



รายงานการวิจัย

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวซีเมนต์ถ้ำลอมวลเบา
(Engineering Properties of Lightweight Blended Cement
Admixed Clay)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอยมวลเบา
(Engineering Properties of Lightweight Blended Cement Admixed Clay)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุชนันต์ หอพิบูลสุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2556-2557

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

เมษายน 2558

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะไม่สามารสรสำเร็จลุล่วงได้ ถ้าปราศจากการช่วยเหลือทางจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง การกล่าวขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้ครบทุกท่านเป็นงานที่ยาก ผู้เขียนต้องขอขมามา ณ ที่นี้ด้วย หากมิได้กล่าวนามของท่าน

ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.สาโรช รุจิวรรณ ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน และขอขอบคุณ ดร.เอก เนรมิตรครบุรี บัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับคำปรึกษาและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานจนทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายสุด ผู้เขียนขอขอบคุณท้ายสุด ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ปีงบประมาณ 2556-2557

สุขสันต์ หอพิบูลสุข
หัวหน้าโครงการวิจัย
เมษายน 2558

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

ดินเหนียวซีเมนต์มวลเบาสามารถประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมโครงสร้างพื้นฐานและในงานก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคใหม่ งานวิจัยนี้ศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณน้ำ ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณฟองอากาศ และอัตราส่วนการแทนที่ดินเหนียวด้วยเถ้าลอย ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา คุณสมบัติทางวิศวกรรมแปรผันตามสถานะความเค้นทั่วไป (w/w_L) เมื่อ w คือปริมาณน้ำ และ w_L คือขีดจำกัดเหลว การแทนที่ดินเหนียวด้วยเถ้าลอยลดขีดจำกัดเหลวและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ w/w_L ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการผลิตดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบาควรมากกว่า 1.5 เท่าของขีดจำกัดเหลวความสามารถในการไหลของเพสต์ดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบาไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ และสามารถประมาณได้ในพจน์ของ w/w_L และปริมาณฟองอากาศ ในฟังก์ชันล็อกกาลีทิม อัตราส่วนโพรงต่อซีเมนต์ (V/C) ซึ่งนิยามว่าเป็นปริมาตรโพรงต่อปริมาตรปูนซีเมนต์ในส่วนผสม เป็นพารามิเตอร์หลักที่ควบคุมการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา แอปริค (การจัดเรียงตัวของอนุภาคดินเหนียวและโพรง) ซึ่งเป็นผลกระทบจากปริมาณฟองอากาศและปริมาณน้ำ ควบคุมโดยปริมาตรโพรง ขณะที่ แรงปฏิกิริยาระหว่างอนุภาค (ระดับความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสาน) ควบคุมโดยปริมาณปูนซีเมนต์ โดยอาศัยกฎของ Abrams ผู้วิจัยได้พัฒนาสมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของ V/C ที่อายุบ่มหนึ่ง จากการวิเคราะห์ผลการศึกษา ผู้วิจัยได้นำเสนอแนวทางการออกแบบส่วนผสมของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบาเพื่อให้ได้หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และความสามารถในการไหล เป้าหมาย ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

ABSTRACT

Lightweight cemented clay has wide applications in the infrastructure rehabilitation and in the construction of new facilities. This research investigates and analyzes roles of water content, cement content, air content, and fly ash (FA) replacement on the engineering properties including unit weight, flow and strength of lightweight cemented clay-FA material. The engineering properties are strongly controlled by the generalized stress state, w/w_L , where w is the water content and w_L is the liquid limit. The FA replacement reduces w_L , resulting in a change in w/w_L . The $w > 1.5w_L$ is recommended to produce the lightweight cemented clay-FA material. The flowability of clay-cement-FA paste (before hardening) is irrespective of cement content and approximated in terms of w/w_L and air content in logarithmic function. The void/cement ratio (V/C), defined as the ratio of the void volume to the cement volume in the mix, is found to be the dominant parameter governing the strength development in lightweight cemented clay-FA material. The fabric (arrangement of clay particles, clusters and pore spaces) reflected from both air foam content and water content is taken into consideration by the void volume while the inter-particle forces (levels of cementation bond strength) are governed by the cement volume. A predictive strength equation in terms of V/C at a particular curing time is introduced using Abrams' law as a basis. From the critical analysis of test results, a mix design method to attain the target unit weight, flowability and strength is suggested. This method is beneficial from both engineering and economic viewpoints.

สารบัญ

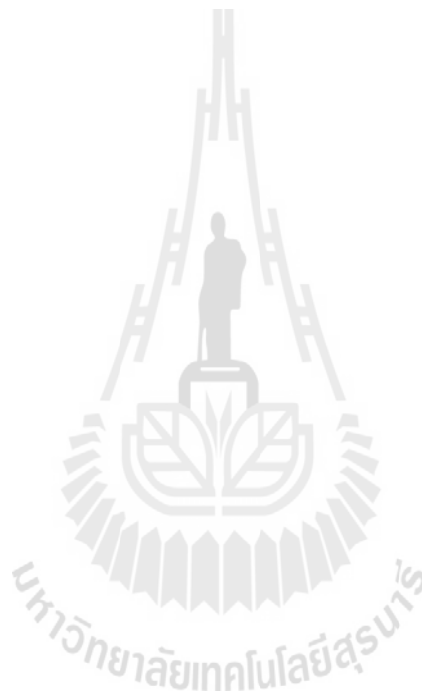
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทัศนวิสัยการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงดินด้วยสารผสมเพิ่ม.....	5
2.2 ประเภทของปูนซีเมนต์.....	6
2.3 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement).....	6
2.3.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์.....	7
2.3.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7
2.3.2.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทธรรมดา.....	7
2.3.2.2 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทดัดแปลง.....	7
2.3.2.3 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว.....	7
2.3.2.4 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ.....	8
2.3.2.5 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภททนซัลเฟตได้สูง.....	8
2.4 ปฏิกริยาทางเคมีของดินซีเมนต์.....	8
2.5 โครงสร้างดินซีเมนต์.....	9
2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	10
2.7 ความหนาแน่นและปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดดินซีเมนต์.....	12
2.8 อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	14
2.9 บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.1 กำล้างต้านทานแรงเสียดของดิน.....	17
2.9.2 การอัดตัวคายน้ำ.....	17
2.9.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ.....	19
2.10 สมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์มวลเบา.....	19
บทที่ 3 ผลการศึกษาและบทสรุป	22
3.1 บทนำ.....	22
3.2 วัสดุและวิธีการทดสอบ.....	22
3.2.1 ดินตัวอย่าง.....	22
3.2.2 ปูนซีเมนต์และสารเติมฟอง.....	23
3.2.3 แก้วลอย.....	23
3.2.4 วิธีการทดสอบ.....	23
3.3 ผลทดสอบ.....	25
3.4 การวิเคราะห์ผลทดสอบ.....	31
3.5 ขั้นตอนการกำหนดสัดส่วนผสมของดินเหนียว-แก้วลอย- ซีเมนต์มวลเบา.....	36
3.6 บทสรุป.....	37
เอกสารอ้างอิง	39
ประวัตินักวิจัย	44

สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 ออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7
2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7



สารบัญรูป

	หน้า
2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell และ Jack, 1966).....	9
2.2 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8 (Davidson, 1961).....	10
2.3 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 12 (Davidson, 1961).....	11
2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 16 (Davidson, 1961).....	11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของทรายที่มีขนาดคละสม่ำเสมอและดินตะกอนปนดินเหนียว (Grimer และ Krawczyk ,1963).....	12
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง-กำลังอัด-ปริมาณความชื้นของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด (Horpibulsuk et al., 2006).....	13
2.7 อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Loamy Sand (Felt, 1965).....	14
2.8 อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Medium Clay (Felt, 1965).....	14
2.9 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay (Felt, 1965).....	15
2.10 ปริมาณปูนซีเมนต์กับกำลังอัดของดินชนิดต่างๆ (Metcalfe, 1977).....	16
2.11 โชนการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2006).....	16
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล (Horpibulsuk et al., 2004a).....	18
2.13 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวปั้นใหม่ (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2546).....	18
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวปั้นใหม่และดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2546).....	19
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินเบนโทไนต์ซีเมนต์มวลเบา (Horpibulsuk et al., 2012b).....	20

สารบัญรูป

	หน้า
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ V/C ของดินเหนียวกรุงเทพมหานคร (Horpibulsuk et al., 2012b).....	20
3.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย.....	23
3.2 แผนภูมิสัดส่วนของส่วนผสมระหว่างดินเหนียว-เถ้าลอย-ปูนซีเมนต์-สารเพิ่มฟอง.....	24
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติพื้นฐานและอัตราส่วนแทนที่ด้วยเถ้าลอย.....	26
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดพลาสติกและขีดจำกัดเหลว.....	26
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณน้ำเริ่มต้น.....	27
3.6 ผลเปรียบเทียบระหว่างหน่วยน้ำหนักจริงและหน่วยน้ำหนักเป้าหมาย.....	28
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่จุดเปลี่ยนผันและอัตราส่วนการแทนที่ ด้วยเถ้าลอย.....	28
3.8 ความสามารถในการไหลที่ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณฟองอากาศต่างๆ.....	29
3.9 การเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการไหลตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำ.....	30
3.10 อิทธิพลของ V/C ต่อการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา.....	30
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่จุดแปรผันและอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย	32
3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลกับ w/w_L	33
3.13 ค่าของ a และ b ในพจน์ของปริมาณฟองอากาศ.....	33
3.14 อิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่อกำลังอัดของ ดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา.....	34
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ V/C ที่ $w/w_L = 2.0$	35
3.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} และกำลังอัด.....	36
3.17 ขั้นตอนการกำหนดสัดส่วนผสมของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา.....	37

บทที่ 1

บทนำ

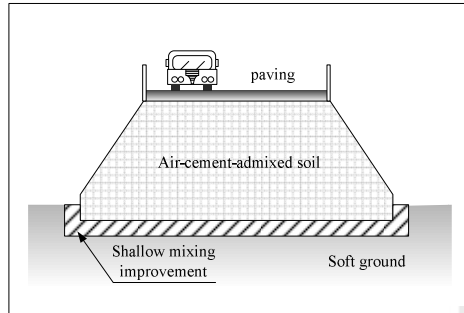
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา

การก่อสร้างโครงสร้างและสาธารณูปโภคบนชั้นดินอ่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณชายฝั่งทะเลมักประสบกับปัญหาทางวิศวกรรม ดินอ่อนนี้ส่วนใหญ่จะเป็นดินเหนียว ดินโคลน และดินตะกอนที่มีการอัดตัวสูง ดินประเภทนี้มักมีปริมาณความชื้นสูง กำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำ และการเสียรูปสูง ดินประเภทนี้เกิดการทรุดตัวและการเสียรูปด้านข้างอย่างมากในระหว่างและหลังการก่อสร้าง

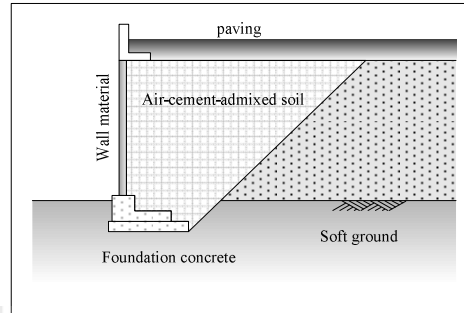
การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินอ่อน เช่น การให้น้ำหนักบรรทุกก่อนร่วมกับระบบระบายน้ำแนวตั้ง (Vertical Drains) และการผสมลึก (deep mixing method) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทยและหลายประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Arulrajah et al., 2009; Chai and Pongsivasathit, 2010; and Horpibulsuk et al., 2004b; 2011b; 2012c) ราคาค่าก่อสร้างจะแปรผันอย่างมากกับความหนาของชั้นดินอ่อน นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวแล้ว การประยุกต์ใช้วัสดุมูลเบาที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนปานกลางถึงสูงเป็นวัสดุดินถมก็เป็นอีกเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ เทคนิคนี้ช่วยลดน้ำหนักที่จะถ่ายลงสู่ชั้นดินอ่อน วัสดุมูลเบาสามารถใช้เป็นคันดิน (embankment) และวัสดุดินถม (backfill) ของโครงสร้างกันดิน เพื่อช่วยลดความเค้นในแนวตั้งและแนวนอน และแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากน้ำหนักขยวดยานบนดินฐานราก ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวและการเสียรูปด้านข้างต่ำ (เพิ่มเสถียรภาพของชั้นดินอ่อน) นอกจากนี้ วัสดุมูลเบาสามารถช่วยลดการทรุดตัวที่ต่างกันของ Bridge approach (จุดเชื่อมต่อระหว่างสะพานและคันดินถม) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว สะพานก่อสร้างบนฐานรากตันหรือฐานรากลึก ในขณะที่ คันดินก่อสร้างบนชั้นทางบดอัด ความแกร่งของฐานรากที่แตกต่างกันนี้มักก่อให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกัน การประยุกต์ใช้วัสดุมูลเบาได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถช่วยแก้ปัญหาการทรุดตัวที่แตกต่างกันได้ (Jamnongpipatkul et al., 2009) การประยุกต์ใช้วัสดุมูลเบาในงานวิศวกรรมโยธาแสดงได้ดังรูปที่ 1.1

ส่วนผสมของดินเหนียว สารเพิ่มฟอง และปูนซีเมนต์ สามารถใช้ผลิตวัสดุมูลเบา ซึ่งเรียกว่า “ดินเหนียวซีเมนต์มูลเบา (Lightweight cellular cemented clay)” (Horpibulsuk et al., 2012b) ดินเหนียวซีเมนต์มูลเบา มีต้นทุนค่าก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพ ในด้านระยะเวลาก่อสร้าง ความสิ้นเปลืองวัสดุ และการขนส่ง ขั้นตอนการผลิตดินซีเมนต์มูลเบาสรุปได้ดังรูปที่ 1.2 ดินเหนียวที่เหลือทิ้งจากงานก่อสร้างจะถูกนำมาผสมกับน้ำจนเป็น slurry และปั๊มเข้าสู่ห้องผสมเพื่อ

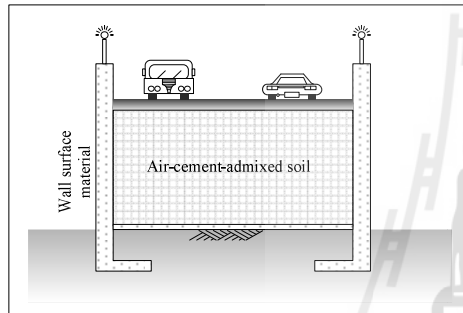
ผสมกับปูนซีเมนต์ ส่วนผสมระหว่าง slurry และปูนซีเมนต์นี้จะถูกนำไปผสมกับสารเพิ่มฟองจนมีความสามารถในการไหล (Flowability) สูงและหนว้น้ำหนักต่ำ หลังจากนั้นจะถูกปั๊มเข้าสู่บริเวณก่อสร้าง



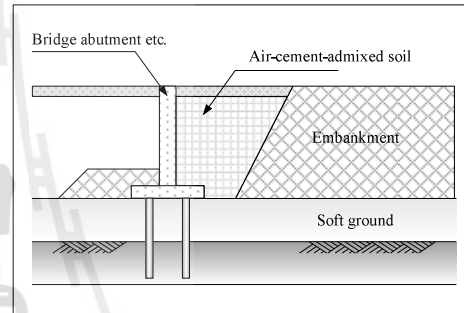
(a) Backfill of road embankment



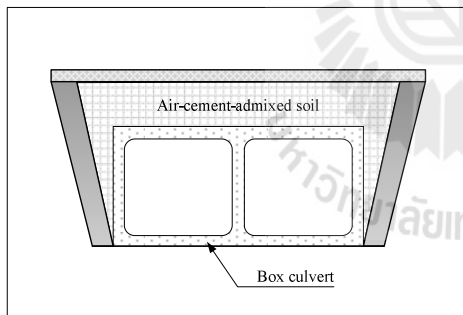
(b) Backfill behind earth retaining structure



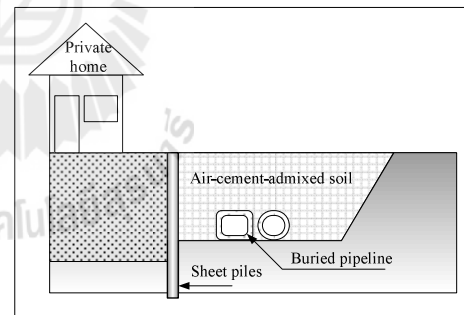
(c) Backfill of vertical embankment



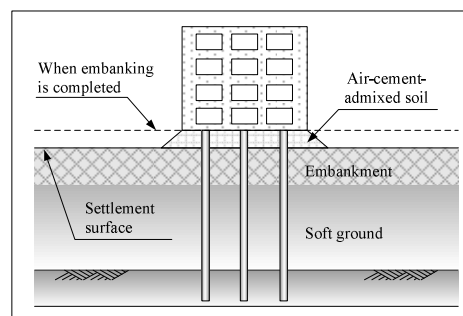
(d) Backfill behind bridge abutment



(e) Backfill between drainage channel

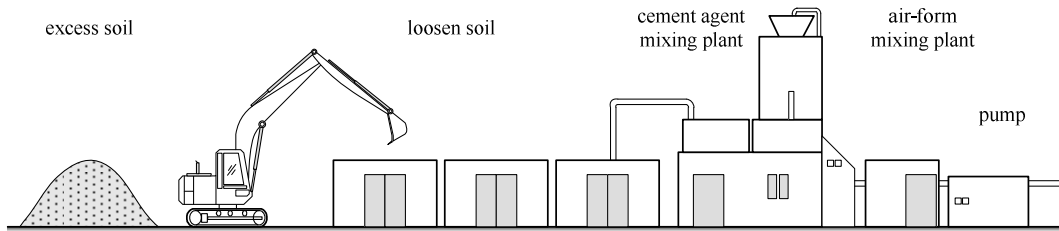


(f) Backfill behind buried pipeline



(g) Backfill under superstructure

รูปที่ 1.1 การประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์มวลเบาในงานวิศวกรรมโยธา



รูปที่ 2: แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตดินซีเมนต์มวลเบา (Miki et al., 2005)

ดินซีเมนต์มวลเบาได้นำมาประยุกต์ใช้งานวิศวกรรมทางและการก่อสร้างท่าเรืออย่างแพร่หลายในประเทศญี่ปุ่น Miki et al. (2003) รายงานความสำเร็จของการประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์มวลเบาเป็นคันดินสูง 6 เมตร บนชั้นดินเหนียวอ่อน การทรุดตัวในระยะเวลา 1 ปี หลังสิ้นสุดการก่อสร้างเกิดขึ้นเพียง 29 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดน้อยกว่าการก่อสร้างด้วยวัสดุดินถมมาก (125 มิลลิเมตร) คันดินซีเมนต์มวลเบาได้ก่อสร้างในประเทศไทยในโครงการมอเตอร์เวย์กรุงเทพ-ชลบุรี การทรุดตัวที่กึ่งกลางคันดินหลังสิ้นสุดการก่อสร้างแล้ว 49 วัน เกิดขึ้นเพียง 60 มิลลิเมตร ซึ่งต่ำกว่าการใช้วัสดุดินถม (100 มิลลิเมตร) (Deechasakulsom, 2006) กรมทางหลวงได้ให้ความสำคัญกับการประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์มวลเบาเพื่อลดการทรุดตัวใต้ Bridge approach โดยทำการทดสอบที่ทางหลวงหมายเลข 35 หลักกิโลเมตรที่ 72+712.5 ถึง 72+775.0 (Jamnongpipatkul et al., 2009) และพบว่าทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยและยอมรับได้ในทางวิศวกรรม

Horpibulsuk et al. (2012b) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ฟองอากาศในการผลิตดินซีเมนต์มวลเบา และพบว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการผลิตดินมวลเบาสำหรับดินเหนียวรวมตัวต่ำและบวมตัวสูงควรมีค่าประมาณ 1.9 เท่าของขีดจำกัดเหลว นอกจากนี้ พวกเขายังได้พัฒนาวิธีการออกแบบส่วนผสมระหว่างดินเหนียว ปูนซีเมนต์ น้ำ และฟองอากาศ เพื่อให้ได้หน่วยน้ำหนักและกำลังอัดตามต้องการ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุเหลือใช้ เช่น ถ้ำลอยและถ้ำกลบ เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนค่าก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น งานวิจัยนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอย พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (อันได้แก่ ปริมาณน้ำ ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณถ้ำลอย และปริมาณฟองอากาศ) ต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์มวลเบา อันได้แก่ หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด ความสามารถในการไหล กำลังอัด และท้ายสุด ผู้วิจัยจะนำเสนอวิธีการออกแบบส่วนผสมเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย ปริมาณฟองอากาศ และอายุบ่ม) ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม (ความสามารถในการไหล หน่วยน้ำหนัก และกำลังอัด) ของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา
- 1.2.2 พัฒนารูปแบบการออกแบบส่วนผสมของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา ที่มีประสิทธิภาพ

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.3.1 ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย ปริมาณฟองอากาศ และอายุบ่ม) ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม (ความสามารถในการไหล หน่วยน้ำหนัก และกำลังอัด) ของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา
- 1.3.2 ได้วิธีการออกแบบส่วนผสมของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา ที่มีประสิทธิภาพ



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงดินด้วยสารผสมเพิ่ม

การปรับปรุงดินโดยใช้สารผสมเพิ่ม (Additive) ได้เกิดขึ้นเป็นเวลากว่าหลายพันปีล่วงมาแล้ว ซึ่งปรากฏมีหลักฐานเกี่ยวกับการปรับปรุงถนนที่ใช้สัญจรตั้งแต่สมัยโรมัน โดยการใช้ปูนขาว หรือ สาร Pozzolans ผสมกับดินที่ใช้ทำพื้นทาง เพื่อให้ถนนมีสภาพการใช้งานที่ดีขึ้น (Woods และ Yoder, 1952)

Portland Cement Association (1956) รายงานว่าปี 1940 ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการก่อสร้างถนนด้วยดินซีเมนต์ซึ่งมีพื้นที่มากกว่า 5.7 ล้านตารางเมตร ส่วนการนำดินซีเมนต์มาใช้ในงานสนามบินได้เริ่มขึ้นระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ในช่วงปี 1941-1944 ซึ่งมีพื้นที่ประมาณ 16.8 ล้านตารางเมตร ภายหลังจากสงครามครั้งที่ 2 ยุติ ได้มีการสร้างถนนด้วยดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางของถนนผิวคอนกรีต โหล่ทาง ที่จอดรถ พื้นคลังสินค้า รองพื้นอ่างเก็บน้ำ คู และคลอง

Davidson (1961) กล่าวถึงวิวัฒนาการของดินซีเมนต์ที่ได้กำเนิดขึ้นในโลกว่า ถนนดินซีเมนต์เส้นแรกของโลกน่าจะสร้างขึ้นในเมือง Sarasota รัฐ Florida ในปี 1915 จากหลักฐานพบว่าถนน Oak ได้ถูกสร้างขึ้นจากการชุดเอาดิน Shell จากอ่าวมาผสมกับทรายและปูนซีเมนต์ จากนั้นก็นำส่วนผสมที่ได้ไปเกลี่ย และบดอัดด้วยรถบดไอน้ำที่มีน้ำหนัก 10 ตัน Mill (1935) รายงานว่าในปี 1932 South California State Department ได้ทำการศึกษาส่วนผสมของดินและซีเมนต์ ภายใต้อำนวยการดูแลของ Dr. C.H.Moorefield และพบว่าดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุที่สามารถเข้ากันได้ และนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางของถนนได้

Terrel and Davidson (1961) ได้บันทึกว่าเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองของ South California State Department ในปี 1935 Bureau of Public Road และ Portland Cement Association (PCA) ได้ร่วมมือกันสร้างถนนดินซีเมนต์ยาว 1.5 ไมล์ ใกล้เมือง Johnsonville ขึ้น ถนนสายนี้ต่อมากลายเป็นที่รู้จักว่าเป็นโครงการแรกของวิศวกรรมถนนซีเมนต์

สำหรับประเทศไทย การประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์ได้เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2508 โดยกรมทางหลวงร่วมกับบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ได้ทดลองนำดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์มาใช้เป็นพื้นทางครั้งแรกในทางสายวาริณชำราบ - เดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี โดยทำการทดลองระยะทางยาว 5 กิโลเมตร ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ กรมทางหลวงจึงได้ออกแบบชั้นพื้นทางซีเมนต์ (Soil-Cement Base) ของถนนหลายสายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การได้ดี

2.2 ประเภทของดินซีเมนต์

Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization (1959) แบ่งดินผสมซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภท ตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมและลักษณะการใช้งานดังต่อไปนี้

2.2.1 Soil-Cement เป็นการนำดินและปูนซีเมนต์มาผสมกันแล้วบดอัดโดยวิธีทางกลแล้วทำการบ่มให้แข็งตัว ปูนซีเมนต์มีปริมาณสูงพอจนทำให้มีกำลังอัด หรือกำลังแบกทานตามที่กำหนด และมากพอที่จะทำให้ดินซีเมนต์กลายเป็นวัสดุก่อสร้างที่แข็งแรงทนทาน มีความชื้นเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีความหล่อลื่นเพียงพอในการบดอัดให้ได้ความแน่นสูงสุด

2.2.2 Cement Modified Granular Soil ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของดินจำพวกทรายและกรวด (Granular Soil) บางชนิด เพื่อลดค่าดัชนีสภาพพลาสติก ดินซีเมนต์ประเภทนี้มักใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง และใช้เป็นชั้นพื้นทางของถนนผิวจราจรคงรูป (Rigid Pavement) และผิวจราจรยืดหยุ่น (Flexible Pavement) ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ประมาณร้อยละ 1-3

2.2.3 Cement Modified Silt-Clay Soil ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้้น้อยมาก โดยมีจุดประสงค์ในการปรับปรุงคุณสมบัติการบวมตัวและหดตัวของดินที่อ่อนมาก หรือดินที่มีโอกาสถูกน้ำท่วมถึง

2.2.4 Cement - Treated Soil Slurries and Grouts เป็นการนำเอาดินและซีเมนต์ผสมน้ำ ให้มีสภาพเหลวพอประมาณ ดินซีเมนต์ประเภทนี้จะใช้ในการบำรุงรักษาถนน ใช้ในการยาหรืออุดรอยร้าวที่เกิดขึ้น เช่น รอยร้าวในอุโมงค์ค้ำน้ำ

2.2.5 Plastic Soil - Cement เป็นการนำดิน ปูนซีเมนต์ และน้ำมาผสมเข้าด้วยกันให้มีสภาพเหลวมาก นิยมใช้ในงานลาดปูลงบนพื้นที่ที่มีความลาดเอียง เช่น การลาดท้องคลองชลประทาน การลาดผิวหน้าคันทาง

2.3 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement)

2.3.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญคือ 1) Calcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk) 2) Argillaceous Material ได้แก่ Silica ซึ่งอยู่ในรูปของดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale) 3) Iron Oxide Material ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron) หรือ ดิลาแลง (Laterite) เมื่อทำการเผาวัสดุตั้งกล่าวทั้งหมดรวมกันในหม้อเผา ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , NaO , TiO_2 , P_2O_5 ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.1 ออกไซด์หลักจะรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) และเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.

ตารางที่ 2.1 ออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
(ชัชวาล เศรษฐบุตฺร, 2536)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
<u>ออกไซด์หลัก</u>	
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0.5-0.6
<u>ออกไซด์รอง</u>	
MgO	0.1-5.5
Na ₂ + K ₂ O	0.5-1.3
TiO ₂	0.1-0.4
P ₂ O ₅	0.1-0.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล เศรษฐบุตฺร, 2536)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรคัลเซียม ซิลิเกต	3CaO . SiO ₂	C ₃ S
ไดคัลเซียม ซิลิเกต	2CaO . SiO ₂	C ₂ S
ไตรคัลเซียม อลูมินา	3CaO . Al ₂ O ₃	C ₃ A
เตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์	4CaO . Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

2.3.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.3.2.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไป ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขี้ยว

2.3.2.2 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกิดความร้อนปานกลาง ทนซัลเฟตได้ปานกลาง ปัจจุบันไม่มีผลิตในประเทศไทย

2.3.2.3 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือถอดแบบในเวลาอันสั้น ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง ข้อควรระวัง คือ ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงมากในช่วงต้น อาจก่อให้เกิดการแตกร้าวได้

2.3.2.4 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ ในประเทศไทยไม่มีการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ปัจจุบันนี้ถูกทดแทนโดยการใช้ปอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมกับเถ้าลอย

2.3.2.5 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีไตรแคลเซียม (C_3A) ต่ำ จึงทำให้มีการพัฒนากำลัั้งอัดซั ทำให้อเกิดความร้อนต่ำกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทธรรมดา ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราช้างฟ้า และตราปลาฉลาม

2.4 ปฏิกริยาทางเคมีของดินซีเมนต์

เมื่อผสมปูนซีเมนต์เข้ากับเม็ดดินและน้ำ ผลของปฏิกริยาไฮเดรชันจะทำให้ได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน และได้ Hydrate Lime ที่แยกตัวออกมาระหว่างการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้ Hydrate Lime ทำปฏิกริยากับซิลิกาและอลูมินาที่ได้จากแร่ดินเหนียว ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานเพิ่มมากขึ้นอีก

ในมวลดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด แรงยึดเกาะกันจะประกอบด้วย Mechanical Interlock และ Chemical Cementation ซึ่งเกิดจากปฏิกริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับซิลิกาและอลูมินา ปฏิกริยานี้จะเกิดขึ้นตามผิวของเม็ดดินโดยจะเกาะอยู่รอบๆ เม็ดดิน ทำให้เม็ดดินเชื่อมกัน เป็นผลให้เม็ดดินมีขนาดใหญ่อขึ้น และมีกำลังสูงขึ้น (Lame, et al. 1959)

Herzog and Mitchell (1963) ได้ศึกษาปฏิกริยาของปูนซีเมนต์กับดินเหนียวและพบว่า การเกิดปฏิกริยาไฮเดรชันก่อให้เกิด CSH และ CAH เป็นกระบวนการแรก ส่วนกระบวนการที่สองเกิดจากปฏิกริยาระหว่างซิลิกา และอลูมินากับ Calcium Ion ที่เกิดจาก Hydrate Lime ทำให้ได้ CSH และ CAH เช่นกัน แต่ต้องใช้ระยะเวลาการเกิดนานกว่ากระบวนการแรก จึงทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุการปมที่เพิ่มขึ้น

Moh (1965) พบว่าปฏิกริยาของดินซีเมนต์สามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



Michell and Jack (1966) อธิบายว่า เมื่อผสมซีเมนต์ลงไปดิน จะเกิดปฏิกริยาและได้สารสุดท้ายเป็น CSH ปฏิกริยาช่วงสั้นๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อผสมซีเมนต์ลงไปดิน ประกอบด้วย

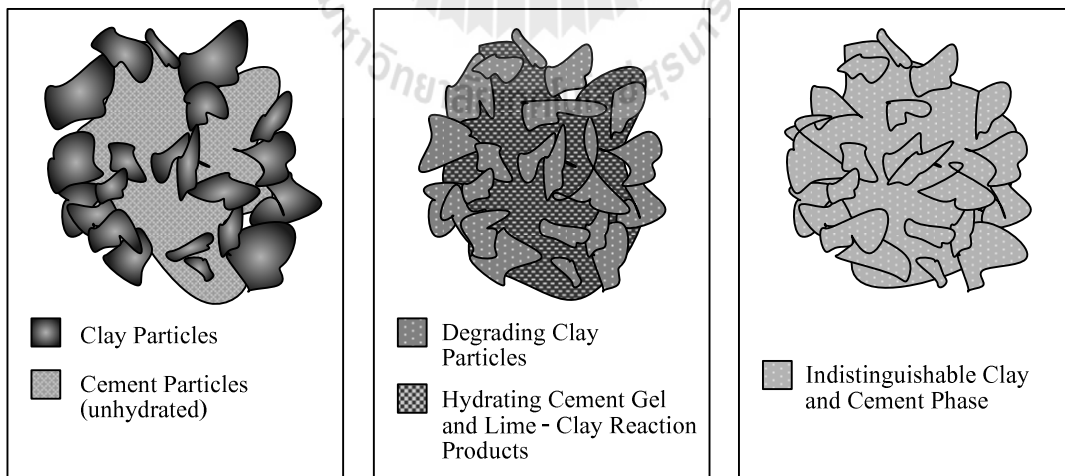
แทนที่หรือการแลกเปลี่ยน Valency โดยการดูดซับ Cation ของแคลเซียม และเม็ดดินจะดูดซับเอา $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เข้าไว้ เกิดสารประกอบที่ทำให้มีการเชื่อมยึดติดกันของเม็ดดิน

Terrel et al. (1979) ได้กล่าวถึงปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ว่า ดินเม็ดละเอียด (Fine grained soil) โดยเฉพาะที่มีส่วนผสมของดินเหนียวอยู่ แร่ดินเหนียวจะมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยากับ Hydrate Lime ก่อให้เกิดสารประกอบ CSH และ CAH

เกษม เพชรเกต และพินิต ตั้งบุญเดิม (2536) ได้ศึกษาพบว่า ดินเหนียวปกติเป็นดินที่มีแร่ซิลิกาผสมอยู่สูง ซึ่งแร่เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ได้ดี ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งทำให้ดินเปลี่ยนคุณสมบัติไป สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่ม และการยุบตัวน้อยลง

2.5 โครงสร้างดินซีเมนต์

Mitchell and Jack (1966) ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินหลังจากผสมปูนซีเมนต์แล้ว โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบและโครงสร้างดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.1 ภายใต้การบดอัด ปูนซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน อนุภาคของปูนซีเมนต์จะผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1(ก) ภายใต้การบดอัด อนุภาคของปูนซีเมนต์เริ่มทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาที่มีอยู่ในดิน เป็นผลให้เกิดวัสดุเชื่อมประสาน จากนั้นซีเมนต์เจลและวัสดุเชื่อมประสานจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดินดังรูปที่ 2.1(ข) ภายใต้การบดอัดยาว การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ วัสดุเชื่อมประสานแทรกซึมกระจายไปทั่วดังรูปที่ 2.1(ค) ส่งผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามกาเพิ่มขึ้นของอายุบ่ม

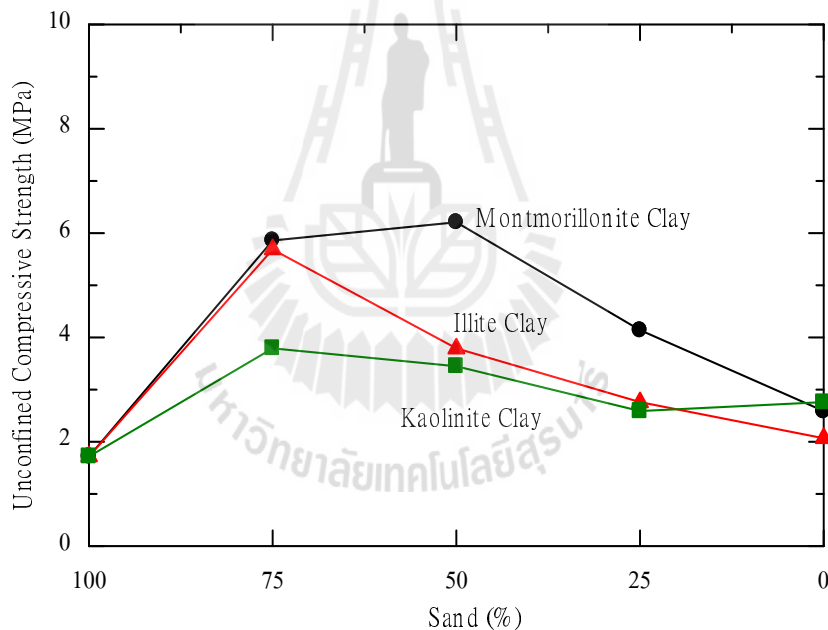


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell และ Jack, 1966)

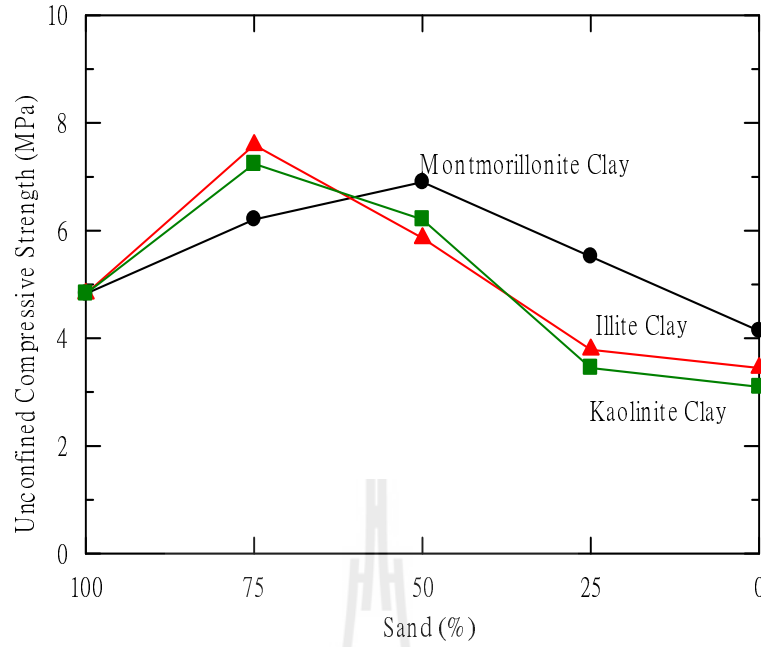
2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

Davidson et al. (1962) ได้ทำการทดลองโดยใช้ทรายผสมดินเหนียวในอัตราส่วนทรายต่อดินเหนียว 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ดินเหนียวที่ใช้เป็นพวก Kaolinite, Illite และ Montmorillonite ดังแสดงผลในรูปที่ 2.2 , 2.3 และ 2.4 ปริมาณดินเหนียวที่มากเกินไป (เกินกว่าร้อยละ 25) เมื่อผสมกับดินจำพวกที่ไม่มีมีความเชื่อมแน่น (Cohesionless Soil) จะทำให้กำลังของดินซีเมนต์ลดลงอย่างเด่นชัด ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 8 และปริมาณสัดส่วนของทรายต่อดินเหนียว 75:25 ให้กำลังสูงสุด สัดส่วนนี้เป็นสัดส่วนผสมที่มีขนาดละเอียด (Well Grade) ทำให้ได้ค่าความแน่นและกำลังอัดสูงสุดด้วย

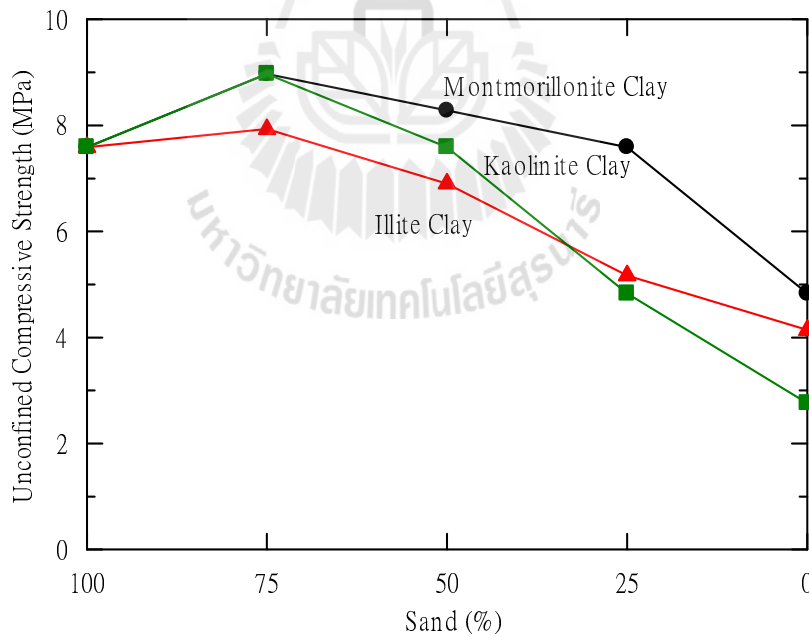
Grimer และ Krawczyk (1963) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุ (log scale) ของดินซีเมนต์ที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 10 ดังรูปที่ 2.5 และพบว่ากำลังอัดของทรายที่มีขนาดละเอียดสม่ำเสมอ (Uniform Sand) และที่ไม่มีดินเหนียวผสม จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงจนถึงอายุการบ่ม 28 วัน หลังจากนั้นมีการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด เชื่อว่าจะมาจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์



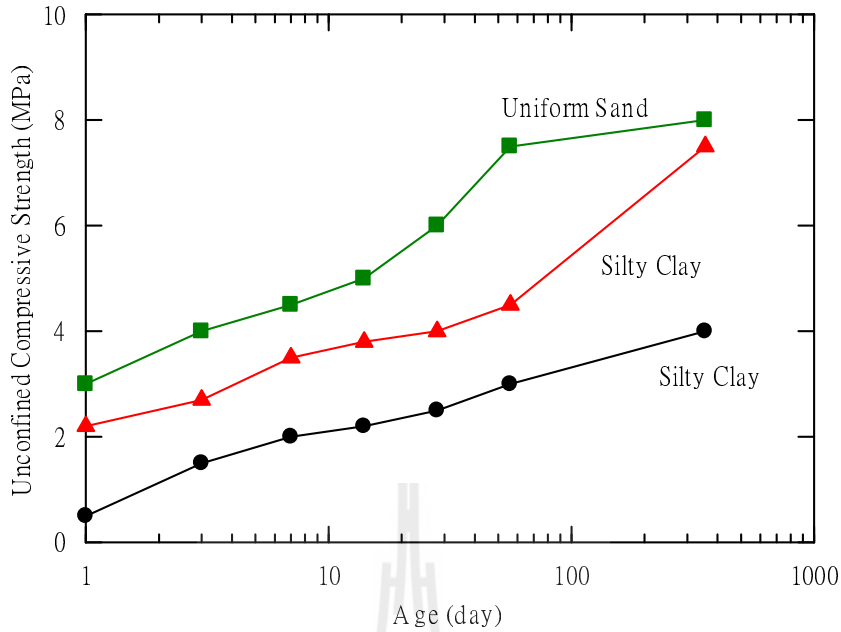
รูปที่ 2.2 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8 (Davidson, 1962)



รูปที่ 2.3 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 12 (Davidson, 1961)



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 16 (Davidson, 1961)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการป่มของทรายที่มีขนาดละเอียดสม่ำเสมอ และดินตะกอนปนดินเหนียว (Grimer และ Krawczyk, 1963)

Bell (1976) พบว่าเมื่อแร่ดินเหนียว Montmorillonite ทำปฏิกิริยากับปูนขาวจะทำให้ Aqueous Phase ลดลง ทำให้สาร Cementious ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะอยู่ในปูนขาวไม่เพียงพอต่อการแข็งตัว การแก้ไขคือการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ลงไปเพื่อเพิ่ม Free Lime ให้มากขึ้น โดยปกติ การเพิ่มซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 15 จะทำให้ดินจำพวก Montmorillonite มีคุณภาพดีสามารถนำมาใช้งานได้

2.7 ความหนาแน่นและปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดดินซีเมนต์

การบดอัด คือการเพิ่มความแน่นของดิน โดยการไล่อากาศออกจากมวลดินด้วยกระบวนการทางกล การบดอัดทำให้อากาศที่มีอยู่ในมวลดินถูกขับออกไป เมื่อดินที่มีขนาดเล็กจะทำหน้าที่สอดแทรกตามโพรงของมวลดินในลักษณะเรียงตัวอัดแน่น ปริมาณน้ำของการบดอัดมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของมวลดิน ในช่วงแรกความหนาแน่นจะสูงขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่ม จนถึงจุดที่ปริมาณน้ำที่ทำให้ความหนาแน่นมีค่าสูงสุด เรียกว่าปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum water content, OWC) จากนั้นค่าความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะเต็มไปด้วยน้ำ เม็ดดินที่มีขนาดเล็กไม่สามารถเข้าไปอยู่ในโพรงระหว่างเม็ดดินได้ ความหนาแน่นของมวลดินจึงลดลง

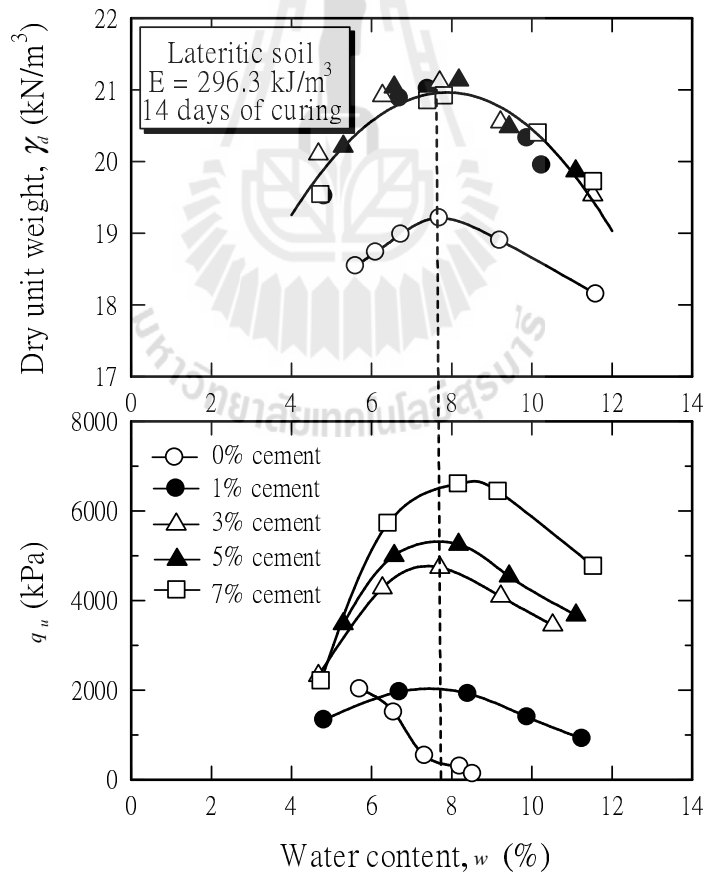
Felt (1955) ได้ทดลองและสรุปผลว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและปริมาณน้ำมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์ ดินทรายผสมปูนซีเมนต์ควรทำการบดอัดทางด้านข้างของ

OWC เล็กน้อยจึงได้ค่ากำลังอัดสูงสุด ส่วนดินเหนียวและดินตะกอนควรบดอัดให้อยู่ทางด้านเปียกของ OWC เล็กน้อยจึงได้ค่ากำลังอัดสูงสุด

นอกจากนี้ Felt (1955) ยังได้ทำการทดลองบดอัดดินด้วยวิธีมาตรฐาน และวิธีสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASSHTO โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม ที่ปริมาณน้ำต่ำ ความหนาแน่นจะไม่มีผลต่อกำลังอัด

Ruenkraairergsa (1982) พบว่าปริมาณน้ำเหมาะสมไม่เพียงแต่จะทำให้ดินซีเมนต์มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่านั้น แต่ยังทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไปอย่างสมบูรณ์อีกด้วย และความหนาแน่นแห้งสูงสุดอาจจะไม่ได้ค่ากำลังอัดสูงสุดสำหรับดินซีเมนต์เสมอไป

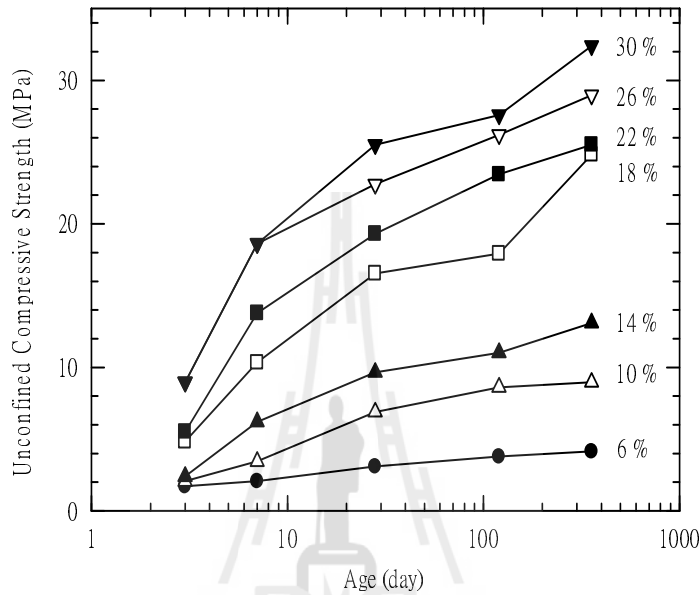
Horpibulsuk et al. (2006) ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำเหมาะสมของดินเม็ดหยาบผสมปูนซีเมนต์บดอัดมีค่าใกล้เคียงกับของดินเม็ดหยาบไม่ผสมปูนซีเมนต์บดอัด ในขณะที่ หน่วยน้ำหนักแห้งของดินเม็ดหยาบผสมปูนซีเมนต์บดอัดมีค่าสูงกว่า แต่ไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ กำลังอัดของดินเม็ดหยาบผสมปูนซีเมนต์บดอัดมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณน้ำเหมาะสม สำหรับทุกอายุปม ดังแสดงในรูปที่ 2.6



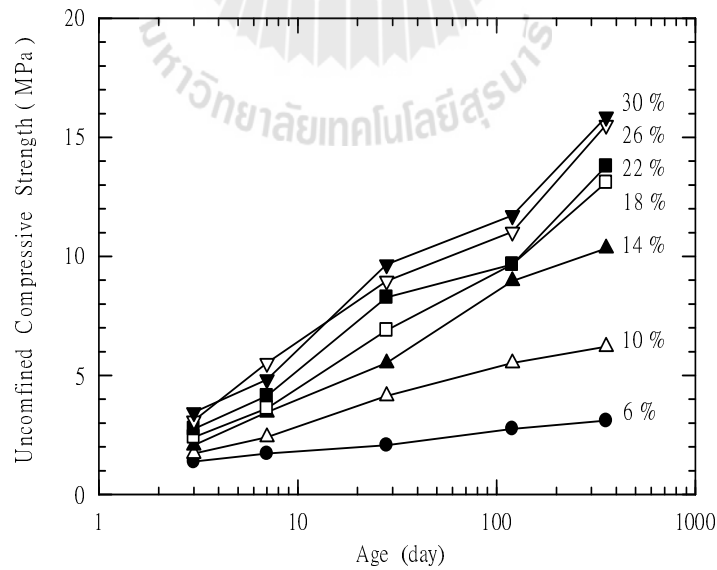
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง-กำลังอัด-ปริมาณความชื้นของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด (Horpibulsuk et al., 2006)

2.8 อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

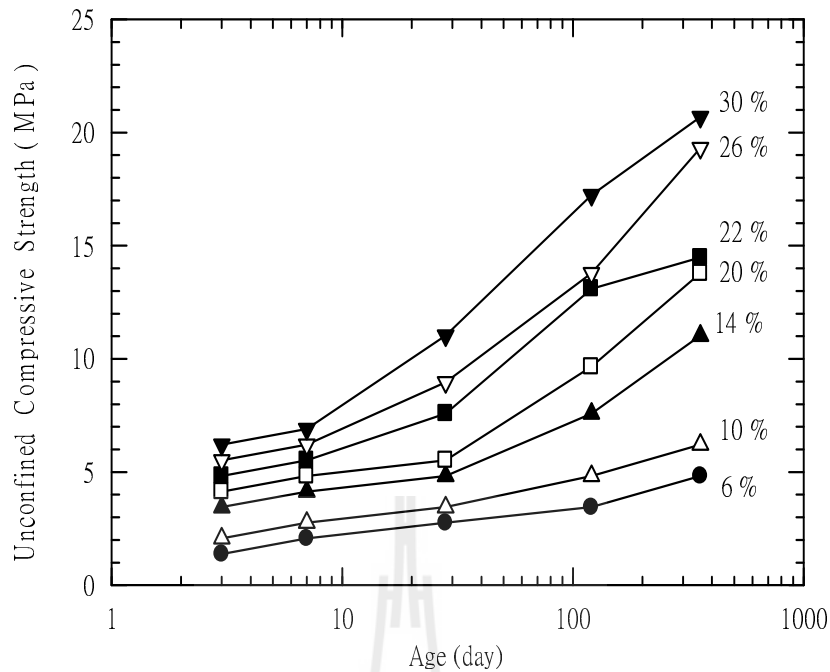
Felt (1955) ได้นำดินสามชนิด คือ Silty Loam, Sandy Loam และ Silty Clay มาผสมกับปูนซีเมนต์ ผลการทดลองกำลังอัดของดินซีเมนต์ทั้งสามชนิดแสดงดังรูปที่ 2.7 ถึง 2.9 และสรุปได้ดังนี้ กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ และดินเม็ดหยาบซีเมนต์มีกำลังอัดที่สูงกว่าดินเม็ดละเอียดซีเมนต์



รูปที่ 2.7 อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Loamy Sand (Felt, 1965)



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Medium Clay (Felt, 1965)



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay (Felt, 1965)

Ruenkraairergsa (1982) อธิบายว่าเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น คุณสมบัติของดินซีเมนต์จะดีขึ้นด้วย อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเม็ดดิน (Cohesion) ของดินเม็ดหยาบซีเมนต์จะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าดินดินเม็ดละเอียดซีเมนต์

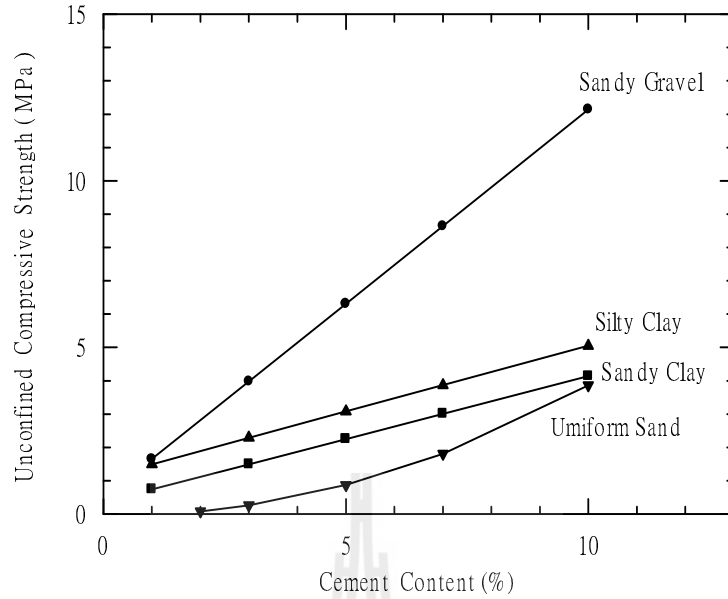
Metcalf (1977) พบว่าปริมาณปูนซีเมนต์มีผลโดยตรงกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ โดยเฉพาะกับดินเม็ดหยาบ และสรุปได้ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ Metcalf ได้เสนอความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) กับปริมาณปูนซีเมนต์ ตามชนิดของดิน ดังรูปที่ 2.10 และสมการต่อไปนี้

$$q_u \text{ (MPa)} = 1.1654 C + 0.4832 \quad \text{สำหรับ Sandy Gravel} \quad (2.4)$$

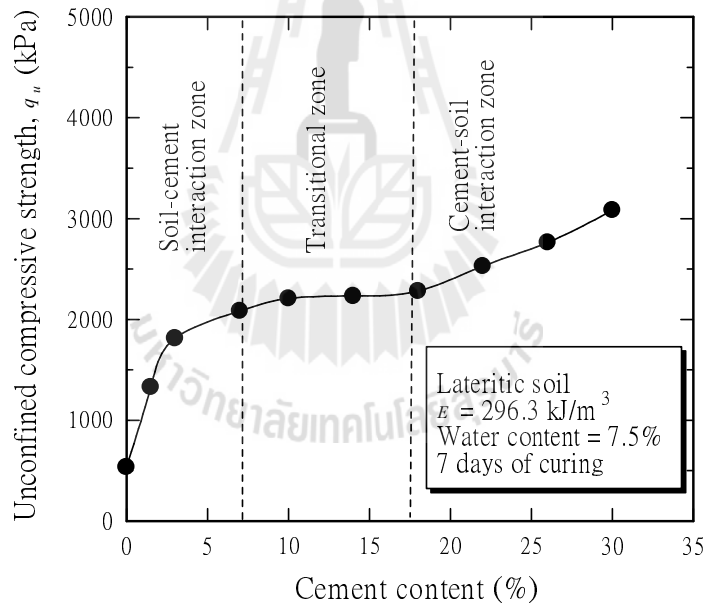
$$q_u \text{ (MPa)} = 0.3953 C + 1.0995 \quad \text{สำหรับ Silty Clay} \quad (2.5)$$

$$q_u \text{ (MPa)} = 0.3785 C + 0.3598 \quad \text{สำหรับ Sandy Clay} \quad (2.6)$$

$$q_u \text{ (MPa)} = 0.042 C^2 - 0.031C - 0.027 \quad \text{สำหรับ Uniform Sand} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.10 ปริมาณปูนซีเมนต์กับกำลังอัดของดินชนิดต่างๆ (Metcalf, 1977)



รูปที่ 2.11 โซนการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2006)

Horpibulsuk et al. (2006) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อการพัฒนา กำลังอัดของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด ที่ปริมาณความชื้น พลังงานการบดอัด และอายุบ่มค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าการพัฒนา กำลังอัดแบ่งออกเป็นสามโซน ในโซนที่หนึ่ง ซีเมนต์เพสต์ต่อจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะก่อให้เกิดพันธะเชื่อมประสานระหว่างจุดสัมผัส โซนนี้เรียกว่า Soil-cement interaction อย่างไรก็ตาม

ตาม ความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานที่จุดสัมผัสจะถูกจำกัด แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ก็ตาม ที่สภาวะนี้ จะเกิดความต่อเนื่องของโครงสร้างดินเม็ดหยาบ แต่ปราศจากความต่อเนื่องที่สมบูรณ์ของโครงสร้างซีเมนต์เฟสตัน จนกระทั่งปริมาณปูนซีเมนต์มีมากพอ จนทำให้เกิดความต่อเนื่องของซีเมนต์เฟสตัน โซนนี้เรียกว่า Cement-soil interaction โซนระหว่างโซนที่หนึ่งและสามเรียกว่าโซน Transitional ซึ่งเป็นโซนที่การเพิ่มขึ้นของกำลังมีน้อยมาก และปริมาณซีเมนต์มิได้มีส่วนช่วยสร้างพันธะเชื่อมประสานระหว่างจุดสัมผัส

2.9 บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

2.9.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน

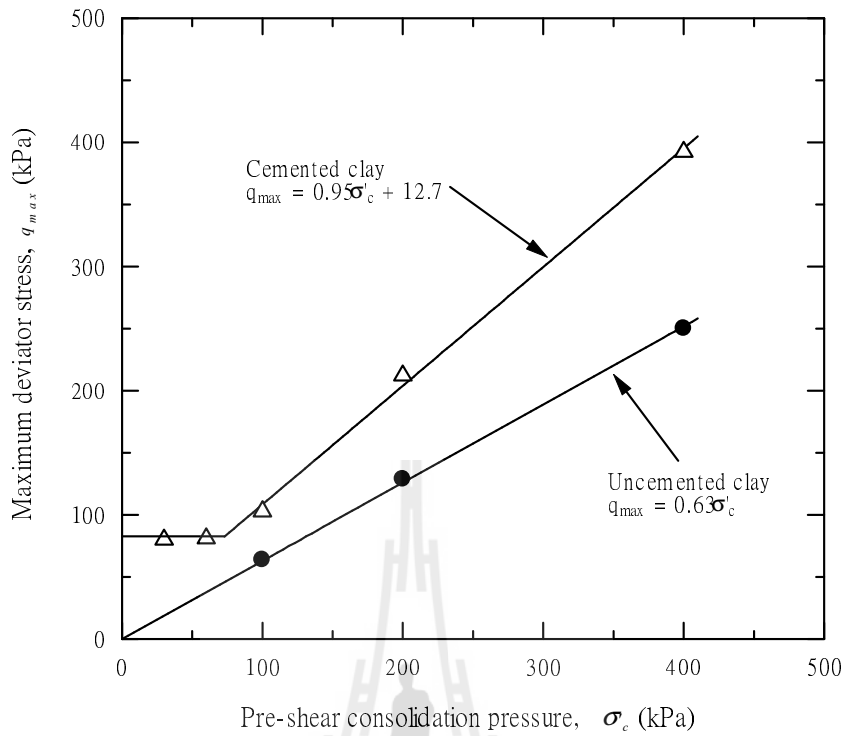
Horpibulsuk et al. (2004a) กล่าวว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสาน เมื่อเฉือนดินประเภทนี้ภายใต้สภาวะที่ความเค้นประสิทธิผลน้อยกว่าความเค้นครากประสิทธิผล (σ'_c) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของเม็ดดินน้อยมาก ในช่วงนี้ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) แต่เมื่อความเค้นประสิทธิผลมากกว่าความเค้นครากประสิทธิผล ทั้งการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสานจะมีอิทธิพลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือน (รูปที่ 2.12) และเสนอความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$q_{max} = q_{bond} + q_{fabric} \quad (2.8)$$

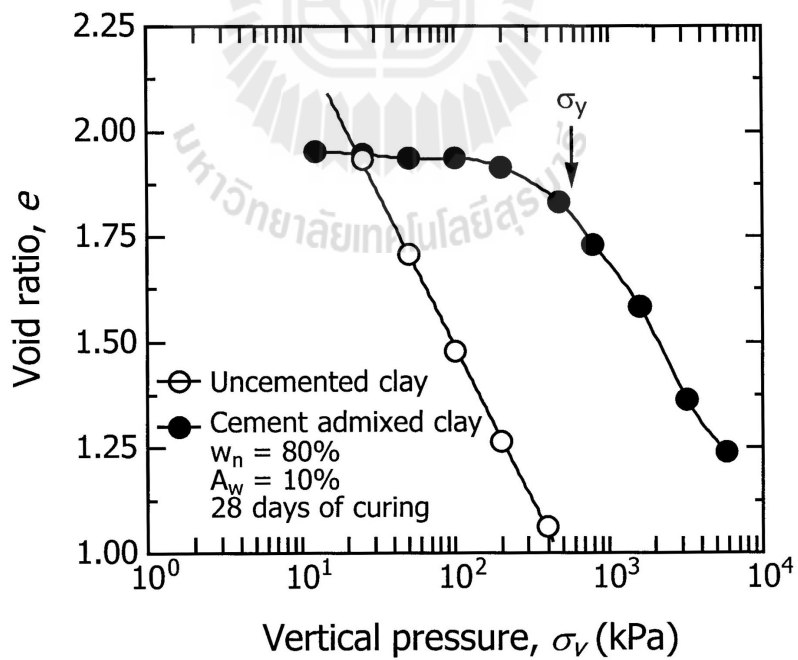
เมื่อ q_{max} คือความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (ที่จุดวิบัติ)
 q_{bond} คือความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน
 q_{fabric} คือความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric)

2.9.2 การอัดตัวคายน้ำ

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน (2546) แสดงผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.13 ดินเหนียวซีเมนต์ (ดินพันธะเชื่อมประสาน) สามารถที่จะเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงสูงๆ เมื่อเทียบกับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานการอัดตัวคายน้ำมีค่าน้อยมากในช่วงก่อนจุดคราก (Yield stress) เป็นเพราะอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน แต่การอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงหลังจุดคราก โดยที่ดัชนีการอัดตัว (Compression index) มีค่าค่อนข้างคงที่แม้จะมีการเพิ่มขึ้นของความเค้นในแนวตั้ง



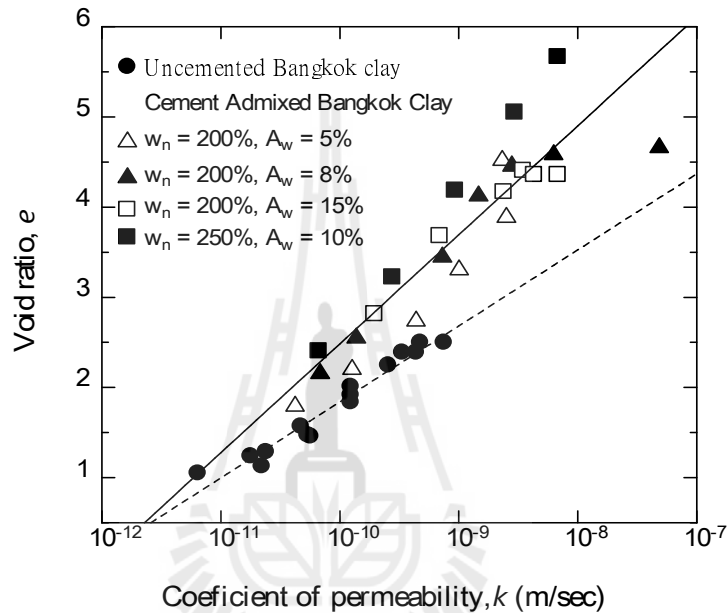
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล (Horpibulsuk et al., 2004a)



รูปที่ 2.13 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวปั้นใหม่ (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2546)

2.9.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน (2546) แสดงผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวปั้นใหม่และดินเหนียวซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.14 จะเห็นว่าพันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวอย่างมาก ที่อัตราส่วนโพรงที่เท่ากัน ดินเหนียวซีเมนต์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่าดินเหนียวปั้นใหม่ ดังนั้น พันธะเชื่อมประสานนอกจากจะเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือน และลดการทรุดตัวแล้ว ยังลดการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับงานโครงสร้างที่บ้น้ำ เช่น งานซ่อมแซมเขื่อนที่แตกกร้าว และ Cut - off wall เป็นต้น



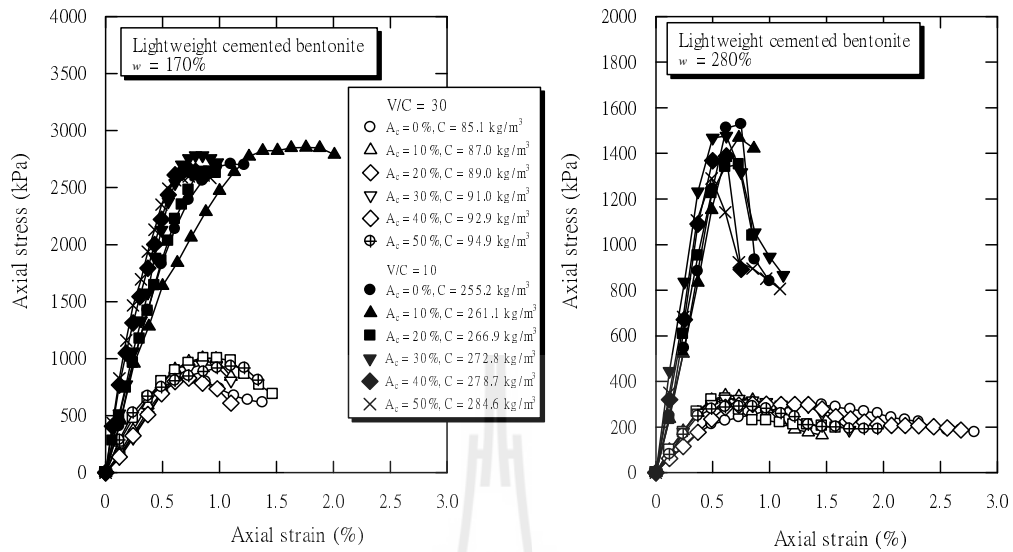
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวปั้นใหม่ และดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2546)

2.10 สมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์มวลเบา

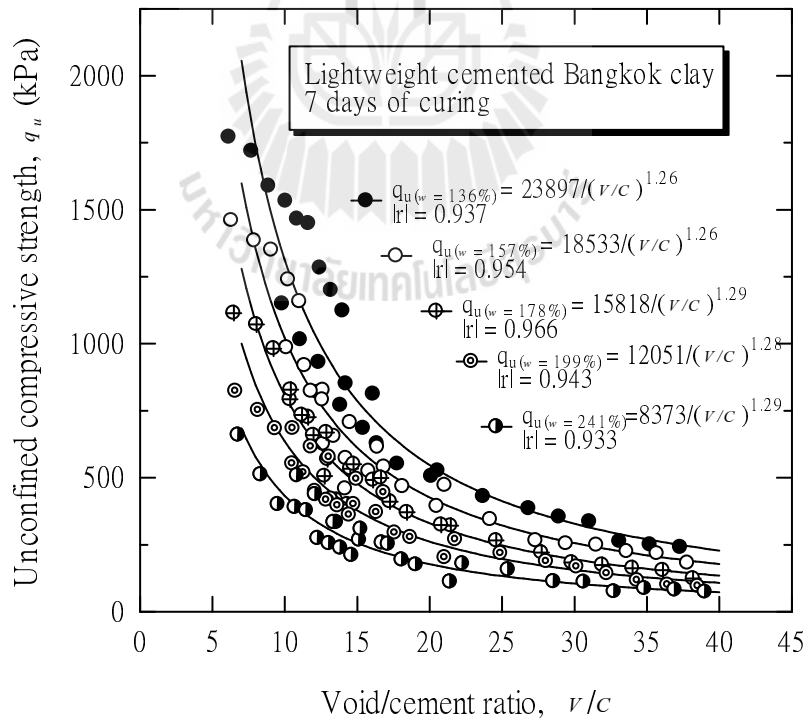
กรอบแนวความคิดของในการศึกษาการพัฒนา กำลังอัดของดินซีเมนต์มวลเบาตั้งอยู่บนสมมติฐาน clay-water/cement ratio hypothesis สำหรับดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอย (Horpibulsuk et al., 2011a) ร่วมกับตัวแปร void/cement ratio, V/C (Horpibulsuk et al., 2012b) ตัวแปร void/cement ratio นิยามเป็นปริมาตรของโพรงต่อปริมาตรของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์มวลเบาที่มีปริมาณฟองอากาศและปริมาณปูนซีเมนต์ต่างกัน แต่มีค่า V/C เท่ากัน ที่อายุบ่ม 14 วัน ดินตัวอย่างเป็นดินเบนโทไนต์ที่มีปริมาณน้ำร้อยละ 170 และ 280 จะเห็น

ได้ว่าเมื่อ V/C มีค่าลดลง กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินตัวอย่างมีลักษณะคล้ายกัน เมื่อ V/C มีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินเบนโทไนต์ซีเมนต์มวลเบา (Horpibulsuk et al., 2012b)



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ V/C ของดินเหนียวกรุงเทพมหานครมวลเบา (Horpibulsuk et al., 2012b)

จากสมมติฐาน clay-water/cement ratio hypothesis ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ V/C ที่ปริมาณความชื้นและอายุบ่มค่าหนึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้ (Horpibulsuk et al., 2012b)

$$q_u = \frac{A}{(V/C)^B} \quad (2.9)$$

เมื่อ q_u คือกำลังอัดที่อายุบ่มค่าหนึ่ง A และ B เป็นค่าคงที่ ซึ่งแปรผันตามชนิดของดิน B มีค่าประมาณ 1.26 ถึง 1.29 (จากผลทดสอบดินบวมตัวต่ำถึงสูง) รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ V/C ของดินกรุงเทพมหานครมวลเบา ที่อายุบ่ม 7 วัน จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ V/C สามารถประมาณได้ด้วยสมการที่ (2.9)



บทที่ 3

ผลการศึกษาและบทสรุป

3.1 บทนำ

แม้ว่าได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เถ้าลอยในงานวิศวกรรม อันได้แก่ คอนกรีต วัสดุเซียว วัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง และงานปรับปรุงคุณสมบัติของดิน (Kawasaki et al., 1981; Kitazume et al., 2001; Kehew, 1995; Hannesson et al., 2012; Kaniraj and Havanagi, 1999; Bin-Shafique et al., 2010; Prabakar et al., 2004; and Sukmak et al., 2013a and b) แต่งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เถ้าลอยในการพัฒนาวัสดุดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบายังมีอยู่อย่างจำกัด Horpibulsuk et al. (2014a) ได้ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ในการพัฒนาวัสดุดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา และได้รายงานอิทธิพลของปริมาณเถ้าลอย ปริมาณน้ำ และปริมาณอากาศ ต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวยังขาดการวิเคราะห์และการทำนายการพัฒนากำลังอัดด้วยพารามิเตอร์โครงสร้าง (แฟบริคและแรงปฏิกริยาระหว่างอนุภาค) นอกจากกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักแล้ว ความสามารถในการไหลของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา (ก่อนแข็งตัว) ก็เป็นอีกพารามิเตอร์ที่สำคัญในการก่อสร้าง ค่าความสามารถในการไหลที่สูงจะช่วยลดต้นทุนในการถมดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา เข้าสู่พื้นที่ก่อสร้าง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมการทำนายกำลังอัดและความสามารถในการไหลของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา และท้ายสุดจะนำเสนอแนวทางในการออกแบบส่วนผสมระหว่างดินเหนียว ปูนซีเมนต์ สารเพิ่มฟอง และน้ำ เพื่อให้ได้กำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และความสามารถในการไหลที่ต้องการ ซึ่งจะเป็ประโยชน์อย่างมากต่อวิศวกรปฐพีและวิศวกรการทาง

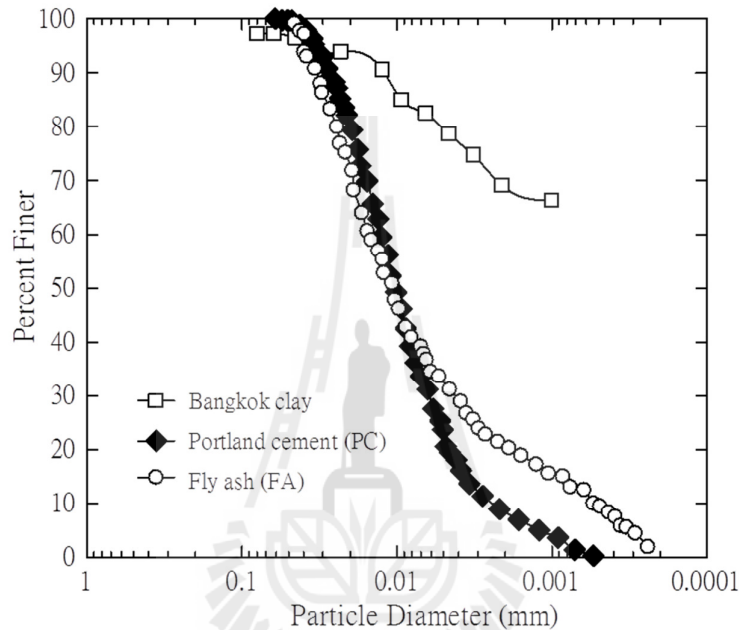
3.2 วัสดุและวิธีการทดสอบ

3.2.1 ดินตัวอย่าง

ดินเหนียวกรุงเทพที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้จากเขตบางกอกน้อย กรุงเทพมหานคร ที่ระดับความลึก 3 เมตร ดินเหนียวมีส่วนผสมของทรายร้อยละ 2 ดินตะกอนร้อยละ 39 และดินเหนียวร้อยละ 55 ปริมาณน้ำธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 78 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.64 ชีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 73 และ 31 ตามลำดับ ดินเหนียวนี้จำแนกเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง ตามระบบการจำแนกแบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System) ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึกประมาณ 1.0 เมตร จากผิวดิน

3.2.2 ปูนซีเมนต์และสารเพิ่มฟอง

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งและสารเพิ่มฟอง Darex AE4 ในการผสมกับดินเหนียว เพื่อทำดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา การกระจายขนาดของปูนซีเมนต์ที่หาจากการทดสอบ Laser particle size analysis และแสดงในรูปที่ 3.1 ความถ่วงจำเพาะและขนาดเฉลี่ยของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.15 และ 0.01 มิลลิเมตร (10 ไมครอน)



รูปที่ 3.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย

3.2.3 เถ้าลอย

เถ้าลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ผลการวิเคราะห์ด้วย X-ray fluorescence (XRF) พบว่าเถ้าลอยมี SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 รวมกันในปริมาณมากถึงร้อยละ 79.4 และจัดเป็น Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 การกระจายขนาดของเถ้าลอยแสดงในรูปที่ 3.1

3.2.4 การดำเนินการวิจัย

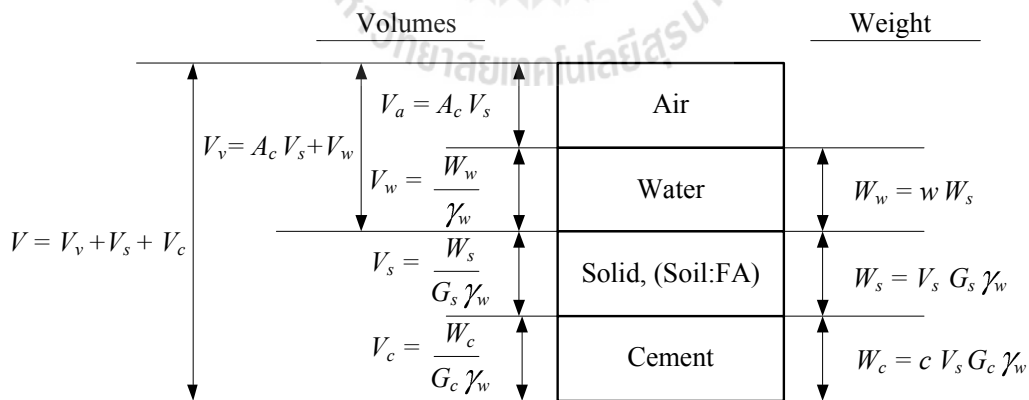
ดินเหนียวทดสอบถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อแยกเปลือกหอยและอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ออก และนำมาผสมเข้ากับเถ้าลอยในอัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ ปริมาณน้ำของดินผสมเถ้าลอยถูกปรับให้มีค่าระหว่าง 1 ถึง 3 เท่าของขีดจำกัดเหลว เพื่อทำการทดสอบการไหลและกำลังอัด ดินเหนียวผสมเถ้าลอยถูกนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 30

โดยน้ำหนักดินแห้ง หลังจากนั้น ก็จะถูกนำมาผสมเข้ากับสารเพิ่มฟอง ในปริมาณฟองอากาศ (A_c) ร้อยละ 10 ถึง 100 ของปริมาณดินแห้ง ดินเหนียว ใต้อลอย ปูนซีเมนต์ และสารเพิ่มฟองถูกนำมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 10 นาที

เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของอัตราส่วนช่องว่างต่อปูนซีเมนต์ (Void/cement ratio, V/C) ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์มวลเบา ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมตัวอย่างที่ค่า V/C เท่ากับ 50, 30 และ 20 รูปที่ 3.2 แสดงแผนภูมิสัดส่วนของส่วนผสมระหว่างดินเหนียว-ใต้อลอย-ปูนซีเมนต์-สารเพิ่มฟอง เพื่อให้เข้าใจถึงความหมายของพารามิเตอร์แต่ละตัว และขบวนการผลิตดินเหนียว-ใต้อลอย-ซีเมนต์มวลเบา สมการทำนายหน่วยน้ำหนักของดินเหนียว-ใต้อลอย-ปูนซีเมนต์มวลเบาแสดงได้ดังนี้

$$\gamma = \frac{\left(\frac{1-V_v}{V_c}\right) G_s \gamma_w (1+w) + G_c \gamma_w}{\frac{1}{V_c} + 1} \quad (3.1)$$

เมื่อ w คือปริมาณความชื้นเริ่มต้นของดินเหนียวก่อนเติมปูนซีเมนต์และฟองอากาศ G_c และ G_s คือความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และดินเหนียว ตามลำดับ γ_w คือหน่วยน้ำหนักของน้ำ (กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร) V_v คือปริมาตรของโพรงในส่วนผสม และ V_c คือปริมาตรของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม สมการนี้สร้างขึ้นจากสมมติฐานที่ว่าฟองอากาศทั้งหมดแทรกเข้าไปในโพรงของดินได้ทั้งหมด



รูปที่ 3.2 แผนภูมิสัดส่วนของส่วนผสมระหว่างดินเหนียว-ใต้อลอย-ปูนซีเมนต์-สารเพิ่มฟอง

หลังจากที่ทำการผสมส่วนผสมระหว่างดินเหนียว-ใต้อลอย-ปูนซีเมนต์-สารเพิ่มฟองเป็นเวลา 10 นาที ส่วนผสมดังกล่าวถูกนำไปใส่ในกรวยทดสอบการไหลและแบบหล่อทดสอบกำลังอัด

แกนเดี่ยว (ขนาด 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร) กรวยทดสอบการไหลมีความสูง 117 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานและยอดกรวยเท่ากับ 254 และ 117 มิลลิเมตร ตามลำดับ กรวยทดสอบจะตั้งอยู่บนโต๊ะทดสอบ ซึ่งสามารถเลื่อนขึ้นลงตามแนวดิ่งด้วยอัตรา 15 ครั้งต่อนาที กรวยทดสอบและโต๊ะทดสอบมีระยะห่างสูงสุดเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร ความสามารถในการไหลคำนวณได้ดังนี้

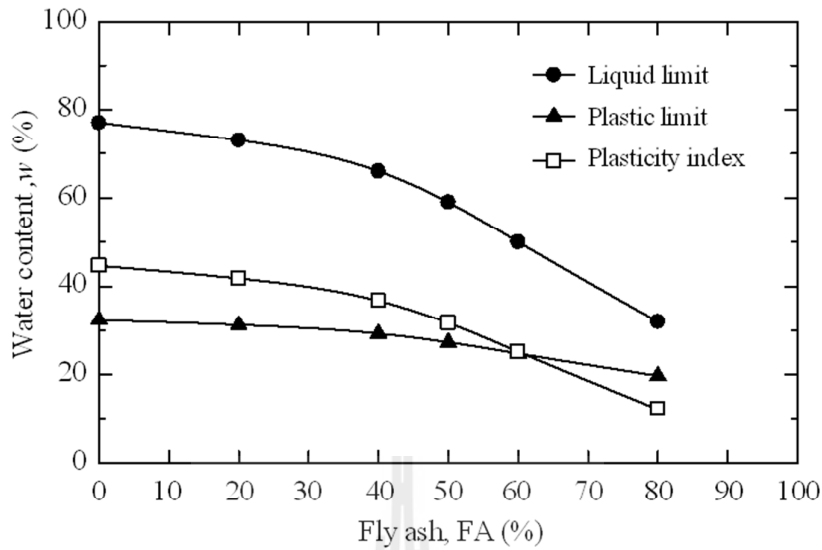
$$F = \frac{(D - 25.4)}{25.4} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของส่วนผสมระหว่างดินเหนียว-เถ้าลอย-ปูนซีเมนต์-สารเพิ่มฟอง ที่วัดใน 6 ทิศทาง ในหน่วยมิลลิเมตร

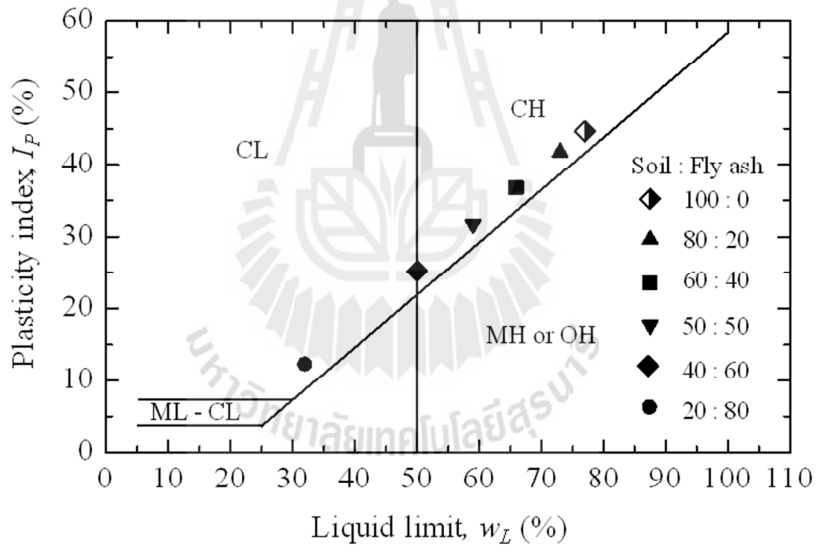
หลังจากบ่มตัวอย่างในแบบหล่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผู้วิจัยทำการถอดตัวอย่างทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยวออกจากแบบหล่อ ห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร และเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้น ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 22 องศาเซลเซียส เมื่อได้อายุบ่มครบ 7 วัน ผู้วิจัยทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยวของตัวอย่างด้วยอัตรา 1 มิลลิเมตรต่อนาที

3.3 ผลทดสอบ

คุณสมบัติพื้นฐานของส่วนผสมระหว่างดินเหนียวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.3 ชีตจำกัดเหลวมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย และเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่าเกินกว่าร้อยละ 50 ชีตจำกัดเหลวมีค่าลดลงอย่างมาก ชีตจำกัดพลาสติกแทบไม่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้นอัตราส่วนการแทนที่ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงดัชนีสภาพพลาสติก (I_p) และชีตจำกัดเหลว (w_L) ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนแทนที่ด้วยเถ้าลอยจึงคล้ายกัน และการลดลงอย่างฉับพลันของ I_p และ w_L เกิดขึ้นที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยค่าเดียวกัน อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่เกิดการลดลงของ I_p อย่างฉับพลันนี้เรียกว่าจุดคงที่ของเถ้าลอย (FA fixation point) (Horpibulsuk et al., 2014a) และมีค่าเท่ากับร้อยละ 50 สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ แม้ว่า w_L และ w_p ของดินเหนียวผสมเถ้าลอยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย แต่พิกัด (I_p , w_L) ยังคงอยู่เหนือ A-line ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และสามารถจำแนกได้เป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำถึงสูง ตามระบบการจำแนกแบบเอกภาพ



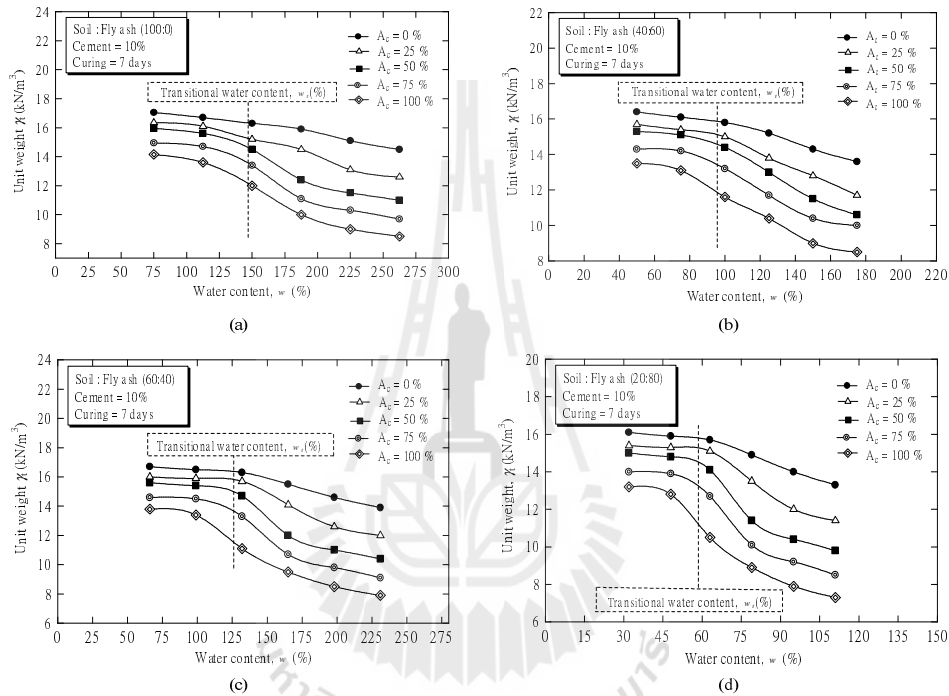
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติพื้นฐานและอัตราส่วนแทนที่ด้วยเถ้าลอย



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดพลาสติกและขีดจำกัดเหลว

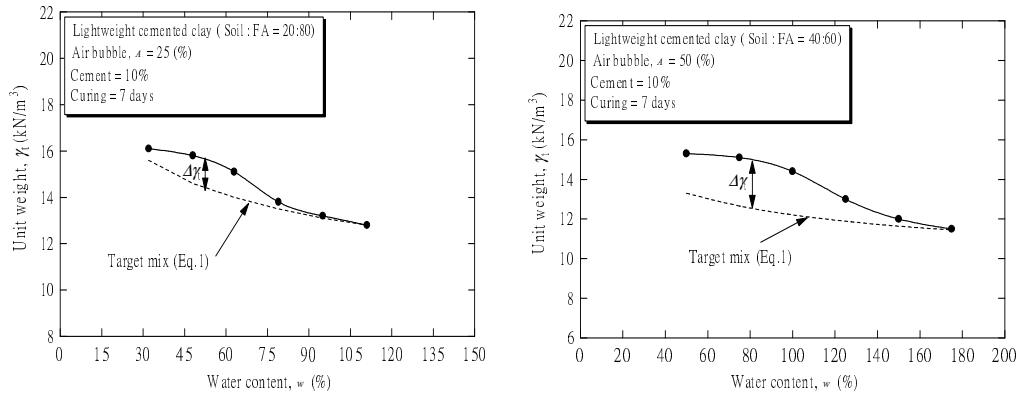
รูปที่ 3.5 แสดงอิทธิพลของปริมาณน้ำเริ่มต้น (ก่อนการผสมเข้ากับปูนซีเมนต์และโฟม) และปริมาณฟองอากาศ ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยมวลเบา ที่อัตราส่วนแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่างๆ สำหรับปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 สารเพิ่มฟองมีส่วนช่วยลดหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยมวลเบาอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณน้ำเริ่มต้นสูง ที่ปริมาณฟองอากาศค่าหนึ่ง หน่วยน้ำหนักมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม การลดลงของหน่วยน้ำหนักแทบไม่มีนัยสำคัญที่ปริมาณน้ำเริ่มต้นต่ำ ปริมาณน้ำที่ทำให้หน่วยน้ำหนัก

มีค่าลดลงอย่างฉับพลัน เรียกว่า “ปริมาณน้ำที่จุดเปลี่ยนผัน (Transitional water content, w_t)” ปริมาณน้ำที่จุดเปลี่ยนผันมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการที่ด้วยเถ้าลอย การเติมเถ้าลอยลงในดินเหนียวช่วยลดขีดจำกัดเหลวและดัชนีสภาพพลาสติกเนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุที่ไม่มีความเป็นพลาสติก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ดินเหนียวผสมเถ้าลอยมีความเป็นพลาสติกลดลงเมื่ออัตราส่วนการที่ด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ดังนั้น ความหนืดของดินเหนียวผสมเถ้าลอยจึงลดลง ดินเหนียวเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยสูงกว่าจะมีความสามารถในการไหลสูงกว่าดินเหนียวเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่ำ ในปริมาณน้ำเริ่มต้นที่เท่ากัน

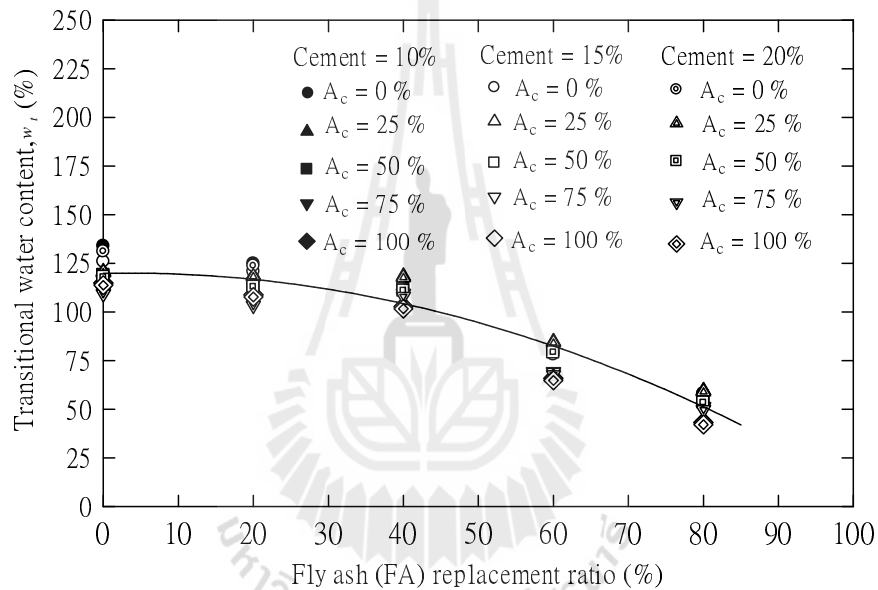


รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณน้ำเริ่มต้น

รูปที่ 3.6 แสดงผลเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักจริงของดินเหนียวซีเมนต์มวลเบา (วัดที่อายุปม 7 วัน) กับหน่วยน้ำหนักเป้าหมาย (คำนวณตามทฤษฎีด้วยสมการที่ (3.1)) ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักจริงมีค่าสูงกว่าหน่วยน้ำหนักเป้าหมาย ซึ่งบ่งบอกถึงการสูญเสียฟองอากาศในระหว่างที่ทำการผสมสารเพิ่มฟองเข้ากับดิน ความแตกต่างของหน่วยน้ำหนักจะพบมากในช่วงที่ปริมาณน้ำมีค่าต่ำ เนื่องจากความหนืดในดินมีค่าสูงและต้านไม่ให้ฟองอากาศเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Horpibulsuk et al., 2012b) การลดลงของ w_t ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณฟองอากาศต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.7



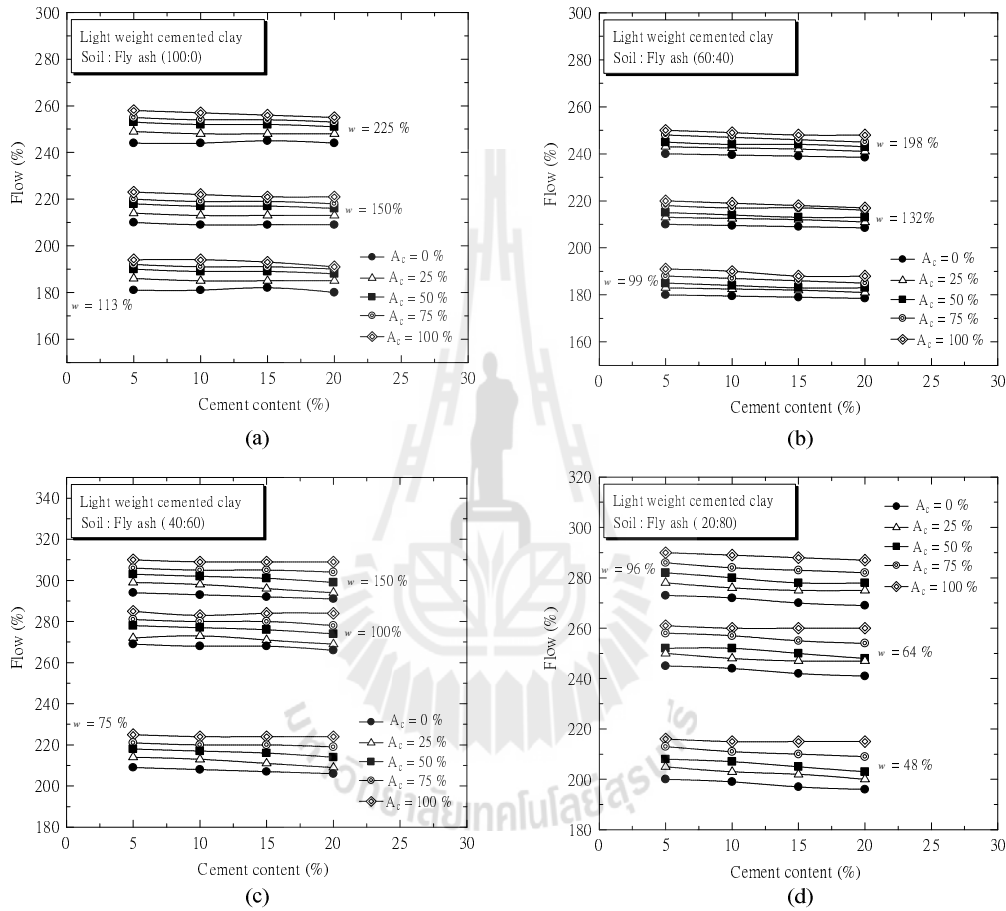
รูปที่ 3.6 ผลเปรียบเทียบระหว่างหน่วยน้ำหนักจริงและหน่วยน้ำหนักเป้าหมาย



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่จุดเปลี่ยนผันและอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย

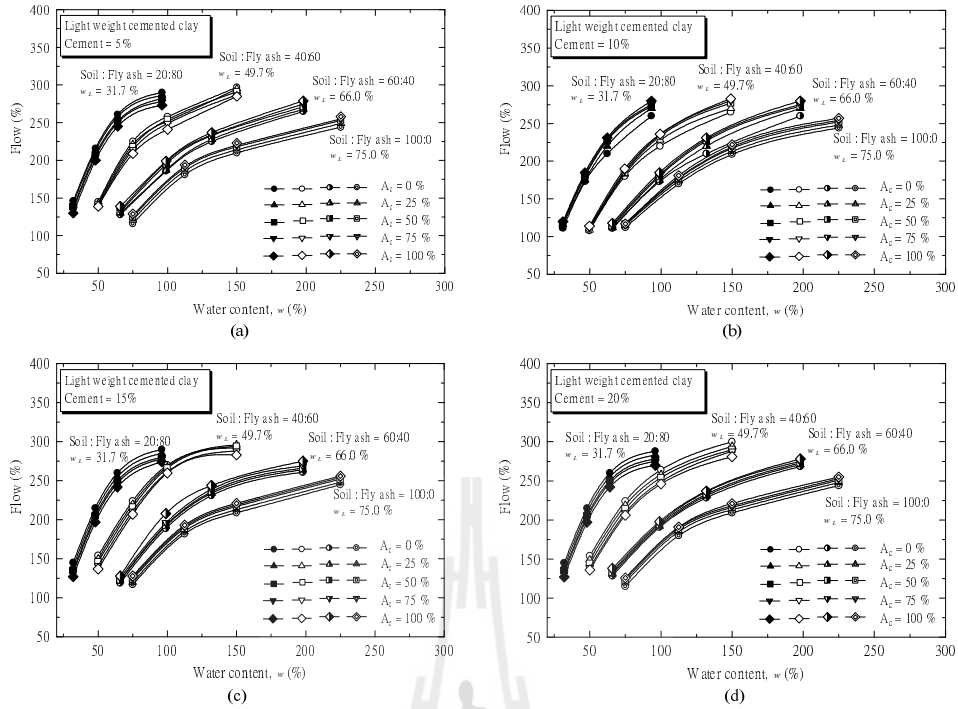
อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณฟองอากาศ ปริมาณน้ำ และอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ต่อความสามารถในการไหลของเพสต์ดินซีเมนต์มวลเบาแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 รูปที่ 3.8 แสดงว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ปริมาณน้ำ และปริมาณฟองอากาศ ค่าหนึ่ง ปริมาณปูนซีเมนต์ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการไหลอย่างมีนัยยะ อิทธิพลของปริมาณฟองอากาศต่อความสามารถในการไหลแทบจะเหมือนกันสำหรับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำและปริมาณปูนซีเมนต์ ดังจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการไหลตามการเพิ่มขึ้นปริมาณฟองอากาศมีสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน ปริมาณน้ำเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมความสามารถในการไหลที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยค่าหนึ่ง (ความสามารถในการไหลมีค่า

เพิ่มขึ้นอย่างมากตามการเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.8a ถึง 3.8d) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลและปริมาณน้ำมีลักษณะที่เหมือนกันสำหรับทุกปริมาณปูนซีเมนต์ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย และปริมาณฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 อัตราการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการไหลมีค่ามากในช่วงปริมาณน้ำต่ำ ในขณะที่ อัตราการเพิ่มขึ้นมีค่าต่ำที่ปริมาณน้ำสูง ในทางทฤษฎี ความสามารถในการไหลสูงสุดของเพลสดินซีเมนต์มวลเบาต้องมีค่าคงที่เท่ากับความสามารถในการไหลของน้ำ

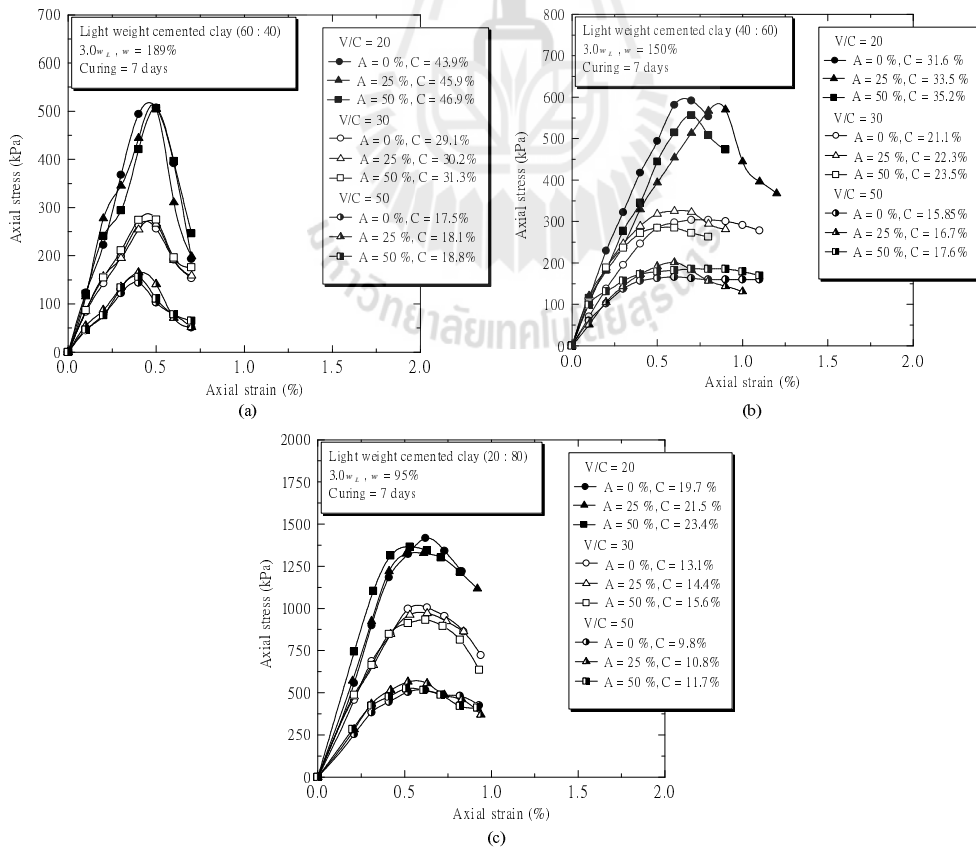


รูปที่ 3.8 ความสามารถในการไหลที่ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณฟองอากาศต่างๆ

Horpibulsuk et al. (2012b) ได้แสดงให้เห็นว่าการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณน้ำค่าหนึ่งแปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณฟองอากาศ และอิทธิพลร่วมระหว่างปูนซีเมนต์และปริมาณฟองอากาศสามารถแทนได้ด้วยพารามิเตอร์ V/C ดังนั้น พารามิเตอร์ V/C นี้ จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบาที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการไหลตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำ



รูปที่ 3.10 อิทธิพลของ V/C ต่อการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา

รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างที่มีปริมาณฟองอากาศและปริมาณปูนซีเมนต์ต่างกัน แต่มีค่า V/C เท่ากันสามค่า (20, 30 และ 50) สำหรับอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40, 60 และ 80 ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า V/C ควบคุมกำลังอัดที่ปริมาณน้ำค่าหนึ่ง และสามารถประยุกต์ใช้กับดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์ ที่ปริมาณเถ้าลอยต่างๆ เมื่อ V/C มีค่าลดลง กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวอย่างดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบาที่มีค่า V/C เท่ากัน จะมีพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดที่คล้ายกัน

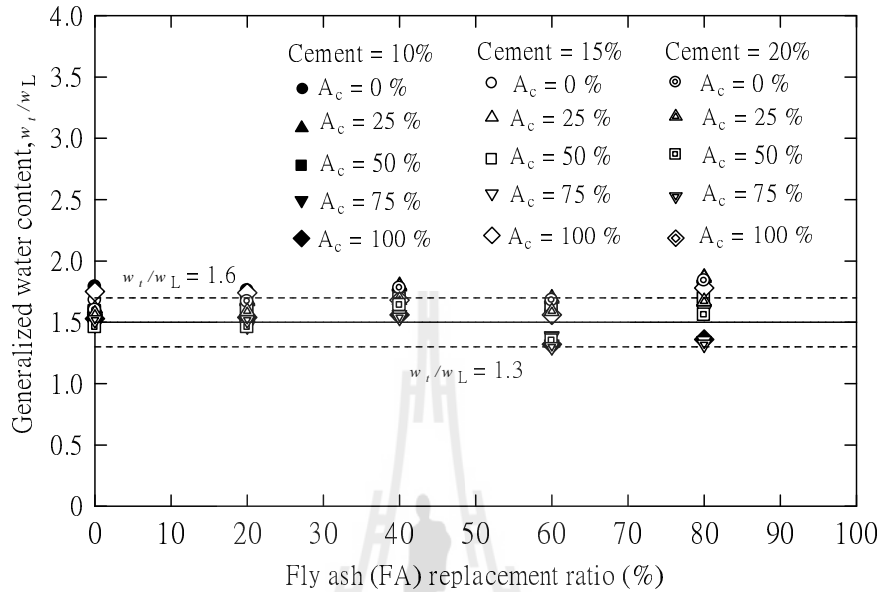
3.4 การวิเคราะห์ผลทดสอบ

แม้ว่าคุณสมบัติพื้นฐานของส่วนผสมระหว่างดินเหนียวและเถ้าลอยจะแปรผันตามอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย แต่ส่วนผสมดังกล่าวยังคงจำแนกเป็นดินเหนียวตามระบบเอกภาพ ดังปรากฏในรูปที่ 3.4 เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุไม่มีพลาสติก ดัชนีสภาพพลาสติกของส่วนผสมระหว่างดินเหนียวและเถ้าลอยจึงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวบ่มใหม่ขึ้นอยู่กับสถานะของความเค้นซึ่งสะท้อนได้จากค่าขีดจำกัดเหลว ดินเหนียวต่างชนิดกันที่ขีดจำกัดเหลวมีค่า suction (5–6 กิโลปาสคาล) ใกล้เคียงกัน (Russell and Mickle, 1970; Wroth and Wood, 1978; and Whyte, 1982) ภายใต้สถานะความเค้นนี้ ดินเหนียวส่วนใหญ่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำประมาณ 10^{-9} m/sec (Nagaraj et al., 1993; Arulrajah and Bo, 2008; and Horpibulsuk et al., 2007) และกำลังต้านทานแรงเฉือนประมาณ 1.7 – 2.5 kPa (Wroth and Wood, 1978; and Whyte, 1982) Nagaraj and Miura (2001) ได้แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวต่างชนิดกันที่สถานะความเค้นทั่วไป (Generalized stress state, w/w_L) เดียวกัน มีความเค้นประสิทธิผลและกำลังต้านทานแรงเฉือนใกล้เคียงกัน ทั้งความเค้นประสิทธิผลและกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม w/w_L ที่ลดลง (Horpibulsuk et al., 2011c) ดังนั้น w/w_L จึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบาในงานวิจัยนี้ Horpibulsuk et al. (2007 และ 2011c) ได้ประสบความสำเร็จในการใช้ w/w_L ในการทำนายคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวบ่มใหม่และดินเหนียวธรรมชาติ

ปริมาณน้ำที่จุดเปลี่ยนผัน (w_c) เป็นสถานะในการผสมที่ปริมาณน้ำและปริมาณอากาศมีอิทธิพลอย่างมากต่อการลดหน่วยน้ำหนัก ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.5 และ 3.6 ส่วนผสมระหว่างดินเหนียวและเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่างกันแต่มีปริมาณน้ำเท่ากันมีกำลังต้านทานแรงเฉือนและความหนืดต่างกัน (ส่วนผสมที่มีค่า w_L ต่ำกว่า จะมีกำลังต้านทานแรงเฉือนและความหนืดต่ำกว่า) ดังนั้น w_c จึงมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย (รูปที่ 3.7) ค่า w_c ที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่างๆ สามารถประมาณได้ด้วย w_L ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ความแปรปรวนของค่า w_c/w_L มีค่าอยู่ในช่วงแคบระหว่าง 1.3 และ 1.6 โดยมี

ค่าเฉลี่ยประมาณ 1.5 (ไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณฟองอากาศ) ดังนั้น ปริมาณน้ำที่สูงกว่า $1.5w_L$ จึงเป็นค่าแนะนำในการผลิตดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา สำหรับปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณฟองอากาศ และอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่างๆ



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่จุดแปรผันและอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย

ความสามารถในการไหลก็ถูกควบคุมด้วยกำลังต้านทานแรงเฉือนและความหนืดด้วยเช่นกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า w/w_L สามารถใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการไหลของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์ รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลและปริมาณน้ำเริ่มต้นของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยฟังก์ชันล็อกการิทึม ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการไหลพบว่าที่ปริมาณฟองอากาศค่าหนึ่ง ดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบาที่มีปริมาณฟองอากาศเท่ากัน แต่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่างกัน จะมีความสามารถในการไหลใกล้เคียงกัน เมื่อ w/w_L มีค่าเท่ากัน แม้ว่าปริมาณน้ำและปริมาณฟองอากาศจะมีค่าต่างกันก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ที่ขีดจำกัดเหลว ความสามารถในการไหลของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา ที่มีอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่างกันมีค่าประมาณร้อยละ 100-150 ขึ้นอยู่กับปริมาณฟองอากาศ ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลที่ปริมาณฟองอากาศค่าหนึ่งสามารถประมาณได้ ดังสมการดังนี้

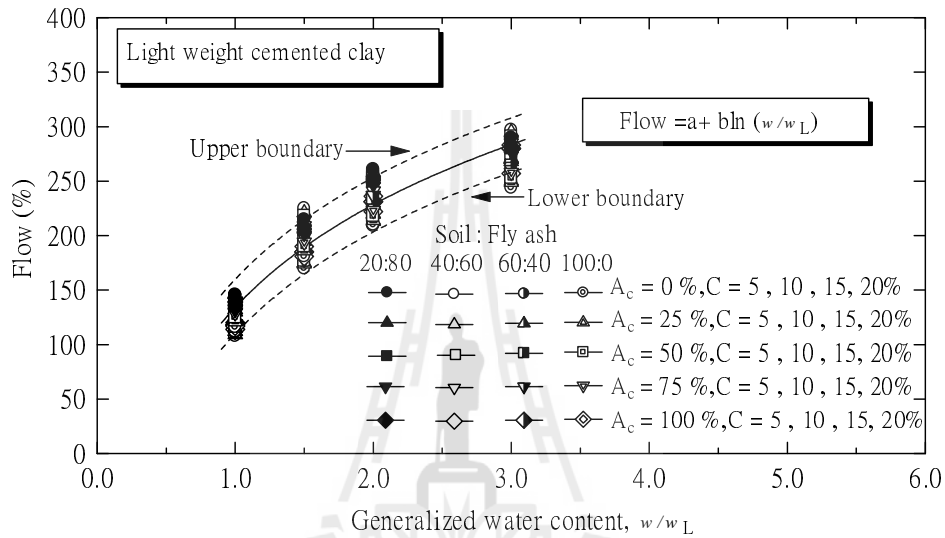
$$F = a + b \log \frac{w}{w_L} \quad (3.3)$$

เมื่อ F คือความสามารถในการไหล a และ b คือค่าคงที่ ซึ่งแปรผันตามปริมาณฟองอากาศ รูปที่ 3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า a และ b และปริมาณฟองอากาศ

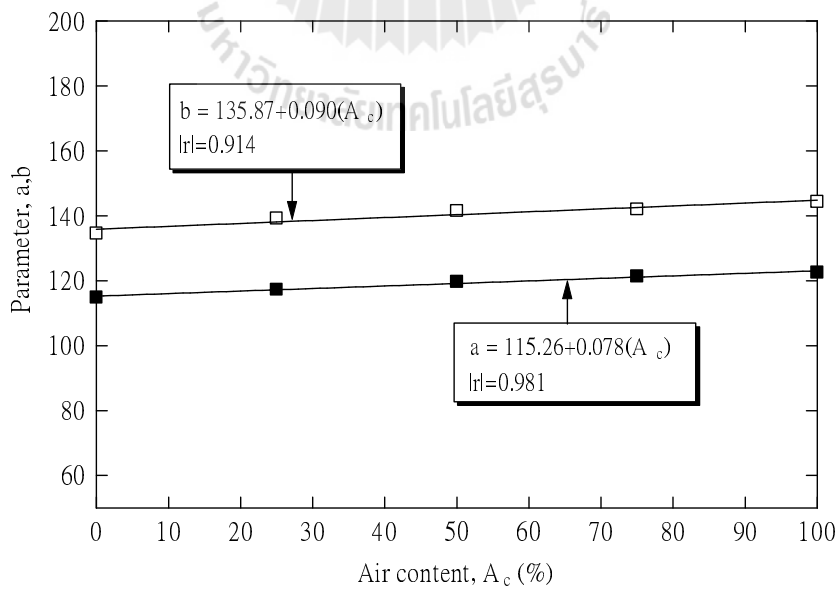
$$a = 115.26 + 0.078A_c \quad (3.4)$$

$$b = 135.87 + 0.090A_c \quad (3.5)$$

เมื่อ Degree of correlation มีค่าเกินกว่า 0.914

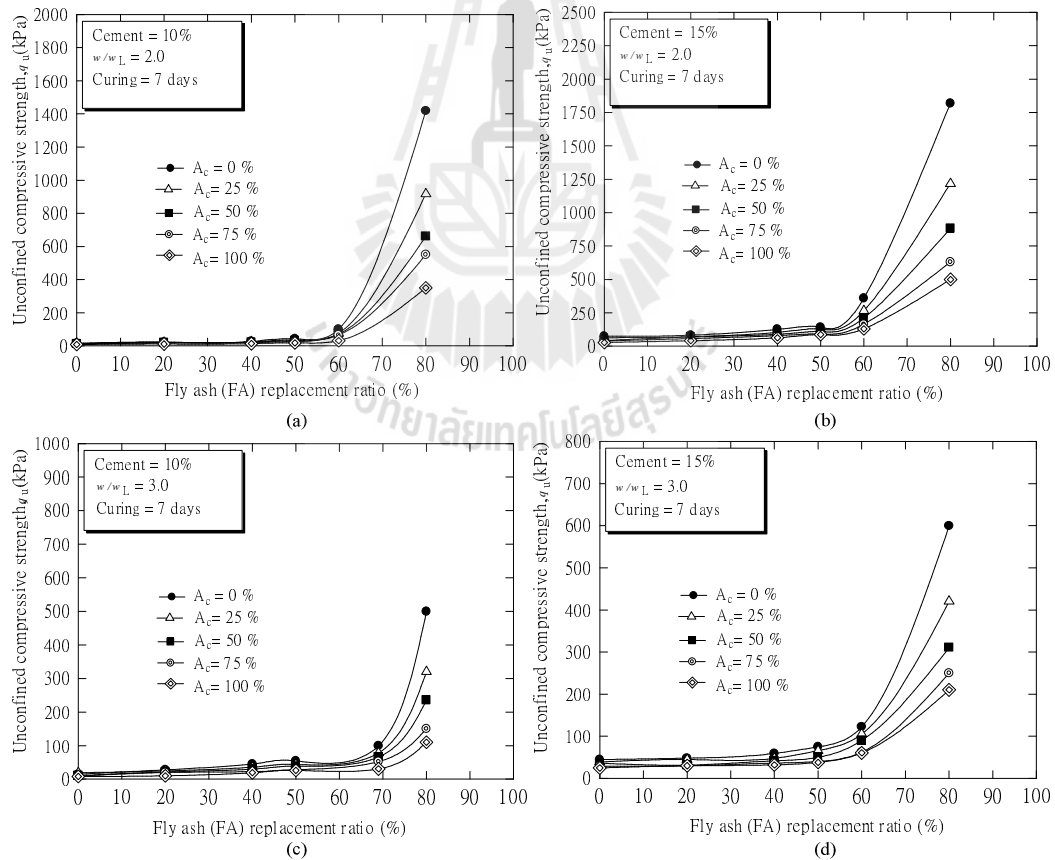


รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลกับ w/w_L



รูปที่ 3.13 ค่าของ a และ b ในพจน์ของปริมาณฟองอากาศ

ผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าสภาวะการทำงานได้คือปริมาณน้ำเริ่มต้นมากกว่า 1.5 เท่าของขีดจำกัดเหลว ดังนั้น การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนแทนที่ด้วยเถ้าลอยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาที่ w/w_L เท่ากับ 2 และ 3 ผลการศึกษาในอดีตพบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาค (แพปริคและแรงปฏิกริยาระหว่างอนุภาค) (Mitchell, 1993; Kasama et al., 2000; Kavvas and Amorosi, 2000; Rouainai and Muir Wood, 2000; Baudet and Stallebrass, 2004; Lee et al., 2004; Miura et al., 2001; Horpibulsuk et al., 2003, 2005, 2010, 2011a, 2012a; Suebsuk et al., 2010 and 2011) ดังนั้น กำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา จึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ซึ่งควบคุมค่าของ w_L อิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่อกำลังอัดสำหรับปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 15 แสดงในรูปที่ 3.14 กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออัตราส่วนการแทนที่มีค่าสูงกว่าร้อยละ 60 ผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของเถ้าลอยต่อสภาวะการทำงานได้ ความสามารถในการไหล และกำลังอัดเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่าเกินกว่าค่าคงที่ของเถ้าลอย

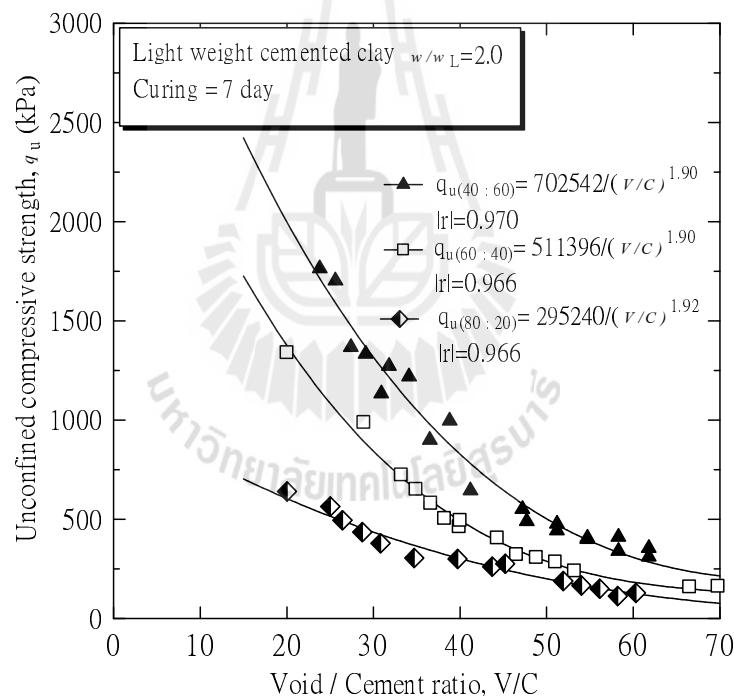


รูปที่ 3.14 อิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่อกำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา

รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (q_u) ที่อายุปม 28 วัน และ V/C ของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา สำหรับ $w/w_L = 2.0$ ที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยค่าหนึ่ง กำลังอัดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ V/C และสามารถแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$q_u = \frac{A}{(V/C)^B} \quad (3.6)$$

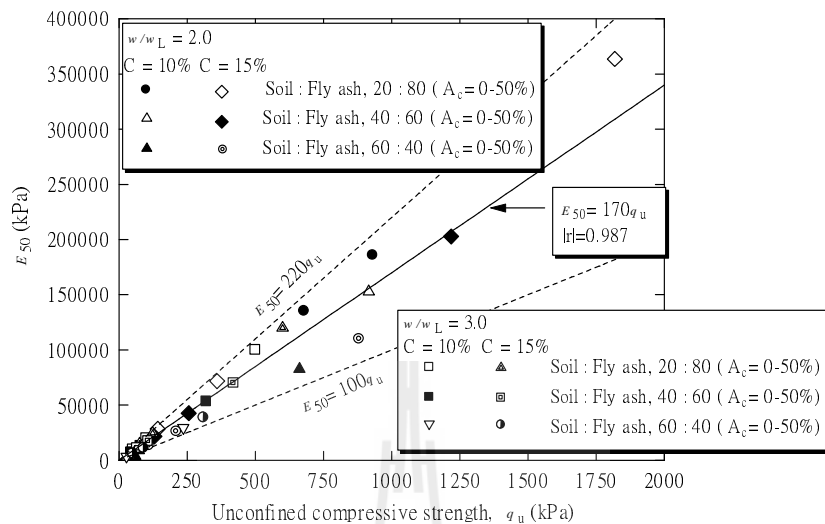
โดยที่ A และ B คือค่าคงที่ เมื่อไม่มีปริมาณฟองอากาศ ($A_c = 0$) สมการนี้จะกลายเป็นสมการเดียวกับที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2011a, b and 2012a) สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ รูปที่ 3.15 แสดงให้เห็นว่า A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย และ B มีค่าประมาณคงที่ (1.90 ถึง 19.2) ไม่แปรผันตามอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย สมการที่ (3.6) จะนำไปใช้กำหนดส่วนผสมของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา ได้ก็ต่อเมื่อทราบค่าของ A และ B ซึ่งประมาณจากการคำนวณกลับ (Back calculation) ของผลทดสอบอย่างน้อย 2 ชุดข้อมูล



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ V/C ที่ $w/w_L = 2.0$

ผลงานวิจัยนี้พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) ของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังอัด (รูปที่ 3.16) เนื่องจากพารามิเตอร์ทั้งสองต่างก็แปรผัน V/C E_{50} มีค่าประมาณ 100 ถึง 220 เท่าของ q_u สำหรับ A_c , C และ FA ต่างๆ ความสัมพันธ์ดังกล่าว

สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Horpibulsuk et al. (2012b) สำหรับดินเหนียวซีเมนต์มวลเบา (ไม่มีเถ้าลอย)



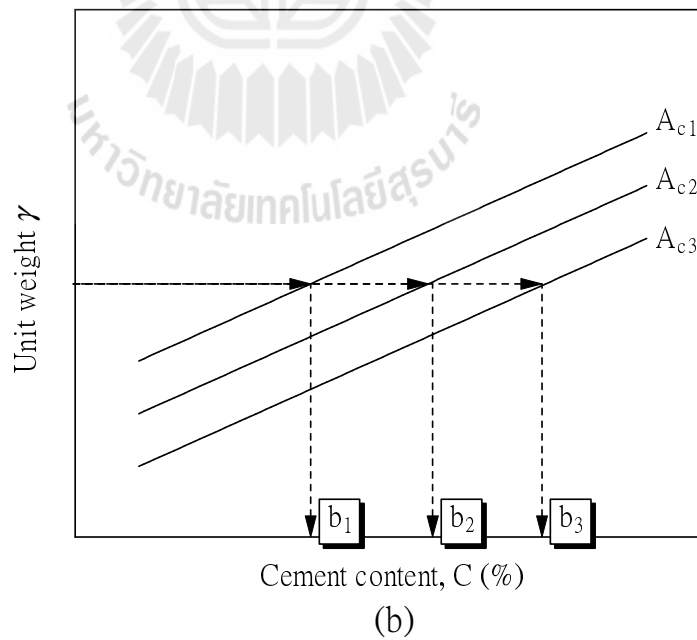
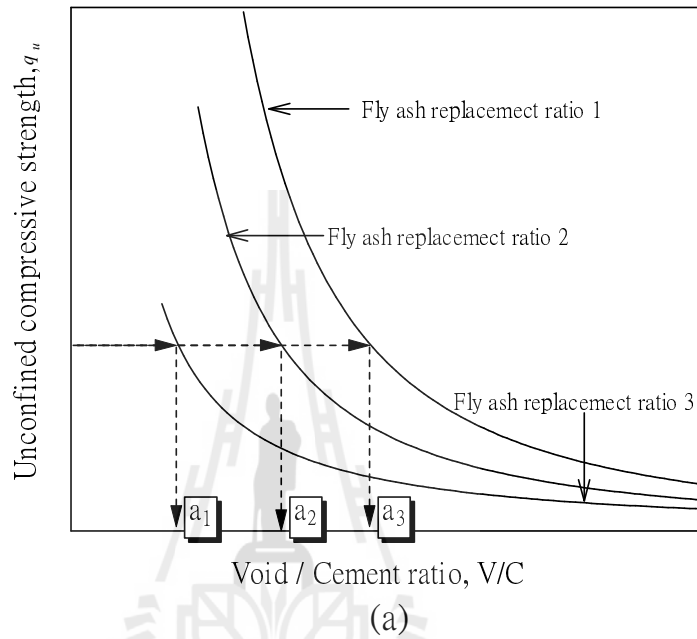
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} และกำลังอัด

3.5 ขั้นตอนการกำหนดส่วนผสมของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา

จากการวิเคราะห์ผลการศึกษาข้างต้น ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการออกแบบส่วนผสมสำหรับดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา เพื่อให้ได้หน่วยน้ำหนัก ความสามารถในการไหล และกำลังอัดตามต้องการ ดังนี้

1. ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่างๆ เพื่อหาอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่จุดเปลี่ยนผัน
2. เพิ่มน้ำในดินเหนียว-เถ้าลอยให้อยู่ในช่วงสภาวะใช้งาน ($w/w_L > 1.5$) และคำนวณหาความสามารถในการไหล โดยใช้สมการที่ (3.3) และ (3.5)
3. สำหรับปริมาณน้ำที่เลือกค่าหนึ่ง ทดสอบกำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา ที่มีอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณฟองอากาศต่างๆ เพื่อหาค่ากำลังอัดอย่างน้อย 2 ค่า
4. คำนวณหาค่า A และ B จากการคำนวณกลับ
5. สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ V/C สำหรับอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่างๆ ด้วยสมการที่ (3.7) ดังแสดงในรูปที่ 3.17a
6. จากกำลังอัดเป้าหมาย คำนวณหาค่า V/C ที่ต้องการที่ค่าอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่างๆ (จุด a_1 , a_2 , และ a_3 ตามลำดับ ในรูปที่ 3.17a)

7. สร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณปูนซีเมนต์ สำหรับปริมาณฟองอากาศต่างๆ ด้วยสมการที่ (3.1) (รูปที่ 3.17b)
8. จากหน่วยน้ำหนักเป้าหมาย หาค่าปริมาณฟองอากาศที่ต้องการที่ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เลือก (จุด b_1 , b_2 และ b_3 ตามลำดับ ในรูปที่ 3.17b)
9. ประมาณราคาค่าใช้จ่ายของแต่ละส่วนผสมเพื่อหาส่วนผสมที่มีต้นทุนเหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการกำหนดสัดส่วนผสมของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา

3.6 บทสรุป

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสถานะความเค้นทั่วไป (Generalized stress state, w/w_L) เป็นพารามิเตอร์หลักในการวิเคราะห์หน่วยน้ำหนัก ความสามารถในการไหล และกำลังอัด ของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา พารามิเตอร์อัตราส่วนโพรงต่อซีเมนต์ (V/C) สามารถรวมอิทธิพลของทั้งแฟปริดและแรงปฏิกริยาระหว่างอนุภาคดินเข้าด้วยกัน บทสรุปที่สำคัญของงานวิจัยแสดงได้ดังนี้

1. เถ้าลอยช่วยลดขีดจำกัดเหลวของดินเหนียว ส่งผลให้ความหนืดของดินเหนียวที่ปริมาณน้ำค่าหนึ่งลดลง ปริมาณน้ำที่สูงกว่า 1.5 เท่าของขีดจำกัดเหลว เป็นปริมาณน้ำที่แนะนำสำหรับการทำดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา
2. ความสามารถในการไหลของเพสต์ดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบาแปรผันตามความหนืดของดินเหนียว ซึ่งมีค่าลดลงตามการลดลงของขีดจำกัดเหลวและการเพิ่มขึ้นของพองอากาศ และแทบไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ ความสามารถในการไหลสามารถประมาณได้เมื่อทราบปริมาณพองอากาศและ w/w_L
3. ที่ปริมาณน้ำและอัตราส่วนแทนที่ด้วยเถ้าลอยค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบาเพิ่มขึ้นตามการลดลงของ V/C ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบาที่ปริมาณพองอากาศและปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ มีพฤติกรรมที่คล้ายกัน หาก V/C มีค่าเท่ากัน
4. การเติมเถ้าลอยในดินเหนียวจะมีอิทธิพลต่อสภาวะการทำงานได้ ความสามารถในการไหล และกำลังอัด ก็ต่อเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่าเกินกว่าจุดคงที่ของเถ้าลอย ซึ่งสามารถประมาณได้จากการทดสอบอัดเทอร์เปิร์ก
5. ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} และ q_u ไม่แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณน้ำ ปริมาณพองอากาศ และอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย E_{50} มีค่าประมาณ 100 ถึง 220 เท่าของ q_u
6. กำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ V/C ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีประโยชน์อย่างมากในการประมาณกำลัง ที่ปริมาณอากาศและปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ โดยอาศัยผลทดสอบเพียงจำนวนจำกัด นอกจากนี้ความสัมพันธ์ดังกล่าวยังสามารถใช้ในการประมาณปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต้องการภายใต้เงื่อนไขของปริมาณพองอากาศต่างๆ เพื่อให้ได้กำลังอัดเป้าหมาย
7. จากสมการกำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และความสามารถในการไหล ผู้วิจัยได้นำเสนอขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมสำหรับผลิตดินเหนียว-เถ้าลอย-ซีเมนต์มวลเบา ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรปฐพีและวิศวกรการทางในการกำหนดสัดส่วนผสมและประมาณคุณสมบัติทางวิศวกรรม

เอกสารอ้างอิง

- เกษม เพชรเกตุ และ พินิต ตังบุญเต็ม (2540). การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. *โยธาสาร*. หน้า 30 – 39.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร (2536). *คอนกรีตเทคโนโลยี*. กรุงเทพฯ: บริษัทคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชนัน (2546). ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์. *วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา*. หน้า 25-31.
- Arulrajah, A. and Bo, M.W. (2008), “Characteristics of Singapore marine clay at Changi”, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.26, No.4, pp.431-441.
- Arulrajah, A., Abdullah, A., Bo, M.W. and Bouazza, A. (2009), “Ground improvement techniques for railway embankments”, *Ground Improvement*, Vol.162, No.1, pp.3-14.
- Baudet, B., Stallebrass, S. (2004), “A constitutive model for structured clays”, *Geotechnique*, Vol.54, No.4, pp.269-278.
- Bell, F.G. (1976), “The influence of the mineral content of clay on their stabilization with cement”, *Association of Engineering Geologists*, pp. 267 – 278.
- Bin-Shafique, A., Rahman, K., Yaykiran, M. and Azfar, I. (2010), “The long term performance of two fly ash stabilized fine-grained soil subbases”, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.54, pp.666-672.
- Chai, J.C. and Pongsivasathit, S. (2010), “A method for predicting consolidation settlements of floating column improved clayey subsoil”, *Front. Archit. Civ. Eng.*, Vol.4, No.2, pp.241-251.
- Davidson, D.T. (1961), “Soil stabilization with Portland cement”, *Highway Research Board*, 200 p.
- Davidson, D.T., Pitre, G.L., Mateos, M., and Kalankamary, P.G. (1962), “Moisture-density, Moisture-strength and compaction characteristic of cement-treated soil mixture”, *Highway Research Board*, pp.42-63.
- Dechasakulsom, M. (2006), “Application of air foam stabilized soil for embankment reduction”, *Research and Development Report No. 231*, Bureau of Road Research and Development, Departments of Highways, Bangkok, Thailand (in Thai).
- Felt, E.J. (1955), “Factors influencing physical properties of soil-cement mixture”, *Highway Research Board*, pp.138-163.

- Grimer, F.L. and Krawczyk, J. (1963), "Relative between strength and age for soil – cement with particular reference to the prediction of later strength from earlier strength", *Magazine Concrete Research*, pp. 21 – 30.
- Hannesson, G., Kuder, K., Shogren, R. and Lehman, D. (2012), "The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.30, pp.161–168.
- Herzog, A. and Mitchell, J.K. (1963), "Reaction accompanying stabilization of clay with cement", *Highway Research Record*. pp.146 – 171.
- 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.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Bergado, D.T. (2004a), "Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. Vol.30, No.10, pp.1096–1105.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Koga, H. and Nagaraj, T.S. (2004b), "Analysis of strength development in deep mixing – a field study", *Ground Improvement*, Vol.8, No.2, pp.59–68.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. (2005), "Clay–water/cement ratio identity of cement admixed soft clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.2, pp.187–192.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R. (2006), "Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils : laboratory and field study", *Soils and Foundations*, Vol.46, No.3, pp.351–366.
- Horpibulsuk, S., Shibuya, S., Fuenkajorn, K, and Katkan, W. (2007), "Assessment of engineering properties of Bangkok clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.44, No.2, pp.173–187.
- Horpibulsuk, S., Liu, M.D., Liyanapathirana, D.S. and Suebsuk, J. (2010), "Behavior of cemented clay simulated via the theoretical framework of the Structured Cam Clay model", *Computers and Geotechnics*, Vol.37, pp.1–9.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Suddeepong, A. (2011a), "Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay", *Construction and Building Materials*, Vol.25, No.4, pp.1521–1531.

- Horpibulsuk, S., Rachan, R., Suddeepong, A. and Chinkulkijniwat, A. (2011b), "Strength development in cement admixed Bangkok clay: laboratory and field investigations", *Soils and Foundations*, Vol.51, No.2, pp.239–251.
- Horpibulsuk, S., Yangsukaseam, N., Chinkulkijniwat, A., and Du, Y.J. (2011c), "Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite", *Applied Clay Science*, Vol.52, pp.150–159.
- Horpibulsuk, S., Phojan, W., Chinkulkijniwat, A., and Liu, M.D. (2012a), "Strength development in blended cement admixed saline clay", *Applied Clay Science*, Vol.55, pp.44–52.
- Horpibulsuk, S., Suddeepong, A., Chinkulkijniwat, A., and Liu, M.D. (2012b), "Strength and compressibility of lightweight cemented clays", *Applied Clay Science*, Vol.69, pp.11–21.
- Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A., Cholphatsorn, A., Suebsuk, J., and Liu, M.D. (2012c), "Consolidation behavior of soil cement column improved ground", *Computers and Geotechnics*, Vol.43, pp.37–50.
- Horpibulsuk, S., Wijitchot, A., Neramitkornburee, A., Shen, S.L. (2014a), "Factors influencing unit weight and strength of lightweight cemented clay", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol.47, pp.101–108.
- Jamnongpipatkul, P., Dechasakulsom, M, and Sukolrat, J. (2009), "Application of air-foam stabilized soil for bridge-embankment transition zone in Thailand", *GeoHuman International Conference*, Geotechnical Special Publication No.190, pp.181–193.
- Kaniraj, S., Havanagi, V.G. (1999), "Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, pp.673–677.
- Kasama, K., Ochiai, H., and Yasufuku, N. (2000), "On the stress-strain behaviour of lightly cemented clay based on an extended critical state concept", *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.37–47.
- Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Honjo, Y. (1981), "Deep mixing method using cement hardening agent", *Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.721–724.
- Kavvasdas, M. and Amorosi, A. (2000), "A constitutive model for structured soils", *Géotechnique*, Vol.50, No.3, pp.263–273.
- Kitazume M, Yamazaki H., Tsuchida T. (2001), "Recent soil admixture stabilization techniques for port and harbor constructions in Japan – deep mixing method, premix method, light-

- weight method”, *Proceedings of International Seminar on Geotechnics in Kochi*, Kochi, Japan, pp.23–40.
- Kehew, EA. (1995), *Geology for Engineers and Environmental Scientists*, 2nd Ed. Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey, pp.295–302.
- Lee, K., Chan D., Lam K. (2004), “Constitutive model for cement treated clay in a critical state framework”, *Soils and Foundations*, Vol.44, No.3, pp.69–77.
- Metcalf, J.B. (1977), “Principle and application of cement and lime stabilization”, *Australian Road Research Board*, 20p.
- Miki, H., Mori, M., and Chida, S. (2003), “Trail embankment on soft ground using lightweight-foam-mixed in-situ surface soil”, *Proceedings of 22nd PIARC World Road Congress*, Durban.
- Mitchell, J.K. (1993), *Fundamentals of Soil Behavior*, New York: John Wiley&Sons, Inc.
- Mitchell, J.K. and Jack, E.K. (1966). “The fabric of soil – cement and its formation”, *Proceedings of 14th National Conference on Clay and Clay Minerals*, Vol.26. pp.279–305.
- 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.
- Moh, Z.C. (1965), “Reaction of soil minerals with cement and chemical”, *Highway Research Board*. pp.39–61.
- Nagaraj, T.S., Pandian, N.S. and Narasimha Raju, P.S.R. (1993), “Stress state–permeability relationships for fine–grained soils”, *Geotechnique*, Vol.43, No.2, pp.333–336.
- Nagaraj TS, and Miura N. (2001) *Soft Clay Behaviour – Analysis and Assessment*. A.A.Balkema, Netherlands.
- Prabakar, J., Dendorkar, N. and Morchhale, R.K. (2004), “Influence of fly ash on strength behavior of typical soils”, *Construction and Building Materials*, Vol.18, pp.263–267.
- Rouainia M., Muir Wood, D. (2000), “A kinematic hardening model for natural clays with loss of structure:”, *Géotechnique*, Vol.50, No.2, pp.153–164.
- Ruennkrairergsa, T. (1982), “Principal of Soil Stabilization”, *Group Training in Road Construction*, Bangkok, Thailand, pp.17–26.
- Russell, E.R. and Mickle, J.L. (1970), “Liquid limit values of soil moisture tension”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, Vol.96, pp.967–987.

- Suebsuk, J., Horpibulsuk, S. and Liu, M.D. (2010), "Modified Structured Cam Clay: A constitutive model for destructured, naturally structured and artificially structured clays", *Computers and Geotechnics*, Vol.37, pp.956–968.
- Suebsuk, J., Horpibulsuk, S. and Liu, M.D. (2011), "A critical state model for overconsolidated structured clays", *Computers and Geotechnics*, Vol.38, pp.648–658.
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S. and Shen, S.L. (2013a), "Strength development in clay–fly ash geopolymer", *Construction and Building Materials*, Vol.40, pp.566–574.
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S., Shen, S.L., Chindaprasirt, P., and Suksiripattanpong, C. (2013b). "Factors influencing strength development in clay–fly ash geopolymer", *Construction and Building Materials*, Vol.47, pp.1125–1136.
- Terrel, R. L., Barenberg, E. J., Michell, J. M., and Thomson, M. R. (1979), *Soil Stabilization in Pavement Structure a User's Manual Mixture Design Consideration*, Washington: Government Printing Office.
- Whyte, I.L. (1982), "Soil plasticity and strength – a new approach using extrusion", *Ground Engineering*, Vol.15, No.1, pp.16–24.
- Woods, L. and Yoder, E.J. (1952), "Soil – cement and construction practices in Geotechnical Engineering", *Highway Research Board*.
- Wroth, C.P. and Wood, D.W. (1978), "The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.2, pp.137–145.





ประวัตินักวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท (เกียรตินิยม) สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2539 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปฐพี จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ในปี พ.ศ. 2541 และวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเทคนิคธรณี จากมหาวิทยาลัย Saga ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2544

ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข เริ่มปฏิบัติงานที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สังกัดสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2545 ต่อมาได้รับการแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ตั้งแต่วันที่ 19 มีนาคม 2547 ได้รับการแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ตั้งแต่วันที่ 18 เมษายน 2550 และได้มีพระบรมราชโองการโปรดเกล้าฯ ให้ดำรงตำแหน่ง ศาสตราจารย์ ในสาขาวิศวกรรมโยธา ตั้งแต่วันที่ 30 มีนาคม 2553 ในตำแหน่งงานบริหาร ท่านดำรงตำแหน่งหัวหน้าหน่วยศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมโยธา หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และกรรมการสภาวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ท่านได้รับทุนสนับสนุนงานและทำวิจัยทั้งจากองค์กรภายในและภายนอกประเทศ มีบทความวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูลสากล (ISI/SCOPUS) 96 เรื่อง รวมบทความวิจัยทั้งในระดับนานาชาติและระดับประเทศมากกว่า 300 เรื่อง และมีผลงานประพันธ์หนังสือสามเล่ม “ปฐพีกลศาสตร์” “วิศวกรรมฐานราก” และ “เทคนิคการปรับปรุงพื้นดิน” งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ ลักษณะทางวิศวกรรมของดินตามธรรมชาติ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดิน และเทคนิคการปรับปรุงดิน

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข มีประสบการณ์การเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และเป็นผู้ทรงคุณวุฒิในการประเมินผลงานวิจัยและหนังสือให้กับหน่วยงานภาครัฐ และเอกชนทั้งในและต่างประเทศ นอกจากนี้ ท่านมีประสบการณ์ในการให้บริการวิชาการด้านวิศวกรรมโยธาอย่างต่อเนื่อง และได้รับใบประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับสามัญวิศวกร สาขาวิศวกรรมโยธา จากสภาวิศวกร