

อิทธิพลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อกำลังอัดแกนเดียว และการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio on unconfined compressive strength and consolidation of soft clay mixed with fly ash geopolymer

ศุภกร ลือพงศ์พัฒนา^{1,*} และ เข็ดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา

* E-mail address: supakorn-13@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อกำลังอัดแกนเดียว และการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ดินเหนียวอ่อนเก็บที่ความลึก 5-8 เมตร บริเวณคลองเตย กรุงเทพฯ โดยมีปริมาณความชื้นของดินเหนียวอ่อน (Water content, W_n) เท่ากับ 2LL (LL คือขีดจำกัดเหลว) และอัตราส่วนดินเหนียวอ่อนต่อเถ้าลอย (SC/FA) เท่ากับ 70/30 ในขณะที่อัตราส่วนอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.6 (Liquid alkaline/Fly ash, L/FA) อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เท่ากับ 50/50, 70/30, 80/20 และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติกำลังอัดแกนเดียวและการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80/20 ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวต่ำสุด, ค่าอัตราส่วนโพรงสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำสูงสุด เนื่องจากปริมาณ NaOH น้อยลงส่งผลให้ความสามารถในการชะละลายเถ้าลอยลดลง

คำสำคัญ: กำลังอัดแกนเดียว, การอัดตัวคายน้ำ, ดินเหนียวอ่อน, เถ้าลอย, จีโอโพลิเมอร์

Abstract

This paper investigated the effect of the $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio on unconfined compressive strength and consolidation of soft clay mixed with fly ash geopolymer. Soft clay was collected at a depth of 5-8 m, Klong Toey, Bangkok. The moisture content of soft clay (W_n) assigned for 2LL (LL = liquid limit). Soft clay to fly ash ratios (SC/FA) of 70/30 and liquid alkaline to fly ash ratio of 0.6 were fixed. Sodium silicate to sodium hydroxide ratios ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) of 50/50 70/30 80/20

with, NaOH concentration of 8 molars were used. The test results showed that $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio affected the unconfined compressive strength and consolidation properties of soft clay mixed with fly ash geopolymer. The soft clay mixed with fly ash geopolymer sample at $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ of 80/20 offered the lowest unconfined compressive strength, highest void ratio, and highest coefficient of permeability. This is because lower NaOH content resulted in lower leaching fly ash.

Keywords: Unconfined compressive, Consolidation, Soft clay, Fly ash, Geopolymer

1. คำนำ

จากรายงานของกรมควบคุมมลพิษในปี 2564 พบว่าปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในชุมชนเมืองทั่วประเทศมีค่าเท่ากับ 24.98 ล้านตัน ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ การนำกลับไปใช้ประโยชน์ (8.61 ล้านตัน) การกำจัดอย่างถูกต้อง (9.68 ล้านตัน) และการกำจัดไม่ถูกต้อง (6.69 ล้านตัน) ซึ่งการกำจัดขยะมูลฝอยที่ไม่ถูกวิธี ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นแหล่งแพร่กระจายสิ่งสกปรกไปสู่แหล่งน้ำและพื้นที่ใกล้เคียง จากกระบวนการน้ำชะขยะมูลฝอย (Leachate) ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ เชื้อโรค และสารพิษต่าง ๆ เจือปนอยู่ เมื่อน้ำเสียที่ไหลสู่แม่น้ำลำคลองจะเกิดความสกปรกปนเปื้อนต่อน้ำใต้ดิน คุณภาพดินเสื่อมสภาพ และคุณภาพน้ำต่ำลง ไม่อาจใช้สำหรับการอุปโภคบริโภคได้

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น หน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้ทำบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยเพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำชะขยะมูลฝอยลงสู่ดิน และแหล่งน้ำธรรมชาติใกล้เคียง โดยการนำดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยสารเคมี เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว และตะกรันเหล็ก เป็นต้น มาใช้เป็นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ ซึ่งการนำปูนซีเมนต์ที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานมาใช้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำเถ้าลอย (Fly ash, FA) ที่เป็นของเหลือ (by-product) จากการเผาถ่านหิน เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามา

ทดแทนปูนซีเมนต์ จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อน องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอย คือ ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เมื่อผสมเถ้าลอยกับสารละลายที่มีด่างแก่ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต จะทำให้มีโครงสร้างจับตัวกันเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง [1]

งานวิจัยนี้ศึกษาค่ากำลังอัดแกนเดียวและสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ โดยทดสอบกำลังอัดแกนเดียว [4] และทดสอบการอัดตัวคายน้ำ [5] ที่อายุบ่ม 28 วัน งานวิจัยนี้แปรผันอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เท่ากับ 50/50, 70/30, 80/20 ปริมาณความชื้นของดินเหนียวอ่อน (Water content, W_n) เท่ากับ 2LL (LL คือขีดจำกัดเหลวของดิน) อัตราส่วน SC/FA เท่ากับ 70/30 อัตราส่วนอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.6 (Liquid alkaline:Fly ash, L/FA) ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ ที่อายุบ่ม 28 วัน.

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 ดินเหนียวอ่อน (SOFT CLAY, SC)

ดินเหนียวอ่อนเก็บที่ความลึกประมาณ 5-8 เมตร บริเวณเขตคลองเตย จังหวัดกรุงเทพฯ ดินเหนียวอ่อนมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 15.68 kN/m^3 ค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.59 ค่าขีดจำกัดเหลว (LL) เท่ากับร้อยละ 71.48 ค่าขีดจำกัดพลาสติก (PL) เท่ากับร้อยละ 41.46 และค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (PI) เท่ากับ 30.02 รูปที่ 1 แสดงขนาดผลึกของดินเหนียวอ่อน ซึ่งทดสอบโดย Laser particle size analysis พบว่า ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D_{50}) ของดินเหนียวอ่อนเท่ากับ 3.6 ไมครอน ดินเหนียวอ่อนจำแนกได้เป็นดินเหนียวที่มีพลาสติกสูง (CH) โดยระบบเอกภาพ Unified Soil Classification System (USCS)

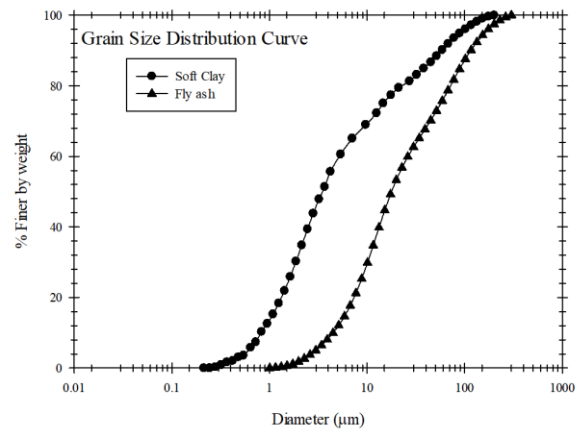
ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ

คุณสมบัติ	ดินเหนียวกรุงเทพฯ
หน่วยน้ำหนัก (kN/m^3)	15.68
ความถ่วงจำเพาะ (G_s)	2.59
ขีดจำกัดเหลว LL (%)	71.48
ขีดจำกัดพลาสติก PL (%)	41.46
ดัชนีความเป็นพลาสติก PI (%)	30.02
ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D_{50})	3.6
USCS	CH

2.2 เถ้าลอย (FLY ASH, FA)

เถ้าลอยได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง เถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.69 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D_{50}) ของเถ้าลอย

เท่ากับ 23 ไมครอน การกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าลอย แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค Laser particle size analysis



รูปที่ 1 ขนาดผลึกของดินเหนียวอ่อนและเถ้าลอย

2.3 สารกระตุ้น (ALKALINE ACTIVATOR)

งานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) ต่อเถ้าลอย (Fly ash) เท่ากับ 0.6 ซึ่งสารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 50/50 70/30 80/20 NaOH เป็นแบบเกล็ดที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์

2.4 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ดำเนินการดังนี้ การปรับปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนเท่ากับ 2LL (LL คือขีดจำกัดเหลว) และเตรียมดินเหนียวอ่อนกับเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินเหนียวอ่อนต่อเถ้าลอยเท่ากับ 70/30 หลังจากเตรียมปริมาณความชื้นและดินเหนียวอ่อนต่อเถ้าลอยเสร็จแล้วทำการผสมสารกระตุ้นที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 50/50, 70/30, 80/20 โดยใช้เวลาในการผสมประมาณ 2 นาที เมื่อผสมสารละลายแล้วทำการผสมสารกระตุ้นกับเถ้าลอย โดยผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำดินเหนียวอ่อนมาผสมเข้าด้วยกันเมื่อผสมตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงทำการเทตัวอย่างลงแบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 38 มิลลิเมตร และความสูง 76 มิลลิเมตร สำหรับกำลังอัดแกนเดียว และเทตัวอย่างลงแบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 75 มิลลิเมตร และความสูง 40 มิลลิเมตร แล้วทำการหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน แล้วจึงทำการถอดแบบออก หลังจากนั้นเริ่มทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM D 2166 [4] และทดสอบการอัดตัวคายน้ำตามมาตรฐาน ASTM D 2435 [5] วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of consolidation) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability) ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์สามารถหาได้จากสมการที่ (1) และ (2)

$$k = c_v m_v \gamma_w \quad (1)$$

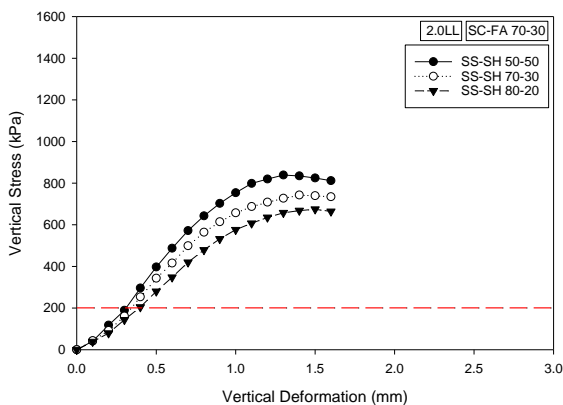
$$C_v = 0.24mH^2 / c \quad (2)$$

เมื่อ k คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability), C_v คือสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of consolidation), m_v คือสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of volume change) และ γ_w คือความหนาแน่นของน้ำ [11] โดยที่ค่า C_v สามารถหาได้จากวิธีของ Sidraran et al. เมื่อ m คือ เส้นความลาดชันระหว่างระยะการทรุดตัวกับเวลา, H คือ ความสูงของตัวอย่าง และ c คือ จุดตัดระยะการทรุดตัวเทียบกับเวลา [2]

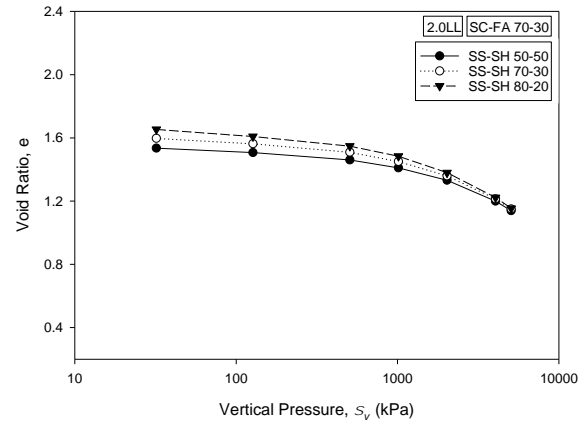
3. ผลการทดสอบ

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่าง ๆ พบว่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมจีโอโพลิเมอร์อยู่ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 50/50 เนื่องจากอนุภาคเม็ดดินจัดเรียงตัวแบบกระจัดกระจาย และถูกเชื่อมประสานมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากสารกระตุ้นสามารถชะซึลิก้า และอะลูมินาออกจากเกล็ดลอยเพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียม ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตร่วมกับแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต [1]

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับความเค้นกดทับในแนวตั้งของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเกล็ดลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่าง ๆ พบว่าตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเกล็ดลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80/20 ให้ค่ากำลังอัดน้อยที่สุดและมีอัตราส่วนโพรงมากที่สุด เนื่องจากปริมาณ NaOH น้อยลงส่งผลให้ความสามารถในการชะละลายเกล็ดลอยลดลง [3] และความหนาของชั้นประจุกระจายตัวมากที่สุด

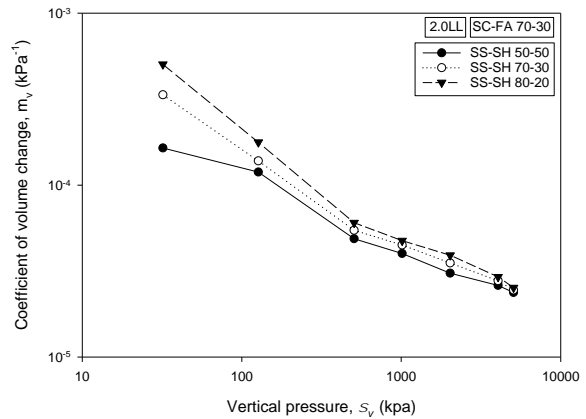


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับระยะการเคลื่อนตัว



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับความเค้นกดทับในแนวตั้ง

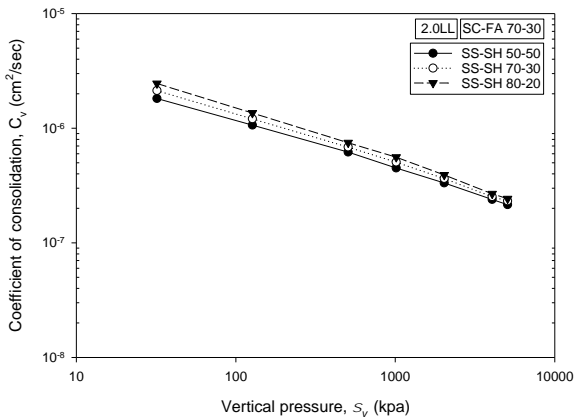
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of volume change) กับความเค้นกดทับในแนวตั้งของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเกล็ดลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่าง ๆ พบว่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเกล็ดลอยจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามความเค้นกดทับในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเกล็ดลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80/20 มีค่าเท่ากับ 5.046×10^{-4} , 1.775×10^{-4} , 6.035×10^{-5} , 4.750×10^{-5} , 3.908×10^{-5} , 2.925×10^{-5} และ 2.531×10^{-5} kPa^{-1} สำหรับความเค้นกดทับในแนวตั้งเท่ากับ 32, 127, 507, 1014, 2027, 4055 และ 5068 kPa ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจะถูกใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability)



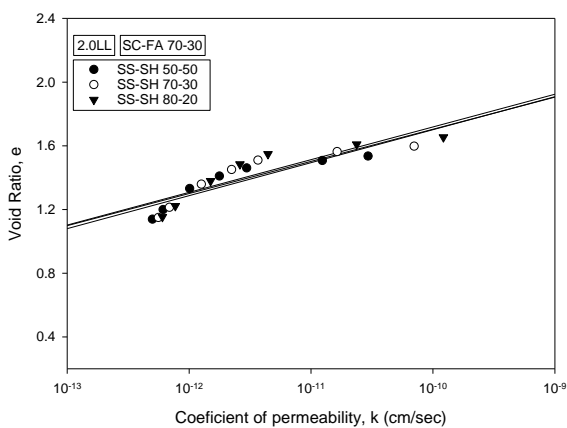
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียวกับความเค้นกดทับในแนวตั้ง

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of consolidation) กับความเค้นกวดทับในแนวดิ่งของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่าง ๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามความเค้นกวดทับในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น สำหรับทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เนื่องจากอนุภาคเม็ดดินจัดเรียงตัวแบบกระจายมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างมีความทึบน้ำมากขึ้น และทำให้สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมีค่าลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำจะถูกใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability)

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability) ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่าง ๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างมีลักษณะเป็นเส้นตรง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำกับความเค้นกวดทับในแนวดิ่ง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ

4. สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการกักน้ำอัดแกนเดียวและการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่าง ๆ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการกักน้ำอัดแกนเดียวและการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80/20 ให้ค่าการกักน้ำอัดแกนเดียวต่ำสุด, ค่าอัตราส่วนโพรงสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำสูงสุด เนื่องจากปริมาณ NaOH น้อยลงส่งผลให้ความสามารถในการชะละลายเถ้าลอยลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามความเค้นกวดทับในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น สำหรับทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เนื่องจากอนุภาคเม็ดดินจัดเรียงตัวแบบกระจายมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างมีความทึบน้ำมากขึ้น และทำให้สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมีค่าลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือในการทดสอบและการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Yeanyong, C. and Arulrajah, A. (2021). Evaluation of polyvinyl alcohol and high calcium fly ash based geopolymer for the improvement of soft Bangkok clay. Transportation Geotechnics, 27.
- [2] Sridaran, A., Murthy, N.S., Prakash, K., 1987. Rectangular hyperbola method for consolidation analysis. Geotechnique 37 (3), 355–368.
- [3] Horpibulsuk, S., Yangsukkaseam, N., Chinkulkijniwat, A. and Du, YJ. (2011). Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite. Applied Clay Science 52, 150–159.
- [4] ASTM D 2166. 2016. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [5] ASTM D 2435. 2020. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [6] ASTM D 854-00. 2014. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

- [7] ASTM D 4254-00. 2006. Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- [8] ASTM D 4318, Standard Test Method for Liquid Limit Plastic Limit and Plasticity Index of Soil. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia.
- [9] ASTM D 421-85, Standard Practice for Dry Preparation of Soil Sample for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants. Annual Book of ASTM Standard, Philadelp
- [10] ASTM D 2487. 2017. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [11] รุ่งลาวัลย์ ราชัน, สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2546). ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนาปีที่ 14 ฉบับที่ 3.