

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินเหนียว ออกจากกระบอกบางกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ The relationship between soil extrusion force in soil extrusion process and undrained shear strength

สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวัชร* ภัณฑิลา กองศรี และ นครินทร์ ศรีวิชัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

*Corresponding author; E-mail address: Sitthiphath@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินเหนียวออกจากกระบอกบางกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้านี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างด้วยกระบอกบางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว ทำการเจาะเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึกทุก ๆ 1 เมตร จนถึง 15 เมตร จำนวนทั้งสิ้น 7 หลุมเจาะ จำนวนตัวอย่างรวม 105 ตัวอย่าง ค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก โดยที่ค่าขีดจำกัดเหลวอยู่ในช่วง 26.33-88.10% ค่าขีดจำกัดพลาสติกอยู่ในช่วง 15.42-49.31% และค่าปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 12.41-75.88% ผลการศึกษาพบว่าแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกบางมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

คำสำคัญ: ดินเหนียวกรุงเทพฯ, กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ, เครื่องดันดิน, การทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ

Abstract

This research aims to study the relationship between the extrusion force applied to the soil sample during the soil extrusion process and the undrained shear strength from the unconfined compression test. A total of 105 samples were obtained from seven boreholes with a thin wall of 2.5-inch diameter. Samples were collected at every one meter up to 15 meters belowground. Atterberg's limit of the soil sample, including Liquid Limit (L.L.), is in the range of 26.33-88.10%, the Plastic Limit(P.L.) is in the range of 15.42-49.31%, and the natural moisture content is in the range of 12.41-75.88%. The study found that the extrusion force applied to the soil sample is directly related to the undrained shear strength.

Keywords: Bangkok clay, Undrained shear strength, Extrusion Machine, Unconfined Compression Test

1. บทนำ

ในการก่อสร้างโครงสร้างต่าง ๆ นั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการตรวจสอบลักษณะของชั้นดินในบริเวณที่ตั้งของโครงการเพื่อตรวจสอบชนิดและคุณสมบัติทางวิศวกรรม ก่อนที่จะนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการออกแบบฐานรากให้มีความแข็งแรง ประหยัดและปลอดภัย โดยทั่วไปการตรวจสอบลักษณะของชั้นดินจะทำการเจาะสำรวจและทดสอบความแข็งแรงของดินทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ

วิธีการเก็บตัวอย่างดินในสนามเพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นที่นิยมจะทำการเก็บตัวอย่างดินเหนียวแข็งและดินทรายด้วยกระบอกผ่า (Split spoon sampler) ซึ่งการเก็บตัวอย่างกระบอกผ่านั้นจะทำการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard penetration test, SPT) [1] ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบจะเรียกว่าค่า SPT-N ซึ่งสามารถระบุความแข็งแรงของดินเบื้องต้นในสนามได้เลย อย่างไรก็ตามตัวอย่างดินที่ได้จากกระบอกผ่านี้เป็นตัวอย่างดินที่ถูกรบกวน (Disturbed sample) ซึ่งสามารถนำไปทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้เพียงบางการทดสอบเท่านั้น สำหรับตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสามารถเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนได้โดยการใช้กระบอกบาง (Thin wall tube) โดยตัวอย่างดินเหนียวที่ได้นี้เป็นตัวอย่างดินที่ไม่รบกวน (Undisturbed sample) สามารถนำไปทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ทุกการทดสอบ เมื่อทำการเก็บตัวอย่างจากสนามแล้วจะต้องทำการดันตัวอย่างดินออกจากกระบอก เครื่องมือดันดินนั้นมีอยู่สองแบบ ได้แก่เครื่องดันดินแบบใช้แรงคนและเครื่องดันดินระบบไฮดรอลิก จากการสังเกตกระบวนการการดันดินแบบใช้แรงคนพบว่าตัวอย่างดินเหนียวอ่อนนั้นสามารถดันออกจากกระบอกได้ง่ายและรวดเร็ว ส่วนตัวอย่างดินเหนียวแข็งนั้นต้องใช้แรงที่มากขึ้นในการดันตัวอย่างดินออกจากกระบอก

การศึกษาค้นคว้านี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินเหนียวออกจากกระบอกบาง (Extrusion force) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) [2] เพื่อเป็นอีกทางเลือกสำหรับการทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok Clay)

ดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) เป็นตะกอนชั้นบนที่พบในบริเวณกว้างตลอดที่ราบลุ่มภาคกลางของประเทศไทย Ohtsubo และคณะ. [3] ศึกษาส่วนประกอบทางเคมีและแร่ธาตุของดินเหนียวกรุงเทพ พบว่า ดินเหนียวกรุงเทพประกอบไปด้วยแร่ Smectite เป็นส่วนใหญ่ ค่าขีดจำกัดเหลวอยู่ระหว่าง 100% ถึง 140% และค่าความไวอยู่ระหว่าง 1.25 ถึง 1.90 โดยชั้นดินเหนียวกรุงเทพแบ่งออกได้เป็นสามชั้น ชั้นบนสุดมีความหนาประมาณ 2-5 เมตร เป็นชั้นดินเหนียวปนซิลต์แข็งปานกลาง มีค่า SPT-N อยู่ระหว่าง 2-21 และเนื้อดินมีความชื้นธรรมชาติอยู่ระหว่าง 10% - 35% ชั้นกลางของดินเหนียวกรุงเทพที่เป็นชั้นดินเหนียวอ่อน มีความลึกตั้งแต่ลึก 3-12 เมตร มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำอยู่ระหว่าง 10-25 kN/m² เนื้อดินมีความชื้นธรรมชาติอยู่ระหว่าง 60% - 105% ชั้นล่างของดินเหนียวกรุงเทพเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมาก อยู่ในระดับความลึก 15-35 เมตร มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำอยู่ระหว่าง 26-160 kN/m² เนื้อดินมีความชื้นธรรมชาติอยู่ระหว่าง 15% - 60% นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาคุณสมบัติวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพและผลลัพธ์สรุปไว้ในตาราง 1 [4-7]

2.2 ตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed sample)

ตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed sample) เป็นตัวอย่างดินที่เก็บจากสนามโดยพยายามรักษารูปทรงและโครงสร้างของดินให้เหมือนกับสภาพจริงในสนาม การเก็บตัวอย่างดินคงสภาพจะใช้กระบอกเก็บตัวอย่างชนิดกระบอกบาง (Thin Wall Tube) หรือกระบอกลูกสูบ (Piston sampler) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว ยาว 50 เซนติเมตร ในชั้นดินที่มีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง ในการเก็บตัวอย่าง จะทำการกดกระบอกบางลงไปในชั้นดิน ตัวอย่างดินจะติดอยู่ในกระบอกบาง และถูกดึงขึ้นมาพร้อมกับกระบอกบาง ตัวอย่างดินที่ถูกเก็บขึ้นมาจากหลุมเจาะจะถูกบันทึกชนิดดิน และสีด้วยสายตา (Visual Classification) แล้วใช้พาราฟินปิดที่ปลายกระบอกทั้งสองด้านไว้กั้นการระเหยของน้ำ หมายเลขตัวอย่าง ความลึก วันที่เก็บตัวอย่าง ชื่อหลุมเจาะ ชื่อโครงการ และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง จะถูกบันทึกลงบนกระดาษติดกระบอกบางทุกกระบอกก่อนส่งเข้าห้องทดสอบ และทำการขนส่งอย่างระมัดระวัง (ดินตัวอย่างได้รับการกระทบกระเทือนน้อยที่สุด) ซึ่งดินตัวอย่างชนิดนี้จะใช้ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการต่อไป

2.3 กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u)

กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ คือกำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาพที่น้ำไม่สามารถไหลเข้าหรือออกจากตัวอย่างดินระหว่างกระบวนการเฉือน กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินเนื้อละเอียด เช่น ดินเหนียวและดินตะกอน กำลังรับแรงเฉือน

แบบไม่ระบายน้ำสามารถหาได้จากวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบในสนาม ทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น การทดสอบกำลังรับแรงอัดสามแกนแบบ Unconsolidated undrained (UU) การทดสอบกำลังรับแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated undrained (CU) การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง การทดสอบการเจาะมาตรฐาน (SPT) การทดสอบการทะลุผ่านกรวย (CPT) และการทดสอบแรงเฉือนแบบใบพัด

วิธีหาลำดับรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินที่ง่ายและรวดเร็ว คือการทดสอบ Unconfined compression test [2] ซึ่งทำการทดสอบโดยให้แรงกดในแนวตั้งต่อตัวอย่างดินเหนียวรูปทรงกระบอกโดยไม่มีแรงดันทางด้านข้าง ทำการทดสอบกับตัวอย่างดินคงสภาพที่อิ่มตัวด้วยน้ำและไม่ระบายน้ำระหว่างการทดสอบ และในบางกรณีอาจทดสอบกับตัวอย่าง remolded และตัวอย่างดินบดอัด ตัวอย่างดินควรดินควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 33 มิลลิเมตร (1.3 นิ้ว) และใหญ่กว่าขนาดอนุภาคดินใหญ่ที่สุดมากกว่า 6 เท่า อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 2-2.5 เท่า ให้แรงต่อตัวอย่างดินด้วยอัตรา axial strain 0.5-2%/นาที และการทดสอบโดยทั่วไปจะกดตัวอย่างจน axial strain เท่ากับ 15% โดยควรใช้เวลาไม่เกิน 15 นาที



รูปที่ 1 เครื่องมือทดสอบ Unconfined compression test

ผลการทดสอบเสนอในรูปแบบกราฟ stress-strain โดยค่า strain คำนวณตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ สภาพการวิบัติดินนิยามว่าเป็นค่าสูงสุดของ total vertical stress (σ_v) ซึ่งเรียกว่า Unconfined compressive strength (q_u) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) นิยามว่าเป็นรัศมีของ Mohr's circle ซึ่งเท่ากับ maximum shear stress (τ_{max}) ดังสมการที่ (3)

$$\sigma_v = \frac{P}{A_c} \quad (1)$$

$$\epsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (2)$$

$$S_u = \tau_{max} = \frac{q_u}{2} \quad (3)$$

โดยที่

P คือแรงกดในแนวตั้ง

A_c พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

ΔH คือการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างดินระหว่างการทดสอบ

H_0 คือความสูงเริ่มต้นของตัวอย่างดิน

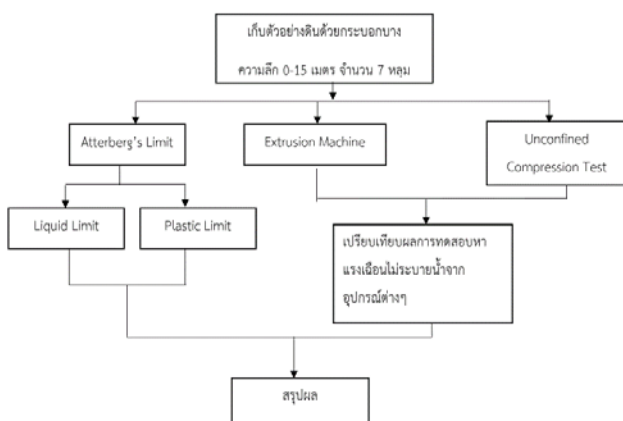
โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสามารถจำแนกความแข็งแรงของชั้นดิน [8] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจำแนกความแข็งแรงของดินเหนียวจากค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ [8]

Consistency	S_u (kPa)
Very soft	<12.5
Soft	12.5–25
Medium	25–50
Stiff	50–100
Very stiff	100–200
Hard	>200

3. ขั้นตอนการศึกษา

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินเหนียวออกจากกระบอกบางกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ โดยทำการเก็บตัวอย่างดินเหนียวด้วยกระบอกบาง ที่ความลึก 0-15 เมตร จำนวน 7 หลุม ห่างกันหลุมละ 1 เมตร จำนวนตัวอย่างรวม 105 ตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างกระบอกบางที่ได้มาทำการดันออกด้วยเครื่องดันดินแบบวัดแรงดันดินได้ นำตัวอย่างดินไปทดสอบ Atterberg' Limit [9] การจำแนกดิน[10] และ Unconfined Compression Test [2] จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบหาแรงเฉือนไม่ระบายน้ำที่ทดสอบได้ โดยขั้นตอนการศึกษาแสดงดังรูปที่ 2

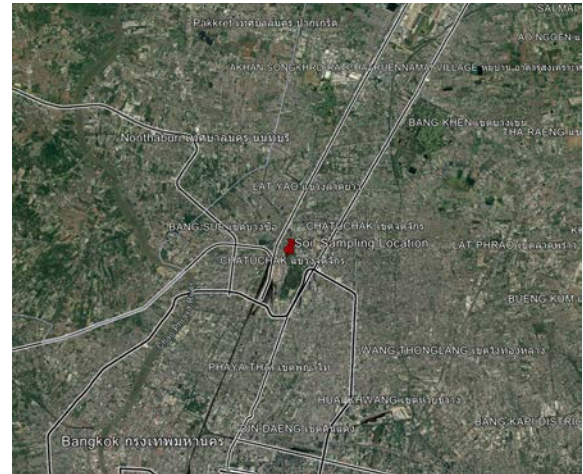


รูปที่ 2 ขั้นตอนการศึกษา

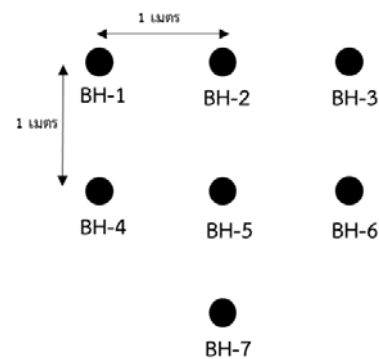
3.1 สถานที่เก็บตัวอย่าง

สถานที่เจาะเก็บตัวอย่างคือ กองวิศวกรรมวิจัย ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย แขวงจตุจักร เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร (1528092.00 N 667607.00 E) ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างด้วยกระบอกบาง (Thin wall tube) ขนาด 2.5" ทำการเจาะเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึกทุก ๆ 1 เมตร จนถึง 15 เมตร จำนวนทั้งสิ้น 7 หลุม เจาะมีระยะห่างกันหลุมละ 1 เมตร โดยดำเนินการเจาะเก็บตัวอย่างดินระหว่างวันที่ 24-26 เดือนพฤศจิกายน 2564 ตำแหน่งที่ทำการเจาะสำรวจ

ชั้นดินแสดงดังรูปที่ 3 ผังตำแหน่งการเจาะเก็บตัวอย่างดิน แสดงดังรูปที่ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 ตำแหน่งที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างดิน



รูปที่ 4 ผังตำแหน่งการเจาะชั้นดิน

3.2 การวัดแรงที่เกิดขึ้นจากการดันดินออกจากกระบอกบาง

การศึกษาครั้งนี้จะทำการติดตั้งวงแหวนวัดแรง (Proving ring) เพื่อใช้ในการวัดแรงที่เกิดขึ้นจากการดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกบาง โดยบันทึกและกำหนดค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นเป็น แรงดันดินสูงสุด (Maximum extrusion force) จากนั้นนำตัวอย่างดินเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้แก่ การทดสอบ Unconfined compression test ทดสอบค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก ทดสอบค่าปริมาณความชื้น



รูปที่ 5 การติดตั้งกระบอกบางเพื่อทำการดันดิน



รูปที่ 6 วงแหวนวัดแรงดันที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินจากกระบอกบาง



รูปที่ 7 ตัวอย่างดินที่ดันออกมาจากเครื่องดันดิน

4. ผลการศึกษา

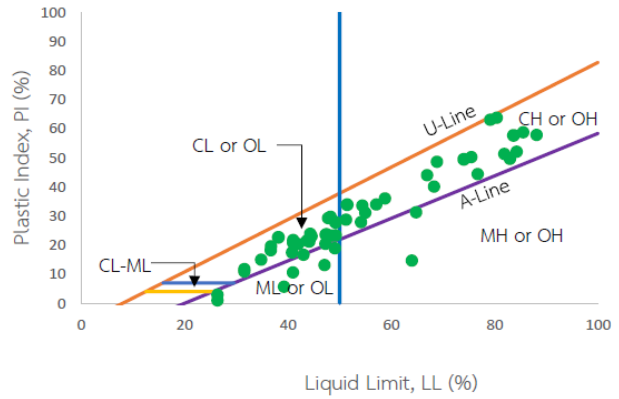
ตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบถูกเก็บด้วยกระบอกบางที่มีความลึก 0-15 เมตร จำนวน 7 หลุม รวม 105 ตัวอย่าง ตัวอย่างดินจะถูกนำมาดันออกจากกระบอกบางด้วยเครื่องดันดิน ทำการทดสอบหาค่า Atterberg Limit ได้แก่ Liquid Limit, Plastic Limit และทำการทดสอบ Unconfined Compression Test ทั้งนี้ตัวอย่างที่ระดับความลึก 0 – 2 เมตรไม่ได้นำมาพิจารณาเนื่องจากชั้นดินที่ระดับดังกล่าวมีอาจมีการรบกวนจากกิจกรรมในพื้นที่และจากการดันตัวอย่างกระบอกบางพบว่าตัวอย่างที่สามารถนำไปทดสอบ Unconfined Compression Test ได้เพียง 64 ตัวอย่างเท่านั้น ผลการทดสอบต่างๆ แสดงดังนี้

4.1 ผลการทดสอบค่าขีดจำกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limit)

ผลการทดสอบค่าขีดจำกัดแอตเตอร์เบิร์กของตัวอย่างดินเหนียว แสดงดังตารางที่ 1 เมื่อนำมาจำแนกประเภทของดินด้วยวิธีของ Unified Soil Classification System(USCS) พบว่าดินตัวอย่างที่นำมาทดสอบอยู่ในช่วงของดินประเภท CH และ CL ดังแสดงในรูปที่ 8

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าขีดจำกัดแอตเตอร์เบิร์กของตัวอย่างดินเหนียว

ความลึก	Wn,(%)	LL,(%)	PL,(%)
2-14	12.41 – 75.88	26.33 – 88.10	15.42 – 49.31
14-15	21.36 – 47.61	31.54 – 80.39	15.42 – 26.79

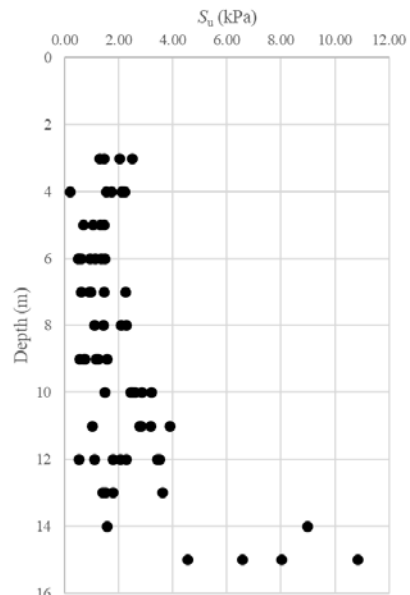


รูปที่ 8 การจำแนกประเภทดินด้วยวิธี USCS

4.2 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined Compression Test)

การทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined Compression Test) ทำโดยให้แรงกดในแนวตั้งต่อตัวอย่างดินเหนียวรูปทรงกระบอกโดยไม่มีแรงดันทางด้านข้าง โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างดินคงสภาพที่อิ่มตัวด้วยน้ำและไม่ระบายน้ำระหว่างการทดสอบ ซึ่งการเตรียมตัวอย่างดิน ดินจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 6.5 เซนติเมตร มีความสูงอยู่ที่ 10 และ 13 เซนติเมตร ซึ่งตัวอย่างแบ่งออกเป็นทั้งหมด 7 หลุม แต่ละหลุมจะมีความลึกอยู่ที่ 0-15 เมตร ผลการทดสอบเมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) มาเปรียบเทียบกับความลึกได้ผลตามรูปที่ 9

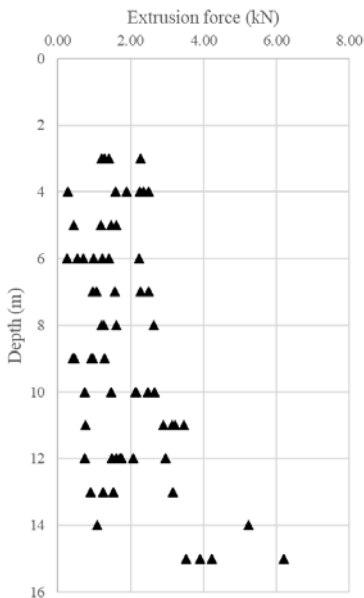
ผลจากการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined Compression Test) ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) ค่อนข้างไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำต่ำที่สุดคือ 0.19 kPa ค่าสูงที่สุดคือ 10.83 kPa มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.18 kPa สามารถจำแนกตาม [8] ได้เป็น Very soft clay



รูปที่ 9 ค่า S_u จากการทดสอบ UC Test ที่ความลึกต่างๆ

4.3 ผลการวัดแรงดันดินจากเครื่องดันตัวอย่างดิน

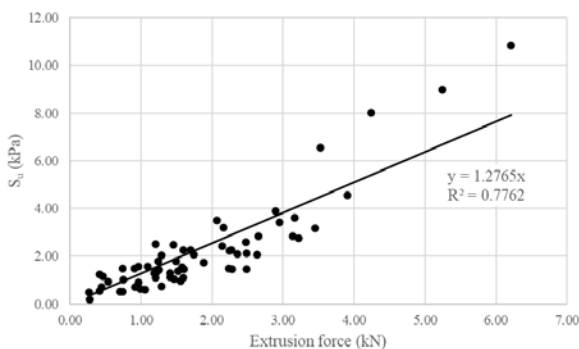
ผลการวัดแรงดันดินที่ใช้ในการดันดินออกจากกระบอกบาง ที่ระดับความลึกต่างๆ แสดงดังรูปที่ 10 ค่าแรงสูงที่สุดที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกบาง (Extrusion force) มีค่าเท่ากับ 6.21 kN จากตัวอย่างที่เก็บจากหลุมเจาะ BH-5 ที่ความลึก 15 เมตร และค่าแรงน้อยที่สุดที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกบางมีค่าเท่ากับ 0.26 kN จากตัวอย่างที่ระดับความลึก 6 เมตร ของหลุมเจาะ BH-3 มีค่าเฉลี่ยของแรงที่ใช้ในการดันดินมีค่าเท่ากับ 1.83 kN ในภาพรวมพบว่าค่าแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกบางมีความสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ



รูปที่ 10 ค่าแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินที่มีความลึกต่างๆ

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่าแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดิน

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินเหนียวออกจากกระบอกบาง (Extrusion Force) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) จากการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined Compression Test) แสดงดังรูปที่ 11 โดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 4



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ S_u จากการทดสอบ UC Test และ Extrusion Force

$$S_u = 1.2765x \quad (4)$$

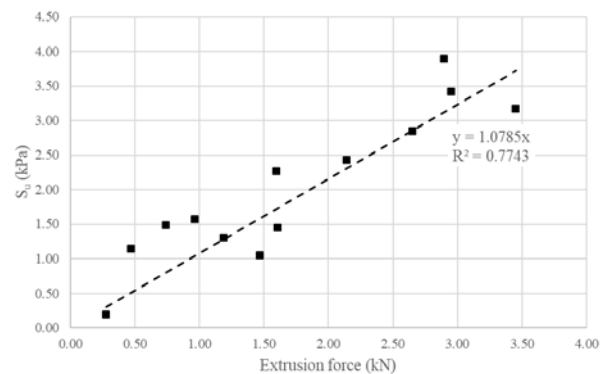
เมื่อ S_u คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และ x คือค่าแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดิน

จากความสัมพันธ์พบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบที่ระดับแรงดันดินน้อยกว่า 3 kN มีค่าที่เกาะกลุ่มกันดี ส่วนที่ระดับแรงดันดินที่มากกว่า 3 kN ความสัมพันธ์ที่ปรากฏยังห่างจากเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์อยู่พอสมควร อาจส่งผลถึงความเชื่อมั่นในการนำสมการความสัมพันธ์ไปทำนายค่าในอนาคต

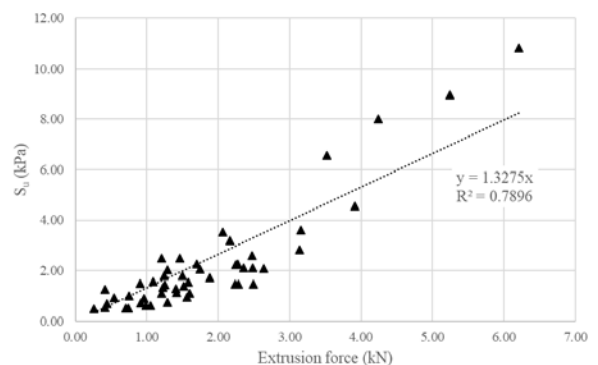
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินเหนียวออกจากกระบอกบางกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ในกรณีของ High plasticity clay (CH) ความสัมพันธ์ที่ปรากฏเป็นที่น่าพอใจ โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำแปรผันตรงกับค่าแรงดันดิน พบความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 5 และรูปที่ 12 ส่วนกรณีของ Low plasticity clay (CL) ความสัมพันธ์ที่ปรากฏสอดคล้องกับกรณีดินเหนียวอ่อนในภาพรวมคือเมื่อค่าแรงดันดินมีค่ามากกว่า 3 kN ความสัมพันธ์ที่ปรากฏยังห่างจากเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์อยู่พอสมควร ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงในสมการที่ 6 และรูปที่ 13 ตามลำดับ

$$S_u = 1.0785x \quad (5)$$

$$S_u = 1.3275x \quad (6)$$



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ S_u จากการทดสอบ UC Test และ Extrusion Force สำหรับ High plasticity clay (CH)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ S_u จากการทดสอบ UC Test และ Extrusion Force สำหรับ Low plasticity clay (CL)

5. บทสรุป

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินเหนียวออกจากกระบอกบางกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระเพื่อเป็นแนวทางในการทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) แปรผันตรงกับค่าแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดิน (Extrusion Force) โดยสมการที่ดีที่สุดในการทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากค่าแรงที่ใช้ในการดันตัวอย่างดินเหนียวออกจากกระบอกบางของดินเหนียวกรุงเทพฯ มีดังนี้

- ดินเหนียวไม่จำแนกประเภท, $S_u = 1.2765x$ ($R^2 = 0.7762$)
- CH, $S_u = 1.0785x$ ($R^2 = 0.7743$)
- CL, $S_u = 1.3275x$ ($R^2 = 0.7896$)

การประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันดินและค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ มีข้อสังเกตว่าที่ระดับแรงดันดินที่มากกว่า 3 kN ความสัมพันธ์ที่ปรากฏยังห่างจากเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์อยู่พอสมควร อาจส่งผลถึงความเชื่อมั่นในการนำสมการความสัมพันธ์ไปทำนายค่าในอนาคต ดังนั้นอาจต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมในอนาคตเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับสมการทำนายค่าดังกล่าวสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนโครงการทางวิศวกรรมสำหรับนิสิตปริญญาตรี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 สัญญาที่ PJ.4/2565 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM International. (2011). ASTM D1586-11: Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. American Society for Testing and Materials.
- [2] ASTM International. (2016). ASTM D2166-16: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. American Society for Testing and Materials.
- [3] Ohtsubo, M., Ishihara, K., Bergado, D. T., & Shibuya, S. (2002). Engineering properties of Bangkok clay. *Soils and Foundations*, 42(5), 45-57.
- [4] Yimsiri, S., Ratananikom, W., Fukuda, F., & Likitlersuang, S. (2013). Undrained strength-deformation characteristics of Bangkok Clay under general stress condition. *Geomechanics and Engineering*, 5(5), 419-445. DOI: 10.12989/gae.2013.5.5.419
- [5] Surarak, C., Likitlersuang, S., Wanatowski, D., Balasubramaniam, A., Oh, E., & Guan, H. (2012). Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and

- stiff Bangkok clays. *Soils and Foundations*, 52(4), 682-697. DOI: 10.1016/j.sandf.2012.07.009
- [6] Horpibulsuk, S., Yangsukkaseam, N., Chinkulkijniwat, A., & Du, Y. J. (2011). Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite. *Applied Clay Science*, 52(1-2), 150-159. DOI: 10.1016/j.clay.2011.02.014
- [7] Pholkainuwatra, P., Eua-apiwatch, S., & Yimsiri, S. (2021). Experimental study of pile set-up of driven piles in Bangkok Clay. *Engineering Applied Science Research*, 49(1), 96-102. DOI: 10.14456/easr.2022.11
- [8] K. Terzaghi, Ralph Brazelton Peck. (1948). Soil mechanics in engineering practice. New York: J. Wiley
- [9] ASTM International. (2017). ASTM D4318-17: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. American Society for Testing and Materials.
- [10] ASTM International. (2017). ASTM D2487-17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). American Society for Testing and Materials.