การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

CONSOLIDATION OF SOFT CLAY MIXED WITH FLY ASH GEOPOLYMER

ศุภกร ลือพงศ์พัฒนะ[1*], ธนศักดิ์ อุดมรักษ์[1], ปิยธิดา อยู่สุข[2], เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์[3] และ วิศิษฏ์ศักดิ์ ทับยัง[4]

[1] นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, จ.นครราชสีมา, ประเทศไทย

[2]นักศึกษาปริญญาเอก, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, จ.นครราชสีมา, ประเทศไทย

[3]ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, จ.นครราชสีมา, ประเทศไทย

[4]อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, จ.สงขลา, ประเทศไทย

[*]Corresponding author address: supakorn-13@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ดินเหนียวอ่อนเก็บที่ความลึก 5-8 เมตร บริเวณคลองเตย กรุงเทพฯ ตัวแปรต้นที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ปริมาณความชื้นของดินเหนียวอ่อน (Water content, W_n) เท่ากับ 1LL, 2LL และ 3LL (LL คือ ขีดจำกัดเหลว) และอัตราส่วนดินเหนียวอ่อนต่อเถ้าลอย (SC:FA) เท่ากับ 90:10 ในขณะที่อัตราส่วนอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.6 (Liquid alkaline:Fly ash, L/FA) อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เท่ากับ 50:50 และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้น (W_n) ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ อัตราส่วนโพรงของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 3LL มีค่ามากที่สุด เนื่องจากปริมาณความชื้นสูงทำให้ความเข้มข้นของสารกระตุ้นถูกเจือจางลง ในทางตรงกันข้าม อัตราส่วนโพรงของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1LL มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากอนุภาคเม็ดดินจัดเรียงตัวแบบกระจัดกระจาย

คำสำคัญ: *การอัดตัวคายน้ำ, ดินเหนียวอ่อน, เถ้าลอย, จีโอโพลิเมอร์*

Abstract

This paper investigated consolidation of soft clay mixed with fly ash geopolymer. Soft clay was collected at a depth of 5-8 m, Klong Toey, Bangkok. The dominant factors used in this study were the moisture content of soft clay (W_n) of 1LL, 2LL and 3LL (LL = liquid limit) and soft clay:fly ash (SC:FA) ratios of 90:10. Whereas, liquid alkaline:fly ash ratio of 0.6, sodium silicate:sodium hydroxide ratio (Na_2SiO_3/NaOH) of 50:50, NaOH concentration of 8 molar were fixed curing 28 day. The tested result showed that the moisture content (W_n) has an effect on consolidation properties of soft clay mixed with fly ash geopolymer. The void ratio of soft clay mixed with fly ash geopolymer sample at W_n = 3LL was the highest. This is because the high W_n dilutes NaOH concentration. On the other hand, the void ratio of sample at W_n = LL was the lowest because soil particles flocculate.

Keywords: *Consolidation, Soft clay, Fly ash, Geopolymer*

1. บทนำ

การออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน หรือระบบสาธารณูปโภค เช่น โครงสร้างฐานราก โครงสร้างคันดิน และโครงสร้างถนนบนชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมักประสบปัญหาทางวิศวกรรม เนื่องจากดินเหนียวอ่อน ปริมาณความชื้นสูง ซึ่งส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกต่ำ ดังนั้นการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นก่อนก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานบนชั้นดินเหนียวอ่อนนี้ เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงแบกทานและลดการทรุดตัว ในปัจจุบันการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนคือการปรับปรุงด้วยสารเคมี เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว และตะกรันเหล็ก เป็นต้น อย่างไรก็ตามการนำปูนซีเมนต์ที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานมาใช้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก

เถ้าลอย (Fly ash, FA) ที่เป็นของเหลือ (by-product) จากการเผาถ่านหิน เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามาทดแทนปูนซีเมนต์ จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อน องค์ประกอบ

หลักทางเคมีของเถ้าลอย คือ ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมิน่า (Al_2O_3) เมื่อผสมเถ้าลอยกับสารละลายที่มีด่างแก่ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต จะทำให้มีโครงสร้างจับตัวกันเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งเป็นโครงสร้างกึ่งผลึกที่มีความแข็งแรง [6]

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ โดยทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบรวดเร็ว (Rapid consolidation test) [3] ที่อายุบ่ม 28 วัน งานวิจัยนี้แปรผันปริมาณความชื้น (Water content, W_n) เท่ากับ 1LL, 2LL, 3LL (LL คือขีดจำกัดเหลวของดิน) อัตราส่วน SC:FA เท่ากับ 90:10 อัตราส่วนอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.6 (Liquid alkaline:Fly ash, L/FA) อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เท่ากับ 50:50 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1. ดินเหนียวอ่อน (SOFT CLAY, SC)

ดินเหนียวอ่อนเก็บที่ความลึกประมาณ 5-8 เมตร บริเวณเขตคลองเตย จังหวัดกรุงเทพฯ ดินเหนียวอ่อนมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 15.97 kN/m^3 ค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.68 ค่าขีดจำกัดเหลว (LL) เท่ากับร้อยละ 63.93 ค่าขีดจำกัดพลาสติก (PL) เท่ากับร้อยละ 25.49 และค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (PI) เท่ากับ 38.44 รูปที่ 1 แสดงขนาดคละของดินเหนียวอ่อน ซึ่งทดสอบโดย Laser particle size analysis พบว่า ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D_{50}) ของดินเหนียวอ่อนเท่ากับ 3.6 ไมครอน ดินเหนียวอ่อนจำแนกได้เป็นดินเหนียวที่มีพลาสติกสูง (CH) โดยระบบเอกภาพ Unified Soil Classification System (USCS)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพ

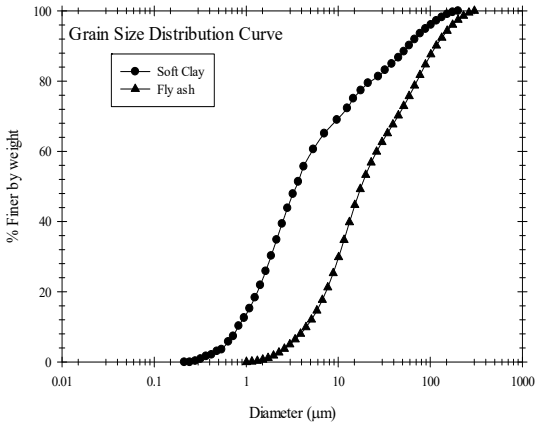
คุณสมบัติ	ดินเหนียวกรุงเทพ
หน่วยน้ำหนัก (kN/m^3)	15.97
ความถ่วงจำเพาะ (G_s)	2.68
ขีดจำกัดเหลว LL (%)	63.93
ขีดจำกัดพลาสติก PL (%)	25.49
ดัชนีความเป็นพลาสติก PI (%)	38.44
ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D_{50})	3.6
USCS	CH

2.2. เถ้าลอย (FLY ASH, FA)

เถ้าลอยได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง เถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.69 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D_{50}) ของเถ้าลอยเท่ากับ 23 ไมครอน การกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าลอย แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค Laser particle size analysis

2.3. สารกระตุ้น (ALKALINE ACTIVATOR)

งานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) ต่อเถ้าลอย (Fly ash) เท่ากับ 0.6 ซึ่งสารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Na_2SiO_3:NaOH เท่ากับ 50:50 NaOH เป็นแบบเกล็ด ที่ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์



รูปที่ 1 ขนาดคละของดินเหนียวอ่อนและเถ้าลอย

2.4. การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ดำเนินการดังนี้ การปรับปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนเท่ากับ 1LL, 2LL และ 3LL (LL คือขีดจำกัดเหลว) หลังจากเตรียมปริมาณความชื้นเสร็จแล้ว ทำการผสมดินเหนียวอ่อนกับเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินเหนียวอ่อนต่อเถ้าลอยเท่ากับ 90:10 โดยผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยถูกนำมาผสมกับสารกระตุ้นที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน Na_2SiO_3:NaOH เท่ากับ 50:50 โดยใช้เวลาในการผสมประมาณ 5 นาที เมื่อผสมตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงทำการเทตัวอย่างลงแบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 75 มิลลิเมตร และความสูง 40 มิลลิเมตร แล้วทำการหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน แล้วจึงทำการถอดแบบออก หลังจากนั้นเริ่มทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบรวดเร็ว (Rapid consolidation test) ตามวิธีของ Horpibulsuk et al. [3] โดยใช้ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำของ Terzaghi (1923) ร่วมกับหลักการ Hyperbola method ของ Sridharan et al. (1985) ในการประมาณหาค่าระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยของดิน (Average degree of consolidation) ที่เวลาใด ๆ หลังจากวางน้ำหนัก เมื่อทราบค่าความเค้นประสิทธิผลแล้วทำการทดสอบซ้ำโดยวางน้ำหนักค่าต่อไป [1] วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient

of consolidation) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability) ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์สามารถหาได้จากสมการที่ (1) และ (2)

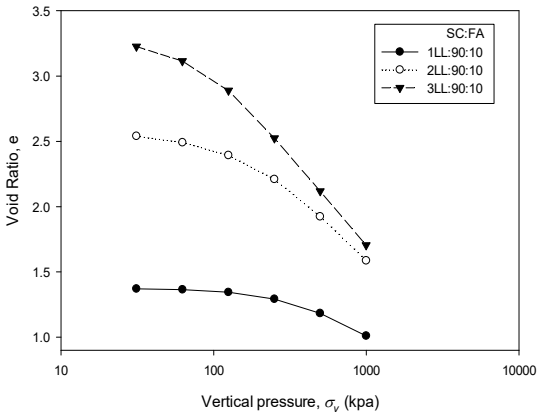
$$k = c_v m_v \gamma_w \quad (1)$$

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

เมื่อ k คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability), C_v คือสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of consolidation), m_v คือสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of volume change) และ γ_w คือความหนาแน่นของน้ำ [2] โดยที่ค่า C_v สามารถหาได้จากวิธีของ Sridraran et al. เมื่อ m คือ เส้นความลาดชันระหว่างระยะการทรุดตัวกับเวลา, H คือ ความสูงของตัวอย่าง และ c คือ จุดตัดระยะการทรุดตัวเทียบกับเวลา [4]

3. ผลการทดสอบ

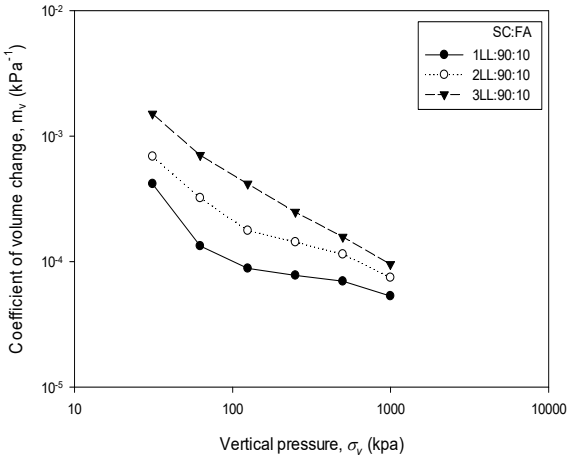
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับความเค้นกดทับในแนวดิ่งของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ พบว่าอัตราส่วนโพรงของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 3LL มีค่ามากที่สุด เนื่องจากปริมาณความชื้นสูงทำให้ความเข้มข้นของสารกระตุ้นถูกเจือจางลง [5] ซึ่งส่งผลให้ความหนาของชั้นประจุกระจายตัวมากที่สุด ในทางตรงกันข้ามอัตราส่วนโพรงของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1LL มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากอนุภาคเม็ดดินจัดเรียงตัวแบบกระจัดกระจายและถูกเชื่อมประสานมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากสารกระตุ้นสามารถชะซิลิก้า และอะลูมิน่าออกจากเถ้าลอยเพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียม ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตร่วมกับแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต [6]



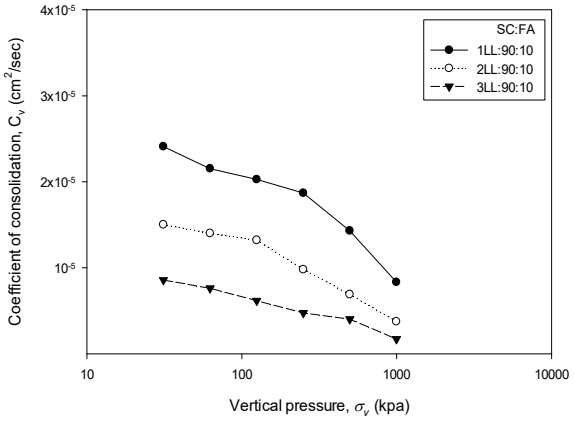
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับความเค้นกดทับในแนวดิ่ง

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of volume change) กับความเค้นกดทับในแนวดิ่งของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ พบว่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามความเค้นกดทับในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 3LL มีค่าเท่ากับ 1.51×10^{-3}, 7.06×10^{-3} , 4.17×10^{-3}, 2.49×10^{-3}, 1.57×10^{-3} และ 9.51×10^{-3} kPa^{-1} สำหรับความเค้นกดทับในแนวดิ่งเท่ากับ 30, 60, 120, 240, 480 และ 1000 kPa ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของสารกระตุ้นถูกเจือจางและทำให้มีอัตราส่วนโพรงที่มากขึ้นทำให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจะถูกใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability)

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of consolidation) กับความเค้นกดทับในแนวดิ่งของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามความเค้นกดทับในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น สำหรับทุกปริมาณความชื้น เนื่องจากอนุภาคเม็ดดินจัดเรียงตัวแบบกระจัดกระจายมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างมีความทึบน้ำมากขึ้น และทำให้สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมีค่าลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำจะถูกใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability)

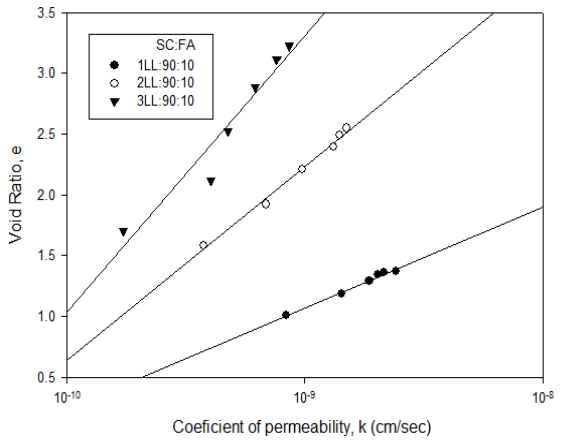


รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียวกับความเค้นกดทับในแนวดิ่ง



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำกับความเค้นกดทับในแนวดิ่ง

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability) ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารกระตุ้นถูกเจือจาง [5] ซึ่งทำให้ความหนาของชั้นประจุเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ

4. สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อัตราส่วนโพรงของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 3LL มีค่ามากที่สุด เนื่องจากปริมาณความชื้นสูงทำให้ความเข้มข้นของสารกระตุ้นถูกเจือจางลงในทางตรงกันข้าม อัตราส่วนโพรงของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1LL มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากอนุภาคเม็ดดินจัดเรียงตัวแบบกระจัดกระจาย และถูกเชื่อมประสานมากขึ้น

2. ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามความเค้นกดทับในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น สำหรับทุกปริมาณความชื้น เนื่องจากอนุภาคเม็ดดินจัดเรียงตัวแบบกระจัดกระจายมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างมีความทึบน้ำมากขึ้น และทำให้สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมีค่าลดลง

3. ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารกระตุ้นถูกเจือจาง ซึ่งทำให้ความหนาของชั้นประจุเพิ่มมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือในการทดสอบและการทำวิจัยในครั้งนี้

6. การอ้างอิง

[1] ณรงค์เดช ยังสุขเกษม. (2550). การวิเคราะห์และทำนายลักษณะการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา.

[2] รุ้งลาวัลย์ ราชัน, สุขสันติ์ หอพิบูลสุข. (2546). ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนาปีที่ 14 ฉบับที่ 3.

[3] Horpibulsuk, S., Shibuya, S., Fuenkajorn, K. and Katkan, W. (2007). Assessment of engineering properties of bangkok clay. Geotechnique, Vol. 44, pp. 173 - 187.

[4] Sridraran, A., Murthy, N.S., Prakash, K., 1987. Rectangular hyperbola method for consolidation analysis. Geotechnique 37 (3), 355–368.

[5] 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.

[6] 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.

[7] ASTM D 4318, Standard Test Method for Liquid Limit Plastic Limit and Plasticity Index of Soil. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia.

[8] 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