



การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการทดสอบ Unconfined

Compression Test ชนิดวัดแรงดูด suction

Determination of Effective Strength Parameters of Bangkok Clay using Suction-monitored

Unconfined Compression Tests

วสัน สุทธิณัฐ (Wasan Sutthinun)¹ดร. อภินิติ โชติสังกาศ (Apiniti Jotisankasa)²¹นักศึกษาระดับปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, sutthinun_w@hotmail.com²อาจารย์, ศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, fengatj@ku.ac.th

บทคัดย่อ : บทความนี้นำเสนอการทดสอบหาพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนในรูปแบบหน่วยแรงประสิทธิภาพ c' , ϕ' ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยใช้วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไร้ขอบเขต (Unconfined Compression Test) ซึ่งมีการวัดแรงดูด suction หรือค่าแรงดันน้ำในช่องว่างดินที่เป็นลบของตัวอย่างดินในขณะที่ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือเทนซิโอมิเตอร์ (Tensiometer) ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เครื่องมือเทนซิโอมิเตอร์ นี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ระดับจุลภาค (MEMs) ทำให้เครื่องมือมีขนาดเล็กและประยุกต์ใช้กับชุดทดสอบกำลังรับแรงอัดได้ง่าย ผลการทดสอบในเบื้องต้นกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งเก็บจากคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิ พบว่าได้ค่า $c' = 0$, $\phi' = 20 - 28^\circ$ ในช่วง Effective mean stress หรือ Suction เท่ากับ 0 ถึง 100 kPa. ซึ่งสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์จากผลการวิจัยในอดีตที่ใช้เครื่องมือทดสอบแบบสามแกน (Triaxial Apparatus) เทคโนโลยีการทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้จะเป็ทางเลือกที่สำคัญในการทดสอบหาลังรับแรงเฉือนแบบหน่วยแรงประสิทธิภาพซึ่งมีราคาทดสอบถูกกว่าใช้เครื่องมือทดสอบสามแกนอย่างมาก และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับการทดสอบหาลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำชนิด UC ซึ่งเป็นที่นิยมใช้อย่างสูงในประเทศไทย

ABSTRACT : The paper reports on determination of effective strength parameter for soft Bangkok Clay using Unconfined Compression Test with measurement of soil suction during testing. Suction measurements were performed using miniature tensiometers developed by Kasetsart University which makes use of Micro – Electro – Mechanical Systems (MEMs) pressure sensors. The newly developed tensiometers work satisfactorily for suction range to 10 to 100 kPa. The tested soil samples were obtained from a construction site along the drainage canal of Suvarnabhumi airport. The value of the effective angle of shearing resistance, ϕ' , obtained from these tests is 20 to 28 with effective cohesion equal to zero. These values correspond to those obtained from previous research which used Triaxial apparatus. This innovative testing method is expected to be an attractive alternative for determination of effective strength parameters with its cost much lower than the triaxial tests and will also be value-adding to unconfined compression test which is commonly used in Thailand.

KEYWORDS : soft clay, effective strength parameter, negative pore water pressure, tensiometer, matric suction

1. บทนำ

ในปัจจุบันการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำในห้องปฏิบัติการมีด้วยกันหลายวิธี โดย 2 วิธีที่เป็นที่นิยม ได้แก่ การทดสอบแรงอัดแบบไร้ขอบเขต (Unconfined Compression Test, UC) และการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ข้อแตกต่างที่สำคัญของทั้งสองวิธีคือวิธีแรงอัดสามแกนจะสามารถควบคุมค่าแรงดันด้านข้าง (Confining Stress) แรงดันน้ำ และหน่วยแรงประสิทธิผลได้อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะมีราคาสูงโดยจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ สำหรับการทดสอบแรงอัดแบบไร้ขอบเขตซึ่งแรงดันด้านข้างเป็นศูนย์ เป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยมเนื่องจากกระทำได้ง่าย รวดเร็ว และมีราคาที่ถูกกว่ามาก ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวจะเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, s_u , $c_u = \frac{q_u}{2}$) และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในรูปแบบหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) หรือการวิเคราะห์ด้วยหลักการ $\phi_u = 0$ สำหรับดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำนั่นเอง (ภาพที่ 1) สมมุติฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์นี้ คือค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) ของดินเหนียวอ่อนขณะที่ทำการทดสอบ Unconfined compression test มีค่าเท่ากับค่า Effective stress ของดินในสนามจริง แต่อย่างไรก็ตาม การเก็บตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed Sample) สำหรับดินเหนียวอ่อนนั้น เป็นไปได้อย่างยากในทางปฏิบัติ การรบกวนดินจะทำให้ค่า Effective stress ในดินมีค่าลดลงได้มากสำหรับดินเหนียวอ่อน

ภาพที่ 2 แสดงถึงลักษณะของหน่วยแรงที่แปรเปลี่ยนในระหว่างการเก็บตัวอย่างแบบไม่รบกวน (Perfect Undisturbed Sampling) จะเห็นได้ว่าถ้าการเก็บตัวอย่างไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินและบริเวณของตัวอย่างดินที่ถูกเฉือนถูกจำกัดอยู่ในพื้นที่บางๆ ดินตัวอย่างจะอยู่ในสถานะ Undrained unloading และค่า Effective stress จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้ค่าแรงดันน้ำมีค่าติดลบ หรือมีลักษณะเป็นแรงดูด Suction ซึ่งมีค่าเท่ากับหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย (Mean Effective Stress) นั่นเอง

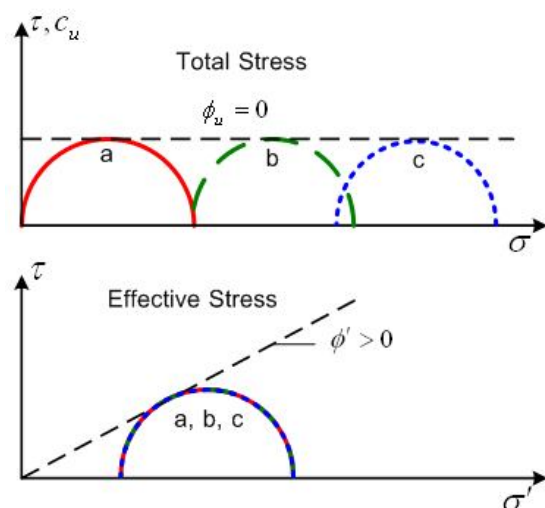
ในประเทศไทย ยังไม่มีการศึกษาวิจัยด้านทางดินของหน่วยแรงประสิทธิผล ระหว่างการทดสอบ Unconfined compression test มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากในอดีตการวัดแรงดันน้ำด้านลบสามารถกระทำได้อย่างยาก การศึกษาครั้งนี้จะก่อให้เกิดความ

เข้าใจเรื่องกำลังรับแรงเฉือนแบบหน่วยแรงประสิทธิผล (ϕ' และ c') จากการทดสอบ UC และเสนอเทคนิคการทดสอบชนิดใหม่ และหวังว่าจะเป็นประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ขั้นสูง เช่น การวิเคราะห์สภาวะระยะยาว (Long Term Condition) ซึ่งต้องใช้พารามิเตอร์ในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล

2. วิธีการวิจัย

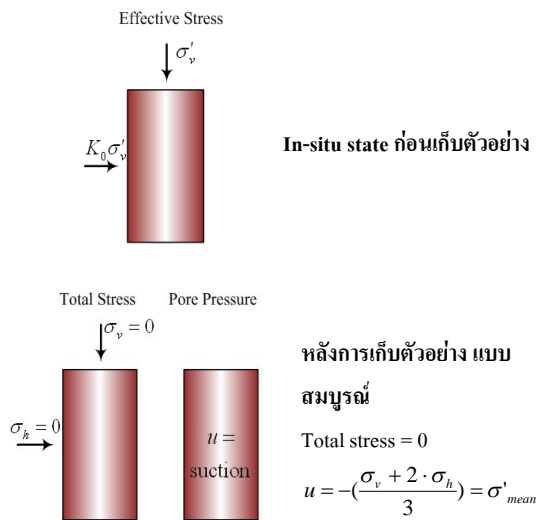
2.1 ทฤษฎี

พารามิเตอร์ในรูปหน่วยแรงรวม (ϕ_u, c_u) นั้นพิจารณาเฉพาะหน่วยแรงรวม $\sigma = \sigma' + u$ ซึ่งรวมเอาผลของการเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในดินที่จุดวัดไว้ด้วย การทดสอบจึงตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าแรงดันน้ำส่วนเกินระหว่างทดสอบมีค่าเทียบเท่ากับแรงดันน้ำในสภาวะจริงในสนาม ส่วนพารามิเตอร์ในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล ได้แก่ ค่ามุมแรงเฉือนประสิทธิผล ϕ' และ ความเชื่อมแน่นประสิทธิผล c' จะได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน τ และหน่วยแรงประสิทธิผล $\sigma' = \sigma - u$ ซึ่งแยกค่าแรงดันน้ำ (Pore Pressure) ออกจากการพิจารณา ทำให้สามารถประเมินกำลังของดินที่สภาวะแรงดันน้ำต่างๆกันได้



ภาพที่ 1 เส้นแสดงขอบเขตการวิบัติของดินเหนียวในรูปของหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล

ในระหว่างการทดสอบ Unconfined compression test นั้น โดยทั่วไปแรงดันน้ำในช่องว่างดินจะมีค่าเป็นลบ ดังได้อธิบายไว้ข้างต้น ค่าแรงดันน้ำที่เป็นลบนี้จะบ่งชี้ถึงแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดิน หรือที่เรียกว่า แรงดูดเมทริก (Matric Suction, s)



ภาพที่ 2 พฤติกรรมของดินในสภาวะก่อนและหลังจากเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพอย่างสมบูรณ์ (Perfect Undisturbed Sampling)

ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ $s = u_a - u_w = -u_w$ โดยค่า u_w เท่ากับค่าแรงดันน้ำในช่องว่างดิน และ u_a จะมีค่าเท่ากับแรงดันอากาศในช่องว่างดิน ซึ่งในการทดสอบ UC โดยทั่วไปจะมีค่าเท่ากับศูนย์หรือเท่ากับความดันบรรยากาศ เมื่อพิจารณาลักษณะทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Path) ระหว่างการทดสอบ Unconfined compression test โดยใช้สัญลักษณ์แบบ MIT, Lambe & Whitman (1969) จะได้สมการด้านล่างดังนี้

$$p' = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} = \frac{\sigma_v}{2} + s \quad (1)$$

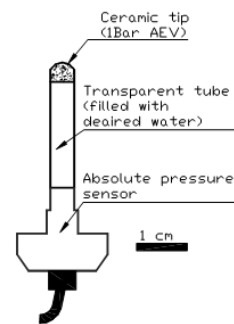
$$q = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} = \frac{\sigma_v}{2} \quad (2)$$

โดย s คือ ค่าแรงดูดเมตริก ซึ่งสามารถวัดโดยใช้เครื่องมือเทนซิโอมิเตอร์ Tensiometer, ค่า σ_v คือหน่วยแรงกดในแนวตั้ง และหน่วยแรงในแนวราบ σ_h มีค่าเท่ากับศูนย์

2.2 เครื่องมือวัดค่าแรงดูดเมตริก (Tensiometer)

เครื่องมือวัดค่าแรงดันน้ำด้านลบหรือแรงดูดเมตริกนั้นเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับฟิสิกส์ของดินและการชลประทาน สำหรับในงานวิศวกรรมปฐพี

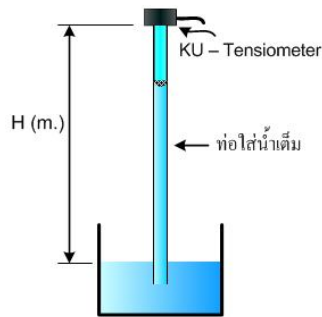
Ridley และ Burland (1993) ได้พัฒนาเทนซิโอมิเตอร์ซึ่งสามารถวัดค่าแรงดูดได้เท่ากับ 1500 kPa. ในประเทศไทย อภินิติและวิษณุพงศ์ (2007) ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ระดับจุลภาค (MEMs) ในการพัฒนา KU-Tensiometer (ภาพที่ 3) ซึ่งทำให้เครื่องมือมีขนาดเล็กเหมาะสมในการประยุกต์สำหรับการทดสอบ Unconfined compression test และวัดค่าแรงดูดได้สูงสุดเท่ากับ 90 kPa.



ภาพที่ 3 KU-Tensiometer ชนิดแรงดูดต่ำ (Low Suction Absolute)

KU-Tensiometer ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ 1) ปลายดินเผา 2) กะเปาะน้ำ และ 3) อุปกรณ์วัดแรงดันหรือเกจสูญญากาศ โดยขณะที่ใช้งานทุกส่วนต้องมีน้ำเต็มช่องว่างเพื่อให้สามารถส่งถ่ายแรงดึงระหว่างน้ำในมวลดินและน้ำด้านหน้าเซ็นเซอร์วัดแรงดันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเซ็นเซอร์ที่สามารถวัดได้ทั้งแรงดันและแรงดูด (Suction)

ขั้นตอนการเติมน้ำลงใน KU-Tensiometer และการกำจัดฟองอากาศนั้นมีความสำคัญมาก เนื่องจากการถ่ายแรงระหว่างน้ำในดินและในเซนเซอร์จะไม่มีประสิทธิภาพเมื่อมีฟองอากาศในตัวเซนเซอร์ และแรงดูดที่วัดได้อาจไม่ใช่แรงดูดจริงของดิน ขั้นตอนการเติมน้ำและไล่ฟองได้กล่าวไว้โดยละเอียดใน อภินิติและวิษณุพงศ์ (2551) โดยจะใช้ปั๊มสูญญากาศเป็นหลักในการไล่ฟองอากาศ และรวมไปถึงการเจาะรูไล่ฟองอากาศและปิดผนึกที่เจาะนี้อย่างดีเมื่อใช้งาน ก่อนการใช้งาน KU-Tensiometer จะต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดโดยใช้หลักการ Hanging water column หรือการห้อยน้ำออกจากตัวเครื่องมือวัดดังภาพที่ 4 เพื่อให้ให้น้ำส่งถ่ายแรงดึงจากน้ำหนักไปยังเซนเซอร์ได้ ทั้งนี้ข้อควรระวังในการสอบเทียบ จะต้องพยายามไม่ให้มีฟองอากาศก่อดำในท่อน้ำเพื่อความต่อเนื่องของน้ำในการส่งถ่ายแรง. เครื่องมือวัดชนิดนี้โดยทั่วไปจะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและแรงดูดน้ำเป็นเส้นตรง (~0.044 V/kPa) และมีความเสถียรดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง



ภาพที่ 4 การสอบเทียบ KU – Tensiometer โดยวิธีการห้อยน้ำหรือ Hanging water column

2.3 การทดสอบ Suction-monitored Unconfined Compression Test ($S - UC$)

ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ทำการทดสอบเป็นตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed Sample) ทำการขุดเจาะโดยใช้กระบอกลูกเหล็กจากคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ ความลึก 1 – 4 เมตร โดยตัวอย่างดินถูกห่อหุ้มด้วยพาราฟินจุดหลอมเหลวต่ำเพื่อเก็บรักษาความชื้นอย่างดีก่อนการทดสอบ สำหรับขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์ ϕ' และ c' นั้นเช่นเดียวกับการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ซึ่งมีการเปลี่ยนตัวอย่างดินที่หน่วยแรงประสิทธิผลแตกต่างกัน และกระทำโดยเปลี่ยนแปลงการอัดตัวคายน้ำตัวอย่างที่ แรงดันด้านข้าง Effective consolidation stress, σ'_c แตกต่างกัน สำหรับการทดสอบแรงอัดแบบไร้ขอบเขต (Unconfined Compression Test) ที่เสนอขึ้นนี้มีวิธีการเปลี่ยนแปลง Effective stress ของตัวอย่างดินโดยเพิ่มหรือลดแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดิน (Suction) หรือแรงดันน้ำด้านลบ ด้วยการทำให้ตัวอย่างดินแห้งหรือเปียกอย่างช้าๆนั่นเอง

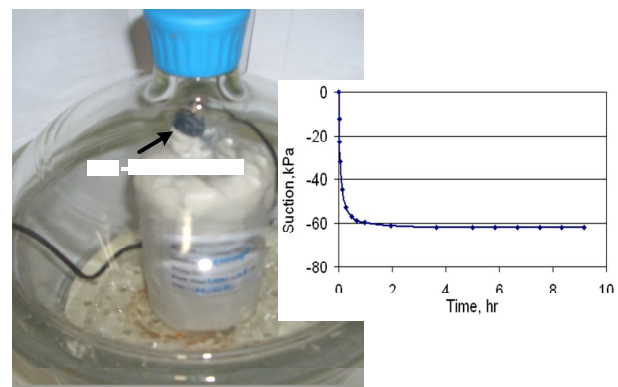
อนึ่ง ลักษณะการเปลี่ยนแปลง Effective stress ด้วยการเพิ่มแรงดูด Suction ในตัวอย่างดินที่เสนอขึ้นนั้น Cunningham et al. (2001) ได้ทำการวิจัยกับดินเหนียวปนทรายแข็งที่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ามีผลเช่นเดียวกับการเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลโดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Effective stress ที่คิดแปลงเพิ่มเติมโดย Bishop (1959)

สำหรับขั้นตอนการทดสอบในงานวิจัยนี้มีดังนี้ (1) ติดตั้ง KU-Tensiometer ลึกไปในดินตัวอย่างประมาณ 5 มิลลิเมตร เพื่อให้แน่ใจว่าผิวเซรามิกสัมผัสกับเนื้อดินอย่างดี และ

รอนค่าแรงดูดของดินตัวอย่างคงที่ (ภาพที่ 5) ในการทดสอบนี้จะเรียกค่าดังกล่าวว่าแรงดูดเริ่มต้น Initial suction

(2) สำหรับกรณีที่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดิน ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น สามารถทำได้โดยเพิ่มความชื้นโดยการพรมไอน้ำบนตัวอย่างดิน หรือลดความชื้นโดยการตากตัวอย่างอย่างช้าๆ ซึ่งมีผลให้ค่าแรงดูดระหว่างเม็ดดินเปลี่ยนแปลง ข้อสำคัญคือขบวนการนี้ต้องทำอย่างช้าๆ และทำการบันทึกค่าแรงดูดไปด้วยในระหว่างกระบวนการ เนื่องจากดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำ เพื่อให้ดินทั้งตัวอย่างมีแรงดูดน้ำที่สม่ำเสมอ ซึ่งมีผลต่อการกระจายของแรงดันน้ำระหว่างทำการเลื่อน

(3) เมื่อได้ตัวอย่างดินที่มีค่าแรงดูด (หรือ Effective stress) แตกต่างกัน จึงทำการเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับการทดสอบแรงอัดแบบไร้ขอบเขต แตกต่างกันที่ระหว่างทำการเลื่อนนั้นจะต้องมีการบันทึกค่าแรงดูดของดินตัวอย่าง โดยการติดตั้ง KU-Tensiometer ไว้ด้านบนของตัวอย่าง (ภาพที่ 6) ในการทดสอบนี้ส่วนใหญ่ใช้อัตราการกดเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที และ 0.5, 2.0 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้กับตัวอย่างที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

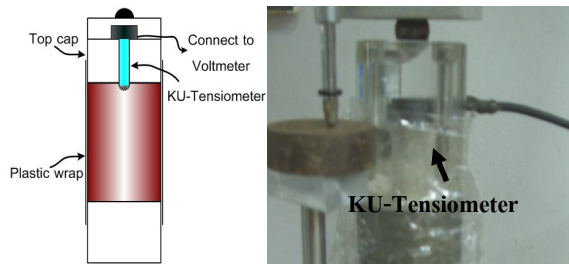


ภาพที่ 5 การทดสอบวัดแรงดูดของตัวอย่างดินโดย KU-Tensiometer

3. ผลการทดสอบ

การทดสอบ Unconfined compression test เป็นการทดสอบที่เรียกว่า Quick test ซึ่งมีสมมุติฐานที่ว่า ระหว่างการทดสอบค่าความชื้นของดินตัวอย่างไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อมีผลของหน่วยแรงกระทำจะทำให้ความดันน้ำ (Pore Water Pressure) และแรงดูดของดินตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป เช่นเดียวกับกรณีกดอัดแบบไม่ระบายน้ำ Undrained loading

สำหรับอัตราการกดที่เหมาะสมในการทดสอบครั้งนี้เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากระหว่างการเลื่อนตัวอย่าง การกระจายตัวของแรงดันน้ำสม่ำเสมอทั้งตัวอย่าง (ตัวอย่างที่ 1 และ 2 ระหว่างการเลื่อนพบว่า การกระจายตัวของแรงดันน้ำอาจไม่สม่ำเสมอทั้งตัวอย่าง) ดังสรุปในตารางที่ 1



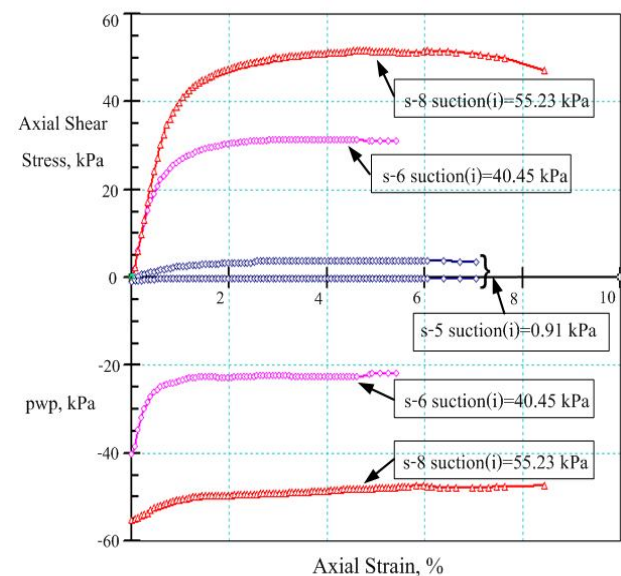
ภาพที่ 6 การติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบ S – UC – Test

จากการทดสอบนี้เห็นได้ว่าเมื่อค่าแรงกด (หรือ Effective Stress) ของดินแตกต่างกัน ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแตกต่างกันด้วยคือ เมื่อค่าแรงกด (Suction) ของดินเพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงเฉือนก็จะเพิ่มขึ้นตาม โดยระหว่างการเลื่อนนั้นค่าแรงกดของดินตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรก (แรงดันน้ำเพิ่มขึ้น) แล้วจะเริ่มคงที่ ($\Delta u = 0$) เมื่อถึงจุด Critical state ดังแสดงในภาพที่ 7

ในการวิเคราะห์ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Path) และวิเคราะห์หาเส้นขอบเขตการวิบัติ นั้นตั้งอยู่บนเงื่อนไขว่าดินที่ทดสอบจะต้องอิ่มตัวด้วยน้ำหรือใกล้เคียง ($S_r > 95\%$) เพื่อให้หลักการของ Effective stress สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของดิน (Cunningham et al., 2003). จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้มีค่า Degree of saturation ที่ใกล้เคียงตัว (>95%) จากภาพที่ 8 สามารถบอกถึงลักษณะพฤติกรรมของดินได้คือ S-4, S-6, S-7 เป็นดินเหนียวที่มีสภาพอัดแน่นปกติ (NC – Clay) และ S-3, S-8 เป็นดินเหนียวที่มีสภาพอัดแน่นเกินตัว (OC – Clay) ส่วนใน S-1, S-2, S-5 ไม่สามารถบอกได้ชัดเจนเนื่องมาจากแรงดูดของดิน (Suction) ในการทดสอบมีค่าที่ต่ำ

ตารางที่ 1 ตารางสรุปผลการทดสอบ Suction-monitored Unconfined

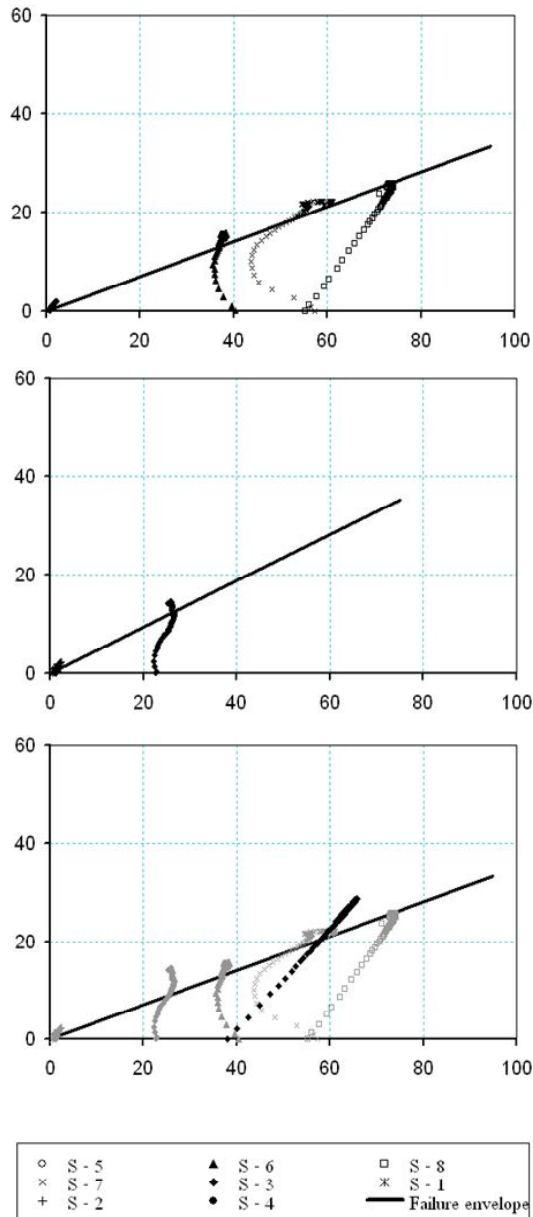
| Compression Test | | | | | | |
|------------------|------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------------|--------|
| Sample | Depth (m.) | Rate mm/min | W/C (initial) (%) | Suction (initial) kPa. | W/C (final) (%) | Sr (%) |
| 1 | 3.5-4.0 | 0.5 | 114.18 | 0.68 | 108.44 | 95.54 |
| 2 | 3.5-4.0 | 2 | 120.47 | 1.14 | 117.24 | 98.00 |
| 3 | 0.5-1.0 | 0.1 | 56.88 | 37.95 | 54.88 | 98.53 |
| 4 | 3.5-4.0 | 0.1 | 95.07 | 22.27 | 89.70 | 95.70 |
| 5 | 2.5-3.0 | 0.1 | 123.84 | 0.91 | 120.87 | 96.90 |
| 6 | 2.5-3.0 | 0.1 | 67.85 | 40.45 | 67.43 | 95.15 |
| 7 | 2.0-2.5 | 0.1 | 78.24 | 57.27 | 76.65 | 97.08 |
| 8 | 2.5-3.0 | 0.1 | 73.22 | 55.23 | 70.31 | 97.59 |



ภาพที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและแรงดันน้ำกับความเครียดจากการทดสอบ S-UC-Test (ความลึก 2.5-3.0 เมตร)

จากตัวอย่าง S – 3 (ภาพที่ 8 (ค.)) เป็นดินเหนียวที่มีสภาพอัดแน่นเกินตัว (OC – Clay) และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูง เนื่องจากเป็นดินตัวอย่างบริเวณ Crust zone (1-2 เมตร)

จากงานวิจัยนี้ศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้เท่ากับ $c' = 0, \phi' = 20.5^\circ$ (ตารางที่ 2) ซึ่งมีค่าที่สอดคล้องจากการทดสอบแรงอัดสามแกน (Manoon, 1969) กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ความลึกประมาณ 1 – 5 เมตร จากบริเวณรังสิตปทุมธานี ซึ่งได้ค่า $c' = 0, \phi' = 17.2 - 21.9^\circ$



ภาพที่ 8 กราฟแสดงทางเดินและเส้นขอบเขตการวิบัติในรูปหน่วยแรงประสิทธิผลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จากการทดสอบ S-UC-Test (ก.) ความลึก 2.0 – 3.0 เมตร (ข.) ความลึก 3.5 – 4.0 เมตร (ค.) ความลึก 0.5 – 4.0 เมตร

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เครื่องมือ Tensiometer กับการทดสอบ Unconfined compression test แบบวัดแรงดูด ค่ากำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลที่ได้จากการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต เนื่องจากการทดสอบ Unconfined Compression Test เป็นการทดสอบที่ง่าย และใช้มากที่สุดในประเทศไทย วิธีการนี้จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าอย่างมากให้กับ

ทดสอบ UC – Test สำหรับดินเหนียวอ่อนในช่วงค่า Effective stress เท่ากับ 0 ถึง 100 kPa.

ตารางที่ 2 ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล จากการทดสอบ S - U C - Test

| Depth | $At (\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ | | | |
|---------|----------------------------------|-----------------|--------------------------|---------------|
| | Stress Path Parameter | | Mohr – Coulomb Parameter | |
| | $\alpha'^{(1)}$ | $\alpha'^{(2)}$ | $c'^{(1)}$ | $\phi'^{(2)}$ |
| 2.0-3.0 | 0 | 19.3 | 0 | 20.5 |
| 3.5-4.0 | 0 | 25.2 | 0 | 28 |

¹ a', c' : kPa

² α', ϕ' : Degrees

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนหลักขอขอบคุณ ดร. อภินิธิ โชติสังกัส ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและวิธีการในการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่างๆ และโครงการก่อสร้างคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บดินตัวอย่าง

6. บรรณานุกรม

- [1] อภินิธิ โชติสังกัส และ วิชญพงศ์ พ่อถึละ, 2551ข. การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำในดิน. การประชุมวิชาการครั้งที่ 46 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บางเขน 29 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ 2551
- [2] Bishop A. W. (1959). *The principle of effective stress*. Teknisk Ukeblad 39, pp.859-863
- [3] Cunningham, M. R., Ridley, A. M., Dineen, K. & Burland, J. J. (2003). *The mechanical behaviour of a reconstituted unsaturated silty clay*. Geotechnique 53, No. 2, 183–194
- [4] Jotisankasa, A., Porlila, W., Soralump, S., Mairiang W. (2007). *Development of a low cost miniature tensiometer and its applications*. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, Nanjing, China.
- [5] Lambe, T.W. and R.B. Whitman (1979). *Soil Mechanics*, SI Version. John Wiley and Sons Inc., New York. 553 p.
- [6] Manoon Arayasiri, (1969). *Shear strength characteristics of bangkok clay in the weathered zone*. Master's Thesis, Asian Institute of Technology.
- [7] Ridley, A. M. & Burland, J. B. 1993. *A new instrument for the measurement of soil moisture suction*. Geotechnique 43, No. 2, 321–324.
- [8] Terzaghi, K., R.B. Peck, G. Mesri (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons Inc., New York.