

ความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการแปลผล
การทดสอบหลายวิธี

นายพงศกร สุนทรานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

VARIATIONS OF UNDRAINED SHEAR STRENGTH VALUES OF BANGKOK CLAY
INTERPRETED FROM VARIOUS TESTING RESULTS

Mr. Pongsakorn Soontranont

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
ของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการแปลผลการทดสอบหลายวิธี

โดย

นายพงศกร สุนทรานนท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ ลิขิตเลอสรวง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ ลิขิตเลอสรวง)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สยาม ยิ้มศิริ)

พงศกร สุนทรานนท์ : ความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการแปลผลการทดสอบหลายวิธี. (VARIATIONS OF UNDRAINED SHEAR STRENGTH VALUES OF BANGKOK CLAY INTERPRETED FROM VARIOUS TESTING RESULTS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 168 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการแปลผลจากการทดสอบหลายวิธีทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม พื้นที่ดำเนินการศึกษาประกอบด้วย 3 สถานที่ ได้แก่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบในสนาม 2 วิธี ได้แก่ การทดสอบไบริมิดสนาม และการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน การทดสอบในห้องปฏิบัติการ 2 วิธี ได้แก่ การทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยว และการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯถูกเจาะเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพจนถึงชั้นทรายแรกของชั้นดินกรุงเทพฯ เพื่อใช้สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการจำนวนทั้งสิ้น 44 ตัวอย่างต่อรูปแบบการทดสอบ ซึ่งแบ่งออกเป็นตัวอย่างดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนปานกลาง 29 ตัวอย่าง และดินเหนียวแข็ง 15 ตัวอย่าง ผลการทดสอบทั้งหมดได้นำมาเปรียบเทียบและหาค่าความแปรปรวนของแต่ละวิธี โดยมีผลของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนปานกลางเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้คือ การทดสอบไบริมิดสนาม การทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ และการทดสอบแรงกดแกนเดี่ยวตามลำดับ นอกเหนือไปจากนี้ผลการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐานสามารถนำไปสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่าการตอกมาตรฐาน ทำได้ที่สุด งานวิจัยยังเสนอความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับค่าความเค้นประสิทธิผลในสนามและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ที่ครึ่งของกำลังครากได้ด้วย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา...2554.....

5270781521: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : UNDRAINED SHEAR STRENGTH / BANGKOK CLAY / FIELD TEST /
LABORATORY TEST / VARIATIONS

PONGSAKORN SOONTRANONT: VARIATIONS OF UNDRAINED SHEAR STRENGTH VALUES OF BANGKOK CLAY INTERPRETED FROM VARIOUS TESTING RESULTS. ADVISOR : ASSOC. PROF. SUCHED LIKITLERSUANG, D.PHIL., 168 pp.

This research aims to study the variation of the undrained shear strength values of Bangkok Clays from different interpretation methods. The study areas include Chulalongkorn University, Kasetsart University and AIT campus. The testing programs consist of 2 field tests: Field Vane test (FV) and Standard Penetration Test (SPT), and 2 laboratory tests: Unconfined Compression test (UC), and Consolidated Isotropically Undrained Compression triaxial (CIUC). The undisturbed Bangkok clay specimens were collected from the soft clay layer until the first sand layer of Bangkok subsoils. The totally 44 undisturbed samples, which are consisted of 29 soft to medium clay samples and 15 stiff clay samples, were tested in laboratory for each test. The testing results were interpreted based on well-known theoretical and empirical methods to determine the undrained shear strength values. These values were then compared among each others to investigate the variations from each test. The results indicate that the FV test provide the highest value of the undrained shear strength following by the CIUC test and the UC test respectively. The SPT N-values could be evaluated using linear regression analysis to indicate the relationship with the undrained shear strength values. Additionally, the results could also be used to determine the relationship of the undrained shear strength values toward the effective vertical stress as well as the undrained Young's modulus at 50% of yield strength.

Department :Civil Engineering..... Student's Signature.....

Field of Study :Civil Engineering..... Advisor's Signature.....

Academic Year : ..2011.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือตลอดมา และคอยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏานัน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สยาม ยิ้มศิริ ผู้เป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบภาคสนาม

นอกจากนั้นขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความช่วยเหลือ เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง โดยเฉพาะนายจาตุรงค์ ทองจากรู แขน ผู้ให้ความช่วยเหลือหลักในงานวิจัย

ท้ายที่สุดผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่สนับสนุนการเรียนเป็นอย่างดี รวมทั้งคณาจารย์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เคยสั่งสอนมาในอดีต

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความเค้นในสนาม.....	4
2.2 พารามิเตอร์แรงดันน้ำของสเคมตัน.....	4
2.3 กำลังรับแรงเฉือนของดิน.....	5
2.4 เงื่อนไขระบายน้ำและเงื่อนไขไม่ระบายน้ำของดิน.....	5
2.5 กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ.....	6
2.5.1 นิยามของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ.....	6
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ.....	6
2.5.3 สูตรเชิงประสพการณ์สำหรับประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ ไม่ระบายน้ำ.....	7
2.6 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ.....	8
2.6.1 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในสนาม.....	8
1) การทดสอบโปมิตสนาม.....	8
2) การทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน.....	10

	หน้า
3) การทดสอบกรวยทะลวง.....	14
4) การทดสอบมาตรฐานแรงดัน.....	15
2.6.2 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในห้องปฏิบัติการ.....	17
1) การทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว.....	17
2) การทดสอบแรงกดสามแกนแบบไม่อัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ.....	19
3) การทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ.....	21
4) การทดสอบการเฉือนโดยตรงอย่างง่าย.....	23
2.7 การเก็บตัวอย่างดิน.....	24
2.7.1 ตัวอย่างดิน.....	24
2.7.2 การเจาะเก็บตัวอย่างดิน.....	26
2.8 ลักษณะเฉพาะของดินเหนียวกรุงเทพฯ.....	27
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	35
3.1 สถานที่ในการทดสอบ.....	35
3.2 การเจาะเก็บตัวอย่างดิน.....	36
3.3 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในภาคสนาม.....	37
3.3.1 การทดสอบไบบีตสนาม.....	37
3.3.2 การทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน.....	38
3.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในห้องปฏิบัติการ.....	39
3.4.1 การทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว.....	40
3.4.2 การทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ.....	40
3.5 การทดสอบสมบัติดัชนี.....	41
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	42
4.1 ผลการทดสอบในงานวิจัย.....	42
4.1.1 ผลคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ.....	42
4.1.2 ผลการทดสอบไบบีตสนาม.....	46
4.1.3 ผลการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน.....	50
4.1.4 ผลการทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว.....	51
4.1.5 ผลการทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ.....	55

4.2 การวิเคราะห์ผลทดสอบ.....	60
4.2.1 สรุปข้อมูลจากการรวมข้อมูลดินเหนียวกรุงเทพในงานวิจัย.....	60
4.2.2 ความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำใน การทดสอบแต่ละวิธี.....	61
1) การทดสอบ CIUC และการทดสอบ UC.....	61
2) การทดสอบ FV และการทดสอบ UC.....	66
4.2.3 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบแรงกดแกน เดียวกับจำนวนครั้งการตอกที่มีการปรับแก้พลังงาน 60% จากการ ทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน.....	67
4.2.4 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับค่า ความเค้นประสิทธิผลในสนาม.....	69
1) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ σ'_{v0}	69
2) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ σ'_{v0}^*	71
3) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ σ'_{v0}	72
4) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ σ'_{v0}^*	74
5) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(corr)}$ กับ σ'_{v0}	75
6) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(corr)}$ กับ σ'_{v0}^*	76
4.2.5 ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ที่ครึ่งของกำลังครากแบบ ไม่ระบายน้ำกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ.....	78
1) การทดสอบ UC.....	78
2) การทดสอบ CIUC.....	80
4.2.6 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และค่าความเค้นประสิทธิผลในสนามกับค่าดัชนีพลาสติก.....	82
1) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}/\sigma'_{v0}$ กับ PI	82
2) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}/\sigma'_{v0}^*$ กับ PI	83
3) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}/\sigma'_{v0}$ กับ PI	84
4) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}/\sigma'_{v0}^*$ กับ PI	85
5) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(corr)}/\sigma'_{v0}$ กับ PI	86
6) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(corr)}/\sigma'_{v0}^*$ กับ PI	87

	หน้า
4.2.7 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับงานวิจัยในอดีต.....	88
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	90
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	90
5.2 สรุปประเด็นที่ได้จากงานวิจัย.....	91
5.3 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม.....	92
รายการอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน.....	97
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว.....	99
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ.....	123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	168

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงค่าปรับแก้ค่า N	12
2.2 การเปรียบเทียบค่า N กับ s_u ของดินเหนียว.....	13
2.3 การเปรียบเทียบการเก็บตัวอย่างดินระหว่าง Hand auger และ Wash boring.....	27
2.4 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ.....	28
2.5 คุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.....	29
2.6 ความสัมพันธ์ของค่า s_u กับ σ'_{v0} ของการทดสอบแบบต่างๆ.....	31
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของดินกรุงเทพฯ.....	33
3.1 ตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานที่ทดสอบ.....	35
4.1(ก) คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว CU.....	43
4.1(ข) คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว KU.....	44
4.1(ค) คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว AIT.....	45
4.2(ก) ข้อมูลการทดสอบ FV ของดินเหนียว CU.....	47
4.2(ข) ข้อมูลการทดสอบ FV ของดินเหนียว KU.....	48
4.2(ค) ข้อมูลการทดสอบ FV ของดินเหนียว AIT.....	49
4.3 ข้อมูลการทดสอบ SPT จากสามสถานที่ (CU, KU, AIT).....	50
4.4(ก) ผลการทดสอบ UC ของดินเหนียว CU.....	52
4.4(ข) ผลการทดสอบ UC ของดินเหนียว KU.....	53
4.4(ค) ผลการทดสอบ UC ของดินเหนียว AIT.....	54
4.5 ค่าความเค้นประสิทธิผลในสนามของตัวอย่างดิน.....	55
4.6(ก) ผลการทดสอบ CIUC ของดินเหนียว CU.....	57
4.6(ข) ผลการทดสอบ CIUC ของดินเหนียว KU.....	58
4.6(ค) ผลการทดสอบ CIUC ของดินเหนียว AIT.....	59
4.7(ก) สรุปคุณสมบัติพื้นฐานของชั้นดินกรุงเทพฯจาก 3 แหล่ง (CU, KU, AIT).....	60
4.7(ข) สรุปผลการทดสอบ FV ของชั้นดินกรุงเทพฯจาก 3 แหล่ง (CU, KU, AIT).....	60
4.7(ค) สรุปผลการทดสอบ SPT ของชั้นดินกรุงเทพฯจาก 3 แหล่ง (CU, KU, AIT).....	60
4.7(ง) สรุปผลการทดสอบ UC ของชั้นดินกรุงเทพฯจาก 3 แหล่ง (CU, KU, AIT).....	61
4.7(จ) สรุปผลการทดสอบ CIUC ของชั้นดินกรุงเทพฯจาก 3 แหล่ง (CU, KU, AIT).....	61
4.8 สรุปผลความสัมพันธ์ของค่า s_u กับค่าความเค้นประสิทธิผลในสนาม.....	77

ตารางที่	หน้า
4.9 สรุปผลความสัมพันธ์ของค่า E_u^{50} กับค่า s_u	81
5.1 สรุปผลค่า s_u / σ'_{v0}	91
5.2 ตารางสรุปผลค่า E_u^{50} / s_u	91

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ความเค้นประสิทธิผลเทียบกับความลึก.....	4
2.2 วงกลมมอร์แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ.....	6
2.3 วงกลมมอร์แสดงการเพิ่มแรงดันโอบรัดที่มีผลต่อค่า s_u	7
2.4 ไบมีดของการทดสอบไบมีดสนาม.....	8
2.5 ระนาบวิบัติของการทดสอบไบมีดสนาม.....	9
2.6 ค่าปรับแก้ s_u ของการทดสอบ FV.....	10
2.7 กระจบอกเก็บตัวอย่างมาตรฐาน Split-spoon.....	11
2.8 การเก็บข้อมูล N -value.....	11
2.9 การทดสอบกรวยทะลวง.....	14
2.10 หลักการทดสอบ CPT.....	15
2.11 การทดสอบ PMT.....	16
2.12 กราฟระหว่าง p_L กับปริมาตรของบอลูน.....	16
2.13 หลักการทดสอบ UC.....	17
2.14 กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดแนวแกนในการทดสอบ UC.....	18
2.15 วิธีความเค้นในการทดสอบ UC.....	18
2.16 วงกลมมอร์ของความเค้นรวมในการทดสอบ UC.....	18
2.17 หลักการในการทดสอบ UU.....	19
2.18 กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดแนวแกนในการทดสอบ UU.....	20
2.19 วิธีความเค้นในการทดสอบ UU.....	20
2.20 วงกลมมอร์ของความเค้นรวมในการทดสอบ UU.....	20
2.21 หลักการในการทดสอบ CIUC.....	21
2.22 กราฟระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนในการทดสอบ CIUC.....	22
2.23 วิธีความเค้นรวมในการทดสอบ CIUC.....	22
2.24 ชนิดของเครื่องมือทดสอบ DSS.....	23
2.25 หลักการทดสอบ DSS.....	23
2.26 กราฟระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของการทดสอบ DSS.....	24
2.27 กระจบอกเปลือกบาง.....	25
2.28 กระจบอกแบบลูกสูบ.....	25

ภาพที่	หน้า
2.29 กระบอกทะลวงมาตรฐาน.....	26
2.30 การเปลี่ยนวิถีความเค้นในการเก็บตัวอย่างดิน.....	26
2.31 ข้อมูลชั้นดินเหนียวกรุงเทพ.....	27
2.32 แรงดันน้ำในโพรงวัดโดยเครื่องมือไพอซิซึมิเตอร์.....	29
2.33 ค่า s_u ของดินเหนียวบอสตัน (Boston blue clay) กับระดับความลึกจากผลทดสอบ หลายวิธี.....	30
2.34 ค่า s_u ของดินเหนียวโบธเคนนาร์ (Bothkennar Clay) กับระดับความลึกจากผล ทดสอบหลายวิธี.....	31
3.1 สถานที่ในการทดสอบ.....	35
3.2 การเจาะเก็บตัวอย่างในงานวิจัย.....	36
3.3 กระบอกเปลือกบาง (Shelby Tube).....	36
3.4 ตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพ	37
3.5 ไบมีดที่ใช้ในการทดสอบไบมีดสนาม.....	38
3.6 การทดสอบไบมีดสนาม.....	38
3.7 กระบอกผ่า (Split-spoon).....	39
3.8 ค้อนแบบโคนัท.....	39
3.9 เครื่องทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว.....	40
3.10 เครื่องทดสอบ CIUC.....	41
4.1(ก) ภาพแสดงชั้นดินและข้อมูลพื้นฐานของดินเหนียว CU.....	43
4.1(ข) ภาพแสดงชั้นดินและข้อมูลพื้นฐานของดินเหนียว KU.....	44
4.1(ค) ภาพแสดงชั้นดินและข้อมูลพื้นฐานของดินเหนียว AIT.....	45
4.2 ภาพชั้นดินกรุงเทพแบบหยาบเรียงตามตำแหน่งสถานที่ทดสอบ.....	46
4.3(ก) กราฟของค่า $s_u, FV(corr)$, $s_u, FV-rem(corr)$ กับระดับความลึกของดินเหนียว (CU).....	47
4.3(ข) กราฟของค่า $s_u, FV(corr)$, $s_u, FV-rem(corr)$ กับระดับความลึกของดินเหนียว (KU).....	48
4.3(ค) กราฟของค่า $s_u, FV(corr)$, $s_u, FV-rem(corr)$ กับระดับความลึกของดินเหนียว (AIT).....	49
4.4 กราฟระหว่าง σ_a และ ϵ_a ของตัวอย่างดินเหนียว UC-11-KU.....	51
4.5(ก) กราฟของค่า s_u, UC กับระดับความลึกของดินเหนียว CU.....	52
4.5(ข) กราฟของค่า s_u, UC กับระดับความลึกของดินเหนียว KU.....	53
4.5(ค) กราฟของค่า s_u, UC กับระดับความลึกของดินเหนียว AIT.....	54

ภาพที่	หน้า
4.6 กราฟระหว่าง q และ ε_q ของตัวอย่างดินเหนียว CIUC-11-KU.....	56
4.7(ก) กราฟของค่า $s_{u,CIUC}$ กับระดับความลึกของดินเหนียว CU.....	57
4.7(ข) กราฟของค่า $s_{u,CIUC}$ กับระดับความลึกของดินเหนียว KU.....	58
4.7(ค) กราฟของค่า $s_{u,CIUC}$ กับระดับความลึกของดินเหนียว AIT.....	59
4.8(ก) กราฟของค่า s_u จากวิธีต่างๆกับระดับความลึกของดินเหนียว CU.....	62
4.8(ข) กราฟของค่า s_u จากวิธีต่างๆกับระดับความลึกของดินเหนียว KU.....	63
4.8(ค) กราฟของค่า s_u จากวิธีต่างๆกับระดับความลึกของดินเหนียว AIT.....	64
4.9(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ $s_{u,UC}$ (Soft to medium clay).....	65
4.9(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ $s_{u,UC}$ (Stiff clay).....	65
4.10 ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(cor)}$ กับ $s_{u,UC}$ (Soft to medium clay).....	66
4.11(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ N_{60} (Soft to stiff clay).....	67
4.11(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ N_{60} (Soft to medium clay).....	68
4.11(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ N_{60} (Stiff clay).....	68
4.12(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ σ'_{v0} (Soft to medium clay).....	69
4.12(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ σ'_{v0} (Stiff clay).....	70
4.12(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC} / \sigma'_{v0}$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay).....	70
4.13(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ σ'_{v0}^* (Soft to medium clay).....	71
4.13(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ σ'_{v0}^* (Stiff clay).....	71
4.13(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC} / \sigma'_{v0}^*$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay).....	72
4.14(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ σ'_{v0} (Soft to medium clay).....	72
4.14(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ σ'_{v0} (Stiff clay).....	73
4.14(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC} / \sigma'_{v0}$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay).....	73
4.15(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ σ'_{v0}^* (Soft to medium clay).....	74
4.15(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ σ'_{v0}^* (Stiff clay).....	74
4.15(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC} / \sigma'_{v0}^*$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay).....	75
4.16(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(cor)}$ กับ σ'_{v0} (Soft to medium clay).....	75
4.16(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(cor)} / \sigma'_{v0}$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay).....	76
4.17(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(cor)}$ กับ σ'_{v0}^* (Soft to medium clay).....	76

ภาพที่	หน้า
4.17(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(corr)} / \sigma'_{v0}^*$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay).....	77
4.18(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $E_u^{50}{}_{,UC}$ กับค่า $s_{u,UC}$ (Soft to medium clay).....	78
4.18(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $E_u^{50}{}_{,UC}$ กับค่า $s_{u,UC}$ (Stiff clay).....	79
4.18(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $E_u^{50}{}_{,UC} / s_{u,UC}$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay).....	79
4.19(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $E_u^{50}{}_{,CIUC}$ กับค่า $s_{u,CIUC}$ (Soft to medium clay).....	80
4.19(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $E_u^{50}{}_{,CIUC}$ กับค่า $s_{u,CIUC}$ (Stiff clay).....	80
4.19(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $E_u^{50}{}_{,CIUC} / s_{u,CIUC}$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay).....	81
4.20(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC} / \sigma'_{v0}$ กับค่า PI (Soft to medium clay).....	82
4.20(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC} / \sigma'_{v0}$ กับค่า PI (Stiff clay).....	83
4.21(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC} / \sigma'_{v0}^*$ กับค่า PI (Soft to medium clay).....	84
4.21(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC} / \sigma'_{v0}^*$ กับค่า PI (Stiff clay).....	84
4.22(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC} / \sigma'_{v0}$ กับค่า PI (Soft to medium clay).....	84
4.22(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC} / \sigma'_{v0}$ กับค่า PI (Stiff clay).....	85
4.23(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC} / \sigma'_{v0}^*$ กับค่า PI (Soft to medium clay).....	85
4.23(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC} / \sigma'_{v0}^*$ กับค่า PI (Stiff clay).....	86
4.24 ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(corr)} / \sigma'_{v0}$ กับค่า PI (Soft to medium clay).....	86
4.25 ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(corr)} / \sigma'_{v0}^*$ กับค่า PI (Soft to medium clay).....	87

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Δ	= การเปลี่ยนแปลง (Change)
ASTM	= American Society for Testing and Materials
CU	= จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Chulalongkorn University)
KU	= มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University)
AIT	= สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology)
SS	= กระบอกเปลือกบาง (Split Spoon sampler)
ST	= กระบอกผ่า (Sheby Tube sampler)
FV	= การทดสอบใบมีดสนาม (Field vane test)
SPT	= การทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน (Standard penetration test)
CPT	= การทดสอบกรวยทะลวง (Cone penetration test)
PMT	= การทดสอบมาตรแรงดัน (Pressuremeter test)
UC	= การทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว (Unconfined compression test)
UU	= การทดสอบแรงกดสามแกนแบบไม่อัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (Unconsolidated undrained triaxial)
CIUC	= การทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (Consolidated isotropically undrained compression triaxial)
CIUE	= Consolidated isotropically undrained extension triaxial
DSS	= การทดสอบการเฉือนโดยตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Test)
PSC	= Plane Strain Compression
PSE	= Plane Strain Extension
CK_0UC	= K_0 -Consolidated Undrained Compression Test
CK_0UE	= K_0 -Consolidated Undrained Extension Test
CAK_0U	= Anisotropically K_0 -Consolidated Undrained Test
CAUC	= Anisotropically Consolidated Undrained Compression Test
DST-UU	= Unconsolidated Direct Shear Test
DST-CU	= Consolidated Direct Shear Test
σ_{v0}	= ความเค้นรวมแนวตั้ง (Total vertical stress)
σ'_{v0}	= ความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง (Effective vertical stress)
σ_{h0}	= ความเค้นรวมแนวราบ (Total horizontal stress)

σ'_{h0}	= ความเค้นประสิทธิผลแนวราบ (Effective horizontal stress)
σ'_{v0}^*	= ความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งแบบดรอร์ดาว์น (Drawdown effective vertical stress)
σ_1	= ความเค้นหลัก (Major principal stress)
σ_2	= ความเค้นกลาง (Intermediate principal stress)
σ_3	= ความเค้นรอง (Minor principle stress)
$\Delta\sigma_m$	= การเปลี่ยนแปลงความเค้นรวมภายนอก (Change in total stress)
$\sigma'_{v,max}$	= ความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งสูงสุดในอดีต (Maximum pass pressure)
σ_{nf}	= ความเค้นตั้งฉากบนระนาบวิบัติ (Normal stress at failure plane)
u	= ค่าแรงดันน้ำในโพรงดินสถิต (Hydrostatic pore pressure)
u^*	= ค่าแรงดันน้ำในโพรงดินดรอร์ดาว์น (Drawdown pore pressure)
Δu	= การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดันน้ำในมวลดิน (Excess pore pressure)
C_s	= ค่าการอัดตัวของดิน (Compressibility of soil structure)
C_w	= ค่าการอัดตัวของน้ำ (Compressibility of water)
n	= ความพรุนของดิน (Porosity)
τ_f	= ความเค้นเฉือนบนระนาบวิบัติ (Shear stress at failure plane)
c	= ค่าแรงยึดเหนี่ยวภายใน (Cohesion)
ϕ	= ค่ามุมแรงเสียดทานภายใน (Friction angle)
NC	= ดินสภาพอัดแน่นปกติ (Normally consolidated)
OC	= ดินสภาพอัดแน่นกว่าปกติ (Overconsolidated)
OCR	= Overconsolidation ratio
T	= ค่าแรงบิดจากการทดสอบไบริมิดสนาม
T_{max}	= ค่าแรงบิดสูงสุดจากการทดสอบไบริมิดสนาม
T_{rem}	= ค่าแรงบิดคงตัวจากการทดสอบไบริมิดสนาม
μ_{FV}	= ค่าปรับแก้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของการทดสอบไบริมิดสนาม
S_i	= ค่าความไวตัว (Sensitivity)
$N-value$	= จำนวนครั้งการตอกในการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน
N_{cor}	= N-correction
C_h	= ค่าปรับแก้จากประเภทค้อน (Hammer correction)
C_r	= ค่าปรับแก้จากความยาวก้าน (Rod length correction)
C_p	= ค่าปรับแก้จากกระบอกเก็บตัวอย่าง (Sampler correction)

C_d	= ค่าปรับแก้จากขนาดหลุมเจาะ (Borehole diameter correction)
N_{60}	= จำนวนครั้งที่การตอกที่มีการปรับแก้อัตราส่วนพลังงาน 60% ในการทดสอบ SPT
q_c	= แรงต้านทานกรวยในการทดสอบกรวยทะลวง
f_s	= แรงเสียดทานด้านข้าง (Sleeve friction)
p_L	= ค่าแรงดันลิมิต (Limit pressure)
G	= ค่าโมดูลัสเฉือนของดิน (Shear modulus)
E_u	= ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ
σ_c	= แรงดันโอบรัด (Confining pressure)
σ_b	= แรงดันภายในดิน (Back pressure)
σ_p	= แรงดันโพรงดิน (Pore pressure)
σ'_c	= ความเค้นประสิทธิผลสุทธิ (Effective confining pressure)
σ_a	= ความเค้นในแนวแกน (Axial stress)
ϵ_a	= ความเครียดในแนวแกน (Axial strain)
p	= ความเค้นเฉลี่ย (Mean stress)
q	= ความเครียดเบี่ยงเบน (Deviator stress)
q_u	= Unconfined compressive strength
TSA	= Total Stress Analysis
ESA	= Effective Stress Analysis
TSP	= Total Stress Path
ESP	= Effective Stress Path
ϕ'_{cs}	= Critical State Friction Angle
ϕ'_p	= Peak Friction Angle
τ_{zx}	= ความเค้นเฉือนในแนวราบ (Horizontal shear stress)
$\tau_{zx,max}$	= ความเค้นเฉือนในแนวราบสูงสุด (Maximum horizontal shear stress)
ϵ_x	= ความเครียดในแนวราบ (Horizontal strain)
ϵ_y	= ความเครียดในแนวตั้ง (Vertical strain)
$\epsilon_{a,fail}$	= ความเครียดในแนวแกนที่เกิดการวิบัติของตัวอย่าง
LL	= ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit)
PL	= ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit)
SL	= ขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage limit)
PI	= ดัชนีพลาสติก (Plasticity index)

PI_{avg}	= ดัชนีพลาสติกเฉลี่ยของชั้นดิน
s_u	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength)
$s_{u,FV}$	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสูงสุดจากการทดสอบ FV
$s_{u,FV(corr)}$	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสูงสุดจากการทดสอบ FV แบบปรับแก้
$s_{u,FV-rem}$	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำคงตัวจากการทดสอบ FV
$s_{u,FV-rem(corr)}$	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำคงตัวจากการทดสอบ FVT แบบปรับแก้
$s_{u,UC}$	= ค่ากำลังรับแรงรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ UC
$s_{u,UU}$	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ UU
$s_{u,CIUC}$	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ CIUC
$s_{u,DSS}$	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ DSS
$s_{u,DST-CU}$	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ DST-CU
$s_{u,DST-UU}$	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ DST-UU
s_{u,CK_0UC}	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ CK_0UC
s_{u,CAK_0U}	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ CAK_0U
$s_{u,CAUC}$	= ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ CAUC
E_0	= ค่าโมดูลัสเริ่มต้น (Initial Young's Modulus)
E_u^{50}	= โมดูลัสยืดหยุ่นที่แกนตัดที่ครึ่งของกำลังคราก (Secant Young's modulus at 50% of yield strength)
$E_{u,UC}^{50}$	= โมดูลัสยืดหยุ่นที่แกนตัดที่ครึ่งของกำลังครากจากการทดสอบ UC
$E_{u,CIUC}^{50}$	= โมดูลัสยืดหยุ่นที่แกนตัดที่ครึ่งของกำลังครากจากการทดสอบ CIUC

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

โดยทั่วไปแล้วในงานก่อสร้างทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคในพื้นที่ที่ดินมีความเชื่อมแน่น (Cohesive soil) เช่น การก่อสร้างฐานราก การก่อสร้างเสาเข็ม การก่อสร้างกำแพงกันดิน การก่อสร้างคันดินถม เป็นต้น ในขั้นตอนก่อสร้างนั้นจะมีการให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Rapid loading) และเมื่อเสร็จสิ้นการก่อสร้างจะมีการคืนตัวของน้ำหนัก (Unloading condition) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนในระยะเวลาดังกล่าวโดยที่ดินยังไม่เกิดการอัดตัวคายน้ำ ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบนั้นจะใช้การวิเคราะห์แบบความเค้นรวม (Total Stress Analysis, TSA) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ค่าหนึ่งคือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) ดังนั้นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจึงเป็นค่าที่มีความสำคัญในงานทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค

เนื่องด้วยการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำนั้นมีด้วยกันหลายวิธี การทดสอบในแต่ละวิธีมีการควบคุมสภาพของดินขณะทดสอบที่แตกต่างกันทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้มีค่าแตกต่างกัน นอกจากนี้ในการทดสอบทุกวิธีไม่สามารถที่จะจำลองสภาพดินให้เหมือนกับสภาพดินที่อยู่ในสภาพจริงได้ ค่าของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จึงไม่สามารถได้ค่าที่ตรงกับความเป็นจริง ดังนั้นการทราบว่าวิธีการทดสอบวิธีใดเป็นวิธีที่ให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดจึงเป็นประโยชน์ต่อผู้นำค่าไปใช้งาน

นอกจากนี้การทำงานในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค การเลือกวิธีการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบว่าต้องการค่าจากการทดสอบวิธีใด สาเหตุของการเลือกวิธีการทดสอบที่ความแตกต่างกันนั้นมีด้วยกันหลายอย่างเช่น ระยะเวลาในการทดสอบ งบประมาณในการทดสอบ ความเหมาะสมกับพื้นที่ทำงาน เป็นต้น การสร้างความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนในแต่ละวิธีจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ออกแบบ เพราะผู้ออกแบบสามารถใช้ความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นเพื่อปรับแก้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากวิธีที่ผู้ทำงานใช้ให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

จากเหตุผลข้างต้นทำให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเป็นค่าที่มีความสำคัญค่าหนึ่งในการทำงานทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค การนำค่าที่มีความใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดไปใช้ออกแบบ ทำให้เกิดความเสียหายในการออกแบบน้อยลงและประหยัดต้นทุนในการก่อสร้าง ผู้วิจัยจึงเห็นว่างานวิจัยนี้มีความสำคัญ และมีความจำเป็นที่ต้องทำการวิจัย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการหาจากผลการทดสอบในสนามและห้องปฏิบัติการ
- 2) สร้างสหสัมพันธ์ที่แสดงถึงความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในแต่ละวิธี
- 3) สร้างสมการความสัมพันธ์ที่ใช้แปรผลค่าจากการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐานเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
- 4) เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับผลการทดสอบในอดีตภายในประเทศ
- 5) นำสหสัมพันธ์และสมการถดถอยของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในแต่ละวิธีที่ได้เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ที่ถูกสร้างขึ้นในอดีต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ทำการเจาะเก็บตัวอย่างดินตามมาตรฐาน ASTM: D1587-94 โดยทำการเก็บตัวอย่างดินทั้งหมด 3 สถานที่ ได้แก่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KU) และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)
- 2) ทำการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในสนาม 2 การทดสอบ ได้แก่
 - 2.1) การทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) ตามมาตรฐาน ASTM: D1586-99
 - 2.2) การทดสอบใบมีดสนาม (Field vane test, FV) ตามมาตรฐาน ASTM: D2573-01
- 3) นำตัวอย่างดินที่ได้มาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในห้องปฏิบัติการ 2 การทดสอบ ได้แก่
 - 3.1) การทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว (Unconfined Compression test, UC) ตามมาตรฐาน ASTM: D2166-91
 - 3.2) การทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (Consolidated Isotropically Undrained Compressoin triaxial test, CIUC) ตามมาตรฐาน ASTM: D4767-04
- 4) นำดินที่เหลือจากการทดสอบในข้อ 3) มาทดสอบหาสมบัติดัชนี (Index properties) โดยใช้ในการทดสอบ Atterberg Limits and Indices ตามมาตรฐาน ASTM: D 4318-9, D 427-93

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ค้นคว้า และทำการศึกษาเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ การเก็บตัวอย่างดิน การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในสนาม การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในห้องปฏิบัติการ ศึกษางานวิจัยในอดีต เป็นต้น
- 2) กำหนดโครงร่างของเนื้อหา ได้แก่ กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการศึกษา และ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย
- 3) จัดทำข้อเสนอโครงร่างวิทยานิพนธ์
- 4) ศึกษาวิธีการ และมาตรฐานการทดสอบวัสดุที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 5) ทำการเก็บตัวอย่างดิน และทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในสนามในพื้นที่ที่กำหนดไว้
- 6) นำตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ
- 7) วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถนำผลการทดสอบไปใช้ในการศึกษาต่อไป
- 2) ทราบความแปรปรวน (Variations) ของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบแบบต่างๆ
- 3) สามารถนำความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำไปใช้ในการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด
- 4) สามารถนำผลของงานวิจัยไปใช้ประกอบในการตัดสินใจเลือกใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบหลายวิธี

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

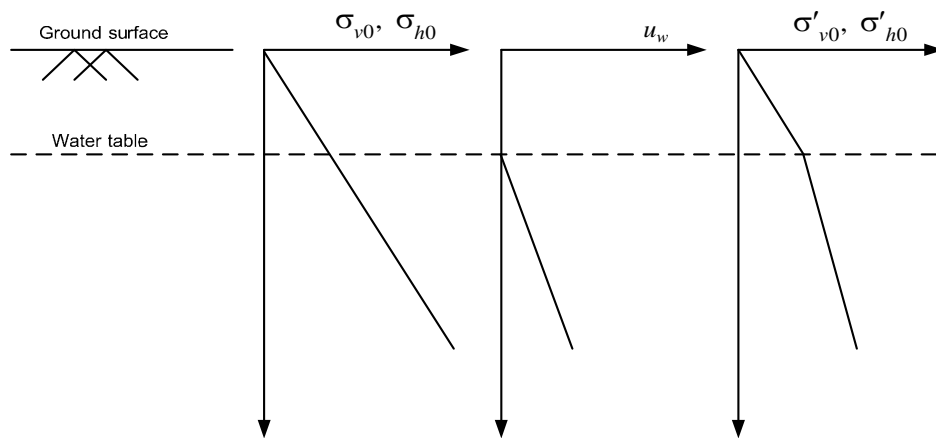
2.1 ความเค้นในสนาม (In situ stresses)

ความเค้นที่กระทำในมวลดินมีสองทิศทางคือ ความเค้นรวมในแนวดิ่ง (Total vertical stress, σ_{v0}) และความเค้นรวมในแนวราบ (Total horizontal stress, σ_{h0}) ซึ่งถ้าดินมีระดับน้ำใต้ดินดังภาพที่ 2.1 สามารถหาความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง (Effective vertical stress, σ'_{v0}) และความเค้นประสิทธิผลในแนวราบ (In situ effective horizontal stress, σ'_{h0}) ได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u \quad (2.1)$$

$$\sigma'_{h0} = \sigma_{h0} - u \quad (2.2)$$

โดย u คือค่าแรงดันน้ำในโพรงดินสถิต (Hydrostatic pore pressure)



ภาพที่ 2.1 ความเค้นประสิทธิผลเทียบกับความลึก

2.2 พารามิเตอร์แรงดันน้ำของสเคมตัน (Skempton's pore pressure parameters)

เมื่อมีแรงภายนอกกระทำต่อมวลดิน ในขณะที่เริ่มถูกแรงกระทำ กระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ยังไม่เกิดขึ้น นั่นคือดินยังอยู่สภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained) จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีอีลาสติกสามารถหาการเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดันน้ำในมวลดิน (Excess pore pressure, Δu) ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นรวมภายนอก (Total stress, $\Delta \sigma_m$) จากสมการที่ 2.3

$$\Delta u = \frac{1}{\left(1 + \frac{C_s}{nC_w}\right)} \Delta \sigma_m \quad (2.3)$$

โดย C_s คือค่าการอัดตัวของดิน (Compressibility of soil structure)

C_w คือค่าการอัดตัวของน้ำ (Compressibility of water)

n คือความพรุนของดิน (Porosity)

2.3 กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear strength of soil)

คูลอมบ์ (Coulomb) ได้ค้นพบว่ากำลังของดินมาจาก 2 ส่วนประกอบคือ แรงยึดเหนี่ยวภายใน (Cohesion) และแรงเสียดทาน (Friction) หลังจากนั้น ออตโต มอร์ (Mohr) ได้ใช้แนวคิดของคูลอมบ์เสนอเกณฑ์การวิบัติ (Mohr-Coulomb failure criteria) ด้วยการวิเคราะห์วงกลมมอร์ (Mohr's Circle) ดังสมการที่ 2.4

$$\tau_f = c + \sigma_{nf} \tan \phi \quad (2.4)$$

โดย τ_f คือความเค้นเฉือนบนระนาบวิบัติ

σ_{nf} คือความเค้นตั้งฉากบนระนาบวิบัติ

c คือค่าแรงยึดเหนี่ยวภายใน

ϕ คือค่ามุมแรงเสียดทานภายใน

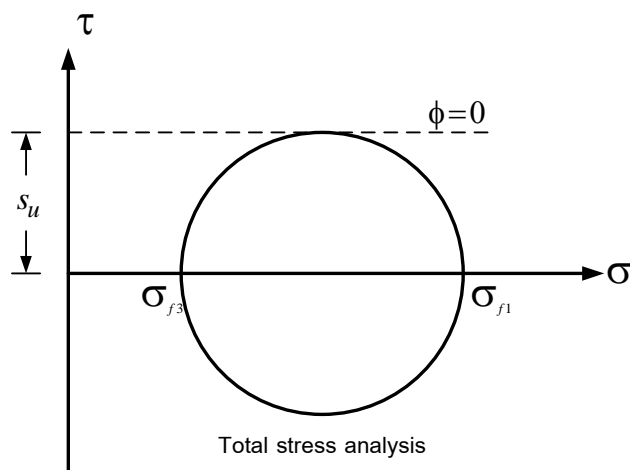
2.4 เงื่อนไขระบายน้ำและเงื่อนไขไม่ระบายน้ำของดิน

- 1) เงื่อนไขระบายน้ำ (Drained condition) คือเมื่อดินถูกแรงภายนอกกระทำ แรงดันน้ำในโพรงดินส่วนเกิน (Excess pore water pressure) สามารถระบายออกได้ในช่วงเวลาที่พิจารณา ($\Delta u = 0$)
- 2) เงื่อนไขไม่ระบายน้ำ (Undrained condition) คือเมื่อดินถูกแรงภายนอกกระทำ แรงดันน้ำในโพรงดินส่วนเกินไม่สามารถระบายออกได้ในช่วงเวลาที่พิจารณา ($\Delta u \neq 0$)
- 3) เงื่อนไขระบายน้ำบางส่วน (Partially drained condition) เป็นเงื่อนไขที่เกิดขึ้นจริงในงานทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคคือ เมื่อดินถูกแรงภายนอกกระทำ แรงดันน้ำในโพรงดินส่วนเกิน (Excess pore water pressure) สามารถระบายน้ำออกได้บางส่วน แต่การนำเงื่อนไขนี้ไปพิจารณาที่มีความซับซ้อนมาก วิศวกรจึงวิเคราะห์งานด้วยเงื่อนไขระบายน้ำ และเงื่อนไขไม่ระบายน้ำ ซึ่งเป็นขอบเขตของเงื่อนไขระบายน้ำบางส่วน (Boundary condition)

2.5 กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, s_u)

2.5.1 นิยามของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, s_u) คือกำลังรับแรงเฉือนของดินในเงื่อนไขไม่ระบายน้ำ โดยปริมาตรของดินไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสามารถหาได้จากวงกลมมอร์ของความเค้นหลักที่ระนาบวิบัติ นั่นคือเท่ากับรัศมีของวงกลมมอร์ ดังภาพที่ 2.2



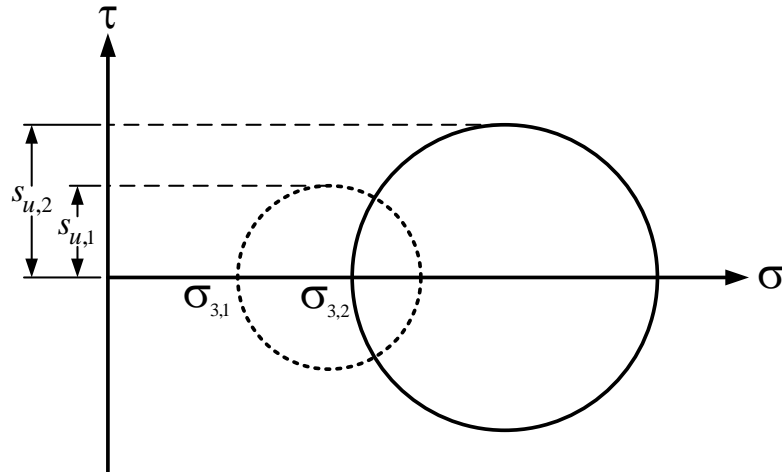
ภาพที่ 2.2 วงกลมมอร์แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

ในบางครั้งค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะถูกเรียกว่า ค่าแรงยึดเหนี่ยว (c) ในเงื่อนไขมุมแรงเสียดทานเท่ากับศูนย์ ($\phi = 0$) จากเกณฑ์การวิบัติมอร์-คูลอมบ์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบความเค้นรวม (Total stress analysis, TSA) ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$\tau_f = c + \sigma_{nf} \tan(0) = c \quad (2.5)$$

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำนั้นไม่ได้เป็นค่าคงตัวของดิน เพราะค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำขึ้นอยู่กับสภาพเริ่มต้นของดินก่อนการเฉือน นั่นคือ อัตราส่วนโพรงเริ่มต้น (e_i) ปริมาณน้ำในมวลดินเริ่มต้น (w_i) การเพิ่มแรงดันโอบรัด (σ_3) ให้กับดินจะส่งผลให้อัตราส่วนโพรงลดลง กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำก็มีค่าสูงขึ้น ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 วงกลมมอร์แสดงการเพิ่มแรงดันโอบรัดที่มีผลต่อ s_u

2.5.3 สูตรเชิงประสพการณ์สำหรับประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

ในปี 1954 สเคมปีตันได้เสนอสูตรเชิงประสพการณ์สำหรับดินอัดแน่นปกติ (Normally consolidated clay, NC) ดังสมการที่ 2.6 ซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบไบริดสนามขึ้นอยู่กับค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI)

$$\left(\frac{s_{u,FV}}{\sigma'_{v0}} \right)_{NC} = 0.11 + 0.0037 PI \quad (2.6)$$

ในปี 1975 เมซรี (Mesri, 1975) สำหรับดินเหนียวทุกประเภท ดังสมการที่ 2.7

$$\frac{s_u}{\sigma'_{v,max}} = 0.22 \quad (2.7)$$

ในปี 1977 ซาลล์ แลด์ และคณะ (Ladd et al., 1977) ได้ศึกษาพฤติกรรมของดินโดยใช้เทคนิคการทดสอบแบบชันเซป (Stress History And Normalised Soil Engineering Parameter, SHANSEP) และความสัมพันธ์แบบบรรทัดฐาน (Normalised relationship) ได้ความสัมพันธ์สำหรับดินอัดแน่นกว่าปกติ (Overconsolidated clay, OC) ดังสมการที่ 2.8

$$\left(\frac{s_u}{\sigma'_{v0}} \right)_{OC} = \left(\frac{s_u}{\sigma'_{v0}} \right)_{NC} OCR^{0.8} \quad (2.8)$$

ในปี 1985 ปีเตอร์ โลดส์ และกาย ไวลส์บี (Wroth et al, 1985) ได้สรุปค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำควรขึ้นอยู่กับมุมแรงเสียดทานภายในและอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำ ดังสมการที่ 2.9

$$\frac{s_u}{\sigma'_{v0}} = f(\phi, OCR) \quad (2.9)$$

2.6 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

(Determination of Undrained Shear Strength)

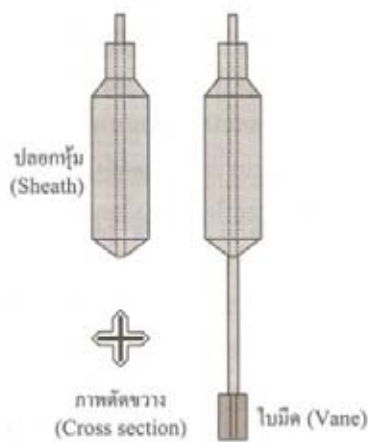
การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) แบ่งออกได้ 2 ประเภท คือการทดสอบในสนาม (Field test) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory test)

2.6.1 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในสนาม

1) การทดสอบไวมิตสนาม (Field vane test, FV)

(ASTM: D2573-01)

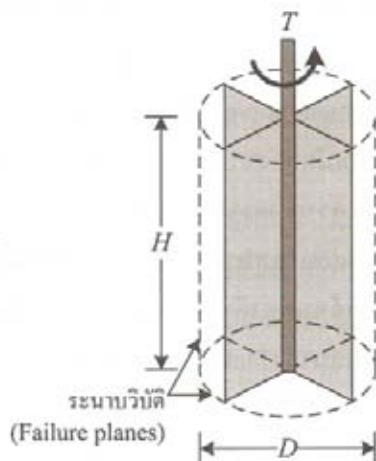
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) เครื่องมือทดสอบประกอบด้วยแท่งเหล็กติดกับใบพัดโลหะ 4 แฉกตั้งฉากกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 50 ถึง 75 มิลลิเมตร มีขนาดความสูง (H) เท่ากับ 100 ถึง 150 มิลลิเมตร มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (H/D) เท่ากับ 2 อัตราส่วนพื้นที่ใบต่อพื้นที่ดินที่ถูกเฉือนน้อยกว่า 15% ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ใบมีดของการทดสอบไวมิตสนาม (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 2551)

1.1) ขั้นตอนและหลักการ

เริ่มต้นด้วยการเจาะหลุมลงไปให้ถึงระดับที่เหนือระดับความลึกที่ต้องการวัดค่า จากนั้นจึงดันแกนเหล็กเพื่อให้ใบพัดลงไปอยู่ในระดับที่ต้องการแล้วจึงหมุนใบพัดด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 6° /นาที วัดแรงบิดสูงสุด (T_{max}) ที่เกิดขึ้นในการหมุน โดยคิดวาระนาบวิบัติ (Failure surface) เป็นภาพทรงกระบอกตามการหมุนของใบพัด ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ระนาบวิบัติของการทดสอบบิดสาม (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 2551)

1.2) การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

วัดขนาดความสูงของบิด (H) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบิด (D) ดังภาพที่ 2.4 จากนั้นนำค่าแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบไปคำนวณเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากสมการที่ 2.10

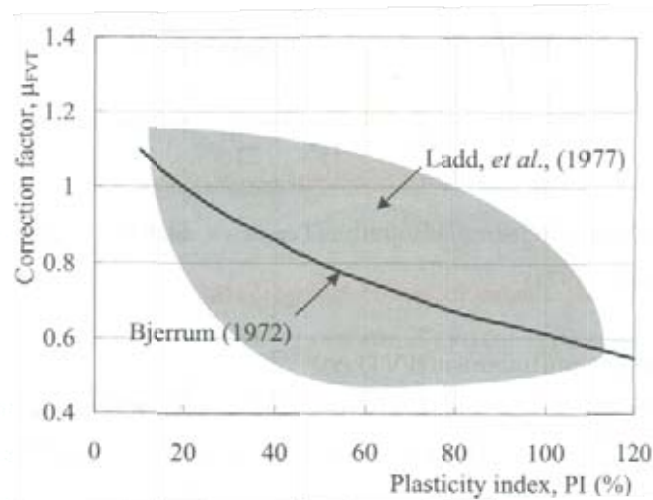
$$T = \frac{\pi}{2} D^3 \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right) s_{u, FV} \quad (2.10)$$

จากการทดสอบบิดสามค่าที่ได้มีค่ามากกว่าความเป็นจริง (Overestimate) โดยมีข้อเสนอแนะในการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 2551) ดังสมการที่ 2.11

$$s_{u, FV}(\text{cor}) = \mu_{FV} \cdot s_{u, FV} \quad (2.11)$$

โดยค่าปรับแก้ (μ_{FV}) ใช้ตามข้อเสนอแนะของเบอรัม (Bjerrum, 1972) โดย μ_{FV} ใช้สูตรที่เขียนใหม่ (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 2551) ดังสมการที่ 2.12 ซึ่งหามาจากกราฟของแลดด์ และคณะ (1977) ดังภาพที่ 2.6 ซึ่งแสดงค่า μ_{FV} มีความสัมพันธ์กับค่า PI

$$\mu_{FV} = 1.18 - 0.0107PI + 5.13 \times 10^{-5} PI^2 \quad (2.12)$$



ภาพที่ 2.6 ค่าปรับแก้ s_u ของการทดสอบ FV (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรอง, 2551)

นอกจากนั้นในการหมุนใบพัดเมื่อหมุนต่อไปจะพบว่าแรงบิดจะลดลงจนมีค่าคงตัวซึ่งเรียกค่าดังกล่าวนี้ว่า แรงบิดคงตัว (T_{rem}) ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาค่าความไวตัว (Sensitivity, S_t) ของความดินเหนียวได้จากสมการที่ 2.13

$$S_t = \frac{T_{max}}{T_{rem}} \quad (2.13)$$

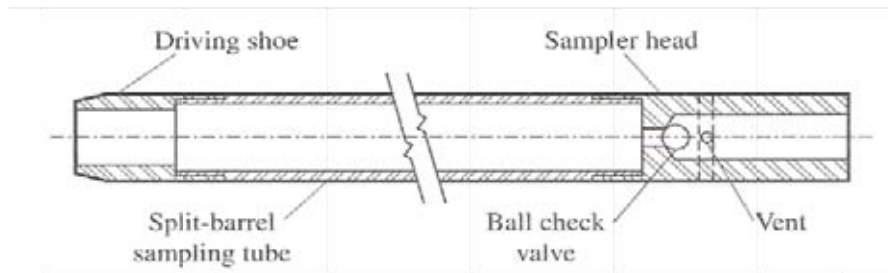
1.3) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการทดสอบ

การทดสอบนี้ไม่สามารถควบคุมเงื่อนไขการระบายน้ำได้ การหมุนด้วยความเร็วที่กำหนดไว้ไม่สามารถบอกได้ว่าดินจะอยู่ในเงื่อนไขไม่ระบายน้ำตามที่ต้องการ การกระจายตัวของความเค้นดินรอบระนาบวิบัติอาจไม่สม่ำเสมอตามทฤษฎี นอกจากนั้นกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ระนาบวิบัติด้านข้างอาจไม่เท่ากับกำลังรับแรงเฉือนที่ระนาบวิบัติด้านบนและล่าง

2) การทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน (Standard penetration test, SPT)

(ASTM: D1586-99)

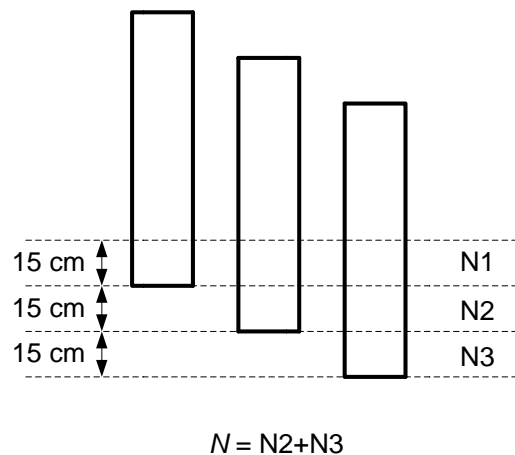
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาจำนวนครั้งในการตอกสองชุดสุดท้าย (N -value) โดยเครื่องมือทดสอบประกอบด้วยกระบอกเก็บตัวอย่างมาตรฐาน (Split-spoon) ดังภาพที่ 2.7 และค้อน (Hammer) โดยค้อนมีน้ำหนักเท่ากับ 630 นิวตัน หรือ 140 ปอนด์ มีระยะปล่อยของค้อนเท่ากับ 760 มิลลิเมตร



ภาพที่ 2.7 กระบอกเก็บตัวอย่างมาตรฐาน Split-spoon (Salgado, 2008)

2.1) ขั้นตอนและหลักการ

เริ่มต้นด้วยการเจาะหลุมลงไปให้ถึงระดับที่เหนือระดับความลึกที่ต้องการวัดค่าประมาณ 45 เซนติเมตร จากนั้นจะทำการตอกกระบอกมาตรฐานลงในดินเป็นระยะ 45 เซนติเมตร หรือ 1 ½ ฟุต แบ่งการตอกออกเป็น 3 ช่วง ช่วงละ 15 เซนติเมตร บันทึกจำนวนครั้งที่ตอกในสองช่วงสุดท้าย เรียกผลรวมของจำนวนครั้งที่ตอกในสองช่วงสุดท้ายว่า N -value หรือ Blow count ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การเก็บข้อมูล N -value

2.2) การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐานนั้นประสิทธิภาพในการทดสอบไม่เท่ากัน เนื่องจากเครื่องจักรที่ใช้มีส่วนประกอบไม่เหมือนกันได้แก่ ค้อนที่ใช้ในการตอก ความยาวเชือก กระบอกเก็บตัวอย่างมาตรฐาน และขนาดหลุมเจาะ การนำค่า N -value มาใช้จึงต้องมีการปรับแก้ ดังสมการที่ 2.14

$$N_{cor} = C_h C_r C_s C_d N \quad (2.14)$$

โดย N_{cor} = N-correction

C_h = ค่าปรับแก้จากประเภทค้อน (Hammer correction) = (ER/60%)

C_r = ค่าปรับแก้จากความยาวก้าน (Rod length correction)

C_p = ค่าปรับแก้จากกระบอกเก็บตัวอย่าง (Sampler correction)

C_d = ค่าปรับแก้จากขนาดหลุมเจาะ (Borehole diameter correction)

N = N -value

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าปรับแก้ค่า N (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรอง, 2551)

ค่าปรับแก้ (Correction factor)	รายการ		ค่าที่ใช้ปรับแก้
C_h	โดนัท	ER = 45 %	0.75
	Safety US	ER = 55 -60 %	0.92 - 1.0
	Safety UK	ER = 50 %	0.83
	Automatic trip US	ER = 55 - 83 %	0.92 -1.38
	Automatic UK	ER = 60 %	1.00
	แบบเข็ม	ER = 72 %	1.20
C_r	ความยาวก้าน	≥ 10 m	1.00
		6 - 10 m	0.95
		4 - 6 m	0.85
		3 - 4 m	0.75
C_p	กระบอกมาตรฐาน ISSMFE	มีการบากร่อง	1.00
	กระบอกมาตรฐาน ASTM	ไม่มีการบากร่อง	1.20
C_d	เส้นผ่านศูนย์กลางหลุม เจาะ	65 - 115 mm	1.00
		150 mm	1.05
		200 mm	1.15

นอกจากนี้ยังมีค่า N_{cor} ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือค่า N -value ที่ปรับแก้เฉพาะผลของอัตราส่วนของพลังงานโดยอ้างอิงจากคั่นประเภทปลอดภัย (Safety) US ที่มีอัตราส่วนพลังงาน 60% เรียกว่า N_{60} ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.15

$$N_{60} = C_h N = \left(\frac{ER}{60\%} \right) N \quad (2.15)$$

ค่า N -value ที่ผ่านการปรับแก้แล้ว (N_{cor}) สามารถนำค่า N ไปตีความสามารถนำผลการทดสอบไปตีความได้หลายอย่างเช่น คุณสมบัติดินเหนียว กำลังรับน้ำหนัก ค่าการยุบตัวของดิน เป็นต้น ในที่นี้ขอกล่าวเฉพาะการตีความ N -value ไปเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน ซึ่งมีตัวอย่างตารางเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเม็ดละเอียด (Fine grained soil) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบค่า N กับ s_u ของดินเหนียว
(วาดใหม่จาก สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 2551)

N	ชนิดของดิน	s_u (kPa)
0 - 2	Very soft	< 10
3 - 5	Soft	10 - 25
6 - 9	Medium	25 - 50
10 - 15	Stiff	50 - 100
15 - 30	Very stiff	100 - 200
> 30	Extremely stiff	> 200

การตีความค่ากำลังรับแรงเฉือนจากค่า N นั้นมีความสัมพันธ์ที่ใช้ตีความอยู่มากมาย โดยความสัมพันธ์เป็นความสัมพันธ์เชิงประสบการณ์ หรือความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากการวิจัยในพื้นที่ที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดความสัมพันธ์ที่ต่างกันเช่น ความสัมพันธ์ของ Terzaghi และ Peck (1967) ดังสมการที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของ Stroud (1975) ดังสมการที่ 2.17 และ ความสัมพันธ์ของวีรพันธ์ (2526) สำหรับการแปลงค่าหากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวในกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นสมการที่ใช้งานแพร่หลายในประเทศไทยดังสมการที่ 2.18 และ 2.19 เป็นต้น

$$s_u = 0.625N \text{ (t/m}^2\text{)} \quad (2.16)$$

$$\frac{s_u}{p_a} = f_1 N \quad (2.17)$$

$$s_u = 5.10N \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad \text{for CL} \quad (2.18)$$

$$s_u = 6.72N \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad \text{for CH} \quad (2.19)$$

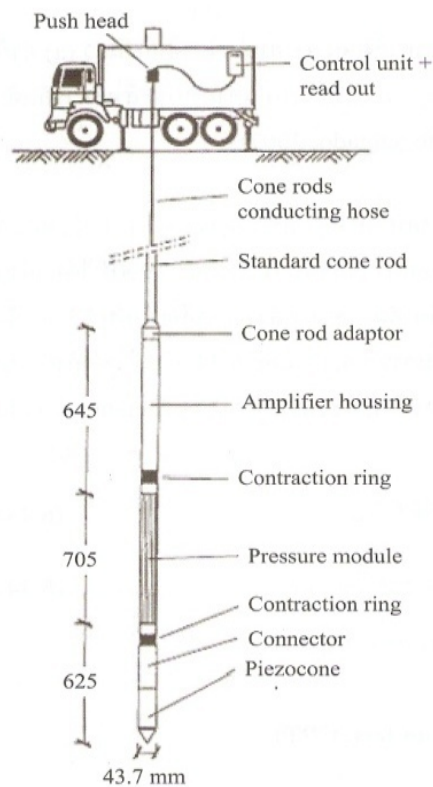
2.3) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการทดสอบ

การทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐานยังมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเช่น ความคลาดเคลื่อนเชิงบุคคล (Human error) ความคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์การทดสอบ (Instrument error) แต่การทดสอบนี้ก็เป็นที่นิยมเพราะเป็นการทดสอบที่สามารถทำได้ง่าย

3) การทดสอบกรวยทะลวง (Cone penetration test, CPT)

(ASTM: D5778)

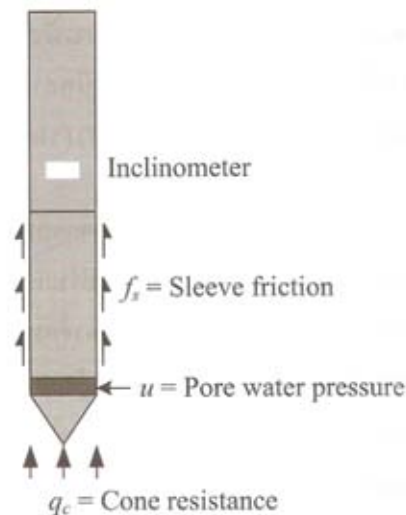
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าแรงต้านทานกรวย (q_c) และค่าแรงดันน้ำโพรง (u) จากนั้นนำค่าทั้งสองไปตีความเพื่อหาค่าอื่นต่อไป โดยเครื่องทดสอบประกอบด้วย กรวยแหลมขนาดมุม 60° มีพื้นที่หน้าตัด 10 cm^2 ต่อกับด้ามจับ ดังภาพที่ 2.10 มีมาตรวัดความดัน (Pressure gage) มาตรวัดความเครียด (Strain gage) และมาตรวัดแรงดันน้ำ (Piezometric) โดยอุปกรณ์ทั้งหมดจะอยู่ในรถบรรทุก (Cone truck) ที่สามารถเคลื่อนที่ไปในที่ที่ต้องการทดสอบ ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การทดสอบกรวยทะลวง (Brouwer, 1999: online)

3.1) ขั้นตอนและหลักการ

ขั้นตอนการทดสอบคือ การกดกรวยแหลมลงในดินด้วยอัตราเร็ว 2 เซนติเมตรต่อวินาที พร้อมการวัดแรงต้านทานกรวย (Cone resistance, q_c) วัดแรงเสียดทานด้านข้าง (Sleeve friction, f_s) และวัดแรงดันน้ำในโพรง (Pore water pressure, u) ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 หลักการทดสอบ CPT (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรอง, 2551)

3.2) การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบ CPT สามารถนำไปตีความได้หลายอย่างเช่น จำแนกประเภทของดิน ประมาณค่าการทรุดตัว หาค่าพารามิเตอร์ของกำลังของดิน เป็นต้น ในที่นี้ขอกล่าวเพียงการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากผลทดสอบ CPT

การวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสามารถประมาณได้จากสูตรแรงแบกทาน (Bearing capacity) ดังสมการที่ 2.20 (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรอง, 2551)

$$s_u = \frac{q_c - \sigma'_{v0}}{N_k} \quad (2.20)$$

โดย s_u = ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength)

q_c = แรงต้านทานกรวย (Cone resistance)

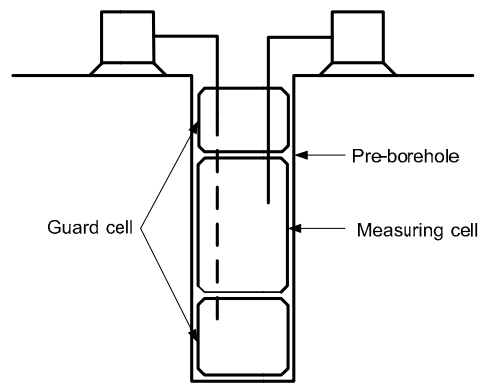
σ'_{v0} = ความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง (In situ vertical effective stress)

$$N_k = 19 - \frac{PI - 10}{5} ; PI > 10$$

4) การทดสอบมาตรแรงดัน (Pressuremeter test, PMT)

(ASTM: D4719-87)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือน โดยเครื่องทดสอบประกอบด้วย บอลลูน มาตรวัดแรงดัน ป้อนน้ำ และเครื่องให้แรงดัน ดังภาพที่ 2.11



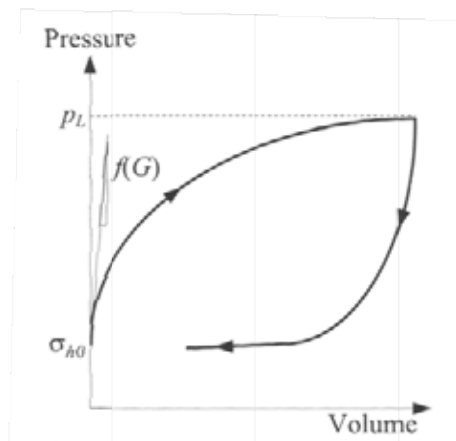
ภาพที่ 2.11 การทดสอบ PMT (วาดใหม่จาก สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 2551)

4.1) ขั้นตอนและหลักการ

การทดสอบเริ่มต้นด้วยการเจาะหลุมลงไปให้ถึงระดับที่ต้องการทดสอบ จากนั้นส่งบอลลูนเข้าไปในหลุมเจาะ ให้แรงดันบอลลูนจนบอลลูนพองตัวออกทำให้หลุมเจาะขยายขนาด ซึ่งการทดสอบใช้หลักการขยายตัวของโพรง (Cavity expansion)

4.2) การวิเคราะห์ผลทดสอบ

ผลทดสอบจะแสดงด้วยเส้นโค้งการขยายตัวซึ่งแสดงกราฟระหว่างแรงดันและปริมาตรของบอลลูน ดังภาพที่ 2.12 ซึ่งค่าแรงดันเริ่มต้นก่อนการทดสอบเท่ากับความเค้นรวมในแนวราบในสนาม (σ_{h0})



ภาพที่ 2.12 กราฟระหว่าง p_L กับปริมาตรของบอลลูน (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 2551)

ค่าแรงดันลิมิต (Limit pressure, p_L) จะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ดังสมการที่ 2.21 และค่าโมดูลัสเฉือนของดิน (Shear modulus, G) สามารถหาได้จากความชันของกราฟในภาพที่ 2.12

$$p_L = \sigma_{h0} + s_u \left(1 + \ln \left(\frac{G}{s_u} \right) \right) \quad (2.21)$$

2.6.2 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในห้องปฏิบัติการ

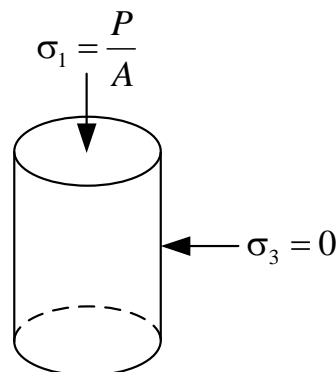
1) การทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว (Unconfined Compression Test, UC)

(ASTM: D2166)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated clay) รวมทั้งยังสามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (E_u) การทดสอบเป็นการทดสอบมีข้อดีคือ สะดวก รวดเร็ว และประหยัด

1.1) ขั้นตอนและหลักการ

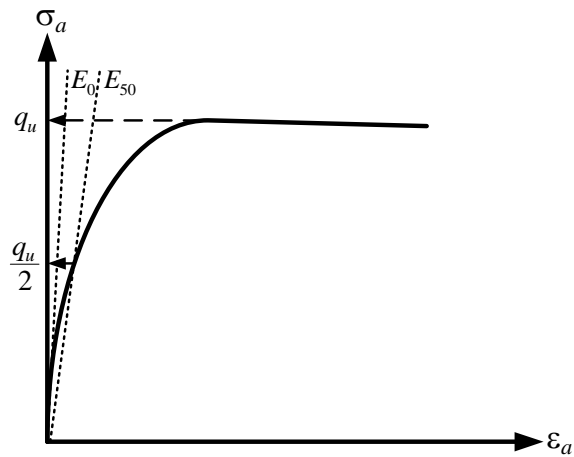
นำตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพที่เก็บได้จากการเจาะเก็บตัวอย่างดินมาเตรียมตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 38 มิลลิเมตรหรือ $1\frac{1}{2}$ นิ้ว และมีความสูง (H) เท่ากับ 76 มิลลิเมตรหรือ 3 นิ้ว โดยตัวอย่างดินที่เตรียมมีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (H/D) เท่ากับ 2 จากนั้นนำตัวอย่างดินที่เตรียมมาให้แรงดันในแนวแกน (σ_1) เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการให้แรงดันโอบรัด (σ'_c) ดังภาพที่ 2.13 ให้แรงดันในแนวแกนด้วยความรวดเร็วเพียงพอที่แรงดันน้ำในโพรง (Pore water pressure) ไม่สามารถระบายออกจากตัวอย่างดินได้ ให้แรงจนตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ (Failure) โดยวัดแรงดันในแนวแกนและการเคลื่อนตัวในแนวแกนไปพร้อมกัน



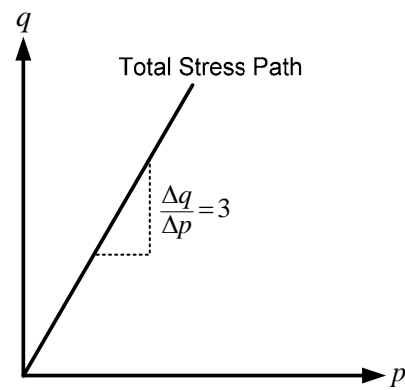
ภาพที่ 2.13 หลักการทดสอบการทดสอบ UC

1.2) การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

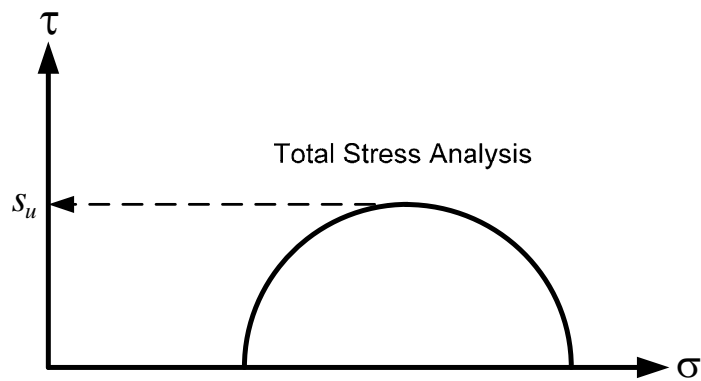
นำผลการทดสอบมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้แก่ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแนวแกน ($\sigma_a - \epsilon_a$) ดังภาพที่ 2.14 วิธีความเค้นรวม ($p - q$) ดังภาพที่ 2.15 และวงกลมมอริซของความเค้นรวม ($\tau - \sigma_n$) ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.14 กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดแนวแกนในการทดสอบ UC



ภาพที่ 2.15 วิธีความเค้นในการทดสอบ UC



ภาพที่ 2.16 วงกลมมอร์ของความเค้นรวมในการทดสอบ UC

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแนวแกน ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสามารถหาได้จากสมการที่ 2.22 รวมทั้งยังสามารถหาค่าโมดูลัสเริ่มต้น (Initial Young's Modulus, $E_0 = \frac{\sigma_a}{\epsilon_a}$) และโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ที่ครึ่งของกำลังคราก (Secant Young's modulus at 50% of yield strength, E_u^{50}) ได้จากสมการที่ 2.23

$$s_u = \frac{q_u}{2} \quad (2.22)$$

$$E_u^{50} = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \quad \text{โดยที่ } \sigma_a = q_u / 2 \quad (2.23)$$

1.3) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการทดสอบ

ดินที่นำมาทดสอบอาจไม่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ และตัวอย่างดินเริ่มต้นทดสอบอยู่ในสภาพที่มีแรงดันน้ำในโพรงติดลบ (Suction) ตัวอย่างดินพยายามดูดความชื้นเข้าสู่มวลดินตลอดเวลา

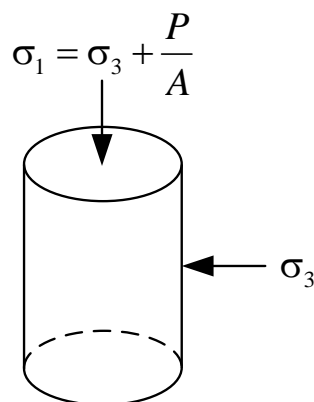
2) การทดสอบแรงกดสามแกนแบบไม่อัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ

(Unconsolidated Undrained Triaxial, UU) (ASTM: D2850-03a)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว อิ่มตัวด้วยน้ำ รวมทั้งยังสามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (E_u) ได้

2.1) ขั้นตอนและหลักการ

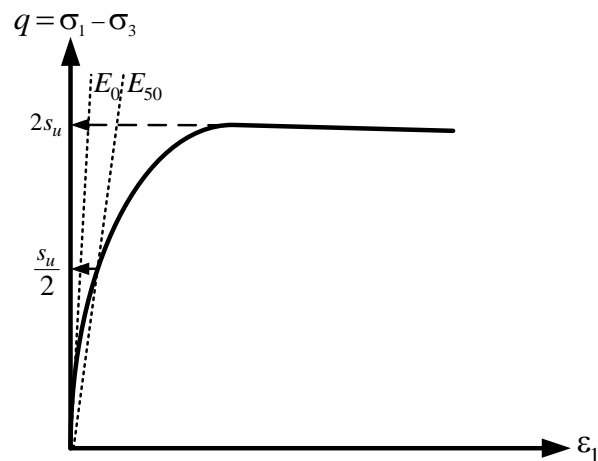
นำตัวอย่างดินคงสภาพที่เก็บได้จากการเจาะเก็บตัวอย่างดินมาทำการเตรียมตัวอย่างให้เป็นทรงกระบอก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ตั้งแต่ 38 มิลลิเมตรหรือ $1 \frac{1}{2}$ นิ้ว ถึง 100 มิลลิเมตร หรือ 4 นิ้ว ควบคุมอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (H/D) เท่ากับ 2 จากนั้นนำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้มาให้แรงดันรอบทิศ (Cell pressure, σ_c) ให้เท่ากับความเค้นประสิทธิผลของดินในสภาพจริงในสนาม (In-situ effective stress, σ'_{v0}) โดยไม่ให้แรงดันน้ำในโพรง (Pore water pressure) สามารถระบายออกได้ นั่นคือดินยังไม่เกิดการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) จากนั้นเพิ่มแรงดันแนวแกน (Axial pressure, σ_1) ด้วยความรวดเร็วเพียงพอที่แรงดันน้ำในโพรง (Pore water pressure) ไม่สามารถระบายออกจากตัวอย่างดินได้ เพิ่มแรงดันแนวแกนจนตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ (Failure) โดยขณะเพิ่มแรงดันในแนวแกนให้แรงดันรอบทิศมีค่าคงที่ ดังภาพที่ 2.17



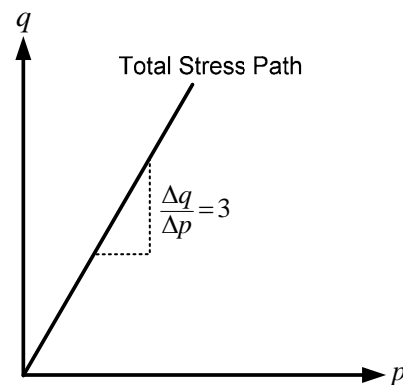
ภาพที่ 2.17 หลักการในการทดสอบ UU

2.2) การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

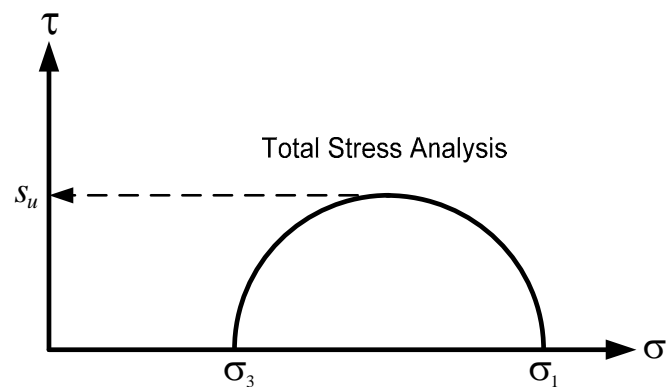
การวิเคราะห์ที่สามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะแบบความเค้นรวม (Total stress analysis) เพราะไม่ได้มีการวัดแรงดันน้ำในโพรงตลอดการทดสอบ นำผลทดสอบมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ ได้แก่ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแนวแกน ($\sigma_a - \epsilon_a$) ดังภาพที่ 2.18 วิธีความเค้นรวม ($p - q$) ดังภาพที่ 2.19 และวงกลมมอร์รี่ของความเค้นรวม ($\tau - \sigma_n$) ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.18 กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดแนวแกนในการทดสอบ UU



ภาพที่ 2.19 วิธีความเค้นในการทดสอบ UU



ภาพที่ 2.20 วงกลมมอร์รี่ของความเค้นรวมในการทดสอบ UU

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแนวแกนจะได้ว่า $s_u = \frac{q_{max}}{2}$ รวมทั้งยังสามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (E_u) จากโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น (E_0) และโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนดที่ครึ่งของกำลังคราก (E_u^{50}) เหมือนในการวิเคราะห์การทดสอบ UC

3) การทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ

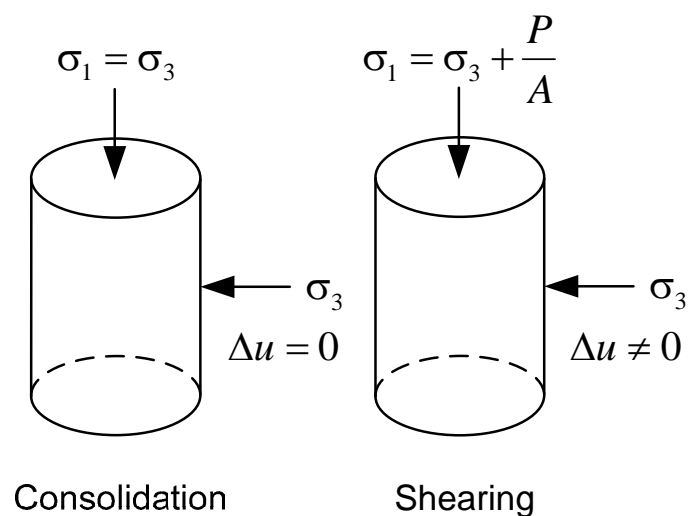
(Consolidated isotropically undrained compression triaxial, CIUC)

(ASTM: D4767-04)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว อิมิตัวด้วยน้ำ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (E_u) รวมทั้งยังสามารถหาค่า ϕ'_{cs} และ ϕ'_p ได้

3.1) ขั้นตอนและหลักการ

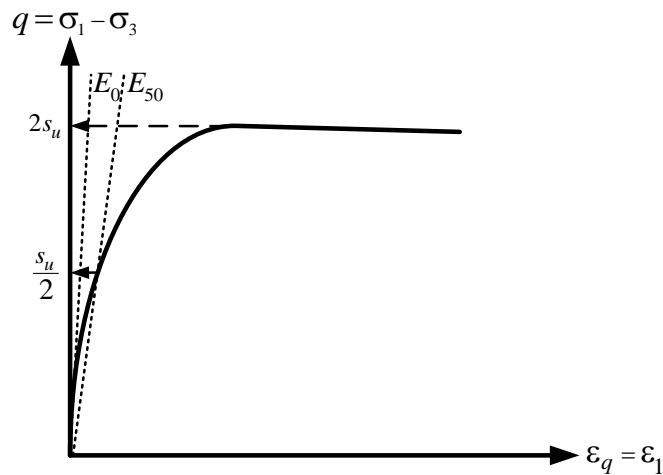
นำตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพที่เก็บได้จากการเจาะเก็บตัวอย่างดินมาทำการเตรียมตัวอย่างให้เป็นทรงกระบอกขนาดเท่ากับการทดสอบ UU จากนั้นนำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้มาทำการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ด้วยการให้แรงดันรอบทิศ (Cell pressure, σ_c) เท่ากับความเค้นประสิทธิผลของดิน (σ'_{v0}) ในสภาพจริงในสนาม ให้แรงดันทิ้งไว้จนแรงดันน้ำในโพรง (Pore water pressure) ระบายออก ขั้นตอนต่อมาคือ การเพิ่มแรงดันแนวแกน (Axial pressure, σ_1) ด้วยความรวดเร็วเพียงพอที่แรงดันน้ำในโพรง (Pore water pressure) ไม่สามารถระบายออกจากตัวอย่างดินได้ เพิ่มแรงดันแนวแกนจนตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ (Failure) โดยขณะเพิ่มแรงดันในแนวแกนให้แรงดันรอบทิศมีค่าคงที่ ดังภาพที่ 2.21



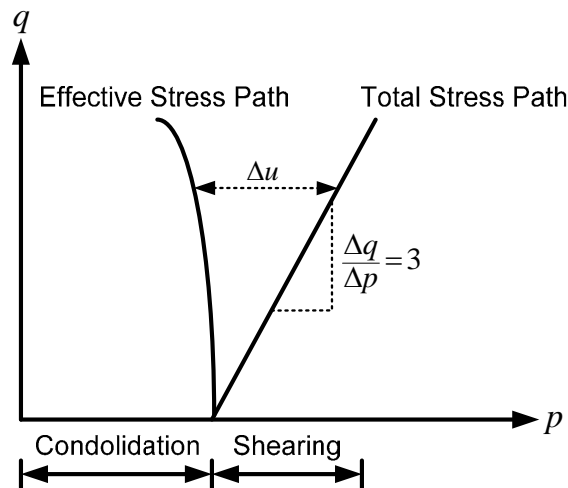
ภาพที่ 2.21 หลักการในการทดสอบ CIUC

3.2) การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์ที่สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแบบความเค้นรวม (Total stress analysis) และความเค้นประสิทธิผล (Effective stress analysis) นำผลทดสอบมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ ได้แก่ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบน ($q - \epsilon_q$) ดังภาพที่ 2.22 วิธีความเค้นรวม ($p - q$) ดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.22 กราฟระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบน ในการทดสอบ CIUC



ภาพที่ 2.23 วิธีความเค้นรวมในการทดสอบ CIUC

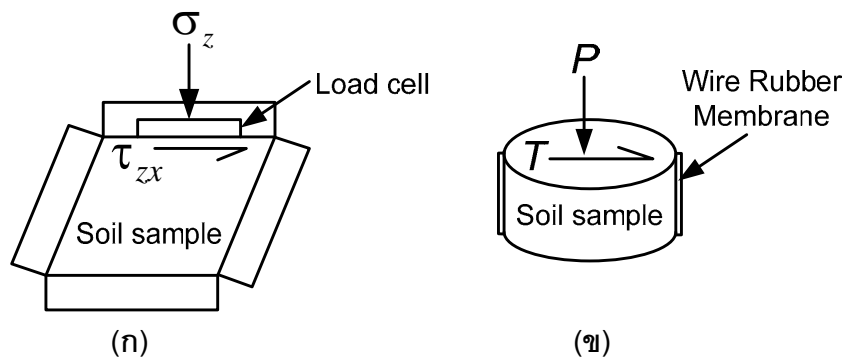
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแนวแกนจะได้ว่า $s_u = \frac{q_{max}}{2}$ รวมทั้งยังสามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (E_u) จากโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น (E_0) และโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนตที่ครึ่งของกำลังคราก (E_u^{50}) เหมือนในการวิเคราะห์การทดสอบ UC

4) การทดสอบการเฉือนโดยตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Test, DSS)

(ASTM: D6528-00)

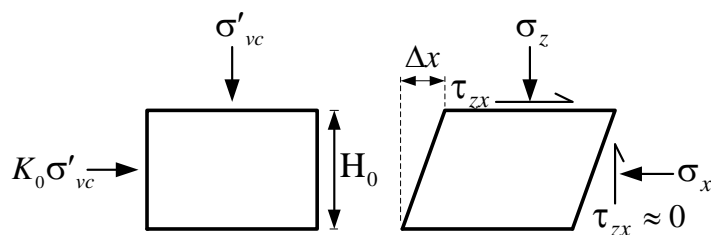
4.1) ขั้นตอนและหลักการ

การทดสอบการเฉือนโดยตรงอย่างง่ายเป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ เป็นการทดสอบที่ระนาบวิบัติใกล้เคียงกับสภาพวิบัติจริง เครื่องมือทดสอบการเฉือนโดยตรงอย่างง่ายที่ใช้กันโดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบคือ แบบที่หนึ่งเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมกลวงทำจากแผ่นโลหะ ดังภาพที่ 2.24(ก) แบบที่สองเป็นรูปทรงกระบอกถูกหุ้มด้วยยางชนิดพิเศษเสริมลวด ดังภาพที่ 2.24(ข)



ภาพที่ 2.24 ชนิดของเครื่องมือทดสอบ DSS

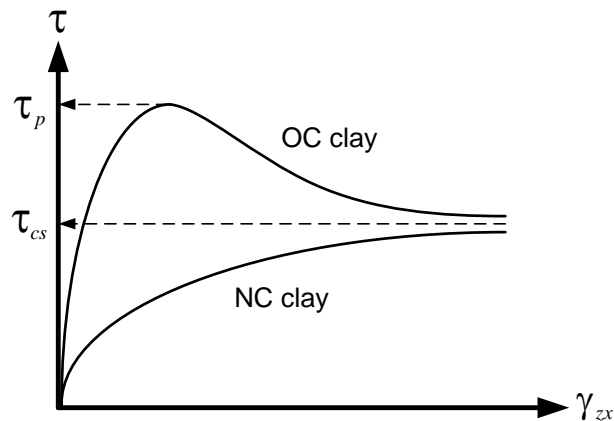
ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นด้วยการเตรียมตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร และมีความสูง 16 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้วางบนเครื่องทดสอบ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่ ขั้นตอนอัดตัวคายน้ำ (Consolidation stage) คือการจำลองสถานะความเค้นในเงื่อนไขปราศจากการเคลื่อนตัวในแนวราบ (K_0 -consolidation) ให้ความเค้นประสิทธิผลตามสภาพดินที่อยู่ในสนามด้วยการให้แรงในแนวตั้งกับตัวอย่างดิน (Vertical effective consolidation stress, σ'_{vc}) และขั้นตอนการเฉือน (Shearing stage) คือขั้นตอนให้แรงเฉือนในแนวราบกับตัวอย่างดิน (τ_{zx}) โดยเครื่องจะควบคุมให้ปริมาณคงที่ตลอดการเฉือน ควบคุมอัตราความเครียดเฉือนเท่ากับ 5% / hour ให้แรงเฉือนจนตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ (Failure) วัดแรงดันในแนวแกน แรงเฉือน การเคลื่อนตัวในแนวแกนและแนวราบตลอดเวลา โดยเงื่อนไขการทดสอบเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane strain) ดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 หลักการทดสอบ DSS

4.2) การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในการทดสอบจะสมมติว่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณตรงกลางของตัวอย่างดินมีค่าสม่ำเสมอ โดยไม่มีความเครียดในแนวราบ ($\epsilon_x = \epsilon_y = 0$) ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสามารถหาได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนดังภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 กราฟระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของการทดสอบ DSS

ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำคือ ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดจากภาพที่ 2.26 ดังสมการที่ 2.24

$$S_{u,DSS} = \tau_{zx,max} \quad (2.24)$$

4.3) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการทดสอบ

การทดสอบการเฉือนโดยตรงอย่างง่าย ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นอาจไม่สม่ำเสมอ

2.7 การเก็บตัวอย่างดิน (Soil Sampling)

2.7.1 ตัวอย่างดิน (Soil Sample)

โดยทั่วไปแล้วตัวอย่างดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1) ตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed Sample)

ตัวอย่างดินที่ถูกเก็บขึ้นมาแล้วมีสภาพเหมือนสภาพที่อยู่ภายในธรรมชาติ นั่นคือ ความเค้นในดิน ความหนาแน่นของดิน และโครงสร้างของดิน แต่ในความเป็นจริงแล้วในขั้นตอนของการเก็บตัวอย่างดินนั้นไม่สามารถที่จะเก็บตัวอย่างดินได้โดยที่ไม่รบกวนดินเลย (Imperfect) จึงเป็นที่เข้าใจกันว่าตัวอย่างดินคงสภาพนั้นหมายถึงดินที่มีคุณภาพระดับสูง มีสภาพใกล้เคียงสภาพธรรมชาติ (Salgado, 2008) การเลือกใช้กระบอกลูกที่นำมาเก็บตัวอย่างดินนั้นต้องมีการเลือกใช้ให้เหมาะสม กระบอกลูกต้องมีความบางที่มีขนาด 1.6 ถึง 3.2 มิลลิเมตร เพราะการใช้กระบอกลูกที่หนา

จะทำให้เกิดการเฉือนขึ้นในดิน โดยการเก็บตัวอย่างต้องใช้การดันกระบอกลงไปช้าๆ ห้ามใช้การตอกโดยเด็ดขาด ตามมาตรฐาน ASTM: D1587-94 กระบอกที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างคงสภาพที่ใช้กันทั่วไป คือ กระบอกเปลือกบาง (Shelby Tube sampler) ดังภาพที่ 2.27 และกระบอกแบบลูกสูบ (Piston sampler) ดังภาพที่ 2.28 ตัวอย่างคงสภาพจะถูกนำไปใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการได้ทุกชนิด ซึ่งโดยทั่วไปคือ การหาค่ากำลังของดิน



ภาพที่ 2.27 กระบอกเปลือกบาง (Salgado, 2008)



ภาพที่ 2.28 กระบอกแบบลูกสูบ (Salgado, 2008)

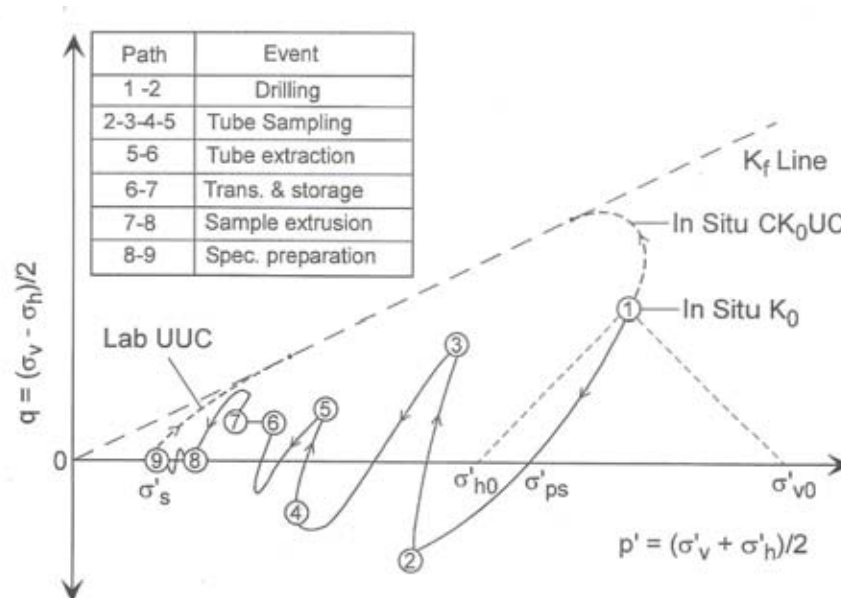
2) ตัวอย่างเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample)

ตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนทำให้สภาพของดินไม่เหมือนกับสภาพที่อยู่ภายในธรรมชาติ เกิดจากในการตอกกระบอกลงไปเพื่อเก็บตัวอย่างดิน เช่น การทดสอบกระบอทะลวงมาตรฐานด้วยกระบอผ่า (SPT Split-Spoon Sampler) ดังภาพที่ 2.29 หรือการตอกกระบอเปลือกบาง (Shelby Tube Sampler) เป็นต้น รวมทั้งการรบกวนดินยังเกิดขึ้นในขั้นตอนของการเก็บตัวอย่างดิน ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.29 กระบอกทะลวงมาตรฐาน
(Archway Engineering Ltd., 2011: online)

ตัวอย่างเปลี่ยนสภาพถูกนำไปใช้ในการทดลองหลายอย่างในห้องปฏิบัติการเช่น การหาความชื้นในมวลดิน (Water content) การหาความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity) การทดลองจำแนกดิน (Classification tests) เป็นต้น



ภาพที่ 2.30 การเปลี่ยนแปลงวิถีความเค้นในการเก็บตัวอย่างดิน (Ladd et al., 1987)

2.7.2 การเจาะเก็บตัวอย่างดิน (Soil Boring)

ในการเจาะเก็บตัวอย่างดินนั้นมีหลายวิธี โดยแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดการใช้งานที่ต่างกันไป การเลือกใช้งานจึงต้องมีการเลือกให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ตัวอย่างตามที่ต้องการ โดยวิธีการเก็บตัวอย่างดินที่มีความนิยมในปัจจุบัน ได้แก่ การเจาะโดยใช้สว่านมือ (Hand auger) การเจาะโดยใช้การฉีดล้าง (Wash boring) และเครื่องเจาะแบบหมุนวนโดยใช้สว่านยาวต่อเนื่องเจาะนำ (Rotary drilling with continuous flight augers) เป็นต้น โดยการเจาะโดยใช้การฉีดล้างใช้กันเป็นส่วนใหญ่ในทวีปอเมริกาใต้ รวมทั้งบางส่วนในทวีปเอเชียและทวีปแอฟริกา เครื่องเจาะแบบหมุนวนโดยใช้สว่านยาวต่อเนื่องเจาะนำนั้นนิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่ในประเทศอเมริกา ส่วนการเจาะโดยใช้สว่านมือนิยมให้กันในงานที่มีขนาดเล็กเท่านั้น (Salgado, 2008) ในประเทศไทยนั้นการเก็บตัวอย่างดินที่ใช้มาก ได้แก่ การเจาะโดยใช้สว่านมือ (Hand auger) และการเจาะโดยใช้การฉีดล้าง (Wash boring) ซึ่งทั้งสองวิธีจะมีความแตกต่างกันคร่าวๆ ดังตารางที่ 2.3

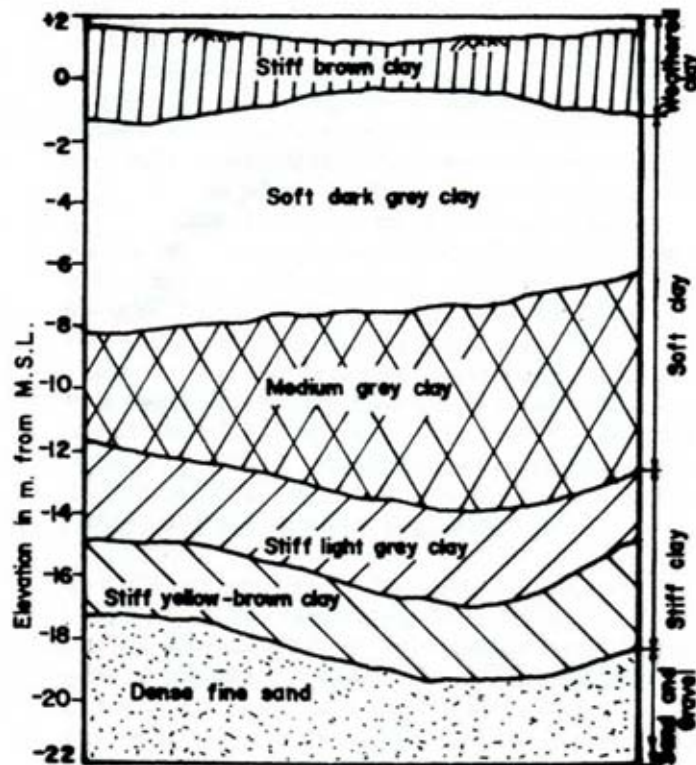
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบการเก็บตัวอย่างดินระหว่าง Hand Auger และ Wash Boring

	แรงงาน	ตัวอย่างดิน	ความลึก
Hand Auger	มนุษย์	รบกวน	10 m
Wash Boring	เครื่องจักร + มนุษย์	ไม่ถูกรบกวน	80 m

2.8 ลักษณะเฉพาะของดินเหนียวกรุงเทพ

(Characteristic of Bangkok Clay)

จากงานวิจัยและการศึกษาในอดีตในหลายพื้นที่ ทำให้ทราบว่าดินเหนียวกรุงเทพมีลักษณะ และคุณสมบัติทั่วไปที่ใกล้เคียงกัน เช่น การศึกษาชั้นดินบริเวณแม่น้ำเจ้าพระยาของชัย มุกตพันธุ์ (2510) ได้แสดงข้อมูลของชั้นดิน ดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 ข้อมูลชั้นดินเหนียวกรุงเทพ (ชัย มุกตพันธุ์, 2510)

ข้อมูลจากงานวิจัยของสมชาย อัครพงศ์พิสัย (2513) แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพในชั้นดินทับถม (Weathered layer) และชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ดังตารางที่

2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพ (สมชาย อัครพงศ์พิสัย, 2513)

Properties	Typical Range	
	* Weathered Clay	** Soft Clay
Particle Size Distribution		
Sand 2.0 - 0.06 mm (%)	1-2	1-3
Silt 0.06 - 0.002 mm (%)	43 - 47	38-43
Clay < 0.002mm (%)	52-56	54-61
Natural Water Content, w (%)	71-85	77-91
Liquid Limit, LL (%)	81-88	82-94
Plastic Limit, PL (%)	33-36	35-39
Plasticity Index, PI (%)	45-52	45-58
Liquidity Index, LI (%)	0.72-0.96	0.80-1.00
Activity	0.87-0.92	0.77-1.01
Specific Gravity	2.67-2.69	2.66-2.69
Total Unit Weight (t/m ²)	1.56-1.9	1.50-1.52
Sensitivity Field Vane Shear	3-4	3-8
Laboratory Vane Shear	4-8	3-6
Unconfined		
Compression Test	4-12	4'-14
Color	Dark Grey	
Consistency	Soft	

* Depth from 2.50-4.50 m below existing ground surface

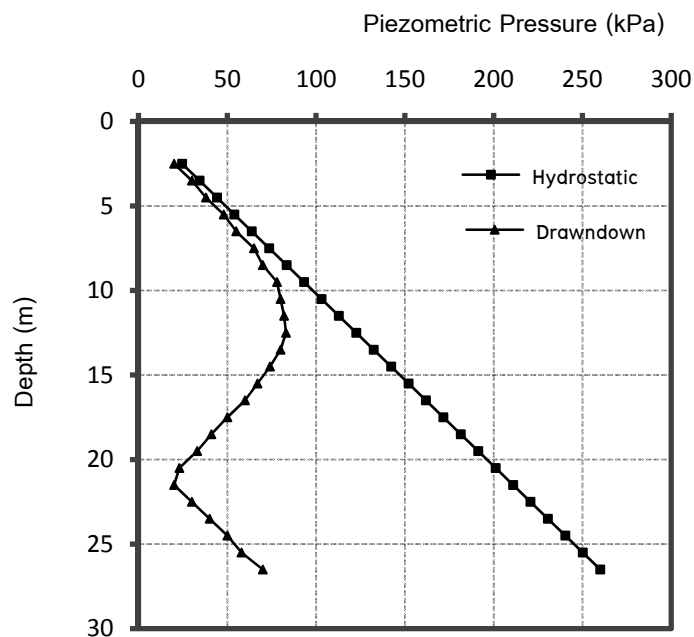
** Depth from 4.50-7.50 m below existing ground surface

และจากงานวิจัยของ คิม (1991) ได้แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตารางคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Kim, 1991)

Natural water content, (%)	81±5
Liquid limit, (%)	98
Plastic limit, (%)	37
Plasticity index,	61
Liquidity index,	0.73
Average unit weight,	14.8
Specific gravity,	2.69
Clay content (%)	70
Silt content (%)	24
Sand content (%)	6

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่แสดงถึงค่าแรงดันน้ำในโพรงดิน (Pore pressure) ของดินกรุงเทพ โดยใช้เครื่องมือไพเอโซมิเตอร์ (Piezometer) วัดค่าแรงดันน้ำในดินจริง เช่นในภาพที่ 2.32 งานวิจัยของ Phienwej & Giao ในปี 2006 ซึ่งแสดงค่าแรงดันน้ำในช่วงต้นที่ระดับความลึก 20m แรงดันน้ำจะลดลงจากค่าตามทฤษฎี (Hydrostatic pore pressure) เนื่องมาจากการสูบน้ำบาดาลมาใช้งานในพื้นที่ ซึ่งค่าที่ได้นี้จะมีผลต่อค่าความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง (σ'_{v0})



ภาพที่ 2.32 แรงดันน้ำในโพรงวัดโดยเครื่องมือไพเอโซมิเตอร์
(วาดใหม่จาก Phienwej and Giao, 2006)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

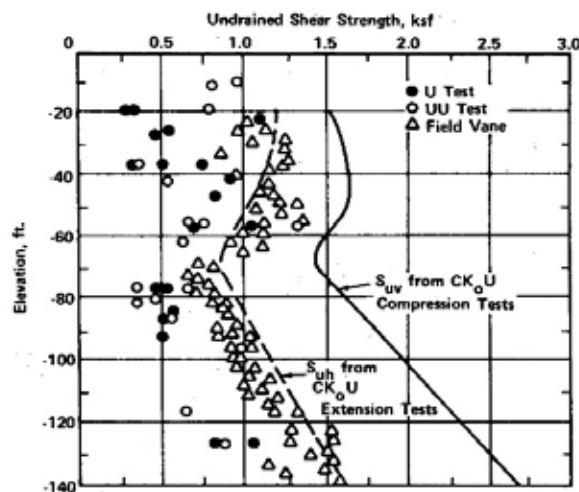
ในอดีตมีงานวิจัยที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับการศึกษาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวมากมายทั้งในประเทศไทยและในต่างประเทศ โดยในแต่ละงานวิจัยมีการเลือกใช้การทดสอบในการศึกษาที่แตกต่างกัน ตัวอย่างการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในต่างประเทศเช่น

- 1) การทดสอบดินเหนียวบอสตันที่ถูกรวบรวมโดย โรธและคณะ(1985) ได้ผลค่า s_u กับระดับความลึก ดังภาพที่ 2.33 จะเห็นว่าเห็นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบหลายวิธีนั้นมีค่าแปรปรวนอยู่ ซึ่งงานวิจัยมีข้อสรุปดังนี้

$$s_{u,FV} \approx 0.70 s_{u,CK_0UC}$$

$$s_{u,FV} \approx 1.50 s_{u,UU}$$

$$s_{u,FV} \approx 1.50 s_{u,UC}$$



ภาพที่ 2.33 ค่า s_u ของดินเหนียวบอสตัน (Boston blue clay) กับระดับความลึก จากผลทดสอบหลายวิธี (Wroth et al., 1985)

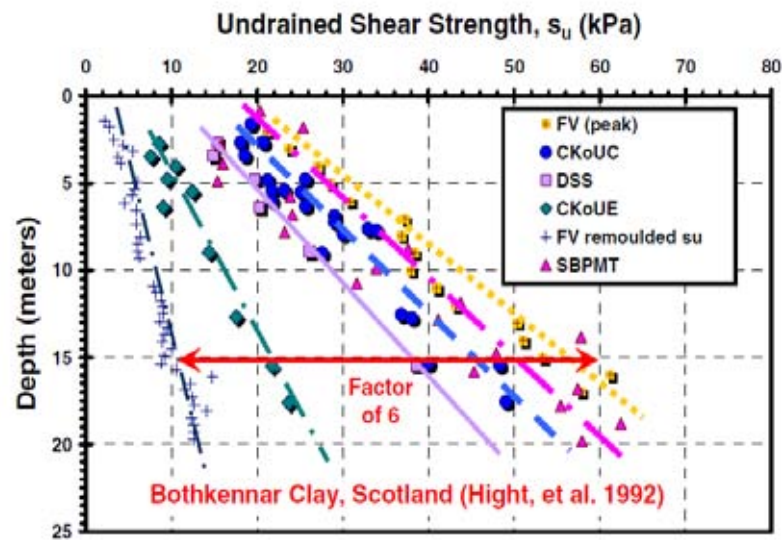
- 2) การทดสอบดินเหนียวโบธเคนนาร์ที่ถูกรวบรวมโดย เมย์เนและคณะ(2009) ได้ผลค่า s_u กับระดับความลึก ดังภาพที่ 2.34 จะเห็นว่าเห็นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบหลายวิธีนั้นมีค่าแปรปรวนอยู่มากซึ่งงานวิจัยมีข้อสรุปดังนี้

$$s_{u,FV} \approx 1.20 s_{u,CK_0UC}$$

$$s_{u,FV} \approx 1.50 s_{u,DSS}$$

$$s_{u,FV} \approx 2.60 s_{u,CK_0UE}$$

$$s_{u,FV} \approx 5.50 s_{u,FV-rem}$$



ภาพที่ 2.34 ค่า s_u ของดินเหนียวโบธเคนนาร์ (Bothkennar Clay) กับระดับความลึก จากผลทดสอบหลายวิธี (Mayne et al., 2009)

นอกจากนั้นในปี 2009 Mayne ได้รวบรวมจากข้อมูลของ Ladd & Lambe (1963) และ Ladd et al. (1980) ได้สรุปความสัมพันธ์ของค่า s_u และ σ'_{v0} แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของค่า s_u และ σ'_{v0} ของการทดสอบแบบต่างๆ (Mayne, 2009)

Test Method	$(s_u / \sigma'_{v0})_{NC}$
Plane strain compression (PSC)	0.34
Triaxial compression (CK_0UC)	0.33
Iso-consolidated triaxial compression (CIUC)	0.32
Iso-consolidated triaxial extension (CIUE)	0.24
Direct simple shear (DSS)	0.2
Plane strain extension (PSE)	0.19
Unconsolidated Undrained (UU)	0.185
Triaxial extension (CK_0UE)	0.16
Unconfined compression (UC)	0.14

- 3) ในปี 2526 วีรพันธ์ได้ศึกษาดินเหนียวกรุงเทพแล้วนำเสนอความสัมพันธ์ของค่า s_u จากการทดสอบ UC ว่ามีความสัมพันธ์กับค่า N_{60} ซึ่งแบ่งความสัมพันธ์เป็นดินเหนียวประเภทที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity, CH) และดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity, CL) ใ้ดังสมการที่ 2.24 และ 2.25 ตามลำดับ

$$s_u = 5.10N \text{ (kN/m}^2\text{) for CL} \quad (2.24)$$

$$s_u = 6.72N \text{ (kN/m}^2\text{) for CH} \quad (2.25)$$

นอกจากตัวอย่างงานวิจัยในต่างประเทศแล้ว ตัวอย่างงานวิจัยที่แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของดินกรุงเทพฯ

ผู้แต่ง / ปี	ชื่องานวิจัย / ชื่อสิ่งพิมพ์	สถานที่เก็บตัวอย่างดิน	ความลึก	ผลสรุปจากงานวิจัย
Muktabhant, et al (1967)	General Engineering Properties of Bangkok sub-soils	-	0 m - 15 m	$s_{u, FV(cor)} \approx (1.01 - 1.2)s_{u, UC}$
Somchai (1970)	Comparison of Strengths Measured by Vane Shear, Unconfined Compression and Triaxial Shear Tests in Bangkok Clay	AIT site	2.1 m - 7.5 m	$s_{u, UU} = 1.09s_{u, UC}$ $s_{u, FV(cor)} = 1.32s_{u, UC}$ $s_{u, DST-CU} \approx s_{u, FV}$
Somchai (1973)	Undrained Direct Shear Strength Characteristics of Bangkok Clay at Rangsit	AIT site	1.75 m - 8.50 m	$s_{u, DST-CU} \approx s_{u, FV}$ $s_{u, DST-CU} > s_{u, CIUC}$
Peng Soon (1975)	Undrained Shear Strength Characteristics of Rangsit Clay	AIT site	0 m - 20 m	$s_{u, UU} = 1.11s_{u, UC}$ $s_{u, UU} = 0.70s_{u, CAK_0U}$ $s_{u, FV(cor)} = 1.5s_{u, UC}$ $s_{u, FV(cor)} = 0.72s_{u, CAK_0U}$
Ching-Nan (1976)	Undrained Shear Strength Characteristics of Patumwan Clay	Patumwan site	2 m - 11 m	$s_{u, UU} = 1.11s_{u, FV(cor)}$ $s_{u, FV(cor)} \approx 1.01s_{u, UC}$

ตารางที่ 2.7(ต่อ) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของดินกรุงเทพฯ

ผู้แต่ง / ปี	ชื่องานวิจัย / ชื่อสิ่งพิมพ์	สถานที่เก็บตัวอย่าง	ความลึก	ผลสรุปจากงานวิจัย
ธีรพล (2526)	การให้ความหมายและความเหมาะสมของวิธีการวัดแรงเฉือนในสนามแบบอันเดรนสำหรับใช้กับดินอ่อนในกรุงเทพฯ	Memorial Bridge site & Teves site	2.00 m - 12.50 m	$s_{u,FV(cor)} = 0.90 s_{u,DST-CU}$ $s_{u,FV(cor)} = 0.85 s_{u,DST-UU}$ $s_{u,FV(cor)} = 0.90 s_{u,CAK_0U}$ $s_{u,FV(cor)} = 1.6 s_{u,UC}$
Ahamad (1997)	Undrained Shear Strength Characteristics of Soft Bangkok Clay by Recompression Triaxial Tests	Bangkok Chonburi Highway	1.00 m - 23.95 m	$s_{u,CK_0UC} = 1.40 s_{u,UC}$ $s_{u,CK_0UC} = 1.12 s_{u,FV}$

$s_{u,UU}$ = s_u from Unconsolidated Undrained Test

$s_{u,UC}$ = s_u from Unconfined Compression Test

$s_{u,FV(cor)}$ = s_u from Corrected Field Vane Test

$s_{u,FV}$ = s_u from Field Vane Test

$s_{u,DST-CU}$ = s_u from Consolidated Direct Shear Test

$s_{u,DST-UU}$ = s_u from Unconsolidated Direct Shear Test

s_{u,CK_0UC} = s_u from K_0 -Consolidated Undrained Compression Test

s_{u,CAK_0U} = s_u from Anisotropically K_0 -Consolidated Undrained Test

$s_{u,CAUC}$ = s_u from Anisotropically Consolidated Undrained Compression Test

$s_{u,CIUC}$ = s_u from Isotropically Consolidated Undrained Compression Test

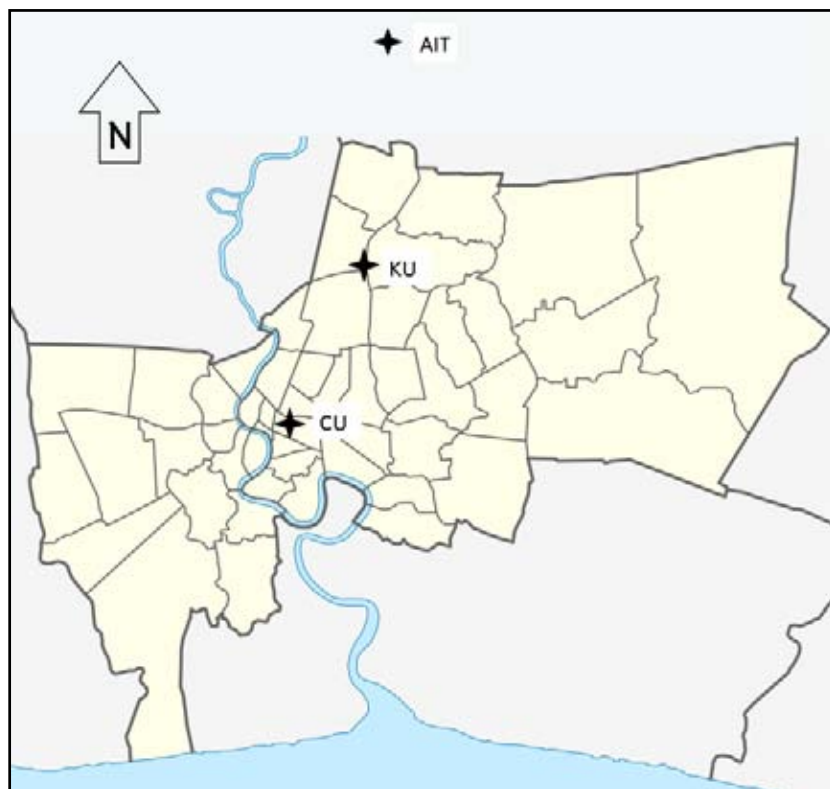
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สถานที่ในการทดสอบ (Soil investigation sites)

ในงานวิจัยนี้เลือกพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 3 พื้นที่ ได้แก่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Chulalongkorn University, CU) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University, KU) และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology, AIT) พิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานที่ทดสอบ วันที่ทดสอบและสภาพอากาศของวันที่ทดสอบแสดงอยู่ดังตารางที่ 3.1 โดยเลือกพื้นที่ที่มีข้อมูลของดินที่มีผู้ศึกษามาในอดีต และพื้นที่ที่มีความครอบคลุมกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ดังภาพที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานที่ทดสอบ

สถานที่	พิกัดภูมิศาสตร์	วันที่ทดสอบ	สภาพอากาศ
CU	13°44'16" N 100°31'51.7" E	5 พ.ค. 2553	มีแดด ท้องฟ้าแจ่มใส
KU	13°50'50.9" N 100°34'01.7" E	22 ก.พ. 2554	มีแดด ท้องฟ้าแจ่มใส
AIT	14°04'58.4" N 100°36'44.4" E	2 ก.ย. 2554	มีแดด ท้องฟ้ามีเมฆ



ภาพที่ 3.1 สถานที่ในการทดสอบ (<http://en.wikipedia.org/>, 2011: online)

3.2 การเจาะเก็บตัวอย่างดิน (Soil sampling)

การเจาะเก็บตัวอย่างดินเป็นการเก็บตัวอย่างดินเหนียวแบบคงสภาพ ตามมาตรฐาน ASTM: D1587-94 โดยการจ้างบริษัท JLP Engineering Services จำกัด เข้าเจาะเก็บตัวอย่างในพื้นที่ที่กำหนด การเจาะเก็บตัวอย่างดินใช้การเจาะโดยใช้การฉีดล้าง ดังภาพที่ 3.2 ใช้กระบอกล้อเลื่อนบาง ในการเก็บตัวอย่างคงสภาพ กระบอกล้อเลื่อนบางมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 7.2 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 60 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.2 การเจาะเก็บตัวอย่างในงานวิจัย



ภาพที่ 3.3 กระบอกล้อเลื่อนบาง (Shelby Tube)

ในการเก็บตัวอย่างดินจะเริ่มเก็บดินเหนียวตั้งแต่ใต้ระดับชั้นดินทับถม(Weathered layer) จนถึงระดับชั้นทรายชั้นแรก(First sand layer) โดยเก็บตัวอย่างดินทุกทุก 1 เมตร เจาะเก็บ

ตัวอย่างดินทั้งหมดสองหลุมต่อหนึ่งสถานที่ โดยการเก็บตัวอย่างดินในแต่ละหลุมจะได้ตัวอย่างดินประมาณ 1 ถึง 2 ตัวอย่างต่อความลึก 1 เมตร ตัวอย่างดินที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.2 เซนติเมตร ความสูงประมาณ 16 เซนติเมตร ตัวอย่างดินที่ได้นำมาห่อแผ่นฟิล์มถนอมอาหาร (Wrap) ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil) แล้วจึงเคลือบด้วยไข (Wax) ตามลำดับ เพื่อคงสภาพความชื้นในตัวอย่างดินดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพ

3.3 การทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในภาคสนาม (Field test)

การทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในภาคสนามที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 การทดสอบคือ การทดสอบไบริมิตสนาม และการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน โดยการจ้างบริษัท JLP Engineering Services จำกัด ในการดำเนินการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบไบริมิตสนาม (Field vane test, FV)

การทดสอบใช้ไบริมิตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 63 มิลลิเมตร ความสูงเท่ากับ 126 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.5 ซึ่งมีอัตราส่วน H/D เท่ากับ 2 ตามมาตรฐาน ASTM: D2573-01 เครื่องมือทดสอบใช้แรงงานมนุษย์ในการหมุนไบริมิต ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.5 ไบมีดที่ใช้ในการทดสอบไบมีดสนาม



ภาพที่ 3.6 การทดสอบไบมีดสนาม

ทำการทดสอบไบมีดสนามทุกทุก 1 เมตร โดยเริ่มการทดสอบตั้งแต่ได้ระดับชั้นดินที่บถมจนถึงความลึกเริ่มต้นของชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) นั่นก็คือทดสอบเฉพาะชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง (Soft to medium Clay) เพราะไบมีดไม่สามารถใช้งานได้ในชั้นดินเหนียวแข็ง ค่าจากการทดสอบในสนามที่ได้คือ ค่าแรงบิด โดยวัดค่าแรงบิดสูงสุด (T_{max}) และค่าแรงบิดคงตัว (T_{rem}) ซึ่งค่าแรงบิดคงตัวเป็นค่าที่แรงบิดหลังจากการรบกวนดิน (Remolded)

3.3.2 การทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน (Standard penetration test, SPT)

การทดสอบใช้กระบอกผ่า ดังภาพที่ 3.7 และใช้ค้อนแบบโดนนัท ดังภาพที่ 3.8 ในการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน การเจาะดินลงไปถึงระดับที่ต้องการทดสอบใช้การเจาะดินโดยใช้การชีดล่าง จากนั้นจะตอกตุ่มน้ำหนักเพื่อเก็บข้อมูลตามมาตรฐาน ASTM: D1586-99 ทดสอบจนถึงชั้นดินเหนียวแข็งที่ระดับความลึก 30 เมตร จากระดับผิวดิน เก็บข้อมูลทุกทุก 1 เมตรค่าที่ได้จากการทดสอบคือค่า N -value



ภาพที่ 3.7 กระบอกผ่า (Split-spoon)



ภาพที่ 3.8 ค้อนแบบไดนัท

ในการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐานที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขณะทดสอบมี นักศึกษาปริญญาโทบัณฑิตจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์คือ นายธีรชัย เต็งชู มาร่วมทดสอบ หาค่าพลังงานประสิทธิผลในการตอกเก็บข้อมูลของเครื่อง เพื่อนำไปใช้รวบรวมหาพลังงาน ประสิทธิภาพเฉลี่ยของการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐานในประเทศไทย

3.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในห้องปฏิบัติการ (Laboratory test)

นำตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพจากการเจาะเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในห้องปฏิบัติการ เลือกการทดสอบที่มีอยู่ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทั้งหมด 2 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว และการทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ ซึ่งทั้งสองการทดสอบมีการใช้งานอยู่ในประเทศไทย

3.4.1 การทดสอบแรงกดแกนเดียว (Unconfined compression test, UC)

การทดสอบแรงกดแกนเดียวทดสอบตามมาตรฐาน ASTM: D2166-91 ดังภาพที่ 3.9 โดยการนำตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพมาเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 38 มิลลิเมตร ความสูงเท่ากับ 76 มิลลิเมตร อัตราส่วน H/D เท่ากับ 2 การเตรียมตัวอย่างให้แรงดันแนวแกนในอัตราเร็วความเครียด 1% ต่ออนาที หรือเท่ากับ 0.76 มิลลิเมตรต่ออนาที ให้แรงดันจนตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ หรือที่ความเครียดเท่ากับ 20% โดยการอ่านค่าใช้ไดอัลเกจ (Dial gage) ที่มีการปรับเทียบมาตรฐาน (Calibration) ก่อนการทดสอบ โดยใช้ไดอัลเกจทั้งการอ่านค่าแรงดัน และค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง



ภาพที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงกดแกนเดียว

3.4.2 การทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ

(Consolidated isotropically undrained compression triaxial test, CIUC)

การทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำตามมาตรฐาน ASTM: D4767-04 โดยใช้เครื่องทดสอบที่พัฒนาโดย รศ.ดร.จิรวัดร บุญญะสิทธิ์ ดังภาพที่ 3.10 โดยการนำตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพมาเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ความสูงเท่ากับ 100 มิลลิเมตร อัตราส่วน H/D เท่ากับ 2 จากนั้นนำตัวอย่างดินสวมด้วยยาง (Membrane) นำตัวอย่างดินวางบนเครื่องทดสอบ ใช้เครื่องดูดอากาศ (Suction) เพื่อไล่อากาศที่อยู่ในตัวอย่างทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) จากนั้นนำตัวอย่างดินไปทำการอัดตัวคายน้ำด้วยการให้แรงดันรอบทิศ (σ'_c) เท่ากับความเค้นประสิทธิผลของดินในสนาม (σ'_{v0}) โดยจะเท่าผลต่างระหว่างแรงดันโอบรัด (Cell pressure, σ_c) และแรงดันภายในดิน (Back pressure, σ_b) ในการทดสอบทุกตัวอย่างจะใช้ $\sigma_b = 100kPa$ เท่ากันทุกตัวอย่าง ซึ่งในงานวิจัยของสถาบัน

เทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Philip, 1970) ได้บอกว่าการใช้แรงดันภายในดินที่สูงจะไม่มีผลต่อค่า s_u ทำการอัดตัวคายน้ำจนแรงดันน้ำในโพรงเท่ากับศูนย์ ($\Delta u = 0$) หรือทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง โดยการตรวจสอบค่า B (B-check) หลังจากอัดตัวคายน้ำเสร็จแล้ว เชื้อนตัวอย่างดินโดยให้แรงดันแนวแกน ในอัตราเร็วความเครียด 0.025% ต่อนาที หรือเท่ากับ 0.025 มิลลิเมตรต่อนาที ให้แรงดันจนตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ หรือที่ความเครียดเท่ากับ 15% โดยการทดสอบจะมีการวัดแรง แรงดันรอบทิศ วัดแรงดันภายในดิน การไหลเข้าออกของน้ำจากมวลดิน (Flow) และการเคลื่อนตัวแนวตั้งตลอดการทดสอบโดยส่งข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ตลอดการทดสอบ



ภาพที่ 3.10 เครื่องทดสอบ CIUC

3.5 การทดสอบหาสมบัติดัชนี (Index properties)

การทดสอบหาสมบัติดัชนีโดยใช้การทดสอบ Atterberg Limits and Indices ตามมาตรฐาน ASTM: D 4318-9, D 427-93 ทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำในมวลดิน (Moisture content, w) ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) ขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage limit, SL) และดัชนีพลาสติก (Plasticity, PI)

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ผลการทดสอบจากการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในสนามและในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การทดสอบแบบมีดินสนาม การทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน การทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว และการทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำในและไม่ระบายน้ำ

4.1 ผลการทดสอบในงานวิจัย

4.1.1 ผลคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ

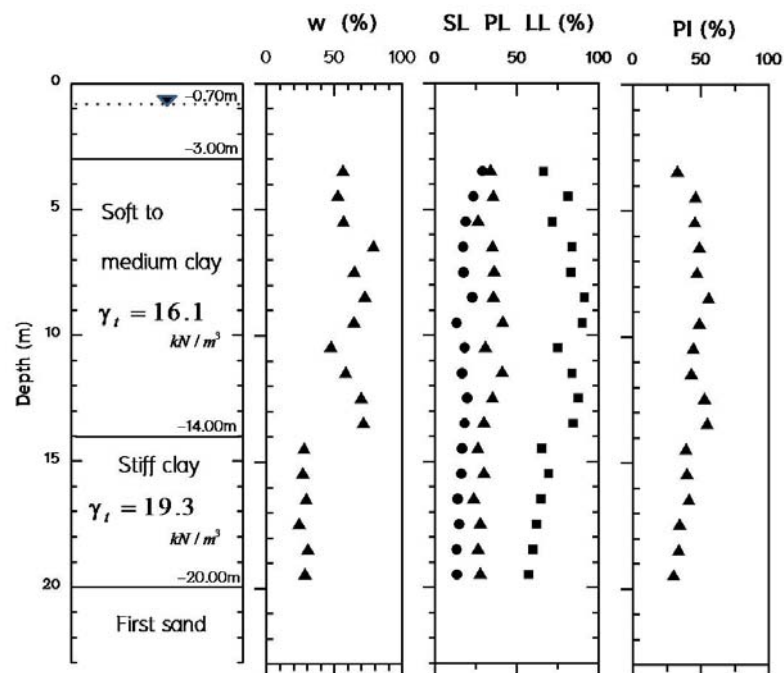
จากการทดสอบ Atterberg Limits and Indices ของ 3 สถานที่ทดสอบ ได้ผลค่า w , LL , PL , SL และ PI นำค่า w ไปวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio, e) และหน่วยน้ำหนักดินรวม (Total unit weight, γ_t) โดยในงานวิจัยนี้ให้ตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพมีสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำนั่นคือ ระดับความชื้นความอิ่มตัว (Degree of saturation, S_r) เท่ากับ 100% และดินเหนียวมีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, G_s) เท่ากับ 2.69 ตามงานวิจัยของคิม (1991) ข้อมูลทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.1

จากข้อมูล LL และ PI เมื่อนำค่าทั้งสองมาใช้จำแนกดินโดยใช้แผนภูมิพลาสติกซิตี (Plasticity chart) ตามระบบการจำแนกดินของสหราชอาณาจักร (ภาคผนวก) ได้ผลว่าตัวอย่างดินทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบคือ ดินเหนียวมีสภาพพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH)

จากข้อมูลข้างต้นจากทั้ง 3 สถานที่ เมื่อนำค่า w , LL , PL , SL และ PI มาจำแนกชั้นดินของในแต่ละสถานที่ที่สามารถแบ่งชั้นดินได้ โดยเขียนกราฟของค่าข้างต้นเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินดังภาพที่ 4.1 ชั้นดินเริ่มต้นคือชั้นดินทับถม (Weathered layer) ซึ่งเกิดจากการทับถมของในอดีต โดยชั้นดินทับถมลึก 1-3 เมตรจากระดับผิวดิน ชั้นดินถัดมาคือชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง (Soft to medium clay) โดยชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางมีความลึกถึงระดับความลึก 9-14 เมตรจากระดับผิวดิน ชั้นดินถัดมาคือชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) โดยมีความลึกถึงระดับความลึก 13-20 เมตรจากระดับผิวดิน ส่วนชั้นสุดท้ายที่พบในการทดสอบของงานวิจัยนี้คือ ชั้นทรายชั้นแรก (First sand) เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากทั้ง 3 สถานที่มาเขียนชั้นดินแบบต่อเนื่องแบบหยาบจะได้ภาพชั้นดินดังภาพที่ 4.2

ตารางที่ 4.1(ก) คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว CU

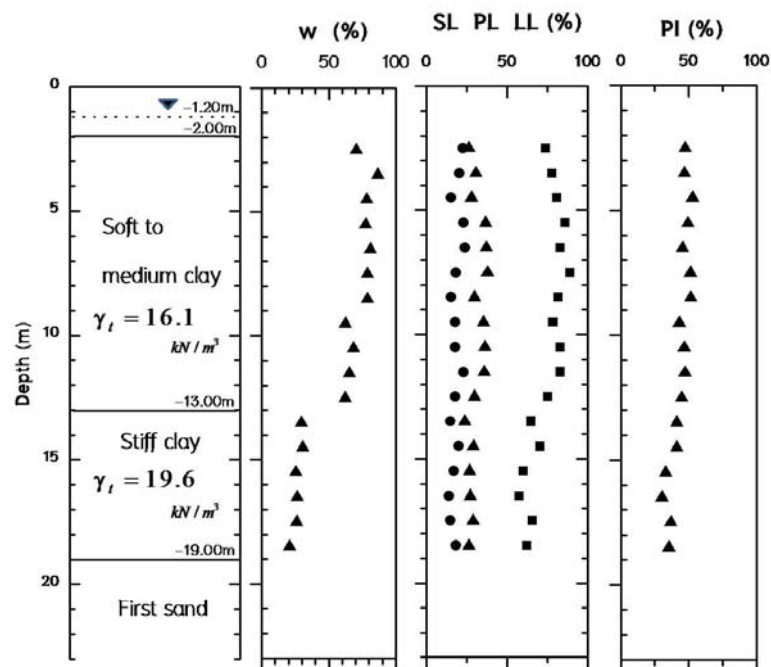
Depth (m)	w (%)	LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI	$e = \frac{wG_s}{S_r}$	$\gamma_t = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{(1+e)}$ (kN/m ³)
3.50	56.4	66.3	33.7	29.2	32.6	1.52	16.4
4.50	52.8	81.5	35.4	23.5	46.1	1.42	16.7
5.50	56.6	71.8	26.3	18.9	45.6	1.53	16.4
6.50	78.8	83.9	35.0	17.3	48.9	2.13	15.1
7.50	64.7	83.2	36.1	17.4	47.0	1.75	15.9
8.50	72.7	91.3	35.6	22.9	55.7	1.96	15.4
9.50	64.4	90.1	41.2	13.3	48.9	1.74	15.9
10.50	47.4	75.1	30.9	18.1	44.3	1.28	17.1
11.50	58.4	83.9	41.1	16.7	42.8	1.58	16.3
12.50	69.9	87.8	35.1	19.8	52.7	1.89	15.6
13.50	71.4	84.4	30.0	18.1	54.4	1.93	15.5
14.50	27.5	65.1	26.2	16.6	38.9	0.74	19.4
15.50	26.8	69.7	30.0	16.0	39.7	0.72	19.5
16.50	29.3	65.0	23.7	13.8	41.3	0.79	19.1
17.50	24.3	62.1	27.7	14.9	34.4	0.65	19.9
18.50	30.5	60.0	26.3	13.2	33.7	0.82	19.0
19.50	28.6	57.4	27.6	13.4	29.8	0.77	19.2



ภาพที่ 4.1(ก) ภาพแสดงชั้นดินและข้อมูลพื้นฐานของดินเหนียว CU

ตารางที่ 4.1(ข) คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว KU

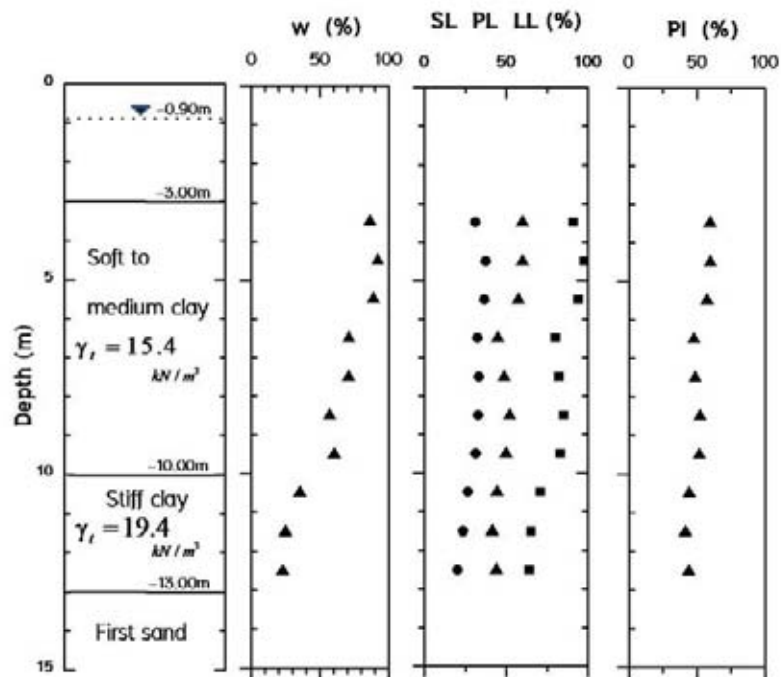
Depth (m)	w (%)	LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)	$e = \frac{wG_s}{S_r}$	$\gamma_t = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{(1+e)}$ (kN/m ³)
2.50	33.4	74.0	26.6	22.4	47.4	0.90	18.7
3.50	43.7	77.7	30.8	20.5	46.9	1.18	17.5
4.50	59.9	80.6	27.9	15.2	52.7	1.62	16.2
5.50	54.7	86.2	36.8	23.1	49.4	1.47	16.6
6.50	81.2	82.9	37.3	24.1	45.6	2.19	15.0
7.50	79.0	89.1	37.8	18.2	51.2	2.13	15.1
8.50	79.0	81.5	29.8	15.3	51.7	2.13	15.1
9.50	62.4	78.5	35.4	18.2	43.1	1.68	16.0
10.50	68.6	83.2	36.4	18.1	46.8	1.85	15.7
11.50	65.3	83.1	35.9	23.1	47.2	1.76	15.8
12.50	62.1	75.0	30.1	18.0	44.9	1.68	16.0
13.50	29.6	65.0	23.9	15.2	41.1	0.80	19.1
14.50	30.6	70.4	29.3	20.2	41.2	0.83	18.9
15.50	25.4	60.0	26.8	17.1	33.2	0.69	19.7
16.50	26.4	57.7	27.4	14.1	30.2	0.71	19.5
17.50	26.2	65.7	29.0	15.0	36.7	0.71	19.6
18.50	20.8	62.1	26.6	18.6	35.5	0.56	20.5



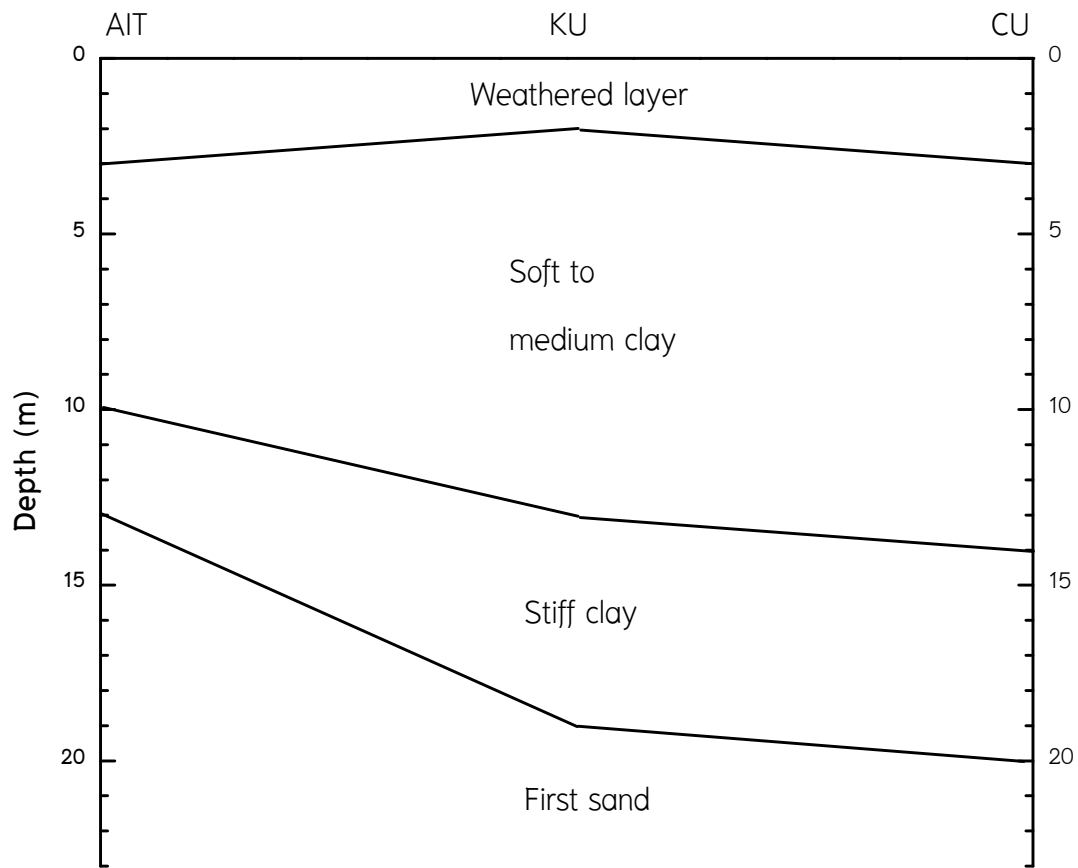
ภาพที่ 4.1(ข) ภาพแสดงชั้นดินและข้อมูลพื้นฐานของดินเหนียว KU

ตารางที่ 4.1(ค) คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว AIT

Depth (m)	w (%)	LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)	$e = \frac{wG_s}{S_r}$	$\gamma_t = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{(1+e)}$ (kN/m ³)
3.50	86.7	90.9	31.2	59.7	59.7	2.34	14.8
4.50	92.3	97.3	37.6	59.7	59.7	2.49	14.6
5.50	89.0	94.1	36.6	57.4	57.4	2.40	14.7
6.50	71.2	80.1	32.3	44.7	47.7	1.92	15.5
7.50	71.0	82.2	33.4	48.7	48.7	1.92	15.5
8.50	57.2	85.1	32.9	52.2	52.2	1.55	16.4
9.50	60.4	83.1	31.4	49.7	51.7	1.63	16.1
10.50	35.5	70.8	26.5	44.3	44.3	0.96	18.3
11.50	24.9	65.1	23.7	41.4	41.4	0.67	19.8
12.50	23.1	64.1	20.3	43.8	43.8	0.62	20.1



ภาพที่ 4.1(ค) ภาพแสดงชั้นดินและข้อมูลพื้นฐานของดินเหนียว AIT



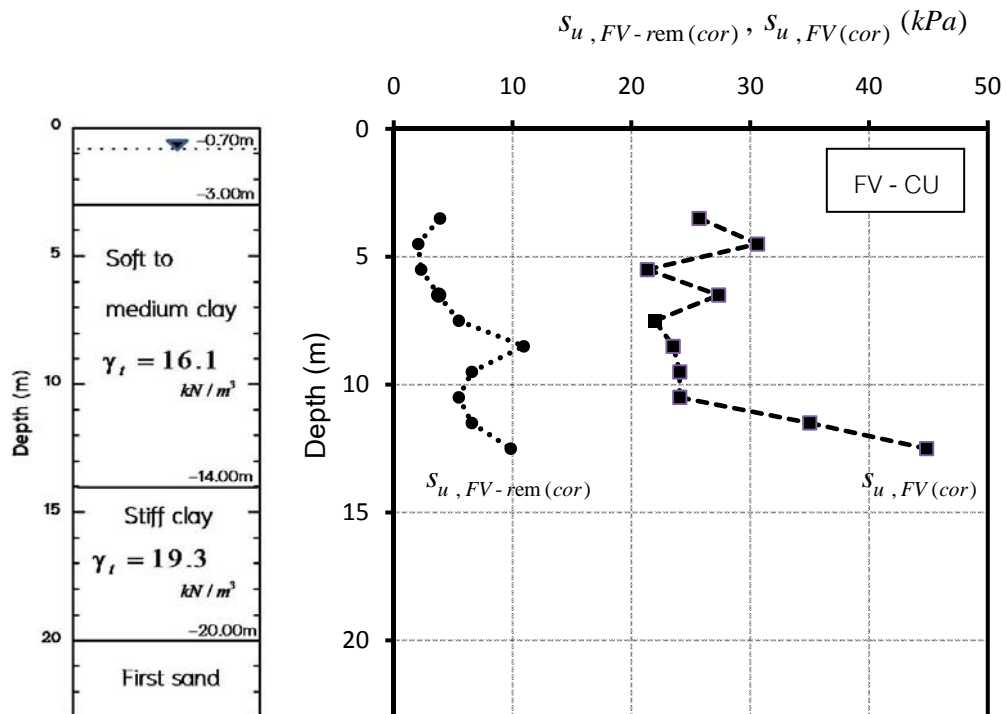
ภาพที่ 4.2 ภาพชั้นดินกรุงเทพแบบหยาบเรียงตามตำแหน่งของสถานที่ทดสอบ

4.1.2 ผลการทดสอบไบนีตสนาม (FV)

จากการทดสอบไบนีตสนาม นำค่าแรงบิดสูงสุด (T_{max}) มาคำนวณหาค่า $s_{u,FV}$ และแรงบิดคงตัว (T_{rem}) นำมาคำนวณหาค่า $s_{u,FV-rem}$ ตามสมการที่ 2.10 จากนั้นนำค่าทั้งสองข้างต้นมาปรับค่าตามสมการที่ 2.11 ด้วยค่า μ_{FVT} ซึ่งค่า μ_{FVT} นั้นขึ้นอยู่กับค่า PI ใช้ค่าเฉลี่ย PI ของชั้นดินนั้นๆ (PI_{avg}) ได้ผลค่า $s_{u,FV(cor)}$ และ $s_{u,FV-rem(cor)}$ ซึ่งค่าทั้งสองนี้เป็นค่าที่ใช้วิเคราะห์เพื่อหาความแปรปรวนของค่า s_u ต่อไป ผลการทดสอบไบนีตสนามจาก 3 สถานที่แสดงในตารางที่ 4.2 และนำค่า $s_{u,FV(cor)}$ และ $s_{u,FV-rem(cor)}$ ไปเขียนกราฟเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินได้ดังภาพที่ 4.3

ตารางที่ 4.2(ก) ข้อมูลการทดสอบ FV ของดินเหนียว CU

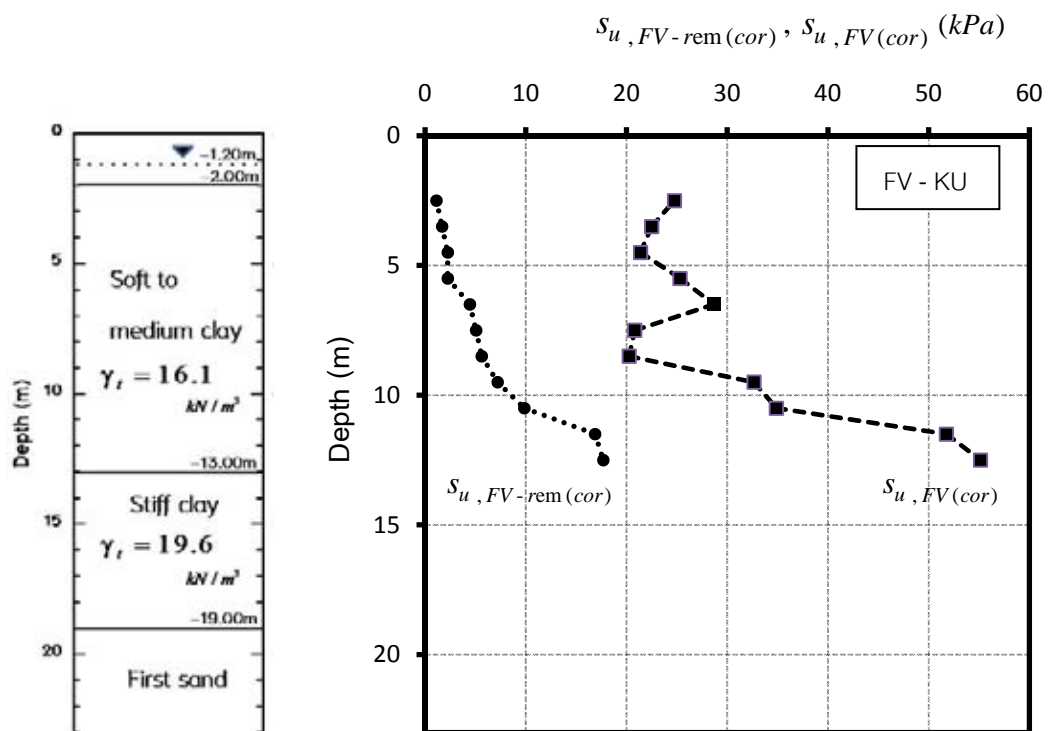
CU						
Depth (m)	$S_{u, FV}$ (kPa)	$S_{u, FV-rem}$ (kPa)	μ_{FVT}	$S_{u, FV(cor)}$ (kPa)	$S_{u, FV-rem(cor)}$ (kPa)	S_t
3.50	32.4	4.9	0.79	25.7	3.9	6.6
4.50	38.6	2.6	0.79	30.6	2.0	15.0
5.50	26.9	2.9	0.79	21.3	2.3	9.3
6.50	34.5	4.8	0.79	27.3	3.8	7.2
7.50	27.7	6.9	0.79	22.0	5.5	4.0
8.50	29.6	13.8	0.79	23.5	10.9	2.2
9.50	30.3	8.3	0.79	24.1	6.6	3.7
10.50	30.3	6.9	0.79	24.1	5.5	4.4
11.50	44.1	8.3	0.79	35.0	6.6	5.3
12.50	56.5	12.4	0.79	44.8	9.8	4.6



ภาพที่ 4.3(ก) กราฟของค่า $S_{u, FV(cor)}, S_{u, FV-rem(cor)}$ กับระดับความลึกของดินเหนียว CU

ตารางที่ 4.2(ข) ข้อมูลการทดสอบ FV ของดินเหนียว KU

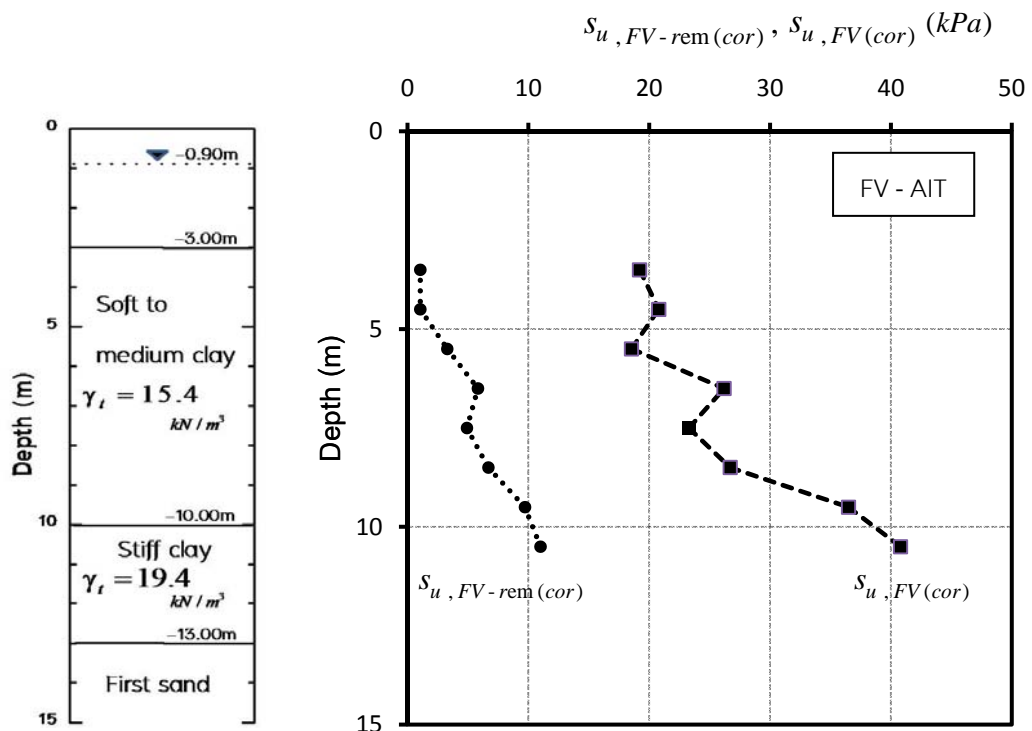
KU						
Depth (m)	$S_{u, FV}$ (kPa)	$S_{u, FV-rem}$ (kPa)	μ_{FVT}	$S_{u, FV(cor)}$ (kPa)	$S_{u, FV-rem(cor)}$ (kPa)	S_t
2.50	30.3	1.4	0.82	24.8	1.1	22.0
3.50	27.6	2.1	0.82	22.5	1.7	13.3
4.50	26.2	2.8	0.82	21.4	2.3	9.5
5.50	31.0	2.8	0.82	25.3	2.3	11.3
6.50	35.1	5.4	0.82	28.7	4.4	6.5
7.50	25.5	6.2	0.82	20.8	5.1	4.1
8.50	24.8	6.9	0.82	20.3	5.6	3.6
9.50	40.0	8.8	0.82	32.6	7.2	4.5
10.50	42.7	12.1	0.82	34.9	9.9	3.5
11.50	63.4	20.7	0.82	51.8	16.9	3.1
12.50	67.5	21.7	0.82	55.1	17.7	3.1



ภาพที่ 4.3(ข) กราฟของค่า $S_{u, FV-rem(cor)}, S_{u, FV(cor)}$ กับระดับความลึกของดินเหนียว KU

ตารางที่ 4.2(ค) ข้อมูลการทดสอบ FV ของดินเหนียว AIT

AIT						
Depth (m)	$S_{u, FV}$ (kPa)	$S_{u, FV-rem}$ (kPa)	μ_{FVT}	$S_{u, FV(cor)}$ (kPa)	$S_{u, FV-rem(cor)}$ (kPa)	S_t
3.50	25.4	1.4	0.76	19.2	1.1	18.1
4.50	27.5	1.4	0.76	20.8	1.1	19.6
5.50	24.5	4.4	0.76	18.5	3.3	5.6
6.50	34.7	7.7	0.76	26.2	5.8	4.5
7.50	30.8	6.5	0.76	23.3	4.9	4.7
8.50	35.3	8.9	0.76	26.7	6.7	4.0
9.50	48.3	12.9	0.76	36.5	9.7	3.8
10.50	54.0	14.6	0.76	40.8	11.0	3.7



ภาพที่ 4.3(ค) กราฟของค่า $S_{u, FV-rem(cor)}, S_{u, FV(cor)}$ กับระดับความลึกของดินเหนียว AIT

4.1.3 ผลการทดสอบทะลวงมาตรฐาน (SPT)

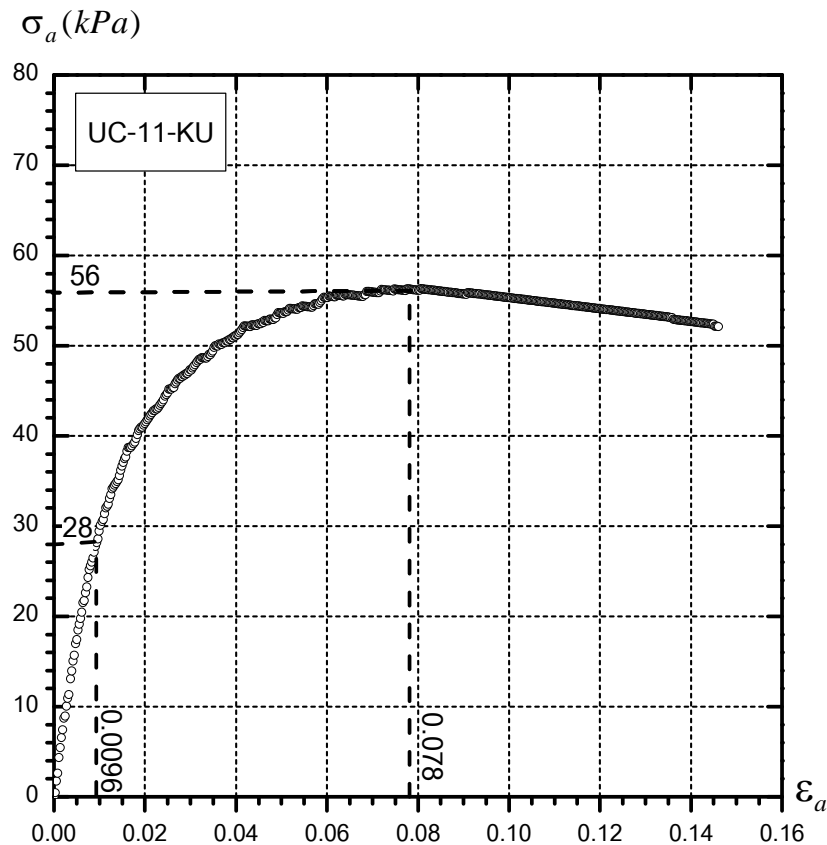
จากการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐานในสนามจาก 3 สถานที่ นำผลค่า N -value ตั้งแต่ระดับความลึกใต้ชั้นดินที่บดจนถึงที่ระดับความลึกชั้นทรายชั้นแรกมาใช้ นำค่า N -value ที่ได้มาปรับแก้ค่าให้เป็นค่าพลังงาน 60% หรือ N_{60} ตามสมการที่ 2.15 โดยใช้ค่าพลังงานเฉลี่ยของค้อนแบบโดนต์ในประเทศไทยซึ่งมีค่าประมาณ 49% (อิรัชย์ เต็งชู, 2553) ในการทดสอบนำกระบอกผ่าในการตอกข้อมูลแต่ละครั้งมาแยกออกจากกันเพื่อดูชนิดและสีของดิน ทำให้สามารถระบุชนิดของดินในแต่ละระดับความลึกได้ ผลการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐานแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการทดสอบ SPT จากสามสถานที่ (CU, KU, AIT)

Location		CU		KU		AIT	
		N -value	N_{60}	N -value	N_{60}	N -value	N_{60}
From	To	(blows)	(blows)	(blows)	(blows)	(blows)	(blows)
2.00	2.45	-	-	2	1.63	-	-
3.00	3.45	2	1.63	2	1.63	2	1.63
4.00	4.45	3	2.45	1	0.82	3	2.45
5.00	5.45	1	0.82	2	1.63	4	3.27
6.00	6.45	3	2.45	4	3.27	3	2.45
7.00	7.45	3	2.45	4	3.27	4	3.27
8.00	8.45	2	1.63	6	4.90	4	3.27
9.00	9.45	2	1.63	6	4.90	2	1.63
10.00	10.45	4	3.27	9	7.35	23	18.78
11.00	11.45	3	2.45	3	2.45	28	22.87
12.00	12.45	5	4.08	4	3.27	39	31.85
13.00	13.45	9	7.35	12	9.80	33	26.95
14.00	14.45	11	8.98	19	15.52	65	53.08
15.00	15.45	19	15.52	21	17.15	21	17.15
16.00	16.45	17	13.88	24	19.60	60	49
17.00	17.45	20	16.33	23	18.78	30	24.50
18.00	18.45	18	14.70	29	23.68	80	65.33
19.00	19.45	21	17.15	52	42.47	65	53.08

4.1.4 ผลการทดสอบแรงกดแกนเดียว (UC)

นำตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้ผลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวแกน (σ_a) และความเครียดในแนวแกน (ϵ_a) ข้อมูลการทดสอบทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข ตัวอย่างกราฟระหว่าง σ_a และ ϵ_a ของตัวอย่างดินเหนียว UC-11-KU แสดงในภาพที่ 4.4

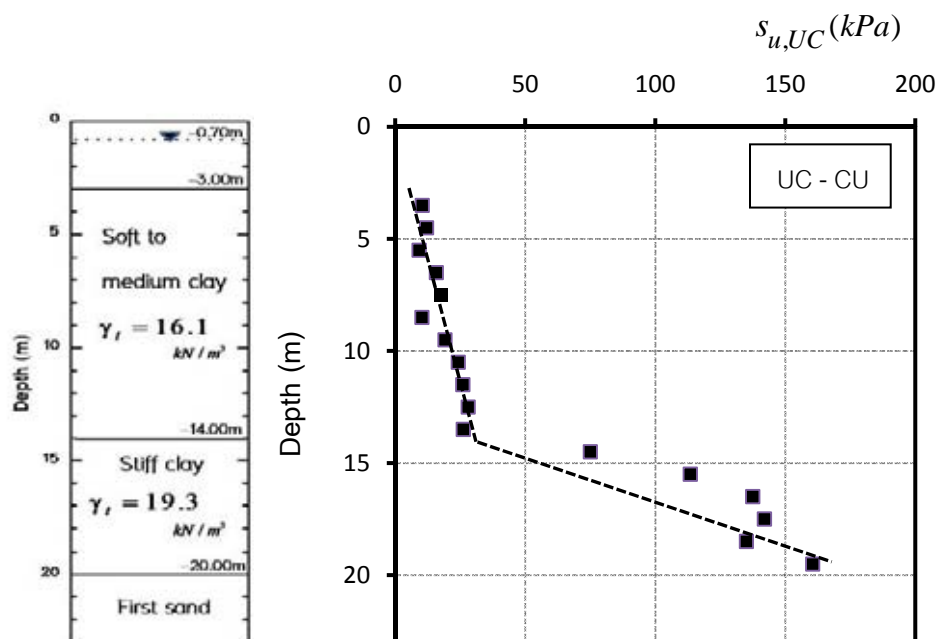


ภาพที่ 4.4 กราฟระหว่าง σ_a และ ϵ_a ของตัวอย่างดินเหนียว UC-11-KU

จากนั้นหาค่า $s_{u,UC}$ ตามสมการที่ 2.22 และค่า $E_{u,UC}^{50}$ ตามสมการที่ 2.23 ผลการทดสอบจาก 3 สถานที่แสดงในตารางที่ 4.4 ประกอบด้วยสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงตัวอย่างทดสอบ ค่าปริมาณน้ำในมวลดินก่อนการทดสอบ (w_p) ค่าร้อยละของความเครียดในแนวแกนที่เกิดการวิบัติของตัวอย่าง ($\epsilon_{a,fail}$) ค่า $s_{u,UC}$ และค่า $E_{u,UC}^{50}$ จากนั้นนำค่า $s_{u,UC}$ มาเขียนกราฟกับค่าระดับความลึกได้กราฟดังภาพที่ 4.5

ตารางที่ 4.4(ก) ผลการทดสอบ UC ของดินเหนียว CU

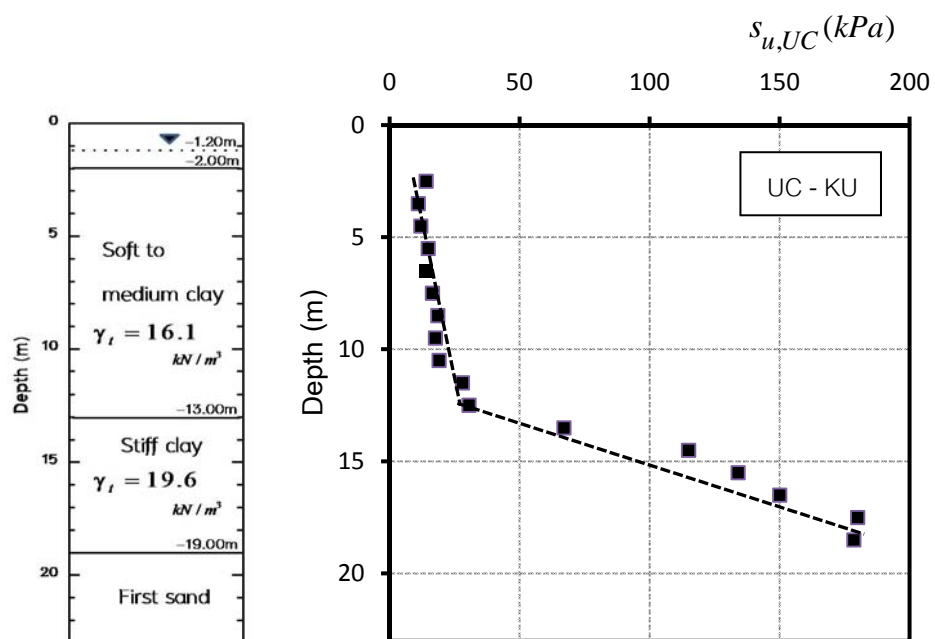
Symbol	Depth (m)	w_i (%)	$\epsilon_{a, fail}$ (%)	$s_{u, UC}$ (kPa)	$E_{u, UC}^{50}$ (kPa)
UC-3-CU	3.50	56.40	5.5	10.30	626
UC-4-CU	4.50	52.77	4.0	12.00	1753
UC-5-CU	5.50	56.64	10.8	9.20	503
UC-6-CU	6.50	78.79	7.6	15.75	619
UC-7-CU	7.50	64.72	7.7	17.50	597
UC-8-CU	8.50	72.68	7.6	10.20	700
UC-9-CU	9.50	64.38	11.6	19.10	766
UC-10-CU	10.50	47.38	6.0	24.20	1185
UC-11-CU	11.50	58.40	7.0	26.50	1624
UC-12-CU	12.50	69.92	5.0	28.00	3095
UC-13-CU	13.50	71.39	1.7	26.20	3269
UC-14-CU	14.50	27.52	3.5	75.00	6486
UC-15-CU	15.50	26.79	4.0	114.50	8953
UC-16-CU	16.50	29.27	6.4	137.00	13411
UC-17-CU	17.50	24.25	4.8	142.00	15456
UC-18-CU	18.50	30.50	4.2	135.00	10596
UC-19-CU	19.50	28.57	6.9	160.50	16043



ภาพที่ 4.5(ก) กราฟของค่า $s_{u, UC}$ กับระดับความลึกของดินเหนียว CU

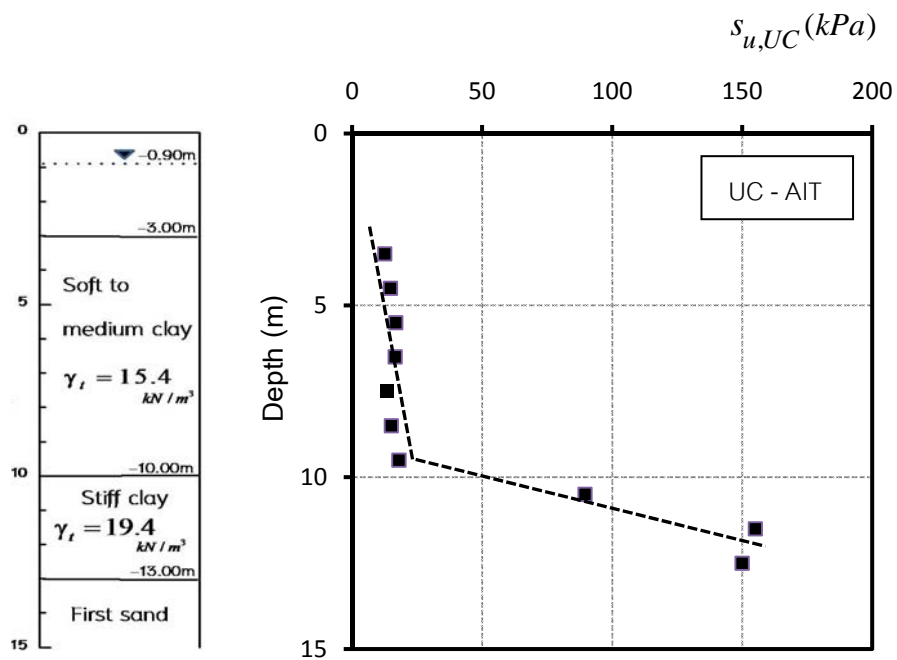
ตารางที่ 4.4(ข) ผลการทดสอบ UC ของดินเหนียว KU

Symbol	Depth (m)	w_i (%)	$\epsilon_{a, fail}$ (%)	$s_{u, UC}$ (kPa)	E_u^{50} (kPa)
UC-2-KU	2.50	33.48	4.3	14.00	2335
UC-3-KU	3.50	43.73	7.7	11.00	2186
UC-4-KU	4.50	59.89	10.7	12.50	826
UC-5-KU	5.50	54.47	12.3	14.90	807
UC-6-KU	6.50	81.22	3.7	13.90	1180
UC-7-KU	7.50	78.99	2.4	16.50	2209
UC-8-KU	8.50	79.03	5.7	18.50	1572
UC-9-KU	9.50	62.39	4.7	17.60	1292
UC-10-KU	10.50	68.59	8.8	18.90	920
UC-11-KU	11.50	65.29	7.8	28.00	2970
UC-12-KU	12.50	62.14	6.6	30.50	3027
UC-13-KU	13.50	29.63	8.4	67.00	9043
UC-14-KU	14.50	30.60	6.0	115.00	12804
UC-15-KU	15.50	25.43	6.1	134.00	14927
UC-16-KU	16.50	26.43	5.4	150.00	16318
UC-17-KU	17.50	26.20	5.3	180.00	21284
UC-18-KU	18.50	20.80	4.7	178.50	20493

ภาพที่ 4.5(ข) กราฟของค่า $s_{u, UC}$ กับระดับความลึกของดินเหนียว KU

ตารางที่ 4.4(ค) ผลการทดสอบ UC ของดินเหนียว AIT

Symbol	Depth (m)	w_i (%)	$\epsilon_{a, fail}$ (%)	$s_{u, UC}$ (kPa)	$E_{u, UC}^{50}$ (kPa)
UC-3-AIT	3.50	86.67	3.6	12.50	1272
UC-4-AIT	4.50	92.28	5.5	14.75	877
UC-5-AIT	5.50	89.04	4.8	16.75	1138
UC-6-AIT	6.50	71.21	2.1	16.50	2318
UC-7-AIT	7.50	71.00	10.3	13.00	520
UC-8-AIT	8.50	57.23	10.1	15.00	578
UC-9-AIT	9.50	60.42	13.6	18.00	533
UC-10-AIT	10.50	35.46	4.9	89.50	8346
UC-11-AIT	11.50	24.87	7.2	155.00	12647
UC-12-AIT	12.50	23.12	7.0	150.00	13496



ภาพที่ 4.5(ค) กราฟของค่า $s_{u, UC}$ กับระดับความลึกของดินเหนียว AIT

4.1.5 ผลการทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (CIUC)

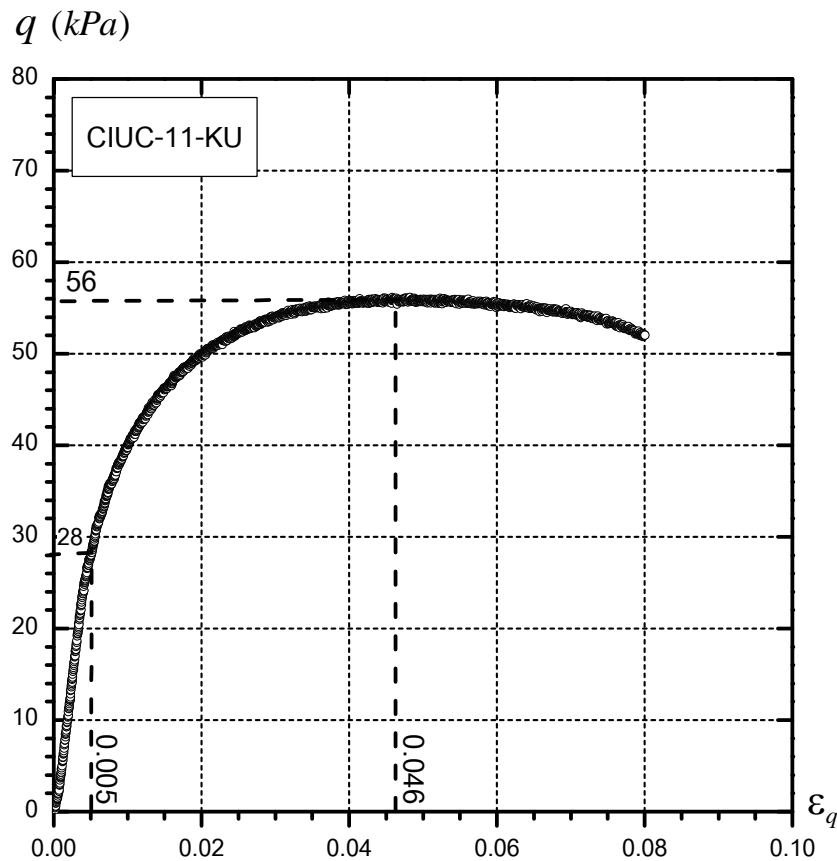
จากตารางที่ 4.1 นำค่าหน่วยน้ำหนักดินรวม และระดับน้ำใต้ดิน (Water table) จากข้อมูลเก่าในอดีต นำไปคำนวณหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของดินในสนามแบบสถิต (σ'_{v0}) เพื่อนำค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของดินในสนามไปใช้ในการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวในการทดสอบ CIUC นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของดินแบบดรอร์ดาวร์ (Drawdown effective stress, σ'_{v0}^*) จากค่าความดันน้ำในโพรงดินในสนามจริง หรือค่าความดันน้ำแบบดรอร์ดาวร์ (Drawdown pore pressure, u^*) จากงานวิจัยของ Phienwej & Giao ในปี 2006 ตามภาพที่ 2.33 ข้อมูลทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความเค้นประสิทธิผลในสนามของตัวอย่างดิน

Depth (m)	σ'_{v0} (kPa)			σ'_{v0}^* (kPa)		
	CU	KU	AIT	CU	KU	AIT
2.50	-	26.35	-	-	17.14	-
3.50	27.68	32.69	27.21	23.18	23.29	20.75
4.50	33.98	39.03	32.78	31.30	31.44	28.13
5.50	40.29	45.37	38.34	37.42	37.59	33.51
6.50	46.60	51.70	43.91	46.53	46.73	41.89
7.50	52.90	58.04	49.48	52.65	52.88	47.27
8.50	59.21	64.38	55.05	63.76	64.03	57.64
9.50	65.51	70.72	60.62	71.88	72.18	65.02
10.50	71.82	77.06	67.39	86.00	86.33	79.61
11.50	78.13	83.39	76.98	100.11	100.48	97.01
12.50	84.43	90.75	86.57	115.23	116.65	115.40
13.50	90.74	100.50	-	134.34	139.20	-
14.50	98.01	110.24	-	157.43	164.75	-
15.50	107.55	119.99	-	183.77	191.31	-
16.50	117.08	129.73	-	210.11	217.86	-
17.50	126.61	139.47	-	239.46	247.42	-
18.50	136.14	149.22	-	267.80	275.97	-
19.50	145.68	-	-	295.14	-	-

นำตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ นำมาอัดตัวคายน้ำด้วยแรงดันโอบรัด (σ'_c) เท่ากับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของดินแบบสถิตจากตารางที่ 4.5 โดยโปรแกรมการทดสอบแสดงแรงดันรอบทิศ (σ_c) และแรงดันภายในดิน (σ_b) ผลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหากราฟ

ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress, q) และความเครียดเบี่ยงเบน (Deviator strain, ε_q) นอกจากนั้นยังนำข้อมูลการทดสอบไปเขียนกราฟของวิถีความเค้น (Stress path) ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress, q) กับความเค้นเฉลี่ยรวม (Total mean stress, p) และความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล (Effective mean stress, p') ข้อมูลการทดสอบทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข ตัวอย่างกราฟระหว่าง σ_a และ ε_a ของตัวอย่างดินเหนียว CIUC-11-KU แสดงในภาพที่ 4.6

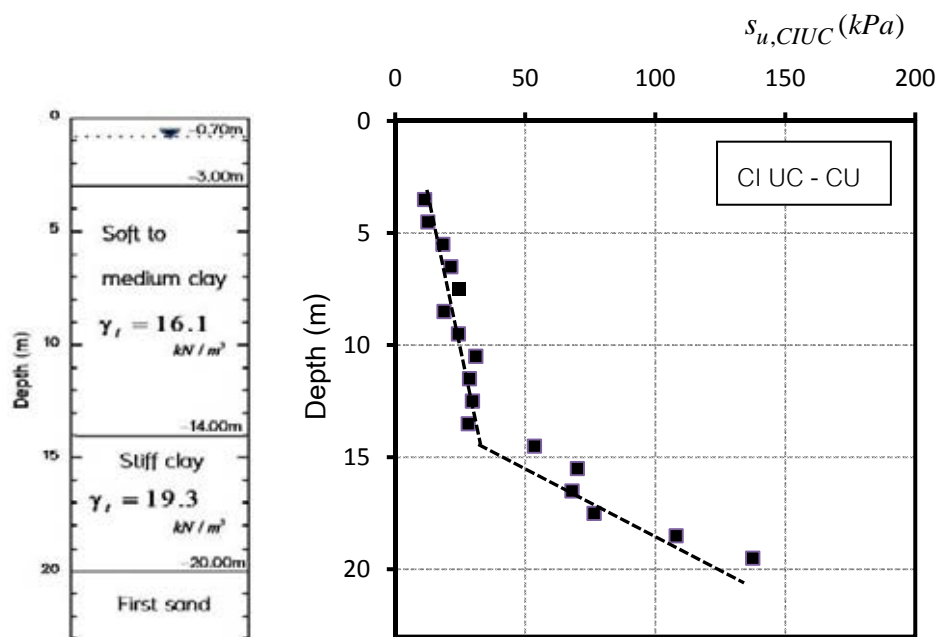


ภาพที่ 4.4 กราฟระหว่าง q และ ε_q ของตัวอย่างดินเหนียว CIUC-11-KU

จากนั้นนำค่าทั้งสองไปหาค่า $s_{u,CUC}$ ตามสมการที่ 2.22 และหาค่า $E_{u,CUC}^{50}$ ได้ตามสมการที่ 2.23 ผลการทดสอบจาก 3 สถานที่แสดงในตารางที่ 4.6 ประกอบด้วยสัญลักษณ์ของตัวอย่างดิน ค่าปริมาณน้ำในมวลดินก่อนการทดสอบ (w_i) แรงดันโอบรัด (σ_c) แรงดันภายในดิน (σ_b) ความเค้นประสิทธิผลสุทธิ (σ'_c) ร้อยละของความเครียดในแนวแกนที่เกิดการวิบัติของตัวอย่าง ($\varepsilon_{a,fail}$) ค่า $s_{u,CUC}$ และค่า $E_{u,CUC}^{50}$ จากนั้นนำค่า $s_{u,CUC}$ มาเขียนกราฟกับค่าระดับความลึกได้กราฟดังภาพที่ 4.7

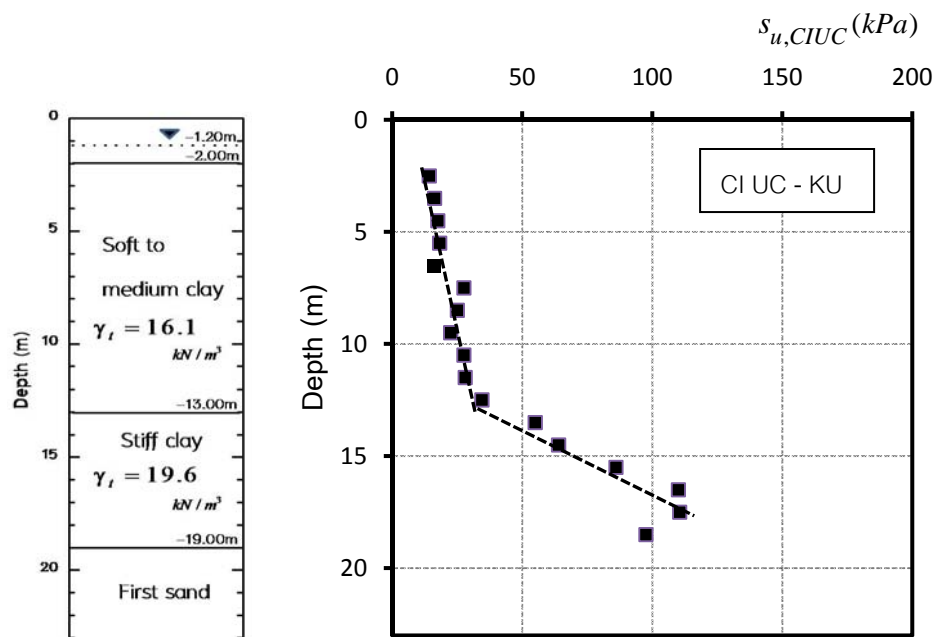
ตารางที่ 4.6(ก) ผลการทดสอบ CIUC ของดินเหนียว CU

Symbol	Depth (m)	w_i (%)	σ_c (kPa)	σ_b (kPa)	σ'_c (kPa)	$\varepsilon_{a, fail}$ (%)	$s_{u, CIUC}$ (kPa)	$E_{u, CIUC}^{50}$ (kPa)
CIUC-3-CU	3.50	53.94	128	100	28	7.4	15.15	2214
CIUC-4-CU	4.50	58.24	134	100	34	4.8	13.20	1853
CIUC-5-CU	5.50	62.35	140	100	40	3.3	18.40	3068
CIUC-6-CU	6.50	69.94	146	100	46	2.9	21.35	4873
CIUC-7-CU	7.50	75.24	153	100	53	6.1	24.40	3150
CIUC-8-CU	8.50	72.68	159	100	59	4.7	18.70	4893
CIUC-9-CU	9.50	63.59	166	100	66	6.0	24.25	3331
CIUC-10-CU	10.50	57.25	172	100	72	7.4	31.00	4835
CIUC-11-CU	11.50	64.24	178	100	78	8.6	28.90	4455
CIUC-12-CU	12.50	67.45	184	100	84	11.0	29.70	3102
CIUC-13-CU	13.50	71.39	191	100	91	5.0	29.00	4334
CIUC-14-CU	14.50	28.00	198	100	98	4.7	53.50	8939
CIUC-15-CU	15.50	27.01	208	100	108	4.9	70.00	13614
CIUC-16-CU	16.50	30.41	217	100	117	4.3	68.00	18035
CIUC-17-CU	17.50	33.29	227	100	127	6.8	75.50	14858
CIUC-18-CU	18.50	30.50	236	100	136	5.4	106.00	15734
CIUC-19-CU	19.50	19.71	246	100	146	8.6	137.50	25281

ภาพที่ 4.7(ก) กราฟของค่า $s_{u, CIUC}$ กับระดับความลึกของดินเหนียว CU

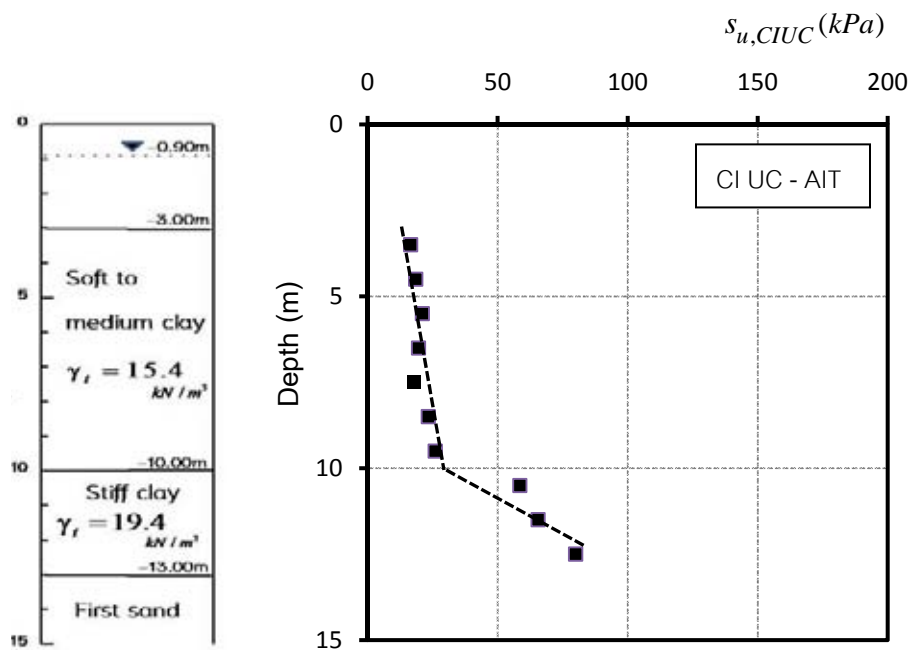
ตารางที่ 4.6(ข) ผลการทดสอบ CIUC ของดินเหนียว KU

Symbol	Depth (m)	w_i (%)	σ_c (kPa)	σ_b (kPa)	σ'_c (kPa)	$\epsilon_{a, fail}$ (%)	$s_{u, CIUC}$ (kPa)	E_u^{50} , CIUC (kPa)
CIUC-2-KU	2.50	70.71	127	100	27	6.7	14.25	2171
CIUC-3-KU	3.50	86.68	133	100	33	10.3	16.10	2240
CIUC-4-KU	4.50	58.13	139	100	39	5.4	17.50	4890
CIUC-5-KU	5.50	77.52	145	100	45	6.6	18.75	2426
CIUC-6-KU	6.50	74.40	151	100	51	6.7	16.00	1892
CIUC-7-KU	7.50	78.77	158	100	58	4.0	27.50	4060
CIUC-8-KU	8.50	63.96	164	100	64	5.5	25.00	4422
CIUC-9-KU	9.50	86.38	170	100	70	8.0	22.50	3016
CIUC-10-KU	10.50	71.73	177	100	77	8.3	27.50	3219
CIUC-11-KU	11.50	67.43	183	100	83	4.6	28.00	5653
CIUC-12-KU	12.50	62.14	191	100	91	6.0	34.50	4346
CIUC-13-KU	13.50	30.09	201	100	101	6.0	55.00	9819
CIUC-14-KU	14.50	28.90	210	100	110	8.9	63.00	10603
CIUC-15-KU	15.50	27.19	220	100	120	6.6	86.00	11358
CIUC-16-KU	16.50	27.21	230	100	130	6.5	110.00	14004
CIUC-17-KU	17.50	25.26	240	100	140	5.2	110.50	17178
CIUC-18-KU	18.50	26.39	249	100	149	12.5	95.00	12396

ภาพที่ 4.7(ข) กราฟของค่า $s_{u, CIUC}$ กับระดับความลึกของดินเหนียว KU

ตารางที่ 4.6(ค) ผลการทดสอบ CIUC ของดินเหนียว AIT

Symbol	Depth (m)	w_i (%)	σ_c (kPa)	σ_b (kPa)	σ'_c (kPa)	$\varepsilon_{a,fail}$ (%)	$s_{u,CIUC}$ (kPa)	$E_{u,CIUC}^{50}$ (kPa)
CIUC-3-AIT	3.50	78.75	127	100	27	4.8	16.50	2192
CIUC-4-AIT	4.50	97.64	133	100	33	5.8	18.50	2374
CIUC-5-AIT	5.50	87.86	138	100	38	3.6	23.00	3012
CIUC-6-AIT	6.50	96.16	144	100	44	4.1	19.50	2923
CIUC-7-AIT	7.50	69.32	150	100	50	5.4	17.75	2534
CIUC-8-AIT	8.50	58.48	155	100	55	3.4	23.25	4219
CIUC-9-AIT	9.50	87.96	160	100	60	4.4	26.00	3484
CIUC-10-AIT	10.50	27.15	167	100	67	5.5	58.50	10936
CIUC-11-AIT	11.50	21.55	177	100	77	8.6	65.00	11457
CIUC-12-AIT	12.50	23.12	187	100	87	9.5	81.00	15307



ภาพที่ 4.7(ค) กราฟของค่า $s_{u,CIUC}$ กับระดับความลึกของดินเหนียว AIT

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.2.1 สรุปข้อมูลจากการรวมข้อมูลดินเหนียวกรุงเทพฯในงานวิจัย

จากข้อมูลการทดสอบจาก 3 สถานที่ที่สามารถแบ่งชั้นดินเหนียวที่นำมาวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ 2 ชั้นดินได้แก่ ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง (Soft to medium clay) และชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) โดยมีตัวอย่างดินที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการทั้งหมด 44 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง 29 ตัวอย่าง และชั้นดินเหนียวแข็ง 15 ตัวอย่าง ข้อมูลการทดสอบสามารถสรุปเป็นข้อมูลทางสถิติโดยการคำนวณหาค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่าสูงสุด (Max) ค่าต่ำสุด (Min) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ได้ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7(ก) สรุปคุณสมบัติพื้นฐานของชั้นดินกรุงเทพฯจาก 3 แหล่ง (CU, KU, AIT)

Layers of soil	No. Sam.	W (%)				LL (%)				PI (%)			
		Max	Min	Mean	S.D.	Max	Min	Mean	S.D.	Max	Min	Mean	S.D.
Soft to medium clay	29	92.3	33.5	65.9	13.6	97.3	71.8	83.5	5.8	59.7	44.3	50.0	4.2
Stiff clay	15	35.5	20.8	27.3	3.6	70.8	57.4	64.0	3.6	54.4	29.8	39.1	4.7

ตารางที่ 4.7(ข) สรุปผลการทดสอบ FV ของชั้นดินกรุงเทพฯจาก 3 แหล่ง (CU, KU, AIT)

Layers of soil	No. Samples	$S_{u, FV(cor)}$ (kPa)				$S_{u, FV-rem(cor)}$ (kPa)				S_t Mean
		Max	Min	Mean	S.D.	Max	Min	Mean	S.D.	
Soft to medium clay	29	55.1	18.5	28.1	9.4	17.7	1.1	5.8	4.3	7.4
Stiff clay	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.7(ค) สรุปผลการทดสอบ SPT ของชั้นดินกรุงเทพฯจาก 3 แหล่ง (CU, KU, AIT)

Layers of soil	No. Samples	N_{60} (blows)			
		Max	Min	Mean	S.D.
Soft to medium clay	29	7.4	0.8	2.9	1.6
Stiff clay	15	31.9	9.0	17.6	5.6

ตารางที่ 4.7(ง) สรุปผลการทดสอบ UC ของชั้นดินกรุงเทพฯจาก 3 แหล่ง (CU, KU, AIT)

Layers of soil	No. Samples	$s_{u,UC}$ (kPa)				$E_{u,UC}^{50}$ (kPa)			
		Max	Min	Mean	S.D.	Max	Min	Mean	S.D.
Soft to medium clay	29	28.0	9.2	16.8	5.4	3269	503	1424	882
Stiff clay	15	180.0	67.0	132.2	34.3	21284	6486	13354	4271

ตารางที่ 4.7(จ) สรุปผลการทดสอบ CIUC ของชั้นดินกรุงเทพฯจาก 3 แหล่ง (CU, KU, AIT)

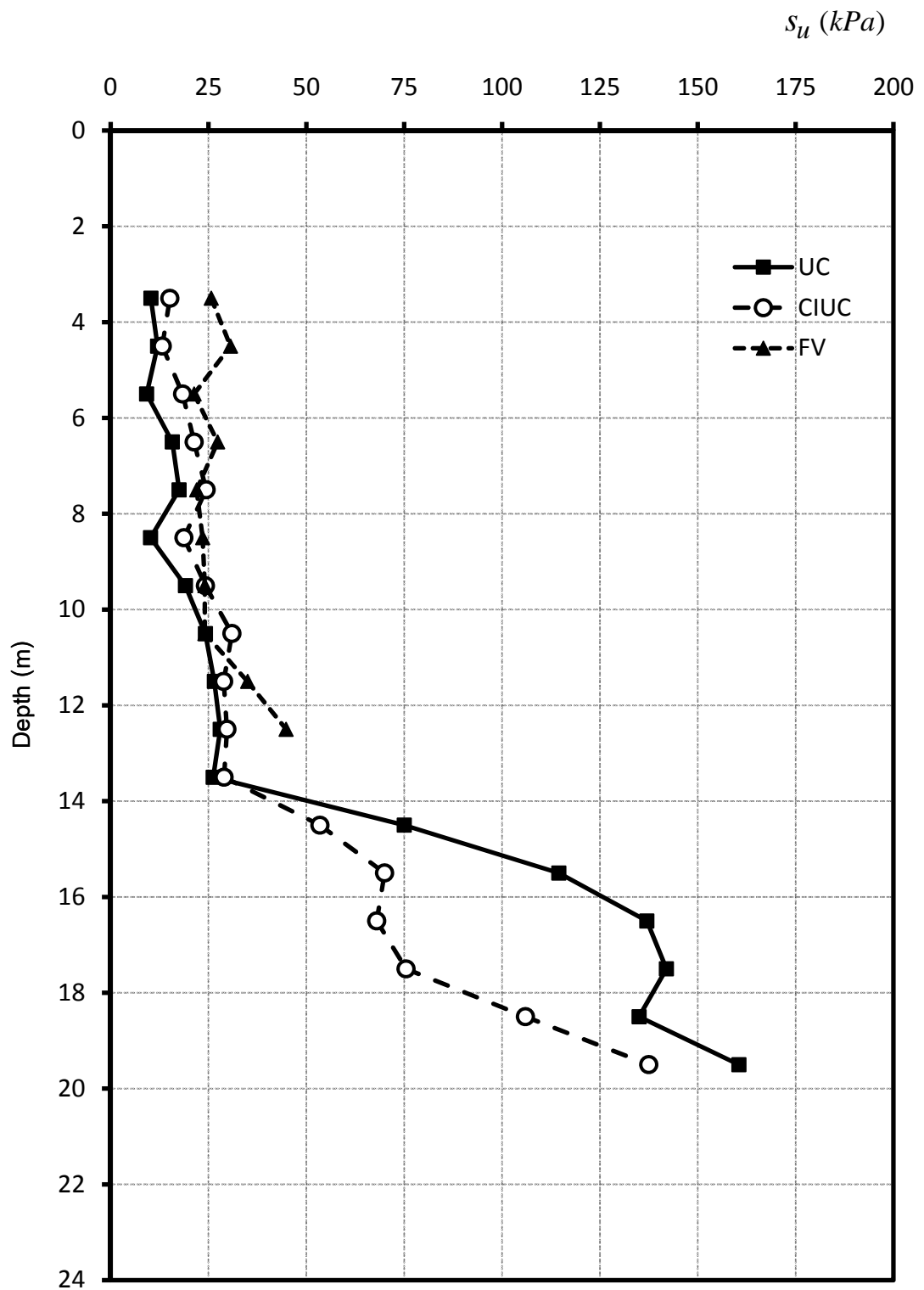
Layers of soil	No. Samples	$s_{u,CIUC}$ (kPa)				$E_{u,CIUC}^{50}$ (kPa)			
		Max	Min	Mean	S.D.	Max	Min	Mean	S.D.
Soft to medium clay	29	34.5	14.3	23.1	5.6	5653	1853	3420	1081
Stiff clay	15	137.5	53.5	82.3	24.7	25281	8939	13968	4134

4.2.2 ความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในการทดสอบแต่ละวิธี

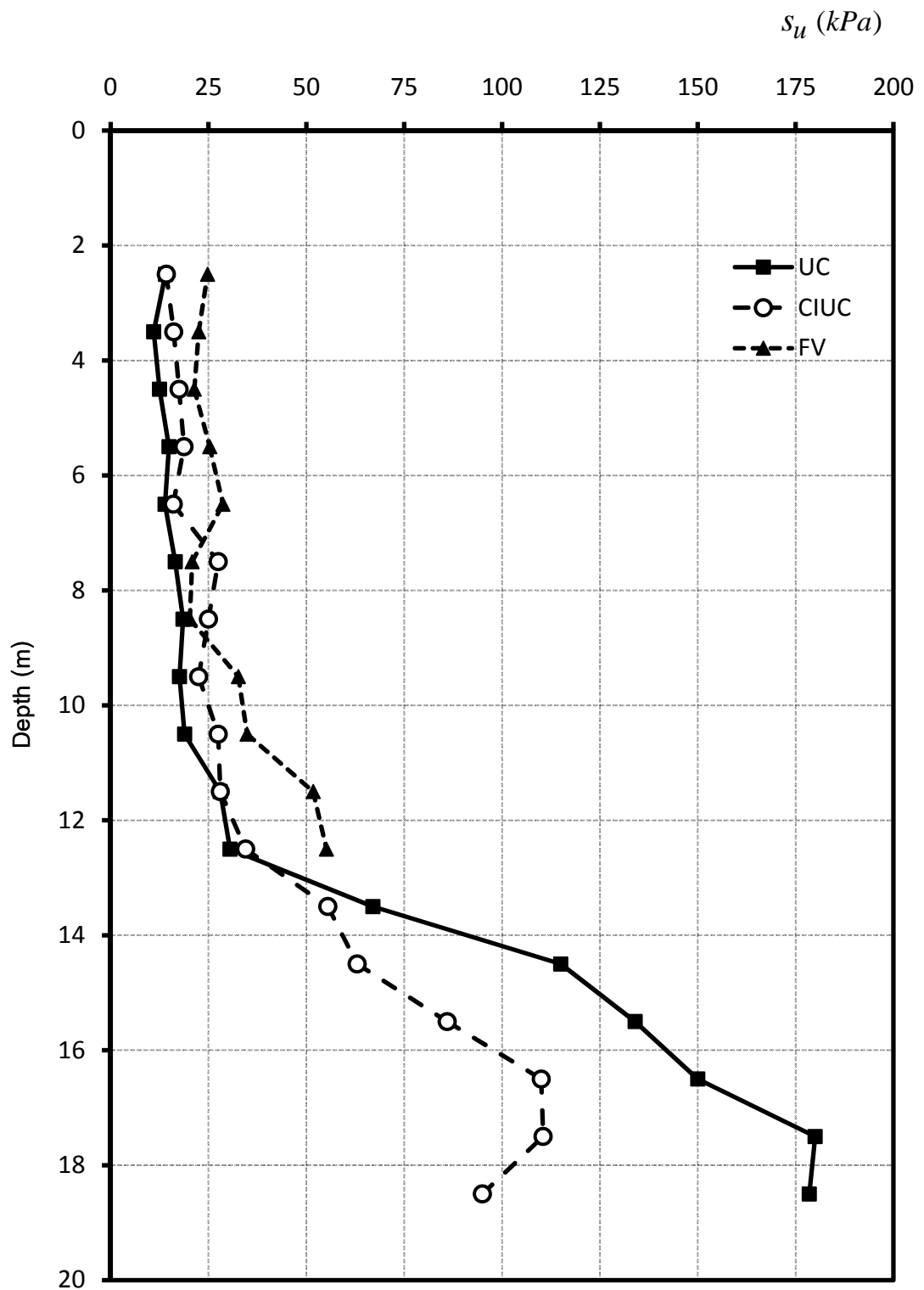
จากผลการทดสอบเพื่อค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจาก 3 สถานที่ ได้แก่ การทดสอบใบมีดสนาม (FV) การทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว (UC) และการทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (CIUC) นำค่า s_u ที่ได้จากการทดสอบแต่ละวิธีมาเขียนกราฟเทียบกับความลึกชั้นดินของแต่ละสถานที่ทดสอบได้ดังภาพที่ 4.8 เพื่อแสดงความแปรปรวนของค่า s_u จากการทดสอบต่างๆ จากนั้นนำ s_u มาค่าหาสหสัมพันธ์ (Correlation) ของค่า s_u ในแต่ละวิธี โดยใช้การทดสอบ UC เป็นตัวเปรียบเทียบหลักเพราะการทดสอบ UC เป็นการทดสอบที่ใช้งานแพร่หลายในประเทศไทย และสามารถทดสอบในชั้นดินเหนียวแข็งได้ การวิเคราะห์แยกวิเคราะห์ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง (Soft to medium clay) กับชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)

1) การทดสอบ CIUC และการทดสอบ UC

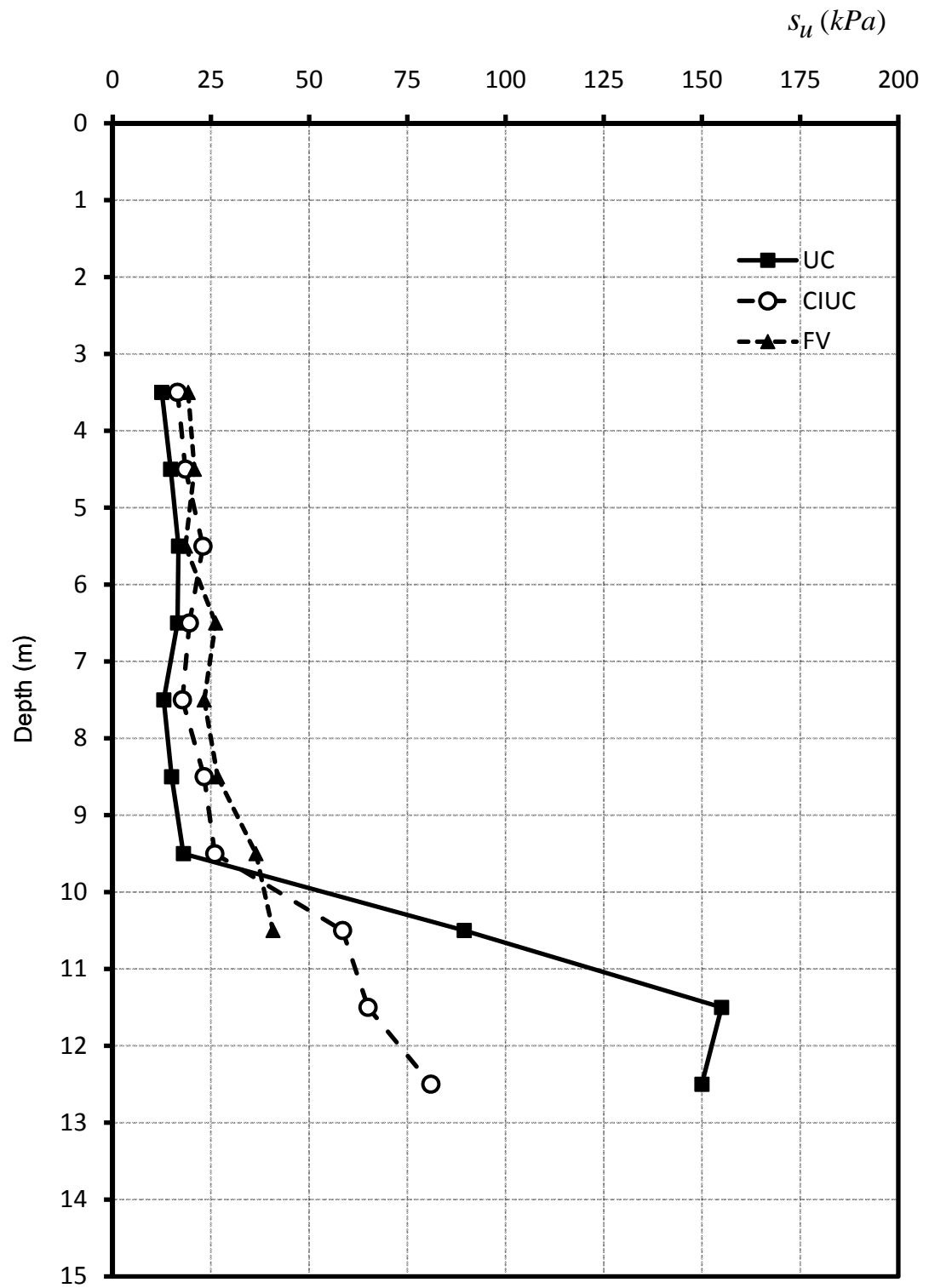
การทดสอบ UC เป็นการทดสอบที่ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการหาค่า s_u แต่การทดสอบ UC ก็ยังมีข้อด้อยอยู่เพราะการทดสอบไม่สามารถควบคุมความเค้นในระหว่างการทดสอบ ค่า s_u ที่ได้จึงมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ในขณะที่การทดสอบ CIUC สามารถควบคุมสภาพความเค้นของดินก่อนการทดสอบ และควบคุมสภาพการไหลในการทดสอบได้ แต่การทดสอบ CIUC ก็ยังไม่นิยมในเชิงการค้าเพราะเป็นการทดสอบที่ใช้เวลานานกว่า และมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการทดสอบ UC นำค่า s_u มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาสหสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 4.9



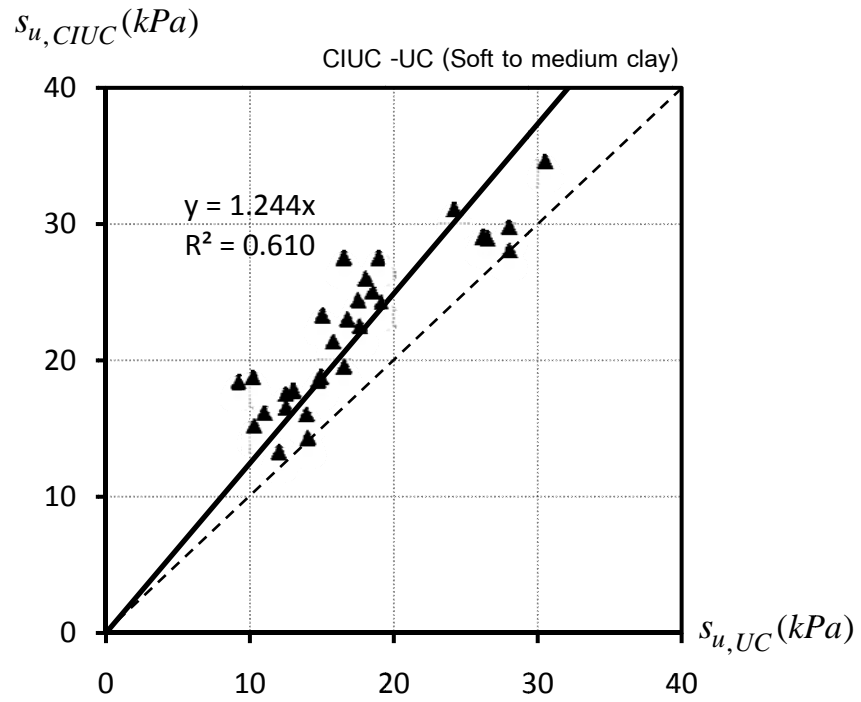
ภาพที่ 4.8(ก) กราฟของค่า s_u จากวิธีต่างๆกับระดับความลึกของดินเหนียว CU



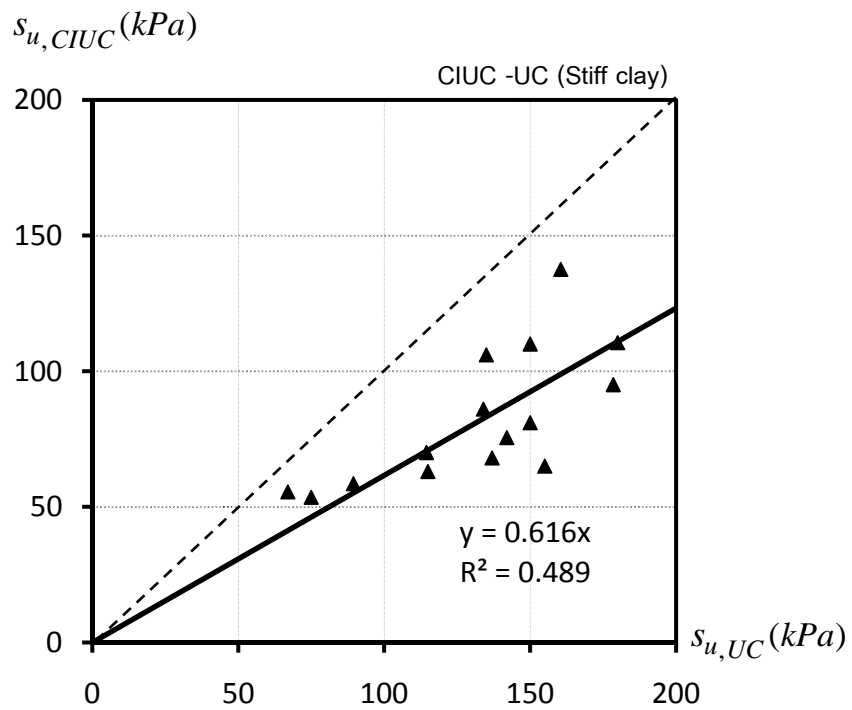
ภาพที่ 4.8(ข) กราฟของค่า s_u จากวิธีต่างๆกับระดับความลึกของดินเหนียว KU



ภาพที่ 4.8(ค) กราฟของค่า s_u จากวิธีต่างๆกับระดับความลึกของดินเหนียว AT



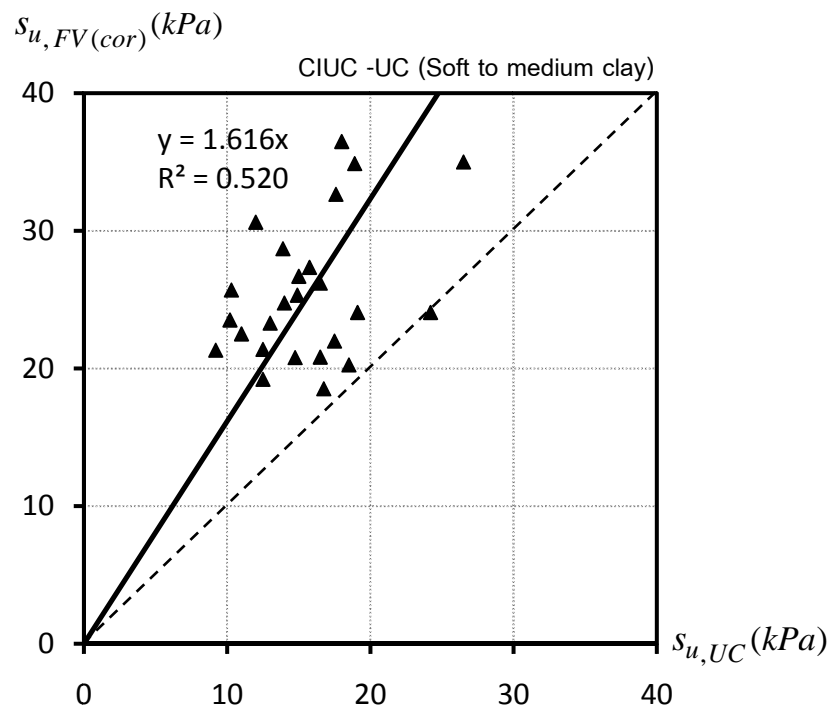
ภาพที่ 4.9(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ $s_{u,UC}$ (Soft to medium clay)



ภาพที่ 4.9(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ $s_{u,UC}$ (Stiff clay)

2) การทดสอบ FV และการทดสอบ UC

การทดสอบ FV เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า s_u ของชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางที่มีความนิยมมากในประเทศไทยเพราะการทดสอบมีขั้นตอนการทดสอบที่ง่ายกว่าการทดสอบ UC เพราะไม่ต้องเก็บตัวอย่างดินเหนียวเพื่อไปทดสอบในห้องปฏิบัติการทำให้การทดสอบใช้เวลาที่น้อยกว่า แต่ทั้งสองการทดสอบให้ค่า s_u ที่แตกต่างกันเพราะการทดสอบ FV มีระนาบการวิบัติที่เกิดจากการหมุนใบมีดทำให้ระนาบการเฉือนเป็นทรงกระบอก ต่างกับการทดสอบ UC ที่ให้แรงอัดในแนวตั้งเพื่อให้ดินเกิดการวิบัติ นำค่า s_u มาเปรียบเทียบกับกันเพื่อหาความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u, FV(corr)}$ กับ $s_{u, UC}$ (Soft to medium clay)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า s_u ของการทดสอบต่างวิธีสามารถหาความแปรปรวนของค่า s_u ด้วยสหสัมพันธ์ของการทดสอบแต่ละวิธีได้ดังนี้

$$\text{Soft to medium clay: } s_{u, CIUC} = 1.244 s_{u, UC} \quad (4.1)$$

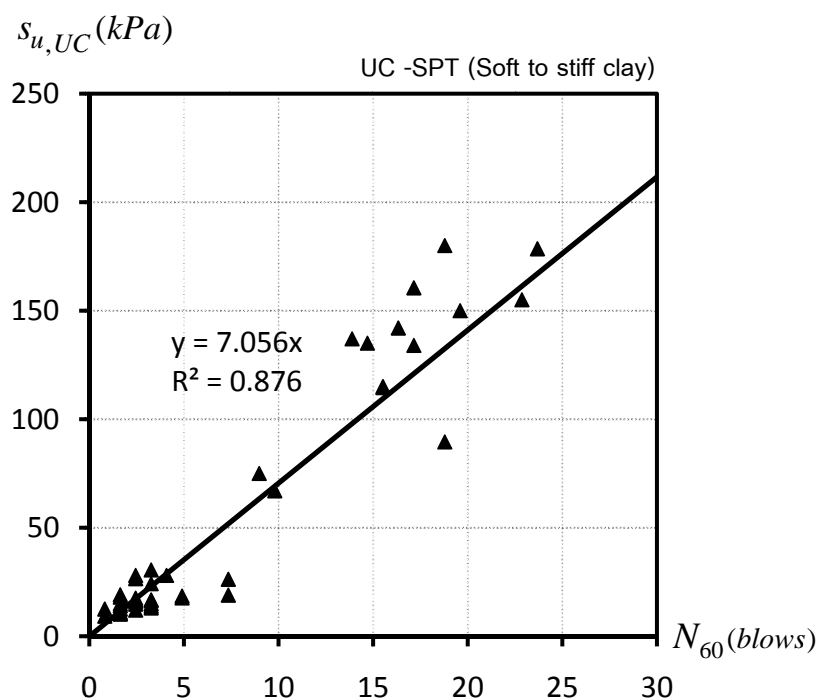
$$s_{u, FV(corr)} = 1.616 s_{u, UC} \quad (4.2)$$

$$\text{Stiff clay: } s_{u, CIUC} = 0.616 s_{u, UC} \quad (4.3)$$

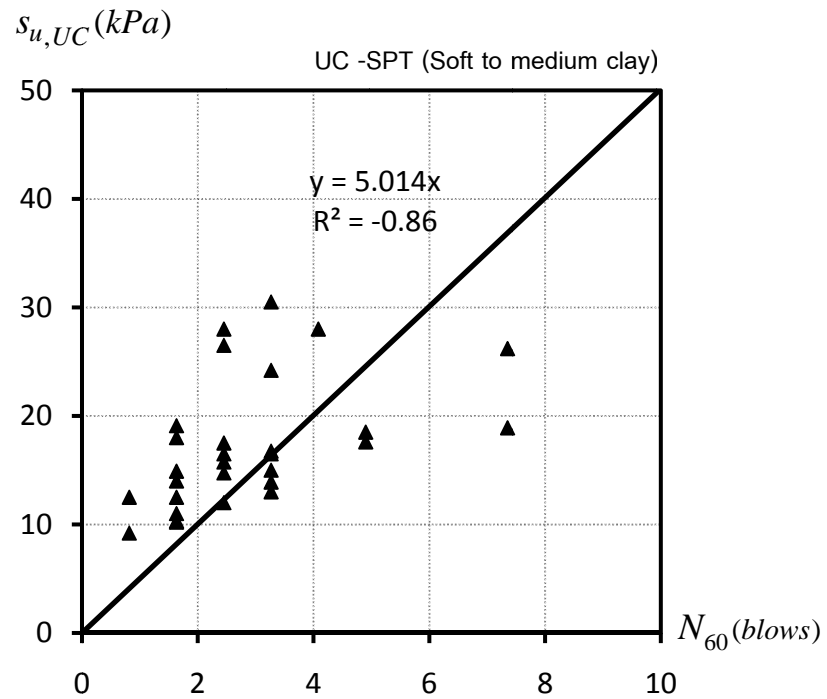
จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่า s_u จากการทดสอบทั้งสามวิธีสามารถเรียงลำดับค่า s_u จากการทดสอบจากมากไปหาน้อยได้คือ การทดสอบ FV, การทดสอบ CIUC และการทดสอบ UC ตามลำดับ แต่ในชั้นดินเหนียวแข็งได้ผลค่า s_u จากการทดสอบ UC มากกว่าการทดสอบ CIUC อาจเป็นเพราะการทดสอบมีอัตราเร็วในการให้แรงดันแนวแกนที่แตกต่างกันมาก

4.2.3 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบแรงกดแกนเดียวกับค่าการตอกที่มีการปรับแก้พลังงาน 60% จากการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน

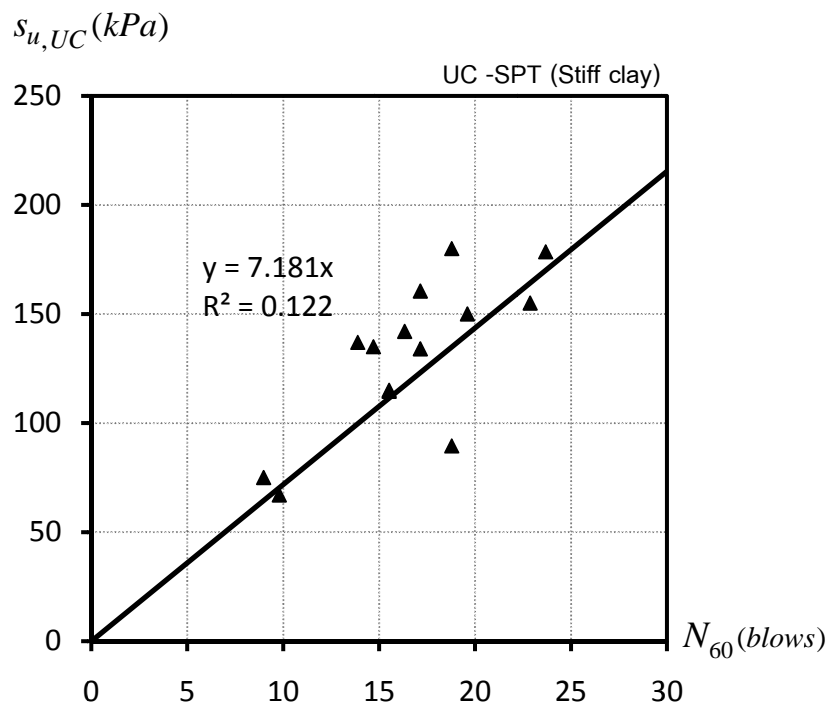
การทดสอบ SPT เป็นการทดสอบนิยมที่ใช้แปลผลเพื่อหาค่ากำลังของดินในประเทศไทย ซึ่งการทดสอบ SPT เป็นการทดสอบที่มีขั้นตอนการทดสอบที่ง่าย และสามารถทดสอบได้ถึงระดับความลึกมาก โดยส่วนใหญ่ในประเทศไทยใช้การทดสอบ SPT เพื่อแปลผลหาค่า s_u ตั้งแต่ชั้นดินเหนียวแข็ง ส่วนการหาค่า s_u ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางจะนิยมใช้การทดสอบ FV แต่ก็ยังมีผู้ที่ใช้การทดสอบ SPT ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางอยู่ ซึ่งจากการทดสอบจะนำค่า N -value มาแปลผลให้เป็นค่า s_u โดยใช้ความสัมพันธ์ (วีรพันธ์ ปิตุภกรณ์, 2526) ในสมการที่ 2.18 และ 2.19 โดยที่ค่า N -value ไม่ได้มีการปรับแก้ประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องทดสอบ งานวิจัยนำค่า N_{60} และ $s_{u,UC}$ มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 4.11 โดยวิเคราะห์รวมทั้งชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง และชั้นดินเหนียวแข็ง รวมทั้งแยกวิเคราะห์ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง และชั้นดินเหนียวแข็ง



ภาพที่ 4.11(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ N_{60} (Soft to stiff clay)



ภาพที่ 4.11(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ N_{60} (Soft to medium clay)



ภาพที่ 4.11(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ N_{60} (Stiff clay)

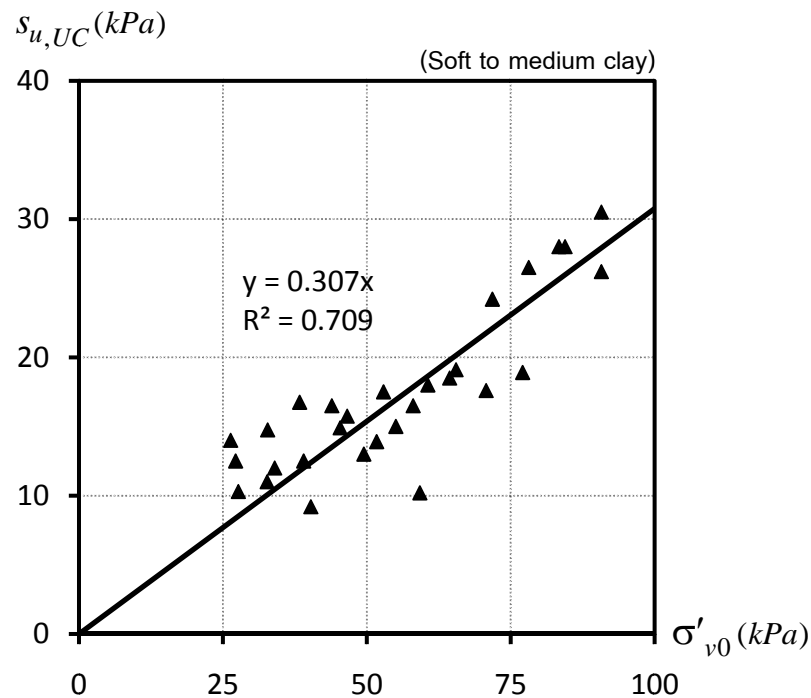
จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ในภาพที่ 4.9 เมื่อแยกวิเคราะห์ห้ชั้นดินระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางและชั้นดินเหนียวแข็ง ได้ผลว่าในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางได้ความสัมพันธ์ที่มีการกระจายมาก ทำให้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า N_{60} และ $s_{u,UC}$ จึงตัดข้อมูลในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางออก จึงได้สมการความสัมพันธ์สำหรับชั้นดินเหนียวแข็งดังสมการที่ 4.4

$$s_{u,UC} = 7.181N_{60} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (4.4)$$

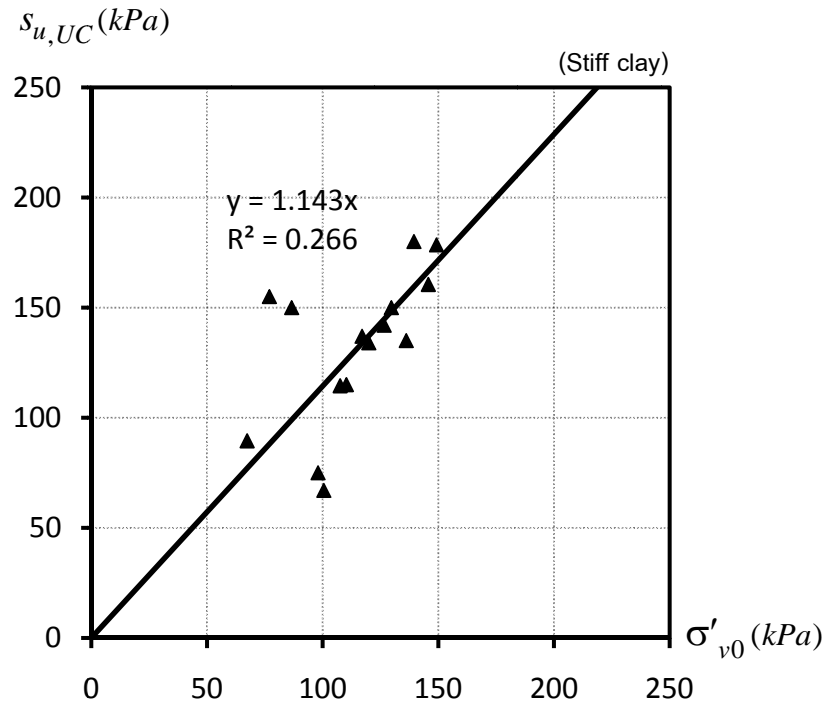
4.2.4 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับค่าความเค้นประสิทธิผลในสนาม

จากผลการทดสอบ UC, CIUC และ FV นำผลของค่า s_u มาหาค่าตัวแปรไร้มิติด้วยการนำค่า σ'_{v0} และ σ'_{v0}^* เป็นตัวหาร หรือที่เรียกว่า Normalisation โดยวิเคราะห์แยกชั้นดินเป็น 2 ชั้นได้แก่ ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง และชั้นดินเหนียวแข็ง หลังจากนั้นนำค่าความสัมพันธ์ที่ได้มาเขียนกราฟเทียบกับความลึกเพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนในแต่ละชั้นดิน การทดสอบ UC แสดงดังภาพที่ 4.12, 4.13 การทดสอบ CIUC แสดงดังภาพที่ 4.14, 4.15 และการทดสอบ FV แสดงดังภาพที่ 4.16, 4.17

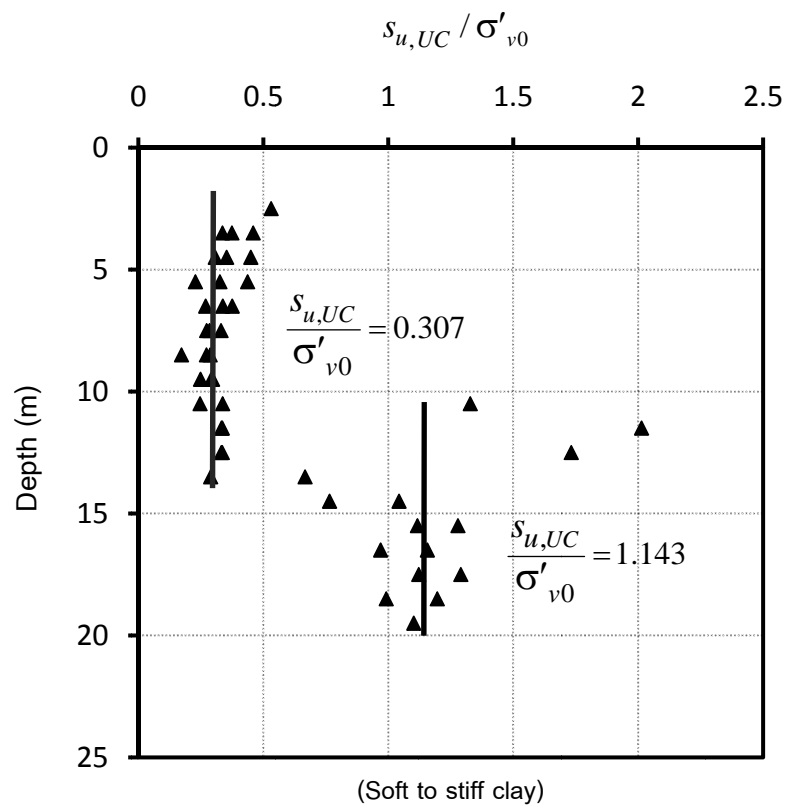
1) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ σ'_{v0}



ภาพที่ 4.12(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ σ'_{v0} (Soft to medium clay)

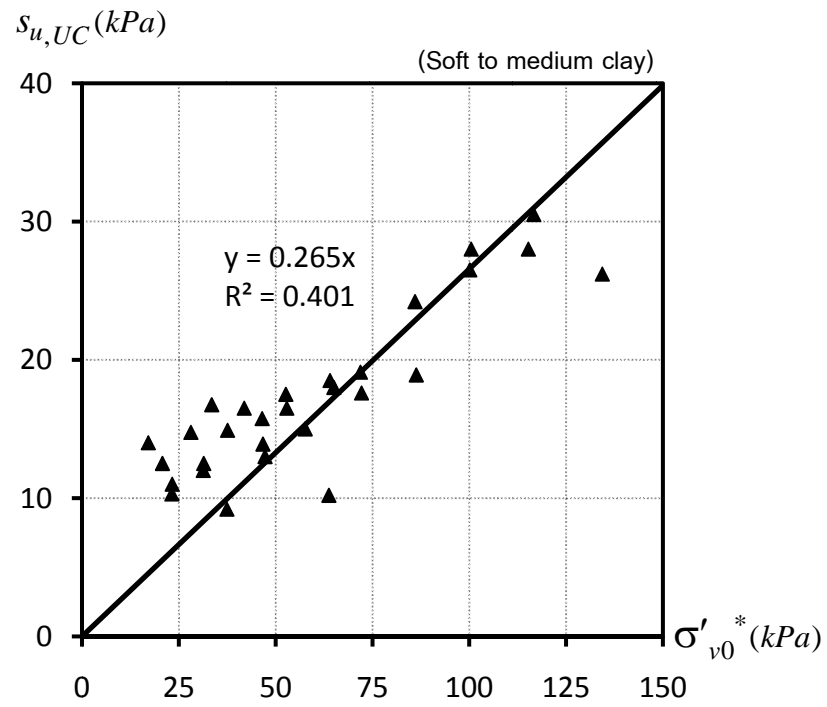


ภาพที่ 4.12(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ σ'_{v0} (Stiff clay)

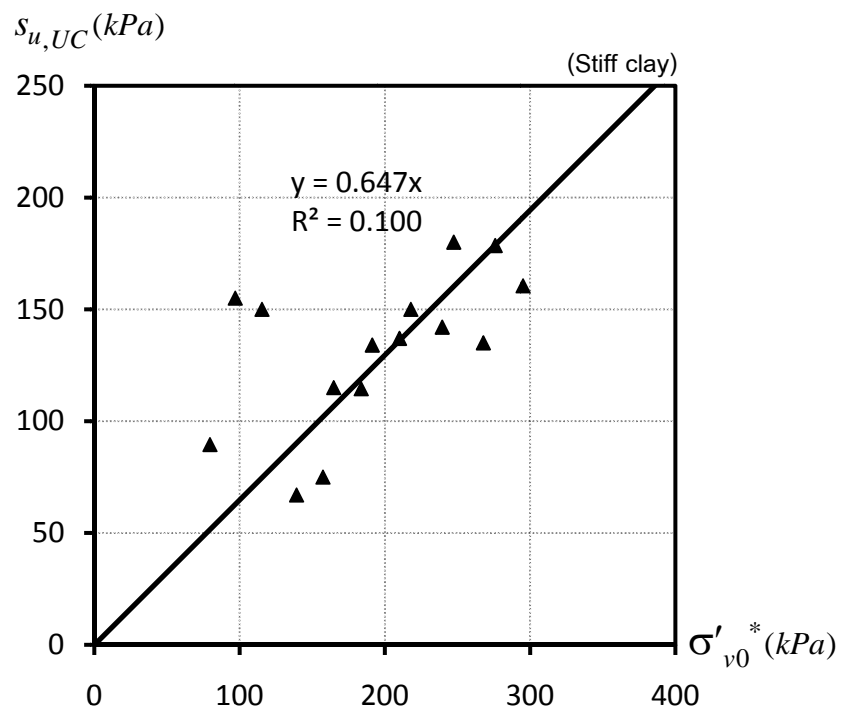


ภาพที่ 4.12(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC} / \sigma'_{v0}$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay)

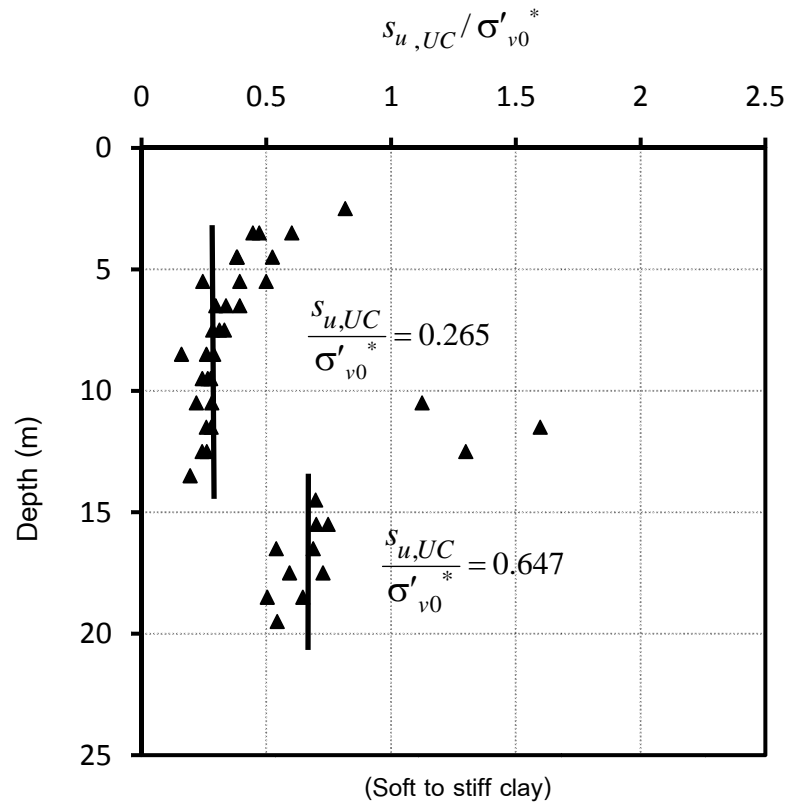
2) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ σ'_{v0}^*



ภาพที่ 4.13(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ σ'_{v0}^* (Soft to medium clay)

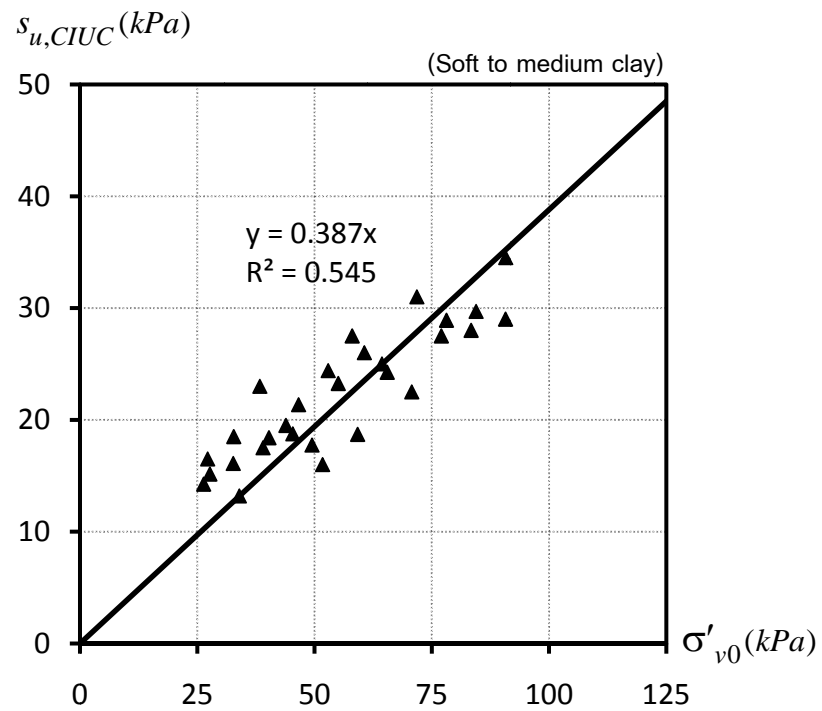


ภาพที่ 4.13(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}$ กับ σ'_{v0}^* (Stiff clay)

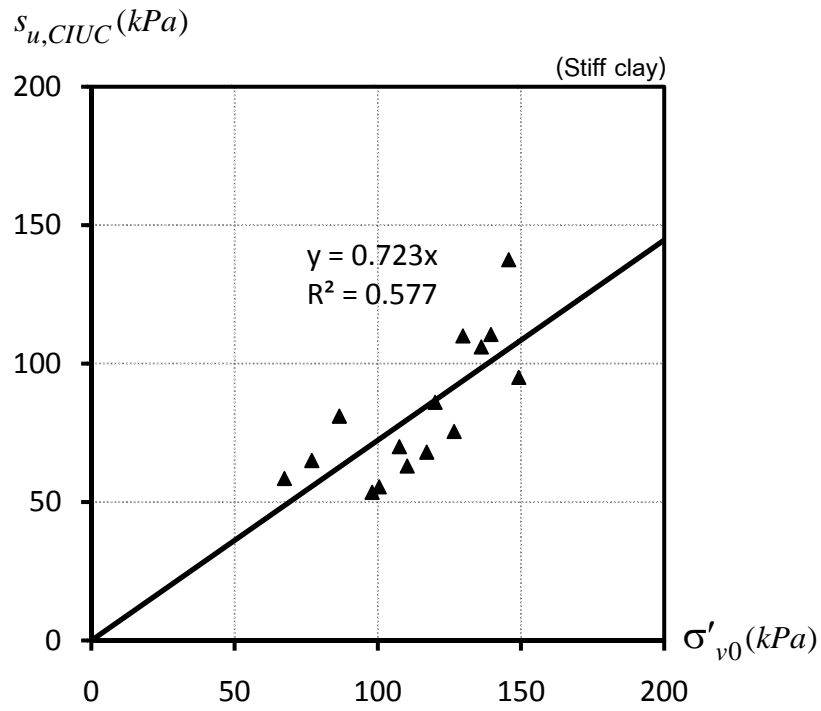


ภาพที่ 4.13(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC} / \sigma'_{v0}$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay)

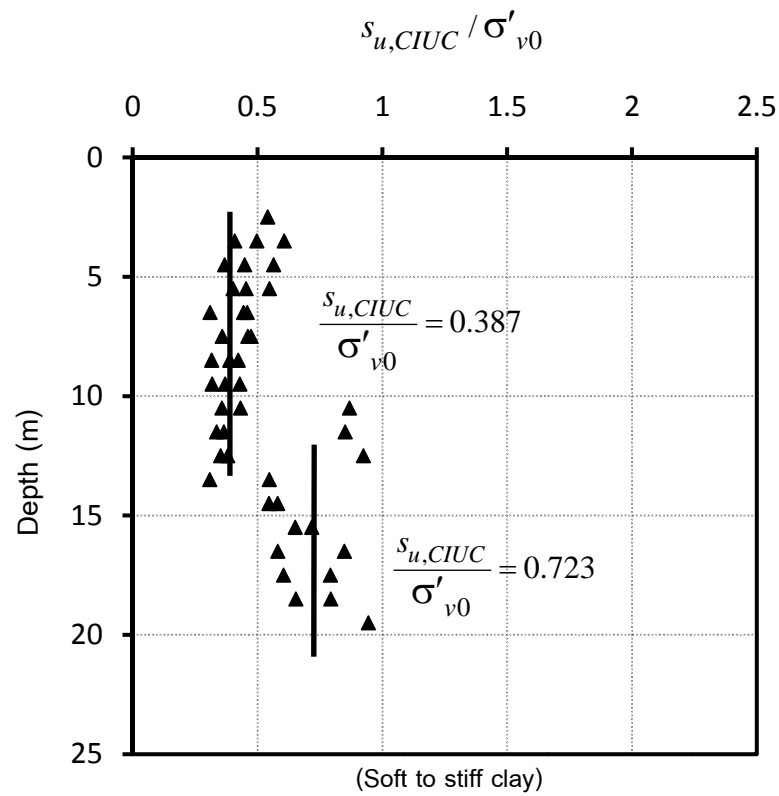
3) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ σ'_{v0}



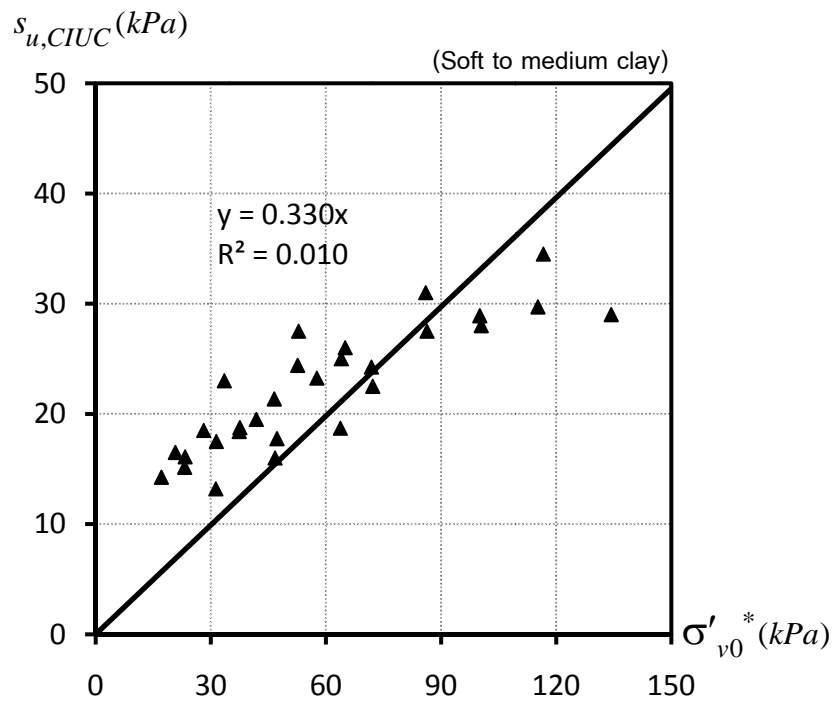
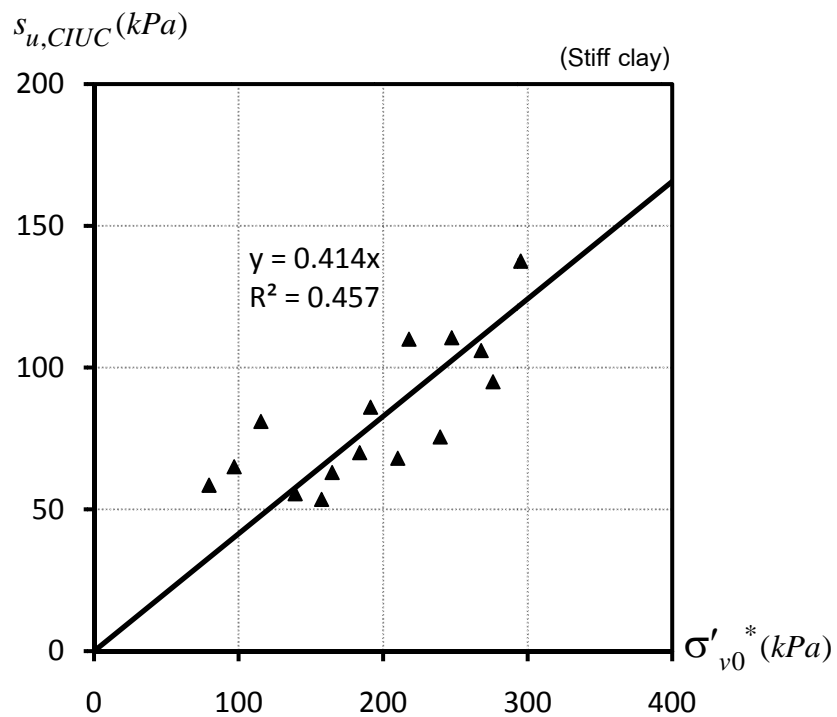
ภาพที่ 4.14(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ σ'_{v0} (Soft to medium clay)

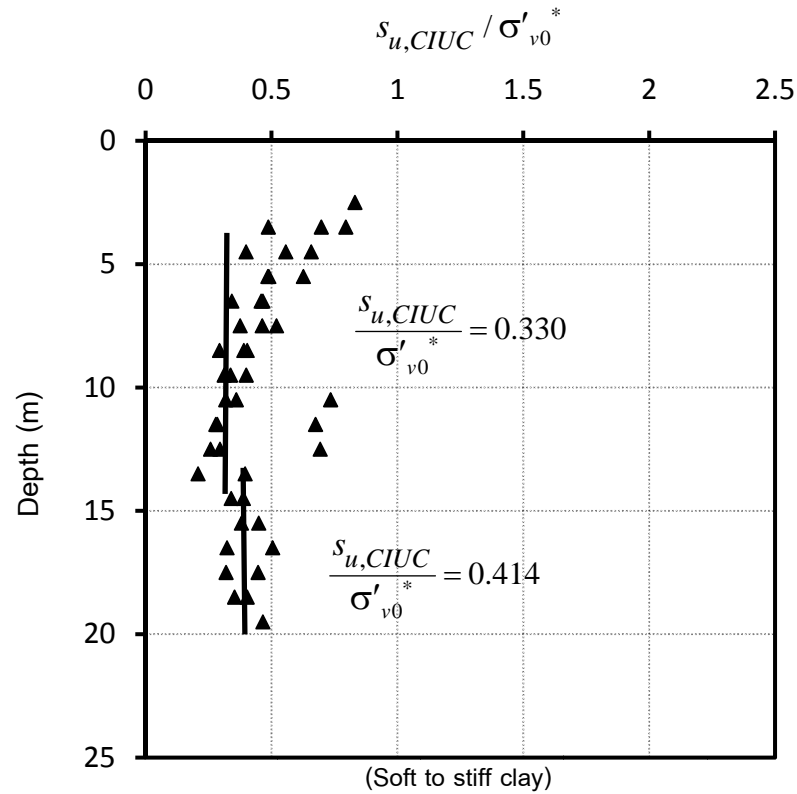


ภาพที่ 4.14(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ σ'_{v0} (Stiff clay)



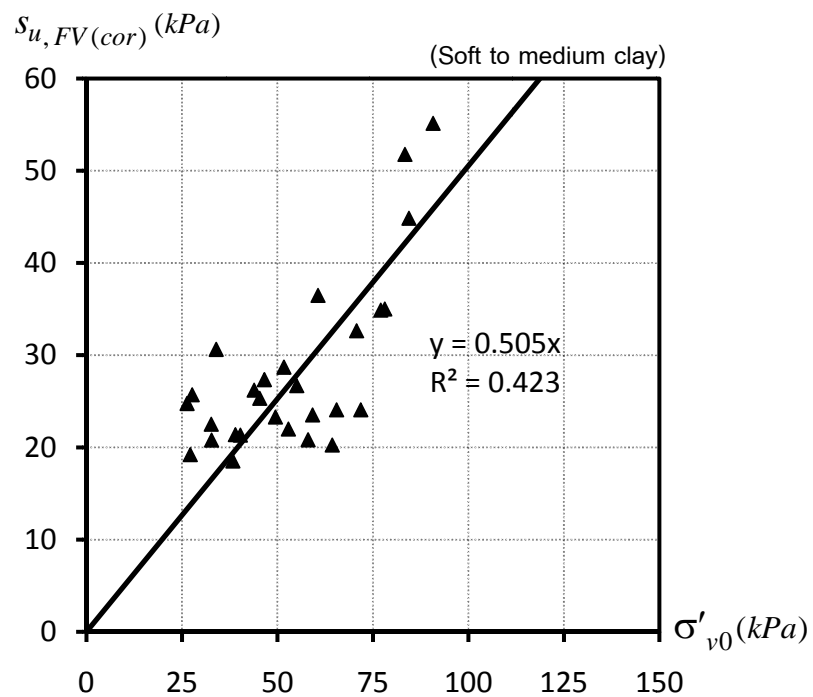
ภาพที่ 4.14(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC} / \sigma'_{v0}$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay)

4) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ σ'_{v0} *ภาพที่ 4.15(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ σ'_{v0} * (Soft to medium clay)ภาพที่ 4.15(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}$ กับ σ'_{v0} * (Stiff clay)

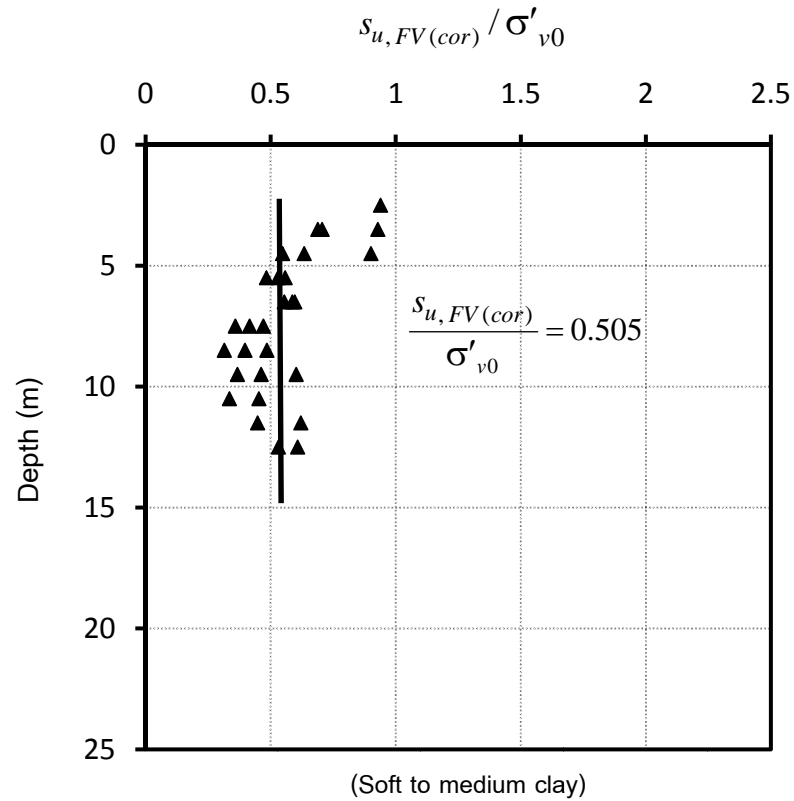


ภาพที่ 4.15(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC} / \sigma'_{v0}$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay)

5) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(cor)}$ กับ σ'_{v0}

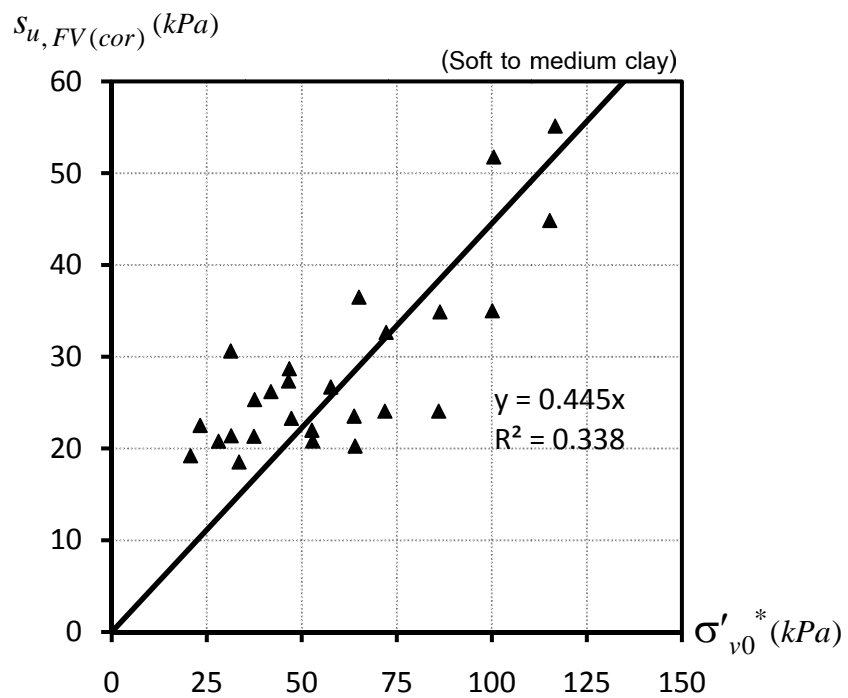


ภาพที่ 4.16(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(cor)}$ กับ σ'_{v0} (Soft to medium clay)

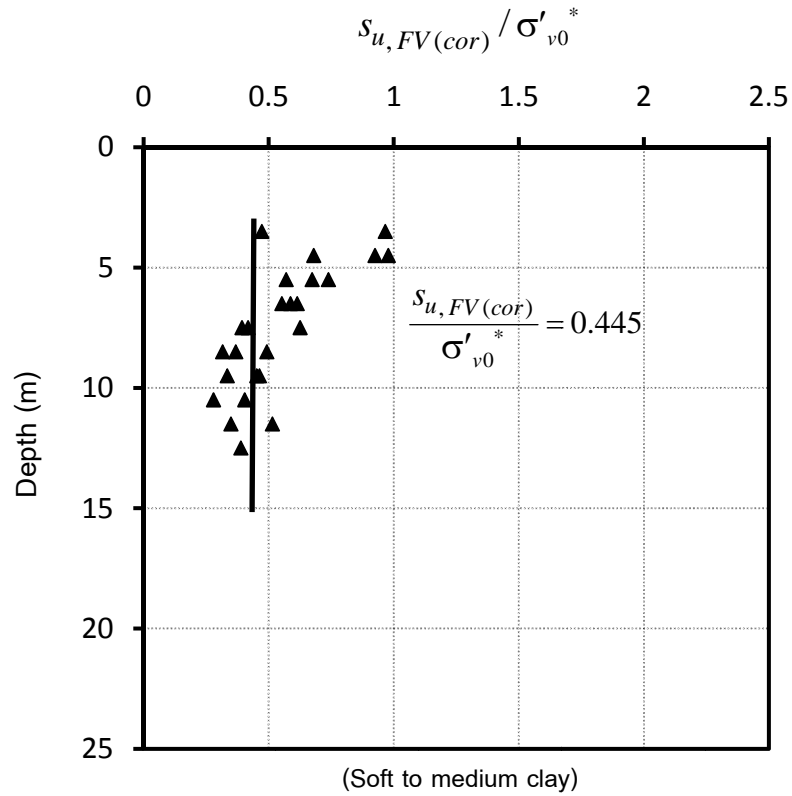


ภาพที่ 4.16(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u, FV(cor)} / \sigma'_{v0}$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay)

6) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u, FV(cor)}$ กับ σ'_{v0}^*



ภาพที่ 4.17(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u, FV(cor)}$ กับ σ'_{v0}^* (Soft to medium clay)



ภาพที่ 4.17(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u, FV(corr)} / \sigma'_{v0}^*$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay)

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับค่าความเค้นประสิทธิผลในสนามได้ผลดังตารางที่ 4.8 ซึ่งเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากความเค้นประสิทธิผลแบบดรอว์ดาวน์นั้นมีค่าน้อยกว่าความเค้นประสิทธิผลแบบสถิต เนื่องจากในพื้นที่กรุงเทพมหานครนั้นแรงดันน้ำในโพรงดินมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงตั้งแต่ระดับความลึก 5 เมตรลงไปดังภาพที่ 2.33 ทำให้มีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ การนำค่าความความสัมพันธ์ในตารางที่ 4.8 ไปใช้จึงควรนำความสัมพันธ์ที่เกิดจากความเค้นประสิทธิผลแบบดรอว์ดาวน์ไปใช้ เพราะจะให้ค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่า

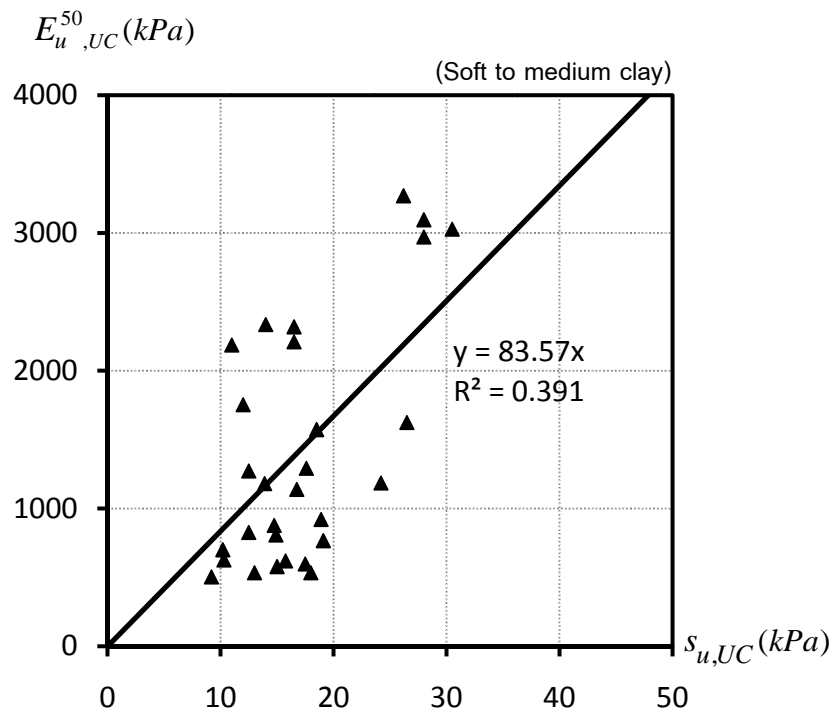
ตารางที่ 4.8 ตารางสรุปผลความสัมพันธ์ของค่า s_u กับค่าความเค้นประสิทธิผลในสนาม

Test	$(s_u / \sigma'_{v0})_{NC}$				$(s_u / \sigma'_{v0}^*)_{NC}$			
	Soft to medium		Stiff		Soft to medium		Stiff	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
FVT	0.505	0.170	-	-	0.445	0.270	-	-
CIUC	0.387	0.090	0.723	0.140	0.330	0.170	0.414	0.140
UC	0.307	0.070	1.143	0.340	0.265	0.140	0.647	0.300

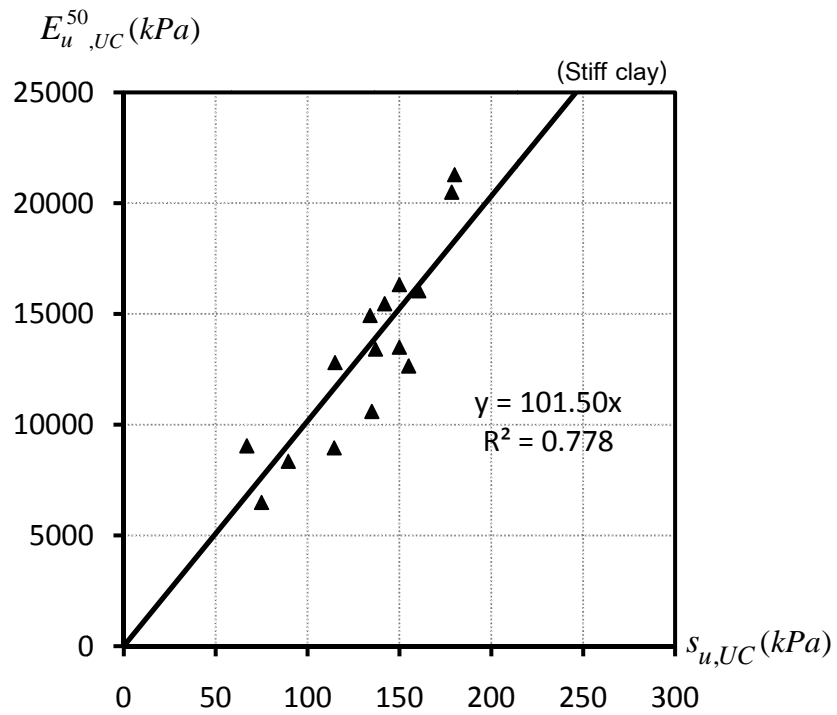
4.2.5 ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ที่ครึ่งของกำลังครากแบบไม่ระบายน้ำ กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

จากผลการทดสอบ UC และ CIUC นำผลของค่า E_u^{50} ซึ่งได้แก่ ค่า $E_{u,UC}^{50}$ และ $E_{u,CIUC}^{50}$ มาหาค่าตัวแปรไร้มิติด้วยการนำค่า $s_{u,UC}$ และค่า $s_{u,CIUC}$ เป็นตัวหารตามลำดับ โดยวิเคราะห์แยกชั้นดินเป็น 2 ชั้นได้แก่ ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง และชั้นดินเหนียวแข็ง การทดสอบ UC แสดงดังภาพที่ 4.18 และการทดสอบ CIUC แสดงดังภาพที่ 4.19

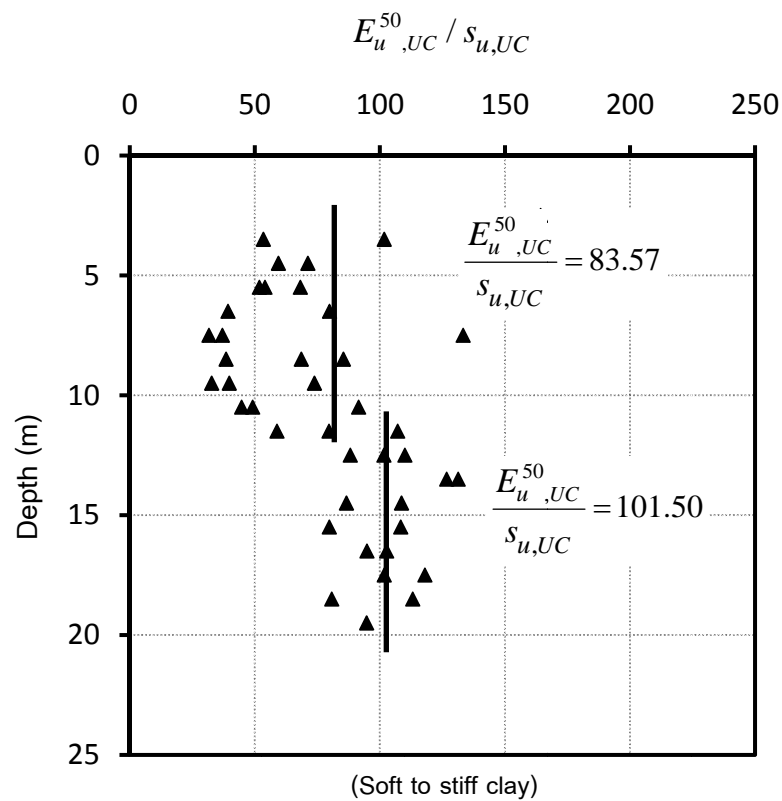
1) การทดสอบ UC



ภาพที่ 4.18(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $E_{u,UC}^{50}$ กับค่า $s_{u,UC}$ (Soft to medium clay)

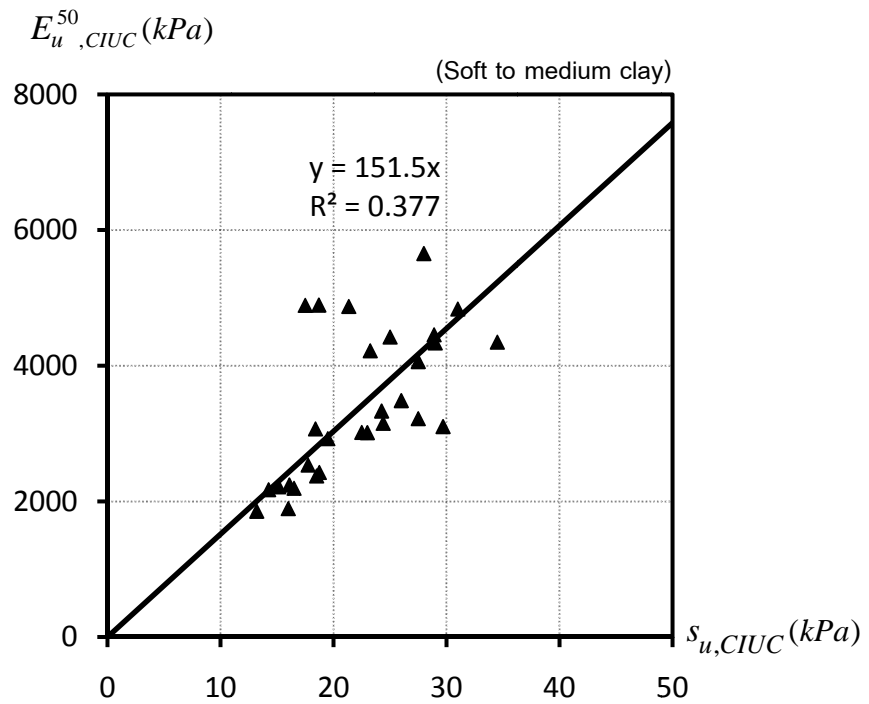


ภาพที่ 4.18(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $E_{u,UC}^{50}$ กับค่า $s_{u,UC}$ (Stiff clay)

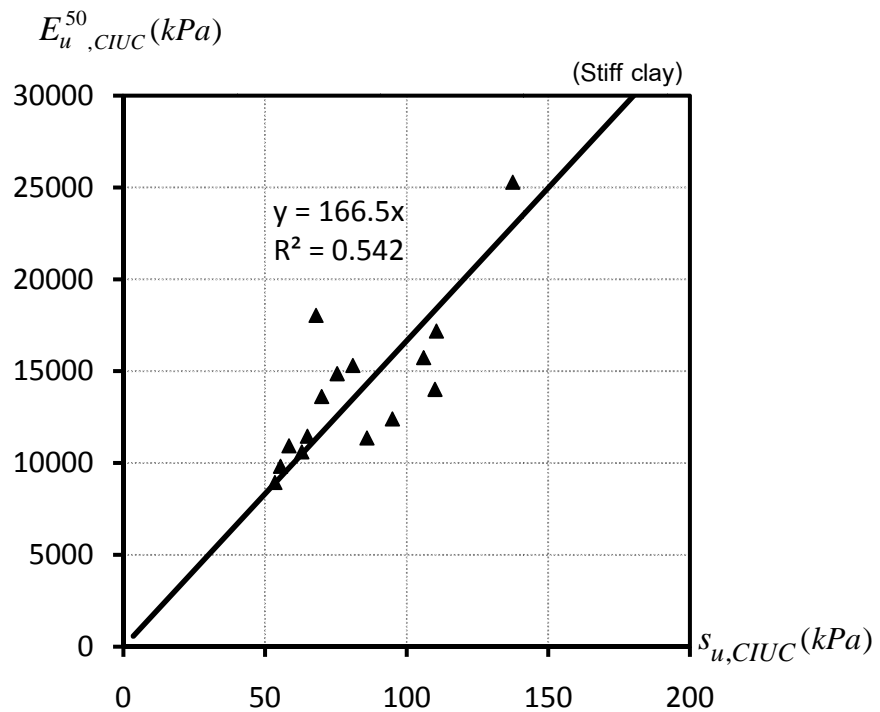


ภาพที่ 4.18(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $E_{u,UC}^{50} / s_{u,UC}$ กับระดับความลึก (Soft to stiff clay)

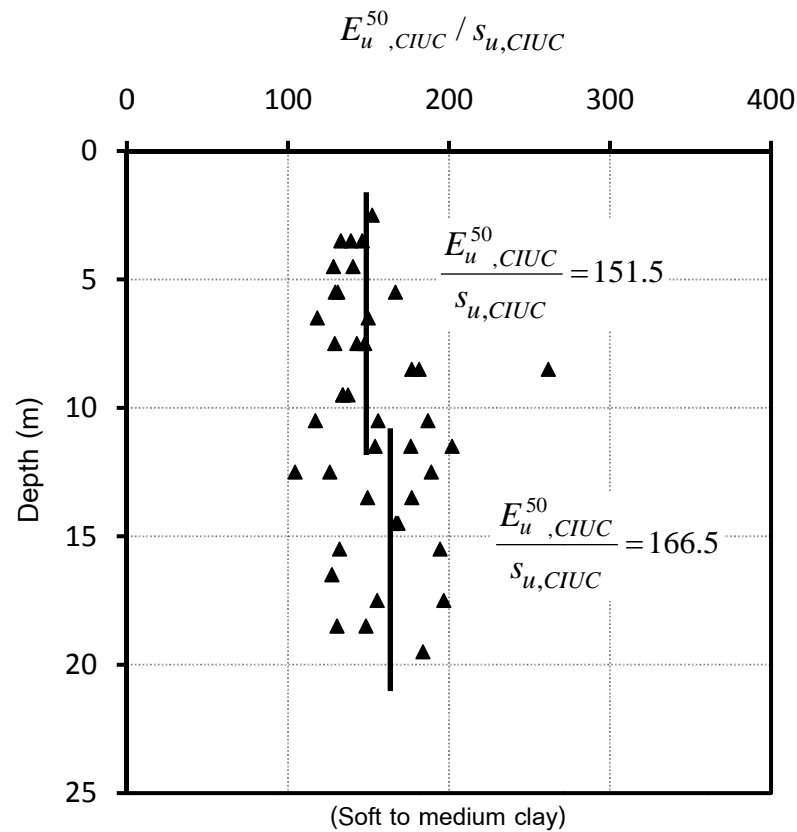
2) การทดสอบ CIUC



ภาพที่ 4.19(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $E_{u, CIUC}^{50}$ กับค่า $s_{u, CIUC}$ (Soft to medium clay)



ภาพที่ 4.19(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $E_{u, CIUC}^{50}$ กับค่า $s_{u, CIUC}$ (Stiff clay)



ภาพที่ 4.19(ค) ความสัมพันธ์ของค่า $E_u^{50, CIUC} / s_{u, CIUC}$ กับระดับความลึก
(Soft to stiff clay)

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า E_u^{50} และค่า s_u ได้ผลดังตารางที่ 4.9 ซึ่งได้ผลคือ E_u^{50} / s_u ในชั้นดินเหนียวแข็งมีค่ามากกว่าชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางเล็กน้อย และค่า E_u^{50} / s_u จากการทดสอบ CIUC มีค่ามากกว่าการทดสอบ UC สมการถดถอยของค่า E_u^{50} ในตารางที่ 4.9 สามารถใช้หาค่า E_u^{50} จากค่า s_u ในการทดสอบแต่ละวิธีและแต่ละชั้นดิน

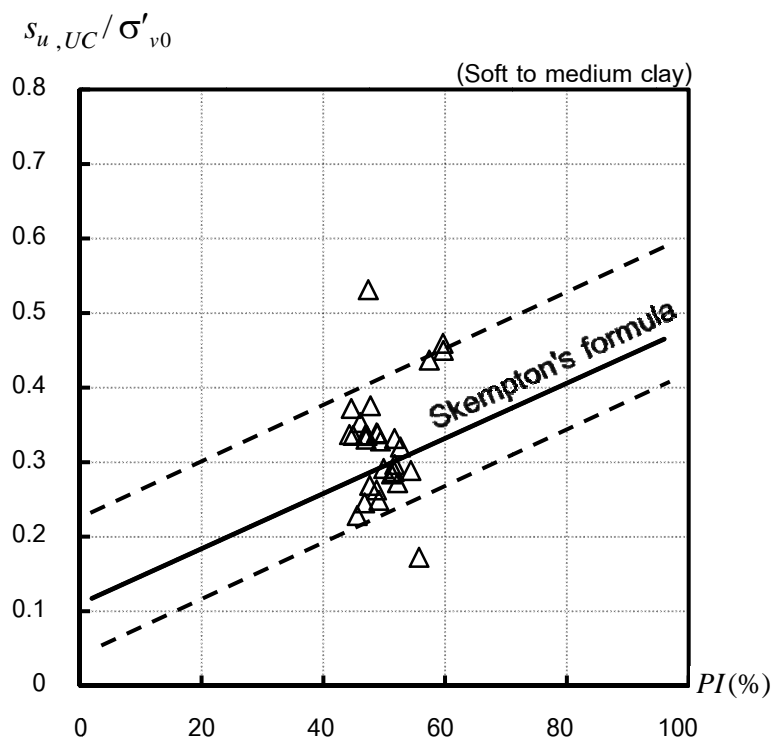
ตารางที่ 4.9 ตารางสรุปผลความสัมพันธ์ของค่า E_u^{50} กับค่า s_u

Test Method	E_u^{50} / s_u			
	Soft to medium		Stiff	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.
CIUC	151.50	41.73	166.50	34.50
UC	83.57	43.49	101.50	16.44

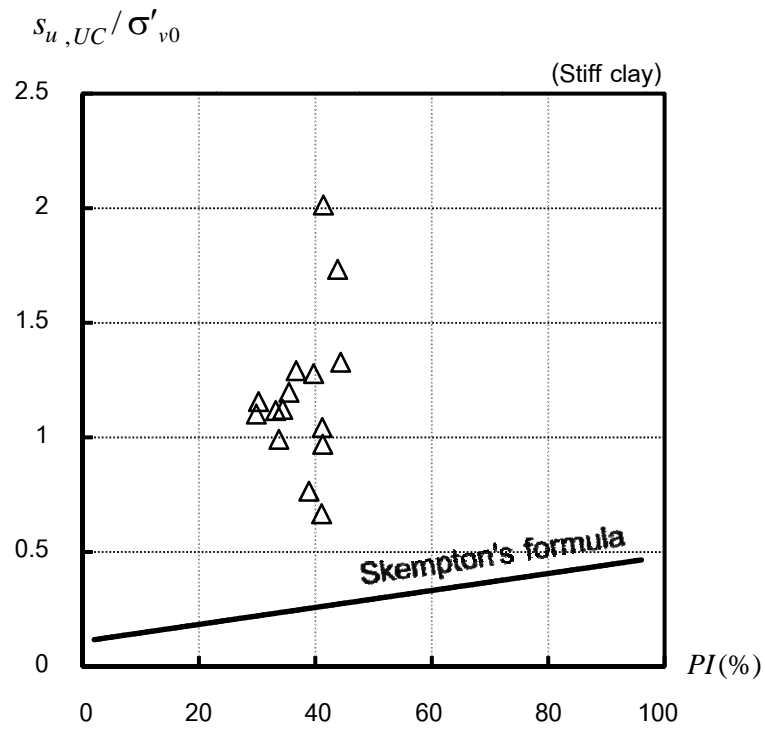
4.2.6 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่าความเค้นประสิทธิผลในสนามกับค่าดัชนีพลาสติก

จากผลการทดสอบ UC, CIUC และ FV นำผลค่า s_u/σ'_{v0} , s_u/σ'_{v0}^* ของแต่ละการทดสอบมาหาความสัมพันธ์กับดัชนีพลาสติก (PI) เพื่อหาสมการถดถอยของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำโดยวิเคราะห์แยกชั้นดินเป็น 2 ชั้นได้แก่ ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง และชั้นดินเหนียวแข็ง ดังภาพที่ 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ

1) ความสัมพันธ์ของ $s_{u,UC}/\sigma'_{v0}$ vs PI

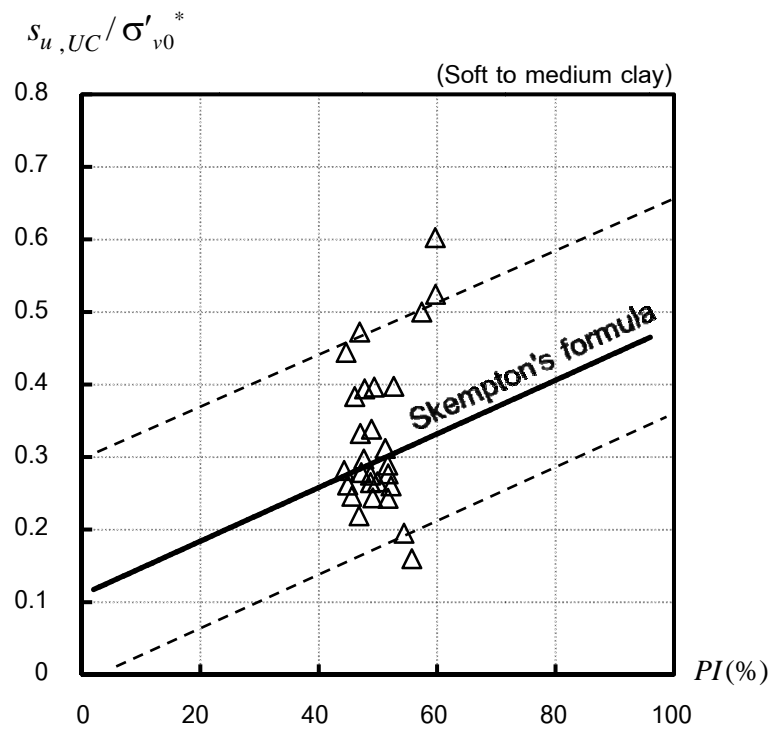


ภาพที่ 4.20(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}/\sigma'_{v0}$ กับค่า PI (Soft to medium clay)

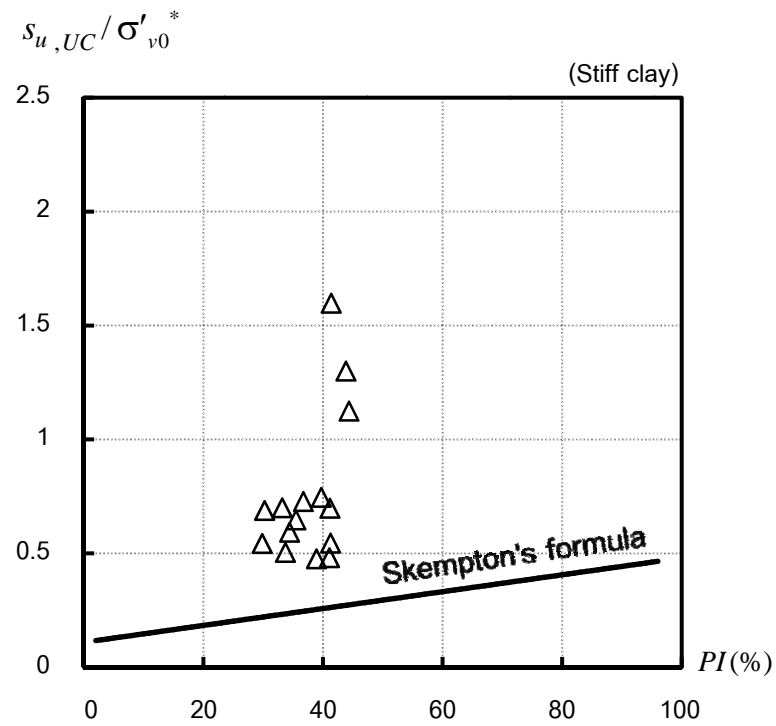


ภาพที่ 4.20(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}/\sigma'_{v0}$ กับค่า PI (Stiff clay)

2) ความสัมพันธ์ของ $s_{u,UC}/\sigma'_{v0}^*$ vs PI

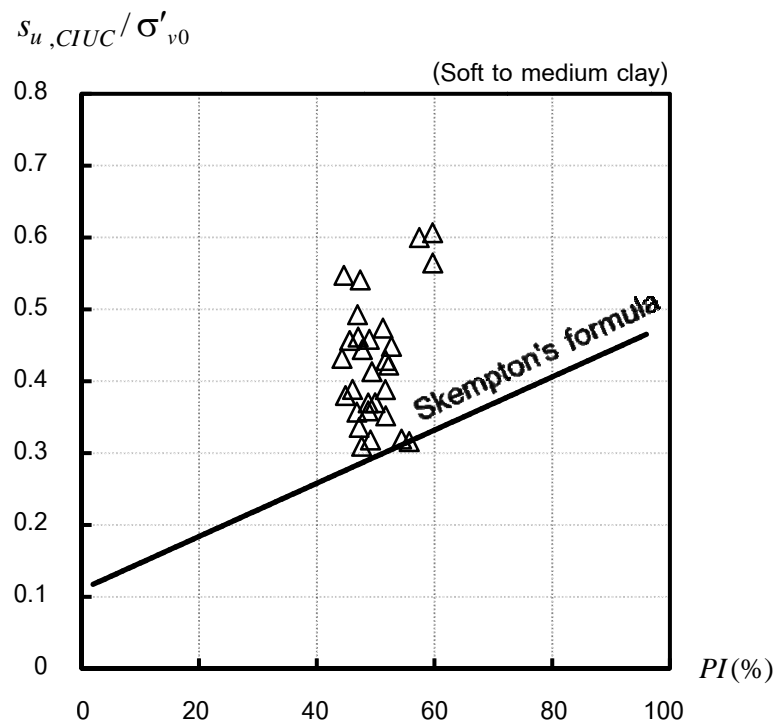


ภาพที่ 4.21(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC}/\sigma'_{v0}^*$ กับค่า PI (Soft to medium clay)

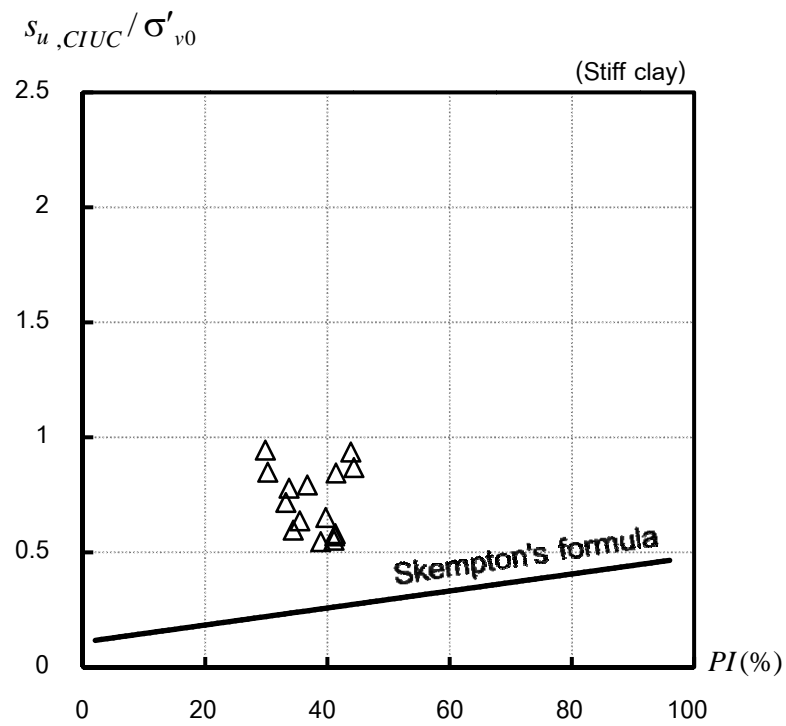


ภาพที่ 4.21(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,UC} / \sigma'_{v0}^*$ กับค่า PI (Stiff clay)

3) ความสัมพันธ์ของ $s_{u,CIUC} / \sigma'_{v0}$ vs PI

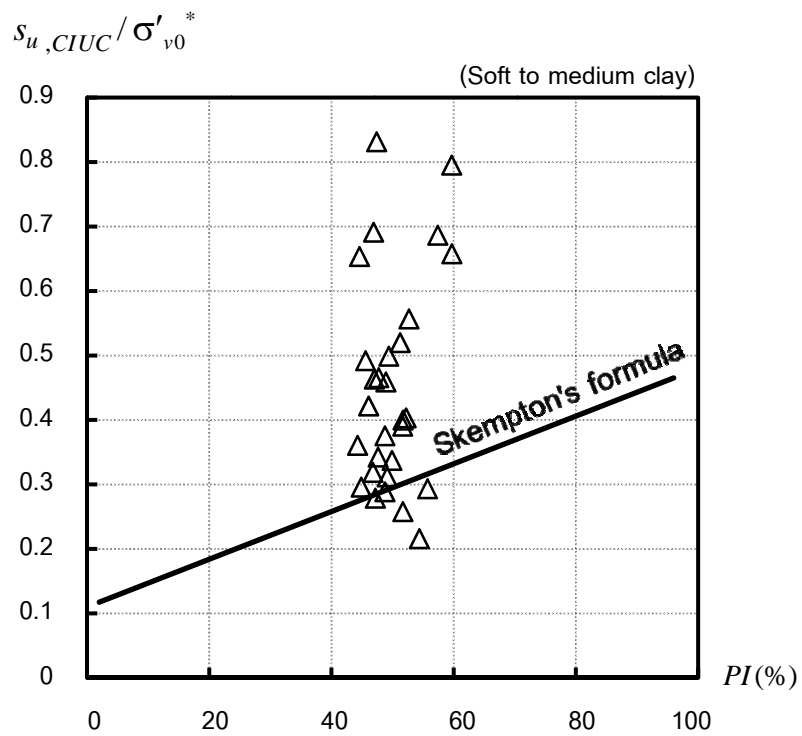


ภาพที่ 4.22(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC} / \sigma'_{v0}$ กับค่า PI (Soft to medium clay)

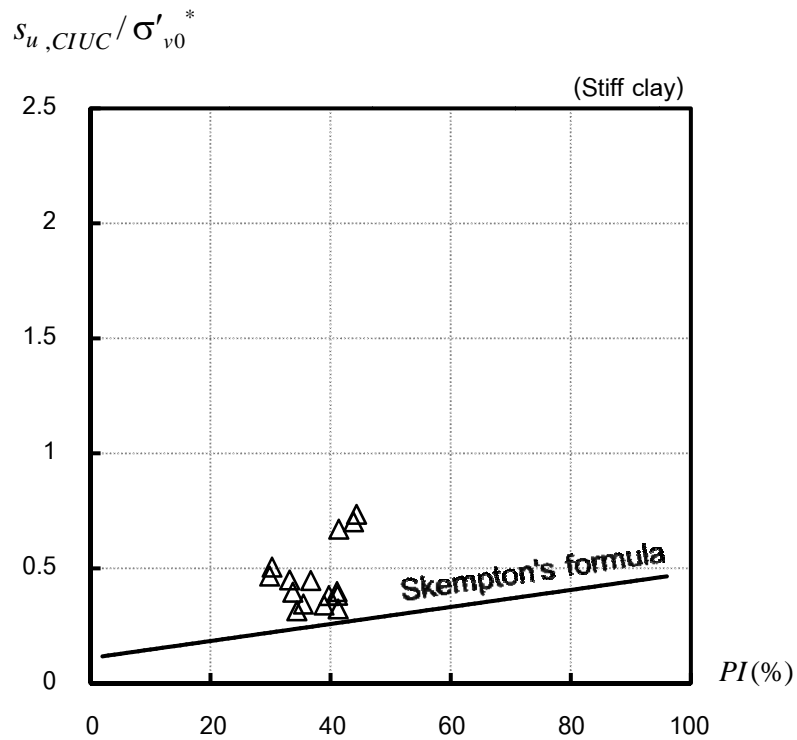


ภาพที่ 4.22(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}/\sigma'_{v0}$ กับค่า PI (Stiff clay)

4) ความสัมพันธ์ของ $s_{u,CIUC}/\sigma'_{v0}^*$ vs PI

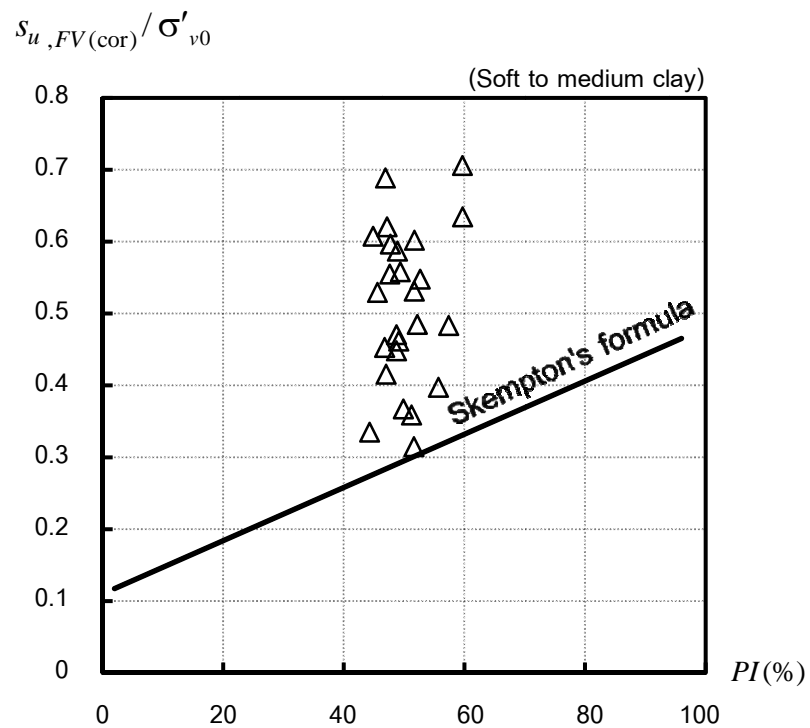


ภาพที่ 4.23(ก) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}/\sigma'_{v0}^*$ กับค่า PI (Soft to medium clay)



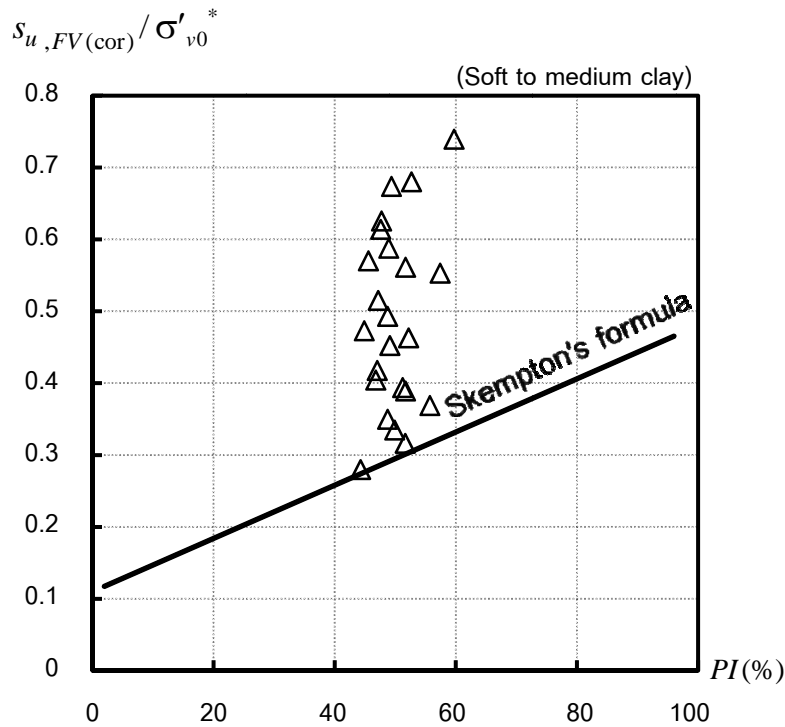
ภาพที่ 4.23(ข) ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,CIUC}/\sigma'_{v0}^*$ กับค่า PI (Stiff clay)

5) ความสัมพันธ์ของ $s_{u,FV(corr)}/\sigma'_{v0}$ vs PI



ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u,FV(corr)}/\sigma'_{v0}$ กับค่า PI (Soft to medium clay)

6) ความสัมพันธ์ของ $s_{u, FV(\text{cor})} / \sigma'_{v0}^*$ vs PI



ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของค่า $s_{u, FV(\text{cor})} / \sigma'_{v0}^*$ กับค่า PI (Soft to medium clay)

จากกราฟความสัมพันธ์ของค่า $s_{u, UC} / \sigma'_{v0}$, $s_{u, UC} / \sigma'_{v0}^*$ กับค่า PI ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางได้ข้อมูลที่อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับสมการที่ 2.6 (Skempton, 1957) ส่วนในชั้นดินเหนียวแข็งนั้นได้ข้อมูลที่มีค่าสูงกว่าสมการที่ 2.6 ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือต่ำเพราะข้อมูลมีความกระจัดกระจายสูง และข้อมูลของดินกรุงเทพฯ นั้นค่า PI มีค่าอยู่ในช่วงจำกัดคือ ดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางค่า PI อยู่ระหว่าง 44.3% ถึง 59.7% และชั้นดินเหนียวแข็งค่า PI อยู่ระหว่าง 29.8% ถึง 54.4% ทำให้ความสัมพันธ์ที่ได้กระจัดกระจายอยู่ในช่วง PI ดังกล่าว ส่วนความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบ FV และ CIUC ได้ความสัมพันธ์ที่สูงกว่าสมการที่ 2.6 แต่ความสัมพันธ์ที่ได้ทั้งหมดก็มีแนวโน้มเดียวกันคือ เมื่อค่าดัชนีพลาสติกของดินสูงขึ้นจะทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับค่าความเค้นประสิทธิผลสูงขึ้นตามไปด้วย

4.2.7 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับงานวิจัยในอดีต

1) ความแปรปรวนของค่า s_u จากการทดสอบแบบต่างๆ

จากการเปรียบเทียบค่า s_u จากการทดสอบ FV และการทดสอบ UC ได้ผลว่าค่า $s_{u,FV(corr)} > s_{u,UC}$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในอดีตเช่น งานวิจัยของโรธและคณะในปี 1985 ศึกษาดินเหนียวบอสตันได้เสนอว่า $s_{u,FV} \approx 1.50 s_{u,UC}$ หรืองานวิจัยของธีรพล (2526) ศึกษาดินเหนียวทะเลสาบได้เสนอว่า $s_{u,FV} \approx 1.50 s_{u,UC}$ เป็นต้น พบว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ที่เสนอว่า $s_{u,FV(corr)} = 1.616 s_{u,UC}$ มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของต่างประเทศและงานวิจัยของไทยในอดีต

จากการเปรียบเทียบค่า s_u จากการทดสอบ CIUC และการทดสอบ UC ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางได้ผลว่า $s_{u,CIUC} > s_{u,UC}$ ซึ่งงานวิจัยในอดีตได้แก่ งานวิจัยของ Ahamad ในปี 1997 ศึกษาดินเหนียวชลบุรีได้เสนอว่า $s_{u,CK_0UC} = 1.40 s_{u,UC}$ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เสนอความสัมพันธ์ว่า $s_{u,CIUC} = 1.244 s_{u,UC}$ ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Ahamad ที่แสดงว่าการทดสอบแรงกดสามแกนให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมากกว่าการทดสอบแรงกดแกนเดียว ส่วนในชั้นดินเหนียวแข็งนั้นได้ผลว่า $s_{u,UC} > s_{u,CIUC}$ คือ $s_{u,CIUC} = 0.616 s_{u,UC}$ ซึ่งน่าจะเกิดจากอัตราเร็วการเฉือนที่แตกต่างกันมากทำให้ได้ค่า $s_{u,UC}$ ของชั้นดินเหนียวแข็งสูง

2) ความสัมพันธ์ของค่า s_u กับค่า N_{60} จากการทดสอบ UC และการทดสอบ SPT

ในงานวิจัยนี้สามารถหาความสัมพันธ์ของค่า s_u และ N_{60} ชั้นดินเหนียวแข็งได้คือ $s_{u,UC} = 7.181 N_{60}$ (kN/m²) ส่วนในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางนั้นไม่สามารถหาความสัมพันธ์ได้ เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ในอดีตของวีรพันธ์ ปิตุปรกรณ์ (2526) ได้เสนอความสัมพันธ์ของดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (CH) คือ $s_{u,UC} = 6.72 N$ (kN/m²) เมื่อเปรียบเทียบกับพบว่าความสัมพันธ์ในงานวิจัยนี้ได้ค่ามากกว่าเพราะในงานวิจัยนี้มีการปรับแก้ค่าพลังงาน 60% ของจำนวนครั้งการตอก แต่ความสัมพันธ์เมื่อเปรียบเทียบกันโดยไม่ปรับแก้พลังงาน 60% ความสัมพันธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าความสัมพันธ์ของวีรพันธ์ (2526)

3) ความสัมพันธ์ของค่า s_u กับ σ'_{v0} จากการทดสอบแบบต่างๆ

จากการทดสอบ UC ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางควรใช้ค่า $(s_u / \sigma'_{v0})_{NC}$ ที่มีค่าเท่ากับ 0.265 เพราะว่าเป็นความเค้นประสิทธิผลในดินจริง ซึ่งมีค่าที่ได้มากกว่าค่า $(s_u / \sigma'_{v0})_{NC}$ จากการทดสอบ UC ในงานวิจัยของ Mayne ที่รวบรวมข้อมูลดินเหนียวโบธเคนนารีในตารางที่ 2.6 ที่เท่ากับ 0.14

จากการทดสอบ CIUC ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางควรรู้ค่า $(s_u / \sigma'_{v0})_{NC}$ ที่มีค่าเท่ากับ 0.387 นั้น เนื่องจากเป็นค่าความเค้นประสิทธิผลที่ใช้ในการอัดตัวคาน้ำ ซึ่งค่าที่ได้มีค่ามากกว่างานวิจัยของ Mayne ในปี 2009 ที่แสดงค่า $(s_u / \sigma'_{v0})_{NC}$ จากการทดสอบ CIUC เท่ากับ 0.32 สรุปได้ว่าควรรู้ค่า σ'_{v0}^* ในการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งเป็นค่าความเค้นประสิทธิผลจริงในสนามจากการวัดค่าแรงดันน้ำในโพรงในสนามจริงที่ให้ค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าค่า σ'_{v0}

จากการทดสอบ FV ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางควรรู้ค่า $(s_u / \sigma'_{v0}^*)_{NC}$ ที่มีค่าเท่ากับ 0.445 เพราะว่าเป็นค่าความเค้นประสิทธิผลในดินจริง

ในชั้นดินเหนียวแข็งทั้งสามการทดสอบในงานวิจัยนี้ให้ค่าที่สูงกว่าค่าในงานวิจัยของ Mayne ในปี 2009 เพราะในงานวิจัยของ Mayne เป็นการวิเคราะห์ผลการทดสอบเฉพาะในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง

4) ความสัมพันธ์ของค่า E_u^{50} กับ s_u จากการทดสอบแบบต่างๆ

ในปี 1964 เบอรัม (Bjerrum, 1964) ได้แนะนำค่า $E_{u,i} / s_u$ จากการทดสอบดินเหนียวนอร์เวเจียน (Norwegian clay) แบบอัดแน่นปกติว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 250 ถึง 500 ซึ่งในงานวิจัยนี้ นั้นได้ผลค่าดังตารางที่ 4.9 ซึ่งเป็นค่า E_u^{50} ซึ่งเป็นจุดที่ค่าความเค้นครึ่งของกำลังครากทำให้ได้ค่าน้อยกว่าที่เบอรัมแนะนำไว้

5) ความสัมพันธ์ของค่า s_u / σ'_{v0} กับ PI จากการทดสอบแบบต่างๆ

ความสัมพันธ์ของค่า s_u / σ'_{v0} กับ PI จากการทดสอบที่ได้มีความกระจัดกระจายของข้อมูล และข้อมูลอยู่ในช่วงของค่า PI จำกัด คือในชั้นดินเหนียวอ่อนค่า PI อยู่ระหว่าง 44.3% ถึง 59.7% และ ชั้นดินเหนียวแข็งค่า PI อยู่ระหว่าง 29.8% ถึง 54.4% ทำให้ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นกลุ่มกระจัดกระจาย แต่จากความสัมพันธ์ที่ได้ก็อยู่ในแนวโน้มเดียวกับสมการที่ 2.6 (Skempton, 1954) คือ เมื่อค่าดัชนีพลาสติกของดิน (PI) สูงขึ้นจะทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับค่าความเค้นประสิทธิผล (s_u / σ'_{v0}) สูงขึ้นตามไปด้วย

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางกรุงเทพ (Soft to medium Bangkok clay) ได้แก่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่ระดับความลึกเดียวกันจากการทดสอบแบบต่างๆ การทดสอบที่ให้ค่า s_u มากที่สุดคือ การทดสอบใบมีดสนาม รองลงมาคือ การทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ และการทดสอบแรงกดแกนเดียวตามลำดับ นั่นคือ

$$s_{u, FV(cor)} > s_{u, CIUC} > s_{u, UC}$$

จากผลของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบแบบต่างๆ สามารถหาสหสัมพันธ์ (Correlation) ที่แสดงถึงความแปรปรวนของค่า s_u ในการทดสอบแต่ละวิธีของดินเหนียวกรุงเทพได้ดังนี้

$$\text{Soft to medium clay: } s_{u, CIUC} = 1.244 s_{u, UC}$$

$$s_{u, FV(cor)} = 1.616 s_{u, UC}$$

$$\text{Stiff clay: } s_{u, CIUC} = 0.616 s_{u, UC}$$

จากผลการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐานสามารถความสัมพันธ์เพื่อประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพได้ดังนี้

$$\text{Stiff clay: } s_{u, UC} = 7.181 N_{60} \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

จากผลของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบแบบต่างๆ สามารถหาความสัมพันธ์ของค่า s_u กับค่าความเค้นประสิทธิผลในสนาม (σ'_{v0}) โดยสมมติว่าดินเหนียวมีสภาพอัดแน่นปกติ (Normally consolidated clay, NC) และแบ่งเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง และชั้นดินเหนียวแข็งได้ความสัมพันธ์ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปผลค่า s_u / σ'_{v0}

Test Method	$(s_u / \sigma'_{v0})_{NC}$			
	Soft to medium		Stiff	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.
UC	0.265	0.140	0.647	0.300
CIUC	0.387	0.090	0.723	0.140
FVT	0.445	0.270	-	-

จากผลของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว และการทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวค้ำน้ำและไม่ระบายน้ำ สามารถหาความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ที่ครึ่งของกำลังครากแบบไม่ระบายน้ำ (E_u^{50}) กับค่า s_u โดยแยกเป็นชั้นดินอ่อนถึงปานกลาง และชั้นดินเหนียวแข็ง ได้ผลดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตารางสรุปผลค่า E_u^{50} / s_u

Test Method	E_u^{50} / s_u			
	Soft to medium		Stiff	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.
CIUC	151.50	41.73	166.50	34.50
UC	83.57	43.49	101.50	16.44

5.2 สรุปประเด็นที่ได้จากงานวิจัย

- 1) ผู้ใช้งานสามารถนำความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) เพื่อปรับแก้ค่า s_u จากวิธีการทดสอบหนึ่งไปเป็นผลของอีกวิธีการทดสอบหนึ่งได้
- 2) ผู้ใช้งานสามารถแปรผลค่า N_{60} จากการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐานไปเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว ($s_{u,UC}$) สำหรับชั้นดินเหนียวแข็ง ได้จากความสัมพันธ์ข้างต้น
- 3) ผู้ใช้งานสามารถประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) อย่างหายาจากความสัมพันธ์ของค่า s_u กับความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง (σ'_{v0})

- 4) ผู้ใช้งานสามารถประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แกนตั้งที่ครึ่งของกำลังครากแบบไม่ระบายน้ำ (E_u^{50}) อย่างหยาบของการทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว และการทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำจากความสัมพันธ์ของค่า E_u^{50} กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) จากตารางที่ 5.2
- 5) การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียวอ่อนไม่ควรใช้การทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐานเพราะผลของค่า N มีค่าน้อยและมีค่าที่ไม่น่าเชื่อถือ
- 6) การทดสอบในสนามได้แก่ การทดสอบโปมีดสนาม และการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน การนำค่าจากการทดสอบมาแปรผลเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำควรมีการปรับแก้เป็นค่ามาตรฐานก่อนการแปรผลเพื่อให้ได้ผลของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ใกล้เคียงความจริง
- 7) การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ควรนำไปใช้งานมากที่สุดคือ การทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ (Consolidated isotropically undrained compression triaxial, CIUC)
- 8) การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำควรมีการตรวจสอบเพื่อให้เครื่องทดสอบมีความเที่ยงตรงอยู่เสมอ (Calibration) ซึ่งจะทำให้ค่าที่ได้มีความถูกต้อง
- 9) ผู้ใช้งานสามารถใช้งานวิจัยนี้เพื่อเป็นปัจจัยในการเลือกใช้การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางและชั้นดินเหนียวแข็ง โดยตระหนักว่าการทดสอบที่ต่างกันจะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่แตกต่างกันด้วย

5.3 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

- 1) งานวิจัยในอนาคตควรทดสอบดินกรุงเทพฯ ด้วยการทดสอบการเฉือนโดยตรงอย่างง่าย (Direct simple shear, DSS) ที่น่าจะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุด
- 2) งานวิจัยในอนาคตเพิ่มสถานที่ทดสอบของดินกรุงเทพฯ เพื่อทำให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ธีรชัย เต็งชู. พลังงานประสิทธิผลในการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานโดยตุ้มตอกชนิดต่างๆ.

ใน รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม พ.ศ.2553 ณ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2553.

ธีรพล ไตรวรชिरากุล. การให้ความหมายและความเหมาะสมของวิธีการวัดแรงเฉือนในสนามแบบ อันเดรอนสำหรับใช้กับดินอ่อนในกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, บัณฑิต วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.

วีรพันธ์ ปิตุปรกรณ์. การคาดคะเนการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยสแตนด์การ์ด เพเนเทรชั่น เทสต์ ในดินกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.

สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรอง. ปฏิพิภคศาสตร์ : หลักการพื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ภาษาอังกฤษ

Ahamad, M. Undrained shear strength characteristics of soft Bangkok clay by recompression triaxial tests. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 1997.

Akrapongpisai, S. Comparison of strengths measured by vane shear, unconfined compression and triaxial shear tests in Bangkok clay. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 1970.

Budhu, M. Soil mechanics and foundations. United States of America : John Wiley and Sons, 2000.

Chen, L.K. Comparison of Recompression and SHANSEP Strength-Deformation Properties of Undisturbed Bangkok Clay. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 1993.

Chiyadhuma, W. Undrained Shear Strength Characteristics of Nong Ngoo Hao Soft Clay Under K_0 Anisotropic Consolidation. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 1974.

- Germaine, J.T. et al. Soil Behavior and Soft Ground Construction. Proceedings of the Symposium, Geotechnical report publication No.119, 2001, October 5-6, 2001, Massachusetts, 2001.
- Jan, C.N. Undrained shear strength characteristics of Pathumwan clay. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 1976.
- Ladd, C.C., Za, C.M., and Gifford, D.G. Undrained strength of soft Bangkok clay. The 4th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paper No.59, July 1971, Bangkok, 1971.
- Ladd, C.C. et al. Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization: Arthur Casagrande Lecture. The 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, June 22-25, 2009, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2009.
- Mayne, P.W. et al. Geomaterial behavior and testing. The 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2777- 2872, 2009.
- Memon, M.A. Undrained shear strength on different failure planes of soft Rangsit clay. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 1976.
- Moh, Z.C., Nelson, J.D., and Brand, E.W. Strength and deformation behaviour of Bangkok clay. The 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paper No.43, August 1969, Mexico City, 1969.
- Mohiuddin, A. Undrained Shear Strength Characteristics of Soft Bangkok Clay by Recompression Triaxial Tests. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 1997.
- Philip, J., Effects of Back Pressure in Strength Behavior of Bangkok Clay. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 1970.
- Sambhandharaksa, S., and Taesiri, Y. Development of theory and practice in geotechnical engineering. The 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Research report No.109., July 20-24, 1987, Kyoto, 1987.

Salgado, R. The engineering of foundations. Singapore : McGraw-Hil, 2008.

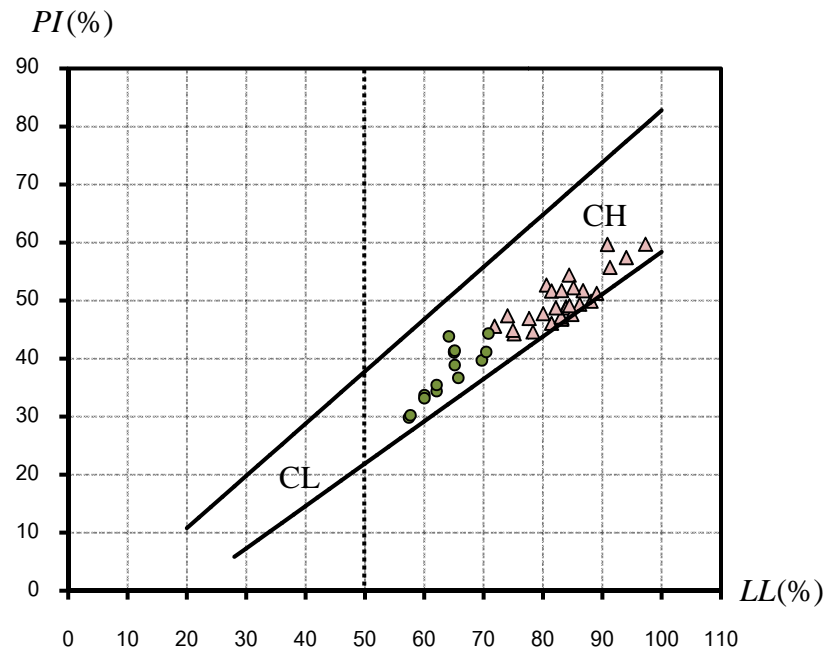
Tan, P.S. Undrained shear strength characteristics of Rangsit clay. Master's Thesis,
Department of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 1975.

Vaughan, P.R., 1994. Assumption, prediction and reality in geotechnical engineering.
Geotechnique 44, Issue 4, No.4, 573 – 609, Institute of Civil Engineering, 1994.

Wroth, C.P.,and Houlsby, G.T. Soil Mechanics-Property Characterization and
Analysis Procedures. The 11th International Conference on Soil Mechanics and
Foundation Engineering, August 12-16, 1985, San Francisco, 1984.

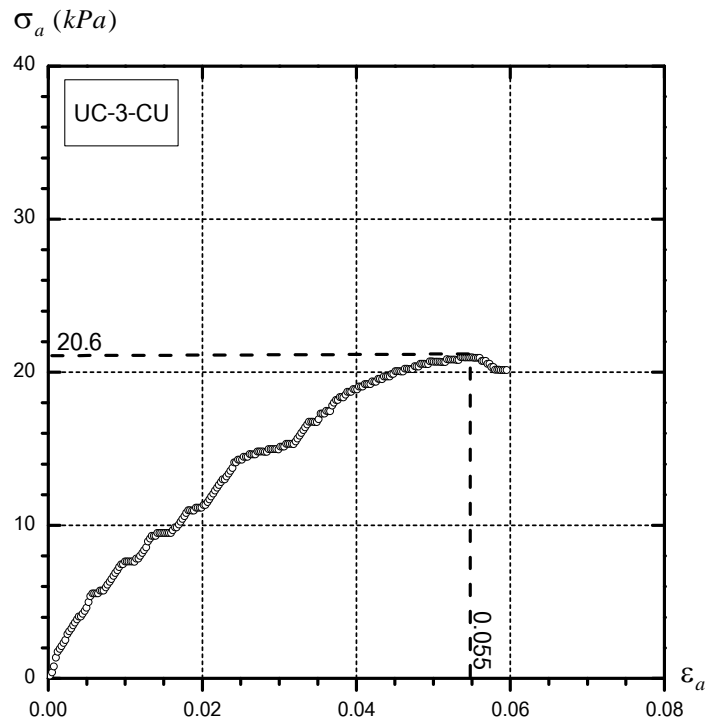
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

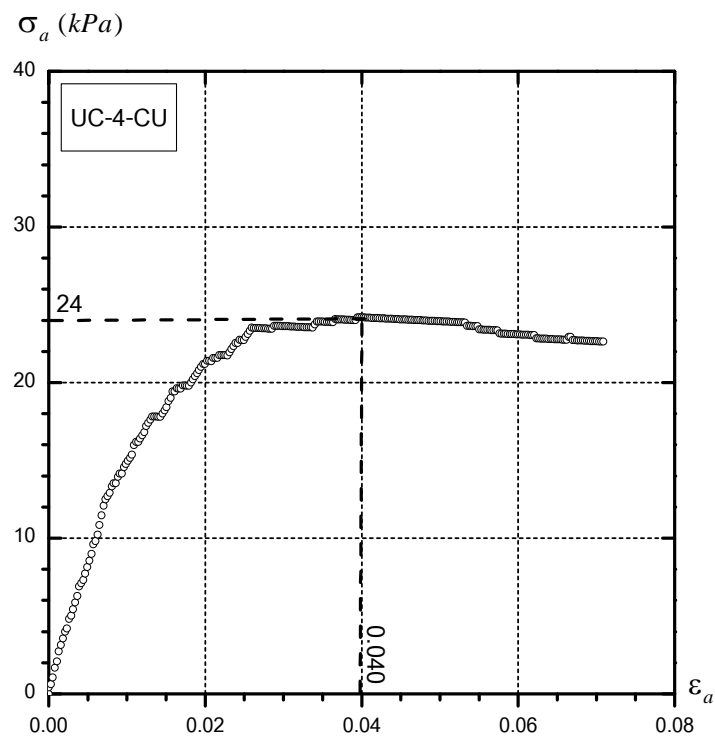


ภาพที่ ก.1 แผนภูมิพลาสติกที่ดีจำแนกชนิดของดินเหนียวในงานวิจัย

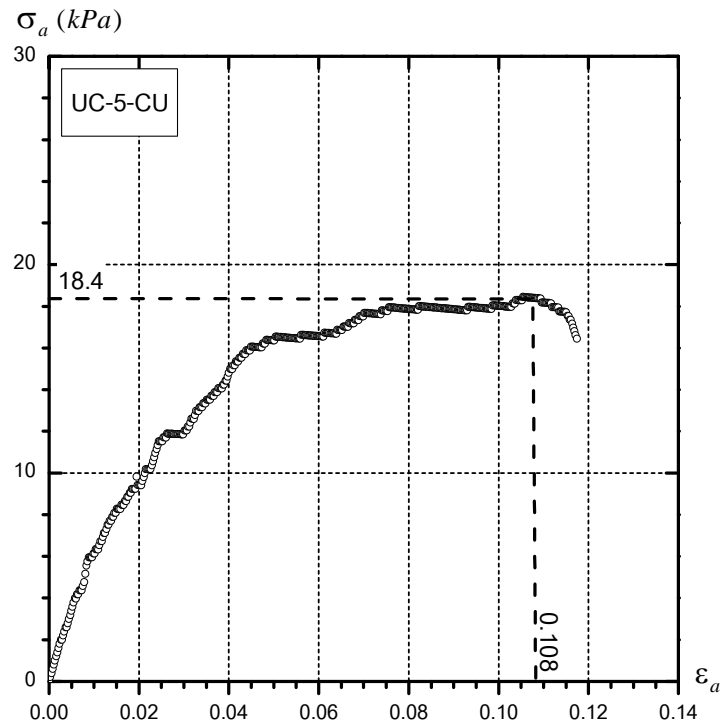
ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบแรงกดแกนเดียว



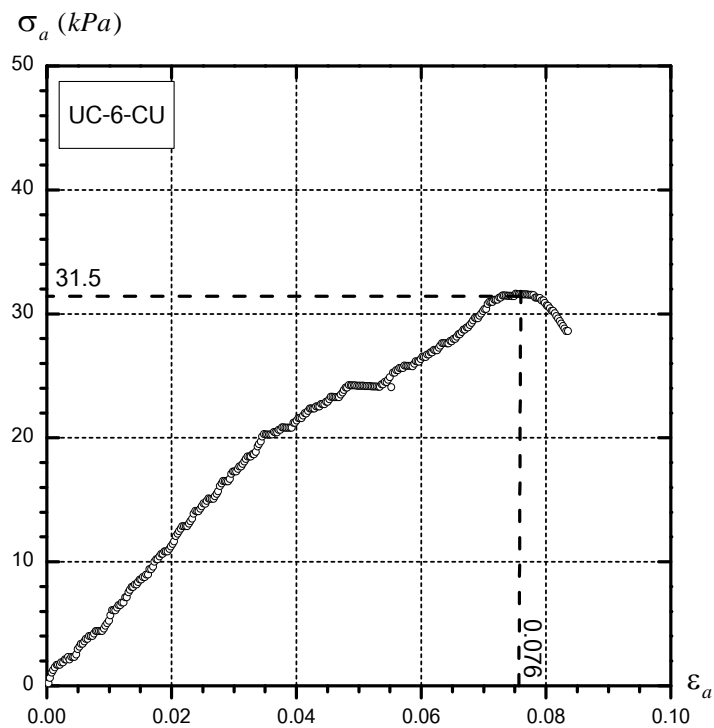
ภาพที่ ข.1 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 3.00-3.50 เมตร



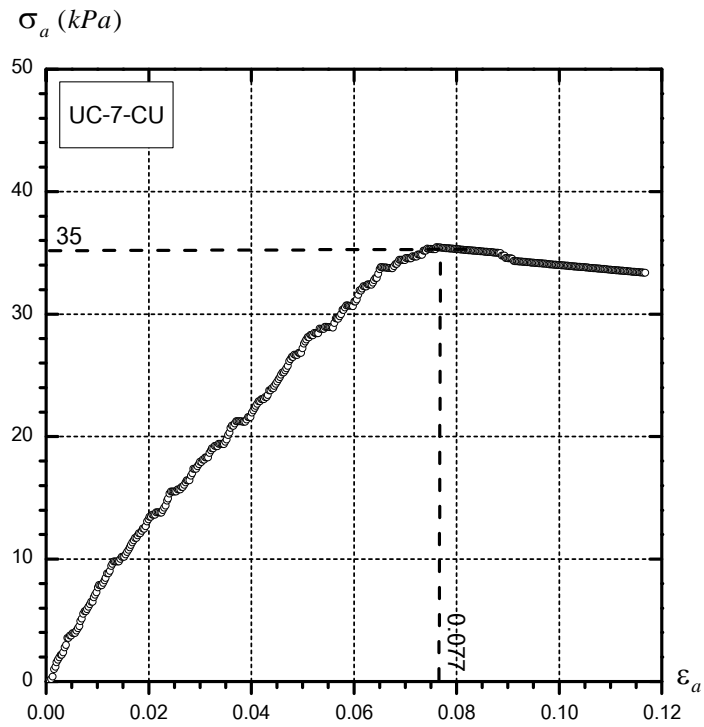
ภาพที่ ข.2 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 4.00-4.50 เมตร



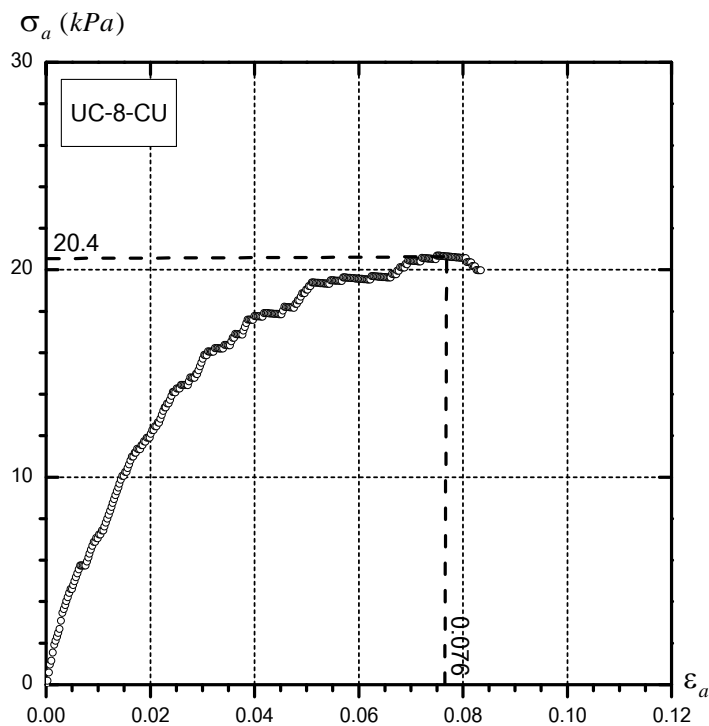
ภาพที่ ข.3 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 5.00-5.50 เมตร



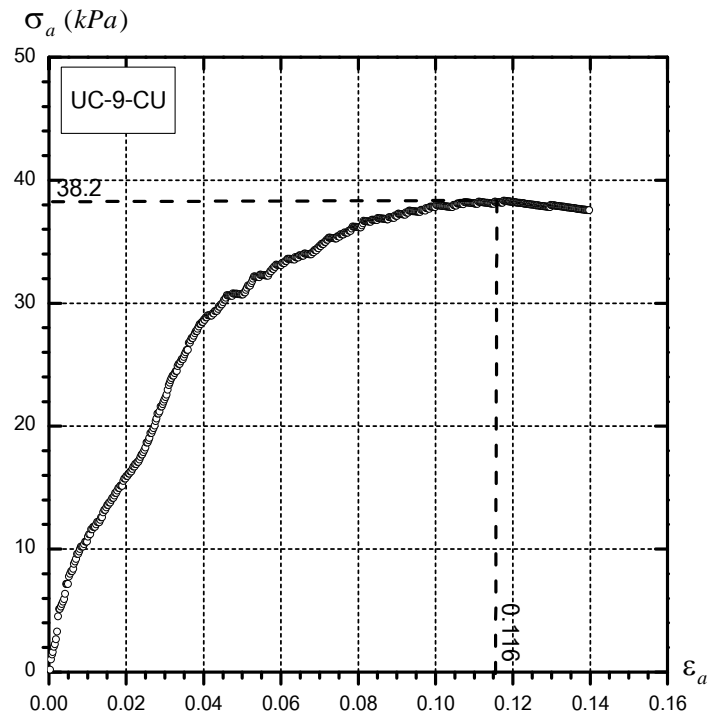
ภาพที่ ข.4 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 6.00-6.50 เมตร



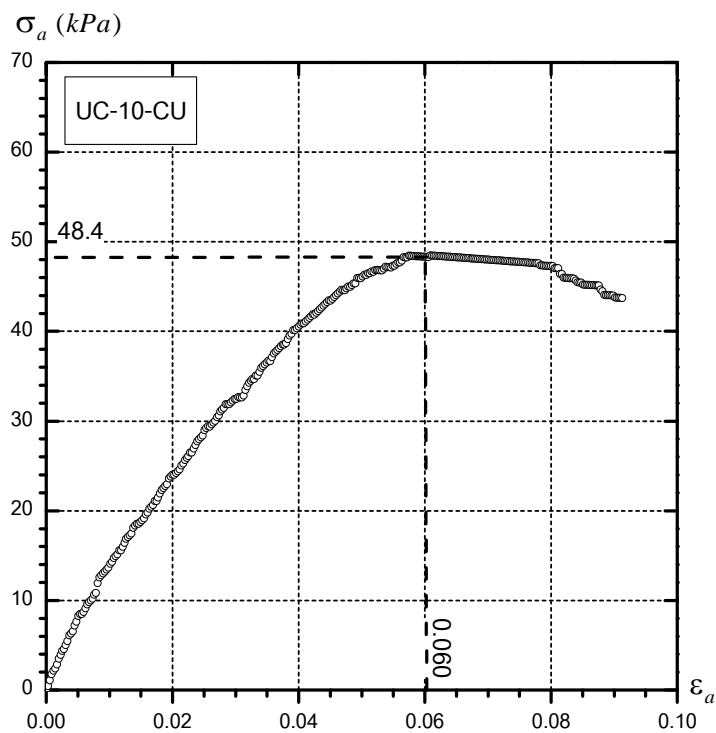
ภาพที่ ข.5 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 7.00-7.50 เมตร



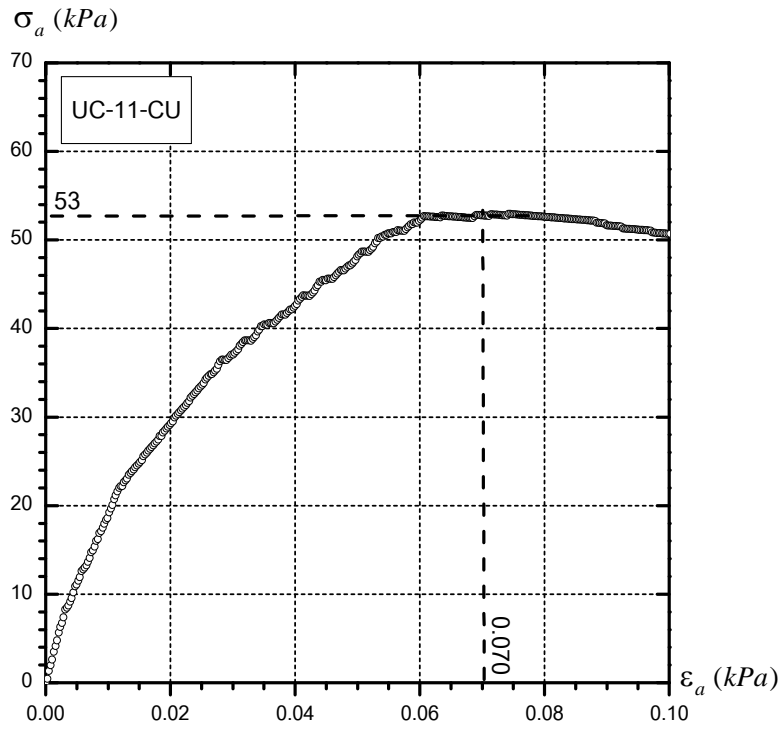
ภาพที่ ข.6 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 8.00-8.50 เมตร



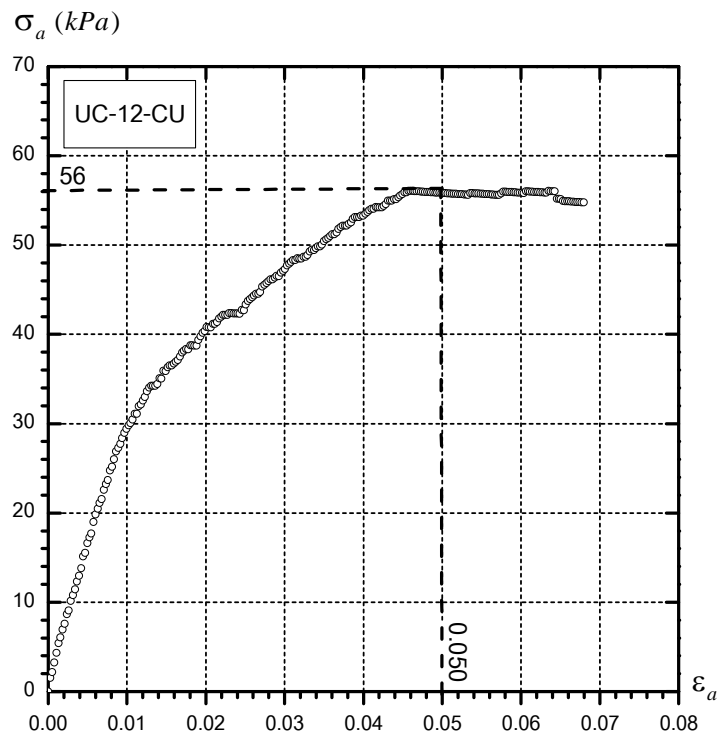
ภาพที่ ข.7 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 9.00-9.50 เมตร



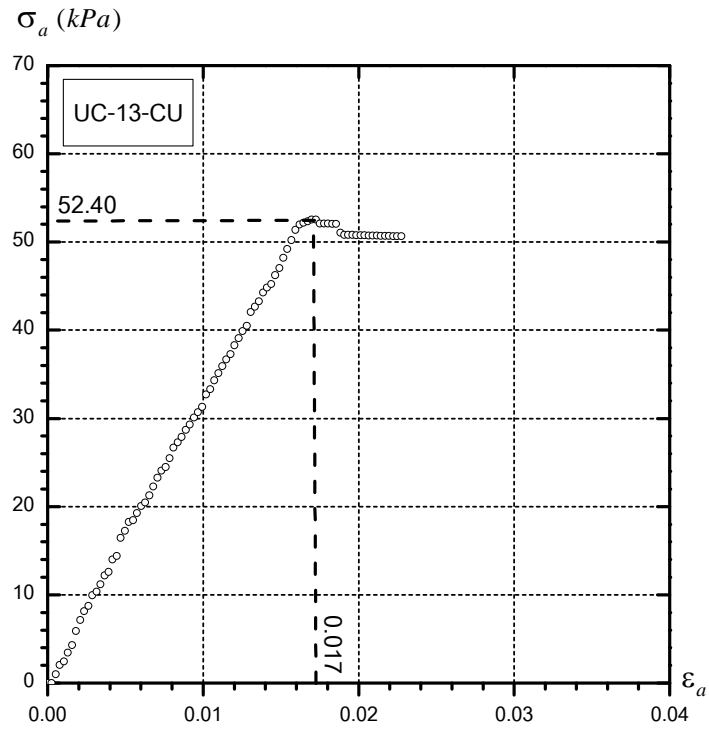
ภาพที่ ข.8 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 10.00-10.50 เมตร



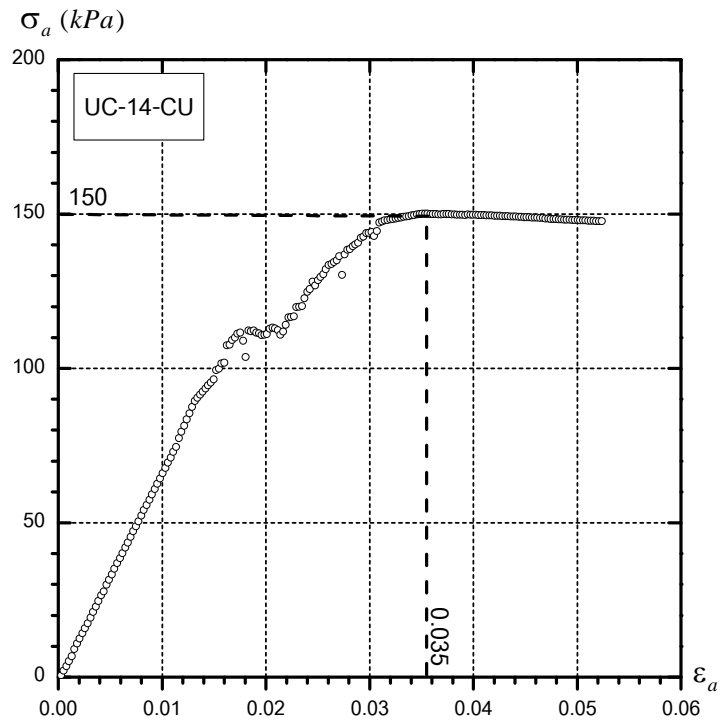
ภาพที่ ข.9 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 11.00-11.50 เมตร



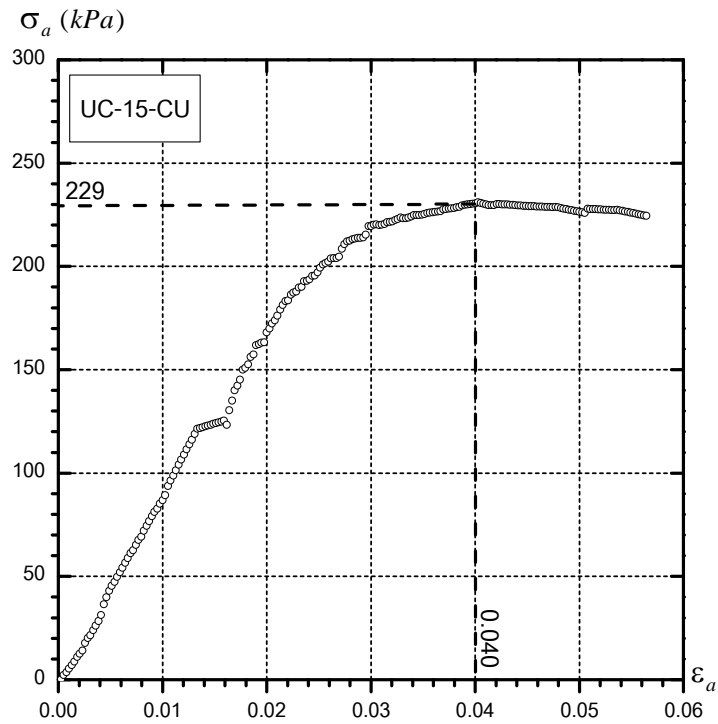
ภาพที่ ข.10 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 12.00-12.50 เมตร



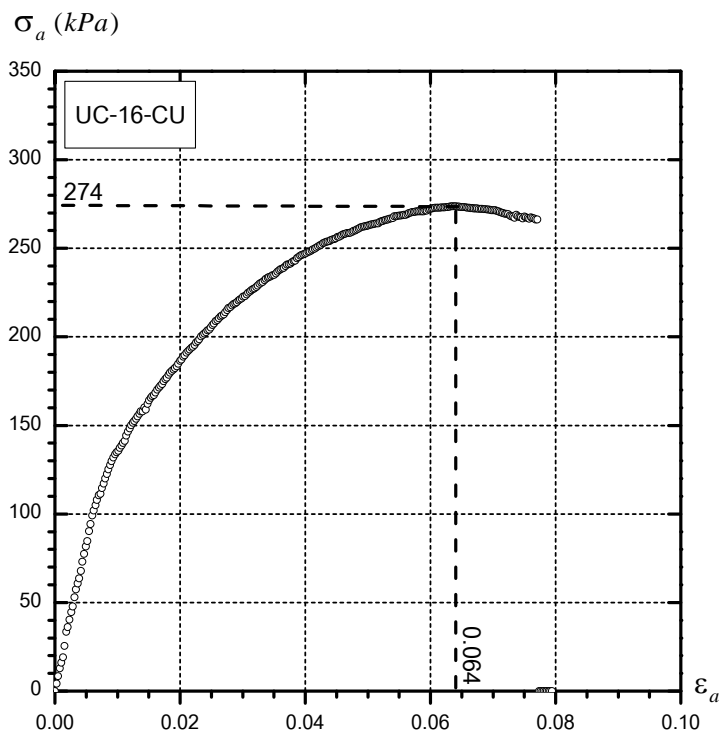
ภาพที่ ข.11 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 13.00-13.50 เมตร



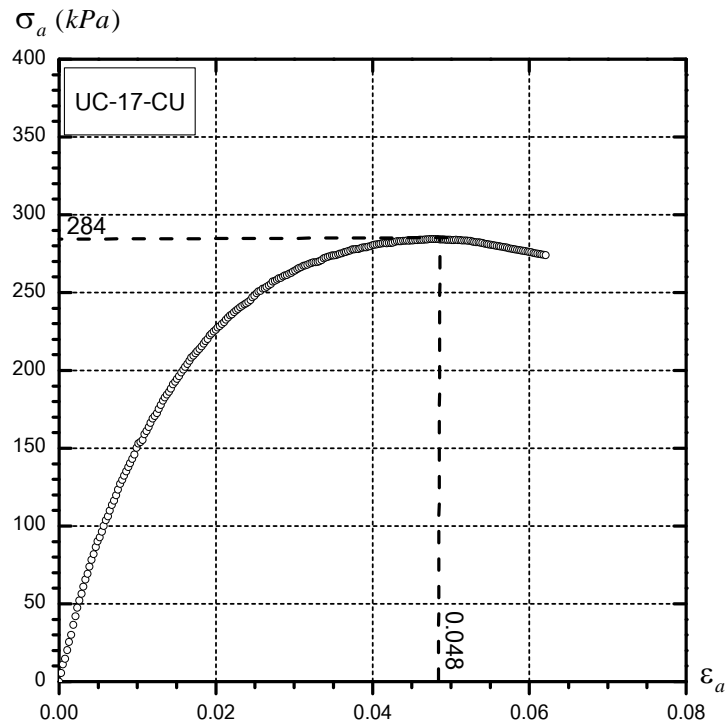
ภาพที่ ข.12 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 14.00-14.50 เมตร



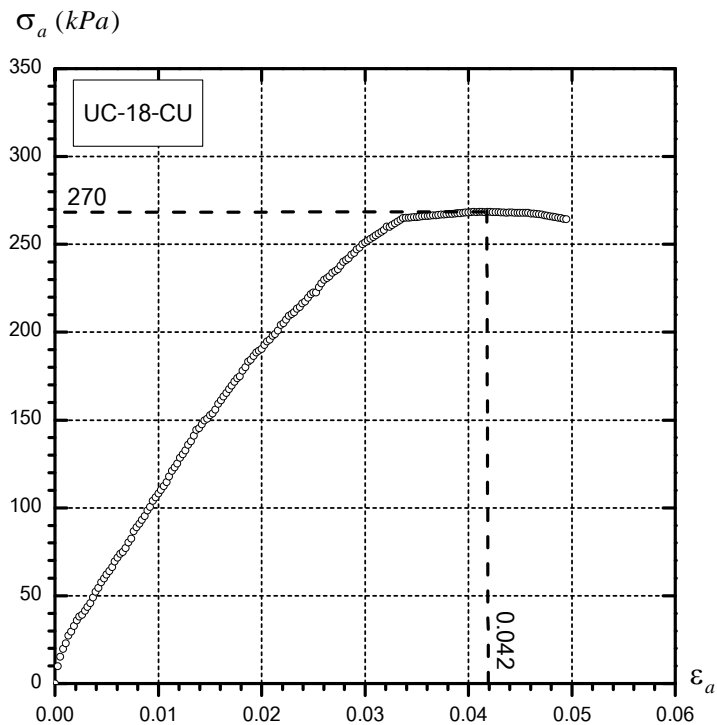
ภาพที่ ข.13 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 15.00-15.50 เมตร



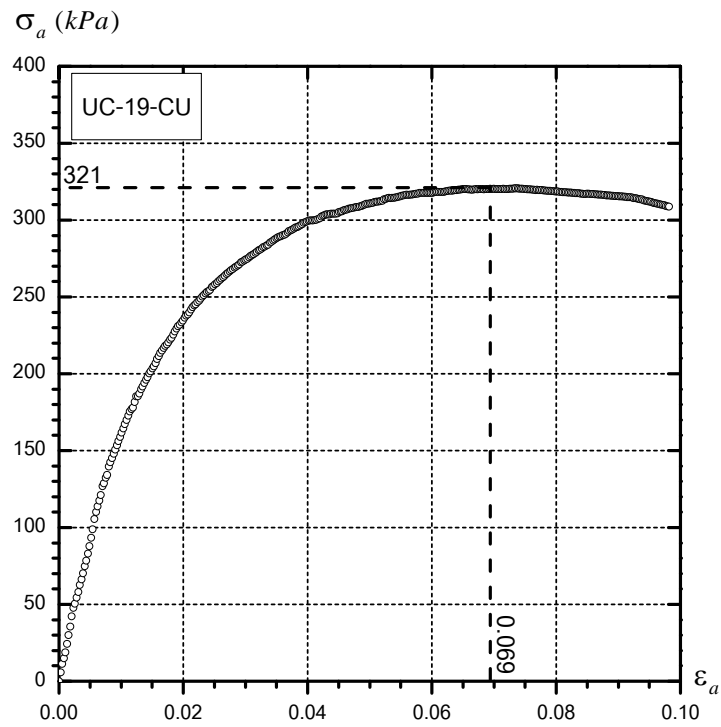
ภาพที่ ข.14 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 16.00-16.50 เมตร



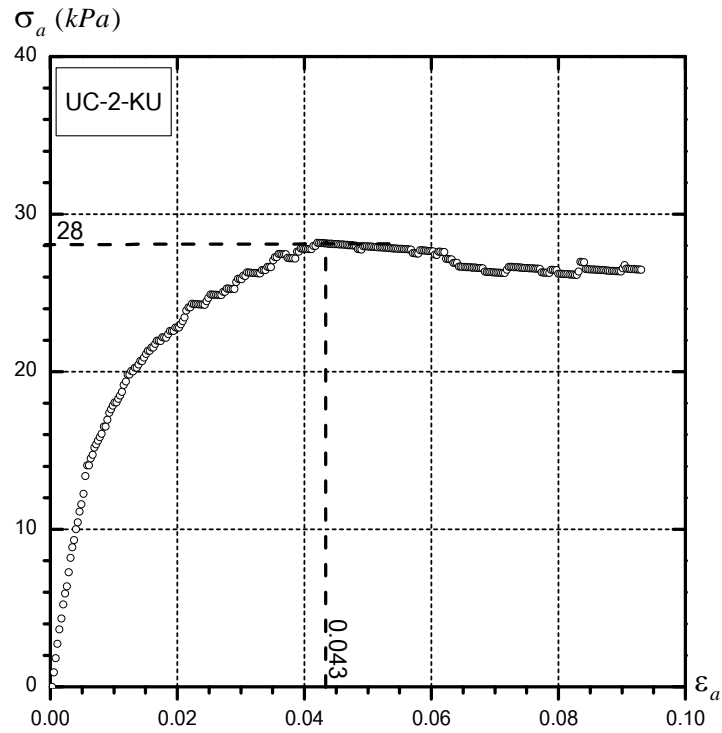
ภาพที่ ข.15 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 17.00-17.50 เมตร



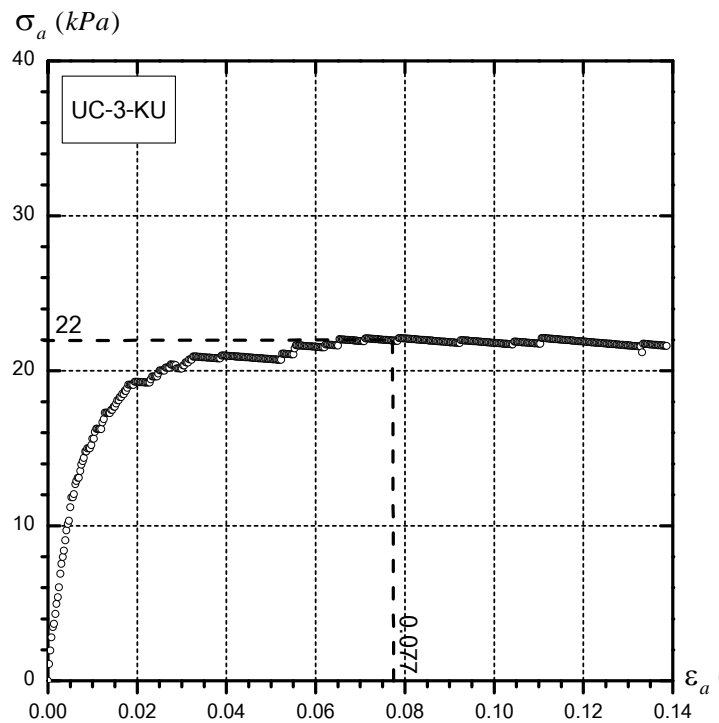
ภาพที่ ข.16 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 18.00-18.50 เมตร



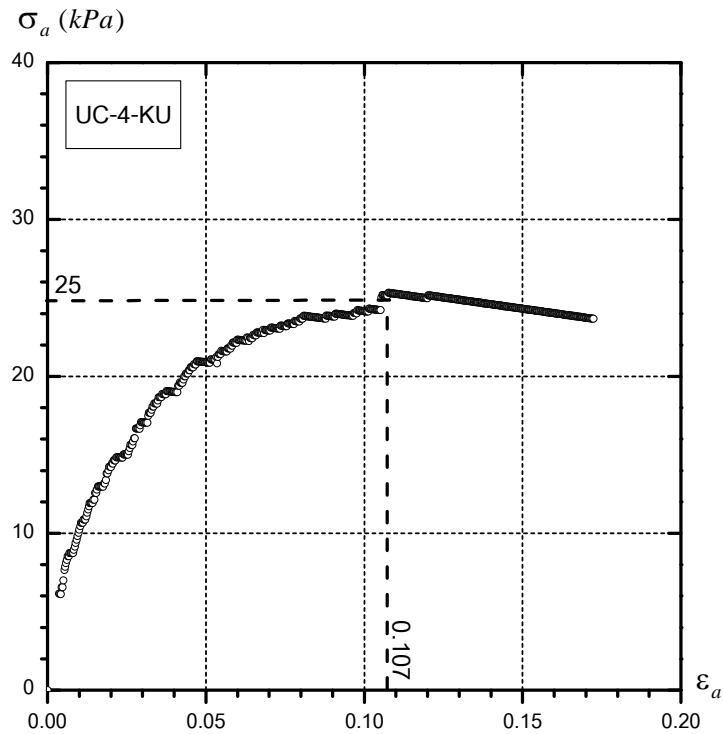
ภาพที่ ข.17 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกน
ของการทดสอบ UC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 19.00-19.50 เมตร



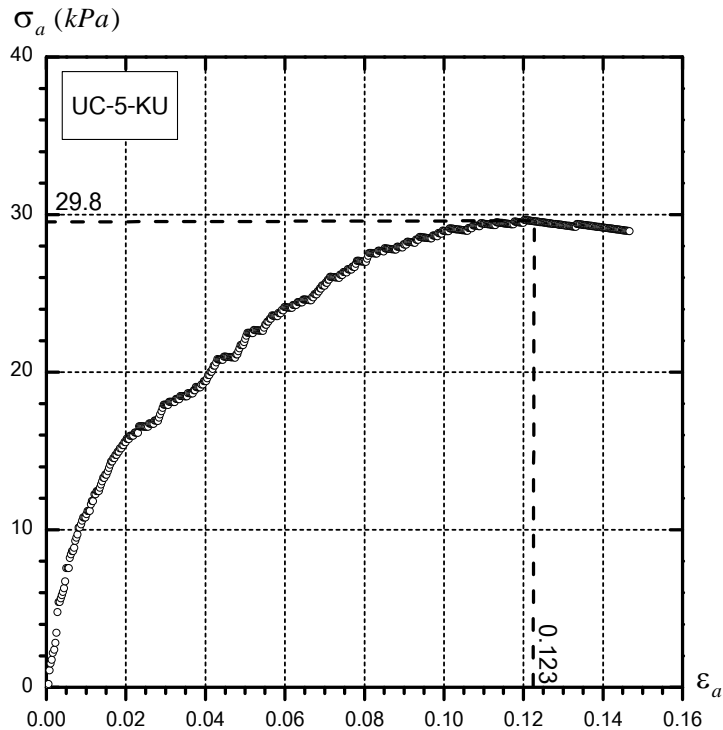
ภาพที่ ข.18 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 2.00-2.50 เมตร



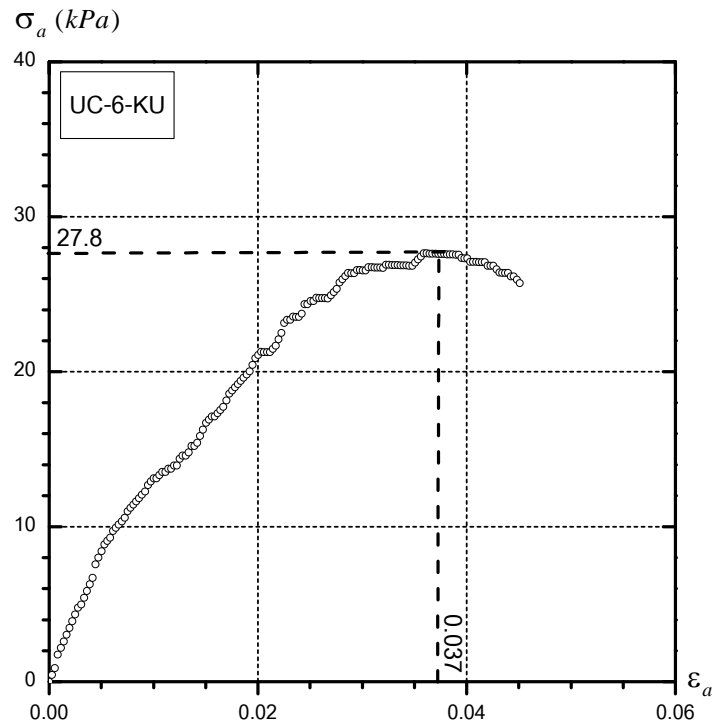
ภาพที่ ข.19 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 3.00-3.50 เมตร



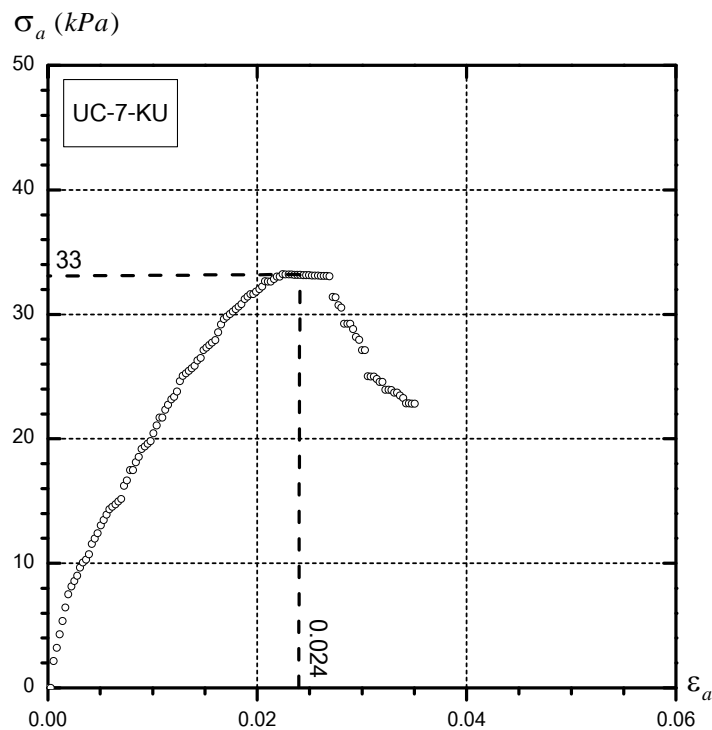
ภาพที่ ข.20 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 4.00-4.50 เมตร



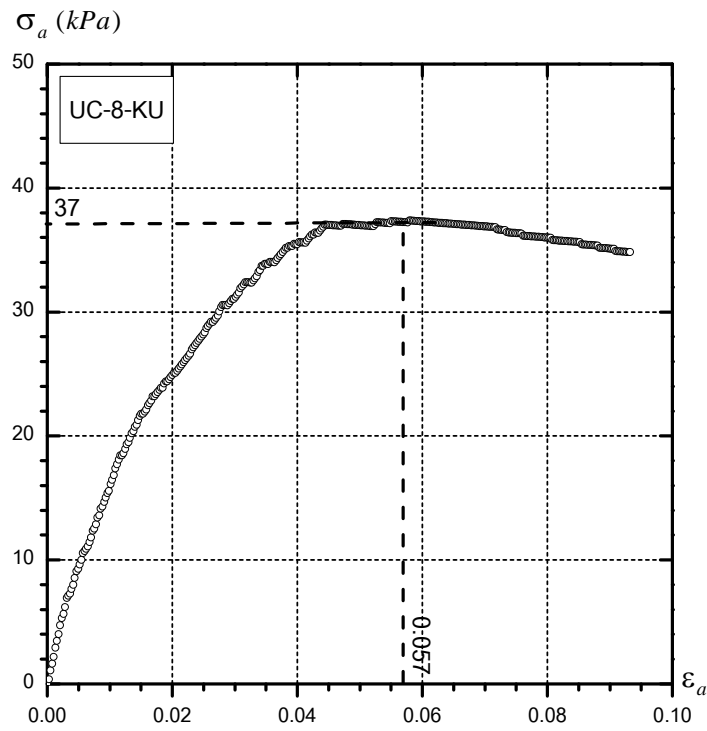
ภาพที่ ข.21 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 5.00-5.50 เมตร



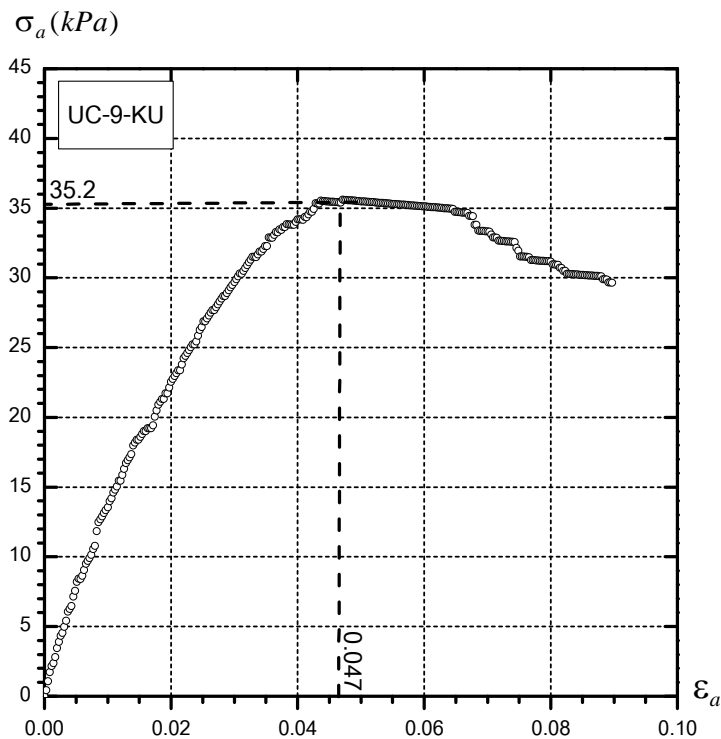
ภาพที่ ข.22 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 6.00-6.50 เมตร



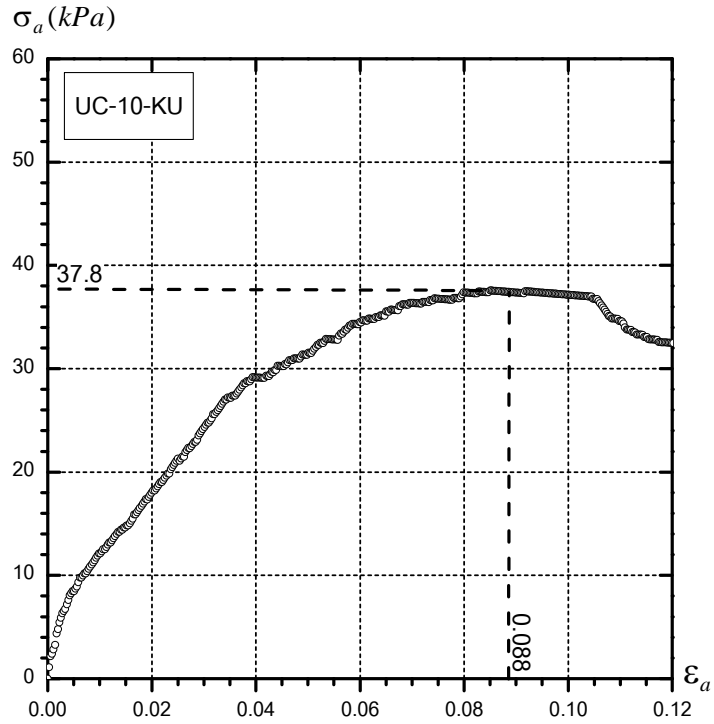
ภาพที่ ข.23 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 7.00-7.50 เมตร



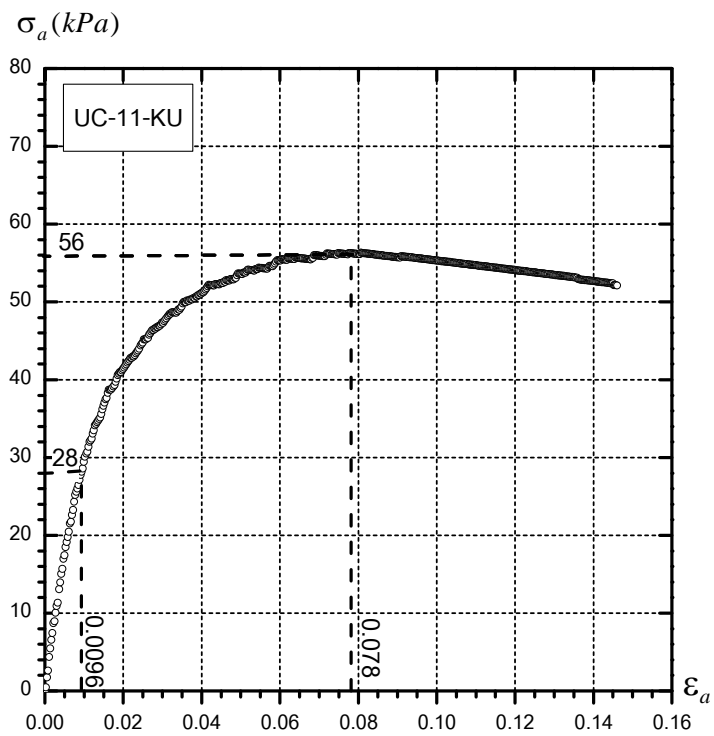
ภาพที่ ข.24 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 8.00-8.50 เมตร



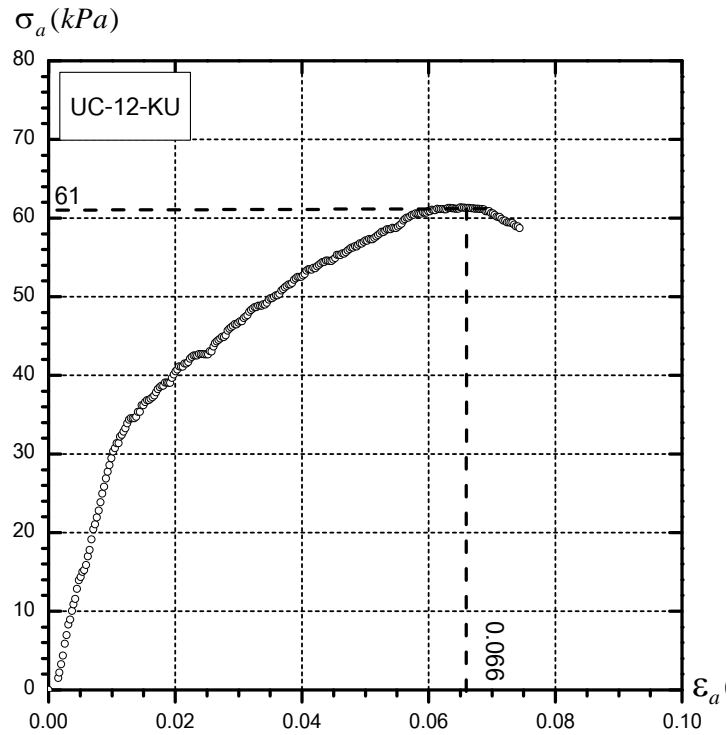
ภาพที่ ข.25 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 9.00-9.50 เมตร



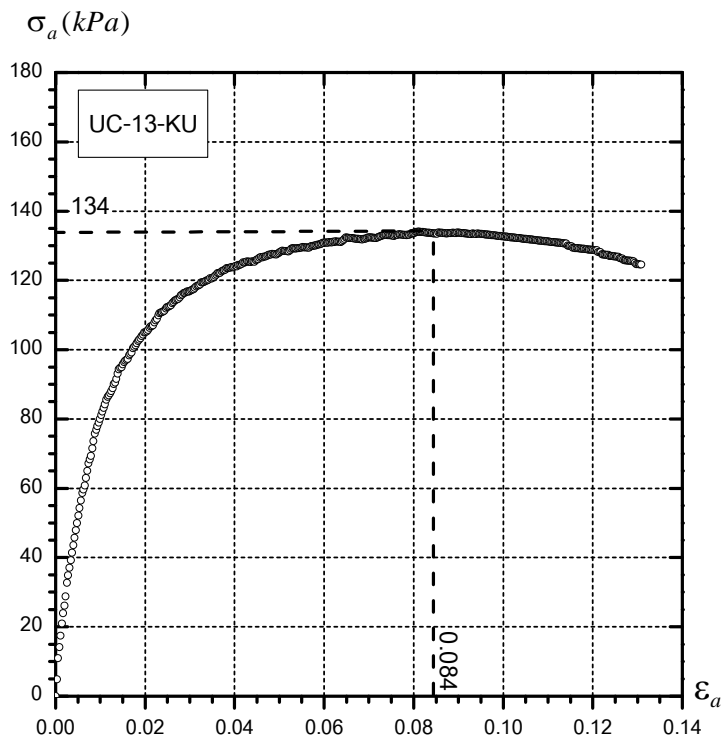
ภาพที่ ข.26 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 10.00-10.50 เมตร



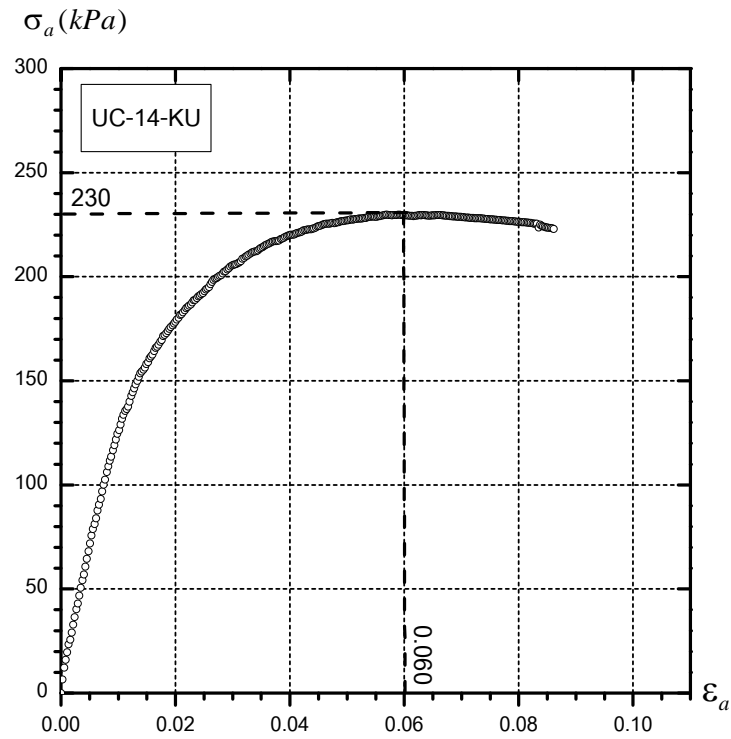
ภาพที่ ข.27 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 11.00-11.50 เมตร



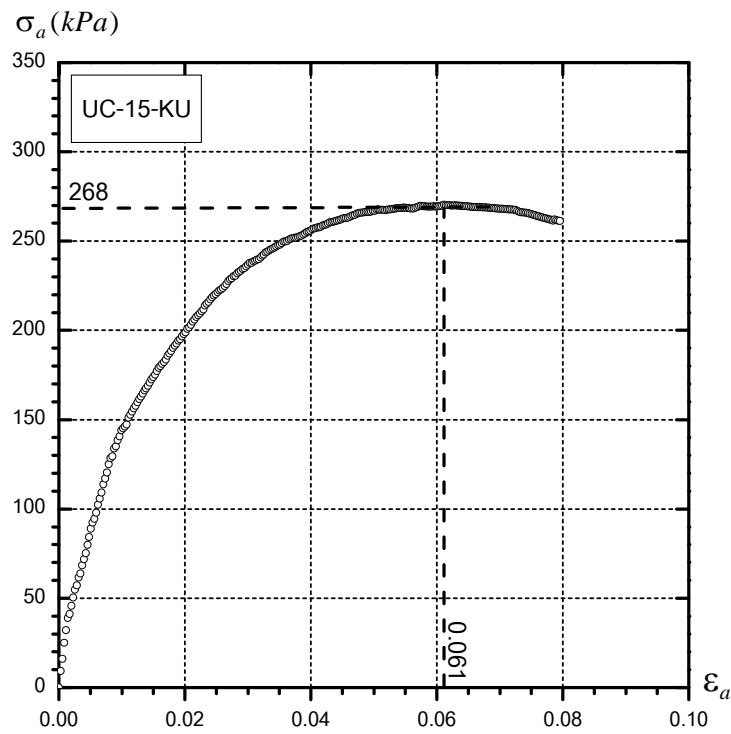
ภาพที่ ข.28 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 12.00-12.50 เมตร



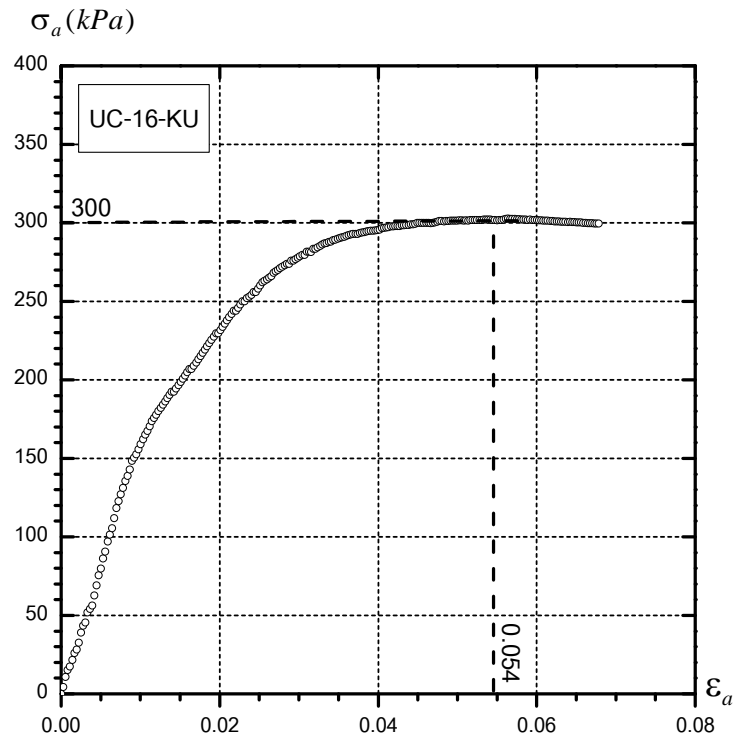
ภาพที่ ข.29 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 13.00-13.50 เมตร



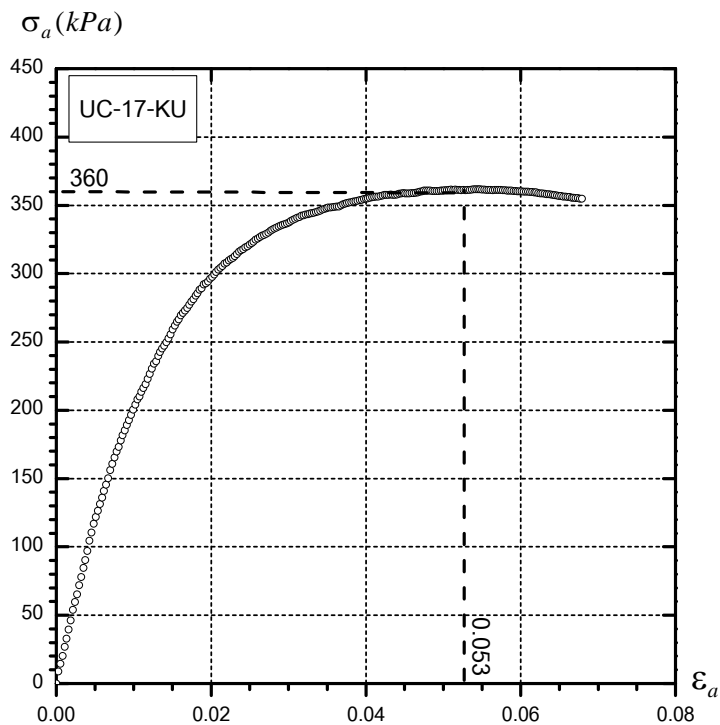
ภาพที่ ข.30 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 14.00-14.50 เมตร



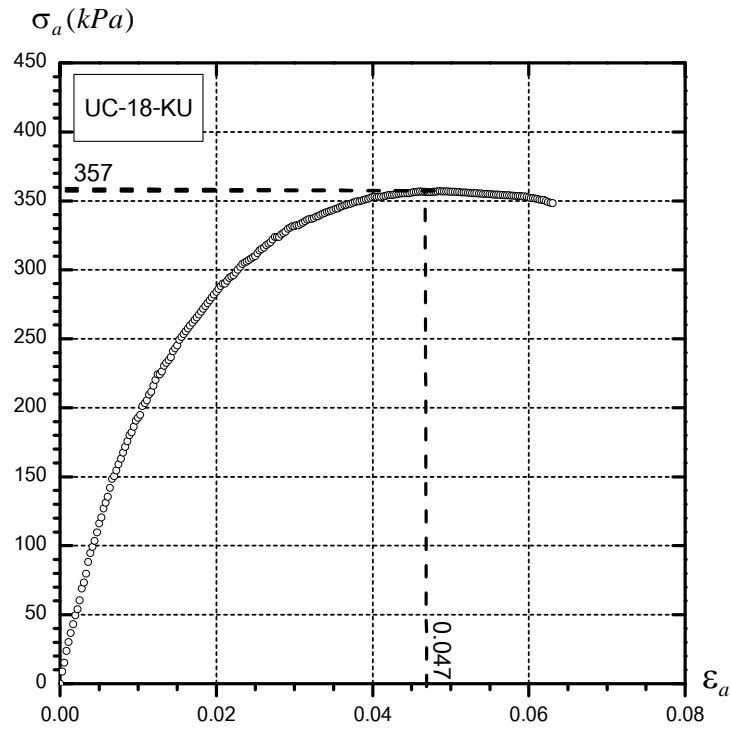
ภาพที่ ข.31 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 15.00-15.50 เมตร



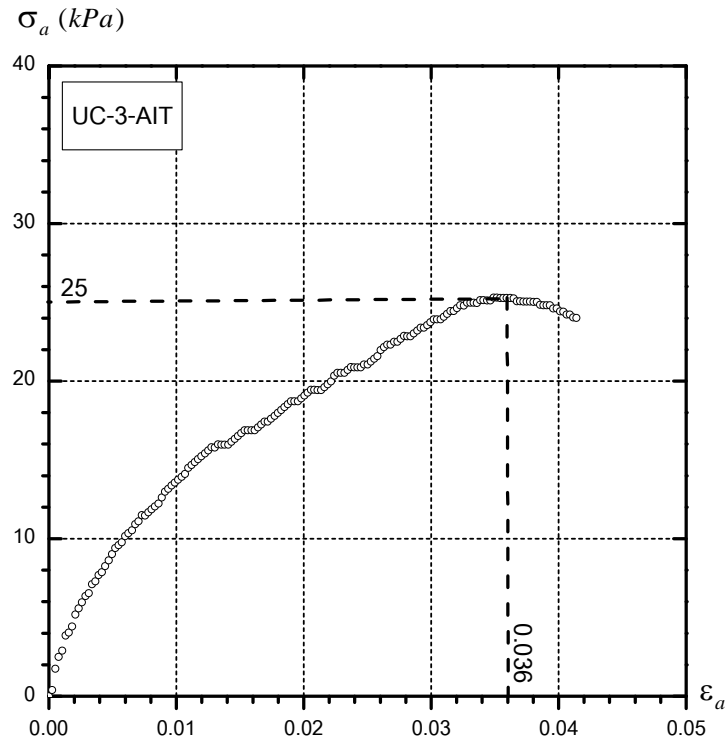
ภาพที่ ข.32 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 16.00-16.50 เมตร



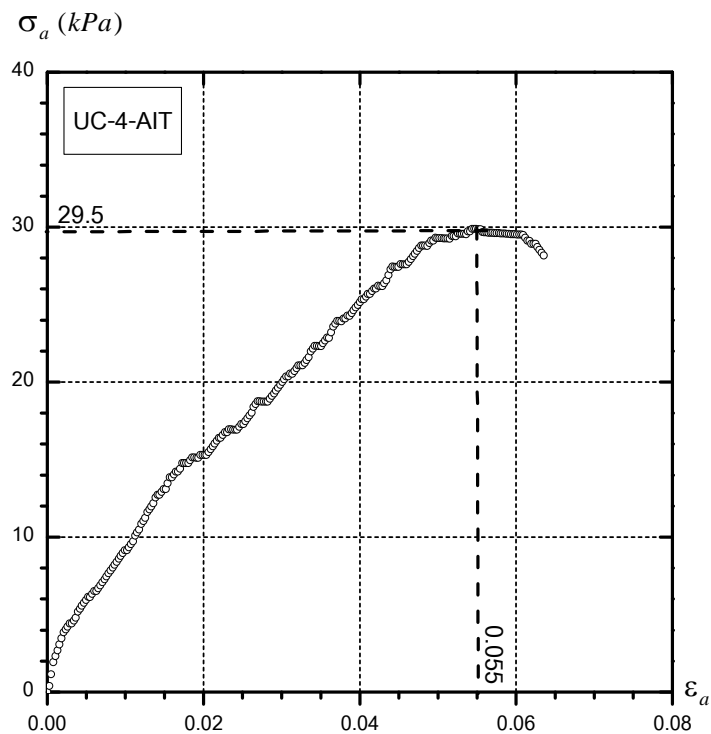
ภาพที่ ข.33 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 17.00-17.50 เมตร



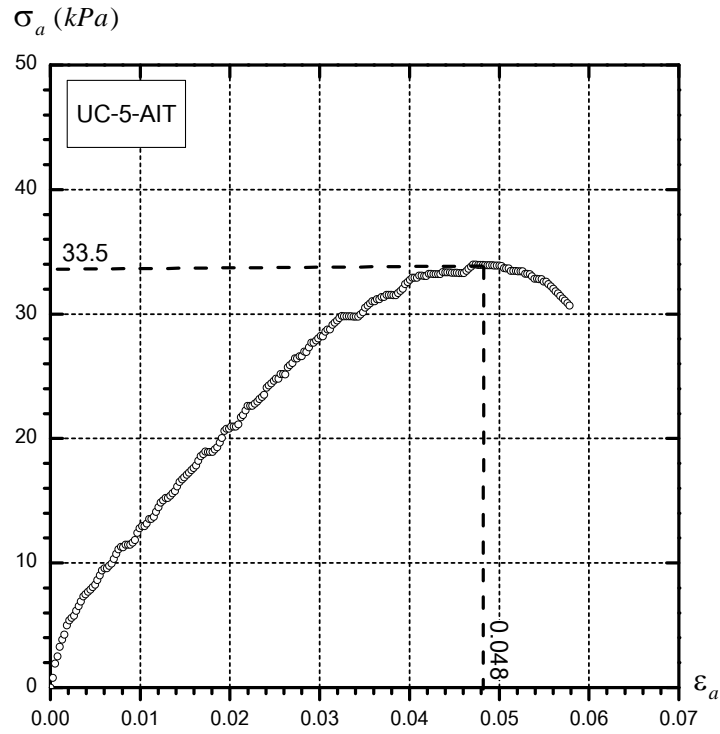
ภาพที่ ข.34 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกน
ของการทดสอบ UC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 17.00-17.50 เมตร



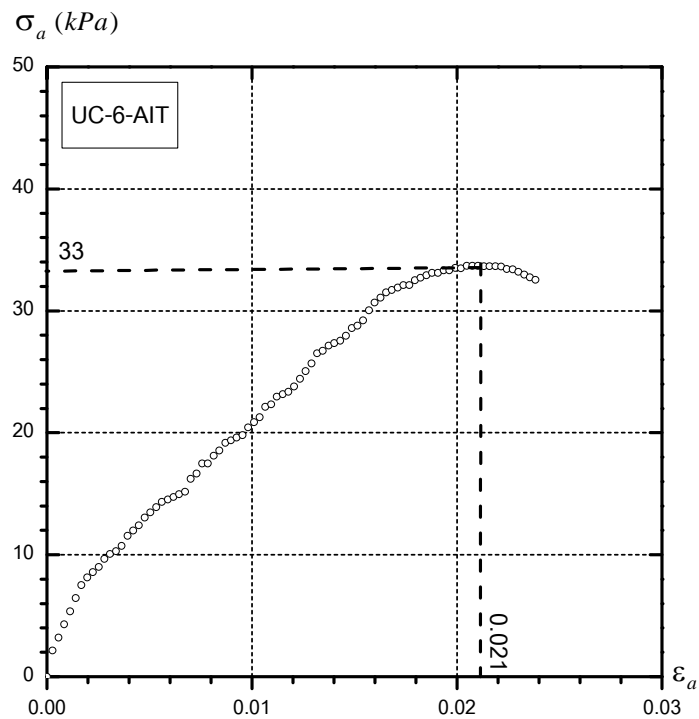
ภาพที่ ข.35 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 3.00-3.50 เมตร



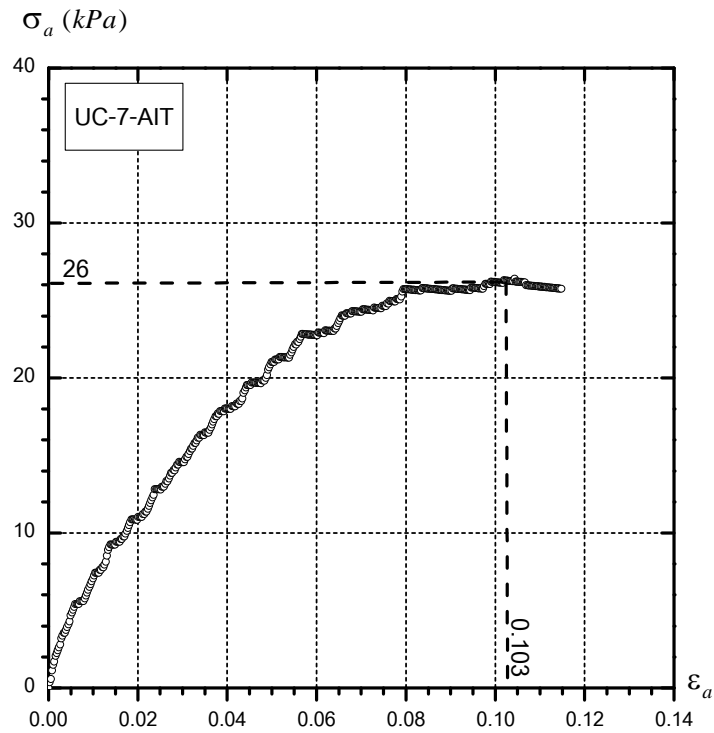
ภาพที่ ข.36 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 4.00-4.50 เมตร



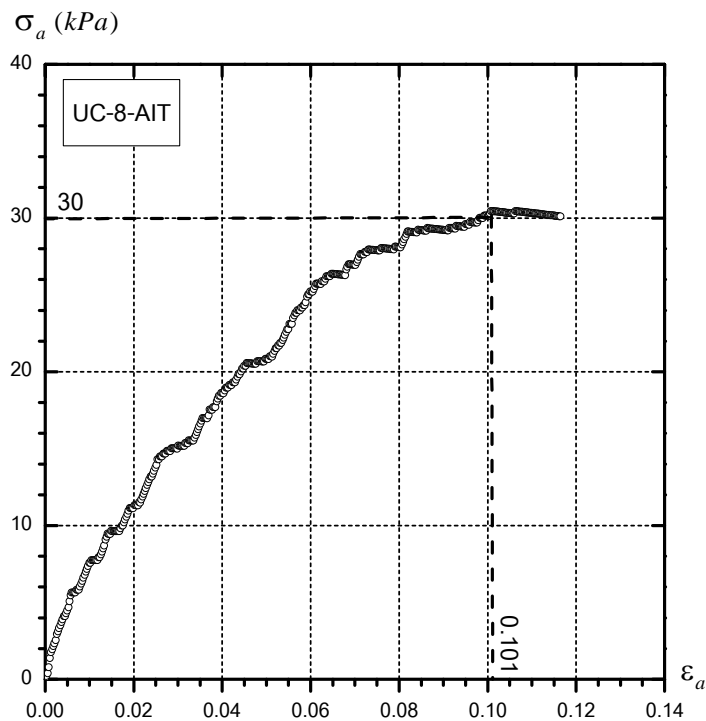
ภาพที่ ข.37 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 5.00-5.50 เมตร



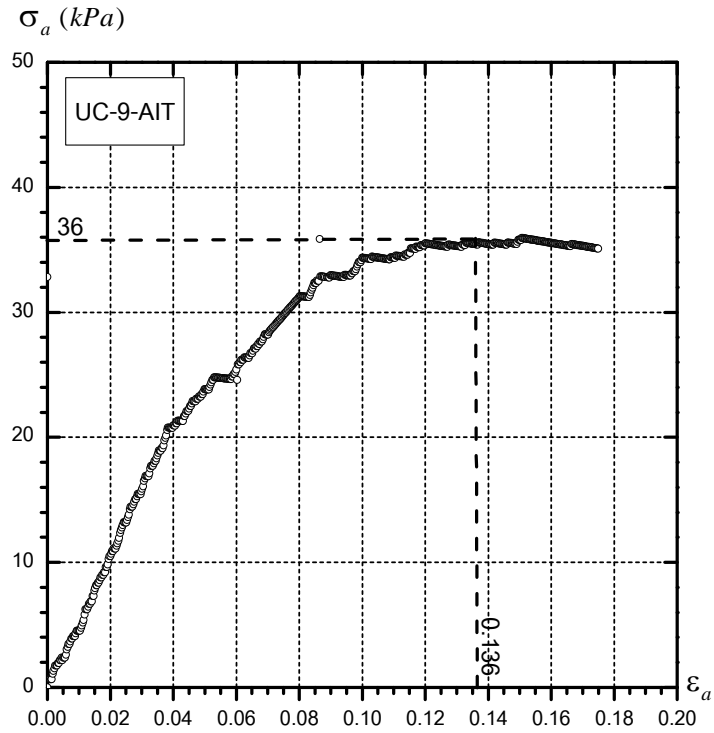
ภาพที่ ข.38 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 6.00-6.50 เมตร



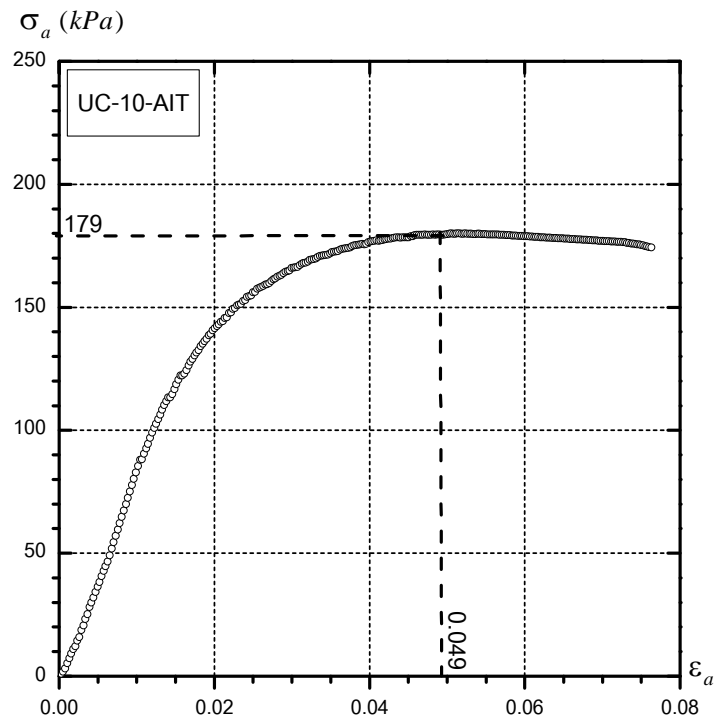
ภาพที่ ข.39 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 7.00-7.50 เมตร



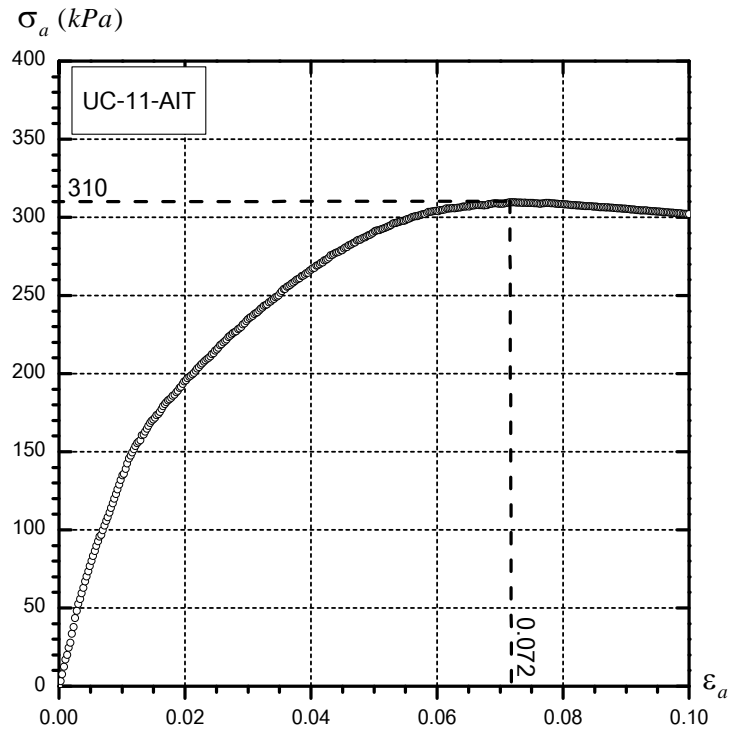
ภาพที่ ข.40 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 8.00-8.50 เมตร



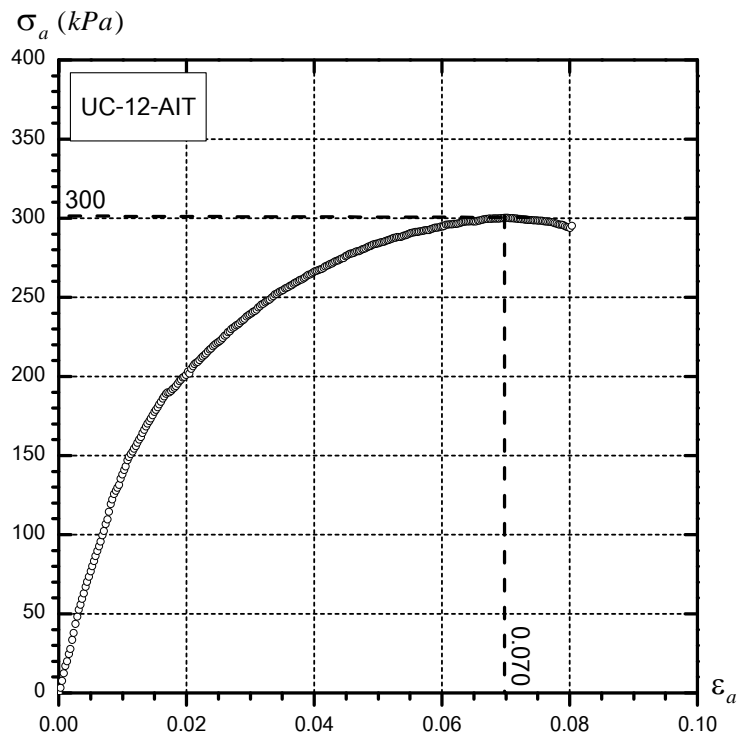
ภาพที่ ข.41 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 9.00-9.50 เมตร



ภาพที่ ข.42 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 10.00-10.50 เมตร



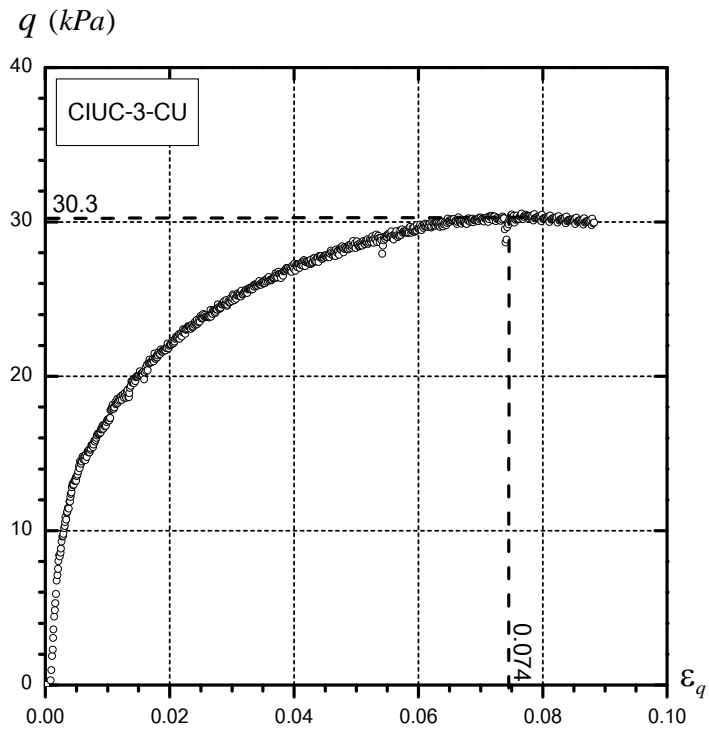
ภาพที่ ข.43 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 11.00-11.50 เมตร



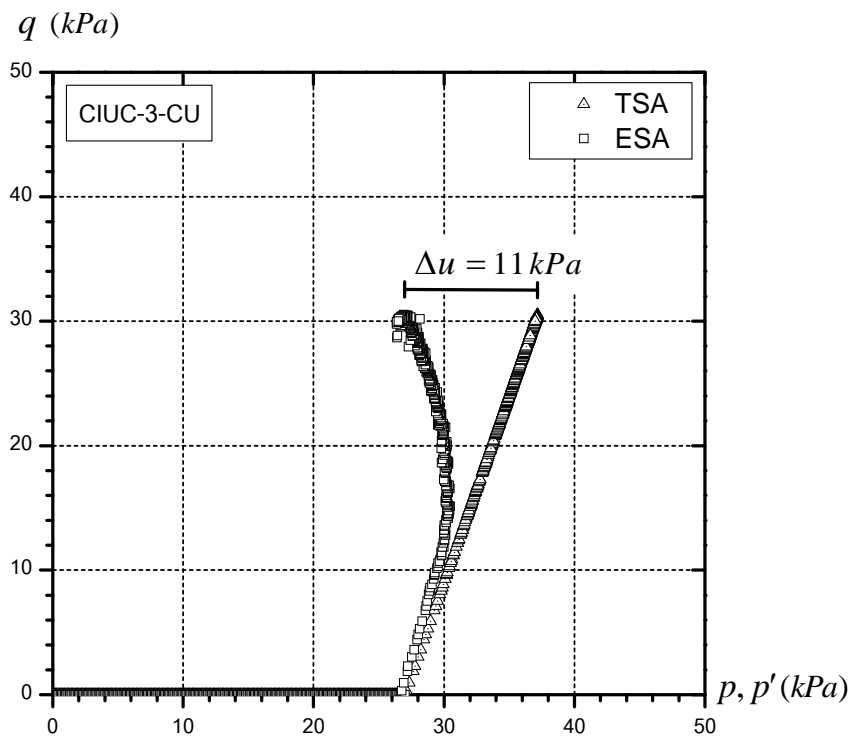
ภาพที่ ข.44 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นแนวแกนและความเครียดแนวแกนของการทดสอบ UC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 12.00-12.50 เมตร

ภาคผนวก ค

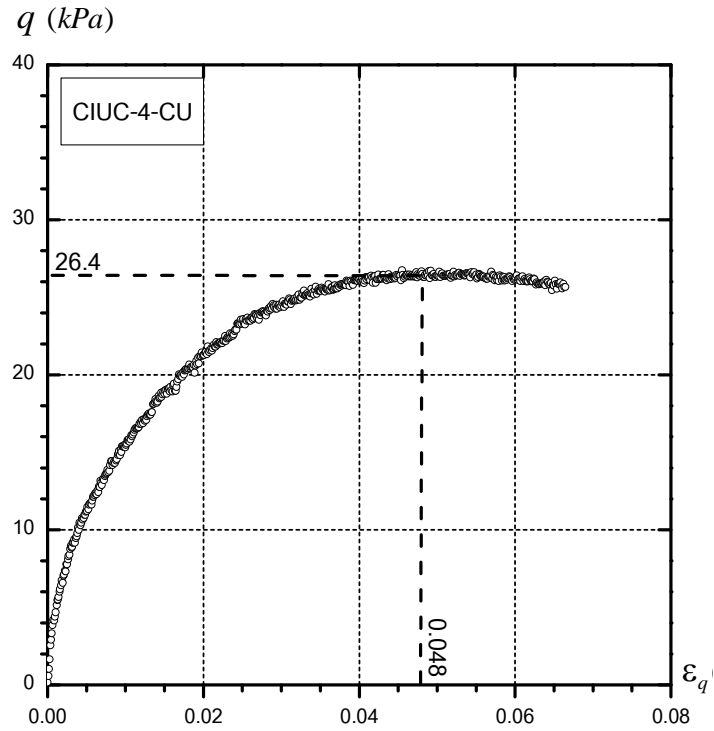
ผลการทดสอบแรงกดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำ



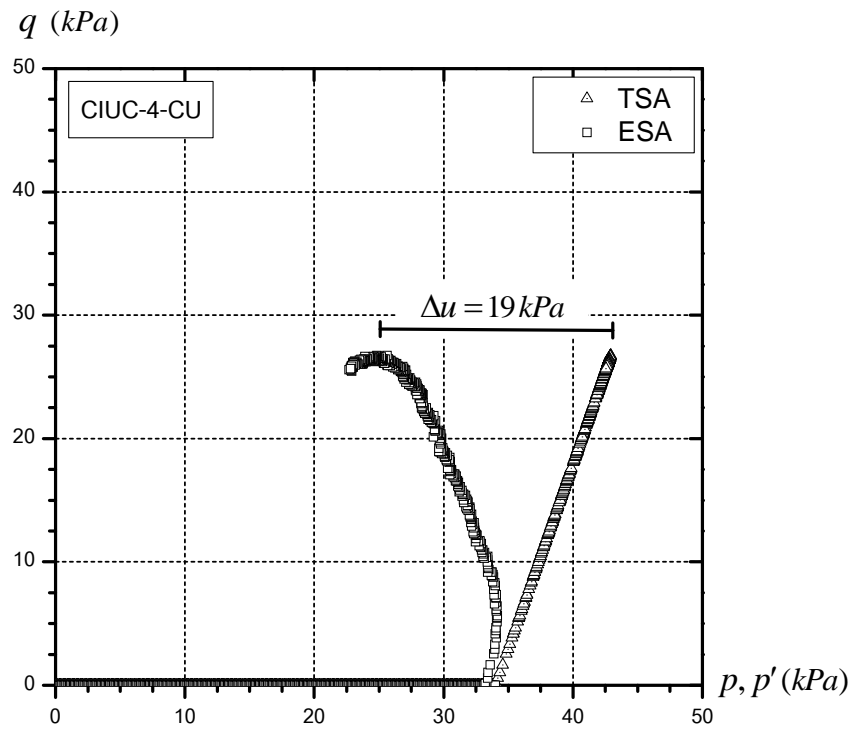
ภาพที่ ค.1(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 3.00-3.50 เมตร



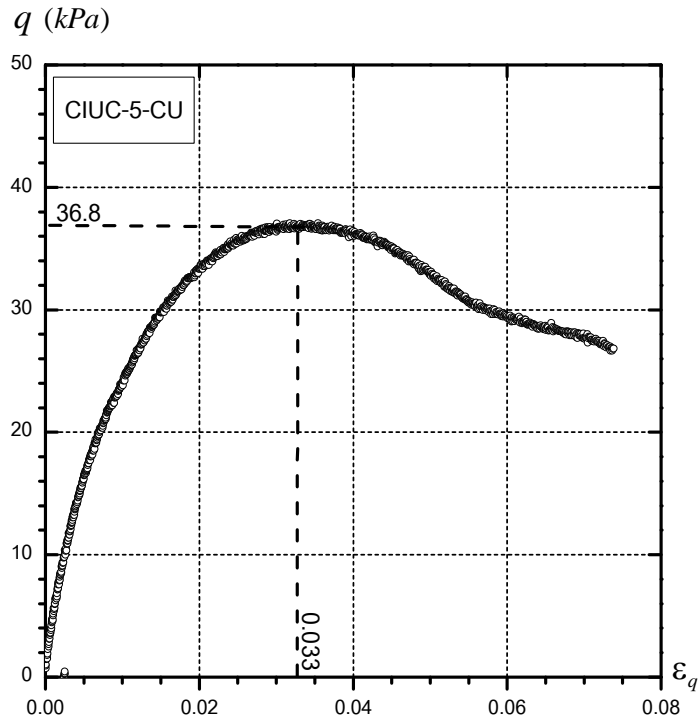
ภาพที่ ค.1(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 3.00-3.50 เมตร



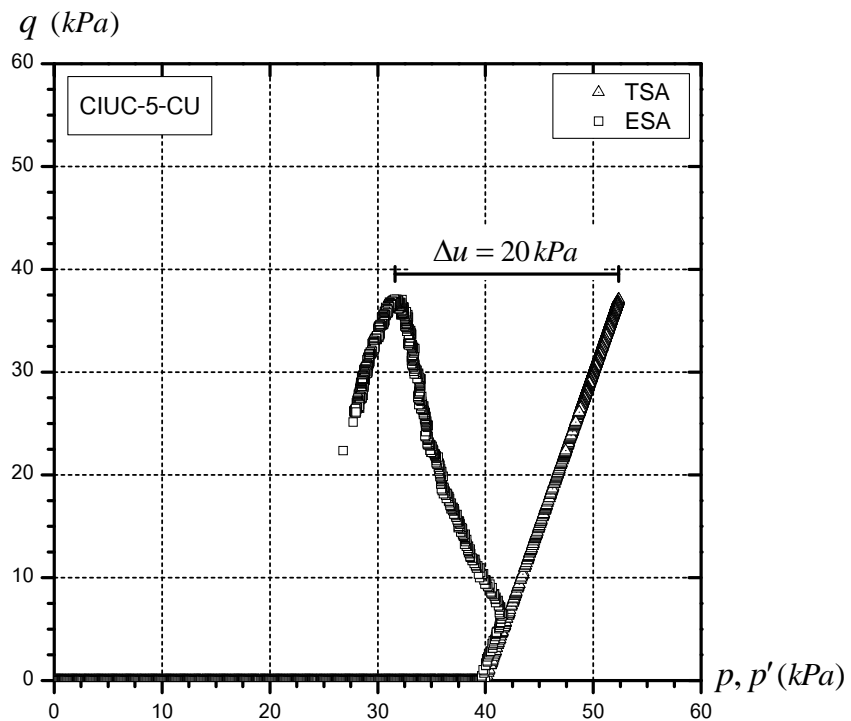
ภาพที่ ค.2(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 4.00-4.50 เมตร



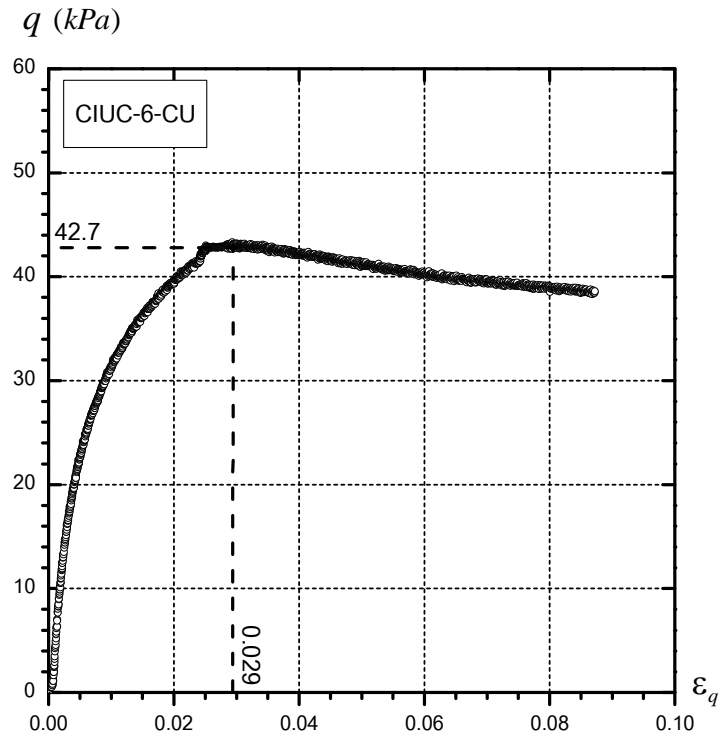
ภาพที่ ค.2(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 4.00-4.50 เมตร



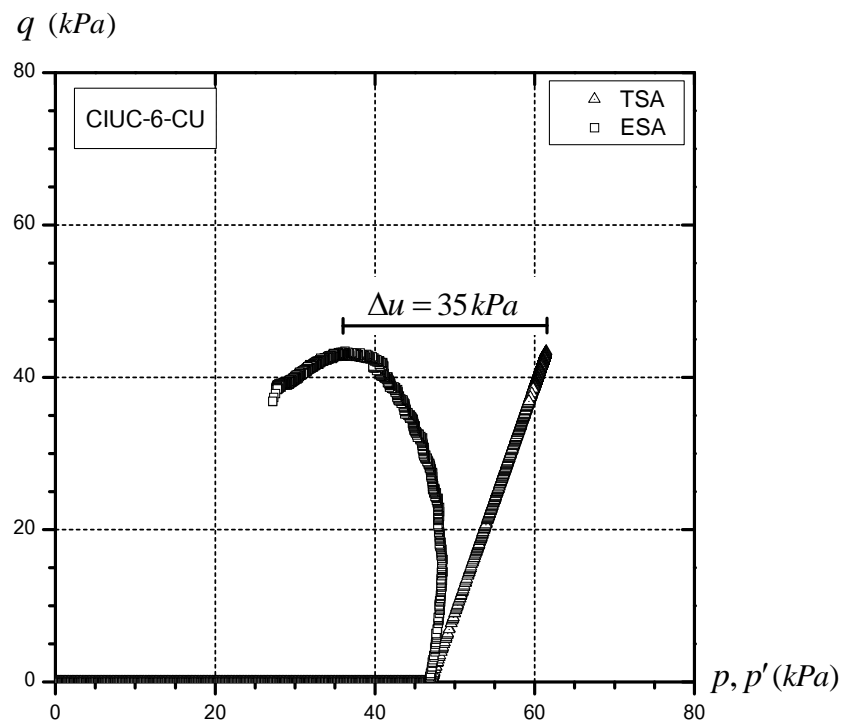
ภาพที่ ค.3(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 5.00-5.50 เมตร



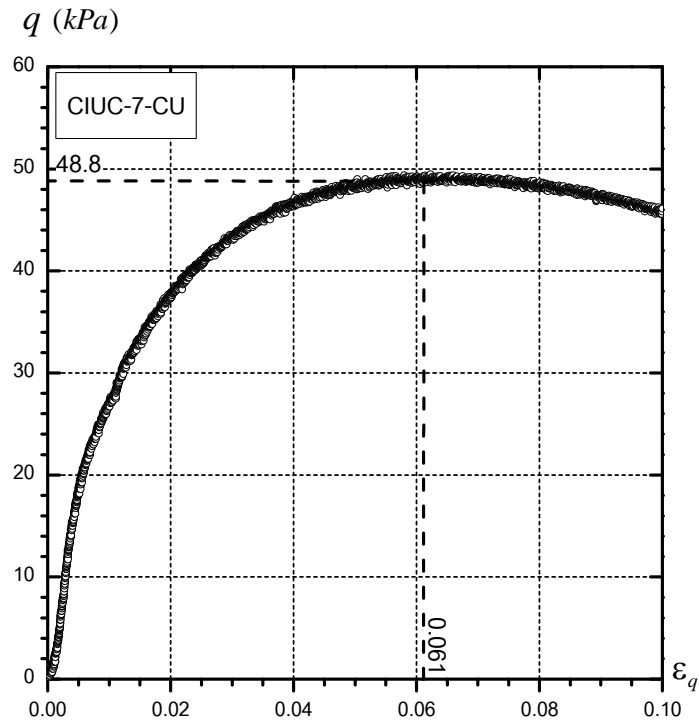
ภาพที่ ค.3(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 5.00-5.50 เมตร



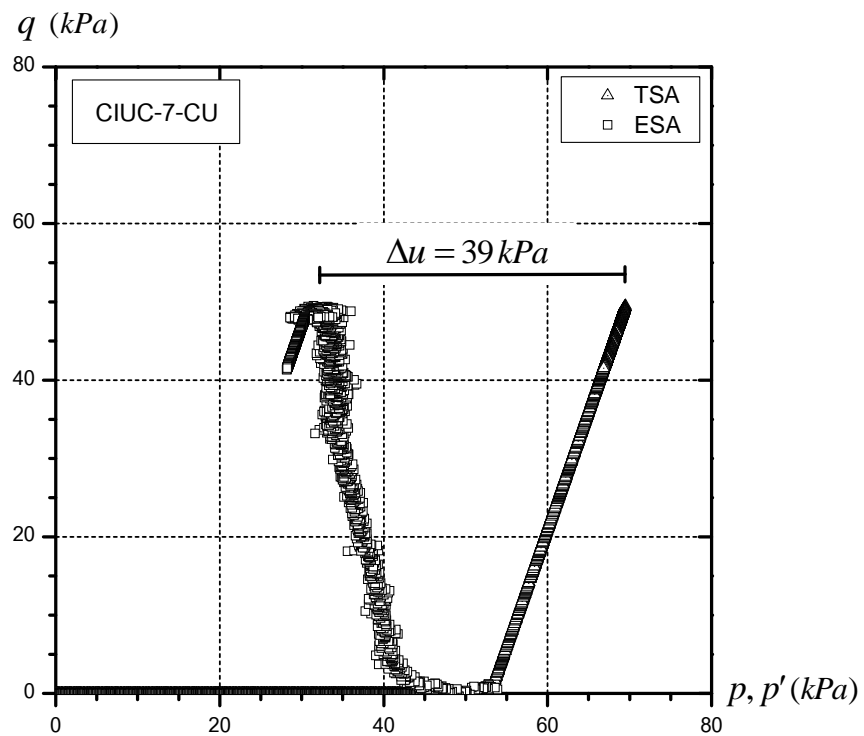
ภาพที่ ค.4(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 6.00-6.50 เมตร



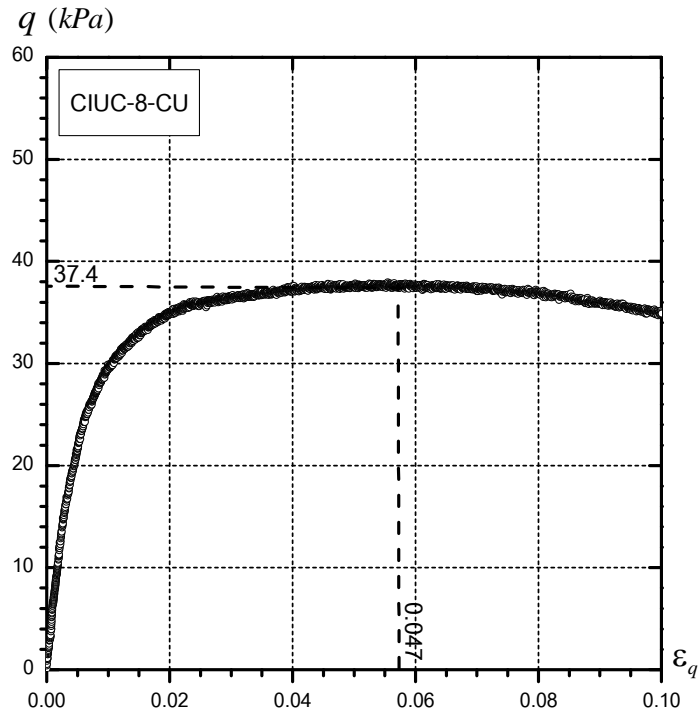
ภาพที่ ค.4(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 6.00-6.50 เมตร



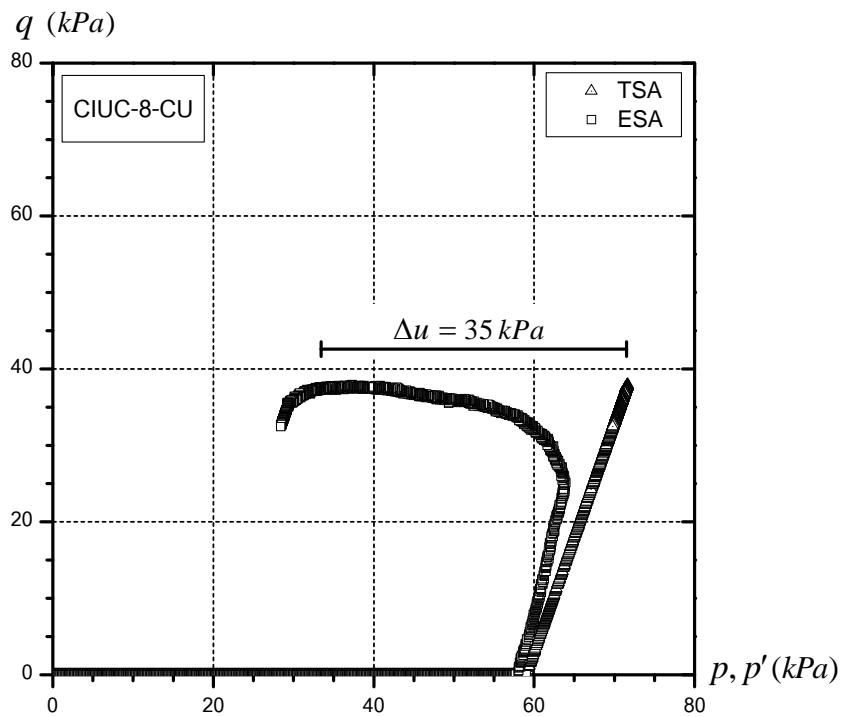
ภาพที่ ค.5(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 7.00-7.50 เมตร



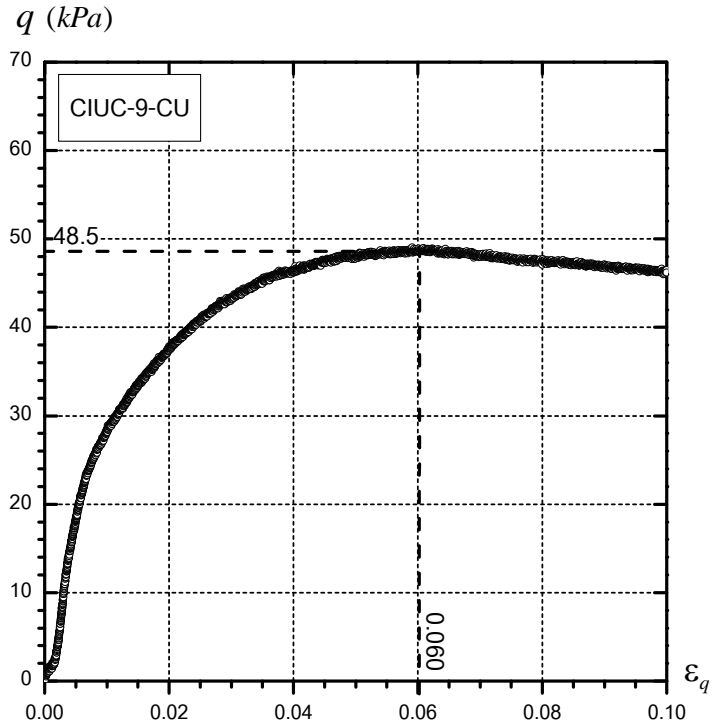
ภาพที่ ค.5(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 7.00-7.50 เมตร



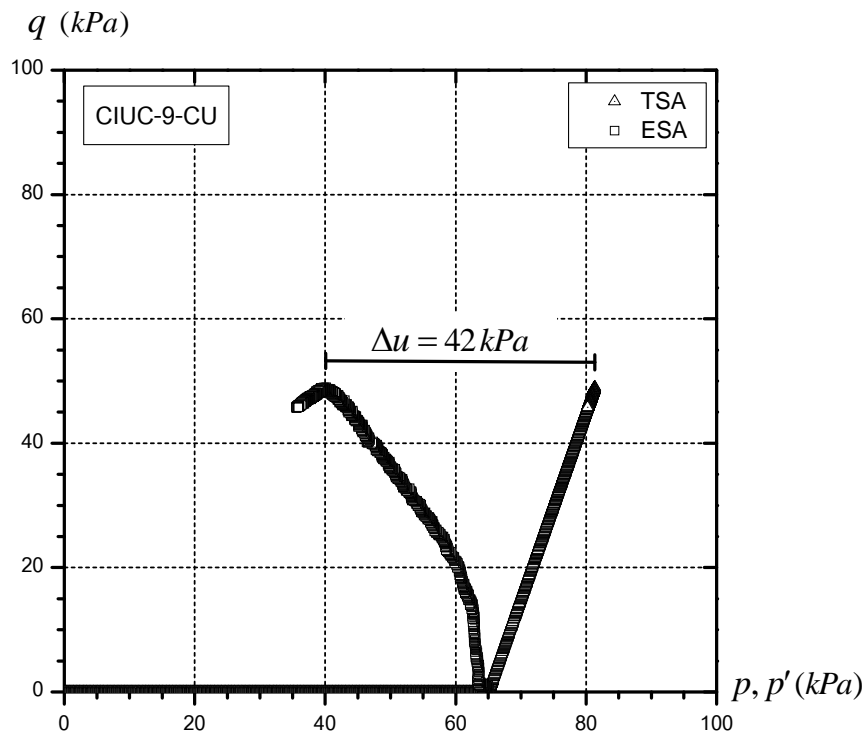
ภาพที่ ค.6(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 8.00-8.50 เมตร



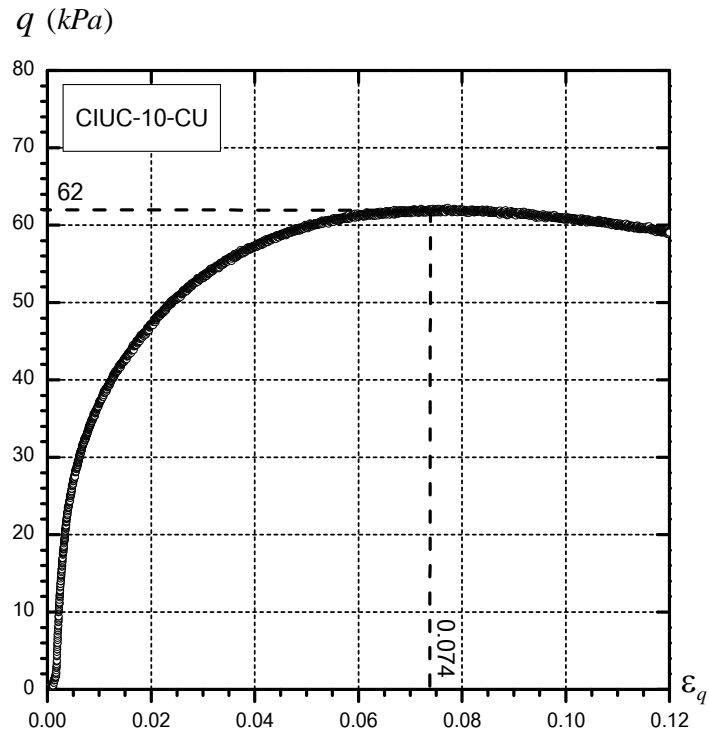
ภาพที่ ค.6(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 8.00-8.50 เมตร



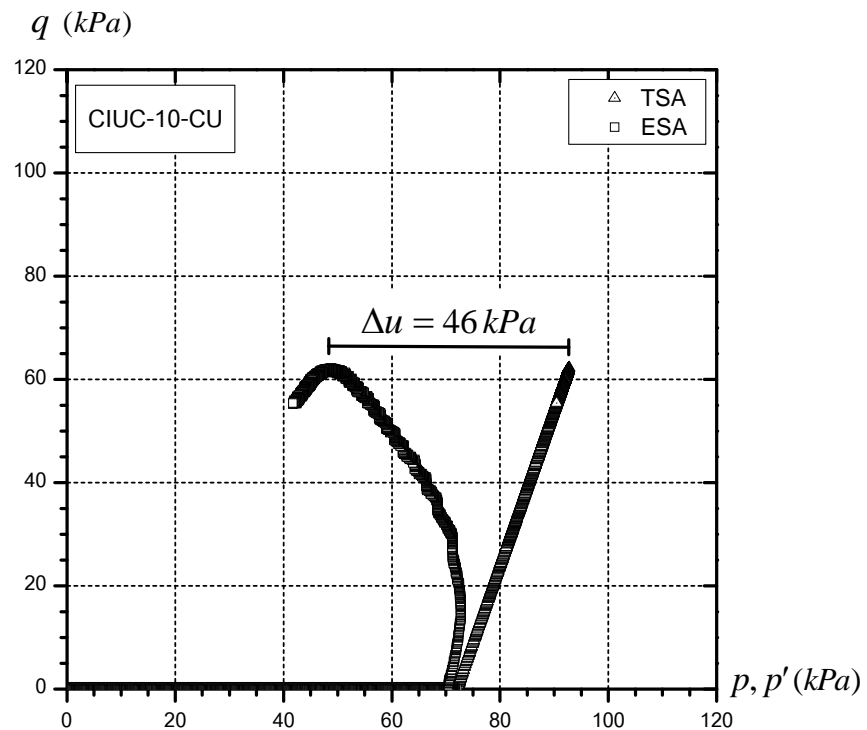
ภาพที่ ค.7(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 9.00-9.50 เมตร



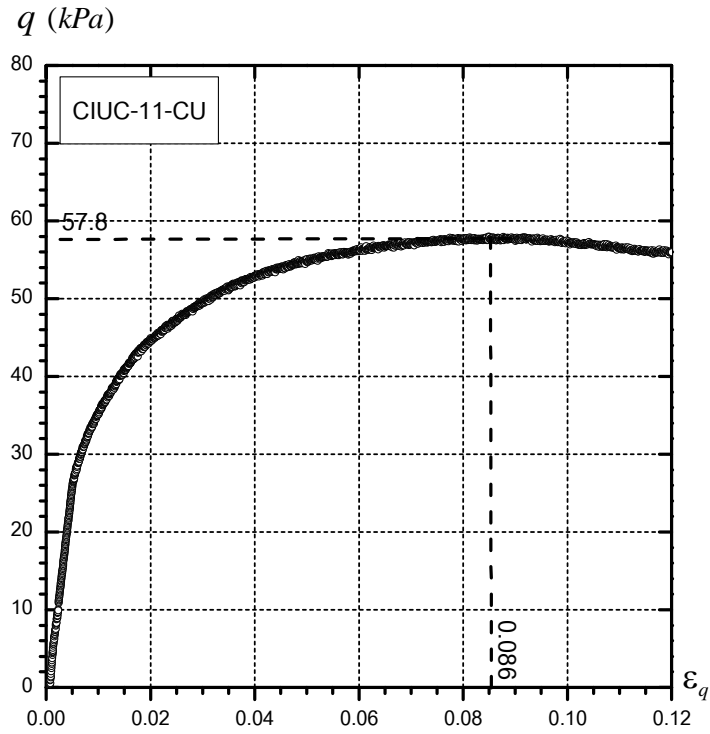
ภาพที่ ค.7(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 9.00-9.50 เมตร



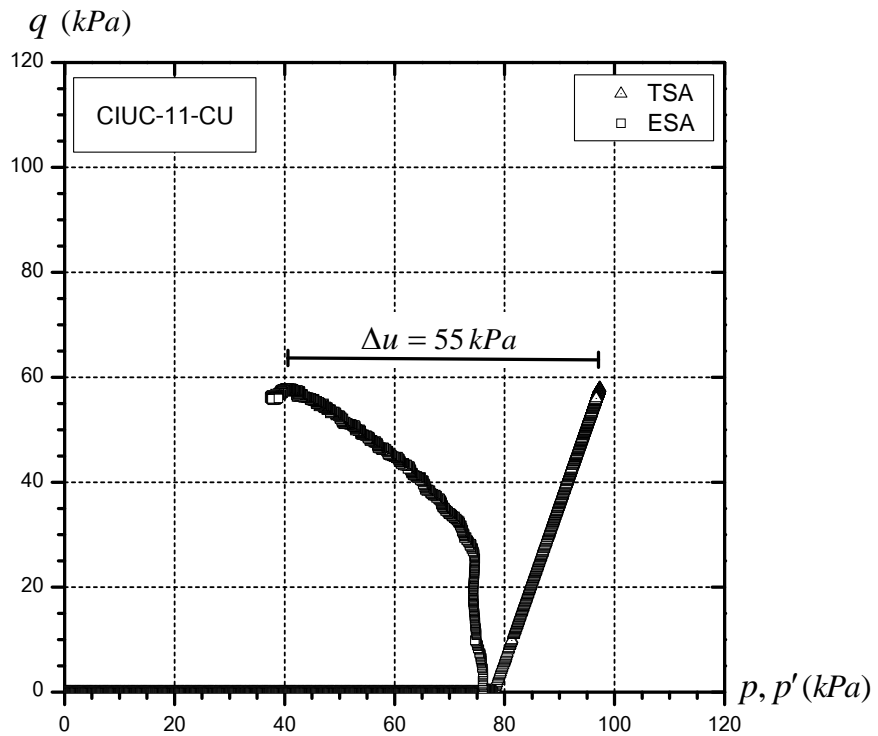
ภาพที่ ค.8(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 10.00-10.50 เมตร



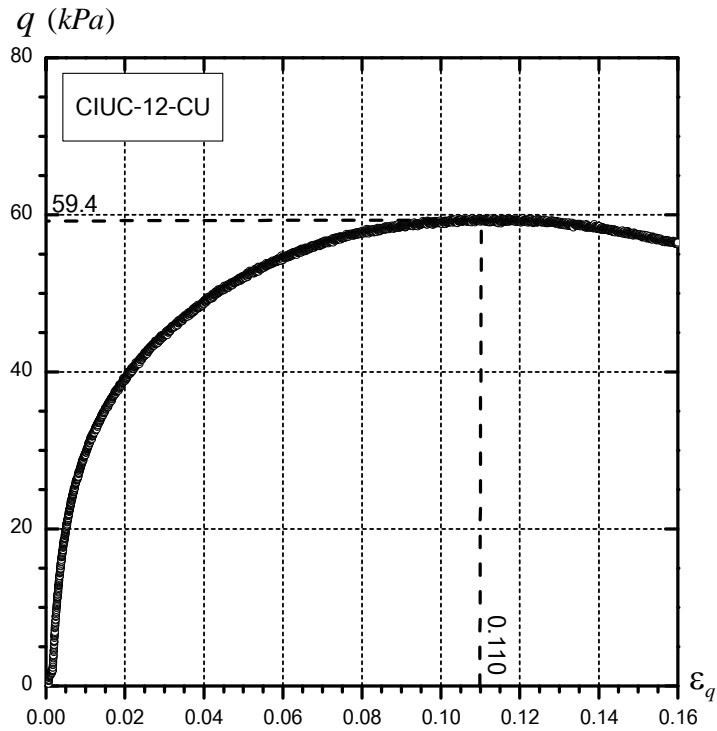
ภาพที่ ค.8(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 10.00-10.50 เมตร



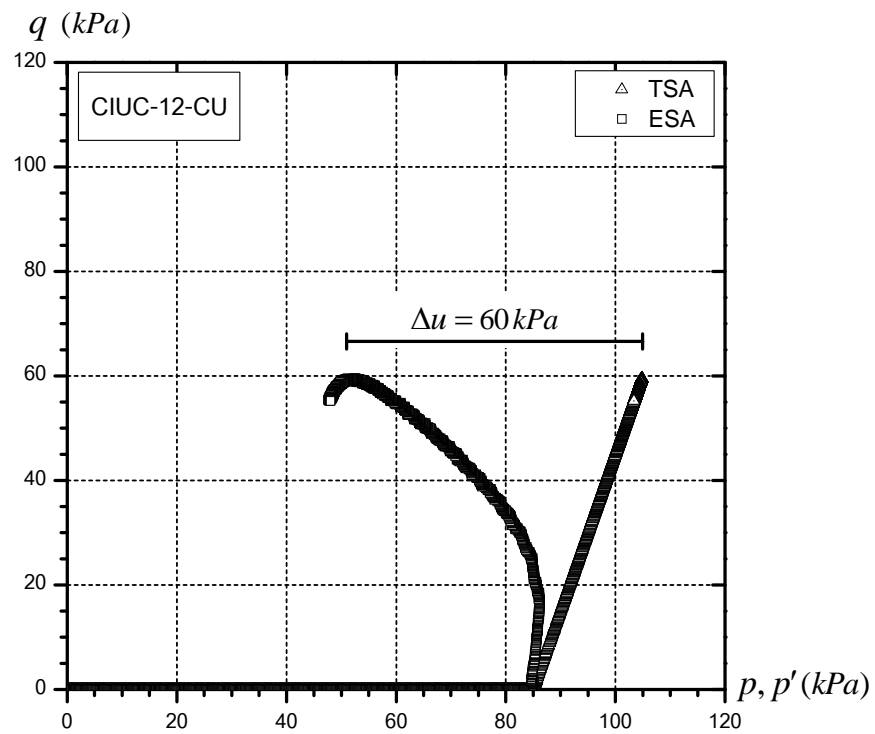
ภาพที่ ค.9(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 11.00-11.50 เมตร



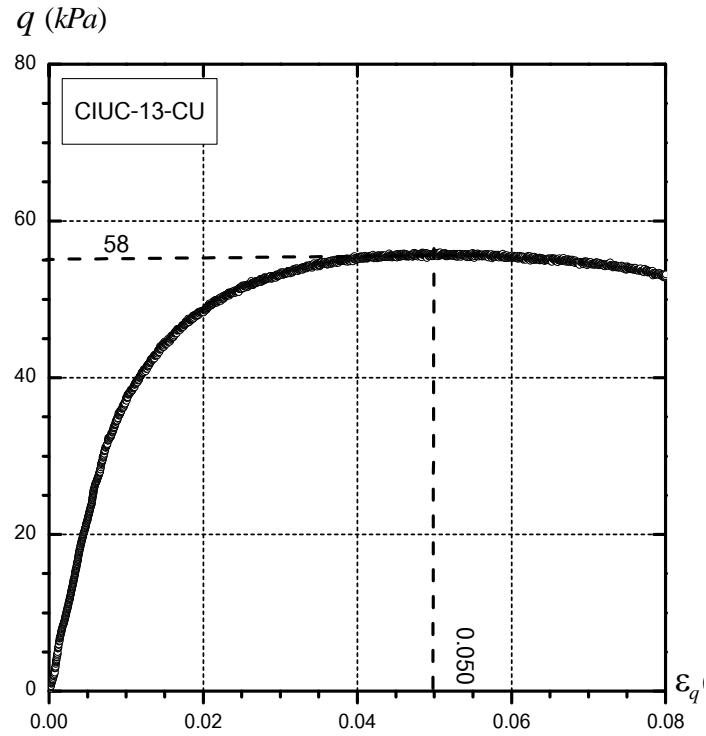
ภาพที่ ค.9(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 11.00-11.50 เมตร



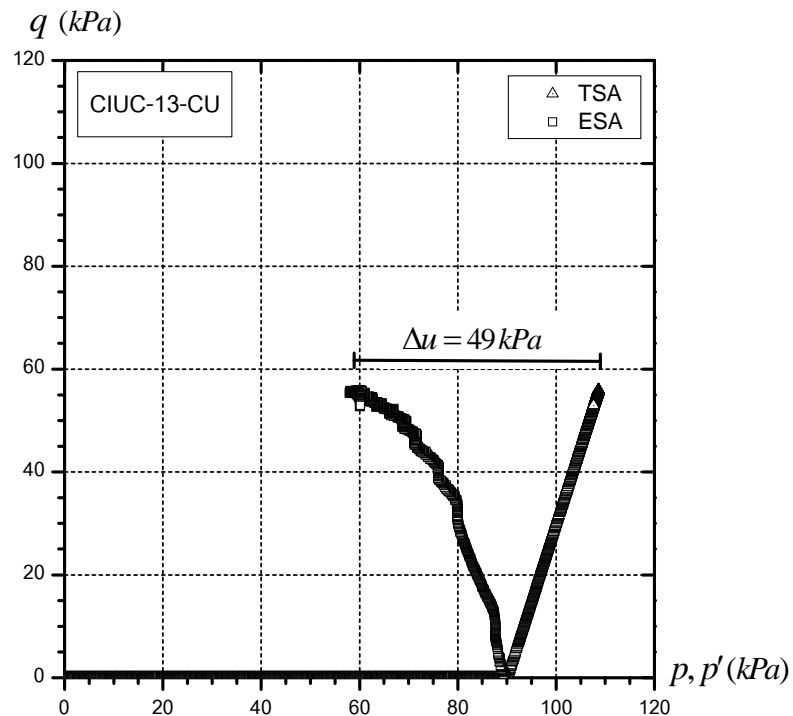
ภาพที่ ค.10(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 12.00-12.50 เมตร



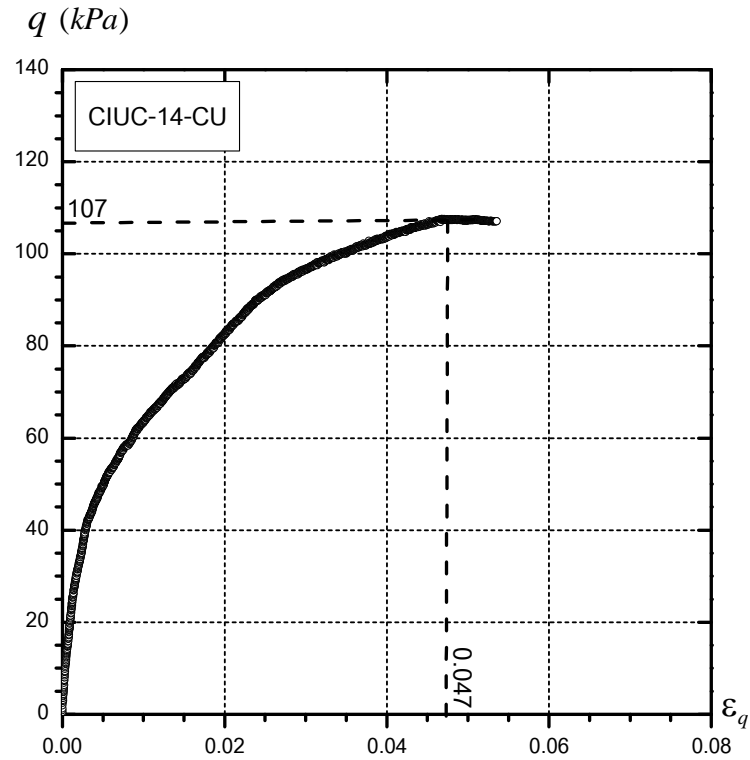
ภาพที่ ค.10(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 12.00-12.50 เมตร



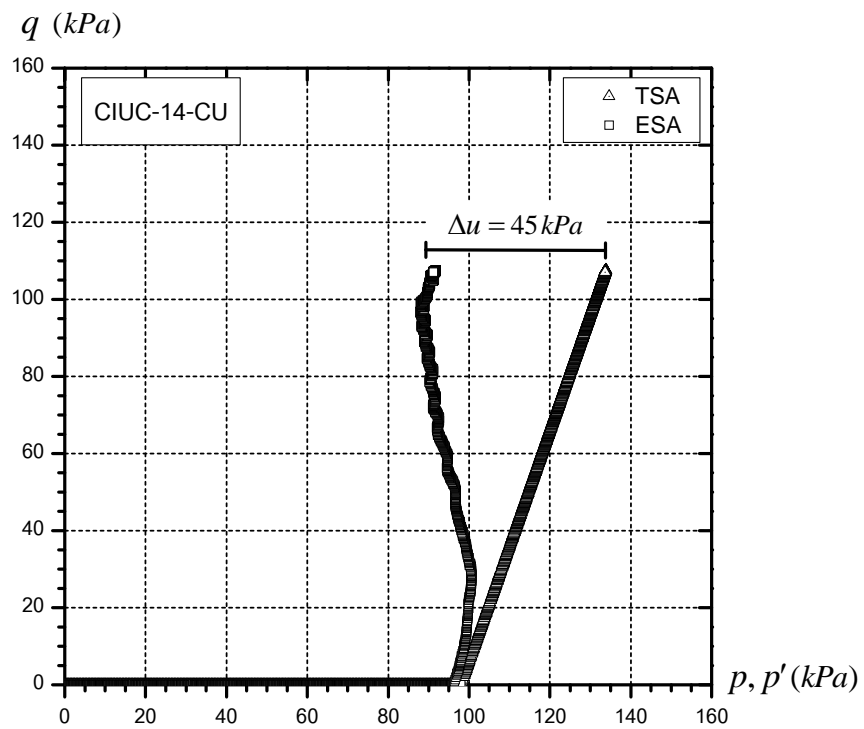
ภาพที่ ค.11(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 13.00-13.50 เมตร



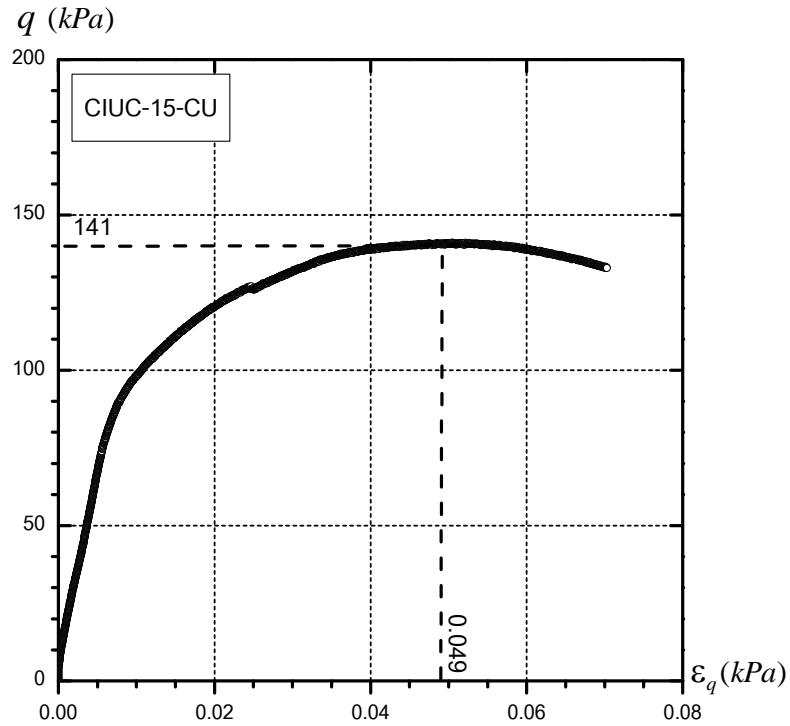
ภาพที่ ค.11(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 13.00-13.50 เมตร



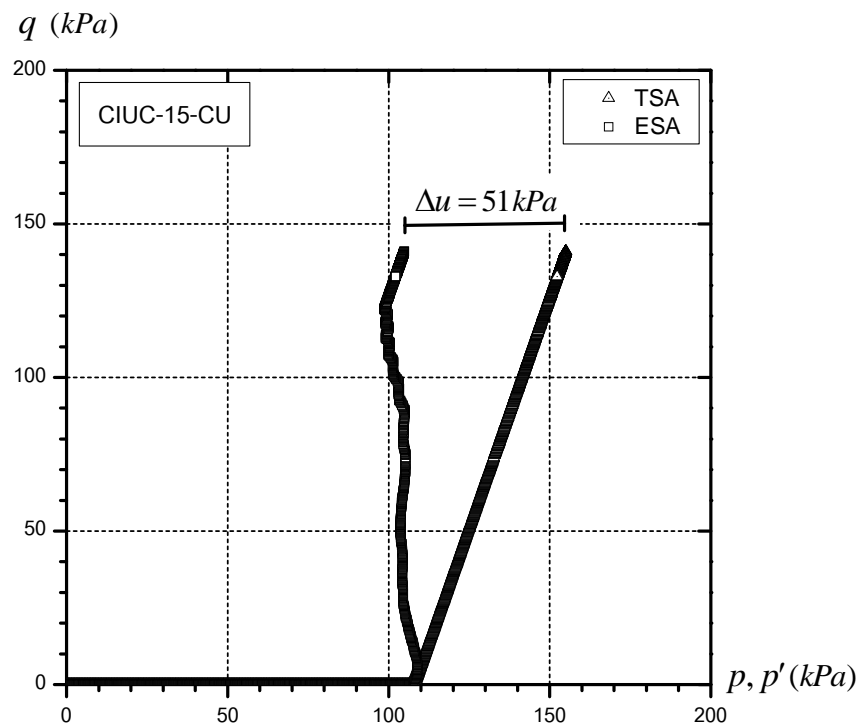
ภาพที่ ค.12(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 14.00-14.50 เมตร



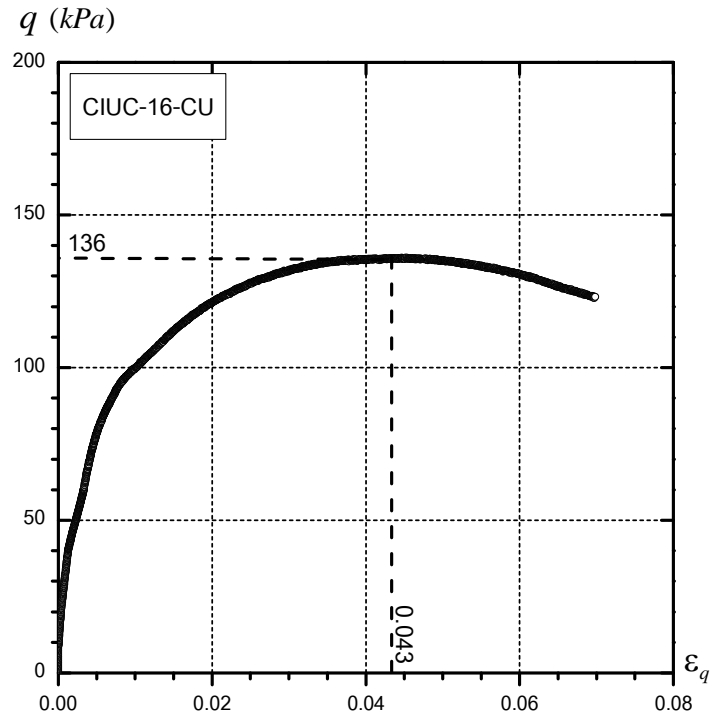
ภาพที่ ค.12(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 14.00-14.50 เมตร



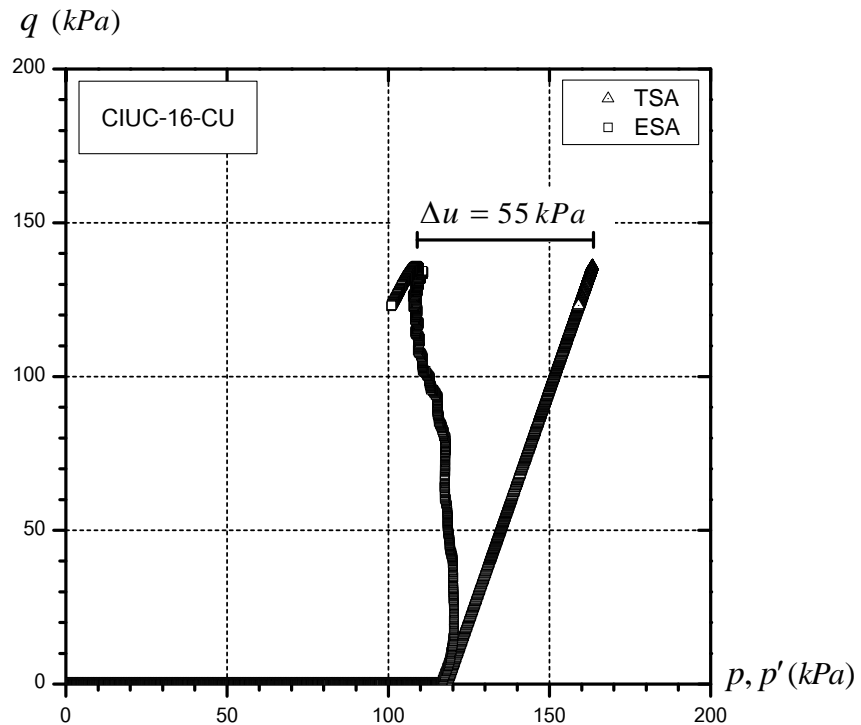
ภาพที่ ค.13(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 15.00-15.50 เมตร



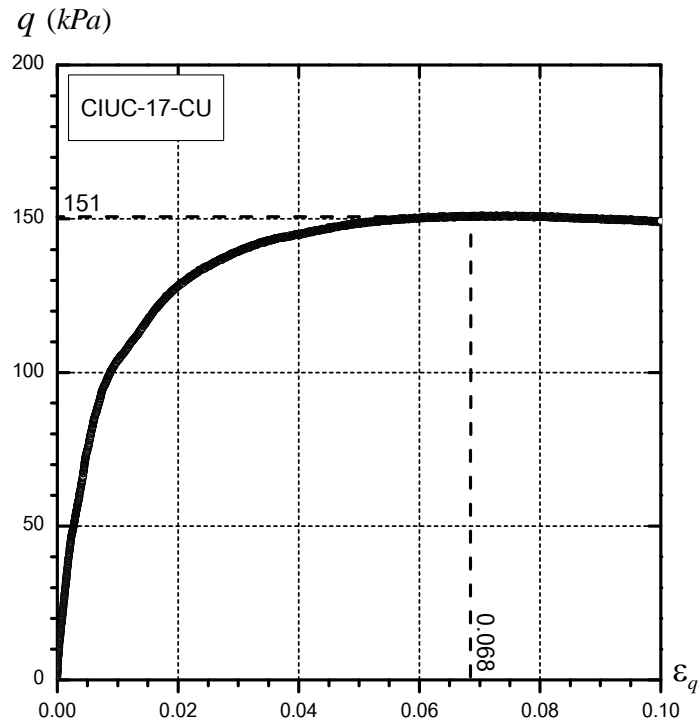
ภาพที่ ค.13(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 15.00-15.50 เมตร



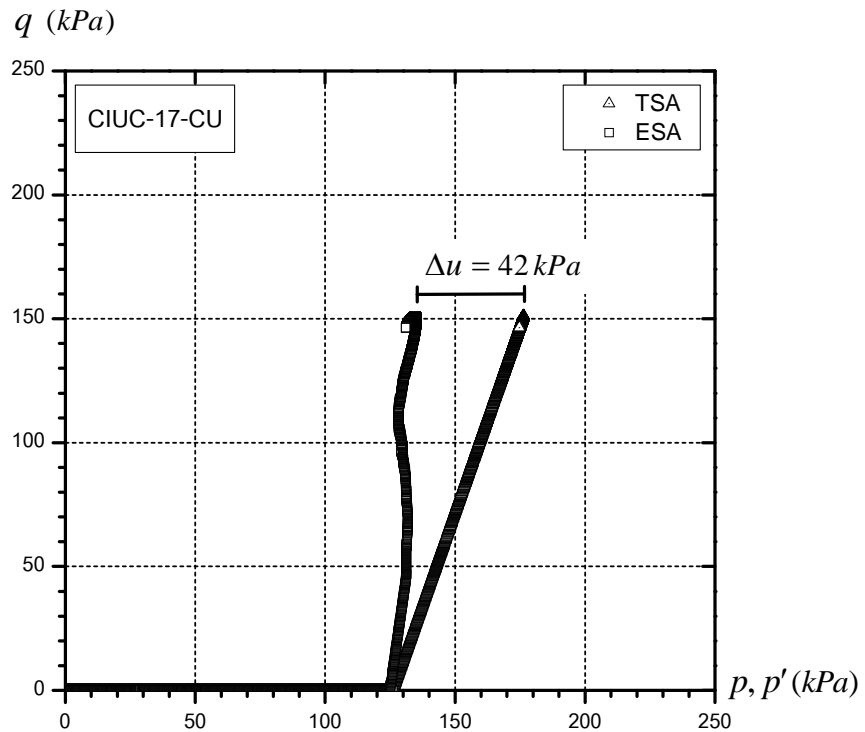
ภาพที่ ค.14(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 16.00-16.50 เมตร



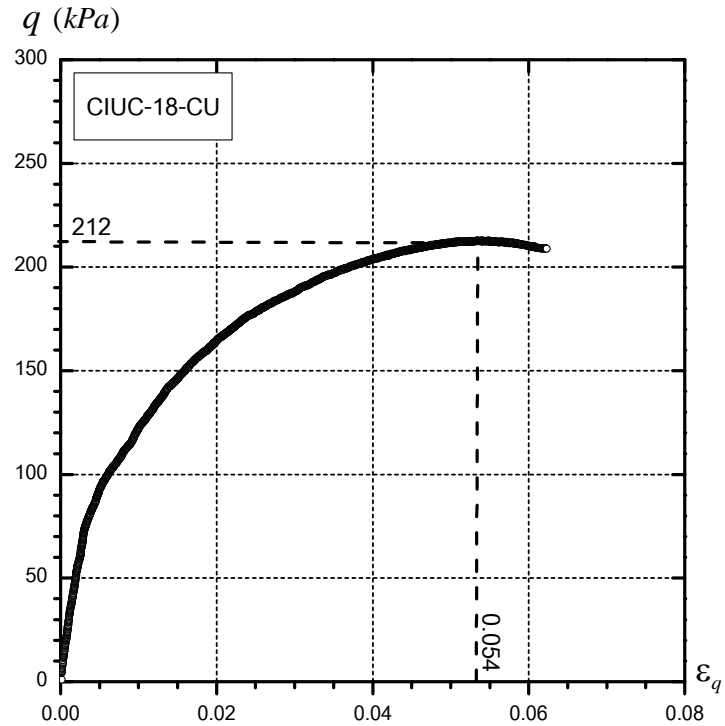
ภาพที่ ค.14(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 16.00-16.50 เมตร



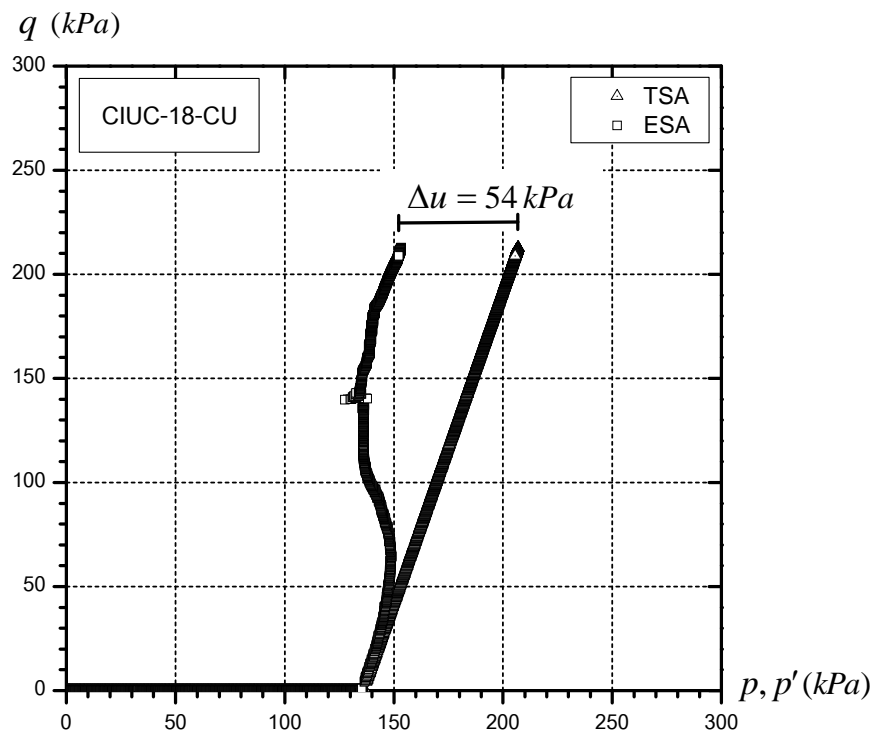
ภาพที่ ค.15(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 17.00-17.50 เมตร



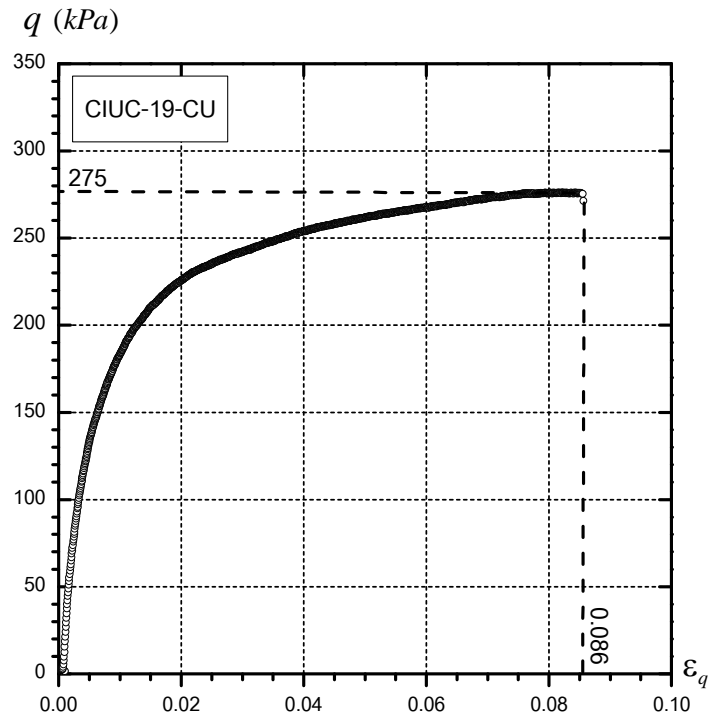
ภาพที่ ค.15(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 17.00-17.50 เมตร



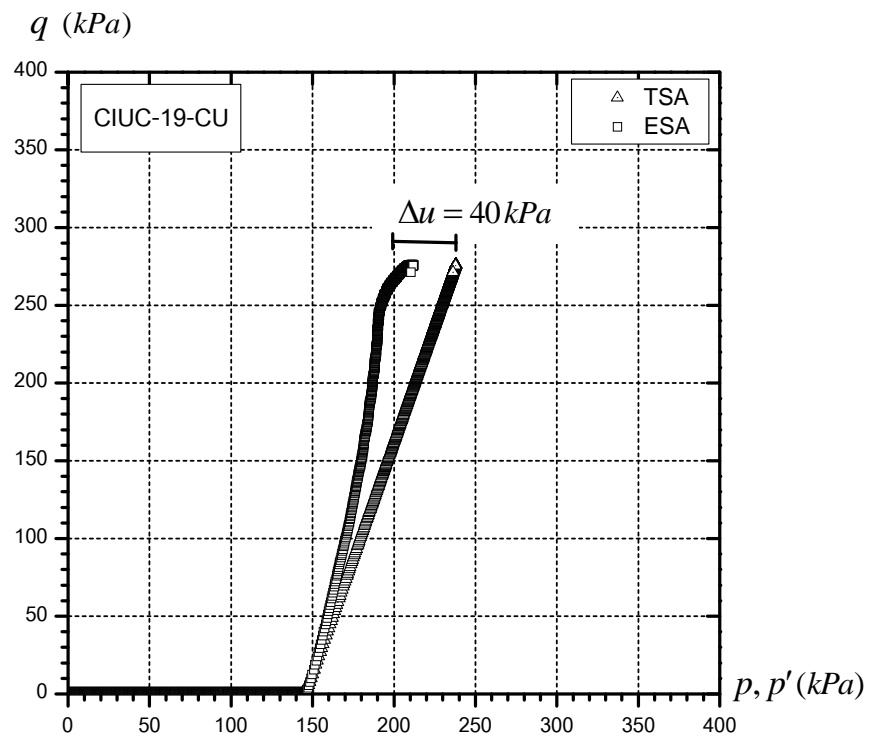
ภาพที่ ค.16(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 18.00-18.50 เมตร



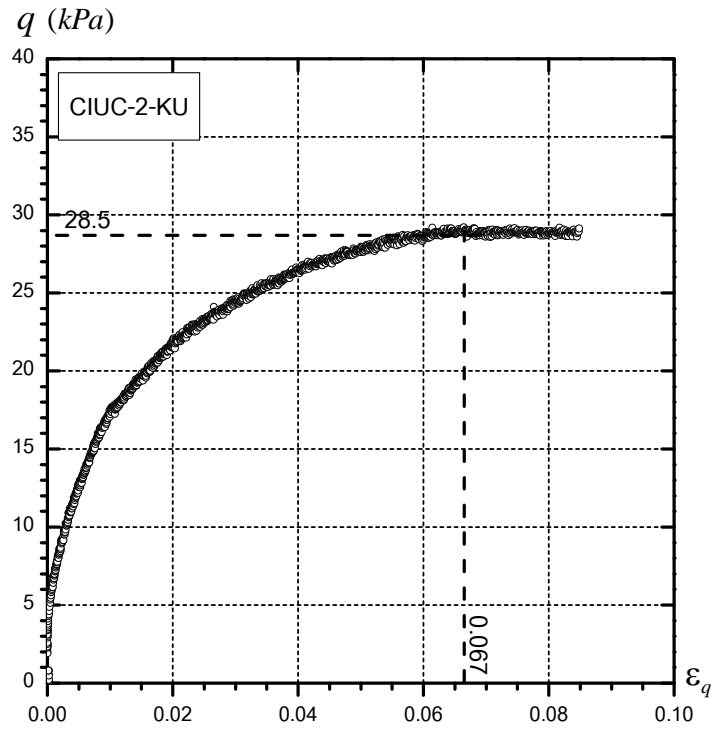
ภาพที่ ค.16(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 18.00-18.50 เมตร



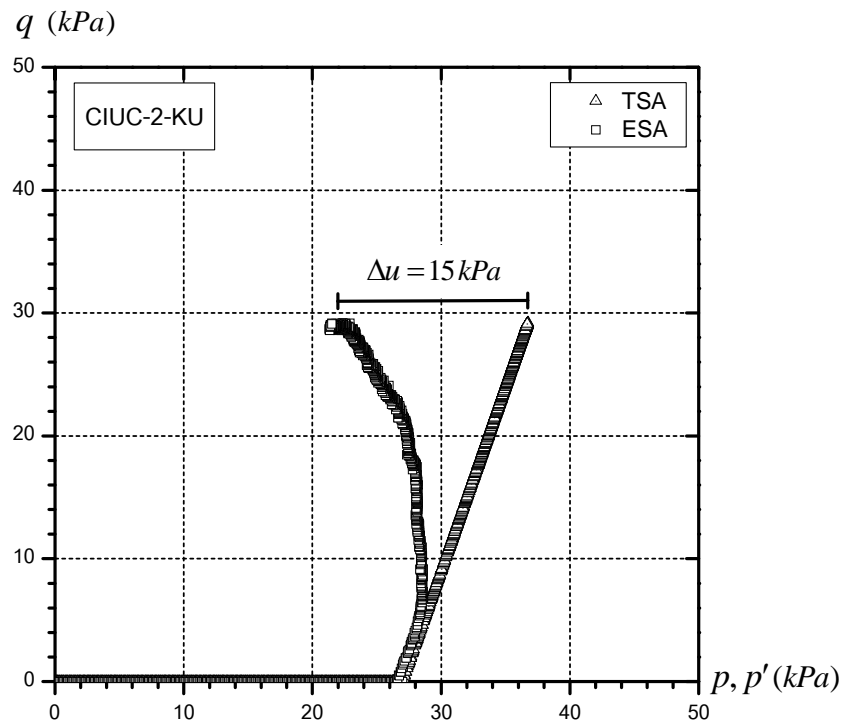
ภาพที่ ค.17(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 19.00-19.50 เมตร



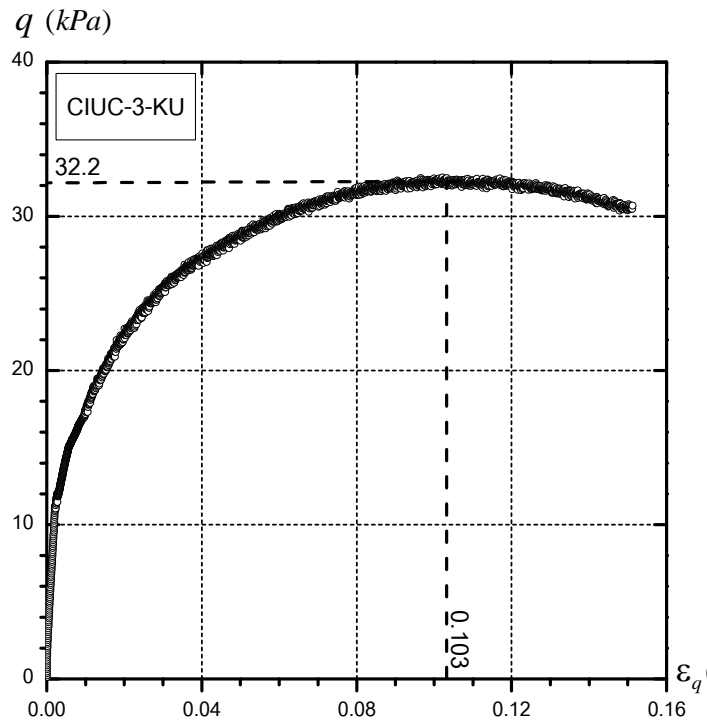
ภาพที่ ค.17(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว CU ที่ระดับความลึก 19.00-19.50 เมตร



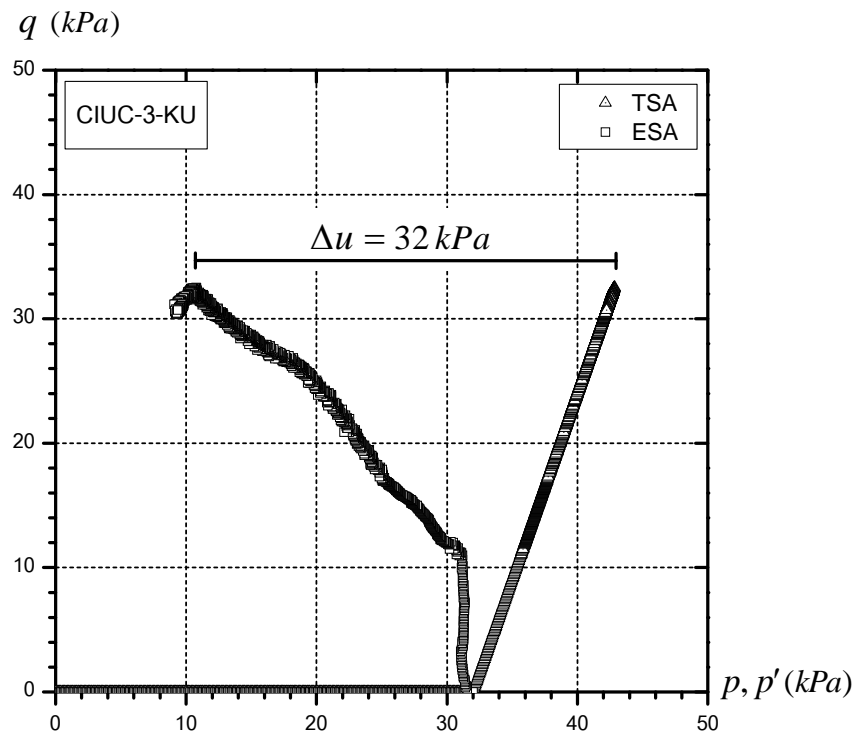
ภาพที่ ค.18(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 2.00-2.50 เมตร



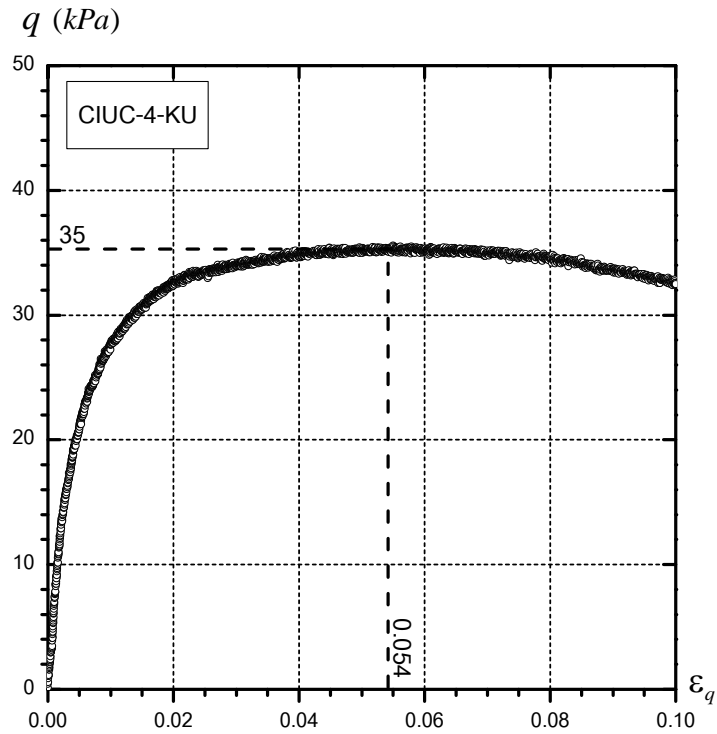
ภาพที่ ค.18(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 2.00-2.50 เมตร



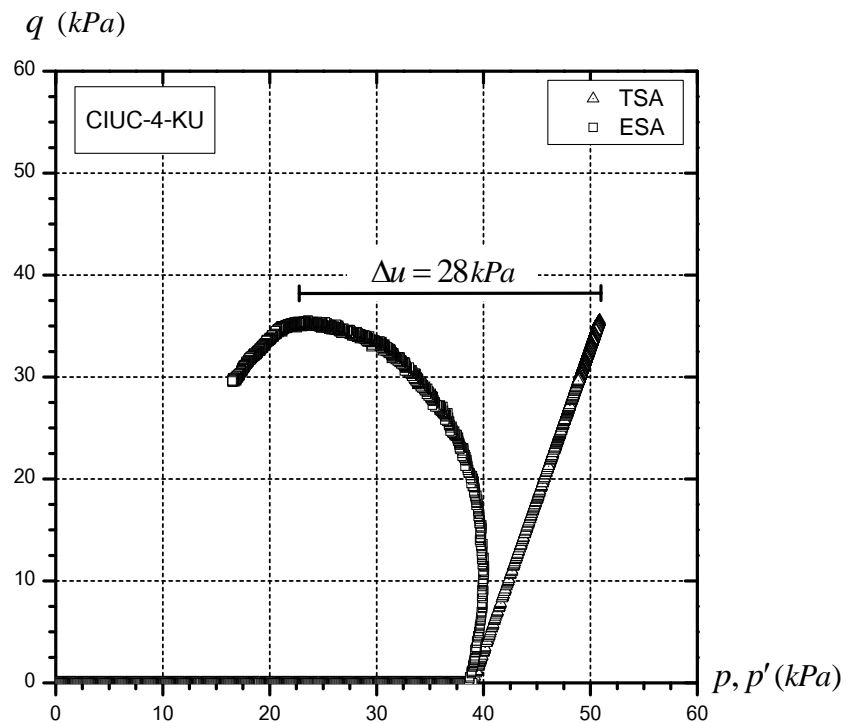
ภาพที่ ค.19(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 3.00-3.50 เมตร



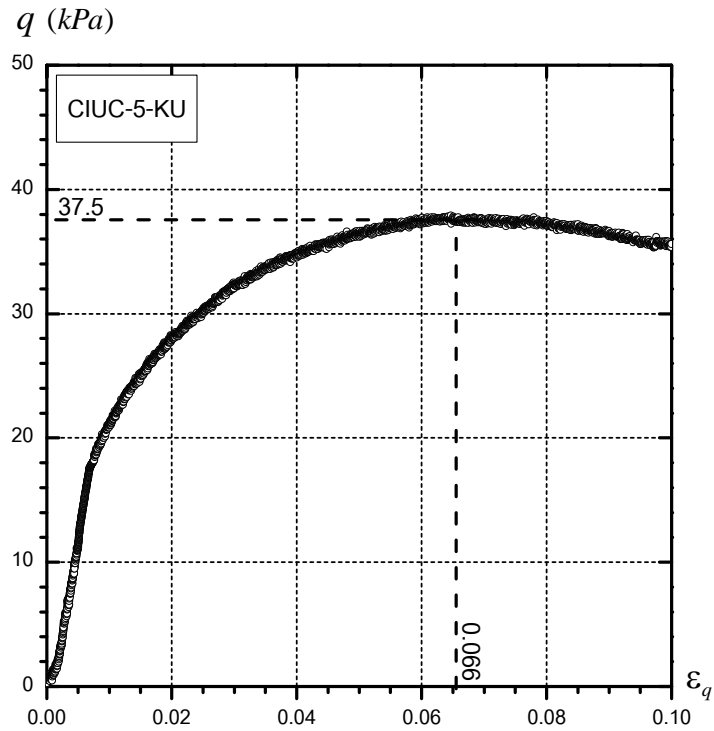
ภาพที่ ค.19(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 3.00-3.50 เมตร



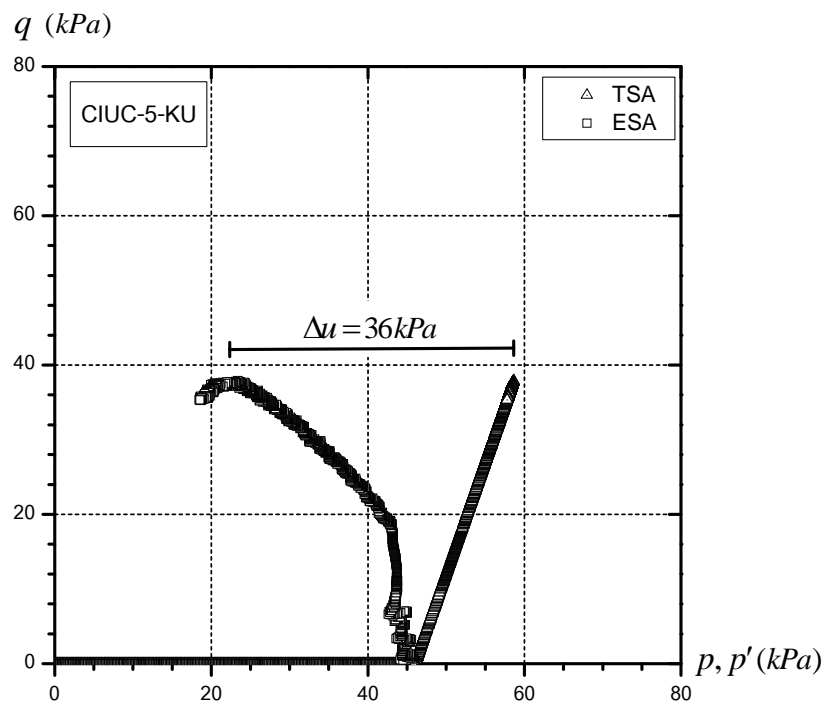
ภาพที่ ค.20(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 4.00-4.50 เมตร



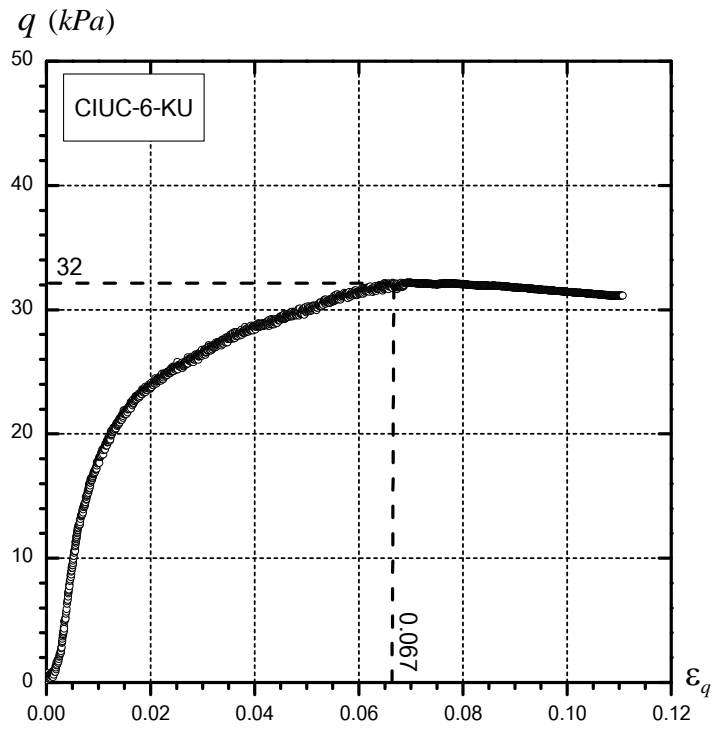
ภาพที่ ค.20(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 4.00-4.50 เมตร



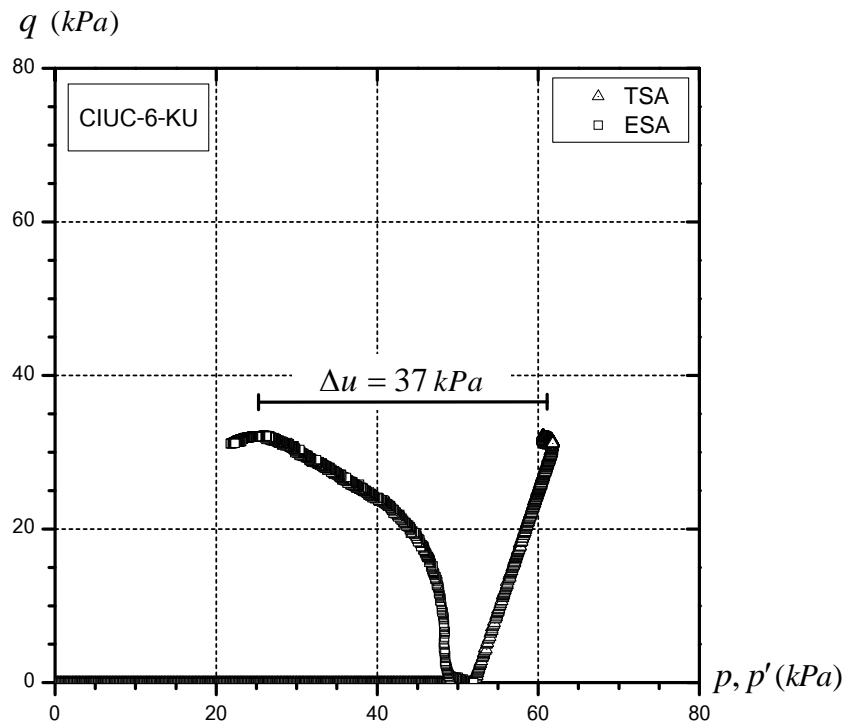
ภาพที่ ค.21(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 5.00-5.50 เมตร



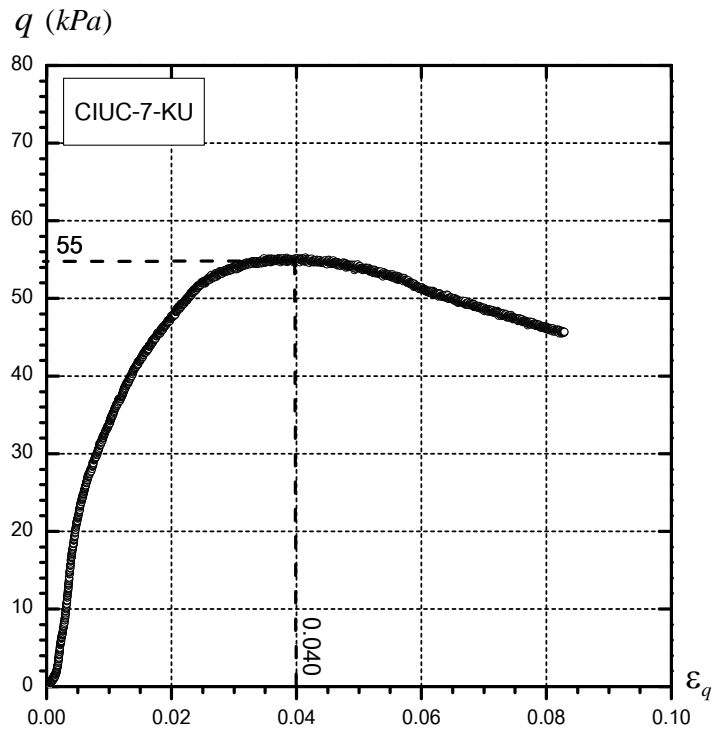
ภาพที่ ค.21(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 5.00-5.50 เมตร



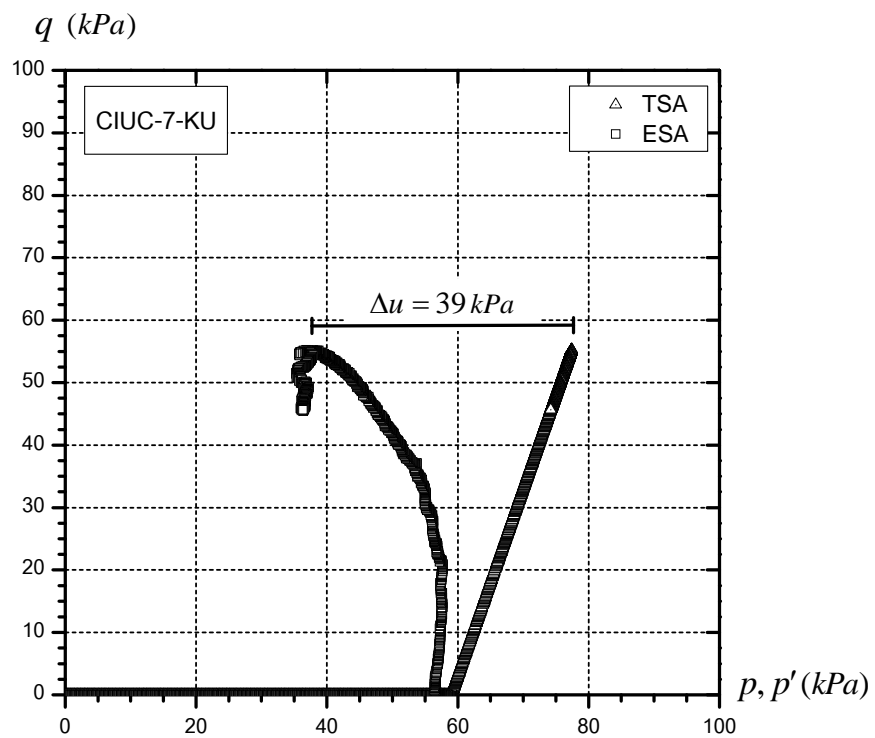
ภาพที่ ค.22(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 6.00-6.50 เมตร



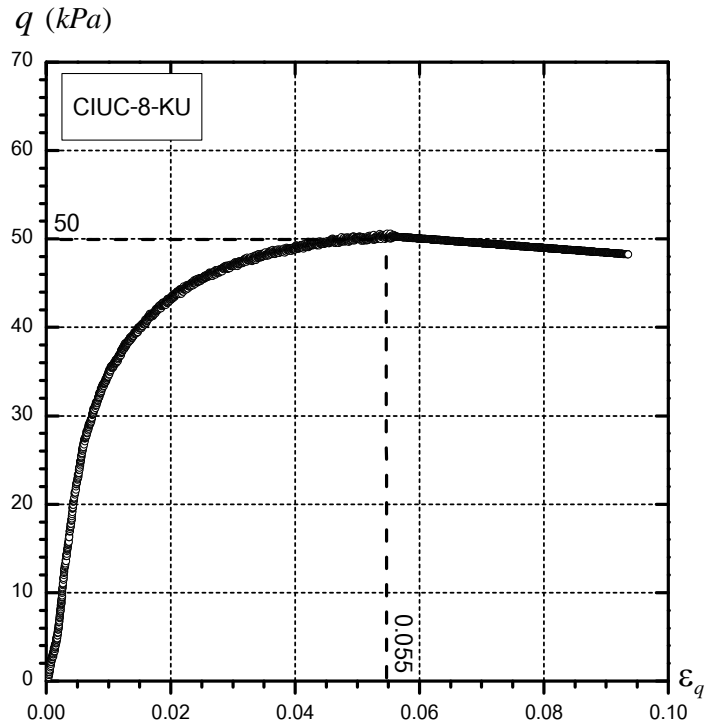
ภาพที่ ค.22(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 6.00-6.50 เมตร



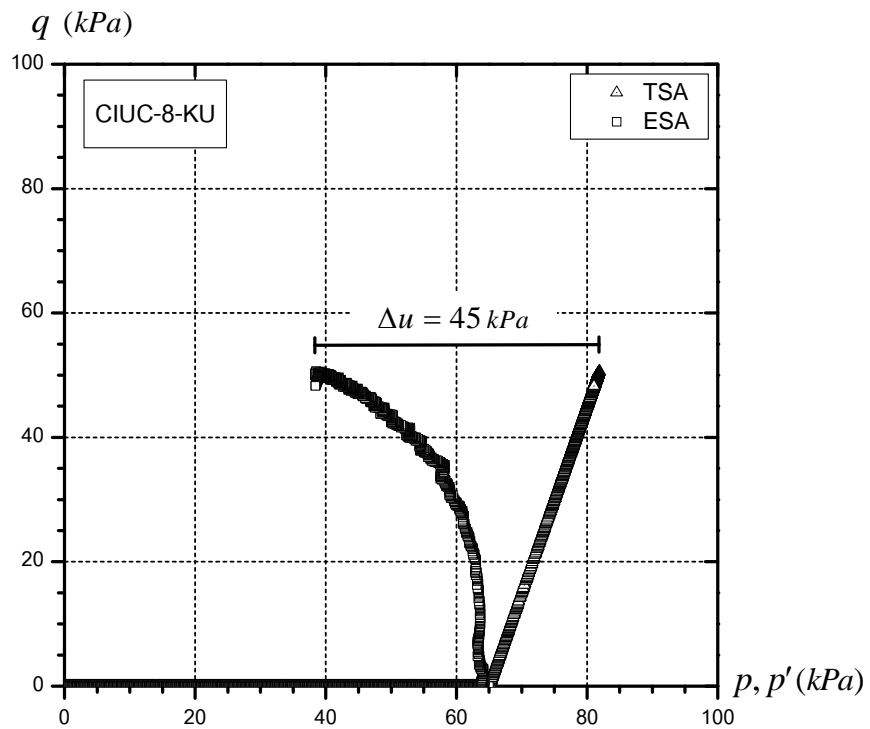
ภาพที่ ค.23(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 7.00-7.50 เมตร



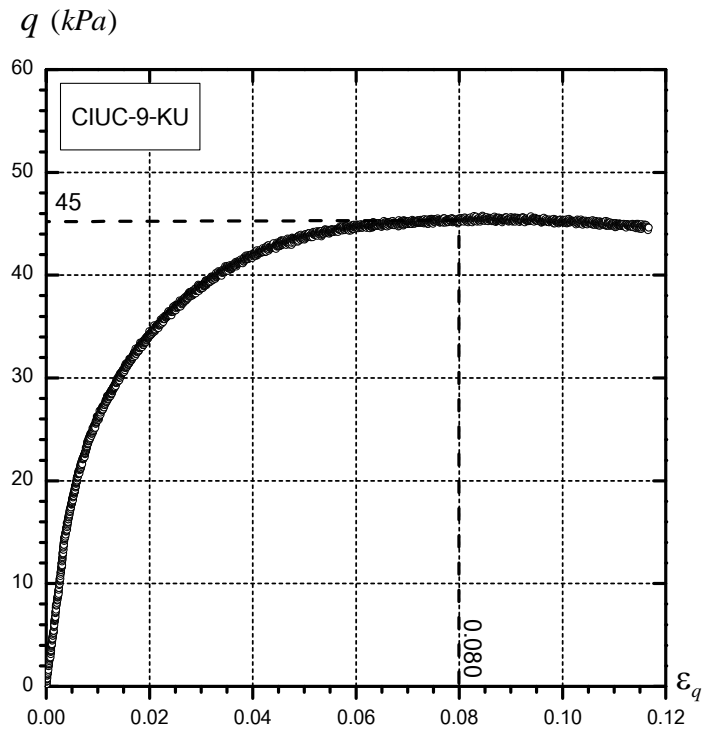
ภาพที่ ค.23(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 7.00-7.50 เมตร



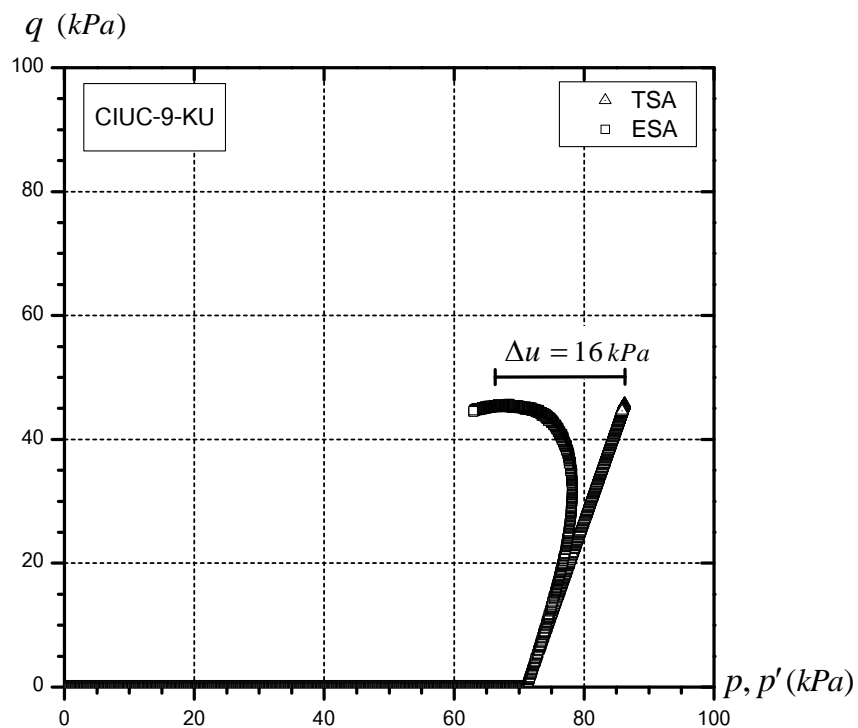
ภาพที่ ค.24(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 8.00-8.50 เมตร



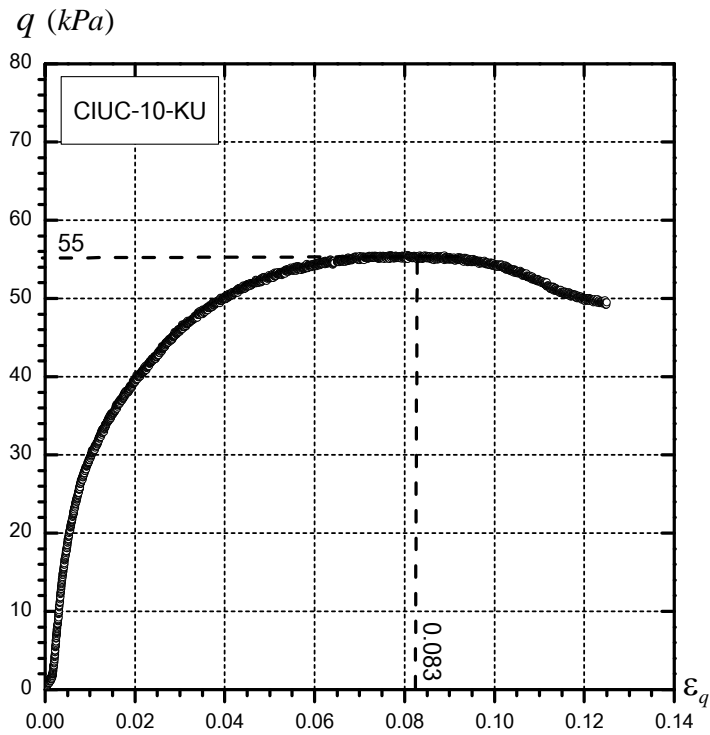
ภาพที่ ค.24(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 8.00-8.50 เมตร



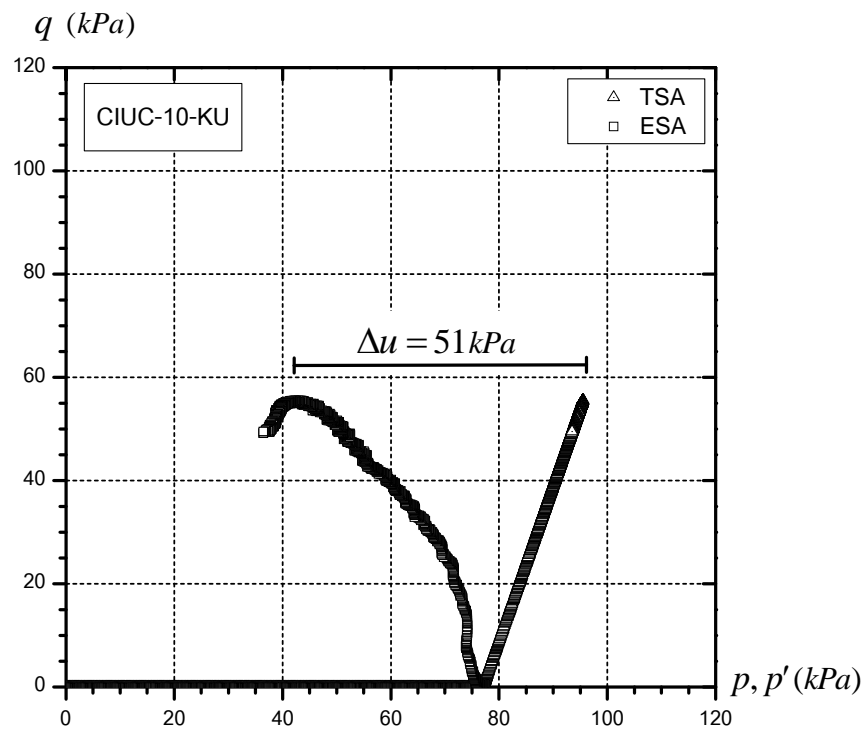
ภาพที่ ค.25(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 9.00-9.50 เมตร



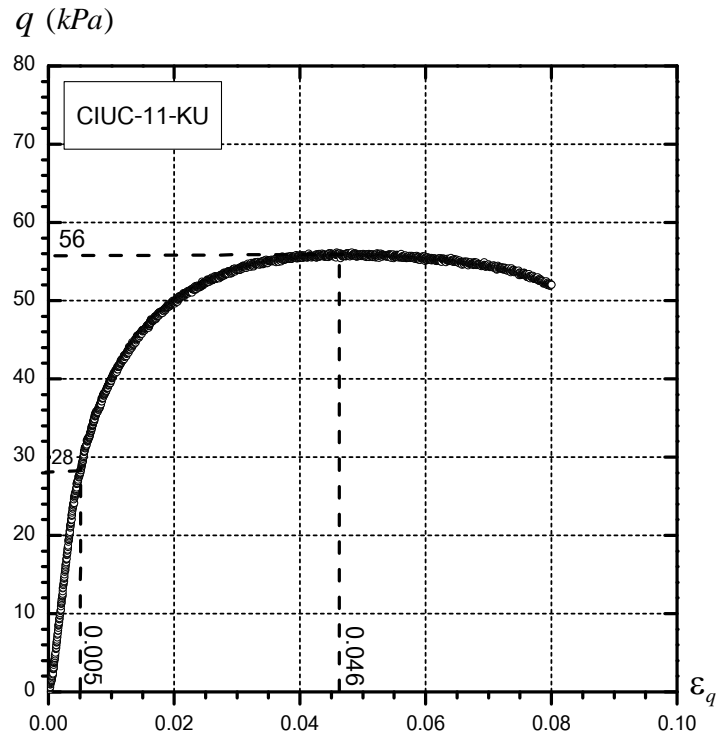
ภาพที่ ค.25(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 9.00-9.50 เมตร



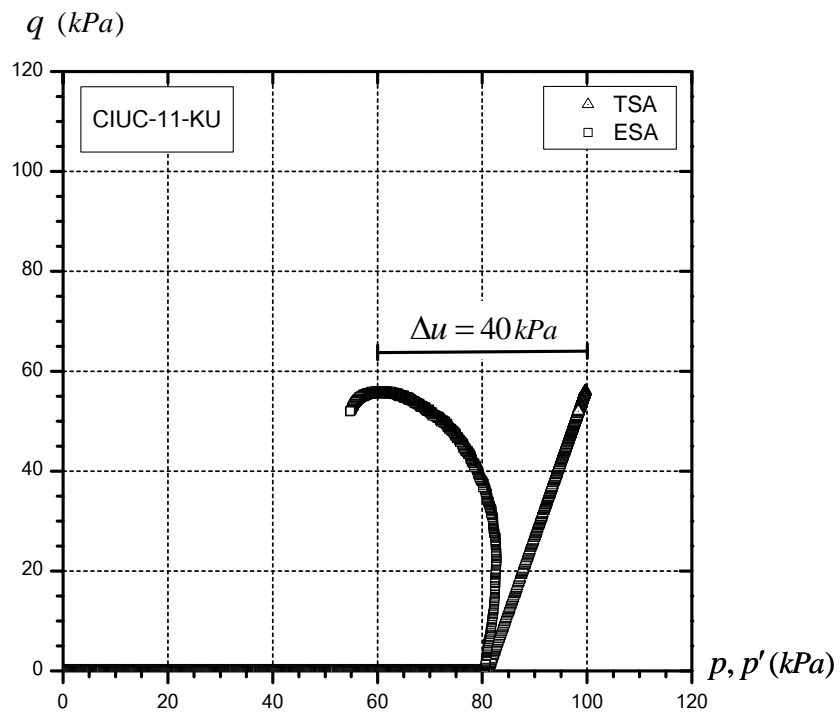
ภาพที่ ค.26(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 10.00-10.50 เมตร



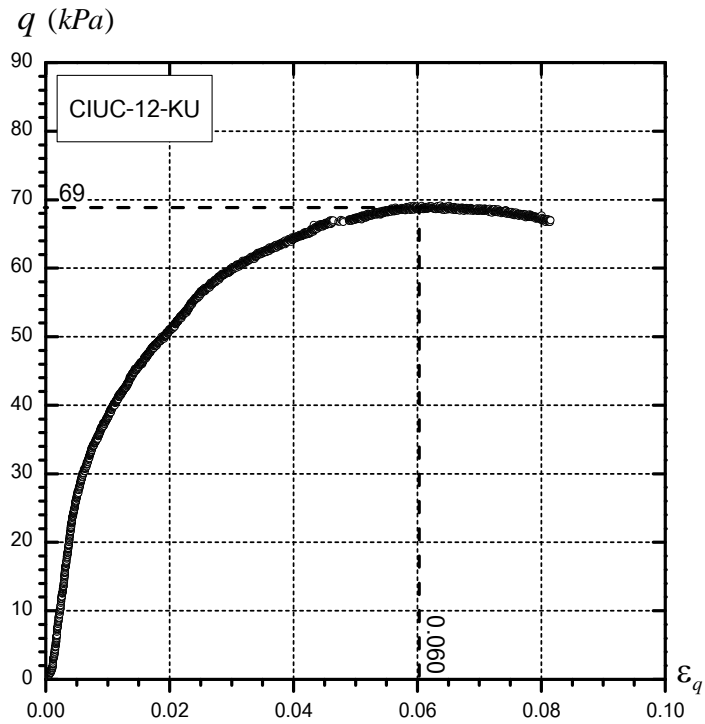
ภาพที่ ค.26(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 10.00-10.50 เมตร



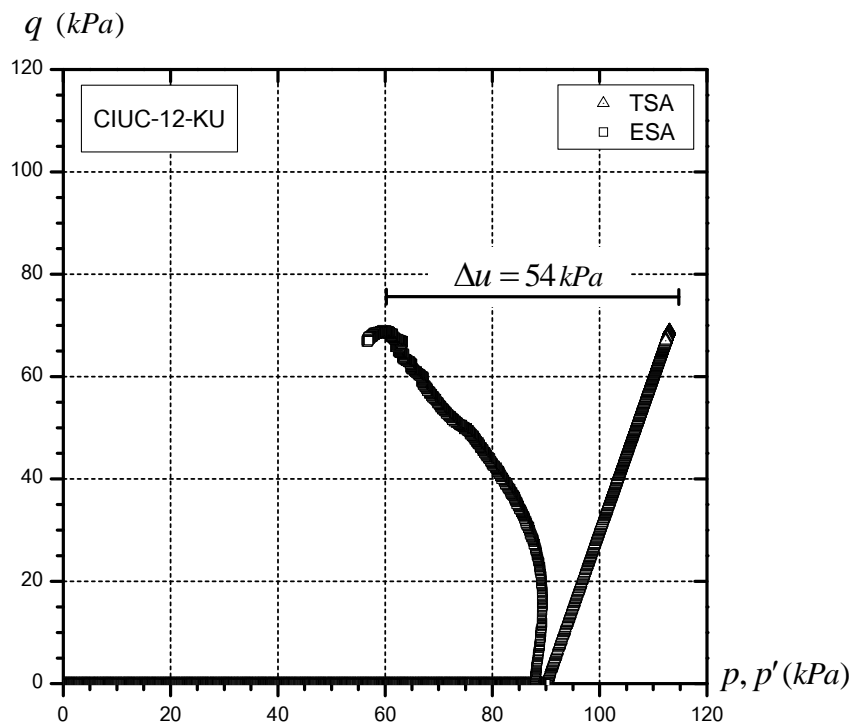
ภาพที่ ค.27(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 11.00-11.50 เมตร



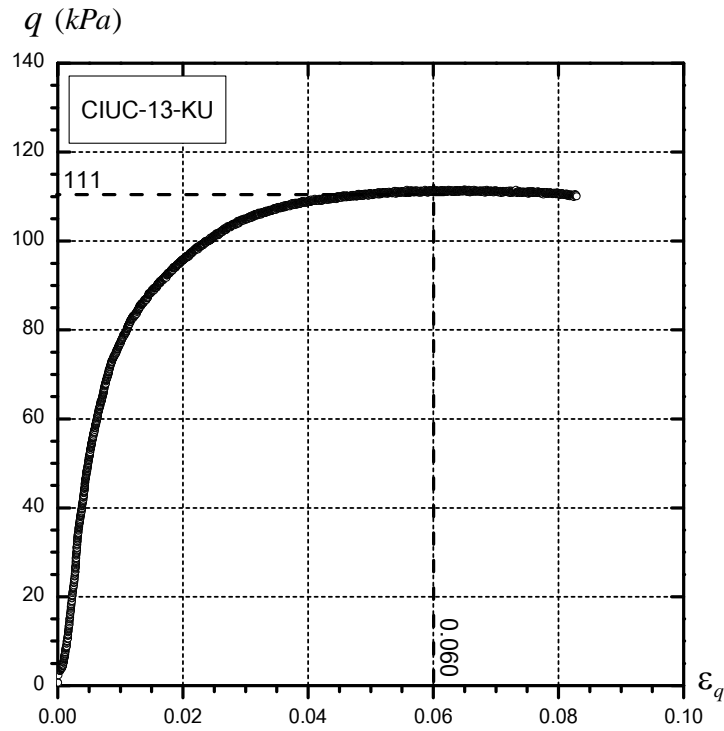
ภาพที่ ค.27(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 11.00-11.50 เมตร



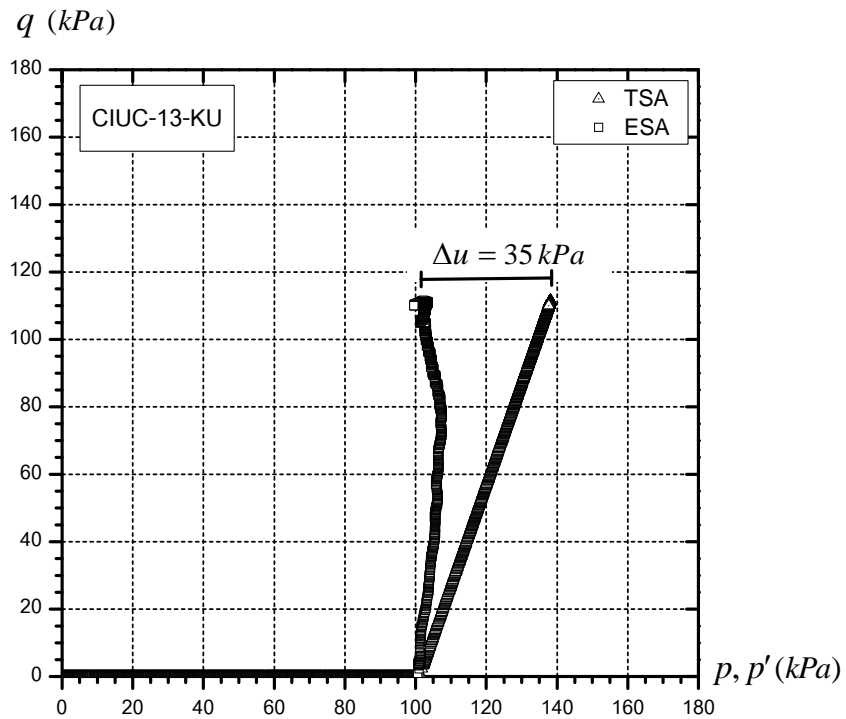
ภาพที่ ค.28(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 12.00-12.50 เมตร



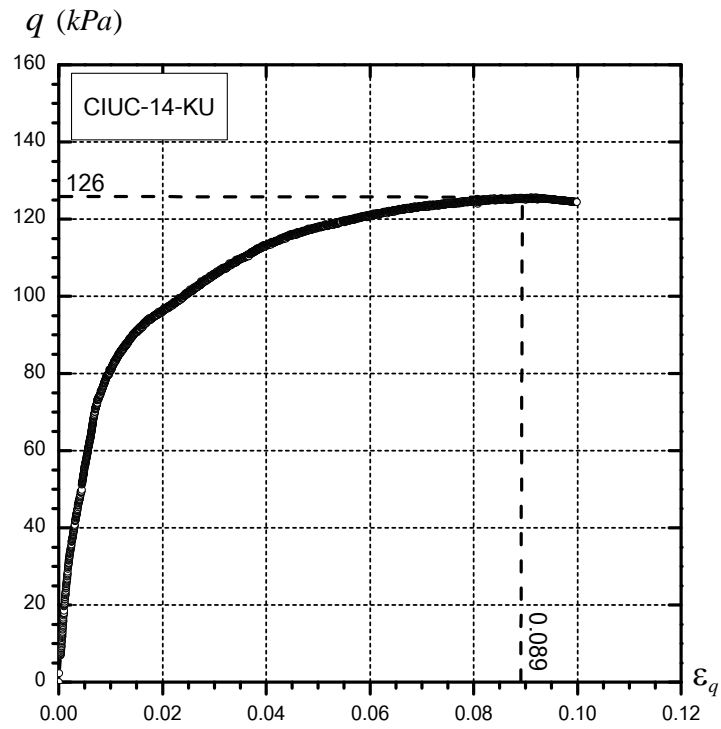
ภาพที่ ค.28(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 12.00-12.50 เมตร



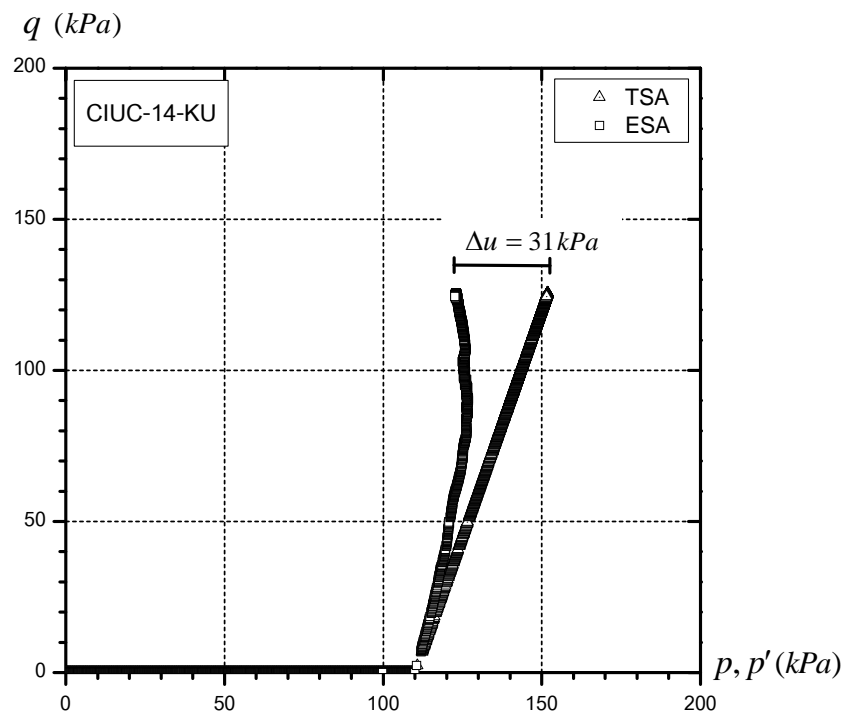
ภาพที่ ค.29(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 13.00-13.50 เมตร



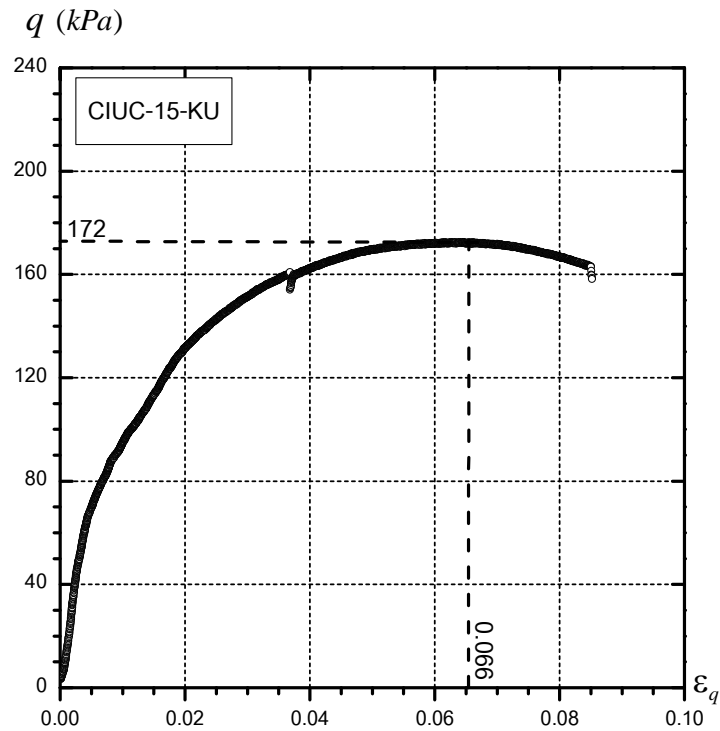
ภาพที่ ค.29(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 13.00-13.50 เมตร



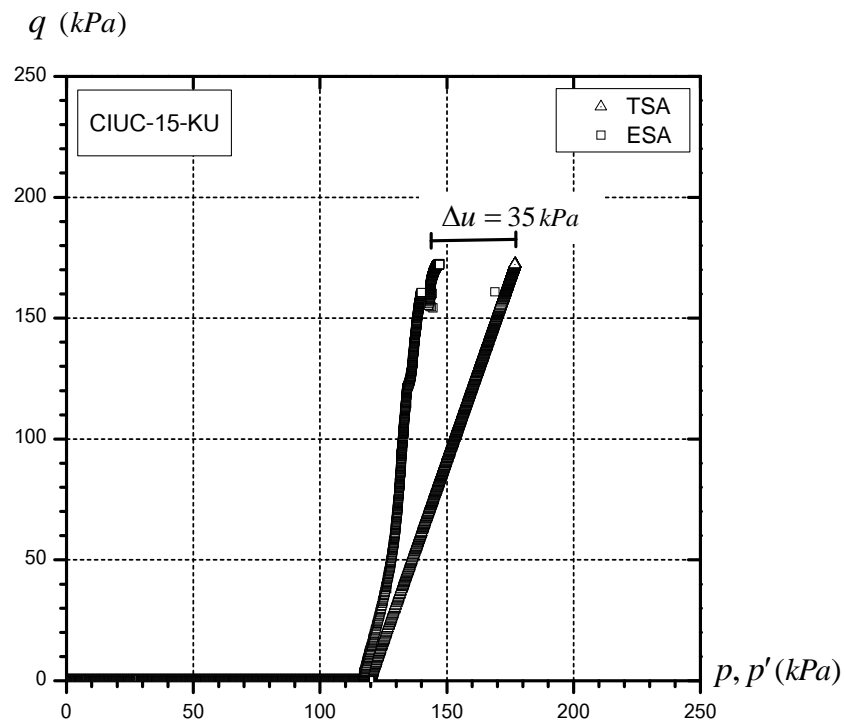
ภาพที่ ค.30(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 14.00-14.50 เมตร



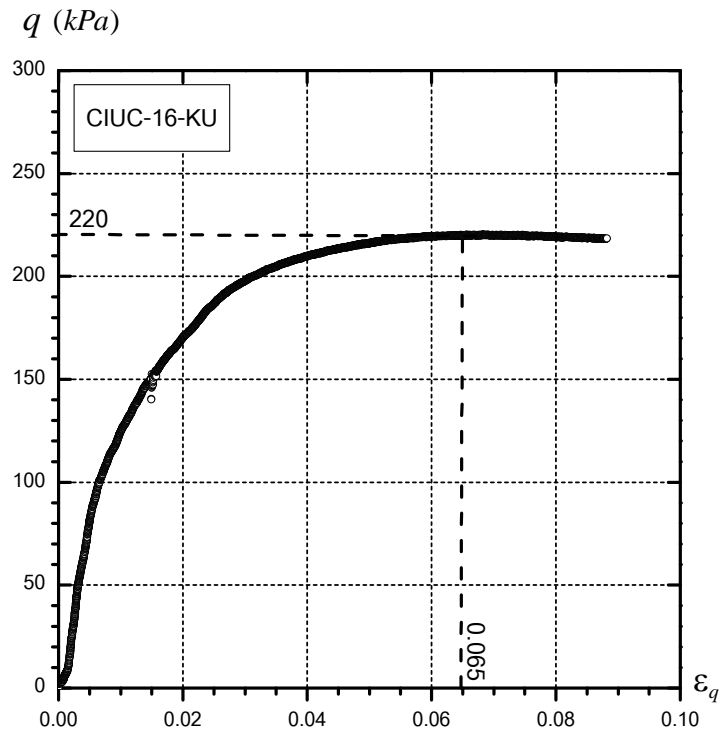
ภาพที่ ค.30(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 14.00-14.50 เมตร



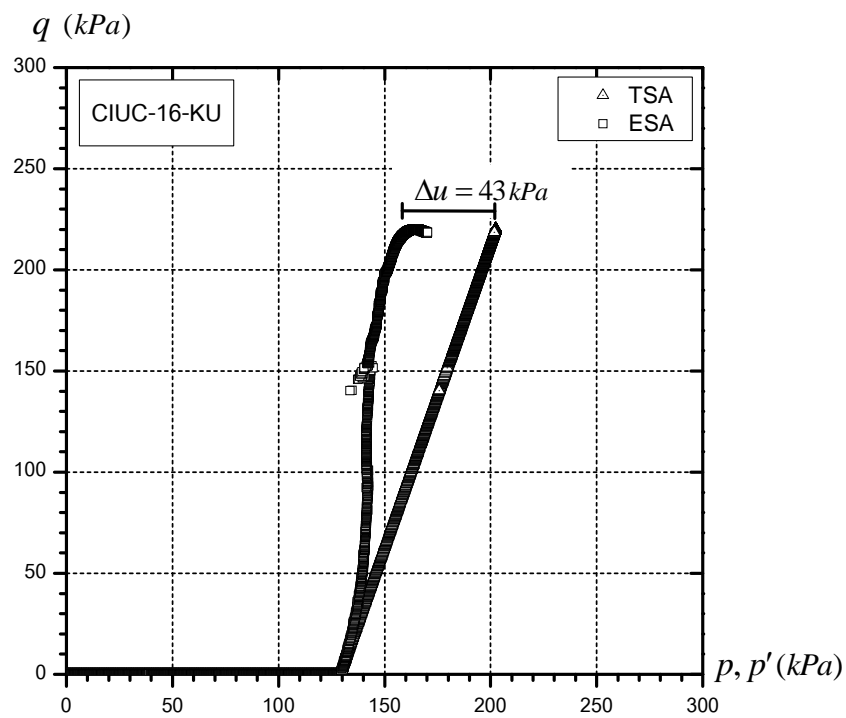
ภาพที่ ค.31(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 15.00-15.50 เมตร



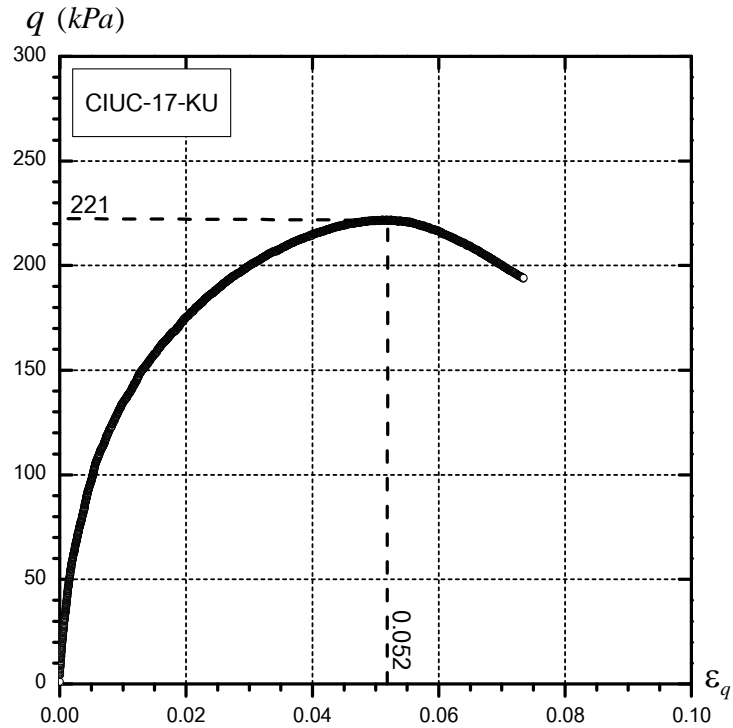
ภาพที่ ค.31(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 15.00-15.50 เมตร



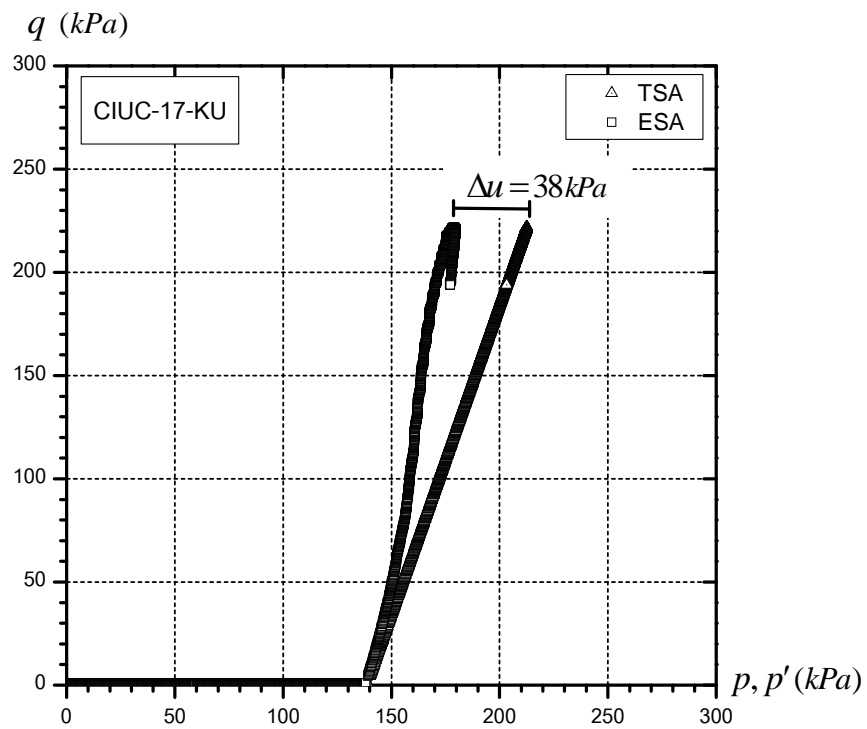
ภาพที่ ค.32(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 16.00-16.50 เมตร



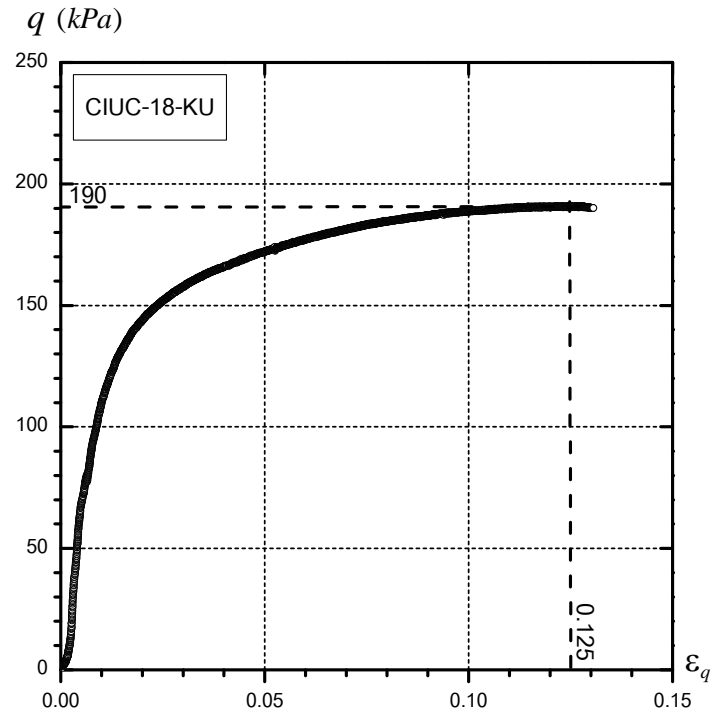
ภาพที่ ค.32(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 16.00-16.50 เมตร



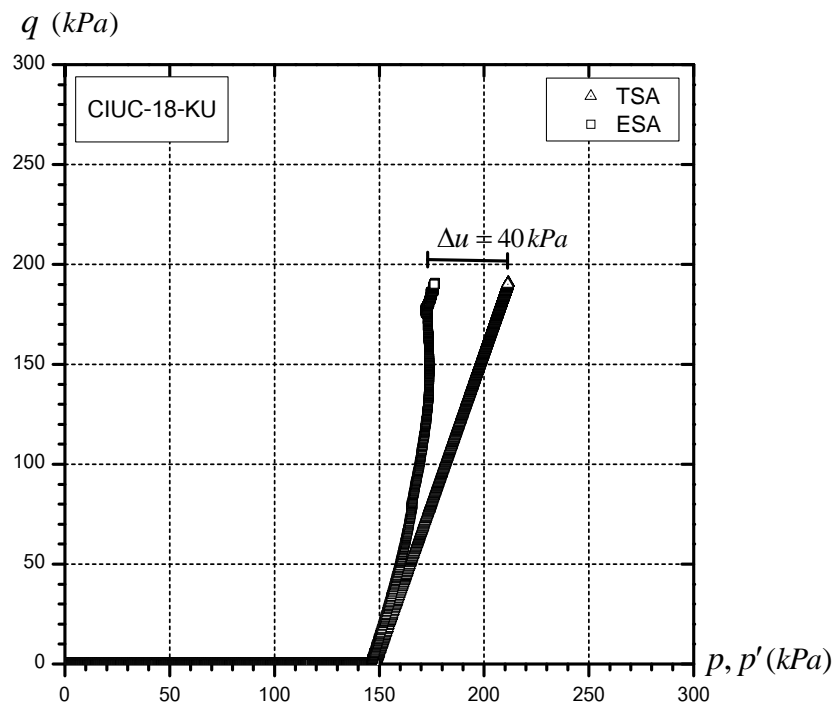
ภาพที่ ค.33(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 17.00-17.50 เมตร



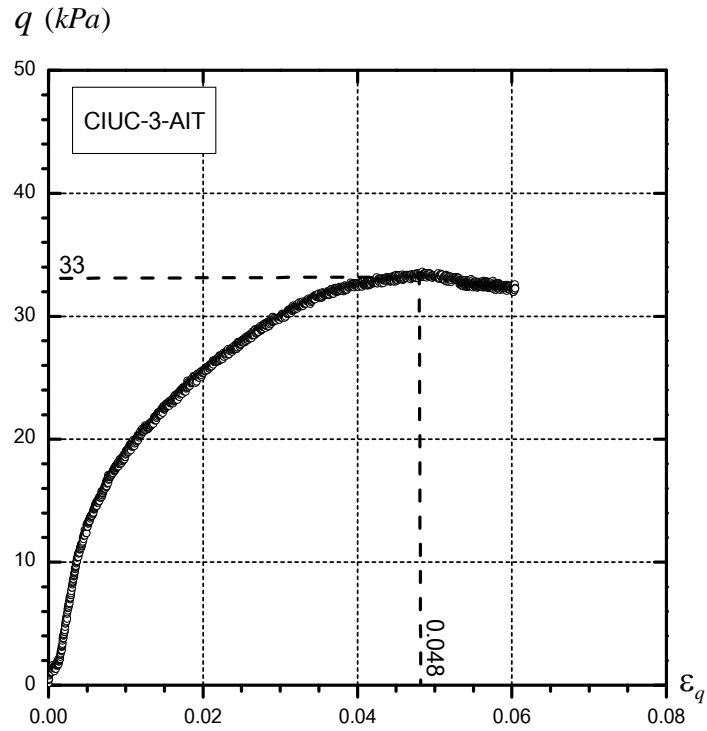
ภาพที่ ค.33(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 17.00-17.50 เมตร



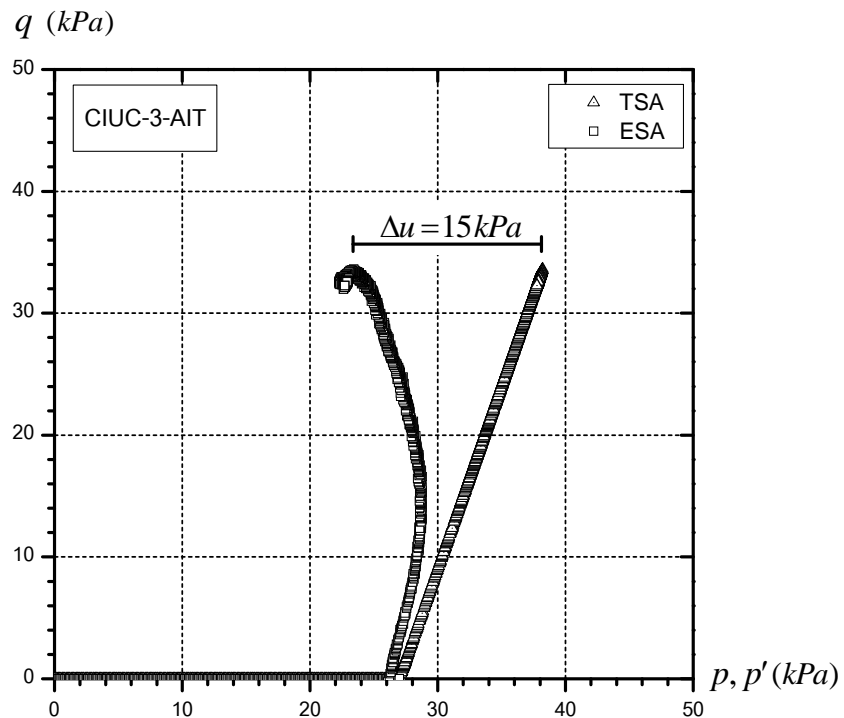
ภาพที่ ค.34(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 18.00-18.50 เมตร



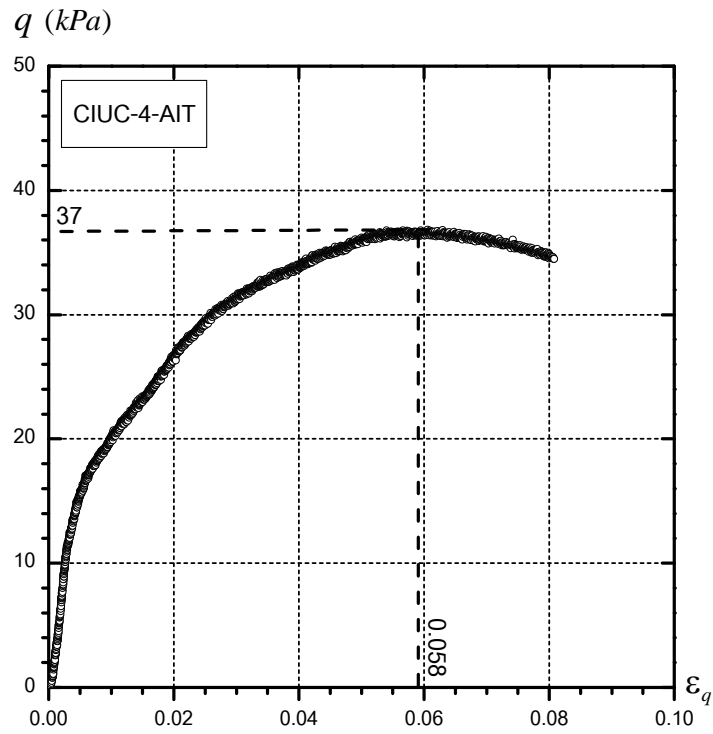
ภาพที่ ค.34(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว KU ที่ระดับความลึก 18.00-18.50 เมตร



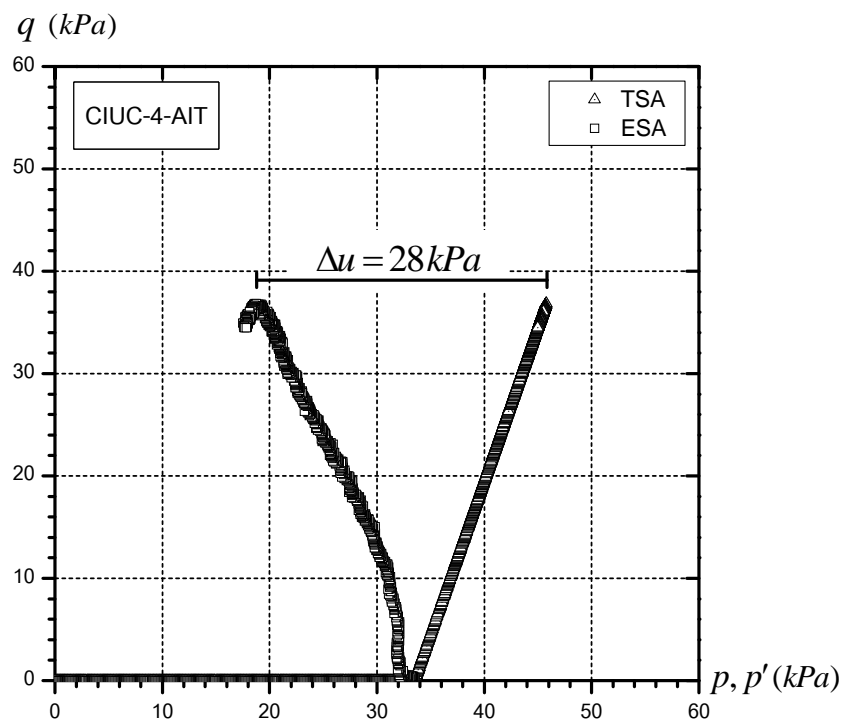
ภาพที่ ค.35(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 3.00-3.50 เมตร



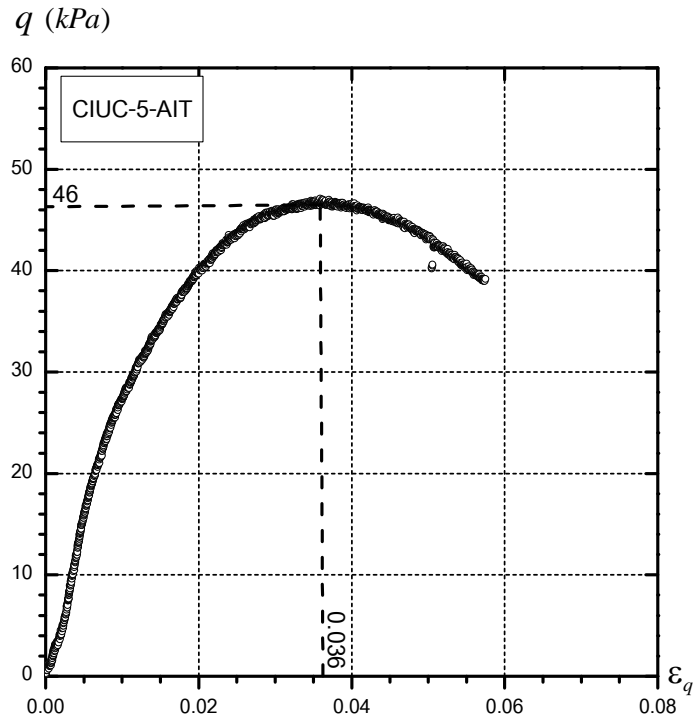
ภาพที่ ค.35(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 3.00-3.50 เมตร



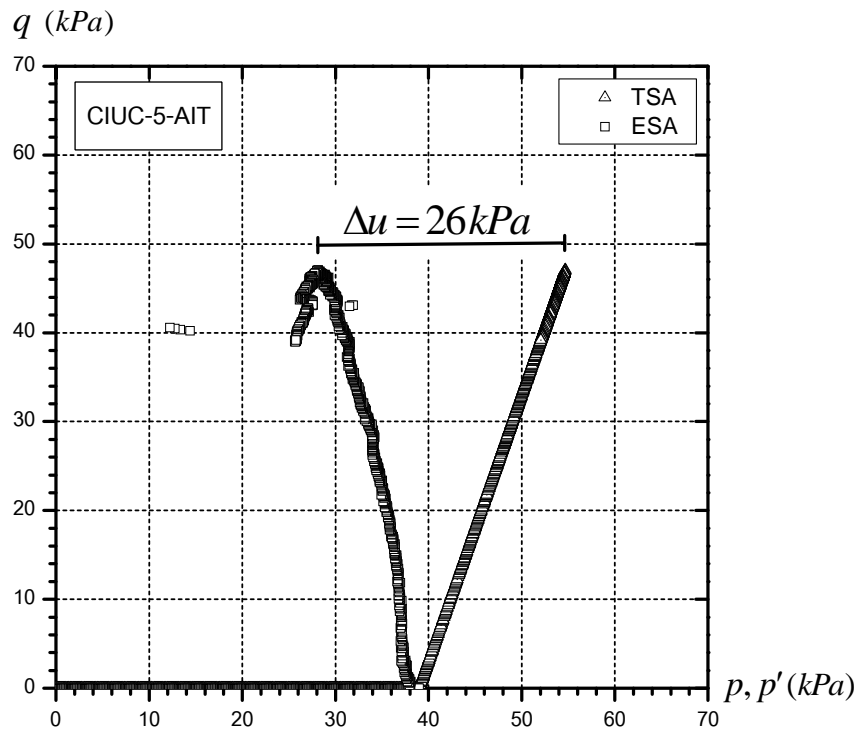
ภาพที่ ค.36(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 4.00-4.50 เมตร



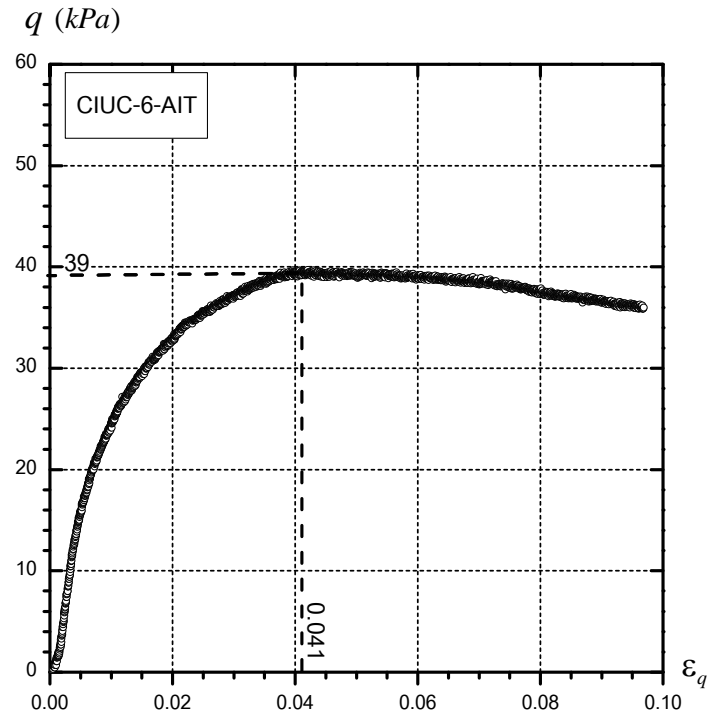
ภาพที่ ค.36(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 4.00-4.50 เมตร



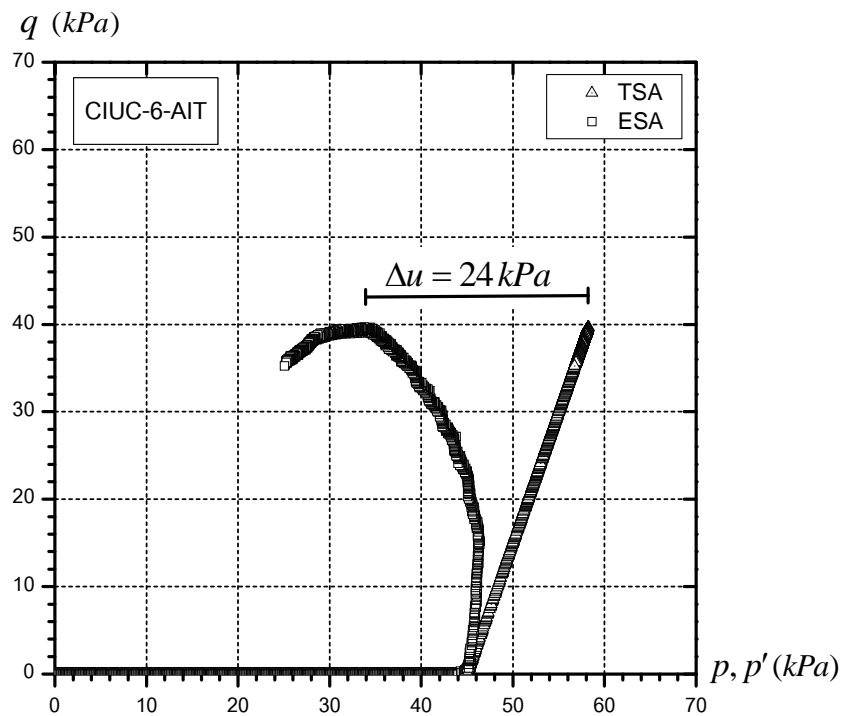
ภาพที่ ค.37(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 5.00-5.50 เมตร



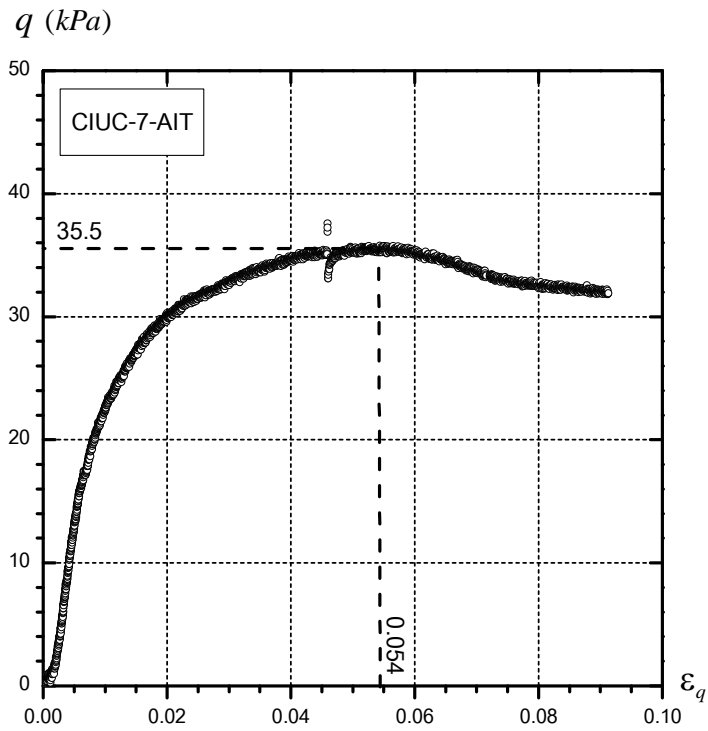
ภาพที่ ค.37(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 5.00-5.50 เมตร



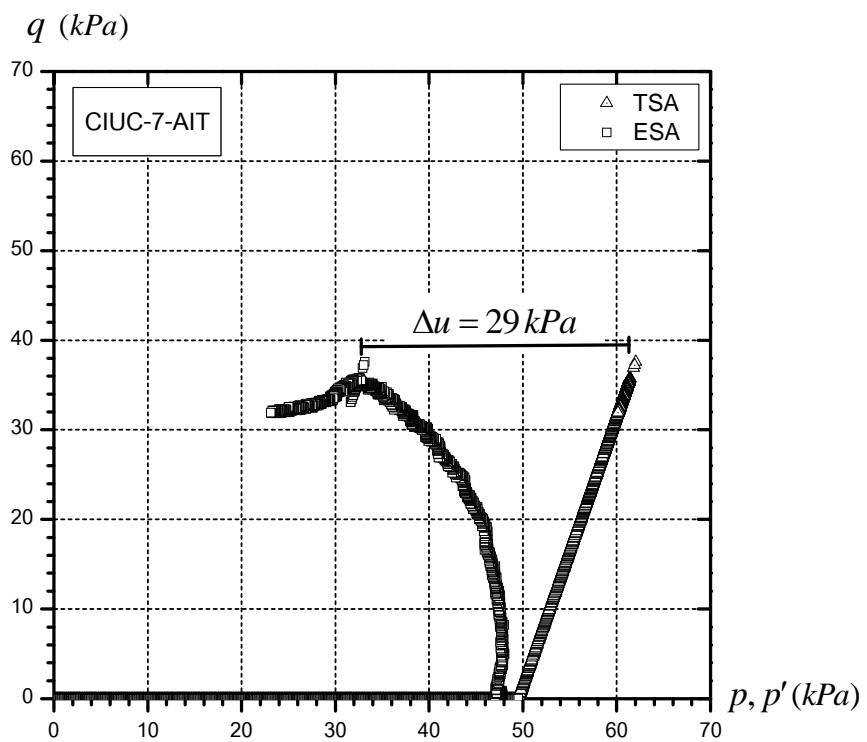
ภาพที่ ค.38(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 6.00-6.50 เมตร



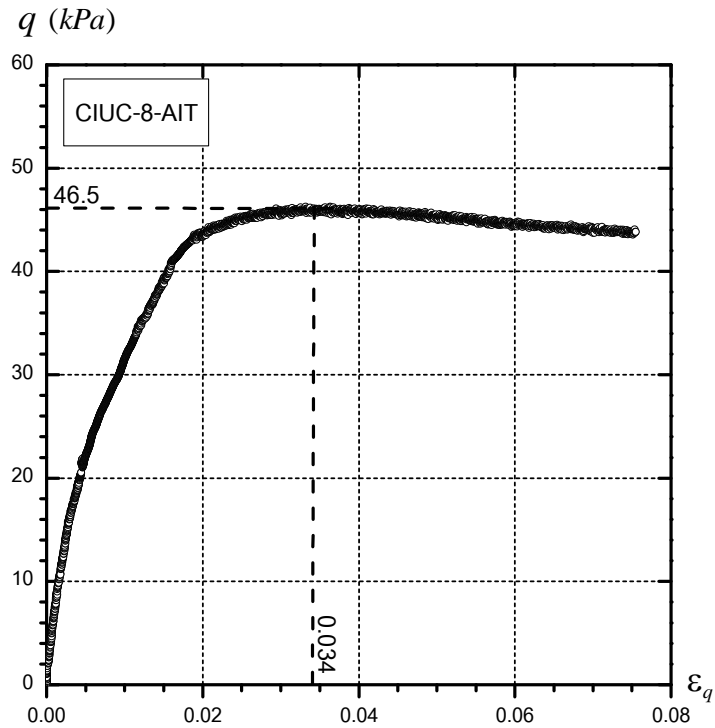
ภาพที่ ค.38(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 6.00-6.50 เมตร



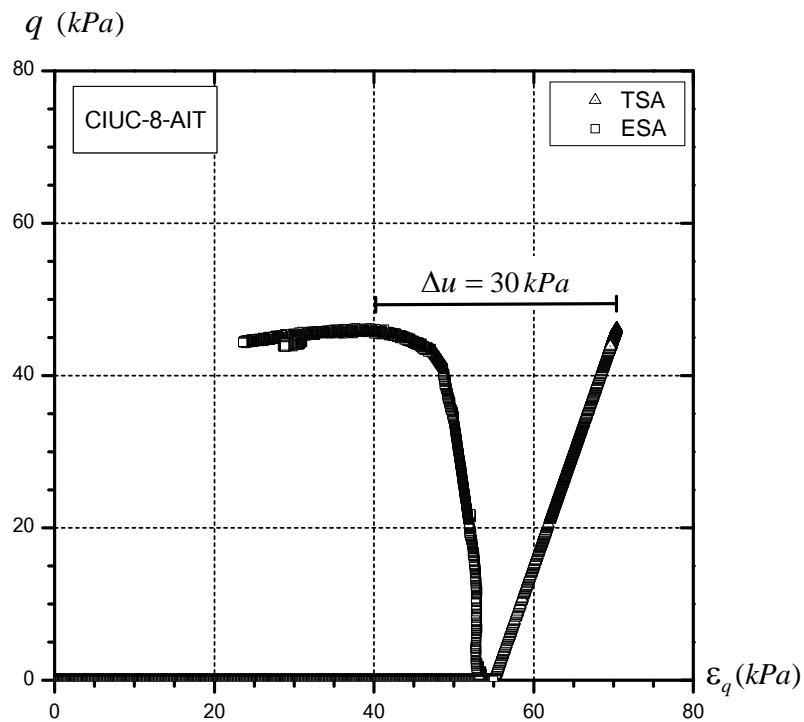
ภาพที่ ค.39(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 7.00-7.50 เมตร



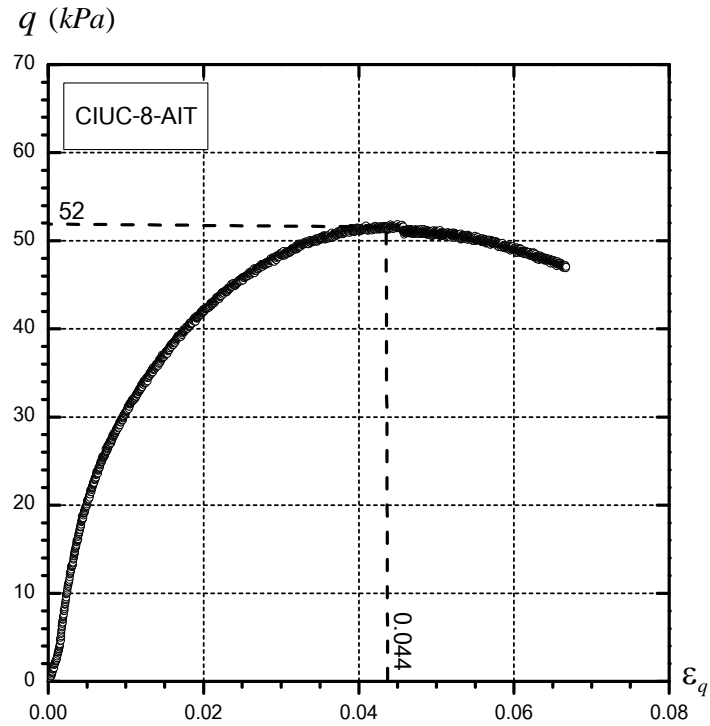
ภาพที่ ค.39(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 7.00-7.50 เมตร



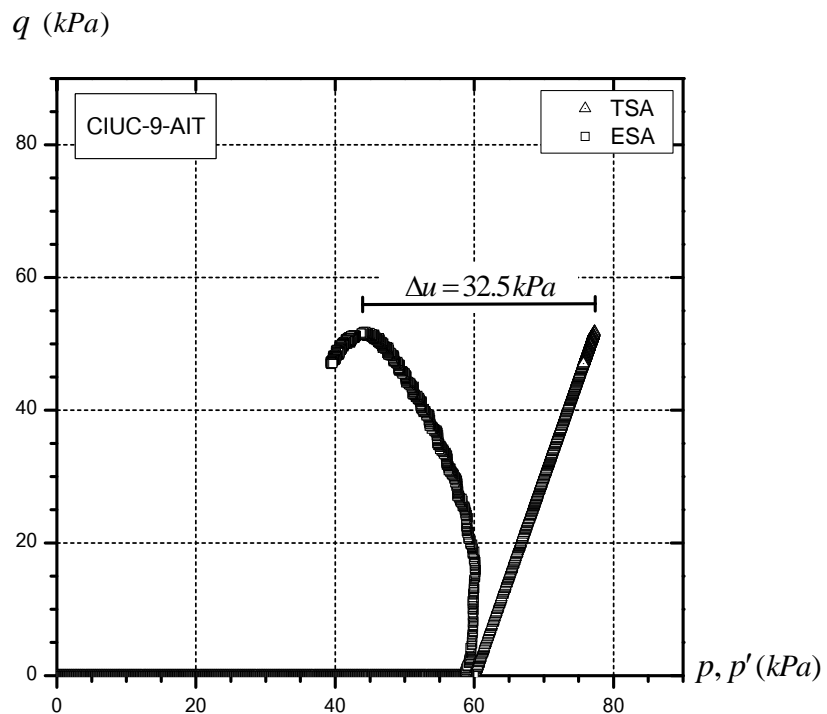
ภาพที่ ค.40(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 8.00-8.50 เมตร



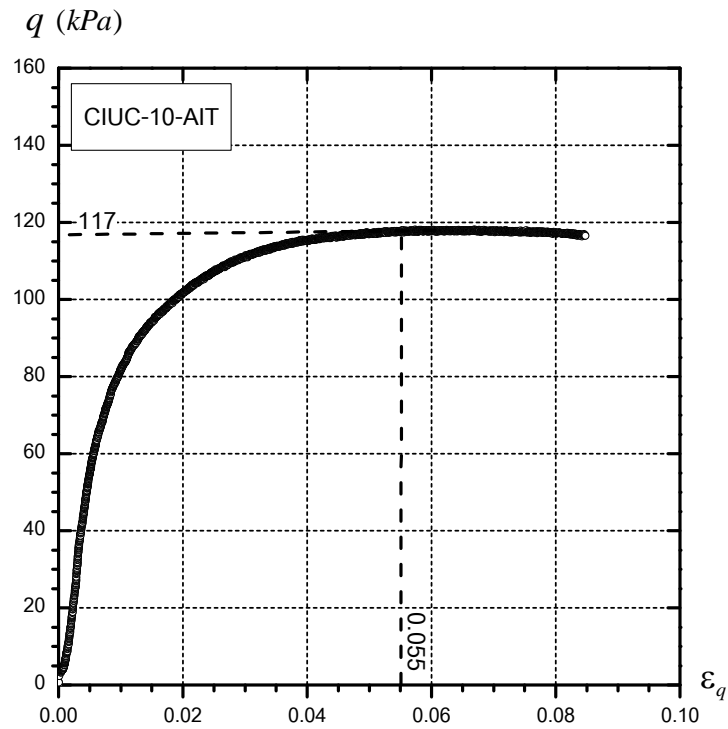
ภาพที่ ค.40(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 8.00-8.50 เมตร



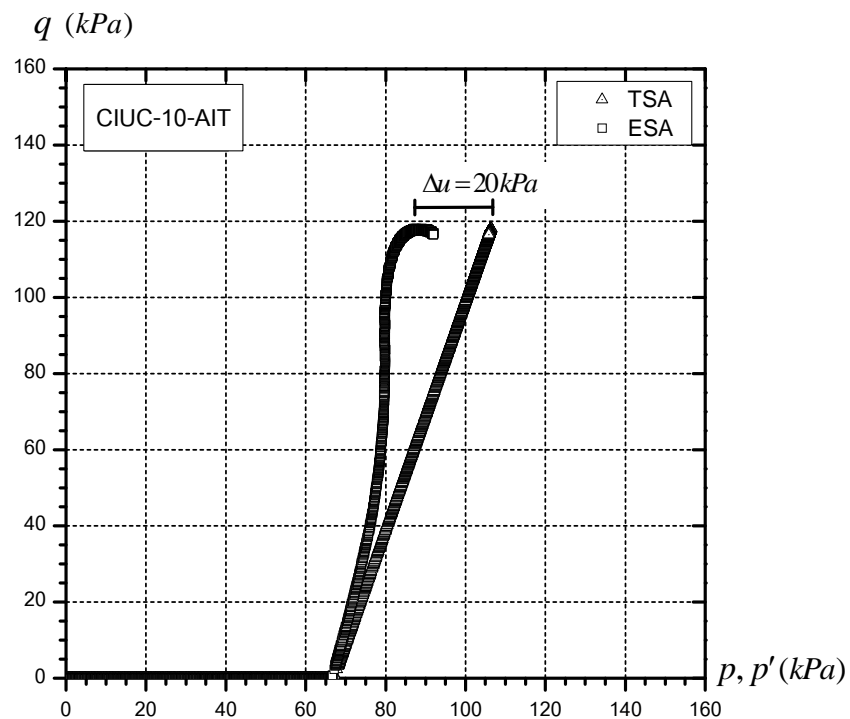
ภาพที่ ค.41(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 9.00-9.50 เมตร



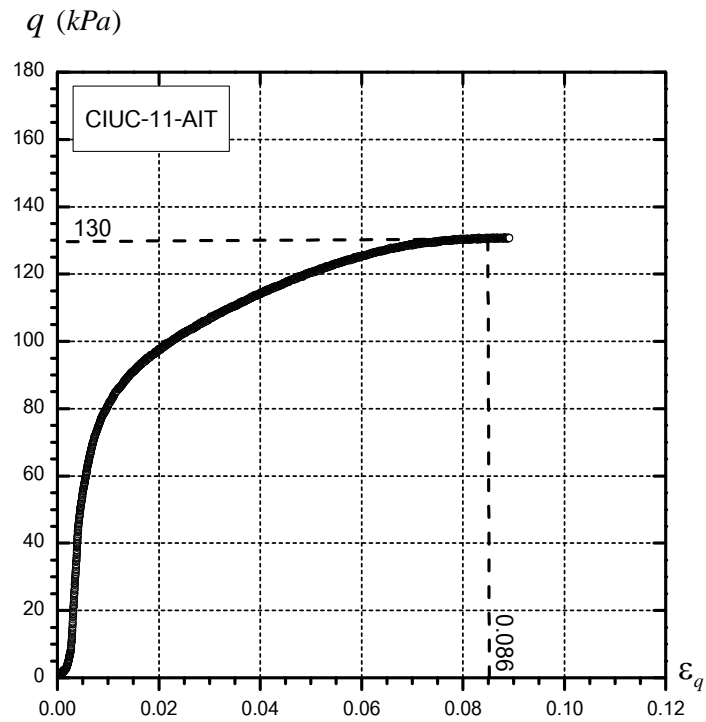
ภาพที่ ค.41(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 9.00-9.50 เมตร



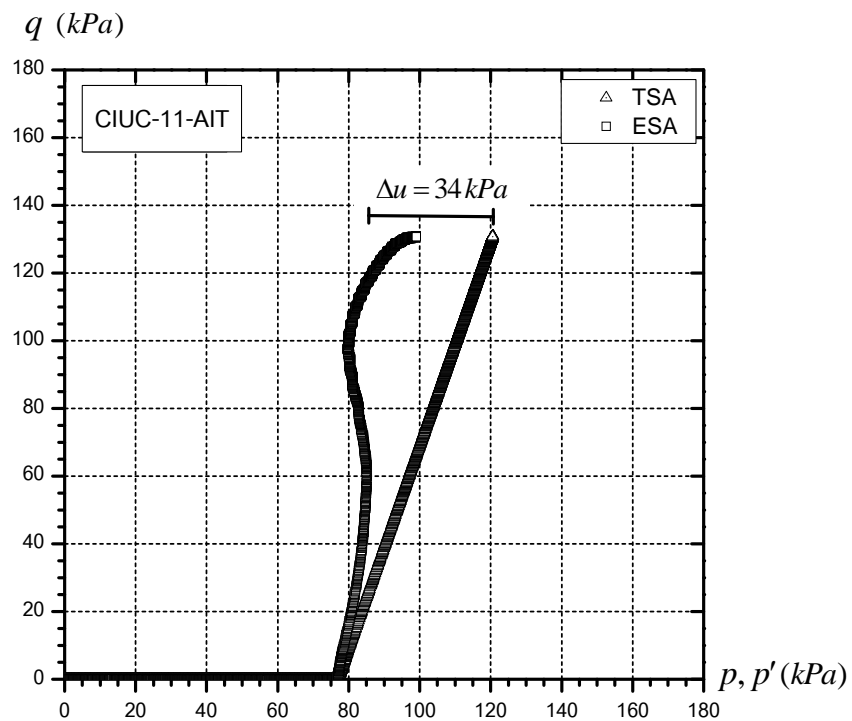
ภาพที่ ค.42(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 10.00-10.50 เมตร



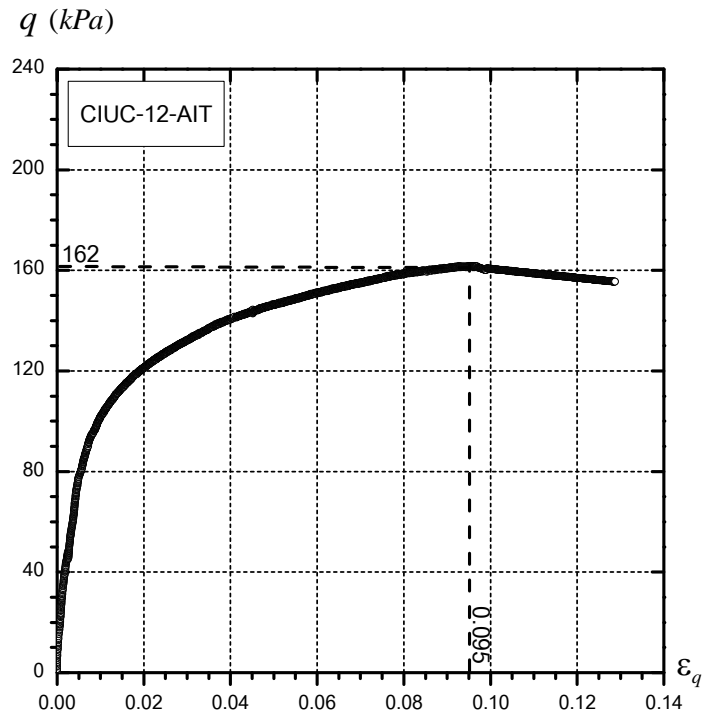
ภาพที่ ค.42(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 10.00-10.50 เมตร



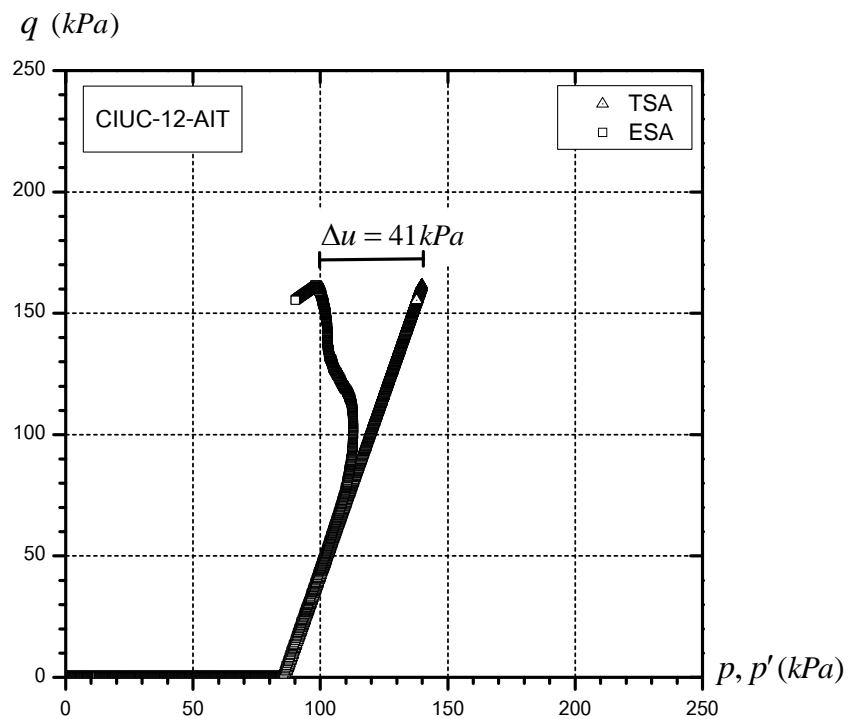
ภาพที่ ค.43(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 11.00-11.50 เมตร



ภาพที่ ค.43(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 11.00-11.50 เมตร



ภาพที่ ค.44(ก) กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดเบี่ยงเบนของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 12.00-12.50 เมตร



ภาพที่ ค.44(ข) กราฟแสดงวิถีความเค้นระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยของการทดสอบ CIUC ดินเหนียว AIT ที่ระดับความลึก 12.00-12.50 เมตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพงศกร สุนทรานนท์ เกิดวันเสาร์ที่ 27 เดือนสิงหาคม พ.ศ.2530 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 409/13 ซ.นพดารา ถ.เยาวราช ต.ตลาดใหญ่ อ.เมือง จ.ภูเก็ต สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552 และปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมธรณีเทคนิค ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย