

บทที่ 4 เครื่องมือ, วิธีการทดลอง, และแผนการทดลอง Torsional Shear Hollow Cylinder

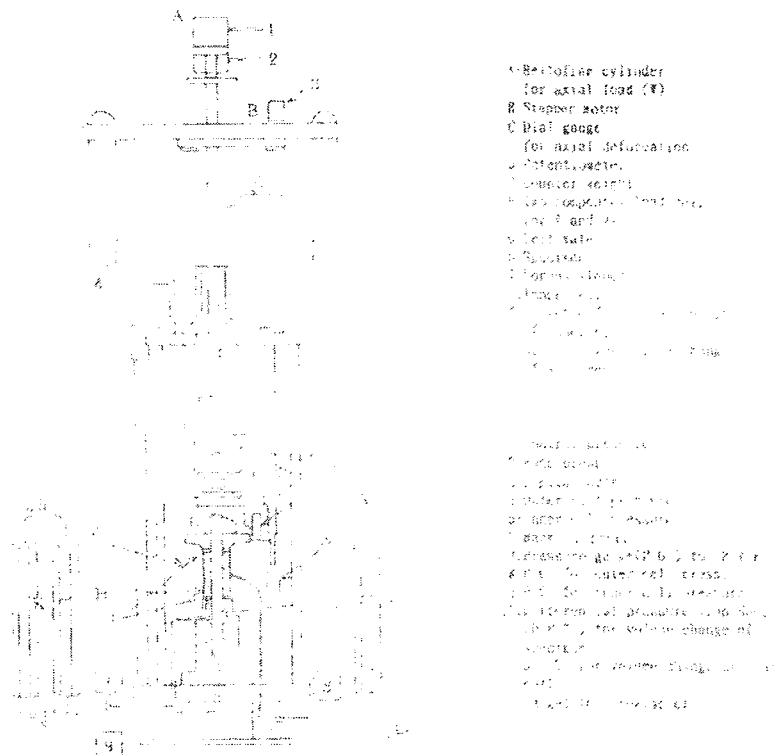
4.1 ระบบการทดลอง torsional shear hollow cylinder

การทดลอง torsional shear hollow cylinder เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการเดียวที่สามารถควบคุมได้ทั้ง major principal stress direction และ intermediate principal stress ไปพร้อมกัน (โดยอาจมีผลกระทบของ stress non-uniformity บ้าง) (Hight et al., 1983) อาจเป็นเพราะเครื่องมือทดลองนี้มีความซับซ้อนและมีราคาแพงจึงยังไม่มีเครื่องมือชนิดนี้ในประเทศไทย ทำให้ยังไม่เคยมีการศึกษาผลกระทบของ major principal stress direction และ intermediate principal stress ต่อพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯมาก่อน สำหรับในต่างประเทศการทดลอง torsional shear hollow cylinder นิยมกระทำกับดินทรายมากกว่าดินเหนียวเหตุผลส่วนหนึ่งเนื่องจากการศึกษาพฤติกรรม liquefaction ซึ่งเป็นพฤติกรรมเฉพาะของทรายภายใต้สภาวะแผ่นดินไหว (เช่น Symes et al., 1984, 1988, Nakata et al., 1998, Yoshimine et al., 1998, Zdravkovic & Jadine, 2000, 2001, Sivathayalan & Vaid, 2002) ส่วนการทดลองนี้กับดินเหนียวมีจำนวนน้อยกว่ามาก (เช่น Hicher & Lade, 1987, Lade & Kirkgaard, 2000, Lin & Penumadu, 2005) ดังนั้นจึงทำให้ยังไม่มีข้อมูลนี้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จะทำการทดลอง torsional shear hollow cylinder กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยทำการทดลองแบบ undrained test (CIUC) ที่ค่า b และ α ต่างๆ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของ major principal stress direction และ intermediate principal stress ต่อพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ภาพร่างของเครื่องมือ torsional shear ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 4-1 โดยมีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

1. cell chamber ขนาดใหญ่เส้นผ่าศูนย์กลาง 256 มม ทำด้วย stainless steel และ perspex หนา 15 มม และยึดกับฐานด้วย 3 bolt
2. loading shaft ที่มี two-component load cell โดยมีแนวแกนตรงกับแกนของ load frame shaft ติดกับ top cap ที่เชื่อมต่อกับ inner cell pressure line, suction line, และ back pressure line ส่วน inner และ outer cell จะเติม de-aired water
3. ระบบให้แรงที่เชื่อมกับ loading shaft โดย axial load และ torque จะกระทำผ่าน rigid end platen การให้แรงทั้ง axial load (W) และ torque (M_T) จะกระทำโดย Bellofram cylinder และ step motor ตามลำดับ
4. ระบบการให้แรงสามารถตั้งเป็นแบบ stress control ระบบจะมี electro-pneumatic controller ที่กระทำผ่าน de-aired water interfaces เพื่อควบคุม inner pressure, outer pressure, และ back pressure ระบบ electro-pneumatic controller นี้เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อการควบคุมการทดลอง

5. ระบบการวัด stress และ strain ค่า outer pressure, inner pressure, และ pore water pressure จะวัดโดย pressure gauges (P.G.) dial gauge transducer ใช้ในการวัด axial displacement ค่า torsional shear deformation ของตัวอย่างดินจะวัดโดย potentiometer ที่ top cap Volume change ของตัวอย่างดินจะวัดโดย differential pressure transducers (D.P.T.) transducer ทั้งหมดจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อ automatic data acquisition และ closed-loop control ลักษณะของ transducer ทั้งหมดได้สรุปในตารางที่ 4-1



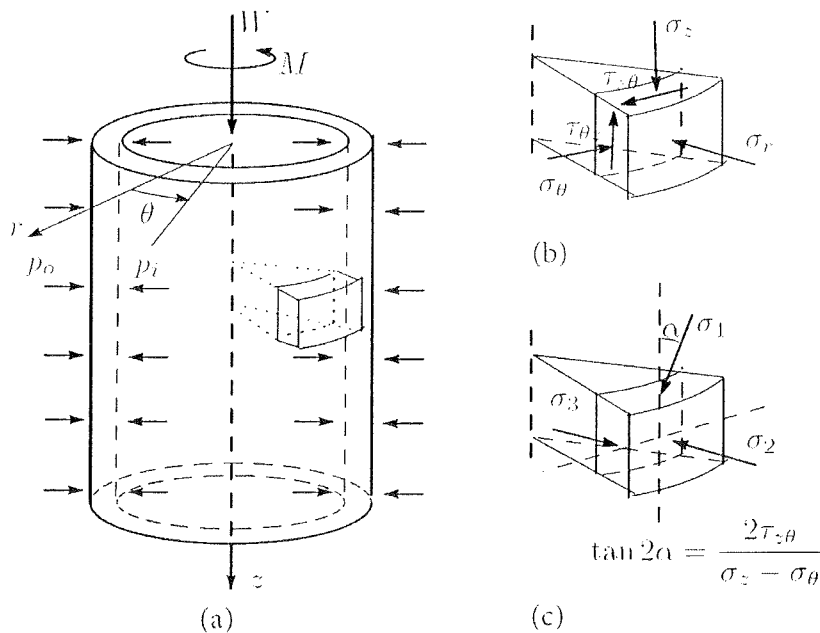
รูปที่ 5-1 เครื่องมือ torsional shear

ตารางที่ 4-1 ลักษณะของ transducer ที่ใช้ในระบบ torsional shear hollow cylinder

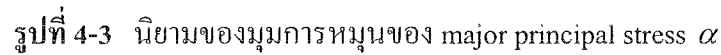
Channel	Transducers	Model No.	Serial Number	Offset	Gain (mV/(mV/V))	Calibration factor	R ²
1	Axial Load	TS300	576301	0	4000	0.7378 N/mV	-
2	Torque	TS300	576301	0	4000	0.007354 N.m/mV	-
3	Axial Displacement	DT-20D	YD9415	0	4000	0.004981 mm/mV	0.99998
4	Rotation	CP-2ut	-	0	4000	0.019487 Deg/mV	0.99994
5	Outer pressure transducer	PG-10KU	EE9360020	0	2255	0.2186 kPa/mV	0.999998
6	Inner pressure transducer	PG-10KU	YT0060050	0	2268	0.21589 kPa/mV	0.999999
7	Pore pressure transducer	PG-5KU	AF-5913	0	2263	0.10889 kPa/mV	0.999998
8	Volume change transducer	BP15-24	74114	0	ZERO 4.46 SPAN 3.92	0.005608 cm ³ /mV	0.999968

4.2 หลักการทดลอง torsional shear hollow cylinder

รูปที่ 4-2 แสดงแรงที่ขอบเขตที่กระทำต่อตัวอย่างดิน hollow cylinder และสภาพความเค้นที่สามารถจำลองได้บนเอลิเมนต์ดิน ส่วนประกอบของความเค้น 4 ตัวบนตัวอย่างดิน hollow cylinder (σ_z , σ_r , σ_θ , $\tau_{\theta z}$) สามารถกำหนดได้โดยการควบคุมตัวแปร 4 ตัวคือ outer pressure (p_o), inner pressure (p_i), axial load (W), และ torque (M_T) torque จะทำให้เกิด torsional shear stress ($\tau_{\theta z}$ และ $\tau_{z\theta}$) ทั้งในระนาบแนวตั้งและแนวนอน axial load จะทำให้เกิด vertical stress (σ_z) ความแตกต่างระหว่าง outer pressure และ inner pressure จะทำให้เกิด gradient ของ radial stress (σ_r) และ circumferential stress (σ_θ) ผ่านผนังของตัวอย่าง เนื่องจากสามารถควบคุมแรงที่ขอบเขตทั้งหมดได้อย่างอิสระทำให้สามารถกำหนดขนาดของ principal stress ทั้ง 3 อัน และมุมเอียงของทิศทาง major และ minor principal stress Mohr circle ของความเค้นในผนังของตัวอย่างดินและทิศทางการหมุนของ major principal stress ได้แสดงในรูปที่ 4-3 ในกรณีที่ outer pressure และ inner pressure มีค่าเท่ากัน ($p_o = p_i$) จะทำให้ค่า radial stress และ circumferential stress เท่ากับทั้ง outer และ inner pressure สำหรับสภาพนี้ทิศทางของ major principal stress จะสัมพันธ์กับค่า intermediate principal stress โดยสมการ $b = \sin^2 \alpha$



รูปที่ 4-2 การทดลอง hollow cylinder (a) แรงที่ขอบเขต (b) ส่วนประกอบของความเค้น และ (c) principal stresses และทิศทางของมัน



ส่วนประกอบของความเค้นและความเครียดในตัวอย่าง hollow cylindrical สามารถคำนวณได้ตามงานวิจัยของ Hight et al. (1983) การวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดนั้นมีสมมุติฐานมาจากว่าตัวอย่างดินเป็นเอลิเมนต์เดี่ยว เนื่องจากความเค้นเปลี่ยนแปลงผ่านผนังของตัวอย่าง hollow cylinder ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนวณค่าความเค้นและความเครียดในรูปของค่าเฉลี่ย การคำนวณค่าความเค้นเฉลี่ยที่เสนอโดย Hight et al. (1983) ได้แสดงในสมการ (4-1) ถึง (4-4)

$$\sigma_r = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i} \quad (4-2)$$

$$\tau_{\partial z} = \frac{3M_T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \quad (4-4)$$

ค่าเฉลี่ยของ axial และ circumferential stress วิเคราะห์มาจากการพิจารณาสภาพสมดุลดังนั้นก็
สามารถใช้ได้โดยไม่ขึ้นกับ constitutive law ของวัสดุ (Hight et al., 1983)

$$\mathcal{E}_z = \frac{W}{H_0} \quad (4-5)$$

$$\mathcal{E}_r = -\frac{u_o - u_i}{r_o - r_i} \quad (4-6)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{u_o + u_i}{r_{oz} + r_{iz}} \quad (4-7)$$

$$\gamma_{\theta z} = \frac{2\theta(r_o^3 - r_i^3)}{3H_0(r_o^2 - r_i^2)} \quad (4-8)$$

โดยที่ ε_z , ε_r , ε_θ และ $\gamma_{\theta z}$ คือค่าเฉลี่ยของ axial, radial, circumferential, และ shear strain H_0 คือความสูงเริ่มต้นของตัวอย่างดิน w คือการเสียรูปในแนวแกนจากความสูงเริ่มต้น θ คือการเสียรูปเชิงมุม (วัดในหน่วย radian) u_o และ u_i คือการเสียรูปในแนวรัศมีของรัศมีเริ่มต้นภายนอกและภายใน r_{oz} และ r_{iz} ตามลำดับ

สมการของความเค้นและความเครียดดังกล่าวจะใช้เพื่อคำนวณหา principal stress ดังสมการ (4-9) ถึง (4-11) ค่า intermediate principal stress จะอยู่ในแนวนอนและเท่ากับ radial stress เสมอ ค่า maximum และ minimum principal stress จะอยู่ในระนาบ $z - \theta$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \quad (4-9)$$

$$\sigma_2 = \sigma_r \quad (4-10)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \quad (4-11)$$

ค่า principal strain แสดงในสมการ (4-12) ถึง (4-14) โดยสมมติว่าทิศทางของ principal stress และ strain ตรงกัน

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\theta z}}{2}\right)^2} \quad (4-12)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_r \quad (4-13)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\theta z}}{2}\right)^2} \quad (4-14)$$

ในวิศวกรรมปฐพีจะสะดวกในการพิจารณา principal stress ใน 3-dimensional principal effective stress space ค่า invariant ของความเค้นสามารถแสดงได้ดังสมการ (4-15) ถึง (4-18)

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} \quad (4-15)$$

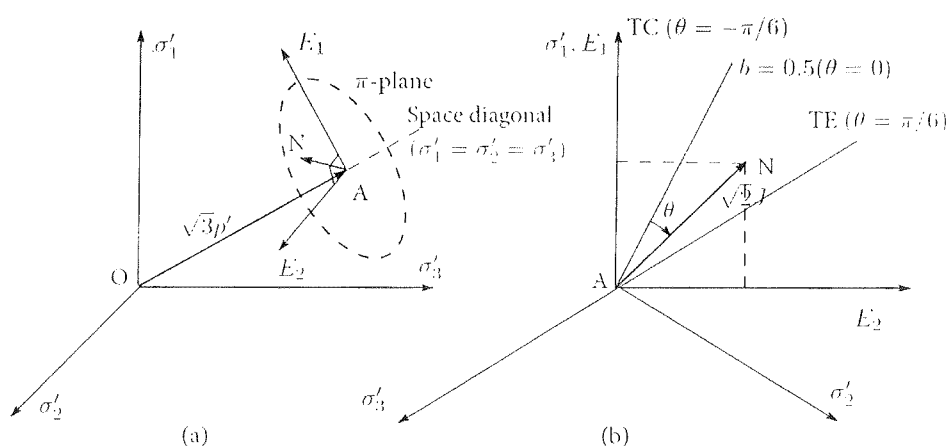
$$J = \frac{1}{6} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2} \quad (4-16)$$

$$\theta = \arctan \frac{[(2b-1)]}{\sqrt{3}} \quad (4-17)$$

$$b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3} \quad (4-18)$$

ค่า normal stresses จะอยู่ในรูป effective stress ($\sigma' = \sigma - u$) และค่า b คือตัวแปร intermediate principal stress ดังนั้นจะได้ว่า $0 \leq b \leq 1$ สำหรับการให้แรงแบบสมมาตรจะมีค่า b เท่ากับ 0 (triaxial compression) หรือ 1 (triaxial extension) ในสภาพ plane strain จะมีค่า b เท่ากับ 0.3-0.5

รูปที่ 4-4 แสดงว่าค่า mean effective stress (p') นั้นแสดงระยะตามแกน space diagonal จากจุดเริ่มต้นของ deviatoric plane ปัจจุบัน ($\overline{OA}$) ใน deviatoric plane (หรือ π -plane) นั้นค่า invariant ของ stress deviator (J) จะแสดงค่าสภาพความเค้นปัจจุบันจากแกน space diagonal ($\overline{AN}$) ค่า Lode's angle (θ) แสดงการวางตัวของสภาพความเค้นนี้บนระนาบดังกล่าว



รูปที่ 4-4 Generalized stress state: (a) Principal stress; (b) Deviatoric plane

4.4 การควบคุมการทดลองและการเก็บข้อมูล

คอมพิวเตอร์จะใช้ในการควบคุมตัวแปรต่างๆ ในเครื่องมือ torsional shear โดยโปรแกรมควบคุมที่เขียนโดยภาษา BASIC โปรแกรมนี้จะควบคุมความเค้น 4 ตัว ($\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$ and $\tau_{\theta z}$) ดังนั้นจึงสามารถควบคุมทิศทางของ major principal stress จากแนวตั้ง (α) และขนาดของ intermediate principal stress coefficient (b) ตัวแปรควบคุมต่างๆ คำนวณมาจากความเค้นปัจจุบันดังสมการ (4-19) ถึง (4-22)

$$p = \frac{(\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta)}{3} \quad (4-19)$$

$$b = \frac{\sigma_r - \left(\frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{\theta z}^2}}{\sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{\theta z}^2}} \quad (4-20)$$

$$R(t) = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta + \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{\theta z}^2}}{\sigma_z + \sigma_\theta - \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{\theta z}^2}} \quad (4-21)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\tau_{\theta z}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \right) \quad (4-22)$$

โดยที่ p , b , R , และ α คือ mean stress, intermediate principal stress ratio, total stress ratio (ในรูปของ stress rate), และมุมที่ทิศทางของ major principal stress กระทำกับแนวตั้ง

จากตัวแปรควบคุมจะสามารถคำนวณความเค้นเป้าหมายดังสมการ (4-23) ถึง (4-26)

$$\sigma_z(t) = \frac{(R(t)+1) + (R(t)-1)\cos 2\alpha}{2b(R(t)-1) + 2(R(t)+2)} 3p \quad (4-23)$$

$$\sigma_r(t) = \frac{b(R(t)-1) + 1}{b(R(t)-1) + (R(t)+2)} 3p \quad (4-24)$$

$$\sigma_\theta(t) = \frac{(R(t)+1) - (R(t)-1)\cos 2\alpha}{2b(R(t)-1) + 2(R(t)+2)} 3p \quad (4-25)$$

$$\tau_{\alpha z}(t) = \frac{(R(t)-1)\sin 2\alpha}{2b(R(t)-1) + 2(R(t)+2)} 3p \quad (4-26)$$

จากนั้นจะมีการเพิ่มแรงในแนวแกนและความเค้นเป้าหมายอื่นๆจะถูกคำนวณใหม่เพื่อจะปรับค่าความเค้นให้เป็นไปตาม stress path ที่ต้องการ ตัวแปรการให้แรงสามารถคำนวณโดยสมการ (4-1) ถึง (4-4) และ (4-27) ถึง (4-30)

$$W = \pi(r_o^2 - r_i^2)\sigma_z(t) - \pi(p_o r_o^2 - p_i r_i^2) \quad (4-27)$$

$$M_t = \frac{2}{3}\pi(r_o^3 - r_i^3)\tau_{\alpha z}(t) \quad (4-28)$$

$$p_o = \frac{\sigma_r(t)(r_o - r_i) + \sigma_\theta(t)(r_o - r_i)}{2r_o} \quad (4-29)$$

$$p_i = \frac{\sigma_r(t)(r_o - r_i) - \sigma_\theta(t)(r_o - r_i)}{2r_i} \quad (4-30)$$

4.5 แผนการทดลองและวิธีการทดลอง torsional shear hollow cylinder

แผนการทดลอง torsional shear hollow cylinder ออกแบบเพื่อศึกษาพฤติกรรม anisotropy ของ Bangkok Clay ในด้านผลกระทบของการหมุนของ major principal stress rotation และขนาดของ intermediate principal stress โดยทำการทดลองที่ทิศทางของ the major principal stress $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$ and 90° และค่า the intermediate principal stress ratio $b = 0, 0.5$ and 1.0 โดยทำการทดลองในสภาพไม่ระบายน้ำ (CIUC) แผนการทดลอง torsional shear hollow cylinder และคุณสมบัติของตัวอย่างดินได้แสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แผนการทดลอง torsional shear hollow cylinder และคุณสมบัติของตัวอย่างดิน

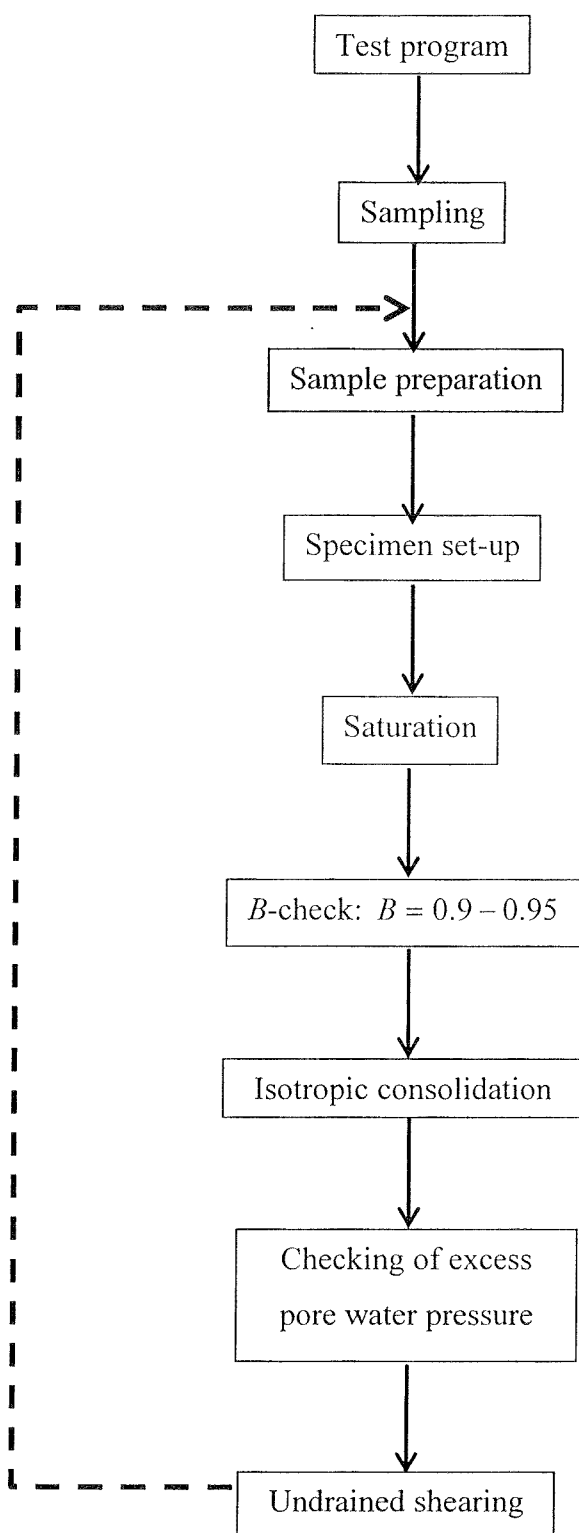
Test No.	α ($^{\circ}$)	b	Borehole No.	Depth (m)	Natural water content (w_n) (%)	Liquid Limit (LL) (%)	Plastic Limit (PL) (%)	Liquid Index (LI) (%)	Plastic Index (PI) (%)
A00B00	0	0	BH-5	14.0-14.6	20.16	64.8	16.31	48.49	7.94
A00B05	0	0.5	BH-5	13.3-13.8	22.16	53.6	17.97	35.63	11.76
A00B10	0	1	BH-5	13.2-13.8	25.26	59.6	17.65	41.95	18.14
A45B00	45	0	BH-6	11.8-12.4	54.29	85.18	32.97	52.21	40.84
A45B05	45	0.5	BH-5	10.6-11.2	61.83	-	-	-	-
A45B10	45	1	BH-5	12.0-12.6	49.4	85.8	27.39	58.41	37.68
A90B00	90	0	BH-6	11.5-12.0	53.36	87.6	31.85	55.75	38.58
A90B05	90	0.5	BH-7	9.8-10.4	79.33	114.2	40.04	74.16	52.98
A90B10	90	1	BH-7	7.0-7.6	55.58	62.80	22.31	40.49	82.16

หมายเหตุ u = underdrainage to lower and stratum

$$K_o = 0.7$$

$$\gamma_s = 17 \text{ kN/m}^3$$

วิธีการทดลอง torsional shear hollow cylinder ได้แสดงโดย flowchart ในรูปที่ 4-5 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะอธิบายดังนี้



รูปที่ 4-5 ขั้นตอนการทดลอง torsional shear hollow cylinder

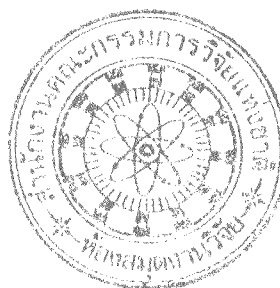
4.5.1 การเก็บตัวอย่างดิน

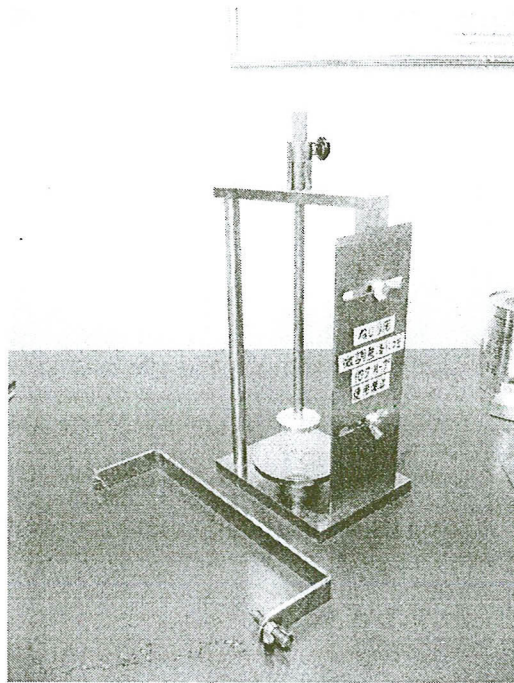
ตัวอย่างดินที่ใช้คือ undisturbed Bangkok Clay จากพื้นที่ลาดพร้าวที่ความลึก 7.5-15 ม โดยเก็บด้วย piston sampler ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 ซม ตัวอย่างจะถูก wax และเก็บไว้ก่อนการทดลอง

4.5.2 การเตรียมตัวอย่างดิน

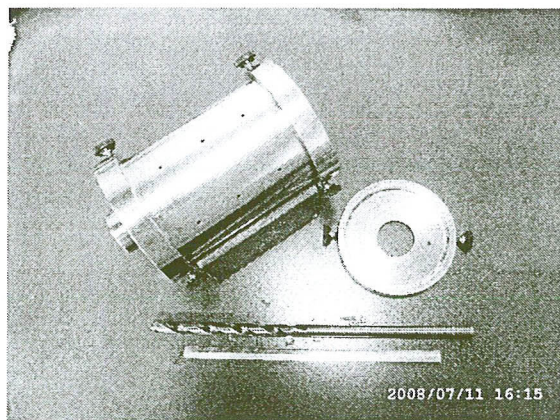
หลังจากการเอา wax และ cling-film ออกจากตัวอย่างดินจะตรวจสอบสภาพตัวอย่างว่าเหมาะสำหรับทำการทดลองหรือไม่หากพบรอยแตกหรือการรบกวนใดๆจะไม่ใช้ตัวอย่างดินนั้น ก่อนที่จะวางตัวอย่างดินใน soil lathe ปลายทั้งสองของตัวอย่างจะถูกตัดให้เรียบด้วยมีด จากนั้นตัวอย่างดินจะถูกตัดด้วย wire saw จนมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 มม

ตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะถูกหุ้มด้วย two-part steel mould (เส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 120 มม) ปลายของตัวอย่างจะถูกตัดเรียบเพื่อให้มีความสูง 120 มม หลังจากนั้น mould จะถูกปิดที่ปลายด้วย end cap และพร้อมสำหรับขั้นตอนการทำทรงกระบอกกลวงภายใน เพื่อไม่ให้ตัวอย่างดินติดกับผนังของ steel mould จะใช้แผ่นพลาสติกบางห่อตัวอย่างดินไว้ก่อนการใส่ mould ตรงกลางของ end cap จะมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มม และ 10 มม ที่คนละด้าน รูปของอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างดินได้แสดงในรูปที่ 4-6





(a) soil lathe และ wire saw เพื่อตัดดินให้ได้ขนาดภายนอก

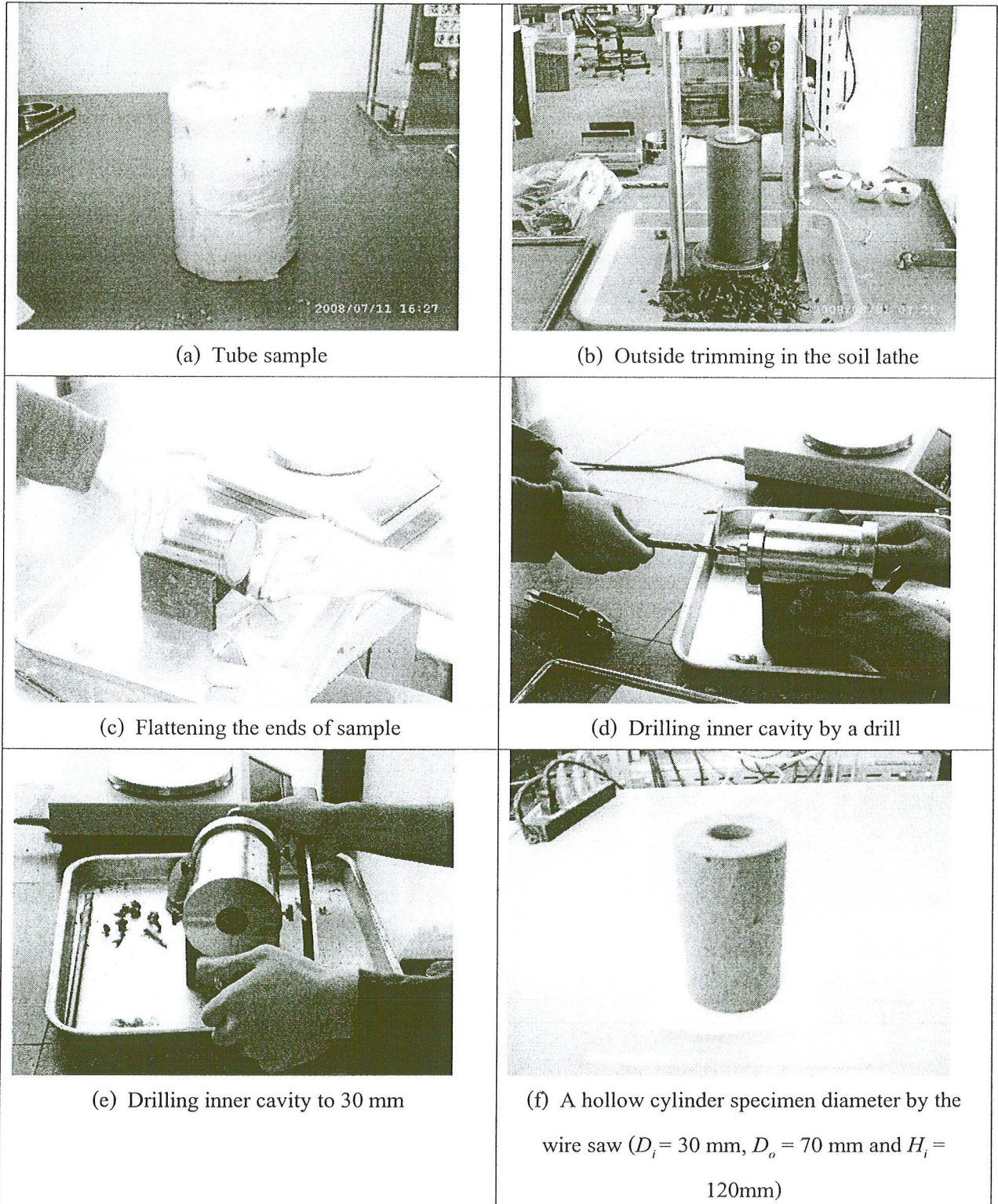


(b) steel mould และสว่านเพื่อตัดดินให้ได้ขนาดภายใน

รูปที่ 4-6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างดิน hollow cylinder

มีหลายวิธีในการทำทรงกระบอกภายในและการเลือกวิธีใดขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ตัวอย่างเช่นวิธีที่ใช้โดย Porovic (1995) และ Albert et al. (2003) จะใช้ soil lathe แบบอัตโนมัติค่อยๆ ุปาดดินให้ได้ขนาดโดยลดขนาดรัศมีของตัวอย่างดินทีละน้อยเป็นลำดับซึ่งพิจารณาว่ารอบกว่นตัวอย่างดินน้อย ในงานวิจัยนี้

ทรงกระบอกภายในจะดำเนินการโดยขยายขนาดของทรงกระบอกภายในโดยใช้สว่านเจาะรูเล็กและใช้ wire saw เพิ่มขนาดของรูดังแสดงในรูปที่ 4-7

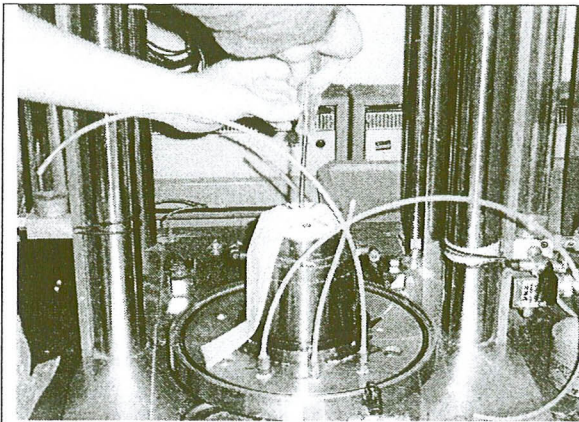


รูปที่ 4-7 กระบวนการเตรียมตัวอย่าง hollow cylinder

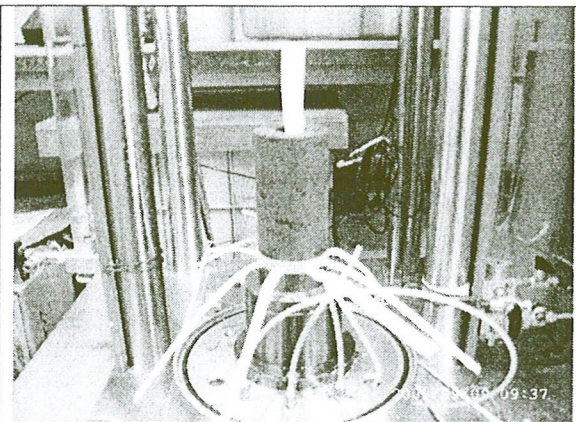
ในแต่ละตัวอย่างดินจะมีการหาความชื้นก่อนและหลังการทดลอง มิติของตัวอย่าง (H , D_i and D_o) จะวัดที่ 4 ตำแหน่งและใช้ค่าเฉลี่ยในการคำนวณที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างดินจะถูกชั่งน้ำหนักด้วย

4.5.3 การติดตั้งตัวอย่างดิน

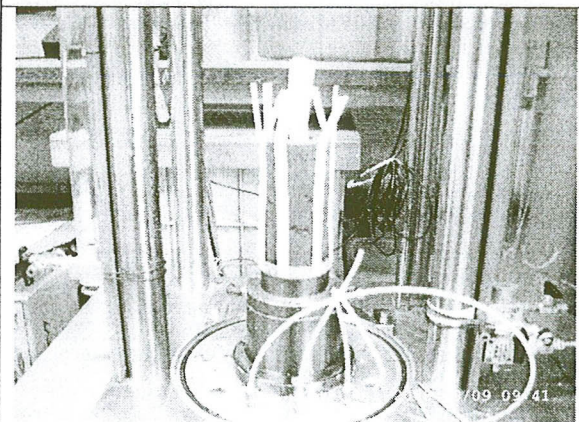
การติดตั้งเครื่องมือและตัวอย่างดิน hollow cylinder ได้แสดงในรูปที่ 4-8 และอธิบายดังนี้



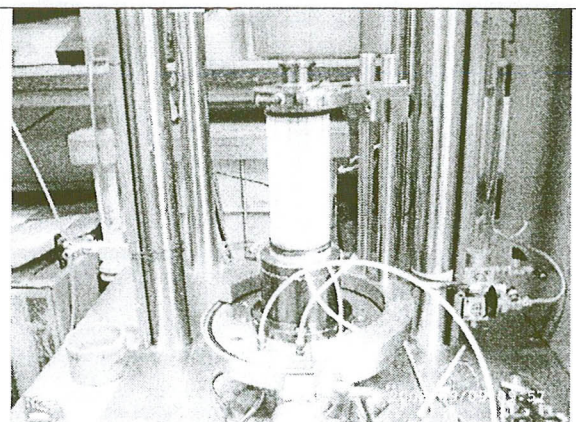
(a) Installing base pedestal, bottom porous stone and inner membrane in the position



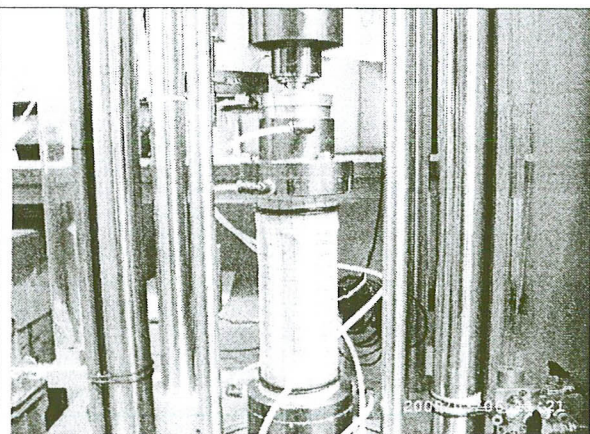
(b) Placing a specimen on the bottom porous stone



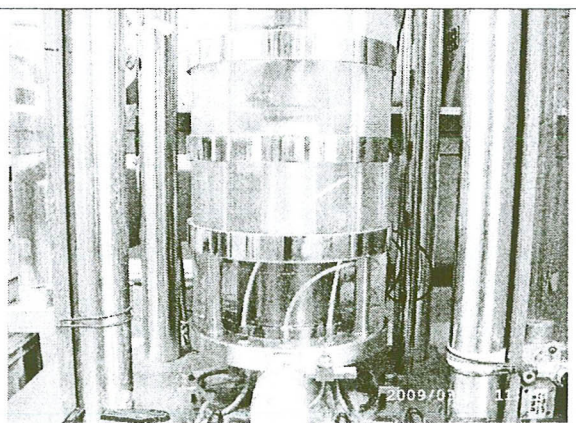
(c) Attaching 8 damp trip filter papers on the specimen wall



(d) Setting the top cap and enclosing inner and outer membrane



(e) Connection between load cell and top cap and potentiometer installation

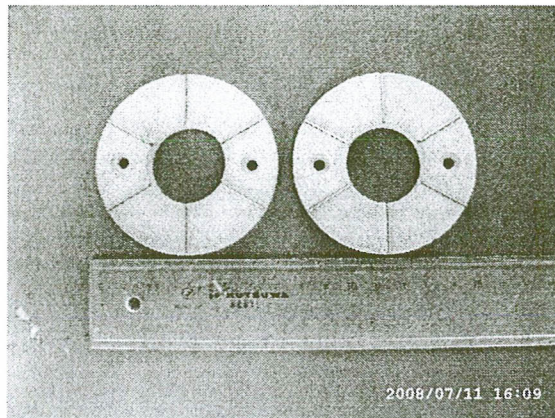


(f) Filling cell water and connection between the set of stationary and load frame

รูปที่ 4-8 กระบวนการติดตั้งตัวอย่าง hollow cylinder

- การติดตั้งตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินจะถูกวางบน base pedestal ซึ่งมี porous stone และ inner membrane ติดตั้งอยู่ porous stone จะมีครีบทองเหลืองบางๆ 6 อันเพื่อป้องกันการลื่นไถลที่ปลายของตัวอย่างเนื่องจากการถ่ายแรง torsion (รูปที่ 4-9)



รูปที่ 4-9 Top และ bottom porous stone กับครีบทองเหลือง

- Side drain

แถบกระดาษกรอกกว้าง 1 ซม จำนวน 8 อันจะวางไว้ที่ผิวด้านนอกของตัวอย่างดินเพื่อช่วยการ consolidation

- Inner และ outer membrane

หลังจากตัวอย่างดินวางอยู่บน pedestal พร้อมกับติดตั้ง side drain และ top cap แล้ว inner และ outer rubber membrane จะถูกครอบตัวอย่างไว้โดยมีการระวังไม่ให้มีอากาศขังอยู่ หลังจากนั้น o-ring จำนวน 2 ตัวจะถูกติดตั้งที่แต่ละด้านของตัวอย่างดินเพื่อป้องกันน้ำรั่วจาก outer cell และใช้ o-ring 1 ตัวที่ top cap เพื่อป้องกันน้ำรั่วจาก inner cell

- การเชื่อมต่อระหว่าง load cell และ top cap

หลังจากติดตั้ง membrane แล้วจะทำการติดตั้ง potentiometer จากนั้นจะทำการติดตั้ง cell chamber ซึ่งยึดติดกับฐานด้วย stiffening ring โดยใช้ bolt 3 ตัว cell จะยึดติดกับฐานของเครื่องมือด้วย bolt หลังจากนั้นก็จะติดตั้งเครื่องมือวัดอื่นๆที่เหลือ

- การเติมน้ำเข้าสู่ cell

การเติมน้ำเข้าสู่ chamber จะทำเป็น 3 ขั้นตอน โดยแต่ละขั้นตอนจะเติมน้ำใน outer cell chamber จนถึงระดับที่ต้องการก่อนแล้วจึงเติมน้ำใน inner cell chamber จนถึงระดับที่ต้องการ เมื่อถึงระดับน้ำสุดท้ายแล้วจะเติมน้ำใน inner cell chamber จนเต็มเพื่อไม่ให้มีอากาศเหลืออยู่

4.5.4 Saturation

หลังจากการติดตั้งตัวอย่างดินแล้วจะให้ suction 100 kPa ต่อ cell และ suction line เพื่อดูดอากาศที่ติดค้างอยู่จากระบบ หลังจากนั้น 15 นาทีอากาศใน drainage line จะถูก flush ด้วย de-aired water ระหว่างที่ลดค่า suction pressure จนเป็นศูนย์ back pressure จะถูกใช้เพื่อการ saturation ค่า cell pressure และ back pressure จะถูกเพิ่มขึ้นพร้อมๆกันในหลายๆขั้นโดยควบคุมความแตกต่างของความดันทั้งสองให้คงที่และเท่ากับ initial effective stress ค่า back pressure ที่ใช้คือ 200 kPa ระหว่างกระบวนการนี้จะทำการตรวจสอบสภาพการ saturation ด้วยการเพิ่ม cell pressure และปิด drainage valve และพบว่าค่า Skempton B -value ที่ได้มากกว่า 0.95 ซึ่งตรงกับ degree of saturation 100% สำหรับ soft และ stiff clay

4.5.5 Isotropic consolidation

ตัวอย่างดินจะถูก isotropic consolidation ไปที่ mean in-situ effective stress รายละเอียดของค่า mean in-situ effective stress ของแต่ละการทดลองได้สรุปในตารางที่ 4-3 ระหว่างการ consolidation น้ำจะสามารถไหลออกจากตัวอย่างดินผ่าน drainage valve

ตารางที่ 4-3 รายละเอียดของแต่ละการทดลอง

Test No.	α (°)	b	Borehole No.	Depth (m)	In-situ effective overburden pressure σ'_{v0} (kPa)	Consolidation pressure p'_0 (kPa)	Initial effective stress p'_i (kPa)	Back pressure u_b (kPa)
A00B00	0	0	BH-5	14.0-14.6	133.1	105	50	200
A00B05	0	0.5	BH-5	13.3-13.8	126.2	100	50	200
A00B10	0	1	BH-5	13.2-13.8	124.5	100	50	200
A45B00	45	0	BH-6	11.8-12.4	104	85	50	200
A45B05	45	0.5	BH-5	10.6-11.2	92.3	75	50	200
A45B10	45	1	BH-5	12.0-12.6	109.1	90	50	200
A90B00	90	0	BH-6	11.5-12.0	105	85	50	200
A90B05	90	0.5	BH-7	9.8-10.4	79.7	65	50	200
A90B10	90	1	BH-7	7.0-7.6	54.1	45	45	200

ระยะเวลาการสิ้นสุดการ consolidation จะพิจารณาโดยวิธี 3-time method โดยจะพล็อตค่า volume change (ΔV) และ time (t) บนกราฟแบบ semi-logarithmic scale และหาพิจารณาส่วนที่ชันที่สุดของกราฟ วาดเส้นตรงขนาดเท่ากับเส้นนี้บนกราฟ semi-logarithmic โดยมีระยะ t เส้นนี้จะเรียกว่า “3t-line” เมื่อกราฟ $\Delta V - \log t$ ถึงเส้น 3-t line จะพิจารณาว่าเป็นการสิ้นสุดการ consolidation (The Japanese Geotechnical Society, 1999).

4.5.6 การตรวจสอบค่า excess pore water pressure หลังจากการ consolidation

เนื่องจากอนุญาตให้มีการ drainage ทั้งสองด้านของตัวอย่างดินทำให้ไม่สามารถวัดค่า excess pore water pressure ได้ในระหว่างการ consolidation การตรวจสอบค่า excess pore water pressure หลังจากการ consolidation ทำโดยการปิด drainage valve และสังเกตการค่า หากค่า excess pore water pressure ไม่เพิ่มขึ้นแสดงว่าตัวอย่างดินอยู่ในสภาพพร้อมที่จะทำการทดลอง undrained shearing แต่หากค่า excess pore water pressure มีค่าเพิ่มขึ้นจะต้องทิ้งตัวอย่างให้ระบายน้ำต่อไปอีก การสิ้นสุดของ isotropic consolidation จะพิจารณาเมื่อ excess pore water pressure ลดลงจนหมด ($\Delta u < 1 \text{ kPa}$)

4.5.7 Undrained shearing

งานวิจัยนี้ทำการเหนือนแบบไม่ระบายน้ำ ในกรณีของ compression และ extension นั้นตัวอย่างดินจะถูกเหนือนจนกระทั่งวิบัติ แต่ในกรณีที่เหนือนแบบ $\alpha=45^\circ$ การเหนือนจะหยุดเมื่อมีการเคลื่อนตัวมากหรือเมื่อการหมุนถึงค่า 30° หลังจากการเหนือนจะมีการทดสอบ water content ของตัวอย่างดิน