บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สถานที่ทำการเก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างดินอ่อนกรุงเทพสำหรับงานวิจัยนี้ เก็บมาจากหลุมเปิดสำหรับงานฐานราก และห้องใต้ดินของการก่อสร้างโรงแรม ROYAL ORCHID ริมท่าน้ำสี่พระยา เขตบางรัก กรุงเทพมหานคร

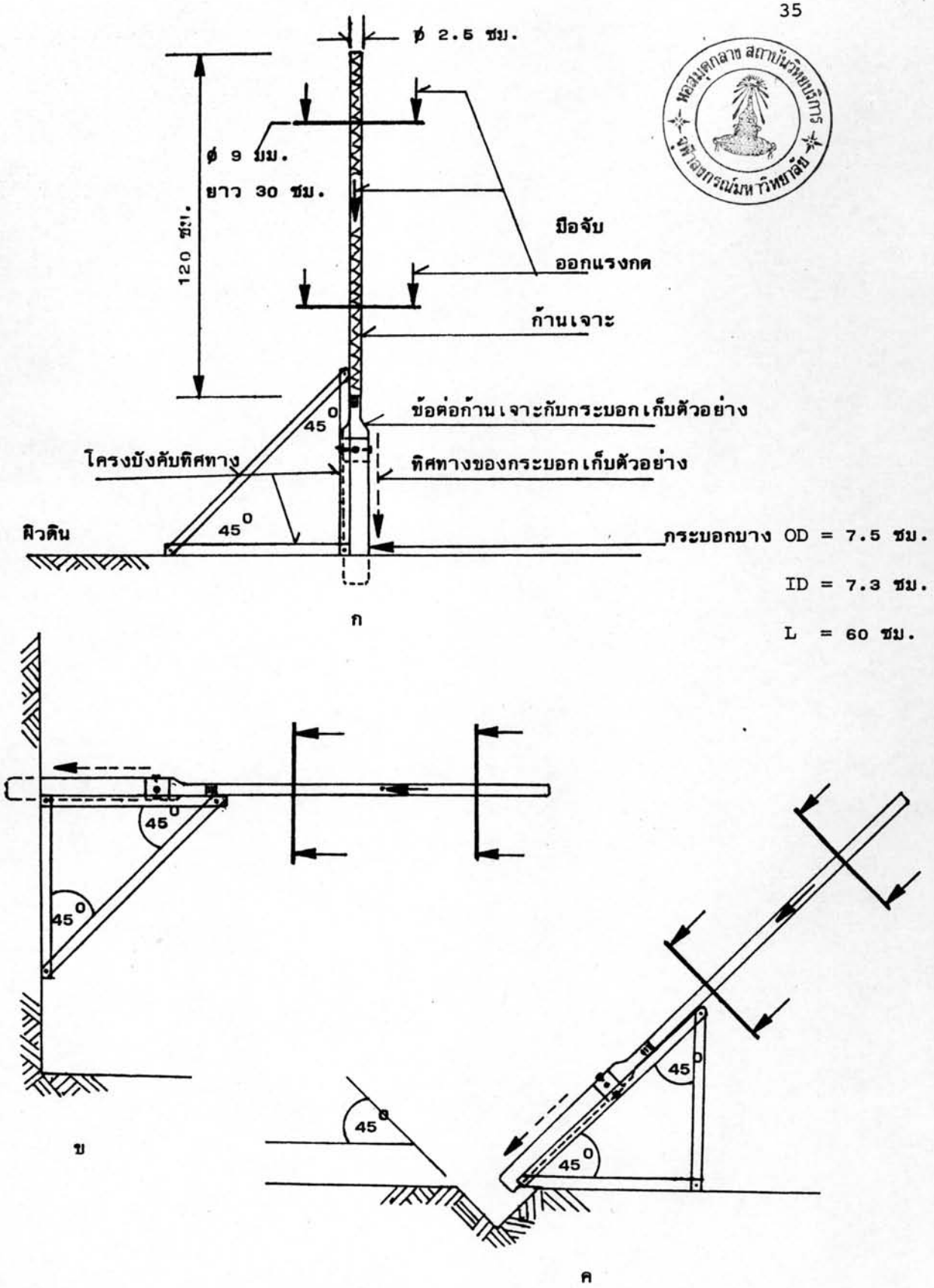
3.2 วิธีการเก็บตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดด้วยกระบอกเหล็กบาง เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 ซม. ยาว 60 ซม. กดกระบอกโดยใช้แรงงานคน เก็บตัวอย่างเป็น 3 แบบคือ แบบดิ่ง ($\beta=0^{\circ}$) แบบเอียง ($\beta=45^{\circ}$) และแบบราบ ($\beta=90^{\circ}$) โดยอาศัยโครงอลูมิเนียมบังคับทิศทางของกระบอก (ดูรูปที่ 3.1)

หลุมเปิดดังกล่าวมีบริเวณกว้างมาก ส่วนบนใช้เครื่องขุด ลึกลงไปในส่วนรายละเอียดก่อนถึงระดับที่ต้องการนั้นใช้แรงงานคน บริเวณที่เลือกเก็บตัวอย่างเป็นจุดที่ใช้เครื่องขุดได้เพียงเล็กน้อย ส่วนใหญ่ใช้แรงงานคน และเป็นบริเวณที่ไม่แห้งแข็ง ไม่แตกร้าว ไม่มีน้ำแช่ ไม่เป็นทางผ่านของคนงานและเครื่องมือ เพื่อป้องกันตัวอย่างจากการถูกรบกวน ได้เผื่อความหนาของดินไว้ก่อนถึงระดับที่จะเก็บตัวอย่าง 60 ซม. และจัดให้คนงานขุดรอบ ๆ ส่วนที่เลือกนี้ เมื่อขุดดินส่วนที่เผื่อไว้ออกจะไม่มีการเหยียบถูกผิวหน้าดินตัวอย่างเลย

สำหรับการเก็บตัวอย่างแบบดิ่ง (ดูรูป 3.1 ก.) เมื่อขุดดินได้ระดับแล้ว ปาดหน้าดินให้เรียบ วางฉากอลูมิเนียมและตรวจสอบด้วยลูกน้ำระดับ จับฉากนั้นไว้ให้มั่นคง ยกกระบอกพร้อมก้านเจาะมาทาบ ใช้คน 3 คนค่อย ๆ กดกระบอกลงไปอย่างต่อเนื่องจนถึงระดับที่ต้องการ ถอดก้านเจาะออกแล้วทำเหมือนเดิมจนครบ 3 กระบอก โดยแต่ละกระบอกห่างกัน 20-30 ซม. ต่อจากนั้นหมุนกระบอกสัก 2 รอบแล้วค่อย ๆ ดึงขึ้นทันที ทำเช่นเดียวกันจนครบทุกกระบอก ปิดฉลากทุกกระบอกบอกระดับความลึก สถานที่เก็บ วันที่เก็บและเป็นตัวอย่างแบบ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ก. การเจาะเก็บตัวอย่างแบบดิ่ง ข. การเจาะเก็บตัวอย่างแบบราบ

ค. การเจาะเก็บตัวอย่างแบบเอียง 45^0

I 1713898X

ไหน และปิดหัวท้ายกระบอกด้วยเทียนไขหลอมละลายป้องกันการเปลี่ยนแปลงของความชื้น

การเก็บตัวอย่างในแนวเอียง 45^{0} (ดูรูป 3.1 ค) ต้องขุดและแต่งหน้าดินปากกระบอกให้เรียบขนานกับปากกระบอก วางโครงบังคับเหมือนการเก็บตัวอย่างดิ่ง วางกระบอกและก้านเจาะทาบไปบนโครงส่วนที่เอียง 45^{0} กับแนวราบ ลองเลื่อนกระบอกแตะหน้าดินนิดหนึ่ง ถ้าปรากฏเป็นวงกลมเต็มวงเป็นอันใช้ได้ จึงกดกระบอกลงไป ส่วนรายละเอียดอื่น ๆ ทำเหมือนกับการเก็บตัวอย่างแบบดิ่ง

การเก็บตัวอย่างแบบราบ (ดูรูป 3.1 ข) ต้องขุดลงไปอีก 1.0 เมตร เพราะต้องยื่นเจาะเข้าไปที่ผนังของหลุม จึงจะได้ตัวอย่างอยู่ในระดับเดียวกับที่เก็บไปแล้ว โดยปาดหน้าดินออกให้เรียบ ทาบโครงบังคับเข้ากับผนังของหลุม วางกระบอกและก้านเจาะทาบไปบนโครงส่วนที่ราบ แล้วกดกระบอกเข้าไปจนถึงระยะที่ต้องการ ส่วนรายละเอียดอื่น ๆ ทำเหมือนกับการเก็บตัวอย่างแบบดิ่ง

ทำการเก็บตัวอย่างแบบละ 3 กระบอก และเก็บจาก 2 ระดับความลึก คือที่ความลึก 4.50-5.00 เมตร และ 7.00-7.50 เมตรจากผิวดินเดิม บรรทุกรถยนต์มาเก็บไว้ที่ห้องชื้นภายในตึกปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

นำตัวอย่างแบบดิ่ง แบบเอียง 45^{0} และแบบราบ ครั้งละอย่างละกระบอกมาดันเอาดินตัวอย่างออก และตัดเป็นท่อน ๆ ละ 3.2-3.5 นิ้ว พันรอบให้มิดชิดด้วยแผ่นอลูมิเนียมบาง (aluminium foil) ปิดฉลากตัวอย่างบอกตำแหน่งในกระบอก ระดับความลึก สถานที่เก็บและแบบของตัวอย่าง แล้วชุบด้วยเทียนไขหลอมละลายหลาย ๆ ชั้น เก็บตัวอย่างไว้ในห้องชื้นเช่นเดิม เพื่อรอการทดสอบต่อไป

3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

3.3.1 รายการทดสอบไตรแอ็กเซียล

ทำการทดสอบตัวอย่างที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดดังรายการในตารางที่ 3.1 และ 3.2 โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 กลุ่มตามความลึก คือตัวอย่างจากความลึก 4.50-5.00 เมตร

ตารางที่ 3.1 รายการทดสอบไตรแอ๊กเซียล ดินจากระดับความลึก 4.50-5.00 เมตร

ชนิดการทดสอบ	หมายเลขตัวอย่าง	ความดันเซลล์ (σ) หรือความเค้นคอนโซลิเดชั่นประสิทธิผล ($\bar{\sigma}$), ksc		β^o	OCR	หมายเหตุ
		σ_a, $\bar{\sigma}_{ac}$	σ_r, $\bar{\sigma}_{rc}$			
UU	V-401	$\sigma_a = \bar{\sigma}_r = \sigma_{vo} = 0.80$		0^o	-	
	INC-402			45^o	-	
	H-403			90^o	-	
UU-RE	V-401 RE	$\sigma_a = \sigma_r = \sigma_{vo} = 0.80$		0^o	-	
	INC-402 RE			45^o	-	
	H-403 RE			90^o	-	
$\overline{CIUC}$	V-404	$\bar{\sigma}_{ac} = \bar{\sigma}_{rc} = \bar{\sigma}_{vo} = 0.45$		0^o	1.40	
	INC-405			45^o	1.40	
	H-406			90^o	1.40	
	V-407	$\bar{\sigma}_{ac} = \bar{\sigma}_{rc} = \bar{\sigma}_{vm} = 0.63$		0^o	1.00	
	INC-408			45^o	1.00	
	H-409			90^o	1.00	
	V-410	$\bar{\sigma}_{ac} = \bar{\sigma}_{rc} = 1.5\,\bar{\sigma}_{vm} = 0.95$		0^o	1.00	
	INC-411			45^o	1.00	
	H-412			90^o	1.00	
$\overline{CK_oUC}$	V-413	$\bar{\sigma}_{vo} = 0.45$	$0.65\bar{\sigma}_{ac} = 0.29$	0^o	1.40	$\bar{\sigma}_{1f}$& $\bar{\sigma}_{vo}$ทำมุม0^o; $\bar{\sigma}_{2f}=\bar{\sigma}_{3f}$
	V-414	$\bar{\sigma}_{vm} = 0.63$	$0.65\bar{\sigma}_{ac} = 0.41$	0^o	1.00	
	V-415	$1.5\bar{\sigma}_{vm} = 0.95$	$0.65\bar{\sigma}_{ac} = 0.62$	0^o	1.00	
$\overline{CK_oUE}$	V-416	$\bar{\sigma}_{vo} = 0.45$	$0.65\bar{\sigma}_{ac} = 0.29$	90^o	1.40	$\bar{\sigma}_{1f}$& $\bar{\sigma}_{vo}$ทำมุม90^o; $\sigma_2 f=\sigma_1 f$
	V-417	$\bar{\sigma}_{vm} = 0.63$	$0.65\bar{\sigma}_{ac} = 0.41$	90^o	1.00	
	V-418	$1.5\bar{\sigma}_{vm} = 0.95$	$0.65\bar{\sigma}_{ac} = 0.62$	90^o	1.00	

$\bar{\sigma}_{ac}$ = ความเค้นคอนโซลิเดชั่นในแนวแกนของตัวอย่าง (Axial Consolidation Pressure)

$\bar{\sigma}_{rc}$ = ความเค้นคอนโซลิเดชั่นทางด้านข้างของตัวอย่าง (Radial Consolidation Pressure)

β^o = มุมระหว่างแกนของตัวอย่างในธรรมชาติกับแนวดิ่งธรรมชาติ

$\bar{\sigma}_{vo}$ = ความเค้นคอนโซลิเดชั่นประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ

σ_{vo} = ความเค้นรวมในแนวดิ่งตามธรรมชาติ

$\bar{\sigma}_{vm}$ = ความเค้นสูงสุดในอดีต (maximum past pressure)

σ_b = back pressure (สำหรับการทดสอบ $\overline{CIUC}$, $\overline{CK_oUC}$ & $\overline{CK_oUE}$ ใช้ σ_b= 2.0 ksc)

ตารางที่ 3.2 รายการทดสอบไตรแอ๊กเชียล ดินจากระดับความลึก 7.00-7.50 เมตร

ชนิดการทดสอบ	หมายเลขตัวอย่าง	ความดันเซลล์ (σ) หรือความเค้นคอนโซลิเดชั่นประสิทธิผล ($\bar{\sigma}$), ksc		β^o	OCR	หมายเหตุ
		$\bar{\sigma}_a$, $\bar{\sigma}_{ac}$	$\bar{\sigma}_r$, $\bar{\sigma}_{rc}$			
UU	V-701	$\sigma_a = \sigma_r = \sigma_{vo} = 1.22$		0^o	-	
	INC-702			45^o	-	
	H-703			90^o	-	
UU-RE	V-701RE	$\sigma_a = \sigma_r = \sigma_{vo} = 1.22$		0^o	-	
	INC-702RE			45^o	-	
	H-703RE			90^o	-	
$\overline{CIUC}$	V-704	$\bar{\sigma}_{ac} = \bar{\sigma}_{rc} = 0.5\bar{\sigma}_{vo} = 0.32$		0^o	2.26	
	INC-705			45^o	2.26	
	H-706			90^o	2.26	
	V-707	$\bar{\sigma}_{ac} = \bar{\sigma}_{rc} = \bar{\sigma}_{vo} = 0.64$		0^o	1.13	
	INC-708			45^o	1.13	
	H-709			90^o	1.13	
	V-710	$\bar{\sigma}_{ac} = \bar{\sigma}_{rc} = 2\bar{\sigma}_{vm} = 1.42$		0^o	1.00	
	INC-711			45^o	1.00	
	H-712			90^o	1.00	
$\overline{CK_oUC}$	V-713	$0.5\bar{\sigma}_{vo} = 0.32$	$0.65\bar{\sigma}_{ac} = 0.21$	0^o	2.26	$\bar{\sigma}_{1f}$&$\bar{\sigma}_{vo}$ทำมุม0^o
	V-714	$1.0\bar{\sigma}_{vo} = 0.64$	$0.65\bar{\sigma}_{ac} = 0.42$	0^o	1.13	$\bar{\sigma}_{2f}=\bar{\sigma}_{3f}$
	V-715	$2.0\bar{\sigma}_{vm} = 1.42$	$0.65\bar{\sigma}_{ac} = 0.92$	0^o	1.00	
$\overline{CK_oUE}$	V-716	$0.5\bar{\sigma}_{vo} = 0.32$	$0.65\bar{\sigma}_{ac} = 0.21$	90^o	2.26	$\bar{\sigma}_{1f}$&$\bar{\sigma}_{vo}$ทำมุม90^o;
	V-717	$1.0\bar{\sigma}_{vo} = 0.64$	$0.65\bar{\sigma}_{ac} = 0.42$	90^o	1.13	$\bar{\sigma}_{2f}=\bar{\sigma}_{1f}$
	V-718	$2.0\bar{\sigma}_{vm} = 1.42$	$0.65\bar{\sigma}_{ac} = 0.92$	90^o	1.00	

$\bar{\sigma}_{ac}$ = ความเค้นคอนโซลิเดชั่นในแนวแกนของตัวอย่าง (Axial Consolidation Pressure)

$\bar{\sigma}_{rc}$ = ความเค้นคอนโซลิเดชั่นทางด้านข้างของตัวอย่าง (Radial Consolidation Pressure)

β^o = มุมระหว่างแกนของตัวอย่างในธรรมชาติกับแนวดิ่งธรรมชาติ

$\bar{\sigma}_{vo}$ = ความเค้นคอนโซลิเดชั่นประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ

σ_{vo} = ความเค้นรวมในแนวดิ่งตามธรรมชาติ

$\bar{\sigma}_{vm}$ = ความเค้นสูงสุดในอดีต (maximum past pressure)

σ_b = back pressure (สำหรับการทดสอบ $\overline{CIUC}$, $\overline{CK_oUC}$ & $\overline{CK_oUE}$ ใช้ σ_b= 2.0 ksc)

กลุ่มหนึ่งและตัวอย่างจากความลึก 7.00-7.50 เมตรกลุ่มหนึ่ง แต่ละกลุ่มแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ชนิด

1. UU = ไม่คอนโซลิเดทและกดแบบอันเดรน (Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test) และ UU-RE = การทดสอบ UU โดยใช้ตัวอย่างที่ถูกคลุกเคล้าใหม่ (UU-Remolded)

2. $\overline{\text{CIUC}}$ = คอนโซลิเดทแบบไอโซทร้อปปิค, กดแบบอันเดรนและวัดความดันน้ำระหว่างเม็ดดิน (Isotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test with pore pressure measurement)

3. $\overline{\text{CKUC}}$ = คอนโซลิเดทแบบแอนไอโซทร้อปปิค, กดแบบอันเดรนและวัดความดันน้ำระหว่างเม็ดดิน (Anisotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test with pore pressure measurement)

4. $\overline{\text{CKUE}}$ = คอนโซลิเดทแบบแอนไอโซทร้อปปิค, ดึงแบบอันเดรนและวัดความดันน้ำระหว่างเม็ดดิน (Anisotropically Consolidated Undrained Triaxial Extension Test with pore pressure measurement)

มีตัวอย่างอยู่ 3 แบบคือ (ก) แบบดิ่ง (V-vertical) เป็นแบบที่แกนของตัวอย่างทำมุม 0° กับแนวดิ่งธรรมชาติ ($\beta=0^{\circ}$) (ข) แบบเอียง 45° (INC-inclined) เป็นแบบที่แกนของตัวอย่างทำมุม 45° กับแนวดิ่งธรรมชาติ ($\beta=45^{\circ}$) และ (ค) แบบราบ H-horizontal) เป็นแบบที่แกนของตัวอย่างทำมุม 90° กับแนวดิ่งธรรมชาติ ($\beta=90^{\circ}$)

การทดสอบ UU และ UU-RE ของตัวอย่าง 3 แบบ ใช้ความดันเซลล์เท่ากับความเค้นทับถมรวมตามธรรมชาติ (in situ overburden pressure) จะได้ผลการทดสอบกำลังที่หน่วยแรงหลักขณะวิบัติ (major principal stress at failure, σ_{1f}) ทำมุม β° ต่าง ๆ กับแนวดิ่งธรรมชาติ ($\beta=0^{\circ}$, 45° และ 90°) การเปรียบเทียบผลการทดสอบ UU และ UU-RE จะให้เห็นผลของการรบกวนของตัวอย่างที่มีต่อพฤติกรรมทางด้านแอนไอโซทร้อปปี้ของแรงเฉือนแบบอันเดรน

การทดสอบ $\overline{CIUC}$ ของตัวอย่าง 3 แบบ ใช้ความเค้นคอนโซลิเดชั่นต่าง ๆ กัน จะได้ผลการทดสอบกำลังที่หน่วยแรงหลักขณะวิบัติ (σ_{1f})) ทำมุมต่าง ๆ กับแนวดิ่งตามธรรมชาติ พร้อมกับทดสอบถึงอิทธิพลของความเค้นคอนโซลิเดชั่น (consolidation stress) ระดับต่าง ๆ

การทดสอบ $\overline{CK_oUC}$ และ $\overline{CK_oUE}$ ใช้ตัวอย่างแบบดิ่ง ใช้ความเค้นคอนโซลิเดชั่นต่าง ๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบ 2 แบบที่ความดันเดียวกัน จะได้ผลการทดสอบกำลังที่เริ่มด้วยสภาพความเค้นคอนโซลิเดชั่นเหมือนกัน มี σ_{1_0}อยู่ในแนวดิ่ง เมื่อกดตัวอย่าง σ_{1f} จะอยู่ในแนวดิ่ง ($\beta=0^o$) เมื่อดึงตัวอย่าง σ_1หมุนไป 90^o ทำให้ σ_{1f} อยู่ในแนวราบ ($\beta=90^o$) (นั่นคือเห็นพฤติกรรมทางด้านแอนไอโซทร้อปปี้) และการใช้ค่า $\bar{\sigma}_{vc}$ ต่างกัน จะทราบอิทธิพลของความเค้นคอนโซลิเดชั่นระดับต่าง ๆ และของ OCR ด้วย

ค่าสัมประสิทธิของแรงดันด้านข้างของดิน (coefficient of horizontal earth pressure)ที่ใช้ในการคอนโซลิเดทตัวอย่าง ใช้ค่าเฉลี่ยของ coefficient of earth pressure at rest ที่ได้จากการทดสอบดินอ่อนกรุงเทพในอดีต

ดินอ่อนกรุงเทพ (Soft Bangkok Clay) K_o = 0.63±0.02 WONG (1968)

3.3.2 เครื่องมือทดสอบไตรแอ๊กเชียล (Triaxial Equipment)

ใช้เครื่องทดสอบไตรแอ๊กเชียลซึ่งผลิตโดยบริษัท Wykeham-Farrance จำกัด ประเทศอังกฤษ ระบบให้ความดันเป็นแบบ Self-compensating mercury column system คือเป็นแบบที่ใช้ความสูงของลำปรอทเป็นตัวกำหนดความดัน และออกแบบไว้ให้ปรอทรักษาระดับได้โดย Self compensating mercury pot โดยใช้สปริงทำให้ความดันระหว่างการทดสอบคงที่ตลอดเวลา

ระบบความดันดังกล่าวจะมีที่บรรจุปรอท (mercury pot) แขวนไว้กับสปริง สปริงนี้ถูกออกแบบให้มีการยืดหดสมดุลย์กับน้ำหนักของปรอทที่ไหลออกจากที่บรรจุปรอท และน้ำหนักของปรอทในสายยางส่วนที่ถูกยกเพิ่มขึ้น นั่นคือเมื่อมีน้ำไหลออกจากเซลล์เล็กน้อย หรือเมื่อน้ำถูกขับไล่ออกจากตัวอย่างระหว่างการคอนโซลิเดชั่น การแทนที่ปริมาตรน้ำในเซลล์

จะทำให้ปรอทในที่บรรจุบนไหลลงมา น้ำหนักที่สปริงจะลดลง สปริงจะหดตัวยกที่บรรจุปรอทขึ้น การหดตัวของสปริงนี้จะต้องยกน้ำหนักของปรอทในสายยางส่วนที่ถูกยกเพิ่มด้วย ระดับปรอทจะสมดุลย์ที่ระดับเดิมเสมอ ทำให้ความดันในเซลล์คงที่ตลอดการทดสอบ ทำนองเดียวกัน ระบบนี้ใช้ได้ดีกับระบบ back pressure

ในการทดสอบแบบอันเดรนที่ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์นี้ สามารถวัดความดันน้ำระหว่างเม็ดดิน (pore water pressure) ได้ด้วย null indicator หรือ electric pressure transducer

สำหรับการคอนโซลิเดทตัวอย่างแบบแอนไอโซทร้อปปี้จะใช้โครงแขวนเหล็กและแขวนด้วยตุ้มน้ำหนักคงที่ โครงแขวนเหล็กและส่วนข้อต่อระหว่างก้านส่งถ่ายน้ำหนัก (loading ram) และวงแหวนวัดแรง (proving ring) นี้ออกแบบและจัดทำภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์นี้

3.3.3 การเตรียมตัวอย่าง (Preparation of Specimen)

นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ตอนแรกซึ่งยาว 3.2-3.5 นิ้ว มาใส่ในโครงเหล็กที่หมุนตัวอย่างรอบแกนตัวอย่างได้ ใช้เลื่อยลวดตัดกลึงตัวอย่างให้กลมเป็นรูปทรงกระบอก ใช้มีดยาว ตรง คม แต่งตัวอย่างให้เรียบ จะได้ตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.4 นิ้ว นำตัวอย่างออกมาตัดหัวท้ายให้เรียบและตั้งฉากกับส่วนสูง โดยใช้ Miter Box และเลื่อยลวดตัดตัวอย่างให้ยาวประมาณ 2.8 นิ้ว

หาความชื้นในตัวอย่าง 3 ค่าจากดินส่วนบน ส่วนกลางและส่วนล่างรอบ ๆ ตัวอย่าง วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างทั้งส่วนบน ส่วนกลางและส่วนล่าง วัดส่วนสูงของตัวอย่าง 2 ค่าตั้งฉากกัน โดยใช้เวอเนียร์และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างก่อนการทดสอบ

3.3.4 การจัดตัวอย่างเข้าที่ทดสอบ (Set-up of specimen)

ขั้นแรกของการทดสอบไตรแอ็กเชียล ต้องตรวจสอบดูว่าฐานของเซลล์และสายต่อจากฐานทุก ๆ สายมีน้ำอยู่เต็ม น้ำในระบบต้องเป็นน้ำที่ถูกต้มและไล่ฟองอากาศออกแล้ว จากนั้นวางหินพรุนอิ่มน้ำบนแท่นตัวอย่าง ปิดหินพรุนด้วยกระดาษกรองเปียกน้ำ ตั้ง

ตัวอย่างและวาง top cap บนตัวอย่าง

พันรอบตัวอย่างด้วยกระดาษกรองตัดเป็นริ้วยาวตามแนวดิ่ง 8 ชิ้น กว้างชิ้นละ 1/4 นิ้ว เว้น 1/4 นิ้ว ยาว 3 1/2 นิ้ว (ขนาดเดียวกับกระดาษกรองของ Whatman's No. 54) สำหรับการทดสอบด้วยการดึงตัวอย่าง จะพันกระดาษกรองเป็นเกลียวรอบตัวอย่าง เพื่อลดแรงดึงที่กระดาษกรองจะรับได้ และปลายของกระดาษกรองจะต้องทาบติดกับหินพรุน การใช้กระดาษกรองรับน้ำด้านข้างนี้เป็นการเร่งอัตราเร็วคอนโซลิเดชั่น และทำให้การกระจายของความดันน้ำในตัวอย่างสม่ำเสมอโดยเร็ว

ใช้ถุงยางอนามัย (rubber membrane) สวมตัวอย่าง 2 ชั้น เพื่อป้องกันตัวอย่างไม่ให้ถูกน้ำ ใช้ยางกลม (O-ring) 6 เส้นรัดที่ส่วนเหนือและใต้ตัวอย่าง วางกระบอกเซลล์เข้าที่ และยึดเข้ากับฐานด้วยสกรูรัดแบบยาว เติมน้ำให้เกือบเต็มเซลล์ เติมน้ำมันเครื่องเกรด 30 ในช่องว่างที่เหลือไว้ เพื่อลดการรั่วของน้ำตรงรอยต่อรอบ ๆ ก้านส่งถ่ายน้ำหนักและเป็นตัวหล่อลื่นก้านส่งถ่ายน้ำหนักด้วย เปิดรู อากาศและเปิดน้ำเข้าจนน้ำมันเริ่มล้นออก จึงปิดรูอากาศนั้น จะแน่ใจได้ว่าไม่มีฟองอากาศในเซลล์

3.3.5 การทำให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพอิ่มน้ำ (Saturation of specimen)

เพื่อให้แน่ใจว่าตัวอย่างจะอิ่มน้ำและเพื่อไม่ต้องลำบากกับการวัดความดันน้ำค้างในตัวอย่าง จึงใช้ back pressure 2 กก./ซม^2 กระทำต่อตัวอย่างไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ในการที่จะให้ตัวอย่างรับความดันดังกล่าว จะต้องค่อย ๆ เพิ่มความดันเซลล์ (cell pressure) และความดันน้ำในตัวอย่าง (back pressure) ด้วยปั๊มมืออย่างช้า ๆ และสลับกันอย่างต่อเนื่อง ด้วยความเร็วประมาณ 0.2 กก./ซม^2 ต่อนาที เพื่อให้ตัวอย่างถูกรบกวนน้อยที่สุดระหว่างการเพิ่มความดัน

เพื่อให้แน่ใจว่าตัวอย่างจะไม่พองตัว เกิดรอยแตกร้าว ควรที่จะให้ความดันเซลล์มากกว่า back pressure ประมาณ 0.05-0.15 กก./ซม^2 คือให้การทำให้ดินอิ่มน้ำนี้ เกิดแนวโน้มที่จะบีบไล่น้ำออกมา

เมื่อวัดความดันเซลล์ (σ_c) และความดันน้ำในตัวอย่างได้ระดับตามที่ต้องการแล้ว จัดเครื่องวัดระยะทาง (strain indicator) เข้าที่ ปรับระดับให้ก้านส่งถ่าย

น้ำหนักแตะ top cap พอดี บันทึกค่าแรกของระยะนี้ไว้ แล้วจึงไอนสายให้ระบบความดันคงที่ด้วยปรอทต่อเข้ากับน้ำในเซลล์ชุดหนึ่ง (เพื่อทำให้เกิด hydrostatic pressure, σ_c) และสายความดันน้ำในตัวอย่างต่อเข้ากับด้านล่างของตัวอย่างชุดหนึ่ง

ปริมาตรน้ำที่ตัวอย่างคายออกหรือดูดเข้าไปสามารถวัดได้ด้วยระบบวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำในตัวอย่าง

3.3.6 การคอนโซลิเดทตัวอย่าง

3.3.6.1 การคอนโซลิเดทตัวอย่างแบบไอโซทร้อปปี้ เมื่อรอให้ตัวอย่างอิ่มน้ำครบ 24 ชั่วโมงแล้ว จะปิดวาล์วเส้นทาง back pressure ก่อน แล้วเพิ่มความดันเซลล์จนได้ระดับที่ต้องการ โดยใช้ปั๊มมือเพิ่มความดันแล้วค่อยกลับวาล์วให้ระบบความดันคงที่ด้วยปรอทต่อเข้ากับเซลล์ วิธีนี้จะทำให้ตัวอย่างไม่ถูกรบกวนและปรับความดันได้สะดวกและละเอียด คอนโซลิเดชั่นจะเริ่มต้นเมื่อเปิดวาล์วเส้นทาง back pressure อีกครั้ง เพื่อให้ตัวอย่างเกิดคอนโซลิเดชั่นอย่างสมบูรณ์ ควรให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพนี้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง

ค่ายุบตัวในแนวดิ่งของตัวอย่างหาได้จากผลต่างของค่าสุดท้ายที่อ่านจากเครื่องวัดระยะทาง (strain indicator) กับค่าแรกก่อนคอนโซลิเดชั่น ส่วนปริมาตรน้ำที่ถูกบีบไล่ออกจากตัวอย่างวัดได้จากระบบวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

ถ้าความเค้นคอนโซลิเดชั่นมีค่าน้อยกว่า 1 กก./ซม^2 จะเพิ่มความเค้นเป็นขั้นตอนเดียว แต่ถ้าความเค้นสูงกว่านี้ ควรจะเป็นช่วง ๆ ละ 1 กก./ซม^2 เพื่อลดความกระทบกระเทือนต่อตัวอย่าง

การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างภายหลังการคอนโซลิเดชั่น (A_c)

$$A_c = \frac{V_o - \Delta V_c}{L_o - \Delta L_c} \qquad (3.1)$$

ซึ่ง V_o = ปริมาตรของตัวอย่างก่อนการทดสอบ

ΔV_c = ปริมาตรของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลง = ปริมาตรน้ำที่ถูกขับออกมาระหว่างการคอนโซลิเดชั่น

L_o = ความสูงของตัวอย่างก่อนการทดสอบ

ΔL_c = ค่ายุบตัวในแนวดิ่งของตัวอย่างหลังจากคอนโซลิเดชั่น

3.3.6.2 การคอนโซลิเดชั่นตัวอย่างแบบแอนไอโซทร้อปปี้

ขั้นแรกจะคอนโซลิเดทตัวอย่างแบบไอโซทร้อปปี้ด้วยความดันค่าหนึ่งก่อน โดยปกติจะให้ความดันเซลล์เป็นครึ่งหนึ่งของความเค้นด้านรางที่ต้องการ แล้วให้เกิดคอนโซลิเดชั่น 24 ชั่วโมง วัดส่วนยุบตัวในแนวดิ่งและปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง สารมารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดหลังจากคอนโซลิเดชั่นได้ และจากค่าความเค้นบนตัวอย่างที่ต้องการ ทำให้ทราบน้ำหนักที่จะต้องกดลงบนตัวอย่างได้จาก

$$L_1 = (1-K_o)\ \bar{\sigma}_{vc}\ A_c \qquad (3.2)$$

ซึ่ง L_1 = น้ำหนักสำหรับกดบนตัวอย่างระหว่างคอนโซลิเดชั่น

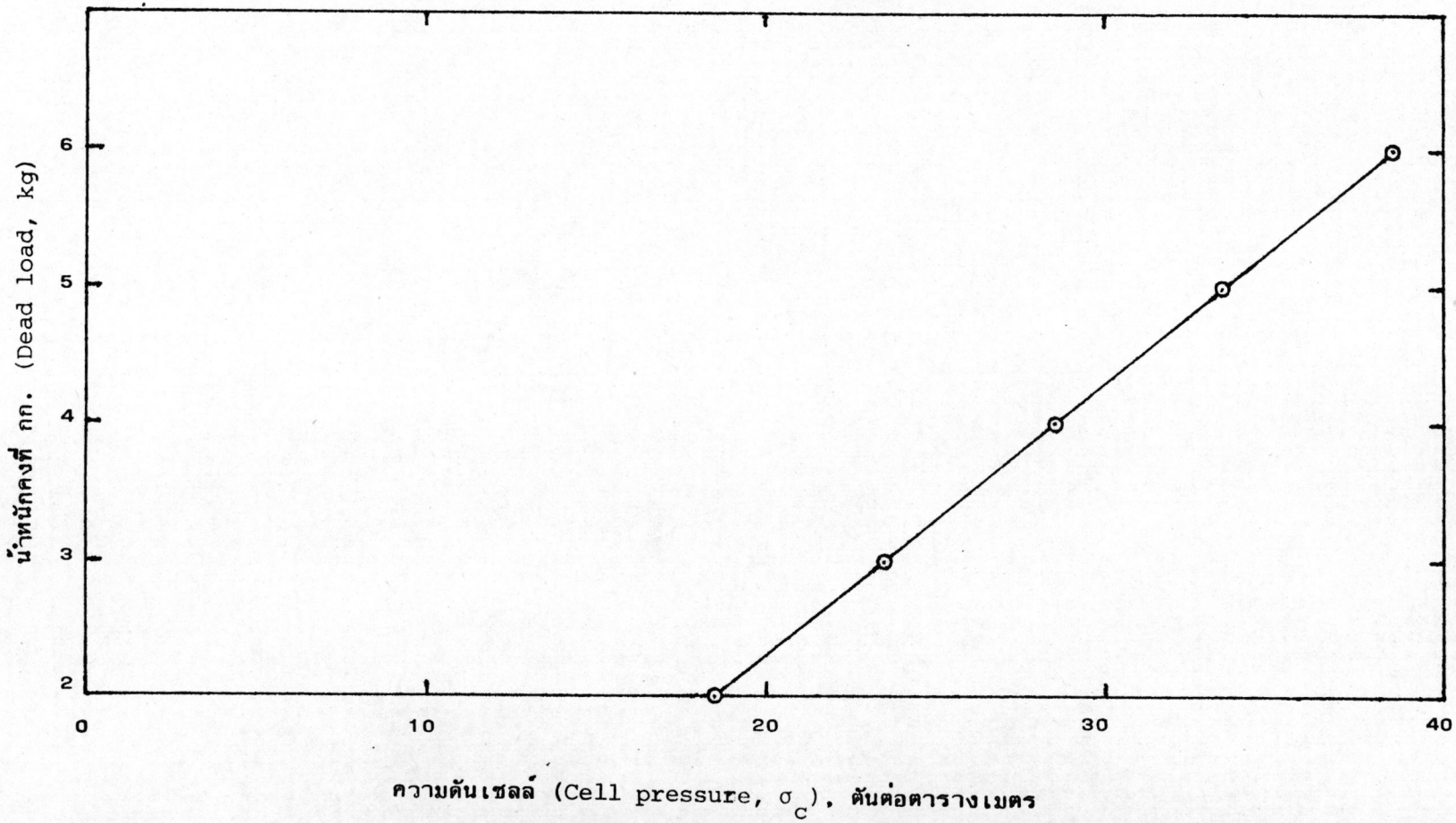
K_o = สัมประสิทธิ์ของแรงดันของดิน

$\bar{\sigma}_{vc}$ = ความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งสำหรับการคอนโซลิเดชั่น

A_c = พื้นที่หน้าตัดสุทธิของตัวอย่าง (final corrected area)

การคอนโซลิเดทแบบนี้ ต้องการน้ำหนักคงที่อีกส่วนหนึ่งกดลงในแนวดิ่งเพื่อให้สมดุลย์กับแรงลอยตัว (buoyant force) และแรงเสียดทานของก้านส่งถ่ายน้ำหนัก (loading ram) รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ของความดันเซลล์กับน้ำหนักคงที่ที่สมดุลย์กับความดันนั้น

เพิ่มความดันเซลล์ให้เท่ากับความเค้นคอนโซลิเดชั่นด้านรางที่ต้องการและใส่ตุ้มน้ำหนักคงที่บนโครงแขวน (น้ำหนักที่ใส่เป็นน้ำหนักที่สมดุลย์กับความดันเซลล์รวมกับน้ำหนักที่จะกดลงบนตัวอย่าง) แล้วปล่อยให้เกิดคอนโซลิเดชั่นต่อไป 24 ชั่วโมง จะได้ระบบความเค้นในตัวอย่างตามต้องการ ทางเดินของความเค้นประสิทธิผลจะเป็น 2 ขั้นตอนต่อเนื่องกันคือ ช่วง 24 ชั่วโมงแรก ทางเดินของความเค้นจะหันไปตามค่า +p (คอนโซลิเดทแบบไอโซทร้อปปิค) ช่วงต่อมาจะหันเข้าหาจุด ($+p_o$,$+q_o$) บนเส้นตรง K_o (K_o line)



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของความดันเซลล์กับน้ำหนักคงที่ที่สมดุลย์กับความดันนั้น

สำหรับการทดสอบแบบดึงตัวอย่าง จะต้องประกอบอุปกรณ์เฉพาะ (ดูรูป 3.3) คือ

1. ต่อ bayonet catch ติดไว้ด้านล่างของก้านส่งถ่ายน้ำหนัก
2. ใช้ loading cap แบบที่ติด slotted plate (ชุดเดียวกันกับ bayonet catch)
3. ใช้ข้อต่อสำหรับดึงก้านส่งถ่ายน้ำหนักขึ้น ต่อกับส่วนล่างของวงแหวนวัดแรง
4. ใช้ก้านที่ววงแหวนวัดแรง สำหรับแขวนวงแหวนวัดแรงอย่างมั่นคง
5. ใช้คาน (cross beam) ที่ออกแบบไว้สำหรับแขวนวงแหวนวัดแรงอย่างมั่นคง

วิธีการและขั้นตอนอย่างอื่นเหมือนกับการคอนโซลิเดทตัวอย่างเพื่อการทดสอบแบบกด ส่วนรายละเอียดของการประกอบเครื่องมือดูได้จากรูปที่ 3.3

3.3.7 การเพิ่มแรงเฉือนกระทำต่อตัวอย่าง (Shearing Process)

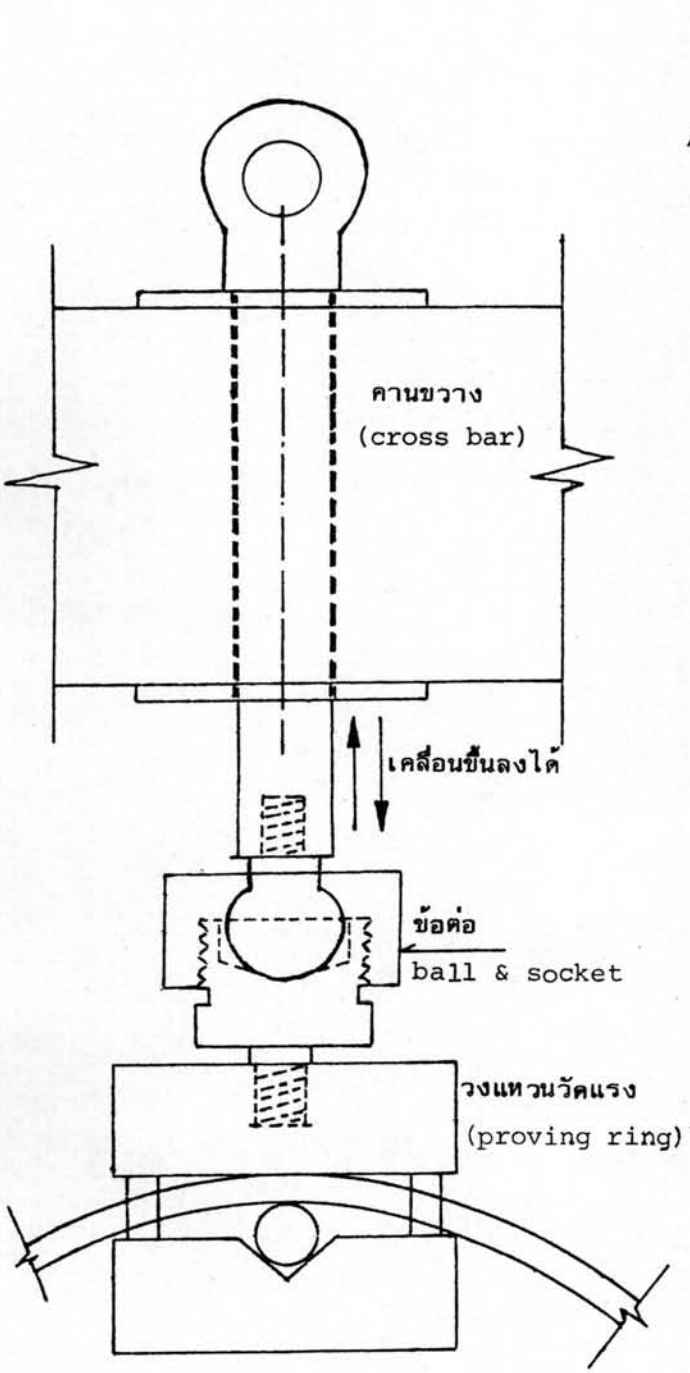
3.3.7.1 ตรวจสอบการตอบสนองของความดันน้ำระหว่างเม็ดดิน (check of pore pressure response) ทำโดยการปิดวาล์วเส้นทาง back pressure แล้วเพิ่มความดันเซลล์ 1 กก./ซม^2 จะทำให้เกิดความดันน้ำระหว่างเม็ดดินตามมา การตอบสนองของความดันน้ำน้อยกว่า 90 % ต่อนาที หรือน้อยกว่า 95 % สำหรับเวลามากกว่านั้น แสดงว่าตัวอย่างยังไม่อิ่มน้ำ จะต้องให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพที่จะทำให้อิ่มน้ำอีก 24 ชั่วโมง เมื่อเรียบร้อยแล้วจึงดำเนินการต่อไป

3.3.7.2 ตรวจสอบความเรียบร้อยของเยื่อบางรอบตัวอย่าง (check of membrane leakage) เพื่อแน่ใจว่าทำการทดสอบได้ถูกต้องจึงต้องทำการตรวจสอบเยื่อบางรอบตัวอย่างก่อนเพิ่มแรงเฉือนกระทำต่อตัวอย่าง โดยการปิดวาล์วเส้นของ back pressure รอสักครู่แล้วทำการวัดความดันน้ำในตัวอย่าง ถ้าปรากฏว่าความดันน้ำในตัวอย่างเท่ากันกับความดันเซลล์ แสดงว่าเกิดการรั่วของเยื่อบางหุ้มตัวอย่าง และถ้าเกิดการรั่วดังกล่าว จะต้องถอดตัวอย่างออก แล้วเริ่มการทดลองใหม่

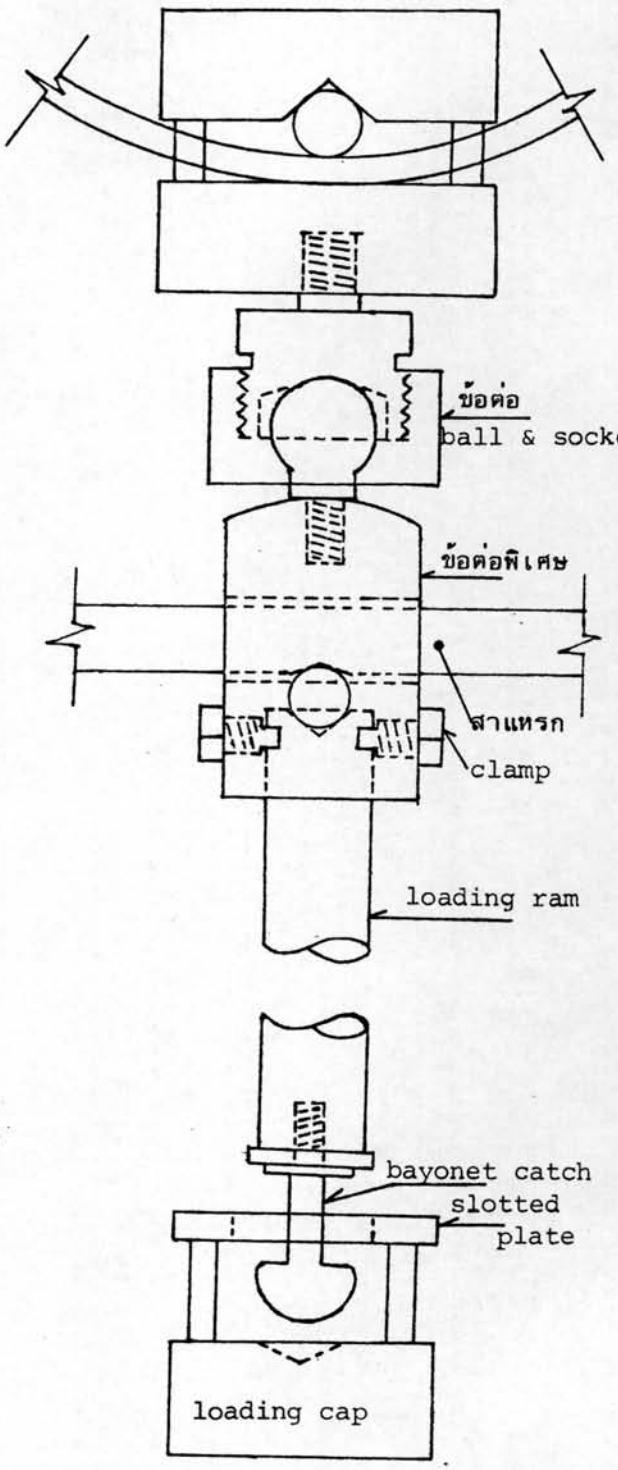
3.3.7.3 การเพิ่มแรงเฉือนโดยการกดและดึงตัวอย่างแบบอันเดรน

ก. การทดสอบแบบ UU

การทดสอบแบบ UU คือไม่คอนโซลิเดทตัวอย่างและกดตัวอย่างแบบ



ก



ข

รูปที่ 3.3 รายละเอียดของการประกอบเครื่องมือสำหรับการทดสอบแบบดึงตัวอย่าง

ก. ส่วนบนสุด แสดงการต่อวงแหวนวัดแรงกับคานขวาง

ข. แสดงการต่อวงแหวนวัดแรงกับก้านส่งถ่ายน้ำหนักและก้านส่งถ่ายน้ำหนักต่อกับชุดดึงตัวอย่าง

อันเดรน (Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test)

เมื่อจัดตัวอย่างเข้าที่ทดสอบแล้ว ให้ความดันเซลล์กระทำต่อตัวอย่างตามที่เลือกไว้โดยไม่ให้เกิดคอนโซลิเดชั่น ในที่นี้ให้ความดันเซลล์เท่ากับความเค้นทับถมในแนวดิ่งตามธรรมชาติ (overburden pressure) แล้วกดตัวอย่างในแนวแกนของตัวอย่าง โดยยกฐานของเซลล์ด้วยมอเตอร์และระบบเฟืองขึ้นด้วยความเร็วคงที่ (Strain controlled) 10 % strain ต่อชั่วโมง น้ำหนักที่กดลงบนตัวอย่างผ่านก้านส่งถ่ายน้ำหนักโดยอาศัยกำลังของวงแหวนวัดแรง (proving ring) ทำการทดสอบจนถึงค่าสูงสุดของความเค้นที่ตัวอย่างจะรับได้ หรือ strain ประมาณ 20 %

สำหรับการทดสอบแบบ UU-RE (การทดสอบ UU โดยใช้ตัวอย่างที่ถูกคลุกเคล้าใหม่)

ทำการคลุกเคล้าตัวอย่างให้ทั่ว เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างเม็ดดินใหม่ แล้วปั้นและกลึงตัวอย่างใหม่ โดยรักษาให้ความชื้นในตัวอย่างคงที่ แล้วทดสอบแบบ UU ทันที

ข. การทดสอบแบบ $\overline{\text{CIUC}}$

การทดสอบแบบ $\overline{\text{CIUC}}$ คือคอนโซลิเดทตัวอย่างแบบไอโซทร้อปปิคเสียก่อนแล้วจึงกดตัวอย่างแบบอันเดรนและวัดความดันน้ำระหว่างเม็ดดิน (Isotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test with pore pressure measurement)

ก่อนอื่นทำการคอนโซลิเดทตัวอย่างแบบไอโซทร้อปปี้ไปที่ $\bar{\sigma}_c$ ที่ต้องการเสียก่อน แล้วกดตัวอย่างตามแนวแกนของตัวอย่างด้วยวิธีธรรมดาแบบการทดสอบ UU แต่กดตัวอย่างด้วยความเร็วคงที่เพียง 1.3 % strain ต่อชั่วโมงเพื่อจะได้วัดค่าความดันน้ำระหว่างเม็ดดินได้ดี ระหว่างการทดสอบวัดความดันน้ำระหว่างเม็ดดินด้วย ทำการทดสอบจนถึงค่าสูงสุดของกำลังรับแรงเฉือน หรือ strain มีค่าประมาณ 8 % (ใช้เวลา 6-7 ชั่วโมง)

ค. การทดสอบแบบ $\overline{\text{CKUC}}$

การทดสอบแบบ $\overline{\text{CKUC}}$ คือคอนโซลิเดทตัวอย่างแบบแอนไอโซทร้อปปี้เสียก่อนแล้วจึงกดตัวอย่างแบบอันเดรนและวัดความดันน้ำระหว่างเม็ดดิน (Anisotropically

Consolidated Undrained Triaxial Compression Test)

ก่อนอื่นทำการคอนโซลิเดทตัวอย่างแบบแอนไอโซทร้อปปี้ แล้วกดตัวอย่างเหมือนกับการทดสอบ $\overline{CIUC}$

ง. การทดสอบแบบ $\overline{CKUE}$

การทดสอบแบบ $\overline{CKUE}$ คือคอนโซลิเดทตัวอย่างแบบแอนไอโซทร้อปปี้เสียก่อนแล้วจึงดึงตัวอย่างแบบอันเดรนและวัดความดันน้ำระหว่างเม็ดดิน (Anisotropically Consolidated Undrained Triaxial Extension Test with pore pressure measurement)

ก่อนอื่นคอนโซลิเดทตัวอย่างแบบแอนไอโซทร้อปปี้ แล้วดึงตัวอย่างโดยการลดระดับฐานเซลล์ลงมาด้วยอัตราเร็วคงที่ 1.3 % strain ต่อชั่วโมง เมื่อชุดน้ำหนักคงที่ลอยพ้นจากตัวอย่าง จะต้องเลื่อนฐานเซลล์ลงมาอีกเป็นระยะจาก bayonet catch ถึง slotted plate ของ top cap แล้วจึงทดสอบต่อไปได้ ทำการทดสอบจนถึงค่าสูงสุดของกำลังรับแรงเฉือนหรือ strain มีค่าประมาณ 8% (ดูรูป 3.3 สำหรับเครื่องมือติดตั้งสำหรับการดึงตัวอย่าง)

สำหรับการทดสอบทุกชนิด เมื่อทดสอบตัวอย่างแล้ว จะหยุดเครื่องคลายน้ำหนักที่กระทำต่อตัวอย่างออก ถ่ายน้ำมันเครื่องและน้ำออกจากเซลล์ แล้วถอดส่วนประกอบอื่น ๆ นำตัวอย่างออกมา บันทึกรูปแบบของการวิบัติ (failure) แล้วนำตัวอย่างไปอบหาความชื้น

3.4 การคำนวณผลการทดสอบ

สมการที่ใช้ในการคำนวณผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

3.4.1 การทดสอบแบบ UU

$$\sigma_1 = \sigma_v = \sigma_c + \Delta\sigma$$

$$\sigma_3 = \sigma_h = \sigma_c$$

ซึ่ง $\Delta\sigma = P/A_c$ = ความเค้นตามแนวแกนของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลง

ในที่นี้ $\Delta\sigma$ = เป็นค่าบวก

σ_1 = หน่วยแรงหลักรวม

σ_3 = หน่วยแรงรองรวม

σ_v = หน่วยแรงในแนวดิ่งรวม

σ_h = หน่วยแรงในแนวราบรวม

3.4.2 การทดสอบแบบ $\overline{CIUC}$

$$\sigma_1 = \sigma_v = \sigma_c + \Delta\sigma$$

$$\sigma_3 = \sigma_h = \sigma_c$$

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 - u$$

$$\bar{\sigma}_3 = \sigma_3 - u$$

$$u = u_o + \Delta u$$

$$A = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma}$$

ซึ่ง $u_o = \sigma_b$ (back pressure, ความดันน้ำในตัวอย่างก่อนการทดสอบ)

ในที่นี้ $\Delta\sigma$ = เป็นค่าบวก

Δu = เป็นค่าบวก

3.4.3 การทดสอบแบบ $\overline{CKUC}$

$$\sigma_1 = \sigma_v = \sigma_c + L_1/A_c + \Delta\sigma$$ (ดูสมการ 3.2 ประกอบ)

$$\sigma_3 = \sigma_h = \sigma_c$$

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 - u$$

$$\bar{\sigma}_3 = \sigma_3 - u$$

$$u = u_o + \Delta u$$

$$A = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma}$$

ในที่นี้ $\Delta\sigma$ = เป็นค่าบวก

u = เป็นค่าบวก

3.4.4 การทดสอบแบบ $\overline{\text{CKUE}}$

$$\sigma_1 = \sigma_v = \sigma_c + L_1/A_c + \Delta\sigma \quad \text{(ดูสมการ 3.2 ประกอบ)}$$

$$\sigma_3 = \sigma_h = \sigma_c$$

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 - u$$

$$\bar{\sigma}_3 = \sigma_3 - u$$

$$u = u_o + \Delta u$$

$$A = 1 - \frac{\Delta u}{\Delta\sigma}$$

ในที่นี้ $\Delta\sigma$ = เป็นค่าลบ

Δu = เป็นค่าลบ