ตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า – พารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย

EQUIVALENT CEMENT CONTENT – A NEW PARAMETER FOR ANALYSIS OF STRENGTH DEVELOPMENT IN BLENDED CEMENT ADMIXED CLAY

อภิชาติ สุดดีพงษ์ (Apichat Suddeepong)[1]
รุ้งลาวัลย์ ราชัน (Runglawan Rachan)[2]
สุขสันติ์ หอพิบูลสุข (Suksun Horpibulsuk)[3]

[1]นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี suddeepong8@hotmail.com
[2]อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร runglawa@gmail.com
[3]รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี suksun@g.sut.ac.th

บทคัดย่อ : บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของเถ้าลอยในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนด้วยปูนซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่าที่ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่มค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยจนกระทั่งปริมาณเถ้าลอยเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ในช่วงปริมาณเถ้าลอยน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ เถ้าลอยทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายตัว ซึ่งทำให้อนุภาคดินเหนียวและปูนซีเมนต์กระจายตัวและสัมผัสน้ำได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ดีขึ้น ด้วยเหตุนี้เอง การใส่เถ้าลอยในดินซีเมนต์จึงเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอตัวแปรใหม่สำหรับการวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ซึ่งเรียกว่า “ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า” เมื่อประยุกต์ใช้ตัวแปรดังกล่าวร่วมกับ Clay-water/cement ratio hypothesis เราสามารถประมาณกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อายุบ่มหนึ่งๆ ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอย) ได้ จากการศึกษาพบว่าทุกอายุบ่ม เถ้าลอยมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.7 เท่าของปูนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอย

ABSTRACT : The present paper investigates the influence of fly ash on the strength development in cement admixed soft clay. It is found from this investigation that for a particular water content, cement content and curing time, strength increases with fly ash content up to 25% of dry weight of cement. In this range, the role of fly ash is to disperse the clay-cement clusters into smaller clusters increasing the reactive surface and hence strength. In other words, the input of fly ash in clay-cement mixture is regarded akin to the effect of an increase in cement content. As such, the novel parameter is introduced and designated as equivalent cement content. When applied with clay-water/cement ratio hypothesis, the strength development at a particular curing time for any water content, cement content, and fly ash content can be assessed. It is found that for all curing time tested, fly ash content is equal to 0.7 cement content for all combinations of water content, cement content, and fly ash content.

KEYWORDS : Fly ash, Clay, Cement, Unconfined compressive strength

1. บทนำ

ในประเทศไทยเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งคือ เทคนิคการผสมลึก (Deep mixing technique) เทคนิคนี้ช่วยเพิ่มพันธะเชื่อมประสานให้กับดินด้วยสารเคมี (ซีเมนต์และปูนขาว เป็นต้น) โดยการสร้างเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อน เพื่อเปลี่ยนจากชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นชั้นดินผสมลึก (Composite ground) ซึ่งความต้านทานการอัดตัวและกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม [1]

วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากในเทคนิคการปรับปรุงดินนี้เป็นผลให้ราคาของการก่อสร้างมีค่าสูงเมื่อเทียบกับวิธีอื่น จึงมีความจำเป็นที่จะหาวัสดุที่มีราคาต่ำกว่าเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ ได้แก่ เถ้าลอยถ่านหิน ในงานทางวิศวกรรมโครงสร้าง การประยุกต์ใช้เถ้าลอยถ่านหินเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย [2] แต่การใช้งานทางวิศวกรรมปฐพียังมีอยู่อย่างจำกัด

ยุทธนา [3] และ Horpibulsuk et al. [4] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอยและกล่าวดินเหนียวและปูนซีเมนต์ต่างก็เป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ดังนั้น เมื่อสัมผัสกับน้ำจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น (Clusters/Aggregates) การใส่เถ้าลอยในดินซีเมนต์จะช่วยให้อนุภาคของดินซีเมนต์กระจายตัวและสัมผัสกับน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น นอกจากนี้ยังกล่าวอีกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์เถ้าลอยมีน้อยมากและแทบจะไม่ผลต่อการพัฒนากำลังอัด เนื่องจากปริมาณ $Ca(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการของซิลิกาที่อยู่ในเถ้าลอย ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นน้อยเป็นผลมาจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงดินมีปริมาณต่ำ ซึ่งแตกต่างจากในงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดที่สูงมาก (โดยปกติจะมากกว่า 280 กิโลกรัมต่อตารางเมตร) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการใส่เถ้าลอยในดินซีเมนต์เปรียบเสมือนการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ให้กับดินซีเมนต์ โดยมีค่าเท่ากับปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า (Equivalent cement content)

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ พร้อมทั้งวิเคราะห์ลักษณะการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ หลักการวิเคราะห์จะอาศัยพารามิเตอร์ปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio, w_c/C) [5-8] ร่วมกับตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า พารามิเตอร์ทั้งสองนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ครั้งแรกในการวิเคราะห์ดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลโดย Rachan et al. [9]

2. วิธีการวิจัย

2.1 ตัวอย่างดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย

ดินตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียวกรุงเทพ เก็บจากเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ที่ระดับความลึก 3.0 - 4.0 เมตร ขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 89 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดินตัวอย่างประกอบด้วยทราย ดินตะกอนและดินเหนียว ในปริมาณ 3, 27 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ดินประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) ตามระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภท 1 เถ้าลอยถ่านหินได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินแสดงดังตารางที่ 1 ดินตัวอย่างถูกนำดินร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อแยกเศษเปลือกหอยและเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ออก และทำการปรับแก้ความชื้นในดินให้มีค่า Liquidity Index (LI) เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 เพื่อจำลองการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นในขณะทำการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยเทคนิคการผสมเปียก (Wet method)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน

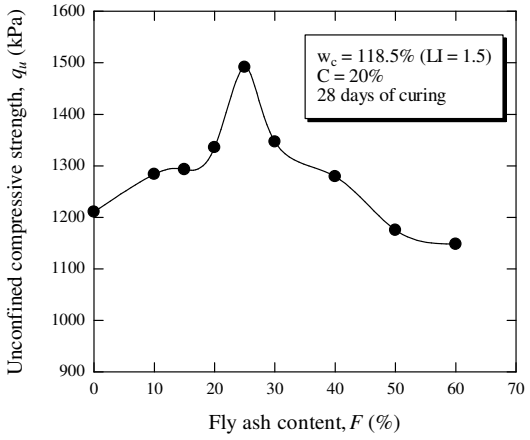
องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอยถ่านหิน
SiO_2	45.63%
Al_2O_3	24.59%
Fe_2O_3	11.26%
CaO	12.15%
MgO	2.87%
SO_3	1.57%
Na_2O	0.07%
K_2O	2.66%
LOI	1.23%

2.2 การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอย

ดินตัวอย่างที่ปริมาณน้ำความชื้นต่างๆ (LI = 1 ถึง 2) ถูกนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณเถ้าลอยเท่ากับ 0 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นบรรจุตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร โดยทำดินตัวอย่าง 3 ตัวอย่างในหนึ่งส่วนผสม หลังจากนั้นอีก 24 ถึง 48 ชั่วโมง ทำการถอดตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยออกจากแบบหล่อและห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหาร บ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิ (25 ± 2^{o}C) เป็นเวลา 7, 14 และ 28 เมื่อครบอายุการบ่มนำไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทันที ด้วยอัตราเร็วในการกด 1.0% ของความสูงดินตัวอย่างต่อนาทีจนกระทั่งดินวิบัติ

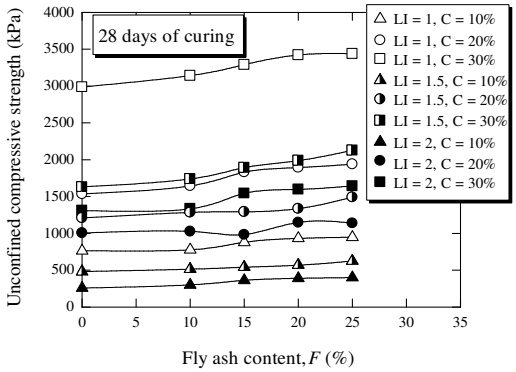
3. ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ภาพที่ 1 แสดงผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น 118.5 เปอร์เซ็นต์ (LI = 1.5) ปริมาณปูนซีเมนต์ 20 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (ปริมาณเถ้าลอยน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์) หลังจากนั้นกำลังอัดมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณเถ้าลอยที่เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 1 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินที่อายุบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 2 แสดงการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้นและปริมาณซีเมนต์ต่างๆ สำหรับเถ้าลอยในปริมาณน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุบ่ม 28 วัน จะเห็นได้ว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยสำหรับทุกอัตราส่วนผสม ในอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่เหมือนกัน ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าให้กำลังอัดที่ต่ำกว่า เนื่องจากระยะห่างระหว่างอนุภาคดิน (Pore space) มีมากกว่า



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าลอยของดินซีเมนต์เถ้าลอย ที่อายุบ่ม 28 วัน

จากภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยในปริมาณน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ เปรียบเสมือนการเพิ่มปูนซีเมนต์ให้กับดินซีเมนต์ [9] ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า

$$C_e = kF \tag{1}$$

เมื่อ C_e คือปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า k คือตัวแปรประสิทธิภาพ และ F คือปริมาณเถ้าลอย ดังนั้น ปริมาณซีเมนต์ทั้งหมด (C) ที่มีอยู่ในดินเหนียวจึงเท่ากับ

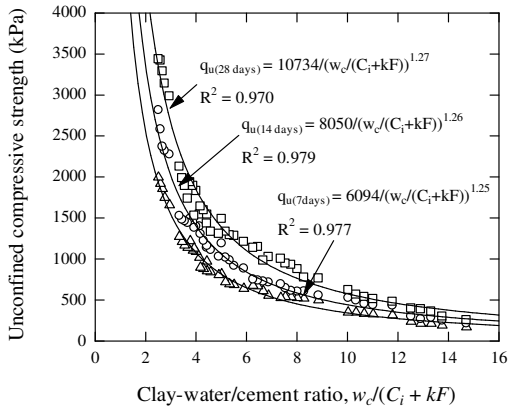
$$C = C_i + C_e \tag{2}$$

เมื่อ C_i คือปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่เริ่มต้น โดยการรวมสมการที่ (1) และ (2) เข้ากับตัวแปรปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่อายุบ่มใดๆ แสดงได้ดังนี้

$$q_u = \frac{A}{\left(\frac{w_c}{C_i + kF}\right)^B} \tag{3}$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ และ q_u คือกำลังอัดที่อายุบ่มใดๆ พารามิเตอร์ A, B, และ k สามารถหาได้จากการทำ Non-linear regression ภาพที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อายุบ่ม 7, 14, และ 28 วัน ด้วยพารามิเตอร์อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ จะเห็นว่าความสัมพันธ์ที่นำเสนอสามารถใช้ได้กับดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอยใดๆ

ได้ ค่าของ A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. [8] ในขณะที่ B และ k มีค่าประมาณคงที่ สำหรับทุกอายุบ่มและอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ น้ำ และเถ้าลอย จากการศึกษาพบว่า B มีค่าประมาณ 1.25 ถึง 1.27 และ k มีค่าเท่ากับ 0.7 ดังนั้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าลอยมีประสิทธิภาพเป็น 0.7 เท่าของปูนซีเมนต์ หรือกล่าวอย่างง่ายว่าในการเติมปูนซีเมนต์ 20 เปอร์เซ็นต์ ของดินแห้ง และเถ้าลอย 25 เปอร์เซ็นต์ ของปูนซีเมนต์ (5 เปอร์เซ็นต์ ของดินแห้ง) เทียบได้เท่ากับการเติมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเท่ากับ 23.5 เปอร์เซ็นต์ ของดินแห้ง



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์

4. บทสรุป

บทความนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าลอยเป็นตัวกระจายตัวในดินซีเมนต์ บทสรุปที่สำคัญแสดงได้ดังนี้

1. เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุกระจายตัวในช่วงปริมาณเถ้าลอยน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ ทำให้อนุภาคของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น
2. เถ้าลอยมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.7 เท่าของปูนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม
3. พารามิเตอร์ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่าสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับพารามิเตอร์ปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ในการวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Broms, B. B. 1986. *Stabilization of soft clay with lime and cement column in Southeast Asia*, Applied Research Project RP10/83, Nanyang Technological Institute, Singapore.

[2] Mindess, S. 1996. *Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone*, RILEM Technical Committee 108-ICC Report, E&FN SPON: 48-63.

[3] ยุทธนา รักษชนม์. 2551. กำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[4] Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Raksachon, Y. (2009). Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay, *Soils and Foundations*, 49(1): 85-98.

[5] Horpibulsuk, S. and Miura, N. (2001). A new approach for studying behavior of cement stabilized clays, *Proc. 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, Turkey, 3: 1759-1762.

[6] Miura, N., Horpibulsuk, S. and Nagaraj, T.S. (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soil and Foundation*, 41(1): 33-45.

[7] Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T.S. (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soils and Foundations*, 41(5): 33-45.

[8] Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S. (2003). Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis, *Geotechnique*, 53(4): 439-444.

[9] Rachan, R., Chim-oye, W., and Horpibulsuk, S. (2009). Application of biomass fly ash as a pozzolanic material for stabilization of low-swelling clay, *Lowland Technology International*, 11(1) (in press).

[10] Papadakis V.G. and Tsimas. S. (2002). Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design. *Cement and Concrete Research*. 32, 1525-1532.