

บทที่ 3 เครื่องมือ, วิธีการทดลอง, และแผนการทดลอง Triaxial

3.1 ขอบเขตของการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในโครงการนี้จะทำโดยใช้ triaxial apparatus อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ไม่สามารถกระทำได้ด้วยเครื่องมือที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน (conventional triaxial apparatus) เพราะจะต้องมีเครื่องมือที่ใช้วัดความเค้นและความเครียดได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะการวัดความเครียดนั้น ต้องวัดให้ได้ละเอียดถึง 0.001% โดยการวัดให้ได้ความเค้นที่แม่นยำทำได้โดยการวัดแรงจากภายใน triaxial cell โดยใช้ internal load cell และการวัดความเค้นที่แม่นยำก็ทำได้โดยการวัดการเคลื่อนตัวของดินบนผิวของตัวอย่างดินโดยตรง (local strain measurement) จากการทำในปัจจุบันได้มีการพัฒนา local strain measurement ที่มีความไวสูงทำให้สามารถวัดความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินได้ในช่วง small- และ intermediate-strain ranges ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งนำไปสู่การศึกษาถึงพฤติกรรมการล้าของดินที่ความเครียดต่ำได้อย่างสมบูรณ์ (เช่น Tatsuoka & Shibuya, 1991; Jardine, 1992; Smith et al., 1992; Kuwano, 1999) การพัฒนา triaxial apparatus โดยการใช้ local strain measurement device ใน triaxial test ได้เริ่มจะกลายเป็นมาตรฐานในการศึกษาพฤติกรรมของดิน ในสองทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาระบบ local strain measurement แบบต่างๆ โดยสถาบันการศึกษาและสถาบันวิจัยต่างๆทั่วโลก ในด้าน local axial strain measurement ก็มี (i) inclinometer gauge (เช่น Burland & Symes, 1982), (ii) Hall effect local strain gauge (เช่น Clayton & Khattrush, 1986), (iii) proximity transducer (เช่น Hird & Yung, 1989), (iv) original-local deformation transducer (original-LDT) (เช่น Goto et al., 1991), (v) LVDT (เช่น Cuccovillo & Coop, 1997), and (vi) cantilever-LDT (Yimsiri et al., 2005) สำหรับการพัฒนาระบบ local radial strain measurement นั้นยังไม่ค่อยแพร่หลายนักเนื่องจากยุ่งยากกว่า การสรุปทบทวนถึงระบบ local strain measurement ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาแล้วนั้นสามารถอ่านได้จาก Scholey et al. (1995) และ Yimsiri & Soga (2002) โดยในโครงการวิจัยนี้จะเลือกใช้ LVDT สำหรับ local axial strain measuring device และ proximity transducer สำหรับ local radial strain measuring device

การทดสอบหาความแข็ง (stiffness) ของดินที่ระดับความเครียดต่ำมากด้วยการวัดความเร็วของคลื่นสั้นสะเทือนที่วิ่งผ่านดินได้เริ่มมีการศึกษาสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เช่น การศึกษาในสนามโดยวิธีต่างๆโดย Ashford & Jakrapiyanun (1999) และ Shibuya & Tamrakar (1999) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วย bender element โดย Teachavorasinskun et al (2001) Teachavorasinshun et al. (2002a, b) Teachavorasinskun & Amornwithayalax (2002) Teachavorasinskun & Lukkunaprasit (2004) และ Teachavorasinskun & Akkarakun (2004) อย่างไรก็ตามข้อมูลส่วนมากมาจากผู้วิจัยกลุ่มเดียวและยังมีพฤติกรรมบางประการที่ยังไม่ได้ทำการศึกษา โครงการวิจัยนี้จึงจะทำการทดลองด้วย bender element

เพิ่มเติม โดยข้อมูลจากผลการทดลองในโครงการนี้ จะเป็นการเพิ่มข้อมูลในฐานข้อมูลของดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ อีกทั้งโครงการนี้จะทำการศึกษา bender element ในส่วนที่ไม่เคยศึกษามาก่อน เช่น anisotropy

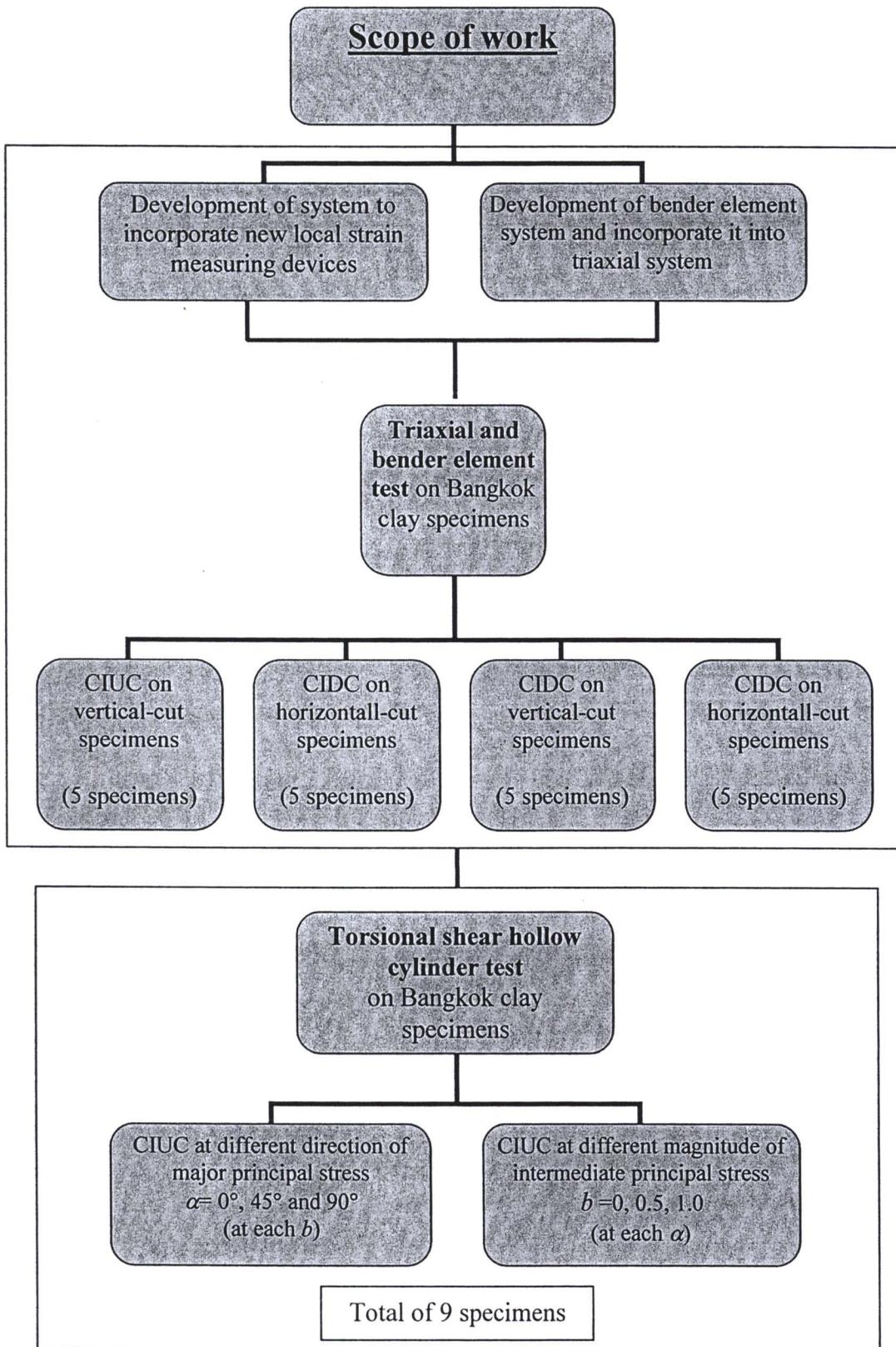


Figure 3.1 Research work diagram

3.2 การทดลอง triaxial

ในส่วนนี้จะอธิบายการออกแบบวิธีการวิจัยของการทดลอง isotropically consolidated undrained compression (CIUC) และ isotropically consolidated drained compression (CIDC) สำหรับตัวอย่างดิน แนวตั้งและแนวนอนเพื่อศึกษาพฤติกรรม anisotropy ของพฤติกรรม stress-strain ในความเค้นขนาด small และ intermediate

3.2.1 ระบบการทดลอง triaxial แบบธรรมดา

ถึงแม้ว่าเครื่อง triaxial แบบธรรมดาคจะเป็นเครื่องมือการทดสอบที่นิยมที่สุดในการศึกษาพฤติกรรม stress-strain จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองจากเครื่องมือ triaxial แบบธรรมดาอาจจะไม่สะท้อนถึงพฤติกรรม stress-strain ที่แท้จริงของดิน โดยมักจะพบเสมอว่าค่า stiffness ของดินที่ได้จากเครื่องมือ triaxial แบบธรรมดาจะน้อยกว่าค่าที่ได้จากค่า stiffness ของดินที่ได้จากการ back calculation จากข้อมูลการเคลื่อนตัวในสนามอย่างมาก มีปัจจัยหลายอย่างที่อาจจะเป็นสาเหตุของความผิดพลาดนี้ เช่น การรบกวนตัวอย่างดิน, การวัดค่า axial strain ที่ได้มากเกินไปจากการวัดความเค้นภายนอก, และ สภาพของการทดลอง อย่างไรก็ตามปัจจัยสำคัญที่สุดคือการได้ค่า stiffness ที่ขนาดความเครียดต่างกัน

งานวิจัยใหม่ๆจำนวนมากแสดงว่าพฤติกรรม stress-strain ของดินนั้น highly non-linear และค่า small-strain stiffness ของดินจะเป็นข้อมูลที่สำคัญมากในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพี อย่างไรก็ตามขนาดของความเครียดที่สนใจอยู่นอกจากความสามารถของเครื่องมือ triaxial ธรรมดา ดังนั้นได้มีการพัฒนาเครื่องมือ triaxial เพื่อให้สามารถวัดพฤติกรรม non-linear ได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะที่ความเครียดเล็กน้อย โดยมีการเพิ่มระบบต่างๆในเครื่องมือ triaxial เช่น ระบบ local strain measurement system และระบบ bender element เพื่อวัด ใน small strain (elastic) stiffness

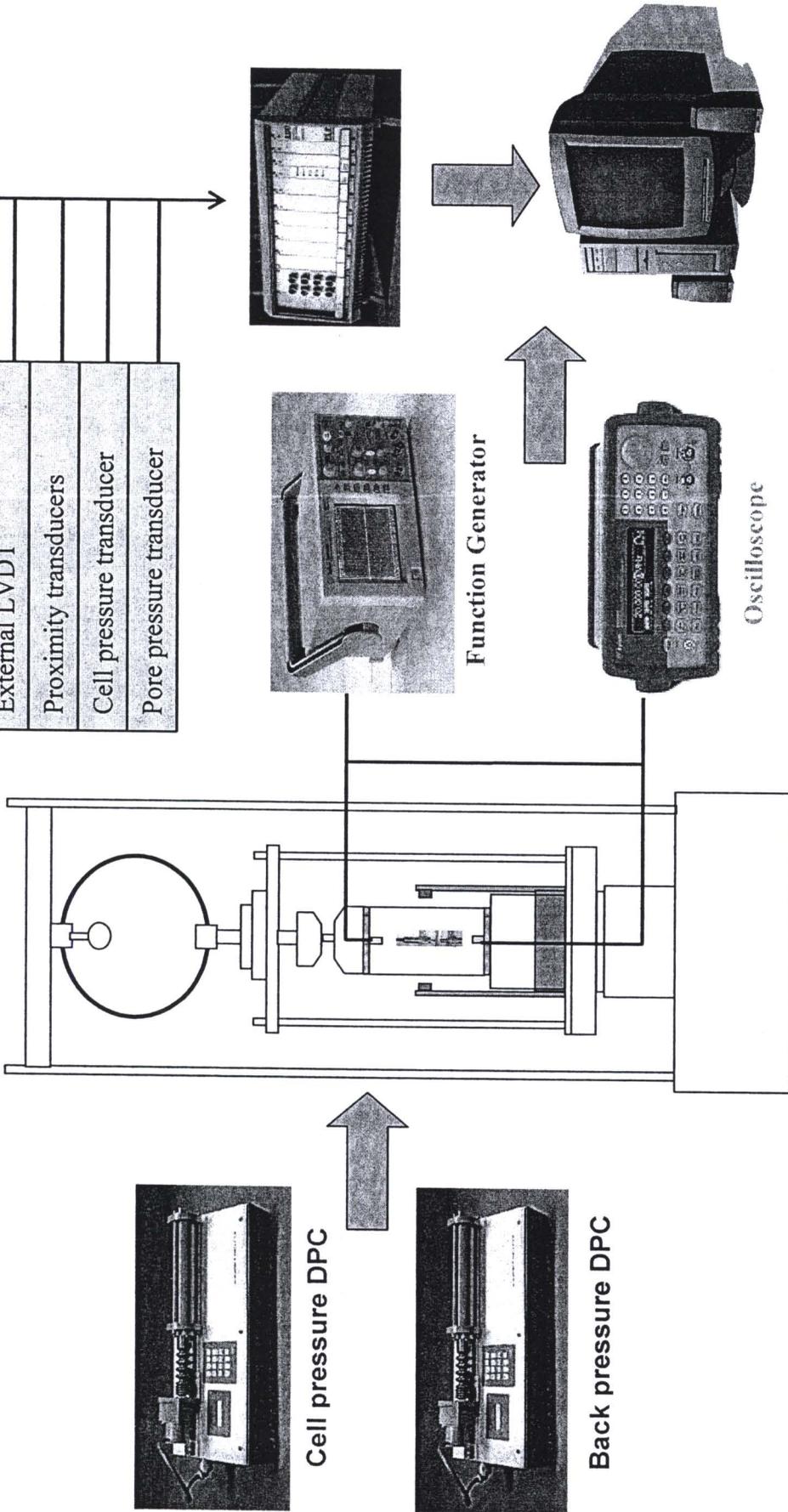
โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องมือ triaxial แบบธรรมดาเพื่อให้สามารถศึกษาพฤติกรรม stress-strain ของดินในขอบเขตความเครียดที่กว้างขึ้น โดยการเพิ่มระบบ local strain measurement และ bender element

3.2.2 เครื่องมือ triaxial ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เครื่องมือ triaxial ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย triaxial cell, pressure controllers (DPC) 2 อัน, เครื่องมือวัดต่างๆ เช่น cell pressure, back/pore pressure transducer, และ controlling microcomputer การพัฒนาเครื่องมือคือการเพิ่มระบบ local axial และ radial strain measurement และระบบ bender element ระบบเครื่องมือ triaxial ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 3-2 โดยส่วนประกอบต่างๆได้อธิบายดังนี้

Instrumentation

- Internal load cell
- Submersible LVDTs
- External LVDT
- Proximity transducers
- Cell pressure transducer
- Pore pressure transducer



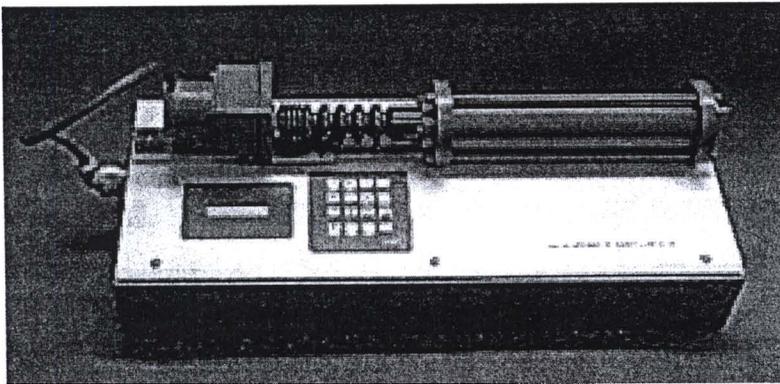
รูปที่ 3-2 ระบบเครื่องมือ triaxial ที่ใช้ในงานวิจัยนี้system

i) Triaxial cell

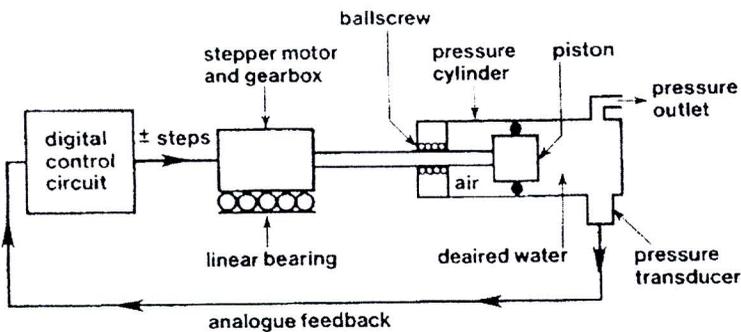
เครื่องมือนี้ใช้ triaxial cell ของ ELE รุ่น EL25-4157 สำหรับตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มม ในแนวแกนต่อตัวอย่างดินกระทำโดย load frame triaxial chamber สามารถรองรับความดันมากที่สุด 1700 kPa และ load frame สามารถให้แรงกระทำมากที่สุด 45 kN

ii) Digital pressure controller

รูปที่ 3-3(a) แสดง digital pressure controller (DPC) โดย DPC คือ microprocessor controlled hydraulic actuator เพื่อควบคุมและวัดความดันของของเหลวและการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยหลักการของการทำงานได้แสดงในรูปที่ 3.3(b) และอธิบายในรายละเอียดโดย Menzies (1988) ระบบนี้ใช้ DPC 2 ตัวเพื่อควบคุมค่า back pressure และ cell pressure โดยการบังคับด้วยคน ความละเอียดของการวัดและควบคุมความดันและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรคือ 1 kPa และ 1 mm³ ขนาดการทำงานของปริมาตรคือ 200 cm³



(a) รูปถ่าย



(b) ไลอะแกรม

รูปที่ 3-3 Digital pressure controller (Menzies, 1988)

iii) Data logger

Data logger ที่ใช้เป็นยี่ห้อ ELE โดยมี 11 ช่องสัญญาณเพื่อรับสัญญาณของ transducer และขยายและกรองสัญญาณก่อนการผ่านสัญญาณไปสู่ microcomputer

iv) Microcomputer

microcomputer ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลจากเครื่องมือวัดต่างๆผ่าน data logger นอกจากนี้ยังใช้ในการควบคุม function generator และจัดเก็บ waveform จาก oscilloscope

v) เครื่องมือวัด

เครื่องมือวัดที่ใช้ในระบบ triaxial นี้มีดังนี้ internal load cell, proximity transducer, submersible LVDT, external LVDT, volume change transducer, cell pressure transducer pore, pressure transducer, และ back pressure transducer

3.3 การพัฒนาระบบ triaxial

1. การพัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือ triaxial โดยการเพิ่มระบบ local strain measurement

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของดินในความเครียดขนาด small ถึง intermediate ในงานวิจัยนี้ เครื่องมือ triaxial ได้ทำการพัฒนาโดยการเพิ่ม local strain measurement ใหม่ โดยในระบบ local strain measurement มีการวัด 2 ชนิด คือ

- Local axial strain measurement system โดยใช้ submersible LVDT
 - Local radial strain measurement system โดยใช้ proximity transducer
- นอกจากนี้มีการพัฒนาระบบ data acquisition เพื่อต่อพ่วงเครื่องมือวัดใหม่เหล่านี้เข้าสู่ระบบ

2. การพัฒนาและปรับปรุงระบบ bender element

โดยการพัฒนาต่างๆได้อธิบายดังข้างล่าง

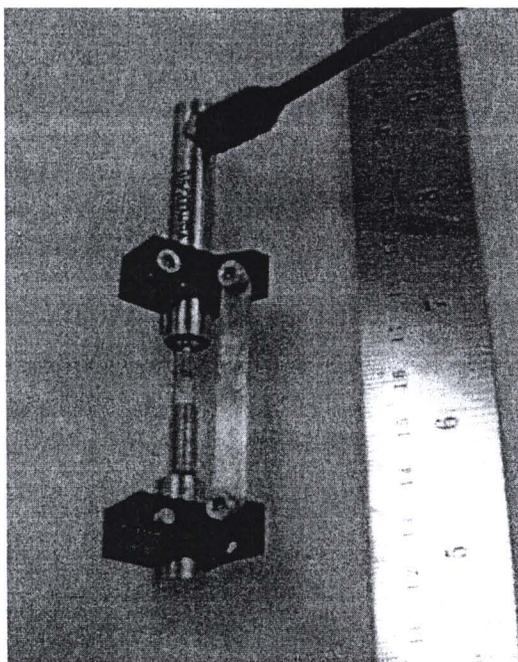
3.3.1 ระบบ local strain measurement

ในการพัฒนาเครื่องมือ triaxial ได้เพิ่ม submersible LVDT เพื่อใช้วัด local axial strain measurement สาเหตุในการเลือกใช้ submersible LVDT เนื่องจากความแข็งแรงของอุปกรณ์ และมีการเพิ่มระบบ proximity transducer เพื่อใช้วัด local radial strain measurement สาเหตุที่เลือกใช้ proximity transducer เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ไม่สัมผัสกับตัวอย่างดินทำให้ง่ายต่อการติดตั้ง

i) Submersible LVDT

อุปกรณ์ linear variable differential transformer (LVDT) คือเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ชนิด inductive ในอดีตจะนิยมใช้แบบ fixed-type LVDT เพราะ LVDT ในสมัยก่อนมีขนาดใหญ่ทำให้จะต้องการตัวอย่างดินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหากต้องการใช้แบบ floating-type อย่างไรก็ตาม LVDT ในปัจจุบันมีขนาดเล็กและ water-submersible ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมใช้แบบ floating-type LVDT และได้ใช้ในงานวิจัยนี้

รูปที่ 3-4 แสดง floating-type LVDT ที่ใช้ในงานวิจัยนี้. โดยจะใช้ 2 ตัวติดตั้งที่ด้านข้างของตัวอย่างดินในทิศทางที่ตรงข้ามกัน สำหรับตัวอย่าง clay และ uncemented sand จะสามารถติดตั้ง LVDT ด้วยกาวแล้วค่อยใช้เข็มยึดติดผ่าน membrane เข้าไปในดิน จากนั้นเข็มจะถูกอุดด้วย vulcanizing solution ในกรณีที่ไม่สามารถใช้เข็มได้ (เช่น กรณีตัวอย่างดิน stiff soil หรือ soft rock) ก็จะเพียงติดตั้งด้วย cyanoacrylate instant cement บน membrane

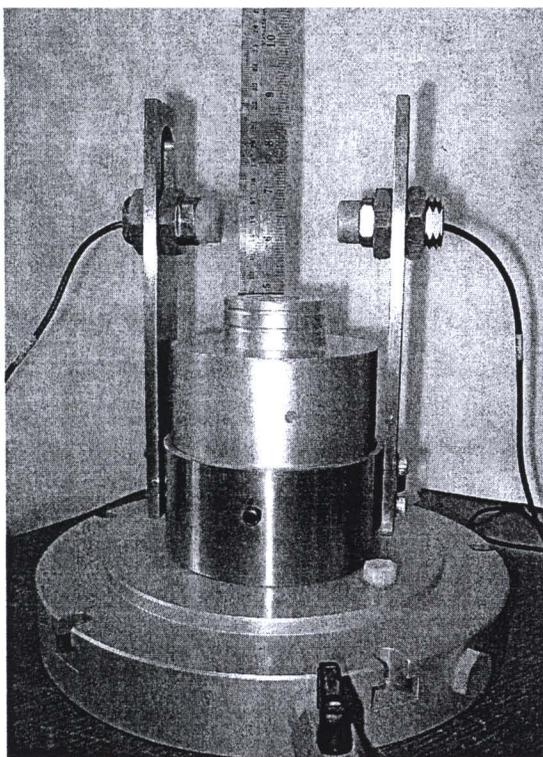


รูปที่ 3-4 Floating-type LVDT

ข้อดีของ LVDT คือ: (i) linear calibration curve, (ii) มี resolution ที่ดีประมาณ 2×10^{-5} % ถึง 1.4×10^{-3} %, และ (iii) ความเสถียร ในทางตรงข้าม LVDT ก็มีข้อจำกัดคือ: (i) ต้องการ cell fluid ที่ไม่นำไฟฟ้า (เช่น อากาศและ silicone oil) ยกเว้นแบบ water-submersible LVDT, (ii) ราคาแพง, (iii) ขนาดใหญ่ ยกเว้นแบบ miniature LVDT, และ (iv) แนวโน้มที่จะติดขัดของ inner rod เพราะการเอียงตัวของ LVDT เมื่อใกล้สภาพวิบัติ (Yimsiri and Soga, 2002)

ii) Proximity transducer

อุปกรณ์ proximity transducer คือ inductive displacement transducer ที่ทำงานบนหลักการของการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการไหลของ eddy current ในเป้าโลหะ การสูญเสียสนามแม่เหล็กจะแปรผันตรงกับระยะระหว่างหัววัดกับเป้าโลหะ ในงานวิจัยนี้ใช้ proximity transducer เป็นอุปกรณ์ local radial strain measurement การติดตั้งของ proximity transducer ได้แสดงในรูปที่ 3-5 โดย proximity transducer จะถูกยึดอยู่กับที่โดยเสาโลหะที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างในแนวตรงข้ามกับเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยเสาถูกยึดกับฐานของ triaxial cell ด้วยสกรู เป้าโลหะใช้แผ่น aluminum foil รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ติดกับ rubber membrane โดยใช้ silicone sealant การเคลื่อนที่ของเป้าในแนวรัศมีจะวัดโดย proximity transducer และแปรเป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลาง



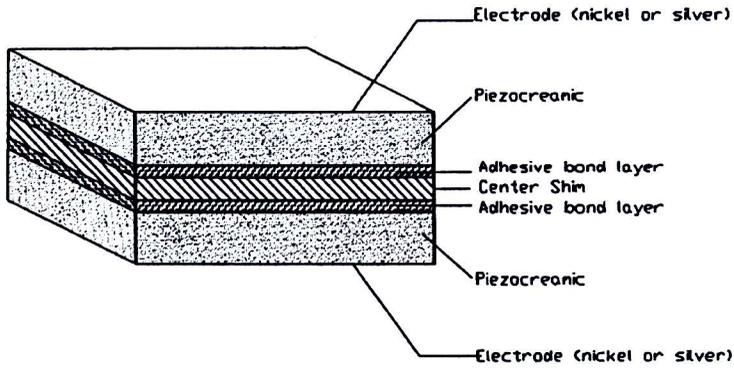
รูปที่ 3-5 Proximity transducer

ข้อดีของ proximity transducer คือ: (i) linear calibration, (ii) มี resolution ที่ดีประมาณ 0.001% และ (iii) มี accuracy ที่ดีประมาณ 0.008% ในทางตรงข้าม proximity transducer ก็มีข้อเสียคือ: (i) การติดตั้งเป้าโลหะ, (ii) ราคาแพง, (iii) ไม่สามารถทำงานใต้น้ำ (ยกเว้นเมื่อสร้างมาเป็นพิเศษ), และ (iv) มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของความดันรอบๆ (ยกเว้นเมื่อสร้างมาเป็นพิเศษ) (Yimsiri and Soga, 2002)

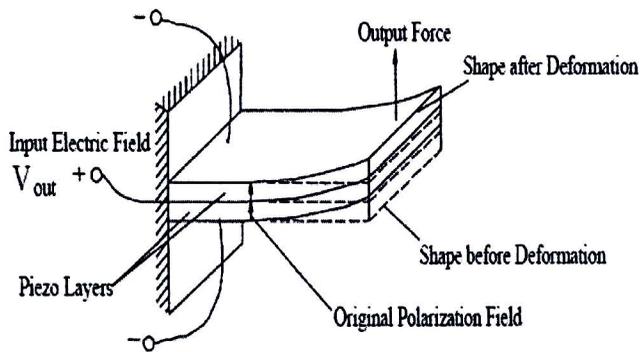
3.3.2 ระบบ bender element

i) การพัฒนาและการติดตั้ง

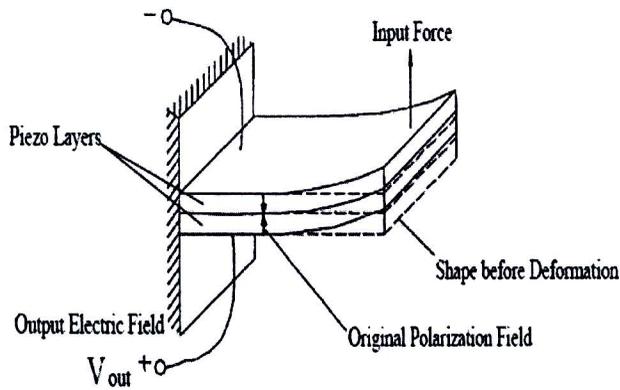
อุปกรณ์ bender element คือ electro-mechanical transducer ที่เปลี่ยนพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้ากลับไปกลับมา โดยประกอบด้วย piezo-ceramic plate 2 อันเชื่อมติดกันคล้ายๆกับเซนวิชที่ต่อวงจรแบบอนุกรม (ซึ่งเหมาะสมจะเป็น receiver) และแบบขนาน (ซึ่งเหมาะสมจะเป็น transmitter) bender elements ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือแบบ T226-A4-303X/Y poled รูปที่ 3-6 แสดง piezoceramic bender element ที่ต่อวงจรแบบอนุกรมและขนาน เหตุผลของการใช้วัสดุนี้คือเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านมันจะหดตัวหรือขยายตัวและในทางกลับกันเมื่อมันหดตัวหรือขยายตัวมันจะให้ไฟฟ้าออกมา ดังนั้นถ้าให้ voltage ที่ทั้งสองด้านของ bender element ด้านหนึ่งจะยึดตัวและอีกด้านหนึ่งจะหดตัวดังรูปที่ 3-7(a) นอกจากนี้ bender element เป็นอุปกรณ์ high impedance ดังนั้นไม่สามารถถูกความชื้นได้มีฉะนั้นจะเกิดการลัดวงจร ดังนั้นจำเป็นต้องมีการป้องกันน้ำและความชื้นโดยการใช้ epoxy รูปที่ 3-7(b) แสดง bender element ที่เตรียมไว้เพื่อติดตั้งในอุปกรณ์การทดสอบดิน



(a) โครงสร้างของ 2-Layer piezoceramic element

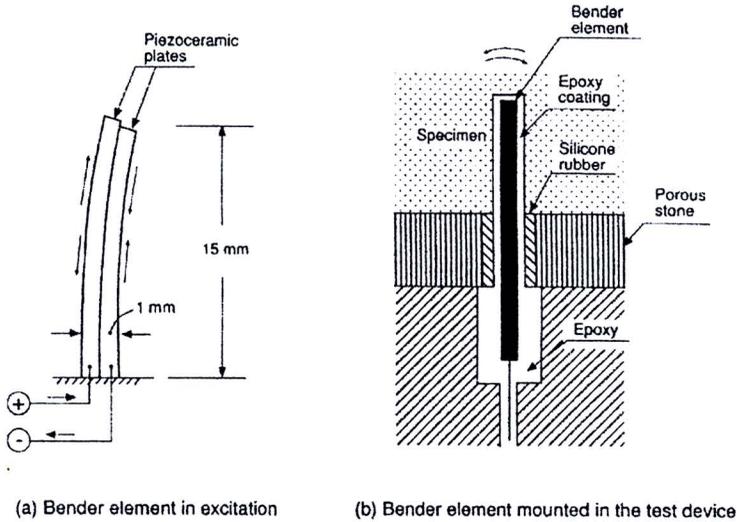


(b) Y - poled with parallel connection (3 wires)



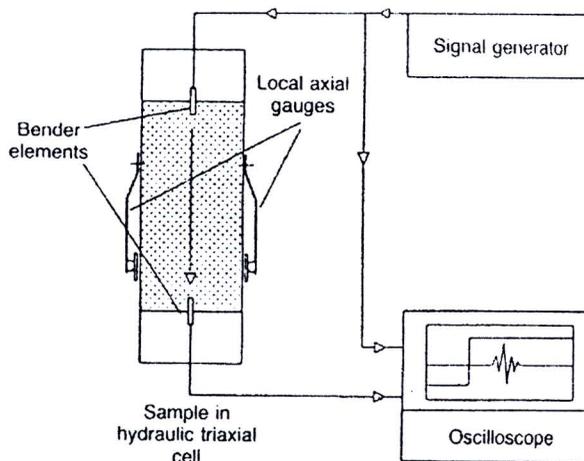
(c) X - poled with series connection (3 wires)

รูปที่ 3-6 Piezoceramic bender element ต่อแบบอนุกรมและขนาน



รูปที่ 3-7 Bender element (Dyvik and Madshus, 1985)

อุปกรณ์ bender element สามารถติดตั้งในเครื่องมือทดลองในห้องปฏิบัติการได้หลากหลายโดยมักจะติดตั้งในเครื่องมือ triaxial และ oedometer การติดตั้งอุปกรณ์ bender element ในเครื่องมือ triaxial ได้แสดงในรูปที่ 3-8 โดยที่ transmitting bender element ติดตั้งที่ top cap และ receiving bender element ติดตั้งที่ base pedestal ส่วนอุปกรณ์ที่จำเป็นอย่างอื่นคือ function generator และ oscilloscope



รูปที่ 3-8 การติดตั้ง bender element (Viggiani and Atkinson, 1995b)

ii) Interpretations of arrival time

ค่า small-strain shear modulus (G_{max}) สามารถคำนวณจากความเร็วของคลื่นเฉือน (V_s) ที่วิ่งผ่าน ตัวอย่างคินดิงสมการ (3-1)

$$G_{max} = \rho V_s^2 \tag{3-1}$$

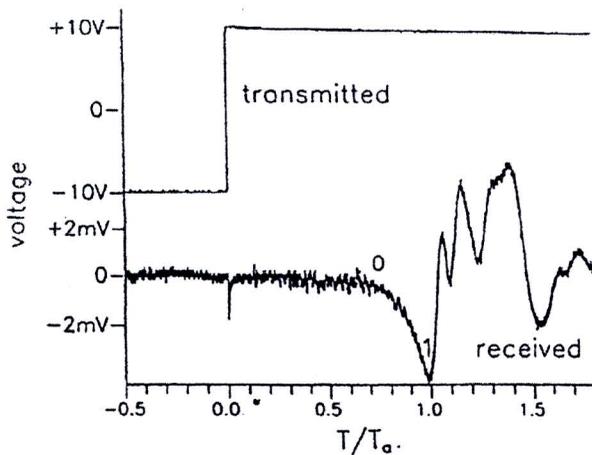
โดยที่ ρ คือความหนาแน่นของดิน

แนวโน้มความผิดพลาดของการวัดค่า shear modulus (ΔG_{max}) แสดงโดยสมการ (3-2)

$$\frac{\Delta G_{max}}{G_{max}} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{2\Delta L}{L} + \frac{2\Delta t}{t} \tag{3-2}$$

Viggiani and Atkinson (1995) ได้รายงานว่าต้องใช้ระยะห่างปลายของ bender element เพื่อคำนวณค่า V_s และยังวิเคราะห์ด้วย fast Fourier transform กับคลื่นที่รับมาเทียบกับคลื่นที่ส่งออกโดย cross-correlation function และ cross-power spectrum เพื่อลดความไม่แน่นอนในการหาระยะเวลาการเดินทาง (t) เป็น $\pm 7\%$ จึงทำให้ความผิดพลาดในการหาค่า G_{max} เป็น $\pm 15\%$

รูปที่ 3-9 แสดงสัญญาณจากการทดลอง bender element ที่วัดโดย oscilloscope จุดเวลาที่ปล่อยคลื่นออกจากตัวส่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนแต่จุดเวลาที่คลื่นมาถึงตัวรับจะไม่ค่อยชัดเจน สัญญาณที่รับจะเริ่มเห็นที่จุด 0 ละจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึงจุด 1 หลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนทิศอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะมีการขึ้นลงอีกหลายรอบก่อนที่สัญญาณจะหายไป



รูปที่ 3-9 สัญญาณจาก bender element ที่วัดโดย oscilloscope

เป็นแนวปฏิบัติโดยทั่วไปที่จะพิจารณาให้จุดที่คลื่นเฉือนเดินทางมาถึงคือจุดที่รับสัญญาณได้ครั้งแรก (คือจุด 0) การกลับขั้วของคลื่นที่ส่งเพื่อสังเกตการกลับขั้วของคลื่นที่รับจะเป็นวิธีในการแสดงว่าจุด 0 เป็นจุดของ first arrival ของ shear wave อย่างแท้จริง (Abbiss, 1981) อย่างไรก็ตามการศึกษาทางทฤษฎีโดย

Salinero et al. (1986) แสดงว่าสัญญาณแรกที่รับรู้อาจจะไม่ใช่ arrival ของ shear wave แต่เป็น arrival ของ คลื่นที่เรียกว่า near-field component ซึ่งจะวิ่งด้วยความเร็วเท่ากับ compression wave Viggiani and Atkinson (1995) อธิบายว่าการพิจารณาคลื่น near-field นี้สามารถทำให้ได้ค่า G_{max} มากเกินไปถึง 14% อย่างไรก็ตาม Salinero et al. (1986) พบว่าการเกิดขึ้นของ near-field effect ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่าง source และ receiver (L) และค่า wavelength (λ) ของ sine wave ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับค่า frequency (f) และความเร็วของคลื่นด้วย โดยนิยามจำนวนของ wavelength ระหว่าง source และ receiver (R_d) เป็นตัวแปรที่ควบคุมดังนี้

$$R_d = \frac{L}{\lambda} = \frac{fL}{V_s} \quad (3-3)$$

ดังนั้นจะไม่เกิด near-field effect ถ้ามีค่า R_d มากกว่าประมาณ 5 และโดยทั่วไปจะเป็นได้โดยการ ควบคุมให้ frequency ของ transmitted wave มีค่าสูงเพียงพอ

iii) ข้อจำกัดของการทดลอง bender element

การทดลอง bender element (Dyvik and Madshus, 1985) ใช้เป็นประจำในการวัดค่า small-strain shear modulus (G_{max}) ของดิน ถึงแม้ว่ามันจะประสบความสำเร็จในการใช้กับ clay, sand, และ stiff material เช่น cemented soil (เช่น Jovicic et al., 1997; Ismail et al, 2004) แต่มันยังมีข้อจำกัดทางการภาพดังนี้ (Ismail and Rammah, 2005)

- bender element จะต้องใส่เข้าไปในตัวอย่างดินเพื่อถ่ายการเคลื่อนตัวแบบ bending ไปเป็น shear strain ในดินรอบๆ ซึ่งอาจจะเป็นการรบกวนตัวอย่าง undisturbed และ cemented การทำรูไว้ใน ตัวอย่างดินจะต้องเติมรูให้เต็มในภายหลังด้วยวัสดุเช่น epoxy หรือ gypsum ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการ รบกวนตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น
- coated bimorph จะสัมผัสกับดินโดยตรงทำให้มีแนวโน้มจะเสียหาย และความเสียหายของ epoxy coat จะทำให้เกิดการลัดวงจร
- bender element ไม่เหมาะสำหรับสภาพแวดล้อมที่รุนแรงที่สารละลายอาจซึมผ่าน epoxy เช่นใน กรณีของ electrokinetic treatment
- bender element จะได้รับผลกระทบจากความเค้นในตัวอย่างดิน โดยเฉพาะส่วนกรวยตรงปลาย ตัวอย่างที่เกิดเนื่องจากความขรุขระของ platen
- เพราะว่า bender element ค่อนข้างบาง (0.5-1.0 mm) จึงมีแนวโน้มจะมีการ depolarization ที่ high voltage อย่างไรก็ตามจะขึ้นอยู่กับจำนวนของ working cycle และรูปร่างของคลื่น voltage ที่สูงขึ้น อาจจะต้องใช้ในสถานการณ์ที่มี signal attenuation มาก เช่นในกรณีของ soft soil หรือ stiff soil ที่มี ระยะเดินทางยาว

iv) Function generator

function generator ที่ใช้เป็นแบบ Agilent 33220A เพื่อสร้างคลื่นรูป sine ให้กับ transmitting bender element โดย function generator สามารถสร้างคลื่นที่มีความถี่ถึง 5 MHz

v) Oscilloscope

oscilloscope ใช้แบบ Agilent 3000 series receiver bender element จะต่อกับ oscilloscope โดยรับคลื่นที่วิ่งผ่านตัวอย่างจาก transmitting bender element oscilloscope จะต่อเชื่อมกับ microcomputer ผ่าน USB port เพื่อการควบคุมและส่งถ่ายข้อมูล

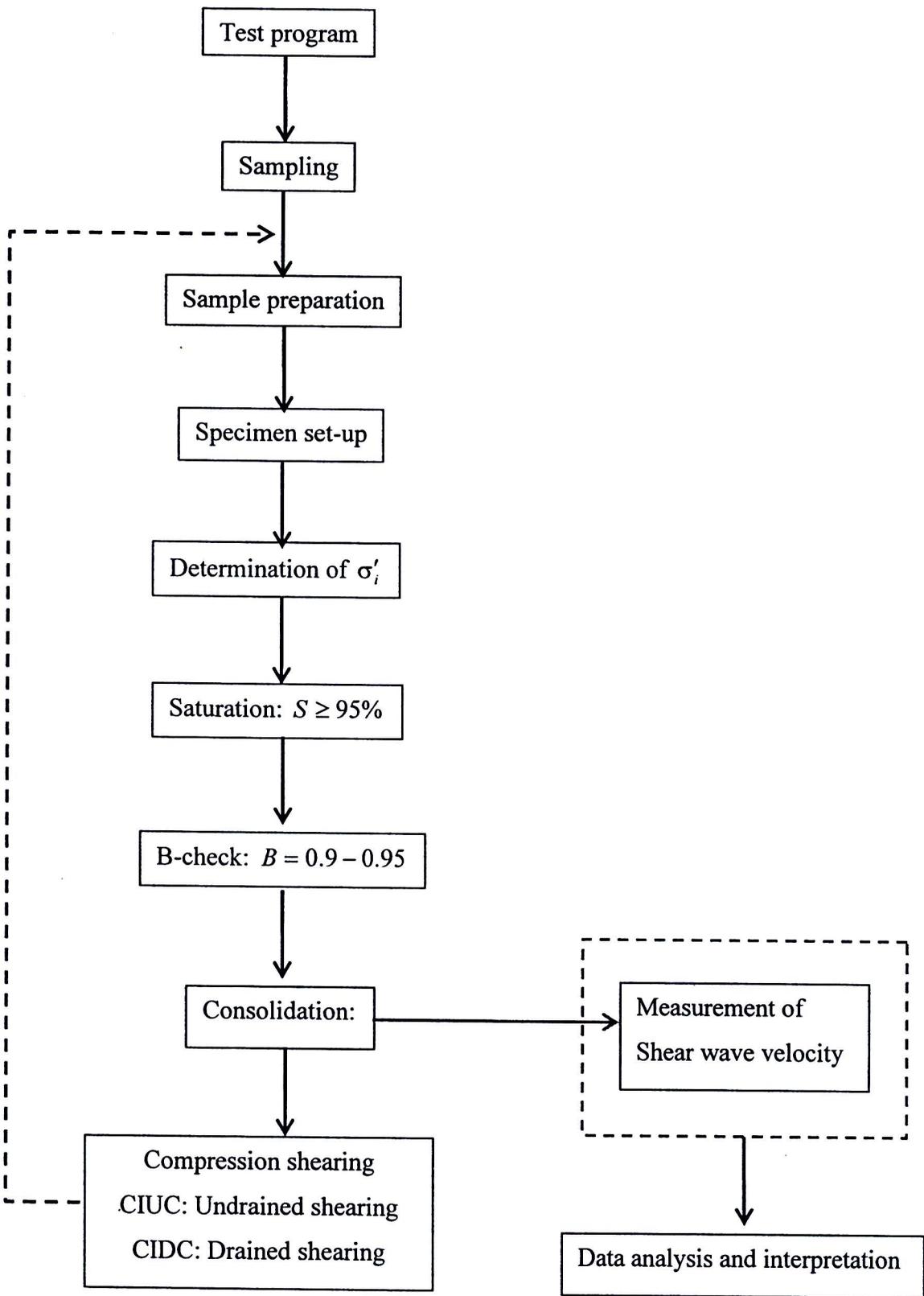
3.4 แผนการทดลอง triaxial

แผนการทดลอง triaxial ถูกออกแบบเพื่อศึกษาพฤติกรรม stress-strain ของ Bangkok Clay ที่ small-strain levels โดยการใช้ local strain measurement และ bender element ร่วมด้วย แผนการทดลองต้องการศึกษาผลกระทบของ non-linearity และ anisotropy ต่อพฤติกรรม stress-strain ของ Bangkok Clay ดังนั้นจะทำการทดลองทั้ง isotropically consolidated undrained compression (CIUC) และ isotropically consolidated drained compression (CIDC) กับตัวอย่างดินที่ตัดในแนวตั้งและในแนวนอนโดยมีการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง แผนการทดลอง triaxial ได้สรุปในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 แผนการทดลอง triaxial

Test No.	Description	Specimen orientation
UV-1	CIUC	Vertical direction
UV-2	CIUC	Vertical direction
UV-3	CIUC	Vertical direction
UV-4	CIUC	Vertical direction
UH-1	CIUC	Horizontal direction
UH-2	CIUC	Horizontal direction
UH-3	CIUC	Horizontal direction
UH-4	CIUC	Horizontal direction
DV-1	CIDC	Vertical direction
DV-2	CIDC	Vertical direction
DV-3	CIDC	Vertical direction
DV-4	CIDC	Vertical direction
DH-1	CIDC	Horizontal direction
DH-2	CIDC	Horizontal direction
DH-3	CIDC	Horizontal direction
DH-4	CIDC	Horizontal direction

วิธีการทดลอง triaxial ได้แสดงใน flowchart ในรูปที่ 3-10 วิธีการทดลองของแต่ละขั้นตอนได้อธิบายในหัวข้อต่อไป



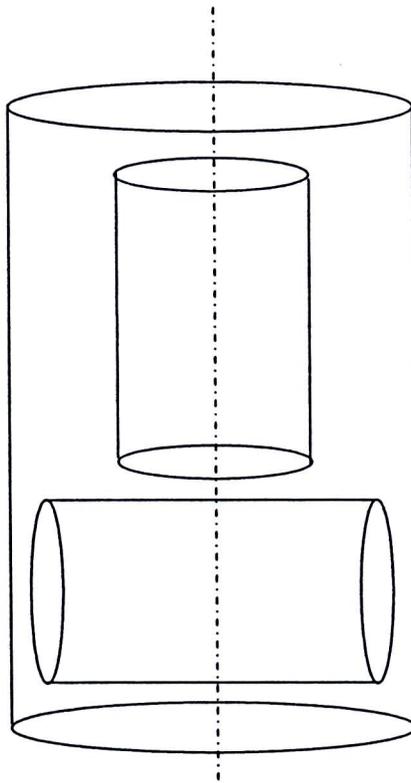
รูปที่ 3-10 วิธีการทดลอง triaxial

3.4.1 Sampling

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลอง triaxial คือ undisturbed Bangkok Clay จากพื้นที่รามาแห่งที่ความลึก 10-14.5 ม ตัวอย่าง undisturbed นี้ถูกเก็บโดย piston sampler ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.5 ซม (5 นิ้ว) ตัวอย่างจะถูกเคลือบด้วย wax และเก็บรักษาก่อนการทดลอง

3.4.2 การเตรียมตัวอย่าง

หลังจากที่เอาชั้น wax และ cling-film ออกจากตัวอย่างดินแล้วจะทำการตรวจสอบเพื่อคุณภาพความเหมาะสมสำหรับการทดสอบ ถ้ามีสิ่งผิดปกติกับตัวอย่างดิน เช่น รอยแตก จะไม่ใช่ตัวอย่างดินนั้น นอกจากนี้ส่วนหัวท้ายของตัวอย่างจะถูกตัดให้เรียบก่อนจะวางลงใน soil lathe ตัวอย่างดินจะถูกตัดให้ได้ขนาดโดย wire saw ให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยมีตัวอย่างดิน 2 ชนิด คือ ตัวอย่างในแนวตั้งและตัวอย่างในแนวนอน ความสูงของตัวอย่างดินจะประมาณ 100 มม ภาพร่างของตัวอย่างนี้แสดงในรูปที่ 3-11 เศษดินที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างจะนำไปใช้ในการหา moisture content



รูปที่ 3-11 ภาพร่างของตัวอย่างในแนวตั้งและแนวนอน

3.4.3 การติดตั้งตัวอย่าง

ตัวอย่างดินจะถูกติดตั้งที่ฐานของเครื่องมือ triaxial โดยวางหินพูนไว้ที่ปลายทั้งสองด้านเพื่อช่วยการชุ่มน้ำ bender element จะถูกดันเข้าไปในตัวอย่างที่ปลายทั้งสองด้าน และเพื่อลดการรบกวนตัวอย่างดินจาก

การดัน bender element เข้าไปจะทำช่องเล็กๆ ไว้ที่ตัวอย่างก่อน โดยใช้มีดคม หลังจากนั้นจะครอบตัวอย่างด้วย rubber membrane รอบๆ top cap และ base pedestal จะทาด้วย silicon grease เพื่อป้องกันการรั่วซึมก่อนจะใช้ O-ring วางทับ

สุดท้าย triaxial cell chamber จะถูกประกอบและเติมด้วย deaired water ระหว่างการติดตั้งตัวอย่างดินจะปิดวาล์วจากระบบ back pressure เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างดินคุดน้ำเข้าไปและบวมตัว

3.4.4 Saturation

มีการใช้ back pressure 200 kPa เพื่อให้ตัวอย่างดิน fully saturated โดยใช้เวลาในกระบวนการ saturation ประมาณ 24 ชั่วโมง การศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับการ saturation ของดินโดยใช้ back pressure ได้อธิบายโดย Black and Lee (1973) ในระหว่างกระบวนการ saturation จะเปิด drainage valve ไปสู่ตัวอย่างดิน การ full saturation ของตัวอย่างดินเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อป้องกันความผิดพลาดในการวัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของตัวอย่างดิน

หลังจากกระบวนการ saturation สมบูรณ์จะมีการวัดค่า Skempton B-value (Skempton, 1954) โดยพบว่าจะมีค่าประมาณ 0.90-0.95 ซึ่งตรงกับ degree of saturation ที่ 100% สำหรับ soft ถึง stiff clay (Black and Lee, 1973)

3.4.5 Isotropic consolidation

อัตราการเพิ่มแรงระหว่างการทดลอง constant-rate-of-stress consolidation คือ 1 kPa/20 minutes เพื่อให้ fully drainage ระหว่างนั้นน้ำจะไหลออกจากตัวอย่างดินผ่าน drainage valve ที่ด้านล่างและจะวัดค่า excess pore pressure จาก pore pressure transducer ที่ด้านบนของตัวอย่างดินเพื่อตรวจสอบ fully drainage

นอกจากนี้ระหว่างการ isotropic consolidation จะมีการวัด shear wave velocity ด้วย bender element เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง small-strain shear modulus และ consolidation stress

3.4.6 Rest period

เพื่อที่จะลดผลกระทบของ recent stress history จะทิ้งตัวอย่างดินไว้นานกว่า 24 ชั่วโมงก่อนการเลื่อน

3.4.7 Compression shearing

ในงานวิจัยนี้จะเลื่อนตัวอย่างดินทั้งแบบไม่ระบายน้ำและระบายน้ำ ซึ่งทั้งสองแบบจะเป็นการเพิ่มแรงในแนวแกนแบบ strain-controlled และควบคุม cell pressure ให้คงที่

สำหรับการเลื่อนแบบไม่ระบายน้ำจะใช้ external strain rate เท่ากับ 0.15 มม/ชม และวัดค่า excess pore pressure ที่เกิดขึ้น สำหรับการเลื่อนแบบระบายน้ำจะใช้ external strain rate เท่ากับ 0.02 มม/ชม และอนุญาตให้น้ำไหลเข้า/ออกจากตัวอย่างดินผ่าน drainage valve และวัดค่า excess pore pressure ที่เกิดขึ้น

3.4.8 การเก็บข้อมูล

ระหว่างการทดลอง triaxial ผลการอ่านค่าจาก transducer ทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ กระบวนการ data logging จะสำคัญมากสำหรับการวัดค่าที่ small strain ระหว่างการเริ่มต้น compression shearing ในช่วงนี้ข้อมูลจะถูกเก็บด้วยความถี่ที่บ่อยทุกๆ 15 และ 30 วินาทีสำหรับการเงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำและระบายน้ำตามลำดับ ข้อมูลที่อ่านในแต่ละชุดข้อมูลมีดังนี้

- เวลา
- Axial load
- Cell pressure
- Pore water pressure
- Back pressure
- Volume change
- Local axial displacement
- Local radial displacement
- External axial displacement
- Proving ring

ลักษณะของ transducer ทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้สรุปในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ลักษณะของ transducer ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Channel	Transducers	Capacity	Vin (V)	Vout	Gain No.	Offset	Calibration factor	Resolution
1	Submersible load cell	3 kN	+5/-5	0 to -10 V	1	0	-0.051904 kN/V	5.894×10^{-4} kN
2	External LVDT	5 cm	+5/-5	0 to 10 V	3	0	5.486 mm/V	6.679×10^{-2} mm
3	Cell pressure transducer	1500 kPa	+5/-5	0 to 143 mV	2	0	-124.050570 kPa/V	0.706 kPa
4	Pore pressure transducer	700 kPa	+5/-5	0 to 143 mV	1	0	-51.020386 kPa/V	0.581 kPa
5	Back pressure transducer	1000 kPa	+5/-5	0 to 143 mV	1	1	-48.490658 kPa/V	0.575 kPa
6	Volume change transducer	60 cm ³	+5/-5	0 to 1.25 V	4	0	39.373 cm ³ /V	12.016 mm ³
7	Local LVDT 1	10 mm	outside	±10 V	1	0	0.473061 mm/V	1.216×10^{-3} mm
8	Local LVDT 2	10 mm	outside	±10 V	1	0	0.437756 mm/V	1.213×10^{-3} mm
9	Proximity transducer 1	5 mm	outside	0 to 5 V	1	0	0.942 mm/V	1.150×10^{-3} mm
10	Proximity transducer 2	5 mm	outside	0 to 5 V	1	0	0.957 mm/V	1.168×10^{-3} mm
11	Proving ring	2 kN	+5/-5	0 to 2 V	4	0	-0.775 kN/V	2.365×10^{-4} kN