วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 38 ฉบับที่ 1 (27-34) มกราคม-มีนาคม 2554 บทความวิจัย
KKU Engineering Journal Vol.38 No.1 (27-34) January – March 2011

การพัฒนากำลังอัดของดินเค็มผสมซีเมนต์และเถ้าลอย

วรวิทย์ โพธิ์จันทร์ [*1)] และ สุขสันติ์ หอพิบูลสุข [2)]

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม) ต่อกำลังอัดของดินเค็มผสม ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของดินเค็ม ผสมปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยและมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 25 ของปริมาณปูนซีเมนต์ เถ้าลอยช่วยให้อนุภาคของดินเค็มและปูนซีเมนต์กระจายตัวและสัมผัสน้ำได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ดีขึ้น กำลังอัดของดินเค็ม ผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมต่างๆ สามารถประมาณได้โดยอาศัยพารามิเตอร์ clay-water/cement ratio ร่วมกับตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า สำหรับการผสมเพิ่มเถ้าลอยในอัตราส่วนน้อยกว่าร้อยละ 25 เถ้าลอยมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.75 เท่าของปูนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างดิน น้ำ ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย

คำสำคัญ: ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ วัสดุกระจายตัว ดินเค็ม

[*1)] นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา 30000, อีเมล์: worawit_phojan@yahoo.com

[2)] รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา 30000, อีเมล์: suksun@g.sut.ac.th

[*] Corresponding Author

Strength Development in Blended Cement Admixed Saline Soil

Worawit Phojan [*1)] and Suksun Horpibulsuk [2)]

Abstract

This present paper investigates influential factors (water content, cement content, fly ash content and curing time) on strength development in saline soil admixed with cement and fly ash. It is found that for a particular cement content, the strength of admixed saline clay increases with fly ash content and the highest strength is attained at 25% fly ash. Fly ash disperses the soil-cement clusters into smaller clusters and increases the reactive surface, hence strength improvement. Based on the clay-water/cement ratio and the parameter equivalent cement content, the strength prediction equation for the cement admixed saline soil is introduced. For fly ash content less than 25%, fly ash content is equivalent to 0.75 cement content for all combinations of water content, cement content and fly ash content.

Keywords: equivalent cement content, fly ash, cement, disperse, saline soil

[*1)] M.Eng. Scholar, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, E-mail: worawit_phojan@yahoo.com

[2)] Associated Professor, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, E-mail: suksun@g.sut.ac.th

[*] Corresponding Author

1. บทนำ

ดินเค็ม (Saline Soils) หมายถึงดินที่ได้รับอิทธิพลจากเกลือ (Salt affected soils) โดยทั่วไปเกลือที่พบในดินเค็มมักเกิดจากการรวมตัวของธาตุที่มีประจุบวกพวกโซเดียม, แคลเซียม, แมกนีเซียม และโพแทสเซียม กับธาตุประจุลบเช่น คลอไรด์, ซัลเฟต, คาร์บอเนต, ไบคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนต

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นพื้นที่ที่มีปัญหาในงานวิศวกรรมปฐพีจากดินเค็มและดินกระจายตัว พื้นที่ดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีกว่า 18 ล้านไร่ และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นทุกๆ ปี ทั้งนี้เนื่องจากสภาพ พื้นที่ ของ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีองค์ประกอบ ของ เกลือหินประมาณ ร้อยละ 34 ของพื้นที่ทั้งภาค ดังนั้นจึงมีการแพร่กระจายของดินเค็มและน้ำเค็มในบริเวณกว้าง (Arunee, 1982) ดินเค็มเกิดจากการที่น้ำนำพาของ เกลือขึ้นมาสู่ผิวดิน เมื่อน้ำระเหย เกลือจะปนเปื้อนอยู่ในดิน

เกลือที่ มีอยู่ภายในมวลดิน มีผลถึงคุณสมบัติ ทางวิศวกรรมของดิน เกลือที่แทรกอยู่ในโพรงระหว่างอนุภาคดินอาจเกิดการ แตกตัวเพื่อแลกประจุบวก (Cation) เช่น ประจุโซเดียม (Na^{+}) และมีผล ให้ดินเกิดการกระจายตัว (Petrukhin ,1993) นอกจากนี้ โซเดียมคลอไรด์ที่อยู่ในดินเมื่อละลายน้ำ จะทำให้อนุภาคของเม็ดดินเกิดการกระจายตัวและการบวมตัว (Israel ,1982)

Davidson (1961) ได้รายงานว่า ประจุลบที่มีอยู่ในอนุภาคของดิน (ซัลเฟตและคลอไรด์) มีผลต่อการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ โดยอาจหน่วง การแข็งตัว ของดินซีเมนต์ ดินที่มีสาร ประกอบของ ซัลเฟตผสมอยู่ เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ จะเกิดการบวมตัวและทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

ดังนั้นเมื่อนำดินจาก พื้นที่ที่มีความเค็ม มาใช้ในงานทางวิศวกรรมโยธา จึงจำเป็น ต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม (การกระจายตัวและการบวมตัว) ให้ดีขึ้น วิธีปรับปรุงดินวิธีหนึ่งที่เหมาะสมคือการผสมปูนซีเมนต์ วิธีการ ลดต้นทุนของการก่อสร้าง วิธีหนึ่งคือการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ที่มีราคาต่ำการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้กำลังอัดของดินเพิ่มขึ้นและช่วยให้ดินซีเมนต์มีความคงทน (Durability) เพิ่มขึ้นด้วย การใส่เถ้าลอยในดินซีเมนต์จะช่วยให้อนุภาคของดินซีเมนต์กระจายตัวและสัมผัสกับน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น นอกจากนี้การใส่เถ้าลอยในดินซีเมนต์เปรียบเสมือนการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ให้กับดินซีเมนต์ (Yutthana,2008; Horpibulsuk et al.,2009; Apichat,2009 and Horpibulsuk et al., 2011)

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษา ความเป็นไปได้ในของการประยุกต์การใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย (Class F) ถ่านหิน ในการปรับปรุง กำลังอัดของดินเค็มธรรมชาติ โดยแปรผันปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม

2.1 ตัวอย่างดิน ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

ดินตัวอย่างที่จะใช้ในงานวิจัยนี้เก็บใน บริเวณ ตำบลท่าหลวง อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่ระดับความลึก 1.00 – 1.50 เมตรจากผิวดิน มีค่าความเค็มอยู่ที่ 26 dS/m. จัดว่าเป็นดินเค็มจัด ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 35 ดินดังกล่าวมีปริมาณดินทราย : ดินตะกอน : ดินเหนียว เท่ากับ 17 : 45 : 38 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ค่าขีดจำกัดเหลว และค่าขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ ร้อยละ 43 และ 24 ตามลำดับ ดินประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกต่ำ (CL) ด้วยการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified soil classification system, USCS) องค์ประกอบทางเคมีของดินเค็ม แสดง ดังตารางที่ 1 ร้อยละของเกลือที่ละลายทั้งหมดในดินเท่ากับร้อยละ 60 ร้อยละของโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ (%ESP) และอัตราการดูดซับโซเดียม (SAR) เท่ากับ 94.82 และ 3.34 ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวแสดงถึงคุณสมบัติของดินเหนียวกระจายตัว

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยถ่านหินได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

จังหวัดลำปาง องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินแสดงดังตารางที่ 2 ดินตัวอย่างถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 เพื่อแยกเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ออก และทำการปรับปริมาณความชื้นในดินให้มีค่า Liquidity index (LI) เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0

ตารางที่ 1 *คุณสมบัติทางเคมีของดินตัวอย่าง*

คุณสมบัติทางเคมี	CL
1. Electrical conductivity (dS/m.)	26.00
2. pH	5.3
3. Chloride, Cl (ppm)**	11,600
4. Sulfate, SO_4(ppm)**	400
5. Sodium Percentage (%)	60
6. Sodium Absorption Ratio (SAR) meq/l	3.34
7. CEC (NH_4OAC) (me/100g)	16.974
8. Exchangeable Sodium Percentage (%ESP)	94.819

ทดสอบโดย **คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ กรมพัฒนาที่ดิน เขต 5 จังหวัดขอนแก่น

ตารางที่ 2 *คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย (Class F)*

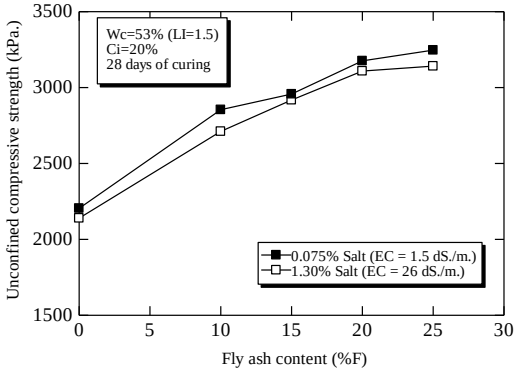
Chemical composition (%)	FA
SiO_2	45.69
Al_2O_3	24.59
CaO	12.15
MgO	2.87
SO_3	1.57
LOI	1.23

2.2 การเตรียมตัวอย่างดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอย

ดินตัวอย่างถูกปรับให้มีปริมาณความชื้นต่างๆ (LI = 1.0 , 1.5 และ 2.0) และนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 30 ของน้ำหนักดิน และปริมาณเถ้าลอย ร้อยละ 0 ถึง 60 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จนเป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้น ดินผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยถูกบรรจุในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร เมื่อได้อายุบ่ม 24 ชั่วโมง ตัวอย่างดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอยถูกถอดออกจากแบบหล่อและห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหารและบ่มในควบคุมอุณหภูมิ เมื่อได้อายุบ่มที่ต้องการ (7, 14, 28, 60 และ 90 วัน) นำตัวอย่างออกจากฟิล์มถนอมอาหาร แล้วนำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทันที ด้วยอัตราการกดร้อยละ 1 ของความสูงตัวอย่างต่อนาที

3. ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

รูปที่ 1 และตารางที่ 3 แสดงถึงอิทธิพลของความเค็มต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอย โดยการลดความเค็ม ตามธรรมชาติ (EC = 26 dS/m. หรือประมาณร้อยละ 1.3 ของปริมาณดิน) วิธีการลดทำได้โดยการนำตัวอย่างดินเค็มมาแช่น้ำและปล่อยให้น้ำไหลซึมออกไปจากดินช้าๆ ซึ่งน้ำจะนำพาความเค็มออกไปจนเหลือระดับความเค็มอยู่ที่ EC = 1.5 dS/m. (หรือประมาณ ร้อยละ 0.075) และทำการผสมตัวอย่างดินดังกล่าวกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น ร้อยละ 53 (LI = 1.5) ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักดิน และปริมาณเถ้าลอย ร้อยละ 0 ถึง 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ทำการบ่มที่อายุ 28 วันแล้วทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

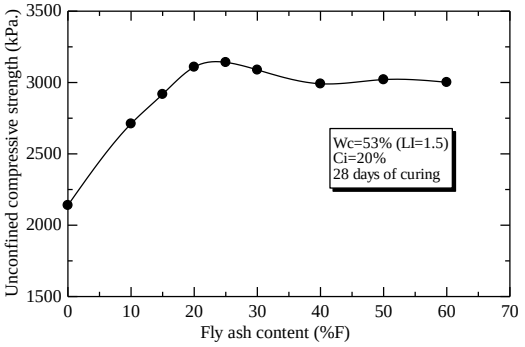


รูปที่ 1 *อิทธิพลของความเค็มต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน ที่อายุบ่ม 28 วัน*

ตารางที่ 3 *กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย*

ปริมาณเถ้าลอย	กำลังอัดแกนเดียว (kPa)	
	0.075% Salt	1.30% Salt
0%	2205	2140
10%	2854	2711
15%	2957	2918
20%	3176	3109
25%	3247	3141

รูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของสารประกอบเกลือในดินมีผลให้กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินซีเมนต์มีค่าสูงขึ้น รูปที่ 2 แสดงผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น ร้อยละ 53 (LI = 1.5) ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย กำลัง อัดของดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และค่ากำลังอัดในช่วง ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 20 ถึง 30 มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก หลังจากนั้นกำลังอัดมีค่าลดลง ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสม (ให้กำลังอัดสูงสุด) คือร้อยละ 25

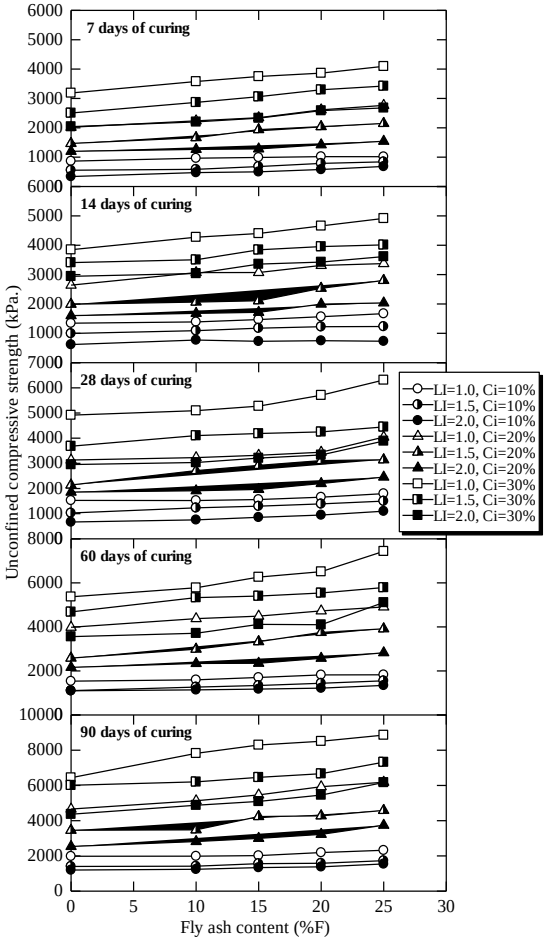


รูปที่ 2 *กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินที่อายุบ่ม 28 วัน*

รูปที่ 3 แสดงการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น ปริมาณ ปูนซีเมนต์และอายุบ่มต่างๆ สำหรับเถ้าลอยในปริมาณน้อยกว่า ร้อยละ 25 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยสำหรับทุกอัตราส่วนผสม ในอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่เหมือนกัน ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าให้กำลังอัดที่ต่ำกว่า เนื่องจากระยะห่างระหว่างอนุภาคดิน (Pore space) มีมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2009) และทุกอัตราส่วนผสมที่เท่ากันกำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม

เมื่อพิจารณาประกอบกับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าลอยจากรูปที่ 3 พบว่าการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยในปริมาณไม่เกิน ร้อยละ 25 ของปูนซีเมนต์ทำให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเปรียบเสมือนการเพิ่มปูนซีเมนต์ให้กับดินซีเมนต์ ดังนั้น

$$C_e = kF \quad (1)$$



รูปที่ 3 *ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าลอยของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อายุบ่มต่างๆ*

เมื่อ C_e คือปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า k คือตัวแปรประสิทธิภาพ และ F คือปริมาณเถ้าลอยซึ่งเป็นปริมาณโดยน้ำหนักของดินแห้ง สมการที่ 1 สามารถจัดรูปได้ใหม่ในพจน์ของปริมาณปูนซีเมนต์ได้ดังสมการที่ 2

$$C_e = kC_iF \quad (2)$$

เมื่อ C_i คือปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่เริ่มต้น F คือปริมาณเถ้าลอยโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมด (C) ที่มีอยู่ในดินเหนียวจึงเท่ากับ

$$C = C_i + C_e$$

$$C = C_i\,(1 + kF) \quad (3)$$

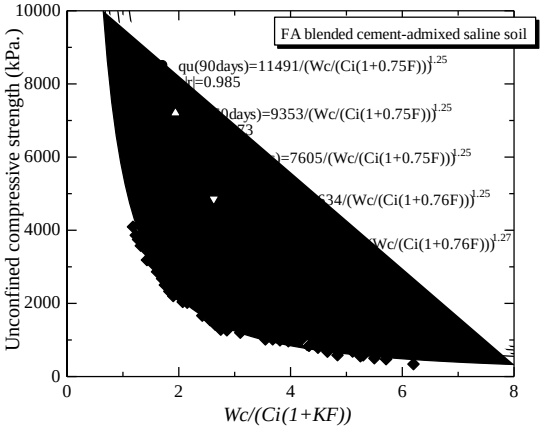
โดยการรวมสมการที่ 2 และ 3 เข้ากับตัวแปรอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk and Miura, 2001; Muira et al., 2001 และ Horpibulsuk

et al., 2003) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่อายุบ่มใดๆ แสดงดังนี้

$$q_u = \frac{A}{\left(\frac{w_c}{C_i(1+kF)}\right)^B} \quad (4)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ และ q_u คือกำลังอัดที่อายุบ่มใดๆ พารามิเตอร์ A, B และตัวแปรประสิทธิภาพ k สามารถหาได้จากการทำ Multi-regression analysis รูปที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน ที่อายุต่างๆ ด้วยพารามิเตอร์อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ที่นำเสนอสามารถใช้ได้กับดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น ในช่วง 1.0 ถึง 2.0 เท่าของ Liquidity Index ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ ร้อยละ 10 ถึง 30 ของน้ำหนักดินแห้ง และปริมาณเถ้าลอยที่ ร้อยละ 0 ถึง 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

ค่าของพารามิเตอร์ A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2003) ในขณะที่ B และ k มีค่าประมาณคงที่ สำหรับทุกอายุบ่มและอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ น้ำ และเถ้าลอย จากการศึกษาพบว่า B มีค่าประมาณ 1.25 และ k มีค่าเท่ากับ 0.75 ดังนั้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีประสิทธิภาพเป็น 0.75 เท่าของปูนซีเมนต์ หรือกล่าวอย่างง่ายว่า ในการเติมปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 ของดินแห้ง และเถ้าลอย ร้อยละ 25 ของปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 5 ของดินแห้ง) เทียบได้เท่ากับการเติมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเท่ากับร้อยละ 23.75 ของดินแห้ง



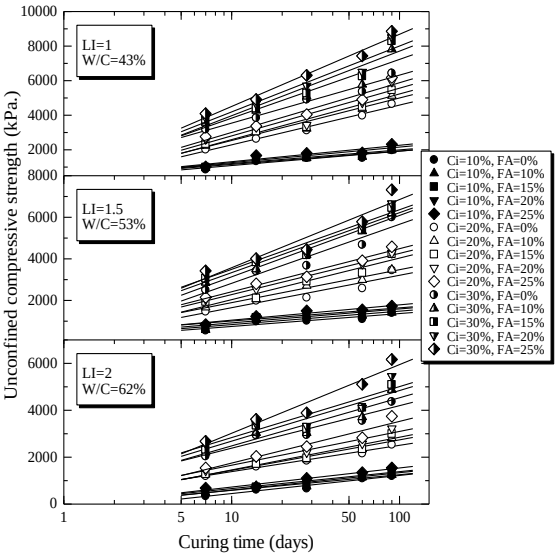
รูปที่ 4 *ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์*

4. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และปริมาณความชื้นต่างๆ ของดินซีเมนต์เถ้าลอย จากการสังเกตพบว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม เนื่องจากเถ้าลอยทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายอนุภาคดินซีเมนต์ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นการพัฒนากำลังอัดกับเวลาจึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเป็นหลักซึ่งถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์ A เท่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 5

$$\frac{q_{D1}}{q_{D2}} = \frac{A_{D1}}{A_{D2}} = \text{ค่าคงที่} \quad (5)$$

เมื่อ q_{D1} คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าที่อายุบ่ม D_1 วัน และ q_{D2} คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่าที่อายุบ่ม D_2 วัน A_{D1} และ A_{D2} คือพารามิเตอร์ A ที่สอดคล้องกับอายุบ่ม D_1 และ D_2 ตามลำดับ

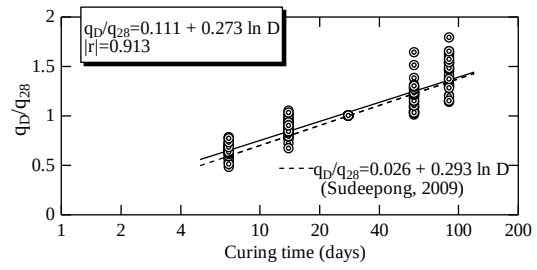


รูปที่ 5 *ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม ของดินซีเมนต์เถ้าลอย*

จากหลักการดังแสดงด้วยสมการที่ 5 ผู้วิจัยได้ทำการ Normalization ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว (q_u) กับอายุบ่ม (D) ภายใต้สภาวะตัวแปรต่างๆ คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และปริมาณความชื้น รูปที่ 6 โดยใช้ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน เป็นค่าอ้างอิง ผลจากการ Normalization ของผลทดสอบทั้งสองจะได้

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.111 + 0.273\ln D \qquad (6)$$

เมื่อ q_D และ q_{28} คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม D ใดๆ และกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าที่อายุบ่ม 28 วันตามลำดับ



รูปที่ 6 *ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มภายใต้สภาวะตัวแปรต่างๆและการNormalization*

5. สมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของตัวแปรควบคุม

ในการสร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย พารามิเตอร์ B เท่ากับ 1.25 ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k ของเถ้าลอย 0.75 ดังนั้นเขียนอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอยที่อายุบ่มค่าหนึ่งได้ดังสมการที่ 7

$$\left[\frac{q_{(w_c/C)_1}}{q_{(w_c/C)^2}}\right] = \left[\left(w_c/C\right)_2 - \left(w_c/C\right)_1\right]^{1.25} \qquad (7)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_1}$ และ คือ $q_{(w_c/C)^2}$ กำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าและกำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่า ตามลำดับ ส่วน $\left(w_c/C\right)_1$ และ $\left(w_c/C\right)_2$ คือ อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต้องการทราบค่าและทราบค่าตามลำดับ

จากการรว มสมการที่ 6 และ 7 เข้าด้วยกัน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ ในช่วง 1 ถึง 6 และอายุบ่มในช่วงความชื้นของดินอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 2.0 เท่าของ Liquidity index ดังนี้

$$\left[\frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)28}}\right] = \left[\frac{w_c/C_i(1+0.75F)_{28}}{w_c/C_i(1+0.75F)_D}\right]^{(0.111+0.273\ln D)} \qquad (8)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)^D}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอยที่ต้องการทราบที่มีค่า $\left(w_c/\left(C_i+0.75F\right)\right)_D$ ใดๆ ที่อายุบ่ม D วัน และ $q_{(w_c/C)28}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ทราบค่า ที่มีค่า $\left(w_c/\left(C_i+0.75F\right)\right)_{28}$ ใดๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน

6. บทสรุป

จากการศึกษากำลังอัดของดินเค็มซีเมนต์และเถ้าลอยถ่านหินสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุกระจายตัวในช่วงปริมาณเถ้าลอยไม่เกิน ร้อยละ 25 ทำให้อนุภาคของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของดินเค็มสูงขึ้น

6.2 สำหรับการผสมเพิ่มเถ้าลอยในอัตราส่วนน้อยกว่าร้อยละ 25 เถ้าลอยมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.75 เท่าของปูนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม

6.3 ตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่ากับความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ สามารถใช้ในการทำนายกำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการทุนสนับสนุนในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

Apichat Suddeepong, Runglawan Rachan and Suksun Horpibulsuk. 2009., Equivalent Cement Content – a New Parameter for Analysis of Strength Development in Blended Cement Admixed Clay, The 14th National Convention on Civil Engineering. Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima. (In Thai).

Arunee Yuvaniyama. 1982., Saline Soils In The Northeast of Thailand, Land Development Department, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, (In Thai).

Yutthana Raksachon. 2008., Unconfined Compressive strength and Microstructure of compacted Cement-Fly Ash Stabilized Clay, Degree of Master of Engineering in Civil Engineering, Suranaree University of Technology. (In Thai).

Davidson, D.T. (1961).Soil stabilization with Portland cement. Highway Research Board:200 p

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.

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.

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.

Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Suddeepong, A. (2011). "Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay", Construction and Building Materials.

Israel, W.R. (1982). Soil stabilization and cold-mix recycle. Koehring Bomag AMCA Int. Corp, Springfield, United States. 65 p.

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.

Petrukhim, V.P. (1993). Construction of Structures on Saline Soils. A.A.Balkema Publishers, Brookfield.

Rachan, R., Chim-oye, N., and Horpibulsuk, S. (2009). Application of biomass fly ash as a pozzolanic material for stabilization of low swelling clay, Lowland Technology International, 11(1):11-19.