



รายงานการวิจัย

**ลักษณะทางวิศวกรรมของดินเหนียวโคราชบดอัดผสม
และไม่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอย
(Engineering Properties of Compacted Korat Clay With and
Without Cement and Fly Ash Stabilization)**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2550-2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2551

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จล่วงได้ ถ้าปราศจากการช่วยเหลือทางจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง การกล่าวขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้ครบทุกท่านเป็นไปได้ยาก ผู้เขียนต้องขอขมา มา ณ ที่นี้ด้วย หากมิได้กล่าวนามของท่าน

ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ณรงค์ อัครพัฒนากุล ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน ขอขอบคุณคุณยุทธนา รักษาชนม์ นักศึกษามหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สำหรับความช่วยเหลือในงานทดสอบและการวิเคราะห์ผลทดสอบ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการทดสอบการกระจายขนาดโพรงด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimetry และขอขอบคุณอาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ ที่ให้คำปรึกษาด้านคอนกรีตเทคโนโลยี

ท้ายสุด ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ปีงบประมาณ 2550

สุขสันต์ หอพิบูลสุข
หัวหน้าโครงการวิจัย
ธันวาคม 2551

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม อันได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ พลังงานการบดอัด อายุบ่ม อัตราส่วนการแทนที่ และความละเอียดของเถ้าลอย ต่อกำลังอัดและ โครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอย การวิเคราะห์กำลังอัดทำโดยอาศัยผลทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยว ส่วนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทำโดยอาศัยผลทดสอบที่ได้จากภาพถ่ายขยาย การวัดการกระจาย ขนาดโพรง และการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง จากการศึกษพบว่า ปูนซีเมนต์ช่วยปรับปรุง โครงสร้างของดิน (เพิ่มพันธะเชื่อมประสานและลดโพรง) ที่พลังงานการบดอัดและอายุบ่มหนึ่ง ปริมาณความชื้นเป็นตัวควบคุมแฟบrikและผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม โพรง ทั้งหมดมีปริมาตรน้อยที่สุด ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานเกิดมากที่สุดที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณ ความชื้นเหมาะสม ที่สภาวะนี้ กำลังอัดมีค่าสูงที่สุด โชนการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์แบ่งออกเป็นสาม โชน ได้แก่ โชนแอคทีฟ โชนล่าช้า และโชนลดกำลัง โชนแอคทีฟเป็นโชนที่เหมาะสมที่สุดในการ ปรับปรุง เนื่องจากผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ ในช่วงอายุบ่ม เริ่มต้น โพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) มีปริมาตรเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอนุภาคขนาดใหญ่ (เมื่อปูนซีเมนต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ) ขณะที่โพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) มีปริมาตรลดลงเนื่องจาก การแข็งตัวของซีเมนต์เจล เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานจะอุดโพรงขนาดใหญ่ ดังนั้น โพรงขนาดเล็กมีปริมาตรเพิ่มขึ้นและโพรงทั้งหมดมีปริมาตรลดลง ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุ บ่ม เถ้าลอยในดินซีเมนต์เป็นวัสดุเฉื่อย ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระจายกลุ่มดินซีเมนต์ที่เกิดการรวมตัวกัน เมื่อสัมผัสกับน้ำ การกระจายตัวจะทำให้ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานเกิดได้มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น การกระจายกลุ่มดินซีเมนต์แปรผันตามปริมาณเถ้าลอยและความละเอียด

ABSTRACT

This present research investigates the role of influential factors such as water content, cement content, compaction energy, curing time, replacement ratio, and fineness of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay. Its strength was examined by unconfined compression test and its microstructure (fabric and cementation bond) by a scanning electron microscope (SEM), mercury intrusion porosimetry (MIP), and thermal gravity (TG) analysis. The role of cement stabilization is to improve the soil structure (increase of inter-cluster cementation bonding and reduction of the pore space). For a particular compaction energy and curing time, the state of water content governs the fabric and the cementitious products. At the optimum water content (*OWC*), the total pore volume is the lowest. The maximum cementitious products are found at water content of about 1.2 *OWC*. At such condition, the strength is the highest. With increasing cement content, three zones of improvement are observed namely active, inert and decline zones. The active zone is the most effective for stabilization where the cementitious products increase with cement and fill up the pore space. In the short period of stabilization, the large pore (>0.1 micron) volume increases due to the input of coarser particles (unhydrated cement particles) while the small pore (<0.1 micron) volume decreases due to the solidification of the cement gel (hydrated cement). With time, the large pores are filled up with the cementitious products, hence the small pore volume increases and the total pore volume decreases. This leads to the strength development with time. Fly ash is an inert material dispersing clay-cement clusters when interacted with water. The dispersion increases the cementitious products, and hence strength, and is dependent upon replacement ratio and fineness.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ก
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงดินด้วยสารผสมเพิ่ม.....	4
2.2 ประเภทของดินซีเมนต์.....	5
2.3 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement).....	5
2.3.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์.....	5
2.3.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.4 ปฏิกริยาทางเคมีของดินซีเมนต์.....	7
2.5 โครงสร้างดินดินซีเมนต์.....	8
2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังของดินซีเมนต์.....	9
2.7 ความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดดินซีเมนต์.....	11
2.8 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลกระทบต่อกำลังของดินซีเมนต์.....	13
2.9 บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน.....	16
2.9.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน.....	16
2.9.2 การอัดตัวคายน้ำ.....	16
2.9.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน.....	18
2.10 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์.....	18

2.11 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure study of soil).....	20
บทที่ 3 การวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์แฉะลอยจากการพิจารณา	28
โครงสร้างจุลภาค	
3.1 บทนำ.....	28
3.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	29
3.2.1 ดินเหนียวตัวอย่าง.....	29
3.2.2 วัสดุเชื่อมประสาน.....	29
3.2.3 วิธีการทดสอบ.....	31
3.3 ผลทดสอบการบดอัดและแรงอัดแกนเดียว.....	34
3.4 การวิเคราะห์ด้าน โครงสร้างจุลภาค.....	39
3.4.1 ดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์.....	39
3.4.2 ดินเหนียวซีเมนต์.....	41
3.4.2.1 อิทธิพลของปริมาณความชื้น.....	41
3.4.2.2 อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์.....	43
3.4.2.3 อิทธิพลของอายุบ่ม.....	46
3.4.2.1 อิทธิพลของแฉะลอย.....	49
3.4.2.1.1 ภาพถ่ายกำลังขยาย.....	49
3.4.2.1.2 การกระจายขนาดโพรง.....	51
3.4.2.1.3 ผลทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง.....	53
3.5 การวิเคราะห์ผลทดสอบ.....	55
บทที่ 4 บทสรุป	58
เอกสารอ้างอิง	60
ประวัตินักวิจัย	67

สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 ออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.3 เครื่องมือที่ใช้สำหรับ โครงสร้างดิน.....	25
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปนดินตะกอน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย.....	30
3.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ.....	35
3.3 กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่างๆ.....	38
3.4 ปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ภายใต้พลังงานงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	43
3.5 ปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ที่บดอัดที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	45
3.6 ปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ 10% บดอัดที่ 1.20WC ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่มต่างๆ.....	47
3.7 Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่างๆ.....	54

สารบัญรูป

	หน้า
2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	8
2.2 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8	9
2.3 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 12.....	10
2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 16.....	10
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของทรายที่มีขนาดคละสม่ำเสมอ และดินตะกอนปนดินเหนียว.....	11
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง-กำลังอัด-ปริมาณความชื้นของดินลูกรังผสมซีเมนต์อัด.....	12
2.7 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Loamy Sand.....	13
2.8 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Medium Clay.....	13
2.9 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay.....	14
2.10 ปริมาณซีเมนต์กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้ตามชนิดของดิน.....	15
2.11 โชนการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์.....	15
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล.....	17
2.13 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพไร้พันธะเชื่อมประสาน.....	17
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์.....	18
2.15 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์.....	20
2.16 ชนิดของ โครงสร้างดินเหนียว.....	21
2.17 โครงสร้างดินที่ตะกอนที่เกิดจากผลกระทบของไฟฟ้าเคมี.....	22

2.18 การเข้าแทนที่และการรวมตัวของอนุภาคและช่องว่างชนิดต่างๆ.....	22
2.19 การกระจายของช่องว่างในเม็ดดิน.....	23
2.20 การจัดเรียงตัวของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน.....	24
2.21 โครงสร้างของดินเหนียว (a) ดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (b) ดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน.....	24
3.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย.....	30
3.2 ภาพถ่ายกำลังขยายของอนุภาคดิน.....	31
3.3 ภาพถ่ายกำลังขยายของปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย.....	31
3.4 กราฟการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอนที่พลังการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน.....	32
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดกับปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์.....	34
3.6 กราฟการบดอัดดินซีเมนต์เถ้าลอย.....	35
3.7 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอน.....	36
3.8 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวซีเมนต์.....	36
3.9 โชนการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์.....	37
3.10 อิทธิพลของพลังงานการบดอัดและอายุบ่มต่อการพัฒนากำลังอัด.....	38
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนการแทนที่ ที่อายุบ่มต่างๆ.....	39
3.12 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัดที่ <i>OWC</i> ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน.....	39
3.13 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัด ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	40
3.14 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ภายใต้พลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	41
3.15 การกระจายโพรงของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ภายใต้พลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	42
3.16 ภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์ที่บดอัดที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน (รูปที่ 4.13a-c สำหรับ โชนแอกทิฟ รูปที่ 4.13d-g สำหรับ โชนล่าช้า และรูปที่ 4.13h-j สำหรับ โชนลดกำลัง).....	45
3.17 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	46

3.18 ภาพถ่ายขยายของคินซีเมนต์ 10 % บคอัดที่ 1.2 <i>OWC</i> ด้วยพลังงานการบคอัดแบบสูง กว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่มต่างๆ.....	47
3.19 การกระจายขนาดโพรงของคินซีเมนต์ 10% บคอัดที่ 1.2 <i>OWC</i> ด้วยพลังงานการบคอัด แบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่มต่างๆ.....	48
3.20 ภาพถ่ายกำลังขยายของคินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 28 วัน.....	49
3.21 ภาพถ่ายกำลังขยายของคินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 60 วัน.....	50
3.22 ภาพถ่ายกำลังขยายของคินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่ม 28 วัน.....	50
3.23 ภาพถ่ายกำลังขยายของคินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่ม 60 วัน.....	51
3.24 การกระจายขนาดโพรงของคินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่มต่างๆ.....	52
3.25 การกระจายขนาดโพรงของคินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่มต่างๆ.....	53
3.26 การพัฒนากำลังอัดของคินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดกับเวลา.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา

ดินเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดและสภาพแวดล้อม ดินบางชนิดจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมก่อนนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรม เทคนิคในการปรับปรุงดินที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายเทคนิคหนึ่งคือการเติมวัสดุเชื่อมประสาน (Binder/Cementing agents) ซึ่งทำได้ง่ายและใช้เวลาสั้น วัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันคือ ปูนซีเมนต์ เพราะหาได้ง่ายในประเทศ แต่อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินในปริมาณมากต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง ถ้าสามารถลดปริมาณซีเมนต์ด้วยการทดแทนด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ที่มีราคาต่ำก็จะลดต้นทุนการก่อสร้างลงได้ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้กำลังอัดของดินซีเมนต์อยู่ในระดับที่ใช้งานได้ วัสดุปอซโซลานที่ยอมรับในงานโครงสร้างของประเทศไทย ได้แก่ เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ การประยุกต์ใช้เถ้าลอยในงานดินยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก ในขณะที่การใช้เถ้าลอยในงานโครงสร้างอาคารคอนกรีตนั้นเป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างกว้างขวาง งานวิจัยหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นถึงข้อดีและการประยุกต์ใช้งานของเถ้าลอย ได้แก่ ปริญา, 2547; สมนึกและคณะ, 2540; Owens, 1979; Jaturapitakkul, 1999; Chindaprasirt et al. 2001; Chindaprasirt et al. 2004; Thumasujarit and Tangtermsirikul, 2004; Ollivier et al., 1995; Mindess, 1996; Mitsui et al., 1994; Igarashi et al., 1996; Ollivier and Massat, 1996; และ Yang and Su, 2002)

การศึกษาทางด้านวิศวกรรมของดินซีเมนต์ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกล อันได้แก่ การทดสอบแรงอัดแกนเดียวและการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ เป็นต้น (Kawasaki et al., 1981; Kamon and Bergado, 1992; Kamaluddin and Balasubramaniam, 1995; Horpibulsuk et al., 1999, และ Nontananandh and Yupakorn, 2002) การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาเชิงมหภาคและไม่สามารถอธิบายเหตุผลของพฤติกรรมทางกลที่เกิดขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะการรับน้ำหนักและสถานะการผสม (เช่น ปริมาณความชื้น ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน และพลังงานการบดอัด เป็นต้น) ได้ ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจลักษณะ โครงสร้างจุลภาค ซึ่งเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2004b) ซึ่งคือพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) และแฟบริค (Fabric) (ลักษณะการจัดเรียงตัวของกลุ่มดิน) (ตามคำนิยามของ Mitchell, 1993) ความเข้าใจโครงสร้าง

จุลภาคจะนำมาซึ่งงานวิจัยประยุกต์ ตัวอย่างเช่น วิธีการทำนายพฤติกรรมทางวิศวกรรม (การอัดตัวคายน้ำและกำลังอัด) ของดินซีเมนต์ ที่เสนอโดย Horpibulsuk et al., 2003; Lorenzo and Bergado, 2004; และ Horpibulsuk et al., 2005 และ 2006 เป็นต้น

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดินซีเมนต์ที่อายุบ่มต่างๆ โดยอาศัยภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์ได้ถูกเริ่มในประเทศไทยโดย Nontananandh et al. (2005) จากการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์ไฮดรเจนทำให้โครงสร้างดินแน่นขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลง และกำลังอัดสูงขึ้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น สุขสันต์และคณะ (2549) และ Horpibulsuk et al. (2006) ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์แก้ลดยในเชิงปริมาณและคุณภาพ (Qualitative and quantitative study) โดยทำการทดสอบการกระจายขนาดโพรงด้วยปรอท (Mercury intrusion porosimeter test) และการส่องกราด (Scanning electron microscope) ของดินซีเมนต์แก้ลดยที่ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน 5 เปอร์เซ็นต์ที่อายุบ่มในช่วง 7 ถึง 90 วัน จากผลการทดสอบทั้งหมด พวกเขาได้อธิบายว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์แก้ลดยแปรผันตามโครงสร้างจุลภาค แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาของพวกเขายังขาดความสมบูรณ์ เนื่องจากยังขาดการทดสอบ X-ray diffraction และการทำ Thermal gravity analysis ซึ่งสามารถบอกความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานในรูปของผลิตภัณฑ์ทางเคมี (CSH) อีกทั้งยังขาดการพิจารณาตัวแปรควบคุมอีกหลายตัว ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์ ปริมาณความชื้น พลังงานการบดอัด อายุบ่ม ปริมาณสารเชื่อมประสาน และความละเอียดของแก้ลดย งานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์แก้ลดย โดยแปรผันตัวแปรควบคุม (อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์ ปริมาณความชื้น พลังงานการบดอัด อายุบ่ม ปริมาณสารเชื่อมประสาน และความละเอียดของแก้ลดย) การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์แก้ลดยทำโดยอาศัยการทดสอบ Scanning electron microscope, Porosimeter test และ Thermal gravity analysis

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษากำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของดินเหนียวซีเมนต์แก้ลดย เมื่อแปรผันตัวแปรควบคุม (อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์ ปริมาณความชื้น พลังงานการบดอัด อายุบ่ม ปริมาณสารเชื่อมประสาน และความละเอียดของแก้ลดย)

1.3 ประโยชน์ที่จะได้รับ

เมื่องานวิจัยแล้วเสร็จประโยชน์ที่จะได้รับเป็นดังนี้

1.3.1 เข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่อโครงสร้างจุลภาคและกำลังอัดของดินซีเมนต์

1.3.2 เข้าใจถึงอิทธิพลของแก้ลดยต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์แก้ลดย เพื่อใช้เป็นความรู้พื้นฐานในการวิเคราะห์ผลทดสอบทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์แก้ลดยในระดับสูงต่อไป และใช้

เป็นความรู้พื้นฐานในการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ ซึ่งสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาคมนาคมและสังคมที่มีคุณภาพ

1.3.3 ทราบถึงความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เก้าอี้ในการแทนที่ซีเมนต์ และทราบถึงอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสม อันนำมาซึ่งการลดต้นทุนการก่อสร้าง และการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือใช้ตามธรรมชาติ (เก้าอี้) ให้เกิดประยุคต์สูงสุดและลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุลและแข่งขันได้ และยุทธศาสตร์การบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงดินด้วยสารผสมเพิ่ม

การปรับปรุงดินโดยใช้สารผสมเพิ่ม (Additive) ได้เกิดขึ้นเป็นเวลากว่าหลายพันปีล่วงมาแล้ว ซึ่งปรากฏมีหลักฐานเกี่ยวกับการปรับปรุงถนนที่ใช้สัญจรตั้งแต่สมัยโรมัน โดยการใช้น้ำปูนขาว หรือสาร 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 ภายหลังสงครามครั้งที่ 2 ยุติ จึงมีการสร้างถนนด้วยดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางของถนนผิวคอนกรีต ใช้เป็นไหล่ทาง ที่จอดรถ พื้นคลังสินค้า รองพื้นอ่างเก็บน้ำ คู และคลองอีกด้วย

Davidson (1961) กล่าวถึงวิวัฒนาการของดินซีเมนต์ที่ได้กำเนิดขึ้นในโลกว่า กิจการรับเหมาก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับถนนในเมือง Sarasota รัฐ Florida ได้ก่อสร้างในปี 1915 น่าจะเป็นการเริ่มต้นครั้งแรกในโลกเกี่ยวกับถนนซีเมนต์ จากหลักฐานพบว่าถนน Oak ได้ถูกสร้างขึ้นจากการขุดเอาดิน Shell จากอ่าวมาผสมกับทราย และซีเมนต์ จากนั้นก็นำส่วนผสมที่ได้ไปเคลือบ และบดอัดด้วยรถบดไอน้ำที่มีน้ำหนัก 10 ตัน และยังได้อ้างถึงรายงานของ Mill (1935) ว่าในปี 1932 South California State Department ได้ทำการศึกษาส่วนผสมของดินและซีเมนต์ ภายใต้อการดูแลของ Dr. C.H. Moorefield ซึ่งได้รายงานผลการทดสอบว่า ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุที่สามารถเข้ากันได้ และนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางของถนนได้

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

สำหรับประเทศไทย การประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์เริ่มในปี พ.ศ. 2508 โดยกรมทางหลวงร่วมกับบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด ได้ทดลองนำดินผสมซีเมนต์ (ซีเมนต์ + ลูกกรง) มาใช้เป็นพื้นทางครั้งแรกในทางสายวารินชำราบ - เดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี โดยทำการทดลองระยะทางยาว 5 กิโลเมตร ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ กรมทางหลวงจึงได้ออกแบบถนนหลายสายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยใช้ซีเมนต์เป็นพื้นทาง (Soil Cement Base) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การได้ดี

2.2 ประเภทของดินซีเมนต์

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

2.2.1 Soil-Cement เป็นการนำดินและซีเมนต์มาผสมกันแล้วบดอัดโดยวิธีทางกล แล้วทำการบ่มให้แข็งตัว ซีเมนต์มีปริมาณสูงพอจนทำให้มีกำลังอัด หรือกำลังแบกทานตามที่กำหนด และมากพอที่จะทำให้ดินซีเมนต์กลายเป็นวัสดุก่อสร้างที่แข็งแรงทนทาน มีความชื้นเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีความหล่อลื่นเพียงพอในการบดอัดให้ได้ความแน่นสูงสุด

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

2.2.3 Cement Modified Silt-Clay Soil ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้น้อยมาก โดยมีจุดประสงค์ในการปรับปรุงคุณสมบัติการบวมตัวและหดตัวของดินที่อ่อนมาก หรือเป็นพื้นที่ดินเปียกน้ำ

2.2.4 Cement - Treated Soil Slurries and Grouts เป็นการนำเอาดินและซีเมนต์ผสมน้ำ ให้มีสภาพเหลวพอประมาณ ดินซีเมนต์ประเภทนี้จะใช้ในการบำรุงรักษาถนน ใช้ในการยา หรืออุดรอยร้าวที่เกิดขึ้น เช่น รอยร้าวในอุโมงค์ส่งน้ำ

2.2.5 Plastic Soil - Cement เป็นการนำดิน ซีเมนต์ และน้ำมาผสมเข้าด้วยกันให้มีสภาพเหลวมาก นิยมใช้ในงานคาดปูลงบนพื้นที่ที่มีความลาดเอียง เช่น การคาดท้องคลองชลประทาน การคาดผิวหน้าคันทาง

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 ศิลาแลง (Laterite) เมื่อทำการเผาวัสดุดังกล่าวทั้งหมดรวมกันในหม้อเผา ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์ และออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , NaO , TiO_2 , P_2O_5 ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.1 ออกไซด์หลักจะรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) และเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล, 2536)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0.5-0.6
ออกไซด์รอง	
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, 2536)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	3CaO . SiO ₂	C ₃ S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	2CaO . SiO ₂	C ₂ S
ไตรแคลเซียม อลูมินา	3CaO . Al ₂ O ₃	C ₃ A
เตตราแคลเซียม 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 ตราพญานาคสีเขียว

2.3.2.2 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับการใช้งานที่เกิดความร้อนปานกลาง 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) ใต้ถูกพัฒนาครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ ในประเทศไทยไม่มีการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ปัจจุบันนี้ถูกทดแทนโดยการใช้พอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมกับเถ้าลอย

2.3.2.5 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีไตรแคลเซียม (C_3A) ต่ำ จึงทำให้มีการพัฒนากำลังอัดซ้ำ ทำให้เกิดความร้อนต่ำกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทธรรมดา ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราช้างฟ้า และตราปลาฉลาม

2.4 ปฏิกริยาทางเคมีของดินซีเมนต์

เมื่อผสมซีเมนต์เข้ากับเม็ดดินและน้ำ 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 ซึ่งเกิดจากปฏิกริยาเคมีระหว่างซีเมนต์กับซิลิกาและอลูมินา ปฏิกริยานี้จะเกิดขึ้นตามผิวของเม็ดดินโดยจะเกาะอยู่รอบๆ เม็ดดิน ทำให้เม็ดดินเชื่อมกัน เป็นผลให้เม็ดดินมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีกำลังสูงขึ้น (Lame, et al. 1959)

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

Moh (1965) พบว่าปฏิกริยาของดินซีเมนต์สามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



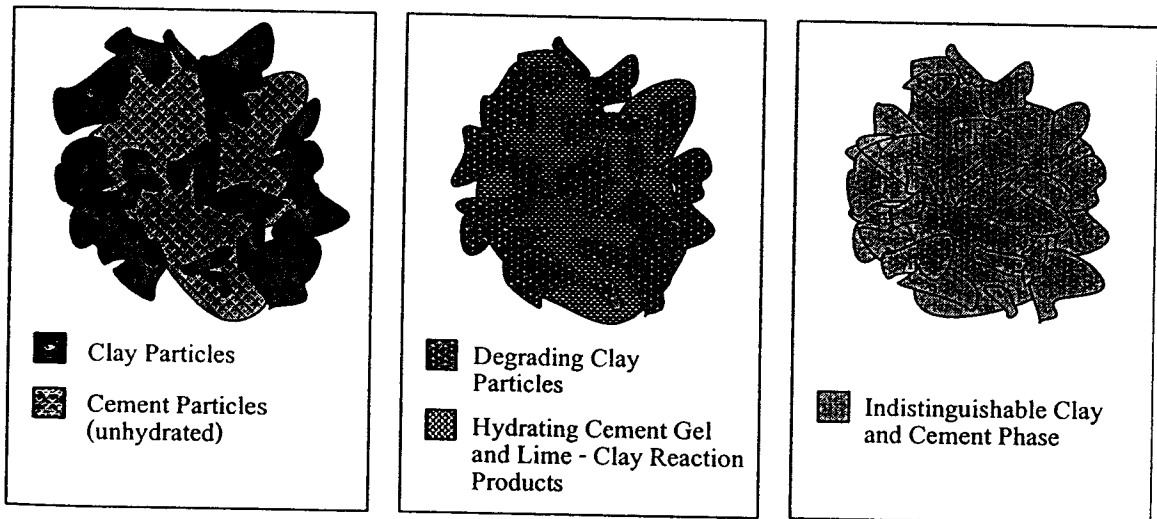
Michell and Jack (1966) อธิบายว่า เมื่อผสมซีเมนต์ลงไปดิน จะเกิดปฏิกริยาและได้สารสุดท้ายเป็น CSH ปฏิกริยาช่วงสั้นๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อผสมซีเมนต์ลงไปดิน ประกอบด้วย การแทนที่หรือการแลกเปลี่ยน Valency โดยการดูดซับ Cation ของแคลเซียม และเม็ดดินจะดูดซับเอา $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เข้าไว้เกิดสารประกอบที่ทำให้มีการเชื่อมยึดติดกันของเม็ดดิน

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

เกษม และพินิต (2536) ได้ศึกษาพบว่า ดินเหนียวปกติเป็นดินที่มีแร่ซิลิกาผสมอยู่สูง ซึ่งแร่เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ได้ดี ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งทำให้ดินเปลี่ยนคุณสมบัติไป สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่ม และการยุบตัวน้อยลง

2.5 โครงสร้างดินซีเมนต์

Michell and Jack (1966) ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินหลังจากผสมปูนซีเมนต์แล้ว โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบและโครงสร้างดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.1 ภายใต้การบดอัด ปูนซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน อนุภาคของปูนซีเมนต์จะผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1(ก) ภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์เริ่มทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน และ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาที่มีอยู่ในดิน เป็นผลให้เกิดวัสดุเชื่อมประสาน จากนั้นซีเมนต์เจลและวัสดุเชื่อมประสานจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดินดังรูปที่ 2.1(ข) ภายใต้การบ่มระยะยาว การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ มีผลทำให้ซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วดังรูปที่ 2.1(ค) เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น



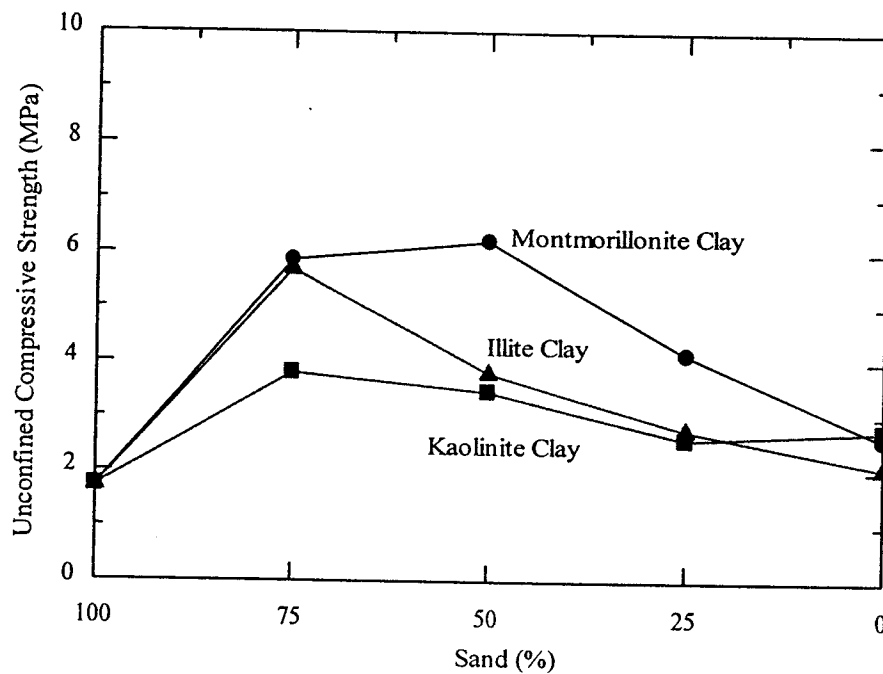
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Michell และ Jack ,1966)

2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังของดินซีเมนต์

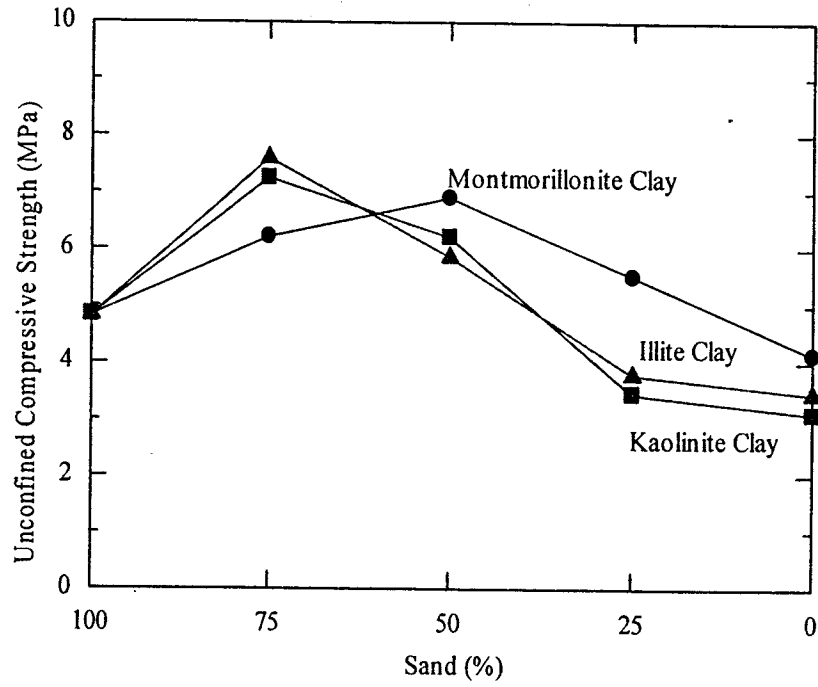
Davidson et al. (1962) ได้ทำการทดลองโดยใช้ทรายผสมดินเหนียวในอัตราส่วนทรายต่อดินเหนียว 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ดินเหนียวที่ใช้เป็นพวก Kaolinite, Illite และ Montmorillonite ดังแสดงผลในรูปที่ 2.2 , 2.3 และ 2.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณดินเหนียวที่มากเกินไป (เกินกว่าร้อยละ 25) เมื่อผสมกับดินจำพวกที่ไม่มีคุณสมบัติเหนียว (Cohesionless Soil) จะทำให้

กำลังของดินซีเมนต์ลดลงอย่างเด่นชัด อีกทั้งที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8 และปริมาณสัดส่วนของทรายต่อดินเหนียว 75:25 จะให้การรับกำลังสูงสุด เพราะว่าที่ปริมาณสัดส่วนนี้เป็นสัดส่วนผสมที่กลมกลืนกัน ก่อให้เกิดส่วนผสมที่มีขนาดละเอียด (Well Grade) ทำให้ได้ค่าความแน่นสูงสุด จึงส่งผลให้ได้กำลังสูงสุดด้วย

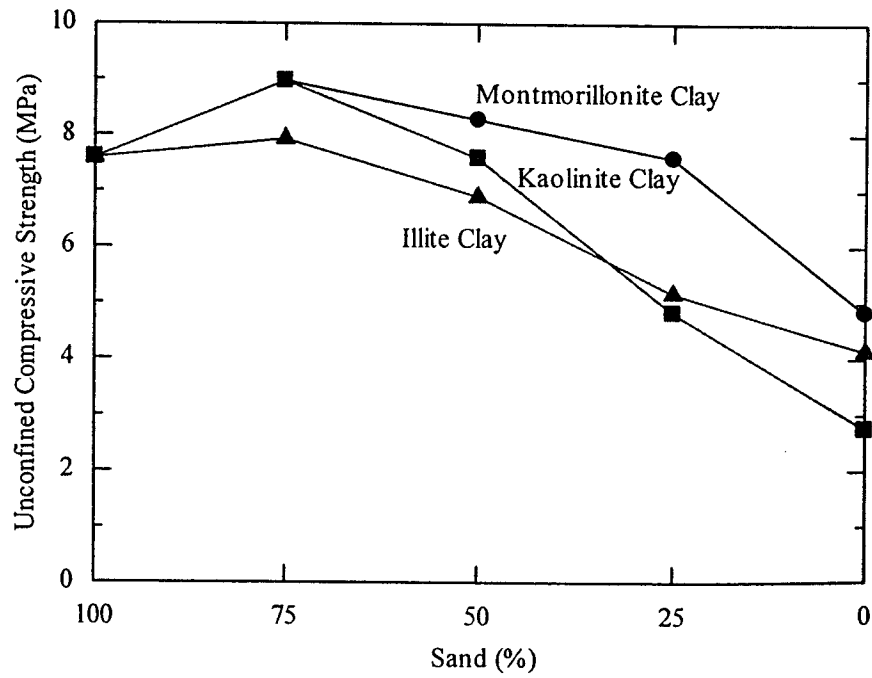
Grimer และ Krawczyk (1963) ได้กล่าวว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุ (log scale) ของดินซีเมนต์ที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 10 ดังรูปที่ 2.5 พบว่ากำลังของทรายที่มีขนาดละเอียดสม่ำเสมอ (Uniform Sand) ที่ไม่มีดินเหนียวผสม จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงจนถึงอายุการบ่ม 28 วัน หลังจากนั้นมีการเพิ่มขึ้นของกำลัง เชื่อว่าจะมาจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์



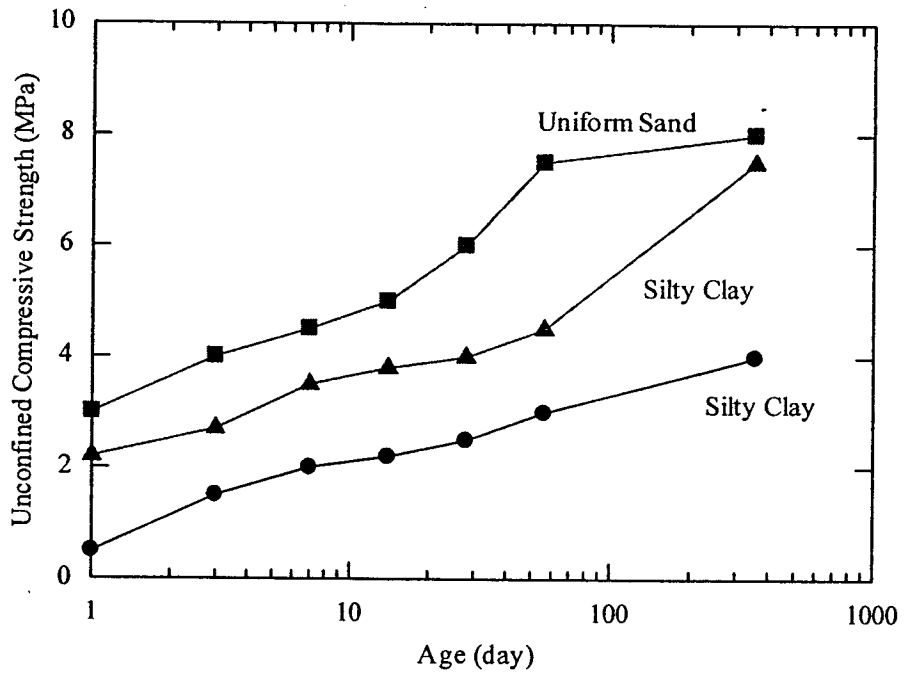
รูปที่ 2.2 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8 (Davidson, 1962)



รูปที่ 2.3 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 12 (Davidson, 1962)



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 16 (Davidson, 1962)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของทรายที่มีขนาดคละสม่ำเสมอ และดินตะกอนปนดินเหนียว (Grimer และ Krawczyk ,1963)

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

2.7 ความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดดินซีเมนต์

การบดอัด คือ การเพิ่มความแน่นของดิน โดยการไล่อากาศออกจากมวลดินด้วยกระบวนการทางกล การบดอัดทำให้อากาศที่มีอยู่ในมวลดินถูกขับออกไป เมื่อดินที่มีขนาดเล็กจะทำหน้าที่สอดแทรกตามช่องว่างต่างๆ ของมวลดินในลักษณะเรียงตัวอัดแน่น ปริมาณความชื้นจะมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของมวลดิน ในช่วงแรกความหนาแน่นจะสูงขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่ม จนถึงจุดที่ปริมาณความชื้นทำให้ความหนาแน่นมีค่าสูงสุด เรียกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum water content, OWC) จากนั้นค่าความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะเต็มไปด้วยน้ำ เมื่อดินที่มีขนาดเล็กไม่สามารถเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้ ความหนาแน่นของมวลดินจึงลดลง

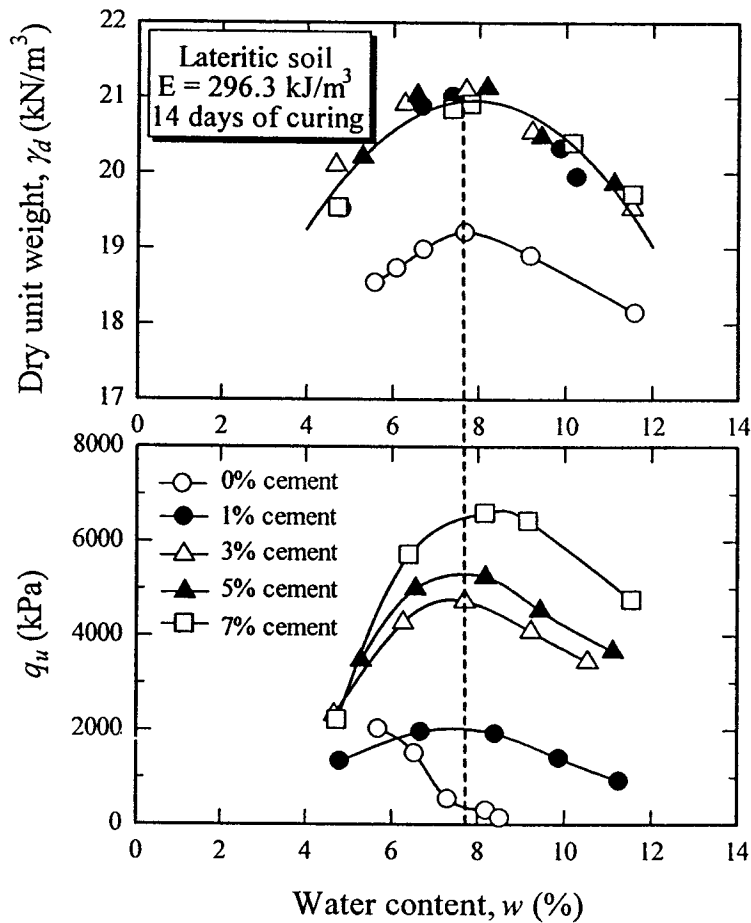
Felt (1955) ได้ทดลองและสรุปผลว่า การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและปริมาณความชื้นมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์ ดินทรายผสมซีเมนต์ควรทำการบดอัดทางด้านข้างของ OWC

เล็กน้อยจึงได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ส่วนดินเหนียวและดินตะกอนควรบดอัดให้อยู่ทางด้านเปียกของ OWC เล็กน้อยจึงได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด

นอกจากนี้ Felt (1955) ยังได้ทำการทดลองบดอัดดินด้วยวิธีมาตรฐาน และวิธีสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASSHTO โดยใช้ปริมาณซีเมนต์คงที่ การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม ที่ปริมาณความชื้นต่ำ ความหนาแน่นจะไม่มีผลต่อกำลังอัด

Ruenkrairergsa (1982) พบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมไม่เพียงแต่จะทำให้ดินซีเมนต์มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่านั้น แต่ยังทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไปอย่างสมบูรณ์อีกด้วย และความหนาแน่นแห้งสูงสุดอาจจะไม่ได้ค่ากำลังอัดสูงสุดสำหรับดินซีเมนต์เสมอไป

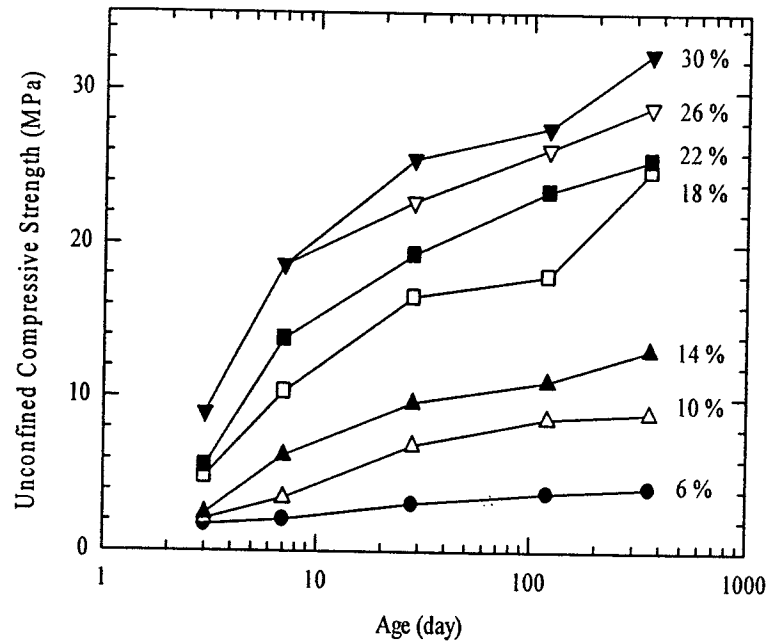
Horpibulsuk et al. (2006b) ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัดมีค่าใกล้เคียงกับของดินเม็ดหยาบไม่ผสมซีเมนต์บดอัด ในขณะที่หน่วยน้ำหนักแห้งของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัดมีค่าสูงกว่า แต่ไม่แปรผันตามปริมาณซีเมนต์ กำลังอัดของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัดมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม สำหรับทุกอายุบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.6



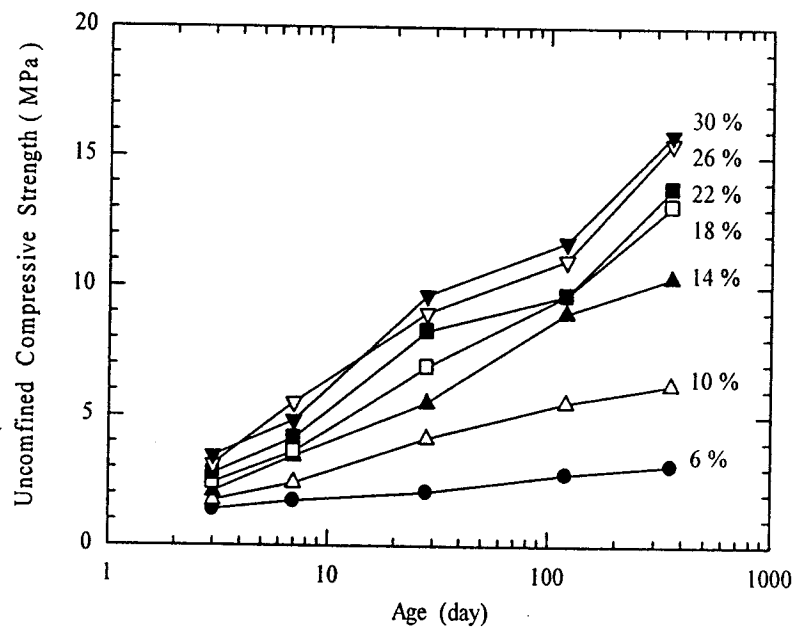
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง-กำลังอัด-ปริมาณความชื้นของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด (Horpibulsuk et al., 2006b)

2.8 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์

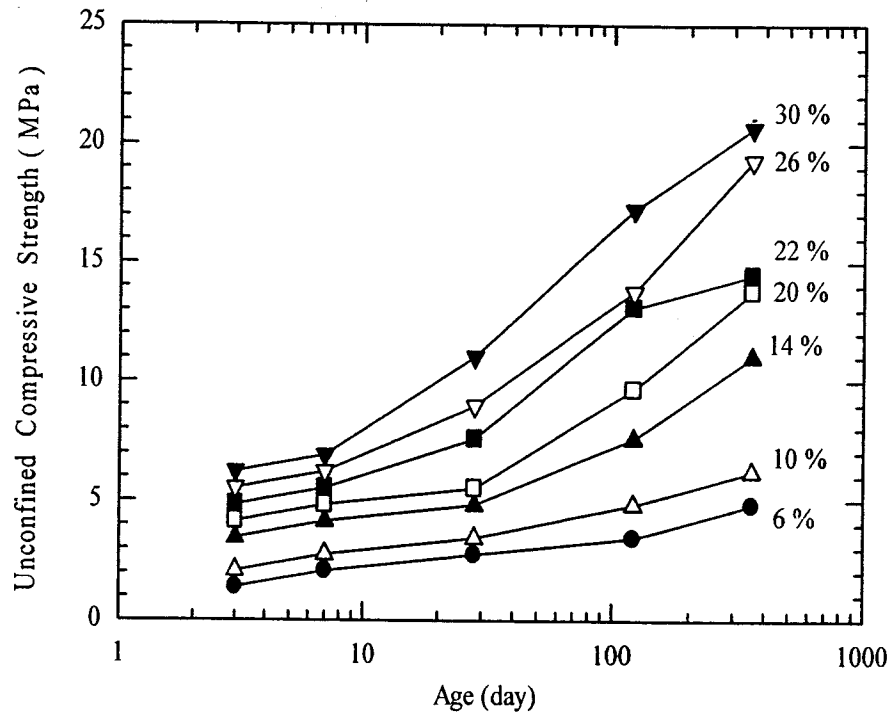
Felt (1955) ได้นำดินสามชนิด คือ Silty Loam, Sandy Loam และ Silty Clay มาใช้ในการทดลองผสมซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.7 ถึง 2.9 สรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ นอกจากนี้ ดินเม็ดหยาบจะมีกำลังอัดที่สูงกว่าดินเม็ดละเอียด



รูปที่ 2.7 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Loamy Sand (Felt, 1965)



รูปที่ 2.8 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Medium Clay (Felt, 1965)



รูปที่ 2.9 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay (Felt, 1965)

Ruenkraairergsa (1982) อธิบายว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นคุณสมบัติของดินซีเมนต์จะดีขึ้นด้วย และอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของดินด้วย ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเม็ดดิน (Cohesion) ของดินซีเมนต์ของดินเม็ดหยาบจะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าดินซีเมนต์ของดินเม็ดละเอียด

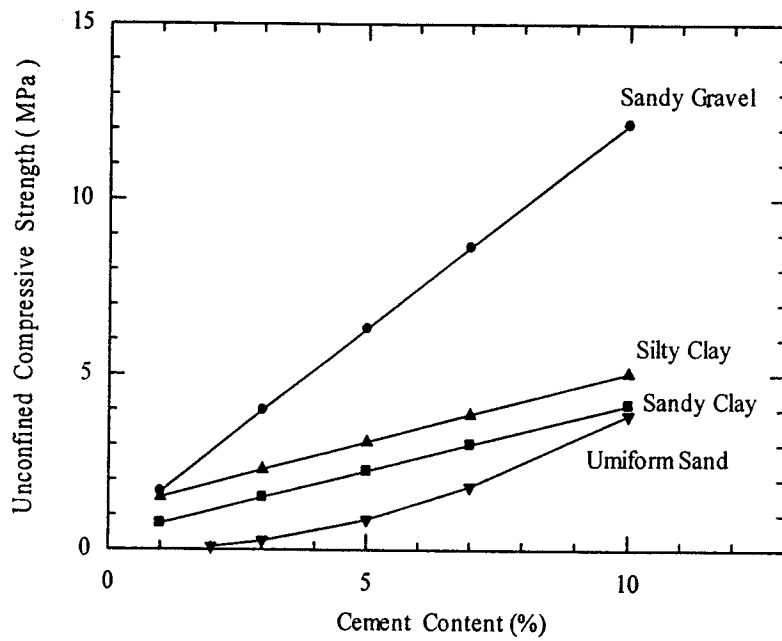
Metcalf (1977) พบว่าปริมาณซีเมนต์มีผลโดยตรงกับกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยเฉพาะกับดินเม็ดหยาบ และสรุปได้ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตรงกับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ และได้แนะนำเกี่ยวกับเรื่องการเลือกปริมาณซีเมนต์ โดยใช้ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) กับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ โดยแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของดิน ดังรูปที่ 2.10 สรุปเป็นสมการได้คือ

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

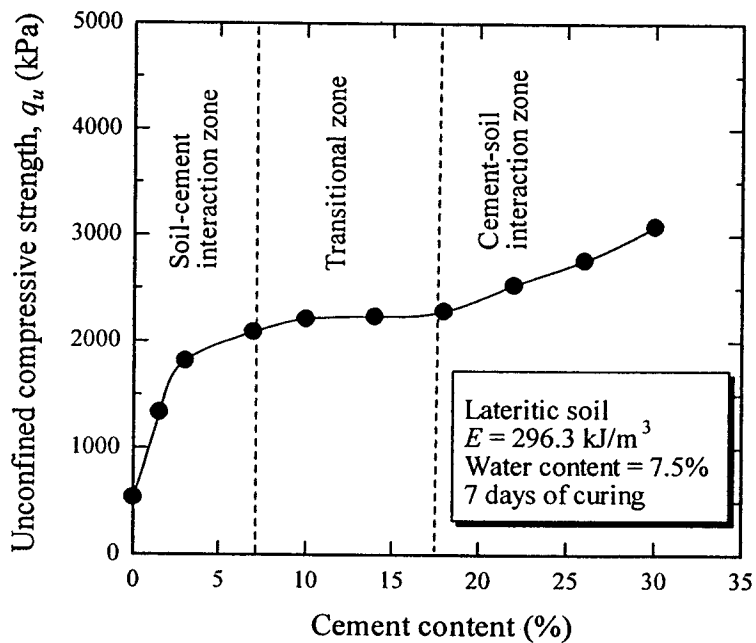
$$q_u \text{ (MPa)} = 0.3953 C + 1.0995 \quad \text{สำหรับ Silty Clay} \quad (2.5)$$

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

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



รูปที่ 2.10 ปริมาณซีเมนต์กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้ตามชนิดของดิน (Metcalf, 1977)



รูปที่ 2.11 โซนการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2006b)

Horpibulsuk et al. (2006b) ได้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อการพัฒนากำลังอัดของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด ที่ปริมาณความชื้น พลังงานการบดอัด และอายุบ่มค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าการพัฒนากำลังอัดแบ่งออกเป็นสามโซน ในโซนที่หนึ่ง เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ปริมาณซีเมนต์ต่อจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคดินเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเกิดการแข็งตัวของซีเมนต์ จะก่อให้เกิดพันธะเชื่อมประสานระหว่างจุดสัมผัส โซนนี้เรียกว่า Soil-cement interaction แต่

อย่างไรก็ตาม เราพบว่าความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานที่จุดสัมผัสจะถูกจำกัด แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ก็ตาม ที่สภาวะนี้ จะเกิดความต่อเนื่องของโครงสร้างดินเม็ดหยาบ แต่ปราศจากความต่อเนื่องที่สมบูรณ์ของโครงสร้างซีเมนต์เฟส จนกระทั่งปริมาณซีเมนต์มีมากพอ จนทำให้เกิดความต่อเนื่องของซีเมนต์เฟส โชนนี้เรียกว่า Cement-soil interaction โชนระหว่างโชนที่หนึ่งและสามเรียกว่าโชน Transitional ซึ่งเป็นโชนที่การเพิ่มขึ้นของกำลังมีน้อยมาก และปริมาณซีเมนต์มิได้มีส่วนช่วยสร้างพันธะเชื่อมประสานระหว่างจุดสัมผัส

2.9 บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

2.9.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน

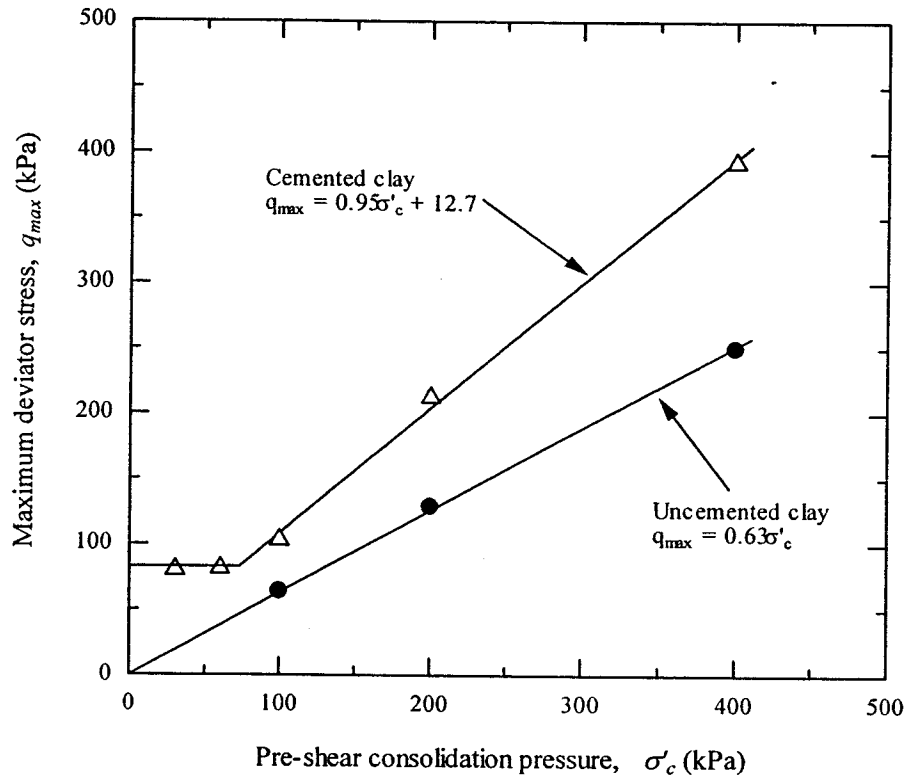
Horpibulsuk et al. (2004b) กล่าวว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสาน เมื่อเฉือนดินประเภทนี้ภายใต้สภาวะที่ความเค้นประสิทธิผลน้อยกว่าความเค้นครากประสิทธิผล (σ'_y) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของเม็ดดินน้อยมาก ในช่วงนี้ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) แต่เมื่อความเค้นประสิทธิผลมากกว่าความเค้นครากประสิทธิผล ทั้งการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสานจะมีอิทธิพลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือน (รูปที่ 2.12) และเสนอความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

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

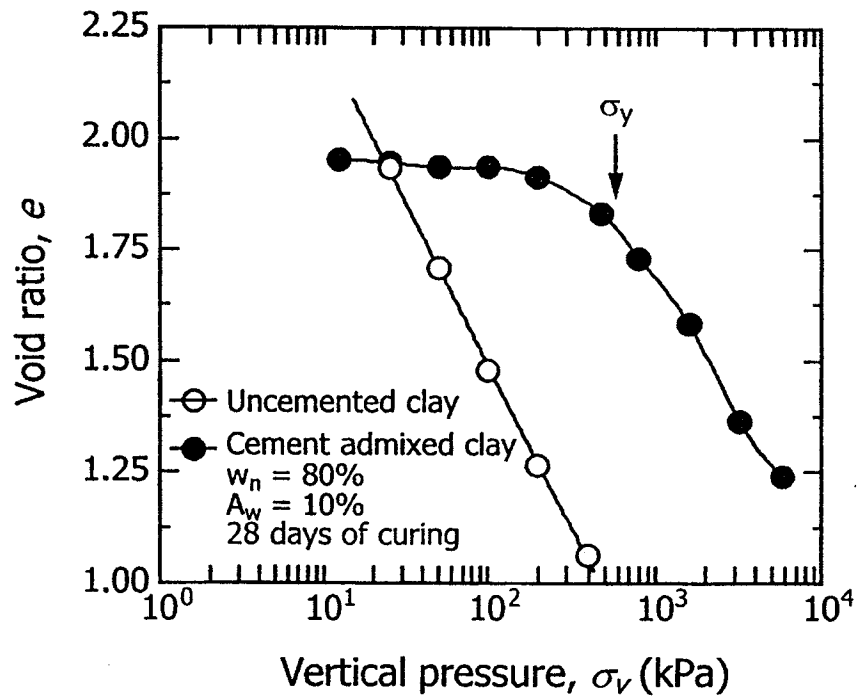
เมื่อ q_{\max} คือความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (ที่จุดวิบัติ)
 q_{bond} คือความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน
 q_{fabric} คือความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric)

2.9.2 การอัดตัวคายน้ำ

สุขสันต์ และรุ่งลาวัลย์ (2546) แสดงผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.13 จากรูปเห็นว่า การอัดตัวคายน้ำมีค่าน้อยมากในช่วงก่อนจุดคราก (Yield stress) เป็นเพราะอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน แต่การอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงหลังจุดคราก ซึ่งสภาวะหลังจุดครากนี้ ดัชนีการอัดตัว (Compression index) มีค่าค่อนข้างคงที่กับการเพิ่มขึ้นของความเค้นในแนวตั้ง นอกจากนี้ ดินเหนียวซีเมนต์ (ดินพันธะเชื่อมประสาน) สามารถที่จะเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วน โพรงสูงๆ เมื่อเทียบกับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน



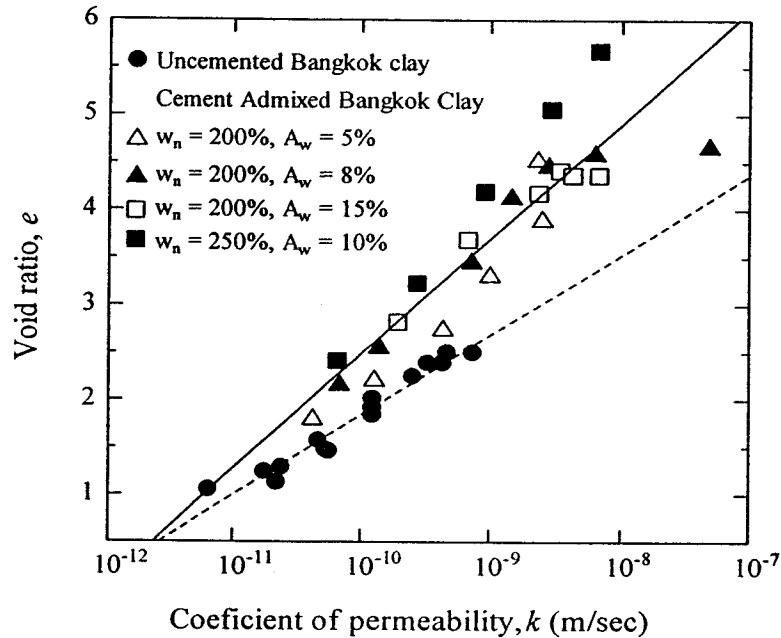
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล (Horpibulsuk et al., 2004b)



รูปที่ 2.13 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพฯไร้พันธะเชื่อมประสาน (สุขสันต์ และรุ่งลาวัลย์, 2546)

2.9.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

สุขสันต์ และ รุ่งลาวัลย์ (2546) แสดงผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่า พันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวอย่างมาก ที่อัตราส่วนโพรงที่เท่ากัน ดินเหนียวซีเมนต์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่า ดังนั้น พันธะเชื่อมประสานนอกจากจะเสริมกำลังด้านทานแรงเฉือน และลดการทรุดตัวแล้ว ยังลดการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับงานโครงสร้างที่บ่อน้ำ เช่น งานซ่อมแซมเขื่อนที่แตกร้าว และ Cut-off wall เป็นต้น



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันต์ และ รุ่งลาวัลย์, 2546)

2.10 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์

โดยอาศัยกรอบความคิดด้านโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ Horpibulsuk et al. (2003) ได้ทำการวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยละเอียด และได้เสนอสมมติฐาน Clay-water/cement ratio hypothesis ขึ้นเพื่อทำนายการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ ซึ่งกล่าวว่า กำลังของดินชนิดหนึ่งที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียว คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio, w/C)

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

เมื่อ q_u คือกำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง

A คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

B คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน มีค่าอยู่ระหว่าง 1.22 ถึง 1.24

w_c/C คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์

นอกจากนี้ Horpibulsuk et al. (2003) ยังได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์การเพิ่มขึ้นของกำลังของดินซีเมนต์ชนิดต่างๆ กับระยะบ่ม และสรุปได้ว่าอัตราการเพิ่มของกำลังของดินซีเมนต์ทุกชนิดมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และสามารถแสดงในฟังก์ชันของลอการิทึม ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และในรูปสมการที่ (2.10) คือ

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.038 + 0.281 \ln D \quad (2.10)$$

เมื่อ q_D คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม D ใดๆ

q_{28} คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 28 วัน

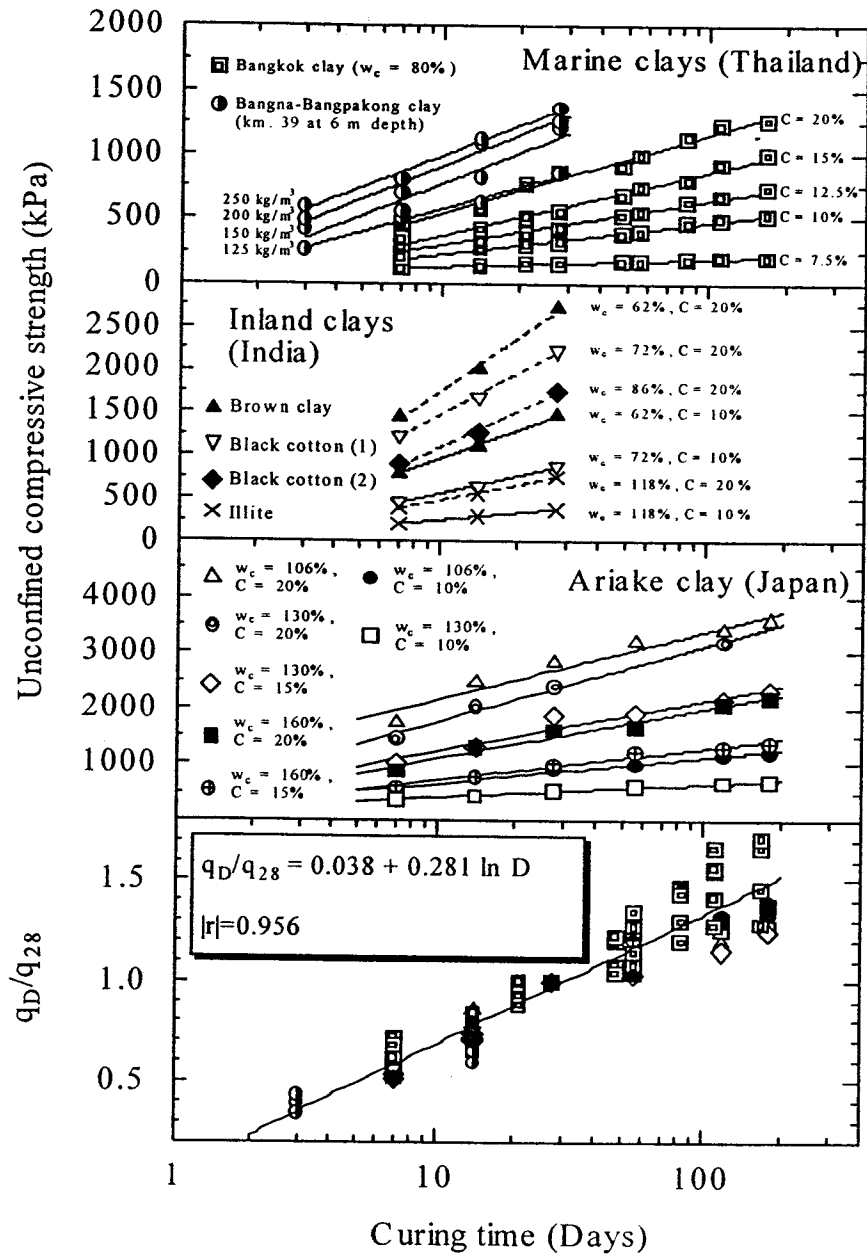
D คือระยะการบ่ม

โดยการรวมสมการที่ (2.9) และ (2.10) จะได้สมการที่สามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และระยะบ่มใดๆ โดยอาศัยเพียงแค่ผลการทดสอบเดี่ยวที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในสมการ

$$\left[\frac{q_{(w_c/C)1,D}}{q_{(w_c/C)28}} \right] = 1.24^{\{(w_c/C)_{28} - (w_c/C)_D\}} - (0.038 + 0.281 \ln D) \quad (2.16)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)1,D}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบ ที่ w_c/C หลังจากระยะบ่ม D วัน

$q_{(w_c/C)28}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทราบค่า ที่ระยะบ่ม 28 วัน



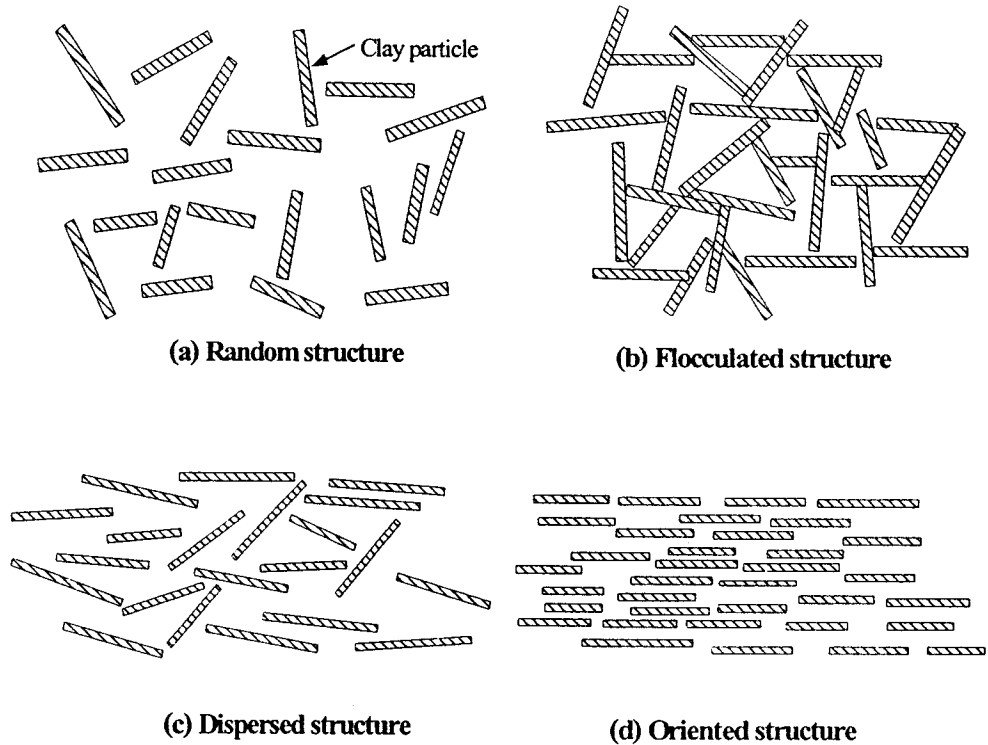
รูปที่ 2.15 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)

2.11 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure study of soil)

2.11.1 แบบจำลองโครงสร้างของดิน (Model of soil structure)

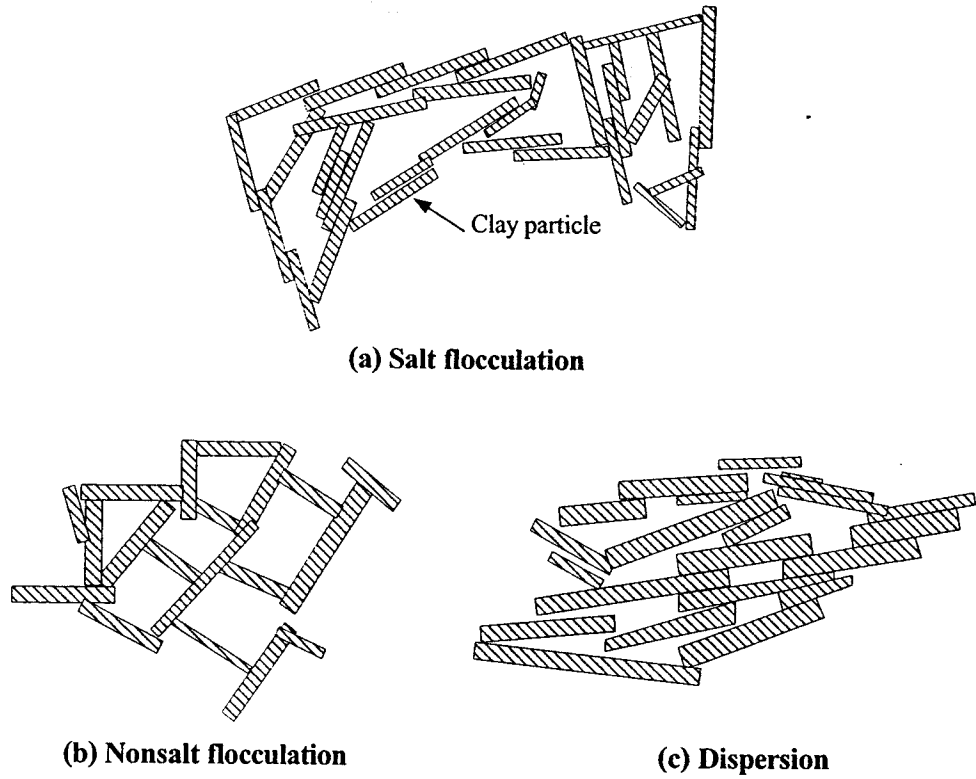
แบบจำลองโครงสร้างดินในเบื้องต้น แสดงดังรูปที่ 2.16 โดย Yong and Warkentin (1966,1975) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของแรงผลึกที่มีมากกว่าแรงคูระหว่างอนุภาคของดินที่ดูดซึมน้ำ หรืออยู่ในสถานะของดินปั้นใหม่ (Remolded) โครงสร้างการจับตัวกันเป็นกลุ่ม (Flocculation) ของเม็ดดินเป็นรูปร่างที่เกิดจากความเข้มข้นของเกลือ ซึ่งจะพบในดินสมุทร (Marine clay) โครงสร้างดินจะมีการกระจายตัว (Dispersed structure) เมื่อดินเหนียวอิมิตัวหรือในกรณีที่ดินเกิดการอัดตัวคายน้ำเพียงเล็กน้อย

ในกรณีที่ดินเหนียวเกิดการอัดตัวคายนํ้ามากๆ โครงสร้างของดินจะเรียงตัวในทิศทางที่ขนานไปทางเดียวกัน (Oriented structure) การยึดเกาะระหว่างอนุภาคของดินสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ คือ การยึดเกาะกันแบบหน้าต่อหน้า, แบบด้านหน้ากับด้านข้าง, และแบบด้านข้างกับด้านข้าง อย่างไรก็ตามแบบจำลองเบื้องต้นไม่ใช่สิ่งเดียวที่ใช้ในการพิจารณาโครงสร้างดิน เพราะว่าดินตามธรรมชาติจะมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแร่ดินเหนียว, ดินตะกอน, ทราย, และยังมีผลเนื่องจากผลกระทบทางเคมีที่มีอิทธิพลกับความเข้มข้นของไฟฟ้าในโพรง, อัตราการตกตะกอน, และตัวแปรอื่นๆ

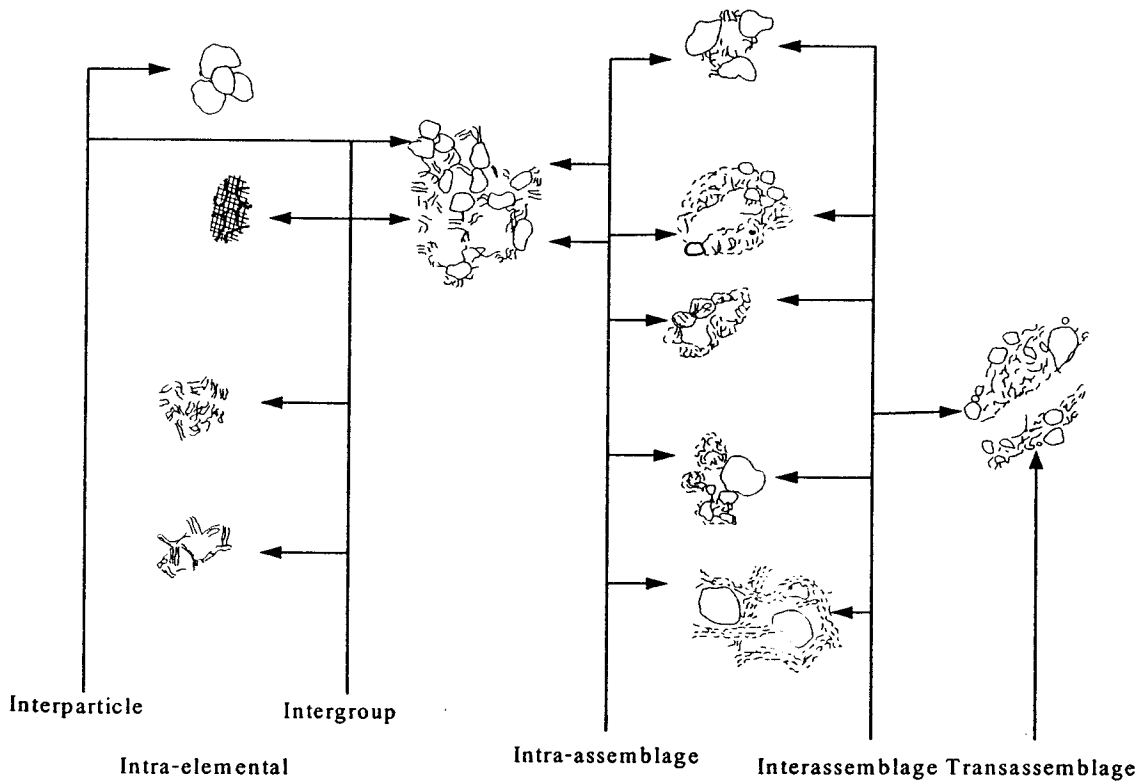


รูปที่ 2.16 ชนิดของโครงสร้างดินเหนียว (Yong and Warkentin, 1966, 1975)

Lambe(1958) แสดงให้เห็นอนุภาคของเม็ดดินที่เกิดจากการตกตะกอน โดยการพิจารณาอิทธิพลทางไฟฟ้าเคมี แสดงในรูปที่ 2.17 ความแตกต่างของการจับตัวกันเป็นกลุ่ม (Flocculation) จะขึ้นอยู่กับแรงทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคดินและน้ำ (Soil-water system) การจับตัวกันเป็นกลุ่มแบบ Salt flocculation จะเกิดในดินที่ตกตะกอนในน้ำทะเล ส่วนการจับตัวกันเป็นกลุ่มแบบ Nonsalt flocculation จะเกิดกับดินที่ตกตะกอนในน้ำจืด O'Brien(1970) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างดินคาร์โอลิไนต์ (Kaolinite) และอีไลต์ (Illite) ที่แช่อยู่ในน้ำกลั่นและน้ำเกลือ ($\text{NaCl} = 1 \text{ g/l}$) โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope และพบว่าดินเหนียวเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่ม (Flocculation) ทั้งการตกตะกอนในน้ำกลั่นและน้ำเกลือ การจับเรียงตัวกันเป็นแบบหน้าต่อหน้าและเรียงทับซ้อนกันเป็นชั้นๆ ดินอีไลต์จะมีการเรียงตัวแบบหน้าต่อหน้าเมื่อตกตะกอนในน้ำกลั่น แต่จะมีการจับเรียงตัวเป็นแบบด้านต่อหน้าเมื่อตกตะกอนในน้ำเกลือ



รูปที่ 2.17 โครงสร้างดินที่ตะกอนที่เกิดจากผลกระทบบของไฟฟ้าเคมี (Lambe, 1958)

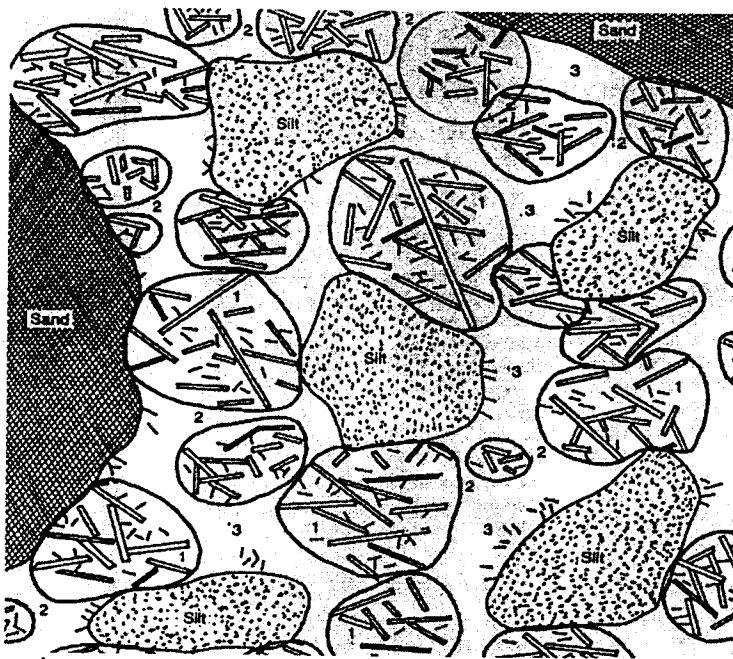


รูปที่ 2.18 การเข้าแทนที่และการรวมตัวของอนุภาคและช่องว่างชนิดต่างๆ

โดยทั่วไปของอนุภาคดินจะไม่อยู่ในอนุภาคเดี่ยว แต่รวมตัวกันเป็นกลุ่มของอนุภาคดินที่ถูกล้อมรอบด้วยโพรง กลุ่มของอนุภาคดินนี้เรียกว่าโดเมน (Domain), คลาสเตอร์ (Cluster), เพด (Ped), แอกริเกต (Aggregate), อะเซมเบลจ (Assemblage) เป็นต้น Matsuo และ Kamon (1976) ได้เสนอโครงสร้างดินให้อยู่ในรูปของเพด (Ped) และพอร์ (Pore) เพื่อนำไปวิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้างดินแบบจำลองของโครงสร้างดินแสดงในรูปที่ 2.18 เสนอโดย Collins และ McGrown (1974) ได้อธิบายว่าโครงสร้างดินเกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างดินตะกอน, ดินทราย, มวลรวม, และโพรงชนิดต่างๆ

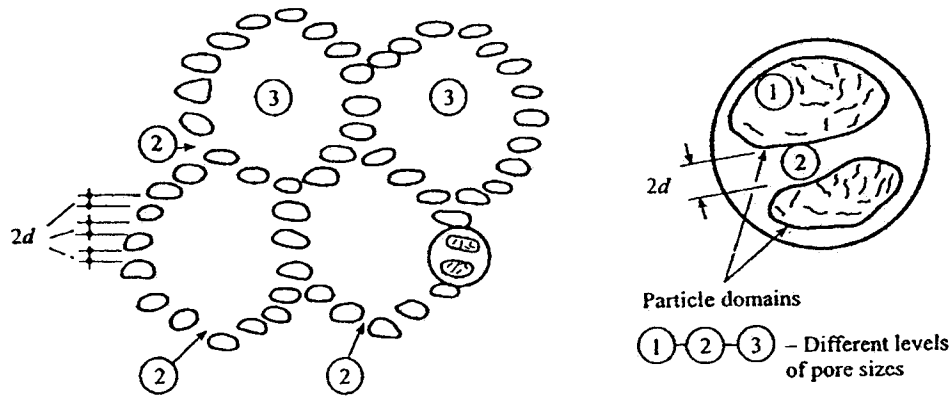
Nagaraj et al. (1990) สรุปผลการทดลองของ Griffith and Joshi (1989) และแสดงแบบจำลองโครงสร้างของเม็ดดินละเอียดโดยอาศัยทฤษฎีกลุ่มอนุภาคดิน (Cluster theory) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และ 2.20 ซึ่งขนาดของช่องว่างมีด้วยกัน 3 ระดับ คือ

- ก. โพรงระหว่างอนุภาคดินเหนียวในกลุ่มอนุภาค (Cluster) มีขนาดน้อยกว่า 20\AA
- ข. โพรงระหว่างกลุ่มอนุภาคดินสองกลุ่ม มีขนาดอยู่ระหว่าง 20\AA ถึง 200\AA
- ค. โพรงขนาดใหญ่ระหว่างของอนุภาคดิน มีขนาดใหญ่มากกว่า 200\AA

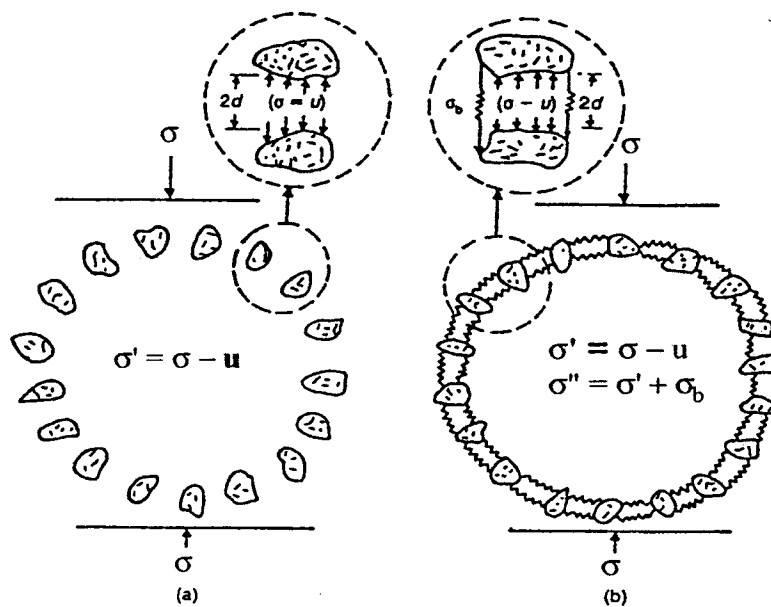


รูปที่ 2.19 การกระจายของช่องว่างในเม็ดดิน (Nagaraj et al., 1990)

Nagaraj et al. (1990) และ Horpibulsuk (2003) ได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ ดังแสดงรูปที่ 2.21 รูปที่ 2.21 (a) เป็นโครงสร้างของดินที่ปราศจากพันธะเชื่อมประสาน (Cementation) เมื่อผสมซีเมนต์กับดิน พันธะเชื่อมประสานจะเชื่อมแฟบริกเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.21(b)



รูปที่ 2.20 การจัดเรียงตัวของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj, 1990)



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของดินเหนียว (a) ดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj, 1990)
(b) ดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน (Horpibulsuk et al., 2003)

2.11.2 การกระจายขนาดโพรง (Pore size distribution)

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการกระจายขนาดโพรงในดินแสดงดังตารางที่ 2.3 เสนอ โดย Kamon (1979) การกระจายขนาดโพรงของดิน สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Mercury intrusion porosimeter ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มีประโยชน์อย่างมากในการหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างดินกับพฤติกรรมทางกล ตัวอย่างที่ใช้สำหรับการวัดการกระจายขนาดโพรง โดยทั่วไปจะต้องทำให้น้ำในโพรงหายไป โดยการทำให้ Freeze - Dry ก่อน เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยที่สุด หลักการในการวัดการกระจายขนาดโพรงจะอยู่บนพื้นฐานของสมการที่เสนอโดย Washburn (1921) ซึ่งขนาดเส้นผ่าน

บทที่ 3

การวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย จากการพิจารณาโครงสร้างจุลภาค

3.1 บทนำ

ชั้นดินในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยโดยทั่วไปมีด้วยกันสองชั้น ดินชั้นบนเป็นดินที่เกิดจากการพัดพาของลม (Wind-blown deposit) ซึ่งมีความหนาประมาณ 1-3 เมตร ดินชั้นนี้เป็นดินทรายปนดินเหนียวหรือดินเหนียวปนดินตะกอน ซึ่งมีความไวต่อปริมาณความชื้น (Horpibulsuk et al., 2008b) พฤติกรรมการทรุดตัวเมื่อได้รับความชื้นได้รับการศึกษาโดย Kohgo et al. (1997) และ Kohgo and Horpibulsuk (1999) ชั้นดินชั้นล่างเป็นดินกำเนิดกับที่ (Residual soil) ที่มีความแข็งและเกิดจากการผุกร่อนของ Claystone (Udomchore, 1991) เทคนิคการปรับปรุงดินชั้นบนที่นิยมใช้กันเทคนิคหนึ่งคือการผสมเข้ากับปูนซีเมนต์และบดอัด ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมเนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นได้เองในประเทศ อีกทั้งกำลังอัดของดินซีเมนต์ยังพัฒนาขึ้นได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้น อิทธิพลของตัวแปรควบคุม ซึ่งได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และพลังงานการบดอัด ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ ได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลาย (Terashi et al., 1979 and 1980; Kawasaki et al., 1981; Clough et al., 1981; Tatsuoka and Kobayashi, 1983; Kamon and Bergado, 1992; Uddin, 1994; Nagaraj et al., 1997; Yin and Lai, 1998, Consoli et al., 2000; Kasama et al., 2000; Kitazume et al., 2000; Miura et al. 2001; Horpibulsuk and Miura, 2001; Horpibulsuk et al., 2003 and 2004a and b Horpibulsuk et al., 2005; Horpibulsuk et al., 2006 เป็นต้น)

งานวิจัยทางด้านคอนกรีตเทคโนโลยี (Owens, 1979; Mitsui et al., 1994; Ollivier and Massat, 1996; Igashi et al., 1996; Yang and Su, 2002; Chindapasirt et al., 2004 เป็นต้น) ได้ประยุกต์ใช้วัสดุปอสตแลนเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมในการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน วัสดุปอสตแลนส่วนใหญ่จะประกอบด้วย Silica, Alumina, และ Ferric oxide เป็นหลัก ส่วนประกอบเหล่านี้จะก่อให้เกิดเป็นตัวเชื่อมประสาน (Cementitious material) เมื่อรวมตัวกับซีเมนต์และน้ำ เถ้าลอยจัดเป็นวัสดุ Pozzolan ชนิดหนึ่งที่ได้จากขบวนการผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีปริมาณมากเกินความต้องการ Kawasaki et al. (1981) ได้ใช้เถ้าลอยผสมกับซีเมนต์ในการก่อสร้างเกาะสำหรับสะพาน Hakucho ในเกาะฮอกไกโด ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าซีเมนต์ผสมเถ้าลอยสามารถช่วยลดการบวมตัว การอัดตัว และเพิ่มกำลังอัดให้กับดิน เถ้าลอยที่ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์อาจมีส่วนช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์

และมีผลให้คุณสมบัติทางวิศวกรรม (กำลังอัด การอัดตัว และการซึมผ่านน้ำ) ของดินซีเมนต์ดีขึ้น จนถึงปัจจุบัน บทบาทของเถ้าลอยต่อการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคยังไม่ได้รับการศึกษามากนัก การศึกษานี้มีความสำคัญและความจำเป็นอย่างยิ่งในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับตัวแปรควบคุม อันจะนำมาซึ่งการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์อย่างมีประสิทธิภาพ (ตามหลักวิชาการและประหยัด)

3.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.2.1 ดินเหนียวตัวอย่าง

ดินตัวอย่างเป็นดินเหนียวปนดินตะกอนที่เก็บภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ที่ระดับความลึก 3 เมตร ดินเหนียวปนดินตะกอนนี้ประกอบด้วยทราย 2 เปอร์เซ็นต์ ดินตะกอน 45 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียว 53 เปอร์เซ็นต์ ความถ่วงจำเพาะของดินเท่ากับ 2.74 ซึ่คจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 74 และ 27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดินประเภทนี้จัดเป็นดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) ด้วยการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) ระหว่างการเก็บตัวอย่างไม่ปรากฏระดับน้ำใต้ดิน ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ผลทดสอบการบวมตัวอิสระ (Free swelling test) ที่เสนอโดย Prakash and Sridharan (2004) แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวปนดินตะกอนนี้จัดเป็นดินบวมตัวต่ำและมีค่าอัตราส่วนบวมตัวอิสระเท่ากับ 1.0 คุณสมบัติทางเคมีและการกระจายขนาดเม็ดดินแสดงดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 ภาพขยายของอนุภาคดินแสดงดังรูปที่ 3.2 ต่อจากนี้ไป ผู้เขียนขอใช้คำว่า “ดินเหนียว” แทน “ดินเหนียวปนดินตะกอน”

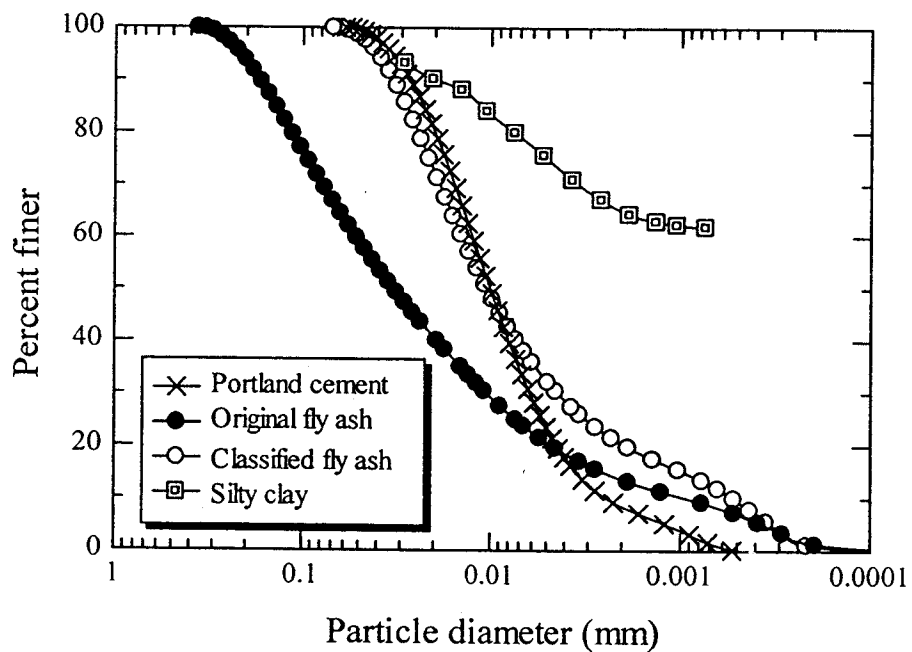
3.2.2 วัสดุเชื่อมประสาน

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทหนึ่ง ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.15 เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษานำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียว ปูนซีเมนต์ (Portland cement, PC) เถ้าลอยหยาบ (Original fly ash, OFA) และเถ้าลอยละเอียด (Classified fly ash, CFA) แสดงดังตารางที่ 3.1 เถ้าลอยละเอียดได้จากการร่อนเถ้าลอยหยาบผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ผลรวมของส่วนผสมหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ใน OFA และ CFA มีปริมาณเท่ากับ 81.54 และ 79.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้น เถ้าลอยทั้งสองนี้จึงจัดเป็นเถ้าลอยชั้น F (Class F) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ขนาดเม็ดดินเฉลี่ย (Median particle size, D_{50}) มีค่าเท่ากับ 0.03 มิลลิเมตร (30 ไมครอน) และ 0.09 มิลลิเมตร (9 ไมครอน) สำหรับ OFA และ CFA ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากราฟการกระจายขนาดของ PC และ CFA มีลักษณะคล้ายกันมาก D_{50} ของ PC มีค่าเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร (10 ไมครอน) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า D_{50} ของ CFA ค่าความถ่วงจำเพาะของ PC, OFA และ CFA เท่ากับ 3.15, 2.33, และ 2.54 ตามลำดับ ภาพถ่ายขยายของ PC, OFA และ CFA แสดงดังรูปที่ 3.3 จากกราฟการ

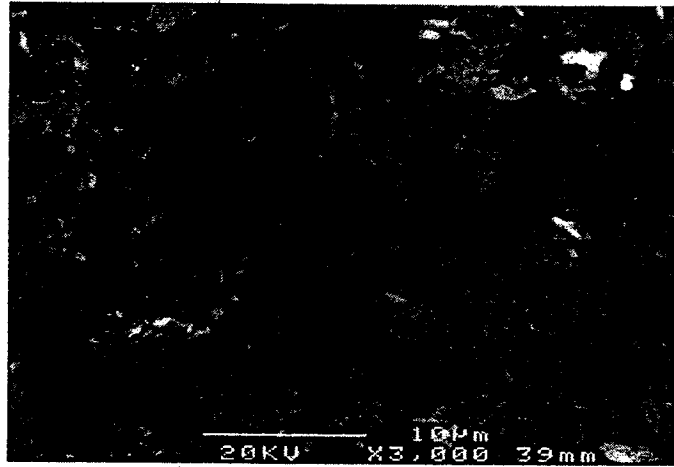
กระจายขนาดและภาพถ่ายขยาย จะเห็นได้ว่าเม็ดดินมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์และเถ้าลอยมาก อนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ขณะที่อนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปนดินตะกอน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย

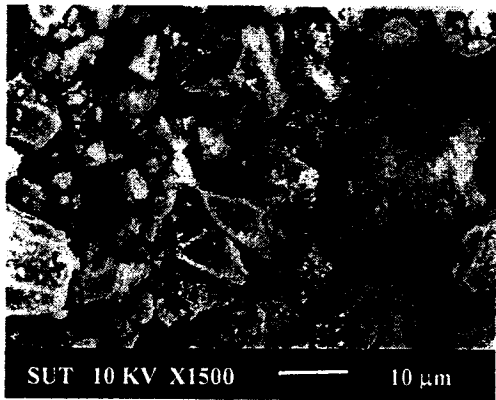
Chemical composition (%)	Silty clay	PC	OFA	CFA
SiO ₂	20.10	20.90	45.69	44.72
Al ₂ O ₃	7.55	4.76	24.59	23.69
Fe ₂ O ₃	32.89	3.41	11.26	11.03
CaO	26.15	65.41	12.15	12.67
MgO	0.47	1.25	2.87	2.63
SO ₃	4.92	2.71	1.57	1.28
Na ₂ O	ND	0.24	0.07	0.07
K ₂ O	3.17	0.35	2.66	2.87
LOI	3.44	0.96	1.23	1.42



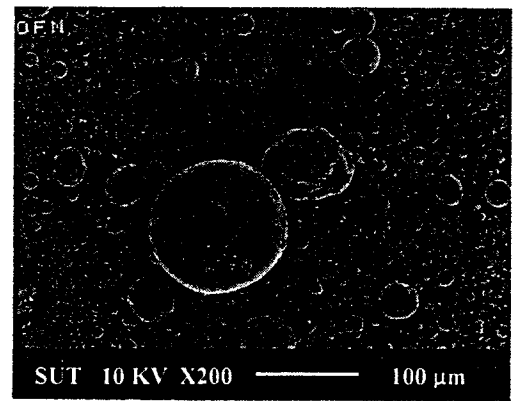
รูปที่ 3.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย



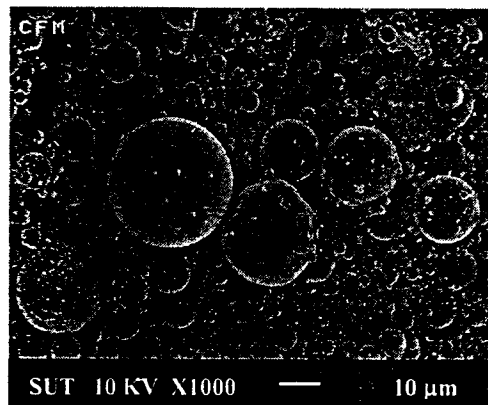
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายขยายของอนุภาคดิน



(a) Type I Portland Cement (PC)



(b) Original Fly Ash (OFA)



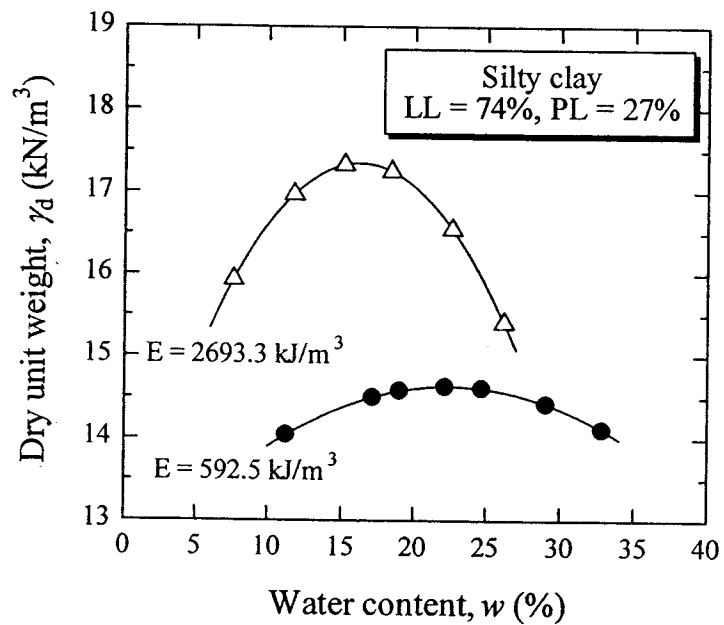
(c) Classified Fly Ash (CFA)

รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายกำลังขยายของปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย

3.2.3 วิธีการทดสอบ

ดินเหนียวปนดินตะกอนนี้จะถูกนำมาร้อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 16 มิลลิเมตร เพื่อขจัดเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ ดินตัวอย่างนี้จะถูกนำไปผึ่งแห้งเป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน และปรับปริมาณความชื้นให้

เหมาะสมกับการบดอัด การบดอัดกระทำตามมาตรฐาน ASTM D 698 และ D 1557 ในแบบหล่อขนาด 4 นิ้ว สำหรับการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน ตามลำดับ กราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดทั้งสองแสดงดังรูปที่ 3.4 ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) มีค่าเท่ากับ 22.4 เปอร์เซ็นต์ และ 14.6 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับการบดอัดแบบมาตรฐาน และ 17.2 เปอร์เซ็นต์ และ 14.6 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน



รูปที่ 3.4 กราฟการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอนที่พลังการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน

การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ทำโดยนำดินเหนียวผึ่งแห้งมาผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ตั้งแต่ 3 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ และผสมเข้ากับน้ำเพื่อทำการบดอัด การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์แฉะล่อยทำโดยนำดินเหนียวผึ่งแห้งมาผสมกับวัสดุเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์และแฉะล่อย) ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแฉะล่อยเท่ากับ 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ พลังงานการบดอัดเท่ากับแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐานสำหรับดินซีเมนต์ และสูงกว่ามาตรฐานสำหรับดินซีเมนต์แฉะล่อย หลังจาก 24 ชั่วโมง ตัวอย่างทดสอบถูกถอดออกจากแบบหล่อ ห่อด้วยถุงพลาสติก และเก็บในห้องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ ($25 \pm 2^\circ\text{C}$) เมื่อได้อายุบ่มที่กำหนด (7, 28 และ 60 วัน) ทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ด้วยอัตรา 1 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ตัวอย่าง สำหรับแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของผลทดสอบ

การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ทำโดยอาศัยผลทดสอบที่ได้จากกล้องขยายกำลังสูง (Scanning electron microscope, SEM) เครื่องวัดขนาดโพรงด้วยปรอท (Mercury intrusion porosimetry, MIP) และเครื่องวัดความร้อนภายใต้สูญญากาศ (Thermal gravity, TG) ดินตัวอย่างทดสอบ

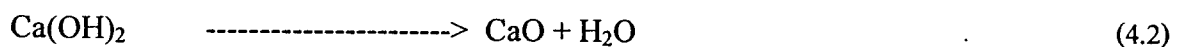
ถูกทำให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ และนำไปทำให้เย็นและแห้ง (Freezing and drying) ที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียส โดยการจุ่มในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 5 นาที และดูดด้วยความดัน 0.5 ปาสกาล ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน (Miura et al., 1999 และ Yamadera, 1999) ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกเคลือบด้วยทองคำก่อนเข้ากล้องขยายกำลังสูง (JOEL JSM-6400)

การวัดการกระจายขนาดโพรงในมวลดินกระทำโดยใช้เครื่องวัดขนาดโพรงด้วยปรอท (MIP) ที่มีความดันในช่วง 0 ถึง 288 เมกกะปาสกาล ซึ่งสามารถวัดโพรงที่มีขนาดเล็กถึง 0.0057 ไมครอน ขึ้นตัวอย่างทดสอบ MIP ได้จากการกะเทาะดินซีเมนต์อย่างระมัดระวังด้วยสิ่ว จนมีขนาด 3-6 มิลลิเมตร และหนักประมาณ 1.0 ถึง 1.5 กรัม ปฏิบัติวิธีไฮดรอสแตติกด้วยการทำให้เย็นและแห้ง (Freezing and drying) เช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่าง SEM ขนาดของโพรงสามารถประมาณได้จากสมการ Washburn (Washburn, 1921) โดยการสมมติว่ามุมสัมผัสและแรงตึงผิว (γ) มีค่าเท่ากับ 140 องศา และ 480 dynes ต่อเซนติเมตร ดังสมการที่ (4.1)

$$D = - \frac{(4\gamma \cos \theta)}{P} \quad (4.1)$$

เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่าง (ไมครอน) และ P คือความดัน (เมกกะปาสกาล)

การวัดความร้อนภายใต้สุญญากาศ (TG) เป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายในการประมาณผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) แคลเซียมอลูมิเนต (CAH) และแคลเซียมอลูมินาซิลิเกต (CASH) Ettringite และอื่นๆ (Midgley, 1979) CSH, CAH และ CASH รวมเรียกว่าผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน (Cementitious products) แคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถประมาณได้จากน้ำหนักที่สูญเสียในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 580 องศาเซลเซียส (El-Jazairi and Illston, 1977 และ 1980 และ Wang et al., 2004) เมื่อเผาหินซีเมนต์ได้ลอบที่อุณหภูมิดังกล่าว แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเปลี่ยนสภาพเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และน้ำ ดังสมการที่ (4.2)

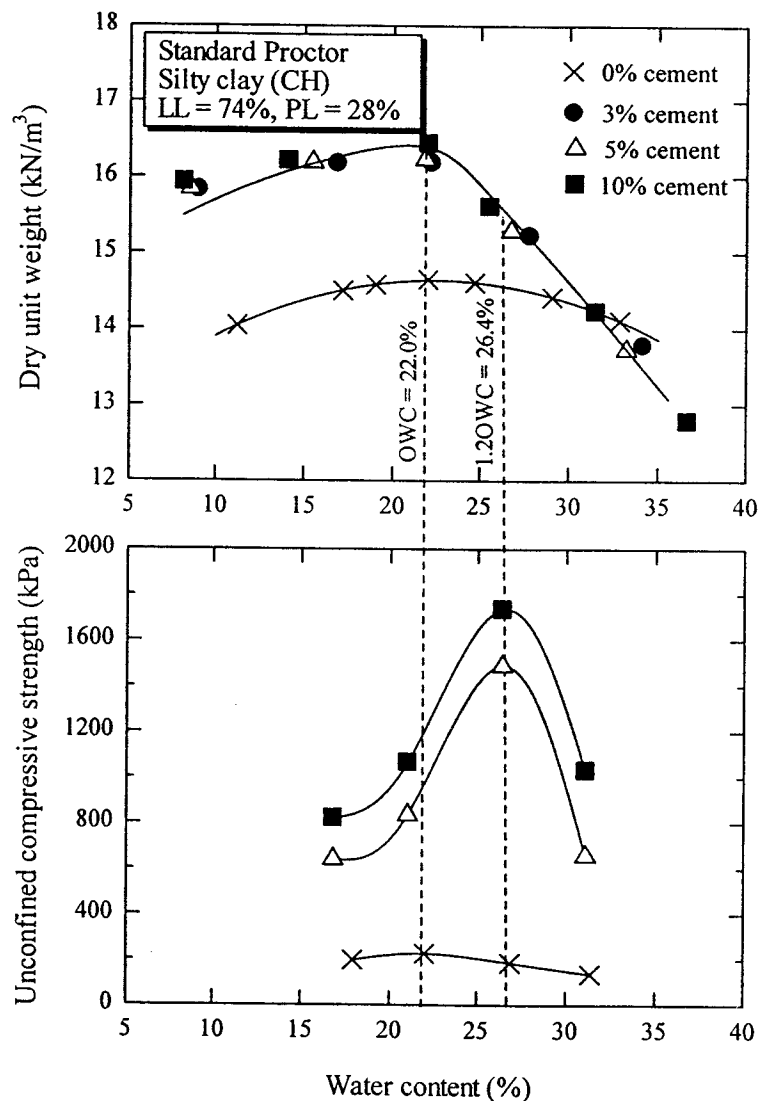


ปริมาณน้ำที่สูญเสียเนื่องจากความร้อน ส่งผลให้น้ำหนักของดินตัวอย่างลดลง ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถประมาณได้จากน้ำหนักน้ำที่สูญเสียดังสมการที่ (4.2) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.11 กุณด้วยปริมาณน้ำที่สูญเสียน้ำหนัก (El-Jazairi and Illston, 1977 และ 1980) การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานสามารถตรวจสอบได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งต่างก็เป็นผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์

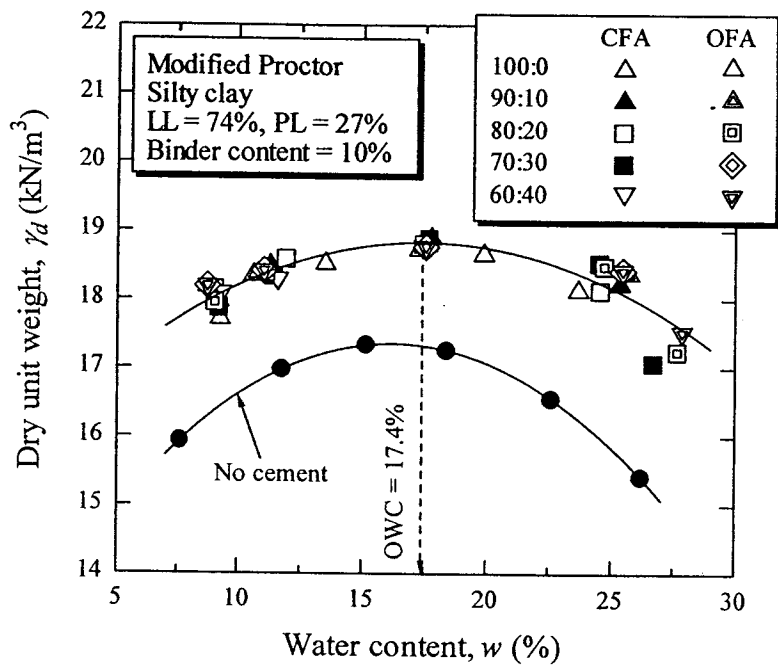
ตัวอย่างดินซีเมนต์หลังจากได้อายุบ่มตามต้องการแล้วจะถูกกะเทาะจนมีขนาดเล็กและอบแห้งด้วยความเย็นเช่นเดียวกับตัวอย่าง MIP ก่อนที่จะทำการทดสอบ TG ตัวอย่างอบแห้งจะถูกบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (150 ไมครอน) ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะมีน้ำหนักประมาณ 10-20 มิลลิกรัม และถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.3 ผลทดสอบการบดอัดและแรงอัดแกนเดียว

รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้นของดินเหนียวปนดินตะกอน (ไม่ผสมซีเมนต์) และดินเหนียวซีเมนต์ จากกราฟการบดอัด จะเห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์มีค่าสูงกว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินไม่ผสมซีเมนต์ ขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง พฤติกรรมนี้เป็นเช่นเดียวกับพฤติกรรมของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2006b)



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดกับปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์



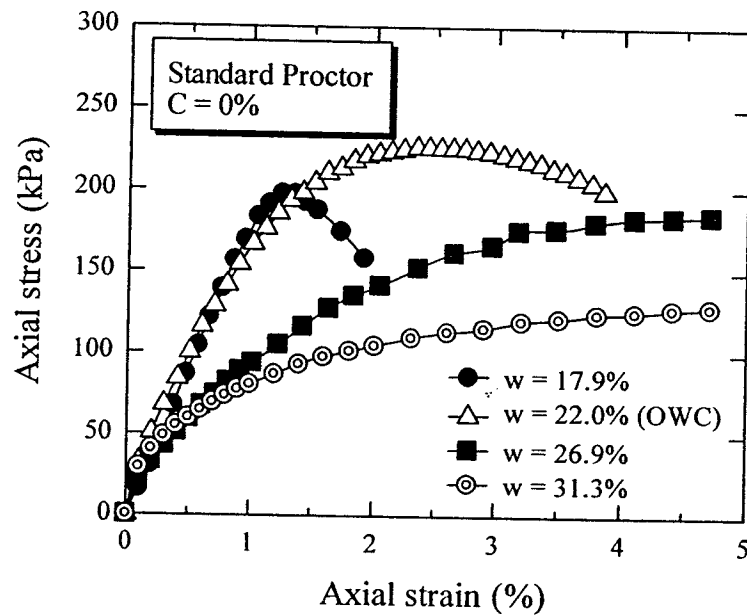
รูปที่ 3.6 กราฟการบดอัดดินซีเมนต์เถ้าลอย

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ

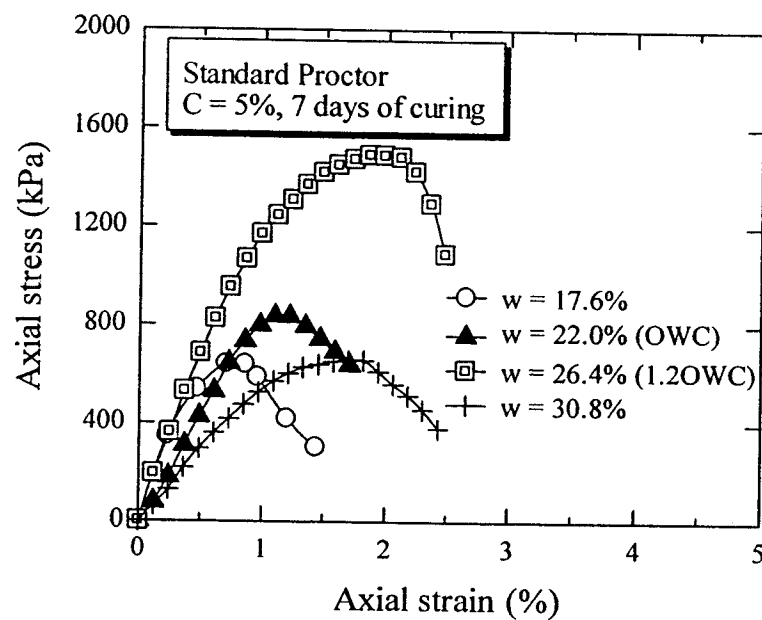
Type of stabilization	C:F	Atterberg's limits (%)		
		LL	PL	PI
No stabilization	0:0	74.1	27.5	46.6
PC	100:0	71.0	44.8	26.2
PC + CFA	0:100	73.1	29.4	43.7
	80:20	71.4	37.6	33.8
	60:40	71.7	33.3	38.4
PC + OFA	80:20	71.4	36.3	35.1
	60:40	71.7	33.3	38.4

ความละเอียดของเถ้าลอยและอัตราส่วนการแทนที่ไม่มีผลต่อกราฟการบดอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์เถ้าลอยมีค่าสูงกว่าของดินบดอัดเช่นเดียวกับดินซีเมนต์ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.6 ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดเปรียบเทียบกับดินเหนียวปนดินตะกอน จะเห็นได้ว่าพิกัดพลาสติกของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ (การลดลงของอัตราส่วนการแทนที่) การเพิ่มขึ้นของพิกัดพลาสติกบ่งบอกถึงการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคดินเนื่องจากการดูดซับ Ca^{2+} จากขบวนการ

แลกเปลี่ยนประจุ เถ้าลอยไม่มีอิทธิพลต่อพิกัดพลาสติกคั้งจะเห็นได้จากผลทดสอบที่ C:F = 0:100 และ C:F = 0:0 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เถ้าลอยไม่มีอิทธิพลต่อการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน การรวมตัวเป็นกลุ่มอนุภาคมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดแต่แทบจะไม่ผลต่อขีดจำกัดเหลว ด้วยเหตุนี้ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) ของดินเหนียว ดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์เถ้าลอย จึงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากขีดจำกัดเหลวเป็นตัวควบคุมปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินเหนียวรวมตัวต่ำ (Nagaraj et al., 2006 และ Horpibulsuk et al., 2008a)



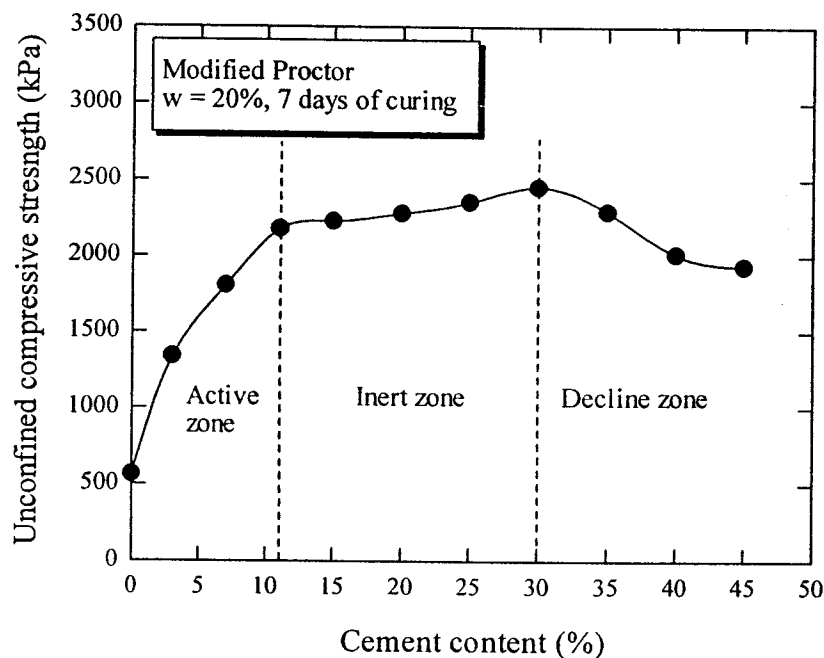
รูปที่ 3.7 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอน



รูปที่ 3.8 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวซีเมนต์

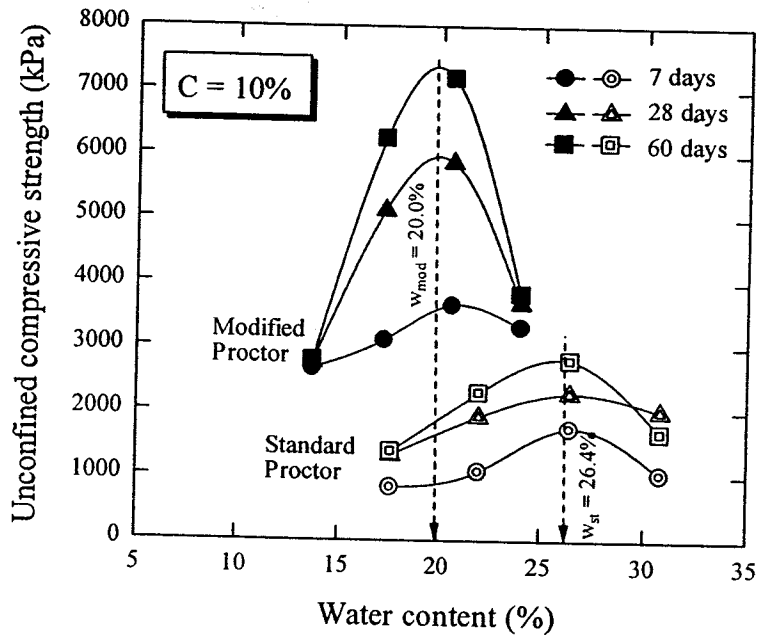
กำลังอัดและสตีเฟนของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นจนกระทั่งถึงปริมาณความชื้นเหมาะสม และมีค่าน้อยลงตามปริมาณความชื้นเมื่อปริมาณความชื้นอยู่ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (ดูรูปที่ 3.7) พฤติกรรมนี้แตกต่างจากพฤติกรรมของดินเหนียวซีเมนต์ซึ่งกำลังอัดและสตีเฟนสูงสุดจะอยู่ที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม (รูปที่ 3.8)

รูปที่ 3.9 แสดงอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่บดอัดภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม (20%) และที่อายุบ่ม 7 วัน การพัฒนากำลังอัดแบ่งออกเป็นสามโซน เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ซีเมนต์เจลที่จุดสัมผัสจะมีมากขึ้น และเมื่อซีเมนต์เจลแข็งตัว พันธะเชื่อมประสานที่จุดสัมผัสก็จะมีแข็งแรงเพิ่มขึ้นตาม โซนนี้เรียกว่าโซนแอคทีฟ (Active zone) ถัดจากโซนนี้ กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โซนนี้เรียกว่าโซนล่าช้า (Inert zone) กำลังอัดของดินซีเมนต์จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซีเมนต์มีค่าเกินกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ โซนนี้เรียกว่าโซนลดกำลัง (Decline zone)



รูปที่ 3.9 โซนการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์

อิทธิพลของอายุบ่มและพลังงานการบดอัดต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ในโซนแอคทีฟแสดงดังรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์แปรผันตามพลังงานการบดอัด พลังงานการบดอัดที่สูงขึ้นจะมีผลให้กำลังอัดสูงสุดมีค่าสูงขึ้น และปริมาณความชื้นที่กำลังอัดสูงสุดมีค่าต่ำลง ภายใต้พลังงานการบดอัดที่เท่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นมีลักษณะเหมือนกันทุกอายุบ่ม ซึ่งกำลังอัดสูงสุดเกิดที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม

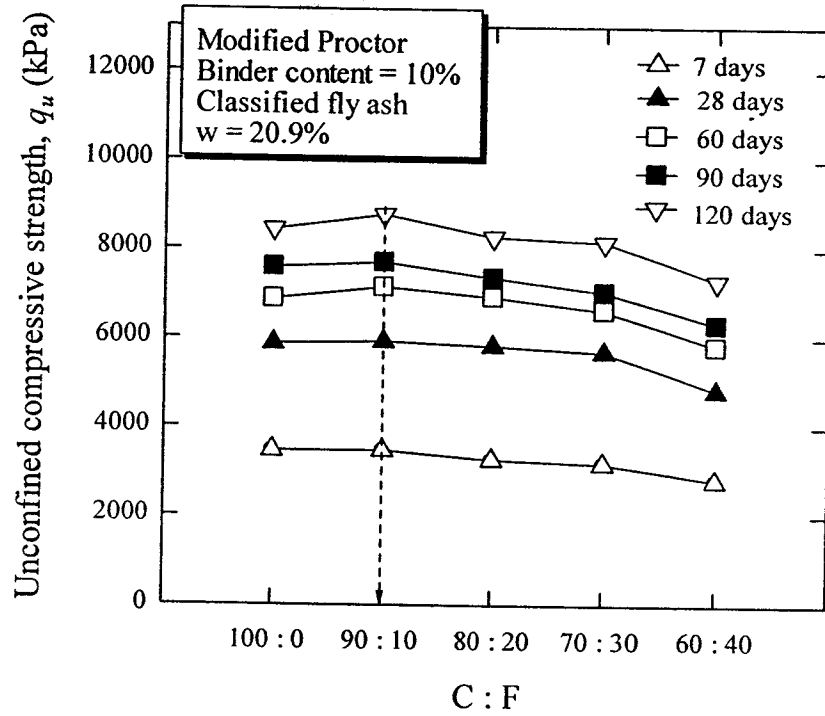


รูปที่ 3.10 อิทธิพลของพลังงานการบดอัดและอายุบ่มต่อการพัฒนากำลังอัด

อิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่และความละเอียดของเถ้าลอยต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่อายุบ่มต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.11 และตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าที่ทุกอายุบ่ม กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบเล็กน้อย ดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดที่มีอัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับดินซีเมนต์ (อัตราส่วนแทนที่ 0 เปอร์เซ็นต์) ดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนแทนที่ 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดต่ำกว่าดินซีเมนต์ ดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดสูงที่สุด ตั้งแต่อายุบ่มเริ่มแรก ผลการทดสอบนี้มีความแตกต่างจากผลทดสอบของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ซึ่งเถ้าลอยในฐานะของวัสดุป้อนสแลนจะเริ่มแสดงบทบาทที่อายุบ่มสูงๆ (โดยทั่วไปเกินกว่า 60 วัน) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า กำลังอัดของคอนกรีตเถ้าลอยจะมีค่ามากกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ปราศจากเถ้าลอยเมื่ออายุบ่มเกินกว่า 60 วัน

ตารางที่ 3.3 กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่างๆ

Curing time (days)	Compressive strength (kPa)								
	C:F = 100:0	C:F = 90:10		C:F = 80:20		C:F = 70:30		C:F = 60:40	
		CFA	OFA	CFA	OFA	CFA	OFA	CFA	OFA
7	3460	3465	3479	3262	3257	3174	3082	2803	2669
28	5867	5916	5362	5817	5701	5685	5263	4821	4634
60	6872	7138	6828	6918	6437	6627	6537	5821	5840
90	7586	7353	7691	7353	7043	7038	6753	6316	6181
120	8432	8272	8566	8271	8182	8771	7901	7300	7200

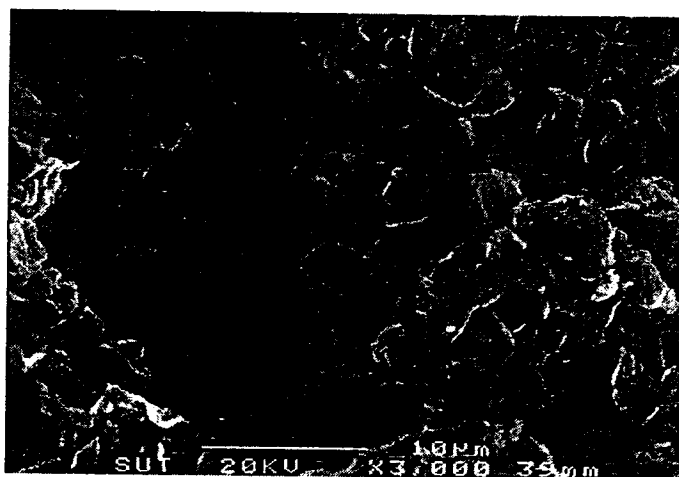


รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนการแทนที่ ที่อายุบ่มต่างๆ

3.4 การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาค

3.4.1 ดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์

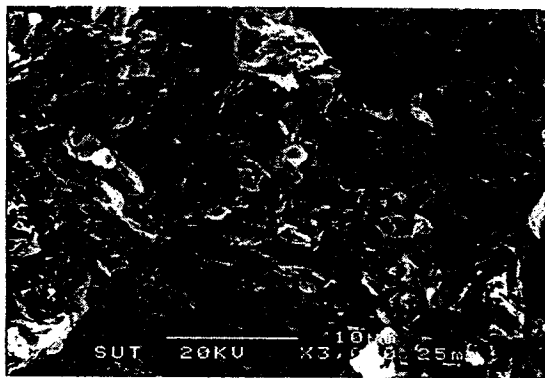
สำหรับดินเหนียวบดอัด (ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำสูง) แพบริก (การจัดเรียงตัวของกลุ่มของเม็ดดินและโพรง) เป็นตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดและความต้านทานการทรุดตัว ซึ่งถูกควบคุมโดยพลังงานการบดอัดและปริมาณความชื้น การบดอัดจะทำให้กลุ่มเม็ดดินขนาดใหญ่แตกตัวเป็นกลุ่มอนุภาคดินขนาดเล็ก และยังคงขนาดโพรงลงด้วย (ดูรูปที่ 3.2 และ 3.12)



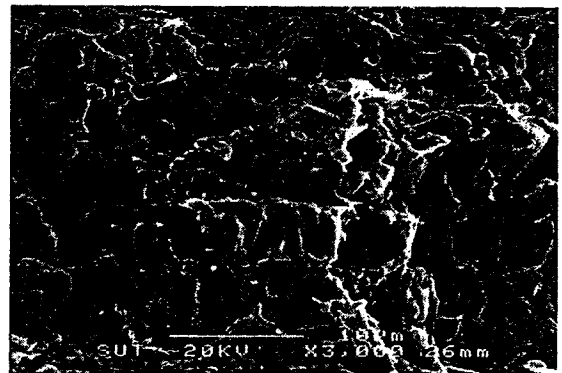
รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัดที่ OWC

ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

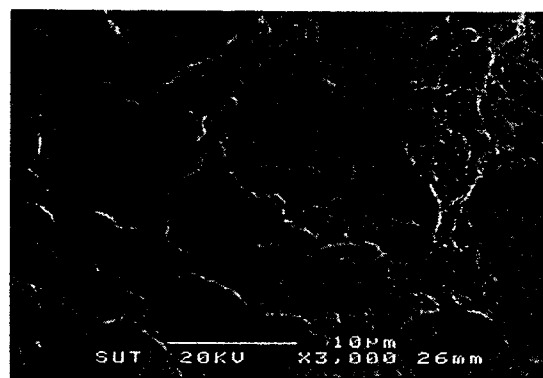
รูปที่ 3.13 แสดงภาพถ่ายขยายของดินไม่ผสมซีเมนต์บดอัดภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้นระหว่าง 0.8 ถึง 1.2 เท่าของ *OWC* ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (รูปที่ 3.13c) โครงสร้างมีลักษณะเป็นแบบกระจาย (Dispersed structure) เนื่องจากปริมาณความชื้นมีมากเพียงพอต่อการพัฒนา Diffusion double layer ส่งผลให้เกิดแรงผลักที่สูง ดังนั้นอนุภาคดินและกลุ่มอนุภาคดินจึงสามารถเคลื่อนตัวข้ามกันได้ง่ายเมื่อถูกเฉือน ส่งผลให้กำลังอัดและสติฟเนสต่ำ ทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม (รูปที่ 3.13a) ปริมาณความชื้นไม่มากพอที่จะพัฒนา Diffusion double layer ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น ระยะห่างระหว่างอนุภาคดินจึงมีน้อย ส่งผลให้โครงสร้างดินมีแนวโน้มเป็นแบบรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Flocculation) ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะเป็นผลรวมของโครงสร้างทั้งสอง ที่ปริมาณความชื้นนี้ ดินตัวอย่างแสดงกำลังอัดและสติฟเนสสูงที่สุด อิทธิพลของพลังงานการบดอัดแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจากรูปที่ 3.12 และ 3.13b จะเห็นได้ว่าพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานก่อให้เกิดกลุ่มอนุภาคดินขนาดใหญ่



(a) $w = 14\%$ (0.8OWC)



(b) $w = 17\%$ (OWC)



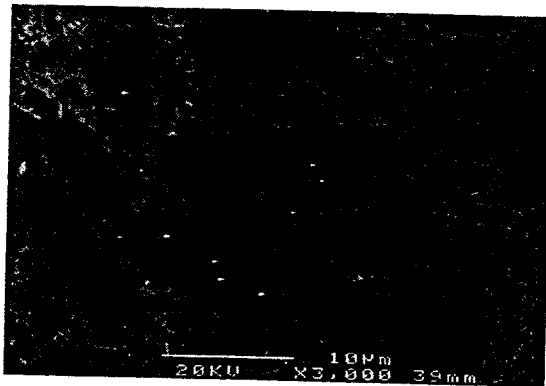
(c) $w = 20\%$ (1.2OWC)

รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัด ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

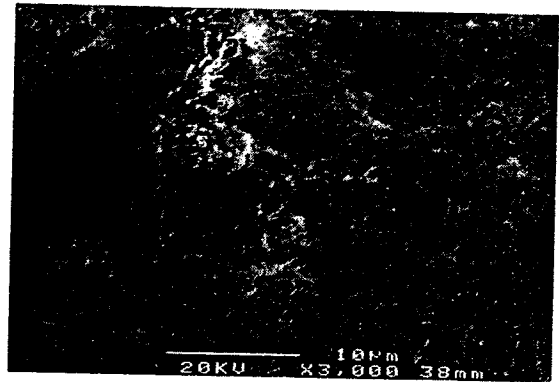
3.4.2 ดินเหนียวซีเมนต์

3.4.2.1 อิทธิพลของปริมาณความชื้น

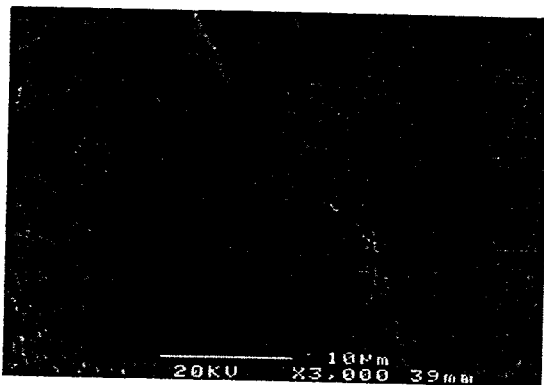
รูปที่ 3.14 แสดงรูปถ่ายขยายของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน จะเห็นได้ว่าโพรงเต็มได้ด้วยผลิตภัณฑ์ไฮดรเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับดินตัวอย่างที่ปริมาณความชื้น 17% (*OWC*) และ 20% (*1.2OWC*) ดินตัวอย่างที่ปริมาณความชื้น 14% (*0.8OWC*) และ 24% (*1.4OWC*) แสดงผลิตภัณฑ์ไฮดรเจนในปริมาณที่น้อยกว่า นอกจากนี้แล้ว ปริมาณความชื้นยังมีอิทธิพลต่อปริมาตรโพรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโพรงขนาด 1.0-0.1 ไมครอน ซึ่งมีจำนวนประชากรมากที่สุด การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์มีลักษณะคล้ายคลึงกับของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์ กล่าวคือ สถานะที่แน่นที่สุด (ปริมาตรโพรงทั้งหมดต่ำที่สุด) อยู่ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม สถานะที่หลวมกว่า (ปริมาตรโพรงทั้งหมดสูงกว่า) จะปรากฏทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม



(a) $w = 14\%$ (*0.8OWC*)



(b) $w = 17\%$ (*OWC*)



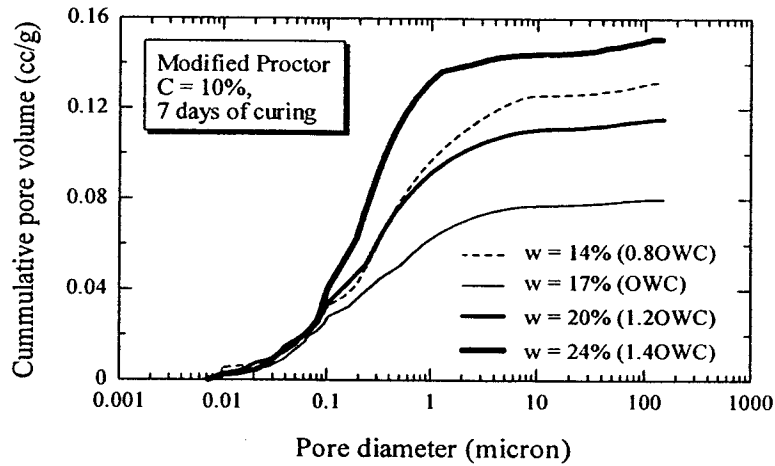
(c) $w = 20\%$ (*1.2OWC*)



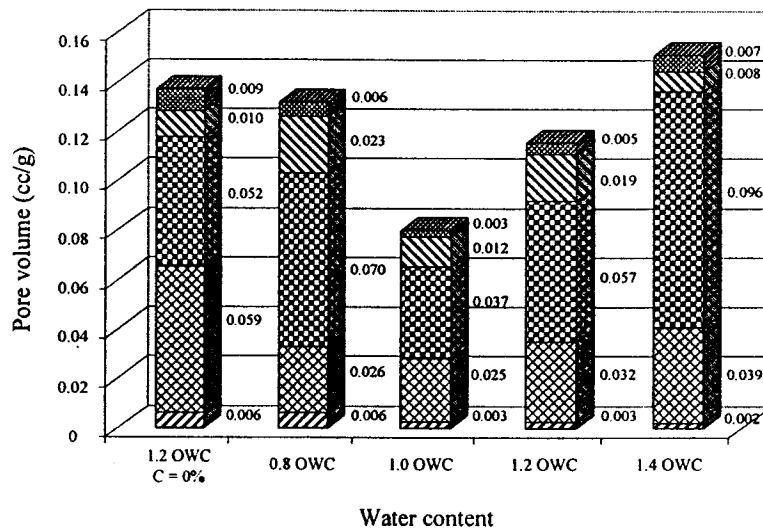
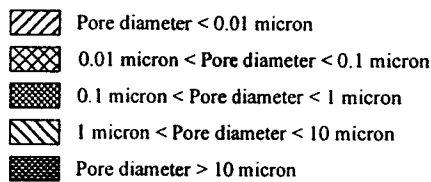
(d) $w = 24\%$ (*1.4OWC*)

รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ภายใต้พลังงานงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน

แม้ว่าปริมาตรโพรงทั้งหมดและปริมาตรโพรงแต่ละขนาดของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น 17 เปอร์เซ็นต์ (*OWC*) จะต่ำที่สุด (รูปที่ 3.15) แต่กำลังอัดมิได้มีค่าสูงที่สุด สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าสำหรับดินเหนียวซีเมนต์ นอกจากแปบริกแล้ว พันธะเชื่อมประสานเป็นตัวแปรที่ควบคุมการพัฒนา กำลังอัด ดินตัวอย่างที่ปริมาณความชื้น 20% (*1.2OWC*) แสดงกำลังอัดสูงสุด เนื่องจากผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานมีปริมาณมากที่สุด ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 3.4 ซึ่งแสดงปริมาณ Ca(OH)_2 มากที่สุด



(a)



(b)

รูปที่ 3.15 การกระจายโพรงของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ภายใต้พลังงานงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน

ตารางที่ 3.4 ปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินเหนียวซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ภายใต้พลังงานงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน

ปริมาณความชื้น (%)	น้ำหนักที่สูญเสีย (%)	ปริมาณ Ca(OH)_2 (%)
14% (0.8 OWC)	1.42	5.84
17% (OWC)	1.46	6.00
20% (1.2 OWC)	1.52	6.25
24% (1.4 OWC)	1.40	5.75

3.4.2.2 อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์

รูปที่ 3.16 และ 3.17 และตารางที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายขยาย การกระจายขนาดโพรง และปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินเหนียวซีเมนต์ในปริมาณซีเมนต์ต่างๆ และบดอัดที่ปริมาณความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้พลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน รูปที่ 3.16a-c, 3.16d-g และ 3.16h-j แสดงภาพถ่ายขยายของดินเหนียวซีเมนต์ในโซนแอคทีฟ ล้ำช้า และลดกำลัง ตามลำดับ ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะคล้ายคลึงกับของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์ เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่ผสมมีปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของดินเหนียว

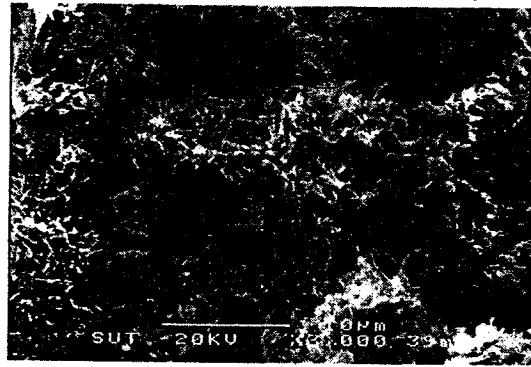
เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น (ในโซนแอคทีฟ) ผลึกภัณฑ์ไฮดรอกไซด์และผลึกภัณฑ์เชื่อมประสานในโพรงมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 3.16b และ c และตารางที่ 3.5) ผลึกภัณฑ์เชื่อมประสานไม่เพียงแต่เพิ่มแรงยึดระหว่างกลุ่มเม็ดดิน แต่ยังช่วยลดปริมาตรโพรงในดิน ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.17 โพรงที่เล็กกว่า 0.1 ไมครอน มีปริมาตรลดลงอย่างมากตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดลดลง และกำลังอัดเพิ่มขึ้น สำหรับโซนล้ำช้า ปริมาณผลึกภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ (รูปที่ 3.16d ถึง g) และผลึกภัณฑ์เชื่อมประสาน (ตารางที่ 3.5) แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ ดังนั้นการกระจายขนาดโพรงและกำลังอัดจึงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สำหรับช่วงลดกำลัง การเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ทำให้ปริมาณน้ำในมวลดินลดลง ส่งผลให้เกิดการรวมตัวของดินและปูนซีเมนต์ และการลดระดับปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ อันนำมาซึ่งการลดลงของผลึกภัณฑ์เชื่อมประสาน (ตารางที่ 3.5) กลุ่มดินซีเมนต์ที่เกิดขึ้นนี้มีความแข็งและมีกำลังต้านทานการบดอัดสูง ส่งผลให้ปริมาตรโพรงขนาด 1.0-0.1 ไมครอน และปริมาตรโพรงทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ (รูปที่ 3.17) ผลทดสอบนี้มีความแตกต่างจากผลทดสอบของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด ซึ่งกำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากโซนล้ำช้า ทั้งนี้เนื่องจากดินเหนียวมีผิวเฉพาะ (Specific surface) ที่มากกว่า ดังนั้นซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวได้อย่างสมบูรณ์จึงต้องการน้ำในปริมาณที่มากกว่าในกรณีของการปรับปรุงดินเม็ดหยาบด้วยซีเมนต์



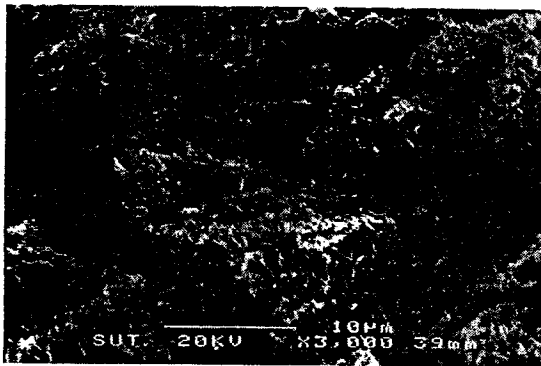
(a) ปูนซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์



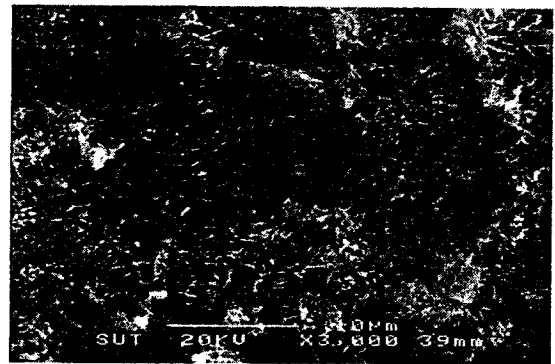
(b) ปูนซีเมนต์ 7 เปอร์เซ็นต์



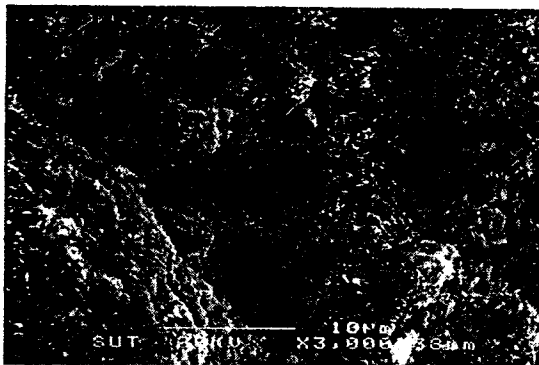
(c) ปูนซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์



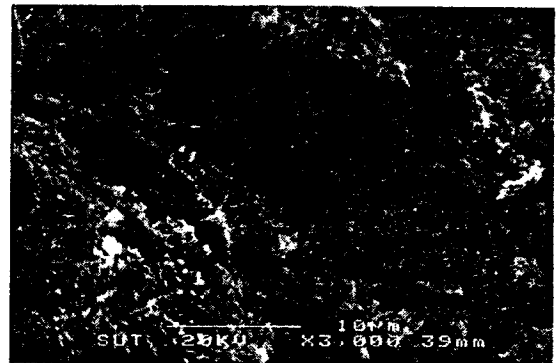
(d) ปูนซีเมนต์ 15 เปอร์เซ็นต์



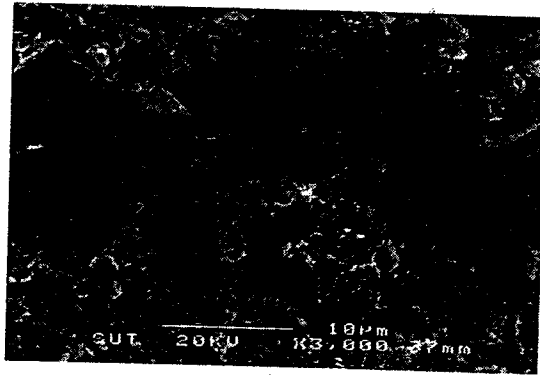
(e) ปูนซีเมนต์ 20 เปอร์เซ็นต์



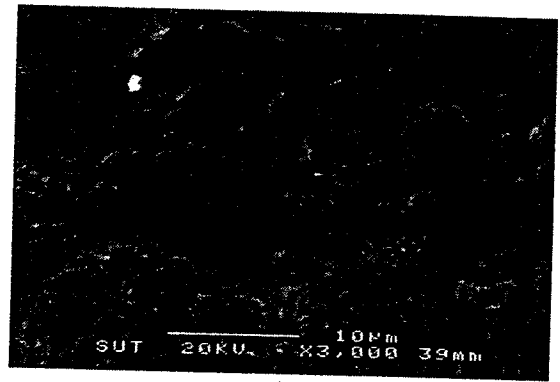
(f) ปูนซีเมนต์ 25 เปอร์เซ็นต์



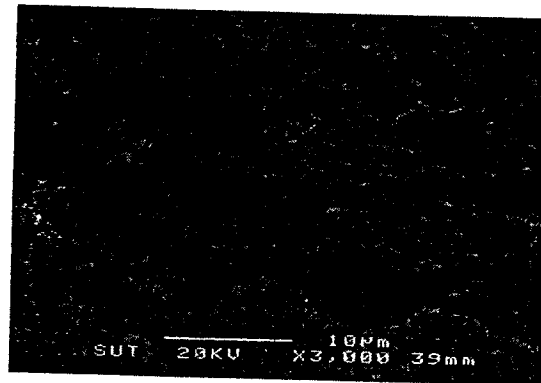
(g) ปูนซีเมนต์ 30 เปอร์เซ็นต์



(h) ปูนซีเมนต์ 35 เปอร์เซ็นต์



(i) ปูนซีเมนต์ 40 เปอร์เซ็นต์

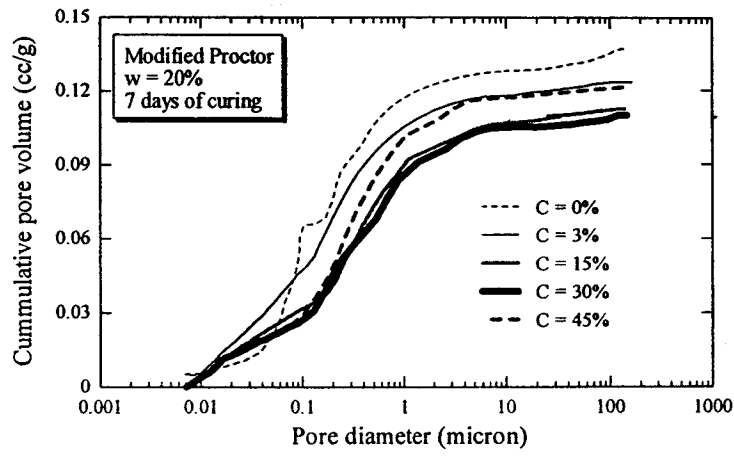


(j) ปูนซีเมนต์ 45 เปอร์เซ็นต์

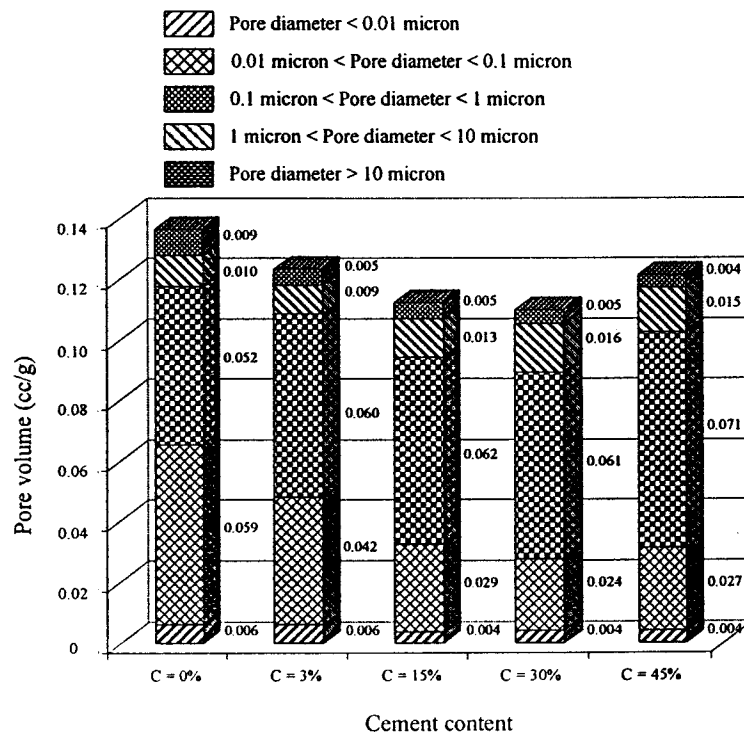
รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์ที่บดอัดที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน (รูปที่ 3.16a-c สำหรับ โชนแอกทีฟ รูปที่ 3.16d-g สำหรับ โชนล่าช้า และรูปที่ 3.16h-j สำหรับ โชนลดกำลัง)

ตารางที่ 3.5 ปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ที่บดอัดที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน

โชนการปรับปรุง	ปริมาณซีเมนต์ (%)	น้ำหนักที่สูญเสีย (%)	ปริมาณ Ca(OH)_2 (%)
แอกทีฟ	3	1.34	5.51
	7	1.50	6.17
	11	1.60	6.58
ล่าช้า	15	1.62	6.66
	20	1.65	6.78
	30	1.68	6.90
ลดกำลัง	35	1.54	6.33
	40	1.48	6.08
	45	1.37	5.63



(a)

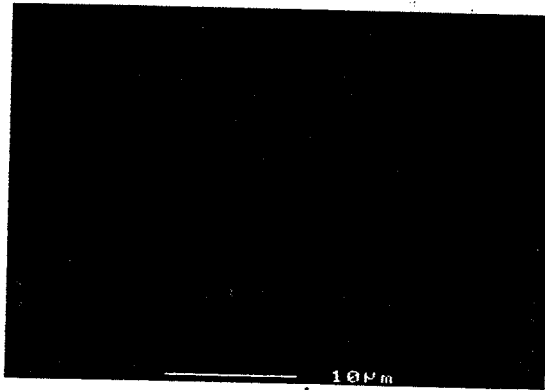


(b)

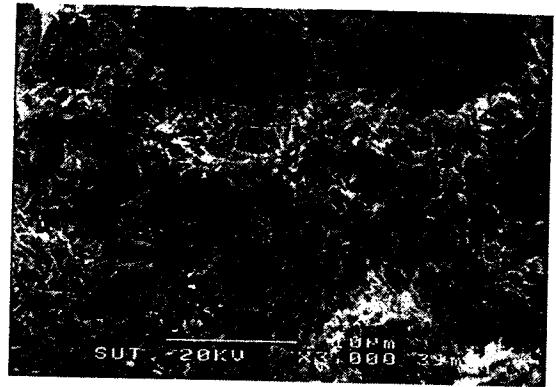
รูปที่ 3.17 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์ที่บดอัดที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน

3.4.2.3 อธิธิพลของอายุบ่ม

รูปที่ 3.18 แสดงอิทธิพลของอายุบ่มต่อโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ เซนต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ (1.20WC) ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จะเห็นได้ว่าหลังจาก 4 ชั่วโมง กลุ่มอนุภาคดินและโพรงถูกปกคลุมไปด้วยซีเมนต์เจล (รูปที่ 3.18a) เมื่ออายุบ่มมากขึ้น ผลึกกัณฑ์ไฮเดรชันในโพรงเพิ่มขึ้นและกลุ่มดินซีเมนต์มีขนาดใหญ่ขึ้น (รูปที่ 3.18b ถึง c) ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของผลึกกัณฑ์ไฮเดรชันกับเวลา (ตารางที่ 3.6)



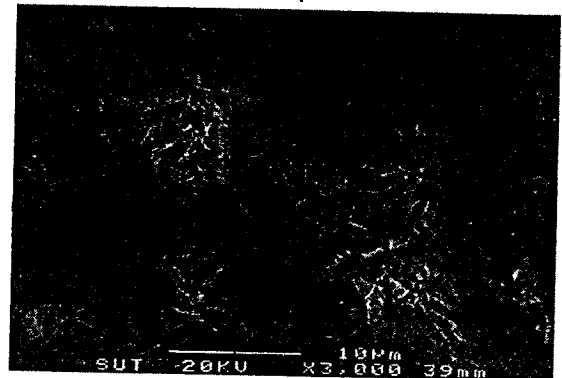
(a) อายุบ่ม 4 ชั่วโมง



(b) อายุบ่ม 7 วัน



(c) อายุบ่ม 28 วัน



(d) อายุบ่ม 60 วัน

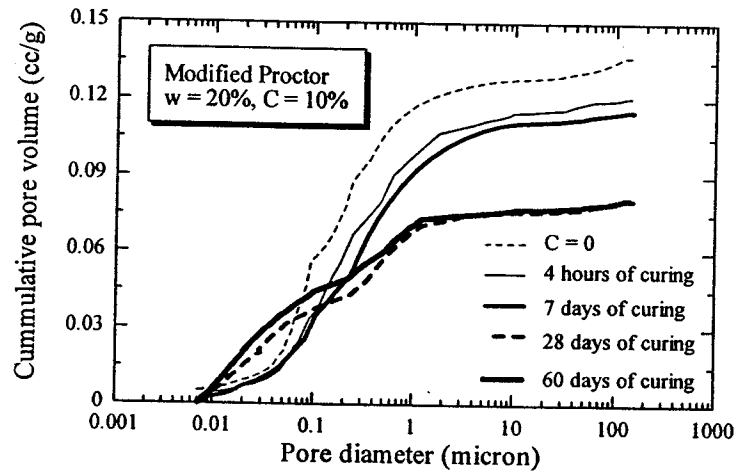
รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์ 10% บดอัดที่ 1.20WC
ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่มต่างๆ

ตารางที่ 3.6 ปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ของดินซีเมนต์ 10% บดอัดที่ 1.20WC
ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่มต่างๆ

อายุบ่ม (วัน)	น้ำหนักที่สูญเสีย (%)	ปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)
7	1.52	6.25
28	1.65	6.78
60	1.85	7.63

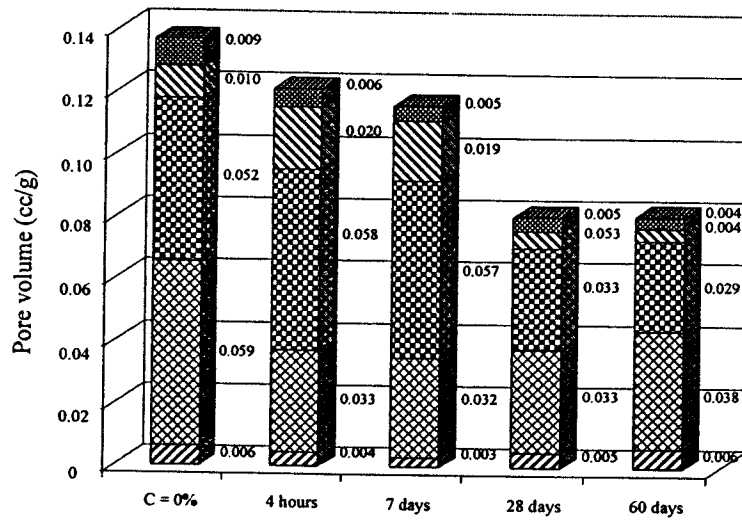
อิทธิพลของอายุบ่มต่อการกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์แสดงดังรูปที่ 3.19 จะเห็นได้ว่าที่อายุบ่มเริ่มต้น (อายุบ่มน้อยกว่า 7 วัน) โพรงที่เล็กกว่า 0.1 ไมครอน มีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่ โพรงที่ใหญ่กว่า 0.1 ไมครอน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าในช่วงอายุบ่ม 7 วัน ผลึกไฮดรอกไซด์โพรงขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน ในขณะที่ อนุภาคขนาดใหญ่ (อนุภาคของซีเมนต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ) ก่อให้เกิดกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ ที่มีโพรงขนาดใหญ่ หลังจากอายุบ่ม 7 วัน ปริมาณโพรงขนาดใหญ่กว่า 0.1 ไมครอน มีแนวโน้มลดลง ขณะที่ ปริมาณโพรงขนาดเล็กกว่า 0.1

ไมครอน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์เช่นนี้อาจเกิดเนื่องจากผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานอุดโพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) ทำให้ปริมาณโพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) เพิ่มขึ้น มีผลให้ปริมาณโพรงทั้งหมดลดลง



(a)

- Pore diameter < 0.01 micron
- 0.01 micron < Pore diameter < 0.1 micron
- 0.1 micron < Pore diameter < 1 micron
- 1 micron < Pore diameter < 10 micron
- Pore diameter > 10 micron



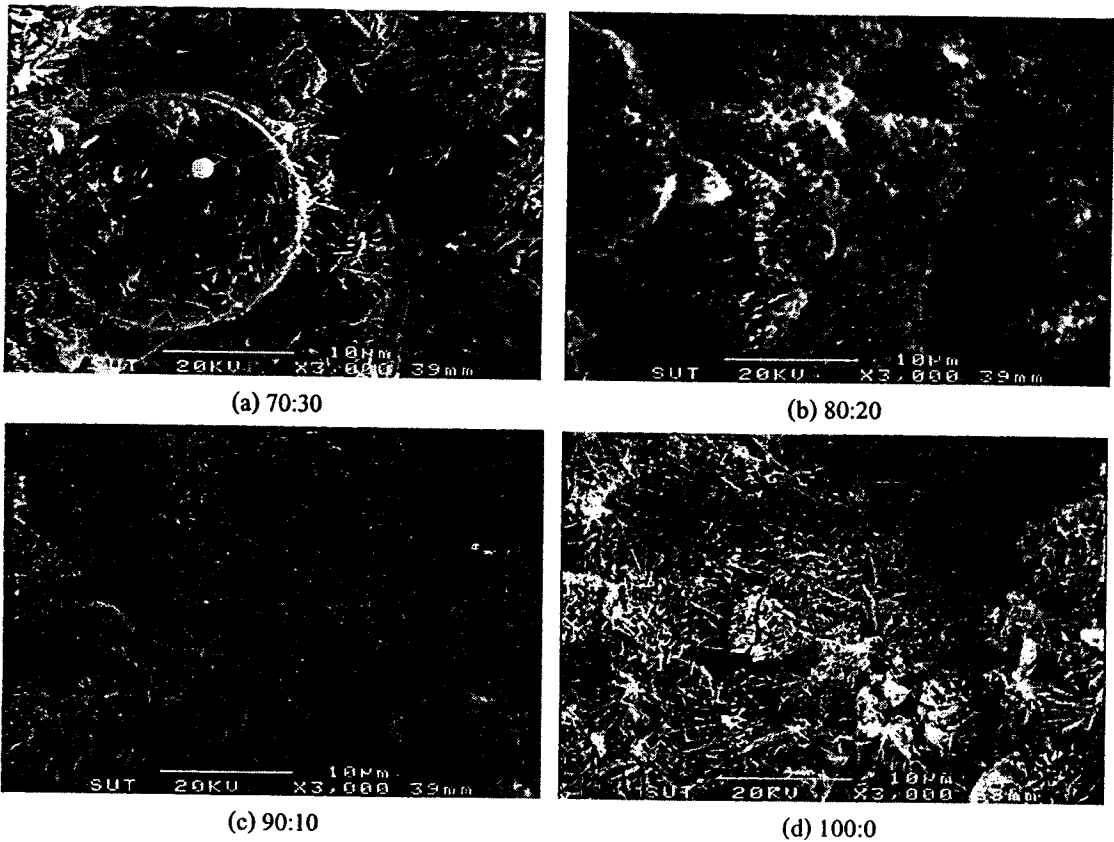
(b)

รูปที่ 3.19 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์ 10% บดอัดที่ 1.20WC ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่มต่างๆ

3.4.2.4 อิทธิพลของเถ้าลอย

3.4.2.4.1 ภาพถ่ายกำลังขยาย

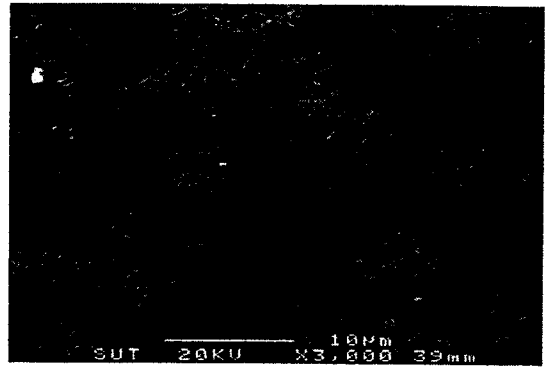
รูปที่ 3.20 ถึง 3.23 แสดงภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดที่บดอัดที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม (20 เปอร์เซ็นต์) ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ อนุภาคของเถ้าลอยปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจนระหว่างกลุ่มอนุภาคดินและซีเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอัตราส่วนการแทนที่ 30 เปอร์เซ็นต์ (C:F = 70:30) สำหรับทั้งสองอายุบ่ม (รูปที่ 3.20a, 3.21a, 3.22a และ 3.33a) ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ที่พัฒนาขึ้นรอบอนุภาคปูนซีเมนต์เชื่อมต่อกับอนุภาคของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยเข้าด้วยกัน ที่อายุบ่มเดียวกัน อนุภาคของเถ้าลอยยิ่งเล็กลงก็ยิ่งอุดโพรงในมวลดินได้มาก นอกจากนี้ยังพบว่าแม้ว่าผิวของเถ้าลอยถูกเคลือบด้วยชั้นของผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ แต่ผิวของเถ้าลอยที่อายุบ่มต่างๆ ยังคงเรียบ สิ่งนี้บ่งบอกว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุเฉื่อย ผลการวิจัยนี้แตกต่างจากผลการศึกษาด้านคอนกรีตเทคโนโลยี ซึ่งอิทธิพลของปฏิกิริยาปออสลานเห็นได้อย่างชัดเจนจากรอยกัดตามผิวของเถ้าลอย (Fraay et al., 1989; Berry et al., 1994; and Xu and Sarker, 1994; and Chindapasirt, 2005) ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมีปริมาณสูงมากพอที่จะผลิต Ca(OH)_2 เพื่อใช้ในปฏิกิริยาปออสลาน จากผลการสังเกตนี้ เราสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาปออสลานแทบจะไม่มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย



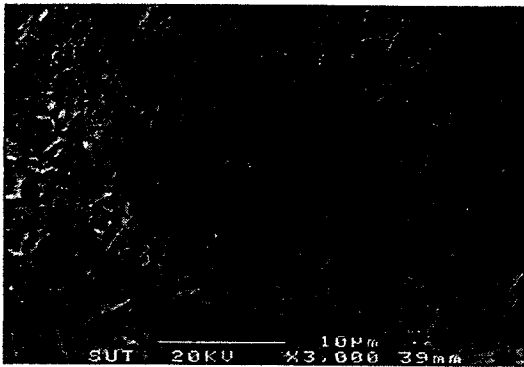
รูปที่ 3.20 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 28 วัน



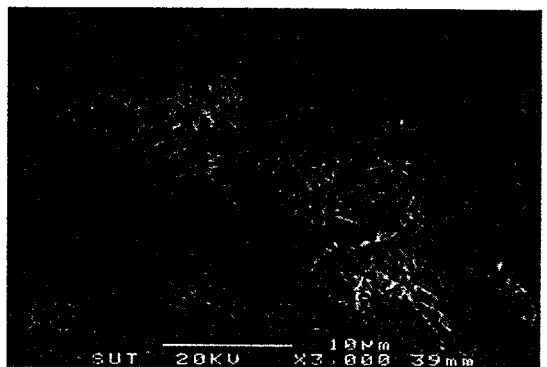
(a) 70:30



(b) 80:20

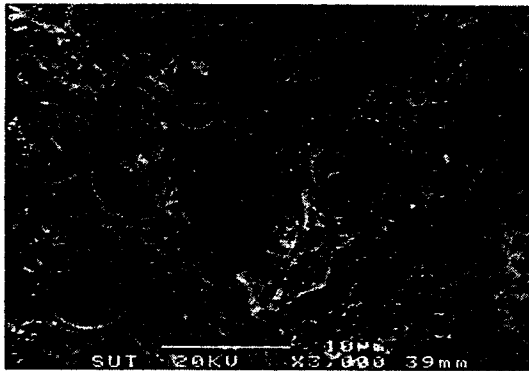


(c) 90:10

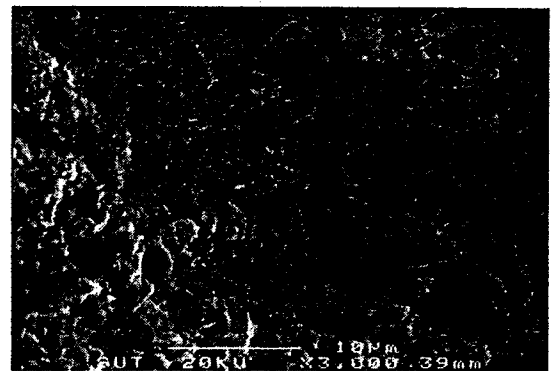


(d) 100:0

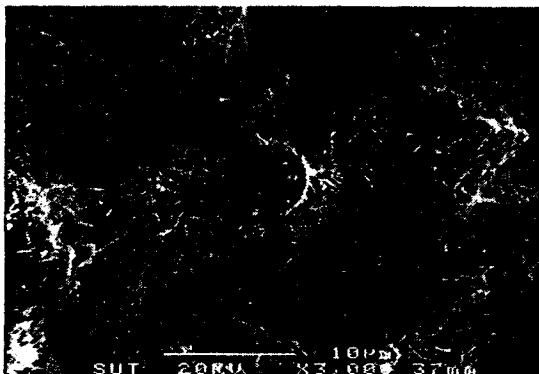
รูปที่ 3.21 ภาพถ่ายกำลังขยายของคินซีเมนต์ได้ล่อยหยาบที่อายุบ่ม 60 วัน



(a) 70:30



(b) 80:20

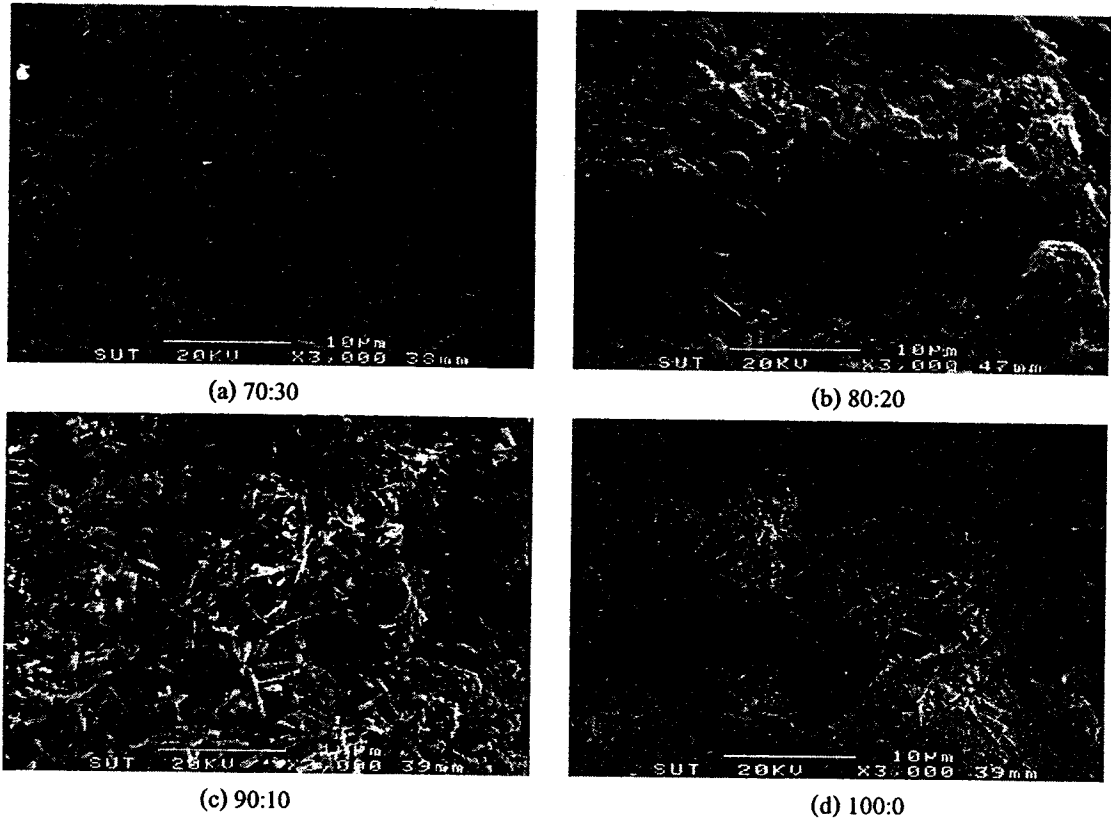


(c) 90:10



(d) 100:0

รูปที่ 3.22 ภาพถ่ายกำลังขยายของคินซีเมนต์ได้ล่อยละเอียดที่อายุบ่ม 28 วัน



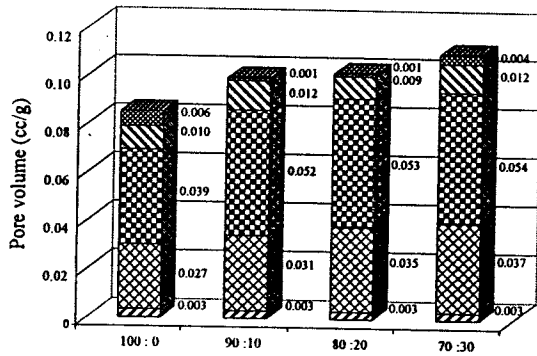
รูปที่ 3.33 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่ม 60 วัน

3.4.2.4.2 การกระจายขนาดโพรง

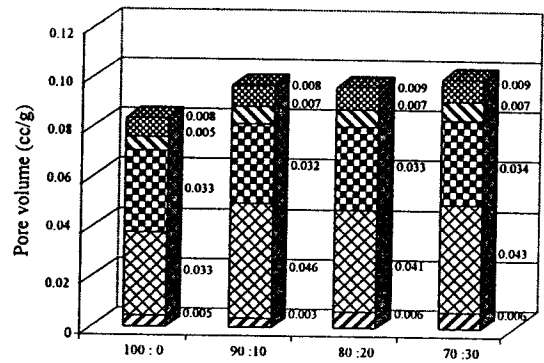
รูปที่ 3.34 และ 3.35 แสดงการกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดที่อายุบ่มและอัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ จะเห็นได้ว่าที่อายุบ่มหนึ่ง การกระจายขนาดโพรงแปรผันตามความละเอียดของเถ้าลอย ดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดมีปริมาตรโพรงทั้งหมด (Total pore volume) ต่ำกว่าปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับภาพถ่ายขยาย สำหรับดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบ ปริมาตรโพรงทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยหยาบมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของดินและปูนซีเมนต์ ดังนั้น การเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่จึงเป็นการเพิ่มมวลหยาบ ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโพรง แต่สำหรับดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียด การกระจายขนาดโพรงมีลักษณะเกือบเหมือนกันสำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่ ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยละเอียดมีลักษณะคล้ายกัน อีกทั้ง D_{50} ยังมีค่าใกล้เคียงกัน

แม้ว่าการกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดจะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า แม้ว่าโพรงทั้งหมดของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาตรมากกว่าของดินซีเมนต์ แต่กำลังอัดดินซีเมนต์เถ้าลอยมีค่าสูงกว่า สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยมิได้แปรผันตามการกระจายขนาดโพรงเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตาม การกระจาย

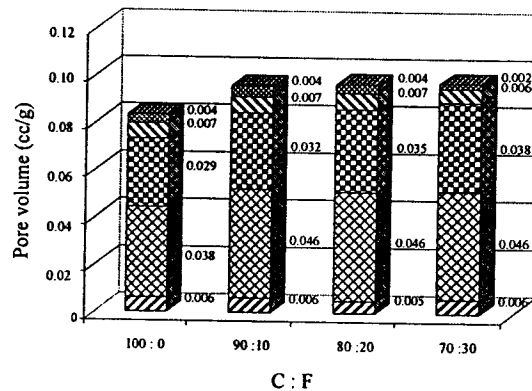
ขนาดโพรงอาจมีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและความคงทน เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น โพรงทั้งหมดและโพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) มีปริมาณลดลง ขณะที่ โพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) มีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันอุดโพรงในมวลดิน การเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันจะอธิบายในหัวข้อถัดไป สิ่งที่น่าสนใจอีกประเด็นหนึ่งที่พบจากการศึกษานี้ก็คือ โพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) ของทั้งดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดมีปริมาณสูงกว่าของดินซีเมนต์ ซึ่งหมายความว่าเถ้าลอยช่วยทำให้กลุ่มดินซีเมนต์ที่มีโพรงขนาดใหญ่มีปริมาณลดลง ส่งผลให้ปริมาณของโพรงขนาดเล็กเพิ่มขึ้น



C : F
(a) อายุบ่ม 7 วัน



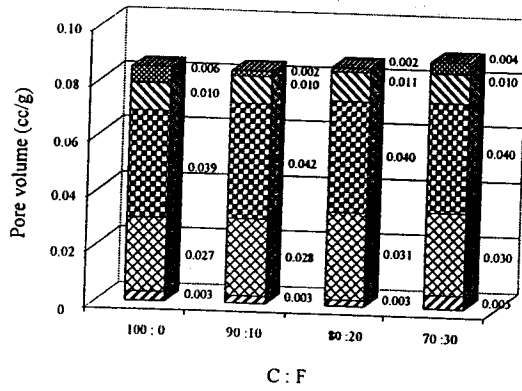
C : F
(b) อายุบ่ม 28 วัน



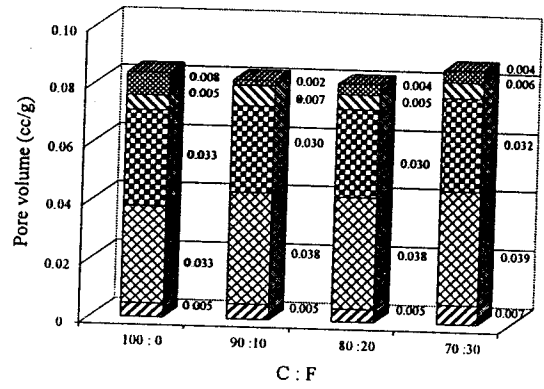
C : F
(c) อายุบ่ม 60 วัน

- Pore diameter < 0.01 micron
- 0.01 micron < Pore diameter < 0.1 micron
- 0.1 micron < Pore diameter < 1 micron
- 1 micron < Pore diameter < 10 micron
- Pore diameter > 10 micron

รูปที่ 3.34 การกระจายขนาด โพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่มต่างๆ



(a) อายุบ่ม 7 วัน



(b) อายุบ่ม 28 วัน

- Pore diameter < 0.01 micron
- 0.01 micron < Pore diameter < 0.1 micron
- 0.1 micron < Pore diameter < 1 micron
- 1 micron < Pore diameter < 10 micron
- Pore diameter > 10 micron

รูปที่ 3.35 การกระจายขนาดโพรงของคินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่มต่างๆ

3.4.2.4.3 ผลทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง

ตารางที่ 3.7 แสดง Ca(OH)_2 ของคินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสมสำหรับอัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่างๆ เราสามารถสรุปได้ว่า Ca(OH)_2 มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความละเอียด สำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่ม ที่ปริมาณความชื้นและอายุบ่มหนึ่ง Ca(OH)_2 ของคินซีเมนต์เถ้าลอยหายับและละเอียดลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ ที่ต่อเมื่ออัตราส่วนการแทนที่มีค่าเกินกว่าค่าๆ หนึ่ง ผลทดสอบนี้แตกต่างจากผลการศึกษาด้านคอนกรีตเทคโนโลยี ซึ่ง Ca(OH)_2 มีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความละเอียดและอัตราส่วนการแทนที่ (Berry et al., 1989; Sybertz and Wiens, 1991; and Harris et al., 1987; and Chindapasirt, 2005 and 2006 เป็นต้น) เนื่องจากปฏิกิริยาปอสลาน ปริมาณ Ca(OH)_2 เกิดมากที่สุดที่ C:F = 90:10 สำหรับทั้งการปรับปรุงค้ำยเถ้าลอยหายับและละเอียด และสำหรับทุกอายุบ่ม เมื่ออัตราส่วนการแทนที่มีค่าเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ Ca(OH)_2 มีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ Ca(OH)_2 ที่อัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณใกล้เคียงกับที่อัตราส่วนการแทนที่ 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวที่ว่าอัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดสูงสุด และกำลังอัดของคินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่ 0 และ 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่าประมาณใกล้เคียงกันสำหรับทุกอายุบ่ม ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวควบคุมการพัฒนาำลังอัด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า กำลังอัดของคินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีเงื่อนไขการผสม (ปริมาณซีเมนต์ อัตราส่วนการแทนที่ และอายุบ่ม) ต่างกัน จะมีค่าประมาณใกล้เคียงกัน ตลาคใดที่ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์มีปริมาณเท่ากัน

ตารางที่ 3.7 Ca(OH)₂ ของคินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่างๆ

Curing time (days)	Replacement ratio C : F	Fly ash	Ca(OH) ₂ (%)		
			Test	Hydration	Induced
7	100:0	-	6.67	6.67	0.00
	90:10	CFA	6.97	6.00	0.97
	80:20	CFA	6.79	5.34	1.45
	70:30	CFA	6.39	4.67	1.72
	90:10	OFA	6.77	6.00	0.77
	80:20	OFA	6.66	5.34	1.32
	70:30	OFA	6.12	4.67	1.45
	28	100:0	-	6.79	6.79
90:10		CFA	6.96	6.11	0.85
80:20		CFA	6.81	5.43	1.38
70:30		CFA	6.57	4.75	1.82
90:10		OFA	6.83	6.11	0.72
80:20		OFA	6.76	5.43	1.33
70:30		OFA	6.46	4.75	1.70
60		100:0	-	6.82	6.82
	90:10	CFA	7.16	6.14	1.02
	80:20	CFA	6.92	5.46	1.46
	70:30	CFA	6.68	4.77	1.91
	90:10	OFA	6.89	6.14	0.75
	80:20	OFA	6.81	5.46	1.35
	70:30	OFA	6.53	4.77	1.76
	90	100:0	-	7.07	7.07
90:10		CFA	7.28	6.36	0.91
80:20		CFA	6.94	5.66	1.28
70:30		CFA	6.67	4.95	1.72
90:10		OFA	7.07	6.36	0.71
80:20		OFA	6.83	5.66	1.17
70:30		OFA	6.62	4.95	1.67
120		100:0	-	7.08	7.08
	90:10	CFA	7.29	6.37	0.92
	80:20	CFA	6.96	5.66	1.30
	70:30	CFA	6.70	4.96	1.74
	90:10	OFA	7.09	6.37	0.72
	80:20	OFA	6.85	5.66	1.19
	70:30	OFA	6.68	4.96	1.72

จากภาพถ่ายขยายและผลการกระจายขนาดโพรง เราสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุเฉื่อย ที่ทำหน้าที่กระจายกลุ่มของอนุภาคคินซีเมนต์ที่รวมตัวกันเมื่อสัมผัสกับน้ำให้แตกตัวออกเป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง ด้วยเหตุนี้เอง คิวสัมผัสที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันมีปริมาณมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากปริมาณ Ca(OH)₂ ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการกระจายตัว (Dispersion effect) (ตารางที่ 3.7) ปริมาณ Ca(OH)₂ ที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถคำนวณได้จากผลต่างของ Ca(OH)₂ ของคินซีเมนต์เถ้าลอยที่เกิดจากอิทธิพลร่วม (อิทธิพลจากไฮเดรชันและการกระจายตัว) และจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน Ca(OH)₂ เนื่องจากอิทธิพลร่วมหาได้โดยตรงจากผลทดสอบการวัดความร้อน

ภายใต้ศูนย์ถ่วงของดินซีเมนต์ละลาย ในทำนองเดียวกัน Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถหาได้จากการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วงของดินซีเมนต์ซึ่งมีปริมาณซีเมนต์เท่ากับของดินซีเมนต์ละลาย เพื่อความง่าย Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ใดๆ สามารถประมาณได้จาก Ca(OH)_2 ที่ทราบค่าของดินซีเมนต์ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ค่าหนึ่ง โดยการสมมติว่าการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ (Sinsiri et al., 2006) ดังนั้น Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (H) ที่อัตราส่วนการแทนที่ใดๆ ที่อายุบ่มค่าหนึ่งสามารถประมาณได้จาก

$$H = T \times \left(1 - \frac{F}{100}\right) \quad (5.1)$$

เมื่อ T คือ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ (อัตราส่วนการแทนที่เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งหาได้จากการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง และ F คืออัตราส่วนการแทนที่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ Sinsiri et al. (2006) ได้แสดงให้เห็นว่า Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสละลายมีค่าต่ำกว่า Ca(OH)_2 ที่เกิดจากไฮเดรชัน (H) เสมอ เนื่องจากการใช้ Ca(OH)_2 ในปฏิกิริยาปอสลาน แต่ในกรณีของดินซีเมนต์ละลาย Ca(OH)_2 เนื่องจากอิทธิพลร่วมมีค่าสูงกว่าของปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่ม Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของเกล็ดและอัตราส่วนการแทนที่สำหรับทุกอายุบ่ม

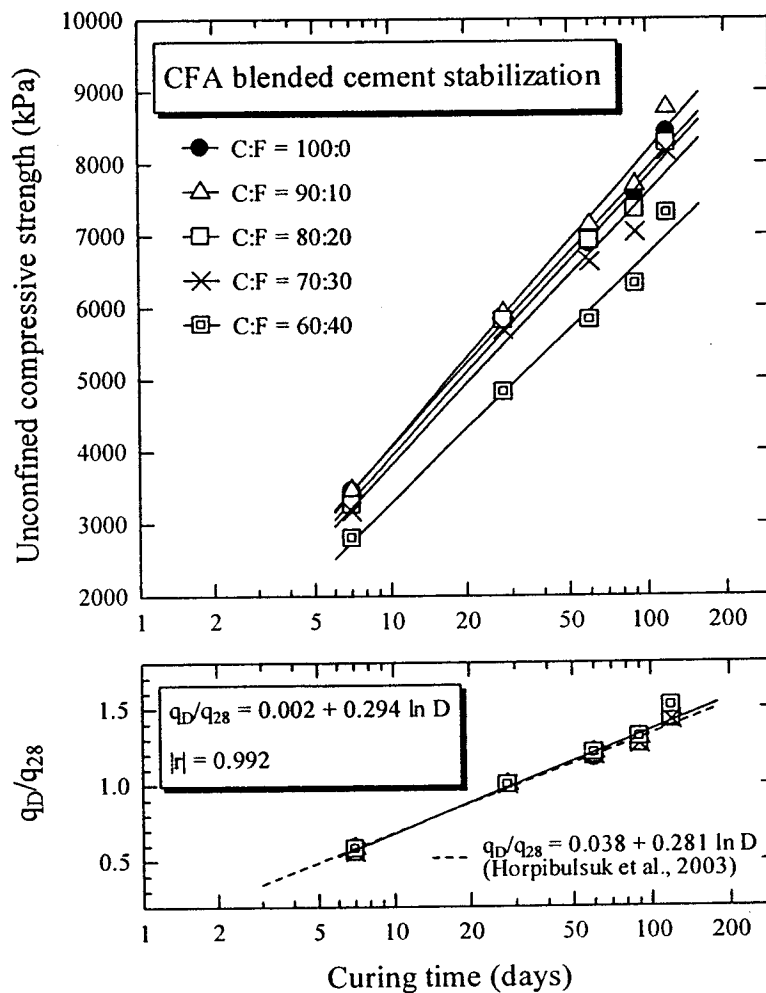
3.5 การวิจารณ์ผลทดสอบ

จากผลทดสอบทั้งหมด โพรงในมวลดินซีเมนต์สามารถจำแนกออกได้เป็นสามประเภท ได้แก่ โพรงอากาศ (>10 ไมครอน) โพรงขนาดใหญ่ระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์ (10-0.1 ไมครอน) และ โพรงขนาดเล็กระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์ (<0.1 ไมครอน) โพรงขนาดใหญ่ระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์มีปริมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรโพรงทั้งหมด และ โพรงขนาดเล็กระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์มีปริมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรโพรงทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบการกระจายขนาดโพรงของดินเหนียว อิมตัวด้วยน้ำ (Nagaraj et al., 1990) ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ทำให้ปริมาตรทั้งหมดลดลง แต่ปริมาตรโพรงแต่ละขนาดเทียบกับปริมาตรโพรงทั้งหมดยังคงเหมือนเดิม

เราอาจสมมติว่าเมื่อผสมปูนซีเมนต์เข้ากับดินเหนียวเปียก ปูนซีเมนต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะถูกล้อมรอบด้วยอนุภาคของดินและกลายเป็นกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ขนาดใหญ่ ก่อให้เกิดโพรงขนาดใหญ่ ซีเมนต์เจล (ซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ) จะเสถียรอยู่ในโพรงระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์ขนาดเล็กด้วยแรงดึงดูดที่เกิดจากพลังงานการบดอัดและแรงปฏิกิริยาทางกายภาพเคมี (Physicochemical forces) และในโพรงระหว่างกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ขนาดใหญ่ด้วยแรงดึงผิวที่เกิดขึ้นระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์และซีเมนต์

เจด แม้ว่าอากาศจะถูกไล่ออกจากมวลดินซีเมนต์โดยการบดอัด แต่ก็ไม่อาจไล่ออกได้ทั้งหมด ดังจะเห็นได้จากโพรงอากาศที่ตกค้างอยู่ในปริมาณ 8-10 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรโพรงทั้งหมด (ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำประมาณ 90-92 เปอร์เซ็นต์) etailoyซึ่งเป็นวัสดุไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำสามารถกระจายกลุ่มของอนุภาคดินและซีเมนต์ให้เป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ดีขึ้น

รูปที่ 3.36 แสดงการพัฒนากำลังอัด (q_D/q_{28}) กับเวลาของดินซีเมนต์etailoyละเอียด เมื่อ q_D คือกำลังอัดที่อายุบ่ม D วัน และ q_{28} คือกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเหมือนกันสำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่และสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นสูงที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2003) ผลทดสอบนี้สนับสนุนบทสรุปที่ได้จากการสังเกตโครงสร้างจุลภาคที่ว่า การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์etailoyขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยที่ปฏิกิริยาปอสถานเทบจะไม่มีบทบาท



รูปที่ 3.36 การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์etailoyละเอียดกับเวลา

จากการศึกษานี้ เราสามารถสรุปได้ว่ากำลังอัดของคินซีเมนต์เถ้าลอยขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วม (ไฮดรเจนและการกระจายตัว) อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮดรเจนถูกควบคุมโดยปริมาณปูนซีเมนต์ ขณะที่อิทธิพลจากการกระจายตัวถูกควบคุมโดยปริมาณเถ้าลอย (อัตราส่วนการแทนที่) ที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮดรเจนมีมากที่สุด แต่อิทธิพลจากการกระจายตัวมีน้อยที่สุด (Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นจากการกระจายตัวมีปริมาณต่ำสุด) ในทางตรงกันข้าม ที่อัตราส่วนการแทนที่ 40 เปอร์เซ็นต์ อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮดรเจนมีน้อยที่สุด แต่อิทธิพลจากการกระจายตัวสูงมีมากที่สุด แม้ว่าอิทธิพลจากการกระจายตัวที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ จะมีน้อยที่สุด แต่กำลังอัดมีค่าสูงที่สุด และสามารถกล่าวได้ว่าอัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ไฮดรเจน (Ca(OH)_2) เนื่องจากอิทธิพลร่วมมีปริมาณมากที่สุด ดังนั้น เราสามารถกล่าวได้ว่า นอกจากการประยุกต์ใช้เถ้าลอยในรูปแบบของวัสดุแทนที่ (Replacement material) แล้ว เรายังสามารถประยุกต์ใช้เถ้าลอยในรูปแบบของวัสดุช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซีเมนต์ (Dispersing material) ที่เติมลงในปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาไฮดรเจน และเพิ่มกำลังอัด ซึ่งอัตราส่วนการเพิ่มที่เหมาะสมนั้น จำเป็นต้องได้รับการศึกษาต่อไป

บทที่ 4

บทสรุป

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ etailoy เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม อันได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ พลังงาน การบดอัด อายุบ่ม อัตราส่วนการแทนที่ และความละเอียดของetailoy บทสรุปของงานวิจัยนี้มีดังนี้

1. การปรับปรุงด้วยซีเมนต์ช่วยเพิ่มพันธะเชื่อมประสานระหว่างกลุ่มอนุภาคดินและลดโพรง ในมวลดิน โพรงสามารถจำแนกออกได้เป็นสามประเภท ได้แก่ โพรงอากาศ (>10 ไมครอน) โพรงขนาดใหญ่ระหว่างกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ ($10-0.1$ ไมครอน) และโพรงขนาดเล็กระหว่างกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ (<0.1 ไมครอน)
2. กำลังอัดสูงสุดของดินเหนียวซีเมนต์อยู่ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่สภาวะนี้ กำลังของพันธะเชื่อมประสานมีความแข็งแรงที่สุด แม้ว่าโพรงทั้งหมดจะมีปริมาตรสูงกว่าโพรงทั้งหมดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์แปรผันอย่างมากกับพันธะเชื่อมประสาน
3. ที่อายุบ่มและปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง การปรับปรุงดินสามารถแบ่งออกเป็นสามโซน ได้แก่ แอคทีฟ ล่าช้า และลดกำลัง ในโซนแอคทีฟ ปริมาตรโพรงขนาดน้อยกว่า 0.1 ไมครอน ลดลงอย่างมากตามปริมาณซีเมนต์เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพันธะเชื่อมประสาน ในโซนล่าช้า ทั้งการกระจายขนาดโพรงและผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานเกิดการเปลี่ยนแปลง น้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดน้อย ในโซนลดกำลัง ปริมาณน้ำมีไม่เพียงพอสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์มากเกินไป จึงก่อให้เกิดกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ขนาดใหญ่และแข็ง ดังนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาตรโพรงจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ กำลังอัดลดลง
4. ในช่วงเริ่มต้นของการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ โพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) มีปริมาตรลดลงอย่างมาก ขณะที่ ปริมาตรโพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) เพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาตรโพรงขนาดใหญ่ที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอนุภาคปูนซีเมนต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ หลังจาก 7 วัน โพรงขนาดใหญ่และโพรงทั้งหมดมีปริมาตรลดลง ขณะที่ โพรงขนาดเล็กมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพันธะเชื่อมประสานทำหน้าที่อุดโพรงขนาดใหญ่ในโครงสร้าง

5. เถ้าลอยมีผลต่อคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวน้อยมาก ขบวนการแลกเปลี่ยนประจุก่อให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มของดินเหนียว มีผลให้พิกัดพลศาสตร์ลดลงและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงขึ้น ปริมาณซีเมนต์ยิ่งมาก (อัตราส่วนการแทนที่ยิ่งต่ำ) การรวมตัวเป็นกลุ่มก็ยิ่งมาก การรวมตัวเป็นกลุ่มมีอิทธิพลต่อขีดจำกัดเหลวเล็กน้อย ดังนั้น ปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินซีเมนต์เถ้าลอยจึงมีค่าใกล้เคียงกับของดินธรรมชาติ
6. ผิวของเถ้าลอยในดินซีเมนต์ยังคงเรียบแม้ว่าอายุบ่มและความละเอียดจะเพิ่มขึ้น สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปออสถานเกิดขึ้นได้น้อยมาก ดังนั้น เถ้าลอยจึงถูกพิจารณาเป็นวัสดุเฉื่อยในงานปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ ปรากฏการณ์นี้แตกต่างจากงานคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัด ซึ่ง $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณมากพอต่อการใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน
7. ผลการกระจายขนาดโพรงแสดงให้เห็นว่าโพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) ในดินซีเมนต์เถ้าลอยมีปริมาณสูงกว่าในดินซีเมนต์ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำทำหน้าที่กระจายกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ขนาดใหญ่ (ที่มีโพรงขนาดใหญ่) ให้เป็นกลุ่มขนาดเล็ก (ที่มีโพรงขนาดเล็กลง)
8. อิทธิพลของการกระจายตัว โดยเถ้าลอยช่วยเพิ่มผิวที่ทำปฏิกิริยากับน้ำและมีผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดียิ่งขึ้น ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ตามอัตราส่วนการแทนที่ และความละเอียด การเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับเวลานอกจากจะสังเกตได้จากผลการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้สุญญากาศแล้วยังสังเกตได้จากผลการกระจายขนาดโพรง โพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) และโพรงทั้งหมดมีปริมาณลดลงตามเวลา สิ่งนี้แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่ทำหน้าที่อุดโพรง
9. การสังเกตเชิงมหภาคของผลการพัฒนากำลังอัดกับเวลาสนับสนุนบทสรุปที่ได้จากโครงสร้างจุลภาคที่ว่า การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก
10. ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์เถ้าลอยเป็นผลมาจากอิทธิพลร่วม (ปฏิกิริยาไฮเดรชันและการกระจายตัว) ปริมาณความชื้นที่ 1.2OWC และอัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงดิน ซึ่งเกิด $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในปริมาณที่มากที่สุด
11. งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือใช้ตามธรรมชาติ (เถ้าลอย) ในการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อลดต้นทุนการก่อสร้างและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังเป็นงานวิจัยพื้นฐานในการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การปรับปรุงโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุลและแข่งขันได้ ยุทธศาสตร์การบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และยุทธศาสตร์การพัฒนาคนและสังคมที่มีคุณภาพ

เอกสารอ้างอิง

- เกษม เพชรเกตุ และ พินิต ตั้งบุญเติม (2540), การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, *โยธา* สาร, หน้า 30-39.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ (2547), *ถ้ำลอยในงานคอนกรีต*, สมาคมคอนกรีตไทย, 109 หน้า
- สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล บุรฉัตร ฉัตรวีระ วรรณิการ์ พหลพิพัฒน์ และชาติชาย เสงวามิชย์ (2540), การศึกษาการหดตัวแบบอโตจีนัสของซีเมนต์ผสมถ้ำลอยที่ผ่านการคัดขนาด, *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 4*, ภูเก็ต
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน (2546), ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์, *วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา*, หน้า 25-31.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข รุ่งลาวัลย์ ราชัน ศิวฤทธิ์ หิรัญเรือง และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (2549) โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ถ้ำลอย. *วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11*.
- Ahemed, S., Lovell, C.W., Jr. and Diamond, S. (1974), "Pore size and strength of compacted clay", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.100, pp.407-425.
- Bell, F.G. (1976), "The influence of the mineral content of clay on their stabilization with cement", *Association of Engineering Geologists*, pp.267-278.
- Bengochea, I.G., Lovell, C.W., and Altschaeffl, A.G. (1979), "Pre distribution and permeability of silty clays", *Journal of the Geotechnical Division*, ASCE, Vol.105, pp.839-859.
- Berry, E.E., Hemmings, R.T., Zhang, M.H., and Cornelious, B.J. and Golden, D.M. (1994), "Hydration in high-volume fly ash binders", *ACI Material Journal*, Vol. 91, pp.382-389.
- Chew, S.H., Kamaruzzaman, A.H.M., and Lee, F.H. (2004), "Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays", *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.130, No.7, pp.696-706.
- Chindapasirt, 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.
- Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T. (2005), "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement plates", *Cement and Concrete Composites*, Vol.27, pp.425-258.

- 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 mortars", *Proc. of 8th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Singapore, p.6.
- Clough, G.W., Sitar, N., Bachus, R.C. and Rad, N.S. (1981), "Cemented sands under static loading", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE. Vol.107, No.GT6, pp.799-817.
- Collins, K., and McGown, A. (1974), "The form and function of microfibrillar fibers in a variety of natural soils", *Geotechnique*, Vol.24, No.2, pp.223-254.
- Consoli, N.C., Rotta, G.V. and Prietto, P.D.M. (2000), "Influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soil", *Geotechnique*, Vol.50, No.1, pp.99-105.
- 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.
- Delage, P., and Lefebvre, G. (1984), "Study on the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.21, pp.21-35.
- El-Jazairi, B., and Illston, J.M. (1977), "A simultaneous semi-isothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement plates", *Cement and Concrete Research*, Vol.7, pp.247-258.
- El-Jazairi, B., and Illston, J.M. (1980), "The hydration of cement plate using the semi-isothermal method of thermogravimetry", *Cement and Concrete Research*, Vol.10, pp.361-366.
- Felt, E.J. (1955), "Factors influencing physical properties of soil-cement mixture", *Highway Research Board*, pp.138-163.
- Fraay, A.L.A, Bijen, J.M., and de Haan, Y.M. (1989), "The reaction of fly ash in concrete: A critical examination", *Cement and Concrete Research*, Vol.19, pp.235-246.
- Griffiths, F., and Joshi, R.C. (1989), "Change in pore size distribution due to consolidation of clays", *Geotechnique*, Vol.39, No.1, pp.159-167.
- 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.
- Herzog, A. and Mitchell, J.K. (1963), "Reaction accompanying stabilization of clay with cement", *Highway Research Record*, pp.146-171.

- 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.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S. (1999), "Prediction of strength and consolidation parameters of cement stabilized clays", *Report of the Faculty of Science and Engineering*, Saga University, Japan, Vol.28, No.2, pp.27-38.
- 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., Bergado, D.T., and Lorenzo, G.A. (2004a), "Compressibility of cement admixed clays at high water content", *Geotechnique*, Vol.54, No.2, pp.151-154.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Bergado, D.T. (2004b), "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., 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., Rachan, R. and Nagaraj, T.S. (2006a) Microstructural study on strength development of cement-fly ash stabilized clay, *International Symposium on Lowland Technology*.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R. (2006b), "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., Katkan, W., and Apichatvullop, A. (2008a) "An approach for assessment of compaction curves of fine-grained soils at various energies using a one point test", *Soils and Foundations*, Vol.48, No.1, pp.155-126.
- Horpibulsuk, S., Kumpala, A., and Katkan, W. (2008b). "A case history on underpinning for a distressed building on hard residual soil underneath non-uniform loose sand", *Soils and Foundations*, Vol.48, No.2, pp.267-286.
- Kamon, M. (1979), *Study on Engineering Properties of Very Soft Clay and Its Stabilization*, Doctoral dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan (in Japanese).

- Lapierre, C., Leroueil, S., and Locat, J. (1990), "Mercury intrusion and permeability of Louiseville clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp.761-773.
- Lorenzo, G.A., and Bergado, D.T. (2004), "Fundamental parameters of cement-admixed clay – New approach", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.130, No.10, pp.1042-1050.
- Igarashi, S., Bentur, A., and Mindess, S. (1996), "Microhardness testing of cementations materials", *Advanced Cement Based Materials*, Vol.4, pp.48-57.
- 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, Proc. of 7th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Kochi, Japan.
- Kamaluddin, M. and Balasubramaniam, A.S. (1995), "Overconsolidated behavior of cement treated soft clay", *Proceedings of 10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Thailand, 407-412.
- Kamon, M. and Bergado, D.T. (1992), "Ground improvement techniques", *Proceedings of 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, pp.526-546.
- Kasama, K., Ochiai, H., 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.
- Kitazume, M., Yamazaki, H. and Tsuchida, T. (2000), "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.
- Kohgo, Y., and Horpibulsuk, S. (1999), "Simulation of volume change behavior of yellow soil sampled from Khon Kaen City in Northeast Thailand", *Proceedings of 11th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, Korea, pp.141-144.
- Kohgo, Y., Tamrakar, S.B., and Tang, H.G. (1997), "Investigations on the mechanical properties of typical soils distributed in northeast Thailand for the construction of irrigation facility", *Technical Report*, Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 222p.
- Lambe, T.W. (1958), "The structure of compacted clay", *Proc. ASCE*, Vol.48, No.SM2, pp.1-34.

- Locat, J., Berube, M.A., and Choyette, M. (1990), "Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clay: Shear strength development", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp.294-304.
- Matsuo, S., and Kamon, M. (1976), "Terminology of clay structure", *Journal of the Japanese Geotechnical Society*, Vol.24, No.1, pp.59-64.
- Metcalf, J.B. (1977), "Principle and application of cement and lime stabilization. *Australian Road Research Board*, 20p.
- Mindess, S. (1996), "Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone, *J.C. ed., RILEM Technical Committee 108-ICC Report*, E&FN SPON, pp.48-63.
- 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", *Proceeding 14th National Conference on Clay and Clay Minerals*, Vol.26, pp. 279 – 305.
- 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.
- 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.
- Miura, N., Yamadera, A., and Hino, T. (1999), "Consideration on compression properties of marine clay based on the pore size distribution measurement", *Journal of Geotechnical Engineering*, JSCE. 624III-47.
- Moh, Z.C. (1965), "Reaction of soil minerals with cement and chemical", *Highway Research Board*, pp.39-61.
- Nagaraj, T.S., Vatsala, A., and Srinivasa Murthy, B.R. (1990), Discussion on change in pore size distribution due to consolidation of clays by Griffith and Joshi, *Geotechnique*, Vol.40, No.2, pp.303-309.
- Nagaraj, T.S., Miura, N., Yamadera, A. and Yaligar, P. (1997), "Strength assessment of cement admixed soft clays – Parametric study", *Proceedings of International Conference on Ground Improvement Techniques*, Macau, pp.379-386.
- Nontananandh, S., and Yupakorn, A. (2002), "Influence of cement content and water content on strength of lateritic soil cement", *Proc. Symposium on Soft Ground Improvement and Geosynthetic Applications*, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 281-294.

- Nontananandh, S., Yoobanpot, T., and Boonyong, S. (2005), "Scanning electron microscopic investigations of cement stabilized soil", *10th National Convention on Civil Engineering*, pp.GTE23-GTE26.
- Ollivier, J.P. and Massat, M. (1996), "The effect of the transition zone on transfer properties of concrete", J.C. ed, *RILEM Technical Committee 108-ICC Report*, E&FN SPON, pp.118-131.
- Owens, P.L. (1979), "Fly ash and its usage in concrete", *Journal of Concrete Society*, Vol.13, pp.21-26.
- Portland Cement Association (1959), *Soil – Cement Laboratory Handbook*. Illinois: Portland Cement Association.
- Prakash, K., and Sridharan, A. (2004), "Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soils", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.27, No.2, pp.220-225.
- Ruengkrairergsa, T. (1982), "Principal of Soil Stabilization", *Group Training in Road Construction*, Bangkok, Thailand, pp.17-26.
- Tateishi, Y. (1997), "Geotechnical properties and stability of cut slope surface of Diatom earth", Doctoral dissertation, Saga University, Saga, Japan (in Japanese).
- Tatsuoka, F. and Kobayashi, A. (1983), "Triaxial strength characteristics of cement-treated soft clay", *Proceedings of 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.421-426.
- Terashi, M., Tanaka, H. and Okumura, T. (1979), "Engineering properties of lime treated marine soils and DMM", *Proceedings of 6th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.191-194.
- Terashi, M., Tanaka, H., Mitsumoto, T., Niidome, Y., and Honma, S. (1980), "Fundamental of lime and cement treated soils", *Report of Port and Harbour Research Institute*, Vol.19, No.1, pp.33-62 (in Japanese).
- Terashi, M., Tanaka, H., and Okumura, T. (1979), "Engineering properties of lime treated marine soils and DMM", *Proceedings of 6th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.191-194.
- Thumasujarit, K., and Tangtermsirikul, S. (2004), "Bleeding model for fly ash concrete", *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9*, หน้า MAT184-MAT189.
- Uddin, K. (1994), *Strength and Deformation Behaviour of Cement Treated Bangkok Clay*, Doctoral Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok. Thailand.
- Udomchore, V. (1991), *Origin and Engineering Characteristics of the Problem Soils in the Khorat Basin, Northeastern Thailand*, D.Tech. Dissertation, Asian Institute of Technology.

- Xu, A., and Sarker, S.L. (1994), "Microstructure development in high-volume fly ash cement system", *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, Vol.6, pp.117-136.
- Wang, K.S., Lin, K.L., Lee, T.Y., and Tzeng, B.Y. (2004), "The hydration characteristics when C₂S is present in MSWI fly ash slag", *Cement and Concrete Research*, Vol.26, pp.323-330.
- Washburn, E.W. (1921). "Note on method of determining the distribution of pore size in porous material", *Proceedings of the National Academy of Science*, USA. 7:115-116.
- Woods, L. and Yoder, E.J. (1952), "Soil – cement and construction practices in Geotechnical Engineering", *Highway Research Board*.
- Yamadera, A. (1999), Microstructural Study of Geotechnical Characteristics of Marine Clays, Ph.D. Dissertation, Saga University, Japan.
- Yamaguchi, H. (1992), "Changes in pore size distribution in isotropic consolidation and drained shear processes of undisturbed peat", *Journal of Geotechnical Engineering*, JSCE, Vol.III-19, pp.1-8 (in Japanese with English summary).
- Yamaguchi, H., and Ikenaga, H. (1992), "Pore structure of compacted soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, JSCE, Vol.III-19, pp.35-44 (in Japanese with English summary).
- Yamaguchi, H., Hashizume, Y., and Ikenaga, H. (1992), "Change in pore size distribution of peat in shear processes", *Soils and Foundations*, Vol.32, No.4, pp.1-16.
- 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.
- Yin, J.H., and Lai, C.K. (1998), "Strength and stiffness of Hong Kong marine deposit mixed with cement", *Geotechnical Engineering Journal*, Vol.29, No.1, pp.29-44.
- Yong, R.N., and Warkentin, B.P. (1960), *Introduction to Soil Behavior*, Macmillan, New York.
- Yong, R.N., and Warkentin, B.P. (1975), *Soil Properties and Behaviour*, Elsevier Scientific Publishing Company.

ประวัตินักวิจัย

ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยม) สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2539 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปฐพีจากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ในปี พ.ศ. 2541 และวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเทคนิคธรณี จากมหาวิทยาลัย Saga ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2544

ดร. สุขสันต์ ได้เริ่มปฏิบัติงานในตำแหน่งอาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2545 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ หัวหน้าหน่วยวิจัยเพื่อเทคโนโลยีการก่อสร้าง และหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ท่านได้รับทุนสนับสนุนงานและทำวิจัยหลายทุนทั้งจากองค์กรภายในและภายนอกประเทศ และมีผลงานวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารและสัมมนาวิชาการระดับนานาชาติและระดับประเทศกว่า 100 เรื่อง และมีผลงานประพันธ์หนังสือสองเล่ม “ปฐพีกลศาสตร์” และ “วิศวกรรมฐานราก” งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ ลักษณะทางวิศวกรรมของดินตามธรรมชาติ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดิน และเทคนิคการปรับปรุงดิน

ดร.สุขสันต์ มีประสบการณ์การเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาระดับบัณฑิตศึกษาและการให้บริการวิชาการ ท่านเป็นวิศวกรที่ปรึกษาด้านกำแพงกันดินเสริมกำลัง (Mechanically Stabilized Earth Wall) ให้กับบริษัท จีไอฟอรัม จำกัด นอกจากนี้ท่านยังเป็นผู้ทรงคุณวุฒิในการประเมินผลงานวิจัยและหนังสือให้กับหน่วยงานภาครัฐและเอกชนทั้งในและต่างประเทศ