

# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราความเครียดต่อความแข็งแรง  
ของดินเหนียวอ่อนทะเล: กรณีศึกษาดินเหนียวปากพั้ง  
The influence analysis of strain rate on yield strength of soft  
marine clay: case study of Pakpanang Clay

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร.ธำมภ์ ชูบอุปการ  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดิน  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2556 ถึง 2557 รหัสโครงการ ENG 570068S

## สารบัญ

บทที่ 1	บทนำ.....	1
1.1	ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3	ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2	แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1	สภาพทางธรณีวิทยา.....	4
2.2	สภาพชั้นดินบริเวณชายฝั่ง.....	7
2.3	ทฤษฎีกำลังเฉือนของดิน (Shear strength theory).....	7
2.3.1	การตอบสนองของดินต่อแรงเฉือน (Response of soils to shearing forces).....	8
2.3.2	สภาพอิลาสติกในปฐพีกลศาสตร์ (elasticity in soil mechanics).....	10
2.3.3	การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) .....	11
2.4	คุณสมบัติการยุบตัว (Compressibility).....	16
2.4.1	ระยะเวลาและอัตราการอัดตัวของดิน (Consolidation rate).....	18
2.4.2	การยุบตัวระยะที่สอง (secondary compression).....	21
2.4.3	คืบและสมมติฐานการยุบตัว (Creep and consolidation hypothesis).....	22
2.5	พฤติกรรมความหนืด (Viscosity behavior) .....	22
2.6	ทฤษฎีสถานะวิกฤต (Critical state theory) .....	24
2.6.1	แนวคิดสถานะวิกฤต (Critical state concept) .....	24
2.6.2	วิถีความเค้นของดินสภาพอัดแน่นปกติ (Stress path of NC soil) .....	26
2.6.3	วิถีความเค้นของดินสภาพอัดแน่นกว่าปกติ (Stress path of OC soil).....	26
2.7	ทฤษฎีกระบวนการอัตรา (Rate Process Theory).....	28
2.8	ทฤษฎีไฮเปอร์พลาสติกซิตี.....	29
2.8.1	หลักเกณฑ์พื้นฐานของทฤษฎีไฮเปอร์พลาสติกซิตี Hously and Puzrin (2001).....	29
2.8.2	แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตรา .....	30
2.8.3	แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราที่ใช้หลายตัวแปรภายใน .....	32
2.8.4	แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีแบบขึ้นกับอัตราชนิดไม่เชิงเส้น .....	37

2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	38
2.9.1	คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง .....	38
2.9.2	Time-dependent behavior of undisturbed clay.....	38
2.9.3	Rate effect and cyclic loading of sensitive clays .....	40
2.9.4	Rate-Dependent Undrained Shear Behavior of Saturated Clay.....	41
2.9.5	Strain-rate-dependent stress-strain behavior of overconsolidated Hong Kong marine clays.....	41
2.9.6	Evaluation time-dependent behavior of soils .....	44
2.9.7	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียวโดยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงอัตรา ความเครียด.....	45
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย .....	47
3.1	การเก็บตัวอย่างดินและวิธีการเก็บตัวอย่างทดสอบ .....	48
3.2	การทดสอบหาสมบัติทางกายภาพ (Index Properties) .....	50
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ .....	50
3.3.1	เครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำ(Oedometer test) .....	50
3.3.2	เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน (Conventional triaxial apparatus).....	51
3.4	การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering properties).....	53
3.4.1	การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ .....	53
3.4.2	การเลือกอัตราความเครียด.....	55
3.4.3	การทดสอบแรงอัดสามแกน.....	55
3.5	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินด้วยแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี.....	61
3.5.1	การกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ.....	61
3.5.2	การสอบเทียบแบบจำลอง.....	64
3.5.3	คำนวณค่าตัวแปรตามที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์ความหนืด .....	64
บทที่ 4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา .....	65
4.1	คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของดินเหนียวปากพั้ง .....	65
4.2	คุณสมบัติทางวิศวกรรม .....	68
4.2.1	ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ.....	68

4.2.2	การเลือกอัตราความเครียด.....	74
4.2.3	ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ .....	76
4.3	การวิเคราะห์พฤติกรรมของดินเหนียวปากพั้งด้วยแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี .....	104
4.4	ค่าความคลาดเคลื่อนความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดของดินเหนียวปากพั้ง.....	112
4.5	ค่าดัชนีบ่งบอกความเหนียวของดินเหนียวปากพั้ง .....	112
บทที่ 5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	114
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	114
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	115
บรรณานุกรม	.....	116

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบมาตรฐาน (Standard triaxial compression test) .....	13
ตารางที่ 2.2	ค่า $c_r/c_c$ จำแนกตามชนิดของดิน .....	20
ตารางที่ 2.3	สมการพื้นฐานสำหรับทฤษฎีไฮเปอร์พลาสติกิกซิตี .....	30
ตารางที่ 2.4	เปรียบเทียบสมการของแบบจำลองสำหรับวัสดุขึ้นกับอัตราและวัสดุไม่ขึ้นกับอัตรา .....	31
ตารางที่ 2.5	สรุปสมการของแบบจำลองของวัสดุที่ขึ้นกับอัตรา .....	33
ตารางที่ 3.1	แสดงการทดสอบหาคคุณสมบัติทางกายภาพ .....	50
ตารางที่ 3.2	แสดงการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวปากพวง .....	58
ตารางที่ 3.3	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของเวลาที่เกิดการวิบัติ ( $k$ ) .....	60
ตารางที่ 4.1	คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวปากพวง .....	66
ตารางที่ 4.2	ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ .....	70
ตารางที่ 4.3	ค่าความเค้นเบี่ยงสูงสุดที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนเงื่อนไข ตัวอย่างในแต่ละค่า OCR .....	93
ตารางที่ 4.4	ค่าพารามิเตอร์ของดินเหนียวปากพวงที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 (OCR1) .....	105
ตารางที่ 4.5	ค่าพารามิเตอร์ของดินเหนียวปากพวงที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 2 (OCR2) .....	105
ตารางที่ 4.6	ค่าพารามิเตอร์ของดินเหนียวปากพวงที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 4 (OCR4) .....	106
ตารางที่ 4.7	ค่าพารามิเตอร์ของดินเหนียวปากพวงที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 8 (OCR8) .....	106
ตารางที่ 4.8	ค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุดของแบบจำลองและผลการทดสอบของดินเหนียว .....	109
ตารางที่ 4.9	ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปากพวง .....	109
ตารางที่ 4.10	ค่าความคลาดเคลื่อนความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดของดินเหนียวปากพวง .....	112
ตารางที่ 4.11	ค่าดัชนีความหนืดของดินเหนียวปากพวง .....	112
ตารางที่ 4.12	โมดูลัสเริ่มต้นของดินเหนียวปากพวง .....	113
ตารางที่ 4.13	พารามิเตอร์ด้านกำลังของดินเหนียวปากพวง .....	113

## สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 แสดงชายฝั่งทะเลทางภาคใต้เมื่อ 6000 ปีที่แล้วเทียบกับปัจจุบัน.....	5
รูปที่ 2.2 แผนที่แสดงลักษณะทางธรณีวิทยาลุ่มน้ำปากพนัง .....	6
รูปที่ 2.3 แสดงชั้นดินบริเวณชายฝั่งตะวันออก จังหวัดนครศรีธรรมราช .....	7
รูปที่ 2.4 กฎการวิบัติของ Mohr และ Coulomb .....	8
รูปที่ 2.5 ภาพ Radiograph แสดงแถบเงื่อนไขที่เกิดขึ้นในดินทรายละเอียดแน่น จุดสีขาวแสดงตำแหน่งตะกั่วที่ใช้ในการตามการเคลื่อนที่ภายใน ส่วนเส้นสีขาวแสดงแถบเงื่อนไข .....	9
รูปที่ 2.6 การตอบสนองของดินต่อแรงเฉือน (Response of soils to shearing forces).....	10
รูปที่ 2.7 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial apparatus).....	11
รูปที่ 2.8 แสดงการทดสอบแรงอัดสามแกนและแรงดิ่งสามแกน.....	12
รูปที่ 2.9 วงกลมมอร์จากการทดสอบแรงอัดสามแกน .....	14
รูปที่ 2.10 วงกลมมอร์จากการทดสอบแรงอัดสามแกน 3 ตัวอย่าง .....	15
รูปที่ 2.11 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวงกลมมอร์กับวิถีความเค้น .....	16
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างและความเค้นประสิทธิผลแนวดิ่งสำหรับดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติ (Normally consolidated clay) .....	19
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างและความเค้นประสิทธิผลแนวดิ่งสำหรับดินเหนียวสภาพอัดแน่นกว่าปกติ (Overconsolidated clay).....	20
รูปที่ 2.14 การประมาณค่าความเค้นสูงสุดในอดีต .....	21
รูปที่ 2.15 การยุบตัวระยะที่สอง (Secondary compression).....	22
รูปที่ 2.16 การไหลแบบนิวโตเนียนและการไหลแบบไมนิวโตเนียน .....	23
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	24
รูปที่ 2.18 เส้นอัดตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic consolidation line) บนระนาบ.....	25
รูปที่ 2.19 เส้นสถานะวิกฤต (Critical state line).....	26
รูปที่ 2.20 วิถีความเค้นไม่ระบายน้ำของดินเหนียวประเภทต่างๆ (Typical undrained stress path of clays) .....	27
รูปที่ 2.21 พื้นผิวครากของดินเหนียว (Yield surface of clays).....	27
รูปที่ 2.22 จำลองพลังงานกระตุ้นของโมเลกุลดินเมื่อมีแรงเฉือนมากกระทำ.....	28
รูปที่ 2.23 แสดงรูปแบบกลศาสตร์ของแบบจำลองความหนืดเชิงเส้น 1 มิติ .....	31
รูปที่ 2.24 แสดงกลศาสตร์ของแบบจำลองสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราด้วยตัวแปรภายในตัวเดียว .....	33
รูปที่ 2.25 แสดงกลศาสตร์ของแบบจำลองสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราที่ใช้หลายตัวแปรภายใน .....	35
รูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำโดยการปรับเปลี่ยนอัตราความเครียดในงานวิจัยของ Vaid และ Campanella (1977) .....	39

รูปที่ 2.27 แสดงผลกระทบของอัตราความเครียดต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำใน งานวิจัยของ Vaid และ Campanella (1977) .....	40
รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการบรรทัดฐานค่าความเค้นเบี่ยงเบนกับความเครียดในแนวแกน .....	42
รูปที่ 2.29 สัมพันธ์ระหว่างการบรรทัดฐานค่าแรงดันน้ำส่วนเกินความเครียดในแนวแกน .....	43
รูปที่ 2.30 การบรรทัดฐานค่าวิถีความเค้นของดินเหนียวชายทะเลฮ่องกง .....	44
รูปที่ 2.31 พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียว Saint – Jean-Vianny clay ในการ ทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ .....	45
รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินทราย .....	45
รูปที่ 2.33 ผลกระทบของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ ต่ออัตรา ความเครียด .....	46
รูปที่ 2.34 ผลกระทบของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว .....	46
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	47
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายทางอากาศพื้นที่อำเภopakพนัง .....	48
รูปที่ 3.3 แผนที่แสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน .....	49
รูปที่ 3.4 แสดงการเก็บตัวอย่างดินเหนียวpakพนัง .....	49
รูปที่ 3.5 เครื่องมือการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ .....	51
รูปที่ 3.6 เครื่องมือการทดสอบแรงอัดสามแกนอุปกรณ์บันทึกผลและอุปกรณ์วัดค่าต่าง ๆ .....	52
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการทดสอบอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติ .....	54
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบแรงอัดสามแกน .....	59
รูปที่ 4.1 การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดินจำนวน 3 ตัวอย่าง .....	66
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแผนภูมิพลาสติกซิตีกับแร่ดินเหนียว .....	67
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบหาค่าประกอบของแร่หลักของตัวอย่างดินเหนียวpakพนัง .....	68
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวpakพนังที่กำลังขยาย .....	69
รูปที่ 4.5 ลักษณะชั้นดิน (Boring log) อำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช .....	70
รูปที่ 4.6 เส้นโค้งการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินเหนียวpakพนังจำนวน 2 ตัวอย่าง .....	72
รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ จำนวน 2 ตัวอย่าง .....	73
รูปที่ 4.8 อัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ จำนวน 2 ตัวอย่าง .....	74
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบอัตราความเครียดที่ความเค้นประสิทธิผลใด ๆ ที่ได้จากทดสอบอัด ตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ .....	75
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนกับอัตราความเครียด .....	79
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่ากำลังรับแรงเฉือน เฉลี่ยกับค่าอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน .....	81

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้น ประสิทธิผลเฉลี่ยกับค่าอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน.....	84
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผล เฉลี่ยกับค่าอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน .....	87
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผล เฉลี่ยกับค่าอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน .....	90
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่อัตราความเครียดแตกต่างกัน.....	92
รูปที่ 4.16 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้น ประสิทธิผลก่อนเงื่อนไขตัวอย่างกับอัตราความเครียดที่OCR แตกต่างกัน.....	93
รูปที่ 4.17 ค่าความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับอัตราความเครียดที่ค่าการอัดแน่น เกินตัวที่แตกต่างกันของดินในบริเวณต่าง ๆ .....	96
รูปที่ 4.18 เส้นทางเดินของวิถีความเค้นของดินเหนียวที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน .....	99
รูปที่ 4.19 เส้นทางเดินของวิถีความเค้นของดินเหนียวที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน .....	102
รูปที่ 4.20 ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับค่าการอัดแน่นเกินตัวที่อัตราความเครียดแตกต่างกัน.....	103
รูปที่ 4.21 แรงดันน้ำส่วนเกินสูงสุดกับค่าการอัดแน่นเกินตัวที่อัตราความเครียดแตกต่างกัน.....	103
รูปที่ 4.22 พฤติกรรมของดินเหนียวปากพ้องที่อัตราความเครียดต่าง ๆ ที่ OCR1.....	107
รูปที่ 4.23 พฤติกรรมของดินเหนียวปากพ้องที่อัตราความเครียดต่าง ๆ ที่ OCR2.....	107
รูปที่ 4.24 พฤติกรรมของดินเหนียวปากพ้องที่อัตราความเครียดต่าง ๆ ที่ OCR4.....	108
รูปที่ 4.25 พฤติกรรมของดินเหนียวปากพ้องที่อัตราความเครียดต่าง ๆ ที่ OCR8.....	108
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและอัตราความเครียด ของดินเหนียวปากพ้องที่ OCR1 .....	110
รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและอัตราความเครียด ของดินเหนียวปากพ้องที่ OCR2 .....	110
รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและอัตราความเครียด ของดินเหนียวปากพ้องที่ OCR4 .....	111
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและอัตราความเครียด ของดินเหนียวปากพ้องที่ OCR8 .....	111



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ขอบพระคุณ สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนสนับสนุนที่ใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณ รศ.ดร.ชนิต เฉลิมยานนท์ และ ผศ.ชนากร ชมพूर्ตตัน ที่ให้แนวทางในการทำวิจัย ขอขอบคุณทีมงาน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือการวิจัย ครั้งนี้

ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ผศ.ดร.ชนันท์ ชูบุญอุปการ

**การวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราความเครียดต่อความแข็งแรงของดินเหนียว  
อ่อนทะเล: กรณีศึกษาดินเหนียวปากพั่ง**

**The influence analysis of strain rate on yield strength of soft marine clay:  
case study of Pakpanang Clay**

ธันท์ ชูอุปการ  
**Tanan Chubuppakarn**

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์จ.สงขลา 90110

**บทคัดย่อ**

การศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ของการทรุดตัวของดินเหนียว เช่นพฤติกรรมการทรุดตัวขั้นที่สองหรือพฤติกรรมการคืบ (Creep behavior) ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเป็นพฤติกรรมที่แปรผันตามเวลา (Time dependent) หรือแปรผันตามอัตรา (Rate dependent) โดยเมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำที่อัตราความเครียดที่แตกต่างกัน จะทำให้ดินเหนียวเกิดการตอบสนองที่ต่างกัน ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวมีพฤติกรรมแบบขึ้นกับอัตราความเครียด ตัวอย่างเช่นการศึกษาของ Vaid และ Campanella (1977) Jun และ Jian (2000) นอกจากนี้มีงานวิจัยในประเทศ เช่น วีระ และสุเชษฐ์ (2550) เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดและค่าอัตราส่วนการอัดแน่นเกินตัว (OCR) ต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ รวมทั้งแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้น เพื่ออธิบายพฤติกรรมค่าความไม่เป็นเชิงเส้น (Non - linear) ของดินเหนียวปากพั่ง โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายที่ค่าอัตราความเครียดคงที่ 4 อัตราคือ 0.02 0.075 1.0 และ 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที ใช้ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว 4 ค่า คือ 1 2 4 และ 8 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบพบว่าอัตราความเครียดมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินเหนียว โดยที่อัตราความเครียดเท่ากับ 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที มีค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงที่สุด และที่อัตราความเครียดเท่ากับ 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที มีค่าความเค้นเบี่ยงเบนต่ำที่สุด เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าความแตกต่างจะได้ค่าประมาณ 68.48 เปอร์เซ็นต์ 72.42 เปอร์เซ็นต์ 55.16 เปอร์เซ็นต์ และ 60.20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว เท่ากับ 1 2 4 และ 8 ตามลำดับ จากนั้นเมื่อนำผลการทดสอบไปหาผลกระทบจากอัตราความเครียดและค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่อค่าแรงดันน้ำส่วนเกินพบว่า มีผลต่อแรงดันน้ำส่วนเกินเช่นเดียวกัน โดยที่อัตราความเครียดช้าและอัตราการอัดแน่นเกินตัวน้อย จะมีผลต่อแรงดันน้ำส่วนเกินมากกว่าอัตราความเครียดเร็วและอัตราการอัดแน่นเกินตัวสูง ทั้งนี้ที่ค่าอัตราการเฉือนที่เร็วที่สุด (8.5 เปอร์เซ็นต์ ต่อ นาที) แรงดันน้ำส่วนเกินจะไม่มีผลกระทบ ถึงแม้ว่าจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว

จากผลการทดสอบพบว่าอัตราความเครียดมีผลต่อเส้นทางเดินของวิถีความเค้น (Stress path) ในแต่ละค่าของอัตราการอัดแน่นเกินตัว ที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว เท่ากับ 1 และ 2 เส้นทางเดินของวิถีความเค้นจะไม่ซ้อนทับกันซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนและเส้นทางเดินของวิถีความเค้นมีแนวโน้มเคลื่อนที่จากขวาไปซ้ายเข้าหาเส้นสถานะวิกฤต (Critical state line, CSL) ที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว เท่ากับ 4 และ 8 เส้นทางเดินของวิถีความเค้นมีความคล้ายคลึงกันและแทบมองไม่เห็นความแตกต่างมากนักและเส้นทางเดินของวิถีความเค้นมีแนวโน้มเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาเข้าหาเส้นสถานะวิกฤต เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ค่าวิถีความเค้นยังสามารถนำไปหาความชันจากเส้นสถานะวิกฤต (M) โดยมีค่าดังต่อไปนี้ M เท่ากับ 0.60 0.67 และ 0.71 และ 0.5 จากนั้นนำค่า M ที่ได้ไปหาค่ามุมเสียดทานภายใน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15.83 17.54 18.51 และ 13.34 องศา สำหรับอัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่ 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่ 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่ และ 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่ ตามลำดับ

ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราความเครียดที่ใช้ในการทดสอบเร็วขึ้นในทุกๆ ค่าของอัตราการอัดแน่นเกินตัว โดยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะแปรผันโดยตรงกับลอกกาลิทึมของอัตราความเครียดในช่วงอัตราความเครียดร้อยละ 0.02 – 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่ แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวปากพรมมีคุณสมบัติของการตอบสนองด้านอัตราความเครียดแบบไม่เชิงเส้น เช่นเดียวกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั้งนี้ลักษณะของอัตราความไม่เชิงเส้นในทุกๆ ค่าของอัตราการอัดแน่นเกินตัว มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันอีกด้วย

## Abstract

Secondary consolidation or creep behavior on clay is recognized as time or rate dependent behavior, which external forces can be made different responds. This behavior has been studied by several researchers (e.g., Vaid and Campanella, 1977; Jun and Jian, 2000; Saksupan and Likitlersuang, 2007 etc.). In this research, PakPanung clay was therefore used to study the influence of strain rate and *over - consolidation ratio* (OCR) on undrained shear strength of clay and excess pore pressure for explaining non - linear behaviors of PakPanung clay. Triaxial tests, consolidated undrained type, were performed by varying strain rates (0.02, 0.075, 1.0, and 8.5% per minute) under different over - consolidation ratio, respectively in doubly increasing from OCR 1 to OCR 8.

The results of this study revealed that the strain rate have effected to increment of undrained shear strength of PakPanung clay. The results significantly indicated that the deviator stresses have extended to the maximum value under the highest strain rate (8.5% per minute) while the minimum deviator stresses have resulted from the lowest strain rate (0.02% per minute). These experimental results revealed that changing of OCR had the effect on the deviator stresses which the difference between maximum and minimum values fell in range 68.48%, 72.42%, 55.16% and 60.20%, respectively for OCR 1 to 8.

On the other hand, the strain rate and OCR also had the effect on excess pore pressure as well. Both lower strain rate and OCR had more effect on the deviator stresses than higher strain rate and OCR. Even though the experimental results almost had same tendency, but the influence of the highest strain rate on the excess pore pressure had no effect although increasing OCR still took place.

In case of stress path behavior, the study revealed that the strain rate had the effect on stress path in each OCR. The stress path of both OCR 1 and 2 obviously separated and trended to the critical state line. Another one, the stress paths had a similar in both influence of both OCR 4 and 8 though they still trended to the critical state line as well. However, the stress paths can be determined a slope of the critical state line, and can be turned back to calculate an internal friction angle of soil. The results shown that the slopes of the critical state line which were: 0.60, 0.67, 0.71, and 0.5 corresponding with: 0.02, 0.075, 1.0, and 8.5% per minute of the strain rate, respectively. These slope of critical state line related with the internal friction angle which were: 15.8, 17.54, 18.51, and 13.34 degree, respectively.

In summary, the deviator stress can be reached to the maximum value when the strain rate has increasingly changed for any OCR range. This reason can be caused to the undrained shear strength relating with the strain rate as the logarithmic relationship in range 0.02 - 8.5% per minute. The experimental results obviously indicated that PakPanung clay has responded as the rate dependent behavior, similar to Bangkok clay.

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

จากพฤติกรรมการเคลื่อนตัว (Deformations) ของวัสดุสามารถแบ่งออกเป็นการเคลื่อนตัวแบบอีลาสติก แบบพลาสติกและแบบหนืด (Viscous deformations) ซึ่งการเคลื่อนตัวแบบหนืดจะเป็นการเคลื่อนตัวที่แปรผันตามเวลา กล่าวคือเมื่อวัสดุได้รับหน่วยแรงวัสดุจะไม่เกิดการเคลื่อนตัวทั้งหมดโดยทันทีทันใดหลังจากกระทำหน่วยแรง แต่การเคลื่อนตัวของวัสดุจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ เป็นผลเนื่องจากคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุเรียกว่าความหนืด เช่นเดียวกับการเคลื่อนตัวของดินเหนียวเมื่อได้รับหน่วยแรง จะพบว่า การเคลื่อนตัวจะแปรผันไปตามเวลาเช่นกัน ดังจะพบได้จากพฤติกรรมความคืบ (Creep) และการคลายตัวของความเครียด (Stress relaxation) [1] ซึ่งเป็นผลจากคุณสมบัติด้านความหนืดของดินเหนียว (Viscous property) ซึ่งคุณสมบัติด้านความหนืดของดินเหนียวจะพิจารณาออกมาด้วยค่าของสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียว ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีความเกี่ยวเนื่องในด้านการทรุดตัวของดินและด้านพลศาสตร์ของดิน (Dynamic property) ซึ่งปัจจุบันการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดในดินเหนียวยังไม่มีมาตรฐานอย่างชัดเจน โดยทั่วไปการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียวอาจใช้มาตรฐานการทดสอบของวัสดุชนิดอื่น เช่น แอสฟัลต์มาเป็นพื้นฐานในการทดสอบซึ่งกระทำได้ในเฉพาะดินเหนียวอ่อนมาก ๆ หรือจะต้องทำให้ดินอยู่ในสภาพเหลวเสียก่อนจึงอาจทำให้คุณสมบัติบางอย่างเปลี่ยนแปลงไป

จากการศึกษาในอดีตเกี่ยวกับผลกระทบของอัตราความเครียด (Strain rate) ต่อพฤติกรรมการรับแรงของดินพบว่าอัตราความเครียดส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวอย่างมีนัยสำคัญ ดังเช่น งานวิจัยของ Vaid และ Campanella (1977) [2] ได้ทำการศึกษาดินเหนียวแฮนนี่ (Haney clay) ซึ่งเป็นดินเหนียวตกตะกอนที่ค่อนข้างไวตัวสูง (High sensitive) โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับอัตราความเครียดเนื่องผลการวิจัยพบว่าการปรับเปลี่ยนอัตราความเครียดจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อพฤติกรรมการรับแรง เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (Peak deviator stress) ที่ทำการบรรทัดฐาน (Normalized) ด้วยความเค้นเฉือนประสิทธิผล จะมีค่าแปรผันตรงตามระดับอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้น ส่วนการศึกษาในประเทศวีระและสุเชษฐ์ (2550) [3] ทำการศึกษาผลของอัตราความเครียดที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Consolidated Undrained test) และใช้แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีในการทำนายผลของความหนืด (Viscosity) ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองให้ผลในแนวทางเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ

ดินเหนียวปากพั้งเกิดจากการตกตะกอนและการทับถมของดินเหนียวที่ตกตะกอนในน้ำทะเล (Marine deposits) ซึ่งดินเหนียวดังกล่าวเกิดจากการพัดพามาสะสมตัวบริเวณชายทะเล มีความหนาโดยประมาณ 15 – 20 เมตร จากการทดสอบเพื่อนำไปจำแนกทำให้ทราบว่าดินเหนียวปากพั้งมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ที่มีลักษณะดินเหนียวพลาสติกซิตีสูง (High plasticity clay, CH)

อัครเดช (2552) [4] ทำให้ดินเหนียวมีการทรุดตัวสูง จากการศึกษาพฤติกรรมพื้นฐานของดินเหนียวปากพนังเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับดินกรุงเทพฯ พบว่ามีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน คือเป็นดินเหนียวที่มีความไวตัวสูง (High sensitivity) โดยดินประเภทนี้จะมีแรงระหว่างอนุภาคสูง ส่งผลให้มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงแต่เมื่อโครงสร้างดินถูกทำลายความสามารถในการรับแรงของดินเหนียวจะมีค่าลดลง ซึ่งจากการสำรวจพบว่าสภาพสิ่งก่อสร้างบริเวณ อ.ปากพนัง มักพบปัญหาการทรุดของโครงสร้างไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างอาคารหรือโครงสร้างทาง ส่งผลให้อาจเกิดความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินของคนในพื้นที่บริเวณดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงทำให้เกิดงานวิจัยหลาย ๆ งานที่ทำการศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวปากพนังเพื่อเป็นข้อมูลในการป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างอาคาร รวมทั้งสาธารณูปโภคต่างๆ ในบริเวณ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในประเด็นการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียวปากพนังโดยการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Compression test) ซึ่งแปรผันค่าอัตราความเครียดตามแนวแกน (Axial strain rate) ที่อัตราต่างๆ และค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidation ratio, OCR) แล้วทำการศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดที่มีต่อพฤติกรรมด้านกำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) พฤติกรรมของแรงดันน้ำส่วนเกิน (Access pore pressure) และการวิเคราะห์ประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดด้วยแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีแบบขึ้นกับอัตราที่นำเสนอโดย Puzrin, A.M. และ Houlsby, G.T. [5] ในปี พ.ศ. 2544 ที่ได้มาจากการวิจัยของชนกร และสุเชษฐ์ (2551) [6] ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์และประมวลผลทดสอบด้วยแบบจำลองสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราที่ใช้หลายตัวแปรภายใน (Rate-dependent plasticity with multiple internal variables) เพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียวปากพนังไปใช้ในการประเมินการก่อสร้างในบริเวณ อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินเหนียวปากพนังที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่างๆเมื่ออัตราความเครียดเปลี่ยนไป
2. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของของพฤติกรรมแรงดันน้ำส่วนเกิน (Pore - water pressure) ในมวลดินของดินเหนียวปากพนังที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่างๆเมื่ออัตราความเครียดเปลี่ยนไป
3. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเส้นทางเดินของวิถีความเค้น (Stress path) เมื่ออัตราความเครียดเปลี่ยนไป
4. เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียวปากพนัง ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนโดยใช้แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีแบบขึ้นกับอัตรา

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. รวบรวมงานวิจัยและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมความหนืดของดินเหนียวอ่อน

2. รวบรวมงานวิจัยและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดินเหนียวปากพนัง และกำหนดพื้นที่เก็บตัวอย่างชนิดไม่ถูกรบกวน
3. ทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างดินเหนียวปากพนัง
4. ทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ และหาสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ เพื่อใช้ในการกำหนดอัตราความเครียดที่เหมาะสมในการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ
5. ทำการทดสอบแรงอัดแบบสามแกน แบบไม่ระบายน้ำ โดยกำหนดให้แรงดันในการอัดตัวคายน้ำเท่ากันทั้งสามแกน (isotropic consolidation) ซึ่งมีแรงดันเซลล์ประมาณ 200 kPa แล้วทำการลดแรงดันเซลล์เพื่อให้ได้ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว (over consolidation ratio, OCR) เท่ากับ 1 2 4 และ 8 แล้วทำการทดสอบแรงเฉือนด้วยอัตราความเครียดคงที่ (Constant strain rate) ที่ระดับต่าง ๆ
6. ทำการเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ โดยเก็บข้อมูลความเค้นความเครียด และแรงดันน้ำส่วนเกิน ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลาที่ดินเกิดการพิบัติ (ประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ของอัตราความเครียดตามแนวแกน) เพื่อนำมาวิเคราะห์ผล
7. ทำการประมวลผลของดินเหนียวปากพนัง โดยใช้แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีแบบขึ้นกับอัตรา

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายพฤติกรรมการรับแรงเฉือน ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว รวมทั้งแรงดันน้ำส่วนเกิน ของดินเหนียวปากพนัง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน
2. เป็นการพัฒนาความรู้ ความเข้าใจพฤติกรรมแบบขึ้นกับอัตราความเครียดของดินเหนียว
3. สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดและพฤติกรรมความไม่เชิงเส้นของดินเหนียวอ่อนด้วยแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีแบบขึ้นกับอัตรา
4. ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียวโดยประมาณ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการอธิบายพฤติกรรมแบบขึ้นกับอัตราความเครียดและนำไปใช้ในงานด้านพลศาสตร์ของดินได้
5. เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมหรือเพื่อพัฒนาเป็นงานวิจัยอื่นๆ ต่อไป



## บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

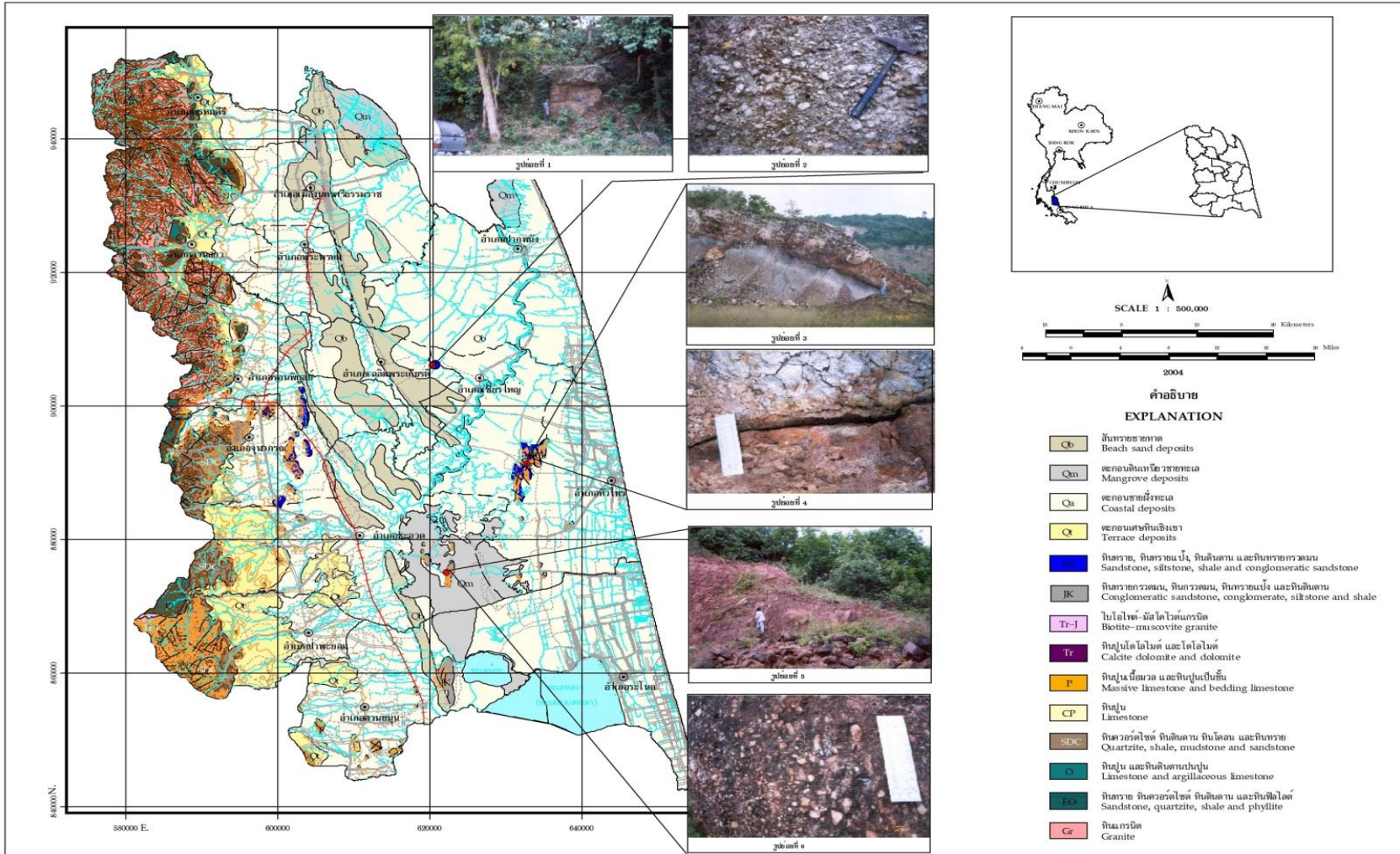
เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อดินเหนียวเมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำจะไม่เกิดการเคลื่อนตัวทั้งหมดโดยทันทีทันใดหลังจากกระทำหน่วยแรง แต่การเคลื่อนตัวของดินเหนียวจะดำเนินต่อเนื่องไปอย่างช้า ๆ ที่เป็นเช่นนี้เพราะคุณสมบัติด้านความหนืดของดินเหนียว และในทางกลับกันเมื่อควบคุมการเคลื่อนตัวของดินเหนียวในอัตราการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกัน แรงต้านทานที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ประวัติการรับน้ำหนักและระดับอัตราการเคลื่อนตัวที่ควบคุมไว้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียด (Rate dependent) ต่อพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียว ปากพหนังที่มีค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่างๆกัน โดยการศึกษาในครั้งนี้ ประกอบไปด้วย สภาพทางธรณีวิทยา สภาพชั้นดินบริเวณชายฝั่ง ทฤษฎีกำลังเฉือนของดิน คุณสมบัติการยุบตัว พฤติกรรมไม่เชิงเส้น และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สภาพทางธรณีวิทยา

ภาคใต้มีลักษณะแหลมยื่นออกไปในทะเล ด้านตะวันออกติดกับอ่าวไทย ด้านตะวันตกติดทะเลอันดามัน การเปลี่ยนแปลงทางธรณีของชายฝั่งทางภาคใต้เริ่มในช่วงระยะเวลาประมาณ 10,000 ปีที่แล้ว โดยคาบสมุทรทางใต้ได้มีการตัวแยกตัวเอียงไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ทำให้ชายฝั่งทะเลด้านทิศตะวันออกยกตัวขึ้น และชายฝั่งด้านตะวันตกจมลง ประกอบกับการลดลงของระดับน้ำทะเลฝั่งทะเลตะวันออกที่เคยจมอยู่ใต้น้ำถูกยกขึ้นสูงกว่าระดับน้ำทะเล เกิดเป็นที่ราบกว้างชายฝั่งที่มีระดับต่ำกว่าที่ราบเดิม และเกิดเป็นลักษณะที่ลาดริมฝั่งทะเล (Marine terrace) ขึ้นใหม่ ซึ่งแนวชายฝั่งทะเลบริเวณนี้จะมีลักษณะค่อนข้างราบเรียบ นอกจากนี้การยกตัวขึ้นของแผ่นดินทำให้แม่น้ำมีการปรับการไหล และการกัดเซาะ โดยลำน้ำจะกัดเซาะบริเวณกลางและปลายน้ำให้ลึกลงไป ทำให้มีลักษณะที่ลาดริมแม่น้ำ (River terrace) ใหม่เกิดขึ้น สภาพภูมิประเทศในบริเวณนี้จึงมีการกัดเซาะในลักษณะรูปตัวยู (U - shape) จากรูปที่ 2.1 แสดงเปรียบเทียบบริเวณชายฝั่งทะเลในอดีตและปัจจุบันในบริเวณภาคใต้ ทำให้เห็นตำแหน่งตัวอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช อย่างชัดเจนซึ่งตั้งอยู่ตามแนวสันทรายเก่าและอยู่ห่างจากสันทรายริมทะเลปัจจุบันประมาณ 20 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังมีร่องรอยของเกิดแอ่งน้ำหลังสันทรายเก่า (Lagoon) ทำให้เห็นเป็นแนวยาวในบริเวณด้านทิศตะวันตกของตัวเมือง [7] สภาพธรณีวิทยาของพื้นที่ อ.ปากพหนัง จ.นครศรีธรรมราช ประกอบด้วยหมวดหินยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) คือประกอบด้วยชั้นของกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ซึ่งเกิดจากการพัดพามาสะสมของทางน้ำบริเวณที่ราบเชิงเขาและที่ราบลุ่มแม่น้ำ รวมทั้งตะกอนที่เกิดจากการพัดพามาสะสมโดยน้ำทะเล (Marine deposit) นอกจากนี้บางบริเวณยังอาจเกิดจากการสะสมตัวของตะกอนที่เกิดจากการผุพังของหินโดยขบวนการทางกายภาพและเคมี (Physical and chemical weathering) ทำให้เกิดการสะสมตัวอยู่กับที่ โดยรูปที่ 2.2 แสดงแผนที่ลักษณะทางธรณีวิทยาของที่ราบลุ่มแม่น้ำปากพหนัง



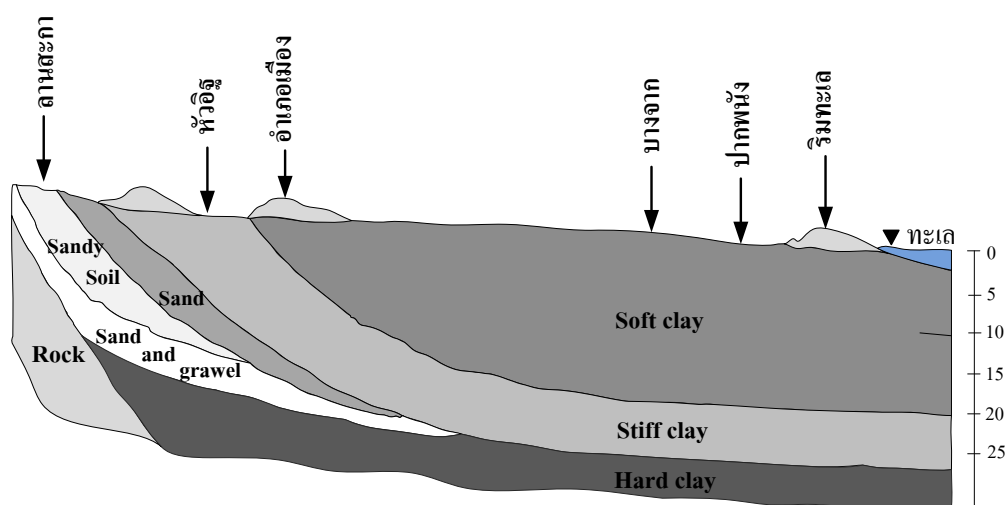
รูปที่ 2.1 แสดงชายฝั่งทะเลทางภาคใต้เมื่อ 6000 ปีที่แล้วเทียบกับปัจจุบัน [7]



รูปที่ 2.2 แผนที่แสดงลักษณะทางธรณีวิทยาส่วนน้ำปากพอง [8]

## 2.2 สภาพชั้นดินบริเวณชายฝั่ง

บริเวณที่ราบชายฝั่งด้านตะวันออกตั้งแต่จังหวัดสุราษฎร์ธานีลงไปจนถึงจังหวัดนราธิวาส ชั้นดินบริเวณชายฝั่งส่วนใหญ่จะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน ในบริเวณที่เคยเป็นชายหาดเก่าก็จะมีชั้นทรายทับถมอยู่ข้างบนในบางบริเวณเช่นที่อำเภอเมืองสงขลาและอำเภอเมืองนราธิวาส ชั้นทรายอาจหนาถึง 12 เมตร หลังชั้นทรายจะมีร่องน้ำซึ่งเป็นสันทรายเก่าขนานกับแนวชายฝั่ง ดินผิวบนในบริเวณนี้จะเป็นดินอินทรีย์ และในพื้นที่จังหวัดนราธิวาสได้แปรสภาพเป็นดินพรุ (Peat) ปกคลุมผิวบนอยู่หนา 3.0 - 4.0 เมตร ล่างลงไปเป็นดินเหนียวชายฝั่ง (Marine clay)



รูปที่ 2.3 แสดงชั้นดินบริเวณชายฝั่งตะวันออก จังหวัดนครศรีธรรมราช [7]

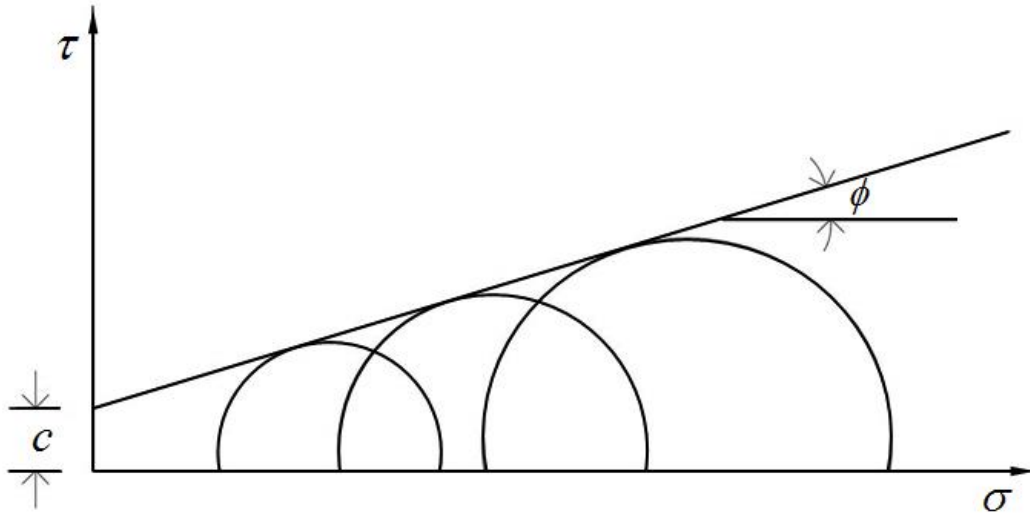
ชั้นดินในบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช จะมีชั้นทรายและทรายปนดินสลับอยู่เบื้องล่าง ชั้นดินเหล่านี้เกิดจากการสะสมของตะกอนแม่น้ำก่อนที่ชายฝั่งจะถอยร่นไปการก่อตัวของชายหาดใหม่ เกิดจากการก่อตัวเป็นแหลมยื่นออกไปปิดชายฝั่งเดิม ซึ่งรวมถึงทะเลสาบสงขลาด้วย ดังนั้นแนวชายฝั่งใหม่จะไม่มีตะกอนแม่น้ำทับถมอยู่ข้างล่าง ชั้นดินลักษณะนี้เกิดขึ้นตลอดแนวชายฝั่งจากอำเภอปากพ่วงถึงอำเภอสิงหนคร ยกเว้นบริเวณปากทะเลสาบสงขลาซึ่งมีตะกอนของแม่น้ำเข้ามาทับถมอยู่ด้วย โดยสภาพชั้นดินบริเวณชายฝั่งตะวันออก จังหวัดนครศรีธรรมราชแสดงในรูปที่ 2.3

## 2.3 ทฤษฎีกำลังเฉือนของดิน (Shear strength theory)

แรงกระทำมวลดินในธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ แรงดันอันเกิดจากน้ำหนักของดินเองโดยรอบซึ่งเรียกว่า Geostatic Stress และแรงกระทำภายนอกอันเป็นสาเหตุให้มวลดินรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นจนเกิดการพิบัติ ดังนั้นกำลังรับแรงเฉือนของดิน (shear strength of soil) หมายถึงกำลังต้านทานต่อการเฉือนสูงสุดที่ดินจะสามารถรับได้โดยไม่วิบัติหรือพังทลาย (failure) โดยการวิบัติของมวลดินมักมีพฤติกรรมไปตามหรือใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่คาดคะเนโดยกฎการวิบัติที่เสนอโดย Mohr และ Coulomb ซึ่งกฎของ Mohr และ Coulomb กำหนดไว้ว่า มวลดินจะถึงการวิบัติเมื่อวงกลมของมอร์ที่ให้

แทนสภาพของหน่วยแรงในมวลดินสัมพันธ์กับเส้นขอบเขตการวิบัติ (Failure Envelope) ของ Mohr และ Coulomb ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะได้สมการว่า

$$\text{ในรูปของหน่วยแรงรวม } \tau = \sigma \tan \phi + c$$



รูปที่ 2.4 กฎการวิบัติของ Mohr และ Coulomb

หลักการของกำลังเฉือนของดินเป็นหลักสำคัญที่ต้องศึกษา เพื่อใช้ในการหาความสามารถของดินต่อการต้านทานน้ำหนักที่มากกระทำในรูปแบบต่าง ๆ และเป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบทางด้านวิศวกรรมปฐพี เช่นการออกแบบฐานราก (Foundation design) การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาด (Slope stability) การออกแบบโครงสร้างรับแรงด้านข้าง (Lateral earth pressure) เป็นต้น

### 2.3.1 การตอบสนองของดินต่อแรงเฉือน (Response of soils to shearing forces)

การตอบสนองของดิน หมายถึง พฤติกรรมการต้านทานต่อแรงเฉือนภายนอกที่กระทำต่อมวลดินทั้งในแง่แรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะกล่าวถึงพฤติกรรมของดิน 2 ประเภทคือ

- ดินประเภทไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion less soil) หมายถึงดินที่มีแรงยึดเกาะภายในระหว่างอนุภาคมีความอ่อนแอมากเมื่อเทียบกับแรงเชิงกลที่กระทำระหว่างอนุภาคดินส่วนมาก และดินกลุ่มนี้มักจะเป็นดินที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ตัวอย่างของดินประเภทนี้เช่นทราย (S) กรวด (G) เป็นต้น
- ดินประเภทมีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive soil) หมายถึงดินที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคแข็งแรงมาก โดยเป็นผลจากพันธะทางเคมี เช่น ทรายแป้ง (M) ดินเหนียว (C) เป็นต้น

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงเฉือนอย่างง่าย (Simple shear) พบว่าการเสียรูปของดินอาจจะเกิดได้ 2 แบบ คือ แบบยุบตัว (Compression) และการขยายตัว (Expansion) ซึ่งเรียกรูปแบบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินดังกล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงแบบที่ I และ การเปลี่ยนแปลงแบบที่ II โดยดินที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อรับแรงกระทำจะมีลักษณะเด่นบางประการมีดังนี้

การเปลี่ยนแปลงแบบที่ I เป็นการเปลี่ยนแปลงของ พวกดินทรายหลวม (Loose sand) หรือดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติ (Normally consolidated, NC clay) ถึงสภาพอัดแน่นกว่าปกติเล็กน้อย (Lightly overconsolidated, LOC clay)  $OCR \leq 2$

- ความเค้นเฉือนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีของพฤติกรรมที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยความเครียด (Strain hardening) โดยความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกือบมีค่าคงที่ ซึ่งอาจจะถือว่าเข้าสู่สถานะวิกฤตที่เรียกว่า ความเค้นสถานะวิกฤต (Critical state shear stress,  $\tau_{cs}$ )
- การอัดตัวจะทำให้ดินมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเข้าใกล้สภาพที่อัตราส่วนช่องว่างคงตัวหรือที่เรียกว่า เข้าสู่อัตราส่วนโพรงวิกฤต (Critical void ratio,  $e_{cs}$ )

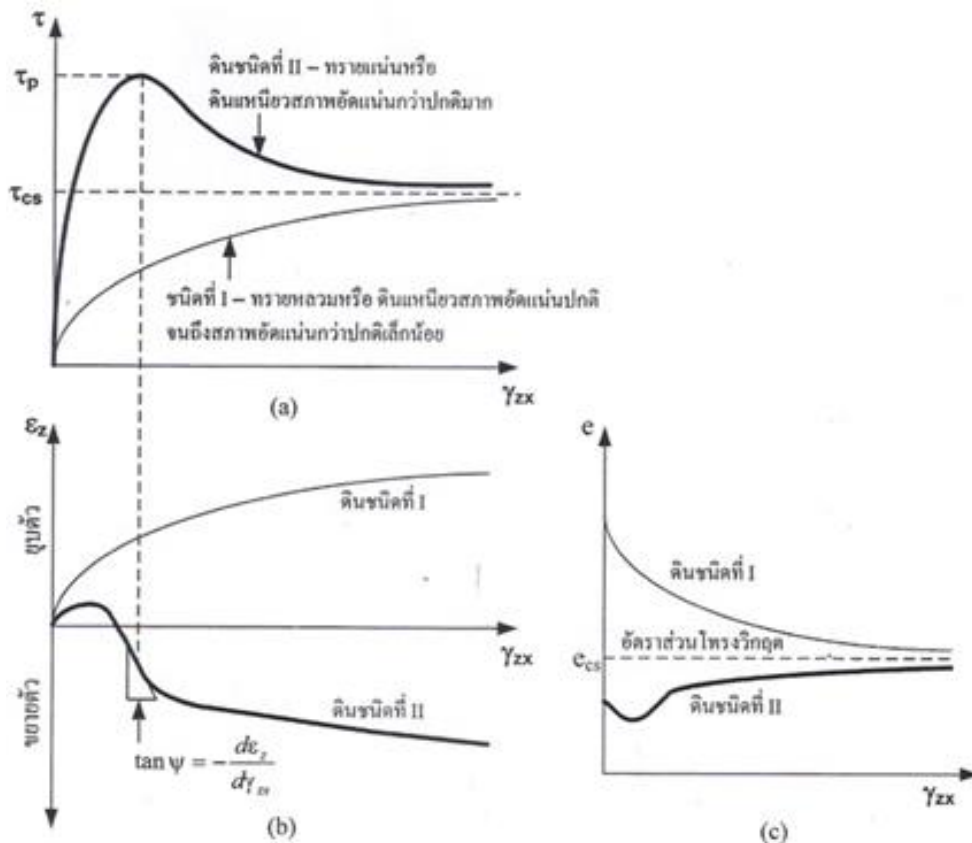
การเปลี่ยนแปลงแบบที่ II เป็นการเปลี่ยนแปลงของ พวกดินทรายแน่น (Dense sand) และดินเหนียวสภาพอัดแน่นกว่าปกติ (Heavily overconsolidated, HOC clay) หรือมีค่า  $OCR > 2$

- ความเค้นเฉือนจะค่อยๆ เพิ่มอย่างรวดเร็วไปจนกระทั่งถึงจุดสูงสุด (Peak shear stress,  $\tau_p$ ) ณ ตำแหน่งที่ความเครียดเฉือนมีค่าต่ำกว่า (เมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงแบบที่ I) และจากนั้นความเค้นเฉือนจะลดลงแบบพฤติกรรมที่อ่อนตัวด้วยความเครียด (Strain softening) จนเข้าใกล้ถึงความเค้นเฉือนวิกฤต  $\tau_{cs}$  โดยที่การตอบสนองแบบนี้ โดยทั่วไปแล้วเกิดจากการวิบัติเฉพาะที่ (localization) หรืออาจจะเรียกว่าแถบเฉือน (Shear bands) ดังแสดงในรูปที่ 2.5
- เกิดการอัดตัวในช่วงแรกซึ่งเป็นผลจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคดิน แต่ต่อมากจะขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็วและส่งผลให้ดินเริ่มหลวมขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่อัตราส่วนโพรงวิกฤต  $e_{cs}$  เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงแบบที่ I



รูปที่ 2.5 ภาพ Radiograph แสดงแถบเฉือนที่เกิดขึ้นในดินทรายละเอียดแน่น จุดสีขาวแสดงตำแหน่งตะกั่วที่ใช้ในการตามการเคลื่อนที่ภายใน ส่วนเส้นสีขาวแสดงแถบเฉือน [9]

พฤติกรรม การตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 แบบต่อแรงเฉือนอาจจะสามารถพิจารณา รูปที่ 2.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่สำคัญของดินในสภาวะที่ความเค้นประสิทธิผลตั้งฉาก (Normal effective stress) มีค่าคงตัวและมีการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนในอัตราคงที่ รูปที่ 2.6(a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) กับความเครียดเฉือน ( $\gamma_{zx}$ ) รูปที่ 2.6(b) แสดงความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain,  $\epsilon_z$ ) กับความเครียดเฉือน และในรูปที่ 2.6(c) แสดงอัตราส่วนโพรง (Void ratio,  $e$ ) เทียบกับความเครียดเฉือน



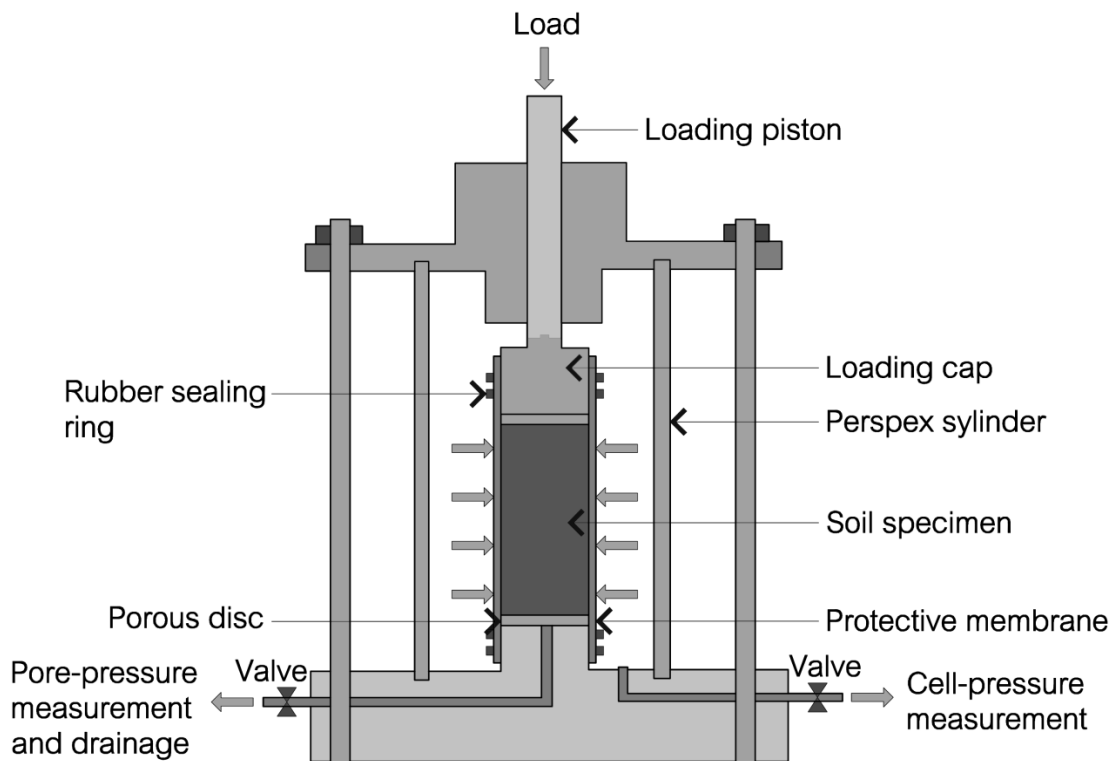
รูปที่ 2.6 การตอบสนองของดินต่อแรงเฉือน (Response of soils to shearing forces) [10]

### 2.3.2 สภาพอิลาสติกในปฐพีกลศาสตร์ (elasticity in soil mechanics)

พฤติกรรมอิลาสติกคือ พฤติกรรมคืนสภาพสมบูรณ์แบบ (recoverable) ของดินภายหลังการลดแรง (unload) โดยความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดิน คือสมบัติอิลาสติก (elastic property) หรือ อิลาสติกโมดูลัส (elastic modulus) อย่างไรก็ตามค่าสตีเฟนหรือโมดูลัสของดินจะขึ้นกับหลายปัจจัย เช่นระดับความเค้น (stress level) อัตราส่วนโพรง ( $e$ ) ประวัติความเค้น (stress history) หรืออัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำ ( $OCR$ ) เป็นต้น โดยมีผลงานวิจัยหลายชิ้นได้นำเสนอผลการทดสอบแบบต่างๆ เพื่อหาค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (maximum shear modulus,  $G_{max}$ ) หรือค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น (initial shear modulus,  $G_0$ )

### 2.3.3 การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial test)

การทดสอบแรงอัดสามแกน เป็นวิธีทดสอบเพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่นิยมมากในห้องปฏิบัติการ เพราะสามารถปรับสภาพของดินให้ใกล้เคียงกับดินในธรรมชาติเหมาะสำหรับการทดสอบดินเหนียว โดยมีวิธีการกึ่งดินให้เป็นรูปทรงกระบอก โดยให้มีอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เท่า แล้วหุ้มด้วยปลอกยางเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและกั้นน้ำในกล่องทรงกระบอกซึมเข้าไปในตัวอย่างขณะทำการทดสอบ ที่ปลายทั้ง 2 ข้างจะมีหินพรุน (Porous stone) เพื่อให้น้ำในมวลดินมีโอกาสระบายออก และเพื่อให้สามารถวัดความดันของน้ำได้ด้วย จากนั้นนำไปวางลงในกล่องทรงกระบอกใส เติมน้ำพร้อมอัดความดันเข้าไปด้วย เพื่อให้ดินตัวอย่างที่จะทดสอบอยู่ในสภาวะที่ใกล้เคียงกับธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 2.7 แสดงเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน ซึ่งการทดสอบจะมี 2 กรณี คือ ที่แรงแนวแกนมากกว่าแรงโอบรัด หรือ  $\sigma_a = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_3$  จะเป็นการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression test) แต่ในทางตรงข้ามถ้าแรงโอบรัดมากกว่าแรงแนวแกน  $\sigma_r = \sigma_1 > \sigma_a = \sigma_3$  จะเป็นการทดสอบแรงดึงสามแกน (Triaxial extension test)



รูปที่ 2.7 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial apparatus)



การทดสอบแรงอัดสามแกนจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

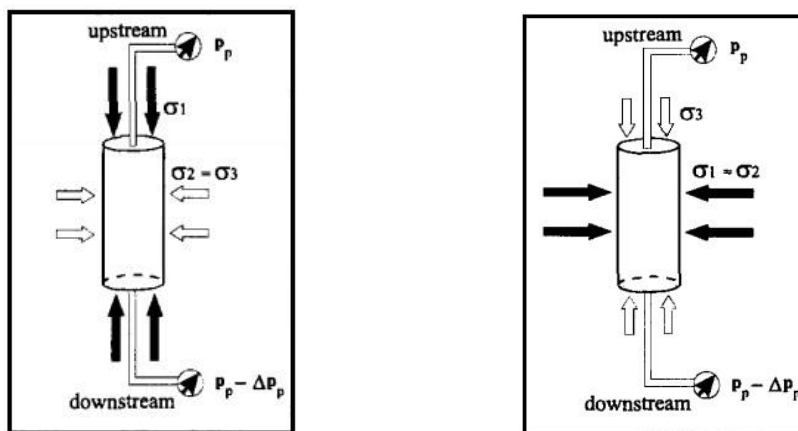
- ค่าความเค้นในแนวรัศมีโอบรัด ( $\sigma_3$ ) จะคงที่ และความเค้นในแนวแกน ( $\sigma_1$ ) จะเพิ่มขึ้น
- ความเค้นในแนวแกน ( $\sigma_1$ ) จะคงที่ และค่าความเค้นในแนวรัศมีโอบรัด ( $\sigma_3$ ) ลดลง
- ความเค้นหลักเฉลี่ย (Mean principal stress) จะคงที่ และ ค่าแรงในแนวแกนโอบรัดลดลง

สำหรับการระบายน้ำของการทดสอบแรงอัดสามแกน  $\sigma_1$  จะเท่ากับค่าความเค้นหลัก และ  $\sigma_3$  จะเท่ากับค่าความเค้นรอง และ  $\sigma_2$  จะเท่ากับค่าความเค้นกลาง สำหรับการทดสอบอยู่ภายใต้ 3 ข้อที่กล่าวมาข้างต้น ค่าความเค้นหลักเฉลี่ย มาจาก  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 / 3$  เป็นค่าคงที่ และ  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = j = \sigma_1 + 2\sigma_3$  เป็นค่าคงที่ โดยให้  $\sigma_1$  เพิ่มขึ้น และ  $\sigma_3$  ลดลง

การทดสอบแรงดึงสามแกนจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

- ค่าความเค้นในแนวรัศมีโอบรัด ( $\sigma_3$ ) จะคงที่ และความเค้นในแนวแกน ( $\sigma_1$ ) จะลดลง
- ความเค้นในแนวแกน ( $\sigma_1$ ) จะคงที่ และค่าความเค้นในแนวรัศมีโอบรัด ( $\sigma_3$ ) เพิ่มขึ้น
- ความเค้นหลักเฉลี่ยจะคงที่ และค่าแรงในแนวแกนโอบรัดเพิ่มขึ้น

สำหรับการระบายน้ำของการทดสอบแรงดึงสามแกน  $\sigma_1$  จะเท่ากับค่าความเค้นประสิทธิผลหลัก  $\sigma'_1$  และ  $\sigma_3$  จะเท่ากับค่าความเค้นประสิทธิผลรอง  $\sigma'_3$  และ  $\sigma_2$  จะเท่ากับค่าความเค้นประสิทธิผลกลางนั่นเอง โดยรูปที่ 2.8 แสดงการทดสอบแรงอัดสามแกนและแรงดึงสามแกน



รูปที่ 2.8 แสดงการทดสอบแรงอัดสามแกนและแรงดึงสามแกน [11]

ขั้นตอนการทดสอบแรงอัดสามแกนแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation stage) และขั้นตอนการเฉือน (Shearing stage) ดังนั้นวิธีการทดสอบแรงอัดสามแกนสามารถแบ่งตามเงื่อนไขการทดสอบในแต่ละขั้นตอน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบมาตรฐาน (Standard triaxial compression test)

ชนิดการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression test)	ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation stage)	ขั้นตอนการเฉือน (Shearing stage)
แบบไม่อัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (Unconsolidated undrained test, UU)	ไม่ทำ	ไม่ระบายน้ำ (Undrained)
แบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (Consolidated undrained test, CU)	แบบเท่ากันทุกทิศทุกทาง (Isotropic)	ไม่ระบายน้ำ (Undrained)
แบบอัดตัวคายน้ำและระบายน้ำ (Consolidated drained test, CD)	แบบเท่ากันทุกทิศทุกทาง (Isotropic)	ระบายน้ำ (Drained)

1. ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation stage) เป็นขั้นตอนการจำลองสถานะความเค้นประสิทธิผลให้เหมือนกับในสนาม โดยทำการเพิ่มแรงดันเซลล์ ( $\Delta\sigma_c$ ) ทีละขั้น (Step by step) และในแต่ละขั้นต้องรอให้กระบวนการอัดตัวคายน้ำเสร็จสิ้น นั่นคือแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore pressure,  $\Delta_u$ ) ลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ เพื่อให้ความเค้นประสิทธิผลเท่ากับแรงดันเซลล์  $\Delta\sigma_c = \Delta\sigma'$  กระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบใช้แรงดันทุกทิศทุกทางเรียกว่า การอัดตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทุกทาง (Isotropic consolidation) อาจจะมีเงื่อนไขการอัดตัวคายน้ำแบบอื่นได้ เช่นเงื่อนไขปราศจากความเครียดด้านข้าง (No lateral strain) หรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อ เงื่อนไข  $K_0$  ( $K_0$  - Consolidation) เป็นต้น

ขั้นตอนนี้ต้องระวังให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated) โดยอาจจะต้องทำการเปิกแรงดันหลัง (Back pressure,  $u_b$ ) เข้าช่วยในการไล่ฟองอากาศที่แทรกตัวระหว่างดินออกให้หมด เทคนิคการตรวจสอบการอิ่มตัวด้วยน้ำของดินได้แนะนำไว้โดย อลัน บิชอป และ เฮนเกล (Bishop and Henkel, 1962) ว่าทำการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์แรงดันน้ำสเคมตัน  $B$  ( $B$  - check) ว่ามีค่าเข้าใกล้ 1 หรือประมาณ 0.98 นั่นคือ 1

$$B = \Delta_u / \Delta\sigma_c \rightarrow 1 \quad (2.1)$$

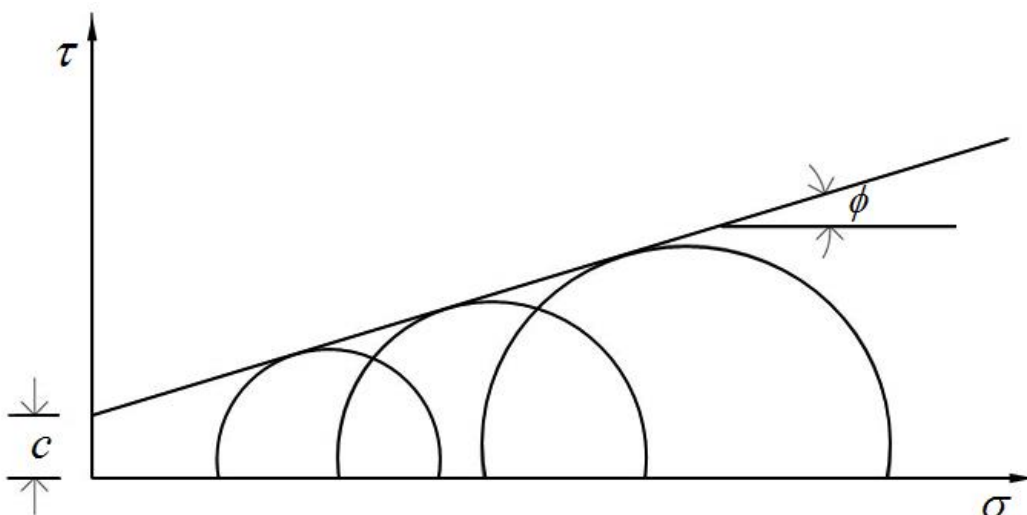
2. ขั้นตอนการเฉือน (shearing stage) เป็นการให้แรงในแนวแกนจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ มีทั้งแบบควบคุมแรง (load control) โดยทำการควบคุมลูกสูบให้แรง (loading piston) หรือควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement control) จากการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนที่ขึ้นลงของแท่นฐาน เป็นต้น

ในทศวรรษที่ 18 วิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อคูลอมบ์ (Coulomb) ได้คิดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากกับผิวสัมผัสที่ระนาบใดๆ ของมวลดินในรูปสมการเส้นตรงแสดงขอบเขตการพิบัติของมวลดิน เรียกว่าสมการมอร์คูลอมบ์ซึ่งใช้หาค่าแรงเฉือนของดินที่จุดวิบัติ

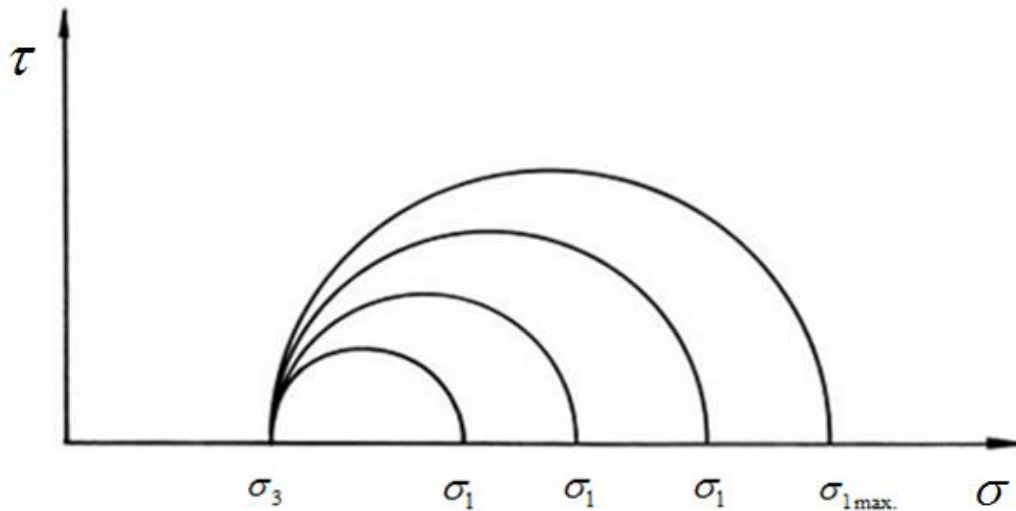
$$\tau = \sigma \tan \phi + c \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $\tau$  = หน่วยแรงเฉือนรวมหรือค่ากำลังเฉือนของดิน  
 $\sigma$  = หน่วยแรงตั้งฉากรวมบนระนาบ  
 $c$  = การยึดเกาะกัน  
 $\phi$  = มุมเสียดทานภายใน

มุมของระนาบแรงเฉือน (Shear plane) ที่ดินวิบัติตามทฤษฎีค่า  $\sigma_1$  และ  $\sigma_3$  สามารถทดสอบได้ด้วยวิธีแรงอัด 3 แกน โดยกำหนดค่าและกดตัวอย่างให้วิบัติด้วยและทำการทดสอบที่ค่าต่างๆ กันเมื่อพิจารณาสภาพของความดันในขณะที่เกิดการเคลื่อนพังจะเห็นว่าความดันหรือแรงดันทั้งหมดเป็นความเค้นหลัก (principal stresses) โดยค่าความเค้นที่มีค่ามากเรียกว่าความเค้นหลัก (major principal stress,  $\sigma_1$ ) และค่าความเค้นที่น้อยกว่าเรียกว่าความเค้นรอง (minor principal stress,  $\sigma_3$ ) เมื่อนำค่าทั้งสองมาพล็อตเป็น กราฟวงกลมมอร์ (Mohr's diagram) และลากเส้นสัมผัสวงกลมมอร์ จะสามารถหาค่าแรงยึดเหนี่ยว ( $c$ ) และค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ส่วนรูปที่ 2.10 แสดงวงกลมมอร์ จากการทดสอบ-แรงอัดสามแกน 3 ตัวอย่าง



รูปที่ 2.9 วงกลมมอร์จากการทดสอบแรงอัดสามแกน



รูปที่ 2.10 วงกลมมอร์จากการทดสอบแรงอัดสามแกน 3 ตัวอย่าง

จากผลการทดสอบแรงอัดสามแกนความสัมพันธ์แรงเฉือน  $\tau$  และแรงอัด  $\sigma$  ด้วยการเขียนวงกลมมอร์ จะไม่สามารถสื่อความถึงประวัติของดินได้ ดังนั้นแลมเบิร์ตและวิชแมน [12] จึงได้เสนอวิธีแสดงผลการทดสอบแรงอัด 3 แกนในรูปแบบวิถีความเค้น (Stress path)

วิถีความเค้น (Stress path) คือเส้นทางที่แสดงการเปลี่ยนแปลง ของหน่วยแรงในมวลดินแสดงได้ด้วยเส้นของลูกศรที่ลากผ่านจุดยอดของวงกลมมอร์ ในสภาพความเค้นรวม (Total stress) ที่ทำการทดสอบ  $\Delta\sigma_3 = 0$  (คงที่)  $\Delta\sigma_3 > 0$  สามารถพิสูจน์ได้ว่าทำมุม 45 องศาเซลเซียส กับแกนนอน เพื่อความสะดวกจึงตั้งแกนขึ้นมาใหม่โดยที่

$$\text{แกน } y : \quad q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.3)$$

$$\text{แกน } x : \quad p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad (2.4)$$

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

$$\sigma' = \sigma - u \quad \text{และ}$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u \quad \text{หรือ}$$

$$q' = q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.5)$$

$$p' = p = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (2.6)$$

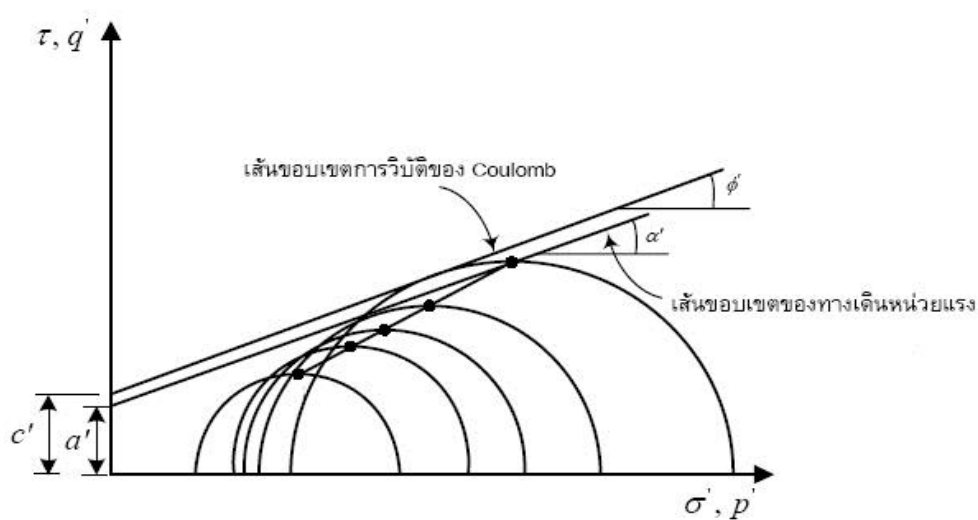
จากคุณสมบัติของดินเหนียวที่สภาพอัดแน่นปกติ ค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน ( $u$ ) มีค่าสูงหรืออาจเป็นบวก ดินเหนียวสภาพอัดแน่นกว่าปกติค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าต่ำหรืออาจเป็นลบเมื่อเขียนกราฟจากผลการทดสอบแรงอัดสามแกน เส้นทางเดินวิถีความเค้นแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของดินเหนียวสภาพ

อัดแน่นปกติและดินเหนียวสภาพอัดแน่นกว่าปกติจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างวงกลมมอร์กับวิถีความเค้น จากการเฉลี่ยจากผลการทดสอบแรงอัดสามแกน 2 – 4 ตัวอย่างเมื่อนำไปใช้จึงต้องทำการแปลงค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\phi' = \sin^{-1} \tan \alpha' \quad (2.7)$$

$$c' = \frac{a'}{\cos \alpha'} \quad (2.8)$$

โดยที่  $\alpha'$  = ค่ามุมลาดประสิทธิผล  
 $a'$  = ค่าตัดแกนตั้งประสิทธิผล



รูปที่ 2.11 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวงกลมมอร์กับวิถีความเค้น

## 2.4 คุณสมบัติการยุบตัว (Compressibility)

การทดสอบการอัดตัวคายน้ในทิศทางเดียวเสนอโดยเทอร์ซาคี [13] เป็นผู้เขียนบทความทฤษฎีการอัดตัวคายน้ (Consolidation theory) ซึ่งกล่าวว่าหน่วยแรงในมวลดินแรงมีหน่วยแรงเพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากฐานรากหรือจากแรงกระทำใด ๆ จะทำให้ดินมีการเปลี่ยนรูปร่างเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินจะเกิดเนื่องจาก 3 สาเหตุคือ

1. การเปลี่ยนรูปของเม็ดดิน
2. การที่ดินจัดเรียงตัวกันใหม่
3. น้ำในดินถูกบีบออกจากช่องว่างในดิน

ดังนั้นเทอร์ซากิได้ประดิษฐ์เครื่องมือและวิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (consolidation test หรือ oedometer test) ของดินแบบคานงัด (Lever Arm) การทดสอบนี้จะทำการทดสอบกับดินคงสภาพ (Undisturbed sample) ที่อิมตัวด้วยน้ำเท่านั้น ส่วนดินชนิดอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติไม่สมบูรณ์ตามคุณสมบัตินี้ ถือว่ามีพฤติกรรมไม่ตรงตามทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำ แต่ในบางกรณีก็จะพออนุโลมให้ใช้ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำได้ เช่นตัวอย่างดินเหนียวที่มีทรายผสม (sandy clay) ที่ไม่อิมตัว (partially saturated) เป็นต้น ในปัจจุบันการทดสอบการอัดตัวคายน้ำยังใช้เครื่องมือที่ไม่แตกต่างไปจากเครื่องมือที่ได้พัฒนาใช้ในสมัยก่อนมากนัก และการทดสอบการอัดตัวคายน้ำชนิดเดียวกันนี้ก็ยังคงเป็นการทดสอบมาตรฐานสำหรับหาค่าคุณสมบัติการทรุดตัวของดินเหนียวที่จะถูกกดทับด้วยน้ำหนักบรรทุกฐานราก เช่นดินถมบริเวณ (fill) คันดินถม (embankment) ฐานแผ่ (spread footing) ลานเก็บสินค้า (storage area) เป็นต้น

ในการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ จะบรรจุตัวอย่างดินไว้ในวงแหวนบีบรัด (rigid confining ring) น้ำหนักจะกดเฉพาะในแนวตั้ง ผ่านแผ่นหินพรุนบนและล่าง (top and bottom porous stone) ซึ่งระบายน้ำได้และสมมติว่าตัวอย่างดินไม่ขยายตัวด้านข้างจะทรุดตัวได้เฉพาะในแนวตั้งเพียงแกนเดียว (one dimensional consolidation) ซึ่งเป็นการสมมติฐานให้มีความใกล้เคียงกับสภาพจริงในธรรมชาติมีมิติด้านข้างไม่จำกัด และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในแนวนอนน้อยมาก ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ โดยที่ดินจะมีการทรุดตัว 3 ระดับ ดังต่อไปนี้

- การอัดตัวขั้นแรก (initial consolidation) เกิดขึ้นในทันทีในสภาวะยืดหยุ่น (elastic) มีค่าน้อยและค่าความชื้นไม่เปลี่ยนแปลง
- การอัดตัวหลัก (primary consolidation) มีค่ามากที่สุด เป็นค่าการทรุดตัวหลักเนื่องจากน้ำถูกบีบตัวออกตามทฤษฎีการอัดคายน้ำของเทอร์ซากิ มีปริมาณมากและใช้เวลานานมีการเปลี่ยนแปลงทั้งความชื้นและปริมาตรลดลง
- การอัดตัวระยะที่สอง (secondary consolidation) หรือการคืบ (creep) ของดินเกิดขึ้นหลังจากการอัดตัวหลักเสร็จสมบูรณ์แล้วมีค่าน้อย

ขนาดของการยุบตัวของดินขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินที่เรียกว่า “ความสามารถในการยุบตัว” ส่วนอัตราในการยุบอัดตัวของดินขึ้นอยู่กับ “ความสามารถในการไหลซึมผ่านได้ของน้ำในดิน” (permeability) เมื่อรวมความสามารถในการยุบอัดตัวของดินและความสามารถในการไหลซึมผ่านได้ของดินเข้าด้วยกันก็จะเป็นคุณสมบัติของดินที่เรียกว่า สมประสิทธิ์การอัดตัวนั่นเองโดยการทดสอบการอัดตัวคายน้ำจะได้คุณสมบัติการอัดตัวของดินที่สำคัญ 2 ตัว ดังต่อไปนี้

- ระยะเวลาและอัตราการอัดตัวของดิน (Consolidation rate) ค่าคงตัวสมประสิทธิ์การอัดตัว (Coefficient of consolidation,  $C_v$ )
- ปริมาณการทรุดตัวของดินทั้งหมด (total settlement) ค่าดัชนีการยุบตัว (compression index,  $C_c$ )

### 2.4.1 ระยะเวลาและอัตราการอัดตัวของดิน (Consolidation rate)

จากการทดสอบการอัดตัวจะได้สัมประสิทธิ์การอัด ( $c_v$ ) ทั่วจากสมการต่อไปนี้

$$c_v = \frac{T_v H^2 d}{t} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $H_d$  = ระยะทางระบายน้ำยาวที่สุด (Longest drainage path)

$t$  = ระยะเวลาทรุดตัว

$T_v$  = องค์กรประกอบเวลา (Time factor) (ไม่มีหน่วย) ได้จากการแก้สมการอัดตัวคายน้ำ

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.10)$$

ซึ่งเทอซาภิ(Terzaghi, 1934) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $T_v$  และ  $u$ ,

$$\begin{aligned} u &= \text{เปอร์เซ็นต์การคายตัวของน้ำ} \\ &= \frac{u_t}{u_0} \times 100 \% \\ &= \text{ความดันในน้ำขณะนั้น} / \text{ความดันน้ำเริ่มแรก} \times 100 \% \\ &= \frac{s_t}{s} \times 100 \% \\ &= \text{ค่าทรุดตัวในขณะนั้น} / \text{ค่าทรุดตัวทั้งหมด} \times 100 \% \end{aligned}$$

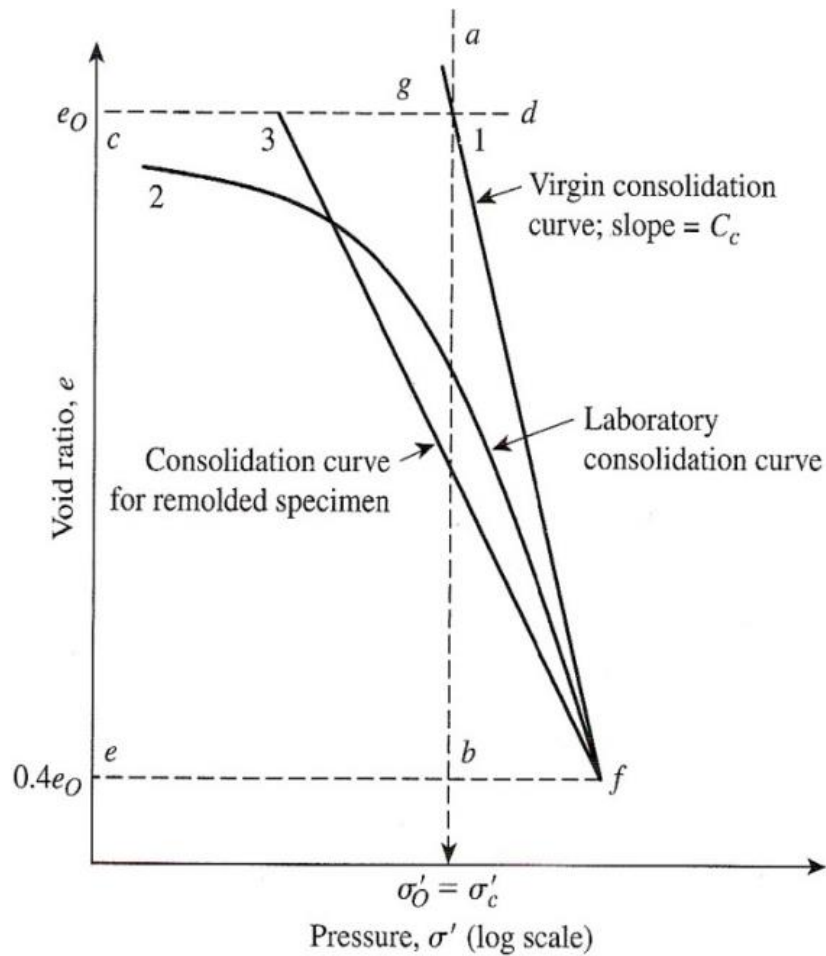
ค่าดัชนีการยุบตัวเป็นค่าความชันของกราฟระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio,  $e$ ) กับความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง ( $\sigma'_{vo}$ ) ในแกนล็อกฐาน (Log effective overburden pressure) สำหรับดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติ (Normally consolidated, NC clay) แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ค่าดัชนีการยุบตัวสามารถหาได้จากสมการที่ 2.11

$$c_c = \Delta e / \Delta \log \sigma'_v \quad (2.11)$$

โดยที่  $c_c$  = ค่าดัชนีการยุบตัว (Compression index)

$\Delta e$  = ผลต่างของค่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างจุดสเกลล็อก

$\Delta \log \sigma'_v$  = ผลต่างของค่าความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง ( $\sigma'_v$ ) แกนล็อกฐาน



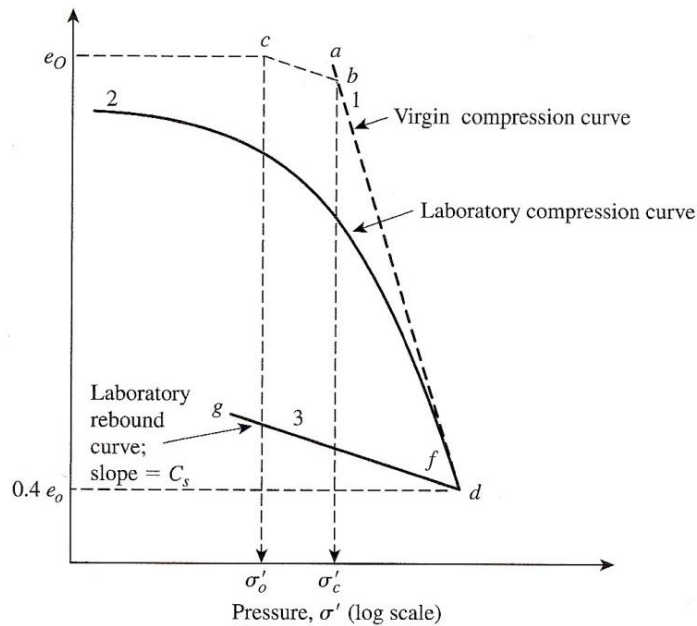
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างและความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งสำหรับดินเหนียวสภาพอัดแน่นปกติ (Normally consolidated clay) [11]

ดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression index) เป็นค่าความชันของกราฟระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งในแกนลอการิทึม (Log effective overburden pressure) สำหรับดินเหนียวสภาพอัดแน่นกว่าปกติ (Overconsolidated clay, OC clay) ช่วงก่อนถึงค่าความเค้นสูงสุดในอดีต (Maximum past Pressure) แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 และสามารถหาค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำสามารถหาได้จากสมการที่ 2.12

$$c_r = \Delta e / \Delta \log \sigma'_{vo} \quad (2.12)$$

โดยที่  $c_r$  = ดัชนีการอัดตัวซ้ำ  
 $\Delta e$  = ผลต่างของค่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างจุดสองจุด  
 $\Delta \log \sigma'_{vo}$  = ผลต่างของค่าความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง ณ ปัจจุบันระหว่างจุดสองจุดในสเกลลอการิทึม





รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างและความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งสำหรับดินเหนียวสภาพอัดแน่นกว่าปกติ (Overconsolidated clay) [11]

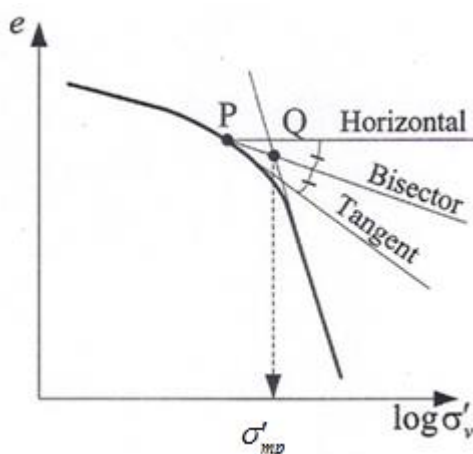
โดยทั่วไปแล้วค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression index,  $c_r$ ) จะมีค่าประมาณ 1/4 - 1/5 ของค่าดัชนีการยุบตัว (Compression index,  $c_c$ ) ซึ่งค่า  $c_r/c_c$  สำหรับดินชนิดต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.2 ตารางที่ 2.2 ค่า  $c_r/c_c$  จำแนกตามชนิดของดิน [11]

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

ค่าความเค้นสูงสุดในอดีต (Preconsolidation pressure or Maximum past pressure)  $\sigma'_{mp}$  หรือ  $\sigma'_c$  คือหน่วยแรงมากที่สุดที่ดินนั้นถูกกระทำมาก่อนในอดีตสำหรับดินที่มีการทับถมกันตามปกติเรียกว่า ดินอัดตัวปกติ (Normally consolidated soil) หน่วยแรงสูงสุดจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติ ( $\sigma'_{vo}$ ) ถ้าค่าความเค้นสูงสุดในอดีตมีค่ามากกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติดินนั้นเรียกว่าดินอัดตัวแน่นกว่าปกติ (Overconsolidated soil) นอกจากนี้ค่าความเค้นสูงสุดในอดีตจะแสดงให้เห็นทราบถึงหน่วยแรงมากที่สุดที่เคยกระทำต่อมวลดินในอดีตนั่นเอง

วิธีการทดสอบหาค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เคยกดทับดินในอดีตโดยวิธีของ Casagrande แสดงได้ ดังรูปที่ 2.14 โดยมีขั้นตอนดังนี้

เริ่มจากจุด P หรือจุดที่มีความโค้งสูงสุด (Maximum curvature) และลากเส้นในแนวราบจากจุด P (Horizontal line) แล้วเขียนเส้นสัมผัสที่จุด P (Tangent) เป็นเส้นตรงมาตัดกับเส้นแบ่งครึ่งมุมที่จุด Q จากนั้นลากเส้นตรงที่จุด Q ลงมาตามแนวตั้งจะได้ค่าหน่วยแรงต้นสูงสุดในอดีตค่า  $\sigma'_{mp}$

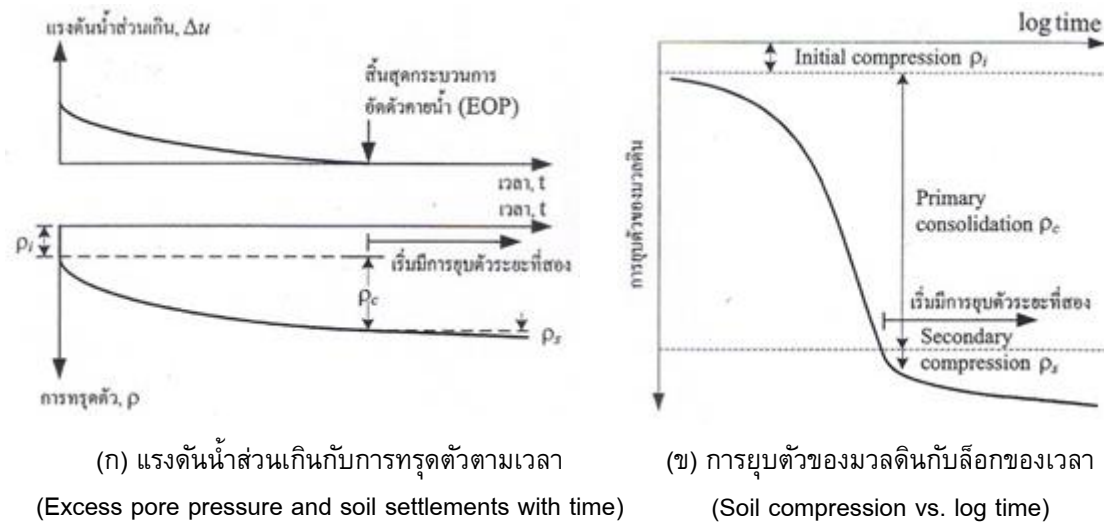


รูปที่ 2.14 การประมาณค่าความเค้นสูงสุดในอดีต [14]

ผลจากการหาค่าความเค้นสูงสุดในอดีตสามารถบอกถึงประวัติการรับแรง (stress history) ของดินซึ่งแสดงโดยค่าอัตราส่วนการอัดแน่น (over consolidation ratio) ถ้าความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในอดีตมีค่ามากกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลที่กดทับในปัจจุบัน แสดงว่าดินอยู่ในสภาพอัดแน่นเกินตัว (overconsolidated) และมีค่า OCR มากกว่า 1.0 ซึ่งค่า OCR ต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 1.0 และดินจัดอยู่ในสภาวะอัดแน่นปกติ (normally consolidated)

#### 2.4.2 การยุบตัวระยะที่สอง (secondary compression)

พฤติกรรมดินที่ขึ้นกับเวลา (time effect on soil behavior) หรือพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา (rate – dependent behavior) เป็นพฤติกรรมตอบสนองของดินต่อการกระทำเนื่องจากน้ำหนักภายนอกด้วยอัตราที่แตกต่างกัน ตัวอย่างของพฤติกรรมนี้ เช่น การคืบ (creep) คือ การที่ดินถูกน้ำหนักคงที่กระทำและเมื่อปล่อยเวลาผ่านไปจะเกิดการเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ หรือการผ่อนคลายของความเค้น (stress relaxation) คือ การที่ดินลดระดับความเค้นภายในเมื่อเวลาผ่านไปโดยไม่มีการเคลื่อนตัวหรือความเครียดเกิดขึ้น ซึ่งจะตรงข้ามกับการคืบนั่นเอง แต่จะแตกต่างจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ เพราะกระบวนการอัดตัวคายน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งความเค้นประสิทธิผลและความเครียดตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากน้ำในโพรงดินไหลออกไปไม่ได้เกิดจากอนุภาคของดินเอง



รูปที่ 2.15 การยุบตัวระยะที่สอง (Secondary compression) [10]

พฤติกรรมของดินที่ขึ้นกับเวลาเป็นที่รู้จักกันดีอันหนึ่ง คือพฤติกรรมการอัดตัวระยะที่สอง (Secondary compression,  $\rho_s$ ) นั่นคือ ภายหลังจากดินเกิดกระบวนการอัดตัวคายน้ำแล้วเสร็จ (After primary consolidation) ดินที่ปราศจากแรงดันน้ำส่วนเกินในมวลดินอาจจะยังคงเกิดการยุบตัวเพิ่มขึ้นต่อเนื่องไปอย่างช้าๆ การยุบตัวนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15

#### 2.4.3 คีบและสมมติฐานการยุบตัว (Creep and consolidation hypothesis)

การคีบ คือพฤติกรรมทรุดตัวของดินขณะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นภายในมวลดิน ในทางทฤษฎีการคีบจะเกิดขึ้นได้ทั้งในขณะที่ยังไม่ระบายออกจากมวลดินหรือเงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained creep) และหลังกระบวนการอัดตัวคายน้ำแล้วเสร็จสิ้นหรือเงื่อนไขระบายน้ำ (Drained creep) แต่ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถแยกการคีบแบบไม่ระบายน้ำออกจากทรุดตัวจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำได้

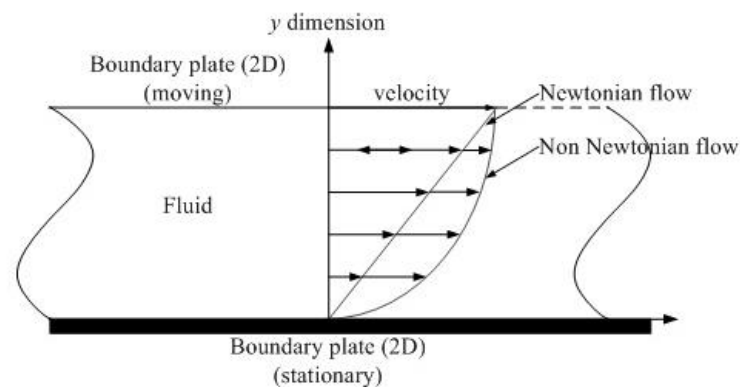
นอกจากนี้ ชาลส์ แลด์ และคณะ (1977) [15] ได้ตั้งสมมติฐานสองประการเกี่ยวกับการยุบตัวระยะที่สองไว้ว่า สมมติฐาน A การยุบตัวระยะที่สองจะเกิดขึ้นหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอัดตัวคายน้ำและจะดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ ส่วนสมมติฐาน B การยุบตัวระยะที่สองจะเริ่มเกิดขึ้นไปพร้อมๆ กับกระบวนการอัดตัวคายน้ำ และยังคงดำเนินต่อไปหลังสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำแล้วและยังดำเนินต่อไปเรื่อยๆ ซึ่งถ้ายุบตัวระยะที่สองเป็นกระบวนการที่ขึ้นกับอัตรา (Rate - dependence) สมมติฐาน B น่าจะสมเหตุสมผลมากกว่านั่นเอง

### 2.5 พฤติกรรมความหนืด(Viscosity behavior)

ความหนืด (Viscosity) คือความสามารถในการต้านทานการไหลของวัสดุที่ขึ้นกับอัตราเมื่อมีแรงกระทำ ถ้าของเหลวใดที่มีความหนืดมากจะมีความสามารถในการต้านทานการไหลสูงในทางกลับกันของเหลวใดที่มีความหนืดน้อยจะมีความสามารถในการต้านทานการไหลต่ำ จากหลักการของนิวตันได้

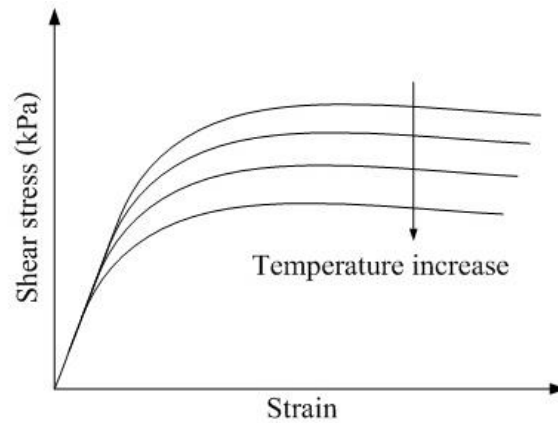
กล่าวไว้ว่า แรงเฉือนมีค่าแปรผันตามอัตราการเคลื่อนตัว และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน ลักษณะของการไหลของวัสดุสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด [16] คือ

- การไหลนิวโตเนียน (Newtonian flow) หรือ การไหลแบบเชิงเส้น (Linear flow) ค่าเป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของไหลจะมีความหนืดเป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงหรือจะแปรผันตามความเครียดตลอดเวลา ( $\tau \propto \dot{\epsilon}$ ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและอัตราความเครียดจะแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น โดยที่ความชันจะมีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์ความหนืด ตัวอย่างเช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม เป็นต้น
- การไหลไม่นิวโตเนียน (Non - newtonian flow) หรือการไหลแบบไม่เชิงเส้น (Non - linear flow) เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตันคือที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของไหลมีความหนืดเป็นค่าไม่คงที่ แรงเฉือนจะมีค่าแปรเปลี่ยนตามฟังก์ชันของอัตราความเครียด ( $\tau \propto f(\dot{\epsilon})$ ) เป็นเพราะภายในของไหลมีขนาดของอนุภาคที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆซึ่งทำให้ในระหว่างช่วงการไหลเกิดลักษณะไม่ราบรื่น ตัวอย่างการไหล เช่น ซอสมะเขือเทศ สี และดินเหนียว เป็นต้นซึ่งการไหลแบบนี้ยังสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่คือ พวกที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time independent non - newtonian fluids) และ พวกที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent non - newtonian fluids) ซึ่งการไหลนิวโตเนียน และ การไหลไม่นิวโตเนียน แสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การไหลแบบนิวโตเนียนและการไหลแบบไม่นิวโตเนียน [6]

นอกจากพฤติกรรมแรงเฉือนของวัสดุหนึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราการแปรเปลี่ยนของอัตราแล้ว พฤติกรรมแรงเฉือนของวัสดุหนึ่งยังขึ้นกับฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วย ( $\tau \propto f(Temp)$ ) กล่าวคือ ความหนืดเป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ [6]

## 2.6 ทฤษฎีสถานะวิกฤต (Critical state theory)

ผลจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ สามารถนำไปหาค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) ค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction angle) และค่าพารามิเตอร์ของวิถีความเค้น (Parameter  $p-q$ ) ซึ่งการทดสอบตัวอย่างดินวิธีนี้สามารถหาค่าตัวแปรได้อีกอย่างคือ ตัวแปรในรูปแบบของสถานะวิกฤต (Critical state)

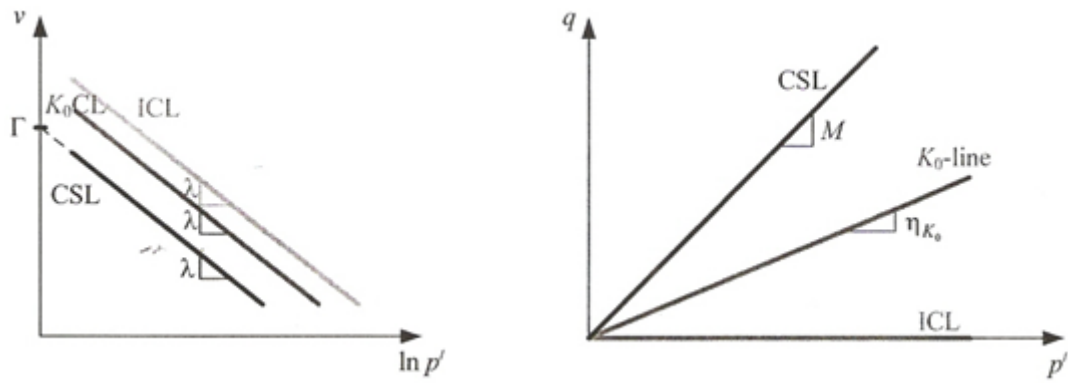
### 2.6.1 แนวคิดสถานะวิกฤต (Critical state concept)

ทฤษฎีสถานะวิกฤตเป็นทฤษฎีที่อาศัยการสังเกตพฤติกรรมของดินเหนียวจากผลการทดสอบแรงอัดสามแกนของดินเหนียวสร้างใหม่ ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกที่มหาวิทยาลัยบริติช โดยศาสตราจารย์เคนเนตส์ รอสโคล และคณะ [17] มีสาระสำคัญ คือช่วงจุดสูงสุด (Ultimate) และช่วงสถานะวิกฤต (Critical state) ของดิน ต่อมาได้มีการพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบที่เข้าใจง่ายขึ้น โดยแอตคินสัน และบรานบี (Atkinson and Bransby, 1978) และล่าสุดมีการนำเสนอหลักการดังกล่าวได้อย่างครบถ้วนขึ้น โดยเดวิด เมย วูดส์ (Wood, 1991) ทำให้ทฤษฎีสถานะวิกฤตเป็นที่นิยมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมอิลาสโตพลาสติกของดินสภาพอัดแน่นปกติ

#### 1. เส้นอัดตัวคายน้ำ (Consolidation lines)

เส้นอัดตัวคายน้ำ คือ เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (อัตราส่วนช่องว่าง) กับความเค้นประสิทธิผล โดยมากจะอ้างถึงเส้นการอัดตัวคายน้ำใน 2 เงื่อนไข คือเงื่อนไขความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic stress condition, ICL) และเงื่อนไขปราศจากการเคลื่อนตัวด้านข้าง ( $K_0$  - condition) โดยที่เส้นอัดตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทางบนระนาบ (ICL) แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 และสามารถเขียนสมการได้ในสมการที่ 2.13





(ก) ภาพฉายบนระนาบ (

(ข) ภาพฉายบนระนาบ ( $p', q$ )

รูปที่ 2.19 เส้นสถานะวิกฤต (Critical state line) [18]

### 2.6.2 วิธีความเค้นของดินสภาพอัดแน่นปกติ (Stress path of NC soil)

เส้นอัตราตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทาง (ICL) และเส้นสถานะวิกฤต (CSL) เป็นตัวกำหนดขอบเขตของดินสภาพอัดแน่นปกติ หรืออาจเรียกขอบเขตของสถานะดังกล่าวว่า พื้นผิวรอสโคล (Roscoe surface) ซึ่งตั้งชื่อตามผู้คิดค้นชื่อ ศาสตราจารย์เคนเนตส์ รอสโคล (1958) โดยสามารถพิจารณาจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำและการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ

### 2.6.3 วิธีความเค้นของดินสภาพอัดแน่นกว่าปกติ (Stress path of OC soil)

ดินสภาพอัดแน่นปกติอาจนิยามด้วยค่าอัตราส่วนอัตราตัวคายน้ำ (Overconsolidation ratio) ซึ่งจะใช้ค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ดังสมการดังต่อไปนี้

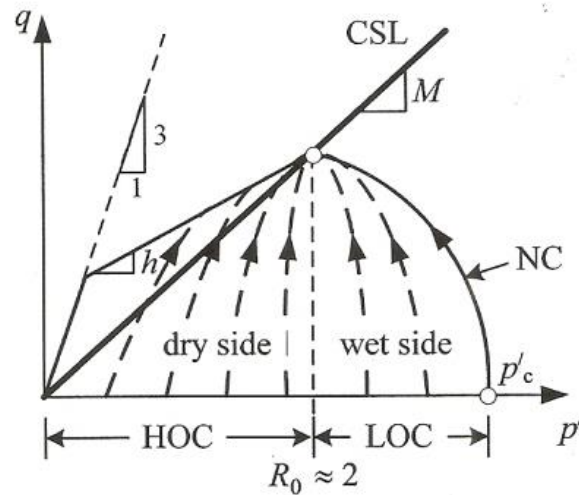
$$R_0 = \frac{p'_c}{p'_0} \quad (2.16)$$

โดยที่  $R_0$  = ค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย

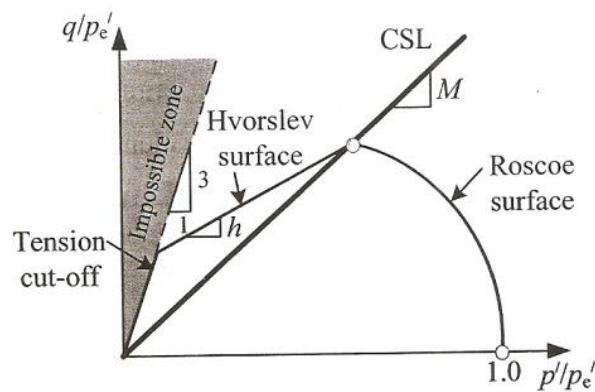
$p'_c$  = ค่าความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในอดีต

$p'_0$  = ค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ณ ปัจจุบัน

เราสามารถพิจารณาดินสภาพอัดแน่นปกติออกเป็น 2 กลุ่มคือ ดินสภาพอัดแน่นปกติและอัดแน่นกว่าปกติเล็กน้อย (Normally consolidated, NC and lightly overconsolidated soil, LOC) และดินสภาพอัดแน่นกว่าปกติมาก (Heavily overconsolidated soil, HOC) โดยใช้อัตราการอัตราตัวคายน้ำเป็นเกณฑ์คือ ดินชนิด NC หรือ LOC หรือเรียกว่าดินที่อยู่มนด้านเปียก (Wet side) มีค่า  $R_0 < 2$  และดิน HOC หรือดินที่อยู่ในด้านแห้ง (Dry side) จะมีค่า  $R_0 > 2$  สำหรับวิธีความเค้นแบบไม่ระบายน้ำของดินทั้ง 2 กลุ่มดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 วิธีความเค้นไม่ระบายน้ำของดินเหนียวประเภทต่างๆ (Typical undrained stress path of clays) [18]



รูปที่ 2.21 พื้นผิวครากของดินเหนียว (Yield surface of clays) [18]

### 3. พื้นผิวฮอฟสลีฟ (Hvorslev Surface)

วิธีความเค้นแบบไม่ระบายน้ำของดินชนิด HOC จะมีแนวโน้มอยู่เหนือเส้นสถานะวิกฤต (CSL) ก่อนที่จะโค้งลงเข้าสู่จุดตัดระหว่างพื้นผิวโรสโคลกับเส้นสถานะวิกฤต เมื่อลากเส้นเชื่อมต่อขอบเขตของวิธีความเค้นพบว่าอาจจะประมาณได้เป็นเส้นตรง โดยเส้นตรงดังกล่าวคือ ภาพฉายของพื้นผิวฮอฟสลีฟ ระบายตั้ง  $(p', q)$  ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งถูกค้นพบโดยนักวิจัยชาวออสเตรเลีย ฮอฟสลีฟ (1937)

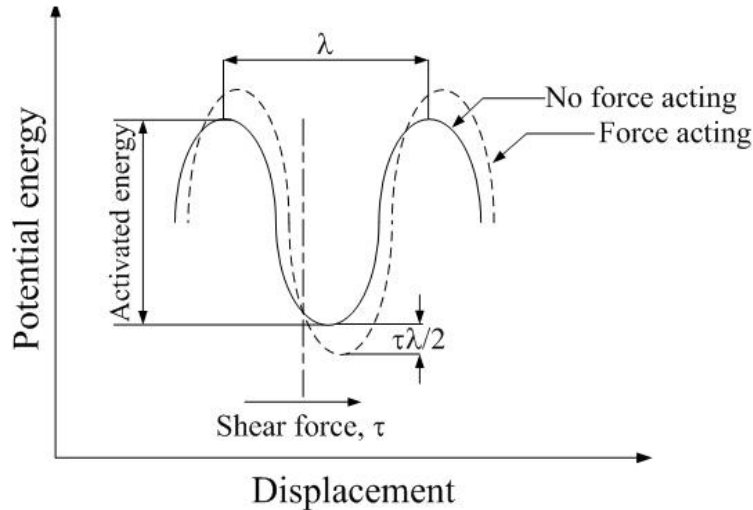
### 4. ช่วงตัดออกแรงดึง (Tension Cut-off)

เนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วดินไม่สามารถรับแรงดึงได้เพราะว่าสถานะดังกล่าวจะทำให้ความเค้นติดลบ ดังนั้นขอบเขตสถานะความเค้นของดินจึงไม่สามารถอยู่เหนือเส้นอัตราส่วน  $q/p' = 3$  ที่ลากจากจุดกำเนิดได้ โดยเรียกเส้น  $q/p' = 3$  ที่ลากจากจุดกำเนิดไปตัดกับพื้นผิวฮอฟสลีฟว่า ช่วงตัดออกแรงดึงนั่นเอง



## 2.7 ทฤษฎีกระบวนการอัตรา (Rate Process Theory)

พื้นฐานของทฤษฎีกระบวนการอัตราเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมทางด้านกำลังและการจัดเรียงอนุภาคของวัสดุ อาทิเช่น ดิน โดยการจัดเรียงตัวของอนุภาคจะอธิบายในรูปของพลังงานกระตุ้น (Activated energy,  $E_a$ ) และความถี่ (Frequency,  $f$ ) ที่ทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนตัวดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 จำลองพลังงานกระตุ้นของโมเลกุลดินเมื่อมีแรงเฉือนมากระทำ

Mitchell และ Soga (2005) [19] ได้สรุปไว้ว่าอัตราการเคลื่อนที่ของโมเลกุลดินจะแปรผันกับความถี่ของพลังงานกระตุ้น ( $\dot{\epsilon} \propto f$ ) ดังนั้นสมการอัตราความเครียดสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\dot{\epsilon} = 2Xh \frac{k\theta}{h} \exp\left(-\frac{Ea}{R\theta}\right) \sinh\left(\frac{\tau\lambda}{2k\theta}\right) \quad (2.17)$$

เมื่อ  $X$  คือ ค่าคงที่แปรผัน  $k$  คือค่าคงที่ของโบลทซ์แมน (Boltzman's constant,  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)  $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant,  $6.624 \times 10^{-34}$  J/s)  $E_a$  คือ พลังงานกระตุ้น  $R$  คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (Universal gas constant,  $8.3114$  J/(K.mol)) และ  $\theta$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature) สำหรับในกรณีของแข็งที่อุณหภูมิคงที่ ค่าของ  $\frac{\tau\lambda}{2k\theta} > 1$  ดังนั้นอัตราความเครียดจะเขียน

ได้ว่า  $\dot{\epsilon} \propto \sinh\left(\frac{\tau\lambda}{2k\theta}\right)$  หรือ  $\dot{\epsilon} = r \sinh\left(\frac{\tau}{\mu r}\right)$  เมื่อ  $r$  คือค่าคงที่มีหน่วยเดียวกับอัตราความเครียด

## 2.8 ทฤษฎีไฮเปอร์พลาสติกซิตี

แบบจำลองทางด้านพลาสติกจำนวนมากหลายทฤษฎีที่นำมาใช้กับงานด้านปฐพีกลศาสตร์ ซึ่งส่วนใหญ่จะไม่เป็นไปตามกฎอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics Laws) เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองพลาสติกที่พัฒนาบนพื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ เช่น แบบจำลองพลาสติกที่ใช้การเปลี่ยนแปลงภายใน (Internal variable) ซึ่งได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดย Coleman และ Gurtin(1967) [20], Lubliner(1972) [21] และ Ziegler (1977 & 1983) [22] ซึ่ง Ziegler ได้แสดงให้เห็นถึงการได้มาของ Constitutive ในวัสดุประเภทของแข็งจากการใช้ปริมาณทางอุณหพลศาสตร์ 2 ปริมาณคือ Energy function กับ Dissipation function ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้เป็นการบ่งชี้ให้เห็นว่าสามารถพัฒนา Constitutive ให้อยู่บนพื้นฐานของอุณหพลศาสตร์เพื่อใช้จำลองความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดได้ และในเวลาต่อมา Collins and Houlsby (1997) [23] ได้พัฒนาแบบจำลองตามแนวความคิดของ Ziegler และเรียกว่า ทฤษฎีไฮเปอร์พลาสติกซิตี (Hyper plasticity theory)

### 2.8.1 หลักเกณฑ์พื้นฐานของทฤษฎีไฮเปอร์พลาสติกซิตี Houlsby and Puzrin (2001) [5]

ได้อธิบายถึงที่มาของแบบจำลองพลาสติกบนพื้นฐานของอุณหพลศาสตร์โดยแนวทางการได้มาของ Constitutive จะถูกกำหนดขึ้นจากปริมาณทางอุณหพลศาสตร์ 2 ปริมาณคือ ฟังก์ชันพลังงาน (Energy function) กับฟังก์ชันการสูญเสียพลังงาน (Dissipation function) หรือฟังก์ชันคราก (Yield function) ซึ่งฟังก์ชันพลังงานจะนิยามถึงปริมาณพลังงานที่สะสมในวัสดุ ซึ่งมีรูปแบบฟังก์ชันอย่างไรอย่างหนึ่งในสี่รูปแบบของปริมาณพลังงานคือ พลังงานภายใน (Internal energy or  $u$ ), Helmholtz free energy or  $f$ , Gibbs free energy or  $g$  และเอนทัลปี (Enthalpy or  $h$ ) ซึ่งปริมาณพลังงานเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันโดยการแปลงรูปแบบด้วยความสัมพันธ์ เลอจองด์ทรานส์ฟอร์ม (Legendre transformation) ในขณะที่ฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานจะนิยามถึงสถานะและอัตราการเปลี่ยนแปลงของสถานะทางอุณหพลศาสตร์ตามกฎข้อที่สอง ซึ่งสามารถนิยามได้ใน 4 รูปแบบเช่นเดียวกับฟังก์ชันพลังงานขึ้นอยู่กับผู้ใช้จะนิยามพลังงานในรูปแบบใดให้เหมาะสมกับวัสดุ ซึ่งในความเป็นจริงสามารถที่จะพิจารณาฟังก์ชันการสูญเสียให้ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรภายใน (Internal variable,) เพียงอย่างเดียวเท่านั้นได้ ดังตารางที่ 2.3 ที่ได้แสดงผลสรุปของฟังก์ชันที่นิยาม Constitutive ในรูปแบบของ Gibbs free energy และ Helmholtz free energy โดยในแบบจำลองนี้จะไม่พิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานกับฟังก์ชันครากจะสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันด้วย Legendre transformation เช่นกัน

ตารางที่ 2.3 สมการพื้นฐานสำหรับทฤษฎีไฮเปอร์พลาสติกซิตี [5]

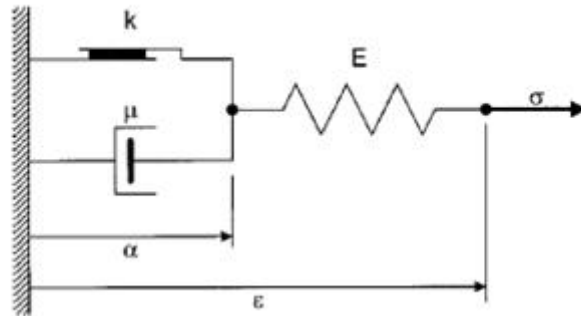
	พลังงานอิสระ Gibbs	พลังงานอิสระ Helmholtz
ฟังก์ชันพลังงาน	$g = g(\sigma_{ij}, \alpha_{ij})$	$f = f(\varepsilon_{ij}, \alpha_{ij})$
ฟังก์ชันการสูญเสียพลังงาน	$d = d^g(\sigma_{ij}, \alpha_{ij}, \dot{\alpha}_{ij}) \geq 0$	$d = d^f(\varepsilon_{ij}, \alpha_{ij}, \dot{\alpha}_{ij}) \geq 0$
ความเค้นทั่วไป	$\bar{\chi}_{ij} = -\frac{\partial g}{\partial \alpha_{ij}}$	$\bar{\chi}_{ij} = -\frac{\partial f}{\partial \alpha_{ij}}$
ความเค้นและความเครียด	$\varepsilon_{ij} = -\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$	$\sigma_{ij} = \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{ij}}$
ความเค้นสูญเสียทั่วไป	$\chi_{ij} = \frac{\partial d^g}{\partial \dot{\alpha}_{ij}}$	$\chi_{ij} = \frac{\partial d^f}{\partial \dot{\alpha}_{ij}}$
ฟังก์ชันคราก	$y = y^g(\sigma_{ij}, \alpha_{ij}, \chi_{ij}) = 0$	$y = y^f(\varepsilon_{ij}, \alpha_{ij}, \chi_{ij}) = 0$
กฎการไหล	$\dot{\alpha}_{ij} = \lambda \frac{\partial y^g}{\partial \chi_{ij}}$	$\dot{\alpha}_{ij} = \lambda \frac{\partial y^f}{\partial \chi_{ij}}$

### 2.8.2 แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตรา

Houlsby and Puzrin (2001) [5] ได้อธิบายที่มาของแบบจำลองพลาสติกสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราจาก 2 ปริมาณทางอุณหพลศาสตร์เช่นเดียวกับแบบจำลองพลาสติกสำหรับวัสดุที่ไม่ขึ้นกับอัตรา (Rate-independent model) โดยนิยามฟังก์ชันพลังงานให้มีรูปแบบฟังก์ชันและความหมายไม่แตกต่างไปจากแบบจำลองสำหรับวัสดุที่ไม่ขึ้นกับอัตรา แต่สิ่งที่แตกต่างออกไปคือฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานจะนิยามมาจากผลรวมของปริมาณทางอุณหพลศาสตร์ 2 ปริมาณคือ force potential,  $z$  และ flow potential,  $w$  โดยฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้โดยความสัมพันธ์ เลอจองด์ทรานส์ฟอร์ม (Legendre transformation) ดังตารางที่ 2.4 ที่แสดงการเปรียบเทียบฟังก์ชันสำหรับแบบจำลองของวัสดุที่ไม่ขึ้นกับอัตราและวัสดุที่ขึ้นกับอัตรา

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบสมการของแบบจำลองสำหรับวัสดุขึ้นกับอัตราและวัสดุไม่ขึ้นกับอัตรา

	แบบจำลองแบบไม่ขึ้นกับอัตรา	แบบจำลองแบบขึ้นกับอัตรา
ฟังก์ชันพลังงาน	ใช้เหมือนกันทั้งสองแบบจำลอง	
ฟังก์ชันที่นิยามแตกต่าง	Dissipation function (d) Yield function (y)	Force potential (z) Flow potential (w)
ความเค้นสูญเสียทั่วไป	$\chi_{ij} = \frac{\partial d}{\partial \dot{\alpha}_{ij}}$	$\chi_{ij} = \frac{\partial z}{\partial \dot{\alpha}_{ij}}$
ความเค้นสูญเสียทั่วไป	$\chi_{ij} = \frac{\partial d}{\partial \dot{\alpha}_{ij}}$	$\chi_{ij} = \frac{\partial z}{\partial \dot{\alpha}_{ij}}$
การแปลงรูปแบบด้วย เลอจองด์ทรานส์ฟอร์ม	$\lambda y = \chi_{ij} \dot{\alpha}_{ij} - d = 0$	$w = \chi_{ij} \dot{\alpha}_{ij} - z = d - z$
กฎการไหล	$\dot{\alpha}_{ij} = \lambda \frac{\partial y}{\partial \chi_{ij}}$	$\dot{\alpha}_{ij} = \frac{\partial w}{\partial \chi_{ij}}$



รูปที่ 2.23 แสดงรูปแบบกลศาสตร์ของแบบจำลองความหนืดเชิงเส้น 1 มิติ [5]

เพื่อยกตัวอย่างให้เห็นถึงรูปแบบฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานของแบบจำลองสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราอย่างง่ายด้วยพฤติกรรมอีลาสโตพลาสติกแบบหนืดจะใช้แบบจำลองความหนืดเชิงเส้นแบบ 1 มิติ ดังรูปที่ 2.23 ซึ่งเป็นการรวมของแบบจำลองอีลาสติก-พลาสติกสมบูรณ์ (elastic-perfectly plastic model) ต่อขนานกับแบบจำลองอีลาสติกแบบหนืด (visco elastic model) ซึ่งเมื่อนำฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานของแบบจำลองอีลาสติกแบบหนืดที่นิยามได้ว่า  $d = \mu \dot{\alpha}^2$  รวมเข้ากับของฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานของแบบจำลองอีลาสโตพลาสติกสมบูรณ์ที่นิยามว่า  $d = c|\dot{\alpha}|$  จะทำให้ได้ฟังก์ชันการสูญเสีย

พลังงานที่รวมพฤติกรรมแบบหนืดและแบบพลาสติกสมบูรณ์เข้าด้วยกัน (Viscoplastic model) ในรูปแบบอย่างง่าย ซึ่งฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานจะออกมาในรูปของสมการ

$$d = c|\dot{\alpha}| + \mu\dot{\alpha}^2 \quad (2.18)$$

ฟังก์ชันต่าง ๆ ของแบบจำลองความหนืดเชิงเส้นแบบ 1 มิติ สามารถนิยามขึ้นได้ตามการนิยามฟังก์ชันสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งผลสรุปฟังก์ชันได้แสดงดังตารางที่ 2.5 ซึ่งโดยรวมแล้วแบบจำลองความหนืดเชิงเส้นมีศักยภาพเพียงพอสำหรับการจำลองผลการทดสอบแรงอัดสามแกนเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดไม่มากจนเกินไป แต่เมื่อนำมาใช้ในการแก้ปัญหาทางธรณีเทคนิคที่มีความซับซ้อน การใช้แบบจำลองที่สลับซับซ้อนมากขึ้น เช่น ใช้ควบคู่กับทฤษฎี Rate process theory อาจจะมีเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดย Houlsby and Puzrin (2001) [5] ได้อธิบายแบบจำลองของวัสดุที่ขึ้นกับอัตราบนพื้นฐานของ Rate process theory (Mitchell, 1976) ด้วยฟังก์ชันการสูญเสียพลังงาน

$$d = c|\dot{\alpha}| + \mu r \dot{\alpha} \sinh^{-1}\left(\frac{\dot{\alpha}}{r}\right) \quad (2.19)$$

ตามการนิยามฟังก์ชันสำหรับวัสดุแบบขึ้นกับอัตราดังแสดงในตารางที่ 2.4 เมื่อนำมาใช้ในแบบจำลองที่อยู่บนพื้นฐาน Rate process จะได้ฟังก์ชันดังแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (small strain rate, เข้าใกล้ศูนย์) น้อยมาก ๆ จะพบว่าฟังก์ชัน flow potential ในแบบจำลองที่อ้างถึง Rate process จะให้ค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากแบบจำลองแบบเชิงเส้น

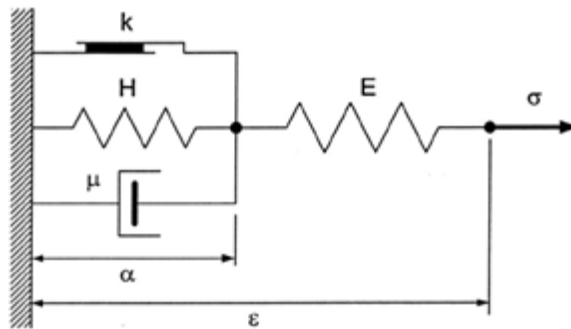
$$\text{หรือ } w \approx \frac{(|\mathcal{X}| - c)^2}{2\mu} \quad \text{ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก } \cosh(x) \approx 1 + \frac{x^2}{2} + \dots$$

### 2.8.3 แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราที่ใช้หลายตัวแปรภายใน

แบบจำลองพลาสติกชนิดนี้เป็นรูปแบบหนึ่งของแบบจำลองสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราบนพื้นฐานทฤษฎีไฮเปอร์พลาสติก ซึ่งต่อขยายมาจากแบบจำลองพลาสติกสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราด้วยตัวแปรภายในตัวเดียว (Rate-dependent plasticity with single internal variable) และเพื่อความเข้าใจแบบจำลองจะแสดงตัวอย่างการนิยามฟังก์ชันต่าง ๆ ให้เห็นถึงที่มาของสมการในการนำไปใช้งานในแบบจำลองพลาสติกสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราด้วยตัวแปรภายในตัวเดียว ซึ่งรวมพฤติกรรมการแข็งตัว (Hardening behavior) ของวัสดุมาร่วมพิจารณาในแบบจำลองด้วย โดยมีรูปแบบกลศาสตร์ของวัสดุดังรูปที่ 2.24

ตารางที่ 2.5 สรุปสมการของแบบจำลองของวัสดุที่ขึ้นกับอัตรา [5]

	แบบจำลองความ หนืดเชิงเส้น	แบบจำลองความหนืด บนพื้นฐาน rate process
ฟังก์ชันการสูญเสีย พลังงาน	$d = c \dot{\alpha}  + \mu\dot{\alpha}^2$	$d = c \dot{\alpha}  + \mu r \dot{\alpha} \sinh^{-1}\left(\frac{\dot{\alpha}}{r}\right)$
Force potential	$z = c \dot{\alpha}  + \frac{\mu\dot{\alpha}^2}{2}$	$z = c \dot{\alpha}  + \mu r \left[ \dot{\alpha} \sinh^{-1}\left(\frac{\dot{\alpha}}{r}\right) + r - \sqrt{r^2 + \dot{\alpha}^2} \right]$
Flow potential	$w = \frac{\langle  \chi  - c \rangle^2}{2\mu}$	$w = \mu r^2 \left[ \cosh\left(\frac{\langle  \chi  - c \rangle}{\mu r}\right) - 1 \right]$
กฎการไหล	$\dot{\alpha} = \frac{\langle  \chi  - c \rangle}{\mu} \text{sgn}(\chi)$	$\dot{\alpha} = r \sinh\left(\frac{\langle  \chi  - c \rangle}{\mu r}\right) \text{sgn}(\chi)$



รูปที่ 2.24 แสดงกลศาสตร์ของแบบจำลองสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราด้วยตัวแปรภายในตัวเดียว [5]

จากรูปที่ 2.24 สามารถนิยามสมการพลังงาน (Energy function) ในรูปแบบของ Gibbs free energy ได้ด้วยสมการที่ (2.20)

$$g = -\frac{\sigma^2}{2E} - \sigma\alpha + \frac{H\alpha^2}{2} \quad (2.20)$$

ส่วนสมการการสูญเสียพลังงาน (Dissipation function) สามารถนิยามได้ด้วยสมการที่ (2.21)

$$d = k|\dot{\alpha}| + \mu\dot{\alpha}^2 \quad (2.21)$$

ด้วยหลักการของแบบจำลองสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราตามแสดงไว้ในตารางที่ 2.4 ซึ่งสามารถนิยามฟังก์ชัน force potential,  $z$  ได้ด้วยสมการที่ (2.22)

$$z = k|\dot{\alpha}| + \frac{\mu\dot{\alpha}^2}{2} \quad (2.22)$$

ตามการนิยามฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ได้จากหลักการของทฤษฎีไฮเปอร์พลาสติกข้างต้น เมื่อทำการ Differential ฟังก์ชันพลังงานและการสูญเสียพลังงานจะได้ความเครียด ( $\varepsilon$ ) ความเค้นทั่วไป ( $\bar{\chi}$ ) และความเค้นการสูญเสียทั่วไป ( $\chi$ ) ดังสมการที่ (2.23), (2.24) และ (2.25) ตามลำดับ

$$\varepsilon = \frac{\partial g}{\partial \sigma} = \frac{\sigma}{E} + \alpha \quad (2.23)$$

$$\bar{\chi} = -\frac{\partial g}{\partial \alpha} = \sigma - H\alpha \quad (2.24)$$

$$\chi = \frac{\partial z}{\partial \dot{\alpha}} = k \cdot sg(\dot{\alpha}) + \mu \dot{\alpha} \quad (2.25)$$

เมื่อ  $sg(x)$  คือ *signumfunktion* ซึ่งเป็นรูปแบบฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ให้ค่า  $sg(x) = 1$  เมื่อ  $x > 0$ ,  $sg(x) = -1$  เมื่อ  $x < 0$  เท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว  $sg(x) = 0$  เมื่อ  $x = 0$  ซึ่ง ณ ที่นี้จะละเว้นไว้และไม่นิยามค่า  $sg(x)$  ให้มีค่าภายในช่วง  $-1$  ถึง  $1$  เพื่อมิให้ปัญหาการเกิด convex มีขึ้น จึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมการขึ้นใหม่ เพื่อให้สามารถนิยามความหมายได้เมื่อ  $\dot{\alpha} = 0$  และ  $\dot{\alpha} \neq 0$

ในกรณีนี้จะเริ่มจากพิจารณาในกรณี  $\dot{\alpha} \neq 0$  ซึ่งหมายความว่ามีการเคลื่อนตัวแบบพลาสติกเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ความเค้นทั่วไป ( $\bar{\chi}$ ) มีค่าเท่ากับความเค้นสูญเสียทั่วไป ( $\chi$ ) และเพื่อการอธิบายกรณี  $\dot{\alpha} \neq 0$  ได้กระชับยิ่งขึ้นจะแปลงสมการ (2.25) ได้ด้วยสมการ

$$\sigma - H\alpha = (k + \mu|\dot{\alpha}|) \cdot sg(\dot{\alpha}) \quad (2.26)$$

เมื่อพิจารณาให้ละเอียดขึ้นพบว่าเมื่อเกิดการเคลื่อนตัวแบบพลาสติก ซึ่งหมายความว่า  $|\sigma - H\alpha| > k$  หากพิจารณาสมการที่ (2.23) จะพบว่าเครื่องหมายของพจน์  $\sigma - H\alpha$  ต้องมีเครื่องหมายเช่นเดียวกับ  $\dot{\alpha}$  ในขณะที่หากพิจารณาในกรณี  $|\sigma - H\alpha| \leq k$  นั่นคือ  $\dot{\alpha} = 0$  เป็นผลทำให้  $\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E}$  หรือจะเกิดเฉพาะการเคลื่อนตัวแบบอีลาสติก ซึ่งขอบเขตของการเคลื่อนตัวแบบอีลาสติกจะกำหนดด้วย "kinematic hardening yield surface"  $|\sigma - H\alpha| - k = 0$  จะเห็นว่าถ้าพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกด้วยระดับของความเค้นในพจน์  $|\sigma - H\alpha| - k$  จะสามารถนิยามได้ทั้งกรณี  $\dot{\alpha} = 0$  และ  $\dot{\alpha} \neq 0$  ซึ่งทำให้การตอบสนองของความเค้นและความเครียดสมบูรณ์มากขึ้น และสามารถจัดรูปแบบสมการที่ (2.26) ขึ้นใหม่ได้ว่า

$$\dot{\alpha} = \frac{\langle |\sigma - H\alpha| - k \rangle}{\mu} sg(|\sigma - H\alpha|) \quad (2.27)$$

เมื่อ  $\langle x \rangle$  คือ *Macaulay brackets* ซึ่งเป็นรูปแบบฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ให้ค่า  $\langle x \rangle = 0$  เมื่อ  $x < 0$  และให้ค่า  $\langle x \rangle = x$  เมื่อ  $x \geq 0$  ซึ่งผลที่ได้จากสมการที่ (2.27) จะทำให้รูปแบบสมการเป็นไปตามความหมายของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์และทำให้แบบจำลองมีความรัดกุมมากยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการที่ (2.27) จะพบว่าคือฟังก์ชันกฎการไหลในตารางที่ 2.5

จากสมการที่ (2.27) จะเป็นผลทำให้สามารถนิยามสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดได้ว่า

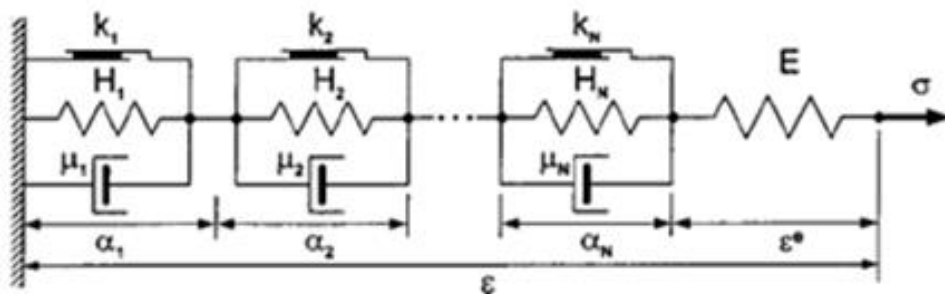
$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\langle |\sigma - H\alpha| - k \rangle}{\mu} \text{sg}(|\sigma - H\alpha|) \quad (2.28)$$

สมการที่กำหนดขึ้นข้างต้นเป็นการกำหนดขึ้นจากฟังก์ชัน force potential,  $z$  ซึ่งสามารถกำหนดสมการต่าง ๆ จาก flow potential,  $w$  ได้เช่นกัน ซึ่งสมการ flow potential หาได้จากความสัมพันธ์  $w = d - z = \frac{\mu \dot{\alpha}^2}{2}$  เมื่อแทนค่า  $\dot{\alpha}$  ที่ได้จากสมการที่ (2.27) และแทนค่า  $|\sigma - H\alpha|$  ด้วย  $\chi$  จะได้สมการ flow potential ในรูปของ  $\chi$  ว่า

$$w = \frac{\langle |\chi| - k \rangle^2}{2\mu} \quad (2.29)$$

ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการหา  $\dot{\alpha}$  เริ่มจาก flow potential ในสมการที่ (2.29) จะมีกระชับกว่าเริ่มจาก force potential ในสมการที่ (2.22) ซึ่งเมื่อทำการ Differentiation สมการที่ (2.29) จะได้  $\dot{\alpha} = \frac{\partial w}{\partial \chi} = \frac{\langle |\chi| - k \rangle}{\mu} \text{sg}(\chi)$  จะให้รูปแบบสมการเหมือนกับสมการที่ (2.27) เมื่อแทนค่า  $\chi$  ด้วย  $|\sigma - H\alpha|$

จากการนิยามฟังก์ชันต่าง ๆ ตั้งแต่สมการที่ (2.20) ถึงสมการที่ (2.29) จะสามารถนำมาสร้างแบบจำลองพลาสติกสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราด้วยตัวแปรภายในตัวเดียวได้ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีผิวการวิบัติเพียงขอบเขตเดียว และเมื่อต้องการให้การตอบสนองของพฤติกรรมแบบอิลาสติกไปเป็นพฤติกรรมแบบอิลาสโตพลาสติกมีความราบเรียบมากขึ้น สามารถทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนผิวการวิบัติให้มากขึ้น ซึ่งเป็นที่มาของแบบจำลองพลาสติกสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราที่ใช้หลายตัวแปรภายใน (Rate-dependent plasticity with multiple internal variables) ซึ่งกลศาสตร์ของแบบจำลองได้แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงกลศาสตร์ของแบบจำลองสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราที่ใช้หลายตัวแปรภายใน [5]



จากกลศาสตร์ของแบบจำลองที่แสดงด้วยรูปที่ 2.25 จะพบว่าได้เพิ่มผิวการวิบัติเป็น  $N$  ขอบเขต โดยแต่ละส่วนจะต่อเชื่อมแบบอนุกรมต่อกัน ซึ่งจะทำให้ผลรวมของปริมาณพลาสติกทั้งหมดเท่ากับผลรวมของปริมาณพลาสติกในแต่ละส่วน ซึ่งสามารถนิยามฟังก์ชันพลังงาน, พลังงานการสูญเสีย, force potentials และ flow potentials ดังที่กล่าวมาข้างต้นได้ตั้งสมการ (2.30) ถึง (2.33)

$$g = -\frac{\sigma}{2E} - \sigma \sum_{n=1}^N \alpha_n + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N H_n \alpha_n^2 \quad (2.30)$$

$$d = \sum_{n=1}^N k_n |\dot{\alpha}_n| + \sum_{n=1}^N \mu_n \dot{\alpha}_n^2 \quad (2.31)$$

$$z = \sum_{n=1}^N k_n |\dot{\alpha}_n| + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \mu_n \dot{\alpha}_n^2 \quad (2.32)$$

$$w = \sum_{n=1}^N \frac{\langle |\chi_n| - k_n \rangle}{2\mu_n} \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.30) ถึง (2.33) เมื่อใช้หลักการของทฤษฎีไฮเปอร์พลาสติกสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตรา จะสามารถนิยามสมการตอบสนองของความเค้นและความเครียดได้ตั้งสมการที่ (2.34) ถึง (2.36)

$$d\varepsilon = \frac{1}{E} d\sigma + \sum_{n=1}^N \frac{\langle |\chi_n| - k_n \rangle}{\mu_n} sg(\chi_n) dt \quad (2.34)$$

$$\chi_n = \bar{\chi}_n = -\frac{\partial g}{\partial \alpha_n} = \sigma - H_n \alpha_n \quad (2.35)$$

$$d\alpha_n = \frac{\partial w}{\partial \chi_n} dt = \frac{\langle |\chi_n| - k_n \rangle}{\mu_n} sg(\chi_n) dt \quad (2.36)$$

จากสมการตอบสนองที่ได้จะสามารถนำไปสร้างแบบจำลองพลาสติกสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตราที่ใช้หลายตัวแปรภายในได้ ซึ่งสมมติให้แบบจำลองมีการเคลื่อนตัวแบบหนืดเชิงเส้น การตอบสนองของแบบจำลองจะขึ้นอยู่กับตัวแปรค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดในการแสดงพฤติกรรมแบบหนืด ซึ่งเป็นผลกระทบโดยตรงจากการควบคุมอัตราความเครียดในการทดสอบ เป็นผลทำให้กำลังรับหน่วยแรงเฉือนเป็นสัดส่วนกันอัตราความเครียด ในขณะที่ค่าแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการคำนวณจะเป็นผลจากการกำหนดค่า  $dt$  ในแต่ละขั้นของการเพิ่มความเครียดให้คำนวณละเอียดเพียงไร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดโดยเทคนิคการปรับเปลี่ยนอัตราความเครียด

## 2.8.4 แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีแบบขึ้นกับอัตราชนิดไม่เชิงเส้น

Puzrin and Houlsby (2001) [5] พัฒนาและใช้แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีแบบขึ้นกับอัตราชนิดไม่เชิงเส้น อธิบายพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของพฤติกรรมทางด้านกำลังรับแรงเฉือนกับวัสดุประเภทขึ้นกับอัตรา เช่น ดินเหนียว แบบจำลองนี้อาศัยหลักการอุณหพลศาสตร์ในการอธิบายพฤติกรรมอีลาสโตพลาสติก (Elasto-plastic behaviour) โดยการใช้สมการพลังงาน 2 ชนิด คือ สมการพลังงานของกิบส์ (Gibb free energy) และสมการพลังงานการไหล (Flow potential) นอกจากนี้แบบจำลองนี้ยังได้ใช้หลักการของผิวครากต่อเนื่อง (Continuous yield surface) เพื่อใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงในช่วงอีลาสติกและพลาสติก สำหรับการทำนายพฤติกรรมวัสดุประเภทดินเหนียวภายใต้อัตราความเครียดจะใช้ทฤษฎีกระบวนการอัตราด้วย ดังนั้นสมการพลังงานของกิบส์สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$g = -\frac{\sigma}{2E_0} - \sigma \int_0^1 \hat{\alpha} d\eta + \int_0^1 \frac{\hat{H}\hat{\alpha}^2}{2} d\eta \quad (2.37)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ความเค้น  $E_0$  คือ โมดูลัสเริ่มต้น ( $E_0 = 3G_0$  สำหรับเงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ)  $\hat{\alpha} = \hat{\alpha}(\eta)$  คือ ความเครียดพลาสติก และ  $\hat{H} = \hat{H}(\eta)$  คือ kernel function ซึ่งใช้สำหรับอธิบายรูปร่างของความเค้นและความเครียด

$$\hat{H}(\eta) = \frac{E_0}{2(a-1)} (1-\eta)^3 \quad (2.38)$$

เมื่อ  $a$  คือ ค่าคงที่สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างความแข็งตัว

สมการพลังงานการไหล

$$w = \mu r^2 \int_0^1 \left( \cosh \left( \frac{\left| \sigma - \hat{H}\hat{\alpha} - k_0 \exp(\alpha/\alpha_0)\eta \right|}{\mu r} \right) - 1 \right) d\eta \quad (2.39)$$

$$d\varepsilon = \frac{d\sigma}{E_0} + \left[ \int_0^1 r \sinh \left( \frac{\left| \sigma - \frac{E_0(1-\eta)^3 \hat{\alpha}}{2(a-1)} - k_0 \exp(-\alpha/\alpha_0)\eta \right|}{\mu r} \right) S(\sigma - \hat{H}\hat{\alpha}) d\eta \right] dt \quad (2.40)$$

โดยที่  $S(x)$  คือ ฟังก์ชันเครื่องหมาย (Signum) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$S(x) = -1, x < 0; -1 \leq S(x) \leq 1, x = 0; S(x) = 1, x > 0$$

สำหรับการทำนายพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียวที่อัตราความเครียดต่าง ๆ ต้องอาศัยพารามิเตอร์ในการทำนายทั้งหมด 6 พารามิเตอร์คือ ( $E_0, k_0, \mu, r, a, \alpha_0$ ) [6]

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราความเครียดที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของความเค้นความเครียดของดินเหนียว ได้มีผู้ให้ความสนใจและศึกษาด้านนี้กันอย่างแพร่หลาย โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

### 2.9.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง [4]

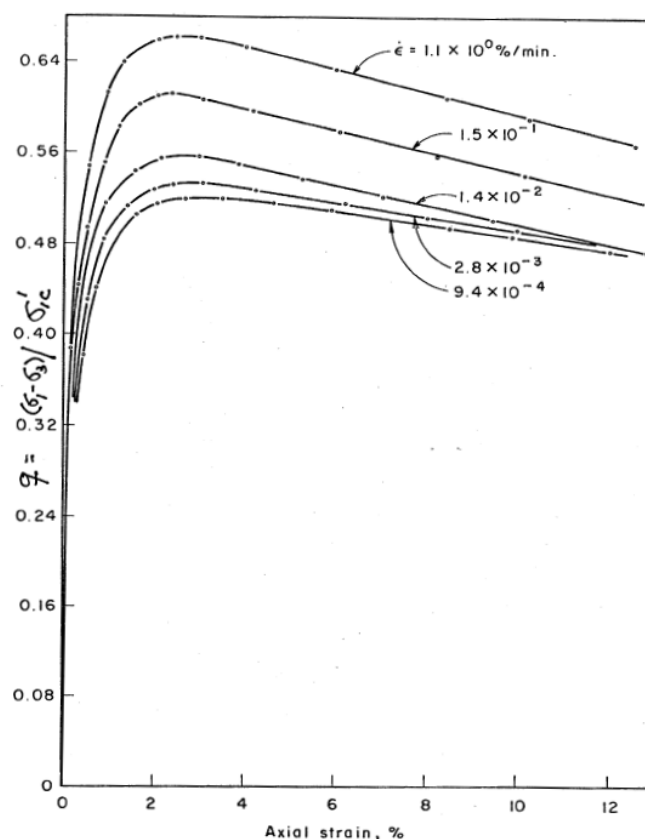
อัครเดช (2552) [4] ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพั้ง จากทั่วพื้นที่ในอำเภอปากพั้ง จ.นครศรีธรรมราช โดยการเจาะสำรวจดินและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่าชั้นดินเหนียวอ่อนปากพั้ง มีความลึกประมาณ 15.00 – 18.00 เมตรจากผิวดิน และจัดอยู่ในลักษณะของดินเหนียวอ่อนที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนในสนาม (Field vane shear test, FV - test) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.81 ตันต่อตารางเมตร เมื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการได้แก่ การทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined compression test) ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.67 และเมื่อทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ (Oedometer test) พบว่าทำให้ทราบว่าดินเหนียวปากพั้งมีค่าอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำ (Over consolidation ratio, OCR) มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.932 แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวปากพั้งเป็นดินที่มีลักษณะการอัดตัวแน่นปกติ (Normally consolidation clay) นอกจากนี้เมื่อหาค่าแรงยึดเหนี่ยวของมวลดินและมุมเสียดทานภายในแบบแรงดันรวมและแรงดันประสิทธิผล พบว่ามีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.80 ตันต่อตารางเมตร กับ 4.70 ตันต่อตารางเมตรและ 17.61 องศา กับ 25.47 องศา ตามลำดับ

### 2.9.2 Time-dependent behavior of undisturbed clay [2]

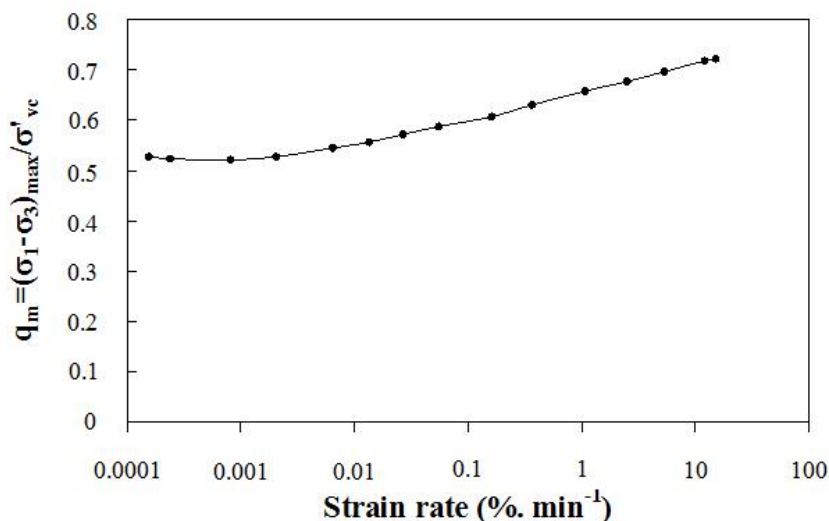
Vaid และ Campanella (1977) [2] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอัตราการเคลื่อนตัวและผลกระทบด้านเวลา (Time effect) ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของความเค้น (Stress) – ความเครียด (Strain) และพฤติกรรมด้านกำลังของดินเหนียวคงสภาพในท้องถิ่น ที่เรียกว่าดินเหนียวแฮนนี่ (Haney clay) ซึ่งเป็นดินเหนียวตักตะกอนที่ค่อนข้างไวตัวสูง (High sensitive) โดยการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ ผลของการวิจัยพบว่าการปรับเปลี่ยนอัตราความเครียด (Strain rate) จะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับหน่วยแรง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด (Peak deviator stress) ที่ทำการบรรทัดฐาน (Normalized) ด้วยหน่วยแรงประสิทธิผลของการอัดตัวคายน้ำ ดังแสดงรูปที่ 2.26 จะมีค่ามากที่สุดที่อัตราความเครียดเร็วที่สุด ซึ่งให้ค่าสูงกว่าค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุดที่อัตราความเครียดช้าสุดถึงร้อยละ 30 ในขณะที่ระดับของอัตราความเครียดไม่มีอิทธิพลต่อระดับความเครียดที่เกิดหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด ซึ่งทุกการทดสอบจะให้ค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุดที่ระดับความเครียดประมาณ ร้อยละ 2.5 ถึง 3.0 ซึ่งตรงกับข้อมูลการทดสอบในดินเหนียวคงสภาพแมกซิโก (Mexico city clay) โดยการวิจัยของแอลเบโร และแซนตาเยา (1973) [24]

นอกจากนี้ยังพบว่า กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะแปรผันโดยตรงกับลอการิทึมของอัตราความเครียด ซึ่งมีความสัมพันธ์จะเป็นแบบเส้นตรงในช่วงระดับอัตราความเครียดช่วงหนึ่งและเมื่อระดับอัตราความเครียดลดต่ำลง พบว่าจะเกิดขอบ เขตล่างของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ที่จะ

ไม่ทำให้กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำลดลงไปได้อีก ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอัตราความเครียดต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ โดยส่วนใหญ่ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ ร้อยละ 5 – 10 ในช่วงลอกการที่มของอัตราความเครียด (10 - fold) ซึ่งดินเหนียวแฮนนี่ (Haney clay) จะมีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10 ต่อ 1 ช่วงลอกการที่มของอัตราความเครียด ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับดินคงสภาพนอร์วีเจียน (Norwegian clay) ที่วิจัยโดยเบอริ และบเจอร์ม (1973) [25]



รูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ โดยการปรับเปลี่ยนอัตราความเครียดในงานวิจัยของ Vaid และ Campanella (1977) [2]



รูปที่ 2.27 แสดงผลกระทบของอัตราความเครียดต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในงานวิจัยของ Vaid และ Campanella (1977) [2]

### 2.9.3 Rate effect and cyclic loading of sensitive clays [26]

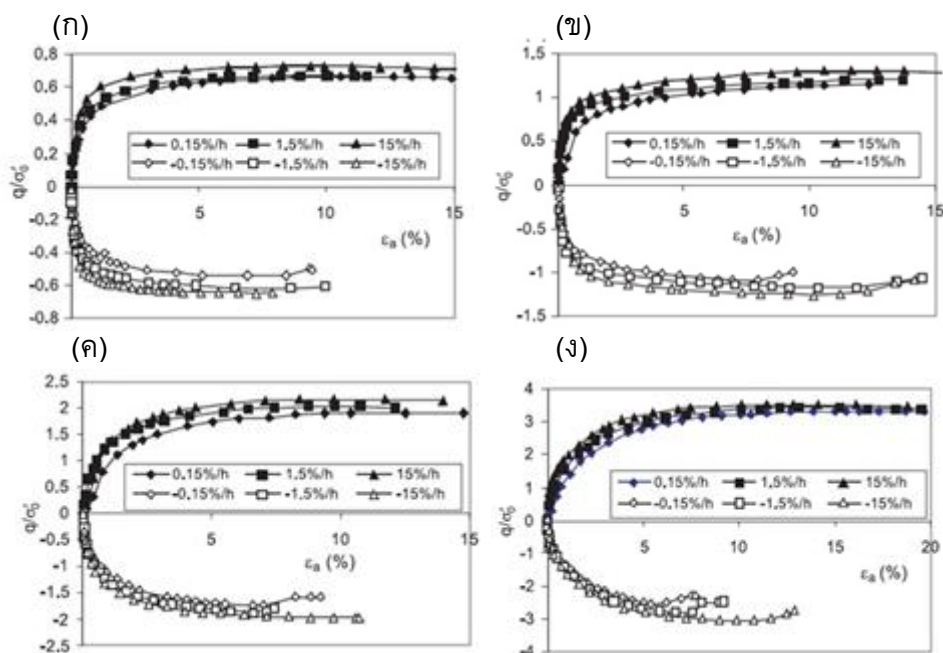
Guy และ Denis (1987) ได้ทำการทดสอบแรงอัดสามแกน โดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน 2 แบบคือ เครื่องมือแบบตั้งเดิมและแบบวัฏจักร (Monotonic and cyclic triaxial tests) เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดและแรงดันน้ำส่วนเกิน ซึ่งจะทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ โดยตัวอย่างดินที่มีนำมาทดสอบมีความไวตัวสูง ตัวอย่างที่นำมาใช้ทดสอบนำมาจาก 3 พื้นที่ (Grande - baleine clay , B - 6 clay และ Olgaclay) ซึ่งตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกของประเทศแคนาดา โดยทำการทดสอบดินเหนียวที่มีค่าการอัดแน่นปกติ (Normally consolidated) และดินเหนียวที่มีค่าการอัดแน่นเกินตัวมากกว่าปกติ (Naturally overconsolidated) ผลการทดสอบพบว่าดินเหนียวที่มีค่า OCR ปกติ อัตราความเครียดมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่าง รวมทั้งแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าดินที่มี OCR มากกว่าปกติ ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างดินที่เกิดการคืบ (Creep) ในขณะที่ทำการเฉือนตัวอย่าง ส่วนในดินเหนียวที่มีค่า OCR สูง อัตราความเครียดมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างเช่นเดียวกัน แต่ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าไม่มาก นอกจากนี้ดินที่มี OCR สูง ดินประเภทนี้จะมีขอบเขตการพิบัติสูงสุด (Peak strength envelope) ให้เห็น ทั้งนี้ค่าขอบเขตของการพิบัติจะลดลงเมื่ออัตราความเครียดลดลงอีกด้วย

#### 2.9.4 Rate-Dependent Undrained Shear Behavior of Saturated Clay [27]

Sheahan Ladd และ Germaine (1996) ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดต่อดินเหนียวบอสตัน (Boston blue clay, BBC) โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ และอัดตัวคายน้ำแบบปราศจากการเคลื่อนตัวด้านข้าง ( $K_0$ - consolidated) ที่ค่า OCR 4 ค่า คือ 1 2 4 และ 8 และเงื่อนไขด้วยอัตราความเครียดคงที่ 4 อัตรา คือ 0.05 0.5 5 และ 50 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง ตามลำดับผลการทดสอบทำให้ทราบว่าอัตราการเฉือนเร็ว (50 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง) ไม่มีผลกับค่า OCR โดยที่ค่าอัตราการเฉือนเร็วค่าความเค้นเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆ ค่าของ OCR ตรงข้ามกับที่อัตราการเฉือนช้า เมื่อค่า OCR เพิ่มขึ้นจะมีผลกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวบอสตัน ทั้งนี้ที่อัตราการเฉือนช้าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่ามากกว่าอัตราการเฉือนเร็วกว่าอีกด้วย

#### 2.9.5 Strain-rate-dependent stress-strain behavior of overconsolidated Hong Kong marine clays [28]

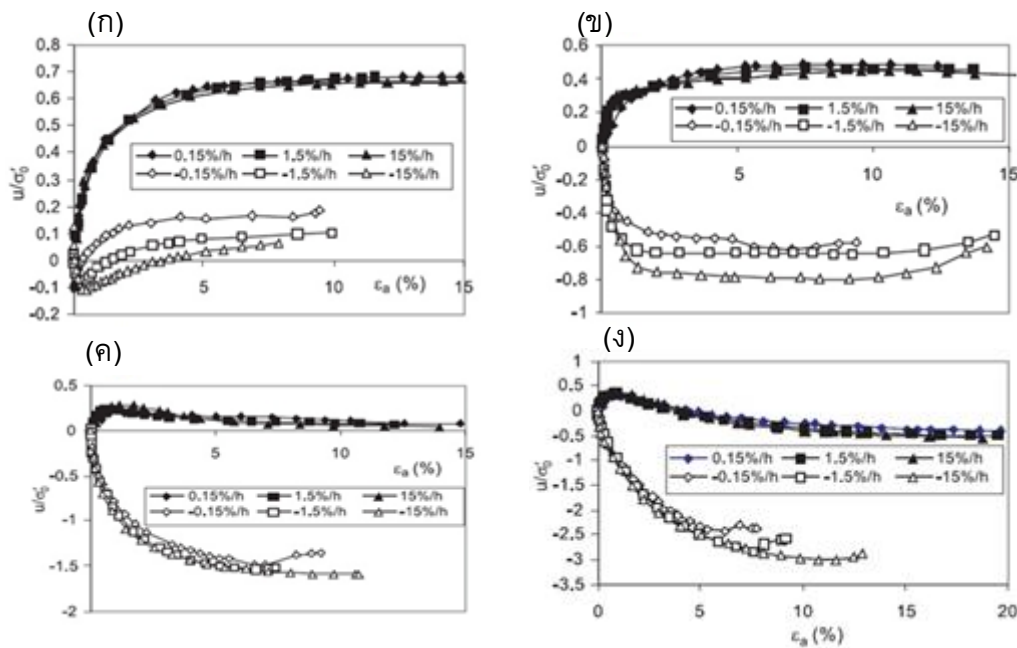
Jun - Geo Zhu และ Jian – Hua Yin (2000) ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียด (Strain rate dependent) ต่อพฤติกรรมของความเค้น (Stress) – ความเครียด (Strain)– กำลังรับแรง (Strength) รวมทั้งแรงดันน้ำส่วนเกินของดินเหนียวอ่อนชายทะเลฮ่องกง (Hong Kong Marine clay, HKMC) ซึ่งดินเหนียวดังกล่าวเกิดจากการตกตะกอนและการทับถมของดินเหนียวชายทะเล (Marine deposits) มีลักษณะดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำและทำการอัดตัวคายน้ำ (Consolidated) ทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการแน่นเกินตัว (Overconsolidation ratios, OCR) จำนวน 4 ค่า คือ 1 2 4 และ 8 และเงื่อนไขด้วยอัตราความเครียดคงที่จำนวน 3 อัตรา คือ  $\pm 0.15$   $\pm 1.5$  และ  $\pm 15$  เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง โดยทำการเฉือนภายใต้ 2 สภาวะ คือ การทดสอบแรงอัดและการทดสอบแรงดึง (Compression and extension shear state) เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่มีผลกระทบต่ออัตราความเครียด จากรูปที่ 2.28 แสดงผลการทดสอบแรงอัดและแรงดึงสามแกน ในกรณีการทดสอบแรงอัดพบว่าค่าความเค้นจะมากที่สุดที่อัตราความเครียดเร็วที่สุด ส่วนในกรณีการทดสอบแรงดึงนั้นให้ผลเช่นเดียวกัน ในทุกๆ ค่าของอัตราการอัดแน่นเกินตัว



(ก) OCR1 (ข)OCR2 (ค)OCR 4 และ (ง)OCR 8

รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการบรรทัดฐานค่าความเค้นเบี่ยงเบนกับความเครียดในแนวแกน [28]

จากรูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการบรรทัดฐานค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน(Pore - water pressure) กับอัตราความเครียดตามแนวแกน (Axial strain) ในกรณีการทดสอบแรงอัดสามแกน พบว่าที่ค่า OCR เท่ากับ 1 และ 2 ค่าของความดันน้ำส่วนเกินมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราความเครียดมีค่าน้อย ส่วนที่ค่า OCR เท่ากับ 4 และ 8 ค่าความดันน้ำส่วนเกินจะเริ่มต้นเพิ่มขึ้นก่อนแล้วจะค่อยๆ ลดลงเมื่ออัตราความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีการทดสอบแรงดึงสามแกนพบว่าที่ค่า OCR เท่ากับ 1 นั้นค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้น ที่ค่า OCR เท่ากับ 2 ค่าของความดันน้ำส่วนเกินจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความเครียดตามแนวแกนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ แรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนที่ค่า OCR เท่ากับ 4 และ 8 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีความคล้ายคลึงกันกล่าวคือ ค่าจะลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงแรกแล้วจึงคงที่

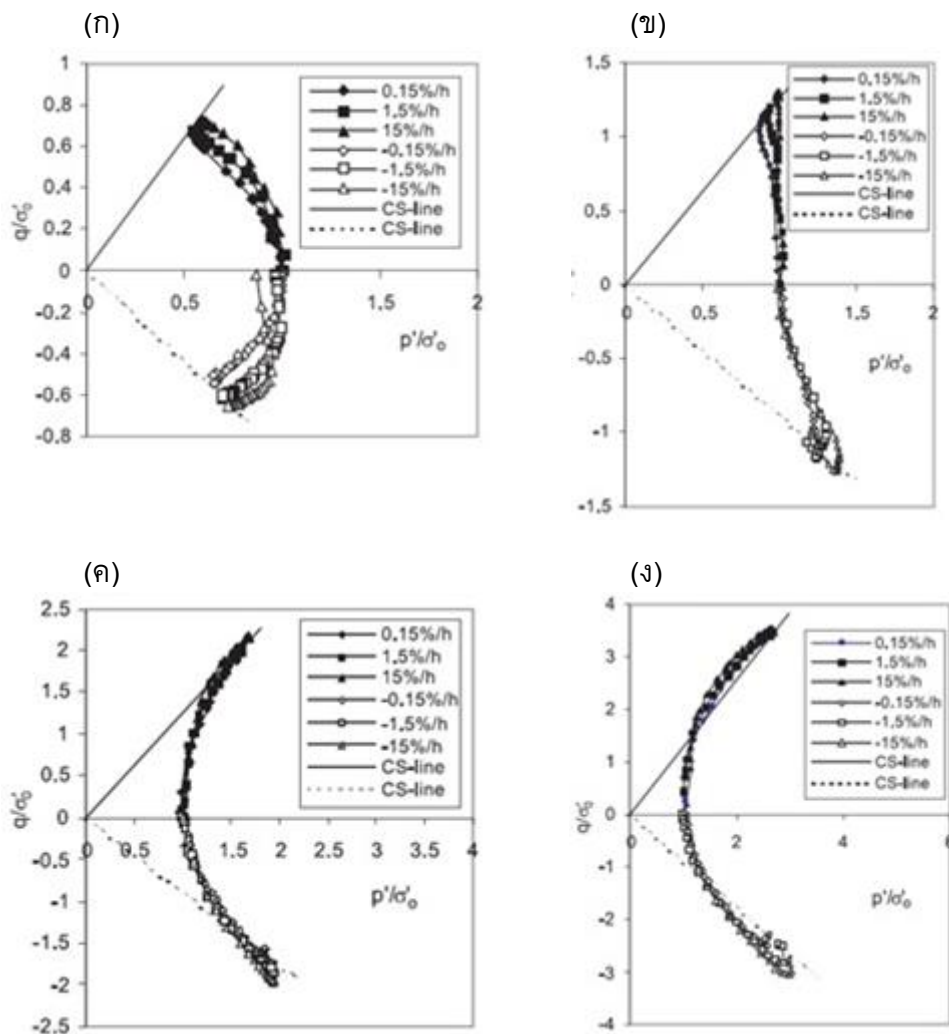


รูปที่ 2.29 สัมพันธ์ระหว่างการบรรทัดฐานค่าแรงดันน้ำส่วนเกินความเครียดในแนวแกน [28]

(ก) OCR1 (ข)OCR2 (ค)OCR 4 (ง)OCR 8

จากรูปที่ 2.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการบรรทัดฐานค่าวิถีความเค้นประสิทธิผล (Effective stress path) กับความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย (Mean effective stress) พบว่าที่ค่า OCR เท่ากับ 1 เส้นทางเดินของวิถีความเค้นจะเบนไปทางด้านซ้ายเข้าหาเส้นสถานะวิกฤต (Critical state line, CSL) ทั้งในกรณีการทดสอบแรงอัดและแรงดึงสามแกน แต่ในการทดสอบแรงดึงสามแกนที่อัตราความเครียดเฉือน -15 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง นั้นค่าเริ่มต้นของวิถีความเค้นไม่ได้เริ่มต้นที่จุด (1.0, 0) ส่วนที่ค่า OCR เท่ากับ 2 เส้นทางเดินของวิถีความเค้นเกือบจะตั้งฉากกับเส้น CSL สำหรับการทดสอบแรงอัดโดยเส้นทางเดินของวิถีความเค้นจะเบนกลับไปทางขวาเล็กน้อยส่วนการทดสอบแรงดึง ที่ค่า OCR เท่ากับ 4 และ 8 วิถีความเค้นจะเบนไปทางขวาเข้าหาเส้น CSL ทั้งในกรณีการทดสอบแรงอัดและการทดสอบแรงดึงสามแกน แต่ที่ค่า OCR เท่ากับ 8 ของการทดสอบแรงอัดนั้นเส้นทางเดินของวิถีความเค้น จะเดินทางออกไปจากเส้นสถานะวิกฤตเคลื่อนออกไปก่อนเล็กน้อยแล้วเบนกลับมาหาเส้นสถานะวิกฤต



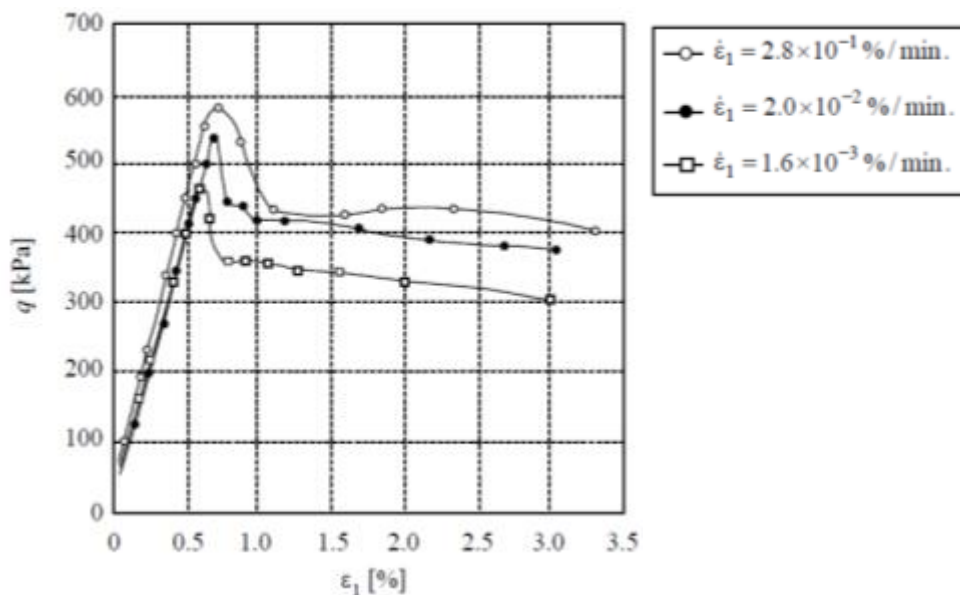


(ก) OCR1 (ข) OCR2 (ค) OCR 4 และ (ง) OCR 8

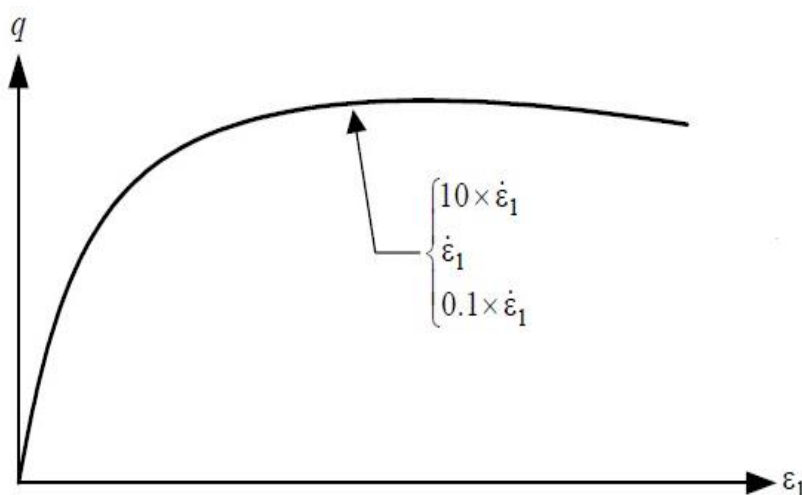
รูปที่ 2.30 การบรรทัดฐานค่าวิถึความเค้นของดินเหนียวชายทะเลฮ่องกง [28]

## 2.9.6 Evaluation time-dependent behavior of soils [29]

Mortem Anders และ Lade (2004) [29] ได้ศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นกับอัตรา (ขึ้นกับเวลา) ของดินทรายและดินเหนียวโดยการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรม การคืบ (Creep behavior) พฤติกรรมการผ่อนคลายของความเค้น (Stress relaxation behavior) รวมทั้งผลกระทบของความเครียดสะสม (Accumulated effect) เนื่องจากเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าพฤติกรรม Isotach ซึ่งจากการศึกษาพบว่าผลกระทบจากอัตราความเครียดจะ แสดงพฤติกรรมเฉพาะดินเม็ดละเอียดหรือดินเหนียวเท่านั้น ไม่มีผลกับดินเม็ดหยาบ เช่น ทราย จากรูป ที่ 2.31 แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวมีขอบเขตการแสดงพฤติกรรม Isotach และรูปที่ 2.32 แสดงให้เห็นว่า ดินทรายแสดงพฤติกรรมที่ไม่ Isotach นำไปสู่ข้อสรุปที่ว่า พฤติกรรมที่ขึ้นกับอัตรานั้นจะไม่ส่งผลกับดิน ทราย แต่จะส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับดินเหนียวนั่นเอง



รูปที่ 2.31 พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียว Saint – Jean-Vianny clay ในการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ [29]

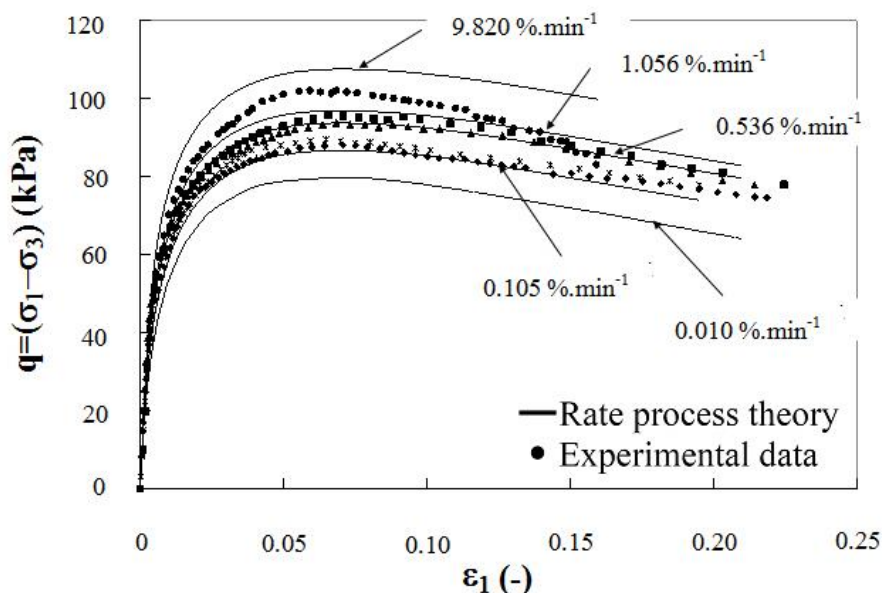


รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินทราย [29]

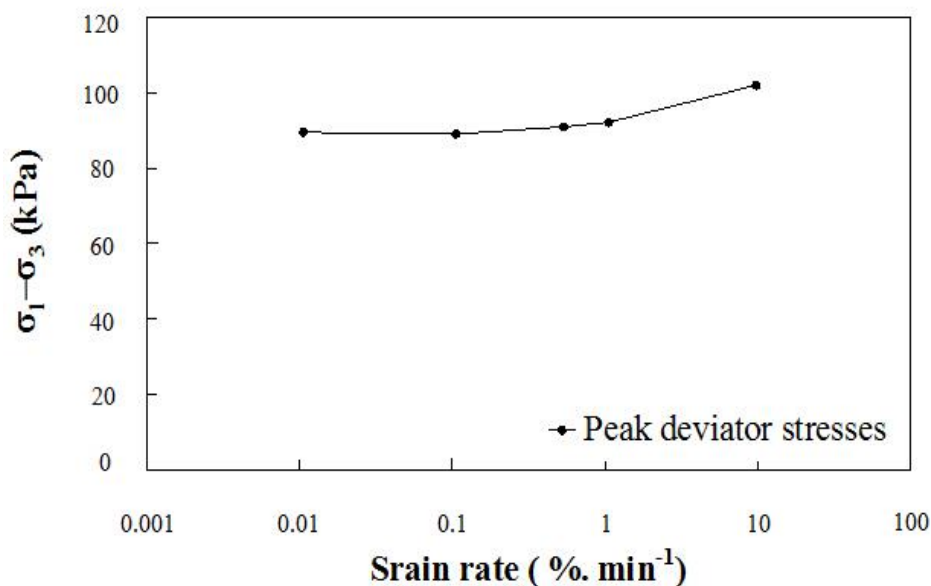
### 2.9.7 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียวโดยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียด [3]

วีระ และ สุขษรฐ์ (2550) [3] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดของดินเหนียวกรุงเทพฯ และสรุปว่าดินเหนียวกรุงเทพฯ มีพฤติกรรมแบบความหนืดแบบไม่เชิงเส้นเช่นเดียวกับดินเหนียวแฮนนี่ (Haney clay) ความสัมพันธ์กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ จะแปรผันตรงกับลอการิทึมของอัตราความเครียดแบบไม่เชิงเส้น นอกจากนี้ทำการจำลองพฤติกรรมการรับหน่วยแรงเฉือนของดินเหนียวในแบบจำลอง เปรียบเทียบกับผลการทดสอบหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ ในห้องปฏิบัติการ ที่กำหนดอัตราความเครียดคงที่ 0.01 เปอร์เซ็นต์ถึง 10.0 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดต่อ

นาที่ โดยการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ความหนืดในแบบจำลอง จนกระทั่งผลที่ได้จากแบบจำลอง สัมพันธ์กับผลที่ได้จากการทดสอบจริง ซึ่งผลสรุปที่ได้ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีสำหรับวัสดุที่ขึ้นกับอัตรา สามารถจำลองพฤติกรรมแบบหนืดของดินเหนียวกรุงเทพฯ และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียว กรุงเทพฯ จะมีค่าในช่วงประมาณ  $3.24 \times 10^3 - 3.60 \times 10^3$  kPa.s โดยผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 2.33 และรูปที่ 2.34



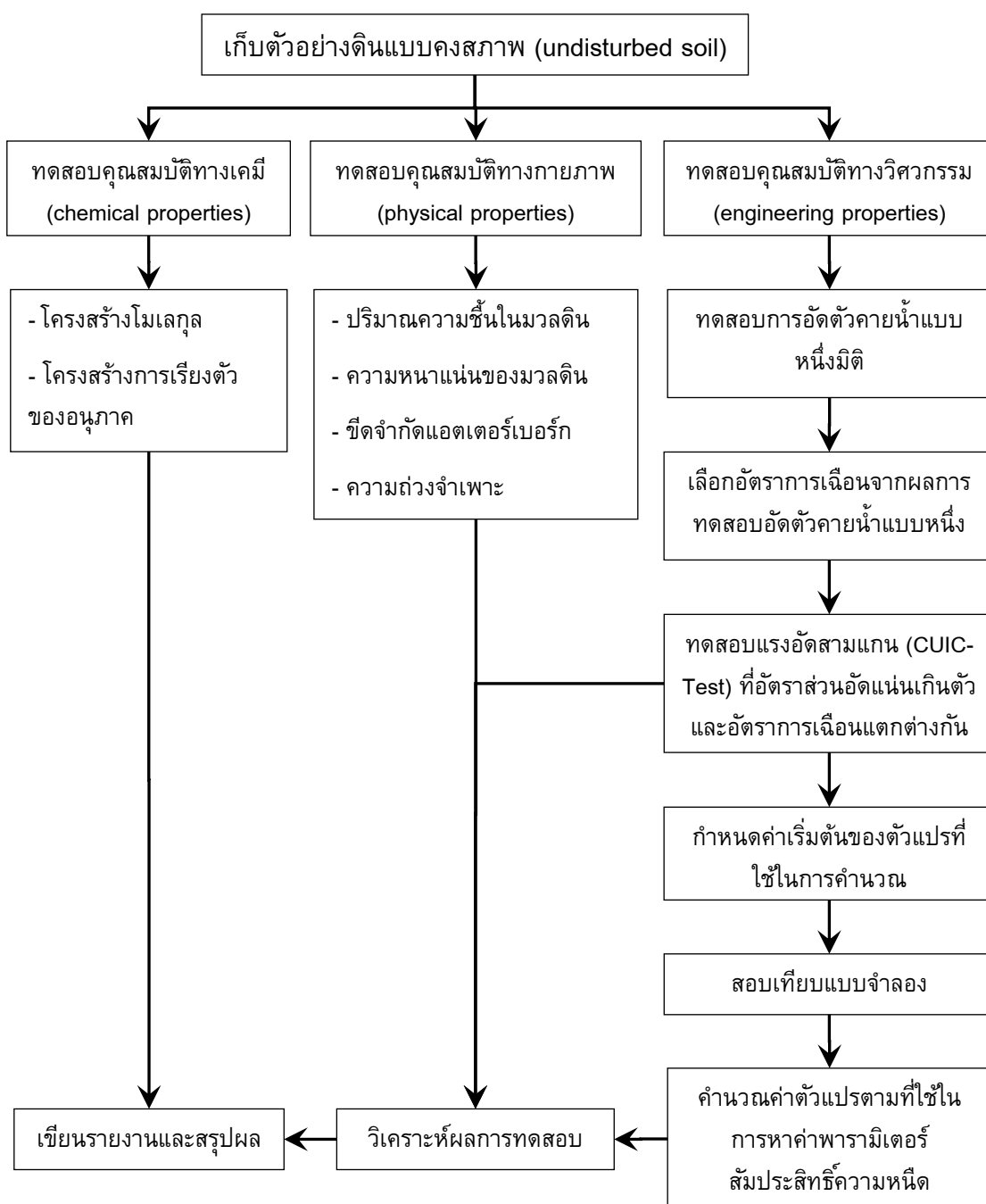
รูปที่ 2.33 ผลกระทบของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ ต่ออัตราความเครียด [3]



รูปที่ 2.34 ผลกระทบของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ ต่ออัตราความเครียด [3]

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมความหนืด (Viscosity) ของดินเหนียวปากพั้ง โดยขั้นตอนการดำเนินงาน สามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วนดังนี้ การเก็บตัวอย่างดิน การทดสอบหาคุณสมบัติทางเคมี การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ การทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรมของดินในห้องปฏิบัติการ วิเคราะห์พฤติกรรมความหนืดด้วยทฤษฎีกระบวนการอัตราพร้อมกับแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีแบบขึ้นกับอัตรา เพื่ออธิบายค่าความความหนืดของดินเหนียวปากพั้ง และการสรุปผลการทดสอบ โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในภาพรวมได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1

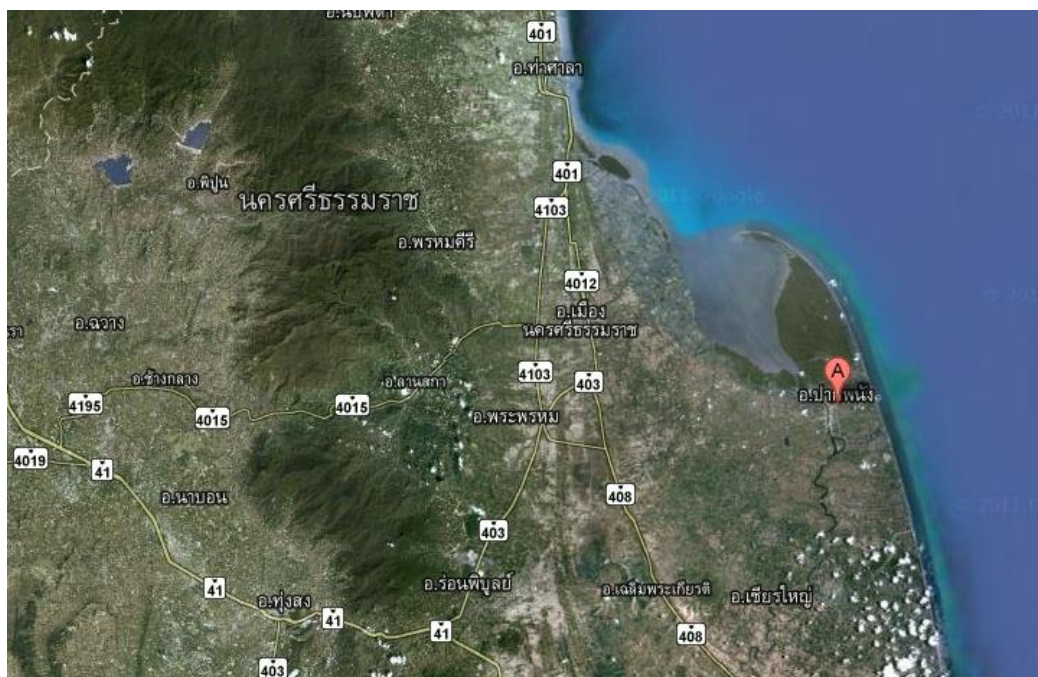


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

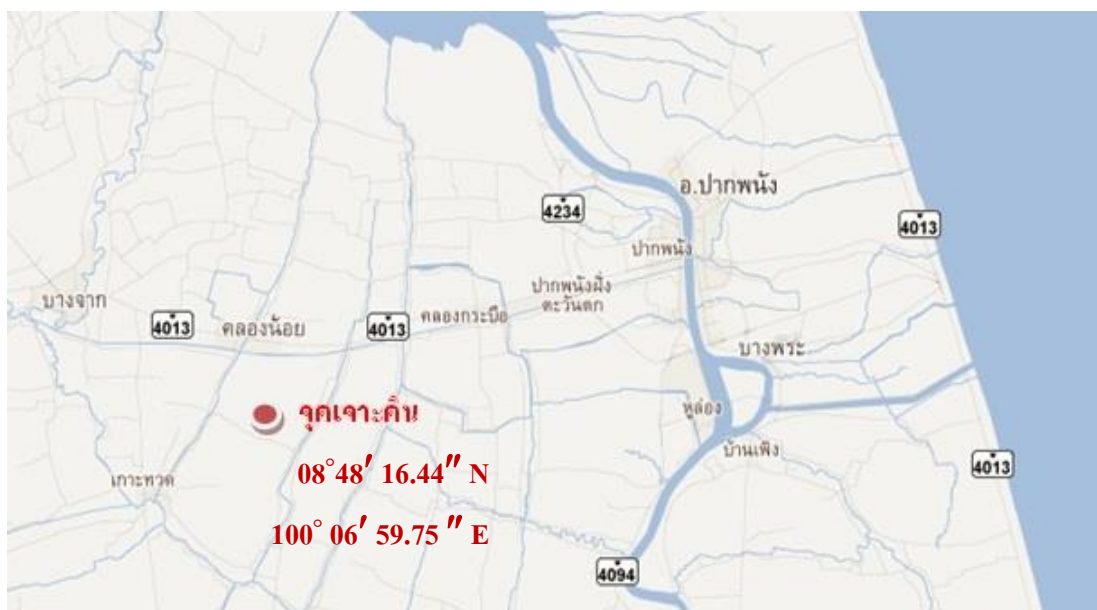
### 3.1 การเก็บตัวอย่างดินและวิธีการเก็บตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เก็บมาจากโรงเรียนบ้านปากคลอง ตำบลคลองน้อย อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยทำการเจาะเก็บตัวอย่างดินที่ช่วงระดับความลึก 3.5 – 10 เมตรเป็นจำนวน 3 หลุม โดยรายละเอียดของสถานที่เจาะเก็บตัวอย่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3 ในการเจาะสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่างดิน ทำการเก็บตัวอย่างดินโดยวิธี เจาะล้าง (Wash boring) และทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed sample) โดยใช้กระบอกผนังบาง (Shelby tube) ซึ่งจะทำให้การเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนทุกระยะ 1.50 เมตร จนถึงชั้นดินเหนียวแข็งดังแสดงในรูปที่ 3.4(ก) และ (ข)

ในขั้นตอนของการขนส่งตัวอย่างดินเหนียวนั้นเป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญมากจะต้องขนส่งอย่างระมัดระวัง เพื่อไม่ให้ดินถูกรบกวน (Disturb) เนื่องจากเมื่อดินถูกรบกวนจะทำให้ความสามารถในการรับแรงของดินเหนียวเปลี่ยนแปลงไป โดยมากมักจะทำให้กำลังลดลง ผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการก็จะผิดไปจากความเป็นจริงได้ส่วนการเก็บรักษาก่อนตัวอย่างที่ตัดแต่งเป็นก้อนเพื่อรอทำการทดสอบนั้นจะต้องติดฉลากระบุความลึก หมายเลขหลุมเจาะ และวันที่เก็บดังแสดงในรูปที่ 3.4(ค) จากนั้นนำไปเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้น เพื่อรอนำไปใช้ในการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายทางอากาศพื้นที่อำเภอปากพนัง



รูปที่ 3.3 แผนที่แสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 แสดงการเก็บตัวอย่างดินเหนียวปากพนัง

(ก) แสดงการเก็บตัวอย่างดินเหนียวปากพนัง (ข) แสดงการบรรจุดินในกระบอกพ่นบาง

### 3.2 การทดสอบหาสมบัติทางกายภาพ (Index Properties)

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนจากหลุมเจาะบริเวณอำเภอบางแพ่งในการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพจะทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของดินที่สามารถสังเกตหรือประเมินเบื้องต้นได้จากภายนอกเช่น รูปร่าง ขนาด สี ตลอดจนพฤติกรรมของดินที่แสดงออกมาภายนอก การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวปากแพ่งจะกระทำไปพร้อมกับการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมโดยการทดสอบจะใช้วิธีการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ

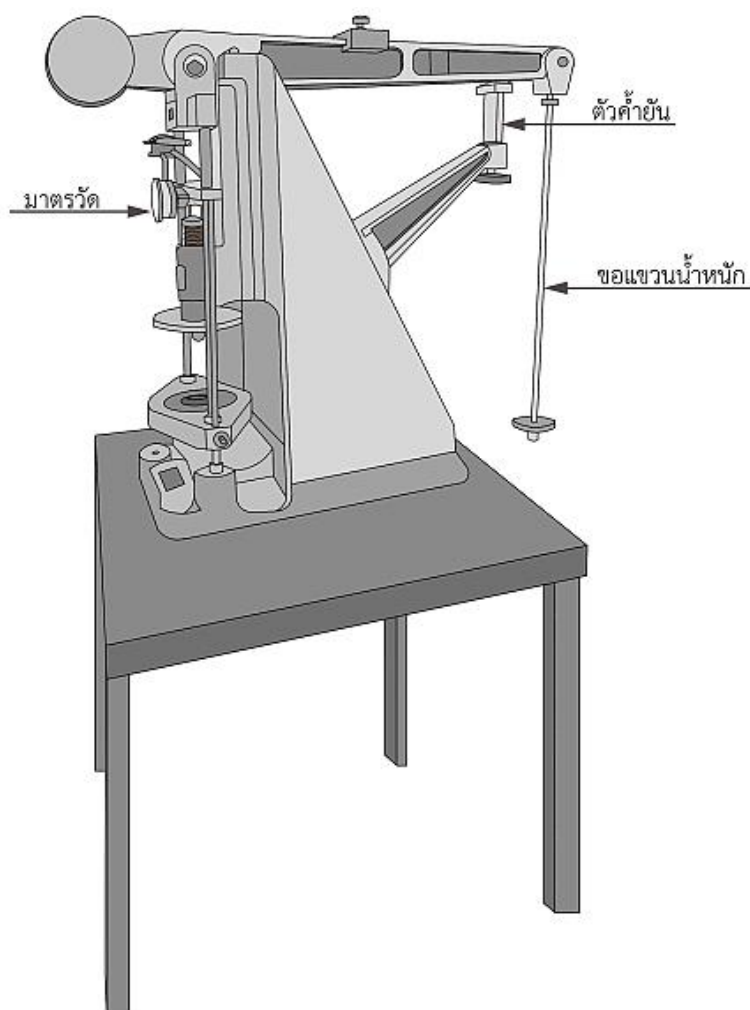
คุณสมบัติ	วิธีการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง
1.หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างคงสภาพ	การทดสอบหาน้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตร	ASTM D 3282
2.ขีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์ก	การทดสอบพิกัดอัตราเตอร์เบอร์ก	ASTM D 4318
3.ความชื้นในธรรมชาติของดิน	การทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลดิน	ASTM D 2216
4.ความถ่วงจำเพาะของดิน	การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน	ASTM D 854
5.ตรวจหาองค์ประกอบของแร่	การทดสอบ X-Ray Diffraction(XRD)	-
6.ตรวจหาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค	การทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM)	-

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

#### 3.3.1 เครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำ(Oedometer test)

เครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติในงานวิจัยนี้ผลิตโดยบริษัท Wykeham Farrance Pte Ltd.เป็นอุปกรณ์ให้แรงในแนวดิ่ง ลักษณะเครื่องมือจะมีคานถ่วงแรง (Loading Beam) โดยใช้จุดแขวนน้ำหนักเท่ากับ 10:1 ส่วน การเพิ่มแรงจะเป็นแบบเท่าทวี (Double) หรืออัตราการเพิ่มแรงเท่ากับ 1 (Load increment ratio, LIR = 1) เช่น 1 24 8 16 32 และ 64 ปอนด์เป็นต้น ซึ่งสัดส่วนการกดน้ำหนักของเครื่องมือลงบนวงแหวนบีบรัด(Rigid confining ring) ดินต่อน้ำหนักที่ให้ระยะจากจุดหมุนถึงขอแขวนน้ำหนัก รวมทั้งมีตัวค้ำยัน (Screw Jack) ดังแสดงในรูปที่ 3.5ทำหน้าที่เป็นตัวรับหรือพยุงน้ำหนักจากคานถ่วงแรง เพื่อว่าในขณะที่มีการเพิ่มน้ำหนักโดยที่ยังไม่พร้อมจับเวลาจะได้มีตัวประคองรับน้ำหนักเอาไว้ก่อนนั้นเองคานถ่วงแรงจะถูกกดต่ำลงมา ต่อเมื่อพร้อมที่จะจับเวลาเริ่มการทดสอบให้น้ำหนัก ก็ให้คลายเกลียวค้ำยันลงมา เมื่อทำดังนี้จึงเป็นการเริ่มต้นให้คานน้ำหนักบรรทุก ต่อวงแหวนบีบรัดดินนั่นเอง

ดังนั้นเมื่อนำน้ำหนักบรรทุกออกและยังไม่พร้อมสำหรับจับเวลาในการทดสอบ จำเป็นต้องมีน้ำหนักมากดทับที่ด้านบนสุดของจุดแขวนเสมอ โดยน้ำหนักที่นำมากดต้องมีค่ามากกว่าน้ำหนักเดิมก่อนเปลี่ยนน้ำหนักทดสอบ การหลุดตัวของตัวอย่างดินจะถูกวัดจากมาตรหน้าปัดที่มีความละเอียดสูงไม่น้อยกว่า 0.002 มิลลิเมตรถูกยึดติดไว้กับขายึดตั้งรูปประกอบช่วงระยะการวัดของมาตรหน้าปัดนี้จะมีระยะไม่มากนักเนื่องจากมีความละเอียดสูง ดังนั้นเมื่อเริ่มทำการติดตั้งตัวอย่างในครั้งแรกสุดจะต้องให้ขาวัดของมาตรปัดนี้ถูกกดเข้าไปก่อน เมื่อดินถูกกดหลุดตัวลงมาขาวัดของมาตรปัดนี้ก็ค่อยๆ ยึดขึ้นตามระยะการหลุดตัวนั่นเอง



รูปที่ 3.5 เครื่องมือทดสอบการอัดตัวค้ำยันแบบหนึ่งมิติ

### 3.3.2 เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน (Conventional triaxial apparatus)

เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนในงานวิจัยนี้ผลิตโดยบริษัท Wykeham Farrance Pte Ltd. เป็นเครื่องทดสอบที่ควบคุมอัตราความเครียด (Strain controlled) เพียงอย่างเดียว โดยเครื่องมือดังกล่าวได้รับการพัฒนาจากเครื่องมือดั้งเดิมคือรูปแบบของเครื่องมือทดสอบสามารถปรับเปลี่ยนลดค่าแรงดันของแรงดันเซลล์ (Cell pressure) และแรงดันภายใน (Back pressure) ให้มีความดันคงที่ อุปกรณ์ควบคุมแรงดันน้ำ (Bladder) จะเปลี่ยนแรงดันอากาศเป็นแรงดันน้ำก่อนส่งผ่านแรงดันน้ำคงที่เข้าสู่ภายในเซลล์



ทดสอบ (Traixial chamber) และภายในตัวอย่างทดสอบ แรงดันภายในตัวอย่างทดสอบจะถูกวัดค่าแรงดันด้วยอุปกรณ์วัดค่าแรงดัน (Pressure transducer) แล้วส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์บันทึกข้อมูลเชิงตัวเลขแบบอัตโนมัติ (Autonomous data acquisition unit, ADU) พร้อมส่งข้อมูลแรงดันภายในไปสู่คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงค่าความดันสำหรับการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันต่อไปในกระบวนการอัดตัวคายน้ำ จะหาอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดิน โดยทำการวัดปริมาณน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างผ่านสายแรงดันภายในมายังตัวอุปกรณ์ควบคุมแรงดันแล้วอ่านค่าจากอัตราการไหลออก ทำการบันทึกค่า แล้วนำไปแปรผลการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อไป

ส่วนด้านบนของเซลล์ทดสอบจะมีช่องสำหรับใส่แท่งเหล็กให้แรง (Piston) ซึ่งจะติดตั้งสัมผัสกับแป้นบน(Top cap)ซึ่งยึดติดกับด้านบนของก้อนตัวอย่างทดสอบ โดยทั้งแป้นบนและแท่งเหล็กให้แรงจะใช้สำหรับกระจายและส่งผ่านแรงจากก้อนตัวอย่างทดสอบไปยังอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน ที่เรียกว่าแหวนโลหะ(Proving ring)ซึ่งจะติดตั้งมาพร้อมกับอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว (Linear variable differential transformer, LVDT) สำหรับวัดการเสียรูปของแหวนโลหะ เพื่อนำไปแปรผลเป็นแรงที่ใช้ในการกดก้อนตัวอย่างตามแนวแกน นอกจากนี้ที่แท่งเหล็กให้แรงยังมีอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวอีกชั้น ใช้วัดการเคลื่อนตัวของก้อนตัวอย่างทดสอบ และสามารถนำไปคำนวณหาค่าความเครียดตามแนวแกน (Axial strain) ของก้อนตัวอย่างได้ โดยที่อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ทั้งสองชั้นจะส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์บันทึกข้อมูลเชิงตัวเลขแบบอัตโนมัติเพื่อเก็บข้อมูลต่อไปโดยอุปกรณ์การทดสอบแรงอัดสามแกนแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องมือการทดสอบแรงอัดสามแกนอุปกรณ์บันทึกผลและอุปกรณ์วัดค่าต่างๆ

### 3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering properties)

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินเหนียว เป็นคุณสมบัติที่นำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมปฐพี โดยการทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวปากผนังใช้วิธีการทดสอบและมาตรฐานดังต่อไปนี้

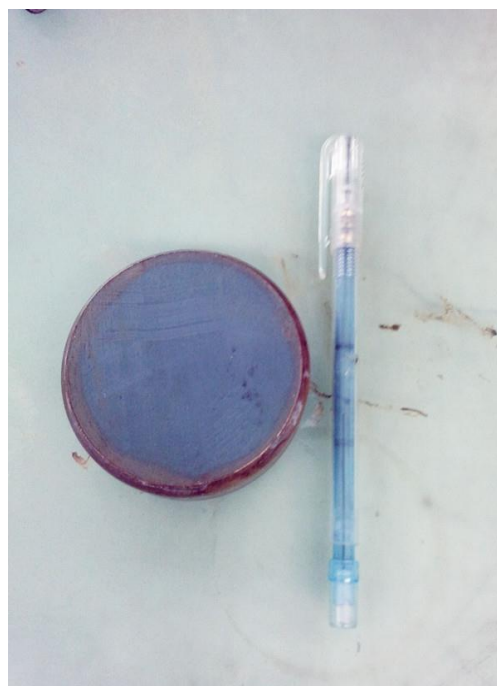
#### 3.4.1 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D 2435 Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils เพื่อหาค่าความเค้นที่กดทับสูงสุดในอดีต (Maximum past pressure,  $\sigma'_{mp}$ ) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidation ratio, OCR) ทั้งนี้ค่าหน่วยแรงกดสูงสุดในอดีตจะนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการอัดตัวคายน้ำในจากการทดสอบแรงอัดสามแกนต่อไป

นางวงแหวนบีบรัด กดลงบนตัวอย่างดินคงสภาพแล้วใช้เลื่อยตัดแต่งผิวของตัวอย่างดินทั้งด้านบนและด้านล่างให้มีผิวเรียบ ซึ่งวงแหวนบีบรัดที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มิลลิเมตรสูง 20 มิลลิเมตรตั้งแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 (ก) และ (ข) นอกจากนี้วงแหวนบีบรัดยังทำหน้าที่บังคับไม่ให้มีการเคลื่อนตัวด้านข้าง ซึ่งทำให้สถานะความเค้นของดินอยู่ในเงื่อนไข  $K_0$  ทั้งนี้จะต้องมีผิวเรียบและมีแรงเสียดทานน้อยที่สุด นำกระดาษกรองและหินพรุนวางไว้ทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดินในวงแหวนบีบรัด ในขั้นตอนของการใส่น้ำหนักกด (Loading) จะใส่น้ำหนักจำนวน 6 ค่า โดยเริ่มต้นที่น้ำหนัก 14 กิโลปาสคาลและเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 เท่าจนกระทั่งถึง 451 กิโลปาสคาล และผ่อนคลายน้ำหนักกด (Unloading) โดยจะลดน้ำหนักลง 2 ค่า ครั้งละ 4 เท่า จนกระทั่งถึง 28 กิโลปาสคาล หลังจากนั้นจะทำการใส่น้ำหนักกดทับอีกครั้ง (Reloading) เป็นจำนวน 4 ค่า เริ่มต้นที่น้ำหนัก 113 กิโลปาสคาลและเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 เท่าจนกระทั่งถึง 903 กิโลปาสคาล ทั้งนี้แต่ละน้ำหนักกดจะใช้เวลาในการเปลี่ยนน้ำหนักกดประมาณ 24 ชั่วโมง จดบันทึกค่าการทรุดของตัวอย่างดินตามเวลาที่กำหนด ส่วนตัวอย่างดินที่เหลือต้องนำไปหาค่าความชื้นในธรรมชาติ (Natural water content) ต่อไป



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

### รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการทดสอบอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติ

- (ก) ตัวอย่างการตัดแต่งตัวอย่างดินเหนียวอ่อน (ข) ตัวอย่างดินเหนียวดินอ่อนในวงแหวนบีบรัด  
 (ค) การติดตั้งตัวอย่างดินเหนียวเข้าเครื่องทดสอบ (ง) การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบแบบหนึ่งมิติ

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติจะเป็นการทดสอบหาค่าความสามารถในการระบายน้ำได้ของดินเหนียว และค่าอัตราความเครียดอ้างอิง โดยออกมาในรูปความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ย (Average axial strain rate,  $\dot{\epsilon}_{ave}$ ) ซึ่งค่าดังกล่าวจะใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับอัตราความเครียดน้อยสุด ในการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ โดยค่าอัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยสามารถหาได้จากการเฉลี่ยค่าความเครียดตามแนวแกนที่เกิดขึ้น ด้วยเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดขบวนการอัดตัวคายน้ำขั้นต้น (Primary consolidation) ซึ่งการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.7(ค)และ (ง)และในการปรับเปลี่ยนอัตราความเครียดในช่วงการทดสอบแรงเฉือนสามแกนนั้น จะส่งผลกระทบต่อแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore - pressure) ในการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำอีกด้วย

### 3.4.2 การเลือกอัตราความเครียด

อัตราความเครียดในการทดสอบแรงเฉือนจะมีผลต่อการเกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน ซึ่งในงานศึกษามีสองแนวทางในการกำหนดอัตราความเครียดขั้นต่ำ คือ พิจารณาจากอัตราความเครียดที่กำหนดในมาตรฐานการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำหรือพิจารณาจากอัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยจากการทดสอบอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ซึ่งค่าอัตราความเครียดตามแนวแกนขั้นต่ำจะนำมาใช้ทดสอบแรงอัดสามแกนและผลทดสอบที่ได้จะนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในแบบจำลองต่อไป

### 3.4.3 การทดสอบแรงอัดสามแกน

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน D4767 - 02Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils เพื่อหาค่าคงตัวของกำลังของดินทั้งแบบความเค้นรวมและความเค้นประสิทธิผล (Total stress and effective stress) ซึ่งการปรับเปลี่ยนอัตราความเครียดในช่วงการทดสอบแรงเฉือน จะส่งผลกระทบต่อแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore - pressure) ในการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ การทดสอบแรงอัดสามแกนในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการทดสอบแบบอัดตัวอย่างด้วยความดันและกระทำแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Consolidated undrained triaxial test, CU - Test) โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

#### 1. การจัดเตรียมเครื่องมือก่อนทดสอบ

ก่อนทำการทดสอบ จะต้องตรวจสอบเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน ตัวฐานรองต้องไม่หลุดเนื่องจากอาจจะมีเศษวัสดุต่างๆ ไปติดอยู่ได้ ดังนั้นต้องตรวจสอบทุกครั้งก่อนใช้งาน ทำการต่อสายแรงดันเซลล์ สายแรงดันภายใน และสายแรงดันด้านบนเข้ากับตัวเซลล์และระบบควบคุมความดัน ทั้งนี้สายแรงดันทุกสายต้องถูกใส่ฟองอากาศที่ค้างอยู่อกให้หมดด้วยน้ำที่ไม่มีฟองอากาศ (De-aired water) จากนั้นตั้งค่าอุปกรณ์วัดค่าแรงดัน ให้เท่ากับศูนย์เมื่อเปิดให้สัมผัสกับอากาศ และต้มแผ่นหินพรุน (Porous stone) ในน้ำเดือดประมาณ 30 นาทีเพื่อไล่ฟองอากาศทุกครั้งก่อนการทดสอบ

## 2. การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

นำตัวอย่างดินคงสภาพมาตัดแต่ง (Trim) ให้ได้รูปทรงกระบอกและเรียบตั้งแสดงในรูปที่ 3.8(a) จากนั้นแต่งปลายทั้งสองให้ได้ขนาดตามมาตรฐานคือมีความสูงเป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 35 เซนติเมตร และความยาวประมาณ 70 เซนติเมตรนำตัวอย่างดินไปชั่งน้ำหนัก ใช้แปรงสีฟันปาดที่ผิวดินทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดินเพื่อลดผลของผลกระทบจากรอยเปื้อน (Smear effect) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงบันทึกค่าเก็บไว้ตั้งแสดงในรูปที่ 3.8(b) หลังจากนั้นนำกระดาษกรองพันรอบตัวอย่างดิน รวมทั้งบนหน้าตัดด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดินด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.8(c) สุดท้ายนำดินส่วนที่เหลือไปหาค่าปริมาณความชื้นเริ่มต้น (Water content,  $w_n$ ) และน้ำหนักที่ได้จากการวัดไปหาหน่วยน้ำหนัก (Total unit weight,  $\gamma_t$ ) ต่อไป

## 3. การจัดตัวอย่างดินบนฐานเซลล์

ประกบหินพรุนที่ต้มไล่อากาศแล้วลงบนหน้าตัดบนและล่าง (Top porous stone) ของตัวอย่างดิน จากนั้นวางตัวอย่างดินลงบนฐานเซลล์สามแกน (Triaxial cell) วางหมวกกด (Top cap) ลงบนหินพรุนด้านบนของตัวอย่างดิน ใส่ปลอกยาง (Rubber membrane) ครอบตัวอย่างดินโดยใช้กระบอกขยายปลอกยางหุ้มแล้วใช้วงแหวนยาง (Rubber o-ring) รัดปลอกยางที่ฐานและที่หมวกกดให้ติดแน่นดังแสดงรูปที่ 3.8(d) เพื่อไม่ให้ของเหลวภายนอกซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างดินทำการยึดสายระบายน้ำที่ติดกับหมวกกดโดยขันน็อตยึดให้แน่น ดังแสดงในรูปที่ 3.8(e) หลังจากติดตั้งตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้วสวมฝาครอบเซลล์ให้ปลายด้านล่างสัมผัสกับฝาครอบด้านบนพอดี แล้วขันแป้นเกลียวยึดกับฐานให้แน่นถ่ายน้ำเข้าเซลล์ทางสายความดันเซลล์จนกระทั่งน้ำเข้าเต็มเซลล์และล้นออกมาทางช่องอากาศ (Vent) จากนั้นปิดช่องอากาศแล้วทำการติดตั้งตัวแปลงสัญญาณวัดค่าเปลี่ยนรูป (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) พร้อมทั้งตรวจสอบทรานสดิวเซอร์ต่างๆ ให้เรียบร้อยและตั้งค่าให้เป็นศูนย์

## 4. การทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

ให้แรงดันเซลล์และแรงดันภายในผ่านสายแรงดัน โดยเริ่มต้นจะให้แรงดันเซลล์เท่ากับ 50 กิโลปาสคาลและแรงดันภายใน 40 กิโลปาสคาล เปิดวาล์วทางช่องแรงดันภายในเพื่อให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างดิน การทำเช่นนี้จะทำให้อากาศที่อยู่ในตัวอย่างดินถูกดันมากับน้ำด้วย เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยใช้เวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมงจึงจบกระบวนการ หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มแรงดันเซลล์และแรงดันภายในอย่างช้าๆ และสลับกันอย่างต่อเนื่องครั้งละประมาณ 50 กิโลปาสคาลเพื่อให้ตัวอย่างดินถูกรบกวนน้อยที่สุด โดยระหว่างการเพิ่มแรงดันควรให้แรงดันเซลล์มีค่ามากกว่าแรงดันภายในประมาณ 10 กิโลปาสคาลเพื่อป้องกันมิให้ตัวอย่างบวม (Swilling) ทำการเพิ่มแรงดันไปจนกระทั่งแรงดันเซลล์เท่ากับ 210 กิโลปาสคาล และ

แรงดันภายใน 200 กิโลปาสคาล จะทำให้อากาศสลายตัวไป การเพิ่มแรงดันดังกล่าวทำให้ น้ำเข้าไปเติมช่องว่างระหว่างและทำให้ตัวอย่างดินอิมมัตด้วยน้ำ หลังจากนั้นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง โดยก่อนการทดสอบในขั้นตอนต่อไป ต้องตรวจสอบความอิมมัตด้วยน้ำ (B – Check) ของตัวอย่างดินเสียก่อน โดยการปิดวาล์วระบายน้ำทั้งหมดแล้วเพิ่มค่าแรงดันเซลล์ขึ้นจากเดิม 10 กิโลปาสคาล วัดค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นพร้อมจับเวลา ถ้าสัดส่วนค่าแรงดันน้ำส่วนเกินต่อค่าแรงดันเซลล์ที่เพิ่มขึ้น (B Parameter) มากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 1 นาที จะถือว่าตัวอย่างดินอิมมัตด้วยน้ำ แล้วลดแรงดันเซลล์ลงเท่าเดิม

#### 5. การอัดตัวคายน้ำตัวอย่างดิน

เมื่อตัวอย่างอิมมัตด้วยน้ำแล้ว จะทำให้โพรงของตัวอย่างดินเต็มไปด้วยน้ำ ซึ่งผลต่างของแรงดันในเซลล์กับแรงดันโพรงจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงประสิทธิผล โดยทั่วไปในการทดสอบแรงอัดสามแกน จะใช้แรงดันประสิทธิผลโดยการจำลองหน่วยแรงให้ใกล้เคียงในธรรมชาติหรือใช้หน่วยแรงประสิทธิผลที่อ้างอิงจากหน่วยแรงสูงสุดในอดีต (Maximum past pressure,  $\sigma'_{mp}$ ) ในงานวิจัยนี้จะใช้หน่วยแรงประสิทธิผลไม่เท่ากัน โดยจะเพิ่มอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำ (Overconsolidation ratio, OCR) ให้เท่ากับ 4 ค่า คือ 1 2 4 และ 8 ซึ่งในขบวนการนี้จะทำการเพิ่มแรงดันเซลล์เพียงอย่างเดียวเพื่อเริ่มทำการอัดตัวคายน้ำตัวอย่างดินโดยการเพิ่มแรงดันในสายแรงดันเซลล์ให้มีแรงดันเท่ากับ 450 กิโลปาสคาล และคงแรงดันภายในไว้ที่ 200 กิโลปาสคาล ทั้งนี้ยังคงปิดวาล์วเชื่อมต่อกับภายในตัวอย่างทดสอบ จากนั้นจึงเปิดวาล์วดังกล่าวพร้อมเริ่มจับเวลาแล้วทำการบันทึกค่าปริมาตรน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปแล้วทำการวัดความสัมพันธ์ของค่าปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับค่ารากที่สองของเวลา (Square root time) เช่นเดียวกับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ จนเสร็จสิ้นกระบวนการอัดตัวคายน้ำขั้นต้น แล้วคงการอัดตัวคายน้ำทิ้งไว้อีก 24 ชั่วโมง เมื่อต้องการเพิ่มค่าการอัดแน่นเกินตัวจะทำการปรับค่าแรงดันเซลล์ให้ลดลง จากนั้นจึงเปิดวาล์วดังกล่าวพร้อมเริ่มจับเวลาแล้วทำการบันทึกค่าปริมาตรน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป โดยแรงดันเซลล์ที่ปรับลดลงแสดงในตารางที่ 3.2 แสดงค่าการอัดแน่นเกินตัวของดินเหนียวปากพั้ง จากนั้นนำค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรที่ได้มาหาเวลาที่ร้อยละ 50 ของการอัดตัวคายน้ำขั้นต้น (Time for 50% primary consolidation,  $t_{50}$ ) ต่อไป รูปที่ 3.8(f) แสดงการอัดตัวคายน้ำในการทดสอบแรงอัดสามแกน

ตารางที่ 3.2 แสดงการอัดตัวของดินเหนียวปากพั้ง

OCR	$\sigma'_c$ (kPa)	$\sigma'_0$ (kPa)	$u_b$ (kPa.)
1	250	250	200
2	250	125	200
4	250	63	200
8	250	31	200

หมายเหตุ:  $\sigma'_c$  คือ ค่าความเค้นประสิทธิผลภายในเซลล์  $\sigma'_0$  คือ ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยก่อนเงื่อนไขตัวอย่างและ  $u_b$  คือ แรงดันภายใน

#### 6. การเงื่อนไขตัวอย่างดินเหนียว

การทดสอบแรงเฉือนด้วยแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำโดยการเพิ่มหน่วยแรงตามแนวแกนเพียงอย่างเดียว ก่อนการทดสอบควรทำการตรวจสอบวาล์วสายแรงดันน้ำทั้งหมด ซึ่งตลอดการทดสอบจะปิดวาล์วระบายน้ำจากตัวอย่างทดสอบตลอดเวลา แต่ยังคงเปิดวาล์วสายแรงดันเซลล์ให้แรงดันเซลล์คงที่ แล้วทำการตั้งค่าอัตราความเครียดตามแนวแกนที่จะใช้ในการทดสอบแรงเฉือนบนหน้าจอบคุมของเครื่องทดสอบ ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM 4767-02 ได้เสนอสมการในการคำนวณอัตราความเครียดตามแนวแกนไว้ดังนี้

$$\dot{\epsilon} = \epsilon_f / 10t_{50} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $t_{50}$  หาได้จากกระบวนการอัดตัวของน้ำก่อนหน้า และ  $\epsilon_f$  เป็นค่าความเครียดที่คาดว่าจะเกิดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

ในขณะที่ K.H. Head(1980) ได้เสนอสมการอัตราความเครียดตามแนวแกน ที่มีความคล้ายคลึงกับสมการของมาตรฐาน ASTM 4767 - 02 โดยรูปสมการเป็นดังนี้

$$\dot{\epsilon} = \epsilon_f / (k \times t_{100}) \quad (3.2)$$

เมื่อ  $t_{100}$  เป็นเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดขบวนการบดอัดตัวน้ำขึ้นต้น และ  $k$  เป็นสัมประสิทธิ์ของเวลาที่เกิดการวิบัติ ซึ่งมีค่าดังตารางที่ 3.3



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

### รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบแรงอัดสามแกน

(ก) การตัดแต่งดินเหนียวอ่อน (ข) การวัดตัวอย่างขนาดดินเหนียวอ่อน (ค) การติดตั้งกระดาศกรอง  
 (ง) รั้ววงแหวนยางหัวและท้าย (จ) ติดตั้งระบบระบายน้ำภายในตัวอย่าง (ฉ) การอัดตัวคายน้ำของ  
 ตัวอย่าง (ช) การเงื่อนไขตัวอย่างดินเหนียว (ซ) ตัวอย่างดินเหนียวหลังจากเงื่อนไขเสร็จ



ตารางที่ 3.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของเวลาที่เกิดการวิบัติ ( $k$ )

ประเภทของการทดสอบ	ไม่มีการระบายน้ำ ด้านข้าง	มีการระบายน้ำ ด้านข้าง
การทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ	0.51	1.8
การทดสอบแบบระบายน้ำ	8.5	14

อัตราความเครียดทั้งสองสมการจะอ้างอิงกระบวนการอัดตัวคายน้ำก่อนหน้านี้เช่นกัน โดยสมการของ K.H. Head(1980) จะพิจารณาผลของการระบายน้ำด้านข้างเนื่องจากกระดาษกรองฉลุที่พันรอบตัวอย่างทดสอบด้วย ซึ่งแตกต่างออกไปจากสมการของมาตรฐาน ASTM 4767 – 02 ที่ไม่ได้เจาะจงในส่วนนี้ แต่พิจารณาให้เป็นการทดสอบที่มีการระบายน้ำด้านข้างอยู่แล้วโดยภาพการเงื่อนไขตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.8(g) และรูปที่ 3.8(h) แสดงตัวอย่างดินเหนียวหลังทำการเงื่อนไขเสร็จ

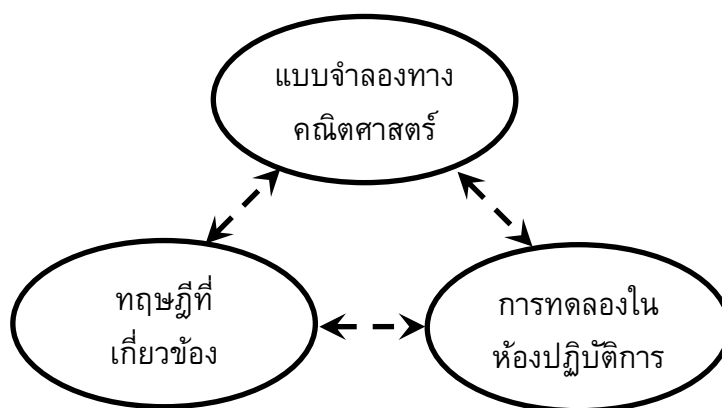
อัตราความเครียดสำหรับงานวิจัยนี้ จะปรับเปลี่ยนความเครียดตามแนวแกนของการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งไม่ควรน้อยกว่าค่าคงที่คำนวณได้จากสมการข้างต้นและอัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบอัดตัวคายแบบหนึ่งมิติ ซึ่งควรให้ค่าใกล้เคียงกัน แล้วนำมาใช้เป็นค่ากำหนดอัตราความเครียดขั้นต่ำในการทดสอบในแต่ละตัวอย่างทดสอบ

หลังจากตั้งค่าอัตราความเครียดที่จะให้ในการทดสอบเรียบร้อยแล้ว กดปุ่มเริ่มทำงานพร้อมบันทึกค่าความดันเซลล์ ความดันภายใน ความดันภายในส่วนเกิน แรงตามแนวแกนการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรและการเคลื่อนที่ของตัวอย่างดินทุกร้อยละ 0.1 ของความเครียดในช่วงร้อยละ 0.1 – 1 ของความเครียด แล้วเพิ่มขึ้นเป็นบันทึกข้อมูลทุกร้อยละ 1 ของความเครียดจนกระทั่งการเคลื่อนที่ของตัวอย่างดินได้ประมาณร้อยละ 18 ของความเครียด หรืออาจหยุดการทดสอบก่อน เมื่อหน่วยแรงเบี่ยงเบน (Deviator stress) ที่เกิดขึ้นลดลงเกิน ร้อยละ 20 ของหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด

### 3.5 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวของดินด้วยแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี

#### 3.5.1 แบบจำลองแสดงคุณลักษณะของวัสดุ (constitutive model)

ในการศึกษาวิจัยคุณลักษณะของวัสดุจำพวกดิน มีความยุ่งยาก ซับซ้อน และยากที่จะทำการวัดค่าแรงดันต่างๆ ในมวลดิน ณ จุดที่สนใจ ดังนั้นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินจึงมีความจำเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามเพื่อให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและแสดงผลใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่แท้จริงของดิน จึงจะต้องมีการสอบเทียบแบบจำลอง ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องตามทฤษฎี ทั้งนี้ความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทฤษฎีและการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทฤษฎี และการทดลอง

แบบจำลองคุณลักษณะของวัสดุจำพวกดินเพื่อทำนายพฤติกรรมการรับแรงเฉือนในมวลดินภายใต้อัตราความเครียดสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี (hyperplasticity model) ที่พัฒนาโดย สุเชษฐ์ และธนากร (2551) โดยแบบตัวแปรที่สำคัญของแบบจำลองนี้คือ ตัวแปรที่อธิบายผลกระทบเนื่องจากอัตราความเครียดที่เปลี่ยนแปลงต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลดิน ซึ่งคุณสมบัติความเหนียวของวัสดุเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นกับอัตราความเครียดของวัสดุดังนั้นสมการที่ 3.3

$$\varepsilon = \frac{\sigma t}{\mu} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ความเค้น (stress)

$\varepsilon$  คือ ความเครียด (strain)

$t$  คือ เวลา (time)

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเหนียวในสมการแบบจำลองจะเกี่ยวข้องกับอัตราการเฉือนซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.4

$$\dot{\alpha} = r \sinh\left(\frac{\sigma_{visc}}{\mu r}\right) \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด (viscosity coefficient)

$r$  คือ ค่าคงที่มีหน่วยเป็นอัตราความเครียด (constant)

$\dot{\alpha}$  คือ อัตราความเครียดพลาสติก (plastic strain rate)

นอกจากนี้ทฤษฎีพฤติกรรมที่ขึ้นกับอัตราที่มีสมการดังสมการที่ 3.5

$$\dot{\epsilon} = A\theta \exp\left(\frac{-B}{\theta}\right) \sinh\left(\frac{\sigma_{visc}}{C\theta}\right) \quad (3.5)$$

เมื่อ  $A, B, C$  คือ ค่าคงที่ (constant) โดย  $\mu r = C\theta$ ,  $r = A\theta \exp(-B/\theta)$

$$\text{และ } \mu = (C/A) \exp(B/A)$$

ทฤษฎีพฤติกรรมที่ขึ้นกับอัตราไม่มีรูปแบบความสัมพันธ์กับ  $E_0$  และ  $k_0$  แต่  $\mu$  มีความสัมพันธ์กับ กำลังต้านทานความหนืด และ  $k_0$  มีความสัมพันธ์กับกำลังต้านทานแรงเฉือน ดังนั้น  $E_0$  เท่ากับ  $E_1 \exp(\theta_E/\theta)$  และ  $k_0$  เท่ากับ  $k_1 \exp(\theta_k/\theta)$

พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของพฤติกรรมทางด้านกำลังรับแรง เจือปนกับวัสดุประเภทขึ้นกับอัตรา เช่น ดินเหนียว แบบจำลองนี้อาศัยหลักการอุณหพลศาสตร์ในการอธิบายพฤติกรรมอีลาสโตพลาสติก (Elasto-plastic behaviour) โดยการใช้สมการพลังงาน 2 ชนิด คือ สมการพลังงานของกิบส์ (Gibb free energy) และ สมการพลังงานการไหล (Flow potential) นอกจากนี้ แบบจำลองนี้ยังได้ใช้หลักการของผิวครากต่อเนื่อง (Continuous yield surface) เพื่อใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงในช่วงอีลาสติกและพลาสติก สำหรับการทำนายพฤติกรรมวัสดุประเภทดินเหนียวภายใต้อัตราความเครียดจะใช้ทฤษฎีกระบวนการอัตราด้วย ดังนั้นสมการพลังงานของกิบส์สามารถแสดงดังสมการที่ 3.6

$$g = -\frac{\sigma}{2E_0} - \sigma \int_0^1 \hat{\alpha} d\eta + \int_0^1 \frac{\hat{H}\hat{\alpha}^2}{2} d\eta \quad (3.6)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ความเค้น

$E_0$  คือ โมดูลัสเริ่มต้น ( $E_0 = 3G_0$  สำหรับเงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง)

$\hat{\alpha} = \hat{\alpha}(\eta)$  คือ ความเครียดพลาสติก

$\hat{H} = \hat{H}(\eta)$  คือ kernel function ซึ่งใช้สำหรับอธิบายรูปร่างของความเค้นและความเครียด ดังสมการที่ 3.7

$$\hat{H}(\eta) = \frac{E_0}{2(a-1)}(1-\eta)^3 \quad (3.7)$$

เมื่อ  $a$  คือ ค่าคงที่สำหรับการเปลี่ยนรูปร่างความแข็งตัว

สมการพลังงานการไหลดังสมการที่ 3.9

$$w = \mu r^2 \int_0^1 \left( \cosh \left( \frac{\langle \sigma - \hat{H}\hat{\alpha} - k_0 \exp(\alpha/\alpha_0)\eta \rangle}{\mu r} \right) - 1 \right) d\eta \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ พารามิเตอร์ความหนืด

$k_0$  คือ พารามิเตอร์ต้านกำลัง

$\alpha$  คือ ความเครียดพลาสติก

$\alpha_0$  คือ ความเครียดอ้างอิง

โดยที่สัญลักษณ์  $\langle \rangle$  หมายถึง Macaulay brackets ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\langle x \rangle = 0, x < 0; \langle x \rangle = x, x \geq 0$  จากสมการที่ 3.6 และ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแสดงได้ดังสมการ 3.9

$$d\varepsilon = \frac{d\sigma}{E_0} + \left[ \int_0^1 r \sinh \left( \frac{\langle \sigma - \frac{E_0(1-\eta)^3 \hat{\alpha}}{2(a-1)} - k_0 \exp(-\alpha/\alpha_0)\eta \rangle}{\mu r} \right) S(\sigma - \hat{H}\hat{\alpha}) d\eta \right] dt \quad (3.9)$$

โดยที่  $S(x)$  คือ ฟังก์ชันเครื่องหมาย (Signum) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $S(x) = -1, x < 0; -1 \leq S(x) \leq 1, x = 0; S(x) = 1, x > 0$

สำหรับการทำนายพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียวที่อัตราความเครียดต่างๆ ต้องอาศัยพารามิเตอร์ในการทำนายทั้งหมด 6 พารามิเตอร์ ( $E_0, k_0, \mu, r, a, \alpha_0$ )

### 3.5.2 การกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

การกำหนดค่าเริ่มต้นของดินเหนียวปากผนังโดยการนำค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Axial strain และ Deviator stress ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งได้กำหนดค่าอัตราความเครียดคงที่ 4 อัตราคือ 0.020 0.075 1.000 และ 8.500 เปอร์เซนต์ต่ออนาที่ และค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว 4 ค่าคือ 1 2 4 และ 8 ตามลำดับ เพื่อไปเปรียบเทียบกับแบบจำลอง โดยใช้แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีแบบขึ้นกับอัตรา เพื่ออธิบายพฤติกรรมแบบที่ขึ้นอยู่กับอัตราความเครียดตามแนวแกนของดินเหนียว ซึ่งนำเสนอโดย G.T.Houlsby and A.M.Puzrin. ในปี ค.ศ. 2001 โดยเป็นแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี (Hyperplasticity model) ซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดในดินเหนียวที่สามารถเก็บตัวอย่างดินในสภาวะคงสภาพได้ โดยไม่ต้องแปลงสภาพดินให้อยู่ในสภาวะดินเหลวเสียก่อน (วีระ และสุเชษฐ์, 2549)

### 3.5.3 การสอบเทียบแบบจำลอง

ทำการกำหนดค่าคงที่จากค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Axial strain และ Deviator stress โดยการสุ่มค่าคงที่จากข้อมูลของค่า Axial strain จากค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด สำหรับดินเหนียวปากผนังจะประมาณค่าออกเป็น 9 ช่วงคือ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16 และ 0.18 ตามลำดับ จากนั้นทำการกำหนดค่าสภาวะการทดสอบโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าแบบจำลองและค่าการทดสอบเพื่อหาผลต่างที่ได้ แล้วนำไปประมวลผล

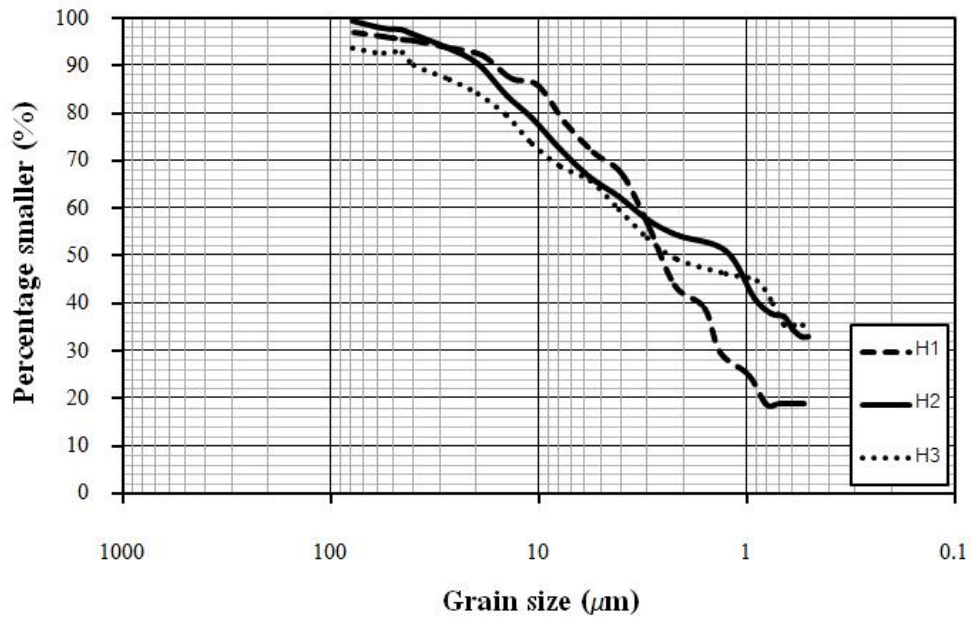
### 3.5.4 คำนวณค่าตัวแปรตามที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์ความหนืด

คำนวณตัวแปรตามต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ โดยทำการเลือกพารามิเตอร์แต่ละตัวที่จะทำการประมวลผล เพื่อทำการเปรียบเทียบให้แบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมของตัวอย่างดินเหนียวเมื่อได้รับหน่วยแรงให้ได้ ซึ่งดูได้จากกราฟความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเบี่ยงเบน และความเครียดตามแนวแกนที่ได้จำลองเทียบกับความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเบี่ยงเบนกับความเครียดที่ได้จากการทดสอบให้ซ้อนทับกันพอดี ซึ่งในการวิเคราะห์จะต้องทำการลองผิดลองถูกในการกำหนดตัวแปรคงที่ต่าง ๆ และสัมประสิทธิ์ความหนืด โดยการใช้วิธีกำลังสองต่ำสุด (Least square method) จนกราฟซ้อนทับกันหรือเข้าใกล้กันมากที่สุด ซึ่งวิธีการประมาณค่าฟังก์ชันโดยวิธีกำลังสองต่ำสุดจะได้ฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดของข้อมูล เพราะได้จากการเกลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้เหลือน้อยที่สุด ดังนั้นเมื่อเขียนกราฟของฟังก์ชันเส้นกราฟจะผ่านไปบริเวณจุดต่าง ๆ ของข้อมูล โดยจะตัดผ่านจุดของข้อมูลบางจุด เส้นกราฟจะมีลักษณะราบเรียบใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่า จนได้กราฟที่เกิดการซ้อนทับกันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด

## บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา

### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของดินเหนียวปากพั้ง

ดินเหนียวปากพั้งเกิดจากการตกตะกอนและทับถมบริเวณชายฝั่งทะเล (Marine deposits) โดยมีต้นกำเนิดมาจากเทือกเขาหลวง ลักษณะดินมีสีเทาเนื้อค่อนข้างละเอียดอนุภาคเม็ดดินมีลักษณะแบนและเล็ก ผลจากการศึกษาพบว่าชั้นดินเหนียวอ่อนปากพั้งบริเวณชั้นบนตั้งแต่ระดับผิวดินลงไปถึงระดับความลึกประมาณ 3 เมตรมีลักษณะแข็งซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในมวลดินจากระดับความลึก 3 เมตรลงไปจะมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนมีความลึกโดยประมาณ 20 เมตรจากผลการทดสอบตัวอย่างดินด้านคุณสมบัติชั้นพื้นฐานของดินเหนียวในธรรมชาติพบว่าตัวอย่างดินมีค่าความชื้นในมวลดิน (Water content,  $w_n$ ) ประมาณร้อยละ  $80.67 \pm 3.36$  [4] ทำการทดสอบพิกัดอัตราเตอร์เบอร์เกอร์ได้ค่าขีดพิกัดเหลว (Liquid Limit,  $LL$ ) ประมาณร้อยละ  $64.90 \pm 1.64$  ค่าขีดพิกัดพลาสติก (Plastic limit,  $PL$ ) ประมาณร้อยละ  $29.90 \pm 2.40$  จากนั้นซึ่งเมื่อนำไปหาค่าดัชนีพลาสติก (Plastic index,  $PI$ ) ได้ค่าประมาณร้อยละ  $34.90 \pm 2.57$  และค่าดัชนีเหลว (Liquidity index,  $LI$ ) เท่ากับ 1.45 ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าดินเหนียวปากพั้งมีค่าความชื้นในธรรมชาติสูงกว่าค่าพิกัดเหลว และมีค่าดัชนีเหลวสูงกว่า 1 ทำให้ทราบว่าคุณสมบัติดังกล่าวบอกลักษณะความไวตัวของดินเหนียวว่ามีค่าความไวตัวสูง ลักษณะเช่นนี้เมื่อตัวอย่างดินถูกกระทบกระเทือนจะทำให้ดินเหนียวรับกำลังได้น้อยมีการทรุดตัวสูงสำหรับความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity of soil solid,  $G_s$ ) มีค่าประมาณ  $2.71 \pm 0.022$  หน่วยน้ำหนักรวม (Total unit weight,  $\gamma_t$ ) มีค่าประมาณ  $1.52 \pm 0.019$  ตันต่อลูกบาศก์เมตรนอกจากนี้ทำการทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคสำหรับดินเม็ดละเอียด (Particle size distribution test for fine grained soil) โดยวิธีการทดสอบไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer test) จำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งในการทดสอบจะตั้งชื่อตัวอย่างในการทดสอบดังต่อไปนี้ ตัวอย่างที่ 1 เรียก H1 เป็นต้น ผลการทดสอบสามารถจำแนกโดยการหาค่าเฉลี่ยออกเป็นดินตะกอน (Silt) ประมาณ 48.70 เปอร์เซ็นต์ ดินเหนียว (Clay) ประมาณ 46.77 เปอร์เซ็นต์และทราย (Sand) ประมาณ 1.31 เปอร์เซ็นต์ซึ่งผลจากการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 ตามลำดับ

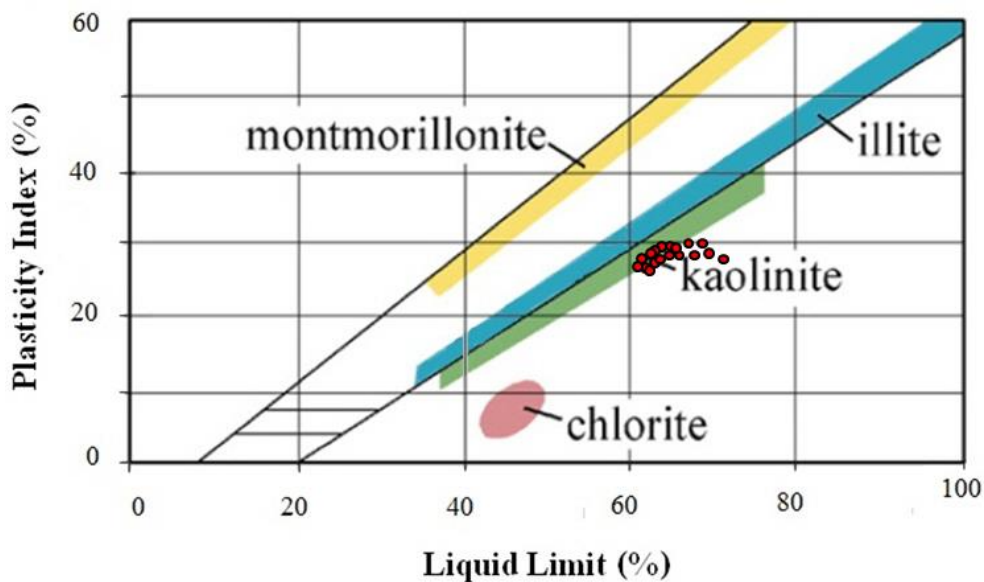


รูปที่ 4.1 การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดินจำนวน 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวปากพั้ง

คุณสมบัติ	ค่า	ค่าเบี่ยงเบน	หน่วย
ค่าความชื้นในธรรมชาติ ( $W_n$ )	80.67	3.36	%
ค่าพิกัดเหลว ( $LL$ )	64.90	1.64	%
ค่าพิกัดพลาสติก ( $PL$ )	29.90	2.40	%
ค่าดัชนีพลาสติก ( $PI$ )	34.90	2.57	%
ค่าดัชนีเหลว ( $LI$ )	1.45	-	-
ค่าแอกติวิตี ( $A$ )	0.75	-	-
ค่าหน่วยน้ำหนัก ( $\gamma_t$ )	1.52	0.019	ton/m <sup>3</sup>
ค่าความถ่วงจำเพาะ ( $G_s$ )	2.71	0.022	-
ทราย (Sand) ขนาด 0.06 – 2 mm.	1.31	-	%
ดินตะกอน (Silt) ขนาด 0.002 – 0.06 mm.	48.70	-	%
ดินเหนียว (Clay) ขนาด <0.002 mm.	46.77	-	%
อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (Initial void ratio, $e_0$ )	2.23	0.08	-

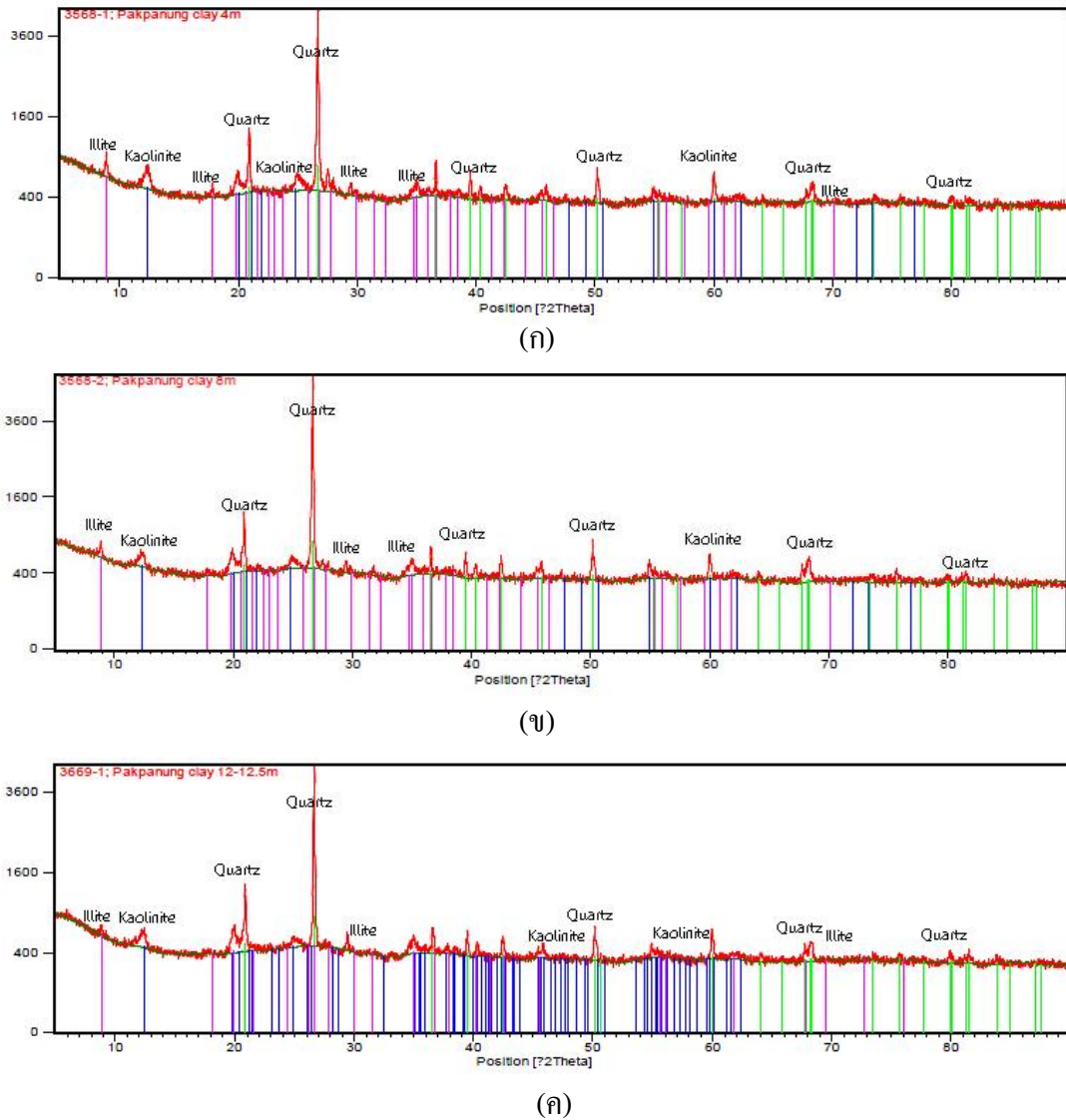
จากนั้นเมื่อนำค่าพิกัดเหลวและค่าดัชนีพลาสติกมาเปรียบเทียบกับแผนภูมิพลาสติกซิตีกับแร่ดินเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าดินเหนียวปากพนังมีพิกัดอยู่ที่โซนเคโอลิไนต์ และเมื่อนำตัวอย่างดินเหนียวปากพนังไปหาองค์ประกอบของแร่หลัก (Major Minerals) โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์แร่ในดิน ภา.ศ.ศ.น. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ดังแสดงผลในรูปที่ 4.3 ซึ่งได้นำตัวอย่างดินเหนียวปากพนังจำนวน 3 ตัวอย่าง ที่ระดับความลึก 4 เมตร 8 เมตร และ 12 – 12.5 เมตรไปหาองค์ประกอบของแร่หลัก จะเห็นได้ว่าดินเหนียวปากพนังประกอบไปด้วย แร่ควอตซ์ (Quartz) แร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) และอีลไลต์ (Illite) เป็นแร่ประกอบหลัก เมื่อสังเกตลักษณะของกราฟทั้ง 3 ตัวอย่างพบว่ามีความคล้ายคลึงกันทำให้มีความสอดคล้องกับการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ของดินเหนียวปากพนังจะเห็นได้ว่ามีลักษณะที่แตกต่างกัน 3 ลักษณะ คือโครงสร้างของดินมีลักษณะเป็นรูปทรงหกเหลี่ยมซึ่งเป็นผลึกของแร่ควอตซ์ และมีผลึกลักษณะรูปร่างเป็นแผ่นแบนคล้ายกับผลึกแร่เคโอลิไนต์สุดท้ายมีลักษณะเป็นแผ่นแบนที่มีรูปร่างที่ไม่ชัดเจนนักและจะมีขนาดเล็กกว่าผลึกของแร่เคโอลิไนต์ ซึ่งอาจจะเป็นลักษณะของแร่อีลไลต์ โดยจะสามารถสังเกตได้ถ้าเพิ่มกำลังขยายไปถึงขนาด 5 ไมครอนในรูปที่ 4.4(ค) และ(ง)



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแผนภูมิพลาสติกซิตีกับแร่ดินเหนียว

จากรูปที่ 4.5 แสดงรูปตัดชั้นดินของดินเหนียวปากพนัง พบว่าดินชั้นบนเป็นดินถม 2.3 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งสีน้ำตาล ไปจนถึงความลึก 4.0 เมตร จากนั้นก็เปลี่ยนเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนสีเทาถึงน้ำตาลแก่ ไปจนถึงความลึก 14.0 เมตร ก็เปลี่ยนเป็นชั้นดินเหนียวแข็งสีเทาแกมน้ำตาล ไปจนกระทั่งความลึก 24.0 เมตร ซึ่งสุทธระยะที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างดิน ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วง 4.0 – 14.0 เมตร ดินเหนียวมีลักษณะค่อนข้างอ่อนมาก จากผลการทดสอบการตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard penetration test, SPT) โดยได้ค่า N อยู่ระหว่าง 1 – 2 ครั้งต่อฟุตเท่านั้น





รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบหาลักษณะประกอบของแร่หลักของตัวอย่างดินเหนียวปากพนัง

(ก) ความลึก 4 เมตร (ข) ความลึก 8 เมตร (ค) ความลึก 12 – 12.5 เมตร

## 4.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรม

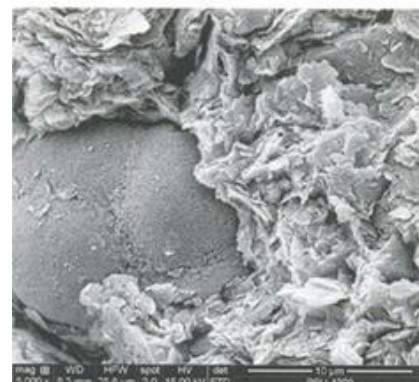
### 4.2.1 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ

เมื่อทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติซึ่งได้ทำการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวปากพนังจำนวน 2 ตัวอย่าง ที่ระดับความลึกแตกต่างกันคือ 4 – 4.5 เมตร และ 7 – 7.5 เมตร โดยระดับความลึกนี้ได้นำไปใช้ในการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำด้วย ซึ่งจากผลการทดสอบทั้งหมดประกอบไปด้วยเส้นโค้งการอัดตัว (Compression curve) ซึ่งได้จากการเพิ่มแรงในครั้งแรก เส้นโค้งการบวมตัว (Swelling curve) ซึ่งเป็นการลดแรง (Unload) และเส้นโค้งการอัดตัวซ้ำ (Recompression curve) ซึ่งเป็นการ

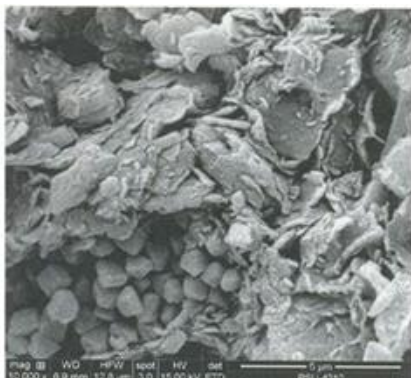
เพิ่มแรงซ้ำ (Reloading) โดยลักษณะของกราฟแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนความเครียด (Strain) ของมวลดินจากการเพิ่มแรงในครั้งแรกจะมีค่ามากกว่าการเปลี่ยนแปลงความเครียดบนเส้นโค้งการบวมตัวและเส้นโค้งการอัดตัวซ้ำ โดยผลจากการทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าเส้นโค้งการอัดตัวมีความคล้ายคลึงกันและมีความโค้งไม่มากนัก หลังจากนั้นเมื่อลากเส้นตัดกราฟเพื่อนำไปพิจารณาหาค่าความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในอดีต (Preconsolidation pressure,  $\sigma'_{mp}$ ) เทียบกับความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง ณ ปัจจุบัน (Effective overburden pressure,  $\sigma'_{vo}$ ) พบว่าได้ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว (Over consolidation ratio, OCR) โดยที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึก 1.20 เมตร จากผิวดินตั้งนั้นที่ระดับความลึก 4 – 4.5 เมตร มีค่า OCR เท่ากับ 0.940 และที่ระดับความลึก 7 – 7.5 เมตร มีค่า OCR เท่ากับ 0.931 ตามลำดับ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าดินเหนียวปากพนังเป็นดินเหนียวอัดตัวแน่นปกติ (Normally consolidated clay, NC) และเมื่อพิจารณาค่า OCR พบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อระดับความลึกของชั้นดินเพิ่มมากขึ้น ผลจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2



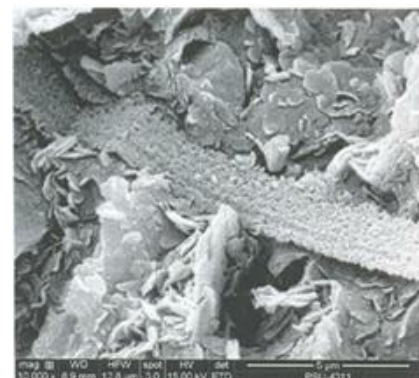
(ก)



(ข)

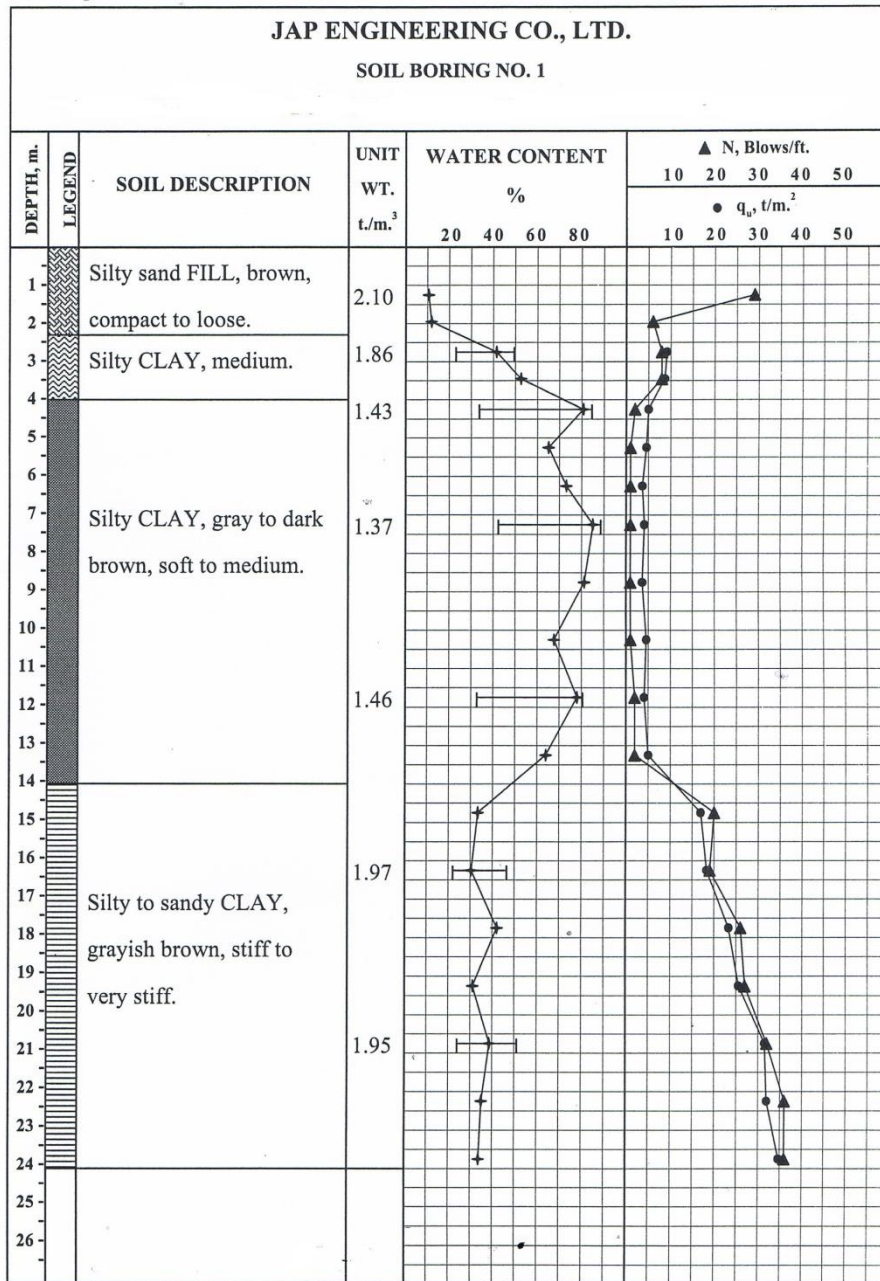


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวปากพนังที่กำลังขยาย (ก) 50 ไมครอน (ข) 10 ไมครอน (ค) 5 ไมครอน (ง) 5 ไมครอน



รูปที่ 4.5 ลักษณะชั้นดิน (Boring log) อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช

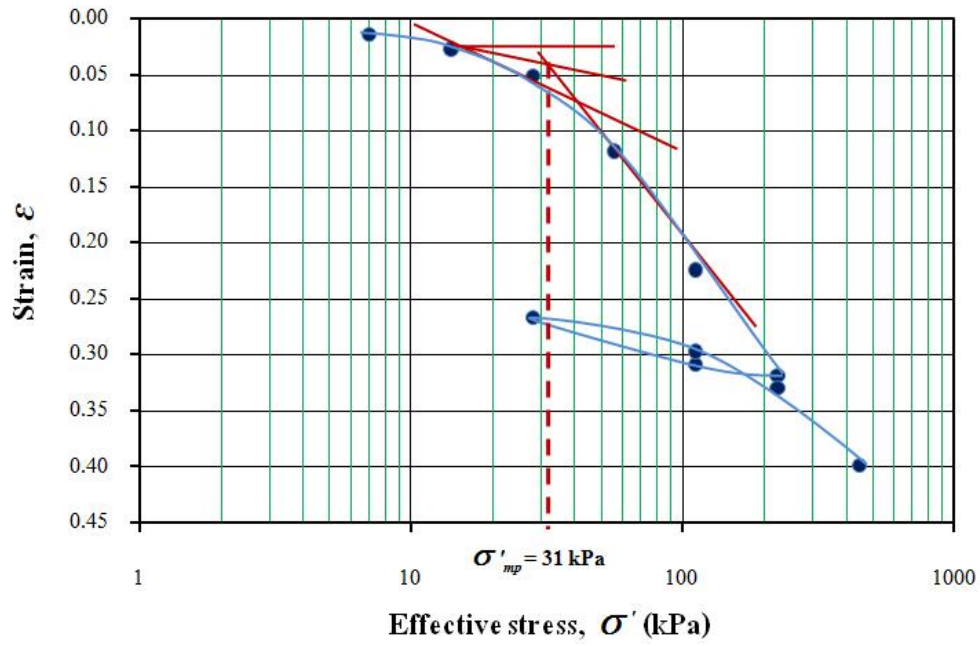
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้แบบหนึ่งมิติ

ความลึก (m)	อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น	หน่วยน้ำหนักเริ่มต้น (ton/m <sup>3</sup> )	หน่วยน้ำหนักสุดท้าย (ton/m <sup>3</sup> )	อัตราส่วนช่องว่างสุดท้าย	ค่าการทรุดตัวสูงสุด (mm)	ค่าแรงดันสูงสุดในอดีต (kPa)	อัตราการอัดแน่นเกินตัว (OCR)
4.0 – 4.5	2.408	1.510	1.886	1.100	7.647	31.00	0.940
7.0 – 7.5	3.395	1.556	2.054	1.504	8.476	47.00	0.931

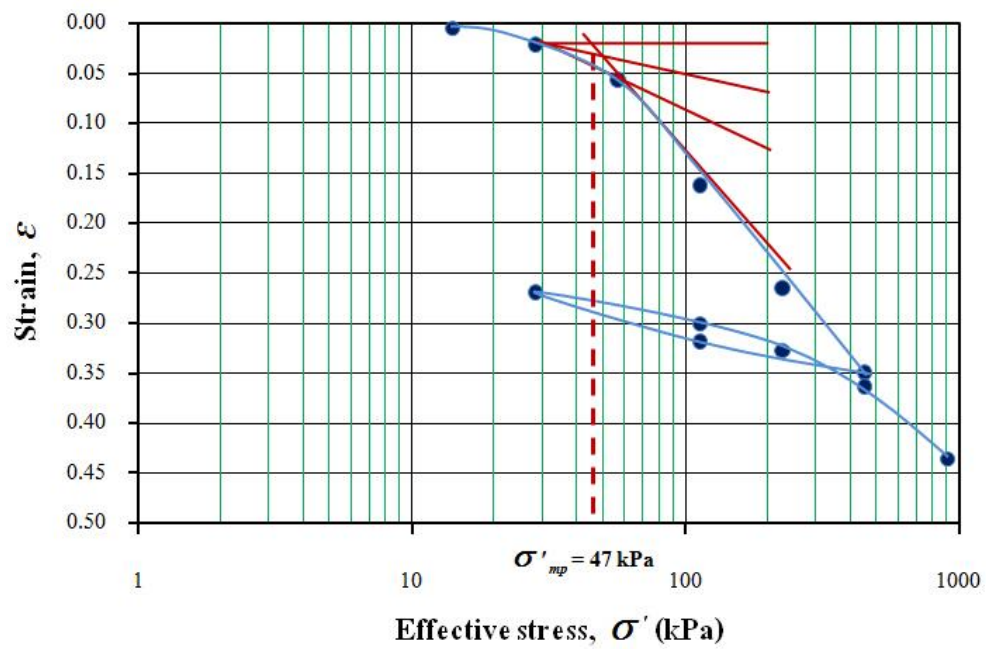
ผลจากการหาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of consolidation,  $c_v$ ) ของตัวอย่างดินเหนียวปากพนังพบว่า ในช่วงเริ่มต้นค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมีค่าสูง เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นเป็นช่วงที่ตัวอย่างดินยังมีความเป็น OC อยู่สูง หลังจาก que เพิ่มหน่วยแรงสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำค่าค่อยๆ ลดลงและคงที่ เนื่องจากตัวอย่างดินมีความเป็น NC มากขึ้น ทั้งนี้ผลการทดสอบทั้งสองระดับความลึก มีลักษณะของกราฟที่คล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ก) และ (ข)

ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression index,  $C_c$ ) ที่ระดับความลึกของตัวอย่าง 4 – 4.5 เมตร ได้ค่า 0.970 และที่ระดับความลึกของตัวอย่าง 7 – 7.5 เมตร ได้ค่า 1.21 ส่วนค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Compression index,  $C_r$ ) ได้ค่า 0.174 และได้ค่า 0.299 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ อครเดช (2552) ได้ค่าดัชนีการอัดตัวอยู่ระหว่าง 0.311 – 0.947 และค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำอยู่ระหว่าง 0.078 – 0.205 ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกันทั้งค่า  $C_c$  และ  $C_r$  เมื่อนำค่าทั้งสองมาหาอัตราส่วนระหว่างค่า  $C_r/C_c$  ได้ค่าเท่ากับ 0.179 และ 0.247 สำหรับดินที่ระดับความลึก 4 – 4.5 เมตร และ 7 – 7.5 เมตร ตามลำดับ ส่วนอครเดช (2552) ได้ค่า  $C_r/C_c$  อยู่ในช่วง 0.216 – 0.251 ซึ่งก็ให้ค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน

เมื่อนำผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติของดินเหนียวปากพนัง เพื่อนำไปหาค่าความสัมพันธ์ของอัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ย ซึ่งได้จากการเฉลี่ยค่าอัตราความเครียดตามแนวแกนที่เกิดขึ้นด้วยเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดการหดตัวหลัก (Primary consolidation) ในแต่ละช่วงของการกดทับด้วยน้ำหนักกด ใช้เวลาในการทดสอบในการทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยใช้วิธีการหาค่าอัตราความเครียด 2 วิธี คือวิธีรากของเวลา (Root time method) และวิธีล็อกของเวลา (Log time method) ดังแสดงในภาคผนวก ก. ผลการทดสอบจากทั้งสองวิธีให้ค่าใกล้เคียงกัน แต่วิธีล็อกของเวลาจะให้ค่าที่น้อยกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยยังขึ้นอยู่กับขนาดของหน่วยแรงกดทับอีกด้วยผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.8 โดยอัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละความลึกของดินจะมีค่าอัตราการเงื่อนไขที่ต่ำสุดและสูงสุดแตกต่างกันดังต่อไปนี้ ที่ระดับความลึก 4 – 4.5 เมตร มีอัตราความเครียดต่ำสุด 0.000169 ต่อหน้าที่ อัตราความเครียดสูงสุด 0.00135 ต่อหน้าที่และที่ระดับความลึก 7 – 7.5 เมตรมีอัตราความเครียดต่ำสุด 0.000147 ต่อหน้าที่อัตราความเครียดสูงสุด 0.00175 ต่อหน้าที่โดยเมื่อนำค่าดังกล่าวมารวมกันจะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเลือกอัตราความเครียดในการทดสอบแรงอัดสามแกนต่อไป



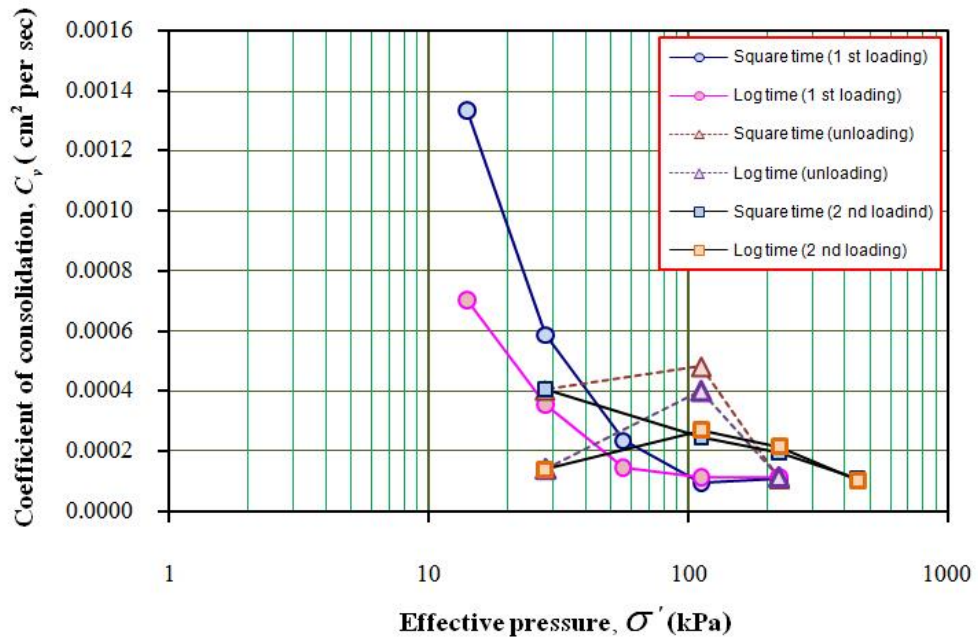
(ก)



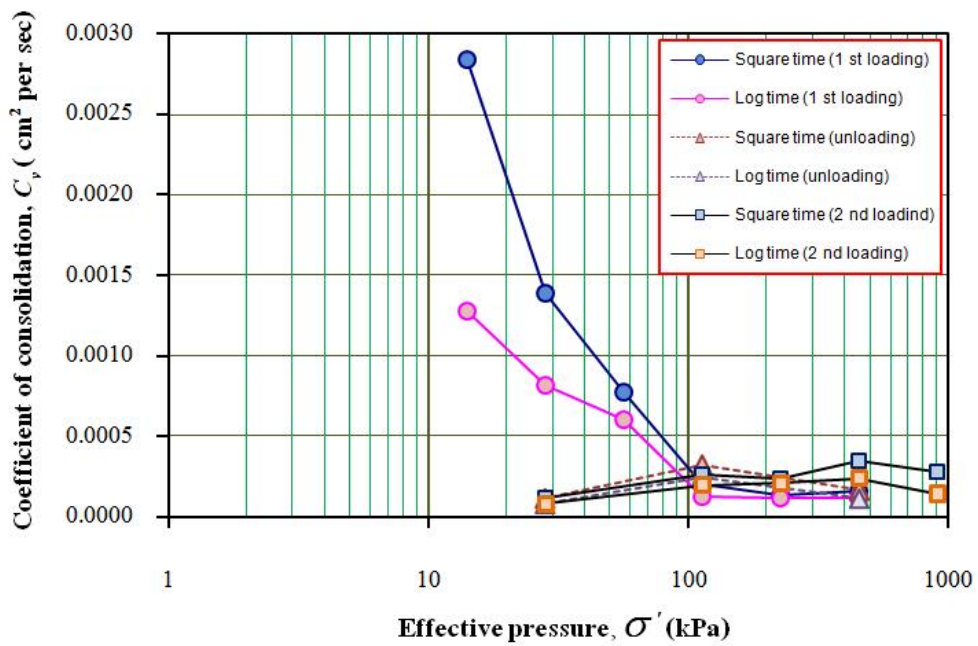
(ข)

รูปที่ 4.6 เส้นโค้งการอัดตัวของตัวอย่างดินเหนียวปากพนังจำนวน 2 ตัวอย่าง

(ก) ความลึก 4 – 4.5 เมตรและ (ข) ความลึก 7 – 7.5 เมตร

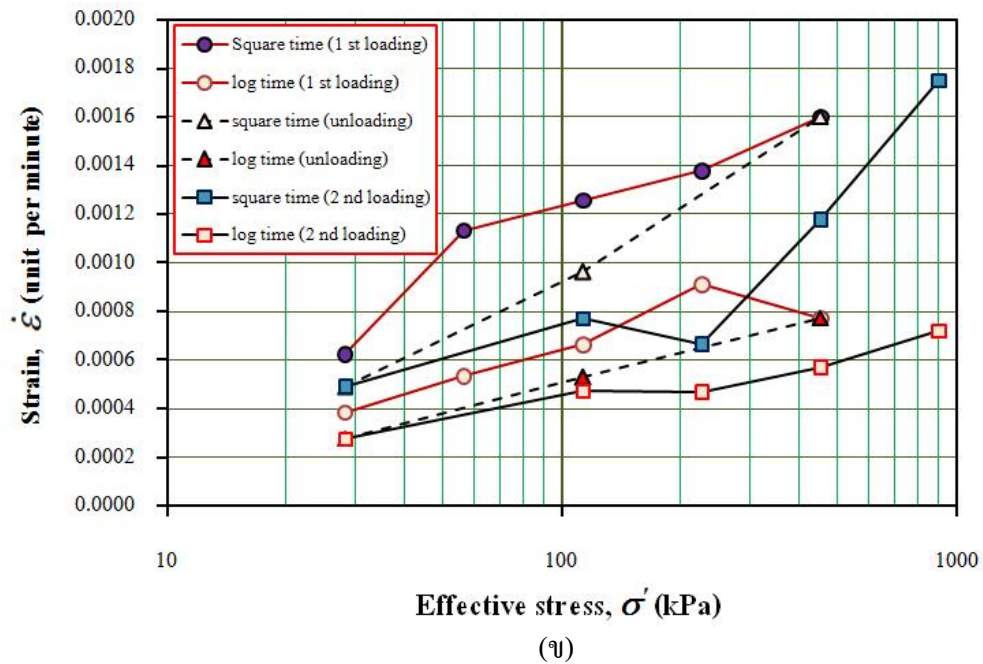
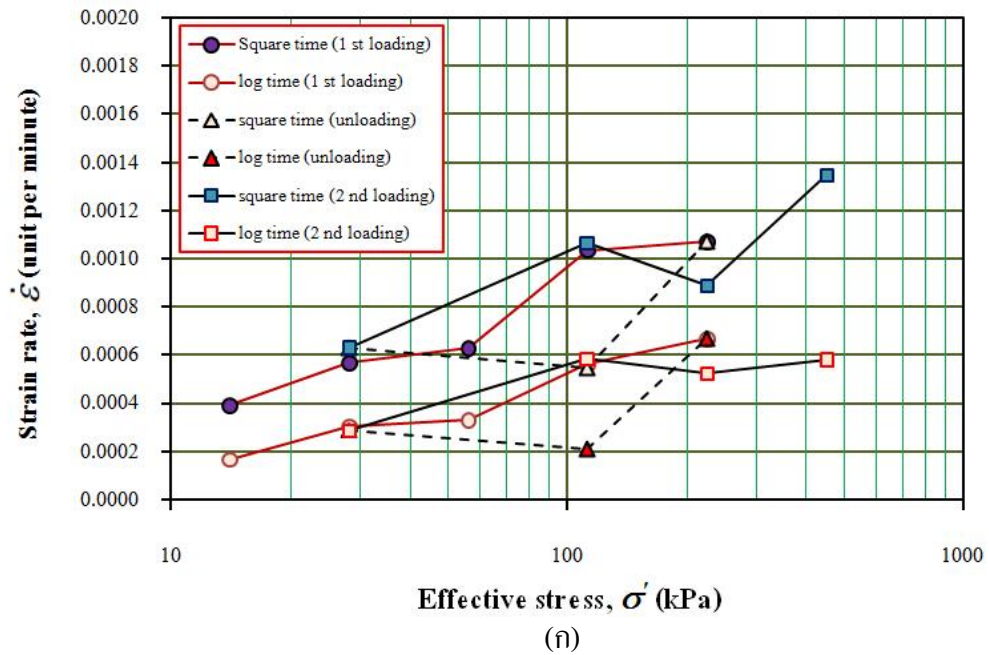


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ จำนวน 2 ตัวอย่าง (ก) ความลึก 4 – 4.5 เมตร และ (ข) ความลึก 7 – 7.5 เมตร

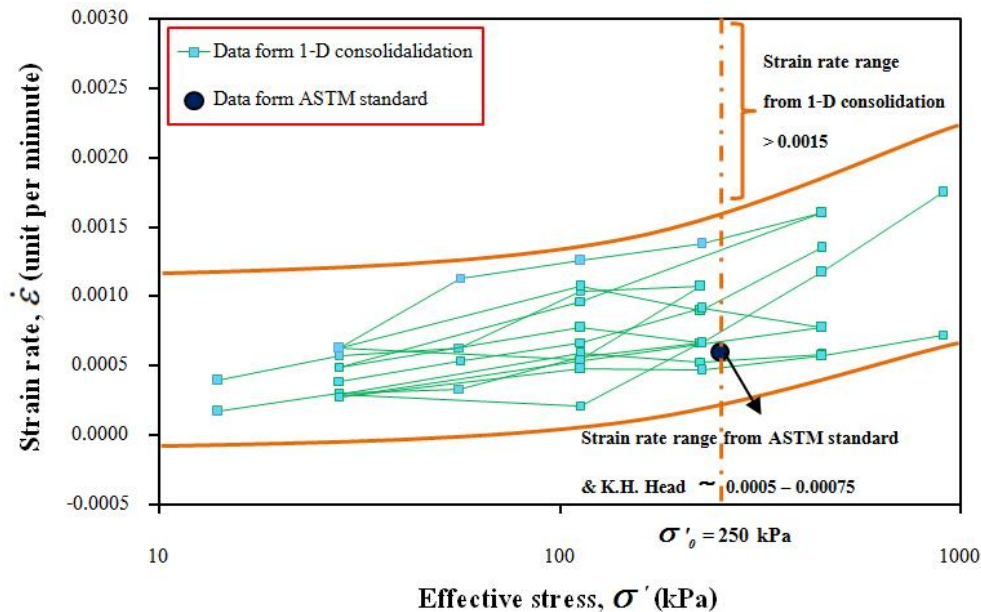


รูปที่ 4.8 อัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบหนึ่งมิติจำนวน 2 ตัวอย่าง (ก) ความลึก 4 – 4.5 เมตร (ข) ความลึก 7 – 7.5 เมตร

#### 4.2.2 การเลือกอัตราความเครียด

การกำหนดค่าอัตราความเครียดที่นำมาใช้ในการทดสอบแรงอัดสามแกนสามารถทำได้ 2 แนวทาง คือ พิจารณาจากอัตราความเครียดที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM 4767 และ K.H. Head (1980) ได้นำมาจากผลของการอัดตัวคายนํ้าโดยวิธีการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบหนึ่งมิติ (Oedometer test) และผลของการอัดตัวคายนํ้าโดยวิธีการทดสอบแรงอัดสามแกนซึ่งผลที่ได้ทั้งสองแนวทางแสดงในรูปที่ 4.9 กราฟสามารถสังเกตเห็นได้ว่าค่าที่ได้จะอยู่ในบริเวณช่วงระหว่าง 0.00035 – 0.0014 ต่อหน้าที่แสดงให้

เห็นว่าค่า 0.00035 ต่อนาทีคือค่าขอบเขตล่าง (Lower bound) ส่วนค่า 0.0014 ต่อนาทีคือค่าขอบเขตบน (Upper bound) ซึ่งในบริเวณดังกล่าวจะแสดงให้เห็นถึงระยะเวลาของการสิ้นสุดการทรุดตัวหลักของตัวอย่างดินเหนียวปากพั้ง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดของค่าความเค้นประสิทธิผลภายในเซลล์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการค่าความเค้นประสิทธิผลภายในเซลล์เพื่อใช้สำหรับขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำเท่ากับ 250 กิโลปาสคาล ส่วนค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยก่อนเงื่อนไขตัวอย่างดินมีค่าเท่ากับ 250 125 63 และ 31 กิโลปาสคาล สำหรับค่า OCR เท่ากับ 1 2 4 และ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบอัตราการความเครียดที่ความเค้นประสิทธิผลใดๆที่ได้จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงอัตราการความเครียดที่มีต่อดินเหนียวปากพั้ง ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าอัตราการความเครียดที่เลือกใช้มีลักษณะที่ครอบคลุมภายใต้เงื่อนไขการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ โดยใช้ค่าแนะนำจากค่ามาตรฐาน ASTM และ K.H. Head [30] โดยจะใช้สมการดังต่อไปนี้ สมการ  $\dot{\epsilon} = \epsilon_f / 10t_{50}$  จากค่าแนะนำโดย ASTM 4767 - 02 และ สมการ  $\dot{\epsilon} = \epsilon_f / (k \times t_{100})$  จากค่าแนะนำโดย K.H. Head (1980) [30] โดยที่ค่าแนะนำทั้ง 2 จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.0005 – 0.00075 ต่อนาทีดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเลือกค่าอัตราการความเครียดดังต่อไปนี้ 0.0002 0.0075 (เป็นมาตรฐาน ASTM และ K.H. Head) 0.01 และ 0.85 ต่อนาทีทั้งนี้อัตราการความเครียดที่เลือกใช้นั้นเพื่อหาค่าความแตกต่างในแต่ละอัตราการความเครียดที่สามารถเห็นความแตกต่างของการผลกระทบจากอัตราการเงื่อนไขได้อย่างชัดเจน โดยมีค่ามาตรฐานของ ASTM และ K.H. Head [30] เป็นตัวตั้ง แล้วเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ของอัตราการความเครียดที่ต่ำกว่าและสูงกว่ากับค่ามาตรฐานที่แนะนำโดย ASTM และ K.H. Head [30] นั้นเอง



#### 4.2.3 ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ

##### 4.2.3.1 กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดและค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่อค่าความเค้นเบี่ยงเบน

จากผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดในการเงื่อนไขตัวอย่างดินเหนียวปากพั้งที่ค่า OCR เท่ากับ 1 2 4 และ 8 สามารถสร้างกราฟเป็น 2 กรณีคือ กรณี (a) ค่าความเค้นเบี่ยงเบนกับอัตราความเครียด และกรณี (b) ค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำการบรรทัดฐาน (Normalized) ด้วยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) กับอัตราความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ทั้งนี้ทำการบรรทัดฐานเพื่อให้สามารถเห็นความชัดเจนของกราฟมากยิ่งขึ้นโดยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

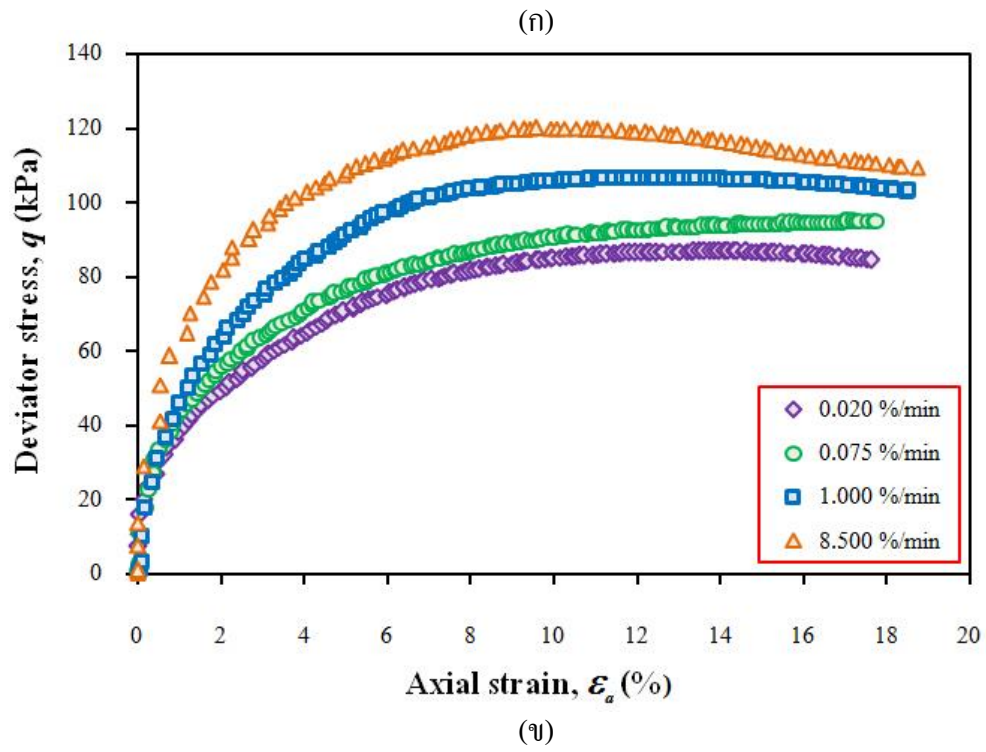
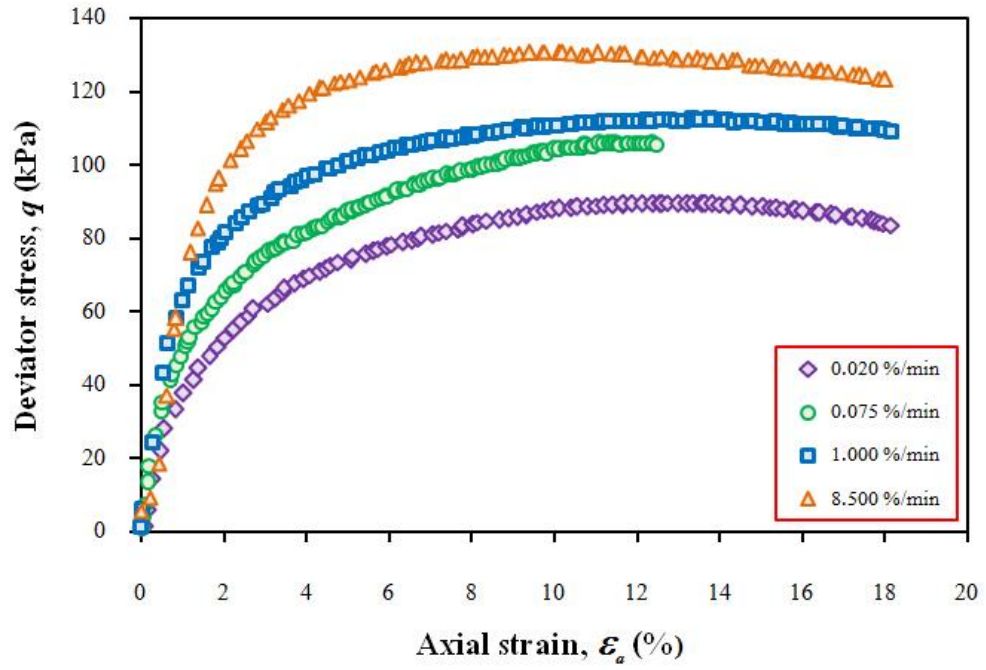
ผลของอัตราความเครียดของดินที่มีค่า OCR เท่ากับ 1 พบว่าอัตราความเครียดมีผลกับการเพิ่มขึ้นของพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวปากพั้ง โดยที่อัตราความเครียดเท่ากับ 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่มีค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงที่สุด และที่อัตราความเครียดเท่ากับ 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่มีค่าความเค้นเบี่ยงเบนต่ำที่สุดโดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าความแตกต่างได้ค่าโดยประมาณ 68.48 เปอร์เซ็นต์ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (1a) และ (1b) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนและอัตราความเครียดตามแนวแกน (Axial strain) จะสังเกตได้ว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 4 เปอร์เซ็นต์ของอัตราความเครียดตามแนวแกนจนกระทั่งดินเกิดการพิบัติ (Failure) จากนั้นค่าจะเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนักลักษณะกราฟจะค่อนข้างคงที่ถึงแม้ว่าอัตราความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้นนอกจากการนี้จะเห็นได้ว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินมีค่าแปรผันตามความเค้นประสิทธิผลก่อนเงื่อนไขตัวอย่างด้วย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเป็นพฤติกรรมของดินเหนียวอัดแน่นปกติ (Normally Consolidation clay) โดยดินประเภทนี้จะไม่มีการแตกสลายของกลุ่มเม็ดดิน ขณะทำการเงื่อนไขตัวอย่างทำให้อัตราส่วนช่องว่างเป็นผลกระทบที่สำคัญของลักษณะดินเหนียวประเภทนี้นั่นเอง

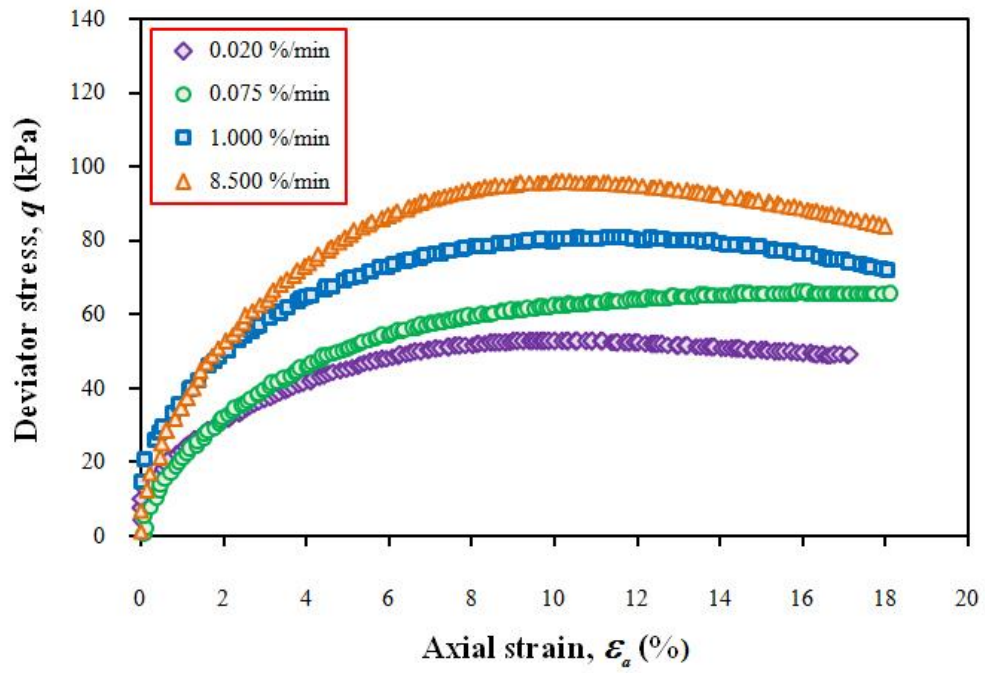
ผลของอัตราความเครียดของดินที่มีค่า OCR เท่ากับ 2 พบว่าอัตราความเครียดมีผลกับการเพิ่มขึ้นของพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวปากพั้งเช่นเดียวกับค่าของ OCR เท่ากับ 1 โดยอัตราความเครียดเร็วที่สุดให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้นไป 72.42 เปอร์เซ็นต์ ของค่าความเค้นเบี่ยงเบนต่ำสุดของอัตราความเครียดที่ช้าที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.10 (2a) และ (2b) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนและอัตราความเครียดตามแนวแกน สามารถสังเกตได้ว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้นแต่ความชันในช่วงเริ่มต้นมีค่าน้อยกว่าที่ค่า OCR เท่ากับ 1 โดยที่อัตราความเครียดเท่ากับ 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่และ 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่แตกต่างกันมากนักและที่อัตราความเครียด เท่ากับ 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่ค่าความเค้นเบี่ยงเบนค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่ออัตราความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้นไปจนกระทั่งถึงประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าความแข็งของตัวอย่างที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

ผลของอัตราความเครียดของดินที่มีค่า OCR เท่ากับ 4 พบว่าอัตราความเครียดมีผลกับการเพิ่มขึ้นของพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวปากพั้งเช่นเดียวกับค่า OCR เท่ากับ 1 และ 2 โดยอัตราความเครียดเร็วที่สุดให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้นไป 55.16 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเค้นเบี่ยงเบนต่ำสุด

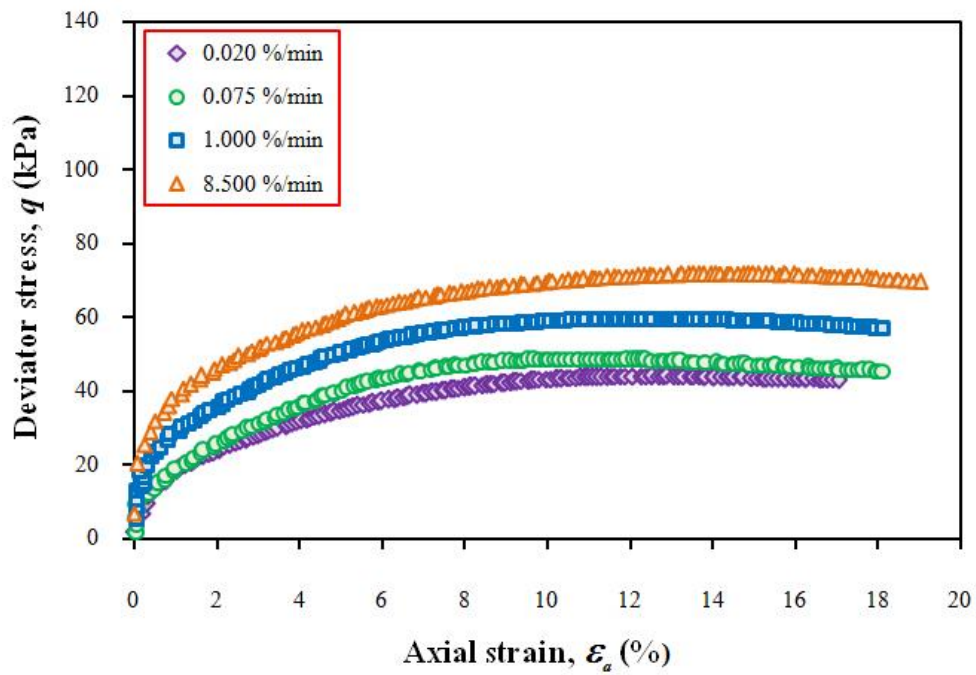
ของอัตราความเครียดที่ช้าที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.10 (3a) และ (3b) ในช่วงเริ่มต้นของการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวที่ค่าอัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซนต์ต่อหน้าที่ค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นเกือบจะซ้อนทับกับอัตราความเครียดเท่ากับ 0.075 เปอร์เซนต์ต่อหน้าที่ เช่นเดียวกับที่อัตราความเครียด 1.0 เปอร์เซนต์ต่อหน้าที่ค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นอัตราความเครียดเกือบจะซ้อนทับกับอัตราความเครียดเท่ากับ 8.5 เปอร์เซนต์ต่อหน้าที่เมื่อสังเกตกราฟจะเห็นว่าที่ค่าอัตราความเครียดเท่ากับ 0.02 เปอร์เซนต์ต่อหน้าที่ค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งดินพิบัติ หลังจากนั้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนค่อยๆ ลดต่ำลงอย่างไม่ชัดเจนนัก ที่อัตราความเครียดเท่ากับ 0.075 เปอร์เซนต์ต่อหน้าที่ค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งดินพิบัติ ส่วนที่อัตราความเครียด 1.0 เปอร์เซนต์ต่อหน้าที่และ 8.5 เปอร์เซนต์ต่อหน้าที่ค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งดินพิบัติ หลังจากนั้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งจะสามารถเห็นได้ชัดเจนที่อัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซนต์ต่อหน้าที่ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าความแข็งในมวลดินที่เพิ่มสูงขึ้น ดินเหนียวแสดงพฤติกรรมการคงรูปที่มากขึ้น และการแตกสลายของกลุ่มเม็ดเริ่มเข้ามามีบทบาทต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงเฉือนของตัวอย่างดินอีกด้วย

ผลของอัตราความเครียดต่อค่า OCR เท่ากับ 8 พบว่าอัตราความเครียดมีผลกับการเพิ่มขึ้นของพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวปากพียงเช่นเดียวกับ OCR ทั้ง 3 ค่าที่น้อยกว่า โดยอัตราความเครียดเร็วที่สุดให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น 60.20 เปอร์เซนต์ของค่าความเค้นเบี่ยงเบนต่ำสุดของอัตราความเครียดที่ช้าที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.10 (4a) และ (4b) ทั้งนี้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งดินพิบัติ หลังจากนั้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนค่อยๆ ลดต่ำลง ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนที่อัตราความเครียดเท่ากับ 0.075 เปอร์เซนต์ต่อหน้าที่ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากพฤติกรรมของดินเหนียวอัดตัวแน่นมากกว่าปกติ (Over Consolidation clay) ซึ่งการแตกสลายของกลุ่มเม็ดดินเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงเฉือนเช่นเดียวกับดินเหนียวที่มีค่าเท่ากับ OCR เท่ากับ 4 ทั้งนี้ที่อัตราความเครียดเท่ากับ 8.5 เปอร์เซนต์ต่อหน้าที่ค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่ค่อยๆ ลดต่ำลงเช่นเดียวกันแต่ไม่ชัดเจนนัก อาจเนื่องมาจากขณะเฉือนตัวอย่างดินเหนียวยังมีแรงดันค้างอยู่ทำให้อนุภาคดินไม่ได้รับแรงเฉือนโดยตรงนั่นเอง





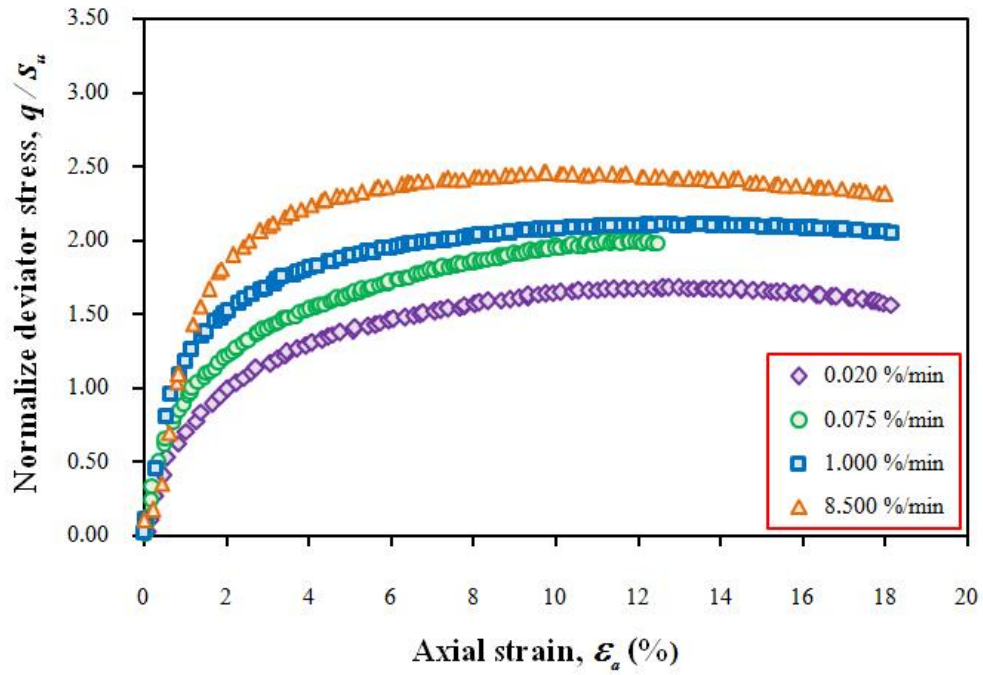
(ก)



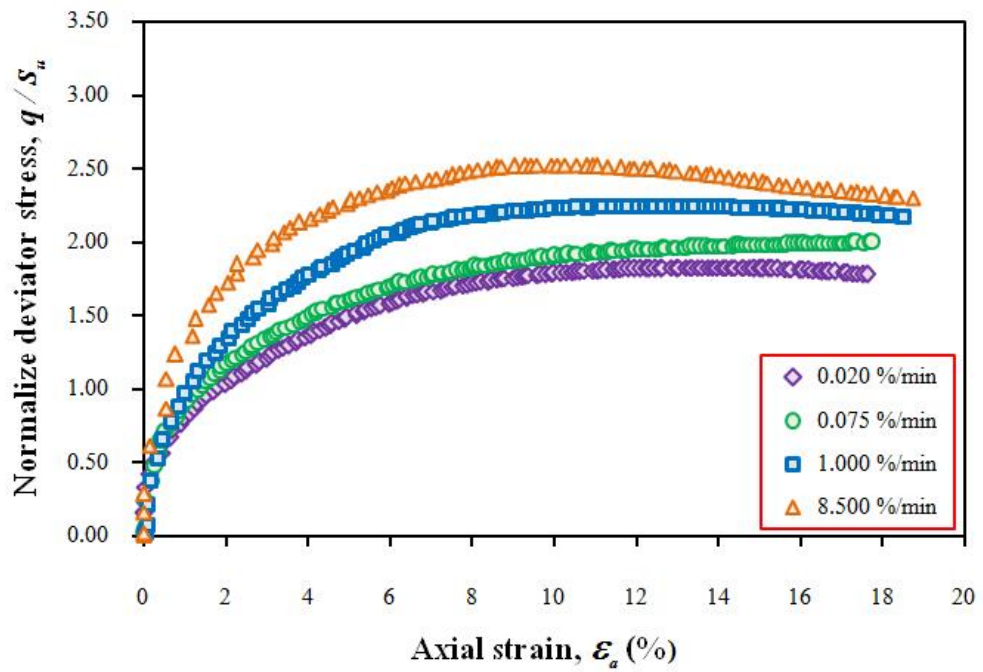
(ง)

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนกับอัตราความเครียด

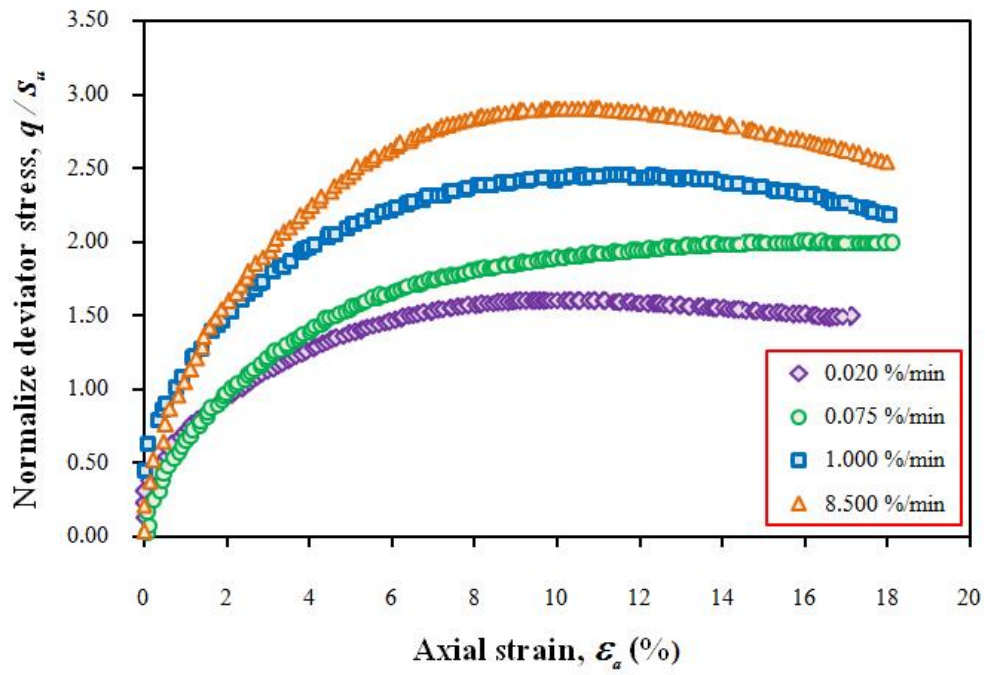
(ก) OCR1 (ข) OCR2 (ค) OCR4 และ (ง) OCR8



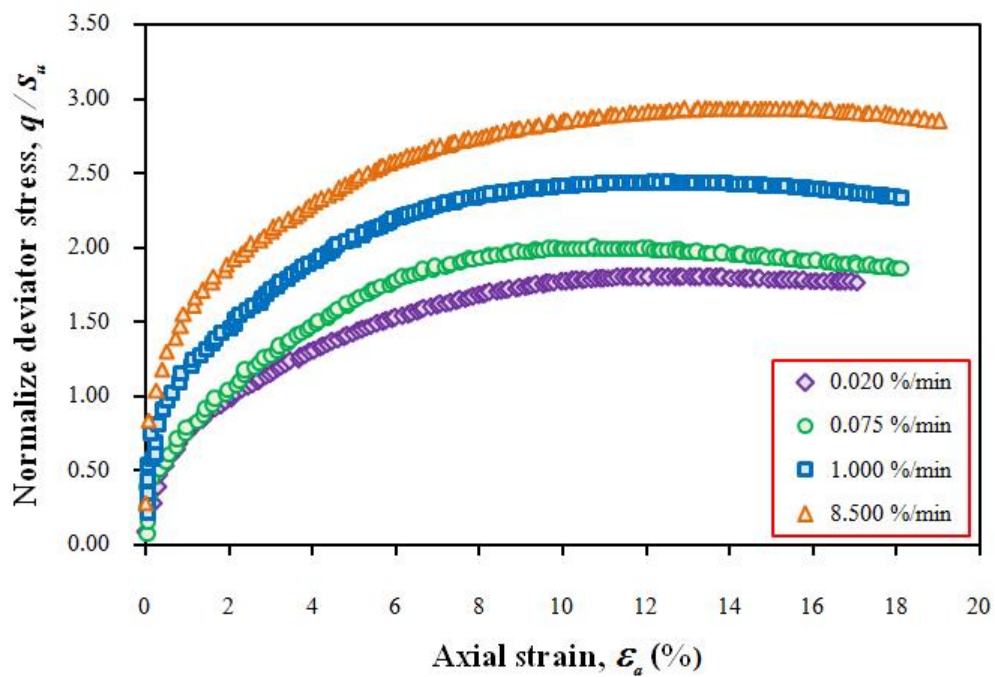
(n)



(u)



(ก)



(ง)

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด  
กับค่าอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน

(ก) OCR1 (ข) OCR2 (ค) OCR4 และ (ง) OCR8

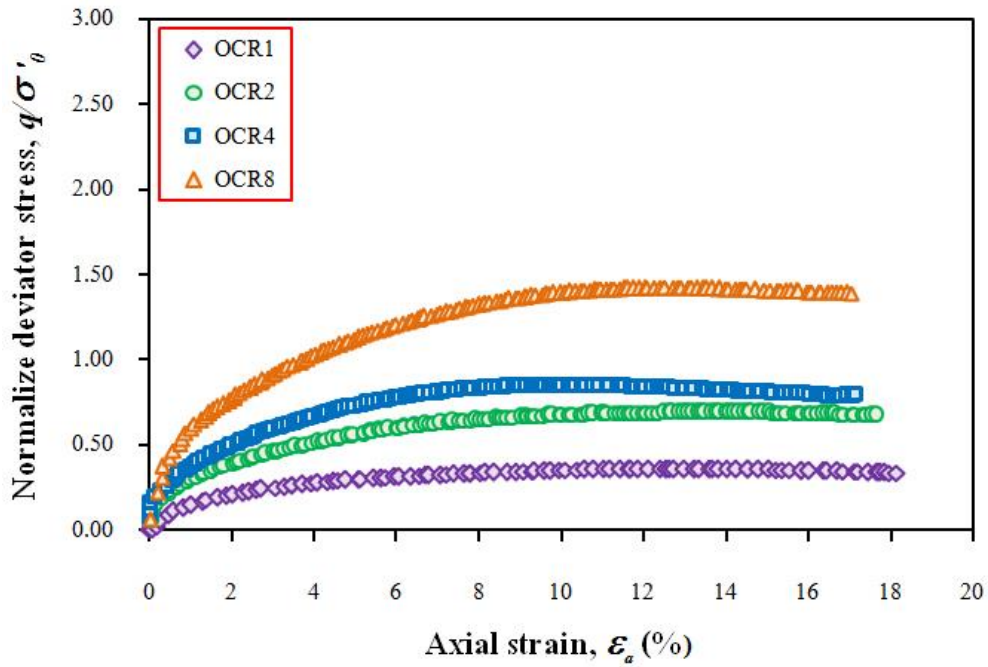
จากนั้นได้นำค่าของอัตราความเครียดเดียวกันมาเปรียบเทียบกันในแต่ละค่า OCR ผลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์ผลกระทบของ OCR ที่มีต่อดินเหนียวปากพนัง โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราความเครียดที่มีผลต่อค่า OCR ต่างๆ ได้แสดงในรูปที่ 4.12 ที่อัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที ค่า OCR เท่ากับ 8 มีค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น 26.08 เปอร์เซ็นต์ ของค่า OCR เท่ากับ 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า OCR เพิ่มขึ้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ที่อัตราความเครียด 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที ค่า OCR เท่ากับ 8 ให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น 27.27 เปอร์เซ็นต์ของค่า OCR เท่ากับ 1 แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนแปรผันกับค่า OCR เช่นเดียวกับที่อัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที ที่อัตราความเครียด 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที ค่า OCR เท่ากับ 8 ให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น 23.62 เปอร์เซ็นต์ของค่า OCR เท่ากับ 1 ซึ่งค่าความเค้นเบี่ยงเบนในแต่ละค่า OCR เริ่มเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนมากกว่าที่อัตราการเฉือนช้า และที่อัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าทีค่า OCR เท่ากับ 8 ให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น 22.80 เปอร์เซ็นต์ ของค่า OCR เท่ากับ 1 โดยจะเห็นได้ว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะมีเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่า 3 อัตราการเฉือนที่ช้ากว่า เนื่องจากเมื่อเฉือนตัวอย่างที่อัตราการเฉือนที่เร็วมากนั้น อนุภาคของเม็ดดินมีการจัดเรียงตัวจนขนานกับทิศทางของแถบเฉือน รวมทั้งการที่แรงดันน้ำในมวลดินเป็นตัวรับแรงเฉือนในช่วงเริ่มต้นเฉือนตัวอย่างผลการทดสอบที่ได้อาจจะไม่ใช่กำลังรับแรงเฉือนที่แท้จริงของตัวอย่างดินนั่นเอง

#### 4.2.3.1 กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดและค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่อค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน

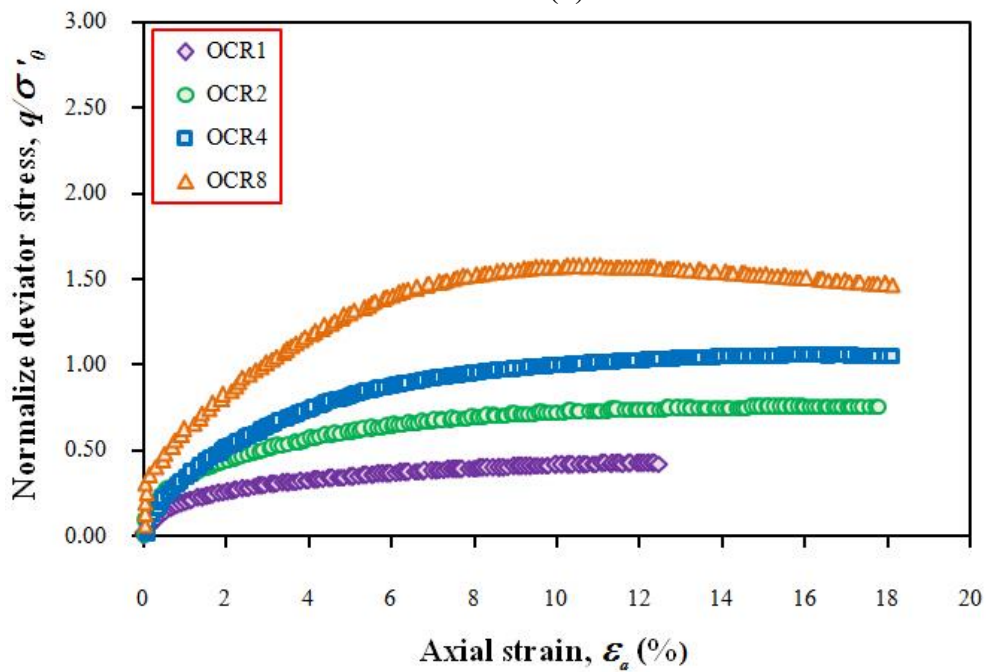
จากผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore - pressure) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดในการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวปากพนังที่ค่า OCR เท่ากับ 1 2 4 และ 8 โดยค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการบรรทัดฐานด้วยความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยก่อนเฉือนตัวอย่างดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ผลของอัตราความเครียดต่อแรงดันน้ำส่วนเกินของค่า OCR เท่ากับ 1 พบว่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ก) ที่อัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าทีจะมีค่าแรงดันน้ำส่วนเกินเพิ่มขึ้นมากที่สุดซึ่งค่าของแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออัตราความเครียดตามแนวแกนเพิ่มขึ้น ที่อัตราความเครียด 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าทีแรงดันน้ำส่วนเกินเป็นลบในช่วง 1.8 เปอร์เซ็นต์ของอัตราความเครียดตามแนวแกน จากนั้นแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าบวก ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลกระทบจากการที่ก่อนทำการเฉือนตัวอย่างดิน ในตัวอย่างยังมีแรงดันค้างอยู่ ทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของการเฉือนแสดงค่าเป็นลบนั่นเอง ที่อัตราความเครียด 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าทีแรงดันน้ำส่วนเกินเพิ่มขึ้นอย่างคงที่เมื่ออัตราความเครียดตามแนวแกนที่เพิ่มมากขึ้นและที่อัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าทีแรงดันน้ำส่วนเกินเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่ออัตราความเครียดตามแนวแกนเพิ่มมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในขณะที่อัตราการเฉือนเร็วจะมีผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์ของแรงดันน้ำส่วนเกิน ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นจะเกิดในบริเวณด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดินเท่านั้น แต่ในขณะที่อัตราการเฉือนช้าแรงดัน

น้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นจะกระจายตัวทั่วทั้งตัวอย่างดิน นอกจากนี้การจัดเรียงตัวของอนุภาคเม็ดดินในอัตรา การเฉือนเร็ว นั้น จะจัดเรียงตัวไม่ทันทำให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากความเป็นจริงที่ ควรจะเกิดขึ้น

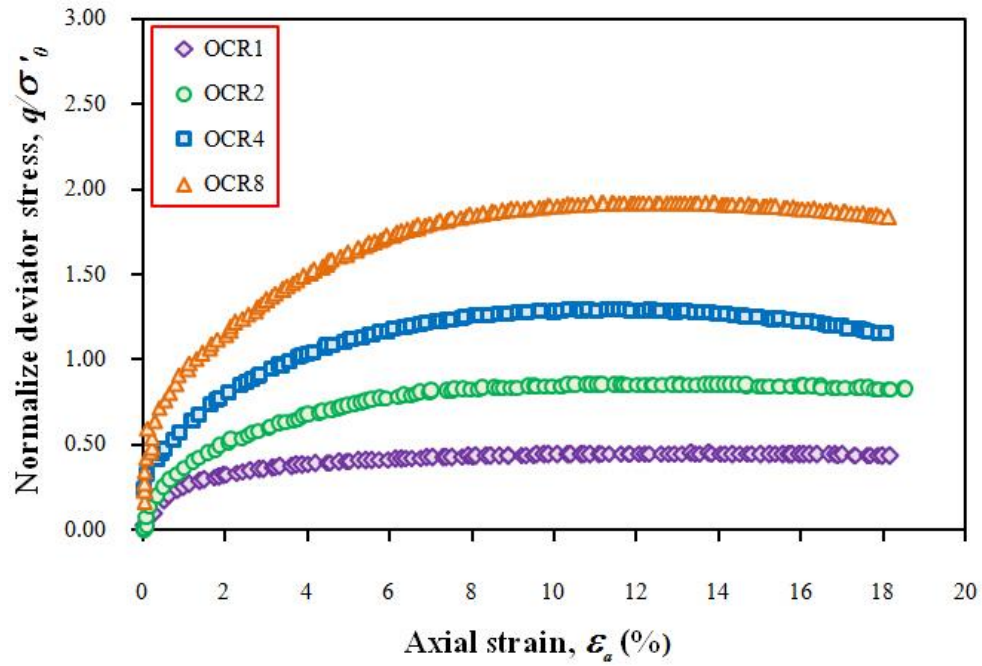


(ก)

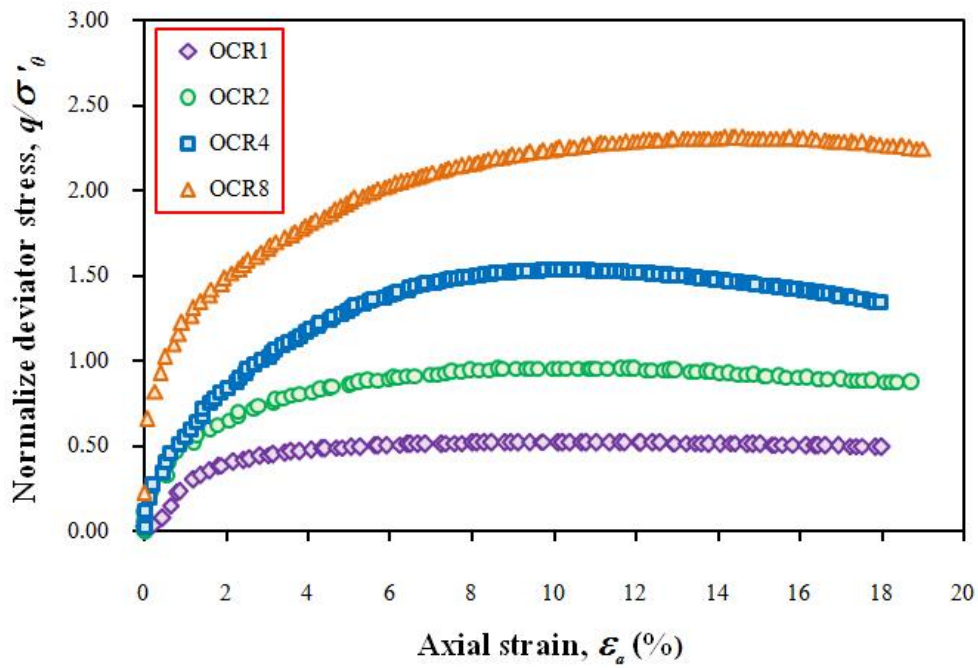


(ข)





(ก)



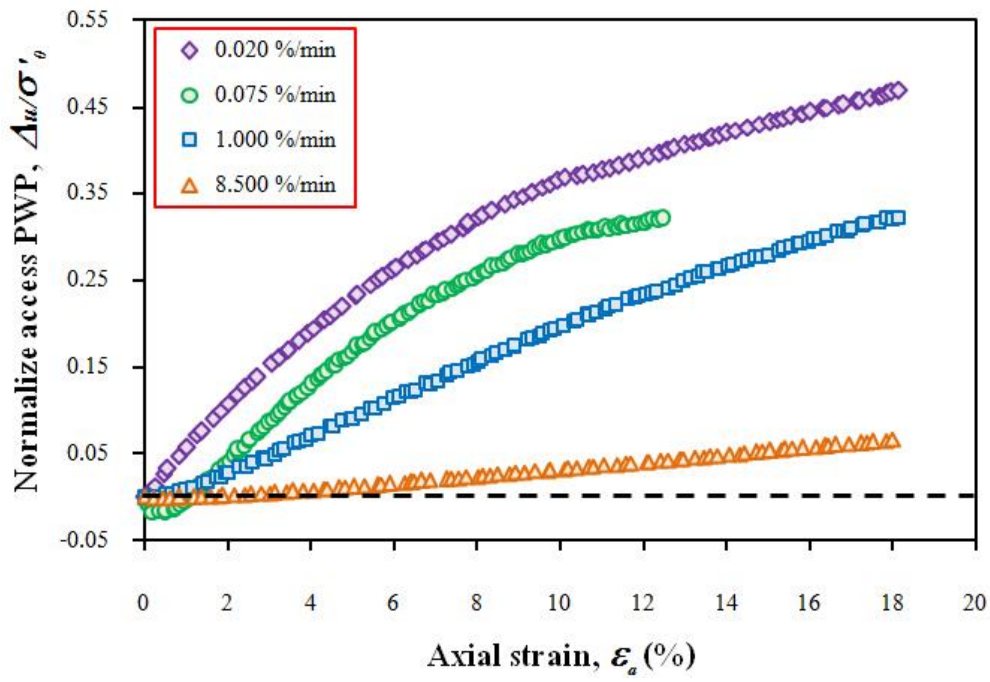
(ง)

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผล  
 เปรียบกับค่าอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน  
 (ก) 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อวินาที (ข) 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อวินาที  
 (ค) 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่อวินาที (ง) 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อวินาที

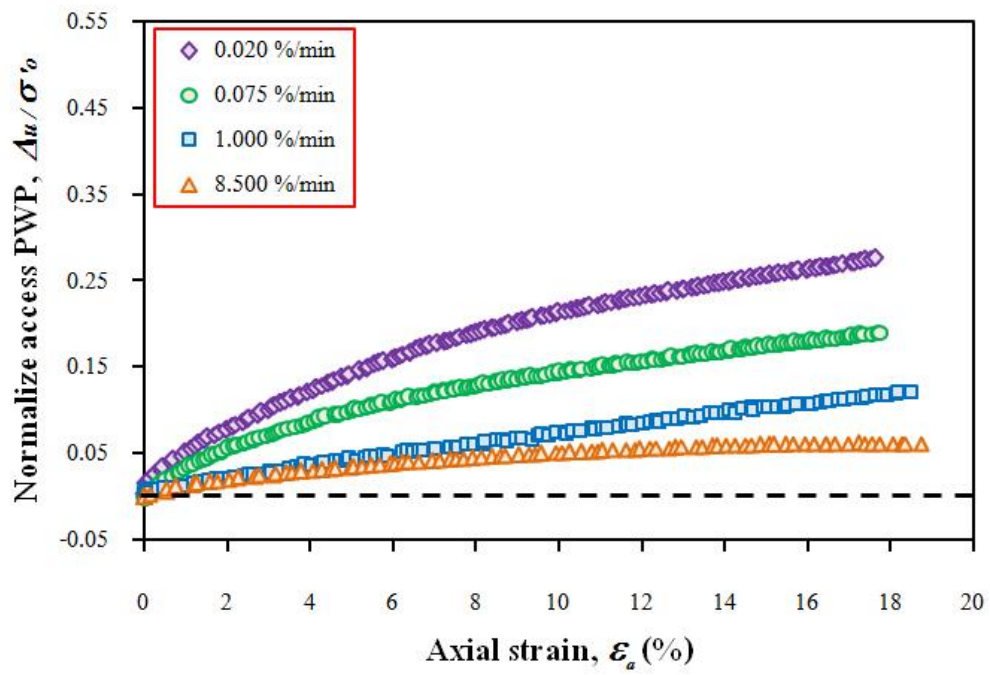
ผลของอัตราความเครียดต่อแรงดันน้ำส่วนเกินของค่า OCR เท่ากับ 2 แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่แตกต่างกันแต่ไม่ชัดเจนนัก โดยที่อัตราการเงื่อนไขมีค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมากกว่าอัตราการเงื่อนไขเร็วเช่นเดียวกันกับ OCR เท่ากับ 1 ซึ่งเป็นผลจากความแข็งของตัวอย่างดินที่มีค่ามากขึ้นทำให้อัตราส่วนช่องว่างในมวลดินลดลง ส่งผลให้ค่าของอัตราความเครียดมีผลต่อแรงดันน้ำส่วนเกินลดน้อยลง และที่อัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่แรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ข) ซึ่งสามารถอธิบายผลได้เช่นเดียวกับอัตราความเครียดเร็วที่สุดของ OCR เท่ากับ 1 นั้นเอง

ผลของอัตราความเครียดต่อแรงดันน้ำส่วนเกินของค่า OCR เท่ากับ 4 พบว่าที่อัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อยเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของอัตราความเครียดตามแนวแกน จากนั้นจะค่อยๆ ลดลง เช่นเดียวกับที่อัตราความเครียด 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยก่อนแล้วจากนั้นจะค่อยๆ ลดต่ำลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าความแข็งของดินที่เพิ่มมากขึ้นรวมทั้งอัตราส่วนช่องว่างที่มีค่าลดลง และขณะเงื่อนไขตัวอย่างดินพยายามที่จะขยายตัวทำให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ค) และที่อัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่แรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกันโดยสามารถอธิบายผลได้เช่นเดียวกับอัตราความเครียดเร็วที่สุดของค่า OCR เท่ากับ 1 และ 2

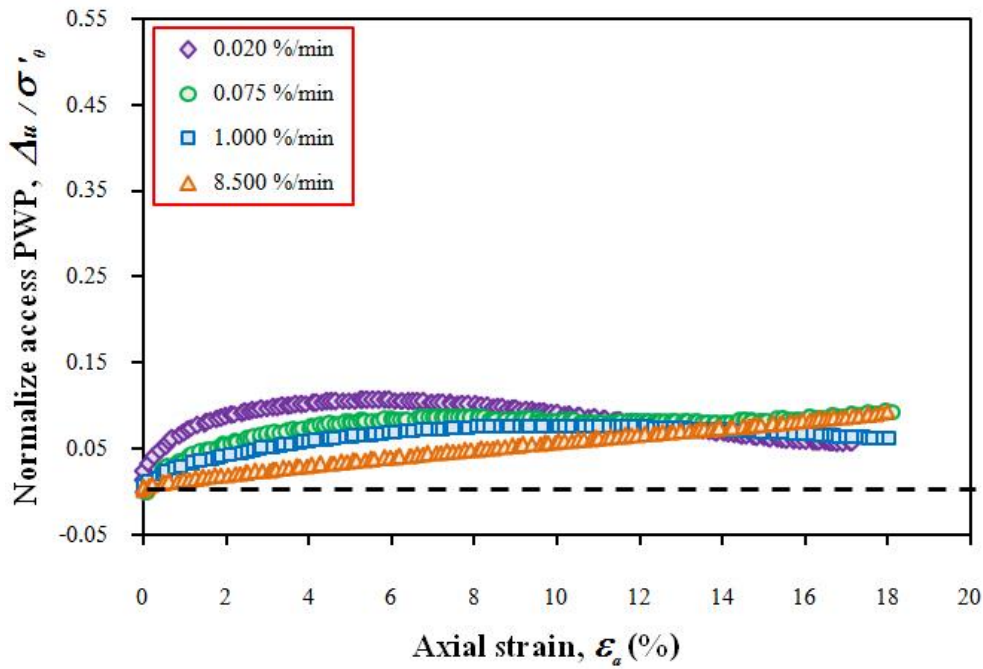
ผลของอัตราความเครียดต่อแรงดันน้ำส่วนเกินของค่า OCR เท่ากับ 8 ที่อัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่ 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่ ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดตามแนวแกนเพิ่มมากขึ้น จากนั้นค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าเป็นลบทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างดินพยายามที่จะขยายตัวขณะเงื่อนไขแต่ถูกป้องกันไว้ด้วยการปิดวาล์วระบายน้ำ ปรากฏการณ์นี้ก่อให้เกิดการแตกสลายของเม็ดดินส่งผลให้แรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าเป็นลบก่อนที่ดินจะถึงจุดพิบัติพฤติกรรมเช่นนี้เป็นพฤติกรรมของดินอัดตัวแน่นมากกว่าปกติ และที่อัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อหน้าที่แรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ง) ซึ่งสามารถอธิบายผลได้เช่นเดียวกับอัตราความเครียดเร็วที่สุดของทั้ง 3 ค่า OCR ที่ช้ากว่า



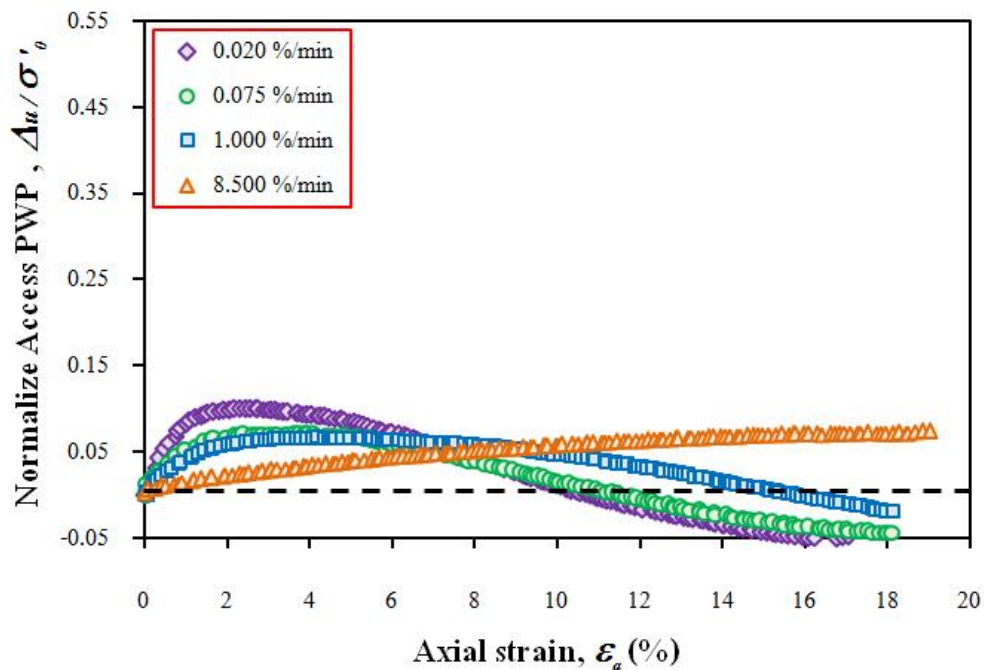
(n)



(o)



(ก)



(ง)

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยกับค่าอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน

(ก) OCR1 (ข) OCR2 (ค) OCR4 และ (ง) OCR8

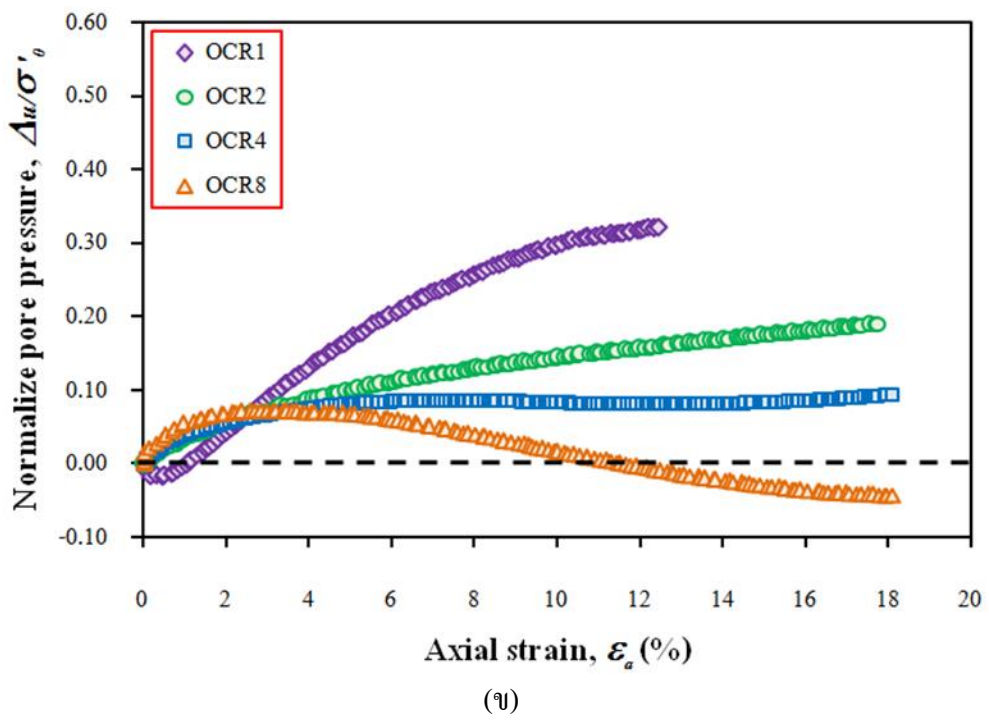
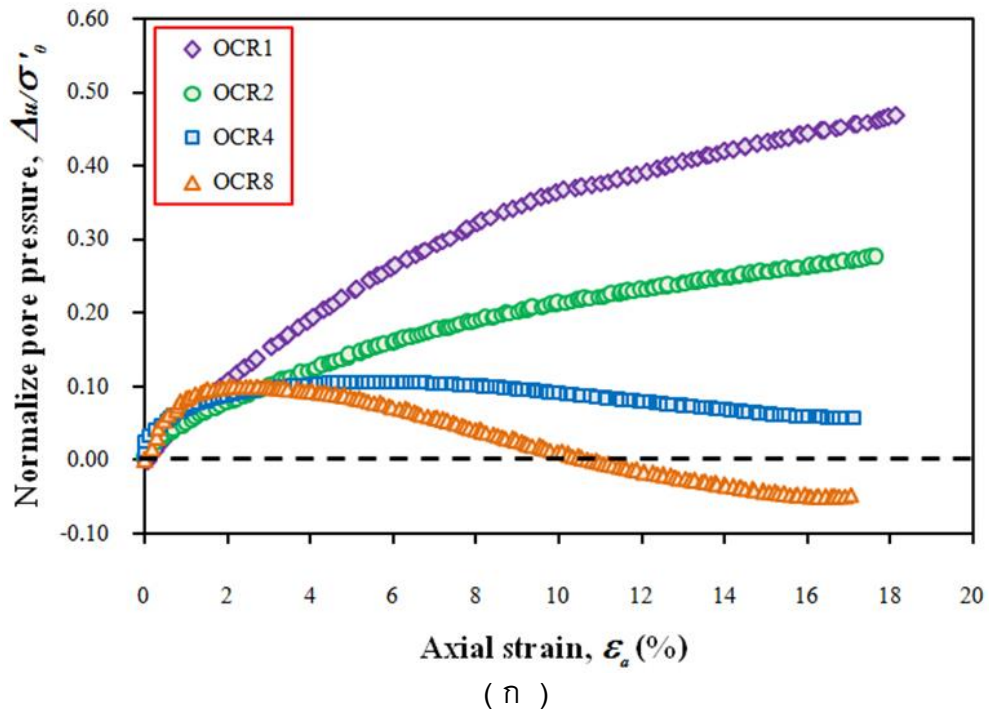
จากนั้นเมื่อนำค่าความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการบรรทัดฐานค่าด้วยความเค้นประสิทธิผลก่อนเงื่อนไขตัวอย่างมาเปรียบเทียบกันในแต่ละค่า OCRผลที่ได้พบว่าอัตราความเครียดมีผลต่อค่าการกระจายตัวของแรงดันน้ำในมวลดิน ซึ่งค่าอัตราความเครียดช้าจะมีผลกระทบมากกว่าที่อัตรา

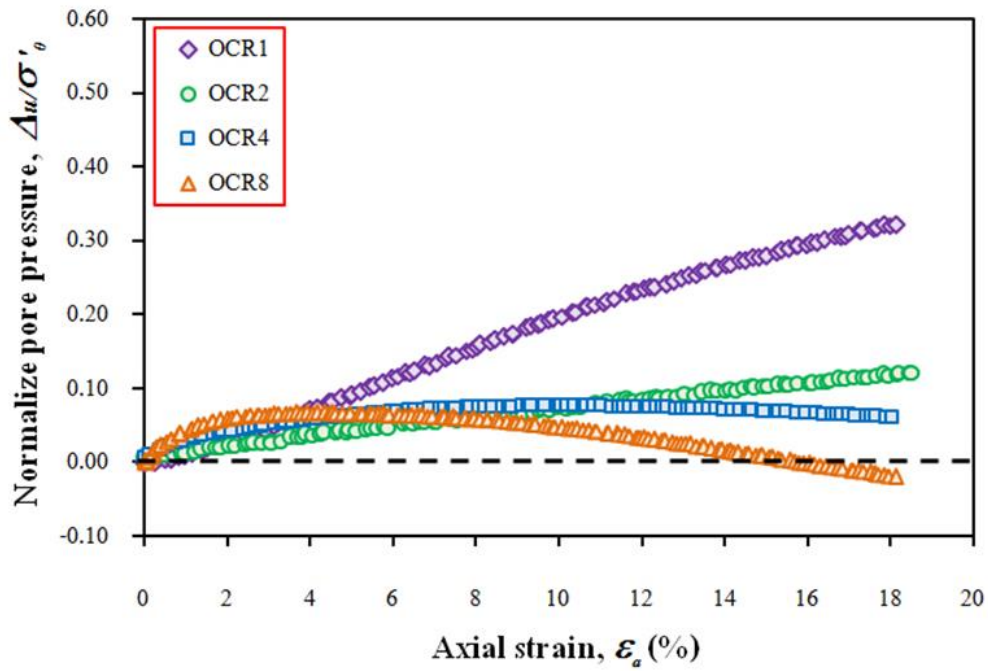
ความเครียดเร็ว โดยที่อัตราความเครียด 0.02เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีและ 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) โดยที่การกระจายตัวของน้ำในมวลดินมีลักษณะที่แตกต่างกันได้อย่างชัดเจน ซึ่งค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่ค่า OCR เท่ากับ 1 และที่ค่า OCR เท่ากับ 4 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นก่อนแล้วค่อยๆ ลดลง ส่วนที่ค่า OCR เท่ากับ 8 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นก่อนแล้วค่อยๆ ลดลง จนมีค่าเป็นลบ (ซึ่งได้อธิบายผลมาแล้ว) ที่ค่าอัตราความเครียด 1.0เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 (ค) ค่าแรงดันน้ำเริ่มมีการกระจายตัวลดลง ในทุกๆ ค่า OCR โดยที่ค่า OCR เท่ากับ 8 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นก่อนแล้วค่อยๆ ลดลงจนมีค่าเป็นลบเช่นเดียวกับ 2 อัตราความเครียดที่ช้ากว่า และที่อัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 (ง) ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นไม่มีความแตกต่างกันแม้ว่าค่า OCR จะเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินไม่มีผลกระทบต่ออัตราการการเฉือนเร็วนี้เอง

#### 4.2.3.1 กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดและค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่อค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด

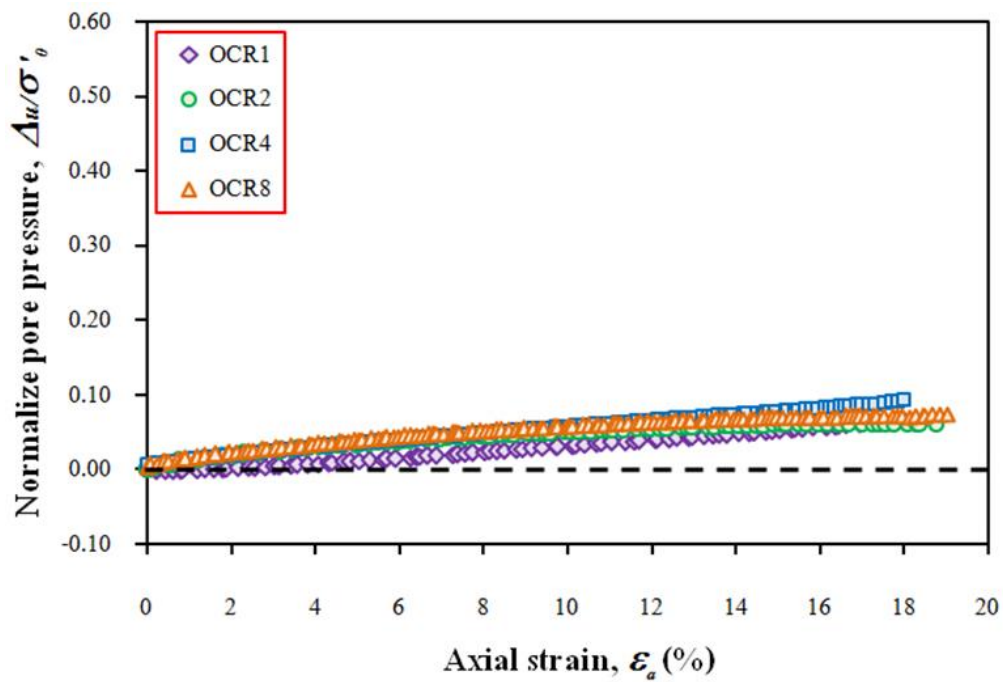
เมื่อนำค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดในการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวปากพหังพบว่า ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราความเครียดที่ใช้ในการทดสอบเร็วขึ้นในทุกๆค่า OCR โดยความสัมพันธ์ระหว่างการบรรทัดฐานค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำการปรับเปลี่ยนอัตราความเครียดในแต่ละค่าของ OCR แสดงในรูปที่ 4.15 จะสังเกตเห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะแปรผันโดยตรงกับลอการิทึมของอัตราความเครียดในช่วงอัตราความเครียดร้อยละ 0.02 – 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีแสดงให้เห็นว่าดินเหนียวปากพหังมีคุณสมบัติของการตอบสนองด้านอัตราความเครียดแบบไม่เชิงเส้น (Non - linear) เช่นเดียวกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั้งนี้ลักษณะของอัตราความไม่เป็นเชิงเส้นในทุกๆ ค่า OCR มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน

จากนั้นเมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนเฉือนตัวอย่างที่ค่าอัตราความเครียดแตกต่างกัน ในแต่ละค่า OCR มาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่า ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ OCR เพิ่มขึ้นโดยที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ค่า OCR เท่ากับ 8 ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น 23.93 เปอร์เซ็นต์ ของค่า OCR เท่ากับ 1 นอกจากนี้ค่าความชันของกราฟก็เพิ่มสูงขึ้น 16.22 เปอร์เซ็นต์อีกด้วยที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าความแข็งของตัวอย่างดินที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ดินแสดงพฤติกรรมต้านทานแรงเฉือนได้มากขึ้นเมื่อค่า OCR เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนช่องว่างจะก็มีค่าลดลงเมื่อค่า OCR เพิ่มสูงขึ้นด้วย ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนเฉือนตัวอย่างในแต่ละค่า OCR แสดงไว้ในตารางที่ 4.3





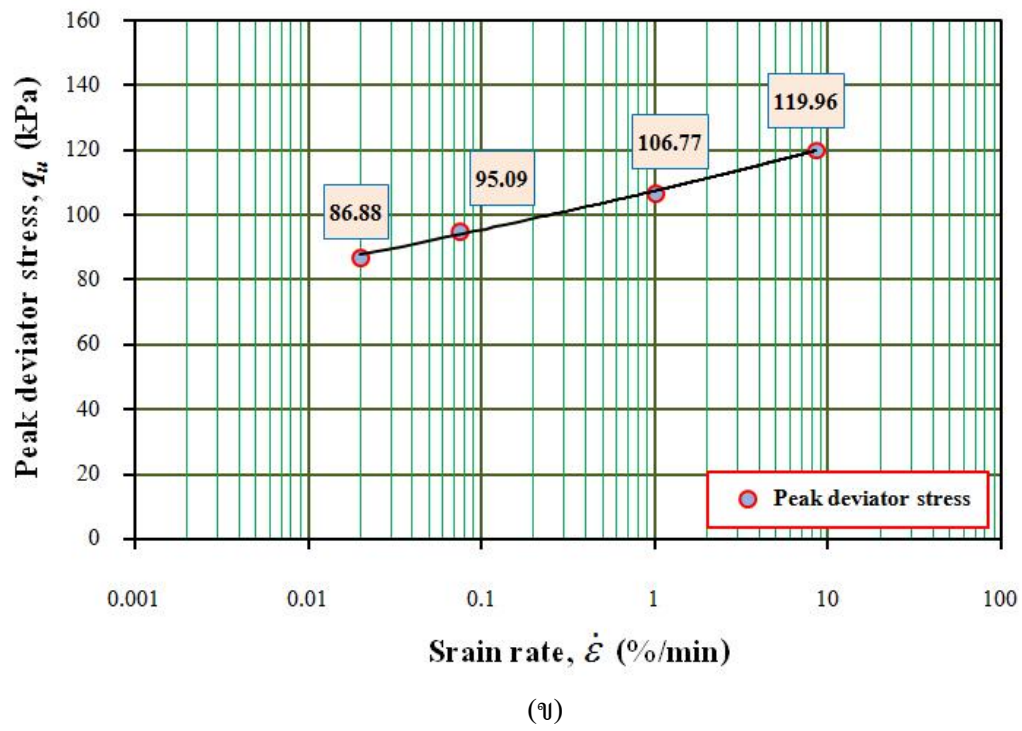
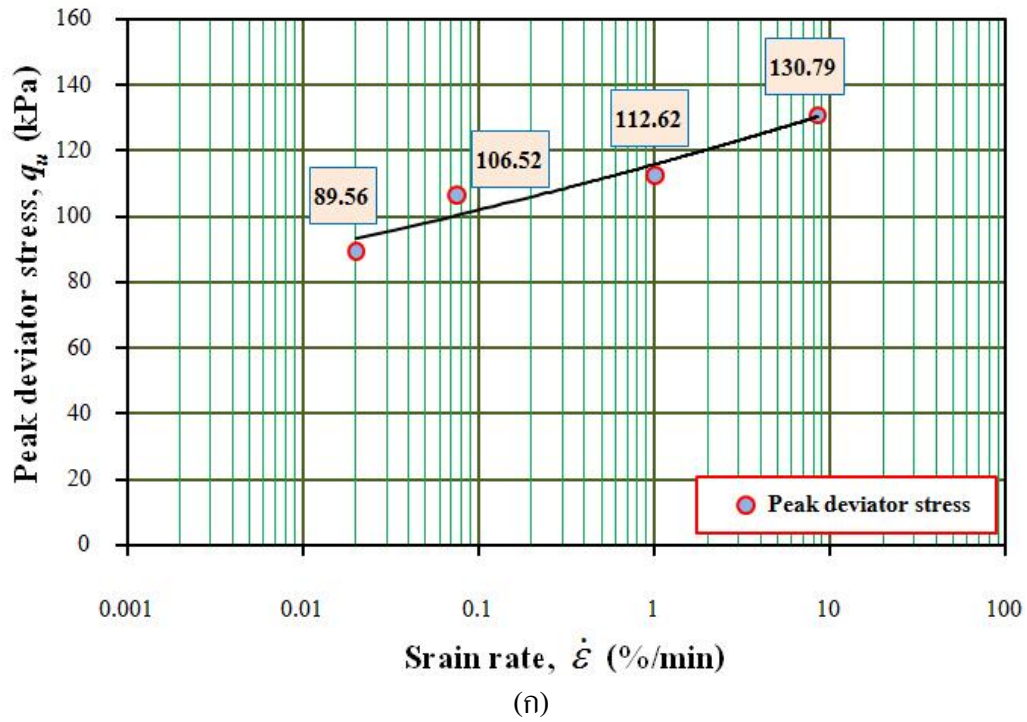
(ก)



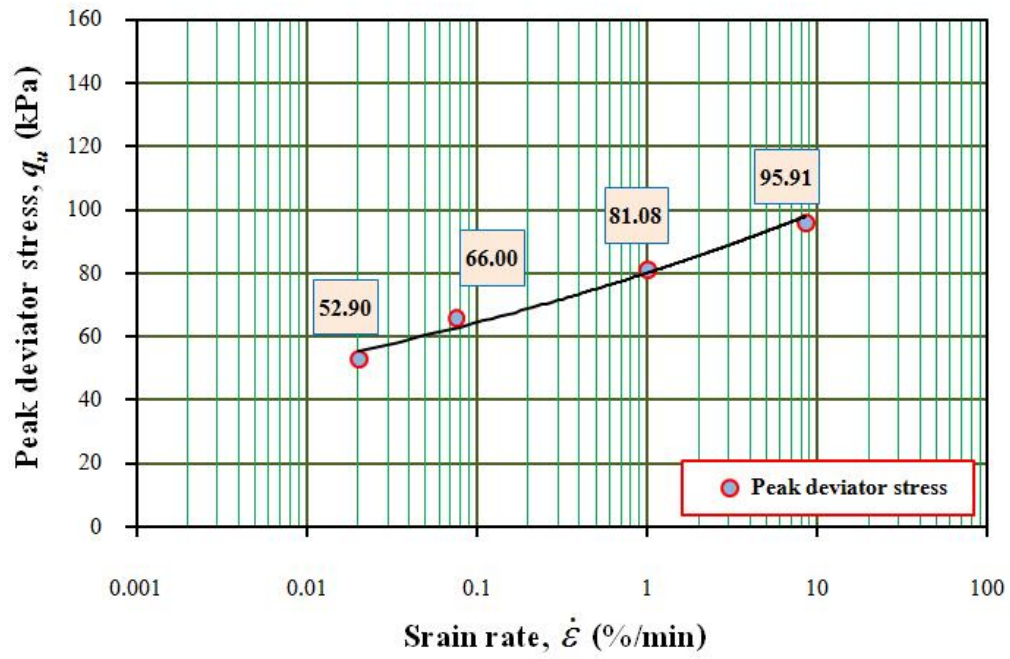
(ง)

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยกับค่าอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน

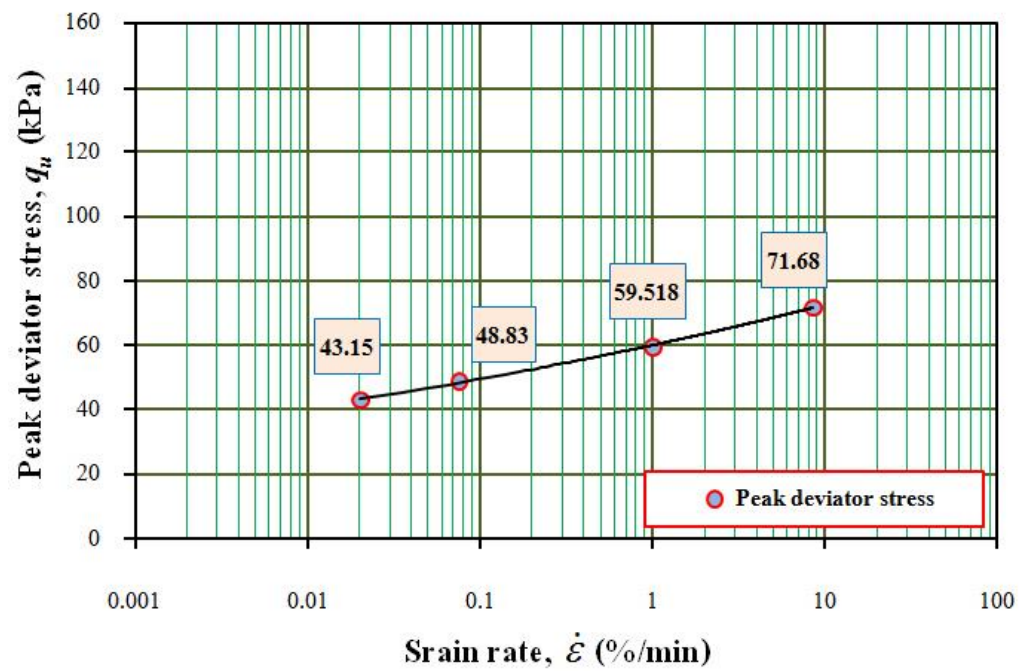
(ก) 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที (ข) 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที (ค) 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีและ (ง) 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที







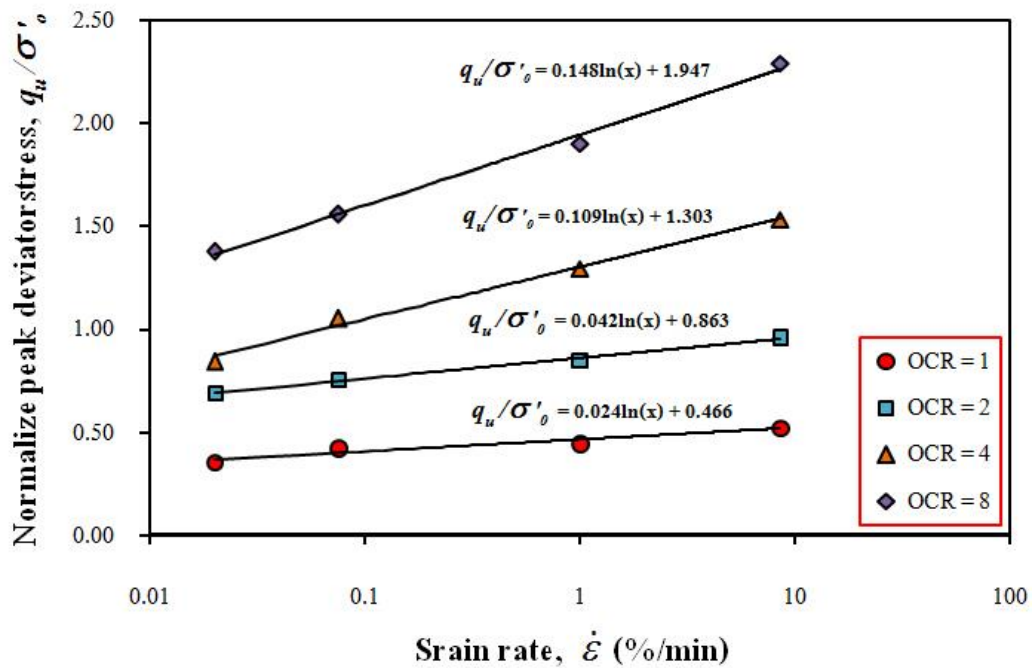
(ค)



(ง)

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่อัตราความเครียดแตกต่างกัน

(ก) OCR1 (ข) OCR2 (ค) OCR4 (ง) OCR8



รูปที่ 4.16 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนเฉือนตัวอย่างกับอัตราความเครียดที่ OCR แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนเฉือนตัวอย่างในแต่ละค่า OCR

Rate \ OCR	Normalize peak deviator stress ( $q_u / \sigma'_o$ )			
	1	2	4	8
0.020 %/min	0.358	0.695	0.846	1.381
0.075 %/min	0.426	0.761	1.056	1.514
0.100 %/min	0.450	0.854	1.297	1.846
8.500 %/min	0.523	0.960	1.535	2.223

จากนั้นได้นำค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับค่าอัตราความเครียดของดินเหนียวอ่อนในบริเวณต่างๆ จากงานวิจัยอื่นๆ ที่เคยได้รายงานไว้บางส่วนมาเปรียบเทียบกับดินเหนียวปากพอง (PakPhanang clay, PPNC) ซึ่งประกอบไปด้วยดินเหนียวในบริเวณต่างๆ ดังต่อไปนี้ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Bangkok clay, BKKC) ดินเหนียวชายทะเลฮ่องกง (Hong Kong marine

clay, HKMC) และดินเหนียวบอสตัน (Boston Blue clay, BBC) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

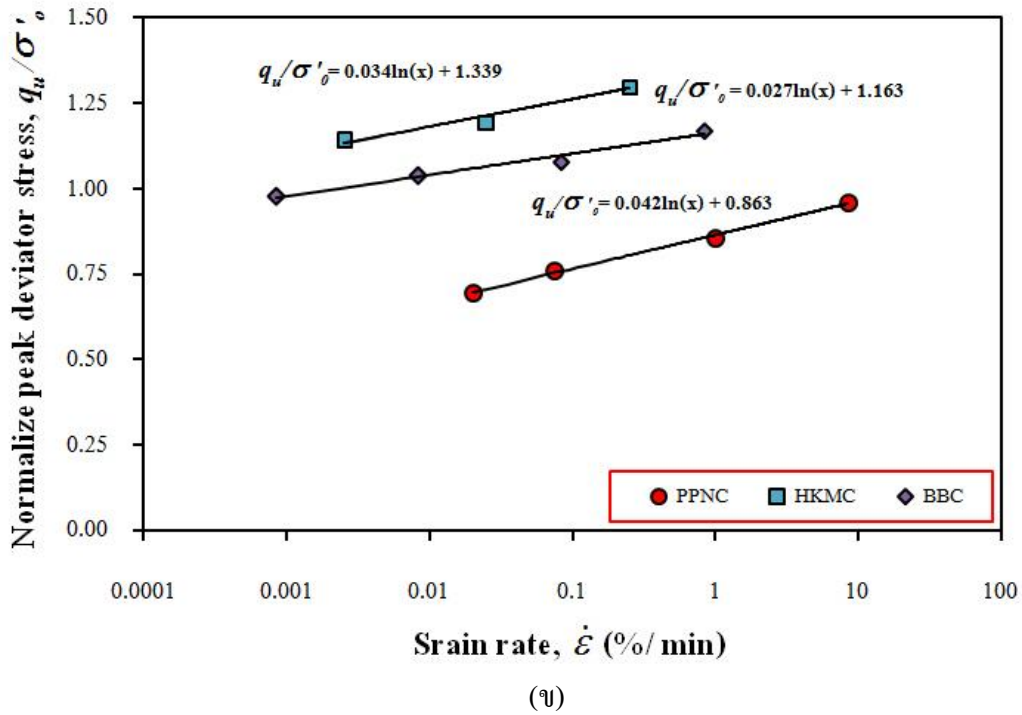
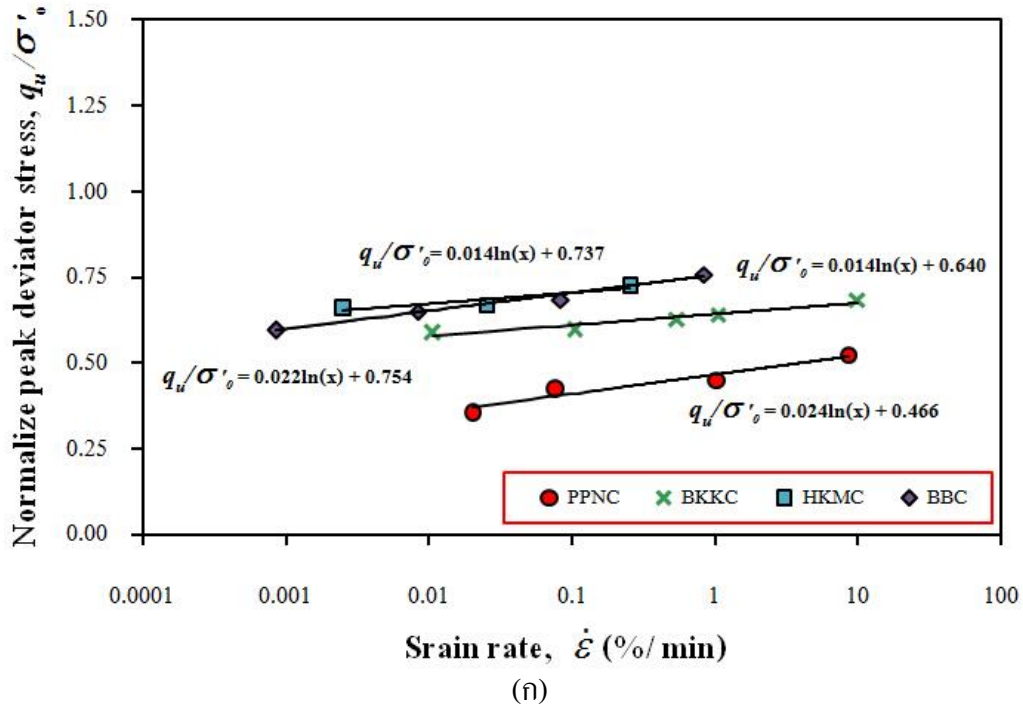
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับค่าอัตราความเครียดที่ OCR เท่ากับ 1 แสดงในรูปที่ 4.17 (ก) พบว่าดินเหนียวชายทะเลฮ่องกง (HKMC) มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกับดินเหนียวบอสตัน (BBC) ส่วนดินเหนียวปากพนัง (PPNC) นั้นมีค่ากำลังรับแรงเฉือนน้อยที่สุดและมีค่าความชันมากที่สุด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดจะส่งผลกับกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวปากพนังมากนั่นเอง ส่วนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (BKCC) มีค่ากำลังรับแรงเฉือนมากกว่าดินเหนียวปากพนังแต่ไม่มากนัก ทั้งนี้เมื่อสังเกตค่าความสัมพันธ์ของกราฟที่ค่า OCR เท่ากับ 1 พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวในบริเวณต่างๆ มีค่าที่แตกต่างกันแต่ไม่ชัดเจนมากนัก เนื่องจากการเฉือนตัวอย่างดินที่ค่า OCR เท่ากับ 1 ซึ่งเป็นดินอัดตัวปกตินั่นเอง ทั้งนี้ลักษณะดินเหนียวในบริเวณพื้นที่ต่างๆ มีความแตกต่างกันของลักษณะการตกตะกอนของเม็ดดินทำให้ผลการทดสอบแตกต่างกัน นอกจากนี้ค่าอัตราความเครียดที่ใช้ในการเฉือนก็แตกต่างกันอีกด้วย

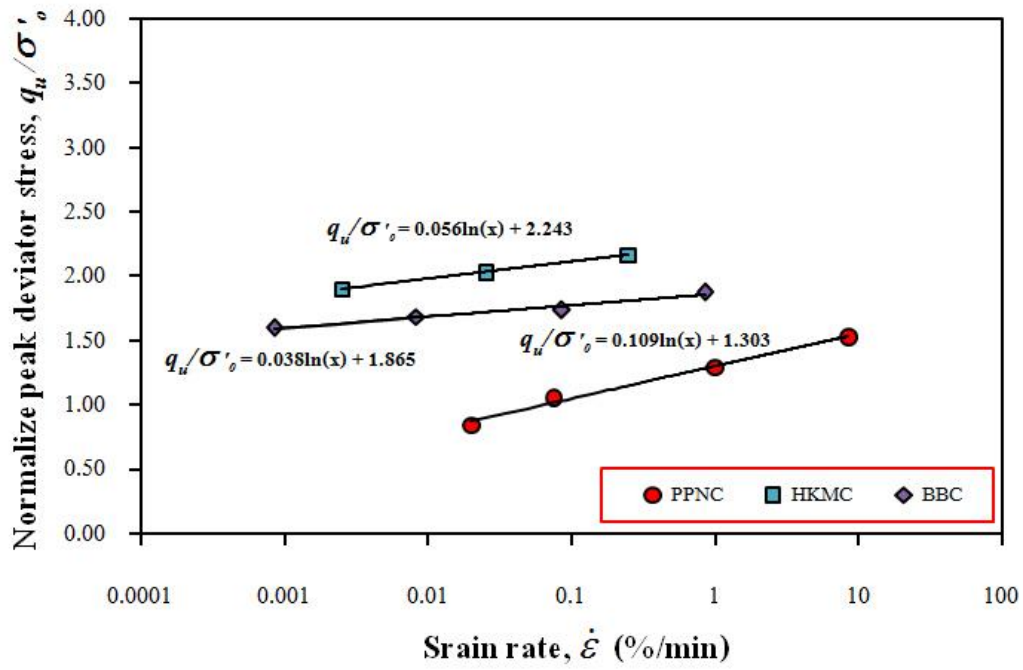
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับค่าอัตราความเครียดที่ OCR เท่ากับ 2 แสดงในรูปที่ 4.17 (ข) พบว่าดินเหนียวชายทะเลฮ่องกง (HKMC) มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงที่สุด ดินเหนียวปากพนัง (PPNC) มีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำสุดและมีค่าความชันมากที่สุด เช่นเดียวกับที่ค่า OCR เท่ากับ 1 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดเดียวกันกับ OCR เท่ากับ 1 ค่าความเค้นเฉือนของดินที่ค่า OCR เท่ากับ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความแข็งของดินมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับค่าอัตราความเครียดที่ OCR เท่ากับ 4 แสดงในรูปที่ 4.17 (ค) พบว่าดินเหนียวชายทะเลฮ่องกง (HKMC) มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงที่สุด ดินเหนียวปากพนัง (PPNC) มีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำสุดและมีค่าความชันมากที่สุด เช่นเดียวกับที่ค่า OCR เท่ากับ 1 และ 2 และเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับค่า OCR เท่ากับ 1 และ 2 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นและมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนมากขึ้นด้วยเนื่องจากค่า OCR เท่ากับ 4 เป็นดินที่มีการอัดแน่นที่สูงขึ้นและความคงตัวของดินก็มีมากขึ้นนั่นเอง

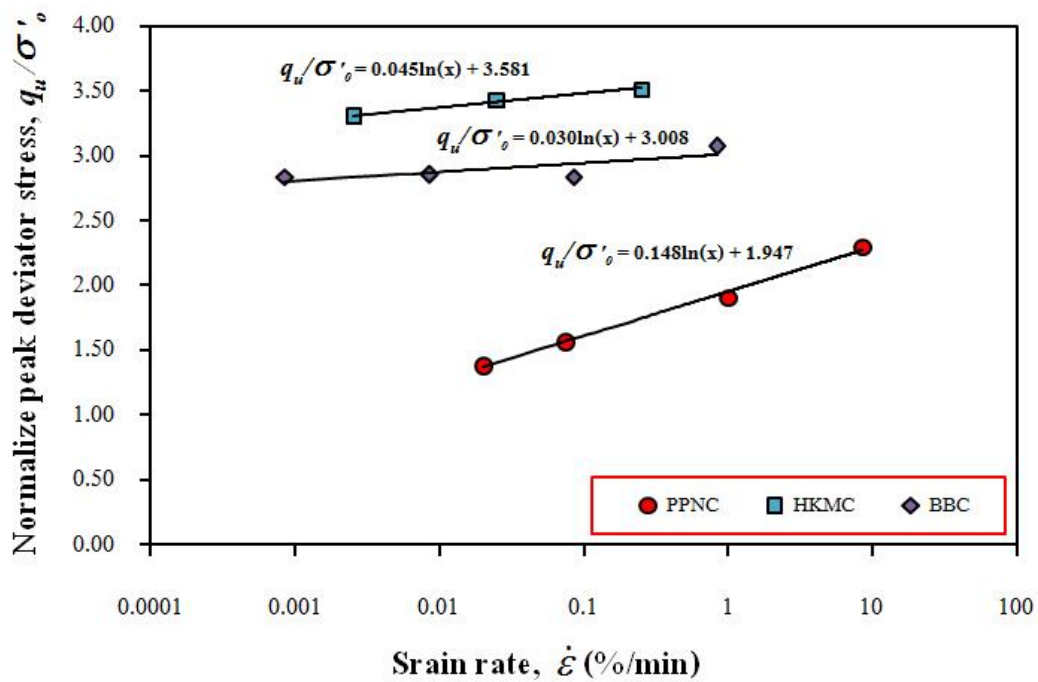
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับค่าอัตราความเครียดที่ OCR เท่ากับ 8 แสดงในรูปที่ 4.17 (ง) พบว่าดินเหนียวชายทะเลฮ่องกง (HKMC) มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงที่สุด ดินเหนียวปากพนัง (PPNC) มีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำสุดและมีค่าความชันมากที่สุดเช่นเดียวกับที่สาม OCR ที่ช้ากว่าเมื่อสังเกตลักษณะของกราฟพบว่าจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับค่า OCR เท่ากับ 4 โดยที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน กำลังรับแรงเฉือนที่ค่า OCR เท่ากับ 8 มีกำลังรับแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น 23.93 เปอร์เซ็นต์ 20.58 เปอร์เซ็นต์ และ 25.07 เปอร์เซ็นต์ของค่า OCR เท่ากับ 1 สำหรับดินเหนียวปากพนัง ดินเหนียวชายทะเลฮ่องกง และดินเหนียวบอสตันตามลำดับ ทำให้ทราบว่าเมื่อค่า OCR เพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกันที่เป็นเช่นนี้เป็นพฤติกรรมของดินเหนียวอัดตัวแน่นมากกว่าปกติ ซึ่งการแตกสลายของกลุ่มเม็ดมีบทบาทต่อการเพิ่มของ

กำลังต้านทานแรงเฉือนตั้งที่ได้โดยกล่าวมาแล้วนั่นเอง ทั้งนี้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวให้ค่าใกล้เคียงกันทั้งสามตัวอย่างที่นำมาเปรียบเทียบ





(ก)



(ง)

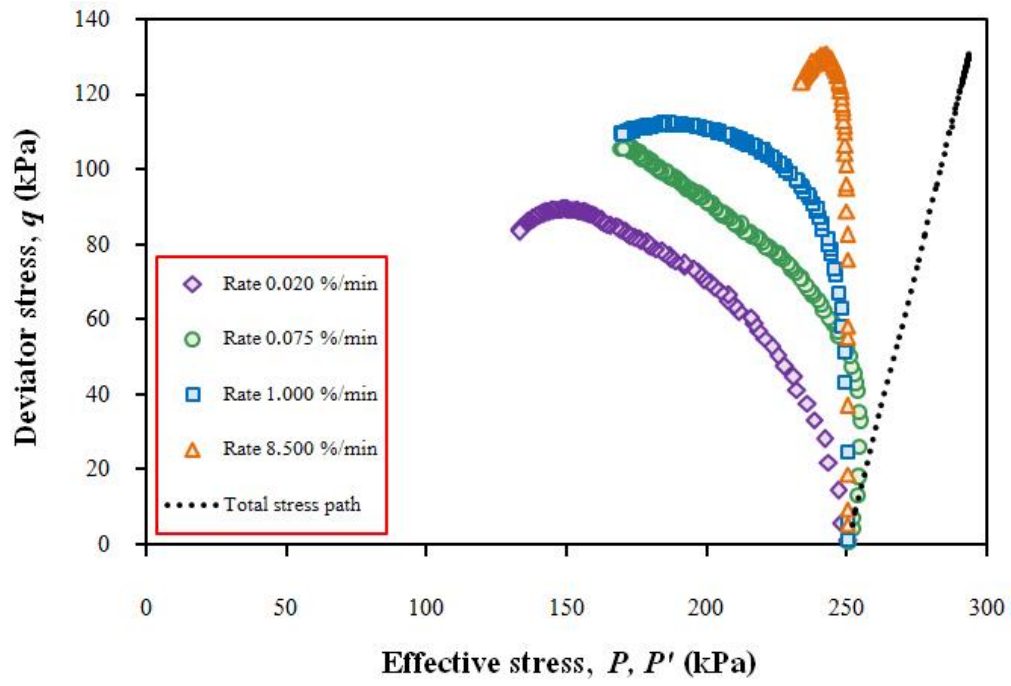
รูปที่ 4.17 ค่าความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับอัตราการความเครียดที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวที่แตกต่างกันของดินในบริเวณต่างๆ

(ก) OCR1 (ข) OCR2 (ค) OCR4 (ง) OCR8

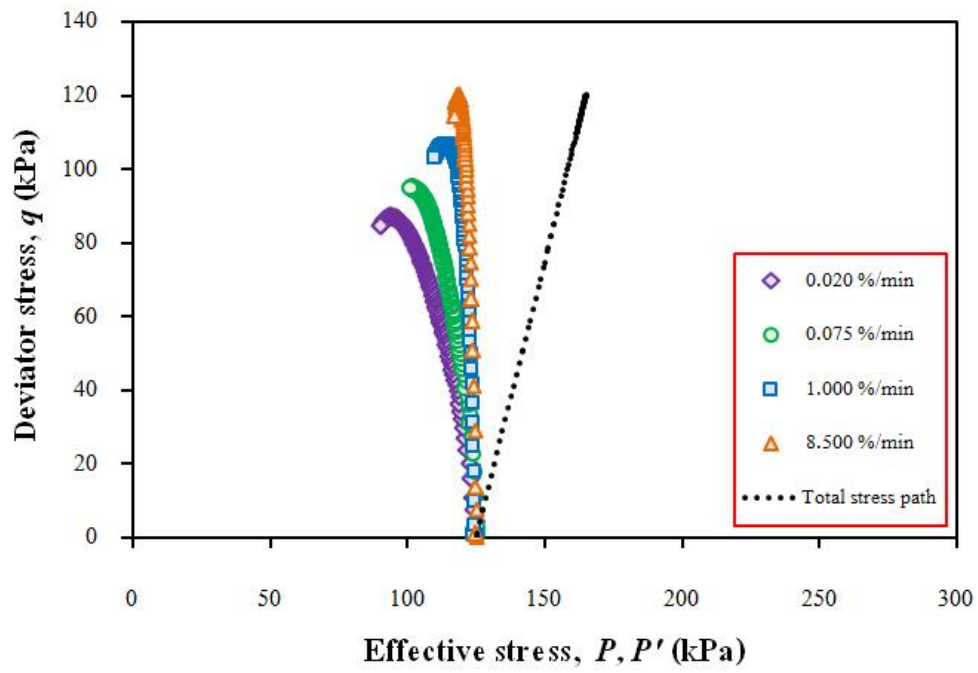
#### 4.2.3.2 กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดและค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว ต่อค่าวิถีความเค้น

พิจารณาเส้นทางเดินของวิถีความเค้น (Stress path) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดในการเจียนตัวอย่างดินเหนียวปากพั้ง ในทุกๆ ค่า OCR พบว่าที่ OCR เท่ากับ 1 และ 2 เส้นทางเดินของวิถีความเค้นจะไม่ซ้อนทับกันในแต่ละอัตราความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) และ (ข) เนื่องจากค่าการเกิดแรงดันน้ำในมวลดินที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าของอัตราความเครียดมีค่าไม่เท่ากัน จึงทำให้เส้นทางเดินของวิถีความเค้นแตกต่างกันออกไปโดยที่ค่า OCR เท่ากับ 1 สามารถสังเกตเห็นได้ว่าค่าวิถีความเค้นมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนมากกว่าที่ค่า OCR เท่ากับ 2 และเส้นทางเดินของวิถีความเค้นมีแนวโน้มเคลื่อนที่จากขวาไปซ้าย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเป็นลักษณะของวิถีความเค้นของดินเหนียวที่มีค่าการอัดแน่นปกตินั่นเอง ที่ค่า OCR เท่ากับ 2 วิถีความเค้นมีแนวโน้มเคลื่อนที่จากขวาไปซ้ายเช่นเดียวกัน แต่ลักษณะของความโค้งมีน้อยกว่าที่ค่า OCR เท่ากับ 1 เนื่องจากลักษณะดินที่มีค่าความแข็งตัวสูงขึ้นแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดน้อยกว่า อาจเรียกว่าดินเหนียวที่มีค่าการอัดแน่นมากกว่าปกติเล็กน้อย ส่วนที่ค่า OCR เท่ากับ 4 และ 8 วิถีความเค้นมีลักษณะคล้ายคลึงกันและแทบจะมองไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ค) และ (ง) โดยเส้นทางเดินของวิถีความเค้นจะเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา เป็นผลมาจากค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นลบ ดินจึงแสดงพฤติกรรมดินสภาพอัดแน่นมากกว่าปกตินั่นเอง ส่วนเส้นทางเดินของวิถีความเค้นรวม (Total stress path) ในแต่ละค่าของ OCR มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยจะมีลักษณะเป็นเส้นเพิ่มเป็นอัตราส่วน 3:1 ในทุกๆ ค่า OCR

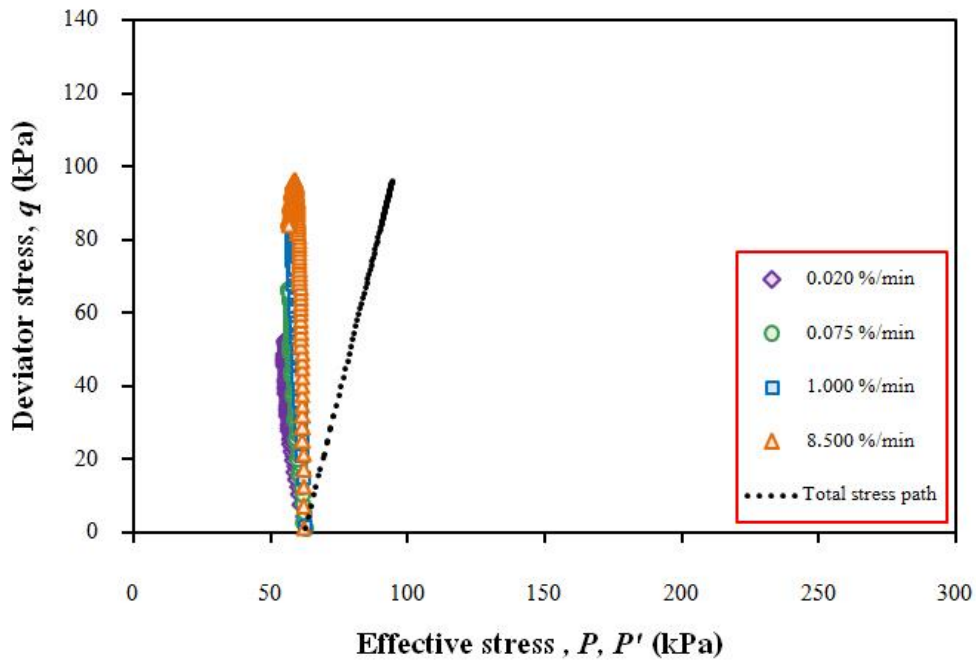
จากนั้นเมื่อนำค่าวิถีความเค้นในแต่ละ OCR มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยที่อัตราความเครียดที่ต่างกันซึ่งแสดงในรูปที่ 4.19 จะสามารถแบ่งลักษณะดินออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ดินสภาพอัดแน่นปกติ (NC) และดินสภาพอัดแน่นกว่าปกติมาก (HOC) โดยใช้อัตราการอัดตัวคาน้ำเป็นเกณฑ์ เมื่อลากเส้นสถานะวิกฤติ (Critical state line, CSL) ไปตัดกับจุดสูงสุดของวิถีความเค้นของดินสภาพอัดแน่นปกติ (NC) หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เส้นของรอสโคล (Roscoe line) และวิถีความเค้นแบบไม่ระบายน้ำของดินชนิดสภาพอัดแน่นกว่าปกติมาก (HOC) จะมีแนวโน้มอยู่เหนือเส้นสถานะวิกฤติ (CSL) ก่อนที่จะโค้งเข้าสู่จุดตัดระหว่างพื้นผิวรอสโคลกับเส้นสถานะวิกฤติ จากนั้นเมื่อลากเส้นเชื่อมต่อขอบเขตของวิถีความเค้น จะได้เส้นของฮอฟสลิฟ (Hvorslev line) นอกจากนี้ในช่วงเริ่มต้นของการหาเส้นของฮอฟสลิฟ จะเริ่มลากจากช่วงตัดออกแรงดึง (Tension cut - off) ซึ่งช่วงดังกล่าวจะมีค่าอัตราส่วน  $q/p' = 3$  เนื่องจากเป็นผลของการที่ดินไม่สามารถรับแรงดึงได้นั่นเอง



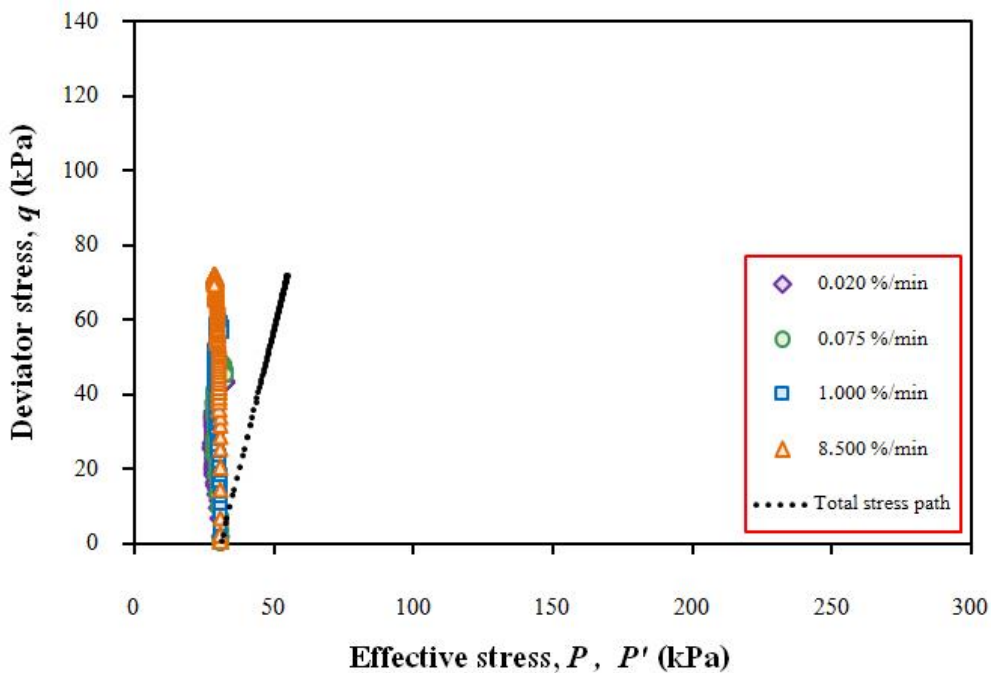
(n)



(u)



(ก)



(ง)

รูปที่ 4.18 เส้นทางเดินของวิถีความเค้นของดินเหนียวปากพั้งที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน

(ก) OCR1 (ข) OCR1 (ง) OCR4 (ง) OCR8

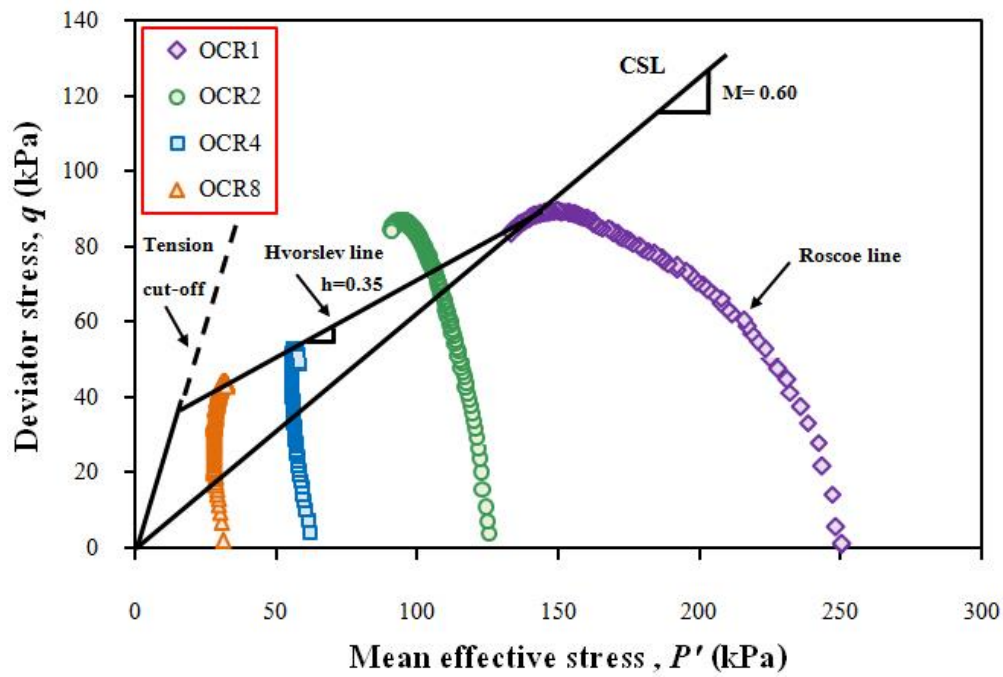
เส้นทางเดินของวิถีความเค้นในแต่ละค่า OCR ที่อัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่ 0.075 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่นั้นจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันจะเห็นได้จากค่าความชันของเส้นสถานะวิกฤตที่มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนที่อัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่เส้นทางเดินของวิถีความเค้นไม่แตกต่างกันในทุกๆ ค่า OCR เนื่องจากการกระจายตัวของแรงดันน้ำส่วนเกินที่



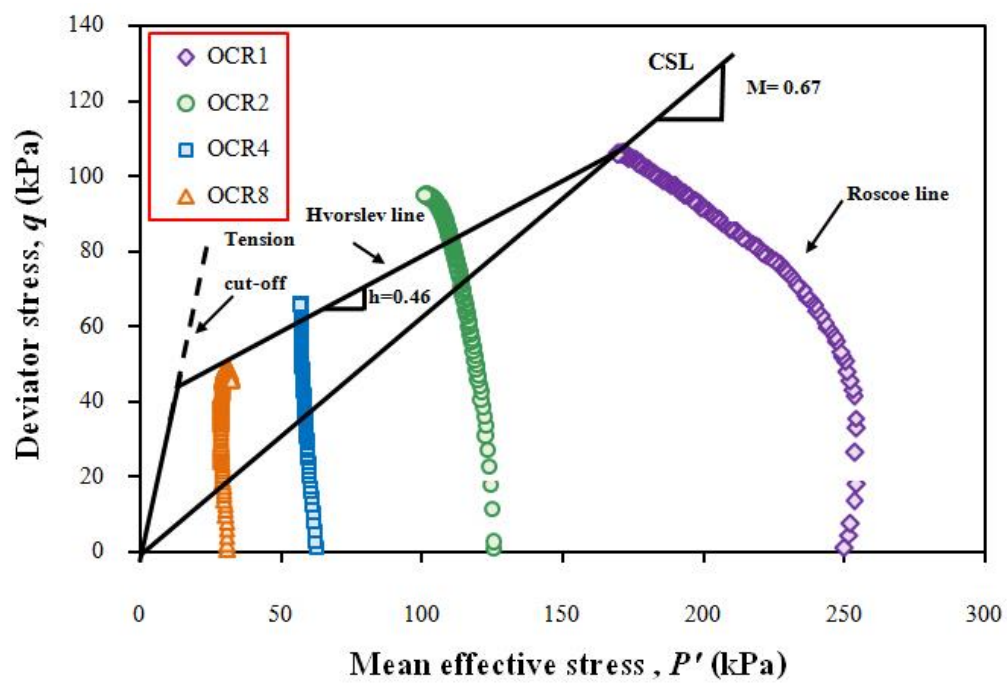
เกิดขึ้นน้อยมากเมื่ออัตราการเฉือนเร็ว โดยค่าความชัน ( $M$ ) ของเส้นสถานะวิกฤตที่อัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีและ 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีได้ค่า  $M$  เท่ากับ 0.60 0.67 และ 0.71 และอัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีได้ค่า  $M$  เท่ากับ 0.50 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ อัครเดช (2552) ได้ค่า  $M$  อยู่ระหว่าง 0.30 – 0.68 ซึ่งได้ค่าใกล้เคียงกัน จากนั้นนำค่า  $M$  ที่ได้นำไปหาค่า มุมเสียดทานภายใน จากสมการ  $M = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi}$  โดยค่ามุมเสียดทานภายในที่ได้ที่อัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีและ 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีมีค่า เท่ากับ 15.83 17.54 18.51 และ 13.34 องศา ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าค่ามุมเสียดทานภายในมี แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราความเครียดสูงขึ้น ยกเว้นที่อัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีที่เป็น เช่นนี้เนื่องจากอัตราการเฉือนเร็วจะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินขณะทำการเฉือนเกิดขึ้นไม่ทัน ทำให้ค่า OCR ไม่มีผลกับอัตราความเครียดสูงนั่นเอง เมื่อนำค่าความชันของเส้นฮอฟสลิฟ ( $h$ ) มา พิจารณา ทำให้ทราบว่าค่า  $h$  จะแปรผันกับค่า  $M$  โดยเมื่อค่า  $M$  สูง ค่า  $h$  จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

เมื่อนำค่าความสัมพันธ์ของอัตราความเครียดที่แตกต่างกันมาทำการเปรียบเทียบกับค่าอัตรา ความเครียดอ้างอิงจากค่าแนะนำโดยมาตรฐาน ASTM และของ K.H. Head (อัตราความเครียด 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที) เพื่อสังเกตค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดในแต่ละค่า OCR ที่แตกต่างกันนำมาสนับสนุน และเปรียบเทียบกับค่าของการเพิ่มขึ้นของ OCR จะเห็นว่าที่ค่า OCR เท่ากับ 1 ค่าความเค้นเบี่ยงเบน สูงสุดที่เกิดขึ้นมีการความแตกต่างกันไม่มากนักเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดในการเฉือนตัวอย่าง ดิน ที่ค่า OCR เท่ากับ 2 ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดเริ่มมีความแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดในการเฉือนตัวอย่างดิน ที่ค่า OCR เท่ากับ 4 และ 8 สามารถเห็นความ แตกต่างของค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดได้อย่างชัดเจนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดในการ เฉือนตัวอย่างดิน ทั้งนี้ผลที่ได้สอดคล้องกับอัตราการเฉือนเร็วและ OCR มากส่งผลให้ค่าความเค้น เบี่ยงเบนมีค่ามากกว่าที่อัตราการเฉือนช้าและ OCR น้อย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยค่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับค่า OCR แสดงในรูปที่ 4.20

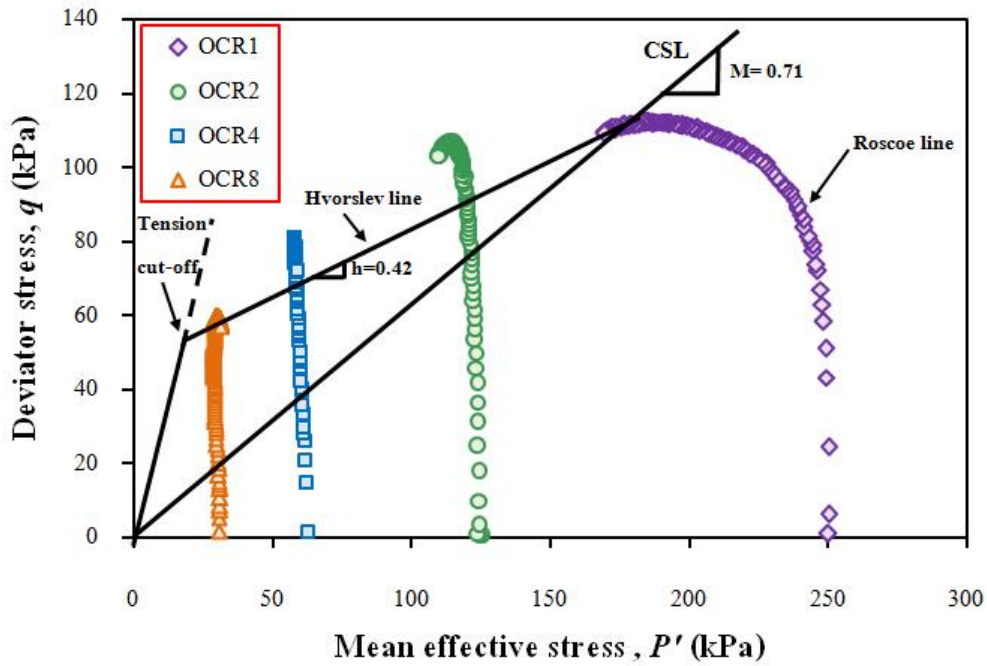
เช่นเดียวกับเมื่อนำค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่จุดสูงสุดของค่าความเค้นเบี่ยงเบนมาสร้างกราฟเพื่อ ตรวจสอบอิทธิพลของค่า OCR ต่อแรงดันน้ำส่วนเกิน จะสังเกตเห็นว่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่ามากที่สุด ที่ค่า OCR เท่ากับ 1 (อัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที) ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีความ แตกต่างกันอย่างชัดเจน และที่อัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่จุดสูงสุด ของค่าความเค้นเบี่ยงเบนแตกต่างจากสามอัตราความเครียดที่ช้ากว่า โดยที่ ค่า OCR เท่ากับ 1 ค่า แรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าน้อยกว่าที่ค่า OCR เท่ากับ 8 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราการเฉือนเร็วไม่มี ผลกระทบต่อแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นขณะเฉือนตัวอย่างทั้งที่ OCR สูงหรือต่ำนั่นเอง โดยค่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่จุดสูงสุดกับค่า OCR แสดงในรูปที่ 4.21



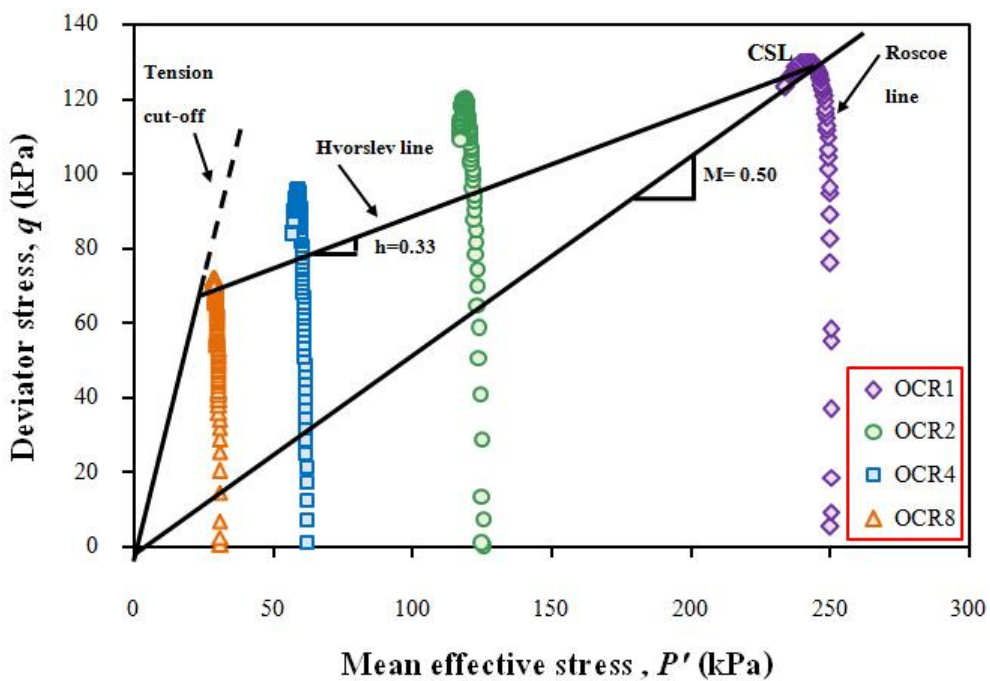
(n)



(o)



(ก)

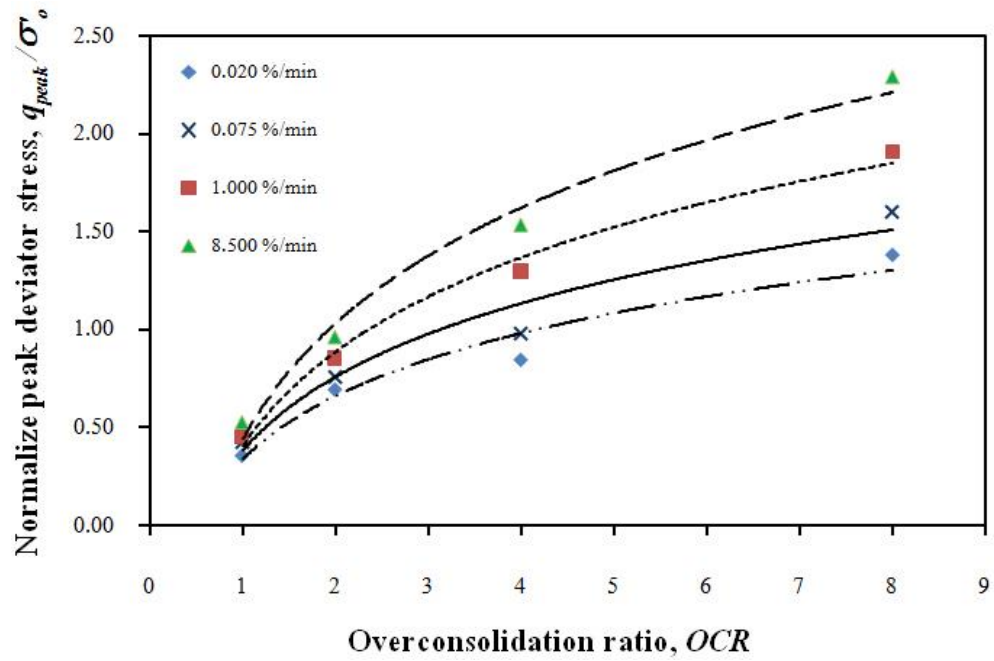


(ง)

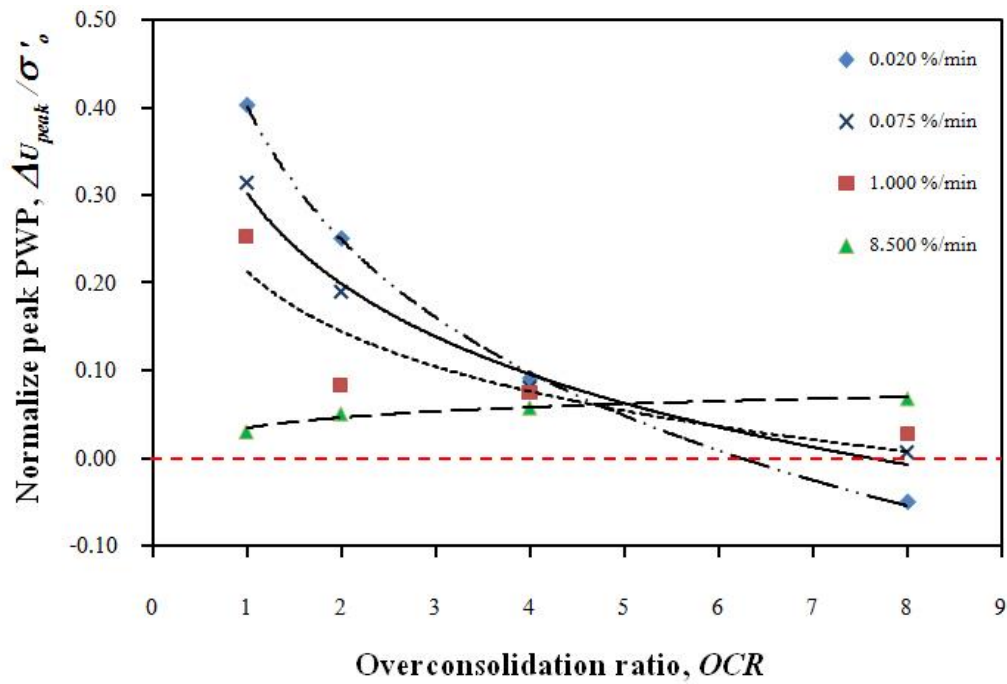
รูปที่ 4.19 เส้นทางเดินของวิถีความเค้นของดินเหนียวปากพั้งที่ค่าการอัดแน่นเกินตัวแตกต่างกัน

(ก) 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที (ข) 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที

(ค) 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีและ(ง) 8.50 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที



รูปที่ 4.20 ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดกับค่าการอัดแน่นเกินตัวที่อัตราความเครียดแตกต่างกัน



รูปที่ 4.21 แรงดันน้ำส่วนเกินสูงสุดกับค่าการอัดแน่นเกินตัวที่อัตราความเครียดแตกต่างกัน

### 4.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมของดินเหนียวปากพั้งด้วยแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิติ

ผลการวิเคราะห์นี้ทำการทดสอบการประมาณค่าพารามิเตอร์ความหนืดแบบไม่เชิงเส้นของดินเหนียวเหนียวปากพั้ง โดยการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีกระบวนการอัตราพร้อมกับแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิติแบบขึ้นกับอัตราโดยแบบจำลองนี้อาศัยหลักการทางด้านอุณหพลศาสตร์ภายใต้พฤติกรรมแบบอิลาสโตพลาสติก [6] เพื่ออธิบายพฤติกรรมค่าความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) ของดินเหนียวปากพั้ง โดยพิจารณาจากสมการ 2.37 – สมการ 2.40 ซึ่งอ้างอิงจากการทดลองแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าอัตราความเครียดคงที่ 4 อัตราคือ 0.020, 0.075, 1.000 และ 8.500 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที ใช้ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว 4 ค่าคือ 1, 2, 4 และ 8 ตามลำดับผลของการหาค่าพารามิเตอร์ของแต่ละค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว (OCR) ทั้ง 4 ค่าโดยการใช้วิธีกำลังสองต่ำสุด (Least square method) แสดงในตารางที่ 4.4 ถึง ตารางที่ 4.7 สำหรับการทำนายพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของดินเหนียวปากพั้งที่อัตราความเครียดต่าง ๆ ต้องอาศัยพารามิเตอร์ในการทำนายทั้งหมด 6 พารามิเตอร์คือ  $E_0$ ,  $k_0$ ,  $\mu$ ,  $r$ ,  $a$  และ  $\alpha_0$  เมื่อ  $E_0$  คือ โมดูลัสเริ่มต้น,  $k_0$  คือ พารามิเตอร์ด้านกำลัง,  $\mu$  คือ พารามิเตอร์ความหนืด,  $r$  คือ ค่าคงที่,  $a$  คือ ความเครียดพลาสติกและ  $\alpha_0$  คือ ความเครียดอ้างอิงผลของการสรุปการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยการใช้วิธีกำลังสองต่ำสุด จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของดินเหนียวปากพั้งที่อัตราความเครียดต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.22 ถึง รูปที่ 4.25 (ตามวิธีการ ในหัวข้อ 3.5) ผลการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุดของผลทดสอบกับแบบจำลองที่ระดับความเครียดเดียวกันที่ให้ค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุดด้วยวิธี optimization แสดงใน

ตารางที่ 4.8 ซึ่งจะทำให้เกิดค่า objective function ที่เหมาะสมที่สุด จะได้กราฟผลกระทบของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปากพั้งต่ออัตราความเครียดการนำค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุดของผลการทดสอบกับแบบจำลองของดินเหนียวปากพั้งที่ระดับความเครียดคงที่ 4 อัตรามาหารด้วยค่าความเค้นก่อนอัดตัวคายน้ำจะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งกำหนดค่าความเค้นก่อนอัดตัวคายน้ำของค่าการอัดแน่นเกินตัวที่ 1, 2, 4 และ 8 คือ 450 kPa, 325 kPa, 262.5 kPa และ 231 kPa ตามลำดับ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และอัตราความเครียดของดินเหนียวปากพั้งแสดงในรูปที่ 4.26 ถึง รูปที่ 4.29 จากผลที่ได้จะเห็นว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราความเครียด

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของดินเหนียวปากพนังที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 (OCR1)

พารามิเตอร์	อัตราการเคียดคงที่ (%min <sup>-1</sup> )				ค่าปรับแก้	หน่วย
	0.020	0.075	1.000	8.500		
E <sub>0</sub>	12.50	12.60	12.70	12.80	12.65	MPa
K <sub>0</sub>	15.00	15.50	15.00	15.30	15.02	kPa
μ	8.00	8.80	7.00	7.00	7.70	MPa.min
r	0.06	0.08	0.12	0.12	0.10	% / min
μr	4.8	7.0	8.4	8.4	7.15	kPa
a	8.00	7.00	7.00	7.00	7.25	(-)
α <sub>0</sub>	-40.00	-59.50	-40.00	-40.00	0.45	(-)

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ของดินเหนียวปากพนังที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 2 (OCR2)

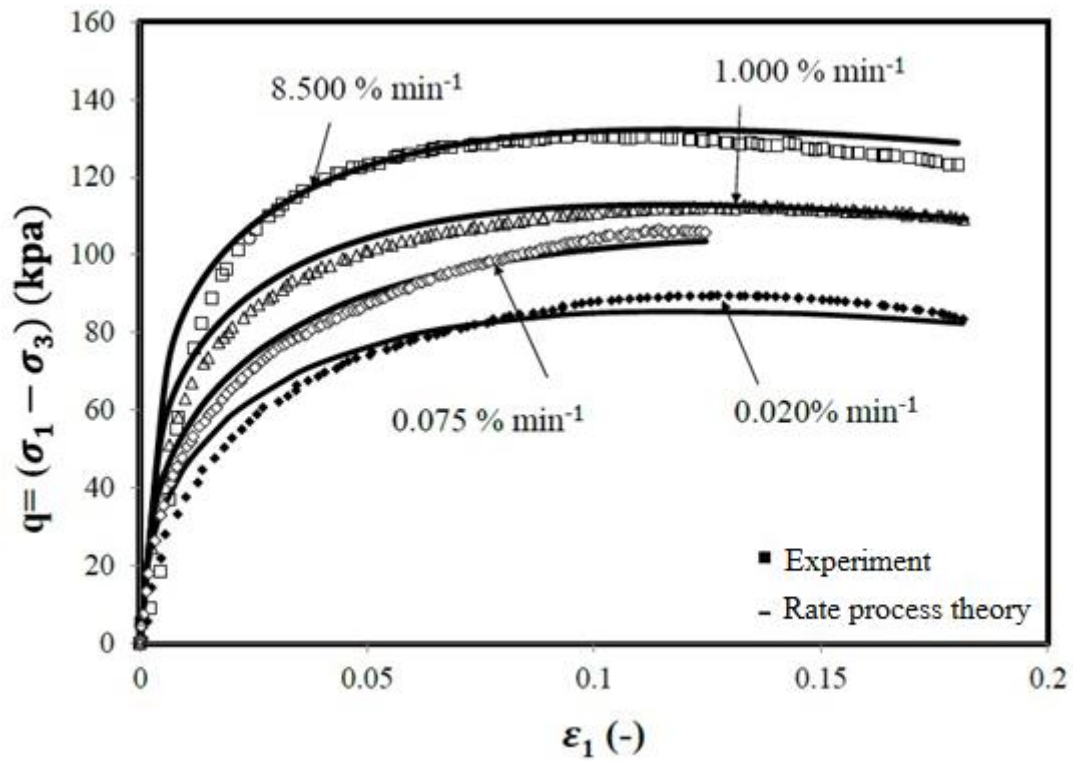
พารามิเตอร์	อัตราการเคียดคงที่ (%min <sup>-1</sup> )				ค่าปรับแก้	หน่วย
	0.020	0.075	1.000	8.500		
E <sub>0</sub>	14.60	14.60	14.00	13.00	14.05	MPa
K <sub>0</sub>	13.00	14.00	14.00	17.00	14.50	kPa
μ	6.00	6.00	7.40	5.00	6.10	MPa.min
r	0.07	0.07	0.07	0.09	0.075	% / min
μr	4.20	4.20	5.18	4.50	4.52	kPa
a	8.00	10.00	8.00	6.70	8.175	(-)
α <sub>0</sub>	-65.00	-90.00	-55.00	-33.00	0.61	(-)

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของดินเหนียวปากพั้งที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 4 (OCR4)

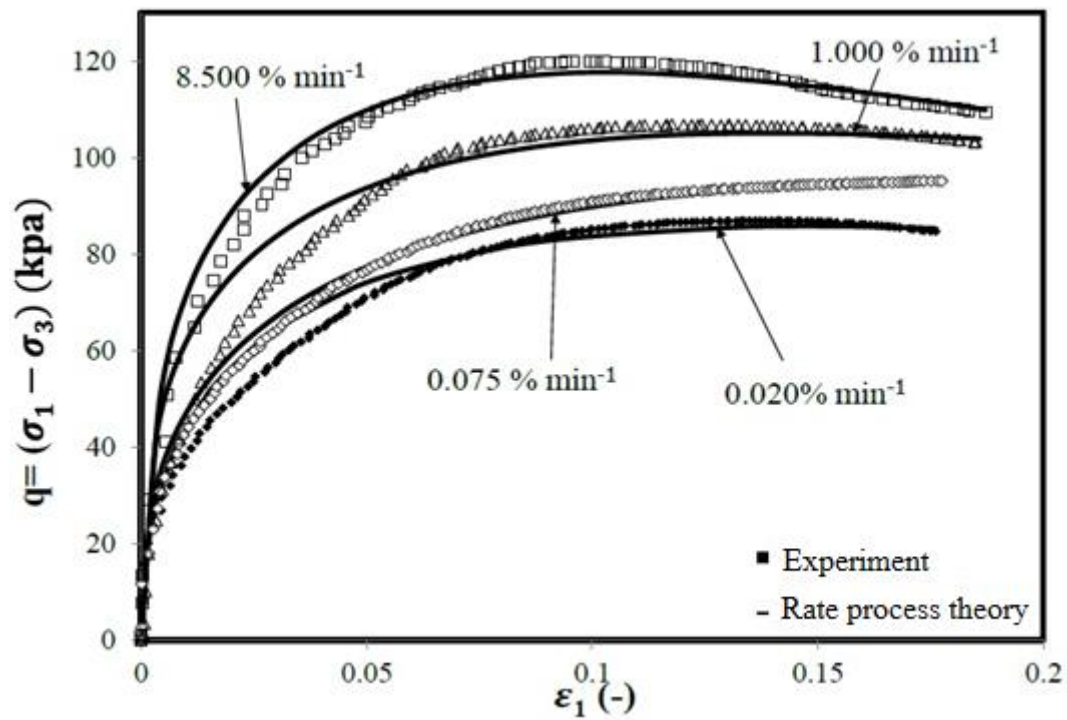
พารามิเตอร์	อัตราการความเครียดคงที่ (%min <sup>-1</sup> )				ค่าปรับแก้	หน่วย
	0.020	0.075	1.000	8.500		
$E_0$	2.50	2.60	2.90	3.00	2.75	MPa
$K_0$	9.00	11.00	15.00	16.00	12.75	kPa
$\mu$	3.00	4.88	6.50	9.00	5.85	MPa.min
$r$	0.06	0.06	0.06	0.04	0.06	% / min
$\mu r$	1.8	2.9	3.9	3.60	3.05	kPa
$a$	3.00	3.13	3.50	3.00	3.16	(-)
$\alpha_0$	-30.00	-45.00	-22.00	-20.00	0.29	(-)

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ของดินเหนียวปากพั้งที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 8 (OCR8)

พารามิเตอร์	อัตราการความเครียดคงที่ (%min <sup>-1</sup> )				ค่าปรับแก้	หน่วย
	0.020	0.075	1.000	8.500		
$E_0$	9.00	9.00	8.00	8.00	8.50	MPa
$K_0$	6.70	7.87	8.50	10.00	8.26	kPa
$\mu$	1.96	0.78	1.96	1.96	1.66	MPa.min
$r$	0.10	0.02	0.10	0.10	0.08	% / min
$\mu r$	1.96	0.15	1.96	1.96	1.50	kPa
$a$	9.00	8.00	7.60	7.60	8.05	(-)
$\alpha_0$	-55.00	-45.00	-55.00	-55.00	0.53	(-)

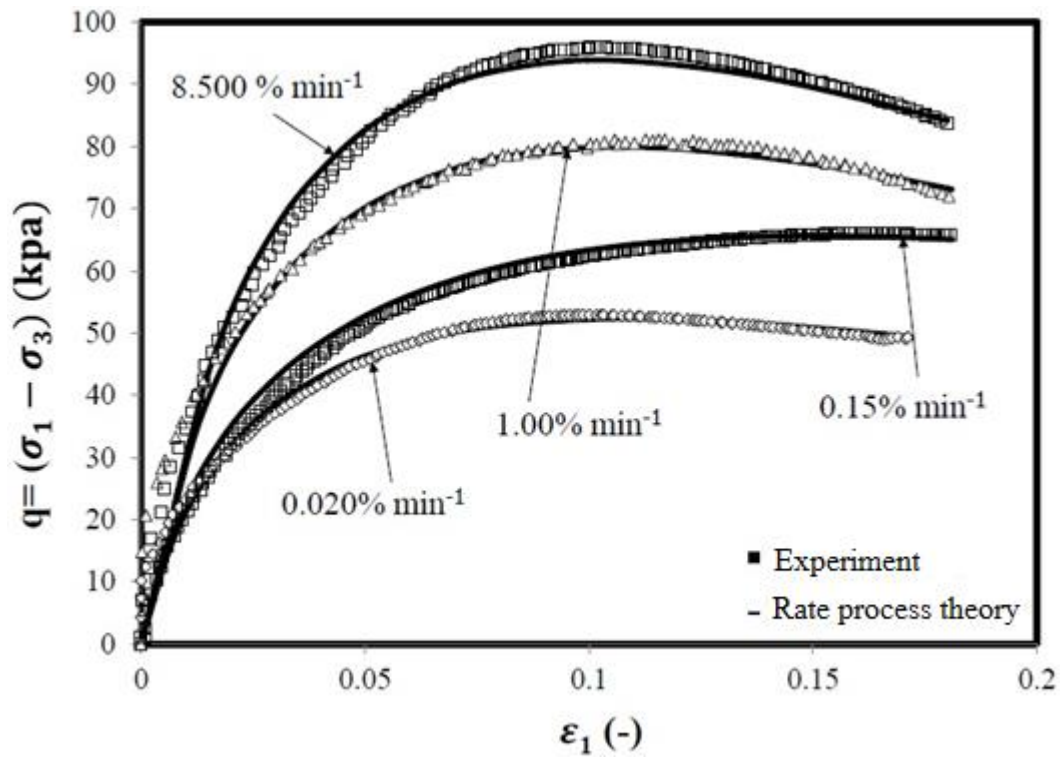


รูปที่ 4.22 พฤติกรรมของดินเหนียวปากพนังที่อัตราความเครียดต่าง ๆ ที่ OCR1

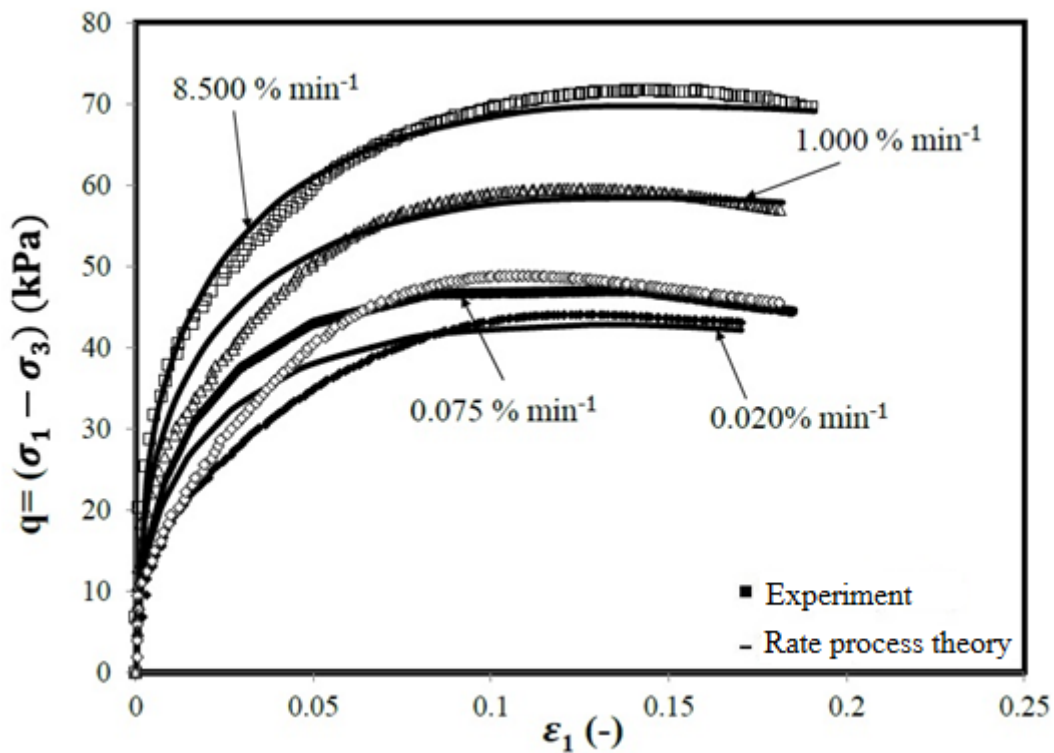


รูปที่ 4.23 พฤติกรรมของดินเหนียวปากพนังที่อัตราความเครียดต่าง ๆ ที่ OCR2





รูปที่ 4.24 พฤติกรรมของดินเหนียวปากพั้งที่อัตราความเครียดต่าง ๆ ที่ OCR4



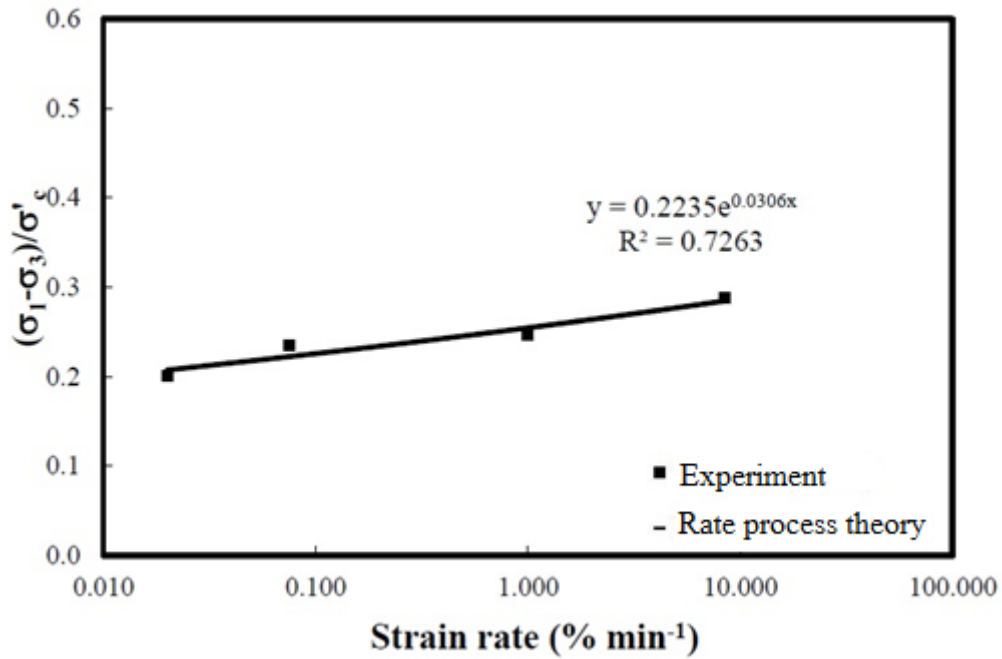
รูปที่ 4.25 พฤติกรรมของดินเหนียวปากพั้งที่อัตราความเครียดต่าง ๆ ที่ OCR8

ตารางที่ 4.8 ค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุดของแบบจำลองและผลการทดสอบ

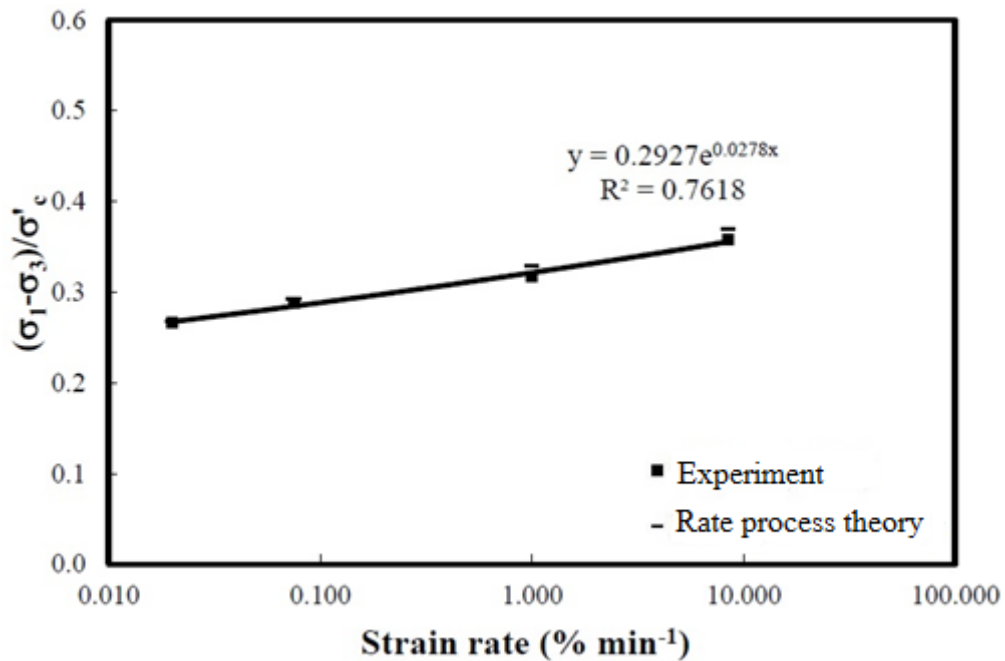
อัตราความเครียด คงที่ (%min <sup>-1</sup> )	ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (kPa)							
	แบบจำลอง				ผลทดสอบ			
	1	2	4	8	1	2	4	8
0.020	90.58	88.38	51.93	43.49	89.56	86.88	52.90	44.06
0.075	105.68	95.62	64.55	48.94	106.52	95.09	66.00	48.83
1.000	110.80	106.05	79.44	58.65	112.62	106.78	81.08	59.52
8.500	129.45	119.38	94.12	72.99	130.80	119.97	95.91	71.69

ตารางที่ 4.9 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปากพั้ง

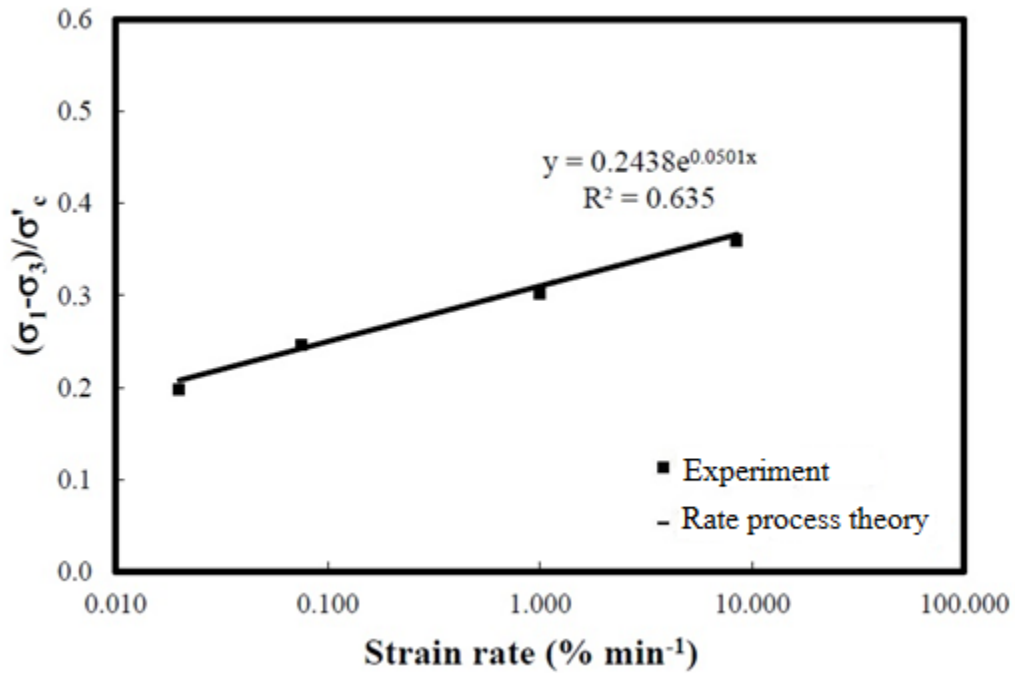
อัตราความเครียด คงที่ (%min <sup>-1</sup> )	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (kPa)							
	แบบจำลอง				ผลทดสอบ			
	1	2	4	8	1	2	4	8
0.020	0.201	0.266	0.198	0.188	0.199	0.267	0.202	0.191
0.075	0.235	0.288	0.246	0.206	0.237	0.293	0.251	0.211
1.000	0.246	0.318	0.303	0.251	0.250	0.329	0.309	0.258
8.500	0.288	0.357	0.359	0.300	0.291	0.369	0.365	0.310



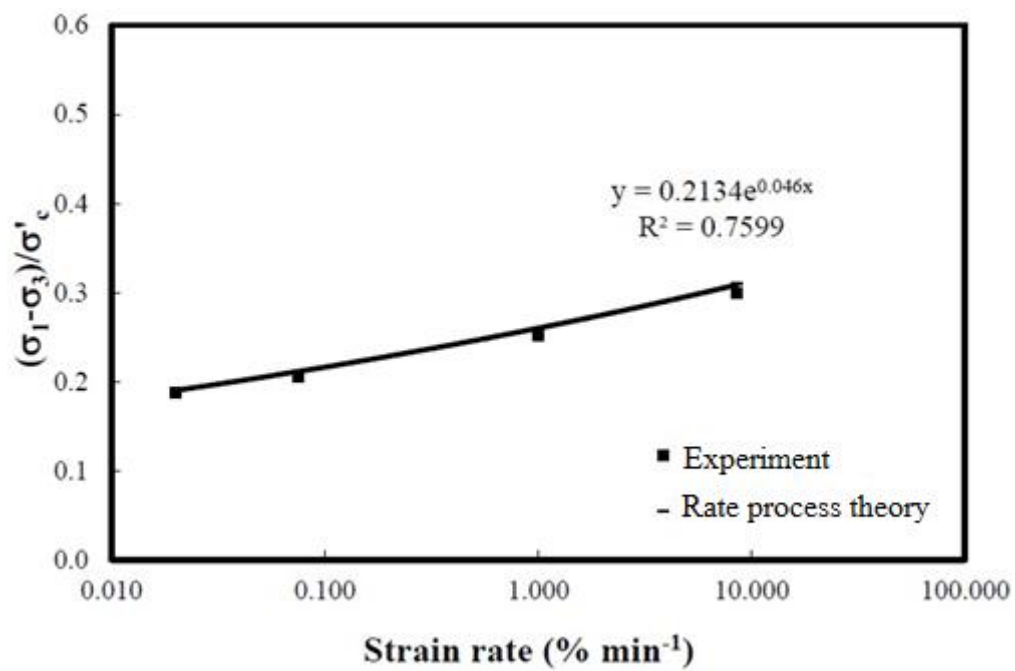
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและอัตราความเครียดของดินเหนียวปากพั้งที่ OCR1



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและอัตราความเครียดของดินเหนียวปากพั้งที่ OCR2



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและอัตราความเครียดของดินเหนียวปากพั้งที่ OCR4



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและอัตราความเครียดของดินเหนียวปากพั้งที่ OCR8

#### 4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดของดินเหนียวปากพั้ง

ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดระหว่างแบบจำลอง ความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบ ในการทดสอบอัตราการอัดแน่นเกินตัว 4 อัตราของดินเหนียวปากพั้ง ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าความคลาดเคลื่อนความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดของดินเหนียวปากพั้ง

อัตราความเครียดคงที่ (%/min)	ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (%)			
	1	2	4	8
0.020	1.2	0.5	1.9	1.6
0.075	0.8	1.6	2.2	2.6
1.000	1.6	3.4	2.1	2.6
8.500	1.1	3.3	2.0	3.4

#### 4.5 ค่าดัชนีบ่งบอกความเหนียวของดินเหนียวปากพั้ง

ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดระหว่างแบบจำลอง โดยใช้ การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยทฤษฎีกระบวนการอัตราร่วมแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีแบบขึ้นกับ อัตรา เพื่ออธิบายพฤติกรรมค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของดินเหนียวปากพั้งที่การทดสอบแรงอัดสามแกน แบบไม่ระบายที่ค่าอัตราความเครียด 4 อัตรา มีค่าดัชนีความเหนียว ตารางที่ 4.11 มีค่าโมดูลัสเริ่มต้นดัง แสดงในตารางที่ 4.12 และมีค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.11 ค่าดัชนีความเหนียวของดินเหนียวปากพั้ง

อัตราความเครียดคงที่ (%/min)	ดัชนีบ่งบอกความเหนียว (kPa)			
	1	2	4	8
0.020	2.00	4.20	1.46	1.96
0.075	6.57	4.20	1.31	0.15
1.000	6.57	5.18	1.95	1.96
8.500	6.57	4.50	3.60	1.96

ตารางที่ 4.12 โมดูลัสเริ่มต้นของดินเหนียวปากพั้ง

อัตราความเครียดคงที่ (%min <sup>-1</sup> )	โมดูลัสเริ่มต้น (MPa)			
	1	2	4	8
0.020	10.00	14.60	2.80	9.00
0.075	10.50	14.60	3.13	9.00
1.000	10.50	15.00	4.50	8.00
8.500	11.00	14.00	3.00	8.00

ตารางที่ 4.13 พารามิเตอร์ด้านกำลังของดินเหนียวปากพั้ง

อัตราความเครียดคงที่ (%min <sup>-1</sup> )	พารามิเตอร์ด้านกำลัง (kPa)			
	1	2	4	8
0.020	15.00	14.00	9.00	6.70
0.075	14.70	14.00	13.00	7.87
1.000	14.70	13.80	15.00	8.50
8.500	14.70	15.00	16.00	10.00

## บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดที่มีต่อพฤติกรรมด้านกำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) พฤติกรรมของแรงดันน้ำส่วนเกิน (Access pore pressure) รวมทั้งผลของค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว (Over consolidation ratio, OCR) ต่อดินเหนียวปากพั้ง สามารถสรุปผลการทดสอบทั้งหมดได้ดังนี้

1. ดินเหนียวปากพั้งแสดงพฤติกรรมแบบวัสดุที่ขึ้นกับอัตราความเครียด กล่าวคือ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปากพั้ง ในทุกๆ ค่าของอัตราการอัดแน่นเกินตัว (OCR) ทั้งนี้เมื่อค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวปากพั้งเพิ่มสูงขึ้นด้วย
2. อัตราความเครียดมีผลต่อแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในมวลดินในขณะที่ทำการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวเกิดขึ้นไม่เท่ากันโดยแรงดันน้ำส่วนเกินที่อัตราการเฉือนช้าจะมีค่าสูงกว่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่อัตราการเฉือนเร็ว และมีผลกระทบในทุกๆ ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวยกเว้นที่อัตราการเฉือนเร็วจะไม่ส่งผลกระทบต่อแรงดันน้ำส่วนเกินทั้งค่าของค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวทั้งน้อยและมาก
3. เส้นทางเดินของวิถีความเค้น (Stress path) จะไม่ซ้อนทับกันในแต่ละอัตราความเครียด เนื่องจากขณะเฉือนตัวอย่างดินเหนียวการเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในแต่ละค่าของอัตราความเครียดมีค่าไม่เท่ากัน ที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 1 และ 2 เส้นทางเดินของวิถีความเค้นมีแนวโน้มเคลื่อนที่จากขวาไปซ้ายโดยจะสามารถสังเกตเห็นทางเดินของวิถีความเค้นได้อย่างชัดเจน ส่วนที่ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 4 และ 8 เส้นทางเดินของวิถีความเค้นจะเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาทั้งนี้วิถีความเค้นมีลักษณะคล้ายคลึงกันและแทบจะมองไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากนัก
4. ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดในการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวปากพั้งพบว่า ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราความเครียดที่ใช้ในการทดสอบเร็วขึ้นในทุกๆ ค่าการอัดแน่นเกินตัว แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวปากพั้งเป็นดินเหนียวที่มีพฤติกรรมที่ขึ้นกับอัตราแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) เช่นเดียวกับดินเหนียวกรุงเทพฯ
5. จากผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดระหว่างแบบจำลองจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองกับค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบมีค่าอยู่ประมาณไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

6. ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 1, 2, 4 และ 8 ของดินเหนียวปากพริกค่าโมดูลัสเริ่มต้น ( $E_0$ ) ที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 1, 2, 4 และ 8 ไม่สามารถอธิบายได้ แต่ประมาณค่าได้อยู่ในช่วง 3.49-12.04 MPa และค่าพารามิเตอร์ด้านกำลัง ( $k_0$ ) ที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 1, 2, 4 และ 8 ไม่สามารถอธิบายค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังได้เช่นกัน แต่ประมาณค่าได้อยู่ในช่วง 8.21-12.02 kPa และมีค่าดัชนีบ่งบอกความหนืด ( $\mu_r$ ) ที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 1, 2, 4 และ 8 อยู่ประมาณ 4.54, 4.01, 2.46 และ 2.80 kPa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าดัชนีบ่งบอกความหนืดของอัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 1 มีค่ามากที่สุด
7. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและอัตราความเครียด จะเห็นได้ว่าดินเหนียวปากพริกมีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่ขึ้นกับอัตราแบบไม่เชิงเส้น โดยมีค่าดัชนีบ่งบอกถึงความหนืดของดินเหนียวปากพริก ( $\mu_r$ ) ประมาณ 3.57 kPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าดัชนีความหนืดของดินเหนียวกรุงเทพฯ ( $\mu_r$ ) ซึ่งมีค่าประมาณ 4.80 kPa

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- อัตราการเฉือนเร็วไม่สามารถบอกค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่แท้จริงของตัวอย่างดินได้ เนื่องจากการพัฒนาของแรงดันน้ำในขณะที่ทำการเฉือนเร็วจะเกิดขึ้นที่ด้านบนและด้านล่าง ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกันทั่วทั้งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ทำให้ผลการทดสอบผิดไปจากความเป็นจริงที่ควรจะเป็น
- เนื่องจากดินเหนียวปากพริกมีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับดินเหนียวชายทะเลฮ่องกงและดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ดังนั้นสามารถศึกษาพฤติกรรมของอัตราความเครียดต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวปากพริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ รวมทั้งการเฉือนตัวอย่างแบบแรงดึงสามแกน เพื่อต่อยอดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต่อไป



## บรรณานุกรม

- วีระ ศักดิ์สุพรรณ, “การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียด,” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2549.
- 1] Y. P. Vaid and R. G. Campanella, "Time dependent behavior of undisturbed clay,"
- 2] *Journal of geotechnical engineering division*, vol. 103, no. 7, pp. 693-709, July 1977.
- วีระ ศักดิ์สุพรรณ, สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, “การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียด,” ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12*, พิษณุโลก, 2550.
- 3] อัครเดช แซ่จิว, “คุณสมบัติของดินเหนียวปากพ้าง,” มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552.
- 4] A. M. Puzrin and G. T. Houlsby, "A Thermomechanical framework for rate-
- 5] independent dissipative materials with internal functions," *International Journal of Plasticity*, vol. 17, no. 8, pp. 1147-1165, August 2001.
- ธนกร ชมภูรัตน์, สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, “พฤติกรรมความหนืดแบบไม่เชิงเส้นของดินเหนียวกรุงเทพฯ,” ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13*, โรงแรมจอมเทียนปาล์ม บีช พัทยา จ.ชลบุรี, 2551.
- 6] อภิชัย จุฑาศิริวงศ์, สภาพทางธรณีและลักษณะของชั้นดินในบริเวณภาคใต้, สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2546.
- 7] กรมทรัพยากรธรณี, ธรณีวิทยาประเทศไทย, กรุงเทพฯ: กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม, 2550.
- 8] M. Budhu, Soil mechanics and foundations, 2nd, Wiley, 2007.
- 9] สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, ปฐพีกลศาสตร์: หลักการพื้นฐาน, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง
- 10] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- B. M. Das, Fundamentals geotechnical engineering, Sacramento: California State
- 11] University, 2000.
- W. T. Lambe and R. V. Whitman, Soil mechanics. , SI Version, Wiley, 1979.

12]

K. Terzaghi, *Erbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*, Leipzig und Wein,  
13] 1925, p. 399.

A. Casagrande, "The determination of the preconsolidation load and its practical  
14] significance," in *Proceeding 1st international conference on soil mechanics and foundation  
engineering*, 1936.

C. C. Ladd, R. Foott, K. Ishihara, F. Schlosser and H. G. Poulos, "Stress-  
15] deformation and strength characteristics," in *Proceeding of international conference on soil  
mechanics and foundation engineering*, Tokyo, 1977.

สายัณห์ สุขพงษ์พันธ์, วิรัตน์ ปฐมชัยอัมพร, "ความหนืดคุณลักษณะเฉพาะของของไหล,"  
16] *กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 4 กันยายน 2549. [ออนไลน์]. Available:  
[http://www.dss.go.th/images/st-article/pep\\_9\\_2549\\_viscosity.pdf](http://www.dss.go.th/images/st-article/pep_9_2549_viscosity.pdf).

K. H. Roscoe, A. N. Schofield และ C. P. Wroth, "On the yielding of soils,"  
17] *Geotechnique*, เล่มที่ 8, %11, pp. 22-53, March 1958.

สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, ปฐพีกลศาสตร์: พลาสติกซิตีและทฤษฎีสถานะวิกฤต, กรุงเทพฯ:  
18] สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

J. K. Mitchell and K. Soga, *Fundamentals of soil behavior* (3rd Ed.), New Jersey:  
19] Wiley, 2005.

B. D. Coleman และ M. E. Gurtin, "Thermodynamics with Internal State Variables,"  
20] *The Journal of Chemical Physics*, เล่มที่ 47, %12, p. 85-98, 1967.

J. Lubliner, "On the thermodynamic foundations of non-linear solid mechanics,"  
21] *International Journal of Non-linear Mechanics*, เล่มที่ 7, %13, pp. 237-254, June 1972.

H. Ziegler, *An introduction to thermomechanics*, 2nd Ed., Amsterdam, North  
22] Holland, 1983.

I. F. Collins and G. T. Houlsby, "Application of thermomechanical principles to the  
23] modelling of geotechnical materials," in *Proceeding Royal Society of London*, London, 1997.

J. Alberro และ E. Santoyo, "Long term behavior of Mexico city clay," ใน *Proc.eeding  
24] of 8 th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow,  
1973.

T. Berre and L. Bjerrum, "Shear strength of normally consolidated clay," in  
25] *Proceeding 8th international conference soil mechanics and foundation engineering*,  
Moscow, 1973.

G. Lefebvre and D. LeBoeuf, "Rate effects and cyclic loading of sensitive clays,"  
26] *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 113, no. 5, pp. 476-489, May 1987.

T. C. Sheahan, C. C. Ladd and J. T. Germaine, "Rate dependent undrained shear  
27] behavior of saturated clay," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 122, no. 2, p. 99-108,  
February 1996.

J.-G. Zhu and J.-H. Yin, "Strain – rate–dependent stress–strain behavior of over  
28] consolidated Hong Kong marine clay," *Journal of geotechnical engineering*, vol. 37, no. 6, p.  
1272 – 1282, December 2000.

A. Augustesen, M. Liingaard และ P. V. Lade, "Evaluation of time-dependent  
29] behavior of soils," *International Journal of Geomechanics*, เล่มที่ 4, % 13, pp. 137-156,  
September 2004.

K. H. Head, *Manual of soil laboratory testing*, 3 ed., London: Pentech Press, 1986.  
30]

การเผยแพร่  
บทความวิจัยที่นำเสนอที่ประชุมวิชาการ

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18  
8 - 10 พฤษภาคม 2556. โรงแรม ดิเอ็มเพรส เชียงใหม่