บทที่ 3

วิธีการทดสอบและวิจัย

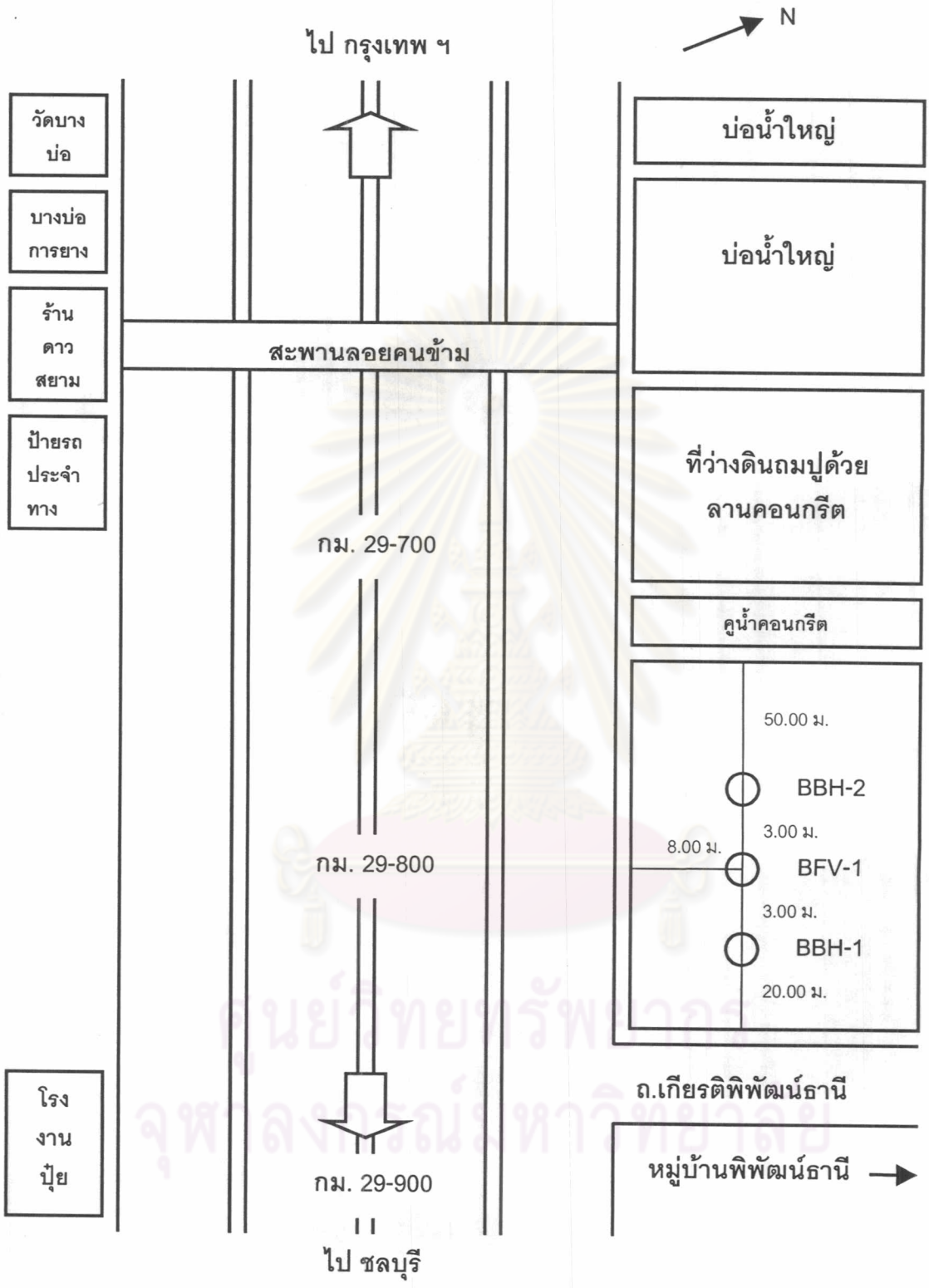
3.1 สถานที่และการเก็บตัวอย่างดิน

3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกเก็บมาจากบริเวณ ถ.สาย บางนา-บางปะกง กม.29-800 สาเหตุที่เลือกเก็บตัวอย่างดินจากบริเวณนี้ ถูกเรียกว่าเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ บริเวณอยู่ชานเมือง ยิ่งไปกว่านั้นดินเหนียวอ่อนในบริเวณ ถ.สาย บางนา-บางปะกง กม.29-800 ถือว่าเป็นบริเวณที่มีปัญหาในการก่อสร้างมากที่สุด จากข้อมูลการทรุดตัวของถนนสายนี้ในช่วงปี พ.ศ. 2512-2522 พบว่ามีการทรุดตัวมากถึงประมาณ 2.50 ม. อันเนื่องมาจากดินบริเวณนี้เป็นดินเหนียวอ่อนมากมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ ค่าการยุบตัวสูง และมีความหนาของชั้นดินอ่อนถึงประมาณ 20 ม. อีกทั้งเคยมีการศึกษาพฤติกรรมของดินบริเวณนี้มาบางแล้วโดย พินิจ (2528) ทำให้เหมาะสมเป็นอย่างมากในการที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้

- บริเวณ ถ.สาย บางนา-บางปะกง กม.29-800

ทำการเก็บตัวอย่างบริเวณที่ดินว่างเปล่าริม ถ.สาย บางนา-บางปะกง กม.29-800 ขาออกจากกรุงเทพฯ ซึ่งอยู่บริเวณหน้าทางเข้าหมู่บ้านพิพัฒน์ธานี จำนวน 2 หลุม คือ BBH-1 และ BBH-2 และทำการทดสอบ Filed Vane Shear Test 1 หลุม คือ BFV-1 ตำแหน่งต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.2 โดยแต่ละหลุมห่างกันประมาณ 3 ม. เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด และพยายามให้หลุมเจาะอยู่ห่างจากถนนมากที่สุดเพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่เป็นธรรมชาติมากที่สุด เนื่องจากบริเวณถนนสายนี้ฝั่งขาออกที่ทำการเก็บตัวอย่างดินเพิ่งมีการปรับปรุงครั้งล่าสุดเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2528 การอัดตัวคายน้ำของดินบริเวณนี้จึงอาจยังไม่สมบูรณ์ อีกทั้งยังเป็นการหลีกเลี่ยงแนวท่อก๊าซของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทยที่ฝังไว้ห่างจากแนวขอบถนนประมาณ 5 ม. โดยบริเวณที่ทำการเจาะเพื่อเก็บตัวอย่างคาดว่าจะเป็นบริเวณขอบ Berm ซึ่งเคยถูกต่อเติมเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของถนนสายนี้ประมาณปี พ.ศ. 2528



รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งของหลุมเจาะ สำหรับบริเวณ ถ.สายบางนา-บางปะกง กม. 29-800 (Not to Scale)

3.1.2 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน

เนื่องจากการเก็บตัวอย่างดินนี้นำมาเพื่อใช้ในงานวิจัย ดังนั้นเพื่อให้ได้ตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) ที่มีคุณภาพดีที่สุด จึงเลือกเก็บตัวอย่างด้วยวิธี Fixed Piston Sampling โดยใช้กระบอกบางที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3 นิ้ว และยาวประมาณ 1 ม. ในการเก็บตัวอย่างจากทั้ง 2 บริเวณ อีกทั้งบริเวณ ถ. สาย บางนา-บางปะกง กม.29-800 นี้เป็นบริเวณที่ดินอ่อนมาก มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ ปริมาณความชื้นในธรรมชาติสูง (110-150 %) และมีค่าความอ่อนไหวสูง (ประมาณ 6) การจะเก็บตัวอย่างด้วยกระบอกบางธรรมดา (Shelby Tube) อาจจะเก็บไม่ได้หรือได้ตัวอย่างที่มีคุณภาพไม่ดี การเก็บตัวอย่างจะทำทุกๆ 1.50 ม. จนกว่าจะไม่สามารถเก็บตัวอย่างด้วยกระบอกบางได้ ซึ่งจะใช้เวลาในการทำงานประมาณ 1 วัน ต่อ 1 หลุม

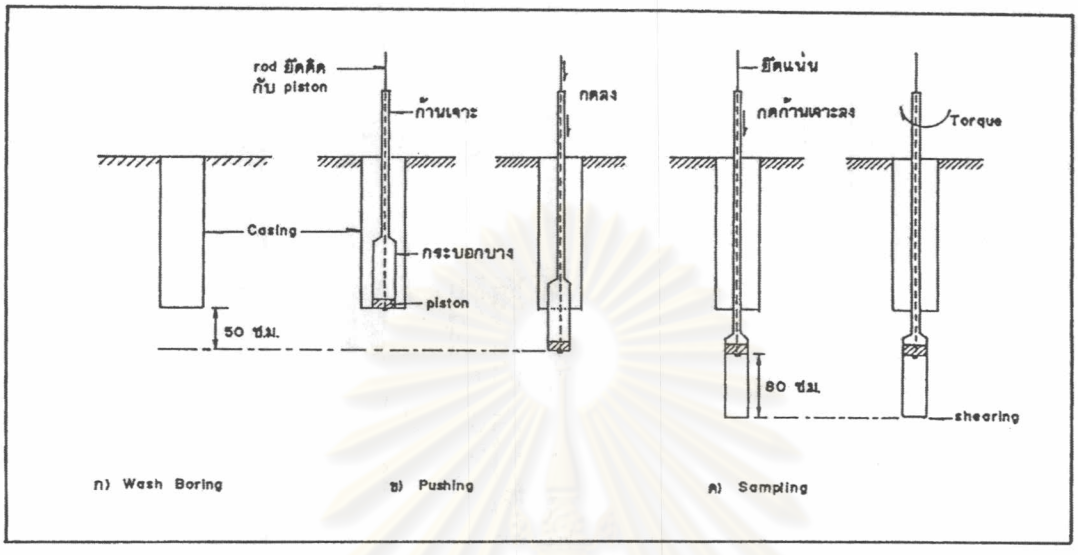
ขั้นตอนในการเก็บตัวอย่างมีดังนี้ (ดูรูปที่ 3.3 ประกอบ)

1. ใช้ Hand Auger เจาะนำเพื่อให้ได้แนวหลุมเจาะเบื้องต้น
2. เจาะดินโดยการใช้การฉีดล้าง (Wash Boring) จนถึงระดับก่อนเก็บตัวอย่างประมาณ 0.50 ม. (รูปที่ 3.2 ก)
3. ใช้กระบอกบางทำด้วย Stainless Steel เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว ยาวประมาณ 1.0 ม. ที่ประกอบกับ Piston เรียบร้อยแล้ว ดันไล่ดินอ่อนลงไปอีก 0.50 ม. โดยใช้ Hydraulic Jack ของเครื่องเจาะดิน (รูปที่ 3.2 ข)
4. เริ่มทำการเก็บตัวอย่างดิน โดยการล็อค Piston ให้นิ่งอยู่กับที่ พร้อมกันนั้นก็ใช้ Hydraulic Jack ของเครื่องเจาะดิน ดันกระบอกบางโดยส่งถ่ายแรงทางก้านเจาะลงไปในดินอ่อนประมาณ 0.80 ม. (รูปที่ 3.2 ค)
5. หมุนก้านเจาะเพื่อเฉือนดินที่ปลายกระบอกบางให้ขาดออกจากกัน จากนั้นนำกระบอกบางขึ้นมาเคลือบพาราฟินที่หัวและท้ายกระบอกบาง พร้อมทั้งเขียนคำอธิบายเกี่ยวกับรายละเอียดของตัวอย่างที่เก็บ และปิดไว้กับตัวกระบอกบาง

เนื่องจากบริเวณที่เก็บเป็นดินเหนียวอ่อน ฉะนั้นจึงป้องกันหลุมเจาะพังทลายด้วยการ Stabilize หลุมเจาะด้วย Casing ตลอดช่วงที่เป็นดินเหนียวอ่อนและเติมน้ำให้เต็มหลุมตลอดเวลา

หลังจากเก็บตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว นำตัวอย่างทั้งหมดมาดันออกด้วย Hydraulic Jack ที่ห้องปฏิบัติการ โดยตัดตัวอย่างออกเป็นก้อนขนาดความยาวประมาณ 10 ซม. แล้วหุ้มด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์เคลือบทับด้วยพาราฟินจนแน่ใจว่าสามารถรักษาความชื้นไว้ได้ พร้อมติดฉลากระบุหมายเลขตำแหน่งของตัวอย่างในกระบอกโดยเรียงลำดับจากบนลงล่าง สถานที่เก็บตัวอย่าง

หมายเลขหลุมเจาะ และวันที่เก็บ จากนั้นนำไปเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้นเพื่อรอการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการเก็บตัวอย่างด้วยวิธี Fixed Piston Sampling

3.2 การทดสอบและการเก็บข้อมูลในสนาม

3.2.1 การทดสอบ Field Vane Shear Test

การทดสอบ Field Vane Shear Test เป็นการทดสอบเพื่อวัดกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength , S_u) ในสนาม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบ Field Vane Shear Test ในทั้ง 2 บริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่าง โดยทำการทดสอบบริเวณละ 1 หลุม คือ CFV-1 สำหรับบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ BFV-1 สำหรับบริเวณ ถ.สาย บางนา-บางปะกง กม.29-800 ซึ่งผลการทดสอบนี้จะนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของตัวอย่างที่ทำการเก็บมาตามวิธีที่เสนอ โดย Bjerrum (1972) และ Mesri (1975) ซึ่งจะช่วยในการเลือกตัวอย่างที่จะนำมาใช้ในการงานวิจัยนี้ โดยวิธีการตรวจสอบคุณภาพของตัวอย่างนี้จะกล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อที่ 4.4.1 และผลการทดสอบนี้ยังทำให้รู้ค่าความไว (Sensitivity) ของดินจากทั้ง 2 บริเวณด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแบบ Geonor Vane Shear ซึ่งจะไม่มีการเจาะเอาดินออก โดยใช้ใบ Vane ขนาด 55 x 110 มม. ที่เหมาะสำหรับดินอ่อนที่มีกำลังรับแรงเฉือนระหว่าง 0-10 ตัน/ม^2

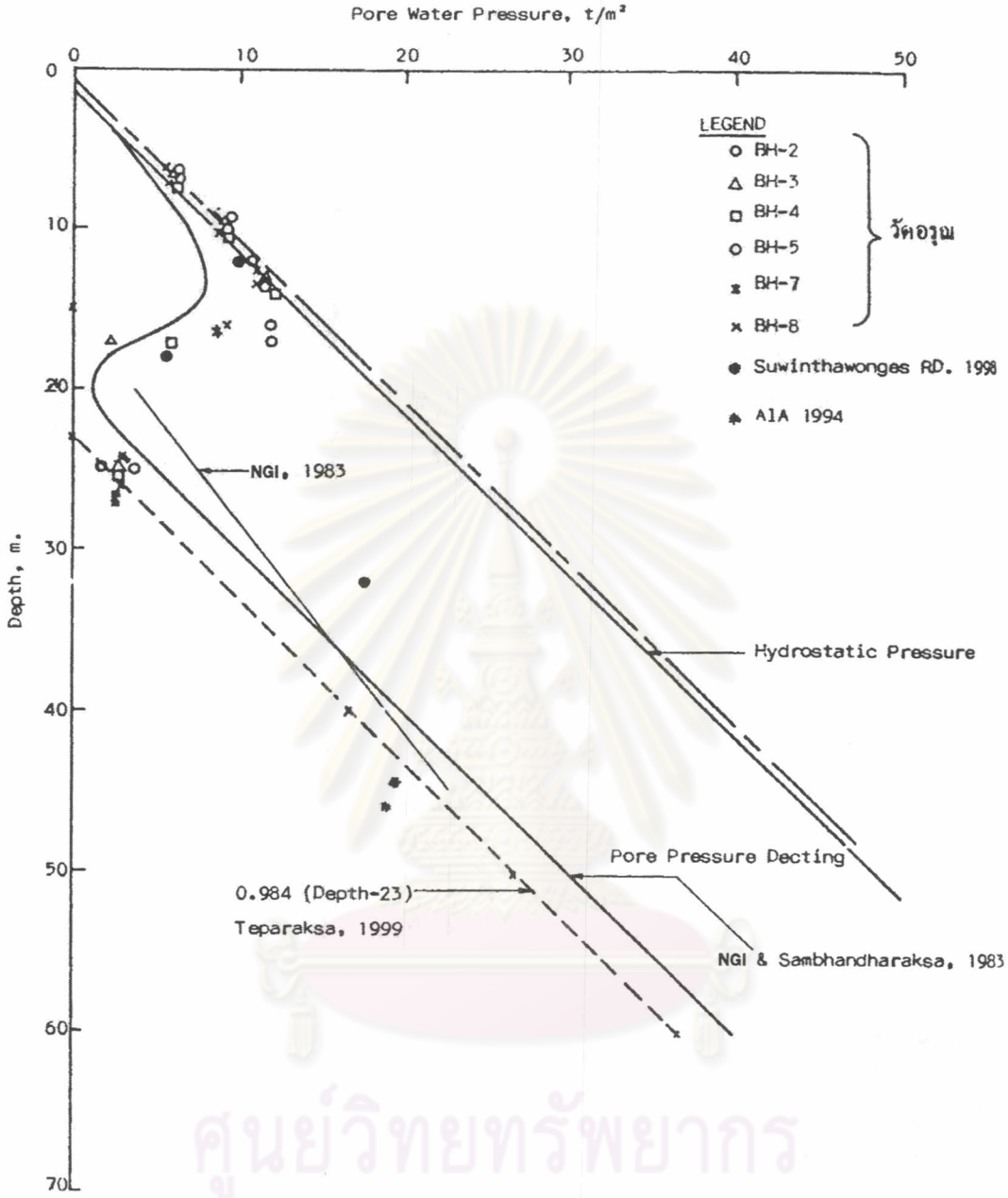
ขั้นตอนในการทดสอบ Field Vane Shear Test มีดังนี้

1) กด Vane Borer ด้วย Hydraulic Jack ลงไปในดิน จนถึงระดับก่อนทดสอบ 0.50 ม.
2) กด Inner Rod ที่ต่อกับใบ Vane ที่ซ่อนอยู่ใน Protection Shoe ลงไป 0.50 ม. จนถึงระดับที่ต้องการทดสอบ
3) ติดตั้งเครื่องมือส่งถ่ายโมเมนต์บิด (Torque) โดยต่อกับ Inner Rod ในข้อ 2 จากนั้นทำการทดสอบพร้อมบันทึกค่าโมเมนต์บิด (Torque) สูงสุดที่อ่านได้เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือน
4) หลังจากวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนเสร็จแล้วให้ดึงใบ Vane กลับเข้าไปอยู่ใน Protection Shoe แล้วทำการเปลี่ยนระดับทดสอบโดยดำเนินการทดลองใหม่ จากข้อ 1 ถึง ข้อ 4

การทดสอบ Field Vane Shear นี้จะทำการทดสอบทุกๆ 1 ม. จากผิวดินลงไป โดยหลังจากทำการทดลองเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนในแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength , S_u) ของตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) แล้ว จะทำการหมุนใบ Vane 25 รอบ ก่อนทำการทดสอบอีกครั้งที่ระดับเดิม เพื่อหากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างดินที่ถูกรบกวน (Remolded Shear Strength) ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาค่าความไว (Sensitivity) ของดินจากทั้ง 2 บริเวณ โดยจะทำการทดสอบจนกว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะมีค่าประมาณ 6-7 ตัน/ม^2 จึงทำการหยุดการทดสอบ ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ที่ระดับประมาณ 13-15 ม. สำหรับดินบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ และ ประมาณ 20-22 ม. สำหรับดินบริเวณชานเมือง

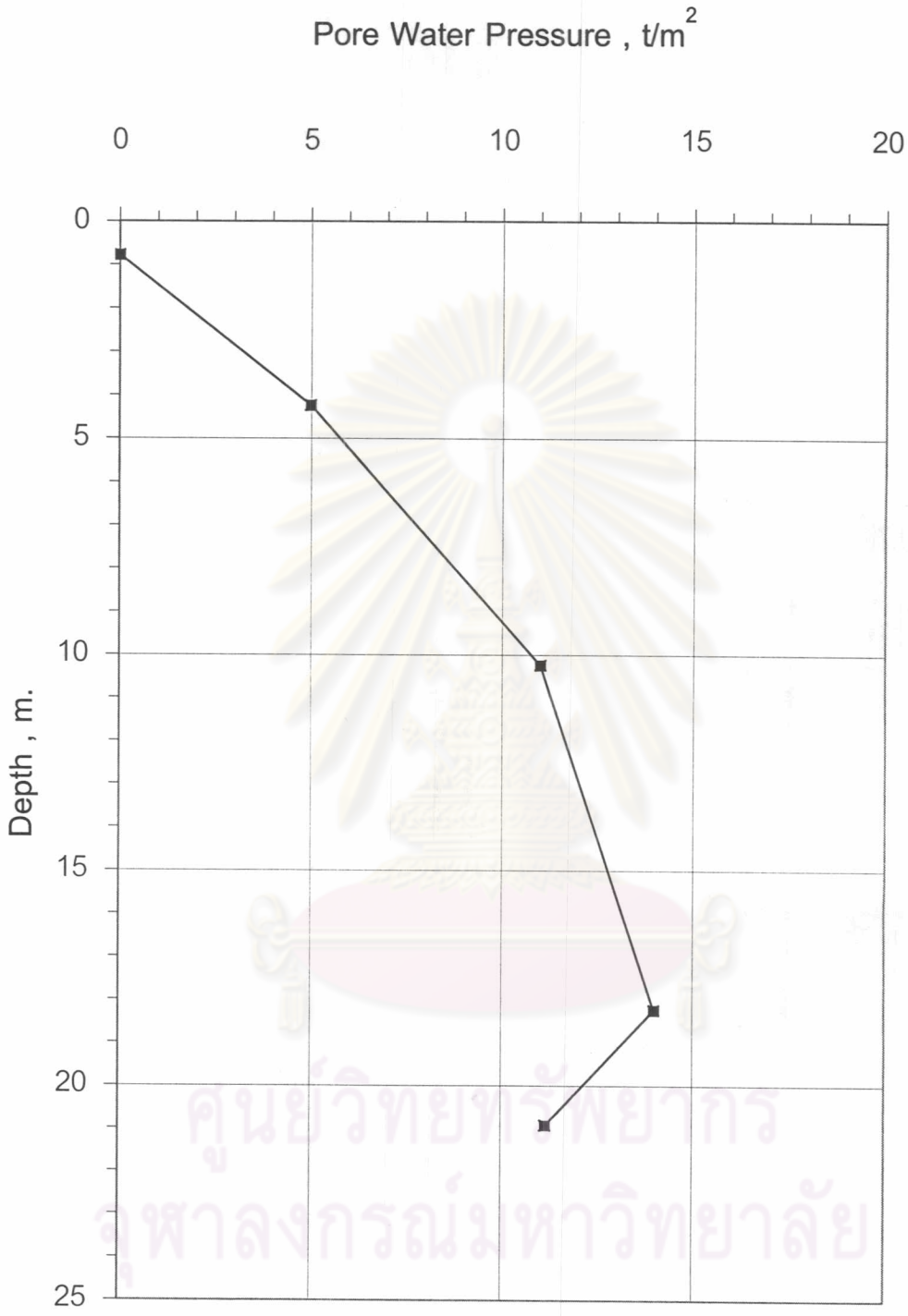
3.2.2 การวัดระดับน้ำและแรงดันน้ำในสนาม

บริเวณ ถ.สาย บางนา-บางปะกง กม.29-80 ได้อาศัยข้อมูลจากบริเวณ กม. 30 ซึ่งห่างจากบริเวณที่เก็บตัวอย่าง (กม. 29-800) เพียง 200 ม. โดยในปี 2527 คณะวิจัยโครงการ "ศึกษาผลกระทบอันจะมีต่อแนวท่อส่งก๊าซธรรมชาติบนบก" ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการติดตั้ง Piezometer และ Dummy Piezometer เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของแนวท่อส่งก๊าซ ระดับที่ติดตั้งอยู่ที่ -4.245 , -10.245 , -18.245 และ -20.934 ม. สำหรับข้อมูลแรงดันน้ำได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ซึ่งจะใช้ในการคำนวณสำหรับตัวอย่างดินจากบริเวณนี้



รูปที่ 3.3 แสดงแรงดันน้ำในโพรงดินสำหรับบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ (พินิจ , 2544)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 แสดงแรงดันน้ำในโพรงดินสำหรับบริเวณ ถ.สายบางนา-บางปะกง กม.30 (พินิจ , 2528)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐาน (Basic Properties Test)

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดิน เพื่อจำแนกชนิดของดินและช่วยในการตัดสินใจในการเลือกตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบ โดยทำการทดสอบดังนี้

ก. Natural Water Content

ข. Atterberg Limit

ค. Wet Density

โดยทุกการทดสอบทำตามมาตรฐานของ ASTM และทำการทดสอบทุกความลึกที่ทำการเจาะสำรวจ โดยจะพยายามเลือกตัวอย่างดินก้อนที่คิดว่าเป็นตัวแทนของความลึกนั้นๆ ได้ดีที่สุด ซึ่งในที่นี้ส่วนใหญ่จะทำการทดสอบในก้อนที่ 2 นับจากด้านหัวกระบอก

3.4 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ 1 มิติ (1-D Consolidation Test) โดยเครื่องมือมาตรฐาน

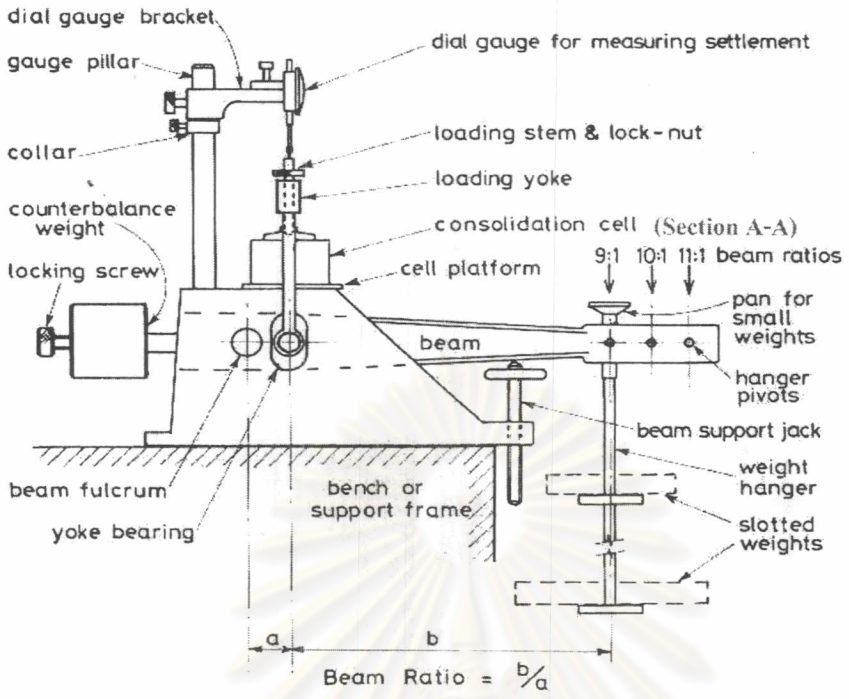
การทดสอบส่วนนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ (Maximum Past Pressure , σ'_p) สัดส่วนการอัดตัว (Compression Ratio , CR) สัดส่วนการอัดตัวซ้ำ (Recompression Ratio , RR) และสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation , C_v) ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการทดสอบด้วยวิธี Recompression ในเครื่องมือ Triaxial โดยการทดสอบนี้ใช้เครื่องมือทดสอบแบบ Lever Arm หรือที่เรียกกันว่า Oedometer ซึ่งตัว Container ที่ใช้ใส่ตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตามมาตรฐานประมาณ 50 มม. สูง 20 มม. และเป็นแบบยึดแน่น (Fixed-Ring Container) การทดสอบทั้งหมดทำตามมาตรฐาน ASTM D2435-90 แบบ Method B ซึ่งเป็นการเพิ่มน้ำหนักเมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ (100% Primary Consolidation หรือ End of Primary , EOP) ยกเว้นอัตราส่วนการเพิ่มน้ำหนัก (Load Increment Ratio , LIR) ที่ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า LIR เท่ากับ 0.5 เพื่อให้ได้กราฟการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Curve) ที่ละเอียดและสามารถระบุจุดที่เกิดความโค้งสูงสุด (Maximum Curvature) ได้อย่างชัดเจน ซึ่งจะทำให้ได้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ (Maximum Past Pressure, σ'_p) ที่ใกล้เคียงกับในธรรมชาติมากที่สุด โดยใช้วิธีการของ Casangrande (1936) ในการหาค่า σ'_p และสำหรับเวลา

ที่เกิด EOP หาได้โดยการ พล็อต ระหว่าง $\%\sigma_v$ กับ $\sqrt{t}$ ตามวิธีการของ Taylor (1942) ซึ่งสามารถศึกษาโดยละเอียดได้จาก ASTM D2435-90

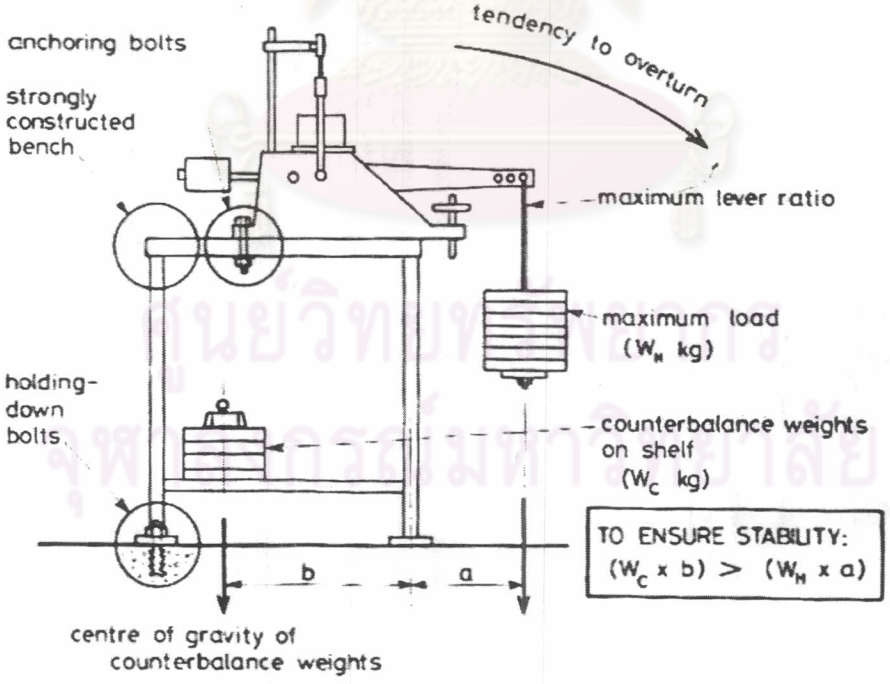
3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. Load Device ต้องเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะที่จะประยุกต์ให้แรงแก่ตัวอย่างในทางดิ่ง เพียงอย่างเดียว ไม่เกิดแรงกระแทก
2. Consolidometer มีลักษณะเป็นวงแหวน โดยมี Porous stone สองอันใช้สำหรับประกบตัวอย่าง
    2.1 Minimum Sample Diameter ตัวอย่างการทดลองควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 2 นิ้ว (50 มม.)
    2.2 ตัวอย่างต้องไม่บางกว่า 0.5 นิ้ว (20 มม.)
    2.3 ตัวอย่างต้องมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาไม่น้อยกว่า 2.5 เท่า ในการทดสอบในวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ใช้ขนาดตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม.และความหนา 60 ,50,40 มม.
    2.4 ความหนาของวงแหวนต้องเพียงพอ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางต้องไม่ยืดหรือหดเกิน 0.03% เมื่อใช้น้ำหนักกดสูงสุดในการทดลอง
    2.5 แหวนต้องทำด้วยโลหะที่ไม่สึกกร่อนขณะทดสอบ ผิวภายในเรียบหรือทาด้วยวัสดุลดแรงเสียดทาน
3. Porous stone
4. นาฬิกาจับเวลา
5. Extensometer สำหรับการเปลี่ยนแปลงความหนาต้องละเอียดถึง 0.001 นิ้ว หรือ .025 มิลลิเมตร

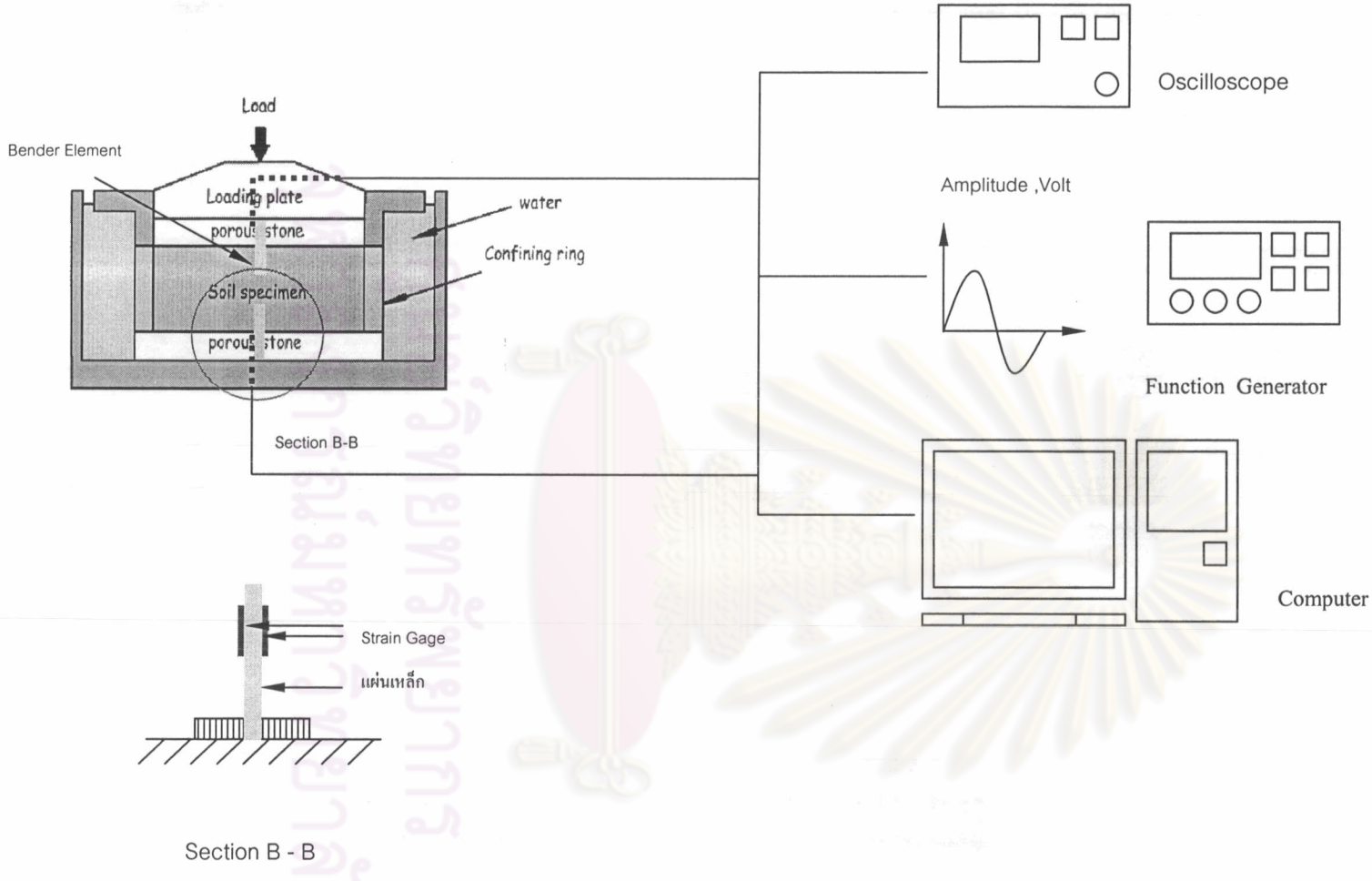
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบ Oedometer



รูปที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์ส่วนที่เป็นฐาน



รูปที่ 3.8 **แสดง** section A-A **ในการทดสอบที่ติดตั้ง** Bender Element

3.4.2 ขั้นตอนในการทดสอบ

3.4.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

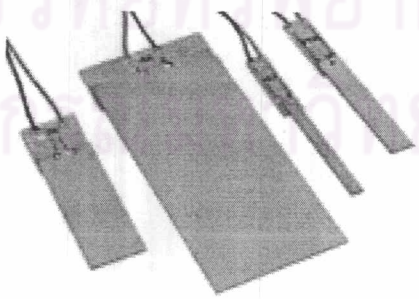
1. Trim ตัวอย่างตามขนาดที่กำหนดไว้ โดยการดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกตัวอย่างหรือแกะออกจากที่เก็บตัวอย่างดิน ให้ได้ความยาวประมาณ 4-5 ซม. และตรวจสอบความสมบูรณ์ของตัวอย่างโดยรอบ
2. เมื่อทำการทดสอบ ใช้จารบี (Grease) ทาในวงแหวนตัวอย่างบางๆ วางวงแหวนลงหันด้านคมเข้าหาตัวอย่าง ใช้เลื่อยเส้นลวดตัดแต่งขนาดให้มีขนาดใกล้เคียงกับแหวน กดวงแหวนลงในตัวอย่าง ในแนวดิ่งจนกระทั่งดินพ้นขอบบนขึ้นมาเหนือวงแหวน ทำความสะอาดดินบริเวณรอบวงแหวน และใช้เลื่อยเส้นลวดตัดตัวอย่างดินให้เสมอขอบแหวนตัวอย่าง

3.4.2.2 การเตรียมเครื่องมือการทดสอบ

ติดตั้ง Bender Element ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน

1. การประกอบ Bender Element

Bender Element เป็นอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นตัวส่งสัญญาณเมื่อเกิดการกระตุ้นด้วยคลื่นไฟฟ้าซึ่งได้ทั้งแบบชนิดไฟฟ้าคือ กระแสตรงและกระแสสลับ



รูปที่ 3.8 Bender Element

ในการต่อเชื่อสายไฟฟ้าเข้ากับแผ่น Bender Element นั้น ให้ใช้ตะกั่วบัดกรีและน้ำยาประสานของบริษัทที่ส่งมาพร้อมกัน โดยการเชื่อมต่อนั้นผู้เขียนแนะนำว่าควรใช้สายที่เรียกว่า สาย " ชีล-โมโน " เพื่อป้องกันการรบกวนสัญญาณจากเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆรวมทั้งกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเอง โดยต่อตามลักษณะของตัวรับและตัวส่ง

2. การหุ้มแผ่น Bender Element ด้วยกาว Epoxy

Bender Element เป็นวัสดุที่มีความต้านทานสูงจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันการลัดวงจรด้วยการเคลือบ Bender Element ด้วย Epoxy ตามขั้นตอน ดังนี้

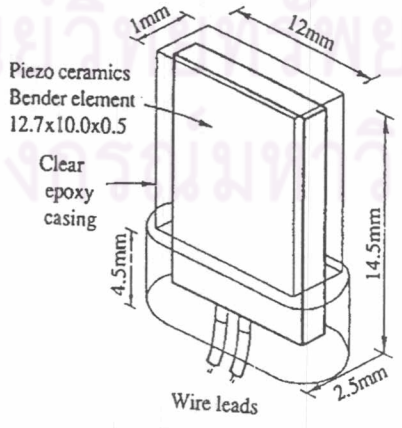
1. ใช้กระดาษกาวสองหน้าทำแม่แบบให้มีขนาดตามต้องการเป็นรูปตัวยู (ให้ได้ขนาดความกว้างประมาณ1.5 เซนติเมตรและยาว 2 เซนติเมตรและความหนาประมาณ 2 เท่าของความหนาเทปกาว)

2. ผสมกาว Epoxy

3. เทกาวลงในแม่แบบเพียงครึ่งของความสูงแม่แบบก่อน จากนั้นใช้เข็มเขี่ยไล่อากาศ ออกจากเนื้อกาวให้หมด

4. นำแผ่น Bender Element วางลงบนกาวที่เทเตรียมไว้ในแบบและเทกาวทับหน้าอีกทีให้มีความหนาพอสมควร

ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แกะแบบออก และนำมาขัดด้วยกระดาษทรายให้ได้ขนาดตาม รูปที่ 3.9 (ควรใช้การดาษทรายน้ำเบอร์ 150 และเบอร์ 400)



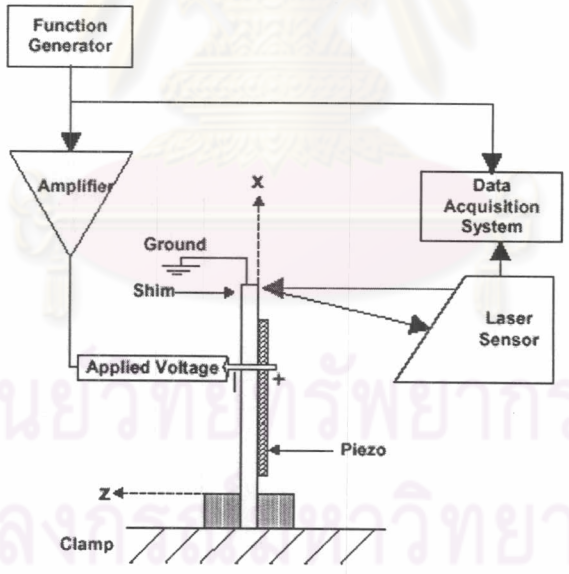
รูปที่ 3.9 การเคลือบ Bender Element ด้วยกาว epoxy

3. การ Calibration Defection of Bender Element

ในการทดสอบครั้งนี้ เป็นการทดสอบโดยการใช้ Bender Element เป็นอุปกรณ์ในการกำเนิดค่าความเครียดในมวลดินจากการบิดตัวของ Bender Element ที่มีการบิดตัวในระดับการเกิดในระดับ ไมโครเมตร (10^{-6} เมตร) จึงจำเป็นต้องมีการหาค่าการบิดตัวที่แน่นอน ดังนั้นการหาค่าการบิดตัวนั้นใช้อุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์ได้ 2 วิธี คือ

1. Laser Displacement Sensor

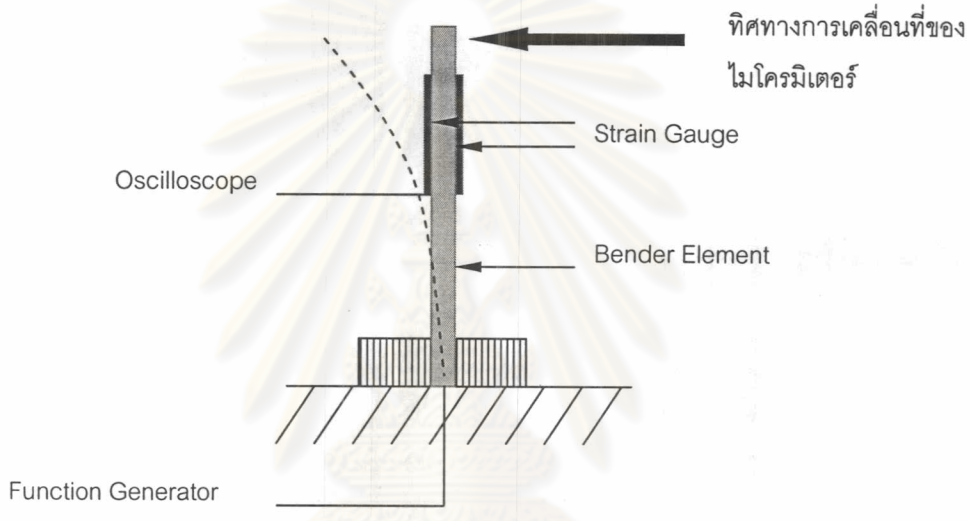
โดยอาศัยหลักการของการหักเหของแสงและการเปลี่ยนความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น ซึ่งใช้ Oscilloscope เป็นตัววัดสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น และทำการทดสอบในห้องมืดเพื่อป้องการการรบกวนจากคลื่นรังสีอื่นๆ ตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์การ calibration bender element

2. Strain Gauge ของบริษัท KYOWA

โดยการติดตั้งที่ Bender Element ตัวส่งสัญญาณ และตัวรับสัญญาณทั้ง 2 ด้าน เพื่อหาค่า Strain ที่เป็นทั้งค่า Compression Strain และ Extension Strain ไปพร้อมกัน โดยใช้ Ceramic Strain Gage ตามรูปที่ 3.11

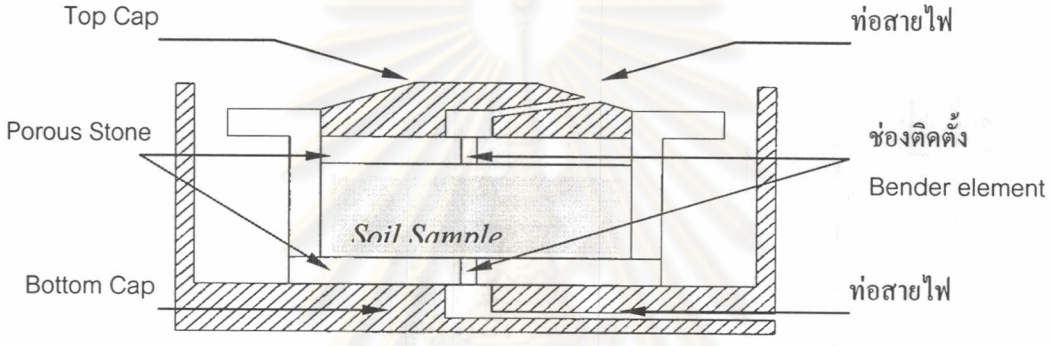


รูปที่ 3.11 แสดงการติดตั้ง Strain Gauge บน Bender Element

เมื่อทำการติดตั้ง strain gauge แล้วทำการ calibration อีกครั้งโดยการใช้ไมโครมิเตอร์ดันแผ่น Bender Element ไปในทิศทางตามแนวแกน x ก็จะสามารถรู้ระยะทางตามแนวแกน x ได้ และต่อจากนั้น เมื่อดันแผ่น Bender Element แล้วนั้น แผ่น Strain Gage จะเกิดการเปลี่ยนแปลงและกำเนิดค่า Voltage และใช้ Oscilloscope เป็นตัวเก็บค่าที่เกิดขึ้น นำค่าทั้ง 2 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป

4. การเตรียม Top & Bottom Cap ในการติดตั้ง Bender Element

ในการทดสอบครั้งนี้ เป็นการทดสอบที่ใช้ Bender Element เป็นตัวกำเนิดค่าความเครียด จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อรองรับการติดตั้ง Bender Element และขนาดตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น โดยเงื่อนไขของตัวอย่างยังคงมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงตัวอย่างมากกว่า 2.5 เท่าตามมาตรฐานASTM – D2435-90 ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 **แสดงลักษณะของ** Oedometer

5. การเตรียมแผ่นหินพรุน (Porous Stone)

ปกติแผ่นหินพรุนที่ใช้มีขนาด 75 - 80 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมเต็มแผ่น แต่เนื่องจากมีการติดตั้ง Bender Element แล้วจึงจำเป็นต้องเจาะรู เพื่อให้สวมเข้ากับ Bender Element ได้ โดยใช้ทรายที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 40 และควรใช้ทราย Ottawa และผสมอิพอกซี่ในอัตราส่วน 10:1 (ถ้าใช้ทราย 10 กรัม ใช้อิพอกซี่ 1 กรัม) เทลงในแบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามต้องการ และทำการตกแต่งผิว ทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง

6. การเตรียมแผ่นกระดาษกรอง (Filter Paper)

โดยปกติแล้ว Filter Paper จะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร เมื่อนำมาใช้กับการทดลองในอุปกรทดสอบแบบ 1 มิติ นั้นจะต้องทำให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับตัวอย่าง

3.4.3 วิธีการทดสอบ

1) เครื่องมือธรรมดา (Convention Type)

นิยมใช้ทั่วไป ราคาถูก ติดตั้งและทดสอบได้ง่าย โดยเครื่องมือแบบคานงัดนี้ จะมีส่วนประกอบตามรูปที่ 3.5 – 3.7

2) อัตราส่วนส่วนเพิ่มน้ำหนัก (Load Increment Ratio)

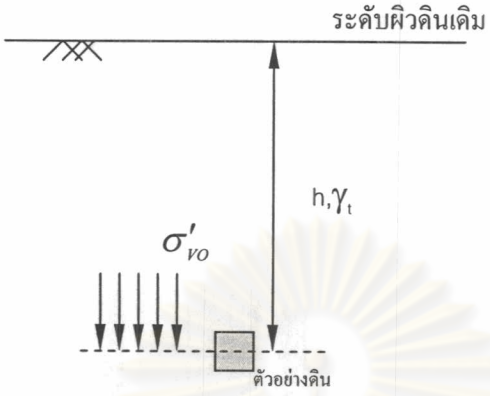
อัตราส่วนการกดน้ำหนักมีผลต่อกราฟการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ เพื่อเป็นมาตรฐานนั้น นิยมใช้อัตราส่วนการเพิ่มน้ำหนักเป็น 1.0 เช่น น้ำหนักกดเดิมมีค่าเท่ากับ 5 กิโลกรัม จะต้องเพิ่มขึ้นเป็น 10 กิโลกรัม หรืออาจจะใช้อัตราส่วนการเพิ่มน้ำหนักเป็น 0.5 เท่า เพื่อที่จะสามารถได้ค่าที่ละเอียดมากและถูกต้องมากขึ้นในการหาค่าความดันอัดตัวสูงสุดในอดีต (Maximum Past Pressure) ของวิธี Casagrande

3) ระยะเวลาการทดสอบ (Load Duration)

เพื่อสะดวกในการหาค่า $\sqrt{t}$ แนะนำให้อ่านค่าการทรุดตัวตามระยะเวลา ดังนี้ 0,0.25,1,2.25,4,6.25,9,12.25,16,25,36,49,64,100 นาที และหลังจากนั้นเพิ่มเวลาอ่านครั้งต่อไปเป็นเท่าตัว

4) การกดน้ำหนัก (Loading Program)

จะต้องพิจารณาถึง ความลึกของตัวอย่างดิน และความสามารถในการกดน้ำหนักของเครื่องมือควบคู่กันไป โดยหลักการสำคัญของการทดสอบต้องทำการกดน้ำหนักผ่านความดันประสิทธิผล เหนือตัวอย่างที่กดทับในธรรมชาติ ซึ่งจะกดน้ำหนักประมาณ 5-8 ครั้ง และน้ำหนักในการทดสอบควร กำหนดไว้ ดังนี้ $\frac{1}{8},\frac{1}{4},\frac{1}{2},1,2,4,8,16,32$ ของความดันประสิทธิผลเหนือระดับที่ตัวอย่างดินอยู่ $\left(\sigma'_{vo}\right)$ ต่อจากนั้นนำมาเขียนกราฟระหว่างการเปลี่ยนแปลงความหนากับเวลา ในการอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงความหนานั้น ต้องอ่านจนกระทั่งกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวมีค่าคงที่แล้วค่อยๆเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขั้นต่อไป



รูปที่ 3.13 แสดงการหาค่า σ'_{vo} ในการทดสอบ Oedometer

5) วิธีการส่งคลื่นแรงเฉือน

ในการส่งคลื่นนั้นก็ใช้ Function Generator เป็นตัวกำเนิดแรงดันไฟฟ้า แล้วส่งต่อให้กับ Bender element ซึ่งจะเป็นตัวกำเนิด Shear Wave อีกทอดหนึ่ง โดยการส่งคลื่นในแต่ละครั้งจะเป็นการส่งคลื่นที่เรียกว่า Single Shot ซึ่งเป็นการส่งคลื่นเพียงหนึ่งลูกคลื่นเท่านั้น เป็นผลให้เกิดคลื่นแรงเฉือนหนึ่งลูกคลื่นเช่นกัน

วิธีการกำเนิด Shear Wave โดย Bender element นั้นจะใช้การควบคุมค่าความถี่ที่ 0 - 500 Hz และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงคลื่นที่ส่ง โดยมีค่าเริ่มต้นที่ประมาณ 20 -120 voltage เพื่อดูพฤติกรรมของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสเฉือนที่จะทำการหาต่อไป เช่น เวลาการเคลื่อนที่และความเร็วคลื่นแรงเฉือน เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 การทดสอบ Stress Path Test และ โปรแกรมการทดสอบ

การทดสอบ Stress Path Test หรือ อาจเรียกได้ว่า การทดสอบ Triaxial Test แบบ $\overline{CK_0UC}$ (K_0-Consolidation Undrained Compression Test) เพียงแต่สามารถเฉือนตัวอย่างในทิศทางที่แตกต่างออกไปจาก Triaxial ปกติ (Conventional Triaxial) การทดสอบ Stress Path Test นี้จะทำการทดสอบกับตัวอย่างดินทั้ง 2 บริเวณในรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน เพื่อให้สามารถนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกันได้

3.5.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ Tri-Test

ในการทดสอบนี้จะใช้เครื่องมือทดสอบ Stress Path Control System ของบริษัท ELE Co .,Ltd. จากประเทศอังกฤษ ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก คือ

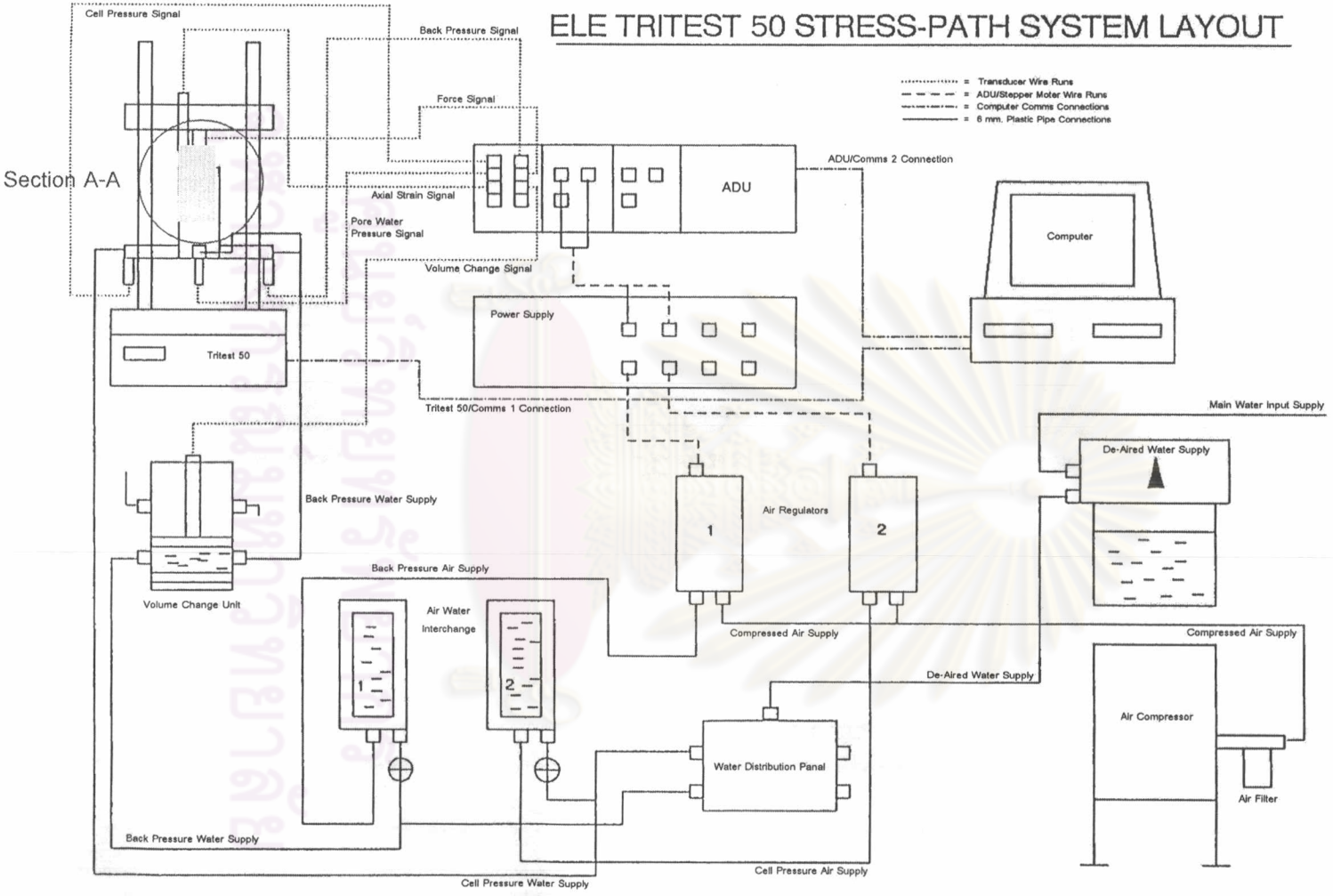
1. Control Computer
2. ADU (Autonomous Data-acquisition Unit)
3. Load Frame (Tritest 50)
4. Internal Load Cell
5. LVDT (Linear Variable Differential Transformer)
6. 3 Water Pressure Transducer
7. Volume Change Transducer
8. Pressure Pump
9. Deair Water Apparatus

ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้กำเนิดคลื่นของบริษัท Piezo และอุปกรณ์ที่ใช้ราวกัน ดังนี้

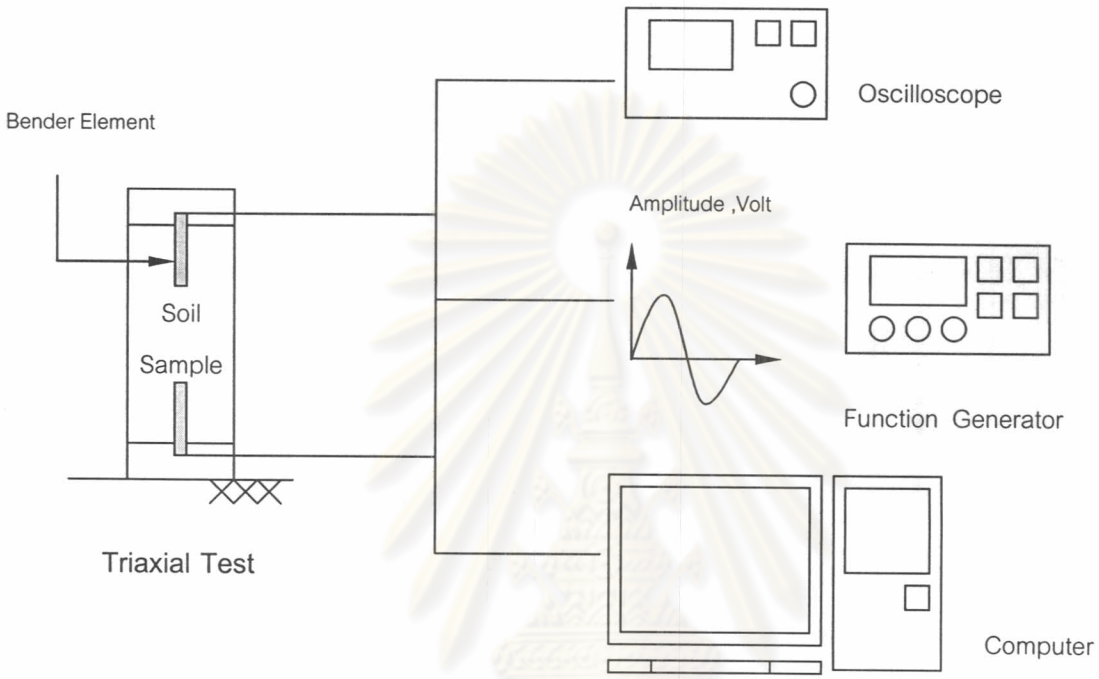
1. Bender Element Device (Piezo ceramic)
2. Wave Generator
3. Digital Oscilloscope
4. Top and Bottom Cap for Bender Element

รูปที่ 3.14 แสดงแผนผังความสัมพันธ์ของอุปกรณ์แต่ละชิ้นส่วน (System Layout) และ รูปที่ 3.15 แสดงส่วนขยายอุปกรณ์กำเนิดคลื่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.15 แผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์แต่ละชิ้นของเครื่องมือทดสอบ Stress Path Control System



รูปที่ 3.15 **การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อการทดสอบอุปกรณ์ในส่วนการส่งคลื่นแรงเฉือน** (Section A-A)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.2 ขั้นตอนในการทดสอบ

3.5.2.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

นำตัวอย่างที่ต้องการทำการทดสอบมาทำการเอาพาราฟินและอลูมิเนียมฟอยท์ที่หุ้มอยู่ออก แล้วนำมาตัดแต่งขอบ (Trim) ด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก (Steel Wire Saw) ใน Trimming Frame จนกระทั่งได้ตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 38 มม. แล้วนำตัวอย่างที่ได้มาทำการตัดหัวและท้ายโดยใช้ Meter Box ให้เหลือความยาวประมาณ 76 มม. เพื่อให้ได้สัดส่วนของความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 2 ต่อ 1 (H:D=2:1) ตามขนาดมาตรฐาน จากนั้นนำตัวอย่างที่ถูกตัดแต่งแล้วมาวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่น (Total Density , σ_t) ส่วนปริมาณความชื้น (Water Content , W_n) ในตัวอย่างดินหาได้โดยใช้ค่าเฉลี่ยระหว่างปริมาณความชื้นของดินส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของตัวอย่าง

3.5.2.2 การเตรียมเครื่องมือการสอบ

การติดตั้ง Bender Element ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน

1. **การประกอบ** Bender Element

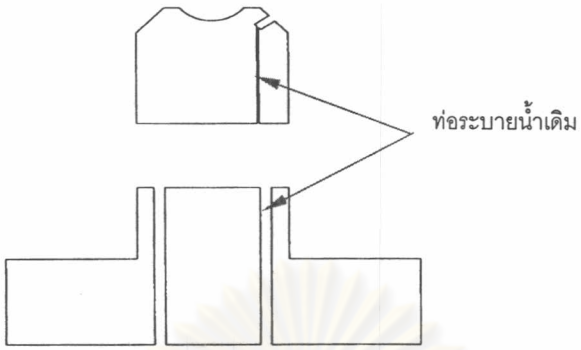
   ทำตามที่กล่าวไว้ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ (ตามรูปที่ 3.8)

2. **การหุ้มแผ่น** Bender Element **ด้วยกาว** Epoxy

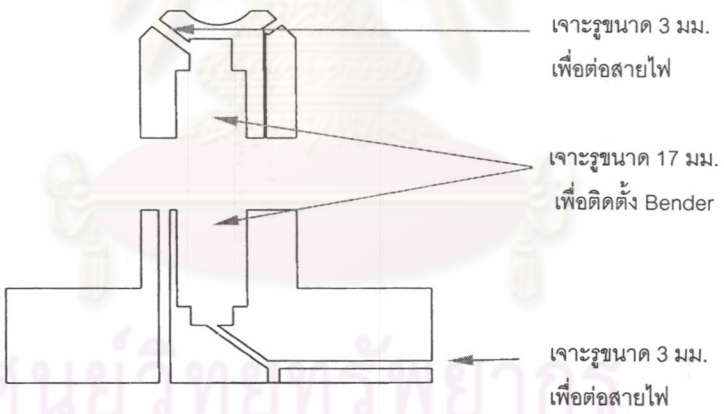
   ทำตามที่กล่าวไว้ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ (ตามรูปที่ 3.9)

3. **การเตรียม** Top & Bottom Cap **ในการติดตั้ง** Bender Element

   ในการเตรียม Top & Bottom Cap นั้น ได้ทำการวาดแบบในลักษณะที่ต้องโดยใช้ขนาดตามมาตรฐานของ Top & Bottom Cap ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่าง 38 มิลลิเมตรตามรูปที่ 3.16 และทำการเจาะบริเวณตรงกลางเพื่อการติดตั้ง Bender Element ตามรูปที่ 3.17 ในขั้นตอนการเตรียม Top และ Bottom Cap นี้ ควรใช้วัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เพื่อป้องกันการรั่วของกระแส จากตัวส่งสู่ตัวรับ ซึ่งอาจจะรบกวนสัญญาณที่แท้จริง ทำให้เกิดการผิดพลาดในการทดสอบ



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างภาพตัด Top & Bottom Cap ตามปกติ

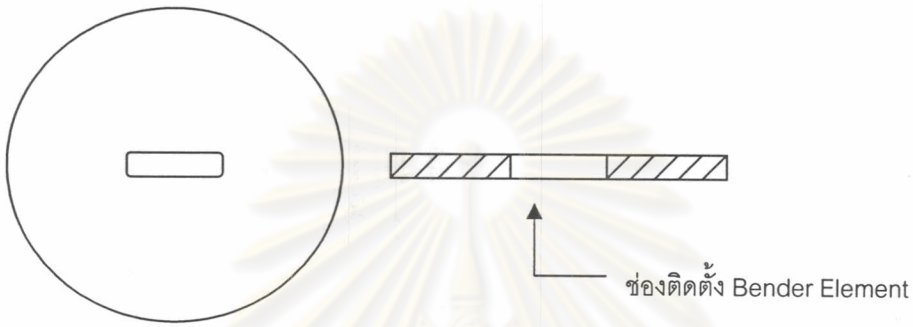


รูปที่ 3.17 ตัวอย่างภาพตัด Top & Bottom Cap เมื่อทำการเจาะเพื่อติดตั้ง Bender Element

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การเตรียมแผ่นหินพรุน (Porous Stone)

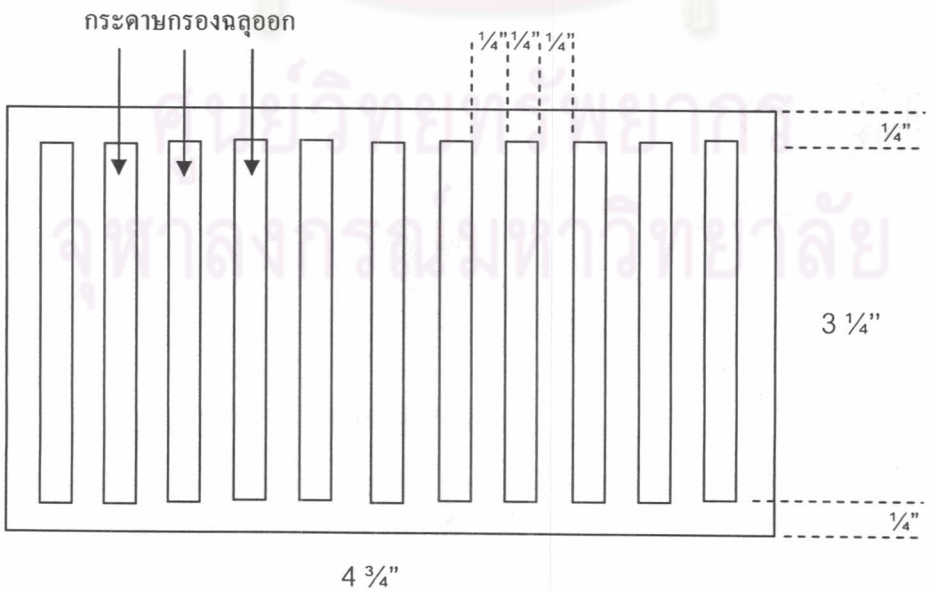
ปกติแผ่นหินพรุนที่ใช้มีขนาด 38 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมเต็มแผ่น แต่เนื่องจากมีการติดตั้ง Bender Element แล้วจึงจำเป็นต้องเจาะรู เพื่อให้สวมเข้ากับ Bender Element ได้ โดยใช้สว่านเจาะเหล็กขนาด 3 มิลลิเมตรเจาะ และจำเป็นต้องยึดแผ่นหินพรุนเข้ากับแผ่นไม้ เพื่อเวลาเจาะแล้วจะได้ไม่เกิดการแตกร้าวของแผ่นหินพรุน ตามรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การเจาะแผ่นหินพรุน

5. การเตรียมแผ่นกระดาษกรอง (Filter Paper)

โดยปกติแล้ว Filter Paper จะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร เมื่อนำมาใช้กับการทดลองในอุปการทดสอบแบบแกนอัดสามแกนนั้นจะต้องทำให้เป็นลักษณะดังรูปที่ 3.19 แล้วนำไปติดรอบตัวอย่าง



รูปที่ 3.19 การเตรียมกระดาษกรอง

3.5.2.3 การเตรียมเครื่องมือทดสอบและจัดตัวอย่างในเครื่องมือทดสอบ Triaxial

1. ทำการตรวจสอบอุปกรณ์ไฟฟ้า (Load Cell , Transducer , LVDT และ Volume Change Unit) ว่าอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้และต่อกับ ADU อย่างเรียบร้อย

2. ทำการตรวจสอบข้อต่อจุดต่างๆ ว่ามีการรั่วซึมหรือไม่

3. ตรวจสอบน้ำใน Bladder ว่าเต็มหรือไม่ ก่อนการทดสอบ

4. ทำการไล่ฟองอากาศออกจากระบบด้วย Deair Water (จากเครื่อง Deair Water Apparatus โดยทำการ Deair น้ำที่จะใช้ในการทดสอบเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที ก่อนนำมาใช้) ทั้งในสายของ Cell Pressure และ Back Pressure และที่สำคัญคือ หลังจากไล่ฟองอากาศออกจากระบบแล้ว ต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีแรงดันตกค้างอยู่ในระบบ โดยการเปิดระบบ (ประตูน้ำ หรือ Value) ออกสู่บรรยากาศ

5. นำหินพรุน (Porous Stone) ที่ผ่านการต้มไล่ฟองอากาศในน้ำเดือดอย่างน้อย 10 นาที วางบนฐานของ Triaxial แล้วตามด้วยกระดาษกรอง (Filter Paper) ก่อนที่จะนำตัวอย่างที่ผ่านการตัดแต่ง (Trimmed) มาวาง จากนั้นตามด้วย กระดาษกรองและ Top Cab

6. ทำการติด Side Drained ซึ่งมีจำนวน 10 แถบ ขนาดตามมาตรฐานของ Bishop and Henkel (1962) เพื่อช่วยเร่งอัตราการระบายของแรงดันน้ำ (Pore Pressure Dissipation) ระหว่างการอัดตัวคายน้ำ และช่วยในการกระจายของแรงดันน้ำในระหว่างเฉือนตัวอย่าง โดยปลายทั้ง 2 ของ Side Drained จะต้องสัมผัสกับหินพรุนทั้งด้านบนและด้านล่าง

7. หุ้มตัวอย่างด้วย Rubber Membrane เพื่อไม่ให้น้ำสัมผัสกับตัวอย่างโดยตรง ซึ่งในที่นี้จะใช้ถุงยางอนามัย

8. นำ Triaxial Cell ที่ติดด้วย Internal Load Cell ครอบลงบนตัวอย่าง แล้วทำการยึดด้วยสกรู และควรระวัง Load Cell กระแทกหรือกดตัวอย่างก่อนเริ่มการทดสอบ ซึ่งอาจทำให้ตัวอย่างวิบัติได้ (Load Cell มีน้ำหนักประมาณ 1 กก.) จึงควรมีการล็อคหรือค้ำ Load Cell ไว้ก่อนกระทำขั้นตอนนี้

9. เติมน้ำเข้าใน Triaxial Cell ผ่านทางสายของ Cell Pressure โดยเปิด Air Value ด้านบนของ Triaxial Cell ไว้ แล้วรอจนกระทั่งน้ำเต็มและล้นออกทาง Air Value จากนั้นทำการปิด Air Value

3.5.2.4 การทำให้ตัวอย่างอิ่มตัว (Saturation Stage)

ขั้นตอนนี้เป็นการทำให้มั่นใจว่าตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ และขจัดปัญหาของ Negative Pore Pressure ซึ่งเราไม่รู้ค่า โดยทำการใส่ Back Pressure เข้าไปที่บริเวณหัวและท้ายของตัวอย่างแล้วทิ้งไว้ประมาณ 24 ชม. เพื่อให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ ($B \geq 0.96$ หรือ $S \geq 96$ %) โดยเริ่มต้นก่อนทำการเพิ่มแรงดันจะต้องทำการขยับ Load Cell ให้สัมผัสกับ Top Cab มากที่สุดแต่ยังคงใช้ตัวค้ำๆ ไว้อยู่ จากนั้นทำการยก Load Frame ขึ้นจนกระทั่ง Load Cell สัมผัสกับ Reaction Beam จากนั้นจึงเริ่มทำการเพิ่มแรงดันเข้าไป เพื่อป้องการการกระแทกของ Load Cell เนื่องจากแรงลอยตัว ในกรณีที่มีช่องว่างระหว่าง Load Cell กับ Reaction Beam

ในงานวิจัยนี้จะใช้ Back Pressure (u_b) ประมาณเท่ากับ 200 KPa และใช้ Cell Pressure (σ_c) ประมาณเท่ากับ 210 KPa เพื่อสร้างค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเบื้องต้นซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ไม่ทำให้ตัวอย่างเกิดการบวม (Swell) และเป็นการป้องกันไม่ให้ถุงยางอนามัยเกิดการบวม ในการเพิ่มแรงดันนั้นจะเพิ่มด้วยอัตราประมาณ 30 KPa/นาที และ 20 KPa/นาที สำหรับ Cell Pressure และ Back Pressure ตามลำดับ เพื่อให้เกิดการรบกวนต่อตัวอย่างน้อยที่สุด โดยทำการเพิ่มไป

พร้อมๆ กันด้วยการควบคุมจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทำการวัดปริมาตรที่เปลี่ยนไปจากน้ำที่ไหลออกมาจากตัวอย่างระหว่าง Saturation Stage (หลังจาก Cell Pressure>50 KPa สามารถปลดตัวค้ำ Load Cell ออกได้โดยไม่ทำอันตรายกับตัวอย่างดิน)

3.5.2.5 การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างและการส่งคลื่นแรงเฉือน (Consolidation & Shear wave measurement)

การอัดตัวคายน้ำเป็นการทำตัวอย่างดินภายใต้ความดันที่กดทับแบบประสิทธิผลในธรรมชาติ หรือ การอัดตัวอย่างดินตามค่าความดันที่ต้องการ ดังนั้นการอัดตัวอย่างดินจึงหมายถึง การเพิ่มความดันภายนอกของตัวอย่างดินทำให้เกิดความต่างศักย์ของน้ำระหว่างภายนอกและภายในตัวอย่างดิน เมื่อเปิดทางระบายน้ำ จึงทำให้ค่าความต่างศักย์ของภายนอกและภายในตัวอย่างดินมีค่าเท่ากัน ตัวอย่างจะยุบอัดตัวลง ซึ่งปกติแล้วตัวอย่างดินในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ จะต้องใช้เวลาประมาณ 1 วัน เมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำแล้ว ค่าความชื้น และค่าน้ำหนักต่อปริมาตรของตัวอย่างดินจะลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับ และจะทำการทดสอบการ

ส่งคลื่นแรงเฉือนต่อไป (ในการทดสอบครั้งนี้ จะทำการอัดตัวคายน้ำตามสภาพธรรมชาติของตัวอย่างดิน)

3.6 การคำนวณผลและวิเคราะห์ข้อมูล

เป็นการคำนวณหาค่าโมดูลัสเฉือน และ ความเครียดเฉือน โดยการประยุกต์ใช้สมมุติฐานที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 เมื่อได้ค่าทั้งสองอย่างนั้น นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้ง 2 นั้น โดยใช้ความสัมพันธ์ที่ว่าแนวระนาบเป็นค่าของความเครียดเฉือน และค่าในแนวดิ่งเป็นค่าของโมดูลัสเฉือน โดยใช้สูตรที่ว่า

$$\text{Shear Strain, } (\gamma) = \frac{V_{Particle}}{(V_{Wave})}$$

$$\text{Shear Modulus ,(G)} = \rho(V_S)^2$$

เมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองแล้วนำมาวิเคราะห์ผลหางตัวเลขเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรในลักษณะที่เป็นตัวเลขในรูปแบบค่าคงที่ขอกราฟ ที่มีผลกระทบต่อ โมดูลัสเฉือนเพื่อการใช้ในการทางวิศวกรรมปฐพี หรือ เพื่อการศึกษาและวิจัยต่อไปในอนาคต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย