ตัวแปรประสิทธิภาพการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลในดินเหนียวบวมตัวต่ำผสมซีเมนต์

วีรยา ฉิมอ้อย [1]

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) คลองหลวง ปทุมธานี 12121

และ รุ้งลาวัลย์ ราชัน [2]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

รับเมื่อ 6 ตุลาคม 2551 ตอบรับเมื่อ 22 มกราคม 2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยหลักการทางเคมี โดยนำเสนอความเป็นไปได้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าชีวมวลในดินเหนียวบวมตัวต่ำผสมซีเมนต์ ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบคือดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปริมาณเถ้าชีวมวลที่ใช้ในการแทนที่เท่ากับร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์และหาค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ด้วยการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การศึกษานี้พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 เป็นอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดในช่วงอายุบ่ม 14 ถึง 60 วัน สำหรับเถ้าชีวมวลนี้และพบว่าตัวแปรหลักที่ควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลคืออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสมที่ใช้, w_c/C^* ปริมาณส่วนผสมที่ใช้เท่ากับผลรวมของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่ในการผสม, C_i และปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า, C_e เมื่อ C_e คือผลคูณของตัวแปรประสิทธิภาพ (k) กับปริมาณเถ้าชีวมวล, F ที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ซึ่งเท่ากับ $k.F$ และตัวแปรประสิทธิภาพ (k) นี้หมายถึงความสามารถของวัสดุปอซโซลานในการแทนที่เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่าตัวแปรประสิทธิภาพของการแทนที่ขึ้นกับอัตราส่วนการแทนที่และระยะเวลาบ่มโดยไม่ขึ้นกับปริมาณส่วนผสม**บ**ทความนี้ได้นำเสนอวิธีการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลสำหรับดินเหนียวบวมตัวต่ำโดยประยุกต์ใช้ตัวแปรประสิทธิภาพซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายเพื่อเป็นแนวทางช่วยในการทำนายกำลังของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลกับดินที่มีการบวมตัวต่ำชนิดอื่นๆ ต่อไปได้

---

[1] *รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

[2] *อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาตร์*

The Replacing Efficiency Factor of Biomass Ash for Cement Stabilized Low Swelling Clay

Weeraya Chim-oye [1]

Thammasart University, (Rangsit Center), Khong Luang, Pathum Thanee 12120.

and Runglawan Rachan [2]

Mahanakorn University, Nong Chok, Bangkok 10530.

Received 6 October 2008 ; accepted 22 January 2009

Abstract

This research studied the soil improvement with the concepts of chemical ground improvement technique on soft clay. The main objective of this study was to present the possibility of utilizing biomass ash to partially replace Type I Portland cement for stabilization of a low swelling clay. The kaolinitic soil and soft Bangkok clay in this study are represented the low swelling clay. Type I Portland cement was used as a main stabilizer and biomass ash was partially replaced with 10-40 % by weight of cement. The compressive strengths were investigated through unconfined compression test. For this experimental result, strength of the stabilized clay, the 20% biomass ash replacement produces the highest strength between 14 – 60 days of curing. It is found that the prime parameter controlling the strength of cement-biomass ash stabilized clay is the clay-water/blended cement ratio, w_c/C^*. The binder content of the blended cement, C^* is the summation of the input of cement, C_i and the equivalent cement, C_e. The C_e is determined based on the concept of an efficiency factor (k), which is adopted as a measure of the relative performance of supplementary cementing material compared with Type I Portland cement. The C_e is equivalent to $k.F$ where F is biomass ash content and k is efficiency factor. From the analysis, the value of k is dependent upon the replacement ratio and curing time, and irrespective of binder content and water content. A phenomenological model for assessing the strength development is introduced and verified. It can possibly be applied as a simple and rational tool for predicting the other blended cement stabilized low swelling clays.

---

[1] *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

[2] *Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพดินส่วนใหญ่จะเป็นการปรับปรุงคุณภาพของดินอ่อน ซึ่งในปัจจุบันการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินอ่อนมีอยู่หลายวิธี การปรับปรุงคุณภาพของดินอ่อนด้วยวัสดุเชื่อมประสาน (Binder/ Cementing agents) หรือวิธีการผสมลึก (Deep Mixing Method, DMM) เป็นเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ภายในระยะเวลาอันสั้น วัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันคือปูนซีเมนต์ เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศ การออกแบบ Cement column จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของ Cement column เช่นเดียวกับการออกแบบงานคอนกรีต ต้องรู้คุณสมบัติของคอนกรีตซึ่งได้จากการออกแบบส่วนผสม (Mix design) เนื่องจากวัสดุต่างๆ ที่นำมาผสมคอนกรีตสามารถเลือกได้ แต่วัสดุที่จะนำมาทำ Cement column นั้น ไม่สามารถเลือกได้ เพราะเป็นการผสมในที่ และดินแต่ละที่ก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงต้องมีการทำ Trial mix กับทุกที่ เพื่อให้ได้กำลังตามต้องการ ดังนั้นการเลือกใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของ Cement column สำหรับดินเหนียวอ่อนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ แต่อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินในปริมาตรมากจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง เพื่อเป็นการลดต้นทุนการก่อสร้าง จำเป็นต้องลดปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มีราคาต่ำ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานในอัตราส่วนที่เหมาะสมนอกจากจะช่วยเพิ่มกำลังอัดแล้วยังช่วยเพิ่มความคงทน (Durability) ให้กับดินซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่เป็นที่ยอมรับในงานโครงสร้างของประเทศ ได้แก่ เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ แต่ถ้ามีการนำวัสดุเหลือใช้ที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์มาช่วยทดแทนปูนซีเมนต์ดังกล่าวก็จะช่วยลดปริมาณการใช้ทรัพยากรที่เหลืออยู่น้อยได้อีกวิธีหนึ่ง นอกจากการใช้เถ้าลอยและปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มกำลังและเสถียรภาพของดินอ่อนแล้วยังสามารถช่วยในกระบวนการบำบัดของเสียอันตราย ซึ่งการปรับเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็งเป็นอีกวิธีในการบำบัดของเสีย โดยอาศัยการยึดเชื่อมประสานทำให้ของเสียยึดติดกันเป็นก้อน (Solidification) เพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารอันตรายสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นการปรับปรุงดินวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมทั้งในด้านงบประมาณและสิ่งแวดล้อม จากปัญหาและเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาเพื่อพัฒนาการนำเถ้าลอยไปใช้ประโยชน์ในงานดินให้มากขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องทราบศักยภาพของวัสดุแทนที่ (เถ้าลอย)

ทุกๆ ปีถ่านหิน (Coal) จำนวนมากที่ถูกเผาไหม้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับโรงไฟฟ้า (Electric power plant) อาทิ เช่น ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งมีการใช้ถ่านหินประมาณวันละ 40,000 ตัน ผลผลิตพลอยได้จากการเผาถ่านหินเหล่านี้ ก็คือ เถ้าลอย (Fly ash) ที่มากถึงวันละ 8,000 ตัน [1] และยังมีเถ้าอีกประเภทหนึ่งซึ่งได้จากการเผาไหม้วัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติซึ่งเรียกว่า เถ้าชีวมวล (Biomass ash) ซึ่งเถ้าเหล่านี้จัดเป็นขยะที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตและได้สร้างปัญหาในการหาวิธีทำลาย และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันในประเทศไทยได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตมากขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยที่มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นและการแทนที่ในซีเมนต์ทำให้ราคาคอนกรีตถูกลง [2] แต่การนำไปใช้ในงานดินยังไม่เป็นที่นิยมอาจเนื่องมาจากการขาดแหล่งข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์นั่นเอง ในอดีตมีการวิจัยมากมายเกี่ยวกับเถ้าลอยจากถ่านหิน การประยุกต์ใช้เถ้าลอยถ่านหินในงานวิศวกรรมเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย [3-12] จึงทำให้เถ้าลอยถ่านหินมีค่าราคาที่สูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เอง งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าชีวมวลในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวร่วมกับซีเมนต์ โดยจะเน้นศึกษาถึงการหาประสิทธิภาพของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลเพียงอย่างเดียวเนื่องจากเถ้าประเภทนี้ยังคงเป็นวัสดุเหลือใช้ที่ไม่มีมูลค่าและในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังกับเถ้าประเภทนี้โดยกำหนดประสิทธิภาพของการแทนที่ด้วยค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผลเทียบเท่าปูนซีเมนต์ (*k*-factor)

นอกจากประเภทของเถ้าแล้ว ชนิดของดิน (ระดับการบวมตัว) ก็เป็นอีกตัวแปรหลักที่ควบคุมการพัฒนากำลังอัด Sridharan and Prakash [13-14] แบ่งดินเหนียวออกเป็นสองประเภทหลักๆ คือดินเหนียวบวมตัว (Swelling

clay) และดินเหนียวไม่บวมตัว (Non-swelling clay) ซึ่งได้แก่ดินเหนียวเบนโทไนท์และดินเหนียวคาโอลิไนท์ ตามลำดับ ทั้งนี้ งานวิจัยนี้จะศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินไม่บวมตัวถึงดินบวมตัวต่ำเท่านั้นที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าชีวมวล ทั้งนี้เพราะดินในธรรมชาติส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการบวมตัวต่ำ อีกทั้งสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ จัดอยู่ในประเภทดินที่มีการบวมตัวต่ำ [15] โดยอาศัยหลักการของตัวแปรประสิทธิภาพการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน [16] พร้อมนำเสนอวิธีการทำนายกำลังอัด

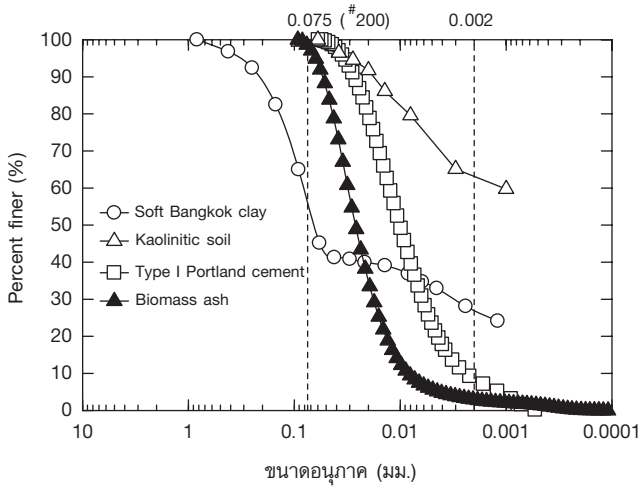
2. วัสดุทดสอบ

เพื่อเป็นการศึกษาถึงระดับการบวมตัวให้ครอบคลุมระดับการบวมตัวจากดินไม่มีการบวมตัวถึงดินบวมตัวต่ำ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ดินเหนียวสองชนิดคือ ดินคาโอลิไนท์ (ดินเหนียวไม่บวมตัว) และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (ดินเหนียวที่มีการบวมตัวต่ำ) ดินคาโอลิไนท์ มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 1.43 ค่าขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับร้อยละ 42.5 และ 33.5 ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.78 สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพเก็บจากบริเวณเขตลำลูกกา โครงการก่อสร้างถนนวงแหวนรอบนอกตะวันออก ที่ความลึก 3 - 4 เมตร จากผิวดิน มีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 80-90 ค่าขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับร้อยละ 103 และ 31.8 ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.71 เถ้าชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยเพาเวอร์โอเปอร์เลต จำกัด (TPO) ที่ หมู่ 3 ตำบลเขาหินซ้อน อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งเถ้าชีวมวลนี้ได้จากการเผาวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ แกลบ เปลือกไม้ ไม้บอร์ด ไม้ยูคาลิปตัสสับละเอียดและแกลบอัดเม็ด เถ้าชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นเถ้าลอยในชั้นคุณภาพ C และ F ตามมาตรฐานของ ASTM C 618 ได้ เถ้าชีวมวลนี้นำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (เถ้าละเอียด) ขนาดอนุภาคของเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์ได้จากการทดสอบ Laser particle size analysis คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทดสอบแสดงดังในตารางที่ 1 และการกระจายตัวดังในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทดสอบ

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าชีวมวล	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	ดินคาโอลิไนท์	ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ
% SiO_2	74.12	20.90	59.79	63.83
% Al_2O_3	0.57	4.76	31.84	21.34
% Fe_2O_3	0.88	3.41	1.59	8.41
% MgO	1.54	1.25	-	1.54
% CaO	5.91	65.41	-	0.94
% Na_2O	3.33	0.24	-	0.28
% K_2O	1.71	0.35	3.05	2.45
% SO_3	0.50	2.71	0.05	1.22
w_{ni} , %	-	-	1.43	80 - 90
LL,%	-	-	42.5	103
PI, %	-	-	9	71.2
Specific Gravity	1.95	3.15	2.78	2.71
Compositional fuel formular of biomass ash				
rice husk	36%			
Bark	24%			
board wood	6%			
fined Eucalyptus wood	23%			
seed husk	11%			

หมยเหตุ : *LL* = Liquid Limit , *PI* = Plasticity Index, w_{in} = Initial water content



รูปที่ 1 การกระจายตัวของดินคาโอลิไนท์ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล

3. วิธีการทดสอบ

ดินตัวอย่างนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 2.5 ถึง 7.5 โดยน้ำหนักดินแห้ง ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.0 ถึง 2.0 เท่าของค่าดัชนีเหลว เพื่อจำลองปริมาณน้ำที่สูงเนื่องจากการเทคนิคการผสมลึก ดินซีเมนต์ถูกนำมากวนประมาณ 10 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากัน จากนั้นทำการเตรียมดินสำหรับทดสอบ กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 ซม. และความสูงเท่ากับ 10 ซม. ทั้งนี้ทำการควบคุมหน่วยน้ำหนักของดินในแต่ละก้อนให้เท่ากันโดยทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบอย่างน้อย 3 ก้อนตัวอย่าง สำหรับแต่ละส่วนผสมและทำการบ่มตัวอย่างทั้งหมดในห้องบ่มเป็นเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน สำหรับการทดสอบดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลให้ผสมดินตัวอย่างที่อัตราส่วนผสมทั้งหมดเหมือนกับดินซีเมนต์คือที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสม, w_c/B เท่ากับ 2.5 ถึง 7.5 โดยน้ำหนักดินแห้ง โดยทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลที่ร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ในแบบหล่อขนาดเท่ากันและบ่มที่เวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน เท่ากัน จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ตามมาตรฐาน ASTM D 2166-85 กำหนดอัตราการกดแท่งตัวอย่างเท่ากับ 1 มม./นาที ซึ่งรายละเอียดของการทดสอบแสดงดังในตารางที่ 2

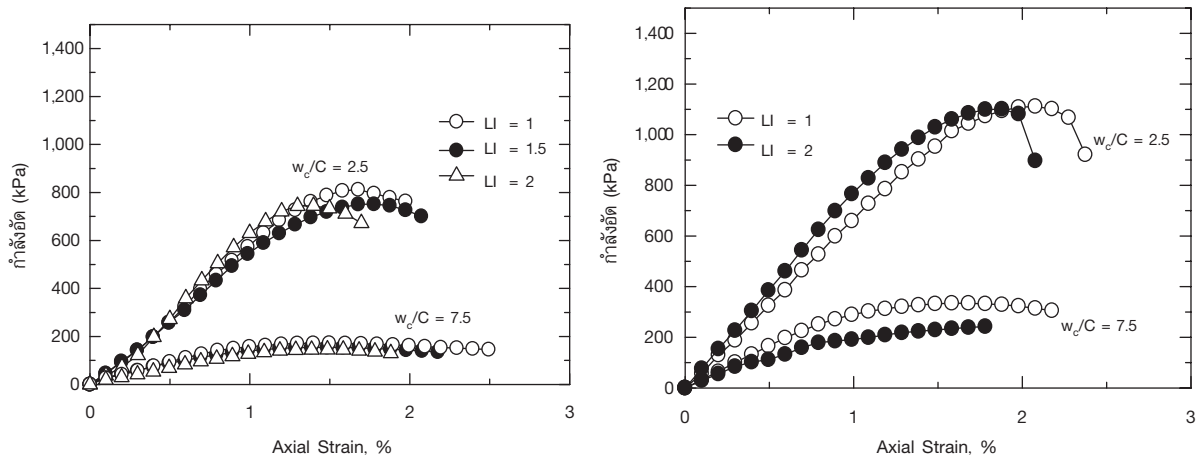
ตารางที่ 2 รายละเอียดการทดสอบ

Type of stabilization	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น	w_c/C หรือ w_c/B	ปริมาณเถ้าชีวมวล (%)	ระยะเวลาบ่ม (วัน)
Type A	1- 2	2.5 - 7.5	0	7, 14, 28, 60
Type B	1- 2	2.5 - 7.5	10, 20, 30, 40	7, 14, 28, 60

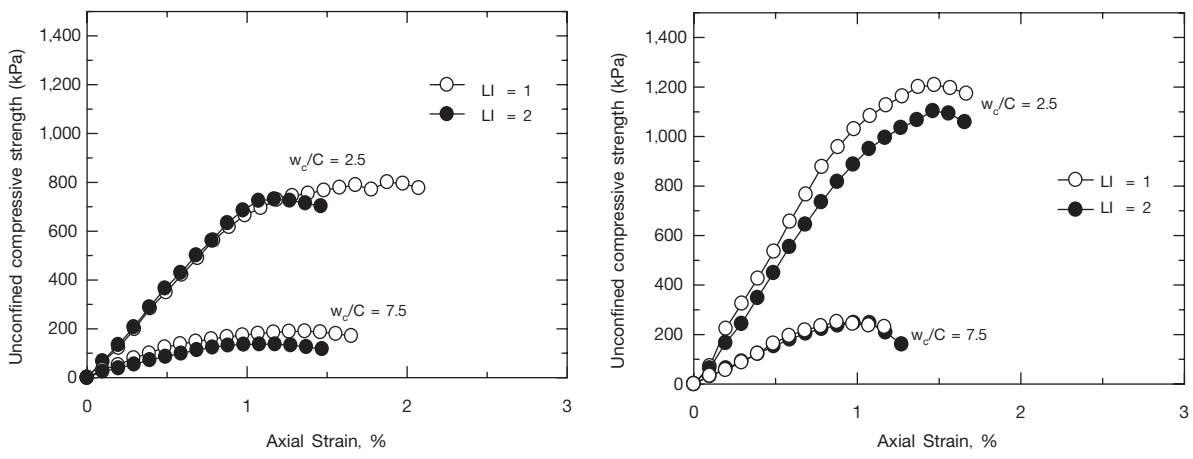
หมายเหตุ : Type A = ดินซีเมนต์ (ดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ)
Type B = ดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล (ดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ)

4. ผลทดสอบ

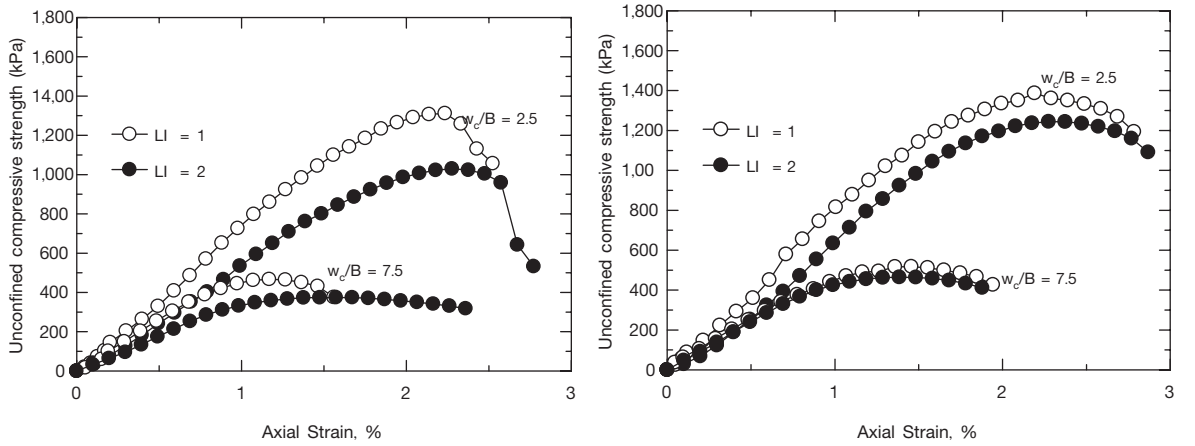
รูปที่ 2 ถึง 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียดของดินเหนียวกรุงเทพและดินคาโอลิไนท์ผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วันจะเห็นว่าที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (w_c/C) เดียวกัน ความสัมพันธ์ความเค้น - ความเครียด มีลักษณะเหมือนกันและค่ากำลังสูงสุดใกล้เคียงกันแม้ว่าดินจะมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน (LI = 1, 2) ก็ตาม แสดงว่าในช่วงปริมาณความชื้นดังกล่าวตัวแปรหลักที่มีผลต่อกำลังของดินไม่มีการบวมตัวถึงบวมตัวต่ำผสมซีเมนต์คืออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์ (w_c/C) เพียงอย่างเดียว ถึงแม้ว่าจะมีช่วงปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่กว้างก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานศึกษาในอดีต [17-18] และพบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 28 วันจะให้ค่ากำลังที่สูงกว่าที่ระยะบ่ม 7 วัน ทั้งนี้เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานที่สมบูรณ์ขึ้น



รูปที่ 2 ความเค้น - ความเครียดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 7 และ 28 วัน

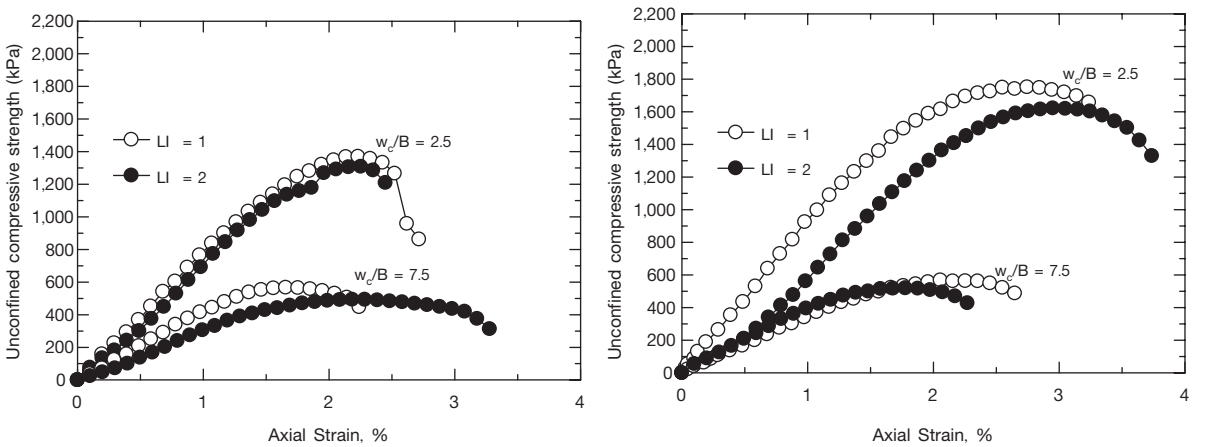


รูปที่ 3 ความเค้น - ความเครียดของดินคาโอลิไนท์ผสมซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 7 และ 28 วัน



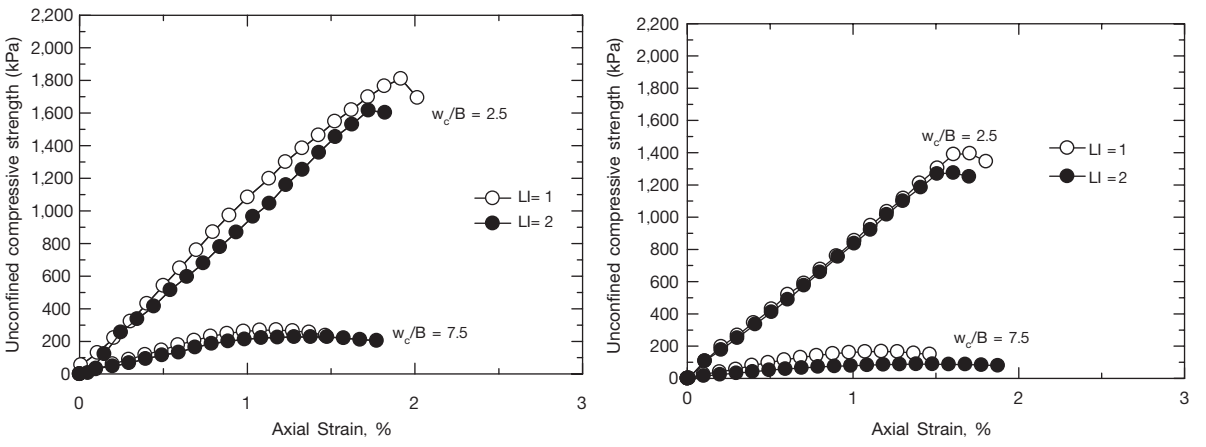
ก) ปูนซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล = 90:10 ข) ปูนซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล = 70:30

รูปที่ 4 ความเค้น - ความเครียดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่ระยะบ่ม 28 วัน



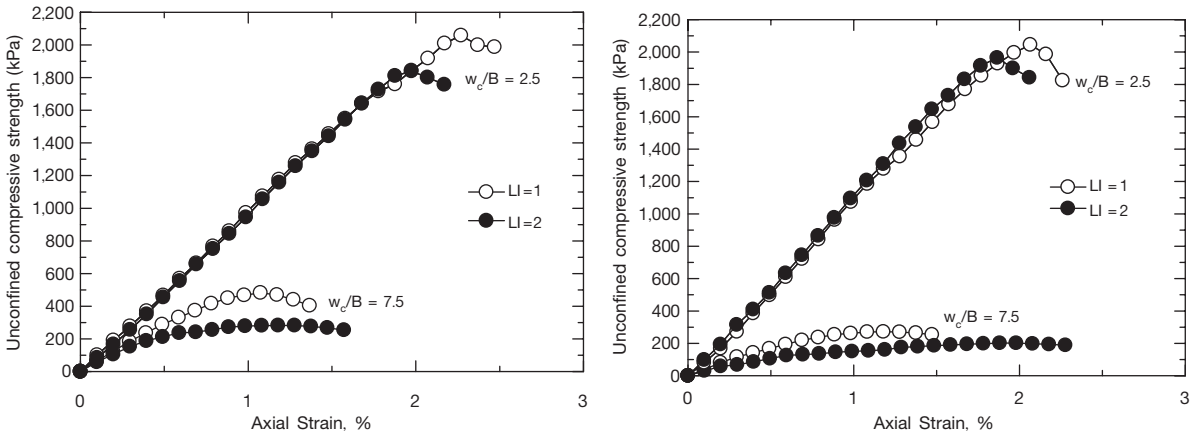
ก) ปูนซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล = 90:10 ข) ปูนซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล = 70:30

รูปที่ 5 ความเค้น - ความเครียดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่ระยะบ่ม 60 วัน



ก) ปูนซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล = 90:10 ข) ปูนซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล = 70:30

รูปที่ 6 ความเค้น - ความเครียดของดินคาโอลิไนท์ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่ระยะบ่ม 28 วัน

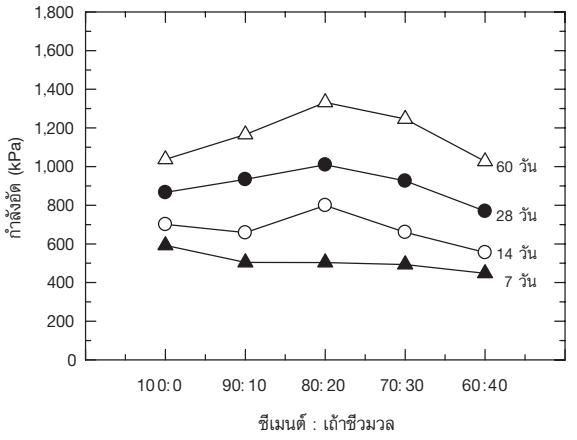


ก) ปูนซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล = 90:10 ข) ปูนซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล = 70:30

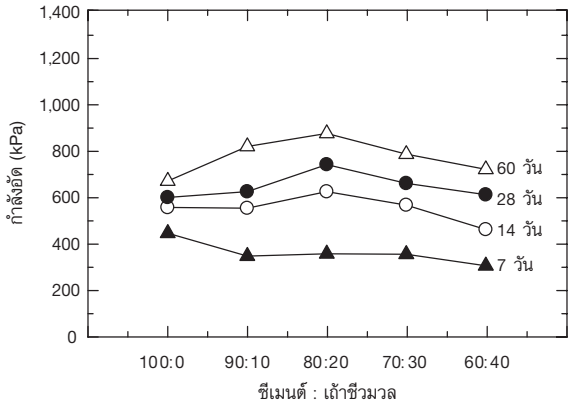
รูปที่ 7 ความเค้น - ความเครียดของดินคาโอลิไนท์ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่ระยะบ่ม 60 วัน

สำหรับดินเหนียวกรุงเทพและดินคาโอลิไนท์ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลจะเห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียดมีลักษณะคล้ายกับดินซีเมนต์ คือที่ระยะเวลาบ่มใดๆ แม้ดินตัวอย่างจะมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน (LI = 1, 2) แต่เมื่ออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสม, w_c/B เท่ากันแล้ว ดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลจะมีค่ากำลังอัดสูงสุดใกล้เคียงกันดังในรูปที่ 4 ถึง 7 และพบว่าที่ระยะเวลา 60 วัน ดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลให้กำลังอัดสูงที่สุดและสูงกว่าที่ระยะบ่ม 28 วัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน และจะเห็นว่าดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่มี w_c/B ที่ต่ำกว่าจะให้ค่ากำลังที่สูงกว่า ดังนั้นตัวแปรที่ควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลคืออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสมและระยะเวลาบ่ม นอกจากตัวแปรอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสมและระยะเวลาบ่มจะเป็นตัวควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลแล้ว และจากงานวิจัยในอดีต [19-20] พบว่าอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องพิจารณา

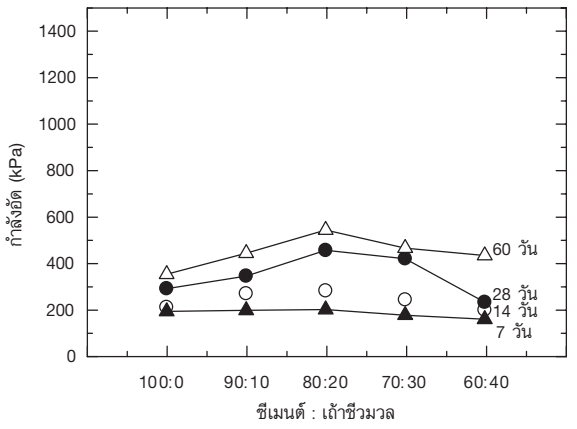
รูปที่ 8 และ 9 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าชีวมวล ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์พบว่าที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสมหนึ่งๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 14-60 วัน อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลสูงที่สุดและมีแนวโน้มที่จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าชีวมวล และพบว่าเถ้าชีวมวลจะเข้ามามีบทบาทในการเพิ่มกำลังมากขึ้นตามอายุบ่มที่สูงขึ้น (14-60 วัน) โดยเฉพาะอายุบ่มที่มากกว่า 28 วัน แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลคืออายุบ่มและอัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าชีวมวล



ก) ที่ w_c/B = 3.69

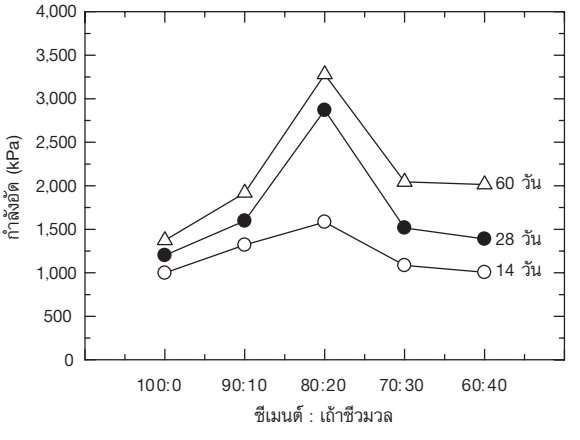


ข) ที่ w_c/B = 4.44

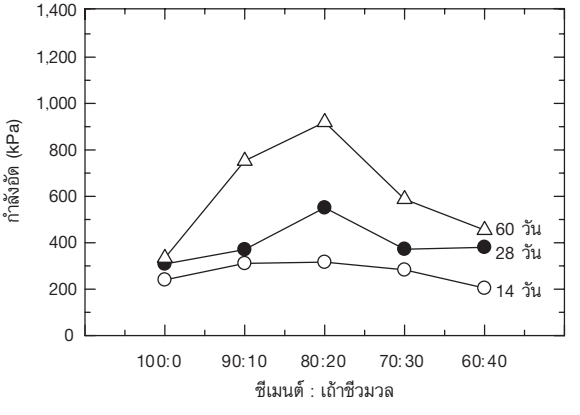


ค) ที่ w_c/B = 7.5

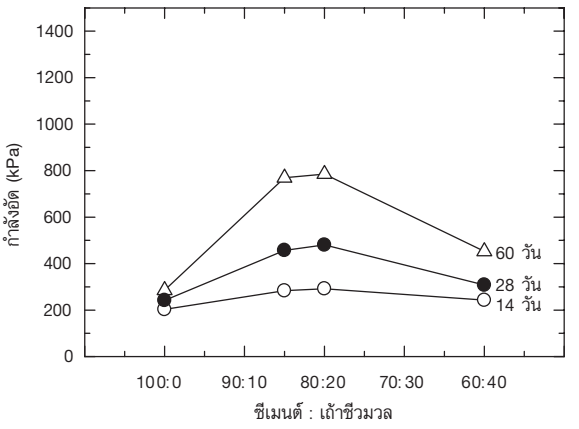
รูปที่ 8 กำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพ ผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล



ก) ที่ w_c/B = 2.5



ข) ที่ w_c/B = 5.0



ค) ที่ w_c/B = 6.5

รูปที่ 9 กำลังอัดของดินคาโอลิไนท์ ผสมซีเมนต์และและเถ้าชีวมวล

5. การวิเคราะห์ผลทดสอบด้านกำลังอัด

Horpibulsuk และคณะ [21] ได้นำเสนอสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มใดๆ โดยอาศัยสมมติฐานอัตราส่วนน้ำในดินต่อซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio hypothesis) ซึ่งเสนอโดย Miura และคณะ [18] สมมติฐานน้ำในดินต่อซีเมนต์กล่าวว่า "กำลังของดินชนิดหนึ่งที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียวคืออัตราส่วนของปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio, w_c/C)" รูปที่ 10 แสดงการพัฒนากำลังอัดของดินบวมตัวต่ำ (ดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ) พบว่าดินซีเมนต์มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์ ในความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในฟังก์ชั่นกำลัง (Power function) ดังสมการที่ 1

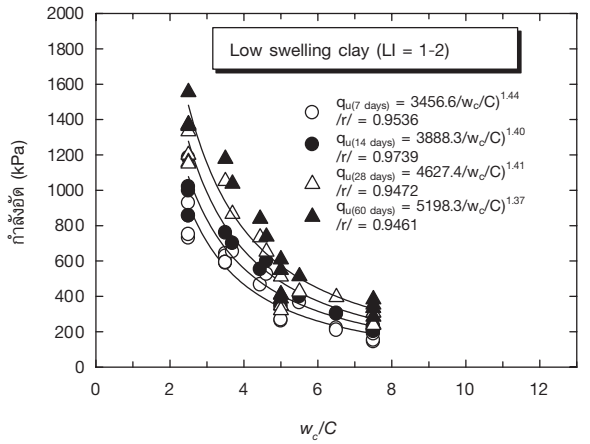
$$q_u = \frac{A}{\left(w_c/C\right)^B} \qquad \textbf{(1)}$$

เมื่อ q_u คือกำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง (kPa) A และ B เป็นค่าคงที่ ซึ่งแปรผันตามชนิดของดิน B จะเป็นตัวแปรที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ w_c/C ต่อกำลังอัดค่า B ยิ่งมาก การเปลี่ยนแปลงจะมีค่ามากตาม สำหรับดินชนิดหนึ่งผสมซีเมนต์ A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม อัตราการเปลี่ยนแปลงของ w_c/C ต่อกำลังอัด จะแปรผันอย่างมากกับประเภทของปูนซีเมนต์ [21] แต่เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง ดังนั้น B จึงมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับดินทุกชนิด

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่า B มีค่าใกล้เคียงกันและจากเหตุผลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้พารามิเตอร์ B ประมาณคงที่และมีค่าเท่ากับ 1.40 สำหรับดินบวมตัวต่ำ และที่ระยะเวลาหนึ่งๆ มีพารามิเตอร์ A คงที่ ด้วยเหตุนี้เอง อัตราส่วนกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีเหลวสำหรับดินบวมตัวต่ำ สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\left\{\frac{q_{(w_c/C)_1}}{q_{(w_c/C)_2}}\right\} = \left[\frac{A/(w_c/C)_1^{1.40}}{A/(w_c/C)_2^{1.40}}\right] = \left[\frac{(w_c/C)_2}{(w_c/C)_1}\right]^{1.40} \qquad \textbf{(2)}$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้ทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ในช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังและอัตราส่วนความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ใดๆ ได้เมื่อทราบกำลังอัดที่อัตราส่วนการผสมหนึ่งๆ (w_c/C = 2.5 - 7.5) ที่ช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งข้อจำกัดของความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นคือไม่สามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของ ดินซีเมนต์ที่อายุบ่มใดๆ ได้ ซึ่งในทางปฏิบัติอาจมีสถานการณ์ที่จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณซีเมนต์เพื่อลดอายุบ่ม แต่ยังคงได้กำลังอัดตามต้องการ ด้วยเหตุนี้จำเป็นต้องมีการศึกษาอิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียว พร้อมทั้งสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้นในดิน และอายุบ่ม แสดงได้ดังรูปที่ 11 กล่าวคืองานวิจัยนี้ได้รวบรวมงานวิจัยในอดีต [22-23] มาร่วมวิเคราะห์กับงานวิจัยนี้พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ของดินไม่บวมตัวถึงบวมตัวต่ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มและมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงบนสเกลล็อกกาลึทึมของเวลาและมีแนวความลาดชันของการพัฒนากำลังอยู่ในแนวความลาดชันที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากปฏิกิริยาหลักเดียวกัน ในที่นี้คืออิทธิพลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังนั้นค่าอัตราการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์กับระยะเวลาบ่มจึงควรจะมีค่าคงที่สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกันของดินทุกชนิด งานวิจัยนี้เลือกใช้ระยะเวลาบ่มที่ 28 วันเป็นวันอ้างอิงและได้ความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ระยะเวลาใดๆ ต่อระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน บนเส้นความสัมพันธ์เอกภาพกับเวลา (q_D/q_{28}) ได้ดังในรูปที่ 11 ด้วยค่า Relative Correlation เท่ากับ 0.9041

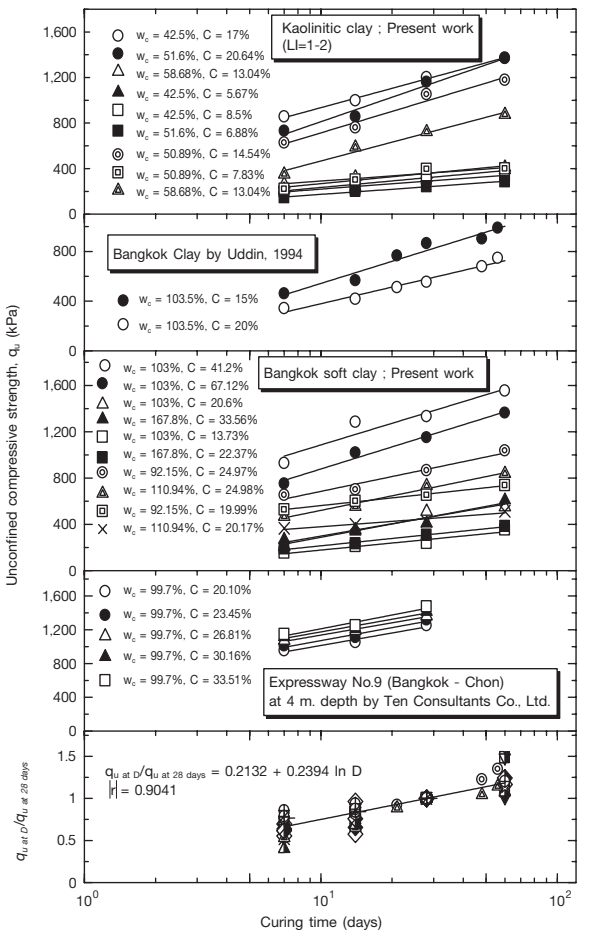


รูปที่ 10 การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวบวมตัวต่ำ (ดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวกรุงเทพ) ผสมซีเมนต์กับอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์ที่อายุบ่มต่างๆ

พิจารณาจากสมการที่ (2) และความสัมพันธ์ของอัตราการพัฒนากำลังกับเวลาบนเส้นความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างกำลัง ระยะเวลาการบ่มในช่วงที่ w_c/C มีค่าระหว่าง 2.5 ถึง 7.5 ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\left\{\frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}}\right\} = \left[\frac{(w_c/C)_{28}}{(w_c/C)_D}\right]^{1.40} (0.2132 + 0.2394\ln D) \quad \textbf{(3)}$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_D}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบ ที่ w_c/C หลังจากอายุบ่ม D วัน $q_{(w_c/C)_{28}}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทราบค่า ที่ระยะบ่ม 28 วัน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์และอัตราการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์กับอายุบ่ม

ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการทำนายกำลังอัดดินซีเมนต์ อาศัยสมการที่ (3) โดยมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดังตารางที่ 3 เลือกผลทดสอบของกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ w_c/C หนึ่งๆ ที่อายุบ่ม 28 วันเป็นค่าอ้างอิงดังในตารางที่ 4 และ 5 จากนั้นสามารถคำนวณหากำลังอัดที่วันใดๆ และที่ w_c/C ใดๆ ที่ต้องการได้ซึ่งแสดงผลการทำนายของกำลังอัดที่ได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3) กับผลการทดสอบจริงดังแสดงในตารางที่ 4 สำหรับงานออกแบบส่วนผสมของการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ บริเวณโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน3) อำเภอบางพลี - อำเภอธัญบุรี [24] และตารางที่ 5 สำหรับดินเหนียวของประเทศญี่ปุ่นโดย Kawasaki, และคณะ [25] จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของ Mean Absolute Percent Error เท่ากับร้อยละ 12.45 และ 13.98 ตามลำดับซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพและดินเหนียวญี่ปุ่น

Location	Sand content (%)	w_n (%)	*LL* (%)	*PL* (%)	Humus content (%)	pH	Remark
Bangkok	-	120	80 - 91.5	25 - 29.6	-	-	[24]
Chiba	44	61.0	55.8	24.0	0.34	6.6	[25]
Tokyo	1	99.6	90.5	35.2	0.39	1	[25]
Osaka	5	113.0	95.0	29.9	0.37	7.5	[25]
Hiroshima	3	136.3	121.0	36.1	0.54	7.3	[25]
Kangawa	16	109.7	91.0	31.5	0.71	6.7	[25]
Aichi	5	99.3	83.4	23.4	0.60	7.4	[25]

ตารางที่ 4 การทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์

D (days)	*C* %	w_c %	w_c/C	q_{ul} kPa[24]	q_{up} kPa	$\frac{\lvert q_{up} - q_{ul} \rvert}{q_{ul}} \times 100$ %
7	24.12	122.62	5.08	631	648	2.64
14	24.12	122.62	5.08	758	806	6.32
28	24.12	122.62	5.08	1,053	964	8.44
7	25.50	124.00	4.86	703	689	1.97
14	25.50	124.00	4.86	874	858	1.88
28	25.50	124.00	4.86	1,121	1,026	8.48
7	27.57	126.06	4.57	793	751	5.29
14	27.57	126.06	4.57	920	935	1.59
28	27.57	126.06	4.57	1,175	1,118	4.84
7	22.03	108.33	4.92	565	678	20.07
14	22.03	108.33	4.92	722	844	16.92
28	22.03	108.33	4.92	999	Ref.	1.09
7	23.29	109.59	4.71	634	721	13.80
14	23.29	109.59	4.71	773	898	16.14

ตารางที่ 4 (ต่อ) การทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์

D (days)	C %	w_c %	w_c/C	q_{ul} kPa[24]	q_{up} kPa	$\frac{\lvert q_{up} - q_{ul} \rvert}{q_{ul}} \times 100$ %
28	23.29	109.59	4.71	1119	1074	4.01
7	25.18	111.48	4.43	668	786	17.62
14	25.18	111.48	4.43	918	978	6.50
28	25.18	111.48	4.43	1,236	1,170	5.37
7	18.80	89.60	4.77	552	709	28.39
14	18.80	89.60	4.77	658	882	34.03
28	18.80	89.60	4.77	807	1,055	30.75
7	19.87	90.67	4.56	638	753	18.09
14	19.87	90.67	4.56	775	937	20.97
28	19.87	90.67	4.56	940	1,122	19.32
7	21.48	92.28	4.30	705	820	16.29
14	21.48	92.28	4.30	900	1,020	13.35
28	21.48	92.28	4.30	1,090	1,220	11.97
Mean Absolute Percent Error, MAPE						12.45 %

ตารางที่ 5 การทำนายกำลังอัดของดินเหนียวญี่ปุ่นผสมซีเมนต์

D (days)	C %	w_c %	w_c/C	q_{ul} kPa[25]	q_{up} kPa	$\frac{\lvert q_{up} - q_{ul} \rvert}{q_{ul}} \times 100$ %
Aichi clay *LL* = 90.5%, PL = 35.2%						
7	20.0	99.3	5.0	925	831	10.16
28	20.0	99.3	5.0	1889	1237	34.50
60	20.0	99.3	5.0	2506	1460	41.72
7	30.0	99.3	3.3	1079	1466	35.87
28	30.0	99.3	3.3	2159	Ref.	1.09
60	30.0	99.3	3.3	2872	2577	10.29
Tokyo *LL* = 90.5%, PL = 35.2%						
7	10.0	61.0	6.1	1473	1078	26.82
28	10.0	61.0	6.1	2063	1605	22.22
60	10.0	61.0	6.1	2400	1894	21.07
7	20.0	61.0	3.1	2042	2845	39.30
28	20.0	61.0	3.1	4189	Ref.	1.09
60	20.0	61.0	3.1	5157	4999	3.06

ตารางที่ 5 (ต่อ) การทำนายกำลังอัดของดินเหนียวญี่ปุ่นผสมซีเมนต์

D (days)	C %	w_c %	w_c/C	q_{ul} kPa[25]	q_{up} kPa	$\frac{\lvert q_{up} - q_{ul} \rvert}{q_{ul}} \times 100$ %
Chiba clay *LL* = 55.8%, PL = 24%						
7	20.0	56.7	2.8	810	1001	23.67
28	20.0	56.7	2.8	1465	1491	1.80
60	20.0	56.7	2.8	1754	1760	0.37
7	10.0	56.7	5.7	347	380	9.39
28	10.0	56.7	5.7	559	Ref.	1.09
60	10.0	56.7	5.7	771	667	13.48
Osaka clay LL = 95%, PL = 29.9%						
7	20	113.5	5.68	901	760	15.58
28	20	113.5	5.68	1707	1132	33.66
60	20	113.5	5.68	2052	1337	34.86
7	30	113.5	3.78	1036	1342	29.52
28	30	113.5	3.78	1976	Ref.	1.09
60	30	113.5	3.78	2513	2358	6.16
Hiroshima clay LL = 121%, PL = 36.1%						
7	20	136.3	6.82	1745	1521	12.82
28	20	136.3	6.82	2436	2265	7.03
60	20	136.3	6.82	2877	2673	7.08
7	30	136.3	4.54	2589	2684	3.65
28	30	136.3	4.54	3952	Ref.	1.09
60	30	136.3	4.54	4508	4716	4.62
Kanagawa clay LL = 91%, PL = 31.5%						
7	20	109.7	5.49	2384	1943	18.51
28	20	109.7	5.49	3120	2892	7.30
60	20	109.7	5.49	3560	3414	4.10
7	30	109.7	3.66	3623	3427	5.41
28	30	109.7	3.66	5047	Ref.	1.09
60	30	109.7	3.66	5340	6023	12.79
Mean Absolute Percent Error, MAPE						13.98 %

Rachan, R. และคณะ [19] ได้ทำการพิจารณากำลังอัดของดินซีเมนต์กับส่วนกลับของปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์, C/w_c ที่ระยะเวลาบ่มหนึ่งๆ พบว่ามีความ สัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังสมการที่ (4)

$$q_u = A\left(\frac{C}{w_C}\right) + E \qquad \textbf{(4)}$$

เมื่อ q_u คือกำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง (kPa) A และ A คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และ C/w_c คือ cement/clay-water ratio ซึ่งคือปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาณความชื้นในดิน

ในกรณีของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลงานศึกษาวิจัยได้ประยุกต์กรอบความคิดข้างต้นและหลักการของการใช้ตัวแปรประสิทธิภาพของวัสดุปอซโซลาน [19] มาช่วยในการวิเคราะห์ โดยงานวิจัยได้กำหนดปริมาณซีเมนต์เทียบเท่าคือ C_e เมื่อปริมาณซีเมนต์เทียบเท่านี้มีค่าดังสมการที่ (5)

$$C_e = k.F \qquad \textbf{(5)}$$

เมื่อ C_e คือปริมาณซีเมนต์เทียบเท่า k คือตัวแปรประสิทธิภาพและ F คือปริมาณเถ้าชีวมวล (%) ดังนั้นปริมาณส่วนผสมระหว่างซีเมนต์และเถ้าชีวมวล (Binder content) จึงเกิดจากผลรวมของปริมาณซีเมนต์ที่ใส่ในการผสม, C_i และปริมาณซีเมนต์เทียบเท่าที่เกิดจากการใส่เถ้าชีวมวลเข้าไปแทนที่, C_e ความสัมพันธ์ของการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ในสมการที่ (4) จึงถูกประยุกต์สำหรับกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลได้ดังสมการที่ (6)

$$q_u = A\left(\frac{C_i + k.F}{w_c}\right) + E \qquad \textbf{(6.1)}$$

$$q_u = A\left(\frac{C_i}{w_c}\right) + A_2\left(\frac{F}{w_c}\right) + E \qquad \textbf{(6.2)}$$

เมื่อ A และ A_2 คือค่าคงที่ได้จากการทำ multi linear regression และตัวแปรประสิทธิภาพ k มีค่าเท่ากับ $\frac{A_2}{A}$

ในกรณีที่ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงความสามารถของวัสดุปอซโซลานที่อัตราส่วนการแทนที่นี้มีค่าเทียบเท่าความสามารถของปูนซีเมนต์ 100 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 12 แสดงผลของค่าตัวแปรประสิทธิภาพของดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ พบว่าที่ระยะบ่มมากกว่า 28 ของเถ้าชีวมวลนี้ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 จะให้ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k สูงที่สุดและพบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่หนึ่งๆ ค่าตัวแปร k จะมีค่าเพิ่มขึ้นในความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับระยะเวลาบ่มในสเกลล็อกกาลิทึมเช่นเดียวกันทั้งในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและดินคาโอลิไนท์และพบว่าแนวความลาดชันของการพัฒนาตัวแปรประสิทธิภาพ k กับเวลานั้นจะมีแนวความลาดชันที่ใกล้เคียงกันทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาหลักเดียวกันแต่ในกรณีของดินคาโอลิไนท์ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 มีแนวความลาดชันแตกต่างจากผลทดสอบส่วนอื่นๆ อาจเป็นเพราะความคลาดเคลื่อนของการทดสอบที่อายุบ่ม 7 วัน แต่ทั้งนี้อัตราการพัฒนาของตัวแปรประสิทธิภาพ k ที่วันใดๆ เทียบต่อค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k ที่วันหนึ่งๆ ควรมีค่าคงที่สำหรับเถ้าชนิดเดียวกันของดินทุกชนิดเนื่องมาจากปฏิกิริยาหลักเดียวกัน ดังนั้นทำการ Normalized k-factor กับเวลาโดยใช้ระยะเวลาบ่มที่ 28 วันเป็นตัวอ้างอิง โดยพิจารณาอัตราการพัฒนาของตัวแปรประสิทธิภาพ k ของเถ้าชีวมวลนี้ในดินไม่บวมตัวถึงบวมตัวต่ำ (ดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ตามลำดับ) ดังในรูปที่ 13 และได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7) ด้วยค่า Relative Correlation เท่ากับ 0.9453

$$\frac{k_D}{k_{28}} = 0.4284 \ln D = 0.455 \qquad \textbf{(7)}$$

เมื่อ k_D คือตัวแปรประสิทธิภาพที่ระยะเวลาบ่มหลังจาก D วัน, k_{28} คือตัวแปรประสิทธิภาพที่ระยะเวลาบ่มหลังจาก 28 วัน และ D คือระยะเวลาบ่ม (วัน)

สามารถประยุกต์ใช้สมการที่ (7) เพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพของเถ้าชีวมวลนี้ที่เวลาใดๆ (7 - 60 วัน) และอัตราส่วนการแทนที่หนึ่งๆ (10 - 40%) ได้และสามารถทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลได้โดยประยุกต์จากสมการที่ (3) ได้ดังความสัมพันธ์ที่นำเสนอดังสมการ

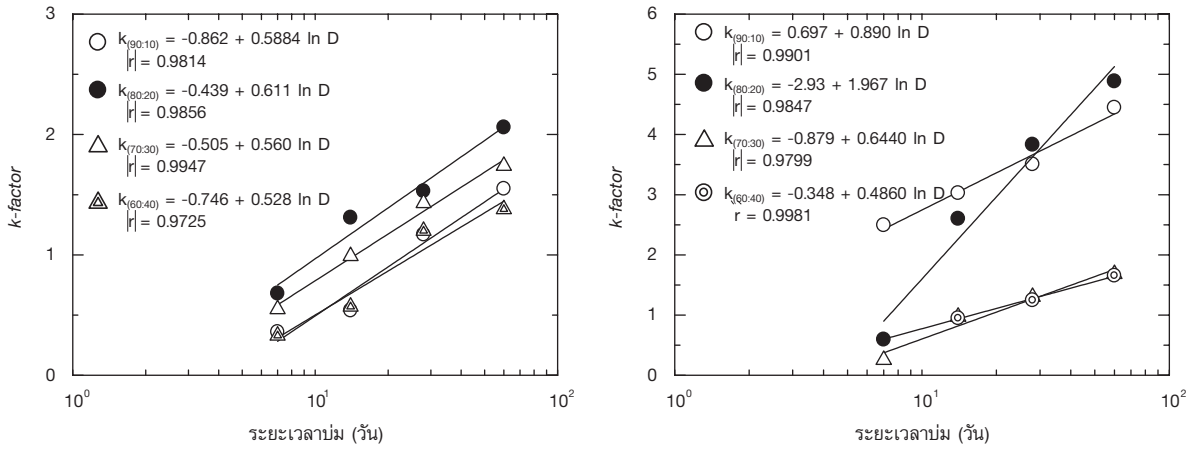
ต่อไปนี้

$$\left\{\frac{q_{(w_c/C^*)D}}{q_{(w_c/C^*)28}}\right\}=\left[\frac{(w_C/C^*)_{28}}{(w_C/C^*)_D}\right]^{1.40}(0.2132+0.2394\ln D) \quad \textbf{(8)}$$

เมื่อ $q_{(wc/c^*),D}$ คือกำลังของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่ทำนายได้ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสม (w_c/C^*) ที่วัน D วัน และ $q_{(wc/c^*),28}$ คือกำลังของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสม (w_c/C^*) ที่ระยะบ่มที่ 28 วันซึ่งเป็นวันอ้างอิงและ C^* คือปริมาณซีเมนต์เทียบเท่า ซึ่งมีค่าดังสมการต่อไปนี้

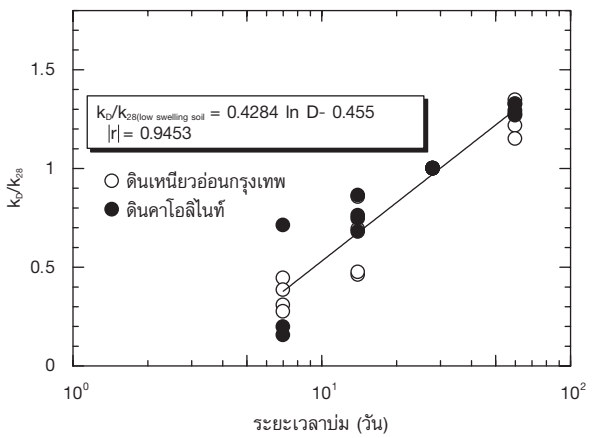
$$C^* = C_i + kF \quad \textbf{(9)}$$

เมื่อ k คือตัวแปรประสิทธิภาพ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม C_i คือปริมาณซีเมนต์ที่ใส่ในการผสม (%) และ F คือปริมาณเถ้าชีวมวล (%)



ก) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ข) ดินคาโอลิไนท์

รูปที่ 12 ตัวแปรประสิทธิภาพ k ของเถ้าชีวมวลกับเวลาของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและดินคาโอลิไนท์ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพัฒนาประสิทธิภาพของเถ้าชีวมวลกับเวลาของดินบวมตัวต่ำและการ Normalization

ทำการตรวจสอบวิธีและแนวทางที่นำเสนอในการหากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลซึ่งอาศัยสมการที่ (8) และหลักการหาค่าตัวแปรประสิทธิภาพ (k) ของเถ้าชีวมวลนี้ โดยงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลจากการทดสอบหากำลังอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 28 วัน เป็นข้อมูลพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 6 จากข้อมูลพื้นฐานของปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าชีวมวล และกำลังอัดที่เกิดขึ้นที่แต่ละอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าชีวมวล สามารถนำไปหาค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k ของแต่ละอัตราส่วนการแทนที่ซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ (6.2) โดยหลักการวิเคราะห์เชิงเส้นแบบถดถอยหลายตัวแปร (Multi - linear regression analysis) ได้ค่าดังในตารางที่ 6 สำหรับดินซีเมนต์ (F = 0) จะมีค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k เท่ากับ 1 เพราะเป็นความสามารถเต็มที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของปูนซีเมนต์ จากนั้นอาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ (7) จะได้ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k ที่วันใดๆ ของแต่ละอัตราส่วนการแทนที่หนึ่งๆ งานวิจัยนี้กำหนดกำลังอัดของดินซีเมนต์ (C:F = 100:0) ที่อายุบ่ม 28 วัน และที่ w_c/C^* เท่ากับ 3.69 เป็นกำลังอัดอ้างอิง ($q_{(wc/c^*),28}$) เพื่อใช้ในการคำนวณหากำลังอัดที่ได้จากการทำนายโดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ (8) และ (9) แสดงผลของกำลังที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนายดังในรูปที่ 14 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ด้วยค่า Relative Correlation เท่ากับ 0.9061

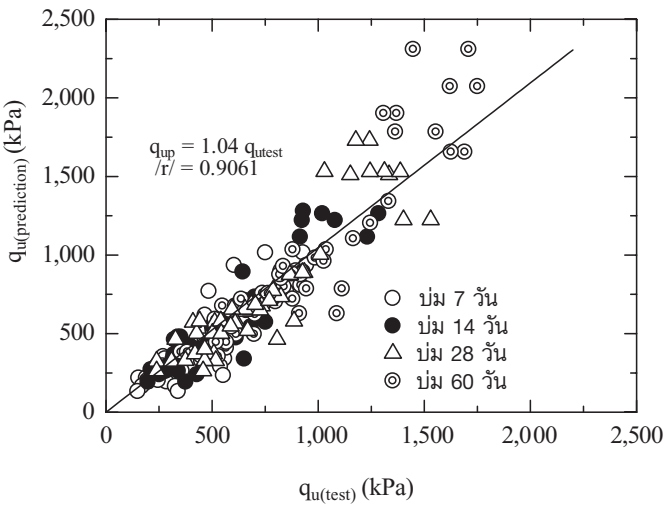
ตารางที่ 6 กำลังอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 28 วัน (*LL* = 92.15% and *PL* = 42.5%)

C:F	Time, days	w_c %	C_i %	F %	*k-factor*	w_c/C^*	q_{ul} kPa
100:0	28	92.15	25.00	0	1.00	3.69	867[A]
	28	110.94	25.00	0	1.00	4.44	734
90:10	28	92.15	22.50	2.50	1.13	3.64	934
	28	110.94	22.50	2.50	1.13	4.38	684
80:20	28	92.15	20.00	5.00	1.55	3.32	1010
	28	110.94	20.00	5.00	1.55	4.00	786
70:30	28	92.15	17.50	7.50	1.06	3.62	926
	28	110.94	17.50	7.50	1.06	4.36	704
60:40	28	92.15	15.00	10.00	0.67	4.25	769
	28	110.94	15.00	10.00	0.67	5.11	587

หมายเหตุ 1. C:F = ปริมาณซีเมนต์:ปริมาณเถ้าชีวมวล ในหน่วยเปอร์เซ็นต์

2. [A] = ค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วันซึ่งเป็นค่าอ้างอิง ($q_{(wc/c^*),28}$)

3. ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k หาจาก multi-linear regression analysis



รูปที่ 14 การทำนายกำลังอัดและกำลังอัดในห้องปฏิบัติการของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่มต่างๆ

6. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้กล่าวถึงตัวแปรควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลและนำเสนอค่าตัวแปรประสิทธิภาพของวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับดินที่ไม่มีการบวมตัวถึงบวมตัวต่ำ ประเด็นสำคัญของการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1. ปัจจัยควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล คือ อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณส่วนผสม ระยะเวลาบ่มและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวล

2. ตัวแปรประสิทธิภาพ k จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการแทนที่โดยไม่ขึ้นกับปริมาณส่วนผสมเพราะที่อายุบ่มหนึ่งของอัตราส่วนการแทนที่หนึ่งๆ เมื่อทำการผสมวัสดุผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จะให้ค่าตัวแปรประสิทธิภาพเพียงค่าเดียวสำหรับวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งๆ ซึ่งหลักการใช้ตัวแปรประสิทธิภาพ k สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุปอซโซลานอื่นๆ

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณแผ่นดินปี 2552 เป็นอย่างสูงสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

1. <URL:http://maemoh.egat.com/index.php?content=sara&topic=2>

2. Ferguson, G. 1993, “Use of self-commenting fly ash as a soil stabilizing agent”, *Geotechnical special publication*, No. 36, ASCE New York, N.Y.

3. Owens, PL. 1979, “Fly ash and its usage in concrete”, Concrete, *the Journal of Concrete Society*, Vol. 13, pp. 21-26.

4. Mitsui, K., Li, Z., Lange, D.A., and Shah, D.P. 1994, “Relation between microstructure and mechanical properties of the paste-aggregate interface”, *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 1, pp. 30-39.

5. Ollivier, J.P. and Massat, M. 1996, “The effect of the transition zone on transfer properties of concrete”, *J.C. Maso ed, RILEM Technical Committee 108-ICC Report*, E&FN SPON, pp. 118-131.

6. Mindess, S. 1996, "Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone", *J.C .Maso ed., RILEM Technical Committee 108-ICC Report*, E&FN SPON, pp. 48-63.

7. Igarashi, S., Bentur, A., and Mindess, S. 1996, "Microhardness testing of cementations materials", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 4, pp. 48-57.

8. Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichkorn, A., and Kuchorn, T. 1999, "Strength activity index of single size fly ash mixed with Portland cement type I and Type III", *Proceedings of 7th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Kochi, Japan.

9. Chindaprasirt, P., Ruangsiriyaku, S., Cao, H.T., and Bucea, L. 2001, "Influence of Mae Moh fly ash fineness on characteristics, strength and drying shrinkage development of blended cement mortors", *Proceedings of 8th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Singapore, pp. 6.

10. Yang, C.C. and Su, J.K. 2002, "Approximate migration coefficient of interfacial transition zone and the effect of aggregate content on the migration coefficient of mortar", *Cement and Concrete research*, Vol. 32, pp. 1559-1565.

11. Chindaprasirt, P, Homwuttiwong, S., and Sirivivatnanon, V. 2004, "Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1087-1092.

12. Thumasujarit, K., and Tangtermsirikul, S. 2004, "Bleeding model for fly ash concrete", *Proceedings of 9 th National Convention on Civil Engineering*, pp. MAT184-MAT189.

13. Sridharan, A., and Prakash, K. 1999a, "Influence of clay mineralogy and pore-medium chemistry on clay sediment formation", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, No. 5, pp. 961-966.

14. Sridharan, A., and Prakash, K. 1999b, "Mechanisms controlling the undrained shear strength behaiour of clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, No. 6, pp. 1030-1038.

15. Rachan, R., and Horpibulsuk, S. 2006, "Effect of chemistry and mineralogy on geotechnical properties of Bangkok clay", *Proc. International Symposium on Lowland Technology*, Saga, Japan, 14- 16, September, pp. 25--30.

16. Papadakis V.G. and Tsimas. S. 2002, "Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1525-1532.

17. Horpibulsuk, S., and Miura, N. 2001, "A new approach for studying behavior of cement stabilized clays", *Proceedings of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*, Istanbul, Turkey, Vol. 3, pp. 1759-1762.

18. Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T.S. 2001, "Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content", *Soils and Foundations*, Vol. 41, No.5, pp. 33-45.

19. Rachan, R., Chim-oye, W., and Horpibulsuk, S. 2008, "Application of biomass fly ash as a pozzolanic material for stabilization of low swelling clay", *Lowland Technology International Journal. (Tentatively accepted for publication)*

20. สุขสันติ์ หอพิบูลสุข รุ้งลาวัลย์ ราชัน ศิวฤทธิ์ หิรัญเรือง และธีรวัฒน์ สินศิริ, 2549, "โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอย", สัมมนาวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11.

21. 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, Vol. 53, No. 4, pp. 439-444.

22. Uddin, K. 1994, “Strength and Deformation Behaviour of Cement Treated Bangkok Clay”, Doctoral Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

23. กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย, 2547 รายงานผลทดสอบกำลังของ Cement Column โครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษเส้นกรุงเทพ - ชลบุรี โดยบริษัท Ten Consultants Co., Ltd.

24. กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย, 2550 รายงานผลทดสอบกำลังของ Cement Column โครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก เส้นบางพลี-ธัญบุรี โดยบริษัท Ten Consultants Co., Ltd.

25. Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Sukuzi, Y. and Honjo, Y. 1981, “Deep mixing method using cement hardening agent”, Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, pp.721-724.