

การพัฒนาการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่และพฤติกรรมการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ของดินเหนียวกรุงเทพฯ สร้างใหม่

Development of a Large Direct Simple Shear Apparatus and Undrained Shear Strength Behavior of a Reconstituted Bangkok Clay

อธิจิต สุขปัญญา¹ และ อภินิติ โชติสังกาศ²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

E-mail: ¹ atijit@hotmail.com, ² fengatj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการพัฒนาเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ เพื่อทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือน ความเค้น และความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นของตัวอย่างซึ่งสามารถใช้คำนวณหาค่าโมดูลัสเฉือนของดินได้โดยตรง โดยตัวอย่างดินที่ทดสอบสามารถมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ใหญ่สุดถึง 50 ซม. และสูงได้ถึง 16.5 ซม. ระบบทดสอบประกอบด้วยระบบควบคุมแรงดันลมสำหรับให้น้ำหนักกดทับในแนวตั้ง มอเตอร์ปรับรอบสำหรับควบคุมการเคลื่อนตัวในแนวราบ และเซ็นเซอร์สำหรับวัดการเคลื่อนตัว แรงดันน้ำ และแรงเฉือนที่เกิดขึ้น เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ได้นำไปทดสอบตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ สร้างใหม่ ที่ความชื้น 1.25 เท่าของค่าพิกัดเหลว และอัดตัวคายน้ำที่ค่าน้ำหนักกดทับต่างกันในช่วง 6-24 กิโลปาสกาล ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่า เมื่อน้ำหนักกดทับเพิ่มมากขึ้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและความเครียดเฉือนที่จุดพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่จะเพิ่มมากขึ้น ขณะที่โมดูลัสเฉือนมีค่าลดลงตามความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่มีค่ามุมเสียดทานในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล เท่ากับ 21.8 องศา และค่ามุมเสียดทานแบบหน่วยแรงรวม เท่ากับ 15.6 องศา

คำสำคัญ: ดินเหนียวกรุงเทพฯ สร้างใหม่, การทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย, กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

Abstract

This paper is intended to present development of a large direct simple shear apparatus which allows determination of shear strength, stress-strain and consequently the shear modulus of soil sample during test. The soil samples which can be tested are of the size up to 50 cm in diameter and up to 16.5 cm in height. The test system consists of air pressure controller for vertical load, a variable gear motor for controlling of horizontal displacement and sensors for measuring pressure and shear displacement. The apparatus has been used to test the soft Bangkok clay reconstituted at a moisture content of 1.25 times the Liquid Limit and consolidated at a pressure range of 6-24 kPa. The test results showed that with increasing overburden pressure, the undrained shear strength and shear strain at failure of sample increased. The shear modulus also decreased as the shear strain increased. The

reconstituted soft Bangkok clay exhibited an effective friction angle of 21.8° and a total friction angle of 15.6°.

Keywords: Reconstituted clay, Direct Simple Shear Test, Undrained Shear Strength

1. คำนำ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินหลากหลายวิธี แบ่งออกเป็นการทดสอบในสนาม (อาทิ STP, Field Van Shear Test, CPT) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (อาทิ Unconfined Compression Test, Direct Shear Test, และ Triaxial Test) แต่ผลการทดสอบจะสามารถศึกษาพฤติกรรมแต่ละด้านต่างๆและมีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป การทดสอบในสนามข้อดีคือสภาพของดินจะถูกรบกวนน้อยที่สุด แต่ก็เป็นที่ยากที่จะประเมินการเสีรูปหรือแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นได้ในชั้นดินได้ ส่วนการทดสอบห้องปฏิบัติการนั้นสามารถตรวจวัดทั้งค่ากำลังรับแรงเฉือน, ความเค้นความเครียดและแรงดันน้ำอย่างละเอียดได้ แต่การเจาะสำรวจหรือเก็บตัวอย่างดินมักจะทำให้สภาพดินไม่เหมือนกับอยู่ในสนาม และโดยทั่วไปตัวอย่างที่เก็บได้มักจะมีขนาดเล็ก ทำให้ผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับสภาพชั้นดินในสนาม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการหรือเครื่องมือทดสอบแบบใหม่ขึ้นมา เพื่อแก้ไขและลดข้อจำกัดดังกล่าว

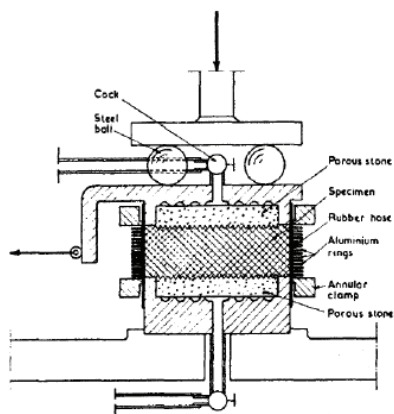
จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้มุ่งไปสู่การคิดค้นประดิษฐ์เครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังเฉือนและการเสีรูปของตัวอย่างดิน รวมถึงสามารถตรวจวัดแรงดันน้ำได้ โดยใช้หลักการทดสอบเฉือนตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Test) และทดสอบตัวอย่างดินที่มีขนาดใหญ่กว่าปกติ และใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างดินแบบสร้างใหม่ (Reconstituted) ซึ่งทำการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันน้ำฝังเข้าไปในเนื้อดิน เพื่อตรวจวัดค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นขณะทดสอบด้วย

2. การพัฒนาวิธีการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายในอดีต

Kjellman (1951) ได้ทำการพัฒนาเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus) โดยใช้ดินตัวอย่างลักษณะทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร และมีความสูง 20 มิลลิเมตร หุ้มด้วยแผ่นยาง (Rubber Membrane) และล้อมรอบด้วยวงแหวนอลูมิเนียม (Aluminium Ring) ดังรูปที่ 1 ตัวอย่างถูกประกบด้วยหินพรุนทั้งด้านบนและด้านล่าง เพื่อช่วยระบายน้ำออกจากตัวอย่างระหว่างขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ คล้ายกับการทดสอบอัดตัวคายน้ำแบบทั่วไป (Oedometer One Dimensional

Compression) ตัวอย่างดินจะถูกเชื่อมจากส่วนบนของตัวอย่างด้วยการรักษาค่าแรงกดหรือค่าความสูงของตัวอย่างให้คงที่ ซึ่งมักจะให้ส่วนฐานรองตัวอย่างทั้งด้านบนและด้านล่างมีลักษณะเป็นพื้นเล็กๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการเลื่อนไถลระหว่างฐานรองกับตัวอย่างดิน เช่น เซอร์วิตแรง (Load Cell) ทั้งแนวตั้งและแนวราบ รวมถึงเซ็นเซอร์วัดการเคลื่อนตัว (LVDT) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจวัดค่าความเค้นในแนวตั้ง, ค่าความเค้นเฉือน, ค่าความเครียดในแนวตั้ง, และค่าความเครียดเฉือนตามลำดับ ข้อดีของเครื่องมือนี้คือ สามารถบังคับให้การเคลื่อนที่ของตัวอย่างดินมีพื้นที่หน้าตัดที่คงที่ (เมื่อเทียบกับการทดสอบการเฉือนตรงแบบธรรมดา) และยังได้ความสม่ำเสมอของความเค้นที่กระจายสู่ตัวอย่างดิน ซึ่งในทางเปรียบเทียบกับ การทดสอบการเฉือนตรงแบบธรรมดา (Direct Shear) นั้น ทิศทางของความเค้นหลัก (Major Principal Stress) นั้นก็คือ น้ำหนักกดทับแนวตั้งในช่วงการอัดตัวคายน้ำ (ความเค้นรองอยู่ในแนวราบ) เมื่อทำการเฉือนตัวอย่าง ปริมาณและทิศทางของความเค้นหลักภายในตัวอย่างจะไม่สม่ำเสมอในระหว่างการเฉือนหรือการเคลื่อนที่

เครื่องมือที่คิดค้นโดย Kjellman ได้รับการพัฒนาต่อยอดโดย Landva แห่งมหาวิทยาลัย Norwegian Geotechnical Institute (NGI) (Bjerrum และ Landva, 1966) ซึ่งคุณลักษณะใหม่ที่สำคัญของเครื่องมือนี้ก็คือ มีการใช้แผ่นยางเสริมแรง (Reinforce Membrane) หุ้มรอบผิวด้านข้างของดินตัวอย่างเพื่อบังคับให้เกิดความคงที่ของพื้นที่หน้าตัด โดยแผ่นยางเสริมแรงนี้ประกอบไปด้วย ลวดที่มีลักษณะเป็นขดเกลียวซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเท่า 0.15 มิลลิเมตร และพื้นเป็น 25 รอบต่อความหนา 1 เซนติเมตร ตัวแผ่นยางเสริมแรงนี้ถูกนำไปใช้กับตัวอย่างดินด้วยวิธีทางสุญญากาศเพื่อห่อหุ้มผิวด้านข้างเพื่อให้เกิดความพอืด ซึ่งจะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะทำให้สามารถทำขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำและรักษาปริมาตรของดินตัวอย่างให้คงที่ระหว่างการเฉือนตัวอย่างได้ โดยเครื่องมือที่พัฒนาโดย NGI นี้ ตัวอย่างจะมีความสูงเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 80 มิลลิเมตร

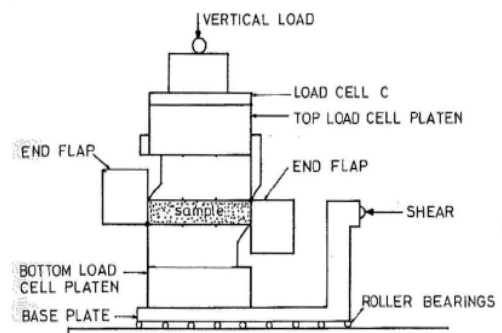


รูปที่ 1 เครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (DDS) ที่คิดค้นโดย Kjellman (1951)

ได้มีการพัฒนาเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายในรูปแบบอื่นๆ ออกมาเพิ่มเติม อย่างเช่น การพัฒนาโดยมหาวิทยาลัย Cambridge University ดังรูปที่ 2 เครื่องมือจะใช้ตัวอย่างดินที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Sample) ที่มีขนาดความกว้าง 60x60 มิลลิเมตรและสูง 20 มิลลิเมตร ได้รับการออกแบบให้ลักษณะด้านข้าง

ของตัวอย่างมีความแตกต่างจากเครื่องมือในรูปแบบเดิม (Roscoe, 1953) คือ ผิวด้านข้างที่สัมผัสกับตัวอย่างดินจะมีความผิดที่น้อยมาก แต่ตัวบริเวณฐานทั้งด้านบนและด้านล่างจะมีความขรุขระ ซึ่งอุปกรณ์การทดสอบนี้ถือเป็นอุปกรณ์ชุดแรกๆ ที่พัฒนาในมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ และผ่านการศึกษามาอย่างถี่ถ้วนโดยนักวิจัยหลายคน

ด้วยที่เครื่องมือทดสอบนี้ไม่สามารถทำการทดสอบการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำได้สมบูรณ์แบบ เนื่องจากไม่มีการใส่ Back Pressure ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำจริงๆ (Full Saturation) ต่อมาจึงมีการทำให้ตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายนี้อยู่ในหม้อที่มีแรงดันน้ำอยู่โดยรอบ ซึ่งพัฒนาโดย Franke (1979) และ Dyvik (1987) โดยจุดประสงค์หลักก็เพื่อทำให้ตัวอย่างดินเกิดการอิ่มตัวด้วยน้ำ และทำให้การวัดค่าแรงดันน้ำในตัวอย่างดินมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2 เครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (DDS) ที่คิดค้นโดย Roscoe (1953)

3. วิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เริ่มโดยการคิดค้นและประดิษฐ์เครื่องมือรวมถึงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ โดยพยายามยึดหลักการตามการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายในมาตรฐาน ASTM D6528 จากนั้นทำการสอบเทียบเครื่องมือตามหลักปฏิบัติพื้นฐาน

ในขั้นตอนเตรียมตัวอย่างดิน จะใช้ดินเหนียวที่ระดับความลึก 3 เมตร ซึ่งเป็นตัวอย่างดินแบบถูกรบกวน เก็บมาจากคลองระบายน้ำ สนามบินสุวรรณภูมิ โดยใช้การเตรียมตัวอย่างแบบดินเหนียวสร้างใหม่ ซึ่งจะทำการอัดตัวคายน้ำตามน้ำหนักกดทับต่างๆ และติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำ เพื่อตรวจสอบค่าแรงดันน้ำส่วนเกินในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ ให้ได้ค่าการระบายมากกว่า 90 % หลังจากนั้นจึงทำการเฉือนตัวอย่างดินพร้อมทั้งตรวจวัดค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้น ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการทำงานวิจัยประกอบด้วย

3.1 การออกแบบเครื่องมือทดสอบ

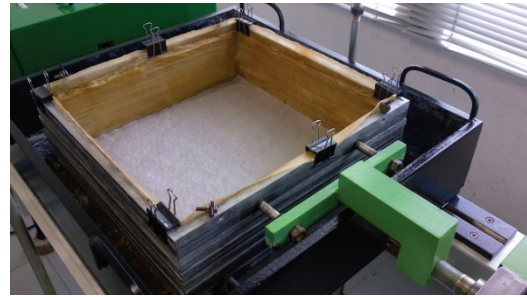
3.1.1 ลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องมือทดสอบจะประกอบไปด้วย โครงสร้างส่วนฐานซึ่งเป็นเหล็กรูปตัวโอวางเป็นคู่ขนาดตลอดความยาวของเครื่องมือโดยมีความยาว 2.0 เมตรวางห่างกันประมาณ 0.6 เมตร ประกอบยึดกับขาตั้งเหล็กทั้งด้านหัวและท้ายซึ่งสูงขึ้นมา 1.1 เมตร ที่ด้านบนของเหล็กรูปตัวโอจะมีชุดแผ่นเหล็กวางสองแผ่นประกบกันโดยมีลูกปืนแทรกอยู่ระหว่างกลางเพื่อเป็นตัวช่วยให้เกิดการเคลื่อนที่ในระหว่างการเฉือนตัวอย่าง ที่ด้านบนชุดของแผ่นเหล็กวางจะมีกระเบเหล็กสำหรับการใส่ตัวอย่างดินและน้ำโดยมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 70 เซนติเมตร ส่วนด้านหน้าของเครื่องมือจะประกอบไป

ด้วยเหล็ก 3 ส่วนซึ่งมีหน้าที่คอยรับแรงในขั้นตอนการฉีดยังมาสู่เซ็นเซอร์วัดแรงในแนวราบ (Horizontal Load Cell) ซึ่งเซ็นเซอร์วัดแรงจะประกอบอยู่กับเหล็กแท่งกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และมีระบบลูกปืนชนิดเคลื่อนที่ในแนวราบช่วยในการลดแรงทานระหว่างผิวสัมผัส ในส่วนระบบคานสำหรับให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินจะประกอบไปด้วยเหล็กแท่งสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มียาว 90 เซนติเมตร 2 ท่อนบนและล่างยึดกับเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร 2 ท่อนที่มีความยาวประมาณ 1.0 เมตร ซึ่งทั้งหมดนี้จะประกอบเข้ากับชุดกระบอกลมดังรูปที่ 3

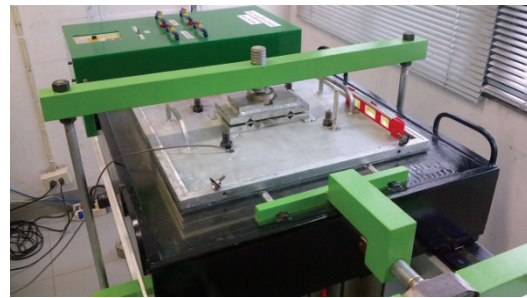


รูปที่ 3 ลักษณะทั่วไปของเครื่องมือทดสอบที่คิดค้นขึ้นมาใหม่

3.1.2 รูปแบบของกล่องฉีดยัง (Shear Box) มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนเหล็กรูปสี่เหลี่ยมเรียงต่อกันเป็นชั้นๆ ทั้งหมด 13 ชั้นตามความสูงของตัวอย่างดิน มีรูปร่างเป็นกรอบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความกว้างและความยาวเท่ากับ 50 เซนติเมตร ใน 2 ชั้นบนสุดมีความหนาของกรอบเท่ากับ 1.9 เซนติเมตร ตรงกลางจะมีกรอบเหล็ก 10 ชั้นที่มีความหนา 0.9 เซนติเมตร ส่วนชั้นล่างสุดจะมี 1 ชั้นซึ่งมีความหนาเช่นเดียวกับชั้นบน ในส่วนของชั้นบนจะประกอบอยู่กับเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร เพื่อถ่ายแรงไปสู่ Horizontal Load Cell ในขั้นตอนการฉีดยังตัวอย่าง ในระหว่างของแต่ละชั้นของกรอบเหล็กนั้นจะมีลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.75 มิลลิเมตรแทรกอยู่ เพื่อช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างกรอบเหล็ก นอกจากนี้ภายในผนังด้านข้างจะมีแผ่นยาง (Membrane) รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดเช่นเดียวกับกับ Shear Box ใส่เข้าไปด้วยเพื่อให้อัดตัวอย่างดินเป็นไปในทิศทางเดียวและป้องกันกันไหลของดินออกด้านข้างอีกด้วย ดังรูปที่ 4 ในส่วนของ Top Cap ด้านบนจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกัน โดยมีขนาดความกว้างและยาวประมาณ 49.8 เซนติเมตร และหนา 2.0 เซนติเมตร โดย Top Cap จะมีการเจาะรูเพื่อให้สามารถติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมอื่นๆได้ ส่วนด้านบนขึ้นไปอีกจะมีระบบราง (Ball Bearing) ซึ่งเป็นแผ่นเหล็กวางสองชั้นแทรกด้วยลูกปืนขนาด เพื่อแยกแรงฉีดยังในแนวราบกับแรงดึงออกจากกัน รวมถึงเป็นส่วนไว้สำหรับการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรงในแนวตั้ง (Vertical Load Cell) อีกด้วย ดังรูปที่ 5

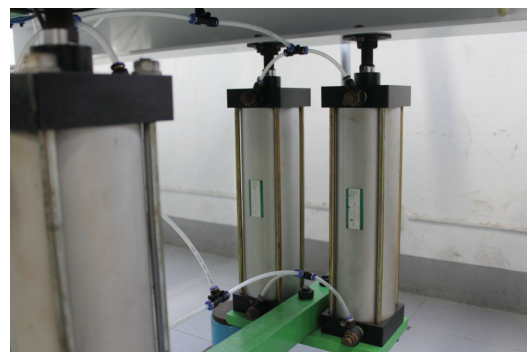


รูปที่ 4 ลักษณะของ Shear box และ Membrane



รูปที่ 5 ลักษณะของ Top cap และระบบ Ball Bearing

3.1.3 ระบบการให้แรงจะใช้แม่แรงที่มีลักษณะเป็นแบบทางกล (Screw Jack) โดยเมื่อทำการหมุนแม่แรงด้วยมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ แกนหลักของแม่แรงจะเกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งจะสัมพันธ์กับความเร็วในการหมุน กล่าวคือเมื่อความเร็วในการหมุนมีค่าสูง การฉีดยังตัวอย่างดินก็จะมีอัตราที่สูงตาม ในทางกลับกันเมื่อความเร็วในการหมุนมีค่าต่ำ การฉีดยังตัวอย่างดินก็จะมีอัตราที่ต่ำตามไปด้วย และในส่วนของ การให้น้ำหนักกดทับแก่ตัวอย่างดินจะใช้ระบบกระบอกลม (Air Pressure Cylinder) จำนวน 4 กระบอกช่วยกันจ่ายน้ำหนักโดยแต่ละกระบอกลสามารถให้แรงได้สูงสุด 400 กิโลกรัม ซึ่งรวมกันแล้วจะได้แรงเท่ากับ 1600 กิโลกรัม ตัวกระบอกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร ดังรูปที่ 6



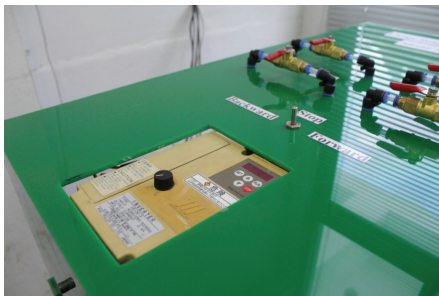
รูปที่ 6 ลักษณะของ Air Pressure Cylinder

3.1.4 ระบบควบคุมการให้น้ำหนักบรรทุกประกอบไปด้วยวาล์วสำหรับการให้น้ำหนัก (Loading) และวาล์วสำหรับการถอนน้ำหนัก (Unloading) ต่อเข้ากับวงจรควบคุมแรงดันลมแบบดิจิทัล (Digital Regulator) ซึ่งสามารถควบคุมลมได้ละเอียดและเที่ยงตรง สามารถตั้งโปรแกรมเพื่อให้น้ำหนักหรือถอนน้ำหนักแบบอัตโนมัติได้ พร้อมทั้งมีถังพักลมสำรองในกรณีเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ ซึ่งช่วยเลี้ยงระบบลมให้มี

แรงดันอย่างคงที่ เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง ในส่วนของระบบควบคุมการเดินจะใช้เป็นลักษณะของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วการหมุนของมอเตอร์ (Inverter) โดยสามารถปรับอัตราการเดินได้ช้าสุดที่ประมาณ 0.05 มิลลิเมตรต่อนาที และยังมีสวิตช์สามทางเพื่อควบคุมการเดินหน้าถอยหลังหรือหยุดของมอเตอร์ได้ ระบบที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 7 และ 8

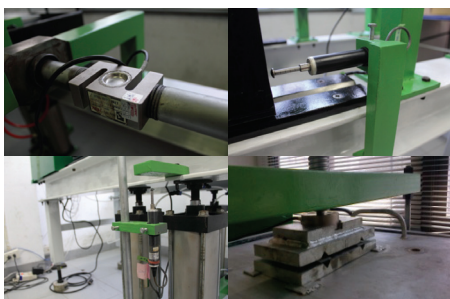


รูปที่ 7 ลักษณะของถังพักลม และ Digital Regulator

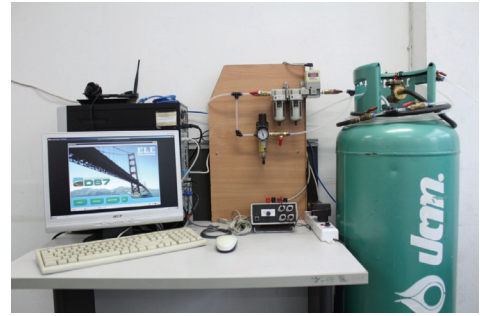


รูปที่ 8 แผงควบคุมการเดินและการให้น้ำหนักแกตัวอย่างดิน

3.1.5 อุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วย เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำในมวลดิน (Miniature Pressure Transducer) ซึ่งสามารถวัดแรงดันน้ำถึง 100 กิโลปาสกาล โดยจะใช้คู่กับเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Interface) ของ Wisco รุ่น DL2100 อุปกรณ์การตรวจวัดการเคลื่อนที่จะประกอบไปด้วย LVDT ทั้งหมดสองตัว ที่มีความละเอียด 2.5 ไมโครเมตร สามารถวัดการเคลื่อนที่ได้ 2.5 เซนติเมตร โดยจะอยู่ในตำแหน่งของการเคลื่อนที่ในแนวราบหนึ่งตัวและการเคลื่อนที่ในแนวตั้งอีกหนึ่งตัว ในส่วนของเซ็นเซอร์วัดแรง (Load Cell) จะมีอยู่ด้วยกันสองจุด คือตำแหน่งการวัดแรงเดิน ซึ่งตัวเซ็นเซอร์จะมีความละเอียดอยู่ที่ 0.01 นิวตัน และที่ตำแหน่งการวัดแรงในแนวตั้ง ซึ่งตัวเซ็นเซอร์จะมีความละเอียดอยู่ที่ 0.5 นิวตัน ซึ่งทั้ง LVDT และ Load Cell จะต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการดูและบันทึกผลข้อมูลในระหว่างการทดสอบ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาแสดงดังรูปที่ 9 และ 10



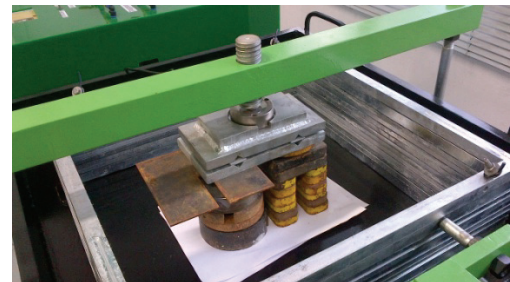
รูปที่ 9 อุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 10 อุปกรณ์บันทึกและมอเตอร์ข้อมูล

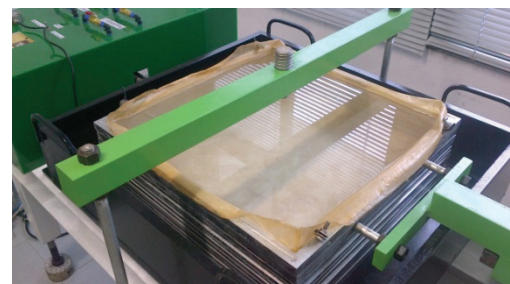
3.2 การสอบเทียบเครื่องมือและการเตรียมตัวอย่าง

3.2.1 การสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดใช้รูปแบบวิธีการทั่วไป กล่าวคือ เซ็นเซอร์วัดแรงจะใช้น้ำหนักคงที่ (Dead Weight) ในการสอบเทียบ และในส่วนของเซ็นเซอร์วัดการเคลื่อนที่จะใช้ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ในการสอบเทียบ ซึ่งเมื่อได้ค่าการสอบเทียบของอุปกรณ์เหล่านี้แล้วก็จะนำมาสอบเทียบให้กับเครื่องมือหลักอีกที โดยเครื่องมือหลักจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน อย่างแรกคือการสอบเทียบน้ำหนักบรรทุกและการยุบตัวที่เกิดในเครื่องมือ ซึ่งจะใช้การปล่อยแรงดันลมจาก Digital Regulator ตามค่าต่างๆจากน้อยไปมาก แล้วทำการวัดแรงที่ได้ด้วย Load Cell พร้อมทั้งวัดค่าการยุบตัวของเครื่องมือด้วย LVDT ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การสอบเทียบน้ำหนักบรรทุก

อย่างที่สองคือการสอบเทียบค่าความผิดที่เกิดขึ้นใน Shear Box และความเร็วในการเดินตัวอย่าง โดยการนำ Membrane ติดตั้งเข้าไปใน Shear Box และเทน้ำเข้าไปให้เต็มจากนั้นทำการเดินตัวอย่าง เนื่องจากน้ำไม่สามารถรับแรงเดินได้ จึงทำให้ตรวจวัดค่าความผิดของกรอบเหล็ก แรงดึงของแผ่นยางและยางเส้นสำหรับยึดใน Shear Box ได้ รวมถึงทำการสอบเทียบความเร็วของการเดินตามความเร็วต่างๆ ซึ่งเกิดจากการหมุนของมอเตอร์ได้อีกทางหนึ่ง ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 การสอบเทียบ Shear Box และ Membrane

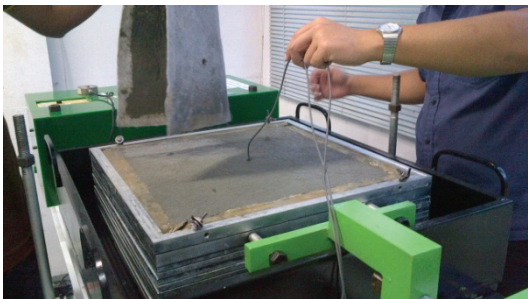
3.2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบใช้วิธีเตรียมแบบ Reconstituted โดยยึดหลักการทำตามวิธีของ Burland (1990) ซึ่งจะผสมตัวอย่างดินให้ได้ค่าปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.25 เท่าของค่าพิกัดเหลว ตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้เป็นตัวอย่างดินที่เก็บมาจากสนามบินสุวรรณภูมิ โดยเก็บมาแบบ Disturbed Sample โดยจะนำมาทำการหาค่าความชื้นและค่าพิกัดเหลวของตัวอย่างดิน เพื่อที่จะนำมาคำนวณประมาณน้ำที่ต้องใส่เพิ่มในขั้นตอนการผสม ซึ่งจากการทดสอบพบว่าดินตัวอย่างมีความชื้นเฉลี่ยอยู่ที่ 130 เปอร์เซ็นต์ และค่าพิกัดเหลวอยู่ที่ 112 เปอร์เซ็นต์ และจากการคำนวณพบว่าจะต้องทำการผสมน้ำเพิ่มเข้าเพื่อให้ได้ความชื้นที่ 140 เปอร์เซ็นต์ โดยจะผสมน้ำเข้าไปประมาณ 25-30 กรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ซึ่งจะใช้ดินที่ผสมแล้วประมาณ 55 กิโลกรัมต่อการทดสอบหนึ่งตัวอย่าง (ดินจะมีหน่วยน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 1.4 ตันต่อลูกบาศก์เมตร) การผสมจะผสมโดยเครื่องที่มีลักษณะเป็นตะกร้อ ซึ่งสามารถทำให้ดินที่ถูกผสมแล้วเป็นเนื้อเดียวกันได้อย่างดี ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่

3.3 การทดสอบดินตัวอย่าง

3.3.1 ทำการติดตั้งส่วนของ Shear Box, แผ่น Geotextile และ Membrane ให้ได้ดังรูปที่ 4 และทำการเทตัวอย่างดินที่ผสมแล้วลงไปให้เต็มพื้นที่ของ Shear Box หลังจากนั้นติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ (Miniature Pressure Transducer) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชั้นดิน พร้อมทั้งเติมน้ำและวาง Top Cap บนตัวอย่างดินจากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน ดังรูปที่ 14

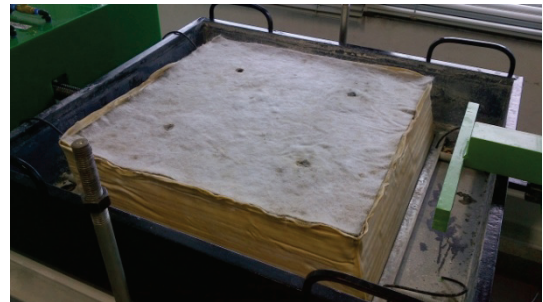


รูปที่ 14 การเตรียมตัวอย่างทดสอบและติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ

3.3.2 หลังจากนั้นทำการตั้งค่าเครื่องมือวัดพฤติกรรมต่างๆให้อยู่ในตำแหน่งที่ศูนย์ พร้อมทั้งตั้งค่าเครื่องมือบันทึกผลและโปรแกรมสำหรับการการมอนิเตอร์ข้อมูลให้พร้อมใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบด้วยกัน 3 ตัวอย่าง โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนแรกจะเป็นขบวนการของการอัดตัวคายน้ำของ

ตัวอย่างดิน ซึ่งจะให้น้ำหนักบรรทุกทุกแก็ตัวอย่างแรกเท่ากับ 5.9 กิโลปาสคาล, ตัวอย่างที่สองเท่ากับ 11.8 กิโลปาสคาล, และตัวอย่างที่สามเท่ากับ 23.6 กิโลปาสคาล (จำลองตัวอย่างดินในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีความลึก 1.5, 3, และ 6 เมตรตามลำดับ) ในระหว่างขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำนั้น จะทำการบันทึกค่าแรงดันน้ำและค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ซึ่งขั้นตอนนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อค่าการทรุดตัวหรือค่าการระบายออกของน้ำมีค่ามากกว่า 90 % Degree of Consolidation

เมื่อขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินเสร็จสิ้นแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนที่สอง โดยจะทำการเฉือนตัวอย่างดินในวิธีการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shearing) ตามวิธีการทดสอบใน ASTM D6528 กล่าวคือจะพยายามรักษารักษาปริมาณของตัวอย่างดินให้คงที่ตลอดระยะเวลาการเฉือนตัวอย่าง ซึ่งจะใช้อัตราในการเฉือนที่ความเร็ว 0.14 มิลลิเมตรต่อนาที รวมถึงจะทำการตรวจวัดการเคลื่อนตัว การยุบตัว และแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในตัวอย่างอีกด้วย โดยจะทำการเฉือนจนกระทั่งเกิดค่า Shear Stain ไม่น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 15 เมื่อสิ้นสุดการเฉือนตัวอย่างดินแล้วจึงทำการเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาค่าปริมาณน้ำในมวลดินและวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบต่อไป

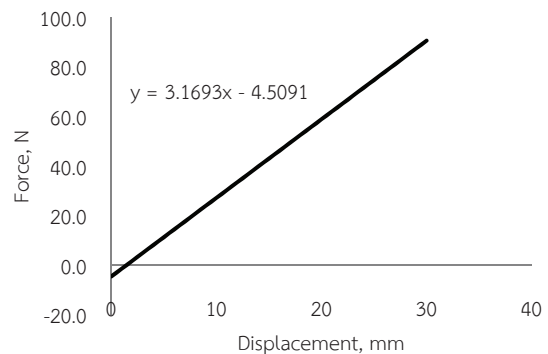


รูปที่ 15 ตัวอย่างทดสอบเมื่อสิ้นสุดการเฉือนตัวอย่าง

4. ผลการวิจัย

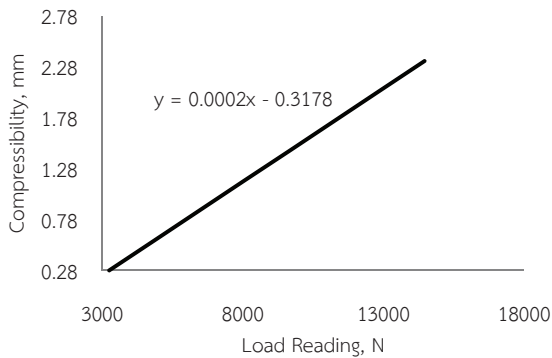
4.1 ผลการทดสอบเทียบเครื่องมือ

4.1.1 ผลจากการสอบเทียบค่าแรงเสียดทานของ Shear Box, Membrane และยางที่ใช้อัด Shear Box ระหว่างการเฉือนตัวอย่างโดยการใส่ น้ำแทนที่ตัวอย่างดิน พบว่าเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของ Shear Box ในระหว่างการเฉือนค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นตามการเคลื่อนที่ โดยจะมีค่าติดลบเมื่อเริ่มการเฉือนอยู่เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากกลไกของ Screw Jack ตอนเริ่มการเคลื่อนที่ แต่หลังจากนั้นก็ทำงานตามปกติ และผลการสอบเทียบแสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านของ Shear Box กับการเคลื่อนตัว

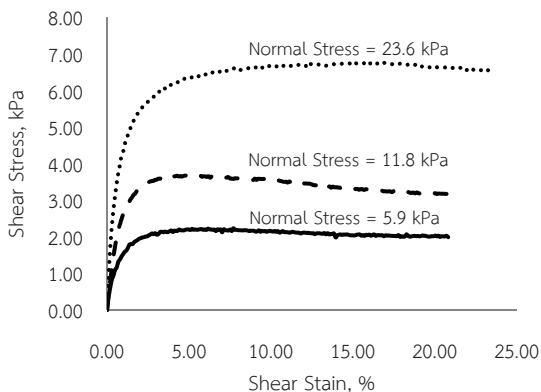
4.1.2 ผลจากการสอบเทียบค่าน้ำหนักกดทับและค่าการยุบตัวของเครื่องมือทดสอบ โดยการให้แรงกระทำต่อเครื่องมือจากค่าน้อยไปหาค่ามาก แล้วทำการวัดค่าการยุบตัวด้วย LVDT พบว่าเมื่อเริ่มใส่น้ำหนักอยู่ในช่วง 0 ถึง 3000 นิวตันการยุบตัวของเครื่องมือจะยังไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อน้ำหนักมีค่ามากกว่า 3000 นิวตันขึ้นไปการยุบตัวของเครื่องมือจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวของเครื่องมือกับน้ำหนักบรรทุก

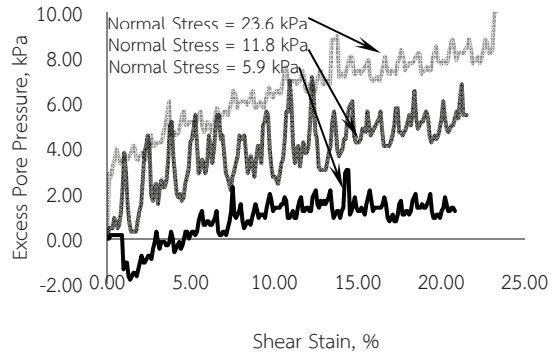
4.2 ผลการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่

4.2.1 ผลจากการทดสอบการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเฉือนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเฉือน 0.14 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่มีค่าสูงขึ้นตามค่าน้ำหนักบรรทุก โดยตัวอย่างดินที่น้ำหนักบรรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาล มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 2.2, 3.7 และ 6.8 กิโลปาสคาลตามลำดับ ดังรูปที่ 18



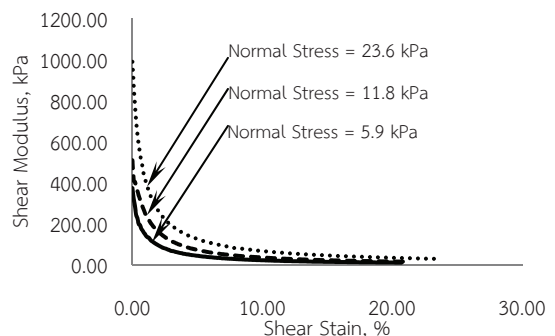
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Strain

4.2.2 ผลจากการทดสอบการวัดแรงดันส่วนเกินระหว่างการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเฉือนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเฉือน 0.14 มิลลิเมตรต่อวินาทีพบว่า เมื่อเริ่มทำการเฉือนตัวอย่างดินค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า Shear Strain และค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่ามากที่สุด ที่ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ดังรูปที่ 19



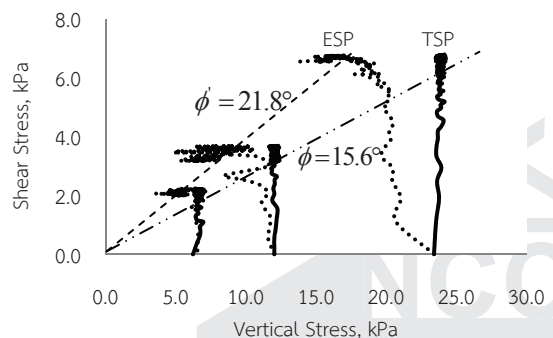
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับ Shear Strain

4.2.3 ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตัวอย่างแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแบบสร้างใหม่ โดยเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่พบว่า ค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus) ของตัวอย่างมีค่าลดลงตามค่า Shear Strain ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะให้ค่าโมดูลัสแรงเฉือนที่มากที่สุด โดยโมดูลัสแรงเฉือนของทั้ง 3 ตัวอย่างจะมีค่าเข้าหากันเมื่อค่า Shear Strain ค่ามากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus และ Shear Strain

4.2.4 ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตัวอย่างแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแบบสร้างใหม่ โดยเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ทั้งหมด 3 ตัวอย่างพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินแบบ Effective Stress และ Total Stress จะมีค่ามากขึ้นตามค่าน้ำหนักบรรทุก ซึ่งสามารถหาค่ามุมเสียดทานในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล เท่ากับ 21.8 องศา และค่ามุมเสียดทานแบบหน่วยแรงรวม เท่ากับ 15.6 องศา ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Vertical Stress

5. สรุปผลการวิจัย

จากการคิดค้นและพัฒนาเครื่องมือการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ (Large Direct Simple Shear Apparatus) และการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแบบสร้างใหม่ (Reconstituted Clay) ครั้งนี้ ทำให้เห็นว่าสามารถทำการทดสอบได้ค่อนข้างมีประสิทธิภาพ ซึ่งผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการพัฒนาเครื่องมือ

5.1.1 การพัฒนาเครื่องมือการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ ทำให้สามารถทำการทดสอบตัวอย่างดินที่มีขนาดใหญ่ได้ โดยตัวอย่างสามารถมีขนาดได้ใหญ่ถึง 50x50 เซนติเมตร สามารถให้น้ำหนักบรรทุกได้สูงที่สุดถึง 2000 กิโลกรัม และสามารถทำการเฉือนตัวอย่างดินที่ความแข็งแรงได้มากถึง 1300 กิโลกรัม ตามแต่ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินที่ทดสอบ รวมถึงสามารถตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างได้อย่างละเอียด พร้อมทั้งสามารถติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอื่นๆ เช่น เครื่องวัดแรงดันน้ำ (Miniature Pressure Transducer) หรือ Stain gage เข้าไปในตัวอย่างได้อีกด้วย

5.1.2 ระบบเครื่องมือบันทึกผลสามารถบันทึกผลได้อย่างอัตโนมัติ และมีความแน่นอน ผ่านระบบ Data Logger รวมถึงระบบการควบคุมการเฉือนและการให้น้ำหนักแก่ตัวอย่างทำได้โดยง่าย โดยควบคุมผ่านระบบ Digital Regulator และระบบ Inverter ซึ่งสามารถทำการเฉือนตัวอย่างได้เข้าสู่จุดประมาณ 0.05 มิลลิเมตรต่ออนาที

5.2 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างดิน

5.2.1 จากการทดสอบในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินเหนียวแบบสร้างใหม่นี้ เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างแบบขั้นเดียวทำให้ดินตัวอย่างมีความสม่ำเสมอ โดยในแต่ละตัวอย่างจะให้การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันกล่าวคือ เมื่อน้ำหนักบรรทุกยิ่งมาก การทรุดตัวของตัวอย่างดินยิ่งสูง รวมถึงทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างสูงตามไปด้วย ซึ่งทุกตัวอย่างทดสอบจะให้เกิดการระบายน้ำให้มีค่ามากกว่า 90 % Degree of Consolidation

5.2.2 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามน้ำหนักบรรทุกที่ให้แก่ตัวอย่าง โดยมีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 2.2, 3.7 และ 6.8 กิโลปาสคาลตามลำดับ โดยแนวโน้มของค่า Shear Stain จะมีโอกาสที่จะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกอีกด้วย

5.2.3 ค่าของแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นระหว่างการเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามค่า Shear Stain ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าแรงดันน้ำส่วนเกินนี้มีค่าโดยเฉลี่ยมากที่สุดที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด สำหรับแรงดันน้ำส่วนเกินค่าลบ (มีค่าประมาณ -2 kPa) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง Normal stress = 5.9 kPa ในช่วงแรกของการเฉือนอาจเกิดเนื่องจากกระบวนการติดตั้ง Pressure Sensor ลงในตัวอย่างดินทำให้เกิดการอัดตัวของดิน (Overconsolidation) เล็กน้อยบริเวณรอบๆเซนเซอร์ เรียกว่า Inclusion Effect ซึ่งเห็นได้ชัดเมื่อ Normal stress มีค่าต่ำแต่เมื่อเฉือนตัวอย่างจนค่าความเค้นมากขึ้นอิทธิพลจาก Overconsolidation ก็น้อยลง จึงไม่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของผลการทดสอบ

5.2.4 ค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus) ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่จะมีค่าสูงขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่สูงขึ้น แต่ในทางกลับกันก็จะลดลงตามค่า Shear Stain โดยจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว

ในช่วง 0 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ และจะลูเข้าหากันเมื่อมีค่า Shear Stain มีค่ามากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

5.2.5 จากการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายกับตัวอย่างดินเหนียวแบบสร้างใหม่ในครั้งนี้ เนื่องจากการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำขนาดเล็ก จึงทำให้ทราบถึงค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการเฉือนตัวอย่าง ซึ่งสามารถสร้างเส้นการพิบัติหรือ Mohr Coulomb Envelope ที่หาค่ามุมเสียดทานได้ทั้งรูปหน่วยแรงประสิทธิผลและแบบหน่วยแรงรวม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 21.8 และ 15.6 องศา ตามลำดับ (ค่าที่ทดสอบได้นี้ มีค่าใกล้เคียงกับ Shibuya & Tamrakar (2003) ซึ่งทำการทดสอบการเฉือนตรงแบบปกติกับตัวอย่างดินแบบ Reconstituted ที่เก็บมาจากพื้นที่หนองงูเห่า โดยมีค่ามุมเสียดทานในหน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากับ 25.5 องศา และค่าแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 5 กิโลปาสคาล)

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้การปรึกษาและแนะนำจนสามารถประดิษฐ์เครื่องมือนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการสนับสนุนทุนวิจัย รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องนิสิต ป.โท วิศวกรรมปฐพีที่แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ช่วยลงมือลงแรงจนทำให้การงานวิจัยครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Roscoe K.H. (1953), An apparatus for the application of simple shear to soil samples, Proceedings third ICSMFE 1, 186-191.
- [2] Dyvik, R., Berre, T., Lacasse, S. and Raadim, B. 1987. "Comparison of truly undrained and constant volume direct simple shear tests," Géotechnique, Vol.37, No. 1, pp. 3-10.
- [3] Burland J. B. (1990), On the compressibility and shear strength of natural soils. Géotechnique, 40, No. 3, pp.329-378.
- [4] ASTM D 6528 – 00 Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils
- [5] Kjellman W. (1951), Testing the shear strength of clay in Sweden, Géotechnique, Vol.2, No. 3, 225-235.
- [6] Franke E., Kiekbusch M. and Schuppener B. (1979), A new Direct Simple Shear device, Geotechnical testing journal, Vol.2 No.4, 190-199.
- [7] Bjerrum L. and Landva A. (1966), Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay, Géotechnique, Vol.16 No.1, 1-20.
- [8] Shibuya & Tamrakar 2003, Engineering properties of Bangkok clay, Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils – Tan et al. (eds.), ISBN 90 5809 537 1, 662-665.