

การทดสอบการกดกรวยขนาดเล็กในเครื่องมือแรงอัดสามแกน



นายพลากร พีรภาคย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-2014-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MINIATURE CONE PENETRATION TEST IN TRIAXIAL APPARATUS



Mr. Palakorn Peerapark

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-2014-5

4470430121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : CLAYS / MINIATURE CONE PENETRATION / PIEZOCONE / CONE RESISTANCE / SKIN FRICTION / PORE PRESSURE

PALAKORN PEERAPARK : MINIATURE CONE PENETRATION TEST IN TRIAXIAL APPARATUS. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.DR.BOONCHAI UKRITCHON, 114 pp. ISBN 974-53-2014-5.

This thesis presents a research on the development of the advanced equipment for the miniature cone penetration test (MCPT) in triaxial apparatus. The MCPT is performed in the triaxial apparatus where the state of stress can be controlled similar to that of the field test. The geometry of the miniature cone is 8 mm diameter and 60° cone head angle. The cone head and the penetrometer is made of stainless steel in order to prevent rust and corrosion during the test. The porous ceramic is installed at the cone base for measuring the excess pore water pressure during the penetration. In addition, another pore water pressure transducer is also installed at the pedestal base for back pressure measurement. The load cell is equipped at the bottom of the cone penetrometer for measuring the total cone resistance. The calibration procedures consist of measurement friction force between the o-ring and the penetrometer, and verification of pore water pressure at the cone head.

The MCPT is tested on the reconstituted Bangkok clay obtained from the south entrance of Suvarnabhumi Airport (PI ≈ 62 %). The reconstitution process is prepared in the condition such that initial water content $W_n \approx 150\%$, the maximum vertical stress = 1 ksc and unloading stress = 0.25 ksc before trimming (OCR = 4). The test sample has the diameter of 130 mm and the height of 100 mm, yielding the ratio of sample diameter to cone diameter of 16.25. The rate of cone penetration is 0.156 mm/minute. The clay is tested on the isotropic state of stress as $\sigma'_{vc} = 0.5$ ksc and OCR = 2. The standard undrained triaxial test at the same state of stress is also carried out to determine the undrained shear strength of the clay sample. The two MCPT show consistent results of two different relationships between total cone resistance and penetration depth (CF-PD). The first behavior corresponds to the non-linear CF-PD curve in the penetration of 0-20 mm because of stress boundary effect at the initial stage of penetration. On the contrary, for penetration of 20-70 mm, CF-PD curve increase linearly due to the product of steady state cone resistance and linear skin friction resistance. Thus, the cone resistance and the sleeve friction are obtained from the straight line interception and its slope of the second range, respectively. The calculated N_k from the test is about 19, which corresponds well with other researches. The interface friction ratio between clay and the stainless sleeve is 0.6. In addition, there is small increase in the excess pore water pressure in the magnitude of 0.1 ksc caused by the very slow rate of penetration.

Department	Civil Engineering	Student's signature.....
Field of study	Civil Engineering	Advisor's signature.....
Academic year	2004	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง ตรวจสอบ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

Dr.Tian Ho Seah อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ได้ให้คำแนะนำในการพัฒนาเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus เพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการจนสำเร็จ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาใช้เวลาและให้คำแนะนำ รวมทั้งข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษาวิจัยนี้

ผู้เขียนขอขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อนๆทุกคนตลอดจนเจ้าหน้าที่วิจัยรัฐพิภคศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความร่วมมือ ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้เสมอมาแม้ในยามที่ท้อแท้

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอแสดงความระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา และอาจารย์ทุกท่านที่ได้กรุณาอบรม สั่งสอน และสนับสนุนมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ๖

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ๗

กิตติกรรมประกาศ ๘

สารบัญ ๗

สารบัญตาราง ๙

สารบัญรูป ๑๐

สัญลักษณ์ ๑๑

บทที่

1. บทนำ 1

 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

 1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย 3

2. ทฤษฎีและการศึกษาในอดีต 4

 2.1 การทดสอบ Cone Penetration Test (CPT) 4

 2.1.1 ชนิดของวิธีการทดสอบ CPT 4

 2.1.1.1 การทดสอบ Mechanical Cone Penetration Test 4

 2.1.1.2 การทดสอบ Electric Cone Penetration Test 7

 2.1.2 จุดประสงค์ของการทดสอบ CPT 9

 2.1.3 ระบบการจัดเก็บข้อมูลและการคำนวณผลการทดสอบ CPT 9

 2.1.4 ข้อดีและลักษณะเฉพาะของการทดสอบ CPT 10

 2.1.5 ข้อจำกัดของการทดสอบ CPT 11

 2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ CPT 11

 2.1.6.1 ขนาดและรูปลักษณะของกรวย 11

 2.1.6.2 การเอียงของ Penetrometer 12

 2.1.6.3 การสอบเทียบเครื่องมือ CPT 12

 2.2 การทดสอบ Piezocone (CPTU) 12

 2.3 ค่าพารามิเตอร์ในดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบ CPT 16

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.4 การประมาณกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวจากการทดสอบ CPT ...	16
2.4.1 การทดสอบ CPT	17
2.4.2 การทดสอบ Piezocone (CPTU)	17
2.5 การพัฒนาเครื่องมือ CPT ในห้องปฏิบัติการ	20
2.6 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวจากการทดสอบ แรงอัดสามแกน	21
2.6.1 ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Process)	23
2.6.1.1 ไม่อัดตัวคายน้ำในตัวอย่างดิน (Unconsolidated)	23
2.6.1.2 อัดตัวคายน้ำในตัวอย่างดิน (Consolidated)	23
2.6.2 ขั้นตอนการกระทำแรงเฉือน (Shearing Process)	24
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
2.7.1 การพัฒนาความดันน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ CPT	25
2.7.2 ผลกระทบของอัตราทด CPT	27
2.7.3 ผลกระทบขอบเขต	27
2.7.4 งานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ CPT ในต่างประเทศ	28
2.7.5 งานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ CPT ในประเทศไทย.....	29
3. ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	30
3.1 ดินที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.2 การทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดิน	30
3.3 โปรแกรมการทดสอบ	32
3.3.1 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำในสถานะดินเหลว (Reconstituted Consolidation Test)	32
3.3.2 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบแรงอัดสามแกน	32
3.3.3 การทดสอบการกดกรวยขนาดเล็ก (MCPT)	33
3.4 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำในสถานะดินเหลว (Reconstituted Consolidation Test)	33
3.4.1 ลักษณะเครื่องมือทดสอบ	33
3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ	35

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4.2.1 การเตรียมตัวอย่างดินเหลว (Mixing Clay Slurry)	35
3.4.2.2 การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)	38
3.4.2.3 การดันและตัดแต่งตัวอย่าง (Extrusion and Trimming)	39
3.5 การหาค่ารับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบแรงอัดสามแกน	39
3.5.1 ลักษณะเครื่องมือทดสอบ	39
3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ	41
3.5.2.1 การจัดเตรียมเครื่องมือ	41
3.5.2.2 การจัดเตรียมตัวอย่างดิน	41
3.5.2.3 การจัดวางตัวอย่างดินในเครื่องมือทดสอบ	42
3.5.2.4 การทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated)	42
3.5.2.5 การอัดตัวคายน้ำแบบ Isotropic	43
3.5.2.6 การเฉือนตัวอย่างดิน (Shearing)	43
3.6 การทดสอบการก่กรวยขนาดเล็ก (MCPT)	44
3.6.1 ลักษณะเครื่องมือทดสอบ	44
3.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ	44
3.6.3 การสอบเทียบเครื่องมือทดสอบ	44
3.6.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ MCPT	47
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	49
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน	49
4.2 การตรวจสอบความสม่ำเสมอของดินเหนียวสร้างใหม่	50
4.3 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในสถานะดินเหลว	52
4.3.1 พฤติกรรมการอัดตัว (Compression Curve)	52
4.3.2 สัมประสิทธิ์การอัดตัวในแนวตั้ง (Vertical Coeff. of Consolidation, c_v)	54
4.4 ผลการพัฒนาเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus	54
4.4.1 Triaxial Cell	54
4.4.2 Top Cap	54
4.4.3 Base Plate	55
4.4.4 Bottom Cap	55
4.4.5 LM Socket และ Water Stopper	55

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.4.6 Cone Penetrometer	55
4.4.7 Loading Machine	56
4.4.8 Porous Stone	56
4.4.9 Rubber Membrane	57
4.4.10 O-ring	60
4.4.11 Trimming Frame	60
4.4.12 Split Former	60
4.4.13 อุปกรณ์เบ่ง O-ring และ Rubber Membrane	61
4.5 ผลการทดสอบแรงอัดสามแกน	61
4.6 ผลการทดสอบการกดกรวยขนาดเล็ก (MCPT)	64
4.6.1 ผลการสอบเทียบเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus	64
4.6.2 ผลการทดสอบ MCPT ในดินเหนียวสร้างใหม่	68
4.6.3 การคำนวณหาค่า q_c และ f_s จากผลการทดสอบ MCPT	73
4.7 การตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ MCPT	73
4.7.1 หน่วยแรงต้านทานปลายกรวย (q_c)	73
4.7.2 หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวปลอก (f_s)	75
4.7.3 อัตราส่วนเสียดทาน (FR)	76
5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	78
5.1 สรุปผลการทดสอบ	78
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยต่อไป	78
รายการอ้างอิง	80
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	83

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบ Reconstituted Consolidation Test	84
ภาคผนวก ข แบบรายละเอียดเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus	93
ภาคผนวก ค รูปเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus	103
ภาคผนวก ง รูปเครื่องมือ Conventional Triaxial Test	109
ภาคผนวก จ รูปเครื่องมือ Reconstituted Consolidometer	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	114



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การปรับแก้วิธีการคำนวณของ Schmertmann (1970) และ Wirojanagud (1974)	29
3.1 โปรแกรมการทดสอบ	33
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวธรรมชาติ	49
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวสร้างใหม่	50
4.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวธรรมชาติกับดินเหนียวสร้างใหม่	51
4.4 ผลการทดสอบอัดตัวคาน้ำในสถานะดินเหลว	52
4.5 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ S ที่คำนวณได้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, $\text{OCR} = 2$)	64
4.6 ผลการทดสอบ MCPT ($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, $\text{OCR} = 2$)	73
4.7 ชนิดของดินที่แบ่งออกเป็น Zone ต่างๆในแผนภูมิของ Robertson (1990)	76
4.8 ผลการเปรียบเทียบค่า f_s (ksc)	76

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องมือทดสอบ Mechanical Penetrometer (Meigh, 1987)	5
2.2 ขั้นตอนการทดสอบ Mechanical Penetrometer (University of New South Wales, 1990)	6
2.3 เครื่องมือทดสอบ Electric Penetrometer (Meigh, 1987)	8
2.4 ระบบการจับเก็บข้อมูลการทดสอบ CPT (University of New South Wales, 1990)	9
2.5 รถทดสอบ CPT (IGN (Thailand) Ltd., 1994)	10
2.6 เครื่องมือทดสอบ Piezocone เปรียบเทียบกับเครื่องมือทดสอบ Electric Penetrometer	13
2.7 ตำแหน่งการติดตั้ง Filter ใน Piezocone (University of New South Wales, 1990)	14
2.8 อิทธิพลของตำแหน่งติดตั้ง Filter ที่มีต่อแรงดันน้ำที่วัดได้ใน Piezocone (University of New South Wales, 1990)	15
2.9 รูปลักษณะของเครื่องมือ Piezocone และผลกระทบของแรงดันน้ำ ที่มีต่อหน่วยแรงที่วัดได้ (University of New South Wales, 1990)	15
2.10 ค่าปรับแก้ N_k ที่ได้จากการทดสอบในสถานที่ต่างๆ (Lunne and Eide, 1976)	18
2.11 ค่า N_c ที่ได้จากการทดสอบในสถานที่ต่างๆ (Baligh, 1985)	19
2.12 เครื่องมือเตรียมตัวอย่างดิน (Almeida and Parry, 1985)	20
2.13 การติดตั้งเครื่องมือ CPT (Almeida and Parry, 1985)	21
2.14 การทดสอบ CPT ใน Calibration Chamber (Kurup et al., 1994)	22
2.15 การแปรผันของ Normalized Δu กับ OCR ในดินเหนียว Gault (Almeida and Parry, 1985)	26
2.16 ผลกระทบของอัตรากด CPT ในชั้นดินตะกอน Clayey Silt (Campanella et al., 1983)	28
3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งที่ตั้งโครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิ	31
3.2 แผนที่แสดงตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างดิน	31
3.3 ไดอะแกรมเครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหลว (Reconstituted Consolidometer)	35
3.4 ขั้นตอนการผสมตัวอย่างดินเหลว	37
3.5 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหลว	38
3.6 การดันตัวอย่างดินออกจาก Cell Chamber	40
3.7 เครื่องมือตัดแบ่งตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่	41
3.8 เครื่องมือ Miniature Cone Penetrometer Test in Triaxial Apparatus	45
3.9 รูปขยายเครื่องมือทดสอบบริเวณ Bottom Cap	46
3.10 การสอบเทียบเครื่องมือทดสอบ	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 การหาค่า Q_c และ Q_u จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมด้านทานปลายกรวยกับ Cone Position	47
3.12 ภาพจำลองการทดสอบ MCPT	48
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง e -log σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำในสถานะดินเหลว	51
4.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการหุดตัวและเวลา จากการทดสอบใน Batch ที่ 1 ถึง 4	53
4.3 แม่แบบอลูมิเนียมที่ใช้ในการผลิต Rubber Membrane	58
4.4 การจุ่มแม่แบบลงในถาดที่ใส่ Latex	59
4.5 การตากแม่แบบที่เคลือบด้วย Latex ให้แห้ง	59
4.6 ตัวอย่าง Rubber Membrane ที่ผลิตขึ้นมาได้	59
4.7 Trimming Frame	60
4.8 Split Former , O-ring , อุปกรณ์เบ่ง O-ring และ Rubber Membrane	61
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\sigma_1 - \sigma_3$ กับ $\% \epsilon_v$ ของดินเหนียวสร้างใหม่ ($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, $\text{OCR} = 2$)	62
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Δu กับ $\% \epsilon_v$ ของดินเหนียวสร้างใหม่ ($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, $\text{OCR} = 2$)	63
4.11 ทางเดินหน่วยแรงประสิทธิผลของดินเหนียวสร้างใหม่ ($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, $\text{OCR} = 2$)	63
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับ Cone Position	65
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมกับ Cone Position	66
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\sigma_c A_c$ กับ Cone Position	67
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมด้านทานปลายกรวยกับ Cone Position ของดินเหนียวสร้างใหม่ ($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, $\text{OCR} = 2$)	69
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Δu กับ Cone Position ของดินเหนียวสร้างใหม่ ($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, $\text{OCR} = 2$)	70
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงค้ำน้ำที่วัดได้ในตำแหน่งที่ต่างกันกับ Cone Position ของตัวอย่างที่ 1 (TEST-1)	71
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงค้ำน้ำที่วัดได้ในตำแหน่งที่ต่างกันกับ Cone Position ของตัวอย่างที่ 2 (TEST-2)	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมด้านทานปลายกรวยกับ Cone Position สำหรับใช้คำนวณหาค่า q_c และ f_s	74
4.20 แผนภูมิแสดง Profiling (Robertson, 1990)	75
4.21 แผนภูมิจำแนกชนิดของดินสำหรับการทดสอบ CPT	77
ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว (Batch 1)	85
ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง e -log σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว (Batch 1)	86
ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง c_v กับ σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว (Batch 1)	86
ก-4 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว (Batch 2)	87
ก-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง e -log σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว (Batch 2)	88
ก-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง c_v กับ σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว (Batch 2)	88
ก-7 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว (Batch 3)	89
ก-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง e -log σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว (Batch 3)	90
ก-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง c_v กับ σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว (Batch 3)	90
ก-10 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว (Batch 4)	91
ก-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง e -log σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว (Batch 4)	92
ก-12 ความสัมพันธ์ระหว่าง c_v กับ σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว (Batch 4)	92
ค-1 เครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus	104

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค-2 เครื่องคอมพิวเตอร์และ ADU สำหรับเก็บข้อมูลการทดสอบ	104
ค-3 Triaxial Cell สำหรับทำการทดสอบตัวอย่างดิน	105
ค-4 Hydraulic Oil Pump สำหรับปรับเปลี่ยนแรงดันน้ำ	105
ค-5 Pressure Gauge สำหรับควบคุมแรงดันน้ำแบบ Manual	106
ค-6 Load Cell สำหรับวัดแรงรวมต้านทานปลายกรวย	106
ค-7 Loading Machine สำหรับกด Cone Penetrometer เข้าไปในตัวอย่างดิน	106
ค-8 Volume Change Unit สำหรับวัดปริมาตรน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในโพรงดิน	107
ค-9 Pressure Transducer สำหรับวัดแรงดันน้ำในโพรงดิน	107
ค-10 LVDT สำหรับวัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง	107
ค-11 Deaired Water Apparatus สำหรับผลิต Deaired Water ที่ใช้ในการทดสอบ	108
ง-1 เครื่องมือ Conventional Triaxial Test	110
ง-2 Triaxial Cell สำหรับทำการทดสอบตัวอย่างดิน	110
ง-3 Proving Ring สำหรับวัดแรงในแนวดิ่งที่กระทำกับตัวอย่างดิน	111
จ-1 เครื่องมือ Reconstituted Consolidometer No.1 (วิโรจน์, 2546)	113
จ-2 เครื่องมือ Reconstituted Consolidometer No.2	113

สัญลักษณ์

A, B	=	พารามิเตอร์แรงดันน้ำในโพรงดินของ Skempton
A_c	=	พื้นที่หน้าตัดกรวย
A_s	=	พื้นที่ผิวปลอกที่สัมผัสกับดิน
ADU	=	Autonomous Data-acquisition Unit
BH	=	หลุมเจาะ (Bore Hole)
c_c	=	ดัชนีการอัดตัว (Compression Index)
c_u	=	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)
c_v	=	สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation)
CI	=	Isotropic Consolidation Test
\overline{CIU}	=	Isotropic Consolidation Undrained Compression Test with Pore Water Pressure Measurement
CPT	=	การทดสอบ Cone Penetration Test
CPTU	=	การทดสอบ Piezocone Penetration Test
e	=	อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio)
e_0	=	อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (Initial Void Ratio)
E_u	=	Young's Modulus แบบไม่ระบายน้ำ
E'	=	Young's Modulus แบบระบายน้ำ
EOP	=	จุดสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ (End of Primary)
f	=	แรงเสียดทาน (Friction Force)
f_s	=	หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวปลอก (Friction Sleeve)
f_T	=	หน่วยแรงเสียดทานปรับแก้ที่ผิวปลอก (Corrected Friction Sleeve)
FR	=	อัตราส่วนเสียดทาน (Friction Ratio)
FVT	=	การทดสอบ Field Vane Shear Test
G_s	=	ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil Solid)
H	=	ความสูงของตัวอย่างดิน
ΔH	=	ความสูงของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการทดสอบ
k	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of Permeability)
K_0	=	สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง ณ สภาวะสมดุล (Coefficient of Lateral Earth Pressure at Rest)
LL	=	ขีดพิกัดเหลว (Liquid Limit)

สัญลักษณ์ (ต่อ)

LI	=	ดัชนีความเหลว (Liquidity Index)
LIR	=	อัตราส่วนการเพิ่มน้ำหนัก (Load Increment Ratio)
LVDT	=	Linear Variable Differential Transformer
M	=	Constrained Modulus
MCPT	=	การทดสอบการกดกรวยขนาดเล็ก (Miniature Cone Penetration Test)
N_c	=	Cone Factor
N_k	=	Piezocone Factor
$N_{\Delta u}$	=	Excess Pore Pressure Factor
NC	=	สภาพอัดแน่นปกติของดิน (Normally Consolidated Clay)
OC	=	สภาพอัดแน่นเกินตัวของดิน (Overconsolidated Clay)
OCR	=	อัตราส่วนการอัดแน่นเกินตัวของดิน (Overconsolidation Ratio)
PI	=	ดัชนีพลาสติกซิตี (Plasticity Index)
PL	=	ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)
p, p'	=	$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ และ $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$
q, q'	=	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ และ $\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$
Q_{Total}	=	แรงรวมต้านทานปลายกรวย (Total Cone Resistance)
Q_c	=	แรงต้านทานปลายกรวย
Q_s	=	แรงเสียดทานที่ผิวปลอก
q_c	=	หน่วยแรงต้านทานปลายกรวย (Cone Resistance)
q_T	=	หน่วยแรงต้านทานปลายกรวยปรับแก้ (Corrected Cone Resistance)
R_d	=	อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างดินต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวย
S	=	ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (Degree of Saturation)
SD	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)
sqr	=	Square Root
u	=	แรงดันน้ำทั้งหมดในโพรงดิน (Pore Water Pressure)
u_b	=	Back Pressure
u_{max}	=	แรงดันน้ำสูงสุดในโพรงดิน (Maximum Pore Water Pressure)
u_s	=	Preshear Pore Pressure
UU	=	Unconsolidated Undrained Test

สัญลักษณ์ (ต่อ)

Δu	=	แรงดันน้ำส่วนเกินในโพรงดิน (Excess Pore Water Pressure)
Δu_{bt}	=	แรงดันน้ำส่วนเกินในโพรงดินที่ฐานกรวย
Δu_t	=	แรงดันน้ำส่วนเกินในโพรงดินที่ปลายกรวย
W_n	=	ปริมาณความชื้นธรรมชาติในมวลดิน (Natural Moisture Content)
z	=	ความลึกกรวยที่กดเข้าไปในตัวอย่างดิน
Δz	=	ผลต่างของความลึกกรวยที่กดเข้าไปในตัวอย่างดิน
α	=	Adhesion Factor
ϵ_v	=	ความเครียดในแนวตั้ง (Vertical Strain)
γ_t	=	หน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight)
σ	=	หน่วยแรงรวมในมวลดิน (Total Stress)
σ_c	=	Cell Pressure
σ_v	=	หน่วยแรงรวมในแนวตั้ง (Vertical Total Stress)
σ_{vc}	=	หน่วยแรงรวมในแนวตั้งที่ทำให้ดินถูกอัดตัวคายน้ำในแต่ละชั้นตอน (Total Vertical Consolidation Stress)
σ_{vo}	=	หน่วยแรงรวมในแนวตั้งตามธรรมชาติ (Total Vertical Overburden Stress)
σ_1	=	Major Principal Stress
σ_3	=	Minor Principal Stress
$\Delta\sigma_1$	=	Major Principal Increment Stress
$\Delta\sigma_3$	=	Minor Principal Increment Stress
σ'	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดิน (Effective Stress)
σ'_p	=	หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ (Maximum Past Pressure)
σ'_s	=	Preshear Effective Vertical Pressure
σ'_v	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vertical Effective Stress)
σ'_{vc}	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งที่ทำให้ดินถูกอัดตัวคายน้ำในแต่ละชั้นตอน (Effective Vertical Consolidation Stress)
σ'_{vo}	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งตามธรรมชาติ (Effective Vertical Overburden Stress)
σ'_1/σ'_3	=	Principal Stress Ratio , Obliquity

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การทดสอบดินในที่ (In-situ Test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นต่อการออกแบบในงานวิศวกรรมปฐพีเช่นเดียวกับการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ เหตุผลหนึ่งที่ใช้การทดสอบดินในที่เนื่องมาจากข้อมูลที่ได้จะมีความน่าเชื่อถือและความถูกต้องมากกว่าการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีโอกาสที่ตัวอย่างดินจะถูกรบกวน (Soil Disturbed) จากวิธีการเก็บตัวอย่างหรือจากการขนส่งได้ สำหรับในปัจจุบันวิธีการทดสอบดินในที่มียุหลายวิธี อาทิเช่น Standard Penetration Test (SPT) , Cone Penetration Test (CPT) , Field Vane Shear Test (FVT) , Pressuremeter Test เป็นต้น

การทดสอบ Cone Penetration Test หรือ CPT เริ่มใช้เป็นที่แรกในปี ค.ศ.1917 และพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนเป็นรูปแบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันตั้งแต่ ค.ศ.1934 เป็นต้นมา ซึ่งวิธีการทดสอบนี้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก สำหรับในประเทศไทยนั้นวิธีการทดสอบดังกล่าวยังไม่เป็นที่นิยมมากนักส่วนใหญ่นำมาใช้กับโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่เท่านั้น แต่เป็นที่คาดหมายกันว่าในอนาคตวิธีการทดสอบนี้จะได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้น

การทดสอบ Cone Penetration Test ในดินเหนียวนั้นส่วนใหญ่แล้วค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบจะมีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพารามิเตอร์ด้านกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) ซึ่งจะมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของดิน การศึกษาหาความสัมพันธ์นี้เพื่อนำมาใช้งานในทางปฏิบัติตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้กระทำอย่างต่อเนื่องในดินชนิดต่างๆทั่วโลก โดยวิธีการศึกษาที่ใช้กันอยู่จะมี 3 แนวทางหลักได้แก่ ในทางทฤษฎี ในห้องปฏิบัติการ และในภาคสนาม ซึ่งการศึกษาในทางทฤษฎีขณะนี้ยังคงเป็นเรื่องที่ยังยากอยู่ที่จะทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำ สำหรับในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครการศึกษาหาความสัมพันธ์ในภาคสนามจะเป็นวิธีการศึกษาที่ใช้กันอยู่ ซึ่งมักจะประสบปัญหาของการไม่รู้สภาวะหน่วยแรงและความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของดิน ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้วิธีการศึกษาในห้องปฏิบัติการแทน โดยทำการพัฒนาเครื่องมือทดสอบขึ้นมาโดยเฉพาะและใช้ดินเหนียวที่สร้างขึ้นใหม่มาทำการศึกษาเพื่อให้ดินมีเนื้อเดียวกันตลอดและสามารถควบคุมสภาวะหน่วยแรงได้ตามต้องการ

ในการศึกษาวิจัยนี้จะทำการพัฒนาเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus ขึ้นมาใหม่สำหรับทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยจำลองสภาพการทดสอบ CPT มาไว้ในเครื่องมือแรงอัดสามแกน ซึ่งสามารถควบคุมสถานะของหน่วยแรงในดินให้สอดคล้องกับสภาพจริงในสนามได้ และทำการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาโดยใช้ดินเหนียวสร้างใหม่ที่จัดเตรียมไว้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ มีดังนี้

- 1) เพื่อพัฒนาเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus ขึ้นมาใหม่
- 2) เพื่อทดสอบขีดความสามารถของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาใหม่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของการศึกษาวิจัย มีดังนี้

- 1) พัฒนาเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus ขึ้นมาใหม่
- 2) จัดเตรียมตัวอย่างดินเหนียว Reconstituted Clay
- 3) ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ โดยใช้เครื่องมือแรงอัดสามแกนทำการทดสอบแบบ \overline{CIU} ที่ OCR เท่ากับ 2
- 4) ทดสอบขีดความสามารถของเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ทำการทดสอบแบบ CI ที่ OCR เท่ากับ 2 และใช้อัตรากดเท่ากับ 0.156 mm/Min.
- 5) ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ พร้อมข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยในขั้นต่อไป

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาวิจัย มีดังนี้

- 1) ได้เครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus ขึ้นมาใหม่สำหรับใช้ทำการศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการ
- 2) สามารถนำเครื่องมือที่ได้ไปศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯได้
- 3) สามารถนำเครื่องมือที่ได้ไปศึกษาหาค่า Piezocone Factor (N_k) สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯได้
- 4) สามารถนำความสัมพันธ์ที่ศึกษาได้ไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบ CPT ในสนามสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและการศึกษาในอดีต

2.1 การทดสอบ Cone Penetration Test (CPT)

การทดสอบ Cone Penetration Test (CPT) หรือที่รู้จักกันในชื่อของ Dutch Cone Penetration Test, Quasi-static Cone Penetration Test, Dutch Sounding หรือ Dutch Deep Sounding Test จะเป็นการทดสอบดินในที่ (In-situ Test) อีกวิธีหนึ่งที่มีการศึกษาค้นคว้า และพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนเป็นที่ยอมรับและนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก โดยเฉพาะกลุ่มประเทศในแถบทวีปยุโรป ซึ่งจะทำการกดกรวยลงไปในพื้นดินที่อัตราคง (Penetration Rate) คงที่เพื่อวัดแรงต้านทานปลายกรวย (Q_c) และแรงเสียดทานที่ผิวปลอก (q_c) ที่เกิดขึ้น โดยหลักการทดสอบที่ใช้จะคล้ายคลึงกับการทดสอบเสาเข็ม สำหรับการทดสอบนี้เริ่มใช้กันเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1917 โดย The Swedish State Railways และพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนเป็นรูปแบบการทดสอบ CPT ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันเมื่อปี ค.ศ.1934 ที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ จุดประสงค์ในตอนแรกของการทดสอบ CPT ก็คือใช้สำหรับหาความหนาของชั้นดินอ่อนบริเวณพื้นที่ราบลุ่มปากแม่น้ำ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของชั้นดินคล้ายกับชั้นดินในกรุงเทพฯ ต่อมาก็ได้ขยายไปถึงการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม รวมทั้งการหาค่าพารามิเตอร์และส่วนประกอบต่างๆของชั้นดินด้วย

2.1.1 ชนิดของวิธีการทดสอบ CPT

การทดสอบ CPT ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่ การทดสอบ Mechanical Cone Penetration Test และการทดสอบ Electric Cone Penetration Test ซึ่งจะมีรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้

2.1.1.1 การทดสอบ Mechanical Cone Penetration Test

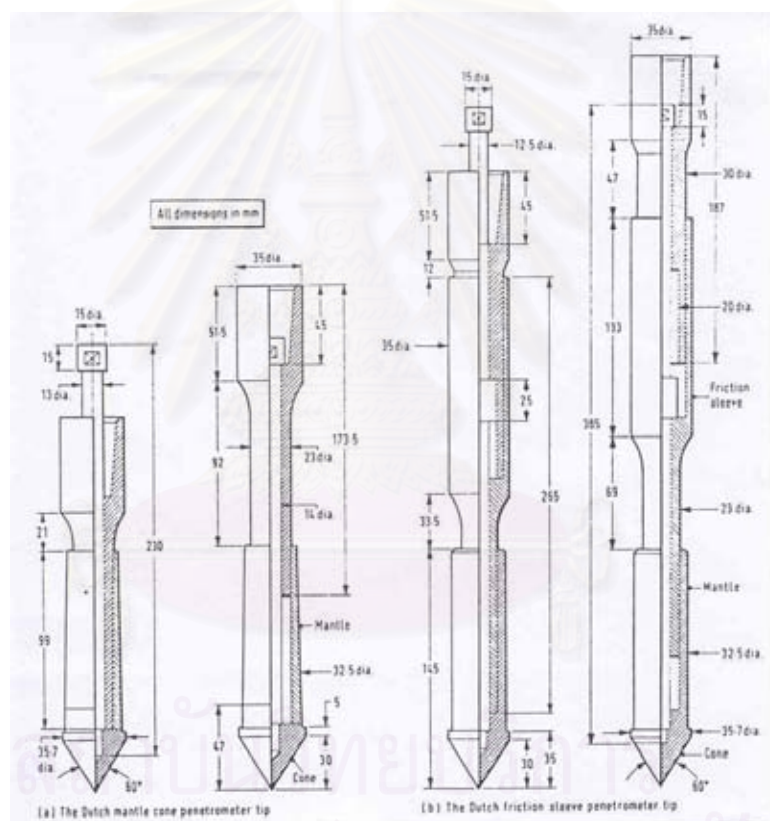
การทดสอบ Mechanical Cone Penetration Test เป็นวิธีการทดสอบที่เก่าแก่มากรวิธีหนึ่ง ซึ่งลักษณะของเครื่องมือทดสอบจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

ก. กรวย (Cone) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35.7 mm พื้นที่หน้าตัด 10 cm^2 และมีมุมปลายกรวย 60°

ข. ปลอกวัดแรงเสียดทาน (Friction Sleeve) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35.7 mm (+0.5/-0.0 mm) ซึ่งจะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของกรวยเล็กน้อย และมีพื้นที่ผิวของ Sleeve ที่สัมผัสกับดิน 150 cm^2

ค. ก้านเหล็กในและท่อเหล็กนอก (Inner and Outer Rods) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถกดได้เฉพาะกรวย และกรวยกับปลอกวัดแรงเสียดทานลงไป在地ได้

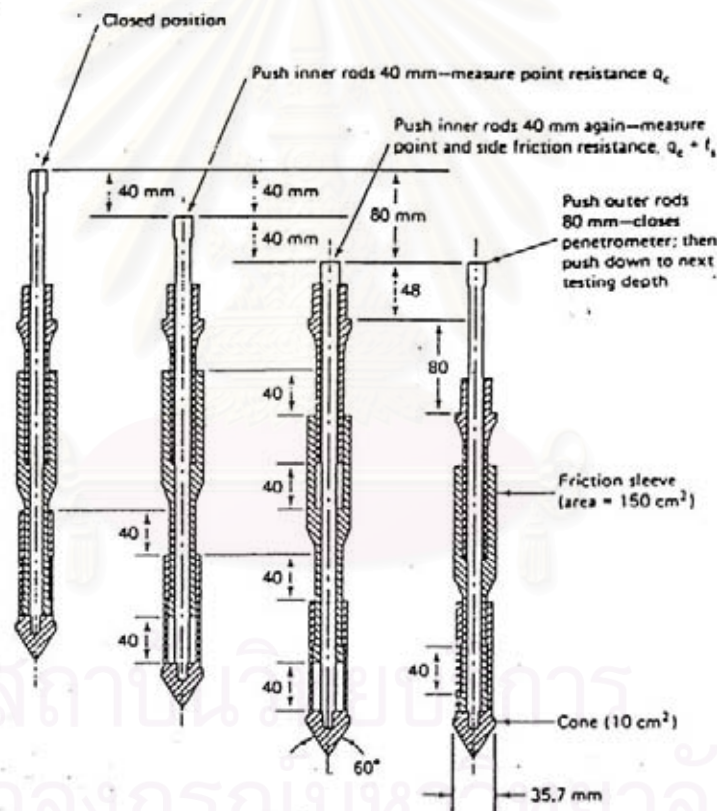
ง. เครื่องมือวัดแรงที่เกิดขึ้นจากการกด Mechanical Penetrometer ซึ่งโดยปรกติจะติดตั้งอยู่ที่ผิวดิน



รูปที่ 2.1 เครื่องมือทดสอบ Mechanical Penetrometer (Meigh, 1987)

สำหรับขั้นตอนการทดสอบทั้งหมดจะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) ขั้นตอนที่ 1 : กดท่อเหล็กนอกเคลื่อนที่ไปยังความลึกที่ต้องการทดสอบ
- 2) ขั้นตอนที่ 2 : กดก้านเหล็กในลงไป 40 mm โดยใช้อัตรากด 20 mm/Min. ซึ่งจะวัดได้เฉพาะแรงต้านทานปลายกรวยเท่านั้น
- 3) ขั้นตอนที่ 3 : กดก้านเหล็กในต่อเนื่องลงไปอีก 40 mm โดยใช้อัตรากด 20 mm/Min. เช่นเดียวกัน ซึ่งจะวัดแรงต้านทานปลายกรวยและแรงเสียดทานที่ผิวปลอกรวมกัน โดยแรงเสียดทานที่ผิวปลอกจะสามารถหาได้จากแรงที่วัดได้ในขั้นตอนที่ 3 หักลบด้วยแรงที่วัดได้ในขั้นตอนที่ 2
- 4) ขั้นตอนที่ 4 : กดท่อเหล็กนอกลงไป 80 mm เพื่อเปิด Penetrometer กลับเข้าที่เดิม ต่อจากนั้นกดท่อเหล็กนอกเคลื่อนที่ไปยังความลึกถัดไปที่ต้องการทดสอบ ซึ่งโดยปกติจะอยู่ในช่วง 200 mm



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการทดสอบ Mechanical Penetrometer

(University of New South Wales, 1990)

การทดสอบ Mechanical CPT จะเป็นการทดสอบที่ต้องใช้แรงงานคนมาก ซึ่งจะต้องใช้อย่างน้อย 3 คนสำหรับการทดสอบในแต่ละครั้ง และผลการทดสอบที่ได้จะไม่สามารถแปลผลในสนามได้โดยตรง ทำให้การตรวจสอบย้อนกลับกับสภาพจริงในสนามกระทำไม่ได้ นอกจากนี้

ยังมีข้อเสียอีกตรงที่เครื่องมือวัดแรงจะติดตั้งอยู่ที่ผิวดิน ซึ่งจะทำให้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในก้านเหล็กมีผลต่อค่าแรงที่วัดได้ เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังนี้และการทำให้ราคาในการทดสอบถูกลงจึงมีการนำ Load Cell ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดแรงที่มีความน่าเชื่อถือมากกว่าเข้ามาใช้งานส่งผลให้การทดสอบ Mechanical CPT ทั้งหมดเกือบจะถูกแทนที่ด้วย Electric Cone Penetration Test

2.1.1.2 การทดสอบ Electric Cone Penetration Test

การทดสอบ Electric Cone Penetration Test เป็นวิธีการทดสอบที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเมื่อปี ค.ศ.1948 และเริ่มนิยมนำมาใช้กันโดยทั่วไปในช่วงปี ค.ศ.1960-1970 ซึ่งลักษณะของเครื่องมือทดสอบจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

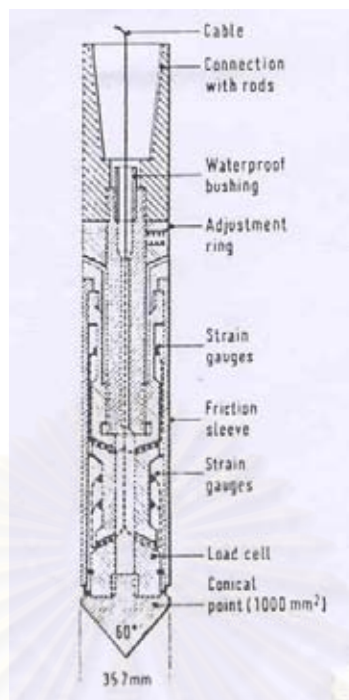
ก. กรวย (Cone) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35.7 mm พื้นที่หน้าตัด 10 cm^2 และมีมุมที่หัวกรวย 60°

ข. ปลอกวัดแรงเสียดทาน (Friction Sleeve) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35.7 mm และมีพื้นที่ผิวของปลอกเหล็กที่สัมผัสกับดิน 150 cm^2

ค. Load Cell เป็นเครื่องมือวัดแรงที่ติดตั้งภายใน Electric Penetrometer ซึ่งจะวัดแรงต้านทานปลายกรวยและแรงเสียดทานที่ผิวปลอกแยกจากกัน โดยปรกติขนาดความจุของ Load Cell ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับกำลังของดินที่จะทำการทดสอบ สำหรับ Load Cell ส่วนใหญ่จะใช้ Bonded Strain Gauges เป็นส่วนประกอบหลัก

ง. สายเคเบิล จะถูกสอดผ่านก้านเหล็กสำหรับทดสอบเพื่อเชื่อมต่อ Transducer เข้ากับอุปกรณ์เก็บข้อมูล ซึ่งอยู่บนผิวดิน

สำหรับขั้นตอนการทดสอบจะเริ่มจากการกด Electric Penetrometer ลงไปในดินอย่างต่อเนื่องตลอดความลึกที่ทำการทดสอบโดยใช้อัตรากด 20 mm/Min . ยกเว้นเฉพาะช่วงที่มีการต่อก้านเหล็กเพิ่มสำหรับทดสอบในช่วงความลึกถัดไปเท่านั้น ซึ่งแรงต้านทานที่ปลายกรวย (Q_c) และแรงเสียดทานที่ผิวปลอก (Q_s) จะได้รับการบันทึกอย่างต่อเนื่อง ผลการทดสอบที่ได้นี้จะถูกแปลผลทันทีในสนามทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินที่ระดับความลึกต่างๆได้



รูปที่ 2.3 เครื่องมือทดสอบ Electric Penetrometer (Meigh, 1987)

การทดสอบ Electric CPT จะเป็นการทดสอบที่ใช้แรงงานคนค่อนข้างน้อยและหลีกเลี่ยงแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในก้านเหล็ก โดยการวัดแรงที่ Electric Penetrometer โดยตรง ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าการทดสอบ Mechanical CPT นอกจากนี้ยังมีข้อดีอื่นๆอีก ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) สามารถปฏิบัติงานได้อย่างรวดเร็ว
- 2) ผลการทดสอบมีความถูกต้องแม่นยำมากและสามารถทำการทดสอบซ้ำได้ โดยเฉพาะในชั้นดินอ่อน
- 3) การจำแนกและการจัดเรียงตัวของชั้นดินมีความถูกต้องแม่นยำ โดยเฉพาะในดินที่มีชั้นความหนาบางๆปะปนอยู่
- 4) มีความเป็นไปได้ที่จะรวม Sensor อื่นๆเพิ่มเติมไว้ภายใน Electric Penetrometer

สำหรับข้อเสียของการทดสอบ Electric CPT ก็คือ ปัญหาด้านราคาและค่าใช้จ่ายของเครื่องมือทดสอบ นอกจากนี้ปัญหาด้านทักษะการปฏิบัติงานกับความรู้ทางไฟฟ้า รวมทั้งการสนับสนุนอุปกรณ์ทางเทคนิคที่จำเป็นสำหรับการสอบเทียบ (Calibration) และการบำรุงรักษาเครื่องมือก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับการทดสอบชนิดนี้

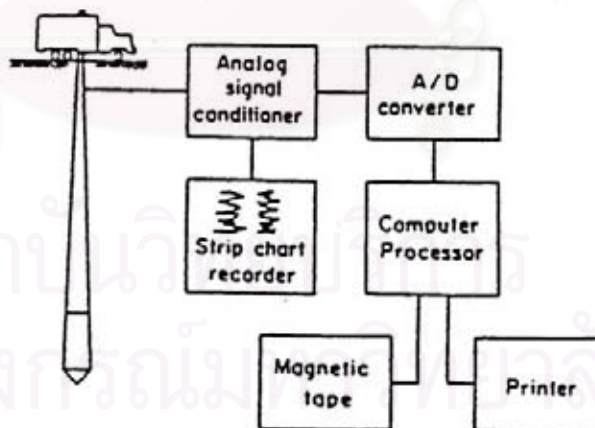
2.1.2 จุดประสงค์ของการทดสอบ CPT

จุดประสงค์ของการทดสอบ CPT จะมีอยู่ 3 ข้อหลักๆ ซึ่งได้แก่

- 1) เพื่อพิจารณาการจัดเรียงตัวของชั้นดินและการระบุชนิดของดิน
- 2) เพื่อเพิ่มเติมสภาพดินระหว่างที่ควบคุมการเจาะสำรวจดิน
- 3) เพื่อประเมินค่าพารามิเตอร์ต่างๆและ Bearing Capacity ของดิน

2.1.3 ระบบการจัดเก็บข้อมูลและการคำนวณผลการทดสอบ CPT

ระบบการจัดเก็บข้อมูลการทดสอบ CPT แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ซึ่งในปัจจุบันจะทำการบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ในรถทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.5 นอกจากการจัดเก็บข้อมูลการทดสอบไว้ในรถแล้วยังสามารถติดตั้งเครื่องมือทดสอบ CPT และอุปกรณ์ต่างๆรวมทั้งน้ำหนักถ่วงและสมอยึดได้อีกด้วย ซึ่งทำให้การเคลื่อนย้ายเพื่อไปทดสอบในสถานที่ต่างๆเป็นไปได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว สำหรับข้อมูลการทดสอบ CPT สามารถนำมาคำนวณหาหน่วยแรงต้านทานปลายกรวย , หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวปลอก และอัตราส่วนเสียดทานได้ดังแสดงในสมการที่ (2.1)-(2.3)



รูปที่ 2.4 ระบบการจัดเก็บข้อมูลการทดสอบ CPT

(University of New South Wales, 1990)



รูปที่ 2.5 รถทดสอบ CPT (IGN (Thailand) Ltd., 1994)

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad (2.1)$$

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s} \quad (2.2)$$

$$FR = \frac{f_s}{q_c} \quad (2.3)$$

โดยที่

q_c = หน่วยแรงต้านทานปลายกรวย (Cone Resistance)

Q_c = แรงต้านทานปลายกรวย

A_c = พื้นที่หน้าตัดกรวย

f_s = หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวปลอก (Friction Sleeve)

Q_s = แรงเสียดทานที่ผิวปลอก

A_s = พื้นที่ผิวปลอกที่สัมผัสกับดิน

FR = อัตราส่วนเสียดทาน (Friction Ratio)

2.1.4 ข้อดีและลักษณะเฉพาะของการทดสอบ CPT

การทดสอบ CPT จะมีข้อดีและลักษณะเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบดินวิธีอื่นๆ ดังต่อไปนี้

- 1) สามารถทราบข้อมูลการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับลักษณะเฉพาะของชั้นดินต่างๆได้อย่างต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าจะเป็นชั้นดินบางๆที่มีส่วนประกอบหรือพฤติกรรมที่ผิดปกติไป นอกจากนี้ความถูกต้องของข้อมูลจะมีมากกว่าการเจาะสำรวจดิน
- 2) การวัดค่าพารามิเตอร์จะถูกกระทำในที่ ซึ่งจะไม่มีผลกระทบของการรบกวนดิน
- 3) สามารถแปลผลการทดสอบในสนามได้ทันที
- 4) สามารถทำการทดสอบได้อย่างรวดเร็ว (ขึ้นอยู่กับความลึกที่ต้องการและระยะห่างระหว่างสถานที่ทดสอบ)
- 5) ค่าใช้จ่ายในการทดสอบจะต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบดินวิธีอื่นๆ

2.1.5 ข้อจำกัดของการทดสอบ CPT

ถึงแม้ว่าการทดสอบ CPT จะเป็นวิธีการทดสอบดินที่มีคุณประโยชน์อย่างมากก็ตาม แต่ก็ยังมีข้อจำกัดบางประการอยู่ดังต่อไปนี้

- 1) การทดสอบ CPT จะไม่สามารถทำการทดสอบผ่านชั้นทรายแน่นที่มีความหนามากๆได้
- 2) การทดสอบ CPT จะไม่สามารถทำการเก็บตัวอย่างดินขณะทำการทดสอบได้ ซึ่งจะต้องทำการเจาะสำรวจดินควบคู่กันไปด้วยเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการแปลผลการทดสอบและตรวจสอบชั้นดินต่างๆ รวมถึงการนำดินที่เก็บตัวอย่างได้ไปทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์อื่นๆที่จำเป็นต่อการใช้งาน
- 3) การทดสอบ CPT ที่ระดับความลึกมากๆนั้นอาจพบปัญหาจากการเอียงหรือเบี่ยงเบนทิศทางของ Penetrometer ได้

2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ CPT

ปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อ การทดสอบ CPT จะมีดังนี้

2.1.6.1 ขนาดและรูปลักษณะของกรวย

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและรูปลักษณะของกรวยที่แตกต่างกันจะมีผลต่อค่า q_c และ f_s ที่ทดสอบได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก

2.1.6.2 การเอียงของ Penetrometer

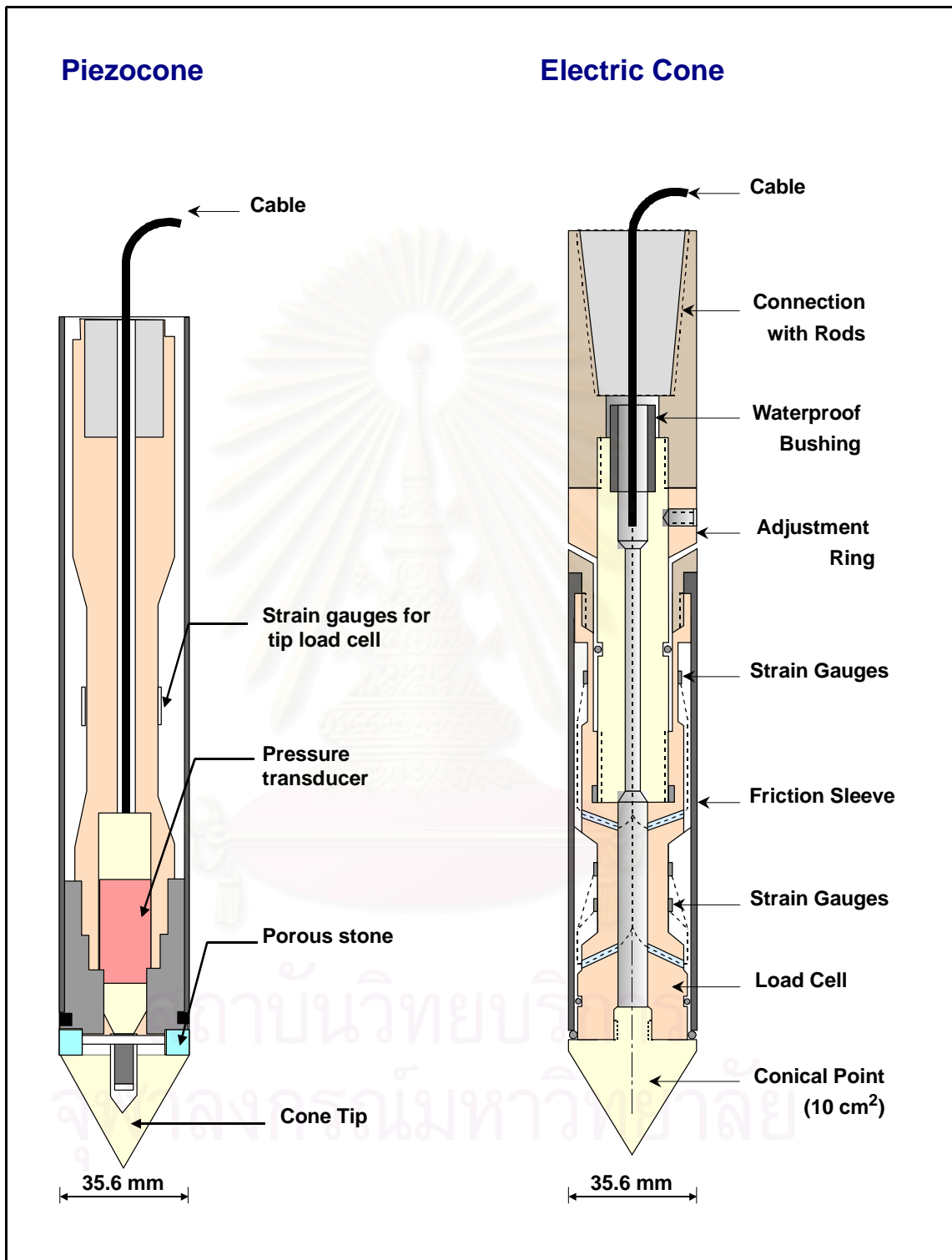
ในระหว่างการทดสอบ CPT ที่ระดับความลึกมาก ๆ นั้น การเอียงหรือการเบี่ยงเบนทิศทางของ Penetrometer จะเป็นปัญหาหนึ่งที่จะส่งผลทำให้ผลการทดสอบที่ได้ผิดพลาดไป ซึ่งสาเหตุอาจเกิดขึ้นจากการจัดวางก้านเหล็กและ Penetrometer ก่อนเริ่มทำการทดสอบ , การกด Penetrometer ผ่านชั้นดินที่มีหินปะปน , การจัดเรียงตัวของชั้นดินไม่อยู่ในแนวราบ เป็นต้น สำหรับวิธีแก้ไขสามารถทำได้โดยการติดตั้ง Inclinomater ใน Penetrometer เพื่อตรวจสอบแนวแกนดิ่งของก้านเหล็กระหว่างการกดทดสอบ ซึ่งจะเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบที่ได้มากยิ่งขึ้น

2.1.6.3 การสอบเทียบเครื่องมือ CPT

การสอบเทียบ (Calibration) เครื่องมือทดสอบ CPT และอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องอย่างถูกต้องและเหมาะสมในช่วงก่อนและระหว่างการใช้งาน ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบที่ได้ไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น

2.2 การทดสอบ Piezocone (CPTU)

การทดสอบ Piezocone (CPTU) จะเป็นวิธีการทดสอบที่ได้รับการพัฒนามาจากการทดสอบ Electric CPT ซึ่งจะรวมเอา Piezometer และ Filter เข้าไปไว้ที่บริเวณหัวกรวยเพื่อวัดแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างที่กดลงไปในดิน ซึ่งลักษณะของเครื่องมือทดสอบ Piezocone เปรียบเทียบกับเครื่องมือทดสอบ Electric Penetrometer แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 สำหรับความแตกต่างหลักๆของ Piezocone ที่ใช้กันอยู่ก็คือตำแหน่งการติดตั้ง Filter ซึ่งจะมีการอยู่ทั้งหมด 3 ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยในรูป (a) จะเป็นตำแหน่งที่ปลายกรวย , รูป (b) จะเป็นตำแหน่งบนผิวหน้ากรวย และรูป (c) จะเป็นตำแหน่งบน Shaft ระหว่างกรวยและปลอก (Sleeve) ซึ่งในปัจจุบันนี้ยังไม่มีการมาตรฐานที่แน่ชัดในการออกแบบและตำแหน่งการติดตั้ง Filter ของ Piezocone แต่จากผลการศึกษาแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป (Δu) ที่ตำแหน่งต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะพบว่าแรงดันน้ำที่วัดได้จะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งการติดตั้ง Filter โดยที่แรงดันน้ำสูงสุดจะอยู่บริเวณผิวหน้ากรวยและจะลดลงอย่างรวดเร็วที่บริเวณเหนือฐานกรวยขึ้นไป สำหรับตำแหน่งการติดตั้ง Filter ที่ปลายกรวยจะมีปัญหาจากการอุดตันของ Filter ส่วน Filter ที่ติดตั้งอยู่บริเวณตำแหน่งบนผิวหน้ากรวยจะมีข้อดีตรงที่เป็นบริเวณที่แรงดันน้ำมีค่ามากที่สุดและคงที่ และ Filter ที่ติดตั้งอยู่บน Shaft ก็จะมีอยู่ในตำแหน่งที่การตอบสนองของแรงดันน้ำคงที่เช่นเดียวกันกับ Filter ที่ติดตั้งอยู่บน Shaft แต่ที่จุดนี้จะเป็นจุดที่มีการลดลงของแรงดันน้ำสูงสุด



รูปที่ 2.6 เครื่องมือทดสอบ Piezocone เปรียบเทียบกับเครื่องมือทดสอบ Electric Penetrometer

สำหรับใน Piezocone จะพิจารณาให้มีการปรับแก้การวัดค่า q_c และ f_s ไปเป็น q_T และ f_T ตามสมการที่ (2.4) และ (2.5) เนื่องจากผลกระทบของแรงดันน้ำที่มีต่อหน่วยแรงที่วัดได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9

$$q_T = q_c + k_c(1-a) u_{\max} \quad (2.4)$$

$$f_T = f_s + k_s(1-b) u_{\max} \quad (2.5)$$

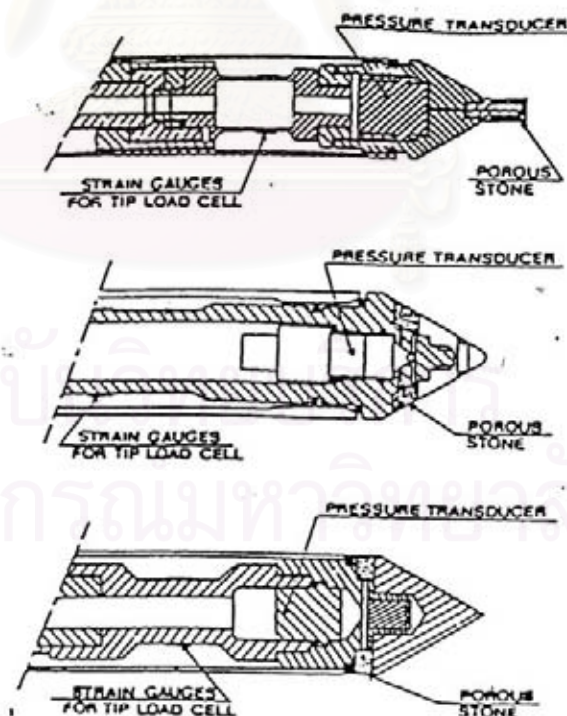
โดยที่

q_c กับ f_s เป็นหน่วยแรงต้านทานปลายกรวยกับหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวปลอก ซึ่งวัดได้จาก Load Cell

u_{\max} เป็นแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งวัดได้จาก Pore Pressure Cell ที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว

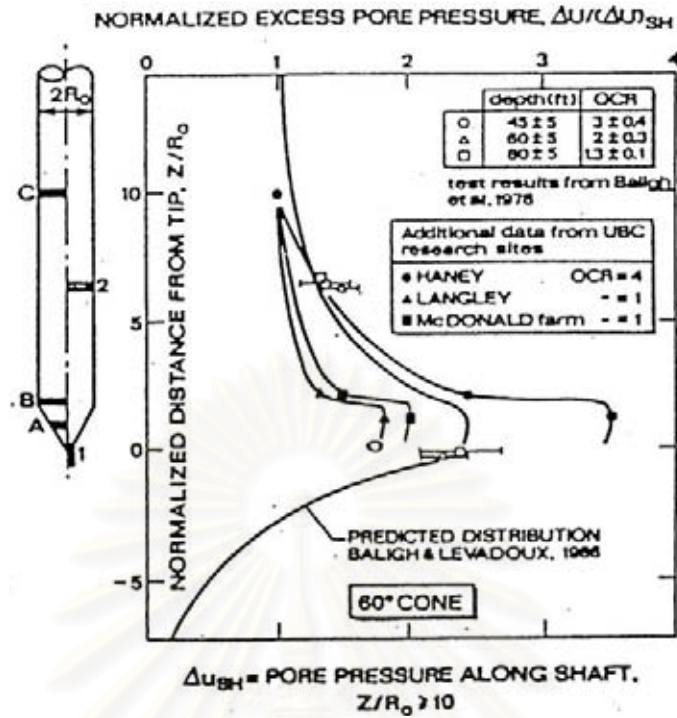
k_c กับ k_s เป็นตัวแปรที่พิจารณาแรงดันน้ำไม่สม่ำเสมอที่กระจายไปตามเซลล์ (ขึ้นอยู่กับว่าเครื่องมือวัด u_{\max} อยู่ที่ส่วนไหน)

a กับ b เป็นค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของกรวยที่ใช้

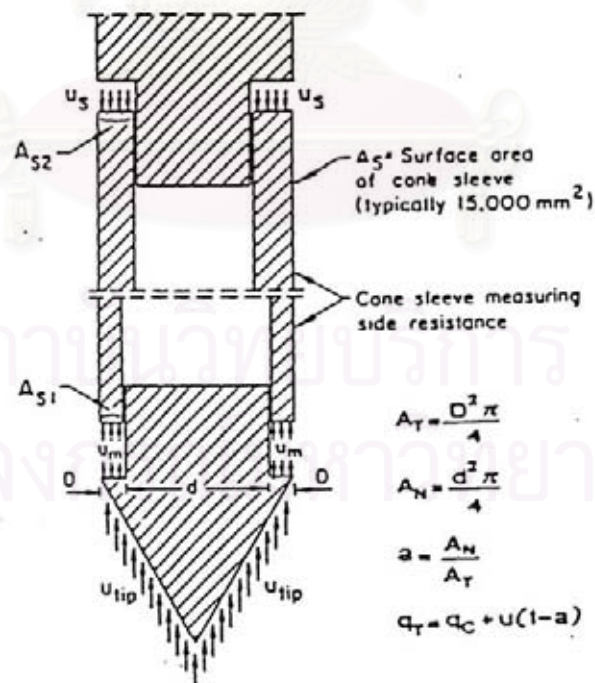


รูปที่ 2.7 ตำแหน่งการติดตั้ง Filter ใน Piezocone

(University of New South Wales, 1990)



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของตำแหน่งที่ติดตั้ง Filter ที่มีต่อความแรงน้ำที่วัดได้ใน Piezocone (University of New South Wales, 1990)



รูปที่ 2.9 รูปลักษณะของเครื่องมือ Piezocone และผลกระทบของแรงดันน้ำที่มีต่อหน่วยแรงที่วัดได้ (University of New South Wales, 1990)

2.3 ค่าพารามิเตอร์ในดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบ CPT

จุดประสงค์หนึ่งของการทดสอบ CPT และ Piezocone ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นก็คือ การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นต่อการนำไปใช้ในงานวิศวกรรมปฐพี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบนี้จะประกอบด้วย

- 1) กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, c_u)
- 2) Constrained Modulus (M)
- 3) Young's Modulus แบบระบายน้ำ (E') และไม่ระบายน้ำ (E_u)
- 4) OCR (Overconsolidation Ratio)
- 5) สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation, c_v)
- 6) สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of Permeability, k)

2.4 การประมาณกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวจากการทดสอบ CPT

การทดสอบ CPT ในดินเหนียวนั้นส่วนใหญ่แล้วค่า q_c จะมีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพารามิเตอร์ด้านกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (c_u) ซึ่งจะมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของดิน การศึกษาหาความสัมพันธ์นี้เพื่อนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้กระทำอย่างต่อเนื่องในดินชนิดต่างๆทั่วโลก โดยวิธีการศึกษาที่ใช้กันอยู่จะมีอยู่ 3 แนวทางหลัก ได้แก่

- 1) ในทางทฤษฎี
 - Bearing Capacity Theory
 - Cavity Expansion Theory
 - Steady State Approach
 - Incremental Finite-element Method จะใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ Small Strain Models และ Large Strain Models
- 2) ในห้องปฏิบัติการ
- 3) ในภาคสนาม

วิธีการศึกษาทางทฤษฎีขณะนี้ยังคงเป็นเรื่องที่ยู่ยากอยู่ที่จะทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำ สำหรับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวในภาคสนามสามารถหาได้จากการทดสอบ CPT และ Piezocone ดังสมการต่อไปนี้

2.4.1 การทดสอบ CPT

$$c_u = \frac{(q_c - \sigma_{vo})}{N_c} \quad (2.6)$$

โดยที่

σ_{vo} = หน่วยแรงรวมกดทับทั้งหมดในแนวดิ่ง

N_c = Cone Factor

2.4.2 การทดสอบ Piezocone (CPTU)

$$c_u = \frac{(q_T - \sigma_{vo})}{N_k} \quad (2.7)$$

โดยที่

q_T = หน่วยแรงด้านทานปลายกรวยปรับแก้

N_k = Piezocone Factor

สำหรับ N_c , N_k จะเป็น Bearing Capacity Factor ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_c กับ c_u ของดินเหนียว ซึ่งได้จากการทดสอบ Field Vane Shear Test หรือการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยที่ค่า c_u นี้จะขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ในการทดสอบเป็นสำคัญ ใน [สมการที่ 2.6 และ 2.7](#) สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

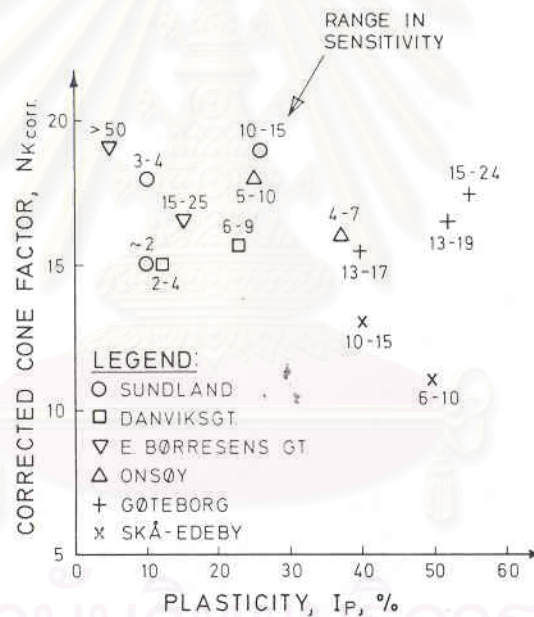
$$q_c = c_u N_c + \sigma_{vo} \quad (2.8)$$

$$q_T = c_u N_k + \sigma_{vo} \quad (2.9)$$

ในอดีตที่ผ่านมาจนกระทั่งถึงปี 1975 ค่า Cone Factor (N_c) ที่ได้รับรายงานมาจะแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วงกว้างระหว่าง 5 ถึง 70 อย่างไรก็ตามในระยะหลังนี้ค่า N_c ที่ได้จะมีช่วงที่แคบลงมา เนื่องจากการปรับปรุงเครื่องมือและวิธีการทดสอบให้มีมาตรฐานมากยิ่งขึ้น

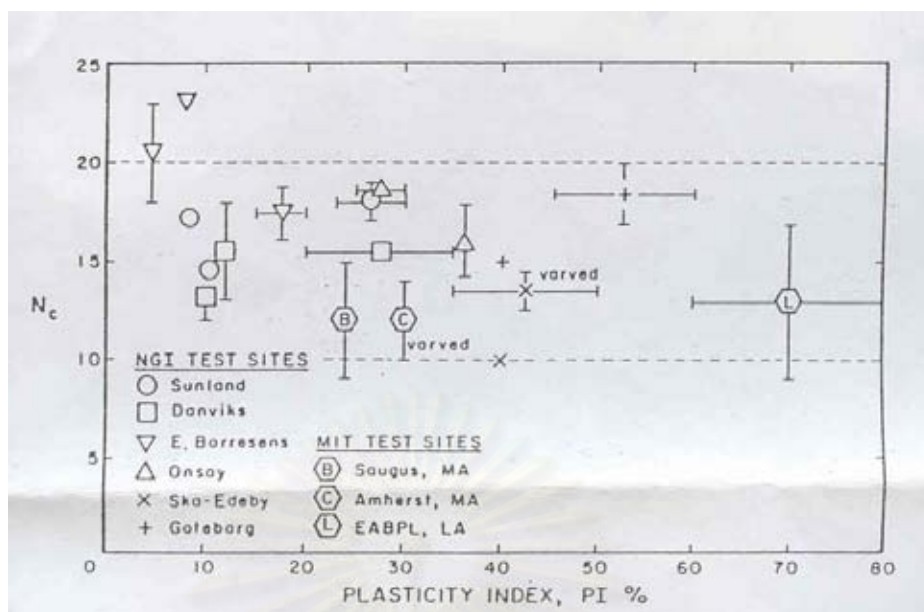
Thomas (1965) ได้ทำการศึกษาถึงการประเมินค่า c_u ของดินเหนียว London จากค่า q_c โดยทำการทดสอบ Dutch Cone Penetration Test ที่มีพื้นที่หน้าตัดกรวยเท่ากับ 10 และ 20 cm^2 บริเวณพื้นที่ใจกลางเมืองจำนวน 2 แห่ง ผลการศึกษาพบว่าในดินเหนียว London จะมีค่า N_c เท่ากับ 18 นอกจากนี้ยังพบว่าค่า q_c จะได้รับอิทธิพลจากพื้นที่หน้าตัดกรวย, รูปลักษณะของกรวย และรูปแบบการวิบัติของดิน รวมทั้งอัตราทดที่ใช้อีกด้วย

Lunne and Eide (1976) ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_c ซึ่งได้จากการทดสอบ Electric CPT กับค่า c_u ซึ่งได้จากการทดสอบ Field Vane Shear Test บริเวณที่มีชั้นดินเหนียว Scandinavian อ่อนถึงแข็งปานกลาง โดยจะทำการทดสอบในสถานที่ที่แตกต่างกันจำนวน 6 แห่ง ในประเทศนอร์เวย์และสวีเดน ผลการศึกษาพบว่าดินเหนียว Marine NC จะมีค่า N_k ผันแปรระหว่าง 13 ถึง 24 และในดินเหนียว Ska°-Edeby Brackish-marine ค่า N_k จะอยู่ในช่วง 8 ถึง 12 สำหรับค่าปรับแก้ N_k ที่ได้จากการทดสอบในสถานที่ต่างๆแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ค่าปรับแก้ N_k ที่ได้จากการทดสอบในสถานที่ต่างๆ (Lunne and Eide, 1976)

Baligh (1985) ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_c ซึ่งได้จากการทดสอบ Electric CPT กับค่า c_u ซึ่งได้จากการทดสอบ Field Vane Shear Test บริเวณที่มีชั้นดินเหนียวอ่อนมากถึงปานกลาง โดยทำการทดสอบในสถานที่ต่างๆกันจำนวน 9 แห่ง ผลการศึกษาพบว่าค่า N_c จะอยู่ในช่วง 10 ถึง 20 ดังแสดงในรูปที่ 2.11 สำหรับค่า N_c นี้จะไม่ได้ทำการปรับแก้เนื่องจากผลกระทบของแรงดันน้ำบริเวณฐานกรวยที่มีต่อค่า q_c แต่อย่างไรก็ตามการปรับแก้ค่า q_c จะทำให้ค่า N_c เพิ่มขึ้น ซึ่งค่า N_c ที่ประเมินได้ในรูปจะต่ำกว่าค่าที่ปรับแก้แล้ว



รูปที่ 2.11 ค่า N_c ที่ได้จากการทดสอบในสถานที่ต่างๆ (Baligh, 1985)

Almeida and Parry (1985) ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า c_u , q_c และ OCR ในดินเหนียวสร้างใหม่ โดยทำการทดสอบ CPT และ Piezocone ขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่าในดินเหนียว Kaolin ค่า N_c จะอยู่ในช่วงจาก 4.5 ถึง 10 ที่ OCR เท่ากับ 1 ถึง 10 ตามลำดับ ซึ่งค่า N_c จะเพิ่มขึ้นตามค่า OCR สำหรับในดินเหนียว Gault ค่า N_c จะอยู่ในช่วงจาก 9 ถึง 14 ที่ OCR เท่ากับ 1 ถึง 7 ตามลำดับ ซึ่งค่า N_c จะเพิ่มขึ้นตามค่า OCR เช่นเดียวกัน แต่มีค่าสูงมากกว่าในดินเหนียว Kaolin ที่ค่า OCR เดียวกัน

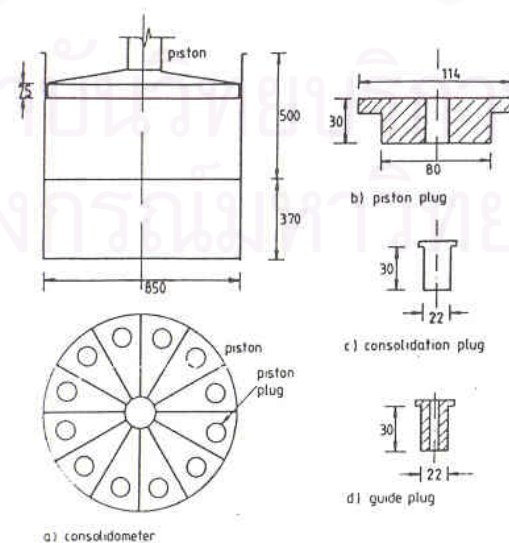
Kurup et al. (1994) ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อข้อมูลการทดสอบ CPT ในดินเหนียวสร้างใหม่ โดยทำการทดสอบ Quasi-static CPT และ Piezocone ขนาดเล็กภายใน Calibration Chamber ซึ่งสามารถจำลองสภาพขอบเขตโดยรอบได้ตามต้องการ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อสภาพขอบเขตโดยรอบมีหน่วยแรงคงที่กระทำ ค่า N_k ที่ทดสอบได้จะอยู่ในช่วงจาก 13 ถึง 16 ซึ่งสูงกว่าค่า N_c ที่วิเคราะห์ได้ และเมื่อสภาพขอบเขตในแกนแนวดิ่งมีหน่วยแรงคงที่กระทำ ส่วนแกนแนวราบมีความเครียดเป็นศูนย์ ค่า N_k ที่ทดสอบได้จะอยู่ในช่วงจาก 6 ถึง 7 ซึ่งต่ำกว่าค่า N_c ที่วิเคราะห์ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าหน่วยแรงในแกนแนวราบและชนิดของดินจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่า N_k ที่ได้

2.5 การพัฒนาเครื่องมือ CPT ในห้องปฏิบัติการ

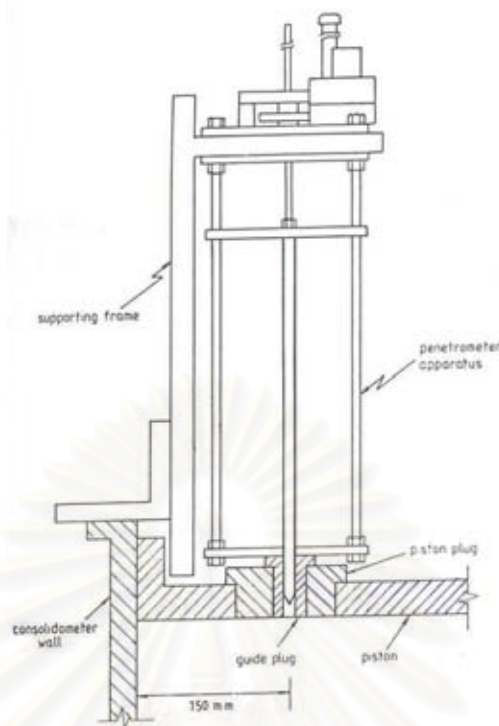
ในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการศึกษาและทดสอบ CPT ในห้องปฏิบัติการอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันทั้งในดินทรายและดินเหนียว ซึ่งการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นจะต้องพัฒนาเครื่องมือทดสอบขึ้นมาใหม่โดยเฉพาะ โดยจำลองมาจากสภาพการทดสอบจริงในสนาม สำหรับรายละเอียดต่างๆของเครื่องมือทดสอบ CPT ในดินเหนียว ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นมาในอดีตมีดังต่อไปนี้

Almeida and Parry (1985) ได้ทำการทดสอบ CPT โดยใช้ Cone Penetrometer ขนาดเล็ก เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm ในดินเหนียว Kaolin และ Piezocone ขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 mm ในดินเหนียว Gault ซึ่งดินทั้งสองชนิดนี้จะถูกสร้างขึ้นมาใหม่ภายในห้องปฏิบัติการจากการอัดตัวคายนํ้าของดินเหลว โดยใช้เครื่องมือเตรียมตัวอย่างดินดังแสดงในรูปที่ 2.12 การทดสอบ CPT จะถูกกดลงไปในดินผ่านทาง Guide Plug ในเครื่องมือเตรียมตัวอย่างดินนี้ ซึ่งสามารถถอดเปลี่ยนกับ Consolidation Plug ได้ สำหรับการติดตั้งเครื่องมือทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.13

Kurup et al. (1994) ได้ทำการทดสอบ CPT โดยใช้ Piezocone ขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 11.28 mm และ Quasi-static Cone Penetrometer ขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.72 mm ในดินเหนียว Kaolinite ซึ่งจะถูกสร้างขึ้นมาใหม่ภายในห้องปฏิบัติการ การทดสอบ CPT จะทำใน Calibration Chamber ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะนำดินเหลวที่ผ่านการอัดตัวคายนํ้าแล้วจากเครื่องมือเตรียมตัวอย่างดินมาทำการอัดตัวคายนํ้าอีกครั้งหนึ่งใน Calibration Chamber เพื่อให้ได้หน่วยแรงสูงสุดที่ต้องการทดสอบ โดยสามารถจำลองสภาพขอบเขตโดยรอบได้ตามต้องการเพื่อลดผลกระทบจากรigid Boundary ที่เกิดขึ้นจากการเตรียมตัวอย่างดิน ซึ่งทำให้ตัวอย่างดินที่ได้มีคุณภาพสูงก่อนที่จะนำไปทดสอบต่อไป



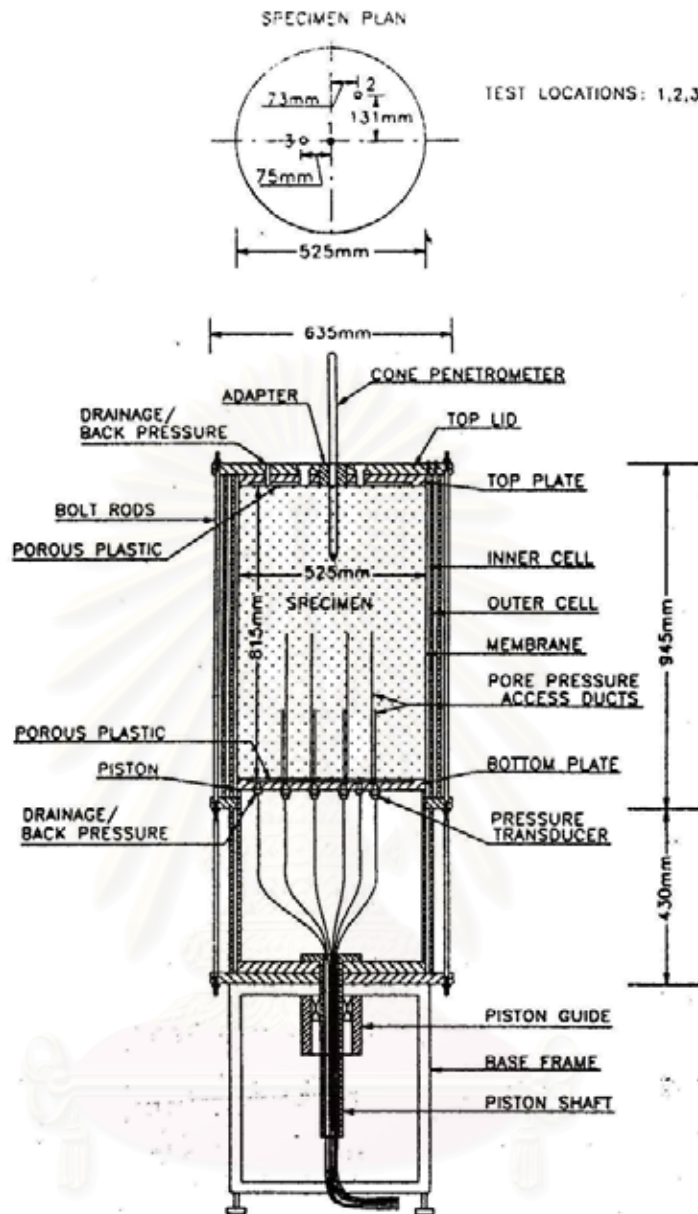
รูปที่ 2.12 เครื่องมือเตรียมตัวอย่างดิน (Almeida and Parry, 1985)



รูปที่ 2.13 การติดตั้งเครื่องมือ CPT (Almeida and Parry, 1985)

2.6 การหาค่ารับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวจากการทดสอบแรงอัดสามแกน

การหาค่ารับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (Undrained Shear Strength, c_u) จากการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ภายในห้องปฏิบัติการจะเป็นวิธีการทดสอบที่มีความน่าเชื่อถือและใกล้เคียงกับสภาวะจริงในธรรมชาติมากที่สุดวิธีหนึ่ง ซึ่งใช้ศึกษาพฤติกรรมการรับกำลัง ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของดินในสภาวะต่างๆกัน ถึงแม้ว่าในการทดสอบจริงจะสามารถกระทำแรงต่างกันได้เพียง 2 แกนเท่านั้น คือ แกนแนวราบและแกนแนวตั้ง แต่ก็ถือได้ว่าเป็นวิธีการทดสอบที่สมบูรณ์มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบวิธีอื่น อาทิเช่น Direct Shear Test, Unconfined Compressive Test เป็นต้น สำหรับการทดสอบ Triaxial Test นอกจากจะสามารถควบคุมสภาวะของหน่วยแรงได้ตามต้องการแล้วยังสามารถอัดแรงดันให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อวัดแรงดันน้ำสำหรับนำไปใช้หาค่าพารามิเตอร์ประสิทธิผลของดินได้อีกด้วย



รูปที่ 2.14 การทดสอบ CPT ใน Calibration Chamber (Kurup et al., 1994)

การทดสอบ Triaxial Test จะมีส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญดังต่อไปนี้

ก. Triaxial Cell สำหรับครอบตัวอย่างดินที่จะทำการทดสอบ ภายในบรรจุน้ำที่มีแรงดันคงที่จาก Cell Pressure Line

ข. Pressure System จากแหล่งที่ให้แรงดันคงที่และสามารถปรับแรงดันได้ในระหว่างการทดสอบ ซึ่งจะมีอยู่ 2 สาย ได้แก่ Cell Pressure Line และ Back Pressure Line สำหรับการวัดแรงดันน้ำในตัวดินอย่าง ซึ่งจะใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า Pressure Transducer เป็นตัววัด

ค. ตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบ จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกโดยมีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (H/D) เท่ากับ 2 และจะถูกหุ้มด้วย Rubber Membrane เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำในตัวอย่างดินเคลื่อนที่ออกไปสู่น้ำใน Triaxial Cell และป้องกันไม่ให้น้ำใน Triaxial Cell เข้าไปในตัวอย่างดิน

ง. ทางระบายน้ำ (Drainage) จะมีอยู่ 2 ทาง เป็นแผ่นหินพรุนน้ำ (Porous Stone) อยู่ที่ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดิน นอกจากนี้ยังมีกระดาษกรองด้านข้าง (Filter-Paper Strips) สำหรับช่วยในการระบายน้ำในตัวอย่างอีกด้วย

จ. Piston จะติดตั้งอยู่ด้านบนของ Triaxial Cell สามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลงได้

ขั้นตอนในการทดสอบแรงอัดสามแกนจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Process) และขั้นตอนการกระทำแรงเฉือน (Shearing Process) ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1 ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Process)

จะแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่

2.6.1.1 ไม่อัดตัวคายน้ำในตัวอย่างดิน (Unconsolidated)

ทำการทดสอบตัวอย่างดินในสภาพที่เก็บมาจากหลุมเจาะ โดยอัดความดันจาก Cell Pressure Line ตามความดันที่ต้องการทดสอบ ไม่เปิดวาล์ว Back Pressure Line ให้น้ำระบายออกก่อน และระหว่างกระทำแรงเฉือน (Shearing) จะยังคงปิดวาล์วระบาย ตัวอย่างดินจะอยู่ในสภาพถูกกดอัดแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained) และกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จะเป็นแบบไม่ระบายน้ำ (c_u) ในการทดสอบชนิดนี้มักจะ ไม่ทำการวัดแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดิน

2.6.1.2 อัดตัวคายน้ำในตัวอย่างดิน (Consolidated)

ทำการอัดตัวอย่างดินภายใต้แรงดันที่ต้องการทดสอบ โดยการเพิ่ม Cell Pressure เพื่อทำให้เกิดความต่างศักย์ของน้ำระหว่างภายนอกกับภายในตัวอย่าง และเปิดทางระบายน้ำให้น้ำในตัวอย่างดินระบายออกผ่านทางแผ่นหินพรุน เมื่อความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเหลือเท่ากับศูนย์ตัวอย่างดินก็จะหยุดการอัดตัว ซึ่งโดยปกติในตัวอย่างดินที่ทดสอบจะใช้เวลาอัดตัวคายน้ำประมาณ 1 วัน ในขั้นตอนนี้จะทำการอัดแรงดันน้ำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัว (Saturated) ก่อนหรือพร้อมกับการอัดตัว

คายน้ำ เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change) เนื่องจากฟองอากาศ ทำให้สามารถวัดแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดินได้อย่างถูกต้อง สำหรับวิธีการตรวจสอบจะทำได้จากการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ B ซึ่งเมื่อตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำจะได้ค่าพารามิเตอร์ $B \approx 1.00$ สำหรับวิธีการอัดตัวคายน้ำสามารถทำได้ 3 วิธี ดังต่อไปนี้

1) อัดตัวอย่างดินแบบความดันเท่ากันรอบทิศทาง (Isotropic Consolidation) จะทำการอัดความดันเท่ากันทุกทิศทางแล้วปล่อยให้ให้น้ำในตัวอย่างดินระบายออก

2) อัดตัวอย่างดินแบบความดันแนวแกนราบ และความดันแนวแกนตั้งไม่เท่ากัน (Anisotropic Consolidation) จะทำการอัดตัวอย่างดินใน 2 แนวแกนที่ไม่เท่ากันตามอัตราส่วนที่ต้องการทดสอบ ซึ่งความดันแนวแกนราบได้มาจาก Cell Pressure Line และความดันแนวแกนตั้งได้มาจาก Cell Pressure Line รวมกับการถ่วงน้ำหนักผ่านแกนกด (Piston) ที่อยู่ด้านบนของตัวอย่างดิน

3) อัดตัวอย่างดินในสภาพสัดส่วนความดันดินในธรรมชาติ (K_0 -Consolidation) จะทำการอัดตัวอย่างดินใน 2 แนวแกน เป็นสัดส่วนกันตามค่าสัมประสิทธิ์ความดันดินในธรรมชาติ (Coefficient of Lateral Earth Pressure at Rest, K_0)

2.6.2 ขั้นตอนการกระทำแรงเฉือน (Shearing Process)

จะแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่

1) การเพิ่มหรือลดแรงในแนวแกนตั้ง ในขณะที่ความดันในแนวแกนราบจะควบคุมให้คงที่

2) การเพิ่มหรือลดความดันในแนวแกนราบ ในขณะที่แรงในแนวแกนตั้งจะควบคุมให้คงที่

วิธีการกระทำแรงเฉือนในข้อ 1) จะเป็นวิธีที่นิยมทดสอบกันมากกว่าวิธีในข้อ 2) เนื่องจากสามารถควบคุมขั้นตอนได้ง่ายกว่า โดยที่การกระทำแรงเฉือนในข้อ 1) สามารถทำได้หลายลักษณะดังต่อไปนี้

ก. แบบไม่ระบายน้ำ (Undrained) จะทำการปิดวาล์ว Back Pressure Line ตลอดเวลาขณะกระทำแรงเฉือน และถ้าต้องการค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพจะทำการวัดแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดินด้วย

ข. แบบระบายน้ำ (Drained) จะทำการเปิดวาล์ว Back Pressure Line ตลอดเวลาขณะกระทำแรงเฉือน ซึ่งจะหาค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพได้โดยไม่ต้องทำการวัดแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดิน สำหรับการทดสอบลักษณะนี้จะต้องควบคุมอัตรากระทำแรงเฉือน (Strain Rate) ให้ช้ามาก เพื่อไม่ให้แรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) เกิดขึ้นในตัวอย่างดิน

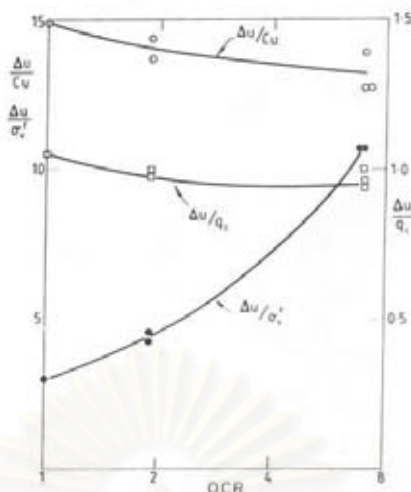
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ CPT ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามมีดังต่อไปนี้

2.7.1 การพัฒนาความดันน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ CPT

Almeida and Parry (1985) ได้ทำการศึกษาถึงการพัฒนาแรงดันน้ำที่เกิดขึ้น (Δu) ระหว่างการทดสอบ Piezocone ขนาดเล็กในดินเหนียว Gault ที่สร้างขึ้นมาใหม่ในห้องปฏิบัติการ โดยจะนำค่า Δu ที่ได้มา Normalized กับค่า c_u , σ'_v และ q_c ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งพบว่า $\Delta u/c_u$ จะมีค่าค่อนข้างสูงและแปรผันระหว่าง 15 และ 13 ส่วนค่า $\Delta u/\sigma'_v$ จะแปรผันระหว่าง 3 และ 10.7 และค่า $\Delta u/q_c$ จะแปรผันระหว่าง 1.05 และ 0.95 สำหรับผลการศึกษาจะถูกลำดับไปเปรียบเทียบกับ Francescon (1983) ซึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบเสาเข็มจำลองในดินเหนียว Kaolin ผลการศึกษาพบว่าค่า $\Delta u/c_u$ จะแปรผันระหว่าง 12 และ 10 ส่วนค่า $\Delta u/\sigma'_v$ จะแปรผันระหว่าง 2.5 และ 9.5 และค่า $\Delta u/q_c$ จะแปรผันระหว่าง 1.14 และ 1.00 ซึ่งผลการศึกษาทั้งสองนี้สามารถสรุปได้ว่าการ Normalized Δu ในดินเหนียว Gault จะคล้ายกับในดินเหนียว Kaolin แต่การนำ $\Delta u/q_c$ มาประมาณค่าหา OCR นั้นอาจจะไม่สามารถทำได้เนื่องจากเมื่อ OCR เพิ่มขึ้นค่า $\Delta u/q_c$ จะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจึงไม่เพียงพอที่จะนำมาใช้พิจารณา

Mayne and Kulhawy (1990) ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Δu ซึ่งวัดได้ที่ปลายกรวย (Δu_p) และที่ฐานกรวย (Δu_b) กับหน่วยแรงต้านทานปลายกรวยปรับแก้ (q_T) โดยทำการทบทวนข้อมูลการทดสอบ Piezocone ในดินเหนียวจากสถานที่ต่างๆจำนวน 83 แห่ง ผลการศึกษาพบว่าตำแหน่งการวัดแรงดันน้ำจะมีผลอย่างมากต่อข้อมูลที่ได้ โดยที่ $\Delta u/q_T$ จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.73, 0.64 และ 0.46 ในขณะที่ $\Delta u_b/q_T$ จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.53, 0.58 และเข้าใกล้ศูนย์หรือติดลบเล็กน้อย สำหรับดินเหนียวทั่วไป, ดินเหนียว Leda และดินเหนียว Overconsolidated Fissured ตามลำดับ ซึ่งการวัดความดันน้ำที่ปลายกรวยจะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าสัดส่วน $\Delta u_b/\Delta u_p$ จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ OCR



รูปที่ 2.15 การแปรผันของ Normalized Δu กับ OCR ในดินเหนียว Gault
(Almeida and Parry, 1985)

Jacobs and Coutts (1992) ได้ทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า Δu จากการทดสอบ Electric Piezo-friction Cone Penetration ที่มี Filter Material และตำแหน่งการติดตั้งที่ต่างกัน โดยทำการทดสอบ Piezocone ที่มีพื้นที่หน้าตัดปลายกรวยเท่ากับ 10 และ 15 cm² ในดินเหนียวอ่อนที่ Bothkennar จำนวน 18 แห่ง ผลการศึกษาพบว่าการใช้ Filter Material ที่ต่างกันและมีความหนาไม่เท่ากันจะไม่มีผลต่อแรงดันน้ำที่วัดได้ เมื่อใช้ Piezocone ที่มีขนาดเท่ากันและตำแหน่งการติดตั้ง Filter ที่เหมือนกัน โดยที่อัตราส่วนแรงดันน้ำที่วัดได้ระหว่างที่ Shoulder กับที่ Face จะอยู่ในช่วง 0.65-0.70

Kurup et al. (1994) ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อข้อมูลการทดสอบ Piezocone ขนาดเล็กในดินเหนียวสร้างใหม่ โดยทำการทดสอบใน Calibration Chamber ซึ่งสามารถจำลองสภาพขอบเขตโดยรอบได้ตามต้องการ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อสภาพขอบเขตโดยรอบมีหน่วยแรงคงที่กระทำ ค่า $N_{\Delta u}$ ที่ได้จะอยู่ในช่วงจาก 7.4 ถึง 13.2 ซึ่งสูงกว่าค่า $N_{\Delta u}$ ที่วิเคราะห์ได้ และเมื่อสภาพขอบเขตในแกนแนวดิ่งมีหน่วยแรงคงที่กระทำในขณะที่แกนแนวราบมีความเครียดเป็นศูนย์ ค่า $N_{\Delta u}$ ที่ได้จะอยู่ในช่วงจาก 5.6 ถึง 7.5 ซึ่งต่ำกว่าค่า $N_{\Delta u}$ ที่วิเคราะห์ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าค่า $N_{\Delta u}$ จะได้รับอิทธิพลอย่างมากจากหน่วยแรงในแกนแนวราบและชนิดของดิน และยังแสดงแนวโน้มที่คล้ายกับค่า N_{KT} อีกด้วย โดยที่ Pore Pressure Factor ($N_{\Delta u}$) จะเป็นสัดส่วนระหว่าง Δu กับค่า c_u

2.7.2 ผลกระทบของอัตราการกด CPT

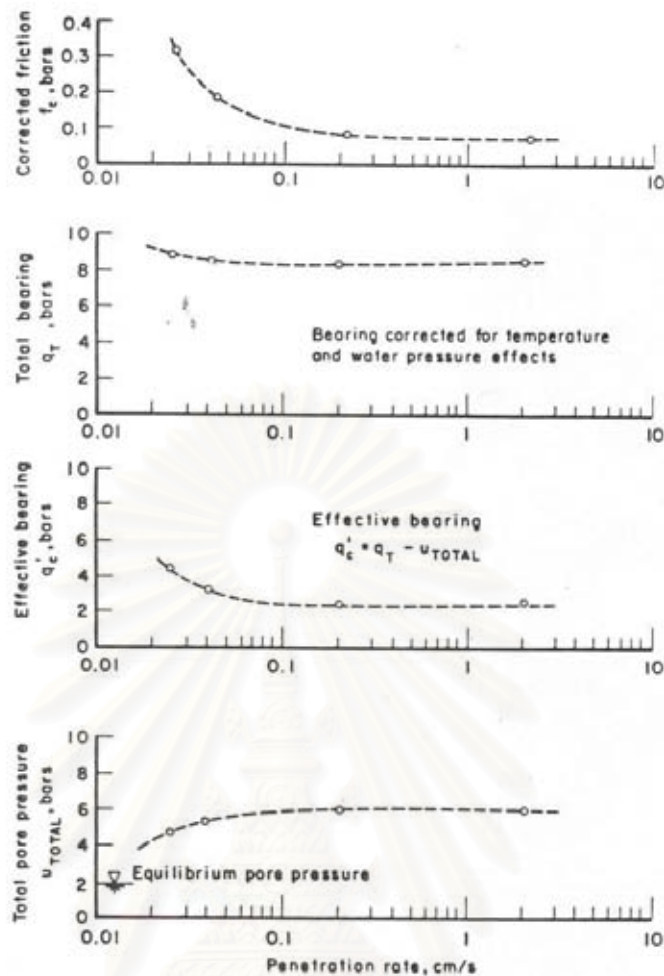
Kok (1982) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของอัตราการกด CPT ที่มีต่อค่า q_c โดยทำการทดสอบ Mechanical และ Electric CPT ที่อัตราการกด 5 และ 20 mm/Min. ในบริเวณพื้นที่ทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของอัมสเตอร์ดัม ซึ่งเป็นชั้นทรายปกคลุมด้วยชั้นดินเหนียว ผลการศึกษาพบว่าค่า q_c ที่ได้จะไม่มีความแตกต่างกันมากนักเมื่อใช้อัตราการกดที่ไม่เท่ากัน แต่ค่า q_c ที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 ชนิดนี้จะให้ข้อมูลที่ค่อนข้างต่างกัน

Campanella et al. (1983) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการวัดค่าพารามิเตอร์เนื่องจากอัตราการกด CPT ที่ต่างกันรวมถึงปัจจัยต่างๆ โดยทำการทดสอบ Electric CPT ในสนามที่มีชั้นดินตะกอน Saturated Deltaic ซึ่งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับสนามบินนานาชาติแวนคูเวอร์ อัตราการกดที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 0.025 และ 2 cm/s ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราการกดน้อยกว่า 0.2 cm/s จะส่งผลทำให้แรงดันน้ำทั้งหมดที่วัดได้ลดลงในขณะที่ค่า q_c และ f_u จะเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะแสดงในรูปที่ 2.16

Almeida and Parry (1985) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของอัตราการกด CPT ที่มีต่อค่า q_c ในดินเหนียวสร้างใหม่ โดยทำการทดสอบ CPT และ Piezocone ขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่าผลกระทบของอัตราการกดในดินเหนียว Kaolin จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ OCR โดยเฉพาะที่ OCR เท่ากับ 3 และ 10 จะมีผลกระทบเกิดขึ้นน้อยมาก สำหรับในดินเหนียว Gault ที่ OCR มากกว่า 1 แรงดันน้ำที่วัดได้และค่า q_c จะไม่ได้รับผลกระทบจากการแปรเปลี่ยนอัตราการกดมากนัก ยกเว้นที่ OCR เท่ากับ 1 ซึ่งแรงดันน้ำจะได้รับผลกระทบของอัตราการกดที่ต่างกันมากกว่าค่า q_c

2.7.3 ผลกระทบขอบเขต

Almeida and Parry (1985) ได้ทำการทดสอบ CPT และ Piezocone ขนาดเล็กในดินเหนียวที่สร้างขึ้นใหม่ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องมือเตรียมตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 850 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งการทดสอบทั้งสองจะดำเนินการที่ระยะห่างจากผนังของเครื่องมือเตรียมตัวอย่าง 150 mm เพื่อป้องกันผลกระทบขอบเขต โดยมีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างจากผนังกับรัศมีกรวยที่ใหญ่ที่สุด (R_u) เท่ากับ 24



รูปที่ 2.16 ผลกระทบของอัตรากด CPT ในชั้นดินตะกอน Clayey Silt
(Campanella et al., 1983)

Silvestri and Fahmy (1995) ได้ทำการทดสอบ CPT ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm ในดินเหนียวที่สร้างขึ้นใหม่ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้แม่แบบพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm ซึ่งการทดสอบจะดำเนินการที่บริเวณตรงกลางของแบบหล่อเพื่อลดผลกระทบขอบเขต ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างจากผนังแม่แบบกับรัศมีกรวย (R_0) เท่ากับ 20

2.7.4 งานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ CPT ในต่างประเทศ

Titi et al. (2000) ได้ทำการศึกษาถึงผลการทดสอบ CPT ในดินเหนียว Louisiana แบบอัดแน่นเกินตัวและอัดแน่นปรกติ โดยทำการทดสอบ Electric CPT ขนาดเล็กแบบต่อเนื่องที่มีพื้นที่หน้าตัดปลายกรวยเท่ากับ 2 และ 15 cm² ผลการศึกษาพบว่าค่า q_c และ f_s ที่ได้จากการทดสอบทั้งสองนี้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

2.7.5 งานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ CPT ในประเทศไทย

ภูมิต (2524) ได้ทำการศึกษาถึงการหาค่า c_u ของการทดสอบ Unconfined Compressive Test , Field Vane Shear Test และ Triaxial Test (UU) จากการทดสอบ Dutch Cone Penetration Test บริเวณใจกลางพื้นที่กรุงเทพฯ โดยใช้วิธีการคำนวณของ Schmertmann (1970) และ Wirojanagud (1974) ผลการศึกษาพบว่าในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯค่าที่คำนวณได้ทั้งสองวิธีนี้จะมีความแตกต่างกับค่าที่ทดสอบได้จริงในสนาม ซึ่งจะต้องปรับแก้วิธีการคำนวณใหม่ดังแสดงใน **ตารางที่ 2.1** เพื่อให้ความต่างนี้น้อยลง

ทนงชัย (2543) ได้ทำการศึกษาถึงการประเมินหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะจากการทดสอบ Electric CPT ในดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยรวบรวมข้อมูลการทดสอบ CPT จำนวน 80 หลุม และการทดสอบ Static Pile Load Test ของเสาเข็มเจาะที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดไว้จำนวน 26 ต้น ในบริเวณพื้นที่เดียวกันหรือใกล้เคียงกันแล้วนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ ผลการศึกษาพบว่าการประเมินหาหน่วยแรงด้านทานปลายเข็มเจาะโดยใช้ค่า q_c จะให้ความสัมพันธ์ที่ดีกว่าการใช้ค่า f_s ส่วนการประเมินหาหน่วยแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มเจาะสามารถใช้ได้ทั้งค่า q_c และ f_s แต่ถ้าใช้ค่า Normalized f_s กับ q_c จะให้ความสัมพันธ์ที่ดีมากกว่า สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่า c_u กับ q_c ที่ได้ค่อนข้างดี ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันมากนักตามชนิดของดิน แต่ถ้าใช้ค่า Normalized c_u กับ σ'_{vo} แทนจะทำให้ความสัมพันธ์ที่ได้แตกต่างกันตามชนิดของดิน

ตารางที่ 2.1 การปรับแก้วิธีการคำนวณของ Schmertmann (1970) และ Wirojanagud (1974)

การคำนวณ	Schmertmann (1970)	Wirojanagud (1974)
1) Unconfined Compressive Test	$c_u = 0.04(q_c - \gamma_r z) \left(\frac{1}{W_n / LL} \right)^{1.5}$	$c_u = 0.02q_c \left(\frac{1}{W_n / LL} \right)^{2.5}$
2) Field Vane Shear Test	$c_u = 1.5 + 0.03q_c$	
3) Triaxial Test (UU)	$c_u = \frac{q_c - \gamma_r z}{16}$	$c_u = 0.83(q_c)^{0.1}$

บทที่ 3

ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.1 ดินที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวอย่างดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้ดินเหนียว ซึ่งเก็บมาจากบริเวณทางเข้า-ออกด้านใต้ของโครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิ (ถนนสายกิ่งแก้ว – รัตนโกสินทร์ 200 ปี กิโลเมตรที่ 16) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 โดยดินในบริเวณดังกล่าวจะเป็นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก (Soft to Very Soft Clay) มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมค่อนข้างเลวกว่าคือดินมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำและมีค่าการยุบตัวสูง วิธีการเก็บตัวอย่างดินจะใช้กระบอกบาง (Shelby Tube) เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว และยาวประมาณ 1 m เก็บตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพ (Undisturbed Sample) แบบต่อเนื่องที่ระดับความลึกประมาณ 5-8 m ซึ่งเป็นระดับความลึกโดยเฉลี่ยของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จำนวน 4 หลุม (BH-1 ถึง BH-4) โดยมีระยะห่างระหว่างหลุมเจาะประมาณ 2-3 m หลังจากเก็บตัวอย่างดินขึ้นมาแล้วจะทำการเคลือบพาราฟินที่หัวและท้ายกระบอกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำในดินพร้อมทั้งติดฉลากระบุรายละเอียดต่างๆของตัวอย่างดิน และนำมาเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้นเพื่อรอทำการทดสอบต่อไป

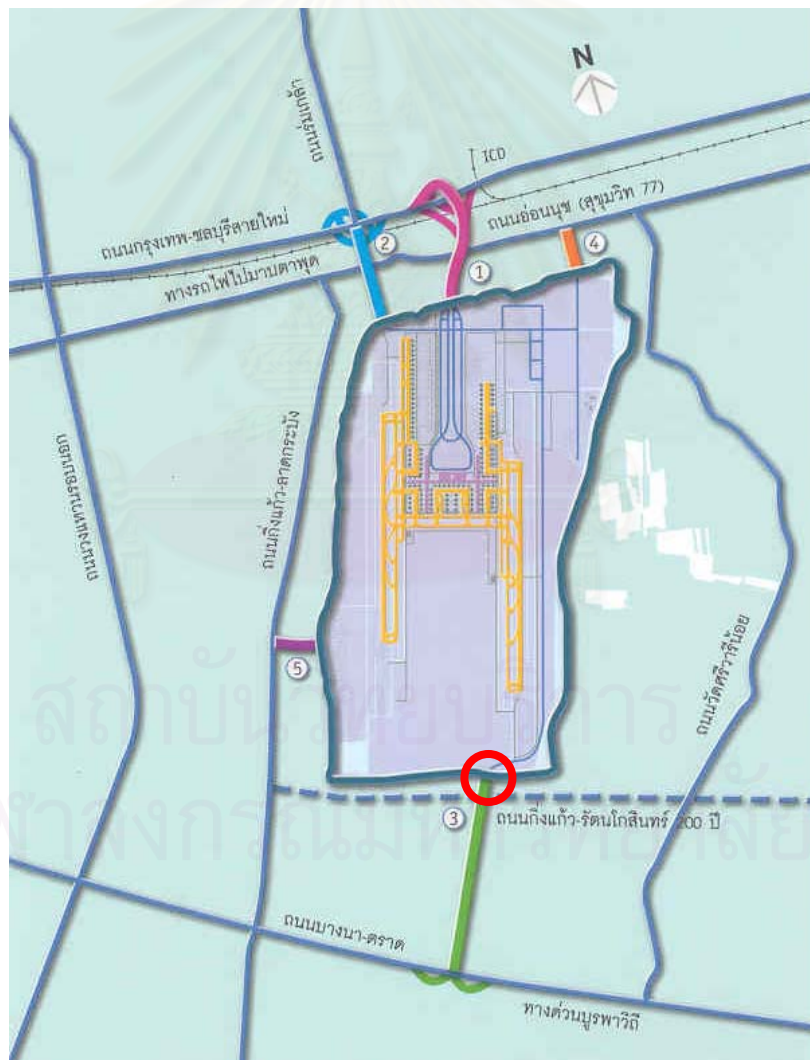
3.2 การทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดิน

ตัวอย่างดินที่เก็บมาได้จากหลุมเจาะ BH-1 ถึง BH-4 จะนำมาทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติขั้นพื้นฐาน (Index Properties) ตามมาตรฐาน ASTM ดังต่อไปนี้

- ก. การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight, γ_t)
- ข. การทดสอบหาความชื้นธรรมชาติในมวลดิน (Natural Moisture Content, W_n)
- ค. การทดสอบหาขีดพิกต์เหลว (Liquid Limit, LL) และขีดพิกต์พลาสติก (Plastic Limit, PL)
- ง. การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil Solid, G_s)



รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งที่ตั้งโครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิ



สัญลักษณ์ :



ตำแหน่งหลุมเจาะ BH-1 ถึง BH-4

รูปที่ 3.2 แผนที่แสดงตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างดิน

3.3 โปรแกรมการทดสอบ

โปรแกรมการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับการศึกษาวิจัยนี้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดต่างๆของการทดสอบดังต่อไปนี้

3.3.1 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำในสถานะดินเหลว (Reconstituted Consolidation Test)

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวในสถานะเหลวและจัดเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ ซึ่งจะนำไปใช้ทำการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) และการทดสอบการกดยขนาดเล็กลูก (MCPT) ต่อไป การอัดตัวคายน้ำจะทำการทดสอบทั้งสิ้น 4 ตัวอย่าง โดยใช้อัตราส่วนการเพิ่มน้ำหนักกด (Load Increment Ratio, LIR) เท่ากับ 1 สำหรับลำดับการเพิ่มน้ำหนักจะมีดังนี้ 0.125 , 0.25 , 0.50 และ 1.00 ksc และหลังจากนั้นจะทำการลดน้ำหนักลงจาก 1.00 ksc เป็น 0.50 และ 0.25 ksc ตามลำดับ

การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstituted Clay) จะทำการทดสอบตามวิธีการของวิโรจน์ (2546) ซึ่งได้พัฒนาขึ้นมา โดยนำดินเหนียวที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดินในสนามมาทำการสร้างเป็นก้อนตัวอย่างดินขึ้นมาใหม่ภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่มีขนาดใหญ่ตามต้องการสำหรับใช้ทดสอบและมีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ตลอดทั่วทั้งก้อน นอกจากนี้ยังทำการทดสอบไฮโดรมิเตอร์ในแต่ละรุ่นผสม (Batch) จากตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่บริเวณด้านบนและล่าง เพื่อตรวจสอบโอกาสในการเกิดการแยกตัวของอนุภาคดิน (Segregation) ในระหว่างขบวนการอัดตัวคายน้ำ

3.3.2 การหาค่าลึงรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบแรงอัดสามแกน

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาหาค่าลึงรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, c_u) ของดินเหนียวสร้างใหม่จากการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ซึ่งจะทำการทดสอบทั้งสิ้น 2 ตัวอย่าง โดยวิธีการทดสอบแบบ CIU ซึ่งจะใช้ตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm สูง 100 mm ทำการอัดตัวคายน้ำไปที่ OCR เท่ากับ 2 (OC Clay) เมื่อขบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดแล้วก็จะเฉือนตัวอย่างดินในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Test) โดยใช้อัตราความเครียดในแนวตั้ง (Strain Rate) ที่ 1 % ของความสูงตัวอย่างต่อชั่วโมง ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง c_u กับ q_c ซึ่งได้จากการทดสอบการกดยขนาดเล็กลูก (MCPT) ต่อไป

3.3.3 การทดสอบการก่กรวยขนาดเล็ก (MCPT)

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของหน่วยแรงต้านทานปลายกรวย (q_c) และแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้น (Δu) กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งได้แก่ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (c_u), OCR และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (σ'_{vc}) ในดินเหนียวสร้างใหม่ภายใต้สภาวะแรงอัดสามแกน ซึ่งจะทำให้การทดสอบทั้งสิ้น 2 ตัวอย่าง ก่อนเริ่มทำการทดสอบนั้นจะต้องพัฒนาเครื่องมือทดสอบขึ้นมาใหม่โดยเฉพาะ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข และ ค) ซึ่งจะใช้ตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 130 mm สูง 100 mm มาทำการทดสอบอัดตัวคายน้ำแบบ CI ไปที่ OCR เท่ากับ 2 เมื่อขบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงแล้วก็จะกด Cone Penetrometer ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 mm เข้าไปในตัวอย่างดินในสภาพไม่ระบายน้ำ โดยใช้อัตรากด (Penetration Rate) ที่ 0.156 mm/Min.

ตารางที่ 3.1 โปรแกรมการทดสอบ

การทดสอบ	OCR	σ'_{vc} (ksc)	σ'_p (ksc)	จำนวน ตัวอย่าง
1) Reconstituted Consolidation Test	-	-	1.0	4
2) Triaxial Test (\overline{CIU})	2	0.5	1.0	2
3) Miniature Cone Penetration Test (CI)	2	0.5	1.0	2

3.4 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำในสถานะดินเหลว (Reconstituted Consolidation Test)

3.4.1 ลักษณะเครื่องมือทดสอบ

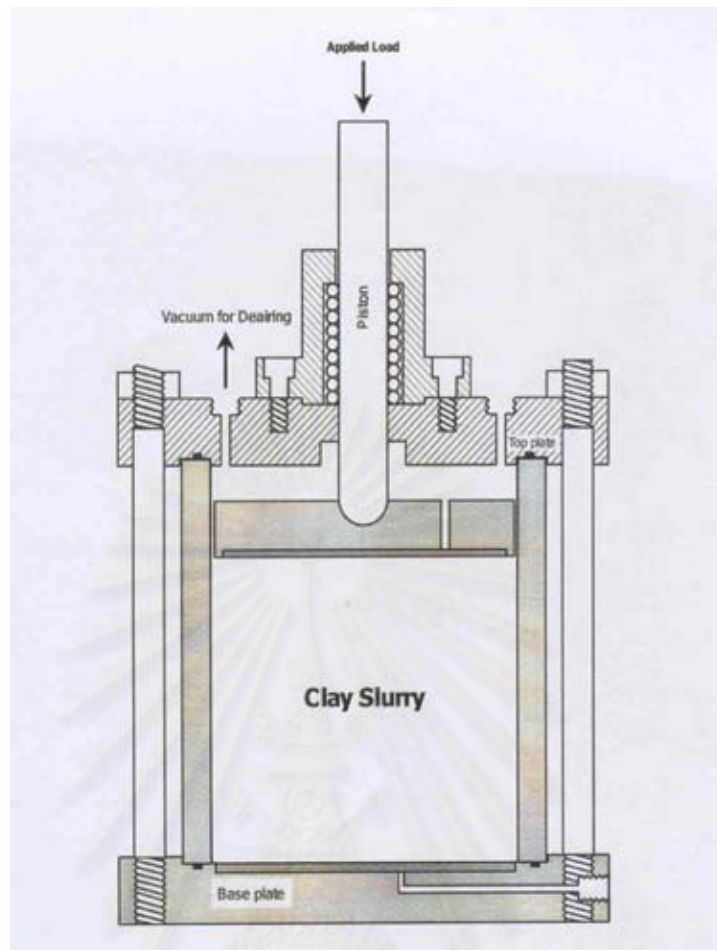
เครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหลว (Reconstituted Consolidometer) จะเป็นเครื่องมือที่ใช้กับตัวอย่างดินเหนียวเหลว เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการอัดตัวคายน้ำในสภาพ 1 มิติ ซึ่งสามารถระบายน้ำได้ในแนวตั้ง ลักษณะของเครื่องมือทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.3 เครื่องมือทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งสิ้น 2 เครื่อง (ดูภาคผนวก จ) ซึ่งเครื่องมือทดสอบ No.1 จะเป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาโดยวิโรจน์ (2546) และเครื่องมือทดสอบ No.2 จะเป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

มาใหม่ โดยได้ทำการแก้ไขข้อบกพร่องที่พบจากเครื่องมือทดสอบ No.1 สำหรับส่วนประกอบหลักของเครื่องมือจะมีดังต่อไปนี้

ก. ท่อใส่ตัวอย่างดินพร้อมฐาน (Cell Chamber) จะเป็นท่อทองเหลืองหรือท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 155 mm สูง 300 mm และหนา 5 mm โดยมีแผ่นฐานสแตนเลสกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 180 mm หนา 20 mm ปิดตัวท่อทั้งด้านบนและด้านล่าง (Top Plate and Base Plate) ซึ่งแผ่นสแตนเลสทั้งสองนี้จะถูกยึดเข้ากับ Cell Chamber ด้วยเพลาสแตนเลส (Tie Rod) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm ยาว 350 mm จำนวน 4 ท่อน บริเวณรอยต่อจะสวม O-ring เอาไว้เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำ สำหรับ Top Plate จะเจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 mm เพื่อใช้ป้อนน้ำสำหรับให้เพลาคดน้ำหนัก (Loading Piston) สามารถเลื่อนขึ้น-ลงได้ผ่านกระบอกลูกปืน (Piston Assembly) ส่วน Base Plate จะเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm พร้อมติดตั้งแผ่นหินพรุนน้ำ (Porous Stone) เพื่อระบายแรงดันน้ำส่วนเกินออกไปยังที่รับน้ำภายนอก และให้ดินสามารถคูดน้ำกลับได้ในขั้นตอนลดน้ำหนัก (Unloading)

ข. แผ่นโลหะถ่วงน้ำหนัก (Top Cap) จะเป็นแผ่นสแตนเลสกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 155 mm หนา 10 mm สำหรับถ่วงน้ำหนักกดทับ (Dead Weight) ลงสู่ดิน บริเวณขอบด้านข้างของแผ่นจะเจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นรอบวง ลึกประมาณ 3 mm เพื่อใช้สวม O-ring ป้องกันการรั่วซึมของน้ำ สำหรับบริเวณตรงกลางแผ่นจะเชื่อมติดกับเพลาลูกสูบแข็งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 mm ยาว 400 mm เพื่อใช้รองรับชุดวางก้อนน้ำหนักกดทับ นอกจากนี้ที่เพลาลูกสูบแข็งจะติดตั้งที่ล้อ LVDT เพื่อใช้วัดค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินที่เกิดขึ้น

ค. ชุดวางน้ำหนักกดทับ จะเป็นแผ่นเหล็กขนาด 300x300x10 mm ซึ่งจะทำการเจาะรูวงไว้จากด้านริมออกไปยังบริเวณจุดศูนย์กลางของแผ่นเหล็ก สำหรับใช้นำไปสวมเข้ากับเพลาสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 mm เพื่อถ่วงน้ำหนักไปยังเพลาลูกสูบแข็งและกระจายน้ำหนักลงสู่ตัวอย่างดินเหลวผ่าน Top Cap



รูปที่ 3.3 โดอะแกรมเครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว
(Reconstituted Consolidometer)

3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมตัวอย่างดินเหนียว การอัดตัวคายน้ำ และการค้นเก็บตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.2.1 การเตรียมตัวอย่างดินเหนียว (Mixing Clay Slurry)

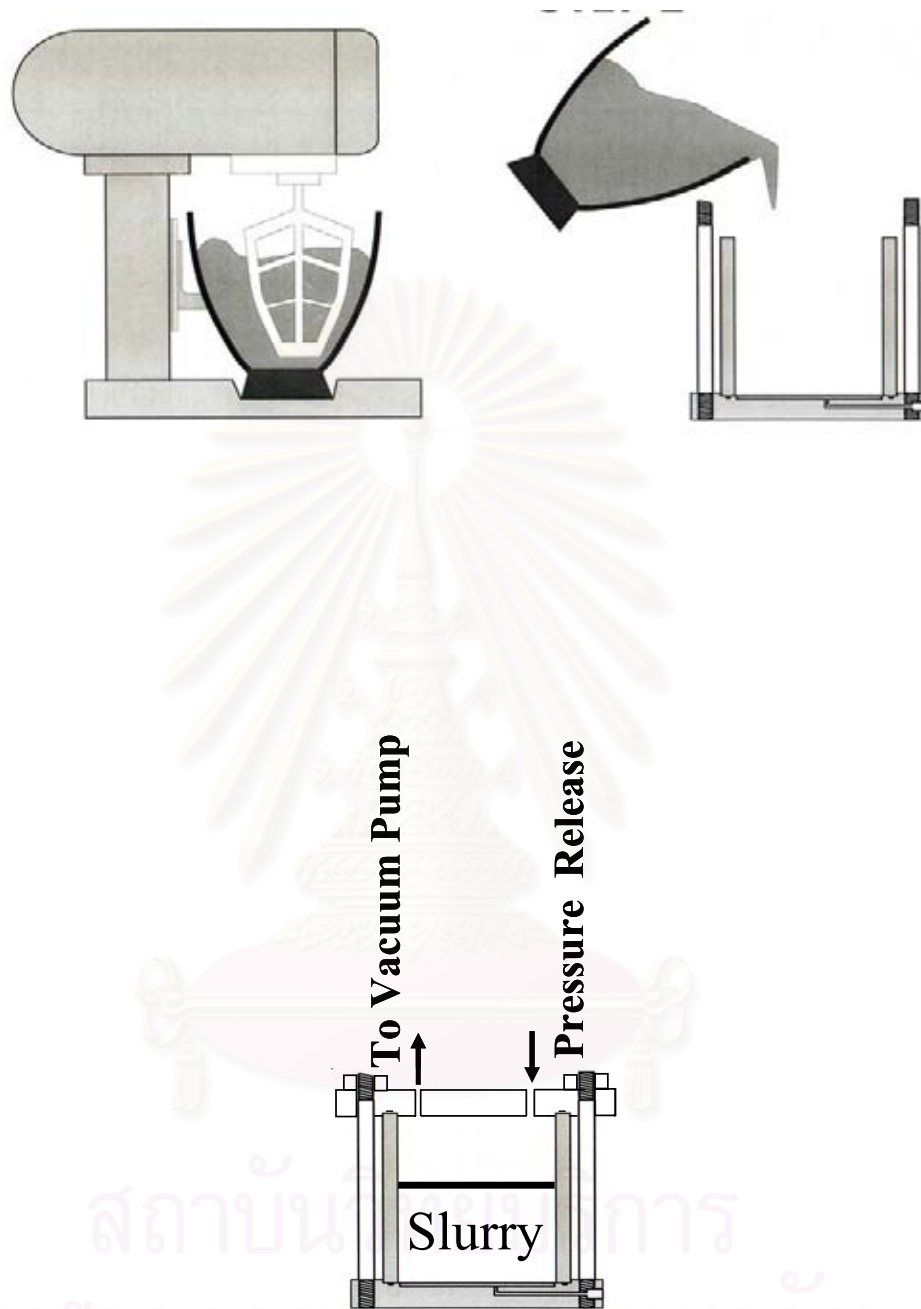
ปริมาณส่วนผสมที่ต้องการในการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสูงประมาณ 250 mm และภายหลังจากบวมการอัดตัวคายน้ำเสร็จสิ้นจะได้ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่สูงไม่น้อยกว่า 130 mm จะมีดังนี้

- ดินเหนียวธรรมชาติ ประมาณ 5 kg
- น้ำกลั่นที่ไล่ฟองอากาศแล้ว เพื่อผสมให้เป็นดินเหลวและมีค่าปริมาณน้ำในดิน ประมาณ 150 %
- เกลือแกง เพื่อทำให้น้ำที่ผสมมีความเข้มข้น 11 g/liter

ขั้นตอนการผสมดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยสรุปแล้วจะนำดินเหนียวธรรมชาติที่ระดับความลึก 5-8 m มาในปริมาณที่เท่ากัน เติมน้ำเกลือ และผสมในเครื่องกวนดิน (Mechanical Mixer) ประมาณ 30-60 นาที หรือจนกระทั่งดินสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ในระหว่างการผสมควรใช้ Spatula ปาดดินที่ขอบภาชนะและใบกวนดินเป็นระยะๆ เพื่อไม่ให้ดินจับตัวกัน การศึกษานี้จะไม่ใช้ดินอบแห้ง เพราะจะทำให้ค่า Atterberg Limits เปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งใช้น้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 11 g/liter ซึ่งเป็นค่า Salt Content เฉลี่ยของดิน ทั้งนี้เพราะชนิดและปริมาณเกลือของน้ำในช่องว่างดิน (Pore Fluid) จะมีผลต่อพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำ ในงานวิจัยนี้จะใช้ปริมาณน้ำในดินเหลว (Water Content) ประมาณ 150 % หรือประมาณ 1.5 เท่าของขีดพิกัดเหลวของดิน (LL) ซึ่งจะมีปริมาณน้ำมากเพียงพอที่จะผสมดินให้เหลวเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถเทใส่ Cell Chamber ได้ โดยที่จะไม่เกิด Segregation หรือ Breeding

ดินเหลวที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จะนำมาเทใส่ใน Cell Chamber ที่ยึดติดกับ Base Plate แล้ว ผนังด้านในของ Cell Chamber จะทาน้ำมันหล่อลื่นบางๆ เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่าง O-ring รอบ Top Cap กับ Cell Chamber ซึ่งจากการ Calibrate พบว่ามีค่าประมาณ 10-15 kg หลังจากนั้นจะปิดฝาบนด้วยแผ่น Acrylic ใสที่ต่อเข้ากับปั๊มดูดอากาศเพื่อไล่ฟองอากาศที่ติดอยู่ในดินเหลวนานประมาณ 15-30 นาที วัดความสูงเริ่มต้นของดินเหลวก่อนที่จะใส่ Top Cap และ Top Plate ต่อจากนั้นติดตั้ง LVDT เข้ากับ Loading Piston เพื่อวัดการทรุดตัวกับเวลาในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการผสมตัวอย่างดินเหลว

3.4.2.2 การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)

ใส่น้ำหนัก Dead Weight ให้ตัวอย่างดินเหลวรับหน่วยแรงในแนวตั้งเริ่มต้นที่ 0.125 ksc และเพิ่มน้ำหนักด้วย LIR = 1 จนถึงหน่วยแรงสูงสุดที่ 1.00 ksc (รูปที่ 3.5) จากนั้นจะทำการลดน้ำหนักลงที่ 0.50 และ 0.25 ksc ตามลำดับ การเพิ่มน้ำหนักในแต่ละชั้นจะต้องให้ขบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงก่อน โดยเวลาสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำหาได้จากวิธี Log t Method ของ Casangrande (1936) การเพิ่มน้ำหนักขั้นแรกที่ 0.125 ksc จะใช้เวลาในการอัดตัวคายน้ำนานประมาณ 16 วัน ซึ่งนานมากกว่าขั้นอื่นๆ หลังจากนั้นเวลาที่ใช้จะลดลงเหลือประมาณ 9 วัน รวมระยะเวลาการทดสอบทั้งหมดประมาณ 47 วัน เมื่อการทดสอบสิ้นสุดลงตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ได้จะมีอัตราส่วนการอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidation Ratio, OCR) ประมาณ 4 และมีสถานะของหน่วยแรงใกล้เคียงกับ Hydrostatic กล่าวคือ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (σ'_v) ประมาณเท่ากับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ (σ'_h) ซึ่งจะช่วยให้ลดการรบกวนตัวอย่างในระหว่างการดันดินออกจาก Cell Chamber นอกจากนี้การอัดตัวคายน้ำที่สูงถึง 1.00 ksc จะทำให้สามารถจับยกตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ได้ โดยตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ได้จะสูงประมาณ 140 mm และหนักประมาณ 4.6 kg



รูปที่ 3.5 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหลว

3.4.2.3 การดันและตัดแต่งตัวอย่าง (Extrusion and Trimming)

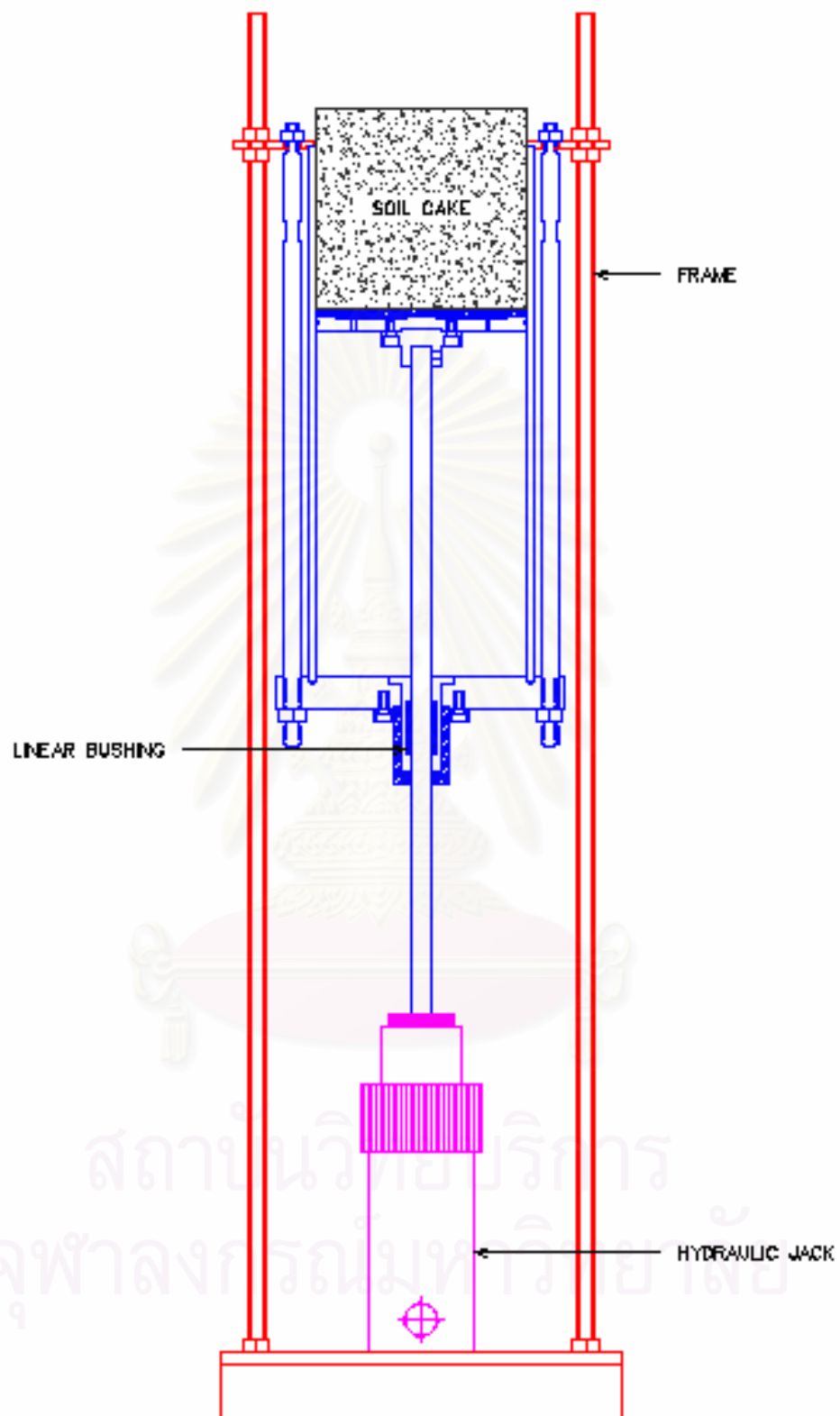
ก่อนยกก้อนน้ำหนักชั้นสุดท้ายจะต้องควบน้ำออกจาก Cell Chamber ก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้ดินควบน้ำได้อีก หลังจากนั้นจึงค่อยๆดันตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ออกมาโดยใช้ Hydraulic Jack (รูปที่ 3.6) ชั่งน้ำหนัก วัดความสูง และตัดแบ่งดินออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่าง เพื่อนำไปทดสอบหาค่าความชื้นในมวลดิน (Water Content) ก่อนที่จะนำดินที่เหลือมาห่อด้วย Waxed Paper เคลือบด้วยพาราฟิน และเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้นต่อไป สำหรับดินตัวอย่างที่จะนำไปหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบแรงอัดสามจะทำการตัดแบ่งด้วยเครื่องตัดดังแสดงในรูปที่ 3.7 ก่อนที่จะนำดินที่ได้ไปห่อ Waxed Paper

3.5 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบแรงอัดสามแกน

3.5.1 ลักษณะเครื่องมือทดสอบ

ในการทดสอบนี้จะใช้เครื่องมือ Triaxial Test ซึ่งผลิตขึ้นโดย ELE International Company (ดูภาพผนวก ง) จะมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

- 1) Control Computer
- 2) ADU (Autonomous Data-Acquisition Unit)
- 3) Load Frame (Tritest 50)
- 4) Load Cell
- 5) LVDT (Linear Variable Differential Transformer)
- 6) Water Pressure Transducer
- 7) Volume Change Transducer
- 8) Pressure Pump
- 9) Deaired Water Apparatus



รูปที่ 3.6 การดันตัวอย่างดินออกจาก Cell Chamber



รูปที่ 3.7 เครื่องมือตัดแบ่งตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่

3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบ Triaxial Test แบบ CIU จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.2.1 การจัดเตรียมเครื่องมือ

สายแรงดันน้ำทุกเส้นต้องถูกไล่ฟองอากาศที่ค้างอยู่ออกให้หมดด้วย Deaired Water , ตั้งค่า Pressure Transducer ให้เท่ากับศูนย์เมื่อเปิดให้สัมผัสกับอากาศ และต้ม Porous Stone ในน้ำเดือด ประมาณ 30 นาที เพื่อไล่อากาศออกให้หมด

3.5.2.2 การจัดเตรียมตัวอย่างดิน

นำตัวอย่างดินที่ต้องการทดสอบมาแกะพาราฟินและ Waxed Paper ที่หุ้มอยู่ออก แล้วนำมา ตัดแต่งขอบ (Trim) ด้วยเส้นลวดขนาดเล็กใน Trimming Frame จนกระทั่งได้ตัวอย่างดินรูป ทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 50 mm แล้วนำตัวอย่างที่ได้มาทำการตัดหัวและท้ายโดยใช้ Meter Box ให้เหลือความยาวประมาณ 100 mm เพื่อให้ได้ส่วนของความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง เป็น 2 ต่อ 1 (H:D = 2:1) ตามขนาดมาตรฐาน แล้วใช้เปลงสีฟันที่ไม่ใช่แล้วปาดที่ผิวดินทั้งข้างบน

และข้างล่างเพื่อลดผลของ Smear Effect (Head, 1986) จากนั้นนำตัวอย่างที่ถูกตัดแต่งแล้วมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาหน่วยน้ำหนักรวม (γ) และปริมาณความชื้นธรรมชาติในมวลดิน (W_n) ต่อไป

3.5.2.3 การจัดวางตัวอย่างดินในเครื่องมือทดสอบ

วาง Porous Stone ซึ่งถูกดัดม้วนแล้วไว้ที่ Bottom Cap ต่อจากนั้นจึงนำตัวอย่างดินมาวางบน Porous Stone , วาง Porous Stone และ Top Cap ตามลำดับไว้ที่ด้านบนของตัวอย่าง โดยที่ระหว่าง Porous Stone กับตัวอย่างดินนั้นจะต้องมีกระดาษกรองวางคั่นไว้เสมอ เพื่อมิให้ส่วนของดินที่ละลายในน้ำไหลเข้าไปใน Porous Stone ได้ หลังจากนั้นจึงใช้ Rubber Membrane บางๆหุ้มตัวอย่างดินไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างสัมผัสกับน้ำใน Triaxial Cell โดยตรง ต่อจากนั้นจึงรัด Rubber Membrane ไว้ด้วย O-ring จำนวน 4 เส้น (ที่ Bottom Cap 2 เส้น และที่ Top Cap 2 เส้น) หลังจากการจัดวางตัวอย่างดินเสร็จสิ้นแล้วจึงนำเอา Triaxial Cell มาครอบไว้และยึดด้วยสกรูให้เรียบร้อย ใส่น้ำเข้าไปใน Triaxial Cell ทาง Cell Pressure Line ด้วยความดันบรรยากาศ เมื่อน้ำไหลเข้าไปจนเต็ม Triaxial Cell และล้นออกมาทางวาล์วระบาย (Air Release) จึงจะปิดวาล์ว Air Release ต่อจากนั้นก็ทำการติดตั้ง LVDT และตั้งค่าให้เป็นศูนย์ก่อนทำการทดสอบต่อไป

3.5.2.4 การทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated)

ขั้นตอนนี้เป็นการทำงานให้มั่นใจว่าตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำและขจัดปัญหา Negative Pore Pressure ซึ่งเราไม่รู้ค่าโดยการใส่ Back Pressure เข้าไปที่บริเวณหัวและท้ายของตัวอย่างแล้วทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งจะกำจัดฟองอากาศในตัวอย่างออกไปให้หมดเสียก่อนเพื่อที่จะได้วัดแรงดันน้ำในตัวอย่างดินได้อย่างถูกต้องโดยที่จะไม่เกิด Time Lag ขึ้นในการที่จะทำให้ตัวอย่างดินรับแรงดันดังกล่าวได้นั้นจะต้องค่อยๆเพิ่ม Cell Pressure และ Back Pressure อย่างช้าๆและสลับกันอย่างต่อเนื่องในอัตราการเพิ่มประมาณ 20 kPa/Min. เพื่อให้ตัวอย่างดินถูกรบกวนน้อยที่สุด โดยระหว่างการเพิ่มแรงดันนั้นควรให้ Cell Pressure มีค่ามากกว่า Back Pressure ประมาณ 10 kPa เพื่อป้องกันมิให้ตัวอย่างเกิดการบวมตัวจนกระทั่ง Cell Pressure มีค่าเท่ากับ 410 kPa และ Back Pressure มีค่าเท่ากับ 400 kPa ต่อจากนั้นจึงทำการบันทึกปริมาตรของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป (Volume Change) ขณะที่ทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ การตรวจสอบระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำจะพิจารณาจากค่า B-Parameter ซึ่งทำได้โดยการปิดวาล์ว Back Pressure และเพิ่ม Cell Pressure จำนวน 10-20 kPa แรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้น (Excess Pore Water Pressure, Δu) ในขณะที่หน่วยแรงประสิทธิผล (σ'_v) จะไม่เปลี่ยนแปลง (อิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว) ซึ่งจะไม่เป็นการไป

รบกวนตัวอย่างดินแต่อย่างใด หลังจากการตรวจสอบเสร็จสิ้นแล้วก็ทำการลดแรงดันน้ำลงกลับมาที่เดิม เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทดสอบในขั้นต่อไป

3.5.2.5 การอัดตัวคายน้ำแบบ Isotropic

ในขั้นตอนนี้จะทำการเพิ่ม Cell Pressure ไปที่ 450 kPa เพื่อให้ตัวอย่างดินมีหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (σ'_{vc}) เท่ากับ 0.5 ksc และ OCR มีค่าเท่ากับ 2 (σ'_p เท่ากับ 1.0 ksc) ในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำจะทำการเปิดวาล์ว Back Pressure เพื่อให้ น้ำสามารถระบายได้ทั้งสองทาง การตรวจสอบว่าตัวอย่างอัดตัวคายน้ำเสร็จสิ้นหรือยัง ทำได้โดยการปิดวาล์ว Back Pressure ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อดูว่ายังมีแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) คงค้างอยู่หรือไม่ หากไม่มีแรงดันน้ำส่วนเกินเหลืออยู่ก็สามารถทำการทดสอบในขั้นต่อไปได้ หรือดูจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป (Volume Change) กับเวลา หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำก็ถือว่า การอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงแล้ว สำหรับเวลาสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำในแต่ละขั้นตอนขึ้นอยู่กับค่า OCR ของดิน ซึ่งดินที่อยู่ในช่วง OC การอัดตัวคายน้ำจะใช้เวลาไม่นาน (ประมาณ 1-2 วัน) แต่ถ้าดินอยู่ในช่วง NC การอัดตัวคายน้ำจะใช้เวลานานมาก และเมื่อการอัดตัวคายน้ำเสร็จสิ้นลงแล้วจะทำการบันทึกปริมาณการทรุดตัวในแนวตั้งและประมาณน้ำที่ออกมาจากตัวอย่างดิน เพื่อคำนวณหน้าตัดดินใหม่ก่อนที่จะทำการเงื่อนไขตัวอย่างดินต่อไป

3.5.2.6 การเฉือนตัวอย่างดิน (Shearing)

หลังจากการอัดตัวคายน้ำแบบ Isotropic เสร็จสิ้นลงแล้วก็ทำการปิดวาล์ว Back Pressure เพื่อไม่ให้น้ำไหลออกจากตัวอย่างดินและบันทึกค่า Pore Pressure เริ่มต้นไว้ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ Back Pressure หลังจากนั้นตัวอย่างดินจะถูกทำการเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Test) โดยใช้ อัตราความเครียดในแนวตั้ง (Strain Rate) ที่ 1 % ของความสูงตัวอย่างต่อชั่วโมง บันทึกแรงที่กระทำในแนวตั้ง (Deviator Stress) และแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้น (Δu) ระหว่างการทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างดิน Failure เพื่อนำข้อมูลผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ผลต่อไป

3.6 การทดสอบการกดกรวยขนาดเล็ก (MCPT)

3.6.1 ลักษณะเครื่องมือทดสอบ

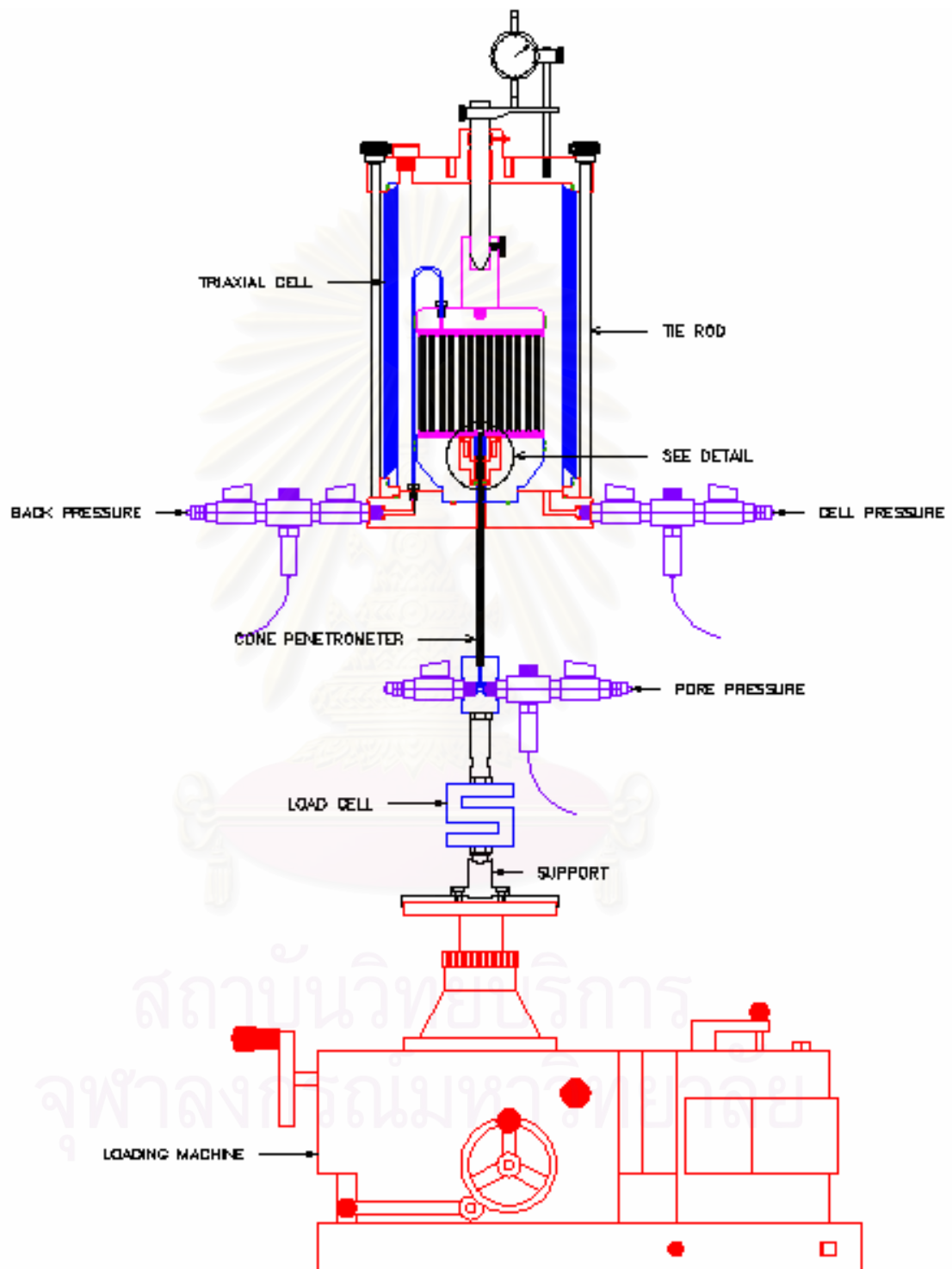
เครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus เป็นเครื่องมือที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่ (ดูภาพผนวก ข และ ค) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 สำหรับคำอธิบายส่วนประกอบต่างๆของเครื่องมือทดสอบสามารถดูได้ในหัวข้อที่ 4.4 ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

3.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ

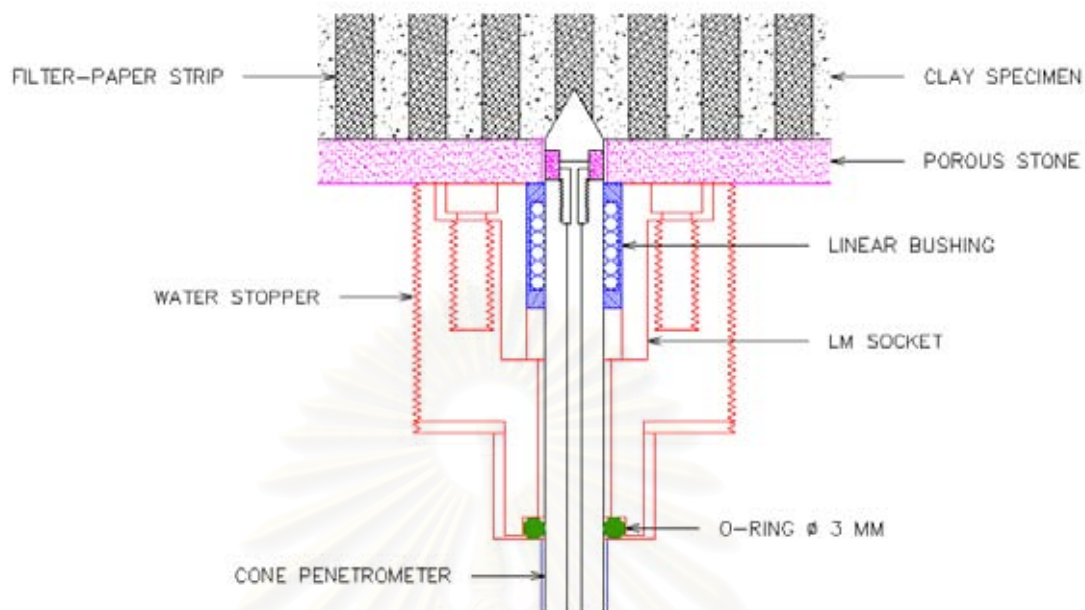
สำหรับขั้นตอนการทดสอบ MCPT นั้นจะเป็นไปตามขั้นตอนการทดสอบ Triaxial Test ทุกประการ ยกเว้นขั้นตอนการเฉือนตัวอย่างดิน (Shearing) เท่านั้นที่จะทำการทดสอบกด Cone Penetrometer เข้าไปในตัวอย่างดินแทน โดยจะทำการปิดวาล์ว Back Pressure เพื่อไม่ให้น้ำไหลออกจากตัวอย่างดินขณะทดสอบ (Undrained Test) และบันทึกค่า Pore Pressure เริ่มต้นไว้ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ Back Pressure รวมทั้งแรงที่กระทำกับ Cone Penetrometer เมื่อใช้อัตรากดที่ 0.156 mm/Min. การทดสอบนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อความลึกของ Cone Penetrometer ที่กดเข้าไปมีค่าประมาณ 70-80 mm ซึ่งเป็นขีดจำกัดของ LVDT ที่ใช้ในการอ่านค่า บันทึกค่า Back Pressure และ Pore Pressure ที่บริเวณปลายกรวย รวมทั้งแรงที่กระทำกับ Cone Penetrometer ระหว่างการทดสอบเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ผลต่อไป

3.6.3 การสอบเทียบเครื่องมือทดสอบ

การสอบเทียบ (Calibration) เครื่องมือทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่าง O-ring กับ Cone Penetrometer นอกจากนี้ยังเป็นการตรวจสอบการวัดแรงดันน้ำที่ปลายกรวยอีกด้วย การสอบเทียบนี้จะต้องทำทุกครั้งหลังจากการทดสอบ MCPT เสร็จสิ้นแล้ว โดยวิธีการสอบเทียบจะเหมือนกับการทดสอบ MCPT ทุกประการ แต่จะแตกต่างกันตรงที่ภายใน Triaxial Cell จะมีเฉพาะน้ำ Deaired Water ซึ่งใช้แรงดันจาก Cell Pressure Line เท่านั้น (ดูรูปที่ 3.10) วาล์วของ Cell Pressure จะเปิดอยู่ตลอดเวลาและวาล์ว Back Pressure จะถูกปิดเอาไว้ในขณะที่กด Cone Penetrometer เข้าไป ซึ่งใช้อัตรากดเช่นเดียวกับการทดสอบ MCPT แรงเสียดทานที่ได้นี้จะนำมาหักลบออกจากแรงที่วัดได้จาก Load Cell เพื่อปรับแก้ข้อมูลการทดสอบไม่ให้มีผลกระทบของแรงเสียดทานเข้ามาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 3.8 เครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus



รูปที่ 3.9 รูปขยายเครื่องมือทดสอบบริเวณ Bottom Cap



รูปที่ 3.10 การสอบเทียบเครื่องมือทดสอบ

3.6.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ MCPT

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ MCPT เพื่อหาหน่วยแรงต้านทานปลายกรวย (q_c) และแรงเสียดทานที่ผิวปลอก (f_s) สามารถทำได้จากการพิจารณารูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมต้านทานปลายกรวยกับ Cone Position (รูปที่ 3.11) ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้นี้จะเป็นเส้นตรงตามสมการที่ 3.3 ค่า Q_c และ Q_s จะหาได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า q_c และ f_s ได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ สำหรับภาพจำลองการทดสอบ MCPT จะแสดงไว้ในรูปที่ 3.12

$$Q_{Total} = Q_c + Q_s \quad (3.1)$$

$$X = \frac{-C + Y}{M} \quad (3.2)$$

$$Y = MX + C \quad (3.3)$$

โดยที่

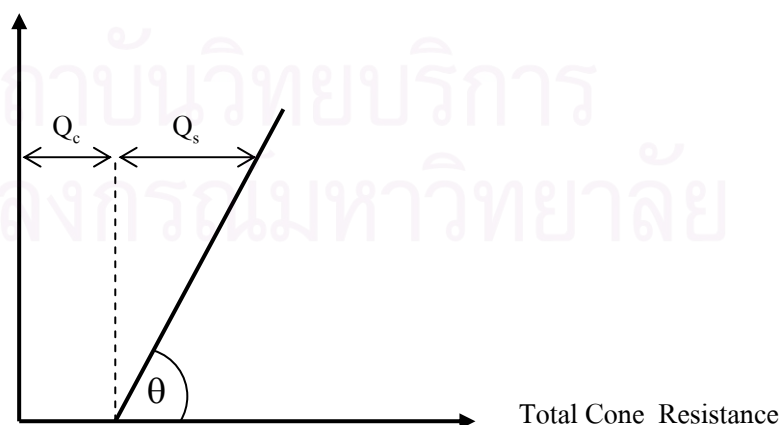
Q_{Total} = แรงรวมต้านทานปลายกรวย (Total Cone Resistance)

Q_c = แรงต้านทานปลายกรวย = $-C/M$

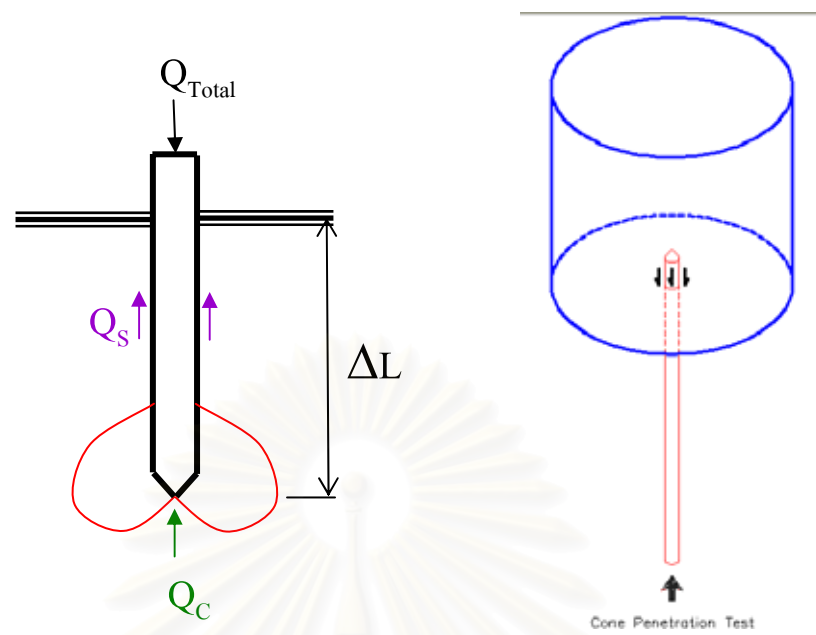
Q_s = แรงเสียดทานที่ผิวปลอก = Y/M

$M = \tan \theta$ = ความชันของกราฟ

Cone Position



รูปที่ 3.11 การหาค่า Q_c และ Q_s จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมต้านทานปลายกรวยกับ Cone Position



รูปที่ 3.12 ภาพจำลองการทดสอบ MCPT

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวธรรมชาติแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยมีค่าขีดพิกต์เหลว (Liquid Limit, LL) ประมาณ 96.3 ± 3.18 % ค่าขีดพิกต์พลาสติก (Plastic Limit, PL) ประมาณ 33.4 ± 0.50 % ซึ่งจะได้ค่าดัชนีพลาสติกซีดี (Plasticity Index, PI) ประมาณ 63.0 ± 3.45 % และความชื้นธรรมชาติในมวลดิน (W_n) มีค่าประมาณ 98.3 ± 5.96 % จะได้ค่าดัชนีความเหลว (Liquidity Index, LI) ประมาณ 1.0 ± 0.04 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าเป็นดินอ่อนที่มีความไว สำหรับความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil Solid, G_s) จะมีค่าประมาณ 2.65 และหน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight, γ_t) มีค่าประมาณ 1.48 ± 0.01 t/m³ จากผลการทดสอบดินระหว่างหลุมเจาะแสดงให้เห็นว่าดินมีความสม่ำเสมอและมีการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีน้อยมาก

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวธรรมชาติ

Bore Hole No.	Depth (m)	W_n (%)	γ_t (t/m ³)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI	G_s
BH-1	5-8	103.7	1.47	98.9	33.5	65.4	1.1	2.65
BH-2	5-8	89.9	1.48	91.8	33.9	57.9	1.0	2.65
BH-3	5-8	100.9	1.48	98.1	33.3	64.8	1.0	2.65
BH-4	5-8	98.6	1.47	96.5	32.7	63.8	1.0	2.65
Average		98.3	1.48	96.3	33.4	63.0	1.0	2.65
SD.		5.96	0.01	3.18	0.50	3.45	0.04	0
Coeff. of Variation (%) = (SD x 100)/Average		6.07	0.68	3.30	1.50	5.47	4.35	0

4.2 การตรวจสอบความสม่ำเสมอของดินเหนียวสร้างใหม่

การทดสอบหาปริมาณความชื้นในดินเหนียวสร้างใหม่ และขีดพิกัด Atterberg Limits เป็นวิธีการที่ง่ายและสะดวกที่สุดในการตรวจสอบความสม่ำเสมอของเนื้อดิน ซึ่งจะพบว่ามีความแปรปรวนค่อนข้างต่ำ โดยขีดพิกัดเหลว (LL) มีค่าประมาณ 98.2 ± 2.72 % ขีดพิกัดพลาสติก (PL) มีค่าประมาณ 35.8 ± 0.64 % ซึ่งจะได้ค่าดัชนีพลาสติกซิติ (PI) ประมาณ 62.4 ± 2.90 % และปริมาณความชื้นในมวลดิน (W_n) มีค่าประมาณ 73.0 ± 3.55 % ซึ่งจะได้ค่าดัชนีความเหลว (LI) ประมาณ 0.6 ± 0.06 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และเมื่อเปรียบเทียบขีดพิกัด Atterberg Limits ระหว่างดินเหนียวธรรมชาติกับดินเหนียวสร้างใหม่ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จะพบว่าขีดพิกัดเหลว (LL) ของดินเหนียวสร้างใหม่มีค่ามากกว่าดินเหนียวธรรมชาติเล็กน้อย สำหรับขีดพิกัดพลาสติก (PL) จะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเช่นเดียวกัน ซึ่งผลการทดสอบที่ได้นี้จะสอดคล้องกับผลการศึกษาวิจัยของวิโรจน์ (2546)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวสร้างใหม่

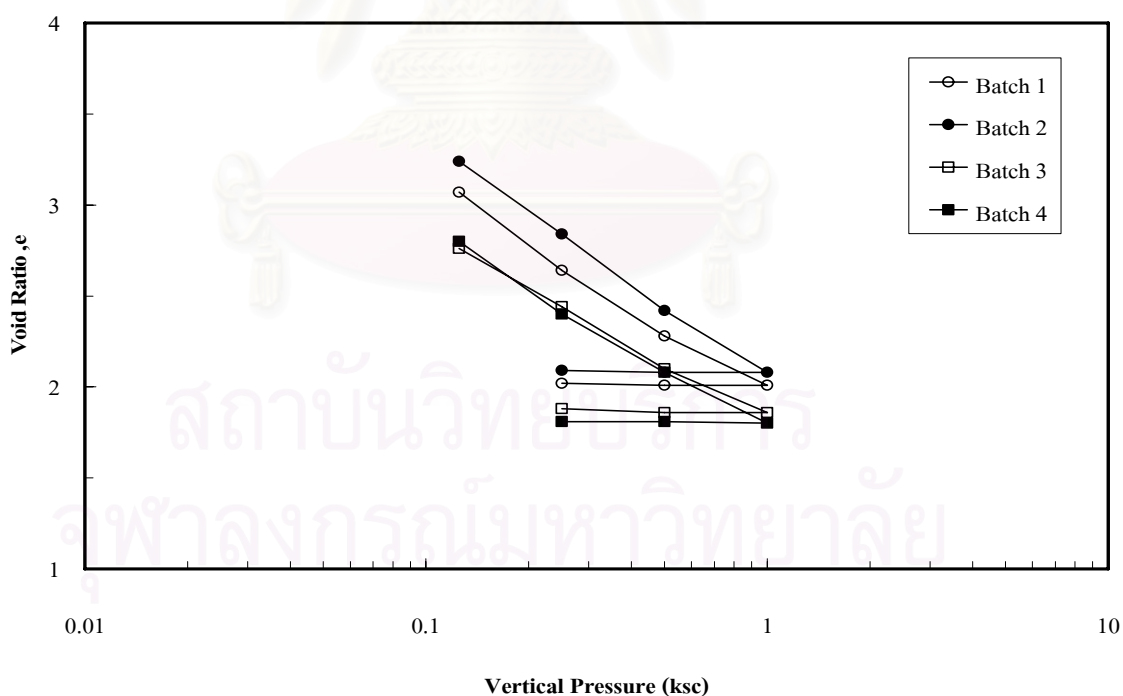
Batch No.	W_n (%)	γ_t (t/m^3)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI
1	74.4	1.53	100.9	35.1	65.8	0.6
2	77.3	1.52	97.0	36.5	60.5	0.7
3	70.9	1.58	99.8	36.1	63.7	0.5
4	69.4	1.60	94.9	35.4	59.5	0.6
Average	73.0	1.56	98.2	35.8	62.4	0.6
SD.	3.55	0.04	2.72	0.64	2.90	0.06
Coeff. of Variation (%) = (SD x 100)/Average	4.86	2.48	2.77	1.79	4.65	9.30

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวธรรมชาติกับดินเหนียวสร้างใหม่

Clay Type	W_n (%)	γ_t (t/m^3)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI
Natural Clay	98.3	1.48	96.3	33.4	63.0	1.0
Reconstituted Clay	73.0	1.56	98.2	35.8	62.4	0.6

หมายเหตุ : คุณสมบัติพื้นฐานที่แสดงไว้ในตารางจะเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างหลุมเจาะของดินเหนียวธรรมชาติและค่าเฉลี่ยระหว่างรุ่นผสมของดินเหนียวสร้างใหม่

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง e - $\log \sigma'_v$ (Compression Curve) ในสถานะดินเหลวของแต่ละรุ่นผสม (Batch) แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.4 พบว่าจะมีพฤติกรรมที่เหมือนกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าด้วยกระบวนการเตรียมตัวอย่างดินที่ปฏิบัติตามวิธีการของวิโรจน์ (2546) สามารถเตรียมตัวอย่างซ้ำให้มีคุณสมบัติสม่ำเสมอในแต่ละรุ่นผสมได้ (Repeatability)



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง e - $\log \sigma'_v$ จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำในสถานะดินเหลว

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบอัดตัวคายนํ้าในสถานะดินเหลว

Batch No.	Initial				Final			
	H (mm)	γ_t (t/m ³)	W_n (%)	e_0	H (mm)	γ_t (t/m ³)	W_n (%)	e
1	255.0	1.33	152.8	4.05	156.0	1.53	74.4	2.02
2	245.0	1.32	154.5	4.09	147.0	1.52	77.3	2.09
3	255.0	1.35	151.9	4.03	147.5	1.58	70.9	1.88
4	245.0	1.33	150.1	3.98	136.5	1.60	69.4	1.81

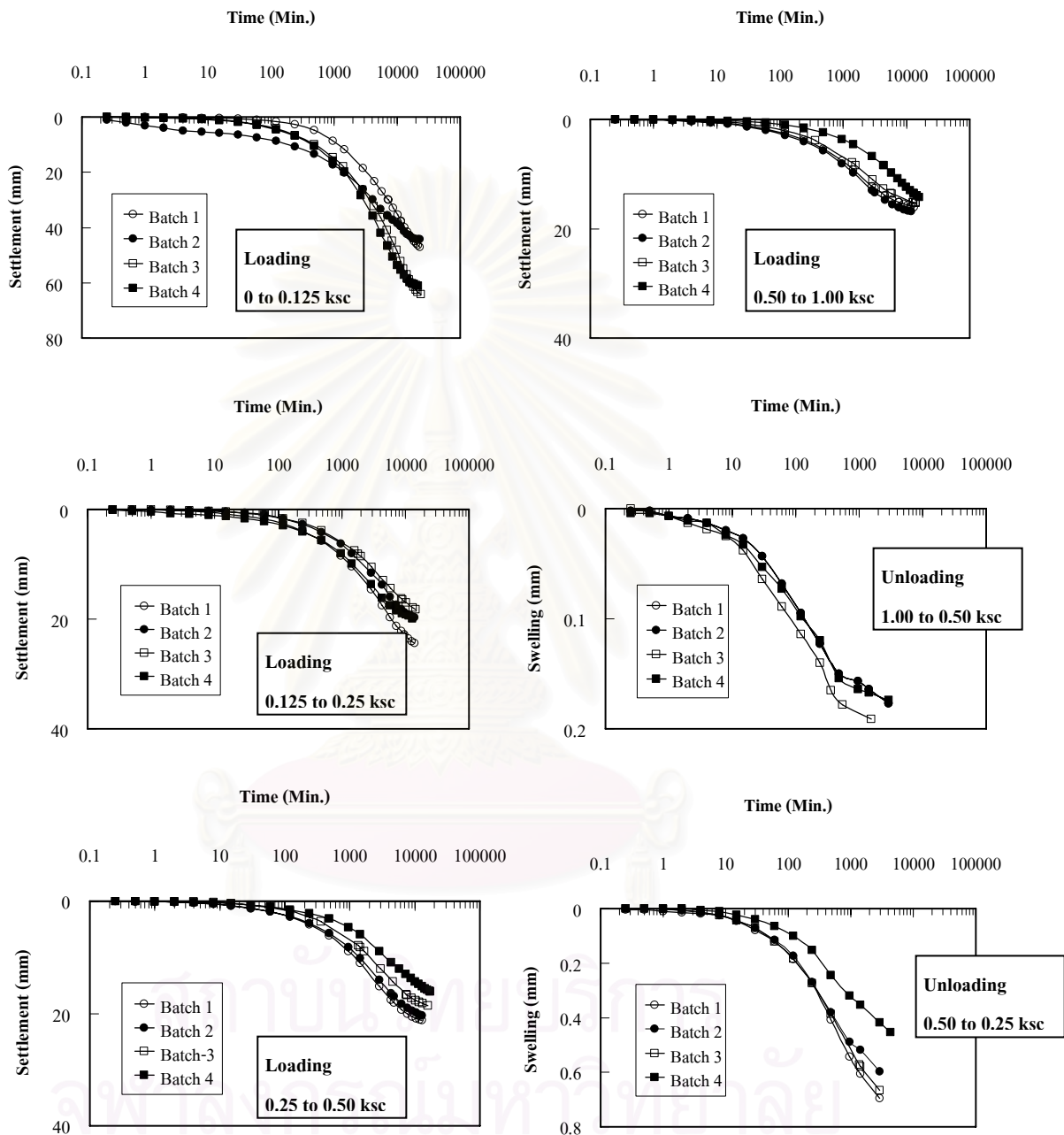
4.3 ผลทดสอบการอัดตัวคายนํ้าในสถานะดินเหลว

ผลการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าในสถานะดินเหลวจะประกอบด้วย พฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้า และสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนํ้าในแนวตั้ง (c_v) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 พฤติกรรมการอัดตัว (Compression Curve)

จากตารางที่ 4.3 จะพบว่าตัวอย่างดินเหนียวเหลว (Clay Slurry) มีปริมาณนํ้าในดินเริ่มต้นประมาณ 150 % หรือประมาณ 1.5 เท่าของค่า LL ค่าหน่วยนํ้าหนักรวม (γ) ประมาณ 1.33 t/m³ และอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (e_0) ประมาณ 4.04 หลังจากทำการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแล้ว ตัวอย่างทรุดตัวลงไปประมาณ 41 % มีหน่วยนํ้าหนักรวม (γ) ประมาณ 1.56 t/m³ และอัตราส่วนช่องว่าง (e) ประมาณ 1.95

ความสัมพันธ์ระหว่าง e -log σ'_v (Compression Curve) ในสถานะดินเหลวของแต่ละรุ่นผสมแสดงไว้ดังรูปในภาคผนวก ก ซึ่งสามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2 กราฟที่ได้จะแตกต่างกันเล็กน้อยและมีลักษณะที่เหมือนกันตลอดช่วงของการอัดตัวคายนํ้า (ยกเว้นในช่วง Unloading) โดยจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งภายในช่วง Virgin Compression นั่นคือความชันหรือดัชนีการอัดตัว (c_v) จะมีค่าลดลงเมื่อหน่วยแรงประสิทธิผลเพิ่มขึ้น การทรุดตัวในช่วงการเพิ่มนํ้าหนักแรกที่ 0.125 ksc จะมีค่ามากที่สุดประมาณ 60 % ใช้เวลาการอัดตัวคายนํ้ามากที่สุดประมาณ 16 วัน สำหรับการทรุดตัวในช่วงการเพิ่มนํ้าหนักถัดไปที่ 0.25 , 0.50 และ 1.00 ksc จะมีค่าที่ลดลงและใช้เวลาการอัดตัวคายนํ้าเฉลี่ยประมาณ 9 วัน



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและเวลา จากการทดสอบใน Batch ที่ 1 ถึง 4

4.3.2 สัมประสิทธิ์การอัดตัวในแนวดิ่ง (Vertical Coeff. of Consolidation, c_v)

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวในแนวดิ่ง ($c_{v(150)}$ จาก Log (t) Method และ $c_{v(190)}$ จาก Sqr (t) Method) กับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง (σ'_v) แสดงดังรูปใน **ภาคผนวก ก** ซึ่งพบว่าที่หน่วยแรงประสิทธิผลเริ่มต้น 0.125 ksc c_v จะมีค่าต่ำสุดและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้ว c_v จากวิธี Log (t) และ Sqr (t) มีค่าประมาณเท่ากัน

4.4 ผลการพัฒนาเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus

ก่อนที่จะเริ่มทำการศึกษาวิจัยได้นั้นจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องมือทดสอบขึ้นมาใหม่สำหรับทำการทดสอบโดยเฉพาะ ซึ่งเครื่องมือนี้จะเรียกว่า Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus (MCPT) โดยได้ทำการประดิษฐ์ขึ้นส่วน รวมทั้งการพัฒนาและแก้ไขตัดแปลงอุปกรณ์ของเครื่องมือ Triaxial Test ที่มีอยู่เดิมบางส่วน ให้เป็นเครื่องมือที่สามารถดำเนินการทดสอบได้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยที่ได้ตั้งไว้ (ดูแบบรายละเอียดและรูปเครื่องมือทดสอบที่ **ภาคผนวก ข และ ค**) สำหรับรายละเอียดต่างๆของเครื่องมือทดสอบจะประกอบด้วย

4.4.1 Triaxial Cell

Triaxial Cell เป็นเซลล์สำหรับครอบตัวอย่างดินที่จะทำการทดสอบ เมื่อนำมาสวมเข้ากับ Base Plate แล้วสามารถให้แรงดันกระทำกับตัวอย่างดินที่ตั้งอยู่ภายในได้โดยใช้ น้ำที่บรรจุอยู่จนเต็มเซลล์เป็นตัวกระทำ ตัวเซลล์นี้เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องมือ Triaxial Test เดิมที่มีอยู่ ซึ่งผลิตโดย ELE International Company มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 170 mm สูงประมาณ 350 mm ด้านบนมีรูขนาดเล็กอยู่ตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 19 mm สำหรับให้แกนกดน้ำหนัก (Piston Loading) เลื่อนขึ้น-ลงได้ เซลล์นี้จะเป็นเซลล์ใหญ่ที่สุดเท่าที่จะหาได้ ซึ่งสามารถที่จะบรรจุตัวอย่างดินได้ใหญ่ที่สุดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 130 mm

4.4.2 Top Cap

Top Cap เป็นแผ่นโลหะสำหรับใช้ถ่ายแรงจากแกนกดน้ำหนัก (Piston Loading) ลงสู่ตัวอย่างดินใน Triaxial Cell โดยจะนำแผ่นอลูมิเนียมมากลึงให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 130 mm หนา 25 mm ด้านบนตรงกลางแผ่นจะทำการเจาะรูทำเกลียวไว้ให้สามารถยึดติดกับแกนกดน้ำหนักได้

4.4.3 Base Plate

Base Plate เป็นแผ่นโลหะสำหรับใช้เป็นฐานรองรับ Triaxial Cell โดยจะนำแผ่นสแตนเลสมาทำให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 235 mm หนา 38 mm บริเวณด้านข้างฐานจะเจาะรูเกลียว 3 รู ซึ่งจะต่อเข้ากับ Cell Pressure Line จำนวน 1 รู และต่อเข้ากับ Back Pressure Line อีกจำนวน 2 รู (Top Cap และ Bottom Cap) สำหรับบริเวณกึ่งกลางฐานจะเจาะรูทะลุผ่านขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 mm เพื่อให้ Cone Penetrometer สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ นอกจากนี้ที่ด้านบนของฐานจะมีรูเกลียวสำหรับเชื่อมต่อกับ Bottom Cap อีกด้วย ซึ่งจะทำการเจาะร่องเป็นวงแหวน กว้าง 3 mm ลึก 2.5 mm เอาไว้สำหรับใส่ O-ring กันน้ำรั่ว

4.4.4 Bottom Cap

Bottom Cap เป็นฐานโลหะกลมทรงกระบอกสำหรับตั้งตัวอย่างดินที่จะทำการทดสอบ โดยจะนำพลาสติกสแตนเลสมาทำให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 130 mm ยาว 70 mm บริเวณตรงกลางจะเจาะรูเกลียวไว้สำหรับติดตั้ง Water Stopper และ LM Socket เพื่อบังคับให้ Cone Penetrometer สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้เฉพาะในแนวตั้งเท่านั้น

4.4.5 LM Socket และ Water Stopper

LM Socket เป็นชิ้นส่วนสำหรับใส่ Linear Bushing ซึ่งสามารถถอดเปลี่ยนได้เมื่อเกิดความเสียหายขึ้น ในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบนี้ Linear Bushing จะเป็นชิ้นส่วนที่มีปัญหามากที่สุด เนื่องจากต้องแช่อยู่ในน้ำเป็นเวลานานขณะทดสอบและจะต้องบังคับให้ Cone Penetrometer สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้เฉพาะในแนวตั้งเท่านั้น ทำให้ลูกปืนที่อยู่ภายในเป็นสนิมและเกิดการสึกหรอได้ง่ายจึงมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุที่เป็นสแตนเลสทั้งหมด Water Stopper เป็นชิ้นส่วนที่ใช้กด O-ring เข้ากับผิวของ Cone Penetrometer และ Bottom Cap เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำในตัวอย่างดิน (Back Pressure) รั่วออกไปภายนอกได้ นอกจากนี้ยังเป็นชิ้นส่วนที่ประกอบรวมเข้ากับ LM Socket อีกด้วย ซึ่งจะใช้วัสดุที่เป็นสแตนเลสเช่นเดียวกัน

4.4.6 Cone Penetrometer

Cone Penetrometer เป็นพลาสติกสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 mm ยาวประมาณ 230 mm ใช้สำหรับกดเข้าไปในตัวอย่างดินเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง q_c และ f_u กับค่าพารามิเตอร์

ต่างๆของดินเหนียว โดยจะมีปลายกรวยทำมุม 60° และติดตั้ง Porous Ceramic ที่ฐานกรวยเพื่อให้สามารถวัดแรงดันน้ำที่บริเวณปลายกรวยได้ โดยแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านไปตามรูเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm ที่กึ่งกลางของ Cone Penetrometer ไปยัง Pressure Transducer Housing ที่อยู่ด้านล่างสุด ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อกับ Pressure Transducer สำหรับใช้วัดแรงดันน้ำ และยังเป็นจุดเชื่อมต่อกับ Load Cell สำหรับใช้วัดแรงรวมด้านทานปลายกรวยอีกด้วย สำหรับเหตุผลที่ใช้ Cone Penetrometer ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 mm ก็คือเป็นขนาดที่เล็กที่สุดที่สามารถจะสร้างขึ้นมาได้นั่นเอง

4.4.7 Loading Machine

Loading Machine เป็นส่วนที่ใช้กด Cone Penetrometer เข้าไปในตัวอย่างดินตามอัตราคดที่ได้ตั้งไว้ ซึ่งจะนำเอาส่วนขับเคลื่อนของ Loading Frame เดิมที่มีอยู่แล้วมาใช้งาน

4.4.8 Porous Stone

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้จะใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 130 mm ซึ่งเป็นการทดสอบที่ใช้ขนาดตัวอย่างใหญ่กว่าปกติค่อนข้างมาก ในปัจจุบัน Porous Stone ที่มีการผลิตและวางจำหน่ายทั่วไปมีขนาดใหญ่ที่สุดสำหรับใช้กับตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm เท่านั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องผลิต Porous Stone ขึ้นมาโดยเฉพาะ สำหรับมาตรฐาน ASTM D 4767-95 ได้แนะนำเกี่ยวกับ Porous Stone ไว้ว่าจะต้องมีความแข็งเพียงพอและสามารถที่จะระบายน้ำได้ โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of Permeability, k) ประมาณ 1×10^{-4} cm/s สำหรับวิธีการผลิต Porous Stone จะมีดังต่อไปนี้

- เตรียมแม่แบบ Porous Stone ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่น Acrylic ใสเป็นแม่แบบ โดยนำไปกลึงให้ได้ขนาดตามต้องการ
- นำทรายหยาบมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และ 50 สำหรับทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้ำตะแกรงเบอร์ 50 จะนำมาทำ Porous Stone ต่อไป
- นำทรายที่ร้อนได้มาล้างทำความสะอาดและตากให้แห้ง
- เตรียมทรายให้เพียงพอสำหรับทำ Porous Stone และทำการชั่งน้ำหนัก
- นำ Epoxy ชนิดแห้งช้า (60 นาทีขึ้นไป) ใสในภาชนะ ชั่งน้ำหนักของ Epoxy ซึ่งจะใช้ประมาณ 10 % ของน้ำหนักทรายหยาบ

- ผสม Epoxy ให้เข้ากันก่อนและค่อยๆ โรยทรายผสมลงไปด้วยทีละน้อยจนหมด ซึ่งจะต้องผสมให้แล้วเสร็จก่อนที่ Epoxy จะเริ่มแข็งตัว
- เททรายผสม Epoxy ลงในแม่แบบที่เตรียมไว้ ซึ่งได้ทาน้ำมันที่ผิวแม่แบบไว้แล้ว เพื่อป้องกันการยึดเกาะตัวของ Epoxy ตกแต่งผิวหน้าให้เรียบก่อนที่จะนำแผ่น Acrylic ใสสำหรับใช้กดทับมาวางที่ผิวหน้า
- ใช้น้ำหนักประมาณ 20 kg กดทับเอาไว้และรอจนกว่า Epoxy จะแข็งตัว
- คั้นแผ่น Porous Stone ออกจากแม่แบบและทำความสะอาดก่อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป

4.4.9 Rubber Membrane

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้จะใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 130 mm สูง 100 mm ซึ่งเป็นการทดสอบที่ใช้ขนาดตัวอย่างใหญ่กว่าปกติค่อนข้างมาก ในปัจจุบัน Rubber Membrane ที่มีการผลิตและวางจำหน่ายทั่วไปที่มีขนาดใหญ่ที่สุดสำหรับใช้กับตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm สูง 200 mm เท่านั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องผลิต Rubber Membrane ขึ้นมาโดยเฉพาะ สำหรับมาตรฐาน ASTM D 4767-95 ได้กำหนดให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Membrane จะต้องอยู่ระหว่าง 90-95 % ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่างดิน และจะต้องมีความหนาไม่เกินกว่า 1 % ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่างดิน ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้ Membrane บีบรัดตัวอย่างมากเกินไป สำหรับวิธีการผลิต Rubber Membrane จะมีดังต่อไปนี้

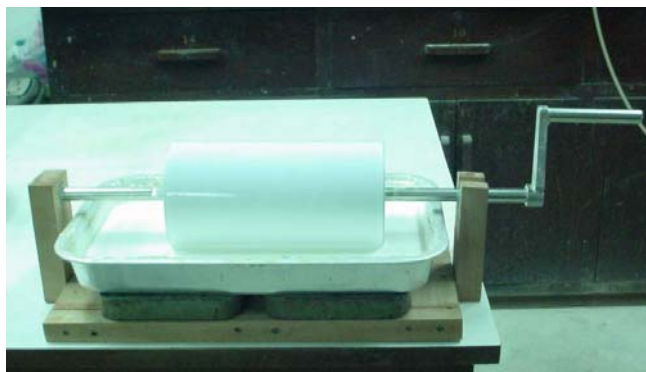
- เริ่มจากการนำ Latex สำเร็จรูป ซึ่งมีสัดส่วนผสมตามคำแนะนำของโรงงานผู้ผลิต มาเทลงในถาดที่ตั้งอยู่บนฐานรองรับแม่แบบ
- จากนั้นนำแม่แบบที่เตรียมไว้ตามรูปที่ 4.3 ซึ่งจะนำลูมิเนียมมากลึงให้ได้ขนาดและความสูงตามต้องการจุ่มลงใน Latex โดยพาดก้านสแตนเลสไว้กับฐานดังแสดงในรูปที่ 4.4 สาเหตุที่เลือกใช้อลูมิเนียมเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและสะดวกในการเคลื่อนย้าย
- หลังจากนั้นค่อยๆ หมุนแม่แบบช้าๆ เพื่อให้ Latex เกาะที่ผิวจนทั่ว ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องระวังไม่ให้มีฟองอากาศที่ปะปนอยู่ใน Latex ไปเกาะอยู่ที่ผิวแม่แบบ เนื่องจากว่าฟองอากาศเหล่านี้จะทำให้ความหนาของ Rubber Membrane บริเวณนั้นบางมากกว่าปกติ ซึ่งจะทำให้ Rubber Membrane รั่วได้ง่ายขณะทำการทดสอบ

- ยกแม่แบบขึ้นมาตากให้แห้งดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง การจุ่มและการตากแม่แบบนี้จะทำเป็นเลขคู่ เช่น 4 , 6 หรือ 8 ครั้ง และในขณะที่ตากแม่แบบจะต้องทำการสลับทิศทางหัวท้ายของแม่แบบด้วย เพื่อให้ Rubber Membrane ที่ได้มีความหนาอย่างสม่ำเสมอ
- นำแม่แบบมาจุ่มต่อใน Latex และทำซ้ำขั้นตอนไปเรื่อยๆจนได้ความหนาของ Rubber Membrane ตามที่ต้องการ
- นำ Rubber Membrane ที่ผลิตได้ออกจากแม่แบบ โดยใช้แปรงทาให้ทั่วและค่อยๆ คึง Membrane ออกมาช้าๆ ตัดแต่งความยาวตามต้องการ
- ตรวจสอบวัดความหนา Rubber Membrane ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์และตรวจสอบรอยร้าวที่อาจเกิดขึ้นด้วยตาเปล่า ในกรณีที่มีรอยร้าวเกิดขึ้นจะต้องทำการคัดออกและผลิตขึ้นมาใหม่ทดแทน
- นำเก็บเข้าถุงพลาสติกและปิดถุงให้มิดชิดเพื่อมิให้ Rubber Membrane สัมผัสกับอากาศ ซึ่งจะทำให้เสื่อมคุณภาพได้เร็ว

Rubber Membrane ที่ผลิตขึ้นมาใช้ในงานวิจัยนี้จะจุ่ม Latex ทั้งสิ้น 6 ครั้ง ซึ่งมีความหนา 0.45 ± 0.05 mm และมีคุณภาพเพียงพอสำหรับนำมาใช้ทดสอบ ตัวอย่าง Rubber Membrane ที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.3 แม่แบบอลูมิเนียมที่ใช้ในการผลิต Rubber Membrane



รูปที่ 4.4 การจุ่มแม่แบบลงในถาดที่ใส่ Latex



รูปที่ 4.5 การตากแม่แบบที่เคลือบด้วย Latex ให้แห้ง



รูปที่ 4.6 ตัวอย่าง Rubber Membrane ที่ผลิตขึ้นมาได้

4.4.10 O-ring

O-ring เป็นเส้นยางใช้สำหรับป้องกันการรั่วซึมของน้ำ ซึ่ง O-ring ที่ใช้ในการทดสอบนี้จะ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหน้าตัด 3 mm สำหรับ O-ring ที่ใช้รัด Rubber Membrane เข้ากับ Top Cap นั้นจะใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงระหว่าง 75-85 % ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Top Cap เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำสามารถรั่วซึมได้

4.4.11 Trimming Frame

Trimming Frame เป็นอุปกรณ์อีกชิ้นหนึ่งที่พัฒนาขึ้นมาโดยเฉพาะ สำหรับใช้ในการยึด ตัวอย่างดินเพื่อให้สามารถทำการตัดแต่งพื้นผิวได้ตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ต้องการดังแสดงใน รูปที่ 4.7 ซึ่งส่วนของ Frame จะใช้แผ่นเหล็กมาตัดและเชื่อมประกอบเข้าด้วยกัน แต่สำหรับ ชิ้นส่วนที่ใช้ยึดตัวอย่างดินจะใช้แผ่นสแตนเลสนำมาทำลึงให้ได้ขนาดตามที่ต้องการแทน



รูปที่ 4.7 Trimming Frame

4.4.12 Split Former

Split Former เป็นอุปกรณ์อีกชิ้นหนึ่งที่พัฒนาขึ้นมาโดยเฉพาะ สำหรับใช้เป็นแบบในการ ตัดแบ่งตัวอย่างดินเพื่อให้ได้ความสูงตามต้องการดังแสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากอุปกรณ์ชิ้นนี้ควร

จะมีน้ำหนักไม่มากและไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงมาก จึงเลือกใช้อลูมิเนียมมากลึงให้ได้ขนาดและรูปทรงตามต้องการ

4.4.13 อุปกรณ์เบ่ง O-ring และ Rubber Membrane

อุปกรณ์เบ่งเส้นยาง O-ring และ Rubber Membrane เป็นอุปกรณ์ชิ้นสุดท้ายที่พัฒนาขึ้นมา โดยเฉพาะ สำหรับใช้เป็นแบบในการเบ่ง O-ring หรือ Rubber Membrane ให้สามารถรอบผ่านตัวอย่างลงไปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8 สำหรับอุปกรณ์เบ่ง O-ring นั้นจะใช้ท่อสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในใหญ่กว่าตัวอย่างเล็กน้อย มาทำตัดแต่งและขัดผิวตามรูป ส่วนอุปกรณ์ที่เบ่ง Rubber Membrane จะใช้ท่อพีวีซีที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในใหญ่กว่าตัวอย่างเล็กน้อยเช่นเดียวกัน มาทำการตัดแต่งและขัดผิวให้เรียบเพื่อป้องกันไม่ให้ Rubber Membrane ที่นำมาสวมใส่เกิดการฉีกขาดหรือเป็นรูรั่ว นอกจากนี้จะต้องเจาะรูและติดตั้งข้อต่อพร้อมกับสายยางดูดอากาศที่ตัวท่อพีวีซีอีกด้วย



รูปที่ 4.8 Split Former , O-ring , อุปกรณ์เบ่ง O-ring และ Rubber Membrane

4.5 ผลการทดสอบแรงอัดสามแกน

การทดสอบ Triaxial Test ในดินเหนียวสร้างใหม่แบบ CIU จำนวน 2 ตัวอย่าง (TEST-1 และ TEST-2) ที่ σ'_{vc} เท่ากับ 0.5 ksc และมีค่า OCR เท่ากับ 2 สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ซึ่งจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\sigma_1 - \sigma_3$ กับ $\% \epsilon_v$ พบว่าจะมี

ความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Δu กับ $\% \epsilon_v$ พบว่าจะมีความใกล้เคียงกันมาก กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (c_u) ของตัวอย่างที่ TEST-1 จะมีค่าเท่ากับ 0.24 ksc (2.4 t/m²) และตัวอย่างที่ TEST-2 จะมีค่าเท่ากับ 0.25 ksc (2.5 t/m²) โดยที่ค่าเฉลี่ยของ c_u จะมีค่าเท่ากับ 0.25 ksc (2.5 t/m²) จากผลการทดสอบที่ได้สามารถนำไปแสดงเป็นทางเดินหน่วยแรง (Stress Path) ประสิทธิภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.11

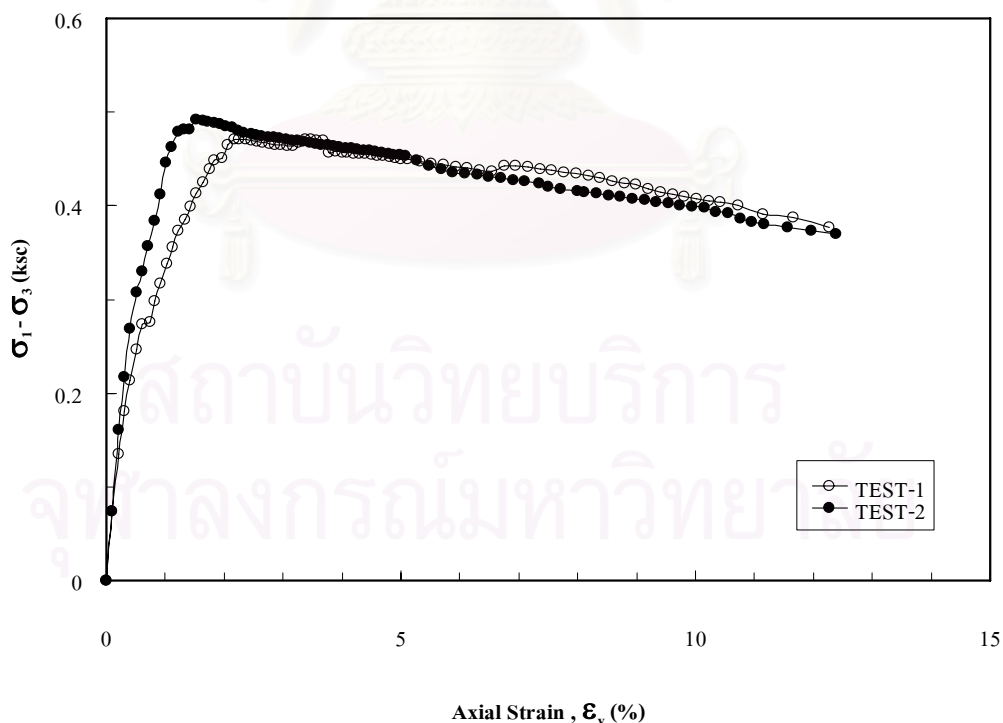
ค่า c_u ที่ได้จากการทดสอบ Triaxial Test (\overline{CIU}) นี้จะถูกนำไปตรวจสอบความถูกต้อง โดยพิจารณาเปรียบเทียบพารามิเตอร์ S ที่คำนวณได้จากผลการทดสอบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่าจะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สำหรับพารามิเตอร์ S สามารถหาได้จากสมการที่ 4.1

$$\frac{c_u}{\sigma'_{vc}} = S(OCR)^m \tag{4.1}$$

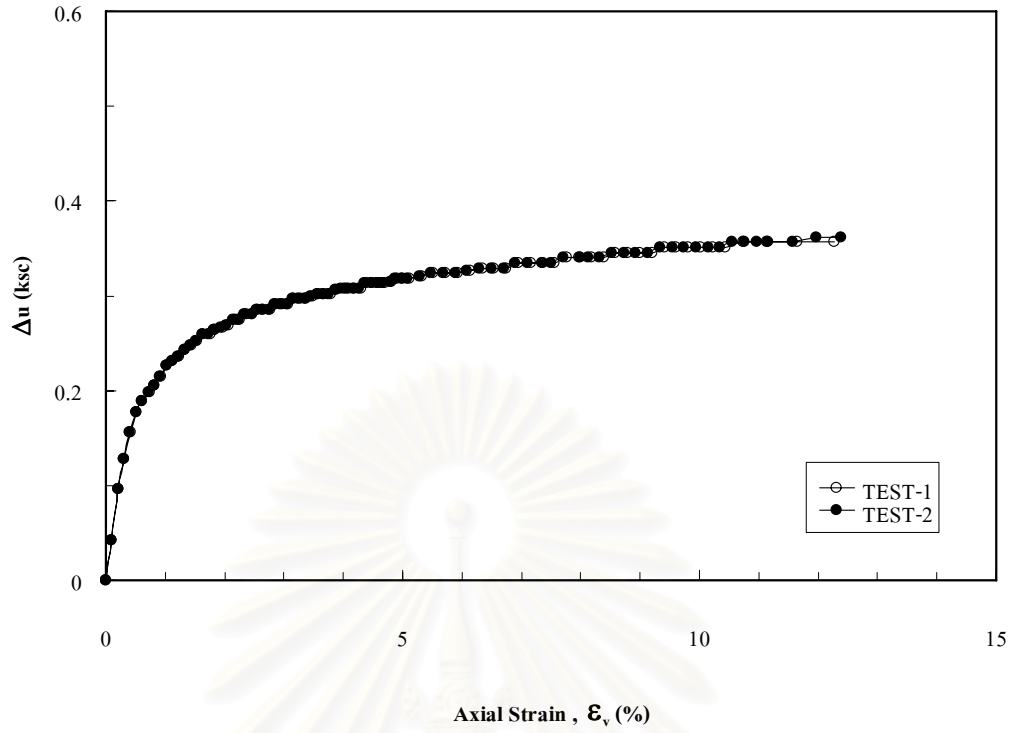
โดยที่

$$m \approx 0.8$$

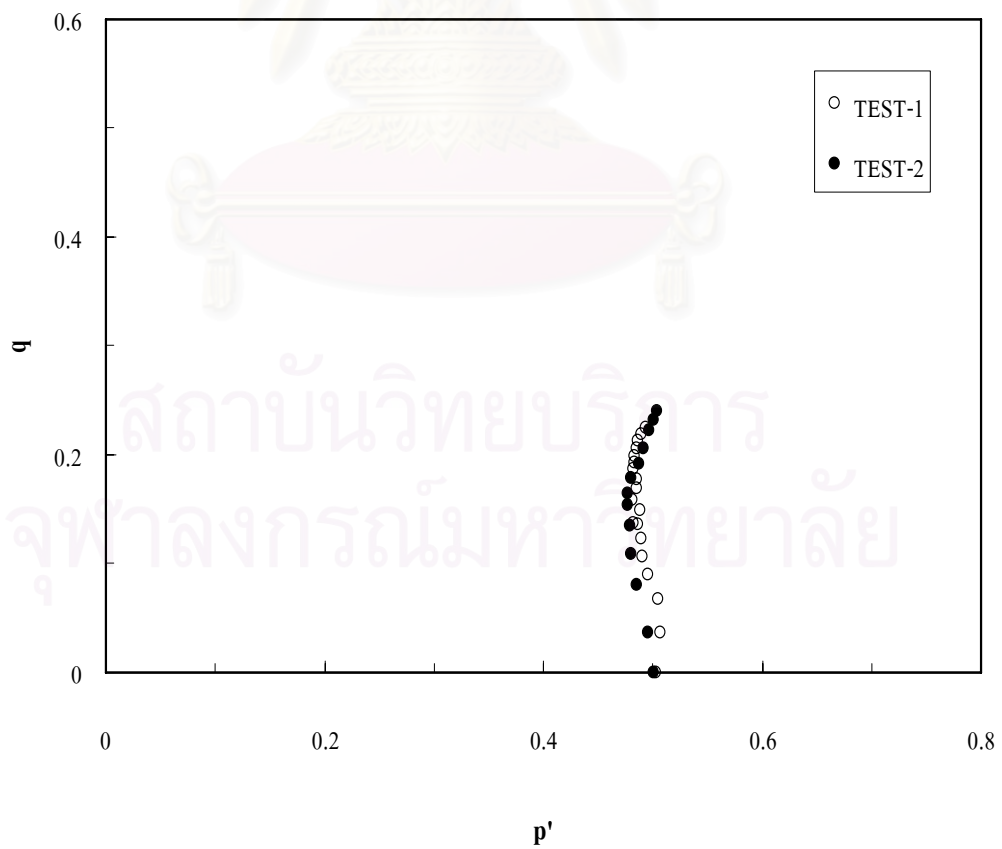
$$S = c_u / \sigma'_{vc} \text{ (สำหรับ NC Clay)}$$



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\sigma_1 - \sigma_3$ กับ $\% \epsilon_v$ ของดินเหนียวสร้างใหม่ ($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, $OCR = 2$)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔU กับ % ϵ_v ของดินเหนียวสร้างใหม่
($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, OCR = 2)



รูปที่ 4.11 ทางเดินหน่วยแรงประสิทธิผลของดินเหนียวสร้างใหม่ ($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, OCR = 2)

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ S ที่คำนวณได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

$$(\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc} , \text{OCR} = 2)$$

Test No.	c_u (ksc)	c_u/σ'_{vc}	S (Lab)	S (Seah and Lai, 2003)
1	0.24	0.48	0.28	0.265
2	0.25	0.50	0.29	

4.6 ผลการทดสอบการกดกรวยขนาดเล็ก (MCPT)

4.6.1 ผลการสอบเทียบเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial

Apparatus

การสอบเทียบ (Calibration) เครื่องมือทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแรงเสียดทานระหว่าง O-ring กับ Cone Penetrometer ซึ่งเกิดจากการบีบรัดของ O-ring ที่สวมใส่เข้าไปใน Cone Penetrometer เพื่อป้องกันแรงดันน้ำในตัวอย่างคิน (Back Pressure) รั่วซึมออกมา นอกจากนี้ยังเป็นการตรวจสอบการวัดแรงดันน้ำที่ปลายกรวยอีกด้วย สำหรับการสอบเทียบเครื่องมือนี้จะทำทุกครั้งหลังจากการทดสอบ MCPT เสร็จสิ้นที่ Cone Position จุดเดียวกันเพื่อให้สามารถนำแรงเสียดทานไปหักลบออกจากแรงรวมในแต่ละจุดได้

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการที่ 4.2 โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับ Cone Position ของตัวอย่างที่ 1 (TEST-1) และตัวอย่างที่ 2 (TEST-2) จะแสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ TEST-1 จะมีค่าประมาณ 0.47 kg และใน TEST-2 จะมีค่าประมาณ 0.27 kg ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่า TEST -1 เล็กน้อย สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมต้านทานปลายกรวยและ $\sigma_c A_c$ กับ Cone Position แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

$$f = F - \sigma_c A_c \quad (4.2)$$

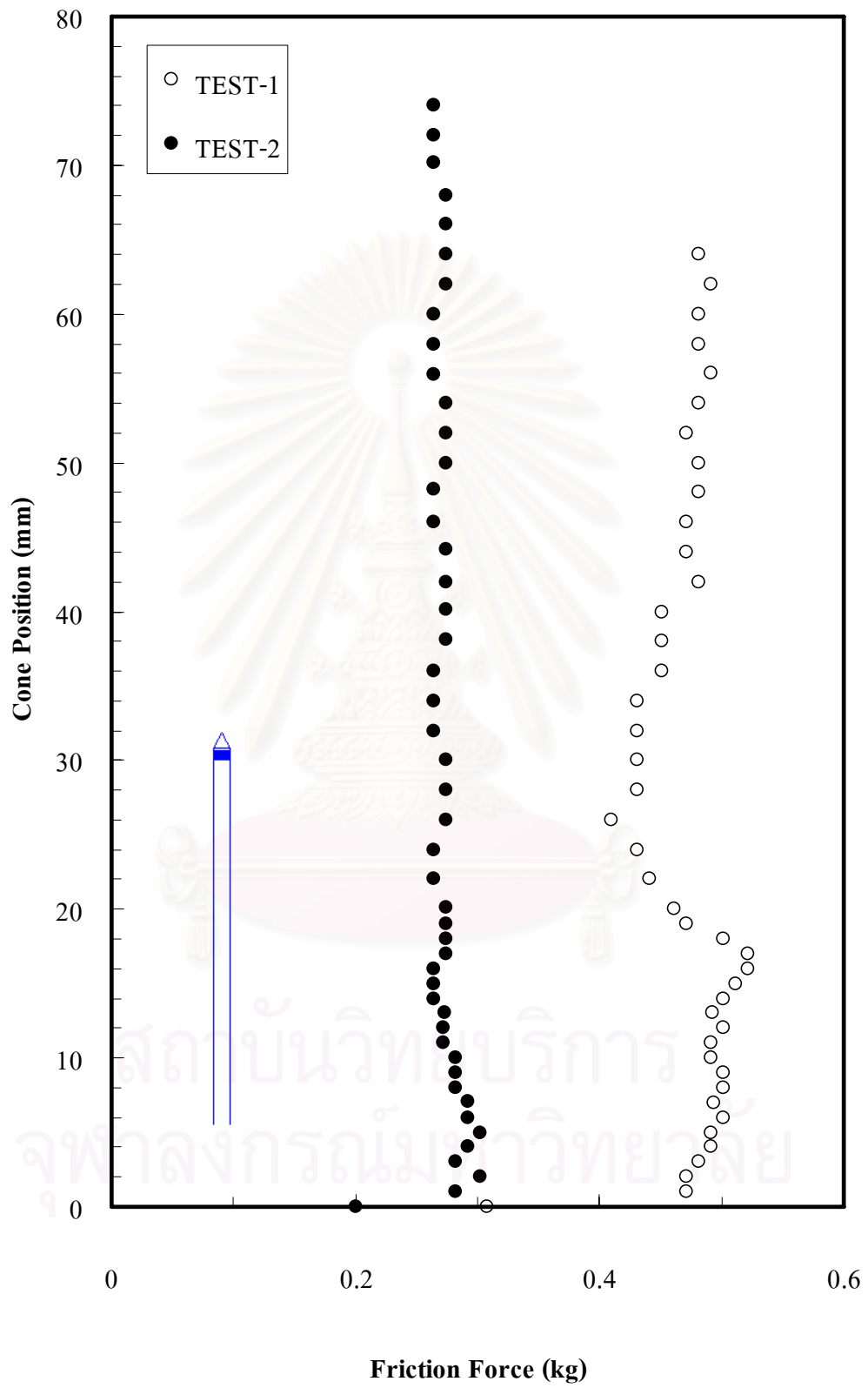
โดยที่

f = แรงเสียดทานที่เกิดขึ้น

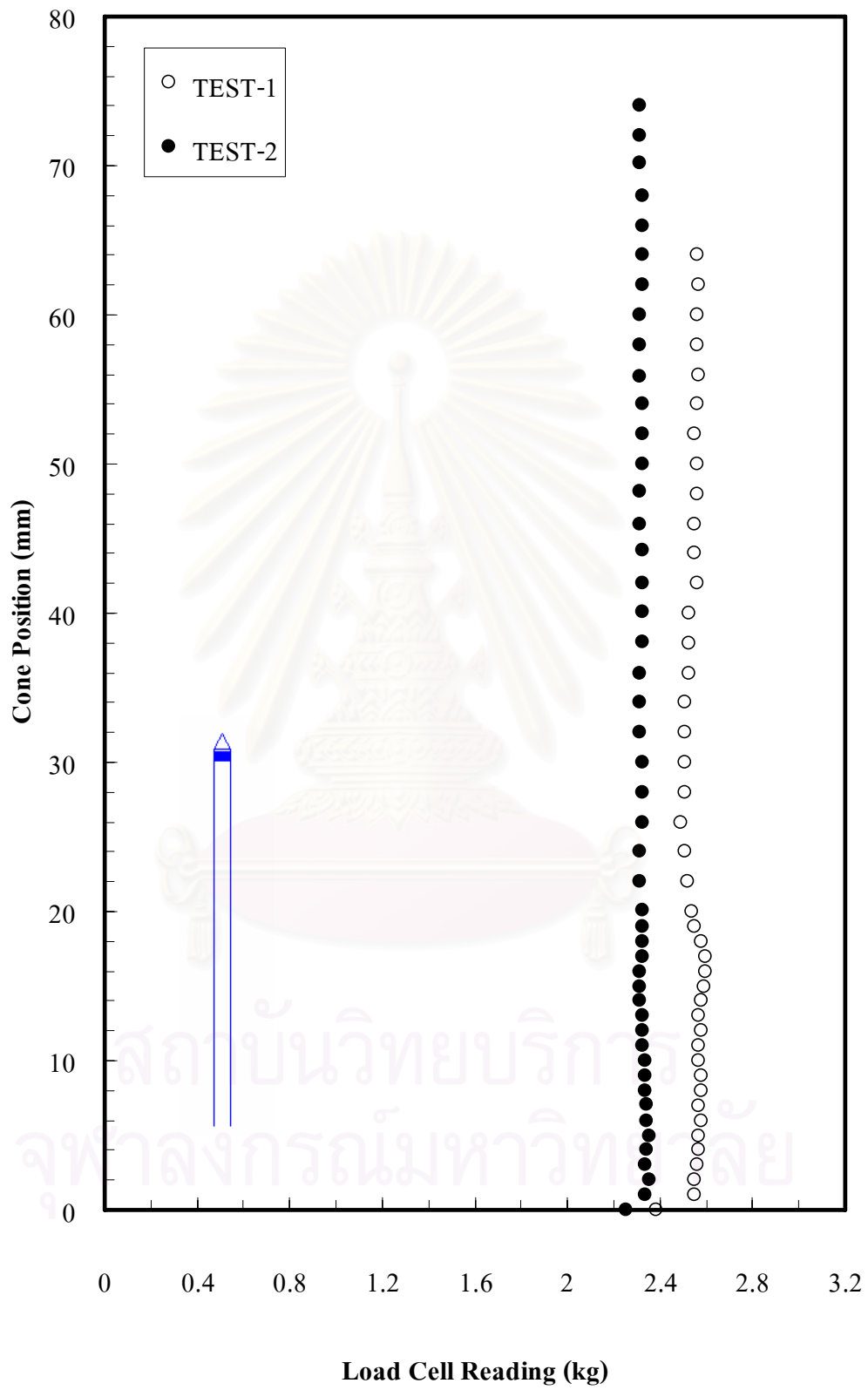
F = แรงรวมต้านทานปลายกรวย (วัดค่าได้จาก Load Cell)

σ_c = Cell Pressure

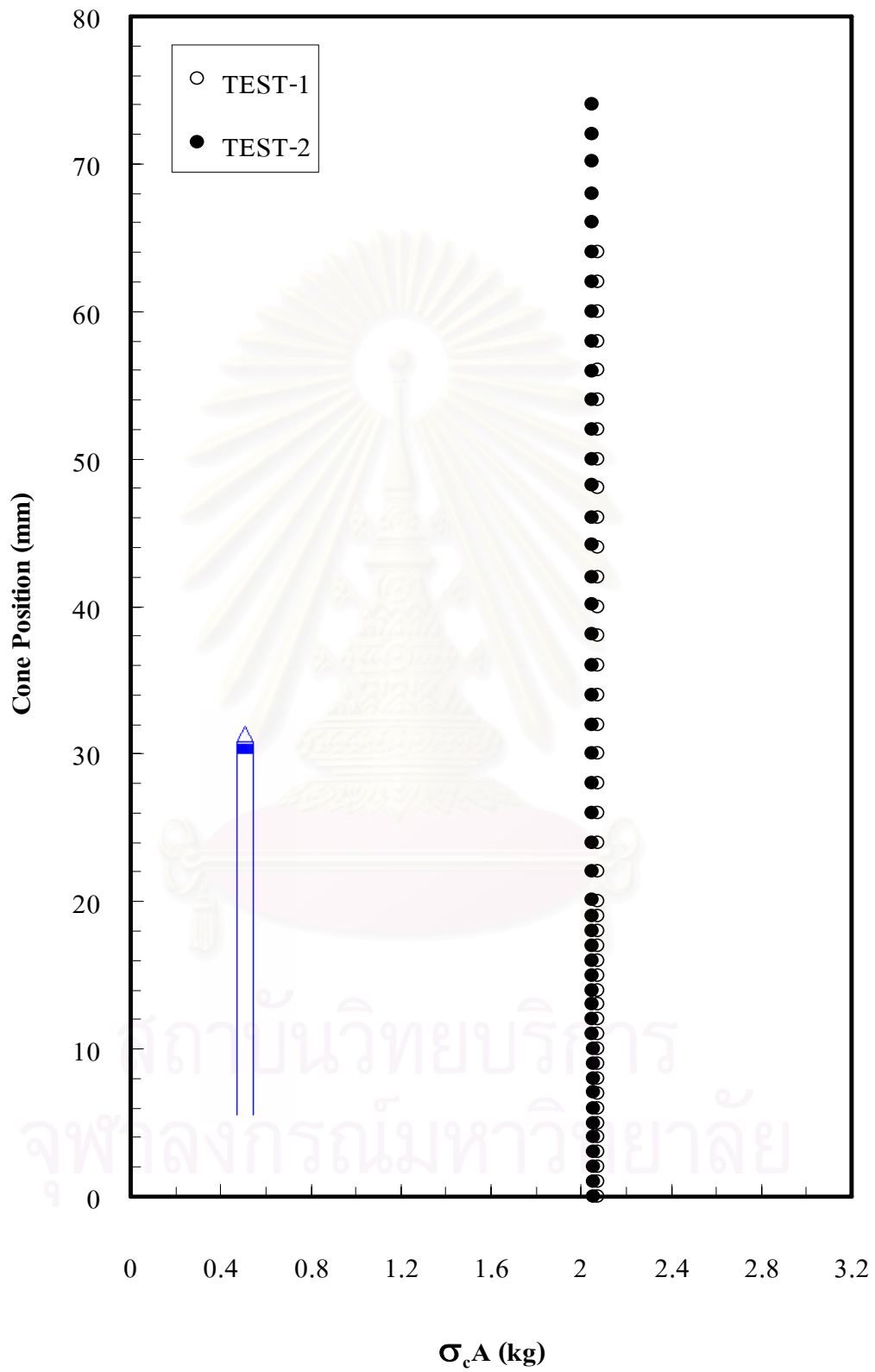
A_c = พื้นที่หน้าตัดปลายกรวย



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับ Cone Position



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมต้านทานปลายกรวยกับ Cone Position



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{cA} กับ Cone Position

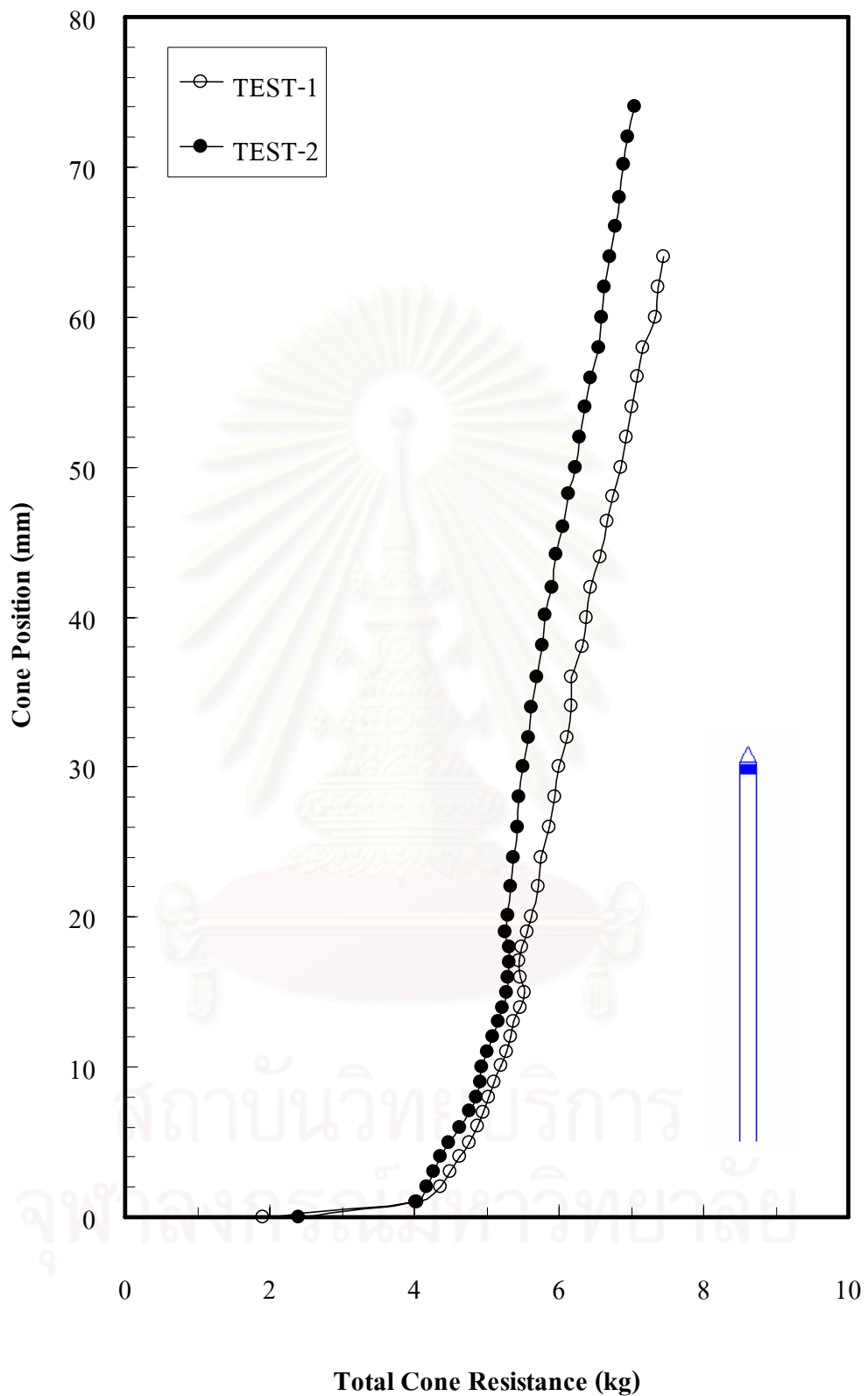
4.6.2 ผลการทดสอบ MCPT ในดินเหนียวสร้างใหม่

การทดสอบ MCPT ในสภาพแบบ \overline{CIU} ของดินเหนียวสร้างใหม่ จำนวน 2 ตัวอย่าง (TEST-1 และ TEST-2) ที่ σ'_{vc} เท่ากับ 0.5 ksc และ OCR เท่ากับ 2 โดยใช้อัตรากดที่ 0.156 mm/Min. สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ถึง 4.18

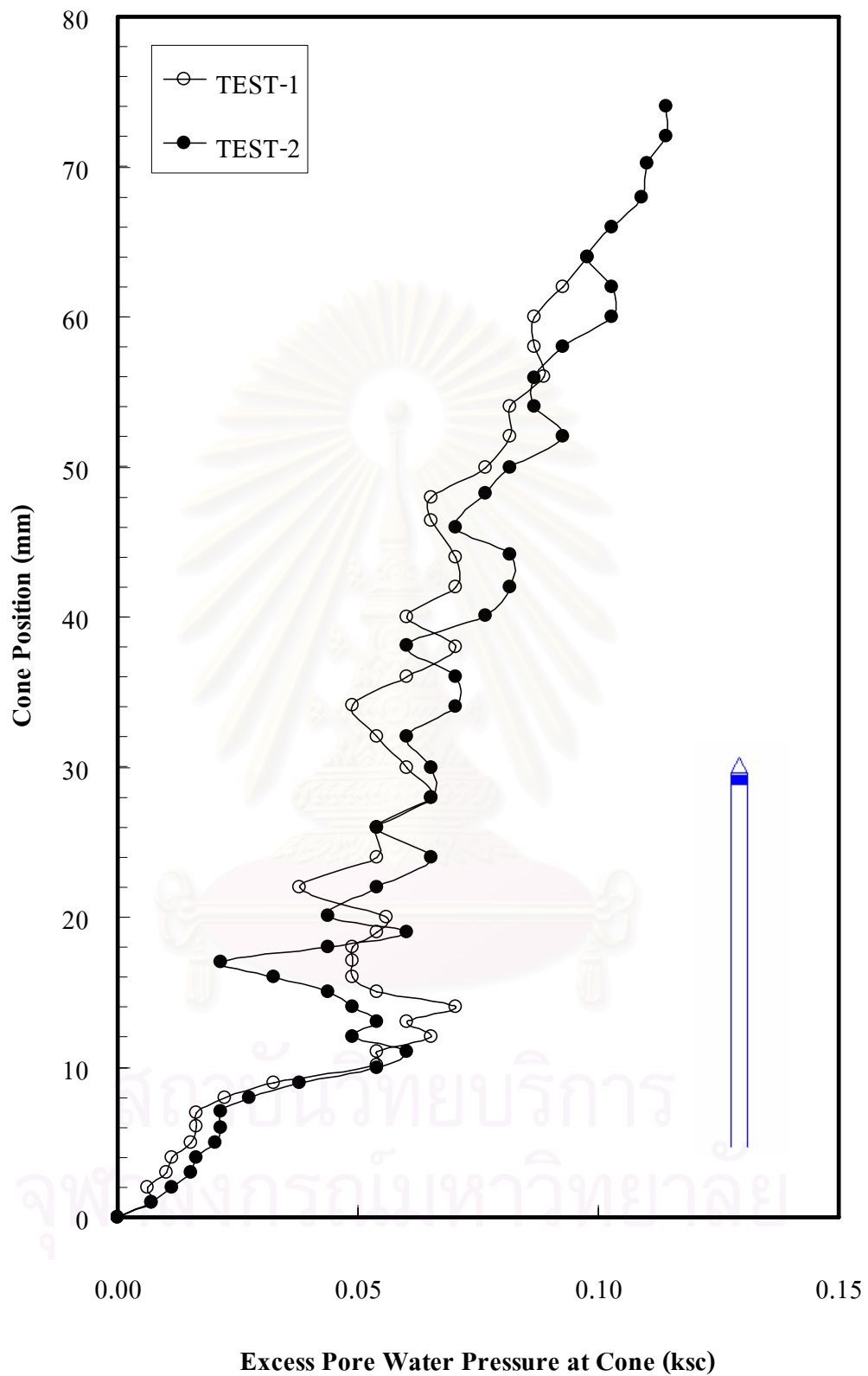
ในรูปที่ 4.15 จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมต้านทานปลายกรวย (เท่ากับ Q_c+Q_s) กับ Cone Position ซึ่งพบว่าผลการทดสอบทั้งสองจะมีความใกล้เคียงกัน สำหรับความสัมพันธ์ดังกล่าว ในขณะที่กด Cone Penetrometer เข้าไปในตัวอย่างดินจะมีความแตกต่างกันอยู่ 2 แบบกล่าวคือ พฤติกรรมแรกในช่วงความลึกเริ่มต้น 0-20 mm ความสัมพันธ์นี้จะไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากผลกระทบขอบเขต (Boundary Effect) ที่เกิดขึ้น ซึ่งแตกต่างกับพฤติกรรมที่สองในช่วงความลึก 20-70 mm ที่ความสัมพันธ์นี้จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงโดยจะมีค่า Q_c ที่คงที่ในขณะที่ Q_s จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกของ Cone Penetrometer ค่า Q_c ในผลการศึกษาวิจัยนี้จะไม่นำมาพิจารณาปรับแก้เป็นค่า Q_T เนื่องจากเครื่องมือทดสอบนี้จะติดตั้ง Load Cell ไว้ที่ปลายของ Cone Penetrometer เพียงจุดเดียวเท่านั้น ทำให้ผลกระทบของแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นบริเวณปลายกรวยจะถูกนำมารวมเข้ากับแรงรวมต้านทานปลายกรวยที่วัดได้แล้ว ซึ่งแตกต่างกับเครื่องมือทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยอื่นๆ ที่จะมี Load Cell ติดตั้งอยู่ 2 จุด ได้แก่ ที่บริเวณปลายกรวย (วัดเฉพาะค่า Q_c) และที่บริเวณปลาย Cone Penetrometer (วัดค่าแรงรวมเท่ากับ Q_c+Q_s) จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับแก้ค่า Q_c เป็นค่า Q_T เพื่อรวมผลกระทบของแรงดันน้ำส่วนเกินเข้ามาพิจารณาด้วย

ในรูปที่ 4.16 จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) ที่เกิดขึ้นบริเวณปลายกรวยกับ Cone Position ซึ่งพบว่าค่า Δu ที่ได้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความลึกของ Cone Penetrometer ที่กดเข้าไปในตัวอย่างดิน ยกเว้นในช่วงความลึกเริ่มต้น 0-20 mm ที่ความสัมพันธ์นี้จะค่อนข้างแปรปรวนเนื่องจากผลของ Boundary Effect สำหรับ Δu ที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าน้อยมากประมาณ 0.1 ksc ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้อัตรากดที่ช้ามากๆ

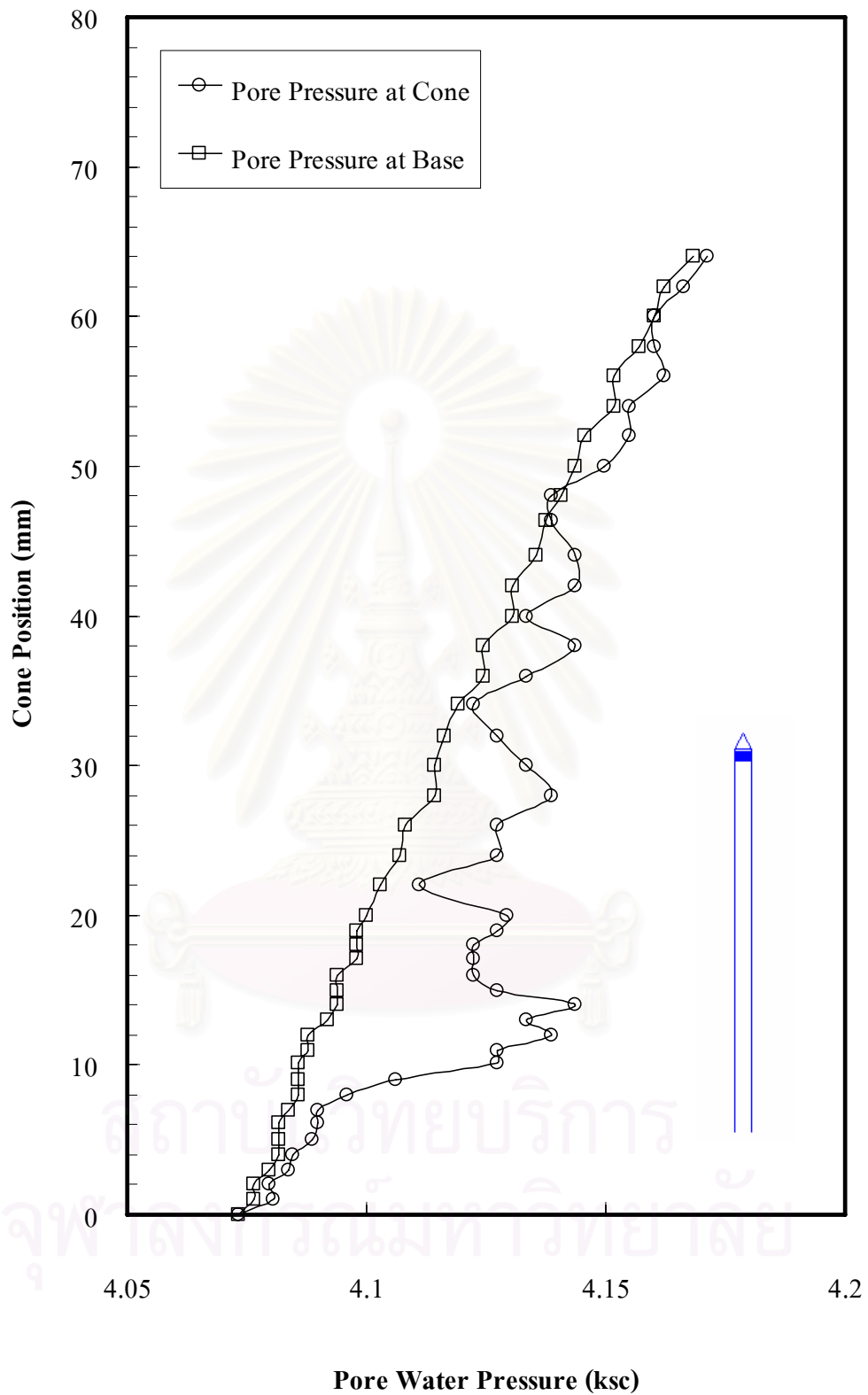
ในรูปที่ 4.17 และ 4.18 จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำในตัวอย่างดินที่วัดได้จาก Pressure Transducer ที่ตำแหน่งต่างกับกับ Cone Position สำหรับตำแหน่งของ Pressure Transducer ที่ใช้วัดค่า ได้แก่ ที่ปลายกรวย และที่ฐานตั้งตัวอย่างดิน ซึ่งพบว่าแรงดันน้ำที่ฐานตั้งตัวอย่างดินจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความลึกของ Cone Penetrometer ส่วนแรงดันน้ำที่ปลายกรวยนั้นถึงแม้ว่าจะไม่เป็นเส้นตรงแต่ก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกัน ยกเว้นในช่วงความลึกเริ่มต้นที่ได้รับผลของ Boundary Effect



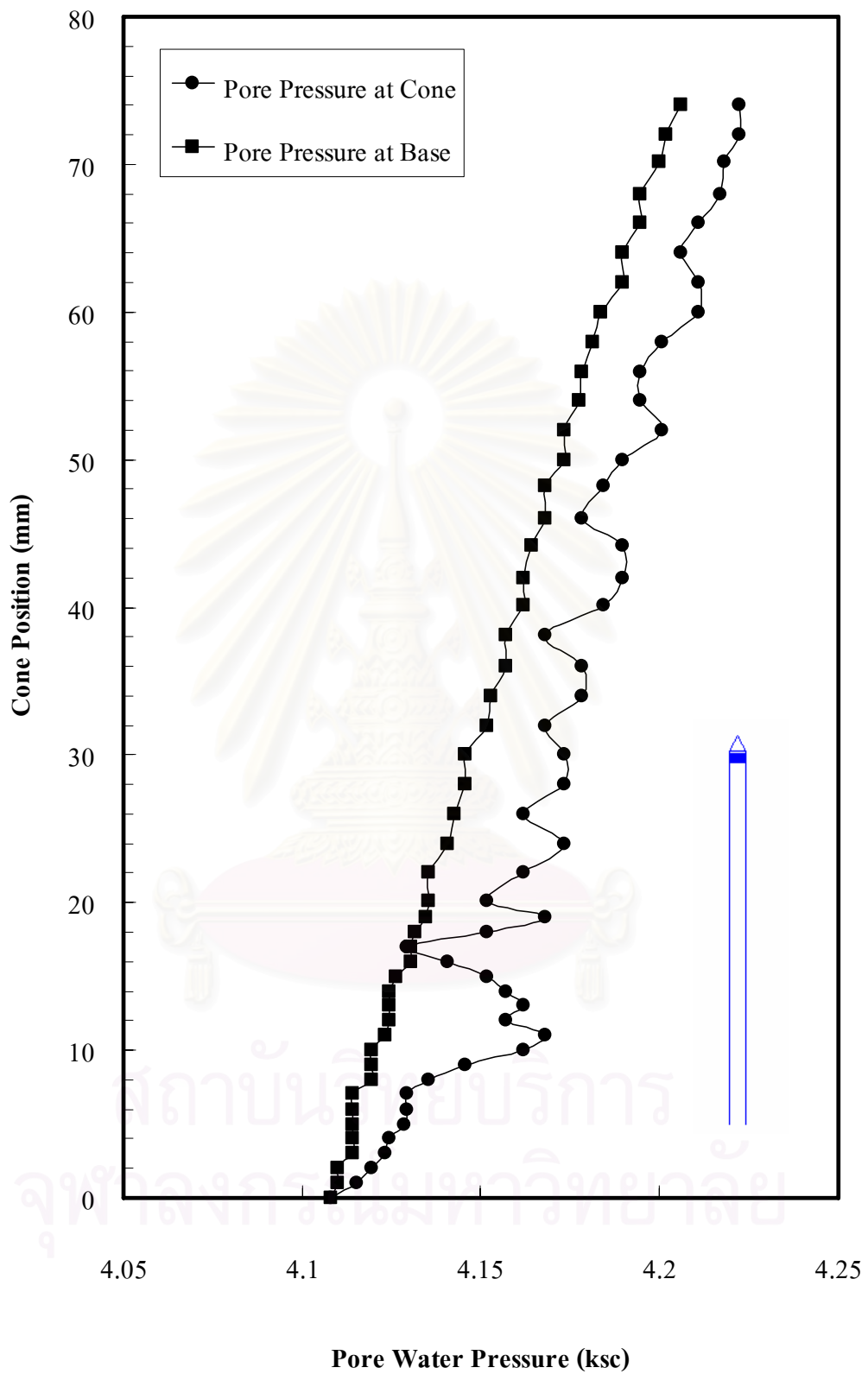
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมต้านทานปลายกรวยกับ Cone Position ของดินเหนียวสร้างใหม่ ($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, $\text{OCR} = 2$)



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Δu กับ Cone Position ของดินเหนียวสร้างใหม่
 ($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, $\text{OCR} = 2$)



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำที่วัดได้ในตำแหน่งที่ต่างกับ Cone Position ของตัวอย่างที่ 1 (TEST-1)



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำที่วัดได้ในตำแหน่งที่ต่างกัน
กับ Cone Position ของตัวอย่างที่ 2 (TEST-2)

4.6.3 การคำนวณหาค่า q_c และ f_s จากผลการทดสอบ MCPT

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงรวมด้านทานปลายกรวยกับ Cone Position ในรูปที่ 4.15 สามารถนำมาคำนวณหาค่า q_c และ f_s ได้ โดยที่ข้อมูลในช่วงความลึก 0-20 mm ซึ่งมีผลของ Boundary Effect เข้ามาเกี่ยวข้องและข้อมูลที่ช่วงความลึกมากกว่า 60 mm ขึ้นไปจะไม่นำมาพิจารณา กราฟความสัมพันธ์ใหม่ที่ได้นี้จะพิจารณาเฉพาะข้อมูลที่เป็นเส้นตรงในช่วงความลึกตั้งแต่ 20-60 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.19 สำหรับผลการทดสอบ MCPT ทั้ง 2 ตัวอย่างรวมทั้งการคำนวณหาค่า q_c และ f_s จะแสดงไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบ MCPT ($\sigma'_{vc} = 0.5 \text{ ksc}$, $\text{OCR} = 2$)

Testing No.	Q_c (kg)	Q_s (kg/40 mm)	q_c (ksc)	f_s (ksc)	f_s/q_c	FR (%)
1	4.75	1.67	9.50	0.17	0.0179	1.79
2	4.51	1.36	9.02	0.14	0.0155	1.55
Average	4.63	1.52	9.26	0.16	0.0167	1.67

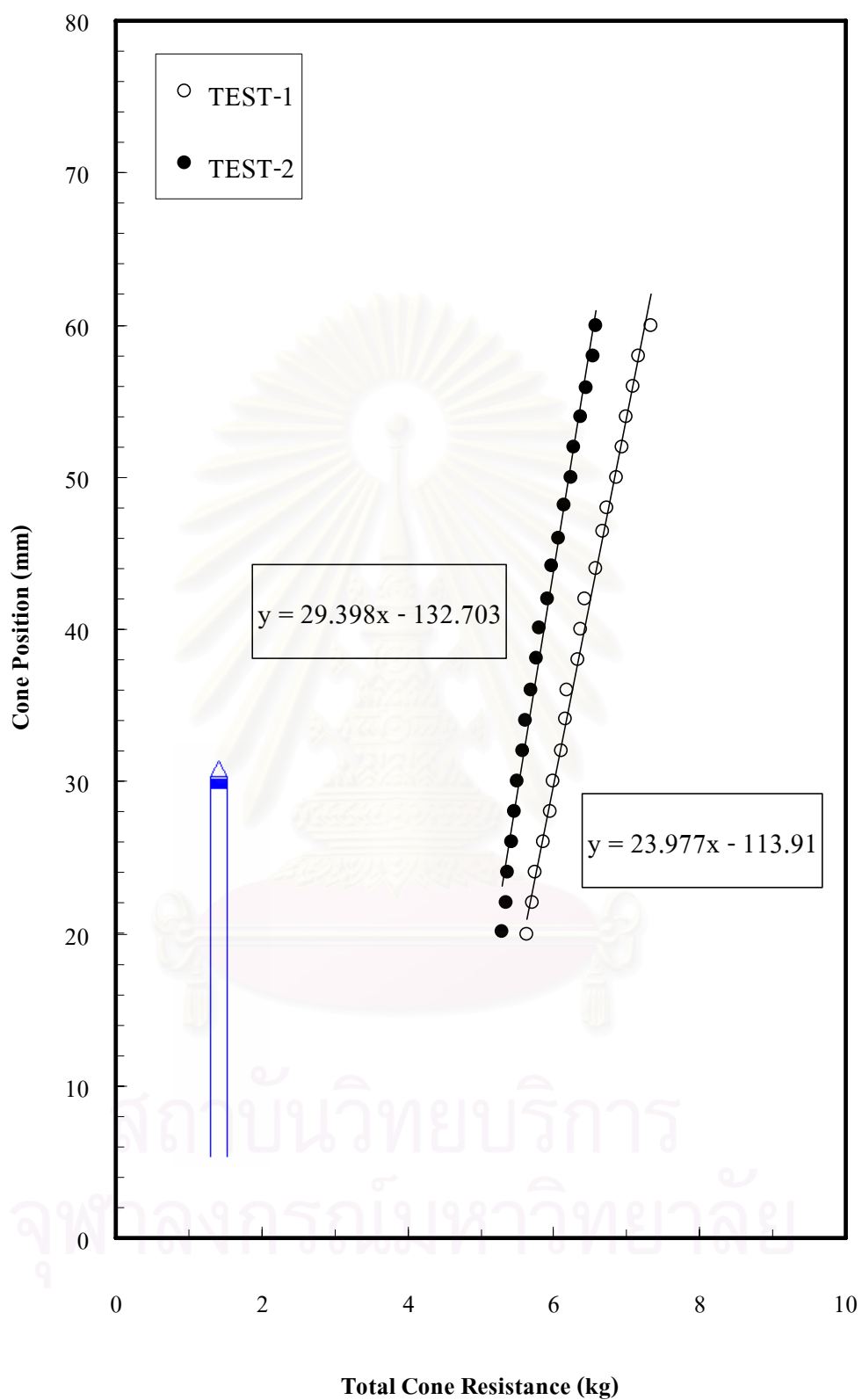
หมายเหตุ :

- 1) พื้นที่หน้าตัดปลายกรวย (A_c) เท่ากับ 0.50 cm^2
- 2) เส้นรอบวงของ Cone Penetrometer เท่ากับ 2.51 cm
- 3) ความลึกของ Cone Penetrometer ที่นำมาคำนวณแรงเสียดทานที่ผิวปลอก (ΔL) เท่ากับ 40 mm

4.7 การตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ MCPT

4.7.1 หน่วยแรงด้านทานปลายกรวย (q_c)

การตรวจสอบหน่วยแรงด้านทานปลายกรวย (q_c) ที่ได้จากการทดสอบ MCPT สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบค่า N_k ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.3 กับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้มาจากการทดสอบ CPT ในสนามตามสถานที่ต่างๆ



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงรวมต้านทานปลายกรวยกับ Cone Position
สำหรับใช้คำนวณหาค่า q_c และ f_s

$$N_k = \frac{(q_c - \sigma_{vc})}{c_u} \quad (4.3)$$

โดยที่

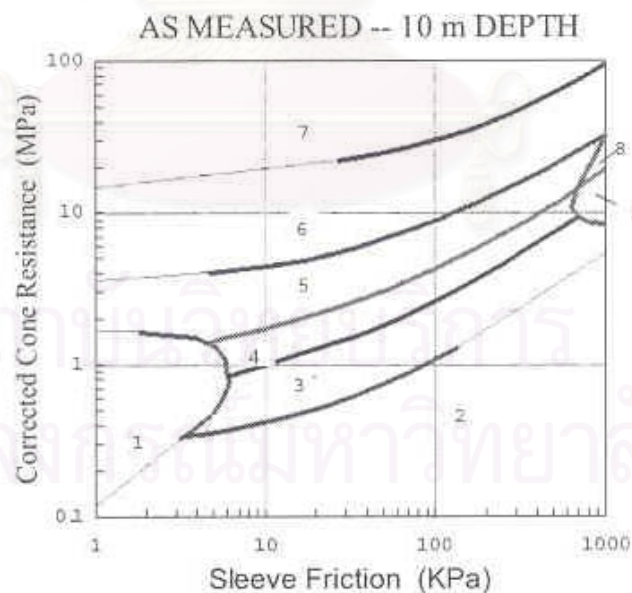
N_k = Piezocone Factor

σ_{vc} = หน่วยแรงรวมในแนวตั้งที่ทำให้ดินถูกอัดตัวคายน้ำในแต่ละชั้นตอน

จากการคำนวณพบว่าตัวอย่างที่ 1 จะมีค่า N_k เท่ากับ 20 และตัวอย่างที่ 2 จะมีค่า N_k เท่ากับ 18.1 ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องพบว่าจะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 10-20 (สำหรับ OC Clay)

4.7.2 หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวปลอก (f_s)

การตรวจสอบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวปลอก (f_s) ที่ได้จากการทดสอบ MCPT สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบกับค่า f_s ที่หาได้จากแผนภูมิแสดง Profiling ของ Robertson (1990) ในรูปที่ 4.20 สำหรับในแผนภูมินี้จะแบ่งชนิดของดินออกเป็น 9 Zone ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งดินที่ใช้ในการทดสอบนี้จะจัดอยู่ใน Zone 3 (Clays)



รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดง Profiling (Robertson, 1990)

ตารางที่ 4.7 ชนิดของดินที่แบ่งออกเป็น Zone ต่างๆในแผนภูมิของ Robertson (1990)

Zone No.	ชนิดของดิน
1	Sensitive, fine-grained soils
2	Organic soils and peat
3	Clays (clay to silty clay)
4	Silt mixtures (silty clay to clayey silt)
5	Sand mixtures (sandy silt to silty sand)
6	Sand (silty sand to clean sand)
7	Sand to gravelly sand
8	Sand (clayey sand to very stiff sand)
9	Very stiff, fine-grained, overconsolidated or cemented soil

ผลการเปรียบเทียบค่า f_s ที่ได้จากการทดสอบกับค่า f_s ที่หาได้จากแผนภูมิจะแสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ซึ่งพบว่าจะมีความแตกต่างกันไม่มากนัก สำหรับ Adhesion Factor (α) ของ Cone Penetrometer ซึ่งใช้วัสดุที่เป็นสแตนเลส สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.4 ค่า α จะมีค่าเท่ากับ 0.68 ในตัวอย่างที่ 1 และมีค่าเท่ากับ 0.56 ในตัวอย่างที่ 2 ซึ่งจะมีค่า α เฉลี่ยประมาณ 0.60

$$\alpha = \frac{f_s}{c_u} \quad (4.4)$$

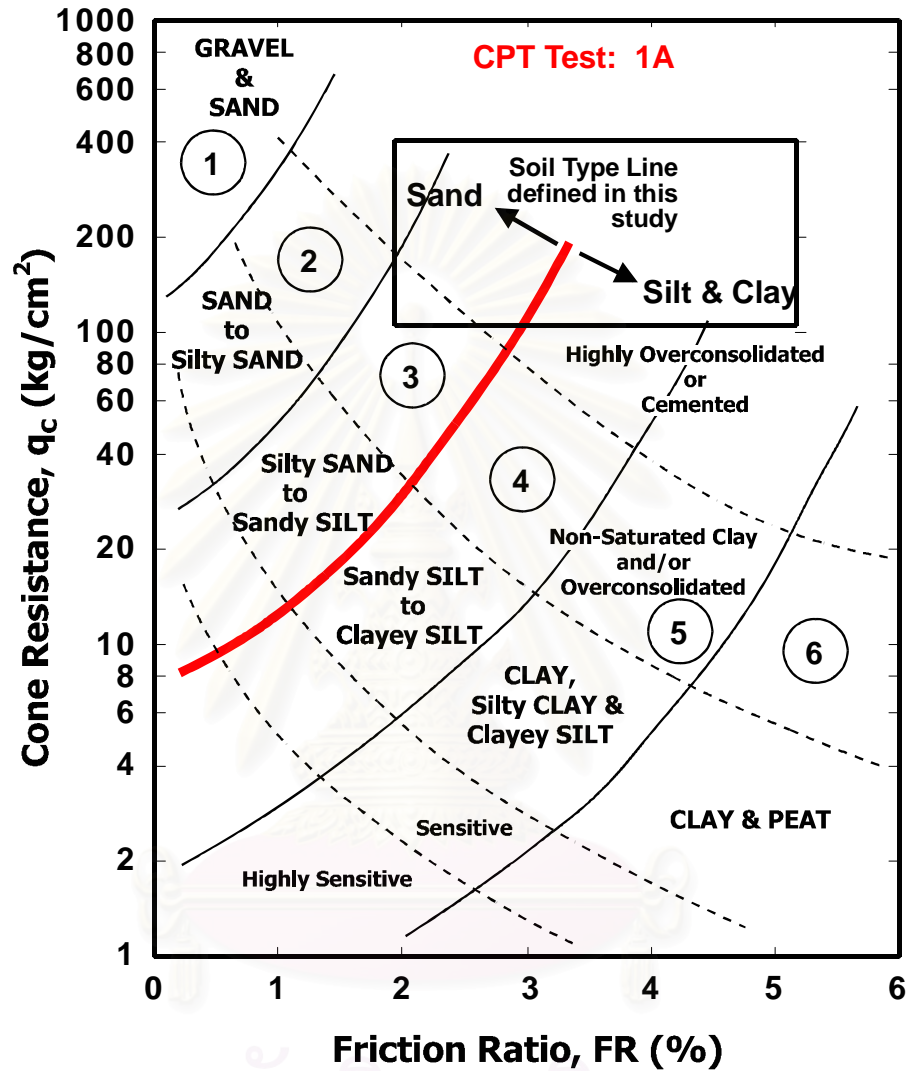
ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบค่า f_s (ksc)

Test No.	q_c (ksc)	f_s (Chart)	f_s (Lab)
1	9.50	0.28	0.17
2	9.02	0.20	0.14

4.7.3 อัตราส่วนเสียดทาน (FR)

การตรวจสอบอัตราส่วนเสียดทาน (Friction Ratio, FR) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบกับแผนภูมิจำแนกชนิดของดินดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งพบว่าผล

การจำแนกดินยังคงคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง โดยจะจำแนกดินได้เป็น Sandy Silt to Clayey Silt (Zone 4)



รูปที่ 4.21 แผนภูมิจำแนกชนิดของดินสำหรับการทดสอบ CPT

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

ผลการศึกษาวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) การพัฒนาเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus ขึ้นมาใหม่นั้นประสบผลสำเร็จด้วยดี ซึ่งเครื่องมือนี้จะทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยจำลองสภาพการทดสอบ CPT ในสนามมาไว้ภายในเครื่องมือแรงอัดสามแกนที่สามารถควบคุมสภาวะหน่วยแรงในดินได้ตามต้องการ

2) จากผลการทดสอบ MCPT ทั้งสองตัวอย่างพบว่า ความสัมพันธ์ของแรงรวมด้านทานปลายกรวยกับความลึกกรวยที่กดเข้าไปในตัวอย่างดินจะมีความแตกต่างกันอยู่ 2 แบบ กล่าวคือ พฤติกรรมแรกในช่วงความลึกเริ่มต้น 0-20 mm ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากผลของ Boundary Effect ที่เกิดขึ้น ซึ่งแตกต่างกับพฤติกรรมที่สองในช่วงความลึก 20-70 mm ที่ความสัมพันธ์นี้จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงโดยหน่วยแรงด้านทานปลายกรวยจะมีค่าคงที่ นอกจากนี้ยังพบว่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่น้อยมากประมาณ 0.1 ksc ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้อัตราทดที่ช้ามากๆ

3) ค่า Piezocone Factor (N_k) ที่คำนวณได้จะมีค่าประมาณ 19 สอดคล้องกับค่า N_k ที่ได้จากงานวิจัยอื่น ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 10-20 (สำหรับ OC Clay)

4) อัตราส่วนแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวกับสแตนเลสที่คำนวณได้จะมีค่าเท่ากับ 0.6

5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคตสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) ควรปรับปรุงเครื่องมือ Reconstituted Consolidometer โดยใช้ระบบแรงดันแทนการใช้ก้อนน้ำหนักถ่วงเพื่อให้ทดสอบได้ง่าย มีความปลอดภัยเพิ่มขึ้น และสามารถทดสอบที่หน่วยแรงสูงขึ้นได้

2) ควรปรับปรุงเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus โดยใช้ระบบแรงดันแทนการใช้โครงแขวนถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินแบบ

Anisotropic หรือ K_0 -Condition เพื่อให้สามารถทดสอบได้ง่าย มีความปลอดภัยเพิ่มขึ้น และสามารถทดสอบที่หน่วยแรงสูงขึ้นได้

3) ควรทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมถึงความสัมพันธ์ของ q_c และ Δu กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของดินเหนียว ซึ่งได้แก่ c_u , OCR และ σ'_v รวมทั้งผลกระทบของอัตราคดที่มีต่อค่า q_c , f_s และ Δu

4) ควรทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมถึงผลกระทบของรูปลักษณะและมุมปลายกรวยที่มีผลต่อค่า q_c และ Δu

5) ควรทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมถึงความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับค่า Adhesion Factor (α) รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่าง FR ที่ได้กับค่า q_c อีกด้วย

6) ควรทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมถึงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างดินต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของกรวย ที่จะไม่ทำให้ผลกระทบขอบเขต (Boundary Effect) เกิดขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ทนงชัย มากชิต. 2543. การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะจากการทดสอบ CPT ของดินในกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภูษิต ศักดิ์พิเศษ. 2524. กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินในกรุงเทพฯ ที่วัดโดยเครื่องมือ Dutch Cone. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิโรจน์ บุศยพลากร. 2546. พฤติกรรมการอัดตัวของดินเหนียวกรุงเทพฯ สร้างใหม่ จากสถานะเหลวถึงสถานะพลาสติก วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Almeida, Marcio S. S.; and Parry, Richard H. G. 1985. Small cone penetrometer tests and piezocone tests in laboratory consolidated clays. Geotechnical Testing Journal 8, 1: 14-24.
- Campanella, R. G.; Robertson, P. K.; and Gillespie, D. 1983. Cone penetration testing in deltaic soils. Canadian Geotechnical Journal 20: 23-35.
- Fellenius, B. H.; and Eslami, A. 2000. Soil profile interpreted from CPTu data. Geotechnical Engineering Conference, Asian Institute of Technology, Bangkok. 27-30 November 2000
- Germaine, J. T. and Ladd, C. C. 1988. Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, Triaxial Testing of Saturated Cohesive Soils, ASTM STP 977, pp. 421-459. Philadelphia: ASTM.
- IGN (Thailand) Ltd. 1994. The static cone penetration test: introduction. Bangkok: (n.p.).
- Jacobs; P. A.; and Coutts, J. S. 1992. A comparison of electric piezocone tips at the Bothkennar test site. Geotechnique. 42, 2: 369-375.
- Kok, L. 1982. The effect of the penetration speed and the cone shape on the dutch static cone penetration test results. Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration. 24-27 May 1982: 215-220.

- Kurup, P. U.; Voyiadjis, G. H.; and Tummy, M. T. 1994. Calibration chamber studies of piezocone test in cohesive soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 120, 1: 81-107.
- Lunne, T.; and Eide, O. 1976. Correlations between cone resistance and vane shear strength in some Scandinavian soft to medium stiff clays. Canadian Geotechnical Journal 13: 430-441.
- Mayne, P. W.; and Kulhawy, F. H. 1990. Observations on the development of pore-water stresses during piezocone penetration in clays. Canadian Geotechnical Journal 27: 418-428.
- Meigh, A. C. 1987. Cone penetration testing: methods and interpretation. London: Butterworths.
- Seah, T. H.; and Lai, K. C. 2003. Strength and Deformation Behavior of Soft Bangkok Clay. Geotechnical Testing Journal 26, 4.
- Silvestri, V.; and Fahmy, Y. 1995. Influence of apex angle on cone penetration factors in clay. Geotechnical Testing Journal 18, 3: 315-323.
- Thomas, D. 1965. Static cone penetration tests in London clay. Geotechnique. 15, 2: 174-179.
- Titi, H. H.; Mohammed, L. N.; and Tummy, M. T. 2000. Miniature cone penetration in soft and stiff clays. Geotechnical Testing Journal 23, 4: 432-442.
- University of New South Wales. 1990. Short course on in-situ testing of soils. University of New South Wales.
- Yu, H. S.; and Mitchell, J. K. 1998. Analysis of cone resistance: review of methods. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 124, 2: 140-149.

บรรณานุกรม

- Baligh, M. M.; Vivatrat, V.; and Ladd, C. C. 1980. Cone Penetration in Soil Profiling. Journal of the Geotechnical Engineering Division 4: 447-461.
- Baligh, M. M. 1985. Lecture 7 : Interpretation of piezocone measurements during penetration. Massachusetts Institute of Technology.
- Bardet, J. P. 1997. Experimental soil mechanics. New Jersey: Prentice Hall.
- Head, K. H. 1986. Manual of Soil Laboratory Testing Volume 3 : Effective Stress Tests. London: Pentech Press.
- Lacasse, S. and Berre, T. 1988. Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, Triaxial Testing Methods for Soils, ASTM STP 977, pp. 264-289. Philadelphia: ASTM.
- Lambe, T. W., and Whitman, R. V. 1979. Soil mechanics. New York: John Wiley & Sons.




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

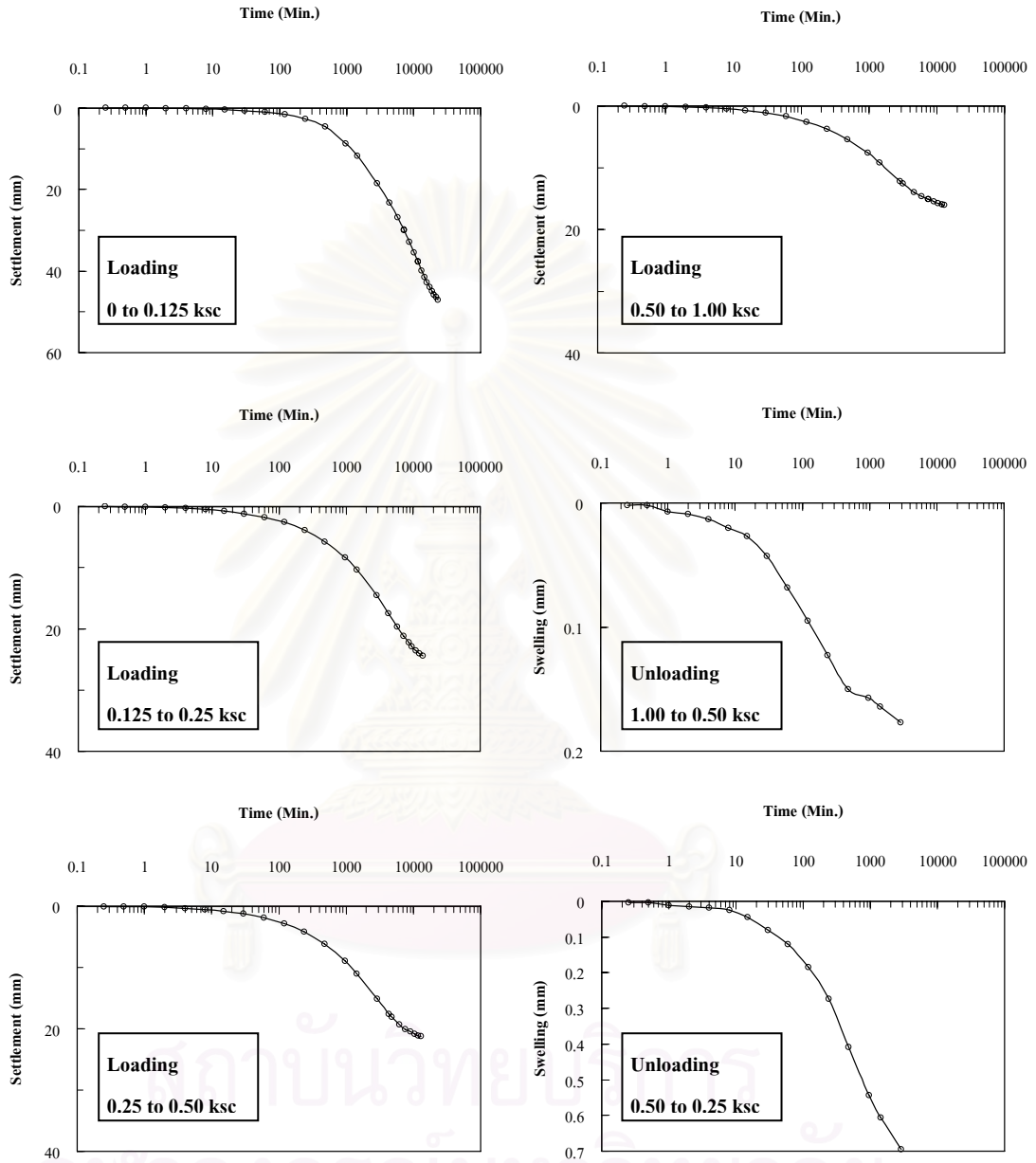
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



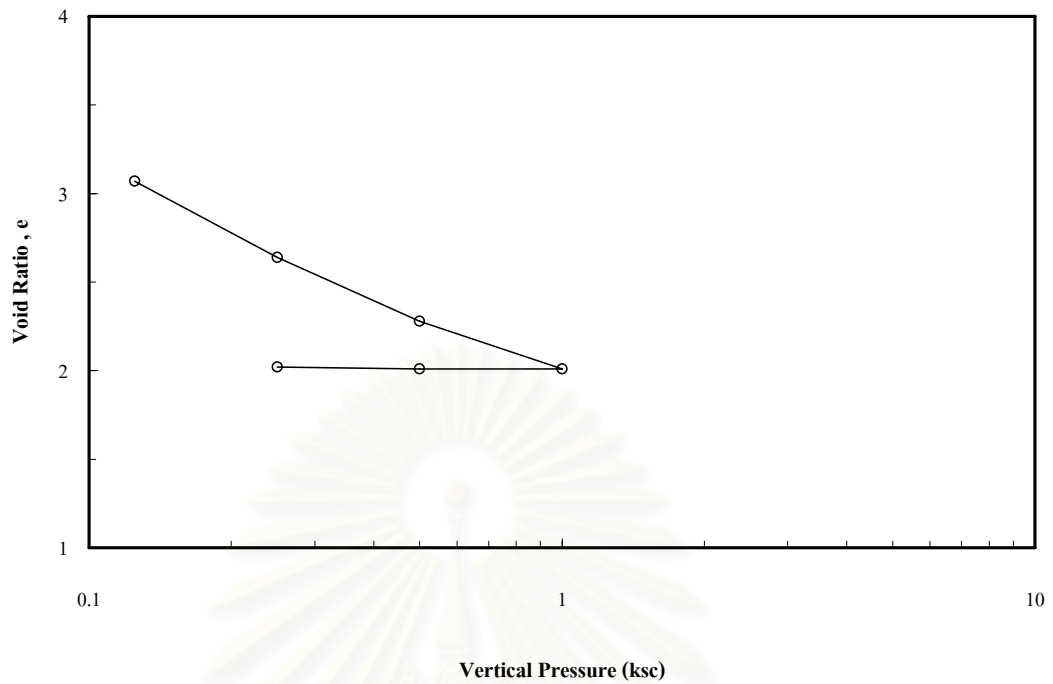
ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบ Reconstituted Consolidation Test

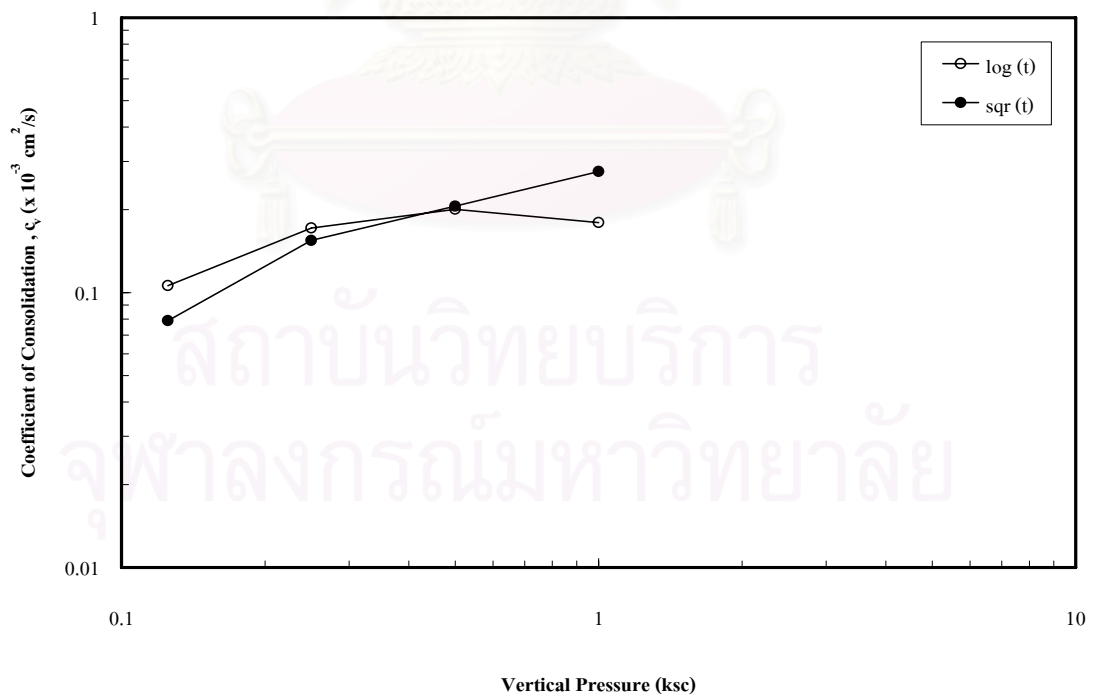
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



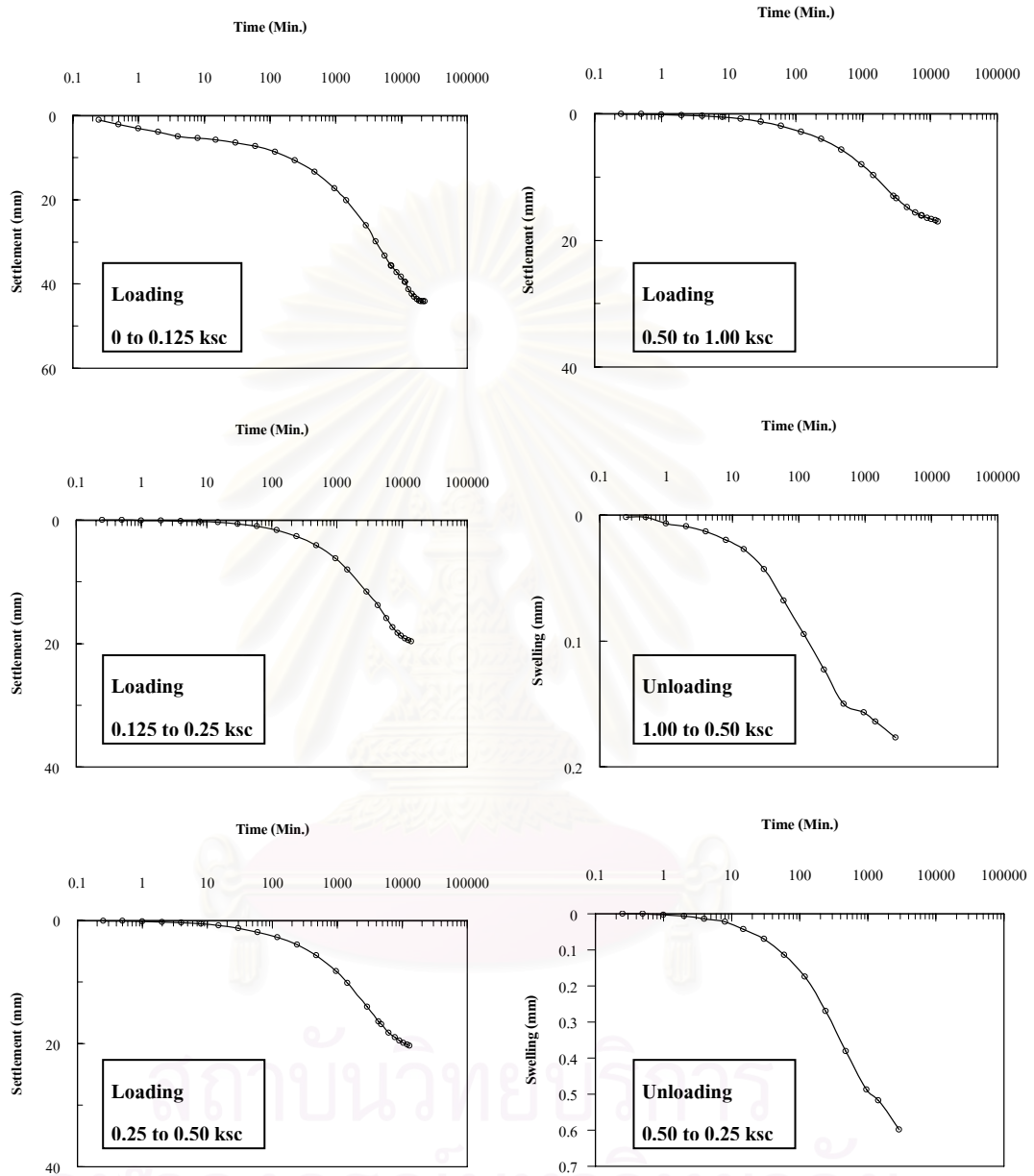
รูปที่ ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ
 ในสถานะดินเหนียว (Batch 1)



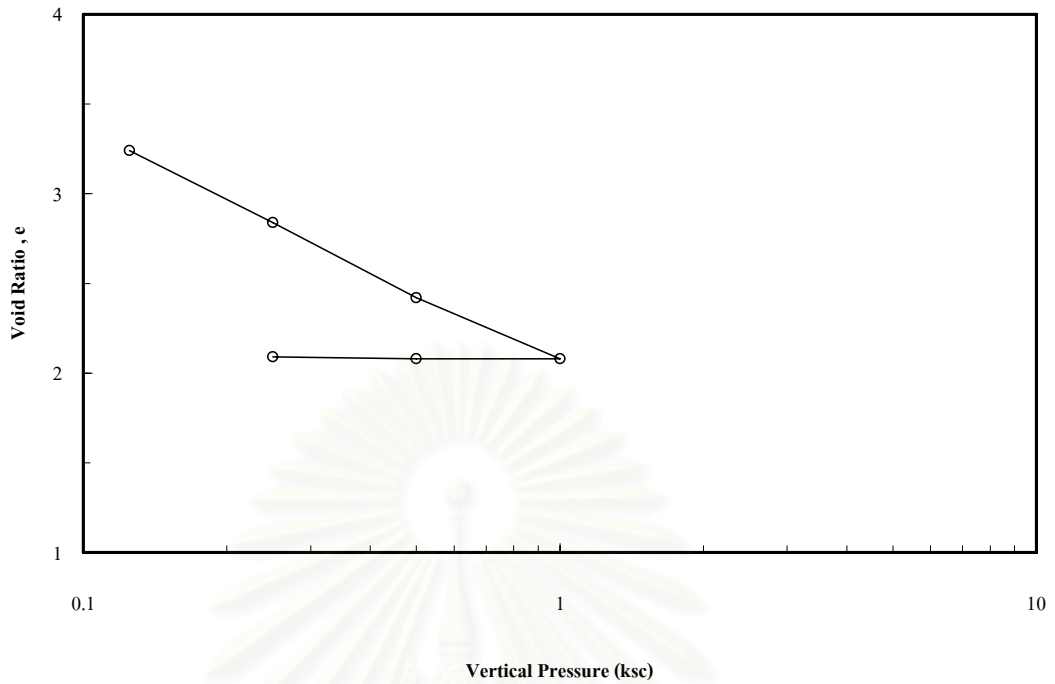
รูปที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง e - $\log \sigma'_v$ จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ
ในสถานะดินเหลว (Batch 1)



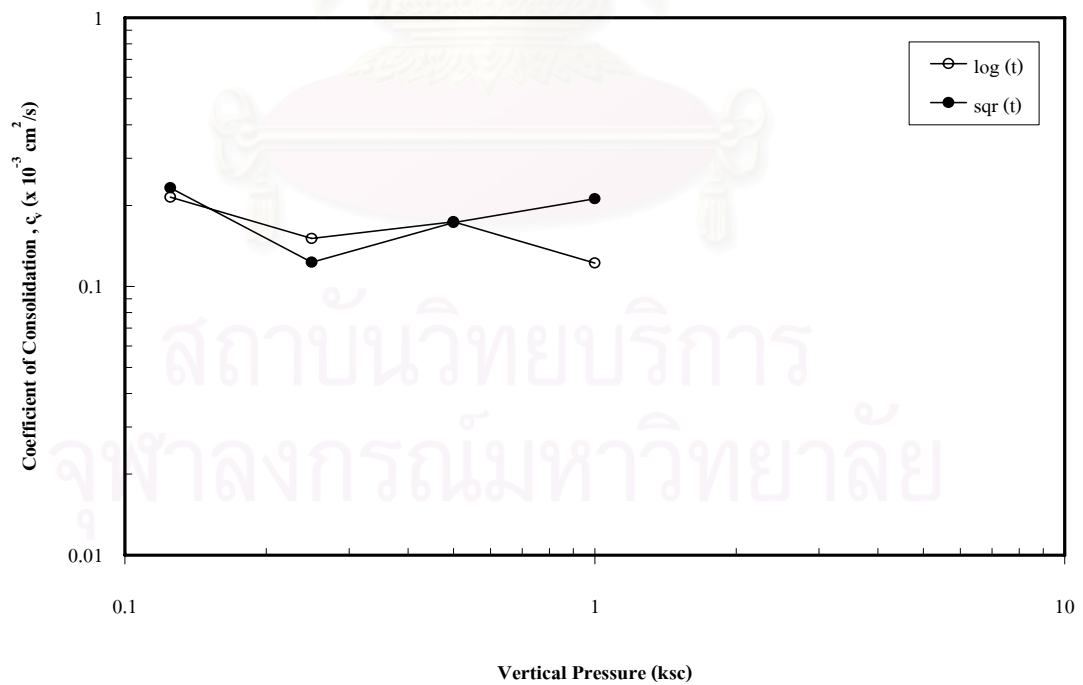
รูปที่ ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง c_v กับ σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ
ในสถานะดินเหลว (Batch 1)



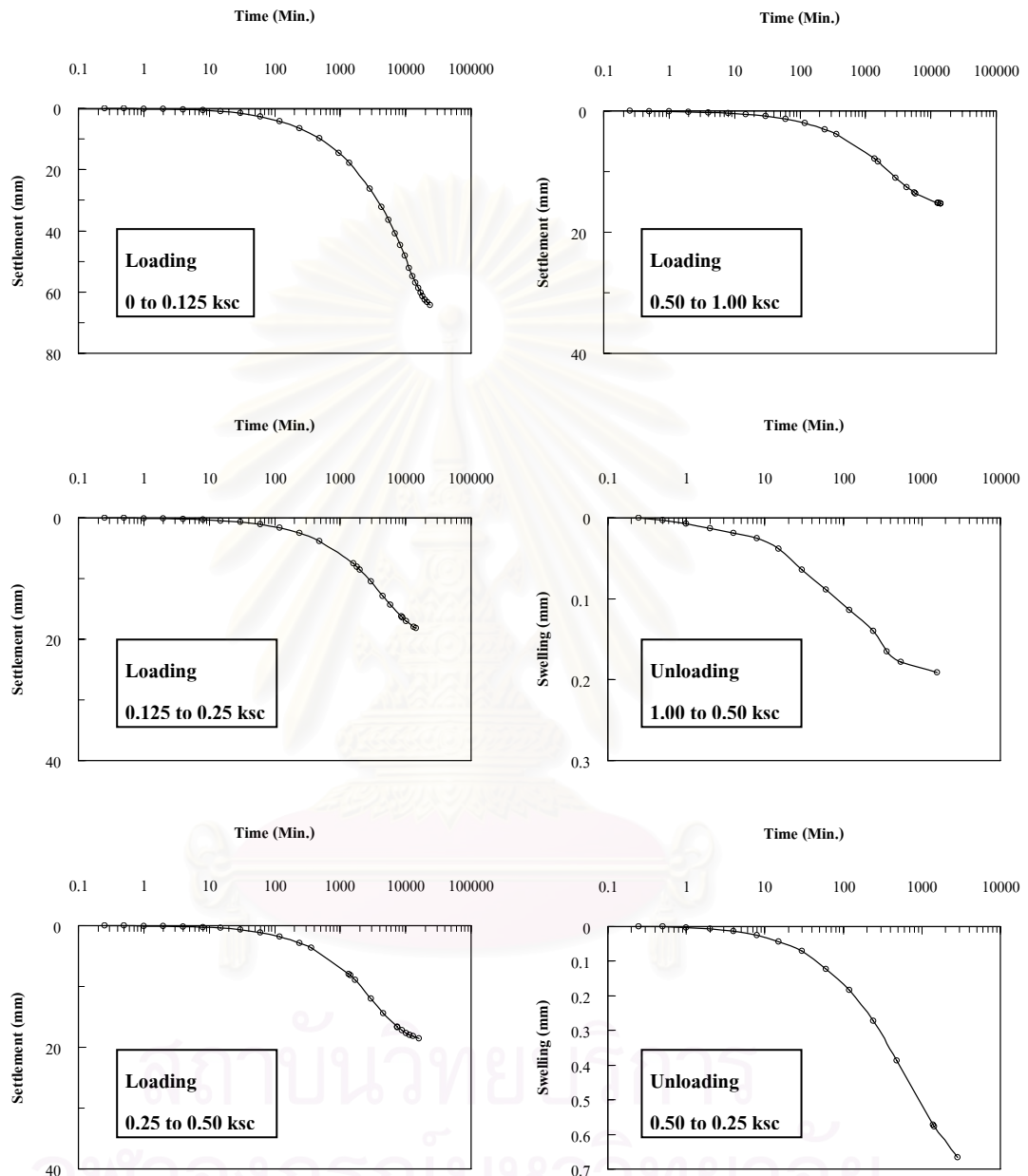
รูปที่ ก-4 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ
ในสถานะดินเหลว (Batch 2)



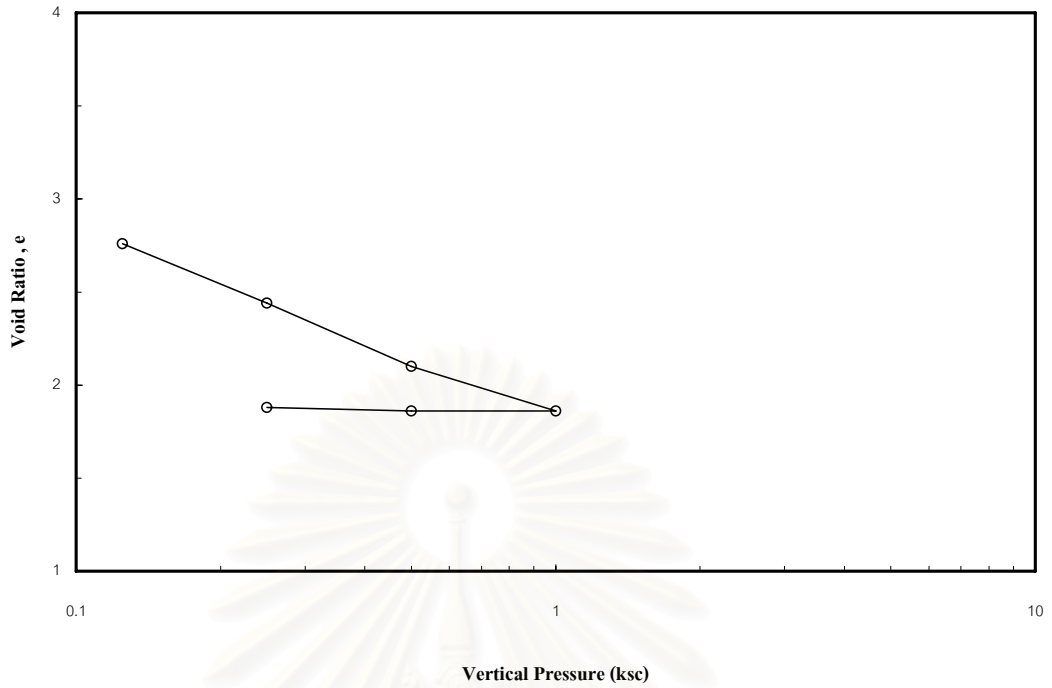
รูปที่ ก-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง e - $\log \sigma'_v$ จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ
ในสถานะดินเหลว (Batch 2)



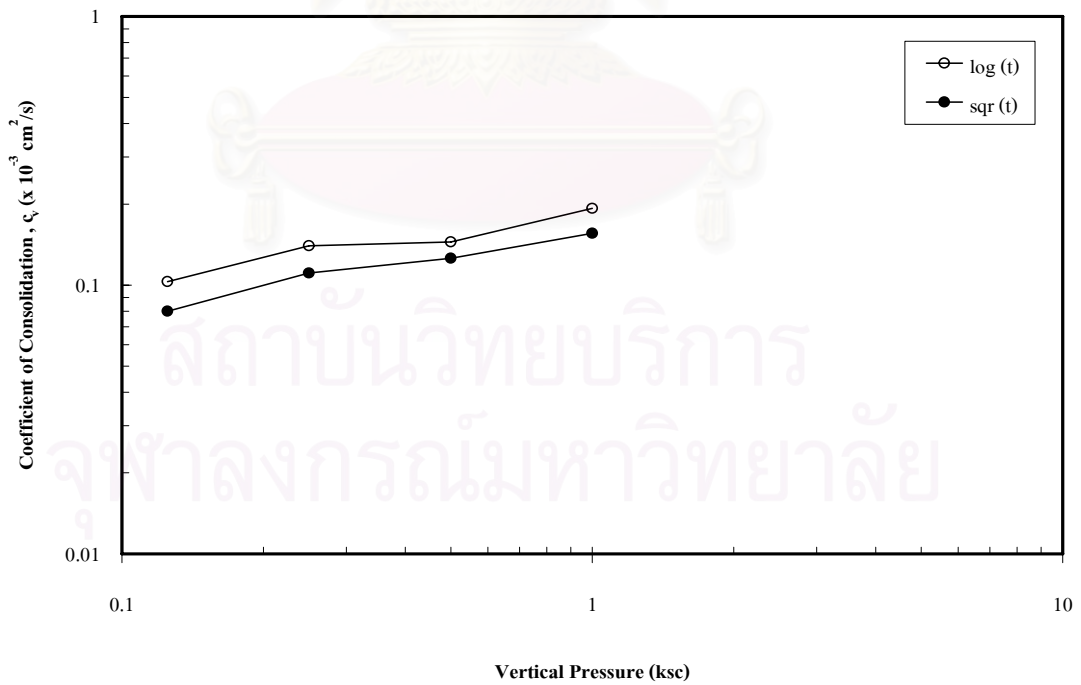
รูปที่ ก-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง c_v กับ σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ
ในสถานะดินเหลว (Batch 2)



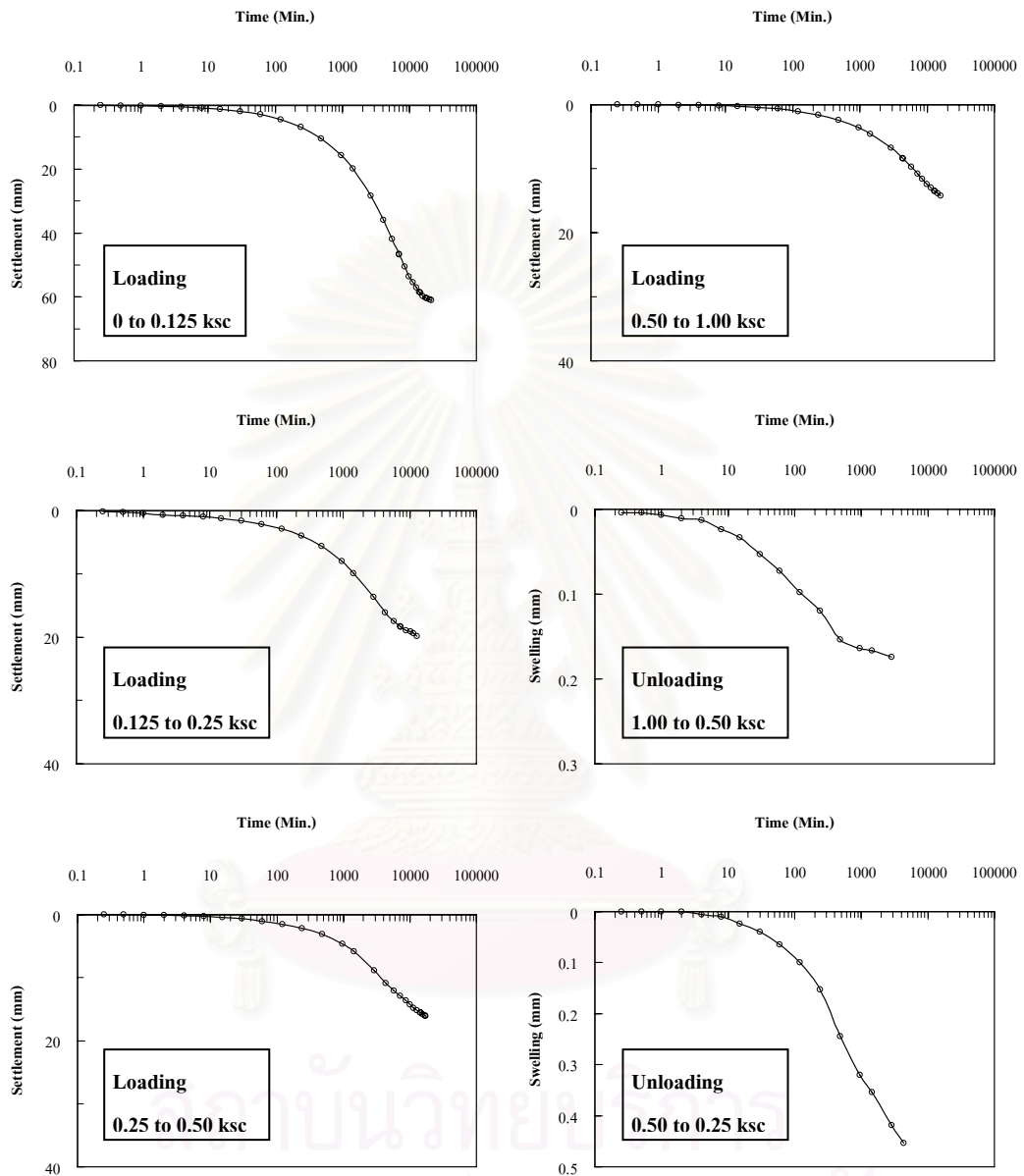
รูปที่ ก-7 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ
ในสถานะดินเหลว (Batch 3)



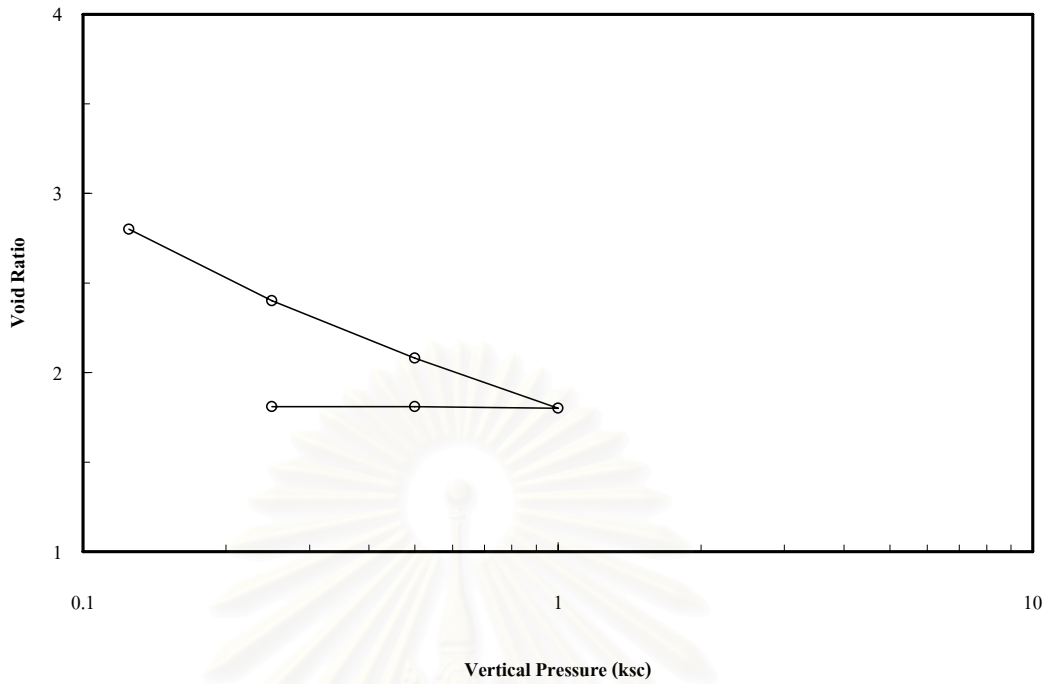
รูปที่ ก-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง e - $\log \sigma'_v$ จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ
ในสถานะดินเหลว (Batch 3)



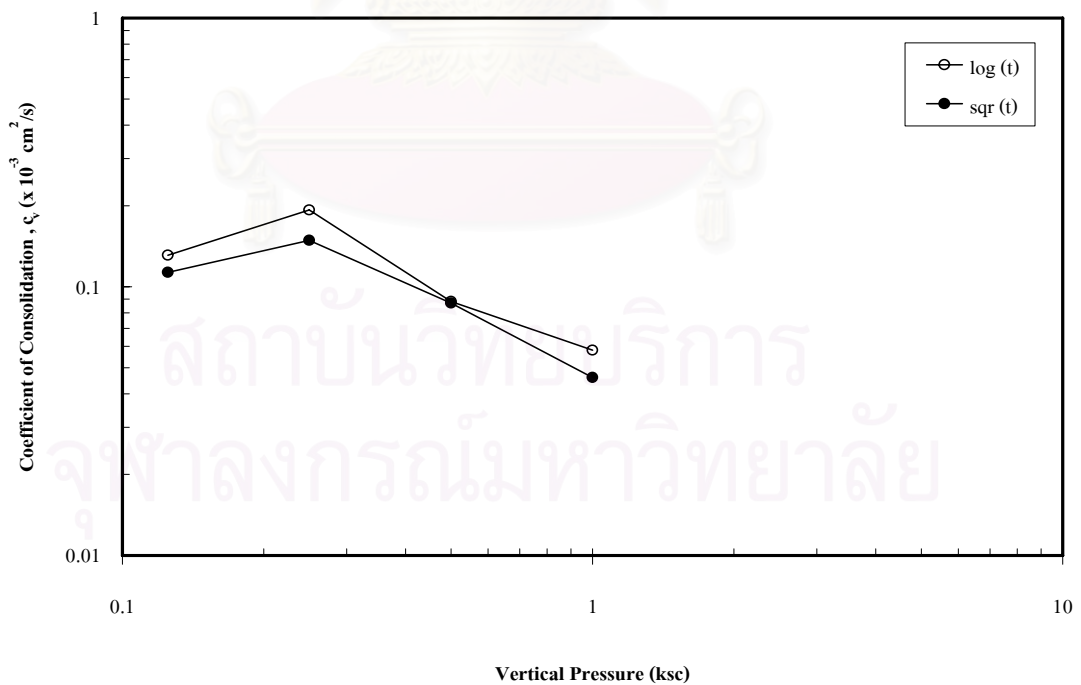
รูปที่ ก-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง c_v กับ σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ
ในสถานะดินเหลว (Batch 3)



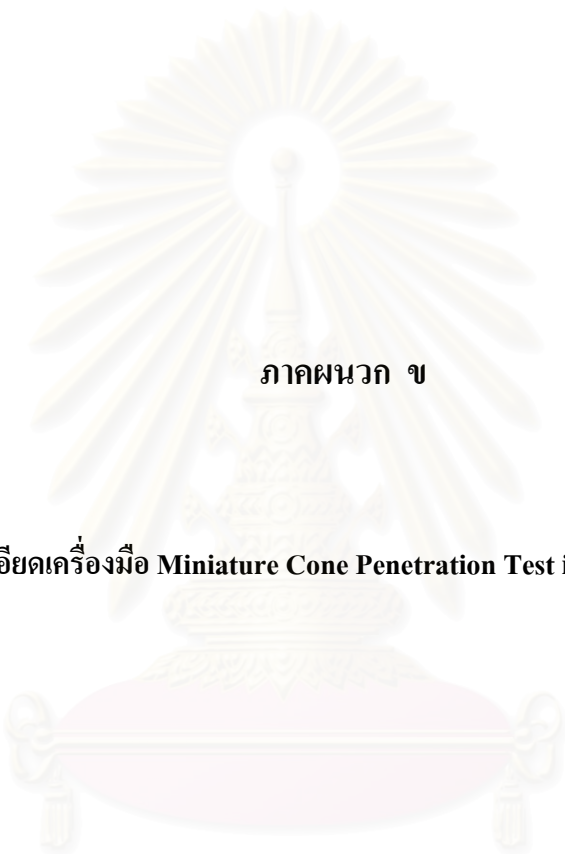
รูปที่ ก-10 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ
 ในสถานะดินเหลว (Batch 4)



รูปที่ ก-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง e - $\log \sigma'_v$ จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ
ในสถานะดินเหลว (Batch 4)



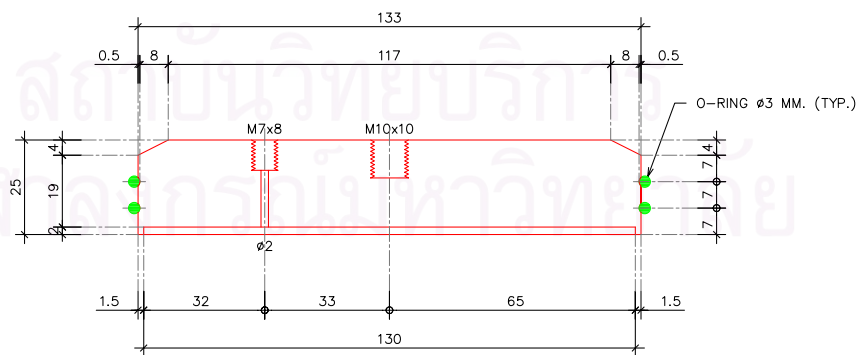
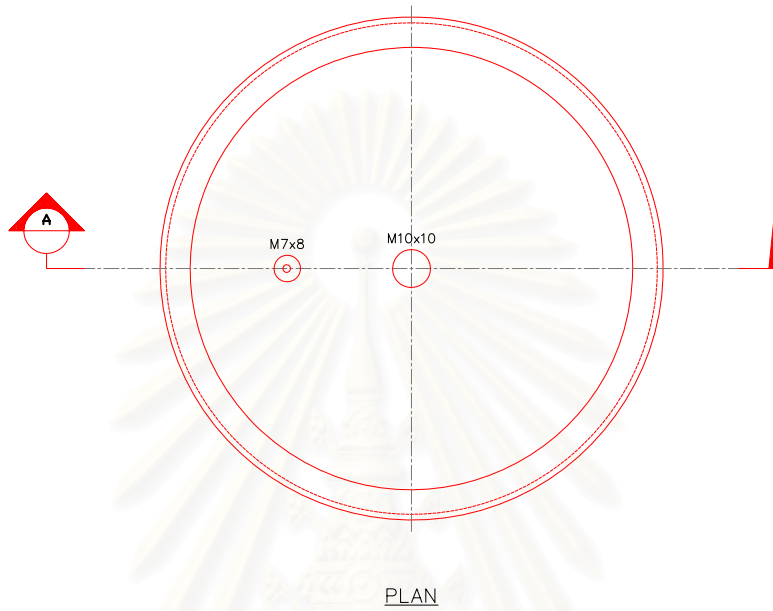
รูปที่ ก-12 ความสัมพันธ์ระหว่าง c_v กับ σ'_v จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ
ในสถานะดินเหลว (Batch 4)



ภาคผนวก ข

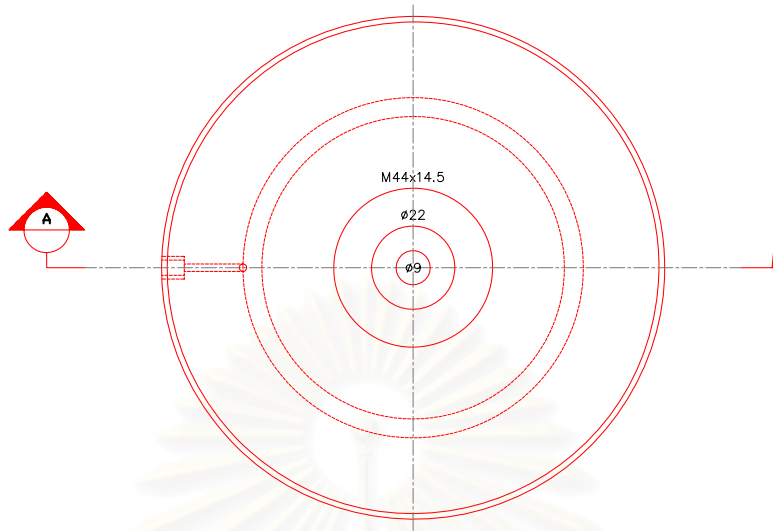
แบบรายละเอียดเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

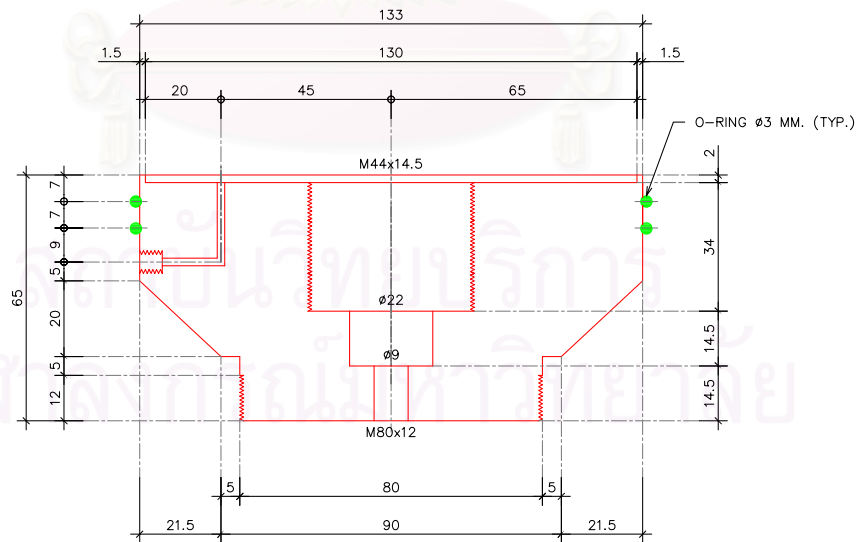


TOP CAP
SCALE 1:2

REMARK : ALL DIMENSION ON THIS DRAWING ARE MILLIMETER (MM.) UNLESS OTHERWISE.



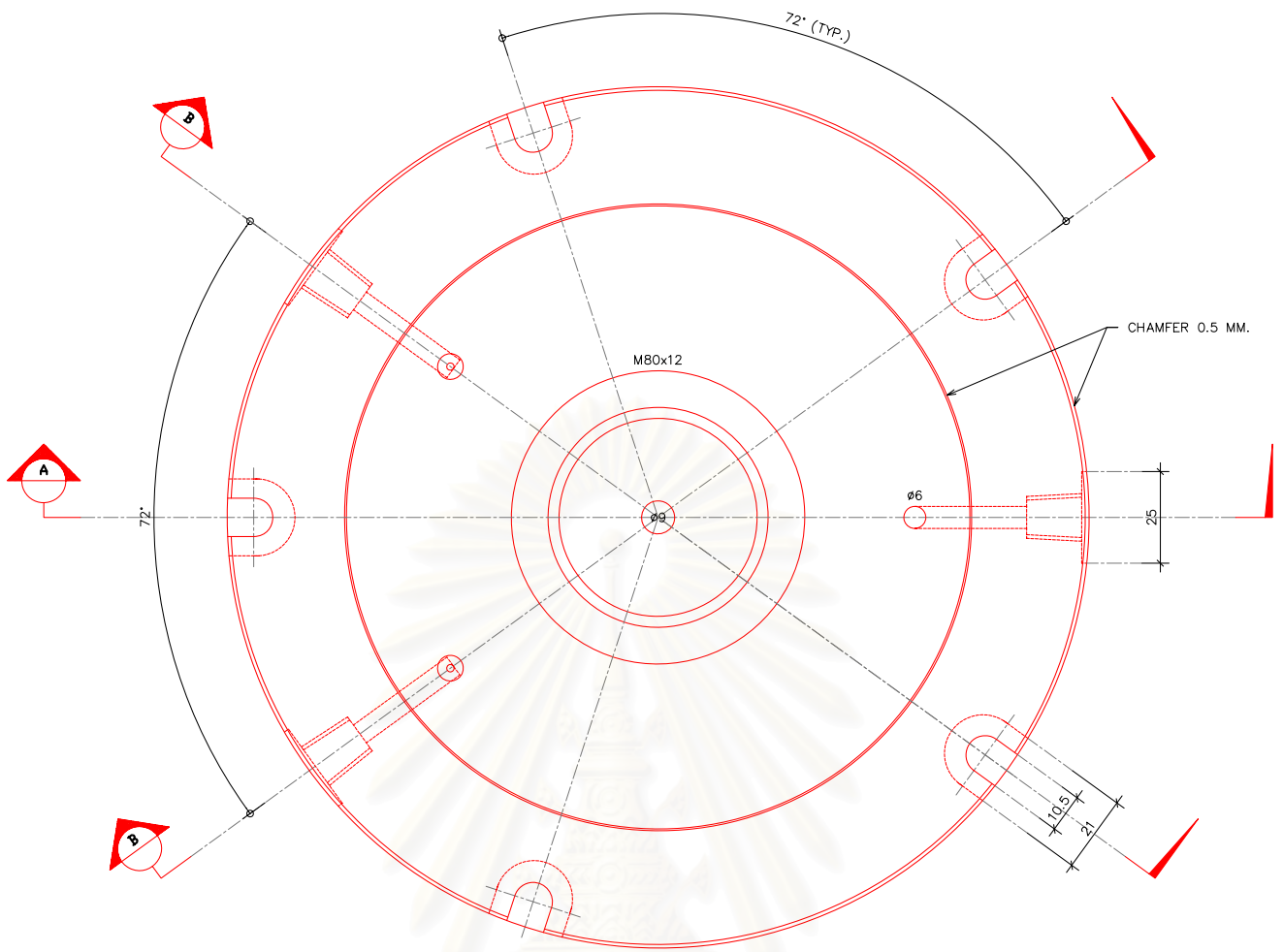
PLAN



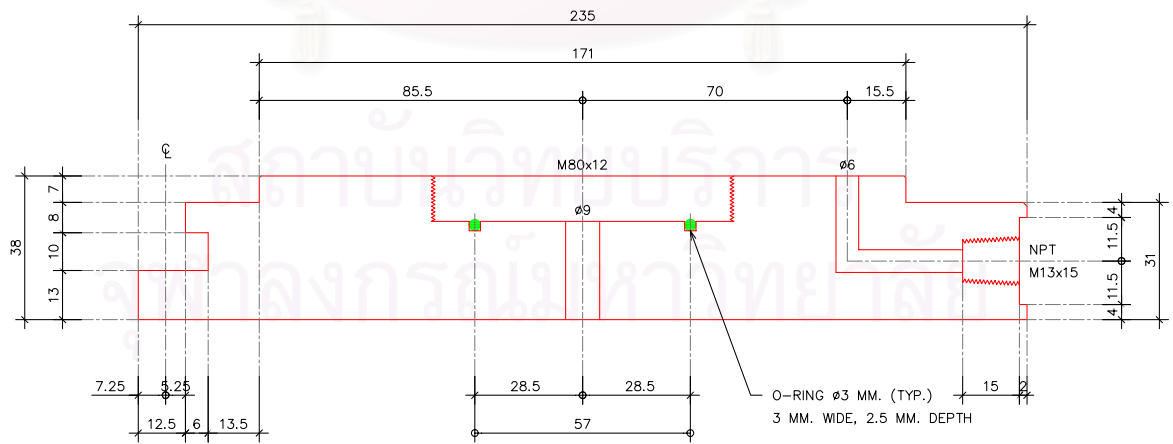
SECTION A-A

PEDESTAL
SCALE 1:2

REMARK : ALL DIMENSION ON THIS DRAWING ARE MILLIMETER (MM.) UNLESS OTHERWISE.



PLAN

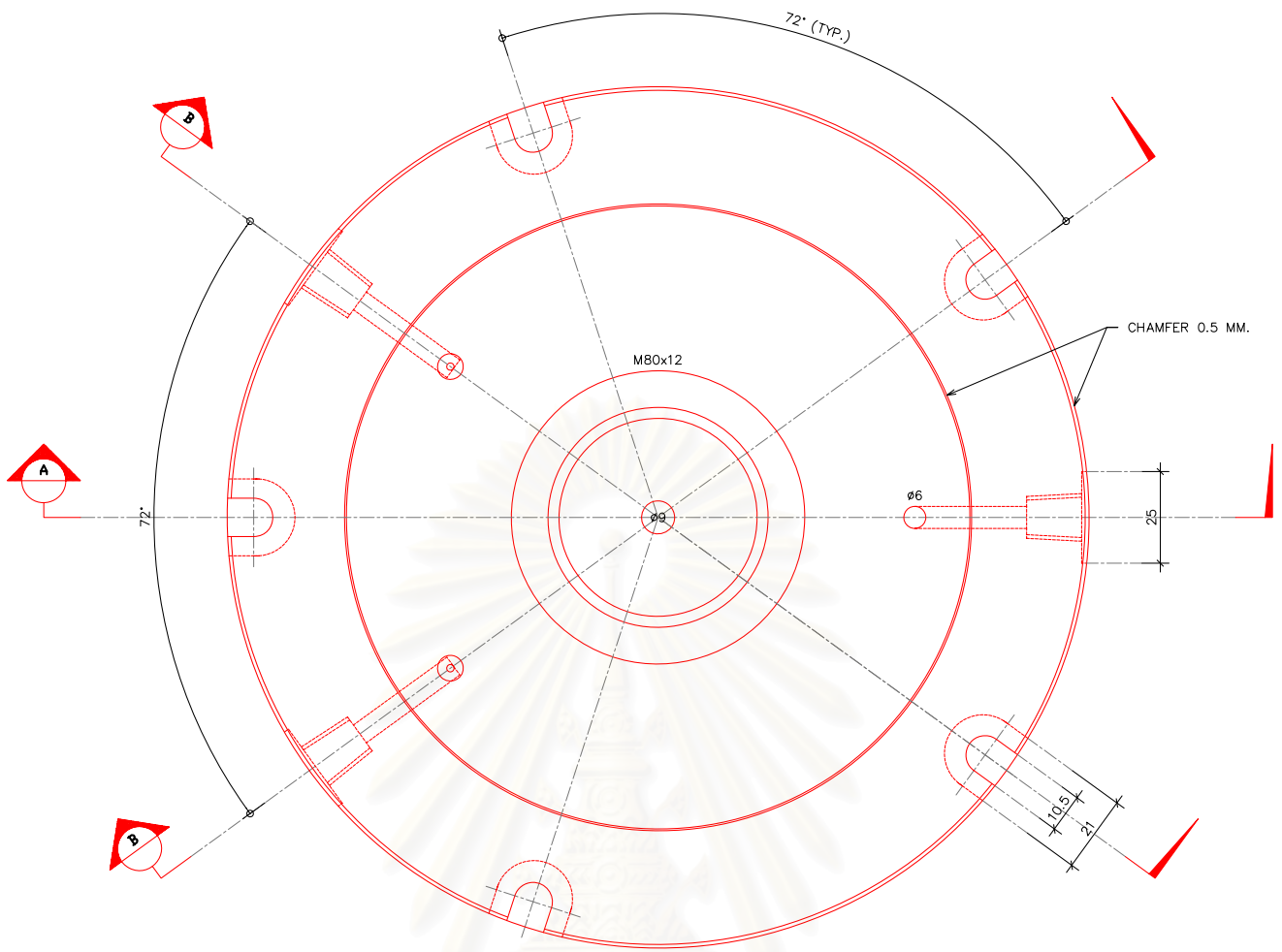


SECTION A-A

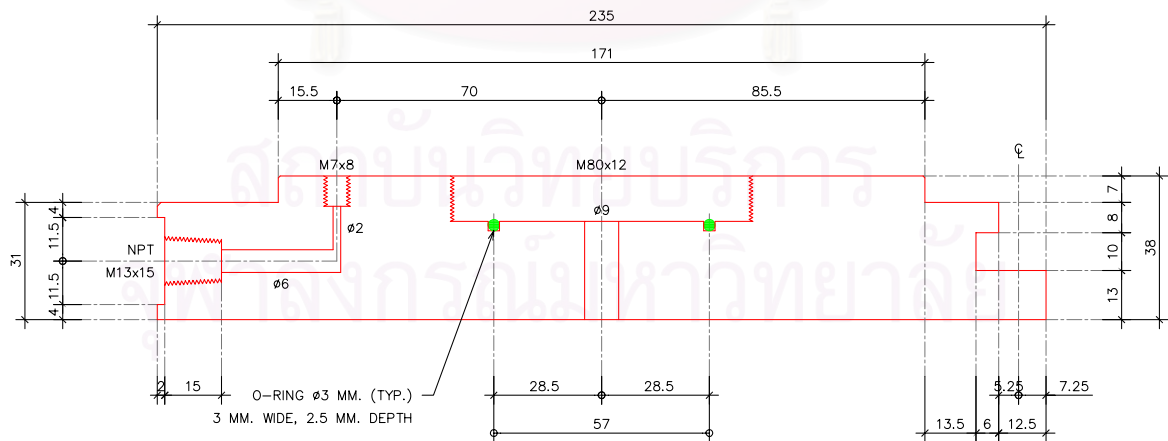
BASE PLATE

SCALE 1:2

REMARK : ALL DIMENSION ON THIS DRAWING ARE MILLIMETER (MM.) UNLESS OTHERWISE.



PLAN

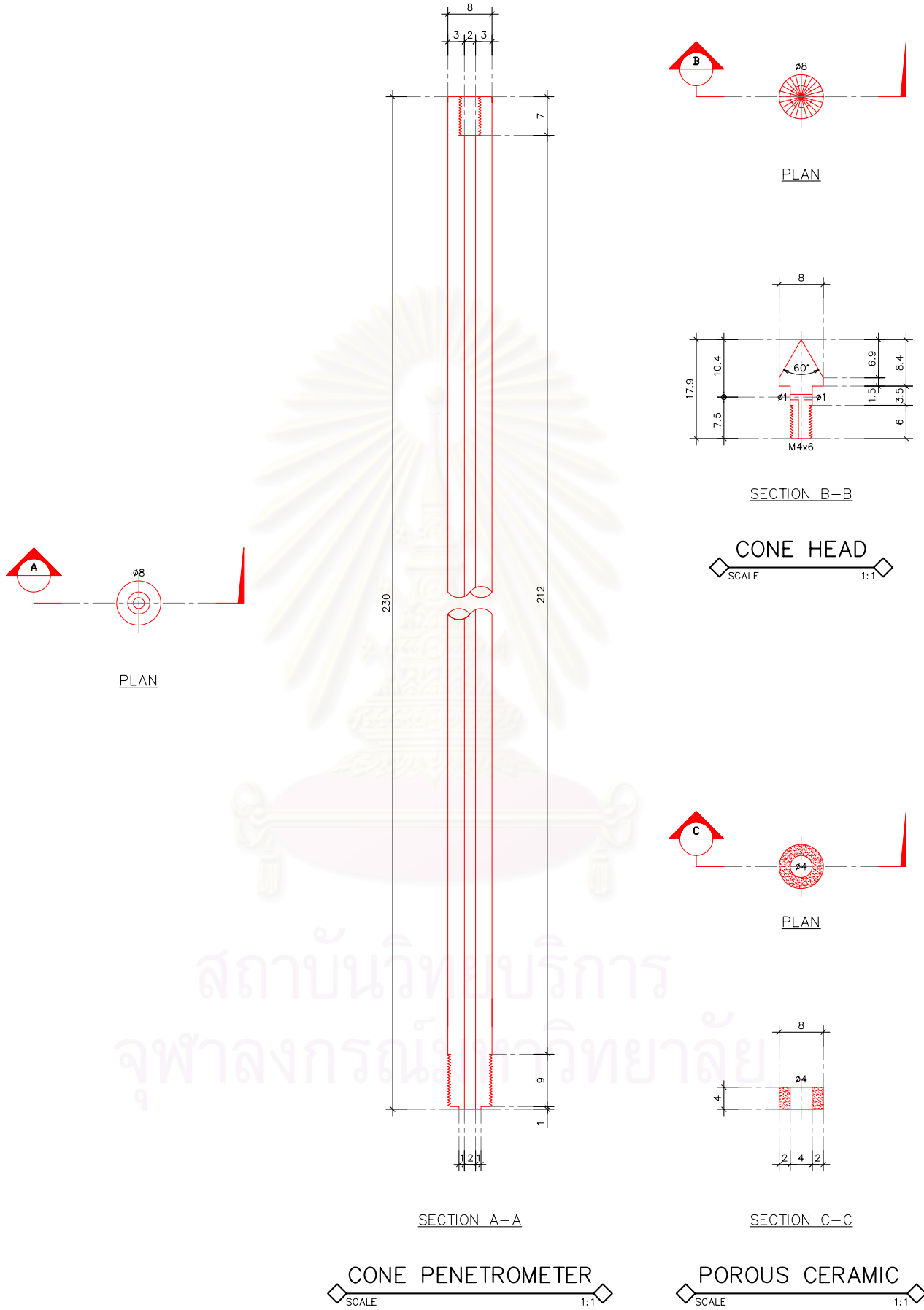


SECTION B-B

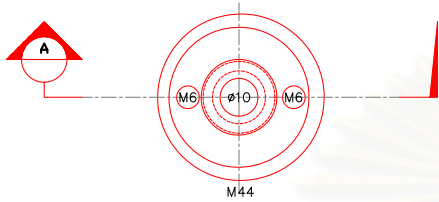
BASE PLATE

SCALE 1:2

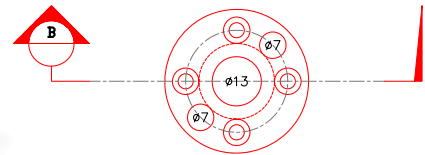
REMARK : ALL DIMENSION ON THIS DRAWING ARE MILLIMETER (MM.) UNLESS OTHERWISE.



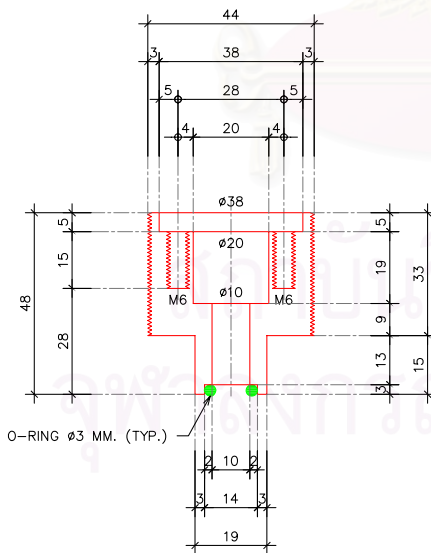
REMARK : ALL DIMENSION ON THIS DRAWING ARE MILLIMETER (MM.) UNLESS OTHERWISE.



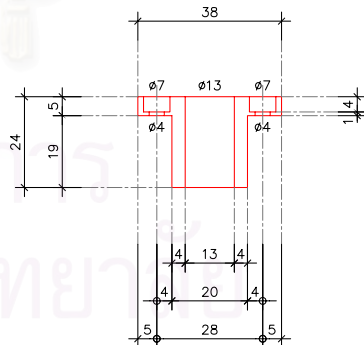
PLAN



PLAN



SECTION A-A

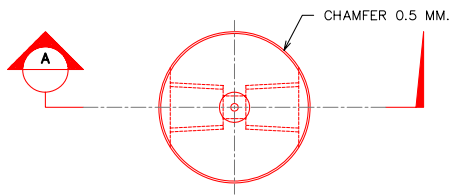


SECTION B-B

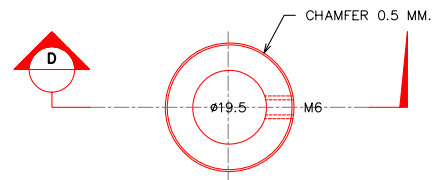
WATER STOPPER
SCALE 1:2

LM SOCKET
SCALE 1:2

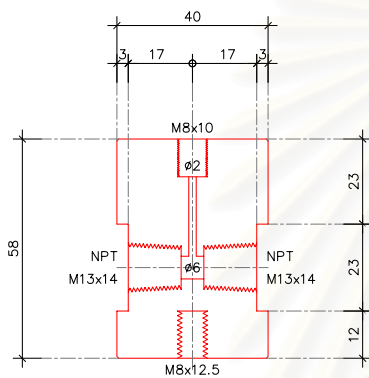
REMARK : ALL DIMENSION ON THIS DRAWING ARE MILLIMETER (MM.) UNLESS OTHERWISE.



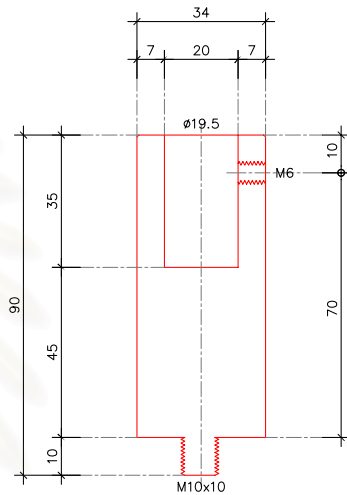
PLAN



PLAN



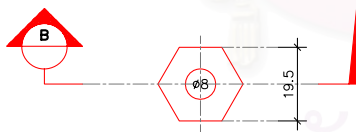
SECTION A-A



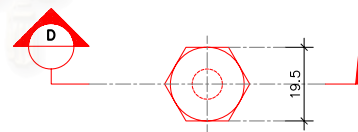
SECTION C-C

TRANSUDCER HOUSING
SCALE 1:2

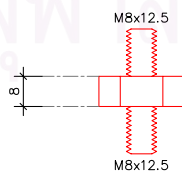
TOP ROD
SCALE 1:2



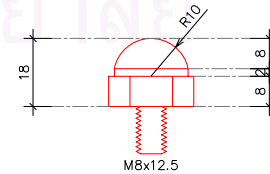
PLAN



PLAN



SECTION B-B

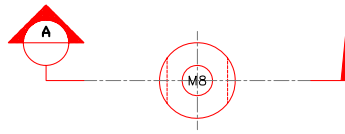


SECTION D-D

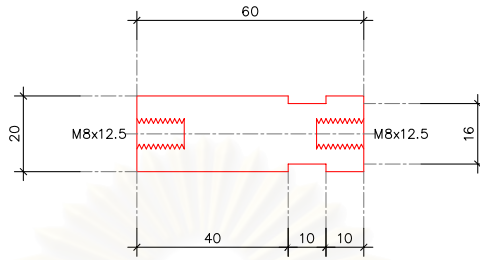
SCREW BOLT
SCALE 1:2

BEARING BOLT
SCALE 1:2

REMARK : ALL DIMENSION ON THIS DRAWING ARE MILLIMETER (MM.) UNLESS OTHERWISE.



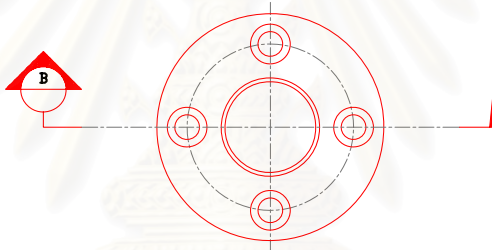
PLAN



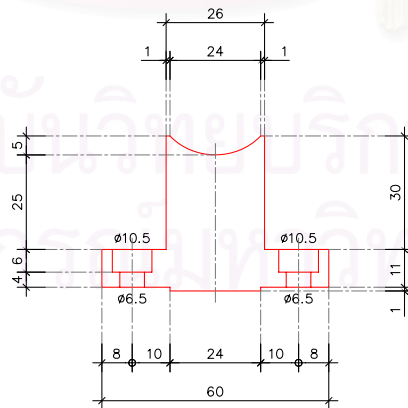
SECTION A-A

BOTTOM ROD

SCALE 1:2



PLAN

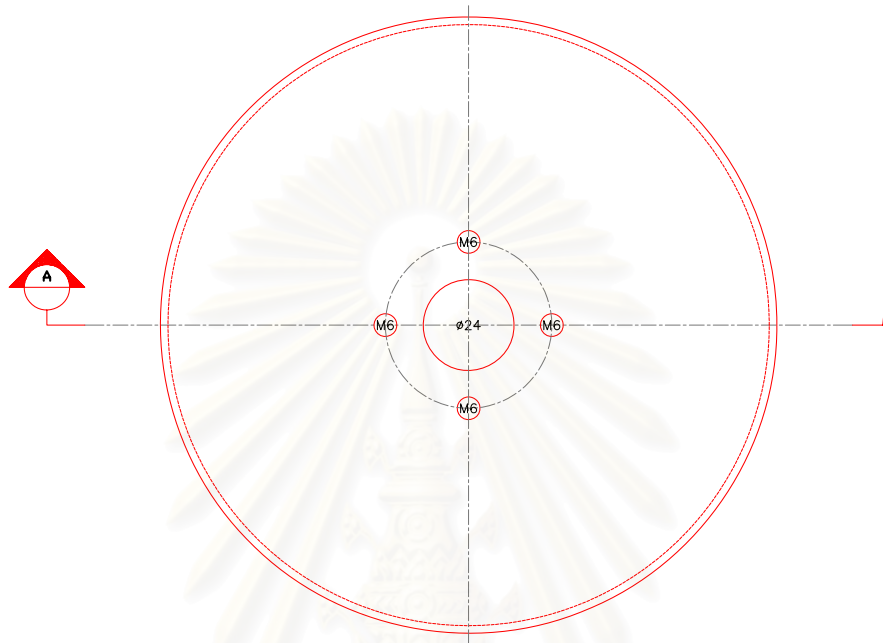


SECTION B-B

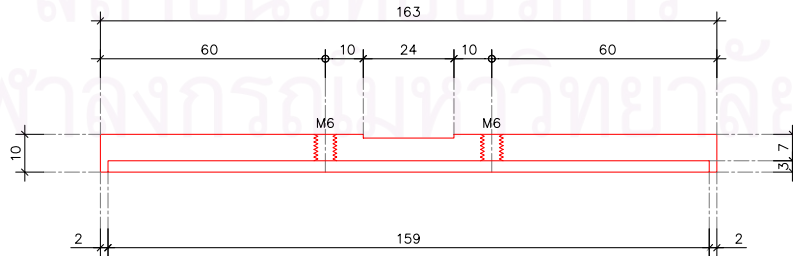
SUPPORT

SCALE 1:2

REMARK : ALL DIMENSION ON THIS DRAWING ARE MILLIMETER (MM.) UNLESS OTHERWISE.




PLAN



SECTION A-A

PLATE
SCALE 1:2

REMARK : ALL DIMENSION ON THIS DRAWING ARE MILLIMETER (MM.) UNLESS OTHERWISE.



ภาคผนวก ก

รูปเครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-1 เครื่องมือ Miniature Cone Penetration Test in Triaxial Apparatus



รูปที่ ค-2 เครื่องคอมพิวเตอร์และ ADU สำหรับเก็บข้อมูลการทดสอบ



รูปที่ ค-3 Triaxial Cell สำหรับการทดสอบตัวอย่างดิน



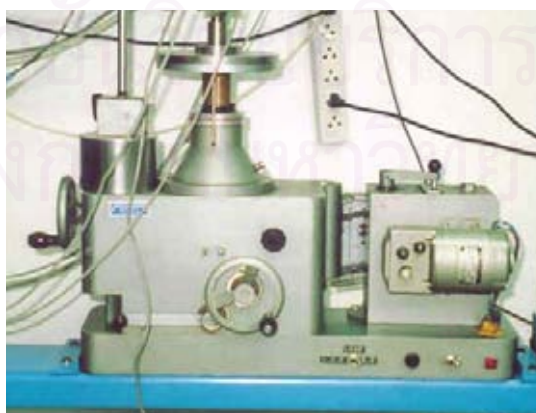
รูปที่ ค-4 Hydraulic Oil Pump สำหรับปรับเปลี่ยนแรงดันน้ำ



รูปที่ ค-5 Pressure Gauge สำหรับควบคุมแรงดันน้ำแบบ Manual



รูปที่ ค-6 Load Cell สำหรับวัดแรงรวมต้านทานปลายกรวย



รูปที่ ค-7 Loading Machine สำหรับกด Cone Penetrometer เข้าไปในตัวอย่างดิน



รูปที่ ก-8 Volume Change Unit สำหรับวัดปริมาตรน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในโพรงดิน



รูปที่ ก-9 Pressure Transducer สำหรับวัดแรงดันน้ำในโพรงดิน



รูปที่ ก-10 LVDT สำหรับวัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง



รูปที่ ค-11 Deaired Water Apparatus สำหรับผลิต Deaired Water ที่ใช้ในการทดสอบ

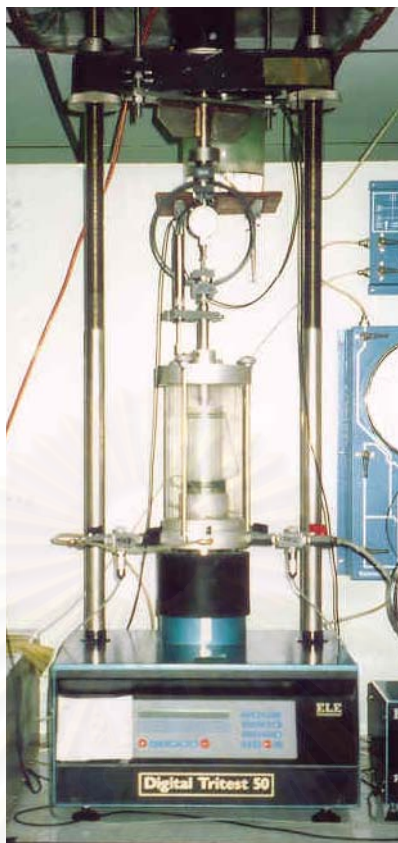
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

รูปเครื่องมือ Conventional Triaxial Test

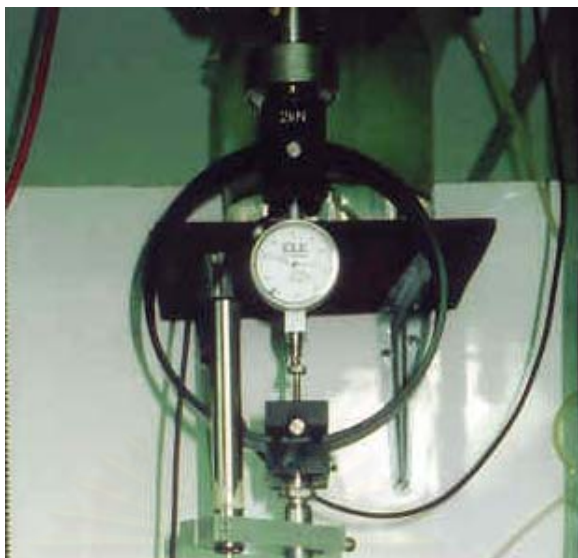
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ง-1 เครื่องมือ Conventional Triaxial Test

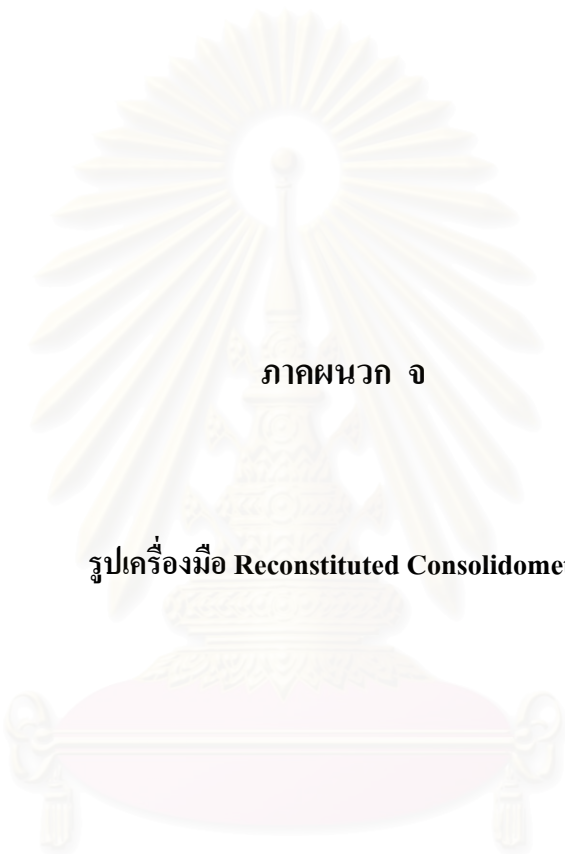


รูปที่ ง-2 Triaxial Cell สำหรับการทดสอบตัวอย่างดิน



รูปที่ ง-3 Proving Ring สำหรับวัดแรงในแวนดิ่งที่กระทำกับตัวอย่างดิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

รูปเครื่องมือ Reconstituted Consolidometer

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ จ-1 เครื่องมือ Reconstituted Consolidometer No.1 (วิโรจน์, 2546)



รูปที่ จ-2 เครื่องมือ Reconstituted Consolidometer No.2

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพลากร พิรภาคย์ เกิดเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ.2520 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2541 หลังจากนั้นได้เข้าทำงานที่ บริษัท ศรีราชาคอนสตรัคชั่น (1994) จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรโยธา ประสบการณ์การทำงาน ได้แก่ งานออกแบบ และงานควบคุมการก่อสร้างอาคารโรงงานปิโตรเคมีในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2542 ถึง 2543 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย