

คุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวผสมโพลีซีเมนต์

ชัยรัตน์ ธีระวัฒน์สุข¹ พานิช วุฒิปุณษ์^{2*} และ สันชัย อินทพิชัย²

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องนี้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และสารก่อให้เกิดฟองอากาศผสมกับดินเหนียวอ่อน ปริมาณซีเมนต์ผสมต่อปริมาตรดินเปียกที่ 100, 150, 200 และ 250 กก./ลบ.ม. และสัดส่วนฟองอากาศต่อปริมาตรดินเปียกที่ร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 ทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 และ 45 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ผสมต่อปริมาตรดินเปียกให้สูงขึ้น ทำให้หน่วยน้ำหนัก และกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เพิ่มสัดส่วนฟองอากาศต่อปริมาตรของดินเปียกให้สูงขึ้น ทำให้หน่วยน้ำหนัก และกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม

การพัฒนาของกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ของดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ปริมาณซีเมนต์ต่อปริมาตรดินเปียก 200 กก./ลบ.ม. ขึ้นไป สรุปได้ว่าการออกแบบชั้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวง โดยพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ที่อายุการบ่ม 7 วัน ต้องกำหนดให้สัดส่วนร้อยละของฟองอากาศไม่มากกว่า 19, 27 และ 44 สำหรับการผสมปริมาณซีเมนต์ต่อปริมาตรดินเปียกที่ 150, 200 และ 250 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ จึงจะสามารถใช้ดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพนั้นเพื่อเป็นวัสดุวิศวกรรมการทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ระบุไว้

คำสำคัญ: ฟองอากาศ โพลีซีเมนต์ วิศวกรรมงานทาง

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 3247 อีเมล: pnv@kmutnb.ac.th



Strength Characteristic of Foam Cement Admixed Clay

Chairat Teerawattanasuk¹ Panich Voottipruex^{2*} and Sunchai Inthapichai²

Abstract

This paper aims to study the strength characteristics of soft clay improved by Portland Cement Type I and air foam. The weight of mixed cement to the volume of wet soil are 100, 150, 200 and 250 kg/m³ respectively, and the percentage ratio of air foam to the volume of wet soil are 0, 10, 30 and 50% respectively. The unconfined compressive strength was tested at the curing periods of 7, 14, 28 and 45 days respectively. The results reveal that as the weight of mixed cement to the volume of wet soil increases, the unit weight and the unconfined compressive strength of the improved clay increases. In contrast, as the percentage of air-foam to the volume of soft soil increases, the unit weight and the unconfined compressive strength decrease. However, the unconfined compressive strength

of the improved clay has been raised clearly at the weight of cement to the volume of wet soil of 200 kg/m³. This can be concluded that the unconfined compressive strength at 7-day curing period was considered for pavement design according to the standard of the Department of Highway. Moreover, the percentage of air foam to the volume of wet soil should not exceed 19, 27 and 44% for the weight of mixed cement to the volume of wet soil of 150, 200 and 250 kg/m³, respectively. Thus, the improved soft clay could be used as the highway engineering material corresponding to the specified standard of the Department of Highway in Thailand.

Keywords: Air-foam, Foam Cement, Highway Engineering

¹ Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

² Associate Professor, Department of Teacher Training in Civil Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext.3247, E-mail: pnv@kmutnb.ac.th

1. บทนำ

ซีเมนต์เป็นวัสดุที่นิยมนำมาก่อสร้างถนน สนามบิน คันทาง หรือดาดคลองส่งน้ำ โดยเริ่มนำมาผสมดินเหนียว เพื่อปรับปรุงความแข็งแรง ลดการบวมตัวและเพิ่มความ สามารถรับแรงแบกทาน นักวิจัยจำนวนมากศึกษา ผลกระทบจากการปรับปรุงดินเหนียวด้วยซีเมนต์เพื่อนำ ไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆ [1]-[8] นอกจากนี้ยังมี ผู้นำเข้าลอยไปใช้เพื่อปรับปรุงดินอินทรีย์ประเภทต่างๆ อีกมาก [9]-[12] แต่เนื่องจากดินซีเมนต์ทั่วไปมีค่าหน่วย น้ำหนักอยู่ในช่วง 15 กิโลนิวตัน/ลูกบาศก์เมตร ถึง 18 กิโลนิวตัน/ลูกบาศก์เมตร เปรียบเทียบกับดินซีเมนต์มวลเบา ซึ่งมีหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง 11 กิโลนิวตัน/ลูกบาศก์เมตร ถึง 14 กิโลนิวตัน/ลูกบาศก์เมตร วิศวกรปฐพีจึงได้คิดค้น ดินซีเมนต์มวลเบามาใช้เพื่อลดน้ำหนักของส่วนผสม ดินซีเมนต์ และลดความดันแบกทานที่ถ่ายลง ไปสู่ชั้นดิน เบื้องล่าง ญี่ปุ่นนับเป็นประเทศแรกที่บุกเบิกการพัฒนา ส่วนผสมของดินซีเมนต์เป็นวัสดุผสมมวลเบา [13]-[17] เพื่อใช้ในการก่อสร้างโดยนำดินเหนียวที่ได้จากการขุดลอก มาผสมกับซีเมนต์และโฟม โดยสามารถปรับส่วนผสม ระหว่างโฟมกับดินซีเมนต์ เพื่อให้ได้หน่วยน้ำหนัก ตามต้องการ ข้อดีของการผลิตดินซีเมนต์มวลเบาคือ เพิ่มความแข็งแรงเฉือน และลดความสามารถในการยุบตัว เมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้ปรับปรุง [18],[19] จากผล งานวิจัยในอดีตพบว่าความแข็งแรงเฉือนของดินซีเมนต์ มวลเบาขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ใส่ลงไป หากผสม ซีเมนต์ในปริมาณมากก็จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงอัด แกนเดียวสูงขึ้นตามไปด้วย [20],[21]

งานวิจัยเรื่องนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ ดินเหนียวตัวอย่าง จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนปูนซีเมนต์ โฟม และระยะเวลาในการบ่มที่มี ผลต่อกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดของตัวอย่างดินเหนียว โฟม ซีเมนต์ เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของดินเหนียว อ่อนมวลเบาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์เพื่อนำไป ประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมทาง โดยสามารถนำ ดินเหนียวอ่อนในที่มาใช้ปรับปรุงเป็นวัสดุมวลเบาเพื่อ

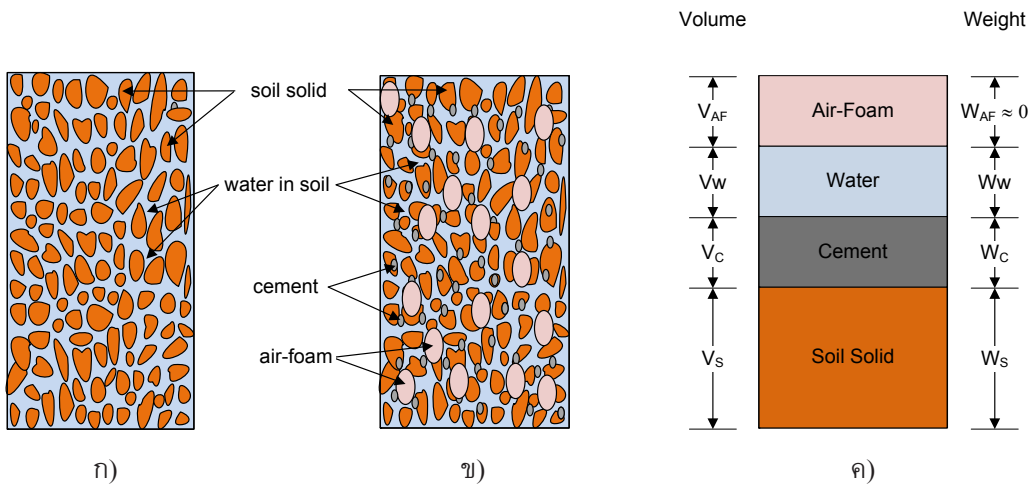
แก้ปัญหาการทรุดตัวของคันทางและบริเวณคอสะพาน

2. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาหากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียว ผสมโฟมซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน ดินที่ใช้ ในการศึกษาในครั้งนี้เป็นตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปฐมธานี ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และน้ำยาเคมีชนิดสาร เพิ่มฟองอากาศ โดยมีอัตราส่วนผสมน้ำเคมีต่อน้ำ 1 : 40 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ผู้ผลิตแนะนำ มาผสมผ่านเครื่องผลิตโฟม นำดินเหนียวตัวอย่างมาหาความชื้นในธรรมชาติ เพื่อคำนวณ ปริมาณน้ำที่ต้องใส่เพิ่มเพื่อให้ดินมีค่าปริมาณความชื้น ประมาณ 2 เท่าของขีดจำกัดเหลว บั้นจนเป็นน้ำโคลน เก็บตัวอย่างในถังที่ปิดสนิทป้องกันการสูญเสียความชื้น นำน้ำยาเคมีมาผสมน้ำให้เข้ากันแล้วเทลงในเครื่องผลิต โฟม เปิดเครื่องแล้วรอจนปริมาตรเนื้อโฟม ออกมาอย่าง สม่าเสมอ จากนั้นตรวจสอบหน่วยน้ำหนักของโฟมให้ มีอัตราส่วนปริมาตร : น้ำหนักโฟม อยู่ในช่วง 20 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อกรัม ถ้าไม่ได้ให้ปรับความดันที่เครื่องผลิต โฟมจนได้น้ำหนักที่ต้องการ

2.1 การเตรียมการผสมตัวอย่าง

จากตัวอย่างดินเหนียวอ้อมตัว (ดินเดิม) ที่อยู่ใน ธรรมชาติซึ่งจะมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือเม็ดดิน และน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 1 ก) ผสมโฟมเพื่อเพิ่มปริมาณ ฟองอากาศ และซีเมนต์ ซึ่งภายหลังจากการผสมดังกล่าว ทำให้สามารถเขียนภาพแสดงส่วนประกอบหลักใน ตัวอย่างเป็นรูปที่ 1 ข) ในการผสมตัวอย่างเริ่มต้นโดย ชั่งน้ำหนักของน้ำดิน ซีเมนต์ ตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ นำมาผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน แต่ไม่ควรใช้เวลาเกิน 6 นาที เมื่อผสมเข้ากันแล้ว จึงนำมาผสมกับ Air-foam จนเนื้อโฟม เข้ากันดี นำตัวอย่างใส่ในแบบหล่อทรงกระบอก ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร นำไปบ่ม เพื่อเตรียมทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) ตามอายุการบ่มต่างๆ



รูปที่ 1 ก) ดินเดิม ข) ภายหลังจากการผสมโฟมซีเมนต์ และ ค) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและน้ำหนักของดินเหนียวผสมโฟมซีเมนต์

ตัวอย่างทั้งหมดจะบ่มที่อายุ 7, 14, 28 และ 45 วัน โดยทดสอบที่อายุการบ่มละ 3 ตัวอย่าง รวมตัวอย่างแต่ละส่วนผสม 12 ตัวอย่าง และจำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ทดสอบรวม 192 ตัวอย่าง

2.2 การคำนวณอัตราส่วนผสม

ความสัมพันธ์เชิงน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 1 ค

$$W = W_c + W_w + W_s \quad (1)$$

เมื่อ W_c = น้ำหนักของซีเมนต์
 W_w = น้ำหนักน้ำ 2 เท่าของซีเมนต์จำกัดเหลว
 W_s = น้ำหนักของดินแห้ง
 ความสัมพันธ์เชิงปริมาตรดังแสดงในรูปที่ 1 ค

$$V = V_{AF} + V_c + V_w + V_s \quad (2)$$

เมื่อ V_{AF} = ปริมาตรเนื้อโฟม
 V_c = ปริมาตรซีเมนต์
 V_w = ปริมาตรน้ำ 2 เท่าของซีเมนต์จำกัดเหลว
 V_s = ปริมาตรดินเหนียวอ่อน

น้ำหนักดินในธรรมชาติ

$$W_{wet} = W_s + W_w \quad (3)$$

$$W_s = \frac{W_w}{1 + \omega} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (5)$$

$$W_w = \omega \cdot W_s \quad (6)$$

น้ำหนักของซีเมนต์

$$W_c = C \times (V_s + V_w) \quad (7)$$

เมื่อ W_{wet} = น้ำหนักดินเปียก
 W_w = น้ำหนักน้ำในดินตามธรรมชาติ
 W_s = น้ำหนักเนื้อดินแห้งตามธรรมชาติ
 ω = ปริมาณความชื้นในดินตามธรรมชาติ
 W_c = น้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผสมในดิน
 C = อัตราส่วนระหว่างโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรของดินเปียก ($C = 100 \sim 250 \text{ kg/m}^3$)

ปริมาตรของเม็ดดินตัวอย่าง

$$V_s = \frac{W_s}{G_s \cdot \gamma_w} \quad (8)$$

ปริมาตรของน้ำ

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} \quad (9)$$

ปริมาตรของซีเมนต์

$$V_c = \frac{W_c}{G_{sc} \times \gamma_w} \quad (10)$$

ปริมาตรของเนื้อโพลีเมอร์

$$V_{AF} = AF \times V_{wet} \quad (11)$$

$$V_{AF} = AF \times (V_s + V_w) \quad (12)$$

- เมื่อ V_s = ปริมาตรของเม็ดดินธรรมชาติ
 V_w = ปริมาตรของน้ำในดินตามธรรมชาติ
 V_c = ปริมาตรของซีเมนต์ที่ผสม
 V_{wet} = ปริมาตรของดินเปียก
 V_{AF} = ปริมาตรของโพลีเมอร์อากาศ
 G_s = ความถ่วงจำเพาะของดินตัวอย่าง
 G_{sc} = ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์
 γ_w = ความหนาแน่นของน้ำ
 AF = อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างโพลีเมอร์อากาศ

ต่อดินตัวอย่างสภาพเปียก ($AF = 0\% - 50\%$)

เพื่อกำหนดส่วนผสมสำหรับตัวอย่างจำนวน 192 ตัวอย่างให้มีสัดส่วนผสมอย่างถูกต้อง จึงคำนวณอัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบซึ่งประกอบด้วย ดินเหนียว ปริมาณน้ำ ปริมาณซีเมนต์ และปริมาณโพลีเมอร์อากาศ จากสมการความสัมพันธ์ในเชิงน้ำหนักและเชิงปริมาตรดังสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 12

3. ผลการทดลอง

3.1 คุณสมบัติของดินเหนียว

ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นตัวอย่างแปลงสภาพ (Disturbed Sample) จากจังหวัดปทุมธานี ลักษณะดินเป็นสีเทาดำ คุณสมบัติเบื้องต้นของดินมีหน่วยน้ำหนักรวมเท่ากับ 1.78 ตัน/ลบ.ม. ปริมาณน้ำในมวลดินธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 37.59 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 ชีตจำกัดความเหลว (LL) เท่ากับร้อยละ 68.68 ชีตจำกัดพลาสติก (PL) เท่ากับร้อยละ 28.48 ดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับร้อยละ 40.20 เมื่อนำมาจำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification จัดอยู่ในกลุ่ม CH ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

Soundness Autoclave expansion (%)	Setting Time (min)		Specific Gravity (Gs)
	Initial Set	Final Set	
0.15	93	139	3.15

3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

ผลการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 โดยใช้แท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 10 เซนติเมตร ตัวอย่างมีอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยาเคมีกับน้ำ 1 ต่อ 40 ทุกอัตราส่วนผสมสัดส่วนฟองอากาศที่ 0, 10, 30, และ 50% ต่อปริมาตรดินเปียก ที่ปริมาณซีเมนต์ 100, 150, 200 และ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปริมาตรดินเปียก ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14, 28 และ 45 วัน การศึกษาครั้งนี้ทดสอบกับตัวอย่างดินแต่ละอัตราส่วนจำนวน 3 ตัวอย่าง

3.3 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

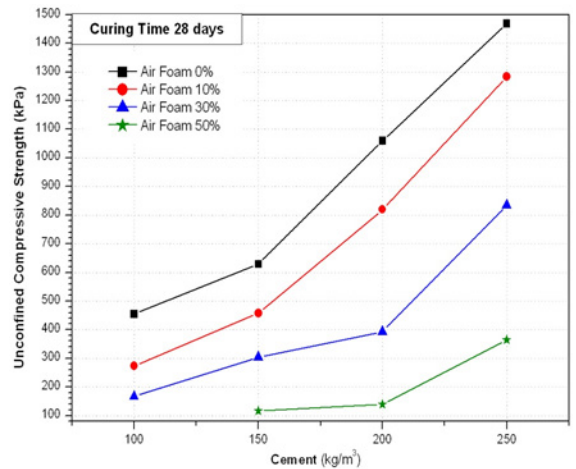
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูก

จำกัดกับปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นของดินเหนียวอ่อนมวลเบา ที่ระยะเวลาการบ่มที่เท่ากันและสัดส่วนฟองอากาศต่างๆ แสดงให้เห็นว่าปริมาณซีเมนต์ที่ผสมลงไปในตัวอย่างมีสัดส่วนเพิ่มขึ้น มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด เพิ่มขึ้นในระยะเวลาบ่มเดียวกันกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนเป็นผลมา ปฏิกริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S) ที่มีอยู่ในซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) จะเป็นตัวเกาะยึดเม็ดดินเข้าด้วยกันทำให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงสูงขึ้น ยิ่งเมื่อปริมาณซีเมนต์มากขึ้นไปด้วยทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดมีค่าสูงขึ้น

จากผลการทดสอบที่สัดส่วนฟองอากาศ 0% และ 10% การพัฒนา กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด สูงขึ้นตามลำดับ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ เมื่อเทียบกับสัดส่วนฟองอากาศ 30% และ 50% โดยเมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ 250 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 0% ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 และ 45 วัน พบว่าการพัฒนา กำลังไม่สูงมากนัก โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1092, 1223, 1469 และ 1524 kPa ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มสัดส่วนฟองอากาศเป็น 10% ค่ากำลังสูงสุดกลับลดต่ำลงเท่ากับ 895, 1052, 1283 และ 1355 kPa. ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 28 และ 45 วันตามลำดับ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 75 kPa เมื่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 150 กก./ลบ.ม. ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 1 สำหรับตัวอย่างที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ 100 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 50% ไม่สามารถทดสอบได้เพราะตัวอย่างแตกหักเนื่องจากมีความพรุนของฟองอากาศมากเกินไป

3.4 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินเหนียวผสมปริมาณซีเมนต์ 100, 150, 200 และ 250 กก./ ลบ.ม. ที่สัดส่วนฟองอากาศเท่ากัน

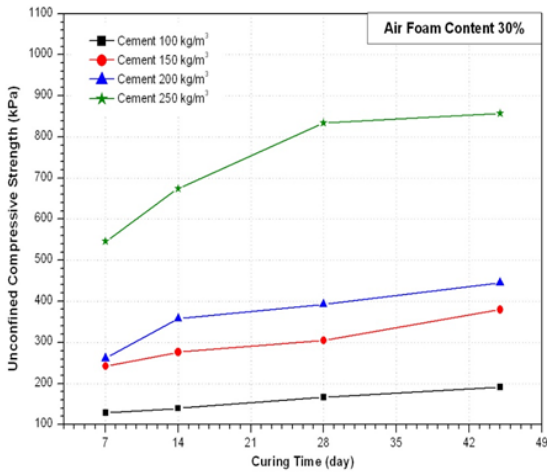


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ที่สัดส่วนฟองอากาศ 0, 10, 30 และ 50% ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

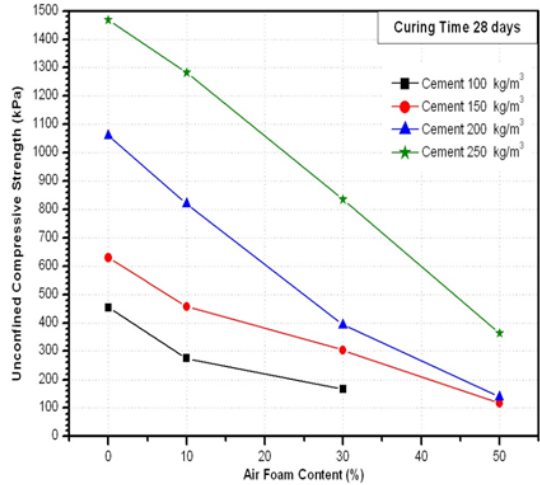
จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้นทุกสัดส่วนผสม โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะ 7 วันแรกหลังจากนั้นอัตราการพัฒนากำลังอัดจะลดลง แต่ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและอย่างช้าๆ เมื่อระยะเวลาการบ่มตัวอย่างนานขึ้น ปฏิกริยา Cement Hydration เกิดขึ้นสมบูรณ์มากขึ้น ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2 และ 3

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับระยะเวลาการบ่ม พบว่าที่สัดส่วนส่วนซีเมนต์เท่ากัน สัดส่วนฟองอากาศ 0% และ 10% มีการพัฒนา กำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดในช่วง 7-14 วัน เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับอัตราสัดส่วนฟองอากาศ 30% และ 50% ซึ่งกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดจะค่อยๆ พัฒนาขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เห็นว่าปริมาณสัดส่วนฟองอากาศเท่ากันไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด

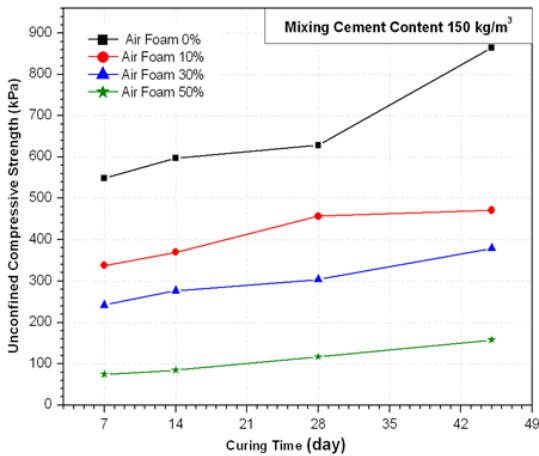
อย่างไรก็ตาม ปริมาณซีเมนต์ 100 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 50% ไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากมีการแทนที่ของฟองอากาศทำให้ปริมาณเนื้อดินเหนียวอ่อนผสมซีเมนต์ลดลงและทำให้การรับกำลังลดลง



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับระยะเวลาการบ่มที่ปริมาณซีเมนต์ 100, 150, 200 และ 250 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 30%



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับสัดส่วนฟองอากาศ ที่ปริมาณซีเมนต์ 100, 150, 200 และ 250 กก./ลบ.ม. ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับระยะเวลาการบ่มที่ปริมาณซีเมนต์ 150 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 0, 10, 30 และ 50%

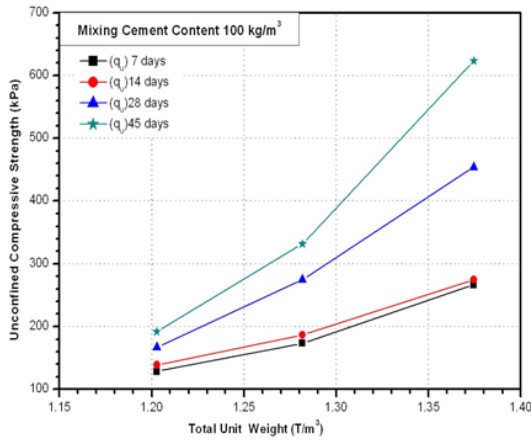
3.5 อิทธิพลของสัดส่วนฟองอากาศที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับสัดส่วนฟองอากาศที่เพิ่มปริมาตรขึ้นของดินเหนียวผสมซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 100, 150, 200 และ 250 กก./ลบ.ม. ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28 และ 45 วัน

พบว่าเมื่อสัดส่วนฟองอากาศต่ำ การรับกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดจะเพิ่มขึ้น และที่ระยะเวลาบ่มเดียวกัน เมื่อตัวอย่างมีฟองอากาศเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดจะลดลง อย่างไรก็ตามปริมาณซีเมนต์ที่มีสัดส่วนผสมมากกว่าจะทำให้กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงกว่า โดยค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด สูงสุดเท่ากับ 1355.48, 857.62 และ 366.33 kPa ที่ปริมาณซีเมนต์ 250 กก./ลบ.ม. ระยะเวลาการบ่ม 45 วัน สัดส่วนฟองอากาศ 10, 30, และ 50% ตามลำดับ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4

3.6 อิทธิพลของหน่วยน้ำหนักรวมที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

จากผลการทดลอง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับหน่วยน้ำหนักรวมของดินเหนียวอ่อนผสมโพลีซีเมนต์ เมื่อหน่วยน้ำหนักรวมเพิ่มขึ้น กำลังอัดก็เพิ่มขึ้นตามลำดับ ในปริมาณซีเมนต์เท่ากัน ที่ระยะเวลาการบ่มต่างกัน โดยสัดส่วนของหน่วยน้ำหนักรวมลดลงตามปริมาณสัดส่วนฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุด เท่ากับ 1.09 ตัน/ลบ.ม.

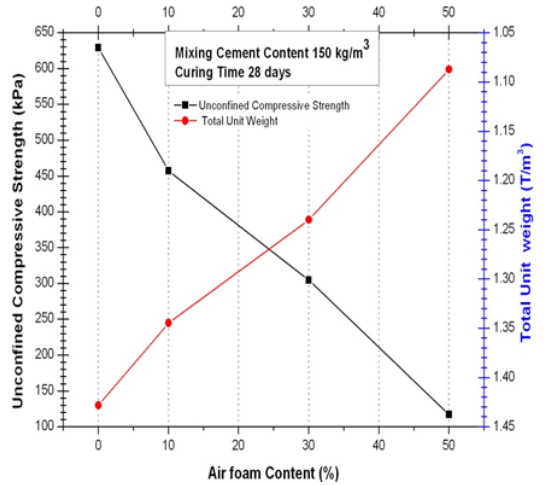


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับหน่วยน้ำหนักรวม ที่ปริมาณซีเมนต์ 100 กก./ลบ.ม. ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 28 และ 45 วัน

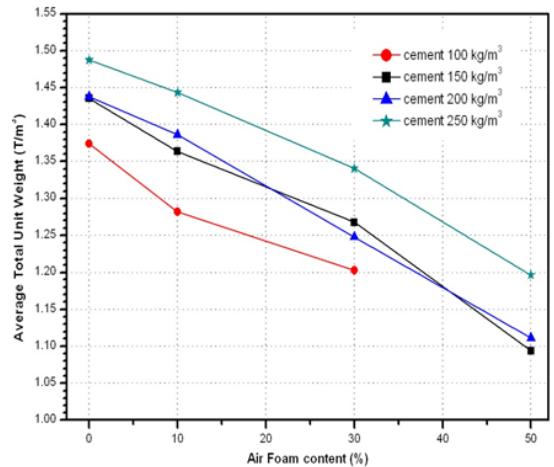
ที่ปริมาณซีเมนต์ 150 กก./ลบ.ม. ตัวอย่างที่มีปริมาณซีเมนต์ 250 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 0% ระยะเวลาการบ่ม 45 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงสุด 1523.55 กิโลปาสคาล ที่หน่วยน้ำหนักรวม เท่ากับ 1.49 ตัน/ลบ.ม. ดังแสดงในรูปที่ 5 สำหรับก้อนตัวอย่างปริมาณซีเมนต์ 100 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 50% ปริมาตรดินเปียก เนื่องจากตัวอย่างมีปริมาณซีเมนต์น้อย และสัดส่วนฟองอากาศมาก ทำให้ปริมาณเนื้อดินเหนียวมีน้อย ทำให้แรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างดินเหนียวอ่อน ปรับปรุงน้อย จึงไม่สามารถทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดได้

3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับสัดส่วนฟองอากาศ และหน่วยน้ำหนักรวม

จากผลการทดลองทราบว่าเมื่อสัดส่วนฟองอากาศเพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และยังทำให้หน่วยน้ำหนักรวมของดินตัวอย่างลดลงตามสัดส่วนของฟองอากาศที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะการบ่มปริมาณซีเมนต์เดียวกัน แสดงดังรูปที่ 6 จากกราฟสามารถทราบกำลังที่มีความสัมพันธ์กับหน่วยน้ำหนักรวมได้ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ได้



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับสัดส่วนฟองอากาศ และหน่วยน้ำหนักรวม ที่ปริมาณซีเมนต์ 150 กก./ลบ.ม. อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนฟองอากาศ กับหน่วยน้ำหนักรวมเฉลี่ยที่ปริมาณซีเมนต์ 100, 150, 200 และ 250 กก./ลบ.ม.

3.8 อิทธิพลของสัดส่วนฟองอากาศที่มีอิทธิพลต่อหน่วยน้ำหนักรวม

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนฟองอากาศ ที่เพิ่มขึ้นและหน่วยน้ำหนักรวมเฉลี่ยของดินเหนียวผสมซีเมนต์ที่ลดลง ในอัตราส่วนของซีเมนต์ 100,

150, 200 และ 250 กก./ลบ.ม. ของปริมาตรดินเปียก อย่างไรก็ตามสัดส่วนฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถลดน้ำหนักของดินเหนียวผสมซีเมนต์ ได้ตามสัดส่วนของฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นของปริมาตรดินเปียก เนื่องจากปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อายุการบ่ม อุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำ และปัจจัยต่างๆ ที่มีผลหน่วยน้ำหนักรวม

4. การประยุกต์ใช้ดินเหนียวอ่อนผสมโฟมซีเมนต์ในงานทาง

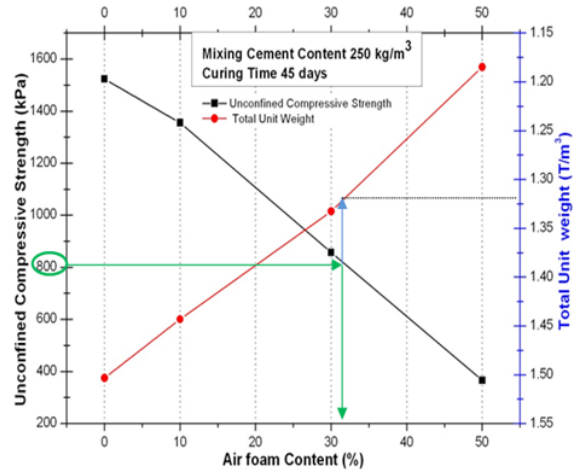
4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบ

ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบ เช่น ค่ากำลังอัด ที่มีผลจากปริมาณซีเมนต์และสัดส่วนฟองอากาศ ทำให้ได้ค่ากำลังการแบกทานเพื่อใช้ในการออกแบบน้ำหนักบรรทุกของคันทาง หน่วยน้ำหนักรวมที่มีผลเนื่องมาจากสัดส่วนฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นและลดลง

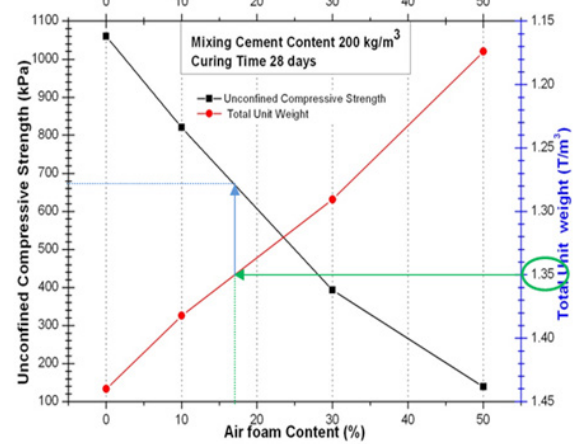
เพื่อลดน้ำหนักบรรทุกคงที่ของชั้นทาง และบรรเทาปัญหาการทรุดตัวของคันทาง จากผลการทดลองทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วน ฟองอากาศ ที่มีผลค่ากำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด และหน่วยน้ำหนักรวม ที่เป็นปัจจัยในการออกแบบ

รูปที่ 8 แสดงการอ่านค่าจากปัจจัยกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด (800 กิโลปาสคาล) อายุการบ่ม 45 วัน ในการออกแบบหลังจากนั้นกำหนดปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการแล้ว (250 กก./ลบ.ม.) แล้วจึงลากเส้นมายังเส้น Unconfined Compressive Strength แล้วอ่านค่าสัดส่วนฟองอากาศที่ได้ในการผสม (32%) และเมื่อลากเส้นตั้งฉากต่อจากจุดตัดแล้วลากเส้นมาชนกับเส้น Unit Weight จากนั้นอ่านค่าทางด้านขวามือจะได้ค่าหน่วยน้ำหนักรวมในการออกแบบครั้งนี้ (1.325 ตัน/ลบ.ม.)

รูปที่ 9 แสดงการอ่านค่าจากปัจจัยหน่วยน้ำหนักรวม (1.35 ตัน/ลบ.ม.) เพื่อแก้ปัญหาทรุดตัว จากนั้นกำหนดปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ (200 กก./ลบ.ม.) แล้วจึงลากเส้นทางขวามือมายังเส้นกราฟ Unit Weight แล้วอ่านค่าสัดส่วน

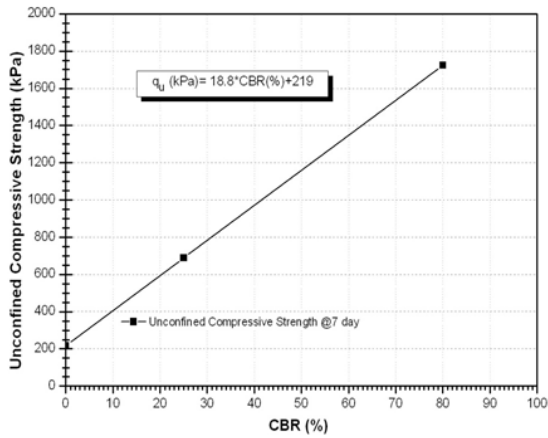


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับสัดส่วนฟองอากาศ และหน่วยน้ำหนักรวมที่มีปริมาณซีเมนต์ 250 กก./ลบ.ม.อายุบ่ม 45 วัน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับสัดส่วนฟองอากาศ และหน่วยน้ำหนักรวมที่มีปริมาณซีเมนต์ 200 กก./ลบ.ม.อายุบ่ม 28 วัน

ฟองอากาศที่ได้ในการผสม (17%) และเมื่อลากเส้นตั้งฉากต่อจากจุดตัดแล้วลากเส้นมาชนกับเส้นกราฟความสัมพันธ์ Unconfined Compressive Strength อ่านค่าทางด้านซ้ายมือ จะได้ค่ากำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดในการออกแบบ (665 กิโลปาสคาล) ที่อายุการบ่ม 28 วัน

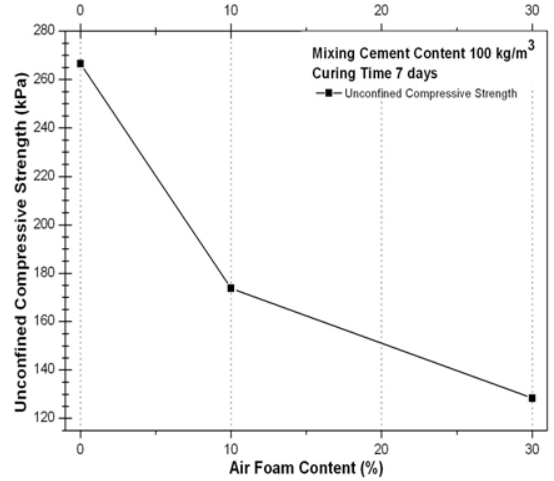


รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CBR กับกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดที่อายุ 7 วัน

ตารางที่ 2 และรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CBR กับกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดที่อายุ 7 วัน สามารถนำมาใช้ออกแบบปริมาณซีเมนต์ สัดส่วนฟองอากาศที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตและการออกแบบก่อสร้างได้ ทำให้ทราบค่ากำลังแบบไม่ถูกจำกัด ที่สามารถจำแนกชนิดของชั้นทางที่ใช้ในการออกแบบได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงของประเทศไทยได้ รูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ 100 กก./ลบ.ม. ที่อายุการบ่ม 7 วัน ไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในทางคั่นทางเพราะค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงสุดมีค่าเพียง 265 กิโลปาสกาล

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับกำลังรับอัดแบบไม่ถูกจำกัดตามมาตรฐานกรมทางหลวง

มาตรฐานชั้นทาง	CBR (%)	Qu (กิโลปาสกาล)
1. มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.-ม.204/2533)	80	1723.00
2. มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.-ม.206/2532)	25	689.00
3. มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก ก (ทล.-ม.208/2532)	10	407.00
4. มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก ข (ทล.-ม.209/2532)	6	331.80
5. มาตรฐานดินถมคั่นทาง (ทล.-ม.102/2532)	4	294.20



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับสัดส่วนฟองอากาศ ที่มีเหมาะสมประยุกต์ใช้ในทางที่ปริมาณซีเมนต์ 100 กก./ลบ.ม.

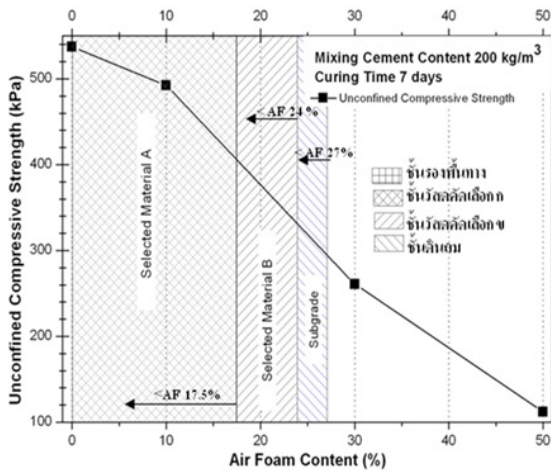
4.2 ดินเหนียวอ่อนผสมโฟมซีเมนต์ที่เหมาะสมประยุกต์ใช้ในทาง

การทดลองครั้งนี้ใช้มาตรฐานกรมทางหลวงของประเทศไทย ดังต่อไปนี้

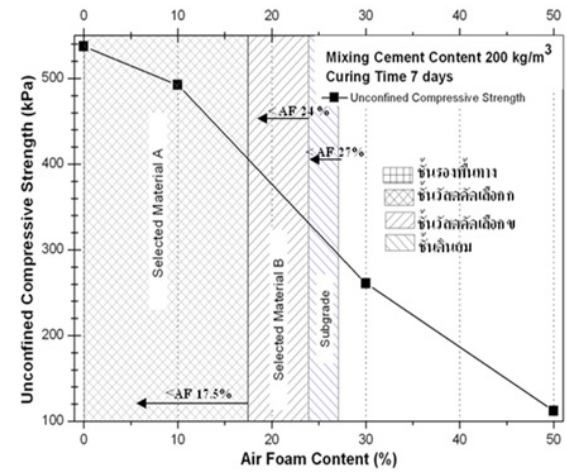
- 1) มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.-ม.204/2533)
- 2) มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.-ม.206/2532)
- 3) มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก ก (ทล.-ม.208/2532)
- 4) มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก ข (ทล.-ม.209/2532)
- 5) มาตรฐานดินถมคั่นทาง (ทล.-ม.102/2532) ใช้

ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR กับ q_u ดังตารางที่ 2

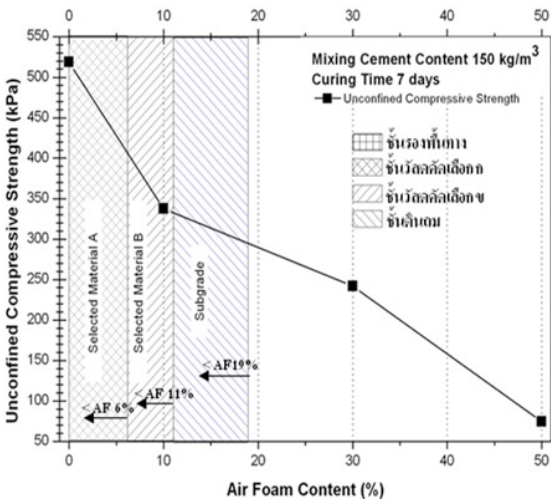
ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานดินถมคั่นทางดังตารางที่ 2 รูปที่ 12, 13 และ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ปริมาณสัดส่วนฟองอากาศที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบชั้นทางให้เหมาะสมกับสภาพในพื้นที่ จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ชั้นวัสดุคัดเลือก ก นั้นเหมาะสมกับปริมาณซีเมนต์ 150 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 0 ถึง 6% หรือปริมาณซีเมนต์ 200 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 0 ถึง 17.5% หรือปริมาณซีเมนต์ 250 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 0 ถึง 36% ส่วนชั้นวัสดุคัดเลือก ข นั้นเหมาะสมกับปริมาณซีเมนต์ 150 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟอง



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด กับสัดส่วนฟองอากาศ ที่เหมาะสมประยุกต์ใช้ในงานทางที่ปริมาณซีเมนต์ 150 กก./ลบ.ม.



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด กับสัดส่วนฟองอากาศ ที่เหมาะสมประยุกต์ใช้ในงานทางที่ปริมาณซีเมนต์ 250 กก./ลบ.ม.



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด กับสัดส่วนฟองอากาศ ที่เหมาะสมประยุกต์ใช้ในงานทางที่ปริมาณซีเมนต์ 200 กก./ลบ.ม.

อากาศ 0 ถึง 11% หรือปริมาณซีเมนต์ 200 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 0 ถึง 24% หรือปริมาณซีเมนต์ 250 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 0 ถึง 41.5% สำหรับดินถมคันทางเหมาะสมกับปริมาณซีเมนต์ 150 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 0 ถึง 19% หรือปริมาณซีเมนต์ 200 กก./ลบ.ม.

สัดส่วนฟองอากาศ 0 ถึง 27% หรือปริมาณซีเมนต์ 250 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 0 ถึง 44% อย่างไรก็ตาม เห็นได้ว่า สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด ในการทำชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ (มล.-ม.206/2532) คือปริมาณซีเมนต์ 250 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ 0 ถึง 22% ต่อปริมาตรดินเปียก

5. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังรับแรงอัดแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test) และหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และฟองอากาศ ที่สัดส่วนซีเมนต์ 100, 150, 200 และ 250 กก./ลบ.ม. ของปริมาตรดินเปียก สัดส่วนฟองอากาศที่ 0, 10, 30, และ 50% ของปริมาตรดินเปียก และระยะเวลาการบ่ม ที่อายุ 7, 14, 28 และ 45 วัน

ตัวอย่างดินเหนียวที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นตัวอย่างดินแปลงสภาพ (Disturbed Sample) จากจังหวัดปทุมธานี ลักษณะดินเป็นสีเทาดำ ดินมีความหนาแน่นรวมเท่ากับ 1.779 ตัน/ลบ.ม. มีปริมาณน้ำในมวลดินธรรมชาติเท่ากับ 42.07% ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 ค่าขีดจำกัดความเหลว (LL) เท่ากับ 69.92% ขีดจำกัดพลาสติก (PL)

เท่ากับ 29.98% ดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับ 39.94% เมื่อนำมาจำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification จัดอยู่ในกลุ่ม CH

ปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากันโดยมีสัดส่วนฟองอากาศต่างกัน แสดงให้เห็นว่าเมื่อผสมซีเมนต์ลงไปในตัวอย่างไร้ปริมาณมาก ทำให้กำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวเพิ่มสูงขึ้นในระยะเวลาบ่มเดียวกัน กำลังอัดของตัวอย่างดินที่เพิ่มขึ้นเชื่อว่าเป็นผลมาจาก ปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S) ที่มีอยู่ในซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ทำหน้าที่เกาะยึดเม็ดดินเข้าด้วยกันทำให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงสูงขึ้นยิ่งเมื่อปริมาณซีเมนต์มากขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงขึ้น

ระยะเวลาการบ่มที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ สัดส่วนฟองอากาศ ปริมาณซีเมนต์ 100, 150, 200 และ 250 กก./ลบ.ม. เมื่อตัวอย่างมีสัดส่วนฟองอากาศเท่ากัน พบว่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวจะเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้นในทุกอัตราส่วนผสม โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะ 7 วันแรกหลังจากนั้นอัตราการพัฒนางำลังอัดจะลดลงแต่ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและอย่างช้าๆ เนื่องจากเมื่อระยะเวลาการบ่มตัวอย่างนานขึ้น ปฏิกิริยา Cement Hydration จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

สัดส่วนฟองอากาศมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ที่มีปริมาณซีเมนต์ 100, 150, 200 และ 250 กก./ลบ.ม. ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, และ 45 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนฟองอากาศลดต่ำลง และกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวจะลดลงเมื่อตัวอย่างมีสัดส่วนฟองอากาศเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาบ่มเดียวกัน เมื่อพิจารณาปริมาณซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมต่างๆ พบว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวจะสูงขึ้นตามไปด้วย

ที่ปริมาณซีเมนต์ 250 กก./ลบ.ม. สัดส่วนฟองอากาศ

0 และ 10% ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเท่ากับ 895 และ 1092 กิโลปาสกาล ตามลำดับสามารถนำมาใช้งานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase) มาตรฐานกรมทางหลวง (ทล.-ม.206/2532) ซึ่งจะต้องมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 689 kPa (100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Porbaha, "State of the art in deep mixing technology, Part I. Basic concepts and overview," *Ground Improvement*, vol. 2, pp. 81-92, 1998.
- [2] A. Porbaha, H. Tanaka, and M. Kobayashi, "State of the art in deep mixing technology, Part II. Applications," *Ground Improvement*, vol. 2, pp. 125-139, 1998.
- [3] N. Miura, S. Horpibulsuk, and T.S. Nagaraj, "Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content," *Soils and Foundations*, vol. 41(5), pp. 33-45, 2001.
- [4] S. Horpibulsuk, N. Miura, and T.S. Nagaraj, "Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis," *Geotechnique*, vol. 53(4), pp. 439-444, 2003.
- [5] S. Horpibulsuk, N. Miura, and D.T. Bergado, "Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, vol. 30(10), pp. 1096-1105, 2004.
- [6] S. Horpibulsuk, N. Miura, and T.S. Nagaraj, "Clay-water/cement ratio identity of cement admixed soft clay," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, vol. 131(2), pp. 187-192, 2005.
- [7] G.A. Lorenzo and D.T. Bergado, "Fundamental



- characteristics of cement- admixed clay in deep mixing,” *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, vol. 18(2), pp. 161-174, 2006.
- [8] P. Voottipruex, T. Suksawat, D. T. Bergado, and P. Jamsawang, “Numerical simulations and parametric study of SDCM and DCM piles under full scale axial and lateral loads,” *Computers and Geotechnics*, vol. 38(3), pp. 318-329, 2011.
- [9] S. Bin-Shafique, T.B. Edil, C.H. Benson, and A. Senol, “Incorporating a fly-ash stabilised layer into pavement design,” in *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, vol. 157(4), pp. 239-249, 2004.
- [10] P.G. Nicholson and V. Kashyap, “Fly ash stabilization of tropical Hawaiian soils. Fly Ash for Soil Improvement,” *Geotechnical Specialpublication No. 36, ASCE*, New York, 1993, pp. 15-29.
- [11] R.L. Smith, “Fly ash for use in the stabilization of industrial wastes,” *Fly Ash for Soil Improvement '93. Sharp, D.K. (ed.). GSP No. 36, ASCE*, New York, NY, USA, 1993, pp. 58-72.
- [12] M.A. Usman and J.J. Jr. Bowders, “Stabilization characteristics of class F fly ash,” Transportation Research Record 1288. Transportation Research Board, Washington, DC, USA, 1990, pp. 59-60.
- [13] T. Tsuchida, “Super geo-material project in coastal zone,” in *Proceedings of the International Symposium on Ocean Space Utilization COSU'95*, Yokohama, 1995, pp. 22-31.
- [14] T. Tsuchida, D. Takeuchi, T. Okumura, and T. Kishida, “Development of light-weight fill from dredging,” in *Proceedings of Environmental Geotechnics*, 1996, pp. 415-420.
- [15] T. Tsuchida, A. Porbaha, and N. Yamane, “Development of a Geomaterial from Dredged Bay Mud,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 13, pp. 152-160, 2001.
- [16] T. Tsuchida and M.S. Kang, “Use of lightweight treated soil method in seaport and airport construction projects,” in *Proceedings of the Nakase Memorial Symposium, Soft Ground Engineering in Coastal Areas*. Yokosuka: A.A. Balkema, 2002, pp. 353-365.
- [17] T. Tsuchida and M.S. Kang, “Case studies of lightweight treated soil method in seaport and airport construction projects,” in *Proceedings of the 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Singapore, 2003, pp. 249-252.
- [18] Y. Watabe, Y. Itou, M.S. Kang, and T. Tsuchida, “One-dimensional compression of air-foam treated lightweight geo-material in microscopic point of view,” *Soils and Foundations*, vol. 44 (6), pp. 53-67. 2004.
- [19] T. Tsuchida and K. Egashira, *The Lightweight Treated Soil Method-New Geo-materials for Soft Ground Engineering in Coastal Areas*, London: A.A. Balkema Publisher, 2004.
- [20] J. Otani, T. Mukunoki, and Y. Kikuchi, “Visualization for engineering property of in-situ light weight soils with air foams,” *Soils and Foundations*, vol. 4 (3), pp. 93-105, 2002.
- [21] Y.T. Kim, H.J. Kim, and G.H. Lee, “Mechanical behavior of lightweight soil reinforced with waste fishing net,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 26, pp. 512-518, 2008.