สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความสมบูรณ์ของเครื่องมือทดสอบการเฉือนแบบตรง และศึกษาถึงข้อดี-ข้อจำกัดของเครื่องมือการเฉือนแบบตรงในการนำมาทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม ด้านพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด-กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว โดยใช้เครื่องมือของ Geonor การทดสอบใช้วิธี Recompression และพิจารณาค่าอัตราส่วนการยุบอัดแน่นเกินตัวเท่ากับ 1 ขั้นตอนการทดสอบการเฉือนแบบตรงแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ ขั้นตอนการยุบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) และขั้นตอนการกระทำแรงเฉือนกับตัวอย่างดิน (Shearing) สรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการยุบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ข้อควรระวังในการทดสอบ คือ
   - 1.1 เครื่องมือทดสอบการเฉือนแบบตรง ต้องปฏิบัติดังนี้
     - 1.1.1 ต้องล๊อค Clamp ที่อยู่ใกล้กับตัวอย่างดินก่อนการทดสอบ
     - 1.1.2 คลายล๊อค Clamp ที่อยู่ไกลกับตัวอย่างดินก่อนการทดสอบ
     - 1.1.3 คลายล๊อค Top cap ของ Top Filter Holder
     - 1.1.4 ต่อสายระบายน้ำ (Drainages Hose) 4 เส้นที่ด้านบนและล่าง
     - 1.1.5 ตรวจสอบระยะเริ่มต้น ก่อนการทดสอบเท่ากับ 49 มิลลิเมตร
     - 1.1.6 ตั้งค่าอ่านเริ่มต้นของ Dial Gauge ในแนวดิ่งให้เท่ากับศูนย์
   - 1.2 กล่องเครื่องมือควบคุมการทดสอบ (Comparator) ต้องปฏิบัติดังนี้
     - 1.2.1 หมุนปุ่มปรับความเร็วมอร์เตอร์ในแนวดิ่งไปที่ค่าที่ต้องการ เช่น "010"
     - 1.2.2 บิดปุ่มควบคุมสีดำไปที่หมายเลข 3 สำหรับใช้ควบคุมตลอดการทดสอบ
     - 1.2.3 ปรับค่าแรงดันทางไฟฟ้า (ค่าสูง และค่าต่ำ) ตาม Increment Load ที่ต้องการ (ดูจากตารางที่คำนวณใน Excel) ระวังเครื่องหมายบวก-ลบ
     - 1.2.4 ควบคุม Vertical Load โดยการ Flip ปุ่มควบคุมไปทางซ้ายมือ
   - 1.3 อื่นๆ ต้องปฏิบัติดังนี้
     - 1.3.1 เปิด Burette วาล์ว เพื่อให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation)
     - 1.3.2 เปิดคอมพิวเตอร์ โปรแกรม "DSSPRO3.2" เพื่อบันทึกข้อมูล
     - 1.3.3 การขึ้น Load ครั้งต่อไปต้องแน่ใจว่าถึง EOP แล้ว (ดู ASTM 2435)

2. ขั้นตอนการกระทำแรงเฉือน (Shearing) ตัวอย่างดิน ข้อควรระวังในการทดสอบ คือ

2.1 เครื่องมือทดสอบการเฉือนแบบตรง ต้องปฏิบัติดังนี้

2.1.1 คลายล๊อค Clamp ที่อยู่ใกล้กับตัวอย่างดินก่อนการทดสอบ

2.1.2 ล๊อค Clamp ที่อยู่ไกลกับตัวอย่างดินก่อนการทดสอบ

2.1.3 ล๊อค Top cap ของ Top Filter Holder โดยค่อยๆ ขัน ไม่ให้รบกวน ต.ย.

2.1.4 สายระบายน้ำ (Drainages Hose) 4 เส้นที่ด้านบนและล่าง ยังต่ออยู่

2.1.5 ตรวจสอบระยะค่าเริ่มต้น ก่อนการทดสอบเท่ากับ 49 มิลลิเมตร

2.1.6 อ่านค่าของ Dial Guage ในแนวดิ่ง ก่อนการ Shearing

2.1.7 ตั้งค่าอ่านเริ่มต้นของ Dial Gauge ในแนวนอน เท่ากับศูนย์

2.2 กล่องเครื่องมือควบคุมการทดสอบในแนวดิ่ง (ด้านขวามือ) ต้องปฏิบัติดังนี้

2.2.1 ปรับค่าแรงดันทางไฟฟ้า(ค่าสูงและค่าต่ำ) ของ Vertical Displacement ให้เท่ากับค่าที่อ่านได้จากหน้าจอในปัจจุบัน (ตัวเลขสีแดง)

2.2.2 ปุ่มปรับความเร็วมอร์เตอร์ในแนวดิ่ง ใช้เท่าเดิม เช่น "010"

2.2.3 บิดปุ่มควบคุมสีดำไปที่หมายเลข 3 สำหรับควบคุมตลอดการทดสอบ

2.2.4 ควบคุม Vertical Displacement โดยการ Flip ปุ่มควบคุมไปทางขวามือ เพื่อทำให้ความสูงของตัวอย่างคงที่ ขณะ Undrained Shearing

2.3 กล่องเครื่องมือควบคุมการทดสอบในแนวนอน (ด้านซ้ายมือ) ต้องปฏิบัติดังนี้

2.3.1 หมุนปุ่มปรับความเร็วมอร์เตอร์ในแนวนอนไปที่ค่าที่ต้องการ เช่น "067"

2.3.2 บิดปุ่มควบคุมสีดำไปที่หมายเลข 2 สำหรับควบคุมตลอดการทดสอบ

2.3.3 กระทำแรงเฉือนตัวอย่าง (Shearing) โดยการ Flip ปุ่มควบคุมมอร์เตอร์ในแนวนอนขึ้นด้านบน

2.3.4 สังเกตค่า Horizontal Load ที่หน้าจอ (ตัวเลขสีแดง) ต้องเพิ่มขึ้น ถ้าไม่แสดงว่าการล๊อค Clamp ที่อยู่ไกลกับตัวอย่างดินก่อนการทดสอบไม่แน่น ให้ทำการล๊อคใหม่อีกครั้ง แล้วตั้งค่าศูนย์ต่างๆ ใหม่

2.4 อื่นๆ ต้องปฏิบัติดังนี้

2.4.1 ปิด Burette วาล์ว เพื่อให้เกิดการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

2.4.2 เปิดคอมพิวเตอร์ โปรแกรม "DSSPRO3.2" เพื่อบันทึกข้อมูล โดย Save เป็นไฟล์ใหม่แยกจากขั้นตอนการยุบอัดตัวคายน้ำ

2.4.3 ความเร็วในการเฉือนเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ของความสูงตัวอย่างต่อชั่วโมง

2.4.4 เฉือนตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งตัวอย่างดินวิบัติ หรือ ค่า Shear Strain ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ปกติใช้เวลาประมาณ 4-5 ชั่วโมงต่อการทดสอบ

5.2 ข้อดี และข้อจำกัดของเครื่องมือการเฉือนแบบตรง

วิธีการทดสอบการเฉือนแบบตรงมีความสำคัญในทางปฏิบัติ เมื่อลองเปรียบเทียบกับการทดสอบแรงเฉือนโดยใช้อุปกรณ์ทดสอบดินชนิดอื่นๆ รวมถึงในงานออกแบบ จากประสบการณ์ที่ผ่านมามากกว่า 20 ปี ในต่างประเทศ ที่มีการทดสอบโดยใช้เครื่องมือการเฉือนแบบตรงนี้ พร้อมกันกับปัญหาการออกแบบและการก่อสร้าง เช่น ดินคันทาง, การสร้างแท็งก์น้ำ ฯลฯ บนดินเหนียวอ่อน ขอแนะนำว่าให้ใช้วิธีการทดสอบแบบแรงเฉือนในระนาบโดยตรงอย่างง่าย

ในดินเหนียว การทดสอบ DSS มักจะทำชนิด Consolidated Undrain ซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยน σ_v ระหว่างที่หน่วยแรงเฉือนกระทำต่อตัวอย่างเพื่อไม่ให้มีแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure, Δu) และการเปลี่ยนแปลงในปริมาตร ค่า τ_h สูงสุด มักจะถูกกำหนดให้เท่ากับ S_u เมื่อการทดสอบชนิดนี้ ใช้ σ'_{vc} (Effective Vertical Consolidation Stress) ในช่วงอัดตัวคายน้ำเท่ากับ σ'_{vo} ค่า S_u นี้ ขณะนี้เชื่อกันว่าเป็นค่าที่ใช้ได้ในการทำการวิเคราะห์ทางด้านเสถียรภาพของดินเหนียว (Jumiokoski et al. 1985; Ladd and Foott 1974) และดีกว่า S_u ที่ได้จากวิธีการทดสอบ Unconsolidated Undrained ที่มีความไม่แน่นอนเนื่องจากผลของตัวอย่างถูกรบกวน (Sample Disturbance)

ค่า σ_n ที่กระทำต่อตัวอย่างในการทดสอบสามารถเปลี่ยนแปลงได้ และการทดสอบไม่มีเครื่องมือควบคุมให้น้ำไหลออกจากตัวอย่างได้เช่นเดียวกันกับ Direct Shear ในการทดสอบที่ไม่ต้องการให้น้ำไหลออกจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ จึงจำเป็นต้องทำโดยเปลี่ยนค่า σ_n เพื่อให้ปริมาตรหรือความสูงของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการทดสอบ การเปลี่ยนแปลง σ_n ที่ความเครียดหนึ่งๆ จะ เท่ากับแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) ที่เกิดขึ้น เพราะการเปลี่ยน σ_n ทำให้ไม่มี Δu เกิดขึ้นในตัวอย่าง ดังนั้นในการทดสอบชนิดนี้ ถึงแม้ว่าจะอยู่ในสภาพที่ไม่ระบายน้ำ ค่า Δu ก็จะไม่เกิดขึ้นในตัวอย่าง แต่ค่า Δu ที่ควรจะเกิดขึ้น เนื่องจากมี τ_h มากระทำ และสามารถคำนวณได้แต่จะให้ผลไม่ดี เพราะ σ_n ต้องมีการเปลี่ยนแปลง ส่วนการทดสอบแบบระบายน้ำ จะใช้ σ_n คงที่ ในการทดสอบนี้ จะมีการวัดทั้งการเคลื่อนตัวทั้งในแนวนอน และในแนวดิ่ง

5.2.1 ข้อดีของการทดสอบ เช่น

1.) ระหว่างการอัดตัวคายน้ำ(Consolidation) ก่อนกระทำแรงเฉือน สามารถแสดงเส้นโค้งการอัดตัว (Compression Curve, C_c) และสัมประสิทธิ์ของข้อมูลการอัดตัวคายน้ำมากกว่าจากการทดสอบโดยวิธีการอัดตัวคายน้ำแบบปกติ เช่น K_0 ดังนั้น เมื่อเริ่มกระทำแรงเฉือนดิน สามารถทำได้เหมือนสภาวะสมดุลสถิตย์ (Geostatic Stress State)

2.) การวัดหาค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในแนวราบ $(\tau_h)_{max}$ จะให้ค่าที่น่าเชื่อถือในการประมาณการค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) สำหรับใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่ระบายน้ำและการวิเคราะห์ความสามารถในการรับน้ำหนัก

3.) การวัดหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Young's Modulus, E_u) จะแสดงความเป็นไปได้ในการเคลื่อนตัวในสนาม (In Situ Displacements) ระหว่างการเสียรูปจากการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ(Undrained Shear Deformations)

4.) การทดสอบกระทำได้ง่ายและมีแนวโน้มที่จะพบปัญหาในการทดสอบน้อยโดยเฉพาะการทดสอบดินเหนียวขยายตัวได้ (Expansive Soils) อีกประการหนึ่งคือ การทดสอบจะใช้ปริมาณดินที่น้อยกว่าและใช้ตัวอย่างดินที่มีความสูงน้อยกว่า คือใช้ความสูงของตัวอย่างทดสอบเพียง 16 มิลลิเมตร เท่านั้น เมื่อเทียบกับการทดสอบแรงอัด 3 แกน หรือการทดสอบด้วยอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ

5.) การทดสอบสามารถกระทำได้ทั้งจากดินเหนียวที่เก็บจากในธรรมชาติ ด้วยกระบอกบาง (Undisturbed Sample) หรือทดสอบกับดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstituted Soil) หรือแม้กระทั่งการทดสอบตัวอย่างทรายก็สามารถทำได้ แต่ต้องใช้เครื่องมือเตรียมตัวอย่างเพิ่มพิเศษ จากที่มีอยู่

6.) การใช้แผ่นยางเสริมลวดเหล็ก (Wire Reinforced Rubber Membrane) ทำให้ขณะเฉือนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ดินเกิดการเสียรูปแบบ Simple Shear และมีความเค้น-ความเครียด สม่ำเสมอตลอดทั้งตัวอย่าง

7.) การใช้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติเพื่อควบคุมให้ความสูงของตัวอย่างคงที่ ทำให้เกิดการเฉือนตัวอย่างดินในสภาพไม่ระบายน้ำ

8.) การแก้ปัญหาเรื่องการรบกวนตัวอย่างดิน (Sample Disturbance) กรณีใช้ตัวอย่างดินเหนียวแบบไม่ถูกรบกวน (Undisturbed Sample) สามารถทำได้โดยใช้เทคนิค SHANSEP Method ในขั้นตอนการยุบอัดตัวคายน้ำ

9.) การทดสอบสามารถเก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ และสามารถแสดงผลการทดสอบแบบ Real Time ทำให้ลดความยุ่งยากในการจดข้อมูล

5.2.2 **ข้อจำกัดของการทดสอบ** เช่น

1.) ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินก่อนการทดสอบ ยุ่งยาก สลับซับซ้อน ต้องใช้ความปราณีต โดยเฉพาะช่วงการใส่แผ่นยางเสริมลวดเหล็กเพื่อหุ้มตัวอย่างดิน (ดูขั้นตอนที่ 24 ในภาคผนวก ค วิธีการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบด้วยเครื่องมือ Geonor DSS)

2.) แผ่นยางเสริมลวดเหล็กที่ใช้ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ยังไม่สามารถผลิตได้ในประเทศ ทำให้มีราคาแพงมาก ราคาเริ่มต้นประมาณ 20,000 บาท ต่อชิ้น จำนวนครั้งของการใช้งานต่อ 1 ชิ้น โดยประมาณ 10 ครั้งขึ้นไป แต่ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ทดสอบอีกด้วย

3.) แผ่นยางเสริมลวดเหล็กที่ใช้ มีความบอบบางมาก ขณะทำการหุ้มตัวอย่างดิน หรือเอาออกหลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นแล้ว ต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก เนื่องจากอาจจะขาดเสียหายได้ ซึ่งถ้าขาดแล้ว ไม่สามารถนำมาใช้งานได้อีกต่อไป

4.) การเก็บข้อมูลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์แบบอัตโนมัติ กรณีที่มีไฟกระชาก หรือกระตุกอาจจะส่งผลต่อการเก็บข้อมูลไม่ต่อเนื่องได้ ทั้งนี้ควรจะต้องมีการเตรียมอุปกรณ์สำรองไฟฟ้าฉุกเฉิน หรือ UPS ให้เพียงพอ

5.) อุปกรณ์ทุกอย่างโดยเฉพาะอุปกรณ์ในการเตรียมดัวอย่างดิน มีเพียง 1 ชุด เท่านั้น ดังนั้นขณะทดสอบ ต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก เนื่องจากถ้าชิ้นใดชิ้นหนึ่งเสียหาย จะทำให้ไม่สามารถทำวิจัยต่อได้ ต้องรอเครื่องมือใหม่จากต่างประเทศ

5.3 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม

สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาการใช้เครื่องมือในเบื้องต้น ยังไม่ได้มีการศึกษาพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด-กำลังรับแรงเฉือนในเชิงลึก ซึ่งสามารถทำได้ทั้งแบบ Monotonic หรือแบบ Cyclic ดังนั้นผู้ที่ต้องการทำการศึกษาวิจัย โดยใช้เครื่องมือนี้ต่อไป มีข้อแนะนำเบื้องต้นในการทดสอบ ดังแสดงได้ในตารางที่ 5.1

จากตารางที่ 5.1 ในกรณีที่เป็นการทดสอบแบบ SHANSEP Method หรือ Cyclic Load ค่า OCR สามารถคำนวณได้จาก OCR = Maximum Stress/Preshear Stress หน่วย kPa ส่วนในกรณี Recompression Method จะต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือ ค่า Maximum Stress เท่ากับ 100 kPa (เนื่องจากในตารางเป็นดิน Reconstituted Soils ที่กำหนดค่า σ'_p ไว้แล้ว) ดังนั้นค่า OCR กรณีวิธี Recompression Method สามารถคำนวณได้จาก OCR = 100/ Preshear Stress หน่วย kPa เช่น การทดสอบ DSS-14 ค่า OCR = 100/25 = 4.0 เป็นต้น

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างโปรแกรมการทดสอบดินเหนียวที่แนะนำ (สำหรับ ระดับปริญญาโท)

DSS No.	ชนิดของดินที่ใช้	Preshear Stress (kPa)	Maximum Stress (kPa)	OCR	หมายเหตุ	ลำดับการทดสอบ
1	ดินเหนียวกรุงเทพฯ	150	150	1.0	SHANSEP	6th Test
2	ดินเหนียวกรุงเทพฯ	150	150	1.0	SHANSEP	
3	ดินเหนียวกรุงเทพฯ	75	150	2.0	SHANSEP	
4	ดินเหนียวกรุงเทพฯ	38	150	3.9	SHANSEP	
5	ดินเหนียวกรุงเทพฯ	20	150	7.5	SHANSEP	
6	Reconstituted Soils	150	150	1.0	SHANSEP	2nd Test
7	Reconstituted Soils	200	200	1.0	SHANSEP	
8	Reconstituted Soils	75	150	2.0	SHANSEP	4th Test
9	Reconstituted Soils	38	150	3.9	SHANSEP	
10	Reconstituted Soils	100	100	1.0	SHANSEP	3rd Test
11	Reconstituted Soils	200	200	1.0	SHANSEP	
12	Reconstituted Soils	300	300	1.0	SHANSEP	
13	Reconstituted Soils	400	400	1.0	SHANSEP	
14	Reconstituted Soils	25	25	4.0	Recompression	1st Test
15	Reconstituted Soils	50	50	2.0	Recompression	
16	Reconstituted Soils	100	100	1.0	Recompression	
17	Reconstituted Soils	150	150	1.0	Cyclic	5th Test
18	Reconstituted Soils	300	300	1.0	Cyclic	

หมายเหตุ Reconstituted Soils (Max. Stress = 100 kPa ~ 1 ksc)

นอกจากตัวอย่างโปรแกรมการทดสอบที่แนะนำแล้ว ยังสามารถศึกษาเพิ่มเติมในส่วนอีกได้มากมาย ยกตัวอย่างเช่น

1) ศึกษาผลของอัตราเร็วจากการเฉือน หรือ Strain Rate Effect ที่เร็วขึ้นหรือช้าลง เพื่อดูค่ากำลังรับแรงเฉือน และพฤติกรรมของดิน

2) ศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการทดสอบแบบ Cyclic ซึ่งมีประโยชน์มากในการศึกษาด้านวิศวกรรมแผ่นดินไหว (Earthquake Engineering)

3) ศึกษาเพิ่มเติมด้าน Stage Construction ขั้นตอนการทดสอบ มีดังนี้คือ

3.1) Consolidation ตัวอย่างจนถึงค่า Max. Stress (kPa) เช่น 100 kPa

3.2) ปิดวาล์วของ Burette เพื่อทำการทดสอบแบบ Undrained Test

3.3) Shearing ตัวอย่างดิน โดยควบคุม Vertical Load จากนั้น Shear ไปจนกระทั่งถึงค่าประมาณ ครึ่งหนึ่งของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินสูงสุดที่ได้จากวิธี Static เช่น ถ้าทดสอบจากวิธี Static ได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 26 kPa ในขั้นตอนนี้ให้ทำการเฉือนตัวอย่างไปจนกระทั่งถึง 26/2 = 13 kPa แล้วหยุด Shear ทันที

3.4) เปิดวาล์วของ Burette โดยไม่ควบคุม Vertical Load คือ ต้องการทำการ Consolidation ตัวอย่างดินอีกครั้ง ปล่อยให้กระบวนการ Consolidation สิ้นสุดจนกระทั่งถึง End of Primary Consolidation (E.O.P.)

3.5) ปิดวาล์วของ Burette อีกครั้ง เพื่อทำการทดสอบแบบ Undrained Test พร้อมกับควบคุม Vertical Load แล้ว Shear ตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างดินวิบัติ

4) ศึกษาพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด-กำลังรับแรงเฉือน ของตัวอย่างทราย (Sand) โดยทำการทดสอบชนิด Drained Test ซึ่งจะมีประโยชน์มากในการศึกษาพฤติกรรมการเกิด Liquefaction ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว