

สมการควบคุมอัตราส่วนกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์ภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว
EQUATIONS CONTROLLING COMPRESSIVE STRENGTH RATIO OF SOFT BANGKOK CLAY STABILIZE WITH CEMENT
UNDER UNCONFINED COMPRESSION TEST.

อนุพงษ์ คำปลอด¹ ธนภฤต เทพอุโมงค์^{2*} อภิชาติ บัวกล้า³ ธนกร ชมภูรัตน์⁴

¹ ผู้ช่วยสอนและอดีตนักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา 56000

^{2, 3} อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา 56000

⁴ รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา 56000

*Corresponding author; E-mail address: thanakit.th@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการก่อสร้างสมการควบคุมอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดภายใต้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ระหว่างปูนซีเมนต์ต่อน้ำในดิน (C/w_c) เท่ากับ 0.2 0.3 และ 0.4 และดัชนีเหลว เท่ากับ 1.0 1.3 และ 1.6 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วยดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สมการควบคุมอัตราส่วนกำลังอัดสามารถบ่งบอกคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดและความแข็งของดินผสมปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณน้ำสูงได้ สุดท้ายในงานวิจัยนี้จะนำเสนอสมการควบคุมอัตราส่วนกำลังอัดในพจน์อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ระหว่างปูนซีเมนต์ต่อน้ำในดิน (C/w_c) และพจน์ของอัตราส่วนความพรุนต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (η/C_p) สำหรับทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

คำสำคัญ: ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, ปูนซีเมนต์, เถ้าลอย, อัตราส่วนความพรุนต่อปริมาณปูนซีเมนต์ และ อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ระหว่างปูนซีเมนต์ต่อน้ำในดิน

Abstract

This paper is to study and develop an equations controlling compressive strength ratio under only unconfined compression strength of soft Bangkok clay stabilized with cement. The mix ratio of soft clay blended with cement is shown in term of the cement/clay-water ratio (C/w_c) which are 0.2, 0.3, and 0.4. Liquidity index are 1.0, 1.3, and 1.6. The law materials consist of soft Bangkok clay and ordinary Portland cement type 1. The equations controlling compressive strength ratio can be explained the strength and stiffness of soil-cement mixtures with high water content. Finally, the equations controlling compressive strength ratio is shown in term of the cement/clay-water ratio (C/w_c) and the porosity/cement ratio (η/C_p) for predicting the compression strength of soft Bangkok clay stabilized with cement.

Keywords: Soft Bangkok clay, Cement, Fly ash, Cement/clay-water ratio, and Porosity/cement ratio.

1. บทนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารและสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ ภายในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลประสบปัญหาในการรับน้ำหนักของดิน เนื่องจากชั้นดินเป็นดินเหนียวอ่อน (soft clay) ดินเหนียวดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (soft Bangkok clay) เป็นดินที่ถูกพัดพาสู่ทะเลและน้ำทะเลก็หนุนกลับเข้ามาตกตะกอนเป็นชั้นๆ มีความลึกโดยประมาณ 15-25 เมตร (ชยานนท์ และคณะ, 2557) [1] ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯมีปริมาณความชื้นในมวลดินสูง จึงส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือน (shear strength) และการรับน้ำหนักของดินต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนก่อนนำไปในงานก่อสร้างฐานราก

การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนในปัจจุบันนิยมใช้วิธีการผสมลึก (deep mixing methods) โดยวิธีนี้ใช้สารเคมี คือ ปูนซีเมนต์ (cement) ผสมเข้ากับดินเหนียว วิธีการผสมลึกสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ (soil cement column) โดยการทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์จะใช้น้ำปูน (cement slurry) เข้าไปผสมกับดินแล้วหล่อเป็นเสาเข็ม สำหรับใช้ในการรองรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างต่างๆ บริเวณที่เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายเนื่องจากมีการก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน เช่น การก่อสร้างคอกสะพาน และการก่อสร้างถนนบริเวณดินเหนียวอ่อน เป็นต้น โดยทั่วไปเสาเข็มดินซีเมนต์มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 50-60 เซนติเมตร และความลึกประมาณ 2-15 เมตร การตรวจสอบกำลังรับแรงอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์จำเป็นจะต้องทำการเจาะเก็บตัวอย่างในสนาม แล้วนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตาม

อายุการบ่มตัว เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามกับในห้องปฏิบัติการ เป็นไปตามการออกแบบกำลังรับแรงอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์หรือไม่ โดยมีงานวิจัยของ ขยานนท์ และคณะ (2557)[1] ที่ได้ทำการศึกษารูปแบบกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามกับในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของในสนามกับในห้องปฏิบัติการมีค่าต่างประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

งานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปในการศึกษารูปแบบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินผสมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว จากงานวิจัยของ Lorenzo and Bergado (2004) [3], Jongpradist et al. (2011, 2018, 2019) [4], [5], [6] และ Jamsawang et al. (2017) [7] แสดงให้เห็นว่าปริมาณปูนซีเมนต์ และเวลาในการบ่มตัวส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ รวมถึงหน่วยน้ำหนัก ปริมาณน้ำในมวลดิน และความถ่วงจำเพาะ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างโดยรวมของตัวอย่าง Consoli et al. (2007) [8] และ Baldovino et al. (2020) [9] จึงได้เสนอให้พิจารณาอัตราส่วนช่องว่างต่อปูนซีเมนต์ ที่กำหนดโดยความพรุนของวัสดุประสานหารกับปริมาตรปูนซีเมนต์ (η/C_{iv}) จะเป็นตัวแปรควบคุมกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (q_u) ดังสมการที่ 1

$$q_u = A_i \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^\beta} \right]^{-B} \quad (1)$$

เมื่อ ค่า A_i จะมากขึ้นตามอายุการบ่มตัว และค่า B ขึ้นอยู่กับวัสดุประสานและแร่ธาตุของดิน

สำหรับตัวอย่างดินผสมปูนซีเมนต์ จากอ้างอิงตามงานวิจัยของ Consoli et al. (2010, 2011, 2016) [10], [11], [12] ความพรุนและปริมาตรปูนซีเมนต์สามารถหาได้จากสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

$$\eta = 100 - 100 \left\{ \left[\frac{\gamma_d}{1 + (C/100)} \right] \left[\frac{1}{\gamma_{ss}} + \frac{C/100}{\gamma_{sc}} \right] \right\} \quad (2)$$

$$C_{iv} = \frac{100 \left\{ \frac{\gamma_d}{1 + C/100} \left(\frac{C}{100} \right) \right\}}{\gamma_{sc}} \quad (3)$$

เมื่อ γ_d คือหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง γ_{ss} คือ หน่วยน้ำหนักแห้งของดิน γ_{sc} คือ หน่วยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และ C คือ เปอร์เซ็นต์ของปูนซีเมนต์ เมื่อนำสมการที่ 2 หารสมการที่ 3 จะได้สมการที่ 4

$$\frac{\eta}{C_{iv}} = \text{ปริมาตรช่องว่าง/ปริมาตรปูนซีเมนต์} \quad (4)$$

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาอัตราส่วนความพรุนต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่เป็นตัวแปรควบคุมค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

2. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

2.1. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

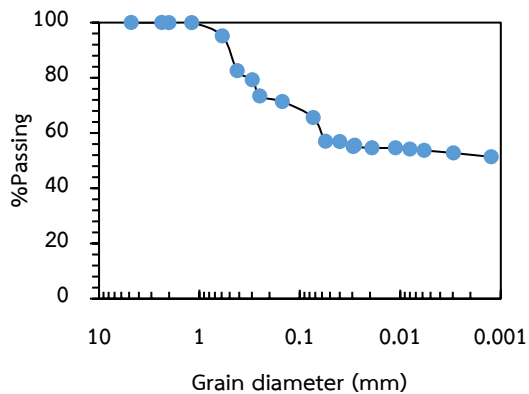
วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย ดินเหนียวอ่อนปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย โดยตัวอย่างดินเหนียวที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ระดับความลึกประมาณ 3-14 เมตร บริเวณถนนสายกาญจนาภิเษก-พุทธมณฑล สาย 2 และพื้นที่ใกล้เคียง สำหรับปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยคือ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดังแสดงในตารางที่ 1 และขนาดผลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดังแสดงในรูปที่ 1

2.2. การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (unconfined compression test) ดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ จากตัวอย่างทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 3.7 เซนติเมตร (1 1/4 นิ้ว) และความสูงเท่ากับ 7.6 เซนติเมตร (2.99 นิ้ว) เตรียมตัวอย่างโดยนำดินเหนียวอ่อนมาอบให้แห้งแล้ววัดเป็นผงนำมาผสมกับ ปูนซีเมนต์ตามด้วยเถ้าลอยคนให้เข้ากัน นำเข้าเครื่องผสมตัวอย่างพร้อมกับเติมน้ำ แล้วทำการหล่อตัวอย่างทรงกระบอกในท่อ PVC หลังจากนั้นนำไปห่อด้วยพลาสติก แล้วนำตัวอย่างไปบ่มในกล่องโฟมเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เมื่อครบอายุการบ่มตัวนำไปตรวจสอบขนาดของตัวอย่าง แล้วนำไปทดสอบในเครื่องกดตัวอย่างดังรูปที่ 2 สำหรับอัตราส่วนผสมในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

คุณสมบัติของดิน	ค่า
ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)	2.64
ขีดจำกัดเหลว (liquid limit)	77.80 %
ขีดจำกัดพลาสติก (plastic limit)	35.78 %
ขีดจำกัดหดตัว (shrinkage limit)	16 %
ดัชนีพลาสติก (plasticity index)	42.02 %
ดัชนีเหลว (liquidity index)	0.63
ปริมาณความชื้นของดินในธรรมชาติ (natural water content)	62.24 %
หน่วยน้ำหนักรวม (total unit weight)	16.81 kN/m ³
เปอร์เซ็นต์การร่อนตะแกรงผ่านเบอร์ 200	56.98 %
การจำแนกประเภทดิน (soil classification, USCS)	CH



รูปที่ 1 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

LI ($w_c, \%$)	C/w_c	อายุการบ่มตัว
1.0, 1.3, 1.6	0.2, 0.3, 0.4	7, 28

*LI คือ ดัชนีเหลว (liquidity index), C/w_c คือ เปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน

3. ผลการทดสอบ

3.1. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

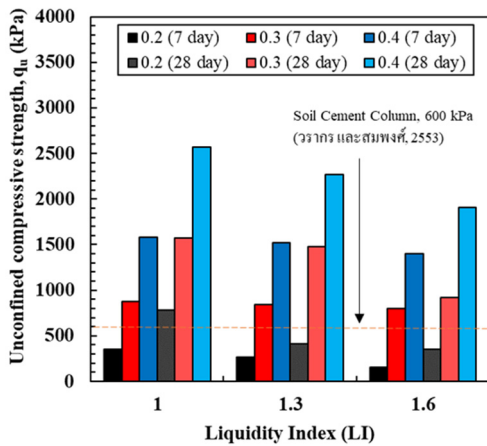
การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพสำหรับใช้ในงานเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมลึก (deep mixing) มีการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากถึง 150 ถึง 300 kg/m³ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ให้ครอบคลุมและอยู่ในช่วงดังกล่าว โดยใช้ค่าดัชนีเหลว (LI) เป็นตัวกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ กล่าวคือหากใช้ปริมาณน้ำมากทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้มากขึ้นเช่นกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวกับดัชนีเหลวแสดงในรูปที่ 3 จากผลการทดสอบพบว่า ที่อายุการบ่ม

ตัว 7 วันมีค่า q_u มากสุดเท่ากับ 1579.21 kPa เป็นส่วนผสม LI1.0C/w_c0.4 และค่า q_u น้อยสุดเท่ากับ 185.64 kPa ที่ส่วนผสม LI1.6C/w_c0.2 จะสังเกตได้ว่า LI เท่ากับ 1.0 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า LI เท่ากับ 1.3 และ 1.6 เพราะ LI เท่ากับ 1.3 และ 1.6 มีปริมาณน้ำในมวลดินมากกว่า LI เท่ากับ 1.0 จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง นอกจากนี้ ในส่วนผสมที่ LI เท่ากับพบว่า C/w_c เท่ากับ 0.4 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า C/w_c เท่ากับ 0.2 เพราะ C/w_c เท่ากับ 0.4 มีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า C/w_c เท่ากับ 0.2 เมื่อพิจารณาอายุการบ่มพบว่า ตัวอย่างที่มีอายุการบ่มตัว 28 วันมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำ โดยมีค่า q_u มากสุดเท่ากับ 2572.70 kPa เป็นส่วนผสม LI1.0C/w_c0.4 และค่า q_u น้อยสุดเท่ากับ 350.17 kPa เป็นส่วนผสม LI1.6C/w_c0.2 ซึ่งมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงอัดเหมือนกับช่วงอายุการบ่มตัว 7 วัน

โดยสรุปแล้วเมื่อดัชนีเหลว (LI) มากขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวลดลง เพราะดัชนีเหลวมากทำให้มีปริมาณน้ำในมวลดินมากจึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงที่อายุการบ่มตัวเดียวกัน ซึ่งในส่วนผสมที่มีค่า LI เท่ากันการเพิ่มอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน (C/w_c) ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ตัวอย่างดินแข็งขึ้นซึ่งผลการทดสอบตรงกับงานวิจัยของพนพันธ์ (2556) เมื่อเพิ่มอายุการบ่มตัวจึงทำให้แต่ละส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นทุกส่วนผสมเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำ

หากนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมลึก (deep cement mixing) จะสรุปส่วนผสมและค่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยข้อกำหนดการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมลึก (deep cement mixing) (วรการ และสมพงษ์, 2553) [2] ได้กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่อายุ 28 วันไม่ต่ำกว่า 600 kPa สำหรับการก่อสร้างรองรับบริเวณคันคลอง และถนน สำหรับส่วนผสมที่มีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน (C/w_c) เท่ากับ 0.2 พบว่ามีคุณสมบัติไม่เหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์เนื่องจากมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ถึงค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานคือ 600 kPa ซึ่งมีเพียงส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.0 ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานดังกล่าว



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวกับ ดัชนีเหลวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์

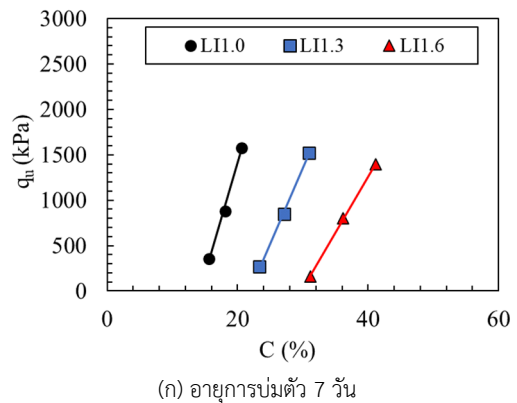
3.2. ผลกระทบของปูนซีเมนต์และความพรุนที่มีผลต่อค่า กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

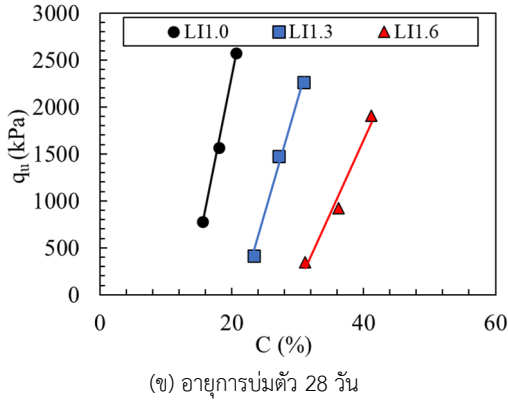
ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (q_u) กับ เปรอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ (C) ดังแสดงในรูปที่ 4 จากผลการทดสอบ พบว่า ในรูปที่ 4(ก) ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวเพิ่มขึ้น ณ ที่ค่า LI เท่ากัน ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเส้นตรง โดยค่า q_u สูงสุดเท่ากับ 1579.21 kPa คือส่วนผสมที่มีค่า LI เท่ากับ 1.0 และมีปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 20.6 เปรอร์เซ็นต์ ส่วนค่า q_u ต่ำสุดเท่ากับ 158.64 kPa คือส่วนผสมที่มีค่า LI เท่ากับ 1.6 และมีปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 31.12 เปรอร์เซ็นต์ จะสังเกตได้ว่าค่า LI เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวลดลง เนื่องจากมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ในตัวอย่างเมื่อบ่มตัวอย่างทำให้ปริมาณน้ำส่วนเกินระเหยออกไป มากก่อให้เกิดจำนวนช่องว่างมากขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง ในส่วนผสม ในรูปที่ 4(ข) ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน มีค่ากำลังรับ แรงอัดมากขึ้นโดยมีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว เหมือนกับที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชัน เส้นตรงเช่นกัน โดยค่า q_u สูงสุดเท่ากับ 2572.70 kPa คือส่วนผสม ที่มีค่า LI เท่ากับ 1.0 ส่วนค่า q_u ต่ำสุดเท่ากับ 350.17 kPa คือ ส่วนผสมที่มีค่า LI เท่ากับ 1.6

ตารางที่ 3 สรุปค่า q_u เปรียบเทียบกับเกณฑ์การออกแบบ เสาเข็มดินซีเมนต์

ส่วนผสม		ค่า q_u (kPa)	เกณฑ์การ ออกแบบ
ดัชนี เหลว, LI	อัตราส่วน C/w_c		
1.0	0.2	778.43	ผ่าน
	0.3	1570.02	ผ่าน
	0.4	2572.70	ผ่าน
1.3	0.2	412.39	ไม่ผ่าน
	0.3	1478.88	ผ่าน
	0.4	2265.16	ผ่าน
1.6	0.2	350.17	ไม่ผ่าน
	0.3	923.18	ผ่าน
	0.4	1904.27	ผ่าน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (q_u) กับ เปรอร์เซ็นต์ความพรุน (η) ดังแสดงในรูปที่ 5 จากผลการทดสอบ พบว่า ในรูปที่ 5(ก) ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน เมื่อค่าความพรุนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวลดลง ณ ที่ค่า LI เท่ากัน ซึ่งได้ ความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังสมการที่ 5 6 7 สำหรับ LI เท่ากับ 1.0 1.3 1.6 ตามลำดับ โดยค่า q_u สูงสุดเท่ากับ 1579.21 kPa คือส่วนผสมที่มีค่า LI เท่ากับ 1.0 และมีความพรุนอยู่ที่ 0.87 เปรอร์เซ็นต์ ส่วนค่า q_u ต่ำสุดเท่ากับ 158.64 kPa คือ ส่วนผสมที่มีค่า LI เท่ากับ 1.6 และมีความพรุนอยู่ที่ 7.38 เปรอร์เซ็นต์ จะสังเกตได้ว่าค่า LI เพิ่มขึ้นทำให้ความพรุนเพิ่มขึ้น เช่นกันเนื่องจากมีปริมาณน้ำในส่วนผสมมาก เมื่อบ่มตัวอย่างทำให้ ปริมาณน้ำส่วนเกินระเหยออกไปมากก่อให้เกิดปริมาณช่องว่างใน ตัวอย่างมากส่งผลต่อความพรุนที่มากขึ้นในตัวอย่าง ในส่วนผสม ใน รูปที่ 5(ข) ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดมากขึ้นโดยมี แนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวเหมือนกับที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเส้นตรงเช่นกัน ดังสมการที่ 8 9 10 สำหรับ LI เท่ากับ 1.0 1.3 1.6 ตามลำดับ โดยค่า q_u สูงสุด





รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (q_u) กับเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ (C) ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน

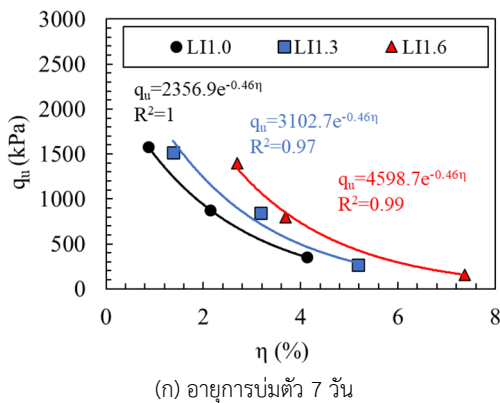
เท่ากับ 2572.70 kPa คือส่วนผสมที่มีค่า LI เท่ากับ 1.0 และมีความพรุนอยู่ที่ 0.71 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่า q_u ต่ำสุดเท่ากับ 350.17 kPa คือส่วนผสมที่มีค่า LI เท่ากับ 1.6 และมีความพรุนอยู่ที่ 5.99 เปอร์เซ็นต์ จะสังเกตได้ว่า เมื่ออายุการบ่มตัวเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความพรุนในตัวอย่างลดลง ณ ที่ค่า LI เท่ากัน เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่เกือบสมบูรณ์ทำให้ตัวอย่างแน่นขึ้นส่งผลให้ช่องว่างลดลงจึงมีความพรุนลดลงนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Consoil et al. (2011) [4]

ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน

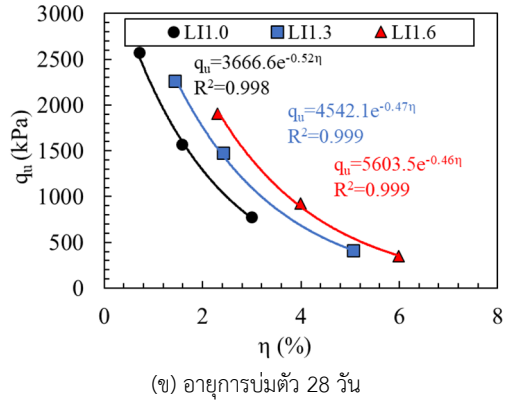
$$q_u = 2356.9e^{-0.46\eta} \quad (5)$$

$$q_u = 3102.7e^{-0.46\eta} \quad (6)$$

$$q_u = 4598.7e^{-0.46\eta} \quad (7)$$



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (q_u) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน (η) ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (q_u) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน (η) ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน

ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน

$$q_u = 3666.6e^{-0.52\eta} \quad (8)$$

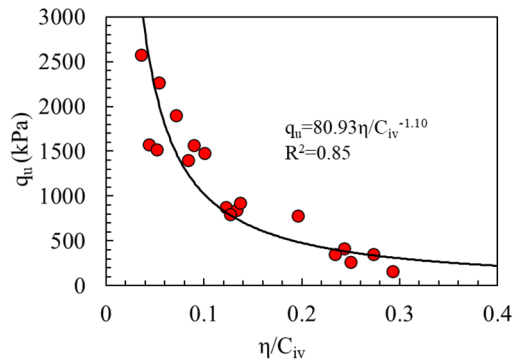
$$q_u = 4542.1e^{-0.47\eta} \quad (9)$$

$$q_u = 5603.5e^{-0.46\eta} \quad (10)$$

3.3. ผลกระทบของอัตราส่วนความพรุนกับปริมาตรปูนซีเมนต์ที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (q_u) กับค่าอัตราส่วนความพรุนกับปริมาตรปูนซีเมนต์ (η/C_{iv}) ดังแสดงในรูปที่ 6 จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อค่า η/C_{iv} เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวลดลง ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันยกกำลัง ดังสมการ ที่ 11 ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.85

$$q_u = 80.93 \left(\frac{\eta}{C_{iv}} \right)^{-1.10} \quad (11)$$



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (q_u) กับค่าอัตราส่วนความพรุนกับปริมาตรปูนซีเมนต์ (η/C_{iv})

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวกับค่าอัตราส่วนความพรุนกับปริมาตรปูนซีเมนต์พบว่าปริมาตรปูนซีเมนต์แปรตรงกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว กล่าวคือเมื่อปริมาตรปูนซีเมนต์มากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากขึ้นตามแต่ในทางกลับกันความพรุนแปรผกผันกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว กล่าวคือเมื่อความพรุนมากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง อย่างไรก็ตาม ความพรุนยังขึ้นอยู่กับอายุการบ่มตัว จากผลการทดสอบในหัวข้อก่อนหน้าซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lorenzo and Bergado (2004) [3], Jongpradist et al. (2011, 2018, 2019) [4], [5], [6] และ Jamsawang et al. (2017) [7]

4. สรุป

งานวิจัยเรื่องสมการควบคุมอัตราส่วนกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์ภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวสามารถสรุปผลได้ว่า

1. เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวลดลง
2. เมื่ออายุการบ่มตัวมากขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวลดลง ณ ปริมาณน้ำที่เท่ากัน
3. จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (q_u) กับค่าอัตราส่วนความพรุนกับปริมาตรปูนซีเมนต์ (η/C_w) พบว่า หากปริมาตรปูนซีเมนต์แปรตรงกับค่า q_u แต่ในทางกลับกันค่า η แปรผกผันกับค่า q_u ณ ปริมาณน้ำที่เท่ากัน
4. ส่วนผสมที่มี C/w_c เท่ากับ 0.2 จะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำและมีจำนวนความพรุนที่มาก
5. ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือส่วนผสม L1.3C/w_c0.3 เพราะมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่ผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์และมีความพรุนที่น้อย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยพะเยา

6. การอ้างอิง

- [1] ชยานนท์ ศรีเจริญ, รุ่งลาวัลย์ ราชัน และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข (2557). การพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 37, กรุงเทพมหานคร, 2 เมษายน – มิถุนายน, หน้า 151-164.
- [2] รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง, และ นายสมพงษ์ โรจน์กั้งสตาล. (2553). คู่มือการก่อสร้างและแนวทางแก้ไขปัญหาก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ :กรณีศึกษาโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ. 136.

- [3] Lorenzo, G. A., & Bergado, D. T. (2004). Fundamental parameters of cement-admixed clay: New approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(10), 1042-1050. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:10\(1042\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:10(1042))
- [4] Jongpradist, P., Youwai, S., & Jaturapitakkul, C. (2011). Effective void ratio for assessing the mechanical properties of cement-clay admixtures at high water content. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(6), 621-627. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000462](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000462)
- [5] Jongpradist, P., Homtragoon, W., Sukkarak, R., Kongkitkul, W., & Jamsawang, P. (2018). Efficiency of Rice husk ash as cementitious material in high-strength cement-admixed clay. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2018/8346319>
- [6] Jongpradist, P., Jamsawang, P., & Kongkitkul, W. (2019). Equivalent void ratio controlling the mechanical properties of cementitious material-clay mixtures with high water content. *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(10), 1151-1162. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2018.1539534>
- [7] Jamsawang, P., Poorahong, H., Yoobanpot, N., Songpiriyakij, S., & Jongpradist, P. (2017). Improvement of soft clay with cement and bagasse ash waste. *Construction and Building Materials*, 154, 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.188>
- [8] Consoli, N. C., D. Foppa, L. Festugato, and K. S. Heineck. 2007. "Key parameters for strength control of artificially cemented soils." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 133 (2): 197-205. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:2\(197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197)).
- [9] Jair de Jesús Arrieta Baldovino., Ronaldo Luis dos Santos Izzo., D.Sc. Mirian Dayane Pereira, P.E., Eduardo Vieira de Goes Rocha (2020). "Equations Controlling Tensile and Compressive Strength Ratio of Sedimentary Soil-Cement Mixtures under Optimal Compaction Conditions." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002973](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002973)

- [10] Consoli, N. C., R. C. Cruz, M. F. Floss, and L. Festugato. 2010. "Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 136 (5): 759–763. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000278](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000278)
- [11] Consoli, N. C., R. C. Cruz, and M. F. Floss. 2011. "Variables controlling strength of artificially cemented sand: Influence of curing time." *J. Mater. Civ. Eng.* 23 (5): 692–696. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000205](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000205).
- [12] Consoli, N. C., P. M. V. Ferreira, C. S. Tang, S. F. V. Marques, L. Festugato, and M. B. Corte. 2016. "A unique relationship determining strength of silty/clayey soils–portland cement mixes." *Soils Found.* 56 (6): 1082–1088. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.11.011>.