ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการวิจัยและการทดสอบ

3.1 ลักษณะทั่ว ๆ ไปของดิน เหนียวอ่อนกรุง เทพฯ

ในที่ราบลุ่มภาคกลางของ เมืองไทยโดย เฉพาะใน เขตกรุง เทพมหานครและพื้นที่ใกล้เคียง ภายใต้พื้นดินข้างล่าง เป็นชั้นดินหนา เกิดจากการตกตะกอนทับถมกันขึ้นมา (sedimentation) ส่วนมาก เป็นพวก soft highly plastic marine clay ซึ่งก่อให้ เกิดปัญหาต่าง ๆ ทาง foundation ของสิ่งก่อสร้างที่อยู่บนชั้นดินนี้อย่างมากมาย

จากการศึกษา เบื้องต้น เกี่ยวกับ geotechnical properties ของชั้นดินใน เขตกรุง เทพมหานครและบริ เวณพื้นที่ใกล้เคียง พบว่าสามารถแบ่งชั้นดินต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ เป็น 4 ชั้น คือ

1. Weathered crust เป็นชั้นดินบนสุดมีความหนาของชั้นดินประมาณ 2±1 เมตร ส่วนมาก เป็นพวก dark grey clay ซึ่งมักพบรอยแตก (crack) อยู่ใน เนื้อดิน เนื่องจาก เกิดการ เปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาของขบวนการ wetting และ drying ในชั้นดินนี้ ผิวดินอยู่ประมาณ 1.5 เมตร เหนือระดับน้ำทะ เล

2. Very soft to medium dark grey clay ดินในชั้นดินนี้ เป็นดิน เหนียวอ่อนที่ เรียกกันว่า ดิน เหนียวอ่อนกรุง เทพฯ (soft Bangkok clay) อยู่ถัดจากชั้น weathered crust ลงมา โดยทั่ว ๆ ไปพบอยู่จนถึงระดับ -(12±2) เมตร ต่ำจากระดับน้ำทะ เล (MSL)

3. Stiff to hard light grey and yellow-brown clay เป็นชั้นดินแข็ง ซึ่งพบอยู่ถัดลงมาจากชั้นดิน เหนียวอ่อนกรุง เทพฯ ความหนาของชั้นดินนี้มีไม่แน่นอน

4. Dense sand and gravel layer ลึกลงไปจากดินแข็ง เป็นชั้นทรายซึ่งมักพบว่ามีพวกดิน เหนียวหรือ silt ปนอยู่ เสมอ และมีความหนาของชั้นนี้อย่างน้อยที่สุดประมาณ 1.50 เมตร

ในการวิจัยนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการวัดค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ของดินในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (soft Bangkok clay) เท่านั้น เพราะเป็นชั้นดินที่มักพบว่ามีปัญหาเกี่ยวกับ foundation อยู่เสมอ และในดินเหนียวอ่อนนี้สามารถทำการวิจัยที่ให้ผลได้แน่นอนกว่าดินในชั้น weathered zone ที่มีคุณสมบัติไม่แน่นอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องคุณสมบัติของดินที่เกี่ยวกับแรงเฉือน เช่น ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับ ($\bar{\sigma}_{vm}$)

3.2 สถานที่และการเก็บตัวอย่างดินที่ทำการทดลอง

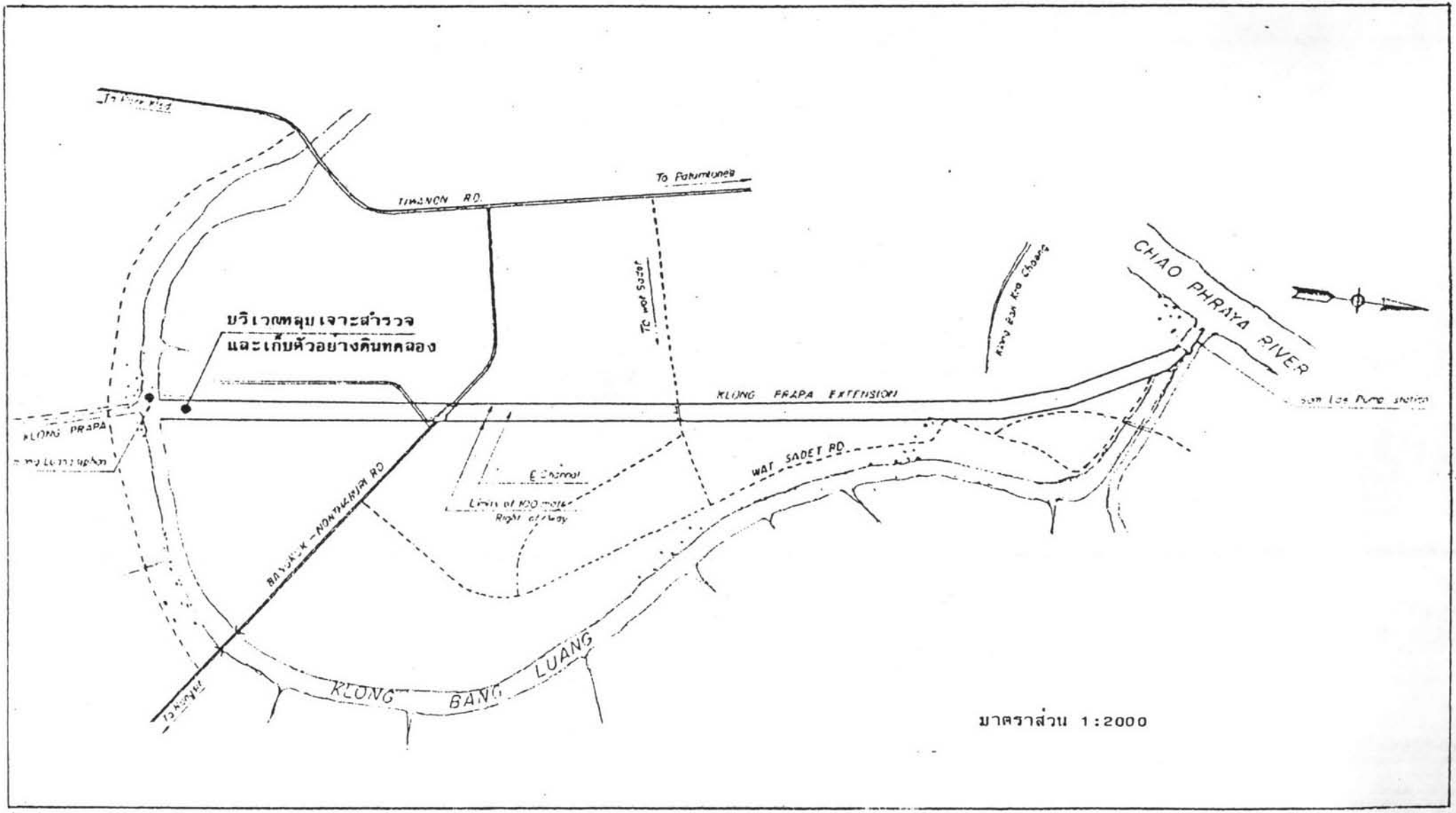
3.2.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดินที่ทำการทดลอง

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ถูกเก็บ (sampling) ขึ้นมาจากชั้นดินเหนียวอ่อนที่ระดับความลึก 5 เมตรจากผิวดินเดิม ณ ที่บริเวณก่อสร้างคลองส่งน้ำบางหลวงของการประปานครหลวงที่จังหวัดปทุมธานี อยู่เลยแยกรังสิตไปทางจังหวัดปทุมธานีประมาณ 10 กิโลเมตร และมีระยะทางห่างจากกรุงเทพฯ ขึ้นไปทางทิศเหนือประมาณ 42 กิโลเมตร (ดูรูปที่ 3.1 แสดงบริเวณสถานที่เก็บตัวอย่างดิน) ตัวอย่างดินที่เก็บขึ้นมาเป็นแบบ tube sample จำนวน 6 tubes และ block sample จำนวน 2 blocks ซึ่งตัวอย่างดินแต่ละจุดที่เก็บขึ้นมานี้มีระยะอยู่ห่างกันไม่เกิน 1 เมตร และที่ความลึกแตกต่างกันไม่เกิน ±0.25 เมตร เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน

3.2.2 วิธีการเก็บตัวอย่างดินที่ทำการทดลอง

ในการเก็บตัวอย่างดินนี้ทำการเก็บตัวอย่างขึ้นมา 2 แบบ คือ ตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุด (undisturbed samples) และตัวอย่างดินที่ถูกรบกวน (disturbed samples) จากบริเวณงานขุดคลองส่งน้ำบางหลวงของการประปานครหลวง ซึ่งมีวิธีการในการดำเนินการเก็บตัวอย่างดินต่อไปนี้

1. ตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุด ใช้วิธีการเก็บแบบ test pit โดยทำการเก็บตัวอย่างแบบ block sample ขนาด 29x29x29 ซม. ขึ้นมาจำนวน 2 blocks จากที่ระดับความลึก 5 เมตรจากผิวดิน ขั้นแรกทำการเปิดหน้าดินบริเวณที่ต้องการเก็บตัวอย่างดินเสียก่อนจนถึงระดับก่อนที่ต้องการเก็บตัวอย่างดินประมาณ 0.5 เมตร แล้วจึงทำการ



รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงบริเวณที่เก็บตัวอย่างดินทดลอง

ขุดดิน เป็นคูล้อมรอบตำแหน่งที่ต้องการ เก็บตัวอย่างดิน โดยมีความลึกกว่าระดับที่ต้องการ เก็บตัวอย่างดิน เล็กน้อย ความกว้างของคูดินที่ขุดประมาณ 0.5 ถึง 1 เมตร และให้ดินที่อยู่กลางคูดินที่ขุด เป็นแท่งดินมีขนาดหน้าตัดประมาณ 50x50 ซม. ทำการตัดแท่งดินที่อยู่กลางคูดินนี้ด้วย เส้นลวดให้มีขนาด เหลือประมาณ 29x29x29 ซม. อยู่ที่ความลึกประมาณ 5 เมตร จากผิวดิน เดิม นำกล่องไม้ (block) ซึ่ง เปิดหัวท้ายได้ขนาด 30x30x30 ซม. มาครอบตัวอย่างดินนี้ไว้ ทำการ เคลือบตัวอย่างดินที่ถูกกล่อง (block) ครอบไว้ด้วย paraffin โดยใช้ paraffin ที่ถูกทำให้ เหลวแล้วราด เคลือบตัวอย่างดินที่อยู่ในกล่องทางด้านบนของตัวอย่างดิน และด้านข้างของตัวอย่างดินที่มีที่ว่างระหว่างด้านข้างกล่องด้าน ในกับผิวของตัวอย่างดินด้านข้าง หลังจาก เคลือบตัวอย่างดินด้วย paraffin แล้วทำการปิดฝากล่องด้านบนไว้ จากนั้นใช้ เส้นลวดตัดตัวอย่างดินออกจากฐานของมัน เสีย ทำการยกตะแคงตัวอย่างดินที่ถูกครอบไว้อยู่ในกล่องนี้มาทำการ เคลือบด้วย paraffin ทางด้านล่างอีก จึงปิดฝากล่องด้านล่าง ให้ เรียบร้อย ทำการยกตัวอย่างดินนี้มาตั้งให้มีลักษณะ เหมือนกับตามธรรมชาติ แล้วทำการขนส่งนำไป เก็บที่ห้องปฏิบัติการต่อไป ในการศึกษาวิจัยนี้ทำการ เก็บตัวอย่างดินแบบ block sample นี้ขึ้นมาจำนวน 2 blocks และให้มีระยะห่างจากกันไม่ เกิน 1 เมตร เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่มีคุณสมบัติ เหมือนกันมากที่สุด

2. ตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนบ้าง ทำการ เก็บตัวอย่างดินแบบนี้ขึ้นมาโดยใช้แท่งกระบอกบาง (thin wall tube) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว และยาว 30 นิ้ว ทำการ เก็บตัวอย่างได้โดยทำการ เปิดหน้าดินขึ้นมาจนถึงความลึกประมาณ 5 เมตรจากผิวดิน ใช้ข้อนยางตอกกระบอกบางลงในดินแล้วทำการหมุน (shear) กระบอกบางโดยรอบ เพื่อ เอาตัวอย่างดินขึ้นมา โดย เจตนาจะให้ตัวอย่างดินถูกรบกวนด้วย ทำการดึง เอาตัวอย่างขึ้นมา เคลือบด้วย paraffin ปิดหัวท้ายทั้งทางด้านบนและด้านล่างไว้ นำ เอาตัวอย่างไป เก็บไว้ที่ห้องปฏิบัติการ ในการศึกษาวิจัยนี้ทำการ เก็บตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนจากกระบอกบางขึ้นมา 6 กระบอก ที่ระดับความลึก 5 เมตรจากผิวดิน เดิม ระยะห่างของจุดที่ทำการ เก็บตัวอย่างดินแบบ block sample และแบบกระบอก (tube sample) นี้ไม่ เกิน 1 เมตร เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินแบบblock sample ที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดและตัวอย่างดินชนิด เป็นกระบอก (tube sample) ที่ถูกรบกวนบ้างมีคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดินใกล้ เคียงกันที่สุด

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 คุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ(Basic Index Properties of Soft Bangkok Clay)

หลังจากการเก็บตัวอย่างดินเรียบร้อยแล้ว ได้นำเอาตัวอย่างดินที่เก็บได้มาทำการทดลองหาคุณสมบัติ index properties ต่าง ๆ ของดิน โดยวิธีการทดลองมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) และเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าที่ได้จาก Moh และคณะ, 1969 ดังแสดงผลในตารางที่ 3.1

จากตัวอย่างดินที่เก็บมาได้ทำการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของดินและได้คำนวณหาค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งตามธรรมชาติ (in situ total vertical stress, σ_{vo}) และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ (in situ effective vertical stress, $\bar{\sigma}_{vo}$) ของตัวอย่างดิน ที่ใช้ในการทำการทดลอง ณ ความลึกที่เก็บขึ้นมาจากชั้นดิน ณ บริเวณที่เก็บตัวอย่างดินนั้น ดังแสดงผลที่ได้ในรูปที่ 3.2

เมื่อทราบค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vo}$) ของดินแล้ว ทำการตรวจสอบหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ (maximum past pressure, $\bar{\sigma}_{vm}$) ของดินจากตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุด โดยวิธี one-dimensional oedometer test ชนิด fixed ring และใช้วิธีการของ Casagrande ในการหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) เพื่อตรวจสอบดูว่าประวัติของหน่วยแรง (stress history) ของตัวอย่างดินเป็นอย่างไร (ดูรูปที่ 3.3 และ 3.4) และได้แสดงผลที่ได้ให้เห็นในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ประวัติของหน่วยแรง (stress history) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่เก็บมาทำการศึกษาและวิจัย

ความลึก (เมตร)	σ_{vo} กก/ซม^2	$\bar{\sigma}_{vo}$ (1) กก/ซม^2	$\bar{\sigma}_{vm}$ กก/ซม^2	OCR
5	0.85	0.45	0.90	2

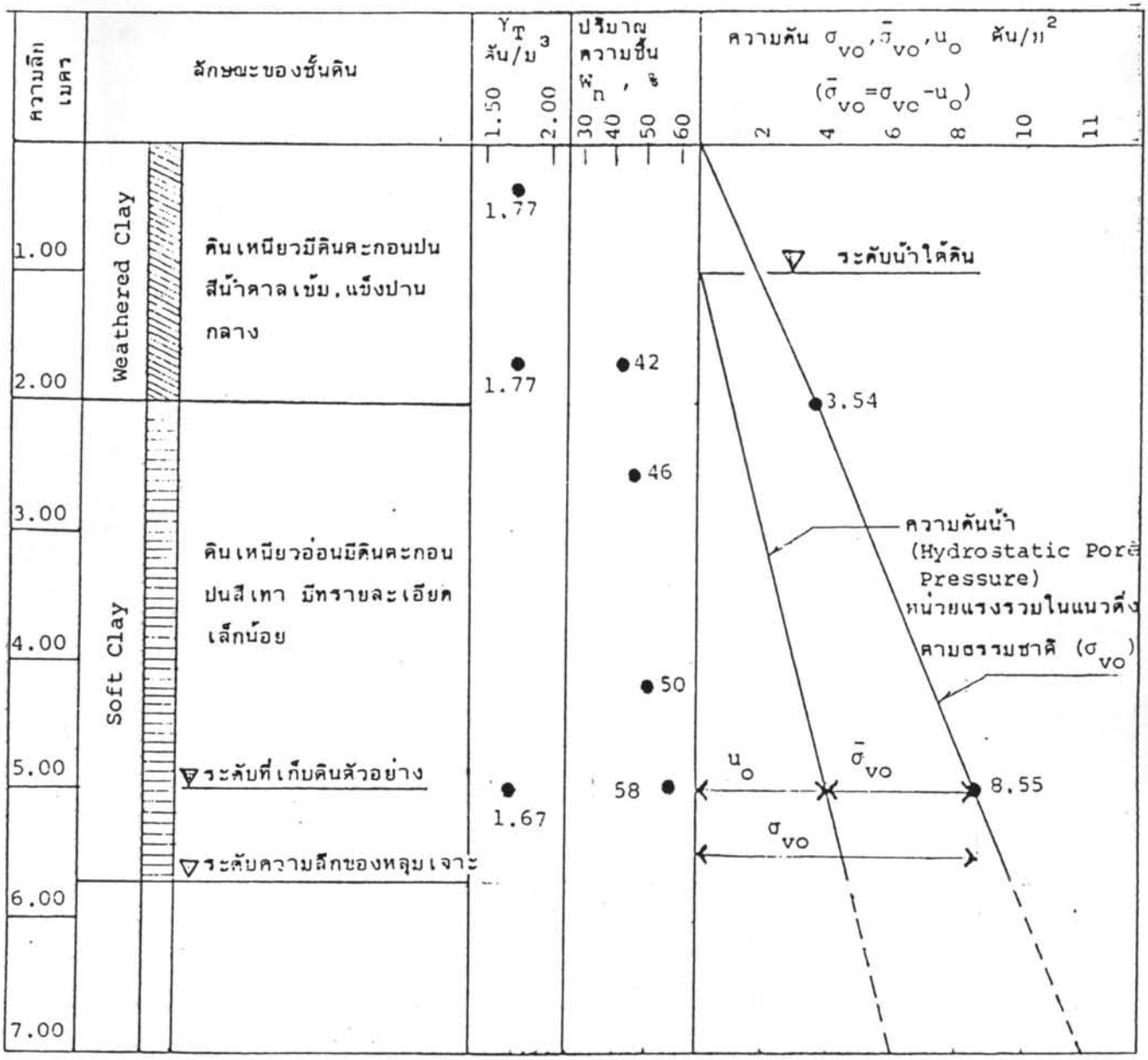
(1) คิดโดยใช้ค่าความดันน้ำในโพรงดินอยู่ในลักษณะ hydrostatic condition และระดับน้ำบาดาลคิดอยู่ที่ความลึก 1.0 เมตร จากพื้นดิน

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

Property	* Moh,Nelson&Brand (1969)		At Site under Investigation
	Representative Value	Typical Range	
Natural Water Content w_n,%	60 -70	50 - 58	52 - 60
Liquid Limit w_l,%	75	55 - 95	64 ± 1
Plastic Limit w_p,%	28	23 - 33	27 ± 1
Plasticity Index I_p,%	47	20 - 60	37 ± 1
Liquidity Index	0.85	0.7 - 1.0	0.8 ± 0.1
Specific Gravity , G_s	2.70	2.65 - 2.77	2.80 ± 0.01
Total Unit Weight γ_t , t/m^3			
Above 2 ± 1 m Depth	1.74	1.65 - 1.80	1.77 ± 0.02
Below 2 ± 1 m Depth	1.65	1.45 - 1.75	1.67 ± 0.03
Color			Dark Grey
Consistency			Soft
Sensitivity			2 - 4
** % Clay < 0.005 mm			70 - 75

* Data are for clay around the city of Bangkok

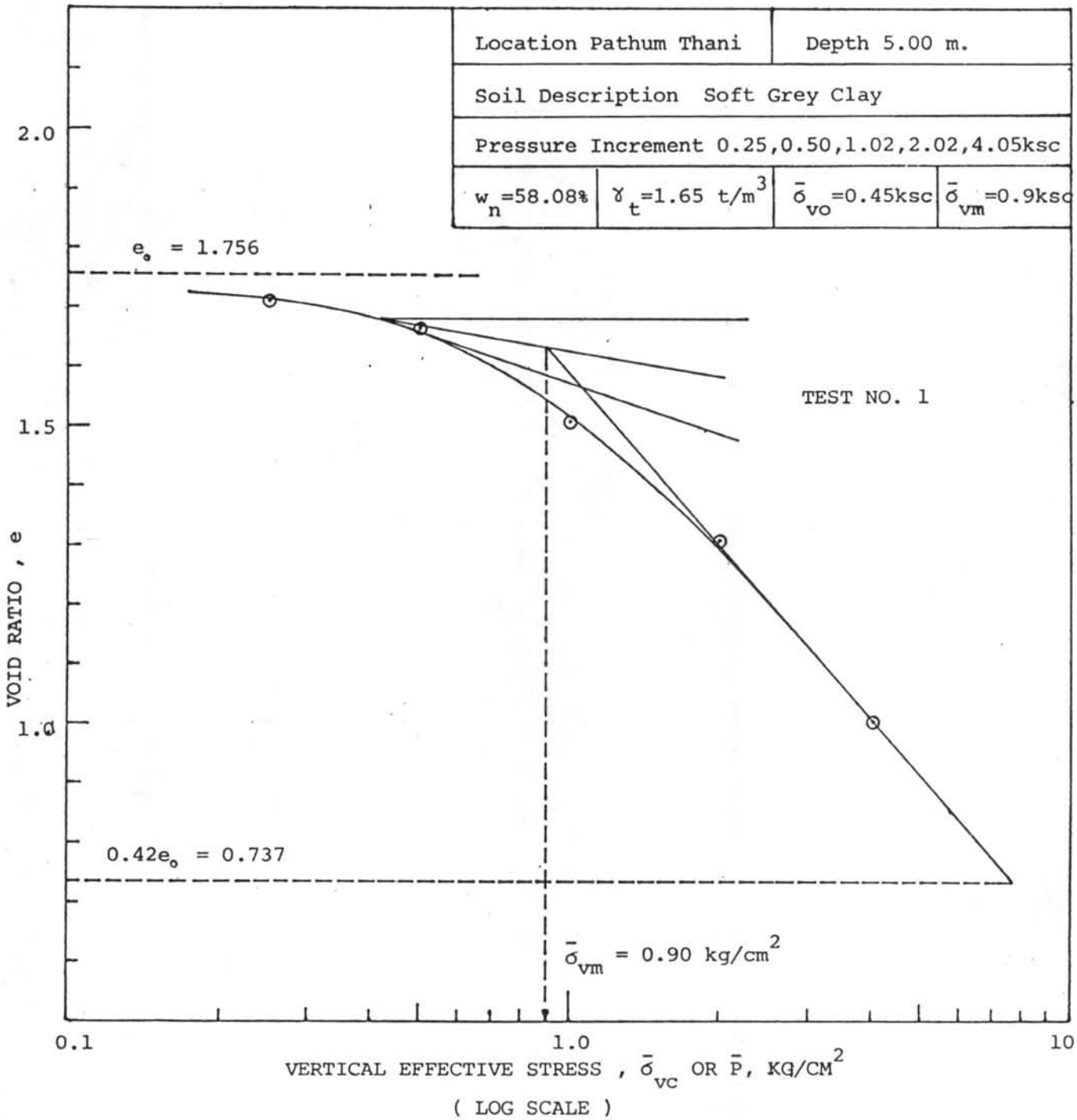
**ASTM Standard



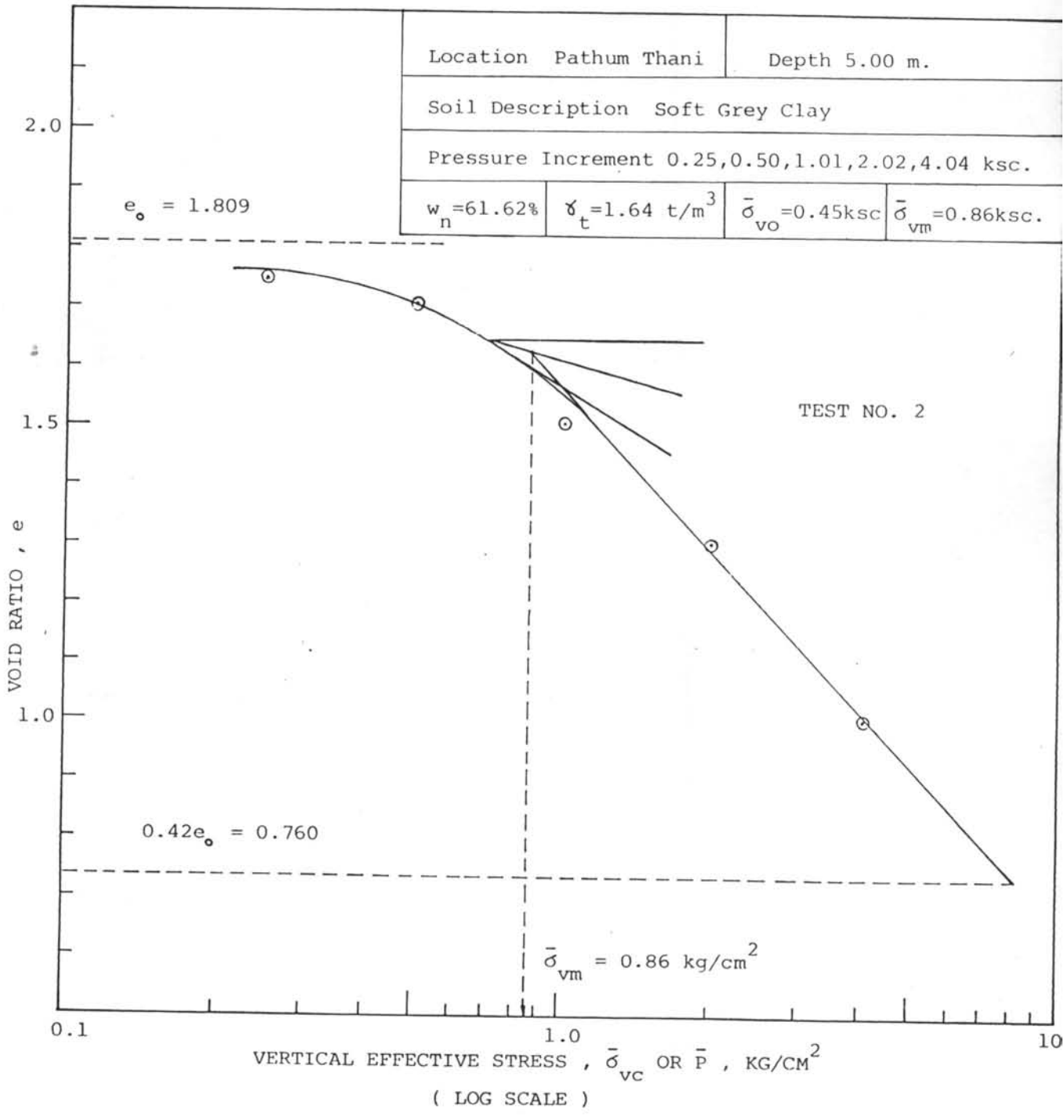
จาก K.E.C. 2-T86C หลุมเจาะที่ BH-1 สถานที่ ข้างคลองบางหลวง (ดูรูปที่ 3.1) จ. ปทุมธานี

โครงการณ์ ขยายคลองประปา เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2524

รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของชั้นดินเหนือระดับที่เก็บดินตัวอย่าง



รูปที่ 3.3 ผลของการทดสอบหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดิน เคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) จากการทดลอง one-dimensional oedometer.



รูปที่ 3.4 ผลของการทดสอบหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) จากการทดลอง one-dimensional oedometer

การประมาณค่า K_o สำหรับดินที่เป็น overconsolidated clay ได้มาจากสูตรความสัมพันธ์ของค่า K_o กับ OCR และ plasticity index ของ Schmidt (1966)

$$K_o(OC)/K_o(NC) = OCR^m$$

m = 0.38 สำหรับดินที่มี plasticity index เท่ากับ 37.5 %

$K_o(NC)$ = 0.58 (จากการทดลองดูในภาคผนวก ก.)

$K_o(OC)$ = $0.58 \times OCR^{0.38}$

จากข้อมูลเหล่านี้ทำให้สามารถคำนวณหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งและแนวนอน เพื่อใช้ในการ consolidated ตัวอย่างดินว่าควรเป็นเท่าใดสำหรับดินที่มีค่า OCR ต่างกัน ค่าของ K_o สำหรับแต่ละค่า OCR ได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.5 จากการทดสอบจริงในห้องทดลอง พบว่าค่า K_o ที่ประมาณได้สำหรับที่ OCR ต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริง

ในการทดลองแบบ $\overline{CAUC}$ นี้ ได้ทำการทดลองวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ของดินเหนียวอ่อน โดยวิธีการ consolidated ตัวอย่างดินทั้งแบบ SHANSEP และ Recompression และทำการทดสอบทั้งกับตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดและที่ถูกรบกวนด้วย โดยทำการทดสอบที่ค่า OCR ต่าง ๆ ดังนี้ คือ ที่ค่า OCR เท่ากับ 1, 1.5, 2 (in situ OCR) และ 3 ตามลำดับ

นอกจากนี้แล้วเพื่อให้แน่ใจว่าดินอ่อนมีคุณสมบัติที่ normalized ได้ ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินได้รับในห้องทดลอง (maximum effective vertical consolidation stress, $\bar{\sigma}_{cm}$) สำหรับวิธีการของ SHANSEP ได้ใช้สองค่า คือ $\bar{\sigma}_{cm}$ เท่ากับ 1.6 และ 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร วิธีการทดลองแบบ SHANSEP จึงมีทั้งหมด 2 ชุดด้วยกัน

3.4 การทดสอบ Triaxial และโปรแกรมของการทดลอง

3.4.1 โปรแกรมของการทดสอบในการวิจัย

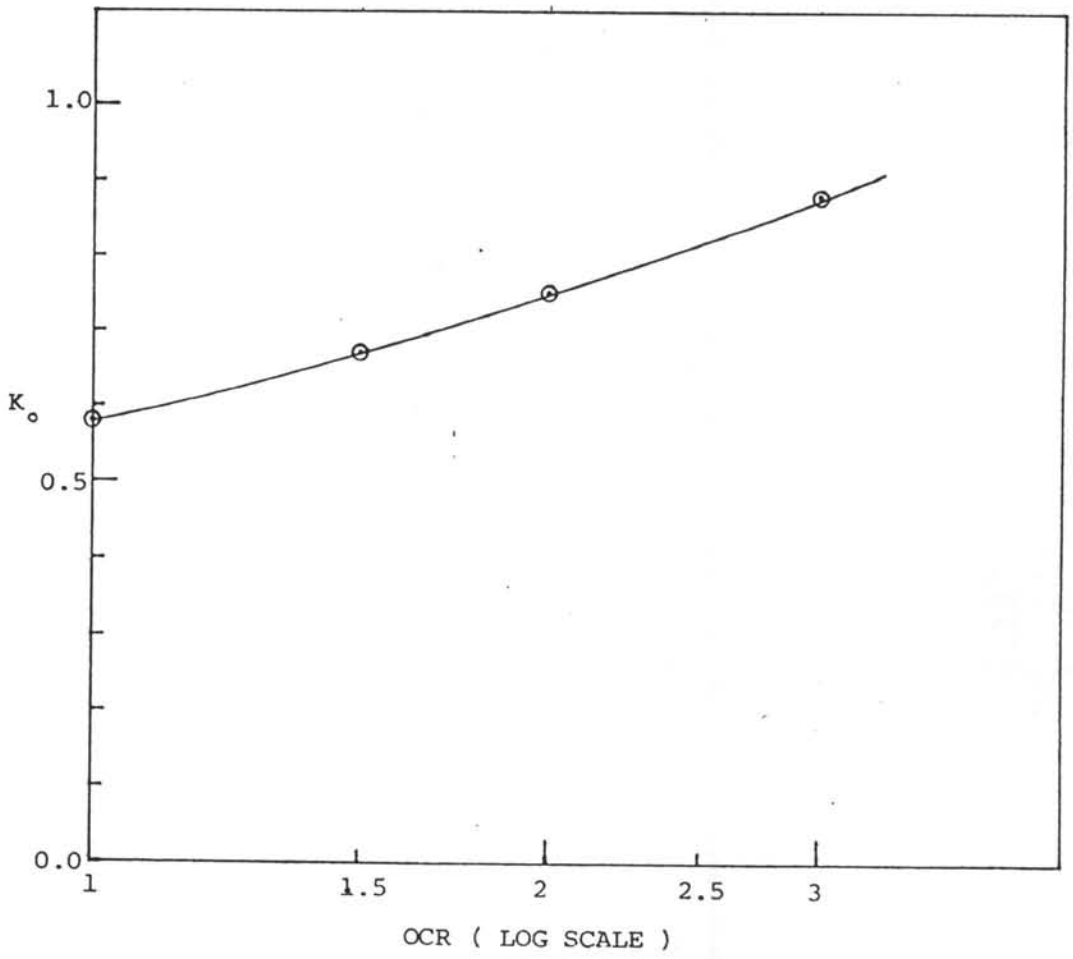
ในการวิจัยนี้ การทดสอบวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) เพื่อให้ได้ค่าแรงเฉือนที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง (ดูตารางที่ 3.3) แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. การทดสอบกำลังรับแรงกดของดินที่ถูกอัดตัวคายน้ำแบบแอนไอโซทรอบิกด้วยเครื่อง triaxial ในสภาพอันเดรนพร้อมวัดค่าความดันน้ำในโพรงดิน (anisotropically consolidated undrained triaxial compression test with pore pressure measurement, $\overline{CAUC}$ test), โดยการ consolidated ตัวอย่างดินด้วยวิธีการแบบ Recompression และ SHANSEP เพื่อเปรียบเทียบผลของการทดลอง ทำให้ทราบว่าวิธีการของ SHANSEP ใช้ได้หรือไม่

2. การทดสอบกำลังรับแรงกดของดินที่ไม่ถูกอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่อง triaxial ในสภาพอันเดรน (unconsolidated undrained triaxial compression test, UU test) เพื่อชี้ให้เห็นว่าผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดินที่จะลดค่าแรงเฉือนที่วัดได้ลงไปเท่าใด

การวัดค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนในวิทยานิพนธ์นี้แบบ $\overline{CAUC}$ test ได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันของดิน (coefficient of earth pressure, K) ในการทดสอบประมาณใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันของดินณ สภาวะสมดุลย์ (K_o) และทำการเพิ่มแรงอัดจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการพิบัติด้วยอัตราความเครียดเท่ากับ 1 %/ชั่วโมง

การประมาณค่า K_o ทำโดยวิธีของ Chang และคณะ (1977) ได้ค่าประมาณของ K_o สำหรับ normally consolidated clay เท่ากับ 0.58 ซึ่งค่านี้เท่ากับค่า K_o ของดินที่หาได้ที่ AIT campus (Moh และ Wang, 1968) วิธีการที่ใช้ดูในภาคผนวก ก. ซึ่งแสดงถึงวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบหาค่า K_o



รูปที่ 3.5 ค่า K_o สัมพันธ์กับค่า OCR ของดินที่ทำการวิจัย

การทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบโดยใช้ตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดและทำการ reconsolidated ตัวอย่างดินโดยวิธีการแบบ Recompression แบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลองคือ

(i) Test No. RU-1100 ที่ OCR = 1.0 K_o = 0.58

(ii) Test No. RU-1150 ที่ OCR = 1.5 K_o = 0.67

(iii) Test No. RU-1200 ที่ OCR = 2.0 K_o = 0.75

(iv) Test No. RU-1300 ที่ OCR = 3.0 K_o = 0.88

(RU = Recompression test on undisturbed samples)

2. การทดสอบโดยใช้ตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุด และทำการ consolidated ตัวอย่างดินโดยวิธีการแบบ SHANSEP แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด ที่ค่า OCR และ K_o เหมือนกับวิธีการทดสอบแบบ Recompression คือ

ก. ที่หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินได้รับในห้องทดลอง (maximum effective vertical consolidation stress in the laboratory, $\bar{\sigma}_{cm}$) เท่ากับ 1.60 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลอง คือ

(i) Test No. S-1100 OCR = 1.0 K_o = 0.58

(ii) Test No. S-1150 OCR = 1.5 K_o = 0.67

(iii) Test No. S-1200 OCR = 2.0 K_o = 0.75

(iv) Test No. S-1300 OCR = 3.0 K_o = 0.88

(S = SHANSEP)

ข. ที่ $\bar{\sigma}_{cm}$ = 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

(i) Test No. S-2100 OCR = 1.0 K_o = 0.58

(ii) Test No. S-2150 OCR = 1.5 K_o = 0.67

(iii) Test No. S-2200 OCR = 2.0 K_o = 0.75

(iv) Test No. S-2300 OCR = 3.0 K_o = 0.88

3. การทดสอบโดยใช้ตัวอย่างที่ถูกรบกวนมาแล้วและทำการ reconsolidated ตัวอย่างโดยวิธีการแบบ Recompression ที่ค่า OCR และ K_o เท่ากับที่ทำการทดสอบแบบ SHANSEP และ Recompression ตามที่กล่าวมาแล้ว ดังต่อไปนี้

(i) Test No. RD-1100 OCR = 1.0 K_o = 0.58

(ii) Test No. RD-1150 OCR = 1.5 K_o = 0.67

(iii) Test No. RD-1200 OCR = 2.0 K_o = 0.75

(iv) Test No. RD-1300 OCR = 3.0 K_o = 0.88

(RD = Recompression test on disturbed samples)

ดูตารางที่ 3.3 แสดงโปรแกรมการทดสอบ $\overline{CAUC}$ test

อนึ่งการเก็บตัวอย่างโดยใช้กระบอกอาจได้ตัวอย่างดีเกินความต้องการจึงจำเป็นต้องมากระแทกกระบอกในห้องทดลองอีกครั้ง จากสภาพตัวอย่างเริ่มมีอาการคดและแน่ใจว่าตัวอย่างถูกรบกวนแน่นอน

4. การทดสอบแบบ UU โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดและที่ถูกรบกวนด้วย โดยใช้ค่าความดันน้ำในเซล (cell pressure, σ_c) มีค่าเท่ากับหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งตามธรรมชาติ (σ_{vo}) และใช้อัตราความเครียด ($\dot{\varepsilon}$) ในการทดสอบที่ทำให้พิบัติเท่ากับ 5 % ต่อชั่วโมง (ดูตารางที่ 3.4)

ตารางที่ 3.3 โปรแกรมการทดสอบ triaxial แบบ $\overline{CAUC}$ test

Set	Mode of Test	Test No.	$\bar{\sigma}_{vm}$ or $\bar{\sigma}_{cm}$ kg/cm^2	$^*\bar{\sigma}_{vc_2}$ kg/cm^2	OCR	K	$\dot{\varepsilon}$ %/hr.	t_c days
I	Recompression on Undisturbed Samples	RU-1100	0.90	0.35,0.90	1.0	0.58	1	2
		RU-1150	0.90	0.40,0.60	1.5	0.67	1	2
		RU-1200	0.90	0.33,0.45	2.0	0.75	1	2
		RU-1300	0.90	0.26,0.30	3.0	0.88	1	2
II	SHANSEP on Undisturbed Samples	S-1100	1.60	0.35,0.50,1.00,1.60	1.0	0.58	1	4
		S-1150	1.60	0.35,0.50,1.00,1.60,1.06	1.5	0.67	1	5
		S-1200	1.60	0.35,0.50,1.00,1.60,0.80	2.0	0.75	1	5
		S-1300	1.60	0.35,0.50,1.00,1.60,0.80,0.53	3.0	0.88	1	6
		S-2100	2.00	0.35,0.50,1.00,2.00	1.0	0.58	1	4
		S-2150	2.00	0.35,0.50,1.00,2.00,1.33	1.5	0.67	1	5
		S-2200	2.00	0.35,0.50,1.00,2.00,1.00	2.0	0.75	1	5
		S-2300	2.00	0.35,0.50,1.00,2.00,1.00,0.66	3.0	0.88	1	6
III	Recompression on Disturbed Samples	RD-1100	0.90	0.35,0.90	1.0	0.58	1	2
		RD-1150	0.90	0.40,0.60	1.5	0.67	1	2
		RD-1200	0.90	0.33,0.45	2.0	0.75	1	2
		RD-1300	0.90	0.26,0.30	3.0	0.88	1	2

หมายเหตุ $\bar{\sigma}_{vm}$ คือหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ

$\bar{\sigma}_{cm}$ คือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งสูงสุดที่ดินได้รับในห้องทดลอง

$^*\bar{\sigma}_{vc}$ คือค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งที่ทำให้ดินถูกอัดตัวคายน้ำในแต่ละขั้นตอนของการ consolidation เช่น 0.35, 0.50, 1.00 กก./ซม^2. เป็นต้น

ตารางที่ 3.4 โปรแกรมการทดสอบ triaxial แบบ UU test

TEST NO.	Type of Sample	Cell Pressure σ_c , kg/cm^2	Strain Rate $\dot{\varepsilon}$, %/hr.
U - 1	Undisturbed Sample	0.85	5
U - 2	Disturbed Sample	0.85	5

3.4.2 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงกดของดินที่ถูกอัดตัวคายน้ำแบบแอนไอโซทรอบปิก ด้วยเครื่อง Triaxial ในสภาพอันเดรนพร้อมวัดค่าความดันน้ำในโพรงดิน (Anisotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test with Pore Pressure Measurement, $\overline{\text{CAUC}}$ Test)

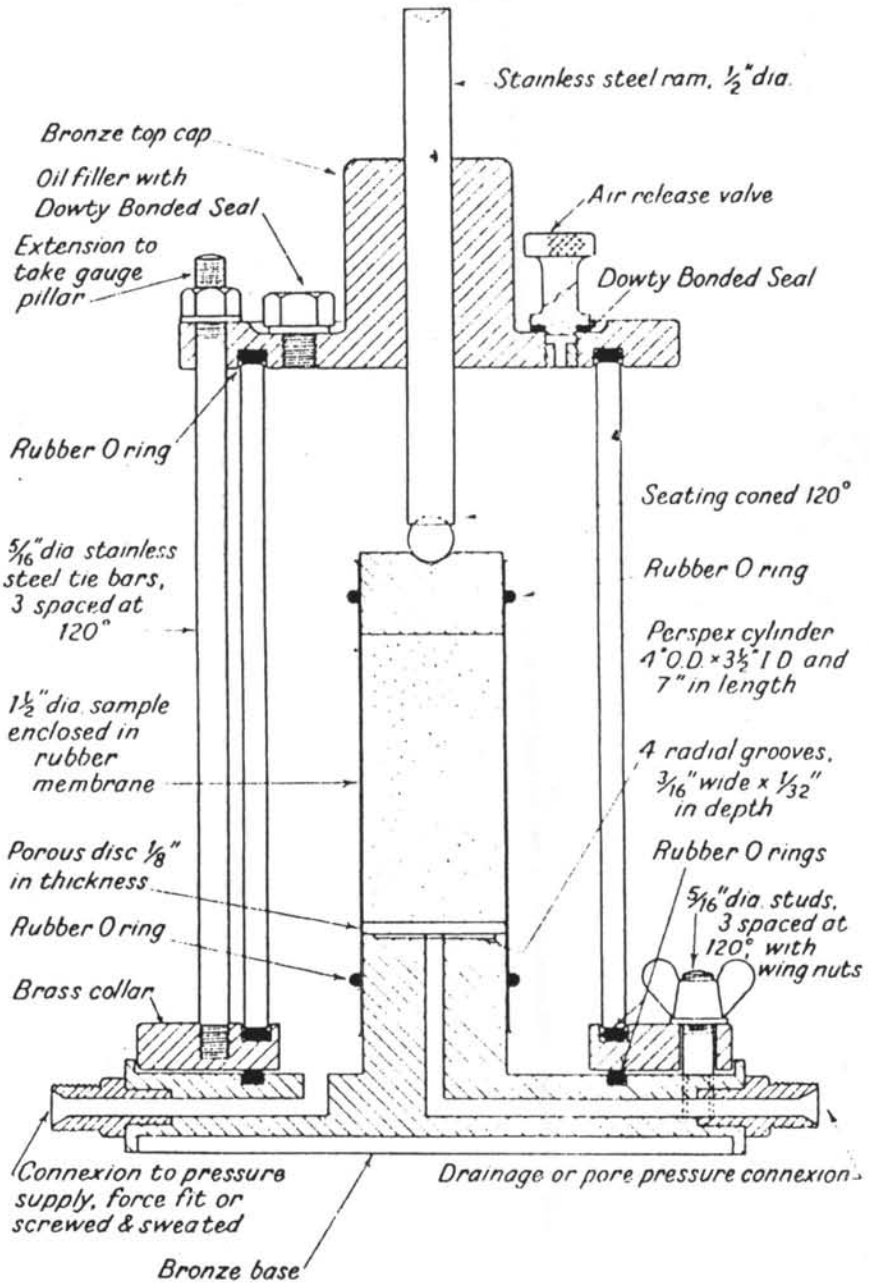
ได้ทำการวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) โดยวิธี $\overline{\text{CAUC}}$ test โดยใช้วิธีการทดลองมาตรฐานของ Bishop และ Henkel (1957) ด้วยอัตราความเครียด ($\dot{\varepsilon}$) คงที่เท่ากับ 1 % ต่อชั่วโมง โดยแบ่งวิธีการ consolidated ตัวอย่างก่อนการวัดหาค่าแรงเฉือนเป็น 2 วิธี คือ

1. การ consolidatedตัวอย่างแบบ Recompression ทำการทดลองโดยการ consolidated ตัวอย่างดินไปที่สภาวะหน่วยแรงที่ทำให้ดินอัดตัวคายน้ำ (consolidation stress) น้อยกว่าหรือ เท่ากับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) จนได้ค่า OCR ที่ต้องการทำการทดสอบ

2. การ consolidated ตัวอย่างดินแบบ SHANSEP โดยทำการ consolidated ตัวอย่างดินที่มีพฤติกรรมที่ใช้หลักการของ NSP ได้ให้ได้ค่า OCR ที่ต้องการ โดยขั้นตอนแรกจะ consolidated ตัวอย่างไปที่หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งมากกว่า หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) ประมาณ 2 ถึง 3 เท่าของ $\bar{\sigma}_{vm}$ นี้ แล้วทำการลดค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในตัวอย่าง (rebound) เพื่อให้ได้ค่า OCR ต่าง ๆ ตามที่ต้องการก่อนการทดสอบ (ถ้าต้องการ OCR = 1.0 ก็ไม่ต้องทำการลดค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ)

รายละเอียดวิธีการทดสอบกำลังรับแรงกดของดินที่ถูกอัดตัวคายน้ำแบบแอนไอโซทรอบปิก ด้วยเครื่อง triaxial ในสภาพอันเดรนพร้อมวัดค่าความดันน้ำในโพรงดิน ($\overline{\text{CAUC}}$ test) ด้วยอัตราความเครียด ($\dot{\varepsilon}$) คงที่เท่ากับ 1 % ต่อชั่วโมง (ดูรูปที่ 3.6 สำหรับรายละเอียดมาตรฐาน) มีดังนี้

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 รายละเอียดมาตรฐานของ triaxial cell

(จาก Bishop และ Henkel, 1957)

ก. เครื่องมือ triaxial ที่ใช้ ใช้ triaxial cell ตามแบบมาตรฐานและเครื่องกดอัด (compression machine) ของบริษัท Wykeham Farrance ระบบของความดันน้ำใน triaxial cell ใช้ระบบสมดุลย์ของแท่งปรอท (self-compensating mercury column system) และใช้ pore pressure transducer ในการวัดค่าความดันน้ำในโพรงดิน โครงแขวนเหล็ก (steel frame hanger) ถูกใช้สำหรับแขวนน้ำหนักในการทดสอบเพื่อทำให้เกิดการอัดตัวคายน้ำแบบแอนไอโซทรอบปิก (anisotropic consolidation)

ข. วิธีการเตรียมตัวอย่าง ตัวอย่างดินที่ได้มาจากการเก็บตัวอย่างดินแบบกล่อง(block sample)ได้ถูกนำมาแบ่งในตอนแรกเป็นก้อนเล็กขนาด 3"x3"x5" ส่วนตัวอย่างที่เก็บมาแบบกระบอก (tube sample)ถูกนำมาดันออกจากกระบอกบาง (thin wall tube) ด้วยเครื่อง hydraulic jack แล้วนำมาแบ่งให้เป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว สูง 5 นิ้ว ตัวอย่างที่ถูกแบ่งมาแล้วเหล่านี้นำมาตัดแต่งขอบ (trim) ด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก (steel wire saw) ใน trimming frame จนกระทั่งได้ตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3.55 เซนติเมตร แล้วนำตัวอย่างนี้มาตัดที่หัวและท้ายให้เหลือความยาวประมาณ 7.11 เซนติเมตร เพื่อทำให้สัดส่วนของความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างเป็น 2 ต่อ 1 หลังจากนี้นำตัวอย่างที่ถูกตัดแต่ง (trimmed) พร้อมวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและขนาดความยาวเรียบร้อยแล้วมาชั่งน้ำหนักไว้ เพื่อหาความหนาแน่น (total density)และปริมาณความชื้น (water content) ของตัวอย่างดินไว้

ค. วิธีการจัดตัวอย่างในเครื่องมือ ก่อนนำเอาตัวอย่างมาตั้งไว้ใน triaxial cell สายความดัน (pressure line) ต่าง ๆ ที่ติดต่อกับด้านล่างฐานของ triaxial cell ต้องถูกไล่ฟองอากาศที่มีค้างอยู่ออกให้หมดด้วย de-aired water แล้วจึงวาง porous stone ซึ่งถูกต้มไล่ฟองอากาศออกแล้ว (ต้ม porous stone ในน้ำเดือดไม่ต่ำกว่า 10 นาที) ไว้ที่ฐานของ triaxial cell ต่อมาจึงนำเอาตัวอย่างมาวางบน porous stone และวาง top cap ไว้ที่ด้านบนของตัวอย่าง ระหว่าง porous stone กับ top cap และตัวอย่างดินต้องมี filter paper วางคั่นไว้ เพื่อมิให้ส่วนของดินที่ละลายในน้ำไหลเข้าไปใน porous stoneได้ และเพื่อให้ตัวอย่างถูก consolidated ได้

เร็วขึ้นจึงได้ใช้ filter paper ขนาด $\frac{1}{4}$"x3" จำนวน 8 อันของ Whitman's No. 54 พันรอบตัวอย่างดิน โดยอาศัย filter paper ด้านข้างนี้ช่วย เพิ่มอัตราการไหลของน้ำออกจากตัวอย่าง (drained) ระหว่างการconsolidationและช่วยกระจายความดันน้ำในโพรงดินให้เท่ากันตลอดความสูงของตัวอย่างในระหว่างการทดสอบหาแรงเฉือน หลังจากนั้นจึงใช้ rubber membrane บาง ๆ หุ้มตัวอย่างไว้ 2 ชั้น เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างสัมผัสกับน้ำโดยรอบใน triaxial cell รัด rubber membrane ไว้ด้วย rubber "O" ring จำนวน 6 เส้นที่ด้านล่าง (pedestal) 3 เส้นและที่ top cap 3 เส้น

หลังจากตั้งตัวอย่างบน Pedestal เสร็จเรียบร้อยจึงนำเอา (cell) ด้านบนครอบไว้และยึดสกรูด้านบนให้เรียบร้อย ใส่น้ำเข้าไปในเซลทาง cell pressure line ด้วยความดันบรรยากาศจนกระทั่งเหลือช่องว่างด้านบนในเซลประมาณ 1 เซนติเมตร แล้วจึงใส่น้ำมันเครื่อง (greasy oil) เข้าไปทางด้านบนทาง oil valve จนเต็มเซล เพื่อเป็นชั้นฟิลม์ด้านบนลดการไหลของน้ำออกจากเซลทาง ram หรือ piston เมื่อใส่น้ำมันเครื่องเข้าไปจนล้นออกมาจึงทำการปิด air valve กับ oil valve ให้เรียบร้อย

ง. การทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อทำให้ตัวอย่างให้มี degree of saturation เท่ากับ 100 % และขจัดปัญหายุ่งยากในการวัด negative pore pressure ของตัวอย่าง การทดสอบจึงใช้ back pressure เท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ cell pressure เท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เข้าไปในตัวอย่างดิน แล้วทิ้งไว้อย่างน้อยที่สุด 24 ชั่วโมง เพื่อทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ในขบวนการทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งเป็นขั้นตอนแรกของการ consolidated ตัวอย่าง ทำโดยค่อย ๆ เพิ่ม back pressure และ cell pressure ด้วยปริมาณเท่า ๆ กันและพร้อม ๆ กันที่ละน้อยด้วยอัตราการเพิ่มความดันเท่ากับ 0.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที โดยใช้ปั๊มมือ (hand pump) เพื่อมิให้ตัวอย่างดินถูกรบกวนมากเกินไป โดยให้ค่า cell pressure เท่ากับ 2.10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (นั่นคือ $\bar{\sigma}_c$ = 0.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตลอดเวลาการเพิ่มความดันน้ำในตัวอย่าง)

บันทึกปริมาตรของน้ำในตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำจากที่อ่านปริมาตรเปลี่ยนแปลงของน้ำ (volume change reading) (หน่วยแรงประสิทธิผลในตัวอย่างดินตอนแรกเท่ากับ 0.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ในทุกตัวอย่างดินพบว่าระหว่างที่ทำให้ตัวอย่างอิ่มตัว ตัวอย่างดินมีการสูญเสียปริมาณน้ำเล็กน้อย เมื่อใช้ผลต่างของ cell pressure และ back pressure เท่ากับ 0.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

(จ) การทำให้ตัวอย่างอัดตัวคายน้ำ ในการ consolidated ตัวอย่างขั้นตอนของการทำแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

(i) การทำให้ตัวอย่างถูกอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทรอบปิก (Isotropic Consolidation) ภายหลังตัวอย่างดินถูกทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำเรียบร้อยแล้ว (รู้โดยการทดสอบค่า B พารามิเตอร์ของ Skempton) (B = 1.0 เมื่อ S = 100 %). ขั้นตอนแรกในการ consolidated ตัวอย่างก็ทำโดยการใช้หน่วยแรงแบบไอโซทรอบปิก (Isotropic stress) คือทำการ consolidated ตัวอย่างด้วยความดันน้ำในเซล (σ_c) โดยเพิ่มความดันน้ำในเซล (σ_c) เข้าไป ให้ผลต่างของความดันน้ำในเซล (σ_c) และ back pressure (σ_b) มีค่าเท่ากับ 0.35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเสียก่อน ($\bar{\sigma}_c$ = 0.35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างเกิดการพิบัติ เพราะตัวอย่างที่มีหน่วยแรงประสิทธิผลต่ำ ๆ สามารถรับแรงเฉือนได้น้อยมาก ขั้นตอนแรกของการ consolidated ตัวอย่างด้วยหน่วยแรงแบบไอโซทรอบปิกนี้จะใช้เวลา 24 ชั่วโมง ระหว่างนั้นทำการบันทึกค่าปริมาตรของน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดินในขณะที่ทำการ consolidation ไว้จากเครื่องมือวัด volume change

(ii) การทำให้ตัวอย่างถูกอัดตัวคายน้ำแบบแอนไอโซทรอบปิก (Anisotropic Consolidation) ภายหลังจากทำให้ตัวอย่างถูกอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทรอบปิกเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนของการ consolidated ตัวอย่างต่อไป คือ การทำให้ตัวอย่างถูกอัดตัวคายน้ำแบบแอนไอโซทรอบปิก โดยการเพิ่ม dead weight ใส่เข้าไปที่ ram ด้านบนโดยใช้ steel frame hanger แขวนน้ำหนักไว้ เพื่อให้หน่วยแรงในแนวดิ่งและหน่วยแรงในแนวนอนมีค่าต่างกัน ซึ่งเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างถูกอัดตัวคายน้ำแบบแอนไอโซทรอบปิกจนได้ค่า OCR ที่ต้องการใช้เวลาตั้งแต่ 1 ถึง 5 วัน (ดูตารางที่ 3.3) ขึ้นอยู่กับค่าหน่วยแรงที่ต้องการ consolidated และวิธีที่จะทำการ consolidated (วิธีการแบบ Recompression หรือ SHANSEP)

ในการทำให้ตัวอย่างถูกอัดตัวคายน้ำแบบแอนไอโซทรอบปิก ควรทำการ calibration ของ triaxial cell ก่อนเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำในเซล (σ_c) กับน้ำหนักแขวน (hanging weight) สำหรับหาน้ำหนักที่ต้องการใช้เพื่อต้านทานความดันน้ำในเซล (σ_c) ที่จะทำให้ loading piston พยายามจะลอยตัวขึ้น น้ำหนักนี้สามารถทำให้ piston ลงมาสัมผัสกับตัวอย่างพอดี ซึ่งทำได้โดยทำการเตรียม triaxial cell เหมือนกับการทดลองจริง ๆ แต่ไม่ได้ใส่ตัวอย่างดินเข้าไป ใส่น้ำหนักแขวนไว้บน loading pistonติดตั้ง dial gauge ไว้ที่ loading piston ใส่ความดันน้ำในเซล (σ_c) เข้าไปด้วยปั๊มมือ (hand pump) และคอยอ่านค่าที่ได้จาก dial gauge ถ้า loading piston ลอยขึ้นมาจน dial gauge อ่านได้ 5 ช่อง ของ dial gauge ที่วัดได้ช่องละ 0.01 มิลลิเมตร น้ำหนักที่ต้องการใช้ต้านทานความดันน้ำในเซล (σ_c) ที่ใส่เข้าไปขณะนั้น มีค่าเท่ากับน้ำหนักที่แขวนอยู่ขณะนั้น ทำการแขวนน้ำหนักเพิ่มขึ้นและใส่ความดันน้ำในเซล (σ_c) เพิ่มขึ้นไปเหมือนเดิม ทำการบันทึกค่าความดันน้ำในเซลและน้ำหนักที่ใช้ต้านทานความดันน้ำในเซล พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำในเซลกับน้ำหนักทั้งหมด (รวมน้ำหนักของ hanger) ที่ใช้ต้านทานความดันน้ำในเซลไว้ ซึ่งน้ำหนักที่ใส่เพิ่มขึ้นบนที่แขวน (hanger) เพื่อต้านทานความดันน้ำในเซลมีค่าเท่ากับน้ำหนักทั้งหมดที่ใช้ต้านทานความดันน้ำในเซลลบด้วยน้ำหนักของที่แขวน (hanger) (ดูรูปที่ 3.7)

น้ำหนักที่ใส่เพิ่มขึ้นบนที่แขวน = น้ำหนักทั้งหมดที่ใช้ต้านทานความดันน้ำในเซล (เพื่อต้านทานความดันน้ำในเซล)

- น้ำหนักของที่แขวน

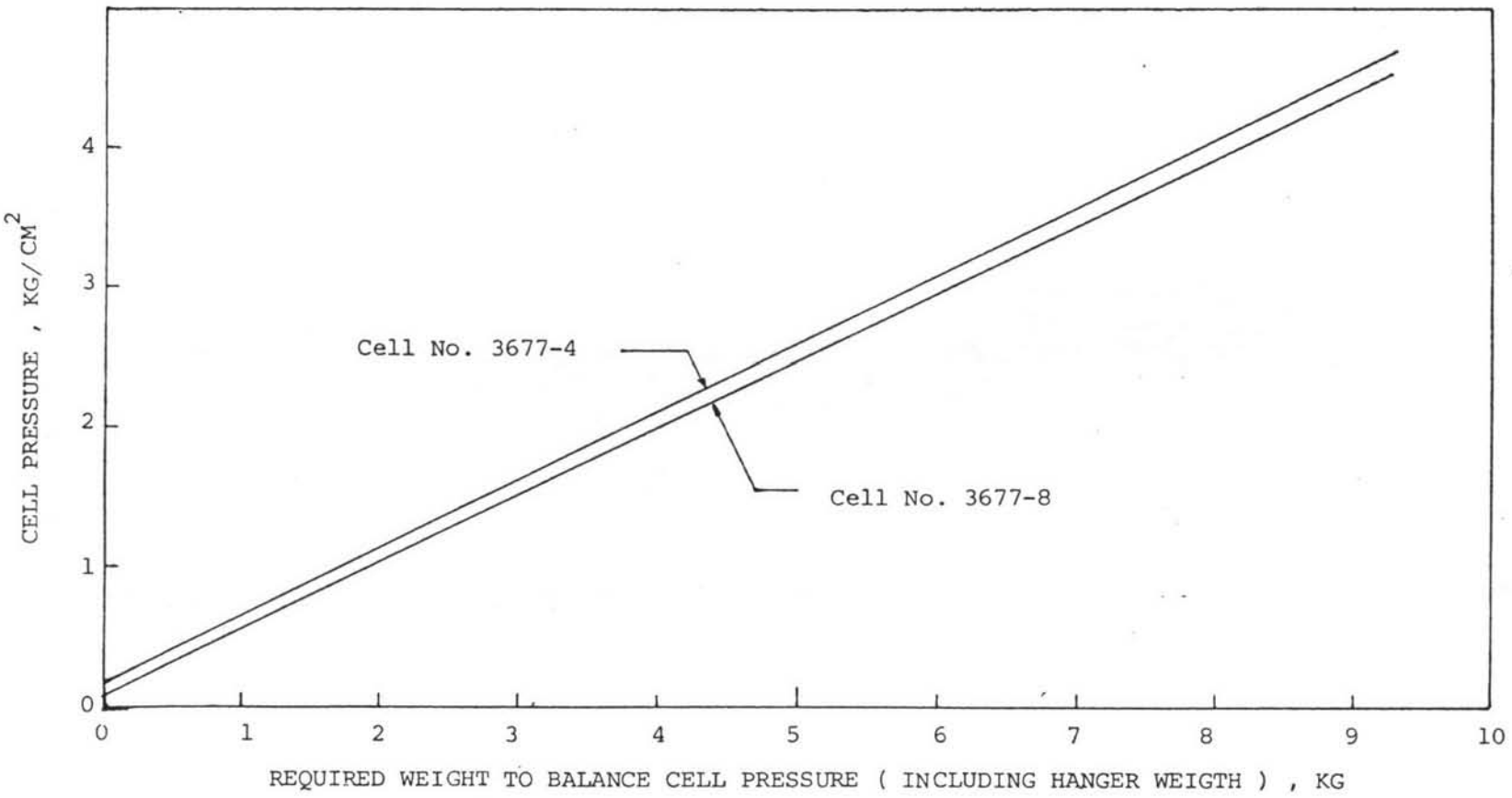
น้ำหนักที่ใส่เพิ่มขึ้นบนที่แขวนทั้งหมด เพื่อทำให้ได้ค่าหน่วยแรงในแนวดิ่ง (σ_v) ที่ต้องการมีค่าเท่ากับ น้ำหนักที่ใส่เพิ่มขึ้นบนที่แขวนเพื่อต้านทานความดันน้ำในเซล บวกด้วยผลคูณของหน่วยแรงเบี่ยงเบน ($\sigma_1-\sigma_3$) กับ corrected area ของตัวอย่างดิน

น้ำหนักที่ใส่เพิ่มขึ้นบนที่แขวนทั้งหมด = น้ำหนักที่ใส่เพิ่มขึ้นบนที่แขวนเพื่อต้านทานความดันน้ำในเซล + $(\sigma_1-\sigma_3)A$

σ_1 หรือ σ_v = หน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง

σ_3 หรือ σ_h = หน่วยแรงรวมในแนวนอน

A = corrected area



รูปที่ 3.7 กราฟ calibration สำหรับ triaxial cell

ฉ. การทดสอบตัวอย่างโดยเพิ่มแรงอัด (Compression Test) ตัวอย่างถูกทำให้พิบัติโดยการเพิ่มหน่วยแรงในแนวดิ่ง โดยมีความดันน้ำในเซล (σ_c) ปล่อยให้มีค่าคงที่ โดยก่อนทำการทดสอบทำการปิด back pressure line เสียก่อน เพื่อมิให้น้ำไหลออกจากตัวอย่าง และเปิด pore pressure line ไว้เพื่อวัดค่าความดันน้ำในโพรงดิน (u) ซึ่งเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ back pressure ที่ใส่เข้าไป แล้วจึงทำการทดสอบตัวอย่างโดยเพิ่มหน่วยแรงในแนวดิ่งเข้าไปด้วยอัตราความเครียดตามแนวแกนเท่ากับ 1 % ต่อชั่วโมง

3.4.3 การทดสอบกำลังรับแรงกดของดินที่ไม่ถูกอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่อง Triaxial ในสภาพอันเดรน (Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test, UU Test)

การทดสอบชนิดนี้เป็นวิธีการวัดค่าแรงเฉือนแบบอันเดรนของดินโดยใช้แนวเหตุผลทฤษฎีที่ว่า ค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ของดินมีความสัมพันธ์อันหนึ่งกับค่าปริมาณความชื้น ณ จุดพิบัติ (w_f) ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแบบ UU นี้ทั้งกับตัวอย่างที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดและตัวอย่างที่ถูกรบกวน เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบวัดค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) แบบ Recompression และ SHANSEP ผลของการเปรียบเทียบจะแสดงถึงบางส่วนของการรบกวนต่อตัวอย่างดิน (sample disturbance) ที่มีต่อค่าแรงเฉือน

วิธีการทดสอบแบบ UU นี้ ก็มีวิธีการทดลองเช่นเดียวกับวิธี CU test (consolidated undrained triaxial compression test) แต่ไม่มีการ consolidated ตัวอย่าง และใช้ค่าความดันน้ำในเซล (σ_c) มีค่าคงที่เท่ากับหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งตามธรรมชาติ (σ_{vo}) และทดสอบแบบการเพิ่มแรงอัดจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการพิบัติด้วยอัตราความเครียดเท่ากับ 5 % ต่อชั่วโมง