว่า เป็นดินเหนียวอ่อนมีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay) โดยมีคุณสมบัติทั่วไปดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ เมื่อ 6000 ปีที่แล้วเทียบกับปัจจุบัน (อภิชัย 2546)



รูปที่ 2.2 อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช (<https://www.google.co.th/maps>)



รูปที่ 2.3 ลักษณะชั้นดินบริเวณชายฝั่งตะวันออก จ.นครศรีธรรมราช (อภิชัย 2546)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวปากพ่

รายละเอียดคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม		ช่วงของค่า
ค่าความชื้นในธรรมชาติ (W_n)	(%)	81.78
ค่าพิกัดเหลว (LL)	(%)	73.10
ค่าพิกัดพลาสติก (PL)	(%)	44.40
ค่าดัชนีพลาสติก (PI)	(%)	28.70
ค่าหน่วยน้ำหนัก (unit weight)	t/m^3	1.52
ค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s)	-	2.67
ทราย (sand) (0.06 – 2 mm.)	(%)	0.75
ดินตะกอน (silt) (0.002 – 0.06 mm.)	(%)	52.67
ดินเหนียว (clay) (< 0.002 mm.)	(%)	43.69
ค่าดัชนีการยุบตัว (C_c)	-	0.668
ค่าดัชนีการยุบตัวซ้ำ (C_r)	-	0.140
อัตราส่วนช่องว่าง (void ratio)	-	2.253

ที่มา : อัครเดช (2552) และศิริพร (2556) คุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวปากพ่

2.2 ประเภทของดิน

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความซับซ้อน ไม่สามารถคาดการณ์คุณสมบัติได้เหมือนวัสดุก่อสร้างที่ได้จากการผลิตอื่นๆ เช่น เหล็ก คอนกรีต เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สามารถแยกประเภทดินได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ ดินเชื่อมแน่น (cohesive soils) เป็นดินที่มีแรงยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดิน น้ำซึมผ่านได้ยาก มีการยัด พองตัว (heave) ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้ และดินไม่เชื่อมแน่น (cohesionless soils) เป็นดินที่ไม่มีแรงยึดเกาะกันระหว่างเม็ด น้ำซึมผ่านได้ง่าย รับแรงแบกทานได้ดี หากพิจารณาตามขนาดและส่วนประกอบของเม็ดดินจะสามารถแยกประเภทดินได้ดังนี้

1.) ดินเม็ดหยาบ

เป็นดินที่มีอนุภาคใหญ่กว่า 75 ไมครอน เนื้อดินมีการเกาะตัวกันหลวมๆ มองเห็นเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ได้ ถ้าสัมผัสดินที่อยู่ในสภาพแห้งจะรู้สึกสากมือ เช่น หิน กรวด ทราย เป็นต้น เป็นดินที่สามารถรับค่าน้ำหนักบรรทุกได้ดี รวมทั้งไม่มีคุณสมบัติทางประจุไฟฟ้า เมื่อลองกำดินที่แห้งนี้ไว้ในอุ้งมือแล้วคลายมือออกดินก็จะแตกออกจากกันได้ แต่ถ้ากำดินที่อยู่ในสภาพชื้นจะสามารถทำให้เป็นก้อนหลวมๆ ได้ แต่พอสัมผัสจะแตกออกจากกันทันที

2.) ดินเม็ดละเอียด

เป็นดินที่มีอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมครอน มากกว่า 50% มีความเหนียว สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้้น้อย มีความทรุดตัวสูง และมีคุณสมบัติทางด้านประจุไฟฟ้า เช่น ตะกอนทราย (silt) ดินเหนียว (clay) วัสดุแขวนลอย (suspension) เป็นต้น

ดินในประเภทนี้ที่สำคัญในงานวิศวกรรม คือ ดินเหนียวอ่อน โดยทั่วไปเป็นดินที่ตกตะกอนอยู่บริเวณปากแม่น้ำ โดยลักษณะการเกิดของดินเหนียวอ่อนบริเวณนี้ เม็ดดินจะถูกพัดพาจากแม่น้ำลงสู่ทะเล และน้ำทะเลก็หนุนกลับเข้ามาตกตะกอน ทำให้ชั้นดินเหนียวอ่อนนั้นมีทั้งแบบตกตะกอนในแม่น้ำและในทะเล ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดของดินเหนียวอ่อนบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างหรือที่เรียกว่าดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) โดยมีลักษณะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 10-15 เมตร ชั้นถัดไปจะเป็นชั้นดินเหนียวแข็งและชั้นทรายสลับกันไป

สำหรับดินเหนียวพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ ความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน (cohesion, c) ซึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของหน่วยแรงอัดไม่โอบรัด (unconfined compressive strength, q_u) ค่า q_u โดยทั่วไปของดินเหนียวมีค่าดังตารางที่ 2.2

3.) ดินอินทรีย์

ดินอินทรีย์ หมายถึง ดินที่มีการสลายตัวเน่าเปื่อยผุพังตามธรรมชาติของพืชซึ่งมักขึ้นอยู่กับพื้นที่ชุ่มน้ำหรือพื้นที่ลุ่มต่ำที่มีน้ำขังอยู่เกือบตลอดปี ทำให้เกิดการทับถมกันของอินทรีย์วัตถุมาเป็นเวลายาวนาน จนเกิดเป็นชั้นหนา ดินอินทรีย์มีอินทรีย์วัตถุสารในรูปของอินทรีย์คาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ในเนื้อดินมากกว่า 20 %

ในเชิงวิศวกรรม ดินเหนียวอินทรีย์ คือ ดินเหนียวที่มีสารอินทรีย์มากพอที่จะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมทางวิศวกรรมอย่างมีนัยสำคัญ จึงจัดเป็นดินอินทรีย์ ซึ่งสามารถระบุความเป็นอินทรีย์ได้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการดำเนินการทดสอบขีดจำกัดเหลวของตัวอย่างที่ทำให้แห้งโดยอากาศและตัวอย่างที่ทำให้แห้งโดยการอบ ถ้าขีดจำกัดเหลวของตัวอย่างที่ทำให้แห้งโดยการอบน้อยกว่าร้อยละ 75 ของขีดจำกัดเหลวของตัวอย่างที่ทำให้แห้งโดยอากาศ จึงจำแนกดินประเภทนี้เป็นดินอินทรีย์ โดยจะเป็นได้ทั้งดินเหนียวอินทรีย์ขีดจำกัดเหลวต่ำ (low liquid limit organic clay, OL) หรือดินเหนียวอินทรีย์ขีดจำกัดเหลวสูง (high liquid limit organic clay ,OH) ขึ้นอยู่กับขีดจำกัดเหลวของตัวอย่างที่ทำให้แห้งโดยอากาศ และนำไปพล็อตในแผนภูมิพลาสติกซิตี (plasticity chart)

ดินอินทรีย์มีเป็นดินที่มีความจุในการอุ้มน้ำสูง โมเลกุลของน้ำที่อยู่ตามช่องว่างขนาดใหญ่และช่องว่างขนาดเล็กมาก จะถูกดูดซับด้วยอินทรีย์สารซึ่งมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ โดยทั่วไปจะที่สามารถรับน้ำได้ และปลดปล่อยออกไปได้ สามารถหดตัวได้สูงเมื่อแห้ง ความหนาแน่นรวมต่ำ และมีความพรุนสูง

ตารางที่ 2.2 สภาพดินเหนียว

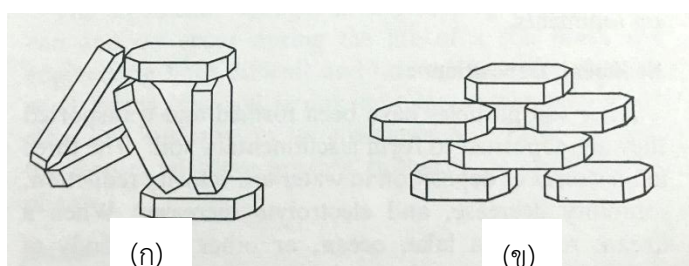
สภาพของดินเหนียว	ความเค้นอัดไม่โอเบิร์ต, q_u (ตันต่อตารางเมตร)
อ่อนมาก (very soft)	น้อยกว่า 2.50
อ่อน (Soft)	2.50 ถึง 5.00
ปานกลาง (Medium)	5.00 ถึง 10.00
แข็ง (Stiff)	10.00 ถึง 20.00
แข็งมาก (Very stiff)	20.00 ถึง 40.00
แข็งที่สุด (Hard)	มากกว่า 40.00

ที่มา : อมร และคณะ (2556)

2.3 ชนิดของแร่ดินเหนียว

แร่ดินเหนียว (clay mineral) เป็นแร่ทุติยภูมิเกิดจากการผุพังของหิน มีผลึกขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร และมีคุณสมบัติทางด้านประจุไฟฟ้าเคมี (electrochemically very active) ซึ่งจะมีปฏิกิริยามากขึ้นเมื่อมีขนาดเล็กลงตามลำดับ แร่ดินเหนียวเป็นสารโครงสร้างผลึก (crystalline) ที่มีโครงสร้างเฉพาะแบบแผ่น (sheet) ประกอบด้วย ผลึกของแร่ที่มีโครงสร้างแบนบาง เช่นเดียวกับแร่ไมกา ประกบซ้อนกันอยู่เป็นจำนวนมาก สำหรับขนาดของอนุภาคนั้นจะมีขนาดแตกต่างกันออกไปแล้วแต่ชนิดและองค์ประกอบทางแร่ อนุภาคของดินเหนียวจะมีประจุลบ อยู่เป็นจำนวนมาก และเมื่ออยู่ในสภาพธรรมชาติ ก็จะมีการดูดยึดประจุบวกไว้เป็นจำนวนมากในสัดส่วนที่เท่าๆ กับประจุลบที่มีอยู่จึงทำให้เกิดสภาพที่เรียกว่า ไอออนิกสองชั้น (ionic double layer) ชั้น คือสภาพที่มีประจุ 2 ชั้น ชั้นในได้แก่ประจุลบของอนุภาคดินเหนียว ชั้นนอกได้แก่ประจุบวกที่ถูกดูดยึดไว้ (adsorbed cation) โครงสร้างดินเหนียวจะถูกควบคุมด้วยคุณสมบัติของแอนไอออน (anion) นั่นคือ ออกซิเจนไอออนหรือไฮดรอกไซด์ เป็นเพราะว่ามีจำนวนแอนไอออนที่มากกว่าแคตไอออนและขนาดที่ใหญ่กว่าแคตไอออน และแอนไอออนมักจะอยู่รวมตัวที่ผิวของแผ่นแร่ดินเหนียว แม้ว่าประจุโดยรวมจะเสถียรภาพก็ตาม แต่อาจจะส่งผลให้แร่ดินเหนียวแสดงคุณสมบัติเป็นลบได้

การจัดเรียงตัวอนุภาคดินเหนียวมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ (dispersed structures) จะเกิดเมื่อตัวรวมของแร่ระหว่างอนุภาคดินเหนียวเป็นแรงผลัก แต่ละอนุภาคของดินเหนียวจะผลักกัน และพยายามที่จะเคลื่อนที่แยกจากกันและกัน มีการจัดเรียงอนุภาคให้ขนานซึ่งโดยปกติจะเป็นโครงสร้างของดินเหนียวที่เกิดจากตกตะกอนในน้ำจัดจะเป็นการจัดเรียงตัวกันแบบหน้าชนหน้า (face to face) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ส่วนโครงสร้างแบบระเกะระกะ (flocculated structure) จะเกิดเมื่อผลรวมของแร่ระหว่างอนุภาคดินเหนียวเป็นแรงดึงดูดแต่ละอนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าหากันอย่างไม่เป็นระเบียบได้โครงสร้างแบบระเกะระกะ ซึ่งโดยปกติจะเป็นโครงสร้างของดินเหนียวที่ตกตะกอนในทะเลและผลจากประจุไฟฟ้าของเม็ดดินทำให้เม็ดดินตกตะกอนและทับถมกันแล้วเกิดการจัดเรียงแบบขอบชนหน้า (edge to face) เม็ดดินจะยึดตัวกันด้วยแรงดึงดูดระหว่างผิวที่สัมผัสได้เป็นโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของดินเหนียว เม็ดดินเหนียวจะมีคุณสมบัติทางด้านประจุไฟฟ้า ถ้าเม็ดดินมีประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันอยู่ใกล้กันจะผลักกันโดยโครงสร้างของดินจะเป็นระเบียบ (dispersed) ในทางตรงกันข้าม ถ้าเม็ดดินที่อยู่ติดกันมีประจุไฟฟ้าแตกต่างกันดินจะติดกัน และมีโครงสร้างแบบเป็นระเกะระกะ (flocculated)



(ก) แบบระเกะระกะ

(ข) แบบเป็นระเบียบ

รูปที่ 2.4 โครงสร้างการรวมตัวของอนุภาคดินเหนียว (Lambe and Whitman 1969)

แร่ธาตุดินเหนียวหลักประกอบด้วยไฮดรอกไซด์อลูมิเนียมซิลิเกต (hydrous aluminum silicates) เหล็ก (iron) และแมกนีเซียม (magnesium) กับรูปแบบแร่ธาตุต่าง (alkaline minerals) แร่ธาตุเหล่านี้จะไม่ละลายในกรด (acid) มีลักษณะซึมซับน้ำได้ดี ยึดหยุ่นเมื่อเปียก และยัดน้ำได้ดี มีความเชื่อมแน่นเมื่อแห้ง รูปลักษณะแร่ธาตุส่วนใหญ่เป็นผลึก ซึ่งโครงสร้างของผลึกประกอบขึ้นด้วยหน่วยพื้นฐาน (unit cell) 2 ชนิด คือ หน่วยรูปเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral unit) และหน่วยรูปเหลี่ยมหกหน้า (octahedral unit) มาเรียงต่อกันในลักษณะต่าง ๆ เป็นแผ่น หรือเป็นโครงสร้างเรียงชั้นของแร่สองชนิดคือแผ่นซิลิกาและแผ่นอลูมินา

แผ่นซิลิกา (silica) เป็นแผ่นทรงสี่เหลี่ยมประกอบจากอะตอมซิลิกอน 4 ด้าน มีอะตอมออกซิเจน (oxygen Atom) อยู่ที่จุดยอดระยะห่างเท่ากันและอะตอมซิลิกาอยู่ภายในมีระยะห่างจากอะตอมออกซิเจนเท่ากัน แผ่นซิลิกาแต่ละหน่วยจะรวมซ้อนกันเป็นรูปหกเหลี่ยมและเป็นโครงสร้างผลึกของแร่

แผ่นอลูมินา (alumina) เป็นแผ่นทรงหกเหลี่ยม โดยมีอะตอมของอลูมิเนียมไอออน แมกนีเซียมไอออน หรือเหล็กไอออน หนึ่งตัวอยู่ตรงกลางรูปหกเหลี่ยม ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนไฮดรอกซิล (OH) 6 ตัวล้อมรอบ

แผ่นซิลิกาและอลูมินาจะรวมตัวประกอบเป็นหน่วยชั้น (layered unit) ทั้งแบบสองชั้น (1:1) หรือแบบสามชั้น (2:1) นอกจากนี้ยังมีแรกกิบไซต์ (gibbsite) เป็นโครงสร้างทรงหกเหลี่ยมที่ประกอบด้วยไฮดรอกไซด์ไอออน 6 ตัว และต้องมีแคตไอออน (cation) ของอลูมิเนียมอย่างน้อยสองในสาม และแร่บรูไซต์ (brucite) เป็นโครงสร้างหกเหลี่ยมที่แคตไอออนของอะลูมิเนียมถูกแทนที่ด้วยแมกนีเซียมไอออนทั้งหมด โครงสร้างแผ่นหกเหลี่ยมไม่มีความเสถียรภาพทางไฟฟ้า ทำให้โครงสร้างแบบนี้ไม่สามารถอยู่ได้โดยลำพังในธรรมชาติ แต่แรกกิบไซต์และบรูไซต์มีความเสถียรภาพ

แร่ดินเหนียวสามารถบอกได้ด้วยข้อมูลของขีดจำกัดแอดเตอร์เบอร์ก โดยการแสดงขีดจำกัดเหลวและดัชนีพลาสติกในแผนภูมิพลาสติกซีดี ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงแร่ดินเหนียวโดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักซึ่งจะแยกตามลักษณะโครงสร้างการจับตัวของแร่ธาตุ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบด้วย

2.3.1) กลุ่มมอนท์มอร์ริลโลไนท์ (Montmorillonite)

มีโครงสร้างเป็นแบบสามชั้น ประกอบด้วยแผ่นอลูมินารูปแปดเหลี่ยม ระหว่างแผ่นซิลิกา รูปแปดเหลี่ยมสองแผ่น การจับตัวกันระหว่างแผ่นแร่ธาตุค่อนข้างหลวม ทำให้เป็นแร่ธาตุที่ไม่อยู่ตัวโดยเฉพาะเมื่อเปียก โดยมีลักษณะลักษณะดูดซับน้ำได้มาก หลังจากนั้นจะบวมตัวและขยายตัวสูงในทางตรงกันข้าม เมื่อแห้งจะหดตัวมากซึ่งจะเห็นรอยแตกได้อย่างชัดเจน มอนท์มอร์ริลโลไนท์เกิดจากการฟูก่อนของแร่ธาตุเฟอร์โรแมกนีเซียม (ferromagnesian) และจะมีแร่ธาตุย่อยอีก 2 ตัว คือ ไบเบเดลไลท์ (beidellite) และนอนไทรท์ (nontronite) จะมีส่วนประกอบผสมอยู่ในดินเป็นส่วนใหญ่ที่รู้จักกันแพร่หลายคือเบนโทไนท์ (bentonite) ที่มีส่วนผสมหลักของมอนท์มอร์ริลโลไนท์ มีคุณสมบัติพิเศษ จะบวมตัวหลายเท่าตัวเมื่อนำมาผสมน้ำ มีค่าพิกัดเหลวสูงกว่า 500% ทำให้มีคุณสมบัติพิเศษ

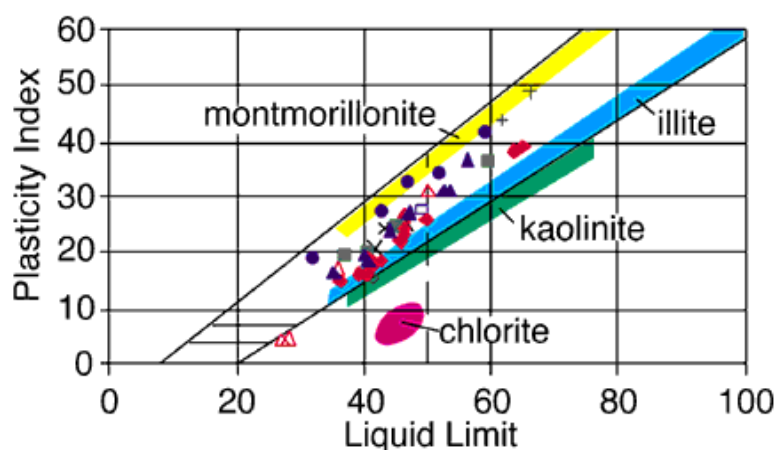
นำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรม เช่น การผสมน้ำนำไปอัดในชั้นดินใต้ฐานเขื่อนให้ที่บ้น้ำ นำมาผสมน้ำเป็นน้ำโคลนเจาะดิน เจาะบ่อบาดาล เจาะบ่อน้ำมัน เจาะเสาเข็มเจาะ เจาะกำแพงพืด เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติพิเศษของน้ำโคลนเบนโทไนท์จะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำเล็กน้อย และสามารถเคลือบผนังบ่อดินไม่ให้น้ำซึมออกจากบ่อดินได้เร็ว สามารถเวียนน้ำโคลนกลับมาใช้ได้ใหม่ และนำน้ำโคลนที่จะทำให้เกิดแรงดันทดแทนดินที่ขุดออกไปจากกลุ่มดินผนังไม่ให้ดินพัง ในขณะที่เครื่องมือขุดเจาะลงไปทำงานได้ระดับน้ำโคลนได้ตามปกติ เทคอนกรีตได้ด้วยวิธีเทได้น้ำ

2.3.2) กลุ่มกาลินไนท์ (Kaolinite ; $Al_2Si_2O_5(OH)_4$)

มีโครงสร้างแบบสองชั้น ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาสี่เหลี่ยมเดี่ยว และแผ่นอลูมินาแปดเหลี่ยมเดี่ยวหรือกิบไซต์ ซึ่งจะเกิดซ้อนกันหลายชั้นไม่สิ้นสุดเกิดเป็นโครงสร้างของแร่ธาตุการจัดเรียงของแร่ธาตุ กาลินไนท์เกิดจากการผุร้อนของเฟลสปาร์ (felspar) สลับชั้นกับซิลิกอนอลูมิเนียม (silicon aluminium) และยังมีแร่ย่อยอีก คือ ดิกไคท์ (dickite) นาไครท์ (nacrite) และฮาลรอยไซต์ (halloysite) รูปหลอดแบน เคโอลินไนต์เป็นโครงสร้างที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำ พันธะระหว่างพื้นผิวเป็นแบบพันธะไฮโดรเจนซึ่งมีความแข็งแรงมาก มีคุณสมบัติความชื้นแน่นสูง ทำให้น้ำซึมเข้าได้ยาก และไม่ขยายตัวเมื่ออิมตัวด้วยน้ำใช้เป็นวัสดุพิเศษสำหรับทำอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา

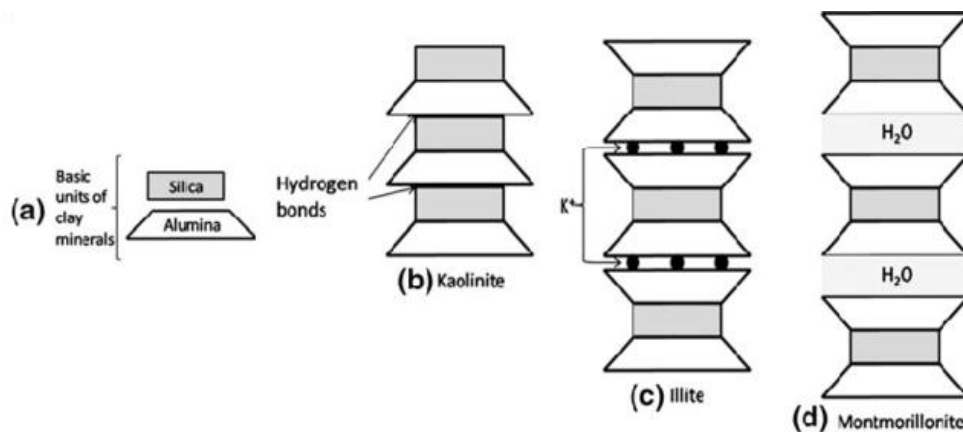
2.3.3) กลุ่มอินไลท์ (Illite ; $2K_2O \cdot 3MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 24SiO_2 \cdot 12H_2O$)

มีโครงสร้างคล้ายกลุ่มมอนท์มอร์ริลโลไนท์แต่มีส่วนประกอบทางเคมีต่างกัน ส่วนประกอบพื้นฐานของอินไลท์ประกอบด้วยแผ่นกิบไซต์รูปแปดเหลี่ยม (gibbsite octahedron) ระหว่างแผ่นซิลิกาสี่เหลี่ยมสองแผ่น มีคุณสมบัติไม่เหมือนมอนท์มอร์ริลโลไนท์ที่ซึมซับน้ำได้ดีและมีขนาดเล็ก แต่อินไลท์จะรวมกันเป็นขนาดใหญ่จึงสามารถซึมซับน้ำได้น้อยกว่ามอนท์มอร์ริลโลไนท์สามารถขยายตัวได้น้อยกว่า โดยปกติอินไลท์เกิดในลักษณะอนุภาคเป็นแผ่นแบน (flaky) เล็กๆ ปนกับแร่ธาตุดินเหนียว (clay) และแร่ธาตุไม่ใช่ดินเหนียว (non clay) อื่นๆ



รูปที่ 2.5 แผนภูมิพลาสติกซิตีแสดงชนิดของแร่ดินเหนียว

ที่มา : <http://www.kgs.ku.edu/Current/2000/ohlmacher/ohlmacher6.html>



รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างการจับตัวของผลึกแร่ธาตุในแร่ดินเหนียว (after Das 2008)

2.4 คุณสมบัติทางกายภาพดิน

2.4.1) คุณสมบัติทางกายภาพของดิน

คุณสมบัติทางกายภาพของดินหรือสมบัติดัชนี (index properties) คือ ตัวเลขที่ใช้ อธิบายสภาพหรือสถานะเฉพาะตัวของดิน ซึ่งคุณสมบัติที่แตกต่างกันตามลักษณะการกำเนิดเป็น เอกลักษณ์ของตัวเองอันมีผลต่อคุณสมบัติด้านวิศวกรรม ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพของมวลดินมีดังนี้

หน่วยน้ำหนักรวม (total unit weight) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักทั้งหมดของ มวลดินกับปริมาตรทั้งหมดของมวลดิน

ความหนาแน่นของอนุภาคดิน (particle density) คือมวลความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หมายถึง อัตราส่วนของน้ำหนักดินต่อน้ำหนักของน้ำซึ่งมีปริมาตรเท่ากับดินที่ อุณหภูมิหนึ่งๆ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงลักษณะทั่วไปของดินนั้นๆ และมีความสำคัญในการนำ คุณสมบัตินี้ไปใช้ในการคำนวณค่าคุณสมบัติอื่นๆ เช่น อัตราส่วนช่องว่างของดิน ความพรุน ระดับ ความอิ่มตัว ความหนาแน่น เป็นต้น โดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของดินแต่ละประเภทจะไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ความชื้นของดินตามธรรมชาติ (natural water content, w) คือน้ำหนักของน้ำใน ดินต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ทำให้รู้สภาพของดินในเบื้องต้นและเป็นข้อมูล ที่ใช้ในการหาคุณสมบัติดัชนี และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เช่น ค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบอร์ก ต่างๆ ซึ่งก็คือค่าความชื้นของดินในสถานะต่างๆนั่นเอง อัตราส่วนช่องว่างในดิน การทรุดตัวของดิน การรับแรงเฉือนของดิน เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 ความถ่วงจำเพาะของดินประเภทต่างๆ

ประเภทของดิน	ความถ่วงจำเพาะ
ทราย (sand)	2.65 ถึง 2.67
ทรายปนดินตะกอน (silt)	2.67 ถึง 2.70
ดินเหนียว (inorganic clay)	2.70 ถึง 2.80
ดินที่มีแร่ไมก้าหรือแร่เหล็ก (soil with Mica or Iron)	2.75 ถึง 3.00
ดินอินทรีย์ (organic Soil)	1.00 ถึง 2.60

ที่มา: สำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ, คู่มือการทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์ (2549)

ขีดจำกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg limits) หรือขีดจำกัดความชื้นเหลว คือ ขีดจำกัดสถานะสภาพของดินเม็ดละเอียดโดยใช้ปริมาณน้ำในมวลดินในการนิยามสภาพความเหนียวตั้งในรูปที่ 2.8 แสดงการแบ่งสถานะของดินเม็ดละเอียดออกเป็น 4 สถานะ คือ สถานะของแข็ง (solid state) สถานะกึ่งแข็ง (semi-solid state) สถานะพลาสติก (plastic state) และสถานะเหลว (liquid state) โดยใช้ปริมาณความชื้นในมวลดิน (moisture content, w) เป็นเกณฑ์ในการแบ่งขีดจำกัดแอตเตอร์เบิร์ก ประกอบไปด้วย

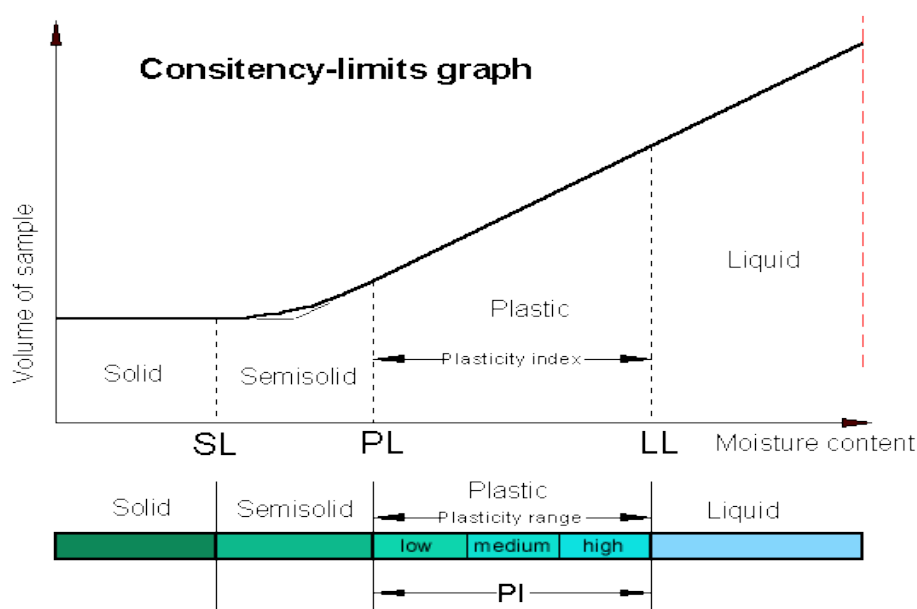
ค่าขีดจำกัดเหลว (liquid limit, LL) คือ ปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของเหลวไปเป็นสารหนืดตัวในสภาพพลาสติก หรือปริมาณน้ำน้อยที่สุดที่ทำให้ดินอยู่ในสถานะไหลตัวได้ ดินเหนียวสามารถไหลได้เหมือนของเหลวเมื่อความชื้นของดินมีมากกว่าค่าขีดจำกัดเหลว ($w > LL$) การทดสอบเพื่อหาค่าขีดจำกัดเหลวสามารถทำได้ 2 วิธีตามมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ วิธีการทดสอบด้วยกรวยทะลวง (cone penetrometer) และวิธีทดสอบด้วยถ้วยคาซากรานเด (Casagrande cup)

ขีดจำกัดพลาสติก (plastic limit, PL) คือ ปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง หรือปริมาณน้ำน้อยที่สุดที่ดินยังสามารถปั้นเป็นก้อนได้ โดยการนำดินมาปั้นด้วยมือเปล่าให้เป็นรูปเส้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มิลลิเมตร และปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้เริ่มมีรอยแตกที่ผิวพอดิคือ ขีดจำกัดพลาสติก

ขีดจำกัดหดตัว (shrinkage limit, SL) คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้ดินมีปริมาตรคงตัวไม่เปลี่ยนแปลง (constant volume) แม้ว่าปริมาณน้ำในมวลดินจะลดลงไปอีก

ดัชนีพลาสติก (plastic index, PI) หมายถึง ช่วงของปริมาณน้ำในมวลดินที่ดินมีสภาพเป็นพลาสติก กล่าวคือมีค่าเป็นผลต่างระหว่างค่าขีดจำกัดเหลวและค่าขีดจำกัดพลาสติก ($PI = LL - PL$) ซึ่งค่าดัชนีพลาสติกจะบ่งบอกถึงความอ่อนไหว (sensitive) ของดินเหนียวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดิน ค่าดัชนีพลาสติกจะสัมพันธ์อย่างมากกับปริมาณแร่ดินเหนียวที่ปนอยู่ในมวลดิน จึงสามารถบ่งบอกถึงสภาพความเหนียวของดินได้ดังตารางที่ 2.4 ดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูง (high plasticity index) จะแสดงว่ามีช่วงความเป็นพลาสติกกว้าง จะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำต่ำ คือ ต้องมีการเพิ่มหรือลดปริมาณน้ำเป็นจำนวนมากถึงจะส่งผลต่อคุณสมบัติของดิน

เหนียว โดยเฉพาะด้านกำลัง มักเป็นดินเม็ดละเอียด มีความยืดหยุ่น ทนต้วมาก รับกำลังได้น้อย ชีมผ่านน้ำไม่ตี มักเป็นแร่ดินเหนียวจะเป็นกลุ่มมอนท์โมริลโลไนท์ อิลไลท์ เป็นต้น จึงมีการนิยามค่าแอกทิวิตี้ (activity, A) ไว้ว่า ($A = \frac{PI}{\% \text{ by weight finer than } 2 \mu\text{m}}$) แร่ดินเหนียว การจำแนกชนิดดินเหนียวโดยใช้ค่าแอกทิวิตี้ ดังตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.7 ขีดจำกัดความชื้นเหลว

ที่มา: <http://boeingconsult.com/tafe/bcg5005/Sand&Clay.html>

ตารางที่ 2.4 การอธิบายค่าดัชนีพลาสติก

ค่าดัชนีพลาสติก (PI)	คำอธิบาย
0	ไม่มีความเหนียว
1 ถึง 5	มีความเหนียวเล็กน้อย
5 ถึง 10	มีความเหนียวน้อย
10 ถึง 20	มีความเหนียวปานกลาง
20 ถึง 40	มีความเหนียวสูง
มากกว่า 40	มีความเหนียวสูงมาก

ที่มา : ชูศักดิ์ (2552)

ตารางที่ 2.5 การจำแนกชนิดดินเหนียวโดยใช้ค่าแอกทิวิตี้

ชนิดดินเหนียว	ค่าแอกทิวิตี้ (Activity, A)
ดินเหนียวไม่แอกทีฟ (Inactive clay)	<0.75
ดินเหนียวธรรมดา (Normal clay)	0.75-1.25
ดินเหนียวแอกทีฟ (Active clay)	1.25-2.0
ดินเหนียวแอกทีฟมาก (Highly active clay)	>2.0

ที่มา: Mitchell และ Soga (2005)

ดัชนีความเหลว (liquidity index, LI) คืออัตราส่วนระหว่างผลต่างของปริมาณน้ำในมวลดินตามธรรมชาติ (natural water content, w_n) กับค่าขีดจำกัดพลาสติกต่อดัชนีพลาสติก ซึ่งเป็นตัวเลขที่บอกว่าดินเหนียวมีสภาพเหลวมากเพียงใด ดังคำอธิบายในตารางที่ 2.6

ความไวตัว (sensitivity, s_f) คือตัวเลขที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินเหนียวเมื่อดินถูกกระทำจากแรงภายนอก เมื่อโครงสร้างดินถูกทำลายความสามารถในการรับแรงของดินเหนียวก็จะเปลี่ยนแปลงไป จึงสามารถนิยามความไวตัวด้วยอัตราส่วนของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินในสภาพที่ไม่ถูกรบกวนต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินในสภาพที่ถูกรบกวนจนไม่เหลือโครงสร้างเดิม โดยมีการจำแนกชนิดดินเหนียวโดยใช้ความไวตัวดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 การอธิบายค่าดัชนีความเหลว

ค่าดัชนีความเหลว (LI)	คำอธิบาย
มากกว่า 1	แสดงว่าปริมาณน้ำในมวลดินมากกว่าค่าขีดจำกัดเหลว ($w > LL$) ดินจะอยู่ในสภาพเหลว
เท่ากับ 1	แสดงว่าปริมาณน้ำในมวลดินเท่ากับค่าขีดจำกัดเหลว ($w = LL$) ดินจะมีสภาพเริ่มเหลวจนไหลได้
มากกว่า 0 แต่น้อยกว่า 1	แสดงว่าปริมาณน้ำในมวลดินมีค่าอยู่ระหว่างขีดจำกัดพลาสติกและขีดจำกัดเหลว ดินจะอยู่ในสภาพพลาสติก
เท่ากับ 0	แสดงว่าปริมาณน้ำในมวลดินเท่ากับค่าขีดจำกัดพลาสติก ($w = PL$) ดินจะอยู่ในขีดจำกัดพลาสติก
น้อยกว่า 0	แสดงว่าปริมาณน้ำในมวลดินน้อยกว่าค่าขีดจำกัดพลาสติก ($w < PL$) ดินจะอยู่ในสภาพกึ่งของแข็ง

ที่มา: ชูศักดิ์ (2552)

ตารางที่ 2.7 การจำแนกชนิดดินเหนียวตามค่าความไวตัว

ชนิดดินเหนียว	ค่าความไวตัว (Sensitivity, S_f)
ไม่ไวตัว (Insensitive)	1
ไวตัวต่ำ (Low sensitive)	1 – 2
ไวตัวปานกลาง (Medium sensitive)	2 – 4
ไวตัว (Sensitive)	4 – 8
ไวตัวพิเศษ (Extra sensitive)	8 – 16
ไวตัวสูง (Quick sensitive)	>16 (อาจถึง 50)

ที่มา: สุเชษฐ์ (2557)

2.4.2) คุณสมบัติของดินมวลละเอียด

ดินมวลละเอียด ได้แก่ ดินจำพวกตะกอน (silt) และดินเหนียว (clay) ลักษณะของเนื้อดินเป็นเม็ดละเอียดมาก มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 75 ไมครอน อยู่ประมาณมากกว่าร้อยละ 50 ของมวลดิน ซึ่งมีคุณสมบัติที่บ่งชี้ให้น้ำซึมผ่านได้ยาก เมื่อให้น้ำในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้สามารถปั้นเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้เนื่องจากมีความเหนียว (plasticity) เมื่อนำไปเผาจะแปรสภาพเป็นวัตถุแข็ง ไม่เปลี่ยนรูป โดยส่วนใหญ่แล้วดินมวลละเอียดจะเป็นดินที่มีความเชื่อมแน่น และมีคุณสมบัติทางด้านประจุไฟฟ้า แต่หากเป็นดินตะกอนที่ไม่มีพลาสติกซีตี้ (non plastic silt) จะเป็นดินไม่เชื่อมแน่น มีอัตราส่วนช่องว่างแตกต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 25 ถึงร้อยละ 93 มีการบวมตัว เปลี่ยนปริมาตรและรูปร่างได้แม้ขณะไม่ต้องรับน้ำหนักหรือเมื่อรับบรรทุกน้ำหนักอยู่ หรือแม้ภายหลังจากเอาน้ำหนักบรรทุกออกแล้ว ความสามารถต้านทานต่อแรงเฉือนขึ้นอยู่กับแรงเชื่อมแน่นที่ยึดเกาะเม็ดดิน

ในส่วนของดินเหนียวจะประกอบด้วยแร่เคลอิไนต์ (kaolinite) เป็นส่วนใหญ่ โดยแร่เคลอิไนต์ที่พบในดินเหนียว มักมีผลึกที่ไม่สมบูรณ์และมีขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังพบแร่ดินชนิดอื่นๆ อาทิ มอนมอริลโลไนต์ (monmorillonite) อิลไลต์ (illite) ควอร์ทซ์ (quartz) แร่ไมกา (mica) แร่เหล็กออกไซด์ (iron oxide) รวมทั้งมักมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่เสมอ ดินเหนียวมีสีต่างๆ เกิดจากการมีแร่ธาตุชนิดต่างๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน อาทิ สีดำ เทา ครีมน้ำตาล ดินเหนียวที่มีสีเทาหรือดำนั้น จะมีอินทรีย์วัตถุปนมาก ส่วนดินเหนียวสีครีมหรือน้ำตาล มาจากแร่เหล็กที่ปะปนอยู่ เนื่องจากอนุภาคของดินเหนียวมีลักษณะเป็นแผ่นแบนและบาง จึงทำให้มีพื้นที่ผิวภายนอกต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (specific surface) มีค่าสูงมาก ซึ่งเป็นเหตุให้มีปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งทางเคมีและฟิสิกส์ เกิดขึ้นได้มาก

ความเหนียวและการอ่อนตัว (cohesion and plasticity) ดินเหนียวแต่ละชนิดจะมีความเหนียวและการอ่อนตัวแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของโมเลกุลดินเหนียวแต่ละชนิด โมเลกุลดินเหนียวที่มีความเหนียวและการอ่อนตัวสูงจะเป็นพวกที่มีพื้นที่ผิวภายนอกมาก จึงมีโอกาสดูดซับยึดอนุภาคของน้ำไว้ที่ผิวได้มาก การเกาะยึดระหว่างอนุภาคของดินก็จะเกิดขึ้นมากตามไปด้วย

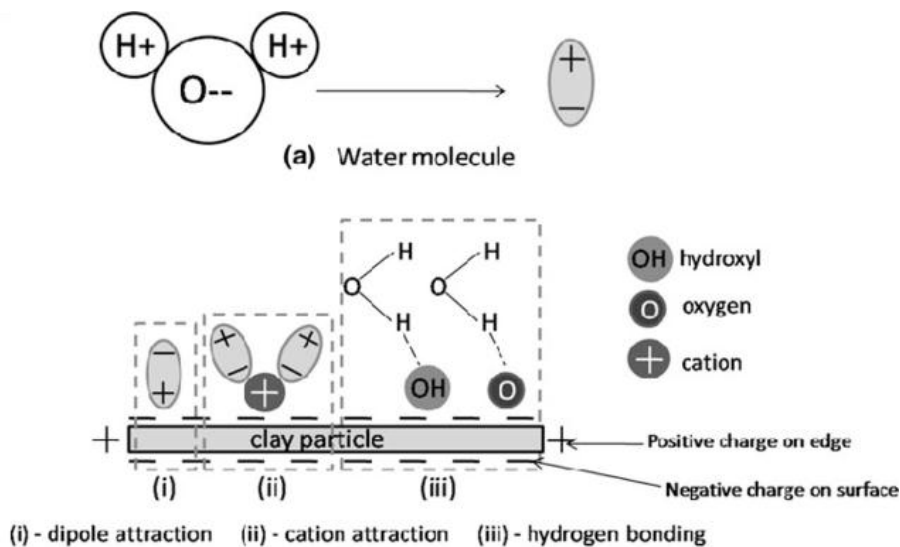
คำว่าความเหนียว (cohesion) นั้น หมายถึงความสามารถเกาะยึดกันได้ระหว่างอนุภาคของดินเหนียว การที่ดินเหนียวชนิดหนึ่งมีความเหนียวสูง ก็เนื่องจากมีพื้นที่ผิวให้น้ำเกาะยึดอยู่มาก จึงทำให้อนุภาคของดินเหนียวนั้นเกาะยึดกันได้ดีด้วย ดังนั้นดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง จะมีสภาพเหนียวและเกาะติดมือ การไถ พรวนดินทำได้ลำบากเมื่อดินนั้นเปียก ถ้ามีความชื้นที่เหมาะสม จะมีความอ่อนนุ่ม บีบปั้นให้เป็นรูปต่างๆ และคงสภาพเช่นนั้นอยู่ได้ คุณสมบัตินี้เรียกว่าการอ่อนตัว (plasticity) สวนดินเหนียวที่มีความเหนียวต่ำ สวนใหญ่จะเป็นดินเหนียวที่มีพื้นที่ผิวให้น้ำเกาะยึดน้ำน้อย ดังนั้นจึงมีผลทำให้การเกาะยึดกันระหว่างอนุภาคของดินเหนียวไม่เหนียวถึงแม้ว่าดินจะมีความชื้นอยู่มากก็ตาม

การขยายตัวและการหดตัว การที่ดินเหนียวแต่ละชนิดจะขยายตัวได้มากหรือน้อยนั้นขึ้น อยู่กับลักษณะทางโครงสร้าง เช่นดินเหนียวบางชนิดแผ่น ผลึกที่ซ้อนทับกัน จะมีช่องหรือหลืบระหว่างแผ่นผลึกค่อนข้างกว้างและเกาะยึดกันไม่เหนียวแน่นนัก โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย จึงมีผลทำให้ดินพวกนี้เกิดการพองตัวเมื่อเปียกน้ำ แต่ถ้าทำให้แห้ง น้ำที่อยู่ในช่องว่างของเม็ดดินจะระเหยออกไป ก็จะทำให้เกิดการยุบตัวจึงทำให้ดินนั้นเกิดการหดตัว

คุณสมบัติของแร่ดินเหนียวแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน แต่คุณสมบัติอย่างหนึ่งซึ่งดินทุกประเภทจะต้องมีเหมือนกัน คือแรงระหว่างอนุภาคได้แก่แรงผลึก (repulsive force) และแรงดึงดูด (attractive force) ในอนุภาคของดินมีน้ำเป็นส่วนประกอบ อยู่ 3 ชั้น ซึ่งมีผลต่อกำลังของดินด้วย คือ

- 1) ชั้นน้ำแอลซอบด์ (absorbed water) เป็นชั้นที่อยู่ล้อมรอบชั้นอนุภาคของดินเหนียว (clay particle) จะมีการจับกันแน่นหนามาก หนาประมาณ 2 - 3 เท่าของโมเลกุลน้ำ
- 2) ชั้นวงน้ำสองชั้น (double layer water) อยู่ถัดมาจากชั้นน้ำแอลซอบด์ออกไปเป็นชั้นสุดท้ายที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างชั้นอนุภาคของดินเหนียวกับแรงไฟฟ้า (electrical force)
- 3) ชั้นน้ำอิสระ (free water) อยู่ถัดจากชั้นวงน้ำสองชั้นออกไปสามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้ ถ้ามีแรงภายในมากระทำ

แรงผลึก (bond repulsion) เกิดขึ้นจากหลายสาเหตุเมื่ออนุภาคดินเหนียวเข้ามาอยู่ใกล้กันมากจนเกิดการซ้อนกันของหมอกอิเล็กตรอน (electron cloud) ในอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะทำให้แรงผลึกกันสูงมาก โดยที่การจัดเรียงตัวของอนุภาคเป็นหน้าชนหน้า (face to face) หรือขอบชนหน้า (edge to face) ก็ได้ แรงดึงดูดระหว่างอนุภาค (electrostatic attraction) เกิดจากสาเหตุหลายประการกล่าวคือ ขอบของผิวอนุภาคดินเหนียวมีประจุแตกต่างกันที่ชั้นวงน้ำสองชั้น ซึ่งระยะระหว่างอนุภาคดินเหนียวที่เกิดการดึงดูดแบบนี้ต้องห่างกันไม่เกิน 30Å ในดินที่มีเนื้อละเอียด (fine grained soil) รูปที่ 2.8 แสดงการยึดเกาะของโมเลกุลน้ำรอบอนุภาคดินเหนียว



รูปที่ 2.8 การยึดเกาะของโมเลกุลน้ำรอบอนุภาคดินเหนียว

ที่มา: ปรับจาก Ranjan and Rao (2007)

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียว (volume change of clay) การหดและบวมตัวของดินเหนียว (shrinkage and swelling of clay) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อปริมาตรความชื้นในดินเหนียวมีการเปลี่ยนแปลง ถ้าปริมาณความชื้นลดลงจะทำให้เกิดการหดตัว และ ถ้าปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการบวมตัว การเปลี่ยนแปลงนี้จะมากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับตัวประกอบต่างๆ เช่น ชนิดของแร่ที่มีอยู่ในดินเหนียว ความถ่วงจำเพาะของดิน ความเข้มข้นของเกลือที่มีอยู่ในน้ำ เป็นต้น ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินมากจะมีผลทำให้เกิดอันตรายแก่โครงสร้าง การบวมตัวของดินเป็นผลมาจากการเพิ่มความหนาของชั้นประจุที่มีน้ำท่วมชนิดของแร่ดินเหนียว

2.4.3) การนำความร้อนของดินเหนียวอ่อน

การส่งผ่านพลังงานความร้อนในมวลดินเป็นเรื่องที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมได้ เช่น การออกแบบสายไฟไฟฟ้าแรงสูงฝังดิน โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และเทคนิคการปรับปรุงดินความร้อน เป็นต้น การถ่ายเทพลังงานความร้อนในดินเหนียวอิมตัวด้วยน้ำ จะถ่ายเทโดยการนำความร้อนเป็นอันดับแรก และรองลงมาก็คือการถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยการพาความร้อน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำในมวลดินเหนียวถูกจำกัดด้วยความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดินซึ่งมีค่าต่ำมาก การเคลื่อนที่ของน้ำจึงมีการเคลื่อนที่ได้้น้อยมาก นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี มีเฉพาะในดินแห้งที่มีช่องว่างในมวลดินสูง และที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น สภาพการนำความร้อนของดิน สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

1. การนำความร้อน (heat conduction) เป็นการส่งผ่านพลังงานความร้อนในลักษณะนี้เป็นการส่งถ่ายความร้อนในรูปแบบของการเคลื่อนตัวของโมเลกุลที่อยู่ติดกันของสสารนั้น

ซึ่งเป็นการส่งถ่ายความร้อนผ่านวัตถุที่อยู่ติดกันต่อเนื่องกันไป เช่น การนำความร้อนในท่อเหล็ก เป็นต้น

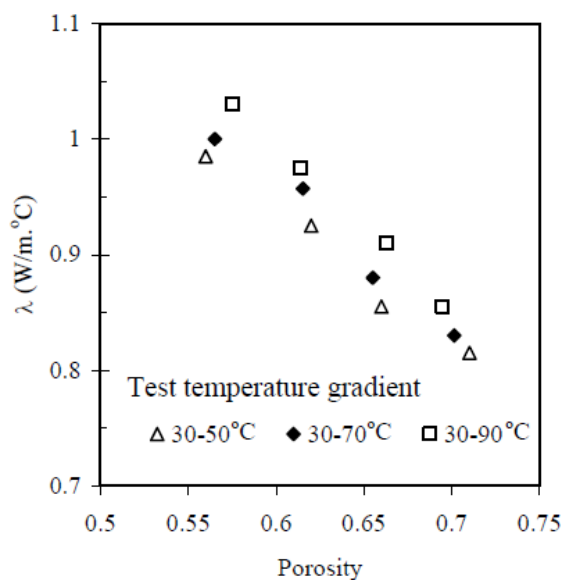
2). การนำพาความร้อน (heat convection) เป็นการส่งผ่านพลังงานความร้อนผ่านตัวกลาง ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ หรือเป็นการนำพาความร้อนในลักษณะที่มีตัวกลางเป็นตัวเคลื่อนย้ายความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลางในการนำพา เช่น การพาความร้อนโดยลม

3). การแผ่รังสีความร้อนแบบคลื่น (heat radiation) เป็นการแผ่กระจายความร้อนออกมาในรูปของรังสี ซึ่งประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยรังสีสามารถกระจายความร้อนได้ดีในอากาศ เนื่องจากตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ จะดูดซับมีรังสีบางส่วนไป หรือบ้างก็เกิดการสะท้อนหักเห ทะลุผ่านไป อันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางนั้นๆ

การนำความร้อนเป็นสมบัติทางกายภาพของดินที่ถูกควบคุมโดยปริมาณและอัตรา การไหลของพลังงานความร้อน กล่าวคือสภาพการนำความร้อนของดิน (Thermal conductivity of soil, λ) ปริมาณความร้อน (Heat capacity, C) และความสามารถในการนำความร้อนของดิน (Thermal diffusivity, D) สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ $D = \lambda / C$ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

การทดสอบภาคสนามหรือในห้องปฏิบัติการสามารถวัดค่าการนำความร้อนของดิน แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบภาคสนามมีค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลานาน และควบคุมสภาวะแวดล้อมได้ยาก ในทางตรงกันข้ามการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าใช้จ่ายต่ำและง่ายกว่า แต่ตัวอย่างดินมีความแปรปรวนสูง นักวิจัยหลายท่าน (Sepaskhah and Boersma. 1979; Sundberg 1988; Morin and Silva 1984; Brandon and Mitchell 1989; Singh and Rao 1998; Abu-Hamdeh and Reeder 2000; Ochsner et al. 2001) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนกับดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแร่ธาตุในดิน ความพรุน (porosity) ของเหลวในช่องว่างของดิน (pore-fluid) ระดับของความอิ่มตัวของน้ำในมวลดิน (degree of saturation) ปริมาณน้ำ (water content) อุณหภูมิ และการจัดเรียงตัวของอนุภาคดิน

ในปี 2005 H.M. Abuel-Naga และ D.T. Bergado ได้ทำการทดสอบการนำความร้อนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ พบว่าผลกระทบของความพรุนของดินต่อค่าการนำความร้อน แสดงในรูปที่ 2.9 ผลการทดสอบดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน (30-50 องศาเซลเซียส 30-70 องศาเซลเซียสและ 30-90 องศาเซลเซียส) แสดงให้เห็นว่าเมื่อความพรุนลดลงค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นการลดลงของความพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อมีแรงดันมากระทำ จะทำให้ปริมาณน้ำในช่องว่างของดินลดลง ทำให้การนำความร้อนของดินเพิ่มขึ้น และผลการทดสอบการนำความร้อนของดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำในอัตราส่วนช่องว่างคงที่และภายใต้ระดับอุณหภูมิที่ต่างกัน พบว่าค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงการนำความร้อนในดินเท่ากับการเปลี่ยนแปลงการนำความร้อนของน้ำในช่องว่างของดิน แสดงให้เห็นว่าการนำค่าความร้อนของเฟสของแข็งของดินไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นการนำความร้อนของดินอิ่มตัวด้วยน้ำจึงขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อนจากน้ำในมวลดินเท่านั้น



รูปที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการนำความร้อนของดิน
ที่มา: Abuel-Naga and D.T. Bergado. (2005)

ตารางที่ 2.8 การนำความร้อนของแร่ต่างๆ (Bejan and Kraus 2003)

Material	Density (kg/m ³)	Heat capacity (kJ/kg.K)	Thermal conductivity (W/m.K)	Thermal diffusivity (m ² /s)x10 ⁻⁷
Air (10°C)	1.25	1.000	0.0026	0.21
Water (25°C)	999.87	4.200	0.56	1.43
Water vapor (1 atm, 400 K)	-	1.901	0.016	233.8
Ice (0°C)	917	2.040	2.25	12
Quartz	2,660	0.733	8.40	43.08
Granite	2,750	0.890	1.70-4.00	~12
Gypsum	1,000	1.090	0.51	4.7
Limestone	2,300	0.900	1.26-1.33	~5
Marble	2,600	0.810	2.80	13
Mica	2,883	0.880	0.75	2.956
Clay	1,450	0.880	1.28	10
Sandstone	~2,270	0.710	1.60-2.10	10-13

2.5 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

2.5.1 พฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดิน (shear strength behaviour of soil)

กำลังของดินหรือกำลังรับแรงเฉือนของดิน (shear strength of soil) คือความสามารถของมวลดินในการต้านทานต่อแรงเฉือนภายนอกที่กระทำต่อมวลดิน หรือกล่าวได้ว่ากำลังต้านทานต่อการเฉือนสูงสุดที่ดินจะสามารถรับได้โดยไม่วิบัติ หรือพังทลาย (failure) ซึ่งจะส่งผลต่อพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดินทั้งในแง่ของการรับแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดินนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบทางด้านวิศวกรรมปฐพี เช่น การออกแบบฐานราก (foundation design) การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาด (slope stability) และการออกแบบโครงสร้างรับแรงด้านข้าง (lateral earth pressure) เป็นต้น

2.5.1.1 การตอบสนองของดินต่อแรงเฉือน

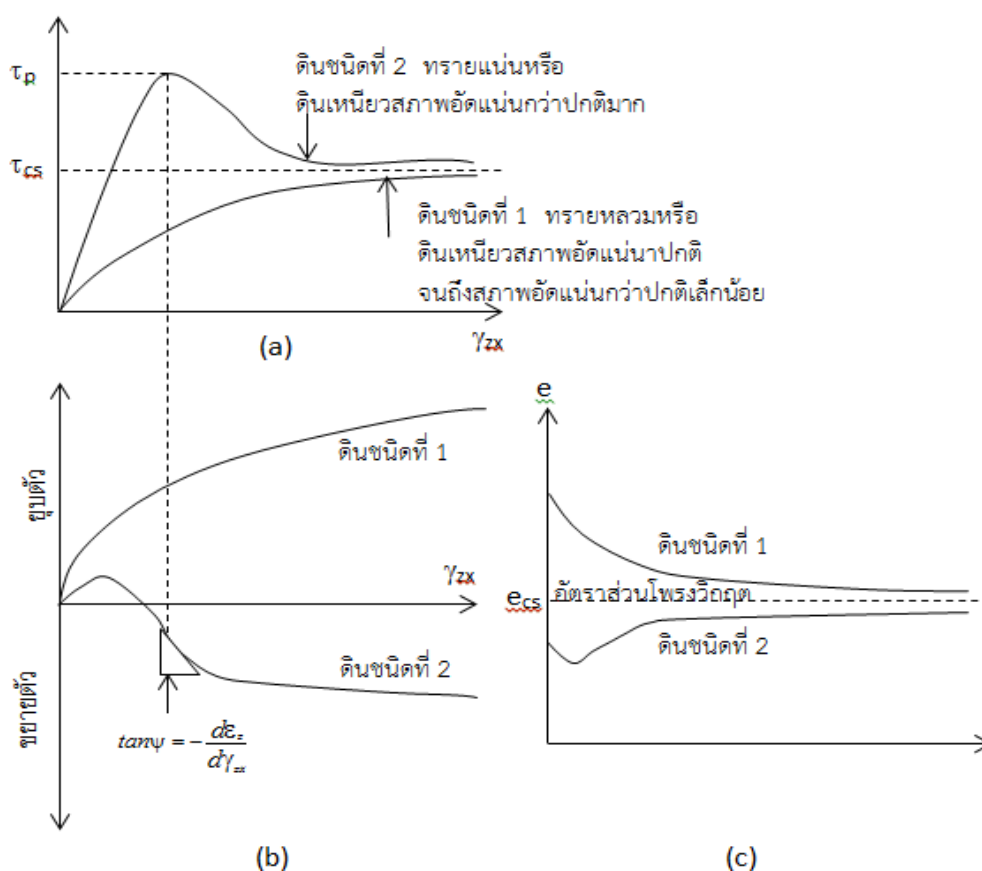
พฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดินกับองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการ คือ แรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน สำหรับเม็ดดินชนิดที่ไม่มี cohesionless soil) หรือดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวภายในระหว่างอนุภาคมีความอ่อนแอมาก เมื่อเทียบกับแรงเชิงกลที่กระทำระหว่างอนุภาคดิน ส่วนมากมักเป็นดินที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ เช่น กรวด ทราย ค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามน้ำหนัก ที่กดกระทำตั้งฉากกับระนาบแรงเฉือน สำหรับดินชนิดที่มีความเชื่อมแน่น หรือดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวภายในระหว่างอนุภาคแข็งแรงมาก เช่น ดินเหนียว ทรายแป้ง พบว่าค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของดินประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินเป็นส่วนใหญ่ โดยเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนหรือการแทนที่ไอออนทางเคมี ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามปริมาณน้ำในดิน ขนาดของเม็ดดิน และความหนาแน่นของดิน พฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดินจะแตกต่างกันไปตามประเภทของดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ดังนี้

- ดินทรายหลวม และดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติถึงสภาพอัดแน่นกว่าปกติเล็กน้อย ค่าความเค้นเฉือนจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้น (strain hardening) โดยความเค้นเฉือนจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกือบคงที่ จนเข้าสู่สถานะวิกฤต ซึ่งเรียกว่าความเค้นเฉือนสถานะวิกฤต (critical state shear stress) ส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้การรับแรงเฉือน พบว่าการเสียรูปเป็นแบบยุบตัว (compression) โดยการอัดตัวทำให้ดินมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเข้าใกล้สภาพที่อัตราส่วนช่องว่างคงตัวหรือเรียกว่าอัตราส่วนโพรงวิกฤต (critical void ratio)

- ดินทรายแน่น และดินเหนียวสภาพอัดแน่นกว่าปกติมาก ค่าความเค้นเฉือนจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงจุดสูงสุด และจากนั้นความเค้นเฉือนจะลดลงแบบพฤติกรรมการอ่อนตัวด้วยความเครียด (strain softening) ส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้การรับแรงเฉือน พบว่าเกิดการอัดตัวในช่วงแรกซึ่งเป็นผลจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคดิน ต่อมาจะขยายตัว (expansion) ขึ้นอย่างรวดเร็วและส่งผลให้ดินหลวมขึ้นจนเข้าสู่อัตราส่วนโพรงวิกฤต

2.5.1.2 ผลของค่าอัตราส่วนอัดตัวคายน้ำ

อัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำของดินที่ต่างกันทำให้การตอบสนองของดินที่มีต่อแรงเฉือนต่างกัน ถึงแม้ว่าจะมีองค์ประกอบทางแร่เหมือนกัน ตัวอย่างเช่น ดินที่มีพฤติกรรมแบบอัดแน่นกว่าปกติ (OC) 2 กลุ่ม ซึ่งมีอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำ OCR ต่างกัน ให้ความเค้นสูงสุดและระดับการขยายตัวแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 จะเห็นได้ว่าดินที่มีสภาพอัดแน่นสูงกว่า (heavily overconsolidated) จะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงกว่า และขนาดการขยายตัวที่สูงกว่าด้วย

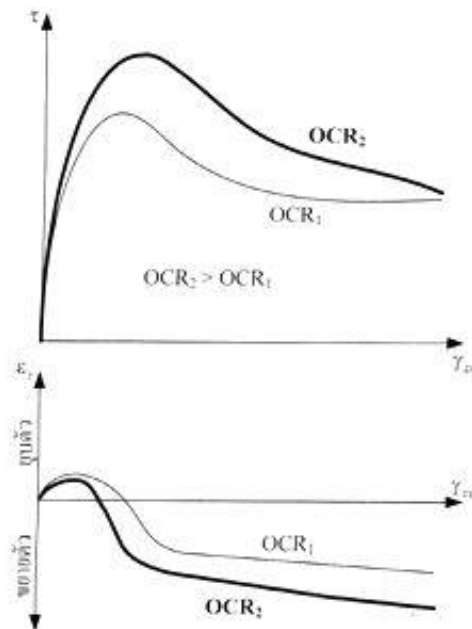


รูปที่ 2.10 การตอบสนองของดินต่อการรับแรงเฉือน (สุเชษฐ์ 2557)

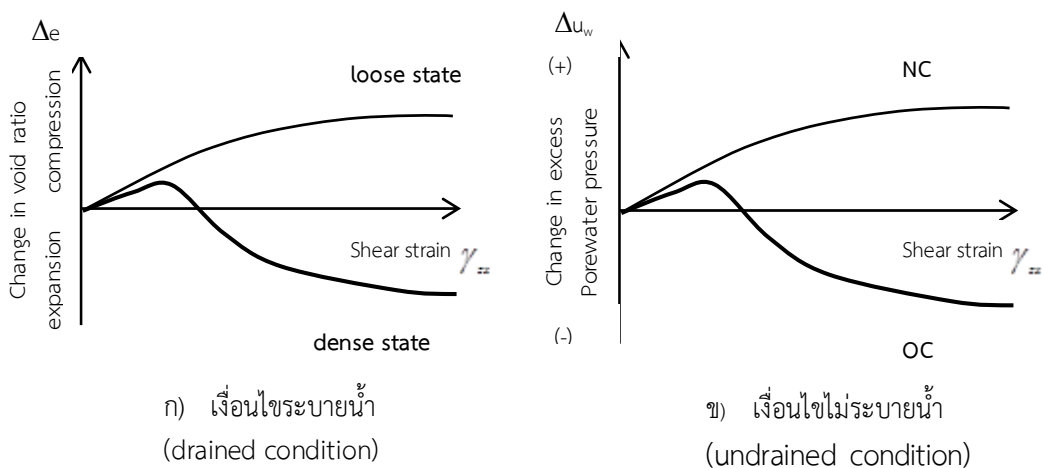
2.5.1.3 ผลของการระบายน้ำของแรงดันน้ำส่วนเกิน

เมื่อดินถูกแรงเฉือนภายนอกกระทำแรงปฏิกริยาของมวลดินที่ต้านทานต่อแรงเฉือนในระยะเวลาอันสั้น คือ แรงดันน้ำโพรงส่วนเกิน (excess pore water pressure) ที่เกิดขึ้นระหว่างช่องว่างในมวลดิน ในดินเม็ดละเอียดช่องว่างในมวลดินมีขนาดเล็ก ทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นระบายออกได้อย่างช้ามากและใช้ระยะเวลานานมาก จึงอยู่ในสภาพเงื่อนไขไม่ระบายน้ำ (undrained condition) มวลดินขณะถูกเฉือนจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร แต่แรงดันน้ำส่วนเกินเปลี่ยนแปลง นั่นคือ ดินสภาพอัดแน่นปกติ (NC) แรงดันน้ำส่วนเกินของดินสภาพอัดแน่นปกติจะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเกือบคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะวิกฤต แต่ดินสภาพอัดแน่นกว่าปกติ (OC) แรงดันน้ำ

ส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกและลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าติดลบ จากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะวิกฤต ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 ผลของค่าอัตราส่วนการคายน้ำต่อการรับแรงเฉือน (สุเชษฐ์ 2557)



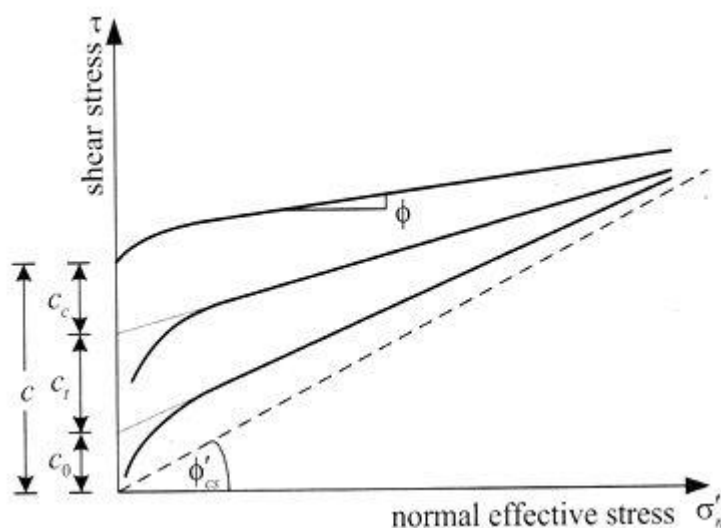
ก) เงื่อนไขระบายน้ำ
(drained condition)

ข) เงื่อนไขไม่ระบายน้ำ
(undrained condition)

รูปที่ 2.12 ผลของเงื่อนไขการระบายน้ำต่อการตอบสนองต่อแรงเฉือนของดิน
ที่มา: สุเชษฐ์ (2557)

2.5.1.4 ผลของแรงยึดเหนี่ยวภายใน

แรงยึดเหนี่ยวภายใน (cohesion, c) เป็นผลมาจากส่วนประกอบหลักๆ คือ พันธะเชื่อมประสานระหว่างโมเลกุลดิน (intermolecular force, c_0) แรงดึงเนื่องจากแรงตึงผิวระหว่างอนุภาค (soil tension, c_t) และวัสดุเชื่อมประสาน (cementation, c_c) ผลของแรงยึดเหนี่ยวภายในรวมจะส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน ผลของแรงยึดเหนี่ยวภายในรวมจะส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ค่าแรงระหว่างโมเลกุลดิน (c_0) จะมีค่าน้อยมาก และมักจะถูกละทิ้งในการวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของดิน สำหรับแรงตึงของดิน (c_t) จะขึ้นอยู่กับแรงดูด (suction) และมักถูกสมมติให้เป็นฟังก์ชันของระดับการอิ่มตัวด้วยน้ำ (degree of saturation, S_r) ในกรณีของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แรงดูดจะส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวภายในจนมีค่าสูงมากหรือเรียกว่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (apparent cohesion) แต่ในกรณีดินอิ่มตัวด้วยน้ำ แรงดูดนี้จะมีค่าน้อย และในส่วนของแรงพันธะเคมีจากวัสดุเชื่อมประสาน (c_c) เช่นพวกแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่ผสมอยู่ในดินธรรมชาติ แรงนี้ขึ้นกับปริมาณของวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งมักจะทำให้ค่าสูงในช่วงแรกของการรับแรง เมื่อดินมีการเสีรูปร่างเพิ่มขึ้น พันธะเคมีจะแตกและสลายไปจนอาจไม่เหลือผลของแรงยึดเหนี่ยวจากวัสดุเชื่อมประสานนี้ภายหลังการลดแรง



รูปที่ 2.13 ขอบเขตความเค้นเฉือนสูงสุดของดินจากแรงยึดเหนี่ยวภายใน
ที่มา: สุเชษฐ์ (2557)

2.5.1.5 การประมาณกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP (Stress History and Normalized Soil Engineering Properties)

ค่ากำลังรับแรงเฉือนสำหรับดินที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัว สามารถประมาณได้ตามหลักการของ SHANSEP (Ladd et al 1977) ดังสมการต่อไปนี้

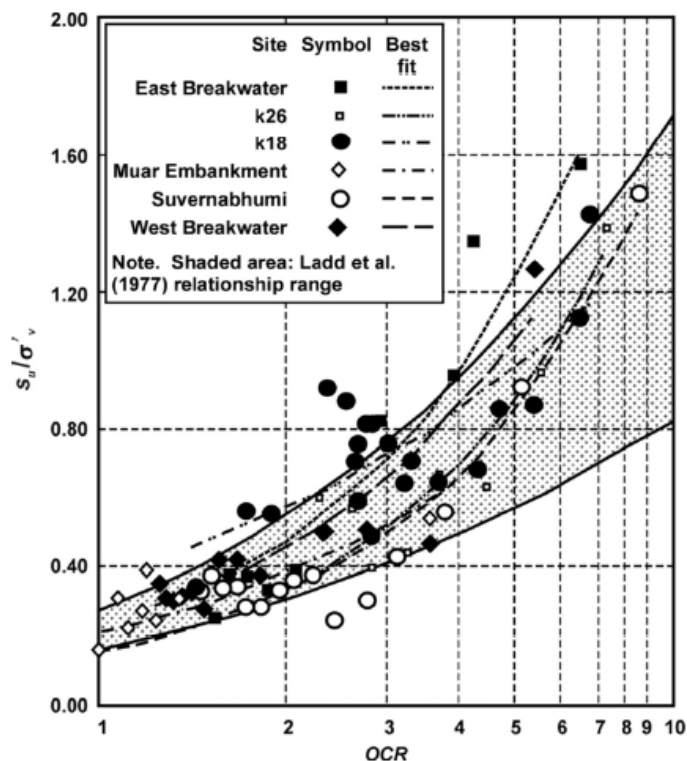
$$\frac{S_u}{\sigma'_{vo}} = (S) OCR^m \quad (2.1)$$

เมื่อ S_u คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ($\phi = 0$) σ'_{vo} คือ ค่าความเค้นกดทับในแนวตั้งประสิทธิภาพ (effective overburden pressure) S คือ ค่าอัตราส่วนกำลัง (normally consolidated ratio of $\frac{\tau}{\sigma'_{vc}}$) OCR คือ อัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำ (over consolidation ratio) m คือ 0.7-0.9

การใช้สมการ SHANSEP มีข้อจำกัด ซึ่งเหมาะกับดินเม็ดละเอียดที่ค่อนข้างไวตัว (sensitive fine grained soils) SHANSEP จึงจะสามารถใช้ในการทำนายค่ากำลังการรับแรงเฉือนค่อนข้างดี (Jamolkowski et al. 1985) อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ S และ m ได้มาจากการจับความสัมพันธ์ของสมการ ซึ่งได้มาโดยการเก็บข้อมูลในการทดลองจำนวนมาก อันขึ้นอยู่กับดินแต่ละชนิดจะให้ค่าต่างกัน จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ SHANSEP ไว้ดังตารางที่ 2.9 และแสดงในรูปที่ 2.14

ตารางที่ 2.9 พารามิเตอร์ของสมการ SHANSEP ของดินแต่ละชนิด (Roy and Singh 2009)

ชนิดดินเหนียว	S, m	r^2	ที่มา
Marine Organic clay	0.29, 0.81	-	Ladd et al 1977
Bangkok clay	0.28, 0.76	-	Ladd et al 1977
Atchafalya clay	0.24, 0.79	-	Ladd et al 1977
AGS CH clay	0.27, 0.70	-	Ladd et al 1977
Boston Blue clay	0.22, 0.70	-	Ladd et al 1977
Connecticut valley varved clay	0.17, 0.71	-	Ladd et al 1977
West Breakwater	0.21, 0.96	0.84	Chung et al. 2006
East Breakwater	0.20, 1.08	0.97	Chung et al. 2006
Muar	0.20, 0.80	0.95	Indraratna et al. 1992
Suvarnabhumi	0.15, 1.04	0.95	Bergado et al. 2001
K18 (CL/CH)	0.34, 0.62	0.62	Roy and Singh 2008
K26 (CL/CH)	0.15, 1.08	0.84	Roy and Singh 2008



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง S_u / σ'_{vo} กับค่า OCR (Roy and Singh 2009)

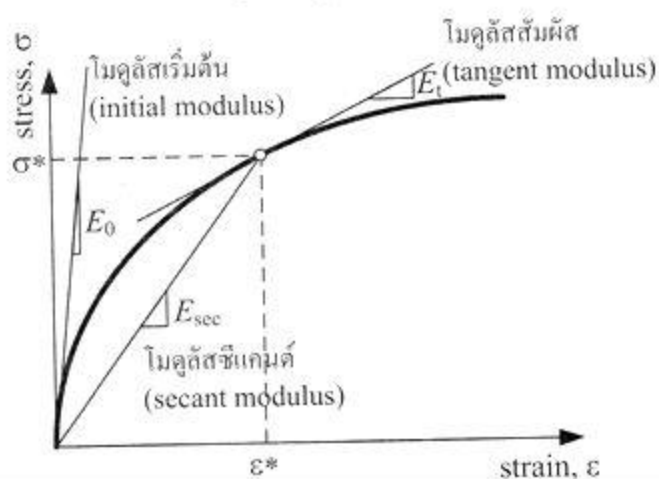
2.5.2 โมดูลัสของดิน

โมดูลัสสภาพยืดหยุ่น (modulus of elasticity) เป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัตถุ และมีประโยชน์ในด้านวิศวกรรมเป็นอย่างมาก เช่น ในการเลือกวัตถุเพื่อใช้เป็นโครงสร้างอาคาร สะพาน หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องเลือกวัตถุที่มีสมบัติสภาพยืดหยุ่นเหมาะสมกับงาน วัตถุที่มีโมดูลัสสภาพยืดหยุ่นต่างกัน สามารถทนต่อแรงภายนอกต่างกัน วัตถุที่มีโมดูลัสสภาพยืดหยุ่นสูง จะสามารถทนต่อแรงภายนอกได้มากหรือทำให้ผิดรูปได้ยาก ส่วนความเค้นที่ขีดจำกัด สภาพยืดหยุ่นจะบอกให้ทราบว่าวัตถุนั้นสามารถทนต่อแรงภายนอกมากที่สุดเพียงใด เพื่อสามารถกับสู่สภาพเดิมได้

โมดูลัสของดิน (soil modulus) คือ อัตราส่วนระหว่าง ความเค้น (stress) ต่อ ความเครียด (strain) หรือหาจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียด โดยค่าโมดูลัสมีอยู่ 3 รูปแบบตามระดับความเครียด (strain level) ดังแสดงตามรูปที่ 2.15 ดังนี้

1. โมดูลัสเริ่มต้น (initial modulus, E_0) คือ ความชันของเส้นสัมผัสที่จุดกำเนิดของเส้นโค้งความเค้นและความเครียด หรือค่าความชันของเส้นโค้งเมื่อความเครียดมีค่าเท่ากับศูนย์
2. โมดูลัสสัมผัส (tangent modulus, E_t) คือ ความชันของเส้นสัมผัสที่ระดับความเค้นที่กำหนด

3) โมดูลัสซีแคนต์ (secant modulus, E_{sec}) คือ ความชันของเส้นที่ลากจากระดับความเค้นที่กำหนดไปที่จุดกำเนิด ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมส่วนใหญ่มักจะใช้โมดูลัสซีแคนต์ที่ครึ่งหนึ่งของกำลังสูงสุด (secant modulus at 50% strength, E_{50})



รูปที่ 2.15 โมดูลัสเริ่มต้น โมดูลัสสัมผัส และโมดูลัสซีแคนต์ (สุเชษฐ์ 2557)

โมดูลัสของดินเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดิน และใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยเฉพาะการคำนวณที่อ้างอิงทฤษฎีอิลาสติก กล่าวคือ เมื่อต้องการทราบทั้งระดับของความเค้นและความเครียดในมวลดินพร้อมกัน หากใช้คุณสมบัติเฉพาะความแข็งแรง (c, ϕ) จะไม่เพียงพอ ต้องคำนวณจากค่าโมดูลัสของดินด้วย ดังกรณีต่อไปนี้

- 1) เมื่อโครงสร้างสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนตัวมากจนไม่สามารถใช้งานได้ แต่ยังไม่วิบัติ เช่น ดินหลังเข็มพืดกันดินจนทำให้สิ่งก่อสร้างข้างเคียงเสียหาย
- 2) ชั้นดินฐานรากที่เมื่อรับน้ำหนักแล้วมีการทรุดตัวทันใดสูง อาจทำให้เกิดความเสียหายได้โดยที่ยังไม่เกิดการวิบัติ เช่น ดินใต้ถังน้ำมัน
- 3) การศึกษาการเคลื่อนตัวของฐานรากหรือโครงสร้างที่ส่งผ่านแรงให้ดิน ทั้งในระหว่างการก่อสร้างและใช้งาน
- 4) การวิเคราะห์พฤติกรรมโดยละเอียดของมวลดินเมื่อรับแรงกระทำต่าง ๆ โดยวิธี Finite Element Method (FEM)

ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับดินเหนียวแสดงไว้ในตารางที่ 2.10 นอกจากนี้ค่าโมดูลัสของดินยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 เงื่อนไข คือ โมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำ (undrained modulus, E_u) ในเงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำนี้ มวลดินจะไม่มีเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือมีความต้านทางการ

เปลี่ยนแปลงปริมาตรสูงมาก ค่าอัตราส่วนปัวของแบบระบายน้ำ มีค่าเท่ากับ 0.5 ค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำหาได้จากการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (UC-test) การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (CU-test) และอีกเงื่อนไขหนึ่งคือ โมดูลัสแบบระบายน้ำ (drained modulus, E') ในเงื่อนไขแบบระบายน้ำ มวลดินมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ดังนั้นค่าอัตราส่วนปัวของแบบระบายน้ำ มีค่าน้อยกว่า 0.5 ขึ้นอยู่กับประเภทของดิน สามารถหาค่าโมดูลัสแบบระบายน้ำได้โดยการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและระบายน้ำ (CD-test)

ตารางที่ 2.10 ค่าทั่วไปของโมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับดินเหนียว

ประเภทดินเหนียว	โมดูลัสความยืดหยุ่น, E_s (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
อ่อนมาก (Very soft)	2 ถึง 15
อ่อน (Soft)	5 ถึง 25
ปานกลาง (Medium)	15 ถึง- 50
แข็ง (Hard)	50 ถึง 100
มีทรายมาก (Sandy)	25 ถึง 250

ที่มา : Subramanian (2010)

2.5.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำ (Pore Pressure Parameter)

ทฤษฎีการคำนวณแรงดันน้ำในมวลดินมีสมมติฐานว่า การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในมวลดิน (excess pore pressure, Δu) เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นรวมภายนอก (total stress change) ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำ (Pore Pressure Parameter) A และ B (Skempton 1954) ซึ่งแตกต่างกันในดินแต่ละชนิด สำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ ความสัมพันธ์เป็นดังนี้:

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (2.2)$$

เมื่อ Δu คือ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำโพรงที่เกิดระหว่างการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ $\Delta\sigma_1$ คือ การเปลี่ยนแปลงของความเค้นรวมในแนวตั้งที่เกิดระหว่างการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ $\Delta\sigma_3$ คือ การเปลี่ยนแปลงของความเค้นรวมในแนวนอนที่เกิดระหว่างการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ A, B คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำของ Skempton

เมื่อทำการทดสอบแรงอัดสามแกนกับดินเหนียวที่มีความอิ่มตัวด้วยน้ำ ต้องพิจารณา ค่า B ก่อนทำการเขียนตัวอย่างดิน กระบวนการประกอบด้วยการปิดการระบายน้ำของตัวอย่างแล้วเพิ่มแรงดันปิดล้อมแก่ตัวอย่าง โดยการเพิ่มความดันเซลล์ ในกรณีนี้ $\Delta\sigma_c = \Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_3$ ดังสมการ (2.2) การเพิ่มขึ้นของความดันปิดล้อม $\Delta\sigma_c = \Delta\sigma_3$ และการวัดการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำโพรง Δu ระหว่างการทำงานของความดันปิดล้อม ค่า B สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.3)

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} \quad (2.3)$$

ค่า A_f ในสถานะวิบัติ (failure) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ทำนายแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) เฉพาะสถานะวิบัติเท่านั้น ไม่ควรนำไปวิเคราะห์หาแรงดันน้ำก่อนวิบัติ ค่า A_f จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และอัตราส่วนการอัดตัวด้วยน้ำ (OCR) ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวิบัติของดินชนิดต่าง

ชนิดของดินเหนียว	A_f
ดินเหนียวไวตัวสูง (Highly Sensitive Clay)	+0.75 ถึง +1.50
ดินเหนียวอัดแน่นปกติ (Normally Consolidation Clay)	+0.50 ถึง +1.00
ดินเหนียวปนทรายบดอัด (Compacted Sandy Clay)	+0.25 ถึง +0.75
ดินเหนียวอัดแน่นเกินตัวน้อย (Lightly Overconsolidated Clay)	0.00 ถึง +0.50
ดินบดอัด (Compacted Clay-Gravel)	-0.25 ถึง +0.25
ดินเหนียวอัดแน่นเกินตัวมาก (Heavily Overconsolidated Clay)	-0.50 ถึง 0.00

ที่มา : Craig (1997)

2.5.4 คุณสมบัติการยุบตัว (Compressibility)

การยุบตัวแบบหนึ่งมิติ (one-dimensional compression) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงปริมาตรในแนวตั้งโดยปราศจากการเคลื่อนตัวของมวลดินในแนวราบ หรือเรียกว่า เงื่อนไข K_0 (K_0 -condition)

Terzaghi (1925) ได้เป็นผู้ศึกษาพฤติกรรมของการยุบตัวแบบหนึ่งมิติ โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า ออโตมิเตอร์ (oedometer) และทำการทดสอบการอัดตัวด้วยน้ำของดิน (consolidation test) จนได้ค้นพบหลักทฤษฎีการอัดตัวด้วยน้ำ (consolidation theory) การทดสอบการอัดตัวด้วยน้ำของดินใช้กับดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated) เท่านั้น ส่วนดินชนิดอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติไม่สมบูรณ์ตามคุณสมบัตินี้ ก็มีพฤติกรรมไม่ตรงตามทฤษฎีการอัดตัวด้วยน้ำนัก แต่ในบางกรณีก็จะพออนุโลมให้ใช้ทฤษฎีการอัดตัวด้วยน้ำได้ เช่น ตัวอย่างดินเหนียวที่มีทรายผสม (sandy clay) ที่ไม่อิ่มตัว (partially saturated) เป็นต้น ในปัจจุบันการทดสอบการอัดตัวด้วยน้ำยังใช้เครื่องมือที่ไม่แตกต่างไป

จากเครื่องมือที่ได้พัฒนาใช้ในสมัยก่อนมากนัก และการทดสอบการอัดตัวคายน้ำชนิดเดียวกันนี้ก็ยังคงเป็นการทดสอบมาตรฐานสำหรับหาคคุณสมบัติการทรุดตัวของดินเหนียวที่จะถูกกดทับด้วยน้ำหนักบรรทุกฐานราก เช่นดินถมบริเวณ (fill) คันดินถม (embankment) ฐานแผ่ (spread footing) ลานเก็บสินค้า (storage area) เป็นต้น

ในปี 1966 โรว์ (Rowe) ได้พัฒนาเครื่องมือทดสอบอัดตัวคายน้ำแบบอัดความดันน้ำ (hydraulically pressurized) โดยใช้ตัวอย่างดินเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 - 9 นิ้ว บิชอป (Bishop) ก็ได้ออกแบบเครื่องมือทดสอบแบบอัดความดันน้ำเช่นเดียวกัน แต่ใช้ขนาดตัวอย่างดินเท่าแบบธรรมดา (2.5 - 3.0) ซึ่งเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาใหม่มีความก้าวหน้ากว่าสามารถอัดความดันน้ำให้ตัวอย่างอิมตัวด้วยน้ำ และสามารถวัดความดันน้ำ (Pore water pressure measurement) ได้ในขณะที่อัดทดสอบซึ่งเป็นค่าคงตัวอีกตัวหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับค่าอำนาจการทรุดตัวของดินที่วัดอยู่ตามปกติสำหรับการทดสอบการอัดตัวทั่วไป

ในการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบอัดตัวคายน้ำ (consolidation machine, consolidometer หรือ odometer) จะบรรจุตัวอย่างดินไว้ในวงแหวนตัวอย่าง (sample ring) น้ำหนักจะกดเฉพาะในแนวตั้ง ผ่านแผ่นหินพรุนบน (Top porous stone) ซึ่งระบายน้ำได้ มีหรือไม่มีแผ่นหินพรุนด้านล่าง (bottom porous stone) และสมมติว่าตัวอย่างดินจะไม่ขยายดินจะไม่ขยายตัวด้านข้าง จะทรุดตัวในเฉพาะแนวตั้งเป็นการทรุดตัวแกนตั้งเพียงแกนเดียว (one dimensional consolidation) ซึ่งเป็นการสมมติฐานใกล้เคียงกับสภาพจริงในธรรมชาติ มีมิติด้านข้างไม่จำกัด และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในแนวนอนน้อยมาก

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ดินจะทรุดตัว 3 ระดับ คือ

- 1) การอัดตัวขั้นแรก (Initial consolidation) เกิดขึ้นในทันทีในสภาวะยืดหยุ่น (elastic) มีค่าน้อยและค่าความชื้นไม่เปลี่ยนแปลง
- 2) การอัดตัวหลัก (primary consolidation) มีค่ามากที่สุด เป็นค่าการทรุดตัวหลักเนื่องจากน้ำ ถูกบีบตัวออกตามทฤษฎีการอัดคายน้ำของเทอร์ซาคี (Terzaghi) มีปริมาณมากและใช้เวลานาน มีการเปลี่ยนแปลงทั้งความชื้นและปริมาตรลดลง
- 3) การอัดตัวระยะที่สอง (secondary consolidation) การคืบ (creep) ของดินเกิดขึ้นหลังจากการอัดตัวหลักเสร็จสมบูรณ์แล้วมีค่าน้อย

สัมประสิทธิ์การอัดตัว ขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลซึมผ่านได้ของน้ำในดิน (Permeability) และความสามารถในการยุบตัว ซึ่งสัมประสิทธิ์การอัดตัวของดินที่สำคัญมี 2 ตัว คือ

- 1) ระยะเวลาและอัตราการอัดตัวของดิน (consolidation rate) หาได้จากค่าคงตัวสัมประสิทธิ์การอัด (Coefficient of consolidation, C_v)
- 2) ปริมาณการทรุดตัวของดินทั้งหมด (total settlement) หาได้จากค่าดัชนีการยุบตัว (Compression index, C_c)

2.5.4.1) ระยะเวลาและอัตราการอัดตัวของดิน

จากการทดสอบการอัดตัวจะได้สัมประสิทธิ์การอัดตัว (Coefficient of consolidation, c_v) จากสมการ (2.4) สามารถหาระยะเวลาและอัตราการอัดตัวของดิน ได้

$$c_v = \frac{T_v \cdot H_d^2}{t} \quad (2.4)$$

เมื่อ H_d คือ ระยะทางระบายน้ำยาวที่สุด (Longest drainage path) t คือ ระยะเวลาทรุดตัว T_v คือ องค์กรประกอบเวลา (Time factor) ไม่มีหน่วยได้มาจากการแก้สมการอัดตัวคายน้ำ

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.5)$$

ซึ่ง Terzaghi (1934) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า T_v และ u ,

u = เปอร์เซ็นต์การคายตัวของน้ำ (Percentage pore water pressure dissipation)

$$\begin{aligned} &= \frac{u_t}{u_0} \times 100 \% \\ &= \text{ความดันในน้ำขณะนั้น} / \text{ความดันน้ำเริ่มแรก} \times 100\% \\ &= \frac{S_t}{S} \times 100 \% \\ &= \text{ค่าทรุดตัวในขณะนั้น} / \text{ค่าทรุดตัวทั้งหมด} \times 100\% \end{aligned}$$

ค่าดัชนีการยุบตัวเป็นค่าเป็นค่าความชันของกราฟระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio, e) กับค่าความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง (σ'_{vo}) ในแกนลือกฐาน (Log effective overburden pressure) สำหรับดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติ (Normally consolidation, NC clay) ค่าดัชนีการยุบตัว สามารถหาได้จากสมการที่ 2.5

$$C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma'_v \quad (2.6)$$

เมื่อ C_c คือ ค่าดัชนีการยุบตัว (Compression index) Δe คือ ผลต่างของค่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างจุดสเกลลือก $\Delta \log \sigma'_v$ คือ ผลต่างของค่าความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งแกนฐานลือก

ดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression index) เป็นค่าความชันของกราฟระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง ในแกนลอการิทึม (Log effective overburden pressure) สามารถหาค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำได้จากสมการที่ 2.6

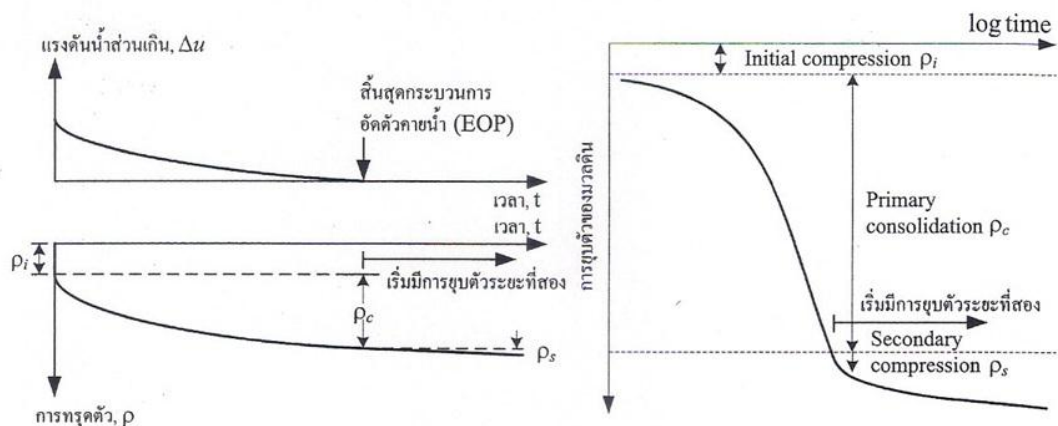
$$c_r = \Delta e / \Delta \log \sigma'_v \quad (2.7)$$

เมื่อ c_r คือ ค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression index) Δe คือ ผลต่างของค่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างจุดสเกลล็อก $\Delta \log \sigma'_v$ คือ ผลต่างของค่าความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งแกนฐานล็อก

2.5.4.2 การยุบตัวระยะที่สอง การคืบและสมมติฐานการยุบตัว

พฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา (rate – dependent behavior) เป็นพฤติกรรมตอบสนองของดินต่อการกระทำเนื่องจากน้ำหนักภายนอกด้วยอัตราที่แตกต่างกัน ตัวอย่างของพฤติกรรมนี้ พฤติกรรมของดินที่ขึ้นกับเวลาเป็นที่รู้จักกันดีอันหนึ่ง คือ พฤติกรรมการอัดตัวระยะที่สอง (secondary compression, ρ_s) และการคืบ (creep)

พฤติกรรมการอัดตัวระยะที่สอง เกิดขึ้นภายหลังจากดินเกิดกระบวนการอัดตัวคายน้ำแล้วเสร็จ (after primary consolidation) ดินที่ปราศจากแรงดันน้ำส่วนเกินในมวลดินอาจจะยังคงเกิดการยุบตัวเพิ่มขึ้นต่อเนื่องไปอย่างช้า ๆ การยุบตัวนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.16



(ก) แรงดันน้ำส่วนเกินกับการทรุดตัวตามเวลา
(Excess pore pressure and soil settlements with time)

(ข) การยุบตัวของมวลดินกับลอการิทึมของเวลา
(Soil compression vs. log time)

รูปที่ 2.16 การยุบตัวระยะที่สอง
ที่มา : สุเชษฐ์ (2551)

การคืบ คือ การที่ดินถูกน้ำหนักคงที่กระทำและเมื่อปล่อยเวลาผ่านไปจะเกิดการเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ หรือพฤติกรรมการทรุดตัวของดินขณะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นภายในมวลดินนั่นเอง การผ่อนคลายของความเค้น (stress relaxation) คือ การที่ดินลดระดับความเค้นภายในเมื่อเวลาผ่านไปโดยไม่มีการเคลื่อนตัวหรือความเครียดเกิดขึ้น ซึ่งจะตรงข้ามกับการคืบนั่นเอง แต่จะแตกต่างจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ เพราะกระบวนการอัดตัวคายน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งความเค้นประสิทธิผลและความเครียดตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากน้ำในโพรงดินไหลออกไปไม่ได้เกิดจากอนุภาคของดินเอง ในทางทฤษฎีการคืบจะเกิดขึ้นได้ทั้งในขณะที่น้ำยังไม่ระบายออกจากมวลดินหรือเงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ (undrained creep) และ หลังกระบวนการอัดตัวคายน้ำเสร็จสิ้นหรือเงื่อนไขระบายน้ำ (drained creep) แต่ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถแยกการคืบแบบไม่ระบายน้ำออกจากการทรุดตัวจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำได้

นอกจากนี้ ซาลล์ แลตต์ และคณะ (Ladd et al. 1977) ได้ตั้งสมมติฐานสองประการเกี่ยวกับการยุบตัวระยะที่สองไว้ว่า สมมติฐาน A (hypothesis A) การยุบตัวระยะที่สองจะเกิดขึ้นหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอัดตัวคายน้ำและจะดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ ส่วนสมมติฐาน B (hypothesis B) การยุบตัวระยะที่สองจะเริ่มเกิดขึ้นไปพร้อม ๆ กับกระบวนการอัดตัวคายน้ำ และยังคงดำเนินต่อไปหลังสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำแล้วและยังดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ ซึ่งถ้าการยุบตัวระยะที่สองเป็นกระบวนการที่ขึ้นกับอัตรา (rate - dependence) สมมติฐาน B น่าจะสมเหตุสมผลมากกว่านั่นเอง

2.6 การทดสอบแรงอัดสามแกนและการแปลผล

2.6.1 การทดสอบแรงอัดสามแกน

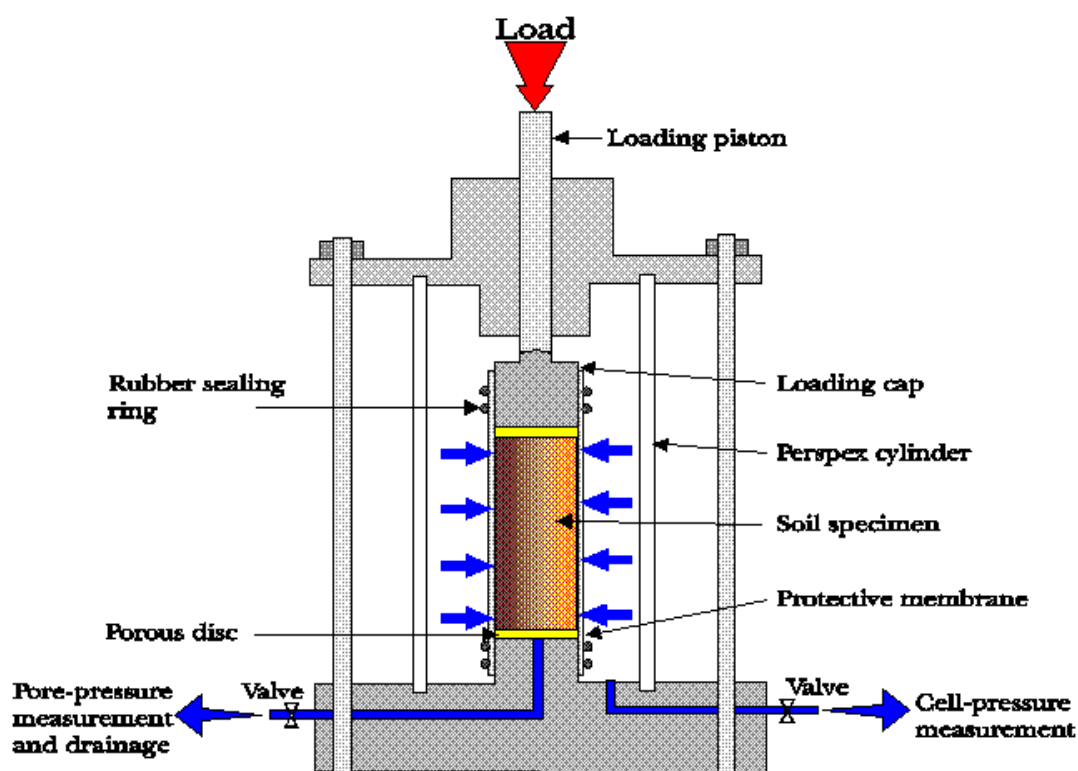
การทดสอบแรงอัดสามแกน (triaxial compression test) เป็นวิธีทดสอบเพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่นิยมมากในห้องปฏิบัติการ เพราะสามารถปรับสภาพของดินให้ใกล้เคียงกับดินในธรรมชาติ เหมาะสำหรับการทดสอบดินเหนียว โดยมีวิธีการกลึงดินให้เป็นรูปทรงกระบอก โดยให้มีอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เท่า หุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น และกั้นน้ำในกล่องทรงกระบอกซึมเข้าไปในตัวอย่างขณะทำการทดสอบที่ปลายทั้ง 2 ข้างจะมีหินพรุน (Porous stone) เพื่อให้ น้ำในมวลดินมีโอกาสรบายออกเพื่อทำการวัดความดันของน้ำ จากนั้นเติมน้ำพร้อมอัดความดันเข้าไปรอบตัวอย่าง เพื่อให้ดินตัวอย่างที่จะทดสอบอยู่ในสภาวะที่ใกล้เคียงกับธรรมชาติ ดังรูปที่ 2.17 แสดงเครื่องมือทดสอบสามแกน ซึ่งการทดสอบจะมี 2 กรณี คือ ที่แรงแนวแกนมากกว่าแรงโอบรัด หรือ $\sigma_a = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_3$ จะเป็นการทดสอบแรงอัดสามแกน แต่ในทางตรงข้ามถ้าแรงโอบรัดมากกว่าแรงแนวแกน $\sigma_r = \sigma_1 > \sigma_a = \sigma_3$ จะเป็นการทดสอบแรงดึงสามแกน (triaxial extension test) การให้แรงแบ่งออกเป็น 2 ทิศทาง คือ ทิศทางด้านข้าง เป็นการให้แรงดันโอบรัด (confining pressure, σ_c) จากแรงดันน้ำ ส่วนอีกทิศทางคือ ทิศทางในแนวตั้ง เป็นการให้แรงจากลูกสูบให้แรง (loading piston) การวัดการเคลื่อนที่ใน

แนวคิดจะติดตั้งเกจอ่านค่าการเคลื่อนที่ภายนอก มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (volume change, Δv)

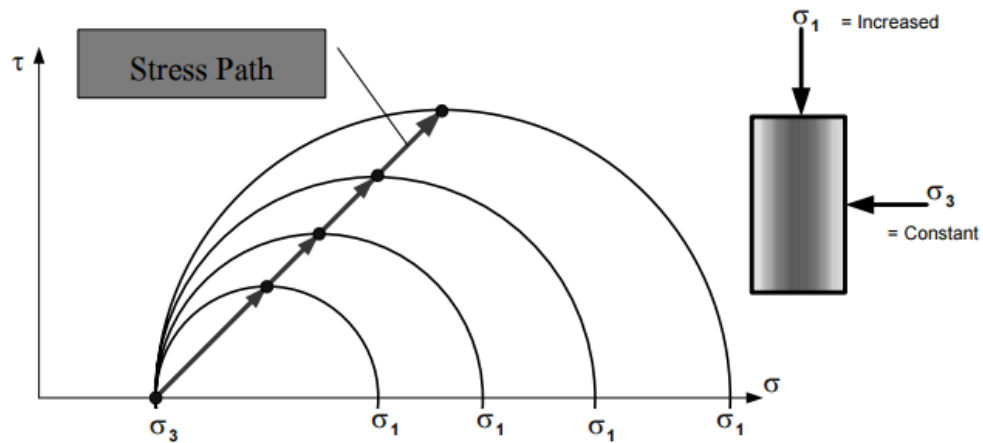
ผลการทดสอบแรงอัด 3 แกน ได้ความสัมพันธ์ของค่าความเค้น (stress) และค่าแรงเฉือน (shear) ซึ่งเป็นค่าคงตัวกำลังของดิน (strength parameters) จึงมีการนำเสนอผลการทดสอบมาแสดงผลด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น วิธีการแสดงผลการทดสอบด้วยวงกลมเมอร์ (Mohr)

2.6.2 ทางเดินของความเค้น (stress Path)

ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนที่แสดงผลในรูปวงกลมเมอร์ไม่สามารถจะให้ความเข้าใจพฤติกรรมสถานะของความเค้นของดินในระดับสมบูรณ์ได้ Lambe และ Whitman (1969) จึงได้เสนอวิธีการแสดงผลด้วยเส้น และลูกศรที่ลากผ่านจุดยอดของวงกลมเมอร์ ดังรูปที่ 2.18 หรือที่เรียกว่า ทางเดินความเค้น (stress path) ซึ่งยังคงให้ข้อมูลเทียบเท่าการเขียนวงกลมเมอร์ แต่จะแสดงได้ง่ายกว่าเพราะไม่ต้องเขียนวงกลมหลายวงต่อเนื่องกัน และยังคงเปลี่ยนกลับมาเขียนวงกลมเมอร์ได้ง่าย พัฒนาขึ้นโดย



รูปที่ 2.17 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน
ที่มา : from <http://environment.uwe.ac.uk/>



รูปที่ 2.18 ทางเดินของความเค้น (Stress Path)

ที่มา : วัชรระ (2560)

พารามิเตอร์ความเค้นประกอบไปด้วยความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress) และความเค้นประสิทธิภาพเฉลี่ย (mean effective stress) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานปฐพีกลศาสตร์ พารามิเตอร์นี้มีใช้กันอยู่ทั่วไปสองสถาบัน คือ สถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ (MIT) และมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ แต่น่าเสียดายที่ ทั้งสองกลุ่มใช้สัญลักษณ์เดียวกัน คือ q และ p แต่เพื่อให้พารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน มหาวิทยาลัยเคมบริดจ์จะใช้ $q - p$ และสำหรับสถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์จะใช้ $t - s$ แทน $q - p$ ตามลำดับ ในแง่ของค่าความเครียดหลัก (σ_1, σ_3) และเทียบเท่าความเค้นประสิทธิภาพ (effective stress)

$$t = t' = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (2.8)$$

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (2.9)$$

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (2.10)$$

พารามิเตอร์ q, p ของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ คือค่าคงที่ความเค้น

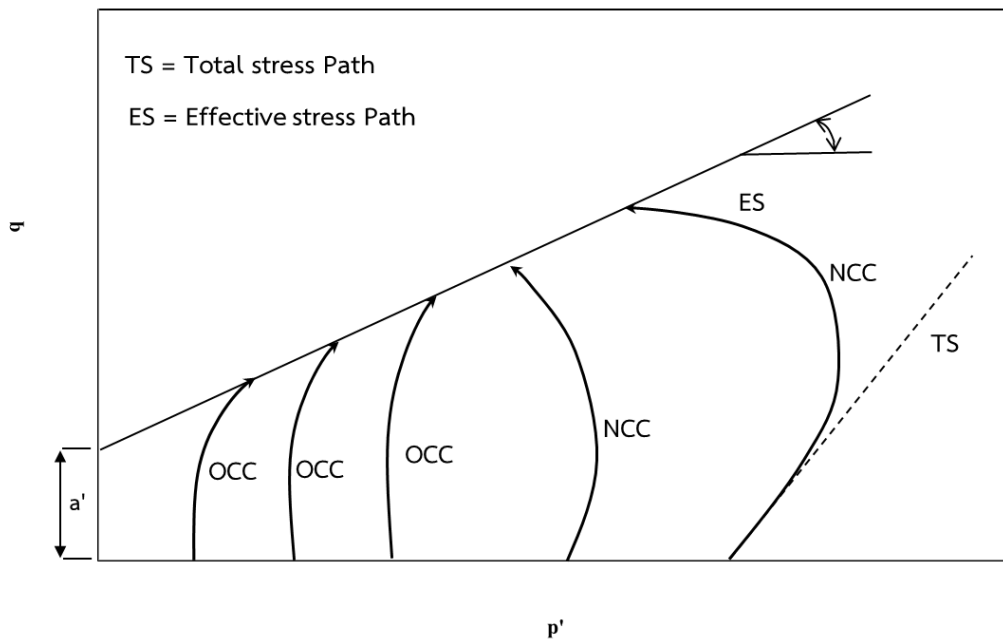
$$q = \frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

$$p = \frac{1}{3} (\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (2.12)$$

$$p' = \frac{1}{3} (\sigma'_1 + 2\sigma'_3) \quad (2.13)$$

เมื่อความดันด้านข้าง σ_3 คงที่ และทำการเฉือนทำให้มีค่า σ_d เพิ่มขึ้นตามแนวแกน ถ้านำมาเขียนวงกลมมอร์ตามระดับความเค้นที่เพิ่มขึ้น จะได้วงกลมมอร์จำนวนมาก ซึ่งไม่สะดวกในการอ่าน เมื่อพล็อตผลการทดสอบในแกน $p-q$ จะได้ทางเดินของจุด หรือทางเดินของความเค้น ซึ่งสำหรับแรงดันรวมเส้นทางเดินของความเค้นจะทำมุม 45 องศากับแกนนอน สำหรับการแสดงทางเดินของความเค้นในรูปของความเค้นประสิทธิผล โดยนำค่าแรงดันน้ำที่วัดได้ในระหว่างการทดสอบ ไปลบค่าแกน p เป็นค่าประสิทธิผล $p' = p - u$ ซึ่งความดันน้ำไม่มีผลในแกน q เนื่องจากค่าแกน q เป็นค่าแรงเฉือนและน้ำไม่สามารถรับแรงเฉือนนั้นได้

ลักษณะของทางเดินความเค้นประสิทธิผลจะบอกถึงประวัติการถูกกดทับของดินในอดีต ดินอัดแน่นตามปกติ (NCC) เมื่อแรงกดกระทำทำให้ค่าความดันน้ำจะเพิ่มขึ้นมากและเป็นบวก ส่วนดินที่เคยอัดแน่นเกินตัว (OCC) เมื่อรับแรงกดทำให้ค่าความดันน้ำจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรืออาจเป็นลบ จะทำให้ทางเดินความเค้นประสิทธิผลมีรูปลักษณะเฉพาะดังแสดงในรูปที่ 2.30 เมื่อนำมาพิจารณาในรูปของการพล็อต $p' - q$ ค่าความเค้นประสิทธิผลจะเห็นผลดินที่แตกต่างกันของดิน ดินอัดแน่นตามปกติ และดินที่เคยอัดแน่นเกินตัวได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.19 ทางเดินของความเค้นของดินที่อัดแน่นเกินตัว
ที่มา : วัชระ (2560)

2.7 ทฤษฎีสถานะวิกฤต

ทฤษฎีสถานะวิกฤต (Critical State Theory) ถูกพัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ โดยการวิจัยของศาสตราจารย์เคนเนตส์ รอสโคล และคณะ (Roscoe and Burland., 1968) ทฤษฎีสถานะวิกฤตถูกพัฒนาครั้งแรกโดยอ้างอิงการทดสอบสามแกนของดินเหนียวสร้างใหม่ (reconstituted clay) และแบบจำลองแคมเคลย์ (Cam-clay model) เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติ ต่อมาได้มีการขยายความและนำเสนอทฤษฎีสถานะวิกฤตในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น โดยจอห์น แอตคินสัน และบรานปีย์ (Atkinson and Bransby, 1978) และสุดท้ายได้มีการนำเสนอหลักการดังกล่าวได้อย่างครบถ้วนโดย เดวิด เมย์ วูดส์ (Wood, 1990) จึงทำให้ทฤษฎีเป็นที่นิยมขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะแบบจำลองแคมเคลย์ที่ค่อนข้างประสบความสำเร็จในการอธิบายพฤติกรรมอิลาสโตพลาสติกของดินสภาพอัดแน่นปกติ

2.7.1 พื้นผิวขอบสถานะ

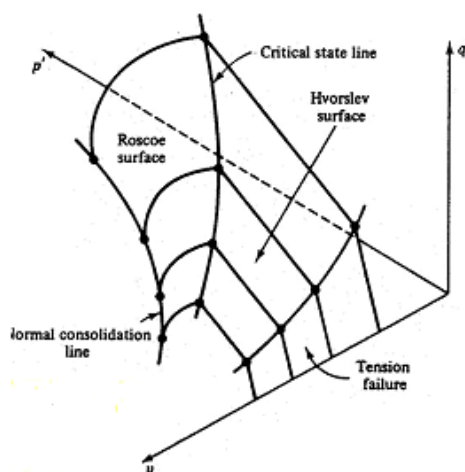
ทฤษฎีสถานะวิกฤตอาศัยการสังเกตพฤติกรรมดินเหนียว จากผลการทดสอบสามแกน โดยทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสามดังนี้

1) ความเค้นประสิทธิภาพเฉลี่ย (mean effective stress) หรือความดันอัดตัวคายนํ้า (consolidation pressure) $p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)$

2) ความเค้นเฉือน (shear stress) หรือความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress) $q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)$

3) ปริมาตรจำเพาะ (specific volume) $v = 1 + e$ หรือการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (volume change)

โดยตัวแปรทั้ง 3 นี้จะใช้นิยามสถานะของดินโดยนำมาสร้างความสัมพันธ์กันในแกน 3 มิติ จะได้ภาพฉายบนระนาบตั้งระหว่าง (p' , q) คือวิถีความเค้น (stress path) และภาพฉายระหว่าง (p' , v) คือเส้นโค้งการอัดตัวคายนํ้า (consolidation curve)



รูปที่ 2.20 พื้นผิวขอบสถานะ (State Boundary Surface)

ที่มา: <http://slideplayer.com/slide/10760017/>

พื้นผิวของเขตสถานะ คือ พื้นผิวที่กำหนดขอบเขตความเป็นไปได้ของสถานะของดิน ซึ่งนิยามบนแกนมิติบนตัวแปร (p', q, v) โดยมีส่วนประกอบเป็นพื้นผิวสำคัญ 3 พื้นผิวคือ พื้นผิว รอสโคล (Roscoe surface) พื้นผิวฮอฟสเลฟ (Hvorslev surface) และช่วงตัดออกแรงตึง (tension cut-off) สถานะของดินอยู่ภายในพื้นผิวขอบสถานะเท่านั้น โดยไม่มีทางอยู่นอกพื้นผิวของสถานะได้ หากสถานะของดินสัมผัสพื้นผิวขอบสถานะ ดินจะมีพฤติกรรมแบบพลาสติก ไม่สามารถคืนสภาพได้ กล่าวคือพื้นผิวขอบสถานะเสมือนเป็นพื้นผิวคราก พื้นผิวขอบสถานะประกอบด้วย 2 เส้น คือ เส้นอัดตัวคายน้ำ (consolidation lines) และเส้นสถานะวิกฤติ (critical state line) แสดงดังรูปที่ 2.20

2.7.1.1 เส้นอัดตัวคายน้ำ

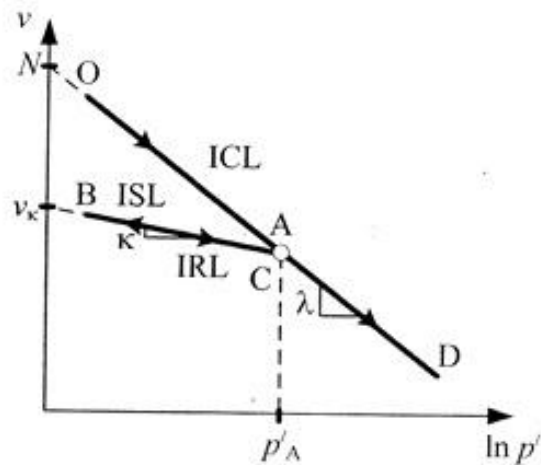
เส้นอัดตัวคายน้ำ (Consolidation lines) คือ เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (หรืออัตราส่วนช่องว่าง) กับความเค้นประสิทธิผล ในระนาบ (p', v) โดยมากจะอ้างอิงถึงเส้นการอัดตัวคายน้ำใน 2 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic stress condition) และเงื่อนไขปราศจากการเคลื่อนตัวด้านข้าง (K_0 condition)

เส้นเส้นอัดตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic consolidation line, ICL) การอัดตัวคายน้ำภายใต้เงื่อนไขความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง คือ ความเค้นหลักประสิทธิผลที่กระทำกับมวลดินเท่ากัน $\sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3$ เปรียบได้กับขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินในการทดสอบสามแกน โดยไม่มีแรงเฉือน สถานะมวลดินอยู่ในระนาบ (p', v) เท่านั้น สำหรับดินที่อยู่ในสภาพอัดแน่นปกติ ดินจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างถาวร จากการจัดเรียงอนุภาคดินส่งผลให้ช่องว่างในมวลดินลดลง กล่าวคือดินเกิดการคราก และแสดงพฤติกรรมการเพิ่มความแข็ง (hardening) ดังนั้นความเค้นครากจะเพิ่มขึ้นตามความดันอัดตัวคายน้ำ เส้นอัดตัวคายน้ำจึงมีความชันเท่ากับ λ (แลมด้า) เส้นอัดตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทาง นิยามตามสมการที่ 2.14 จากรูปที่ 2.21 เมื่อทำการลดแรงจะได้เส้น AB คือเส้นบวมตัวเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic swelling line, ISL) และทำการเพิ่มแรงซ้ำที่เส้น BC จะเรียกว่าเส้นการเพิ่มแรงซ้ำแบบเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic reloading line, IRL) ความชันของเส้นทั้ง 2 นี้ประมาณได้ว่าเป็นความชันเดียวกัน เรียกว่าความชัน K (แคปป่า) นิยามตามสมการที่ 2.15

$$ICL: \quad v = N - \lambda \ln p' \quad (2.14)$$

$$ISL, IRL: \quad v = v_K - \kappa \ln p' \quad (2.15)$$

เมื่อ N คือ ระยะตัดแกนปริมาตรจำเพาะที่ $p' = 1.0 \text{ kPa}$ v_K คือ ระยะตัดแกนปริมาตรจำเพาะที่ $p' = 1.0 \text{ kPa}$



รูปที่ 2.21 เส้นอัตรตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทาง (สุเชษฐ์ 2553)

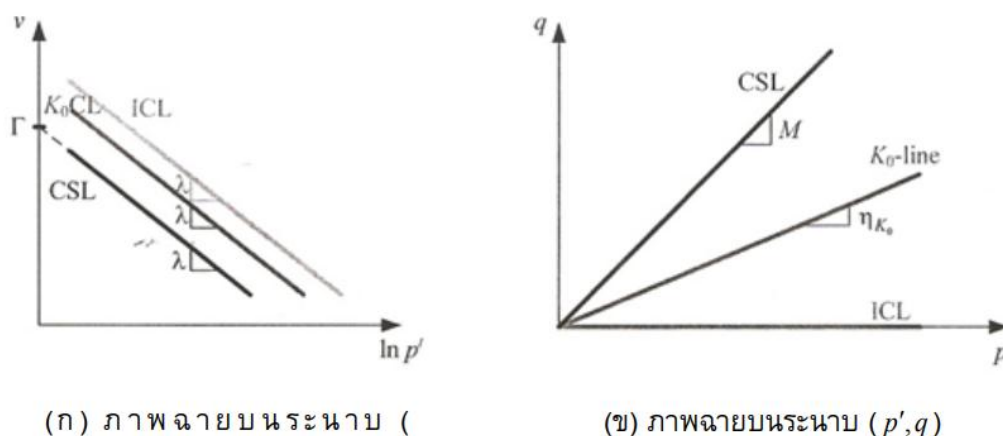
2.7.1.2 เส้นสถานะวิกฤติ

เส้นสถานะวิกฤติ (critical state line) คือ เส้นที่อ้างถึงสถานะวิกฤติของดิน ซึ่งอาจจะเป็นสถานะวิบัติ (failure) สำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกนสามารถวัดแรงดันน้ำได้ โดยการวัดแรงดันน้ำสามารถทำให้เกิดการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดในรูปแบบของความเค้นประสิทธิผล ดังรูปที่ 2.22 และการหาพารามิเตอร์สถานะวิกฤตินั้น การวิเคราะห์ต่างๆ ต้องมีความสัมพันธ์กับแรงดันน้ำดังสมการ

$$q'_f = Mp'_f \quad (2.18)$$

$$v_f = \Gamma - \lambda \ln p'_f \quad (2.19)$$

เมื่อ q'_f คือ พารามิเตอร์ q ของเส้นทางความเค้นที่จุดวิบัติ p'_f คือ พารามิเตอร์ p ของเส้นทางความเค้นที่จุดวิบัติ M คือ ความชันของเส้นสถานะวิกฤติบนระนาบ $p':q'$ v_f คือ ปริมาตรจำเพาะที่จุดวิบัติ Γ คือ ปริมาตรจำเพาะของดินบนเส้นสถานะวิกฤติที่ $p' = 0.1$ ตันต่อตารางเมตร λ คือ ความชันของเส้นสถานะวิกฤติ



รูปที่ 2.22 เส้นสถานะวิกฤต (สุเชษฐ์ 2553)

2.7.2 วิธีความเค้นของดินสภาพอัดแน่นปกติ

เส้นอัดตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทาง (ICL) และเส้นสถานะวิกฤต (CSL) เป็นตัวกำหนดของเขตของดินสภาพอัดแน่นปกติ หรืออาจเรียกขอบเขตของสถานะดังกล่าวว่า พื้นผิวโรสโคล (Roscoe surface) โดยสามารถพิจารณาจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ และการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ

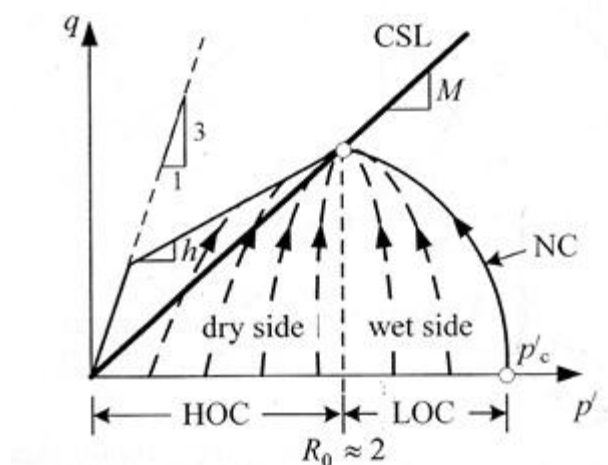
2.7.3 วิธีความเค้นของดินสภาพอัดแน่นกว่าปกติ

ดินสภาพอัดแน่นปกติอาจนิยามด้วยค่าอัตราส่วนอัดตัวคายน้ำ (overconsolidation ratio) ซึ่งจะใช้ค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ดังสมการต่อไปนี้

$$R_o = \frac{p'_c}{p_0} \quad (2.16)$$

เมื่อ R_o คือ ค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย p'_c คือ ค่าความดันอัดตัวคายน้ำ p_0 คือ ค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ณ ปัจจุบัน

ดินสภาพอัดแน่นกว่าปกติแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ดินสภาพอัดแน่นปกติและอัดแน่นกว่าปกติเล็กน้อย (normally consolidated, NC and slightly overconsolidated soil, LOC) และดินสภาพอัดแน่นกว่าปกติมาก (heavily overconsolidated soil, HOC) โดยใช้อัตราการอัดตัวคายน้ำเป็นเกณฑ์ คือ ดินชนิด NC หรือ LOC เรียกว่าดินที่อยู่ด้านเปียก (wet side) มีค่า $R_o < 2$ และดิน HOC หรือดินที่อยู่ในด้านแห้ง (Dry side) มีค่า $R_o > 2$ สำหรับวิธีความเค้นแบบไม่ระบายน้ำของดินทั้ง 2 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.23



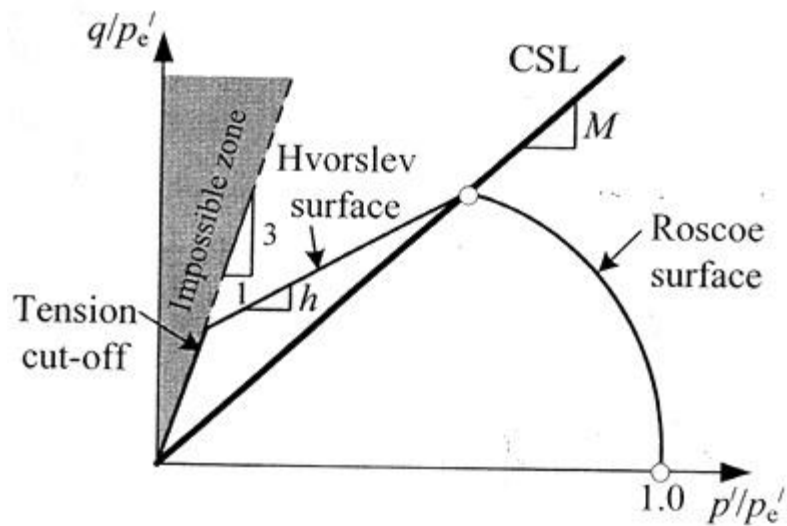
รูปที่ 2.23 วิธีความเค้นแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวประเภทต่างๆ
ที่มา: (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง 2553)

2.7.3.1 พื้นผิวฮอฟสลิฟ

วิธีความเค้นแบบไม่ระบายน้ำของดินชนิด HOC จะมีแนวโน้มอยู่เหนือเส้นสถานะวิกฤต (CSL) ก่อนที่จะโค้งลงเข้าสู่จุดตัดระหว่างพื้นผิวรอสโคลกับเส้นสถานะวิกฤต เมื่อลากเส้นเชื่อมต่อขอบเขตของวิธีความเค้นพบว่าอาจประมาณได้เป็นเส้นตรง โดยเส้นตรงดังกล่าวคือภาพฉายของพื้นผิวฮอฟสลิฟ (Hvorslev Surface) บนระนาบ (p', q) พื้นผิวนี้ถูกค้นพบโดยนักวิจัยชาวออสเตรียชื่อฮอฟสลิฟ (Hvorslev, 1937) ดังแสดงในรูปที่ 2.24

2.7.3.2 ช่วงตัดออกแรงดึง

เนื่องจากในทางปฏิบัติ ดินไม่สามารถรับแรงดึงได้ เพราะสถานะที่อยู่เหนือเส้นอัตราส่วน $q/p' = 3$ ที่ลากจากจุดกำเนิด จะทำให้ค่าความเค้นติดลบหรือคือแรงดึงนั่นเอง ดังนั้นเส้นอัตราส่วน $q/p' = 3$ ที่ลากจากจุดกำเนิดไปตัดกับพื้นผิวฮอฟสลิฟ เรียกว่าช่วงตัดออกแรงดึง (Tension Cut-off)



รูปที่ 2.24 พื้นที่ผิวครากของดินเหนียว (yield surface of clays)
ที่มา: สุเชษฐ์ (2553)

2.7.4 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีสถานะวิกฤต

การใช้ทฤษฎีสถานะวิกฤตมาประยุกต์ใช้ เพื่ออธิบายพฤติกรรมความเค้น ความเครียด และกำลังของดินในดินเหนียว เนื่องจากวิศวกรปฐพีส่วนใหญ่ยังมีความคุ้นเคยกับการใช้ค่าพารามิเตอร์ทางปฐพีกลศาสตร์แบบดั้งเดิม ดังนั้นจึงได้มีการปรับเปลี่ยค่าพารามิเตอร์ในสถานะวิกฤตไปเป็นค่าพารามิเตอร์ปฐพีกลศาสตร์แบบทั่วไป เพื่อให้สะดวกในการนำค่าพารามิเตอร์ไปใช้งานต่อไป

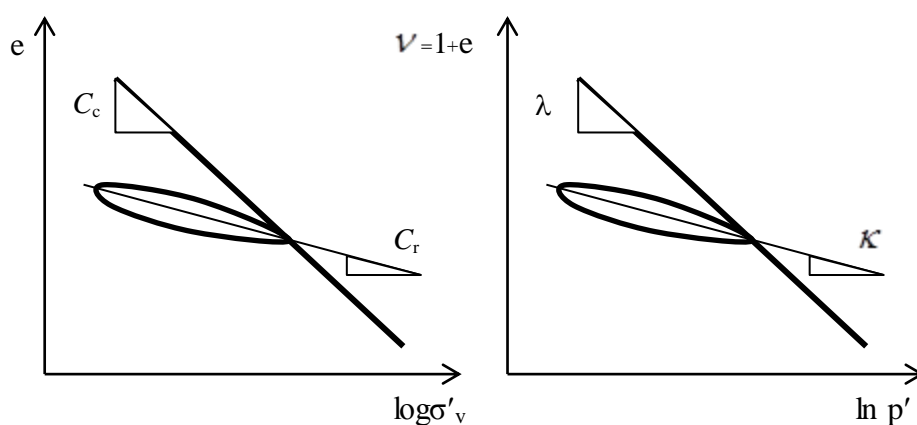
สำหรับทฤษฎีสถานะวิกฤต พฤติกรรมอัดตัวคายนํ้าสามารถอธิบายได้ด้วยกราฟกึ่งลอการิทึมระหว่างปริมาตรจำเพาะ (specific volume, $v = 1 + e$) กับค่าล็อกฐาน e ของค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย (p') แสดงในรูปที่ 2.25 ในรูป 2.26(ข) เรียกว่าเส้นโค้งการอัดตัวคายนํ้าแบบสถานะวิกฤต มักใช้กับผลการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบสามแกน ความชันของเส้นโค้งสามารถนิยามได้ 2 ช่วง คือ ช่วงอัดตัวครั้งแรก นิยามว่าเป็นดัชนีการอัดตัว (compression index) ดังสมการที่ 2.17 และช่วงเส้นโค้งการบวมตัว นิยามว่าเป็นดัชนีการอัดตัวซ้ำ (recompression index) ดังสมการที่ 2.18

$$\lambda = \frac{v_1 - v_2}{\ln(p'_2 / p'_1)} = \frac{\Delta e}{\ln(p'_f / p'_i)}$$

$$\lambda \approx \frac{c_c}{\ln 10} = 0.434 c_c \quad (2.17)$$

$$\kappa = \frac{v_1 - v_2}{\ln(p'_2/p'_1)} = \frac{\Delta e}{\ln(p'_f/p'_i)}$$

$$\kappa \approx \frac{C_r}{\ln 10} = 0.434 C_r \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.25 การจับคู่พารามิเตอร์อัดตัวคายน้ำ (สุเชษฐ์ 2553)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 ผลกระทบของความเป็นพลาสติก (plasticity) ต่อค่ากำลังการรับน้ำหนักของดิน

ดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกสูง ซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคดินเม็ดละเอียดขนาดเล็กร้อยล้านล้าน อันเป็นผลให้มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสของหน้าอนุภาคของเม็ดดินต่อหน่วยน้ำหนักสูง องค์ประกอบของเม็ดดินจะประกอบไปด้วยแร่ดินเหนียวอันมีประจุลบโดยธรรมชาติ ซึ่งประจุลบสามารถดึงดูดประจุบวกในโมเลกุลของน้ำทำให้ดินเหนียวมีน้ำเคลือบอยู่ที่ผิว ดังนั้นดินเหนียวในธรรมชาติจึงมีน้ำเป็นส่วนประกอบ โดยมีชั้นน้ำล้อมรอบหรือน้ำเคลือบผิว (Adsorbed water) ในแต่ละผลึกของแร่ดินเหนียว คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวจึงขึ้นอยู่กับน้ำเคลือบผิวนี้นี้ ซึ่งน้ำจะเคลือบที่ผิวของดินเหนียวได้ โดยประจุบวกในโมเลกุลของน้ำถูกดึงดูดโดยประจุลบที่ผิวของผลึกของแร่ดินเหนียว และน้ำเคลือบผิวบางส่วนถูกยึดติดกับผลึกของแร่ดินเหนียวโดยไฮโดรเจน ในน้ำถูกยึดไว้กับออกซิเจนหรือไฮดรอกซิลบนผิวแร่ดินเหนียวโดยพันธะไฮโดรเจน เมื่อดินเหนียวสัมผัสกับน้ำก็จะดึงประจุบวกของน้ำ(ไฮโดรเจน) และประจุบวกของโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำเข้ามา

เคลือบที่ผิวทำให้เกิดฟิล์มของน้ำรอบอนุภาคของดินเหนียว เรียกว่า ชั้นคู่ดิฟฟิว (Diffuse double layer) ดังนั้นดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง (high plasticity) จะมีโมเลกุลของน้ำมาล้อมรอบอยู่มาก จึงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำต่ำกว่าดินที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (low plasticity)

การออกแบบทางวิศวกรรมฐานรากต่างๆ ไม่ว่าจะ เป็นเสถียรภาพของคันดิน ถนน และ ออกแบบฐานรากของสิ่งก่อสร้างต่างๆ มีความจำเป็นที่จะต้องใช้พารามิเตอร์ทางด้านกำลังของดิน การได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังของดิน จะต้องได้มาจากการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ และ จากภาคสนาม ซึ่งมีความยุ่งยาก จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาและหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินกับค่าดัชนีพลาสติก เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ดังต่อไปนี้

Skempton และ Henkel (1952) ได้เสนอเส้นโค้งของความสัมพันธ์ระหว่างค่า กำลังรับแรงเฉือนที่ทำการนอร์เมลิไลซ์ (the normalized undrained shear strength, q_u / σ'_{vo}) กับค่าดัชนีพลาสติกของดินเหนียวสภาวะอัดตัวแน่นปกติ ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{q_u}{\sigma'_{vo}} = 0.11 + 0.37(PI / 100) \quad (2.19)$$

ต่อมา Bjerrum และ Simons (1960) ได้เสนอสมการถดถอยที่มาจากข้อมูลเชิง ประสบการณ์ ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{q_u}{\sigma'_{vo}} = 0.45 + (PI / 100)^{1/2} \quad (2.20)$$

สำหรับค่า $PI > 50\%$ ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนอยู่ในช่วง $\pm 25\%$

$$\frac{q_u}{\sigma'_{vo}} = 0.18 + (LI / 100)^{1/2} \quad (2.21)$$

สำหรับค่า $LI > 50\%$ ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนอยู่ในช่วง $\pm 30\%$

Karlson และ Viberg (1967) ได้เสนอสมการในรูปอย่างง่าย ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{q_u}{\sigma'_{vo}} = 0.5 + (LL / 100) \quad (2.22)$$

สำหรับค่า $LL > 20\%$ ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนอยู่ในช่วง $\pm 30\%$

ในปี 2005 Obasi และ Anyaegbunam ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ในเชิงสถิติ ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนและดัชนีพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียว ที่ได้มาจากหลายๆแหล่งในเขต เส้นศูนย์สูตร (tropical) ในประเทศไนจีเรีย พบว่าความสัมพันธ์ของค่าดังกล่าวของการศึกษาที่ผ่าน มา มีการกระจายของช่วงข้อมูลค่อนข้างมาก เนื่องจากความแตกต่างกันของชนิดดินเหนียว Obasi

และ Anyaegbunam จึงได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ตามชนิดของดินเหนียว และได้สมการดังต่อไปนี้

$$\log q_u = 1.725 + 0.315 \frac{\sigma_3}{100} + \frac{PI}{100} (0.834 - 0.906 \frac{\sigma_3}{100}) \quad (2.23)$$

สำหรับดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกซีดีต่ำ (low plasticity, CL)

$$\log q_u = 2.334 + 0.0094 \frac{\sigma_3}{100} + \frac{PI}{100} (2.508 - 0.504 \frac{\sigma_3}{100}) \quad (2.24)$$

สำหรับดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกซีดีปานกลาง (intermediate plasticity, CI)

$$\log q_u = 1.821 + 0.131 \frac{\sigma_3}{100} + \frac{PI}{100} (1.054 - 0.0457 \frac{\sigma_3}{100}) \quad (2.25)$$

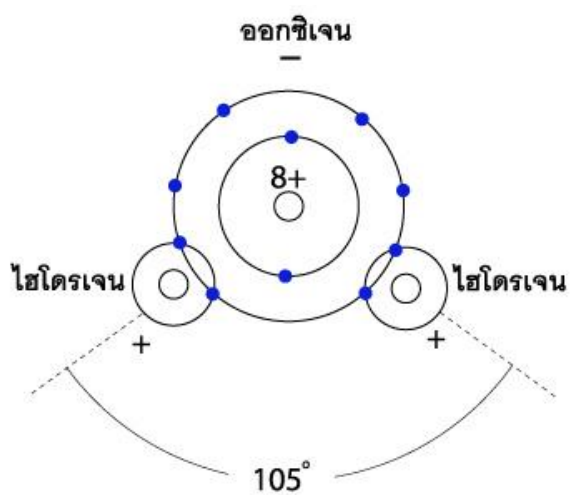
สำหรับดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกซีดีสูง (high plasticity, CH)

โดยที่ σ_3 คือ แรงดันเซลล์ในการทดสอบแรงอัดสามแกน ซึ่งพบว่าแรงดันเซลล์เท่ากับ 210 กิโลปาสคาล ให้ค่าสหสัมพันธ์ที่เชื่อถือได้มากที่สุด

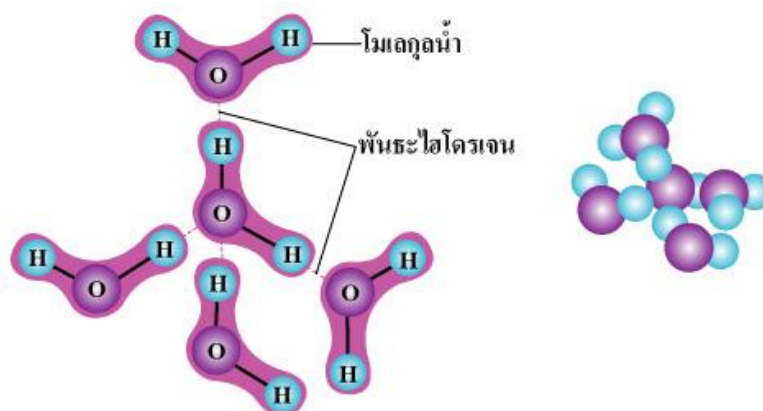
2.8.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความหนืดของของเหลวในดิน

องค์ประกอบของมวลดิน ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของแข็งหรือเม็ดดิน ส่วนของเหลวคือน้ำที่แทรกอยู่ตามโพรงช่องว่างในมวลดิน และอากาศที่แทรกอยู่ตามโพรงช่องว่างของมวลดิน การหาพารามิเตอร์ต่างๆทางด้านวิศวกรรม ได้แก่ การรับกำลังเฉือนของดิน และการอัดตัวคายน้ำของดิน นิยมใช้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated soil) เนื่องจากลดปัญหาความไม่แน่นอนของปริมาตรอากาศที่แทรกอยู่ตามช่องว่างของดิน ดังนั้นน้ำจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินเหนียว เมื่อมีการให้ความร้อนแก่มวลดิน อุณหภูมิจะส่งผลโดยตรงต่อน้ำในมวลดิน ทำให้ความหนืดของน้ำลดลง

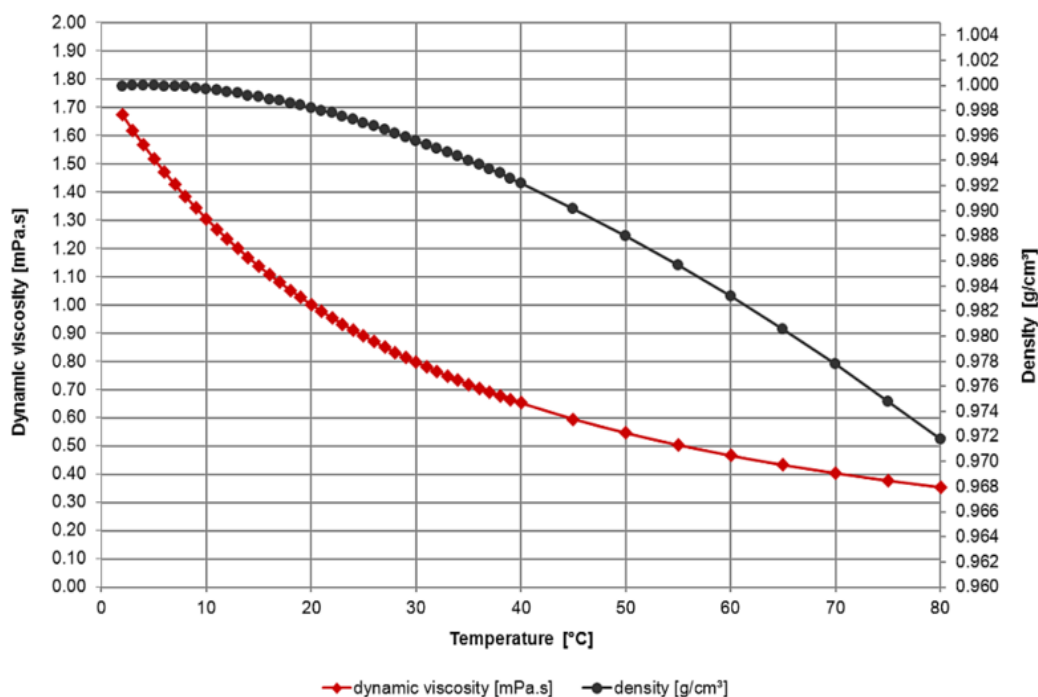
น้ำ 1 โมเลกุล (H_2O) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bonds) ซึ่งใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยที่อะตอมทั้งสามตัวเรียงกันทำมุม 105 องศา โดยมีออกซิเจนเป็นขั้วลบ และไฮโดรเจนเป็นขั้วบวก ดังรูปที่ 2.26 แสดงภาพโมเลกุลแต่ละโมเลกุลของน้ำเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen-bonds) เรียงตัวต่อกัน ดังรูปที่ 2.27 โมเลกุลของน้ำอยู่รวมกัน ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยมีแรงที่ชื่อว่า “อิเล็คโตรสแตติก” (electrostatic force) ดังนั้นเมื่อให้พลังงานความร้อน พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลจะถูกทำลาย ทำให้โมเลกุลของน้ำแยกออกห่างจากกัน จึงทำให้ความหนืดของน้ำลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.28 และตารางที่ 2.12



รูปที่ 2.26 แสดงองค์ประกอบของโมเลกุลน้ำ
ที่มา: <http://portal.edu.chula.ac.th>



รูปที่ 2.27 พันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลน้ำ
ที่มา: <http://portal.edu.chula.ac.th>



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น
ที่มา: IAPWS (2008)

Delage et al. (2011) ได้ทำการศึกษาการไหลของน้ำในช่องว่างของดินเหนียวบูม (Boom clay) เมื่อได้รับอุณหภูมิ โดยใช้การวัดอัตราการไหลซึมของน้ำที่แท้จริง (intrinsic permeability, K) ร่วมกับการให้แรงอัดเท่ากันทุกทิศทาง โดยใช้การทดสอบแรงอัดสามแกนที่สามารถรับแรงดันสูง มีการฉีดน้ำเข้าตัวอย่างดินและวัดค่า hydraulic gradient = 4000 เทียบเท่ากับการไหลของน้ำในดินเหนียวแน่น จากนั้นจึงวัดอัตราการไหลที่คงที่ และให้อุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 90 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบพบว่าค่าอัตราไหลซึมของน้ำ (permeability, k) เพิ่มขึ้นเมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนืดของน้ำลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.29 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการไหลซึมของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและค่าความพรุน (porosity, n) ซึ่งสรุปเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$k = \frac{K \gamma_w(T)}{\mu(T)} \quad (2.26)$$

เมื่อ $\mu(T)$ คือ ค่าความหนืดของน้ำ $\gamma_w(T)$ คือ ค่าหน่วยน้ำหนักของน้ำ

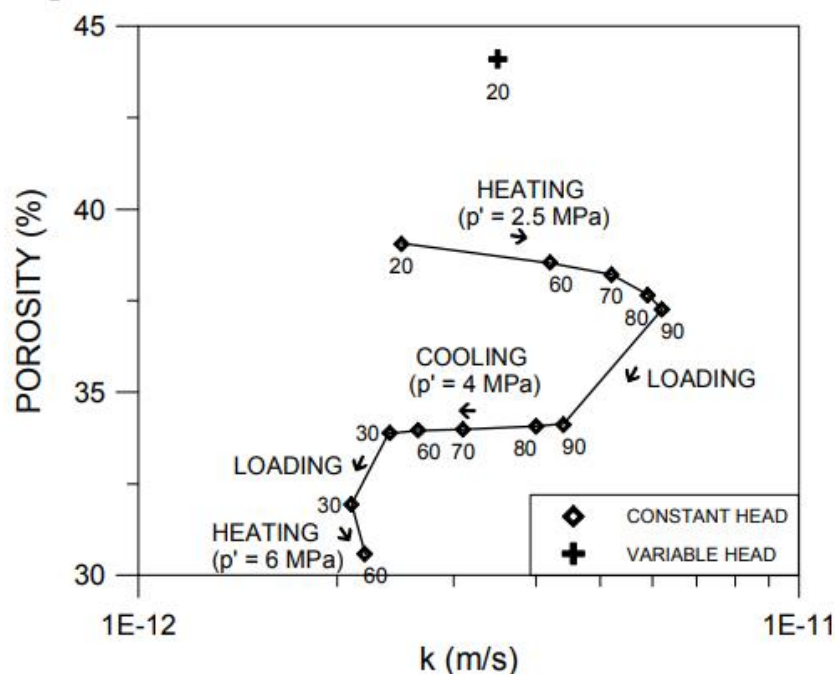
โดยสมการความหนืดของน้ำซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง (Hillel, 1980)

$$\mu(T) = -0.00046575 \ln(T) + 0.00239138 \quad (2.27)$$

เมื่อ T คือ ค่าอุณหภูมิของน้ำ

ตารางที่ 2.12 ค่าความหนืดของน้ำกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

Temp. (°C)	Dynamic Viscosity (mPa.s)	Density (g/cm ³)	Temp. (°C)	Dynamic Viscosity (mPa.s)	Density (g/cm ³)
3	1.6190	1	26	0.8701	0.9968
4	1.5673	1	27	0.8509	0.9965
5	1.5182	1	28	0.8324	0.9962
6	1.4715	0.9999	29	0.8145	0.9959
7	1.4271	0.9999	30	0.7972	0.9956
8	1.3847	0.9999	31	0.7805	0.9953
9	1.3444	0.9998	32	0.7644	0.995
10	1.3059	0.9997	33	0.7488	0.9947
11	1.2692	0.9996	34	0.7337	0.9944
12	1.2340	0.9995	35	0.7191	0.994
13	1.2005	0.9994	36	0.7050	0.9937
14	1.1683	0.9992	37	0.6913	0.9933
15	1.1375	0.9991	38	0.6780	0.993
16	1.1081	0.9989	39	0.6652	0.9926
17	1.0798	0.9988	40	0.6527	0.9922
18	1.0526	0.9986	45	0.5958	0.9902
19	1.0266	0.9984	50	0.5465	0.988
20	1.0016	0.9982	55	0.5036	0.9857
21	0.9775	0.998	60	0.4660	0.9832
22	0.9544	0.9978	65	0.4329	0.9806
23	0.9321	0.9975	70	0.4035	0.9778
24	0.9107	0.9973	75	0.3774	0.9748
25	0.89	0.997	80	0.3540	0.9718



รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ของความสามารถในการไหลซึมและค่าความพรุน
ที่มา: Delage et al.(2011)

สามารถสรุปได้ว่าน้ำที่ไหลออกจากช่องว่างของดินเหนียวเมื่อได้รับความร้อนนั้น คือ โมเลกุลของน้ำอิสระ (free water) ส่วนน้ำที่ยึดเกาะ (adsorbed water) กับแร่ดินเหนียวไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัด ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดสอบของ Habibagahi (1977) และ Morin and Silva (1984)

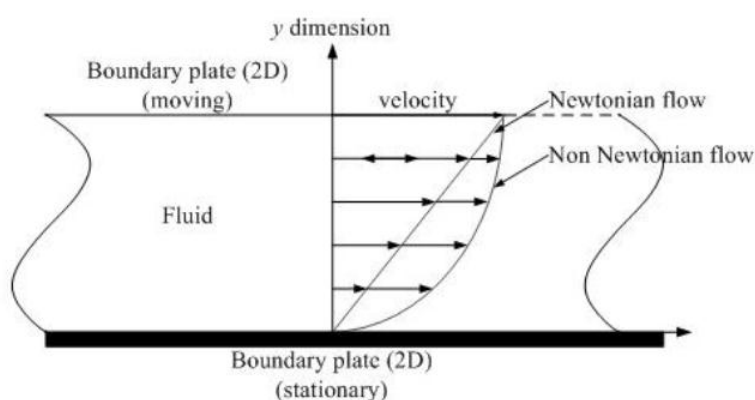
2.8.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความหนืดของดิน

ความหนืด (Viscosity) คือความสามารถในการต้านการไหลของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับอัตราเมื่อมีแรงกระทำ ถ้าของเหลวใดมีความหนืดมาก จะมีความสามารถในการต้านการไหลสูง ในทางตรงกันข้ามคือ ของเหลวใดมีความหนืดน้อยจะมีความสามารถในการต้านทานการไหลต่ำ

ลักษณะของการไหลของวัสดุ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

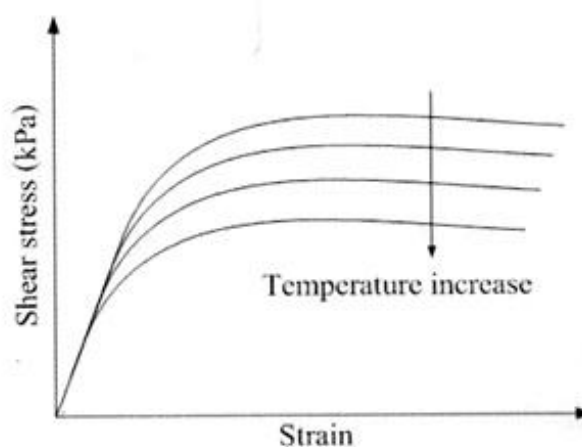
1) การไหลนิวโตเนียน (Newtonian flow) หรือ การไหลแบบเชิงเส้น (linear flow) เป็นการไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน กล่าวคือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆของไหลจะมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการเฉือนหรือความเร็วของแรงที่กระทำ เช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม ก्लीเซอร์ลิน แอลกอฮอล์ เป็นต้น

2) การไหลไม่นิวโตเนียน (non-newtonian flow) หรือการไหลแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear flow) เป็นลักษณะการไหลของวัสดุที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน กล่าวคือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆของไหลมีค่าความหนืดเป็นค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือนหรือความเร็วของแรงที่กระทำ เช่น ดินเหนียว มายองเนส ซอสมะเขือเทศ เป็นต้น ซึ่งการไหลลักษณะนี้ ยังแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ การไหลไม่นิวโตเนียนที่ไม่ขึ้นกับเวลา (time independent non-newtonian fluids) และการไหลไม่นิวโตเนียนที่ขึ้นกับเวลา (time dependent non-newtonian fluids) การไหลนิวโตเนียนและการไหลไม่นิวโตเนียน แสดงดังรูป 2.30



รูปที่ 2.30 การไหลนิวโตเนียนและการไหลไม่นิวโตเนียน (ธนกรและสุเชษฐ์ 2551)

พฤติกรรมการต้านแรงเฉือนของวัสดุหนืดขึ้นกับฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กล่าวคือ ความหนืดเป็นสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ธนกรและสุเชษฐ์ 2551)

พลังงานโมเลกุลของสารใดๆเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิตามหลักการของทฤษฎีพลังงานจลน์ อาทิเช่น พฤติกรรมของมวลดิน หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้พลังงานจลน์ในโมเลกุลของดินเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อพลังงานในการดึงดูดระหว่างโมเลกุลของดินลดลง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้ความแข็งแรงของดินเหนียวลดลง หรือความเหนียวของดินลดลง เนื่องจากส่วนประกอบในมวลดินได้แก่ อนุภาคเม็ดดิน ชั้นน้ำที่ยึดเกาะระหว่างอนุภาคของดินเหนียว ถูกทำให้อ่อนแอลง อย่างไรก็ตามแต่ละส่วนประกอบในมวลดินต่างก็มีความสัมพันธ์กันอย่างแยกออกจากกันไม่ได้ ซึ่งมีการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนกันอย่างซับซ้อน ความแข็งแรงในแต่ละส่วนประกอบของดินที่ลดลง จะส่งผลต่อความสมดุลของสมดุลโดยรวมของมวลดินด้วย โดยเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างดินโดยการส่งถ่ายแรงเค้นจากอนุภาคที่อ่อนแอ ไปยังอนุภาคที่แข็งแรงกว่า ซึ่งมีผลต่อความเหนียว และต้านทานแรงเฉือนของดิน การทำความเข้าใจเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียว จำเป็นต้องมีความเข้าใจถึงกลไกภายในโครงสร้างดินเหนียว ซึ่งกลไกภายในโครงสร้างของดินเหนียวในการรับแรงเฉือน (Kuntiwattanakul et al. 1995) ประกอบด้วยแรงต้านจากหน้าสัมผัสระหว่างอนุภาคดิน หรือเรียกว่าแรงต้านย่อย (micro resistance) และแรงต้านโดยตรงจากเม็ดดินที่เคลื่อนตัวมารับแรงเฉือนหรือแรงต้านหลัก (macro resistance)

แรงต้านจากหน้าสัมผัสระหว่างอนุภาคดินหรือแรงต้านย่อย เป็นแรงต้านโดยการสัมผัสกันของผิวหน้าเม็ดดิน โดยทั่วไปแล้วอนุภาคของดินเหนียวจะถูกยึดเกาะด้วยโมเลกุลของน้ำอยู่รอบๆอนุภาคของดินเหนียว ซึ่งโมเลกุลของน้ำจะรวมตัวกันเป็นชั้นน้ำ อันจะเป็นฟิล์มกั้นการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของดินเหนียวซึ่งเป็นของแข็ง (Christensen and Wu. 1964, Mitchell et al. 1968, Andersland and Douglas. 1970) การสลายชั้นน้ำนี้จะต้องให้พลังงานแก่มวลดินประมาณ 0.1 J/m^2 หรือเท่ากับแรงดัน $4 \times 10^5 \text{ kPa}$ (Van Olphen. 1963) ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำมีการให้แรงดันมากกว่าแรงยึดเกาะของชั้นน้ำนี้ ส่งผลให้น้ำไหลออกจากช่องว่างของดินทำให้เม็ดดินเคลื่อนชนกันมากขึ้น (Lambe and Whitman. 1969)

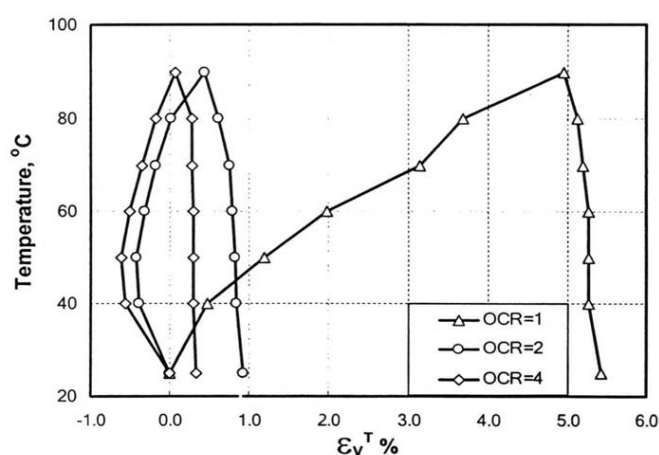
แรงต้านโดยตรงจากเม็ดดิน เกิดจากการเคลื่อนที่ของเม็ดดิน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดิน เพื่อต้านทานแรงเฉือน เมื่อมีการให้ความร้อนแก่มวลดินในกรณีที่ไม่มีการระบายน้ำ จะเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้น ในดินเหนียวอัดแน่นเกินตัวปกติ พบว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดดินนี้ ทำให้ปริมาตรของมวลดินหดตัว และแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นขณะรับแรงเฉือน มีค่าเป็นบวก หากเป็นดินอัดแน่นเกินตัวมากกว่าปกติ พบว่าปริมาตรของมวลดินขยายตัว หรือแรงดันน้ำส่วนเกินติดลบ การเกิดแรงต้านโดยตรงจากเม็ดดินจะขึ้นอยู่กับการวางตัวของโครงสร้างดิน (clay fabric) การจับตัวกันของอนุภาคของดิน (packing) และแรงดันดินด้านข้าง (effective confining stress)

2.8.4 ผลกระทบของอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำต่อค่าความหนืดของน้ำและค่ากำลังการรับน้ำหนักของดิน

เมื่อมีการให้ความร้อนแก่มวลดินเหนียวที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวปกติ (NC clay) และที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวมากกว่าปกติ (OC clay) จะมีพฤติกรรมหรือกลไกการรับแรงเฉือนที่แตกต่างกัน ดังนี้

ในดินเหนียวที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวปกติ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนจะทำให้การยึดเกาะของชั้นน้ำบริเวณที่ผิวหน้าของอนุภาคดินเหนียวลดลง เนื่องจากพลังงานความร้อนส่งผลให้ความหนืดของน้ำลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.26 จะเห็นได้ว่าความหนืดของน้ำลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น หากมีการเปิดการระบายน้ำ น้ำจึงสามารถไหลออกจากช่องว่างในมวลดิน (pore) ได้อย่างอิสระ เมื่อปราศจากชั้นน้ำรอบเม็ดดินซึ่งเป็นตัวกั้นขวางการสัมผัสกันของเม็ดดินแล้ว อนุภาคเม็ดดินจึงเคลื่อนที่เข้าหากันทำให้ปริมาตรของดินลดลงหรือหดตัว ตามการศึกษาของ (Grino. 2004) ดังรูปที่ 2.32 และการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ เป็นผลให้มวลดินเหนียวมีกำลังการรับแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น

ส่วนดินเหนียวที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวมากกว่าปกติ มีอัตราส่วนช่องว่างน้อยกว่าดินเหนียวที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวปกติ เนื่องจากดินเคยรับความเค้นในอดีตมากกว่าปัจจุบัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนทำให้ดินเหนียวขยายตัว มีปริมาตรเพิ่มขึ้นตามการขยายปริมาตรของน้ำ หากมีเปิดการระบายน้ำออกจากมวลดิน เป็นผลให้ชั้นน้ำอิสระไหลออกจากมวลดิน ทำให้ปริมาตรของมวลดินจะเริ่มลดลงในช่วงหลังการระบายน้ำ ดังนั้นการขยายตัวของดิน เป็นผลให้แรงต้านจากการสัมผัสกันของการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างเม็ดดิน เกิดขึ้นน้อยกว่าในดินสภาวะอัดแน่นเกินตัวปกติ ถึงแม้ว่าปริมาตรจะลดลงภายหลังแล้วก็ตาม ก็ยังส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนไม่มากนัก ดังนั้นดินเหนียวที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวปกติจึงมีค่ากำลังการรับแรงเฉือนมากกว่าดินเหนียวที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวมากกว่าปกติเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.32 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับอุณหภูมิของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ
ค่า OCR = 1, 2 และ 4 ที่มา: Grino (2004)

2.8.5 ผลของอินทรีย์วัตถุที่มีต่อกำลังการรับน้ำหนักของดิน

ดินเหนียวอินทรีย์ (organic clay) เป็นดินเหนียวที่มีอินทรีย์วัตถุ (organic matter) ปนอยู่ วัดได้จากค่าร้อยละของดัชนีเหลว (liquid limit) ของมวลดินเหนียวหลังอบแห้งที่ 110 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงน้อยกว่าร้อยละ 75 เมื่อเทียบกับค่าดัชนีเหลวของมวลดินที่ไม่ผ่านการอบแห้ง (ASTM 2487-06) อินทรีย์วัตถุในมวลดิน เป็นอินทรีย์สาร (organic material) ทุกชนิดในดินที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต รวมทั้งสิ่งที่ปลดปล่อยออกมาจากสิ่งมีชีวิต โดยทั่วไปอินทรีย์วัตถุมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบประมาณ 58% รูปที่ 2.34 แสดงขยายของอินทรีย์สารในมวลดินเหนียว

ปฏิกิริยาของสารอินทรีย์กับดินเหนียว (clay-organic interactions) ได้มีการศึกษาในหลายปีมาแล้วเนื่องจากสารอินทรีย์ในดินเหนียวมีความสำคัญในทางวิศวกรรมการเกษตรและวิศวกรรมปิโตรเลียม ซึ่งมีความสำคัญต่อเทคโนโลยีการขุดเจาะที่ต้องควบคุมสารประกอบที่อยู่ในดินเหนียวให้คงที่ รวมถึงในการผลิตสารหล่อลื่น ปัจจุบันวิศวกรรมธรณีเทคนิคและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมต่างให้ความสนใจต่อความรู้เรื่องปฏิกิริยาของสารอินทรีย์ (organic) กับดินเหนียว (clays) เนื่องจากต้องการแก้ปัญหาสารพิษที่เกิดขึ้น และทำความเข้าใจของเสีย การทำความเข้าใจของส่วนประกอบของสารอินทรีย์ทำปฏิกิริยากับอนุภาคดินเหนียวบนพื้นผิวของดินเหนียว (clay surface) มีความจำเป็นต่อการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าว

ในปี 1984 Lagaly ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาของอินทรีย์สารกับอนุภาคดินเหนียว พบว่าปฏิสัมพันธ์ของอินทรีย์สารกับดินเหนียวเกิดขึ้นโดยการยึดเหนี่ยว (adsorption) บนอนุภาคผิวดินเหนียว การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) และการแทรกตัว (intercalation) โดยโมเลกุลของอินทรีย์สารจะแทรกระหว่างชั้นซิลิเกต (silicate layers) และจะเกิดขึ้นมากในแร่ดินขาว (kaolin) การยึดเหนี่ยวของสารอินทรีย์กับผิวดินเหนียวจะขึ้นอยู่กับความสามารถของโมเลกุลสารอินทรีย์ในการแทนที่โมเลกุลของน้ำในดินเหนียว ประจุบวกของสารอินทรีย์สามารถแลกเปลี่ยนและดูดซับไอออนบวกกับโมเลกุลที่ไม่ใช่สารอินทรีย์ (inorganic) ถ้าไอออนบวกของอินทรีย์สารมีขนาดใหญ่กว่า การแลกเปลี่ยนไอออนก็จะไม่เกิดขึ้น การดึงดูดบนผิวหน้าดินเหนียวของโมเลกุลอินทรีย์สารที่มีขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นด้วยแรงจากพันธะแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งจะทำให้เกิดทั้งโมเลกุลของสารอินทรีย์

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของโมเลกุลของอินทรีย์สารในการทำปฏิกิริยากับดินเหนียว คือ ความเป็นกระแสไฟฟ้า (polarity) ความสามารถในการเกิดมีขั้ว (polarizability) ความสามารถในการละลาย (solubility) ขนาด และรูปร่าง เนื่องจากดินเหนียวมีหลายชนิด และมีความแตกต่างของทางกายภาพและทางเคมีมาก จึงทำให้พบความแตกต่างและความซับซ้อนอย่างมากของสารประกอบอินทรีย์ และการทำปฏิกิริยาของดินเหนียวและอินทรีย์สาร

นักวิจัยหลายท่าน (Landva and Pheeney 1980, O'Kelly and Zhang 2013, Hobbs 1986) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของดินพีท (peat soil) และดินอินทรีย์ (organic soil) พบว่าโครงสร้างของอินทรีย์สารมีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (cellular structure) และยึด ทำให้

สามารถดูดซับน้ำไว้ในปริมาณมากได้ จึงทำให้ดินเหนียวอินทรีย์มีปริมาณความชื้นสูง (high water content) ค่าพลาสติกซิติสูง (high plasticity) ส่งผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำ (low shear strength) และการยุบตัวสูง (high compressibility) และการไหลซึมผ่านของน้ำต่ำ (low permeability) ดินพีท (Peat soil) เป็นดินอินทรีย์ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นใยของพืชและอินทรีย์วัตถุอื่นๆที่ย่อยสลาย โดยประกอบด้วยอินทรีย์สารมากกว่า 75% การจำแนกดินอินทรีย์และดินพีท ตาม ASTM D 4427-92 แสดงในตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 การจำแนกดินอินทรีย์ตามปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Jarrett 1995, Huat 2004)

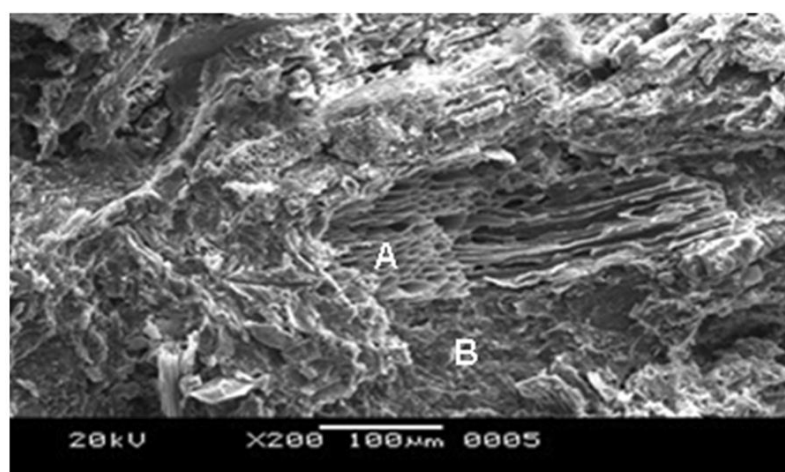
ประเภทดินเบื้องต้น	ลักษณะ	สัญลักษณ์	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%)
Clay, Silt, Sand	Slightly organic	O	2-20
Organic soil		O	25-75
Peat		Pt	>75

ดินเหนียวอินทรีย์ในสภาวะอัตราการอัดแน่นเกินตัวปกติ มีค่าแรงยึดเหนี่ยว (cohesive) เป็นศูนย์หรือมีค่าน้อยมาก แต่ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอินทรีย์สารเพิ่มขึ้น (Edil and Wang 2000, Den Haan and Feddema 2011) ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำนอร์เมิลไลซ์มีค่าอยู่ในช่วง 0.43 ถึง 0.49 (Lechowicz 1994) และ 0.62 ถึง 0.075 (Dhowian 1978) ส่วนค่ามุมเสียดทานประมาณ 30 ถึง 35 องศา และสามารถมีค่าสูงถึง 90 องศาในดินพีท (Den Haan and Feddema 2011) คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอินทรีย์แสดงในตารางที่ 2.14 และรูปที่ 2.33 แสดงรูปถ่าย SEM ของดินเหนียวอินทรีย์ที่มีอินทรีย์สารอยู่ 26% ซึ่ง A คือบริเวณที่เป็นอินทรีย์สารมีลักษณะรูพรุน และ B คือส่วนของที่ไม่ใช่อินทรีย์สารที่ล้อมรอบอยู่

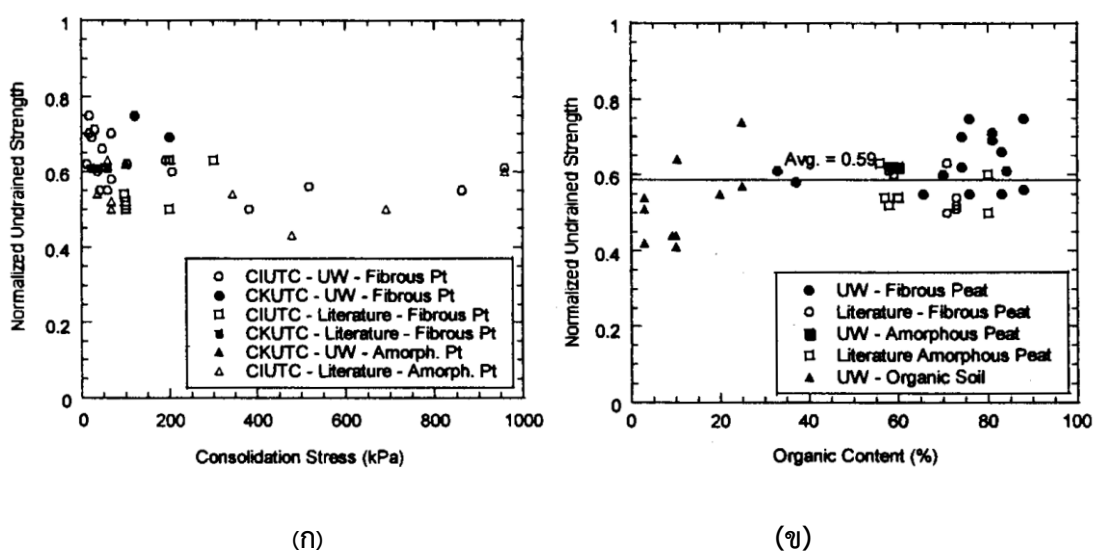
Edil (2000) ได้มีการศึกษากำลังรับแรงเฉือนและค่า K_0 ของดินพีท (peat soil) ซึ่งเป็นดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์มากกว่า 25% และดินอินทรีย์ (organic soil) ซึ่งเป็นดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์น้อยกว่า 25% จาก Minnesota และ Wisconsin โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำในเงื่อนไขไม่ระบายน้ำ (isotropically and anisotropically consolidated undrained triaxial compression test, CIUTC and CKUTC) ที่อัตราเฉือน 0.086 %มม.ต่อนาที โดยผลการทดสอบพบว่าที่สภาวะอัตราการอัดตัวแน่นปกติ ค่า K_0 ของดินพีทมีค่าต่ำกว่าดินที่ไม่มีสารอินทรีย์ (Inorganic soils) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใย (fiber) ในมวลดิน ส่วนค่ามุมเสียดทานของดินอินทรีย์จะไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 41° และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำการนอร์เมิลไลซ์ของดินพีทที่เป็นเส้นใย (fibrous peats) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.59 แต่ในดินอินทรีย์จะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำการนอร์เมิลไลซ์น้อยกว่า ดังรูปที่ 2.34 โดยทั้งค่า K_0 ค่ามุมเสียดทาน และค่ากำลังรับแรงเฉือนนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ แต่ในการทดสอบแรงเฉือนในภาคสนามโดยใช้ vane shear test พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่น้อยกว่าจะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่สูงกว่า

ตารางที่ 2.14 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอินทรีย์ (Devi and Sabu 2014)

Organic Content (%)	Liquid limit (%)	Liquid limit (%)	Plasticity index (%)	Specific gravity
Clay	46	23	23	2.62
7	51	32	19	2.58
15	54	35	19	2.52
20	60	41	19	2.40
26	74	45	29	2.04



รูปที่ 2.33 ภาพถ่าย SEM ของดินเหนียวอินทรีย์ที่มีอินทรีย์สาร (Devi and Sabu 2014)



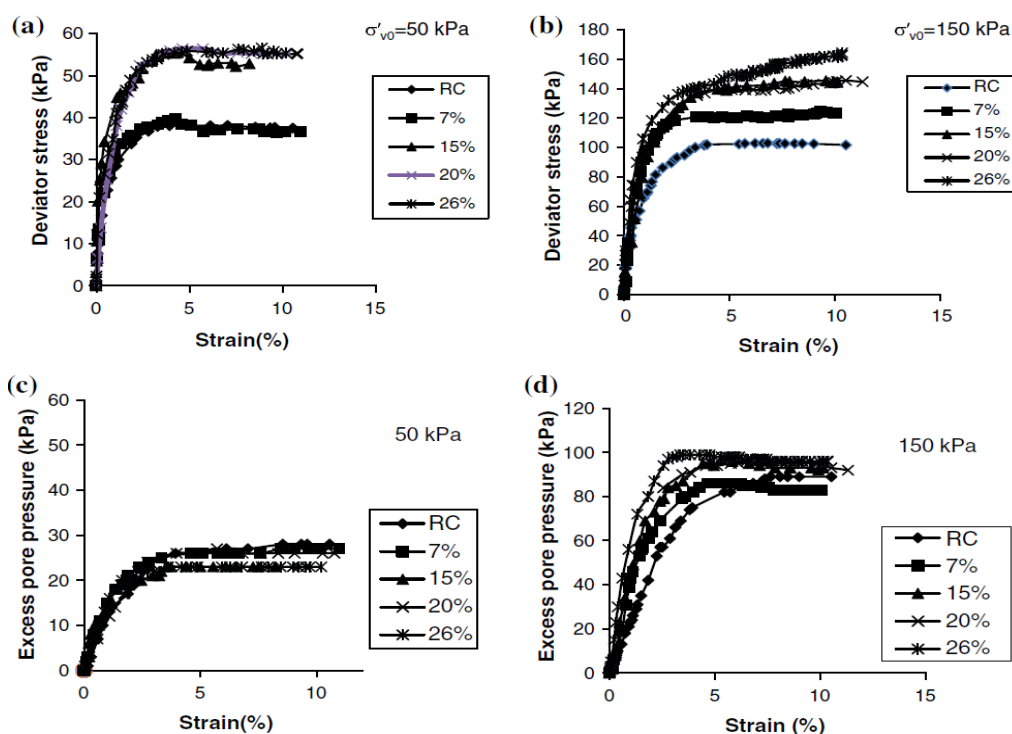
รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ทำการนอร์เมิลไลซ์ของดินอินทรีย์

(ก) กับความเค้นในการอัดตัวคายนํ้า (ข) กับปริมาณสารอินทรีย์

ที่มา: Edil., T.B. and Wang, X. (2000)

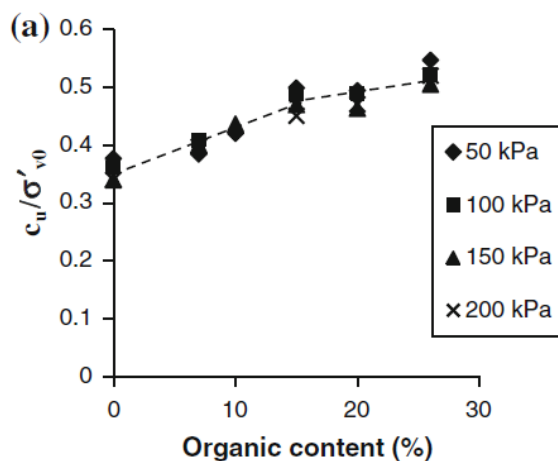
Taiye (2012) ได้ทำการทดสอบผลกระทบของปริมาณสารอินทรีย์ที่มีต่อความพฤติกรรมการบดอัดและการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอินทรีย์จากเมือง Ikoyi ประเทศไนจีเรีย โดยทำการทดสอบการบดอัด (compaction test) การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (unconfined compression tests) และการทดสอบแรงอัดสามแกน (consolidated undrained triaxial compression tests) พบว่าเมื่อค่าปริมาณอินทรีย์สารเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพลาสติกซีดีเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่ทำให้ดินแน่นที่สุด (optimum moisture content, OMC) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าช่องว่างเริ่มต้น (initial void ratio) เพิ่มขึ้น ดัชนีการยุบตัวตัว (Compression index, c_c) เพิ่มขึ้น แต่ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงอย่างมาก ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว (c_v) มีค่าลดลง

ในปี 2014 Devi และคณะได้ทำการศึกษารับกำลังของดินเหนียวอินทรีย์ที่เมือง Kolkata ประเทศอินเดีย ซึ่งเป็นดินที่มีปริมาณอินทรีย์สาร (organic content) อยู่ 0 7 15 20 และ 26% โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ อัตราการเฉือนที่ 0.001 มม./วินาที และใช้ความเค้นประสิทธิผลในการอัดตัวคายน้ำ เท่ากับ 50 100 150 และ 200 กิโลปาสกาล ดังแสดงในรูปที่ 2.35 ผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณอินทรีย์สารเพิ่มขึ้นถึง 15% ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นเบี่ยงเบน และการเพิ่มขึ้นอย่างลดลงเมื่อปริมาณอินทรีย์สารมีมากกว่า 15% แสดงดังในรูปที่ 2.36 และค่ามุมเสียดทานของดินเหนียวอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นเมื่อดินเหนียวมีปริมาณอินทรีย์สารสูงขึ้น



รูปที่ 2.35 แสดงแนวโน้มความเค้นเบี่ยงเบนและแนวโน้มของแรงดันน้ำส่วนเกิน (ปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 7 15 20 26% RC คือ ดินเหนียว)

ที่มา: Devi et al. (2014)



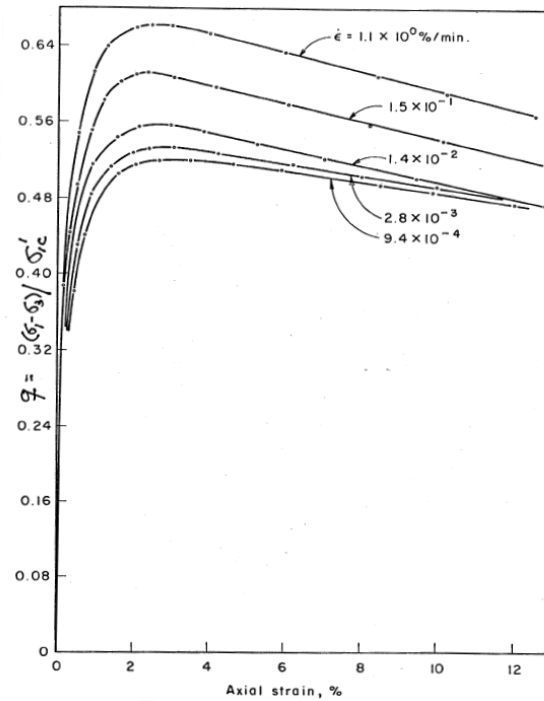
รูปที่ 2.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงยึดเหนี่ยวที่ทำนอร์เมิลไลซ์และค่าปริมาณอินทรียสาร
ที่มา: Devi et al. (2014)

2.8.6 ผลกระทบอัตราความเครียดที่มีต่อดินเหนียว

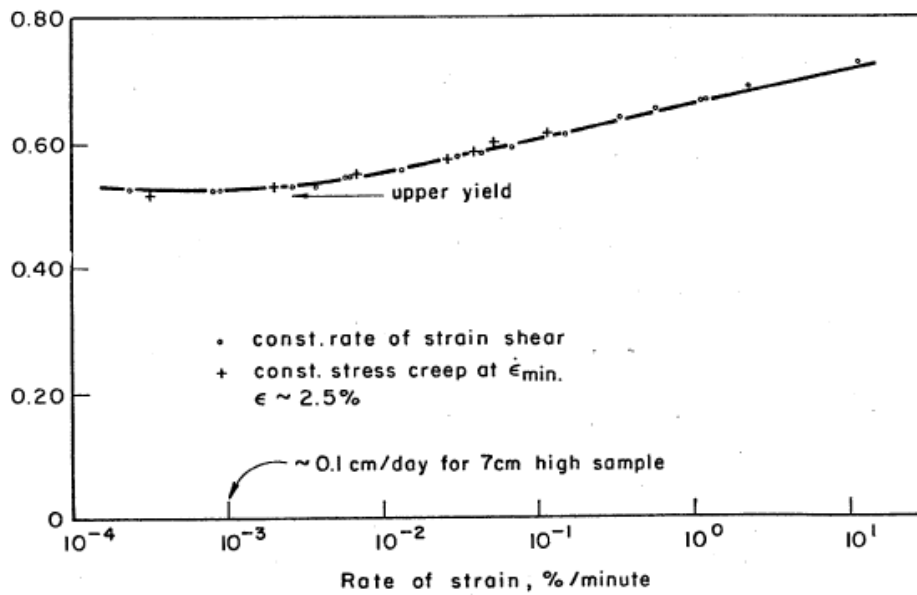
ที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราความเครียดที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของความเค้น – ความเครียดของดิน ซึ่งข้อสรุปที่ได้ออกมาในแนวทางเดียวกัน คือ อัตราความเครียด (Strain rate) ส่งผลกระทบโดยตรงต่อพฤติกรรมความเค้น ซึ่งที่อัตราความเครียดเร็วจะเป็นผลให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น และพฤติกรรมที่ขึ้นกับอัตราจะส่งผลกระทบโดยตรงกับดินเหนียว แต่จะไม่ส่งผลกับดินทราย

ในปี 1977 Vaid. และ Campanella ได้มีการวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของอัตราความเครียดและผลกระทบด้านเวลา (Time effect) ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของความเค้น (stress) – ความเครียด (strain) และพฤติกรรมด้านกำลังของดินเหนียว Haney ซึ่งเป็นดินเหนียวมีความไวตัวสูง (high sensitive) พบว่าการเหนียวตัวอย่างด้วยอัตราความเครียดที่เร็วที่สุดจะให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่สูงที่สุด ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่อัตราความเครียดช้าสุดถึงร้อยละ 30 ทุกการทดสอบจะให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ระดับความเครียดตามแนวแกนประมาณ ร้อยละ 2.5 ถึง 3.0 กล่าวได้ว่าระดับของอัตราความเครียดไม่มีอิทธิพลต่อระดับความเครียดตามแนวแกนที่เกิดความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด ดังรูปที่ 2.37 ซึ่งตรงกับข้อมูลการวิจัยของ Alberro และ Santaya (1973) ที่ทำการทดสอบดินเหนียวเม็กซิโก (Mexico City clay) ซึ่งเป็นดินเหนียวคงสภาพ และความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับลอกการิทึมของอัตราความเครียด พบว่าเป็นแบบเส้นตรงในช่วงระดับอัตราความเครียดช่วงหนึ่ง เมื่อระดับอัตราความเครียดลดต่ำลงจะเกิดขอบเขตล่างของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะไม่ลดลงไปจากขอบเขตล่างนี้ได้อีก ดังรูปที่ 2.38 จากงานวิจัยโดยส่วนใหญ่ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ ร้อยละ 5 – 10 ในช่วงลอกการิทึมของอัตราความเครียด (10 - fold) ซึ่งดินเหนียว Haney จะมีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10 ต่อ 1 ช่วงลอกการิทึมของอัตรา

ความเครียด ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับดินคงสภาพ Norwegian clay ที่วิจัยโดย Berre และ Bjerrum (1973)



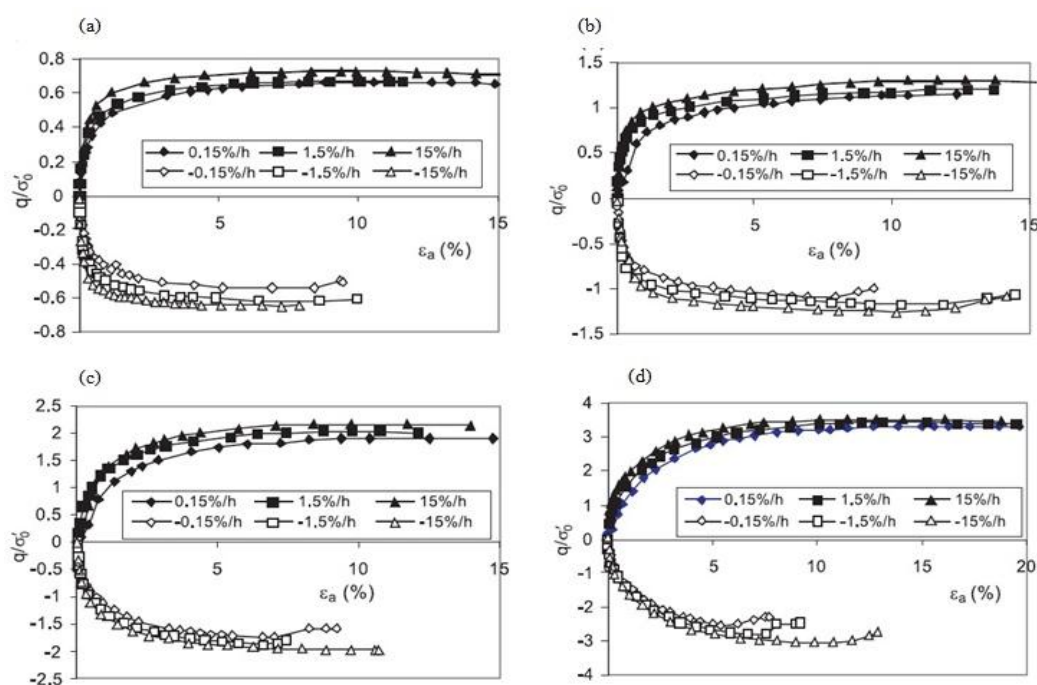
รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ของความเค้น - ความเครียด
ที่มา: Vaid และ Campanella (1977)



รูปที่ 2.38 ผลกระทบของอัตราความเครียดต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
ที่มา: Vaid และ Campanella (1977)

งานวิจัยของ (Zhu and Yin. 2000) นำเสนอการศึกษาผลกระทบของอัตรา (rate) ต่อพฤติกรรมของความเค้น - ความเครียด - กำลังของดิน (strength) รวมทั้งแรงดันน้ำโพรง (pore water pressure) ของดินเหนียวฮ่องกง (Hong Kong Marine Clay, HKMC) ซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก โดยใช้ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว (overconsolidation ratios, OCR) เท่ากับ 1, 2, 4 และ 8 ทำการเฉือนตัวอย่างที่อัตราความเครียดคงที่ 3 อัตรา ได้แก่ $\pm 0.15\%$ ต่อชั่วโมง $\pm 1.5\%$ ต่อชั่วโมง และ $\pm 15\%$ ต่อชั่วโมง ภายใต้สภาวะการทดสอบแรงอัด (compression shear state) และสภาวะการทดสอบแรงดึง (extension shear state) ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนพบว่า ในกรณีการทดสอบแรงอัด ที่อัตราความเครียดเร็วที่สุดจะให้ค่าความเค้นจะสูงที่สุด ส่วนในกรณีการทดสอบแรงดึง นั้นให้ผลเช่นเดียวกัน กล่าวคือที่อัตราความเครียดสูงสุดให้ค่าความเค้นต่ำที่สุดในทุกๆ ค่าของอัตราการอัดตัวคายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.39

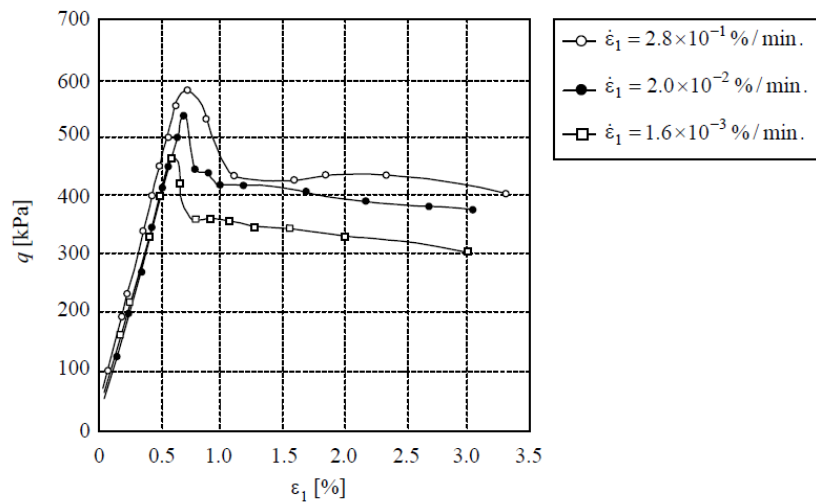
ต่อมาในปี 2002 Morten และคณะ ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับ พฤติกรรมที่ขึ้นกับอัตราของดินทรายและดินเหนียว ที่มีผลกระทบต่อการคืบ (creep behaviour) - การผ่อนคลายของความเค้น (stress relaxation behaviour) รวมทั้งผลกระทบของความเครียดสะสม (accumulated effect) เนื่องจากเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (isotach) โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมดังกล่าวจากรูปที่ 2.40 แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวมีขอบเขตการแสดงผลพฤติกรรม isotach และในรูปที่ 2.41 แสดงให้เห็นว่าดินทรายแสดงผลพฤติกรรมที่ไม่ isotach นำไปสู่ข้อสรุปที่ว่า พฤติกรรมที่ขึ้นกับอัตรา นั้นจะส่งผลกระทบโดยตรงกับดินเหนียว แต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อดินทราย



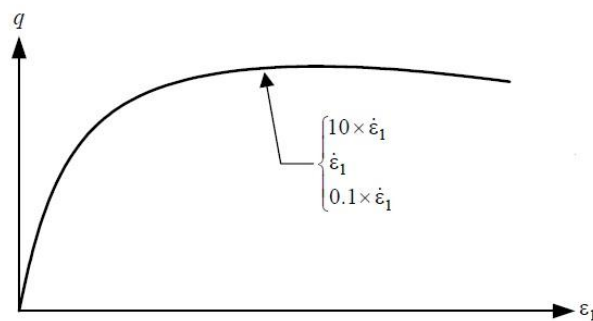
รูปที่ 2.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการค่าความเค้นเบี่ยงเบนประสิทธิผล กับความเครียดแนวแกน

(a) OCR= 1 (b) OCR= 2 (c) OCR= 4 (d) OCR= 8

ที่มา : Zhu และ Yin (1999)

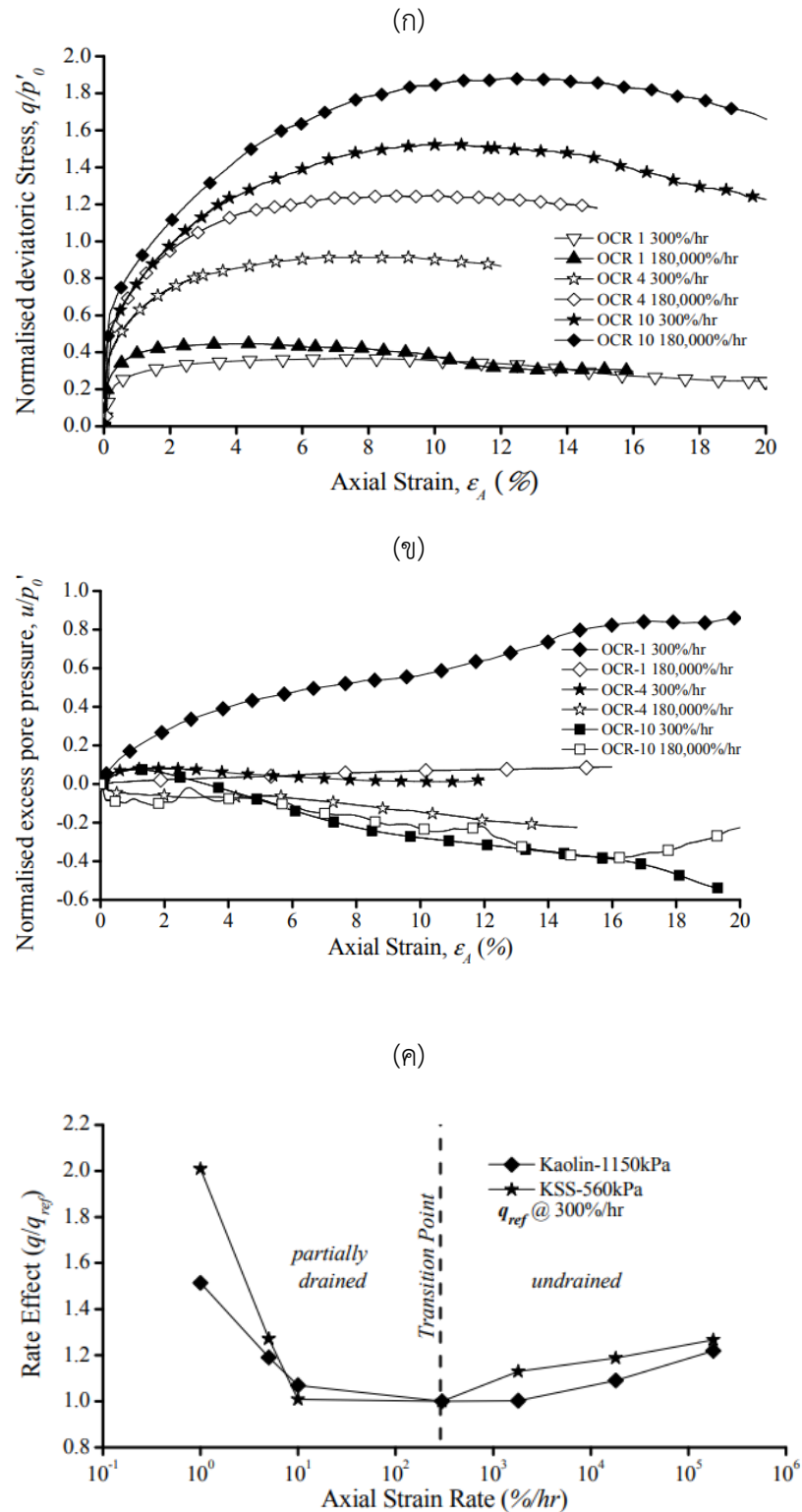


รูปที่ 2.40 พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียว
ที่มา: Morten และ Lade (2002)



รูปที่ 2.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินทราย
ที่มา: Morten และ Lade (2002)

ในปี 2013 Quinn ได้ทำการศึกษาอิทธิพลต่อความเครียดที่มีผลต่อพฤติกรรมของดินเหนียว โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ ในอัตราความเครียดที่แตกต่างกันตั้งแต่ที่ 1%ต่อชั่วโมง ถึง 180,000%ต่อชั่วโมง ผลการทดสอบดังรูปที่ 2.42 พบว่าการเหนียวที่อัตราความเครียดน้อยกว่า 300%ต่อชั่วโมง (5%ต่อนาที) ค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดลดลง ซึ่งดินจะแสดงพฤติกรรมแบบระบายน้ำบางส่วน (partially drained) ในทางตรงกันข้าม การเหนียวที่อัตราความเครียดเร็วกว่า 300%ต่อชั่วโมง พบว่าความเค้นเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นที่เมื่ออัตราความเครียดสูงขึ้น ดินจะแสดงพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำโดยสมบูรณ์ (fully undrained) โดยอัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น ส่วนของแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นพบว่าที่อัตราความเครียดสูงจะแรงดันน้ำส่วนเกินจะเกิดขึ้นต่ำกว่าที่อัตราความเครียดสูง

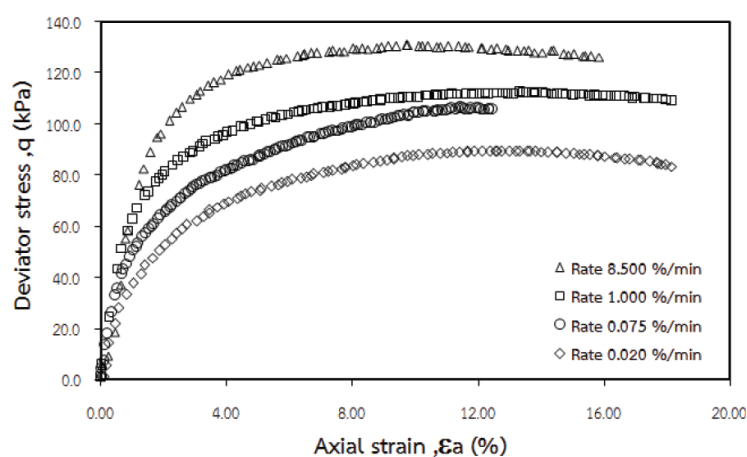


รูปที่ 2.42 ผลการทดสอบในดิน NC clay (Quinn 2013)

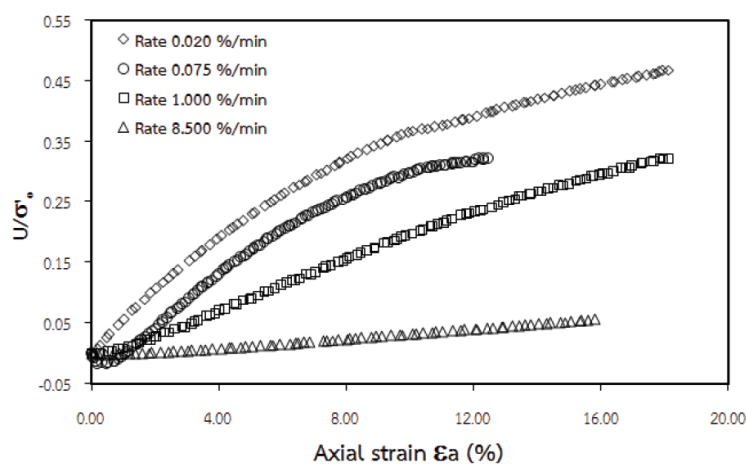
(ก) ค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำนอร์มิลไลซ์ (ข) ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำนอร์มิลไลซ์

(ค) ผลของอัตราความเครียดต่อค่าความเค้นเบี่ยงเบน

ประเทศไทยในปี พ.ศ.2556 ศิริพร และคณะ ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดที่มีต่อพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียวปากพนัง โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างดินเหนียวที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 1 2 4 และ 8 ใช้อัตราความเครียดในการเฉือน 4 อัตรา คือ 0.020% 0.075% 1.0% และ 8.5% ต่อหน้าที่ผลการทดสอบพบว่าอัตราความเครียดมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปากพนัง ในทุกๆ ค่าของอัตราการอัดแน่นเกินตัว โดยค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเร็วขึ้น ดังรูปที่ 2.43 สรุปได้ว่าดินเหนียวปากพนังมีพฤติกรรมที่ขึ้นกับอัตราแบบไม่เชิงเส้นเช่นเดียวกับผลการศึกษาของวีระ และ สุเชษฐ์ (2550) ที่ใช้ดินเหนียวกรุงเทพฯ (Bangkok clay) ในการทดสอบ นอกจากนี้ในขณะที่ทำการเฉือนอัตราความเครียดมีผลต่อการเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินที่ต่างกัน ดังรูปที่ 2.44 จะเห็นได้ว่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่อัตราความเครียดต่ำจะมีค่าสูงกว่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่อัตราความเครียดสูง

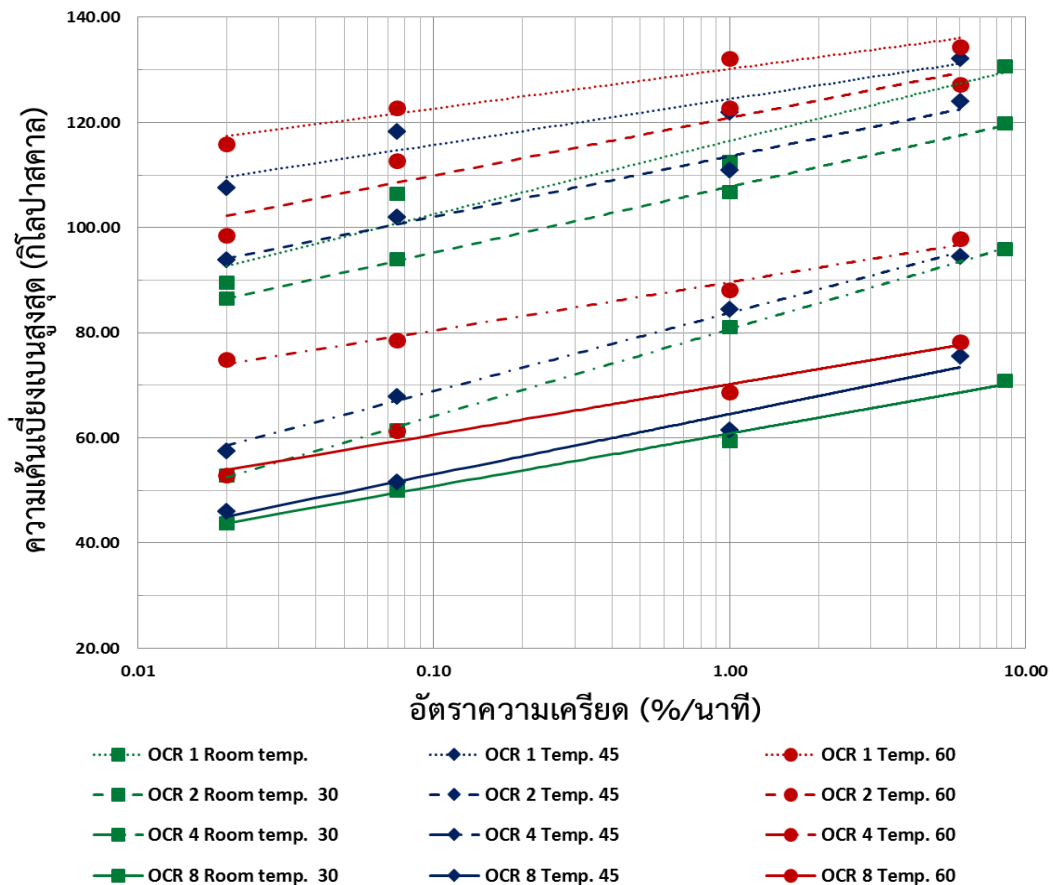


รูปที่ 2.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนกับอัตราความเครียดของดินเหนียวปากพนัง
ที่มา: ศิริพร (2556)



รูปที่ 2.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราความเครียดของดินเหนียวปากพนัง
ที่มา: ศิริพร (2556)

ต่อมาในปี 2560 วัชระ ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความร้อนต่อพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียวปากพนัง โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ ที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 1 2 4 และ 8 ใช้อัตราความเครียดในการเฉือน 4 อัตรา คือ 0.020% 0.075% 1.0% และ 6.0% ต่อหน้าที่ โดยมีการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างดินในเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบระบายน้ำ (drained heating) ที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่าผลกระทบของอัตราความเครียดแสดงเด่นชัดในผลการทดสอบตัวอย่างดินที่อุณหภูมิห้อง เมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างสูงขึ้นจะเห็นผลกระทบของอัตราได้น้อยลง ในทุกอัตราการอัดแน่นเกินตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.45 และแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นขณะทำการเฉือนจะมีค่าสูงเมื่อเฉือนด้วยอัตราความเครียดที่น้อย และแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าน้อยเมื่อเฉือนด้วยอัตราความเครียดที่มากขึ้น เนื่องจากอัตราความเครียดที่เร็วมีผลต่อการกระจายตัวของแรงดันน้ำในมวลดินที่ไม่สม่ำเสมอ รวมถึงการจัดเรียงตัวได้ไม่สมบูรณ์ของโมเลกุลของเม็ดดิน



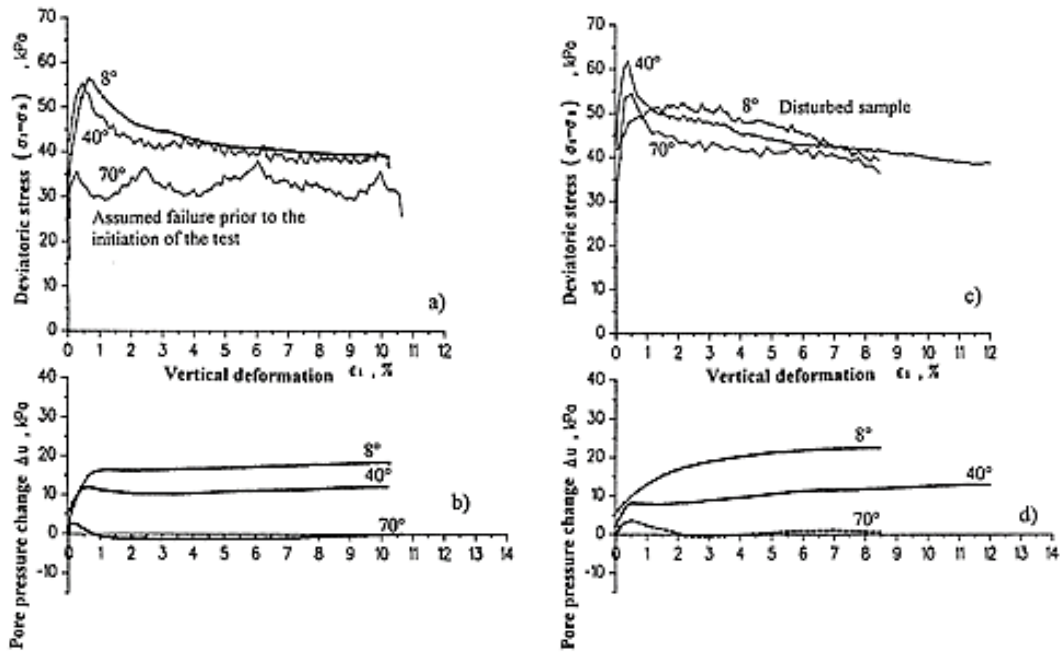
รูปที่ 2.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับอัตราความเครียดที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวต่างๆ (วัชระ 2560)

2.8.7 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการรับน้ำหนักของดินเหนียว

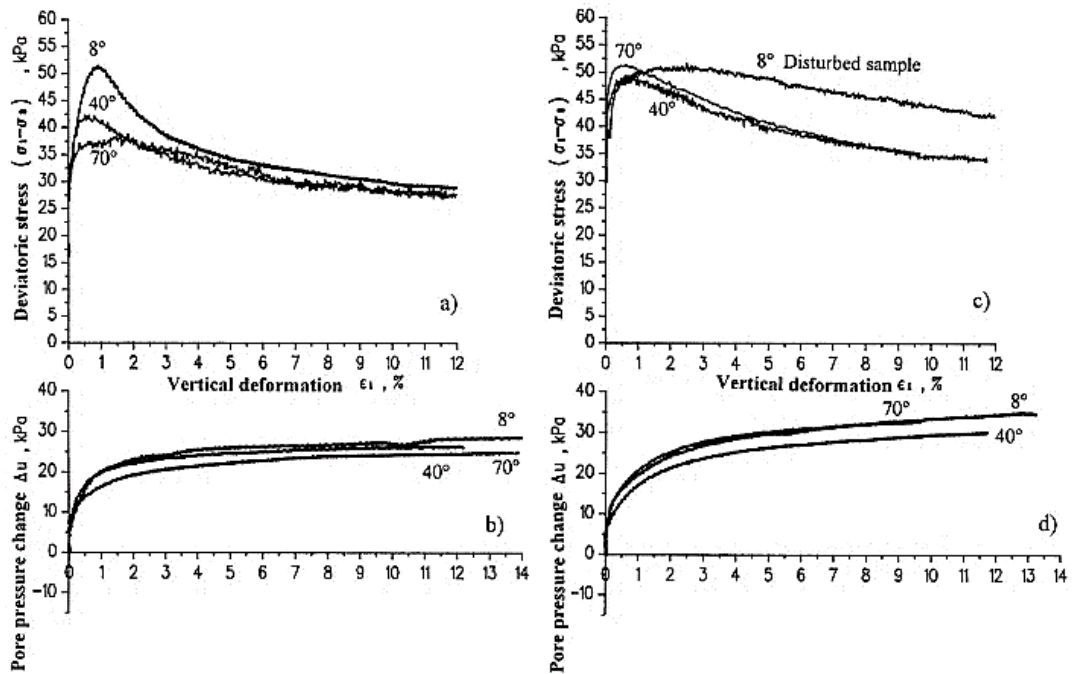
นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมของดิน ซึ่งยังคงมีข้อถกเถียงกันในเรื่องของผลการทดสอบของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังการรับแรงของดินเหนียว เนื่องจากผู้วิจัยหลายท่านได้พบว่าความร้อนจะทำให้ดินเหนียวมีความแข็งแรงลดลง การศึกษา ได้แก่ Murayama (1969) Sherif and Burrous (1969) Lovisa Moritz (1995) Mitchell (1964) และ Hueckel and Baldi (1990) ซึ่งพบว่าทำให้ความร้อนจะทำให้ดินเหนียวมีความแข็งแรงลดลง เช่นเดียวกัน แต่ในอีกมุมหนึ่งได้มีนักวิจัยอีกหลายท่านด้วยกันที่ได้ผลการทดสอบในทางตรงกันข้าม ได้แก่ ผลการทดสอบของ Laguros (1969) Houston et al. (1985) Tanaka et al. (1997) Abuel-Naga, et al. (2006) Trani et al. (2008) และ วัชระ (2560) ซึ่งได้ทำการทดสอบแรงอัดสามแกน แบบไม่ระบายน้ำโดยให้ความร้อนแบบระบายน้ำกลับพบว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบน หรือค่ากำลังการรับแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กล่าวคือทำให้ความร้อนจะทำให้ดินเหนียวมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนั่นเอง

การศึกษาของ Campanella and Mitchell (1968) ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อดินเหนียว 3 ประการ คือ ความร้อนเป็นสาเหตุให้น้ำในช่องว่างของดินเหนียวเกิดการขยายตัว ทำให้อนุภาคของดินขยายตัว และเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างอนุภาคดินเหนียว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยความสามารถในการระบายน้ำออกจากมวลดินเหนียว สำหรับดินสภาวะอัดแน่นเกินตัวปกติพบว่าเมื่อความร้อนทำให้น้ำในช่องว่างของดินเกิดการขยายตัว หากในขณะให้ความร้อนอย่างอิสระ มีการปล่อยให้เกิดการระบายน้ำออกจากมวลดินเหนียวได้ จะส่งผลให้ปริมาตรของดินหดตัวลงเนื่องจากอัตราส่วนช่องว่างของดินลดลง แต่ในดินที่อยู่ในสภาวะอัดแน่นเกินตัวสูงกลับพบว่าอัตราช่องว่างของดินมีค่าสูงขึ้นเมื่อดินได้รับความร้อน ทำให้ปริมาตรของดินขยายตัว เช่นเดียวกับการทดสอบของ Towhata et al. (1993)

ในปี 1995 Moritz ได้ทำการทดสอบพฤติกรรมของดินเหนียวที่อุณหภูมิสูง โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างและหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ 3 อุณหภูมิ คือ 8 40 และ 70 องศาเซลเซียส โดยทำการอัดตัวคายน้ำ (consolidation) ที่ความเค้นในที่ (in situ stress) แล้วทำการทดสอบแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำที่อัตราการเฉือนที่แตกต่างกัน 2 ค่า ตัวอย่างที่ได้รับความร้อนภายใต้เงื่อนไขไม่ระบายน้ำจะถูกเฉือนเร็วแบบไม่ระบายน้ำด้วยอัตราการเสียรูป 1.0% ต่อนาที ส่วนตัวอย่างที่ได้รับความร้อนภายใต้เงื่อนไขระบายน้ำจะถูกเฉือนช้าแบบไม่ระบายน้ำด้วยอัตราการเสียรูป 0.006% ต่อนาที พบว่าผลการทดสอบแรงอัดสามแกนด้วยการเฉือนเร็ว ไม่สามารถประเมินค่ากำลังรับแรงเฉือนได้ นอกจากนี้มีตัวอย่างหลายตัวอย่างใช้ไม่ได้เนื่องจากตัวอย่างถูกรบกวน จึงไม่สามารถสรุปแนวโน้มที่ชัดเจนของผลการกำลังรับแรงเฉือนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.46 ในส่วนของผลที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนด้วยการเฉือนช้า และได้รับความร้อนแบบระบายน้ำ ให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีแนวโน้มลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้นสำหรับตัวอย่างที่ความลึก 6 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.47 แต่แนวโน้มของผลที่ได้จากตัวอย่างที่ความลึก 9 เมตร ยังไม่สามารถสรุปได้เนื่องจากมีข้อสงสัยอยู่มาก

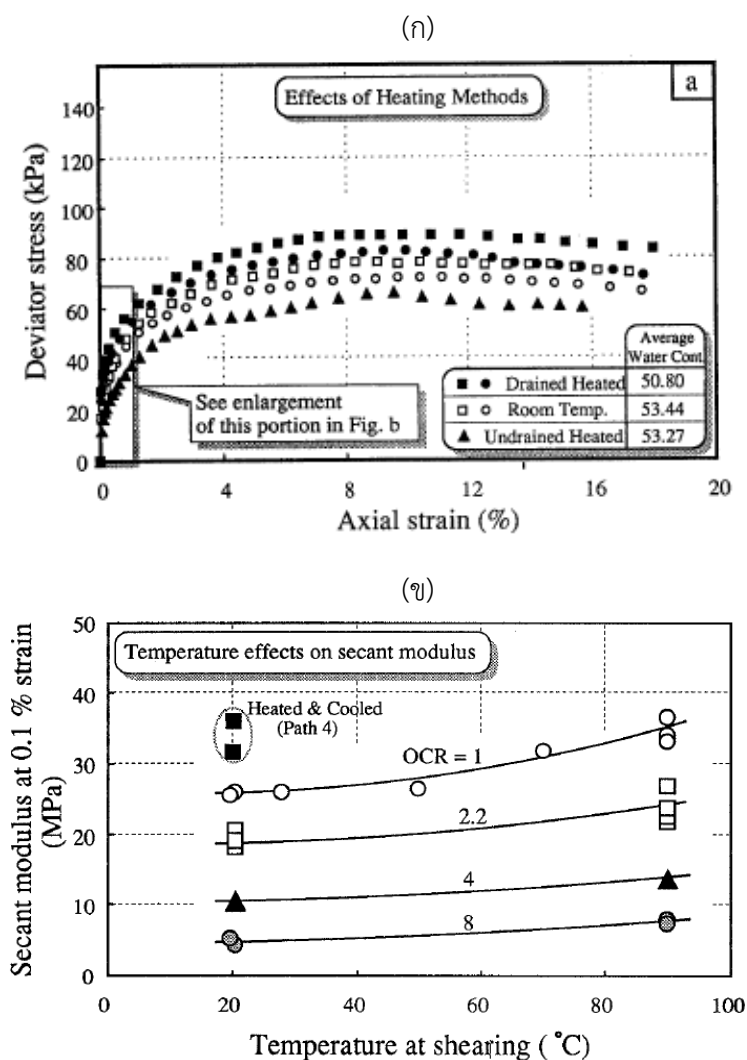


รูปที่ 2.46 ผลการทดสอบด้วยการเฉือนเร็วของ Moritz (1995) ตัวอย่างที่ความลึก 6 เมตร (a) และ (b) ที่ความลึก 9 เมตร (c) และ (d)

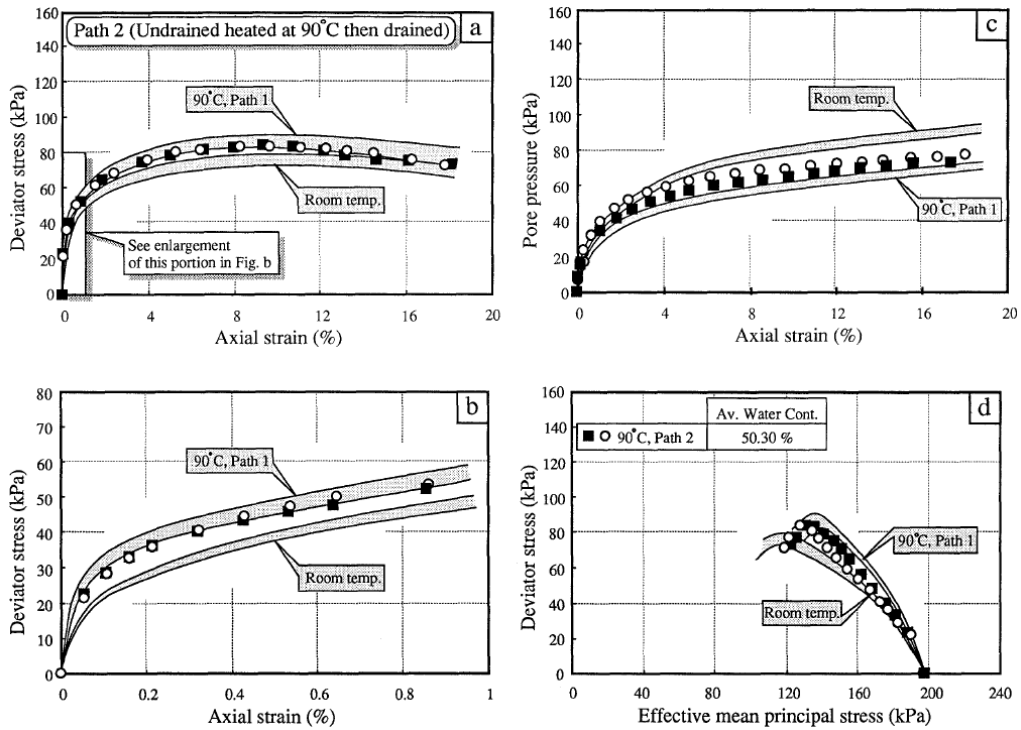


รูปที่ 2.47 ผลการทดสอบด้วยการเฉือนช้าของ Moritz (1995) ตัวอย่างที่ความลึก 6 เมตร (a) และ (b) ที่ความลึก 9 เมตร (c) และ (d)

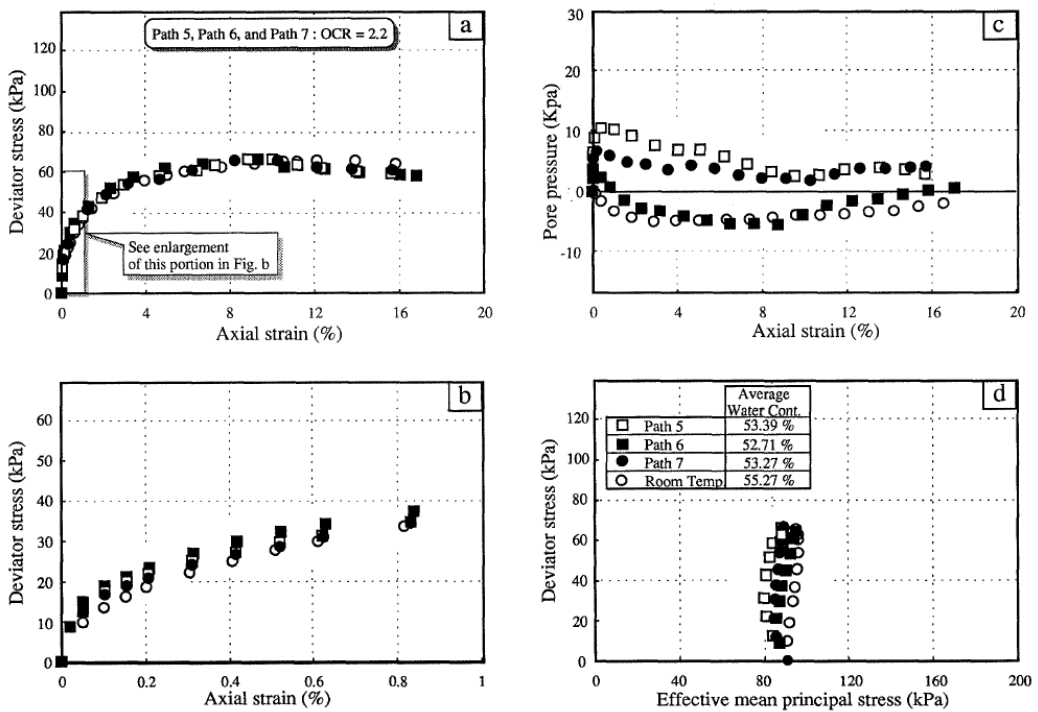
การทดสอบของ Kuntiwattanakul et al. (1995) ได้ทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างดินเหนียว ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ทั้งในสภาวะอัดแน่นปกติและอัดแน่นเกินตัว ใช้อัตราความเครียดในการเฉือน 5% ต่อชั่วโมง หรือ 0.08 ม.ม.ต่ออนาที ทำการให้ความร้อนทั้งแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำ อุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส และตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แต่การให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ ได้ทำการให้ความร้อนโดยปิดวาล์วระบายน้ำ จนเกิดความดันน้ำส่วนเกินคงที่ แล้วจึงเปิดการระบายน้ำให้น้ำระบายออกก่อนทำการเฉือนตัวอย่าง ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.48 ถึง 2.50 พบว่าในดินสภาวะการอัดแน่นเกินตัวปกติ ค่าความเค้นเบี่ยงเบนและค่าโมดูลัสซีแคนต์ของตัวอย่างที่ให้ความร้อนแบบระบายน้ำมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ให้ความร้อน และตัวอย่างที่ให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ ตามลำดับ แต่ในดินสภาวะการอัดแน่นเกินตัวมากกว่าปกติพบว่าค่าโมดูลัสเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่ความร้อนไม่มีผลต่อการเพิ่มของค่าความเค้นเบี่ยงเบน



รูปที่ 2.48 (ก) แสดงค่าความเค้นเบี่ยงเบน (ข) ค่าโมดูลัสซีแคนต์
ที่มา : Kuntiwattanakul และคณะ (1995)

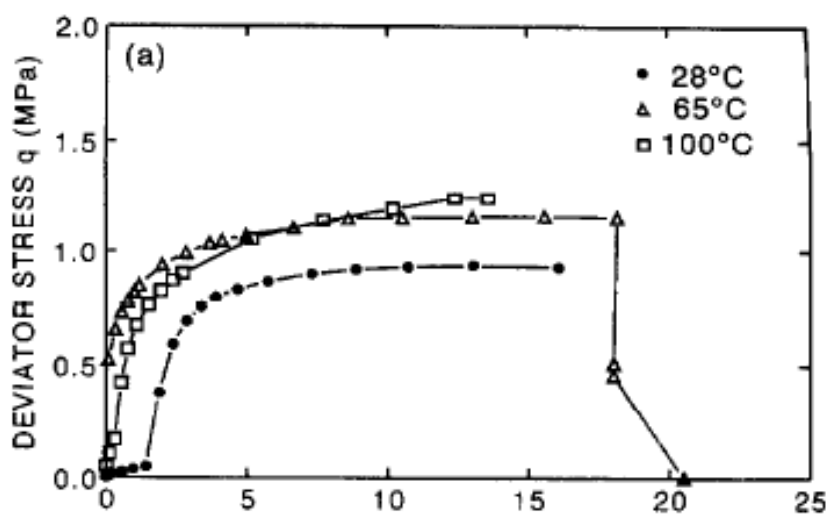


รูปที่ 2.49 ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนที่สภาวะอัดแน่นปกติ
ที่มา: Kuntiwattanukul และคณะ (1995)



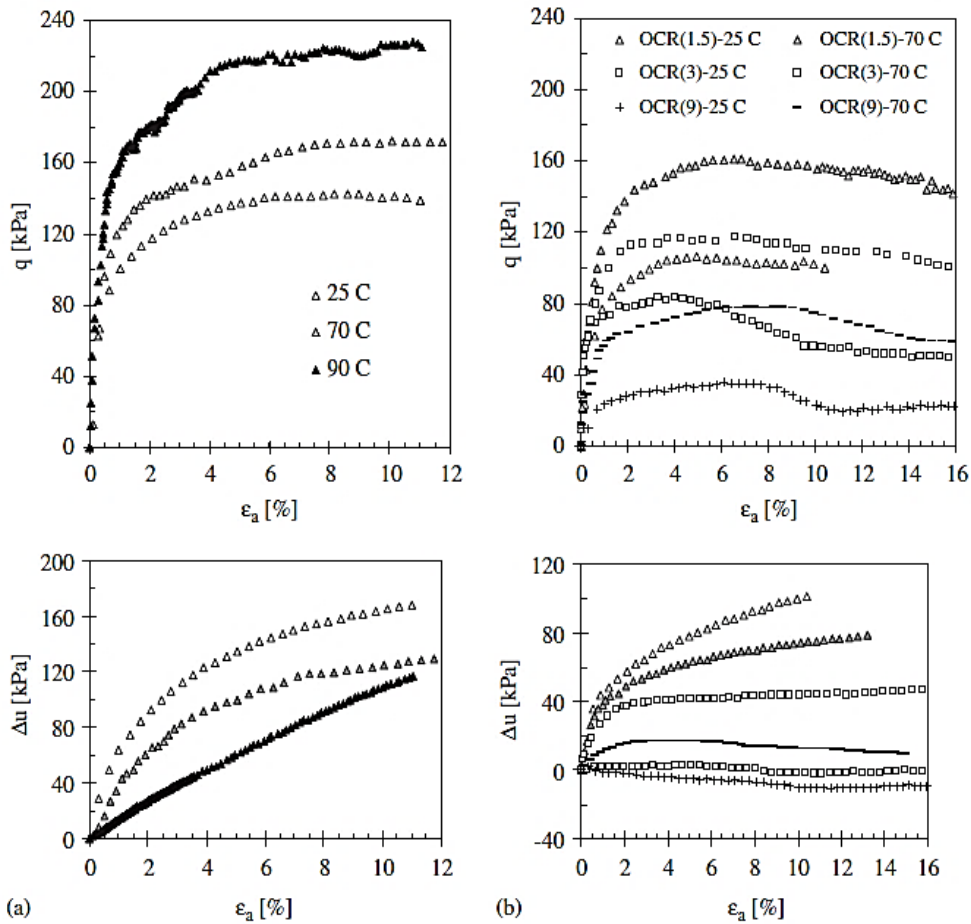
รูปที่ 2.50 ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนที่สภาวะอัดแน่นเกินตัว
ที่มา: Kuntiwattanukul และคณะ (1995)

ปี 1997 Tanaka และคณะ ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวที่เตรียมขึ้นเอง ได้ตรวจสอบอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมทางกลของดินเหนียว ให้ความร้อนถึง 100 องศาเซลเซียส และการทดสอบตัวอย่างอัดตัวปกติและอัดแน่นเกินตัวที่ OCR เท่ากับ 2 สำหรับผลการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ดังรูป 2.51 แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างที่ได้รับอุณหภูมิสูงกว่าจะมีค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูง



รูปที่ 2.51 ผลการทดสอบกำลังอัดสามแกนตัวอย่างสภาพอัดแน่นปกติ
ที่มา: Tanaka และคณะ (1997)

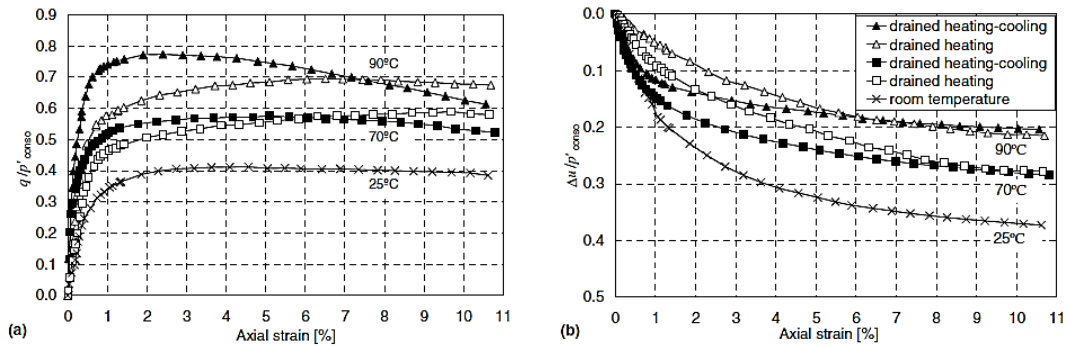
ในปี 2006 Abuel-Naga และคณะ ได้ทำการทำวิจัยหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ของตัวอย่างทั้งสภาพอัดตัวปกติ และอัดแน่นเกินตัว OCR เท่ากับ 1.5 3.0 และ 9.0 ให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุด 90 ในเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบระบายน้ำ องศาเซลเซียสโดยการทำการทดสอบแรงอัดสามแกนและทำการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำโดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างดินถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วปล่อยให้เย็นตัวก่อนการเฉือน ใช้อัตราความเครียด 2% ต่อชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นด้วย แสดงในรูป 2.52 แสดงผลการทดสอบของตัวอย่างสภาพอัดตัวปกติ ส่วนผลการทดสอบของตัวอย่างสภาพอัดแน่นเกินตัวแสดงในรูปที่ 2.52(b) พบว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของดินเพิ่มในทุกๆ OCR นอกจากนี้ สำหรับตัวอย่างสภาพอัดแน่นเกินตัวเล็กน้อย แรงดันน้ำส่วนเกินลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ในทางกลับกันสำหรับตัวอย่างสภาพอัดแน่นเกินตัวสูง แรงดันน้ำส่วนเกินจะสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.52 ผลการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวอ่อน (Abuel-Naga et al. 2006)

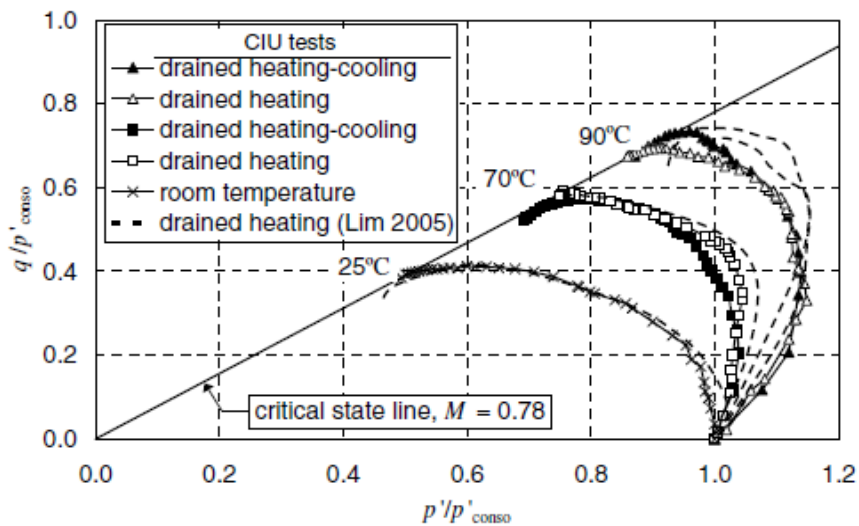
(a) สภาพอัดแน่นปกติ และ (b) สภาพอัดแน่นเกินตัว

งานวิจัยในปี 2008 Trani และคณะ ได้ทดสอบหาผลของอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินอ่อนกรุงเทพในสภาพอัดแน่นปกติ ภายใต้เงื่อนไขให้ความร้อนแบบระบายน้ำ ใช้ 2 กระบวนการในการทดสอบ คือ 1) การทดสอบโดยให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 70 หรือ 90 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะความเค้นคงที่ และ 2) การทดสอบโดยให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง เติมนด้วยอัตราความเครียดคงที่ 2% ต่อชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดสูงขึ้น ได้ดังรูปที่ 2.53(a) แต่แรงดันน้ำส่วนเกินจะลดลง รูปที่ 2.53(b) และยังคงแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวก่อนการเฉือน จะถึงค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ระดับความเครียดตามแนวแกนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนคงที่



รูปที่ 2.53 ผลการทดสอบของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
ที่มา: Trani, et al. (2008)

ผลของอุณหภูมิต่อเส้นสภาวะวิกฤต (critical state line) จะเห็นว่าความชื้น (M) ของสถานะวิกฤต ดังแสดงในรูปที่ 2.54 โดยมีค่าเท่ากับ 0.78 นอกจากนี้เส้นทางความเคียด (stress paths) ของตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงจะมีแนวโน้มย้ายไปทางขวาของตัวอย่างที่ทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่จุดวิบัติดินเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินที่ต่ำกว่า สรุปได้ว่าอุณหภูมิจะเป็นตัวเหนียวน้ำให้กำลังรับแรงเฉือนและความแข็งแรงของดินเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาของวัชระ (2560) ตารางที่ 2.15 แสดงผลการวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับผลกระทบของความร้อนส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน



รูปที่ 2.54 เส้นทางความเค้นของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
ที่มา: Trani, et al. (2008)

ตารางที่ 2.15 ผลการวิจัยที่ผ่านมา

ผู้วิจัย	ชนิดของการระบายน้ำ		กำลังรับแรง เฉือน
	การให้ความร้อน	การเฉือน	
Hueckel and Baldi (1990)	Drained	Drained	Decreased
Murayama (1969)	Undrained	Undrained	Decreased
Sherif and Burrous (1969)	Undrained	Undrained	Decreased
Laguros (1969)	Drained	Undrained	Increased
Nobel and Demirel (1969)	Drained	Drained	Increased
Houston et al. (1985)	Drained	Undrained	Increased
Kuntiwattanakul et al (1995)	Drained	Undrained	Increased
	Undraied	Undrained	Decreased
Lovisa Moritz (1995)	Drained	Undrained	Decreased
	Undraied	Undrained	-
Tanaka et al (1997)	Drained	Undrained	Increased
Graham et al (2001)	Drained	Undrained	Increased
Watchara Srisakul (2016)	Drained	Undrained	Increased

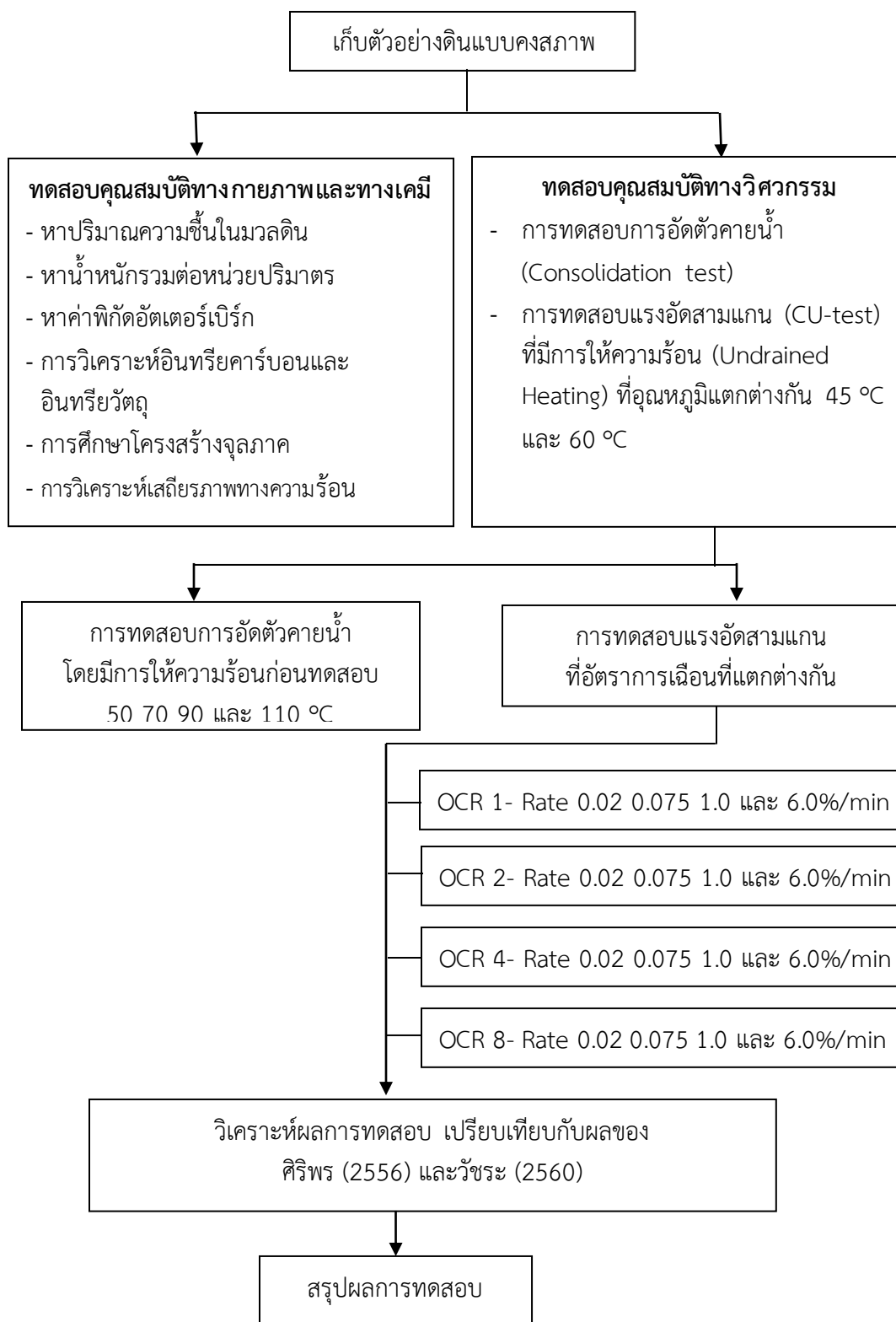
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ขึ้นกับเวลาภายใต้ภาวะความร้อนและอัตราความเครียดของดินเหนียวปากพั้ง จึงได้ทำการทบทวนทฤษฎีและการศึกษาในอดีตถึงกลไกพื้นฐานของดินและพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ จากนั้นจึงได้เริ่มทำการดำเนินการวิจัย โดยได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การเก็บตัวอย่างดิน การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในห้องปฏิบัติการ การวิเคราะห์ผลการทดสอบ และการสรุปผลการทดสอบ ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในภาพรวมได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1 การเก็บตัวอย่างดินและวิธีการเก็บตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เก็บมาจากโรงเรียนบ้านปากคลอง ตำบลคลองน้อย อำเภอปากพั้ง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยการเจาะเก็บตัวอย่างดินที่ช่วงระดับความลึก 4 ถึง 12 เมตร เป็นจำนวน 3 หลุม โดยใช้วิธีเจาะล้าง (Wash boring) แสดงดังรูป 3.2(ก) และทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed sample) โดยใช้กระบอกผนังบาง (Shelby tube) ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนแบบคงสภาพทุกกระยะ 1.50 เมตร จนถึงชั้นดินเหนียวแข็ง จากนั้นจึงทำการปิดหัวและท้ายของกระบอกบางด้วยซีเมนต์ เพื่อป้องกันการความชื้นในดินระเหย แสดงดังรูป 3.2(ข)

การขนส่งตัวอย่างดินเหนียวได้ทำอย่างระมัดระวัง ไม่ให้เกิดการกระทบกระเทือนตัวอย่างดิน ไม่ให้ดินถูกรบกวน (Disturb) เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนจากผลการทดสอบ เมื่อขนส่งตัวอย่างดินถึงที่ห้องปฏิบัติการแล้ว จึงทำการเก็บรักษาก่อนตัวอย่างโดยการตัดแต่งเป็นก้อนเพื่อรอทำการทดสอบ และทำการหุ้มด้วยวัสดุที่ป้องกันการสูญเสียความชื้น ซึ่งจะต้องทำการระบุความลึกหมายเลขหลุมเจาะ และวันที่เก็บ จากนั้นนำไปเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้น เพื่อรอนำไปใช้ในการทดสอบต่อไป ดังแสดงในรูป 3.2(ค)



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

(ก)



(ข)

(ข)



(ค)



(ค)

รูปที่ 3.2 (ก) แสดงการเก็บตัวอย่างดินเหนียวปากพั้ง (ข) แสดงการเก็บดินในกระบอกผนังบาง
(ค) แสดงการเก็บรักษาก่อนตัวอย่างดินเพื่อรอทำการทดสอบ

3.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.2.1 การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (index properties) ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนจากหลุมเจาะ บริเวณอำเภอปากพนัง ในการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพจะทำให้ทราบถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน ได้แก่ น้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตรของดินเหนียวคงสภาพ พิกัดอัตราเตอร์เบอร์ก ค่าความชื้นในธรรมชาติ โดยการทดสอบจะใช้วิธีการทดสอบดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติ	วิธีการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง
1. น้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตรของดินเหนียวคงสภาพ	การทดสอบหาน้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตร	ASTM D 3282
2. พิกัดเหลว ค่าพิกัดพลาสติก และค่าดัชนีพลาสติก	การทดสอบพิกัดอัตราเตอร์เบอร์ก	ASTM D 4318
3. ความชื้นในธรรมชาติของดิน	การทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลดิน	ASTM D 2216
4. ความถ่วงจำเพาะของดิน	การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน	ASTM D 854

3.2.2 การทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี

การทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างดินเหนียวปากพนังทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทางเคมีของดิน ได้แก่ องค์ประกอบชนิดและปริมาณของธาตุและสารประกอบ ผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างโมเลกุลของดินเหนียว และน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่อยู่ในมวลดินเหนียว รวมทั้งลักษณะพื้นผิวของชนิดของสารประกอบต่างๆ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลร่วมในการวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมมารับน้ำหนักของดินเหนียวปากพนัง และเพื่อการเข้าใจมากยิ่งขึ้นในการอธิบายผลการทดสอบอันมีความสอดคล้องและต่อเนื่องกัน จึงได้อ้างอิงผลการทดสอบทางเคมีของวัชระ (2560) มาประกอบกับผลการทดสอบที่เพิ่มเติมมาในการศึกษานี้ ดังการทดสอบทางเคมีในตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 การทดสอบทางเคมีประกอบทางเคมี

คุณสมบัติ	ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ
1.* เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRD / XRF Techniques, X-ray)	ชนิดของสารประกอบ/ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง
2. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM)	รายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง
3.* การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างโมเลกุลของดินเหนียวโดยการวัด Wide angle X-ray scattering (WAXS)	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างโมเลกุลของดินเหนียว
4. การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน ด้วยวิธี Thermo gravimetric analysis (TGA)	วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ
5. การวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุ ด้วยวิธี Walkley-Black method	ปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวอย่างดิน

* การทดสอบของวัชระ (2560)

3.2.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRD / XRF Techniques, X-ray)

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบตัวอย่างชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันนี้ใช้เทคนิคที่นำรังสีเอกซ์มาใช้วิเคราะห์สารประกอบทางเคมี และศึกษารายละเอียดของโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ทำให้ทราบถึงชนิดของสารประกอบต่างๆที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและรายละเอียดของโครงสร้างผลึกได้ นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาถึงปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิด รวมถึงปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบภายในสารตัวอย่างได้

เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X ray) ของแต่ละธาตุ รังสีเอกซ์ที่ให้ออกมาจากแต่ละธาตุในตัวอย่าง สามารถนำมาวิเคราะห์พลังงานของรังสี ซึ่งบ่งบอกถึงชนิดของธาตุ อีกทั้งนำมาวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเพื่อทราบถึงปริมาณของธาตุได้

3.2.2.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร ระบบการสร้างภาพทำงานโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของวัตถุตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ หลักการทำงานของ SEM จะประกอบด้วยกลุ่มอิเล็กตรอนซึ่งถูกผลิตขึ้นโดยแหล่งกำเนิด จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า และถูกป้อนให้กับระบบ จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งจะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นจึงนำสัญญาณนี้ไปสร้างเป็นภาพต่อไป เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ได้แก่ การศึกษาหน้าตัดของโลหะและวัสดุ การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ เป็นต้น

3.2.2.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างโมเลกุลของดินเหนียวโดยการวัด Wide angle X-ray scattering (WAXS)

เพื่อเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างโมเลกุลของดินเหนียว จึงต้องทำการศึกษาระดับความเป็นผลึกของสารกึ่งผลึก โดยการวัด wide angle X-ray scattering (WAXS) ซึ่งสามารถศึกษาโครงสร้างผลึกได้ โดยการยิงรังสีเอกซ์ไปยังตัวอย่างดินเหนียวปากผนังที่อุณหภูมิต่างๆ และวัดความเข้มรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาที่มุมต่างๆ คล้ายกับการวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray diffraction (XRD) ผลการวัด WAXS ที่ได้จะแสดงจุดได้รับพลังงานสูงสุด (brag peak) ของโครงสร้างผลึก ซึ่งสามารถใช้ระบุโครงสร้างผลึกได้ และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลที่อุณหภูมิต่างๆ ได้

3.2.2.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยวิธี Thermo gravimetric analysis (TGA)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) โดยทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 1300 องศาเซลเซียส (°C) อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถ

ควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

3.2.2.5 การวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุโดยวิธี Walkley-Black method

การวิเคราะห์อินทรีย์วัตถุโดยวิธีวอล์คเบลีย์-แบลคอาศัยหลักการวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอน (organic carbon) ก่อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นอินทรีย์วัตถุ โดยจะใช้โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate) ไปออกซิไดซ์ (oxidize) คาร์บอนในสารอินทรีย์ที่กำลังนำไปย่อยรวมทั้งในเซลล์ของจุลินทรีย์ดิน ตลอดจนในอินทรีย์วัตถุที่สลายตัวจนเป็นสารอินทรีย์เชิงซ้อน ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ใช้ความร้อนจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น จากนั้นทำการหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนโดยนำมาไทเทรตด้วยเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous ammonium sulfate) จึงทำให้ทราบปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการออกซิไดซ์คาร์บอน และสามารถคำนวณหาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุได้ในที่สุด

3.2.3 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering properties)

3.2.3.1 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ

ทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ ตามมาตรฐาน ASTM D 2435 Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils เพื่อหาพารามิเตอร์การอัดตัวคายน้ำต่างๆ ทำการทดสอบทั้งหมด 4 ตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวปากพั้งที่ใช้ในการทดสอบ โดยการตัดแต่งตัวอย่างดินตามขนาดวงแหวน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 63.1 มิลลิเมตร สูง 20 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3(ก) จากนั้นนำตัวอย่างดินแช่น้ำและให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีการทำการทดสอบทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ที่อุณหภูมิในการเตรียมตัวอย่างแตกต่างกัน ได้แก่ 50 70 90 และ 110 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 3.3(ข) จากนั้นนำตัวอย่างมาติดตั้งในเครื่องทดสอบ ดังในรูปที่ 3.3(ค) การใส่น้ำหนักกด (Loading) ใส่น้ำหนักจำนวน 6 ค่า โดยเริ่มต้นที่น้ำหนัก 14.06 กิโลปาสคาล และเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 เท่า จนกระทั่งถึง 449.86 กิโลปาสคาล จากนั้นทำการผ่อนคลายน้ำหนักกด (Unloading) โดยลดน้ำหนักลงทีละ 2 เท่า และเพิ่มน้ำหนักกดทับอีกครั้ง (Reloading) เป็นจำนวน 5 ค่า จนกระทั่งถึง 899.72 กิโลปาสคาล ซึ่งในแต่ละน้ำหนักกดจะใช้เวลาในการคองน้ำหนักกดไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการจดบันทึกค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินตามเวลาที่กำหนด และนำตัวอย่างดินที่ทดสอบแล้วไปหาค่าความชื้นหลังทดสอบต่อไป



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.3 (ก) แสดงตัวอย่างดินในวงแหวนบีบรัด (ข) แสดงการนำตัวอย่างไปให้ความร้อน
(ค) แสดงการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ

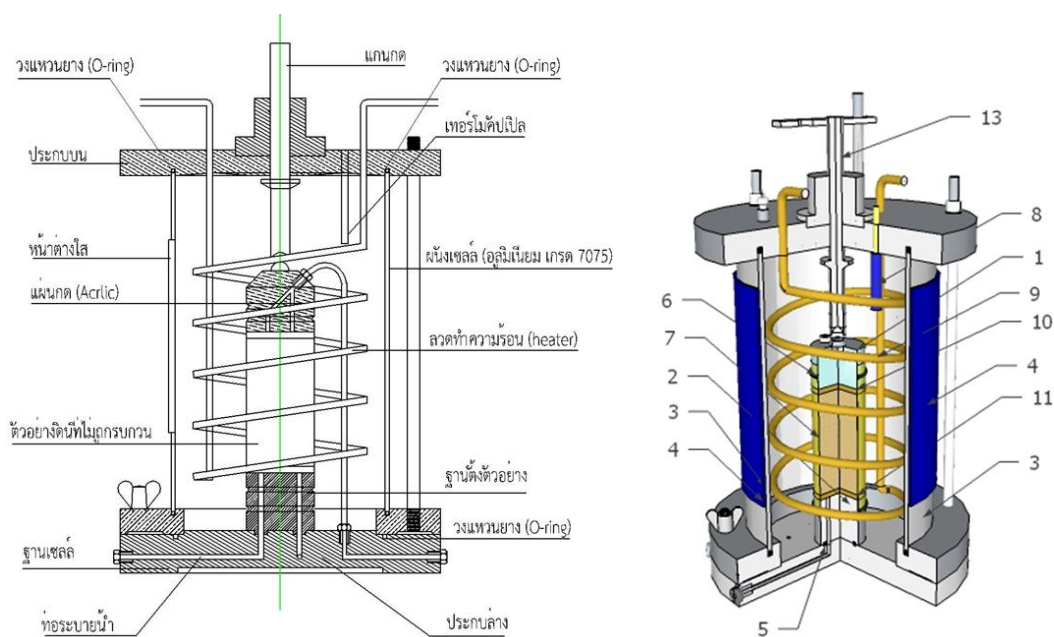
3.2.3.2 การทดสอบแรงอัดสามแกน

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4767-02 Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils เพื่อหาราค่าคงตัวของกำลังของดินทั้งแบบความเค้นรวมและความเค้นเฉือน (Total stress and effective stress) รวมทั้งการศึกษาพฤติกรรมการเกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore pressure) จากการปรับเปลี่ยนอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน อุณหภูมิที่ใช้ต่างกัน 2 อุณหภูมิ คือ 45 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส และค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidation ratio , OCRs) 4 ค่า คือ 1 , 2 , 4 และ 8 ตามลำดับ และนำข้อมูลการทดสอบแรงอัดสามแกนกับดินเหนียวปากพั้งที่อุณหภูมิห้องของศิริพร (2556) มาเปรียบเทียบเพื่อทำการวิเคราะห์และสรุปผล จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.2

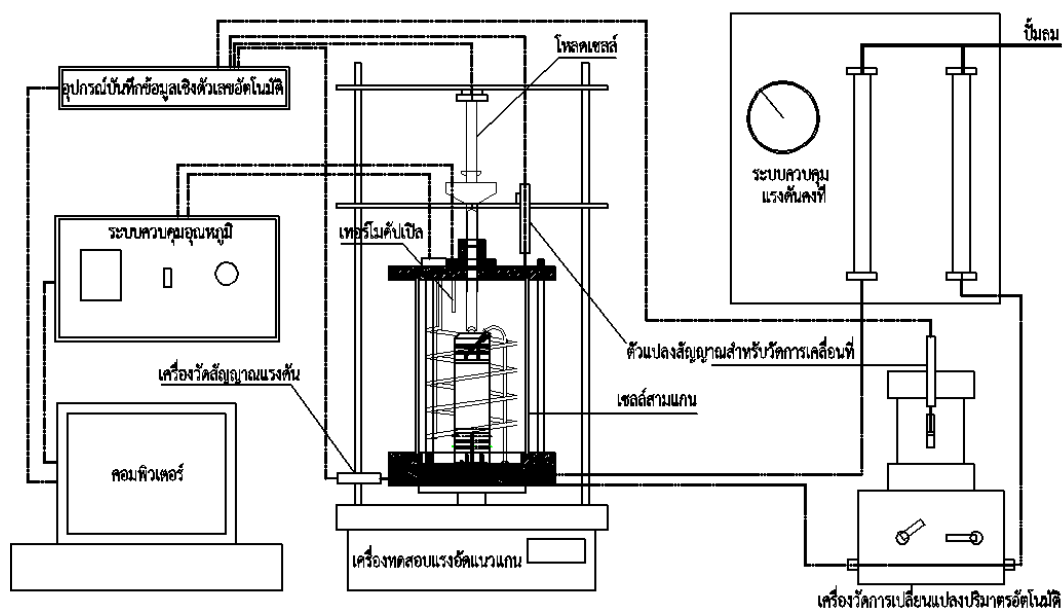
ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างการทดสอบหาแรงอัดสามแกน

อัตรา OCR	0.02%ต่อนาที	0.075%ต่อนาที	1.0%ต่อนาที	6.0%ต่อนาที
1	45°C , 60°C	45°C , 60°C	45°C , 60°C	45°C , 60°C
2	45°C , 60°C	45°C , 60°C	45°C , 60°C	45°C , 60°C
4	45°C , 60°C	45°C , 60°C	45°C , 60°C	45°C , 60°C
8	45°C , 60°C	45°C , 60°C	45°C , 60°C	45°C , 60°C

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบหาแรงอัดสามแกนในการศึกษานี้ ได้ใช้ชุดเครื่องทดสอบที่พัฒนาโดยวัชระ (2560) ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบสามแกนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ก) เซลล์สามแกน ข) ระบบการทำความร้อนและควบคุมอุณหภูมิ โดยการออกแบบของเซลล์สามแกนอยู่ในพื้นฐานของเซลล์แบบดั้งเดิม แต่เพิ่มระบบการจัดการอุณหภูมิ และเปลี่ยนแปลงวัสดุเซลล์เป็นโลหะเพื่อลดผลกระทบของความแข็งแรงเนื่องจากอุณหภูมิดังแสดงในรูป 3.4 และรูปที่ 3.5 แสดงรายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบหาแรงอัดสามแกน



รูปที่ 3.4 แบบเซลล์สามแกนที่ปรับปรุงใหม่ (วัชระ 2560)



รูปที่ 3.5 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบแรงอัดสามแกน (วัชระ 2560)

ขั้นตอนในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

1) การเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่างดินคงสภาพมาตัดแต่งให้เป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ความสูงประมาณ 10 มิลลิเมตร (ความสูงของตัวอย่างจะต้องมากกว่า 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง) ทั้งนี้เพื่อให้รอยฉีก (failure plane) ตกอยู่ในส่วนกลางของตัวอย่าง ใช้กระบอกแบบ (miter box) แบบผ่าช่วยในการที่จะตัดส่วนล่างและส่วนบนของตัวอย่างให้ได้ความยาวตามต้องการ การตัดแต่งตัวอย่างจะต้องทำด้วยความระมัดระวังไม่ให้ตัวอย่างดินถูกกระทบกระเทือน จากนั้นใช้เวอร์เนียร์วัดขนาดที่แน่นอนของตัวอย่าง และนำตัวอย่างดินวางลงบนฐานเซลล์สามแกน โดยรองหินพรุนอยู่ระหว่างตัวอย่างและฐานเพื่อให้ น้ำสามารถระบายเข้าออกได้ วางหินพรุนบน (top porous stone) และแป้นบน (top cap) ลงบนตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.6(ก) จากนั้นใส่ปลอกยาง (rubber membrane) แล้วรัดด้วยยางรัด (O-ring) ให้แน่นทั้ง 2 ด้าน ด้านบนที่หัวแป้นบนและที่ฐานเพื่อไม่ให้ของเหลวไหลเข้าออกจากตัวอย่างดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.6(ข) และ 3.6(ค) จากนั้นประกอบตัวเครื่องทดสอบสามแกนครอบสวมลงบนตัวอย่างดิน ต้องระวังให้แกนกด (piston) อยู่บนกึ่งกลางของแป้นบนพอดี ดังรูปที่ 3.6(ง)

2) การทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำ

หลังจากที่ตัวอย่างใส่ในเซลล์เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนเรียบร้อยแล้ว และเปิดน้ำเข้าเซลล์จนเต็ม จากนั้นเป็นขั้นตอนการให้แรงดันเซลล์ (cell pressure) และแรงดันภายใน (back pressure) ผ่านสายแรงดันเท่ากับ 50 และ 40 kPa ตามลำดับ เปิดวาล์วเพื่อให้ น้ำไหลผ่านตัวอย่าง

ดิน ใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง น้ำและอากาศในตัวอย่างดินจะถูกดันออกมา หลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงดันเซลล์และแรงดันภายในอย่างช้า ๆ และสลับกันอย่างต่อเนื่องครั้งละประมาณ 50 kPa โดยการเพิ่มแรงดันควรให้แรงดันเซลล์มีค่ามากกว่าแรงดันภายในประมาณ 10 kPa เพื่อป้องกันมิให้ตัวอย่างบวม จากนั้นทำการเพิ่มแรงดันไปจนกระทั่งแรงดันเซลล์และแรงดันภายในเท่ากับ 210 และ 200 kPa ตามลำดับ คงที่ระดับแรงดันนี้ไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นต้องทำการตรวจสอบการอึดตัวด้วยน้ำของตัวอย่างดิน โดยตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำ B โดยการเพิ่มแรงดันเซลล์เป็น 280 kPa ตรวจสอบวัดค่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เพิ่มที่เกิดขึ้น ถ้าสัดส่วนค่าแรงดันน้ำส่วนเกินต่อค่าแรงดันเซลล์ที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 98% ในเวลา 2 นาที จะถือว่าตัวอย่างอึดตัวด้วยน้ำ

3) การอัดตัวคายน้ำ

เมื่อตัวอย่างอึดตัวด้วยน้ำแล้ว ผลต่างของแรงดันเซลล์กับแรงดันภายในมีค่าเท่ากับความเค้นประสิทธิผล แรงดันประสิทธิผลโดยการจำลองหน่วยแรงให้ใกล้เคียงในธรรมชาติโดยอ้างอิงจากหน่วยแรงสูงสุดในอดีต ในงานวิจัยนี้จะใช้แรงดันประสิทธิผลเท่ากับ 250 kPa โดยการเพิ่มแรงดันเซลล์ 450 kPa และคงแรงดันภายในไว้ที่ 200 kPa การเพิ่มอัตราส่วนการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4 ค่า คือ 1 2 4 และ 8 โดยการลดแรงดันเซลล์หลังจากการอัดตัวคายน้ำจบลง แรงดันเซลล์ที่ปรับลดลงแสดงในตารางที่ 3.4 โดยขั้นตอนที่ 1 ถึง ขั้นตอนที่ 3 จะใช้ข้อมูลหุ้มห้องปกติ เพื่อเป็นการปรับสภาพให้ตัวอย่างดินมีสภาพใกล้เคียงกับในธรรมชาติมากที่สุด จากนั้นจึงเปิดวาล์วพร้อมจับเวลาทำการบันทึกค่าปริมาตรน้ำที่เปลี่ยนไป แล้วทำการวัดความสัมพันธ์ของค่าปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับค่ารากที่สองของเวลา (Square root time) จนเสร็จสิ้นกระบวนการอัดตัวคายน้ำขั้นต้น แล้วคงการอัดตัวคายน้ำทิ้งไว้อีก 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.4 ค่าแรงดันสำหรับการอัดตัวคายน้ำ

OCR	แรงดันภายใน u (kPa)	แรงดันเซลล์เริ่มต้น σ_c (kPa)	แรงดันเซลล์ลดลง $\Delta\sigma_c$ (kPa)	σ'_c (kPa)	σ'_0 (kPa)
1	200	450	-	250	250.00
2	200	450	325.00	250	125.00
4	200	450	262.50	250	62.50
8	200	450	231.25	250	31.25

หมายเหตุ σ'_c คือ ความเค้นประสิทธิผลภายในเซลล์

σ'_0 คือ ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยก่อนการทดสอบ

4) การให้ความร้อน

การให้ความร้อนแก่ตัวอย่างกำหนดไว้ 2 อุณหภูมิ คือ 45 และ 60 องศาเซลเซียส หลังจากทำการอัดตัวคายน้ำเสร็จสมบูรณ์ จึงทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ตัวอย่างครั้งละ 10 องศาเซลเซียสใช้เวลา 30 นาทีในแต่ละการเพิ่มอุณหภูมิแต่ละขั้น เพื่อให้ความร้อนกระจายไปทั่วตัวอย่างดิน

จนถึงอุณหภูมิที่กำหนด ปิดวาล์วเพื่อไม่ให้แรงดันน้ำระบายออกจากตัวอย่างดินได้ หรือเรียกว่าการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained heat) และรักษาอุณหภูมิให้คงที่ไว้ 24 ชั่วโมง ซึ่งวิธีการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำในการศึกษานี้ มีความแตกต่างกับการศึกษาของ วัชระ (2560) ซึ่งได้ให้ความร้อนพร้อมเปิดวาล์วให้แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนระบายออกจากมวลตัวอย่างดิน

5) การฉีกตัวอย่าง

การทดสอบแรงฉีกด้วยแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำโดยการเพิ่มหน่วยแรงตามแนวแกนเพียงอย่างเดียว ทำการตั้งค่าอัตราความเครียดตามแนวแกนที่จะใช้ในการทดสอบแรงฉีก เริ่มทำการทดสอบพร้อมบันทึกค่าความดันเซลล์ ความดันภายใน แรงดันน้ำส่วนเกิน แรงตามแนวแกน จนกระทั่งการเคลื่อนที่ของตัวอย่างดิน ได้ประมาณร้อยละ 20 ของความเครียด หรืออาจหยุดการทดสอบก่อน เมื่อหน่วยแรงเบี่ยงเบน (deviator stress) ที่เกิดขึ้น ลดลงเกินร้อยละ 20 ของหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด การเก็บข้อมูลระหว่างการฉีกทั้งหมดถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์และข้อมูลที่ได้รับการทดสอบอย่างต่อเนื่องถูกเก็บโดยใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้น ข้อมูลที่ได้ใช้สำหรับการตีความด้วยการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่ต่างกัน

ในการกำหนดอัตราความเครียดที่นำมาใช้ในการทดสอบแรงอัดสามแกนทำได้สองทาง คือ พิจารณาจากอัตราความเครียดที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM D 4767 ซึ่งได้จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ และผลของการอัดตัวคายน้ำจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ ศิริพร (2556) ได้เสนออัตราความเครียดที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดต่อพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียวอ่อนปากพั้งไว้ ผลที่ได้ทั้งสองแนวทางค่าขอบล่างคือ 0.00035 มิลลิเมตรต่ออนาที่ และค่าขอบบนคือ 0.0014 มิลลิเมตรต่ออนาที่ แสดงถึงการสิ้นสุดการทรุดตัวหลักซึ่งจะหมายถึงการกระจายตัวของแรงดันน้ำในมวลดินมีความสม่ำเสมอ และการจัดเรียงตัวของอนุภาคเม็ดดินเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ในการวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียด จึงกำหนดให้ค่าอัตราความเครียดที่ใช้ครอบคลุมโดยเลือก อัตราความเครียด 0.0002 และ 0.00075 ต่ออนาที่ ตามมาตรฐาน ASTM และ K.H. Head (1986) และเลือกใช้อัตราความเครียด 0.01 และ 0.085 ต่ออนาที่ เพื่อให้เห็นความแตกต่างของผลกระทบของอัตราความเครียดได้อย่างชัดเจน สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่ารวมทั้งข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่มี อัตราความเครียดเร็วสุดจึงต้องใช้ 0.06 ต่ออนาที่

นอกจากนี้ต้องพิจารณาจากขนาดของค่าความเค้นประสิทธิผลภายในเซลล์ 250 kPa และความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยก่อนการฉีกเท่ากับ 250 125 62.5 และ 31.25 kPa สำหรับค่าการอัดแน่นเกินตัว (over consolidation ratio, OCR) ก่อนการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างกำหนดไว้ 4 ค่า คือ 1 2 4 และ 8 การให้ความร้อนแก่ตัวอย่างกำหนดไว้ 2 ค่า คือ 45 และ 60 องศาเซลเซียส ในเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ แล้วจึงนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อุณหภูมิห้องของศิริพร (2556) และเปรียบเทียบกับ การให้ความร้อนแบบระบายน้ำของวัชระ (2560) สำหรับตัวอย่างที่ทดสอบทั้งหมด 32 ตัวอย่าง แสดงในตารางที่ 3.5 แสดงจำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบในแต่ละเงื่อนไข (S) คือ ข้อมูลจาก ศิริพร (2556) และ (W) คือ ข้อมูลจากวัชระ (2560)

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขต่างๆ ของตัวอย่างที่ต้องทดสอบ

อุณหภูมิ (°C)	OCR	อัตราความเครียดคงที่			
		0.02 %ต่อนาที	0.075 %ต่อนาที	1.0 %ต่อนาที	6.0 %ต่อนาที
อุณหภูมิห้อง ของศิริพร (2556)	1	S	S	S	S
	2	S	S	S	S
	4	S	S	S	S
	8	S	S	S	S
45 (Drained Heat) วัชระ (2559)	1	W	W	W	W
	2	W	W	W	W
	4	W	W	W	W
	8	W	W	W	W
60 (Drained Heat) วัชระ (2559)	1	W	W	W	W
	2	W	W	W	W
	4	W	W	W	W
	8	W	W	W	W
45 (Undrained Heat)	1	✓	✓	✓	✓
	2	✓	✓	✓	✓
	4	✓	✓	✓	✓
	8	✓	✓	✓	✓
60 (Undrained Heat)	1	✓	✓	✓	✓
	2	✓	✓	✓	✓
	4	✓	✓	✓	✓
	8	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ : S คือ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของศิริพร (2556)

W คือ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของวัชระ (2560)

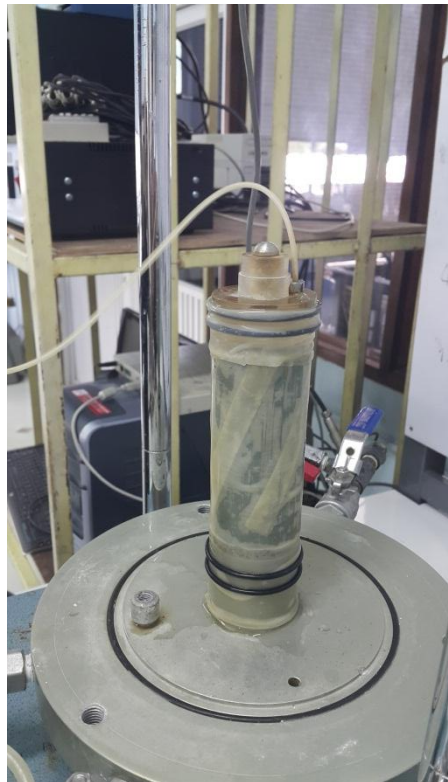
✓ คือ การทดสอบของการศึกษานี้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.6 (ก) แสดงการติดตั้งตัวอย่างบนฐานเซลล์ (ข) แสดงการสวมปลอกยาง (ค) แสดงการใส่ยางรัดทั้งหัวและท้าย (ง) แสดงการประกอบตัวเครื่องพร้อมทำการทดสอบ

3.3 การวิเคราะห์และการสรุปผล

เมื่อได้ข้อมูลจากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางวิศวกรรมทั้งหมดแล้ว สามารถนำข้อมูลดังกล่าวนี้มาวิเคราะห์ และสรุปผล โดยจะทำการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมาของศิริพร (2556) และ วัชระ (2560) เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่มีต่อพฤติกรรมการรับกำลังของดินเหนียวปากพนัง

ระบบสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้มีการทำการทดสอบในหลายตัวแปร และหลายเงื่อนไข ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการอธิบาย และต่อการทำความเข้าใจ จึงทำการกำหนดระบบสัญลักษณ์ดังต่อไปนี้

DH/UH-Rxx-Txx -OCRx

DH	หมายถึง	Drained Heat
UH	หมายถึง	Undrained Heat
R	หมายถึง	Strain rate
T	หมายถึง	Temperature
OCR	หมายถึง	Over Consolidation Ratio

ตัวเลข “xx” หลัง R หมายถึง ค่าอัตราการเฉือน หน่วยเป็น %มม.ต่อนาที

ตัวเลข “xx” หลัง T หมายถึง ค่าอุณหภูมิในการให้ความร้อน หน่วยเป็น องศาเซลเซียส

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ เช่น “IC-UH-R0.02-T45” หมายถึง การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบมีการอัดตัวคายน้ำ ในเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ อัตราการเฉือน 0.02 %มม.ต่อนาที ให้อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

ตัวเลข “x” หลัง OCR หมายถึง ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว

บทที่ 4

ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

บทนี้อธิบายถึงการทดสอบตัวอย่างดินให้ห้องปฏิบัติการ ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง ภายใต้ภาวะความร้อนและอัตราความเครียดตามแนวแกน และสภาวะอัดแน่นเกินตัว รวมทั้งการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อุณหภูมิจากห้องของศิริพร (2556) และการทดสอบที่อุณหภูมิจากห้อง 45 และ 60 องศาเซลเซียส ภายใต้เงื่อนไขการให้ความร้อนแบบระบายน้ำของวัชระ (2560) ความสัมพันธ์ของตัวแปรคุณสมบัติต่างๆ ของดินเหนียวปากพนัง ดังมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวปากพนัง

4.1.1 ผลการศึกษาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRD / XRF Techniques, X-ray)

จากการศึกษาองค์ประกอบของแร่หลัก (Major Minerals) ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ตามมาตรฐานการการวิเคราะห์แร่ในดิน ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยทำการวิเคราะห์ดินเหนียวปากพนังจำนวน 3 ตัวอย่าง คือ ดินเหนียวปากพนังที่ความลึก 4 เมตร 8 เมตร และ 12 เมตร ผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของอัครเดช แซ่จิว (2552) ที่แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวปากพนังมีลักษณะเป็นดินแบบเดียวกัน (Homogenous) จากรูปที่ 4.1 ผลการทดสอบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่าดินเหนียวปากพนังมีส่วนประกอบของแร่เป็นควอตซ์ (Quartz ; SiO_2) เกาลินไนท์ (Kaolinite ; $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) และ อิลไลต์ (Illite ; $2\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 24\text{SiO}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีวัสดุประสานด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) พบว่าองค์ประกอบหลักของดินเหนียวปากพนังประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) 49.21% อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) 16.55% และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) 10.29% ดังแสดงในตารางที่ 4.1

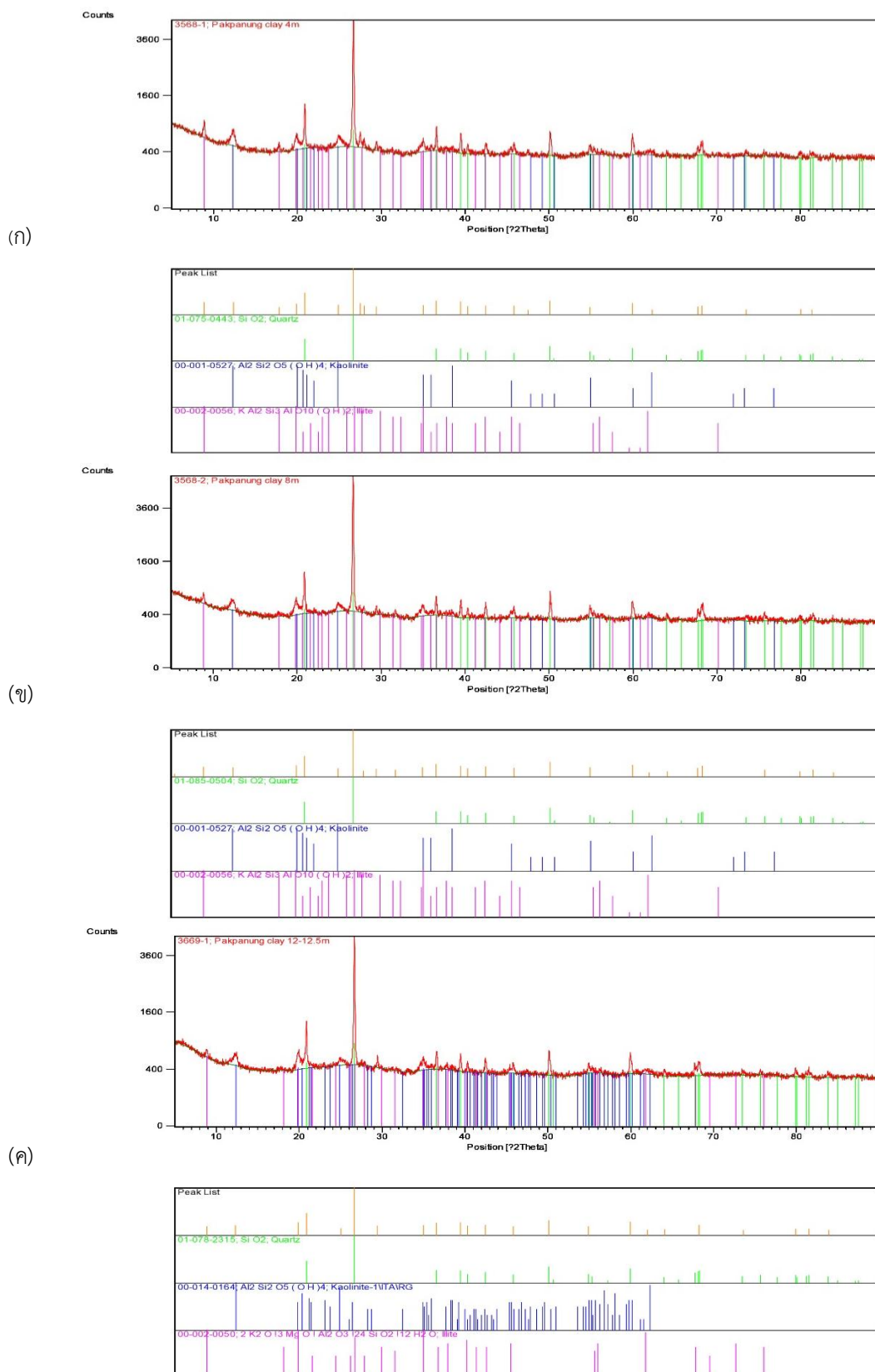
4.1.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) จากการศึกษา สัณฐานและรายละเอียดโครงสร้างของดิน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของดินเหนียวปากพนังเป็นรูปร่างเป็นแผ่นแบน อันเป็นลักษณะผลึกของแร่เคโอลินไนต์ และแร่อิลไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) ส่วนโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูปทรงหกเหลี่ยมเป็นผลึกของแร่ควอตซ์ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.2 (ค) จากรูปที่ 4.2 (ง) จุด A คือผลึกของเกลือ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการตกตะกอนที่บวมของดินเหนียวปากพนังตามลักษณะภูมิประเทศซึ่งใกล้กับทะเล ยืนยันได้ว่าดินเหนียวปากพนังเป็นดินเหนียวทะเล (Marine clay) และยังพบโครงสร้างจุลภาคของอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) ซึ่งมีลักษณะคล้ายฟองน้ำที่มีรูพรุน ตรงบริเวณจุด B ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (จ) และรูปที่ 4.2 (ฉ) บริเวณจุด C ซึ่งเป็นภาพขยายของไดอะตอม (Diatom) ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ซึ่ง

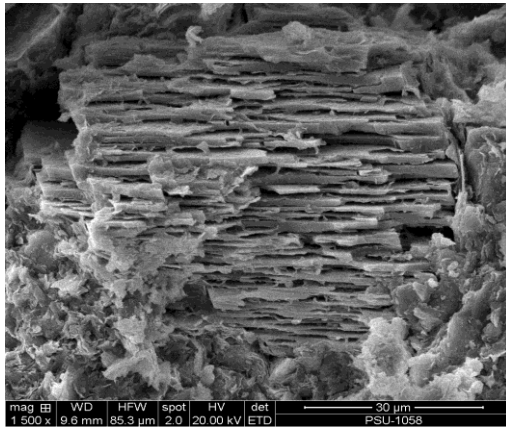
รวมอยู่ในโครงสร้างอินทรีย์วัตถุที่อยู่ในดินเหนียวปากพนัง ดังนั้นการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวปากพนังด้วยวิธี SEM มีความสอดคล้องกับองค์ประกอบของแร่ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ซึ่งพอจะสรุปได้โดยสังเขปว่าดินเหนียวปากพนังเป็นดินเหนียวทะเลที่มีส่วนประกอบของอินทรีย์สาร

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปากพนัง (วัชระ 2560)

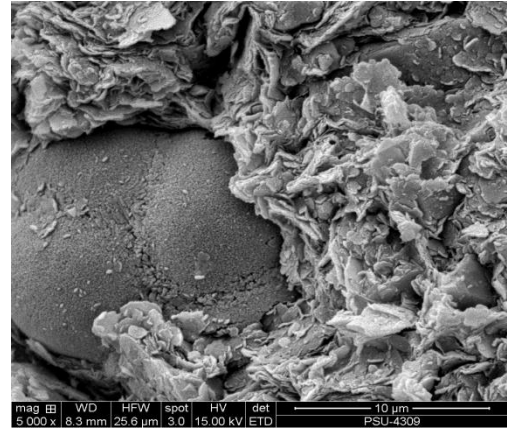
สารประกอบ	ความเข้มข้น (%)		
	4 เมตร	8 เมตร	12 เมตร
Na ₂ O	1.20	1.10	2.08
MgO	2.28	2.59	2.85
Al ₂ O ₃	17.04	16.55	16.65
SiO ₂	49.56	49.21	48.10
SO ₃	1.67	2.17	1.38
K ₂ O	2.58	2.37	3.08
CaO	2.19	2.70	3.05
TiO ₂	1.16	1.18	1.21
MnO	0.22	0.21	0.20
Fe ₂ O ₃	10.74	10.29	9.74
Rb ₂ O	0.09	0.09	0.03
SrO	0.07	0.07	0.03
ZrO ₂	0.12	0.15	0.04
Cl	0.77	1.15	1.13
อื่นๆ	P, Cr, Zn, Br, Nb, Pb		



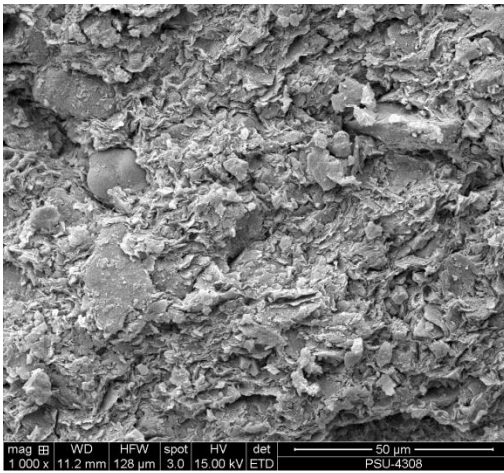
รูปที่ 4.1 ผลเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของดินเหนียวปากพั้ง
ที่ความลึก (ก) 4 เมตร (ข) 8 เมตร และ (ค) 12 เมตร (วัชระ 2560)



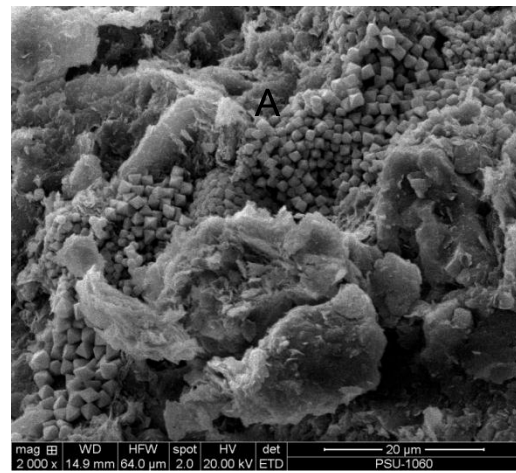
(ก)



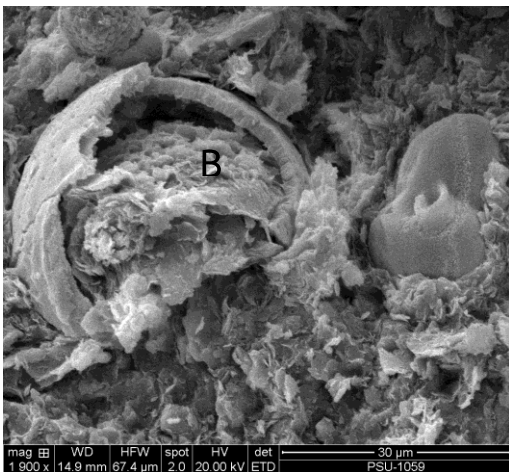
(ข)



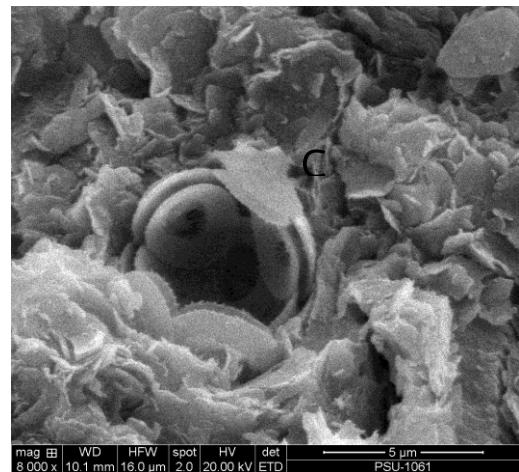
(ค)



(ง)



(จ)

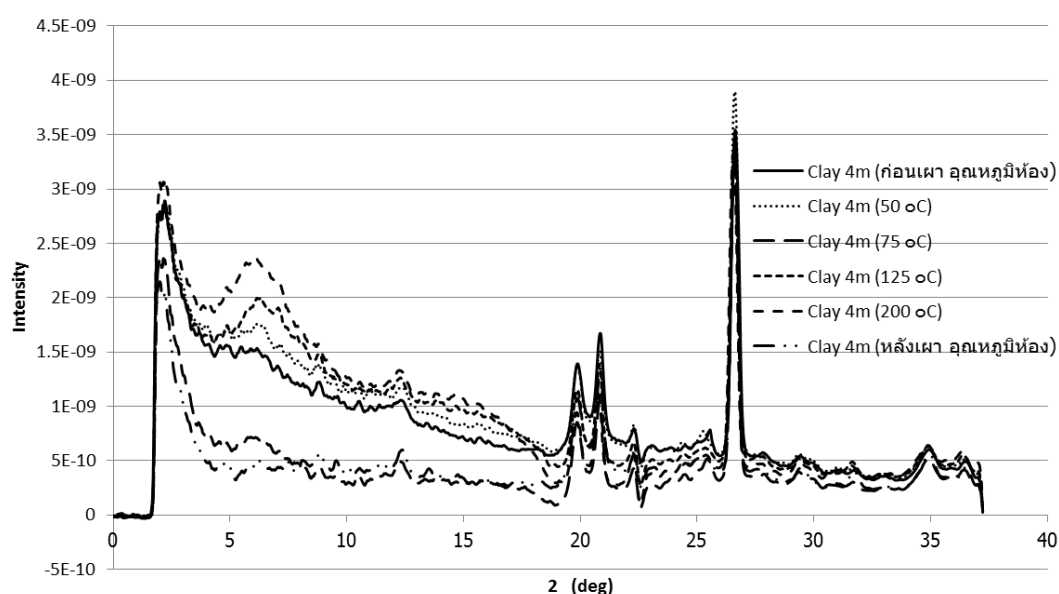


(ฉ)

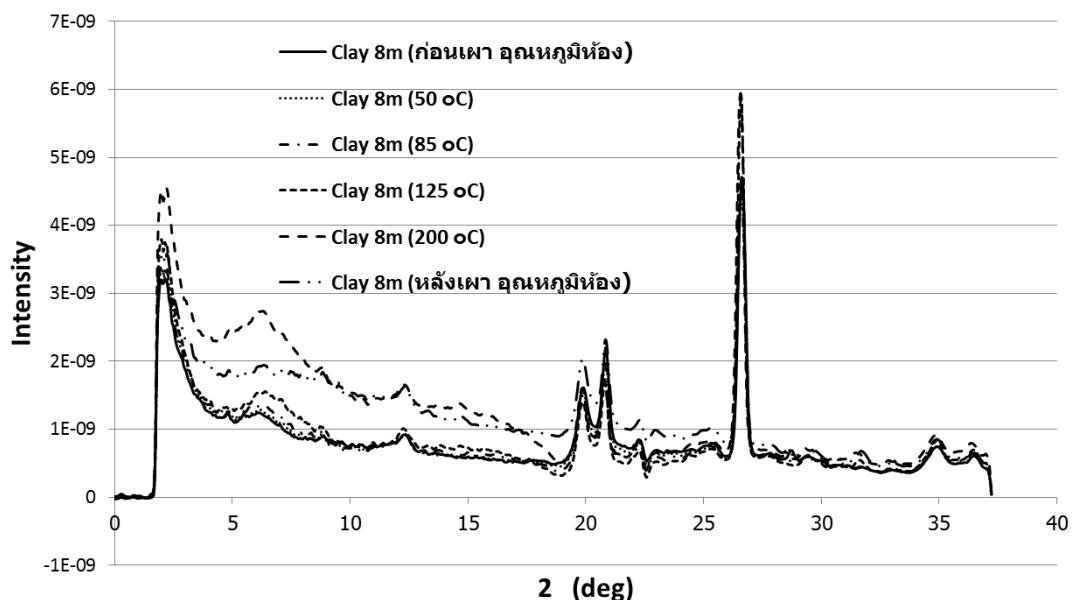
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวปากผนังที่มาตราส่วน
 (ก) 30 μm (ข) 10 μm (ค) 50 μm (ง) 20 μm (จ) 30 μm (ฉ) 5 μm

4.1.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างโมเลกุล ด้วยวิธี wide angle X-ray scattering (WAXS)

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโมเลกุลของดินที่ระดับความลึก 4 และ 8 เมตร โดยได้ทำการศึกษาคูณสมบัติความเป็นผลึก โดยการวัด wide angle X-ray scattering (WAXS) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่า ทุกๆ อุณหภูมิ กราฟมีแนวโน้มลักษณะกราฟมีความใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.3 และ 4.4 โดยกราฟมีจุดยอดของกราฟอยู่ในจุดเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิต่างๆ ไม่มีผลต่อโครงสร้างโมเลกุลของดินเหนียวอย่างชัดเจน ค่าที่ไม่ซ้อนทับกันเนื่องจาก สภาวะแวดล้อมเริ่มต้นต่างกัน แต่รูปร่างของกราฟเหมือนกัน ทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส ไม่มีผลทำให้โครงสร้างดินเปลี่ยนแปลง ส่วนปัจจัยที่ทำให้พฤติกรรมทางด้านกำลังของดินเหนียวเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิต่างๆนั้น จึงเป็นเพียงอิทธิพลของแรงดันน้ำส่วนเกิน ความหนืดของน้ำ การเปลี่ยนแปลงของชั้นไอออนิกสองชั้น (ionic double layer) ของอนุภาคที่ เปลี่ยนไปเนื่องจากพลังงานความร้อน ซึ่งไม่มีผลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของดิน (วัชระ 2560)



รูปที่ 4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติความเป็นผลึกของดินเหนียวที่ความลึก 4 เมตร
ที่มา: วัชระ (2560)



รูปที่ 4.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติความเป็นผลึกของดินเหนียวที่ความลึก 8 เมตร
ที่มา: วัชร (2560)

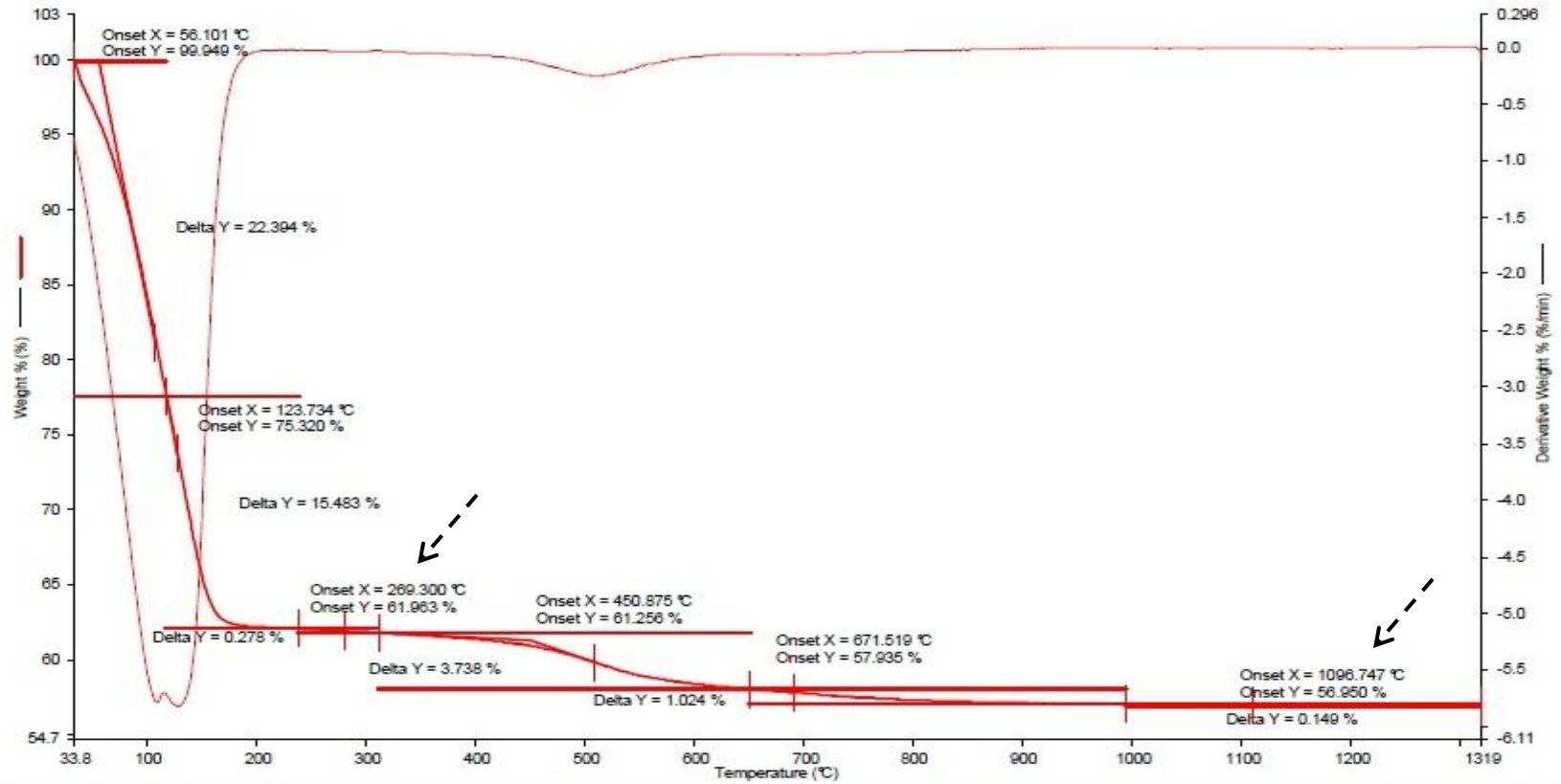
4.1.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน ด้วยวิธี Thermo gravimetric analysis (TGA)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง โดยทำการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 1300 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 55.10 องศาเซลเซียส มวลดินมีน้ำหนักลดลงเหลือ 99.949% ของน้ำหนักมวลดิน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 123.73°C มวลดินมีน้ำหนักลดลงเหลือ 75.32% ของน้ำหนักมวลดิน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 269.30°C มวลดินมีน้ำหนักลดลงเหลือ 61.963% ของน้ำหนักมวลดิน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่านี้ มีผลทำให้น้ำหนักของมวลดินลดลงอีกเพียงเล็กน้อย จนน้ำหนักคงที่เป็น 56.95% ของมวลดินรวม ที่อุณหภูมิ $1,096.747^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อให้ความร้อนแก่มวลดินเหนียวปากพาง น้ำหนักของดินจะลดลงอย่างมากที่ประมาณช่วงอุณหภูมิระหว่าง 55 ถึง 180 องศาเซลเซียส และจากการทดสอบ WAXS ในหัวข้อที่ 4.1.3 ซึ่งพบว่าที่ช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 200°C ความร้อนไม่มีผลทำให้โครงสร้างดินเปลี่ยนแปลง จึงสามารถสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิไม่เกิน 200°C การลดลงของน้ำหนักมวลดินนั้น เนื่องมาจากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุในมวลดิน ไม่ได้เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโมเลกุลของมวลดินแต่อย่างใด

Filename: c:\pel\pyris\data\151260@1.txd - 4/18/2017 3:39:53 PM
 Operator ID:
 Sample ID: Pak phanang clay
 Sample Weight: 40.229 mg
 Comment:

— Pak phanang clay: 151260@1
 — Unsubtracted Weight % (%) : Step: 1
 — Pak phanang clay: 151260@1
 — Derivative Unsubtracted Weight % (%/min) (Smoothed) : Step: 1

Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University



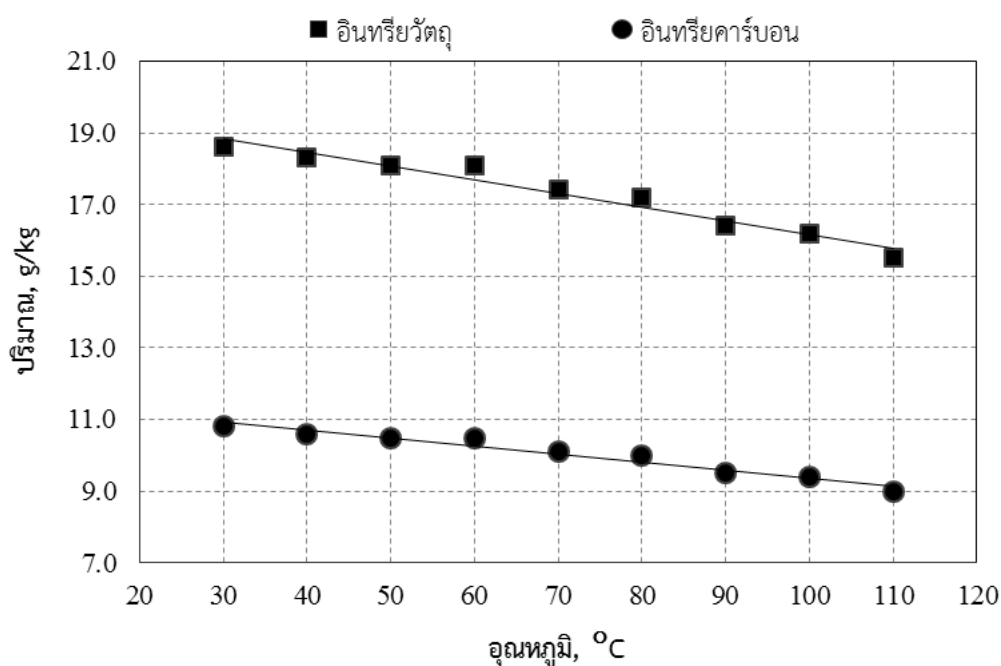
1) Heat from 50.00°C to 1300.00°C at 10.00°C/min

4/18/2017 4:40:54 PM

รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมวลดินกับอุณหภูมิ

4.1.5 การวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุ โดยวิธี Walkley-Black method

การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินโดยวิธีวอล์คเคย์-แบลคอาศัยหลักการวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอน (organic carbon, OC) ก่อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นอินทรีย์วัตถุ เนื่องจากอินทรีย์วัตถุในดิน (organic matter, OM) เป็นอินทรีย์สาร (organic material) ทุกชนิดในดินที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต รวมทั้งสิ่งที่ปลดปล่อยออกมาจากสิ่งมีชีวิต ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในอินทรีย์วัตถุประมาณร้อยละ 58 โดยน้ำหนัก ดังนั้นหากปริมาณอินทรีย์คาร์บอนสูง นั้นหมายความว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงด้วย การวิเคราะห์ทำโดยใช้โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate) ไปออกซิไดซ์ (oxidize) คาร์บอนในสารอินทรีย์ที่กำลังเผาเปื่อยรวมทั้งในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน ตลอดจนในอินทรีย์วัตถุที่สลายตัวจนเป็นสารอินทรีย์เชิงซ้อน และสามารถคำนวณหาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุได้ในที่สุด ผลการทดสอบปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ดินที่อุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณอินทรีย์วัตถุในมวลดินมีแนวโน้มลดลง สามารถสรุปได้ว่าความร้อนส่งผลให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่อยู่ในมวลดินมีปริมาณลดลง



รูปที่ 4.6 แนวโน้มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่อุณหภูมิต่างๆ

4.1.6 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

ดินเหนียวปากพนังเกิดจากการตกตะกอนทับถมบริเวณชายฝั่งทะเล (อภิชัย 2546) ลักษณะดินมีสีเทาเข้ม (dark gray) เนื้อค่อนข้างละเอียด จากผลของการเจาะสำรวจพบว่าบริเวณชั้นบนตั้งแต่ผิวดินลงไปถึงระดับความลึก 3 เมตร เป็นดินเหนียวที่ปะปนด้วยซากพืช และดินเหนียวค่อนข้างแข็งซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในมวลดิน และการปรับสภาพในการใช้ประโยชน์ที่ดิน ขณะที่ระดับชั้นดินลึกลงไปประมาณ 4 ถึง 20 เมตร มีลักษณะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน (soft clay) และพบซากเปลือกหอยปะปนอยู่บ้าง ถัดจากชั้นดินเหนียวอ่อนไปเป็นชั้นดินเหนียวและดินเหนียวปนดินตะกอนทราย (silty clay) ซึ่งมีความแข็งปานกลางจนถึงแข็งมาก (อัครเดช 2552) รูปการเรียงตัวลักษณะของดินบริเวณปากพนังแสดงในรูปที่ 2.3

จากผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่นำมาศึกษาได้แสดงดังในตารางที่ 4.2 พบว่าดินเหนียวปากพนังมีความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) เท่ากับ 2.55 ซึ่งอยู่ในช่วงค่าความถ่วงจำเพาะของดินอินทรีย์ ความชื้นในมวลดิน (water content, w_n) ร้อยละ 81.84 ทำการทดสอบค่าขีดจำกัดเหลว (liquid limit, LL) ได้ร้อยละ 94.08 ค่าขีดจำกัดพลาสติก (plastic limit, PL) ร้อยละ 32.45 ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณค่าดัชนีพลาสติก (plastic index, PI) และค่าดัชนีเหลว (liquid index, LI) ได้ค่า 61.62 และ 0.53 ตามลำดับ แสดงว่าให้เห็นว่าดินเหนียวปากพนังอยู่ในสภาพพลาสติกและมีความเหนียวสูงมาก

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

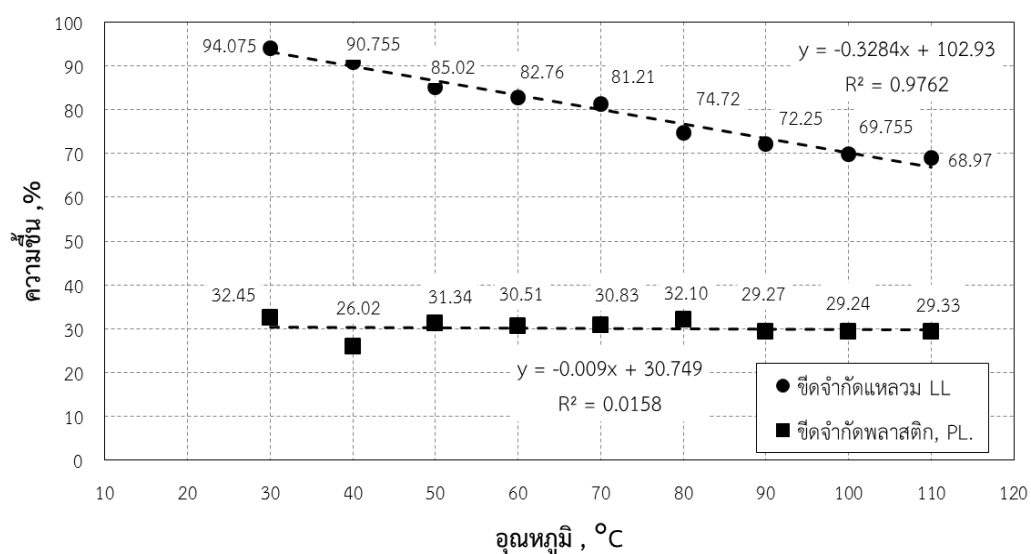
กระบวนการทำให้แห้ง	อุณหภูมิ	คุณสมบัติดัชนี	ค่า	หน่วย
ไม่ผ่าน การให้ความร้อน	อุณหภูมิห้อง หรือประมาณ 30 องศาเซลเซียส	ค่าขีดจำกัดเหลว, LL	94.08	%
		ค่าขีดจำกัดพลาสติก, PL	32.45	%
		ค่าดัชนีพลาสติก, PI	61.62	%
		หน่วยน้ำหนักกรม, γ	1.53	t/m ³
		ความชื้นในมวลดิน, $w\%$	81.84	%
ผ่าน การให้ความร้อน นาน 24 ชั่วโมง	40 ถึง 110 องศาเซลเซียส	ค่าขีดจำกัดเหลว, LL	90.76-68.97	%
		ค่าขีดจำกัดพลาสติก, PL	26.02-32.45	%
		ค่าดัชนีพลาสติก, PI	64.73-39.63	%
		ความถ่วงจำเพาะ, G_s	2.55	-

เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้ดังในตารางที่ 4.3 มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ อัครเดช (2552) แสดงดังในตารางที่ 4.4 พบว่าค่าขีดจำกัดเหลวของตัวอย่างที่ปล่อยให้แห้งที่ อุณหภูมิห้องมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของขีดจำกัดเหลวในการศึกษาของอัครเดชมาก เนื่องจากความ แตกต่างของกระบวนการเตรียมตัวอย่างดินก่อนการทดสอบ กล่าวคือ อัครเดชได้เตรียมตัวอย่างดิน โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำมาทำการทดสอบ แต่ในการศึกษานี้ได้ทำ การเตรียมตัวอย่างโดยการปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำมาทดสอบ ดังนั้นเพื่อเป็นการคู แนวน้อมของความร้อนที่ส่งผลต่อค่าขีดจำกัดเหลว จึงทำการทดลองโดยนำตัวอย่างดินเหนียวปาก พนังมาทำให้แห้งด้วยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างดินที่อุณหภูมิแตกต่างกันตั้งแต่ 40 ถึง 110 องศา เซลเซียส และคงอุณหภูมินั้นๆไว้นาน 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาทำการทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลวและ ขีดพิกิตพลาสติก ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อค่าขีดจำกัดเหลว อย่างชัดเจน โดยตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีค่าขีดจำกัดเหลวร้อยละ 94.08 และตัวอย่าง ดินที่ทำให้แห้งด้วยการอบที่อุณหภูมิสูงสุด 110 องศาเซลเซียส ให้ค่าขีดจำกัดเหลวเพียงร้อยละ 68.97 แสดงให้เห็นว่าค่าขีดจำกัดเหลวมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอัตราส่วนของค่าขีดจำกัด เหลวของดินที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนต่อดินที่ผ่านความร้อนที่ 110 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.73 บ่งชี้ว่าค่าขีดจำกัดเหลวของดินที่อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงมากกว่าร้อยละ 25 ของ ค่าขีดจำกัดเหลวของดินที่ไม่ผ่านความร้อน ดังนั้นดินเหนียวปากพนังจึงสามารถจำแนกเป็นดินเหนียว อินทรีย์ (Organic clay) ตาม ASTM D 2487-06 ซึ่งมีความสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ที่ได้กล่าว มาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.2 ในรูปที่ 4.2 ในส่วนของค่าขีดพิกิตพลาสติก ตัวอย่างดินที่ไม่ได้รับการให้ ความร้อนมีค่าขีดพิกิตพลาสติกร้อยละ 32.45 และตัวอย่างดินที่ทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิสูงสุด 110 องศาเซลเซียส มีค่าขีดพิกิตพลาสติกร้อยละ 29.33 ซึ่งค่าขีดจำกัดพลาสติก ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ ชัดเจน เนื่องจากค่าของแต่ละอุณหภูมิไม่เป็นแนวทางเดียวกัน

จากผลการทดสอบดังกล่าว พบว่าดินเหนียวปากพนังเป็นดินเหนียวอินทรีย์ จึงได้ทำ การทดสอบหาปริมาณอินทรีย์วัตถุในมวลดินตามมาตรฐาน ASTM D 2974 โดยการนำมวลดินเหนียว มาเผาที่อุณหภูมิ 440 และ 750 องศาเซลเซียส จากนั้นชั่งน้ำหนักของมวลดินที่เหลืออยู่ ซึ่งก็คือส่วน ของเถ้า (ash) แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักมวลดินที่อบ 110 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ปริมาณ ของเถ้า (ash content) ซึ่งส่วนที่หายไปก็คือส่วนของปริมาณอินทรีย์วัตถุนั้นเอง จากผลการทดสอบ ดังกล่าวพบว่าดินเหนียวปากพนังเป็นดินเหนียวอินทรีย์ ซึ่งมีปริมาณอินทรีย์วัตถุประมาณร้อยละ 18 ของมวลดิน จัดได้ว่าเป็นดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุระดับปานกลาง (medium organic clay) ตาม มาตรฐานไอเอสโอ (the international Organization standardization, ISO)

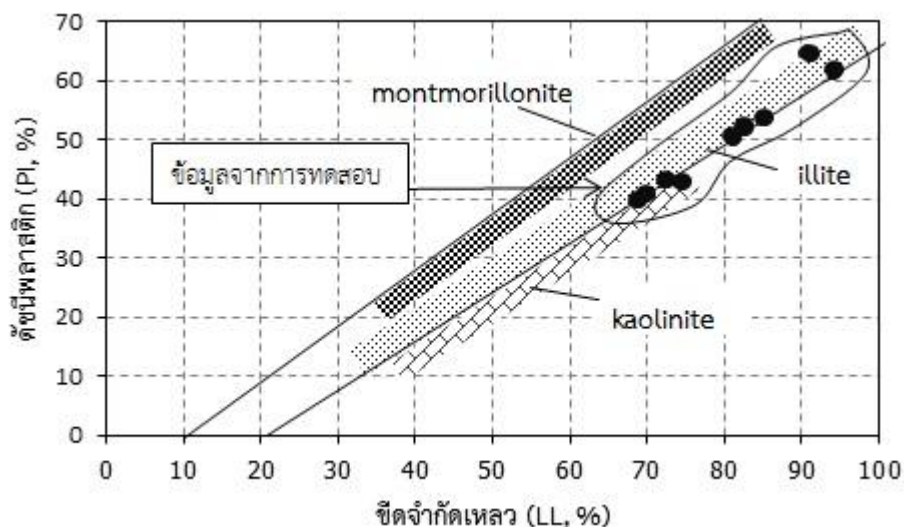
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง (อัครเดช 2552)

คุณสมบัติดัชนี	ช่วงข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	หน่วย
ค่าขีดจำกัดเหลว, LL	61.7-68.5	64.9	%
ค่าขีดพิกต์พลาสติก, PL	36.1-24.6	29.9	%
ค่าดัชนีพลาสติก, PI	30.0-41.5	34.9	%
หน่วยน้ำหนักกรม, γ	1.68-1.79	1.74	t/m ³
ความชื้นในมวลดิน, w	71.1-79.7	72.1	%
ความถ่วงจำเพาะ, G_s	2.67-2.77	2.71	-
ประเภทของดิน, USSC	CH	-	-



รูปที่ 4.7 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก

เมื่อนำค่าขีดจำกัดเหลวและค่าดัชนีพลาสติกของการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ ในรูปที่ 4.7 มาพล็อตลงในแผนภูมิพลาสติกซีต (plasticity chart) ดังรูปที่ 4.8 พบว่าดินเหนียวปากพั้งเป็นดินเหนียวอินทรีย์ซีตจำกัดเหลวสูง (high liquid limit organic clay ,OH) และยังสามารถคล้องกับผลการศึกษาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ ที่กล่าวมาดังในหัวข้อ 4.1.1 ซึ่งพบว่าดินเหนียวปากพั้งมีแร่กาลินไนท์ และอิล-ไลต์เป็นองค์ประกอบหลัก



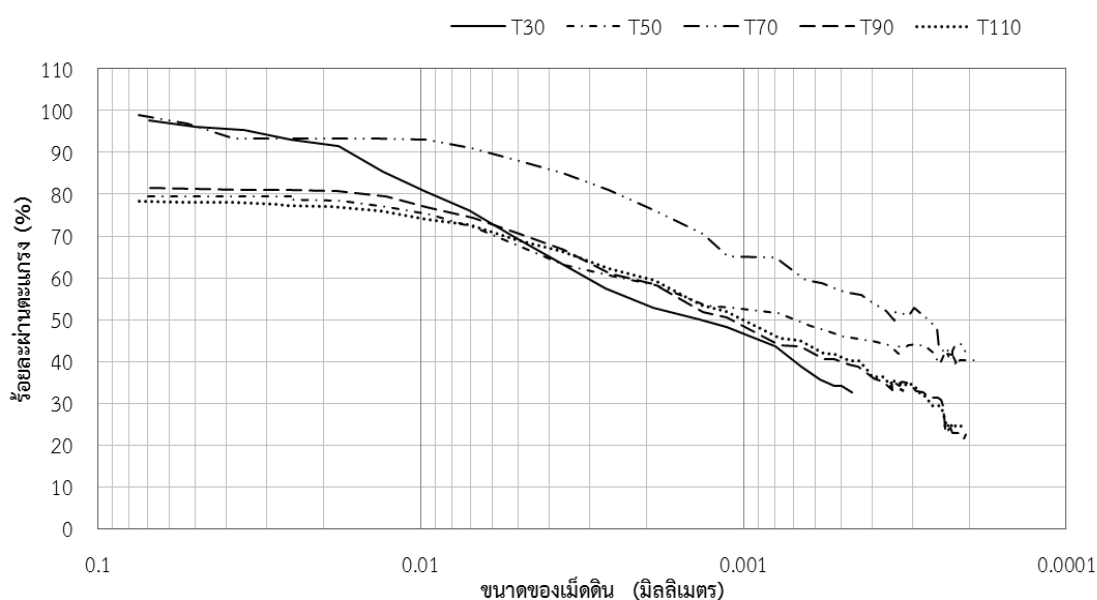
รูปที่ 4.8 แผนภูมิพลาสติกซีตของดินเหนียวปากพั้ง

ค่าขีดจำกัดเหลวและค่าขีดจำกัดพลาสติกขึ้นอยู่กับเนื้อดิน (soil texture) อินทรีย์วัตถุในดิน ชนิดและปริมาณของแร่ดินเหนียว เมื่อมีการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างดิน เป็นผลให้อินทรีย์วัตถุ (organic matter) ในดินเหนียว ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายฟองน้ำที่ดูดซับน้ำไว้ เกิดการสลายตัว ทำให้ชั้นน้ำล้อมรอบเม็ดดินไหลออกจากอนุภาคดินเหนียวได้ง่ายขึ้น จึงเป็นผลให้ค่าขีดจำกัดเหลวลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุในมวลดินที่กล่าวมาในหัวข้อ 4.1.5 ดังตารางที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่าการให้ความร้อนเป็นการลดปริมาณอินทรีย์วัตถุหรือสลายอินทรีย์วัตถุในมวลดินเหนียวปากพั้ง

4.1.7 การทดสอบหาขนาดเม็ดดินโดยวิธีไฮโดรมิเตอร์

การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคสำหรับดินเม็ดละเอียด ด้วยวิธีการทดสอบไฮโดรมิเตอร์ ซึ่งได้ทำการทดสอบทั้งหมด 4 ตัวอย่าง โดยการเตรียมตัวอย่างดินด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ 50 70 90 และ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาทดสอบ และนำมาผลที่ได้มาเทียบกับการทดสอบของศิริพร ชีวะกุล (2556) ซึ่งได้ทำการทดสอบการ

กระจายตัวของเม็ดดินเหนียวปากพั้งที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (อุณหภูมิห้องหรือ 30 °C) พบว่าดินเหนียวปากพั้งสามารถจำแนกโดยการหาค่าเฉลี่ยออกเป็นดินตะกอนทราย (silt) ประมาณร้อยละ 48.70 ดินเหนียว (clay) ประมาณร้อยละ 46.77 และทราย (sand) ประมาณร้อยละ 1.31 จากนั้นได้นำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างดิน พบว่าแนวโน้มกราฟการกระจายตัวของเม็ดดินไม่มีแนวโน้มที่สังเกตได้อย่างชัดเจน แสดงดังในรูปที่ 4.9 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าความร้อนไม่ได้ทำให้ขนาดของเม็ดดินเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.9 การทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดินที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง

4.2.1 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ

เนื่องจากการศึกษานี้ต้องการศึกษาผลกระทบจากความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการรับกำลังของดินเหนียวปากพั้ง จึงได้ทำการศึกษาคุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวปากพั้งที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างดินเทียบกับตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนของผลของการศึกษาที่ผ่านมา ได้แก่ การศึกษาของศิริพร ชีวกุล (2556) ซึ่งได้ทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าดินเหนียวปากพั้งที่ระดับความลึก 7.0-7.5 เมตร เป็นดินเหนียวอัดตัวปกติ (normally consolidated clay, NC) ซึ่งมีค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว (over consolidation ratio, OCR) เท่ากับ 0.931 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (coefficient of consolidation, c_v) ในช่วงเริ่มต้นมีค่าสูง และเมื่อเพิ่มหน่วยแรงมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมีค่าลดลงที่ละน้อยจนคงที่ ค่าดัชนีการอัดตัว (compression index, c_c) มีค่าเท่ากับ 1.21 ค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (recompression index, c_r) มีค่าเท่ากับ 0.299

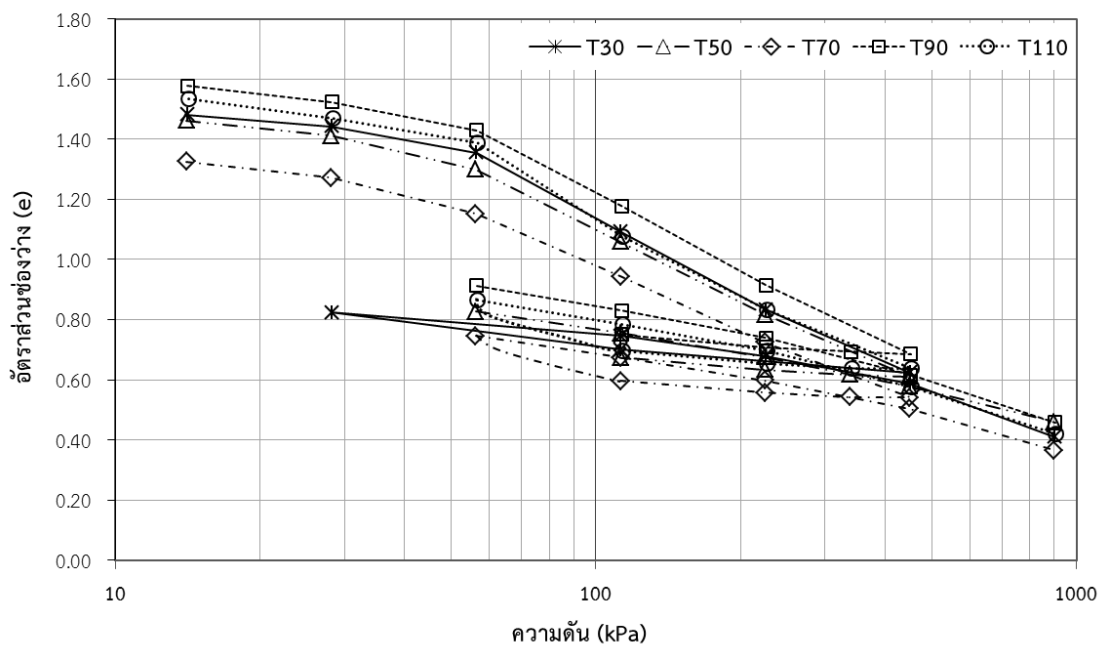
การศึกษานี้จึงได้ทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ จำนวน 4 ตัวอย่าง ซึ่งการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวปากพั้งก่อนนำไปทำการทดสอบนั้น จะทำให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 70 90 และ 110 องศาเซลเซียส โดยการนำตัวอย่างดินมาตัดแต่งตามวงแหวนของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ แล้วนำมาให้ความร้อนผ่านการแช่ในน้ำตามอุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.4 และเส้นโค้งการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.10 จากผลการทดสอบพบว่าค่าดัชนีการอัดตัวและค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละอุณหภูมิ คืออยู่ในช่วงประมาณ 0.707-0.858 และ 0.218-0.254 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการศึกษาของศิริพร (2556) พบว่าค่าดัชนีการอัดตัวและค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำมีค่าใกล้เคียงกัน เส้นกราฟของค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (coefficient of consolidation, c_v) มีความแตกต่างกันในช่วงต้นที่เริ่มให้ความดัน โดยตัวอย่างที่เตรียมที่อุณหภูมิห้องให้ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำสูงกว่าตัวอย่างที่เตรียมที่อุณหภูมิสูง และค่อยๆมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน สังเกตได้จากรูปที่ 4.11(ก) และ 4.11(ข) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (coefficient of Permeability, k) พบว่ามีความแตกต่างกันในช่วงต้นที่เริ่มให้ความดันต่ำกว่า 30 กิโลปาสคาล โดยตัวอย่างที่เตรียมที่อุณหภูมิห้องให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่าตัวอย่างที่อุณหภูมิสูง และค่อยๆมีแนวโน้มใกล้เคียงกันที่ความดันสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.12(ก) และ 4.12(ข) ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนส่งผลให้ความหนืดของชั้นน้ำอิสระ หรือชั้น Double layer ลดลง น้ำจึงไหลออกจากช่องว่างของดินได้ง่ายขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำสูงขึ้น แต่ที่ความดันสูง ผลกระทบของอุณหภูมียังไม่ชัดเจน

ดังนั้นการใช้ความร้อนในการปรับปรุงคุณภาพดินจึงใช้ได้ดีภายใต้ความดันหรือน้ำหนักกดทับที่ต่ำ ผลที่ได้ดังกล่าวนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาของ Bergado et al. (2004) ซึ่งได้ทำการศึกษากการอัดตัวคายน้ำเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของดินเหนียวกรุงเทพ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากความหนืดของน้ำในช่องว่างของดินจากข้อสรุปนี้จึงได้นำมาสู่การศึกษาในการปรับปรุงดินด้วยวิธี prefabricated vertical drain (PVD) โดยใช้ร่วมกับความร้อนและการใช้น้ำหนักกดทับ (preloading) ไม่เกิน 30 กิโลปาสคาล พบว่าการใช้ PVD ร่วมกับการให้ความร้อน และน้ำหนักกดทับช่วยเร่งอัตราการอัดตัวคายน้ำและเพิ่มระยะการหลุดตัวของดินเหนียวกรุงเทพได้ (Pothiraksanon et al. 2007)

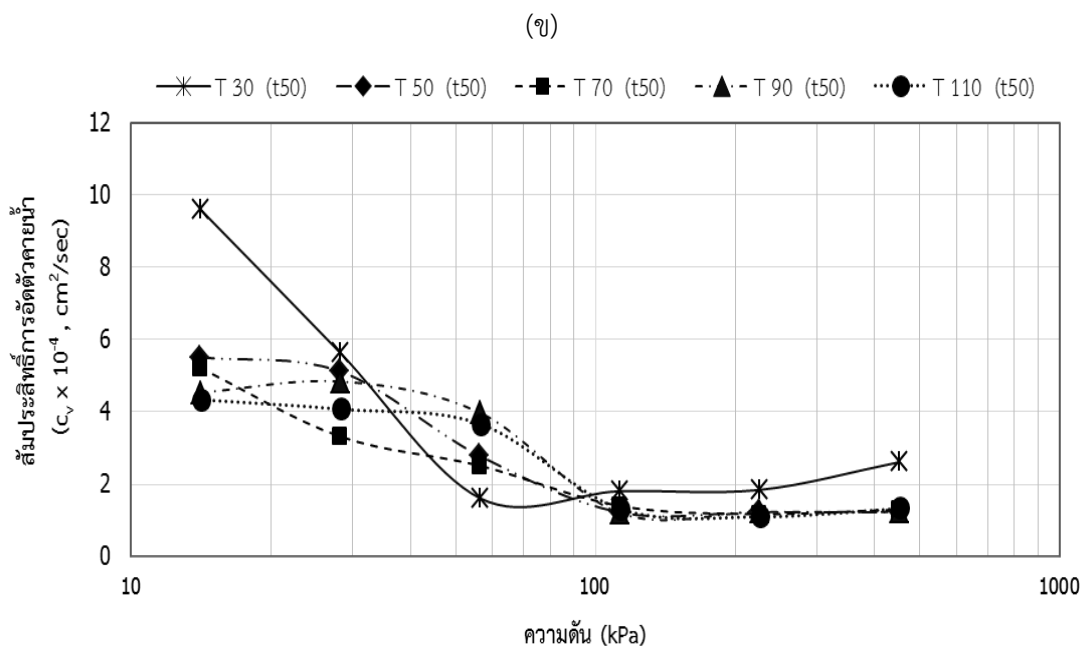
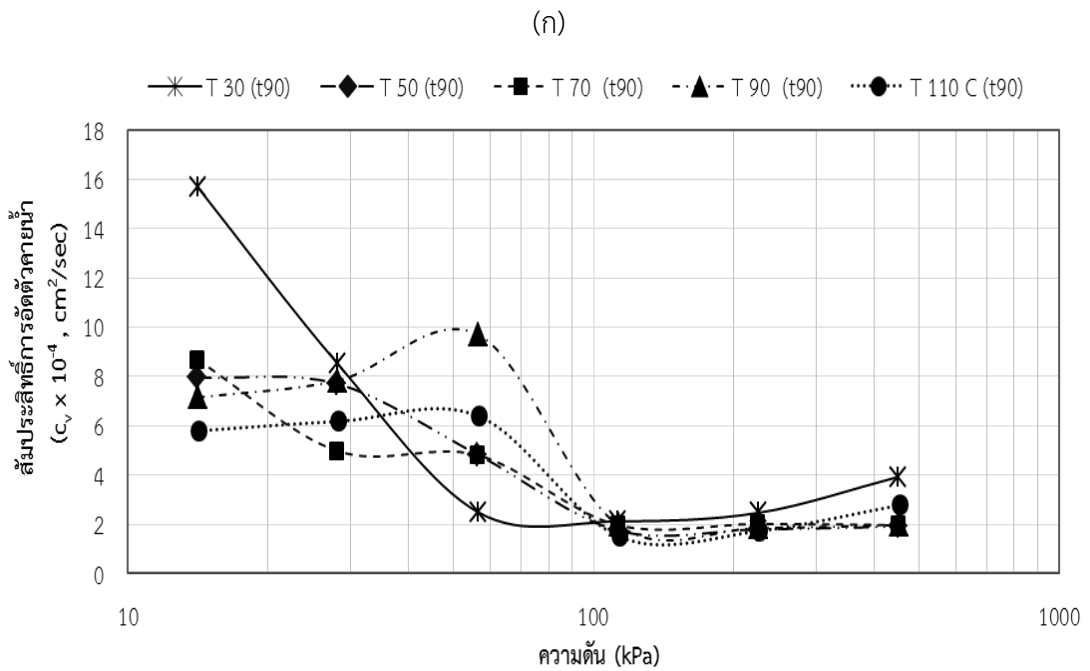
ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

คุณสมบัติวิศวกรรม	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	30 °C *	50 °C	70 °C	90 °C	110 °C
Compression index, C_c	1.210	0.830	0.707	0.837	0.858
Recompression index, C_r	0.299	0.218	0.219	0.254	0.254
C_r/C_c	0.247	0.263	0.310	0.303	0.296
Maximum past pressure, σ'_{pm} , kPa	47.00	51.938	45.725	50.385	54.569
OCR	0.931	1.10	0.93	1.11	1.18

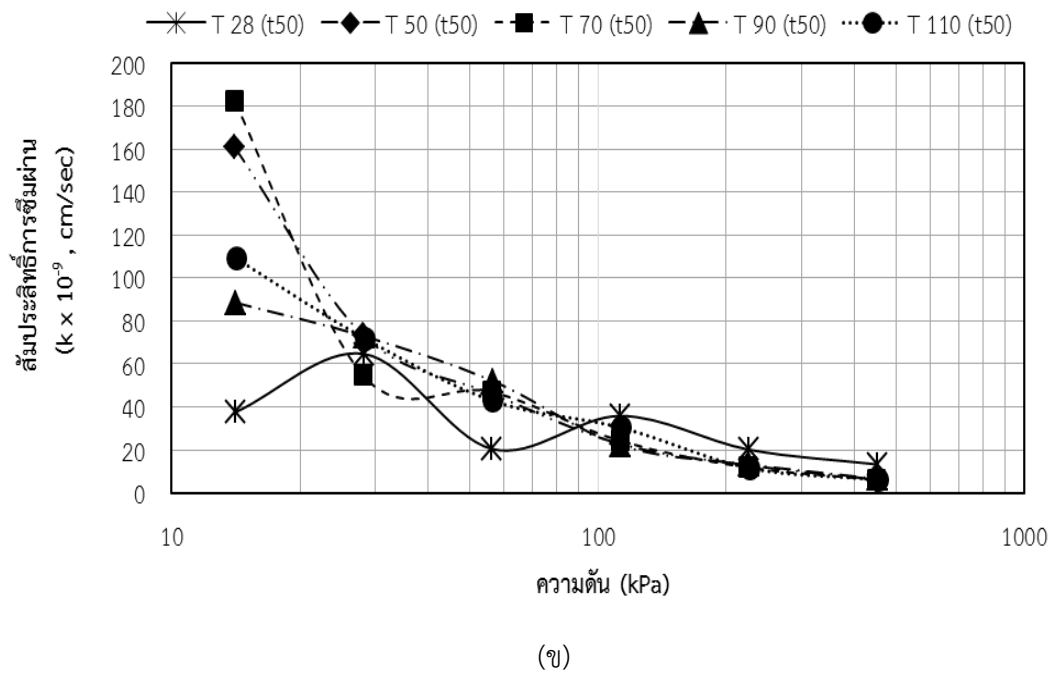
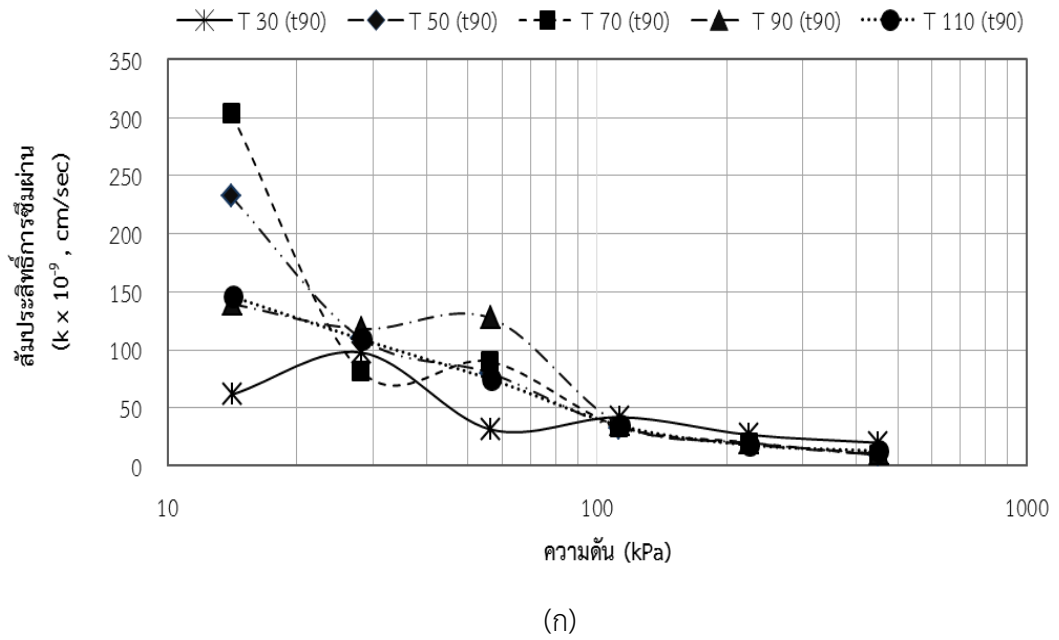
* คือ การทดสอบของศิริพร (2556) ที่ระดับความลึก 7.0 ถึง 7.5 เมตร



รูปที่ 4.10 เส้นโค้งการอัดตัวของตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำและความดัน
ที่ตัวอย่างดินอุณหภูมิต่างๆ (ก) square time (t90) (ข) log time (t50)



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและความดันที่ตัวอย่างดินอุณภูมิต่างๆ (ก) square time (t90) (ข) log time (t50)

4.2.2 ผลการทดสอบสามแกนภายใต้อุณหภูมิและอัตราความเครียดตามแนวแกน และ สภาวะอัดแน่นเกินตัว

จากการทดสอบสามแกนภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิและอัตราความเครียดดังแสดงใน ตารางที่ 3.1 เป็นจำนวน 32 ตัวอย่างตามข้อมูลการทดสอบในภาคผนวก ค มาเปรียบเทียบกับผลการ ทดสอบแรงอัดสามแกนของดินเหนียวปากพั้งที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิสูงในเงื่อนไขการให้ความ ร้อนแบบระบายน้ำ และนำมาแปลผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดิน เหนียวปากพั้งสามารถรับแรงได้น้อยลง ซึ่งได้ผลในทางตรงกันข้ามกับผลการศึกษาของวัชระ (2560) รวมทั้งการศึกษาดินเหนียวกรุงเทพฯของ Abuel-Naga, et al. (2006) และ Trani, et al. (2008)

ตารางที่ 4.5 ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด

อัตรา ความเครียด	อุณหภูมิ, °C	ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทานอร์เมลไรซ์			
		OCR=1	OCR=2	OCR=4	OCR=8
0.02%ต่อนาที	อุณหภูมิห้อง (~30)	0.358	0.695	0.846	1.381
	45 (DH)	0.431	0.751	0.922	1.452
	60 (DH)	0.464	0.788	1.200	1.680
	45 (UH)	0.246	0.627	0.513	1.046
	60 (UH)	0.195	0.537	0.592	0.687
0.075%ต่อนาที	อุณหภูมิห้อง (~30)	0.425	0.761	1.056	1.541
	45 (DH)	0.473	0.816	1.086	1.637
	60 (DH)	0.491	0.901	1.257	1.946
	45 (UH)	0.335	0.634	0.645	0.930
	60 (UH)	0.229	0.546	0.446	1.031
1.0%ต่อนาที	อุณหภูมิห้อง (~30)	0.452	0.854	1.297	1.846
	45 (DH)	0.488	0.888	1.353	1.952
	60 (DH)	0.508	0.982	1.411	2.181
	45 (UH)	0.409	0.698	0.999	1.198
	60 (UH)	0.325	0.559	0.627	0.982
6.0%ต่อนาที	อุณหภูมิห้อง (~30)	0.523	0.960	1.535	2.223
	45 (DH)	0.528	0.992	1.513	2.175
	60 (DH)	0.538	1.018	1.566	2.484
	45 (UH)	0.420	0.767	1.309	1.557
	60 (UH)	0.386	0.658	0.902	1.194

หมายเหตุ: DH คือ การทดสอบที่ให้ความร้อนแบบระบายน้ำทดสอบโดยวัชระ (2560) UH คือ การ ทดสอบที่ให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำในการศึกษานี้

4.2.2.1 ผลกระทบของอัตราความเครียดที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวปากพั้ง

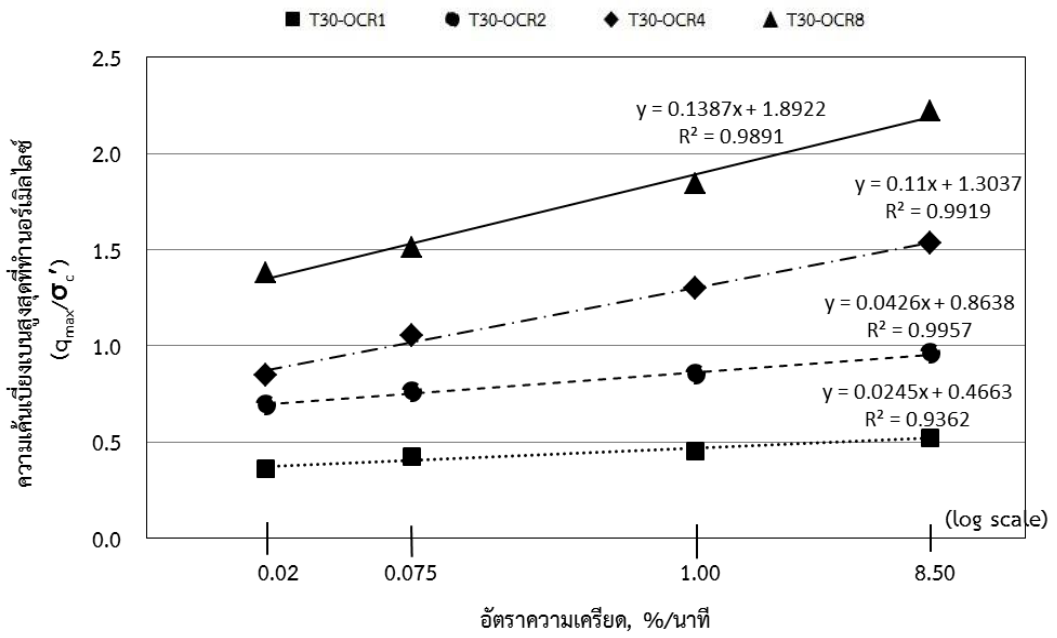
เมื่อทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำ และเงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ ที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียสในเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเครียดที่แตกต่างกัน 0.02% 0.075% 1.0% และ 6.0% ต่อหน้าที่ พบว่าเมื่อทำการเงื่อนไขด้วยอัตราความเครียดที่สูงขึ้น ผลการทดสอบให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำการนอร์มัลไลซ์ มีค่าสูงขึ้นในทุกค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวและอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ก) 4.13 (ข) และ 4.13 (ค) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการศึกษาของ Quinn (2013) พบว่าการเงื่อนไขอัตราความเครียดเร็วที่มากกว่า 5% ต่อหน้าที่ ก้อนตัวอย่างดินจะมีพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำโดยสมบูรณ์ (fully undrained) ซึ่งจะตรงกับกรทดสอบที่ใช้อัตราความเครียดประมาณ 1.0% ต่อหน้าที่ และ 6.0% ต่อหน้าที่ของการศึกษานี้ โดยอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น ยกเว้นที่อัตราการเงื่อนไข (0.02% ต่อหน้าที่) ที่ได้ผลการทดสอบแตกต่างออกไปจากการศึกษาของ Quinn (2013) ซึ่งพบว่าที่อัตราความเครียดต่ำกว่า 5% ต่อหน้าที่ ให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้น ดังในรูปที่ 2.42 ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าผลกระทบของอัตราความเครียดที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวปากพั้งมีปัจจัยของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดกับค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด พบว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำการนอร์มัลไลซ์แปรผันตรงกับลอการิทึมของอัตราความเครียดแบบเส้นตรง (linear) ในช่วงอัตราความเครียด 0.02 ถึง 6.0% ต่อหน้าที่ ค่าความชันของเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับอัตราความเครียด ที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.6 สามารถสังเกตได้ว่าค่าความชันของเส้นแนวโน้มค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำนอร์มัลไลซ์กับอัตราความเครียดจะเพิ่มขึ้น ที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวสูงขึ้น หมายความว่าผลกระทบของอัตราความเครียดส่งผลต่อดินที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวมากกว่าปกติสูงกว่าที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวปกติ แต่ที่อุณหภูมิสูง ค่าความชันของเส้นแนวโน้มจะมีค่าลดลง ทำให้เห็นผลกระทบของอัตราความเครียดได้น้อยลง ในทุกๆอัตราการอัดแน่นเกินตัว

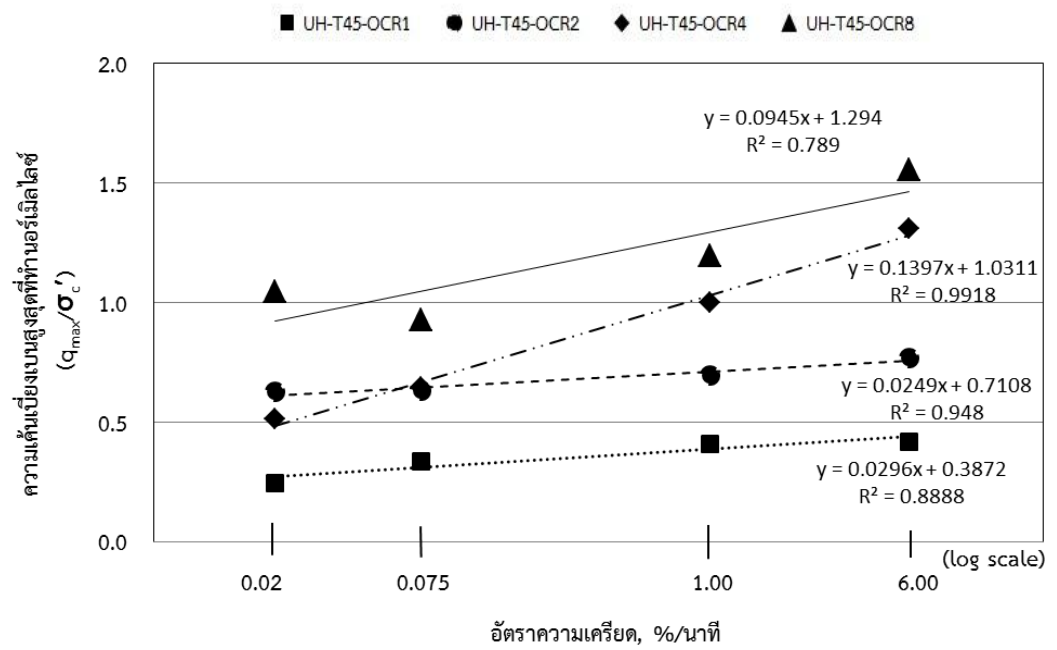
ตารางที่ 4.6 ความชันของเส้นแนวโน้มเชิงเส้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับอัตราความเครียด

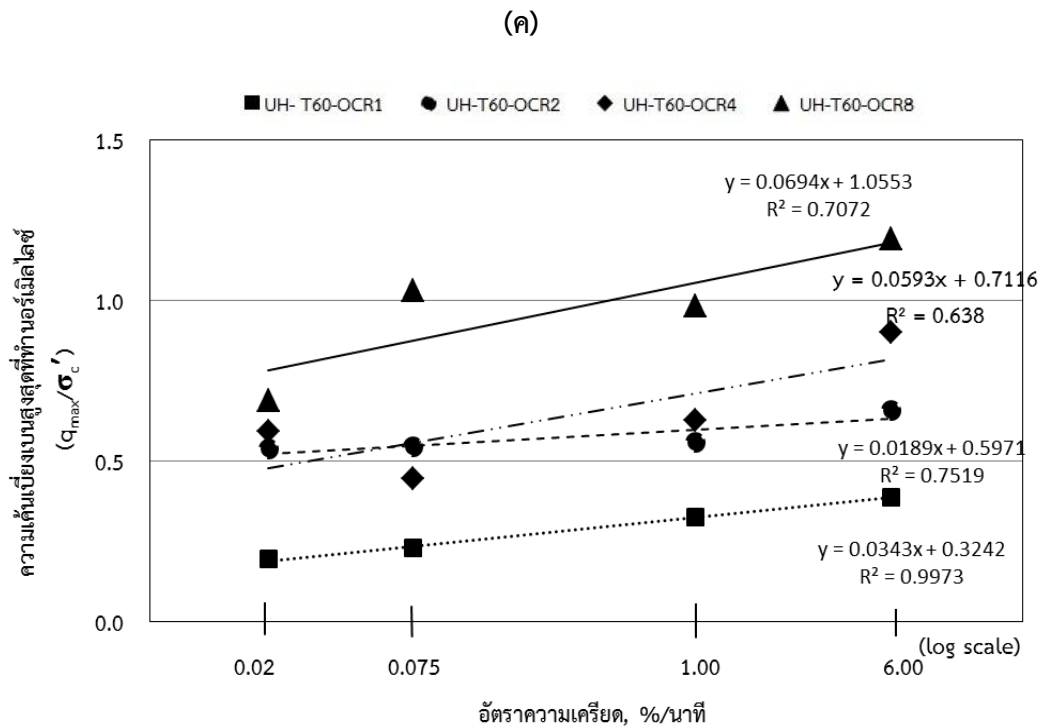
อุณหภูมิ	ความชันของเส้นแนวโน้ม			
	OCR = 1	OCR = 2	OCR = 4	OCR = 8
อุณหภูมิห้อง	0.0245	0.0426	0.110	0.1387
45°C	0.0296	0.0249	0.1397	0.0945
60°C	0.0343	0.0189	0.0593	0.0694

(ก)



(ข)





รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำนอร์เมลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวต่างๆ (ก) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส วาดใหม่จากศิริพร (2556)
(ข) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

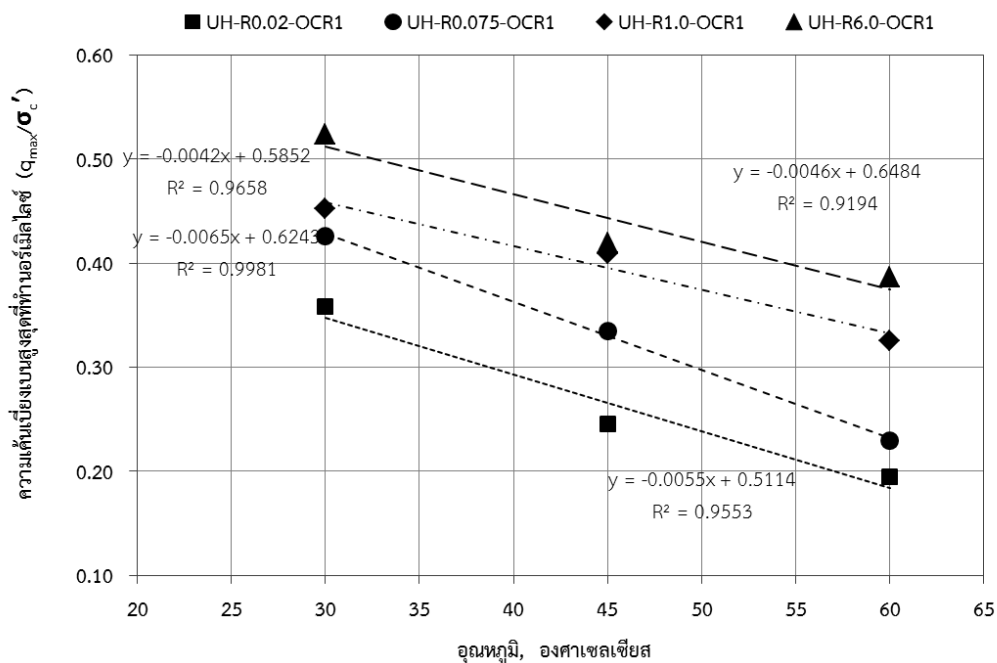
4.2.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราความเครียดในการเฉือนของดินเหนียวปากพั้ง

เมื่อนำค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำนอร์เมลไลซ์ด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนการให้ความร้อนมาสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิต่างกันในแต่ละอัตราความเครียดของแต่ละค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวได้ดังรูปที่ 4.14 ถึง 4.17 จะเห็นได้ว่าในทุกอัตราการอัดแน่นเกินตัว ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำนอร์เมลไลซ์ด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลแปรผกผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำนอร์เมลไลซ์ด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลลดลง

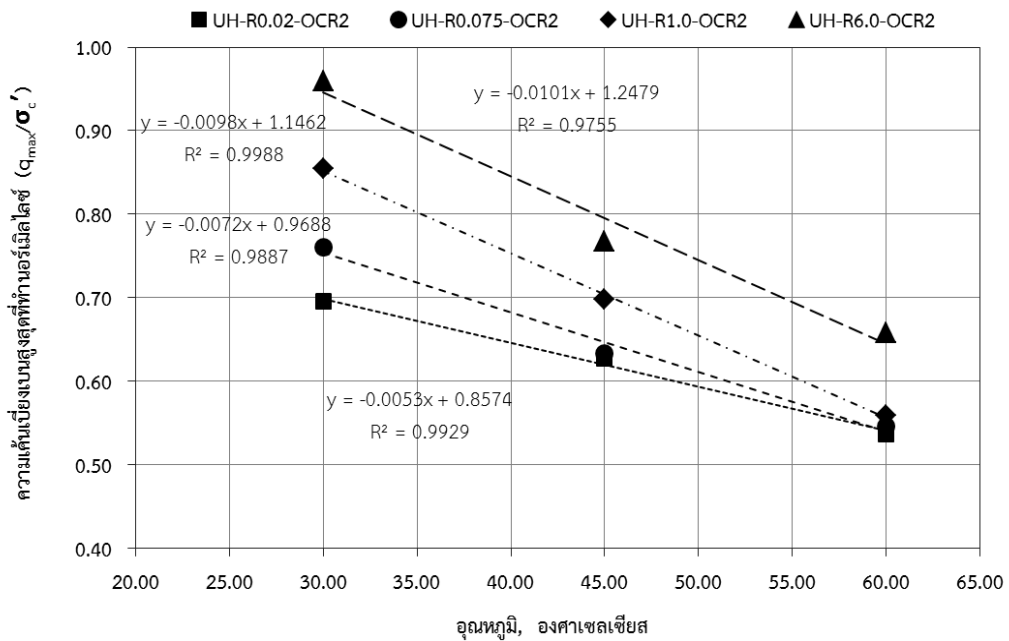
จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าในดินที่สภาวะอัตราการอัดแน่นเกินตัวปกติ ให้ค่าความชันของเส้นแนวโน้มกราฟของการทดสอบที่อัตราความเครียดต่ำจะมีค่าสูงกว่าที่อัตราความเครียดสูง ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ส่วนในดินที่สภาวะอัตราการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 พบว่าความชันของเส้นแนวโน้มกราฟของการทดสอบที่อัตราความเครียดสูงจะมีความชันสูงกว่าที่อัตราความเครียดต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งแนวโน้มมีความคล้ายคลึงกันกับดินที่สภาวะอัตราการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4 และ 8 ยกเว้นการทดสอบของตัวอย่างดินที่สภาวะอัตราการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4 อัตราความเครียด 0.02%ต่อนาทึ ที่อุณหภูมิ 60 °C ให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงกว่าที่ควรจะเป็น ทำให้แนวโน้มกราฟไม่ดีเท่าที่ควร ดังแสดงในรูป 4.16 เนื่องมาจากปัจจัยของตัวอย่างดินตามธรรมชาติ ซึ่ง

มีความแปรปรวนสูง อันไม่สามารถควบคุมได้ เช่นเดียวกันกับการทดสอบของตัวอย่างดินที่สภาวะ อัตราการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 8 อัตราความเครียด 0.075 % ต่อหน้าที่ ที่อุณหภูมิ 60 °C ดังรูปที่ 4.17 ทั้งนี้กล่าวได้ว่าที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวปกติ ผลกระทบของอุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตรา ความเครียดในระดับต่ำมากกว่าอัตราความเครียดในระดับสูง แต่ในอัตราการอัดแน่นเกินตัวมากกว่า ปกติ ผลกระทบของอุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราความเครียดในระดับสูงมากกว่าอัตราความเครียดใน ระดับต่ำ

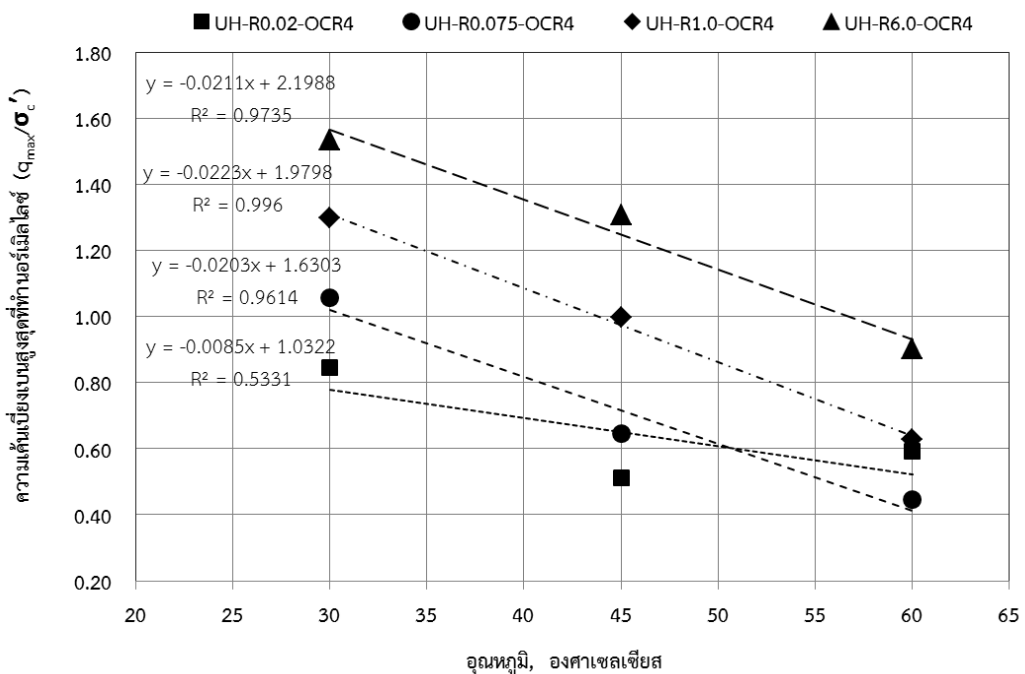
ในดินสภาวะอัตราการอัดแน่นเกินตัวปกติ ผลกระทบของอุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตรา ความเครียดในระดับต่ำหรือการเฉือนช้า (0.02 และ 0.075% มม.ต่อหน้าที่) มากกว่าอัตราความเครียด ในระดับสูงหรือการเฉือนเร็ว ซึ่งตรงกับผลของการศึกษาของศิริพร ชีวะกุล (2556) ได้เสนออัตรา ความเครียดที่ใช้ในการศึกษาไว้ดังรูปที่ 4.18 พบว่าผลของอัตราความเครียดที่ได้จากการทดสอบการ อัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ และจากการทดสอบแรงอัดสามแกน ให้ค่าอยู่ภายในขอบล่างคือ 0.035 % มม.ต่อหน้าที่ และค่าขอบบนคือ 0.14 % มม.ต่อหน้าที่ ซึ่งบ่งบอกถึงการสิ้นสุดการทรุดตัวหลัก หมายความว่า การกระจายตัวของแรงดันน้ำในมวลดินมีความสม่ำเสมอ และการจัดเรียงตัวของ อนุภาคเม็ดดินเป็นไปอย่างสมบูรณ์ เสมือนดินมีพฤติกรรมแบบระบายน้ำ (fully drained) ในทาง กลับกันการเฉือนที่อัตราความเครียดในระดับสูงแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในมวลดินกระจายตัวอย่าง ไม่สม่ำเสมอ เป็นผลให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคเม็ดดินเป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์ ดินจึงมีพฤติกรรม แบบไม่ระบายน้ำ (fully undrained)



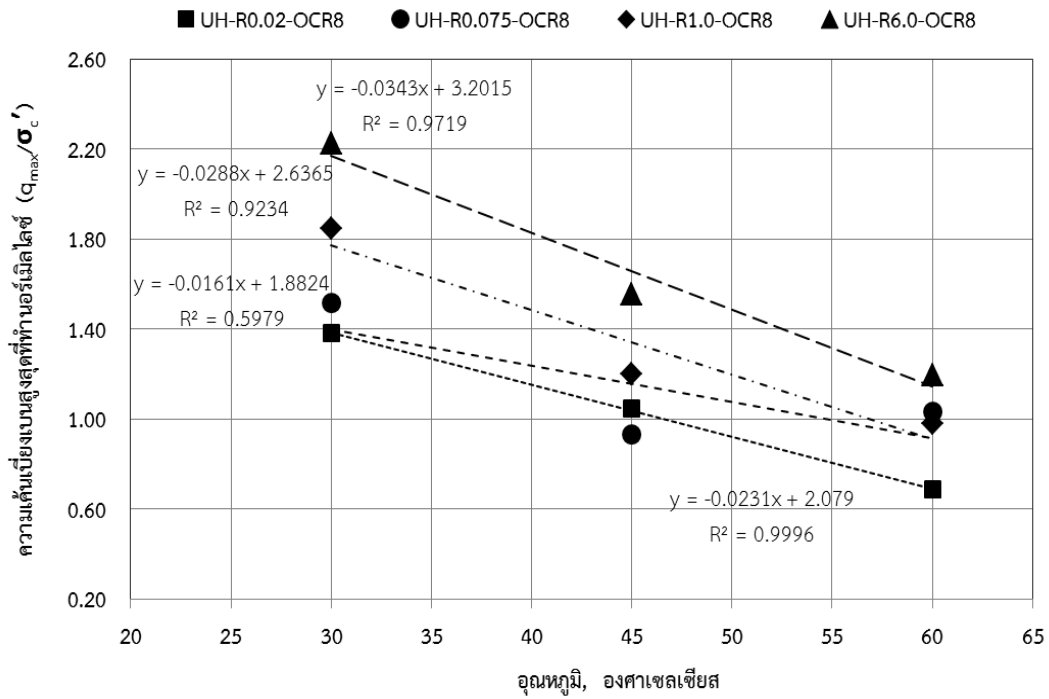
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำนอร์มัลไลซ์ด้วยค่าความเค้น ประสิทธิผลก่อนเฉือนตัวอย่างกับอุณหภูมิ ที่ OCR=1



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำงานอร์เมิลไลซ์ด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนฉีกรวมตัวอย่างกับอุณหภูมิ ที่ OCR=2



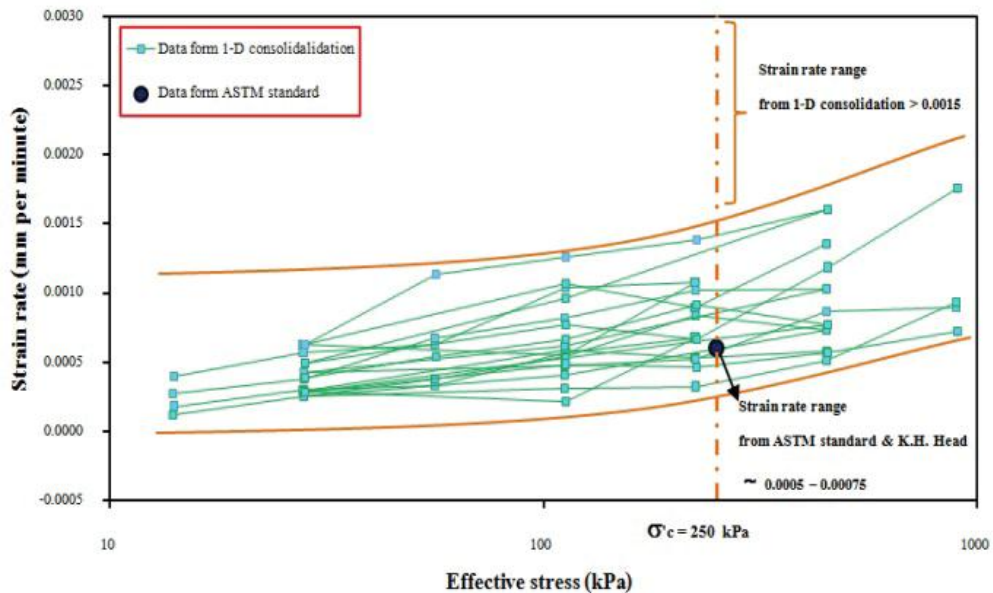
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำงานอร์เมิลไลซ์ด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนฉีกรวมตัวอย่างกับอุณหภูมิ ที่ OCR=4



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำงานอร์เมิลไลซ์ด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนเงื่อนไขตัวอย่างกับอุณหภูมิ ที่ OCR=8

ตารางที่ 4.7 ความชันของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับอุณหภูมิ

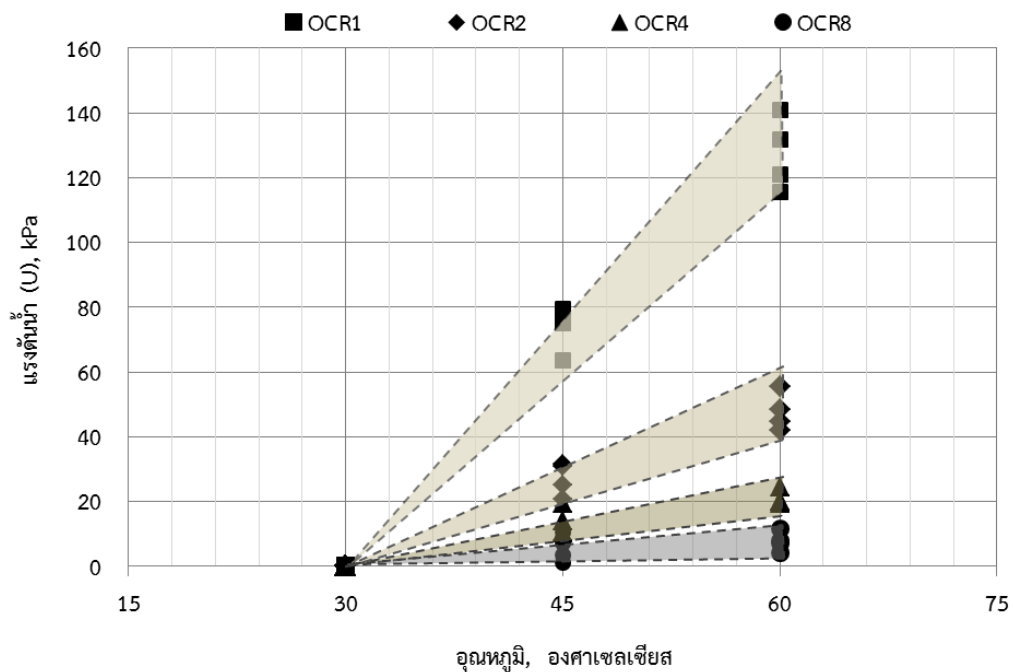
อัตรา (%ต่อนาที)	ความชัน			
	OCR=1	OCR=2	OCR=4	OCR=8
0.02	0.0055	0.0053	0.0085	0.0231
0.075	0.0065	0.0072	0.0203	0.0161
1.00	0.0042	0.0098	0.0223	0.0288
6.00	0.0046	0.0101	0.0211	0.0343



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบอัตราความเครียดที่ความเค้นประสิทธิผลใดๆ ที่ได้จากทดสอบอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ (ศิริพร 2556)

4.2.2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมรับแรงของดินเหนียวปากพั่ง

เมื่อทำการทดสอบแรงอัดสามแกนภายใต้อุณหภูมิที่กำหนดตามแผนการทดสอบในตารางที่ 3.3 หลังจากกระบวนการให้ความร้อนในเงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ คงไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง เมื่อมวลดินได้รับความร้อน จะส่งผ่านและแผ่กระจายความร้อนไปทั่วตัวอย่างดิน ทำให้ปริมาตรของน้ำในมวลดินขยายตัว และความหนืดของน้ำลดลง จึงเป็นผลให้เกิดแรงดันน้ำเพิ่มขึ้น ประกอบกับความร้อนส่งผลต่อปริมาณอินทรีย์วัตถุในมวลดิน ทำให้อินทรีย์วัตถุในมวลดินลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงเป็นผลให้การดูดซับน้ำโดยอินทรีย์วัตถุลดลง ส่งผลให้น้ำไหลออกอย่างอิสระ และเนื่องจากได้ทำการปิดวาล์วระบายน้ำ จึงทำให้แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นนี้สะสมและกระจายตัวอยู่ทั่วมวลดิน โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นสูงกว่าที่ 45 องศาเซลเซียส และที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวปกติแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มสูงที่สุด รองลงมาเป็นที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2, 4 และ 8 ตามลำดับ เนื่องจากดินเหนียวที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวมากกว่าปกติมีการจัดเรียงโครงสร้างดินที่แข็งแรงกว่าดินเหนียวที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวปกติ ทั้งนี้ที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในมวลดินแต่ละตัวอย่างจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ดังจะเห็นได้จากช่วงข้อมูลที่แรงตามรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยของตัวอย่างดินธรรมชาติที่ไม่สามารถควบคุมได้



รูปที่ 4.19 ผลของแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการให้ความร้อน

ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมรับแรงของดินเหนียวปากพั้ง โดยแบ่งตามอัตราการอัดแน่นเกินตัว ดังต่อไปนี้

1) กรณีค่าอัตราความเครียด 0.02% ต่อนาที

ผลการทดสอบกรณีค่าอัตราความเครียด 0.02% มม. ต่อ นาที พบว่าอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมรับแรงของดินเหนียวปากพั้ง โดยค่าความเค้นเบี่ยงเบนของดินลดลงเมื่อดินเหนียวปากพั้งได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น และเมื่อนำเปรียบเทียบกับตัวอย่างดินทดสอบที่อุณหภูมิห้องพบว่า ดินที่ทดสอบที่อุณหภูมิห้องให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่สูงกว่าดินที่ได้รับอุณหภูมิสูงกว่า กล่าวคือดินที่ทดสอบที่อุณหภูมิห้องมีค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่สูงที่สุด และลดลงในดินที่ทดสอบที่ 45 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดและอุณหภูมิ จะสังเกตได้ว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5% ของอัตราความเครียดตามแนวแกนจนกระทั่งตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ จากนั้นค่าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนเข้าใกล้ค่าคงที่ แต่ในตัวอย่างดินที่ให้อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.20 (ก-1) และ 4.21(ง-1) ส่วนที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวปกติ ในช่วง 1% ของอัตราความเครียดตามแนวแกน ลักษณะเส้นกราฟความเค้นเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจนค่อนข้างคงที่และค่อยๆ ลดลง เช่นเดียวกันในทุกๆ ค่าการอัดแน่นเกินตัว แต่ที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 ในรูป 4.20 (ข-1) จะสังเกตเห็นว่าตัวอย่างดินทดสอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แนวโน้มกราฟของค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำนอร์มัลไลซ์ สูงขึ้นเร็วและชันมากกว่าปกติ ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวอื่นๆ เนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของ

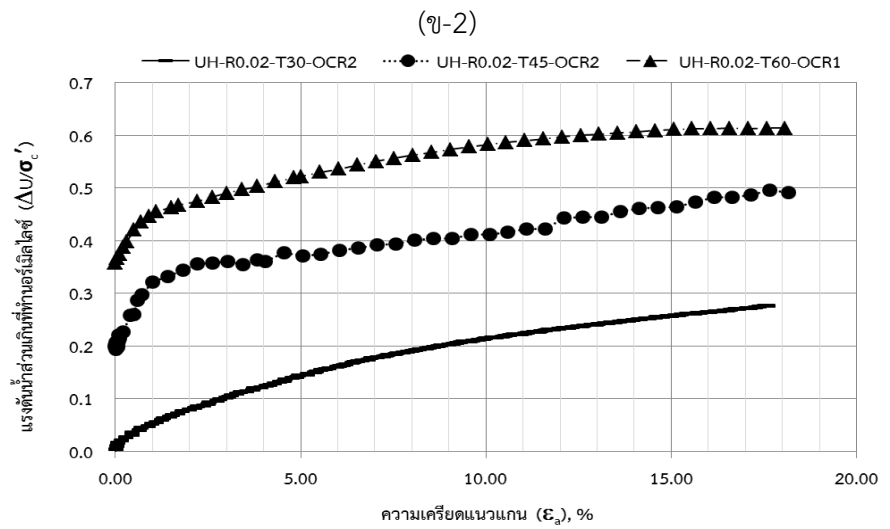
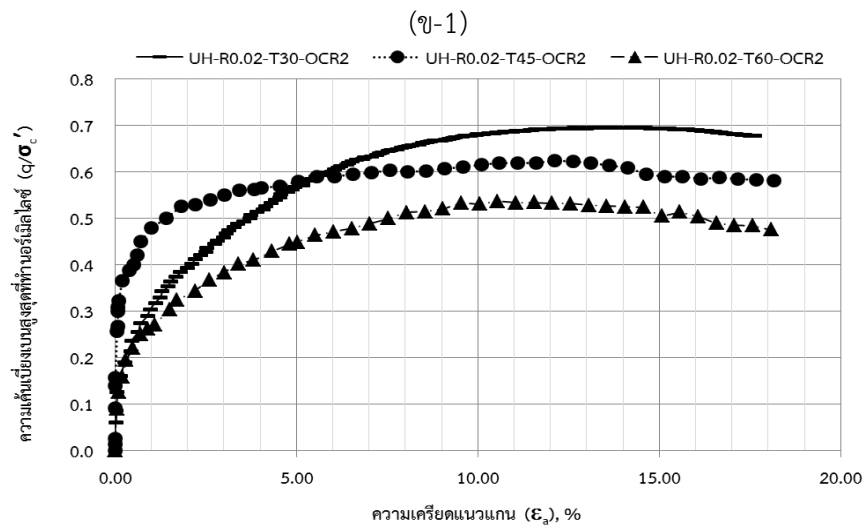
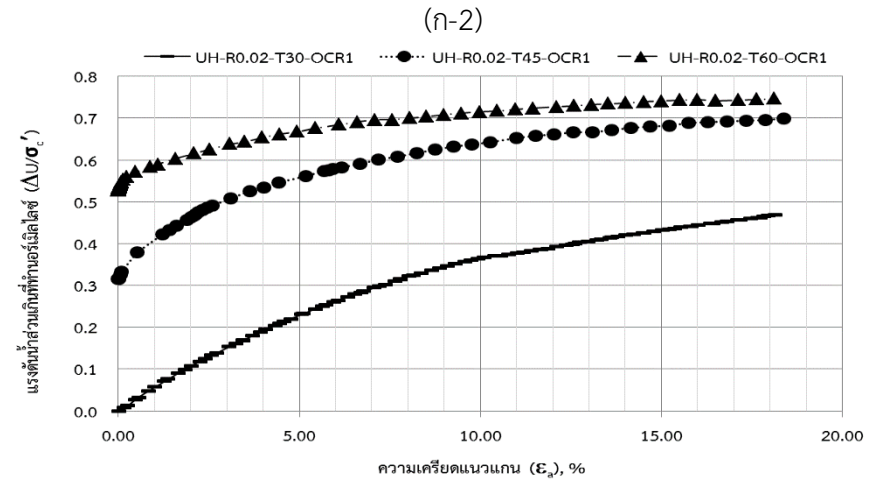
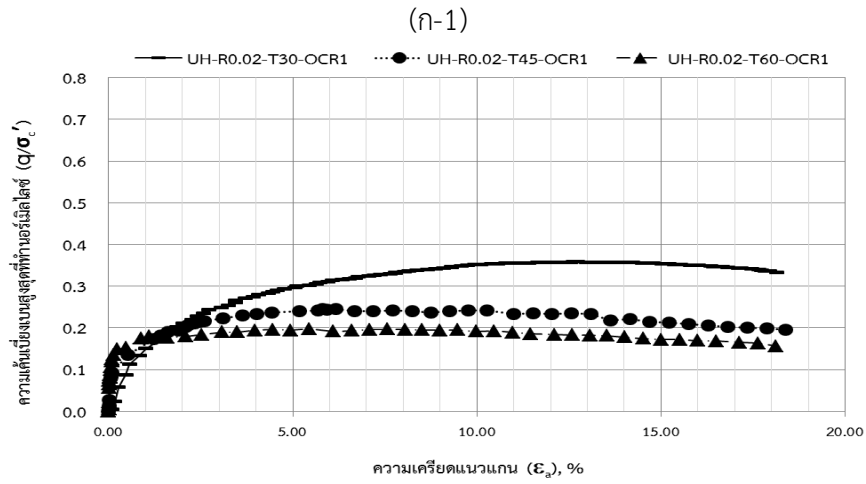
เครื่องมือในการกดตัวอย่างเป็ยงจากจุดศูนย์กลางเล็กน้อย ทำให้ตัวอย่างดินทรุดตัวเร็ว และถึงจุดวิบัติเร็วขึ้น สังเกตได้จากรูปตัวอย่างหลังทำการทดสอบในภาคผนวก ที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4 ในรูปที่ 4.20(ค-1) จะสังเกตเห็นว่าตัวอย่างดินทดสอบที่อุณหภูมิตั้งที่ 60 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มกราฟของค่าความเค้นเป็ยงเบนที่ทำนอร์มัลไลซ์สูงกว่าที่อุณหภูมิตั้งที่ 45 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากปัจจัยของดินธรรมชาติที่ไม่สามารถควบคุมได้

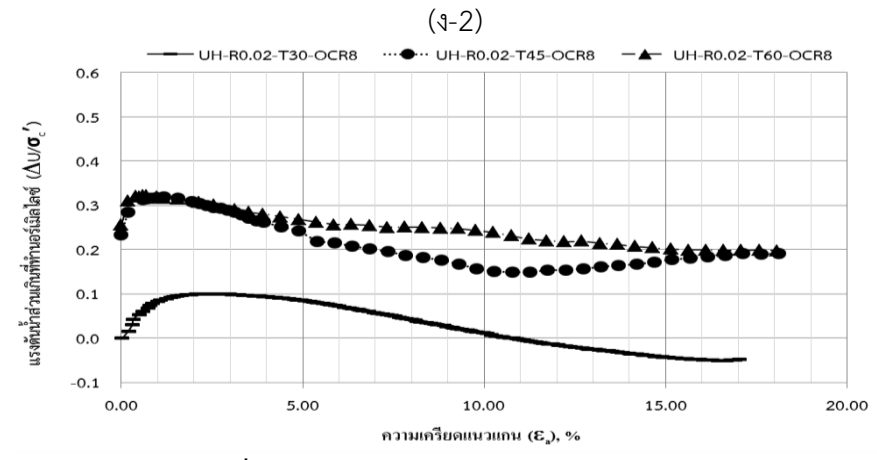
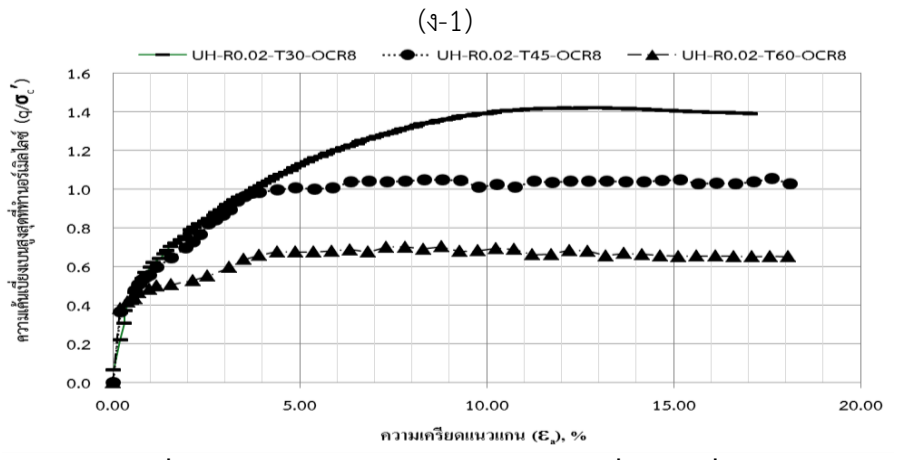
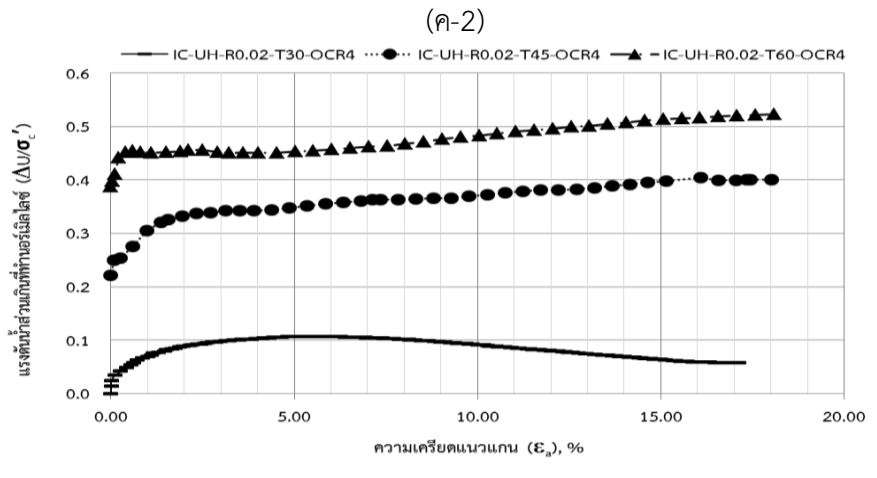
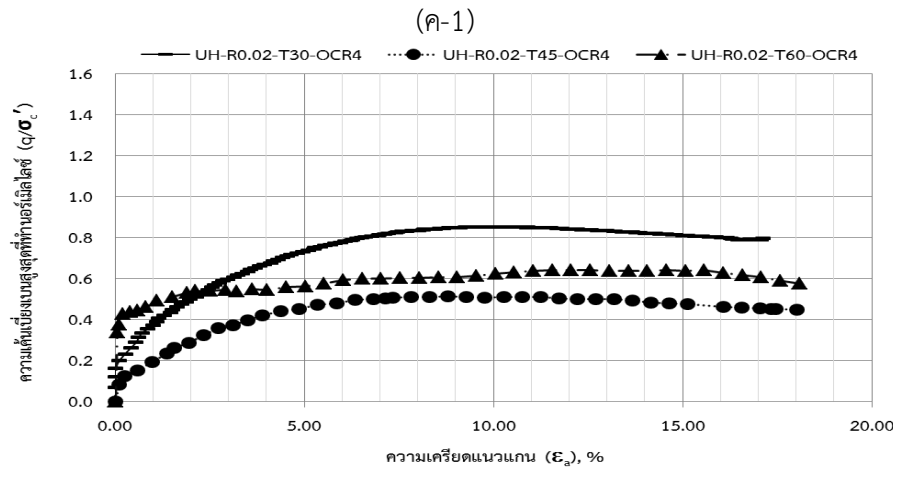
ผลของอุณหภูมิต่อแรงดันน้ำส่วนเกินของกรณีการทดสอบที่ค่าอัตราความเครียด 0.02% ต่อหน้าที่ พบว่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันอย่างชัดเจน ดังแสดงใน 4.20(ก-2), 4.20(ข-2), 4.20(ค-2) และ 4.20(ง-2) จะสังเกตเห็นได้ว่าผลจากการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในก้อนตัวอย่างดินเหนียว เนื่องจากการขยายตัวของมวลน้ำ ทำให้ความหนืดของน้ำลดลง ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.8.2 ทั้งนี้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดจากกระบวนการให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียสจะมีค่าสูงที่สุด และรองลงมาเป็น 45 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิตั้งตามลำดับ ทำให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเฉือนไม่ได้เริ่มจากศูนย์

ที่สภาวะอัดแน่นปกติค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของอัตราความเครียดแนวแกน หลังจากนั้นแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยไปจนหมดการทดสอบ เห็นได้ชัดว่า อุณหภูมิมีผลกระทบทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นมากระหว่างการทดสอบ โดยค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นของตัวอย่างดินที่ให้ความร้อนอุณหภูมิตั้งที่ 45 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งสภาวะอัดแน่นเกินตัวปกติ และสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 มีแนวโน้มกราฟเช่นนี้เกิดขึ้นในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน

ที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวสูง (OCR=4 และ OCR=8) ผลการทดสอบจากสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4 ที่อุณหภูมิตั้ง ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดแนวแกนเพิ่ม จากนั้นจะค่อย ๆ คงที่ และลดลงเล็กน้อย เนื่องจากความแข็งของดินที่เพิ่มขึ้น แต่ผลของตัวอย่างที่ทดสอบที่อุณหภูมิตั้งสูงจะมีค่าแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นในช่วงแรก จากนั้นค่อย ๆ คงที่ และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยมีแนวโน้มไม่ลดลงตลอดการทดสอบ ซึ่งแตกต่างกับผลการทดสอบที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 8 กล่าวคือ แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและค่อย ๆ ลดลงจนคงที่จนสิ้นสุดการทดสอบ ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกันทั้งการทดสอบที่อุณหภูมิตั้ง และที่อุณหภูมิตั้ง 45 และ 60 องศาเซลเซียส

จากพฤติกรรมแนวโน้มของการเกิดแรงดันน้ำในมวลดินดังที่กล่าวมาข้างต้นนี้ เนื่องมาจากเมื่อดินถูกแรงเฉือนภายนอกกระทำ จึงทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาของมวลดินที่ต้านทานต่อแรงเฉือนในระยะเวลายันสั้น คือ แรงดันน้ำโพรงส่วนเกิน (excess pore water pressure) ที่เกิดขึ้นระหว่างช่องว่างในมวลดิน และจากการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินที่ไม่สามารถระบายออกได้ จึงอยู่ในสภาพไม่ระบายน้ำ (undrained condition) มวลดินขณะถูกเฉือนจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงปริมาตร แต่แรงดันน้ำส่วนเกินเปลี่ยนแปลง นั่นคือ ดินสภาพอัดแน่นปกติ (NC) แรงดันน้ำส่วนเกินของดินสภาพอัดแน่นปกติจะมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเกือบคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะวิกฤต แต่ดินสภาพอัดแน่นกว่าปกติ (OC) แรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกและลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าติดลบ จากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะวิกฤต ดังแสดงในรูป 2.12



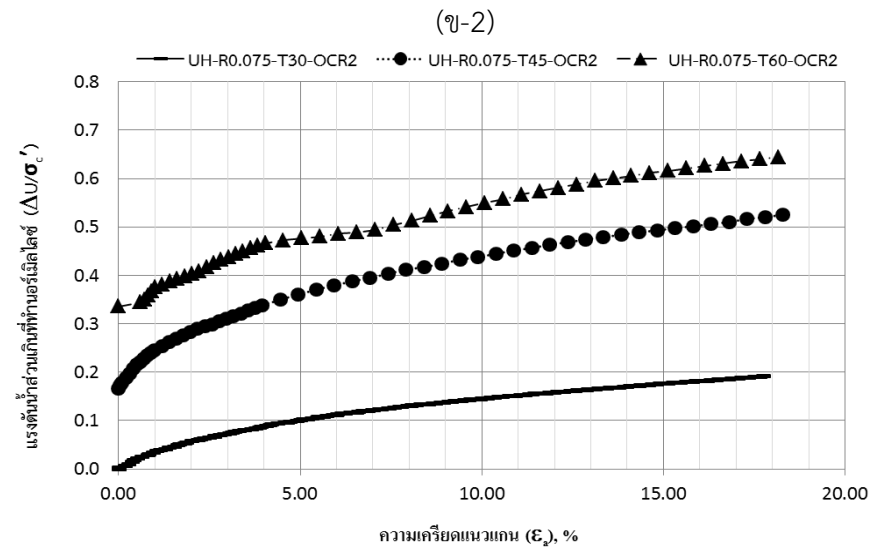
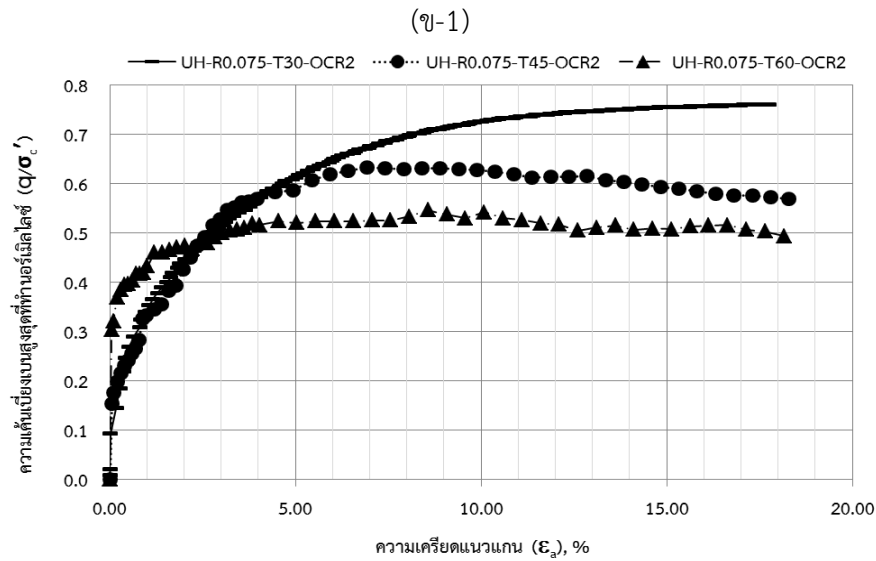
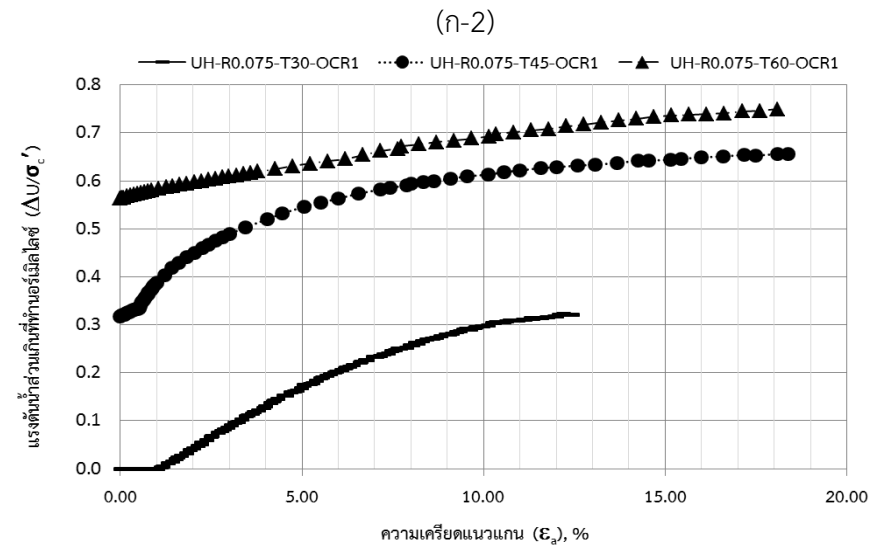
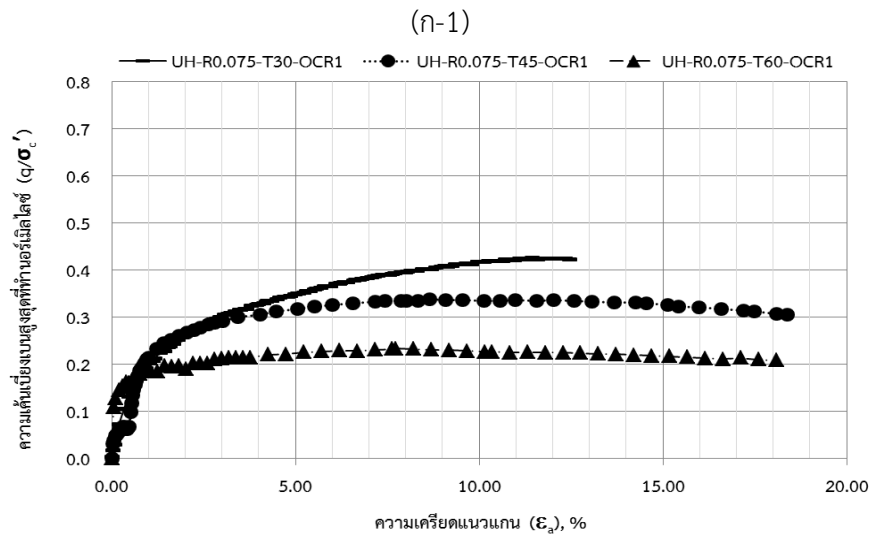


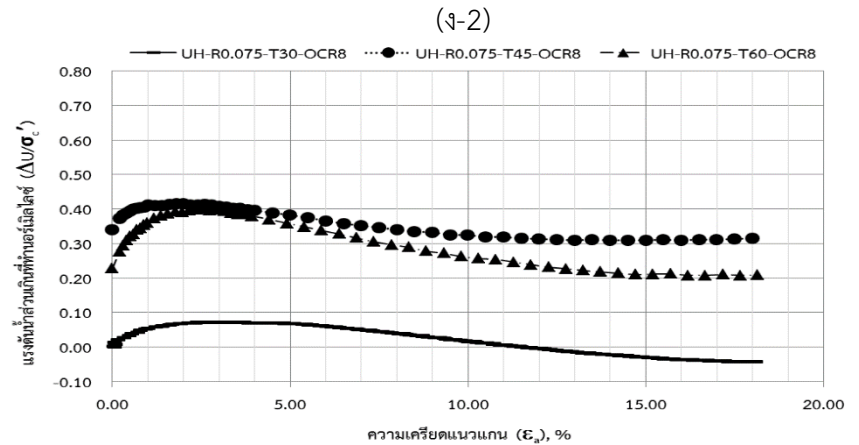
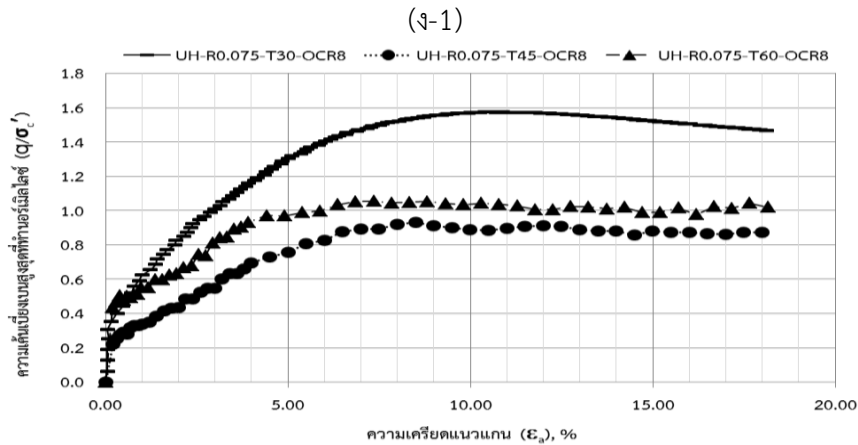
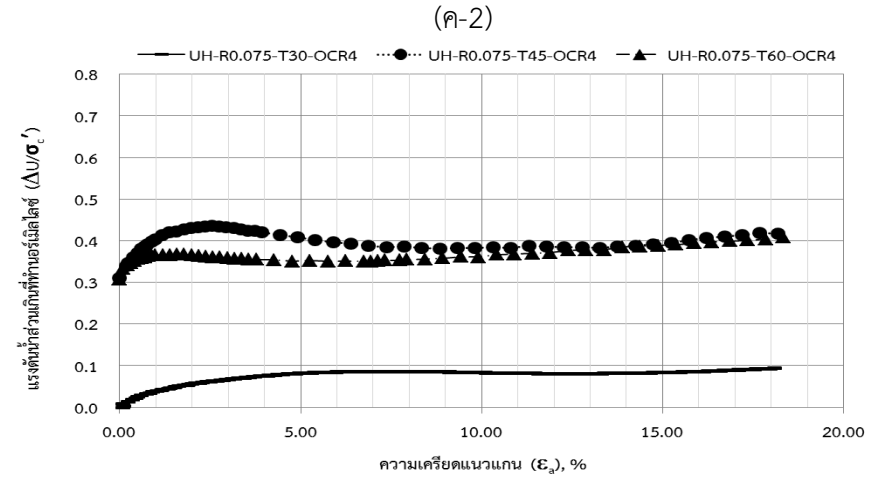
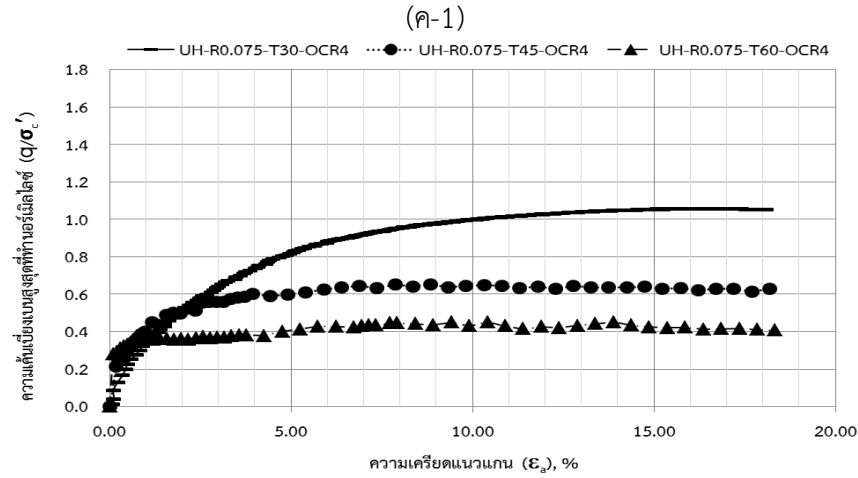
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉียงเบงที่ทำงานอร์เมิลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ก-1) (ข-1) (ค-1) (ง-1) และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราความเครียด (ก-2) (ข-2) (ค-2) (ง-2) ที่อัตราความเครียด 0.02% ต่อหน้าที่ (ก) OCR=1 (ข) OCR=2 (ค) OCR=4 (ง) OCR=8

2) กรณีค่าอัตราความเครียด 0.075% ต่อหน้าที่

เมื่อทำการทดสอบที่ค่าอัตราความเครียด 0.075% ต่อหน้าที่ พบว่าอุณหภูมิส่งผลต่อค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดมีค่าลดลง โดยค่าความเค้นเบี่ยงเบนของตัวอย่างดินจะลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยพบว่า ตัวอย่างดินทดสอบที่อุณหภูมิห้องมีค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่สูงกว่าดินที่ได้รับอุณหภูมิที่สูง จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดและอุณหภูมิ ค่าความเค้นเบี่ยงเบนของตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของอัตราความเครียดตามแนวแกนจนกระทั่งดินเกิดการวิบัติ จากนั้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะลดลงเล็กน้อยจนเกือบคงที่ แต่ตัวอย่างดินที่ได้รับอุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส แนวโน้มของเส้นกราฟความเค้นเบี่ยงเบนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเร็วกว่า จากนั้นค่าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนเกือบคงที่ และมีการลดลงเล็กน้อยหรือเกือบคงที่หลังจากเลยจุดวิบัติไปแล้ว ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันในทุก ๆ สภาวะการอัดแน่นเกินตัว ดังแสดงในรูป 4.22 ยกเว้นตัวอย่างที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 8 ในรูป 4.22(ง-1) ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าตัวอย่างดินทดสอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มกราฟของค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำนอร์มัลไลซ์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือในการกดตัวอย่างเบี่ยงจากจุดศูนย์กลางเล็กน้อย สังเกตได้จากรูปตัวอย่างหลังทำการทดสอบในภาคผนวก

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อแรงดันน้ำส่วนเกินของกรณีการทดสอบที่ค่าอัตราความเครียด 0.075 ต่อหน้าที่ พบว่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดินที่ได้รับอุณหภูมิทั้ง 45 และ 60 องศาเซลเซียส มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมาก เมื่อนำผลการทดสอบตัวอย่างดินที่อุณหภูมิห้องมาเปรียบเทียบกับ จะเห็นว่าลักษณะเส้นกราฟแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดินที่ได้ทดสอบที่อุณหภูมิห้องมีแนวโน้มใกล้เคียงกับลักษณะเส้นกราฟของตัวอย่างดินที่ได้รับอุณหภูมิทั้ง 45 และ 60 องศาเซลเซียส ในทุกๆ อัตราการอัดแน่นเกินตัว ตัวอย่างสภาวะอัดแน่นปกติดังรูปที่ 4.21 (ก) เห็นได้ว่าแรงดันน้ำส่วนเกินของตัวอย่างดินที่ได้รับอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องจะมีแรงดันน้ำส่วนเกินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของอัตราความเครียดแนวแกน หลังจากนั้นแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งผลที่ได้ใกล้เคียงกันในสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 ดังรูปที่ 4.21(ข) ส่วนในสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4 ดังรูปที่ 4.21 (ค) แรงดันน้ำส่วนเกินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของอัตราความเครียดแนวแกนมากกว่าตัวอย่างสภาวะอัดแน่นเกินตัวปกติและสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 ลักษณะของกราฟแรงดันน้ำส่วนเกินจนถึงจุดสูงสุด แล้วค่อยๆ ลดลงจนคงที่ ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้ ในสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 8 ดังรูปที่ 4.21(ง)



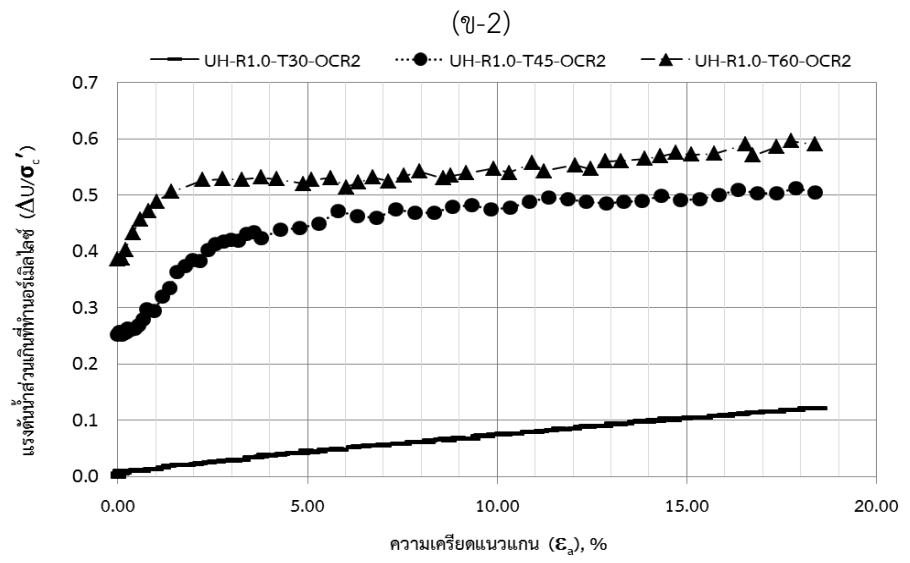
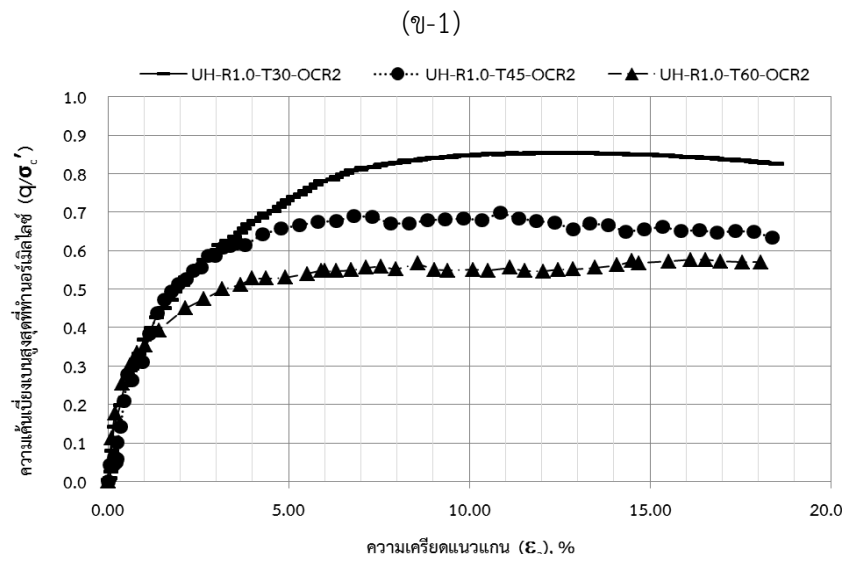
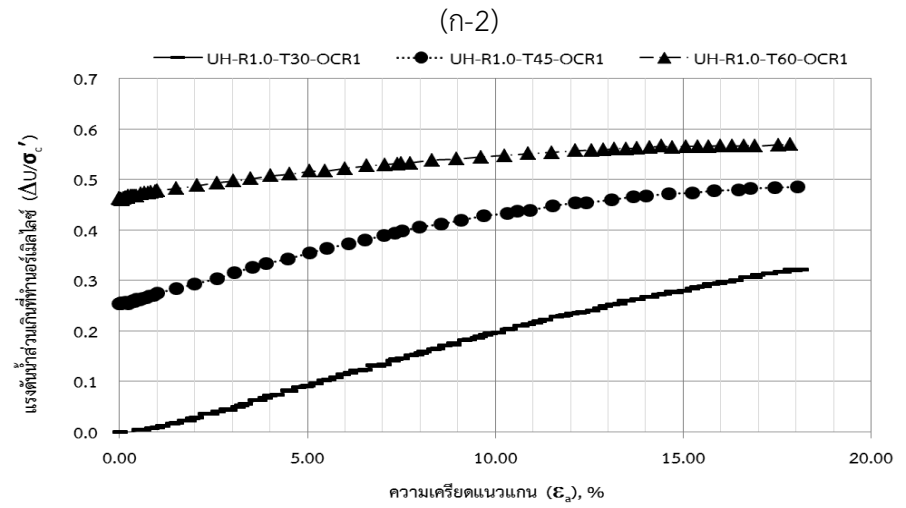
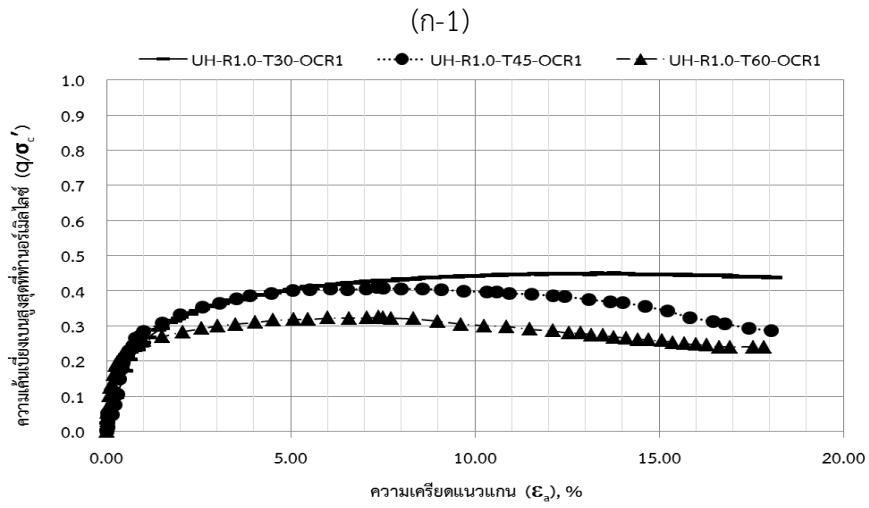


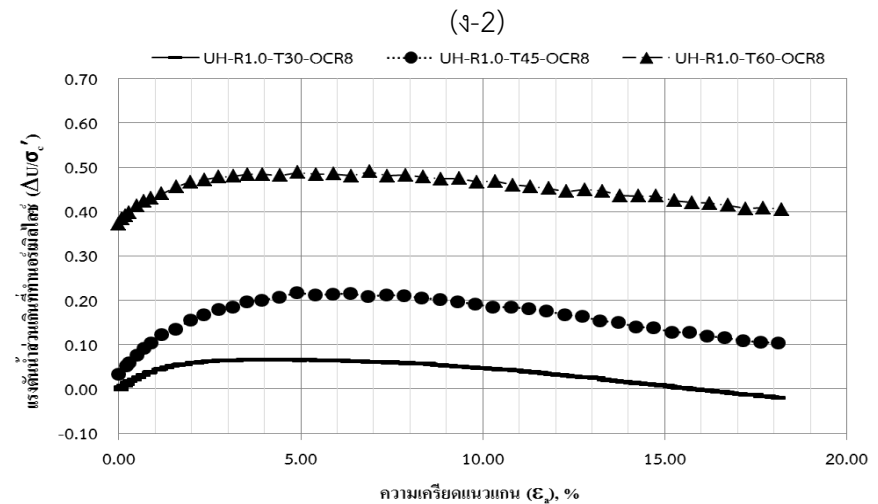
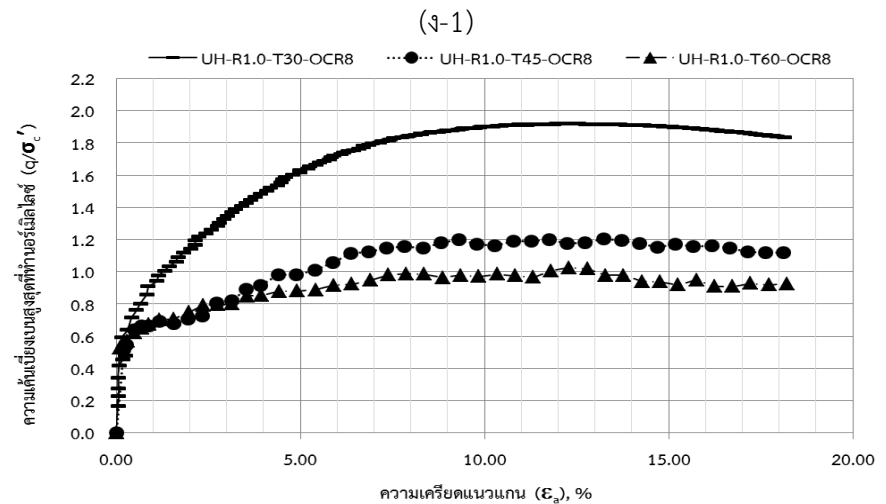
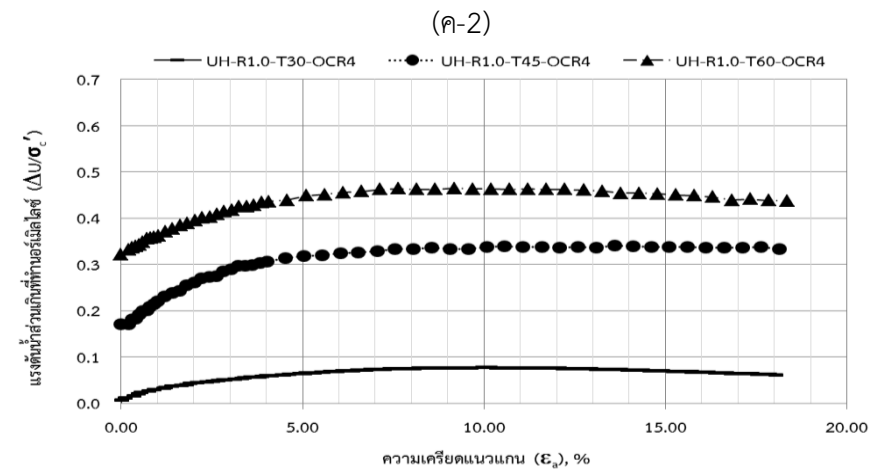
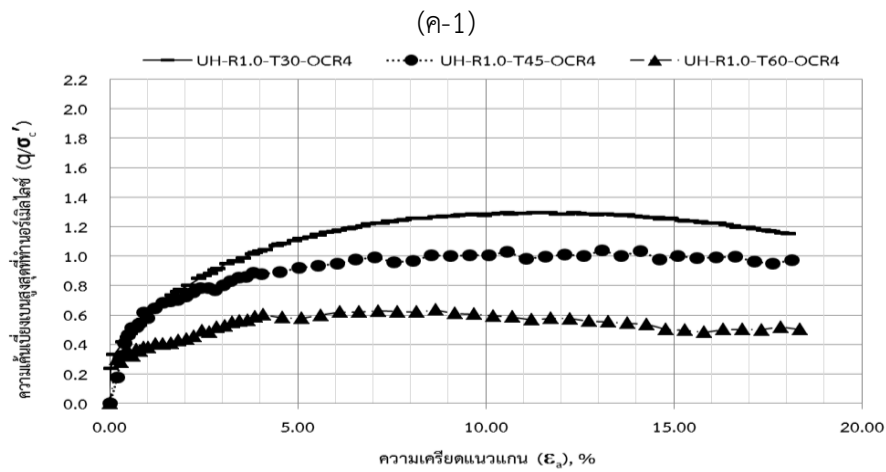
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำนอร์มัลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ก-1) (ข-1) (ค-1) (ง-1) และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราความเครียด (ก-2) (ข-2) (ค-2) (ง-2) ที่อัตราความเครียด 0.075% ต่อหน้าที่ (ก) OCR=1 (ข) OCR=2 (ค) OCR=4 (ง) OCR=8

3) กรณีค่าอัตราความเครียด 1.0% ต่อนาที

ผลของค่าความเค้นเบี่ยงเบนกรณีค่าอัตราความเครียด 1.0% ต่อนาที พบว่าอุณหภูมิมีผลกระทบให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนของดินเหนียวปากพวงมีค่าต่ำลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในทุกๆสภาวะการอัดแน่นเกินตัว ดังรูปที่ 4.22 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดและอุณหภูมิที่สภาวะอัดแน่นปกติ แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งตัวอย่างดินเกิดการวิบัติและค่าความเค้นเบี่ยงเบนมีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ในสภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 ดังรูปที่ 4.22 (ข) จะมีการลดลงของความเค้นเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยหรือค่อนข้างคงที่หลังจากถึงจุดวิบัติไปแล้ว ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันในสภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4 ดังรูปที่ 4.22 (ค) และสภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 8 ดังรูปที่ 4.22 (ง)

ผลของอุณหภูมิต่อแรงดันน้ำส่วนเกินของกรณีการทดสอบที่ค่าอัตราความเครียด 1.0% ต่อนาที พบว่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในตัวอย่างที่ได้รับอุณหภูมิสูงจะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ และมีแนวโน้มใกล้เคียงกันในทุกๆสภาวะการอัดแน่นเกินตัว กล่าวคือที่สภาวะอัดแน่นปกติ ลักษณะกราฟแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงการสิ้นสุดการทดสอบ แต่ในสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 การเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในช่วงแรกจะมีความรวดเร็ว จากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ ส่วนในสภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4 การเกิดแรงดันน้ำในช่วงแรกจะคล้ายคลึงกับสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 และลดลงเพียงเล็กน้อยในช่วงท้ายการทดสอบ ซึ่งคล้ายกับผลการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำของสภาวะเดียวกัน ในสภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 8 แรงดันน้ำในช่วงแรกจะเกิดขึ้นคล้ายกับสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 และ 4 จนถึงจุดสูงสุด และค่อยๆลดลงอย่างเห็นได้ชัด สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิที่สูงมีผลทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นมากระหว่างการทดสอบ และแรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มมากที่สุดที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวปกติและจะลดลงเมื่อสภาวะการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้น



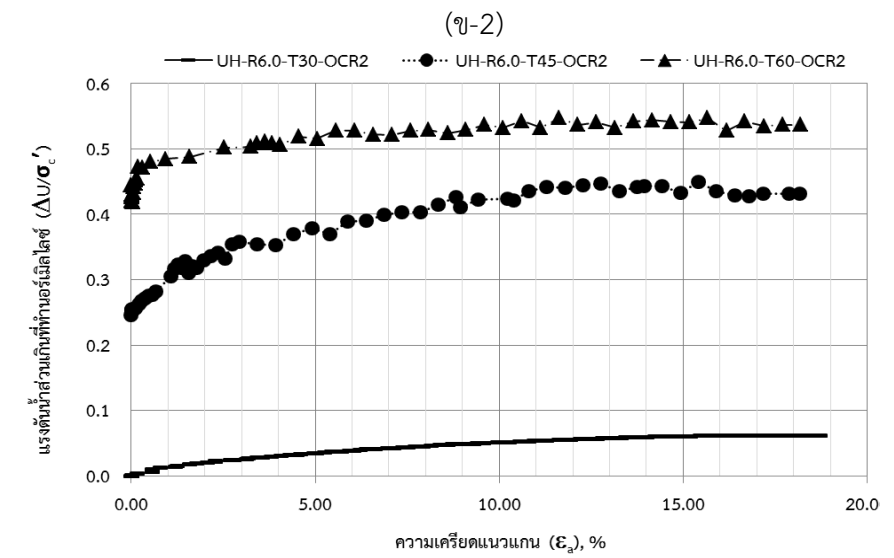
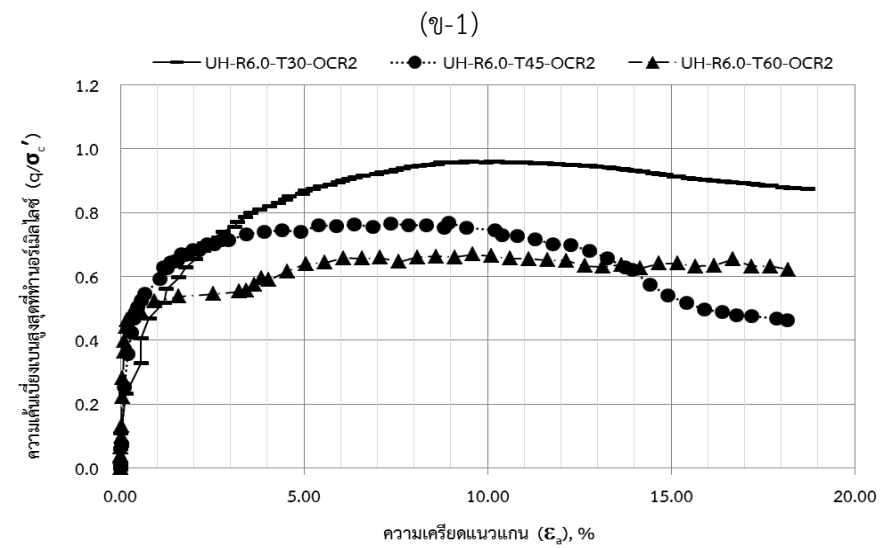
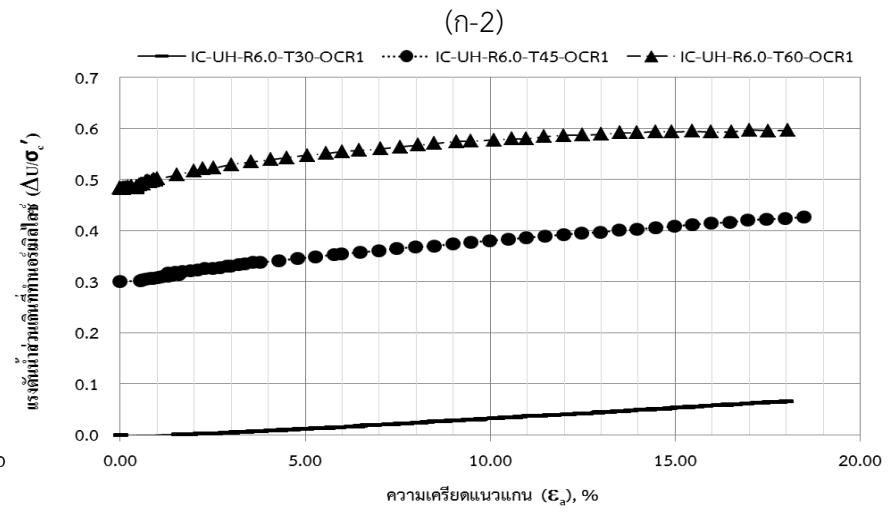
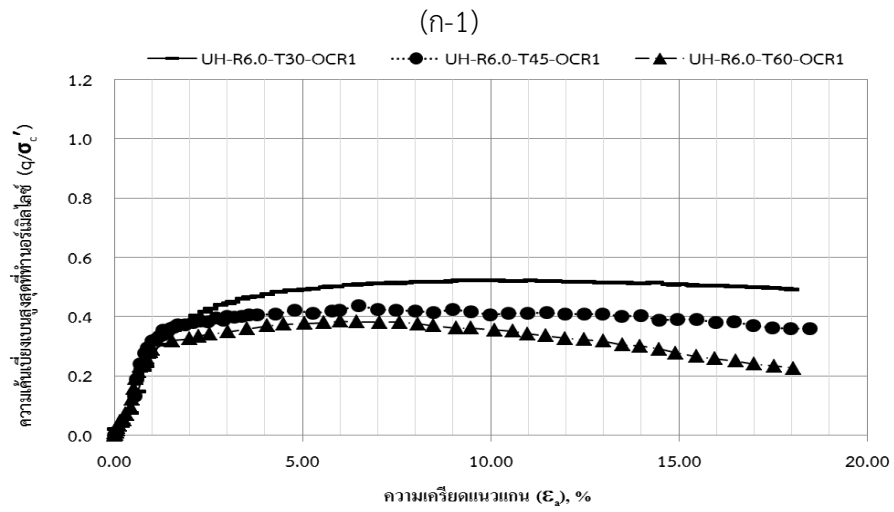


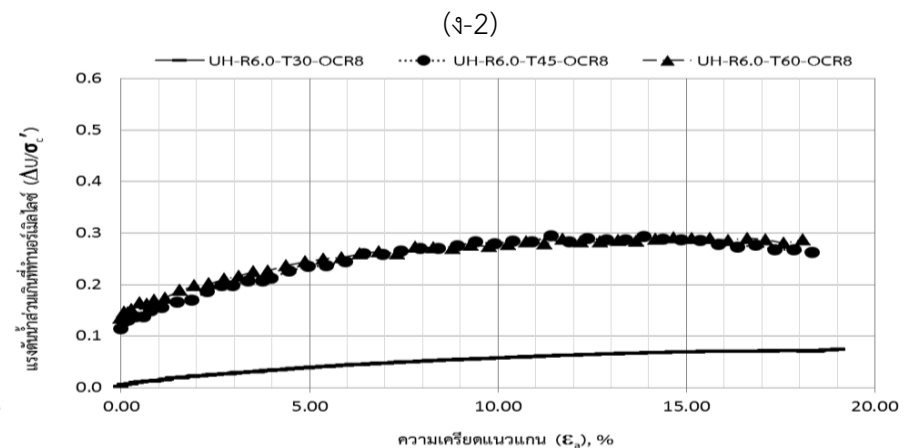
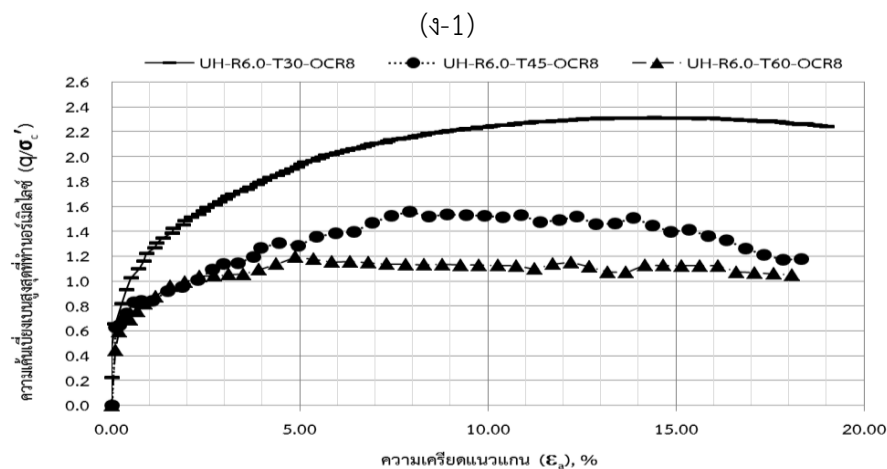
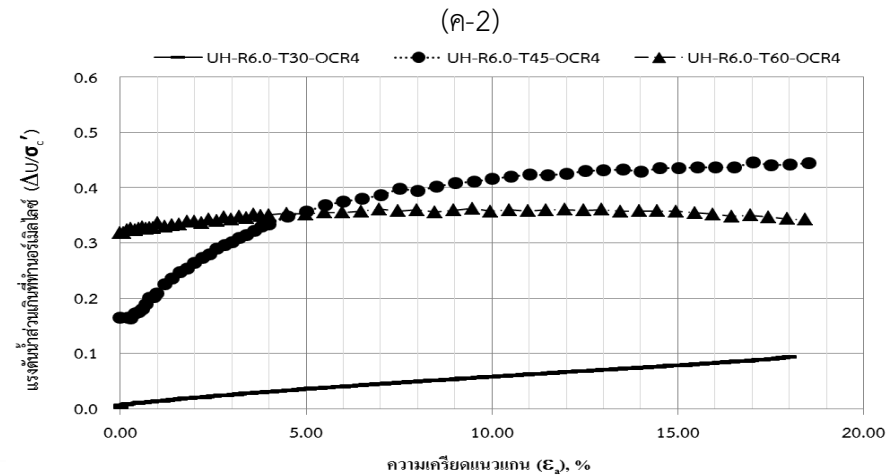
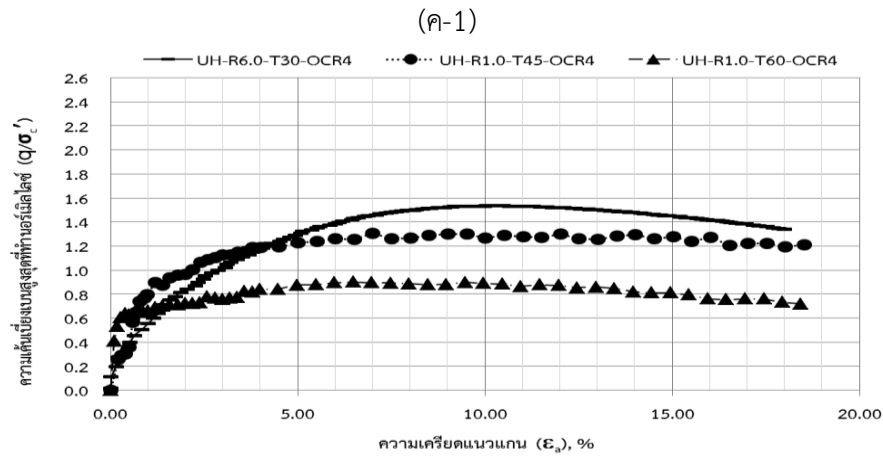
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำนอร์มัลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ก-1) (ข-1) (ค-1) (ง-1) และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราความเครียด (ก-2) (ข-2) (ค-2) (ง-2) ที่อัตราความเครียด 1.0% ต่อหน้าที่ (ก) OCR=1 (ข) OCR=2 (ค) OCR=4 (ง) OCR=8

4) กรณีค่าอัตราความเครียด 6.0% ต่อนาที

ผลของค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกรณีค่าอัตราความเครียด 6.0% ต่อนาที พบว่า อุณหภูมิยังมีผลกระทบต่อพฤติกรรมมารับแรงของดินเหนียวปากพั้งเช่นเดียวกับทุกกรณีอัตราความเครียด เมื่อให้อุณหภูมิสูงที่สภาวะอัดแน่นปกติ พบว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของความเครียดแนวแกนมากกว่าตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง และค่อยๆเพิ่มอย่างช้าๆ จนถึงจุดวิบัติ หลังจากนั้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนจึงค่อยลดลง โดยที่อุณหภูมิห้องจะให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด รองลงมาเป็นที่ 45 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนที่สภาวะอัดตัวมากกว่าปกติ ทั้งที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 4 และ 8 มีแนวโน้มของกราฟมีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ ในช่วงแรกของความเครียดแนวแกน ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ประมาณ 0.5% ของอัตราความเครียดตามแนวแกน จากนั้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนกระทั่งดินเกิดการวิบัติแล้วจึงลดลงเพียงเล็กน้อย แต่เส้นกราฟ 60 องศาเซลเซียสจะค่อนข้างคงที่ จนถึงสิ้นสุดการทดสอบ ดังรูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดและอุณหภูมิ และสภาวะอัดแน่นเกินตัว แต่ที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 ดังรูปที่ 4.23(ข-1) จะสังเกตเห็นว่าเส้นกราฟของอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มต่ำกว่าเส้นกราฟ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเครียดตามแนวแกนประมาณ 13% เป็นต้นไป ทำให้เห็นช่วงอ่อนตัวของความเค้น (strain softening) อย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการทดสอบ กล่าวคือ เมื่อทำการกดตัวอย่างดินจนถึงช่วงวิบัติไปแล้ว ตัวอย่างทดสอบเกิดการเอียงตัวและเสียรูปมาก จึงทำให้ค่าแรงเฉือนที่วัดได้มีค่าต่ำลงไปอย่างมากซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างทั้งหมดที่ทดสอบโดยพบว่าหลังเกิดการวิบัติแล้ว แนวโน้มกราฟของค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะลดลงเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะคงที่

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อแรงดันน้ำส่วนเกินของกรณีการทดสอบที่ค่าอัตราความเครียด 6.0% ต่อนาที จากรูปที่ 4.23 พบว่าในสภาวะอัดตัวปกติ แนวโน้มกราฟของแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีความคล้ายคลึงกันทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง กล่าวคือ แรงดันน้ำส่วนเกินจะเกิดขึ้นมากในช่วงแรก และค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ ส่วนที่สภาวะอัดตัวมากกว่าปกติ ทั้งที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 4 และ 8 ที่อุณหภูมิสูง แรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงจุดวิบัติ หลังจากนั้นจึงค่อยๆลดลงเล็กน้อย หรือคงที่ จนถึงสิ้นสุดการทดสอบ ซึ่งต่างกับที่อุณหภูมิห้อง โดยที่แรงดันน้ำจะยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆอย่างช้าๆจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ ยกเว้นที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4 จะสังเกตเห็นได้ว่ากราฟแรงดันน้ำส่วนเกินของอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มสูงขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว จนมีแนวโน้มสูงกว่ากราฟแรงดันน้ำส่วนเกินของอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความแตกต่างจากตัวอย่างทดสอบอื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะให้ผลของแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีค่าไม่ต่างกันมากในแต่ละอัตรา การอัดแน่นเกินตัวซึ่งแตกต่างจากกรณีค่าอัตราความเครียดที่ช้า เนื่องจาก อัตราความเครียดที่เร็วมีผลต่อการกระจายตัวของแรงดันน้ำในมวลดินยังคงเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์และไม่สม่ำเสมอ





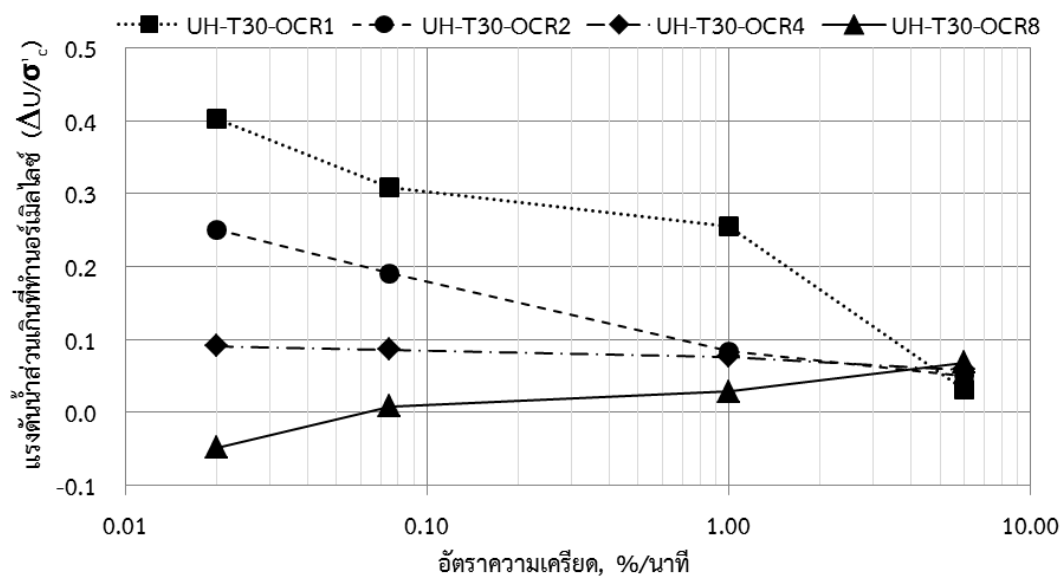
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนที่นอร์มัลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ก-1) (ข-1) (ค-1) (ง-1) และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอัตราความเครียด (ก-2) (ข-2) (ค-2) (ง-2) ที่อัตราความเครียด 6.0% ต่อหน้าที่ (ก) OCR=1 (ข) OCR=2 (ค) OCR=4 (ง) OCR=8

เมื่อทำการวัดค่าแรงดันน้ำหลังจากกระบวนการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ (U_i) พบว่ามีค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเฉือนตัวอย่างดินและทำการวัดแรงดันน้ำที่จุดวิบัติ (U_f) พบว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินขณะทำการเฉือน (ΔU) คือส่วนต่างของค่าแรงดันน้ำที่วัดที่จุดวิบัติกับแรงดันน้ำที่วัดหลังจากการให้ความร้อน และค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการนอร์มิไลซ์ด้วยค่าแรงดันประสิทธิผลอัดตัวคายน้ำ ($\Delta U / \sigma'_c$) ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.8 ถึง 4.11 ทั้งนี้แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลกระทบจากความร้อนที่ส่งผลให้น้ำในมวลดินมีอุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาตรของน้ำขยายตัว ส่งผลต่อความหนืดของน้ำลดลง ชั้นน้ำที่ยึดเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคเม็ดดินจึงมีความหนืดลดลงด้วย รวมไปถึงความร้อนทำให้อนุภาควัตถุในมวลดินสลายตัวจึงไม่สามารถดูดซับมวลน้ำไว้ได้ดั้งเดิม เป็นผลให้มวลน้ำดังกล่าวไหลออกจากช่องว่างของดินได้ง่ายขึ้น กลายเป็นแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นและกระจายตัวอยู่ในมวลดิน รวมกับแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดในระหว่างการเฉือนตัวอย่าง ซึ่งไม่สามารถไหลออกจากมวลดินได้เนื่องจากข้อจำกัดของการระบายน้ำ จึงส่งผลทำให้มวลดินสูญเสียกำลังรับแรงเฉือน จากรูปที่ 4.24 ถึง 4.26 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการนอร์มิไลซ์ มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวปกติ ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการนอร์มิไลซ์เกิดขึ้นมากกว่าที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวมากกว่าปกติ เนื่องจากที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวเกินมากกว่าปกติ มีการเรียงตัวของโครงสร้างดินชิดติดกันแน่นกว่าที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวปกติ และที่อัตราความเครียดในการเฉือนสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าต่ำลง เนื่องมาจากแรงดันน้ำส่วนเกินยังกระจายตัวไม่สมบูรณ์ในอัตราการเฉือนที่เร็วมาก แต่ที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 8 พบว่าที่อัตราความเครียดสูง ให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินสูงขึ้น ทั้งในการทดสอบที่ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากเมื่อมวลดินได้รับแรงดันจากการเฉือน ทำให้อนุภาคดินอัดตัวชิดแน่นมากขึ้น จนเกิดการเคลื่อนที่แตกออกจากกัน เป็นผลให้แรงดันน้ำไหลออกจากช่องว่างของดิน ทำให้สามารถวัดแรงดันน้ำส่วนเกินได้สูง

ตารางที่ 4.8 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินของดินสภาวะอัดแน่นเกินตัวปกติ

อัตราความเครียด (%มม.ต่อนาที)	อุณหภูมิ (°C)	OCR 1			
		U_i	U_f	ΔU	$\Delta U / \sigma'_c$
0.02	30*	0	100.7	100.70	0.403
	45	78.8	143.8	65.00	0.260
	60	131.6	164.6	33.00	0.132
0.075	30*	0	77.1	77.10	0.308
	45	79.3	148.4	69.10	0.276
	60	141.0	161.4	20.40	0.082
1.00	30*	0	63.8	63.80	0.255
	45	63.5	98.4	34.90	0.140
	60	115.6	132.8	17.20	0.069
6.00	30*	0	7.78	7.78	0.031
	45	75.1	91.9	16.80	0.067
	60	121.0	138.7	17.70	0.071

หมายเหตุ: * คือ การศึกษาของศิริพร (2556)

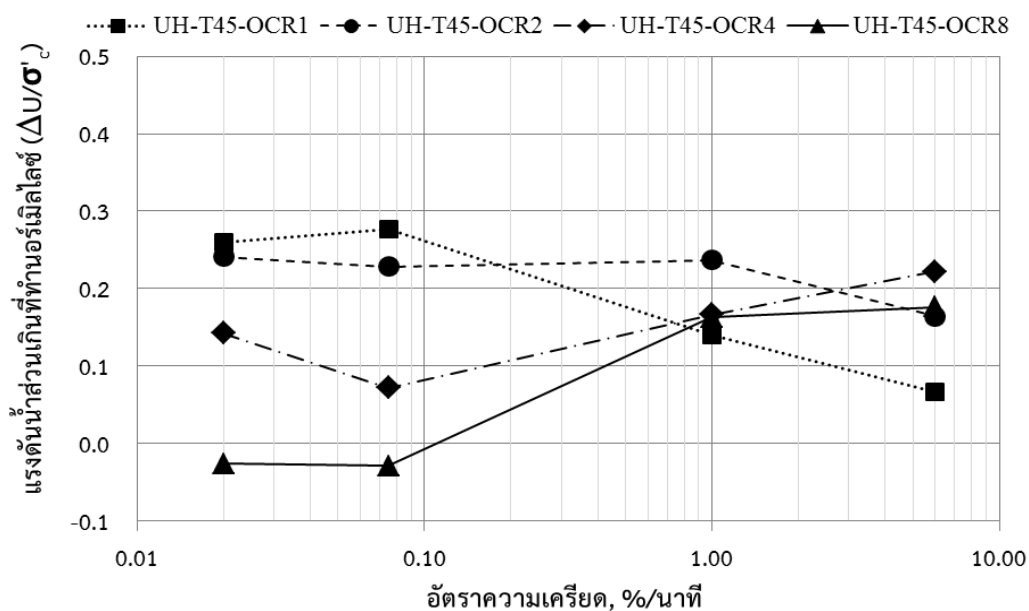


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการนอร์มิไลซ์
กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.9 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินของดินสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2

อัตราความเครียด (%มม.ต่อนาที)	อุณหภูมิ (°C)	OCR 2			
		U_i	U_f	ΔU	$\Delta U / \sigma'_c$
0.02	30*	0.00	31.36	31.36	0.251
	45	25.18	55.30	30.12	0.241
	60	44.60	73.30	28.70	0.230
0.075	30*	0.00	23.83	23.83	0.191
	45	20.80	49.40	28.60	0.229
	60	42.00	71.80	29.80	0.238
1.00	30*	0.00	10.49	10.49	0.084
	45	31.50	61.10	29.60	0.237
	60	48.30	64.80	16.50	0.132
6.00	30*	0.00	6.27	6.27	0.050
	45	30.80	51.30	20.50	0.164
	60	55.50	67.10	11.60	0.093

หมายเหตุ: * คือ การศึกษาของศิริพร (2556)

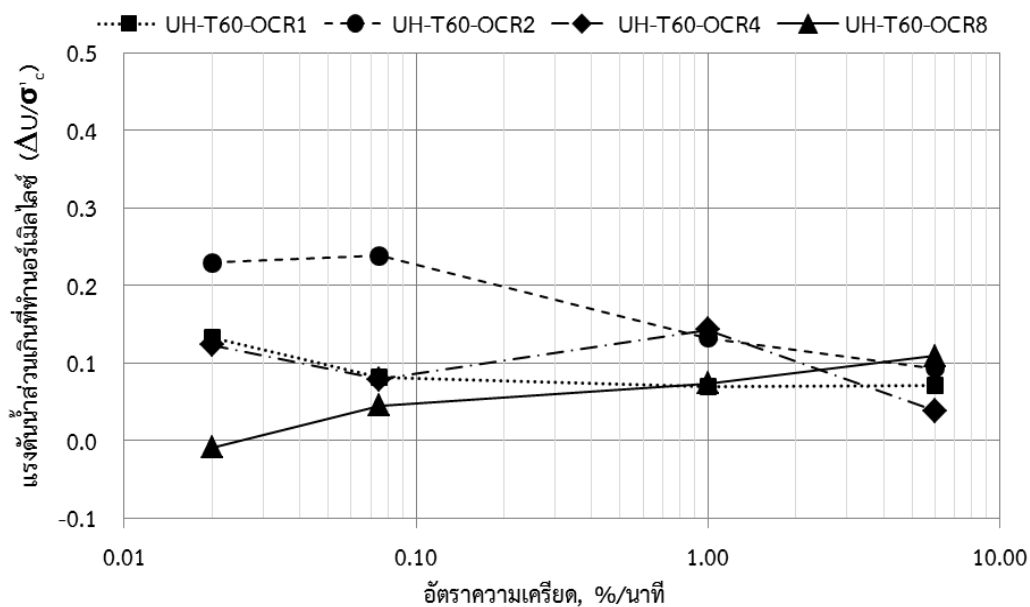


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการนอร์เมิลไลซ์ กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.10 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินของดินสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4

อัตราความเครียด (%มม.ต่อนาที)	อุณหภูมิ (°C)	OCR 4			
		U_i	U_f	ΔU	$\Delta U / \sigma'_c$
0.02	30*	0	5.7	5.69	0.091
	45	13.9	22.8	8.90	0.142
	60	24.3	32.0	7.70	0.123
0.075	30*	0.0	5.4	5.39	0.086
	45	19.4	23.9	4.50	0.072
	60	19.2	24.1	4.90	0.078
1.00	30*	0.0	4.8	4.75	0.076
	45	10.6	21.0	10.40	0.166
	60	20.1	29.0	8.90	0.142
6.00	30*	0.0	3.6	3.63	0.058
	45	10.3	24.2	13.90	0.222
	60	19.9	22.3	2.40	0.038

หมายเหตุ: * คือ การศึกษาของศิริพร (2556)



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำนอร์เมิลไลซ์กับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.11 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินของดินสภาวะอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 8

อัตราความเครียด (%มม.ต่อนาที)	อุณหภูมิ (°C)	OCR 8			
		U_i	U_f	ΔU	$\Delta U / \sigma'_c$
0.02	30*	0	-1.5	-1.52	-0.049
	45	7.3	6.5	-0.80	-0.026
	60	8.0	7.7	-0.30	-0.010
0.075	30*	0.0	0.2	0.24	0.008
	45	10.7	9.8	-0.90	-0.029
	60	7.1	8.5	1.40	0.045
1.00	30*	0.0	0.9	0.88	0.028
	45	1.1	6.2	5.10	0.163
	60	11.6	13.9	2.30	0.074
6.00	30*	0.0	2.1	2.12	0.068
	45	3.6	9.1	5.50	0.176
	60	4.2	7.6	3.40	0.109

หมายเหตุ: * คือ การศึกษาของศิริพร (2556)

จากรูปที่ 4.27 แสดงรูปตัวอย่างดินที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวปกติ จากการเฉือนที่อัตราความเครียดต่ำ จะเห็นได้ว่าลักษณะการเสียรูปของตัวอย่างดินมีการยุบตัวลง และบวมออกด้านข้างเล็กน้อย มีลักษณะเป็นวัสดุเหนียว มุมการวิบัติแบบเฉือนประมาณ 45° ส่วนการเฉือนที่อัตราความเครียดเร็วจะเห็นมุมการวิบัติได้ชัดเจนกว่า มีลักษณะเป็นวัสดุเปราะ ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.27 รูปตัวอย่างดิน NC clay หลังการเฉือนที่อัตราความเครียดต่ำ



รูปที่ 4.28 รูปตัวอย่างดิน NC clay หลังการเผื่อที่อัตราความเคียดสูง

จากการเผื่อตัวอย่างดินที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวมากกว่าปกติ (OC clay) ที่อัตราเผื่อเข้าพบว่าลักษณะการเสียรูปของตัวอย่างดินมีการยุบตัวลงเล็กน้อย และบวมออกด้านข้างเนื่องจากการให้ความร้อนทำให้เกิดการขยายตัวของแรงดันน้ำในช่องว่างมวลดิน เป็นผลให้มวลดินพยายามขยายตัว จึงทำให้ไม่เกิดมุมการวิบัติอย่างชัดเจน แสดงดังในรูปที่ 4.29 ซึ่งแตกต่างกับการเผื่อที่อัตราความเคียดสูงในรูป 4.30 ซึ่งจะสังเกตเห็นมุมวิบัติจากการเผื่อที่เกิดขึ้นประมาณ 45° เนื่องจากที่อัตราการเผื่อเร็วแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ ซึ่งกระจายตัวไม่ทั่วมวลดิน ทำให้การบวมตัวของมวลดินเกิดขึ้นน้อยกว่า รูปตัวอย่างดินหลังการเผื่อสามารถดูได้เพิ่มเติมในภาคผนวก ค.



รูปที่ 4.29 รูปตัวอย่างดิน OC clay หลังการเผื่อที่อัตราความเคียดต่ำ



รูปที่ 4.30 รูปตัวอย่างดิน OC clay หลังการเผื่อที่อัตราความเคียดสูง

จากผลการทดสอบข้างต้นชี้ให้เห็นว่าในดินเหนียวอัดแน่นเกินตัวปกติ พบว่าเมื่อความร้อนทำให้น้ำในช่องว่างของดินเกิดการขยายตัว หากมีการปล่อยให้เกิดการระบายน้ำออกจากดินเหนียวได้ในขณะให้ความร้อนอย่างอิสระ จะส่งผลให้ปริมาตรของดินหดตัวลงเนื่องจากอัตราส่วนช่องว่างของดินลดลง แต่ในดินที่อยู่ในสภาวะอัดแน่นเกินตัวสูงกลับพบว่าอัตราช่องว่างของดินสูงขึ้นเมื่อได้รับความร้อน ทำให้ปริมาตรของดินขยายตัว (วัชระ 2560) แต่หากทำการปิดการระบายน้ำออกขณะให้ความร้อน ทำให้น้ำในช่องว่างดินเกิดการขยายตัว แต่ไม่สามารถไหลออกจากช่องว่างของดินได้ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน เกิดขึ้นมากกว่าการขยายปริมาตรของดิน ทำให้มวลดินรับแรงได้ลดลงในที่สุดเช่นเดียวกับการทดสอบของ Kuntiwattanakul et al (1995) ดังรูปที่ 2.48 (ก) จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนของตัวอย่างที่ทดสอบโดยให้ความร้อนแบบระบายน้ำ ค่าที่ได้จะสูงกว่าการทดสอบที่ไม่ให้ความร้อน และการทดสอบโดยให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ ตามลำดับ

ความสามารถในการระบายน้ำออกจากมวลดิน วัดจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (coefficient of Permeability, k) หากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าสูง แสดงว่าดินนั้นมีคุณสมบัติการซึมผ่านสูง น้ำสามารถระบายออกจากมวลดินได้เร็วกว่าดินที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำ จากการทดสอบโดยให้ความร้อนแบบระบายน้ำของวัชระ (2560) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินที่ได้รับความร้อนมีค่าประมาณ 1.06×10^{-7} ซม.ต่อวินาที โดยหาได้จากการวัดปริมาตรของน้ำที่ไหลออกจากมวลดิน ขณะให้ความร้อน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปพล็อตกราฟหาค่าเวลาที่ระดับการอัดตัวคายน้ำ 90% หรือ t_{90} นำไปสู่การหาค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (determination of the coefficient of consolidation; c_v) เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินที่ได้รับความร้อน มาเปรียบเทียบกับดินที่ทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าค่า k มีค่าประมาณ 2.02×10^{-8} ซม.ต่อวินาที สรุปได้ว่าอุณหภูมิสูงขึ้นมีผลให้ค่า k สูงขึ้น ทำให้การระบายน้ำออกจากมวลดินได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการทดสอบโดยให้ความร้อนแบบระบายน้ำ จะมีผลให้การรับแรงของดินเหนียวมีค่าสูงกว่าการทดสอบที่ไม่ให้ความร้อน และการทดสอบโดยให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ ตามลำดับ

4.2.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำ (Pore pressure parameter, A) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของความดันน้ำที่ได้ในขณะทำการทดสอบแรงอัดสามแกน โดยค่าสัมประสิทธิ์นี้สามารถใช้แสดงถึงชนิดของดินและสภาพของการรับน้ำหนักบรรทุกที่ผ่านมาในอดีต ซึ่งแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ A แสดงในรูปที่ 4.31 ถึง 4.34 ผลการทดสอบพบว่าแนวโน้มกราฟของค่าพารามิเตอร์ A ของการทดสอบที่อัตราความเครียดช้าจะมีค่าสูงกว่าที่อัตราความเครียดเร็ว และแนวโน้มกราฟของค่าพารามิเตอร์ A ที่สภาวะอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่ำจะมีค่าสูงกว่าที่สภาวะอัตราการอัดแน่นเกินตัวสูง ซึ่งแนวโน้มกราฟของอุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียสมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าที่อุณหภูมิห้อง

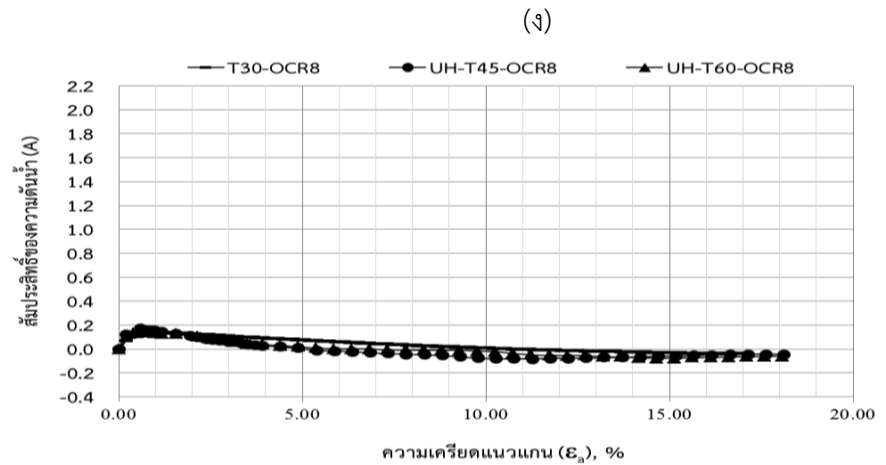
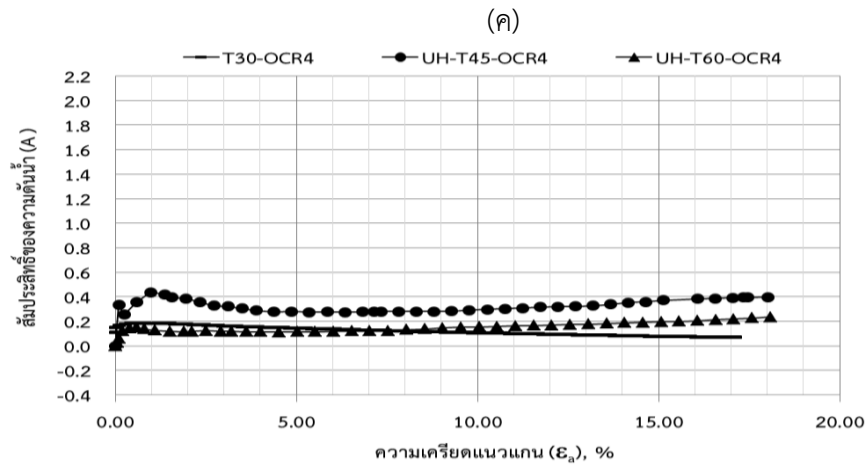
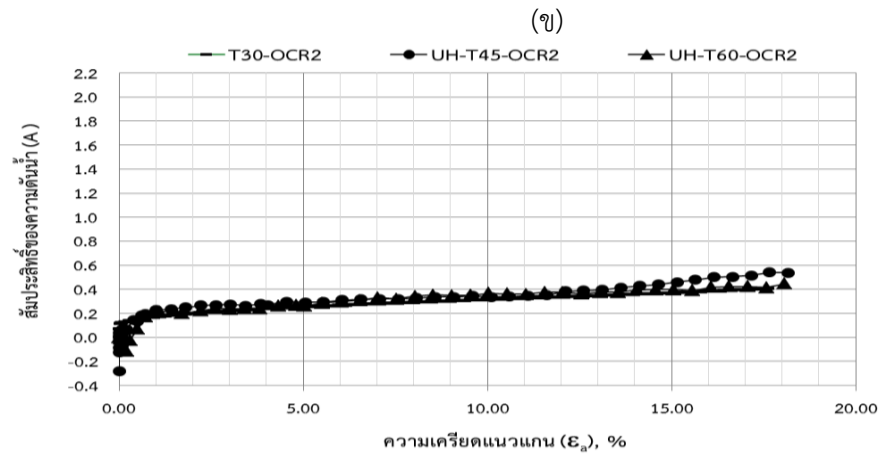
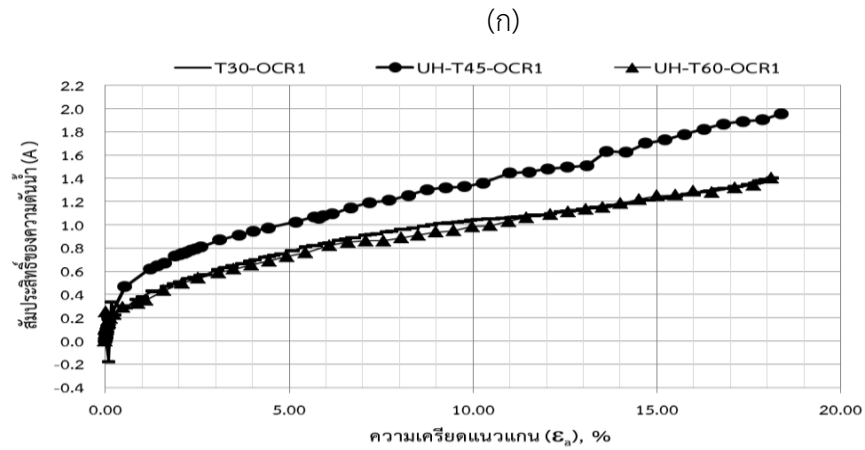
ค่าพารามิเตอร์ A ที่จุดวิบัติของดินเรียกว่า parameter A at failure (A_f) โดยค่าของ A_f ของดินเหนียวปากผนังที่ทำการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราในเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ เปรียบเทียบกับการทดสอบโดยให้ความร้อนแบบระบายน้ำของวัชระ (2560) และการทดสอบที่อุณหภูมิห้องของศิริพร (2556) ซึ่งค่า A_f ของการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.12 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวิบัติหรือค่า A_f จากการทดสอบโดยให้ความร้อนแบบระบายน้ำในดินสภาวะการอัดแน่นเกินตัวปกติ ค่า A_f จะมีแนวโน้มลดลงผกผันกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการเฉือนสูงขึ้น ดังแสดงในรูป 4.53(ก) เนื่องจากการเฉือนช้าทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นและกระจายตัวอย่างสมบูรณ์ทั่วตัวอย่างดิน ส่งผลให้ค่า A_f มีค่าสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้ค่า A_f มีค่าประมาณอยู่ระหว่างช่วง +0.50 ถึง +1.00 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีพื้นฐานที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5.3

เมื่อพิจารณาในส่วนของดินสภาวะการอัดแน่นเกินตัวมากกว่าปกติ พบว่าค่า A_f มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการเฉือนสูงขึ้นเช่นกัน โดยที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 4 และ 8 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวิบัติมีค่าลดลงจนถึงติดลบ เนื่องจากดินที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวสูง การระบายน้ำออกจากช่องว่างของดินได้น้อย ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมไหล (k) ที่มีค่าต่ำลงเมื่อดินที่มีค่าการอัดแน่นเกินตัวที่มากขึ้น ทำให้อนุภาคดินเรียงชิดติดกันแน่นมาก เมื่อดินได้รับแรงดันจากการเฉือน ทำให้อนุภาคดินอัดตัวชิดแน่นจนเกิดการเคลื่อนที่แตกออกจากกัน เป็นผลให้แรงดันน้ำที่อยู่ในมวลดินในขณะนั้นไหลออกจากมวลดินทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำมีค่าลดลงจนกลับทิศในที่สุด ซึ่งค่า A_f ที่ได้จากการทดลอง อยู่ในช่วงประมาณ -0.50 ถึง 0.00

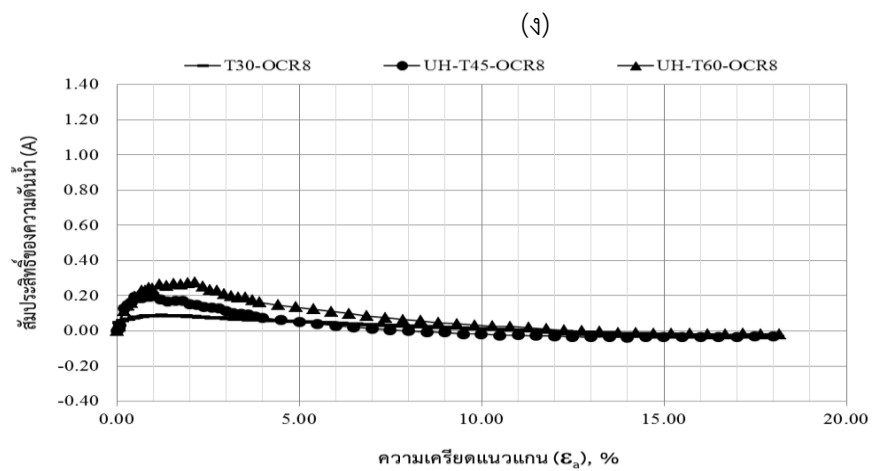
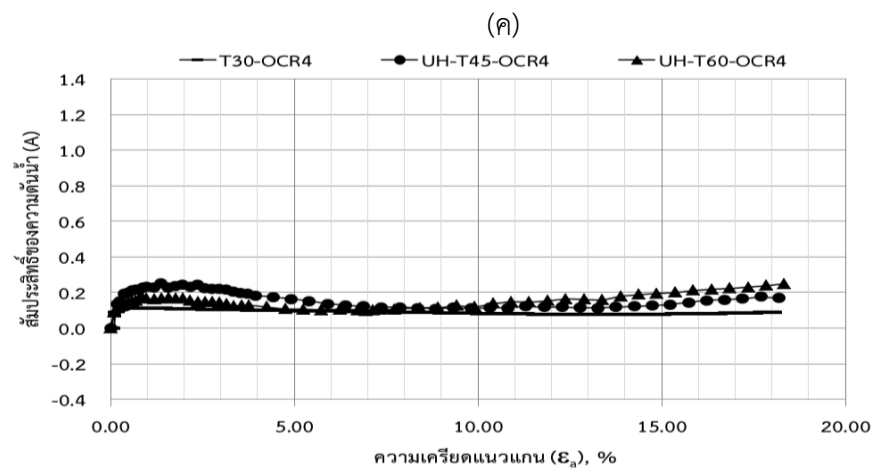
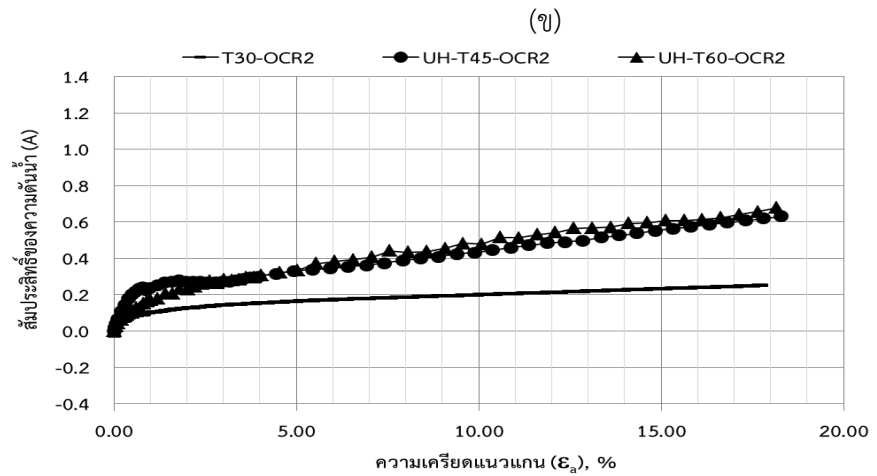
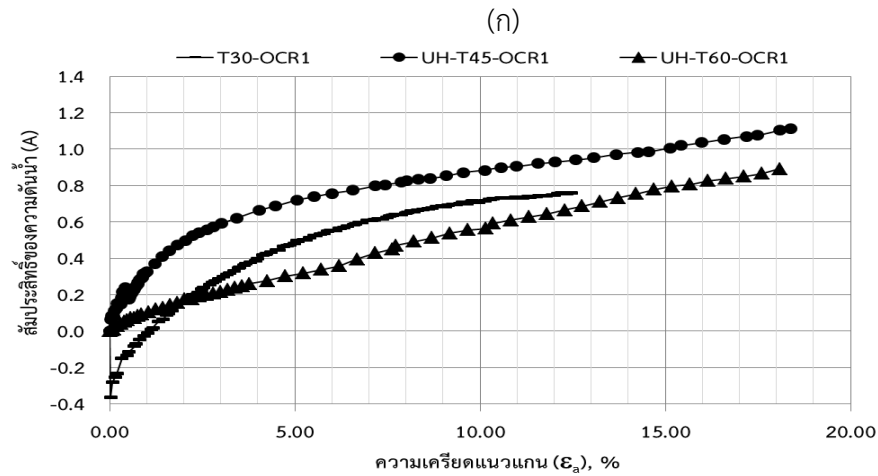
อย่างไรก็ตาม พบว่าแนวโน้มของค่า A_f ที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียสพบว่ามีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก เมื่อนำค่า A_f มาสัมพันธ์กับค่าอัตราความเครียด และเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่ไม่ให้ความร้อน และการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบระบายน้ำ เพื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่า A_f พบว่าการทดสอบโดยให้ความร้อนแบบระบายน้ำ ให้แนวโน้มค่า A_f สูงกว่า การทดสอบโดยให้ความร้อนแบบระบายน้ำและการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 4.35 (ก) ถึง (ง) เนื่องจากผลของการทดสอบโดยให้ความร้อนแบบระบายน้ำให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินสูงกว่าแบบไม่ระบายน้ำ เพราะแรงดันน้ำที่เกิดจากการให้ความร้อนได้ถูกระบายออกทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้น ขณะทำการเฉือนเกิดขึ้นที่บริเวณหัวและท้ายตัวอย่างดิน ทำให้สามารถวัดค่าแรงดัน

น้ำส่วนเกินได้สูง ต่างกับการทดสอบโดยให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งแรงดันน้ำที่เป็นผลมาจากการได้รับความร้อนกระจายตัวอยู่ทั่วมวลดิน ซึ่งไม่ให้น้ำระบายออกได้ ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่วัดได้ในขณะเฉือนจึงมีค่าต่ำกว่า จึงเป็นผลให้ค่า A_f ของการทดสอบโดยให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำต่ำกว่าด้วย

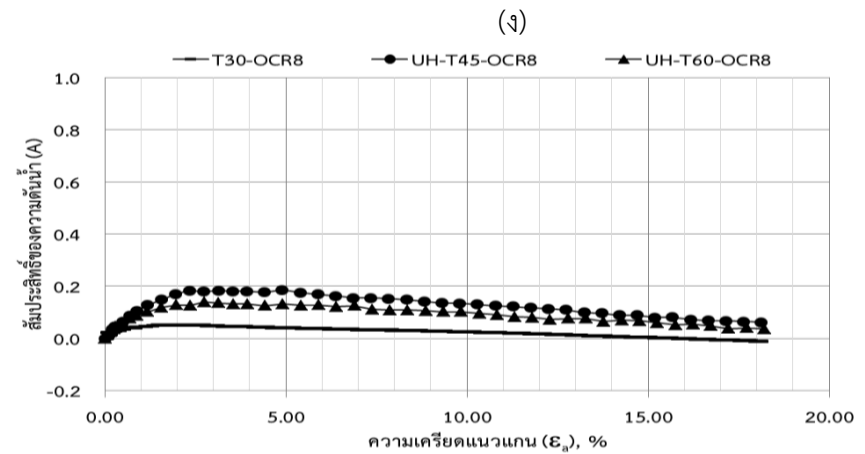
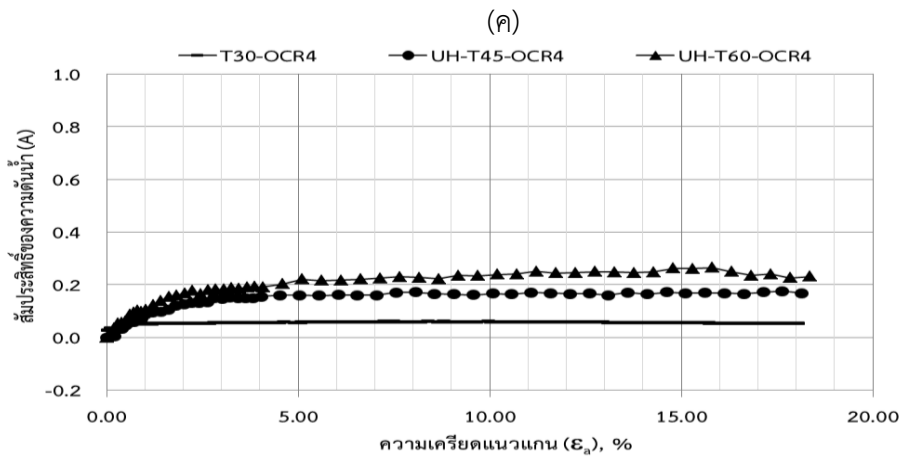
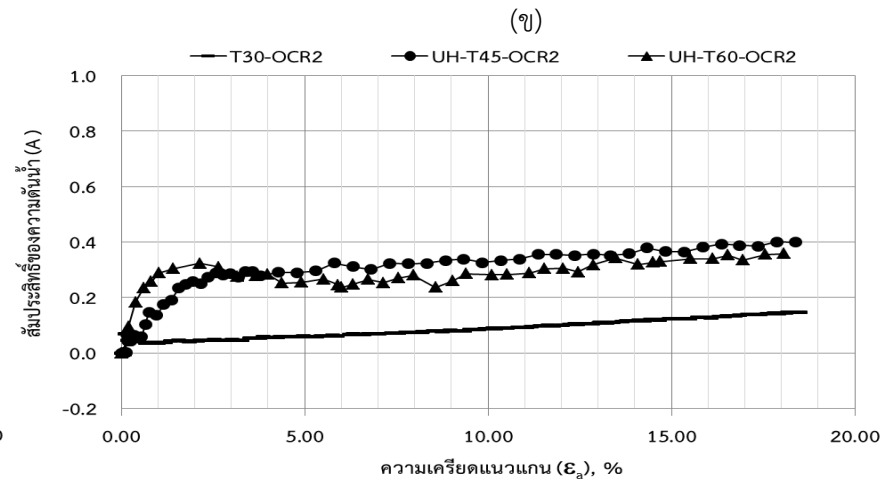
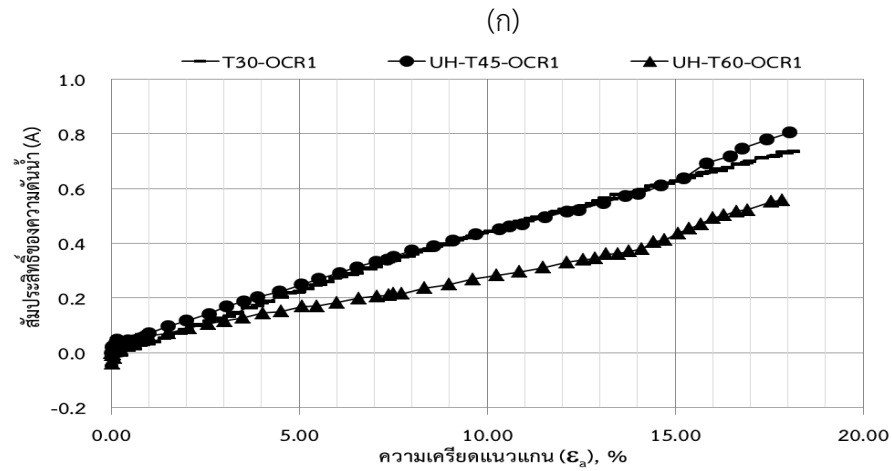
จากตารางที่ 4.13 แสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวิกฤติ ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า A_f และค่าอัตราความเครียด ที่ได้กล่าวมาข้างต้นชี้ให้เห็นว่าอัตราความเครียดและอุณหภูมิมีผลต่อสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวิกฤติที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่ำมากกว่าที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวสูง



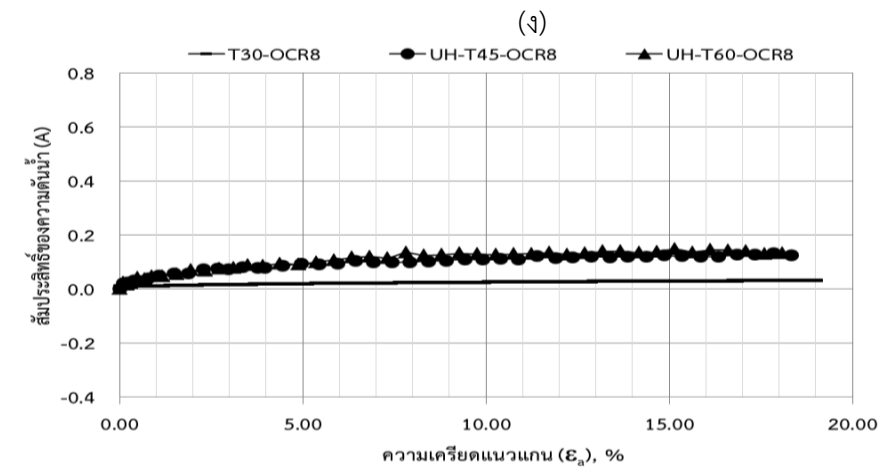
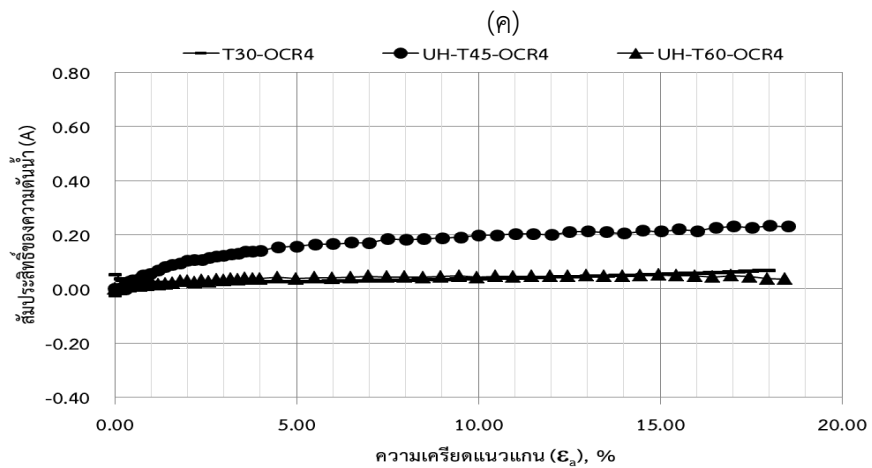
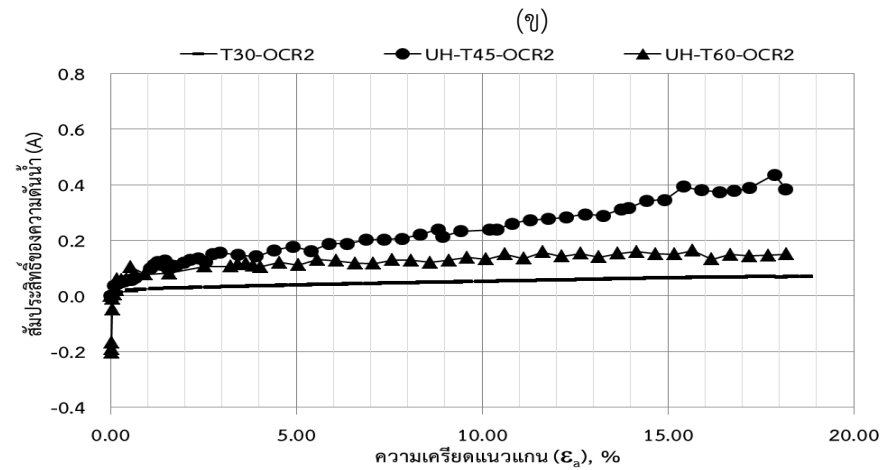
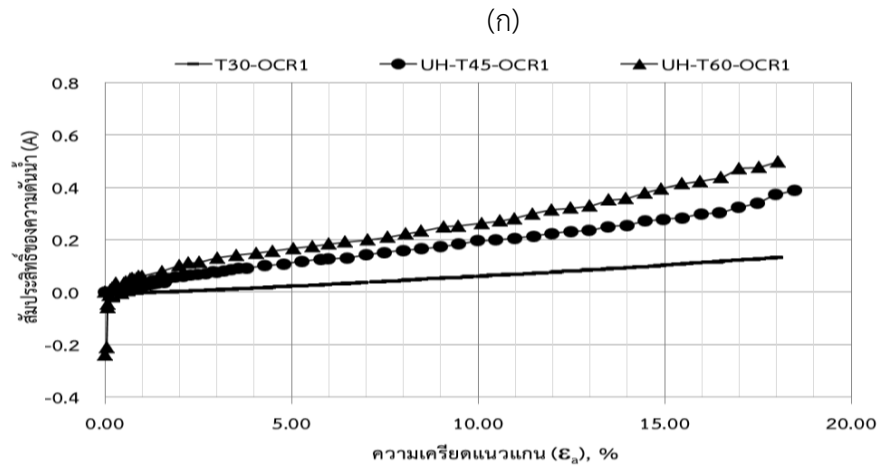
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันน้ำกับอัตราความเครียดตามแนวแกนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน อัตราความเครียด 0.02% ต่อหน้าที่ (ก) OCR=1 (ข) OCR=2 (ค) OCR=4 (ง) OCR=8



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงตึงเครียดกับอัตราความเครียดตามแนวแกนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน อัตราความเครียด 0.075% ต่อนาที
(ก) OCR=1 (ข) OCR=2 (ค) OCR=4 (ง) OCR=8



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันน้ำกับอัตราความเครียดตามแนวแกนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน อัตราความเครียด 1.00% ต่อวินาที
 (ก) OCR=1 (ข) OCR=2 (ค) OCR=4 (ง) OCR=8



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันน้ำกับอัตราความเครียดตามแนวแกนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน อัตราความเครียด 6.00% ต่อหน้าที่
(ก) OCR=1 (ข) OCR=2 (ค) OCR=4 (ง) OCR=8

ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์ของความดันน้ำที่จุดวัดของดินเหนียวปากพั้ง

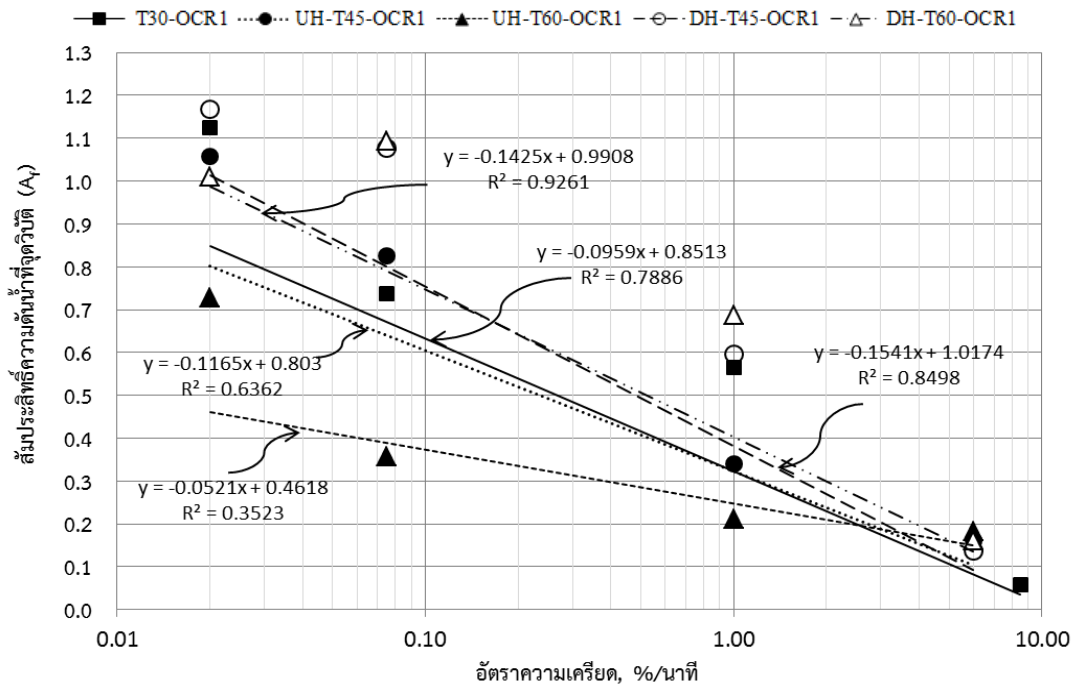
OCR	อุณหภูมิ	สัมประสิทธิ์ของความดันน้ำ			
		0.02%ต่อนาที	0.075%ต่อนาที	1.0%ต่อนาที	6.0%ต่อนาที
1	T30*	1.124	0.738	0.564	0.059
	UH-T45	1.058	0.826	0.341	0.160
	UH-T60	0.727	0.357	0.211	0.183
	DH-T45	1.168	1.077	0.595	0.136
	DH-T60	1.010	1.093	0.688	0.161
2	T30*	0.361	0.251	0.098	0.052
	UH-T45	0.384	0.361	0.339	0.214
	UH-T60	0.428	0.437	0.236	0.128
	DH-T45	0.585	0.493	0.383	0.073
	DH-T60	0.541	0.488	0.152	0.081
4	T30*	0.108	0.082	0.059	0.038
	UH-T45	0.280	0.112	0.164	0.170
	UH-T60	0.117	0.105	0.225	0.043
	DH-T45	0.275	0.259	0.132	0.071
	DH-T60	0.275	0.286	0.163	0.079
8	T30*	-0.035	0.005	0.015	0.030
	UH-T45	-0.048	-0.001	0.136	0.101
	UH-T60	0.001	0.074	0.111	0.092
	DH-T45	0.159	0.092	0.075	0.070
	DH-T60	0.127	0.250	0.200	0.101

หมายเหตุ: * คือ การศึกษาของศิริพร (2556)

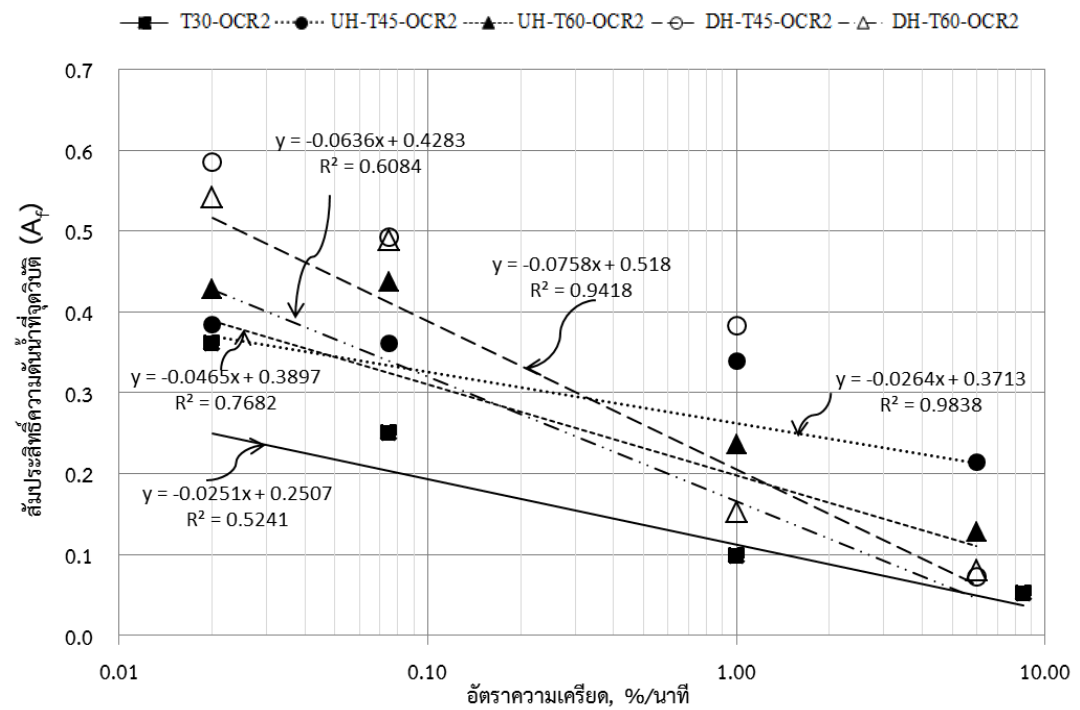
ตารางที่ 4.13 ความชันของเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวัด (วัชระ 2560)

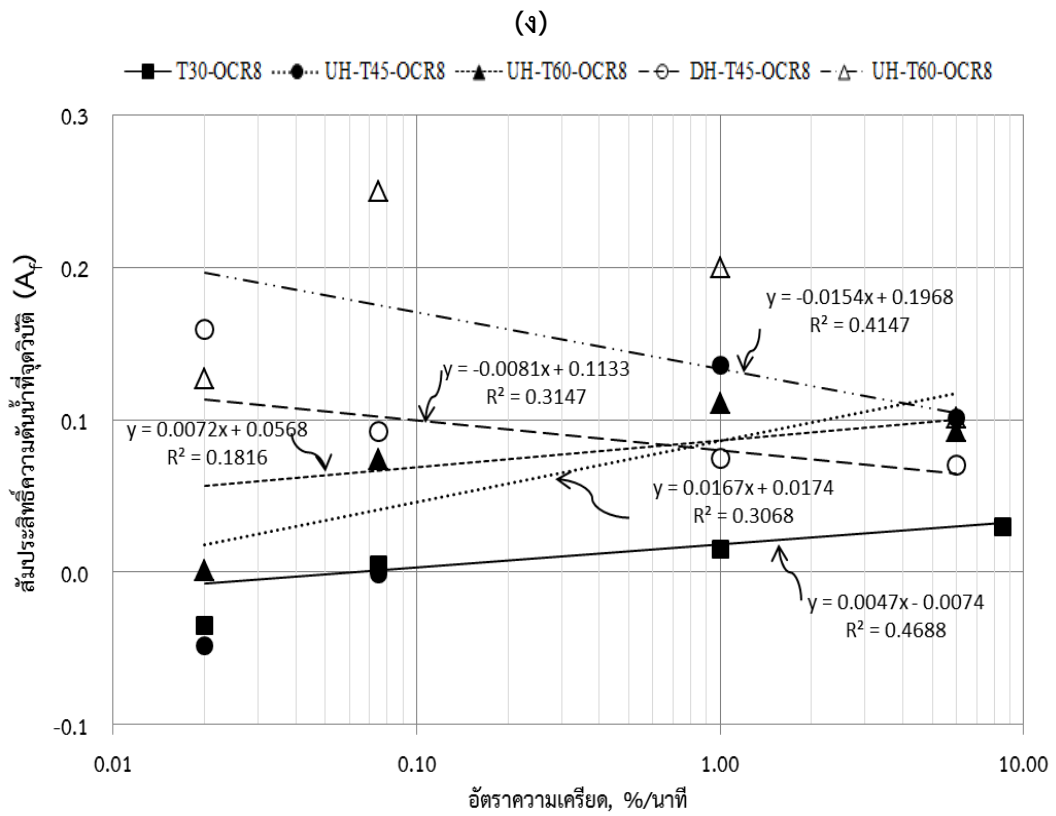
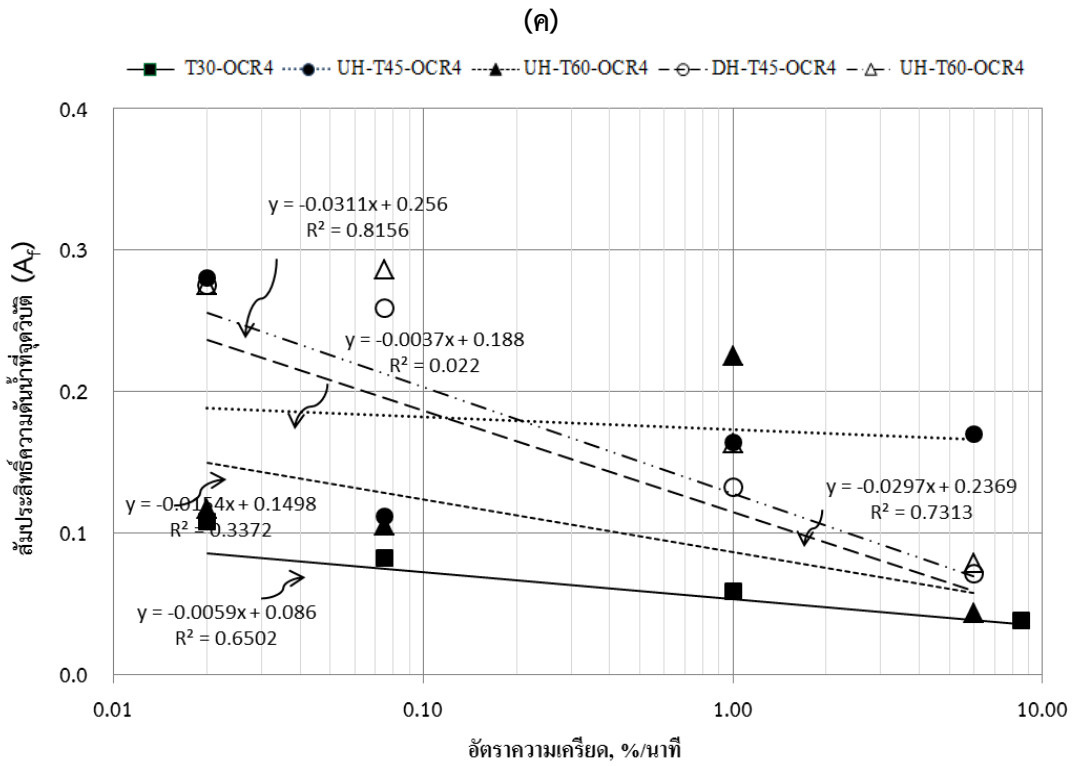
ตัวอย่าง	OCR = 1	OCR = 2	OCR = 4	OCR = 8
IC-T30	-0.0959	-0.0251	-0.0059	0.0047
IC-UH-T45	-0.1165	-0.0264	-0.0037	0.0167
IC-UH-T60	-0.0521	-0.0465	-0.0154	0.0072
IC-DH-T45	-0.184	-0.083	-0.038	-0.014
IC-DH-T60	-0.153	-0.089	-0.037	-0.008

(ก)



(ข)





รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวิกฤตกับอัตราความเครียด
(ก) OCR=1 (ข) OCR=2 (ค) OCR=4 (ง) OCR=8

4.2.2.5 ผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือน

เมื่อทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำงานอร์เมิลไลซ์โดยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราความเครียดแตกต่างกันที่ 0.02% 0.075% 1.0% และ 6.0% ต่อนาที พบว่าได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำงานอร์เมิลไลซ์ (S_u / σ'_{vo}) มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และแปรผันตรงกับอัตราความเครียด กล่าวคือ ยิ่งอัตราความเครียดสูงขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ทำงานอร์เมิลไลซ์สูงขึ้นด้วยในทุกๆ อัตราการอัดแน่นเกินตัว และตัวอย่างดินที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวปกติ มีแนวโน้มการให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำงานอร์เมิลไลซ์ต่ำกว่าที่สภาวะอัดแน่นเกินตัวสูง

เมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมาทำการนอร์เมิลไลซ์ กับค่าความเค้นประสิทธิผล (σ'_{vo}) ที่แสดงดังในตารางที่ 4.14 ถึง 4.16 และนำมาสัมพันธ์กับค่าอัตราการการอัดแน่นเกินตัวของการทดสอบที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส จะได้แนวโน้มกราฟดังแสดงในรูป 4.36 และสมการแสดงในตารางที่ 4.18 ถึง 4.20

ตารางที่ 4.14 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำภายใต้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

อัตราความเครียด (% ต่อนาที)	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำงานอร์เมิลไลซ์			
	OCR1	OCR2	OCR4	OCR8
0.02	0.18	0.35	0.42	0.69
0.075	0.21	0.38	0.53	0.77
1.00	0.23	0.43	0.65	0.92
6.00	0.26	0.48	0.77	1.11

หมายเหตุ: ข้อมูลของศิริพร (2556)

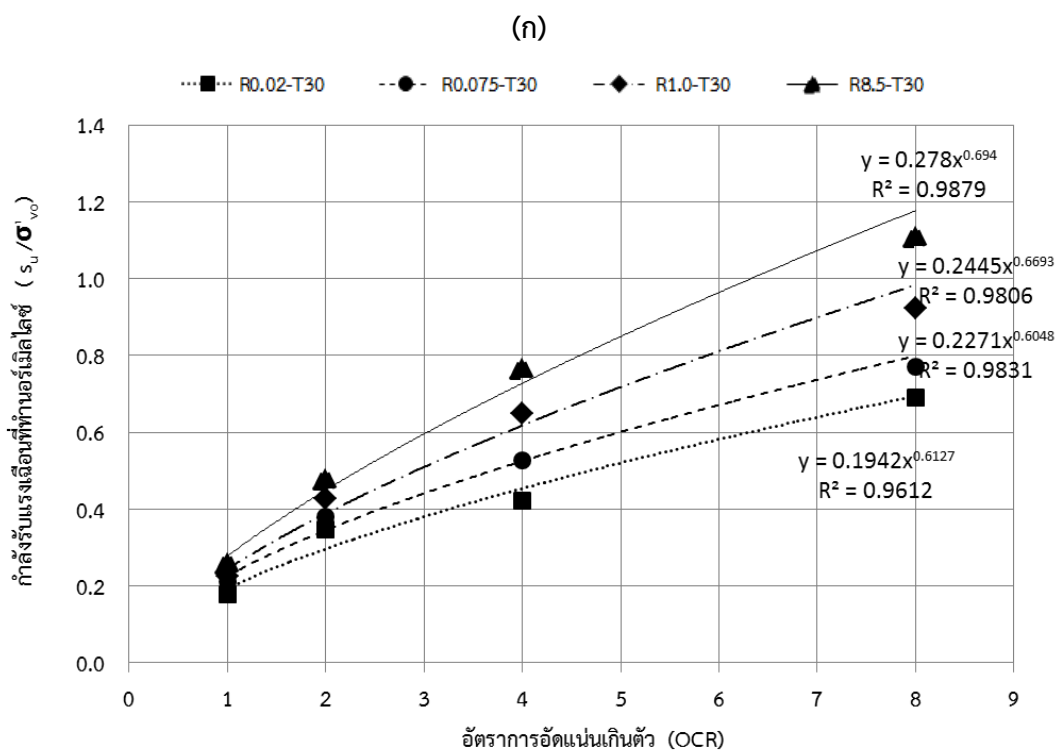
ตารางที่ 4.15 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำภายใต้อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

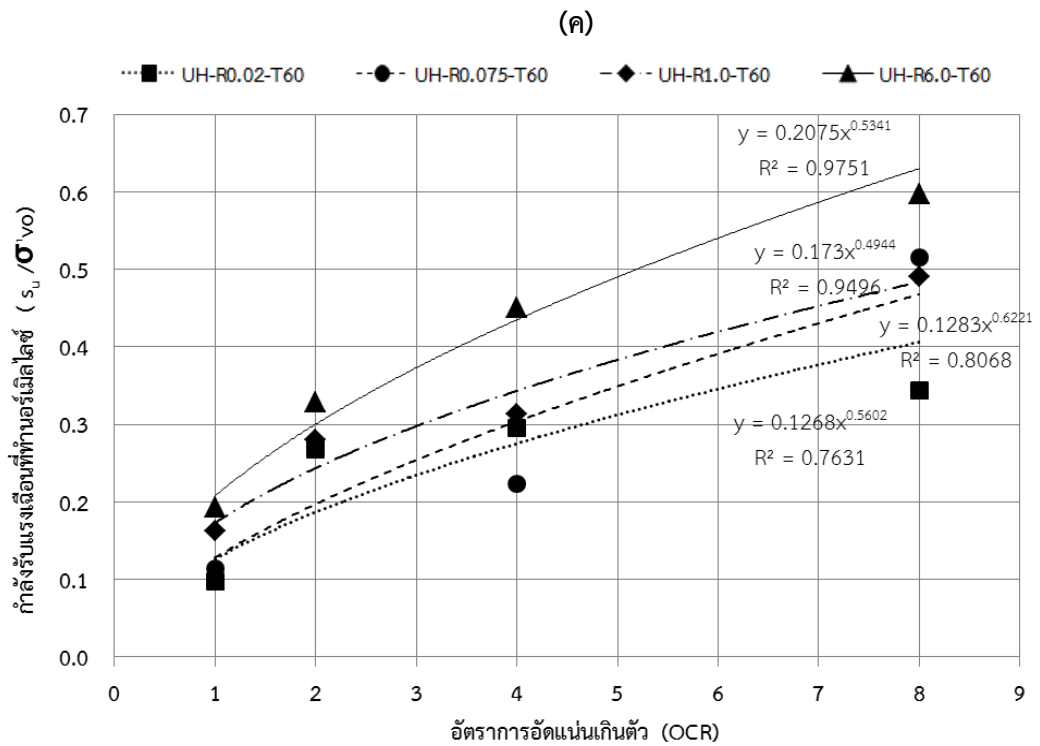
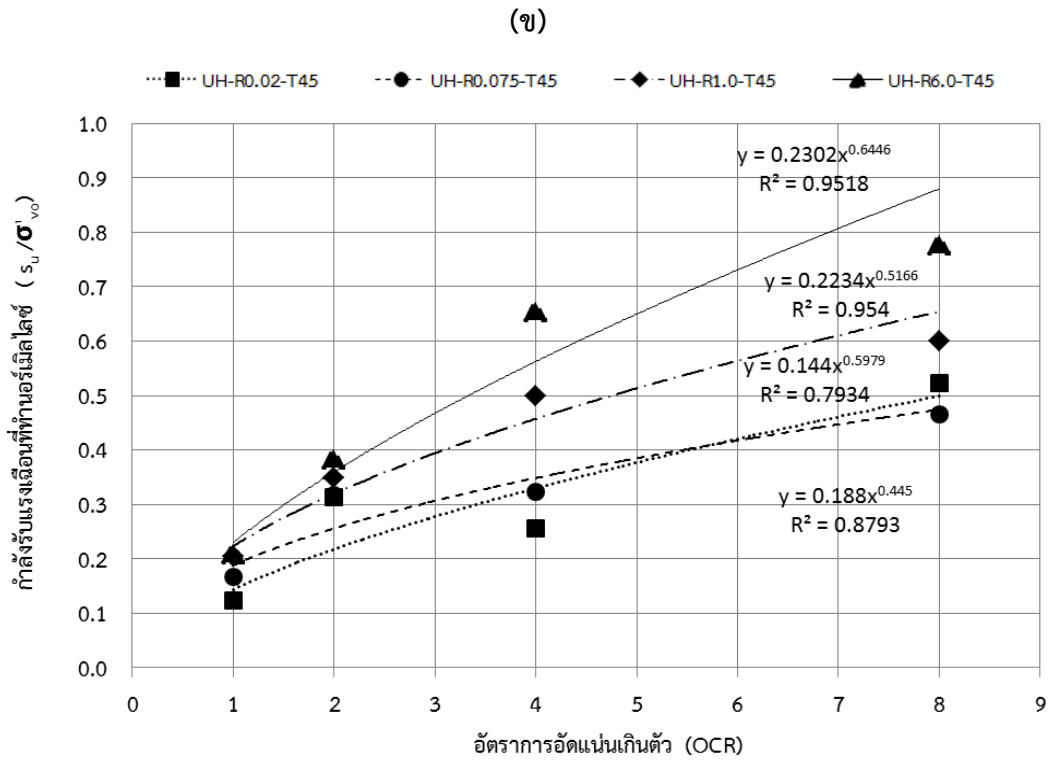
อัตราความเครียด (% ต่อนาที)	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำงานอร์เมิลไลซ์			
	OCR1	OCR2	OCR4	OCR8
0.02	0.12	0.31	0.26	0.52
0.075	0.17	0.32	0.32	0.46
1.00	0.20	0.35	0.50	0.60
6.00	0.21	0.38	0.65	0.78

ตารางที่ 4.16 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำภายใต้อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

อัตราความเครียด (% ต่อนาที)	ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำนอร์มิไลซ์			
	OCR1	OCR2	OCR4	OCR8
0.02	0.10	0.27	0.30	0.34
0.075	0.11	0.27	0.22	0.52
1.00	0.16	0.28	0.31	0.49
6.00	0.19	0.33	0.45	0.60

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำนอร์มิไลซ์ และอัตราการอัดแน่นเกินตัว (OCR) ที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส ในตารางที่ 4.17 ถึง 4.19 ไปเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ S และ m ของสมการ SHANSEP ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 2 หัวข้อ 2.5.1.5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.28 และ 0.76 ตามลำดับ พบว่าค่าพารามิเตอร์ S และ m ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนของดินเหนียวปากพั้ง ที่อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.194 ถึง 0.278 และ 0.605 ถึง 0.694 ตามลำดับมีค่าใกล้เคียงกับพารามิเตอร์ S และ m ของสมการ SHANSEP ของดินเหนียวกรุงเทพฯ แต่ที่การทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิสูงมีค่าแตกต่างออกไปอย่างสังเกตเห็นได้ กล่าวคือความร้อนทำให้ค่าพารามิเตอร์ S และ m มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 0.126 ถึง 0.23 และ 0.445 ถึง 0.645 ตามลำดับ





รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ทำงานอร์เมิลไลซ์ และค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว
 (ก) อุณหภูมิ 30 °C (ข) อุณหภูมิ 45 °C (ค) อุณหภูมิ 60 °C

ตารางที่ 4.17 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำนอร์เมิลไลซ์ และอัตราการอัดแน่นเกินตัว ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

อัตราความเครียด (%/นาทีก)	สมการความสัมพันธ์ในรูปแบบ $S_u / \sigma'_{vo} = (s)OCR^m$
0.02	$S_u / \sigma'_{vo} = 0.194 OCR^{0.613}$
0.075	$S_u / \sigma'_{vo} = 0.227 OCR^{0.605}$
1.00	$S_u / \sigma'_{vo} = 0.245 OCR^{0.669}$
8.50	$S_u / \sigma'_{vo} = 0.278 OCR^{0.694}$

ตารางที่ 4.18 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำนอร์เมิลไลซ์ และอัตราการอัดแน่นเกินตัว ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

อัตราความเครียด (%/นาทีก)	สมการความสัมพันธ์ในรูปแบบ $S_u / \sigma'_{vo} = (s)OCR^m$
0.02	$S_u / \sigma'_{vo} = 0.188 OCR^{0.445}$
0.075	$S_u / \sigma'_{vo} = 0.144 OCR^{0.598}$
1.00	$S_u / \sigma'_{vo} = 0.223 OCR^{0.517}$
6.00	$S_u / \sigma'_{vo} = 0.230 OCR^{0.645}$

ตารางที่ 4.19 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทำนอร์เมิลไลซ์ และอัตราการอัดแน่นเกินตัว ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

อัตราความเครียด (%/นาทีก)	สมการความสัมพันธ์ในรูปแบบ $S_u / \sigma'_{vo} = (s)OCR^m$
0.02	$S_u / \sigma'_{vo} = 0.127 OCR^{0.560}$
0.075	$S_u / \sigma'_{vo} = 0.128 OCR^{0.622}$
1.00	$S_u / \sigma'_{vo} = 0.173 OCR^{0.494}$
6.00	$S_u / \sigma'_{vo} = 0.208 OCR^{0.534}$

4.2.2.6 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อจุดวิบัติ

เมื่อพิจารณาความเครียดตามแนวแกนที่จุดวิบัติ (axial strain at failure) พบว่าอุณหภูมิส่งผลให้ตัวอย่างดินเหนียวปากพวงถึงจุดวิบัติเร็วกว่าตัวอย่างดินที่อุณหภูมิห้อง จากตารางที่ 4.20 แสดงค่าร้อยละของความเครียดแนวแกนที่จุดวิบัติของดินที่ทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ จะเห็นได้ว่าในการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยไม่ระบายน้ำ ร้อยละของความเครียดแนวแกนที่จุดวิบัติของดินที่ทดสอบที่อุณหภูมิห้องมีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 12 ของความเครียดแนวแกน และลดลงมาคือดินที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ มีจุดวิบัติอยู่ประมาณร้อยละ 8.5 และ 7.0 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันไม่มากนักและมีแนวโน้มคล้ายคลึงกันในทุกๆ อัตราการอัดแน่นเกินตัว

เมื่อพิจารณาความเครียดแนวแกนที่จุดวิบัติของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยการระบายน้ำ ดังตารางที่ 4.21 พบว่าอุณหภูมิจึงผลให้ตัวอย่างถึงจุดวิบัติเร็วกว่าตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเช่นกัน โดยที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส มีจุดวิบัติอยู่ที่ประมาณ 9.3 และ 8.4 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดแนวแกน ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มของจุดวิบัติไม่ได้แตกต่างกันมาก เช่นเดียวกับการทดสอบที่ให้ความร้อนโดยไม่ระบายน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความเครียดแนวแกนที่จุดวิบัติของการทดสอบให้ความร้อนโดยระบายน้ำ มีค่าสูงกว่าของการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ เนื่องจากการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยระบายน้ำ ให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดสูงกว่า จึงทำให้กำลังพัฒนาถึงจุดวิบัติตามความเครียดในแนวแกนช้ากว่าการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ

ตารางที่ 4.20 ความเครียดแนวแกนที่จุดวิบัติของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยไม่ระบายน้ำ

OCR	อุณหภูมิ (°C)	ความเครียดแนวแกนที่จุดวิบัติ			
		0.02%ต่อนาที	0.075%ต่อนาที	1.0%ต่อนาที	6.0%ต่อนาที
1	30*	12.7	11.4	13.3	9.8
	45	5.8	8.0	7.3	7.9
	60	5.0	6.2	7.4	6.1
2	30*	14.2	16.3	11.8	9.6
	45	12.1	7.0	10.9	8.9
	60	10.6	8.6	8.5	6.1
4	30*	9.9	14.5	11.7	10.0
	45	8.8	9.8	9.1	7.0
	60	6.0	7.7	7.1	6.5
8	30*	16.9	10.7	12.6	14.4
	45	8.3	8.0	9.3	7.9
	60	6.3	7.4	7.4	4.9

หมายเหตุ: * คือ ข้อมูลของศิริพร (2556)

ตารางที่ 4.21 ความเครียดแนวแกนที่จุดวิบัติของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยระบายน้ำ (วัชระ 2560)

OCR	อุณหภูมิ (°C)	ความเครียดแนวแกนที่จุดวิบัติ			
		0.02%ต่อนาที	0.075%ต่อนาที	1.0%ต่อนาที	6.0%ต่อนาที
1	45	10.74	6.87	5.05	7.03
	60	5.03	5.73	3.57	6.28
2	45	8.90	8.92	6.15	6.11
	60	5.76	6.13	4.43	5.50
4	45	6.98	8.60	7.24	9.38
	60	4.21	6.07	5.84	5.11
8	45	8.36	9.18	9.08	9.99
	60	4.97	7.09	8.08	7.96

4.2.2.7 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม และการออกแบบทางวิศวกรรม มักใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบต่างๆ (Elastic Moduli) ซึ่งแบ่งตามระดับความเครียด (strain level) ดังการทดสอบสามารถหาค่าความชันของเส้นกราฟ โดยเรียกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่จุดวิบัติหรือจุดกำลังสูงสุด (modulus of maximum deviator stress, $E_{q \max}$ ได้ดังตารางที่ 4.22 ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอยู่ในช่วง 338 ถึง 1588 กิโลปาสคาล และสามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ ที่ครึ่งหนึ่งของกำลังสูงสุด (Secant Modulus at 50% strength, E_{50}) ได้ดังตารางที่ 4.24 ซึ่งได้ค่าอยู่ในช่วง 727 ถึง 47725 กิโลปาสคาล และค่าโมดูลัสเริ่มต้น (initial modulus, E_0) คือค่าความชันของเส้นสัมผัสที่จุดกำเนิดของเส้นโค้งความเค้นและความเครียดที่ค่าความเครียดเท่ากับศูนย์ ซึ่งได้ค่าอยู่ในช่วง 12500-40000 กิโลปาสคาล ดังแสดงในตารางที่ 4.26 รวมทั้งค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นของการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบระบายน้ำของวัชระ (2560) ดังแสดงในตารางที่ 4.23 และ 4.25

เมื่อนำค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่จุดวิบัติมาสัมพันธ์กับค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด พบว่าเมื่อค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดเพิ่มสูงขึ้นจะให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่จุดวิบัติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวสูง แสดงดังในรูปที่ 4.37 ถึง 4.39 แนวโน้มของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมินี้ มีลักษณะคล้ายกันทั้งในส่วนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ที่ครึ่งหนึ่งของกำลังสูงสุดและค่าโมดูลัสเริ่มต้น เช่นเดียวกับผลการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการรับกำลังของดินของ Kuntiwattanukul et al. (1995) ดังที่กล่าวมาแล้วแสดงในรูปที่ 2.48 อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสทั้งสามนี้มีลักษณะกระจายตัวของข้อมูลสูง ซึ่งเป็นเพียงข้อมูลประกอบการอธิบายแต่ไม่สามารถสรุปได้ชัดเจน เนื่องจากผลของความร้อนทำให้ดินถึงจุดวิบัติที่

ความเครียดตามแนวแกนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ รวมทั้งปัจจัยทางธรรมชาติของตัวอย่างดินที่ไม่คงที่ และปริมาณอินทรีย์วัตถุในมวลดิน

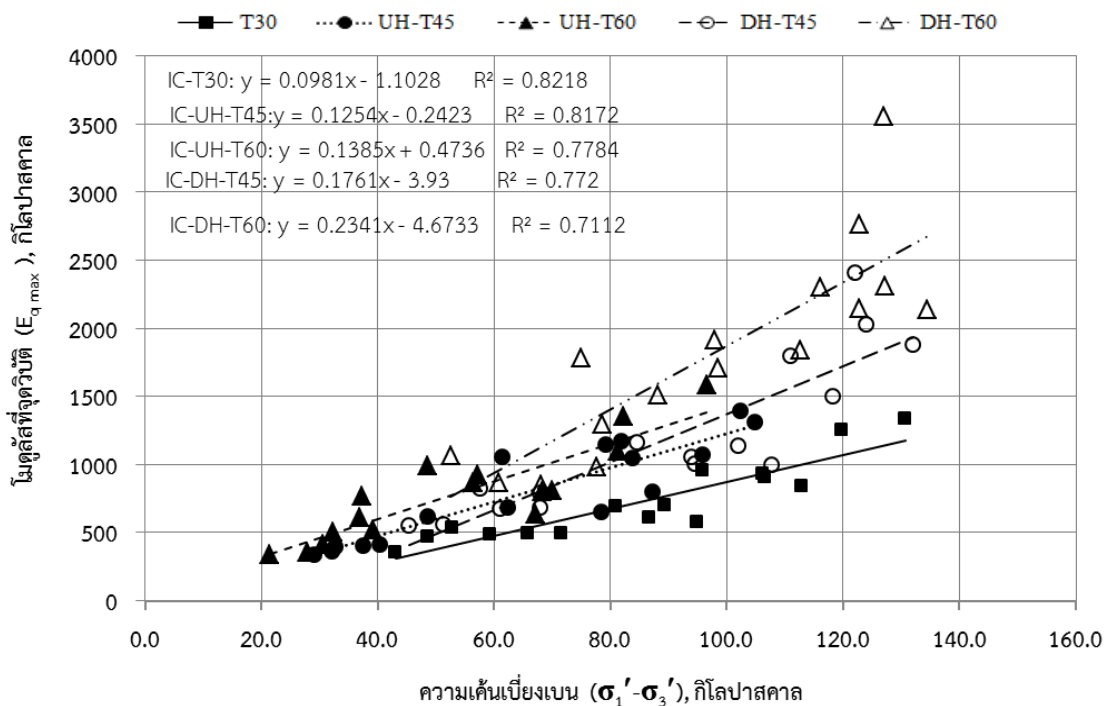
ตารางที่ 4.22 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่จุดวิกฤติของการทดสอบแบบแบบให้ความร้อนโดยไม่ระบายน้ำ

OCR	อุณหภูมิ	โมดูลัสยืดหยุ่นที่จุดวิกฤติ			
		0.02%ต่อนาที	0.075%ต่อนาที	1.0%ต่อนาที	6.0%ต่อนาที
1	30*	704	931	845	1341
	45	1059	1046	1394	1313
	60	992	925	1099	1588
2	30*	613	581	907	1252
	45	648	1148	804	1073
	60	636	797	810	1354
4	30*	536	492	693	956
	45	364	410	686	1169
	60	613	353	516	870
8	30*	352	467	489	497
	45	394	342	403	616
	60	338	505	415	766

หมายเหตุ: * คือ ข้อมูลของศิริพร (2556)

ตารางที่ 4.23 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่จุดวิกฤติของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยระบายน้ำ (วัชระ 2560)

OCR	อุณหภูมิ (°C)	โมดูลัสยืดหยุ่นที่จุดวิกฤติ			
		0.02%ต่อนาที	0.075%ต่อนาที	1.0%ต่อนาที	6.0%ต่อนาที
1	45	1002	1498	2414	1878
	60	2306	2143	3558	2140
2	45	1054	1143	1803	2029
	60	1710	1837	2768	2313
4	45	826	789	1167	1008
	60	1782	1294	1511	1914
8	45	551	562	677	686
	60	1064	864	850	983



รูปที่ 4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดของดินเหนียวปากพุ้งทดสอบที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส

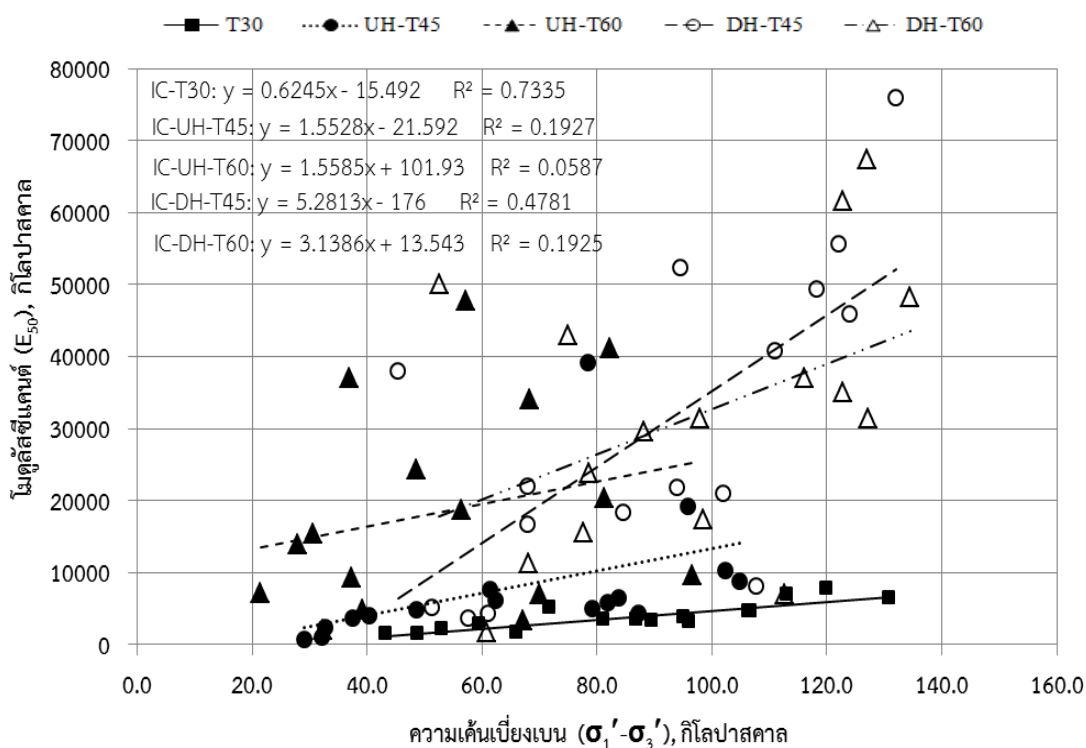
ตารางที่ 4.24 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยไม่ระบายน้ำ

OCR	อุณหภูมิ	โมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ที่ครั้งหนึ่งของกำลังสูงสุด			
		0.02%ต่อนาที	0.075%ต่อนาที	1.0%ต่อนาที	6.0%ต่อนาที
1	30*	3254	4560	6859	6372
	45	7678	6436	10232	8740
	60	24320	47725	20340	9654
2	30*	3358	3686	4449	7717
	45	39215	4949	4362	19180
	60	3354	34125	6990	41100
4	30*	2043	1542	3351	3004
	45	1068	4034	6243	5844
	60	36990	13950	4898	18787
8	30*	1441	1315	2690	4971
	45	2343	727	3744	4865
	60	7157	2014	15340	9328

หมายเหตุ: * คือ ข้อมูลของศิริพร (2556)

ตารางที่ 4.25 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ที่ครึ่งหนึ่งของกำลังสูงสุด ของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยระบายน้ำ (วัชระ 2560)

OCR	อุณหภูมิ	โมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ที่ครึ่งหนึ่งของกำลังสูงสุด			
		0.02%ต่อนาที	0.075%ต่อนาที	1.0%ต่อนาที	8.5or6.0%ต่อ นาที
1	45	8135	49369	55642	75993
	60	36995	61564	67360	48173
2	45	21894	21063	40776	45873
	60	17367	6991	35122	31407
4	45	3730	16736	18386	52341
	60	42910	23836	29541	31397
8	45	38008	5176	4361	21952
	60	50117	1738	11234	15573

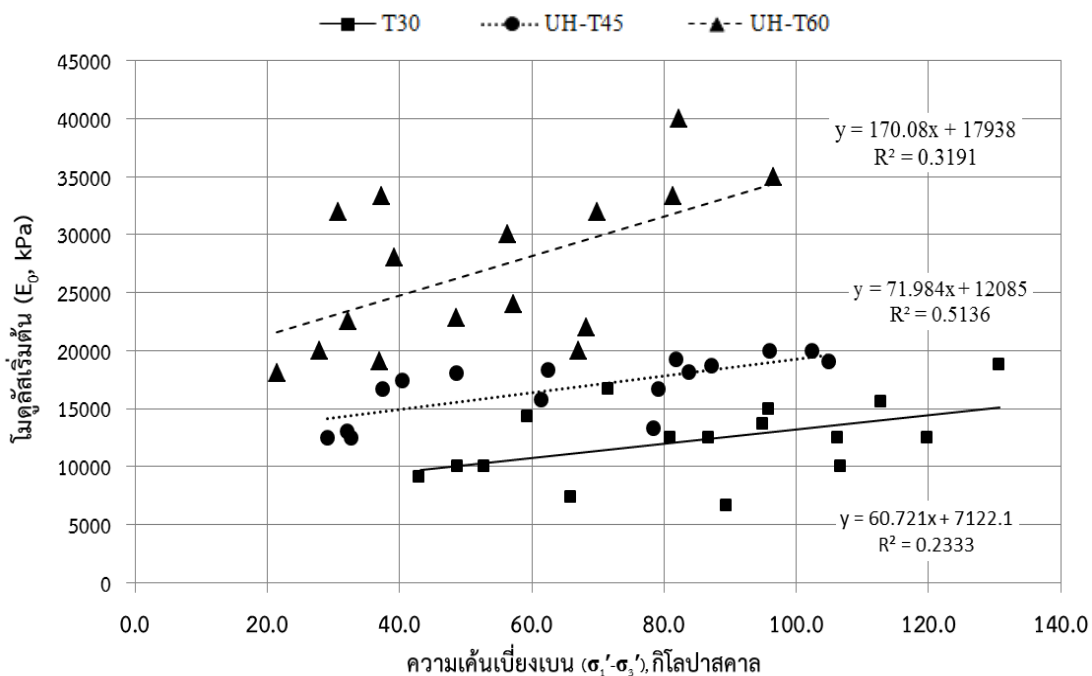


รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์กับค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดของดินเหนียวปากผนังทดสอบที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.26 ค่าโมดูลัสเริ่มต้นของการทดสอบแบบให้ความร้อนโดยไม่ระบายน้ำ

OCR	อุณหภูมิ	ค่าโมดูลัสเริ่มต้น			
		0.02%ต่อนาที	0.075%ต่อนาที	1.0%ต่อนาที	6.0%ต่อนาที
1	30*	6667	12500	15556	18750
	45	15800	18200	20000	19080
	60	22857	24000	33333	35000
2	30*	12500	13636	10000	12500
	45	13333	16667	18700	20000
	60	20000	22000	32000	40000
4	30*	10000	7333	12500	15000
	45	13000	17400	18300	19250
	60	19080	20000	28000	30000
8	30*	9091	10000	14286	16667
	45	12500	12500	16667	18080
	60	18040	22500	32000	33333

หมายเหตุ: * คือ ข้อมูลของศิริพร (2556)



รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเริ่มต้นกับค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดของดินเหนียวปากพนักทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 45 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

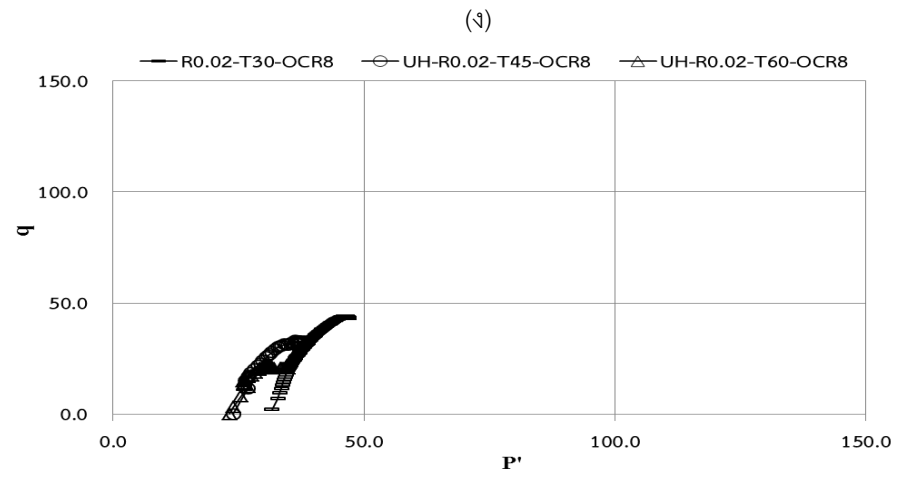
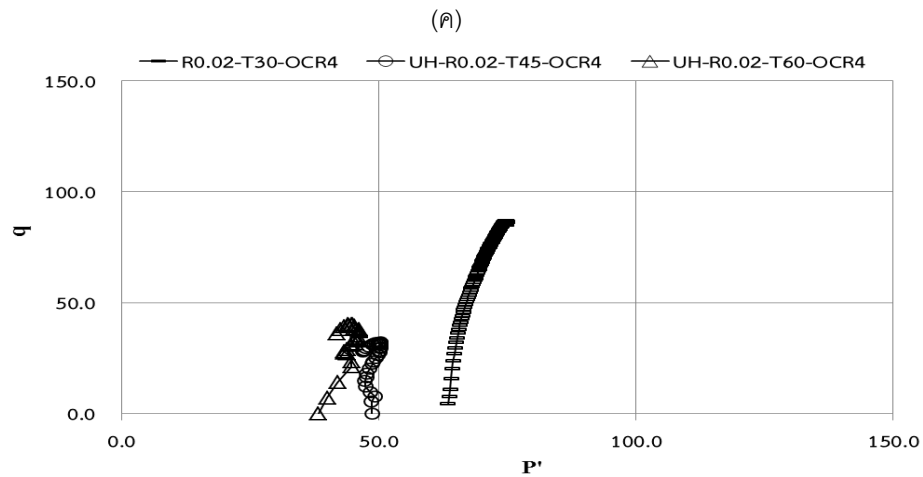
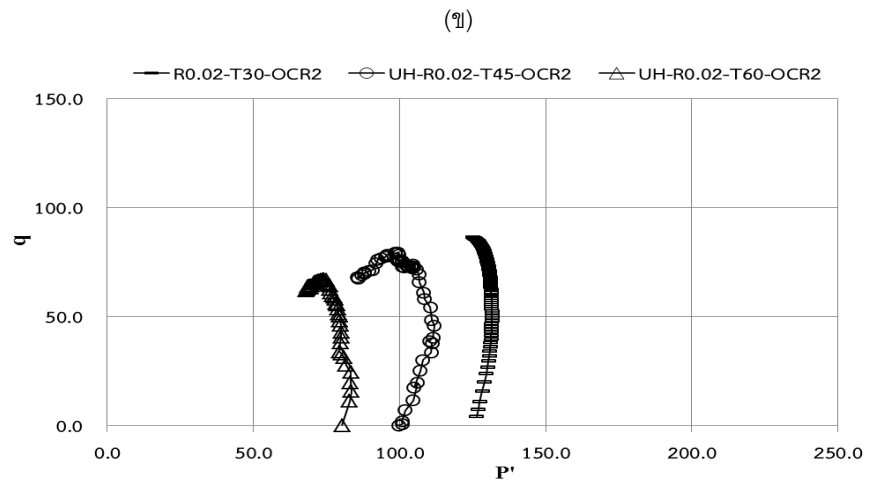
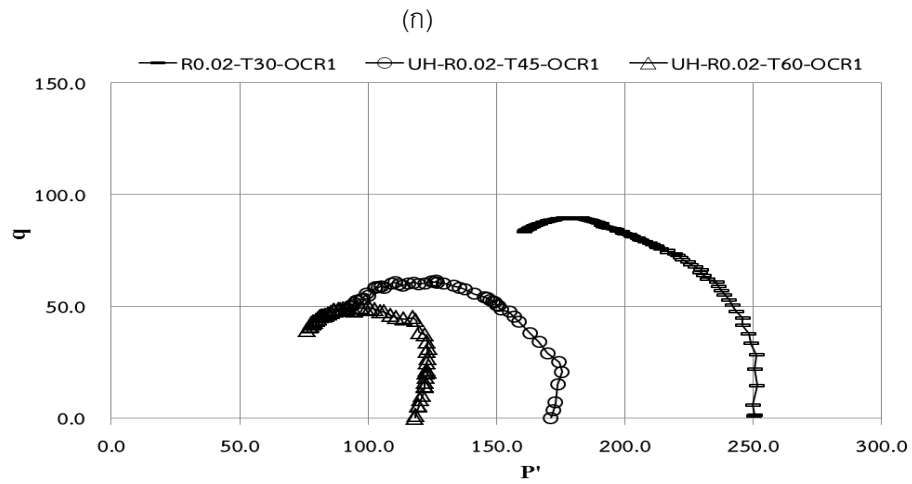
4.2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่มีต่อเส้นทางความเค้น

จากผลการทดสอบแรงอัดสามแกนภายใต้อุณหภูมิของดินเหนียวปากพั้ง โดยการนำค่าความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress, q) และความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย (mean effective stress, p') มาสร้างความสัมพันธ์ภายใต้อัตราความเครียดและสภาวะการอัดแน่นเกินตัวต่างๆ จะได้ค่าวิถีความเค้นหรือเส้นทางความเค้น (stress paths) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิและอัตราความเครียดมีผลต่อเส้นทางความเค้นดังต่อไปนี้

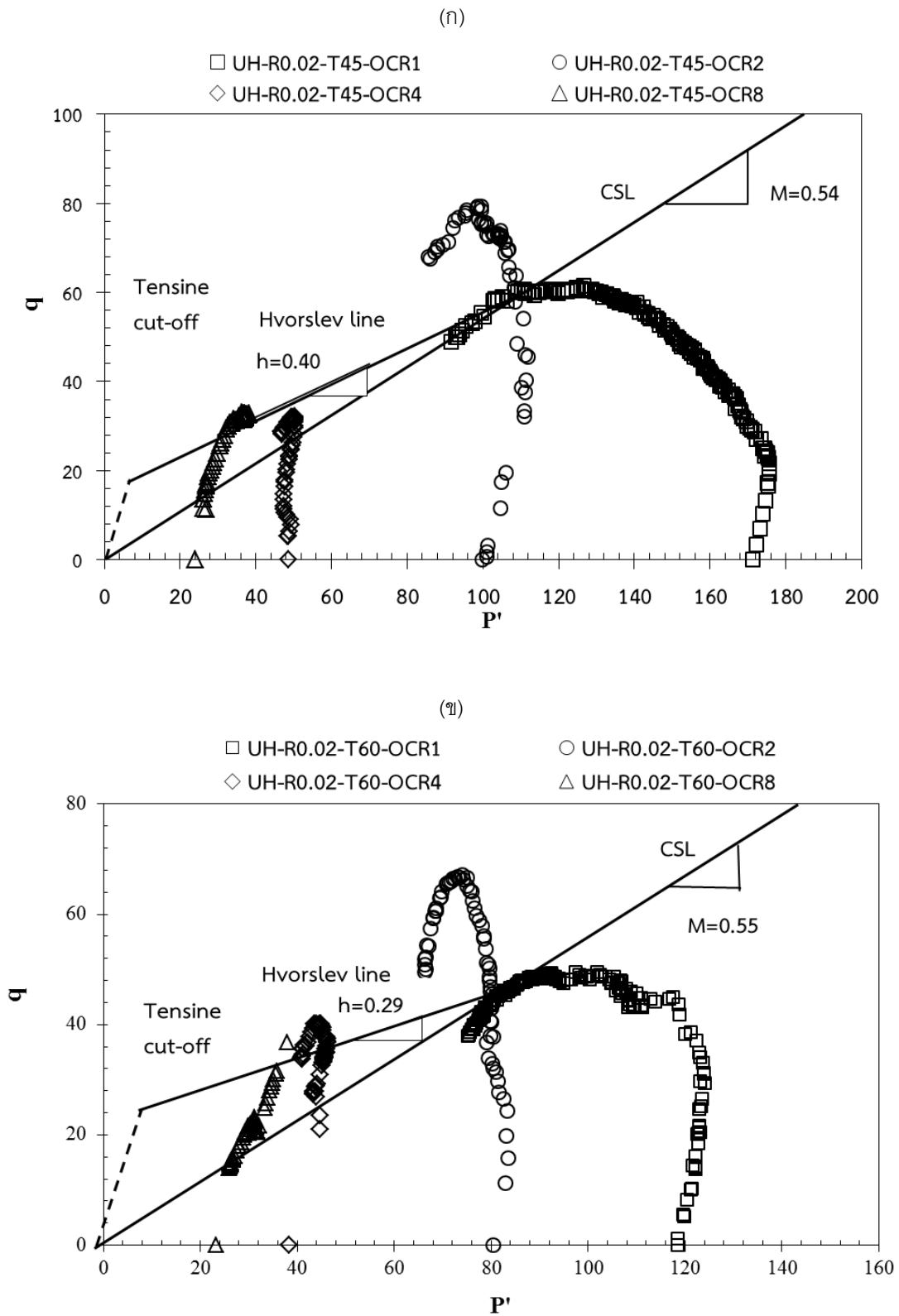
1) กรณีค่าอัตราความเครียด 0.02% ต่อนาที

เมื่อพิจารณาเส้นทางความเค้น (stress paths) ที่ทำการทดสอบที่อัตราความเครียด 0.02% ต่อนาที และให้ความร้อนแก่ตัวอย่างดินเหนียวปากพั้งในอุณหภูมิที่ต่างกัน พบว่าเส้นทางความเค้น และมีแนวโน้มของกราฟของแต่ละอุณหภูมิใกล้เคียงกันในทุกๆ สภาวะการอัดแน่นเกินตัว และในสภาวะการอัดแน่นเกินตัวเดียวกันจะมีค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยเริ่มต้นแตกต่างกันโดยที่อุณหภูมิที่สูงจะอยู่ทางด้านซ้ายสุดเนื่องจากผลของแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นจากการขยายปริมาตรของน้ำ หลังจากการให้ความร้อน จึงทำให้ผลการทดสอบที่อุณหภูมิสูงมีค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยที่จุดเริ่มต้นมีค่าน้อยกว่าในสภาวะอัดแน่นเกินตัวเดียวกันแสดงดังรูป 4.40 จะเห็นได้ว่าการทดสอบที่ (ก) สภาวะการอัดแน่นเกินตัวปกติและ (ข) สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 เส้นทางความเค้นมีแนวโน้มเคลื่อนที่จากขวาไปซ้ายเช่นเดียวกัน แต่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 มีลักษณะความโค้งน้อยกว่า เนื่องจากดินมีความแข็งแรงกว่า และแรงดันน้ำส่วนเกินในขณะเฉือน เกิดขึ้นน้อยกว่า ตัวอย่างดินที่สภาวะอัดตัวปกติ ส่วนการทดสอบ (ค) ที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4 เส้นทางความเค้นจะเริ่มเพิ่มขึ้นและเบี่ยงไปทางขวาของเส้นทางความเค้นของการทดสอบที่อุณหภูมิห้องเล็กน้อย และการทดสอบ (ง) ที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 8 ที่เส้นทางความเค้นจะเคลื่อนไปทางขวาอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลจากแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในขณะเฉือนมีค่าเป็นลบ

เมื่อนำค่าเส้นทางความเค้นของแต่ละอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่การเฉือนด้วยอัตราความเครียด 0.02% ต่อนาที ที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียสมาลากเส้นสถานะวิกฤต (Critical state line, CSL) พบว่าที่เส้นกราฟของอุณหภูมิ 45 ให้ค่าความชันของเส้นสถานะวิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.54 ซึ่งแสดงใน รูปที่ 4.41(ก) และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.41(ข) พบว่าค่าความชันของเส้นสถานะวิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.55 ซึ่งใกล้เคียงกัน และค่าความชันเส้นของฮอปส์ลีย์ซึ่งทั้ง 2 อุณหภูมิ คือ 0.40 และ 0.29 ตามลำดับ



รูปที่ 4.40 เส้นทางความเค้นของตัวอย่าง ที่อัตราความเครียด 0.02% ต่อนาที
(ก) OCR=1 , (ข) OCR=2 , (ค) OCR=4 , (ง) OCR=8



รูปที่ 4.41 เส้นทางการความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกันอัตราความเคียว 0.02% ต่อหน้าที่
 (ก) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

2) กรณีค่าอัตราความเครียด 0.075% ต่อนาที

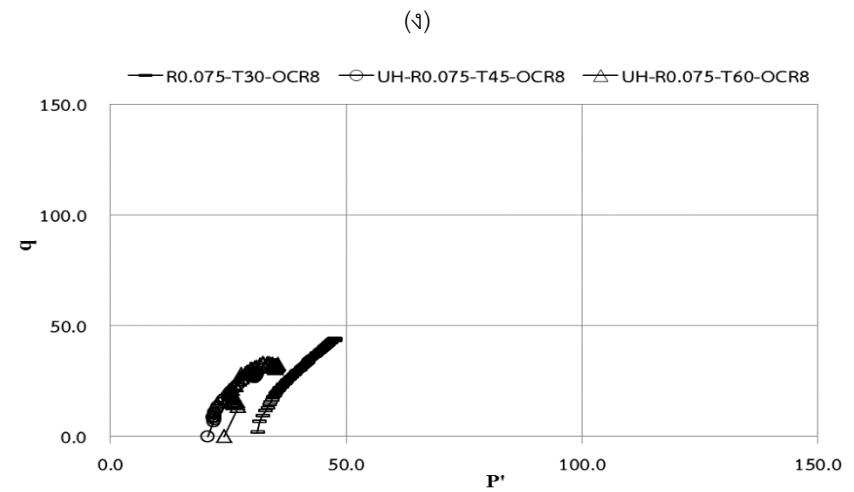
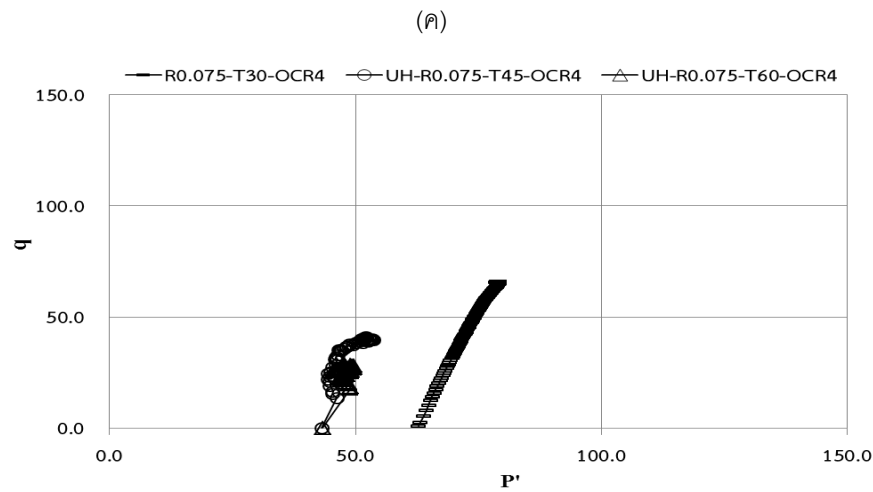
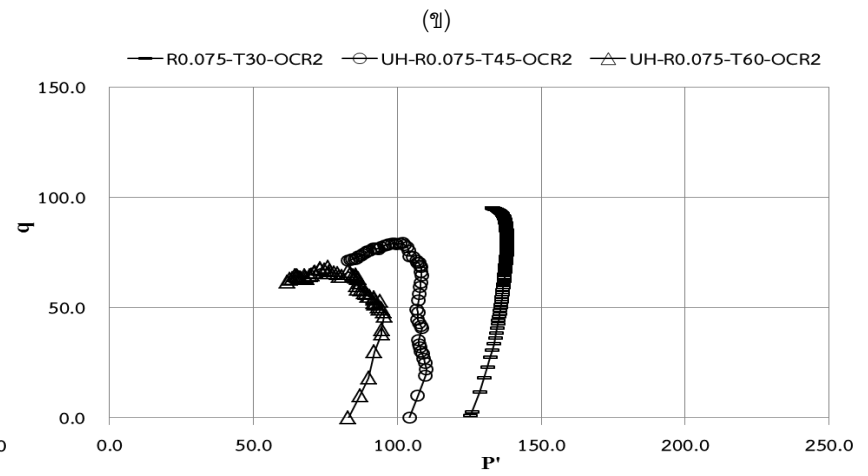
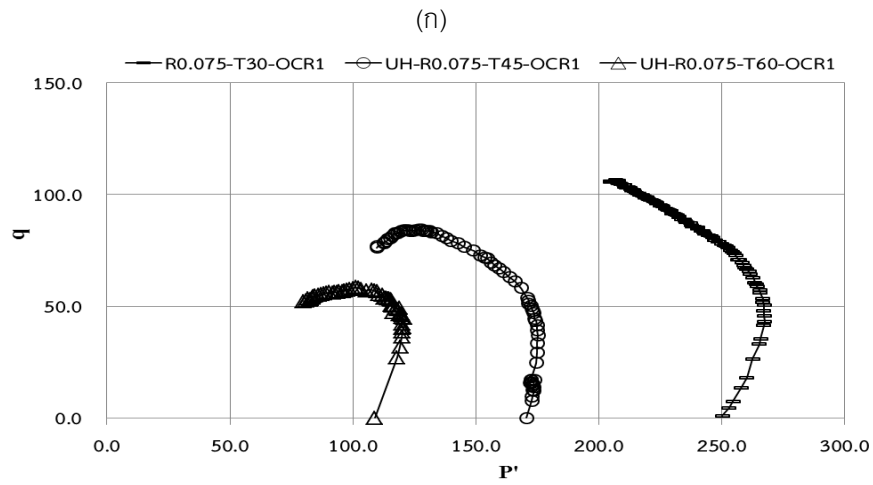
เมื่อพิจารณาเส้นทางความเค้นที่ทำการทดสอบที่อัตราความเครียด 0.075% ต่อนาที และให้ความร้อนแก่ตัวอย่างดินเหนียวปากพวงในอุณหภูมิที่ต่างกัน พบว่าเส้นทางความเค้นมีแนวโน้มย้ายจากขวาไปทางซ้ายของกราฟที่ได้จากการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งแนวโน้มของลักษณะกราฟในแต่ละสภาวะการอัดแน่นเกินตัวคล้ายกับอัตราการเฉือนซ้ำที่ 0.02% ต่อนาที โดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.42 การทดสอบที่ (ก) สภาวะการอัดแน่นเกินตัวปกติ และ (ข) สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 เส้นทางความเค้นมีแนวโน้มเคลื่อนที่จากขวาไปซ้ายเช่นเดียวกัน แต่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 มีลักษณะความโค้งน้อยกว่าและชันตรงกว่า ส่วนการทดสอบ (ค) ที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4 เส้นทางความเค้นจะเริ่มเบี่ยงไปทางขวาของเส้นทางความเค้นของการทดสอบที่อุณหภูมิห้องเล็กน้อย และการทดสอบ (ง) ที่สภาวะการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 8 ที่เส้นทางความเค้นจะเคลื่อนไปทางขวาอย่างเห็นได้ชัด

เมื่อนำค่าเส้นทางความเค้นของแต่ละอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่การเฉือนด้วยอัตราความเครียด 0.075% ต่อนาที ที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส มาลากเส้นสถานะวิกฤต (Critical state line, CSL) พบว่าที่เส้นกราฟของอุณหภูมิ 45 ให้ค่าความชันของเส้นสถานะวิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.70 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.43(ก) และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.43(ข) พบว่าค่าความชันของเส้นสถานะวิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.64 ซึ่งมีความมากกว่าความชันที่การทดสอบด้วยอัตราความเครียด 0.02 % ต่อนาที และเมื่อพิจารณาค่าความชันเส้นของฮอฟสตีฟซึ่งทั้ง 2 อุณหภูมิคือ 0.56 และ 0.48 ตามลำดับ ความชันเส้นของฮอฟสตีฟก็มีความมากกว่าความชันเส้นของฮอฟสตีฟที่ทดสอบด้วยอัตราความเครียด 0.02 % ต่อนาทีเช่นกัน

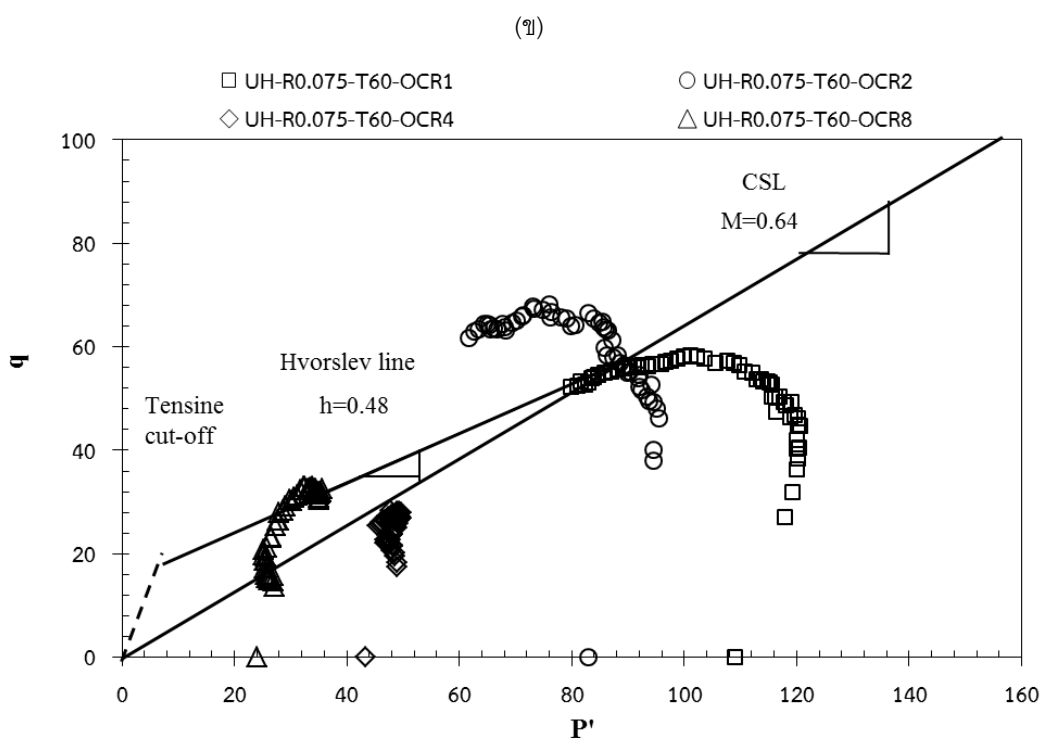
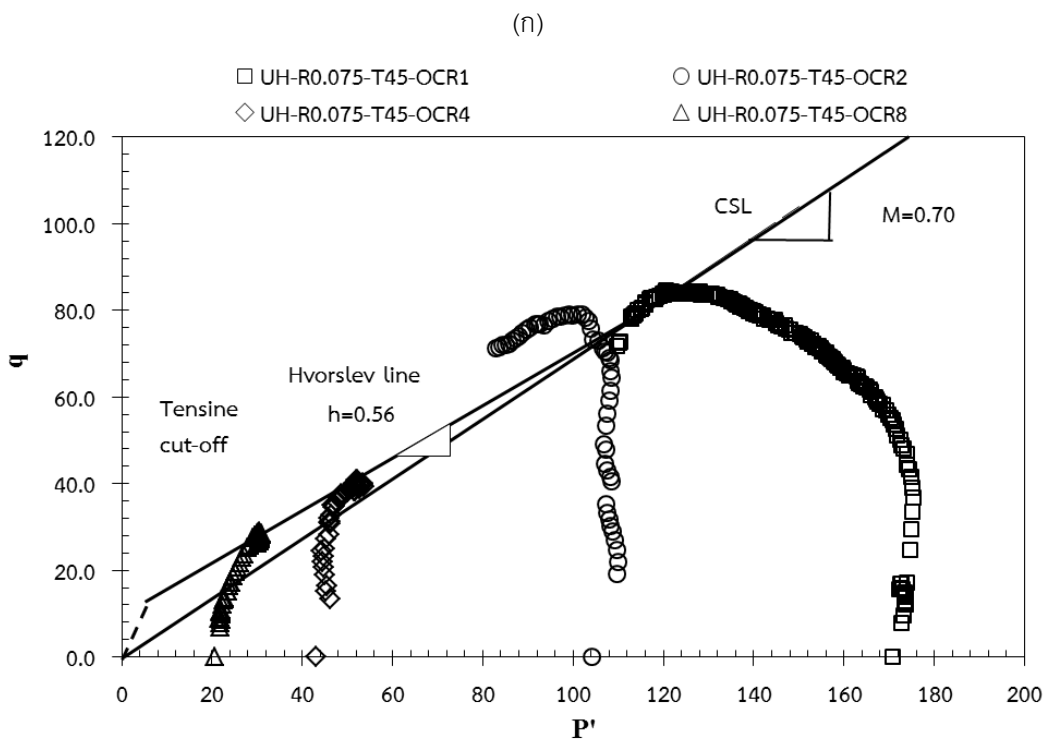
3) กรณีค่าอัตราความเครียด 1.0% ต่อนาที

เมื่อทำการทดสอบดินเหนียวปากพวงที่อัตราความเครียด 1.0% ต่อนาที และให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าในอัตราการอัดแน่นเกินตัวเดียวกันเส้นทางความเค้นมีแนวโน้มลักษณะของกราฟใกล้เคียงกัน จะแตกต่างกันที่ความสูงกราฟของความเค้นเบี่ยงเบน ในสภาวะอัดตัวปกติและอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 2 จะมีเส้นทางความเค้นของตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงมีแนวโน้มย้ายไปทางซ้ายของกราฟอุณหภูมิห้อง ส่วนในสภาวะอัดแน่นเกินตัวสูงเส้นทางความเค้นของตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงมีแนวโน้มย้ายไปทางขวาของกราฟอุณหภูมิห้องดังรูปที่ 4.44

เมื่อลากเส้นสถานะวิกฤตโดยนำค่าเส้นทางความเค้นของแต่ละอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่การเฉือนด้วยอัตราความเครียด 1.0% ต่อนาที ดังรูปที่ 4.45 (ก) และ 4.45 (ข) เป็นการเฉือนที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะได้ความชันของเส้นสถานะวิกฤตที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าเท่ากับ 0.56 และ 0.58 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความชันเส้นของฮอฟสตีฟซึ่งทั้งอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะได้ค่าความชัน 0.38 และ 0.45 ตามลำดับ

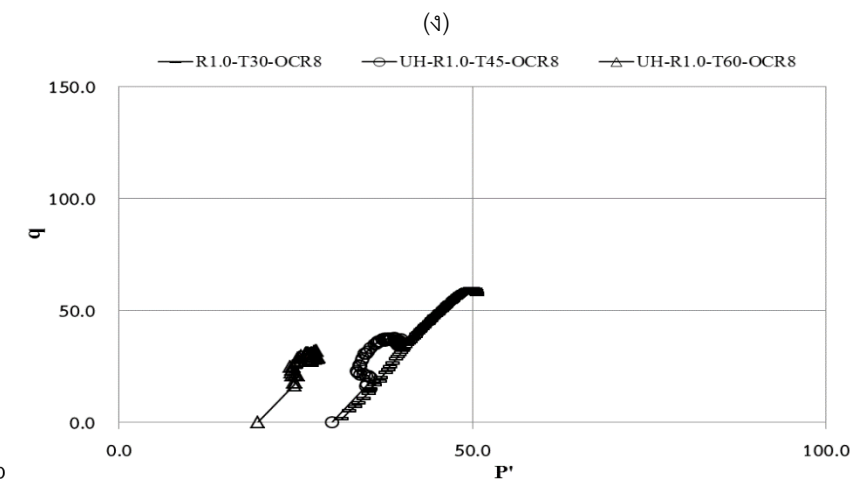
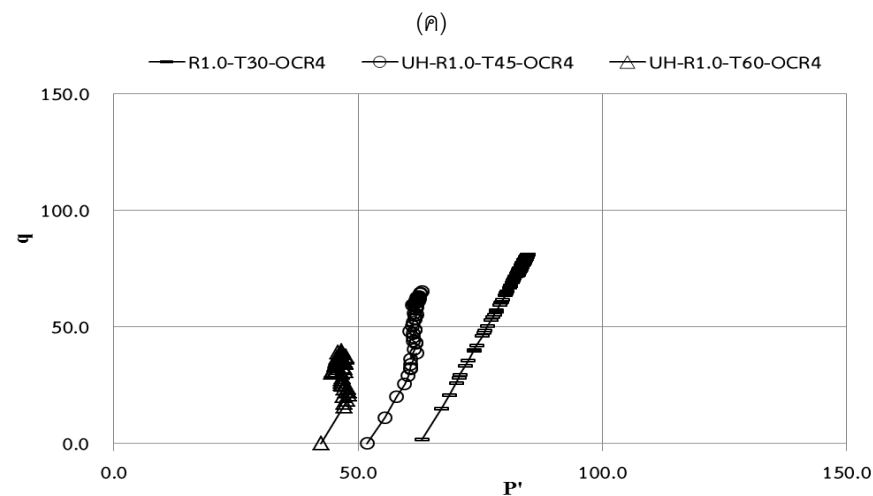
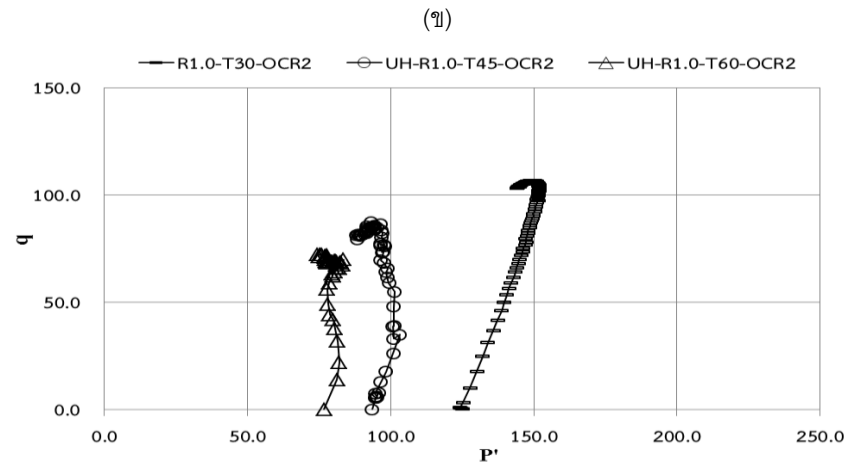
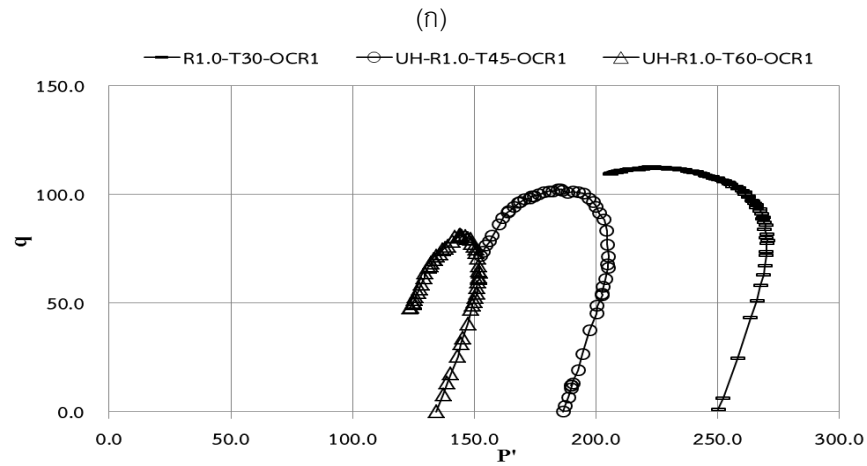


รูปที่ 4.42 เส้นทางความเค้นของตัวอย่าง ที่อัตราความเครียด 0.075%ต่อนาที
 (ก) OCR=1 , (ข) OCR=2 , (ค) OCR=4 , (ง) OCR=8

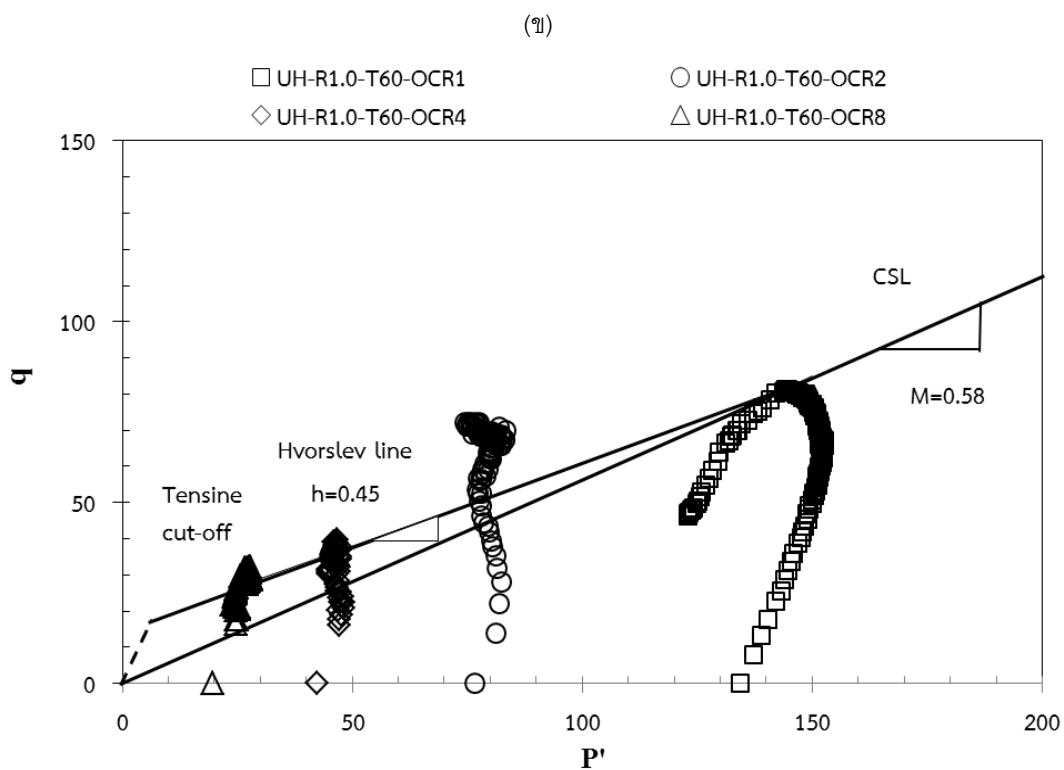
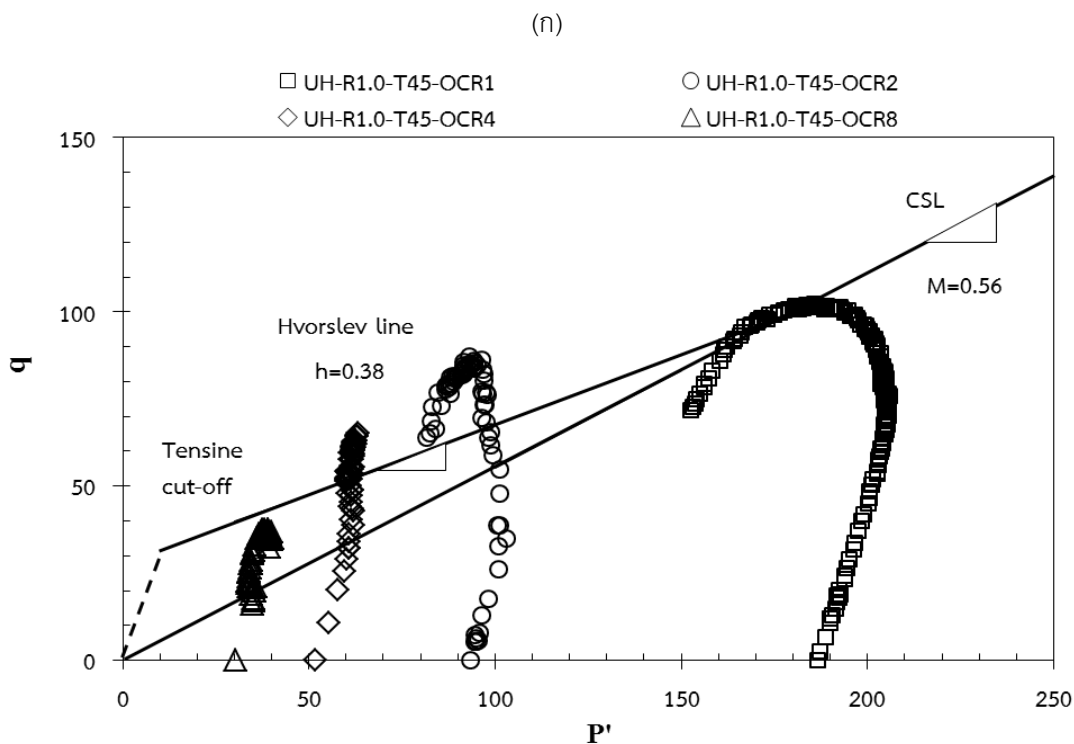


รูปที่ 4.43 เส้นทางการเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 0.075%ต่อนาที

(ก) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.44 เส้นทางการเค้นของตัวอย่าง ที่อัตราความเครียด 1.0% ต่อนาที
 (ก) OCR=1 , (ข) OCR=2 , (ค) OCR=4 , (ง) OCR=8

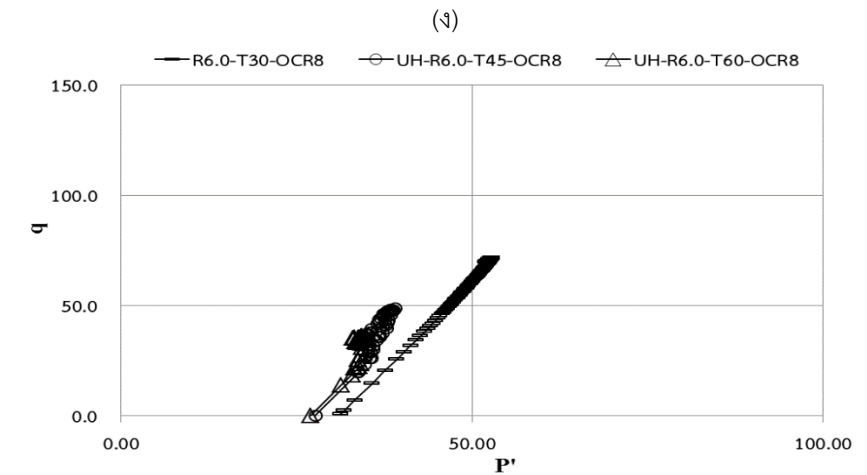
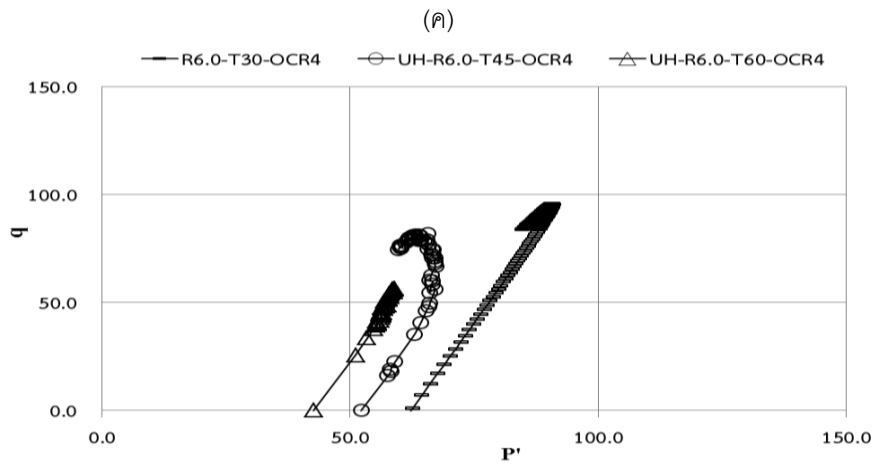
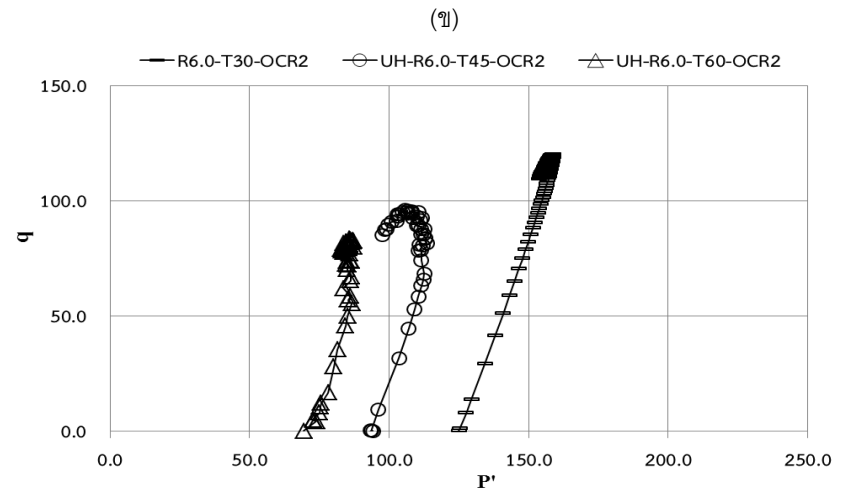
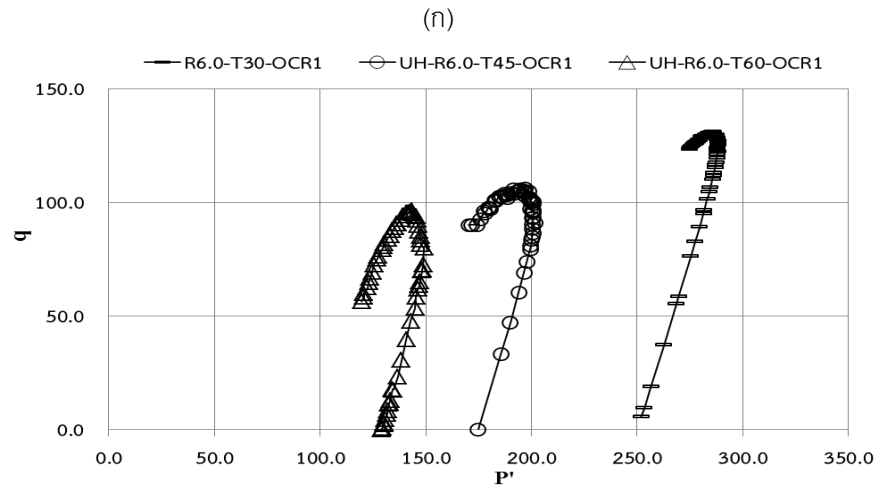


รูปที่ 4.45 เส้นทางการความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 1.0%ต่ออนาที
 (ก) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

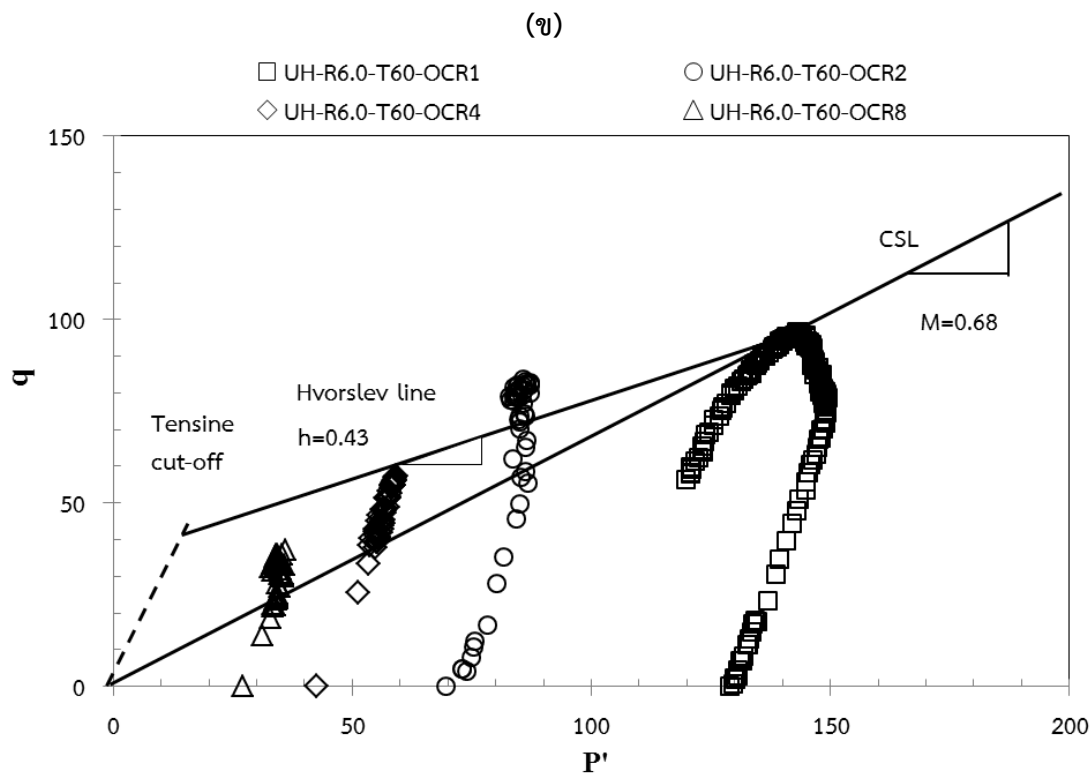
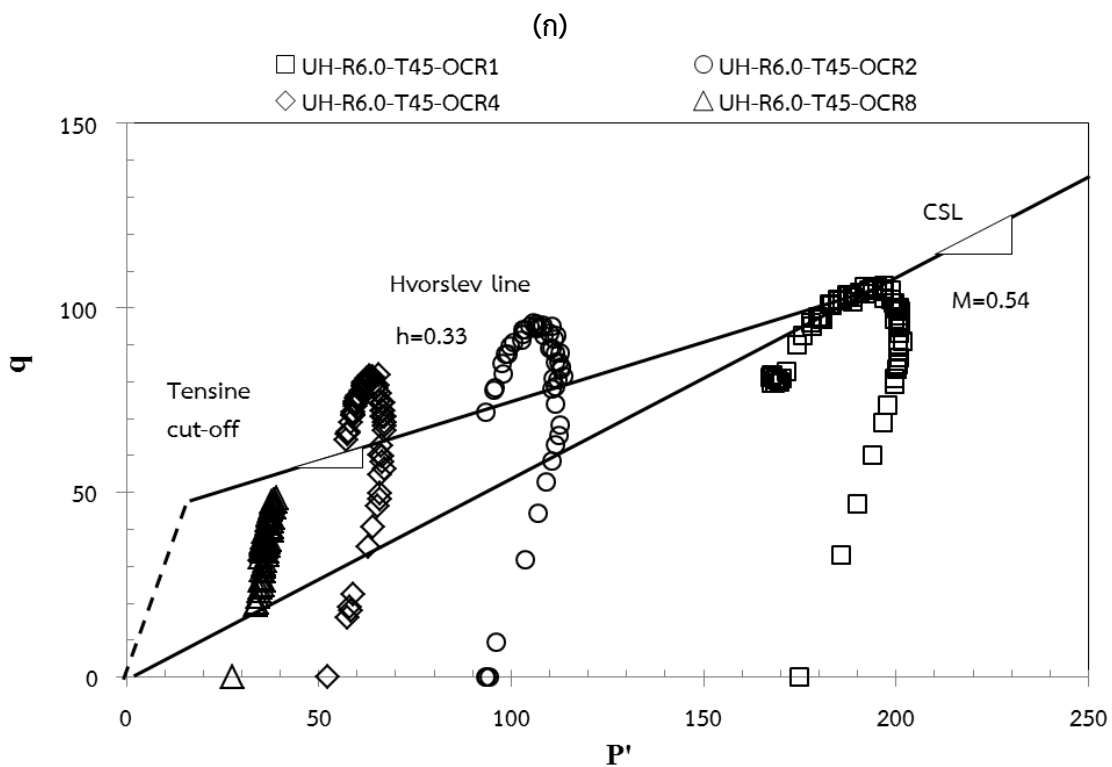
4) กรณีค่าอัตราความเครียด 6.0% ต่อนาที

เมื่อทำการทดสอบดินเหนียวปากพียงที่อัตราความเครียด 6.0% ต่อนาที และให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าในอัตราการอัดแน่นเกินตัวเดียวกันเส้นทางความเค้นมีแนวโน้มลักษณะของกราฟใกล้เคียงกัน และเส้นทางความเค้นของตัวอย่างที่มีอุณหภูมิมากจะมีแนวโน้มที่จะย้ายไปทางซ้ายของกราฟอุณหภูมิห้อง โดยที่อุณหภูมิที่สูงกว่าจะอยู่ทางด้านซ้ายสุดและลักษณะของกราฟไม่แตกต่างกันมากนัก ดังรูปที่ 4.46

เส้นสถานะวิกฤติของแต่ละอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่การเหนือนด้วยอัตราความเครียด 6.0% ต่อนาทีซึ่งเป็นการเหนือนที่เร็วที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.47 (ก) เป็นการเหนือนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และรูปที่ 4.47 (ข) เป็นการเหนือนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อลากเส้นสถานะวิกฤติจะได้ความชันของเส้นสถานะวิกฤติมีค่าเท่ากับ 0.54 และ 0.68 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความชันที่การทดสอบด้วยอัตราความเครียดที่ผ่านมา และเมื่อพิจารณาความชันเส้นของฮอปสลิฟซึ่งทั้ง 2 อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 0.33 และ 0.43 ตามลำดับ

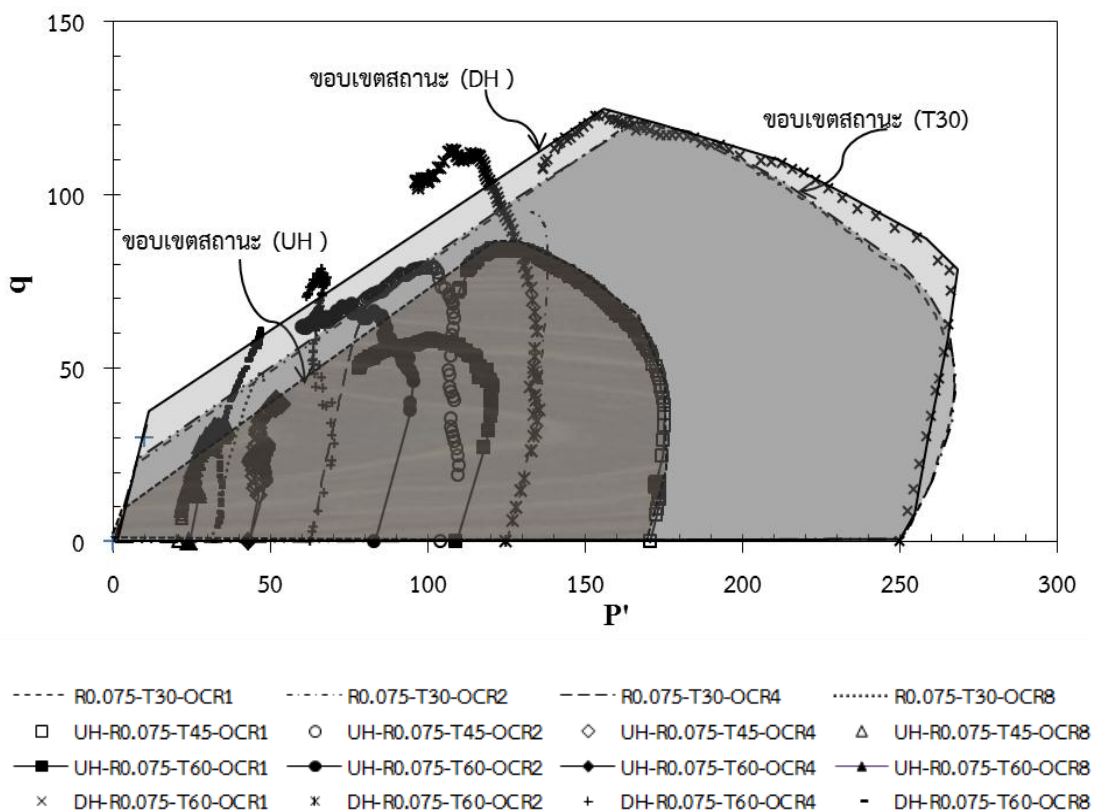


รูปที่ 4.46 เส้นทางความเค้นของตัวอย่าง ที่อัตราความเครียด 6.0% ต่อหน้าที่
 (ก) OCR=1 , (ข) OCR=2 , (ค) OCR=4 , (ง) OCR=8



รูปที่ 4.47 เส้นทางการความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเคียด 6.0% ต่อหน้าที่
 (ก) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

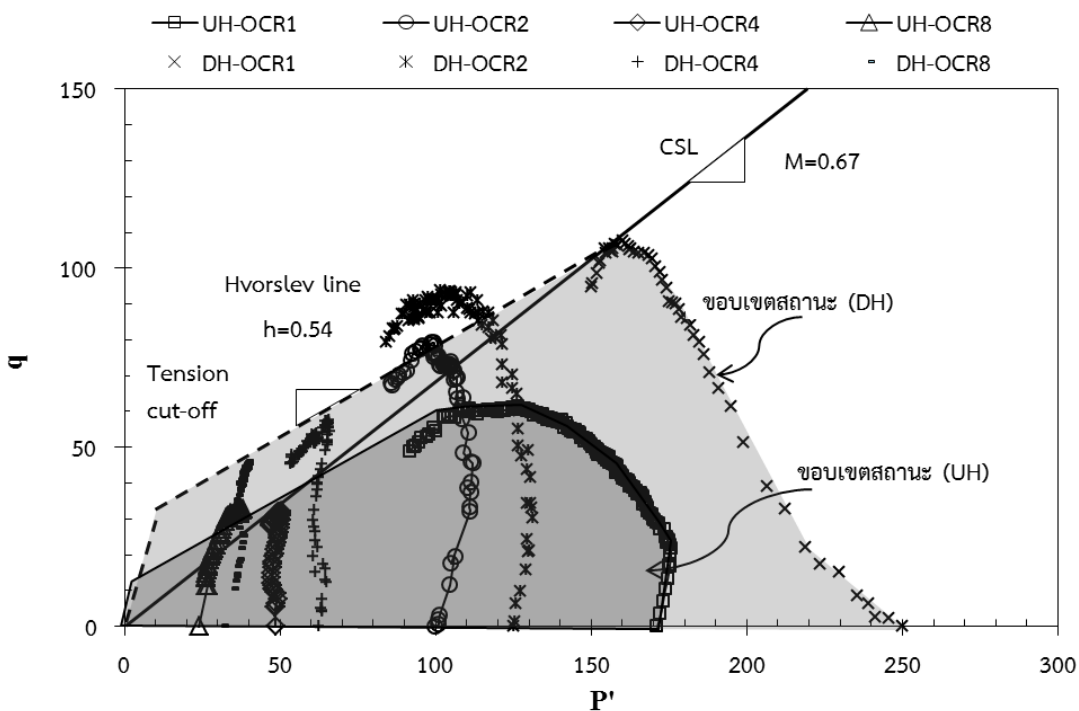
เมื่อนำเส้นทางความเค้นของการทดสอบโดยการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำของทั้งอุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราความเครียด 0.075 %ต่อนาที มาพล็อตร่วมกับเส้นทางความเค้นของการทดสอบที่อุณหภูมิห้องของการศึกษาของศิริพร (2556) ที่อัตราความเครียดเดียวกัน ซึ่งเป็นอัตราความเครียดตามมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสามแกนของ ASTM จากนั้นจึงทำการลากเส้นสถานะวิกฤติ และเส้นของฮอฟสลิฟที่จุดสูงสุดของค่าความเค้นเบี่ยงเบน พบว่าการทดสอบที่อุณหภูมิห้องให้ขอบเขตสถานะ (state boundary) กว้างกว่า และขอบเขตสถานะจะหดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งกล่าวได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อขอบเขตสถานะ แต่เมื่อนำข้อมูลของวัชระ (2560) มาพล็อตร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.48 พบว่าการทดสอบที่อุณหภูมิสูง ในเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบระบายน้ำ ให้ขอบเขตสถานะที่กว้างที่สุด ดังนั้นนอกจากอุณหภูมิมีผลต่อขอบเขตสถานะ และยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการระบายออกของแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในมวลดินด้วย ดังนั้นการให้ความร้อนแก่มวลดินเป็นผลให้พฤติกรรมการรับแรงของมวลดินเพิ่มมากขึ้น หากมีการระบายแรงดันน้ำออกจากมวลดินได้ เนื่องจากอนุภาคเม็ดดินจะทำหน้าที่รับแรงเฉือน แต่หากน้ำไม่สามารถระบายออกจากมวลดิน หรือระบายได้ช้า ทำให้แรงดันน้ำยังคงกระจายอยู่ในมวลดิน แรงดันน้ำจะทำหน้าที่รับแรงเฉือนแทนเม็ดดิน ทำให้ความสามารถในการรับกำลังต่ำลง



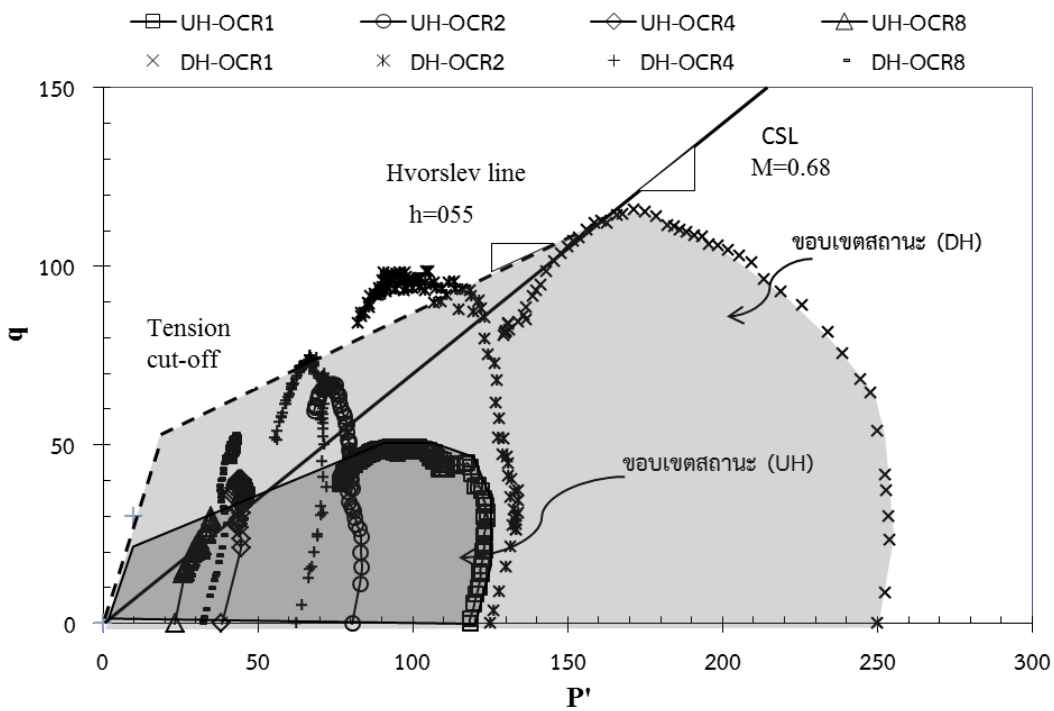
รูปที่ 4.48 ขอบเขตสถานะของการทดสอบในเงื่อนไขการให้ความร้อนต่างกัน ที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.075%ต่อนาที

เมื่อนำเส้นทางความเค้นที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนที่มีการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ มาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของวัชระ (2560) ซึ่งเป็นการทดสอบแรงอัดสามแกนที่มีการให้ความร้อนแบบระบายน้ำ ที่อัตราความเครียดต่างๆ พบว่าการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำมีผลกระทบทำให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนลดลง จึงเป็นผลให้ขอบเขตสถานะของเส้นทางความเค้นจากการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำแคบกว่าขอบเขตสถานะของการทดสอบแบบระบายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.49 ถึง 4.52 สังเกตได้ว่าความร้อนและอัตราความเครียดส่งผลต่อแนวโน้มของเส้นทางความเค้น โดยที่อัตราความเครียดต่ำ ความแตกต่างของความสูงของเส้นทางความเค้นของการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำและแบบระบายน้ำ มีความแตกต่างกันมากกว่าในการทดสอบที่ใช้อัตราความเครียดสูง กล่าวคือแนวโน้มของเส้นทางความเค้นจะขึ้นสูงเกินเส้น Critical state line ที่อัตราความเครียดต่ำ แต่ก็ยังขึ้นไม่ถึงเส้น Hvorslev line ดังนั้นที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวต่ำ ผลกระทบจากอัตราความเครียดและความร้อนจะส่งผลมากกว่าในดินที่มีค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวสูง และส่งผลในการเลื่อนด้วยอัตราความเครียดต่ำมากกว่าที่อัตราความเครียดสูง

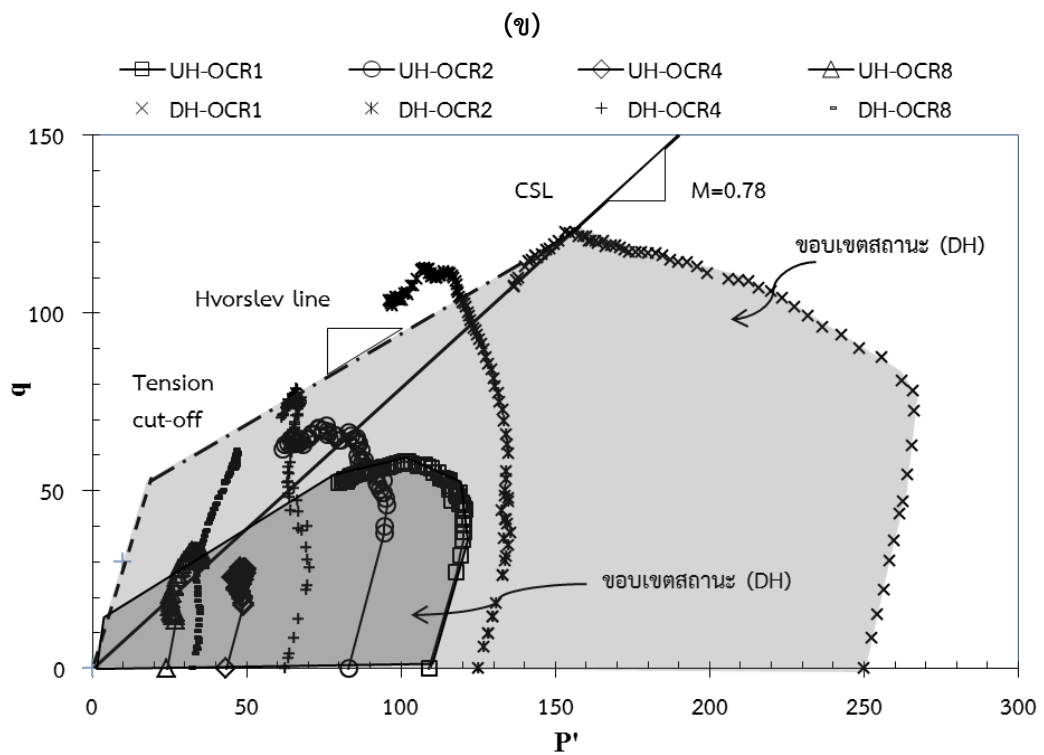
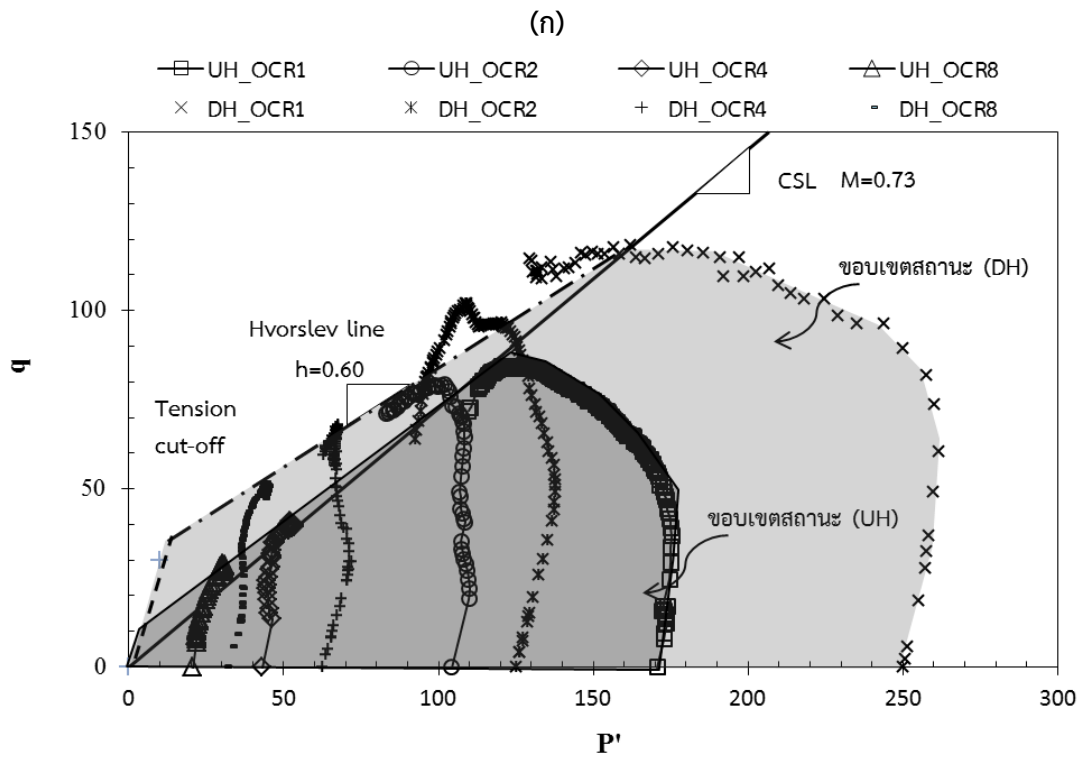
(ก)



(ข)

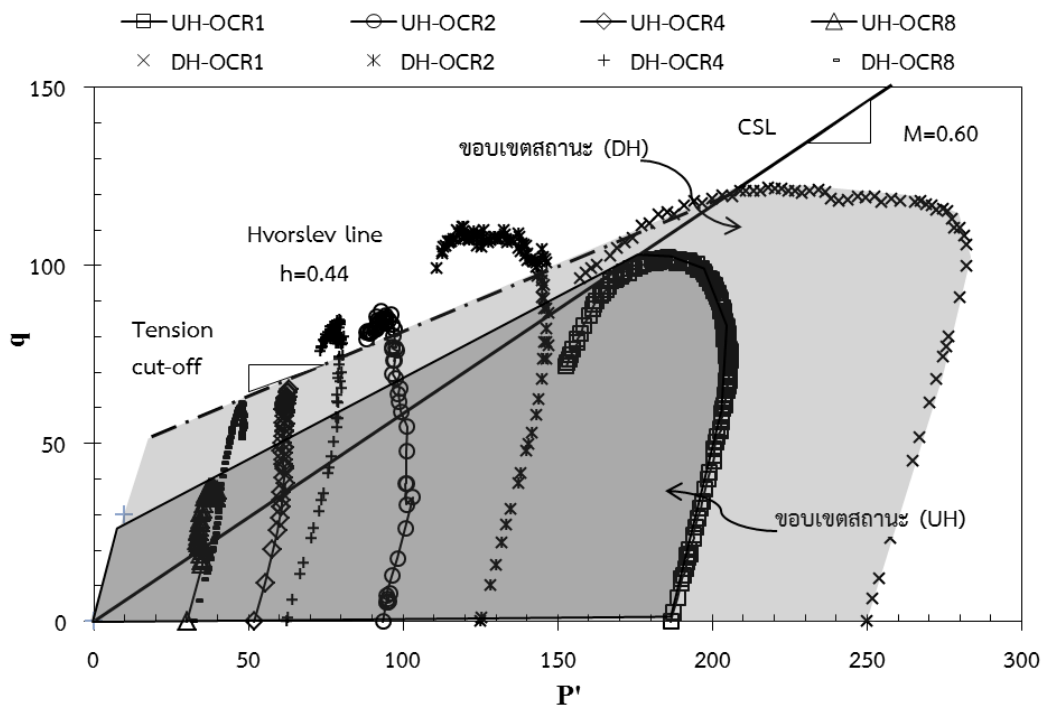


รูปที่ 4.49 เส้นทางการความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 0.02% มม.ต่อ นาที (ก) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

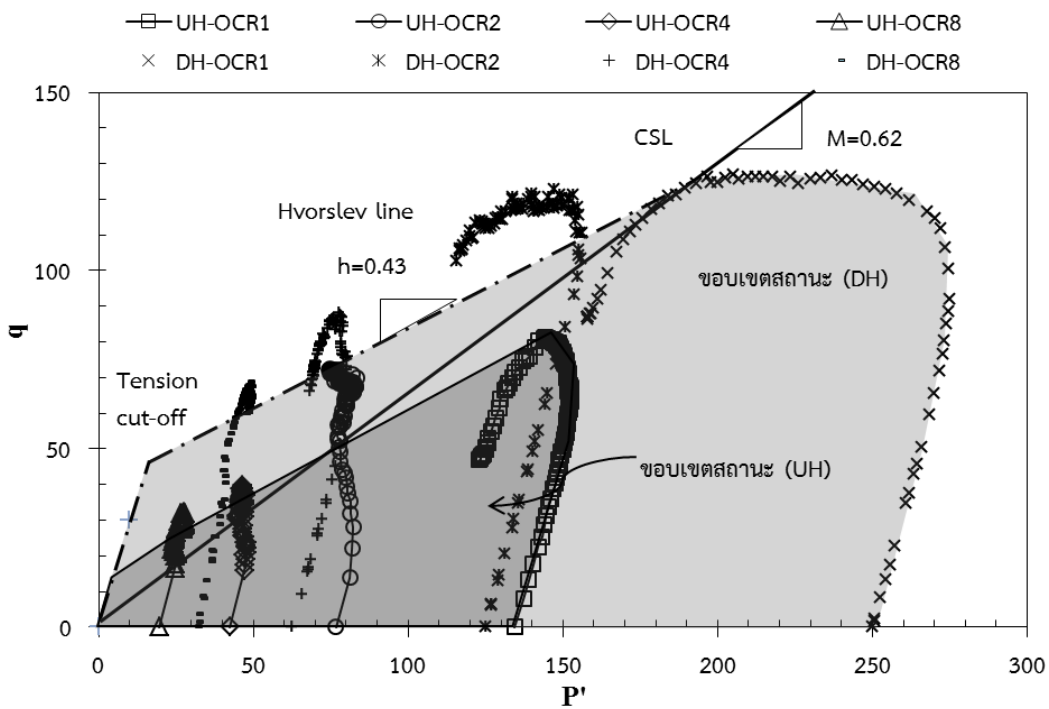


รูปที่ 4.50 เส้นทางการความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกันอัตราความเครียด 0.075% มม.
 ต่อนาที (ก) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

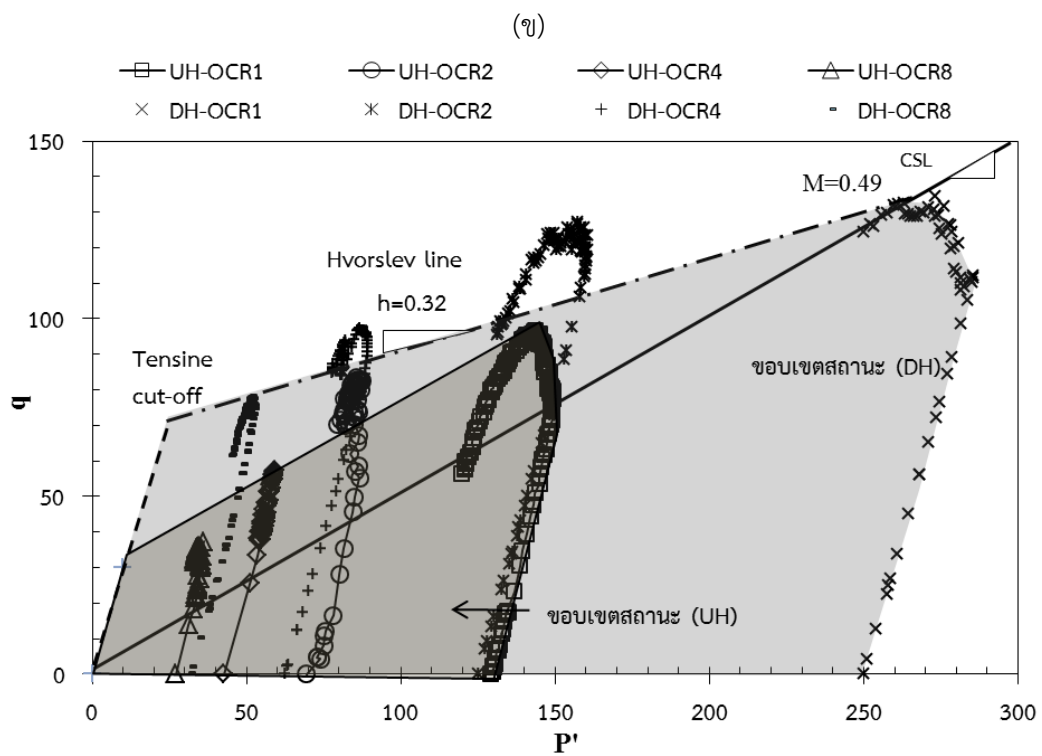
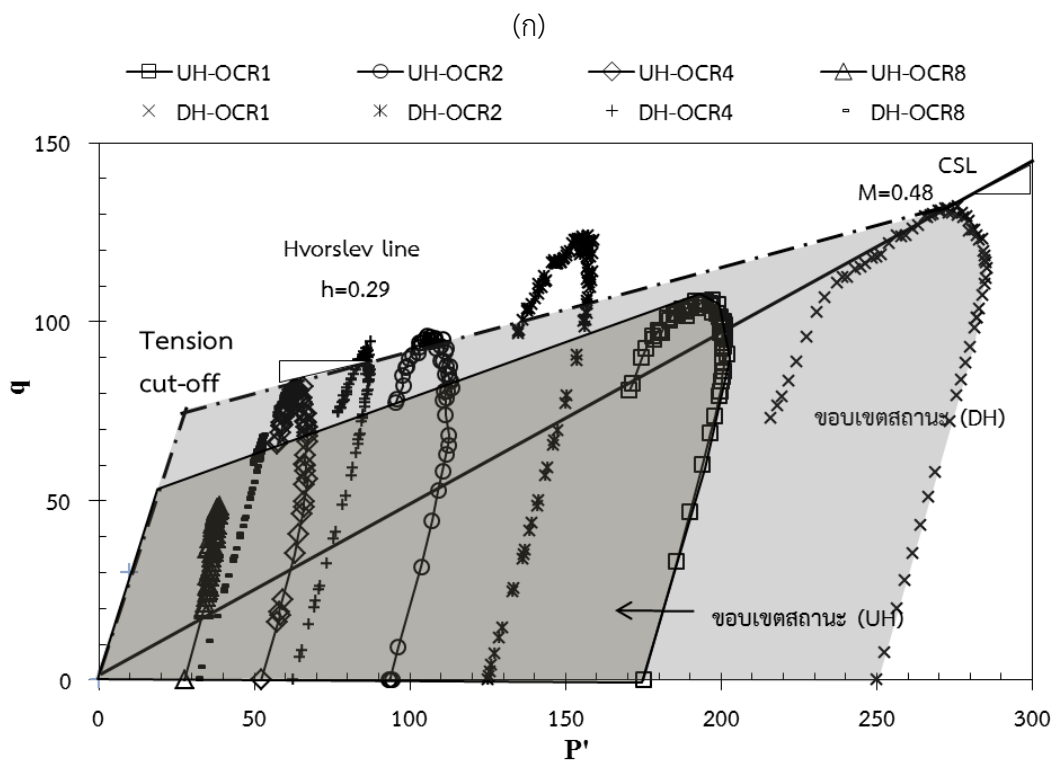
(ก)



(ข)



รูปที่ 4.51 เส้นทางความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 1.0% มม.ต่อนาที (ก) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.52 เส้นทางการความเค้นที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน อัตราความเครียด 6.0% มม.ต่อ นาที (ก) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เมื่อนำความชื้นของเส้นสถานะวิกฤติของตัวอย่างที่ทดสอบที่อุณหภูมิห้องมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทดสอบที่อุณหภูมิสูง พบว่าความชื้นของเส้นสถานะวิกฤติที่ทำการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ มีค่าลดลงเมื่อดินได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกๆอัตราความเครียด ยกเว้นที่อัตราความเครียด 6.0 % ต่อหน้าที่ให้ค่าความชื้นของเส้นสถานะวิกฤติเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.27 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับทดสอบที่ให้ความร้อนแบบระบายน้ำ พบว่าค่าความชื้นของเส้นสถานะวิกฤติของการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ มีค่าต่ำกว่าการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบระบายน้ำและแบบไม่ให้ความร้อน ยกเว้นที่อัตราความเครียด 6.0 % ต่อหน้าที่

ส่วนค่าความชื้นของเส้นฮอฟสลิฟของการทดสอบที่อุณหภูมิห้องมาพิจารณาร่วมกับการทดสอบที่อุณหภูมิสูง ดังตารางที่ 4.28 พบว่าดินที่ได้รับความร้อนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าความชื้นของเส้นฮอฟสลิฟไม่แตกต่างกันมากนักกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แต่มีค่าความชื้นของเส้นฮอฟสลิฟน้อยกว่าการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบระบายน้ำในทุกๆอัตราความเครียด ยกเว้นที่อัตราความเครียด 6.0 % ต่อหน้าที่

ตารางที่ 4.27 ความชื้นของเส้นสถานะวิกฤติที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดต่างกัน

อุณหภูมิ	ความชื้นของเส้นสถานะวิกฤติ			
	0.02%ต่อหน้าที่	0.075%ต่อหน้าที่	1.0%ต่อหน้าที่	6.0%ต่อหน้าที่
อุณหภูมิห้อง*	0.60	0.67	0.71	0.50
45(UH)	0.54	0.70	0.56	0.54
60(UH)	0.55	0.64	0.58	0.68
45(DH)	0.67	0.73	0.60	0.48
60(DH)	0.68	0.78	0.62	0.49

ตารางที่ 4.28 ความชื้นของเส้นฮอฟสลิฟที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดต่างกัน

อุณหภูมิ	ความชื้นของเส้นฮอฟสลิฟ			
	0.02%ต่อหน้าที่	0.075%ต่อหน้าที่	1.0%ต่อหน้าที่	6.0%ต่อหน้าที่
อุณหภูมิห้อง*	0.35	0.46	0.42	0.33
45(UH)	0.40	0.56	0.38	0.33
60(UH)	0.29	0.48	0.45	0.43
45(DH)	0.54	0.60	0.44	0.29
60(DH)	0.55	0.59	0.43	0.32

หมายเหตุ: * คือ ข้อมูลของศิริพร (2556)

DH คือ ข้อมูลของวัชระ (2556)

4.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่มีต่อพารามิเตอร์ในทฤษฎีสถานะวิกฤต

จากการทำการทดสอบแรงอัดสามแกน ได้นำค่าตัวแปรต่างๆ จากผลการทดสอบที่ได้มาพล็อตเส้นทางความเค้นตามหัวข้อ 4.2.3 เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ในสถานะวิกฤต อันประกอบด้วยค่าความชันของเส้นสถานะวิกฤต (slope of critical state line, M) ค่าความชันของเส้นอัดตัวคายนํ้าในช่วงลดแรงและเพิ่มแรงซ้ำ (K) ค่าความชันของเส้นอัดตัวคายนํ้า (λ), ค่าความเค้นประวัติศาสตร์ (p'_c) และค่าโมดูลัสเฉือน (shear modulus, G) โดยค่าต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.34 ซึ่งค่าความชันของเส้นอัดตัวคายนํ้าในช่วงลดแรงและเพิ่มแรงซ้ำและค่าความชันของเส้นอัดตัวคายนํ้าหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าของตัวอย่างดินที่มีการให้ความร้อนตามอุณหภูมิต่างๆ ก่อนการทดสอบตามหัวข้อที่ 4.2.1 ที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวหรือดัชนีการอัดตัว (compression index, c_c) และค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวซ้ำหรือดัชนีการอัดตัวซ้ำ (recompression index, c_r) นำมาประมาณเป็นค่าพารามิเตอร์ในทฤษฎีสถานะวิกฤตโดยความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.17 และ 2.18

ค่าโมดูลัสเฉือน สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนบัวของ ซึ่งมีค่าประมาณ 0.5 สำหรับดินเหนียวอ่อน ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินเหนียวปากพนังจากการทดสอบแรงอัดสามแกนที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงในหัวข้อที่ 4.2.2.6 ตารางที่ 4.29 ซึ่งมีผลให้ค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าประมาณ 113 ถึง 529 กิโลปาสคาล ซึ่งได้มาจากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

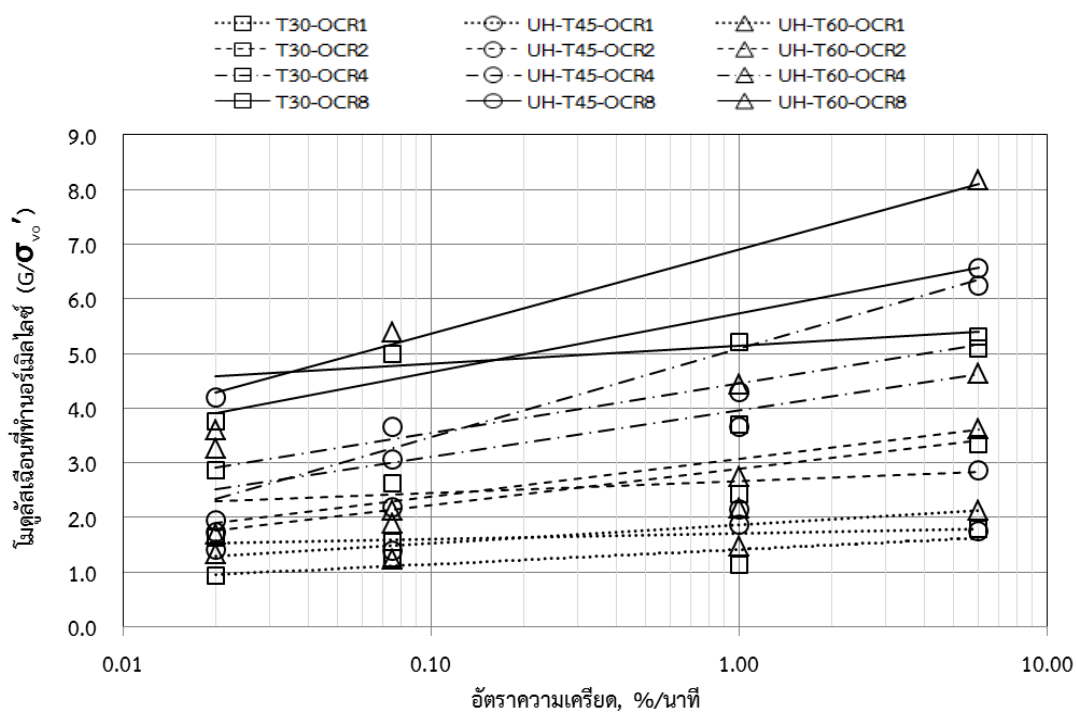
$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ 2.26 จะได้ค่าโมดูลัสเฉือน แสดงในรูปที่ 4.53 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลต่อค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มแปรผันตรงกับอัตราความเครียด และอัตราการอัดแน่นเกินตัว ดังนั้นค่าโมดูลัสเฉือนของการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบระบายน้ำจึงมากกว่าการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำและการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.29 ค่าพารามิเตอร์ในสถานะวิกฤตของดินเหนียวปากพั้ง

ตัวอย่างดินที่ถูกเตรียมที่อุณหภูมิ (°C)	λ	K	p'_c (kPa)	G (kPa)
30*	0.525	0.129	47.00	117-447
50	0.360	0.095	51.94	113-529
70	0.307	0.098	45.73	
90	0.363	0.110	50.39	
110	0.372	0.110	54.57	

หมายเหตุ: * คือ การทดสอบของศิริพร (2556)



รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนที่ทำนอร์มัลไลซ์และอัตราความเครียด

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราที่มีต่อพฤติกรรมด้านกำลังของดินเหนียวปากพั้ง โดยแบ่งการทดสอบเป็นสองส่วน คือ การศึกษาคุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวปากพั้ง และทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ ที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 1 2 4 และ 8 ที่อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส และเดือนด้วยอัตราความเครียด 4 อัตรา คือ 0.02 0.075 1.0 และ 6.0 % ต่อนาที โดยมีการให้ความร้อนในเงื่อนไขไม่ระบายน้ำ (undrained heat) จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และการทดสอบที่ให้ความร้อนในเงื่อนไขระบายน้ำ (drained heat) ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบทั้งหมดได้ดังนี้

5.1 ผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวปากพั้ง

5.2.1. ดินเหนียวปากพั้งมีส่วนประกอบของแร่เป็น ควอตซ์ เกาลินไนท์ และอิลไลต์ มีแร่ดินเหนียวหลักอยู่ในกลุ่มเกาลินไนท์ มีองค์ประกอบหลักทางเคมีประกอบด้วย ซิลิกา อลูมินา และเหล็ก

5.2.2. ดินเหนียวปากพั้งจัดเป็นดินเหนียวอินทรีย์ ที่มีความเป็นพลาสติกสูง (Organic clay, OH) และอุณหภูมิส่งผลต่อค่าขีดพิกต์พลาสติกและค่าขีดจำกัดเหลวของดินเหนียวปากพั้ง โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าขีดจำกัดเหลวลดลงอย่างเห็นได้ชัด

5.2.3. อุณหภูมิส่งผลต่อการลดลงของน้ำหนักรวมดินแห้ง เนื่องมาจากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ (organic content) ในมวลดิน ซึ่งมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ โดยอุณหภูมิมิสูง จะทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในมวลดินลดลง โดยไม่ได้เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างโมเลกุลของดินแต่อย่างใด

5.2 ผลของอัตราความเครียดต่อกำลังของดินเหนียวปากพั้ง

5.4.1. อัตราความเครียดในแนวแกนมีผลให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเร็วขึ้นในทุกค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวและอุณหภูมิ ดินเหนียวปากพั้งมีคุณสมบัติทางของการตอบสนองด้านอัตราความเครียดแบบไม่เชิงเส้นเช่นเดียวกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ผลกระทบของอัตราความเครียดแสดงเด่นชัดในผลการทดสอบตัวอย่างดินที่อุณหภูมิห้อง เมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างสูงขึ้นจะเห็นผลกระทบของอัตราได้น้อยลง ในทุกอัตราการอัดแน่นเกินตัว

5.4.2. แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นขณะทำการเดือนจะมีค่าสูงเมื่อเดือนด้วยอัตราความเครียดที่น้อย และแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าน้อยเมื่อเดือนด้วยอัตราความเครียดที่มากขึ้น เนื่องจากอัตราความเครียดที่เร็วมีผลต่อการกระจายตัวของแรงดันน้ำในมวลดินกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ การจัดเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลเม็ดดินเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์

5.3 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังของดินเหนียวปากพั้ง

5.3.1. จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินเหนียวปากพั้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการให้ความร้อน หากให้ความร้อนแบบร้อนโดยให้แรงดันน้ำสามารถระบายออกได้ จะทำให้มวลดินมีสามารถรับแรงได้มากกว่าการทดสอบที่ไม่ให้ความร้อน แต่หากให้ความร้อนโดยไม่ให้แรงดันน้ำระบายออกได้ มวลดินจะมีกำลังรับแรงได้น้อยกว่าการทดสอบที่ไม่ให้ความร้อน

5.3.2. แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นจากกระบวนการให้ความร้อน จะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของมวลดิน ในขณะที่ทำการเฉือน กล่าวคือให้ความร้อน ทำให้มวลน้ำขยายตัว ความหนืดของน้ำลดลง แต่เนื่องจากน้ำไม่สามารถไหลออกจากช่องว่างของดินได้ จึงทำให้แรงดันของน้ำเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังของดิน ในดินสภาวะอัตราการอัดแน่นเกินตัวปกติ ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินสูงกว่าดินสภาวะอัตราการอัดแน่นเกินตัวมากกว่าปกติ

5.3.3. อุณหภูมิมีผลต่อสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวิบัติที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่ำมากกว่าที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวสูง และพบว่า การทดสอบที่ให้ความร้อนแบบระบายน้ำให้แนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดวิบัติสูงกว่าการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำและการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ เนื่องมาจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัดแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้น ในขณะที่เฉือนที่วัดบริเวณหัวและท้ายของก้อนตัวอย่างดิน ทำให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ได้จากการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบระบายน้ำสูงกว่าการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำและการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

5.3.4. การให้ความร้อนทำให้ดินถึงจุดวิบัติเร็วขึ้น กล่าวคือ ดินที่อุณหภูมิห้องจะถึงจุดวิบัติอยู่ที่ประมาณ 12.1 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดแนวแกน ดินที่ได้รับอุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียสแบบไม่ระบายน้ำ มีจุดวิบัติอยู่ที่ประมาณ 8.5 และ 7.0 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดแนวแกน ซึ่งมากกว่าการทดสอบโดยการให้ความร้อนแบบระบายน้ำเล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.3 และ 6.2 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดแนวแกน ตามลำดับ

5.4 ผลของอุณหภูมิและอัตราความเครียดต่อค่าพารามิเตอร์และขอบเขตสถานะในทฤษฎีสถานะวิกฤต

5.4.1. ขอบเขตสถานะของเส้นทางความเค้นของการทดสอบในเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบระบายน้ำ มีขอบเขตที่กว้างกว่าขอบเขตสถานะของการทดสอบแบบไม่ให้ความร้อน และการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ ตามลำดับ

5.4.2. ค่าความชันของเส้นสถานะวิกฤติของการทดสอบในเงื่อนไขการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ มีค่าต่ำกว่าการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบระบายน้ำ และแบบไม่ให้ความร้อน กล่าวคือ การให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ จะทำให้ค่าความชันของเส้นสถานะวิกฤตมีค่าลดลงในทุกๆอัตราความเครียด ยกเว้นที่อัตราความเครียด 6.0 % ต่อหน้าที่ ซึ่งให้ค่าความชันของเส้นสถานะวิกฤติเพิ่มมากขึ้น

5.4.3 ดินที่ได้รับความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าความชื้นของเส้นฮอฟสลิฟไม่แตกต่างกันมากนักกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แต่ให้ค่าความชื้นของเส้นฮอฟสลิฟน้อยกว่าการทดสอบที่ให้ความร้อนแบบระบายน้ำในทุกๆอัตราความเครียด ยกเว้นที่อัตราความเครียด 6.0 % ต่อนาที

5.5 ข้อเสนอแนะ

5.5.1 ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความร้อนต่อพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวปากพั้ง เพื่อให้ได้รับความเข้าใจที่ชัดเจนขึ้น ควรศึกษาต่อที่อุณหภูมิสูงกว่า 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากผลจากการทดสอบการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน ด้วยวิธี Thermo gravimetric analysis TGA ในหัวข้อที่ 4.1.4 พบว่าน้ำหนักของมวลดินเหนียวปากพั้งจะเปลี่ยนแปลงไปมากที่อุณหภูมิดังกล่าว

5.5.2 ในการศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียว เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุม ควรทดสอบการทดสอบสามแกนแบบแรงดึงเพิ่มเติมด้วย

บรรณานุกรม

- ชูศักดิ์ ศิริรัตน์. 2552. Consistency Limits. สื่อการสอนวิชา Soil Mechanics Laboratory. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.
- ธนกร ชมพูนรัตน์ และ สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. 2551. พฤติกรรมความหนืดแบบไม่เชิงเส้นของดินเหนียวกรุงเทพฯ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13. โรงแรมจอมเทียน ปาล์มบีช พัทยา จ.ชลบุรี 14-16 พฤษภาคม 2551.
- ศิริพร ชีวะกุล. 2556. การศึกษาพฤติกรรมความหนืดแบบไม่เชิงเส้นของดินเหนียวอ่อนปากพนัง. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค), คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ. 2549. คู่มือการทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์. เล่มที่ 1.
- สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. 2551. ปฐพีกลศาสตร์: หลักการพื้นฐาน. 1. แก้ไขโดย ทิพยวรรณ โหละสุต. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. 2553. ปฐพีกลศาสตร์: พลาสติกซิตีและทฤษฎีสถานะวิกฤต พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. 2557. ปฐพีกลศาสตร์: หลักการพื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 2 (ฉบับปรับปรุง) สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วัชระ ศรีสะเกษกุล. 2559. การศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังเนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราของดินเหนียวปากพนัง. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค), คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วีระ ศักดิ์สุพรรณ และสุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. 2550. การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียวกรุงเทพฯโดยการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียด. การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12 โรงแรมอมรินทร์ลากูน จ.พิษณุโลก 2-4 พฤษภาคม 2550.
- อภิชัย จุฑาศิริวงศ์. 2546. สภาพทางธรณีและลักษณะของชั้นดินในบริเวณภาคใต้. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- อมร พิมานมาศ, ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด, และ ปรีดา ไชยมหาวัน. 2556. วิศวกรรมธรณีเทคนิคเบื้องต้น. สภาวิศวกร.
- อัครเดช แซ่จิว. 2552. คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค), คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., and Chaiprakaikeow, S. 2006. Innovative thermal technique for enhancing the performance of prefabricated vertical drain during the preloading process. In Geotextiles and Geomembranes (24): 359–370.
- Alberro, J. and Santoyo, E. 1973. Long term behavior of Mexico city clay. Proceeding of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation

Engineering, Moscow.

- American Society for Testing and Materials. 1992. Standard Classification of Peat Samples by Laboratory Testing. ASTM International: ASTM D 4427-92.
- American Society for Testing and Materials. 2004. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. ASTM International: ASTM D 4767-04.
- American Society for Testing and Materials. 2006. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International: ASTM D 2487-06.
- Andersland, O. B. and Deuglas, A. G. 1970. Soil deformation rates and activation energies. *Geotechnique*, 20(1): 1-16.
- Atkinson, J.H., and Bransby, P.L. 1978. *The mechanics of soils (An introduction to critical state soil mechanics)*. McGraw-Hill.
- Bergado, D.T., Balasubramaniam, A.S., Fannin, R.J., and Holtz, R.D. 2001. Prefabricated vertical drains (PVDs) in soft Bangkok clay: a case study of the new Bangkok international airport project. *Can. Geotech. J.* (39): 304-315.
- Bergado, D.T., Abuel-Naga, H.M. and Thet, Y. 2004. Hydraulic conductivity of soft Bangkok clay under elevated temperature. *Proceeding of the International Symposium on Lowland Technology*, Bangkok, Thailand: 39-42.
- Berre, T. and Bjerrum, L. 1973. Shear strength of normally consolidated clay. *Proceeding of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow.
- Bjerrum, L. and Simons, N. E. 1960. Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays. *Norwegian Geotechnical Institute Publ* (35): 13-22.
- Campanella, R. G. and Mitchell, J. K. 1968. Influence of temperature variations on soil behavior. *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE* 94(3): 709-734.
- Christensen, R. W. and Wu, T. H. 1964. Analysis of clay deformation as a rate process. *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*. 90(1): 125-157.
- Chung, S.G., Kim, S.K., Kang, Y.J., Im, J.C., and Nagendra Prasad, K. 2006. Failure of breakwater founded on thick normally consolidated clay layer. *Geotechnique*. (56): 393-409.
- Craig, G. 1997. *Clinical calculations using dimensional analysis*. Philadelphia, Lippincott-Raven.
- Das, B.M. 2008. *Advanced soil mechanics*. 3rd edn. Taylor & Francis. New York.

- Delage, P., Sultan, N., Cui, Y.J., and Li, X.L. 2011. Permeability changes in Boom clay with temperature. International Conference and Workshop "Impact of Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical (THMC) processes on the safety of underground radioactive waste repositories", European Union, Luxembourg, 29 September - 1 October 2009.
- Den Haan, E. and Feddema, A. 2011. Deformation and strength of embankments on soft Dutch soil. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Paper: 900086.
- Devi, K.R. and Sahu, R.B. 2015. Shear strength of organic clay in Kolkata Region. *Indian Geotech J.*(January-March 2015) 45(1): 25-34.
- Dhowian, A.W. 1978. Consolidation effects on properties of highly compressible soils–peat. Ph.D thesis, University of Wisconsin, Madison.
- Edil, T.N., Wang, X. 2000. Shear strength and K_0 of peats and organic soils. In: Edil TB, Fox PJ (eds) Geotechnics of high water content materials. ASTM International, West Conshohocken: 209–225
- Grino, L. 2004. The Effect of Heat on Deformation and Strength Behavior of Soft Bangkok Clay. Master Thesis, Asian Institute of Technology.
- Habibagahi, K. 1977. Temperature effect and the concept of effective void ratio. *Indian Geotechnical Journal*: 14-34.
- Head, K.H. 1986. Manual of soil laboratory testing. vol.3. Pentech Press, London
- Hueckel, T., and Baldi, G. 1990. Thermoplasticity of saturated clays: Experimental constitute study. *J. Geotech .Engrg.* ,ASCE. 116(12): 1178-1769.
- Hobbs, N.B. 1986. Mire morphology and the properties and behaviour of some British and foreign peats. *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 19(1): 7–80.
- Houston, S. L., Houston, W. N., and Williams, N. D. 1985. Thermo-mechanical behavior of seafloor sediments. *J. Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE. 111(11): 1249-1263.
- Huat, B.B.K. 2004. Organic and peat soils engineering. University Putra Malaysia Press, Serdang: 146-150
- The International Association for the Properties of Water and Steam. **2008**.
- Indraratna, B., Balasubramanian, A.S., and Balachandran, S. 1992. Performance of test embankment constructed on failure on soft marine clay. *J. Geotech. Engg.*, ASCE. (118): 12-33.
- Jarrett, P.M. 1995. Geoguide 6. Site investigations for organic soils and peat. J.K.R. Document 20709-0341-95. Institute Kerja Raya Malaysia, Sarawak
- Karlson, R. and Viberg, L. 1967. Ratio c/p' in relation to liquid limit and plasticity index with special reference to Swedish clays Proc. Geotechnical conference. Oslo. Norway (1): 43-47

- Kuntiwattanukul, P., Towhata, I., Ohishlii, K., and Sekoiv, I. 1995. Temperature effects on undrained shear characteristics of clay. *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 35(1) Mar: 147-162.
- Ladd, C., Foot, R., Ishihara, K., Schlosser, F., and Poulos, H. 1977. Stress-deformation and strength characteristics. Proc. 9th Int. Conf. *Soil Mech. and Found. Engng*, 2 ed.: 421-494.
- Lagaly, G. 1984. Clay-organic interactions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. (A 311): 315-332.
- Lagurous, and J., G. 1969. Effects of temperature on some engineering properties of clay soils. *Proceedings of an International Conference on Effects of Temperature and Heat on Engineering Behavior of Soils*: 189-193.
- Lambe, T., William, and Robert, W. 1969. *Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, New York,
- Landva, A.O. and Pheeney, P.E. 1980. Peat fabric and structure. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(3): 416-435.
- Lechowicz, Z. 1994. An evaluation of the increase in shear strength of organic soils. *Proceeding of the Workshop on Advances in Understanding and Modelling the Mechanical Behaviour of Peat*, Balkema, Rotterdam: 167-179.
- Mitchell, J. K. 1964. Shearing resistance of soils as a rate process. *J. Soil Mech and Found. Engrg. Div., ASCE* 90(1): 231-251.
- Mitchell, J. K., Campanella, R. G. and Singh, A. 1968. Soil creep as a rate process. *J. Soil Mech. and Found, Engrg. Div., ASCE* 94(1): 29-61.
- Mitchell, J.K., and Soga, K. 2005. *Fundamentals of soil behavior*. Wiley.
- Morin, R. and Silva A.J. 1984. The effects of high pressure and high temperature on some physical properties of ocean sediments. *Journal of Geophysical Research* 89(B1): 511-526.
- Moritz, Lovisa. 1995. Geotechnical properties of clay at elevated temperatures. Report 47 vols. Sweden: Roland Offset.
- Morten, L., Augustesen, A., Lade, P.V., and Member ASCE. 2002. OBSERVED TIME DEPENDENT BEHAVIOR OF SOIL. In *ASCE Engineering Mechanics Conference*. New York.
- Murayama, S. 1969. Effect of temperature on the elasticity of clays. *Effects of Temperature and Heat on Engineering Properties of Soils*, Special Report 103, *Highway Research Board*, Washington, D.C.: 194-203.

- O'Kelly, B.C. and Zhang, L. 2013. Consolidated-drained triaxial compression testing of peat. *Geotechnical Testing Journal*, 36(3): 310–321.
- Obasi, N. L. and AnyaegbuNnam, A. J. 2005. Correlation of the undrained shear strength and plasticity index of tropical clays. *Nigerian Journal of Technology* 24(2) (September): 1-11.
- Pothiraksanon, C., Bergado, D.T., Abuel-Naga, Hayashi, S., and Du, Y.J. 2007. Novel thermo-PVD consolidation technique for soft soils. *International Association of Lowland Technology*, 9(2): 38-48.
- Quinn, T. 2013. Rate effect in fine grained soil. Degree of Doctor of Philosophy. University of Dundee.
- Ranjan, G. and Rao, ASR. 2007. Basic and applied soil mechanics. *New Age International Publishers*. New Delhi.
- Roscoe, K.H. and Burland, J.B. 1968. On the generalized behavior of wet clay, *Engineering Plasticity*, (Heyman, J. and Leckie, F.A. eds.), Cambridge University Press: 535-610
- Roy, D., and Singh, R. 2008. Mechanically stabilized earth wall failure at two soft and sensitive soil sites. *Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE*, (22): 373-380
- Sherif, M.A., and Burrous C.M. . 1969. Temperature Effects on The Confined Shear Strength of Saturated. Cohesive Soil. *Proceedings of n International Conference on Effects of Temperature and Heat on engineering Behavior of Soils. Highway Research Board: 267-272.*
- Skempton, A.W., and Nor they, R.D. 1952. The sensitivity of clays. *Geotechnique*. (3): 30 – 53.
- Subramanian, N. 2010. Properties of Soils. *Design of Steel Structures*.
- Taiye, E.A. 2012. Effect of Organic Content on Compaction and Consolidation Characteristics of Lagos Organic Clay. *EJGE*, (17): 2201-2211.
- Tanaka, N., Graham, J., and Crilly, T. 1997. Stress-strain behaviour of reconstituted illitic clay at different temperatures. *Engineering Geology: 339-350.*
- Terzaghi, K. 1925. *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*. Franz Deuticke.
- Towhata, I., Kuntiwattanukul P., Seko, I., and et al. 1993. Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests. *Soils and Foundation: 170 - 183.*
- Trani, L.D., Dennes, O., Bergado, T., and Abuel-Naga, H.M.. 2008. Thermal Effects on Undrained Shear Strength of Normally Consolidated Soft Bangkok Clay. *In*

- Geotechnical special publication*, New Orleans, Louisiana: 1069-1705.
- Vaid., and Campanella. 1977. Time dependent behavior of undisturbed clay. *Journal of geotechnical engineering division*. (103)
- van Oiphen, H. 1963. Introduction to Clay Colloid Chemistry. Wiley Interscience. New York.
- Wood, D.M. 1990. Soil Behaviour and critical state soil mechanics. Cambridge University Press.
- Zhu, J. G., and Yin, J. H. 2000. Strain – rate – dependent stress – strain behavior of over consolidated Hong Kong marine clay. *Journal of geotechnical engineering* (37): 1272 – 1282.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

1 / 4

Job No. : T50 (อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส)

Date : 13-Dec-17

Project : ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราความเครียดต่อพฤติกรรมกรณเอนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปากพั้ง

Owner : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว)

Location : ดินที่ความลึก 6.50-7.00 เมตร

Contractor : พิมพ์ปราชญ์ พันธุ์วิศวกรรม

Soil Sample : ดินเหนียวสีเทา

L.L. = 85.02 P.I. = 53.68

Specific Gravity, G_s = 2.25

Boring No. BH-1 Depth 6.5 - 7 m

Sample No. อุณหภูมิ 50°C

Water table 1.0 m.

APPARATUS MEASUREMENTS

Lever Arm Ratio : 1 : 10

Ring Diameter 6.355

Ring Height, 2H 2 cm.

Ring Area, A 31.72 cm²

Ring Volume, V 63.44 cm³

WATER CONTENT INITIAL FINAL

	INITIAL	FINAL
Container No.	A1	A2
Wt. of Wet Soil + Container (g)	41.92	177.17
Wt. of Dry Soil + Container (g)	29.89	151.01
Wt. of Container (g)	14.06	95.4
Wt. of Water (g)	12.03	26.16
Wt. of Dry Soil (g)	15.83	55.61
Water Content, w (%)	75.99	47.04

Solid Height, H_s = W_s / (G_s ρ_w A) 0.779 cm.

Void Height, H_v = 2H - H_s 1.221 cm.

note: Void Ratio, e = (2H - H_s) / H_s and

SOIL SAMPLE INITIAL FINAL

	INITIAL	FINAL
Sample Ring No.	2	2
Wt. of Soil + Ring (g)	194.67	177.17
Wt. of Ring (g)	95.4	95.4
Wt. of Soil, wt (g)	99.27	81.77
Volume of Sample, V (cm ³)	63.44	36.08
Total Unit Weight, γ _t = W _t / V (kN/m ³)	15.35	22.234
Dry Unit Weight, γ _d = γ _t / (1+w) (kN/m ³)	8.72	15.12
Void Ratio, e	1.57	0.46
Degree of Saturation, S (%)	109.14	230.24

Saturation, S = w G_s / e



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

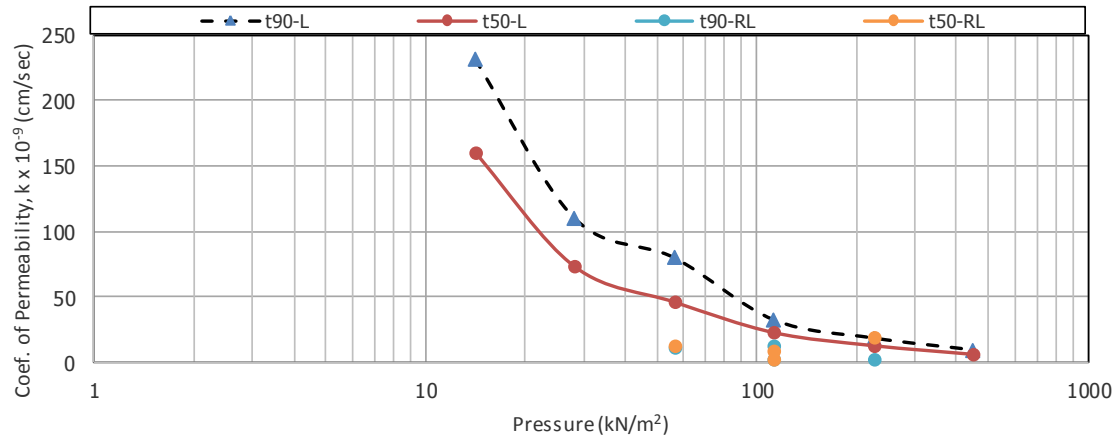
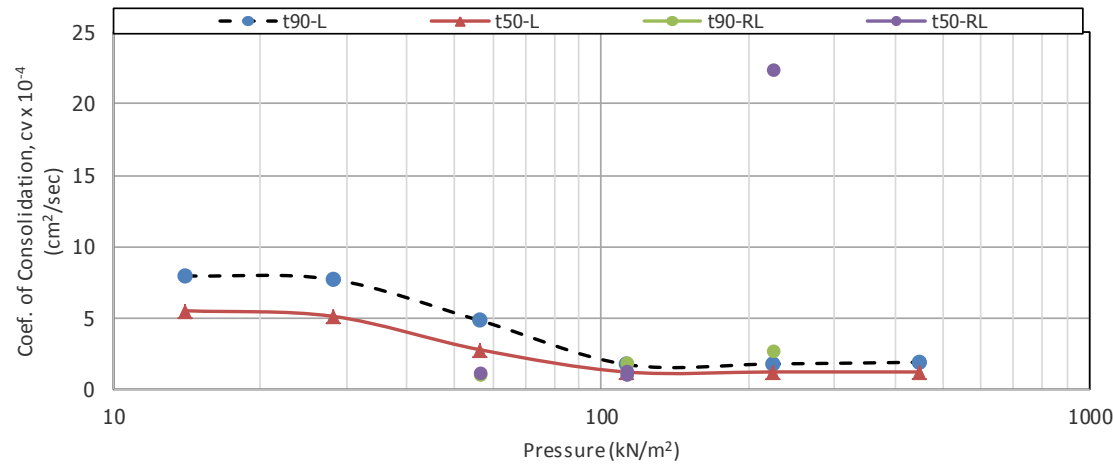
2 / 4

Increment No.	Applied Pressure, kN/m ²	Scaled Load, kg.	Final Dial, 0.0001 in.	Settlement ΔH cm.	Sample Height, 2H, cm.	Void Height, 2H-Hs, cm.	Void Ratio, e (2H-Hs)/Hs	Avg. Sample Height, 2Hav cm.	Fitting Time, sec		Cv, cm ² /sec × 1.00E-04	
									t90 sec	t50 sec	0.848 H ² _{av} / t90	0.197 H ² _{av} / t50
-	0.00	0.000	0	0.0000	2.000	1.221	1.567	-	-	-	-	-
1	14.06	0.455	323.1	0.0821	1.918	1.139	1.461	1.959	1022.99	342.84	7.95	5.51
2	28.12	0.909	475.1	0.1207	1.879	1.100	1.412	1.899	992.49	346.39	7.70	5.13
3	56.23	1.818	819.5	0.2082	1.792	1.013	1.300	1.836	1477.30	594.32	4.84	2.79
4	112.46	3.636	1557.8	0.3957	1.604	0.825	1.059	1.698	3490.83	1156.97	1.75	1.23
5	224.93	7.273	2300.2	0.5843	1.416	0.637	0.817	1.510	2697.94	911.53	1.79	1.23
6	449.86	14.545	2934.8	0.7454	1.255	0.475	0.610	1.335	1978.49	714.38	1.91	1.23
7	337.39	10.909	2911.7	0.7396	1.260	0.481	0.618	1.257	364.29	96.32	9.20	8.09
8	224.93	7.273	2863.5	0.7273	1.273	0.493	0.633	1.267	1241.47	35.29	2.74	22.39
9	112.46	3.636	2737	0.6952	1.305	0.526	0.675	1.289	2616.48	726.30	1.35	1.13
10	0.00	0.000	1920	0.4877	1.512	0.733	0.941	1.409	8701.18	3387.50	0.48	0.29
11	56.23	1.818	2271	0.5768	1.423	0.644	0.826	1.468	4169.95	876.21	1.10	1.21
12	112.46	3.636	2489.2	0.6323	1.368	0.589	0.755	1.395	2148.44	739.30	1.92	1.30
13	224.93	7.273	2736	0.6949	1.305	0.526	0.675	1.336	1454.17	524.51	2.60	1.68
14	449.86	14.545	3032.7	0.7703	1.230	0.450	0.578	1.267	1486.05	462.45	2.29	1.71
15	899.72	29.091	3396	0.8626	1.137	0.358	0.460	1.184	1499.65	413.15	1.98	1.67



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)



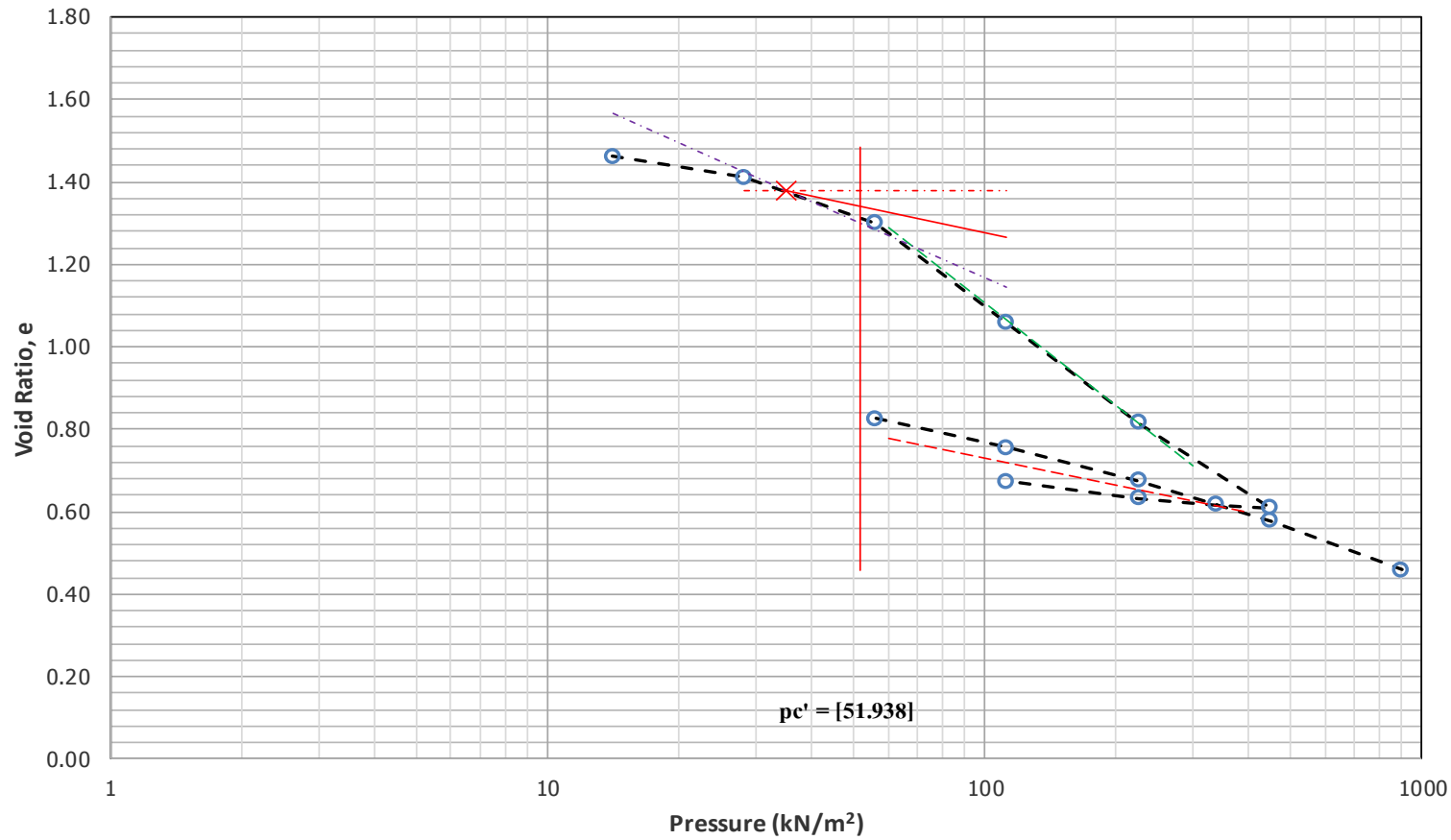
a_v, kPa^{-1} 1.00E-04 $\Delta e / \Delta \sigma$	m_v, kPa^{-1} 1.00E-04 $a_v / (1+e_0)$	Coef. Of Permea	
		$k \times (\text{cm/sec})$	
		t90	t50
		232.131	160.910
		110.257	73.389
		80.049	46.225
		32.592	22.844
		18.726	12.876
		9.669	6.221
		3.827	3.362
		2.366	19.337
		3.021	2.528
		6.836	4.079
		11.482	12.694
		13.307	8.984
		10.611	6.834
		5.883	4.392
		3.303	2.785



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

4 / 4



Applied Pressure, kN/m^2	Void Ratio, e
0.00	1.567
14.06	1.461
28.12	1.412
56.23	1.300
112.46	1.059
224.93	0.817
449.86	0.610
337.39	0.618
224.93	0.633
112.46	0.675
0.00	0.941
56.23	0.826
112.46	0.755
224.93	0.675
449.86	0.578
899.72	0.460

Cc	0.830
Cr	0.218
pc'	51.938
OCR	1.10



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

1 / 4

Job No. : T70 (อุณหภูมิจำกัด 70 องศาเซลเซียส)

Date : 15-Aug-16

Project : ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิจำกัดและอัตราความเครียดต่อพฤติกรรมการเนื้องานแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปากพั้ง

Owner : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว)

Location : ดินที่ความลึก 6.50-7.00 เมตร

Contractor : พิมพไพรัชญ์ พันธุ์วิภาญจน์

Soil Sample : ดินเหนียวสีเทา

L.L. = 81.21 P.I. = 50.38

Specific Gravity, G_s = 2.25

Boring No. BH-1 Depth 6.5 - 7 m

Sample No. T70

Water table 1.0 m

APPARATUS MEASUREMENTS

Lever Arm Ratio : 1 : 10

Ring Diameter 6.355

Ring Height, 2H 2 cm

Ring Area, A 31.72 cm²

Ring Volume, V 63.44 cm³

WATER CONTENT INITIAL FINAL

Container No.	A1	A2
Wt. of Wet Soil + Container (g)	50.67	177.98
Wt. of Dry Soil + Container (g)	35.11	153.77
Wt. of Container (g)	14.42	95.4
Wt. of Water (g)	15.56	24.21
Wt. of Dry Soil (g)	20.69	58.37
Water Content, w (%)	75.21	41.48

Solid Height, $H_s = W_s / (G_s \rho_w A)$ 0.818 cm

Void Height, $H_v = 2H - H_s$ 1.182 cm

note: Void Ratio, $e = (2H - H_s) / H_s$ and

SOIL SAMPLE INITIAL FINAL

Sample Ring No.	2	2
Wt. of Soil + Ring (g)	196.51	177.98
Wt. of Ring (g)	95.4	95.4
Wt. of Soil, wt (g)	101.11	82.58
Volume of Sample, V (cm ³)	63.44	35.42
Total Unit Weight, $\gamma_t = W_t / V$ (kN/m ³)	15.64	22.872
Dry Unit Weight, $\gamma_d = \gamma_t / (1 + w)$ (kN/m ³)	8.92	16.17
Void Ratio, e	1.45	0.37
Degree of Saturation, S (%)	117.07	255.47

Saturation, $S = w G_s / e$



**GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY**

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

2 /4

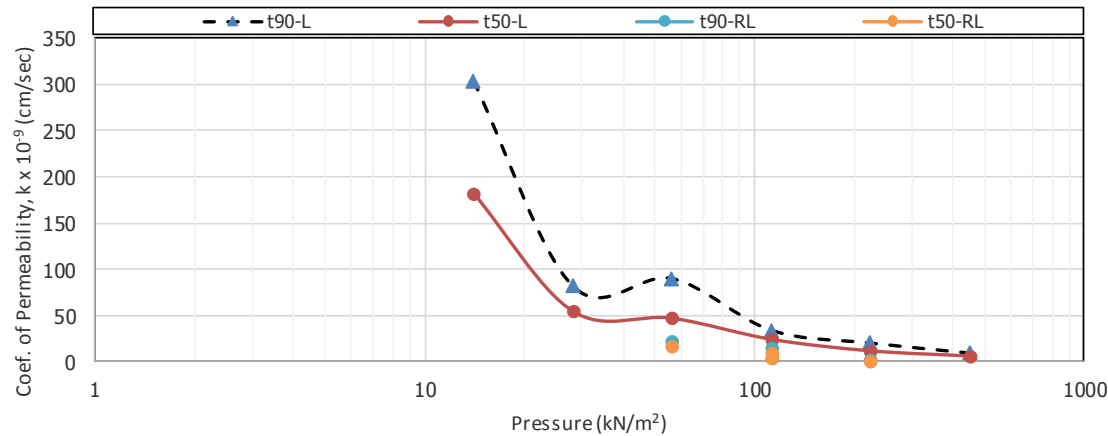
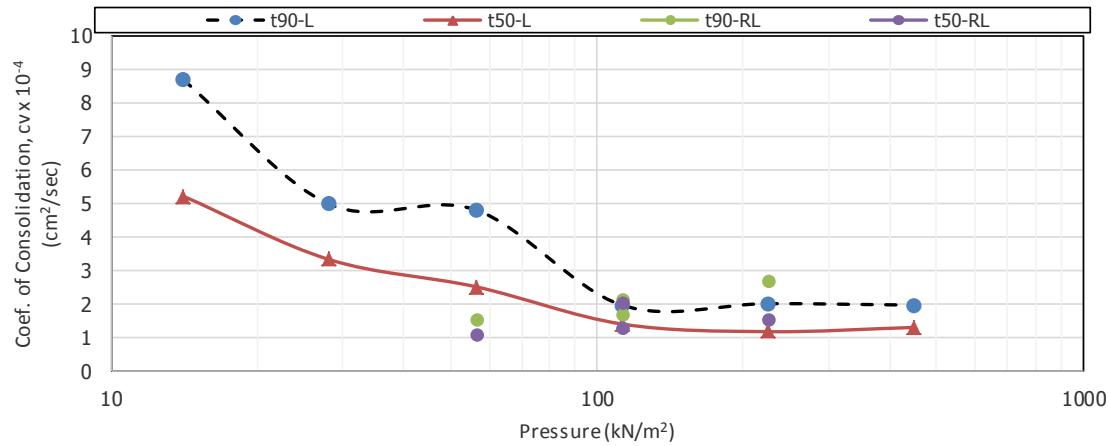
Increment No.	Applied Pressure, kN/m ²	Scaled Load, kg.	Final Dial, 0.0001 in.	Settlement ΔH cm.	Sample Height, 2H, cm.	Void Height, 2H-Hs, cm.	Void Ratio, e (2H-Hs)/Hs	Avg. Sample Height, 2Hav cm.	Fitting Time, sec		Cv, cm ² /sec \times 1.00E-04	
									t90 sec	t50 sec	0.848 H ² _{av} / t90	0.197 H ² _{av} / t50
-	0.00	0.000	0	0.0000	2.000	1.182	1.445	-	-	-	-	
1	14.06	0.455	386.5	0.0982	1.902	1.084	1.325	1.951	928.01	359.00	8.69	5.22
2	28.12	0.909	559.5	0.1421	1.858	1.040	1.272	1.880	1504.79	523.05	4.98	3.33
3	56.23	1.818	944	0.2398	1.760	0.942	1.152	1.809	1442.44	639.84	4.81	2.52
4	112.46	3.636	1616	0.4105	1.590	0.772	0.943	1.675	3018.61	982.24	1.97	1.41
5	224.93	7.273	2320.9	0.5895	1.410	0.593	0.725	1.500	2366.75	940.51	2.02	1.18
6	449.86	14.545	2915	0.7404	1.260	0.442	0.540	1.335	1917.84	672.65	1.97	1.30
7	337.39	10.909	2907	0.7384	1.262	0.444	0.543	1.261	161.26	75.27	20.89	10.40
8	224.93	7.273	2861.5	0.7268	1.273	0.455	0.557	1.267	1260.14	510.09	2.70	1.55
9	112.46	3.636	2735.2	0.6947	1.305	0.487	0.596	1.289	2075.45	396.64	1.70	2.06
10	0.00	0.000	1749	0.4442	1.556	0.738	0.902	1.431	9936.29	15229.14	0.44	0.07
11	56.23	1.818	2255.5	0.5729	1.427	0.609	0.745	1.491	3082.54	992.98	1.53	1.10
12	112.46	3.636	2483	0.6307	1.369	0.551	0.674	1.398	1920.85	728.71	2.16	1.32
13	224.93	7.273	2731	0.6937	1.306	0.488	0.597	1.338	1752.20	439.80	2.17	2.00
14	449.86	14.545	3032.5	0.7703	1.230	0.412	0.504	1.268	1108.03	439.80	3.08	1.80
15	899.72	29.091	3477.8	0.8834	1.117	0.299	0.365	1.173	1604.30	560.77	1.82	1.21



**GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY**

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

3 / 4



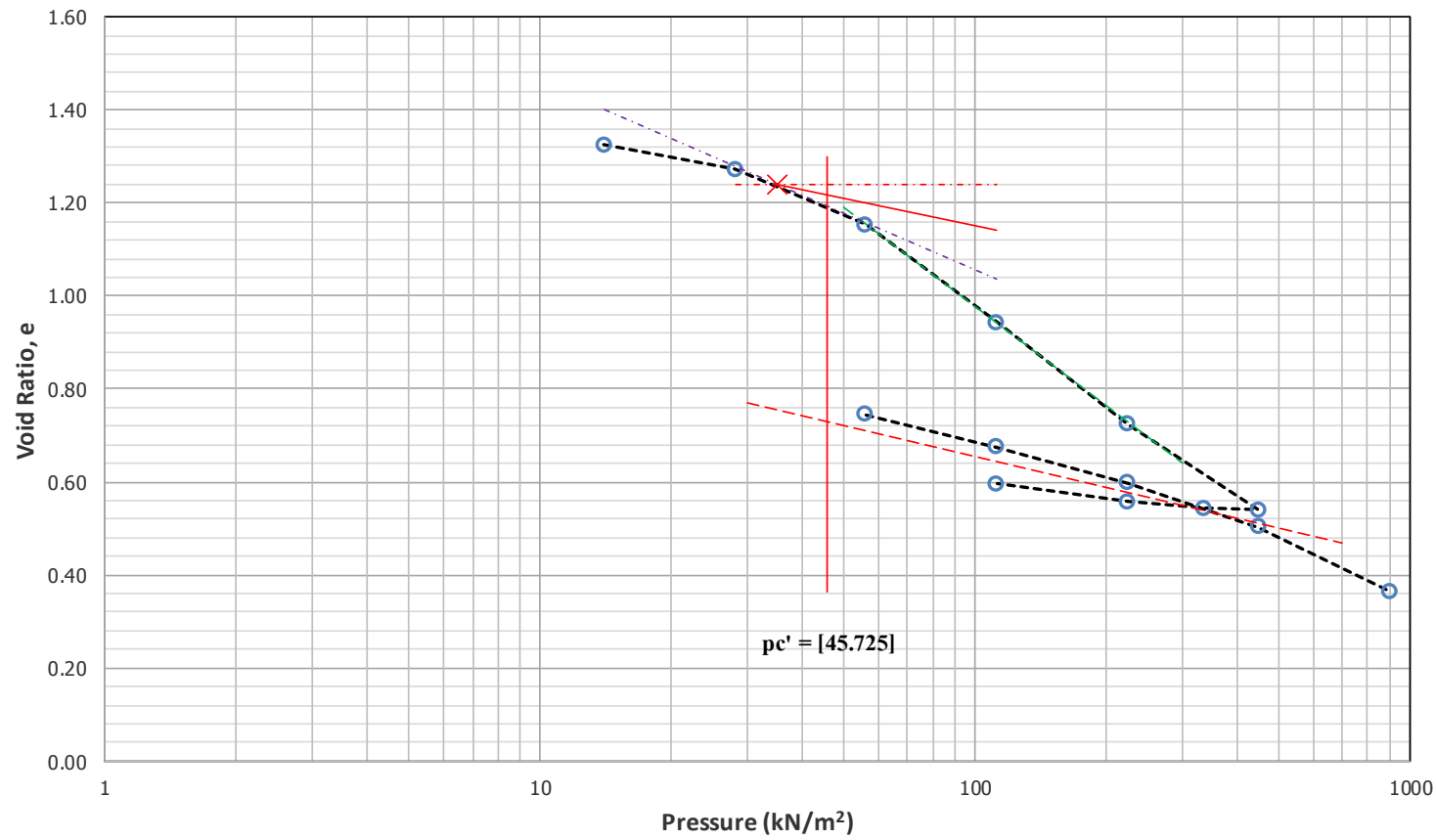
av, kPa ⁻¹ 1.00E-04 $\Delta e / \Delta \sigma'$	mv, kPa ⁻¹ 1.00E-04 av / (1+e ₀)	Coef. Of Permea	
		k x (cm/sec)	1.00E-09
		t90	t50
85.383	34.916	303.590	182.311
38.218	16.436	81.827	54.689
42.471	18.696	89.929	47.097
37.113	17.244	33.974	24.255
19.465	10.016	20.186	11.801
8.203	4.756	9.371	6.207
0.221	0.143	2.997	1.491
1.256	0.815	2.201	1.263
3.488	2.240	3.804	4.624
27.233	17.064	7.450	1.129
27.973	14.706	22.497	16.224
12.564	7.201	15.537	9.514
6.848	4.090	8.858	8.198
4.163	2.606	8.018	4.693
3.074	2.045	3.719	2.471



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

4 / 4



Applied Pressure, kN/m^2	Void Ratio, e
0.00	1.445
14.06	1.325
28.12	1.272
56.23	1.152
112.46	0.943
224.93	0.725
449.86	0.540
337.39	0.543
224.93	0.557
112.46	0.596
0.00	0.902
56.23	0.745
112.46	0.674
224.93	0.597
449.86	0.504
899.72	0.365

Cc	0.707
Cs	0.219
p_c'	45.725
OCR	0.93



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

1 / 4

Job No. : T90 (อุณหภูมิจำกัด 90 องศาเซลเซียส)

Date : 15-Aug-16

Project : ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิจำกัดและอัตราความเครียดต่อพฤติกรรมการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปากพนัง

Owner : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว)

Location : ดินที่ความลึก 6.50-7.00 เมตร

Contractor : พิมพิ์ปราชญ์ พันธุ์วิศวกรรม

Soil Sample : ดินเหนียวสีเทา

L.L. = 72.25 P.I. = 42.98

Specific Gravity, G_s = 2.25

Boring No. BH-1 Depth 6.5 - 7 m

Sample No. ST-2

Water table 1.0 m.

APPARATUS MEASUREMENTS

Lever Arm Ratio : 1 : 10

Ring Diameter 6.34

Ring Height, 2H 2 cm.

Ring Area, A 31.57 cm²

Ring Volume, V 63.14 cm³

WATER CONTENT	INITIAL	FINAL
Container No.	A1	A2
Wt. of Wet Soil + Container (g)	33.46	140.02
Wt. of Dry Soil + Container (g)	24.63	117.51
Wt. of Container (g)	13.21	63.92
Wt. of Water (g)	8.83	22.51
Wt. of Dry Soil (g)	11.42	53.59
Water Content, w (%)	77.32	42.00

W_s

Solid Height, $H_s = W_s / (G_s \rho_w A)$ 0.754 cm.

Void Height, $H_v = 2H - H_s$ 1.246 cm.

note: Void Ratio, $e = (2H - H_s) / H_s$ and

SOIL SAMPLE	INITIAL	FINAL
Sample Ring No.	2	2
Wt. of Soil + Ring (g)	160.83	140.02
Wt. of Ring (g)	63.92	63.92
Wt. of Soil, wt (g)	96.91	76.1
Volume of Sample, V (cm ³)	63.14	34.75
Total Unit Weight, $\gamma_t = W_t / V$ (kN/m ³)	15.06	21.486
Dry Unit Weight, $\gamma_d = \gamma_t / (1+w)$ (kN/m ³)	8.49	15.13
Void Ratio, e	1.65	0.46
Degree of Saturation, S (%)	105.38	206.00

Saturation, $S = w G_s / e$



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

2 / 4

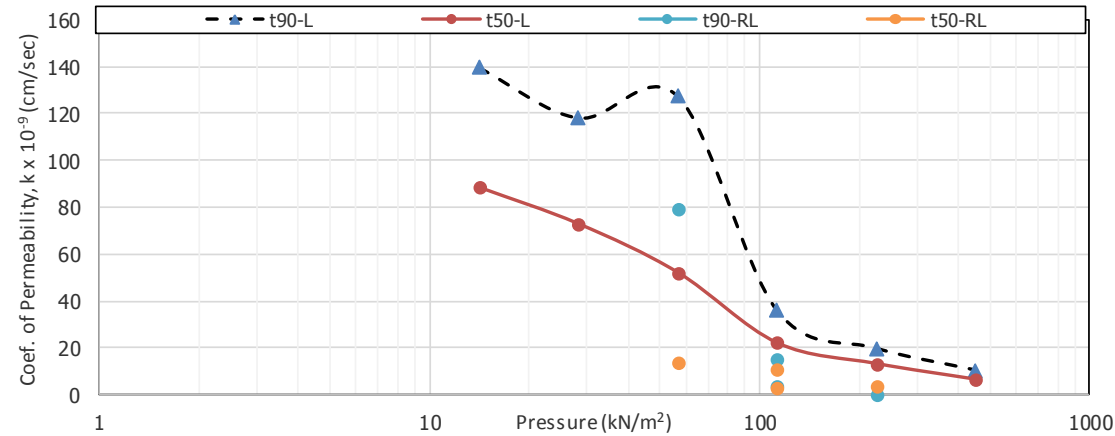
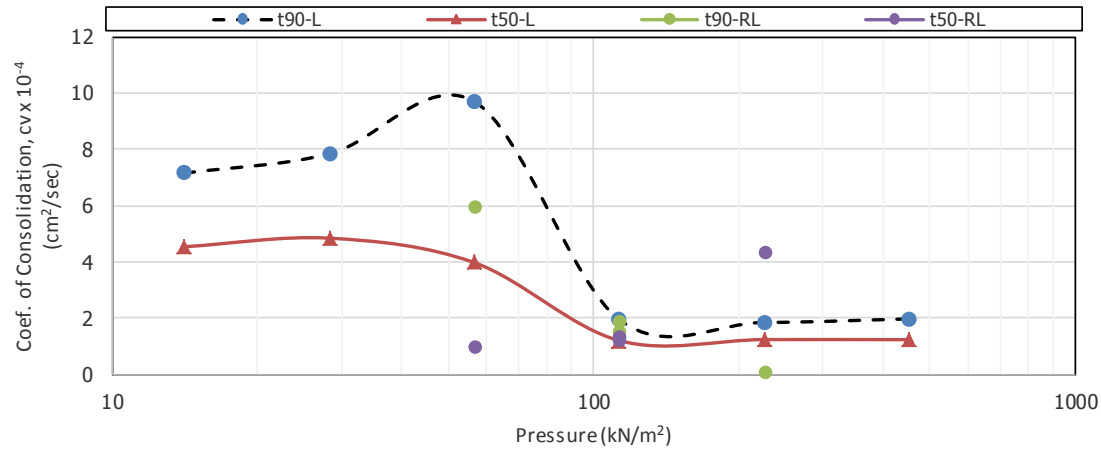
Increment No.	Applied Pressure, kN/m ²	Scaled Load, kg.	Final Dial, 0.0001 in.	Settlement ΔH cm.	Sample Height, 2H, cm.	Void Height, 2H-Hs, cm.	Void Ratio, e (2H-Hs)/Hs	Avg. Sample Height, 2Hav cm.	Fiting Time, sec		Cv, cm ² /sec × 1.00E-04	
									t90 sec	t50 sec	0.848 H ² _{av} / t90	0.197 H ² _{av} / t50
-	0.00	0.000	0	0.0000	2.000	1.246	1.651	-	-	-	-	
1	14.12	0.455	217	0.0551	1.945	1.190	1.578	1.972	1153.58	422.21	7.15	4.54
2	28.25	0.909	380	0.0965	1.903	1.149	1.523	1.924	1002.08	376.59	7.83	4.84
3	56.50	1.818	658	0.1671	1.833	1.078	1.429	1.868	763.18	432.32	9.69	3.98
4	113.00	3.636	1406	0.3571	1.643	0.888	1.178	1.738	3277.17	1232.89	1.95	1.21
5	225.99	7.273	2187	0.5555	1.445	0.690	0.915	1.544	2731.48	945.97	1.85	1.24
6	451.99	14.545	2866.6	0.7281	1.272	0.517	0.686	1.358	1980.72	734.05	1.97	1.24
7	338.99	10.909	2845.2	0.7227	1.277	0.523	0.693	1.275	4500.85	#N/A	0.77	#N/A
8	225.99	7.273	2798.1	0.7107	1.289	0.535	0.709	1.283	27995.63	186.24	0.12	4.35
9	113.00	3.636	2672.5	0.6788	1.321	0.567	0.751	1.305	2296.99	684.16	1.57	1.23
10	0.00	0.000	1726	0.4384	1.562	0.807	1.070	1.441	16455.71	18885.98	0.27	0.05
11	56.50	1.818	2190.5	0.5564	1.444	0.689	0.913	1.503	804.75	1097.04	5.95	1.01
12	113.00	3.636	2440.5	0.6199	1.380	0.626	0.829	1.412	2195.61	709.73	1.92	1.38
13	225.99	7.273	2708	0.6878	1.312	0.558	0.739	1.346	1637.42	549.98	2.35	1.62
14	451.99	14.545	3075.5	0.7812	1.219	0.464	0.616	1.265	1539.76	472.90	2.20	1.67
15	903.98	29.091	3541	0.8994	1.101	0.346	0.459	1.160	1685.26	590.89	1.69	1.12



**GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY**

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

3 / 4



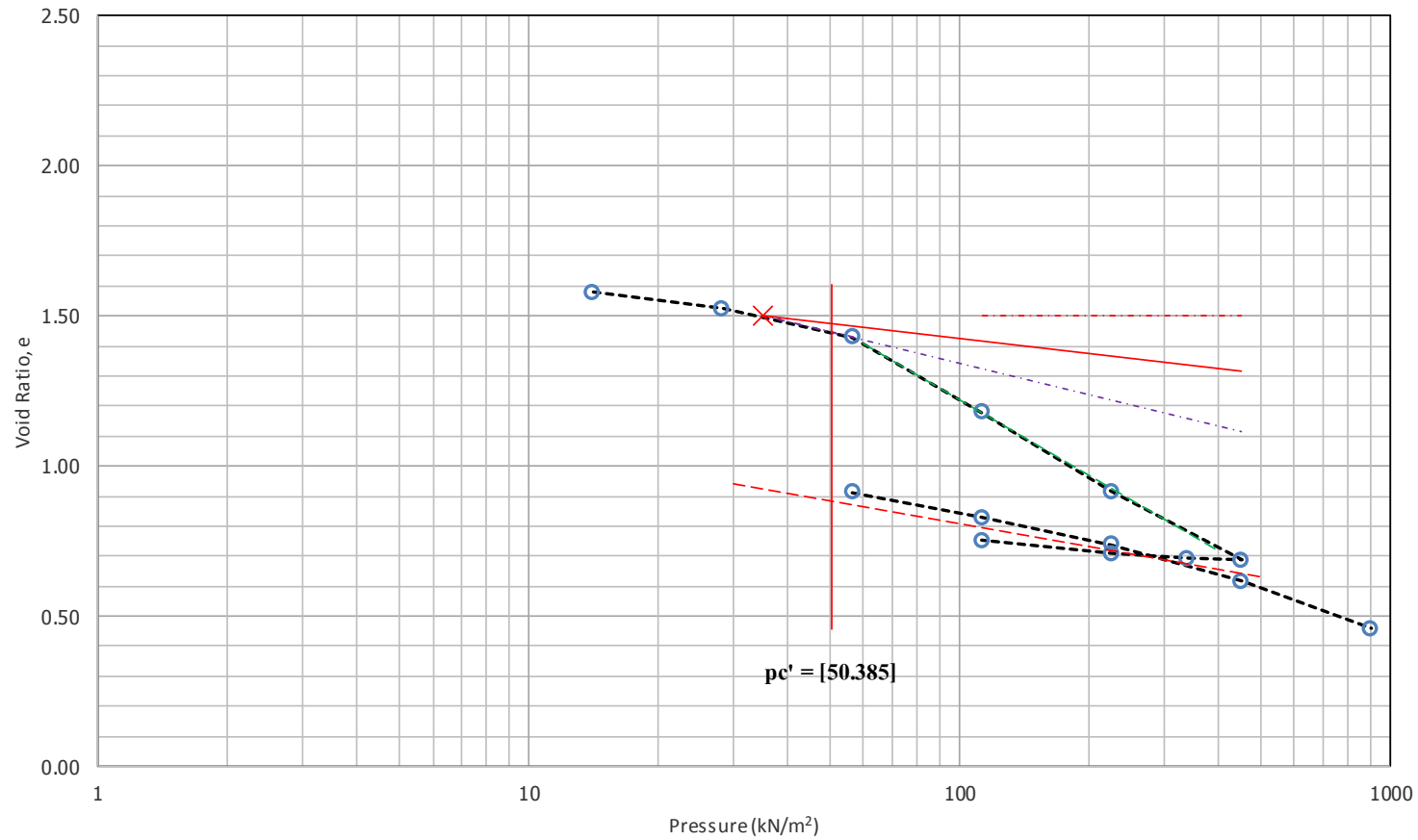
av, kPa ⁻¹ 1.00E-04 $\Delta e / \Delta \sigma$	mv, kPa ⁻¹ 1.00E-04 av / (1+e _v)	Coef. Of Permea	
		k x (cm/sec) 1.00E-09	
		t90	t50
51.723	19.511	139.503	88.547
38.852	15.071	118.052	72.976
33.131	13.132	127.311	52.210
44.572	18.347	35.846	22.135
23.269	10.686	19.764	13.258
10.124	5.288	10.440	6.544
0.638	0.378	0.289	#N/A
1.403	0.829	0.103	3.610
3.742	2.190	3.443	2.686
28.200	16.104	4.310	0.872
27.679	13.373	79.538	13.555
14.897	7.785	14.985	10.769
7.970	4.357	10.222	7.070
5.475	3.148	6.941	5.250
3.467	2.146	3.631	2.406



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

4 / 4



Applied Pressure, kN/m^2	Void Ratio, e
0.00	1.651
14.12	1.578
28.25	1.523
56.50	1.429
113.00	1.178
225.99	0.915
451.99	0.686
338.99	0.693
225.99	0.709
113.00	0.751
0.00	1.070
56.50	0.913
113.00	0.829
225.99	0.739
451.99	0.616
903.98	0.459

C_c	0.837
C_s	0.254
pc'	50.385
OCR	1.11



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

1 / 4

Job No. : T110 (อูณหภูมิตัว 110 องศาเซลเซียส)

Date : 15-Aug-16

Project : ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราความเครียดต่อพฤติกรรมแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปากพั้ง

Owner : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว)

Location : ดินที่ความลึก 6.50-7.00 เมตร

Contractor : พิมพ์ปราชญ์ พันธุ์วิชาญจน์

Soil Sample : ดินเหนียวสีเทา

L.L. = 68.965 P.I. = 39.635

Specific Gravity, Gs = 2.25

Boring No. BH-1 Depth 6.5 - 7 m

Sample No. T110

Water table 1.0 m.

APPARATUS MEASUREMENTS

Lever Arm Ratio : 1 : 10

Ring Diameter 6.325

Ring Height, 2H 2 cm.

Ring Area, A 31.42 cm²

Ring Volume, V 62.84 cm³

WATER CONTENT INITIAL FINAL

Container No.	A1	A2
Wt. of Wet Soil + Container (g)	37.49	141.1
Wt. of Dry Soil + Container (g)	27.41	117.97
Wt. of Container (g)	14.19	64.16
Wt. of Water (g)	10.08	23.13
Wt. of Dry Soil (g)	13.22	53.81
Water Content, w (%)	76.25	42.98

Solid Height, Hs = Ws / (Gs ρw A) 0.761 cm.

Void Height, Hv = 2H-Hs 1.239 cm.

note: Void Ratio, e = (2H-Hs)/Hs and

SOIL SAMPLE INITIAL FINAL

Sample Ring No.	2	2
Wt. of Soil + Ring (g)	161.49	141.1
Wt. of Ring (g)	64.16	64.16
Wt. of Soil, wt (g)	97.33	76.94
Volume of Sample, V (cm ³)	62.84	33.97
Total Unit Weight, γt = Wt / V (kN/m ³)	15.19	22.219
Dry Unit Weight, γd = γd / (1+w) (kN/m ³)	8.62	15.54
Void Ratio, e	1.63	0.42
Degree of Saturation, S (%)	105.41	230.04

Saturation, S = w Gs / e



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

2 / 4

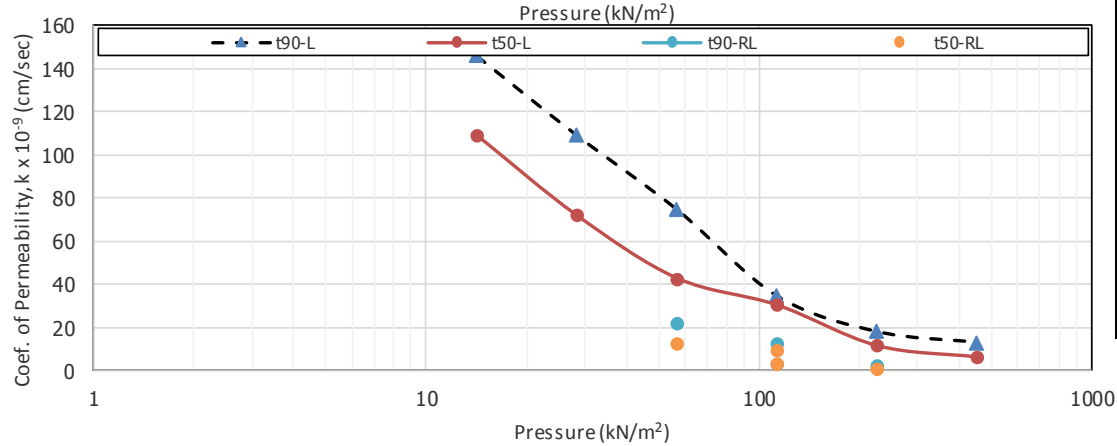
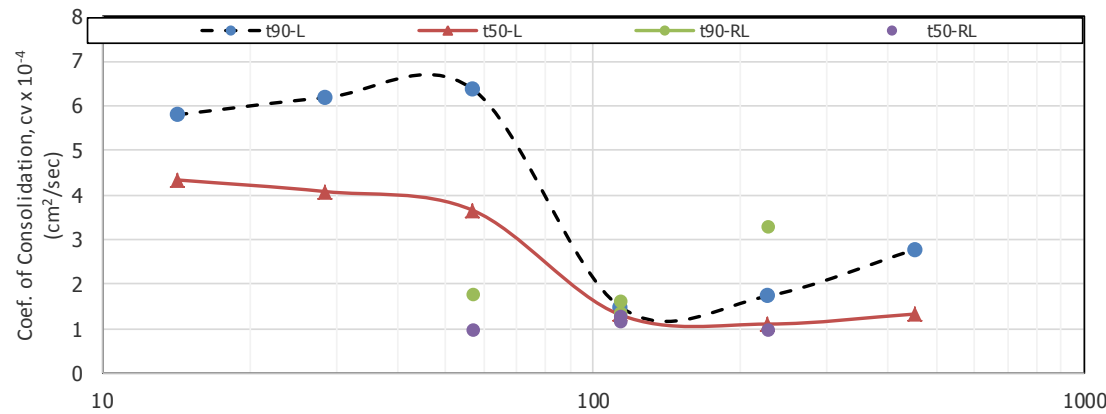
Increment No.	Applied Pressure, kN/m ²	Scaled Load, kg.	Final Dial, 0.0001 in.	Settlement ΔH cm.	Sample Height, 2H, cm.	Void Height, 2H-Hs, cm.	Void Ratio, e (2H-Hs)/Hs	Avg. Sample Height, 2H _{av} cm.	Fitting Time, sec		Cv, cm ² /sec × 1.00E-04	
									t90 sec	t50 sec	0.848 H ² _{av} / t90	0.197 H ² _{av} / t50
-	0.00	0.000	0	0.0000	2.000	1.239	1.628	-	-	-	-	
1	14.19	0.455	281	0.0714	1.929	1.167	1.534	1.964	1411.84	438.28	5.79	4.34
2	28.38	0.909	471	0.1196	1.880	1.119	1.470	1.904	1245.03	438.28	6.18	4.08
3	56.77	1.818	716.5	0.1820	1.818	1.057	1.389	1.849	1136.71	460.22	6.38	3.66
4	113.53	3.636	1654	0.4201	1.580	0.819	1.076	1.699	4095.51	1082.02	1.49	1.31
5	227.07	7.273	2387.5	0.6064	1.394	0.632	0.831	1.487	2705.87	985.50	1.73	1.10
6	454.14	14.545	2969	0.7541	1.246	0.485	0.637	1.320	1328.38	644.83	2.78	1.33
7	340.60	10.909	2969	0.7541	1.246	0.485	0.637	1.246	-	-	-	-
8	227.07	7.273	2922	0.7422	1.258	0.497	0.653	1.252	1001.95	778.94	3.32	0.99
9	113.53	3.636	2787	0.7079	1.292	0.531	0.698	1.275	2546.07	682.51	1.35	1.17
10	0.00	0.000	1860	0.4724	1.528	0.766	1.007	1.410	8425.22	-	0.50	-
11	56.77	1.818	2283.5	0.5800	1.420	0.659	0.866	1.474	2566.22	1071.68	1.79	1.00
12	113.53	3.636	2525	0.6414	1.359	0.598	0.785	1.389	2500.78	745.66	1.64	1.27
13	227.07	7.273	2789.5	0.7085	1.291	0.530	0.697	1.325	1846.18	565.32	2.02	1.53
14	454.14	14.545	3152.5	0.8007	1.199	0.438	0.576	1.245	1185.67	429.02	2.77	1.78
15	908.27	29.091	3617.5	0.9188	1.081	0.320	0.420	1.140	1522.79	612.90	1.81	1.04



**GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY**

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

3 / 4



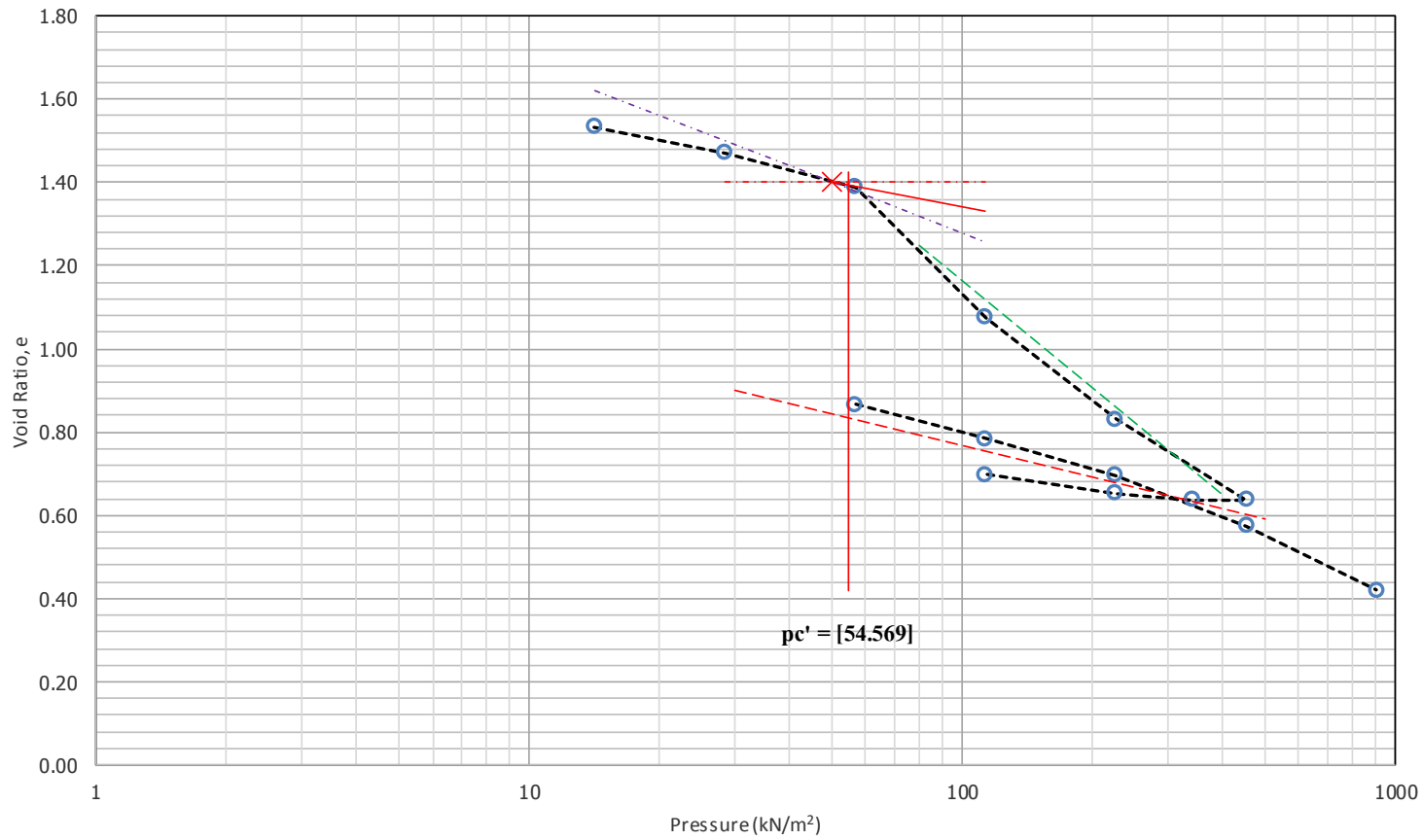
av, kPa ⁻¹ 1.00E-04 $\Delta e / \Delta \sigma$	mv, kPa ⁻¹ 1.00E-04 av / (1+e ₀)	Coef. Of Permea	
		k x (cm/sec) 1.00E-09	
		t90	t50
66.075	25.146	145.696	109.032
44.677	17.632	108.898	71.866
28.864	11.684	74.512	42.754
55.111	23.074	34.475	30.314
21.560	10.387	17.988	11.474
8.546	4.668	12.974	6.209
0.000	0.000	-	-
1.381	0.844	2.798	0.836
3.968	2.401	3.250	2.817
27.247	16.051	8.027	#VALUE!
24.896	12.405	22.259	12.382
14.197	7.610	12.452	9.701
7.774	4.355	8.781	6.662
5.335	3.144	8.719	5.598
3.417	2.169	3.925	2.266



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

1D-CONSOLIDATION USING INCREMENTAL LOADING (ASTM D2435-11)

4 / 4



Applied Pressure, kN/m^2	Void Ratio, e
0.00	1.628
14.19	1.534
28.38	1.470
56.77	1.389
113.53	1.076
227.07	0.831
454.14	0.637
340.60	0.637
227.07	0.653
113.53	0.698
0.00	1.007
56.77	0.866
113.53	0.785
227.07	0.697
454.14	0.576
908.27	0.420

C_c	0.858
C_s	0.254
pc'	54.569
OCR	1.18

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดสอบแรงอัดสามแกน



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.02-T45-OCR1			Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช			Sample No. 1			$\Delta v_c =$ 41.3 mm ³	$\epsilon_v =$ 19.90 %				
Test type CU		without side drains	Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 250 kN/m ²			Lc = 98.55 mm	$(1/3)\epsilon_v =$ 6.63 %					
Rate of Strain 0.02 % per min		Operation A.F.W.		Cell Pressure 450 kN/m ²			Ac = 1704.73 mm ²	$(2/3)\epsilon_v =$ 13.27 %						
1.2 % per hour		Consolidated Length 98.55 mm		Back Pressure 200 kN/m ²			Vc = 166.17 mm ³	shear temp. 45 C°						
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1704.73 mm ²		Consolidated Volume 166.174 cm ³			Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 78.8 kPa							
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, $q, \sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	250.0	250.0	0.0	250.0	250.0	1.00	250.00	250.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.005	253.4	250.0	0.1	253.3	249.9	1.01	251.146	251.05	3.44	1.00	1.00	0.01	0.00	0.029
0.055	270.5	250.0	2.5	268.0	247.5	1.08	256.85	254.35	20.55	1.03	1.02	0.08	0.01	0.122
0.102	274.4	250.0	4.8	269.6	245.2	1.10	258.14	253.34	24.42	1.03	1.01	0.10	0.02	0.197
0.531	284.0	250.0	15.9	268.1	234.1	1.15	261.32	245.42	33.95	1.05	0.98	0.14	0.06	0.468
1.001	291.0	250.0	23.6	267.4	226.4	1.18	263.66	240.06	40.97	1.05	0.96	0.16	0.09	0.576
2.021	300.0	250.0	37.1	262.9	212.9	1.23	266.67	229.57	50.02	1.07	0.92	0.20	0.15	0.742
3.040	306.7	250.0	47.9	258.8	202.1	1.28	268.90	221.00	56.70	1.08	0.88	0.23	0.19	0.845
4.078	308.2	250.0	55.4	252.8	194.6	1.30	269.41	214.01	58.24	1.08	0.86	0.23	0.22	0.951
5.055	310.3	250.0	61.2	249.1	188.8	1.32	270.10	208.90	60.31	1.08	0.84	0.24	0.24	1.015
5.803	311.4	250.0	65.0	246.4	185.0	1.33	270.47	205.47	61.42	1.08	0.82	0.25	0.26	1.058
6.676	310.3	250.0	69.1	241.2	180.9	1.33	270.09	200.99	60.26	1.08	0.80	0.24	0.28	1.147
7.719	310.6	250.0	73.4	237.2	176.6	1.34	270.19	196.79	60.58	1.08	0.79	0.24	0.29	1.212
8.758	309.3	250.0	77.3	232.0	172.7	1.34	269.77	192.47	59.31	1.08	0.77	0.24	0.31	1.303
9.775	310.7	250.0	80.6	230.1	169.4	1.36	270.22	189.62	60.66	1.08	0.76	0.24	0.32	1.329
10.526	310.1	250.0	82.8	227.3	167.2	1.36	270.04	187.24	60.11	1.08	0.75	0.24	0.33	1.377
12.046	308.5	250.0	86.7	221.8	163.3	1.36	269.49	182.79	58.48	1.08	0.73	0.23	0.35	1.482
14.162	305.5	250.0	90.2	215.3	159.8	1.35	268.50	178.30	55.51	1.07	0.71	0.22	0.36	1.625
16.278	301.5	250.0	93.8	207.7	156.2	1.33	267.16	173.36	51.48	1.07	0.69	0.21	0.38	1.822
18.394	299.0	250.0	95.8	203.2	154.2	1.32	266.32	170.52	48.95	1.07	0.68	0.20	0.38	1.957



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.02-T60-OCR1		Location ต. บางจาก อ. ปากพื้ง จ. นครศรีธรรมราช				Sample No. 2				$\Delta v_c = 46.2 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 22.29 \%$		
Test type CU without side drains		Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 250 kN/m ²		Lc = 97.50 mm		(1/3) $\epsilon_v = 7.43 \%$						
Rate of 0.02 % per min		Operation A.F.W.		Cell Pressure 450 kN/m ²		Ac = 1673.94 mm ²		(2/3) $\epsilon_v = 14.86 \%$						
Strain 1.2 % per hour		Consolidated Length 97.50 mm		Back Pressure 200 kN/m ²		Vc = 160.92 mm ³		shear temp. 60 C°						
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1673.94 mm ²		Consolidated Volume 160.921 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu_s) = 131.6 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, $q, \sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	250.0	250.0	0.0	250.0	250.0	1.00	250.00	250.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.019	251.3	250.0	0.3	250.9	249.7	1.01	250.42	250.10	1.27	1.00	1.00	0.01	0.00	0.253
0.024	268.4	250.0	1.9	266.5	248.1	1.07	256.13	254.26	18.40	1.02	1.02	0.07	0.01	0.102
0.050	271.6	250.0	2.6	269.0	247.4	1.09	257.21	254.56	21.62	1.03	1.02	0.09	0.01	0.122
0.071	276.6	250.0	3.9	272.7	246.1	1.11	258.87	255.01	26.60	1.04	1.02	0.11	0.02	0.145
0.475	288.3	250.0	11.2	277.1	238.8	1.16	262.76	251.54	38.29	1.05	1.01	0.15	0.04	0.293
1.095	294.9	250.0	15.8	279.1	234.2	1.19	264.98	249.16	44.93	1.06	1.00	0.18	0.06	0.352
2.093	294.9	250.0	22.3	272.5	227.7	1.20	264.95	242.61	44.86	1.06	0.97	0.18	0.09	0.498
3.007	297.9	250.0	27.4	270.4	222.6	1.22	265.96	238.53	47.87	1.06	0.95	0.19	0.11	0.573
4.135	299.1	250.0	32.3	266.8	217.7	1.23	266.37	234.03	49.10	1.07	0.94	0.20	0.13	0.659
4.301	299.6	250.0	33.0	266.5	217.0	1.23	266.52	233.48	49.57	1.07	0.93	0.20	0.13	0.667
4.944	298.6	250.0	35.3	263.3	214.7	1.23	266.21	230.87	48.64	1.06	0.92	0.19	0.14	0.727
6.108	298.0	250.0	39.5	258.4	210.5	1.23	265.99	226.45	47.97	1.06	0.91	0.19	0.16	0.824
8.041	299.0	250.0	43.4	255.6	206.6	1.24	266.34	222.90	49.02	1.07	0.89	0.20	0.17	0.886
10.134	297.8	250.0	47.3	250.4	202.7	1.24	265.92	218.58	47.77	1.06	0.87	0.19	0.19	0.991
12.100	296.1	250.0	50.2	245.8	199.8	1.23	265.36	215.12	46.08	1.06	0.86	0.18	0.20	1.090
14.023	294.4	250.0	52.5	241.9	197.5	1.23	264.81	212.27	44.44	1.06	0.85	0.18	0.21	1.182
16.156	292.2	250.0	54.6	237.6	195.4	1.22	264.07	209.43	42.20	1.06	0.84	0.17	0.22	1.295
18.106	289.2	250.0	55.0	234.1	195.0	1.20	263.06	208.02	39.17	1.05	0.83	0.16	0.22	1.405



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.075-T45-OCR1		Location ต.บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 3		$\Delta v_c = 37.0 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 18.13 \%$						
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially	250 kN/m ²	Lc = 95.80 mm		(1/3) $\epsilon_v = 6.04 \%$						
Rate of Strain	0.075 % per min 4.5 % per hour		Operation A.F.W.	Cell Pressure	450 kN/m ²	Ac = 1758.54 mm ²		(2/3) $\epsilon_v = 12.09 \%$						
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1758.54 mm ²		Back Pressure 200 kN/m ²		Vc = 166.99 mm ³		shear temp. 45 C°						
				Consolidated Volume 166.986 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 79.3 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, $q, \sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	250.0	250.0	0.0	250.0	250.0	1.00	250.00	250.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.021	257.7	250.0	0.5	257.2	249.5	1.03	252.58	252.08	7.75	1.01	1.01	0.03	0.00	0.065
0.057	259.6	250.0	0.8	258.8	249.2	1.04	253.20	252.40	9.60	1.01	1.01	0.04	0.00	0.083
0.100	262.2	250.0	1.0	261.2	249.0	1.05	254.07	253.07	12.20	1.02	1.01	0.05	0.00	0.082
0.314	265.7	250.0	2.9	262.8	247.1	1.06	255.25	252.35	15.74	1.02	1.01	0.06	0.01	0.184
0.514	274.6	250.0	4.3	270.3	245.7	1.10	258.21	253.91	24.64	1.03	1.02	0.10	0.02	0.175
0.804	298.0	250.0	13.5	284.5	236.5	1.20	266.00	252.50	47.99	1.06	1.01	0.19	0.05	0.281
1.023	304.5	250.0	18.0	286.5	232.0	1.24	268.18	250.18	54.55	1.07	1.00	0.22	0.07	0.330
2.047	316.8	250.0	33.3	283.5	216.7	1.31	272.28	238.98	66.84	1.09	0.96	0.27	0.13	0.498
3.012	322.7	250.0	43.0	279.7	207.0	1.35	274.24	231.24	72.72	1.10	0.92	0.29	0.17	0.591
4.049	326.5	250.0	50.9	275.6	199.1	1.38	275.51	224.61	76.54	1.10	0.90	0.31	0.20	0.665
5.060	329.3	250.0	57.2	272.1	192.8	1.41	276.44	219.24	79.33	1.11	0.88	0.32	0.23	0.721
6.082	331.5	250.0	61.9	269.6	188.1	1.43	277.17	215.27	81.51	1.11	0.86	0.33	0.25	0.759
7.166	333.1	250.0	66.3	266.8	183.7	1.45	277.72	211.42	83.15	1.11	0.85	0.33	0.27	0.797
8.014	333.7	250.0	69.1	264.6	180.9	1.46	277.89	208.79	83.67	1.11	0.84	0.33	0.28	0.826
9.087	334.2	250.0	71.8	262.4	178.2	1.47	278.07	206.27	84.20	1.11	0.83	0.34	0.29	0.853
10.122	333.8	250.0	74.1	259.7	175.9	1.48	277.94	203.84	83.83	1.11	0.82	0.34	0.30	0.884
12.307	334.5	250.0	78.3	256.2	171.7	1.49	278.16	199.86	84.49	1.11	0.80	0.34	0.31	0.927
14.260	332.7	250.0	81.2	251.5	168.8	1.49	277.57	196.37	82.72	1.11	0.79	0.33	0.32	0.982
16.300	329.4	250.0	83.3	246.1	166.7	1.48	276.47	193.17	79.41	1.11	0.77	0.32	0.33	1.049
18.384	326.2	250.0	84.9	241.3	165.1	1.46	275.41	190.51	76.24	1.10	0.76	0.30	0.34	1.114



GEOTECHNICAL LABORATORY

CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.075-T60-OCR1		Location ต.บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช			Sample No. 4			$\Delta v_c = 43.6 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 20.04 \%$				
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 250 kN/m^2			Lc = 103.37 mm		$(1/3)\epsilon_v = 6.68 \%$					
Rate of Strain	0.075 % per min		Operation A.F.W.	Cell Pressure 450 kN/m^2			Ac = 1699.42 mm^2		$(2/3)\epsilon_v = 13.36 \%$					
	4.5 % per hour		Consolidated Length 103.37 mm	Back Pressure 200 kN/m^2			Vc = 173.72 mm^3		shear temp. 60 $^\circ\text{C}$					
Membranes	1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1699.42 mm^2	Consolidated Volume 173.722 cm^3			Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 141 kPa							
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	250.0	250.0	0.0	250.0	250.0	1.00	250.00	250.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.045	277.0	250.0	0.1	276.9	249.9	1.11	259.00	258.90	26.99	1.04	1.04	0.11	0.00	0.004
0.193	286.2	250.0	1.0	285.2	249.0	1.15	262.07	261.04	36.22	1.05	1.04	0.14	0.00	0.029
1.063	296.7	250.0	4.9	291.8	245.1	1.19	265.57	260.68	46.72	1.06	1.04	0.19	0.02	0.105
2.031	297.4	250.0	8.4	289.0	241.6	1.20	265.80	257.39	47.40	1.06	1.03	0.19	0.03	0.177
3.192	303.4	250.0	12.0	291.3	238.0	1.22	267.79	255.75	53.36	1.07	1.02	0.21	0.05	0.226
4.251	305.0	250.0	15.2	289.8	234.8	1.23	268.34	253.10	55.03	1.07	1.01	0.22	0.06	0.277
5.222	306.5	250.0	18.0	288.5	232.0	1.24	268.83	250.86	56.50	1.08	1.00	0.23	0.07	0.318
6.191	307.3	250.0	20.4	286.9	229.6	1.25	269.09	248.67	57.27	1.08	0.99	0.23	0.08	0.357
8.221	307.0	250.0	28.0	279.0	222.0	1.26	269.01	240.98	57.02	1.08	0.96	0.23	0.11	0.492
10.152	306.9	250.0	32.1	274.9	217.9	1.26	268.98	236.92	56.94	1.08	0.95	0.23	0.13	0.563
12.280	306.2	250.0	37.4	268.8	212.6	1.26	268.75	231.31	56.25	1.07	0.93	0.22	0.15	0.666
13.247	305.6	250.0	39.4	266.1	210.6	1.26	268.52	229.08	55.57	1.07	0.92	0.22	0.16	0.710
14.215	304.9	250.0	41.4	263.4	208.6	1.26	268.29	226.85	54.88	1.07	0.91	0.22	0.17	0.755
15.182	304.2	250.0	43.1	261.1	206.9	1.26	268.07	224.92	54.20	1.07	0.90	0.22	0.17	0.796
16.149	303.1	250.0	43.8	259.2	206.2	1.26	267.70	223.85	53.09	1.07	0.90	0.21	0.18	0.826
17.117	303.3	250.0	45.3	258.1	204.7	1.26	267.77	222.50	53.32	1.07	0.89	0.21	0.18	0.849
18.084	302.2	250.0	46.4	255.7	203.6	1.26	267.39	220.94	52.16	1.07	0.88	0.21	0.19	0.890



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R1.0-T45-OCRI		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช				Sample No. 5				$\Delta v_c = 28.6 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 15.00 \%$		
Test type CU		without side drains		Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 250 kN/m ²				$L_c = 91.26 \text{ mm}$		$(1/3)\epsilon_v = 5.00 \%$		
Rate of Strain 1.0 % per min 60.0 % per hour		Operation A.F.W.				Cell Pressure 450 kN/m ²				$A_c = 1786.02 \text{ mm}^2$		$(2/3)\epsilon_v = 10.00 \%$		
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Length 91.26 mm		Back Pressure 200 kN/m ²				$V_c = 162.04 \text{ mm}^3$		shear temp. 45 C°				
Consolidated Area 1786.02 mm ²		Consolidated Volume 162.044 cm ³				Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 63.5 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/ σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/ σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/ σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	250.0	250.0	0.0	250.0	250.0	1.00	250.00	250.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.025	252.5	250.0	0.0	252.5	250.0	1.01	250.84	250.84	2.51	1.00	1.00	0.01	0.00	0.000
0.034	256.5	250.0	0.0	256.5	250.0	1.03	252.18	252.18	6.55	1.01	1.01	0.03	0.00	0.000
0.104	261.9	250.0	0.4	261.5	249.6	1.05	253.96	253.56	11.89	1.02	1.01	0.05	0.00	0.034
0.332	283.6	250.0	1.0	282.6	249.0	1.13	261.19	260.19	33.57	1.04	1.04	0.13	0.00	0.030
0.526	303.6	250.0	1.7	301.9	248.3	1.22	267.86	266.16	53.57	1.07	1.06	0.21	0.01	0.032
1.028	322.1	250.0	5.0	317.1	245.0	1.29	274.02	269.02	72.07	1.10	1.08	0.29	0.02	0.069
2.004	333.2	250.0	9.8	323.4	240.2	1.35	277.72	267.92	83.17	1.11	1.07	0.33	0.04	0.118
3.055	341.2	250.0	15.5	325.7	234.5	1.39	280.41	264.91	91.22	1.12	1.06	0.36	0.06	0.170
4.145	346.4	250.0	20.5	325.9	229.5	1.42	282.13	261.63	96.40	1.13	1.05	0.39	0.08	0.213
5.067	350.4	250.0	25.1	325.3	224.9	1.45	283.47	258.37	100.42	1.13	1.03	0.40	0.10	0.250
6.088	351.2	250.0	29.6	321.6	220.4	1.46	283.75	254.15	101.24	1.13	1.02	0.40	0.12	0.292
7.049	351.5	250.0	33.9	317.6	216.1	1.47	283.84	249.94	101.53	1.14	1.00	0.41	0.14	0.334
7.339	352.3	250.0	34.9	317.4	215.1	1.48	284.11	249.21	102.32	1.14	1.00	0.41	0.14	0.341
8.168	350.9	250.0	37.4	313.5	212.6	1.47	283.65	246.25	100.95	1.13	0.98	0.40	0.15	0.370
9.088	350.8	250.0	41.3	309.5	208.7	1.48	283.59	242.29	100.78	1.13	0.97	0.40	0.17	0.410
10.316	349.1	250.0	44.8	304.3	205.2	1.48	283.05	238.25	99.15	1.13	0.95	0.40	0.18	0.452
12.124	346.4	250.0	49.8	296.6	200.2	1.48	282.12	232.32	96.36	1.13	0.93	0.39	0.20	0.517
14.023	341.7	250.0	53.2	288.5	196.8	1.47	280.55	227.35	91.66	1.12	0.91	0.37	0.21	0.580
16.160	329.4	250.0	56.7	272.7	193.3	1.41	276.48	219.78	79.43	1.11	0.88	0.32	0.23	0.714
18.050	321.8	250.0	57.8	264.0	192.2	1.37	273.92	216.12	71.75	1.10	0.86	0.29	0.23	0.806



GEOTECHNICAL LABORATORY

CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R1.0-T60-OCR1		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช				Sample No. 6				$\Delta v_c =$ 48.6 mm ³	$\epsilon_v =$ 23.15 %			
Test type	CU	without side drains		Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 250 kN/m ²				$L_c =$ 94.78 mm	$(1/3)\epsilon_v =$ 7.72 %			
Rate of	1.0 % per min			Operation A.F.W.		Cell Pressure 450 kN/m ²				$A_c =$ 1727.60 mm ²	$(2/3)\epsilon_v =$ 15.43 %			
Strain	60.0 % per hour			Consolidated Length 94.78 mm		Back Pressure 200 kN/m ²				$V_c =$ 161.24 mm ³	shear temp. 60 C ^o			
Membranes	1 x 0.2 mm			Consolidated Area 1727.60 mm ²		Consolidated Volume 161.238 cm ³				Undrained excess pwp due to change temp. (Δu_s) = 115.6 kPa				
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	250.0	250.0	0.0	250.0	250.0	1.00	250.00	250.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.025	272.6	250.0	-0.1	272.7	250.1	1.09	257.53	257.63	22.58	1.03	1.03	0.09	0.00	-0.004
0.070	275.4	250.0	-0.5	275.9	250.5	1.10	258.46	258.96	25.39	1.03	1.04	0.10	0.00	-0.020
0.106	281.2	250.0	0.2	281.0	249.8	1.12	260.39	260.19	31.18	1.04	1.04	0.12	0.00	0.006
0.233	293.6	250.0	0.7	292.9	249.3	1.17	264.53	263.83	43.58	1.06	1.06	0.17	0.00	0.016
0.523	307.1	250.0	2.0	305.1	248.0	1.23	269.05	267.05	57.14	1.08	1.07	0.23	0.01	0.035
1.010	314.7	250.0	4.0	310.7	246.0	1.26	271.56	267.56	64.68	1.09	1.07	0.26	0.02	0.062
2.070	320.7	250.0	6.4	314.3	243.6	1.29	273.56	267.16	70.69	1.09	1.07	0.28	0.03	0.091
3.023	325.0	250.0	8.7	316.3	241.3	1.31	274.98	266.28	74.95	1.10	1.07	0.30	0.03	0.116
4.029	327.5	250.0	11.2	316.3	238.8	1.32	275.83	264.63	77.50	1.10	1.06	0.31	0.04	0.145
5.070	329.7	250.0	13.5	316.2	236.5	1.34	276.57	263.07	79.72	1.11	1.05	0.32	0.05	0.169
6.008	330.6	250.0	14.8	315.8	235.2	1.34	276.88	262.08	80.64	1.11	1.05	0.32	0.06	0.184
8.328	330.2	250.0	19.0	311.2	231.0	1.35	276.74	257.74	80.22	1.11	1.03	0.32	0.08	0.237
10.870	324.6	250.0	22.1	302.5	227.9	1.33	274.85	252.75	74.55	1.10	1.01	0.30	0.09	0.296
12.124	321.6	250.0	23.7	297.9	226.3	1.32	273.88	250.18	71.63	1.10	1.00	0.29	0.09	0.331
14.117	316.5	250.0	25.3	291.2	224.7	1.30	272.15	246.85	66.46	1.09	0.99	0.27	0.10	0.381
16.002	302.9	250.0	26.1	276.8	223.9	1.24	267.65	241.55	52.95	1.07	0.97	0.21	0.10	0.493
18.810	296.4	250.0	26.9	269.5	223.1	1.21	265.46	238.56	46.38	1.06	0.95	0.19	0.11	0.580



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R6.0-T45-OCR1			Location ต.บงจาก อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช			Sample No. 7			$\Delta v_c = 44.2 \text{ mm}^3$			$\epsilon_v = 20.74 \%$		
Test type CU without side drains			Proving Ring No. 1153-21			Effective Cell Pressure initially 250 kN/m^2			$L_c = 100.15 \text{ mm}$			$(1/3)\epsilon_v = 6.91 \%$		
Rate of 6.0 % per min			Operation A.F.W.			Cell Pressure 450 kN/m^2			$A_c = 1708.39 \text{ mm}^2$			$(2/3)\epsilon_v = 13.83 \%$		
Strain 360.0 % per hour			Consolidated Length 100.15 mm			Back Pressure 200 kN/m^2			$V_c = 169.05 \text{ mm}^3$			shear temp. 45 $^\circ\text{C}$		
Membranes 1 x 0.2 mm			Consolidated Area 1708.39 mm^2			Consolidated Volume 169.049 cm^3			Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 75.11 kPa					
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	250.0	250.0	0.0	250.0	250.0	1.00	250.00	250.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.044	283.0	250.0	0.2	282.8	249.8	1.13	261.01	260.76	33.03	1.04	1.04	0.13	0.00	0.007
0.099	297.0	250.0	0.6	296.5	249.4	1.19	265.67	265.10	47.02	1.06	1.06	0.19	0.00	0.012
0.199	310.3	250.0	1.0	309.3	249.0	1.24	270.09	269.09	60.27	1.08	1.08	0.24	0.00	0.017
0.495	329.4	250.0	1.9	327.5	248.1	1.32	276.46	274.55	79.39	1.11	1.10	0.32	0.01	0.024
1.095	340.9	250.0	3.5	337.5	246.5	1.37	280.31	276.84	90.93	1.12	1.11	0.36	0.01	0.038
2.086	345.4	250.0	5.7	339.7	244.3	1.39	281.78	276.08	95.35	1.13	1.10	0.38	0.02	0.060
3.193	349.9	250.0	8.1	341.8	241.9	1.41	283.30	275.21	99.91	1.13	1.10	0.40	0.03	0.081
4.289	352.2	250.0	10.3	341.9	239.7	1.43	284.08	273.78	102.23	1.14	1.10	0.41	0.04	0.101
5.287	352.7	250.0	12.2	340.6	237.8	1.43	284.25	272.09	102.75	1.14	1.09	0.41	0.05	0.118
6.490	359.2	250.0	14.3	344.9	235.7	1.46	286.39	272.13	109.16	1.15	1.09	0.44	0.06	0.131
7.482	355.5	250.0	16.1	339.5	233.9	1.45	285.17	269.11	105.51	1.14	1.08	0.42	0.06	0.152
7.985	354.9	250.0	16.7	338.1	233.3	1.45	284.96	268.21	104.88	1.14	1.07	0.42	0.07	0.160
8.986	355.8	250.0	18.4	337.4	231.6	1.46	285.27	266.89	105.81	1.14	1.07	0.42	0.07	0.174
9.982	351.7	250.0	20.0	331.8	230.0	1.44	283.92	263.93	101.75	1.14	1.06	0.41	0.08	0.196
10.981	353.1	250.0	21.3	331.8	228.7	1.45	284.36	263.05	103.09	1.14	1.05	0.41	0.09	0.207
12.480	352.1	250.0	23.7	328.4	226.3	1.45	284.04	260.35	102.13	1.14	1.04	0.41	0.09	0.232
14.476	346.9	250.0	26.4	320.5	223.6	1.43	282.30	255.89	96.91	1.13	1.02	0.39	0.11	0.273
16.968	342.6	250.0	29.9	312.7	220.1	1.42	280.87	250.93	92.62	1.12	1.00	0.37	0.12	0.323
18.470	330.9	250.0	31.4	299.4	218.6	1.37	276.95	245.51	80.85	1.11	0.98	0.32	0.13	0.389



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R6.0-T60-OCR1		Location ต.บางจาก อ.ป่าพะยอม จ.นครศรีธรรมราช		Sample No. 8		$\Delta v_c = 43.4 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 21.55 \%$						
Test type CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 250 kN/m ²		Lc = 96.65 mm		$(1/3)\epsilon_v = 7.18 \%$						
Rate of 6.0 % per min		Operation A.F.W.		Cell Pressure 450 kN/m ²		Ac = 1657.39 mm ²		$(2/3)\epsilon_v = 14.37 \%$						
Strain 360.0 % per hour		Consolidated Length 96.65 mm		Back Pressure 200 kN/m ²		Vc = 158.10 mm ³		shear temp. 60 C°						
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1657.39 mm ²		Consolidated Volume 158.099 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 121 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, $q, \sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	250.0	250.0	0.0	250.0	250.0	1.00	250.00	250.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.016	252.1	250.0	-0.5	252.6	250.5	1.01	250.69	251.19	2.08	1.00	1.00	0.01	0.00	-0.240
0.055	252.9	250.0	-0.6	253.5	250.6	1.01	250.95	251.55	2.85	1.00	1.01	0.01	0.00	-0.210
0.125	258.4	250.0	-0.1	258.5	250.1	1.03	252.79	252.89	8.38	1.01	1.01	0.03	0.00	-0.012
0.305	267.9	250.0	0.6	267.3	249.4	1.07	255.95	255.35	17.86	1.02	1.02	0.07	0.00	0.034
0.515	289.6	250.0	1.4	288.2	248.6	1.16	263.19	261.79	39.57	1.05	1.05	0.16	0.01	0.035
1.006	322.4	250.0	4.4	318.0	245.6	1.29	274.14	269.74	72.41	1.10	1.08	0.29	0.02	0.061
1.529	329.8	250.0	6.3	323.5	243.7	1.33	276.59	270.29	79.78	1.11	1.08	0.32	0.03	0.079
2.001	331.5	250.0	8.4	323.1	241.6	1.34	277.17	268.77	81.51	1.11	1.08	0.33	0.03	0.103
3.007	337.3	250.0	11.4	325.9	238.6	1.37	279.09	267.69	87.27	1.12	1.07	0.35	0.05	0.131
4.068	342.2	250.0	13.8	328.4	236.2	1.39	280.74	266.94	92.21	1.12	1.07	0.37	0.06	0.150
5.056	344.2	250.0	15.8	328.4	234.2	1.40	281.39	265.59	94.18	1.13	1.06	0.38	0.06	0.168
6.083	346.5	250.0	17.7	328.8	232.3	1.42	282.18	264.48	96.54	1.13	1.06	0.39	0.07	0.183
7.037	345.4	250.0	19.1	326.3	230.9	1.41	281.80	262.70	95.39	1.13	1.05	0.38	0.08	0.200
8.060	344.1	250.0	21.0	323.1	229.0	1.41	281.35	260.35	94.06	1.13	1.04	0.38	0.08	0.223
9.096	340.6	250.0	22.7	317.9	227.3	1.40	280.19	257.49	90.57	1.12	1.03	0.36	0.09	0.251
10.099	338.9	250.0	23.4	315.5	226.6	1.39	279.62	256.22	88.86	1.12	1.02	0.36	0.09	0.263
11.111	335.0	250.0	24.5	310.5	225.5	1.38	278.32	253.82	84.95	1.11	1.02	0.34	0.10	0.288
12.210	331.1	250.0	26.0	305.1	224.0	1.36	277.03	251.03	81.08	1.11	1.00	0.32	0.10	0.321
13.000	329.3	250.0	26.1	303.2	223.9	1.35	276.42	250.32	79.26	1.11	1.00	0.32	0.10	0.329
14.216	323.6	250.0	26.8	296.8	223.2	1.33	274.53	247.73	73.60	1.10	0.99	0.29	0.11	0.364
16.245	313.9	250.0	26.9	287.0	223.1	1.29	271.31	244.41	63.94	1.09	0.98	0.26	0.11	0.421
18.044	306.4	250.0	28.1	278.3	221.9	1.25	268.79	240.69	56.37	1.08	0.96	0.23	0.11	0.498



GEOTECHNICAL LABORATORY

CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.02-T45-OCR2		Location ต.บึงจาก อ.ป่าพะยอม จ.นครศรีธรรมราช		Sample No. 9		$\Delta v_c =$ 52.0 mm ³	$\epsilon_v =$ 25.16 %							
Test type CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 125 kN/m ²		$L_c =$ 99.05 mm	$(1/3)\epsilon_v =$ 8.39 %							
Rate of Strain 0.02 % per min		Operation A.F.W.		Cell Pressure 325 kN/m ²		$A_c =$ 1610.87 mm ²	$(2/3)\epsilon_v =$ 16.77 %							
Strain 1.2 % per hour		Consolidated Length 99.05 mm		Back Pressure 200 kN/m ²		$V_c =$ 154.62 mm ³	shear temp. 45 C°							
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1610.87 mm ²		Consolidated Volume 154.616 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 25.18 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/ σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/ σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/ σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	125.0	125.0	0.0	125.0	125.0	1.00	125.00	125.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.001	126.8	125.0	-0.5	127.3	125.5	1.01	125.600	126.11	1.80	1.00	1.01	0.01	0.00	-0.280
0.301	171.0	125.0	4.0	167.0	121.0	1.38	140.33	136.35	46.00	1.12	1.09	0.37	0.03	0.087
0.402	173.5	125.0	7.0	166.5	118.0	1.41	141.16	134.14	48.49	1.13	1.07	0.39	0.06	0.145
0.605	183.0	125.0	10.6	172.4	114.4	1.51	144.33	133.71	58.00	1.15	1.07	0.46	0.08	0.183
0.807	188.8	125.0	12.3	176.5	112.7	1.57	146.26	134.00	63.79	1.17	1.07	0.51	0.10	0.192
1.005	190.6	125.0	14.9	175.7	110.1	1.60	146.88	131.96	65.64	1.18	1.06	0.53	0.12	0.227
2.018	196.4	125.0	18.0	178.4	107.0	1.67	148.81	130.78	71.44	1.19	1.05	0.57	0.14	0.252
3.025	197.5	125.0	19.8	177.6	105.2	1.69	149.16	129.33	72.47	1.19	1.03	0.58	0.16	0.274
4.037	198.9	125.0	19.8	179.1	105.2	1.70	149.62	129.83	73.87	1.20	1.04	0.59	0.16	0.268
5.048	197.9	125.0	21.2	176.7	103.8	1.70	149.30	128.12	72.91	1.19	1.02	0.58	0.17	0.290
6.052	197.6	125.0	22.5	175.1	102.5	1.71	149.22	126.71	72.65	1.19	1.01	0.58	0.18	0.310
8.073	200.8	125.0	24.9	175.9	100.1	1.76	150.25	125.37	75.75	1.20	1.00	0.61	0.20	0.328
10.096	203.5	125.0	26.3	177.1	98.7	1.80	151.15	124.81	78.46	1.21	1.00	0.63	0.21	0.336
12.114	203.4	125.0	30.1	173.3	94.9	1.83	151.14	121.00	78.43	1.21	0.97	0.63	0.24	0.384
14.133	201.1	125.0	32.6	168.6	92.4	1.82	150.37	117.81	76.12	1.20	0.94	0.61	0.26	0.428
16.151	195.2	125.0	35.1	160.1	89.9	1.78	148.40	113.26	70.21	1.19	0.91	0.56	0.28	0.500
18.170	192.5	125.0	36.3	156.2	88.7	1.76	147.49	111.18	67.47	1.18	0.89	0.54	0.29	0.538



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.02-T60-OCR2		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช				Sample No. 10				$\Delta v_c =$ 48.3 mm ³	$\epsilon_v =$ 22.83 %			
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21			Effective Cell Pressure initially 125 kN/m ²				$L_c =$ 99.56 mm	$(1/3)\epsilon_v =$ 7.61 %			
Rate of Strain	0.02 % per min		Operation A.F.W.			Cell Pressure 325 kN/m ²				$A_c =$ 1692.44 mm ²	$(2/3)\epsilon_v =$ 15.22 %			
	1.2 % per hour		Consolidated Length 99.56 mm			Back Pressure 200 kN/m ²				$V_c =$ 163.37 mm ³	shear temp. 60 C°			
Membranes	1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1692.44 mm ²			Consolidated Volume 163.374 cm ³				Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 44.6 kPa				
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, $q, \sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	125.0	125.0	0.0	125.0	125.0	1.00	125.00	125.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.049	136.2	125.0	1.2	135.0	123.8	1.09	128.730	127.54	11.19	1.03	1.02	0.09	0.01	0.106
0.100	140.8	125.0	2.2	138.6	122.8	1.13	130.251	128.06	15.75	1.04	1.02	0.13	0.02	0.139
0.300	149.4	125.0	5.1	144.3	119.9	1.20	133.13	128.01	24.40	1.07	1.02	0.20	0.04	0.210
0.502	152.7	125.0	7.9	144.7	117.1	1.24	134.22	126.28	27.66	1.07	1.01	0.22	0.06	0.287
0.903	157.8	125.0	11.2	146.6	113.8	1.29	135.94	124.74	32.83	1.09	1.00	0.26	0.09	0.341
1.506	163.0	125.0	13.3	149.7	111.7	1.34	137.67	124.36	38.02	1.10	0.99	0.30	0.11	0.350
2.007	165.6	125.0	14.0	151.6	111.0	1.37	138.54	124.51	40.61	1.11	1.00	0.32	0.11	0.345
3.013	172.9	125.0	16.7	156.2	108.3	1.44	140.98	124.27	47.95	1.13	0.99	0.38	0.13	0.349
4.319	178.6	125.0	19.4	159.3	105.6	1.51	142.88	123.51	53.64	1.14	0.99	0.43	0.15	0.361
5.524	182.9	125.0	21.7	161.2	103.3	1.56	144.30	122.64	57.91	1.15	0.98	0.46	0.17	0.374
6.528	184.8	125.0	23.3	161.5	101.7	1.59	144.92	121.61	59.77	1.16	0.97	0.48	0.19	0.390
8.035	189.1	125.0	25.7	163.4	99.3	1.64	146.35	120.66	64.06	1.17	0.97	0.51	0.21	0.401
10.044	191.3	125.0	28.2	163.1	96.8	1.69	147.11	118.89	66.33	1.18	0.95	0.53	0.23	0.425
10.547	192.1	125.0	28.7	163.3	96.3	1.70	147.36	118.63	67.07	1.18	0.95	0.54	0.23	0.428
12.053	191.6	125.0	30.0	161.5	95.0	1.70	147.18	117.16	66.55	1.18	0.94	0.53	0.24	0.451
14.564	190.5	125.0	31.5	159.0	93.5	1.70	146.82	115.34	65.47	1.17	0.92	0.52	0.25	0.481
16.071	188.0	125.0	32.0	155.9	93.0	1.68	145.99	113.95	62.98	1.17	0.91	0.50	0.26	0.509
16.572	186.1	125.0	32.1	154.1	92.9	1.66	145.38	113.31	61.15	1.16	0.91	0.49	0.26	0.524
18.078	184.4	125.0	32.1	152.3	92.9	1.64	144.80	112.71	59.40	1.16	0.90	0.48	0.26	0.540



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.075-T45-OCR2		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 11		$\Delta v_c = 49.3 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 22.84 \%$						
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 125 kN/m ²		Lc = 101.11 mm		(1/3) $\epsilon_v = 7.61 \%$						
Rate of Strain	0.075 % per min		Operation A.F.W.	Cell Pressure 325 kN/m ²		Ac = 1698.71 mm ²		(2/3) $\epsilon_v = 15.23 \%$						
Strain	4.5 % per hour		Consolidated Length 101.11 mm	Back Pressure 200 kN/m ²		Vc = 166.59 mm ³		shear temp. 45 C°						
Membranes	1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1698.71 mm ²	Consolidated Volume 166.587 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 20.83 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/ σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/ σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/ σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	125.0	125.0	0.0	125.0	125.0	1.00	125.00	125.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.047	144.2	125.0	0.8	143.4	124.2	1.15	131.391	130.63	19.17	1.05	1.05	0.15	0.01	0.039
0.095	147.0	125.0	1.5	145.5	123.5	1.18	132.336	130.86	22.01	1.06	1.05	0.18	0.01	0.067
0.196	149.7	125.0	2.7	147.0	122.3	1.20	133.23	130.53	24.70	1.07	1.04	0.20	0.02	0.109
0.393	154.0	125.0	5.1	148.8	119.9	1.24	134.66	129.54	28.97	1.08	1.04	0.23	0.04	0.177
0.590	156.8	125.0	6.8	150.0	118.2	1.27	135.60	128.76	31.81	1.08	1.03	0.25	0.05	0.215
1.187	168.0	125.0	10.9	157.1	114.1	1.38	139.35	128.44	43.04	1.11	1.03	0.34	0.09	0.253
2.172	181.3	125.0	15.3	166.0	109.7	1.51	143.75	128.45	56.26	1.15	1.03	0.45	0.12	0.272
3.164	193.4	125.0	18.7	174.8	106.3	1.64	147.81	129.14	68.42	1.18	1.03	0.55	0.15	0.273
4.450	197.9	125.0	22.9	175.0	102.1	1.71	149.31	126.38	72.92	1.19	1.01	0.58	0.18	0.314
5.440	200.8	125.0	25.6	175.2	99.4	1.76	150.27	124.66	75.80	1.20	1.00	0.61	0.20	0.338
6.426	203.3	125.0	27.7	175.6	97.3	1.80	151.11	123.44	78.32	1.21	0.99	0.63	0.22	0.353
6.921	204.2	125.0	28.6	175.6	96.4	1.82	151.40	122.80	79.19	1.21	0.98	0.63	0.23	0.361
8.405	204.0	125.0	31.4	172.6	93.6	1.84	151.32	119.92	78.97	1.21	0.96	0.63	0.25	0.398
10.384	203.1	125.0	34.8	168.3	90.2	1.87	151.04	116.20	78.13	1.21	0.93	0.63	0.28	0.446
12.363	201.8	125.0	37.7	164.1	87.3	1.88	150.59	112.92	76.78	1.20	0.90	0.61	0.30	0.491
14.340	199.7	125.0	40.3	159.4	84.7	1.88	149.91	109.63	74.72	1.20	0.88	0.60	0.32	0.539
16.319	197.4	125.0	42.5	154.9	82.5	1.88	149.12	106.63	72.37	1.19	0.85	0.58	0.34	0.587
18.297	196.2	125.0	44.9	151.3	80.1	1.89	148.73	103.81	71.19	1.19	0.83	0.57	0.36	0.631



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.075-T60-OCR2		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 12		$\Delta v_c =$ 48.8 mm ³	$\epsilon_v =$ 23.77 %								
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 125 kN/m ²		$L_c =$ 99.14 mm	$(1/3)\epsilon_v =$ 7.92 %								
Rate of Strain	0.075 % per min		Operation A.F.W.	Cell Pressure 325 kN/m ²		$A_c =$ 1635.64 mm ²	$(2/3)\epsilon_v =$ 15.84 %								
4.5 % per hour			Consolidated Length 99.14 mm	Back Pressure 200 kN/m ²		$V_c =$ 156.39 mm ³	shear temp. 60 C°								
Membranes 1 x 0.2 mm			Consolidated Area 1635.64 mm ²	Consolidated Volume 156.393 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 42 kPa									
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)
0	125.0	125.0	0.0	125.0	125.0	1.00	125.00	125.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-	125.00
0.047	163.0	125.0	1.1	161.9	123.9	1.31	137.655	136.58	37.96	1.10	1.09	0.30	0.01	0.028	136.58
0.101	165.1	125.0	1.8	163.3	123.2	1.33	138.352	136.58	40.06	1.11	1.09	0.32	0.01	0.044	136.58
0.200	171.1	125.0	2.9	168.2	122.1	1.38	140.37	137.44	46.10	1.12	1.10	0.37	0.02	0.063	137.44
0.302	173.0	125.0	3.9	169.1	121.1	1.40	141.00	137.13	48.00	1.13	1.10	0.38	0.03	0.081	137.13
0.400	174.4	125.0	5.0	169.4	120.0	1.41	141.47	136.50	49.42	1.13	1.09	0.40	0.04	0.101	136.50
0.500	174.5	125.0	5.7	168.8	119.3	1.41	141.50	135.83	49.51	1.13	1.09	0.40	0.05	0.115	135.83
1.007	179.0	125.0	9.1	169.9	115.9	1.47	143.01	133.89	54.03	1.14	1.07	0.43	0.07	0.169	133.89
2.013	184.4	125.0	13.6	170.8	111.4	1.53	144.79	131.24	59.38	1.16	1.05	0.48	0.11	0.228	131.24
3.021	184.8	125.0	17.0	167.8	108.0	1.55	144.95	127.91	59.84	1.16	1.02	0.48	0.14	0.285	127.91
4.033	189.5	125.0	19.7	169.8	105.3	1.61	146.51	126.78	64.54	1.17	1.01	0.52	0.16	0.306	126.78
5.041	191.4	125.0	22.2	169.3	102.8	1.65	147.14	124.98	66.43	1.18	1.00	0.53	0.18	0.334	124.98
6.051	189.1	125.0	24.6	164.5	100.4	1.64	146.36	121.80	64.09	1.17	0.97	0.51	0.20	0.383	121.80
8.066	191.7	125.0	28.8	162.8	96.2	1.69	147.23	118.38	66.69	1.18	0.95	0.53	0.23	0.433	118.38
8.568	193.3	125.0	29.8	163.5	95.2	1.72	147.75	117.95	68.25	1.18	0.94	0.55	0.24	0.437	117.95
10.084	192.7	125.0	32.4	160.3	92.6	1.73	147.57	115.15	67.70	1.18	0.92	0.54	0.26	0.479	115.15
12.102	189.6	125.0	35.1	154.5	89.9	1.72	146.53	111.48	64.60	1.17	0.89	0.52	0.28	0.543	111.48
14.121	188.3	125.0	37.5	150.8	87.5	1.72	146.10	108.62	63.30	1.17	0.87	0.51	0.30	0.592	108.62
16.137	189.4	125.0	39.5	149.9	85.5	1.75	146.48	106.96	64.43	1.17	0.86	0.52	0.32	0.613	106.96
18.153	186.7	125.0	41.8	144.9	83.2	1.74	145.58	103.77	61.73	1.16	0.83	0.49	0.33	0.677	103.77



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No.	IC-UH-R1.0-T45-OCR2		Location	ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No.	13		$\Delta v_c =$	51.6	mm^3	$\epsilon_v =$	24.16	%	
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No.	1153-21		Effective Cell Pressure	initially	125	kN/m^2	Lc =	99.04	mm	$(1/3)\epsilon_v =$	8.05	%
Rate of Strain	1.0	% per min	Operation	A.F.W.		Cell Pressure		325	kN/m^2	Ac =	1691.82	mm^2	$(2/3)\epsilon_v =$	16.11	%
	60.0	% per hour	Consolidated Length	99.04		Back Pressure		200	kN/m^2	Vc =	161.93	mm^3	shear temp.	45	$^{\circ}\text{C}$
Membranes	1 x 0.2	mm	Consolidated Area	1691.82		mm^2	Consolidated Volume	161.931		cm^3	Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) =	31.5			kPa
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A	
0	125.0	125.0	0.0	125.0	125.0	1.00	125.00	125.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-	
0.050	130.4	125.0	0.6	129.8	124.4	1.04	126.787	126.18	5.36	1.01	1.01	0.04	0.00	0.113	
0.119	130.7	125.0	0.0	130.6	125.0	1.05	126.88	126.87	5.65	1.02	1.01	0.05	0.00	0.002	
0.230	131.2	125.0	0.6	130.6	124.4	1.05	127.08	126.49	6.24	1.02	1.01	0.05	0.00	0.095	
0.453	151.2	125.0	1.4	149.8	123.6	1.21	133.73	132.31	26.20	1.07	1.06	0.21	0.01	0.054	
0.655	157.9	125.0	3.4	154.5	121.6	1.27	135.96	132.56	32.89	1.09	1.06	0.26	0.03	0.103	
0.756	163.7	125.0	5.6	158.0	119.4	1.32	137.89	132.26	38.67	1.10	1.06	0.31	0.05	0.146	
1.161	173.0	125.0	8.4	164.6	116.6	1.41	140.99	132.60	47.98	1.13	1.06	0.38	0.07	0.175	
2.171	190.6	125.0	16.5	174.2	108.5	1.60	146.88	130.41	65.64	1.18	1.04	0.53	0.13	0.251	
3.177	201.1	125.0	20.9	180.3	104.1	1.73	150.37	129.52	76.12	1.20	1.04	0.61	0.17	0.274	
4.287	205.4	125.0	23.4	181.9	101.6	1.79	151.79	128.36	80.37	1.21	1.03	0.64	0.19	0.292	
5.301	208.3	125.0	24.7	183.7	100.3	1.83	152.77	128.12	83.32	1.22	1.02	0.67	0.20	0.296	
6.313	209.7	125.0	26.4	183.2	98.6	1.86	153.22	126.79	84.66	1.23	1.01	0.68	0.21	0.312	
8.330	208.7	125.0	27.0	181.6	98.0	1.85	152.89	125.86	83.68	1.22	1.01	0.67	0.22	0.323	
10.350	209.8	125.0	28.3	181.6	96.7	1.88	153.28	125.02	84.83	1.23	1.00	0.68	0.23	0.333	
10.852	212.2	125.0	29.6	182.6	95.4	1.91	154.08	124.48	87.23	1.23	1.00	0.70	0.24	0.339	
12.356	209.0	125.0	29.5	179.5	95.5	1.88	152.99	123.48	83.96	1.22	0.99	0.67	0.24	0.351	
14.340	206.2	125.0	30.8	175.4	94.2	1.86	152.08	121.27	81.23	1.22	0.97	0.65	0.25	0.379	
16.359	206.7	125.0	32.1	174.6	92.9	1.88	152.22	120.12	81.66	1.22	0.96	0.65	0.26	0.393	
18.379	204.2	125.0	31.7	172.5	93.3	1.85	151.40	119.74	79.20	1.21	0.96	0.63	0.25	0.400	



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R1.0-T60-OCR2		Location ด. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 14		$\Delta v_c = 48.9 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 23.44 \%$						
Test type CU		without side drains		Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 125 kN/m ²		$L_c = 97.91 \text{ mm}$		$(1/3)\epsilon_v = 7.81 \%$				
Rate of Strain 1.0 % per min		Operation A.F.W.		Cell Pressure 325 kN/m ²		$A_c = 1687.08 \text{ mm}^2$		$(2/3)\epsilon_v = 15.63 \%$						
Strain 60.0 % per hour		Consolidated Length 97.91 mm		Back Pressure 200 kN/m ²		$V_c = 159.71 \text{ mm}^3$		shear temp. 60 C°						
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1687.08 mm ²		Consolidated Volume 159.714 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 48.3 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	125.0	125.0	0.0	125.0	125.0	1.00	125.00	125.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.100	138.9	125.0	0.1	138.8	124.9	1.11	129.645	129.56	13.93	1.04	1.04	0.11	0.00	0.006
0.198	147.0	125.0	2.1	144.9	122.9	1.18	132.334	130.26	22.00	1.06	1.04	0.18	0.02	0.094
0.395	156.8	125.0	5.8	150.9	119.2	1.27	135.59	129.75	31.76	1.08	1.04	0.25	0.05	0.184
0.604	162.7	125.0	8.8	153.9	116.2	1.32	137.56	128.75	37.68	1.10	1.03	0.30	0.07	0.234
0.817	166.8	125.0	10.8	156.0	114.2	1.37	138.93	128.17	41.79	1.11	1.03	0.33	0.09	0.258
1.018	169.3	125.0	12.8	156.5	112.2	1.39	139.77	126.98	44.30	1.12	1.02	0.35	0.10	0.289
2.141	178.6	125.0	17.3	161.3	107.7	1.50	142.87	125.54	53.61	1.14	1.00	0.43	0.14	0.323
3.063	185.9	125.0	18.1	167.7	106.9	1.57	145.29	127.18	60.86	1.16	1.02	0.49	0.14	0.298
4.186	189.0	125.0	17.8	171.3	107.2	1.60	146.35	128.59	64.04	1.17	1.03	0.51	0.14	0.277
5.104	191.0	125.0	17.6	173.4	107.4	1.61	146.99	129.44	65.96	1.18	1.04	0.53	0.14	0.266
6.015	192.5	125.0	16.0	176.5	109.0	1.62	147.50	131.49	67.51	1.18	1.05	0.54	0.13	0.237
8.573	194.9	125.0	16.5	178.4	108.5	1.64	148.30	131.78	69.90	1.19	1.05	0.56	0.13	0.236
10.106	193.6	125.0	19.3	174.3	105.7	1.65	147.86	128.54	68.57	1.18	1.03	0.55	0.15	0.282
12.051	193.6	125.0	20.9	172.6	104.1	1.66	147.85	126.94	68.56	1.18	1.02	0.55	0.17	0.305
14.093	194.4	125.0	22.2	172.3	102.8	1.68	148.15	125.99	69.44	1.19	1.01	0.56	0.18	0.319
16.131	196.3	125.0	24.3	172.0	100.7	1.71	148.78	124.49	71.33	1.19	1.00	0.57	0.19	0.340
18.074	196.3	125.0	25.5	170.8	99.5	1.72	148.76	123.25	71.28	1.19	0.99	0.57	0.20	0.358



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R6.0-T45-OCR2		Location ต.บางจาก อ.ป่าพะยอม จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 15		$\Delta v_c = 45.5 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 20.78 \%$							
Test type CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 125 kN/m ²		Lc = 101.79 mm		(1/3) $\epsilon_v = 6.93 \%$							
Rate of Strain 6.0 % per min		Operation A.F.W.		Cell Pressure 325 kN/m ²		Ac = 1753.65 mm ²		(2/3) $\epsilon_v = 13.85 \%$							
Strain 360.0 % per hour		Consolidated Length 101.79 mm		Back Pressure 200 kN/m ²		Vc = 173.33 mm ³		shear temp. 45 C°							
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1753.65 mm ²		Consolidated Volume 173.332 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 30.8 kPa									
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, $q, \sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)
0	125.0	125.0	0.0	125.0	125.0	1.00	125.00	125.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-	125.00
0.006	125.2	125.0	0.6	124.6	124.4	1.00	125.058	124.45	0.17	1.00	1.00	0.00	0.00	3.511	124.45
0.025	134.4	125.0	1.1	133.2	123.9	1.08	128.12	127.00	9.36	1.02	1.02	0.07	0.01	0.120	127.00
0.105	156.7	125.0	1.2	155.5	123.8	1.26	135.56	134.39	31.69	1.08	1.08	0.25	0.01	0.037	134.39
0.288	177.9	125.0	2.7	175.2	122.3	1.43	142.64	139.94	52.92	1.14	1.12	0.42	0.02	0.051	139.94
0.567	190.6	125.0	3.8	186.9	121.2	1.54	146.88	143.11	65.64	1.18	1.14	0.53	0.03	0.057	143.11
1.071	199.0	125.0	7.4	191.6	117.6	1.63	149.67	142.29	74.01	1.20	1.14	0.59	0.06	0.100	142.29
2.153	210.3	125.0	11.2	199.2	113.8	1.75	153.45	142.28	85.34	1.23	1.14	0.68	0.09	0.131	142.28
3.427	216.5	125.0	13.5	203.0	111.5	1.82	155.51	141.97	91.54	1.24	1.14	0.73	0.11	0.148	141.97
4.413	218.2	125.0	15.4	202.8	109.6	1.85	156.07	140.68	93.21	1.25	1.13	0.75	0.12	0.165	140.68
5.398	220.1	125.0	15.4	204.7	109.6	1.87	156.70	141.30	95.10	1.25	1.13	0.76	0.12	0.162	141.30
6.378	220.5	125.0	18.0	202.5	107.0	1.89	156.84	138.84	95.51	1.25	1.11	0.76	0.14	0.188	138.84
7.357	220.8	125.0	19.5	201.3	105.5	1.91	156.93	137.42	95.80	1.26	1.10	0.77	0.16	0.204	137.42
8.345	220.1	125.0	21.1	199.0	103.9	1.92	156.70	135.58	95.09	1.25	1.08	0.76	0.17	0.222	135.58
8.935	220.9	125.0	20.5	200.4	104.5	1.92	156.97	136.47	95.90	1.26	1.09	0.77	0.16	0.214	136.47
10.214	218.0	125.0	22.1	195.9	102.9	1.90	156.00	133.87	93.00	1.25	1.07	0.74	0.18	0.238	133.87
12.267	212.4	125.0	24.8	187.6	100.2	1.87	154.13	129.34	87.40	1.23	1.03	0.70	0.20	0.284	129.34
14.433	196.7	125.0	24.6	172.1	100.4	1.71	148.91	124.32	71.72	1.19	0.99	0.57	0.20	0.343	124.32
16.401	186.2	125.0	22.9	163.3	102.1	1.60	145.39	122.50	61.16	1.16	0.98	0.49	0.18	0.374	122.50
18.165	182.9	125.0	22.3	160.6	102.7	1.56	144.30	122.02	57.90	1.15	0.98	0.46	0.18	0.385	122.02



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R6.0-T60-OCR2	Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช	Sample No. 16	$\Delta v_c = 49.6 \text{ mm}^3$	$\epsilon_v = 23.86 \%$
Test type CU without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 125 kN/m ²	$L_c = 98.93 \text{ mm}$	$(1/3)\epsilon_v = 7.95 \%$
Rate of 6.0 % per min	Operation A.F.W.	Cell Pressure 325 kN/m ²	$A_c = 1650.65 \text{ mm}^2$	$(2/3)\epsilon_v = 15.91 \%$
Strain 360.0 % per hour	Consolidated Length 98.93 mm	Back Pressure 200 kN/m ²	$V_c = 158.13 \text{ mm}^3$	shear temp. 60 C°
Membranes 1 x 0.2 mm	Consolidated Area 1650.65 mm ²	Consolidated Volume 158.134 cm ³	Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 55.5 kPa	

Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	125.0	125.0	0.00	125.0	125.0	1.00	125.00	125.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.405	129.2	125.0	-3.04	132.3	128.0	1.03	126.409	129.45	4.23	1.01	1.04	0.03	-0.02	-0.719
0.712	133.0	125.0	-2.84	135.8	127.8	1.06	127.66	130.50	7.97	1.02	1.04	0.06	-0.02	-0.357
0.909	137.2	125.0	-2.04	139.2	127.0	1.10	129.05	131.09	12.16	1.03	1.05	0.10	-0.02	-0.167
1.015	141.6	125.0	-3.17	144.8	128.2	1.13	130.53	133.70	16.59	1.04	1.07	0.13	-0.03	-0.191
2.026	182.9	125.0	3.58	179.4	121.4	1.48	144.31	140.73	57.93	1.15	1.13	0.46	0.03	0.062
3.032	193.2	125.0	7.23	186.0	117.8	1.58	147.74	140.51	68.23	1.18	1.12	0.55	0.06	0.106
4.049	198.7	125.0	7.79	190.9	117.2	1.63	149.58	141.79	73.74	1.20	1.13	0.59	0.06	0.106
5.057	204.9	125.0	8.91	196.0	116.1	1.69	151.65	142.73	79.94	1.21	1.14	0.64	0.07	0.112
6.071	207.2	125.0	10.50	196.7	114.5	1.72	152.40	141.90	82.20	1.22	1.14	0.66	0.08	0.128
8.085	207.6	125.0	10.65	196.9	114.3	1.72	152.53	141.88	82.59	1.22	1.14	0.66	0.09	0.129
10.109	208.0	125.0	11.02	197.0	114.0	1.73	152.66	141.64	82.99	1.22	1.13	0.66	0.09	0.133
12.135	206.3	125.0	11.61	194.7	113.4	1.72	152.09	140.48	81.26	1.22	1.12	0.65	0.09	0.143
14.158	203.2	125.0	12.46	190.7	112.5	1.69	151.06	138.60	78.19	1.21	1.11	0.63	0.10	0.159
16.176	204.3	125.0	10.46	193.9	114.5	1.69	151.45	140.99	79.34	1.21	1.13	0.63	0.08	0.132
18.199	202.6	125.0	11.64	191.0	113.4	1.68	150.88	139.24	77.64	1.21	1.11	0.62	0.09	0.150



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.02-T45-OCR4		Location ต.บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 17		$\Delta v_c = 43.7 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 20.16 \%$						
Test type CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 63 kN/m^2		Lc = 102.61 mm		$(1/3)\epsilon_v = 6.72 \%$						
Rate of 0.02 % per min		Operation A.F.W.		Cell Pressure 262.5 kN/m^2		Ac = 1787.98 mm^2		$(2/3)\epsilon_v = 13.44 \%$						
Strain 1.2 % per hour		Consolidated Length 102.61 mm		Back Pressure 200 kN/m^2		Vc = 173.15 mm^3		shear temp. 45 $^{\circ}\text{C}$						
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1787.98 mm^2		Consolidated Volume 173.149 cm^3		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 13.85 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0.000	62.5	62.5	0.0	62.5	62.5	1.00	62.50	62.50	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.097	67.8	62.5	1.8	66.0	60.7	1.09	64.26	62.48	5.29	1.03	1.00	0.08	0.03	0.34
0.140	68.8	62.5	1.9	66.9	60.6	1.10	64.61	62.70	6.34	1.03	1.00	0.10	0.03	0.30
0.250	70.2	62.5	2.0	68.2	60.5	1.13	65.07	63.10	7.72	1.04	1.01	0.12	0.03	0.26
0.583	72.0	62.5	3.4	68.6	59.1	1.16	65.66	62.29	9.48	1.05	1.00	0.15	0.05	0.36
1.169	75.9	62.5	5.7	70.2	56.8	1.24	66.98	61.28	13.44	1.07	0.98	0.22	0.09	0.42
2.144	81.9	62.5	7.1	74.9	55.4	1.35	68.98	61.90	19.44	1.10	0.99	0.31	0.11	0.36
3.118	85.8	62.5	7.5	78.3	55.0	1.42	70.27	62.74	23.31	1.12	1.00	0.37	0.12	0.32
4.384	90.0	62.5	7.6	82.4	54.9	1.50	71.68	64.03	27.53	1.15	1.02	0.44	0.12	0.28
5.358	92.0	62.5	8.1	83.9	54.4	1.54	72.34	64.21	29.53	1.16	1.03	0.47	0.13	0.28
6.334	93.5	62.5	8.5	84.9	54.0	1.57	72.82	64.30	30.95	1.17	1.03	0.50	0.14	0.28
8.803	94.6	62.5	9.0	85.6	53.5	1.60	73.18	64.20	32.05	1.17	1.03	0.51	0.14	0.280
10.265	94.4	62.5	9.4	85.0	53.1	1.60	73.13	63.70	31.89	1.17	1.02	0.51	0.15	0.30
12.214	93.8	62.5	10.0	83.8	52.5	1.60	72.94	62.95	31.33	1.17	1.01	0.50	0.16	0.32
16.079	91.3	62.5	11.0	80.3	51.5	1.56	72.11	61.07	28.84	1.15	0.98	0.46	0.18	0.38
18.029	90.6	62.5	11.2	79.4	51.3	1.55	71.85	60.69	28.06	1.15	0.97	0.45	0.18	0.40



GEOTECHNICAL LABORATORY

**CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
 TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)**

Loc. No. IC-UH-R0.02-T60-OCR4		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 18		$\Delta v_c = 52.9 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 25.12 \%$						
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 63 kN/m^2		Lc = 99.52 mm		$(1/3)\epsilon_v = 8.37 \%$						
Rate of Strain	0.02 % per min		Operation A.F.W.	Cell Pressure 262.5 kN/m^2		Ac = 1692.24 mm^2		$(2/3)\epsilon_v = 16.75 \%$						
	1.2 % per hour		Consolidated Length 99.52 mm	Back Pressure 200 kN/m^2		Vc = 157.70 mm^3		shear temp. 60 $^\circ\text{C}$						
Membranes	1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1692.24 mm^2	Consolidated Volume 157.703 cm^3		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 24.26 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	62.5	62.5	0.0	62.5	62.5	1.00	62.50	62.50	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.049	83.6	62.5	0.6	83.0	61.9	1.34	69.522	68.95	21.07	1.11	1.10	0.34	0.01	0.027
0.100	86.1	62.5	1.4	84.7	61.1	1.39	70.35	68.96	23.56	1.13	1.10	0.38	0.02	0.059
0.300	90.4	62.5	3.8	86.6	58.7	1.47	71.79	68.02	27.88	1.15	1.09	0.45	0.06	0.135
0.500	90.1	62.5	4.1	86.0	58.4	1.47	71.69	67.57	27.58	1.15	1.08	0.44	0.07	0.149
1.105	93.3	62.5	3.9	89.4	58.6	1.53	72.78	68.87	30.85	1.16	1.10	0.49	0.06	0.127
2.110	99.2	62.5	4.3	94.9	58.2	1.63	74.74	70.47	36.71	1.20	1.13	0.59	0.07	0.116
3.012	95.6	62.5	4.0	91.6	58.5	1.57	73.52	69.54	33.07	1.18	1.11	0.53	0.06	0.120
4.019	96.5	62.5	3.9	92.6	58.6	1.58	73.84	69.92	34.01	1.18	1.12	0.54	0.06	0.115
6.029	99.5	62.5	4.3	95.2	58.2	1.64	74.83	70.50	36.99	1.20	1.13	0.59	0.07	0.117
8.037	100.2	62.5	5.0	95.2	57.5	1.66	75.07	70.09	37.72	1.20	1.12	0.60	0.08	0.132
10.048	101.5	62.5	6.0	95.5	56.5	1.69	75.49	69.53	38.98	1.21	1.11	0.62	0.10	0.153
12.057	102.5	62.5	6.7	95.8	55.8	1.72	75.84	69.11	40.02	1.21	1.11	0.64	0.11	0.168
14.068	102.4	62.5	7.5	94.9	55.0	1.72	75.79	68.32	39.86	1.21	1.09	0.64	0.12	0.187
16.078	101.8	62.5	8.0	93.8	54.5	1.72	75.60	67.57	39.30	1.21	1.08	0.63	0.13	0.204
18.087	98.5	62.5	8.5	90.1	54.0	1.67	74.51	66.04	36.02	1.19	1.06	0.58	0.14	0.235



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.075-T45-OCR4		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 19		$\Delta v_c =$ 42.7 mm ³	$\epsilon_v =$ 20.79 %							
Test type CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 62.5 kN/m ²		Lc = 101.74 mm	(1/3) $\epsilon_v =$ 6.93 %							
Rate of 0.075 % per min		Operation A.F.W.		Cell Pressure 262.5 kN/m ²		Ac = 1620.02 mm ²	(2/3) $\epsilon_v =$ 13.86 %							
Strain 4.5 % per hour		Consolidated Length 101.74 mm		Back Pressure 200 kN/m ²		Vc = 162.85 mm ³	shear temp. 45 C°							
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1620.02 mm ²		Consolidated Volume 162.851 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 19.37 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, $q, \sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	62.5	62.5	0.0	62.5	62.5	1.00	62.50	62.50	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.190	75.9	62.5	1.8	74.1	60.7	1.22	66.97	65.14	13.42	1.07	1.04	0.21	0.03	0.136
0.377	78.9	62.5	3.2	75.7	59.3	1.28	67.95	64.79	16.36	1.09	1.04	0.26	0.05	0.193
0.589	83.2	62.5	4.4	78.8	58.1	1.36	69.40	64.97	20.70	1.11	1.04	0.33	0.07	0.214
1.175	90.6	62.5	6.5	84.1	56.0	1.50	71.87	65.39	28.11	1.15	1.05	0.45	0.10	0.230
2.162	95.3	62.5	7.7	87.6	54.8	1.60	73.44	65.75	32.81	1.18	1.05	0.53	0.12	0.234
3.144	97.3	62.5	7.6	89.8	54.9	1.63	74.11	66.55	34.84	1.19	1.06	0.56	0.12	0.217
4.422	99.4	62.5	6.5	92.9	56.0	1.66	74.80	68.34	36.90	1.20	1.09	0.59	0.10	0.175
5.895	101.5	62.5	5.4	96.1	57.1	1.68	75.49	70.13	38.98	1.21	1.12	0.62	0.09	0.138
6.384	102.3	62.5	5.2	97.2	57.3	1.69	75.77	70.60	39.82	1.21	1.13	0.64	0.08	0.130
8.353	102.4	62.5	4.5	97.9	58.0	1.69	75.81	71.28	39.93	1.21	1.14	0.64	0.07	0.113
9.826	102.8	62.5	4.5	98.3	58.0	1.70	75.95	71.42	40.34	1.22	1.14	0.65	0.07	0.112
10.809	102.7	62.5	4.6	98.1	57.9	1.69	75.89	71.31	40.18	1.21	1.14	0.64	0.07	0.114
12.284	101.7	62.5	4.7	97.0	57.8	1.68	75.58	70.87	39.23	1.21	1.13	0.63	0.08	0.120
14.251	102.2	62.5	4.9	97.3	57.6	1.69	75.73	70.87	39.70	1.21	1.13	0.64	0.08	0.122
16.214	101.4	62.5	6.1	95.3	56.4	1.69	75.47	69.36	38.90	1.21	1.11	0.62	0.10	0.157
18.182	101.8	62.5	6.7	95.1	55.8	1.70	75.60	68.90	39.30	1.21	1.10	0.63	0.11	0.170



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.075-T60-OCR4		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 20		$\Delta v_c = 48.8 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 23.01 \%$						
Test type CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 63 kN/m ²			$L_c = 100.84 \text{ mm}$		$(1/3)\epsilon_v = 7.67 \%$						
Rate of 0.075 % per min	Operation A.F.W.		Cell Pressure 262.5 kN/m ²			$A_c = 1719.54 \text{ mm}^2$		$(2/3)\epsilon_v = 15.34 \%$						
Strain 4.5 % per hour	Consolidated Length 100.84 mm		Back Pressure 200 kN/m ²			$V_c = 163.16 \text{ mm}^3$		shear temp. 60 C°						
Membranes 1 x 0.2 mm	Consolidated Area 1719.54 mm ²		Consolidated Volume 163.162 cm ³			Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 19.17 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	62.5	62.5	0.0	62.5	62.5	1.00	62.50	62.50	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.096	80.8	62.5	1.6	79.1	60.9	1.30	68.59	66.97	18.26	1.10	1.07	0.29	0.03	0.088
0.198	82.0	62.5	2.2	79.8	60.3	1.32	68.99	66.82	19.48	1.10	1.07	0.31	0.03	0.112
0.396	83.2	62.5	2.8	80.3	59.7	1.35	69.39	66.55	20.67	1.11	1.06	0.33	0.05	0.137
0.494	83.8	62.5	3.2	80.7	59.3	1.36	69.62	66.43	21.35	1.11	1.06	0.34	0.05	0.149
0.592	84.1	62.5	3.3	80.8	59.2	1.36	69.69	66.39	21.58	1.12	1.06	0.35	0.05	0.153
1.187	85.1	62.5	3.6	81.4	58.9	1.38	70.02	66.38	22.56	1.12	1.06	0.36	0.06	0.161
2.181	85.4	62.5	3.5	81.8	59.0	1.39	70.12	66.59	22.86	1.12	1.07	0.37	0.06	0.154
3.172	85.9	62.5	3.2	82.8	59.3	1.39	70.31	67.14	23.43	1.12	1.07	0.37	0.05	0.135
4.262	87.5	62.5	3.0	84.5	59.5	1.42	70.83	67.87	25.00	1.13	1.09	0.40	0.05	0.118
5.251	89.2	62.5	2.8	86.4	59.7	1.45	71.41	68.56	26.72	1.14	1.10	0.43	0.05	0.106
6.245	89.0	62.5	2.8	86.2	59.7	1.44	71.33	68.53	26.49	1.14	1.10	0.42	0.04	0.106
7.732	90.4	62.5	2.9	87.5	59.6	1.47	71.80	68.88	27.90	1.15	1.10	0.45	0.05	0.105
8.922	90.5	62.5	3.2	87.3	59.3	1.47	71.84	68.62	28.03	1.15	1.10	0.45	0.05	0.115
10.906	88.4	62.5	3.8	84.6	58.7	1.44	71.13	67.31	25.89	1.14	1.08	0.41	0.06	0.148
12.891	90.1	62.5	4.5	85.6	58.0	1.48	71.70	67.23	27.60	1.15	1.08	0.44	0.07	0.162
14.874	88.7	62.5	5.1	83.6	57.4	1.46	71.24	66.15	26.23	1.14	1.06	0.42	0.08	0.194
16.859	88.5	62.5	5.8	82.7	56.7	1.46	71.17	65.36	26.02	1.14	1.05	0.42	0.09	0.223
18.842	88.5	62.5	6.4	82.1	56.1	1.46	71.16	64.74	25.99	1.14	1.04	0.42	0.10	0.247



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R1.0-T45-OCR4		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 21		$\Delta v_c = 47.9 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 22.86 \%$						
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 63 kN/m^2		Lc = 99.22 mm		$(1/3)\epsilon_v = 7.62 \%$						
Rate of	1.0 % per min		Operation A.F.W.	Cell Pressure 262.5 kN/m^2		Ac = 1738.81 mm^2		$(2/3)\epsilon_v = 15.24 \%$						
Strain	60.0 % per hour		Consolidated Length 99.22 mm	Back Pressure 200 kN/m^2		Vc = 161.76 mm^3		shear temp. 45 $^\circ\text{C}$						
Membranes	1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1738.81 mm^2	Consolidated Volume 161.762 cm^3		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 10.64 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	62.5	62.5	0.0	62.5	62.5	1.00	62.50	62.50	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.201	73.4	62.5	0.0	73.3	62.5	1.17	66.13	66.08	10.90	1.06	1.06	0.17	0.00	0.005
0.401	88.0	62.5	0.8	87.2	61.7	1.41	71.00	70.16	25.51	1.14	1.12	0.41	0.01	0.033
0.592	94.5	62.5	1.8	92.7	60.7	1.53	73.18	71.38	32.04	1.17	1.14	0.51	0.03	0.056
0.703	94.7	62.5	1.9	92.8	60.6	1.53	73.23	71.31	32.20	1.17	1.14	0.52	0.03	0.060
1.006	98.7	62.5	3.2	95.5	59.3	1.61	74.56	71.39	36.18	1.19	1.14	0.58	0.05	0.088
2.013	107.9	62.5	5.7	102.2	56.8	1.80	77.64	71.93	45.42	1.24	1.15	0.73	0.09	0.126
3.023	112.7	62.5	7.4	105.3	55.1	1.91	79.24	71.81	50.21	1.27	1.15	0.80	0.12	0.148
4.028	117.4	62.5	8.5	108.9	54.0	2.02	80.80	72.31	54.90	1.29	1.16	0.88	0.14	0.155
5.034	120.1	62.5	9.2	110.8	53.3	2.08	81.69	72.47	57.56	1.31	1.16	0.92	0.15	0.160
6.044	121.7	62.5	9.6	112.1	52.9	2.12	82.24	72.63	59.21	1.32	1.16	0.95	0.15	0.162
8.060	122.0	62.5	10.2	111.8	52.3	2.14	82.35	72.12	59.55	1.32	1.15	0.95	0.16	0.172
9.058	124.9	62.5	10.2	114.7	52.3	2.19	83.31	73.08	62.43	1.33	1.17	1.00	0.16	0.164
10.074	125.4	62.5	10.5	115.0	52.0	2.21	83.48	73.00	62.94	1.34	1.17	1.01	0.17	0.166
12.087	125.5	62.5	10.4	115.1	52.1	2.21	83.50	73.11	63.00	1.34	1.17	1.01	0.17	0.165
14.104	127.1	62.5	10.6	116.5	51.9	2.24	84.02	73.41	64.56	1.34	1.17	1.03	0.17	0.164
16.121	124.3	62.5	10.4	113.9	52.1	2.19	83.11	72.70	61.83	1.33	1.16	0.99	0.17	0.168
18.139	123.3	62.5	10.2	113.0	52.3	2.16	82.75	72.53	60.76	1.32	1.16	0.97	0.16	0.168



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R1.0-T60-OCR4		Location ต.บางจาก อ.ป่าพะยอม จ.นครศรีธรรมราช		Sample No. 22		$\Delta v_c =$ 47.7 mm ³	$\epsilon_v =$ 22.93 %							
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure	initially 63 kN/m ²	Lc = 98.03 mm	(1/3) $\epsilon_v =$ 7.64 %							
Rate of	1.0 % per min		Operation A.F.W.	Cell Pressure	262.5 kN/m ²	Ac = 1735.66 mm ²	(2/3) $\epsilon_v =$ 15.29 %							
Strain	60.0 % per hour		Consolidated Length 98.03 mm	Back Pressure	200 kN/m ²	Vc = 160.19 mm ³	shear temp. 60 C°							
Membranes	1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1735.66 mm ²	Consolidated Volume	160.190 cm ³	Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 20.06 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/ σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/ σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/ σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	62.5	62.5	0.0	62.5	62.5	1.00	62.50	62.50	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.197	81.3	62.5	0.7	80.7	61.8	1.30	68.78	68.12	18.83	1.10	1.09	0.30	0.01	0.035
0.306	80.0	62.5	0.9	79.1	61.6	1.28	68.34	67.41	17.51	1.09	1.08	0.28	0.01	0.053
0.505	84.7	62.5	1.4	83.4	61.1	1.36	69.91	68.53	22.23	1.12	1.10	0.36	0.02	0.062
0.813	84.8	62.5	2.3	82.5	60.2	1.37	69.94	67.64	22.31	1.12	1.08	0.36	0.04	0.103
1.020	86.2	62.5	2.5	83.7	60.0	1.39	70.39	67.87	23.68	1.13	1.09	0.38	0.04	0.106
2.037	89.9	62.5	4.6	85.3	57.9	1.47	71.64	67.04	27.43	1.15	1.07	0.44	0.07	0.168
4.080	100.0	62.5	7.2	92.8	55.3	1.68	75.01	67.82	37.52	1.20	1.09	0.60	0.11	0.192
6.117	101.3	62.5	8.4	92.9	54.1	1.72	75.43	67.00	38.79	1.21	1.07	0.62	0.13	0.217
7.134	101.7	62.5	8.8	92.8	53.7	1.73	75.56	66.73	39.18	1.21	1.07	0.63	0.14	0.225
8.157	101.3	62.5	8.9	92.5	53.6	1.72	75.44	66.59	38.83	1.21	1.07	0.62	0.14	0.228
10.201	99.6	62.5	8.9	90.8	53.6	1.69	74.88	66.01	37.13	1.20	1.06	0.59	0.14	0.239
12.239	98.4	62.5	8.8	89.6	53.7	1.67	74.46	65.65	35.89	1.19	1.05	0.57	0.14	0.246
14.277	96.1	62.5	8.3	87.7	54.2	1.62	73.69	65.36	33.58	1.18	1.05	0.54	0.13	0.248
16.317	93.8	62.5	7.8	86.0	54.7	1.57	72.94	65.14	31.32	1.17	1.04	0.50	0.12	0.249
18.359	93.9	62.5	7.3	86.6	55.2	1.57	72.98	65.69	31.44	1.17	1.05	0.50	0.12	0.232



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R6.0-T45-OCR4		Location ต.บางจาก อ.ป่าพะยอม จ. นครศรีธรรมราช				Sample No. 23				$\Delta v_c =$ 49.2 mm ³	$\epsilon_v =$ 23.33 %				
Test type	CU	without side drains		Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 63 kN/m ²				Lc = 99.82 mm	$(1/3)\epsilon_v =$ 7.78 %				
Rate of Strain	6.0 % per min	Operation A.F.W.				Cell Pressure 262.5 kN/m ²				Ac = 1717.85 mm ²	$(2/3)\epsilon_v =$ 15.56 %				
	360.0 % per hour	Consolidated Length 99.82 mm				Back Pressure 200 kN/m ²				Vc = 161.79 mm ³	shear temp. 45 C°				
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1717.85 mm ²				Consolidated Volume 161.787 cm ³				Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 10.25 kPa					
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A	
0	62.5	62.5	0.0	62.5	62.5	1.00	62.50	62.50	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-	
0.199	78.5	62.5	0.1	78.5	62.4	1.26	67.84	67.79	16.03	1.09	1.08	0.26	0.00	0.003	
0.291	80.6	62.5	0.0	80.6	62.5	1.29	68.54	68.55	18.13	1.10	1.10	0.29	0.00	0.000	
0.399	81.5	62.5	0.5	81.0	62.0	1.31	68.84	68.32	19.02	1.10	1.09	0.30	0.01	0.027	
0.499	85.0	62.5	0.7	84.3	61.8	1.36	70.00	69.29	22.49	1.12	1.11	0.36	0.01	0.032	
0.597	97.8	62.5	1.0	96.8	61.5	1.57	74.27	73.25	35.31	1.19	1.17	0.56	0.02	0.029	
0.991	112.2	62.5	2.8	109.4	59.7	1.83	79.08	76.29	49.73	1.27	1.22	0.80	0.04	0.056	
1.999	122.7	62.5	6.3	116.4	56.2	2.07	82.56	76.29	60.17	1.32	1.22	0.96	0.10	0.104	
3.000	133.0	62.5	8.6	124.5	53.9	2.31	86.01	77.43	70.54	1.38	1.24	1.13	0.14	0.122	
4.003	136.9	62.5	10.6	126.3	51.9	2.43	87.30	76.74	74.40	1.40	1.23	1.19	0.17	0.142	
5.001	139.3	62.5	12.1	127.2	50.4	2.52	88.09	76.03	76.77	1.41	1.22	1.23	0.19	0.157	
7.007	144.3	62.5	13.9	130.4	48.6	2.68	89.77	75.86	81.81	1.44	1.21	1.31	0.22	0.170	
9.012	143.6	62.5	15.2	128.4	47.3	2.72	89.54	74.30	81.11	1.43	1.19	1.30	0.24	0.188	
11.016	142.4	62.5	16.2	126.2	46.3	2.73	89.13	72.91	79.89	1.43	1.17	1.28	0.26	0.203	
13.008	141.1	62.5	16.7	124.4	45.8	2.72	88.70	71.96	78.59	1.42	1.15	1.26	0.27	0.213	
15.024	142.5	62.5	17.0	125.5	45.5	2.76	89.16	72.18	79.98	1.43	1.15	1.28	0.27	0.212	
17.023	138.8	62.5	17.6	121.2	44.9	2.70	87.94	70.33	76.32	1.41	1.13	1.22	0.28	0.231	
19.033	136.5	62.5	17.4	119.1	45.1	2.64	87.15	69.76	73.95	1.39	1.12	1.18	0.28	0.235	



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R6.0-T60-OCR4		Location ต.บางจอก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 24			$\Delta v_c = 38.5 \text{ mm}^3$	$\epsilon_v = 22.79 \%$						
Test type CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 63 kN/m ²			Lc = 100.28 mm	(1/3) $\epsilon_v = 7.60 \%$						
Rate of 6.0 % per min		Operation A.F.W.		Cell Pressure 262.5 kN/m ²			Ac = 1749.28 mm ²	(2/3) $\epsilon_v = 15.19 \%$						
Strain 360.0 % per hour		Consolidated Length 100.28 mm		Back Pressure 200 kN/m ²			Vc = 163.97 mm ³	shear temp. 60 C°						
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1749.28 mm ²		Consolidated Volume 163.973 cm ³			Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 19.9 kPa							
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	62.5	62.5	0.0	62.5	62.5	1.00	62.50	62.50	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.098	88.1	62.5	0.0	88.1	62.5	1.41	71.02	71.05	25.57	1.14	1.14	0.41	0.00	-0.001
0.182	95.9	62.5	0.3	95.6	62.2	1.54	73.64	73.33	33.42	1.18	1.17	0.53	0.00	0.009
0.390	102.4	62.5	0.3	102.1	62.2	1.64	75.81	75.47	39.92	1.21	1.21	0.64	0.01	0.008
0.595	102.0	62.5	0.6	101.4	61.9	1.64	75.66	75.06	39.48	1.21	1.20	0.63	0.01	0.015
1.194	105.5	62.5	0.7	104.8	61.8	1.70	76.83	76.12	42.99	1.23	1.22	0.69	0.01	0.017
2.192	107.8	62.5	1.1	106.7	61.4	1.74	77.59	76.51	45.28	1.24	1.22	0.72	0.02	0.024
3.190	110.3	62.5	1.8	108.5	60.7	1.79	78.45	76.60	47.85	1.26	1.23	0.77	0.03	0.039
4.980	117.3	62.5	2.1	115.2	60.4	1.91	80.76	78.69	54.78	1.29	1.26	0.88	0.03	0.038
5.483	117.4	62.5	2.3	115.1	60.2	1.91	80.81	78.53	54.92	1.29	1.26	0.88	0.04	0.041
6.477	118.9	62.5	2.4	116.4	60.1	1.94	81.29	78.86	56.36	1.30	1.26	0.90	0.04	0.043
7.974	119.9	62.5	2.6	117.4	59.9	1.96	81.65	79.07	57.44	1.31	1.27	0.92	0.04	0.045
9.473	118.7	62.5	2.7	116.0	59.8	1.94	81.23	78.52	56.20	1.30	1.26	0.90	0.04	0.048
11.462	117.4	62.5	2.6	114.8	59.9	1.92	80.79	78.20	54.87	1.29	1.25	0.88	0.04	0.047
13.452	113.6	62.5	2.4	111.2	60.1	1.85	79.53	77.13	51.09	1.27	1.23	0.82	0.04	0.047
15.451	107.4	62.5	2.2	105.1	60.3	1.74	77.46	75.22	44.89	1.24	1.20	0.72	0.04	0.050
17.449	100.8	62.5	1.8	99.0	60.7	1.63	75.27	73.51	38.30	1.20	1.18	0.61	0.03	0.046
19.941	100.0	62.5	0.9	99.0	61.6	1.61	74.99	74.07	37.47	1.20	1.19	0.60	0.01	0.025



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.02-T45-OCR8		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 25 0		$\Delta v_c = 47.3 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 22.31 \%$						
Test type CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21		Effective Cell Pressure initially 31 kN/m^2		Lc = 102.10 mm		$(1/3)\epsilon_v = 7.44 \%$						
Rate of 0.02 % per min		Operation A.F.W.		Cell Pressure 231.25 kN/m^2		Ac = 1756.40 mm^2		$(2/3)\epsilon_v = 14.87 \%$						
Strain 1.2 % per hour		Consolidated Length 102.10 mm		Back Pressure 200 kN/m^2		Vc = 164.74 mm^3		shear temp. 45 $^\circ\text{C}$						
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1756.40 mm^2		Consolidated Volume 164.744 cm^3		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 7.27 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	31.3	31.3	0.0	31.3	31.3	1.00	31.25	31.25	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.195	44.7	31.3	1.6	43.0	29.6	1.45	35.72	34.08	13.41	1.14	1.09	0.43	0.05	0.122
0.293	44.8	31.3	2.2	42.6	29.1	1.46	35.75	33.55	13.50	1.14	1.07	0.43	0.07	0.163
0.391	44.9	31.3	2.3	42.5	28.9	1.47	35.78	33.47	13.60	1.15	1.07	0.44	0.07	0.170
0.489	45.0	31.3	2.5	42.6	28.8	1.48	35.83	33.38	13.75	1.15	1.07	0.44	0.08	0.178
0.587	46.1	31.3	2.5	43.6	28.7	1.52	36.21	33.68	14.88	1.16	1.08	0.48	0.08	0.170
1.175	49.9	31.3	2.7	47.2	28.5	1.66	37.48	34.78	18.70	1.20	1.11	0.60	0.09	0.145
2.154	54.0	31.3	2.2	51.8	29.0	1.78	38.83	36.62	22.74	1.24	1.17	0.73	0.07	0.097
3.133	59.2	31.3	1.6	57.5	29.6	1.94	40.55	38.93	27.91	1.30	1.25	0.89	0.05	0.058
4.407	62.3	31.3	0.6	61.7	30.6	2.01	41.60	41.00	31.05	1.33	1.31	0.99	0.02	0.019
6.366	63.1	31.3	-0.8	63.8	32.0	1.99	41.86	42.61	31.82	1.34	1.36	1.02	-0.02	-0.024
8.323	63.9	31.3	-1.6	65.5	32.8	2.00	42.15	43.73	32.69	1.35	1.40	1.05	-0.05	-0.048
10.282	63.2	31.3	-2.6	65.8	33.8	1.95	41.91	44.47	31.97	1.34	1.42	1.02	-0.08	-0.080
12.243	62.9	31.3	-2.5	65.3	33.7	1.94	41.79	44.26	31.62	1.34	1.42	1.01	-0.08	-0.078
14.202	61.4	31.3	-2.0	63.4	33.3	1.90	41.28	43.33	30.10	1.32	1.39	0.96	-0.07	-0.068
16.161	60.7	31.3	-1.5	62.3	32.8	1.90	41.08	42.62	29.50	1.31	1.36	0.94	-0.05	-0.052
18.119	60.6	31.3	-1.3	61.9	32.6	1.90	41.02	42.32	29.31	1.31	1.35	0.94	-0.04	-0.045



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.02-T60-OCR8		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 26		$\Delta v_c =$ 35.2 mm ³	$\epsilon_v =$ 16.57 %							
Test type CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 31 kN/m ²		$L_c =$ 102.38 mm	$(1/3)\epsilon_v =$ 5.52 %								
Rate of 0.02 % per min	Operation A.F.W.	Cell Pressure 231.25 kN/m ²		$A_c =$ 1743.66 mm ²	$(2/3)\epsilon_v =$ 11.05 %									
Strain 1.2 % per hour	Consolidated Length 102.38 mm	Back Pressure 200 kN/m ²		$V_c =$ 177.22 mm ³	shear temp. 60 C°									
Membranes 1 x 0.2 mm	Consolidated Area 1743.66 mm ²	Consolidated Volume 177.220 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 8 kPa										
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, $q, \sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	31.3	31.3	0.0	31.3	31.3	1.00	31.25	31.25	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.195	47.0	31.3	1.7	45.3	29.6	1.53	36.50	34.82	15.76	1.17	1.11	0.50	0.05	0.107
0.291	46.7	31.3	1.9	44.8	29.3	1.53	36.39	34.49	15.42	1.16	1.10	0.49	0.06	0.123
0.390	46.2	31.3	2.0	44.2	29.2	1.51	36.23	34.22	14.94	1.16	1.09	0.48	0.06	0.135
0.487	46.2	31.3	2.0	44.2	29.3	1.51	36.23	34.25	14.93	1.16	1.10	0.48	0.06	0.133
0.583	46.0	31.3	2.1	43.9	29.2	1.50	36.16	34.10	14.74	1.16	1.09	0.47	0.07	0.140
1.171	46.2	31.3	1.9	44.4	29.4	1.51	36.24	34.38	14.97	1.16	1.10	0.48	0.06	0.124
2.148	46.7	31.3	1.6	45.1	29.7	1.52	36.41	34.82	15.48	1.17	1.11	0.50	0.05	0.103
3.125	49.9	31.3	1.1	48.8	30.2	1.62	37.46	36.40	18.64	1.20	1.16	0.60	0.03	0.057
4.394	52.7	31.3	0.6	52.1	30.7	1.70	38.41	37.83	21.48	1.23	1.21	0.69	0.02	0.027
6.348	52.7	31.3	0.0	52.7	31.2	1.69	38.41	38.38	21.47	1.23	1.23	0.69	0.0008	0.001
8.301	53.8	31.3	-0.2	54.0	31.4	1.72	38.77	38.95	22.57	1.24	1.25	0.72	-0.01	-0.008
10.255	53.9	31.3	-0.5	54.5	31.8	1.71	38.81	39.35	22.69	1.24	1.26	0.73	-0.02	-0.023
12.206	52.6	31.3	-1.2	53.8	32.4	1.66	38.37	39.56	21.36	1.23	1.27	0.68	-0.04	-0.056
14.163	52.0	31.3	-1.5	53.5	32.8	1.63	38.16	39.68	20.74	1.22	1.27	0.66	-0.05	-0.073
16.116	56.9	31.3	-1.8	58.7	33.0	1.78	39.80	41.57	25.64	1.27	1.33	0.82	-0.06	-0.069
18.070	60.7	31.3	-1.8	62.5	33.1	1.89	41.07	42.90	29.45	1.31	1.37	0.94	-0.06	-0.062



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.075-T45-OCR8	Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช	Sample No. 27	$\Delta v_c = 65.0 \text{ mm}^3$	$\epsilon_v = 29.75 \%$
Test type CU without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 31.25 kN/m ²	Lc = 100.04 mm	$(1/3)\epsilon_v = 9.92 \%$
Rate of 0.075 % per min	Operation A.F.W.	Cell Pressure 231.25 kN/m ²	Ac = 1576.12 mm ²	$(2/3)\epsilon_v = 19.84 \%$
Strain 4.5 % per hour	Consolidated Length 100.04 mm	Back Pressure 200 kN/m ²	Vc = 153.37 mm ³	shear temp. 45 C°
Membranes 1 x 0.2 mm	Consolidated Area 1576.12 mm ²	Consolidated Volume 153.373 cm ³	Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 10.66 kPa	

Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	31.3	31.3	0.0	31.3	31.3	1.00	31.25	31.25	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.200	39.1	31.3	1.0	38.1	30.2	1.26	33.87	32.86	7.85	1.08	1.05	0.25	0.03	0.128
0.398	40.3	31.3	1.5	38.8	29.8	1.30	34.27	32.79	9.06	1.10	1.05	0.29	0.05	0.163
0.598	41.2	31.3	1.8	39.4	29.4	1.34	34.57	32.73	9.95	1.11	1.05	0.32	0.06	0.185
1.197	43.3	31.3	2.2	41.1	29.1	1.41	35.25	33.09	12.01	1.13	1.06	0.38	0.07	0.180
2.196	46.5	31.3	2.2	44.2	29.0	1.52	36.32	34.11	15.22	1.16	1.09	0.49	0.07	0.146
3.197	51.0	31.3	2.0	49.0	29.2	1.68	37.83	35.83	19.75	1.21	1.15	0.63	0.06	0.102
4.497	54.9	31.3	1.5	53.5	29.8	1.79	39.15	37.69	23.69	1.25	1.21	0.76	0.05	0.061
6.496	59.2	31.3	0.5	58.6	30.7	1.91	40.55	40.01	27.91	1.30	1.28	0.89	0.02	0.019
7.996	60.3	31.3	0.0	60.3	31.3	1.93	40.94	40.96	29.06	1.31	1.31	0.93	-0.0007	-0.001
9.497	59.1	31.3	-0.5	59.6	31.8	1.88	40.52	41.04	27.81	1.30	1.31	0.89	-0.02	-0.019
11.493	59.8	31.3	-0.8	60.6	32.1	1.89	40.76	41.57	28.54	1.30	1.33	0.91	-0.03	-0.028
13.495	58.8	31.3	-1.0	59.7	32.2	1.85	40.42	41.38	27.51	1.29	1.32	0.88	-0.03	-0.035
15.492	58.6	31.3	-1.0	59.5	32.2	1.85	40.35	41.30	27.31	1.29	1.32	0.87	-0.03	-0.035
17.493	58.6	31.3	-0.9	59.5	32.2	1.85	40.36	41.26	27.32	1.29	1.32	0.87	-0.03	-0.033
19.491	58.2	31.3	-0.7	58.8	31.9	1.84	40.22	40.88	26.92	1.29	1.31	0.86	-0.02	-0.024



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R0.075-T60-OCR8		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 28		$\Delta v_c = 32.5 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 15.44 \%$						
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 31 kN/m^2		Lc = 101.91 mm		$(1/3)\epsilon_v = 5.15 \%$						
Rate of	0.075 % per min	Operation A.F.W.		Cell Pressure 231.25 kN/m^2		Ac = 1757.93 mm^2		$(2/3)\epsilon_v = 10.29 \%$						
Strain	4.5 % per hour	Consolidated Length 101.91 mm		Back Pressure 200 kN/m^2		Vc = 178.03 mm^3		shear temp. 60 C°						
Membranes	1 x 0.2 mm	Consolidated Area 1757.93 mm^2		Consolidated Volume 178.028 cm^3		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 7.12 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	31.3	31.3	0.0	31.3	31.3	1.00	31.25	31.25	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.196	44.8	31.3	1.5	43.3	29.7	1.46	35.77	34.26	13.56	1.14	1.10	0.43	0.05	0.111
0.292	46.0	31.3	2.1	43.9	29.2	1.50	36.15	34.06	14.71	1.16	1.09	0.47	0.07	0.142
0.392	47.1	31.3	2.5	44.5	28.7	1.55	36.52	33.98	15.82	1.17	1.09	0.51	0.08	0.161
0.489	46.2	31.3	2.9	43.3	28.4	1.53	36.23	33.35	14.93	1.16	1.07	0.48	0.09	0.193
0.588	46.9	31.3	3.1	43.8	28.1	1.56	36.47	33.36	15.65	1.17	1.07	0.50	0.10	0.199
1.175	48.5	31.3	4.5	44.0	26.7	1.65	37.01	32.46	17.27	1.18	1.04	0.55	0.15	0.263
2.155	50.4	31.3	5.3	45.1	26.0	1.74	37.62	32.36	19.11	1.20	1.04	0.61	0.17	0.275
3.140	57.6	31.3	5.2	52.4	26.1	2.01	40.04	34.86	26.37	1.28	1.12	0.84	0.17	0.196
4.415	61.6	31.3	4.4	57.2	26.8	2.13	41.36	36.93	30.34	1.32	1.18	0.97	0.14	0.146
6.375	63.6	31.3	3.1	60.5	28.1	2.15	42.04	38.90	32.37	1.35	1.24	1.04	0.10	0.097
7.357	63.5	31.3	2.4	61.1	28.9	2.12	41.99	39.60	32.23	1.34	1.27	1.03	0.08	0.074
9.322	65.8	31.3	1.4	64.4	29.9	2.16	42.76	41.36	34.53	1.37	1.32	1.10	0.04	0.040
11.284	63.4	31.3	0.6	62.8	30.7	2.05	41.96	41.40	32.12	1.34	1.32	1.03	0.02	0.017
13.247	63.2	31.3	-0.2	63.4	31.4	2.02	41.90	42.08	31.95	1.34	1.35	1.02	-0.01	-0.005
15.209	62.2	31.3	-0.5	62.7	31.8	1.97	41.57	42.10	30.95	1.33	1.35	0.99	-0.02	-0.017
17.172	62.9	31.3	-0.5	63.5	31.8	2.00	41.82	42.35	31.70	1.34	1.36	1.01	-0.02	-0.017
19.132	64.4	31.3	-0.6	65.0	31.9	2.04	42.30	42.90	33.15	1.35	1.37	1.06	-0.02	-0.018



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAXIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-RI.0-T45-OCR8		Location ต.บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 29		$\Delta v_c = 32.8 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 15.50 \%$						
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 31.25 kN/m ²		Lc = 102.06 mm		$(1/3)\epsilon_v = 5.17 \%$						
Rate of Strain	1.0 % per min		Operation A.F.W.	Cell Pressure 231.25 kN/m ²		Ac = 1764.75 mm ²		$(2/3)\epsilon_v = 10.33 \%$						
	60.0 % per hour		Consolidated Length 102.06 mm	Back Pressure 200 kN/m ²		Vc = 178.98 mm ³		shear temp. 45 C°						
Membranes 1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1764.75 mm ²		Consolidated Volume 178.976 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 1.07 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	31.3	31.3	0.0	31.3	31.3	1.00	31.25	31.25	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.195	47.3	31.3	0.6	46.8	30.7	1.52	36.61	36.04	16.09	1.17	1.15	0.51	0.02	0.036
0.288	48.3	31.3	0.8	47.5	30.5	1.56	36.93	36.16	17.03	1.18	1.16	0.54	0.02	0.045
0.389	49.0	31.3	0.9	48.1	30.3	1.58	37.16	36.26	17.74	1.19	1.16	0.57	0.03	0.051
0.490	51.2	31.3	1.3	49.9	30.0	1.67	37.90	36.61	19.94	1.21	1.17	0.64	0.04	0.065
0.585	52.3	31.3	1.4	50.8	29.8	1.71	38.26	36.81	21.03	1.22	1.18	0.67	0.05	0.069
1.172	53.0	31.3	2.8	50.2	28.5	1.76	38.48	35.72	21.70	1.23	1.14	0.69	0.09	0.128
2.152	53.9	31.3	4.0	50.0	27.3	1.83	38.81	34.86	22.69	1.24	1.12	0.73	0.13	0.174
3.134	56.8	31.3	4.7	52.1	26.6	1.96	39.78	35.08	25.58	1.27	1.12	0.82	0.15	0.184
4.408	62.0	31.3	5.4	56.5	25.8	2.19	41.49	36.06	30.72	1.33	1.15	0.98	0.17	0.177
6.366	66.1	31.3	5.7	60.4	25.6	2.36	42.86	37.20	34.83	1.37	1.19	1.11	0.18	0.163
6.855	66.4	31.3	5.5	61.0	25.8	2.36	42.98	37.52	35.18	1.38	1.20	1.13	0.17	0.155
9.301	68.7	31.3	5.1	63.6	26.2	2.43	43.73	38.64	37.44	1.40	1.24	1.20	0.16	0.136
11.268	68.5	31.3	4.6	63.9	26.7	2.40	43.67	39.10	37.26	1.40	1.25	1.19	0.15	0.123
13.227	68.9	31.3	3.7	65.1	27.5	2.37	43.78	40.06	37.60	1.40	1.28	1.20	0.12	0.099
15.186	67.8	31.3	2.9	64.9	28.3	2.29	43.44	40.51	36.58	1.39	1.30	1.17	0.09	0.080
17.145	65.4	31.3	2.3	63.1	28.9	2.18	42.64	40.33	34.18	1.36	1.29	1.09	0.07	0.068
19.106	65.9	31.3	1.8	64.1	29.4	2.18	42.81	41.00	34.67	1.37	1.31	1.11	0.06	0.052



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-RI.0-T60-OCR8		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 30		$\Delta v_c = 37.0 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 17.33 \%$						
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 31 kN/m ²		Lc = 101.56 mm		$(1/3)\epsilon_v = 5.78 \%$						
Rate of Strain	0.02 % per min		Operation A.F.W.	Cell Pressure 231.25 kN/m ²		Ac = 1753.43 mm ²		$(2/3)\epsilon_v = 11.56 \%$						
	1.2 % per hour		Consolidated Length 101.56 mm	Back Pressure 200 kN/m ²		Vc = 176.64 mm ³		shear temp. 60 C°						
Membranes	1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1753.43 mm ²	Consolidated Volume 176.645 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 11.62 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_e	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_e	Normalised Deviator Stress, q/σ'_e	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_e$	Skemton's PWP Parameter A
0	31.3	31.3	0.0	31.3	31.3	1.00	31.25	31.25	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.094	47.7	31.3	0.4	47.4	30.9	1.53	36.74	36.38	16.47	1.18	1.16	0.53	0.01	0.022
0.192	48.9	31.3	0.6	48.3	30.6	1.58	37.14	36.52	17.66	1.19	1.17	0.57	0.02	0.035
0.391	51.7	31.3	1.1	50.6	30.2	1.68	38.07	37.00	20.45	1.22	1.18	0.65	0.03	0.052
0.586	51.3	31.3	1.5	49.8	29.7	1.68	37.94	36.39	20.07	1.21	1.16	0.64	0.05	0.077
1.180	52.3	31.3	2.2	50.1	29.1	1.72	38.26	36.10	21.03	1.22	1.16	0.67	0.07	0.103
2.165	53.0	31.3	3.1	49.8	28.1	1.77	38.49	35.34	21.71	1.23	1.13	0.69	0.10	0.145
3.150	56.3	31.3	3.4	52.9	27.9	1.90	39.59	36.20	25.01	1.27	1.16	0.80	0.11	0.135
4.426	58.7	31.3	3.4	55.3	27.8	1.99	40.40	36.96	27.46	1.29	1.18	0.88	0.11	0.125
6.399	59.1	31.3	3.4	55.7	27.9	2.00	40.54	37.14	27.86	1.30	1.19	0.89	0.11	0.122
7.384	61.9	31.3	3.4	58.5	27.8	2.10	41.48	38.06	30.68	1.33	1.22	0.98	0.11	0.111
9.351	62.8	31.3	3.2	59.6	28.0	2.13	41.78	38.56	31.58	1.34	1.23	1.01	0.10	0.102
11.322	63.5	31.3	2.7	60.8	28.6	2.13	41.98	39.33	32.20	1.34	1.26	1.03	0.08	0.082
13.292	61.9	31.3	2.3	59.5	28.9	2.06	41.45	39.11	30.61	1.33	1.25	0.98	0.07	0.077
15.259	59.2	31.3	1.7	57.5	29.6	1.94	40.57	38.91	27.96	1.30	1.24	0.89	0.05	0.060
17.229	60.3	31.3	1.1	59.2	30.1	1.96	40.93	39.83	29.04	1.31	1.27	0.93	0.04	0.038
19.693	60.1	31.3	0.9	59.2	30.4	1.95	40.86	39.99	28.84	1.31	1.28	0.92	0.03	0.030



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R6.0-T45-OCR8		Location ต. บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 31		$\Delta v_c = 38.6 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 18.37 \%$						
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 31 kN/m ²		Lc = 100.89 mm		$(1/3)\epsilon_v = 6.12 \%$						
Rate of Strain	6.0 % per min		Operation A.F.W.	Cell Pressure 231.25 kN/m ²		Ac = 1718.50 mm ²		$(2/3)\epsilon_v = 12.24 \%$						
	360.0 % per hour		Consolidated Length 100.89 mm	Back Pressure 200 kN/m ²		Vc = 171.80 mm ³		shear temp. 45 C°						
Membranes	1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1718.50 mm ²	Consolidated Volume 171.799 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 3.56 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	31.3	31.3	0.0	31.3	31.3	1.00	31.25	31.25	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.096	50.8	31.3	0.4	50.4	30.8	1.64	37.78	37.34	19.58	1.21	1.19	0.63	0.01	0.023
0.288	52.9	31.3	0.5	52.4	30.7	1.70	38.46	37.94	21.63	1.23	1.21	0.69	0.02	0.024
0.489	56.1	31.3	0.7	55.5	30.6	1.81	39.55	38.90	24.90	1.27	1.24	0.80	0.02	0.026
0.594	57.3	31.3	0.7	56.5	30.5	1.85	39.92	39.18	26.01	1.28	1.25	0.83	0.02	0.029
1.085	56.4	31.3	1.3	55.2	30.0	1.84	39.65	38.36	25.20	1.27	1.23	0.81	0.04	0.051
2.076	60.7	31.3	1.9	58.9	29.4	2.00	41.08	39.22	29.48	1.31	1.26	0.94	0.06	0.063
3.164	65.5	31.3	2.8	62.6	28.4	2.20	42.65	39.82	34.21	1.36	1.27	1.09	0.09	0.083
4.458	72.0	31.3	3.5	68.5	27.7	2.47	44.84	41.32	40.77	1.43	1.32	1.30	0.11	0.086
5.447	73.6	31.3	3.8	69.8	27.4	2.54	45.37	41.53	42.35	1.45	1.33	1.36	0.12	0.091
6.431	74.8	31.3	4.6	70.3	26.7	2.63	45.77	41.21	43.57	1.46	1.32	1.39	0.15	0.105
7.925	79.9	31.3	4.9	75.0	26.4	2.85	47.47	42.57	48.65	1.52	1.36	1.56	0.1567	0.101
9.415	79.1	31.3	5.3	73.8	26.0	2.84	47.20	41.92	47.86	1.51	1.34	1.53	0.17	0.110
11.397	77.4	31.3	5.6	71.7	25.6	2.80	46.62	40.98	46.12	1.49	1.31	1.48	0.18	0.122
13.381	77.0	31.3	5.4	71.6	25.8	2.77	46.51	41.08	45.78	1.49	1.31	1.46	0.17	0.119
15.356	75.4	31.3	5.4	70.0	25.9	2.71	45.97	40.59	44.17	1.47	1.30	1.41	0.17	0.122
17.342	69.0	31.3	4.8	64.2	26.5	2.43	43.83	39.05	37.75	1.40	1.25	1.21	0.15	0.127
19.816	66.0	31.3	4.3	61.6	26.9	2.29	42.82	38.47	34.71	1.37	1.23	1.11	0.14	0.125



GEOTECHNICAL LABORATORY
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT, FACULTY OF ENGINEERING, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
TRIAxIAL TEST (UU/CU/CD) (ASTM D2850-15/D4767-11/D7181-11)

Loc. No. IC-UH-R6.0-T60-OCR8		Location ต.บางจาก อ. ปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช		Sample No. 32		$\Delta v_c = 32.9 \text{ mm}^3$		$\epsilon_v = 15.57 \%$						
Test type	CU	without side drains	Proving Ring No. 1153-21	Effective Cell Pressure initially 31.25 kN/m ²		Lc = 102.28 mm		$(1/3)\epsilon_v = 5.19 \%$						
Rate of Strain	6.0 % per min		Operation A.F.W.	Cell Pressure 231.25 kN/m ²		Ac = 1754.38 mm ²		$(2/3)\epsilon_v = 10.38 \%$						
	360.0 % per hour		Consolidated Length 102.28 mm	Back Pressure 200 kN/m ²		Vc = 178.31 mm ³		shear temp. 60 C°						
Membranes	1 x 0.2 mm		Consolidated Area 1754.38 mm ²	Consolidated Volume 178.305 cm ³		Undrained excess pwp due to change temp. (Δu) = 4.22 kPa								
Axial Strain ϵ_a (%)	Major Principle Stress, σ_1 (kPa.)	Minor Principle Stress, σ_3 (kPa.)	Excess PWP, Δu (kPa.)	Eff. Major Principle Stress, σ'_1 (kPa.)	Eff. Minor Principle Stress, σ'_3 (kPa.)	σ'_1/σ'_3	Mean Stress, p (kPa.)	Mean Eff. Stress, p' (kPa.)	Deviator Stress, q, $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa.)	Normalised Mean Stress, p/σ'_c	Normalised Mean Eff. Stress, p'/σ'_c	Normalised Deviator Stress, q/σ'_c	Normalised Access PWP, $\Delta u/\sigma'_c$	Skemton's PWP Parameter A
0	31.3	31.3	0.0	31.3	31.3	1.00	31.25	31.25	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-
0.098	45.1	31.3	0.3	44.7	30.9	1.45	35.86	35.51	13.82	1.15	1.14	0.44	0.01	0.025
0.288	53.4	31.3	0.5	52.9	30.7	1.72	38.64	38.14	22.17	1.24	1.22	0.71	0.02	0.023
0.487	52.9	31.3	0.9	52.0	30.3	1.71	38.46	37.54	21.62	1.23	1.20	0.69	0.03	0.042
0.583	55.8	31.3	0.9	54.9	30.3	1.81	39.44	38.53	24.57	1.26	1.23	0.79	0.03	0.037
1.172	56.6	31.3	1.2	55.4	30.0	1.84	39.70	38.50	25.36	1.27	1.23	0.81	0.04	0.048
2.136	61.8	31.3	2.0	59.8	29.2	2.05	41.43	39.40	30.55	1.33	1.26	0.98	0.07	0.067
3.118	63.2	31.3	2.5	60.6	28.7	2.11	41.89	39.35	31.92	1.34	1.26	1.02	0.08	0.079
4.390	64.8	31.3	3.2	61.6	28.1	2.20	42.44	39.24	33.56	1.36	1.26	1.07	0.10	0.095
4.879	68.6	31.3	3.4	65.1	27.8	2.34	43.69	40.27	37.31	1.40	1.29	1.19	0.11	0.092
6.346	64.4	31.3	3.9	60.5	27.4	2.21	42.29	38.40	33.12	1.35	1.23	1.06	0.12	0.117
8.304	65.6	31.3	4.3	61.4	27.0	2.27	42.71	38.43	34.38	1.37	1.23	1.10	0.14	0.124
10.264	66.5	31.3	4.5	62.1	26.8	2.32	43.02	38.54	35.30	1.38	1.23	1.13	0.14	0.127
12.211	67.2	31.3	4.6	62.6	26.6	2.35	43.23	38.62	35.95	1.38	1.24	1.15	0.15	0.128
14.175	66.5	31.3	4.8	61.8	26.5	2.33	43.01	38.24	35.29	1.38	1.22	1.13	0.15	0.135
16.123	63.7	31.3	4.7	59.0	26.5	2.22	42.06	37.34	32.42	1.35	1.19	1.04	0.15	0.146
18.082	67.1	31.3	4.8	62.3	26.5	2.35	43.19	38.43	35.81	1.38	1.23	1.15	0.15	0.133

ภาคผนวก ค
รูปตัวอย่างดินหลังการทดสอบแรงอัดสามแกน

OCR	อุณหภูมิ	อัตราความเครียด			
		0.02%ต่อนาที	0.075%ต่อนาที	1.0%ต่อนาที	6.0%ต่อนาที
1	45				
	60				
2	45				
	60				

OCR	อุณหภูมิ	อัตราความเครียด			
		0.02%ต่อนาที	0.075%ต่อนาที	1.0%ต่อนาที	6.0%ต่อนาที
4	45				
	60				
8	45				
	60				

ภาคผนวก ง
การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

STRAIN RATE AND THERMAL EFFECT ON STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF ORGANIC CLAY

Pimparch Phanvisavakarn¹ and * Tanan Chub-uppakarn²

^{1,2} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Thailand.

*Corresponding Author, Received: 20 July 2017, Revised: 10 Feb. 2018, Accepted: 10 March 2018

ABSTRACT: Organic deposits are commonly encountered in estuaries regions. Organic matter directly affects the engineering properties of soil. However, all most economic cities in the world are located in this areas consisting of organic soil. Therefore, a technique to improve the properties of organic soil is important. This work is focused on improving engineering properties of organic soil by heating. In order to investigate the behavior, Pakpanang marine deposit clay is selected for this work. The scope of this research is to study the behavior of soil by using temperature control consolidated undrained triaxial compression test. The strain-rate dependency of undrained shear strength, pore water pressure, and stress path are investigated. The influence of normally consolidated (NC) on stress-strain behaviors of soil is examined. The results of tests indicated that the temperature relatively inverse to organic matter of soil and weaken the strength of soil.

Keywords: Compression triaxial test, Temperature, Organic clay, Strain rate, Undrained shear strength.

1. INTRODUCTION

Organic clays are defined as clay with sufficient organic content to affect the soil properties [1]. Organic clays exhibit mechanical properties somewhat different than the customary behavior of inorganic clays. Organic structure is contained within the porous cellular structure of the fibers, a sponge-like structure. The structure can absorb huge amounts of water but it is uncemented water and soil mineral [2]-[6]. Common characteristics of organic clays are high water content, high plasticity, high compressibility, low permeability and low shear strength [7]. The characteristic of soil directly affects the geotechnical engineering work. However, because of rapid economic growth, numerous constructions in present are usually found in estuaries regions, which are lowlands, where sedimentation of organic clay can be found.

In order to solve the critical problem due to engineering properties of organic soil, ground improvement techniques are applied. Because organic matter generally decays when the temperature is increased, the heating process is one of the ground improvement techniques that can be applied during construction.

Behaviors of fine grain soil are very interesting because viscosity behavior directly relates to plasticity and grain size of soil, resulting in time, strain rate and temperature effects. The effects of strain rate and Thermal are very significant to the stress-strain behavior of clay. Several researchers [8]-[15] have investigated the result of the strain rate effect on stress and pore pressure behavior of

clay. They found that a higher strain rate results in a higher undrained shear strength: the undrained shear strength increased by 5-10% per log cycle of strain rate of testing for Saint-Jean-Vianney clay [11]. “[12] demonstrated that the undrained shear strength increases by 9-20% for a 10-fold change in strain rate for high plastic natural clays.” The studies of the strain-rate effect on pore-water pressure indicate that the strain rate effects to the strength that related to change of excess pore water pressure. Pore-water pressure rises up during shearing at a lower strain rate than a higher strain rate [16]-[18]. Moreover, the higher strain rate affects a higher normalize stiffness, E/σ_c' [10], [11], [18].

There has been a lot of research on the temperature effects on strength and stress-strain behavior of clay. We have found that the results are conflicting. Several investigators have found that increase in temperature decreases shear strength [19]-[23]. On the other hand, increasing temperature increases in shear strength [24]-[27]. Investigation of Bangkok clay in drained heating conditions found that increased temperature also increases shear strength and stiffness of the clay. Temperature has no effect on the slope of the critical state and the stress paths tend to move to the right indicating that temperature caused strengthened clay [28]. Temperature affects to stress in clay that related to volume change and pore pressure such as “Campanella and Mitchell [29] shows that higher temperature affects volume change and pore pressure of clay depending on the drainage conditions of the clay’s mass. Drained

heating, is when the expansion of water leaves the clay mass, increasing the volume thus rearranging the soil's particles. On the other hand, undrained heating causes expansion of water in clay mass inducing development of pore pressure effects on volume expansion." However, there are no clear studies of the strain rate and thermal effect on the stress-strain behavior of organic clay.

By improving engineered properties of organic soil by heating affects relates to viscous behavior of clayey soil in order to predict the soil strength and ground settlement during and after dissipation of the excess pore water pressure, may also change temperature with more accuracy. The thermal conductivity of clay is faster than drainage causes to study in undrained heated conditions. The aim of this work is to understand the mechanical response of organic clay in relation to temperature and strain rate. It should be possible to use these relationships when making rudimentary interpretations of the natural process.

2. MATERIALS AND TEST PROGRAM

In this study, the original clay was recovered from a depth of 4.50 meters to 12.00 meters. The site was within Ban Pakkhaug, Pakpanang, NakhonSiThamarat province, which is on the southern coastline of Thailand. The measured physical properties of the clay samples are summarized in Table1. According to the Unified Soil Classification System (USCS), the clay is classified as organic clay (OH).

Tests were carried out using a temperature controlled triaxial apparatus as shown in Fig. 1. To apply a thermal load to the specimen, heaters were applied in chambers of triaxial cells that filled with water surrounding the sample. During a test, a thermostat was used to control temperature, automatically adjusting the amount of power supplied to the heater based on the feedback from the thermocouple. The soil and water temperature of the triaxial cells were set to equal, at least 1hours was required to achieve thermal equilibrium.

The undisturbed samples were trimmed into a triaxial specimen 50 mm in diameter and 100 mm in height. The specimens were wrapped with filter-paper, side-drains were to implement to accelerate drainage during consolidation and disperse excess pore pressure during shearing. All tests in this study were isotropically consolidated undrained triaxial compression tests in which the cell pressure and shearing rate were kept constant. To investigate the strain rate and thermal effect, the axial strain rates used were 0.02, 0.075, 1, and 6%/min and thermal load were 30 degree Celsius, 45 °C, and 60 °C. Therefore, the number of testing in this study is 12 as tabulated in Table 2.

In a routine testing procedure, a back pressure of 200 kPa. was applied to the specimen, until B values were found greater than 0.95. Then, the specimens were subjected to isotropically consolidation pressure of 450 kPa. The deviator stress and mean stress in this condition are zero and 250 kPa respectively. After the consolidation process, the thermal load was applied to the specimen under undrained conditions. Excess pore pressure in heat process was generated based on the expansion of water. Finally, the shearing was done in a strain controlled apparatus with strain rate as shown in Table 2

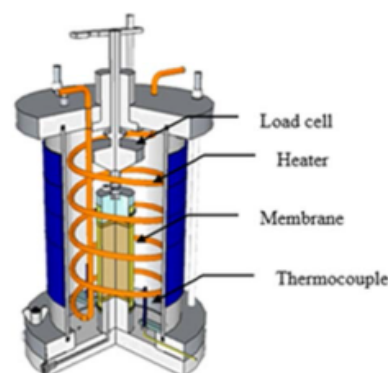


Fig.1 Schematic diagram of temperature controlled triaxial apparatus

Table 1 Physical and basic properties of the organic Pakpanang clay.

Properties	Value	Unit
Natural water content (W_d)	86.81	%
Liquid limit, LL	air dried soil	94.08
	oven dried at 110 °C	68.97
Plastic limit, PL	32.45	%
Plasticity index, PI	61.62	%
Total unit weight	1.5	t/m ³
Specific gravity, G_s ¹	2.67	-
Sand (0.06-2 mm) ¹	0.75	%
Silt (0.002-0.06 mm) ¹	52.67	%
Clay (<0.002 mm) ¹	43.69	%
Compression Index, C_c ¹	0.668	-
Recompression Index, C_r ¹	0.14	-
Coefficient of Consolidation, C_v ¹	1.034	m ² /year
Void ratio ¹	2.253	-

¹(S. Chewakul, T. Chub-uppakarn and T. Chomphurat, 2013)

Table 2 Details of test condition of consolidated undrained triaxial compression test at elevated temperature units

Drainage Condition on heat process	Strain rate (%/min)	OCR = 1		
		Temperature (°C)		
Undrained	0.02	30	45	60
	0.075	30	45	60
	1.00	30	45	60
	6.00	30	45	60

3. DISCUSSIONS OF TEST RESULTS

3.1 Thermal Effect on Plasticity Properties of Organic Clays

The liquid limit (LL) is the point at which the consistency is transformed from a plastic state to a liquid state. From experiments, the liquid limit value is decreased when the temperature of the oven is increased as shown in Figure 2. The ratio of the liquid limit of air-dried soil (30 °C) to oven dried soil (110 °C) was found to be 0.73, indicating that the reduction in the liquid limit of oven dried soil was higher than 25%. Hence, Pakpanang clay is classified an organic clay following ASTM D 2487 – 06.

The plastic limit (PL) is the point in which the consistency is transformed from a semi-solid state to a plastic state. From this study, the plastic limit is a constant value along with the temperature of oven drying. As a result, the liquid limit and plastic limit is mostly dependent on soil texture, organic matter, clay mineralogy, and clay content. When the heating process decomposes organic matter, a spongy structure is destroyed, decreases the water layer surrounding soil. Therefore the liquid limit at high temperatures of oven dry is lower than the liquid limit at a low temperature of oven dry.

3.2 Thermal Effect on Undrained Shear Strength of Organic Clays

The undrained shear strength behavior of organic Pakpanang clay subjected to Isotropically Consolidated Undrained (ICU) compression triaxial test in undrained heating conditions, in various temperatures of 30°C, 45°C, 60°C and strain rates of 0.02, 0.075, 1.0 and 6.0 %/min. Fig. 3 shows pore pressure in the specimen is induced by the undrained heating process. The excess pore pressure was generated due to the increased volume of water. The shearing process began after the pore pressure was fully developed. The total

elapsed time for undrained heating was about 24 hours. The heating time was the same as the period of the oven dried sample as determined in accordance with the procedures in Test Method of Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) in ASTM D 2487-06. Heat transfers around all sample and eliminates some organic matter. The test results of normally consolidated (NC) organic clay will be illustrated using three figures as shown in Fig 4 to 6. Fig.(a) shows the relationship between normalized deviator stress and axial stress. Fig.(b) indicates the changes in normalized excess pore pressure with axial strain. In this diagram, the excess pore does not start from point (0.0, 0.0) because of excess pore pressure induced during undrained heating. Fig.(c) displays normalized stress path deviator stress and mean effective stress and the critical state line. Fig (c) shows that the pre-shear effective stress (p'_{0}) did not keep as a constant because of the uncertainty of the structure making it difficult to control its initial condition.

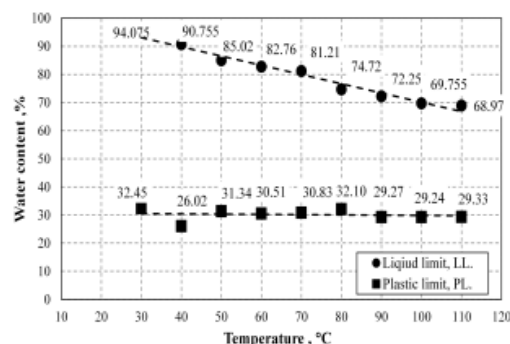


Fig. 2 Liquid limit and Plastic limit values of organic Pakpanang clay air dried and after oven dried.

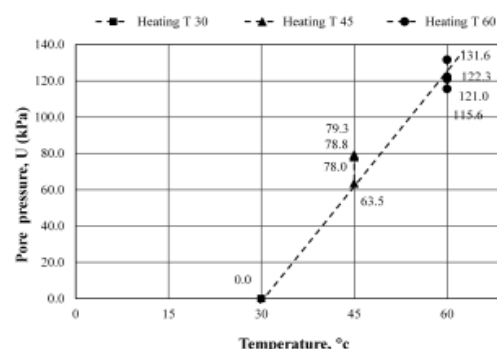


Fig. 3 Changing of excess pore pressure due to undrained heat as a function of temperature.

The exclusive results of this work show that undrained shear strength of organic clay is increased as strain rate increases. In Fig. 4(a), 5(a), and 6(a), the diagrams show the changing of normalized deviator stress, q_u/σ'_c is a direct variable to the change of temperature while the generating of excess pore pressure decreased as the temperature increased. The effect of strain rate and the temperature is shown in softening behavior of fine grain soil and directly related to strain softening. The strain softening behavior of fine grain soil is a result of decreasing of the viscosity and doubling the layer, water in soil structure easily moves out and the pore pressure can be distributed all around soil sample. As the high temperature is implemented, high strain softening as illustrated in Fig 5(a) and 6(a). In Fig. 4(b), 5(b), and 6(b), the undrained shear strength behavior was related to the excess pore water pressure, indicating that there is a tendency that there is higher excess pore pressure generated during low strain-rate because the effect of excess pore pressure that could fully generate and distribute in whole of soil mass. However, with the high strain-rate the excess pore pressure could not fully generate but only on the top and the bottom of soil mass caused low excess pore pressure affecting high shear strength. Pore pressure in the specimen based on shearing state is continuously increased, despite specimens beyond the failure state. The trend of pore pressure at room temperature is affected by organic matter in specimens its cellular structure. When temperature is high (45 °C and 60 °C), the excess pore pressure will be constant at large strains as shown in Fig. 4(b), 5(b), and 6(b). This is one reason that shear strength of organic clay is lower than inorganic clay.

Fig.7 shows that strains at the failure of normalized deviator stress in high temperatures are lower than low temperature. This result affects the decomposition of organic matter. Specimen structure is formed as a rigid material when the temperature is increased. The effect of the organic matter has on undrained shear strength behavior can be emphasized by pore pressure as shown in Fig.8. Excess pore pressure generated on the shearing process is decreased as the temperature is increased. Undrained shear strength is significantly decreased as the temperature is increased displayed in Fig 9.

Due to the fact that pore water pressure is generated by an undrained heating process and volume of specimens was not changed, (for the study of shear strength behavior), undrained shear strength should be normalized by normalization deviator stress. The relation between normalized deviator stress by effective stress before shearing state and strain rate is illustrated in Fig. 9, where

effective stress before shearing state is σ'_c . From Fig. 9, the normalized deviator stress increased as-

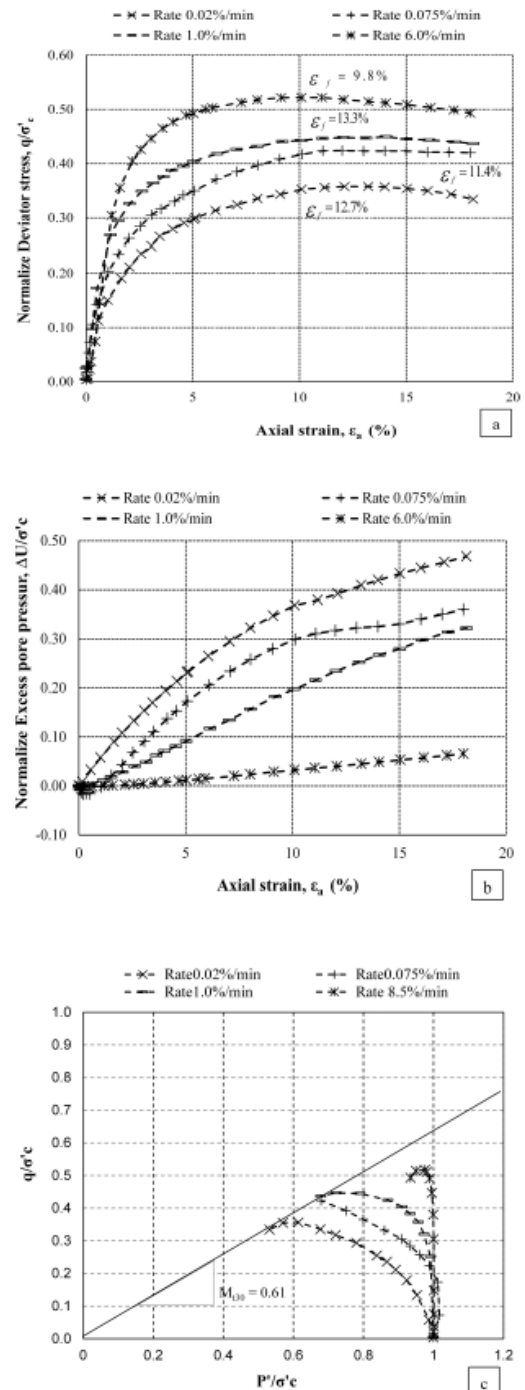


Fig. 4 Result of ICU triaxial compression test in NC organic Pakpanang clay subjected to undrained heating at 30 degree Celsius. (a) Relationship between normalized deviator stress and axial strain. (b) Relationship between normalized pore-water

pressure and axial strain (c) Normalized stress paths for the NC organic clay.

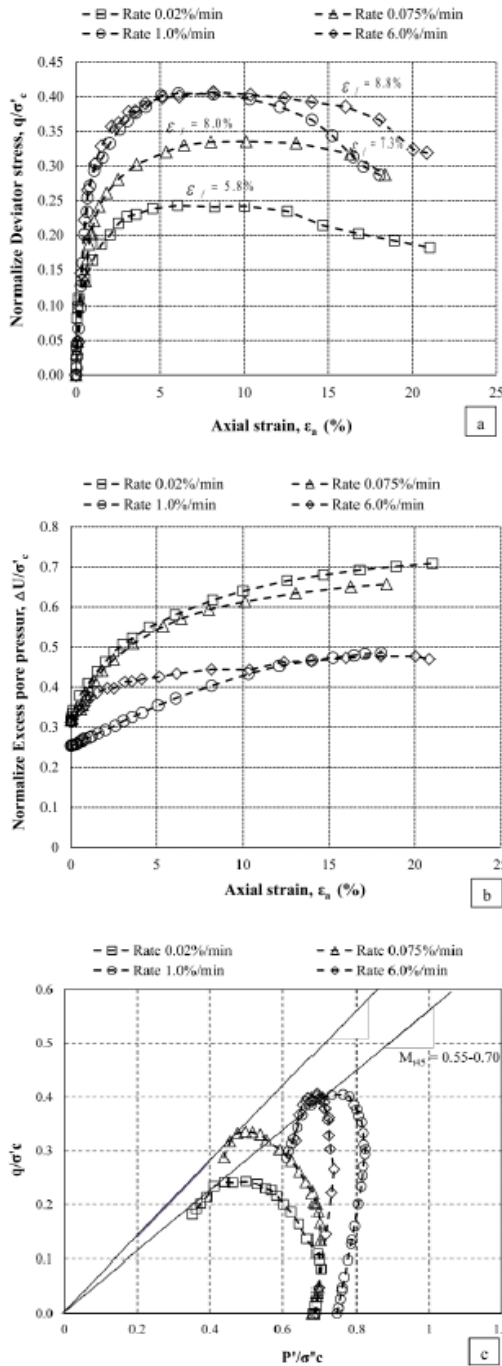


Fig. 5 Result of ICU triaxial compression test in NC organic Pakpanang clay subjected to undrained heating at 45 degree Celsius (a) Relationship between normalized deviator stress and axial strain. (b) The relationship between normalized

pore-water pressure and axial strain (c) Normalized stress paths for the NC organic clay.

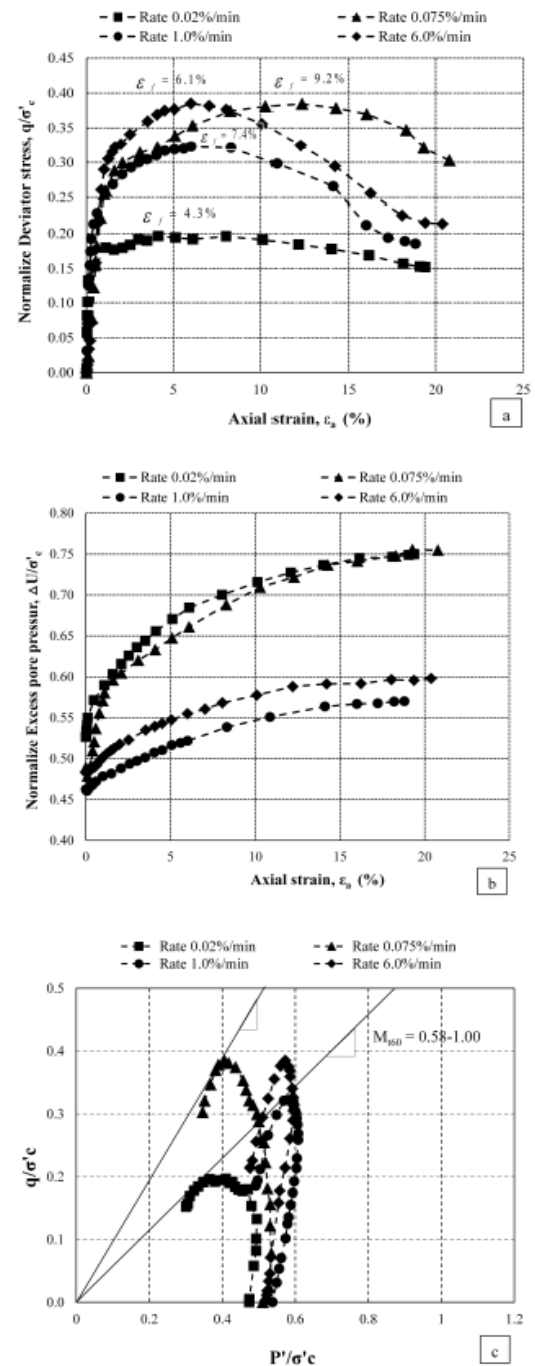


Fig. 6 Result of ICU triaxial compression test in NC organic Pakpanang clay subjected to undrained heating at 60 degree Celsius (a) Relationship between normalized deviator stress and axial strain. (b) The relationship between normalized pore-

water pressure and axial strain (c) Normalized stress paths for the NC organic clay.

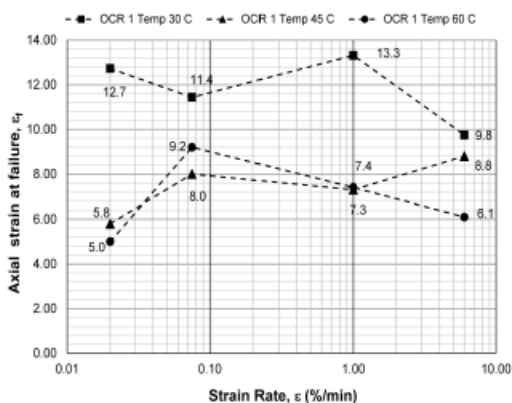


Fig. 7 Relationship between strain at failure and axial strain rate

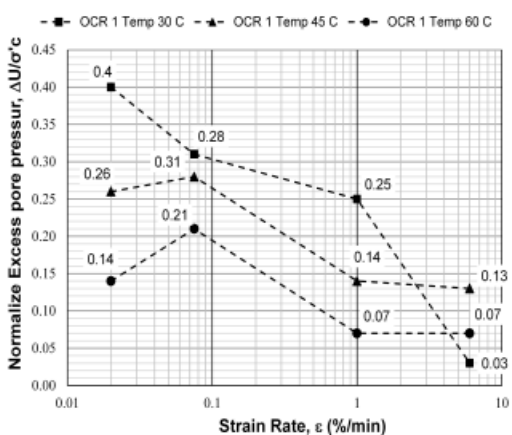


Fig. 8 Relationship between normalized pore water pressure at failure and axial strain rate.

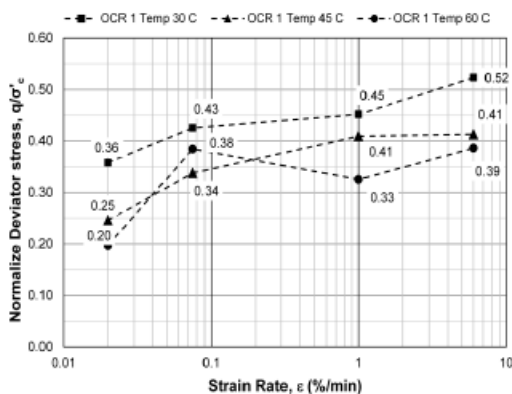


Fig. 9 Relationship between normalized deviator stress at failure and strain rate for NC organic Pakpanang clay.

the strain rate increased, contrary to the increase in temperature, as the lowest strain rate (0.02 %/min) and highest temperature (60 °C) given the lowest normalize deviator stress, as the highest strain rate (6.0 %/min) and the room temperature given the highest normalize deviator stress.

3.3 Thermal Effect on Critical State Line

The effect of temperature on the critical state behavior of organic Pakpanang clay was demonstrated at different temperature levels. Fig.

4(c), 5(c), and 6(c), Normalized stress paths for the NC organic clay shows that the heat stress paths tend to move to the left of the specimen tested at room temperature (30°C). The shifting of the stress path to the left indicates that heat strengthened specimens due to the failure of the specimen at higher normalize deviator stress result from occurring lower excess pore water pressure in the soil mass during shearing. The slope M of critical state lines indicates that NC organic Pakpanang clay, at 30, 45 and 60°C are in the range of 0.61, 0.55 to 0.69 and 0.58 to 1.00 respectively.

4. CONCLUSION

The object of this research studied the mechanical response of organic clay as a function of temperature and strain rate. As heat destroyed a spongy structure of organic matter that absorbed a water layer around fine soil is decreased. This effect directly relates to Atterberg's limit. Moreover, the decay of organic matter is effect by decreasing of excess pore pressure generated due to expanding of the shearing process. In strain rate effect, the tendency of undrained shear strength is a direct variation to strain rate. The behavior effects pore pressure generating in the shearing process. The slope M of the critical state lines indicates that the trend of slope M does not clearly change. Effect of temperature and strain rate is directly related to the path change of the stress path to shift to the left of the original critical state theory.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

“The authors are deeply grateful to Department of Civil Engineering, faculty of engineering, Prince of Songkla University for the assistance of sponsor and financial support. Authors are also grateful to Phan Engineering Consultant Group Co., Ltd. for supporting fieldwork.”

6. REFERENCES

- [1] ASTM D 2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 2006.
- [2] Hobbs N. B., Mire Morphology and The Properties and Behaviour of Some British and Foreign peats, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 19(1), 1986, pp.7-80.
- [3] Landva A. O. and Pheeney P. E., Peat Fabric and Structure, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 17(3), 1980, pp. 416-435.
- [4] O'Kelly, B. C., and P. S P, Effect of Decomposition on The Compressibility of Fibrous Peat, *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, Vol. 8(4), 2013, pp. 286-296.
- [5] Berry P. L. and Poskitt T. J., The Consolidation of Peat, *Geotechnique*, Vol. 22(1), 1972, pp. 27-52.
- [6] Dhowian A. W. and Edil T. B., Consolidation Behaviour of Peats, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 3(3), 1980, pp. 105-114.
- [7] Taiye E. A., Effect of Organic Content on Compaction and Consolidation Characteristics of Lagos Organic Clay, *EJGE*, Vol. 17, 2012, pp. 2201-2211.
- [8] Richardson A. M. and Whitman R. V., Effect of Strain-Rate upon Undrained Shear Resistance of a Saturated Remoulded Fat Clay, *Geotechnique*, 1963, pp. 310-324.
- [9] Alberro J. and Santoyo E., Long-Term Behavior of Mexico City Clay, in *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1973.
- [10] Berre T. and Bjerrum L., Shear Strength of Normally Consolidated Clays, 8th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1973.
- [11] Vaid Y. P., Robertson P. K. and Campanella R. G., Strain Rate Behavior of Saint-Jean-Vianney Clay, *Can.Geotech.J.*, vol. 16(1), 1979, pp. 34-42.
- [12] Graham J., Crooks J. H. and Bell A. L., Time Effects on The Stress-Strain Behaviour of Natural Soft Clays, *Geotechnique*. 33(3), vol. 33(3), 1987, pp. 327-340.
- [13] Lefebvre G. and Lebouf D., Rate effects and cyclic loading of sensitive clays, *Geotech. Engrg.* 113(5), 1987, pp. 476-489.
- [14] Sheahan T. C., Ladd C. C. and Germaine J. T., Rate Dependent Undrained Shear Behavior of Saturated Clay, *Geotech.Engrg.* 122(2), vol. 122(2), 1996, pp. 99-108.
- [15] Abraham D. R. J., Jose Martinez-Vasquez J. and Carlos Santamarina J., Strain-Rate Effects in Mexico City Soil, *Geotech.Engrg. ASCE*, 2009, pp. 301-3055.
- [16] Casagrande A. and Wilson S. D., Effect of Rate Loading on The Strength of Clays and Shales at Constant Water Content," *Geotechnique*. 2(3), 1951, pp. 251-263.
- [17] Crawford C. B., The Influence of Rate of Strain on Effective Stress in Sensitive Clay, in *ASTM Spec. Tech. Publ.*254, 1959, pp. 36-68.
- [18] Zhu J. and Yin J., Strain-Rate-Dependent Stress-Strain Behavior of Overconsolidated Hong Kong Marine Clay, *Can.Geotech.J.* 37(6), 2000, pp. 1272-1282.
- [19] Mitchell J. K., Shearing Resistance of Soil as a Rate Process, *Soil Mechanics, and Foundation Engrg. Div. ASCE*, Vol. 90, 1964, pp. 231-251.
- [20] Murayama S., Effect of Temperature on The Elasticity of Clays, Washington, D.C., 1969.
- [21] Sherif M. A. and Burrous C. M., Temperature Effects on Unconfined Shear Strength of Saturated Cohesive Soil, *Proceedings of International Conference, Highway Research Board*, 1969.
- [22] Hueckel T. and Baldi G., Thermoplasticity of Saturated Clays: Experimental Constitutive Study, *Geotech. Engrg. ASCE*, Vol. 116. No.12, 1990, pp. 1178-1769.
- [23] Moritz L., Geotechnical Properties of Clay at Elevated Temperatures Linkoping Sweden, Report No.47, Linkoping Sweden, 1995.
- [24] Laguros J. G., Effect of Temperature on Some Engineering Properties of Clay Soils, Washington D.C., 1969.
- [25] Houston S. L., Houston W. N. and Williams N. D., Thermo-mechanical Behavior of Seafloor Sediments, *Soil Mech. and Found Div. ASCE.*, Vol. 111. No.11, 1985, pp. 1249-1263.
- [26] Abuel-Naga H. M., Bergado D. T., and Bouazza A., Thermally Induced Volume Change and Excess Pore Water Pressure of Soft Bangkok Clay," *Engineering Geology* 89, 2006, pp. 144-154.
- [27] Kuntiwattanukul P., Towhata I., Ohishi K. and Seko I., Temperature Effects on Undrained Shear Characteristics of Clay, Soils, and foundations. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.*, vol. 35. No.1, Mar 1995, pp. 147-162.
- [28] Trani L. D., Bergado D. T. and Abuel-Naga

- H. M., Thermal Effects on Undrained Shear Strength of Normally Consolidated Soft Bangkok Clay, Geo-Congress: Characterization Monitoring, and Modeling of Geosystem, 2008, pp. 1069-1076.
- [29] Campanella R. W. and Mitchell J. K., Influence of Temperature Variations on Soil Behavior, Soil Mech.and Found. Div. ASCE., Vol. 94. No. 3, 1968, pp. 709-734.
- [30] Chewakul S., Chub-uppakarn T. and Chomphurat T., An Influence of Shear Rate Effect on Stress and Strain Behavior of Pak Panang Soft Clay," The 18 st National Convention on Civil Engineering. NCCE, 2013, pp.249-254.

Copyright © Int. J. of GEOMATE. All rights reserved, including the making of copies unless permission is obtained from the copyright proprietors.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวพิมพ์ปราชญ์ พันธุ์วิศวาญจน์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5810120038

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2551
รัฐประศาสนศาสตรมหาบัณฑิต	สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์	2556

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการการศึกษา)

ทุนบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2559

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปีการศึกษา 2560

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

วิศวกรโยธา บริษัท พันธุ์วิศวกรรม คอนซัลแตนท์ กรุ๊ป จำกัด

เบอร์โทรศัพท์ 074-429716

เบอร์โทรศัพท์มือถือ 098-1545544

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Pimparch Phanvisavakarn and Tanan Chub-uppakarn. 2018. Strain rate and thermal effect on Stress-strain behavior of organic clay. *International Journal of GEOMATE*, July, 2018 Vol.15, Issue 47: 193-200