บทที่ 3

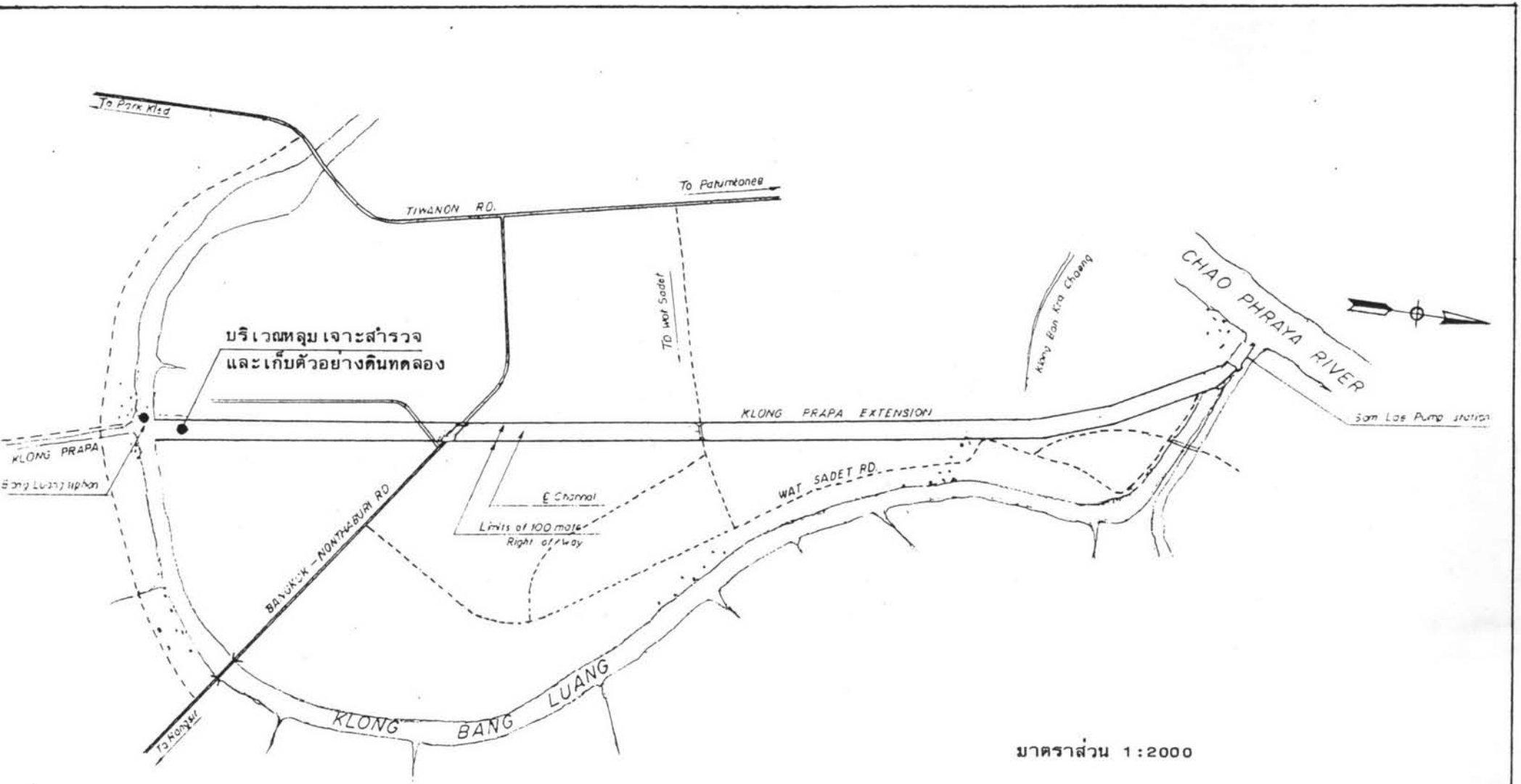
การทดลอง

ในบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างตั้งแต่เขตจังหวัดอยุธยา ปทุมธานี นนทบุรี กรุงเทพมหานครและสมุทรสาคร มีดินเหนียวอ่อนที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอนในน้ำทะเล (Recent Marine Clays) เป็นบริเวณกว้าง ชั้นดินเหนียวอ่อนนี้อาจพบตั้งแต่ระยะลึก 0-4 เมตร และมีความหนาประมาณ 12-20 เมตร ซึ่งมักนิยมเรียกว่า "ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ" (Soft Bangkok Clay) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า "ดินกรุงเทพฯ" เป็นชั้นดินที่มีการยุบตัวสูง (High Compressibility) อันก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งก่อสร้างบนชั้นดินอ่อนในบริเวณนี้

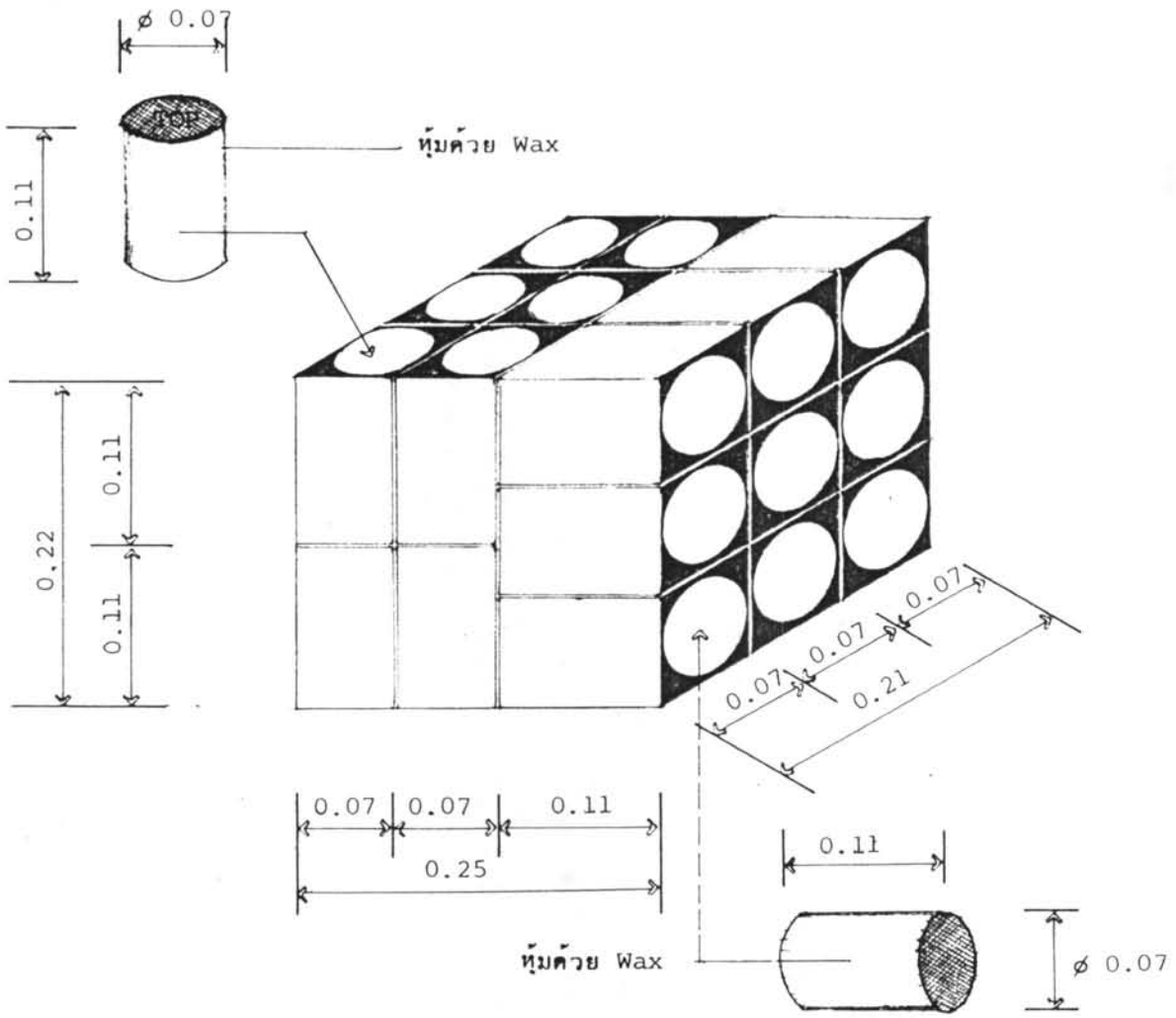
3.1 การเก็บตัวอย่างดินทดลอง

ดินเหนียวอ่อน (มีปริมาณ silt ปนอยู่มาก) ที่ใช้เป็นตัวอย่างสำหรับงานวิจัยนี้เก็บจากบริเวณริมคลองหลวงภายในบริเวณโครงการณ์ขยายคลองประปา จังหวัดปทุมธานี (ดูแผนที่รูปที่ 3.1) ซึ่งอยู่ทางทิศเหนือของกรุงเทพฯ ตัวอย่างดินทดลองถูกเก็บอย่างระมัดระวังโดยใช้วิธีเก็บตัวอย่างแบบกล่อง (Block Sample) จะได้ดินทดลองที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดและเป็นเอกพันธ์ (Homogeneous) ที่ระดับความลึกประมาณ 5 เมตรจากผิวดินซึ่งจะต้องขุดดินต่อจากระดับความลึกเดิมที่เพิ่งขุดไว้ใหม่ (เดิมขุดโดยใช้รถขุด) อีกประมาณ 1.50 เมตร

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องใช้ตัวอย่างดินทดลองจำนวนมาก โดยแบ่งเป็นตัวอย่างดินทดลองในแนวดิ่ง (ดินหมวด V) และตัวอย่างดินทดลองในแนวนอน (ดินหมวด H) จึงเก็บตัวอย่างดินจำนวน 2 กล่องนำมาตัดแบ่งออกเป็นดินตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 7 ซม. สูงประมาณ 11 ซม. เคลือบด้วยขี้ผึ้ง (wax) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ตัวอย่างดินทั้งหมดจะเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้นเพื่อช่วยป้องกันมิให้ปริมาณความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงในระหว่างรอการทดลอง



รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงบริเวณที่เก็บตัวอย่างดินทดลอง



หมายเหตุ ขนาดต่าง ๆ มีหน่วยเป็นเมตร

รูปที่ 3.2 การแบ่งดินจากตัวอย่างดินทดลองแบบกล่อง (Block Sample) เป็นตัวอย่างดินทดลองในแนวดิ่ง (ดินหมวด V) และตัวอย่างดินทดลองในแนวนอน (ดินหมวด H)

3.2 การหาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลอง

ได้ใช้ตัวอย่างดินทั้ง 2 กล่องทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ดังนี้

1. ปริมาณความชื้นในธรรมชาติ
2. Atterberg Limits
3. การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน (Grain size Analysis)
4. ความหนาแน่นเปียก (Wet Density)

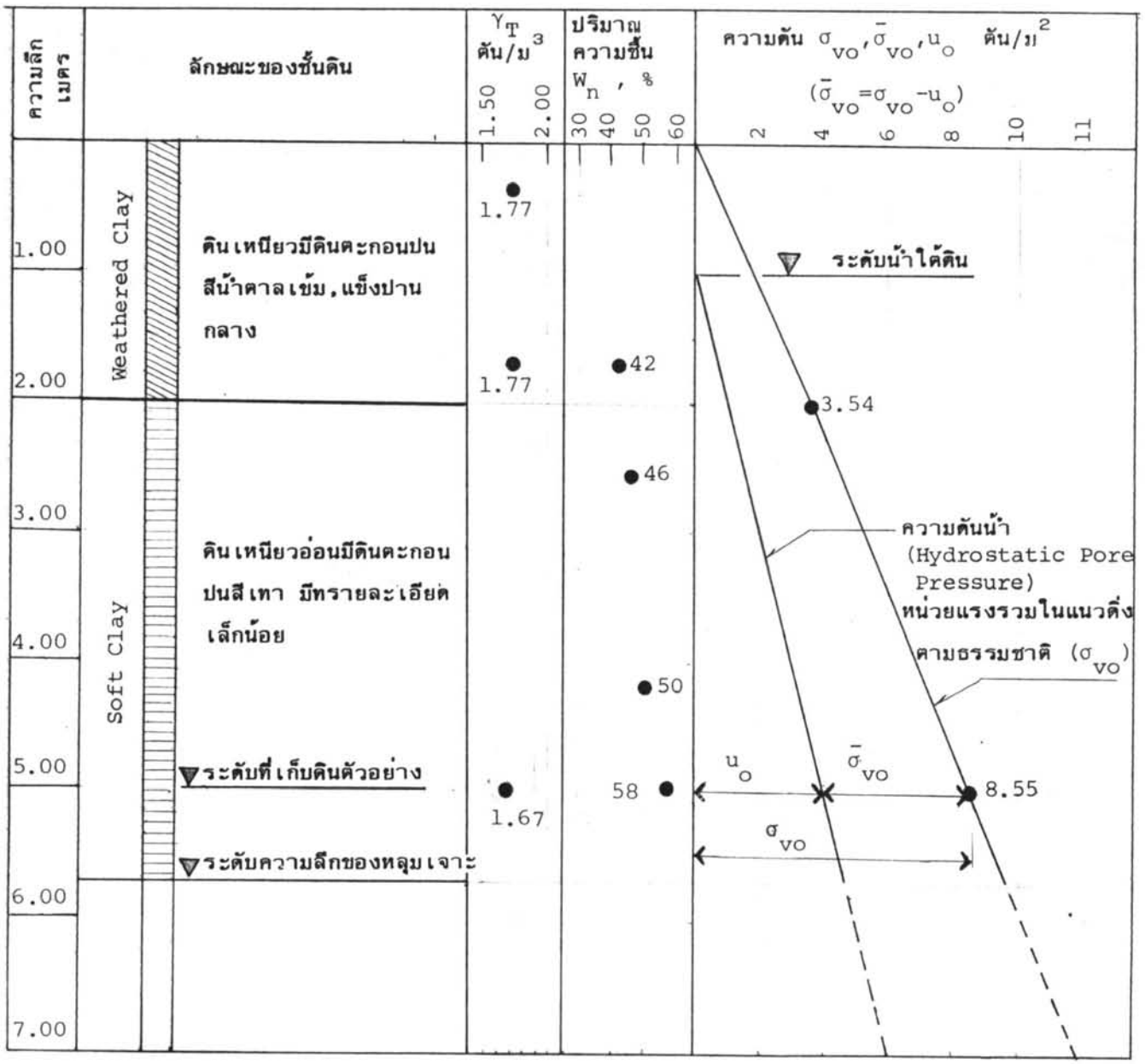
วิธีการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานเหล่านี้ใช้วิธีการตามขั้นตอนในหนังสือ Soil Testing for Engineers (LAMBE, 1951)

การที่ได้ข้อมูลและลักษณะของชั้นดินเหนือระดับดินที่เก็บตัวอย่าง (ดูรูปที่ 3.3) ทำให้สามารถหาหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งตามธรรมชาติ (σ_{vo}) หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vo}$) ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาค่า Maximum Past Pressure โดยใช้การทดลองอัดตัวคายน้ำในลักษณะมิติเดียว (Consolidation Test) เพื่อหาค่า OCR (Over Consolidation Ratio) ของดินทดลองด้วย

3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองใช้เครื่อง Triaxial มาตรฐาน ผลิตจาก WYKEHAM FARRANCE ENGINEERING LTD. SLOUGH;ENGLAND พร้อมอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change Measurement) ระบบการควบคุมความดันในเซลล์ (Cell Pressure) และความดันน้ำในตัวอย่างตอนแรก (Back Pressure) ให้คงที่โดยใช้อุปกรณ์ชดเชยความดันจากสายปรอทโดยอัตโนมัติ (Automatic Compensating Mercury Column) เครื่องแปลงกำลัง (Transducer) สำหรับวัดค่าความดันน้ำในโพรง (Pore Water Pressure) ที่ฐานของดินทดลอง เครื่องกดดิน (Compression Machine) นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อื่น ๆ อีกเช่น โครงเหล็กแขวน (Steel Frame Hanger) สำหรับวางน้ำหนักคงที่ (Dead Load) เกจ (Dial Gage) สำหรับวัดค่าการยุบตัวของดินเป็นต้น



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

โครงการณ์ ขยายคลองประปา เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2524

รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของชั้นดินเหนือระดับที่เก็บดินตัวอย่าง

ก่อนใช้เครื่อง Triaxial ต้องมีการทดสอบเสียก่อนว่า จะมีการรั่วที่ลิ้นระบายน้ำ (Valve) หรือที่ตำแหน่งใด ๆ ของเซลล์(Cell) หรือไม่ เมื่อเตรียมตัวอย่างและใส่น้ำลงไปในเซลล์เรียบร้อยแล้วควรมีการเติมน้ำมันเครื่องที่มีความหนืดพอสมควรเหนือน้ำในเซลล์ด้วย เมื่อเพิ่มความดันเซลล์ไปที่ค่าความดันสูง ๆ การรั่วซึมของน้ำมันตามช่องรอบ ๆ ก้านถ่ายน้ำหนัก (Loading Ram) ควรจะมีไม่มากเกินไปและควรมีน้ำมันอยู่ตลอดเวลาในระหว่างทำการทดสอบเพื่อลดอัตราการซึมของน้ำออกจากเซลล์ เพราะถ้าน้ำมันซึมออกจนหมดจะทำให้ความดันในเซลล์มีค่าลดลงเป็นศูนย์ทันที

Proving Ring สำหรับวัดแรงกระทำในแนวดิ่ง (Vertical Loading) ถูกวัดค่า (Calibrate) หาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าการยุบตัวของ Proving Ring ที่อ่านได้จากเกจโดยใช้น้ำหนักคงที่วาง Proving Ring นี้ใช้ในการทดสอบแรงเฉือนแบบอันเดรนของดิน

เครื่องแปลงกำลัง (Transducer) สำหรับวัดความดันน้ำในโพรงถูกวัดค่า (Calibrate) ให้เทียบกับความดันที่ทราบค่าโดยอ่านจากเกจวัดความดัน (Dial Pressure Gage) ค่าความดันที่แตกต่างกันระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องแปลงกำลังกับค่าความดันที่ถูกต้องจากเกจวัดความดัน จะนำมาใช้ปรับแก้เพื่อหาค่าความดันน้ำในโพรงที่อ่านได้จากเครื่องแปลงกำลังในระหว่างการทดลอง

ในกรณีที่จะเพิ่มหน่วยแรงเบี่ยงเบน (Deviator Stress) ให้กับดินเมื่อทดลองครีพ ทำได้โดยเติมน้ำหนักคงที่ โดยแขวนโครงเหล็กแขวนและเติมน้ำหนัก น้ำหนักที่แขวนทั้งหมดอย่างน้อยจะต้องสมดุลย์กับแรงดันในก้านถ่ายน้ำหนักเนื่องจากความดันในเซลล์เสียก่อน แล้วจึงวางน้ำหนักคงที่ส่วนที่จะไปเพิ่มเป็นหน่วยแรงเบี่ยงเบนให้กับดินทดลอง ดังนั้นเพื่อความถูกต้องของค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนที่เพิ่มให้กับดินทดลอง จึงวัดค่า (Calibrate) หาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคงที่ที่ต้องใช้เพื่อการสมดุลย์กับความดันในเซลล์ค่าต่าง ๆ

การให้แรงในตัวอย่างระหว่างการทดสอบแรงเฉือนกับการทดสอบครีพต่างกันคือ ในการทดสอบอย่างแรกเป็นการทดสอบแบบควบคุมอัตราความเครียด (Strain Rate Control) การให้แรงเบี่ยงเบนทำโดยใช้ Proving Ring ส่วนการทดสอบครีพการให้แรงเบี่ยงเบนทำโดยการแขวนน้ำหนักที่คงที่

i17697ΔΔx

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างดินทดลองในเครื่อง Triaxial

ก่อนที่จะเตรียมตัวอย่างดินทดลองในเครื่อง Triaxial จะต้องตรวจสอบเครื่อง Triaxial ให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะใช้งานเสียก่อน กล่าวคือ สายทุกเส้นต้องเต็มด้วยน้ำที่ปราศจากฟองอากาศ (De-air Water) หินพรุน (Porous Stone) ที่ใช้ต้องต้มไล่ฟองอากาศให้หมดและอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) ก่อนนำไปวางที่ฐาน (Pedestal) ของเครื่อง Triaxial ระบบวัดความดันน้ำในโพรงคือเครื่องแปลงกำลังต้องอิ่มตัวด้วยน้ำ นอกจากนี้ยังต้องตรวจสอบเกจ Proving Ring และอุปกรณ์อื่น ๆ ให้พร้อมที่จะใช้งานด้วย

เมื่อจะทำการทดลอง นำดินทดลองที่เตรียมไว้ออกจากห้องควบคุมความชื้น นำมาแกะขี้ผึ้งที่เคลือบออกแล้วแต่งขอบ (Trim) โดยใช้โครงแต่งขอบ (Trimming Frame) และลวดแต่งขอบ (Wire Saw) ให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.4 นิ้ว (3.55 เซนติเมตร) ตัดตัวอย่างให้มีความสูงของดินที่จะทดลองประมาณสองเท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางคือประมาณ 2.8 นิ้ว (7.10 เซนติเมตร) นำดินส่วนที่เหลือจากการแต่งขอบปริมาณพอสมควรไปหาปริมาณความชื้นเริ่มแรก (Initial Water Content) ชั่งน้ำหนักดินทดลองที่แต่งขอบจนได้ขนาดแล้วด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดถึง 0.05 กรัม วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ด้านบน (Top) กลาง (Middle) และด้านล่าง (Bottom) ตลอดจนความสูงของดินโดยใช้เวอร์เนีย (Vernier) ที่มีความละเอียด 0.05 มิลลิเมตร เพื่อใช้หาพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยและปริมาตรของดิน

นำดินทดลองวางที่ฐานของเครื่อง Triaxial จัดให้ดินทดลองวางสนิทกับฐานเครื่องบนหินพรุนที่มีกระดาษระบายน้ำวางอยู่ข้างบน วาง Top Cap บนยอดของดินทดลอง สำหรับการทดลองที่ต้อง Reconsolidated ดินจะใช้กระดาษระบายน้ำ (Filter Paper Drain) ติดทางด้านข้างเพื่อที่จะช่วยระบายน้ำออกจากดินทดลอง ทำให้เวลาที่ใช้ในการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) รวดเร็วขึ้น กระดาษระบายน้ำที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ของ WYKEHAM FARRANCE มี 6 แถบขนาด 1 ซม.x7.6 ซม. หลังจากพันกระดาษระบายน้ำรอบดินทดลองแล้วใช้เยื่อยาง (Rubber Membrane) คลุมรอบดินทดลองสองชั้น รัดที่ด้านล่าง (Base) ด้วยแหวนยาง (Rubber "O" Ring) จำนวน 3 เส้นและที่ด้านบน (Top Cap) จำนวน 3 เส้น เพื่อที่จะแยกระหว่างระบบน้ำในดินกับระบบน้ำในเซลล์ออกจากกัน

เมื่อเตรียมดินทดลองในเครื่อง Triaxial เสร็จ เปิดให้น้ำที่ไล่ฟองอากาศแล้วเข้าเซลล์จนเกือบเต็ม ใช้น้ำมันเครื่อง (Motor Oil SHELL X100) ฉีดเข้าไปจนเต็มเซลล์ น้ำมันจะลอยเหนือน้ำอยู่ด้านบนของเซลล์ลดการซึมออกรอบ ๆ ก้านถ่ายน้ำหนักเพราะน้ำมันชนิดนี้มีความหนืดสูง นอกจากนี้ยังช่วยลดความเสียดทาน (Friction) ของก้านถ่ายน้ำหนักอีกด้วย น้ำมันจะต้องมีมากพอตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลองสิ้นระบายน้ำทุกตัวที่ไม่ได้ใช้จะถูกปิดให้แน่น

3.3.3 การทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation)

การทำให้ดินทดลองอิ่มตัวด้วยน้ำในงานวิจัยนี้ใช้ความดันน้ำในตัวอย่างตอนแรก (Back Pressure) 200 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร ก็เพียงพอที่จะทำให้น้ำเข้าไปเต็มช่องว่างระหว่างเม็ดดิน การที่จะเพิ่มความดันน้ำในตัวอย่างตอนแรกไปยังค่าที่ต้องการ จะต้องค่อย ๆ เพิ่มความดันในเซลล์และความดันน้ำในตัวอย่างสลับกันไปอย่างช้า ๆ ด้วยอัตราประมาณ 10 กิโลนิวตัน/ตารางเมตรต่อนาที โดยเพิ่มความดันในเซลล์ก่อนเสมอ เมื่อความดันน้ำในตัวอย่างเพิ่มถึง 200 กิโลนิวตัน/ตารางเมตรแล้ว ต่อความดันเข้ากับอุปกรณ์ชดเชยความดันให้คงที่ที่ตั้งความดันไว้เท่ากับความดันน้ำในตัวอย่างตอนแรก ปรับความดันในเซลล์ซึ่งมีค่าสูงกว่าความดันน้ำในตัวอย่างตอนแรกให้มีค่าความดันแตกต่างกันน้อยที่สุด โดยดินทดลองไม่เกิดการบวมตัว (Swell) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินทดลอง. ต่อความดันในเซลล์เข้ากับอุปกรณ์ชดเชยความดันให้คงที่ บันทึกค่าแรกเริ่ม (Initial) ที่จุดยอดของดินทดลองจากเกจไว้เพื่อใช้หาการเปลี่ยนแปลงความสูงของดิน ทิ้งดินทดลองไว้ 24 ชั่วโมง แล้วจึงตรวจสอบว่าดินทดลองอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วหรือไม่ โดยพิจารณาจากค่าความดันน้ำในโพรงที่เพิ่ม (Excess Pore Pressure) กับค่าความดันในเซลล์ที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิมซึ่งแสดงในรูปของค่าพารามิเตอร์ "B" ถ้า B มีค่ามากกว่า 0.95 เมื่อเพิ่มความดันในเซลล์ขึ้นจากเดิม 50 กิโลนิวตัน/ตารางเมตรภายใน 5 นาทีจะถือว่าดินทดลองอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ ค่า B นี้หาได้โดยใช้หลักการความดันน้ำในโพรงของ SKEMPTON (SKEMPTON'S Pore Water Pressure) (1954) กล่าวคือ

$$\Delta u = B\left|\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)\right| \qquad \text{..... (3.1)}$$

เมื่อเพิ่มความดันในเซลล์ $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_3 = \Delta\sigma_c$

$\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3 = 0$

ดังนั้น $B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_c}$ .....(3.2)

เมื่อ Δu คือความดันน้ำในโพรงที่เพิ่ม (Excess Pore Pressure)

$\Delta\sigma_c$ คือความดันในเซลล์ที่เพิ่มขึ้นจากความดันเดิม

3.3.4 การอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทร้อปปิค (Isotropic Consolidation)

เมื่อดินทดลองอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว จึงเพิ่มความดันในเซลล์ไปยังค่าความดันประสิทธิผลในเซลล์ (Effective Cell Pressure) ซึ่งเป็นค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) ในดินทดลองที่ต้องการ (ค่าที่ใช้คือค่า $\bar{\sigma}_{vo}$) ค่าความดันในเซลล์ที่ใช้เพื่อให้ความดันประสิทธิผลในเซลล์ภายหลังดินทดลองเกิดขบวนการอัดตัวคายน้ำอย่างสมบูรณ์มีค่าตามต้องการสามารถหาได้จากสมการ

ความดันในเซลล์ = ความดันประสิทธิผลในเซลล์+ความดันน้ำในตัวอย่างตอนแรก (3.3)

หลังจากเพิ่มความดันในเซลล์ถึงค่าที่ต้องการแล้ว เปิดลิ้นระบาย (Drainage Valve) เพื่อให้ดินทดลองเกิดการอัดตัวคายน้ำ วัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วจึงตรวจสอบดูว่าดินทดลองเกิดการอัดตัวคายน้ำอย่างสมบูรณ์แล้วหรือไม่โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินในระหว่างขบวนการอัดตัวคายน้ำกับกรณ์ที่สองของเวลา โดยหาเวลาที่เกิดการอัดตัวคายน้ำ (Degree of Consolidation) เท่ากับ 100 % หรือตรวจสอบค่าความดันน้ำในโพรงที่เพิ่ม (Excess Pore Pressure) มีค่าเป็นศูนย์ กล่าวคือ เมื่อปิดลิ้นระบายน้ำ ความดันน้ำในโพรงที่วัดได้จากดินทดลองมีค่าเท่ากับความดันน้ำในตัวอย่างตอนแรก บันทึกค่าท้ายสุด (Final) ของจุดยอดของดินจากเกจทำให้สามารถหาความสูงของดินที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างขบวนการทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำและขบวนการอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทร้อปปิค ค่าการเปลี่ยนแปลงในปริมาตรและความสูงของดินจะนำไป

ใช้คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดและความสูงของดินทดลองที่ถูกเตรียมขึ้นด้วยเครื่อง Triaxial ในห้องทดลองให้มีลักษณะใกล้เคียงความเป็นจริงตามธรรมชาติ โดยใช้สูตรคำนวณดังนี้

$$V_o = A_o h_o \qquad \text{.....(3.4)}$$

$$V_c = V_o - \Delta V \qquad \text{.....(3.5)}$$

$$h_c = h_o - \Delta h \qquad \text{.....(3.6)}$$

$$A_c = \frac{V_c}{h_c} \qquad \text{.....(3.7)}$$

เมื่อ A_o คือพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของดินทดลองภายหลังการแต่งขอบ

h_o คือความสูงของดินทดลองภายหลังการแต่งขอบ

V_o คือปริมาตรของดินทดลองภายหลังการแต่งขอบ

Δh คือการเปลี่ยนแปลงความสูง

ΔV คือการเปลี่ยนแปลงในปริมาตร

h_c คือความสูงของดินทดลองภายหลังการอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทร้อปปิค

V_c คือปริมาตรของดินทดลองภายหลังการอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทร้อปปิค

A_c คือพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของดินทดลองภายหลังการอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทร้อปปิค

3.3.5 การทดสอบดินทดลอง

3.3.5.1 การหากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทร้อปปิคมาก่อนด้วยเครื่อง Triaxial ในสภาพอันเดรนพร้อมวัดค่าความดันน้ำในโพรง (Isotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test with Pore Pressure Measurement, $\overline{CIUC}$)

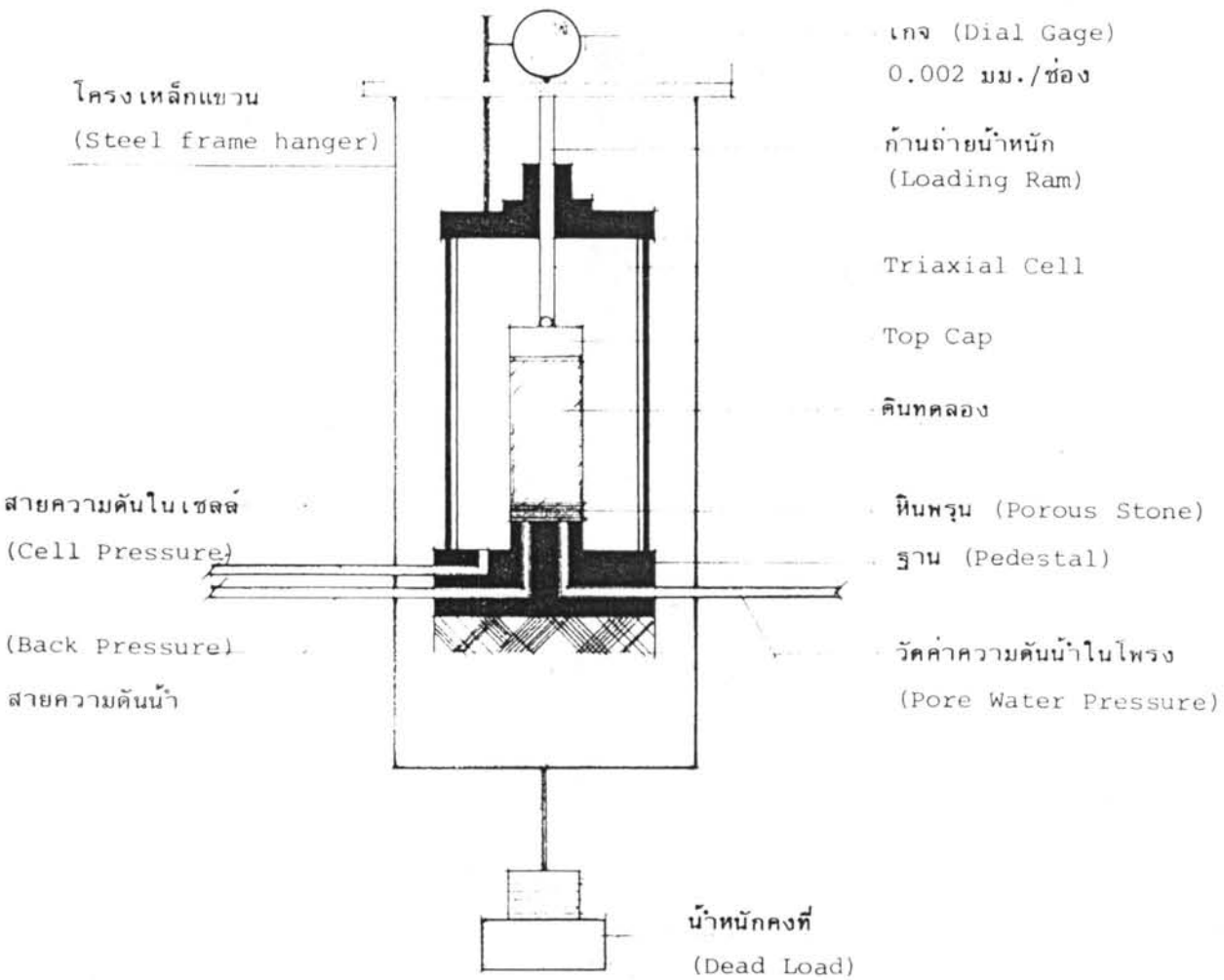
หลังจากเตรียมตัวอย่างดินในเครื่อง Triaxial ดังกล่าวในหัวข้อ 3.3.2 ถึง 3.3.4 แล้ว ทำการเพิ่มหน่วยแรงเบี่ยงเบน (Deviator Stress) ให้กับดินทดลองด้วยเครื่องกดดิน (Compression Machine) โดยจะเพิ่มเฉพาะหน่วยแรง

ในแนวดิ่ง (σ_v) แต่ค่าความดันในเซลล์ (σ_c) จะมีค่าคงที่ ซึ่งแรงในแนวดิ่งสามารถอ่านจากเกจของ Proving Ring ที่ได้วัดหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าการยุบตัวที่อ่านจากเกจไว้ การทดสอบใช้อัตราความเครียด (Strain Rate)ประมาณ 2.5 % ต่อชั่วโมง (0.03 มิลลิเมตรต่อนาที) ระหว่างการทดสอบบันทึกค่าการยุบตัวของดินในแนวดิ่งจากเกจค่าการยุบตัวของ Proving Ring ค่าความดันน้ำในโพรงจากเครื่องแปลงกำลัง (Transducer) การทดสอบจะกระทำจนกระทั่งได้ค่าสูงสุดของหน่วยแรงเบี่ยงเบน (Maximum Deviator Stress, $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$) และได้ค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนเมื่อ $\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_3}$ มีค่าสูงสุด ซึ่งจะทดสอบถึงความเครียดประมาณ 7 % ถึง 8 % หลังจากหยุดการทดสอบแล้วลดความดันในเซลล์ลง เอาน้ำออกจากเซลล์ ถอดเอาเซลล์ออกจากแท่น นำตัวอย่างดินทดลองออกจากเครื่อง Triaxial บันทึกลักษณะการพิบัติ แนวหรือระนาบที่เกิดการพิบัติ (Failure Plane) ขนาดและน้ำหนักของดินทดลอง นำดินทดลองเข้าตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 80^{o}ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาน้ำหนักแห้งของดินสำหรับนำไปใช้คำนวณหาปริมาณความชื้นเริ่มแรกและปริมาณความชื้นท้ายสุดของก้อนดินทดลอง

3.3.5.2 การทดสอบอันเดรนครีพและวิธีการคำนวณหาความเครียด (ε) และอัตราความเครียด ($\dot{\varepsilon}$)

ในระหว่างการทดลองอันเดรนครีพต้องควบคุมอุณหภูมิห้องให้คงที่ งานวิจัยนี้ได้ควบคุมอุณหภูมิห้องให้คงที่ที่ 23 ± 1^{o}ซ. ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง

เมื่อทำให้ดินทดลองอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว ในการเพิ่มความดันเซลล์เพื่อให้ได้หน่วยแรงประสิทธิผลในดินภายหลังเกิดการอัดตัวคายน้ำสมบูรณ์มีค่าตามต้องการ ต้องแขวนโครงเหล็กแขวนและถ่วงด้วยน้ำหนักคงที่ให้สมดุลย์กับความดันในเซลล์ เมื่อดินทดลองอัดตัวคายน้ำอย่างสมบูรณ์แล้วจึงปิดลิ้นระบายน้ำแล้วเพิ่มน้ำหนักคงที่เป็นระยะ ๆ ครั้งละประมาณ 500 กรัม จนเกิดหน่วยแรงเบี่ยงเบน (Deviator Stress) ในดินที่ระดับหน่วยแรงเฉือนที่ต้องการ (ดูรูปที่ 3.4 แสดงการจัดเครื่องมือ Triaxial สำหรับการทดลองอันเดรนครีพ) จดบันทึกค่าความดันน้ำในโพรงและการยุบตัวในแนวดิ่งที่มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ดินทดลองรับหน่วยแรงเฉือนค่าคงที่ที่เวลาต่าง ๆ ระหว่างเกิดอันเดรนครีพ ถ้าดินทดลองไม่เกิดการพิบัติโดยอันเดรนครีพหลังจากทดสอบไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จะทำการทดลองการอัดตัวคายน้ำในเครื่อง



รูปที่ 3.4 การจัดเครื่อง Triaxial สำหรับการทดลองอันเดรนครีพ

Triaxial (Triaxial Consolidation) ต่อดังแสดงขั้นตอนการทดลองในรูปที่ 3.5

สำหรับค่า ε และ $\dot{\varepsilon}$ ในระหว่างอันเดรนครีพสามารถหาได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_o} \qquad \text{.....(3.8)}$$

เมื่อ ε = ความเครียดในระหว่างอันเดรนครีพ

Δh = การยุบตัวของดินในแนวดิ่งในระหว่างอันเดรนครีพ

h_o = ความสูงของดินทดลองก่อนเกิดอันเดรนครีพ

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta h}{h_o \Delta t} \qquad \text{.....(3.9)}$$

เมื่อ $\dot{\varepsilon}$ = อัตราความเครียดในระหว่างอันเดรนครีพ

Δh = การยุบตัวในแนวดิ่งในระหว่างอันเดรนครีพในช่วงเวลา Δt

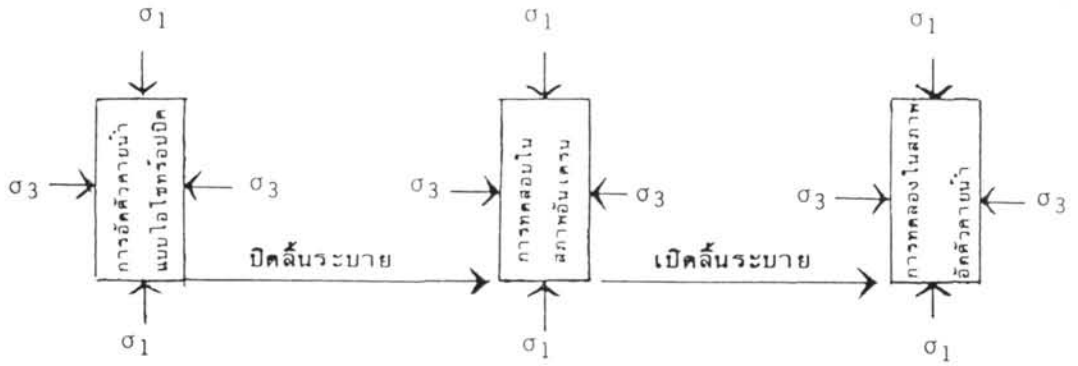
h_o = ความสูงของดินทดลองก่อนเกิดการยุบตัวในช่วง Δt

Δt = ช่วงเวลาที่พิจารณาอัตราความเครียด

ในการทดสอบครีพต้องตั้งสมมุติฐานว่า σ_1 และ σ_3 มีค่าคงที่ตลอดเวลาซึ่งหมายความว่าต้องมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างน้อยมาก สมมติฐานนี้ได้ใช้ในงานวิจัยด้านครีพโดยทั่วไป ถ้ามีความเครียดมากจึงมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเพื่อชดเชยกับพื้นที่ที่เพิ่มขึ้น (ดูหัวข้อ 3.4.1)

3.3.5.3 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำในเครื่อง Triaxial (Triaxial Consolidation)

เป็นการทดลองต่อจากการทดลองอันเดรนครีพในหัวข้อ 3.3.5.2 โดยเปิดลิ้นระบายให้น้ำสามารถระบายออกจากเม็ดดินหลังจากที่ดินไม่เกิดการพิบัติโดยอันเดรนครีพเสียก่อน จดบันทึกค่าการยุบตัวของดินในแนวดิ่งและการเปลี่ยนแปลงในปริมาตรที่เวลาต่าง ๆ ใน



ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 3
$\sigma_1 = \sigma_{vc}$	$\sigma_1 = \sigma_{vc} + \bar{D}(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$	$\sigma_1 = \sigma_{vc} = \bar{D}(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$
$\sigma_3 = \sigma_{vc}$	$\sigma_3 = \sigma_{vc}$	$\sigma_3 = \sigma_{vc}$

ขั้นตอนที่ 1 ดินทดลองถูกอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทร้อปปิค (Isotropically Reconsolidated) ในห้องทดลองด้วยเครื่อง Triaxial ให้มีสภาพใกล้เคียงสภาพตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vc} = \bar{\sigma}_{vo}$)

ขั้นตอนที่ 2 การทดลอง "อันเดรนครีพ" เมื่อดินรับหน่วยแรงเฉือนคงที่ ที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ

ขั้นตอนที่ 3 การทดลอง "การอัดตัวคายน้ำในเครื่อง Triaxial" เมื่อดินรับหน่วยแรงเฉือนค่าคงที่ ที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ

หมายเหตุ $\sigma_{vc} = \bar{\sigma}_{vc} + u_b$

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

เมื่อ u_b คือค่าความดันน้ำในตัวอย่างดินแรก (Back Pressure) = 200 กิโลนิวตัน/เมตร^2

$\bar{\sigma}_{vc}$ คือค่าความดันประสิทธิผลในเซลล์ (Effective Cell Pressure)

$\bar{\sigma}_{vo}$ คือค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ (Vertical Effective Over-burden Pressure)

$\bar{D}$ คือระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่า $\frac{(\sigma_1-\sigma_3)}{2\,S_u}$

σ_{vc} คือค่าความดันในเซลล์ (Cell Pressure)

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทดลองด้วยเครื่อง Triaxial เพื่อศึกษาพฤติกรรมอันเดรนครีพและการยุบตัวเมื่อน้ำระบายออกจากดินที่ระดับหน่วยแรงเฉือนต่าง ๆ

ระหว่างเกิดขบวนการอัดตัวคายน้ำซึ่งจะใช้เวลาในการทดลองประมาณ 3 วัน เพื่อให้ดินทดลองเกิดการอัดตัวคายน้ำอย่างสมบูรณ์ ค่าที่จดบันทึกจากการทดลองจะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของดินคือ ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพระบายน้ำ (E') และอัตราส่วนปัวซองในสภาพระบายน้ำ (ν') ที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ โดยใช้ทฤษฎีอีลาสติกดังสมการ

$$\nu' = \frac{\varepsilon_1 \Delta\bar{\sigma}_3 - \varepsilon_3 \Delta\bar{\sigma}_1}{\varepsilon_1 (\Delta\bar{\sigma}_1 + \Delta\bar{\sigma}_3) - 2\varepsilon_3 \Delta\bar{\sigma}_3} \qquad \text{.....(2.9)}$$

เมื่อ ν' คือค่าอัตราส่วนปัวซองในสภาพระบายน้ำ

$\varepsilon_1, \varepsilon_3$ คือค่าความเครียดตามแนวแกนและแนวรัศมี

$\Delta\bar{\sigma}_1$, $\Delta\bar{\sigma}_3$ คือค่าการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวแกนและแนวรัศมี

ในกรณีที่ $\Delta\bar{\sigma}_3 = 0$

$$\nu' = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \qquad \text{.....(2.10)}$$

ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพระบายน้ำ (E') สามารถหาได้โดยใช้สมการ

$$E' = \frac{(\Delta\bar{\sigma}_1 - \Delta\bar{\sigma}_3)(\Delta\bar{\sigma}_1 + 2\Delta\bar{\sigma}_3)}{\varepsilon_1 (\Delta\bar{\sigma}_1 + \Delta\bar{\sigma}_3) - 2\varepsilon_3 \Delta\bar{\sigma}_3} \qquad \text{.....(2.12)}$$

เมื่อ E' คือค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพระบายน้ำ

$\varepsilon_1, \varepsilon_3$ คือความเครียดตามแนวแกนและแนวรัศมี

$\Delta\bar{\sigma}_1, \Delta\bar{\sigma}_3$ คือการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวแกนและแนวรัศมี

ในกรณีที่ $\Delta\bar{\sigma}_3 = 0$

$$E' = \frac{\Delta\bar{\sigma}_1}{\varepsilon_1} \qquad \text{.....(2.13)}$$

สำหรับวัสดุไอโซทร้อปปิค (Isotropic Materials)

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3 \text{ และ}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3$$

เมื่อ ε_v คือความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric Strain)

ε_1 คือความเครียดตามแนวแกน

$\varepsilon_2, \varepsilon_3$ คือความเครียดตามแนวรัศมี

3.3.5.4 การหากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่ถูกอัดตัวคายน้ำมาก่อนในสภาพอันเดรน (Unconsolidated Undrained Compression Test, UU)

ใช้ดินทดลองที่แต่งขอบให้ได้ขนาดเดียวกับการทดลองแบบ $\overline{\text{CIUC}}$ คือมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.4 นิ้วและความสูงประมาณ 2.8 นิ้ว การทดสอบใช้ความดันเซลล์เท่ากับหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งตามธรรมชาติ (σ_{vo}) ปิดลิ้นระบายน้ำทั้งในระหว่างเพิ่มความดันเซลล์ไปที่ค่าหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งตามธรรมชาติและในระหว่างการทดสอบ การทดสอบทำโดยเพิ่มหน่วยแรงในแนวดิ่งเพียงอย่างเดียวจนกระทั่งดินตัวอย่างเกิดการพิบัติ ทั้งนี้ ดินทดลองชนิดไม่ถูกรบกวน (Undisturb Sample) จะมีปริมาณความชื้นในดินใกล้เคียงกับปริมาณความชื้นในดินตามธรรมชาติ ปริมาณความชื้นในดินจึงมีค่าคงที่ใกล้เคียงกับสภาพตามธรรมชาติในระหว่างการทดลอง ถ้าดินทดลองอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำจะได้ $\phi = 0$ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรนที่ได้จะอยู่ในรูปของหน่วยแรงรวม (Total Stress) ดังนั้นจะไม่มีการวัดค่าความดันน้ำในโพรงระหว่างการทดสอบ การวิจัยนี้ใช้อัตราความเครียดในระหว่างการทดสอบประมาณ 8.4 % ต่อชั่วโมง (0.10 มิลลิเมตรต่อนาที)

3.3.5.5 การหากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบอิสระด้านข้าง (Unconfined Compression Test, UC)

การทดลองนี้จะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรนของดินที่ระดับความลึกของดินทดลองที่เก็บขึ้นมา เป็นค่าที่จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองวิธีอื่น การทดลองนี้จึงใช้ดินทดลองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.4 นิ้ว สูงประมาณ

2.8 นิ้ว ใช้อัตราความเครียดในการทดสอบ ประมาณ 8.4 % ต่อชั่วโมง (0.10 มิลลิเมตรต่อนาที) ค่าอัตราความเครียด 8.4 % ต่อชั่วโมงนี้จะไม่ช้าเกินไปจนทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่บริเวณผิวหน้าของดินทดลอง ซึ่งจะทำให้ปริมาณน้ำในดินทดลองชนิดไม่ถูกรบกวนไม่มีค่าเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทดลอง

3.4 ข้อผิดพลาดและการป้องกันแก้ไขในการทดลองด้วยเครื่อง Triaxial

เครื่อง Triaxial เป็นเครื่องมือที่ง่ายและเหมาะสมที่สุดในปัจจุบัน เพื่อที่จะใช้ศึกษาพฤติกรรมของหน่วยแรง ความเครียดและกำลังของดิน เพราะสามารถเตรียมตัวอย่างดินทดลองให้กลับไปมีหน่วยแรงในสภาพใกล้เคียงตามธรรมชาติ (แต่ปริมาณน้ำในดินจะน้อยกว่าธรรมชาติเล็กน้อย เมื่อมีการ Reconsolidated ตัวอย่าง) ก่อนทำการทดลอง แต่อย่างไรก็ดียังคงมีข้อผิดพลาดเล็ก ๆ น้อย ๆ จากการทดลองซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากส่วนประกอบของเครื่อง Triaxial ลักษณะรูปร่างและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินทดลองในระหว่างการทดลอง ซึ่งข้อผิดพลาดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการวิจัยที่มีผลกระทบต่อผลการทดลองคือ

3.4.1 การควบคุมระดับหน่วยแรงเฉือนให้คงที่

ค่าระดับหน่วยแรงเฉือนของดินในระหว่างการทดลองอันเดรนครีพต้องมีค่าคงที่ เมื่อดินทดลองเกิดการยุบตัวในแนวดิ่งมากขึ้นจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของดินมีค่าเพิ่มขึ้น ยังผลให้ระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าลดลง ดังนั้นในกรณีที่ดินมีการยุบตัวจนพื้นที่หน้าตัดของดินเปลี่ยนแปลงมาก จะทำการเพิ่มน้ำหนักคงที่เพื่อควบคุมให้ระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าคงที่ น้ำหนักเล็กน้อยส่วนที่เพิ่มสามารถคำนวณหาได้จากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของดินทดลองที่เพิ่มขึ้น

3.4.2 ผลของแรงเหนี่ยวรั้งที่ปลาย (Effect of End Restraint)

ความฝืดระหว่างผิวสัมผัสของ Top Cap ที่วางบนส่วนบนของดินทดลองจะทำให้เกิดแรงเหนี่ยวรั้งที่ปลายขึ้น เมื่อเพิ่มแรงกระทำในแนวดิ่งจะเกิดหน่วยแรงและความเครียดที่ไม่สม่ำเสมอ ผลที่เกิดขึ้นคือ ความดันน้ำในโพรงจะมีค่าไม่สม่ำเสมอด้วย ความดันน้ำในโพรงซึ่งวัดจากฐานของดินทดลองจะไม่เท่ากับค่าความดันน้ำในโพรงที่บริเวณเกิดการพิบัติ (Failure Zone) จึงทำให้ค่ากำลังประสิทธิผล (Effective Strength) ที่ได้มีค่าผิดไป

อย่างไรก็ตาม BISHOP และ GREEN (1965) พบว่าผลของแรงเหนี่ยวรั้งที่ปลายที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าน้อยมาก เมื่ออัตราส่วนระหว่างความสูงกับเส้นผ่าศูนย์กลางมีค่าเท่ากับสอง การวิจัยนี้จึงแต่งขอบดินทดลองจนมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.4 นิ้ว และมีความสูงประมาณ 2.8 นิ้วโดยตลอด