

พฤติกรรมแบบสถิตของดินอ่อนขึ้นรูปใหม่ที่สภาวะความเค้นสูงสุดในอดีตที่แตกต่างกัน ภายใต้การทดสอบแรงอัดสามแกน

Static Behavior of Reconstituted Soft Soil in Different Maximum Past Pressure under Triaxial Test

ภุริวิทย์ ใจแก้ว^{1,*} พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม¹ และ ธวัชชัย ต้นชัยสวัสดิ์¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

*Corresponding author; E-mail address: Phuriwit_jaikaw@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

ดินอ่อน (Soft soil) มักพบในบริเวณที่ความลึกตื้น ๆ บ่อยครั้งดินถูกรบกวนจากการเก็บตัวอย่าง อีกทั้งพบปัญหาความแปรปรวนของสมบัติดิน เช่น ความชื้น หน่วยน้ำหนัก การรับน้ำหนักในอดีต รวมถึงการเจือปนของอินทรีย์วัตถุในดินบริเวณตื้น (แรงดันดินโอบรัดที่ต่ำ) ซึ่งทำให้ผลการทดสอบขาดความน่าเชื่อถือ เพื่อที่จะลดความแปรปรวนของสมบัติเริ่มต้นของดิน ในงานวิจัยนี้ดินอ่อนจำลองเกลินจะถูกเตรียมตัวอย่างโดยวิธีการเร่งการอัดตัวคายน้ำ จากการให้ความเค้นสูงสุดที่แตกต่างกัน 3 ตัวอย่าง เพื่อสร้างตัวอย่างดินที่อัดตัวแบบปกติ (OCR = 1) และตัวอย่างดินที่อัดตัวมากกว่าปกติ (OCR = 3, 5) จากนั้นตัวอย่างจะถูกทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบอัดตัวไม่ระบายน้ำ (CU test) ที่ระดับแรงดันดินโอบรัด 40 กิโลปาสกาล ผลจากการเตรียมตัวอย่างดินพบว่าสามารถควบคุมและลดความแปรปรวนของสมบัติดินเบื้องต้นได้ และผลการทดสอบด้านกำลัง พบว่ากำลังดินจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนของการอัดตัวสูงขึ้น และค่าของแรงดันน้ำในมวลดินจะลดลงหลังจากที่ดินเริ่มขยายตัวออก และค่าจะลดลงมากเมื่อการอัดตัวของดินเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การประมาณกำลังของดินเกลินจากแรงเฉือนปรับแก้ (Normalized shear strength) พบว่าสมการที่ได้ใกล้เคียงกับดินทรายแข็งที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ

คำสำคัญ: วิธีการเร่งการอัดตัวคายน้ำจากสภาวะเหลว, ความเค้นสูงสุดในอดีต, ดินทรายแข็งที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ, การทดสอบแรงอัดสามแกน

Abstract

Soft soils are poorly stable soils. Usually found at shallow depths, the soil is often disturbed by sampling. In addition, the variability of soil properties such as moisture content, unit weight, maximum past pressure, and the contamination of organic matter in the shallow depth which makes test results unreliable. To reduce the variability of the soil's initial properties. In this research, the kaolin clay was prepared by

slurry consolidation method. Three different maximum stresses were applied to create a normally consolidated soil (OCR = 1) and two overconsolidated soil (OCR = 3, 5). After that samples were tested by a consolidated undrained triaxial test (CU test) under a constant 40 kPa of confining pressure. The sample preparation displayed that the variability of the initial soil properties can be controlled. From the shear test results, they were found that soil strength tends to increase as the OCR increases. Pore pressure in the soil mass decreased after the soil begins to expand and the value dropped greatly as OCR increases. In addition, the normalized shear strength estimation of kaolin soils showed that the obtained equation was close to that of low-plasticity silt.

Keywords: Slurry consolidation, Maximum past pressure, Low-plasticity silt, Triaxial test

1. ที่มาและความสำคัญ

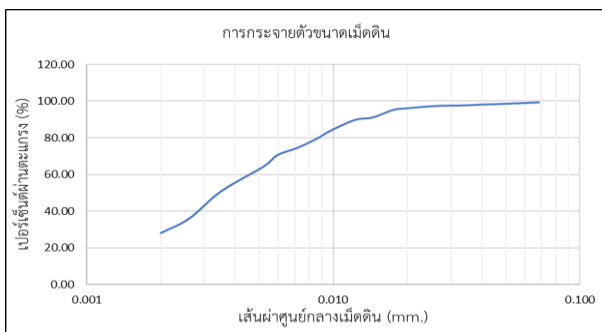
โดยทั่วไปดินอ่อนมักจะถูกพบในบริเวณตื้น แรงดันดินโอบรัดที่ต่ำ บ่อยครั้งการเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการทำได้ยาก เนื่องจากดินมีสภาพที่อ่อนถูกรบกวนได้ง่าย โดยเฉพาะดินที่มีระดับความชื้นสูง ดินอ่อนที่ความลึกไม่มากก็ยังถูกเจือปนด้วยอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ทำให้ผลการทดสอบทางวิศวกรรมที่ได้คลาดเคลื่อน ด้วยเหตุนี้จึงมีการประยุกต์การเตรียมตัวอย่างดินใหม่ เช่น วิธีการเร่งการอัดตัวคายน้ำจากสภาวะเหลว (Slurry consolidation) วิธีนี้เป็นการเร่งการตกตะกอนของเม็ดดินจากสภาวะเหลว ซึ่งทำให้ตัวอย่างดินเกิดการคงตัวได้ไวและสามารถลดความแปรปรวนของสมบัติดินเบื้องต้นได้ [1] นอกจากนี้ดินอ่อนในบริเวณใกล้ผิวดิน โดยทั่วไปมักเป็นดินที่อัดตัวแบบปกติ (Normally consolidated soil) ทำให้งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งศึกษาเฉพาะดินอ่อนอัดตัวแบบปกติ ซึ่งในความเป็นจริงดินอ่อนอาจจะเกิดการอัดตัวมากกว่าปกติ (Overconsolidated soil) เนื่องมาจากการก่อสร้างที่ต้องการเพิ่ม

เสถียรภาพของดินอ่อน เช่น การก่อสร้างถนน ทางรถไฟ โดยในบางพื้นที่มีการให้น้ำหนักกดทับกับพื้นดิน หรือเร่งการอัดตัวคายน้ำแบบสุญญากาศ เพื่อเพิ่มกำลังของดินที่อ่อน ส่งผลให้ความเค้นในอดีตของดินอ่อนในแต่ละที่แตกต่างกันไป มีงานวิจัยพบว่าระดับการอัดตัวมากกว่าปกติของดินเหนียวมีอิทธิพลต่อการทรุดตัวของดินเหนียวพื้นทาง [2] นอกจากนี้ดินอ่อนที่อัดตัวมากกว่าปกติ จะแสดงพฤติกรรมมารับแรงเฉือนและแรงดันน้ำในมวลดินที่แตกต่างกัน [3]

จากการที่ดินเหนียวสังเคราะห์เป็นดินที่มีแร่ดินเหนียวเคลโอลินในส่วนใหญ่ สมบัติคงที่และหาได้ง่ายตามท้องตลาด ในงานวิจัยนี้การเตรียมตัวอย่างดินอ่อนเหนียวจะถูกเตรียมด้วยวิธีการเร่งการอัดตัวคายน้ำจากสภาวะเหลวโดยให้น้ำหนักกดทับสูงสุดแตกต่างกัน เพื่อสร้างสภาวะการอัดตัวของดิน จากนั้นตัวอย่างดินจะถูกนำไปทดสอบหาพฤติกรรมด้านกำลังโดยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน

2. สมบัติของดินที่ใช้ทดสอบ

ดินที่ใช้ทดสอบคือ ดินเหนียว ซึ่งเป็นดินที่มีแร่ดินเหนียวเคลโอลินเป็นส่วนใหญ่ จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพ พบว่าดินชนิดนี้มีค่าขีดจำกัดเหลว (LL) เท่ากับ 36.50% ค่าขีดจำกัดพลาสติก (PL) เท่ากับ 25.62% ค่าดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับ 10.88% และค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.73 และการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน

จากค่าของดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับ 10.88% และปริมาณขนาดของเม็ดดินที่เล็กกว่า 2 ไมครอน ที่ 28.1% ดังนั้นดินชนิดนี้ถูกจำแนกเป็น ML [4]

3. วิธีการเตรียมตัวอย่างดิน

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

อุปกรณ์ในการเตรียมตัวอย่างดินอ่อนจากสภาวะเหลว ถูกประยุกต์ขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์ถูกดัดแปลงมาจากชุดการทดสอบแรงอัดสามแกน ประกอบด้วยฐานและอ่างทรงกระบอก (Base Plate and cell chamber) ที่ถูกยึดเข้าด้วยกันโดยก้านสแตนเลส (Tie rod) นอกจากนี้กระบอกอะคริลิกด้านใน (Inner acrylic Chamber) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 70 มิลลิเมตร สูง 230 มิลลิเมตร ถูกใช้เป็นที่สำหรับใส่ดินเหลว ในส่วนของก้านเพลลา (Loading Piston) เป็นส่วน

ที่ส่งถ่ายน้ำหนักจากแผ่นกระจายน้ำหนัก (Loading plate) ลงสู่ตัวอย่างดินเหลวโดยผ่านพื้นที่รับน้ำหนักส่วนบน (Top cap) พื้นที่ส่วนหัวและท้ายของกระบอกอะคริลิกด้านในจะถูกปิดด้วยกระดาษกรอง (Filter paper) และแผ่นอะคริลิกพรุน (Porous acrylic) เพื่อระบายแรงดันน้ำส่วนเกินทางด้านบนและด้านล่างออกจากตัวอย่าง



รูปที่ 2 วิธีการเตรียมตัวอย่างดิน

3.2 การสร้างตัวอย่างดิน

สำหรับดินเหนียว (Kaolin) โดยทั่วไปจะใช้ปริมาณน้ำในดินเหลว (Water Content) ที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 2 เท่าของพิกัดเหลวของดิน หลังจากผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบ Rotary mixer ดินเหลวจะถูกบ่มไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ เพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน [5] ในการสร้างตัวอย่างดินนี้ ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมกับเม็ดดินอยู่ที่สัดส่วนประมาณ 54.7% ซึ่งเพียงพอที่จะผสมดินให้เหลวเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถเทใส่กระบอกอะคริลิกด้านในได้โดยไม่เกิดการแยกตัวหรือเกิดการเยิ้มขึ้น หลังจาก 1 สัปดาห์ ดินเหลวจะนำมาเทใส่กระบอกอะคริลิกที่ยึดติดกับฐาน ซึ่งผนังด้านในของกระบอกอะคริลิกจะถูกทาน้ำมันหล่อลื่นบางๆ เพื่อลดแรงเสียดทานขณะที่แผ่นอะคริลิกเคลื่อนที่ลง โดยดินเหลวจะถูกเทเป็นชั้น ๆ จากนั้นทำการต่อปั๊มดูดอากาศ (Vacuum pump) เพื่อไล่ฟองอากาศที่ติดอยู่ในดินเหลว จนฟองอากาศหมดถึงเริ่มขึ้นต่อไปจนได้ความสูงดินเริ่มต้น จากนั้นประกอบอ่างทรงกระบอกเข้ากับฐานและเข้าสู่ขั้นตอนของการอัดตัวคายน้ำต่อไป

3.3 ขั้นตอนการเร่งการอัดตัวคายน้ำจากสภาวะเหลว

การเร่งการอัดตัวคายน้ำ ตัวอย่างทั้งสามจะถูกให้ความเค้นในแนวตั้งแต่ละครั้งโดยค้างไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ขบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดก่อน [6] และความเค้นจะถูกเพิ่มด้วย LIR (Load increment ratio) = 1 โดยเริ่มต้นที่ 12.5 kPa จนถึงหน่วยแรงสูงสุด 40, 120 และ 200 kPa โดยระยะเวลาทั้งหมดในการให้ความเค้นแก่ตัวอย่างดิน คือ 10, 15, และ 25 วัน ตามลำดับ

3.4 การเก็บตัวอย่างดิน

การเก็บตัวอย่างดิน ตัวอย่างดินจะถูกดันออกมาโดยใช้แม่แรงยก (Hydraulic Jack) จากนั้นชั่งน้ำหนัก วัดความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลาง และตัดแบ่งดินหัวท้ายเพื่อนำไปทดสอบหาค่าความชื้นในมวลดิน (Water

Content) และจัดเก็บตัวอย่างอย่างระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียความชื้นและรอทดสอบแรงอัดสามแกนต่อไป

3.5 การทดสอบแรงอัดสามแกน

การทดสอบแรงอัดสามแกน เป็นวิธีทดสอบเพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่นิยมมากในห้องปฏิบัติการ เพราะสามารถปรับสภาพของดินเสมือนกับดินในธรรมชาติ ซึ่งเครื่องทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังในรูปที่ 4



รูปที่ 3 เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน

ตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70mm และสูง 140mm จะถูกทดสอบด้วยแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวไม่ระบายน้ำ (CU-Test) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ขั้นตอนการทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation stage) ขั้นตอนการอัดตัวด้วยน้ำ (Consolidation stage) และขั้นตอนการเฉือน (Shearing stage) ดังนี้

3.5.1 ขั้นตอนการทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation stage)

ซึ่งวิธีที่เร็วที่สุดคือการอัดแรงดันน้ำเข้าสู่ตัวอย่างดิน โดยในขั้นตอนนี้แรงดันเซลล์ (Cell pressure) ให้กับตัวอย่างที่ 400 kPa และแรงดันหลัง (Back pressure) 390 kPa เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการตรวจสอบความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน โดยเทคนิคการตรวจสอบการอิ่มตัวด้วยน้ำของดินได้ถูกเสนอโดย บิชอป และเฮนเกล [7] ในการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ Skempton's B coefficient (B - check) ว่ามีค่าเข้าใกล้ 1 หรือไม่ ดังสมการที่ 1

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} \rightarrow 1 \quad (1)$$

โดยตัวแปร B คือ พารามิเตอร์ Skempton's B, Δu คือแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลง และ $\Delta \sigma_c$ คือแรงดันโอบริตที่เปลี่ยนแปลง โดยค่า B ที่กำหนดในการทดสอบนี้คือ 0.95 [8]

3.5.2 ขั้นตอนการอัดตัวด้วยน้ำ (Consolidation stage)

เป็นขั้นตอนการจำลองสถานะความเค้นประสิทธิผลให้เหมือนกับดินในสนาม โดยทำให้แรงดันโอบริตแก่ตัวอย่างดิน แรงดันโอบริตประสิทธิผล (Effective confining pressure, σ'_c) ที่ให้กับตัวอย่างดินทั้งสามสถานะคือ 40 kPa กระบวนการอัดตัวด้วยน้ำในที่นี้ใช้แรงดันเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic consolidation) โดยการอัดตัวด้วยน้ำจะเสร็จสิ้นเมื่อแรงดันน้ำในมวลดินลดลงมากกว่า 95% หรือการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้ำในมวลดินเริ่มคงที่

3.5.3 ขั้นตอนการเฉือน (shearing stage)

เป็นการให้แรงอัดในแนวแกนจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ ซึ่งการให้แรงจะถูกควบคุมด้วยอัตราความเครียด (Strain control) ที่ 1% ต่อหน้าที่ ตามสมการที่ 2

$$\epsilon = \frac{4\%}{10t_{50}} \quad (2)$$

โดยตัวแปร ϵ คือ อัตราความเครียดที่เหมาะสม และ t_{50} คือเวลาการอัดตัวคายน้ำเริ่มต้น (Primary consolidation) ที่ 50% [8]

4. ผลการทดสอบ

4.1 สมบัติดินหลังจากการเตรียมตัวอย่าง

จากการเตรียมตัวอย่างดินทั้ง 3 สถานะ สมบัติทางกายภาพของดินที่เตรียมได้มีความสม่ำเสมอในทุก ๆ สถานะดินดังแสดงตามตารางที่ 1 ความชื้นตัวอย่างดินที่เตรียมได้มีความชื้นที่สูง เข้าใกล้ค่าขีดจำกัดเหลว และดินมีสภาพอ่อน

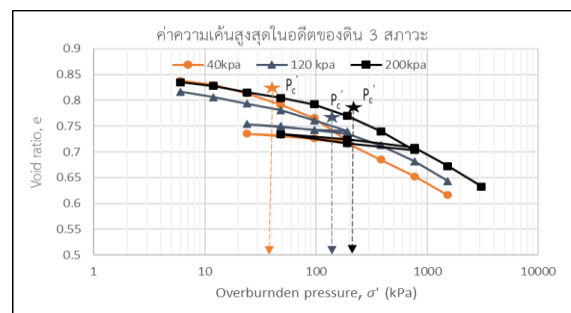
ตารางที่ 1 สมบัติดินหลังจากการเตรียมตัวอย่าง

Maximum past pressure, (kPa)	Initial height, (mm)	Final height, (mm)	W _i (avg), (%)	γ_{wet} , (kN/m ³)	γ_{dry} , (kN/m ³)
40	175	155	32.68	18.84	14.20
120	185	155	33.51	18.75	14.05
200	185	155	34.90	19.12	14.18

ตารางที่ 2 สมบัติดินหลังจากการทดสอบการอัดตัวด้วยน้ำ

Maximum past pressure, (kPa)	Initial void ratio, e_0	Compression index, C_c	Recompression index, C_s
40	0.899	0.117	0.023
120	0.839	0.115	0.024
200	0.859	0.112	0.025

นอกจากนี้มีการยืนยันผลการเตรียมตัวอย่าง ด้วยพฤติกรรมของการอัดตัวคายน้ำจากการทดสอบ Oedometer test [6] พารามิเตอร์หลังจากการทดสอบการอัดตัวด้วยน้ำ พบว่าของค่า e_0 (Initial void ratio) ค่า C_c (Compression index) และค่า C_s (Recompression index) ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันแสดงดังตารางที่ 2

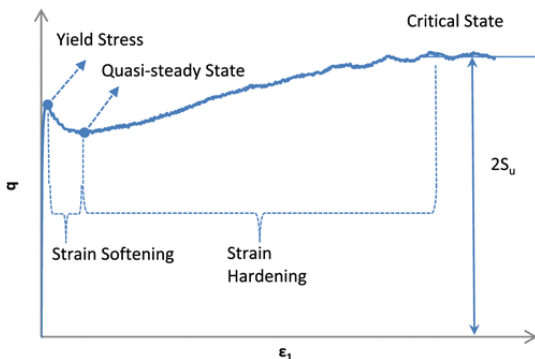


รูปที่ 4 ความเค้นสูงสุดในอดีตของดินทั้ง 3 สถานะ

และความเค้นสูงสุดในอดีตของดินทั้ง 3 สภาวะดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าดินทั้งสามสภาวะมีความเค้นสูงสุดในอดีตสอดคล้องกับการให้ความเค้นสูงสุดในการเตรียมตัวอย่างจากสภาวะเหลว

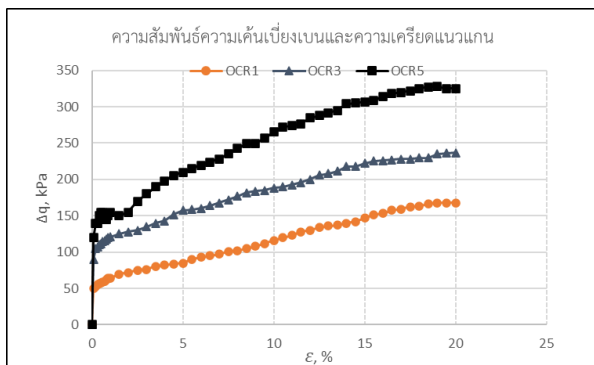
4.2 พฤติกรรมความเค้นและความเครียด

เพื่อความสะดวกในการอธิบายตัวแปรในภายหลัง คำศัพท์บางคำที่เกี่ยวข้องต่อพฤติกรรมความเครียด-ความเค้น ได้กำหนดไว้โดย q คือความเค้นเบี่ยงเบน, ε คือ ความเครียดตามแนวแกน, Δu คือ แรงดันน้ำส่วนเกิน และ p' คือ ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย จากผลการทดสอบดินอ่อนจำลองเกาหลี (ML) ที่มีความชื้นสูงและเข้าใกล้ขีดจำกัดเหลว พบว่าพฤติกรรมความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวไม่ระบายน้ำ (CU-Test) ในช่วงต้นของดินทุกสภาวะมีช่วงยืดหยุ่น (Elastic zone) ที่สั้นและกำลังของดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุด Yield stress หลังจากนั้นดินจะแสดงพฤติกรรมแบบ Strain hardening ในช่วงหลัง ซึ่งพฤติกรรมรูปแบบดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมแรงเฉือน [9] ที่ได้ทดสอบไว้กับดิน MRV silt ที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 พฤติกรรมแรงเฉือนของดิน MRV silt [9]

กำลังของดินจะเพิ่มสูงขึ้นในดินที่มีสภาวะ OCR สูง กำลังของดินที่ความเครียด 15% ในสภาวะ OCR = 1, 3, 5 มีค่ากำลัง 150kPa, 230kPa และ 300kPa ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6

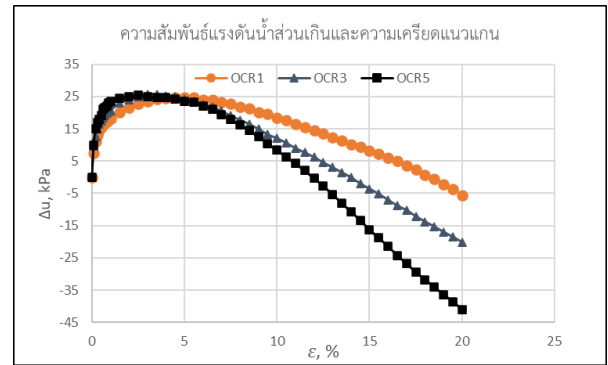


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดแนวแกน

4.3 พฤติกรรมแรงดันน้ำในมวลดิน

นอกจากนี้พฤติกรรมแรงดันน้ำในมวลดิน พบว่าในช่วงความเครียดแนวแกนที่ 2 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ของดินทั้งสามสภาวะมีพฤติกรรมแบบอัดตัว

(Contractive behavior) และเกิดแรงดันน้ำสูงสุดที่ 25 kPa หลังจากนั้นดินจะขยายตัวออก (Dilation behavior) โดยแรงดันน้ำจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งดินเกิดการดูดน้ำกลับ ซึ่งดินที่มีสัดส่วน OCR สูงจะแสดงพฤติกรรมการดูดน้ำกลับที่สูงมากขึ้น จากผลการทดสอบ ดินที่สภาวะ OCR = 1, 3, 5 มีค่าแรงดันน้ำในมวลดินที่ความเครียด 20% สูงสุดที่ -5kPa, -20 kPa, และ -40 kPa ตามลำดับ ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้น มีลักษณะเช่นเดียวกับดิน MRV silt [10]



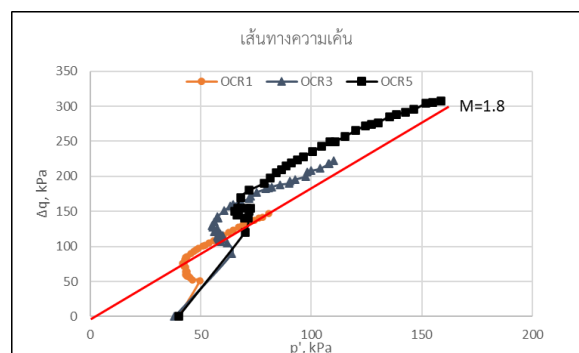
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์แรงดันน้ำส่วนเกินและความเครียดแนวแกน

4.4 สภาวะวิกฤต

เส้นทางความเค้น (Stress path) นี้ แสดงถึงการเคลื่อนที่ของพฤติกรรมดินเกาหลีตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดสิ้นสุดในสภาวะความเค้นในอดีตที่ต่างกัน โคนในช่วงแรก (Yield stress) ดินมีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งสามสภาวะโดยกำลังจะเพิ่มสูงสุดในดินที่มี OCR สูง จากนั้นดินจะเริ่มสะสมแรงดันน้ำทำให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยถอยกลับ แต่ความเค้นเบี่ยงเบนยังคงเพิ่มขึ้น เมื่อถึงจุดที่แรงดันน้ำสะสมสูงสุด ดินเริ่มที่จะขยายตัวออกทำให้เส้นทางความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยเพิ่มขึ้น จนถึงความเครียดแนวแกน 15 % ณ ระดับความเครียดนี้สามารถสร้างเส้นสภาวะวิกฤต (Critical state line, CSL) ได้ โดยแสดงค่าพารามิเตอร์ M (Tangent of the critical state line) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.8 ดังนั้นสามารถประเมินค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle, ϕ') ได้เท่ากับ 43.8 องศา ตามสมการที่ 3

$$\sin \phi' = \frac{3M}{6+M} \quad (3)$$

ความสัมพันธ์เส้นทางความเค้นของดิน 3 สภาวะแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 เส้นทางความเค้นของดิน 3 สภาวะ

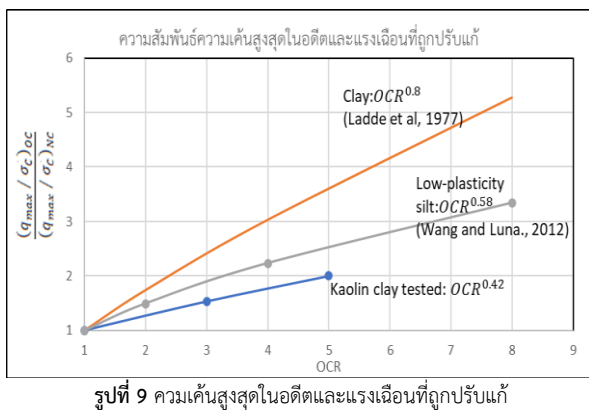
4.5 แรงเฉือนที่ถูกปรับแก้ (Normalized shear strength)

จากการที่สถานะดินมีความเค้นในอดีตที่ต่างกัน กำลังของดินจะเพิ่มขึ้นตามระดับของ OCR เพื่อที่จะประมาณกำลังของดินในแต่ละสถานะสามารถทำได้โดยการปรับแก้แรงเฉือน (Normalized shear strength) โดยการเทียบสัดส่วนของกำลังดินที่ระดับ OCR ใด ๆ กับค่าของกำลังดินที่สถานะอัตรตัวแบบปกติ ตามสมการที่ถูกเสนอไว้โดย Ladd และ คณะ [11] ดังนี้

$$\frac{(s_u/\sigma'_c)_{OC}}{(s_u/\sigma'_c)_{NC}} = OCR^m \quad (4)$$

โดยตัวแปร S_u คือกำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ตัวแปร σ'_c คือความเค้นโอบรัดประสิทธิผล และ m คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดดิน ซึ่งการทดสอบของ Ladd และ คณะ พบว่าค่า m นี้อยู่ที่ประมาณ 0.75-0.85 สำหรับดินเหนียว และขึ้นอยู่กับค่า OCR ยิ่ง OCR สูงจะทำให้ค่า m สูงด้วย นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของ Normalized shear strength กับ OCR ของดินทรายแข็งที่มีค่า PI (Plasticity index) ต่ำ จะแสดงกำลังแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นตามระดับที่เพิ่มขึ้นของ OCR เช่นกัน [10] แต่จะไม่สูงเท่ากับดินเหนียว

จากการทดสอบในดินจำลองเกลิน (ML) นี้พบว่าค่า m มีค่าเท่ากับ 0.42 ซึ่งใกล้เคียงกับค่า m ของดิน MRV silt (Low-plasticity silt) แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งเส้นสมการจากการ Normalized shear strength อยู่ต่ำกว่าเส้นสมการของดินเหนียวและใกล้เคียงกับเส้นสมการการทดสอบสำหรับดินทรายแข็งที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ



รูปที่ 9 ความเค้นสูงสุดในอดีตและแรงเฉือนที่ถูกปรับแก้

5. สรุปผล

มุมมองด้านการเตรียมตัวอย่างดินอ่อนจำลองเกลินโดยวิธีการเร่งการอัตรตัวคายน้ำจากสถานะเหลวเพื่อสร้างดินสถานะ OCR 1, 3 และ 5 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. วิธีการเร่งการอัตรตัวคายน้ำจากสถานะเหลวมีความเหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวอย่างดินให้อยู่ในสถานะความชื้นที่สูง และสามารถลดความแปรปรวนเริ่มต้นของดิน เช่น ความชื้น หน่วยน้ำหนัก อัตราส่วนช่องว่าง การเจือปนอินทรีย์วัตถุ การรบกวนดินขณะเก็บตัวอย่าง รวมถึงสามารถสร้างดินในสถานะความเค้นในอดีตต่าง ๆ

2. การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัตรตัวไม่ระบายน้ำ (CU-Test) ของดินจำลองเกลิน พบว่าดินที่มีสัดส่วน OCR ที่สูง ดินจะมีกำลังรับแรงเฉือนที่สูงขึ้น และ OCR ที่สูงขึ้นนี้จะแสดงพฤติกรรมการดูดน้ำกลับ (Negative pore pressure) ที่มากขึ้นเช่นกัน หลังจากที่ดินเริ่มขยายตัวออก

3. จากทฤษฎีสถานะวิกฤต ค่า M จาก Critical State Line หรือ CSL ได้เท่ากับ 1.8 ดังนั้นสามารถประเมินค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle, ϕ') ได้เท่ากับ 43.8 องศา

4. สามารถทำนายพฤติกรรมกำลังของดินที่มี OCR ต่าง ๆ ได้จากการ Normalized shear strength สำหรับดินเกลินที่ทดสอบนี้มีสมการใกล้เคียงกับดินทรายแข็งที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ

5. จากวิธีการเตรียมตัวอย่างข้างต้นสามารถใช้เป็นแนวทางการเตรียมตัวอย่างใหม่ของดินอ่อนที่เก็บจากสนามเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่มีความน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ถึงแม้ว่าดินที่เก็บจากสนามจะเป็นดินชนิดเดียวกันแต่อิทธิพลของ OCR ของดินมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพิจารณาพฤติกรรมด้านกำลัง

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทุก ๆ ท่าน ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในทุกด้าน ขอคุณ กำลังใจจากเพื่อน ๆ และน้อง ๆ และขอบคุณตัวข้าพเจ้าเองที่มุ่งมั่นผลิตบทความวิจัยฉบับนี้ขึ้นมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. B. H. Loh and H. R. Nikraz, "Compressibility and strength of clay subgrade of railroad foundation in highly saturated condition," *J. Geoenviron.*, vol. 7, no. 2, pp. 43–51, 2012, doi: 10.6310/jog.2012.7(2).1.
- [2] H. Fujiwara and S. Ue, "Effect of preloading on post-construction consolidation settlement of soft clay subjected to repeated loading," *Soils Found.*, vol. 30, no. 1, pp. 76–86, 1990, doi: 10.3208/sandf1972.30.76.
- [3] C. Gu, J. Wang, Y. Cai, L. Sun, P. Wang, and Q. Y. Dong, "Deformation characteristics of overconsolidated clay sheared under constant and variable confining pressure," *Soils and Foundations*, vol. 56, no. 3. pp. 427–439, 2016, doi: 10.1016/j.sandf.2016.04.009.
- [4] A. C. D.-18 on Soil and Rock, "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) 1," vol. i, 2017.
- [5] R. Jackson, *Manual of Soil Laboratory Testing*, vol. 21, no. 3. 2015.
- [6] ASTM International, "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading .," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. i,

- pp. 1–10, 2010.
- [7] A. Bishop and D. Henkel, “The Measurement of Soil Properties in the Tri-axial Test,” *Nature*. p. 190, 1957.
- [8] C. Fluids and S. Mixtures, “Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils,” vol. 04, no. Reapproved, pp. 1–15, 2003, doi: 10.1520/D4767-11R20.2.
- [9] S. Wang, R. Luna, and J. Yang, “Effect of Plasticity on Shear Behavior of Low-Plasticity Fine-Grained Soil,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 3, pp. 2–8, 2017, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001751.
- [10] S. Wang and R. Luna, “Monotonic Behavior of Mississippi River Valley Silt in Triaxial Compression,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 138, no. 4, pp. 516–525, 2012, doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000603.
- [11] Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F., and Poulos, H. G. (1997). “Stress-deformation and strength characteristics.” Proc, 9th Int. Conf.on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2, 421–494.