



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและกำลังอัด
ของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอย

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข

พฤศจิกายน 2551

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและกำลังอัด
ของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอย

รองศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการศึกษา
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จล่วงได้ ถ้าปราศจากการช่วยเหลือทางจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง การกล่าวขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้ครบทุกท่านเป็นงานที่ยาก ผู้เขียนต้องขอขมา ณ ที่นี้ด้วย หากมิได้กล่าวนามของท่าน

ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ณรงค์ อัครพัฒนานุกูล ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน ขอขอบคุณ อาจารย์รุ่งลาวัลย์ ราชัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และคุณยุทธนา รักษาชนม์ นักศึกษาปริญญาปริญญา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สำหรับความช่วยเหลือในงานทดสอบและการวิเคราะห์ผลทดสอบ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการทดสอบการกระจายขนาดโพรงด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimetry และขอขอบคุณคุณพรพิจิตร สุรอภิรักษ์ และคุณอักษรา ภูตาจำ ที่ช่วยเหลือด้านงานพิมพ์และการเงิน

ท้ายสุด ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เป็นอย่างยิ่ง สำหรับทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5080127

ชื่อโครงการ: การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและกำลังอัดของดินเหนียว
ซีเมนต์เถ้าลอย

ชื่อนักวิจัย: รองศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

E-mail Address: suksun@sut.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

งานวิจัยนี้ประกอบสามบทหลัก ได้แก่ กราฟการบดอัด: การวิเคราะห์และประเมิน การวิเคราะห์การพัฒนา กำลังอัดของดินซีเมนต์จากการพิจารณาโครงสร้างจุลภาค และอิทธิพลของเถ้าลอยต่อโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอย ในบทแรก ผู้วิจัยได้สร้างวิธีการเชิงประสบการณ์ในการทำนายกราฟการบดอัดของดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด โดยอาศัยผลทดสอบเพียงหนึ่งผลทดสอบ และยังได้พัฒนากราฟทั่วไปสำหรับการทำนายกราฟการบดอัดที่เรียกว่า “กราฟโอไฮโอปรับปรุง” ในสองบทสุดท้าย อิทธิพลของตัวแปรควบคุม อันได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม อัตราส่วนการแทนที่ และความละเอียดของเถ้าลอย ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยได้รับการอธิบายอย่างชัดเจน โดยอาศัยผลทดสอบทางด้านโครงสร้างจุลภาคจากเครื่องมือส่องกวาด การวัดการกระจายขนาดโพรงด้วยปรอท และการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยแปรผันอย่างมากกับปริมาณผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน ซึ่งเกิดเนื่องจากการปฏิกิริยาไฮเดรชันและการกระจายกลุ่มดินซีเมนต์ ปริมาณความชื้นที่ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานสูงสุด ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ส่งผลให้โพรงทั้งหมดมีปริมาตรลดลงและกำลังอัดเพิ่มขึ้น โชนการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์แบ่งออกเป็นสามโซน ได้แก่ โซนแอคทีฟ โซนล่าช้า และโซนลดกำลัง โซนแอคทีฟเป็นโซนที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุง เนื่องจากผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ เถ้าลอยในดินซีเมนต์เป็นวัสดุเฉื่อย ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระจายกลุ่มดินซีเมนต์ที่เกิดการรวมตัวกันเมื่อสัมผัสกับน้ำ การกระจายตัวจะทำให้ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานเกิดได้มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น การกระจายกลุ่มดินซีเมนต์แปรผันตามปริมาณเถ้าลอยและความละเอียด

คำหลัก: การปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย การกระจายขนาดโพรง การวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง กำลังอัด โครงสร้างจุลภาค พันธะเชื่อมประสาน แผลบรีค ภาพขยายกำลังสูง

ABSTRACT

Project Code: MRG5080127

Project Title: Microstructure and Strength Studies of Cement-Fly Ash Stabilized Clay

Investigator: Associate Professor Suksun Horpibulsuk, Ph.D.
Suranaree University of Technology

E-mail Address: suksun@sut.ac.th

Project Period: 2 years

This research consists of three main chapters: compaction curves-analysis and assessment; analysis of strength development in cement stabilized clay from microstructural considerations; and role of fly ash on microstructure development in blended cement stabilized clay. In the first main chapter, a phenomenological method for predicting compaction curves for both fine- and coarse-grained soils is introduced and modified Ohio's compaction curves are developed. In the last two main chapters, some influential factors such as water content, cement content, curing time, replacement ratio, and fineness of fly ash on the strength development are well understood. A study on the microstructure is carried out using a scanning electron microscope, mercury intrusion pore size distribution measurements, and thermal gravity analysis. Strength development in the blended cement stabilized clay is dependent upon cementitious products due to combined effect (hydration and dispersion). Water content of 1.2 optimum water content gives the highest cementitious products. The cementitious products increase with time, resulting in the reduction in total pore volume and strength development. Three improvement zones are observed: active, inert, and decline. The active zone is the most effective where the cementitious products increase with cement. 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.

Keyword: cement-fly ash stabilization, pore size distribution, thermal gravity analysis, strength, microstructure, cementation bond, fabric, scanning electron microscopic

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
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
2.11.1 แบบจำลองโครงสร้างของดิน (Model of soil structure).....	20
2.11.2 การกระจายขนาดโพรง (Pore size distribution).....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 กราฟการบดอัด: การวิเคราะห์และการประเมิน	28
3.1 บทนำ.....	28
3.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	28
3.2.1 ดินตัวอย่าง.....	28
3.2.2 วิธีการทดสอบ.....	30
3.3 ผลทดสอบและการวิเคราะห์ผลทดสอบ.....	30
3.4 กราฟ Ohio ปรับปรุง.....	42
บทที่ 4 การวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์จากการพิจารณาโครงสร้างจุลภาค	48
4.1 บทนำ.....	48
4.2 วิธีการศึกษา.....	48
4.3 ผลทดสอบการบดอัดและแรงอัดแกนเดียว.....	52
4.4 การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาค.....	56
4.4.1 ดินเหนียวบดอัด.....	56
4.4.2 ดินเหนียวซีเมนต์.....	58
4.4.2.1 อิทธิพลของปริมาณความชื้น.....	58
4.4.2.2 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์.....	60
4.4.2.3 อิทธิพลของอายุบ่ม.....	63
4.5 การวิจารณ์ผลทดสอบ.....	66
บทที่ 5 อิทธิพลของเถ้าลอยต่อโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอย	67
5.1 บทนำ.....	67
5.2 วัสดุทดสอบและวิธีการศึกษา.....	67
5.3 ผลทดสอบการบดอัดและแรงอัดแกนเดียว.....	70
5.4 การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาค.....	73
5.4.1 ภาพถ่ายกำลังขยาย.....	73
5.4.2 การกระจายขนาดโพรง.....	76
5.4.3 ผลทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง.....	77
บทที่ 6 บทสรุป.....	83
เอกสารอ้างอิง	86
Output จากโครงการวิจัย	94

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	95
- ตำแนบบทความเรื่อง “An Approach for Assessment of Compaction Curves of Fine-Grained Soils at Various Energies Using a One Point Test”	
- ตำแนบบทความเรื่อง “Modified Ohio’s Curves: A rapid estimation of compaction curves for coarse- and fine-grained soils”	

สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 ออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.3 เครื่องมือที่ใช้สำหรับโครงสร้างดิน.....	25
3.1 คุณสมบัติพื้นฐานและการจำแนกดินตามระบบเอกภาพ.....	29
3.2 ปริมาณความชื้น หน่วยน้ำหนักแห้ง และระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ของดินทดสอบ.....	32
3.3 ค่า A_u , A_w , B_u และ B_w สำหรับดินทดสอบทุกชนิด.....	38
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และดินเหนียวปนดินตะกอน.....	49
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ.....	54
4.3 ปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ภายใต้พลังงานงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	60
4.4 ปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ของดินซีเมนต์ที่บดอัดที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	62
4.5 ปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ของดินซีเมนต์ 10 % บดอัดที่ 1.20WC ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่มต่างๆ.....	65
5.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปนดินตะกอน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย.....	68
5.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนแทนที่ต่างๆ.....	71
5.3 กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่างๆ.....	72
5.4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ C:F=90.10 ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	78
5.5 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่างๆ.....	79

สารบัญรูป

	หน้า
2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	8
2.2 อิทธิพลของแรงดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 8	9
2.3 อิทธิพลของแรงดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 12.....	10
2.4 อิทธิพลของแรงดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อย ละ 16.....	10
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของทรายที่มีขนาดคละสมำเสมอ และดิน ตะกอนปนดินเหนียว.....	11
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง-กำลังอัด-ปริมาณความชื้นของดินลูกรังผสม ซีเมนต์อัด.....	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 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพ ไร้พันธะเชื่อมประสาน.....	17
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้พันธะ เชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์.....	18
2.15 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์.....	20
2.16 ชนิดของโครงสร้างดินเหนียว.....	21
2.17 โครงสร้างดินที่ตะกอนที่เกิดจากผลกระทบของไฟฟ้าเคมี.....	22
2.18 การเข้าแทนที่และการรวมตัวของอนุภาคและช่องว่างชนิดต่างๆ.....	22
2.19 การกระจายของช่องว่างในเม็ดดิน.....	23
2.20 การจัดเรียงตัวของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน.....	24

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

2.21 โครงสร้างของดินเหนียว(a) ดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน(b) ดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน.....	24
3.1 การกระจายความคละของดินทดสอบ.....	30
3.2 กราฟการบดอัดดินเหนียวผู้ร่อนที่พลังงานการบดอัดต่างๆ.....	31
3.3 กราฟการบดอัดกรวดที่ความคละดีที่พลังงานการบดอัดต่างๆ.....	31
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอึดตัวด้วยน้ำของดินเหนียวผู้ร่อน.....	35
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอึดตัวด้วยน้ำของกรวดที่มีความคละดี.....	36
3.6 อิทธิพลของพารามิเตอร์ A_d และ A_w ต่อกราฟการบดอัด.....	37
3.7 อิทธิพลของพารามิเตอร์ B_d และ B_w ต่อกราฟการบดอัด.....	37
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน OWC/OWC_{ST} และพลังงานการบดอัด.....	41
3.9 กราฟการบดอัดของดินทดสอบและกราฟการบดอัด Ohio.....	42
3.10 กราฟโอไฮโอปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัด 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	44
3.11 กราฟโอไฮโอปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัด 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	44
3.12 กราฟโอไฮโอปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	45
3.13 การทำนายกราฟการบดอัดของดิน Limestone residual clay.....	45
3.14 การทำนายกราฟการบดอัดของดินเหนียว.....	46
3.15 การทำนายกราฟการบดอัดของกรวดปนดินเหนียว.....	46
3.16 การทำนายกราฟการบดอัดของดินลูกรัง.....	47
3.17 การทำนายกราฟการบดอัดของทรายปนดินเหนียว.....	47
4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน.....	50
4.2 ภาพถ่ายกำลังขยายของปูนซีเมนต์และดินเหนียวปนดินตะกอน.....	50
4.3 กราฟการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอนที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน.....	51
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดกับปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์..	53
4.5 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอน.....	54
4.6 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวซีเมนต์.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.7 โชนการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์.....	55
4.8 อิทธิพลของพลังงานการบดอัดและอายุบ่มต่อการพัฒนากำลังอัด.....	56
4.9 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัดที่ <i>OWC</i> ภายใต้พลังงานการบดอัด แบบมาตรฐาน.....	56
4.10 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัด ภายใต้พลังงานการบดอัด แบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	57
4.11 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณ ความชื้นต่างๆ ภายใต้พลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	58
4.12 การกระจายโพรงของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณ ความชื้นต่างๆ ภายใต้พลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	59
4.13 ภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์ที่บดอัดที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัด แบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน (รูปที่ 4.13a-c สำหรับโชนแอคทีฟ รูปที่ 4.13d-g สำหรับโชนล่าช้า และรูปที่ 4.13h-j สำหรับโชนลดกำลัง).....	62
4.14 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัด แบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	63
4.15 ภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์ 10 % บดอัดที่ 1.2 <i>OWC</i> ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูง กว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่มต่างๆ.....	64
4.16 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์ 10% บดอัดที่ 1.2 <i>OWC</i> ด้วยพลังงานการบดอัด แบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่มต่างๆ.....	65
5.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย.....	69
5.2 ภาพถ่ายกำลังขยายของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย.....	69
5.3 กราฟการบดอัดดินซีเมนต์เถ้าลอย.....	70
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่ อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ ที่อายุบ่ม 60 วัน.....	71
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่ อัตราส่วนการแทนที่ 80: 20 ที่อายุบ่มต่างๆ.....	72
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนการแทนที่ ที่อายุบ่มต่างๆ.....	73
5.7 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 28 วัน.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
5.8 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 60 วัน.....	74
5.9 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่ม 28 วัน.....	75
5.10 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่ม 60 วัน.....	75
5.11 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่มต่างๆ.....	76
5.12 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่มต่างๆ.....	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา

ดินเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดและสภาพแวดล้อม ดินบางชนิดจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้เหมาะสมก่อนนำมาใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมโยธา เทคนิคในการปรับปรุงดินที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายเทคนิคหนึ่งคือการเติมวัสดุเชื่อมประสาน (Binder/Cementing agents) ซึ่งทำได้ง่ายและใช้เวลาสั้น วัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันในประเทศไทยคือ ปูนซีเมนต์ เพราะสามารถหาได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินในปริมาณมากต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง ถ้าสามารถลดปริมาณซีเมนต์ด้วยการทดแทนด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ที่มีราคาต่ำก็จะลดต้นทุนการก่อสร้างลงได้ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้กำลังอัดของดินซีเมนต์อยู่ในระดับที่ใช้งานได้ วัสดุปอซโซลานที่เป็นที่ยอมรับในงานโครงสร้างของประเทศไทย 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; 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 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการผสม (เช่น ปริมาณความชื้น ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน และพลังงานการบดอัด เป็นต้น) ได้ ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจลักษณะโครงสร้างจุลภาค ซึ่งเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ ซึ่งคือ พันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) และแฟบริค (Fabric) (ลักษณะการจัดเรียงตัวของกลุ่มดิน) (Horpibulsuk et al., 2004b)

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดินซีเมนต์ที่อายุบ่มต่างๆ โดยอาศัยภาพถ่ายจุลภาคของดินซีเมนต์ได้ถูกเริ่มในประเทศไทยโดย Nontananandh et al. (2005) จากการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ทำให้โครงสร้างดินแน่นขึ้น ส่งผลให้สมบัติการซึมผ่านลดลง และกำลังอัดสูงขึ้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น Horpibulsuk et al. (2006a) ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอยในเชิงปริมาณและคุณภาพ (Qualitative and quantitative study) โดยทำการทดสอบการกระจายขนาดช่องว่างด้วยปรอท (Mercury intrusion porosimeter test) และการส่องกราด (Scanning electron microscope) ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน 5 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุบ่มในช่วง 7 ถึง 90 วัน จากผลการทดสอบทั้งหมด พวกเขาได้อธิบายว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยแปรผันตามโครงสร้างจุลภาค แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาของพวกเขาขาดความสมบูรณ์ เนื่องจากยังไม่สามารถอธิบายความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสาน และยังขาดการพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมอีกหลายตัว ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์ ปริมาณความชื้น พลังงานการบดอัด อายุบ่ม ปริมาณสารเชื่อมประสาน และความละเอียดของเถ้าลอย

การปรับปรุงดินที่มีปริมาณความชื้นต่ำด้วยซีเมนต์จำเป็นต้องบดอัดเพื่อให้ดินซีเมนต์รวมกันเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถใช้เป็นวัสดุวิศวกรรมได้ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะกราฟการบดอัดของดินเม็ดละเอียดและเม็ดหยาบ และทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอยโดยแปรผันตัวแปรควบคุม (อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์ ปริมาณความชื้น พลังงานการบดอัด อายุบ่ม ปริมาณสารเชื่อมประสาน และความละเอียดของเถ้าลอย)

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาและอธิบายลักษณะกราฟการบดอัดของดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด พร้อมทั้งนำเสนอวิธีการทำนายกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดต่างๆ

1.2.2 ศึกษาการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของดินเหนียวซีเมนต์ เมื่อแปรผันตัวแปรควบคุม (อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์ ปริมาณความชื้น พลังงานการบดอัด อายุบ่ม ปริมาณสารเชื่อมประสาน)

1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของเถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย

1.3 ประโยชน์ที่จะได้รับ

เมื่องานวิจัยแล้วเสร็จประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับเป็นดังนี้

1.3.1 เข้าใจลักษณะกราฟการบดอัดและสามารถทำนายกราฟการบดอัดของดินชนิดต่างๆ

1.3.2 เข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่อโครงสร้างจุลภาคและกำลังอัดของดินซีเมนต์

1.3.3 เข้าใจถึงอิทธิพลของถ้ำลอยต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ถ้ำลอย เพื่อใช้เป็นความรู้พื้นฐานในการวิเคราะห์ผลทดสอบทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ถ้ำลอยในระดับสูงต่อไป และใช้เป็นความรู้พื้นฐานในการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงดินด้วยสารผสมเพิ่ม

การปรับปรุงดินโดยใช้สารผสมเพิ่ม (Additive) ได้เกิดขึ้นเป็นเวลากว่าหลายพันปีล่วงมาแล้ว ซึ่งปรากฏมีหลักฐานเกี่ยวกับการปรับปรุงดินที่ใช้สัณฐานตั้งแต่สมัยโรมัน โดยการใส่ปูนขาว หรือสาร Pozzolans ผสมกับดินที่ใช้ทำพื้นทาง เพื่อให้ดินมีสภาพการใช้งานที่ดีขึ้น (Woods และ Yoder, 1952)

Portland Cement Association (1956) รายงานว่าปี 1940 ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการก่อสร้างงานถนนด้วยดินซีเมนต์ซึ่งมีพื้นที่มากกว่า 5.7 ล้านตารางเมตร ส่วนการนำดินซีเมนต์มาใช้งานสนามบินได้เริ่มขึ้นระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ในช่วงปี 1941-1944 ซึ่งมีพื้นที่ประมาณ 16.8 ล้านตารางเมตร ภายหลังสงครามครั้งที่ 2 ยุติ จึงมีการสร้างถนนด้วยดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางของถนนผิวคอนกรีต ใช้เป็นไหล่ทาง ที่จอดรถ พื้นคลังสินค้า รองพื้นอ่างเก็บน้ำ และคลองอีกด้วย

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

Terrel and Davidson (1961) ได้บันทึกไว้เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองของ 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 – เฉลิมสุข จังหวัดอุบลราชธานี โดยทำการทดลองระยะทางยาว 5 กิโลเมตร

ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ กรมทางหลวงจึงได้ออกแบบถนนหลายสายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยใช้ซีเมนต์เป็นพื้นทาง (Soil Cement Base) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การได้ดี

2.2 ประเภทของดินซีเมนต์

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

2.2.1 Soil-Cement เป็นการนำดินและซีเมนต์มาผสมกันแล้วบดอัดโดยวิธีทางกล แล้วทำการบ่มให้แข็งตัว ซีเมนต์มีปริมาณสูงพอจนทำให้มีกำลังอัด หรือกำลังแบกทานตามที่กำหนด และมากพอที่จะทำให้ดินซีเมนต์กลายเป็นวัสดุก่อสร้างที่แข็งแรงทนทาน มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน 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 หรือเป็นพื้นที่ที่ดินเปียกน้ำ

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 นิยมใช้ในงานลาดปูลงบนพื้นที่มีความลาดเอียง เช่น การลาดท้องคลองชลประทาน การลาดผิวหน้าคันทาง

2.3 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement)

2.3.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญคือ 1) Catcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk) 2) Argillaceous Material ได้แก่ Silica ซึ่งอยู่ในรูปของดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale) 3) Iron Oxide Material ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron) หรือ สีลาแดง (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 ออกไซด์หลักจะ

รวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) และเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ซัซวาล, 2536)

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

ตารางที่ 2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ซัซวาล, 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) เหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกิดความร้อนปานกลาง ทนซัลเฟตได้ปานกลาง ปัจจุบันไม่มีผลิตในประเทศไทย

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

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

2.3.2.5 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีไตรแคลเซียม (C_3A) ต่ำ จึงทำให้มีการพัฒนากำลังอัดช้า 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



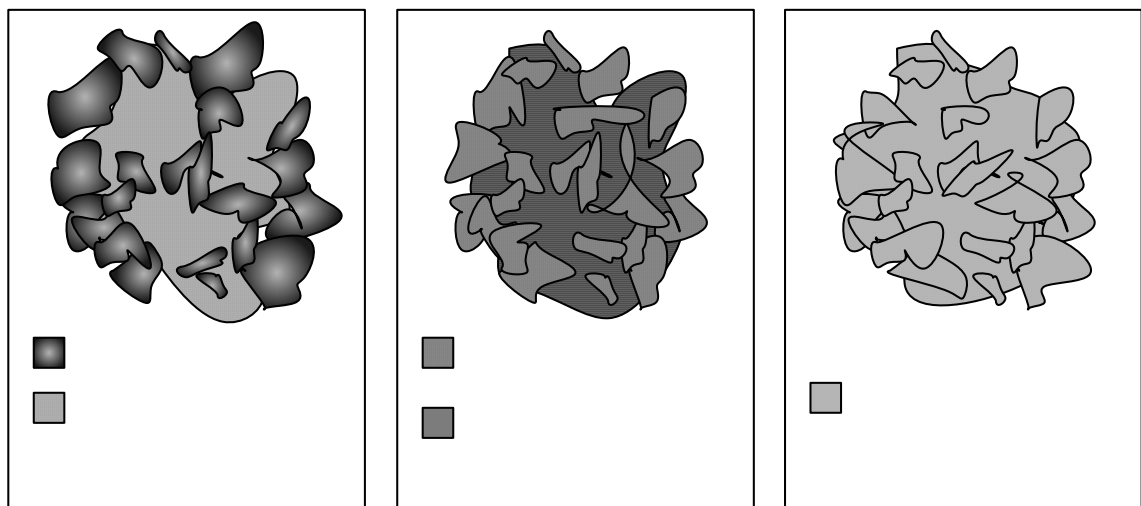
Michell and Jack (1966) อธิบายว่า เมื่อผสมซีเมนต์ลงไปดิน จะเกิดปฏิกริยาและได้สารสุดท้ายเป็น CSH ปฏิกริยาช่วงสั้นๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อผสมซีเมนต์ลงไปดิน ประกอบด้วย การแทนที่หรือการแลกเปลี่ยน Valency โดยการดูดซับ Cation ของแคลเซียม และเม็ดดินจะดูดซับเอา $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เข้าไว้เกิดสารประกอบที่ทำให้มีการเชื่อมยึดติดกันของเม็ดดิน

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

เกษม และพนิต (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

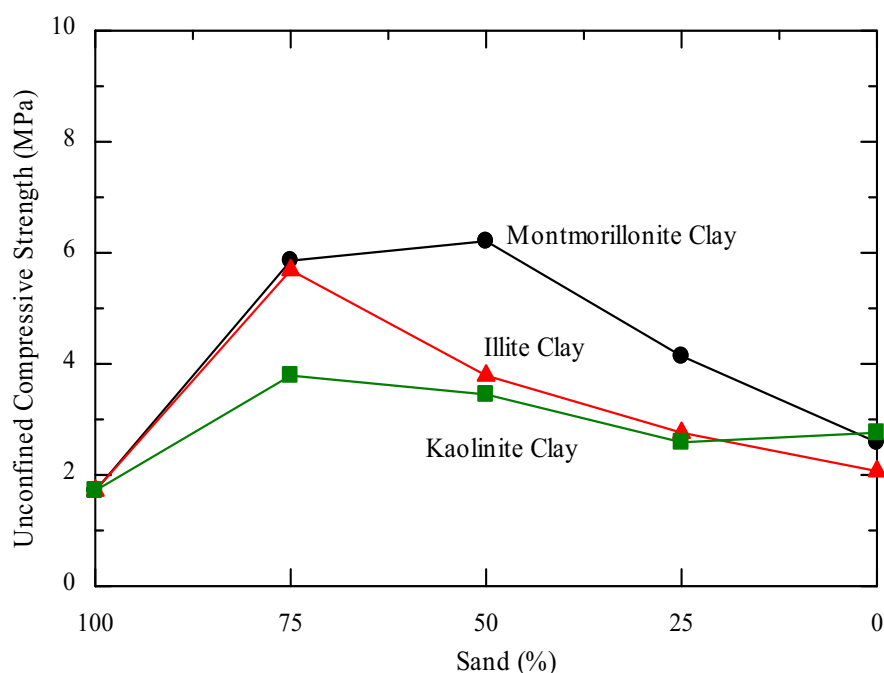


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Michell และ Jack ,1966)

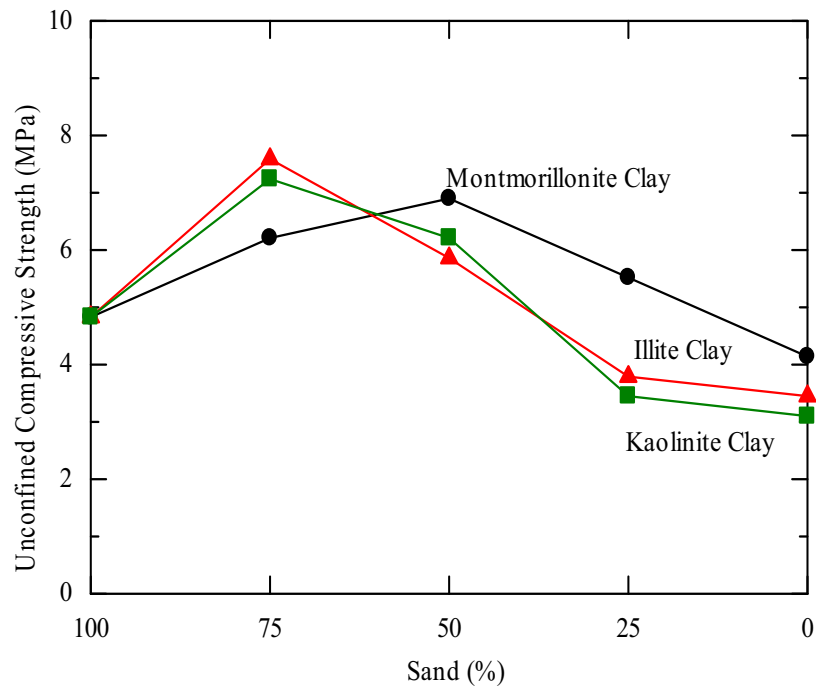
2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังของดินซีเมนต์

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) เมื่อผสมกับดินจำพวกที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless Soil) จะทำให้กำลังของดินซีเมนต์ลดลงอย่างเด่นชัด อีกทั้งที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8 และปริมาณสัดส่วนของทรายต่อดินเหนียว 75:25 จะให้การรับกำลังสูงสุด เพราะว่าที่ปริมาณสัดส่วนนี้เป็นสัดส่วนผสมที่กลมกลืนกัน ก่อให้เกิดส่วนผสมที่มีขนาดละเอียด (Well Grade) ทำให้ได้ค่าความแน่นสูงสุด จึงส่งผลให้ได้กำลังสูงสุดด้วย

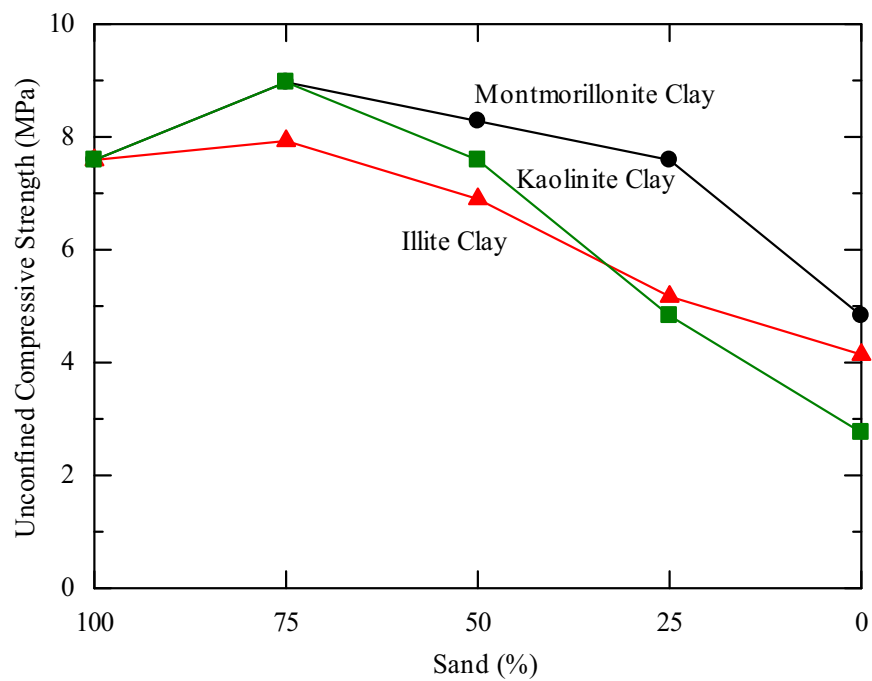
Grimer และ Krawczyk (1963) ได้กล่าวว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุ (log scale) ของดินซีเมนต์ที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 10 ดังรูปที่ 2.5 พบว่ากำลังของทรายที่มีขนาดละเอียดสม่ำเสมอ (Uniform Sand) ที่ไม่มีดินเหนียวผสม จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงจนถึงอายุการบ่ม 28 วัน หลังจากนั้นมีการเพิ่มขึ้นของกำลัง เชื่อว่าจะมาจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์



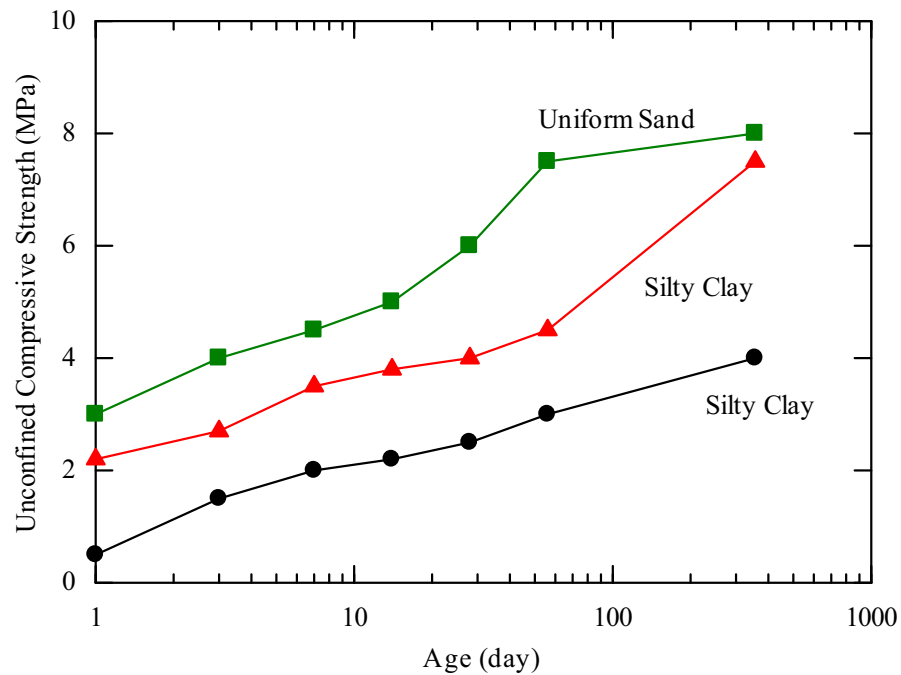
รูปที่ 2.2 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8 (Davidson, 1962)



รูปที่ 2.3 อิทธิพลของแร้ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 12 (Davidson, 1962)



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของแร้ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 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

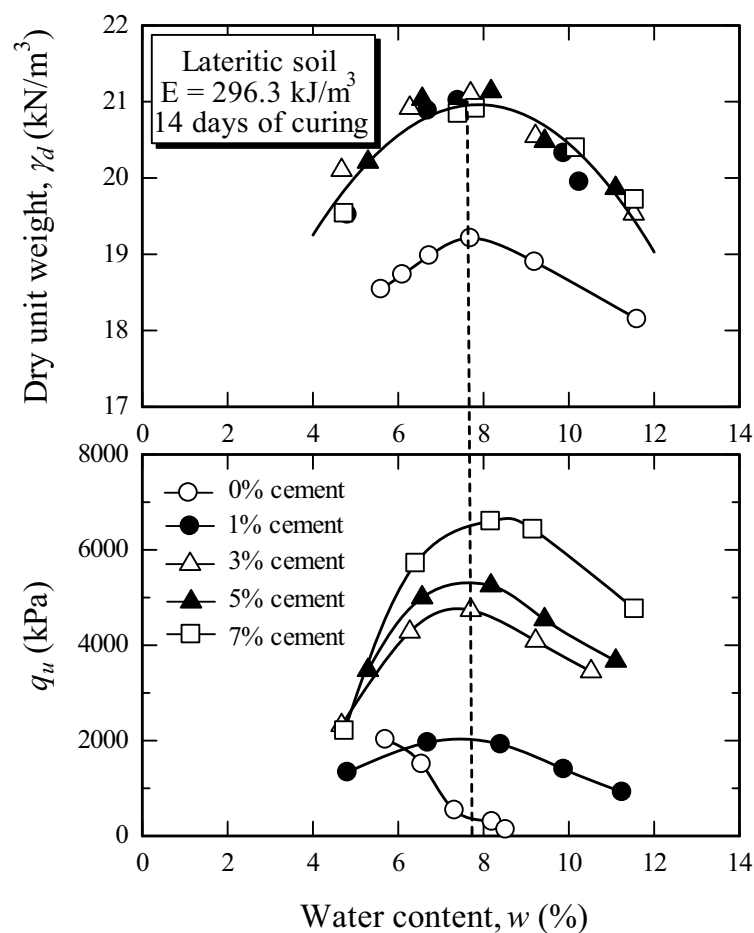
Felt (1955) ได้ทดลองและสรุปผลว่า การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและปริมาณความชื้นมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์ ดินทรายผสมซีเมนต์ควรทำการบดอัดทางด้านข้างของ OWC

เล็กน้อยจึงได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ส่วนดินเหนียวและดินตะกอนควรบดอัดให้อยู่ทางด้านเปียกของ OWC เล็กน้อยจึงได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด

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

Ruenkraairergsa (1982) พบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมไม่เพียงแต่จะทำให้ดินซีเมนต์มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่านั้น แต่ยังทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไปอย่างสมบูรณ์อีกด้วย และความหนาแน่นแห้งสูงสุดอาจจะไม่ได้ค่ากำลังอัดสูงสุดสำหรับดินซีเมนต์เสมอไป

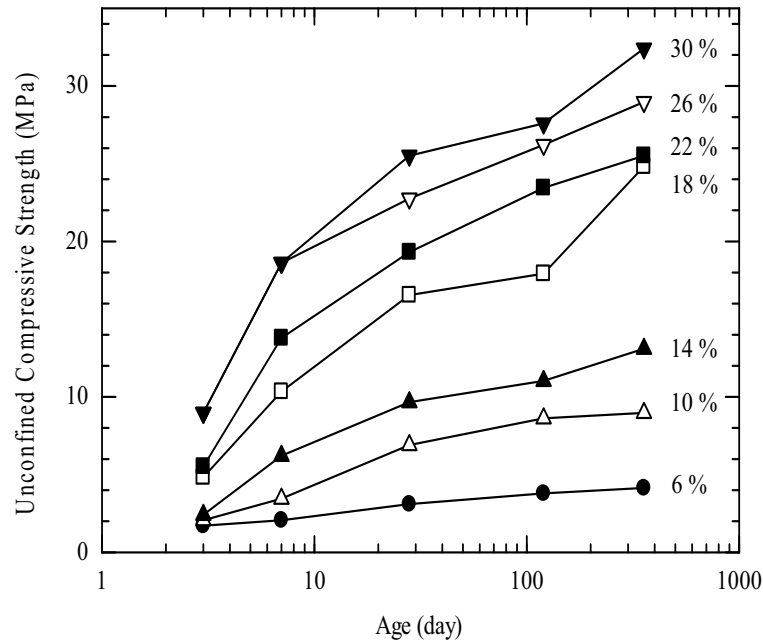
Horpibulsuk et al. (2006b) ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัดมีค่าใกล้เคียงกับของดินเม็ดหยาบไม่ผสมซีเมนต์บดอัด ในขณะที่หน่วยน้ำหนักแห้งของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัดมีค่าสูงกว่า แต่ไม่แปรผันตามปริมาณซีเมนต์ กำลังอัดของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัดมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม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



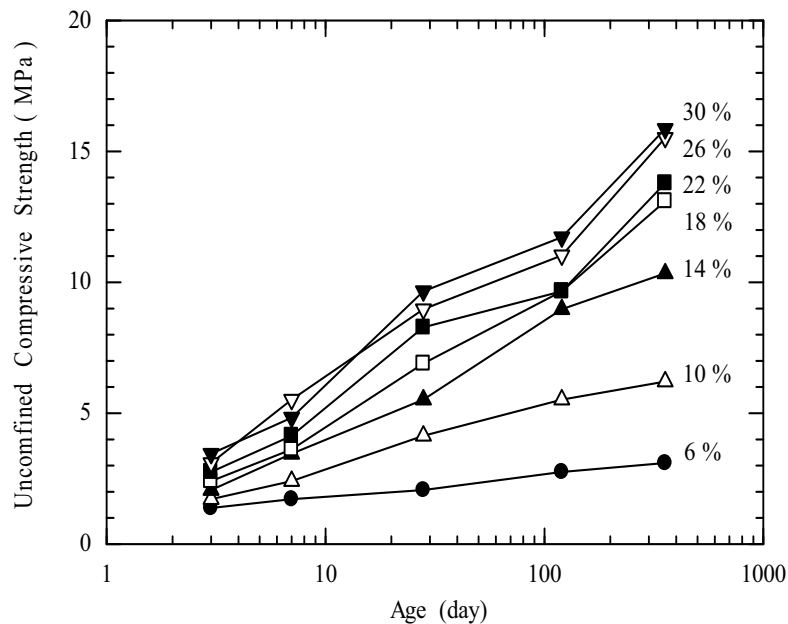
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง-กำลังอัด-ปริมาณความชื้น
ของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด (Horpibulsuk et al., 2006b)

2.8 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์

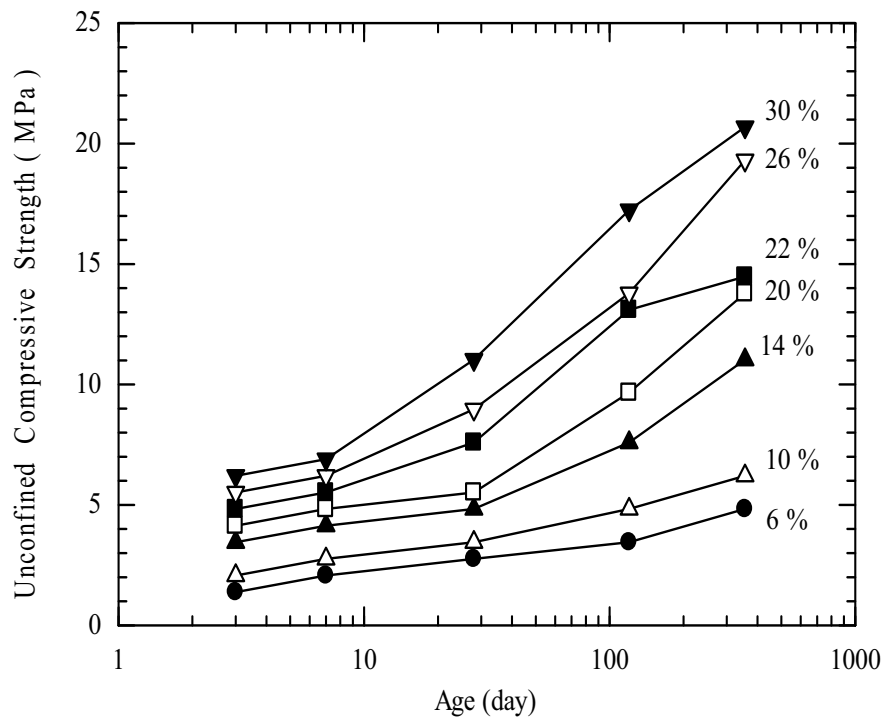
Felt (1955) ได้นำดินสามชนิด คือ Silty Loam, Sandy Loam และ Silty Clay มาใช้ในการทดลองผสมซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.7 ถึง 2.9 สรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ นอกจากนี้ ดินเม็ดหยาบจะมีกำลังอัดที่สูงกว่าดินเม็ดละเอียด



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

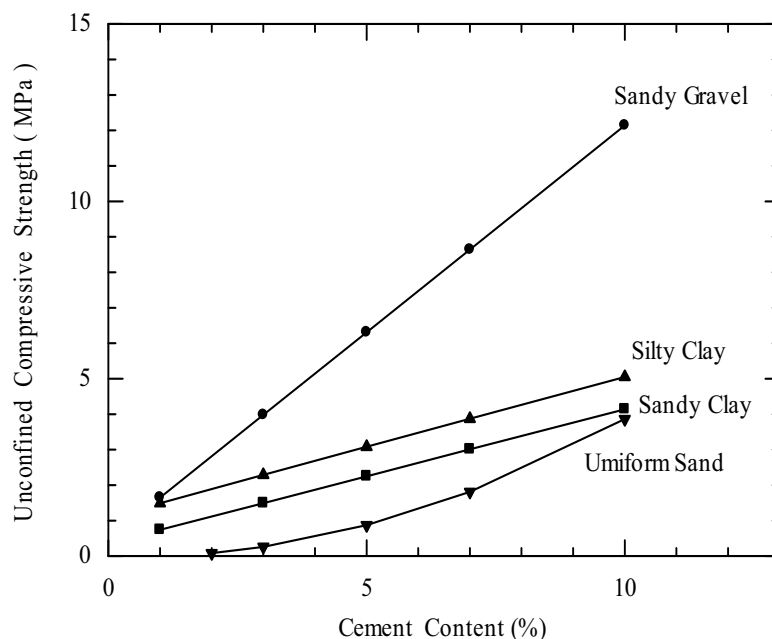
Metcalf (1977) พบว่าปริมาณซีเมนต์มีผลโดยตรงกับกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยเฉพาะกับดินเม็ดหยาบ และสรุปได้ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตรงกับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ และได้แนะนำเกี่ยวกับเรื่องการเลือกปริมาณซีเมนต์ โดยใช้ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดแกนเดียว(Unconfined Compressive Strength) กับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้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

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

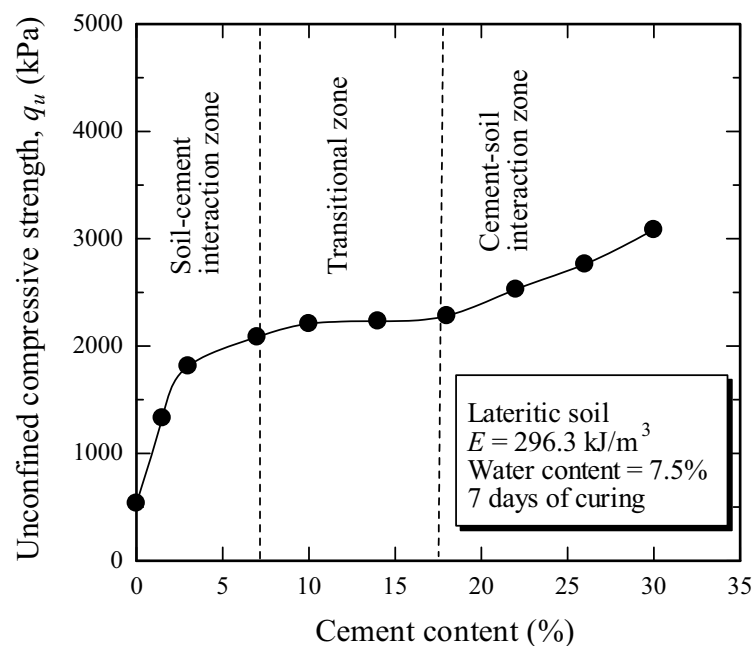
$$q_u \text{ (MPa)} = 0.3953 C + 1.0995 \quad \text{สำหรับ Silty Clay} \quad (2.5)$$

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

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



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

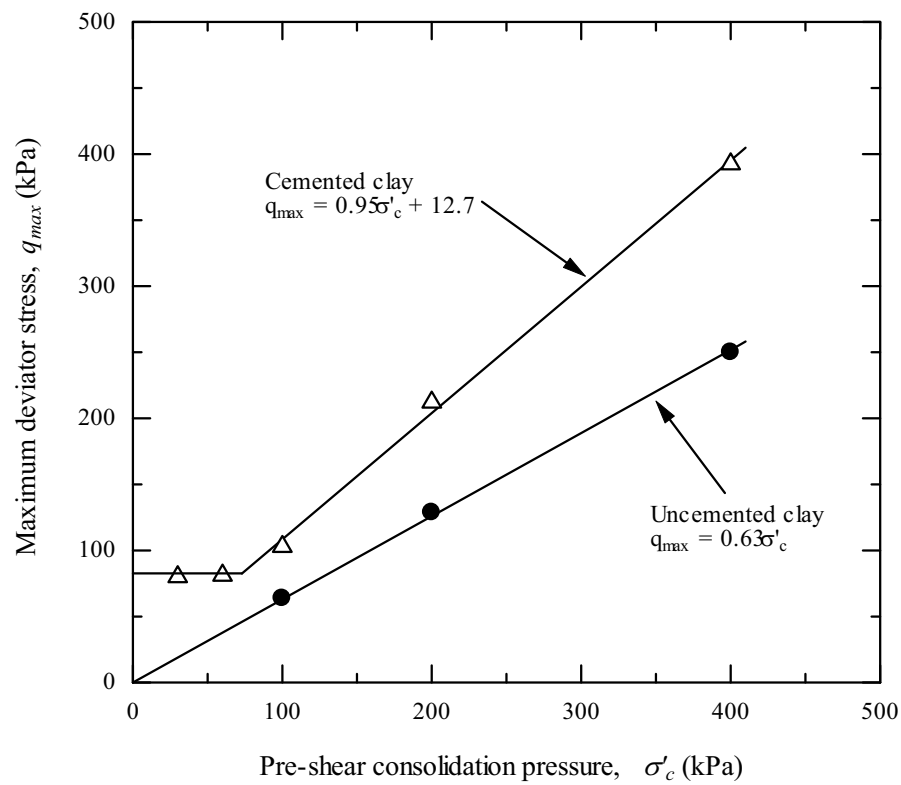
Horpibulsuk et al. (2004b) กล่าวว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสาน เมื่อเฉือนดินประเภทนี้ภายใต้สภาวะที่ความเค้นประสิทธิผลน้อยกว่าความเค้นครากประสิทธิผล (σ'_v) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของเม็ดดินน้อยมาก ในช่วงนี้ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับพันธะเชื่อมประสาน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

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

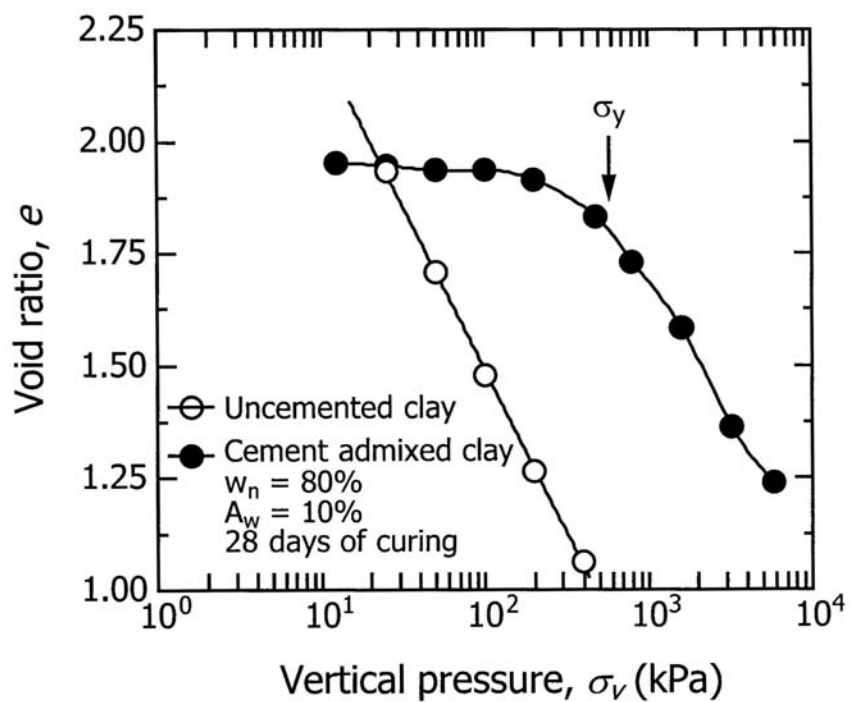
เมื่อ $q_{\max}$ คือความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (ที่จุดวิบัติ)
 q_{bond} คือความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน
 q_{fabric} คือความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric)

2.9.2 การอัดตัวคายน้ำ

สุขสันต์ และรุ่งลาวัลย์ (2546) แสดงผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพมหานคร ผสมซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.13 จากรูปเห็นว่า การอัดตัวคายน้ำมีค่าน้อยมากในช่วงก่อนจุดคราก (Yield stress) เป็นเพราะอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน แต่การอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงหลังจุดคราก ซึ่งสภาวะหลังจุดครากนี้ ดัชนีการอัดตัว (Compression index) มีค่าค่อนข้างคงที่กับการเพิ่มขึ้นของความเค้นในแนวดิ่ง นอกจากนี้ ดินเหนียวซีเมนต์ (ดินพันธะเชื่อมประสาน) สามารถที่จะเสถียรอยู่ได้ทั้งอัตราส่วนโพรงสูงๆ เมื่อเทียบกับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน



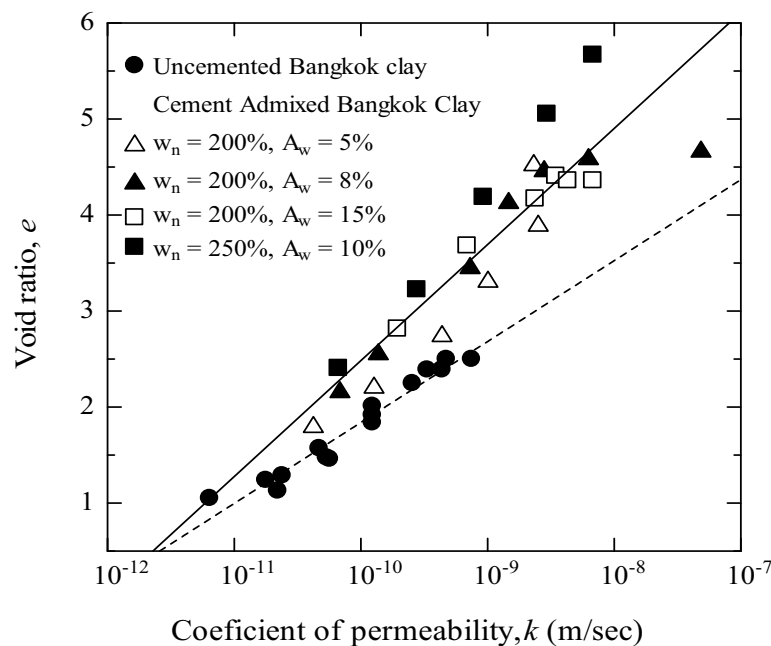
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล
(Horpibulsuk et al., 2004b)



รูปที่ 2.13 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพฯไร้
พันธะเชื่อมประสาน (สุขสันต์และรุ่งลาวัลย์, 2546)

2.9.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

สุขสันต์ และรุ่งลาวัลย์ (2546) แสดงผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่า พันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวอย่างมาก ที่อัตราส่วนโพรงที่เท่ากัน ดินเหนียวซีเมนต์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่า ดังนั้น พันธะเชื่อมประสานนอกจากจะเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือน และลดการทรุดตัวแล้ว ยังลดการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับงานโครงสร้างที่บดน้ำ เช่น งานซ่อมแซมเขื่อนที่แตกร้าว และ Cut - off wall เป็นต้น



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันต์ และรุ่งลาวัลย์, 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/C)

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

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

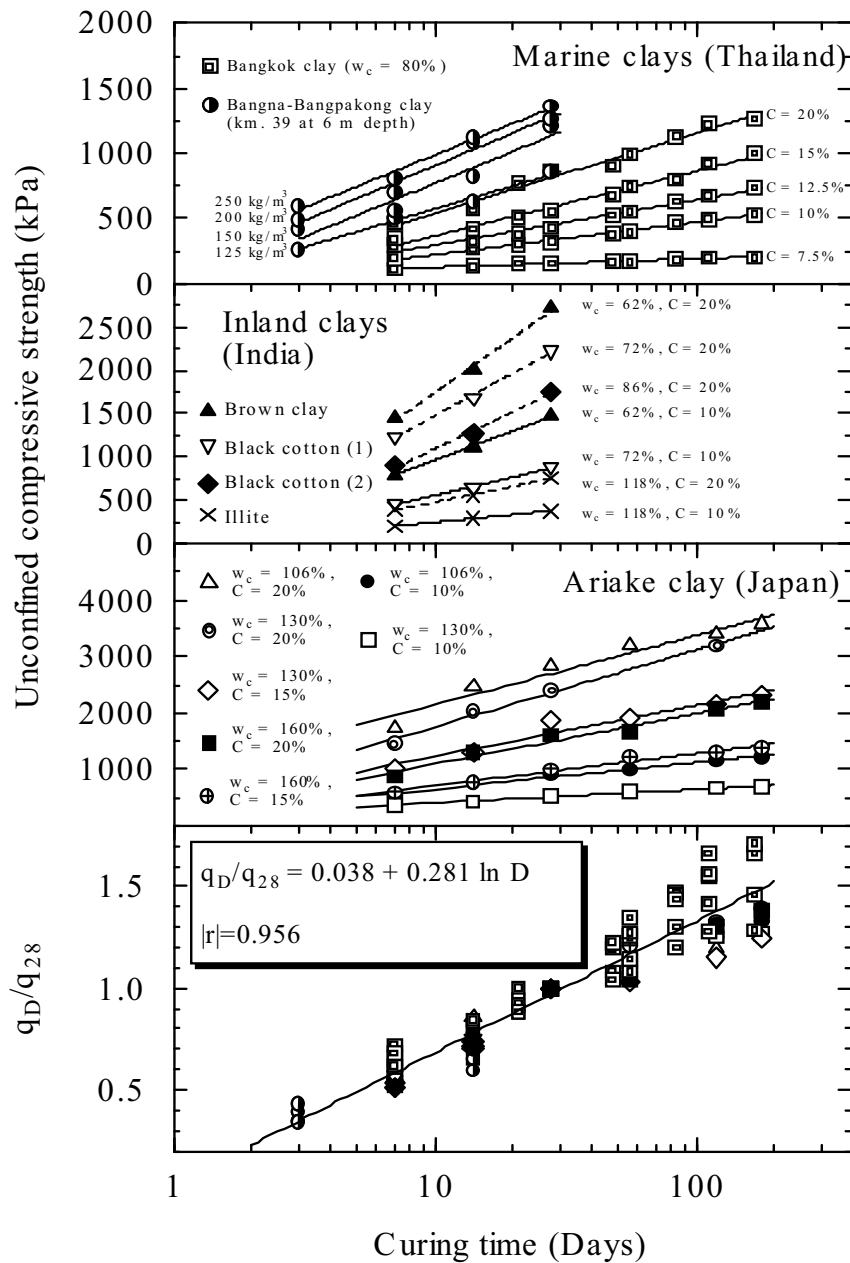
D คือระยะการบ่ม

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

$$\left[\frac{q_{(w_c/C)1,D}}{q_{(w_c/C)28}} \right] = 1.24^{\{(w_c/C)_{28} - (w_c/C)_D\}} - (0.038 + 0.0281 \ln D) \quad (2.16)$$

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

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



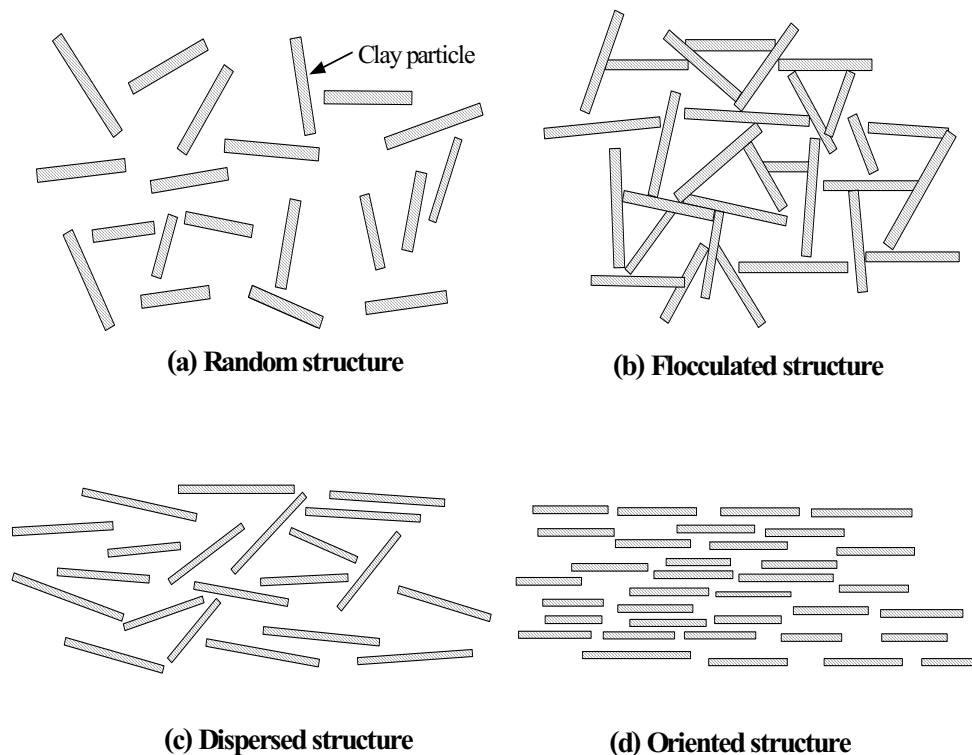
รูปที่ 2.15 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)

2.11 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure study of soil)

2.11.1 แบบจำลองโครงสร้างของดิน (Model of soil structure)

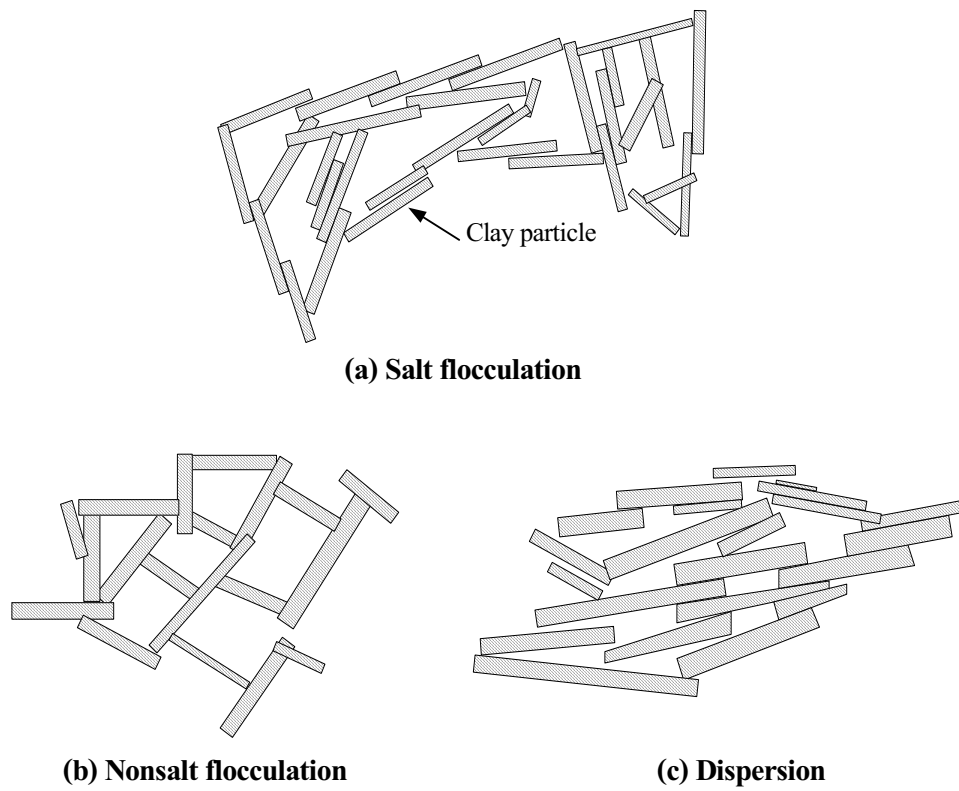
แบบจำลองโครงสร้างดินในเบื้องต้น แสดงดังรูปที่ 2.16 โดย Yong and Warkentin (1966,1975) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของแรงผลัที่มีมากกว่าแรงดูดระหว่างอนุภาคของดินที่ดูดซึมน้ำ หรืออยู่ในสถานะของดินปั้นใหม่ (Remolded) โครงสร้างการจับตัวกันเป็นกลุ่ม (Flocculation) ของเม็ดดินเป็นรูปร่างที่เกิดจากความเข้มข้นของเกลือ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

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

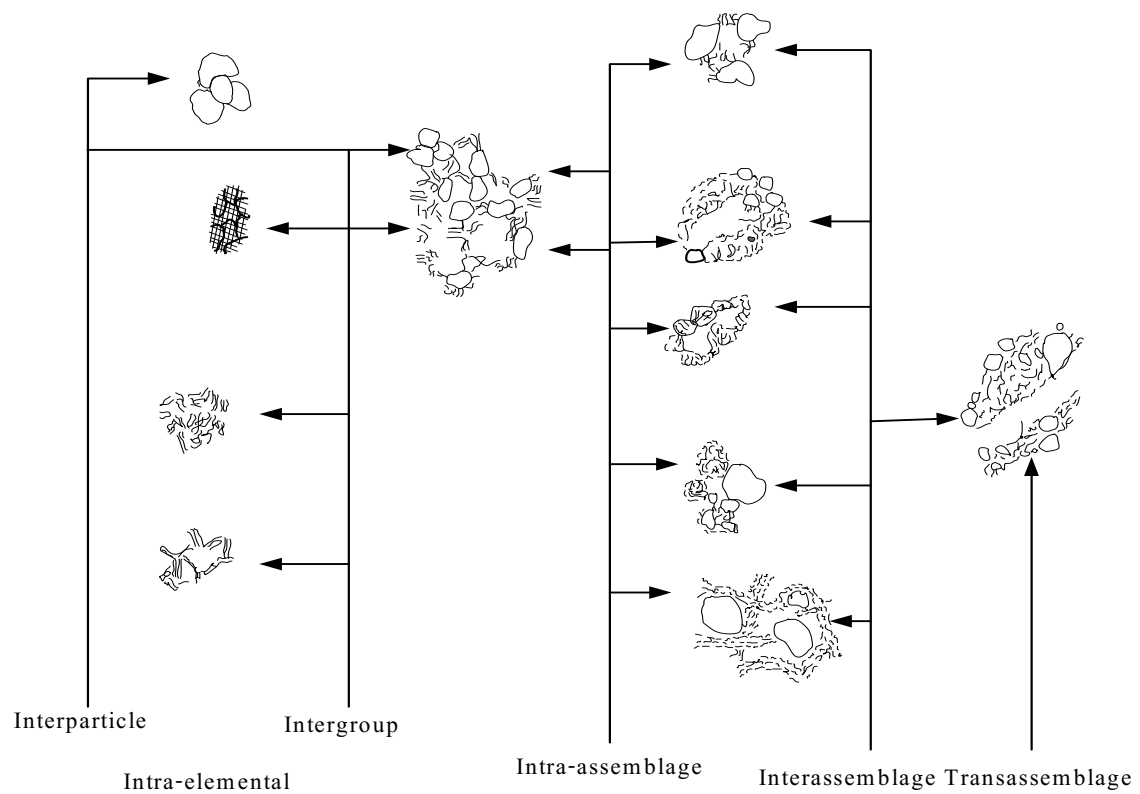


รูปที่ 2.16 ชนิดของโครงสร้างดินเหนียว (Yong and Warkentin, 1966, 1975)

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



รูปที่ 2.17 โครงสร้างดินที่ตะกอนที่เกิดจากผลกระทบของไฟฟ้าเคมี (Lambe, 1958)

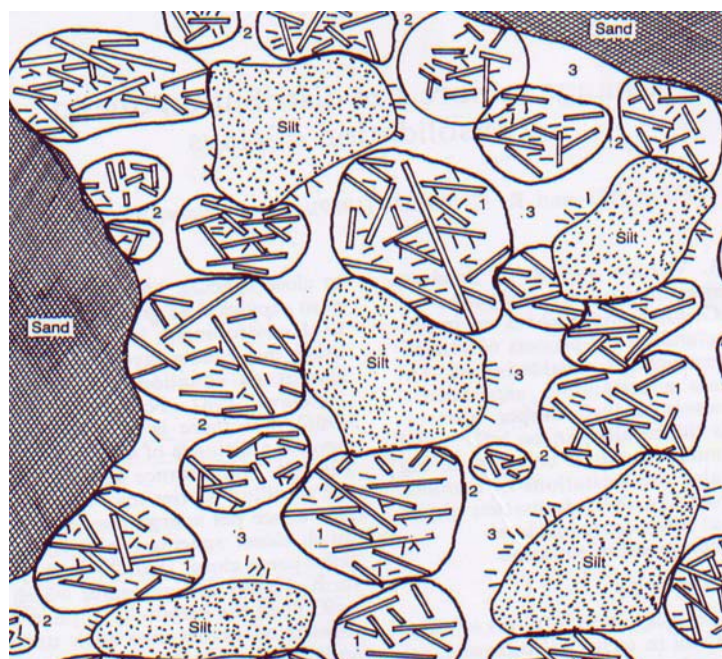


รูปที่ 2.18 การเข้าแทนที่และการรวมตัวของอนุภาคและช่องว่างชนิดต่างๆ

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

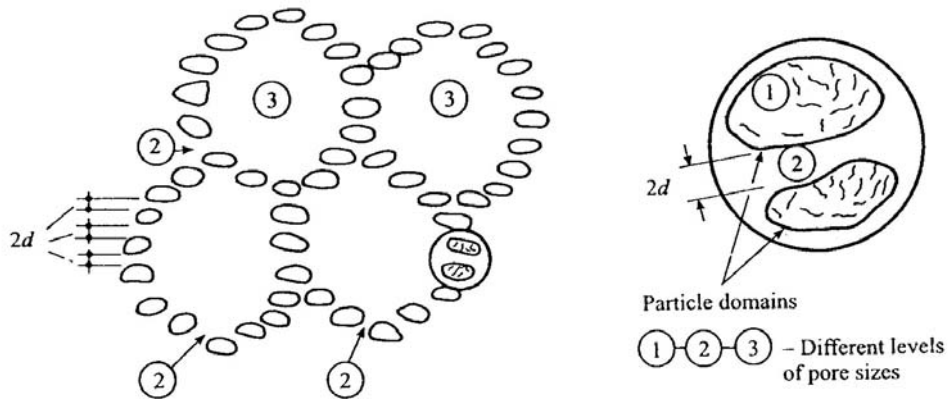
Nagaraj et al. (1990) สรุปผลการทดลองของ Griffith and Joshi (1989) และแสดงแบบจำลองโครงสร้างของเม็ดดินละเอียดโดยอาศัยทฤษฎีกลุ่มอนุภาคดิน (Cluster theory) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และ 2.20 ซึ่งขนาดของช่องว่างมีด้วยกัน 3 ระดับ คือ

- ก. โพรงระหว่างอนุภาคดินเหนียวในกลุ่มอนุภาค (Cluster) มีขนาดน้อยกว่า 20 Å
- ข. โพรงระหว่างกลุ่มอนุภาคดินสองกลุ่ม มีขนาดอยู่ระหว่าง 20 Å ถึง 200 Å
- ค. โพรงขนาดใหญ่ระหว่างของอนุภาคดิน มีขนาดใหญ่กว่า 200 Å

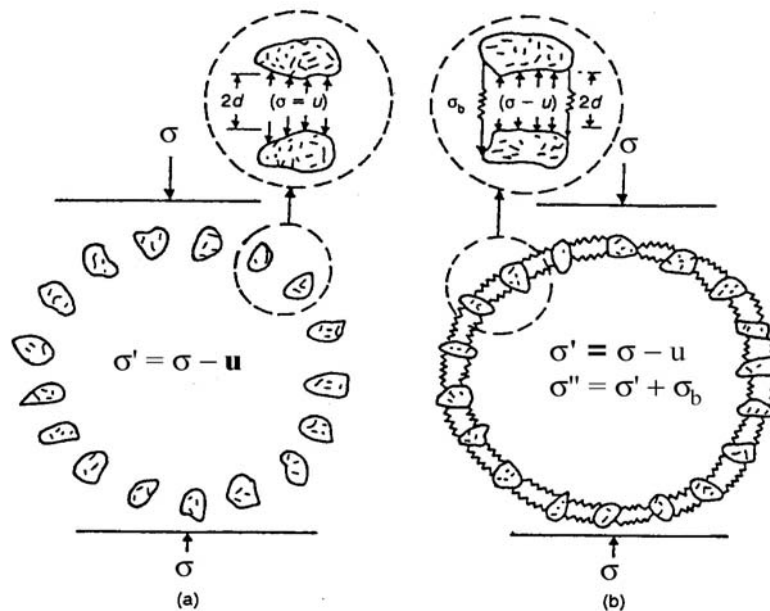


รูปที่ 2.19 การกระจายของช่องว่างในเม็ดดิน (Nagaraj et al., 1990)

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 เสนอโดย Kamon (1979) การกระจายขนาดโพรงของดิน สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Mercury intrusion porosimeter ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มีประโยชน์อย่างมากในการหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างดินกับพฤติกรรมทางกล ตัวอย่างที่ใช้สำหรับการวัดการกระจายขนาดโพรง โดยทั่วไปจะต้องทำให้น้ำในโพรงหายไป โดยการทำ Freeze - Dry ก่อน เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยที่สุด หลักการในการวัดการกระจายขนาดโพรงจะอยู่บนพื้นฐานของสมการที่เสนอโดย Washburn (1921) ซึ่งขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของโพรงสามารถคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการอัดปรอท กับพื้นที่ผิวเมื่อ ปรอทเข้าไปแทรกอยู่ในโพรงของดิน

ตารางที่ 2.3 เครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างดิน (Kamon, 1979)

	Electro microscope		X-ray defflection	Polarization microscope	Porosimeter	อื่นๆ
	Scanning type	Transmission type				
หลักการ	จากการสังเกตโดยใช้ Electronic line		ใช้การหักเห ของรังสี X-ray	ใช้การสั่น เนื่องจากการแผ่ รังสี	ใช้การแทนที่ ของปรอท	คลื่นเสียง, การนำไฟฟ้า, การนำความร้อน, คุณสมบัติ ของแม่เหล็ก
พิจารณารูปร่าง ของอนุภาคดิน	สามารถทำได้	ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 5 ไมครอน	ไม่สามารถ ทำได้	พิจารณาขนาด ตะกอนของ อนุภาคเบื้องต้น	ไม่สามารถ ทำได้	ไม่สามารถ ทำได้
การสังเกต อนุภาคดิน	สามารถทำได้	ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 5 ไมครอน	ไม่สามารถ ทำได้	พิจารณาขนาด ตะกอนของ อนุภาคเบื้องต้น	ไม่สามารถ ทำได้	ไม่สามารถ ทำได้
พิจารณาการ จัดเรียงของ โครงสร้างดิน	สามารถทำได้	สามารถทำได้	สามารถทำ ได้	สามารถทำได้	ไม่สามารถ ทำได้	สามารถทำ ได้
พิจารณาโพรง ช่องว่าง	โพรงภายใน และภายนอก อนุภาคดิน	โพรงภายใน และ ภายนอกอนุภาคดิน	ไม่สามารถ ทำได้	โพรงภายนอก อนุภาคดิน	พิจารณาการ กระจายตัว ของขนาด โพรง	สามารถทำ ได้บางส่วน

Ahemed et al.(1974) ทำการวัดการกระจายขนาดโพรง และได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังและการเปลี่ยนแปลงขนาดโพรงในดินเหนียวอิไลต์ (Illite clay) พวกเขาได้เสนอว่าการกระจาย ขนาดโพรงในดินเหนียวอัดแปรผันอย่างมากกับกับปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัด เมื่อตัวอย่างดิน ถูกบดอัดทางด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงระหว่าง 50 – 0.5 ไมครอน มีปริมาณมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ของความพรุนทั้งหมด ส่วนที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม และทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เส้นผ่านศูนย์กลางโพรงระหว่าง 0.5 – 0.016 ไมครอน มีมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของความพรุนทั้งหมด ดินตัวอย่างที่บดอัดทางด้านเปียกจะมีความพรุนที่ เส้นผ่านศูนย์กลางโพรงระหว่าง 0.5-0.016 ไมครอน มากกว่าดินตัวอย่างที่บดอัดทางด้านแห้งประมาณ 2 เท่า นอกจากนี้ พวกเขาได้ศึกษาผลกระทบจากการอบให้น้ำออกจากโพรงของดินบดอัดที่มีระดับความ

อิมตัวด้วยน้ำต่างๆ และพบว่าตัวอย่างที่มีระดับความอิมตัวด้วยน้ำสูงจะมีการลดลงของปริมาตรมากถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ดินที่มีระดับความอิมตัวด้วยน้ำต่ำจะเกิดการหดตัวต่ำมาก ที่ระดับการอิมตัว 50 เปอร์เซ็นต์ การกระจายขนาดโพรงหลังการอบแห้งและหลัง Freeze-Dry มีค่าใกล้เคียงกัน

Yamaguchi and Ikenaga (1992) ได้ทำการศึกษาการกระจายขนาดโพรงในดินบดอัด โดยใช้ดิน 12 ตัวอย่าง ที่มีกระจายความคละต่างกัน โดยการผสมดินเหนียว (Clay) กับทราย (Sand) ทราย (Sand) กับดินร่วน (Loam) และดินร่วน (Loam) กับดินเหนียว (Clay) ผลที่ได้พบว่าโครงสร้างของดินบดอัด ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของตัวอย่าง โพรงของดินบดอัดทางด้านหนึ่งส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง 1 – 100 ไมครอน โพรงส่วนใหญ่ของดินบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีขนาดระหว่าง 0.01 – 0.1 ไมครอน เส้นกราฟความถี่ของโพรงของดินที่บดอัดทางด้านเปียกจะแสดงจุดยอด 2 จุด อยู่ที่ 0.01 – 0.1 ไมครอน และ 10 – 100 ไมครอน เส้นกราฟแสดงความถี่ของโพรงที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จะได้รับผลกระทบจากขนาดของทรายที่ผสมอยู่ในตัวอย่าง ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินร่วน (Loam) ที่มีปริมาณความชื้นต่างกัน แปรผันตามโครงสร้างดิน

Bengochea et al. (1979) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของขนาดโพรงกับความสามารถในการซึมผ่านของดินเม็ดละเอียด โดยการผสมดินตะกอน (Silt) กับดินคาร์โอไลไนต์ (Kaolinite) ความสามารถในการซึมผ่านคำนวณได้จาก 3 ทฤษฎี โดยใช้การกระจายขนาดโพรงเป็นพารามิเตอร์ พวกเขาพบว่าพารามิเตอร์การกระจายขนาดโพรงสามารถใช้ในการประมาณความสามารถในการซึมผ่าน นอกจากนี้ พวกเขายังกล่าวอีกว่าสมการทำนายความสามารถในการซึมผ่านที่ใช้ปริมาตรและการกระจายขนาดเม็ดดินเป็นพารามิเตอร์ไม่สามารถอธิบายระบบโพรงของดินบดอัดได้

Lapierre et al. (1990) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน Louiseville โดยอาศัยการกระจายขนาดโพรง และเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดสอบ ดินตัวอย่างที่ทดสอบเป็นดินตัวอย่างคงสภาพและดินตัวอย่างปั่นใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างกัน พวกเขาแสดงให้เห็นว่าไม่มีความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์การกระจายขนาดโพรงกับความสามารถในการซึมผ่าน และตัวแปรที่ควบคุมการไหลของน้ำในมวลดินมีอีกหลายตัว ไม่ใช่เพียงการกระจายขนาดโพรง

Delage and Lefebver (1984) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของดินเหนียว Champlian โดยใช้เครื่อง Mercury intrusion porosimeter และ Scanning electron microscope ภายใต้อัตราการอัดตัวคายน้ำ พวกเขาทำการอัดปรอทออกเป็น 2 ครั้ง ในดินตัวอย่างเดียว เพื่อวัดความพรุนของดิน การอัดปรอทครั้งแรกจะเติมเต็มโพรงทั้งหมดและให้ข้อมูลการกระจายขนาดโพรง หลังจากการอัดปรอทครั้งแรก พวกเขาลดความดันปรอท ซึ่งยังปรากฏปรอทที่คงค้างในโพรง ต่อจากนั้นพวกเขาทำการอัดปรอทอีกครั้ง เพื่อหาการกระจายขนาดโพรงในความพรุนอิสระ (Free porosity) ความแตกต่างของการกระจายขนาดโพรงทั้งสองนี้คือความพรุนคงค้าง (Entrapped porosity) จากการศึกษา นี้ พวกเขาสรุปว่าดินเหนียวมีลักษณะโครงสร้างที่เกิดจากการรวมกลุ่มอนุภาคดิน (Aggregated structure) ซึ่งประกอบด้วยโพรงขนาดเล็กและขนาดใหญ่ระหว่างกลุ่มอนุภาคดิน (Intra- and Inter-aggregate porosity) กลุ่มอนุภาคดินจะไม่ถูกทำลาย

แม้ว่าจะถูกปั่นใหม่ และโพรงทั้งสองขนาดยังคงปรากฏอยู่แม้ในสภาวะปั่นใหม่ ความพรุนอิสระเกิดเนื่องจากโพรงระหว่างกลุ่มอนุภาคดินขนาดเล็ก (Intra-aggregate pore) ระหว่างขบวนการอัดตัวคายน้ำ โพรงขนาดใหญ่ (Inter-aggregate pores) จะอัดตัวเพื่อให้มีแฟบริกที่สมดุลกับความเค้นประสิทธิผลที่มากระทำ ส่วนโพรงขนาดเล็ก (Inter-aggregate pores) จะมีปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น ดัชนีการอัดตัว (Compression index) จึงแปรผันตามการลดลงขนาดและปริมาตรของโพรงขนาดใหญ่

Griffith and Joshi (1989) รายงานการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียว 4 ชนิด ภายใต้การทดสอบอัดตัวคายน้ำใน 1 ทิศทาง จากผลการวัดการกระจายขนาดโพรง พวกเขาพบว่า ปริมาตรที่ลดลงเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวเกิดจากการลดปริมาตรของโพรงขนาดใหญ่ (Inter-aggregate pores) ปริมาตรของโพรงขนาดเล็ก (Intra-aggregate pores) ที่วัดจากความพรุนอิสระ (Free porosity) ของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้นของความเค้นประสิทธิผล

Yamaguchi (1992) ได้รายงานผลการเปลี่ยนแปลงการกระจายขนาดโพรงของดินพีท (Peat) ที่ปนเปื้อนด้วยเศษไม้และเสียใยของพืช ภายใต้การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทาง และการทดสอบแรงอัดแบบ 3 แกนในสภาวะระบายน้ำ พวกเขาพบว่าการกระจายขนาดโพรงของดินที่ปนเปื้อนด้วยเศษไม้และดินที่ปนเปื้อนด้วยเส้นใยมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด กราฟความถี่ของโพรงของดินที่ปนเปื้อนด้วยเศษไม้แสดงจุดยอดที่เห็นชัดเจน ในขณะที่ กราฟความถี่ของโพรงของดินที่ปนเปื้อนด้วยเส้นใยไม่แสดงจุดยอดที่ชัดเจนแม้ว่าจะเกิดการอัดตัวที่สูงกว่า

นอกจากนี้ Yamaguchi et al. (1992) ได้ศึกษาการกระจายขนาดโพรงของดินพีท (Peat) ที่สภาวะอัดตัวปกติและอัดตัวมากกว่าปกติภายใต้การเงื่อนไขแบบระบายน้ำ พวกเขารายงานเส้นกราฟความถี่ของการกระจายขนาดโพรงมีลักษณะคล้ายกันสำหรับทั้งดินเหนียวอัดตัวปกติและอัดตัวมากกว่าปกติเล็กน้อย เนื่องจากต่างก็เกิดความดันน้ำส่วนเกินเป็นบวก ในกรณีของดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ กราฟความถี่ของโพรงมีปริมาณโพรงขนาดใหญ่มากกว่า เนื่องจากความดันน้ำมีค่าเป็นลบขณะเงื่อนไข

Tateishi (1997) ได้วัดการกระจายขนาดโพรงของฟิซจำพวกสาหร่าย (Diatom earth) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูง ภายใต้ขบวนการอัดตัวคายน้ำและเงื่อนไข เขาพบว่าการหดตัวของปริมาตรเนื่องจากการอบแห้งมีน้อยมาก ในขบวนการอัดตัวคายน้ำ โพรงของฟิซจำพวกสาหร่ายในสภาวะอัดตัวมากกว่าปกติส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.2-3.0 ไมครอน สำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติ จุดยอดในช่วงโพรงขนาดเล็กไม่ปรากฏให้เห็น จุดยอดที่สองมีลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเค้นประสิทธิผล เนื่องจากพังทลายของโครงสร้างฟิซจำพวกสาหร่ายตามการเพิ่มขึ้นของความเค้นประสิทธิผล

บทที่ 3

กราฟการบดอัด : การวิเคราะห์และประเมิน

3.1 บทนำ

การบดอัดเป็นวิธีการปรับปรุงดินที่ได้รับความนิยมวิธีหนึ่ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดและง่าย วิธีนี้เป็นวิธีที่เพิ่มความหนาแน่นโดยการให้แรงเพื่อให้อนุภาคของดินเคลื่อนที่เข้าใกล้กันและลดโพรงอากาศ วิธีการนี้ช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือน (กำลังรับแรงแบกทาน) และลดการอัดตัวและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน กราฟการบดอัดในห้องปฏิบัติการใช้ควบคุมการบดอัดในสนาม นอกจากนี้กราฟการบดอัดยังมีประโยชน์เพื่อความเข้าใจถึงอิทธิพลของปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดการบดอัด ดังนั้น แบบจำลองทำนายกราฟการบดอัดในห้องปฏิบัติการจึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับงานถนน

3.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.2.1 ดินตัวอย่าง

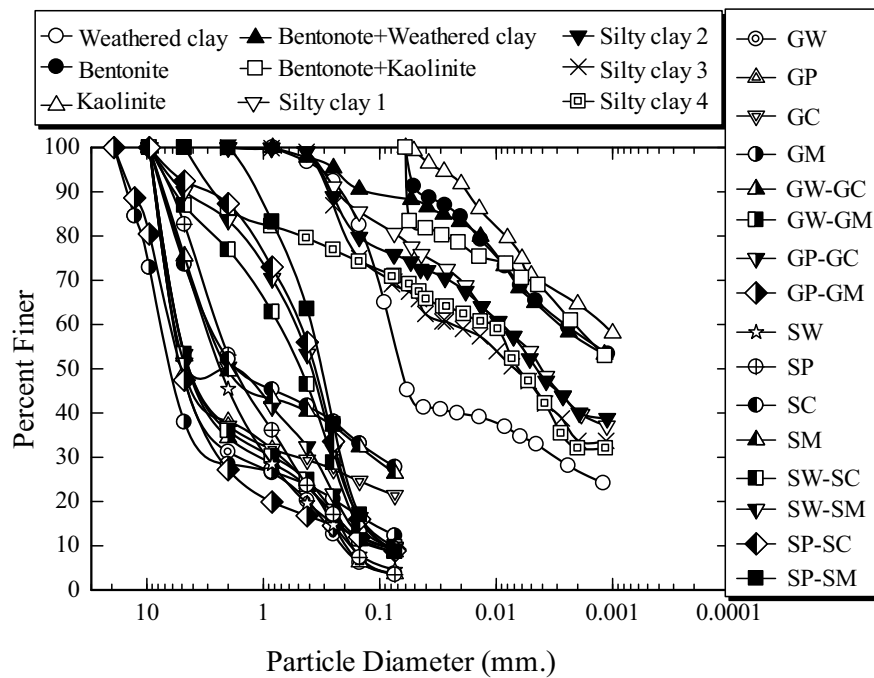
ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด ดินเม็ดหยาบครอบคลุมดิน 16 ชนิด ตามการจำแนกระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) ซึ่งเก็บจากหลายบริเวณในอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ดินเม็ดหยาบเหล่านั้น ได้แก่ กรวดที่มีความคละดี (GW) กรวดที่มีความคละไม่ดี (GP) กรวดที่ผสมดินเหนียว (GC) กรวดที่ผสมดินตะกอน (GM) กรวดผสมดินเหนียวที่มีความคละดี (GW-GC) กรวดผสมดินตะกอนที่มีความคละดี (GW-GM) กรวดผสมดินตะกอนที่มีความคละไม่ดี (GP-GC) กรวดผสมดินเหนียวที่มีความคละไม่ดี (GP-GM) ทรายที่มีความคละดี (SW) ทรายที่มีความคละไม่ดี (SP) ทรายปนดินเหนียว (SC) ทรายปนดินตะกอน (SM) ทรายปนดินเหนียวที่มีความคละดี (SW-SC) ทรายปนดินตะกอนที่มีความคละดี (SW-SM) ทรายปนดินเหนียวที่มีความคละไม่ดี (SP-SC) ทรายปนดินตะกอนที่มีความคละไม่ดี (SP-SM)

ดินเม็ดละเอียดประกอบด้วยดินเหนียวปนดินตะกอน 1 (Silty clay 1) ดินเหนียวปนดินตะกอน 2 (Silty clay 2) ดินเหนียวปนดินตะกอน 3 (Silty clay 3) ดินเหนียวปนดินตะกอน 4 (Silty clay 4) ดินเหนียวผุกร่อน (Weathered clay) ดินคาโอลิไนท์ (Kaolinite) ดินเบนโทไนท์ (Bentonite) และดินผสมระหว่างคาโอลิไนท์และเบนโทไนท์ในอัตราส่วน 2:1 และ 4:1 ซึ่งครอบคลุมทั้งดินบวมตัวต่ำและสูง ระดับการบวมตัวของดินหาได้จากการทดสอบการบวมตัวอิสระ (Free swell test) ที่เสนอโดย Prakash and Sridharan (2004) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและให้คำตอบที่เชื่อถือได้ (Horpibulsuk et al., 2007) จากวิธี

ดังกล่าว ดินเหนียวปนดินตะกอนทั้งสี่ชนิดจัดเป็นดินบวมตัวต่ำถึงสูงปานกลาง (Low to moderately swelling type) ดินเหนียวสุกก่อนจัดเป็นดินบวมตัวต่ำ ดินเหนียวคาโอลิไนท์และเบนโทไนท์จัดเป็นดินไม่บวมตัวและบวมตัวสูง ตามลำดับ ดินผสมระหว่างคาโอลิไนท์และเบนโทไนท์ทั้งสองชนิดจัดเป็นดินบวมตัวสูงปานกลาง คุณสมบัติพื้นฐาน การจำแนกดินตามระบบเอกภาพ และการกระจายความคละของดินทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติพื้นฐานและการจำแนกดินตามระบบเอกภาพ

Soils	Soil composition			LL	PL	G _s	USCS	Sediment volume (mL/10gm)			Swelling
	Gravel (%)	Sand (%)	Silt and Clay (%)	(%)	(%)			In distilled water (a)	In CCl ₄ (b)	FSR Ratio (a/b)	
Silty clay 1	-	30.8	69.2	39.7	7.7	2.70	CL	17.2	10.1	1.7	Moderately
Silty clay 2	-	24.2	75.8	42.3	6.1	2.69	CL	15.9	10.1	1.6	Moderately
Silty clay 3	13.3	15.7	71	47.5	15.8	2.64	CL	13.1	12.2	1.1	Low
Silty clay 4	-	19.3	80.7	49.3	7.4	2.65	CL	15.0	10.0	1.5	Moderately
Kaolinite	-	-	100	52.0	34.8	2.62	CH	13.1	55.2	0.2	Non
Bangkok clay	-	44.3	55.7	63.5	32.7	2.63	CH	20.0	15.8	1.3	Low
Bentonite + Kaolinite	-	-	100	150.6	39.2	2.58	CH	40.1	26.0	1.5	Moderately
Bentonite + Bangkok clay	-	11.3	88.7	152.9	48.3	2.60	CH	81.0	47.9	1.7	Moderately
Bentonite	-	-	100	256.3	39.2	2.66	CH	93.3	45.2	2.1	Highly
Well-graded gravel	52.34	43.95	3.71	-	-	2.71	GW	-	-	-	-
Poorly-graded gravel	50.83	45.51	3.67	-	-	2.75	GP	-	-	-	-
Well-graded gravel with clay	47.13	44.28	8.59	29.47	14.13	2.73	GW-GC	-	-	-	-
Well-graded gravel with silt	46.68	44.64	8.69	-	-	2.75	GW-GM	-	-	-	-
Poorly-graded gravel with clay	48.69	41.89	9.43	37.83	14.73	2.75	GP-GC	-	-	-	-
Poorly-graded gravel with silt	52.60	38.20	9.21	-	-	2.70	GP-GM	-	-	-	-
Clayey gravel	46.75	31.87	21.38	63.21	13.37	2.66	GC	-	-	-	-
Silty gravel	62.07	25.67	12.27	-	-	2.65	GM	-	-	-	-
Well-graded sand	25.65	69.83	4.52	-	-	2.68	SW	-	-	-	-
Poorly-graded sand	17.35	79.20	3.45	-	-	2.69	SP	-	-	-	-
Well-graded sand with clay	13.09	77.27	9.64	30.37	18.78	2.67	SW-SC	-	-	-	-
Well-graded sand with silt	9.93	80.40	9.67	-	-	2.64	SW-SM	-	-	-	-
Poorly-graded sand with clay	7.59	83.59	8.82	31.24	19.34	2.65	SP-SC	-	-	-	-
Poorly-graded sand with silt	-	91.35	8.66	-	-	2.60	SP-SM	-	-	-	-
Clayey sand	26.41	45.80	27.80	61.10	14.75	2.66	SC	-	-	-	-
Silty sand	24.53	49.12	26.35	-	-	2.69	SM	-	-	-	-



รูปที่ 3.1 การกระจายความละเอียดของดินทดสอบ

3.2.2 วิธีการทดสอบ

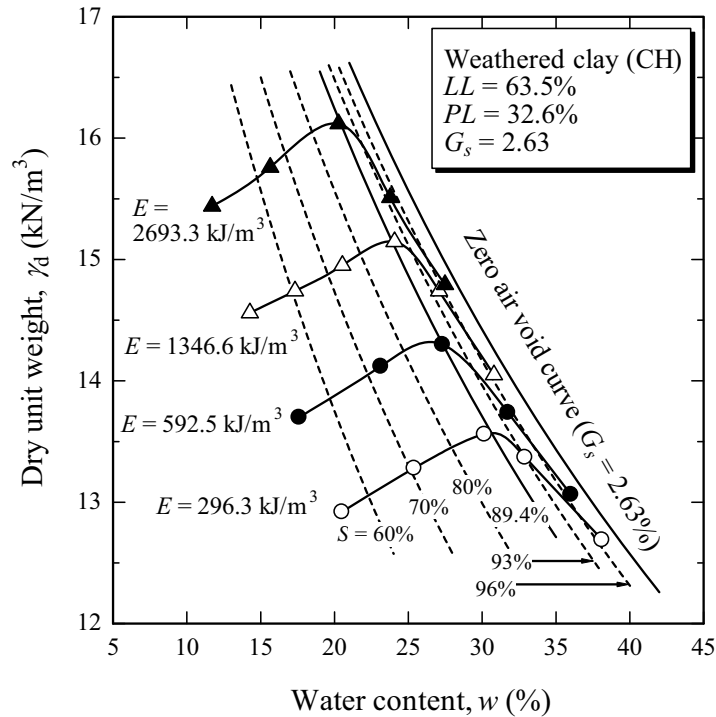
ดินทดสอบทั้งหมดถูกนำมาตากลมเป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน และหาปริมาณความชื้น หลังจากให้น้ำดินแห้งไปผสมกับน้ำและเก็บไว้ในถุงพลาสติกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ปริมาณความชื้นในดินมีความสม่ำเสมอ การบดอัดกระทำในแบบหล่อมาตรฐาน 4 นิ้ว ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) ดินตัวอย่างถูกบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดสี่ค่า ได้แก่ 296.3, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเท่ากับครึ่งพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ครึ่งพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามลำดับ ในแต่ละจุดทดสอบ ผู้ทดสอบทำการทดสอบซ้ำอย่างน้อยสามครั้ง จากการทดสอบ พบว่าผลทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันเกือบทั้งหมด ผลทดสอบทั้งหมดถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายกราฟการบดอัด

ท้ายสุด กราฟการบดอัดดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดที่รวบรวมจากงานวิจัยในอดีต (Bell, 1956; Proctor, 1948; Ruenkrairergsa, 1982; Horpibulsuk et al., 2004c) ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง

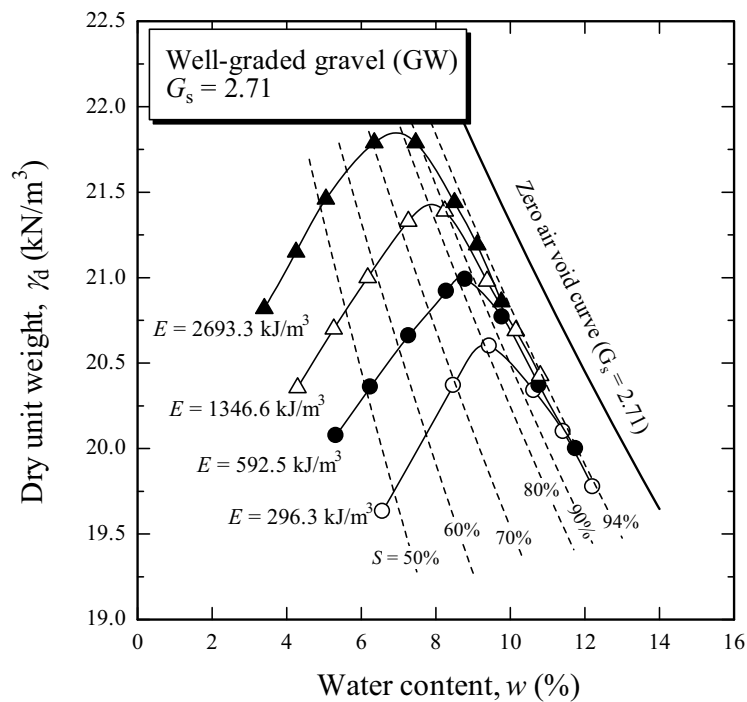
3.3 ผลทดสอบและการวิเคราะห์ผลทดสอบ

รูปที่ 3.2 และ 3.3 แสดงลักษณะกราฟการบดอัดทั่วไปของดินเหนียวกรุงเทพฯและกรวดที่มีความละเอียด (GW) ภายใต้พลังงานการบดอัดสี่ค่า ปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินทุกชนิดแสดงในตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเม็ดหยาบมีค่าสูงกว่าหน่วย

น้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเม็ดละเอียด หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่มากสอดคล้องกับปริมาณความชื้นเหมาะสมที่น้อย ดินเม็ดหยาบมีความไวต่อปริมาณความชื้นมากกว่าดินเม็ดละเอียด โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่า ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินที่จุดเหมาะสม (ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเหมาะสม) มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับดินทดสอบทั้งหมด



รูปที่ 3.2 กราฟการบดอัดดินเหนียวผุกร่อนที่พลังงานการบดอัดต่างๆ



รูปที่ 3.3 กราฟการบดอัดกรวดที่มีความคละดีที่พลังงานการบดอัดต่างๆ

ตารางที่ 3.2 ปริมาณความชื้น หน่วยน้ำหนักแห้ง และระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ของดินทดสอบ

Soils	E (kJ/m ³)	Test Results			Prediction (Eq. 3)		
		OWC (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	ODS (%)	OWC (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	ODS (%)
Silty Clay 1	296.3	17.8	16.8	83.5	17.4	16.9	83.1
	592.5	15.4	17.6	83.1	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	11.7	19.2	83.5	13.4	18.5	83.1
	2693.3	10.2	20.0	84.2	11.6	19.2	83.1
Silty clay 2	296.3	19.1	16.6	86.8	18.6	16.8	87.0
	592.5	16.5	17.5	87.0	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	13.6	18.6	86.9	14.3	18.3	87.0
	2693.3	11.7	19.3	86.3	12.4	19.1	87.0
Silty clay 3	296.3	24.0	14.6	81.7	24.8	14.4	81.7
	592.5	22.0	15.1	81.7	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	20.0	15.8	82.2	19.1	16.0	81.7
	2693.3	18.1	16.4	82.4	16.5	16.9	81.7
Silty clay 4	296.3	20.5	16.1	88.5	19.9	16.2	87.4
	592.5	17.7	16.9	87.4	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	15.0	17.7	85.7	15.4	17.7	87.4
	2693.3	12.4	18.9	87.2	13.3	18.5	87.4
Kaolinite	296.3	33.1	13.2	91.5	33.0	13.2	91.2
	592.5	29.3	14.0	91.2	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	26.3	14.6	91.1	25.5	14.8	91.2
	2693.3	23.3	15.4	90.8	22.0	15.7	91.2
Bangkok clay	296.3	30.7	13.6	89.6	30.6	13.6	89.7
	592.5	27.2	14.4	89.7	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	23.9	15.2	89.8	23.7	15.2	89.7
	2693.3	20.3	16.2	89.8	20.5	16.1	89.7
Bentoinite + Kaolinite	296.3	32.2	13.0	87.2	32.1	13.0	87.7
	592.5	28.5	13.8	87.7	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	24.8	14.7	88.0	24.8	14.6	87.7
	2693.3	20.8	15.7	87.7	21.5	15.5	87.7
Bentoinite + Bangkok clay	296.3	36.8	12.3	89.1	36.7	12.3	89.5
	592.5	32.6	13.1	89.5	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	28.0	14.1	89.7	28.4	14.0	89.5
	2693.3	23.9	15.0	89.0	24.5	14.9	89.5
Bentoinite	296.3	38.7	11.9	85.6	38.1	12.0	86.4
	592.5	33.8	12.8	86.4	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	29.8	13.6	85.7	29.4	13.7	86.4
	2693.3	27.4	14.1	85.8	25.5	14.6	86.4

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Soils	E (kJ/m ³)	Test Results			Prediction (Eq. 3)		
		OWC (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	ODS (%)	OWC (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	ODS (%)
GW	296.3	9.52	20.13	80.4	9.3	20.2	79.8
	592.5	8.52	20.62	79.8	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	7.78	21.05	80.2	7.3	21.3	79.8
	2693.3	6.60	21.68	79.1	6.3	21.9	79.8
GP	296.3	9.59	20.27	79.7	9.4	20.4	79.8
	592.5	8.58	20.82	79.8	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	7.68	21.35	80.1	7.3	21.5	79.8
	2693.3	6.91	21.77	79.4	6.4	22.1	79.8
GW-GC	296.3	7.48	21.21	77.7	7.7	21.1	77.7
	592.5	7.00	21.50	77.7	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	6.19	22.01	78.0	6.0	22.1	77.7
	2693.3	5.25	22.60	77.5	5.2	22.7	77.7
GW-GM	296.3	8.92	20.63	79.7	9.1	20.5	80.0
	592.5	8.35	20.96	80.0	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	7.57	21.37	79.4	7.1	21.7	80.0
	2693.3	6.62	21.91	78.7	6.2	22.2	80.0
GP-GC	296.3	9.17	20.16	74.5	9.2	20.1	74.3
	592.5	8.39	20.59	74.3	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	7.86	20.94	74.9	7.1	21.3	74.3
	2693.3	6.76	21.56	74.0	6.2	21.9	74.3
GP-GM	296.3	10.82	19.39	79.9	10.3	19.6	79.5
	592.5	9.42	20.07	79.5	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	8.38	20.61	79.4	8.0	20.8	79.5
	2693.3	7.22	21.26	79.3	7.0	21.4	79.5
GC	296.3	12.32	18.18	75.3	12.4	18.1	74.9
	592.5	11.35	18.60	74.9	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	10.25	19.14	75.1	9.7	19.4	74.9
	2693.3	9.10	19.68	74.2	8.4	20.1	74.9
GM	296.3	9.67	19.68	79.8	9.8	19.6	79.6
	592.5	8.93	20.04	79.6	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	8.10	20.44	79.0	7.6	20.7	79.6
	2693.3	7.29	20.95	80.2	6.6	21.3	79.6
SW	296.3	8.32	20.25	74.8	7.8	20.5	74.8
	592.5	7.13	20.94	74.9	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	6.21	21.50	74.7	6.1	21.6	74.8
	2693.3	5.18	22.15	74.2	5.3	22.1	74.8

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Soils	E (kJ/m ³)	Test Results			Prediction (Eq. 3)		
		OWC (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	ODS (%)	OWC (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	ODS (%)
SP	296.3	9.72	19.57	75.1	9.3	19.8	75.3
	592.5	8.52	20.23	75.3	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	7.65	20.71	75.0	7.3	21.0	75.3
	2693.3	6.69	21.29	75.2	6.3	21.5	75.3
SW-SC	296.3	11.37	18.97	79.7	10.8	19.3	79.6
	592.5	9.82	19.71	79.6	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	8.43	20.36	78.6	8.4	20.5	79.6
	2693.3	7.32	21.01	79.3	7.3	21.1	79.6
SW-SM	296.3	11.41	18.81	79.9	11.4	18.8	79.5
	592.5	10.44	19.23	79.5	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	9.87	19.57	80.6	8.9	20.0	79.5
	2693.3	9.00	20.01	80.7	7.7	20.6	79.5
SP-SC	296.3	12.25	18.49	80.0	11.9	18.6	79.9
	592.5	10.84	19.12	79.9	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	9.78	19.63	79.9	9.2	19.9	79.9
	2693.3	8.75	20.20	80.7	8.0	20.5	79.9
SP-SM	296.3	14.06	17.54	80.6	14.5	17.4	80.9
	592.5	13.20	17.91	80.9	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	11.96	18.32	79.2	11.2	18.7	80.9
	2693.3	10.80	18.81	78.8	9.8	19.4	80.9
SC	296.3	14.13	17.75	80.0	14.1	17.8	80.4
	592.5	12.83	18.32	80.4	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	11.42	17.40	80.7	10.9	19.2	80.4
	2693.3	10.07	19.54	80.0	9.5	19.9	80.4
SM	296.3	10.15	19.64	79.5	10.1	19.7	80.1
	592.5	9.18	20.17	80.1	Ref.	Ref.	Ref.
	1346.6	8.15	20.74	80.4	7.8	20.9	80.1
	2693.3	7.35	21.21	80.9	6.8	21.5	80.1

งานวิจัยล่าสุดที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองโครงสร้างจุลภาคสำหรับดินเม็ดละเอียดบดอัด (Nagaraj et al., 2006) แสดงให้เห็นว่าที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง แม้ว่าปริมาณความชื้นจะเปลี่ยนแปลงกับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่พารามิเตอร์สถานะ $w/S^{0.5}$ และ w/S^2 เป็นค่าคงที่สำหรับเส้นกราฟการบดอัดทางด้านแข็งและด้านเปียก ตามลำดับ เมื่อ w คือปริมาณความชื้น และ S คือระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่สำหรับการศึกษานี้ พบว่าพารามิเตอร์สถานะทั้งสองนี้ไม่สามารถใช้ได้กับดินทุกชนิดที่นำมาทดสอบ

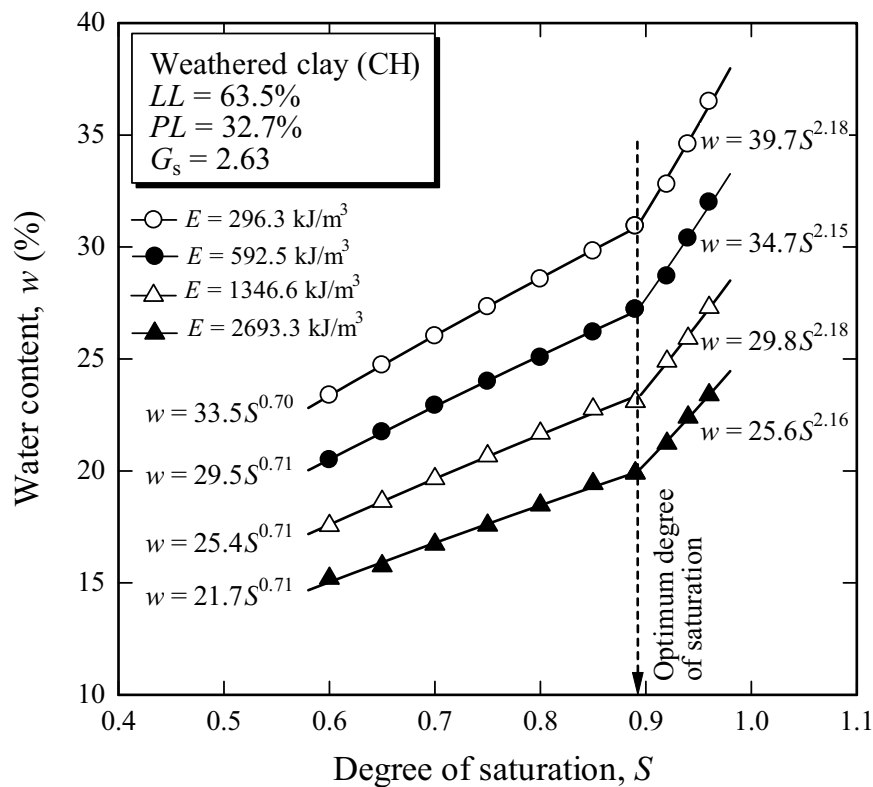
ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้สร้างสมการทั่วไประหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่งในฟังก์ชันพาวเวอร์ดังนี้

$$w = A_d S^{B_d} \quad \text{สำหรับด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม} \quad (3.1)$$

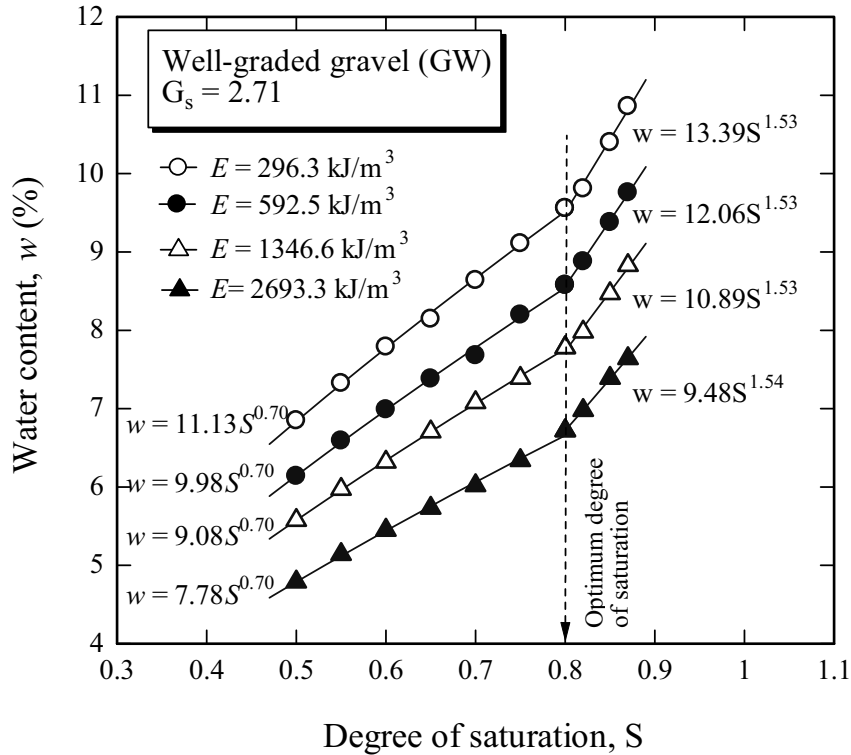
$$w = A_w S^{B_w} \quad \text{สำหรับด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม} \quad (3.2)$$

เมื่อ A_d , B_d , A_w และ B_w คือค่าคงที่ ปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำแสดงในพจน์ของเปอร์เซ็นต์และจุดทศนิยม ตามลำดับ

รูปที่ 3.4 และ 3.5 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ สำหรับดินเหนียวฟูกร่อนและกรวดที่มีความคละดี ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำสำหรับดินทดสอบทั้งหมดสามารถแทนด้วยสมการพาวเวอร์ (สมการที่ 3.1 และ 3.2) ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการทำนายระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเหมาะสม (Optimum degree of saturation, ODS) แนวใหม่ ซึ่งเป็นจุดตัดที่ได้จากความสัมพันธ์ที่แสดงโดยสมการที่ (3.1) และ (3.2) ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเหมาะสมที่แสดงในตารางที่ 3.2 หาโดยวิธีดังกล่าวนี้



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินเหนียวฟูกร่อน

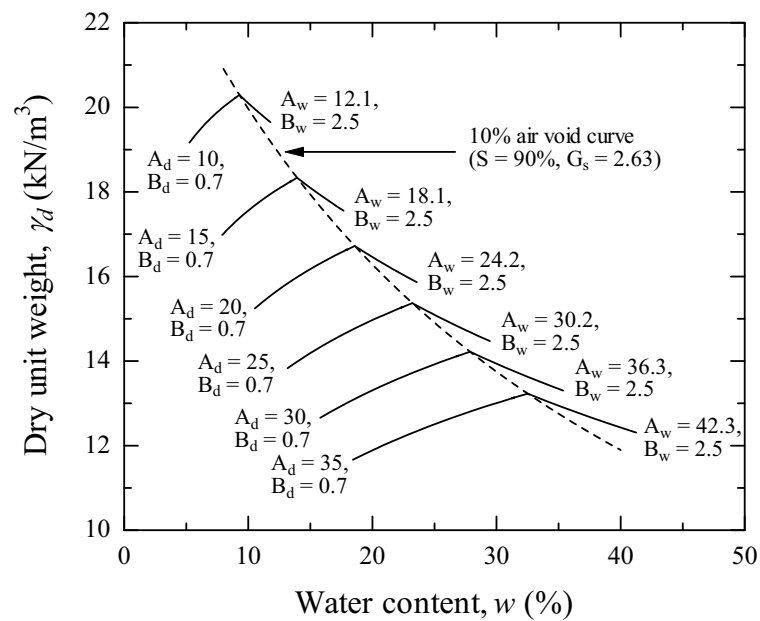


รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของกรวดที่มีความคละดี

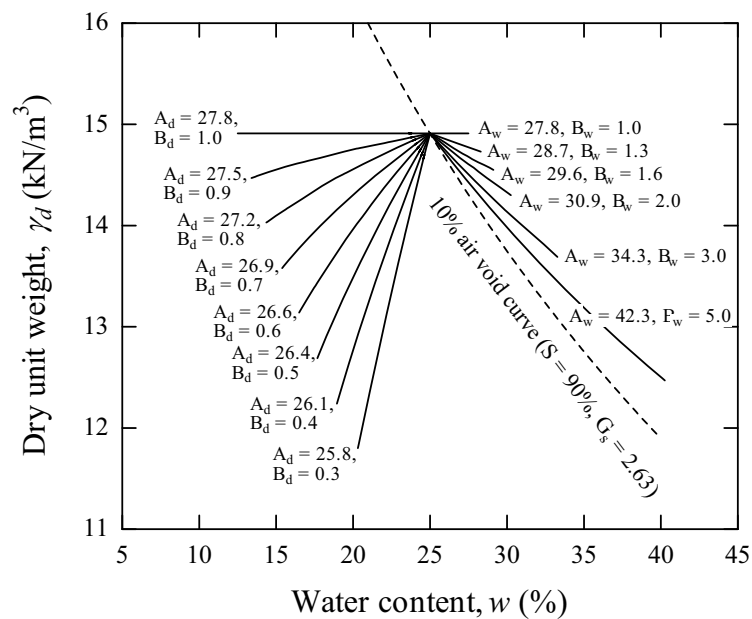
จากการศึกษานี้ เราสามารถสรุปได้ว่ากราฟการบดอัดแปรผันอย่างมากกับชนิดของดิน โดยทั่วไปแล้ว ดินตะกอนจะมีความไวตัวต่อน้ำ (การเพิ่มปริมาณความชื้นเพียงเล็กน้อยจะมีผลอย่างมาก ต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง) ดินเหนียวมีความไวตัวต่อพลังงานการบดอัด (การเพิ่มพลังงานการบดอัดเพียงเล็กน้อยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักแห้งอย่างมาก) (Johnson and Sallberg, 1960 และ Bergado et al., 1996) พารามิเตอร์ A_d , B_d , A_w และ B_w สามารถอธิบายความแตกต่างของกราฟการบดอัด ของดินทุกชนิด ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 สำหรับ B_d และ B_w ค่าหนึ่ง หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะมี ค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ A_d และ A_w มีค่าลดลง (รูปที่ 3.6) พารามิเตอร์ B_d และ B_w เป็นตัวควบคุมความไวตัวต่อน้ำ ทางด้านแห้งและเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ตามลำดับ ดินที่มีค่า B_d และ B_w ที่ต่ำจะมีความไว ตัวต่อน้ำสูง (รูปที่ 3.7) ความชันของกราฟจะเป็นศูนย์ (หน่วยน้ำหนักแห้งไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณ ความชื้น) เมื่อ B_d และ B_w มีค่าเท่ากับ 1.0

ค่า A_d , B_d , A_w , และ B_w สำหรับดินทดสอบทั้งหมดแสดงในตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าสำหรับดิน ชนิดหนึ่งๆ A_d และ A_w มีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัด ขณะที่ B_d และ B_w มีค่าประมาณคงที่สำหรับ ทุกพลังงานการบดอัด B_d สำหรับดินเม็ดหยาบมีค่าต่ำกว่าดินเม็ดละเอียด ขณะที่ B_w มีค่าประมาณ ใกล้เคียงกันสำหรับทั้งดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด ทั้งนี้เนื่องจากดินเม็ดหยาบมีความไวตัวต่อน้ำสูง กว่าดินเม็ดละเอียด ซึ่ง B_d เป็นตัวควบคุมความไวตัวต่อน้ำ สำหรับดินเม็ดละเอียด B_d มีค่าระหว่าง 0.70 ถึง 0.86 และ B_w มีค่าระหว่าง 1.50 ถึง 2.72 สำหรับดินเม็ดหยาบ B_d มีค่าระหว่าง 0.62 ถึง 0.74 และ B_w

มีค่าระหว่าง 1.53 ถึง 2.35 A_d และ A_w สำหรับดินเม็ดหยาบมีค่าสูงกว่าของดินเม็ดละเอียดมาก เนื่องจากหน่วยน้ำหนักแห้งของดินเม็ดหยาบมีค่าสูงกว่าของดินเม็ดละเอียดมาก สำหรับดินเม็ดละเอียด A_d มีค่าระหว่าง 11.50 (พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน) ถึง 44.19 (ครึ่งพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน) และ A_w มีค่าระหว่าง 14.87 (พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน) ถึง 49.66 (ครึ่งพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน) สำหรับดินเม็ดหยาบ A_d มีค่าระหว่าง 6.29 (พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน) ถึง 16.70 (ครึ่งพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน) และ A_w มีค่าระหว่าง 8.24 (พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน) ถึง 24.43 (ครึ่งพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน)



รูปที่ 3.6 อิทธิพลของพารามิเตอร์ A_d และ A_w ต่อกราฟการบดอัด



รูปที่ 3.7 อิทธิพลของพารามิเตอร์ B_d และ B_w ต่อกราฟการบดอัด

ตารางที่ 3.3 ค่า A_d , A_w , B_d และ B_w สำหรับดินทดสอบทุกชนิด

Soils	E (kJ/m ³)	A_d	B_d	A_w	B_w	A_d/A_{dst}	A_w/A_{wst}	OWC/OWC_{st}
Silty clay 1	296.3	20.14	0.70	25.96	2.11	1.14	1.13	1.15
	592.5	17.65	0.73	22.90	2.14	1.00	1.00	1.00
	1346.6	13.30	0.72	17.07	2.10	0.75	0.75	0.76
	2693.3	11.50	0.72	14.87	2.21	0.65	0.65	0.66
Silty clay 2	296.3	21.26	0.75	24.40	1.72	1.16	1.16	1.16
	592.5	18.29	0.75	20.96	1.73	1.00	1.00	1.00
	1346.6	15.10	0.75	17.33	1.73	0.82	0.82	0.82
	2693.3	13.13	0.76	15.17	1.74	0.72	0.72	0.71
Silty clay 3	296.3	28.25	0.80	33.26	1.61	1.10	1.10	1.09
	592.5	25.84	0.80	30.37	1.60	1.00	1.00	1.00
	1346.6	23.44	0.80	27.47	1.61	0.90	0.90	0.91
	2693.3	21.07	0.79	24.64	1.60	0.81	0.81	0.82
Silty clay 4	296.3	22.36	0.70	24.69	1.51	1.15	1.14	1.16
	592.5	19.49	0.71	21.68	1.50	1.00	1.00	1.00
	1346.6	16.79	0.72	18.94	1.50	0.8	0.87	0.85
	2693.3	13.63	0.71	15.21	1.51	0.70	0.70	0.70
Kaolinite	296.3	35.48	0.79	42.05	2.71	1.12	1.12	1.13
	592.5	31.54	0.80	37.54	2.70	1.00	1.00	1.00
	1346.6	28.34	0.81	33.80	2.71	0.90	0.90	0.90
	2693.3	25.21	0.80	30.35	2.72	0.80	0.80	0.80
Bangkok clay	296.3	33.60	0.81	40.21	2.45	1.13	1.13	1.13
	592.5	29.68	0.80	35.44	2.43	1.00	1.00	1.00
	1346.6	26.05	0.81	31.06	2.45	0.87	0.87	0.88
	2693.3	22.18	0.81	26.43	2.44	0.75	0.75	0.75
Bentonite + Kaolinite	296.3	35.70	0.75	40.78	1.72	1.13	1.13	1.13
	592.5	31.53	0.76	35.78	1.72	1.00	1.00	1.00
	1346.6	27.30	0.76	30.86	1.72	0.86	0.86	0.87
	2693.3	22.94	0.75	26.05	1.72	0.77	0.73	0.73
Bentonite + Bangkok clay	296.3	40.33	0.80	45.92	1.92	1.13	1.13	1.13
	592.5	35.70	0.81	40.43	1.93	1.00	1.00	1.00
	1346.6	30.57	0.81	34.49	1.92	0.85	0.85	0.86
	2693.3	26.24	0.81	29.88	1.92	0.74	0.74	0.73
Bentonite	296.3	44.19	0.86	49.66	1.61	1.15	1.16	1.14
	592.5	38.31	0.85	42.87	1.62	1.00	1.00	1.00
	1346.6	34.04	0.86	38.21	1.61	0.89	0.89	0.88
	2693.3	31.22	0.85	35.14	1.62	0.81	0.82	0.81

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

Soils	E (kJ/m ³)	A_d	B_d	A_w	B_w	A_d/A_{dst}	A_w/A_{wst}	OWC/OWC_{st}
GW	296.3	11.13	0.70	13.39	1.53	1.11	1.11	1.12
	592.5	9.98	0.70	12.06	1.53	1.00	1.00	1.00
	1346.6	9.08	0.70	10.89	1.53	0.91	0.90	0.91
	2693.3	7.78	0.70	9.48	1.54	0.78	0.79	0.77
GP	296.3	11.24	0.70	16.22	2.32	1.12	1.12	1.12
	592.5	10.05	0.70	14.46	2.31	1.00	1.00	1.00
	1346.6	8.97	0.70	12.84	2.32	0.89	0.89	0.90
	2693.3	8.13	0.70	11.81	2.32	0.81	0.82	0.81
GW-GC	296.3	8.96	0.72	11.71	1.77	1.07	1.07	1.07
	592.5	8.37	0.72	10.91	1.76	1.00	1.00	1.00
	1346.6	7.38	0.72	9.57	1.76	0.88	0.88	0.88
	2693.3	6.29	0.72	8.24	1.77	0.75	0.75	0.75
GW-GM	296.3	10.48	0.71	13.77	1.91	1.07	1.08	1.07
	592.5	9.78	0.71	12.81	1.92	1.00	1.00	1.00
	1346.6	8.92	0.71	11.79	1.91	0.91	0.92	0.91
	2693.3	7.85	0.72	10.47	1.92	0.80	0.82	0.79
GP-GC	296.3	11.41	0.74	14.43	1.54	1.09	1.09	1.09
	592.5	10.46	0.74	13.25	1.54	1.00	1.00	1.00
	1346.6	9.74	0.74	12.25	1.54	0.93	0.92	0.94
	2693.3	8.46	0.74	10.76	1.54	0.81	0.81	0.81
GP-GM	296.3	12.47	0.63	18.34	2.35	1.14	1.14	1.15
	592.5	10.89	0.64	16.15	2.35	1.00	1.00	1.00
	1346.6	9.71	0.64	14.43	2.35	0.89	0.89	0.89
	2693.3	8.37	0.64	12.46	2.35	0.77	0.77	0.77
GC	296.3	14.67	0.62	19.08	1.54	1.08	1.08	1.09
	592.5	13.58	0.62	17.72	1.54	1.00	1.00	1.00
	1346.6	12.23	0.62	15.93	1.54	0.90	0.90	0.90
	2693.3	10.93	0.62	14.39	1.54	0.81	0.81	0.80
GM	296.3	14.67	0.62	19.08	1.54	1.08	1.08	1.09
	592.5	13.58	0.62	17.72	1.54	1.00	1.00	1.00
	1346.6	12.23	0.62	15.93	1.54	0.90	0.90	0.90
	2693.3	10.93	0.62	14.39	1.54	0.81	0.81	0.80
SW	296.3	10.16	0.69	13.88	1.76	1.17	1.17	1.17
	592.5	8.70	0.69	11.90	1.76	1.00	1.00	1.00
	1346.6	7.60	0.69	10.40	1.76	0.87	0.87	0.87
	2693.3	6.36	0.69	8.76	1.76	0.73	0.74	0.73
SP	296.3	11.63	0.63	19.06	2.35	1.14	1.15	1.14
	592.5	10.18	0.63	16.56	2.34	1.00	1.00	1.00
	1346.6	9.16	0.63	15.03	2.35	0.90	0.91	0.90
	2693.3	8.01	0.63	13.07	2.35	0.79	0.79	0.79

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

Soils	E (kJ/m ³)	A_d	B_d	A_w	B_w	A_d/A_{dst}	A_w/A_{wst}	OWC/OWC_{st}
SW-SC	296.3	13.22	0.66	16.61	1.67	1.16	1.16	1.16
	592.5	11.43	0.67	14.37	1.66	1.00	1.00	1.00
	1346.6	9.91	0.67	12.59	1.66	0.87	0.88	0.86
	2693.3	8.54	0.67	10.76	1.67	0.75	0.75	0.75
SW-SM	296.3	13.43	0.72	17.55	1.92	1.09	1.08	1.09
	592.5	12.33	0.73	16.25	1.93	1.00	1.00	1.00
	1346.6	11.54	0.73	14.94	1.92	0.94	0.92	0.94
	2693.3	10.52	0.73	13.61	1.93	0.85	0.84	0.86
SP-SC	296.3	14.13	0.64	18.53	1.85	1.13	1.13	1.13
	592.5	12.50	0.63	16.47	1.86	1.00	1.00	1.00
	1346.6	11.27	0.63	14.84	1.86	0.90	0.90	0.90
	2693.3	10.02	0.63	13.02	1.86	0.80	0.79	0.81
SP-SM	296.3	16.56	0.76	19.84	1.59	1.07	1.07	1.07
	592.5	15.50	0.76	18.49	1.59	1.00	1.00	1.00
	1346.6	14.20	0.76	17.17	1.59	0.92	0.93	0.91
	2693.3	12.93	0.76	15.76	1.59	0.83	0.85	0.82
SC	296.3	16.70	0.75	24.43	2.45	1.11	1.11	1.10
	592.5	15.10	0.75	21.92	2.46	1.00	1.00	1.00
	1346.6	13.40	0.75	19.30	2.46	0.89	0.88	0.89
	2693.3	11.91	0.75	17.48	2.46	0.79	0.80	0.78
SM	296.3	11.73	0.63	16.11	2.01	1.11	1.11	1.11
	592.5	10.54	0.62	14.51	2.06	1.00	1.00	1.00
	1346.6	9.33	0.62	12.74	2.05	0.88	0.88	0.89
	2693.3	8.39	0.63	11.29	2.03	0.80	0.78	0.80

ในทางปฏิบัติ ถ้าเราสมมติว่า B_d , B_w และ ODS ของดินชนิดหนึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด การเปลี่ยนแปลงของ OWC กับพลังงานการบดอัดจะถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์ A_d และ A_w เท่านั้น (พิจารณาสมการที่ (3.1) และ (3.2)) โดยการใช้ปริมาณความชื้นเหมาะสมที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (OWC_{st}) เป็นค่าอ้างอิง เราสามารถสร้างอัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสมได้ดังนี้

$$\frac{OWC}{OWC_{st}} = \frac{A_d}{A_{dst}} = \frac{A_w}{A_{wst}} = f(E)$$

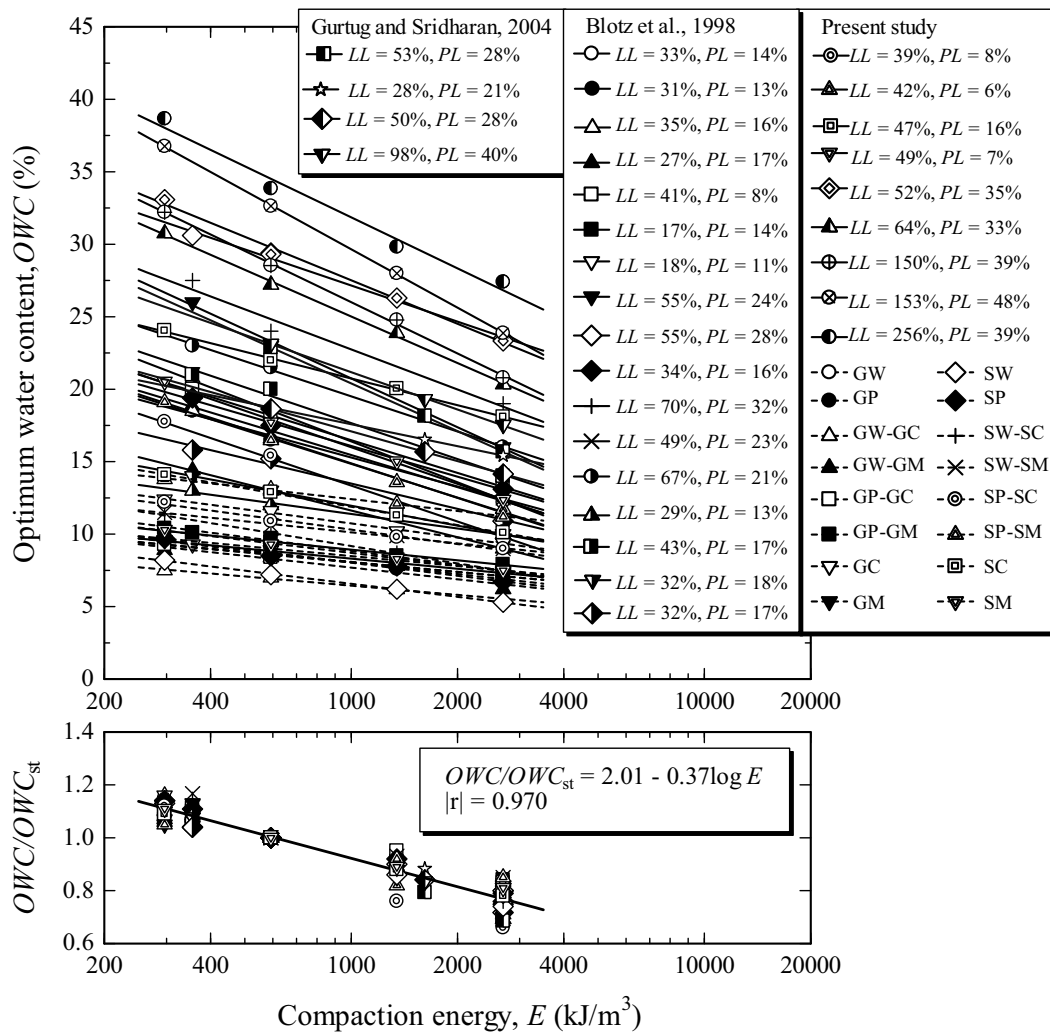
เมื่อ A_{dst} and A_{wst} คือค่าของ A_d and A_w ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

จากตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าแม้ว่า A_d และ A_w มีค่าแตกต่างกันตามแต่ละชนิดของดิน แต่อัตราการลดลงตามพลังงานการบดอัดมีค่าคงที่และไม่แปรผันตามชนิดของดิน ดังจะเห็นได้จากอัตราส่วน A_d/A_{dst} และ A_w/A_{wst} มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับพลังงานการบดอัดค่าหนึ่งๆ ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน OWC/OWC_{st} และพลังงานการบดอัดจึงควรจะเป็นความสัมพันธ์เดียวกันสำหรับดินทุกชนิด

แนวคิดนี้ได้รับการพิสูจน์โดยอาศัยผลทดสอบที่รวบรวมจากนักวิจัยในอดีต (Blotz et al., 1998; Gurtug and Sridharan, 2004) และผลทดสอบของผู้วิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.8 เนื่องจาก OWC มีความสัมพันธ์เชิงลึกลับกับพลังงาน (Blotz et al., 1998; Gurtug and Sridharan, 2004; และ Boutwell, 1961) ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน OWC/OWC_{st} และ $\log E$ จึงเป็นเส้นตรงด้วยเช่นกัน ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{OWC}{OWC_{st}} = 2.01 - 0.37 \log E \quad (3.3)$$

เมื่อ E มีค่าอยู่ระหว่าง 296.3 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร และ Degree of correlation มีค่าเท่ากับ 0.962 ความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นนี้สามารถรวมอิทธิพลของชนิดและลักษณะของดินเข้าด้วยกัน

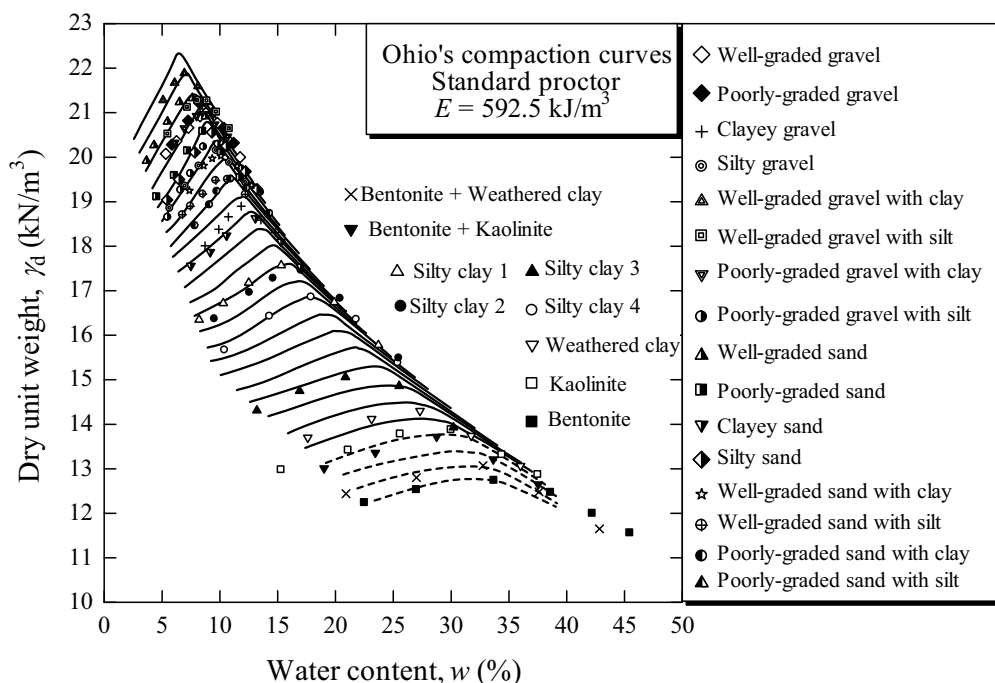


รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน OWC/OWC_{st} และพลังงานการบดอัด

สมการที่ (3.3) สามารถใช้ในการประมาณปริมาณความชื้นเหมาะสมได้ทั้งสำหรับดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด ที่พลังงานการบดอัดใดๆ เมื่อทราบค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่พลังงานการบดอัดใดๆ สามารถหาได้จากปริมาณความชื้นเหมาะสมและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเหมาะสม (มีค่าเท่ากันสำหรับทุกพลังงานการบดอัด) ตัวอย่างการประมาณปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดแสดงดังตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าผลการประมาณและผลทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันมาก

3.4 กราฟ Ohio ปรับปรุง

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของทั้งดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดสอดคล้องกับกราฟการบดอัด Ohio (Joslin, 1959) ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กราฟการบดอัดของดินทดสอบและกราฟการบดอัด Ohio

จากความสัมพันธ์พาวเวอร์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (สมการที่ (3.1) และ (3.2)) และจากการสมมติว่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเหมาะสมสำหรับดินชนิดหนึ่งๆ มีค่าคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด และความถ่วงจำเพาะของดินมีค่าเท่ากับ 2.70 ชุดกราฟการบดอัดที่พลังงานใดๆ สามารถสร้างขึ้นโดยอาศัยกราฟการบดอัด Ohio เป็นกราฟอ้างอิง ชุดกราฟการบดอัดนี้เรียกว่า “กราฟการบดอัด Ohio ปรับปรุง (Modified Ohio compaction curves)” กราฟการบดอัด Ohio ปรับปรุงที่ครึ่งพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ครึ่งพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน สามารถสร้างขึ้นโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. จากกราฟการบดอัด Ohio (พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน) หาค่า A_d , B_d , A_w และ B_w ปริมาณความชื้นเหมาะสม หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหมาะสม ของแต่ละกราฟโดยใช้สมการพาวเวอร์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสมและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหมาะสม
2. หาจุดเหมาะสม (หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นเหมาะสม) สำหรับพลังงานการบดอัดที่ต้องการ ($E = 296.3, 1346.6$, and 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) โดยการแทนค่า OWC_{st} ลงในสมการที่ (3.3) หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดคำนวณได้จากการสมมติว่า ODS มีค่าคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด
3. หาค่า A_d และ A_w สำหรับพลังงานการบดอัดที่ต้องการ โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$A_d = \frac{OWC}{ODS^{B_d}} \quad (3.4)$$

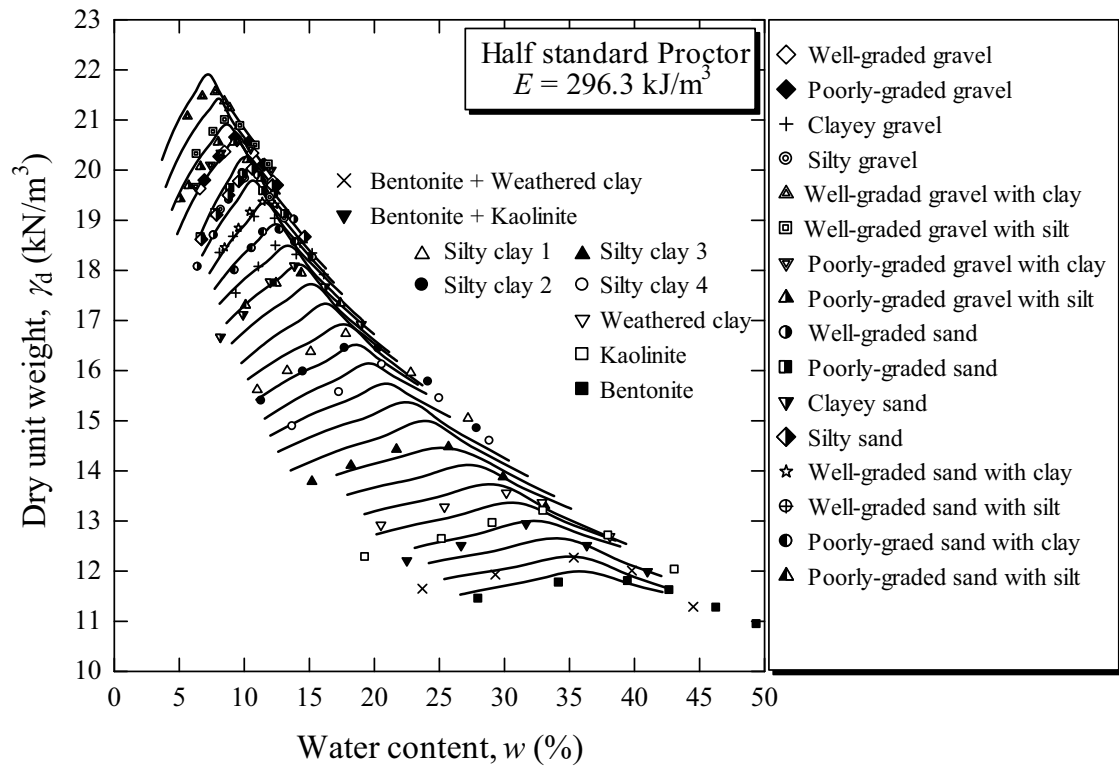
$$A_w = \frac{OWC}{ODS^{B_w}} \quad (3.5)$$

4. หาค่าปริมาณความชื้น (w) ทั้งทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำต่างๆ โดยอาศัยสมการที่ (3.1) และ (3.2) และต่อมาหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง
5. ลากเส้นกราฟเชื่อมต่อดูจุด (γ_d, w)

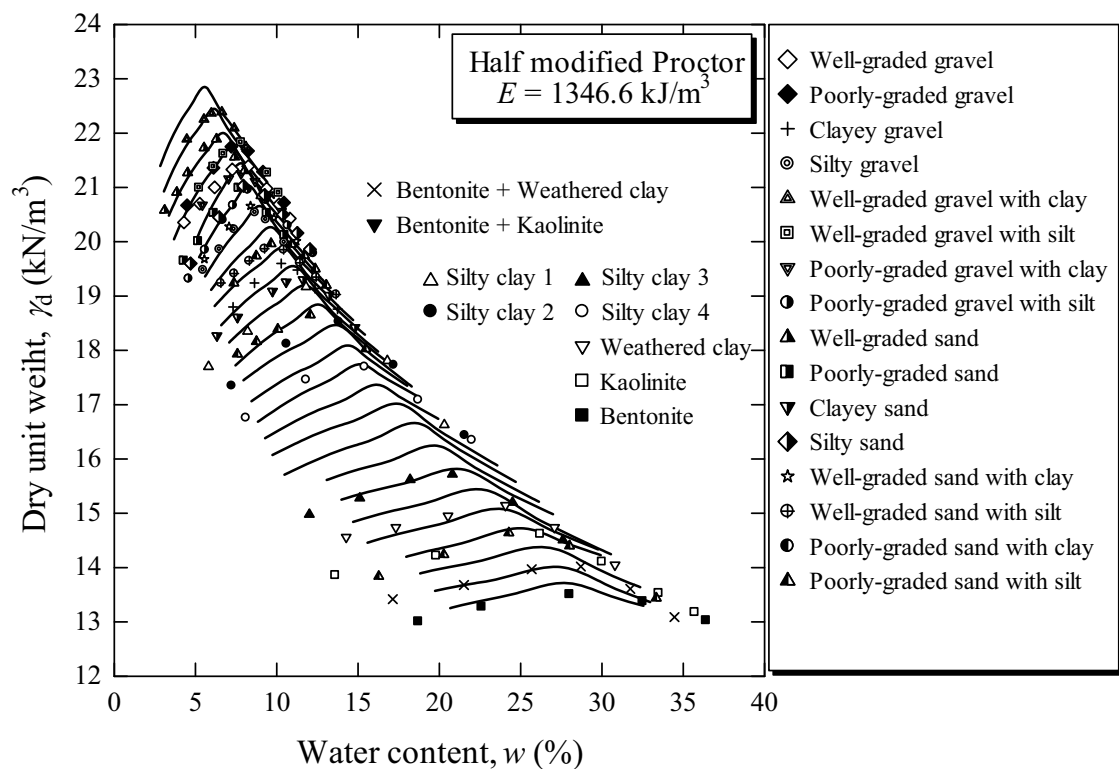
รูปที่ 3.10 ถึง 3.12 แสดงกราฟโอไฮโอปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดทั้งสามค่า ร่วมกับผลทดสอบการบดอัดของดินทดสอบทั้งหมด จะเห็นได้ว่าผลทดสอบทั้งหมดสอดคล้องกับกราฟโอไฮโอปรับปรุง ซึ่งเป็นการยืนยันความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กราฟโอไฮโอในการทำนายกราฟการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดใดๆ โดยอาศัยเพียงแค่ปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งหนึ่งข้อมูลเท่านั้น

นอกจากนี้แล้ว ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการทำนายกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดใดๆ เมื่อทราบกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ขั้นตอนการทำนายทำได้เช่นเดียวกับวิธีที่นำเสนอข้างต้นทันทีที่ทราบกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ค่าของ B_d และ B_w สามารถสมมติให้เป็นค่าคงที่ และสามารถประมาณได้จากกราฟการบดอัดที่ทราบ ค่า OWC_{st} สามารถประมาณได้จากสมการที่ (3.3)

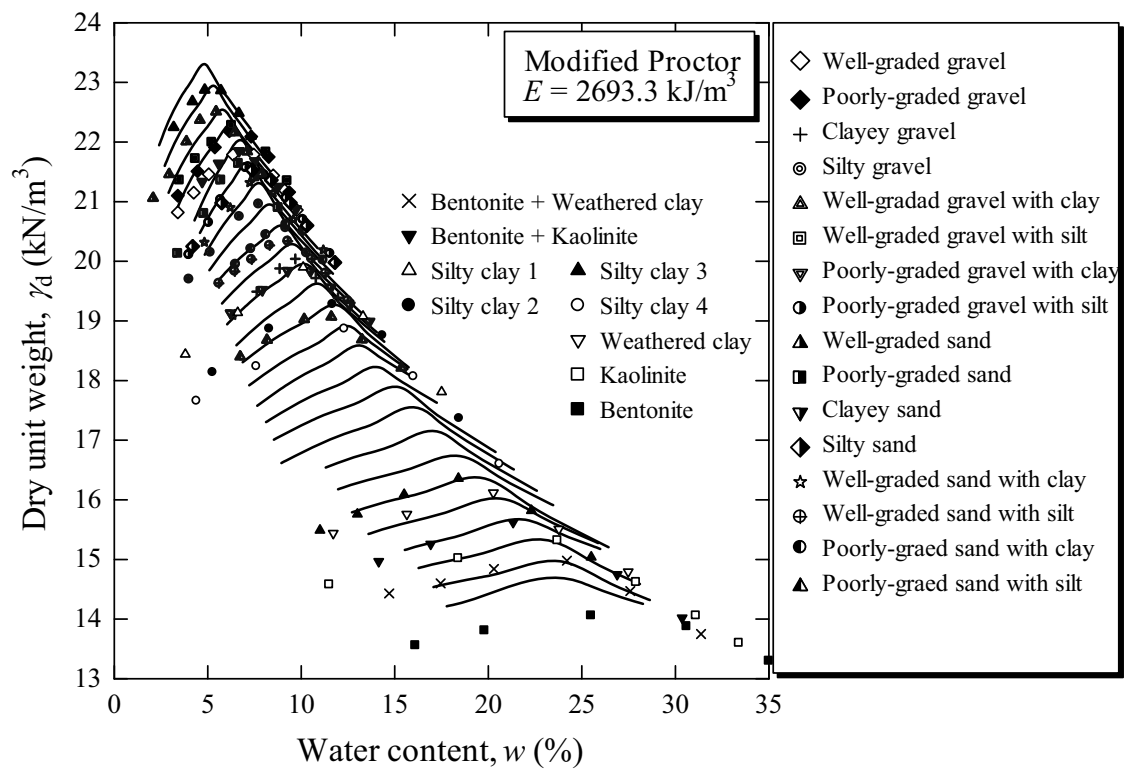
รูปที่ 3.13 ถึง 3.17 แสดงกราฟการบดอัดที่ได้จากการทำนายและจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่รวบรวมจากงานวิจัยในอดีต จะเห็นได้ว่าผลการทำนายกราฟการบดอัดมีความน่าเชื่อถือได้สูง โดยมีความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในงานวิศวกรรม



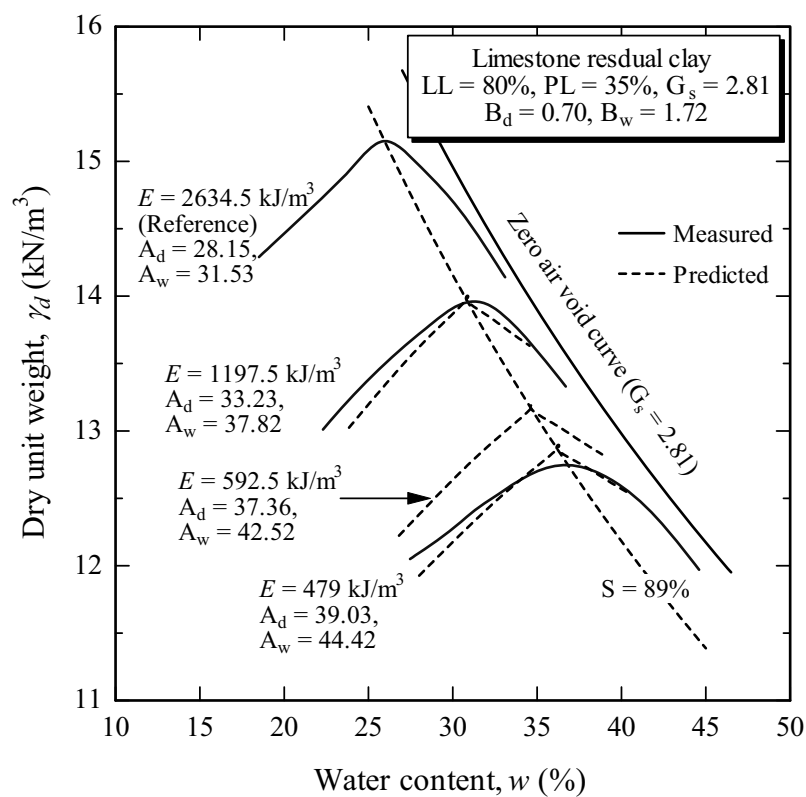
รูปที่ 3.10 กราฟไฮโดรโพรบปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัด 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



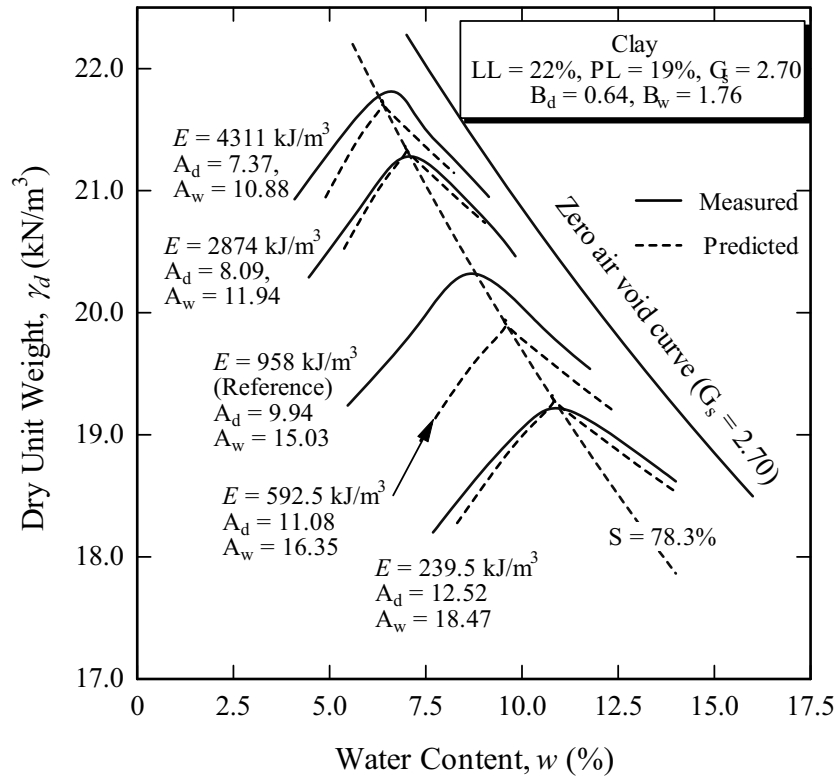
รูปที่ 3.11 กราฟไฮโดรโพรบปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัด 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



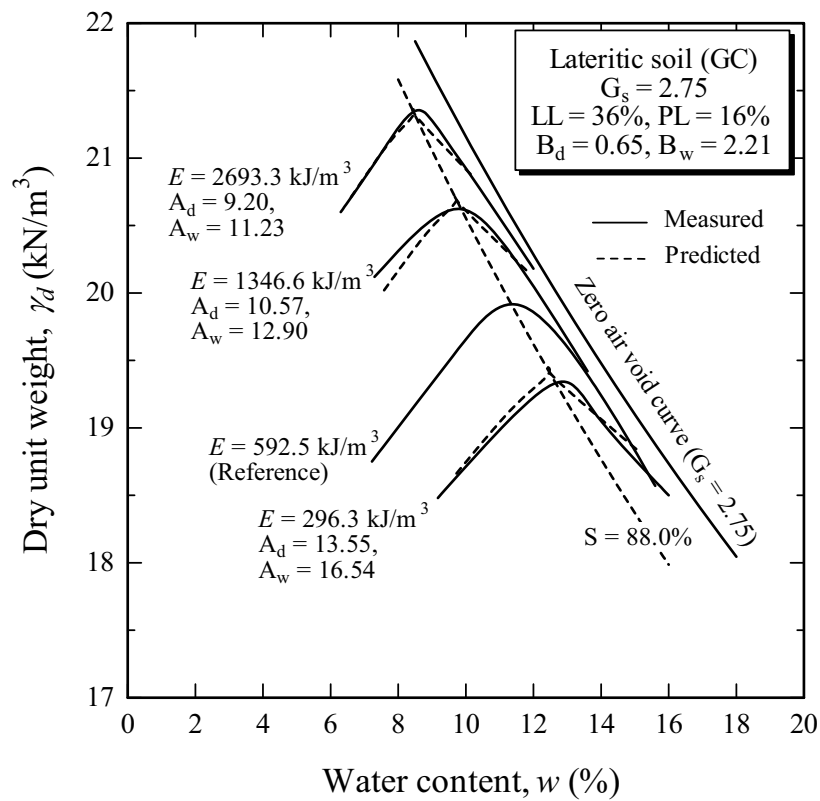
รูปที่ 3.12 กราฟโพลีโพรปร่งสำหรับพลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



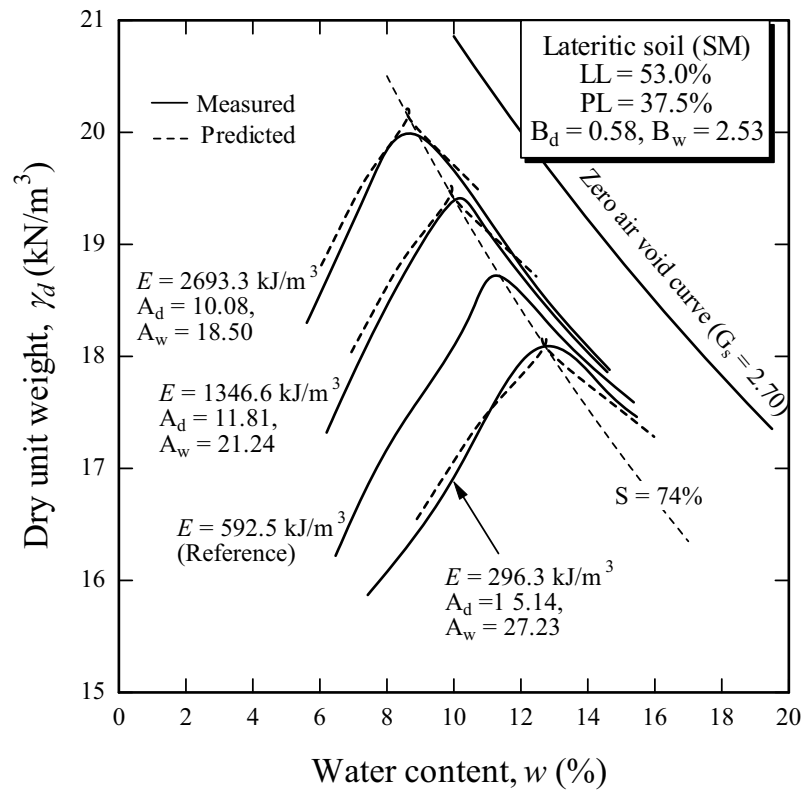
รูปที่ 3.13 การทำนายกราฟการบดอัดของดิน limestone residual clay
(ข้อมูลจาก Bell, 1956)



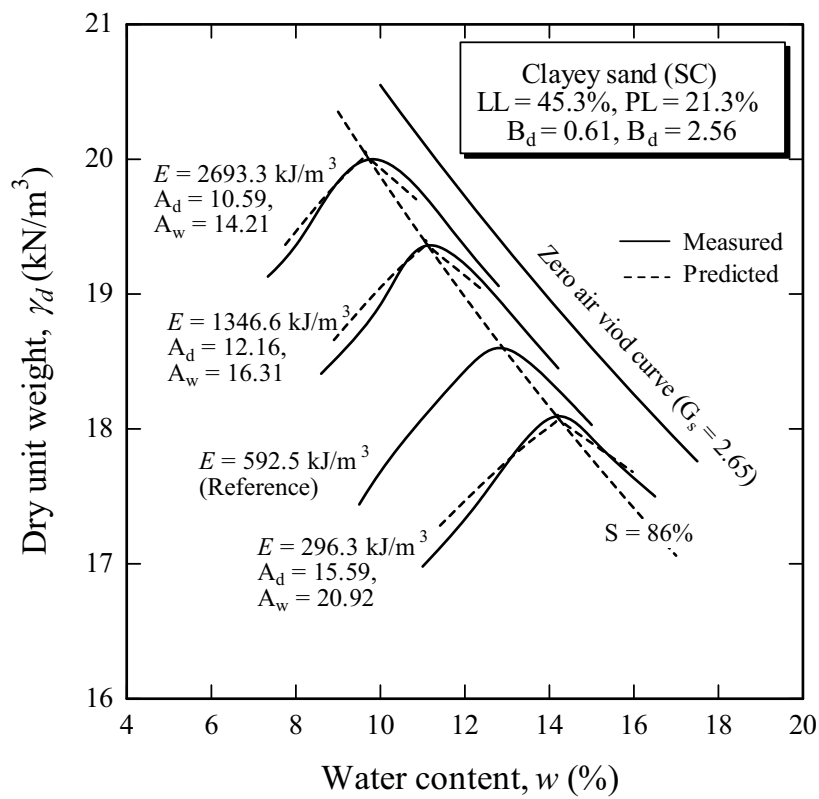
รูปที่ 3.14 การทำนายกราฟการบดอัดของดินเหนียว (ข้อมูลจาก Proctor, 1948)



รูปที่ 3.15 การทำนายกราฟการบดอัดของกรวดปนดินเหนียว (ข้อมูลจาก Ruenkairergsa, 1982)



รูปที่ 3.16 การทำนายกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (ข้อมูลจาก Horpibulsuk et al., 2004c)



รูปที่ 3.17 การทำนายกราฟการบดอัดของทรายปนดินเหนียว (ข้อมูลจาก Horpibulsuk et al., 2004c)

บทที่ 4

การวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์จากการพิจารณาโครงสร้างจุลภาค

4.1 บทนำ

ชั้นดินในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยโดยทั่วไปมีด้วยกันสองชั้น ดินชั้นบนเป็นดินที่เกิดจากการพัดพาของลม (Wind-blown deposit) ซึ่งมีความหนาประมาณ 1-3 เมตร ดินชั้นนี้เป็นดินทรายปนดินเหนียวหรือดินเหนียวปนดินตะกอน ซึ่งมีความไวต่ออัตราความชื้น (Horpibulsuk et al., 2008b) พฤติกรรมทรุดตัวเมื่อได้รับความชื้นได้รับการศึกษาโดย Kohgo et al. (1997) และ Kohgo and Horpibulsuk (1999) ชั้นดินชั้นล่างเป็นดินกำเนิดกับที่ (Residual soil) ที่มีความแข็งและเกิดจากการผุกร่อนของ claystone (Udomchore, 1991) เทคนิคการปรับปรุงดินชั้นบนที่นิยมใช้กันเทคนิคหนึ่งคือการผสมเข้ากับปูนซีเมนต์และบดอัด ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมเนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นได้เองในประเทศ อีกทั้งกำลังอัดของดินซีเมนต์ยังพัฒนาขึ้นได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้น

ถึงแม้ว่าอิทธิพลของตัวแปรควบคุม 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) แต่การศึกษาเหล่านี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาคุณสมบัติทางกลของดินซีเมนต์ ซึ่งปราศจากการอธิบายการเปลี่ยนแปลงเชิงกลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค การศึกษาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคมีความสำคัญและความจำเป็นอย่างยิ่งในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับตัวแปรควบคุม อันจะนำมาซึ่งการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์อย่างมีประสิทธิภาพ (ตามหลักวิชาการและประหยัด)

4.2 วิธีการศึกษา

ดินตัวอย่างเป็นดินเหนียวปนดินตะกอนที่เก็บภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ที่ระดับความลึก 3 เมตร ดินเหนียวปนดินตะกอนนี้ประกอบด้วยทราย 2 เปอร์เซ็นต์ ดินตะกอน 45 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียว 53 เปอร์เซ็นต์ ความถ่วงจำเพาะของดินเท่ากับ 2.74 จัดจำกัด

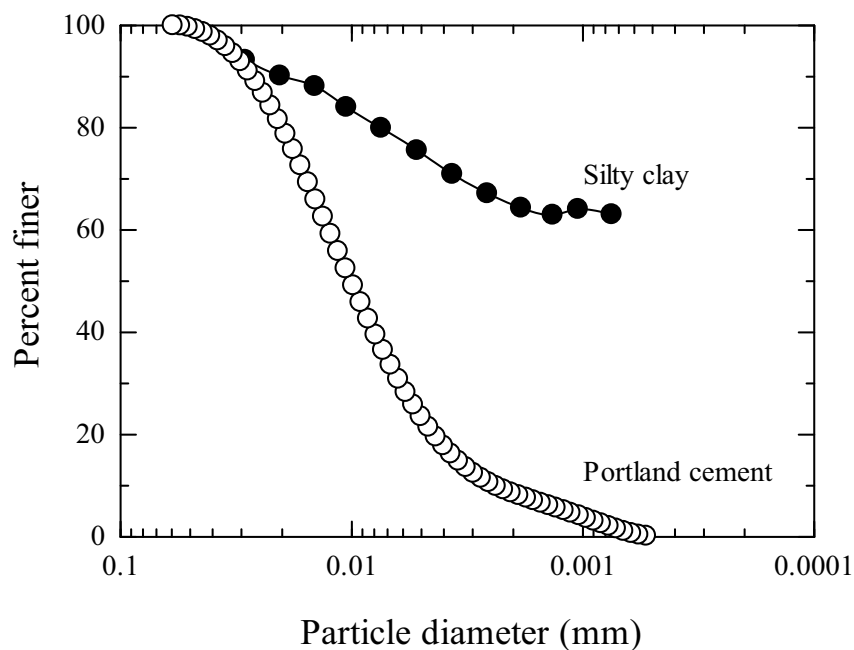
เหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 74 และ 27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดินประเภทนี้จัดเป็นดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) ด้วยการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) ระหว่างการเก็บตัวอย่างไม่ปรากฏระดับน้ำใต้ดิน ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ผลทดสอบการบวมตัวอิสระ (Free swelling test) ที่เสนอโดย Prakash and Sridharan (2004) แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวปนดินตะกอนนี้จัดเป็นดินบวมตัวต่ำและมีค่าอัตราส่วนบวมตัวอิสระเท่ากับ 1.0 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทหนึ่ง ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.15 องค์ประกอบทางเคมีและกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคปูนซีเมนต์เปรียบเทียบกับดินตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ตามลำดับ ภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์และดินตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.2 จากกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคและภาพถ่ายขยาย จะเห็นได้ว่าอนุภาคของดินตัวอย่างมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์มาก อนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ส่วนดินตัวอย่างมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มที่มีหลายขนาด

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และดินเหนียวปนดินตะกอน

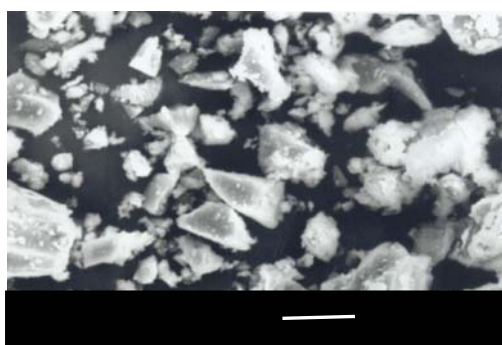
องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์	ดินเหนียวปนดินตะกอน
SiO ₂	20.90	20.10
Al ₂ O ₃	4.76	7.55
Fe ₂ O ₃	3.41	32.89
CaO	65.41	26.15
MgO	1.25	0.47
SO ₃	2.71	4.92
Na ₂ O	0.24	ND
K ₂ O	0.35	3.17
LOI	0.96	3.44

ดินเหนียวปนดินตะกอนนี้จะถูกนำมาร้อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 16 มิลลิเมตร เพื่อขจัดเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ ดินตัวอย่างนี้จะถูกนำไปผึ่งแห้งเป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน และปรับปริมาณความชื้นให้เหมาะสมกับการบดอัด การบดอัดกระทำตามมาตรฐาน ASTM D 698 และ D 1557 ในแบบหล่อขนาด 4 นิ้ว สำหรับการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน ตามลำดับ กราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดทั้งสองแสดงดังรูปที่ 4.3 ปริมาณความชื้นเหมาะสม (*OWC*) และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) มีค่าเท่ากับ 22.4 เปอร์เซ็นต์ และ 14.6 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับการบดอัดแบบมาตรฐาน และ 17.2 เปอร์เซ็นต์ และ 14.6 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

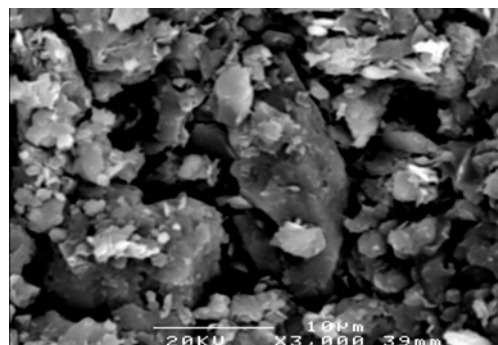
หลังจากได้กราฟการบดอัดแล้ว ดินตัวอย่างผึ่งแห้งจะถูกนำมาผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ตั้งแต่ 3 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ และผสมเข้ากับน้ำเพื่อทำการบดอัด หลังจาก 24 ชั่วโมง ตัวอย่างดินซีเมนต์ถูกถอดออกจากแบบหล่อ ห่อด้วยถุงพลาสติก และเก็บในห้องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ ($25\pm 2^{\circ}\text{C}$) เมื่อได้อายุบ่มที่กำหนด (7, 28 และ 60 วัน) ทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ด้วยอัตรา 1 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้ตัวอย่างอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง สำหรับแต่ละอายุบ่ม พลังงานการบดอัด ปริมาณความชื้น และปริมาณปูนซีเมนต์ เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของผลทดสอบ



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน

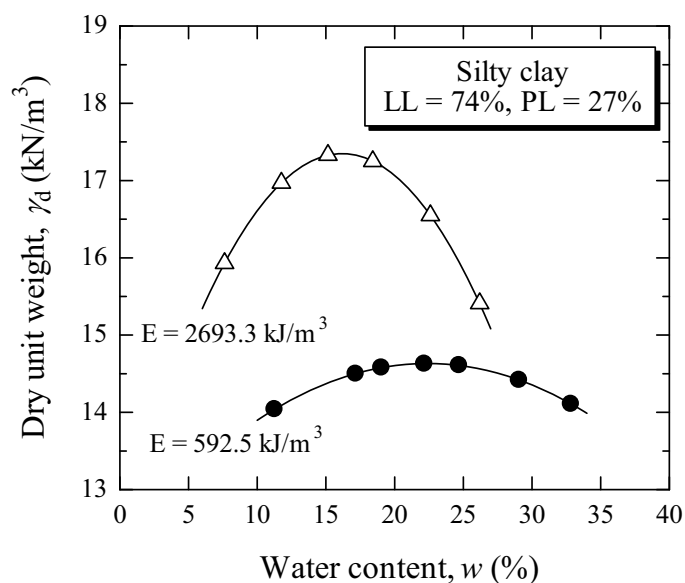


(ก) ปูนซีเมนต์



(ข) ดินเหนียวปนดินตะกอน

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายกำลังขยายของปูนซีเมนต์และดินเหนียวปนดินตะกอน



รูปที่ 4.3 กราฟการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอนที่พลังการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน

การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ทำโดยอาศัยผลทดสอบที่ได้จากกล้องขยายกำลังสูง (Scanning electron microscope, SEM) เครื่องวัดขนาดโพรงด้วยปรอท (Mercury intrusion porosimetry, MIP) และเครื่องวัดความร้อนภายใต้สูญญากาศ (Thermal gravity, TG) ดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น (0.8-1.4 *OWC*) และอายุบ่ม (7, 28, และ 60 วัน) ถูกทำให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ และนำไปทำให้เย็นและแห้ง (Freezing and drying) ที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียส โดยการจุ่มในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 5 นาที และดูดด้วยความดัน 0.5 ปาสคาล ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน (Miura et al., 1999 และ Yamadera, 1999) ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกเคลือบด้วยทองคำก่อนเข้ากล้องขยายกำลังสูง (JOEL JSM-6400)

การวัดการกระจายขนาดโพรงในมวลดินกระทำโดยใช้เครื่องวัดขนาดโพรงด้วยปรอท (MIP) ที่มีความดันในช่วง 0 ถึง 288 เมกกะปาสคาล ซึ่งสามารถวัดโพรงที่ขนาดเล็กถึง 0.0057 ไมครอน ขึ้นตัวอย่างทดสอบ MIP ได้จากการกะเทาดินซีเมนต์อย่างระมัดระวังด้วยส้อม จนมีขนาด 3-6 มิลลิเมตร และหนักประมาณ 1.0 ถึง 1.5 กรัม ปฏิกริยาไฮเดรชันถูกระงับด้วยการทำให้เย็นและแห้ง (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 (เมกกะปาสคาล)

การวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (TG) เป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายในการประมาณผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลเซียมอลูมิเนต (CAH) แคลเซียมอลูมินาซิลิเกต (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) เมื่อเผาดินซีเมนต์ที่อุณหภูมิดังกล่าว แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเปลี่ยนสภาพเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และน้ำ ดังสมการที่ (4.2)



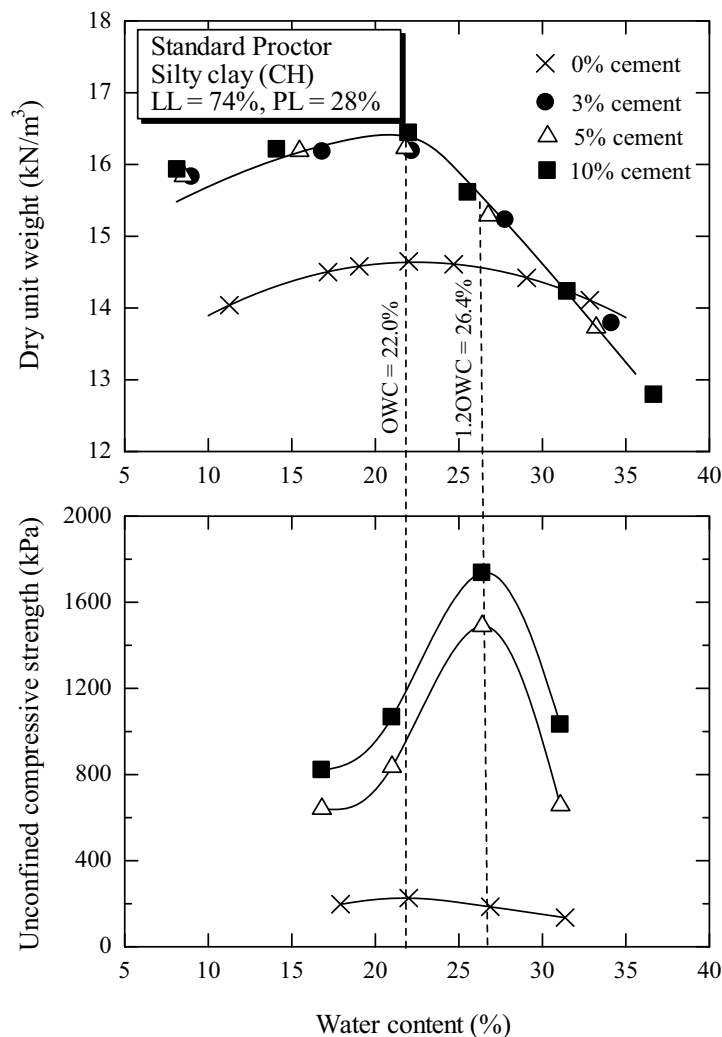
ปริมาณน้ำที่สูญเสียเนื่องจากความร้อน ส่งผลให้น้ำหนักของดินตัวอย่างลดลง ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถประมาณได้จากน้ำหนักน้ำที่สูญเสียดังสมการที่ (4.2) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.11 คูณด้วยปริมาณน้ำที่สูญเสีย (El-Jazairi and Illston, 1977 และ 1980) การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานสามารถตรวจสอบได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์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

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

4.3 ผลทดสอบการบดอัดและแรงอัดแกนเดียว

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้นของดินเหนียวปนดินตะกอน (ไม่ผสมซีเมนต์) และดินเหนียวซีเมนต์ จากกราฟการบดอัด จะเห็นว่าดินซีเมนต์มีความไวต่อน้ำสูงกว่าดินไม่ผสมซีเมนต์ในช่วงปริมาณความชื้นทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังจะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินซีเมนต์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของน้ำ หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์มีค่าสูงกว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินไม่ผสมซีเมนต์ ขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง พฤติกรรมนี้เป็นเช่นเดียวกับพฤติกรรมของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์ ดังได้อธิบายโดย Horpibulsuk et al. (2006) การดูดซับไอออน Ca^{2+} บนผิวของอนุภาคดินเหนียวทำให้เกิดการลดลงของแรงผลักดันอนุภาคดินและก่อให้เกิดการจัดเรียงตัวแบบด้านต่อหน้า (Edge-to-face) ระหว่างแผ่นดินเหนียวมากยิ่งขึ้น (Locat et al., 1990; Shen, 1998 และ Chew et al., 2004) ดังนั้น แผ่นดินเหนียวจับตัวกับเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพิกัดพลาสติก ในขณะที่ขีดจำกัดเหลวมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก (ตารางที่ 4.2)

ส่งผลให้ดัชนีสภาพพลาสติกมีค่าลดลง ผลทดสอบนี้สอดคล้องกับผลทดสอบของดินเหนียวเหนียว กรุงเทพมหานคร (Uddin, 1994) ซึ่งจัดเป็นดินเหนียววามตัวต่ำเช่นเดียวกัน (Horpibulsuk et al., 2007) เนื่องจากขีดจำกัดเหลวเป็นตัวควบคุม *OWC* ของทั้งดินเหนียววามตัวต่ำ (Nagaraj et al., 2006 และ Horpibulsuk et al., 2008a) ดังนั้น *OWC* ของทั้งดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์และดินเหนียวซีเมนต์จึงมีค่าใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.2) หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์มีค่าสูงกว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินไม่ผสมซีเมนต์อาจเนื่องจากการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ของอนุภาคดินเหนียว

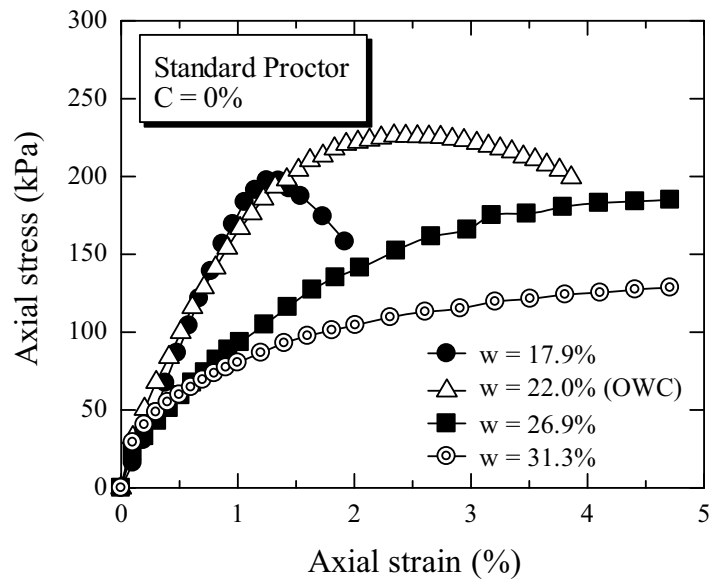


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดกับปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์

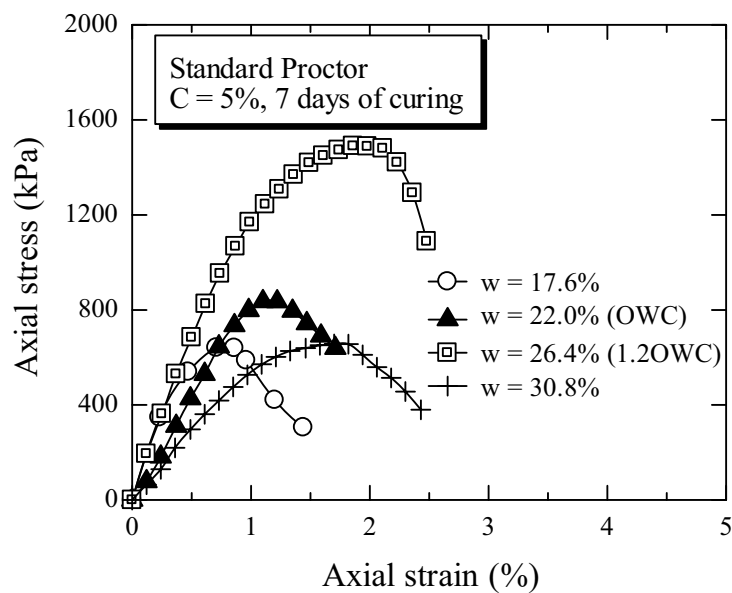
กำลังอัดและสทิเฟนสของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นจนกระทั่งถึงปริมาณความชื้นเหมาะสม และมีค่าน้อยลงตามปริมาณความชื้นเมื่อปริมาณความชื้นอยู่ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (ดูรูปที่ 4.5) พฤติกรรมนี้แตกต่างจากพฤติกรรมของดินเหนียวซีเมนต์ซึ่งกำลังอัดและสทิเฟนสสูงสุดจะอยู่ที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม (รูปที่ 4.6)

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ

ปริมาณซีเมนต์ (%)	พิกัดอัตราเบร็ก (%)			OWC (%)		γ_{dmax} (กิโลนิวตัน ต่อลูกบาศก์เมตร)	
	LL	PL	PI	Std.	Mod.	Std.	Mod.
0	74.1	27.5	46.6	22.4	17.2	14.6	17.4
3	74.1	45.0	29.1	22.2	17.5	16.2	18.5
5	72.5	45.0	27.5	21.8	17.3	16.2	18.7
10	71.0	44.8	26.2	22.0	17.4	16.4	18.8

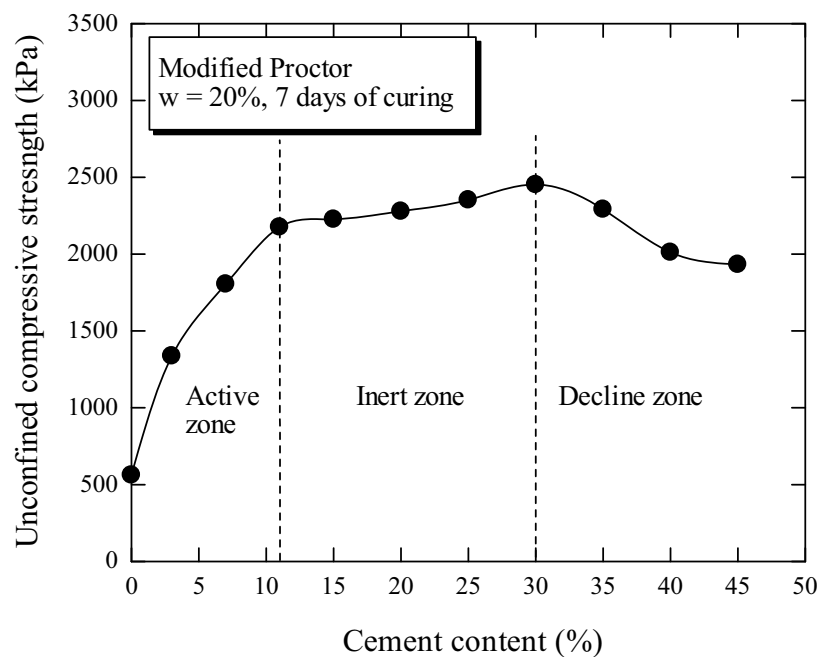


รูปที่ 4.5 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอน



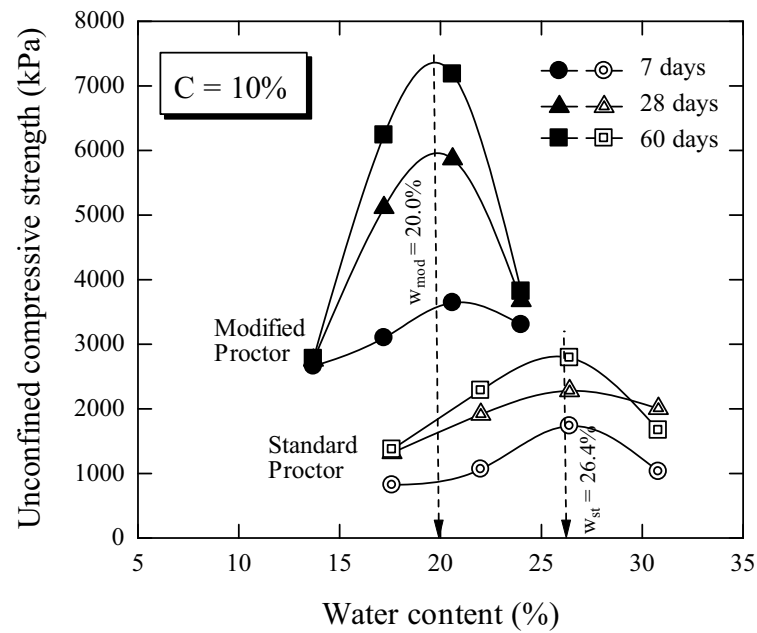
รูปที่ 4.6 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวซีเมนต์

รูปที่ 4.7 แสดงอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่บดอัดภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม (20%) และที่อายุบ่ม 7 วัน การพัฒนากำลังอัดแบ่งออกเป็นสามโซน เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ซีเมนต์เจลที่จุดสัมผัสจะมีมากขึ้น และเมื่อซีเมนต์เจลแข็งตัว พันธะเชื่อมประสานที่จุดสัมผัสก็จะมี ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตาม โซนนี้เรียกว่าโซนแอคทีฟ (Active zone) ถัดจากโซนนี้ กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โซนนี้เรียกว่าโซนล่าช้า (Inert zone) กำลังอัดของดินซีเมนต์จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซีเมนต์มีค่าเกินกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ โซนนี้เรียกว่าโซนลดกำลัง (Decline zone)



รูปที่ 4.7 โซนการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์

อิทธิพลของอายุบ่มและพลังงานการบดอัดต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ในโซนแอคทีฟแสดงดังรูปที่ 4.8 สำหรับปริมาณปูนซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์แปรผันตามพลังงานการบดอัด พลังงานการบดอัดที่สูงขึ้นจะมีผลให้กำลังอัดสูงสุดมีค่าสูงขึ้น และปริมาณความชื้นที่กำลังอัดสูงสุดมีค่าต่ำลง ภายใต้พลังงานการบดอัดที่เท่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นมีลักษณะเหมือนกันทุกอายุบ่ม ซึ่งกำลังอัดสูงสุดเกิดที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม

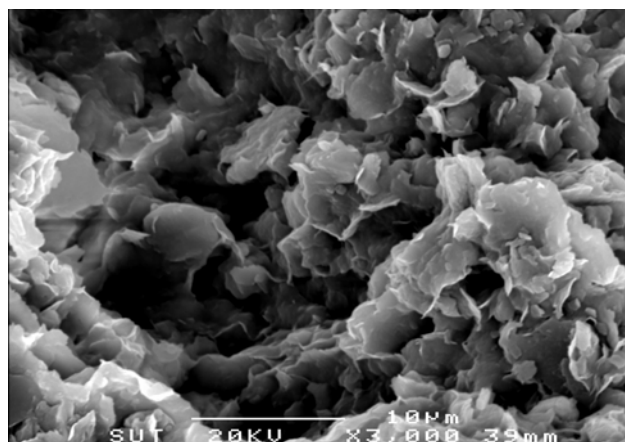


รูปที่ 4.8 อิทธิพลของพลังงานการบดอัดและอายุบ่มต่อการพัฒนากำลังอัด

4.4 การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาค

4.4.1 ดินเหนียวบดอัด

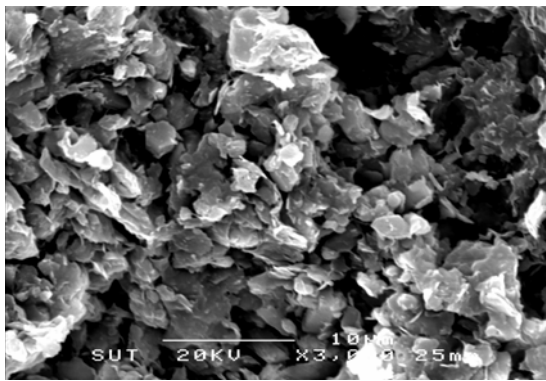
สำหรับดินเหนียวบดอัด (ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำสูง) แพบรีค (การจัดเรียงตัวของกลุ่มของเม็ดดินและโพรง) เป็นตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดและความต้านทานการทรุดตัว ซึ่งถูกควบคุมโดยพลังงานการบดอัดและปริมาณความชื้น การบดอัดจะทำให้กลุ่มเม็ดดินขนาดใหญ่แตกตัวเป็นกลุ่มอนุภาคดินขนาดเล็ก และยังลดขนาดโพรงลงด้วย (ดูรูปที่ 4.3b และ 4.9)



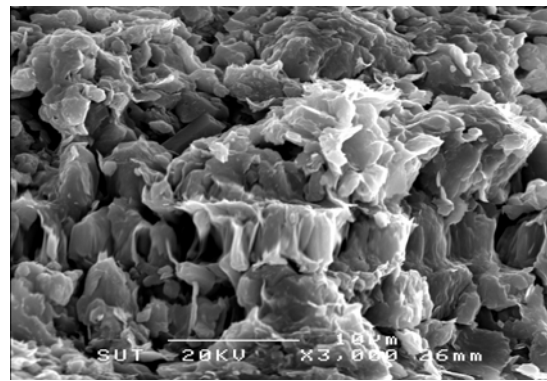
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัดที่ OWC

ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

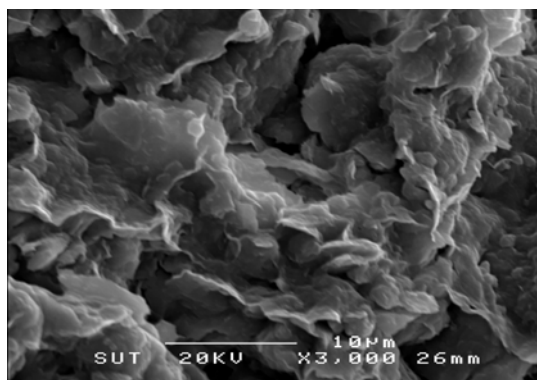
รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายขยายของดินไม่ผสมซีเมนต์บดอัดภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้นระหว่าง 0.8 ถึง 1.2 เท่าของ OWC ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (รูปที่ 4.10c) โครงสร้างมีลักษณะเป็นแบบกระจาย (Dispersed structure) เนื่องจากปริมาณความชื้นมีมากเพียงพอต่อการพัฒนา Diffusion double layer ส่งผลให้เกิดแรงผลักที่สูง ดังนั้นอนุภาคดินและกลุ่มอนุภาคดินจึงสามารถเคลื่อนตัวข้ามกันได้ง่ายเมื่อถูกเฉือน ส่งผลให้กำลังอัดและสตีเฟนส์ต่ำ ทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม (รูปที่ 4.10ก) ปริมาณความชื้นไม่มากพอที่จะพัฒนา Diffusion double layer ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น ระยะห่างระหว่างอนุภาคดินจึงมีน้อย ส่งผลให้โครงสร้างดินมีแนวโน้มเป็นแบบรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Flocculation) ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะเป็นผลรวมของโครงสร้างทั้งสอง ที่ปริมาณความชื้นนี้ ดินตัวอย่างแสดงกำลังอัดและสตีเฟนส์สูงที่สุด อิทธิพลของพลังงานการบดอัดแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจากรูปที่ 4.9 และ 4.10x จะเห็นได้ว่าพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานก่อให้เกิดกลุ่มอนุภาคดินขนาดใหญ่



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



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



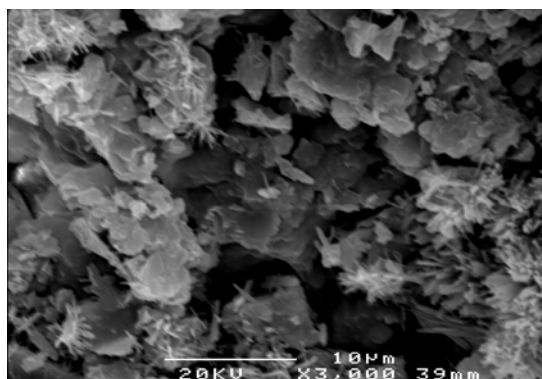
(c) $w = 20\%$ ($1.2OWC$)

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัด
ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

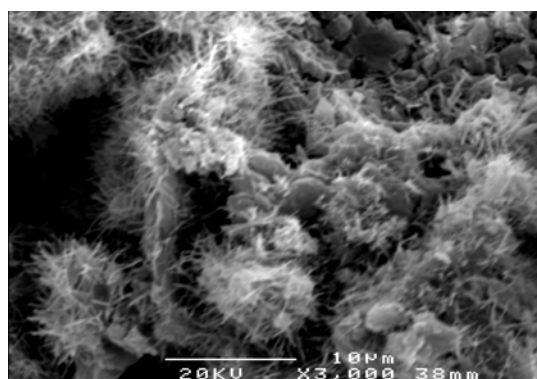
4.4.2 ดินเหนียวซีเมนต์

4.4.2.1 อิทธิพลของปริมาณความชื้น

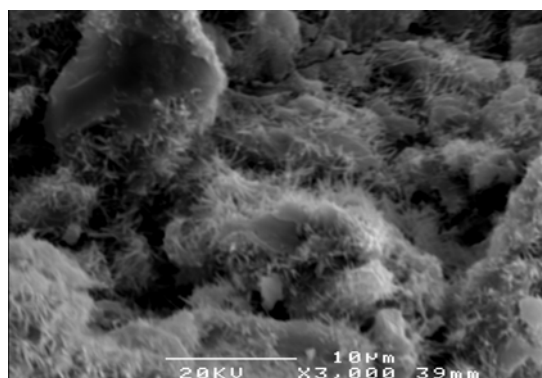
รูปที่ 4.11 แสดงรูปถ่ายขยายของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน จะเห็นได้ว่าโพรงเต็มได้ด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับดินตัวอย่างที่ปริมาณความชื้น 17% (OWC) และ 20% ($1.2OWC$) ดินตัวอย่างที่ปริมาณความชื้น 14% ($0.8OWC$) และ 24% ($1.4OWC$) แสดงผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันในปริมาณที่น้อยกว่า นอกจากนี้แล้ว ปริมาณความชื้นยังมีอิทธิพลต่อปริมาตรโพรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโพรงขนาด 1.0-0.1 ไมครอน ซึ่งมีจำนวนประชากรมากที่สุด การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์มีลักษณะคล้ายคลึงกับของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์ กล่าวคือ สถานะที่แน่นที่สุด (ปริมาตรโพรงทั้งหมดต่ำที่สุด) อยู่ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม สถานะที่หลวมกว่า (ปริมาตรโพรงทั้งหมดสูงกว่า) จะปรากฏทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม



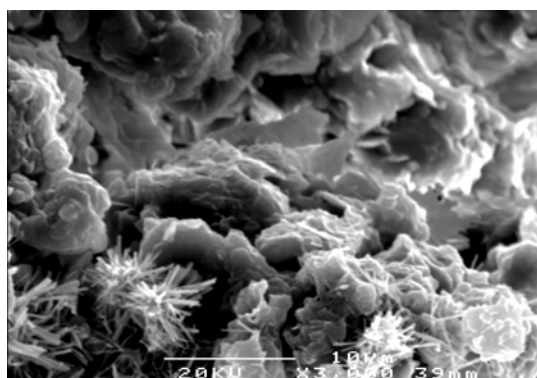
(a) $w = 14\%$ ($0.8OWC$)



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



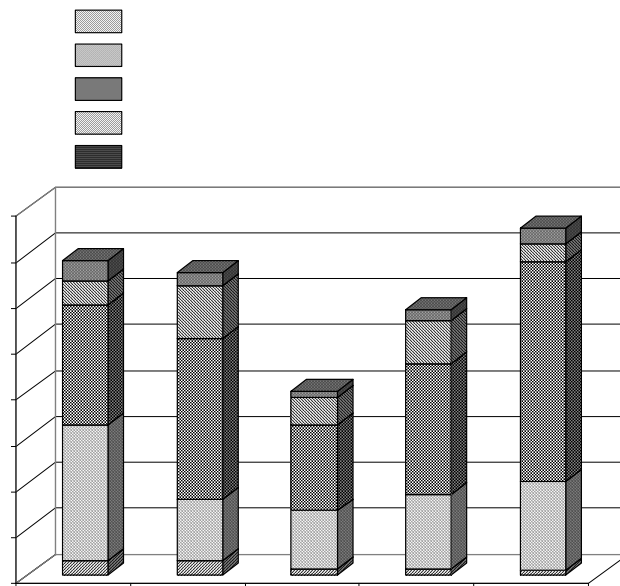
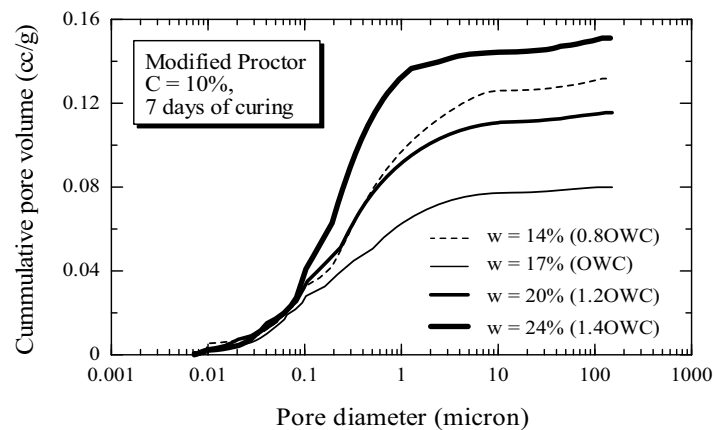
(c) $w = 20\%$ ($1.2OWC$)



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

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ภายใต้พลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน

แม้ว่าปริมาณโพรงทั้งหมดและปริมาณแต่ละขนาดโพรงของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น 17 เปอร์เซ็นต์ (*OWC*) จะต่ำที่สุด (รูปที่ 4.12) แต่กำลังอัดมีได้มีค่าสูงที่สุด สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าสำหรับดินเหนียวซีเมนต์ นอกจากแพบริคแล้ว พันธะเชื่อมประสานเป็นตัวแปรที่ควบคุมการพัฒนา กำลังอัด ดินตัวอย่างที่ปริมาณความชื้น 20% (*1.2OWC*) แสดงกำลังอัดสูงสุด เนื่องจากผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานมีปริมาณมากที่สุด ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงปริมาณ Ca(OH)_2 มากที่สุด



รูปที่ 4.12 การกระจายโพรงของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ภายใต้พลังงานงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน

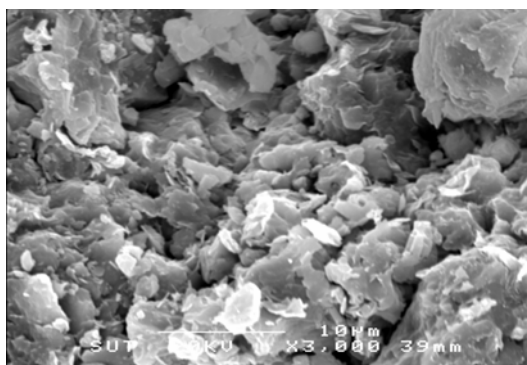
ตารางที่ 4.3 ปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ภายใต้พลังงานงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน

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

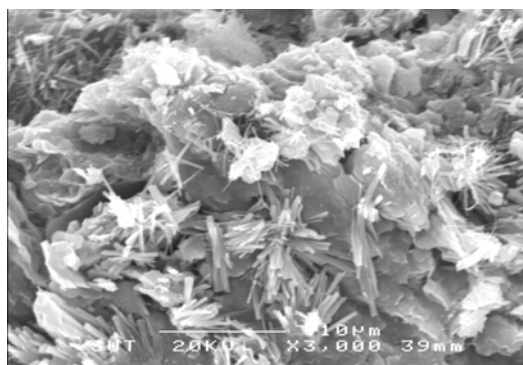
4.4.2.2 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์

รูปที่ 4.13 และ 4.14 และตารางที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายขยาย การกระจายขนาดโพรง และปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินเหนียวซีเมนต์ในปริมาณซีเมนต์ต่างๆ และบดอัดที่ปริมาณความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้พลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน รูปที่ 4.13a-c, 4.13d-g และ 4.13h-j แสดงภาพถ่ายขยายของดินเหนียวซีเมนต์ในโซนแอคทีฟ ลำไส้ และลดกำลัง ตามลำดับ ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะคล้ายคลึงกับของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์ เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่ผสมมีปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของดินเหนียว

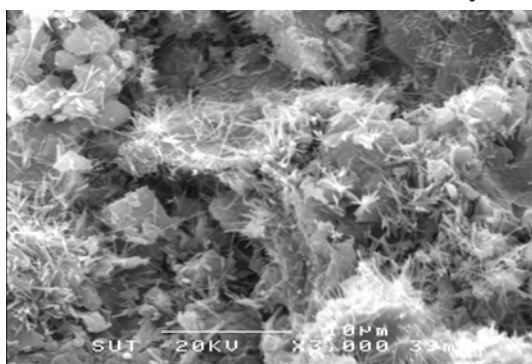
เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น (ในโซนแอคทีฟ) ผลึกภัณฑ์ไฮดรเจนและผลึกภัณฑ์เชื่อมประสานในโพรงมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.13ข และ ค และตารางที่ 4.4) ผลึกภัณฑ์เชื่อมประสานไม่เพียงแต่เพิ่มแรงยึดระหว่างกลุ่มเม็ดดิน แต่ยังช่วยลดปริมาตรโพรงในดิน ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.14 โพรงที่เล็กกว่า 0.1 ไมครอน มีปริมาตรลดลงอย่างมากตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดลดลง และกำลังอัดเพิ่มขึ้น สำหรับโซนลำไส้ ปริมาณผลึกภัณฑ์ไฮดรเจน (รูปที่ 4.13d ถึง g) และผลึกภัณฑ์เชื่อมประสาน (ตารางที่ 4.4) แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ ดังนั้นการกระจายขนาดโพรงและกำลังอัดจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สำหรับช่วงลดกำลัง การเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ทำให้ปริมาณน้ำในมวลดินลดลง ส่งผลให้เกิดการรวมตัวของดินและปูนซีเมนต์ และการลดระดับปฏิกิริยาไฮดรเจน อันนำมาซึ่งการลดลงของผลึกภัณฑ์เชื่อมประสาน (ตารางที่ 4.4) กลุ่มดินซีเมนต์ที่เกิดขึ้นนี้มีความแข็งและมีกำลังต้านทานการบดอัดสูง ส่งผลให้ปริมาตรโพรงขนาด 1.0-0.1 ไมครอน และปริมาตรโพรงทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ (รูปที่ 4.14) ดังนั้น อาจสรุปได้ว่าที่ปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่าโซนแอคทีฟไม่มีประโยชน์ในทางปฏิบัติ



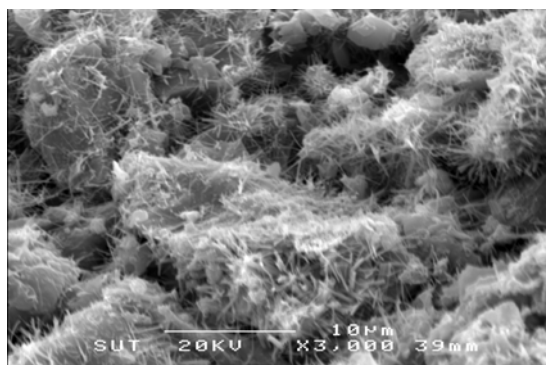
(a) ปูนซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์



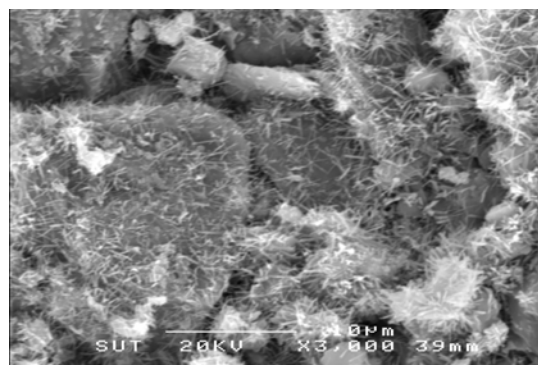
(b) ปูนซีเมนต์ 7 เปอร์เซ็นต์



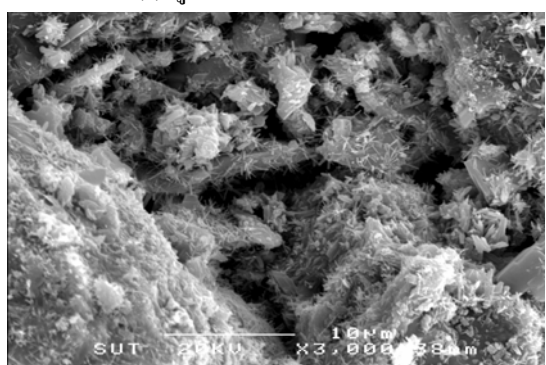
(c) ปูนซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์



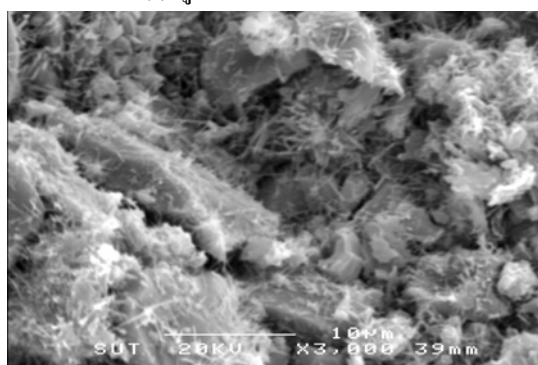
(d) ปูนซีเมนต์ 15 เปอร์เซ็นต์



(e) ปูนซีเมนต์ 20 เปอร์เซ็นต์



(f) ปูนซีเมนต์ 25 เปอร์เซ็นต์



(g) ปูนซีเมนต์ 30 เปอร์เซ็นต์