



คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง  
**Engineering Properties of Soft Pakphanang Clay**

อัครเดช แซ่จิว

**Akradet Saejiw**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์                      คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพ่อง  
ผู้เขียน                                      นายอักรเดช แซ่จิว  
สาขาวิชา                                  วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

---

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**

**คณะกรรมการสอบ**

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เถลิงยานนท์)

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตัญญ)

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม**

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เถลิงยานนท์)

.....  
(ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม)

.....กรรมการ  
(ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม)

.....กรรมการ  
(ดร.อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค)

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง
ผู้เขียน	นายอักรเดช แซ่จิว
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)
ปีการศึกษา	2551

### บทคัดย่อ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาหาคุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนังจากพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยการเจาะสำรวจดินและการทดสอบต่างๆในห้องปฏิบัติการโดยใช้ดินจาก 9 หลุมเจาะ รวม 85 ตัวอย่าง ที่พื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช รวมถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติวิศวกรรม โดยอาศัยหลักการทางสถิติ

ผลการศึกษาพบว่าชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนัง ลึกประมาณ 15.00 – 18.00 เมตร จากผิวดิน โดยที่ดินชั้นบน (Topsoil) หนาประมาณ 1.50 เมตร จึงมีลักษณะเป็นดินแข็งปนซากพืช (Crust) ดินเหนียวอ่อนปากพนังมีค่าปริมาณความชื้นธรรมชาติ ( $w_n$ ) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 72% ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าเฉลี่ยของค่าขีดพิกัดเหลว (LL) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 65% และมีลักษณะเป็นดินที่มีความเป็นพลาสติกสูงโดยมีค่าเฉลี่ยของดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับ 35% ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบ Field vane shear test (FV-Test) และ Unconfined compression test (UCS) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.81 ตันต่อตารางเมตรและ 1.67 ตันต่อตารางเมตรตามลำดับ ค่าคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการยุบอัดตัวของดินเหนียวอ่อนปากพนัง ได้แก่ Compression index ( $C_c$ ) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.668 ค่า Recompression index ( $C_r$ ) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.140 ค่า Coefficient of consolidation,  $C_v$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.034 ตารางเมตรต่อปี ค่า Over consolidation ratio (OCR) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.932 แสดงว่าดินเหนียวอ่อนปากพนังมีลักษณะเป็น Normally consolidation clay และค่าแรงยึดเหนี่ยวของมวลดินและมุมเสียดทานภายในของดินแบบแรงดันรวมและแรงดันประสิทธิผลมีค่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.80 ตันต่อตารางเมตรกับ 4.70 ตันต่อตารางเมตร และ 17.61 องศา กับ 25.47 องศา ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรคุณสมบัติดัชนี คุณสมบัติวิศวกรรม และความลึกการทำกรวิเคราะห์ความสัมพันธ์ สามารถสรุปได้ว่าตัวแปรความลึกเป็นตัวแปรสำคัญ

มากที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) มีค่าที่สูงขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเมื่อวิเคราะห์แบบไม่นำตัวแปรความลึกมาวิเคราะห์

**คำหลัก:** ดินเหนียวอ่อนปากพนัง, คุณสมบัตัดัชนี, คุณสมบัติวิศวกรรม

<b>Thesis Title</b>	Engineering Properties of Soft Pakphanang Clay
<b>Author</b>	Mr. Akradet Saejiw
<b>Major Program</b>	Civil Engineering (Geotechnical Engineering)
<b>Academic Year</b>	2008

## **ABSTRACT**

In this study, field and laboratory tests were conducted to determine index and engineering properties of soft Pakphanang clay using 85 samples taken from nine boreholes in Pakphanang district, Nakhonsithammarat province. In addition, relationships between these index and engineering properties were also determined.

Study results showed that the soft Pakphanang clay is located about 1.5 m from ground surface to the depth of 15.00 -18.00 m. Testing results indicated that the soft Pakphanang clay has average natural water content of 72% which is higher than its liquid limit (i.e., average LL of 65%). Its average plasticity Index is 35%. The average undrained shear strength values obtained from field vane shear and unconfined compression tests (UCS) are 3.81 t/m.<sup>2</sup> and 1.67 t/m.<sup>2</sup>, respectively. The compressibility properties of the soft Pakphanang clay: namely average compression index ( $C_c$ ), average recompression Index ( $C_r$ ) and average coefficient of consolidation,  $C_v$  are 0.668, 0.140 and 1.034 m.<sup>2</sup>/yr, respectively. Its average overconsolidation ratio (OCR) is 0.932 which indicate that the clay is normally consolidated. The average cohesion and internal friction angle of the soft Pakphanang clay in total and effective stress conditions are 2.80 t/m.<sup>2</sup>, 4.70 t/m.<sup>2</sup>, 17.61 degree and 25.47 degree, respectively.

From this study, the relationships between index properties, engineering properties and depth of the soft Pakphanang clay can be evaluated. It was found that the depth is an important parameter that creates good relationships between the index properties and the engineering properties.

**Key word:** Soft Pakphanang Clay, Index Properties, Engineering Properties

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เถลิงยานนท์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา และอาจารย์ ดร.พิพัฒน์ ทองนิม กรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ ความรู้ คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางแก่ผู้วิจัย ตลอดการปฏิบัติงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ่มกตัญญู ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ให้งานวิจัยชิ้นนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณ ศิษย์พร แก้วมุนีโชติ ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลสภาพทางธรณีและลักษณะของชั้นดินในบริเวณภาคใต้ ขอขอบคุณ บริษัท พันธุ์วิศวกรรม คอนซัลแตนท์ กรุ๊ป จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์การเจาะสำรวจดินที่อำเภอปากพนัง

ขอขอบคุณ น้ำใจจากพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษาปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาทั้งหลาย คุณสมมาตร สวัสดิ์ คุณมารุต เรืองจตุโพธิ์พาน คุณชลดา กาญจนกุล คุณศุภวิศว์ จริยะเลอพงษ์ คุณอรุณ ลูกจันทร์ คุณวศิน สันติวารงกูร คุณทวิศักดิ์ ไชยภักดี คุณสรารุช ขอดมณีและอีกหลายๆท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ สิ่งสำคัญสุด ที่ทำให้มีข้าพเจ้าในวันนี้ พระคุณของบิดามารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว กำลังใจและความช่วยเหลือ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ผลักดันจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา และข้าพเจ้าจะระลึกถึงบุคคลเหล่านี้อยู่เสมอตลอดไป

อัครเดช แซ่จิว

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(7)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>2 ทบทวนเอกสาร</b>	
2.1 ดินมวลละเอียด	5
2.2 แร่ประกอบดินเหนียว	6
2.3 สภาพทางธรณีวิทยา	8
2.4 สภาพชั้นดินบริเวณชายฝั่ง	12
2.5 คุณสมบัติดัชนีและการจำแนกชนิดของดิน	13
2.6 คุณสมบัติทางวิศวกรรม	17
2.7 Critical State Parameter	31
2.8 พารามิเตอร์ของแรงดันน้ำ	35
2.9 คุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวจากแหล่งต่างๆ	37
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินเหนียว	39
2.11 สถิติที่ใช้ในงานวิจัย	48
<b>3 วิธีดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 การเก็บตัวอย่างดิน	55
3.2 การทดสอบในสนาม	59
3.3 การทดสอบคุณสมบัติดัชนี	59
3.4 การทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม	60
3.5 การวิเคราะห์และการสรุปผล	64
	(7)

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา</b>	
4.1 ความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนปากพั้ง	69
4.2 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง	71
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม	78
4.4 การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยสหสัมพันธ์ของตัวแปรคุณสมบัติดัชนีกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมในรูปสหสัมพันธ์พหุคูณ	111
4.5 Pore Pressure Parameter A at Failure	120
<b>5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผล	124
5.2 ข้อเสนอแนะ	127
<b>บรรณานุกรม</b>	129
<b>ภาคผนวก</b>	
ก. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าต่างๆ จากการทดสอบ Unconfine Compression Test, Consolidation Test และ Triaxial Test	134
ข. ตารางความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติดัชนีกับคุณสมบัติวิศวกรรม	144
ค. ตัวอย่างผลการทดสอบ Unconfined Compression Test , Consolidation Test และ CU Triaxial Test-ของดินตัวอย่างอำเภอปากพั้ง	149
ง. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าต่างๆของ Critical State Parameter	181
จ. รูปภาพแสดงหลุมเจาะสำรวจดินและการเจาะสำรวจดิน	185
<b>การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์</b>	197
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	204



## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของดินประเภทต่างๆ	14
2.2 ค่า $C_r / C_c$ จำแนกตามชนิดของดิน	29
2.3 Critical State Parameter ของดินจากแหล่งต่างๆ	35
2.4 คุณสมบัติต่างๆของดินเหนียวอ่อนแหล่งต่างๆ	38
2.5 อัตราส่วนของค่า Undrained Modulus of Elasticity กับค่า Undrained Shear Strength	38
2.6 ค่า Parameter A at Failure ของดินชนิดต่าง	39
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity Index กับ Liquid Limit สำหรับดินเหนียว กรุงเทพฯ	40
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Index และ Recompression Index กับ พารามิเตอร์ ต่างๆ	41
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Ratio กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ	43
2.10 ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์	54
3.1 พื้นที่เก็บตัวอย่างดินในอำเภอปากพนัง	57
3.2 จำนวนตัวอย่างของการทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม	60
4.1 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH - 1	73
4.2 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH - 2	74
4.3 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH - 3	74
4.4 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH - 4	75
4.5 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH - 5	75
4.6 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH - 6	76
4.7 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH - 7	76
4.8 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH - 8	77
4.9 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH - 9	77
4.10 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนัง	78
4.11 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH - 1	79
4.12 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH - 2	80

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 3	81
4.14 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 4	82
4.15 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 5	83
4.16 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 6	84
4.17 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 7	85
4.18 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 8	86
4.19 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 9	87
4.20 ค่า Undrained Modulus of Elasticity ของหลุมเจาะต่างๆ ที่ระดับความลึกต่างๆ	89
4.21 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง	95
4.22 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 1	105
4.23 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 2	106
4.24 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 3	106
4.25 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 4	107
4.26 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 5	107
4.27 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 6	108
4.28 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 7	109
4.29 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 8	109
4.30 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH – 9	110
4.31 Critical State Parameter ของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง	111
4.32 สมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าคุณสมบัติวิศวกรรมกับคุณสมบัติดัชนีที่ดีที่สุด โดยไม่มีตัวแปรความลึก	113
4.33 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติวิศวกรรม โดยใช้ตัวแปรความลึก	114
4.34 สมการของค่า Undrained modulus of elasticity กับ Undrained shear strength	115
4.35 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum past pressure กับ Undrained shear strength	117
4.36 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง Overconsolidation ratio กับค่า Normalized undrained shear strength from field vane shear test	119

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.37 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง Overconsolidation ratio กับค่า Normalized undrained shear strength from unconfined compression test	119
4.38 ค่า Parameter A at Failure for Confining Pressure of 5 t/m. <sup>2</sup>	121
4.39 ค่า Parameter A at Failure for Confining Pressure of 10 t/m. <sup>2</sup>	121
4.40 ค่า Parameter A at Failure for Confining Pressure of 15 t/m. <sup>2</sup>	122
4.41 ค่า Parameter A at failure ที่ Confining pressure ต่างๆ	122
5.1 คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนปากพนัง	125

## รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า	
1.1	แผนที่แสดงพื้นที่ที่ทำการศึกษา	2
1.2	การทรุดตัวของถนนบนชั้นดินเหนียวอ่อน	3
2.1	โครงสร้างของดินมวลละเอียด	5
2.2	โครงสร้างรูปผลึกของเคโอลิไนท์	6
2.3	โครงสร้างรูปผลึกของมอนต์มอริลโลไนท์	7
2.4	โครงสร้างรูปผลึกของอิลไลท์	7
2.5	แสดงชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ เมื่อ 6000 ปีที่แล้วเทียบกับปัจจุบัน	9
2.6	แผนที่แสดงลักษณะทางธรณีวิทยาลุ่มน้ำปากพนัง	11
2.7	แสดงชั้นดินบริเวณชายฝั่งตะวันออก จังหวัดนครศรีธรรมราช	12
2.8	แสดงชั้นดินในบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา	13
2.9	ภาพแสดง Unified Soil Classification System chart	16
2.10	ภาพแสดงหน้าตัดมวลดินและการรับแรงของมวลดิน	17
2.11	อุปกรณ์ทดสอบกำลังเฉือนแบบใบพัด Vane และวิธีการทดสอบ	19
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ ( $\lambda$ ) กับ Plasticity Index	21
2.13	เครื่องมือทดสอบ Unconfined Compression Test	22
2.14	เครื่องมือทดสอบ Triaxial Test	23
2.15	Mohr's Circle จาก Triaxial Test	24
2.16	Mohr's Circle จากการทดสอบ Triaxial 3 ตัวอย่าง	25
2.17	แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Mohr' circle กับ Stress path	27
2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Void Ratio กับ Effective Overburden Pressure สำหรับ Normally Consolidated Clay	28
2.19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Void Ratio กับ Effective Overburden Pressure สำหรับ Over consolidated Clay	29
2.20	การหาค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เคยกดทับในอดีต (Maximum Past Pressure)	31
2.21	Critical State of Soil	33
2.22	Critical State Line for Triaxial Tests	34
2.23	Pore Pressure in Triaxial Tests	36

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index กับ Maximum Past Pressure และ Sensitivity Index	40
2.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum Past Pressure กับค่า Undrained Shear Strength From FV-Test	44
2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Overconsolidation Ratio กับค่า Normalized Undrained Shear Strength From FV-Test	46
2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ความสัมพันธ์ $K_{FV}$ กับค่า Plasticity Index	47
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of Consolidation กับ Liquid Limit	48
3.1 แผนภูมิขั้นตอนของการเก็บตัวอย่าง การทดสอบตัวอย่าง วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล	56
3.2 ตัวอย่างดินที่ดันออกจากกระบอกบางแล้ว	57
3.3 แผนที่แสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน	58
3.4 ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปากพนักใน Consolidate Cell	61
3.5 การทดสอบ Consolidation Test ดินเหนียวอ่อนปากพนัก	62
3.6 อัตราความดันน้ำให้ดินตัวอย่างอิมตัว	65
3.7 การ Shearing ดินเหนียวอ่อนปากพนัก ในการทดสอบ Triaxial Test	65
3.8 การหาค่า Slope of Critical State Line project to $p':q'$ plane (M)	66
3.9 การหาค่า Slope of Critical State Line ( $\lambda$ )	67
4.1 ลักษณะชั้นดินของบริเวณเจาะสำรวจดินของอำเภอปากพนัก	70
4.2 ลักษณะตัวอย่างดินของดินเหนียวอ่อนปากพนัก	71
4.3 วงกลมมอร์ของผลการทดสอบ CU Triaxial Test ของหลุมเจาะ BH – 1 ลึก 3.00 เมตร	90
4.4 กราฟเปรียบเทียบค่า $C_v$ ของแต่ละความลึก ของหลุมเจาะ BH – 1	92
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าอัตราส่วนช่องว่างของความลึกต่างๆ ของหลุมเจาะ BH – 1	93
4.6 Boring log of BH - 1	96

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 Boring log of BH - 2	97
4.8 Boring log of BH - 3	98
4.9 Boring log of BH - 4	99
4.10 Boring log of BH - 5	100
4.11 Boring log of BH - 6	101
4.12 Boring log of BH - 7	102
4.13 Boring log of BH - 8	103
4.14 Boring log of BH - 9	104
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Undrained modulus of Elasticity กับค่า Undrained Shear Strength ของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง และเส้นแนวโน้มของข้อมูลแบบสมการเส้นตรง	116
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Maximum past pressure กับค่า Undrained Shear Strength ของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง และเส้นแนวโน้มของข้อมูลแบบสมการเส้นตรง	118
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Overconsolidation ratio กับค่า Normalized undrained Shear Strength ของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง และเส้นแนวโน้มของข้อมูลแบบสมการเส้นตรง	120
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Parameter A at Failure กับความลึก ของ BH - 6	123

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พื้นที่บริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำปากพนัง เป็นบริเวณพื้นที่ที่เกิดจากการพัดพาตะกอนดินมาทับถมกัน โดยกระแสน้ำจากแม่น้ำและการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล โดยพื้นที่บริเวณดังกล่าวมีบริเวณกว้างโดยเฉพาะที่บริเวณอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งมีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น และมีการก่อสร้างสาธารณูปโภคต่างๆมากมาย (รูปที่ 1.1) โครงการก่อสร้างสาธารณูปโภคต่างๆที่อำเภอปากพนังล้วนแต่ทำการก่อสร้างอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งในเนื้อดินจะมีปริมาณความชื้น (Water content) อยู่ในอัตราส่วนที่สูงมาก เมื่อดินมีการรับน้ำหนัก จนเกิดการทรุดตัวค่อนข้างสูงเช่นการทรุดตัวของอาคารที่มีฐานรากตื้น คันดินถม (Embankment) ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนบริเวณคอสะพาน (รูปที่ 1.2) การทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกจะทรุดตัวทันทีเมื่อรับน้ำหนัก (Immediately settlement) ส่วนที่สองจะเกิดจากการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินทำให้เกิดการทรุดตัว (Consolidation settlement) และส่วนที่สามจะเกิดจากความล้าของมวลดิน (Secondary settlement) ซึ่งการทรุดตัวส่วนที่สองและสามจะขึ้นอยู่กับระยะเวลา จากสาเหตุดังกล่าวทำให้การออกแบบโครงสร้างบนพื้นที่ดินเหนียวอ่อนนี้ มักประสบกับปัญหาเรื่องการทรุดตัว โดยทั่วไปในการออกแบบทางด้านวิศวกรรมฐานราก จำเป็นต้องทราบลักษณะพฤติกรรมและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนในบริเวณเป็นอย่างดี

อย่างไรก็ตามชั้นดินเหนียวอ่อนที่อำเภอปากพนังนี้ ยังไม่ได้มีการสำรวจและศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมอย่างจริงจัง โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวอ่อนจากจุดต่างๆ บางส่วนของอำเภอปากพนัง เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน โดยเน้นไปที่คุณสมบัติของการอัดตัวคายน้ำและกำลังเฉือนของดินเหนียวอ่อนปากพนัง ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ขั้นสูงในงานวิศวกรรมปฐพีต่อไป



รูปที่ 1.1 แผนที่แสดงพื้นที่ที่ทำการศึกษา

ที่มา : <http://maps.google.com>





รูปที่ 1.2 การทรุดตัวของถนนบนชั้นดินเหนียวอ่อน

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาลักษณะชั้นดินบริเวณพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช
2. ศึกษาคุณสมบัติดัชนี และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปากพนัง
3. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคุณสมบัติดัชนี และ ค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ตัวอย่างดินแบบไม่ถูกรบกวนจะถูกเก็บในบริเวณพื้นที่ต่างๆของภายในอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช
2. ความลึกของหลุมเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อน ไม่เกิน 18 เมตร หรือตรวจสอบจากค่า N (Standard penetration resistance) โดยค่าจะต้องไม่เกิน 5 blows/ft. (อยู่ในช่วงของดินเหนียวอ่อน)

3. ทำการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง
4. วิเคราะห์เชิงสถิติด้วยสหสัมพันธ์ของตัวแปร คุณสมบัติดัชนีกับคุณสมบัติวิศวกรรมในรูปสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple variable regression)
5. การวิเคราะห์ในเชิงสถิติของตัวแปรต่างๆ วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS version 15.0

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงลักษณะของชั้นดินเหนียวอ่อน ในบริเวณพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช
2. ทราบถึงคุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน บริเวณพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช
3. เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อช่วยในการออกแบบทางวิศวกรรมปฐพีหรืองานวิจัยอื่นๆ ในพื้นที่อำเภอปากพนังจังหวัดนครศรีธรรมราชต่อไปในอนาคต
4. สามารถนำค่าคุณสมบัติดัชนีมาใช้ประมาณค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน บริเวณอำเภอปากพนังได้

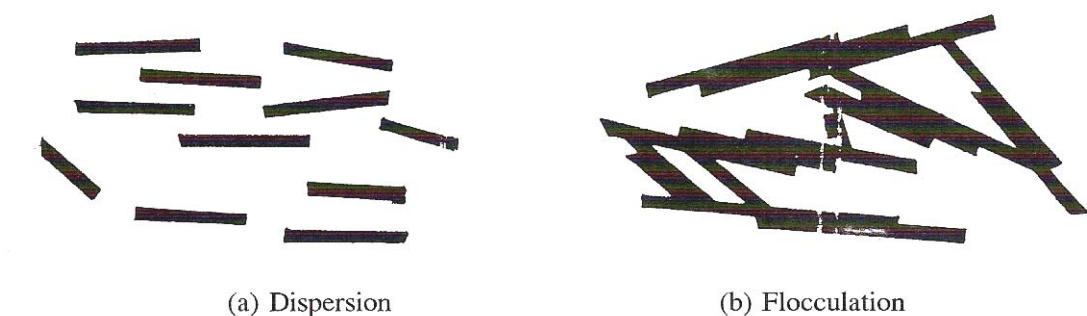
## บทที่ 2

### ทบทวนเอกสาร

การทบทวนเอกสารจะประกอบด้วย ดินมวลละเอียด แร่ประกอบดินเหนียว สภาพทางธรณีวิทยา ลักษณะของชั้นดินบริเวณชายฝั่ง คุณสมบัติดัชนีและการจำแนกชนิดของดิน คุณสมบัติทางวิศวกรรม Critical state parameters ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินเหนียว และสถิติที่ใช้ในงานวิจัย

#### 2.1 ดินมวลละเอียด (Cohesive Soil)

ดินเหนียวอ่อนเป็นดินมวลละเอียดซึ่งเป็นดินที่เกิดจากการผุพังทางเคมี (Chemical weathering) ได้แก่ดินจำพวกดินเหนียว (Clayey soil) ดินเหนียวมีแร่หลายชนิดเป็นองค์ประกอบ ส่วนใหญ่มักเป็นแร่จำพวก เคโอลิไนท์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) และมอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) รูปร่างลักษณะเป็นแผ่นบางๆจับรวมตัวกันเป็นผลึก โดยมีขนาดตั้งแต่ 0.002 มิลลิเมตรลงมา ดินเหนียวแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปตามชนิดของแร่ที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นคุณสมบัติของดินเหนียวจึงต้องกำหนดขึ้นด้วยสภาพความเหลวของมวลดินซึ่งเราเรียกว่า พลาสติกซิตี (Plasticity) โครงสร้างของการรวมตัวของอนุภาคเม็ดดินมีหลายแบบ โดยทั่วไปโครงสร้างของดินเหนียวจะมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ ได้แก่ โครงสร้างแบบกระเปียบ (Dispersed structure) โครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculated structure) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินมวลละเอียด

## 2.2 แร่ประกอบดินเหนียว (Clay Mineral)

ในดินเหนียวนั้นประกอบด้วยแร่ต่างๆมากมาย แต่แร่ส่วนใหญ่ของดินเหนียวนั้นจะประกอบไปด้วยแร่อยู่ 3 ชนิดคือ เคโอลิไนท์ อิลไลต์ และมอนต์มอริลโลไนท์ โดยลักษณะของแร่จะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

เคโอลิไนท์ (Kaolinite) เป็นแร่ที่เกิดจากการผุพังทางเคมีของหินที่มีแร่ลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ ค่าความแข็งเท่ากับ 2.5 เป็นรูปผลึกแบบโมโนคลินิก ซึ่งมีลักษณะจับตัวเป็นชั้นๆระหว่างซิลิกากับกิบไซต์ โดยมีไฮโดรเจนเป็นตัวประสาน ขนาดของเม็ดแร่มีลักษณะเป็นแผ่นกว้าง 1000 – 2000 แองกซ์ตอมส์ (Angstroms;  $10^{-7}$  mm.) และหนา 100 – 1000 แองกซ์ตอมส์ ที่ผิวของเม็ดแร่จะมีประจุลบ ซึ่งสามารถยึดโมเลกุลของน้ำเป็นชั้นหนา ซึ่งน้ำส่วนนี้เรียกว่า แอดซอบด์ (Adsorbed) ชั้นน้ำแอดซอบด์เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ดินเหนียวที่ประกอบด้วยแร่เคโอลิไนท์เป็นพลาสติกเมื่อมีน้ำเป็นส่วนประกอบ ดังรูปที่ 2.2



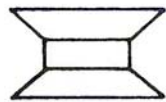
(ก) สัญลักษณ์ของเคโอลิไนท์ 1 ชั้น (ข) โครงสร้างของเคโอลิไนท์ที่จับกันเป็นชั้นๆ

รูปที่ 2.2 โครงสร้างรูปผลึกของเคโอลิไนท์

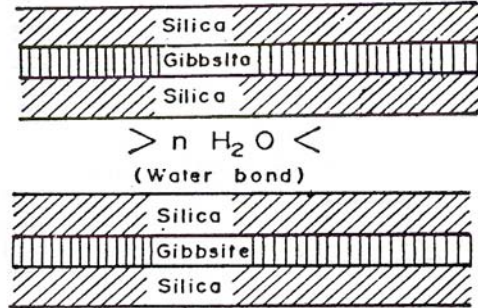
มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) เป็นพวก ไฮดรอส อลูมิเนียม ซิลิเกต (Hydrous aluminum silicate) เป็นผลึกคล้ายแร่เคโอลิไนท์ ต่างกันที่ตรงแผ่นบางของแร่มอนต์มอริลโลไนท์มี 3 ชั้น โดยมีกิบไซต์อยู่ตรงกลาง และซิลิกาจับอยู่ด้านบนและล่างของกิบไซต์ แผ่นบางของแร่มอนต์มอริลโลไนท์จะมีน้ำเป็นตัวประสาน ขนาดของแผ่นกว้างประมาณ 1000 – 5000 แองกซ์ตอมส์ และหนา 10 – 50 แองกซ์ตอมส์ หนึ่งความหนาของน้ำที่เป็นตัวประสานระหว่างแผ่นอาจหนา 400 แองกซ์ตอมส์ โดยที่แผ่นมีความหนาเพียง 10 แองกซ์ตอมส์ ด้วยเหตุนี้ดินเหนียว

ที่มีแร่มอนต์มอริลโลไนท์เป็นส่วนประกอบ  
เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2.3

จะมีปริมาณเปลี่ยนแปลงสูงเมื่อน้ำในมวลดิน



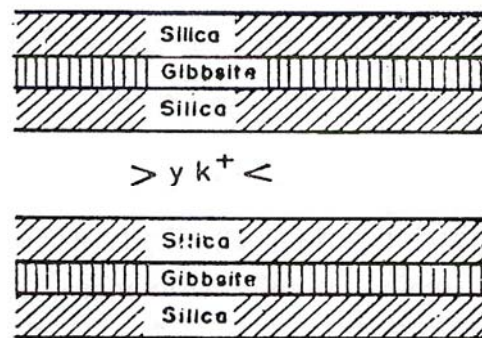
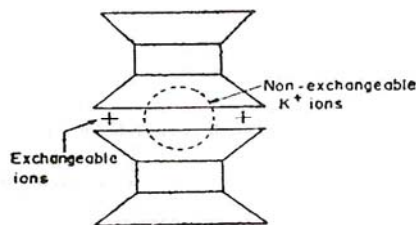
(ก) สัญลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนท์



(ข) โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนท์ที่จับกันเป็นชั้นๆ

รูปที่ 2.3 โครงสร้างรูปผลึกของมอนต์มอริลโลไนท์

อิลไลต์(Millite) เป็นพวก ไฮดร็อกไซด์ อลูมิเนียม ซิลิเกต เหมือนกับแร่มอนต์มอริลโลไนท์ ลักษณะเป็นแผ่นบาง 3 ชั้น ต่างกันตรงระหว่างแผ่นแร่จะมีประจุไฟฟ้าของโปแตสเซียม (Potassium ion) เป็นตัวประสาน โดยที่ประจุไฟฟ้าของโปแตสเซียมเป็นประจุบวกจะเชื่อมกับประจุลบที่บริเวณผิวของซิลิกา แผ่นอิลไลต์มีความกว้างประมาณ 100 – 5000 แองกซ์ตอมส์ และหนา 50 – 500 แองกซ์ตอมส์ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างรูปผลึกของอิลไลต์

### 2.3 สภาพทางธรณีวิทยา

อภิชัย (2546) ได้ทำการเสนอข้อมูลสภาพทางธรณีวิทยาและลักษณะของชั้นดินบริเวณภาคใต้ดังนี้

ภาคใต้มีลักษณะแหลมยื่นออกไปในทะเล ด้านตะวันออกติดกับอ่าวไทย ส่วนด้านตะวันตกติดทะเลอันดามัน ทางเหนือเริ่มจากบริเวณอำเภอท่าแซะ จังหวัดชุมพร ลงไปทางใต้สุดจรดประเทศมาเลเซีย ความยาวจากเหนือจรดใต้มีความยาวประมาณ 610 กิโลเมตร มีความกว้างระหว่าง 220 กิโลเมตร จากฝั่งตะวันออกของอำเภอปากพนังไปจนถึงฝั่งตะวันตกของอำเภอท้ายเหมือง จังหวัดพังงา ส่วนแคบสุดของคาบสมุทรอยู่ที่คอคอคกระ กว้างประมาณ 64 กิโลเมตร ประกอบด้วยจังหวัดต่าง ๆ 14 จังหวัด ทางริมฝั่งทะเลด้านตะวันออกได้แก่ จังหวัดชุมพร, สุราษฎร์ธานี, นครศรีธรรมราช, สงขลา, ปัตตานี, และนราธิวาส ส่วนริมฝั่งทะเลด้านตะวันตกได้แก่ จังหวัดระนอง, พังงา, ภูเก็ต, กระบี่, ตรัง, และสตูล ส่วนจังหวัดที่ไม่ติดกับทะเลได้แก่ จังหวัดพัทลุง และยะลา

การเปลี่ยนแปลงทางธรณีของชายฝั่งทางภาคใต้เริ่มในช่วงระยะเวลา Recent Period (ประมาณ 10,000 ปีที่แล้ว) โดยคาบสมุทรทางใต้ได้มีการดักตัวเอียงไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ทำให้ชายฝั่งทะเลด้านทิศตะวันออกยกตัวขึ้นและชายฝั่งด้านตะวันตกจมลง ประกอบกับการลดลงของระดับน้ำทะเลฝั่งทะเลตะวันออกที่เคยจมอยู่ใต้น้ำถูกยกขึ้นสูงกว่าระดับน้ำทะเล เกิดเป็นที่ราบกว้างชายฝั่งที่มีระดับต่ำกว่าที่ราบเดิม เกิดเป็น Marine terrace ขึ้นมาใหม่ แนวชายฝั่งทะเลบริเวณนี้จะมีลักษณะค่อนข้างราบเรียบ นอกจากนี้การยกตัวขึ้นของแผ่นดินทำให้แม่น้ำต้องมีการปรับการไหลและการกัดเซาะ โดยลำน้ำจะกัดเซาะบริเวณกลางและปลายน้ำให้ลึกลงไป ทำให้มี River terrace ใหม่เกิดขึ้น สภาพภูมิประเทศในบริเวณนี้จึงมีการกัดเซาะในลักษณะของ U shape

บริเวณที่ราบลุ่มชายทะเลจะมีขนาดแคบทางตอนเหนือของอ่าวบ้านดอนและขยายกว้างขึ้นระหว่างจังหวัดนครศรีธรรมราช จนถึง จังหวัดนราธิวาส ที่ราบในบริเวณนี้เกิดจากกระแสน้ำทะเลและคลื่นพัดพาทรายมากองก่อดัวเป็นสันทรายริมฝั่ง สันทรายนี้จะยกเป็นแหลมออกไปในทะเล การก่อดัวของสันทรายริมทะเลเป็นแหลมยื่นออกไปที่มีขนาดใหญ่และเห็นได้ชัดเจน คือ แหลมตะลุมพุก จังหวัดนครศรีธรรมราช, แหลมสนอ่อน จังหวัดสงขลา และแหลม

ตาชี จังหวัดปัตตานี เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งแหลมที่ยื่นไปก็จะปิดบริเวณที่เป็นอ่าว ทำให้เกิดแอ่งน้ำ หลังสันทรายขึ้นเรียกว่า Lagoon ทะเลสาบสงขลาที่เกิดจากขบวนการนี้เช่นกัน ซึ่ง Lagoon เหล่านี้ต่อมาจะตื้นเขินและมีต้นโกงกางหรือไม้เนื้ออย่างอื่นขึ้น กลายเป็นป่าพรุหลังแนวชายหาดในปัจจุบันและดินในบริเวณนี้จะเกิดจากการทับถมของต้นไม้อื่นๆกลายเป็นดินพรุหรือ Peat ซึ่งพบได้ทั่วไปหลังสันทรายในบริเวณจังหวัดนราธิวาส ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปจะมีระดับความสูงน้อยกว่า 10 เมตร เหนือระดับน้ำทะเล

การยกตัวของชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกทำให้ชายฝั่งด้านตะวันตกจมลง บริเวณที่เป็นชายหาดเดิมจะจมลงได้ทะเลทำให้ที่ราบริมทะเลมีน้อยลงและผลอันนี้ยังทำให้ชายฝั่งมีรูปร่างเว้าแหว่งมาก มีลักษณะเป็นอ่าวสลับกับแหลมและมีเกาะต่าง ๆ อยู่นอกชายฝั่งเป็นจำนวนมากมาย ในบางบริเวณจะมีภูเขาปิดล้อมชายหาด จากการที่ทิวเขาขนาดใหญ่อยู่ชิดชายฝั่ง เมื่อชายฝั่งจมลงลำน้ำในบริเวณนี้ก็จะปรับตัวกักเซาะบริเวณต้นน้ำลงเป็นร่องลึกลงไปอีก ทำให้ในบริเวณนี้ นอกจากจะมีที่ราบชายฝั่งน้อยแล้ว สภาพร่องน้ำจะเป็นร่องลึกรูปตัว V ต่างจากร่องน้ำฝั่งตะวันออก ซึ่งจะเป็นร่องกว้างตื้นและมีหลายระดับ River terrace แทบจะไม่พบในชายฝั่งด้านนี้



รูปที่ 2.5 แสดงชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ เมื่อ 6000 ปีที่แล้วเทียบกับปัจจุบัน  
ที่มา: อภิษฐ์ (2546)

รูปที่ 2.5 แสดงบริเวณที่เคยเป็นชายฝั่งทะเลในอดีตเทียบกับปัจจุบัน ในบริเวณภาคใต้ ให้เห็นอย่างชัดเจนในตัวอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ตั้งอยู่ตามแนวสันทรายเก่า และอยู่ห่างจากสันทรายริมทะเลปัจจุบันประมาณ 20 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังมีร่องรอยของ Lagoon เก่าให้เห็นเป็นแนวยาวในบริเวณด้านทิศตะวันตกของตัวเมือง

สภาพธรณีวิทยาของพื้นที่ อ.ปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช จากการศึกษาในเบื้องต้นโดยการรวบรวมข้อมูลเก่าที่ได้มีการศึกษาไว้แล้ว ได้แก่ แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตราส่วน 1:1,000,000 (กรมทรัพยากรธรณี, 2544) และทำการสำรวจข้อมูลเพิ่มเติม พบว่า ธรณีวิทยาของบริเวณพื้นที่ประกอบด้วยหมวดหินยุคควอเทอร์นารี (Quaternary)

หินยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) ประกอบด้วยชั้นของกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ซึ่งเกิดจากการพัดพามาสะสมของทางน้ำบริเวณที่ราบเชิงเขาและที่ราบลุ่มแม่น้ำ รวมทั้งตะกอนที่เกิดจากการพัดพามาสะสมโดยน้ำทะเล การสะสมตัวของตะกอนตามบริเวณเชิงเขา นอกจากเกิดจากการพัดพามาสะสมของทางน้ำแล้ว บางบริเวณยังอาจเกิดจากการสะสมตัวของตะกอนที่เกิดจากการผุพังของหินโดยขบวนการทางกายภาพและเคมี ทำให้เกิดการสะสมตัวอยู่กับที่ หินยุคควอเทอร์นารีเป็นชั้นของตะกอนที่ยังไม่จับตัวเป็นหินแข็ง บางส่วนจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยขบวนการทางเคมีทำให้เกิดเป็นศิลาแลง อายุของตะกอนอยู่ในช่วงประมาณ 1.6 ล้านปี ถึง ปัจจุบัน ตะกอนเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทย่อย ๆ ดังนี้

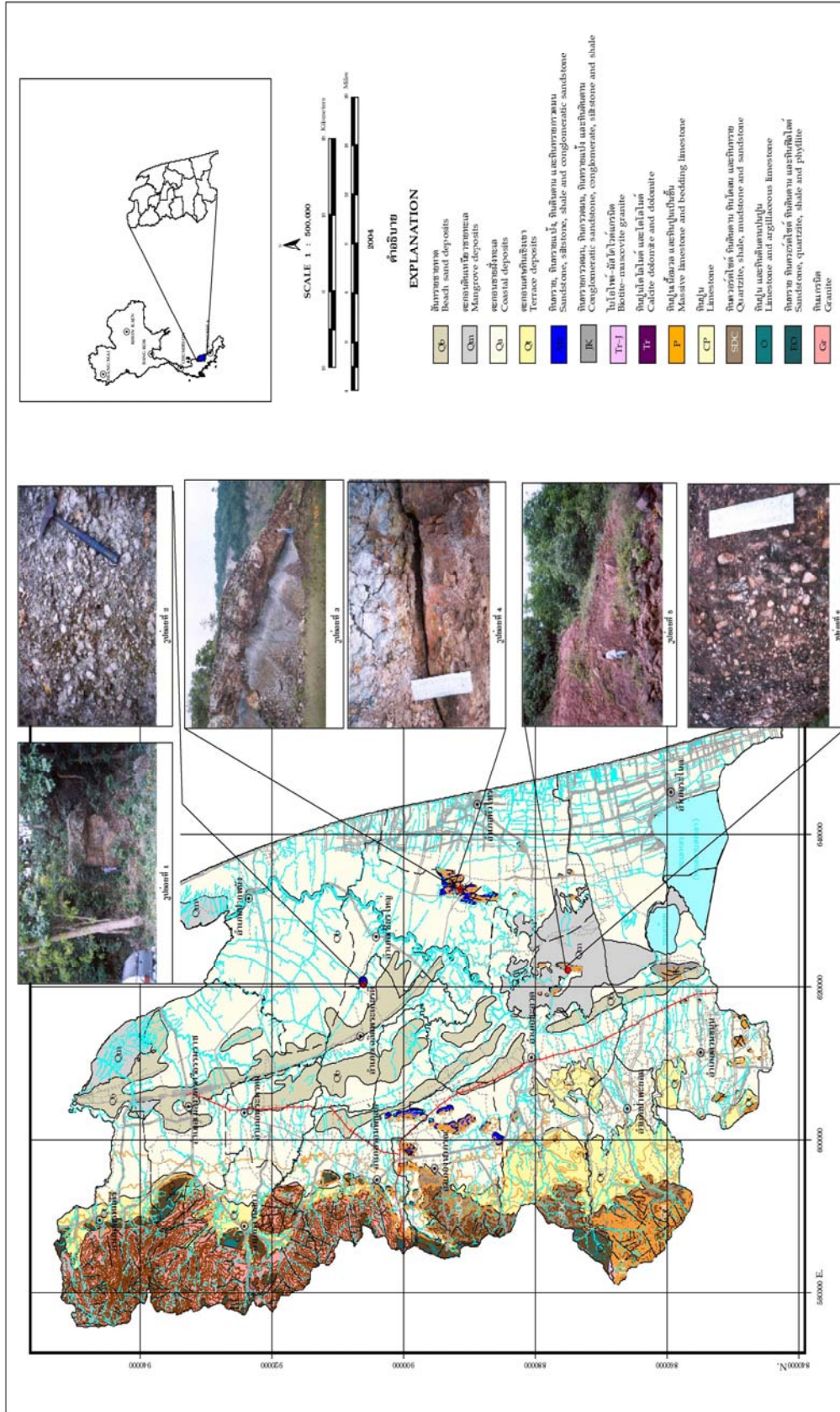
1) สันทรายชายหาด (Beach sand deposits: Qb) เป็นชั้นตะกอนทรายขนาดหยาบถึงละเอียดที่เกิดจากการพัดพามาสะสมตัวโดยน้ำทะเล พบอยู่ตามที่ราบชายฝั่งทะเลต่าง ๆ

2) ตะกอนดินเหนียวชายทะเล (Mangrove deposits: Qm) เป็นชั้นตะกอนดินเหนียวที่เกิดจากการพัดพามาสะสมตัวโดยน้ำทะเล พบบริเวณที่เป็นป่าชายเลน และป่าพรุที่มีน้ำท่วมถึง

3) ตะกอนน้ำพา (Alluvium deposits: Qa) ประกอบด้วยชั้นกรวดปนทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวที่ถูกพัดพามาโดยแม่น้ำ และสะสมตัวอยู่บริเวณที่ราบน้ำท่วมถึง และที่ราบลุ่มแม่น้ำต่าง ๆ

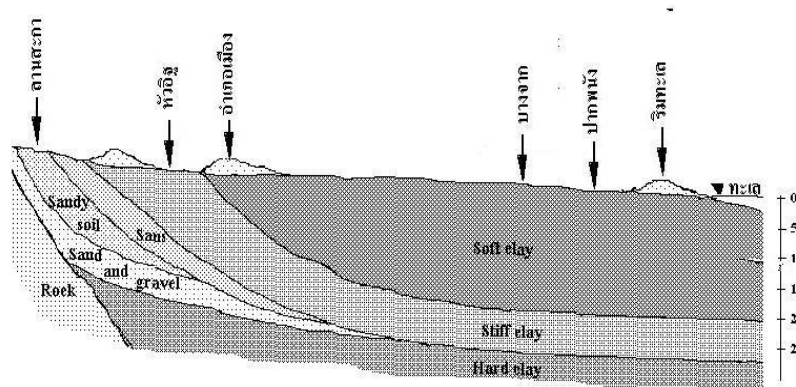
4) ตะกอนเศษหินเชิงเขา (Terrace deposits: Qt) เป็นตะกอนเศษดินและหินที่ผุพังมาจากหินบริเวณเชิงเขา และตกตะกอนทับถมเป็นที่ราบบริเวณเชิงเขา ลักษณะของตะกอนมักมีขนาดต่าง ๆ กัน มีความเหลี่ยมคมสูง การคัดขนาดไม่ดี ส่วนประกอบของชั้นตะกอนชนิดนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของหินต้นกำเนิด (Host Rock)





## 2.4 สภาพชั้นดินบริเวณชายฝั่ง

บริเวณที่ราบชายฝั่งด้านตะวันออก ตั้งแต่จังหวัดสุราษฎร์ธานีลงไปถึงจังหวัดนราธิวาส ชั้นดินบริเวณชายฝั่งส่วนใหญ่จะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน ในบริเวณที่เคยเป็นชายหาดเก่าก็จะมีชั้นทรายทับถมอยู่ข้างบน ในบางบริเวณ เช่นที่อำเภอเมืองสงขลา และอำเภอเมืองนราธิวาส ชั้นทรายอาจหนาถึง 12 เมตร หลังชั้นทรายจะมีร่องน้ำซึ่งเป็น Lagoon ขนานกับแนวชายฝั่ง ดินผิวบนในบริเวณนี้จะเป็นดินอินทรีย์และในบริเวณจังหวัดนราธิวาส ได้แปรสภาพเป็นดินพรุ (Peat) ปกคลุมผิวบนอยู่หนา 3.0 - 4.0 เมตร ต่ำลงไปเป็นดินเหนียวอ่อน (Marine clay) สภาพชั้นดินในบริเวณนี้ได้แสดงในรูปที่ 2.7

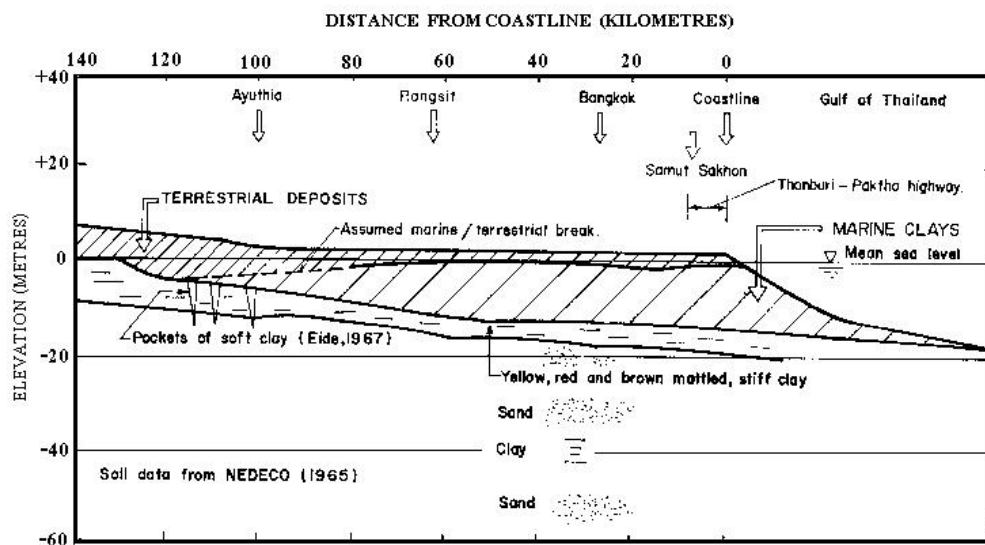


รูปที่ 2.7 แสดงชั้นดินบริเวณชายฝั่งตะวันออก จังหวัดนครศรีธรรมราช  
ที่มา: อภิชัย (2546)

ชั้นดินในบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช จะมีชั้นทรายและทรายปนดินสลับอยู่เบื้องล่าง ชั้นดินเหล่านี้เกิดจากการสะสมของตะกอนแม่น้ำก่อนที่ชายฝั่งจะถอยร่นไป การก่อตัวของชายหาดใหม่เกิดจากการก่อตัวเป็นแหลมยื่นออกไปปิดชายฝั่งเดิม ซึ่งรวมถึงทะเลสาบสงขลาด้วย ดังนั้นแนวชายฝั่งใหม่จะไม่มีตะกอนแม่น้ำทับถมอยู่ข้างล่าง ชั้นดินลักษณะนี้เกิดขึ้นตลอดแนวชายฝั่งจากอำเภอปากพื้งถึงอำเภอสิงหนคร ยกเว้นบริเวณปากทะเลสาบสงขลาซึ่งมีตะกอนของแม่น้ำเข้ามาทับถมอยู่ด้วย

ภาคใต้ฝั่งตะวันออกในอดีตเป็นส่วนหนึ่งของอ่าวไทย การงอกของชายฝั่งเกิดจากการสะสมของตะกอนที่แม่น้ำพัดพาลงมา ลักษณะเช่นเดียวกันนี้ก็เกิดในบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา ดังนั้นลักษณะชั้นดินชายฝั่งจะไม่แตกต่างกันนัก ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นรูปตัดของชั้นดินที่เสนอโดย

Cox (1970) ช้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดอย่างหนึ่งคือ ปากอ่าวเจ้าพระยาค้นพบชั้นดินเหนียวอ่อน ดั้งนั้น จึงไม่มีการก่อตัวของชายหาดเกิดขึ้นและที่น่าสนใจอีกอย่างก็คือ ชั้นดินเหนียวแข็งที่อยู่ใต้ชั้นดินเหนียวอ่อน (Marine clay) มีลักษณะค่อนข้างเหมือนกัน ซึ่งเป็นไปได้ว่าในยุคก่อน Quaternary ชั้นดินนี้อาจเป็นชั้นผิวดินปกคลุมบริเวณอ่าวไทยในภาคกลางและภาคใต้ ก่อนที่อ่าวไทยจะจมลงได้น้ำ



รูปที่ 2.8 แสดงชั้นดินในบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา  
ที่มา: Cox (1970)

## 2.5 คุณสมบัติดัชนีและการจำแนกชนิดของดิน

### 2.5.1 คุณสมบัติดัชนี

ดินในแต่ละสถานที่ที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวและเป็นเอกลักษณ์ของตัวเองโดยจะแตกต่างกันไปตามลักษณะการกำเนิดของดิน ซึ่งคุณสมบัติของมวลดินมีผลต่องานทางด้านวิศวกรรม ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างที่ใช้ดินเป็นวัสดุรองรับฐานราก ผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบถึงลักษณะของคุณสมบัติของดินชนิดนั้นๆ ซึ่งคุณสมบัติของมวลดินสามารถแบ่งได้ดังนี้

ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Natural water content) คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำกับน้ำหนักของมวลดิน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)

ขีดจำกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg's limits) เป็นวิธีการอธิบายปริมาณความชื้นในมวลดินซึ่งจะบ่งบอกถึงสถานะของดินประกอบด้วย

ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) คือปริมาณความชื้นที่ทำให้ดินเปลี่ยนจากสถานะยึดหยุ่นเป็นของเหลว โดยสามารถหาค่า LL โดยใช้วิธีทดสอบตาม ASTM D - 4318

ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) คือปริมาณความชื้นที่ทำให้ดินเปลี่ยนสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid) เป็นสถานะพลาสติก โดยสามารถหาค่า LL โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D - 4318

ดัชนีพลาสติก (Plastic index, PI) คือผลต่างระหว่างขีดจำกัดเหลวกับขีดจำกัดพลาสติก ( $PI = LL - PL$ ) ซึ่งค่า PI แสดงถึงปริมาณความชื้นในมวลดินที่ยังทำให้ดินคงสภาพพลาสติกอยู่และแสดงถึงปริมาณของอนุภาคของมวลดินเหนียวในดินนั้น เช่น ถ้าค่า PI สูงแสดงว่ามีอนุภาคของดินเหนียวอยู่มาก

หน่วยน้ำหนักรวม (Total unit weight) คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักทั้งหมดของมวลดินกับปริมาตรทั้งหมดของมวลดิน

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) คือ อัตราส่วนระหว่างหน่วยน้ำหนักของดินในอากาศกับหน่วยน้ำหนักของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยสามารถหาค่า  $G_s$  โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D - 854

ตารางที่ 2.1 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของดินประเภทต่างๆ

ประเภทของดิน	ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)
Gravel	2.65 – 2.68
Sand	2.65 – 2.68
Silt, Inorganic	2.62 – 2.68
Clay, Inorganic	2.68 – 2.75
Clay, Organic	2.58 – 2.65

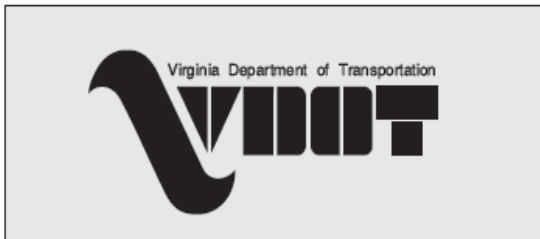
ที่มา: สถาพร (2542)

### 2.5.2 การจำแนกชนิดของดิน

การจำแนกประเภทของดิน (Soil classification) ออกเป็นกลุ่มย่อยๆ โดยอาศัยคุณสมบัติของ Atterberg's limits และขนาดเม็ดดิน (Particle size) ซึ่งการจำแนกที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 2 แบบคือ Unified soil classification system และ AASHTO ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะแบบ Unified soil classification system โดยที่การจำแนกจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือดินมวลหยาบ (Coarse grained soil) และมวลดินละเอียด (Fine grained soil) ซึ่งหลักในการจัดแบ่งดินระบบนี้ได้จากรูปที่ 2.9 โดยที่จะใช้สัญลักษณ์เป็นอักษรภาษาอังกฤษแทนชื่อกลุ่มของดินแต่ละกลุ่มซึ่งจะมีอักษรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปตัวหน้าเป็นกลุ่มหลักและตัวที่สองจะเป็นกลุ่มย่อยลงไปตัวอักษรแต่ละตัวจะมีความหมายในตัวของมันเองดังนี้

ดินมวลหยาบแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ G หมายถึงพวกกรวด (ย่อมาจาก Gravel) และ S หมายถึงพวกทราย (ย่อมาจาก Sand) นอกจากนี้ยังแบ่งเป็นกลุ่มย่อย (อักษรตัวที่ 2) ได้ 4 กลุ่มย่อย คือ W หมายถึงดินเม็ดละเอียด (ย่อมาจาก Well graded) P หมายถึง ดินขนาดไม่ละเอียด (ย่อมาจาก Poorly graded) M หมายถึง ทรายปน (ย่อมาจาก Mjale = Silt) C หมายถึง ดินเหนียว(ย่อมาจาก Clay) ดังนั้นสามารถเขียนตัวอย่างชื่อของดินเม็ดหยาบได้ดังนี้คือ GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM และ SC

ดินเม็ดละเอียดแบ่งเป็น 4 กลุ่มใหญ่ คือ M หมายถึง ทรายปน (Silt) C หมายถึง ดินเหนียว (Clay) O หมายถึง ดินพวกสารอินทรีย์ (Organic) Pt หมายถึงดินพวก Peat นอกจากนี้ยังแบ่งย่อยได้อีก 2 กลุ่มย่อย คือ H หมายถึง High Liquid Limit ( $LL > 50\%$ ) และ L หมายถึง Low Liquid Limit ( $LL < 50\%$ ) ดังนั้นสามารถเขียนตัวอย่างชื่อดินเม็ดละเอียดได้แก่ MH, ML, CH, CL, OH, OL และ Pt



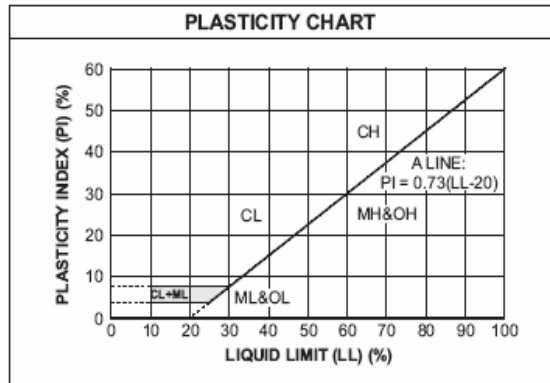
# UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM

UNIFIED SOIL CLASSIFICATION AND SYMBOL CHART		
<b>COARSE-GRAINED SOILS</b> (more than 50% of material is larger than No. 200 sieve size.)		
<b>GRAVELS</b> More than 50% of coarse fraction larger than No. 4 sieve size	Clean Gravels (Less than 5% fines)	
	GW	Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines
	GP	Poorly-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines
	Gravels with fines (More than 12% fines)	
	GM	Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures
	GC	Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures
<b>SANDS</b> 50% or more of coarse fraction smaller than No. 4 sieve size	Clean Sands (Less than 5% fines)	
	SW	Well-graded sands, gravelly sands, little or no fines
	SP	Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines
	Sands with fines (More than 12% fines)	
	SM	Silty sands, sand-silt mixtures
	SC	Clayey sands, sand-clay mixtures
<b>FINE-GRAINED SOILS</b> (50% or more of material is smaller than No. 200 sieve size.)		
<b>SILTS AND CLAYS</b> Liquid limit less than 50%	ML	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands or clayey silts with slight plasticity
	CL	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays
	OL	Organic silts and organic silty clays of low plasticity
<b>SILTS AND CLAYS</b> Liquid limit 50% or greater	MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts
	CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays
	OH	Organic clays of medium to high plasticity, organic silts
<b>HIGHLY ORGANIC SOILS</b>	PT	Peat and other highly organic soils

LABORATORY CLASSIFICATION CRITERIA	
GW	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ greater than 4; $C_c = \frac{D_{30}}{D_{10} \times D_{60}}$ between 1 and 3
GP	Not meeting all gradation requirements for GW
GM	Atterberg limits below "A" line or P.I. less than 4
GC	Atterberg limits above "A" line with P.I. greater than 7
Above "A" line with P.I. between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbols	
SW	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ greater than 4; $C_c = \frac{D_{30}}{D_{10} \times D_{60}}$ between 1 and 3
SP	Not meeting all gradation requirements for GW
SM	Atterberg limits below "A" line or P.I. less than 4
SC	Atterberg limits above "A" line with P.I. greater than 7
Limits plotting in shaded zone with P.I. between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbols.	

Determine percentages of sand and gravel from grain-size curve. Depending on percentage of fines (fraction smaller than No. 200 sieve size), coarse-grained soils are classified as follows:

Less than 5 percent ..... GW, GP, SW, SP  
 More than 12 percent ..... GM, GC, SM, SC  
 5 to 12 percent ..... Borderline cases requiring dual symbols



รูปที่ 2.9 ภาพแสดง Unified soil classification system chart

ที่มา: <http://matrix.vtrc.virginia.edu/DATA/GINT/vdotusc.PDF>

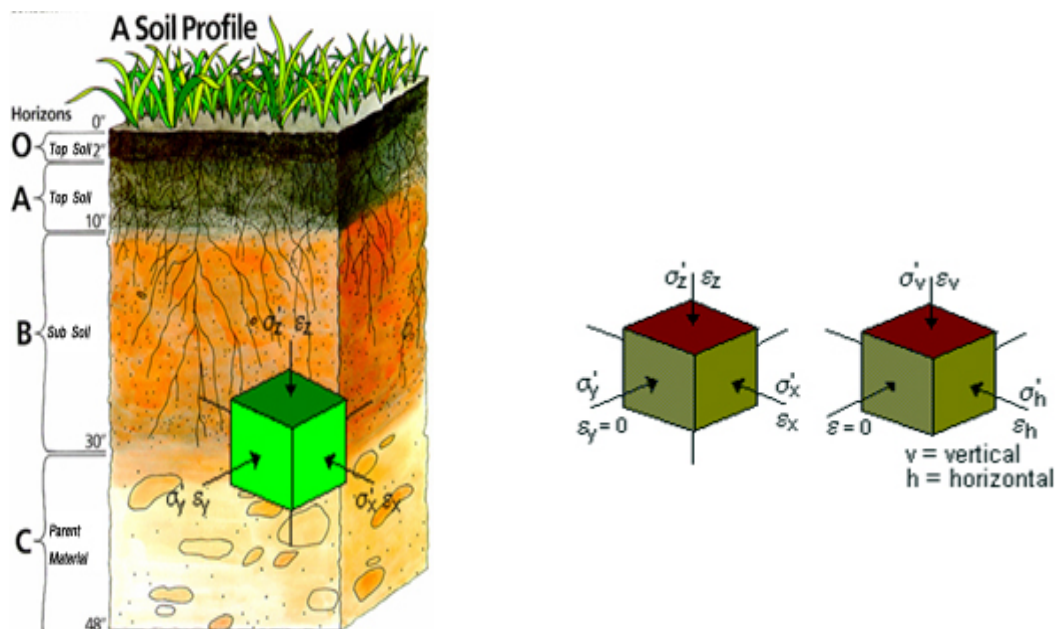
## 2.6 คุณสมบัติทางวิศวกรรม

คุณสมบัติทางวิศวกรรมประกอบด้วย คุณสมบัติกำลังเฉือนและคุณสมบัติการยุบอัดตัว ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.6.1 คุณสมบัติกำลังเฉือน (Shear Strength Parameter)

มวลดินในระดับต่าง ๆ ได้ผิวดินย่อมจะมีแรงดันอันเกิดจากน้ำหนักของดินเอง โดยรอบซึ่งเรียกว่า Geostatic stress และเมื่อมีแรงกระทำหรือน้ำหนักภายนอกอันจะเป็นสาเหตุให้เกิดการเคลื่อนพังของมวลดินนั้นขึ้นภายหลัง หน่วยของแรงส่วนนี้เราอาจจะเรียกว่า Applied stress ซึ่งอาจเกิดจากน้ำหนักของอาคารที่ถ่ายลงบนฐานรากหรือน้ำหนักของเขื่อนดินลงบนผิวดิน เมื่อมี Applied stress นี้มากเกินไปจนเกินกำลังที่มวลดินจะรับไหวก็จะเกิดการเคลื่อนพัง (ดังแสดงในรูปที่ 2.10)

ดินเหมือนกับวัสดุต่างๆ คือสามารถรับแรงกระทำได้ถึงจุดพิบัติ สำหรับดินคือ ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวประกอบต่างๆมากมายตามสภาพและชนิดของดิน โดยตัวประกอบนี้คือ แรงยึดเหนี่ยวหรือความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงหน้าตัดมวลดินและการรับแรงของมวลดิน

ที่มา : <http://www.gerd.eng.ku.ac.th>

ค่ากำลังการรับแรงเฉือนและมุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน เป็นค่าต่างๆที่ได้มาจากการทดสอบทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบ Field vane shear test (FV-Test) การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test) การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง (Direct shear test) และการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial test)

การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test) และการทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง (Direct shear test) เป็นการทดสอบที่ยังไม่ได้ควบคุมสถานะความดันตามความเป็นจริงในธรรมชาติ ที่มีค่าหน่วยแรงแนวนอน (Horizontal stress,  $\sigma_h$ ) เป็นสัดส่วนกับค่าหน่วยแรงในแนวตั้ง (Vertical stress,  $\sigma_v$ ) ตามค่าน้ำหนักได้น้ำต่อหน่วยปริมาตร (Submerged unit weight) ของดินที่กดทับอยู่เหนือขึ้นไป ตามค่าสัมประสิทธิ์ความดันของดิน (Earth pressure coefficient, K)

การทดสอบแรงเฉือนของดินที่ทำการทดลองมาแล้ว ยังไม่ได้คำนึงถึงความแตกต่างของค่าความดันในแนวตั้ง 2 ดังกล่าว และไม่สามารถอัดความดันน้ำให้ตัวอย่างอิมดินตัวด้วยน้ำ (Saturate) เพื่อวัดความดันน้ำ (Pore water pressure measurement) ได้ ส่วนการทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง (Direct shear test) สามารถอัดตัวอย่างดิน (Consolidate) ได้ ส่วนการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test) ไม่สามารถอัดตัวอย่างดินได้ และวิธีการทดสอบทั้ง 2 วิธีไม่สามารถวัดความดันน้ำ (Pore water pressure measurement) ได้เลย จึงไม่สามารถหาค่าคงตัวของดินประสิทธิผล (Effective stress parameters) ได้ ยกเว้นการทดสอบกระทำแรงเฉือนแบบระบายน้ำ (Drained) ด้วยการเดินเครื่องทดสอบแรงเฉือนช้ามาก ๆ ที่ค่าความดันน้ำระบายได้ทันจึงไม่มีความดันน้ำเฉือนโดยตรง (Direct shear box) การทดสอบกำลังเฉือนของดินดังกล่าวทั้งหมดจึงยังไม่สมบูรณ์ เพียงแต่สามารถใช้ผลการทดสอบในงานออกแบบพื้นฐานเท่านั้น

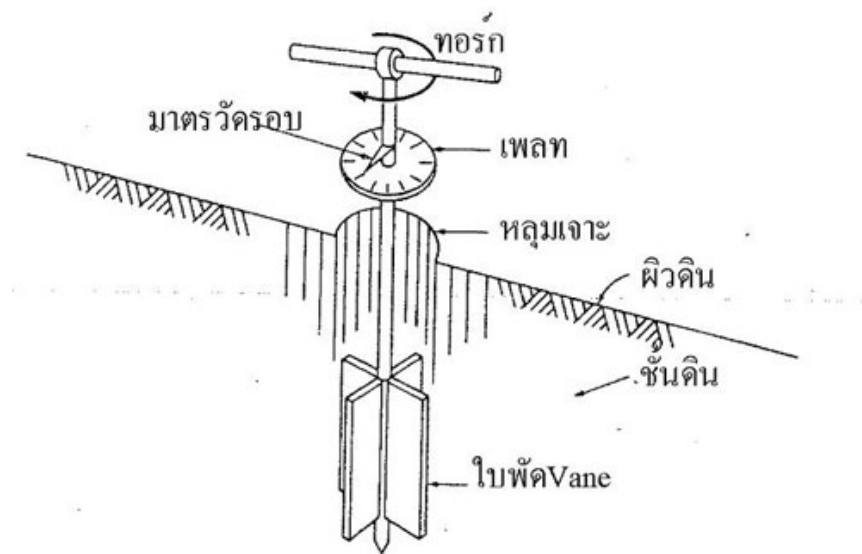
การทดสอบกำลังของดินที่นักวิชาการต้องการมากที่สุดก็คือ การทดสอบแรงอัด 3 แกน (Triaxial test) ถึงแม้ว่าในการทดสอบจริง ๆ สามารถกระทำแรงต่างกันได้เพียง 2 แกน (แกนนอนรอบด้านกับแกนตั้ง) เท่านั้น แต่ก็ยังเป็นเครื่องมือที่สมบูรณ์ที่สุดที่จะทดสอบแรงเฉือนของดินให้ได้ใกล้เคียงสภาวะธรรมชาติมากที่สุด และสามารถทำการทดสอบได้เกือบทุกสภาวะที่ต้องการ

1) การทดสอบหาค่า Shear strength parameter ในสนาม โดยการทดสอบ Field vane shear test (FV-Test) ทดสอบโดยใช้ ASTM D-2573 เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง สำหรับหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) ของดินที่มีความเหนียว โดยเฉพาะดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็ง และเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับดินเหนียวที่มีความไวตัวสูง



(Sensitive clay) ซึ่งยากที่จะหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำโดยไม่รบกวนดิน และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำยังสามารถใช้ในการหาค่าความไวตัว (Sensitivity) ด้วย

เครื่องมือ Vane shear test ประกอบด้วยใบพัด 4 ใบ และต่อก้านมาที่ผิวดินชนิดของใบพัดจะมีสองแบบคือ เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และแบบที่ปลายเป็นมุมแหลม 45 องศา ด้านแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์ทดสอบกำลังเฉือนแบบใบพัด Vane และวิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบโดยทั่วไป จะดันใบมีดลงในดินที่ระดับความลึกที่ต้องการและหมุนจากผิวดินแล้ววัดแรงบิด (Torsion) ด้วยอัตราเร็วคงที่ 0.1 องศาต่อวินาที ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็น Unit Shearing Resistance โดยการสมมุติว่าการพังของดินเป็นไปตามผิวทรงกระบอก ซึ่งสามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) ได้ดังสมการที่ 2.1

$$Su = \frac{T \max}{\pi \left( \frac{DH}{2} + \frac{D^3}{6} \right)} \quad (2.1)$$

- โดยที่  $S_u$  คือ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)  
 $T$  คือ แรงบิดมากที่สุด (Maximum Torque Force)  
 $D$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด (Vane)  
 $H$  คือ ความสูงของใบพัด (Vane)

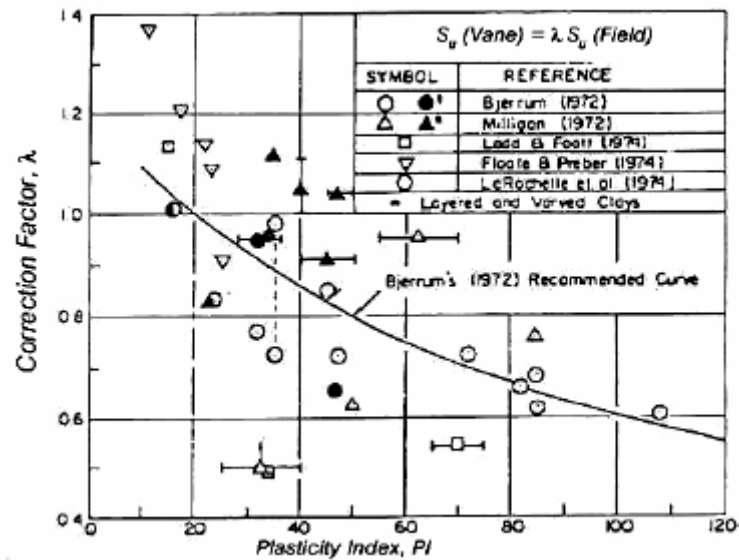
จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบ Field vane shear test มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นสามารถหาค่าปรับแก้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ Field vane shear test ได้ดังสมการที่ 2.2

$$S_{U(\text{design})} = \lambda S_{FV} \quad (2.2)$$

- โดยที่  $S_{U(\text{design})}$  คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ใช้ในการออกแบบ  
 $S_{FV}$  คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบ Field vane shear test  
 $\lambda$  คือ ค่าปรับแก้ความสัมพันธ์ (Correction Factor) ระหว่าง  $S_{U(\text{Design})}$  กับ  $S_{FV}$  ซึ่งมีผู้เสนอไว้หลายท่านดังนี้

Bjerrum (1972) เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ ( $\lambda$ ) กับ Plasticity index แสดงได้ดังสมการที่ 2.3 และรูปที่ 2.12

$$\lambda = 1.70 - 0.54 \log(\text{PI}) \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ ( $\lambda$ ) กับ Plasticity index  
ที่มา: Bjerrum (1972)

Morris and William (1994) เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ ( $\lambda$ ) กับ Plasticity index (PI) และ Liquid limit (LL) ได้ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$\lambda = 1.18 e^{-0.08(PI)} + 0.57 \quad PI > 5 \quad (2.4)$$

$$\lambda = 7.01 e^{-0.08(LL)} + 0.57 \quad PI > 5 \quad (2.5)$$

2) การทดสอบหาค่า Shear strength parameter ในห้องปฏิบัติการ โดย การทดสอบ Unconfined compression test (UC-Test) เป็นการหาค่ากำลังรับแรงอัดของดินเหนียวอย่างง่าย โดยไม่มีแรงด้านข้างมากระทำ โดยมีแต่แรงในแนวตั้งเท่านั้น การกดตัวอย่างดินเหนียวรูปทรงกระบอกทางด้านแนวตั้ง และวัดค่าแรงโดยใช้ proving ring ซึ่งค่าที่ได้จะอยู่ในรูปกำลังรับแรงอัดสูงสุดของดินเหนียว (Unconfined compressive strength,  $q_u$ ) และสามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) ได้



รูปที่ 2.13 เครื่องมือทดสอบ Unconfined compression test

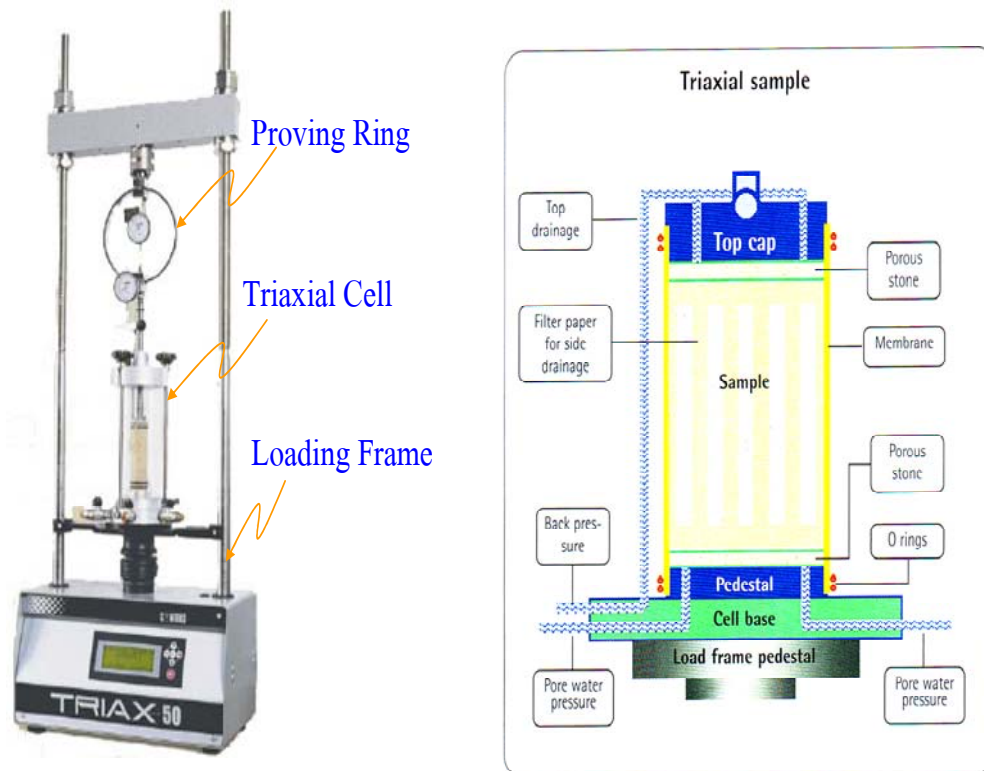
ที่มา: <http://www.thaipilingrig.co.th/unconfined.html>

3) การทดสอบหาค่า Shear strength parameter ในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) เป็นวิธีทดสอบเพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่นิยมมากในห้องปฏิบัติการ เพราะสามารถปรับสภาพของดินให้ใกล้เคียงกับดินในธรรมชาติ เหมาะสำหรับการทดสอบดินเหนียว โดยมีวิธีการกึ่งดินให้เป็นรูปทรงกระบอกโดยให้มีอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เท่า แล้วหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและกั้นน้ำในกล่องทรงกระบอกซึมเข้าไปในตัวอย่างขณะทำการทดสอบ ที่ปลายทั้ง 2 ข้างจะมี porous stone เพื่อให้ น้ำในมวลดินมีโอกาสระบายออก และเพื่อให้สามารถวัดความดันของน้ำได้ด้วย จากนั้นนำไปวางลงในกล่องทรงกระบอกใส เติมน้ำพร้อมอัดความดันเข้าไปด้วย เพื่อให้ดินตัวอย่างที่จะทดสอบอยู่ในสถานะที่ใกล้เคียงกับธรรมชาติ

การทดสอบแรงอัดสามแกน สามารถทดลองได้ทั้งกรณีที่ยอมให้น้ำในดินสามารถระบายออกไปได้ (drained) และไม่ยอมให้น้ำในดินระบายออกไป (undrained) ซึ่งการวัดความดันน้ำจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Pressure transducer

การทดสอบแรงอัดสามแกนนี้ มีการทดสอบอยู่ด้วยกัน 3 วิธี คือ การทดสอบแบบไม่กดอัดตัวอย่างและให้แรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำออก (UU triaxial test) ผลของการทดสอบ

นี้จะได้ค่าแรงยึดเหนี่ยวของมวลดิน วิธีที่ 2 คือ การทดสอบแบบกดอัดตัวอย่างและให้แรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำออก(CU triaxial test) ซึ่งการทดสอบนี้จะต้องทำการกดอัดตัวอย่างทดสอบด้วยความดันเพื่อให้ตัวอย่างทรุดตัวและทำการเฉือนตัวอย่างวัดค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน ซึ่งได้ค่าค่าแรงยึดเหนี่ยวของมวลดินและมุมเสียดทานภายในของดิน ซึ่งการทดสอบแบบนี้ให้ค่าทั้งความดันรวมและความดันประสิทธิผล วิธีที่ 3 คือ การทดสอบแบบกดอัดตัวอย่างและให้แรงเฉือนแบบระบายน้ำออก(CD triaxial test) การทดสอบนี้ใช้เวลาในการทดสอบที่นานและค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับวิธี CU triaxial test วิธีนี้จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยม



รูปที่ 2.14 เครื่องมือทดสอบ Triaxial Test

ที่มา : [www.gf.su.ac.yu/%7Ewus/wus07/web4/triaxial.html](http://www.gf.su.ac.yu/%7Ewus/wus07/web4/triaxial.html)

ระนาบแรงเฉือน (Shear plane) ที่วิบัติคือ เส้นที่ลากสัมผัสวงกลมมอร์ (Mohr) ซึ่งเส้นนี้คือเส้นกำลังของมอร์ – คูลอมป์ (Mohr – Coulomb strength envelope) ซึ่งมีสมการดังสมการที่ 2.6

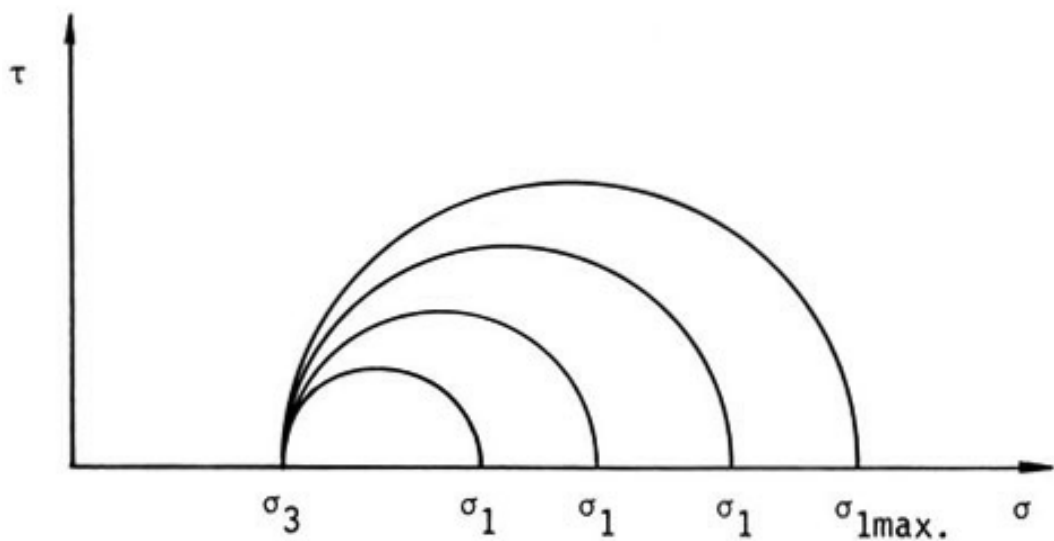
$$\tau = C + \sigma \cdot \tan \phi \quad (2.6)$$

เมื่อ

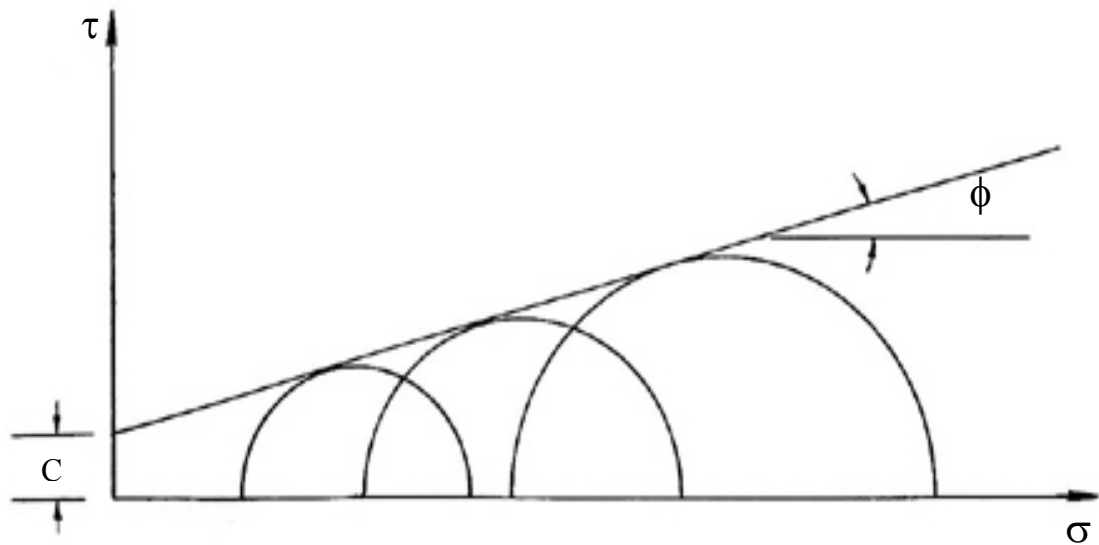
$C$  = ค่าตัดแกนเชื่อมแน่น (Cohesion intercept)

$\phi$  = มุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle)

คือมุมของระนาบแรงเฉือน (Shear plane) ที่ดินวิบัติตามทฤษฎี ค่า  $\sigma_1$  และ  $\sigma_3$  สามารถทดสอบได้ด้วยวิธีแรงอัด 3 แกน โดยกำหนดค่า และกดตัวอย่างให้วิบัติด้วย และทำการทดสอบที่ค่า มีค่าต่าง ๆ กัน เมื่อพิจารณาสภาพของความดันในขณะที่เกิดการเคลื่อนพังจะเห็นว่าความดันหรือแรงดันทั้งหมดเป็น Principal stress หน่วยแรงดันที่มีค่ามาก (แนวตั้ง) เรียกว่า Major principal stress ( $\sigma_1$ ) และที่น้อยกว่า (แนวราบ) เรียกว่า Minor principal stress ( $\sigma_3$ ) หน่วยแรง 2 ค่านี้สามารถนำมาพล็อตเป็น Mohr's diagram ได้ดังแสดงในรูปด้านล่างก็จะสามารถลากเส้นสัมผัสวงกลมมอร์เหล่านั้นโดยเฉลี่ย และสามารถหาค่า  $C$  และ  $\phi$  ได้โดยแสดงดังรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 Mohr's circle จาก Triaxial test



รูปที่ 2.16 Mohr's circle จากการทดสอบ Triaxial 3 ตัวอย่าง

การแสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์แรงเฉือน,  $\tau$  และแรงอัด  $\sigma$  ด้วยการเขียนวงกลมมอร์ (Mohr) จะไม่สามารถสื่อความถึงประวัติของดิน Lambe (1979) จึงได้เสนอวิธีแสดงผลการทดสอบแรงอัด 3 แกนในรูปแบบทางเดินหน่วยแรง (Stress Path)

ทางเดินของหน่วยแรง (Stress path) คือทางเดินของจุดยอดของวงกลมมอร์ในสภาพความดันรวม (Total stress) ที่ทำการทดสอบ  $\Delta\sigma_3 = 0$  (คงที่),  $\Delta\sigma_3 > 0$  สามารถพิสูจน์ได้ว่าทำมุม 45 องศาเซลเซียส กับแกนนอน เพื่อความสะดวกจึงตั้งแกนขึ้นมาใหม่โดยที่

$$\text{แกน } y : q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.7)$$

$$\text{แกน } x : p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (2.8)$$

และในสภาพประสิทธิผล ( Effective stress ) ที่มีการวัดความดันน้ำ (Pore pressure,  $u$ ) เมื่อ

$$\sigma' = \sigma - u$$

และ

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u$$

หรือ

$$q' = q = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (2.10)$$

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (2.11)$$

จากคุณสมบัติของดินเหนียว ดินอัดตัวตามปกติ, NCC : ค่าความดันน้ำ,  $u$  มีค่าสูง หรืออาจเป็น + (บวก) ดินอัดตัวเกิน, QCC : ค่าความดันน้ำ,  $u$  มีค่าต่ำ หรืออาจเป็น - (ลบ) เมื่อเขียนกราฟผลการอัด 3 แกนทางเดินหน่วยแรง จะมีลักษณะแสดงดิน NCC, ดิน OOC แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 2.17

ความสัมพันธ์ค่าคงที่ระหว่างวงกลมมอร์ (Mohr) และทางเดินหน่วยแรง (Stress Path) ค่าเส้นกำลัง (Strength envelope) ของดินของเส้นที่ลากสัมผัสวงกลมมอร์ (Mohr) เฉลี่ย (จากผลการทดสอบ 2-4 ตัวอย่าง) ส่วนเส้นแสดงกำลัง (Strength envelope) ของทางเดินหน่วยแรง (Stress path) เป็นเส้นลากผ่านจุดยอดของวงกลมมอร์ (Mohr) การนำไปใช้จึง ต้องทำการแปลงค่า

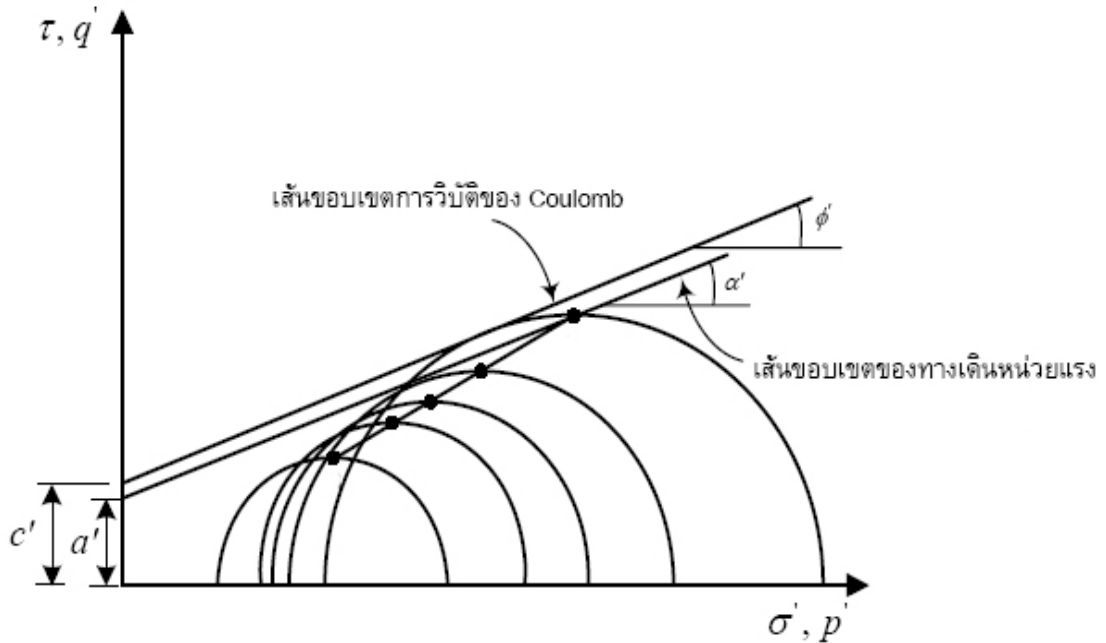
$$\phi' = \sin^{-1} \tan \alpha' \quad (2.12)$$

$$c' = \frac{a'}{\cos \alpha'} \quad (2.13)$$

โดยที่  $\alpha'$  คือ ค่ามุมลาดประสิทธิผล

$a'$  คือ ค่าตัดแกนตั้งประสิทธิผล





รูปที่ 2.17 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Mohr' circle กับ Stress path

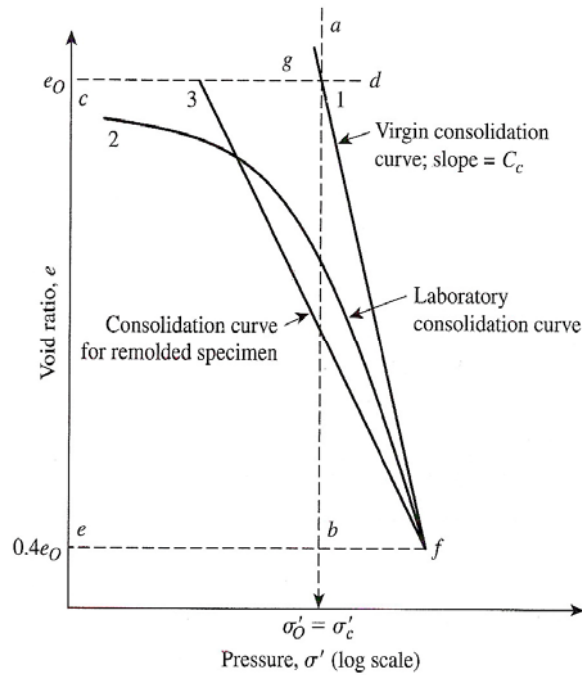
2.6.2 คุณสมบัติการยุบตัว (Compressibility)

ค่าคุณสมบัติการยุบตัวของดินได้มาจากการทดสอบ Consolidation test (ASTM D 2435-80) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้พิจารณาการยุบตัวของดินมีดังนี้

Compression index เป็นค่าความชันของกราฟระหว่าง Void ratio กับ  $\log$  Effective overburden pressure สำหรับดิน Normally consolidated clay แสดงได้ดังรูปที่ 2.18 ค่า Compression index สามารถหาได้จากสมการที่ 2.17

$$C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma'_{vo} \tag{2.17}$$

- โดยที่  $C_c$  คือ Compression index
- $\Delta e$  คือ ผลต่างของค่า Void ratio ระหว่างจุดสองจุด
- $\Delta \log \sigma'_{vo}$  คือ ผลต่างของค่า Effective overburden pressure ระหว่างจุดสองจุดใน Scale  $\log$

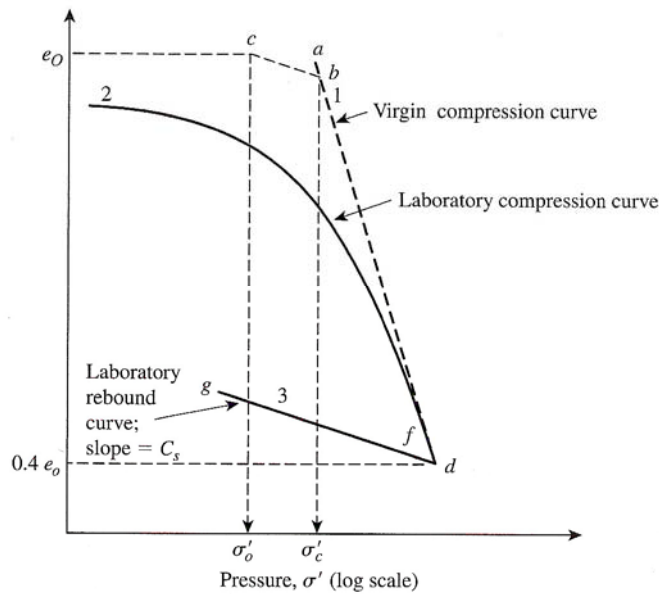


รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Void ratio กับ Effective overburden pressure สำหรับ Normally consolidated clay  
ที่มา: Das (1998)

Recompression index เป็นค่าความชันของกราฟระหว่าง Void ratio กับ log Effecitve overburden Pressure สำหรับดิน Overconsolidated clay ช่วงก่อนถึง Maximum past Pressure แสดงได้ดังรูปที่ 2.19 ค่า Recompression index สามารถหาได้จากสมการที่ 2.18

$$C_r = \Delta e / \Delta \log \sigma'_{vo} \tag{2.18}$$

- โดยที่  $C_r$  คือ Recompression index
- $\Delta e$  คือ ผลต่างของค่า Void Ratio ระหว่างจุดสองจุด
- $\Delta \log \sigma'_{vo}$  คือ ผลต่างของค่า Effective overburden pressure ระหว่างจุดสองจุดใน Scale log



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Void ratio กับ Effective overburden pressure สำหรับ Over consolidated clay

ที่มา: Das (1998)

โดยทั่วไปแล้ว Recompression index ( $C_r$ ) จะมีค่าประมาณ 1/4 - 1/5 ของ Compression index ซึ่งค่า  $C_r / C_c$  สำหรับดินชนิดต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่า  $C_r / C_c$  จำแนกตามชนิดของดิน

ชนิดของดิน	$C_r / C_c$
Boston Blue Clay	0.24-0.33
Chicago Clay	0.15-0.30
New Orleans Clay	0.15-0.28
St. Lawrence Clay	0.05-0.10

ที่มา: รสสุคนธ์ (2548)

Compression ratio คือ อัตราส่วนระหว่างค่า Compression index กับค่าอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (Initial void ratio) สำหรับดิน Normally consolidated clay โดยค่า Compression ratio สามารถหาได้จากสมการที่ 2.19

$$CR = C_c / 1 + e_0 \quad (2.19)$$

โดยที่ CR คือ Compression ratio  
 $C_c$  คือ Compression index  
 $e_0$  คือ Initial void ratio

Recompression ratio คืออัตราส่วนระหว่างค่า Recompression index กับค่าอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (Initial void ratio) สำหรับดิน Overconsolidated clay pressure โดยที่ค่า Recompression ratio สามารถหาได้จากสมการที่ 2.20

$$RR = C_r / 1 + e_0 \quad (2.20)$$

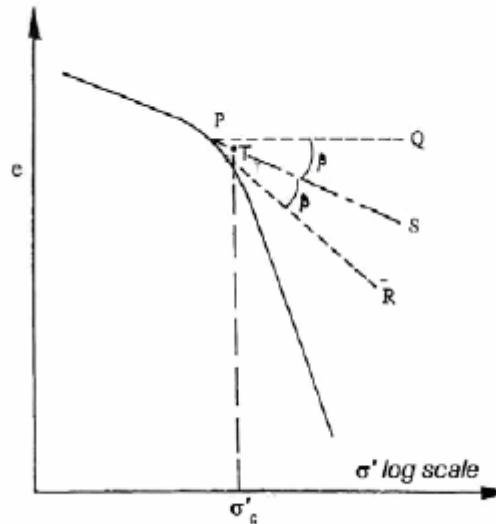
โดยที่ RR คือ Compression ratio  
 $C_r$  คือ Compression index  
 $e_0$  คือ Initial void ratio

หน่วยแรงสูงสุดที่เคยกดทับในอดีต (Preconsolidation pressure or Maximum past Pressure)  $\sigma'_{v \max}$  หรือ  $\sigma'_c$  คือหน่วยแรงมากที่สุดที่ดินนั้นถูกกระทำมาก่อนในอดีต สำหรับดินที่มีการทับถมกันตามปกติเรียกว่า Normally consolidated deposit หน่วยแรงสูงสุดจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติ ( $\sigma'_{vo}$ ) ถ้าหน่วยแรงสูงสุดในอดีตมีค่ามากกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติ ดินนั้นเรียกว่า Over consolidated soil หน่วยแรงสูงสุดที่เคยกดทับในอดีตจะแสดงให้เห็นถึงหน่วยแรงมากที่สุดที่เคยกระทำต่อมวลดินในอดีต

วิธีการทดสอบหาค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เคยกดทับดินในอดีต (Maximum past pressure) โดยวิธีของ Casagrande (1936) แสดงได้ดังรูปที่ โดยมีขั้นตอนดังนี้

เริ่มจากจุด P หรือจุดที่มีความโค้งสูงสุด และลากเส้นในแนวราบ PQ แล้วเขียนเส้นสัมผัสผ่านจุด P ได้เส้น PR ทำการลากเส้น PS ให้แบ่งครึ่งมุม QPR โดยเส้น PS ดังรูป และ

ลากเส้นความชันของกราฟไปตัดกับเส้น PS ที่จุด T ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลที่สามารถอ่านค่าได้จากจุด T คือ ค่า  $\sigma'_{mp}$



รูปที่ 2.20 การหาค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เคยกดทับในอดีต (Maximum past pressure)  
ที่มา: Casagrande (1963)

ผลจากการหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่เคยกดทับในอดีต สามารถบอกถึงประวัติการรับแรง (Stress history) ของดินซึ่งแสดงโดยค่า Over consolidation ratio ถ้าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่เคยกดทับในอดีตมีค่ามากกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลที่กดทับในปัจจุบัน แสดงว่าดินอยู่ในสภาพอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidated) และมีค่า OCR มากกว่า 1.0 ซึ่งค่า OCR ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.0 และดินจัดอยู่ในสภาวะอัดแน่นปกติ (Normally consolidated)

## 2.7 Critical State Parameter

ผลการทดสอบ Consolidated undrained triaxial test ซึ่งสามารถหาค่า Cohesion ค่า Friction angle และค่า Parameter  $p - q$  การทดสอบดินตัวอย่างวิธีนี้สามารถหาค่าตัวแปรได้อีกอย่างคือ ตัวแปรในรูปแบบของ Critical state หรือที่เรียกว่า Critical state parameter

### 2.7.1 Critical State Concept

สาระสำคัญของปฐพีกลศาสตร์คือช่วงจุดสูงสุด (Ultimate) และช่วงสถานะวิกฤติ (Critical state) ของดิน โดยแนวคิดของ Critical state นี้ ได้ถูกเสนอโดย Atkinson and Bransby (1978) และ Muir Wood (1991) สถานะวิกฤติ คือ สถานะขอบเขตที่อ้างถึง ความเครียดที่มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์หรือที่จุดวิบัติ (Failure) และการไหลอย่างรวดเร็วของน้ำในมวลดิน ความสัมพันธ์กันระหว่างความเค้นเฉือน ความเค้นตั้งฉาก และอัตราส่วนช่องว่างของดินที่สถานะวิกฤติซึ่งแสดงในรูปที่ 2.21

รูปที่ 2.21 (a) และ (b) แสดงถึง Critical state line (CSL) กราฟนี้แสดงถึงความสัมพันธ์พิเศษระหว่าง ระหว่างความเค้นเฉือน ความเค้นตั้งฉาก และอัตราส่วนช่องว่าง โดยที่ รูปที่ 2.21 (c) คล้ายกับรูปที่ รูปที่ 2.21 (b) แต่แตกต่างกันตรงที่ ความเค้นตั้งฉากนั้นอยู่ในรูปของ Log สเกล โดยรูปที่ 2.21 (c) คือ One – dimensional normal compression line ที่ (Subscript f) แสดงถึงค่า Stress และ ค่าอัตราส่วนช่องว่างของมวลดินที่จุดสูงสุดที่สถานะวิกฤติ โดยที่ Critical state line นั้นมีความลาดเอียงของเส้นคล้ายกับ ค่า  $C_c$  (Compression index) จาก Critical state line ได้สมการคือ

$$\tau'_f = \sigma'_f \tan \phi'_c \quad (2.21)$$

$$e_f = e_{\Gamma} - C_c \log \sigma'_f \quad (2.22)$$

โดยที่  $\tau'_f$  = Shear stress at failure

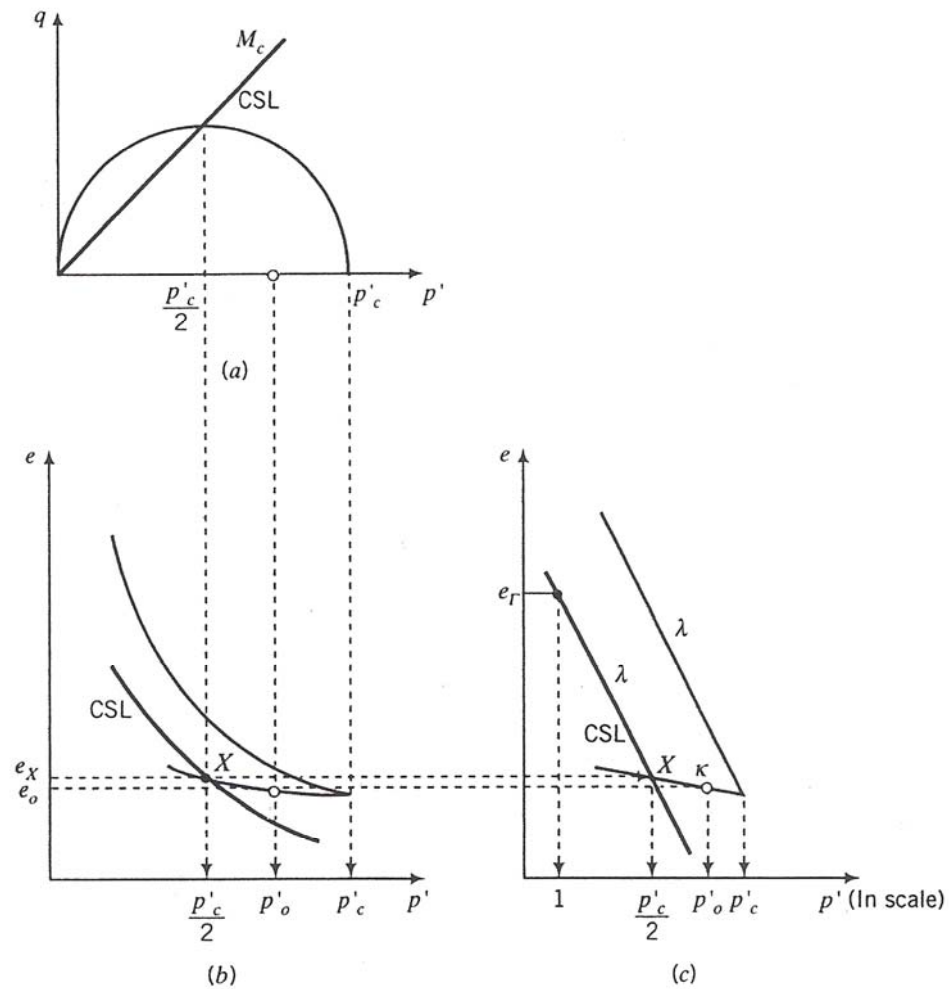
$\sigma'_f$  = Normal stress at failure

$\phi'_c$  = Critical state friction angel

$e_f$  = Voids ratio of soil on critical state line at normal stress at failure

$e_{\Gamma}$  = Voids ratio of soil on critical state line at  $p' = 0.1 \text{ t/m}^2$

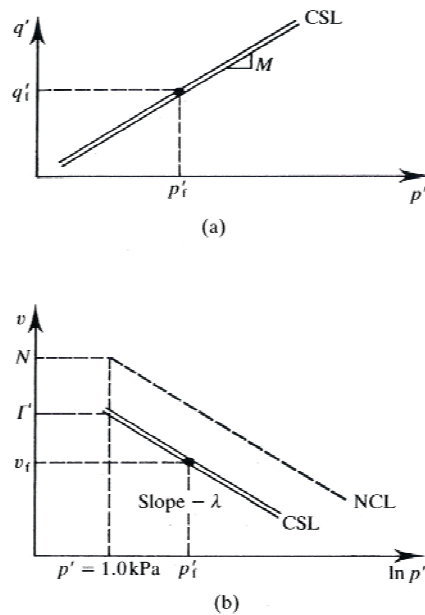
สมการที่ 2.21 ก็คือสมการของ Mohr – Coulomb โดยที่ Critical state line ที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.21 (c) ค่าตัวแปร  $e_{\Gamma}$  คือตำแหน่งของ Critical state line และค่าตัวแปร  $e_0$  คือตำแหน่งของ Normal compression line (NCL)



รูปที่ 2.21 Critical state of soil

### 2.7.2 Critical State Strength of Soil Measured in Triaxial Test

การควบคุมการทดสอบการรับแรงเฉือนของตัวอย่างที่ทำการทดสอบการรับแรงเฉือนในอุปกรณ์ทดสอบการรับแรงเฉือนต่างๆ เช่น การทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear test) การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test) และการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) โดยการทดสอบแรงอัดสามแกนสามารถวัดแรงดันน้ำได้ โดยการวัดความดันน้ำสามารถทำให้เกิดการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) ในรูปแบบของความเค้นประสิทธิผล (Effective stress) และการหาค่าตัวแปร Critical state strength นั้น การวิเคราะห์ต่างๆ ต้องมีความสัมพันธ์กับแรงดันน้ำ



รูปที่ 2.22 Critical state line for triaxial tests

Critical state line ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.22 ได้มาจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ หรือแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ รูปที่ 2.21 ซึ่งแสดงผลจากการทดสอบแรงเฉือน โดย Critical state line ในรูปที่ 2.22 สามารถวิเคราะห์เป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$q'_f = M p'_f \quad (2.23)$$

$$v_f = \Gamma - \lambda \ln p'_f \quad (2.24)$$

โดยที่  $q'_f$  = Parameter q of stress path at failure

$p'_f$  = Parameter p of stress path at failure

M = Slope of critical state line project to  $p' : q'$  plane

$v_f$  = Specific volume at failure

$\Gamma$  = Specific volume of soil on critical state line at  $p' = 0.1 \text{ t/m}^2$

$\lambda$  = Slope of critical state line

โดยที่ Subscript f นั้นแสดงถึงค่าของตัวแปรอยู่ในสถานะวิกฤติ เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสมการที่ 2.23 กับสมการที่ 2.21 อัตราส่วนวิกฤติ M เป็นสิ่งที่สอดคล้องกับ ค่า



มุมเสียดทานวิกฤติ  $\phi'_c$  จากรูปที่ 2.22 (b) มุมลาดของ Critical state line และ Normal state line คือค่า  $\lambda$  โดยค่ามุมลาดเอียงนี้ระหว่างสถานะทั้งสองมีค่าที่เท่ากัน โดยค่าของ Critical state parameters ของดินจากแหล่งต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 Critical state parameter ของดินจากแหล่งต่างๆ

Soil	Critical State Parameter			
	M	$\nu$	$\lambda$	$\Gamma$
London Clay	0.89	2.60	0.16	2.45
Kaolin Clay	1.00	2.70	0.19	3.14
Weald Clay	0.95	2.55	0.09	1.88
Glacial till	1.18	2.65	0.09	1.81
Klein Belt Ton	0.85	2.65	0.36	3.99
Wiener Tegel V	1.01	2.70	0.12	2.13

ที่มา: Atkinson, Schofield and Wroth (1999)

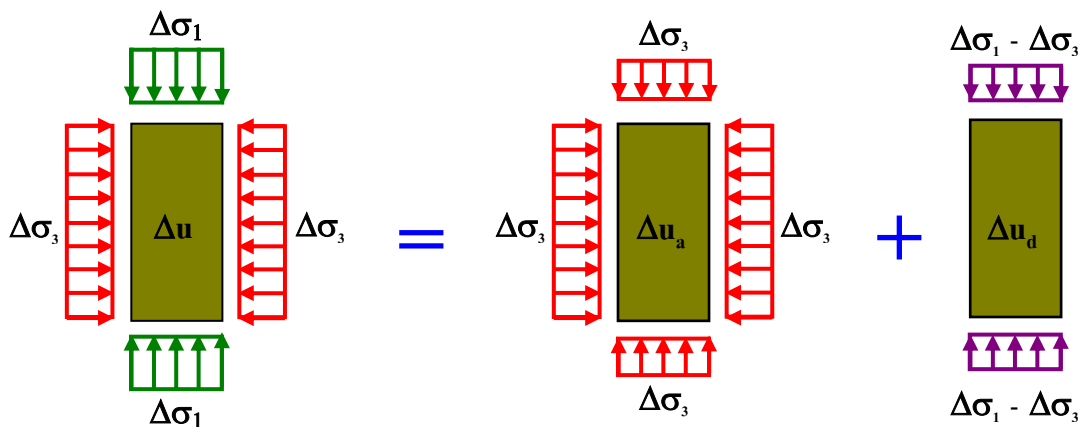
## 2.8 พารามิเตอร์ของแรงดันน้ำ (Pore pressure Parameters)

ความดันน้ำหรือแรงดันน้ำ คือความดันของน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างหรือรอบเม็ดดิน ค่าการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้ความดันของน้ำในมวลดินเปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับน้ำหนักบรรทุกทุกกดทับ สามารถเรียกได้ว่า ค่าของแรงดันน้ำ

ค่าของแรงดันน้ำสามารถอธิบายได้ในระบบความเค้นของการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) โดยค่าแรงดันน้ำจากการทดสอบแรงอัดสามแกนเรียกว่า ค่าพารามิเตอร์ของแรงดันน้ำ A และ B (Skempton, 1954)

### 2.8.1 ค่าพารามิเตอร์ของแรงดันน้ำ A และ B

ในการทดลอง Triaxial compression test จะเห็นว่าตัวอย่างดินถูกอัดด้วยความดันรอบข้าง ( $\Delta\sigma_3$ ) คงที่ และถูกกดด้วยความเค้นในแนวตั้ง คือ  $\Delta\sigma_1$  ซึ่งจะทำให้มีน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเกิดแรงดันน้ำเท่ากับ  $\Delta u$



รูปที่ 2.23 Pore pressure in triaxial test

จากรูปที่ 2.23 ซึ่ง  $\Delta u$  จะสามารถแบ่งได้ว่าเป็นเกิดจาก  $\Delta u_a$  และ  $\Delta u_d$  โดย  $\Delta u_a$  คือแรงดันน้ำซึ่งเกิดจาก  $\Delta\sigma_3$  (All around pressure) และ  $\Delta u_d$  คือแรงดันน้ำที่เกิดจาก  $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$  (Deviator stress)

โดยถ้าให้แรงดันน้ำ เป็นสัดส่วนกับความเค้นที่กระทำ จะได้

$$\Delta u_a = B \cdot \Delta\sigma_3 \quad (2.25)$$

$$\Delta u_d = A \cdot (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad (2.26)$$

ถ้าให้

$$\Delta u = \Delta u_a + \Delta u_d \quad (2.27)$$

ดังนั้น

$$\Delta u = B \cdot \Delta\sigma_3 + A \cdot (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad (2.28)$$

หรือ

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (2.29)$$

เมื่อ

A และ B = พารามิเตอร์แรงดันน้ำ

ค่า Pore pressure parameter A จะสามารถหาได้จากการเพิ่มของแรงดันน้ำเมื่อตัวอย่างดินถูกกดด้วยความเค้นเบี่ยงเบน โดยที่ Pore pressure parameter A ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และขนาดของแรงกดอัดและโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง -0.50 ถึง +1.50 ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ค่า Pore pressure parameter B จะสามารถหาได้จากการเพิ่มของแรงดันน้ำ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความดันรอบข้าง มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่

Pore pressure parameter B = 0 กรณีดินแห้ง

Pore pressure parameter B = 1 กรณีดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

## 2.9 คุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวจากแหล่งต่างๆ

คุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนนั้น มีผู้วิจัยหลายท่าน ได้ทำการทดสอบและรวบรวมไว้จากแหล่งต่างๆ เช่น ดินเหนียวกรุงเทพ ดินเหนียวสิงคโปร์ ดินเหนียวลอนดอน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 ค่าอัตราส่วนของค่า Modulus of elasticity กับค่า Undrained shear strength ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 และค่าค่า Parameter A at failure ของดินชนิดต่าง ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติต่างๆของดินเหนียวอ่อนแหล่งต่างๆ

Properties	Bangkok Clay	Singapore Clay	London Clay
Liquid Limit, LL (%)	75 – 90	75 – 115	66 – 100
Plastic Limit, PL (%)	31 – 36	25 – 38	22 – 34
Plasticity Index, PI (%)	47 – 56	50 – 77	36 – 55
Natural Water Content, %	52 – 75	60 - 110	42 – 72
Unit Weight, t/m. <sup>3</sup>	1.60 – 1.90	1.65 – 1.90	1.70 – 2.00
Specific Gravity, G <sub>s</sub>	2.50 – 2.75	2.62 – 2.78	2.65 – 2.70
Undrained Shear Strength, t/m <sup>2</sup>	1.20 – 4.60	1.05 – 3.50	1.50 – 4.00
Modulus of Elasticity, E, t/m. <sup>2</sup>	340 - 760	250 - 650	1000 - 3600
Compression Index, C <sub>c</sub>	0.59 – 1.15	0.7 – 1.3	-
Recompression Index, C <sub>r</sub>	0.08 – 0.15	-	-
Coefficient of Consolidation, C <sub>v</sub> , m. <sup>2</sup> /year	0.34 – 1.47	0.50 – 2.30	0.20 – 2.00
Maximum Past Pressure, $\sigma'_{pm}$ , t/m <sup>2</sup>	1.02 – 18.15	2.54 – 18.35	-
OCR	0.60 – 2.73	1.30 – 1.45	0.80 – 1.55
Internal Friction Angle, $\phi'$ , Degree	15 – 24	20 – 25	17 - 23
Reference	รสสุคนธ์ (2548)	Lee (2005)	Bell (2000)

ตารางที่ 2.5 อัตราส่วนของค่า Undrained modulus of elasticity กับค่า Undrained shear strength

Site	E <sub>U</sub> /S <sub>U</sub>	Reference
Oslo	150	Lambe (1973)
Boston	240	Lambe (1973)
Shell haven	220	Bjerrum (1964)
South Portland	400	Liu and Dugan (1974)

ตารางที่ 2.6 ค่า Parameter A at failure ของดินชนิดต่าง

Type of Clay	$A_f$
Highly Sensitive Clay	+0.75 to +1.50
Normally Consolidation Clay	+0.50 to +1.00
Compacted Sandy Clay	+0.25 to +0.75
Lightly Overconsolidated Clay	0 to +0.50
Compacted Clay-Gravel	-0.25 to +0.25
Heavily Overconsolidated Clay	-0.50 to 0

ที่มา : Craig (1997)

## 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินเหนียว

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน ได้มีผู้วิจัยไว้หลายท่าน โดยแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติดัชนี (Index properties) และคุณสมบัติทางกำลัง (Strength properties) คุณสมบัติทางการยุบอัดตัว (Compressibility characteristics) คุณสมบัติที่แสดงประวัติการกำเนิดของดิน (Stress history) ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆได้ดังนี้

### 2.10.1 Plasticity Index กับ Liquid Limit

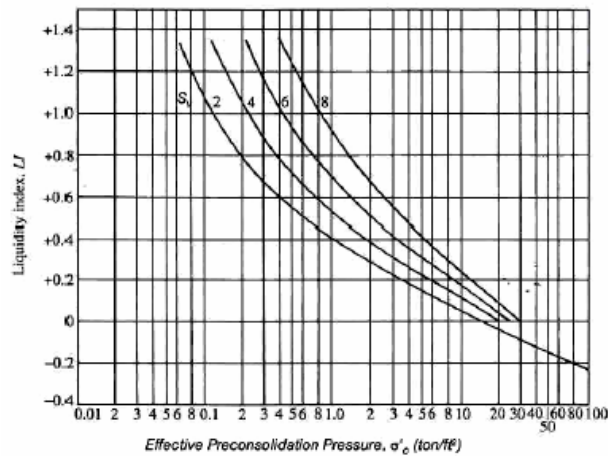
เป็นความสัมพันธ์ที่มีความสำคัญเนื่องจาก Plasticity chart ใช้ในการจำแนกดินเม็ดละเอียดในวิธี Unified soil classification system (USCS) ความสัมพันธ์ดังกล่าวซึ่งวิเคราะห์จากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีผู้วิจัยไว้หลายท่านดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity index กับ Liquid limit สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ

สมการถดถอย	R <sup>2</sup>	ชนิดของดิน	ผู้วิจัย
PI = 0.74LL-9.21	-	กรุงเทพฯ (Soft - Medium Clay)	Muktabhant et al. (1966)
PI = 0.805LL-11.48	-	เขตรังสิต (Soft - Medium Stiff Clay)	Dumn Muh (1977)
PI = 0.745LL-9.89	0.968	เขตปทุมวัน(All Clay)	Tongyagate (1978)
PI = 0.74LL-11.47	0.934	กรุงเทพฯ (Soft Clay)	Kerdsuwan (1984)
PI = 0.753LL-12.26	0.934	กรุงเทพฯ (Soft Clay)	กวีวงษ์ (2530)

### 2.10.2 Liquidity Index กับ Preconsolidation Pressure และ Sensitivity Index

ความสัมพันธ์ดังกล่าววิเคราะห์โดย Kulhaway and Mayne (1990) ซึ่งได้เสนอความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.24 โดยพบว่าค่า  $\sigma'_{mp}$  เพิ่มขึ้นเมื่อ LI ลดลง



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity index กับ Maximum past pressure และ Sensitivity index

ที่มา: Kulhaway and Mayne (1990)

### 2.10.3 Compression Index และ Recompression Index กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression index และ Recompression index กับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ Natural water content ( $W_n$ ), Liquid limit (LL), Plastic limit (PL), Plasticity index (PI), Specific gravity (GS) และ Initial void ratio ( $e_o$ ) มีผู้วิจัยไว้หลายท่านแสดงได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression index และ Recompression index กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ

สมการถดถอย	$R^2$	ชนิดของดิน	ผู้วิจัย
$C_c = -0.09 + 0.009 LL$	-	All Clays	Skempton (1944)
$C_c = 0.20 + 0.008 W_n$	0.770	Soft Clay	Adikari (1977)
$C_c = 0.21 + 0.008 LL$	0.700		
$C_c = 0.22 + 0.29 e_o$	0.770		
$C_c = -0.014 + 0.010 W_n$	0.870	All Clays	
$C_c = -0.015 + 0.38 e_o$	0.870		
$C_c = -0.28 + 0.012 LL$	0.760		
$C_c = -0.59 + 0.04PL$	-		
$C_c = 0.20 + 0.008 W_n$	-	Chicago Clay	Azzouz and All (1976)
$C_c = 0.0083 + 0.208 e_o$	-	Brazilian Clay	
$C_c = -0.0414 + 0.0046 LL$	-		
$C_c = 0.0002 W_n^2 + 0.0067 W_n - 0.014$	-	All Clays	Muktabhant et al. (1977)
$C_c = -0.091 + 0.013 W_n$	0.768	All Clays	ศรัญญูฤทธิ์ (2520)
$C_c = -0.1593 + 0.514 e_o$	0.810		
$C_c = -0.005 + 0.01 LL$	-		
$C_c = -0.965 + 0.029 W_n$	0.890	All Clays	Tonyagate (1978)
$C_c = -0.847 + 0.024 LL$	0.680		
$C_c = -0.941 + 1.057 e_o$	0.880		

ตารางที่ 2.8 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression index และ Recompression index กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

สมการถดถอย	R <sup>2</sup>	ชนิดของดิน	ผู้วิจัย
$C_c = 0.5 (PI/100) G_s$	-	All Clays	Wroth and Wood (1978)
$C_c = 0.1882 + 0.3097 e_o$	-	Soft Clay	Sivandran (1979)
$C_c = -0.5876 + 0.0217 W_n$	0.802	Soft Clay	Kerdsuwan (1984)
$C_c = -0.5906 + 0.8019 e_o$	0.811		
$C_c = 0.1029 + 0.0087 LL$	0.516		
$C_c = 0.2343 (LL/100) G_s$	-	All Clays	Nagaraj and Murthy (1985)
$C_c = 0.007 + 0.011 W_n$	0.702	Soft – Medium Clay	กวีวงษ์ (2530)
$C_c = -0.100 + 0.464 e_o$	0.735		
$C_c = 0.6402 + 0.0202 W_n$	0.702	ม.เกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ Soft Clay	สุพัฒน์ (2530)
$C_c = 0.6554 + 0.7549 e_o$	0.735		
$C_c = 0.1486 + 0.0090 LL$	-		
$C_c = -1.4148 + 0.0326 LL$	-	Verginia Clay	Martin et al. (1995)
$Cr = 0.00045 + 0.00535 LL$	-		
$Cr = 0.0463 (LL/100) G_s$	-	All Clays	Nagaraj and Murthy (1985)

#### 2.10.4 Compression Ratio กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression ratio กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ Natural water content ( $W_n$ ), Liquid limit (LL) และ Initial void ratio ( $e_o$ ) ซึ่งมีผู้วิจัยไว้หลายท่านแสดงได้ดังตารางที่ 2.9



ตารางที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression ratio กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ

สมการถดถอย	R <sup>2</sup>	ชนิดของดิน	ผู้วิจัย
CR = 0.0043 W <sub>n</sub> CR = 0.0045 LL	- -	Soft Marine Clay	Cox (1970)
CR = -0.037 + 0.00566 W <sub>n</sub> CR = -0.013 + 0.00463 LL	0.810 0.630	All Clays	Tonyagate (1978)
CR = 0.037 + 0.00566 W <sub>n</sub> CR = - 0.013 + 0.00463 LL	- -	Bangkok Clays	Balasubra and Branner (1981)
CR = -0.013 + 0.0047 W <sub>n</sub> CR = 0.0265 + 0.1788 e <sub>o</sub> CR = 0.123 + 0.002 LL	0.658 0.689 0.458	Soft Clay	Kerdsuwan (1984)
CR = 0.0421 + 0.0044 W <sub>n</sub> CR = 0.0467 + 0.1645 e <sub>o</sub> CR = 0.1264 + 0.002 LL	- - -	ม.เกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ Soft Clay	สุพัฒน์ (2530)

#### 2.10.5 Effective Preconsolidation Pressure กับ Undrained Shear Strength From FV-Test

ความสัมพันธ์ดังกล่าววิเคราะห์โดย Mayne and Mitchell (1988) ซึ่งได้เก็บรวบรวมข้อมูลของดินเหนียวที่ตกตะกอนตามธรรมชาติ (Normally consolidation) จำนวน 343 แห่ง มาทำการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้น ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบ Log-Log scale แสดงได้ดังสมการที่ 2.30 และรูปที่ 2.25

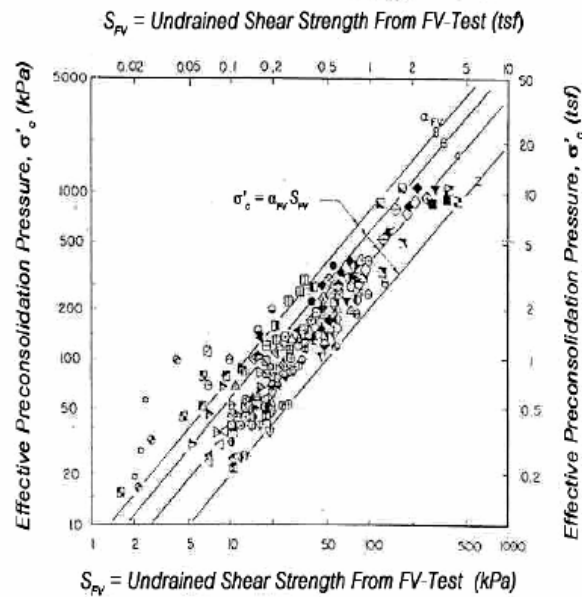
$$\sigma'_{mp} = \alpha_{FV} \cdot (S_{FV}) \quad (\text{kPa}) \quad (2.30)$$

โดยที่  $\sigma'_{mp}$  คือ แรงดันประสิทธิผลที่เคยกดทับในอดีต (Maximum past pressure)

$S_{FV}$  คือ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ Field vane shear test

$\alpha_{FV}$  คือ ค่าปรับแก้ความสัมพันธ์ (Correction factor) ระหว่าง  $\sigma'_c$  กับ  $S_{FV}$

ซึ่งจากรูปที่ 2.24 จะพบว่า  $\alpha_{FV}$  มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 4



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum past pressure กับค่า Undrained shear strength from FV-Test

ที่มา: Mayne and Mitchell (1988)

เมื่อวิเคราะห์โดยใช้วิธีการทางสถิติ เพื่อหารูปแบบของสมการที่ใช้แทนค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด โดยใช้รูปแบบความสัมพันธ์แบบ Power ได้ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation,  $r^2$ ) เท่ากับ 0.89 แสดงได้ดังสมการที่ 2.31

$$\sigma'_{mp} = 7.04 (S_{FV})^{0.83} \quad (\text{kPa}) \quad (2.31)$$

Yudhbir (1982) และ Mesri (1975) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum past pressure กับ Undrained shear strength from FV-Test ในรูปแบบ Linear ได้ดังสมการที่ 2.32

$$\sigma'_{mp} / (S_{FV}) = 4.5 - 6.0 \quad (2.32)$$

Jamiolkowski et al.(1985) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า Effective maximum past pressure กับ Undrained shear strength from FV-Test ในรูปแบบค่าคงที่ได้ดังสมการที่ 2.33

$$(S_{FV}) / \sigma'_{vo} = 0.23 \pm 0.004 \quad (2.33)$$

#### 2.10.6 Overconsolidation Ratio กับ Normalized Undrained Shear Strength จากFV-Test

Mayne and Mitchell (1988) ศึกษาความสัมพันธ์ข้างต้นจากตัวอย่างดินเหนียว 42 แห่ง โดยใช้ความสัมพันธ์แบบ Log – Log Scale ได้ดังสมการที่ 2.34 และรูปที่ 2.26

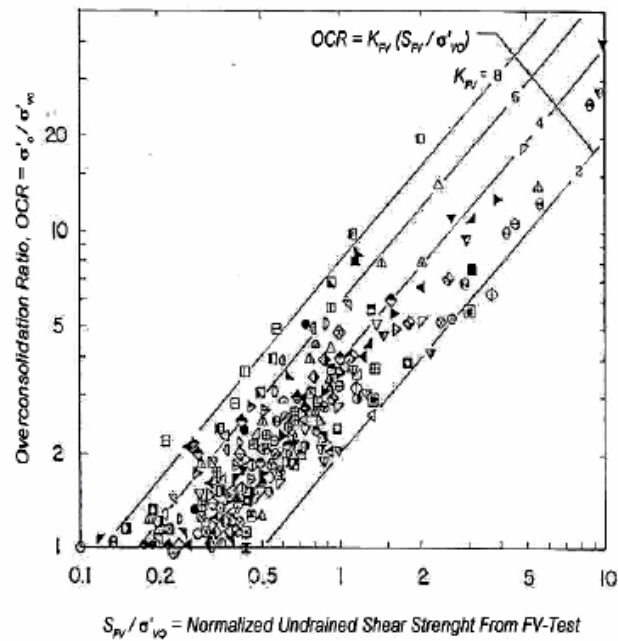
$$OCR = K_{FV} (S_{FV} / \sigma'_{vo}) \quad (2.34)$$

โดยที่ OCR คือ Overconsolidation ratio

$S_{FV}$  คือ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ Field vane shear test

$\sigma'_{vo}$  คือ แรงดันประสิทธิผลที่กดทับในปัจจุบัน (Effective overburden pressure)

$K_{FV}$  คือ ค่าปรับแก้ความสัมพันธ์ (Correction factor) ระหว่าง OCR กับ Normalized undrained shear strength from FV-Test



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Overconsolidation ratio กับค่า Normalized undrained shear strength from FV-Test

ที่มา: Mayne and Mitchell (1988)

เมื่อวิเคราะห์โดยใช้วิธีทางสถิติเพื่อหาสมการแสดงค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด โดยใช้ความสัมพันธ์แบบ Power ได้ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation,  $r$ ) เท่ากับ 0.80 แสดงดังสมการที่ 2.35

$$\text{OCR} = 3.55 (S_{\text{FV}} / \sigma'_{\text{v0}})^{0.66} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ 2.34 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.36

$$K_{\text{FV}} = \text{OCR} / (S_{\text{FV}} / \sigma'_{\text{v0}}) \quad (2.36)$$

Hansbo (1957) เสนอค่า  $K_{\text{FV}}$  ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้วิธีทางสถิติเพื่อหาสมการแสดงความสัมพันธ์เฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด สำหรับ Swedish clay ดังสมการที่ 2.37

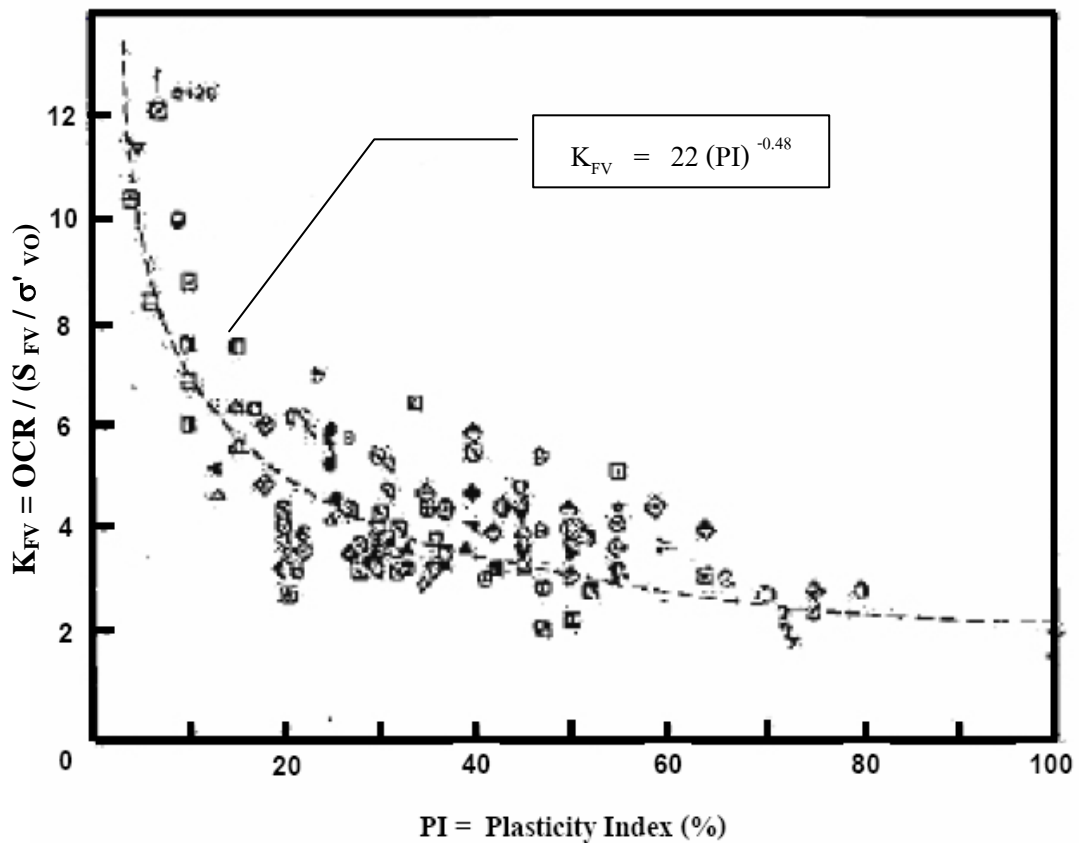
$$K_{\text{FV}} = 222 / W_n\% \quad (2.37)$$

Larsson (1980) เสนอค่า  $K_{FV}$  ซึ่งวิเคราะห์โดยวิธีทางสถิติเพื่อหาสมการแสดงความสัมพันธ์เฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมดสำหรับ Scandinavian clay ดังสมการที่ 2.38

$$K_{FV} = 1 / (0.08 + 0.0055 PI) \quad \text{โดยที่ } PI > 5 \quad (2.38)$$

Mayne and Mitchell (1988) เสนอค่า  $K_{FV}$  ซึ่งวิเคราะห์โดยวิธีทางสถิติเพื่อหาสมการแสดงความสัมพันธ์เฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด โดยใช้ความสัมพันธ์แบบ Power ได้ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation, r) เท่ากับ 0.75 ดังสมการที่ 2.39 และรูปที่ 2.27

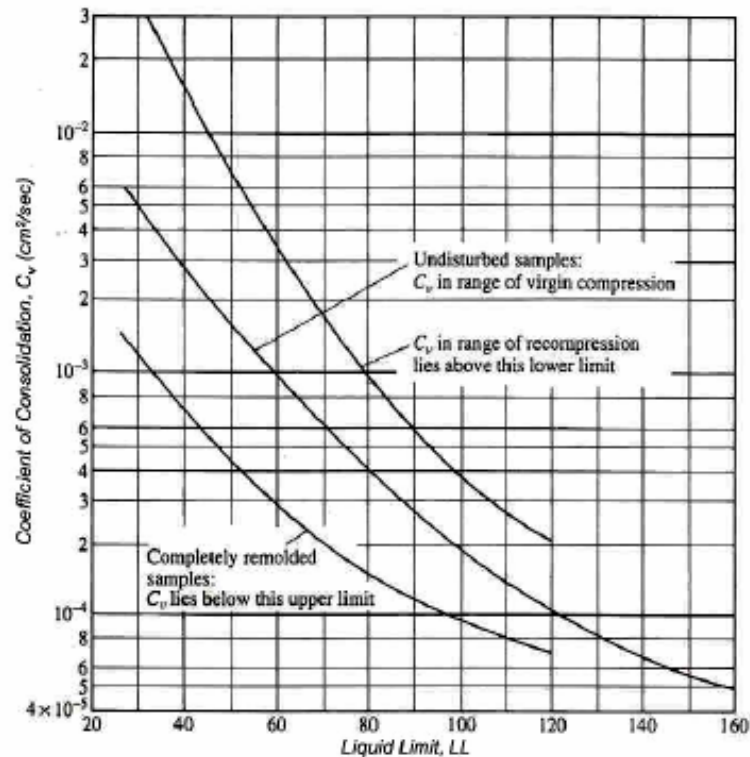
$$K_{FV} = 22 (PI)^{-0.48} \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ความสัมพันธ์  $K_{FV}$  กับค่า Plasticity index  
ที่มา: Mayne and Mitchell (1988)

### 2.10.7 Coefficient of Consolidation กับ Liquid Limit

การหาค่า Coefficient of consolidation ในสนามทำได้ยาก ดังนั้น U.S. Department of the Navy (1971) จึงได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  กับ LL ไว้ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of consolidation กับ Liquid limit

ที่มา: after U.S. Department of the Navy (1971)

### 2.11 สถิติที่ใช้ในงานวิจัย

ระเบียบวิธีทางสถิติ คือ กระบวนการในการเก็บรวบรวม จัดระเบียบ วิเคราะห์ แปลความหมายและนำเสนอข้อมูลในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่ายเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ในการตัดสินใจโดยอาศัยข้อมูลนั้นเป็นพื้นฐาน ระเบียบวิธีทางสถิติประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การวางแผนและเก็บรวบรวมข้อมูล หมายถึง กระบวนการและเทคนิคที่ใช้ในการแสวงหาข้อมูลที่ต้องการเพื่อจะนำไปดำเนินการตามหลักการของวิชาสถิติ

2. การจัดระเบียบข้อมูล หมายถึง การนำข้อมูลที่รวบรวมได้นั้นมาจัดระเบียบใหม่ให้เป็นกลุ่มเพื่อสะดวกแก่การวิเคราะห์หรือการนำเสนอข้อมูลนั้น และให้ผู้ที่สนใจสามารถเข้าใจคุณสมบัติและความหมายของข้อมูลนั้นๆ ได้อย่างสะดวก

3. การวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นนี้ข้อมูลที่ได้รับการจัดระเบียบแล้วจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติต่างๆ เพื่อสรุปหรือหาค่าของคุณสมบัติต่างๆ ของข้อมูลนั้นตามต้องการ

4. การแปลความหมายข้อมูล เป็นการนำข้อมูลที่วิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของสิ่งนั้นๆ แล้วนำมาแปลความหมายซึ่งจะทำให้เข้าใจยิ่งขึ้น

### 2.11.1 สถิติพื้นฐาน

ค่าสถิติพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ค่ากลางของข้อมูล (Measure of central tendency) และค่าการวัดการกระจายของข้อมูล (Measure of dispersion) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การหาค่ากลางของข้อมูล (Measure of central tendency) ค่ากลางของข้อมูลเป็นการหาตัวแทนของข้อมูลทั้งหมด ตัวสถิติที่นิยมใช้วัดค่ากลางของข้อมูลได้แก่ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Mean,  $\bar{x}$ ) สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.40

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.40)$$

โดยที่  $\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

$x_i$  คือ ค่าของข้อมูลตัวที่  $i$

$n$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

การวัดการกระจายของข้อมูล (Measure of dispersion) เป็นค่าที่แสดงการกระจายหรือความแปรปรวนของข้อมูล ถ้าเป็นการวัดการกระจายข้อมูลเพียงชุดเดียว ได้แก่ ความ

แปรปรวน (Variance,  $SD^2$ ) หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้แสดงดังสมการที่ 2.41 และ 2.42

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.41)$$

$$SD^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (2.42)$$

โดยที่ SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
 $SD^2$  คือ ความแปรปรวน  
 $X - X_i$  คือ ส่วนเบี่ยงเบน  
 n คือ จำนวนข้อมูล

### 2.11.2 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

คือการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลตั้งแต่สองชุดขึ้นไป โดยข้อมูลชุดหนึ่งเรียกว่าตัวแปรตาม (Dependent variable) นิยมเขียนแทนด้วย Y และข้อมูลอีกชุดหนึ่งเรียกว่าตัวแปรอิสระ (Independent variable) นิยมเขียนแทนด้วย X มีวัตถุประสงค์ที่จะประมาณหรือพยากรณ์ค่าตัวแปรตามซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มจากตัวแปรอิสระ โดยการวิเคราะห์การถดถอยสามารถแบ่งได้ดังนี้

การถดถอยอย่างง่าย (Simple regression) เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว โดยตัวแปรหนึ่งคือตัวแปรตาม Y อีกตัวแปรหนึ่งคือตัวแปรอิสระ X หรือกล่าวง่าย ๆ คือเป็นการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่พิจารณาให้มีตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวเท่านั้น เขียนในรูปฟังก์ชันได้ดังสมการที่ 2.43

$$Y = f(X) \quad (2.43)$$



โดยที่ X คือ ตัวแปรอิสระ (Independent variables)  
 Y คือ ตัวแปรตาม (Dependent variables)

การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 3 ตัวขึ้นไป โดยที่ตัวแปรหนึ่งคือตัวแปรตาม ตัวแปรอื่นๆ เป็นตัวแปรอิสระ ซึ่งมีจำนวนตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป เขียนในรูปฟังก์ชันทั่วไปของการถดถอยพหุคูณกรณีมีตัวแปรอิสระ k ตัว แสดงได้ดังสมการที่ 2.45

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) \quad (2.45)$$

โดยที่  $X_1, X_2, X_3$  คือ ตัวแปรอิสระตัวที่ 1, 2, 3 ตามลำดับ  
 $X_k$  คือ ตัวแปรอิสระตัวที่ k  
 Y คือ ตัวแปรตาม

การถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear regression) ในการศึกษาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรไม่ว่าจะเป็นแบบการถดถอยอย่างง่ายหรือการถดถอยพหุคูณ ลักษณะของความสัมพันธ์เป็นได้ทั้งเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในกรณีที่สมการถดถอยที่ประมาณได้มีกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัวแปรเป็นเส้นตรง เรียกว่า การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear Regression) และในกรณีที่ตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเป็นเส้นตรง เรียกว่า การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression) แต่ลักษณะของข้อมูลบางประเภทอาจไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งเรียกว่า การถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการศึกษากการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นจึงมีการศึกษาทั้งที่เป็นแบบการถดถอยอย่างง่ายและการถดถอยพหุคูณ

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปร สิ่งที่น่าสนใจเป็นหลักการในการศึกษาคือ ข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์เกี่ยวกับตัวแปรนั้นนั่นเอง เมื่อได้ข้อมูลแล้วต้องนำข้อมูลมาพิจารณาว่าตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันหรือไม่ และสัมพันธ์กันในรูปแบบเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น ในการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรอย่างง่ายนิยมนำข้อมูลมาพล็อตกราฟ โดยแกนตั้งแทนค่าด้วยตัวแปรตาม

Y แกนนอนแทนค่าด้วยตัวแปรอิสระ X เรียกว่าแผนภาพการกระจาย (Scatter diagram) ซึ่งแผนภาพการกระจายทำให้มองเห็นลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างจุดที่พล็อตถ้าลากเส้นผ่านจุดเหล่านี้ จะได้เส้นซึ่งถือว่าเป็นตัวแทนที่แสดงลักษณะหรือแนวโน้มของความสัมพันธ์ เส้นนี้เรียกว่า เส้นการถดถอย (Regression line) เส้นการถดถอยจะเป็นเส้นตรงหรือไม่เป็นเส้นตรงขึ้นอยู่กับลักษณะของจุดที่พล็อตบนแผนภาพการกระจาย ซึ่งวิธีที่นิยมในการหาเส้นแทนลักษณะของความสัมพันธ์คือ วิธีกำลังสองน้อยที่สุดอย่างธรรมดา (Ordinary least square method)

การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Ordinary least square : OLS) เป็นวิธีหาค่าประมาณพารามิเตอร์ของสมการถดถอยที่ให้คุณสมบัติ 3 ประการ คือ มีความเป็นเส้นตรง (Linear) เป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอียงเอน (Unbiased estimator) และมีความแปรปรวนต่ำที่สุด (Minimum variance)

### 2.11.3 ค่าสถิติที่จำเป็นสำหรับวิเคราะห์ความเหมาะสมของเส้นสมการถดถอย

เส้นสมการถดถอยที่จะมีความน่าเชื่อถือจะต้องมีการใช้ค่าทางสถิติที่มาทำการวิเคราะห์ถึงความถูกต้องและเหมาะสมของสมการ โดยมีค่าสถิติที่จำเป็นดังนี้

สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of determination,  $r^2$ ) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างผลบวกกำลังสองที่อธิบายได้โดยสมการถดถอยกับผลบวกกำลังสองทั้งหมด ดังสมการที่ 2.46 และสมการที่ 2.47

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2.46)$$

$$r^2 = \frac{b \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \quad \text{หรือ} \quad r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (2.47)$$

โดยที่  $(Y_i - \bar{Y})^2$  คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด (Sum of square total)

$(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$  คือ ผลบวกกำลังสองที่อธิบายได้โดยสมการถดถอย (Sum-

of Square explained by regression)

$(Y_i - \hat{Y}_i)^2$  คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อน (Sum of square due to error)

$e_i$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Error term)

คุณสมบัติของค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด คือ  $r^2$  มีค่าเป็นบวกเสมอและ  $r^2$  มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 หรือมีค่าตั้งแต่ 0% ถึง 100% นั่นคือ  $0 \leq r^2 \leq 1$  หรือ  $0\% \leq r^2 \leq 100\%$  โดยที่ความหมายของสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด คือเป็นตัววัดความใกล้ชิดระหว่างเส้นถดถอยกับค่า Y บนแผนภาพการกระจายดังนี้คือ

$r^2$  เท่ากับ 1 ค่า Y จะอยู่บนเส้นถดถอยทุกจุด

$r^2$  มีค่ามาก ค่า Y จะอยู่ใกล้กับเส้นถดถอย

$r^2$  มีค่าน้อย ค่า Y จะอยู่ห่างจากเส้นถดถอย

$r^2$  เท่ากับ 0 ค่า Y จะกระจายห่างกันกับเส้นถดถอยมากหาแนวโน้มที่ถูกต้องไม่ได้

ค่า  $r^2$  เป็นตัวแสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ X ที่มีต่อตัวแปรตาม Y เนื่องจากค่า  $r^2$  ที่คำนวณได้บอกให้ทราบว่า การกระจายทั้งหมดของค่า Y นั้นสามารถอธิบายได้จากเส้นการถดถอยที่เปอร์เซ็นต์ หรือกล่าวได้ว่า X มีอิทธิพลต่อ Y ที่เปอร์เซ็นต์ เช่น ถ้า  $r^2$  เท่ากับ 0.7958 หมายความว่า สมการถดถอยนี้สามารถอธิบายการกระจายของ Y ได้ 79.58 % หรือค่า X ที่กำลังพิจารณาอยู่มีอิทธิพลต่อ Y เท่ากับ 79.58% ส่วนตัวแปรอิสระอื่นๆนอกเหนือไปจาก X รวมแล้วจะมีอิทธิพลต่อ Y เท่ากับ  $100 - 79.58$  เท่ากับ 20.42%

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation analysis) สหสัมพันธ์เป็นการศึกษาถึงระดับของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปว่ามีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อย ในการวิเคราะห์จะพิจารณาเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation) สำหรับข้อมูลตัวอย่างใช้สัญลักษณ์  $r$  ซึ่งหาได้จากสมการ 2.48

$$r = \pm \sqrt{\frac{b_1 \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad \text{หรือ} \quad r = \pm \sqrt{\frac{b_1^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (2.48)$$

โดยที่  $b_1$  คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของข้อมูลตัวอย่าง

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นการวัดทิศทางและระดับความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรสองตัว โดย  $r$  (มีเครื่องหมายเหมือนกับค่า  $b_1$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง  $-1$  ถึง  $+1$  ซึ่งมีความหมายดังนี้

ถ้า  $r$  มีค่าเท่ากับ  $\pm 1$  แสดงว่าข้อมูลทั้งหมดไม่มีความเบี่ยงเบน สามารถลากเส้นตรงผ่านได้ ยิ่งถ้าค่า  $r$  มีค่าใกล้เคียงกับ  $1$  มากเท่าใดแสดงว่าข้อมูลนั้นมีความสัมพันธ์กันมาก

ถ้า  $r$  เท่ากับศูนย์ แสดงว่าตัวแปรสองตัวนั้นไม่มีความสัมพันธ์กัน

ถ้า  $r$  มีค่าใกล้เคียงศูนย์ แสดงว่ามีความสัมพันธ์น้อยมาก เครื่องหมายบอกแสดงถึงลักษณะของความสัมพันธ์ ถ้ามีเครื่องหมายบวกแสดงว่าลักษณะความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน แต่ถ้าเครื่องหมายลบแสดงว่ามีลักษณะความสัมพันธ์แบบผกผัน โดยความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์แสดงได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.10 ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์

การถดถอย	สหสัมพันธ์
เป็นการกำหนดความสัมพันธ์ของตัวแปร (X,Y) ว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร	เป็นการศึกษาถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปร (X,Y) ว่าสัมพันธ์กันมากน้อยแค่ไหน
ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งลักษณะของความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงหรือไม่ใช่เส้นตรงก็ได้	ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกรณีที่เป็นเส้นตรง(Linear relation)

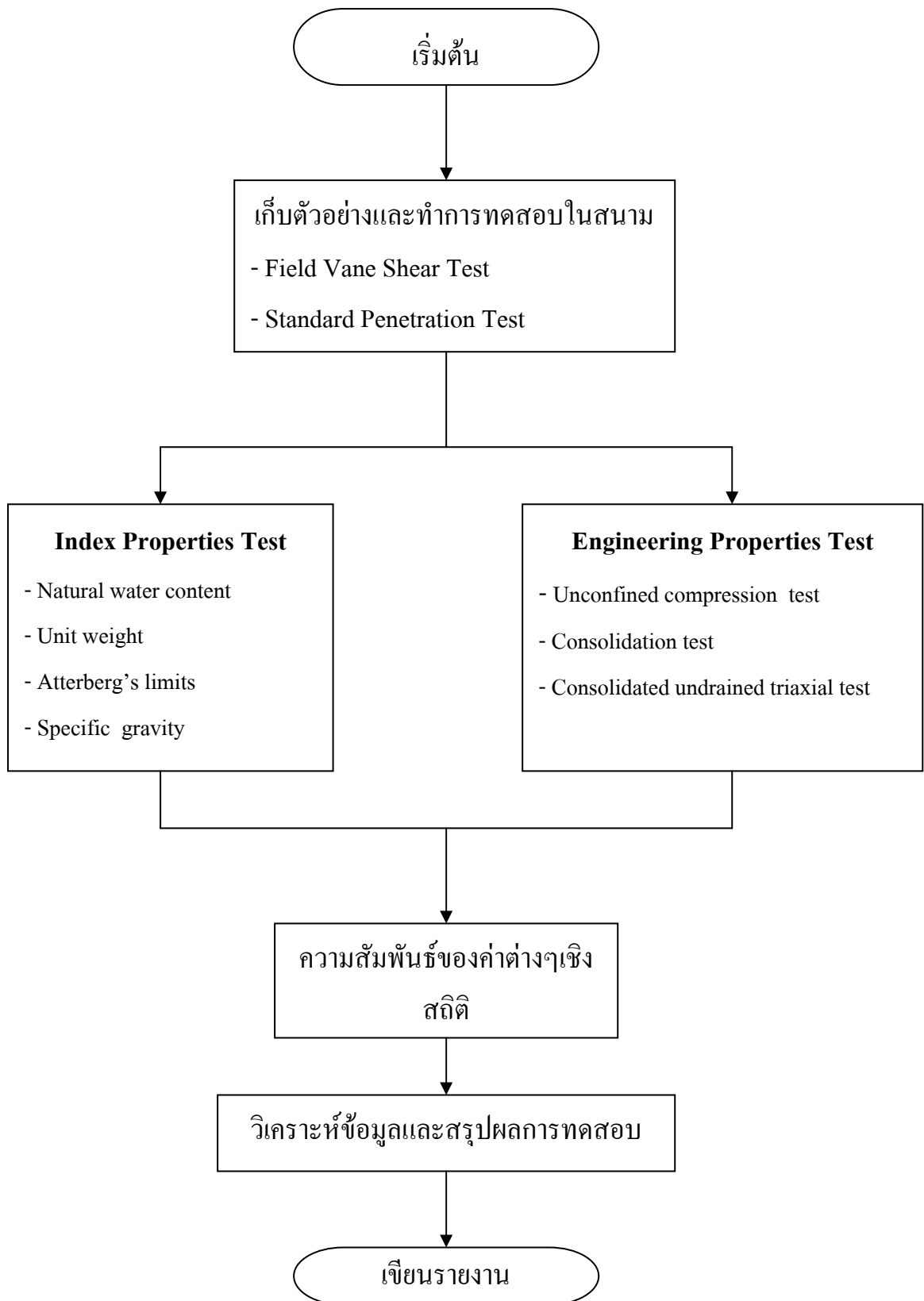
### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิเคราะห์คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนปากพนังในการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินงานเป็นขั้นตอนคือ การเก็บตัวอย่างดิน การทดสอบคุณสมบัติของดินในสนาม การทดสอบคุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติวิศวกรรมของดินในห้องปฏิบัติการ การวิเคราะห์ผลการทดสอบและการสรุปผลการทดสอบ ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในภาพรวมได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1

#### 3.1 การเก็บตัวอย่างดิน

การวิจัยนี้ได้ทำการดำเนินการเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อน จำนวน 9 จุดทดสอบจากพื้นที่ต่างๆ ของอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช (รายละเอียดของสถานที่เจาะเก็บตัวอย่างแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.3) โดยการกำหนดจุดทดสอบทำการกำหนดจากแผนที่ทางหลวงของกรมทางหลวง โดยแต่ละจุดทดสอบห่างกันประมาณ 7–8 กิโลเมตร และความลึกของหลุมทดสอบประมาณ 15 เมตร โดยในการเจาะสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่างดิน ทำการเก็บตัวอย่างดินโดยวิธี เจาะล้าง (Wash boring) และทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed sample) โดยใช้กระบอกบาง (Shelby tube) โดยทำการเจาะเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนทุกระยะ 1.50 เมตร จนถึงชั้นดินเหนียวแข็ง โดยตรวจสอบความแข็งของชั้นดินเหนียวอ่อนด้วยค่า N

เมื่อได้ตัวอย่างดินในกระบอกบางมาแล้ว ทำการดันตัวอย่างดินออกจากกระบอก โดยใช้เครื่องดันตัวอย่างดิน จากนั้นทำการแบ่งตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบต่างๆ เช่น การทดสอบหาค่าคุณสมบัติดัชนี การทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยว การทดสอบการทรุดตัว และการทดสอบแรงอัดสามแกน โดยเมื่อทำการแบ่งตัวอย่างแล้วนำตัวอย่างมาห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหาร (Wrap) และนำไปใส่ถุงพลาสติกที่เขียนรายละเอียดและที่มัดสนิท (รูปที่ 3.2) และนำตัวอย่างดินทั้งหมดไปเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ



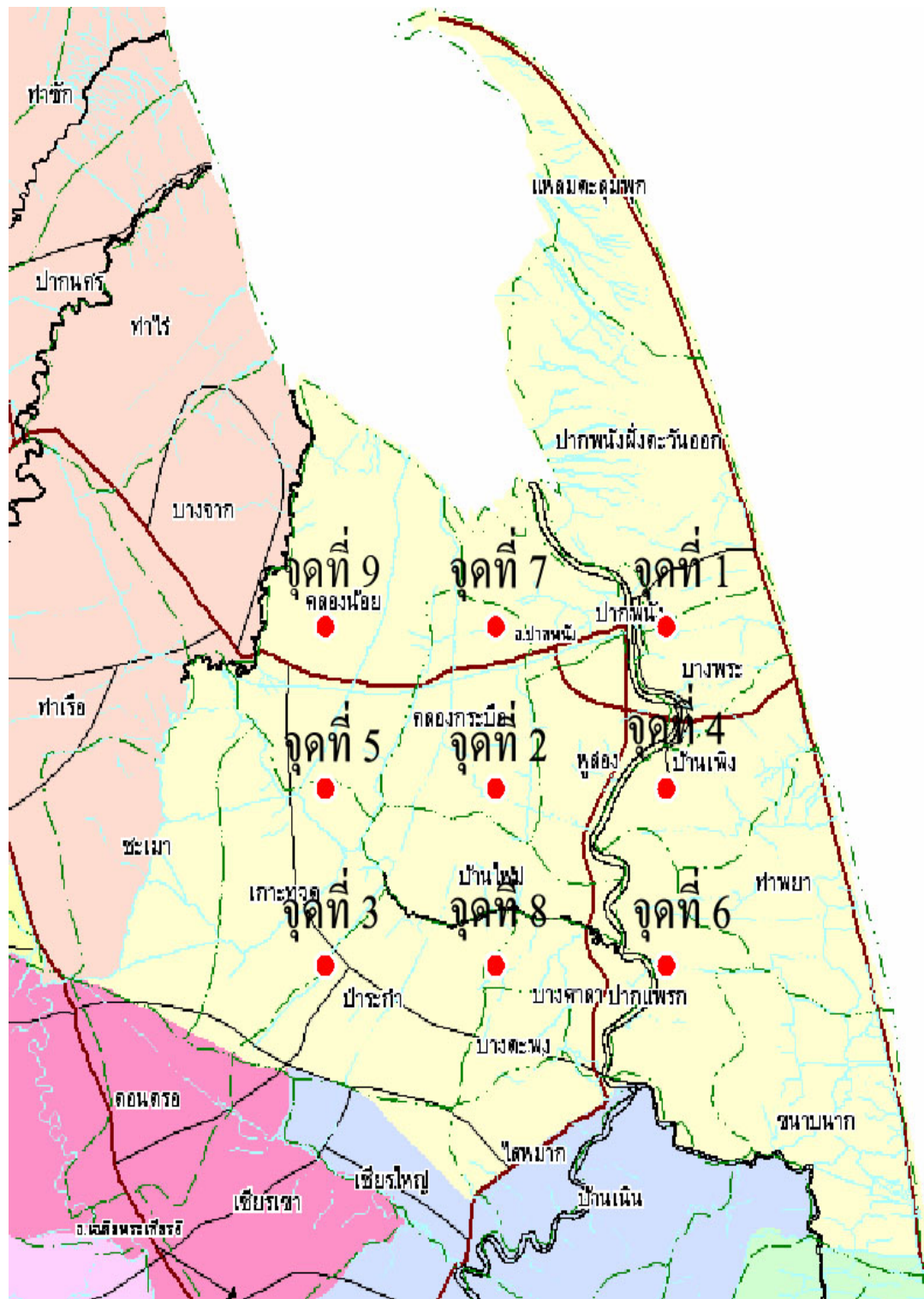
รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนของการเก็บตัวอย่าง การทดสอบตัวอย่าง วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดินในอำเภอปากพนัง

จุดที่	พื้นที่เก็บตัวอย่างดินในอำเภอปากพนัง
BH-1	กม.6 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.บางพระ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
BH-2	กม.25 ทางหลวงหมายเลข 4094 ต.หูล่อง อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
BH-3	ม.1 บ้านปากคลอง ต.บ้านใหญ่ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
BH-4	สถานีอนามัยบ้านบางแรด ม.1 ต.บ้านเพ็ง อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
BH-5	โรงเรียนบ้านปากคลอง ต.คลองน้อย อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
BH-6	ที่ทำการองค์การบริหารส่วนตำบลขนานนาก ต.ขนานนาก อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
BH-7	กม.18 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.คลองน้อย อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
BH-8	สนามกีฬา องค์การบริหารส่วนตำบลบางศาลา ต.บางศาลา อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
BH-9	กม. 25 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.คลองกระบือ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างดินที่ดันออกจากกระบอกบางแล้ว



รูปที่ 3.3 แผนที่แสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน



### 3.2 การทดสอบในสนาม (Filed Test)

#### 3.2.1 การทดสอบแรงเฉือนในที่ด้วยใบพัด (Filed vane shear test)

การทดสอบเพื่อหาค่า การรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength;  $S_u$ ) ตามมาตรฐาน ASTM D 2573 โดยทำการทดสอบทุกหลุมเจาะสำรวจดิน ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 1.50 เมตรและทำการทดสอบเพิ่มทุกระยะความลึกที่เพิ่มขึ้นครั้งละ 1.50 เมตร จนถึงระดับชั้นดินแข็งโดยตรวจสอบจากค่า N

#### 3.2.2 การทดสอบการตอกทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test)

การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังของดิน และหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชั้นดิน ตามมาตรฐาน ASTM D 1586 โดยทำการโดยทำการทดสอบทุกหลุมเจาะสำรวจดิน ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 1.50 เมตร จนถึงระดับชั้นดินแข็งโดยตรวจสอบจากค่า N โดยถ้าค่า N มีค่าที่เท่ากับหรือมากกว่า 5 ครั้งต่อฟุต ให้หยุดทำการทดสอบ เพราะค่า N ค่าที่เท่ากับหรือมากกว่า 5 ครั้งต่อฟุต ดินเหนียวได้อยู่ในช่วงของดินเหนียวแข็งปานกลาง

### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติดัชนี (Index Properties)

การทดสอบคุณสมบัติดัชนีของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนจากหลุมเจาะทดสอบทั้ง 9 หลุมทดสอบบริเวณอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช จำนวน 85 ตัวอย่าง ทุกระดับความลึกของหลุมทดสอบ โดยการทดสอบคุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวปากพนังใช้วิธีการทดสอบและมาตรฐานดังต่อไปนี้

1. ทดสอบหาน้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตร (Total unit weight,  $\gamma_m$ ) ตามมาตรฐาน ASTM D 3282

2. ทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลดิน (Natural water content, W) ตามมาตรฐาน ASTM D 2216

3. ทดสอบค่าพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) และค่าพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318

4. ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity,  $G_s$ ) ตามมาตรฐาน ASTM D854

5. จำแนกดินโดยระบบของ USCS (Unified soil classification system) ตามมาตรฐาน ASTM D 2487

### 3.4 การทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม (Engineering Properties)

การทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรมของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนจากหลุมเจาะทดสอบ ทั้ง 9 หลุมทดสอบบริเวณอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช สามารถแบ่งจำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.2 โดยการทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวปากพนังใช้วิธีการทดสอบและมาตรฐานดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างของการทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม

การทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม	จำนวนตัวอย่างที่ทดสอบ
Unconfined Compression Test	85
Consolidation Test	85
Consolidated Undrained Triaxial Test	85
รวมทดสอบทั้งหมด	255

#### 3.4.1 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2166 เพื่อหาค่าความสามารถในการรับแรงของดินตัวอย่าง ซึ่งจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวสามารถหาค่าสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ดังนี้

1. ค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, UCS,  $q_u$ )
2. ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength,  $S_u$ )
3. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained modulus of elasticity,  $E_u$ )

### 3.4.2 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2435 เพื่อหาค่าคงตัวของการอัดตัวได้ (Compressibility parameter) ซึ่งค่าคงตัวของการอัดตัวได้ สามารถนำมาวิเคราะห์ระยะเวลาและการทรุดตัวของดินกันทางได้ ซึ่งค่าคงตัวของการอัดตัวคายน้ำได้ประกอบด้วย

- ค่าแรงดันที่กดทับสูงสุดในอดีต (Maximum past pressure,  $\sigma'_{vo}$ )
- ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว (Coefficient of consolidation,  $C_v$ )
- ค่าดัชนีอัดตัว (Compression index,  $C_c$ )
- ค่าดัชนีอัดตัวซ้ำ (Recompression index,  $C_r$ )

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนปากพั้งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. นำแหวนที่ใส่ตัวอย่างดินวางลงบน Consolidate cell (แสดงในรูปที่ 3.4) โดยมีกระดาษกรองและแผ่น Porous stones ปิดบนล่าง เอาเซลล์วางบนเครื่องกด ใส่น้ำในเซลล์ให้ท่วมตัวอย่างดิน จัดเครื่องกดให้อยู่ในลักษณะจะเริ่มกด คือผิวของแกนกดเริ่มสัมผัสเซลล์ จากนั้นก็ปรับหน้าปัดของ Dial gauge หรือ Displacement transducer ให้ชี้ที่ศูนย์



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปากพั้งใน Consolidate cell

2. ใส่น้ำหนักกับช่วงที่จะกดลงบนตัวอย่าง จำนวนอัตราเพิ่มของน้ำหนักที่จะกดบนตัวอย่างดิน ใส่น้ำหนักบนเสาแทรกโดยการเพิ่มน้ำหนักแต่ละครั้งจะเป็นไปตามค่าอัตราส่วนการเพิ่มค่าน้ำหนัก (Load increment ratio, LI) ที่คำนวณไว้ โดยน้ำหนักแรงดันที่คำนวณไว้มีค่าดังนี้ ค่าแรงดันเท่ากับ 1.56, 3.13, 7.82, 15.64, 31.28 และ 62.56 ดันต่อตารางเมตร
3. จะแช่น้ำหนักทิ้งไว้จน 24 ชั่วโมง หรือการทรุดตัวถึง 90% ตามแต่กำหนด ก่อนที่จะเพิ่มน้ำหนักใหม่ น้ำหนักที่ใส่จะต้องให้หน่วยน้ำหนักไม่น้อยกว่าที่ตัวอย่างดินจะรับจริงในสนาม
4. อ่านค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดิน ที่เวลา 0.1, 0.25, 0.50, 1.00, 1.25, 2.25, 4.00, 6.25, 9.00, 12.25, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100 นาที และ 3, 6, 12, จนถึง 24 ชั่วโมง แล้วจึงจะเพิ่มน้ำหนักใหม่และจึงเริ่มอ่านค่าที่เวลาต่างๆตามเดิม เพิ่มน้ำหนักและอ่านค่าไปจนเสร็จ (แสดงในรูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 การทดสอบ Consolidation test ดินเหนียวอ่อนปากพนัง

5. ทำการถอดน้ำหนักรอก (Rebound) โดยเว้น 1 ชั้นน้ำหนักรอก ทุกครั้งที่ถอดน้ำหนักรอก เพียงแค่จดค่าบนมาตรหน้าปิด (Dial gauge) ก่อนจะถอดน้ำหนักรอกชั้นต่อไปเท่านั้น จนกระทั่งถอดน้ำหนักรอกหมด

6. หลังจากเสร็จการทดสอบแล้ว ถอดตัวอย่างออก เหน้าให้แห้ง ถอดกระดาษกรองออก ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างดินเข้าอบแห้งหาความชื้น

### 3.4.3 การทดสอบแรงอัด 3 แกน (Triaxial Test)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2850 และ D 4767 เพื่อหาค่าคงตัวของกำลังของดินทั้งแบบความเค้นรวมและความเค้นประสิทธิผล (Total and Effective) ได้โดยค่าคงตัวของดินประกอบด้วย ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion;  $C, C'$ ), ค่ามุมเสียดทาน (Friction angle;  $\phi, \phi'$ ), พฤติกรรมทางความเค้นและความเครียดของดิน, พฤติกรรมของความดันน้ำและทางเดินของหน่วยแรง (Stress path)

การทดสอบแรงอัดสามแกนในครั้งนี้ใช้วิธีแบบอัดตัวอย่างด้วยความดันและกระทำแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Consolidated undrained triaxial test, CU – Test) โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

1. ทำการอัดความดันน้ำให้ดินตัวอย่างอิ่มตัว โดยปล่อยน้ำเข้าภายใน Cell รอบนอกตัวอย่างดินให้น้ำเต็ม เพิ่มความดันของ Confining pressure และ Back pressure เท่ากันทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง (ดังแสดงในรูปที่ 3.5)

2. หลังจากได้อัดความดันน้ำตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำและทิ้งไว้ข้ามคืน (ประมาณ 24 ชั่วโมง) ทำการทดสอบ B Check (การตรวจสอบความอิ่มตัวด้วยน้ำ) โดยการเพิ่มความดัน Confining pressure ทิ้งไว้ประมาณ 1 นาทีและวัดความดัน Back pressure ที่เปลี่ยนแปลงไป

3. ถ้าค่า B มีค่าเกิน 0.95 ทำการอัดตัวอย่างดิน โดยให้ค่า Confining pressure และ Back pressure มีค่า pressure ต่างกันเท่ากับ 5, 10 และ 15 ตันต่อตารางเมตร

4. ขณะที่ทำการอัดตัวอย่างดิน จับเวลาที่เริ่มอัดตัว ถ้าต้องการศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวของตัวอย่างดิน อ่านค่าเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่วัดปริมาตร (Volume change indicator) ตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ คือ 30, 60, 120, 240, 480, 720, 1440 และ 2880 นาที

5. ตั้งอัตราการกดตัวอย่างที่เครื่องกด ( เช่น 1 % ความสูงตัวอย่าง / ชั่วโมง ในกรณีมีการวัดความดันน้ำ ) ตั้งเซลล์บนฐานเครื่องกด ปรับแกนกดลง ให้เตะตัวอย่างดินโดยใช้โดยใช้มือหมุนฐานเครื่องขึ้นและกดแกนกด ลงมาจนใกล้เตะแผ่นกด แล้วจึงค่อย ๆ เคลื่อนแกนกด จนหมดเตะแผ่นกด ซึ่งจะสังเกตได้จากมาตรหน้าปิดที่วงแหวนวัดแรง (Proving ring) เริ่มเคลื่อนที่ ตั้งมาตรหน้าปิดของวงแหวนวัดแรงและมาตรหน้าปิดค่ายุคตัวทั้ง 2 เป็นศูนย์ อ่านค่าเริ่มแรกของเครื่องอ่านสัญญาณ (Read out) ตัวแปลงสัญญาณความดัน (Pressure transducer)

6. ปิดวาล์วสายความดันภายใน (Back pressure) วาล์วระบาย B เดินเครื่องกด ตัวอย่างอ่านค่ามาตรหน้าปิดของวงแหวนวัดแรง และค่าอ่านความดันน้ำต่อค่ายุคตัวของตัวอย่างที่มาตรหน้าปิด ทุกกระยะ 10 ซีด ( 0.1 มม. ) ต่อมาทุก ๆ 25 ซีด ตามเวลาที่เหมาะสม ( ไม่ถี่หรือห่างเกินไป ) จนกระทั่งค่าอ่านมาตรหน้าปิดวงแหวนวัดแรงอ่านค่าสูงสุดและเริ่มลดลง จึงหยุดการทดสอบ หรือถ้าดินไม่วิบัติกดทดสอบจนถึงความเครียด ( $\epsilon$ ) 20% ) ( ดังแสดงในรูปที่ 3.6)

7. ถอดสายออกจากวาล์ว นำเซลล์ไปแกะในอ่างน้ำ และถอดฝาครอบออก ปล่อยน้ำทิ้ง วาดรูปการวิบัติของตัวอย่างดิน แกะตัวอย่างดินออกมาใส่ภาชนะไปชั่งและนำเข้าตู้อบ เพื่อหาค่าความชื้นหลังทดสอบ

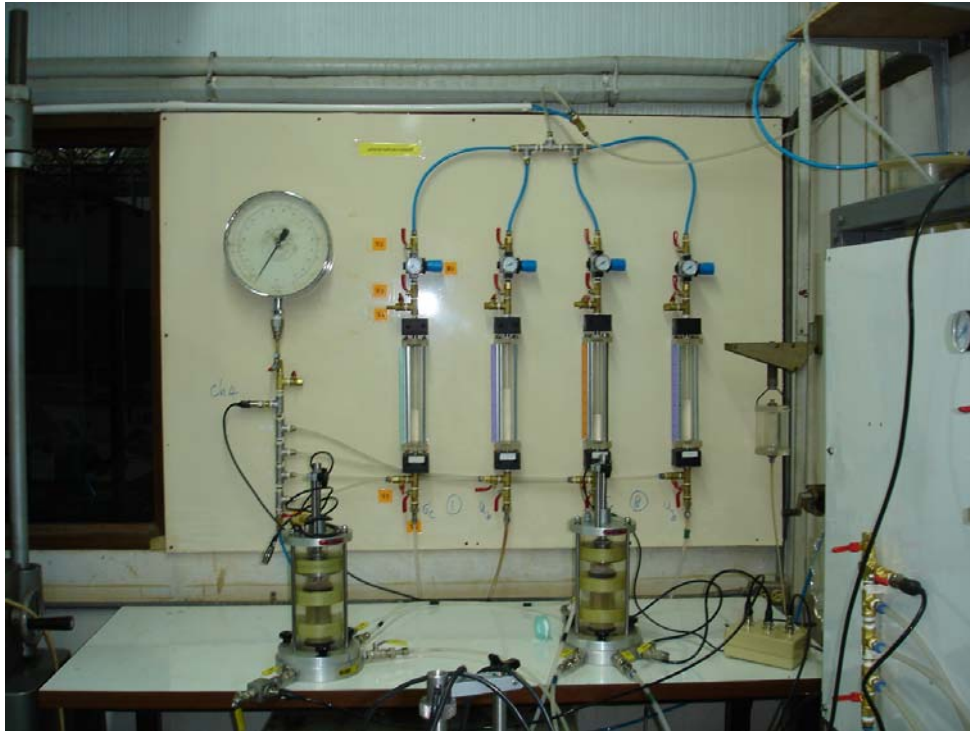
### 3.5 การวิเคราะห์และการสรุปผล

เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติดัชนีและวิศวกรรมของตัวอย่างทั้งหมดแล้วเสร็จ นำนำผลการทดสอบทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบและสรุปผล ดังต่อไปนี้

- วิเคราะห์ผลเพื่อสรุปคุณสมบัติของดิน โดยนำผลการทดสอบคุณสมบัติดัชนี และคุณสมบัติวิศวกรรมมาทำการเปรียบเทียบโดยใช้หลักทางสถิติ เช่น หาค่าเฉลี่ยเลขคณิต การกระจายตัวของข้อมูลและช่วงของข้อมูล โดยทำการเปรียบเทียบค่าของข้อมูลที่ทำการศึกษากับผลของข้อมูลที่ได้ทำการศึกษามาก่อนแล้วของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เนื่องจากการกำเนิดของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯมีลักษณะใกล้เคียงกันกับการกำเนิดของชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนัง

- สรุปคุณสมบัติ, ลักษณะ, ความหนาแน่นสัมพัทธ์และประเภทของชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนัง โดยนำค่าคุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติวิศวกรรม มาเขียนในรูปของกราฟ Boring log โดยเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติต่างๆของแต่ละหลุมเจาะกับระดับความลึกของหลุมเจาะ

- สรุปค่าผลการทดสอบทั้งหมดลงในตาราง Summary of result เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำค่าต่างไปใช้ในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง



รูปที่ 3.6 อัตราความดันน้ำให้ดินตัวอย่างอิมตัว

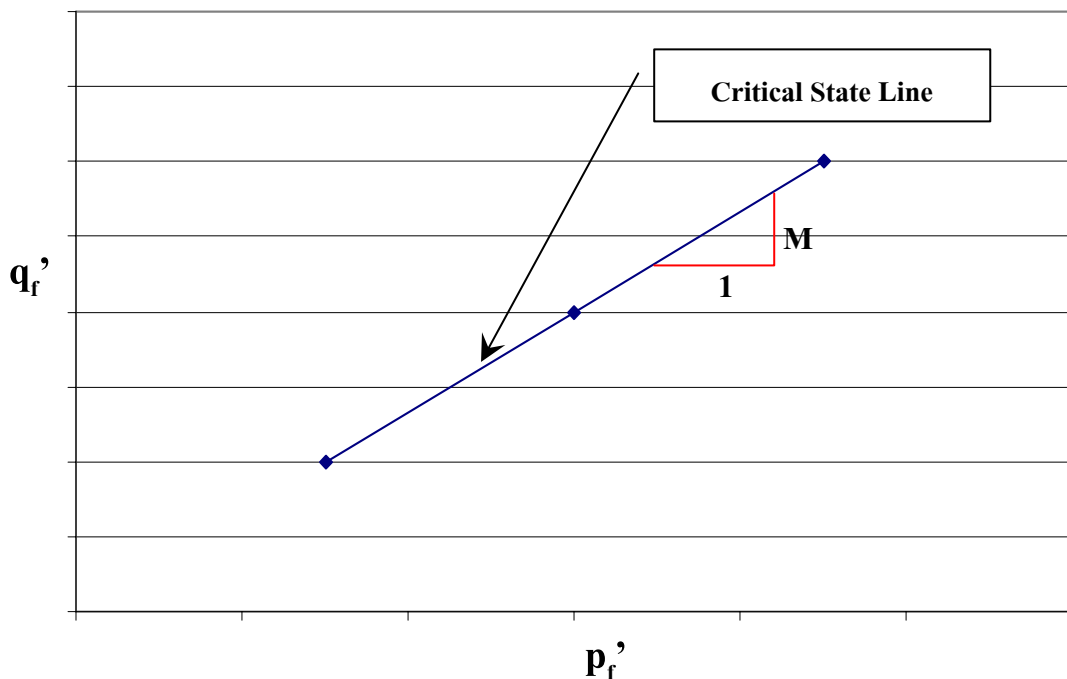


รูปที่ 3.7 การ Shearing ดินเหนียวอ่อนapakพ้ง ในการทดสอบ Triaxial Test

- วิเคราะห์และสรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติวิศวกรรม, คุณสมบัติดัชนี และความลึก โดยการสร้างสมการสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple variable regression) ระหว่างตัวแปร คุณสมบัติดัชนี คุณสมบัติวิศวกรรม และความลึก เพื่อสามารถนำไปประมาณค่าคุณสมบัติวิศวกรรมจากคุณสมบัติดัชนี เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

- วิเคราะห์ผลการทดสอบ ในรูปแบบของ Critical state เพื่อหาค่า Critical state parameters ของดินเหนียวอ่อนปวกพัง โดยนำผลจากการทดสอบ Consolidated undrained triaxial test มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

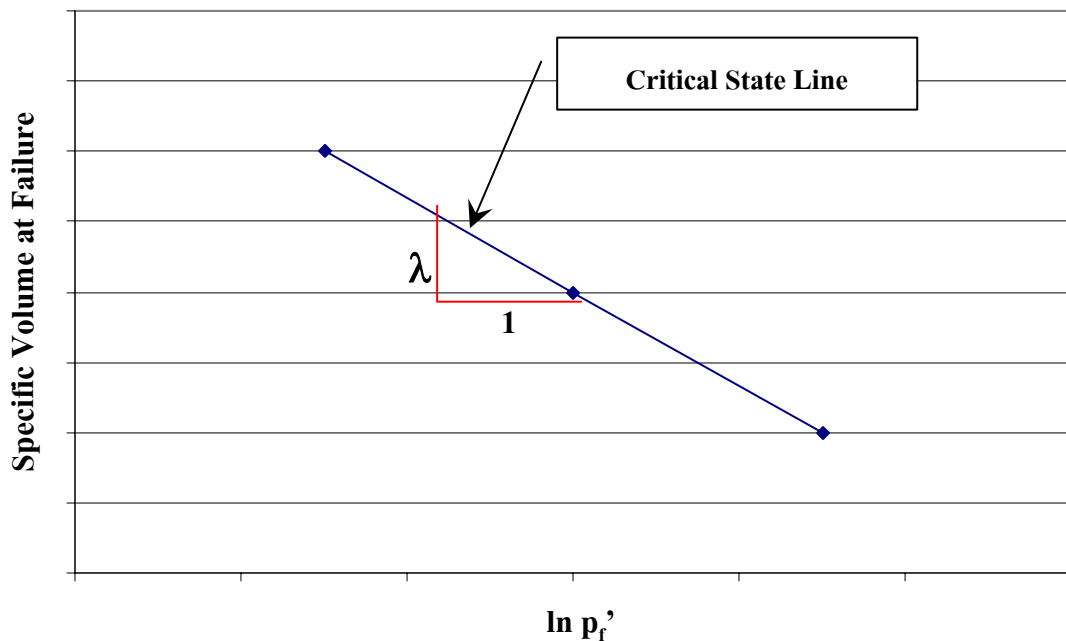
1. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $p'$  กับ  $q'$  ( $p' - q'$  diagram) โดยใช้ค่าที่จุด Failure เป็นค่าที่ใช้ในการเขียนกราฟ จะได้กราฟ  $p - q$  diagram at failure ดังรูปที่ 3.3 และสามารถหาค่า  $M$  (Slope of critical state line project to  $p':q'$  plane) โดยเป็นความชันของกราฟ  $p - q$  diagram at failure



รูปที่ 3.8 การหาค่า Slope of critical state line project to  $p':q'$  plane ( $M$ )



2. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific volume ( $v_p$ ) กับค่า  $\ln p'$  at failure โดยค่า Specific volume ของดินได้มาจากการทดสอบ Consolidated undrained triaxial test นำค่า  $p'$  at failure มาทำให้อยู่ในรูปของค่า  $\log$  ฐานธรรมชาติ ( $\ln$ ) และนำค่ามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 3.4 และหาค่า  $\lambda$  (Slope of critical state line) โดยเป็นค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific volume at failure กับค่า  $\ln p'$  at failure



รูปที่ 3.9 การหาค่า Slope of critical state line ( $\lambda$ )

3. คำนวณหาค่า Specific volume of soil on critical state line at  $p' = 1.0$  kPa ( $\Gamma$ ) โดยสามารถคำนวณได้จากการนำค่า Slope of critical state line ค่า Specific volume at failure และค่า  $p'$  at failure มาวิเคราะห์โดยใช้สมการ

$$\Gamma = v_f + \lambda \ln p'_f$$

โดยที่  $\Gamma$  = Specific volume of soil on critical state line at  $p' = 1.0$  kPa

$v_f$  = Specific volume at failure

$\lambda$  = Slope of critical state line

$p'_f$  =  $p'$  at failure

4. รวบรวมค่าที่ได้ทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ และนำค่าที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบกับค่าดินที่มีผู้วิจัยต่างๆได้ทำการทดสอบไว้ก่อนหน้าเช่น ดินเหนียวลอนดอน (London clay) หรือดินเหนียววีล (Weald clay) เป็นต้น

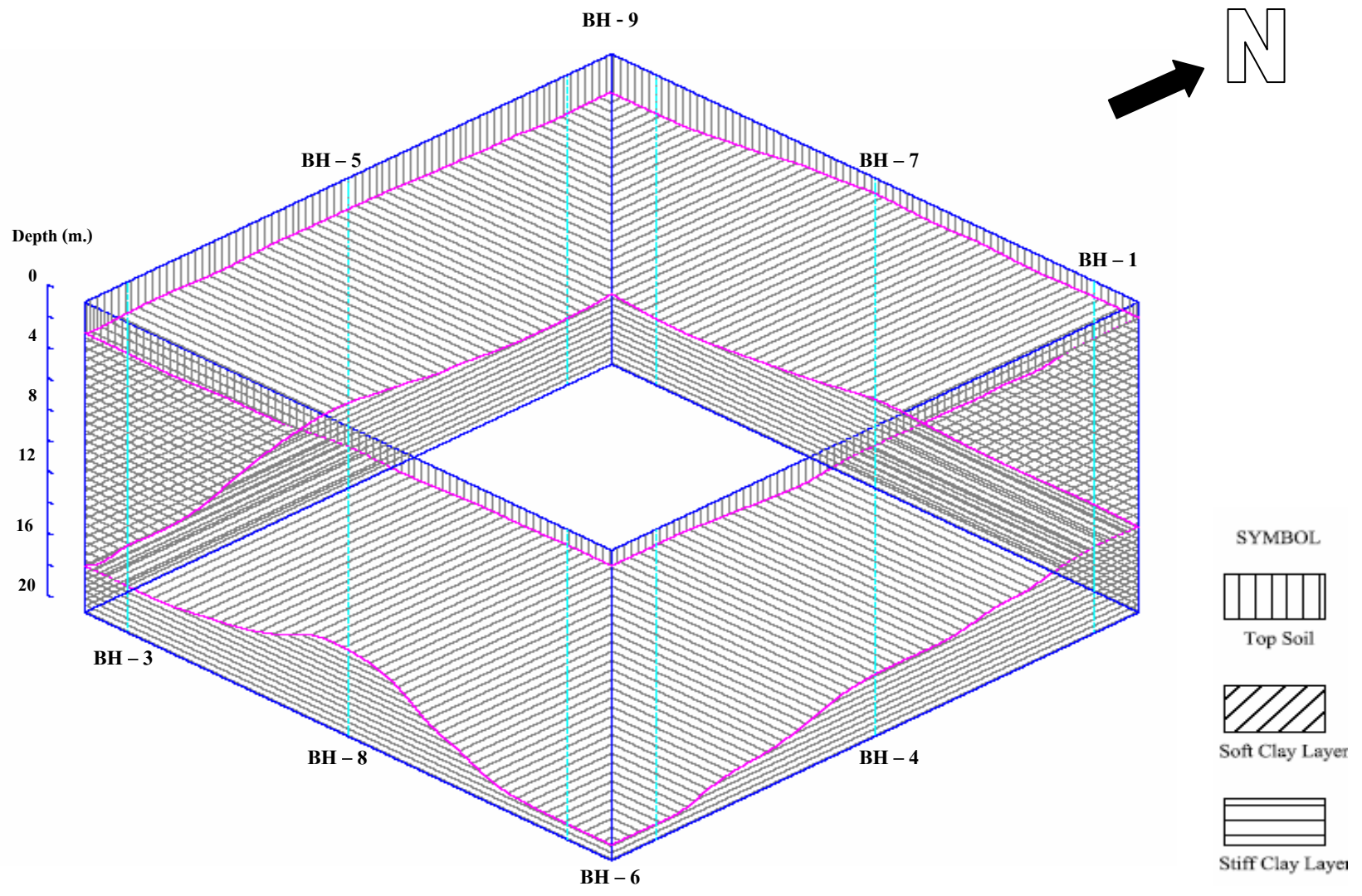
## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบตัวอย่างดินทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ความลึกชั้นดินของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง คุณสมบัติต่างๆของดินเหนียวอ่อนปากพั้งตามความลึก และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรคุณสมบัติต่างๆของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 ความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนปากพั้ง

ผลข้อมูลการเจาะสำรวจดินบริเวณอำเภอปากพั้ง จังหวัดนครศรีธรรมราชดังแสดงในรูปที่ 3.3 สามารถนำมาเขียนแผนที่ภาพแสดงหน้าตัดของชั้นดินและความลึกบริเวณต่างๆได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยลักษณะชั้นดินของอำเภอปากพั้งนั้น ดินชั้นบนตั้งแต่ระดับผิวดินลงไปจนถึงระดับความลึกประมาณ 1.50 เมตร มีลักษณะเป็นดินเหนียวที่ประปนด้วยซากพืชและรวมถึงดินแข็งที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน ทำให้ดินมีลักษณะเป็น Crust ลึกลงไปเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีลักษณะเหมือนกันตลอดพื้นที่ศึกษา (ภาพแสดงดินเหนียวอ่อนปากพั้งได้แสดงในรูปที่ 4.2) โดยความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนปากพั้งอยู่ที่ตั้งแต่ประมาณ 15.00 – 18.00 เมตร (ค่า N มีค่าประมาณ 1-5 ครั้งต่อฟุต) สีของดินเป็นสีเทาเข้ม (Dark gray) และมีเศษเปลือกหอยปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.2 ทำให้สรุปได้ว่าดินเหนียวอ่อนบริเวณอำเภอปากพั้งนั้นเป็นดินเหนียวอ่อนแบบดินเหนียวทะเล ถัดจากชั้นดินเหนียวอ่อนลงไปดินจะเปลี่ยนสภาพเป็นดินเหนียวแข็งปานกลางจนถึงดินเหนียวแข็งมาก (ค่า N มีค่าตั้งแต่ 6 – 35 ครั้งต่อฟุต) โดยชั้นดินเหนียวชั้นนี้จะมีความลึกตั้งแต่ประมาณ 18.00 เมตรเป็นต้น โดยลักษณะของดินจะประกอบไปด้วยดินเหนียวและดินเหนียวปนซิลต์ (Silty clay) ดินส่วนมากเป็นสีเทาอ่อน (Light gray) หรือสีเทาปนเหลือง (Yellowish gray)



รูปที่ 4.1 ลักษณะชั้นดินของบริเวณเจาะสำรวจดินของอำเภอปากพนัง



รูปที่ 4.2 ลักษณะตัวอย่างดินของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

#### 4.2 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนัง (Index Properties)

ผลการทดสอบคุณสมบัติดัชนีของดินตัวอย่างจากการเจาะสำรวจเก็บตัวอย่างดิน ทั้ง 9 จุดจากพื้นที่ต่างๆในบริเวณอำเภอปากพนังจังหวัดนครศรีธรรมราช สามารถแสดงค่าได้ดังตารางที่ 4.1 – 4.9 และสามารถสรุปค่าทั้งหมดได้ดังตารางที่ 4.10 พบว่าเมื่อนำค่ามาจำแนกประเภทของดินโดยใช้ระบบ USCS พบว่าดินเหนียวอ่อนปากพนังเป็นดินจำพวก High plasticity clay (CH) โดยดินมีค่าความชื้นในมวลดินตามธรรมชาติสูงกว่าค่า Liquid limit ทำให้ตัวดินรับกำลังได้น้อย และทำให้ชั้นดินเหนียวอ่อนของอำเภอปากพนังนั้นมีการทรุดตัวสูงเมื่อดินทำการรับแรง

จากผลการทดสอบในสนามและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้ค่าคุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติวิศวกรรม โดยสามารถนำมาวิเคราะห์ผลการทดสอบและสรุปการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติต่างๆของดินเหนียวอ่อนปากพนังกับความลึกได้ดังนี้

ขีดพิกัฒเลหว (Liquid limit) จากตัวอย่างดินที่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมดพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 61.7 – 68.5% และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 64.9% และเมื่อพิจารณาขีดพิกัฒเลหวเทียบกับระดับความลึก พบว่าขีดพิกัฒเลหวมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดความลึกในชั้นดิน

ขีดพิกัฒพลาสติก (Plastic limit) จากตัวอย่างดินที่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมดพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 24.6 – 36.1% และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 29.9 % และเมื่อพิจารณาขีดพิกัฒพลาสติกเทียบกับระดับความลึก พบว่าขีดพิกัฒพลาสติกมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดความลึกในชั้นดิน

ดัชนึพลาสติก (Plasticity index) เป็นค่าที่บอกถึงสภาพพลาสติกของดิน จากตัวอย่างดินที่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมดพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 30.0 – 41.5% และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 34.9 % ซึ่งจะพบว่าดัชนึพลาสติกมีค่าสูงแสดงว่าดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้จะเกิดการยุบตัวหรือหดตัวสูงเมื่อน้ำระเหยออกไปจากมวลดิน เมื่อพิจารณาดัชนึพลาสติกเมื่อเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่าดัชนึพลาสติกมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดความลึกในชั้นดิน

ค่าความชื้นในธรรมชาติ (Natural water content) จากตัวอย่างดินที่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมดพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 71.1 – 79.7% และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 72.1 % เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่า ค่าความชื้นในธรรมชาติมีค่ามากกว่าขีดพิกัฒเลหว ทำให้ดินอยู่ในสภาพของเลหว จากค่าเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่าชั้นดินเหนียวของปากพนังที่ความลึกจากผิวดินประมาณ 1.00 เมตรถึงความลึกประมาณ 18.00 เมตรเป็นดินเหนียวอ่อน และเมื่อพิจารณาค่าความชื้นในธรรมชาติเมื่อเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่าค่าของค่าความชื้นในธรรมชาติ ค่อนข้างคงที่ตลอดความลึกในชั้นดินจะถึงระดับความลึกประมาณ 16.50 เมตร ค่าความชื้นในธรรมชาติมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าชั้นดินเริ่มเปลี่ยนจากดินเหนียวอ่อนเป็นดินเหนียวแข็ง

หน่วยน้ำหนักรวม (Total unit weight) จากตัวอย่างดินที่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมดพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1.68 – 1.79  $\text{t/m}^3$  และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.74  $\text{t/m}^3$  เมื่อหน่วยน้ำหนักรวม เทียบกับระดับความลึก พบว่าหน่วยน้ำหนักรวมมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดความลึกในชั้นดิน

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) จากตัวอย่างดินที่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 2.67 – 2.77 และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.71 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่ามาตรฐานของดินชนิดต่างๆ พบว่าอยู่ในช่วงของดินเหนียว และเมื่อเปรียบเทียบกับระดับความลึก พบว่าความถ่วงจำเพาะมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดความลึกในชั้นดิน

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพรางของหลุมเจาะ BH - 1

Depth (m.)	Atterberg's Limit			Natural Water Content %	Unit Weight t./m. <sup>3</sup>	Specific Gravity
	LL	PL	PI			
1.50 - 1.95	64.5	29.7	34.8	39.4	1.93	2.72
3.00 - 3.45	63.5	27.2	36.3	71.4	1.71	2.68
4.50 - 4.95	64.2	28.3	35.9	72.4	1.72	2.69
6.00 - 6.45	63.7	28.7	35.0	71.9	1.73	2.70
7.50 - 7.95	64.6	27.9	36.7	72.9	1.76	2.71
9.00 - 9.45	63.9	28.1	35.8	73.1	1.72	2.73
10.50 - 10.95	63.7	27.5	36.2	72.4	1.74	2.70
12.00 - 12.45	64.2	27.5	36.7	72.8	1.72	2.69
13.50 - 13.95	64.8	28.2	36.6	72.4	1.74	2.72
15.00 - 15.45	63.1	28.4	34.7	71.9	1.76	2.71
16.50 - 16.95	64.6	27.4	37.2	72.5	1.73	2.68
<b>18.00 - 18.45</b>	<b>54.1</b>	<b>24.4</b>	<b>29.7</b>	<b>40.4</b>	<b>1.93</b>	<b>2.73</b>

หมายเหตุ ตัวอักษรสีแดงหมายความว่า ตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียวแข็ง

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH - 2

Depth (m.)	Atterberg's Limit			Natural Water Content %	Unit Weight t./m. <sup>3</sup>	Specific Gravity
	LL	PL	PI			
1.50 - 1.95	64.4	25.8	38.6	32.5	1.91	2.73
3.00 - 3.45	63.9	28.2	35.7	71.3	1.72	2.70
4.50 - 4.95	64.1	27.5	36.6	72.8	1.75	2.68
6.00 - 6.45	63.8	28.1	35.7	72.5	1.72	2.69
7.50 - 7.95	63.1	27.9	35.2	72.9	1.74	2.72
9.00 - 9.45	63.4	28.0	35.4	71.4	1.76	2.77
10.50 - 10.95	63.9	28.5	35.4	72.6	1.77	2.74
12.00 - 12.45	64.0	29.3	34.7	71.8	1.79	2.71
13.50 - 13.95	63.7	27.2	36.5	72.8	1.72	2.69
15.00 - 15.45	64.2	28.6	35.6	72.9	1.68	2.74
16.50 - 16.95	52.7	23.6	29.1	32.4	1.88	2.71

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH - 3

Depth (m.)	Atterberg's Limit			Natural Water Content %	Unit Weight t./m. <sup>3</sup>	Specific Gravity
	LL	PL	PI			
1.50 - 1.95	63.9	28.7	35.2	71.1	1.74	2.73
3.00 - 3.45	64.9	29.2	35.7	72.8	1.76	2.69
4.50 - 4.95	63.6	27.9	35.7	72.1	1.75	2.72
6.00 - 6.45	64.1	28.8	35.3	71.9	1.72	2.73
7.50 - 7.95	64	29.5	34.5	71.8	1.76	2.68
9.00 - 9.45	63.7	28.4	35.3	71.9	1.76	2.71
10.50 - 10.95	64.8	29.1	35.7	72.0	1.74	2.76
12.00 - 12.45	63.5	29	34.5	72.4	1.71	2.70
13.50 - 13.95	63.9	28.7	35.2	72.5	1.75	2.74
15.00 - 15.45	65.4	31.5	33.9	36.9	1.93	2.77

หมายเหตุ ตัวอักษรสีแดงหมายความว่า ตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียวแข็ง



ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH - 4

Depth (m.)	Atterberg's Limit			Natural Water Content %	Unit Weight t./m. <sup>3</sup>	Specific Gravity
	LL	PL	PI			
1.50 - 1.95	64.5	30	34.5	71.6	1.71	2.72
3.00 - 3.45	64.8	29.7	35.1	72.8	1.76	2.72
4.50 - 4.95	64.2	28.8	35.4	72.5	1.71	2.71
6.00 - 6.45	64.7	29.4	35.3	71.2	1.76	2.69
7.50 - 7.95	63.8	27.9	35.9	71.9	1.72	2.69
9.00 - 9.45	64.9	29.6	35.3	72.3	1.74	2.73
10.50 - 10.95	64.5	29.3	35.2	71.9	1.76	2.74
12.00 - 12.45	64.9	29.4	35.5	72.8	1.73	2.71
13.50 - 13.95	63.8	28.1	35.7	72.5	1.77	2.74
15.00 - 15.45	58.6	25.8	32.8	34.1	1.87	2.83

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH - 5

Depth (m.)	Atterberg's Limit			Natural Water Content %	Unit Weight t./m. <sup>3</sup>	Specific Gravity
	LL	PL	PI			
1.50 - 1.95	63.9	28.1	35.8	72.9	1.72	2.73
3.00 - 3.45	64.1	28.4	35.7	71.9	1.73	2.69
4.50 - 4.95	64.0	29.7	34.3	71.5	1.76	2.74
6.00 - 6.45	63.8	27.9	35.9	72.0	1.74	2.72
7.50 - 7.95	64.2	29.2	35.0	71.5	1.77	2.68
9.00 - 9.45	63.7	28.2	35.5	72.4	1.72	2.70
10.50 - 10.95	64.5	29.1	35.4	71.7	1.73	2.71
12.00 - 12.45	64.8	29.4	35.4	72.3	1.74	2.69
13.50 - 13.95	63.2	27.3	35.9	72.8	1.72	2.69
15.00 - 15.45	46.5	23.7	22.8	22.5	1.97	2.70
16.50 - 16.95	43.4	20.3	23.1	24.3	1.99	2.75

หมายเหตุ ตัวอักษรสีแดงหมายความว่า ตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียวแข็ง

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH - 6

Depth (m.)	Atterberg's Limit			Natural Water Content %	Unit Weight t/m. <sup>3</sup>	Specific Gravity
	LL	PL	PI			
1.50 - 1.95	63.9	29.4	34.5	72.8	1.74	2.73
3.00 - 3.45	64.1	28.9	35.2	71.5	1.76	2.75
4.50 - 4.95	64.7	30.6	34.1	71.4	1.74	2.71
6.00 - 6.45	64.5	29.9	34.6	72.1	1.73	2.74
7.50 - 7.95	63.2	27.4	35.8	72.3	1.73	2.73
9.00 - 9.45	63.3	28.9	34.4	71.9	1.70	2.69
10.50 - 10.95	64.4	29.8	34.6	71.8	1.72	2.69
12.00 - 12.45	63.9	29.7	34.2	71.6	1.75	2.75
13.50 - 13.95	64.1	29.4	34.7	71.9	1.77	2.74
15.00 - 15.45	63.7	28.1	35.6	72.5	1.75	2.70
16.50 - 16.95	63.1	27.6	35.5	72.4	1.79	2.69
18.00 - 18.45	63.8	29.5	34.3	71.1	1.79	2.70
19.50 - 19.95	43.9	19.3	24.6	24.9	1.98	2.64
21.00 - 21.45	46.5	23.7	22.8	25.7	2.01	2.75

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพั้งของหลุมเจาะ BH - 7

Depth (m.)	Atterberg's Limit			Natural Water Content %	Unit Weight t/m. <sup>3</sup>	Specific Gravity
	LL	PL	PI			
1.50 - 1.95	62.4	31.3	31.1	42.4	1.93	2.73
3.00 - 3.45	64.5	29.0	35.5	71.9	1.79	2.75
4.50 - 4.95	63.8	28.4	35.4	72.6	1.74	2.72
6.00 - 6.45	64.2	28.5	35.7	71.8	1.73	2.71
7.50 - 7.95	64.0	29.0	35.0	72.4	1.74	2.70
9.00 - 9.45	63.1	28.4	34.7	72.5	1.76	2.69
10.50 - 10.95	63.6	28.0	35.6	71.5	1.75	2.74
12.00 - 12.45	63.4	28.1	35.3	71.4	1.73	2.69
13.50 - 13.95	64.7	29.5	35.2	72.0	1.75	2.74
15.00 - 15.45	43.9	22.1	21.8	28.9	1.98	2.76
16.50 - 16.95	46.2	23.7	22.5	27.9	1.97	2.83

หมายเหตุ ตัวอักษรสีแดงหมายความว่า ตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียวแข็ง

ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากผนังของหลุมเจาะ BH - 8

Depth (m.)	Atterberg's Limit			Natural Water Content %	Unit Weight t./m. <sup>3</sup>	Specific Gravity
	LL	PL	PI			
1.50 - 1.95	63.5	29.3	34.2	72.6	1.73	2.70
3.00 - 3.45	64.7	30.2	34.5	71.8	1.75	2.69
4.50 - 4.95	64.3	30.0	34.3	72.4	1.72	2.71
6.00 - 6.45	64.5	29.2	35.3	71.5	1.74	2.74
7.50 - 7.95	63.2	28.4	34.8	71.8	1.75	2.67
9.00 - 9.45	63.9	29.1	34.8	72.1	1.73	2.68
10.50 - 10.95	63.6	29.5	34.1	72.3	1.78	2.69
12.00 - 12.45	63.9	28.4	35.5	72.5	1.72	2.74
13.50 - 13.95	64.5	28.6	35.9	71.9	1.75	2.72
15.00 - 15.45	64.3	30.1	34.2	72.7	1.74	2.74
16.50 - 16.95	43.9	24.6	19.3	28.1	1.93	2.80
18.00 - 18.45	41.8	22.1	19.7	25.7	1.95	2.68

ตารางที่ 4.9 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากผนังของหลุมเจาะ BH - 9

Depth (m.)	Atterberg's Limit			Natural Water Content %	Unit Weight t./m. <sup>3</sup>	Specific Gravity
	LL	PL	PI			
1.50 - 1.95	64.5	30.4	34.1	40.7	1.94	2.70
3.00 - 3.45	64.9	30.6	34.3	72.8	1.75	2.69
4.50 - 4.95	64.2	29.7	34.5	72.5	1.73	2.71
6.00 - 6.45	63.9	28.2	35.7	71.2	1.74	2.73
7.50 - 7.95	64.2	29.0	35.2	72.4	1.76	2.70
9.00 - 9.45	63.8	29.1	34.7	72.6	1.71	2.71
10.50 - 10.95	64.7	29.4	35.3	71.5	1.75	2.69
12.00 - 12.45	64.3	29.1	35.2	71.5	1.74	2.71
13.50 - 13.95	64.6	29.4	35.2	72.3	1.76	2.71
15.00 - 15.45	63.9	28.6	35.3	72.4	1.72	2.72
16.50 - 16.95	41.4	20.9	20.5	14.2	2.01	2.69
18.00 - 18.45	43.9	24.1	19.8	15.9	1.98	2.67

หมายเหตุ ตัวอักษรสีแดงหมายความว่า ตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียวแข็ง

ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

คุณสมบัติดัชนี	ช่วงข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	SD
Liquid limit, LL	61.7 – 68.5	64.9	1.644
Plastic limit, PL	36.1 – 24.6	29.9	2.401
Plasticity index, PI	30.0 – 41.5	34.9	2.572
Natural water content, %	71.1 – 79.7	72.1	2.078
Unit weight, t/m. <sup>3</sup>	1.68 – 1.79	1.74	0.021
Specific gravity, G <sub>s</sub>	2.67 – 2.77	2.71	0.022
Color	Dark Gray	-	-
Soil classification, USSC	CH	-	-

จำนวนตัวอย่างทดสอบ 85 ตัวอย่าง จาก 9 หลุมทดสอบ

ผลการทดสอบของคุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวปากพนัง(ตารางที่ 4.1 – 4.9) โดยมีตัวอย่างทดสอบจำนวน 85 จาก 9 หลุมทดสอบพบว่า ดินเหนียวปากพนังของแต่ละหลุมทดสอบนั้น มีค่าคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันมาก และไม่ขึ้นอยู่กับความลึก ดังสรุปได้ในตารางที่ 4.10 ดินเหนียวปากพนังมีค่าความชื้นในธรรมชาติอยู่ในช่วง 71.1 – 79.7 % จึงจัดว่าดินเหนียวปากพนังอยู่ในช่วงของดินเหนียวอ่อน เมื่อวิเคราะห์ค่าขีดพิภักต์เหลวและดัชนีพลาสติกอยู่ในช่วง 61.7 – 68.5 % และ 30.0 – 41.5% เมื่อนำค่ามาวิเคราะห์เพื่อจำแนกดินโดยระบบของ USCS สามารถจำแนกได้เป็น CH ค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวปากพนังอยู่ในช่วง 2.67 – 2.77

#### 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม (Engineering Properties)

ผลการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวอ่อนบริเวณอำเภอปากพนัง โดยการทดสอบในสนามเช่น การทดสอบแรงเฉือนในที่ด้วยใบพัด การทดสอบการคอกทะลวงมาตรฐาน และการทดสอบในห้องปฏิบัติการเช่น การทดสอบแรงอัดแกนเดียว การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ และการทดสอบแรงอัดสามแกน โดยใช้ตัวอย่างจาก 9 หลุมเจาะเป็นจำนวน 85 ตัวอย่างและผลการทดสอบ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11 – 4.19 และสามารถสรุปค่าต่างๆของคุณสมบัติวิศวกรรมได้ดังแสดงในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.11 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากบ่อกองหลุมเจาะ BH – 1

Depth (m.)	$S_u$ (FV-Test) (t/m. <sup>2</sup> )	$S_u$ (USC) (t/m. <sup>2</sup> )	$C_c$	$C_r$	$C_v$ (m. <sup>2</sup> /year)	$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	OCR	C (t/m. <sup>2</sup> )	$C'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$\phi$ (degree)	$\phi'$ (degree)	$a'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$\alpha'$ (degree)	SPT (blows/ft.)
1.50 - 1.95	Stiff Clay													13
3.00 - 3.45	2.77	1.27	0.864	0.097	1.818	3.60	1.13	2.00	2.80	15.64	24.70	0.25	24.20	1
4.50 - 4.95	2.90	1.24	0.812	0.121	1.327	4.46	1.03	2.00	3.20	15.64	24.70	0.31	24.20	1
6.00 - 6.45	3.04	1.39	0.738	0.141	0.962	5.20	0.95	2.00	3.60	17.74	25.64	0.34	26.56	1
7.50 - 7.95	3.00	1.32	0.687	0.150	0.608	6.00	0.88	2.20	4.00	17.74	25.64	0.39	26.56	1
9.00 - 9.45	3.14	1.47	0.681	0.155	0.490	7.10	0.94	2.50	4.80	18.77	23.75	0.43	24.22	1
10.50 - 10.95	3.01	1.44	0.562	0.169	0.308	7.54	0.85	2.70	4.90	18.77	23.75	0.44	24.22	1
12.00 - 12.45	3.12	2.29	0.465	0.178	0.204	8.10	0.83	3.20	5.10	17.74	30.11	0.46	28.81	1
13.50 - 13.95	3.24	2.10	0.436	0.183	0.169	9.08	0.82	3.60	6.00	17.74	30.11	0.48	28.81	1
15.00 - 15.45	4.13	2.18	0.374	0.189	0.128	9.85	0.79	4.20	6.70	17.74	30.11	0.50	28.81	2
16.50 - 16.95	4.29	2.04	0.311	0.194	0.098	10.61	0.81	4.90	7.40	18.77	30.11	0.51	28.81	2
18.00 - 18.45	Stiff Clay													12

Note :  $S_u$ (FV-Test) = Undrained Shear Strength from Field Vane Shear test,  $S_u$ (USC) = Undrained Shear Strength from Unconfine Compression Test,  $C_c$  = Compression Index,  $C_r$  = Recompression Index,  $C_v$  = Coefficient of Consolidation, OCR = Over Consolidation Ratio

หมายเหตุ : ตัวอักษรสีแดงในค่า  $C_v$  เป็นค่าที่ไม่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ 4.12 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากบ่อกองหลุมเจาะ BH - 2

Depth (m.)	$S_u$ (FV-Test) (t/m. <sup>2</sup> )	$S_u$ (USC) (t/m. <sup>2</sup> )	$C_c$	$C_r$	$C_{v(150)}$ (m. <sup>2</sup> /year)	$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	OCR	C (t/m. <sup>2</sup> )	C' (t/m. <sup>2</sup> )	$\phi$ (degree)	$\phi'$ (degree)	a' (t/m. <sup>2</sup> )	$\alpha'$ (degree)	SPT (blows/ft.)
1.50 - 1.95	Stiff Clay Sample													7
3.00 - 3.45	3.86	1.26	0.664	0.120	0.824	3.70	1.14	2.10	3.00	15.64	25.64	0.31	21.80	3
4.50 - 4.95	4.07	1.22	0.611	0.125	0.752	4.60	1.02	2.20	3.50	15.64	25.64	0.37	21.80	3
6.00 - 6.45	3.86	1.44	0.568	0.130	0.698	5.50	1.02	2.40	4.00	17.74	25.64	0.41	24.22	2
7.50 - 7.95	3.51	1.38	0.538	0.135	0.560	6.30	0.95	2.50	4.20	17.74	25.64	0.43	24.22	3
9.00 - 9.45	3.63	1.44	0.480	0.141	0.520	7.20	0.90	2.60	4.80	19.79	24.70	0.45	24.22	2
10.50 - 10.95	3.99	1.62	0.465	0.146	0.449	8.00	0.87	2.90	5.00	19.79	24.70	0.47	24.22	3
12.00 - 12.45	4.25	2.13	0.454	0.152	0.393	8.80	0.83	3.20	5.20	19.75	31.38	0.48	26.56	3
13.50 - 13.95	4.43	2.66	0.392	0.159	0.376	9.70	0.90	3.30	6.00	19.75	31.38	0.50	26.56	4
15.00 - 15.45	4.70	2.45	0.355	0.165	0.348	10.56	0.94	3.50	6.60	19.79	31.38	0.52	26.56	4
16.50 - 16.95	Stiff Clay Sample													14

ตารางที่ 4.13 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากบ่อกำจัดของหลุมเจาะ BH – 3

Depth (m.)	$S_u$ (FV-Test) (t/m. <sup>2</sup> )	$S_u$ (USC) (t/m. <sup>2</sup> )	$C_c$	$C_r$	$C_{v(50)}$ (m. <sup>2</sup> /year)	$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	OCR	$C$ (t/m. <sup>2</sup> )	$C'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$\phi$ (degree)	$\phi'$ (degree)	$a'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$\alpha'$ (degree)	SPT (blows/ft.)
1.50 - 1.95	4.23	1.24	0.974	0.099	2.573	3.26	1.47	1.50	2.70	15.64	21.80	0.19	21.80	4
3.00 - 3.45	3.86	1.33	0.930	0.105	2.412	3.80	1.11	1.70	2.80	15.64	21.80	0.28	21.80	3
4.50 - 4.95	3.62	1.31	0.862	0.112	1.719	4.68	1.04	1.80	3.30	15.64	23.40	0.34	22.40	3
6.00 - 6.45	3.51	1.35	0.795	0.120	1.234	5.50	1.02	2.00	4.00	17.74	23.74	0.38	23.02	3
7.50 - 7.95	3.53	1.44	0.739	0.130	1.182	6.24	0.91	2.30	4.10	17.74	23.70	0.41	23.02	3
9.00 - 9.45	4.23	1.43	0.681	0.136	1.012	7.10	0.89	2.40	4.50	18.26	25.64	0.42	21.80	4
10.50 - 10.95	4.46	1.57	0.639	0.145	0.906	7.52	0.85	2.80	4.90	18.26	25.64	0.45	21.80	4
12.00 - 12.45	4.74	2.17	0.596	0.155	0.843	8.00	0.83	3.30	5.20	16.70	29.24	0.47	24.22	4
13.50 - 13.95	5.07	2.22	0.527	0.165	0.696	8.94	0.79	3.50	6.00	16.70	29.24	0.48	24.22	4
15.00 - 15.45	Stiff Clay Sample													14

ตารางที่ 4.14 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากบ่อกำเนิดของหลุมเจาะ BH - 4

Depth (m.)	$S_u$ (FV-Test) (t/m. <sup>2</sup> )	$S_u$ (USC) (t/m. <sup>2</sup> )	$C_c$	$C_r$	$C_{v(150)}$ (m. <sup>2</sup> /year)	$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	OCR	$C$ (t/m. <sup>2</sup> )	$C'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$\phi$ (degree)	$\phi'$ (degree)	$a'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$\alpha'$ (degree)	SPT (blows/ft.)
1.50 - 1.95	3.05	1.42	0.907	0.078	2.134	3.62	1.70	1.90	2.80	16.69	22.78	0.28	21.80	2
3.00 - 3.45	3.28	1.40	0.864	0.092	1.692	4.20	1.23	2.00	3.10	16.69	22.78	0.32	21.80	2
4.50 - 4.95	3.51	1.31	0.824	0.099	1.498	4.96	1.16	2.20	3.40	17.74	22.78	0.34	21.80	2
6.00 - 6.45	3.75	1.28	0.795	0.107	1.421	5.70	1.00	2.40	3.70	17.74	25.64	0.37	24.23	2
7.50 - 7.95	3.85	1.34	0.741	0.126	1.114	6.30	0.97	2.50	4.20	17.74	25.64	0.40	24.23	3
9.00 - 9.45	4.23	1.47	0.681	0.137	0.913	7.10	0.91	2.70	4.80	17.74	26.10	0.44	24.23	3
10.50 - 10.95	4.35	1.53	0.658	0.161	0.863	7.64	0.84	3.00	5.10	17.74	26.10	0.47	24.23	4
12.00 - 12.45	4.46	2.06	0.625	0.190	0.781	8.20	0.83	3.20	5.50	17.22	27.92	0.51	24.23	3
13.50 - 13.95	5.05	2.12	0.575	0.205	0.690	8.98	0.78	3.40	6.20	17.22	27.92	0.56	24.23	4
15.00 - 15.45	Stiff Clay Sample													11



ตารางที่ 4.15 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากบ่อกำแพงของหลุมเจาะ BH – 5

Depth (m.)	$S_u$ (FV-Test) (t/m. <sup>2</sup> )	$S_u$ (USC) (t/m. <sup>2</sup> )	$C_c$	$C_r$	$C_{v(50)}$ (m. <sup>2</sup> /year)	$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	OCR	$C$ (t/m. <sup>2</sup> )	$C'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$\phi$ (degree)	$\phi'$ (degree)	$a'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$\alpha'$ (degree)	SPT (blows/ft.)
1.50 - 1.95	3.86	1.38	0.891	0.086	12.676	2.37	1.09	1.70	2.80	16.69	22.78	0.28	21.80	3
3.00 - 3.45	3.98	1.36	0.864	0.095	7.098	3.40	1.04	1.80	3.00	16.69	24.70	0.30	21.80	2
4.50 - 4.95	4.26	1.20	0.812	0.104	4.616	4.20	0.92	2.00	3.40	16.73	24.70	0.34	21.80	2
6.00 - 6.45	4.45	1.24	0.759	0.114	2.620	4.60	0.83	2.20	3.80	16.73	24.70	0.37	21.80	3
7.50 - 7.95	4.48	1.77	0.732	0.126	2.077	6.03	0.87	2.40	4.10	16.73	25.64	0.40	21.80	3
9.00 - 9.45	4.58	1.92	0.681	0.138	1.793	7.60	1.01	2.80	4.80	17.75	25.64	0.44	24.22	2
10.50 - 10.95	4.59	2.32	0.653	0.152	1.073	7.86	0.90	2.90	5.00	17.75	25.64	0.47	24.22	3
12.00 - 12.45	4.71	2.00	0.625	0.168	0.690	8.50	0.85	3.10	5.30	17.22	28.36	0.49	25.56	3
13.50 - 13.95	4.69	2.19	0.573	0.184	0.611	9.69	0.90	3.50	6.10	17.22	28.36	0.56	25.56	3
15.00 - 15.45	Stiff Clay Sample													32
16.50 - 16.95	Stiff Clay Sample													30

ตารางที่ 4.16 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากบ่อกำแพงของหลุมเจาะ BH – 6

Depth (m.)	$S_u$ (FV-Test) (t/m. <sup>2</sup> )	$S_u$ (USC) (t/m. <sup>2</sup> )	$C_c$	$C_r$	$C_{v(50)}$ (m. <sup>2</sup> /year)	$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	OCR	$C$ (t/m. <sup>2</sup> )	$C'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$\phi$ (degree)	$\phi'$ (degree)	$a'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$\alpha'$ (degree)	SPT (blows/ft.)
1.50 - 1.95	4.14	1.31	0.964	0.102	3.942	2.22	1.00	1.90	2.90	17.74	25.17	0.28	21.80	4
3.00 - 3.45	3.51	1.33	0.930	0.106	2.772	3.10	0.91	2.10	3.10	18.26	25.17	0.30	24.22	2
4.50 - 4.95	3.67	1.19	0.861	0.116	2.359	3.97	0.89	2.10	3.60	18.26	24.22	0.34	24.22	2
6.00 - 6.45	3.65	1.13	0.795	0.129	2.038	4.85	0.89	2.40	4.20	17.74	24.22	0.39	21.80	2
7.50 - 7.95	4.21	1.45	0.758	0.131	1.518	5.72	0.87	2.40	4.40	17.74	24.22	0.41	21.80	3
9.00 - 9.45	4.62	1.88	0.681	0.138	1.317	6.60	0.91	2.50	4.80	17.22	25.64	0.46	25.64	3
10.50 - 10.95	4.73	1.76	0.655	0.148	1.032	7.47	0.86	3.00	5.40	17.22	25.64	0.51	25.64	4
12.00 - 12.45	4.63	2.88	0.625	0.156	0.822	8.35	0.82	3.60	5.90	17.74	27.02	0.55	27.02	4
13.50 - 13.95	4.97	2.56	0.552	0.167	0.732	9.22	0.80	4.10	6.60	17.74	27.02	0.62	27.02	4
15.00 - 15.45	4.70	2.74	0.501	0.178	0.625	10.10	0.82	4.80	7.30	17.22	27.02	0.68	27.14	4
16.50 - 16.95	5.42	2.33	0.449	0.189	0.538	10.97	0.77	5.50	8.10	17.74	27.02	0.75	27.14	4
18.00 - 18.45	4.75	2.11	0.398	0.201	0.466	11.84	0.77	6.40	9.00	17.74	27.02	0.83	27.14	4
19.50 - 19.95	Stiff Clay Sample													31
21.00 - 21.45	Stiff Clay Sample													35

ตารางที่ 4.17 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากบ่อกองหลุมเจาะ BH - 7

Depth (m.)	$S_u$ (FV-Test) (t/m. <sup>2</sup> )	$S_u$ (USC) (t/m. <sup>2</sup> )	$C_c$	$C_r$	$C_{v(50)}$ (m. <sup>2</sup> /year)	$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	OCR	$C$ (t/m. <sup>2</sup> )	$C'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$\phi$ (degree)	$\phi'$ (degree)	$a'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$\alpha'$ (degree)	SPT (blows/ft.)
1.50 - 1.95	Stiff Clay Sample													8
3.00 - 3.45	3.63	1.27	0.963	0.108	1.902	3.33	0.94	1.90	3.20	17.74	25.64	0.31	24.22	4
4.50 - 4.95	3.39	1.22	0.836	0.117	1.341	4.12	0.93	2.10	3.70	17.74	25.64	0.38	24.22	2
6.00 - 6.45	3.50	1.32	0.738	0.131	0.915	4.91	0.90	2.40	4.40	19.79	27.02	0.45	21.82	2
7.50 - 7.95	4.00	1.38	0.714	0.138	0.574	5.70	0.86	2.60	4.50	19.79	27.02	0.46	21.82	3
9.00 - 9.45	4.25	1.75	0.681	0.140	0.477	6.49	0.81	2.80	4.80	17.74	26.56	0.47	24.22	3
10.50 - 10.95	4.70	1.86	0.644	0.164	0.272	7.28	0.81	3.20	5.40	17.74	26.56	0.52	24.22	4
12.00 - 12.45	4.59	2.09	0.625	0.185	0.171	8.07	0.82	3.60	5.90	16.69	27.92	0.55	25.41	4
13.50 - 13.95	4.83	2.11	0.596	0.194	0.140	8.86	0.79	3.90	6.60	16.69	27.29	0.56	25.41	4
15.00 - 15.45	Stiff Clay Sample													31
16.50 - 16.95	Stiff Clay Sample													20

ตารางที่ 4.18 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากบ่อกองหลุมเจาะ BH – 8

Depth (m.)	$S_u$ (FV-Test) (t/m. <sup>2</sup> )	$S_u$ (USC) (t/m. <sup>2</sup> )	$C_c$	$C_r$	$C_{v(150)}$ (m. <sup>2</sup> /year)	$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	OCR	C (t/m. <sup>2</sup> )	C' (t/m. <sup>2</sup> )	$\phi$ (degree)	$\phi'$ (degree)	a' (t/m. <sup>2</sup> )	$\alpha'$ (degree)	SPT (blows/ft.)
1.50 - 1.95	3.90	1.88	0.927	0.097	2.521	3.07	1.40	1.70	2.70	17.74	21.80	0.14	21.80	4
3.00 - 3.45	3.29	1.25	0.864	0.102	1.698	3.84	1.14	1.80	3.00	17.74	21.80	0.28	21.80	2
4.50 - 4.95	3.42	1.11	0.827	0.112	1.404	4.61	1.07	2.10	3.40	16.70	22.78	0.35	21.80	2
6.00 - 6.45	3.63	1.05	0.795	0.123	1.183	5.38	0.97	2.40	3.80	16.70	22.78	0.40	21.80	2
7.50 - 7.95	3.41	1.08	0.727	0.130	0.874	6.15	0.91	2.50	4.30	16.70	22.78	0.45	21.80	2
9.00 - 9.45	4.73	1.31	0.681	0.146	0.747	6.92	0.90	2.70	5.00	17.74	27.47	0.48	22.74	4
10.50 - 10.95	4.63	1.46	0.627	0.151	0.586	7.69	0.82	3.00	5.40	17.74	27.47	0.51	22.74	4
12.00 - 12.45	5.06	1.82	0.568	0.158	0.468	8.46	0.87	3.20	6.00	17.74	24.22	0.56	24.22	4
13.50 - 13.95	5.16	2.03	0.526	0.176	0.415	9.23	0.82	3.60	6.90	17.74	24.22	0.56	24.22	4
15.00 - 15.45	5.35	2.76	0.476	0.189	0.355	10.00	0.82	3.90	7.70	17.74	24.22	0.58	24.22	5
16.50 - 16.95	Stiff Clay Sample													21
18.00 - 18.45	Stiff Clay Sample													25

ตารางที่ 4.19 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากบ่อกองหลุมเจาะ BH - 9

Depth (m.)	$S_u$ (FV-Test) (t/m. <sup>2</sup> )	$S_u$ (USC) (t/m. <sup>2</sup> )	$C_c$	$C_r$	$C_{v(50)}$ (m. <sup>2</sup> /year)	$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	OCR	C (t/m. <sup>2</sup> )	C' (t/m. <sup>2</sup> )	$\phi$ (degree)	$\phi'$ (degree)	a' (t/m. <sup>2</sup> )	$\alpha'$ (degree)	SPT (blows/ft.)
1.50 - 1.95	Stiff Clay Sample													8
3.00 - 3.45	3.90	1.23	0.830	0.092	2.363	3.79	1.12	2.00	3.20	18.77	23.75	0.35	24.22	4
4.50 - 4.95	3.90	1.28	0.755	0.101	1.763	4.51	1.03	2.30	3.60	18.77	23.75	0.39	24.22	3
6.00 - 6.45	3.98	1.37	0.681	0.111	1.351	5.23	0.94	2.60	4.00	18.77	23.75	0.42	24.22	3
7.50 - 7.95	4.35	1.33	0.648	0.119	1.138	5.95	0.87	2.60	4.50	18.74	23.75	0.46	24.22	4
9.00 - 9.45	4.61	1.41	0.568	0.127	0.883	6.67	0.89	2.80	5.50	17.74	21.31	0.52	24.22	4
10.50 - 10.95	4.83	1.37	0.541	0.140	0.772	7.39	0.82	3.00	5.70	17.74	21.31	0.55	24.22	4
12.00 - 12.45	4.95	2.16	0.511	0.153	0.671	8.11	0.81	3.20	6.00	16.69	22.29	0.58	26.56	4
13.50 - 13.95	5.07	2.34	0.434	0.166	0.544	8.83	0.77	3.50	7.00	16.69	22.29	0.65	26.56	4
15.00 - 15.45	5.19	2.55	0.380	0.180	0.462	9.55	0.80	3.80	7.90	18.74	23.75	0.71	26.56	4
16.50 - 16.95	Stiff Clay Sample													40
18.00 - 18.45	Stiff Clay Sample													32

#### 4.3.1 พารามิเตอร์กำลังเฉือน (Shear Strength Parameter)

a.) ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (ตารางที่ 4.11 – 4.19) กำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ Field vane shear test (FV-Test) มีค่าอยู่ในช่วง 2.77 – 5.42 ตันต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ย 4.12 ตันต่อตารางเมตร ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบ UC Test ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.05 – 2.88 ตันต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ย 1.67 ตันต่อตารางเมตร และค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน(Cohesion) การทดสอบ CU triaxial test แบบความดันรวมมีค่าอยู่ในช่วง 1.50 – 6.40 ตันต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.80 ตันต่อตารางเมตร และแบบความดันประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง 2.70 – 9.00 ตันต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.70 ตันต่อตารางเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าของดินจากแหล่งต่างจากตารางที่ 2.4 พบว่า ค่าของดินปากพนังมีความใกล้เคียงกับดินเหนียวจากแหล่งต่างๆ และเมื่อวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ โดยทำการเปรียบเทียบกับความลึกพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกของชั้นดิน

b.) มุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle) ของดินเหนียวอ่อนปากพนังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองลักษณะคือ แบบความดันรวม และแบบความดันประสิทธิผล โดยค่าของมุมเสียดทานภายในแบบความดันรวมมีค่าอยู่ในช่วง 15.64 – 19.79 องศา และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17.61 องศา และแบบความดันประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง 21.31 – 31.38 องศา และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.47 องศา โดยจะสังเกตได้ว่า ค่ามุมเสียดทานภายในแบบความดันประสิทธิผลจะมีค่ามากกว่าแบบความดันรวม เพราะค่า  $\sigma'_1$  จะเท่ากับ  $\sigma_1$  ลบด้วยแรงดันน้ำส่วนเกิน ทำให้ Mohr circle เคลื่อนที่ไปทางด้านซ้าย (ดังแสดงในรูปที่ 4.3) ทำให้ค่ามุมเสียดทานแบบความดันประสิทธิผลมีค่ามากกว่า และค่ามุมเสียดทานภายในนี้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับความลึก

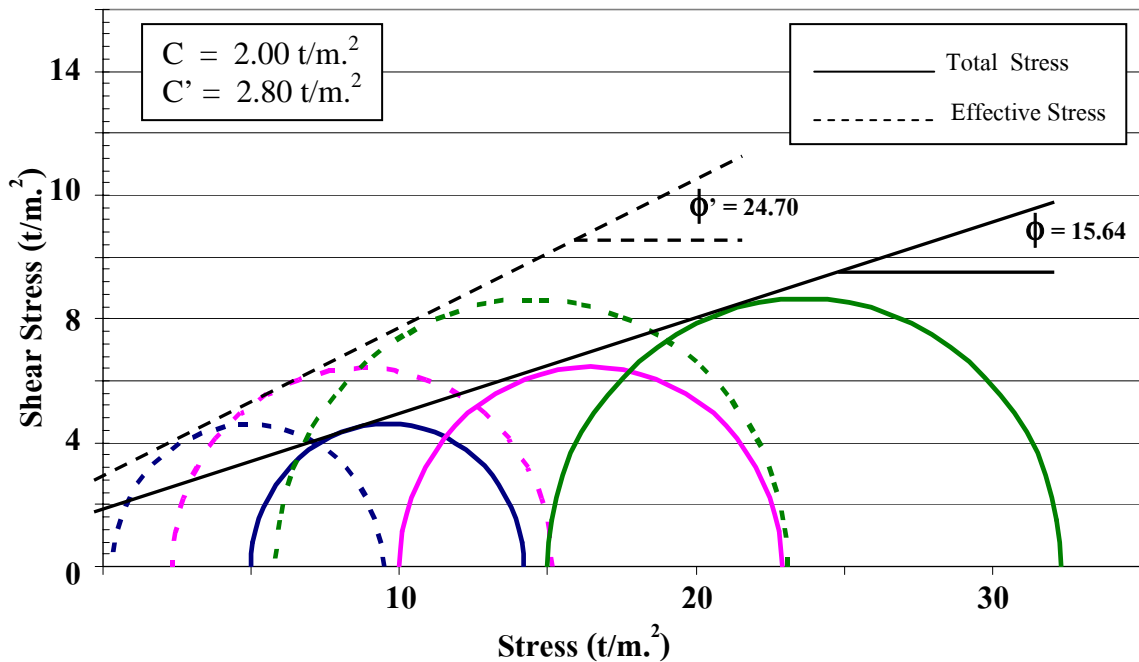
c.) ค่า Undrained modulus of elasticity ( $E_u$ ) เป็นค่าที่หาจากความชันของเส้นกราฟที่ได้จากความสัมพันธ์ของค่า ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) จากการทดสอบ Unconfined compression test โดยจากการทดสอบจากดินตัวอย่างจากการเจาะสำรวจดินที่ระดับความลึกต่างๆสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ค่า Undrained modulus of elasticity ของหลุมเจาะต่างๆ ที่ระดับความลึกต่างๆ

Depth (m.)	Undrained modulus of elasticity (t/m. <sup>2</sup> )								
	BH - 1	BH - 2	BH - 3	BH - 4	BH - 5	BH - 6	BH - 7	BH - 8	BH - 9
1.50	-	-	63.36	-	48.16	41.41	-	-	-
3.00	60.24	66.96	79.08	42.78	66.67	58.39	54.86	-	53.92
4.50	84.74	85.27	98.69	57.70	92.29	82.33	72.05	39.88	65.10
6.00	119.21	108.60	123.17	77.82	127.76	116.10	94.62	56.82	78.61
7.50	167.69	138.30	153.71	104.95	176.85	163.71	124.27	80.95	94.93
9.00	235.90	176.13	191.84	141.54	244.82	230.84	163.20	115.34	114.62
10.50	331.84	224.31	239.41	190.89	338.91	325.51	214.33	164.33	138.41
12.00	366.80	285.67	298.79	257.44	369.20	359.00	281.49	234.13	167.13
13.50	328.30	363.81	372.89	347.19	379.50	368.40	369.68	333.58	201.80
15.00	461.80	463.32	-	-	-	311.80	-	475.26	243.68
16.50	492.40	-	-	-	-	386.90	-	-	-
18.00	-	-	-	-	-	394.60	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย (-) ไม่มีตัวอย่างทดสอบที่ความลึกนั้น

จากตารางที่ 4.20 สามารถสรุปได้ว่า ค่า Modulus of elasticity ของดินเหนียวอ่อนปากพนังมีค่าอยู่ในช่วง 39.88 – 492.40 t/m.<sup>2</sup> และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 196.57 t/m.<sup>2</sup> โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่า Undrained shear strength ของดินพบว่า ค่าอัตราส่วนของค่า  $E_u$  มีค่าประมาณอยู่ในช่วง 10 – 240 เท่าของค่า  $S_u$  ซึ่งอยู่ในช่วงของดินเหนียวอ่อนตามตารางที่ 2.5 และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Modulus of elasticity ของดินต่างที่ได้ทำการวิจัยจากผู้วิจัยท่านอื่นดังตารางที่ 2.4 พบว่าค่า Modulus of elasticity ของดินเหนียวอ่อนปากพนังนั้น มีค่าใกล้เคียงกับดินเหนียวอ่อนจากแหล่งต่างๆ เช่นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดินเหนียวสิงคโปร์ และมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของดินเหนียวอ่อนด้วย



รูปที่ 4.3 วงกลมมอร์ของผลการทดสอบ CU triaxial test ของหลุมเจาะ BH-1 ลึก 3.00 เมตร

d.) ค่า  $a'$  เป็นค่าที่ได้จากการเขียนกราฟ  $p - q$  diagram โดยที่ค่า  $a'$  เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับค่า  $C'$  จากการเขียนวงกลมมอร์ เมื่อทำการวิเคราะห์และตรวจสอบค่าที่ได้จากการเขียน  $p - q$  diagram โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.40 – 8.30 ตันต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ย 4.42 ตันต่อตารางเมตร เมื่อพิจารณาค่า  $a'$  เทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่าค่า  $a'$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อน และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $a'$  ที่ได้จากการแปลงค่า Cohesion ของดินจากแหล่งต่างๆตามตารางที่ 2.4 พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน

e.) ค่ามูม  $\alpha'$  เป็นค่าที่ได้จากการเขียนกราฟ  $p - q$  diagram โดยที่ค่า  $\alpha'$  เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับค่ามูม  $\phi'$  เพราะเป็นมูมที่เส้น modified failure envelop ทำมุมกับแกน X ซึ่งคล้ายกับวิธีหาค่ามูม  $\phi'$  จากการเขียนวงกลมมอร์ เมื่อทำการวิเคราะห์และตรวจสอบค่าที่ได้จากการเขียน  $p - q$  diagram โดยมีค่าอยู่ในช่วง 21.80 – 28.81 องศา และมีค่าเฉลี่ย 24.15 องศา เมื่อพิจารณาค่ามูม  $\alpha'$  เทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่าค่ามูม  $\alpha'$  มีแนวโน้มลงที่ตลอดความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อน และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $\alpha'$  ที่ได้จากการแปลงค่า มูมเสียทานภายใน ของดินจากแหล่งต่างๆตามตารางที่ 2.4 พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก

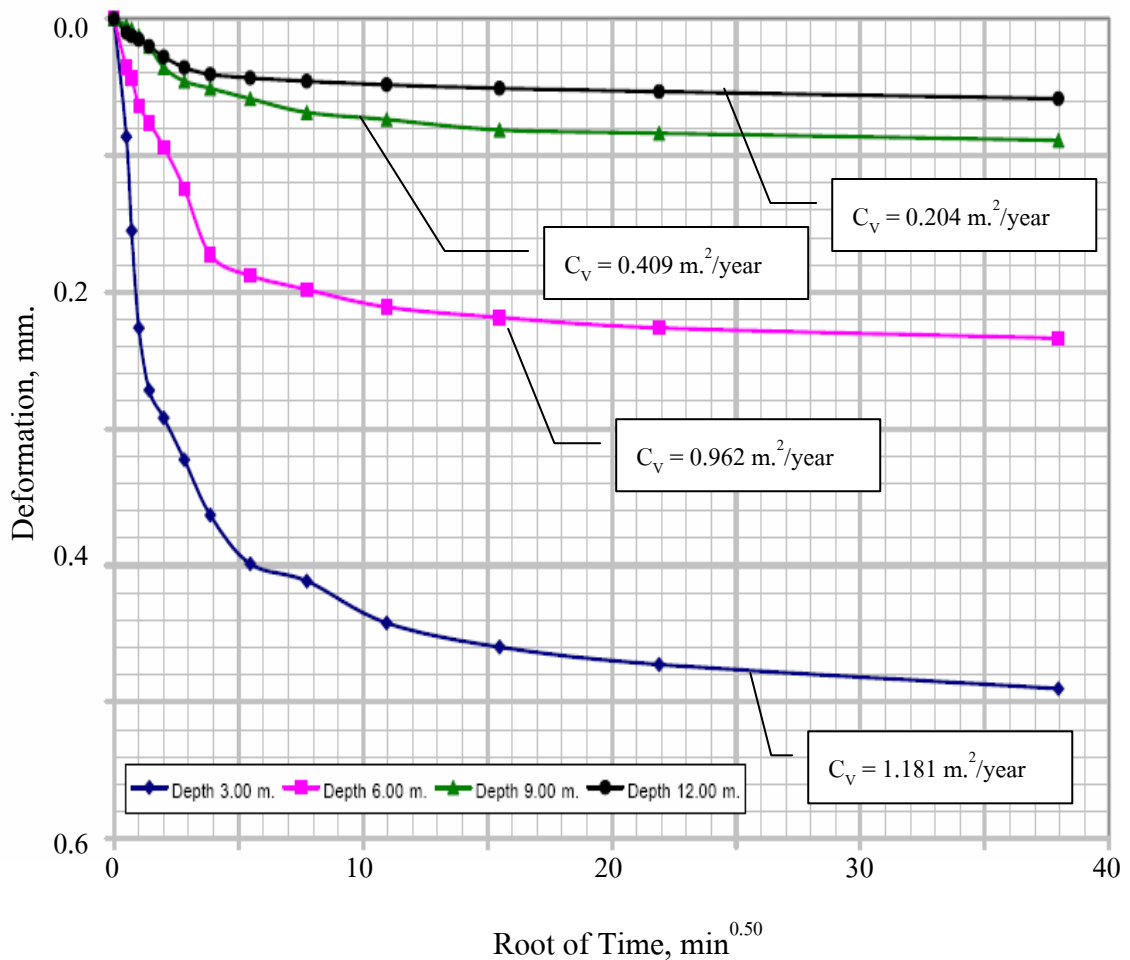


#### 4.3.2 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำอย่างละเอียด แสดงไว้ในภาคผนวก ก. และมีผลการทดลองที่สำคัญดังต่อไปนี้

a.) สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of consolidation,  $C_v$ ) ของดินเหนียวอ่อนปากพนัง มีค่าอยู่ในช่วง  $0.098 - 2.772 \text{ m}^2/\text{year}$  และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1.034 \text{ m}^2/\text{year}$  (โดยในการวิเคราะห์ค่าทางสถิติไม่นำค่าที่มีค่าเกินกว่า  $4 \text{ m}^2/\text{year}$  มาทำการวิเคราะห์) โดยค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำสามารถบอกได้ว่าดินเหนียวการทรุดตัวที่เร็วหรือช้า โดยค่าที่มากจะแสดงว่าดินจะสามารถทรุดตัวได้เร็วมากกว่าเมื่อใช้น้ำกดทับที่เท่ากัน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมีค่าที่ลดลงตามความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของการทรุดตัวและค่ารากที่สอง ของเวลา (Root time) ของดินเหนียวอ่อนปากพนังจากหลุมเจาะที่ BH - 1 พบว่าค่า  $C_v$  ลดลงจาก  $4.213 \text{ m}^2/\text{year}$  เป็น  $2.479 \text{ m}^2/\text{year}$  เมื่อความลึกเพิ่มขึ้นจาก 3.00 เมตร เป็น 12.00 เมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินจากแหล่งอื่นๆเช่น ดินกรุงเทพหรือดินสิงคโปร์ซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อนที่มีลักษณะที่ใกล้เคียง จากตารางที่ 2.5 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถยืนยันผลของการทดสอบได้ว่ามีความถูกต้อง

b.) แรงดันดินที่เคยกดทับในอดีต (Preconsolidation pressure or Maximum past pressure) จากการทดสอบตัวอย่างดินทั้งหมด พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงมีค่าประมาณ 3.2 – 8.9 ตันต่อตารางเมตรขึ้นอยู่กับความลึก โดยมีค่าเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 5.5 ตันต่อตารางเมตร เมื่อพิจารณาค่าความดันที่เคยกดทับในอดีตเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึกของตัวอย่างดินที่นำมาทำการทดสอบ

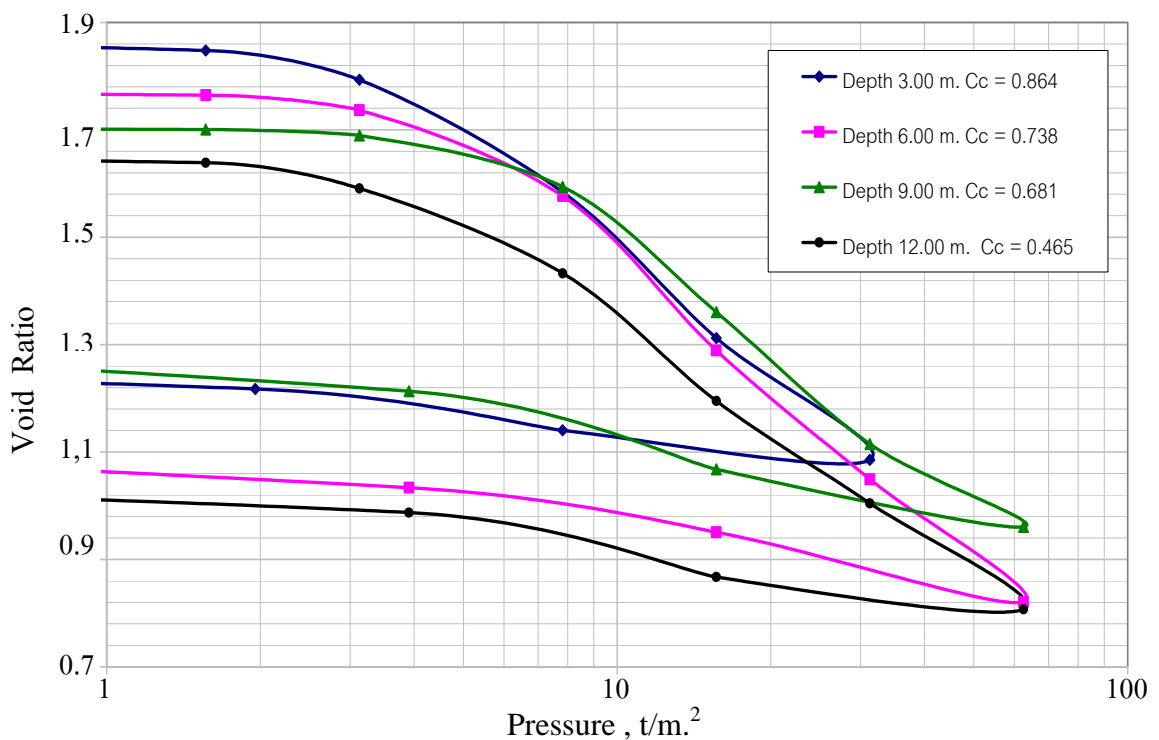


รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบค่า  $C_v$  ของแต่ละความลึก ของหลุมเจาะ BH - 1

c.) Overconsolidation ratio (OCR) จากการทดสอบตัวอย่างดินทั้งหมดที่ระดับความลึกต่างๆของแต่ละหลุมเจาะ พบว่าที่ระดับความลึก 1.50 – 4.00 โดยมากค่า OCR มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1.70 – 1.04 แสดงว่าชั้นดินนี้มีลักษณะของดินเป็นดินเหนียวแบบอัดตัวมากกว่าปกติเล็กน้อย (Lightly over consolidation clay) แต่ชั้นดินตั้งแต่ความลึก 4.50 เมตรลงไปนั้น ค่า OCR ค่าอยู่ในช่วง 1.040 – 0.768 แสดงว่าดินนี้มีลักษณะของดินเป็นดินเหนียวแบบอัดตัวปกติ (NC Clay โดยค่า OCR ต่ำกว่า 1.0 อาจเกิดจากการที่ตัวอย่างดินได้รับการรบกวน หรือเกิดจากการที่ประมาณค่า  $\sigma'_{vo}$  ที่คลาดเคลื่อน) และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของ OCR ทั้งหมดของชั้นดินพบว่า ค่าเฉลี่ยของ OCR ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 0.932 แสดงว่าชั้นดินเหนียวอ่อนปากบ่อก้นนี้เป็นดินเหนียวแบบ

อัตราตัวปกติ โดยเมื่อพิจารณาค่า Overconsolidation ratio เทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่า ชั้นดินตั้งแต่ความลึก 4.50 เมตรลงไปนั้นค่า Overconsolidation ratio มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่

d.) ดัชนีการอัดตัว (Compression index) จากการทดสอบตัวอย่างดินทั้งหมด พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.311 – 0.947 โดยมีค่าเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 0.668 เมื่อพิจารณาค่าดัชนีการอัดตัว เทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่า มีแนวโน้มลดลงตลอดความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อน แสดงว่าดินเหนียวที่ความลึกที่เพิ่มขึ้นนั้น ดินมีความแข็งแรงขึ้น และมีการทรุดตัวของดินน้อยลง เมื่อรับแรง ตัวอย่างค่า  $C_c$  ที่ลดลงตามความลึกแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการอัดตัวของดินตัวอย่างจาก BH – 1 พบว่าค่า  $C_c$  ลดลงจาก 0.864 เป็น 0.465 เมื่อความลึกเพิ่มขึ้นจาก 3.00 เมตร เป็น 12.00 เมตร



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าอัตราส่วนช่องว่างของความลึกต่างๆ ของหลุมเจาะ BH – 1

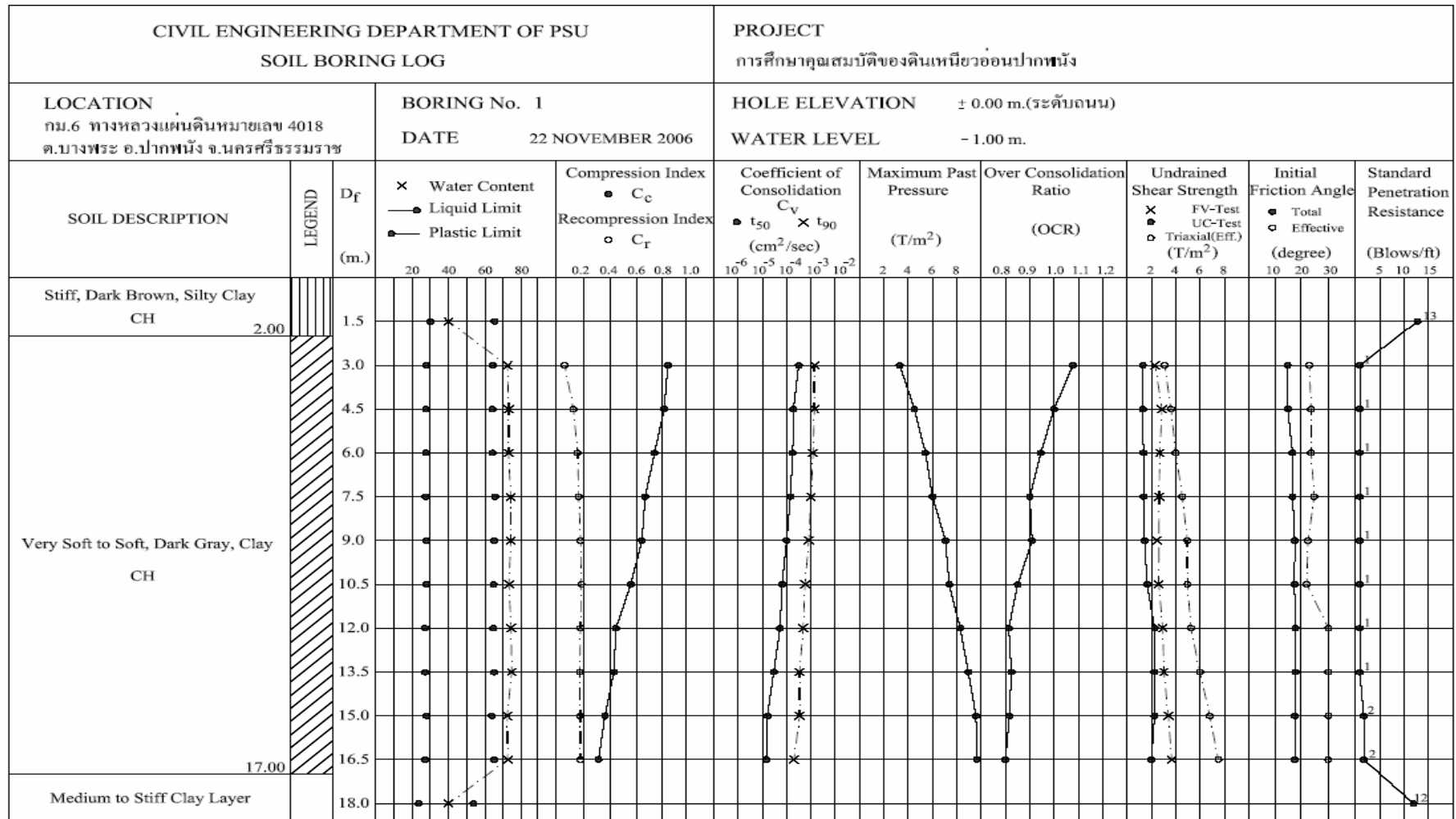
e.) ดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression index) จากการทดสอบตัวอย่างดินทั้งหมด พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.078 – 0.205 และมีค่าเฉลี่ยโดยประมาณ 0.140 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ Compression index กับ Recompression index พบว่าค่า Recompression index มีค่าน้อยกว่า Compression index ประมาณ 5 เท่า ซึ่งโดยปกติแล้วค่า Recompression index มีค่าน้อยกว่า Compression index อยู่ที่ประมาณ 8 เท่า และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ เทียบกับระดับความลึกของชั้นดิน พบว่าค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อน และค่าอัตราส่วนระหว่างค่า  $C_r / C_c$  ของดินเหนียวอ่อนปากพรางมีค่าอยู่ในช่วง 0.216 – 0.251

เมื่อนำผลข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติดัชนี คุณสมบัติวิศวกรรม ลักษณะของดิน และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชั้นดินมาเขียนกราฟในลักษณะการเปรียบเทียบกับความลึก ทำให้ได้กราฟชั้นดิน (Boring log) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.14

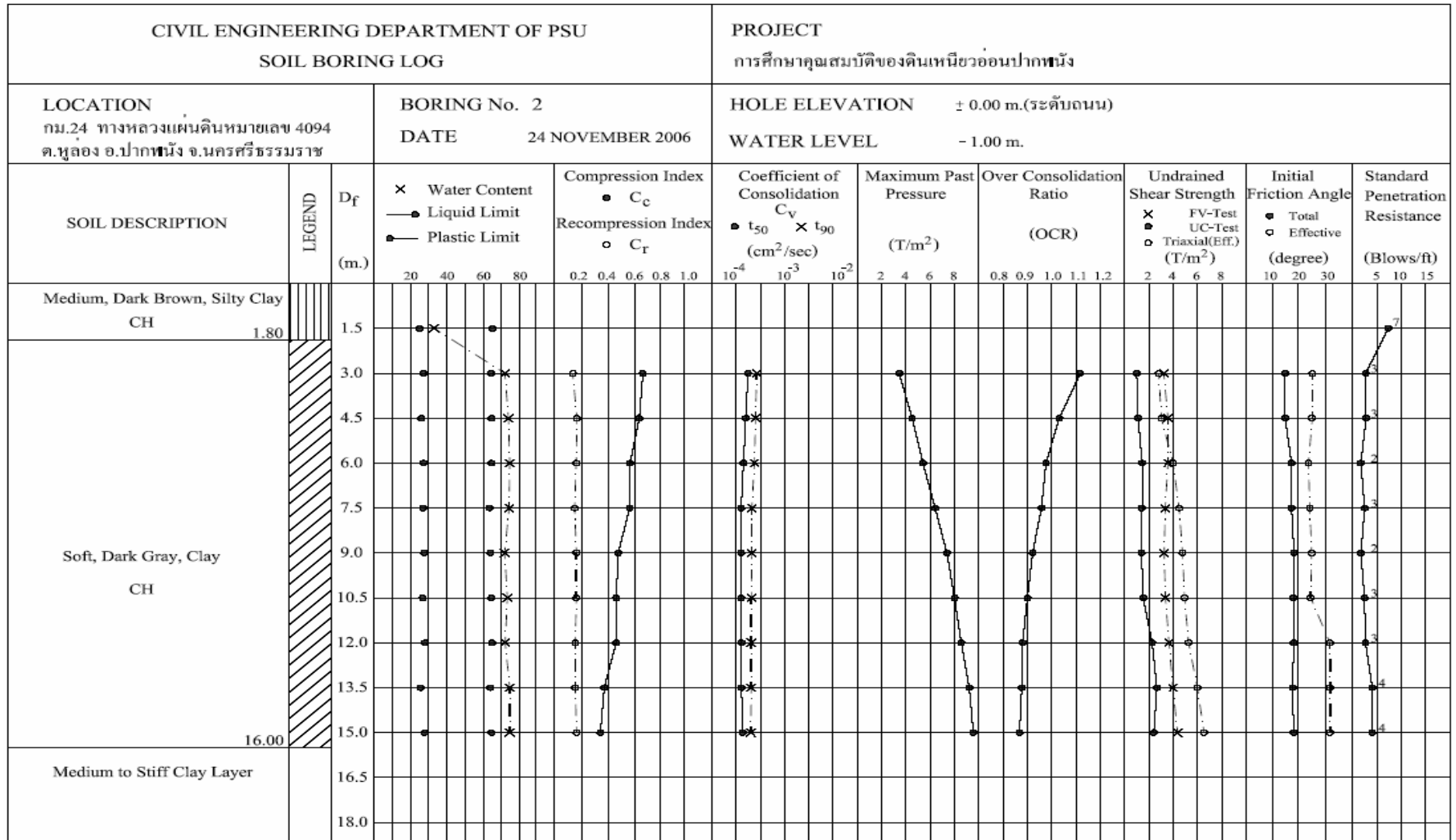
ตารางที่ 4.21 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

คุณสมบัติวิศวกรรม	ช่วงข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	SD
Undrained shear strength, FV – Test, $S_{U(FV)}$ , $t/m^2$	2.64 – 5.11	3.81	0.573
Undrained shear strength, UC, $S_{U(UC)}$ , $t/m^2$	1.05 – 2.88	1.67	0.468
Compression index, $C_c$	0.311 – 0.974	0.668	0.162
Recompression index, $C_r$	0.205 – 0.078	0.140	0.031
Coefficient of consolidation, $C_v$ , $m.^2/year$	0.098 – 2.772	1.034	0.678
Maximum past pressure, $\sigma'_{mp}$ , $t/m^2$	3.2 – 8.9	5.5	2.269
OCR	1.699 – 0.768	0.932	0.148
Total cohesion, CU Triaxial Test, $C$ , $t/m^2$	1.50 – 6.40	2.80	0.871
Effective cohesion, CU Triaxial Test, $C'$ , $t/m^2$	2.70 – 9.00	4.70	1.442
Internal friction angle, $\phi$ , Degree	15.64 – 19.79	17.61	1.019
Effective internal friction angle, $\phi'$ , Degree	21.31 – 31.38	25.47	2.415
$a'$ , $t/m^2$	1.40 – 8.30	4.42	0.119
$\alpha'$ , Degree	21.80 – 28.81	24.15	1.830
Undrained modulus of elasticity, $E_u$ , $t/m^2$	19.65 – 492.40	190.57	1.645

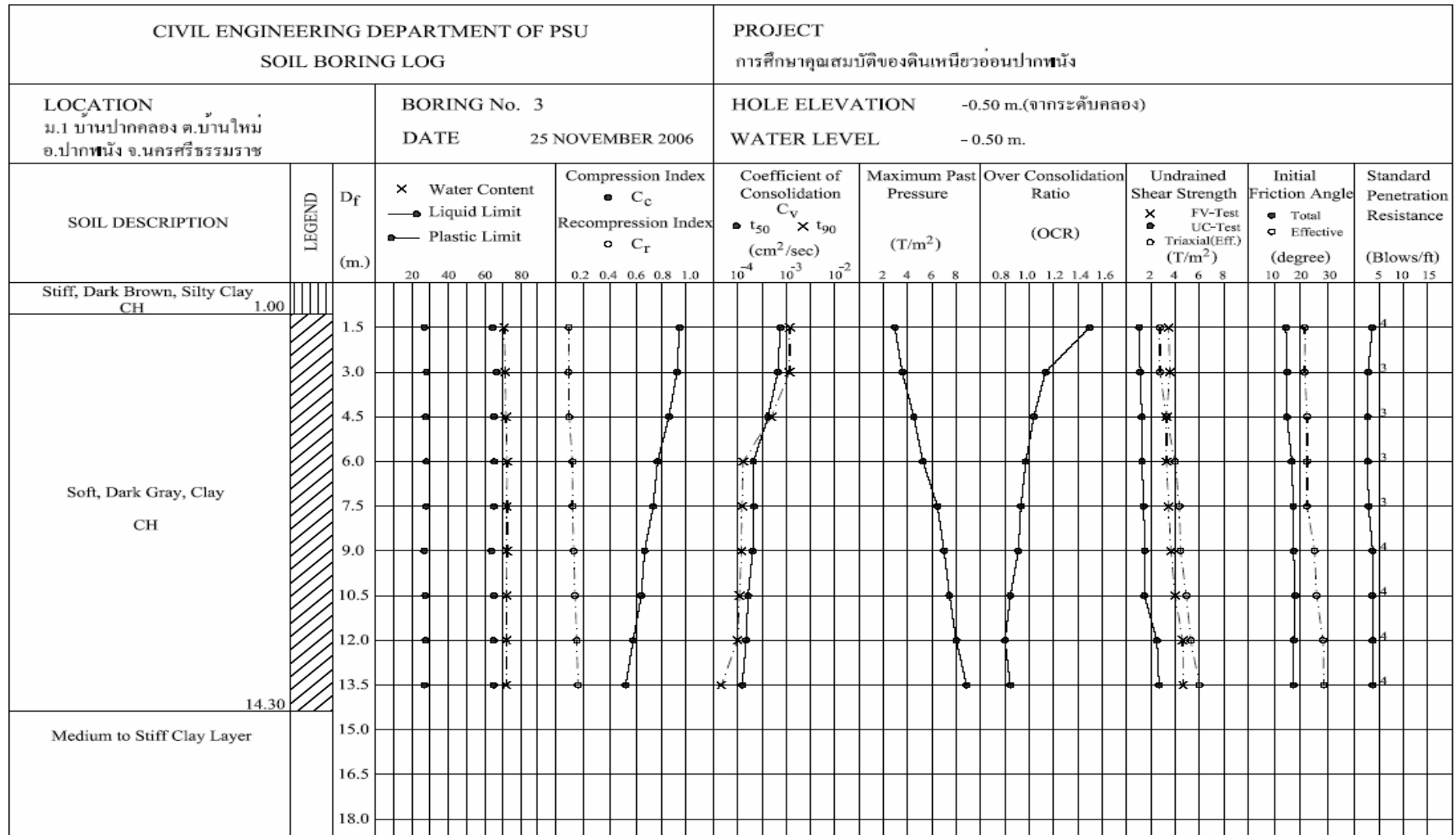
จำนวนข้อมูลทั้งหมด 85 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.6 Boring log of BH - 1

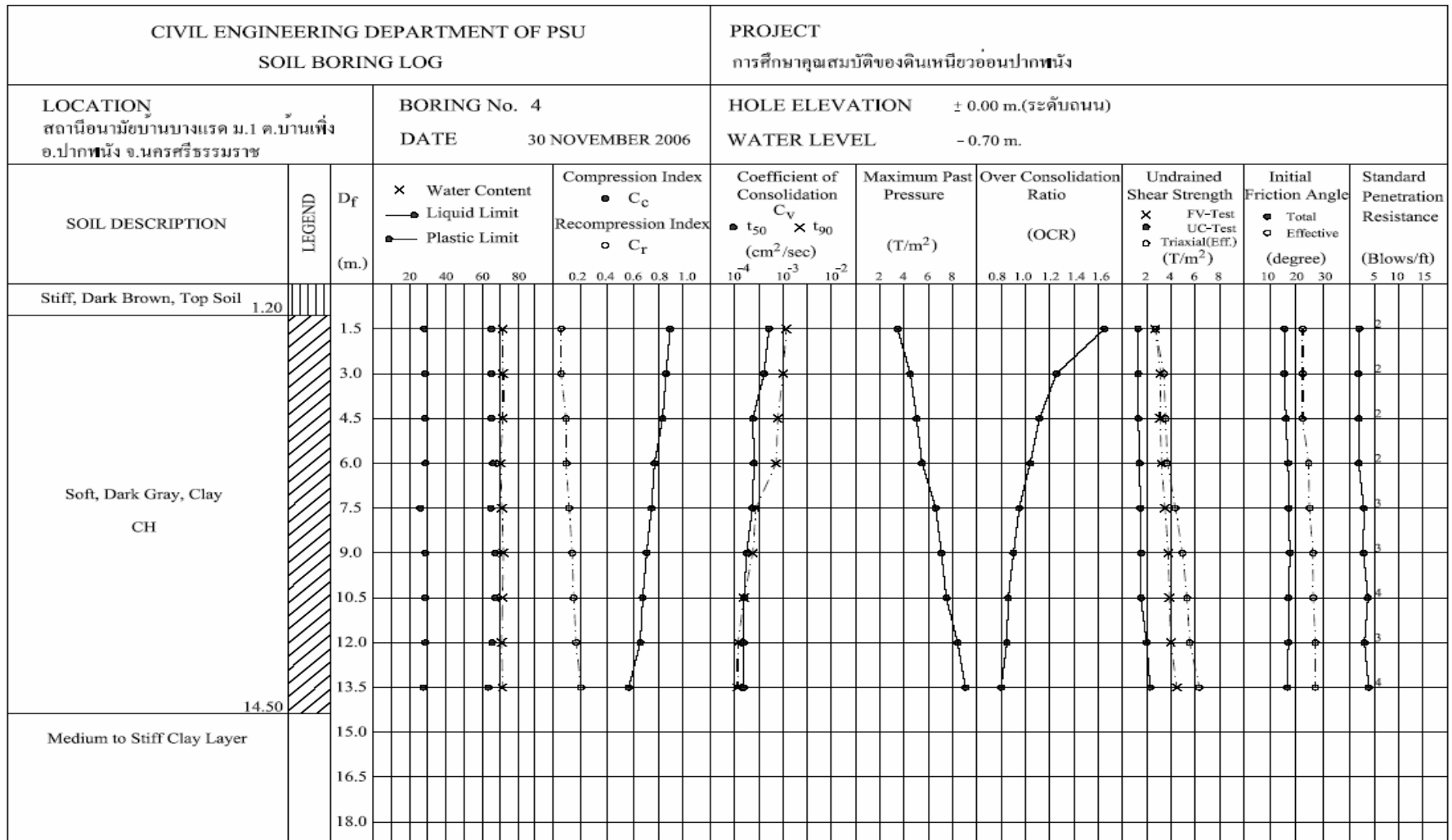


รูปที่ 4.7 Boring log of BH - 2

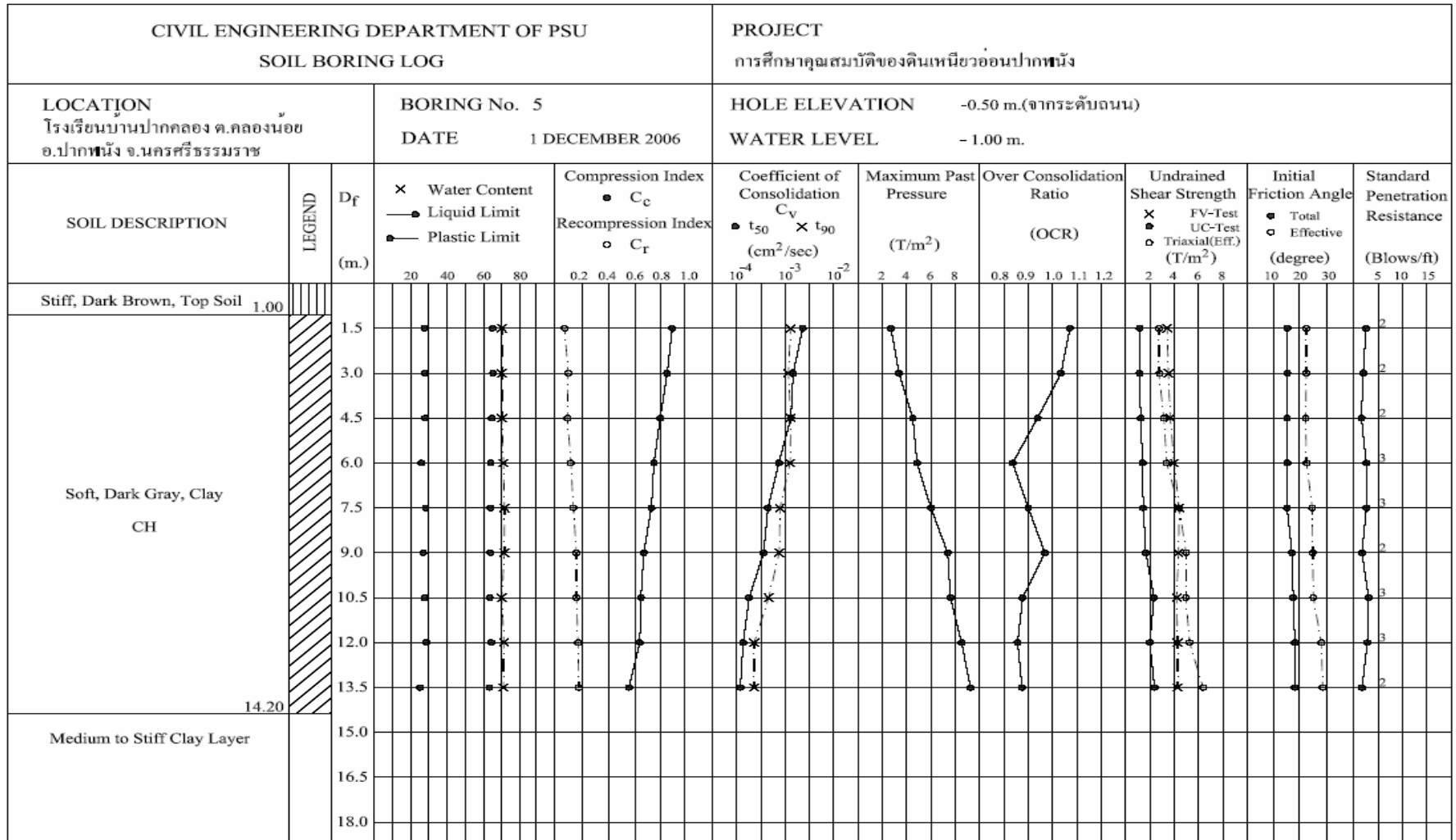


รูปที่ 4.8 Boring log of BH - 3

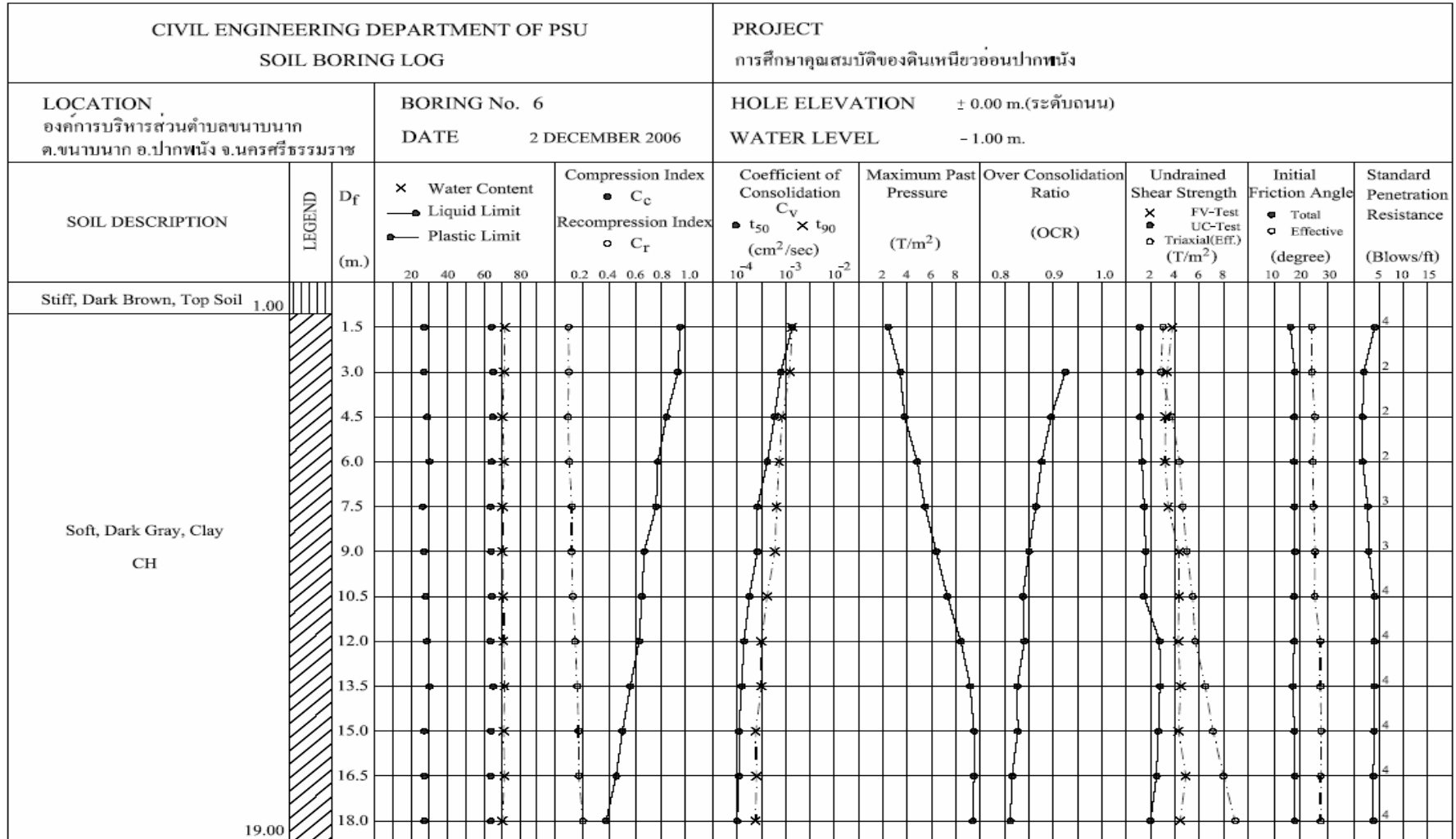




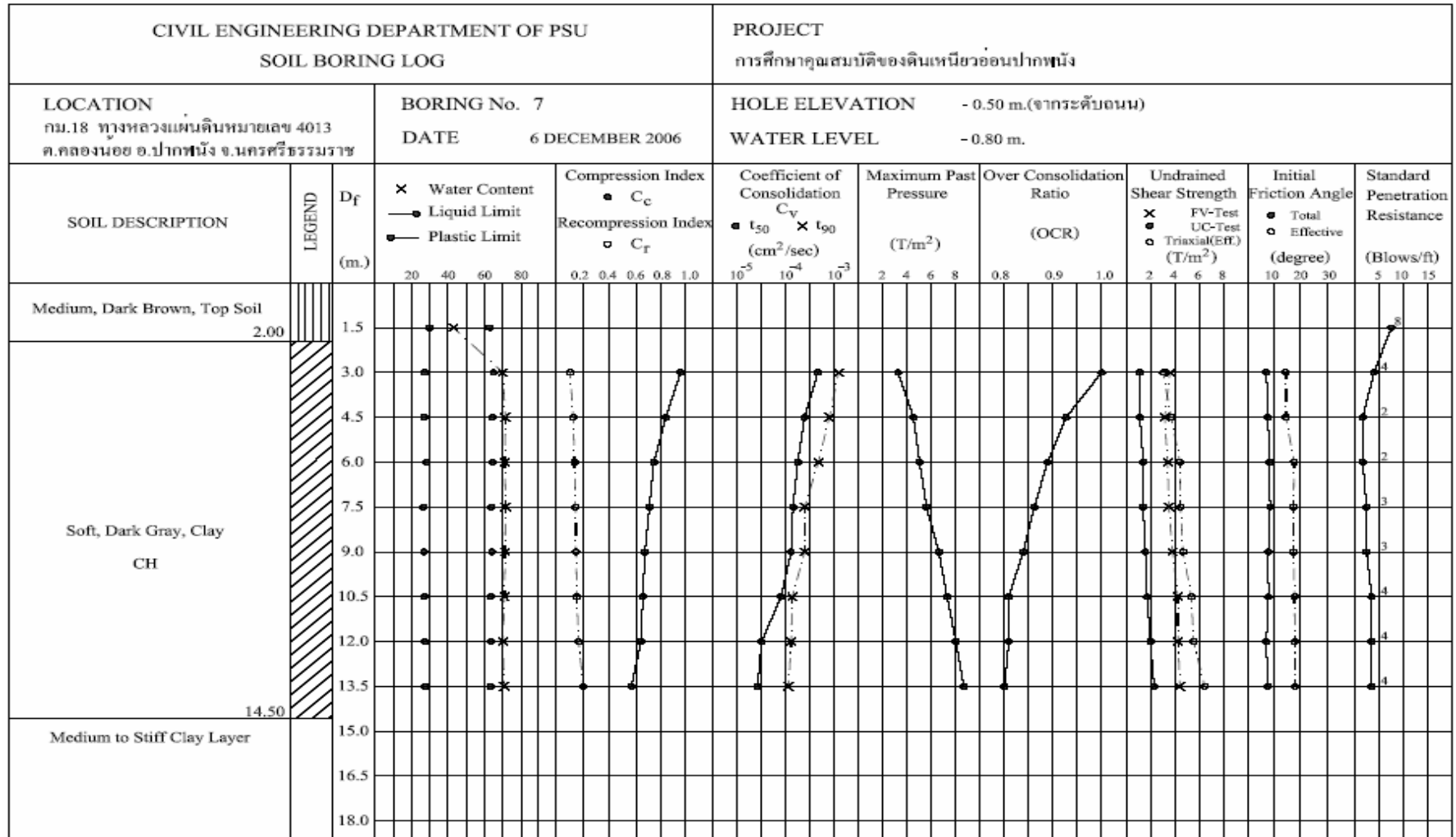
รูปที่ 4.9 Boring log of BH - 4



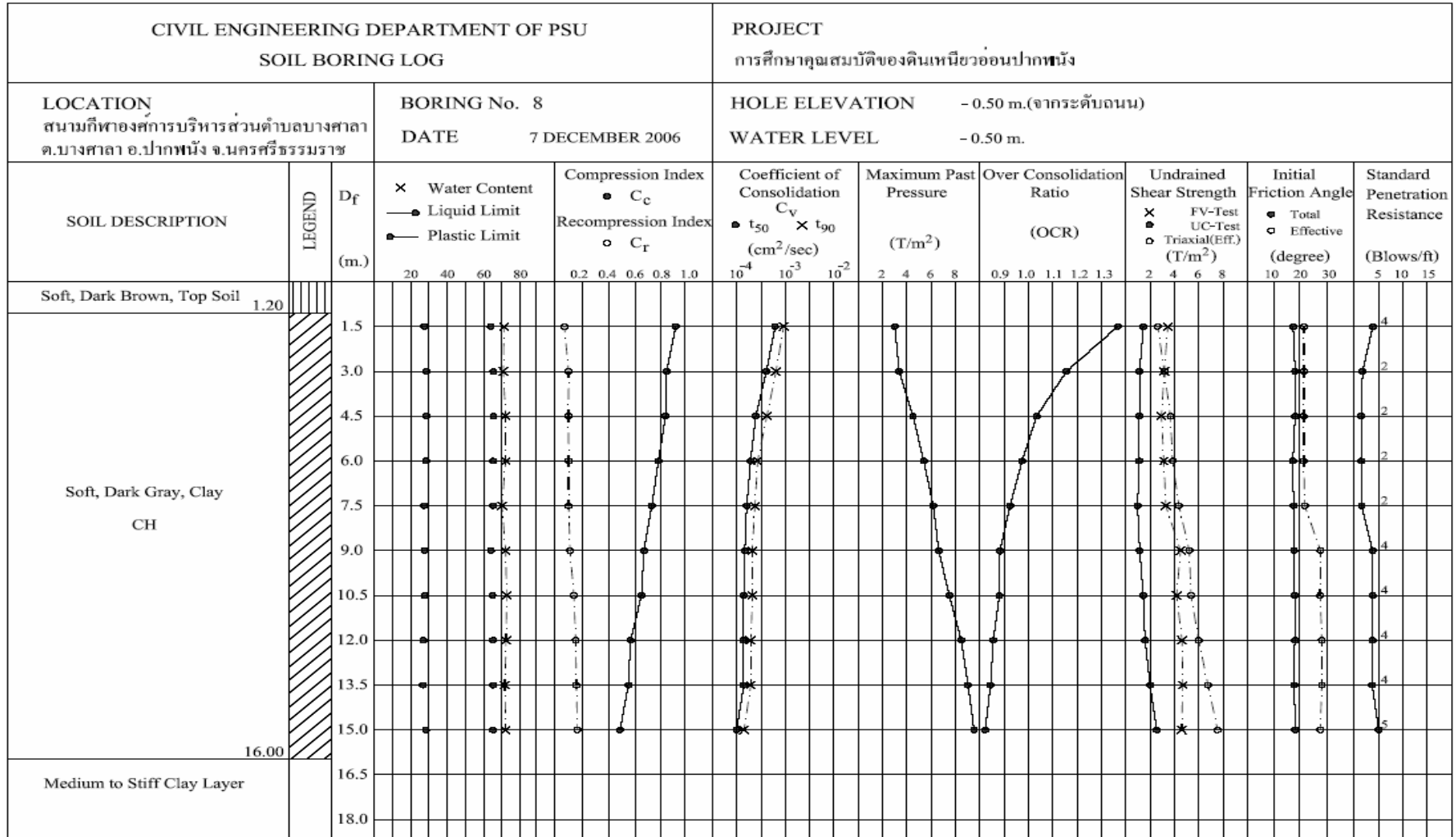
รูปที่ 4.10 Boring log of BH - 5



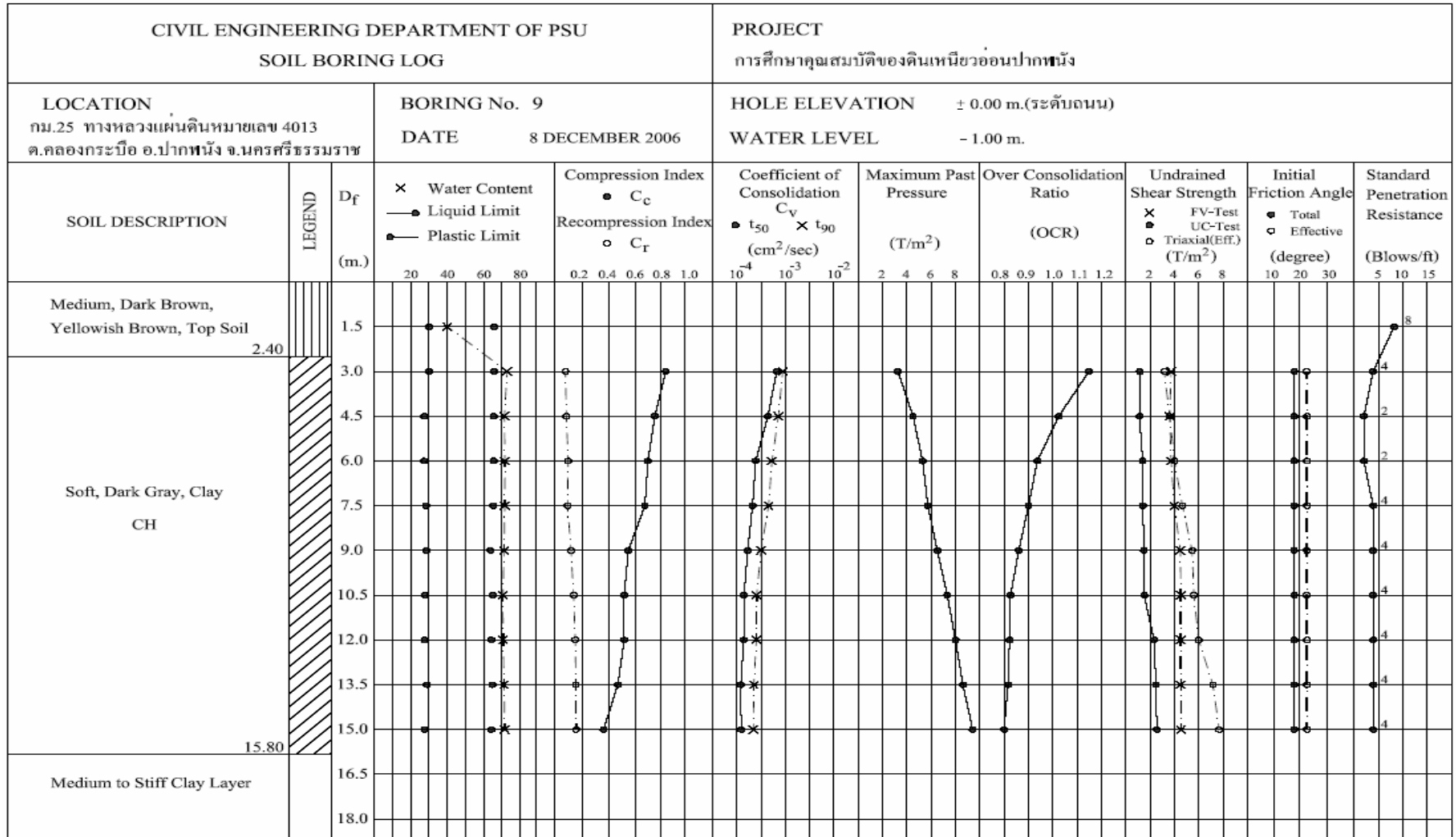
รูปที่ 4.11 Boring log of BH - 6



รูปที่ 4.12 Boring log of BH - 7



รูปที่ 4.13 Boring log of BH - 8



รูปที่ 4.14 Boring log of BH - 9

#### 4.3.3 Critical State Parameters

เมื่อทำการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) เราได้ค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ค่าช่องว่างของมวลดิน (Void Ratio) ค่า  $p'$  และ  $q'$  เราสามารถนำค่าต่างๆเหล่านี้ มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าตัวแปรต่างในรูปแบบของ Critical state ได้ โดยตัวแปรเหล่านี้ประกอบด้วยค่าต่างเช่น ค่า Specific volume ( $U$ ), Slope of critical state line project to  $p':q'$  plane ( $M$ ), Slope of critical state line ( $\lambda$ ), Specific volume of soil on critical state line at  $p' = 1.0$  kPa ( $\Gamma$ ) โดยค่าต่างได้สรุปไว้ดังแสดงในตารางที่ 4.22 – 4.30 โดยตัวอย่างของ  $p - q$  และ  $e - \ln p'$  diagram ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง

ตารางที่ 4.22 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH – 1

Depth (m.)	M	U	$\lambda$	$\Gamma$
3.00 - 3.45	0.39	2.77	0.09	3.17
4.50 - 4.95	0.42	2.77	0.09	3.19
6.00 - 6.45	0.45	2.77	0.10	3.21
7.50 - 7.95	0.48	2.75	0.08	3.14
9.00 - 9.45	0.52	2.71	0.07	3.00
10.50 - 10.95	0.55	2.71	0.07	3.00
12.00 - 12.45	0.58	2.70	0.07	3.01
13.50 - 13.95	0.61	2.70	0.07	3.01
15.00 - 15.45	0.65	2.68	0.07	3.05
16.50 - 16.95	0.68	2.65	0.07	3.01

ตารางที่ 4.23 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH – 2

Depth (m.)	M	$\nu$	$\lambda$	$\Gamma$
3.00 - 3.45	0.40	2.71	0.06	2.97
4.50 - 4.95	0.40	2.72	0.06	2.95
6.00 - 6.45	0.45	2.71	0.06	2.84
7.50 - 7.95	0.45	2.72	0.06	2.87
9.00 - 9.45	0.45	2.74	0.06	3.09
10.50 - 10.95	0.50	2.74	0.06	3.11
12.00 - 12.45	0.55	2.75	0.06	3.28
13.50 - 13.95	0.55	2.73	0.06	3.28
15.00 - 15.45	0.55	2.75	0.06	3.28

ตารางที่ 4.24 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH – 3

Depth (m.)	M	$\nu$	$\lambda$	$\Gamma$
1.50 - 1.95	0.35	2.65	0.04	2.80
3.00 - 3.45	0.35	2.68	0.04	2.85
4.50 - 4.95	0.40	2.70	0.04	3.00
6.00 - 6.45	0.42	2.76	0.07	3.05
7.50 - 7.95	0.42	2.72	0.08	3.15
9.00 - 9.45	0.45	2.72	0.10	3.15
10.50 - 10.95	0.45	2.72	0.10	3.20
12.00 - 12.45	0.50	2.72	0.16	3.41
13.50 - 13.95	0.55	2.72	0.16	3.40



ตารางที่ 4.25 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH – 4

Depth (m.)	M	$\nu$	$\lambda$	$\Gamma$
1.50 - 1.95	0.30	2.70	0.06	3.00
3.00 - 3.45	0.35	2.74	0.06	3.00
4.50 - 4.95	0.35	2.72	0.08	3.00
6.00 - 6.45	0.40	2.71	0.08	3.05
7.50 - 7.95	0.42	2.71	0.08	3.05
9.00 - 9.45	0.45	2.67	0.08	3.01
10.50 - 10.95	0.48	2.68	0.10	3.10
12.00 - 12.45	0.50	2.68	0.14	3.26
13.50 - 13.95	0.55	2.68	0.15	3.20

ตารางที่ 4.26 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH – 5

Depth (m.)	M	$\nu$	$\lambda$	$\Gamma$
1.50 - 1.95	0.35	2.65	0.04	2.85
3.00 - 3.45	0.40	2.68	0.04	2.85
4.50 - 4.95	0.42	2.70	0.03	2.85
6.00 - 6.45	0.45	2.72	0.03	2.85
7.50 - 7.95	0.45	2.72	0.04	2.83
9.00 - 9.45	0.48	1.67	0.04	2.84
10.50 - 10.95	0.50	2.70	0.04	2.85
12.00 - 12.45	0.50	2.70	0.05	2.90
13.50 - 13.95	0.55	2.72	0.05	2.90

ตารางที่ 4.27 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH – 6

Depth (m.)	M	v	$\lambda$	$\Gamma$
1.50 - 1.95	0.35	2.70	0.03	2.90
3.00 - 3.45	0.40	2.73	0.04	2.90
4.50 - 4.95	0.40	2.72	0.04	2.88
6.00 - 6.45	0.45	2.68	0.04	2.85
7.50 - 7.95	0.45	2.68	0.04	2.85
9.00 - 9.45	0.48	2.65	0.05	2.86
10.50 - 10.95	0.50	2.68	0.05	2.88
12.00 - 12.45	0.55	2.68	0.05	2.88
13.50 - 13.95	0.55	2.70	0.05	2.91
15.00 - 15.45	0.55	2.72	0.05	2.95
16.50 - 16.95	0.60	2.72	0.05	3.00
18.00 - 18.45	0.62	2.70	0.05	3.02

ตารางที่ 4.28 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH – 7

Depth (m.)	M	$\nu$	$\lambda$	$\Gamma$
3.00 - 3.45	0.40	2.66	0.08	3.01
4.50 - 4.95	0.40	2.68	0.04	2.98
6.00 - 6.45	0.43	2.70	0.05	2.92
7.50 - 7.95	0.45	2.70	0.06	2.95
9.00 - 9.45	0.45	2.68	0.04	2.84
10.50 - 10.95	0.48	2.68	0.05	2.90
12.00 - 12.45	0.50	2.65	0.09	3.03
13.50 - 13.95	0.55	2.65	0.09	3.01

ตารางที่ 4.29 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH – 8

Depth (m.)	M	$\nu$	$\lambda$	$\Gamma$
1.50 - 1.95	0.35	2.62	0.03	2.75
3.00 - 3.45	0.40	2.65	0.03	2.78
4.50 - 4.95	0.42	2.65	0.04	2.85
6.00 - 6.45	0.45	2.67	0.06	2.93
7.50 - 7.95	0.48	2.70	0.05	2.85
9.00 - 9.45	0.50	2.73	0.04	2.89
10.50 - 10.95	0.50	2.73	0.08	2.94
12.00 - 12.45	0.52	2.74	0.10	3.16
13.50 - 13.95	0.55	2.75	0.10	3.14
15.00 - 15.45	0.55	2.75	0.12	3.15

ตารางที่ 4.30 ค่า Critical State ของดินเหนียวอ่อนปากพนังของหลุมเจาะ BH – 9

Depth (m.)	M	v	$\lambda$	$\Gamma$
3.00 - 3.45	0.35	2.67	0.06	2.94
4.50 - 4.95	0.40	2.68	0.05	2.98
6.00 - 6.45	0.40	2.69	0.09	3.09
7.50 - 7.95	0.42	2.70	0.09	3.10
9.00 - 9.45	0.45	2.71	0.04	2.87
10.50 - 10.95	0.48	2.70	0.04	2.85
12.00 - 12.45	0.55	2.68	0.04	2.85
13.50 - 13.95	0.55	2.69	0.05	2.89
15.00 - 15.45	0.55	2.72	0.06	2.92

จากการคำนวณค่าต่างๆ เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด สามารถสรุปค่าต่างๆ ของ Critical State Parameter ได้ดังตารางที่ 4.31 และนำไปเปรียบเทียบกับค่า Critical State Parameter ของดินจากแหล่งต่างๆ ที่ได้มีการศึกษาดังตารางที่ 2.3

ข้อมูลในตารางที่ 4.31 สามารถสรุปได้ว่า ค่า Specific volume (v) มีค่าอยู่ในช่วง 1.67 – 2.77 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.691 , Slope of critical state line project to p':q' plane (M) มีค่าอยู่ในช่วง 0.30 – 0.68 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.469 , Slope of critical state line ( $\lambda$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 0.03 – 0.16 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.065 , Specific volume of soil on critical state line at p' = 1.0 kPa ( $\Gamma$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 2.75 – 3.14 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.992

ตารางที่ 4.31 Critical State Parameter ของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

Critical State Parameter	ช่วงข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	SD
<b>M</b>	0.30 – 0.68	0.469	0.077
<b>v</b>	1.67 – 2.77	2.691	0.116
<b><math>\lambda</math></b>	0.03 – 0.16	0.065	0.064
<b><math>\Gamma</math></b>	2.75 – 3.41	2.992	0.144

ค่า Critical state parameters ของดินเหนียวอ่อนปากพนังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับดินเหนียวอื่นๆ จากตารางที่ 2.3 พบว่าดินเหนียวอ่อนปากพนังมีค่า Critical State Parameter ต่างๆ ใกล้เคียงกับค่าของดินเหนียววิล (Weald Clay) มากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าผลการทดลองในการศึกษาครั้งนี้มีความน่าเชื่อถือได้ จึงสามารถสรุปได้ว่าค่า Critical State Parameter ที่ได้จากการทดสอบนั้นเป็นค่าเฉพาะของดินเหนียวอ่อนปากพนังโดยเฉพาะ

#### 4.4 การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยสหสัมพันธ์ของตัวแปรคุณสมบัติดัชนีกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมในรูปสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Variable Regression)

ข้อมูลผลการทดสอบคุณสมบัติดัชนีและผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง นำมาหาความสัมพันธ์ ระหว่างคุณสมบัติของดินโดยใช้วิธีการสถิติมาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในรูปของสมการสหสัมพันธ์พหุคูณ ซึ่งความน่าเชื่อถือของสมการสามารถแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ถูกใช้ในการวิเคราะห์นี้ประกอบกับการวิเคราะห์ 2 แบบคือ

- 1) วิเคราะห์โดยไม่นำตัวแปรความลึกมาทำการวิเคราะห์สมการ
- 2) วิเคราะห์โดยนำตัวแปรความลึกมาทำการวิเคราะห์สมการ

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติวิศวกรรม ทำได้โดยการใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and error) โดยลองเลือกค่าคุณสมบัติดัชนีแล้วทำการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ดีที่สุด

สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปร ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในการวิเคราะห์แนะนำโดย Draper and Smith (1966)

$R^2$	<	0.25	มีความสัมพันธ์กันน้อย
$R^2$	=	0.25 – 0.50	มีความสัมพันธ์กันปานกลาง
$R^2$	=	0.50 – 0.80	มีความสัมพันธ์กันดี
$R^2$	>	0.80	มีความสัมพันธ์กันดีมาก

4.4.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติวิศวกรรมโดยไม่ใช่ตัวแปรความลึก

ผลการหาค่าความสัมพันธ์ของคุณสมบัติดัชนีและวิศวกรรมโดยไม่นำตัวแปรความลึกมาทำการวิเคราะห์ สามารถแสดงได้สมการเส้นตรงดังแสดงในตารางที่ 4.32

ตารางที่ 4.32 สมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าคุณสมบัติวิศวกรรมกับคุณสมบัติดัชนีที่ดีที่สุดโดยไม่มีตัวแปรความลึก

ค่า	สมการถดถอย	R <sup>2</sup>
$S_{U(FV)}$ (t/m. <sup>2</sup> )	$-2.719 + 0.068(PL) + 2.586(G_s) - 0.03(W)$	0.302
$S_{U(Uc)}$ (t/m. <sup>2</sup> )	$-1.450 + 0.024(W) + 0.769(\gamma)$	0.214
$C_c$	$7.955 - 0.178(LL) + 7.303(\gamma) - 3.042(G_s)$	0.651
$C_r$	$-0.094 + 0.170(\gamma) - 0.002(PI)$	0.208
$C_{V(t50)}$ (m. <sup>2</sup> /year)	$0.146 + 0.025(PI)$	0.243
$C_{V(t90)}$ (m. <sup>2</sup> /year)	$-0.672 + 0.068(PI)$	0.298
$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	$-8.222 - 0.128(PI) + 11.088(\gamma)$	0.295
OCR	$3.913 + 0.012(PI) - 1.954(\gamma)$	0.364
$C$ (t/m. <sup>2</sup> )	$-8.223 - 0.079(PI) + 7.904(\gamma)$	0.330
$C'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$-4.719 - 0.126(PI) + 7.971(\gamma)$	0.273
$\phi$ (degree)	$-5.869 - 0.025(PI) + 8.99(G_s)$	0.203
$\phi'$ (degree)	$24.239 - 8.675(G_s) + 0.333(W)$	0.291
$a'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$-15.547 + 0.128(PL) + 9.258(\gamma)$	0.334
$\alpha'$ (degree)	$15.478 - 0.112(PI) + 0.17(W)$	0.214

หมายเหตุ: จำนวนตัวอย่างวิเคราะห์ 85 ตัวอย่าง

โดยที่	PL	=	Plastic limit	มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์
	PI	=	Plasticity index	มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์
	W	=	Natural water content	มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์
	$G_s$	=	Specific gravity	ไม่มีหน่วย
	$\gamma$	=	Natural unit weight	มีหน่วยเป็น t/m. <sup>3</sup>

จากตารางที่ 4.21 จะเห็นสมการต่างๆมีความสัมพันธ์กันปานกลาง คือมีค่า R<sup>2</sup> อยู่ในช่วง 0.2 – 0.4 ตามข้อแนะนำของ Draper and Smith (1966) แต่เนื่องด้วยลักษณะของชั้นดินมีลักษณะที่เป็นดินเนื้อเดียวกัน (Homogeneous soil) ทำให้ค่าคุณสมบัติดัชนีมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก

แต่ค่าคุณสมบัติวิศวกรรมมีค่าแปรผันกับความลึกจึงต้องนำตัวแปรความลึกมาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์

#### 4.4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติชั้นดินและคุณสมบัติวิศวกรรมโดยใช้ตัวแปรความลึก

เมื่อทำการนำตัวแปรความลึกของชั้นดินที่ทำการเจาะสำรวจเก็บตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ สามารถสรุปเป็นสมการความสัมพันธ์ที่มีค่าที่ดีที่สุดได้ดังแสดงในตารางที่

#### 4.33

ตารางที่ 4.33 สมการของค่าคุณสมบัติวิศวกรรมกับคุณสมบัติชั้นดินที่ดีที่สุดโดยมีตัวแปรความลึก

ค่า	สมการถดถอย	R <sup>2</sup>
$S_{U(FV)}$ (t/m. <sup>2</sup> )	$0.305 - 0.017(PI) - 0.053(W) + 2.276(G_s) + 0.098(Z)$	0.728
$S_{U(Uc)}$ (t/m. <sup>2</sup> )	$-2.580 + 0.003(PI) + 0.01(W) + 0.984(G_s) + 0.088(Z)$	0.657
$C_c$	$0.852 + 0.002(LL) - 0.034(Z)$	0.814
$C_r$	$0.044 + 0.022(\gamma) + 0.007(Z)$	0.891
$C_{V(t50)}$ (m. <sup>2</sup> /year)	$2.434 - 0.007(PI) - 0.129(Z)$	0.615
$C_{V(t90)}$ (m. <sup>2</sup> /year)	$1.038 + 0.050(PI) - 0.121(Z)$	0.659
$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	$2.127 + 0.015(PI) - 0.33(\gamma) + 0.529(Z)$	0.981
OCR	$3.415 + 0.005(PI) - 1.404(\gamma) - 0.025(Z)$	0.771
$C$ (t/m. <sup>2</sup> )	$-4.680 - 0.030(PI) + 3.995(\gamma) + 0.181(Z)$	0.858
$C'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$3.388 - 0.040(PI) + 0.323(Z)$	0.943
$\phi$ (degree)	$-6.452 - 0.005(PI) + 8.723(G_s) + 0.067(Z)$	0.646
$\phi'$ (degree)	$1.747 + 0.282(W) + 0.324(Z)$	0.636
$a'$ (t/m. <sup>2</sup> )	$-6.217 + 0.077(PL) + 3.575(\gamma) + 0.245(Z)$	0.861
$\alpha'$ (degree)	$13.431 - 0.005(PI) + 0.109(W) + 0.331(Z)$	0.730

หมายเหตุ: จำนวนตัวอย่างวิเคราะห์ 85 ตัวอย่าง



โดยที่	PL	=	Plastic limit	มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์
	PI	=	Plasticity index	มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์
	W	=	Natural water content	มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์
	G <sub>s</sub>	=	Specific gravity	ไม่มีหน่วย
	γ	=	Natural unit weight	มีหน่วยเป็น t/m. <sup>3</sup>
	Z	=	Depth	มีหน่วยเป็น m.

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมการจากตารางที่ 4.21 พบว่าเมื่อนำตัวแปรความลึกมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาสมการความสัมพันธ์พบว่า ค่า R<sup>2</sup> มีค่าเพิ่มมากขึ้น คือมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.60 – 0.98 เมื่อเปรียบเทียบกับข้อเสนอแนะของ Draper and Smith (1966) พบว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันดีถึงดีมาก เพราะฉะนั้นตัวแปรความลึกจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ตัวแปรอื่นๆ มีความสัมพันธ์กัน

#### 4.4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained modulus of elasticity กับ Undrained shear strength

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า E<sub>U</sub> กับค่า S<sub>U</sub> สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการต่างได้ดังตารางที่ 4.34 และรูปที่ 4.15

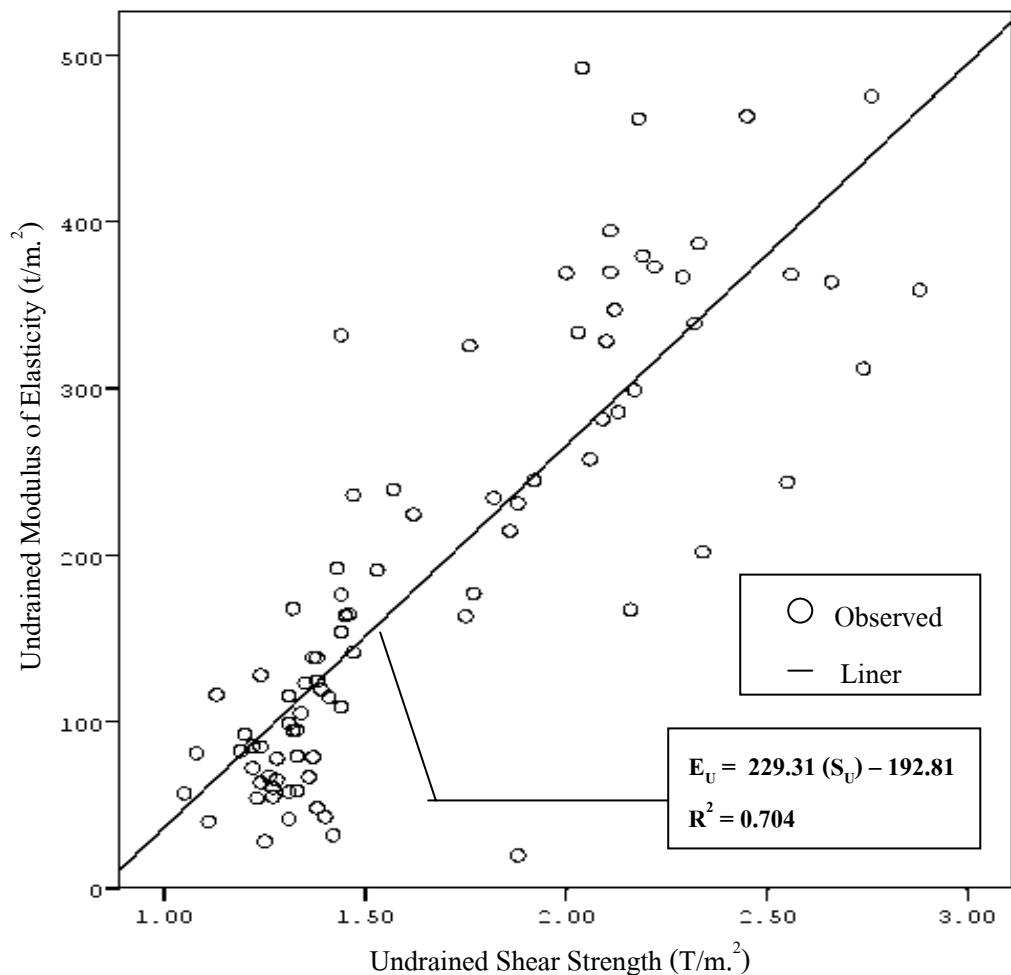
ตารางที่ 4.34 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained modulus of elasticity กับ Undrained shear strength

ค่า	สมการถดถอย	รูปแบบสมการ	R <sup>2</sup>
E <sub>U</sub> (t/m. <sup>2</sup> )	<b>229.31(S<sub>U</sub>) – 192.81</b>	Liner	0.704
E <sub>U</sub> (t/m. <sup>2</sup> )	<b>411.02 ln(S<sub>U</sub>) – 192.98</b>	Logarithmic	0.721
E <sub>U</sub> (t/m. <sup>2</sup> )	<b>49.39 (S<sub>U</sub>)<sup>2.277</sup></b>	Power	0.608
E <sub>U</sub> (t/m. <sup>2</sup> )	<b>17.963 e<sup>(1.256 (SU))</sup></b>	Exponential	0.580

จากตารางที่ 4.34 สามารถสรุปได้ว่าสมการซึ่งใช้ประมาณค่า Modulus of elasticity ( $E_u$ ) ซึ่งใช้ในการประมาณค่าการทรุดตัวแบบทันทีทันใด (Immediate settlement) โดยที่ค่า Undrained shear strength ได้มาจากการทดสอบ Unconfined compression test ได้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดคือ

$$E_u = 229.31 (S_u) - 192.81$$

โดยที่  $E_u$  = Undrained modulus of elasticity มีหน่วยเป็น  $t/m^2$   
 $S_u$  = Undrained shear strength มีหน่วยเป็น  $t/m^2$ .



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Undrained Modulus of elasticity กับค่า Undrained shear strength ของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง และเส้นแนวโน้มของข้อมูลแบบสมการเส้นตรง

#### 4.4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum past pressure กับ Undrained shear strength

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Maximum past pressure กับ ค่า Undrained Shear Strength From Unconfined compression test โดยวิเคราะห์จากข้อมูลจำนวน 85 ข้อมูล สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆได้ดังแสดงในตารางที่ 4.35 และกราฟความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในรูปแบบที่ 4.16

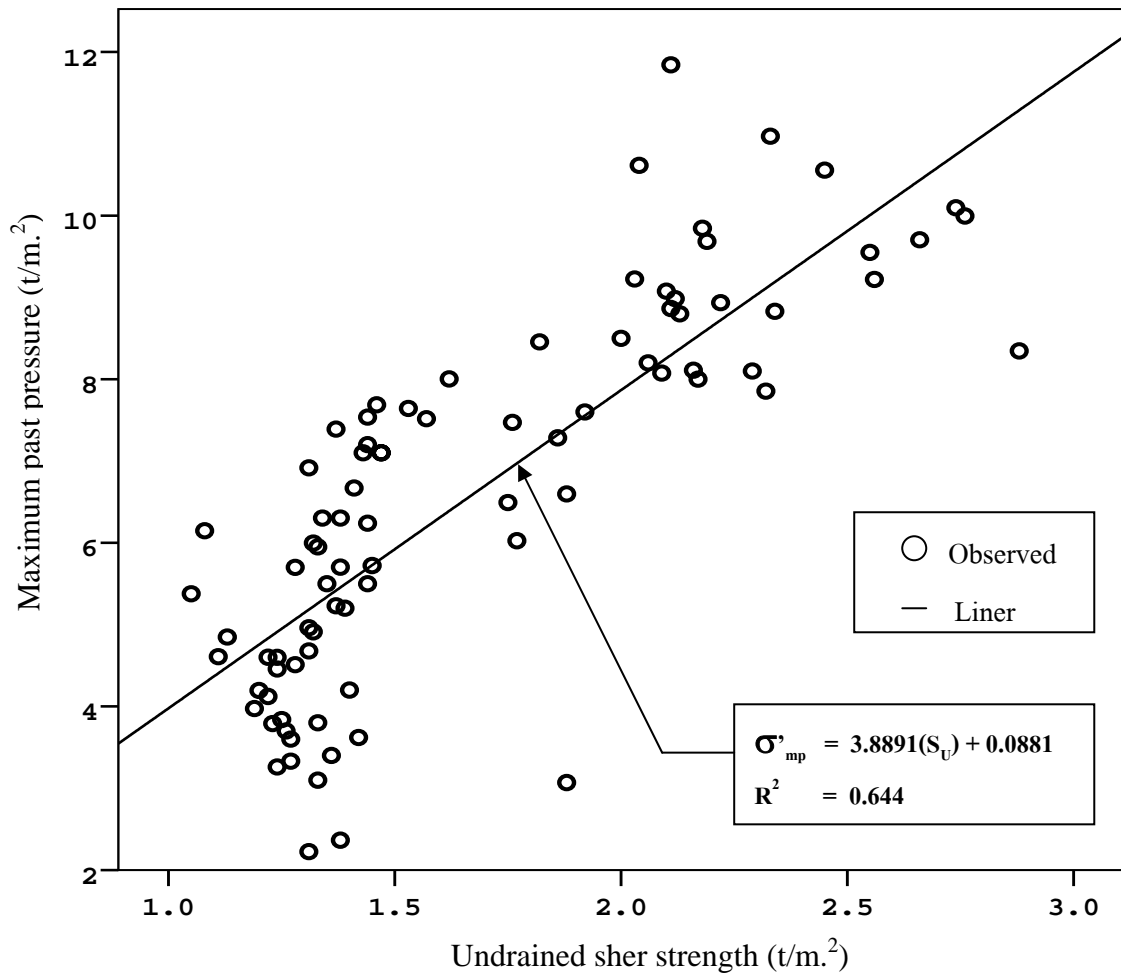
ตารางที่ 4.35 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum past pressure กับ Undrained shear strength

ค่า	สมการถดถอย	รูปแบบสมการ	R <sup>2</sup>
$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	$3.8891(S_U) + 0.0881$	Linear	0.644
$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	$6.9827 \ln(S_U) + 3.2514$	Logarithmic	0.662
$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	$3.6942 (S_U)^{1.073}$	Power	0.561
$\sigma'_{mp}$ (t/m. <sup>2</sup> )	$2.2821 e^{0.595(S_U)}$	Exponential	0.541

จากตารางที่ 4.35 พบว่ารูปแบบของสมการแบบ Logarithmic ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R<sup>2</sup>) ดีที่สุดคือ มีค่าเท่ากับ 0.662 แต่เมื่อทำการพิจารณาถึงการนำไปใช้งาน พบว่ารูปแบบสมการแบบ Linear สามารถใช้งานได้สะดวกกว่า จึงนำรูปแบบสมการแบบ Linear มาใช้งาน และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า R<sup>2</sup> กับข้อเสนอแนะของ Draper and Smith (1966) พบว่าค่า R<sup>2</sup> ของสมการนี้มีค่าเท่ากับ 0.644 ซึ่งอยู่ในขั้นที่มีความสัมพันธ์กันดี โดยสมการคือ

$$\sigma'_{mp} \text{ (t/m.}^2\text{)} = 3.8891(S_U) + 0.0881$$

โดยที่  $\sigma'_{mp}$  = Maximum past pressure มีหน่วยเป็น t/m.<sup>2</sup>  
 $S_U$  = Undrained shear strength มีหน่วยเป็น t/m.<sup>2</sup>



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Maximum past pressure กับ Undrained shear strength ของดินเหนียวอ่อนปากพนัง และเส้นแนวโน้มของข้อมูลแบบสมการเส้นตรง

#### 4.4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Overconsolidation ratio กับค่า Normalized undrained shear strength

ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Overconsolidation Ratio กับ ค่า Normalized Undrained Shear Strength จากการทดสอบ Field vane shear และ Unconfined compression test จำนวน 85 ตัวอย่าง นำมาหาสมการความสัมพันธ์ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.36 และ 4.37

ตารางที่ 4.36 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง Overconsolidation ratio กับค่า Normalized undrained shear strength from field vane shear test

ค่า	สมการถดถอย	รูปแบบสมการ	R <sup>2</sup>
OCR	$0.3392(S_U / \sigma'_{vo}) + 0.7047$	Liner	0.621
OCR	$0.2762 \ln(S_U / \sigma'_{vo}) + 1.0695$	Logarithmic	0.612
OCR	$1.0542 (S_U / \sigma'_{vo})^{0.2685}$	Power	0.651
OCR	$0.7424 e^{0.3238 (S_U / \sigma'_{vo})}$	Exponential	0.637

ตารางที่ 4.37 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง Overconsolidation ratio กับค่า Normalized undrained shear strength from unconfined compression test

ค่า	สมการถดถอย	รูปแบบสมการ	R <sup>2</sup>
OCR	$0.9952(S_U / \sigma'_{vo}) + 0.6745$	Liner	0.651
OCR	$0.3392 \ln(S_U / \sigma'_{vo}) + 1.4147$	Logarithmic	0.641
OCR	$1.4565(S_U / \sigma'_{vo})^{0.321}$	Power	0.646
OCR	$0.7257 e^{0.9267(S_U / \sigma'_{vo})}$	Exponential	0.636

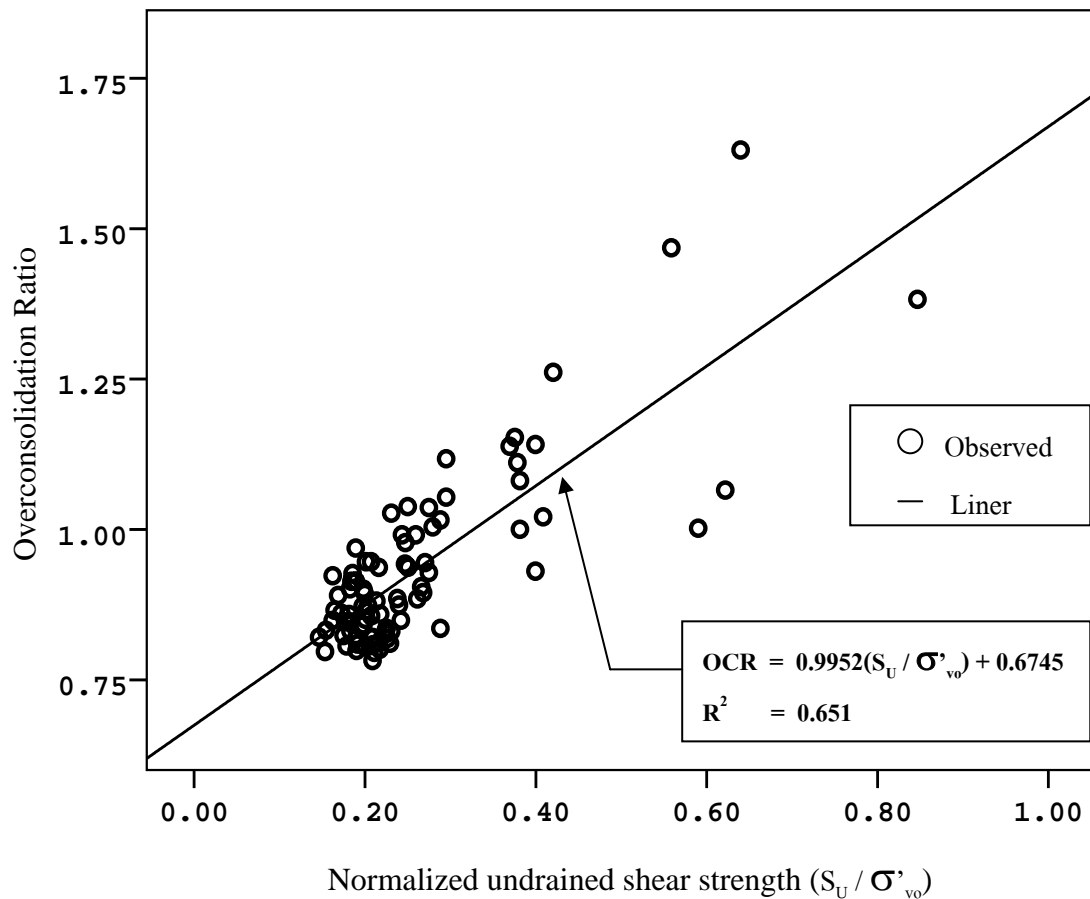
จากตารางที่ 4.36 และ 4.37 สามารถสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R<sup>2</sup>) ของสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Overconsolidation ratio กับค่า Normalized undrained shear strength แบบ Linear ของทั้งวิธีการทดสอบแบบ field vane shear test และ unconfined compression test มีค่าที่อยู่ในช่วงมีความสัมพันธ์กันดี ตามคำแนะนำของ Draper and Smith (1966) โดยสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในรูปแบบที่ 4.17 โดยที่สมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดคือ

$$\text{OCR} = 0.9952(S_U / \sigma'_{vo}) + 0.6745$$

โดยที่ OCR = Overconsolidation ratio

$(S_U / \sigma'_{vo})$  = Normalized undrained shear strength

โดยสมการนี้อยู่ในรูปแบบการทดสอบหาค่า Undrained Shear strength แบบ Unconfined compression test เนื่องจากการทดสอบแบบนี้เป็นการทดสอบที่ง่ายกว่าการทดสอบ Field vane shear test



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Overconsolidation ratio กับ Normalized undrained shear strength ของดินเหนียวอ่อนปากพนัง และเส้นแนวโน้มของข้อมูลแบบสมการเส้นตรง

#### 4.5 Pore Pressure Parameter A at Failure

Pore pressure parameter A เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันน้ำที่ได้ในขณะที่ทำการทดสอบ Triaxial test โดยค่า Parameter A สามารถใช้แสดงถึงถึงชนิดของดินและสภาพของการรับน้ำหนักบรรทุกที่ผ่านมาในอดีต โดยค่า Parameter A ที่จุดวิบัติของดินเรียกว่า Parameter A at failure ( $A_f$ ) โดยค่าของ  $A_f$  ของดินเหนียวอ่อนปากพนังแสดงในตารางที่ 4.38 ถึงตารางที่ 4.40

ตารางที่ 4.38 ค่า Parameter A at failure for confining pressure of 5 t/m.<sup>2</sup>

Depth (m.)	Parameter A at Failure ( $A_p$ ) (Confining Pressure of 5 t/m. <sup>2</sup> )								
	BH - 1	BH - 2	BH - 3	BH - 4	BH - 5	BH - 6	BH - 7	BH - 8	BH - 9
1.50	-	-	0.62	0.55	0.60	0.56	-	0.61	-
3.00	0.51	0.64	0.67	0.58	0.63	0.58	0.60	0.62	0.55
4.50	0.55	0.60	0.65	0.54	0.64	0.55	0.57	0.63	0.54
6.00	0.61	0.62	0.70	0.59	0.68	0.64	0.58	0.65	0.56
7.50	0.60	0.59	0.64	0.60	0.65	0.62	0.53	0.62	0.59
9.00	0.69	0.64	0.59	0.64	0.61	0.65	0.58	0.69	0.70
10.50	0.54	0.55	0.58	0.65	0.63	0.61	0.54	0.64	0.68
12.00	0.50	0.51	0.55	0.69	0.67	0.62	0.57	0.66	0.75
13.50	0.51	0.54	0.59	0.62	0.61	0.68	0.59	0.67	0.70
15.00	0.53	0.52	-	-	-	0.64	-	0.65	0.69
16.50	0.50	-	-	-	-	0.69	-	-	-
18.00	-	-	-	-	-	0.62	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย (-) ไม่มีตัวอย่างทดสอบที่ความลึกนั้น

ตารางที่ 4.39 ค่า Parameter A at failure for confining pressure of 10 t/m.<sup>2</sup>

Depth (m.)	Parameter A at Failure ( $A_p$ ) (Confining Pressure of 10 t/m. <sup>2</sup> )								
	BH - 1	BH - 2	BH - 3	BH - 4	BH - 5	BH - 6	BH - 7	BH - 8	BH - 9
1.50	-	-	0.54	0.51	0.52	0.53	-	0.58	-
3.00	0.60	0.51	0.51	0.50	0.54	0.53	0.47	0.51	0.46
4.50	0.58	0.58	0.52	0.58	0.57	0.54	0.49	0.57	0.52
6.00	0.54	0.52	0.59	0.54	0.63	0.53	0.56	0.57	0.53
7.50	0.57	0.53	0.54	0.57	0.59	0.58	0.50	0.55	0.55
9.00	0.58	0.57	0.60	0.60	0.62	0.63	0.60	0.59	0.57
10.50	0.55	0.54	0.55	0.62	0.60	0.57	0.51	0.53	0.54
12.00	0.56	0.56	0.58	0.66	0.69	0.64	0.61	0.64	0.57
13.50	0.57	0.57	0.54	0.61	0.60	0.60	0.57	0.59	0.62
15.00	0.58	0.57	-	-	-	0.62	-	0.60	0.61
16.50	0.60	-	-	-	-	0.64	-	-	-
18.00	-	-	-	-	-	0.59	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย (-) ไม่มีตัวอย่างทดสอบที่ความลึกนั้น

ตารางที่ 4.40 ค่า Parameter A at failure for confining pressure of 15 t/m.<sup>2</sup> ของหลุมเจาะต่างๆ

Depth (m.)	Parameter A at Failure ( $A_f$ ) (Confining Pressure of 15 t/m. <sup>2</sup> )								
	BH - 1	BH - 2	BH - 3	BH - 4	BH - 5	BH - 6	BH - 7	BH - 8	BH - 9
1.50	-	-	0.45	0.41	0.45	0.43	-	0.49	-
3.00	0.53	0.47	0.42	0.43	0.48	0.45	0.44	0.45	0.40
4.50	0.51	0.45	0.47	0.48	0.42	0.48	0.42	0.47	0.42
6.00	0.52	0.44	0.51	0.49	0.48	0.49	0.47	0.48	0.46
7.50	0.55	0.48	0.49	0.54	0.51	0.51	0.45	0.51	0.48
9.00	0.52	0.49	0.55	0.55	0.52	0.56	0.51	0.58	0.50
10.50	0.56	0.54	0.52	0.54	0.55	0.52	0.50	0.52	0.49
12.00	0.57	0.51	0.57	0.63	0.64	0.60	0.57	0.59	0.56
13.50	0.53	0.52	0.54	0.61	0.58	0.58	0.55	0.54	0.58
15.00	0.54	0.50	-	-	-	0.55	-	0.53	0.54
16.50	0.55	-	-	-	-	0.59	-	-	-
18.00	-	-	-	-	-	0.51	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย (-) ไม่มีตัวอย่างทดสอบที่ความลึกนั้น

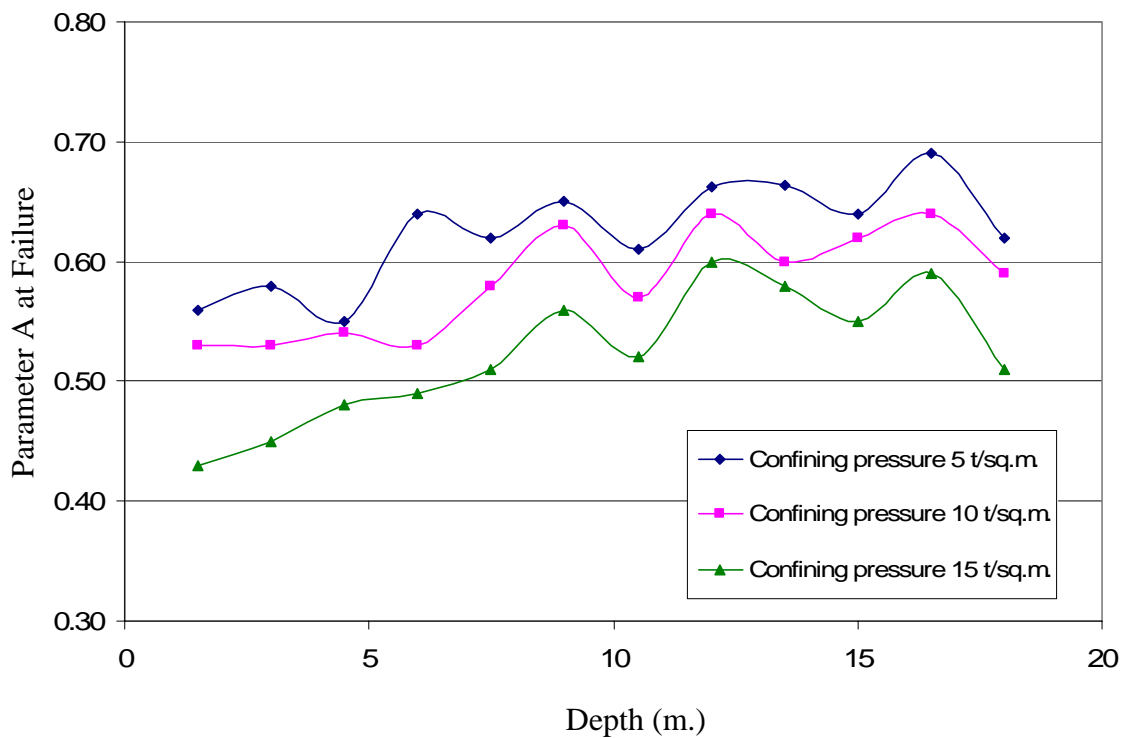
ค่า Parameter A at failure (ตารางที่ 4.38 ถึงตารางที่ 4.40) พบว่าค่า  $A_f$  ลดลงตาม Confining pressure ที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างที่ระดับความลึกเดียวกัน และค่า  $A_f$  จะเพิ่มขึ้นตามความลึกของดินตัวอย่างที่ Confining pressure ที่เท่ากันเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า  $A_f$  ของหลุมเจาะเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ตัวอย่างหลุมเจาะที่ 6 (ดังรูปที่ 4.18)

ตารางที่ 4.41 ค่า Parameter A at failure ที่ Confining pressure ต่างๆ

Parameter A at Failure Confining Pressure (t/m. <sup>2</sup> )	ช่วงข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	SD
<b>5</b>	0.50 – 0.75	0.608	0.055
<b>10</b>	0.46 – 0.69	0.567	0.043
<b>15</b>	0.40 – 0.64	0.511	0.053

ตัวอย่างทดสอบ 85 ตัวอย่างต่อ 1 ความดัน





รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Parameter A at Failure กับความลึก ของ BH – 6

ข้อมูลตารางที่ 4.38 ถึงตารางที่ 4.40 สามารถสรุปค่าค่า  $A_f$  ของดินเหนียวอ่อนปากพั้งดังแสดงในตารางที่ 4.41 โดยสามารถแบ่งช่วงของค่า  $A_f$  ได้เป็นช่วงตามความดันที่ใช้ในการกดอัดตัวอย่าง โดยที่ Confining pressure เท่ากับ  $5 \text{ t/m}^2$  นั้นมีค่าอยู่ในช่วง  $0.50 - 0.75$  และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.608$  , ที่ Confining pressure เท่ากับ  $10 \text{ t/m}^2$  นั้นมีค่าอยู่ในช่วง  $0.46 - 0.69$  และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.567$  และที่ Confining pressure เท่ากับ  $15 \text{ t/m}^2$  นั้นมีค่าอยู่ในช่วง  $0.40 - 0.64$  และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.511$  โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าที่ได้ทั้งหมดพบว่า ค่า  $A_f$  จะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับ Confining pressure ที่ใช้ในการกดอัดตัวอย่าง โดย Confining pressure ที่น้อยกว่าจะทำให้ค่า  $A_f$  มีค่ามากกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $A_f$  ของดินเหนียวอ่อนต่างจากตารางที่ 2.7 พบว่าค่า  $A_f$  ของดินเหนียวอ่อนปากพั้งมีค่าอยู่ในช่วง Normally consolidated clay

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปากพนัง สามารถสรุปผลการทดสอบทั้งหมดได้ดังนี้ (ตารางที่ 5.1)

#### 5.1 สรุปการศึกษา

5.1.1 ชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนัง บริเวณอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช มีความลึกโดยประมาณ 15 – 18 เมตร และจัดอยู่ในลักษณะของดินเหนียวอ่อน เนื่องจากความชื้นในธรรมชาติมีค่าที่สูงกว่าขีดพิกัดเหลว และค่า N – value อยู่ในช่วงของดินเหนียวอ่อน ตามการแบ่งความแข็งแรงของชั้นดิน โดยสามารถจำแนกชนิดของดินตามมาตรฐานของ Unified soil classification system ได้เป็น High plasticity clay (CH)

5.1.2 ค่าคุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนังเช่น Natural water content, Specific gravity, Unit weight, Liquid limit, Plastic limit และ Plasticity index แต่ละหุ้มนจะทั้ง 9 หุ้มน มีค่าที่ใกล้เคียงกัน สามารถสรุปได้ว่า ลักษณะของดินบริเวณอำเภอปากพนังนั้นเป็นดินชนิดเดียวกัน

5.1.3 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง เช่น Undrained shear strength , Coefficient of consolidation, Compression index, Recompression index, OCR, Modulus of elasticity และ Internal friction angle (ตารางที่ 5.1) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากับดินเหนียวจากแหล่งต่างๆ ที่มีผู้วิจัยท่านอื่นได้ทำการวิจัยไว้ (ตารางที่ 2.4) พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นเพราะลักษณะการเกิดของดินเหนียวอ่อนปากพนังและดินเหนียวอ่อนจากแหล่งต่างๆ มีลักษณะการเกิดที่คล้ายกัน

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

คุณสมบัติวิศวกรรม	ช่วงข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	SD
Undrained shear strength, FV – Test, $S_{U(FV)}$ , $t/m^2$	2.64 – 5.11	3.81	0.573
Undrained shear strength, UC, $S_{U(UC)}$ , $t/m^2$	1.05 – 2.88	1.67	0.468
Compression index, $C_c$	0.311 – 0.974	0.668	0.162
Recompression index, $C_r$	0.205 – 0.078	0.140	0.031
Coefficient of consolidation, $C_v$ , $m.^2/year$	0.098 – 2.772	1.034	0.678
Maximum past pressure, $\sigma'_{pm}$ , $t/m^2$	3.2 – 8.9	5.5	2.269
OCR	1.699 – 0.768	0.932	0.148
Total cohesion, CU Triaxial Test, $C$ , $t/m^2$	1.50 – 6.40	2.80	0.871
Effective cohesion, CU Triaxial Test, $C'$ , $t/m^2$	2.70 – 9.00	4.70	1.442
Internal friction angle, $\phi$ , Degree	15.64 – 19.79	17.61	1.019
Effective internal friction angle, $\phi'$ , Degree	21.31 – 31.38	25.47	2.415
$a'$ , $t/m^2$	1.40 – 8.30	4.42	0.119
$\alpha'$ , Degree	21.80 – 28.81	24.15	1.830
Undrained modulus of elasticity, $E_U$ , $t/m^2$	19.65 – 492.40	190.57	1.645
Critical state parameter $M$	0.30 – 0.68	0.469	0.077
Critical state parameter $U$	1.67 – 2.77	2.691	0.116
Critical state parameter $\lambda$	0.03 – 0.16	0.065	0.064
Critical state parameter $\Gamma$	2.75 – 3.41	2.992	0.144

5.1.4 ชั้นดินเหนียวอ่อนปากพรางมีลักษณะของดินเหนียวเป็นดินเหนียวที่มีการยุบตัวตามปกติ (Normally consolidation clay) โดยมีค่าเฉลี่ยของค่า OCR เท่ากับ 0.932 (ดังแสดงในตารางที่ 5.1)

5.1.5 ค่า Parameter A at failure ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะพฤติกรรมของดินในอดีต จากค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปากพราง พบว่ามีความสอดคล้องกับค่า OCR คือ ค่า Parameter A at failure ของชั้นดินเหนียวอ่อนปากพรางนั้นอยู่ในช่วง +0.50 ถึง +1.00 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.6 พบว่ามีลักษณะของดินเป็นดินเหนียวที่มีการยุบอัดตัวตามปกติ

5.1.6 ค่าเฉลี่ยของ Critical state parameter ของดินเหนียวอ่อนปากพราง (ดังแสดงในตารางที่ 5.1) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของดินเหนียวลอนคอนและดินจากแหล่งต่างๆ (ตารางที่ 2.3) พบว่ามีค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อย สรุปได้ว่าค่าที่ได้เป็นค่าของดินเหนียวอ่อนปากพรางมีค่าที่ใกล้เคียงกับดินเหนียววีล (Weald Clay) มากที่สุด

5.1.7 คุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพรางนั้น มีความสัมพันธ์กับความลึกทุกตัวแปร โดยสังเกตได้จากค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ เช่น คุณสมบัติกำลังเฉือนมีความแข็งแรงขึ้นและคุณสมบัติการยุบอัดตัวมีค่าลดลงเมื่อความลึกของตัวอย่างดินเพิ่มมากขึ้น และเมื่อทำการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์โดยไม่มีการนำตัวแปรความลึกมาทำการวิเคราะห์ในตัวสมการ ค่า  $R^2$  มีค่าต่ำคืออยู่ในช่วง 0.2 – 0.4 แต่เมื่อนำตัวแปรความลึกมาวิเคราะห์พบว่าค่า  $R^2$  มีค่าที่เพิ่มมากขึ้นเป็น 0.6 – 0.9

5.1.8 ค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity index, PI) เป็นค่าคุณสมบัติดัชนีที่มีความสำคัญมาก เพราะเกือบทุกสมการของความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติวิศวกรรมกับคุณสมบัติดัชนี จะมีค่าดัชนีพลาสติกเป็นตัวแปรอยู่ด้วย

5.1.9 สมการสหสัมพันธ์พหุคูณ ของค่าต่างๆของคุณสมบัติวิศวกรรมกับค่าต่างๆของคุณสมบัติดัชนี คือ

$$\begin{aligned}
 S_{U(FV)} &= 2.276(G_s) - 0.017(PI) - 0.053(W) + 0.098(Z) + 0.305 \text{ ค่า } R^2 = 0.728 \\
 S_{U(Uc)} &= 0.984(G_s) + 0.003(PI) + 0.01(W) + 0.088(Z) - 2.580 \text{ ค่า } R^2 = 0.657 \\
 C_c &= 0.002(LL) - 0.034(Z) + 0.852 \text{ ค่า } R^2 = 0.814 \\
 C_r &= 0.022(\gamma) + 0.007(Z) + 0.044 \text{ ค่า } R^2 = 0.891 \\
 C_v &= -0.007(PI) - 0.129(Z) + 2.434 \text{ ค่า } R^2 = 0.615 \\
 \sigma'_{mp} &= 0.015(PI) - 0.33(\gamma) + 0.529(Z) + 2.127 \text{ ค่า } R^2 = 0.981 \\
 OCR &= 0.005(PI) - 1.404(\gamma) - 0.025(Z) + 3.415 \text{ ค่า } R^2 = 0.771 \\
 C &= 3.995(\gamma) - 0.030(PI) + 0.181(Z) - 4.680 \text{ ค่า } R^2 = 0.858 \\
 C' &= -0.040(PI) + 0.323(Z) + 3.388 \text{ ค่า } R^2 = 0.943 \\
 \phi &= 8.723(G_s) - 0.005(PI) + 0.067(Z) - 6.452 \text{ ค่า } R^2 = 0.646 \\
 \phi' &= 0.282(W) + 0.324(Z) + 1.747 \text{ ค่า } R^2 = 0.636 \\
 a' &= 0.077(PL) + 3.575(\gamma) + 0.245(Z) - 6.217 \text{ ค่า } R^2 = 0.861 \\
 \alpha' &= 0.109(W) - 0.005(PI) + 0.331(Z) + 13.431 \text{ ค่า } R^2 = 0.730 \\
 E_U &= 229.31 (S_U) - 192.81 \text{ ค่า } R^2 = 0.636
 \end{aligned}$$

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษานี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างจากพื้นที่ต่างในอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราชเพียง 9 จุดเท่านั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมทุกตำบลของอำเภอปากพนังควรทำการสำรวจพื้นที่ และทำการเจาะสำรวจเก็บตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์เพิ่มเติม เพื่อทำฐานข้อมูลให้ครอบคลุมทุกตำบลของอำเภอปากพนัง

5.2.2 สมการสหสัมพันธ์พหุคูณ ของค่าต่างๆของคุณสมบัติวิศวกรรมกับค่าต่างๆของคุณสมบัติดัชนีที่ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นสมการของดินเหนียวอ่อนปากพนังเท่านั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่หลากหลายและมากยิ่งขึ้น ควรศึกษาบริเวณชั้นดินอ่อนของจังหวัดอื่นๆเช่น จังหวัดสงขลา จังหวัดสตูล จังหวัดพัทลุง จังหวัดปัตตานี เป็นต้น

5.2.3 การศึกษานี้ได้สมการสหสัมพันธ์พหุคูณที่มาจากความสัมพันธ์กับความลึก ซึ่งสมการที่ไม่มีความลึกมาเกี่ยวของนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ยังต่ำอยู่ ควรทำการศึกษาที่ระดับความลึกเดียวกันเพิ่มเติม เพื่อวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์โดยไม่นำตัวแปรความลึกมาเกี่ยวของเพิ่มเติม

5.2.4 การนำสมการในงานวิจัยนี้ไปใช้งาน ควรตรวจสอบค่าคุณสมบัติดัชนีที่ทำการทดสอบให้ถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับค่าตัวอย่างที่อยู่ในงานวิจัยนี้

5.2.5 สมการที่อยู่ในงานวิจัยนี้เป็นสมการของดินเหนียวอ่อนเท่านั้น ไม่สามารถใช้กับค่าของดินเหนียวแข็งได้ ควรทำการเก็บข้อมูลของดินเหนียวแข็ง เพื่อเป็นการสร้างสมการสหสัมพันธ์พหุคูณของดินเหนียวแข็งปากพนังโดยเฉพาะ

### บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี (2544). ธรณีวิทยาประเทศไทย. กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร
- กวีวงศ์ คูสุวรรณ (2530). การประเมินค่าทางสถิติของสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศรัญยูทธ์ สุธรรมนาถพงษ์ (2520). คุณสมบัติและพฤติกรรมทางด้านวิศวกรรมของดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รสสุคนธ์ ชื่นวัฒนา (2546). การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- สถาพร ฤวิจิตรจารุ (2542). ปฏิพิภคศาสตร์. ไลบารี นาย พับลิชซิ่ง. กรุงเทพมหานคร.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน (2550). ปฏิพิภคศาสตร์. สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล. กรุงเทพมหานคร.
- สุพัฒน์ แสวงเวช (2530). การทดสอบตัวของชั้นดินอ่อนในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อภิชัย จุฑาศิริวงศ์ (2546). สภาพทางธรณีและลักษณะของชั้นดินในบริเวณภาคใต้. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. จังหวัดสงขลา
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (1989). Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Vol. 04.08, Soil and Rock Building Stones; Geotextiles, Philadelphia, Pa.
- Designation D-854 : Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer
- Designation D-1586 : Standard Method for Penetration Test and Split – Barrel Sampling of Soils.
- Designation D-1587 : Standard Practice for Thin – Walled Tube Sampling of Soils.
- Designation D-2166 : Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil
- Designation D-2216 : Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

Designation D-2435 : Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading

Designation D-2487 : Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)

Designation D-2573 : Standard Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soils

Designation D-3282 : Standard Practice for Classification Of Soils and Soil Aggregate Mixture for Highway Construction Purposes.

Designation D-4318 : Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

Designation D-4767 : Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils

Adikari, G.S.N. (1977). Statistical Evaluation of Strength and Deformation Characteristics of Bangkok Clays. M.Eng. Thesis, AIT.

Azzouz, A.S. (1976). Regression Analysis of Soil Compressibility. Soils and Foundations 16 (2) pp. 19-29.

Atkinson J.H. (1993). An Introduction to The Mechanics of Soils and Foundation Through Critical State Soil Mechanics. McGraw-Hill Book Company Europe. London.

Bjerrum, L., and Simons, N.E. (1960). Comparison of Shear Strength Characteristics of Normally Consolidated Clay. Proceedings of Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. ASCE. pp. 711-726.

Bjerrum, L. (1972). Embankments on Soft Ground. Proceedings of Conference Performance of Earth and Earth Supported Structure, Lafauette. pp. 1-54

Casagrande, A. (1936). Determination of The Preconsolidation Load and Its Practical Significance. Proceedings of First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Mass 3. Cambridge. pp. 60-64.

Cox, J.B. (1970). A Review of The Engineering Charactersitics of The Recent Marine Clays in Southeast Asia. Res. Rep. AIT(6).



- Das, B. (1998). Advanced Soil Mechanics. Taylor and Francis. Washington, D.C.
- Draper, N.R. and Smith H. (1966). Applied Regression Analysis. New York. John Wiley and Son. 407 p
- Dumn Muh, J. (1977). Geotechnical Observation from a Deep Borehole at Rangsit. M.Eng. Thesis, AIT.
- Fook Hou Lee, Yeong Lee, Soon Hoe Chew and Kwet Yew Yong (2005). Strength and Modulus of Marine Clay-Cement Mixes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering February. pp. 178 - 176
- Frederic G. B. (2000). Engineering Properties of soils and rocks. John Wiley and Sons Inc. USA.
- Haley and Aldrich. (1968). Effect of Deep Well Pumping on Land Subsidence in Bangkok. Report by Camp. Dresser & Mackey Inc. Submitted to Metropolitan Water Workers Association, Bangkok.
- Hansbo, S. (1957). A New Approach to the Determination of The Shear Strength of Clay by the Fall Cone Test. Swedish Geotechnical Institute. Report No.114.
- Jamiolkowski, M. (1985). New Developments In Field and Laboratory Testing of Soils. International Conference Soil Mechanic and Foundation Engineering 11<sup>th</sup> ed. n.d. pp. 57-153.
- Karlsson, R. and Viberg, L. (1967). Ratio  $c/p'$  in relation to Liquid Limit and Plasticity Index with special reference to Swedish Clays, Proceedings of Geotechnical Conference 1<sup>st</sup> ed. Norway. pp. 43-47.
- Kerduwan, T. (1984). Basic Properties and Compressibility Characteristics of First and Second Layers of Bangkok Subsoils. M.Eng. Thesis, AIT.
- Kulhaway, F.H. and Mayne, P.W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. Electric Power Research Institute, California.
- Ladd, C.C. and R. Foott. (1974). New Design Procedure for Stability of Soft Clays. Journal of Geotechnical Engineering Division. pp. 421-494.
- Larsson, R. (1980). Undrained Shear Strength in Stability Calculation of Embankments and Foundation on Clay. Canadian Geotechnical Journal 17. pp. 591-602.

- Martin, R.E., Drahod, E.G. and Pappas, J.L. (1995). Characterization of Preconsolidated Soils in Richmond Virginia. Transportation Research Record No.1479. National Research Council, Washington, D.C. pp. 89-98.
- Mayerhof, G.G. (1957). Discussion on Sand Density by Spoon Penetration. International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering (4). pp. 110
- Mayne, P.W. and Kemper, J.B. (1988). Profiling OCR in Stiff Clays by CPT and SPT. Geotechnical Testing Journal 11(2). pp. 139-147.
- Mayne, P.W. and Mitchell, J.K. (1988). Profiling of Overconsolidation Ratio in Clays by Field Vane. Canadian Geotechnical Journal 25 (1). pp. 150-158.
- Mesri, G. (1975). Discussion on New Design Procedure for Stability of Soft Clays. Journal of Geotechnical Engineering Division: pp. 409-412.
- Moh, Z.C., J.D. Neilson and E.W. Brand. (1969). Strength and Deformation Behavior of Bangkok Clay. Proceeding of International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 7<sup>th</sup> ed. Mexico.
- Morris, P.M., and Williams, D.T. (1994). Effective Stress Vane Shear Strength Correction Factor Correlation. Canadian Geotechnical Journal 31(3). pp. 335-342.
- Muktabhant, C., Teerawong, P. and Tenggamnuay. (1966). Engineering Properties of Bangkok Subsoils Report. Chulalongkorn University. 37p.
- Muni Budhu. (2007). Soil Mechanics and Foundation. John Wiley and Sons Inc. USA.
- Nagaraj, T.S. and Murthy, B.R.S. (1985). Prediction of The Preconsolidation Pressure and Recompression Index of Soils. Geotechnical Testing Journal, American Society for Testing and Material 8(4). pp. 199-202.
- Nedeco. (1965). Report of Netherlands Engineering Consultants to Government of Thailand Bangkok Vol. 2. 80 p.
- Peck, R.B., W.E. Hanson and T.H. Thornburn. (1974). Foundation Engineering, 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Son Inc., New York.
- Pham, T.N. (1972). Application of The Dutch Cone in The Bangkok Area. M.Eng. Thesis. AIT.
- Sivandran, C. (1975). Finite Element Analysis of The Test Embankment and Excavation at Nong Ngoo Hao. M.Eng. Thesis. AIT.

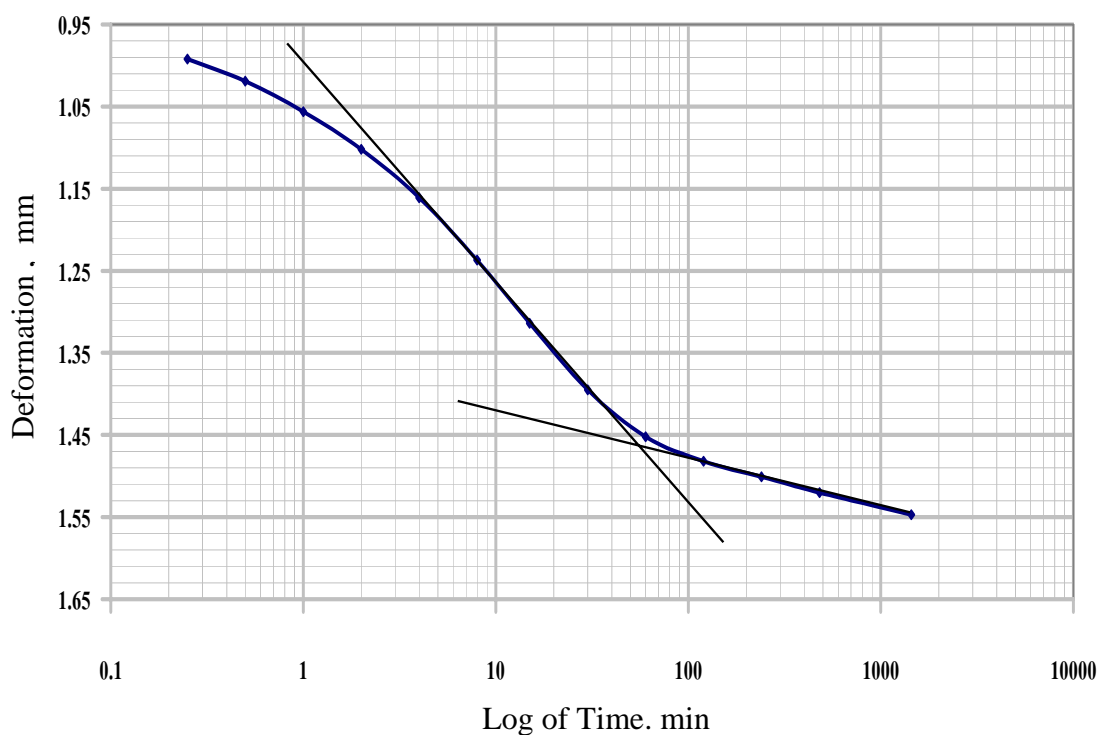
- Skempton, A.W. (1944). Notes on The Compressibility of Clays. Quarterly Journal of the Geological Society, London 100. pp. 119-135.
- Tan, P.S. (1975). Undrained Shear Strength Characteristic of Rangsit Clay. M.Eng. Thesis. AIT.
- Terzaghi and Peck. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, New York.
- Tonyagate, W. (1978). Geotechnical Properties of Bangkok Subsoils for Subsidence Analysis. M.Eng. Thesis. AIT.
- Truong, Hoang V.P. (1973). Size Effects on Undrained Strength of Bangkok Clay. M.Eng. Thesis. AIT.
- Tsai, C.Y. (1982). A Monograph on the Engineering Properties of Bangkok Subsoils. M.Eng. Thesis. AIT.
- Wroth, C.P. (1979). Correlations of Some Engineering Properties of Soils. Conference on Behaviour of Off-shore Structures. n.d.
- Yudhbir. (1979). In-situ Design Parameters for Sedimentary Clays. Symposium on In-situ Testing of Soils and Rocks and Performance of Structures. Roorkee U.P., India. pp. 184-189.
- Yuen, H.W. (1975). Predictions of Movements during Construction of Embankments on Soft Clay using Finite Element Analysis. M.Eng. Thesis. AIT.

**ภาคผนวก ก.**

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าต่างๆ จากการทดสอบ Unconfine compression test, Consolidation test  
และ Triaxial test

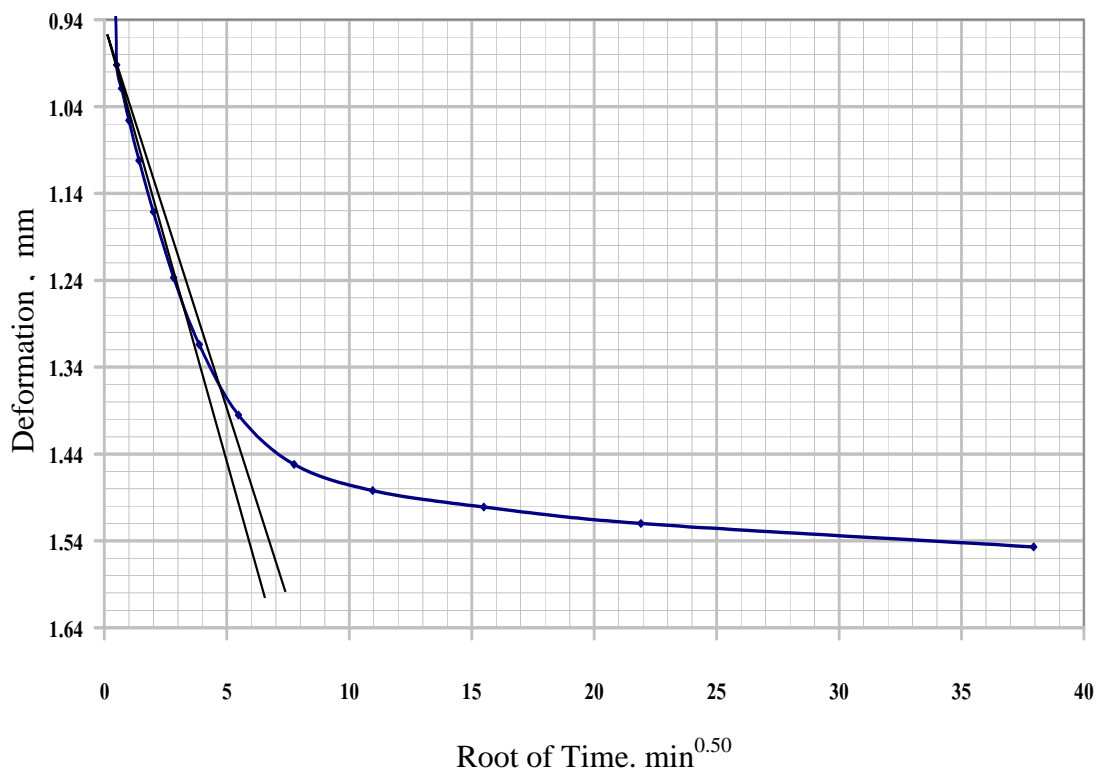
### 1. ตัวอย่างการหาค่าต่างๆ จากการทดสอบ Consolidation Test

จากการทดสอบการทรุดตัวของดิน (Consolidation test) สามารถนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวของดินกับ Log ของเวลาเพื่อหาค่าต่างๆ เช่นค่าเวลา  $t_{50}$ , ค่าเวลา  $t_{90}$ , ค่าดัชนีการอัดตัว, ดัชนีการอัดตัวช้า และ กำลังสูงสุดที่ดินเคยรับมาในอดีต



รูปที่ ก.1 Log of time & deformation graph

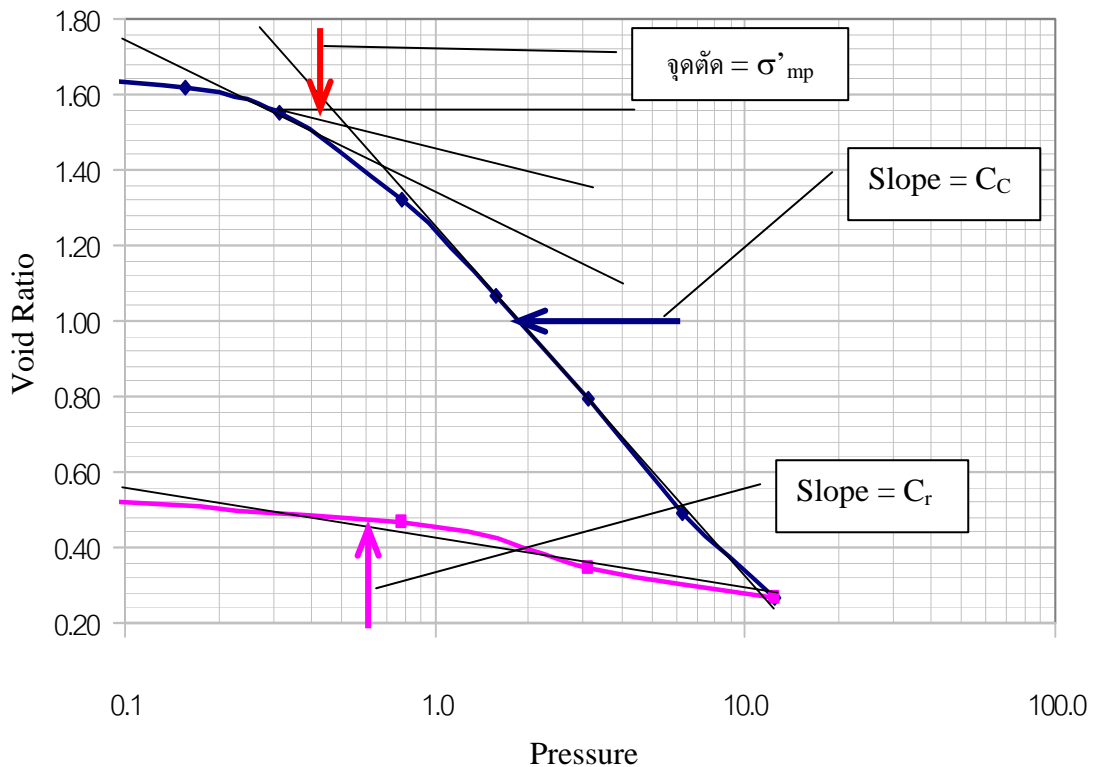
รูปที่ ก - 1 แสดงการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนปากพนัง หลุมเจาะที่ BH - 2 ที่ความลึก 7.50 เมตร เป็นการหาค่าระยะเวลา  $t_{50}$  เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว (Coefficient of consolidation,  $C_v$ ) โดยใช้วิธีของ Casagrande โดยการเขียนกราฟระหว่างค่าการทรุดตัวของดินกับเวลาในการทรุดตัว โดยค่าเวลานั้นเขียนอยู่ในรูป Log scale ทำให้ได้ค่า  $C_{v(t_{50})}$  ของดินเหนียวอ่อนปากพนัง โดยจากรูปสามารถหาค่า  $t_{50} = 5.10$  min



รูปที่ ก-2 Root of time & deformation graph

รูปที่ ก-2 การทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนปากพนัง หลุมเจาะที่ BH - 2 ที่ความลึก 7.50 เมตร เป็นการหาค่า  $t_{90}$  เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า สัมประสิทธิ์การอัดตัว (Coefficient of consolidation) โดยวิธีของ Taylor โดยการเขียนกราฟระหว่างค่าการทรุดตัวของดินกับเวลาในการทรุดตัว โดยค่าเวลานั้นเขียนโดยค่า Root of time เมื่อหาค่าได้ค่าที่ได้จะเป็นค่า Root ของเวลา จึงต้องทำการยกกำลังของค่าที่ได้ก่อนนำไปคำนวณ เมื่อคำนวณทำให้ได้ค่า  $C_{v(t90)}$  ของดินเหนียวอ่อนปากพนัง โดยจากรูปสามารถหาค่า  $t_{90}^{(0.5)} = 4.40 \text{ min}$  เมื่อทำให้เป็นค่าเวลาจริงเท่ากับ  $t_{90} = 19.36 \text{ min}$

ตัวอย่างการหาค่าดัชนีการอัดตัว ค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ และ กำลังสูงสุดที่ดินเคยรับมาในอดีต แสดงในรูปที่ ก-3

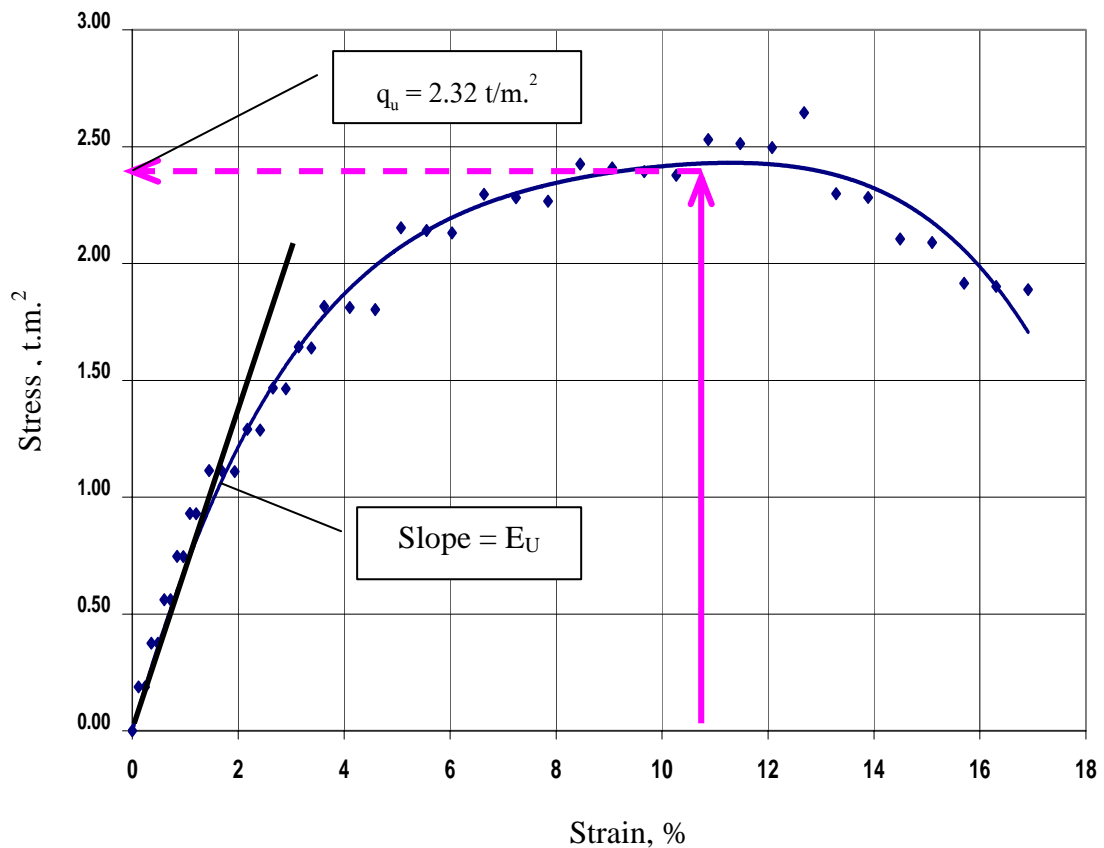


รูปที่ ก-3 Compressibility graph

รูปที่ ก-3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างในมวลดินกับแรงดัน โดยเป็นการหาค่าดัชนีการอัดตัว ดัชนีการอัดตัวซ้ำ และกำลังสูงสุดที่ดินเคยรับมาในอดีต โดยการเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วนช่องว่างของดินกับแรงที่กดทับ โดยค่าดัชนีการอัดตัวหาค่าได้จากค่า Slope ของเส้นสีน้ำเงินซึ่งอยู่ที่ลูกศรสีน้ำเงิน ค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำหาค่าได้จากค่า Slope ของเส้นสีชมพูซึ่งอยู่ที่ลูกศรสีชมพู และค่ากำลังสูงสุดที่ดินเคยรับมาในอดีตอยู่ที่ลูกศรสีแดงแสดงอยู่

## 2. ตัวอย่างการหาค่าต่างๆจากการทดสอบ Unconfined Compression Test

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compression test) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน (Undrained shear strength) โดยสามารถหาค่าได้จากกราฟดังแสดงในรูปที่ ก-4



รูปที่ ก-4 Unconfined compression test graph

รูปที่ ก-4 Unconfined compression test graph สามารถหาค่ากำลังอัดแกนเดียวค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่า Undrained modulus of elasticity โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ค่าสูงสุดของกราฟที่ Strain น้อยที่สุดคือค่ากำลังอัดแกนเดียว ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่ากำลังอัดแกนเดียว เพราะฉะนั้นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำคือค่ากำลังอัดแกนเดียวหารด้วยสอง ส่วนค่า Undrained modulus of elasticity คือค่า Slope ของเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain

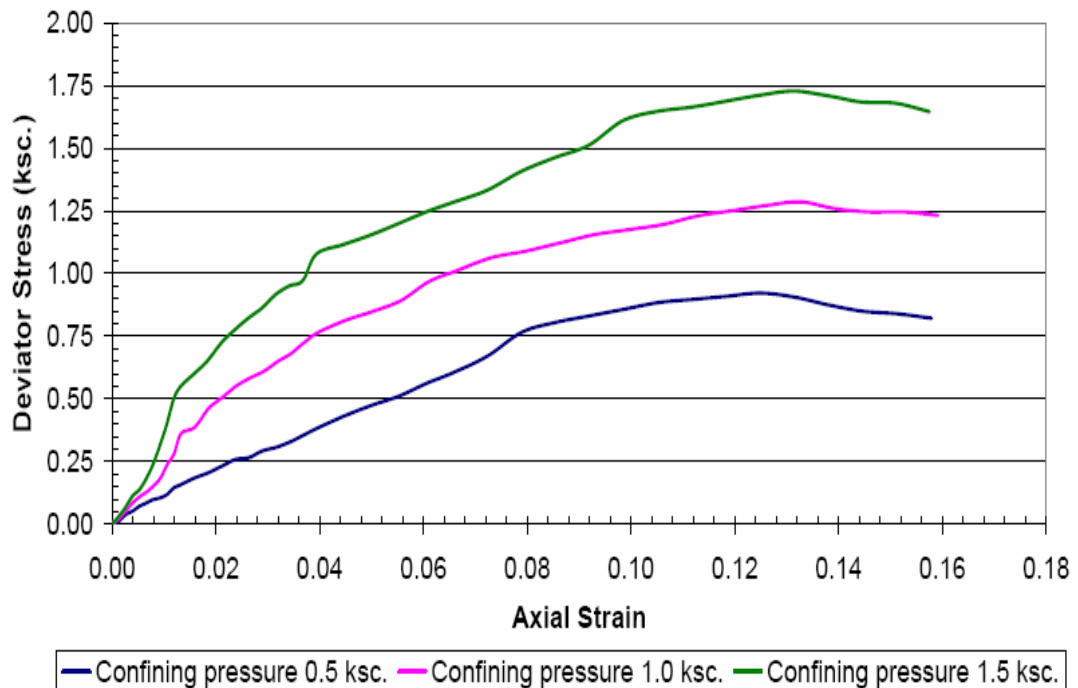
### 3 ตัวอย่างการหาค่าต่างๆจากการทดสอบกำลังอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Consolidated Undrained Triaxial Test ; CU – Test)

การทดสอบแรงอัดสามแกนเป็นการทดสอบเพื่อหาค่า กำลังรับแรงเฉือนของดิน มุมเสียดทานภายในของดิน ซึ่งสามารถหาค่าได้ทั้งแบบระบายน้ำและแบบไม่ระบายน้ำ และ



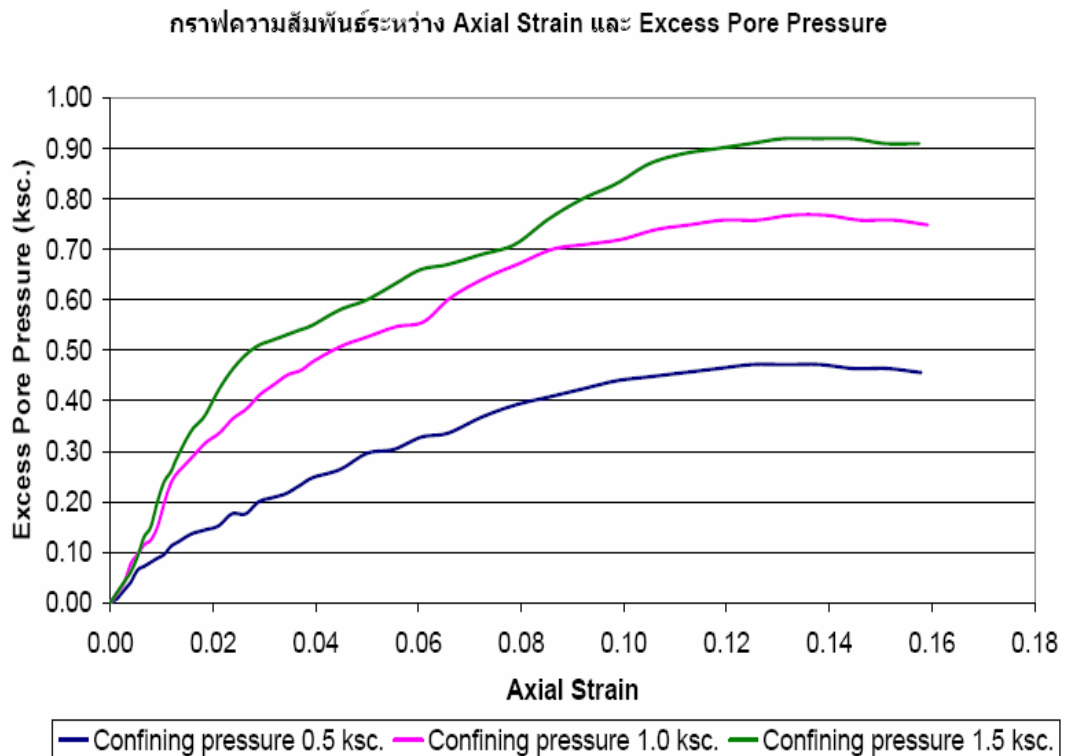
ลักษณะทางเดินของหน่วยแรง (Stress path) โดยในที่นี้ได้แสดงการหาค่าแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งในการทดสอบได้ทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับความเครียด ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด และการทรุดตัวของดินดังแสดงในรูปที่ ก-5 – ก-6

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Strain และ Deviator Stress



รูปที่ ก-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Axial strain และ Deviator stress หลุมเจาะที่ 1 ความลึก 3.00 เมตร

รูปที่ ก-5 จะสังเกตได้ว่าค่า Deviator stress ของตัวอย่างที่ใช้ Confining pressure เท่ากับ 1.5 ksc. มีค่าสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ เพราะว่าเป็นตัวอย่างที่ใช้ความดันในการอัดตัวอย่างสูงที่สุดและค่า Deviator stress ระหว่างทดสอบที่อ่านค่าได้จากเครื่องทดสอบมีค่าสูงที่สุดด้วย

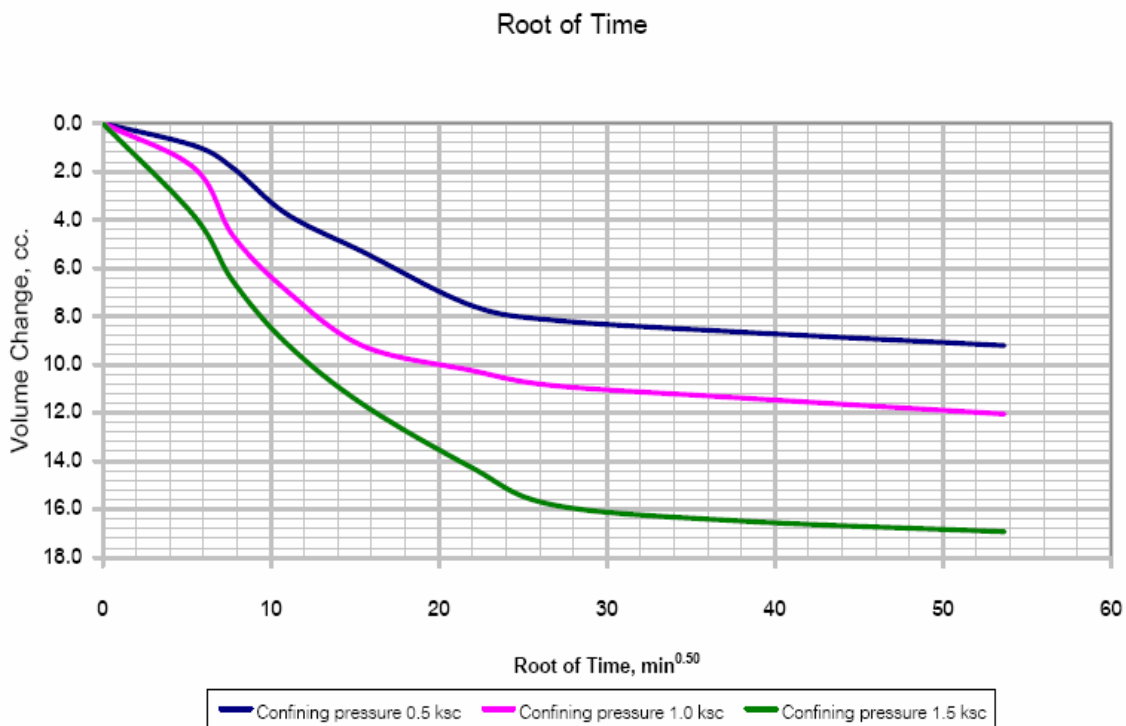


รูปที่ ก-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Axial strain และ Excess pore pressure หลุมเจาะที่ 1 ความลึก 3.00 เมตร

จากรูปที่ ก-6 พบว่าตัวอย่างที่ Confining pressure เท่ากับ 1.5 ksc. มีค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมากที่สุด จากรูปที่ ก-5 และรูปที่ ก-6 และพบว่าเมื่อค่า Deviator stress ของตัวอย่างที่มีค่ามากขึ้น ค่า Excess pore pressure ของตัวอย่างก็จะมีค่ามากขึ้นไปด้วย เนื่องจากตัวอย่างเป็นดินเหนียวอ่อนเมื่อตัวอย่างดินรับแรงกด น้ำที่อยู่ในตัวอย่างดินไม่สามารถระบายออกได้อย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำเป็นตัวที่รับแรงก่อนตัวอย่างดินทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินขึ้น โดยแรงดันน้ำส่วนเกินจะขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำบนตัวอย่างดิน เมื่อแรงที่กระทำกับตัวอย่างดินสูงแรงดันน้ำส่วนเกินก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

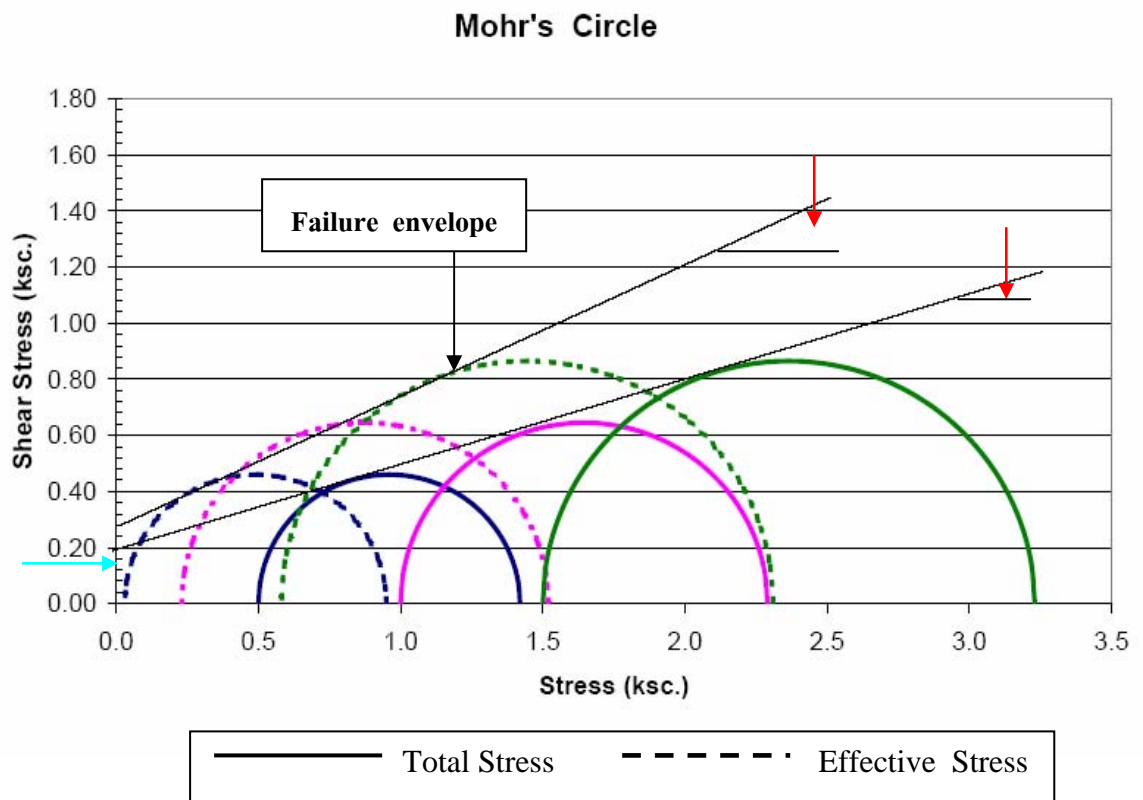


รูปที่ ก-7 Log of time & deformation graph หลุมเจาะที่ 1 ความลึก 3.00 เมตร



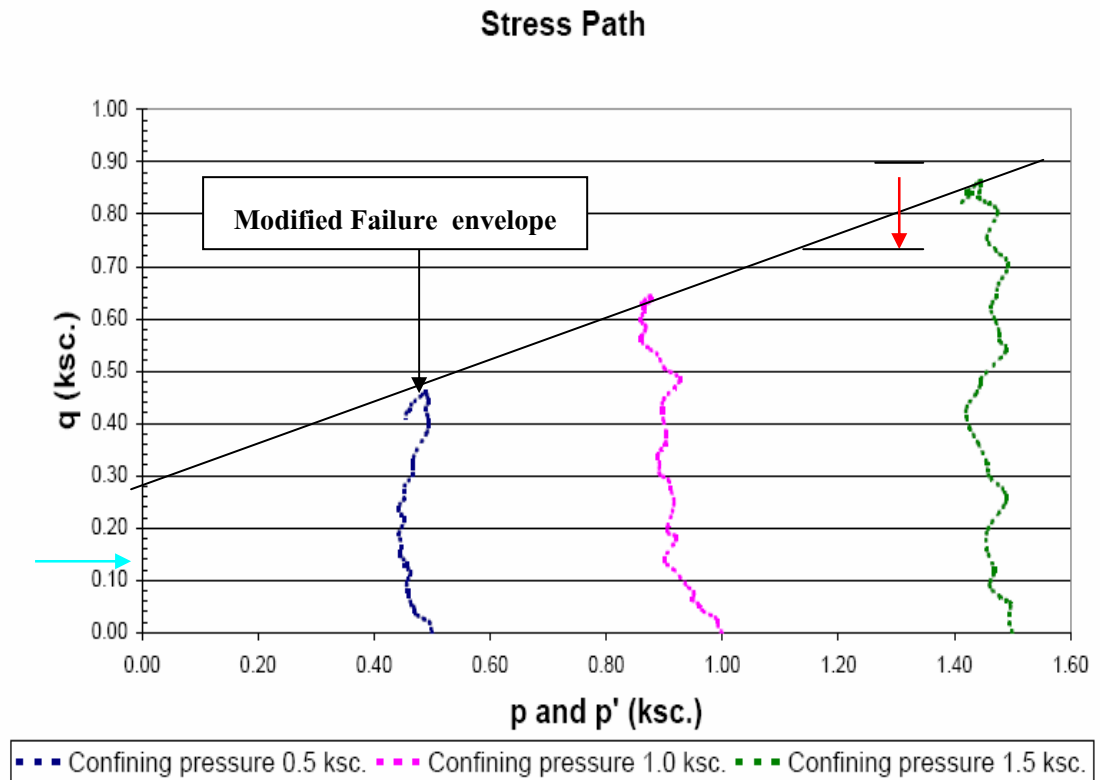
รูปที่ ก-8 Root of time & deformation graph หลุมเจาะที่ 1 ความลึก 3.00 เมตร

รูปที่ ก-7 และ รูปที่ ก-8 เป็นกราฟที่แสดงการ Consolidation ตัวอย่างทดสอบ โดยการวัดปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างดินกับเวลาที่ใช้ในการ Consolidated ตัวอย่าง โดยพบว่าเมื่อใช้ pressure มากขึ้นในการ Consolidated ตัวอย่างทำให้ปริมาตรของตัวอย่าง เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก



รูปที่ ก-9 Mohr's circle หลุมเจาะที่ 1 ความลึก 3.00 เมตร

รูปที่ ก-9 เป็นวิธีการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่ามุมเสียดทานภายในของดิน โดยใช้วิธีการเขียนวงกลมมอร์ในการหาค่าต่างๆ โดยเส้นที่บีบเป็นค่าของหน่วยแรงรวมและเส้นประคือค่าของหน่วยแรงประสิทธิผล แล้วทำการลากเส้นสัมผัสวงกลมทั้ง 3 ตัวอย่างเส้นสัมผัสเรียกว่าเส้น Failure envelope มุมของเส้น Failure envelope เรียกว่ามุมเสียดทานภายใน (ลูกศรสีแดง) จุดที่เส้น Failure envelope ตัดแกน Y คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (ลูกศรสีฟ้า) และพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่ามุมเสียดทานภายในของดินแบบประสิทธิผลจะมีค่าสูงกว่าค่าของแบบหน่วยแรงรวม



รูปที่ ก-10 p – q Diagram and stress path หลุมเจาะที่ 1 ความลึก 3.00 เมตร

รูปที่ ก-10 เป็นวิธีการหาค่ากำลังการรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและมุมเสียดทานภายในของดิน โดยไม่ต้องเขียนวงกลมมอร์ โดยค่าที่ได้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับวิธีการเขียนวงกลมมอร์ การหาค่ากำลังการรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและมุมเสียดทานภายในของดินทำได้โดยการเขียนเส้นทางเดินของหน่วยแรง โดยเส้นทางเดินของหน่วยแรงจะนิยมเขียนอยู่ในรูปแบบหน่วยแรงประสิทธิผล ทำการลากเส้นสัมผัสจุดสูงสุดของเส้นทางเดินของหน่วยแรง เรียกเส้นนี้ว่าเส้น Modified Failure envelope มุมลาดเอียงของเส้น Modified failure envelope คือมุม  $\alpha'$  ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงมุม  $\phi'$  ของวงกลมมอร์ ค่าที่เส้น Modified failure envelope ตัดแกน Y คือค่า  $a'$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงค่ากำลังการรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำแบบหน่วยแรงประสิทธิผล

ภาคผนวก ข.

ตารางความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติดัชนีกับคุณสมบัติวิศวกรรม

ตารางที่ ข-1 ความสัมพันธ์ลดถอยเชิงพหุคูณระหว่างคุณสมบัติดัชนีกับคุณสมบัติวิศวกรรมและความลึก

		Depth	LL	PL	PI	Water Content	Unit Weight	G.S.	S <sub>u</sub> (FV-Test)	S <sub>u</sub> (UC)
Depth	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	1 .447	-.084 .447	.139 .205	-.183 .094	.064 .560	.139 .204	.030 .785	.662(**) .000	.808(**) .000
LL	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	-.084 .447	1 .447	.235(*) .030	.420(**) .000	-.031 .776	-.015 .889	.047 .670	.013 .908	.007 .950
PL	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	.139 .205	.235(*) .030	1 .000	-.783(**) .000	-.162 .139	.180 .099	.087 .429	.364(**) .001	.142 .194
PI	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	-.183 .094	.420(**) .000	-.783(**) .000	1 .000	.131 .231	-.178 .103	-.051 .641	-.332(**) .002	-.128 .241
Water Content	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	.064 .560	-.031 .776	-.162 .139	.131 .231	1 .188	-.144 .188	.093 .396	-.138 .209	.101 .355
Unit Weight	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	.139 .204	-.015 .889	.180 .099	-.178 .103	-.144 .188	1 .120	.120 .274	.163 .135	.020 .853
G.S.	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	.030 .785	.047 .670	.087 .429	-.051 .641	.093 .396	.120 .274	1 .350	.103 .350	.074 .500
S <sub>u</sub> (FV-Test)	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	.662(**) .000	.013 .908	.364(**) .001	-.332(**) .002	-.138 .209	.163 .135	.103 .350	1 .000	.643(**) .000
S <sub>u</sub> (UC)	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	.808(**) .000	.007 .950	.142 .194	-.128 .241	.101 .355	.020 .853	.074 .500	.643(**) .000	1

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ ข-2 ความสัมพันธ์คอดอยเชิงพหุคูณระหว่างคุณสมบัติดัชนีกับคุณสมบัติวิศวกรรมและความลึก

		Depth	LL	PL	PI	Water Content	Unit Weight	G.S.	C <sub>c</sub>	C <sub>r</sub>	σ' <sub>mp</sub>
Depth	Pearson Correlation	1	-.084	.139	-.183	.064	.139	.030	-.904(**)	.944(**)	.990(**)
	Sig. (2-tailed)		.447	.205	.094	.560	.204	.785	.000	.000	.000
LL	Pearson Correlation	-.084	1	.235(*)	.420(**)	-.031	-.015	.047	.092	-.041	-.103
	Sig. (2-tailed)	.447		.030	.000	.776	.889	.670	.401	.713	.349
PL	Pearson Correlation	.139	.235(*)	1	-.783(**)	-.162	.180	.087	.015	.156	.106
	Sig. (2-tailed)	.205	.030		.000	.139	.099	.429	.893	.154	.335
PI	Pearson Correlation	-.183	.420(**)	-.783(**)	1	.131	-.178	-.051	.045	-.171	-.165
	Sig. (2-tailed)	.094	.000	.000		.231	.103	.641	.681	.117	.132
Water Content	Pearson Correlation	.064	-.031	-.162	.131	1	-.144	.093	-.166	.082	.060
	Sig. (2-tailed)	.560	.776	.139	.231		.188	.396	.128	.454	.588
Unit Weight	Pearson Correlation	.139	-.015	.180	-.178	-.144	1	.120	-.066	.146	.132
	Sig. (2-tailed)	.204	.889	.099	.103	.188		.274	.551	.182	.228
G.S.	Pearson Correlation	.030	.047	.087	-.051	.093	.120	1	.017	.036	.012
	Sig. (2-tailed)	.785	.670	.429	.641	.396	.274		.880	.742	.911
C <sub>c</sub>	Pearson Correlation	-.904(**)	.092	.015	.045	-.166	-.066	.017	1	-.832(**)	-.905(**)
	Sig. (2-tailed)	.000	.401	.893	.681	.128	.551	.880		.000	.000
C <sub>r</sub>	Pearson Correlation	.944(**)	-.041	.156	-.171	.082	.146	.036	-.832(**)	1	.922(**)
	Sig. (2-tailed)	.000	.713	.154	.117	.454	.182	.742	.000		.000
σ' <sub>mp</sub>	Pearson Correlation	.990(**)	-.103	.106	-.165	.060	.132	.012	-.905(**)	.922(**)	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.349	.335	.132	.588	.228	.911	.000	.000	

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).



ตารางที่ ข-3 ความสัมพันธ์คอดอยเชิงพหุคูณระหว่างคุณสมบัติดัชนีกับคุณสมบัติวิศวกรรมและความลึก

		Depth	LL	PL	PI	Water Content	Unit Weight	G.S.	C <sub>v</sub> (t <sub>50</sub> )	C <sub>v</sub> (t <sub>90</sub> )	OCR
Depth	Pearson Correlation	1	-.084	.139	-.183	.064	.139	.030	-.560(**)	-.633(**)	-.750(**)
	Sig. (2-tailed)		.447	.205	.094	.560	.204	.785	.000	.000	.000
LL	Pearson Correlation	-.084	1	.235(*)	.420(**)	-.031	-.015	.047	.243(*)	.156	.033
	Sig. (2-tailed)	.447		.030	.000	.776	.889	.670	.025	.153	.766
PL	Pearson Correlation	.139	.235(*)	1	-.783(**)	-.162	.180	.087	-.122	-.254(*)	-.220(*)
	Sig. (2-tailed)	.205	.030		.000	.139	.099	.429	.265	.019	.043
PI	Pearson Correlation	-.183	.420(**)	-.783(**)	1	.131	-.178	-.051	.269(*)	.338(**)	.226(*)
	Sig. (2-tailed)	.094	.000	.000		.231	.103	.641	.013	.002	.037
Water Content	Pearson Correlation	.064	-.031	-.162	.131	1	-.144	.093	-.013	.049	-.066
	Sig. (2-tailed)	.560	.776	.139	.231		.188	.396	.907	.656	.548
Unit Weight	Pearson Correlation	.139	-.015	.180	-.178	-.144	1	.120	-.098	-.139	-.142
	Sig. (2-tailed)	.204	.889	.099	.103	.188		.274	.371	.203	.196
G.S.	Pearson Correlation	.030	.047	.087	-.051	.093	.120	1	.074	-.040	-.059
	Sig. (2-tailed)	.785	.670	.429	.641	.396	.274		.504	.717	.592
CV (t <sub>50</sub> )	Pearson Correlation	-.560(**)	.243(*)	-.122	.269(*)	-.013	-.098	.074	1	.801(**)	.373(**)
	Sig. (2-tailed)	.000	.025	.265	.013	.907	.371	.504		.000	.000
CV (t <sub>90</sub> )	Pearson Correlation	-.633(**)	.156	-.254(*)	.338(**)	.049	-.139	-.040	.801(**)	1	.513(**)
	Sig. (2-tailed)	.000	.153	.019	.002	.656	.203	.717	.000		.000
OCR	Pearson Correlation	-.750(**)	.033	-.220(*)	.226(*)	-.066	-.142	-.059	.373(**)	.513(**)	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.766	.043	.037	.548	.196	.592	.000	.000	

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ ข-4 ความสัมพันธ์ถดถอยเชิงพหุคูณระหว่างคุณสมบัติดัชนีกับคุณสมบัติวิศวกรรมและความลึก

		Depth	LL	PL	PI	Water Content	Unit Weight	G.S.	c	c'	Phi	Phi'
Depth	Pearson Correlation	1	-.084	.139	-.183	.064	.139	.030	.915(**)	.968(**)	.288(**)	.588(**)
	Sig. (2-tailed)		.447	.205	.094	.560	.204	.785	.000	.000	.007	.000
LL	Pearson Correlation	-.084	1	.235(*)	.420(**)	-.031	-.015	.047	-.099	-.055	-.059	-.074
	Sig. (2-tailed)	.447		.030	.000	.776	.889	.670	.365	.620	.589	.500
PL	Pearson Correlation	.139	.235(*)	1	-.783(**)	-.162	.180	.087	.218(*)	.226(*)	.037	-.042
	Sig. (2-tailed)	.205	.030		.000	.139	.099	.429	.045	.038	.736	.702
PI	Pearson Correlation	-.183	.420(**)	-.783(**)	1	.131	-.178	-.051	-.267(*)	-.246(*)	-.073	-.008
	Sig. (2-tailed)	.094	.000	.000		.231	.103	.641	.013	.023	.509	.941
Water Content	Pearson Correlation	.064	-.031	-.162	.131	1	-.144	.093	-.001	-.016	.059	.279(**)
	Sig. (2-tailed)	.560	.776	.139	.231		.188	.396	.990	.885	.592	.010
Unit Weight	Pearson Correlation	.139	-.015	.180	-.178	-.144	1	.120	.239(*)	.160	.062	.040
	Sig. (2-tailed)	.204	.889	.099	.103	.188		.274	.028	.143	.576	.718
G.S.	Pearson Correlation	.030	.047	.087	-.051	.093	.120	1	-.010	.054	.199	-.053
	Sig. (2-tailed)	.785	.670	.429	.641	.396	.274		.928	.621	.068	.630
c	Pearson Correlation	.915(**)	-.099	.218(*)	-.267(*)	-.001	.239(*)	-.010	1	.947(**)	.212	.530(**)
	Sig. (2-tailed)	.000	.365	.045	.013	.990	.028	.928		.000	.052	.000
c'	Pearson Correlation	.968(**)	-.055	.226(*)	-.246(*)	-.016	.160	.054	.947(**)	1	.273(*)	.470(**)
	Sig. (2-tailed)	.000	.620	.038	.023	.885	.143	.621	.000		.012	.000
Phi	Pearson Correlation	.288(**)	-.059	.037	-.073	.059	.062	.199	.212	.273(*)	1	.291(**)
	Sig. (2-tailed)	.007	.589	.736	.509	.592	.576	.068	.052	.012		.007
Phi'	Pearson Correlation	.588(**)	-.074	-.042	-.008	.279(**)	.040	-.053	.530(**)	.470(**)	.291(**)	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.500	.702	.941	.010	.718	.630	.000	.000	.007	

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

**ภาคผนวก ก.**

ตัวอย่างผลการทดสอบ Unconfined Compression Test , Consolidation Test และ CU Triaxial Test-  
ของดินตัวอย่างอำเภอปากพนัง

Civil Engineering Department			UNCONFINED COMPRESSION TEST	
Prince of Songkhla University				
Project : คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง			Sample No.	BH - 1
Location : กม.6 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.บางพระ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช			Depth :	3.00
Hight of Sample :	8.28	cm.	Area :	10.29 cm. <sup>2</sup>
Diameter of Sample :	3.62	cm.	Water Content :	85.1 %
			Unit Wt. :	1.71 g./cm. <sup>3</sup>
Strain Dial (0.01 mm.)	Strain (%)	Corrected Area (cm. <sup>2</sup> )	Axial Load (kg.)	Stress (T/m. <sup>2</sup> )
0	0.00	10.29	0.0000	0.0000
10	0.12	10.29	0.1935	0.1880
20	0.24	10.30	0.1935	0.1878
30	0.36	10.32	0.3870	0.3751
40	0.48	10.33	0.3870	0.3747
50	0.60	10.34	0.5805	0.5613
60	0.72	10.35	0.5805	0.5606
70	0.85	10.37	0.7740	0.7466
80	0.97	10.38	0.7740	0.7457
90	1.09	10.39	0.9675	0.9310
100	1.21	10.41	0.9675	0.9298
120	1.45	10.42	1.1610	1.1144
140	1.69	10.44	1.1610	1.1117
160	1.93	10.47	1.1610	1.1090
180	2.17	10.49	1.3545	1.2906
200	2.42	10.52	1.3545	1.2874
220	2.66	10.55	1.5480	1.4677
240	2.90	10.57	1.5480	1.4641
260	3.14	10.60	1.7415	1.6430
280	3.38	10.63	1.7415	1.6389
300	3.62	10.65	1.9350	1.8165
340	4.11	10.68	1.9350	1.8120
380	4.59	10.73	1.9350	1.8029
420	5.07	10.79	2.3220	2.1525
460	5.56	10.84	2.3220	2.1416
500	6.04	10.90	2.3220	2.1307
550	6.64	10.95	2.5155	2.2965
600	7.25	11.02	2.5155	2.2817
650	7.85	11.10	2.5155	2.2670
700	8.45	11.17	2.7090	2.4255
750	9.06	11.24	2.7090	2.4096
800	9.66	11.32	2.7090	2.3937
850	10.27	11.39	2.7090	2.3778
900	10.87	11.47	2.9025	2.5306
950	11.47	11.55	2.9025	2.5136
1000	12.08	11.63	2.9025	2.4965
1050	12.68	11.71	3.0960	2.6448
1100	13.29	11.79	2.7090	2.2983
1150	13.89	11.87	2.7090	2.2824
1200	14.49	11.95	2.5155	2.1046
1250	15.10	12.04	2.5155	2.0899
1300	15.70	12.12	2.3220	1.9155
1350	16.30	12.21	2.3220	1.9019
1400	16.91	12.30	2.3220	1.8882
Unconfined Compressive Strength, $q_u$ = 2.5306 T/m. <sup>2</sup>				
Undrained Shear Strength, $c_u = q_u/2$ = 1.2653 T/m. <sup>2</sup>				

รูปที่ ค-1 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test BH – 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

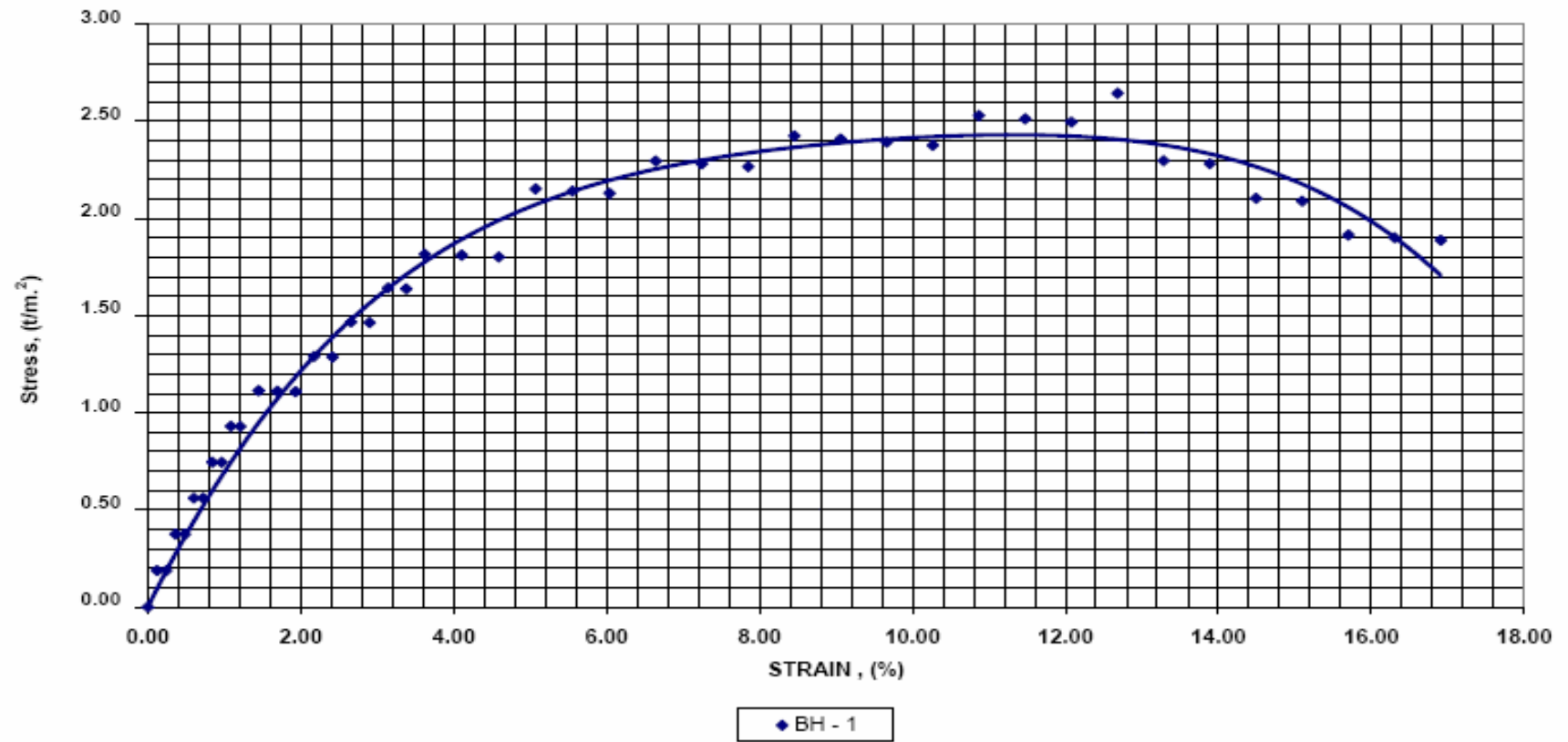
Civil Engineering Department Prince of Songkhla University			UNCONFINED COMPRESSION TEST	
Project : คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพ่อง			Sample No. BH - 2	
Location : กม.25 ทางหลวงหมายเลข 4094 ต.พลอง อ.ปากพ่อง จ.นครศรีธรรมราช			Depth : 3.00	
Hight of Sample :	8.25 cm.	Area :	10.52 cm. <sup>2</sup>	Unit Wt. : 1.71 g/cm. <sup>3</sup>
Diameter of Sample :	3.66 cm.	Water Content :	75.26 %	
Strain Dial (0.01 mm.)	Strain (%)	Corrected Area (cm. <sup>2</sup> )	Axial Load (kg.)	Stress (T/m. <sup>2</sup> )
0	0.00	10.52	0.0000	0.0000
10	0.12	10.52	0.3870	0.3678
20	0.24	10.53	0.3870	0.3674
30	0.36	10.55	0.3870	0.3669
40	0.48	10.56	0.5805	0.5498
50	0.61	10.57	0.5805	0.5491
60	0.73	10.59	0.5805	0.5484
70	0.85	10.60	0.7740	0.7303
80	0.97	10.61	0.7740	0.7294
90	1.09	10.62	0.7740	0.7285
100	1.21	10.64	0.9675	0.9096
120	1.45	10.65	0.9675	0.9085
140	1.70	10.68	0.9675	0.9062
160	1.94	10.70	1.1610	1.0848
180	2.18	10.73	1.1610	1.0821
200	2.42	10.76	1.5480	1.4393
220	2.67	10.78	1.5480	1.4357
240	2.91	10.81	1.5480	1.4321
260	3.15	10.84	1.5480	1.4286
280	3.39	10.86	1.9350	1.7812
300	3.64	10.89	1.9350	1.7768
340	4.12	10.92	1.9350	1.7723
380	4.61	10.97	2.3220	2.1161
420	5.09	11.03	2.3220	2.1054
460	5.58	11.09	2.3220	2.0947
500	6.06	11.14	2.7090	2.4313
550	6.67	11.20	2.7090	2.4188
600	7.27	11.27	2.7090	2.4032
650	7.88	11.35	2.7090	2.3876
700	8.48	11.42	2.7090	2.3720
750	9.09	11.50	2.9025	2.5247
800	9.70	11.57	2.9025	2.5080
850	10.30	11.65	2.3220	1.9930
900	10.91	11.73	2.3220	1.9796
950	11.52	11.81	2.3220	1.9663
1000	12.12	11.89	1.9350	1.6274
1050	12.73	11.97	1.9350	1.6163
1100	13.33	12.06	1.9350	1.6051
1150	13.94	12.14	1.7415	1.4346
1200	14.55	12.22	1.7415	1.4245
1250	15.15	12.31	1.7415	1.4145
1300	15.76	12.40	1.7415	1.4045
1350	16.36	12.49	0.9675	0.7747
1400	16.97	12.58	0.9675	0.7691
Unconfined Compressive Strength, $q_u$ = 2.5247 T/m. <sup>2</sup>				
Undrained Shear Strength, $c_u = q_u/2$ = 1.2624 T/m. <sup>2</sup>				

รูปที่ ค-2 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test BH – 2 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

Civil Engineering Department			UNCONFINED COMPRESSION TEST		
Prince of Songkha University					
Project :		คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง		Sample No.	BH - 3
Location :		ม.1 บ้านปากคลอง ต.บ้านใหญ่ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช		Depth :	3.00
Hight of Sample :	8.23	cm.	Area :	10.41	cm. <sup>2</sup>
Diameter of Sample :	3.64	cm.	Water Content :	72.80	%
				Unit Wt. :	1.76 g./cm. <sup>3</sup>
Strain Dial (0.01 mm.)	Strain (%)	Corrected Area (cm. <sup>2</sup> )	Axial Load (kg.)	Stress (T/m. <sup>2</sup> )	
0	0.00	10.41	0.0000	0.0000	
10	0.12	10.41	0.3870	0.3719	
20	0.24	10.42	0.3870	0.3714	
30	0.36	10.43	0.5805	0.5565	
40	0.49	10.44	0.5805	0.5558	
50	0.61	10.46	0.7740	0.7402	
60	0.73	10.47	0.7740	0.7393	
70	0.85	10.48	1.1610	1.1075	
80	0.97	10.50	1.1610	1.1062	
90	1.09	10.51	1.1610	1.1048	
100	1.22	10.52	1.5480	1.4713	
120	1.46	10.53	1.5480	1.4695	
140	1.70	10.56	1.5480	1.4659	
160	1.94	10.59	1.5480	1.4623	
180	2.19	10.61	1.9350	1.8233	
200	2.43	10.64	1.9350	1.8188	
220	2.67	10.67	1.9350	1.8143	
240	2.92	10.69	2.3220	2.1717	
260	3.16	10.72	2.3220	2.1663	
280	3.40	10.75	2.3220	2.1609	
300	3.65	10.77	2.3220	2.1554	
340	4.13	10.80	2.7090	2.5084	
380	4.62	10.85	2.7090	2.4957	
420	5.10	10.91	2.7090	2.4831	
460	5.59	10.97	2.7090	2.4704	
500	6.08	11.02	2.9025	2.6333	
550	6.68	11.08	2.9025	2.6197	
600	7.29	11.15	2.9025	2.6028	
650	7.90	11.22	2.9025	2.5859	
700	8.51	11.30	2.9025	2.5689	
750	9.11	11.37	2.9025	2.5520	
800	9.72	11.45	2.7090	2.3660	
850	10.33	11.53	2.7090	2.3502	
900	10.94	11.60	2.7090	2.3344	
950	11.54	11.68	2.5155	2.1530	
1000	12.15	11.76	2.5155	2.1383	
1050	12.76	11.85	2.5155	2.1236	
1100	13.37	11.93	2.5155	2.1089	
1150	13.97	12.01	1.9350	1.6109	
1200	14.58	12.10	1.9350	1.5996	
1250	15.19	12.18	1.9350	1.5883	
1300	15.80	12.27	1.5480	1.2616	
1350	16.40	12.36	1.5480	1.2526	
1400	17.01	12.45	1.5480	1.2436	
<b>Unconfined Compressive Strength, <math>q_u</math></b>		=	<b>2.6333</b>	T/m. <sup>2</sup>	
<b>Undrained Shear Strength, <math>c_u = q_u/2</math></b>		=	<b>1.3167</b>	T/m. <sup>2</sup>	

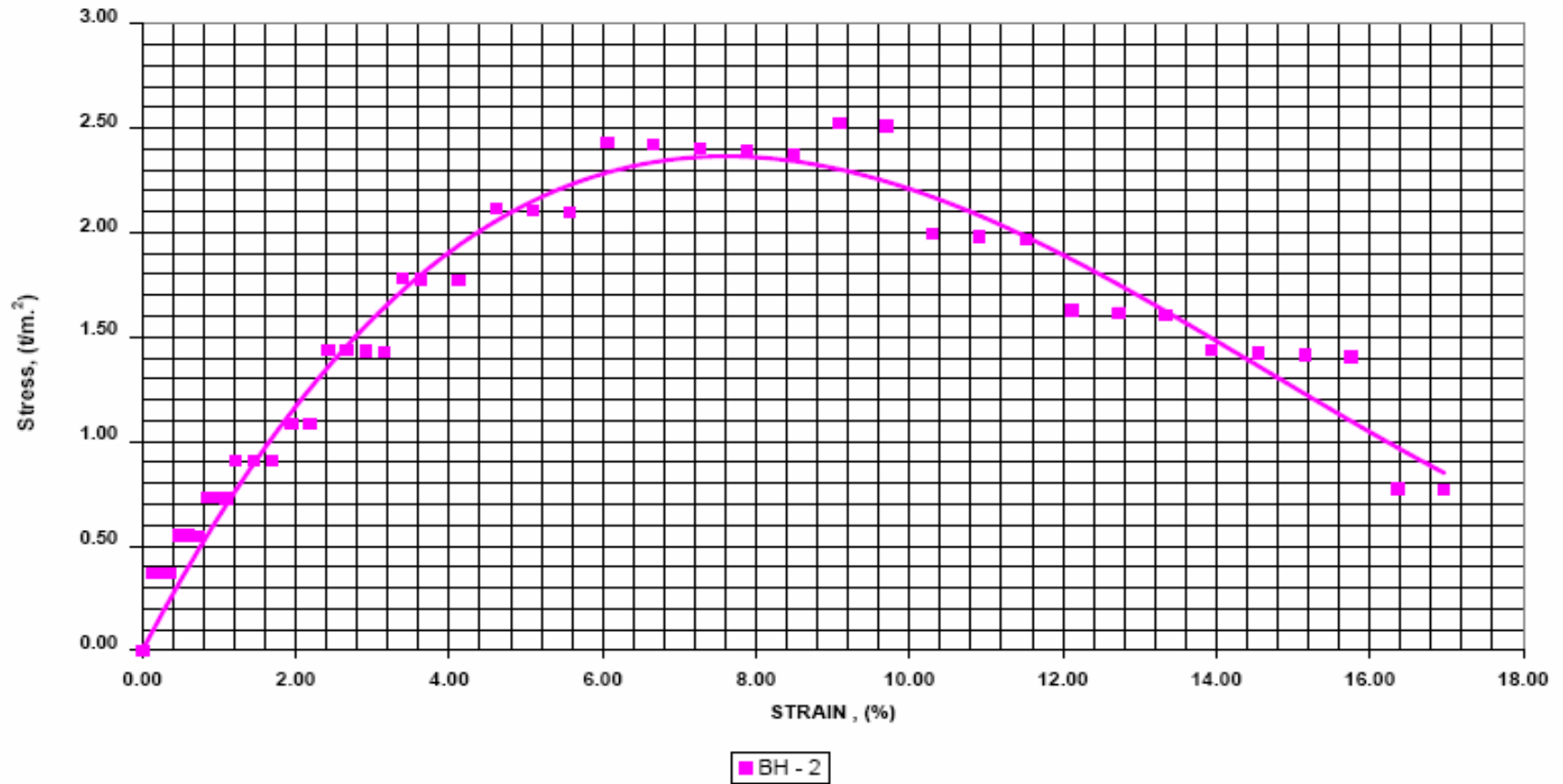
รูปที่ ค-3 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test BH – 3 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

### Unconfined Compression Test



รูปที่ ค-4 กราฟผลการทดสอบ Unconfined Compression Test BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

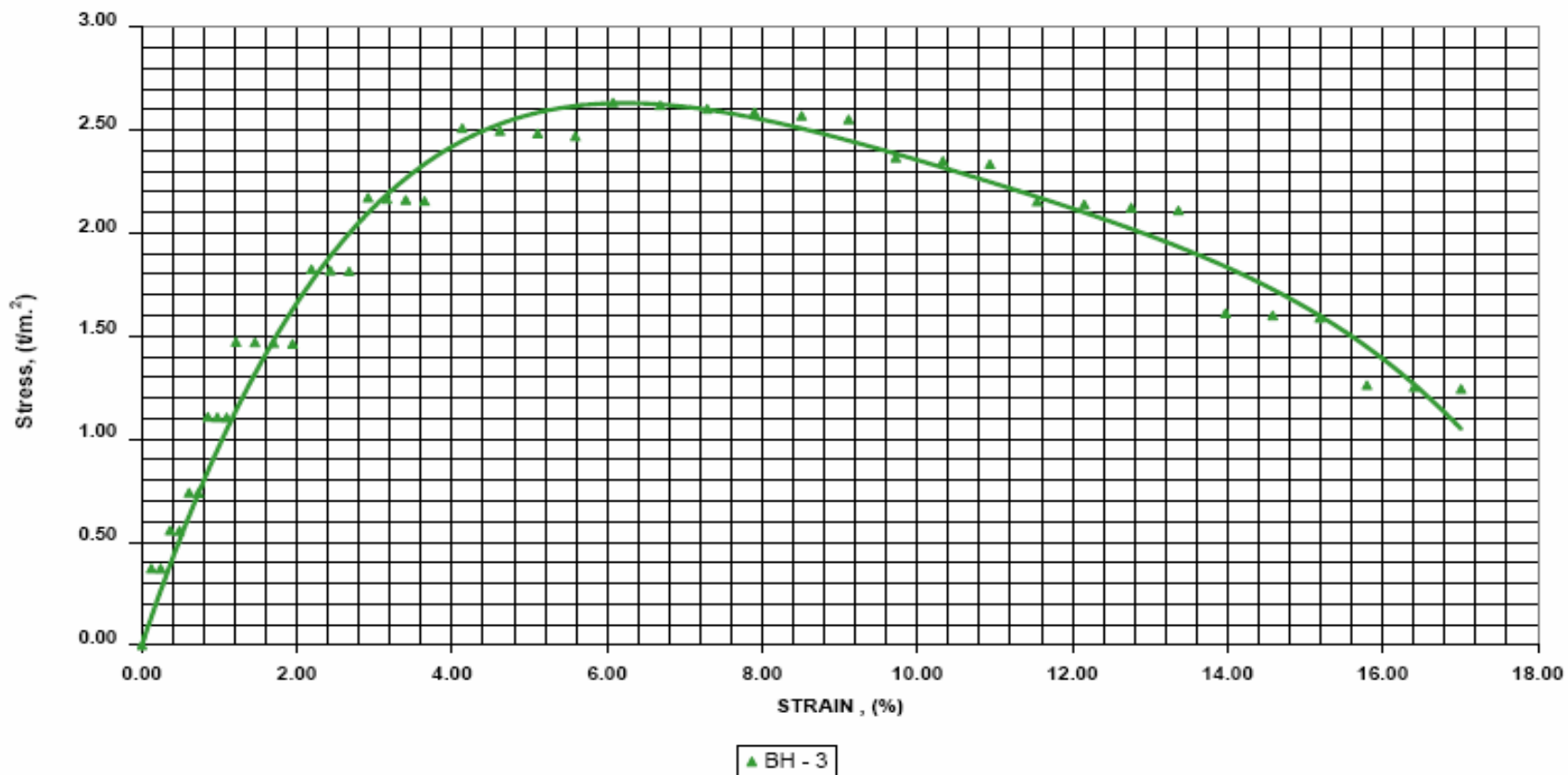
### Unconfined Compression Test



รูปที่ ค-5 กราฟผลการทดสอบ Unconfined Compression Test BH-2 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร



### Unconfined Compression Test



รูปที่ ค-6 กราฟผลการทดสอบ Unconfined Compression Test BH - 3 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

## ONE DIMENSIONAL CONSOLIDATION TEST

Project [คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง](#)  
Location [กม.6 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.บางพระ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช](#)  
Boring No. [BH-1](#) Test No. [1](#)  
Soil Description [Clay](#) Depth [3.00 m.](#)  
Tested By [นายศักดิ์ยศ แสงจิ๋ว](#) Date [12 June 2007](#)  
Checked By [นายศักดิ์ยศ แสงจิ๋ว](#) Date [18 June 2007](#)

### SAMPLE DATA

Type of Specimen (Check One)	<input checked="" type="checkbox"/> Undisturbed	<input type="checkbox"/> Remolded
Sample Diameter	<a href="#">6.38</a> cm	Sample Area <a href="#">31.97</a> cm <sup>2</sup>
Initial Sample Ht.	<a href="#">1.98</a> cm	Wet Sample Wt. <a href="#">103.30</a> gm
Initial Water Content	<a href="#">75.84</a> %	Specific Gravity <a href="#">2.710</a>
Ht. of Solid	<a href="#">0.68</a> cm	Initial Void Ht. <a href="#">1.30</a> cm
Initial Void Ratio	<a href="#">1.920</a>	Final Water Content <a href="#">59.35</a> %
Initial Dry Density	<a href="#">0.928</a> gm / cm <sup>3</sup>	Final Dry Density <a href="#">1.075</a> gm / cm <sup>3</sup>
Initial Degree of Sat.	<a href="#">100.00</a> %	Final Degree of Sat. <a href="#">100.00</a> %

### EQUIPMENT DATA

Consolidometer No.	<a href="#">-</a>	Consolidation Type	<a href="#">-</a>
LVDT/Dial Gage No.	<a href="#">-</a>	Gage Factor	<a href="#">-</a>
Loading Device No.	<a href="#">-</a>	Remark	<a href="#">-</a>

### TIME FACTOR

Consolidation	<a href="#">50.0</a> %	Time Factor	<a href="#">0.196</a>
Consolidation	<a href="#">90.0</a> %	Time Factor	<a href="#">0.848</a>

### LOADING TEST

No. of Increment	<a href="#">5.0</a>	No. of Rebounding	<a href="#">3</a>
------------------	---------------------	-------------------	-------------------

### FROM VOID RATIO & PRESSURE CURVE

Preconsolidation Pressure	<a href="#">0.390</a> ksc	Compression Index	<a href="#">0.864</a>
		Recompression Index	<a href="#">0.097</a>

รูปที่ ก-7 ผลการทดสอบ Consolidation Test ของ BH – 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

## ONE DIMENSIONAL CONSOLIDATION TEST

### INITIAL CONDITION

Wt. of Soil + Container Ring	<u>199.29</u>	gm	
Wt. of Container Ring	<u>95.99</u>	gm	
Wt. of Soil in Container Ring	<u>103.30</u>	gm	
Volume of Container Ring	<u>63.30</u>	cm <sup>3</sup>	
Wet Density	<u>1.632</u>	gm / cm <sup>3</sup>	
Dry Density	<u>0.928</u>	gm / cm <sup>3</sup>	
<b>Initial Moisture</b>			
	No. 1	No. 2	
Wt. of Wet Soil + Can	<u>65.71</u>	<u>65.71</u>	gm
Wt. of Dry Soil + Can	<u>52.44</u>	<u>52.24</u>	gm
Wt. of Water in Soil	<u>13.27</u>	<u>13.47</u>	gm
Can No.	<u>1</u>	<u>2</u>	gm
Wt. of Can	<u>34.71</u>	<u>34.71</u>	gm
Moisture Content	<u>74.84</u>	<u>76.84</u>	%
Average Moisture Content	75.84		%
Specific Gravity	<u>2.710</u>		
Initial Void Ratio	<u>1.920</u>		

### FINAL CONDITION

Wt. of Soil + Container Ring	<u>195.99</u>	gm	
Wt. of Container Ring	<u>95.99</u>	gm	
Wt. of Soil in Container Ring	<u>-</u>	gm	
Volume of Container Ring	<u>-</u>	cm <sup>3</sup>	
Wet Density	<u>-</u>	gm / cm <sup>3</sup>	
Dry Density	<u>-</u>	gm / cm <sup>3</sup>	
<b>Final Moisture</b>			
	No. 1	No. 2	
Wt. of Wet Soil + Can	<u>60.78</u>	<u>60.78</u>	gm
Wt. of Dry Soil + Can	<u>50.97</u>	<u>50.97</u>	gm
Wt. of Water in Soil	<u>9.81</u>	<u>9.81</u>	gm
Can No.	<u>1</u>	<u>2</u>	gm
Wt. of Can	<u>34.44</u>	<u>34.44</u>	gm
Moisture Content	<u>59.35</u>	<u>59.35</u>	%
Average Moisture Content	59.35		%

รูปที่ ก-8 ผลการทดสอบ Consolidation Test ของ BH – 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

## ONE DIMENSIONAL CONSOLIDATION TEST

Project คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

Location กม.6 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.บางพระ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช

Boring No. BH-1

Test No. 1

Soil Description Clay

Depth 3.00 m.

Tested By นายอัครเดช แซ่จิว

Date 12 June 2007

Checked By นายอัครเดช แซ่จิว

Date 18 June 2007

### READING DATA

No.	Pressure, ksc	D.R. at End, mm	Conso. , cm	Change of Sample Ht. , cm	Void Ratio	Time for 50 % , min	Cv, cm <sup>2</sup> / sec	k, cm/sec
1	0.000	0.000	0.0000	1.980	1.920	-	-	-
2	0.156	0.490	0.0490	1.9310	1.848	1.00	3.12E-03	4.94E-04
3	0.313	0.861	0.0861	1.8939	1.793	8.00	3.73E-04	4.47E-05
4	0.782	2.278	0.2278	1.7522	1.584	14.50	1.87E-04	2.86E-05
5	1.564	4.122	0.4122	1.5678	1.312	19.10	1.18E-04	1.40E-05
6	3.128	5.659	0.5659	1.4141	1.085	34.10	5.32E-05	2.64E-06
7	0.782	5.286	0.5286	1.4514	1.141	-	-	-
8	0.196	4.765	0.4765	1.5035	1.217	-	-	-
9	0.000	4.044	0.4044	1.5756	1.324	-	-	-

รูปที่ ก-9 ผลค่า  $C_v$  ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

## ONE DIMENSIONAL CONSOLIDATION TEST

Project คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

Location กม.6 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.บางพระ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช

Boring No. BH-1

Test No. 1

Soil Description Clay

Depth 3.00 m.

Tested By นายอัศวเดช แซ่จิว

Date 12 June 2007

Checked By นายอัศวเดช แซ่จิว

Date 18 June 2007

### READING DATA

No.	Pressure, ksc	D.R. at End, mm	Conso. , cm	Change of Sample Ht. , cm	Void Ratio	Time for 90 % , min	Cv, cm <sup>2</sup> / sec	k, cm/sec
1	0.000	0.000	0.0000	1.980	1.920	-	-	-
2	0.156	0.490	0.0490	1.9310	1.848	2.25	6.00E-03	9.51E-04
3	0.313	0.861	0.0861	1.8939	1.793	7.09	1.82E-03	2.18E-04
4	0.782	2.278	0.2278	1.7522	1.584	25.58	4.59E-04	7.00E-05
5	1.564	4.122	0.4122	1.5678	1.312	43.22	2.25E-04	2.68E-05
6	3.128	5.659	0.5659	1.4141	1.085	58.43	1.34E-04	6.67E-06
7	0.782	5.286	0.5286	1.4514	1.141	-	-	-
8	0.196	4.765	0.4765	1.5035	1.217	-	-	-
9	0.000	4.044	0.4044	1.5756	1.324	-	-	-

รูปที่ ค-10 ผลค่า  $C_v$  ของ BH – 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

## ONE DIMENSIONAL CONSOLIDATION TEST

Project คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

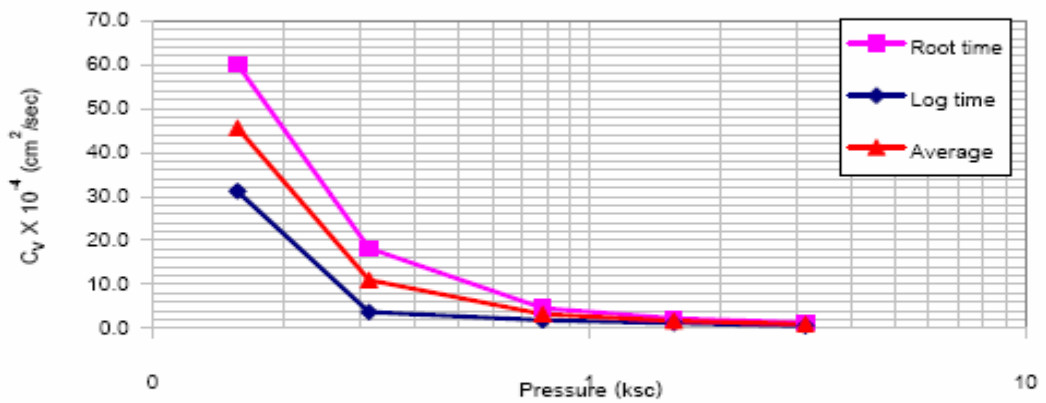
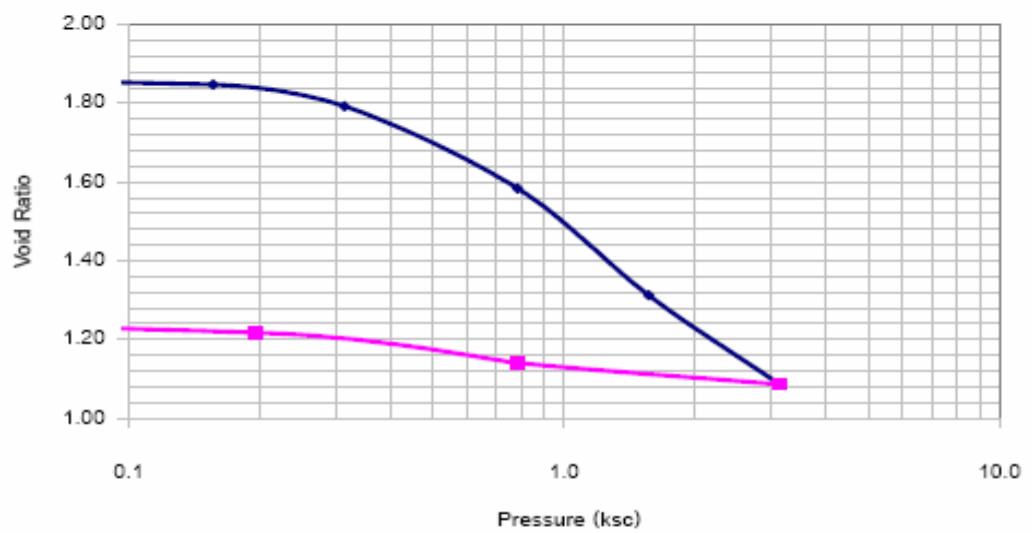
Location กม.6 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.บางพระ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช

Boring No. BH-1

Test No. 1

Soil Description Clay

Depth 3.00 m.



PRECONSOLIDATION PRESSURE = 0.390 ksc

COMPRESSION INDEX,  $C_c$  = 0.864

RECOMPRESSION INDEX,  $C_r$  = 0.097

รูปที่ ค-11 ผลค่า  $C_c$  ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

ONE DIMENSIONAL CONSOLIDATION TEST							
Boring No. <u>1</u>				Test No. <u>1</u>			
Soil Description <u>Clay</u>				Depth <u>3.00 m.</u>			
Pressure Increment 0.000 ksc to 0.156				Pressure Increment 0.156 ksc to 0.313			
Date	Time	Elapsed Time (min)	Deformation Dial Reading (mm)	Date	Time	Elapsed Time (min)	Deformation Dial Reading (mm)
		0	0.000			0	0.490
		0.25	0.086			0.25	0.531
		0.5	0.155			0.5	0.551
		1	0.226			1	0.574
		2	0.272			2	0.597
		4	0.292			4	0.632
		8	0.323			8	0.655
		15	0.363			15	0.688
		30	0.399			30	0.726
		60	0.411			60	0.759
		120	0.442			120	0.780
		240	0.460			240	0.823
		480	0.472			480	0.838
		1440	0.490			1440	0.861

รูปที่ ค-12 ค่าการทรุดตัวของดินที่ Pressure และเวลาต่างๆ ของ BH – 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

ONE DIMENSIONAL CONSOLIDATION TEST							
Boring No. <u>1</u>				Test No. <u>1</u>			
Soil Description <u>Clay</u>				Depth <u>3.00 m.</u>			
Pressure Increment 0.313 ksc to .782				Pressure Increment .782 ksc to 1.564			
Date	Time	Elapsed Time (min)	Deformation Dial Reading (mm)	Date	Time	Elapsed Time (min)	Deformation Dial Reading (mm)
1 Jan 00	9:00	0	0.861	2 Jan 00	9:00	0	2.278
		0.25	0.879			0.25	2.357
		0.5	0.937			0.5	2.400
		1	1.001			1	2.464
		2	1.054			2	2.631
		4	1.173			4	2.819
		8	1.389			8	3.045
		15	1.575			15	3.282
		30	1.707			30	3.493
		60	1.824			60	3.584
		120	1.943			120	3.767
		240	1.986			240	3.846
		480	2.136			480	3.993
		1440	2.278			1440	4.122

รูปที่ ค-13 ค่าการทรุดตัวของดินที่ Pressure และเวลาต่างๆ ของ BH – 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร



ONE DIMENSIONAL CONSOLIDATION TEST							
Boring No. 1				Test No. 1			
Soil Description Clay				Depth 3.00 m.			
Pressure Increment 1.564 ksc to 3.128				Pressure Increment 3.128 ksc to .782			
Date	Time	Elapsed Time (min)	Deformation Dial Reading (mm)	Date	Time	Elapsed Time (min)	Deformation Dial Reading (mm)
3 Jan 00	9:00	0	4.122	4 Jan 00	9:00	0	5.659
		0.25	4.209			1440	5.286
		0.5	4.288				
		1	4.356				
		2	4.379				
		4	4.470				
		8	4.544				
		15	4.633				
		30	4.928				
		60	5.116				
		120	5.288				
		240	5.367				
		480	5.497				
		1440	5.659				

รูปที่ ค-14 ค่าการทรุดตัวของดินที่ Pressure และเวลาต่างๆ ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

ONE DIMENSIONAL CONSOLIDATION TEST

Boring No.	1	Test No.	1		
Soil Description	Clay	Depth	3.00 m.		

Pressure Increment .782 ksc to .196

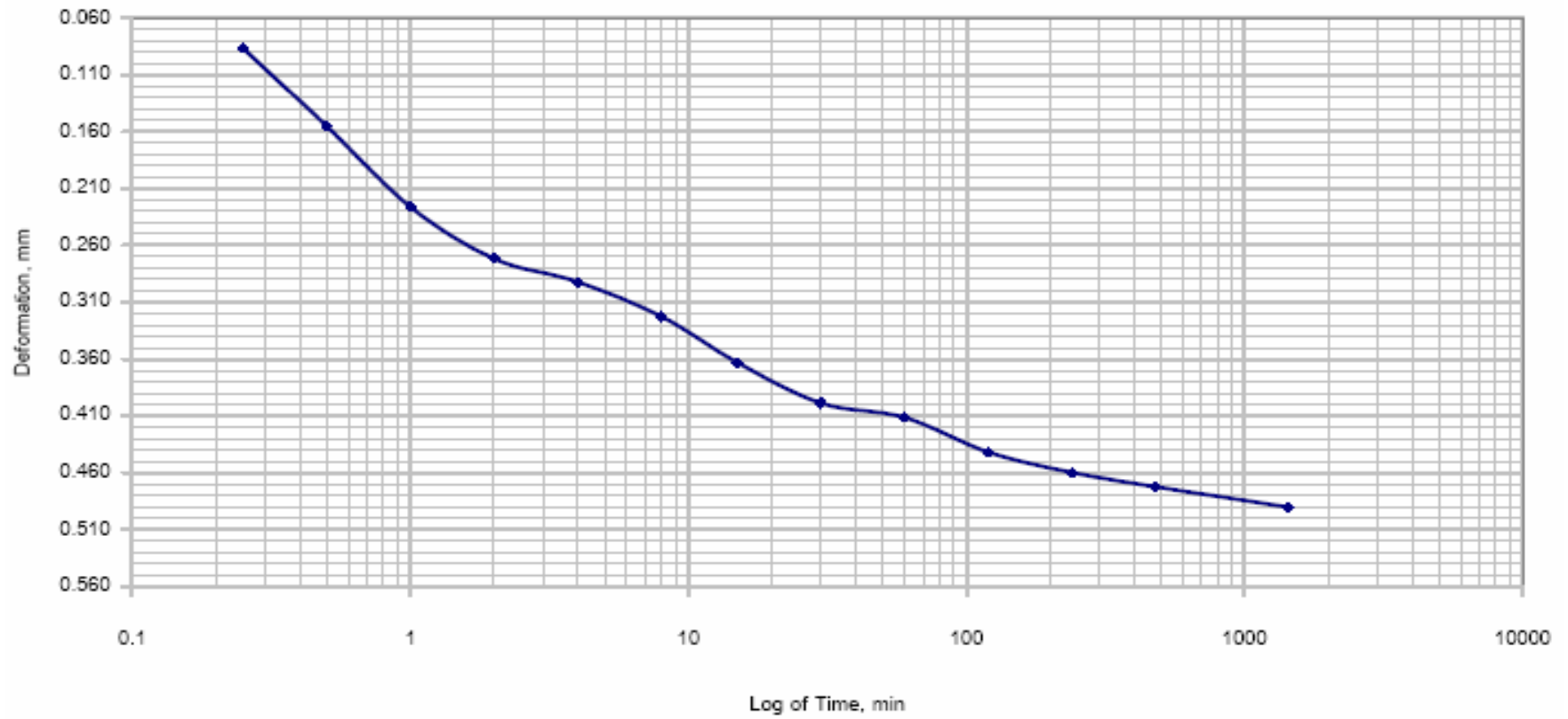
Pressure Increment .196 ksc to .

Date	Time	Elapsed Time (min)	Deformation Dial Reading (mm)	Date	Time	Elapsed Time (min)	Deformation Dial Reading (mm)
5 Jan 00	9:00	0	5.286	6 Jan 00	9:00	0	4.765
		1440	4.765			1440	4.044

รูปที่ ค-15 ค่าการทรุดตัวของดินที่ Pressure และเวลาต่างๆ ของ BH – 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

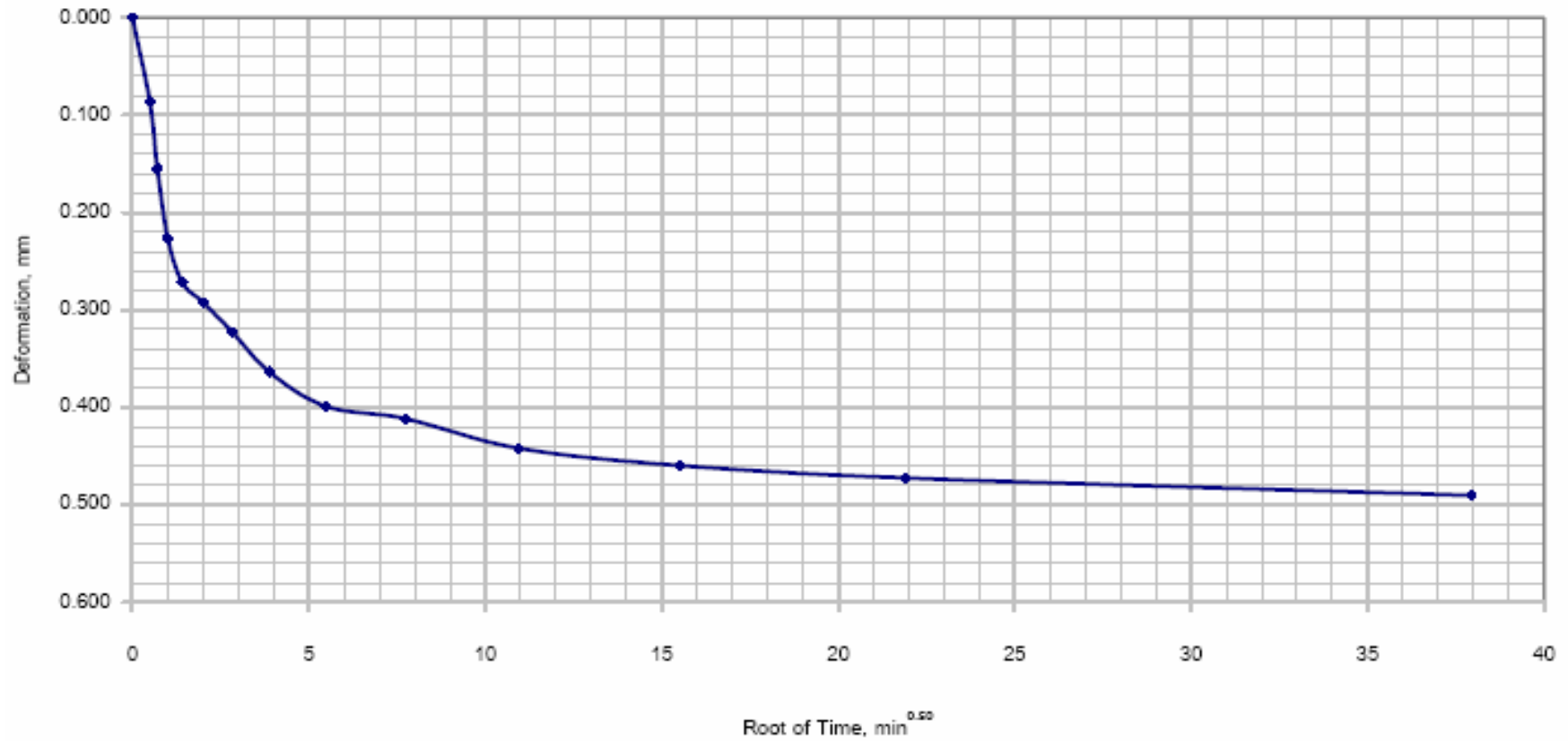


Log of Time & Deformation Graph (Pressure from 0.000 ksc to 0.156 ksc)



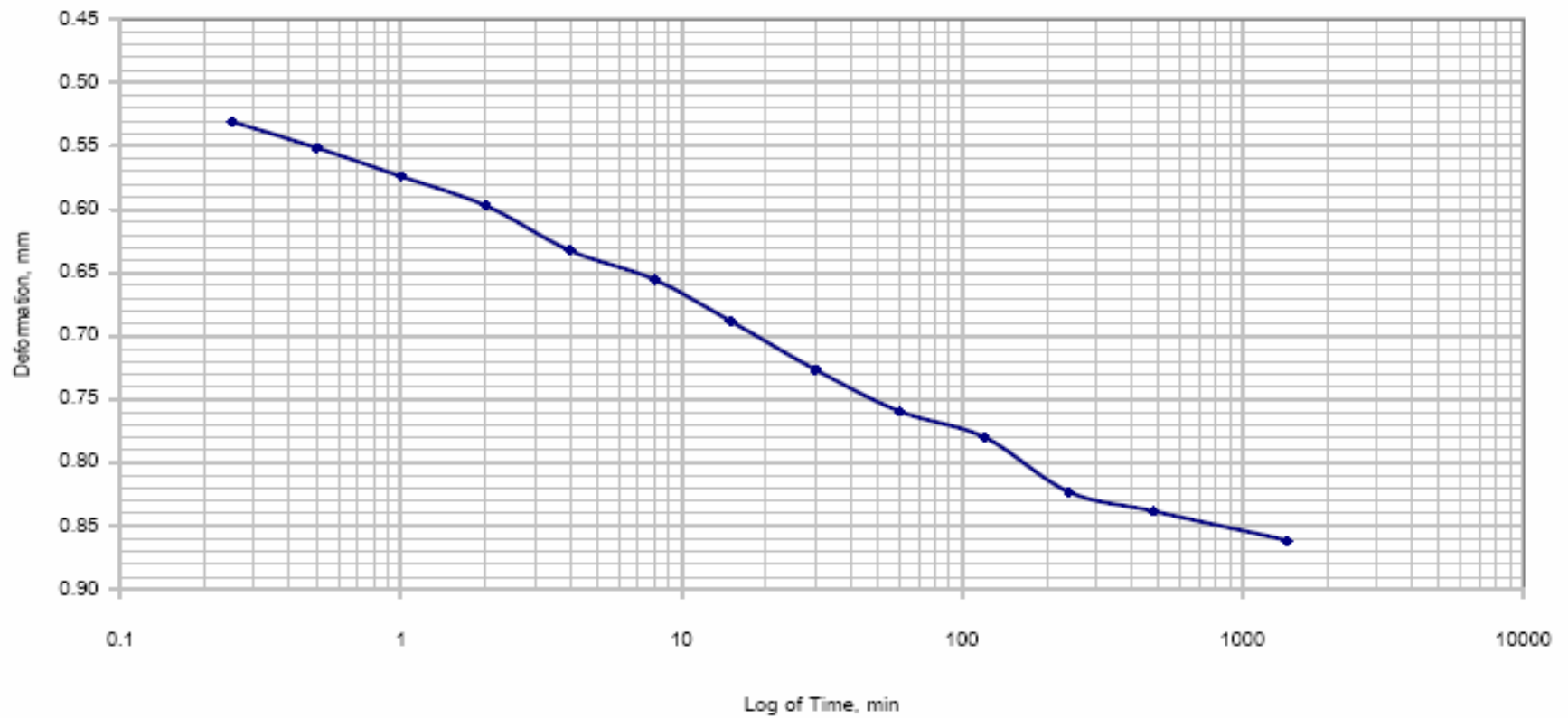
รูปที่ ค-16 กราฟ Log of Time ที่ Pressure ต่างๆ ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

Root of Time & Deformation Graph (Pressure from 0.000 ksc to 0.156 ksc)



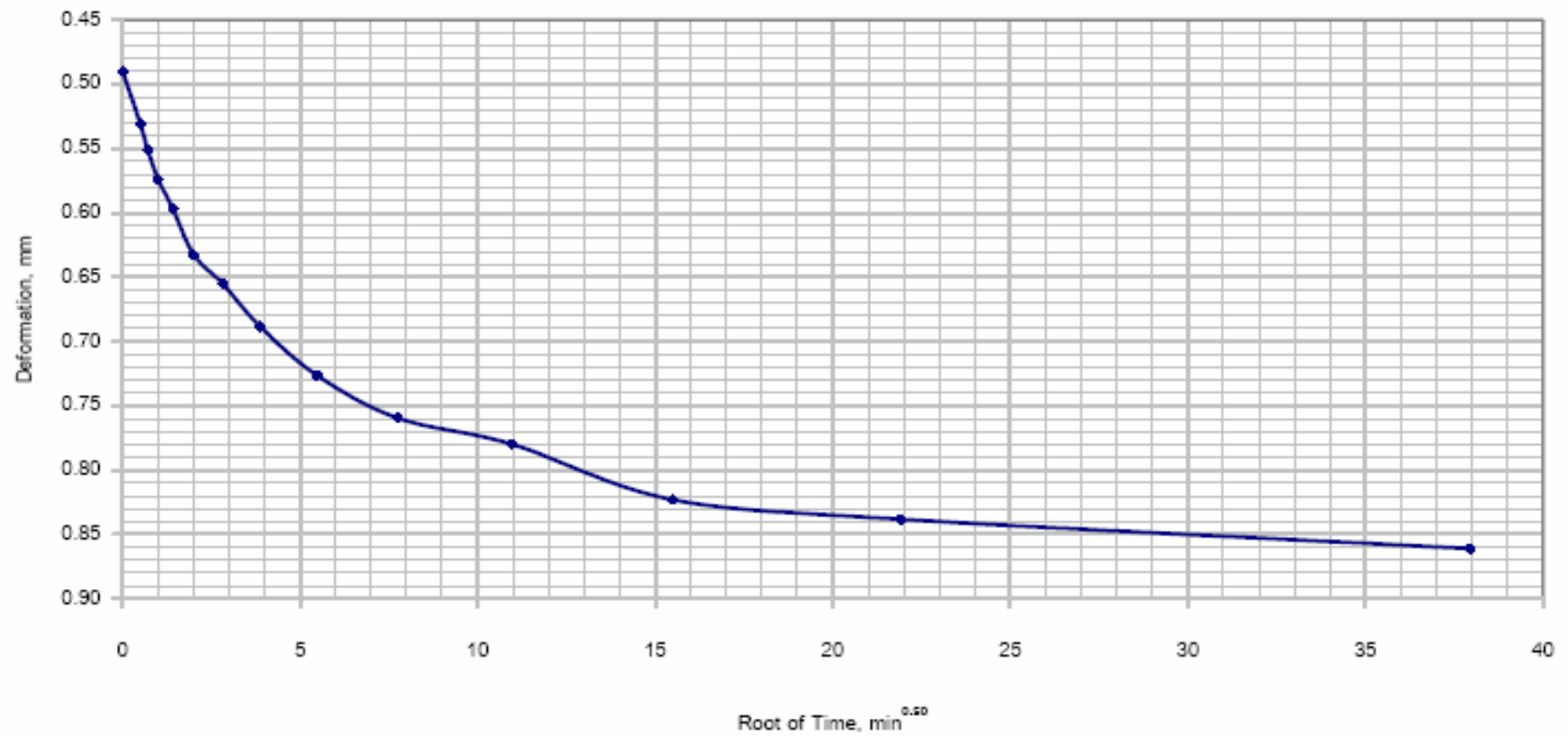
รูปที่ ค-17 กราฟ Root of Time ที่ Pressure ต่างๆ ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

Log of Time & Deformation Graph (Pressure from 0.156 ksc to 0.313 ksc)



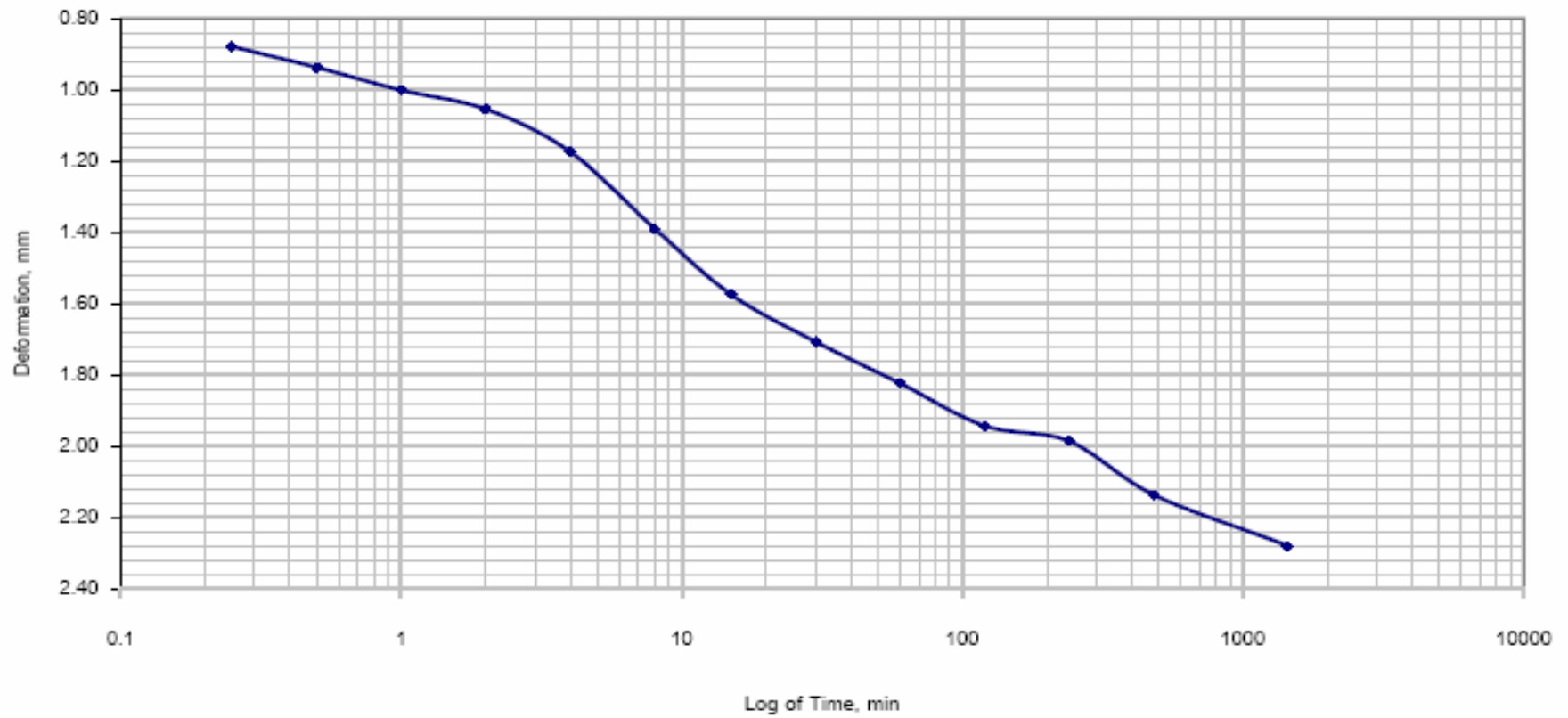
รูปที่ ค-18 กราฟ Log of Time ที่ Pressure ต่างๆ ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

Root of Time & Deformation Graph (Pressure from 0.156 ksc to 0.313 ksc)



รูปที่ ค-19 กราฟ Root of Time ที่ Pressure ต่างๆ ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

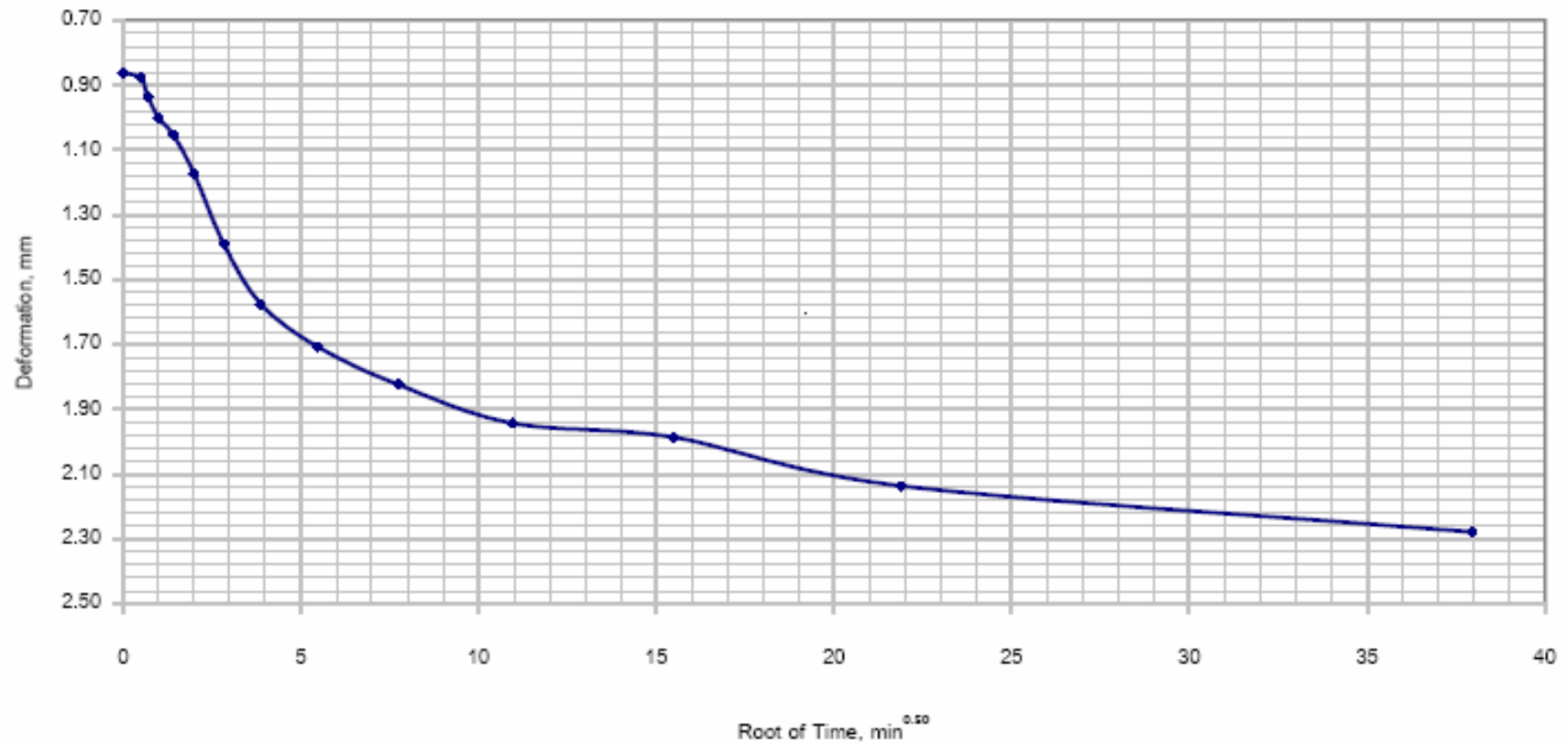
Log of Time & Deformation Graph (Pressure from 0.313 ksc to 0.782 ksc)



รูปที่ ค-20 กราฟ Log of Time ที่ Pressure ต่างๆ ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

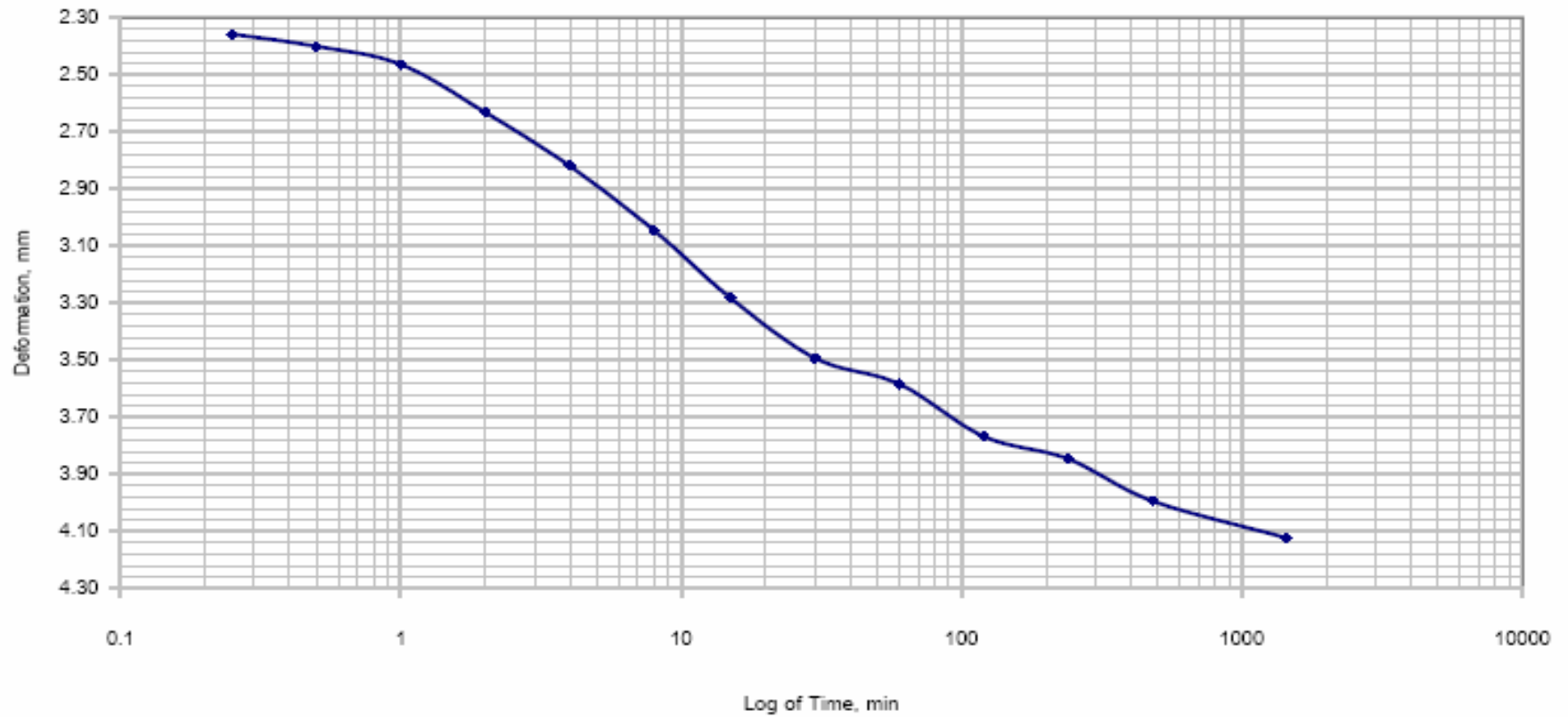


Root of Time & Deformation Graph (Pressure from 0.313 ksc to 0.782 ksc)



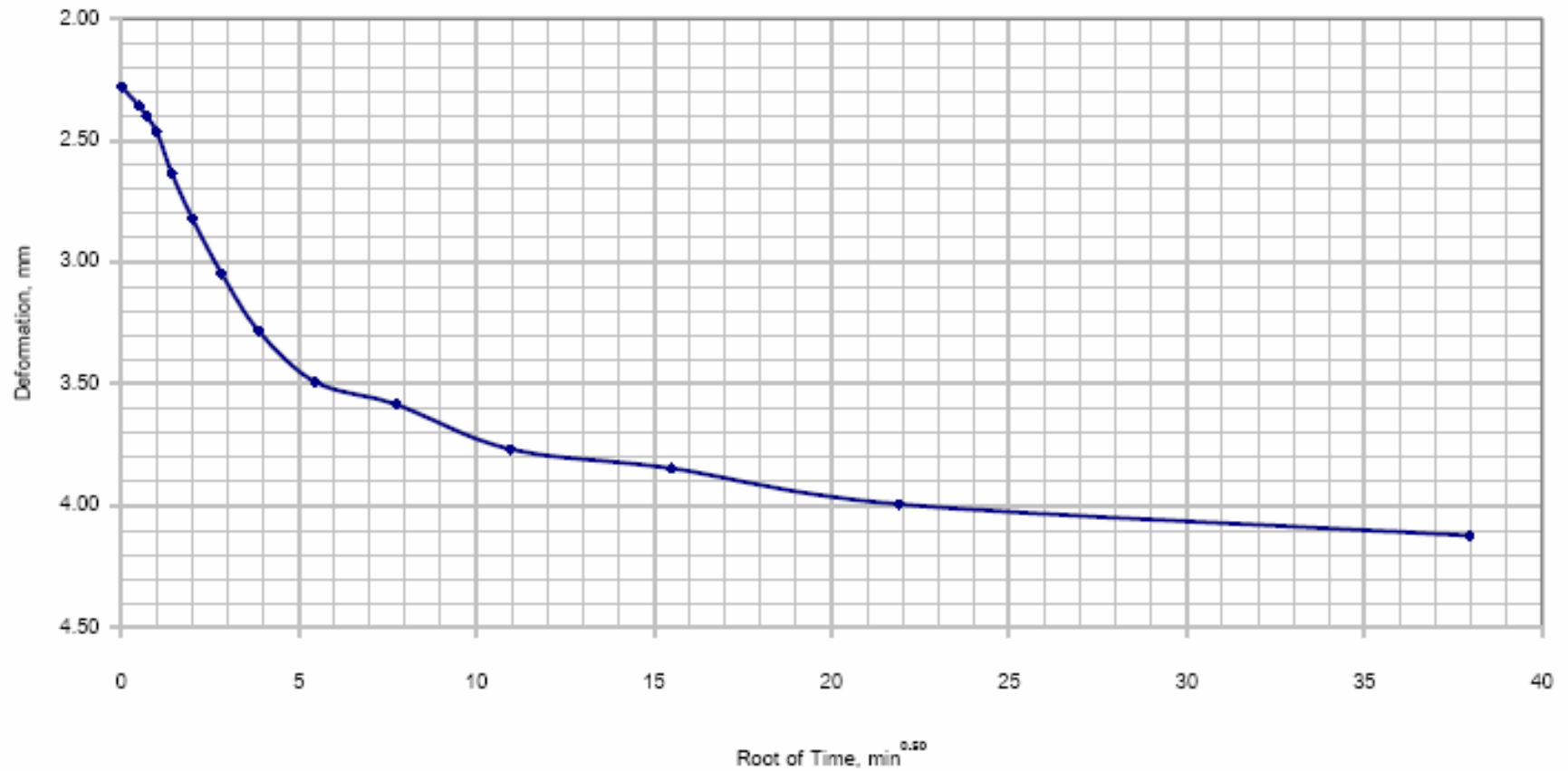
รูปที่ ค-21 กราฟ Root of Time ที่ Pressure ต่างๆ ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

Log of Time & Deformation Graph (Pressure from 0.782 ksc to 1.564 ksc)



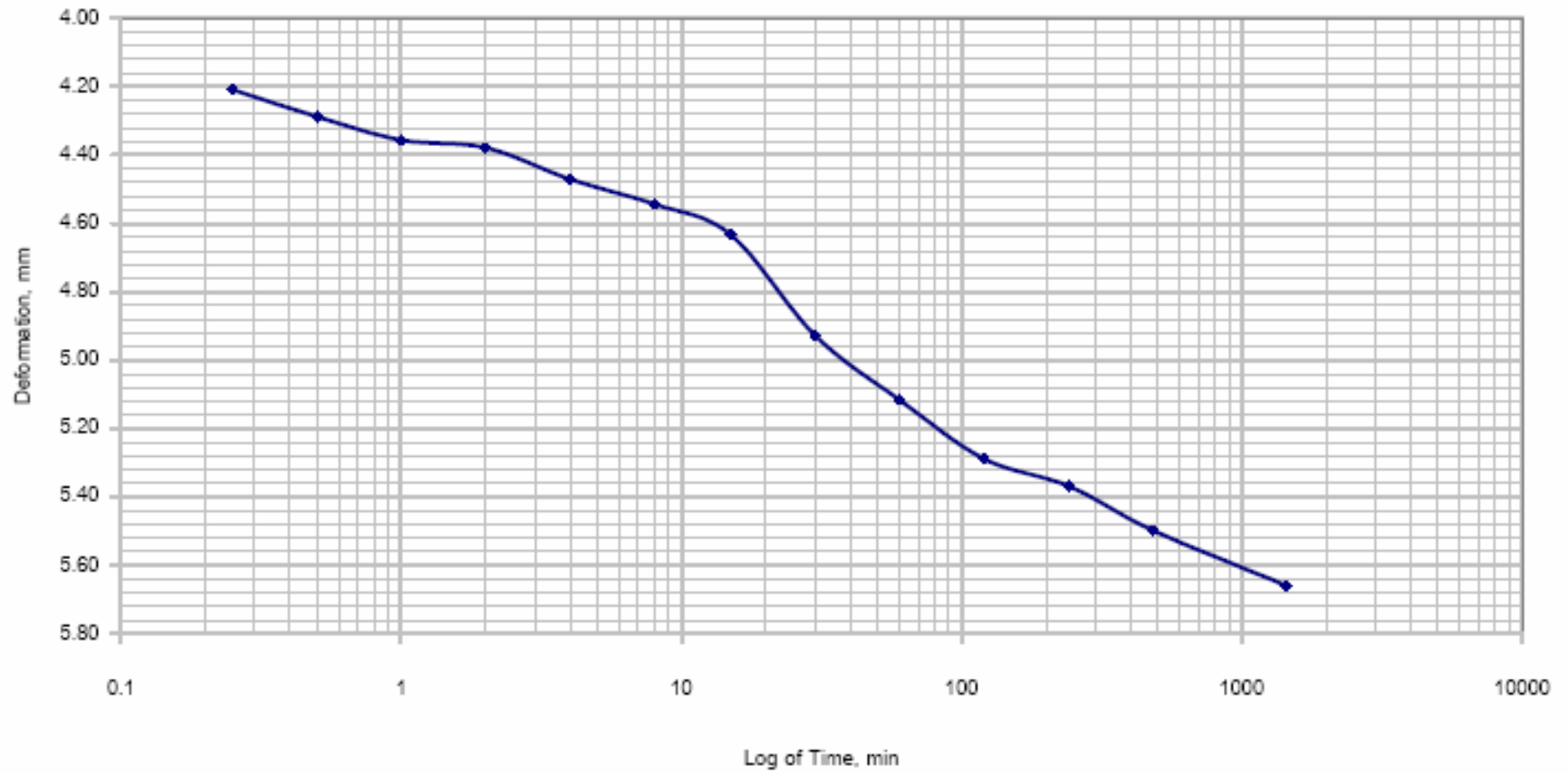
รูปที่ ก-22 กราฟ Log of Time ที่ Pressure ต่างๆ ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

Root of Time & Deformation Graph (Pressure from 0.782 ksc to 1.564 ksc)



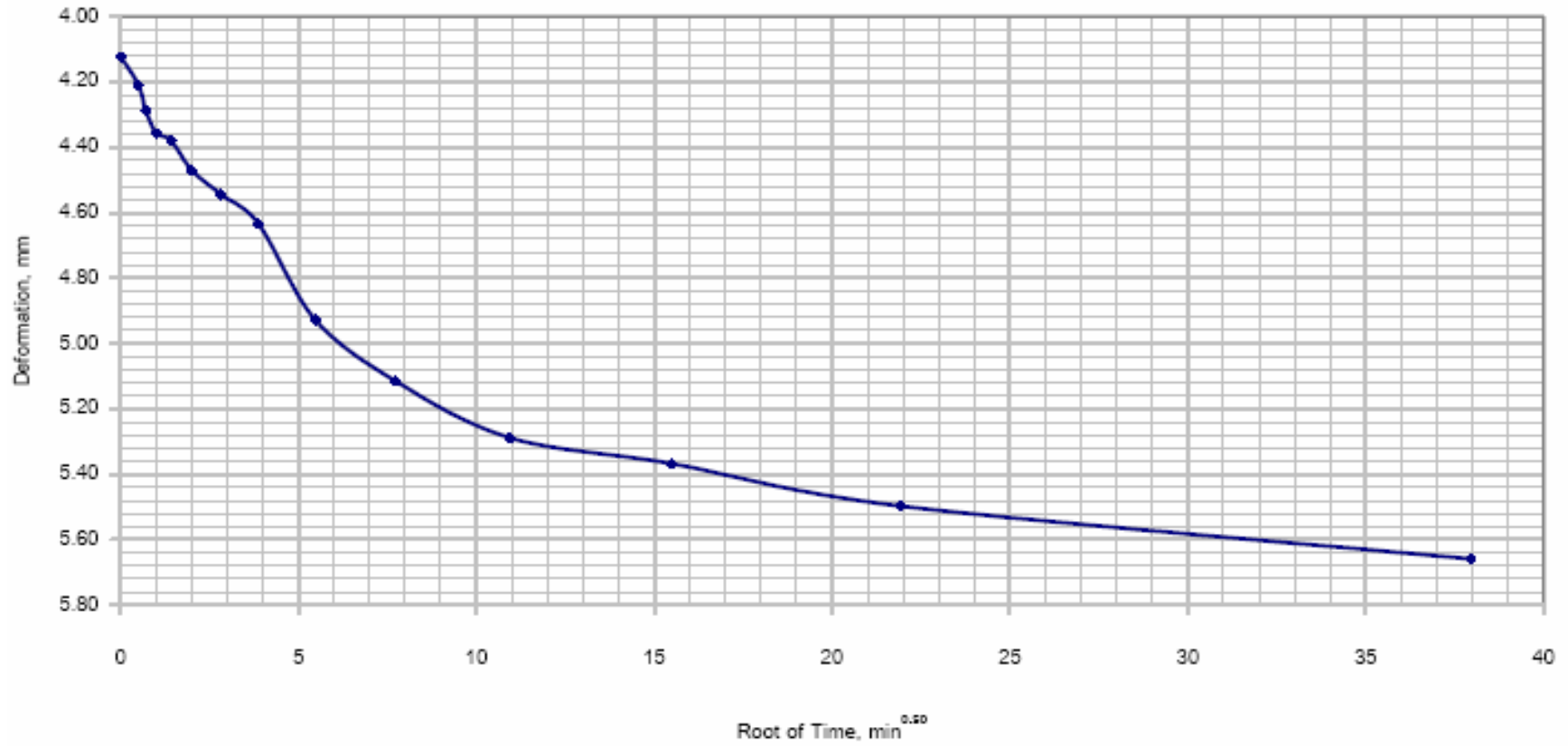
รูปที่ ค-23 กราฟ Root of Time ที่ Pressure ต่างๆ ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

Log of Time & Deformation Graph (Pressure from 1.564 ksc to 3.128 ksc)



รูปที่ ก-24 กราฟ Log of Time ที่ Pressure ต่างๆ ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

Root of Time & Deformation Graph (Pressure from 1.564 ksc to 3.128 ksc)



รูปที่ ก-25 กราฟ Root of Time ที่ Pressure ต่างๆ ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร



**PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY**  
**CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST**

Deformation	Strain	Proving Ring Read		Corr. Area	Axial Stress	Ex. Pore Pressure
cm	%	Div	kg	cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
0	0.0000	0	0.000	10.07	0.00	0.00
10	0.0013	2	0.130	10.05	0.01	0.01
20	0.0026	5	0.390	10.04	0.04	0.02
30	0.0039	7	0.520	10.03	0.05	0.04
40	0.0053	9	0.714	10.01	0.07	0.06
50	0.0066	11	0.844	10.00	0.08	0.07
60	0.0079	13	0.974	9.99	0.10	0.08
70	0.0092	14	1.039	9.97	0.10	0.09
80	0.0105	15	1.169	9.96	0.12	0.10
90	0.0118	19	1.429	9.95	0.14	0.11
100	0.0132	20	1.559	9.94	0.16	0.12
120	0.0158	24	1.818	9.91	0.18	0.14
140	0.0184	26	2.013	9.88	0.20	0.14
160	0.0211	30	2.273	9.86	0.23	0.15
180	0.0237	33	2.533	9.83	0.26	0.18
200	0.0263	34	2.598	9.81	0.26	0.18
220	0.0289	37	2.857	9.78	0.29	0.20
240	0.0316	39	2.987	9.76	0.31	0.21
260	0.0342	42	3.182	9.73	0.33	0.22
280	0.0368	45	3.442	9.71	0.35	0.23
300	0.0395	48	3.702	9.68	0.38	0.25
340	0.0447	54	4.156	9.63	0.43	0.26
380	0.0500	60	4.546	9.59	0.47	0.30
420	0.0553	64	4.871	9.54	0.51	0.30
460	0.0605	70	5.325	9.49	0.56	0.33
500	0.0658	75	5.715	9.44	0.61	0.34
550	0.0724	82	6.299	9.39	0.67	0.37
600	0.0789	94	7.143	9.33	0.77	0.39
650	0.0855	98	7.468	9.27	0.81	0.41
700	0.0921	100	7.663	9.22	0.83	0.42
750	0.0987	103	7.858	9.16	0.86	0.44
800	0.1053	105	8.053	9.11	0.88	0.45
850	0.1118	106	8.118	9.05	0.90	0.46
900	0.1184	107	8.182	9.00	0.91	0.46
950	0.1250	108	8.247	8.95	0.92	0.47
1000	0.1316	105	8.053	8.90	0.91	0.47
1050	0.1382	101	7.728	8.84	0.87	0.47
1100	0.1447	98	7.468	8.79	0.85	0.46
1150	0.1513	96	7.338	8.74	0.84	0.46
1200	0.1579	94	7.143	8.69	0.82	0.46

PROJECT: คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนป่ากิ้ง  
LOCATION: กม.6 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.บางพระ  
BORING NO.: 1  
DEPTH (m): 3.00  
SAMPLE NO.: 1  
DATE: 3/12/2007  
CELL PRESSURE = 2.50 ksc.  
BACK PRESSURE = 2.00 ksc.  
CONSOLIDATION PRESSURE = 0.50 ksc.  
Strain Rate Use: 0.07 mm/min  
Loading Ring Constant: 0.0764 kg/Div

**SOIL SPECIMEN MEASUREMENTS**

Diameter, $d$	(cm)	3.58
Height, $h_o$	(cm)	7.60
Area, $A_o = \pi d^2/4$	(cm <sup>2</sup> )	10.07
Volume, $V_o = A_o h_o$	(cm <sup>3</sup> )	76.50
Wt. of Soil + Split Former	(g)	199.29
Wt. of Split Former	(g)	95.99
Wt. of Soil, $M$	(g)	103.30
Wet Unit Weight	(t/m <sup>3</sup> )	1.35
Dry Unit Weight	(t/m <sup>3</sup> )	0.75
Void Ratio		2.595
Degree of Saturation	(%)	96.00
Specific Gravity		2.71

**WATER CONTENT DETERMINATION**

Container No.		1
Wt. of Wet Soil + Container	(g)	62.66
Wt. of Dry Soil + Container	(g)	50.04
Wt. of Water	(g)	12.62
Wt. of Container	(g)	34.09
Wt. of Dry Soil	(g)	15.95
Water Content	(%)	79.12

**CONSOLIDATION DETERMINATION**

DATE	TIME	ELAPSED TIME	VOLUME CHANGE
		min	cm. <sup>3</sup>
4/12/2007	10:30	30	0.94
4/12/2007	11:00	60	1.85
4/12/2007	12:00	120	3.76
4/12/2007	14:00	240	5.33
4/12/2007	18:00	480	7.54
4/12/2007	22:00	720	8.16
5/12/2007	10:00	1440	8.65
6/12/2007	10:00	2880	9.21

รูปที่ ก-26 ผลการทดสอบ CU Triaxial Test ที่ Confining Pressure = 0.5 ksc. ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร



**PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY**  
**CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST**

Deformation	Strain	Proving Ring Read		Corr. Area	Axial Stress	Ex. Pore Pressure	PROJECT
cm	%	Div	kg	cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	
0	0.0000	0	0.000	10.12	0.00	0.00	LOCATION
10	0.0013	3	0.244	10.11	0.02	0.02	กม.6 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.บางพระ
20	0.0027	7	0.550	10.10	0.05	0.04	BORING NO
30	0.0040	11	0.856	10.08	0.08	0.08	1
40	0.0053	14	1.100	10.07	0.11	0.10	DEPTH (m)
50	0.0066	17	1.284	10.06	0.13	0.12	3.00
60	0.0080	20	1.528	10.04	0.15	0.12	SAMPLE NO
70	0.0093	24	1.834	10.03	0.18	0.15	2
80	0.0106	31	2.384	10.02	0.24	0.20	DATE
90	0.0119	37	2.812	10.00	0.28	0.24	3/12/2007
100	0.0133	47	3.606	9.99	0.36	0.26	CELL PRESSURE =
120	0.0159	50	3.851	9.96	0.39	0.29	3.00 ksc.
140	0.0186	60	4.584	9.94	0.46	0.32	BACK PRESSURE =
160	0.0212	66	5.012	9.91	0.51	0.34	2.00 ksc.
180	0.0239	71	5.440	9.89	0.55	0.36	COSOLIDATION PRESSURE =
200	0.0265	75	5.745	9.86	0.58	0.38	1.00 ksc.
220	0.0292	78	5.990	9.84	0.61	0.41	Strain Rate Use
240	0.0318	83	6.356	9.81	0.65	0.43	0.07 mm/min
260	0.0345	87	6.662	9.78	0.68	0.45	Loading Ring Constant
280	0.0371	93	7.090	9.76	0.73	0.46	0.0764 kg/Div
300	0.0398	98	7.457	9.73	0.77	0.48	<b>SOIL SPECIMEN MEASUREMENTS</b>
340	0.0451	103	7.884	9.69	0.81	0.51	Diameter, $d$ (cm)
380	0.0504	107	8.190	9.64	0.85	0.53	3.59
420	0.0557	112	8.557	9.59	0.89	0.55	Height, $h_o$ (cm)
460	0.0610	121	9.229	9.54	0.97	0.56	7.54
500	0.0663	126	9.596	9.49	1.01	0.60	Area, $A_o = \pi d^2/4$ (cm <sup>2</sup> )
550	0.0729	131	10.024	9.43	1.06	0.64	10.12
600	0.0796	134	10.207	9.38	1.09	0.67	Volume, $V_o = A_o h_o$ (cm <sup>3</sup> )
650	0.0862	137	10.452	9.32	1.12	0.70	76.32
700	0.0928	140	10.696	9.26	1.15	0.71	Wt. of Soil + Split Former (g)
750	0.0995	142	10.818	9.21	1.18	0.72	198.11
800	0.1061	143	10.940	9.15	1.20	0.74	Wt. of Split Former (g)
850	0.1127	146	11.185	9.10	1.23	0.75	95.99
900	0.1194	148	11.307	9.04	1.25	0.76	Wt. of Soil, $M$ (g)
950	0.1260	150	11.429	8.99	1.27	0.76	102.12
1000	0.1326	150	11.491	8.94	1.29	0.77	Wet Unit Weight (t/m <sup>3</sup> )
1050	0.1393	146	11.185	8.88	1.26	0.77	1.34
1100	0.1459	144	11.002	8.83	1.25	0.76	Dry Unit Weight (t/m <sup>3</sup> )
1150	0.1525	143	10.940	8.78	1.25	0.76	0.75
1200	0.1592	141	10.757	8.73	1.23	0.75	Void Ratio
							2.590
							Degree of Saturation (%)
							95.40
							Specific Gravity
							2.71
							<b>WATER CONTENT DETERMINATION</b>
							Container No.
							1
							Wt. of Wet Soil + Container (g)
							63.74
							Wt. of Dry Soil + Container (g)
							50.82
							Wt. of Water (g)
							12.92
							Wt. of Container (g)
							34.09
							Wt. of Dry Soil (g)
							16.73
							Water Content (%)
							77.23
							<b>CONSOLIDATION DETERMINATION</b>
							DATE
							TIME
							ELAPSED TIME
							min
							VOLUME CHANGE
							cm. <sup>3</sup>
							4/12/2007
							10:30
							30
							1.87
							4/12/2007
							11:00
							60
							4.65
							4/12/2007
							12:00
							120
							6.94
							4/12/2007
							14:00
							240
							9.23
							4/12/2007
							18:00
							480
							10.24
							4/12/2007
							22:00
							720
							10.87
							5/12/2007
							10:00
							1440
							11.38
							6/12/2007
							10:00
							2880
							12.05

รูปที่ ค-27 ผลการทดสอบ CU Triaxial Test ที่ Confining Pressure = 1.0 ksc. ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร



**PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY  
CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST**

Deformation cm	Strain %	Proving Ring Read		Corr. Area cm <sup>2</sup>	Axial Stress kg/cm <sup>2</sup>	Ex. Pore Pressure kg/cm <sup>2</sup>
		Div	kg			
0	0.0000	0	0.000	9.84	0.00	0.00
10	0.0013	4	0.306	9.83	0.03	0.02
20	0.0026	9	0.672	9.82	0.07	0.04
30	0.0039	14	1.100	9.80	0.11	0.06
40	0.0052	18	1.345	9.79	0.14	0.09
50	0.0066	23	1.772	9.78	0.18	0.13
60	0.0079	30	2.323	9.77	0.24	0.15
70	0.0092	40	3.056	9.75	0.31	0.20
80	0.0105	50	3.851	9.74	0.40	0.24
90	0.0118	63	4.828	9.73	0.50	0.26
100	0.0131	70	5.317	9.71	0.55	0.29
120	0.0157	76	5.806	9.69	0.60	0.34
140	0.0184	82	6.295	9.66	0.65	0.37
160	0.0210	91	6.968	9.64	0.72	0.42
180	0.0236	98	7.457	9.62	0.78	0.46
200	0.0262	103	7.884	9.59	0.82	0.49
220	0.0289	108	8.251	9.57	0.86	0.51
240	0.0315	114	8.740	9.54	0.92	0.52
260	0.0341	118	9.046	9.52	0.95	0.53
280	0.0367	121	9.229	9.49	0.97	0.54
300	0.0394	134	10.207	9.47	1.08	0.55
340	0.0446	138	10.513	9.42	1.12	0.58
380	0.0499	142	10.818	9.37	1.15	0.60
420	0.0551	146	11.185	9.33	1.20	0.63
460	0.0604	151	11.552	9.28	1.24	0.66
500	0.0656	155	11.857	9.24	1.28	0.67
550	0.0722	160	12.224	9.18	1.33	0.69
600	0.0787	168	12.835	9.12	1.41	0.71
650	0.0853	174	13.263	9.07	1.46	0.76
700	0.0919	178	13.630	9.01	1.51	0.80
750	0.0984	189	14.424	8.96	1.61	0.83
800	0.1050	192	14.669	8.91	1.65	0.87
850	0.1115	193	14.730	8.85	1.66	0.89
900	0.1181	194	14.852	8.80	1.69	0.90
950	0.1247	196	14.974	8.75	1.71	0.91
1000	0.1312	197	15.036	8.70	1.73	0.92
1050	0.1378	194	14.791	8.65	1.71	0.92
1100	0.1444	190	14.485	8.60	1.68	0.92
1150	0.1509	188	14.363	8.55	1.68	0.91
1200	0.1575	183	13.996	8.50	1.65	0.91

PROJECT    คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนป่าภพวัง  
 LOCATION   กม.6 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.บางพระ  
 BORING NC    1  
 DEPTH (m)    3.00  
 SAMPLE NC    3  
 DATE          3/12/2007  
 CELL PRESSURE =                    3.50   ksc.  
 BACK PRESSURE =                    2.00   ksc.  
 CONSOLIDATION PRESSURE =         1.50   ksc.  
 Strain Rate Use                    0.07   mm/min  
 Loading Ring Constant            0.0764   kg/Div

**SOIL SPECIMEN MEASUREMENTS**

Diameter, <i>d</i>	(cm)	3.54
Height, <i>h<sub>o</sub></i>	(cm)	7.62
Area, $A_g = \pi d^2/4$	(cm <sup>2</sup> )	9.84
Volume, $V_o = A_g h_o$	(cm <sup>3</sup> )	75.00
Wt. of Soil + Split Former	(g)	213.47
Wt. of Split Former	(g)	79.10
Wt. of Soil, <i>M</i>	(g)	134.37
Wet Unit Weight	(t/m <sup>3</sup> )	1.79
Dry Unit Weight	(t/m <sup>3</sup> )	1.03
Void Ratio		1.624
Degree of Saturation	(%)	96.00
Specific Gravity		2.71

**WATER CONTENT DETERMINATION**

Container No.		1
Wt. of Wet Soil + Container	(g)	51.03
Wt. of Dry Soil + Container	(g)	44.05
Wt. of Water	(g)	6.98
Wt. of Container	(g)	34.55
Wt. of Dry Soil	(g)	9.50
Water Content	(%)	73.47

**CONSOLIDATION DETERMINATION**

DATE	TIME	ELAPSED TIME	VOLUME CHANGE
		min	cm. <sup>3</sup>
4/12/2007	10:30	30	3.87
4/12/2007	11:00	60	6.54
4/12/2007	12:00	120	9.13
4/12/2007	14:00	240	11.65
4/12/2007	18:00	480	14.25
4/12/2007	22:00	720	15.82
5/12/2007	10:00	1440	16.48
6/12/2007	10:00	2880	16.93

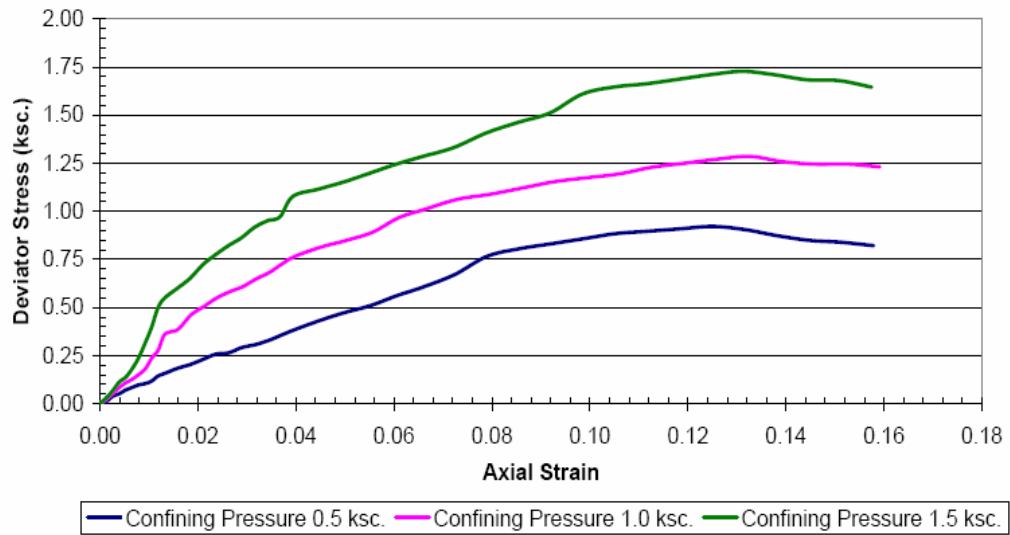
รูปที่ ก-28 ผลการทดสอบ CU Triaxial Test ที่ Confining Pressure = 1.5 ksc. ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร



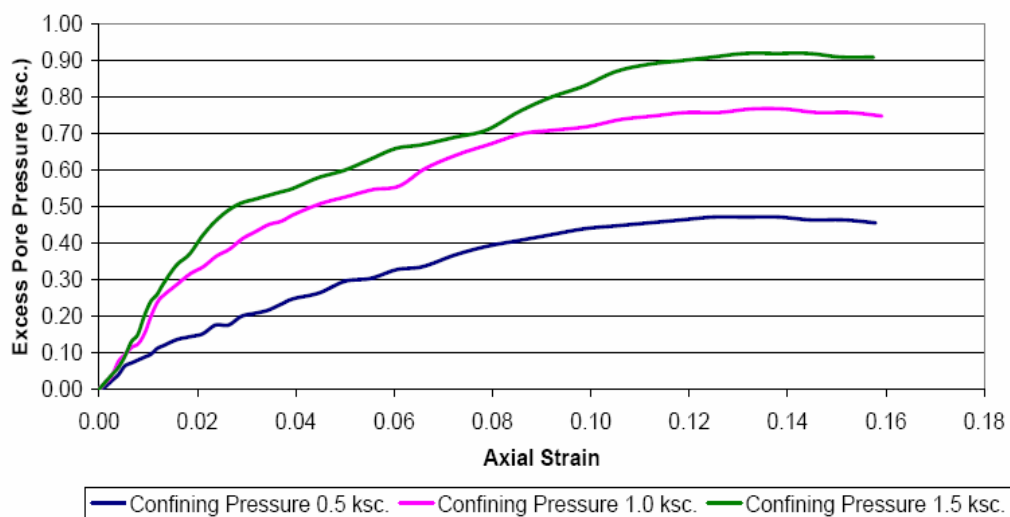


## PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Strain และ Deviator Stress



กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Strain และ Excess Pore Pressure

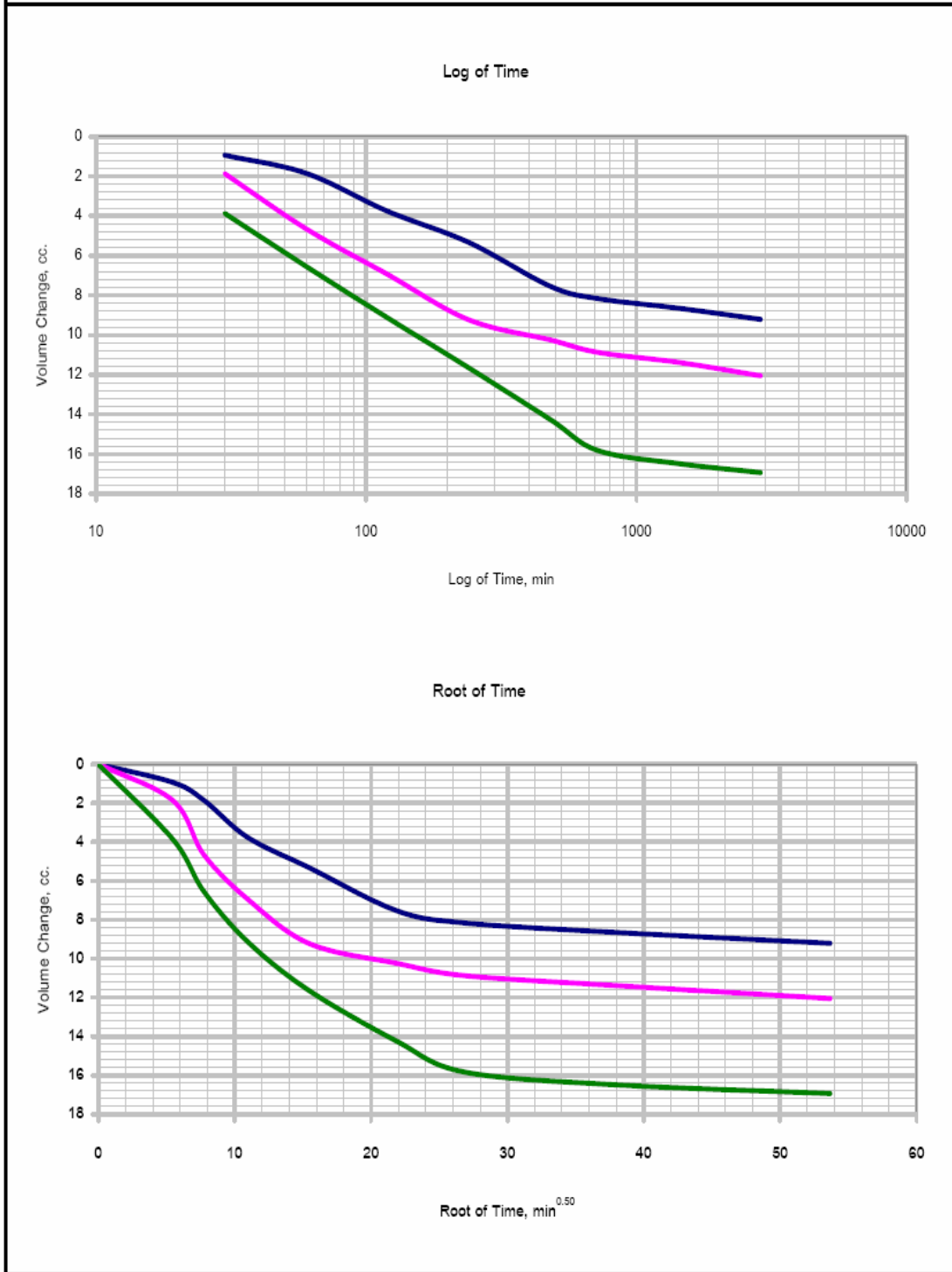


รูปที่ ค-29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress และ Excess Pore Pressure กับ Axial Strain ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร



# PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

## CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST

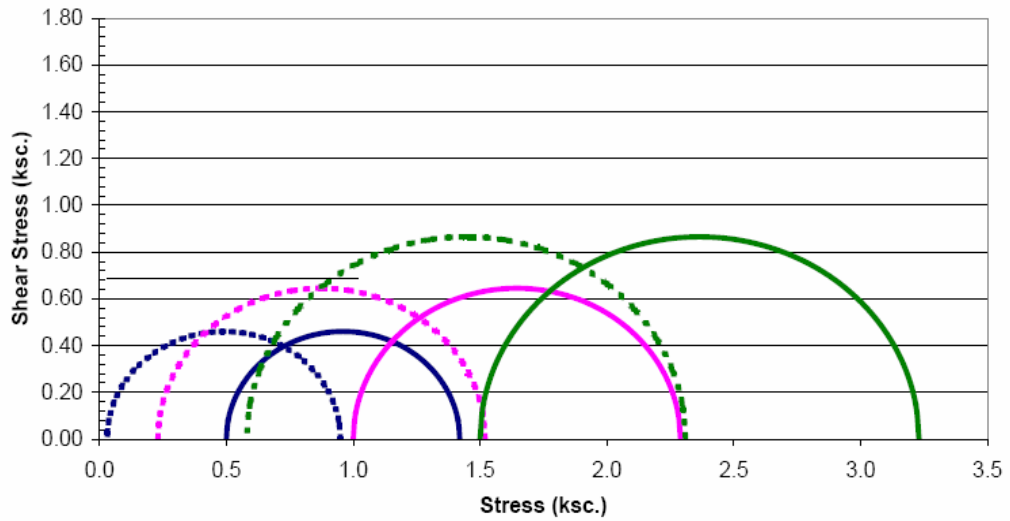


รูปที่ ค-30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volume Change กับ เวลา ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

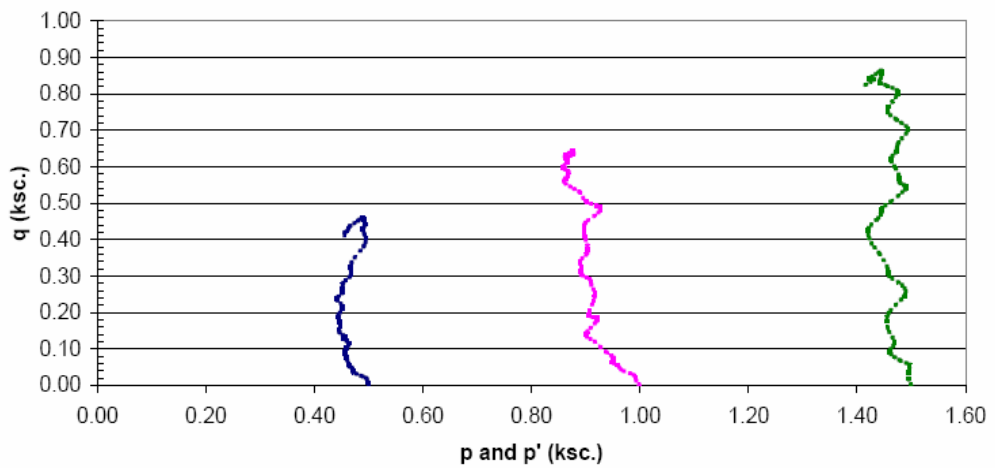


PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY  
CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST

Mohr's Circle



Stress Path



รูปที่ ก-31 Mohr's Circle และ Stress Path ของ BH - 1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร

**ภาคผนวก ง.**

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าต่างๆ ของ Critical State Parameter

### 1. ตัวอย่างการหาค่า Slope of Critical State Line project to p':q' plane (M),

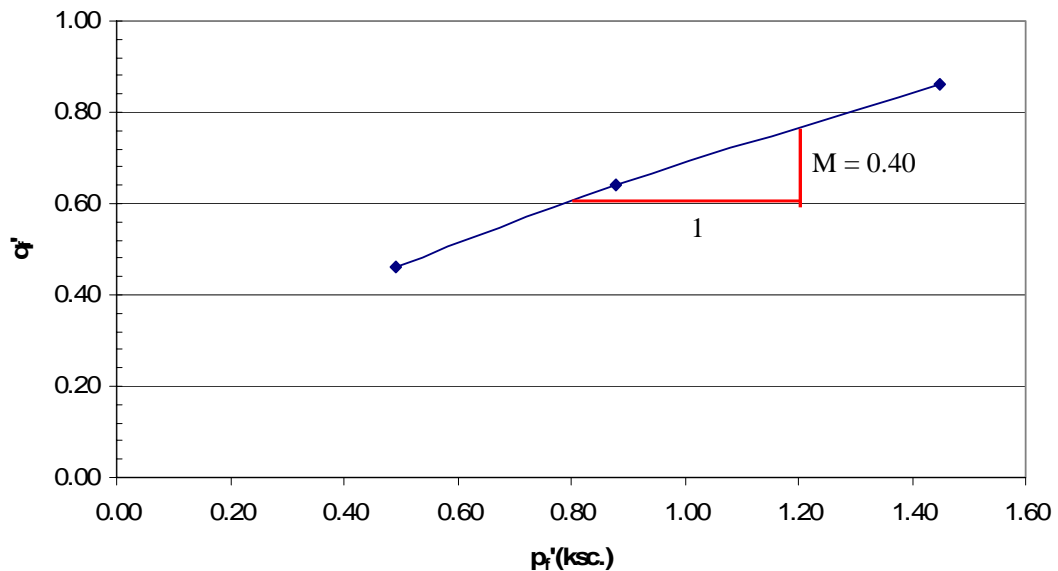
เมื่อทำการทดสอบ CU Triaxial Test สามารถหาค่า  $p'$  และ  $q'$  ได้ ค่า Slope of Critical State Line project to p':q' plane (M) ได้จากการนำค่า  $p'$  และ  $q'$  ที่จุด Failure การเขียนกราฟดังตัวอย่างของหลุมเจาะที่ BH-1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร ได้ข้อมูลดังตารางที่ ง-1

ตารางที่ ง-1 ค่า  $p'$  และ  $q'$  ที่จุด Failure

Confining Pressure (ksc.)	$p'$ at Failure	$q'$ at Failure
0.5	0.49	0.46
1.0	0.88	0.64
1.5	1.45	0.86

นำข้อมูลจากตารางที่ ง-1 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $p'$  และ  $q'$  โดยค่าความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์คือค่า Slope of Critical State Line project to p':q' plane (M) ดังแสดงในรูปที่ ง-1 โดยที่ค่า M เท่ากับ 0.40

Depth 3.00



รูปที่ ง-1 Stress Path

## 2. ตัวอย่างการหาค่า Slope of Critical State Line ( $\lambda$ )

เมื่อทำการทดสอบ CU Triaxial Test สามารถได้ค่า อัตราส่วนช่องว่างของมวลดิน และค่า  $p'$  ที่จุด Failure ค่า Slope of Critical State Line ( $\lambda$ ) ได้จากการนำค่า Specific Volume at Failure ( $U_f$ ) ของดิน และค่า  $\ln$  ของ ค่า  $p'$  ที่จุด Failure มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific Volume และ ค่า  $\ln p'$  ตัวอย่างข้อมูลของตัวอย่างดินที่ BH – 1 ความลึก 3.00 เมตร (ดังแสดงในตารางที่ ง-2) โดยค่า  $p'_f$  ที่มีหน่วยเป็น ksc. จะต้องทำการแปลงหน่วยให้เป็นหน่วย kPa. และทำค่าให้อยู่ในรูปของ  $\ln p'$  และค่า Specific Volume ของดินคือ ค่าอัตราส่วนช่องว่างของมวลดินบวกด้วยหนึ่ง

ตารางที่ ง-2 ค่า Specific Volume และ ค่า  $\ln p'_f$

Confining Pressure (ksc.)	$p'_f$ (ksc.)	$\ln p'_f$ (kPa.)	e	$U$
0.5	0.49	3.87	1.83	2.83
1.0	0.88	4.46	1.76	2.76
1.5	1.45	4.96	1.73	2.73

นำข้อมูลจากตารางที่ ง-2 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific Volume และ ค่า  $\ln p'$  โดยค่าความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์คือค่า Slope of Critical State Line ( $\lambda$ ) ดังแสดงในรูปที่ ง-2 โดยที่ค่า  $\lambda$  เท่ากับ 0.09

## 3. ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Specific Volume of soil on critical state line at $p' = 1.0$ kPa ( $\Gamma$ )

เมื่อเราได้ค่า Slope of Critical State Line project to  $p':q'$  plane (M), Specific Volume at Failure ( $U_f$ ) , ค่า  $\ln$  ของ ค่า  $p'$  ที่จุด Failure และค่า Slope of Critical State Line ( $\lambda$ ) สามารถหาค่า Specific Volume of soil on critical state line at  $p' = 1.0$  kPa ( $\Gamma$ ) โดยการนำมาแทนค่าในสมการ

$$\Gamma = U_f + \lambda \ln p'_f$$

โดยที่  $\Gamma$  = Specific Volume of soil on critical state line at  $p' = 1.0$  kPa

$v_f$  = Specific Volume at Failure

$\lambda$  = Slope of Critical State Line

$p'_f$  =  $p'$  at Failure

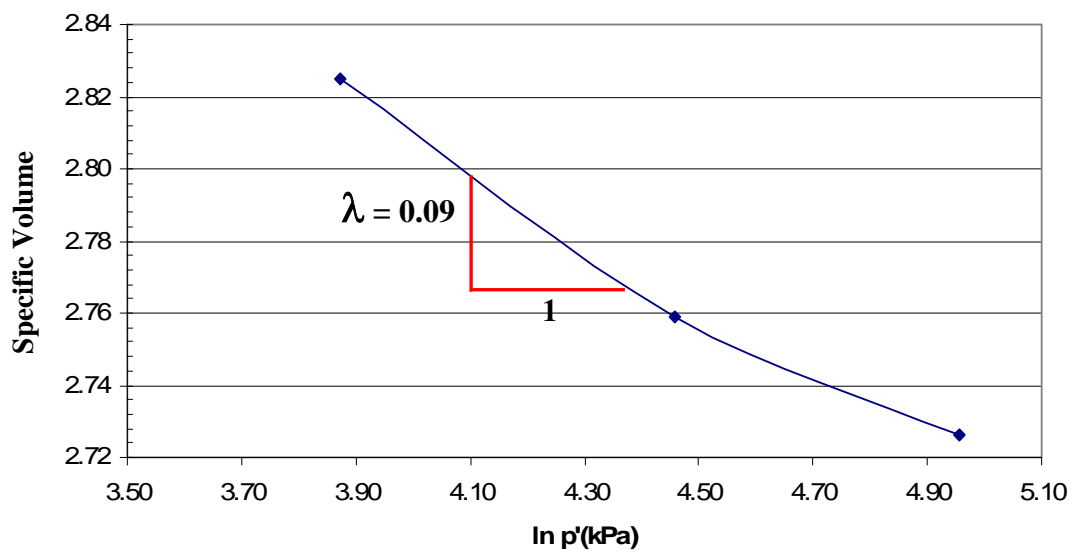
แทนค่าตัวแปรโดยใช้ค่าของตัวอย่าง BH -1 ที่ระดับความลึก 3.00 เมตร โดยสามารถทำการแทนค่าตัวแปรได้ดังนี้

โดยที่  $v_f = 2.83$

$\lambda = 0.09$

$\ln p'_f = 3.87$

จากสมการได้ค่า Specific Volume of soil on critical state line at  $p' = 1.0$  kPa ( $\Gamma$ ) = 3.17



รูปที่ ง-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific Volume และ ค่า  $\ln p'$

**ภาคผนวก จ.**

รูปภาพแสดงหลุมเจาะสำรวจดินและการเจาะสำรวจดิน





รูปที่ จ-1 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH-1 กม.6 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.บางพระ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ-2 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH-2 กม.25 ทางหลวงหมายเลข 4094 ต.หูล่อง อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ-3 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH-3 ม.1 บ้านปากคลอง ต.บ้านใหญ่ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ-4 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH-3 ม.1 บ้านปากคลอง ต.บ้านใหญ่ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ - 5 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH-4 สถานีอนามัยบ้านบางแรด ม.1 ต.บ้านเพ็ง อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ - 6 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH-4 สถานีอนามัยบ้านบางแรด ม.1 ต.บ้านเพ็ง อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ - 7 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH - 5 โรงเรียนบ้านปากคลอง ต.คลองน้อย อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ - 8 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH - 5 โรงเรียนบ้านปากคลอง ต.คลองน้อย อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ – 9 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH – 6 ที่ทำการองค์การบริหารส่วนตำบลขนานนา ต.ขนานนา อ.ปากพอง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ – 10 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH – 6 ที่ทำการองค์การบริหารส่วนตำบลขนานนา ต.ขนานนา อ.ปากพอง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ – 11 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH – 7 กม.18 ทางหลวงหมายเลข 4013 ต.คลองน้อย อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ – 12 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH – 8 สนามกีฬา องค์การบริหารส่วนตำบลบางศาลา ต.บางศาลา อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ – 13 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH-8 สนามกีฬา องค์การบริหารส่วนตำบล  
บางศาลา ต.บางศาลา อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ – 14 แสดงบริเวณสถานที่เจาะสำรวจดิน BH-9 กม. 25 ทางหลวงหมายเลข 4013  
ต.คลองกระบือ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



รูปที่ จ – 15 แสดงการเจาะสำรวจดินบริเวณ BH – 5 โรงเรียนบ้านปากคลอง



รูปที่ จ – 16 แสดงการเจาะสำรวจดินบริเวณ BH – 5 โรงเรียนบ้านปากคลอง





รูปที่ จ - 17 แสดงการเตรียมทดสอบ Standard Penetration Resistance Test



รูปที่ จ - 18 แสดงการเตรียมทดสอบ Standard Penetration Resistance Test



รูปที่ จ – 19 แสดงการเตรียมกระบอบางเพื่อเก็บตัวอย่างดิน



รูปที่ จ – 20 แสดงการเก็บตัวอย่างดินด้วยกระบอบาง

**การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์**

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13  
14 – 16 พฤษภาคม 2551 โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช พัทยา จังหวัดชลบุรี



## คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง ENGINEERING PROPERTIES OF SOFT PAK PHANANG CLAY

อัครเดช แชจิว (Akradet Jiw)<sup>1</sup>

ธนิศ เถลิมนานนท์ (Tanit Chalermyanont)<sup>2</sup>

พิพัฒน์ ทองฉิม (Pipat Thongchim)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ akradet\_psu@hotmail.com

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ Tanit.c@psu.ac.th

<sup>3</sup>อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ Pipat\_thongchim@yahoo.com

**บทคัดย่อ :** ดินเหนียวอ่อนของกลุ่มน้ำปากพนังมีลักษณะเป็นดินเหนียวทะเล โดยชั้นดินเหนียวอ่อนชั้นบนสุดมีความหนาโดยประมาณ 15 – 20 เมตร ซึ่งมักจะก่อให้เกิดปัญหาด้านการทรุดตัว งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนกลุ่มน้ำปากพนังอย่างละเอียด โดยทำการเก็บรวบรวมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนจากพื้นที่ต่างๆของอำเภอปากพนัง ทำการทดสอบในสนาม และในห้องปฏิบัติการ ซึ่งรวมไปถึง คุณสมบัติดัชนี การทดสอบแรงอัดแกนเดียว การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ ผลการทดสอบถูกนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับคุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนปากพนัง เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรมปฐพี หรือใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์แก้ไขปัญหาและพื้นฐานข้อมูลของงานวิจัยต่างๆ บริเวณอำเภอปากพนังต่อไปในอนาคต

**ABSTRACT :** A soft clay layer found in Pak Phanang basin is a marine clay. The soft Pak Phanang clay is about 15 – 20 m. deep and highly compressible which usually causes settlement problem. This research aims to study properties of soft Pak Phanang clay. The clay samples were collected from many locations in Pak-Phanang district. Field and Laboratory tests were conducted namely, field vane shear test, index properties test, unconfined compressive strength test, and consolidation test. Relationships between index properties and engineering properties were determined. Testing results and their relationships obtained can be readily used by engineer and researcher for geotechnical purposes.

**KEYWORDS :** Soft Pak Phanang clay, Index Properties, Engineering Properties

### 1. บทนำ

โครงการก่อสร้างสาธารณูปโภคต่างมากมายที่อำเภอปากพนังล้วนแต่ทำการก่อสร้างอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งในเนื้อดินจะมีปริมาณความชื้นอยู่ในอัตราส่วนที่สูงมาก ดังนั้นเมื่อดินมีการรับน้ำหนักจะเกิดการทรุดตัวค่อนข้างสูง ซึ่งการทรุดตัวจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะทรุดตัวทันทีเมื่อรับน้ำหนัก

ส่วนที่สองจะเกิดจากการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินทำให้เกิดการทรุดตัว [1] โดยการทรุดตัวจะขึ้นอยู่กับระยะเวลา จากสาเหตุดังกล่าวทำให้การออกแบบโครงสร้างบนพื้นที่ดินเหนียวอ่อนนี้มักประสบกับ ปัญหาเรื่องการทรุดตัวและส่งผลให้ราคาค่าก่อสร้างมีราคาสูง ในการออกแบบทางวิศวกรรมปฐพีที่ต้องทราบลักษณะพฤติกรรมและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเป็นอย่างดี



ชั้นดินเหนียวอ่อนที่อำเภอปากพนังนี้ ยังไม่ได้มีการสำรวจ และศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมอย่างจริงจัง โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวอ่อนจากจุดต่างๆ บางส่วนของอำเภอปากพนัง เพื่อที่จะหาค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน โดยเน้นไปที่คุณสมบัติของการอัดตัวคายน้ำ และกำลังของดินเหนียวอ่อนปากพนัง ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญ สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบในงานวิศวกรรมปฐพีต่อไป

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 การเจาะเก็บตัวอย่างดินและการทดสอบในสนาม

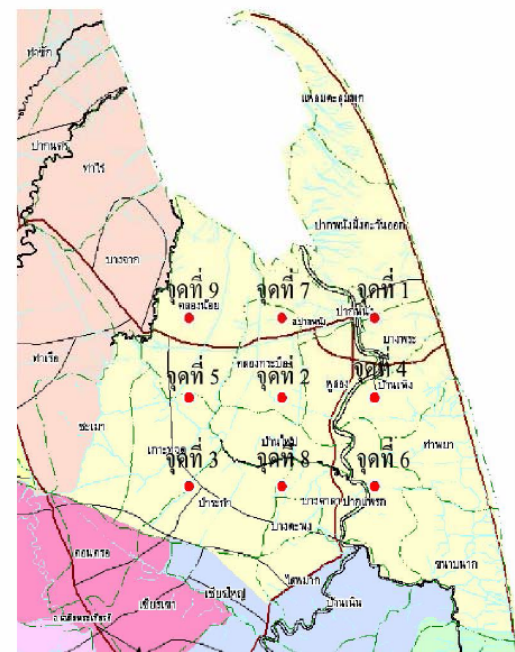
การเจาะสำรวจเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนทำโดยใช้วิธี Wash Boring บริเวณพื้นที่ศึกษาในอำเภอปากพนัง จังหวัด นครศรีธรรมราช จำนวน 9 จุด จนถึงระดับความลึกที่ 15 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 1 โดยในแต่ละจุดทดสอบห่างกันประมาณ 5 กิโลเมตร การเก็บตัวอย่างดินทำโดยใช้กระบอกเก็บดินชนิดผนังบาง (Shelby tube) ซึ่งตัวอย่างที่เก็บได้จะเป็น ตัวอย่างดินแบบ Undisturbed sample ทุกระยะ 1.50 เมตร ในขณะที่เดียวกันทำการทดสอบคอกทะลวงมาตรฐาน (Standard penetration resistance test, SPT, N – Value) และทำการทดสอบ หาค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) โดยวิธีทดสอบแรงเฉือนในที่ด้วยใบพัด (Field vane shear test, FV-test)

ตารางที่ 1 พื้นที่เก็บตัวอย่างดินในอำเภอปากพนัง

จุดที่	ตำแหน่งอ้างอิง
1	กม.6 ทางหลวงหมายเลข 4013 ด.บางพระ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
2	กม.25 ทางหลวงหมายเลข 4094 ด.หูล่อง อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
3	ม.1 บ้านปากคลอง ด.บ้านใหญ่ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
4	สถานีอนามัยบ้านบางแรด ม.1 ด.บ้านเต็ง อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
5	โรงเรียนบ้านปากคลอง ด.คลองน้อย อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
6	ที่ทำการองค์การบริหารส่วนตำบลชานบานาก ด.ชานบานาก อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
7	กม.18 ทางหลวงหมายเลข 4013 ด.คลองน้อย อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช

ตารางที่ 1 พื้นที่เก็บตัวอย่างดินในอำเภอปากพนัง (ต่อ)

จุดที่	ตำแหน่งอ้างอิง
8	สนามกีฬา องค์การบริหารส่วนตำบลบางศาลา ด.บางศาลา อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช
9	กม. 25 ทางหลวงหมายเลข 4013 ด.คลองกระบือ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช



ภาพที่ 1 แผนที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน

### 2.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างดินที่ได้จากการเจาะสำรวจ ทำการแบ่งตัวอย่างดิน ออกจากกระบอกบาง โดยทำการแบ่งตัวอย่างดินเป็นแต่ละชั้น ความลึกและแต่ละหลุมทดสอบ และนำตัวอย่างที่ทำการแบ่ง เรียบร้อยแล้วห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกป้องกันความชื้นไม่ให้ ระบายออกไป นำตัวอย่างบางส่วนมาทดสอบหาค่า คุณสมบัติ ดัชนี (Index Properties) เช่น หาค่าขีดพิกต์เหลว (Liquid limit, LL), ขีดพิกต์พลาสติก (Plastic limit, PL), ดัชนีพลาสติก (Plasticity index, PI), ค่าความชื้นในธรรมชาติ (Natural water content, W), ค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight,  $\gamma$ ), ค่าความ ถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity,  $G_s$ ) เป็นต้น



นำตัวอย่างดินส่วนหนึ่งมาตัดแต่งตัวอย่างเพื่อทดสอบหา ค่าแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength test, UCS Test, ASTM D 2166-00) และทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test, ASTM D 2435-96) โดยในการทดสอบ การยุบอัดตัวคายน้ำนี้ เราจะทราบถึงค่า สัมประสิทธิ์การอัดตัว คายน้ำ(Coefficient of consolidation,  $C_v$ ), ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression index,  $C_c$ ), และค่าความเค้นสูงสุดที่ดินเคยรับในอดีต (Maximum past pressure,  $\sigma'_{pm}$ ) ของดินตัวอย่าง

### 2.3. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับคุณสมบัติดัชนี

เมื่อเราทราบค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมและคุณสมบัติดัชนี แล้ว นำค่าคุณสมบัติดัชนี เช่น ชีตจำกัดเหลว ชีตจำกัดพลาสติก ดัชนีพลาสติก ค่าความชื้นในธรรมชาติ ค่าหน่วยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะ ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ(จากFV-test และ USC) ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ ดัชนีการอัดตัวและค่า ความเค้นที่ดินเคยรับในอดีตมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปร [2] โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ (โปรแกรม SPSS version 15) เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติ ดัชนีกับค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรม และนำมาสมการที่ได้มา เปรียบเทียบกับสมการที่นักวิจัยท่านอื่นๆ ได้ทำการศึกษาไว้ เพื่อให้สามารถนำมาสมการเหล่านี้ไปใช้ประมาณค่าคุณสมบัติทาง วิศวกรรมได้โดยไม่ต้องนำตัวอย่างไปทดสอบที่ยุ่งยากและ เสียเวลา โดยสมการที่ได้มานั้นจะเป็นสมการของดินบริเวณนี้ โดยเฉพาะ

## 3. ผลการทดสอบ

### 3.1 คุณสมบัติดัชนี (Index Properties)

ดินเหนียวอ่อนบริเวณอำเภอปากพนังตลอดจนถึงความลึก ประมาณ 15 เมตร เป็นดินเหนียวที่มีค่าความชื้นในธรรมชาติ ค่า ชีตพิกต์เหลว ค่อนข้างสูง โดยค่าเฉลี่ยของความชื้นในธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 72.1% ซึ่งมากกว่าค่าเฉลี่ยของชีตพิกต์เหลวที่มีค่า เท่ากับ 64% แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวปากพนังเป็นดินเหนียว อ่อน และสามารถจำแนกประเภทของดินโดยระบบ USCS ได้ เป็นประเภท High plasticity clay (CH) และสามารถสรุปได้ว่า ดินบริเวณนี้ มีค่าอยู่ในช่วงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติดัชนี

คุณสมบัติดัชนี	ช่วงข้อมูล	ค่าเฉลี่ย
Liquid Limit, LL	61.7 – 68.5	64.0
Plasticity Index, PI	30.0 – 41.5	35.3
Natural Water Content, %	71.1 – 79.7	72.1
Unit Weight, $g/cm^3$	1.68 – 1.73	1.70
Specific Gravity, $G_s$	2.67 – 2.77	2.70
Soil Classification, USSC	CH	-

จำนวนตัวอย่างวิเคราะห์ 85 ตัวอย่าง

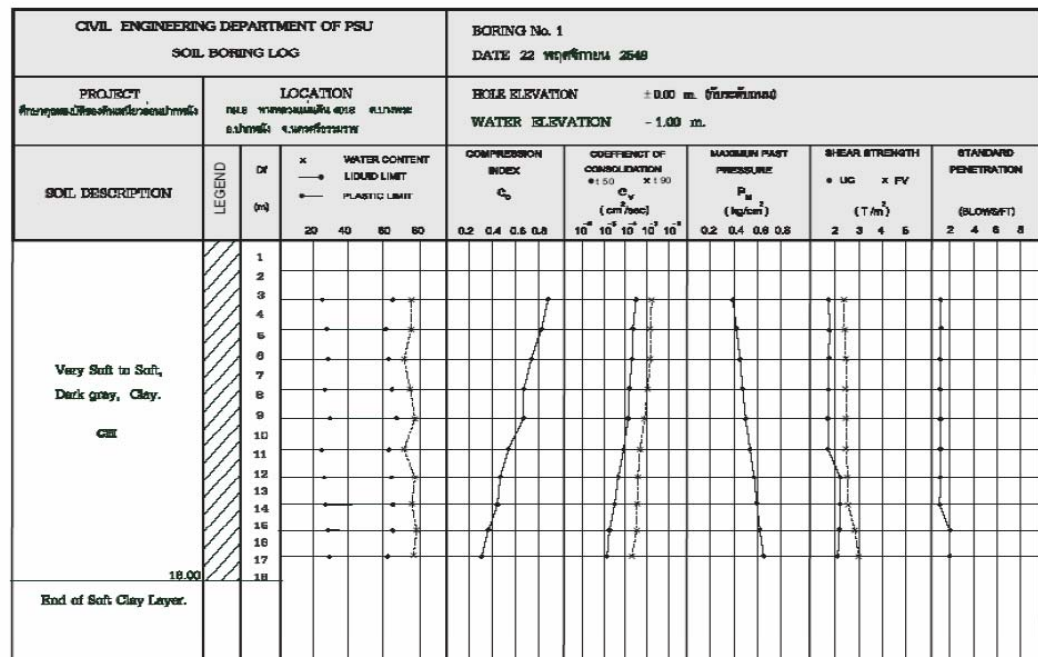
### 3.2 คุณสมบัติวิศวกรรม (Engineering Properties)

ผลการทดสอบดักทะลวงแบบมาตรฐาน, การทดสอบแรงเฉือนในที่ด้วยใบพัด, การทดสอบแรงอัดแกนเดียวและการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินตัวอย่างเมื่อเทียบกับความลึก จำนวน 9 หลุม มีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงแสดงตัวอย่างในรูปของ Boring Log ของหลุมเจาะที่ 1 ในภาพที่ 2 และคุณสมบัติทาง วิศวกรรมไว้ในตารางที่ 3 ผลการศึกษาพบว่า ชั้นดินเหนียวอ่อน ปากพนังมีความลึกประมาณ 18 เมตรจากระดับผิวดิน โดยมีค่า  $S_u$  อยู่ในช่วง 1.05 – 2.88  $t/m^2$  โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.064 และมี ค่า Over consolidation ratio อยู่ในช่วง 0.833 – 1.553 แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวอ่อนปากพนังเป็น Normally consolidation clay

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม

คุณสมบัติวิศวกรรม	ช่วงข้อมูล	ค่าเฉลี่ย
Undrained Shear Strength, FV – Test, $S_{u(FV)}$ $t/m^2$	2.64 – 5.11	3.79
Undrained Shear Strength, UCS, $S_{u(USC)}$ $t/m^2$	1.05 – 2.88	1.67
Compression Index, $C_c$	0.311 – 0.974	0.67
Maximum Past Pressure, $\sigma'_{pm}$ $t/m^2$	3.2 – 8.9	5.5
OCR	0.833 – 1.553	1.064

จำนวนตัวอย่างวิเคราะห์ 85 ตัวอย่าง



ภาพที่ 1 Boring Log ของ BH - 1

ลักษณะของชั้นดินเหนียวอ่อนป่าตมพบว่า บริเวณความลึกตั้งแต่ผิวดินจนถึงระดับ 4.00 เมตรนั้นเป็นลักษณะของดินจะเป็นแบบที่มีการยุบอัดตัวมากกว่าปกติ (Over consolidated clay) โดยในชั้นดินนี้จะมีค่า OCR อยู่ในช่วงระหว่าง 1.121 – 1.553 และในชั้นดินที่ระดับความลึก 4.00 เมตรเป็นดินไปจะเป็นดินเหนียวแบบยุบอัดตัวตามปกติ (Normally consolidation clay) โดยมีค่า OCR อยู่ในช่วงระหว่าง 0.833 – 1.121

นอกจากนี้พบว่า ค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆจะมีความสัมพันธ์กับความลึก เช่นค่าความดันของดินที่รับมาในอดีต ค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และค่าดัชนีการอัดตัว โดยที่ค่าความดันของดินที่รับมาในอดีตและค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ จะเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น แต่ค่าดัชนีการอัดตัวมีค่าลดลง เพราะเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นดินจะมีความแข็งแรงขึ้น ทำให้ค่าคุณสมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกไปด้วย ส่วนค่าดัชนีการอัดตัว ค่าตัวเลขที่มีค่ามากบ่งบอกถึงความอ่อนตัวของดิน เมื่อค่าดัชนีการอัดตัวมีค่าลดลง แสดงว่าดินมีความแข็งแรงขึ้น

### 3.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนป่าตมกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ค่าของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯนั้นได้มีผู้ทำการทดลองไว้มากมาย จากการรวบรวมข้อมูลของ รสสุคนธ์ ชื่นวัฒนา [3] สามารถสรุปได้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติต่างๆของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

คุณสมบัติ	ช่วงข้อมูล	ค่าเฉลี่ย
Liquid Limit, LL	61.0 – 110.9	85.9
Plasticity Index, PI	32.9 – 71.8	52.3
Natural Water Content, %	55.2 – 85.3	70.2
Unit Weight, g/cm <sup>3</sup>	1.48 – 1.70	1.59
Specific Gravity, GS	2.62 – 2.70	2.65
Undrained Shear Strength, FV – Test, $S_{UVFV}$ , T/m <sup>2</sup>	1.28 – 3.21	2.25
Undrained Shear Strength, UCS, $S_{UUCS}$ , T/m <sup>2</sup>	0.49 – 2.16	1.33
Maximum Past Pressure, $\sigma'_{pm}$ , T/m <sup>2</sup>	3.70 – 10.90	7.30
Compression Index, $C_c$	0.59 – 1.15	0.87
OCR	1.164 – 1.923	1.546





เมื่อได้ทำการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติต่างๆของดินเหนียวอ่อนปากพนัง (ตารางที่ 2 และ 3) กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (ตารางที่4) พบว่า คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนปากพนัง มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ แต่ดินเหนียวอ่อนปากพนังมีความแข็งแรงของดินมากกว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพเล็กน้อย ความแข็งแรงของดินสามารถเปรียบเทียบได้จากค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่าดัชนีการอัดตัว โดยจะเห็นได้ว่าค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่าดัชนีการอัดตัวของดินเหนียวอ่อนปากพนังมีค่าที่สูงกว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

### 3.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติดัชนีกับคุณสมบัติทางวิศวกรรม

ผลการทดสอบทั้งหมด นำค่าที่ได้มาทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์กันของตัวแปรต่าง โดยใช้โปรแกรม SPSS version 15 เพื่อตรวจสอบดูว่า ค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรม(เช่น  $S_u, C_c, \sigma'_{mp}$ ) กับค่าคุณสมบัติดัชนี(เช่น  $N, LL, PI, G_s, W$ ) ตัวแปรใดที่มีความสัมพันธ์กันมากที่สุด และนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับคุณสมบัติดัชนี โดยใช้ตัวแปรความลึก ซึ่งพบว่ามีส่วนสำคัญที่ทำให้สมการมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ(Coefficient of determination,  $R^2$ ) ได้สมการดังแสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สมการต่างๆของดินเหนียวอ่อนปากพนังที่มีความสัมพันธ์กับความลึก

ค่า	สมการ	$R^2$
$S_{u(FV)}$ ( $t/m^2$ )	$1.376 + 0.056D_f + 0.03PL + 0.352N$	0.827
$S_{u(USC)}$ ( $t/m^2$ )	$0.770 + 0.082D_f + 0.073N - 0.009\gamma$	0.664
$C_c$	$0.852 + 0.002LL - 0.034D_f$	0.812

จำนวนตัวอย่างวิเคราะห์ 85 ตัวอย่าง

โดยที่  $D_f$  คือ ความลึก หน่วยเป็นเมตร  $N$  คือ ค่า SPT หน่วยเป็น Blows/ft.  $LL$  คือ Liquid Limit  $PL$  คือ Plastic Limit  $PI$  คือ Plasticity Index

โดยสมการที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 เป็นสมการที่ได้ทำการพิจารณาจากตัวแปรคุณสมบัติดัชนีต่างๆ และเลือกตัวแปรที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าที่ดีที่สุดมาใช้

เมื่อนำผลการทดสอบทั้งหมดมาทำการคำนวณโดยไม่มีกรนำตัวแปรที่ความลึกเข้ามาเกี่ยวข้องและทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ผู้วิจัยท่านอื่นๆได้ทำการวิจัยไว้สำหรับดินเหนียวกรุงเทพ โดยสามารถเปรียบเทียบได้ดังตัวอย่างของสมการที่แสดงไว้ในตารางที่ 6 และ ตารางที่ 7

ตารางที่ 6 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางวิศวกรรมและคุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

ค่า	สมการ	$R^2$	ผู้วิจัย
$C_c$	$0.007 + 0.011 W$	0.702	กวีวงษ์ (2530) [4]
$C_c$	$-0.847 + 0.024 LL$	0.680	Tonyagate (1978) [5]
$C_c$	$0.6402 + 0.0202 W$	0.702	สุพัฒน์ (2530) [6]
$S_u$ ( $t/m^2$ )	$N/1.15$	-	-

ตารางที่ 7 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางวิศวกรรมและคุณสมบัติดัชนีต่างๆ ของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

ค่า	สมการ	$R^2$
$C_c$	$4.436 - 0.052W$	0.270
$C_c$	$-2.552 + 0.05LL$	0.245
$C_c$	$7.955 - 0.178LL + 7.303\gamma - 3.042 G_s$	0.651
$S_{u(FV)}$ ( $T/m^2$ )	$1.851 + 0.025PI + 0.232N$	0.465

โดยที่  $\gamma$  คือ Unit Weight หน่วยเป็น  $T/m^3$   $N$  คือ ค่า SPT หน่วยเป็น Blows/ft.  $G_s$  คือ Specific Gravity  $LL$  คือ Liquid Limit  $PI$  คือ Plastic Limit  $PI$  คือ Plasticity Index

จากผลการวิเคราะห์เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางวิศวกรรมและคุณสมบัติดัชนีต่างๆ ของดินเหนียวอ่อนปากพนัง โดยการที่ใช้โปรแกรม SPSS version 15 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมการ ของผู้วิจัยท่านอื่นแล้วพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจไม่ใกล้เคียงกัน เมื่อได้ใช้ตัวแปรตัวเดียวกันกับผู้วิจัยท่านอื่นๆ ทำให้ต้องใช้ตัวแปรจำนวนมาก เช่น หน่วยน้ำหนักหรือความถ่วงจำเพาะเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ดีที่สุด



#### 4.สรุป

1.ชั้นดินเหนียวอ่อนปากพ่อง มีความหนาของชั้นดินประมาณ 18 เมตร และสามารถจำแนกดินได้เป็น High plasticity clay(CH) ตามมาตรฐานของ Unified Soil Classification System

2.ค่าคุณสมบัติชั้นดินเหนียวอ่อนปากพ่องเช่น Natural water content, Specific gravity, Unit weight, Liquid limit, Plastic limit และ Plasticity index แต่ละหลุมเจาะทั้ง 9 หลุม มีค่าที่ใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่า ลักษณะของดินบริเวณอำเภอปากพ่องนั้นเป็นดินชนิดเดียวกัน

3.ดินเหนียวปากพ่องมีค่าเฉลี่ยของ Natural water content เท่ากับ 72.1% ,ค่าเฉลี่ยของ Liquid limit เท่ากับ 64% ,ค่าเฉลี่ยของ Plasticity index เท่ากับ 35.3% ,ค่าเฉลี่ยของ Unit weight เท่ากับ 1.70 t/m.2 และค่าเฉลี่ยของ Specific gravity เท่ากับ 2.70 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของดินเหนียวจากแหล่งอื่นๆ (กรุงเทพมหานคร, สิงคโปร์ [7]) ทำให้ทราบได้ว่ามีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงมากกับดินเหนียวอ่อนจากแหล่งต่างๆ

4.ค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมดินเหนียวอ่อนปากพ่องเช่น  $C_c$ ,  $S_u$  และ มีความสัมพันธ์กับความลึก เมื่อความลึกมีค่าเพิ่มขึ้นค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

5.ดินเหนียวอ่อนปากพ่องมีลักษณะของดินเป็นดินเหนียวที่มีการยุบตัวตามปกติ (Normally consolidation clay) โดยมีค่า OCR เฉลี่ยเท่ากับ 1.064

6.ตัวแปรค่า Plastic limit, N-value, Unit weight, Liquid limit และ ความลึก เป็นตัวแปรของค่าคุณสมบัติชั้นดินที่ดีที่สุดที่ทำให้สมการความสัมพันธ์ของค่า Undrained Shear Strength from Field vane shear test, Undrained Shear Strength from USC และ Compression index มีค่าสัมพันธ์การตัดสินใจที่ดีที่สุด

#### 5. บรรณานุกรม

- [1] สุขสันต์ หอพิบูลสุข, ชู่งลาวัลย์ ราชัน. 2548. ปฐพีกลศาสตร์. สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล, กรุงเทพฯ, หน้า 147-148.
- [2] กัลยา วานิชย์บัญชา. 2550. การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, หน้า 352.
- [3] รสสุคนธ์ ชื่นวัฒนา. 2546. การศึกษาคูสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[4] กวีวงศ์ อุตสุวรรณ. 2530. การประเมินค่าทางสถิติของสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[5] Tonyagate, W. 1978. Geotechnical Properties of Bangkok Subsoils for Subsidence Analysis. M.Eng. Thesis, AIT.

[6] สุพัฒน์ แสงเวช. 2530. การทดสอบของชั้นดินอ่อนในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตบางเขน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[7] Lim, Thian Loke. 1982. Geotechnical properties of the Singapore marine clay. M.Eng. Thesis, AIT.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายอักรเดช แซ่จิว

รหัสประจำตัวนักศึกษา 4812087

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	2547

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

วิศวกรโยธา

บริษัท พันธุ์วิศวกรรม คอนซัลแตนท์ กรุ๊ป จำกัด

55 ถนนโชติวิทระยะกุด 4 ตำบลหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

โทรศัพท์ 0-74-429716-7 มือถือ 0-8946-42108 E-mail: akradet\_psu@hotmail.com

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อักรเดช แซ่จิว, ธนิต เฉลิมยานนท์ และ พิพัฒน์ ทองจิม (2551). คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง.การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, 14 - 16 พฤษภาคม 2551 โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช พัทยา จังหวัดชลบุรี