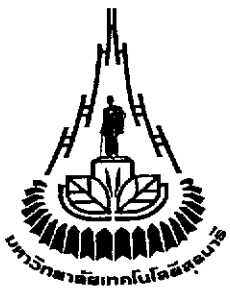
รหัสโครงการ SUT7-712-46-12-38



รายงานการวิจัย

การเพิ่มกำลังของดินเหนียวและดินตะกอนโดยการผสมซีเมนต์สำหรับงานฐานราก

(Strength Improvement of Clays and Silts Admixed with Cement for Foundation Works)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2546

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2547

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ ถ้าปราศจากการช่วยเหลือทางจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง การกล่าวขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้ครบทุกท่านเป็นงานที่ยาก ผู้เขียนต้องขอกล่าวขอขมามา ณ ที่นี้ด้วย หากมิได้กล่าวนามของท่าน

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ. ดร.สุเทพ อุสาหะ ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณติงศักดิ์ เหลืองเจริญทิพย์ ที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติงาน และคุณวรรชัย เกษกัน ผู้ช่วยวิจัย ที่ทำงานขยันขันแข็งตลอดระยะเวลาโครงการวิจัย

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ปีงบประมาณ 2546

สุขสันติ์ หอพิบูลสุข
หัวหน้าโครงการวิจัย
มิถุนายน 2547

บทคัดย่อ

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติ ซึ่งมักจะมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมกับงานก่อสร้าง และจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม การปรับปรุงด้วยซีเมนต์เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับความนิยม เนื่องจากเป็นวิธีที่เพิ่มกำลังอัดของดินได้ในระยะเวลาอันสั้น วิธีการปรับปรุงและการเพิ่มขึ้นของกำลังหลังปรับปรุงแล้วจะขึ้นอยู่กับสถานะของดิน (สถานะเหลวหรือสถานะแห้ง) เริ่มต้น ความพยายามจะศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวได้ถูกจัดทำขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยใช้ดินเหนียวกรุงเทพและดินลูกรัง สำหรับการปรับปรุงดินในสถานะเหลวและสถานะแห้ง ตามลำดับ

ในสถานะเหลว โดยระบบดินเหนียวและน้ำ (Clay-water system) ดินสามารถสร้างโครงสร้าง (Structure) ได้ ดังนั้น การปรับปรุงจึงเป็นเพียงการผสมดินเข้ากับซีเมนต์ เมื่อระยะบ่มเพิ่มขึ้น พันธะซีเมนต์จะแข็งแรงและทำให้กำลังอัดสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ และระยะบ่ม เป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด งานวิจัยนี้ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและตัวแปรหลักเหล่านี้ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และระยะบ่ม ใดๆ เมื่อมีผลทดสอบกำลังอัดอย่างน้อยหนึ่งผลทดสอบ สมการดังกล่าวคือ

$$\left\{\frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}}\right\} = 1.05^{\{(w_c/C)_{28}-(w_c/C)_D\}}(0.491+0.154\ln D)$$

ในสถานะแห้ง ดินอยู่ในระบบดิน น้ำ และอากาศ (soil-water-air system) ดังนั้นในการปรับปรุง จึงจำเป็นต้องใส่พลังงานบดอัดเพื่อทำให้ดินและซีเมนต์จับตัวกันเป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยเหตุนี้เอง ตัวแปรที่อิทธิพลนอกเหนือจากอัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ และระยะบ่ม คือพลังงานการบดอัด จากผลทดสอบพบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดจะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ซึ่งแตกต่างจากผลทดสอบการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความชื้นเหมาะสมเป็นตำแหน่งซึ่งมีปริมาณน้ำในดินเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น นอกจากนี้ กำลังอัดด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมแปรผันตามอัตราส่วนดิน-น้ำ/ซีเมนต์ เช่นเดียวกับดินที่ได้รับการปรับปรุงโดยการผสมซีเมนต์ในสถานะเหลว กำลังอัดของดินลูกรังซีเมนต์บดอัด ที่อายุบ่ม 7 วัน ที่ปริมาณความชื้น และปริมาณซีเมนต์ใดๆ สามารถประมาณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$q_u = \frac{3717.2}{1.41^{(m_f/C)}}$$ ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม

$$\frac{q_u}{q_{max}} = 0.199 + 0.817\left(\frac{m_f}{OMC_{am}}\right)$$ ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม

ABSTRACT

Soils are materials that are not "made to order" and thus do not always exhibit the properties desired for construction. The cement improvement is one of the most extensively used means since the strength of the improved soils increases within a short period. The techniques of improvement and the strength development are dependent upon the initial state of the soils either liquid or dry states. An attempt to investigate this effect has been done in this research. Bangkok clay and lateritic soil are used to study the improvement in liquid and plastic states, respectively.

In liquid state, due to the clay-water system, the clay would form its structure. As such the improvement of the clay is only to admix the cement. The cementation bond strength increases as the increase in curing time, resulting in higher compressive strength. It is found from this study that the clay-water/cement ratio and curing time are the prime parameters governing the strength development. The relationship among the compressive strength and these prime parameters are introduced, which is useful for assessing the strength of cement admixed clays at any water content, cement content and curing time. The relationship is shown as follows.

$$\left\{\frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}}\right\} = 1.05^{\{(w_c/C)_{28}-(w_c/C)_D\}}(0.491+0.154\ln D)$$

In dry state, soil is in the soil-water-air system. To improve this soil, the compactive energy is needed so that the soil and cement can be transferred to a homogenous mass. Thus, besides the clay-water/cement ratio, the compactive energy is one of the prime parameters. It is shown that maximum compressive strength is attained at the optimum moisture content which is different from that of compacted soils. This is because the optimum moisture is the state in which the water is suitable for hydration. In addition, the compressive strength at wet side of optimum moisture content depends upon the soil-water/cement ratio similar to that of cement admixed clay. The compressive strength of the cement stabilized lateritic soil at 7 days of curing and at any water content and cement content can be estimated from:

$$q_u = \frac{3717.2}{1.41^{(m_f/C)}} \qquad \text{Wet side of optimum water content}$$

$$\frac{q_u}{q_{max}} = 0.199+0.817\left(\frac{m_f}{OMC_{am}}\right) \qquad \text{Dry side of optimum water content}$$

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
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 ปฏิกิริยาทางเคมีของดินซีเมนต์	7
2.5 โครงสร้างดินซีเมนต์	8
2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังของดินซีเมนต์	9
2.7 ความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดดินซีเมนต์	12
2.8 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์	12
2.9 บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน	15
2.9.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน	15
2.9.2 การอัดตัวคายน้ำ	16
2.9.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	16
2.10 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์	18
บทที่ 3 กำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์	
3.1 บทนำ	21

3.2 ดินตัวอย่างและวิธีการทดสอบ..... 21
3.3 ผลทดสอบและการอธิบาย..... 22
3.4 การวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์..... 24
3.5 อิทธิพลของระยะบ่มต่อการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์. 26
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด อัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ และระยะบ่ม.. 28
บทที่ 4 กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด
4.1 บทนำ..... 31
4.2 ดินตัวอย่างและวิธีการทดสอบ..... 31
4.3 ลักษณะเส้นกราฟการบดอัดและการรับน้ำหนักของดินบดอัด..... 32
4.4 กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด..... 34
บทที่ 5 บทสรุป
เอกสารอ้างอิง..... 47
ประวัตินักวิจัย..... 50

สารบัญตาราง

หน้า

2.1 ออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 6

2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 6

3.1 การทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ บริเวณบางนา-บางปะกง ที่ระดับความลึก 12 เมตร..... 30

สารบัญรูป

หน้า

2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell และ Jack, 1966)..... 9

2.2 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8 (Davidson, 1962)..... 10

2.3 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 12 (Davidson, 1962)..... 10

2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 16 (Davidson, 1962)..... 11

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของทรายที่มีขนาดคละสม่ำเสมอ และดินตะกอนปนดินเหนียว (Grimer และ Krawezyk ,1963)..... 11

2.6 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Loamy Sand (Felt, 1965)..... 13

2.7 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดินMedium Clay (Felt, 1965)..... 14

2.8 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay (Felt, 1965)..... 15

2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล (Horpibulsuk et al., 2004)..... 16

2.11 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพไร้พันธะเชื่อมประสาน (สุขสันติ์ และรุ้งลาวัลย์ , 2546)..... 17

2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันติ์ และรุ้งลาวัลย์ , 2546)..... 17

2.13 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)..... 20

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้น 100% และระยะบ่มต่างๆ..... 22

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้น 145% และระยะบ่มต่างๆ..... 22

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้น 145% และระยะบ่มต่างๆ..... 23

3.4 (a) โครงสร้างของดินเหนียว (b) โครงสร้างของดินเหนียวซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)..... 23
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์..... 25
3.6 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระยะบ่ม ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับดัชนีสภาพความเหลว..... 26
3.7 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระยะบ่ม ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.5 เท่าของดัชนีสภาพความเหลว..... 27
3.8 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระยะบ่ม ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 2.0 เท่าของดัชนีสภาพความเหลว..... 27
3.9 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดและอัตราส่วนกำลังกับเวลา..... 29
4.1 ขนาดคละของดินเหนียวปนดินตะกอน..... 31
4.2 ผลทดสอบการบดอัดของดินดินเหนียวปนดินตะกอน..... 32
4.3 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่บดอัดด้วยพลังงานบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร..... 33
4.4 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่บดอัดด้วยพลังงานบดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร..... 33
4.5 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่บดอัดด้วยพลังงานบดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร..... 34
4.6 (a) ลักษณะการอัดตัวของดินตะกอนปนดินเหนียวบดอัดที่ด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น..... 35
4.7 ผลทดสอบการบดอัดของดินลูกรัง..... 36
4.8 ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังบดอัดที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 3% ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร..... 37
4.9 ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังบดอัดที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 3% ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร..... 37
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเริ่มต้นทดสอบกับหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดแกนเดียว..... 38
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นหลังผสมกับหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดแกนเดียว ที่พลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร..... 39
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเริ่มต้นทดสอบกับหน่วยน้ำหนักแห้งและ

กำลังอัดแกนเดียว ที่พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร..... 40
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นหลังผสม
ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 3%..... 41
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นหลังผสม
ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 7% 41
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นหลังผสม
ที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม..... 42
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสมหลังผสมและพลังงานการบดอัด..... 43
4.17 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพัฒนากำลังและปริมาณความชื้นหลังผสม
(b) Generalization..... 44

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบัน การออกแบบและการก่อสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกและอาคารใช้สอยต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ปัญหาที่สำคัญอย่างมากสำหรับวิศวกรคือการออกแบบฐานรากและสาธารณูปโภคบนชั้นดินที่มีปัญหา ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะแตกต่างกันออกไปตามแต่ละภาคของประเทศไทย เช่น ในแถบกรุงเทพมหานครและปริมณฑล วิศวกรมักประสบกับปัญหาของดินเหนียวอ่อนที่มีค่ากำลังรับแรงแบกทานต่ำ และการทรุดตัวที่มากและกินเวลานาน ปัญหานี้ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายอย่างมากในการก่อสร้างฐานรากของโครงสร้าง และการสร้างสาธารณูปโภคบนชั้นดินเหนียวอ่อนนี้

ในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปัญหาของดินตะกอนปนดินเหนียวไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเป็นปัญหาที่เห็นกันอย่างชัดเจน ดินประเภทนี้จะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีมากในสภาพแห้ง มีกำลังรับแรงแบกทานสูง และมีการทรุดตัวที่น้อยมาก แต่ปัญหาจะเกิดขึ้นเมื่อดินประเภทนี้อยู่ในสภาพเปียก คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่เคยดีจะเปลี่ยนไปและก่อปัญหาอย่างมากในงานวิศวกรรม ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือเกิดการแตกร้าวของอาคารจำนวนมากมายในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เนื่องจากว่าการก่อสร้างมักจะกระทำกันในฤดูแล้งที่ปราศจากฝน ทำให้วิศวกรเกิดความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ และทำการออกแบบโดยใช้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินในขณะนั้นเป็นเกณฑ์ในการออกแบบฐานราก หลังสิ้นสุดการก่อสร้างและเข้าสู่ฤดูฝน ประกอบกับอาคารมีระบบระบายน้ำที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดการขังของน้ำใต้ฐานราก กำลังรับแรงแบกทานของดินจะเริ่มลดลงกับปริมาณความชื้นของดินที่เพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของโครงสร้าง และนำไปสู่การวิบัติของอาคารในที่สุด ซึ่งทำให้วิศวกรต้องทำการแก้ไขฐานรากของอาคารเหล่านี้โดยวิธีที่เรียกว่า Underpinning ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงมาก และเป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ ปัญหานี้เกิดเนื่องจากว่าเรายังไม่มี Code of practice สำหรับการออกแบบฐานรากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

งานวิจัยนี้มุ่งที่จะเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยเทคนิคการปรับปรุงดินโดยการผสมดินที่มีปัญหาเหล่านี้กับซีเมนต์ เพื่อเป็นการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน และลดการทรุดตัวโดยใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ไม่มากนัก นอกเหนือจากวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินโดยการผสมซีเมนต์แล้วยังมีวิธีอื่นๆ อีก เช่นการบดอัดดิน (Compaction), Prelaoding และ Sand column เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีก็เหมาะสมกับดินแต่ละประเภท ดังเช่น Preloading เหมาะสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ แต่ไม่เหมาะสมกับดินในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ข้อได้เปรียบของการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ คือวิธีนี้สามารถใช้ได้กับดินเกือบทุกประเภท และกำลังของดินสามารถเพิ่มขึ้น

อย่างรวดเร็ว ทำให้การก่อสร้างของโครงสร้างอาคารและสาธารณูปโภคต่างๆ สามารถทำได้ในเวลาอันสั้นหลังจากการผสมดินกับซีเมนต์ นอกจากนี้ซีเมนต์ยังเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและผลิตได้ในประเทศไทย

เทคนิคการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ และดินตะกอนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะแตกต่างกัน การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนกรุงเทพสามารถทำโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า Deep mixing method ซึ่งเป็นการสร้างเสาเข็มดินเหนียว (Soil-cement column) โดยให้น้ำหนักจากโครงสร้างถ่ายลงมายังเสาเข็ม และเสาเข็มถ่ายต่อไปยังชั้นดินแข็ง วิธีนี้ได้นำมาใช้และประสบความสำเร็จในงานถนนสายบางนา-บางประกง (Ruenkrairergsa, T., 1998; Bergado et al., 1999) และในงานฐานรากอาคารต่างๆ มากมายในประเทศญี่ปุ่น (Terashi and Tanaka, 1981) สำหรับดินในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยทั่วไปวิศวกรจะทำการแก้ปัญหาโดยการใช้ฐานรากเสาเข็ม ซึ่งการก่อสร้างโดยวิธีการนี้จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายอย่างมาก ทางเลือกอีกทางหนึ่งสำหรับการแก้ปัญหาอันนี้คือการปรับปรุงกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินใต้ฐานราก โดยการบดอัดดินกับซีเมนต์และปริมาณน้ำที่เหมาะสม ซึ่งเป็นงานที่ท้าทายเนื่องจากยังไม่เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย และเป็นวิธีการที่ประหยัดกว่าวิธีการให้เสาเข็มอย่างมาก โดยอาจทำการขุดดินเดิมขึ้นมาหรือนำดินจากแหล่งอื่น แล้วผสมกับซีเมนต์และน้ำตามอัตราส่วนที่เหมาะสมและทำการบดอัดด้วยเครื่องมือบดอัด นอกจากนี้การปรับปรุงดินโดยวิธีนี้ยังสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนนเพื่อเป็นวัสดุคันทางในกรณีที่ไม่สามารถหาดินที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมได้ในบริเวณก่อสร้าง นอกจากวิธีการบดอัดแล้วเรายังสามารถสร้างเสาเข็มดิน (Soil-cement column) โดยการทำหลุมเจาะ (Borehole) ลงไปถึงชั้นดินแข็ง แล้วนำดินที่ได้จากการทำหลุมเจาะมาผสมกับซีเมนต์และน้ำเพื่อให้มีความสามารถในการไหลสูง และเทกลับไปในหลุมเจาะ เมื่อดินแข็งตัวก็จะได้เสาเข็มดินที่มีกำลังสูง

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อแสดงให้วิศวกรและนักวิจัยทราบถึงประโยชน์และความเป็นไปได้ของการแก้ปัญหาด้านฐานรากโดยการผสมซีเมนต์ ทั้งที่มีการบดอัดและปราศจากการบดอัด
2) เพื่อเป็นความรู้พื้นฐานสำหรับการสร้าง Code of practice สำหรับงานออกฐานรากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือในอนาคต
3) เพื่อให้วิศวกรได้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของดินเมื่อผสมซีเมนต์
4) เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น ระยะเวลาบ่ม ปริมาณซีเมนต์ พลังงานการบดอัด และกำลัง จากความสัมพันธ์นี้วิศวกรสามารถทำนายกำลังของดินผสมซีเมนต์จากผลการทดสอบที่อยู่จำกัด

5) เพื่อให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถตรวจสอบความถูกต้องของผลทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ และสามารถออกแบบได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีแนวทางหลักสองอย่างคือ (1) การสร้างทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการหากำลังของดินผสมซีเมนต์ทั้งแบบที่มีการใช้พลังงานการบดอัด (เมื่อดินอยู่ในสภาวะที่มีปริมาณน้ำในดินน้อย) และปราศจากการใช้พลังงานการบดอัด (เมื่อดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ) และ (2) การสร้างสมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐาน

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงดินด้วยสารผสมเพิ่ม

การปรับปรุงดินโดยใช้สารผสมเพิ่ม (Additive) ได้เกิดขึ้นเป็นเวลากว่าหลายพันปีล่วงมาแล้ว ปรากฏมีหลักฐานเกี่ยวกับการปรับปรุงถนนที่ใช้สัญจรตั้งแต่สมัยโรมัน โดยการใช้ปูนขาว หรือสาร Pozzolans ผสมกับดินที่ใช้ทำพื้นทาง เพื่อให้ถนนมีสภาพการใช้งานที่ดีขึ้น (Woods และ Yoder, 1952)

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

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

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

สำหรับประเทศไทย การประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์เริ่มในปี พ.ศ. 2508 โดยกรมทางหลวงร่วมกับบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด ได้ทดลองนำดินผสมซีเมนต์ (ซีเมนต์ + ลูกรัง) มาใช้เป็นพื้นทางครั้งแรกในทางสายวาริณชำราบ – เดชอุดม 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 เป็นการนำดินและซีเมนต์มาผสมกันแล้วบดอัดโดยวิธีทางกลศาสตร์ แล้วทำการบ่มให้แข็งตัว ซีเมนต์มีปริมาณสูงพอจนทำให้มีกำลังอัด หรือกำลังแบกทานตามที่กำหนด และมากพอที่จะทำให้ดินซีเมนต์กลายเป็นวัสดุก่อสร้างที่แข็งแรงทนทาน มีความชื้นเพียงพอที่จะทำปฏิกริยาไฮเดรชั่น 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 เป็นการนำเอาดินและซีเมนต์ผสมน้ำให้มีสภาพเหลวพอประมาณ ดินซีเมนต์ประเภทนี้จะใช้ในการบำรุงรักษาถนน ใช้ในการยา หรืออุดรอยรั่วที่เกิดขึ้น เช่น รอยรั่วในอุโมงค์ส่งน้ำ

2.2.5 Plastic Soil - Cement เป็นการนำดิน ซีเมนต์ และน้ำมาผสมเข้าด้วยกันให้มีสภาพเหลวมาก นิยมใช้ในงานดาดปูลงบนพื้นที่มีความลาดเอียง เช่น การดาดท้องคลองชลประทาน การดาดผิวหน้าคันทาง

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

ตารางที่ 2.1 ออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล, 2536)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
<u>ออกไซด์หลัก</u>	
CaO	60-67
SiO_2	17-25
Al_2O_3	3-8
Fe_2O_3	0.5-0.6
<u>ออกไซด์รอง</u>	
MgO	0.1-5.5
$Na_2 + K_2O$	0.5-1.3
TiO_2	0.1-0.4
P_2O_5	0.1-0.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล, 2536)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรคัลเซียม ซิลิเกต	$3CaO . SiO_2$	C_3S
ไดคัลเซียม ซิลิเกต	$2CaO . SiO_2$	C_2S
ไตรคัลเซียม อลูมินา	$3CaO . Al_2O_3$	C_3A
เตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4CaO . Al_2O_3 . Fe_2O_3$	C_4AF

2 3.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.3.2.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไป 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 เพราะมีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือถอดแบบในเวลาอันสั้น ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง ข้อควรระวัง คือ ไม่ควรใช้

ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดสูงมากในช่วงต้น อาจก่อให้โครงสร้างเกิดการแตกร้าวได้

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 ปฏิกิริยาทางเคมีของดินซีเมนต์

เมื่อผสมซีเมนต์เข้ากับเม็ดดินและน้ำ ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะทำให้ได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน และได้ Hydrate Lime ที่แยกตัวออกมาระหว่างการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชั่น นอกจากนี้ Hydrate Lime ทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาที่ได้จากแร่ดินเหนียว ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานเพิ่มมากขึ้นอีก

ในมวลดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด แรงยึดเกาะกันจะประกอบด้วย Mechanical Interlock และ Chemical Cementation ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์กับซิลิกาและอลูมินา ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นตามผิวของเม็ดดินโดยจะเกาะอยู่รอบๆ เม็ดดิน ทำให้เม็ดดินเชื่อมกัน เป็นผลให้เม็ดดินมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีกำลังสูงขึ้น (Lame, et al. 1959)

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

Moh (1965) พบว่าปฏิกิริยาของดินซีเมนต์สามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้

$$Cement + H_2O \rightarrow CSH + Ca(OH)_2 \quad (2.1)$$

$$Ca(OH)_2 + SiO_2(\text{Soil Silica}) \rightarrow CSH \quad (2.2)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3(\text{Soil Alumina}) \rightarrow CAH \quad (2.3)$$

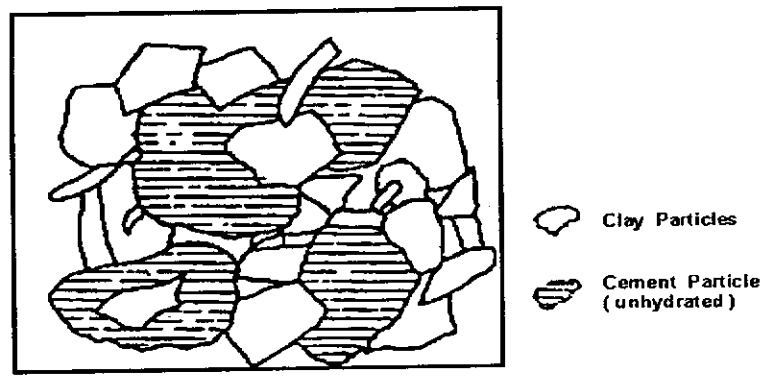
Michell and Jack (1966) อธิบายว่า เมื่อผสมซีเมนต์ลงไปในเม็ดดิน จะเกิดปฏิกิริยาและได้สารสุดท้ายเป็น CSH ปฏิกิริยาช่วงสั้นๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อผสมซีเมนต์ลงไปในดิน ประกอบด้วยการแทนที่หรือการแลกเปลี่ยน Valency โดยการดูดซับ Cation ของแคลเซี่ยม และเม็ดดินจะดูดซับเอา $Ca(OH)_2$ เข้าไว้ เกิดสารประกอบที่ทำให้มีการเชื่อมยึดติดกันของเม็ดดิน

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

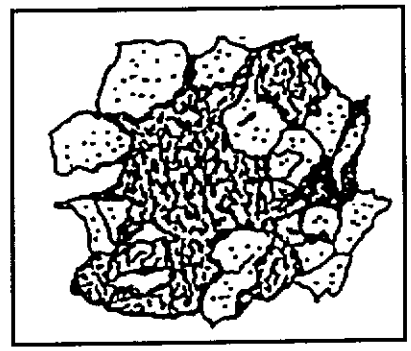
เกษม และพินิต (2536) ได้ศึกษาพบว่า ดินเหนียวปกติเป็นดินที่มีแร่ซิลิกาผสมอยู่สูง ซึ่งแร่เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ได้ดี ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิคซึ่งทำให้ดินเปลี่ยนคุณสมบัติไป สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่ม และการยุบตัวน้อยลง

2.5 โครงสร้างดินซีเมนต์

Michell and Jack (1966) ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินหลังจากผสมปูนซีเมนต์แล้ว โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบและโครงสร้างดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.1 ภายใต้การบดอัด ซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น อนุภาคของปูนซีเมนต์จะผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1(ก) ภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของซีเมนต์เริ่มทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน และ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเริ่มทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาที่มีอยู่ในดิน เป็นผลให้เกิดวัสดุเชื่อมประสาน จากนั้นซีเมนต์เจลและวัสดุเชื่อมประสานจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดินดังรูปที่ 2.1(ข) ภายใต้การบ่มระยะยาว การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ มีผลทำให้ซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วดังรูปที่ 2.1(ค) เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น



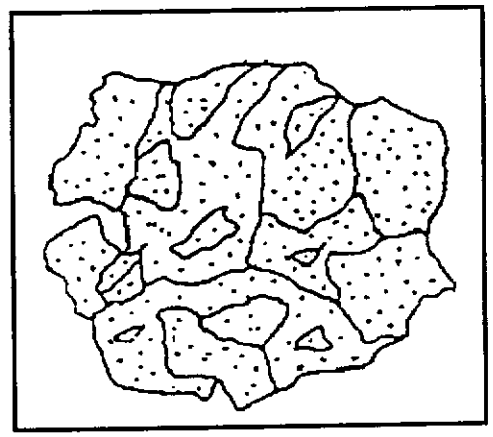
(ก) AS – COMPACTED CONDITION



Degrading Clay Particles

Hydrating Cement Gel And Lime – Clay Reaction Products

(ข) AFTER SHORT CURING PERIOD



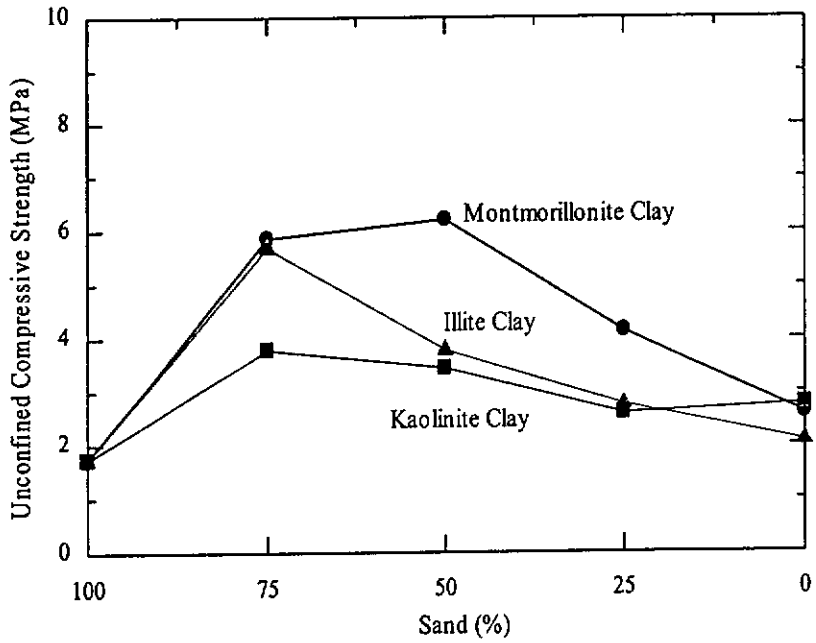
Indistinguishable Clay and Cement Phase

(ค) AFTER LONG CURING PERIOD

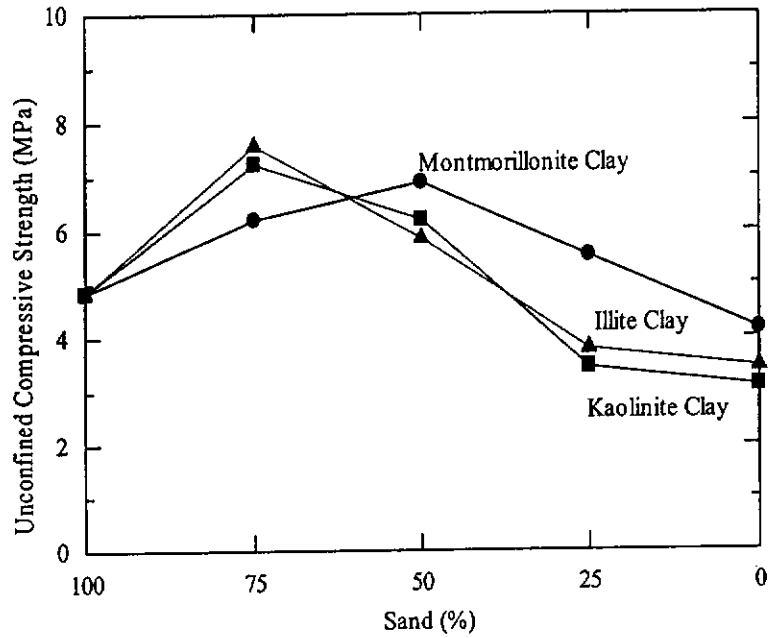
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Michell และ Jack ,1966)

2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังของดินซีเมนต์

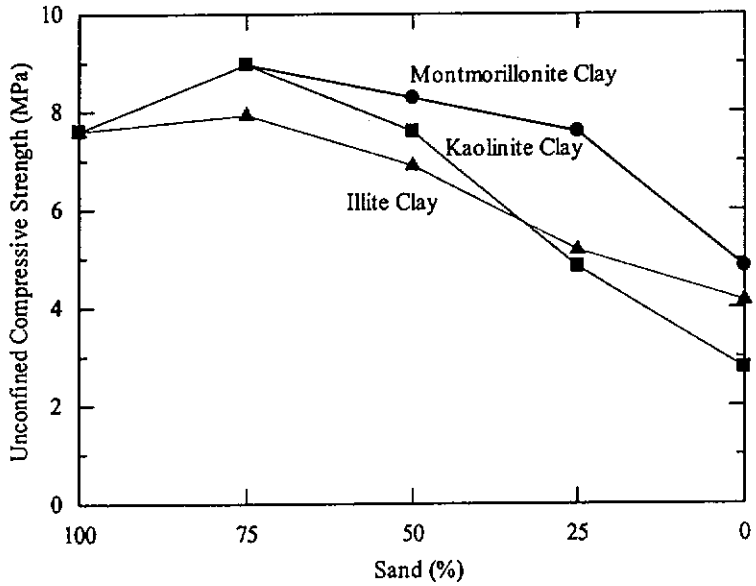
Davidson et al. (1962) ได้ทำการทดลองโดยใช้ทรายผสมดินเหนียวในอัตราส่วนทรายต่อดินเหนียว 100:0, 75:25 , 50:50 , 25:75 และ 0:100 ดินเหนียวที่ใช้เป็นพวก Kaolinite , Illite และ Montmorillonite ดังแสดงผลในรูปที่ 2.2 , 2.3 และ 2.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณดินเหนียวที่มากเกินไป (เกินกว่าร้อยละ 25) เมื่อผสมกับดินจำพวกที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless Soil) จะทำให้กำลังของดินซีเมนต์ลดลงอย่างเด่นชัด อีกทั้งที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8 และปริมาณสัดส่วนของทรายต่อดินเหนียว 75:25 จะให้การรับกำลังสูงสุด เพราะว่าที่ปริมาณสัดส่วนนี้เป็นสัดส่วนผสมที่กลมกลืนกัน ก่อให้เกิดส่วนผสมที่มีขนาดคละดี (Well Grade) ทำให้ได้ค่าความแน่นสูงสุด จึงส่งผลให้ได้ค่ากำลังสูงสุดด้วย



รูปที่ 2.2 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8 (Davidson, 1962)

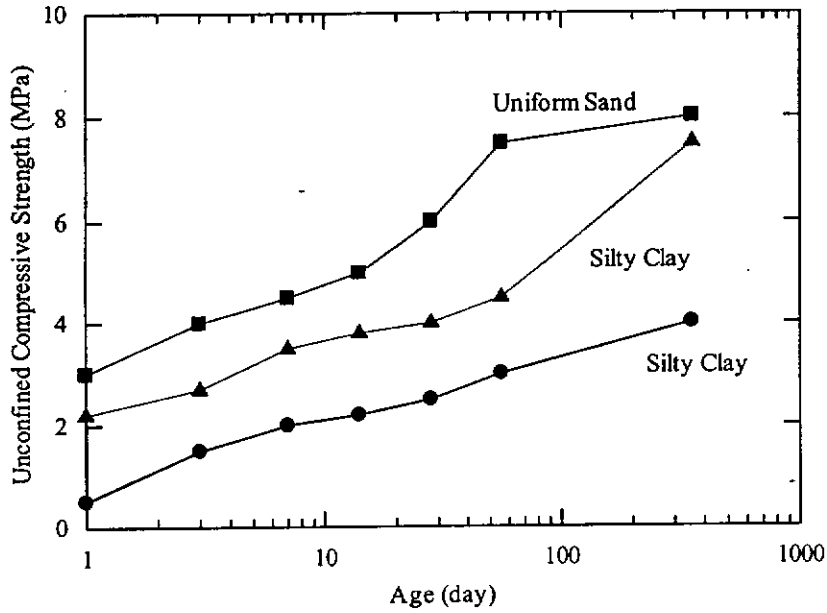


รูปที่ 2.3 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 12 (Davidson, 1962)



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 16 (Davidson, 1962)

Grimer และ Krawezyk (1963) ได้กล่าวว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุ (log scale) ของดินซีเมนต์ที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 10 ดังรูปที่ 2.5 พบว่ากำลังของทรายที่มีขนาดคละสม่ำเสมอ (Uniform Sand) ที่ไม่มีดินเหนียวผสม จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงจนถึงอายุการบ่ม 28 วัน หลังจากนั้นมีการเพิ่มขึ้นของกำลัง เชื่อว่าจะมาจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของทรายที่มีขนาดคละสม่ำเสมอ และดินตะกอนปนดินเหนียว (Grimer และ Krawezyk ,1963)

Bell (1976) พบว่าแร่ดินเหนียว Montmorillonite เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาวจะทำให้ 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 เม็ดดินที่มีขนาดเล็กจะทำหน้าที่สอดแทรกตามช่องว่างต่างๆ ของมวลดินในลักษณะเรียงตัวอัดแน่น ปริมาณความชื้นจะมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของมวลดิน ในช่วงแรกความหนาแน่นจะสูงขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มจนถึงจุดที่ปริมาณความชื้นทำให้ความหนาแน่นมีค่าสูงสุด เรียกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) จากนั้นค่าความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะเต็มไปด้วยน้ำ เม็ดดินที่มีขนาดเล็กไม่สามารถเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้ ความหนาแน่นของมวลดินจึงลดลง

Felt (1955) ได้ทดลองและสรุปผลว่า การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและปริมาณความชื้นมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์ ดินทรายผสมซีเมนต์ควรทำการบดอัดทางด้านแห้งของ OMC เล็กน้อยจึงได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ส่วนดินเหนียวและดินตะกอนควรบดอัดให้อยู่ทางด้านเปียกของ OMC เล็กน้อยจึงได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด

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

Ruenkraairergsa (1982) พบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมไม่เพียงแต่จะทำให้ดินซีเมนต์มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่านั้น แต่ยังทำให้ปฏิกริยาทางเคมีเป็นไปอย่างสมบูรณ์อีกด้วย และความหนาแน่นแห้งสูงสุดอาจจะไม่ได้ค่ากำลังอัดสูงสุดสำหรับดินซีเมนต์เสมอไป

2.8 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์

Felt (1965) ได้นำดินสามชนิด คือ Silty Loam, Sandy Loam และ Silty Clay มาใช้ในการทดลองผสมซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.6, 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ สรุปได้ว่า กำลังอัด

ของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ นอกจากนี้ ดินเม็ดหยาบจะมีกำลังอัดที่สูงกว่าดินเม็ดละเอียด

Ruenkraairergsa (1982) อธิบายว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นคุณสมบัติของดินซีเมนต์จะดีขึ้นด้วย และอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของดินด้วย ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเม็ดดิน (Cohesion) ของดินซีเมนต์ของดินเม็ดหยาบจะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าดินซีเมนต์ของดินเม็ดละเอียด

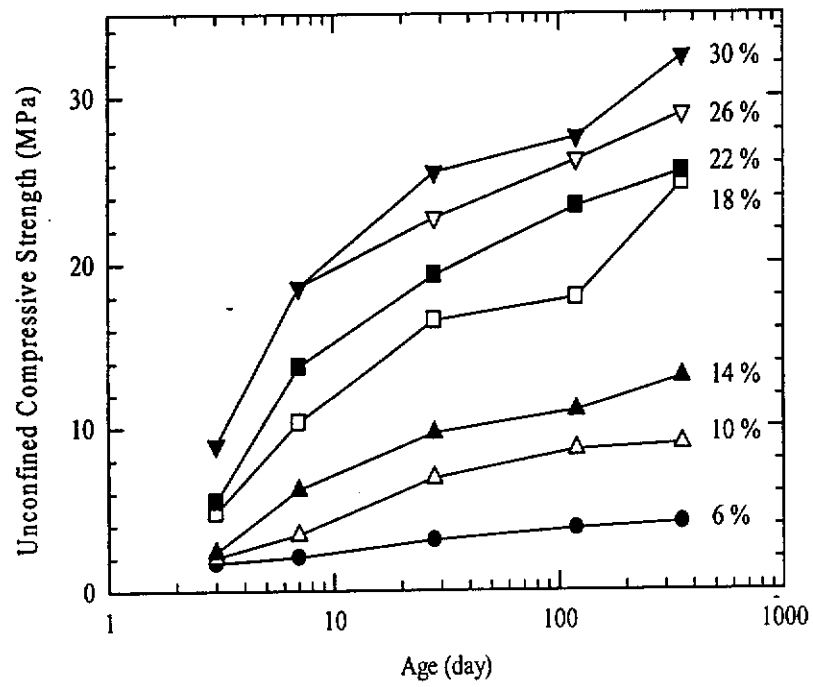
Metcalf (1977) พบว่าปริมาณซีเมนต์มีผลโดยตรงกับกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยเฉพาะกับดินเม็ดหยาบ และสรุปได้ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตรงกับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ และได้แนะนำเกี่ยวกับเรื่องการเลือกปริมาณซีเมนต์ โดยใช้ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) กับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ โดยแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของดิน ดังภาพที่ 2.9 สรุปเป็นสมการได้คือ

q_u (MPa) = 1.1654 C + 0.4832 สำหรับ Sandy Gravel (2.4)

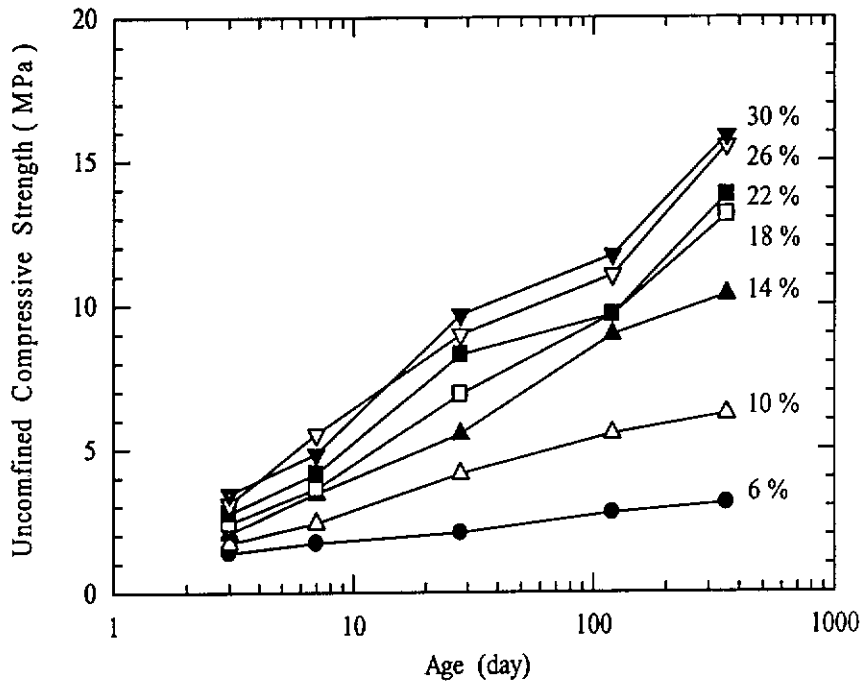
q_u (MPa) = 0.3953 C + 1.0995 สำหรับ Silty Clay (2.5)

q_u (MPa) = 0.3785 C + 0.3598 สำหรับ Sandy Clay (2.6)

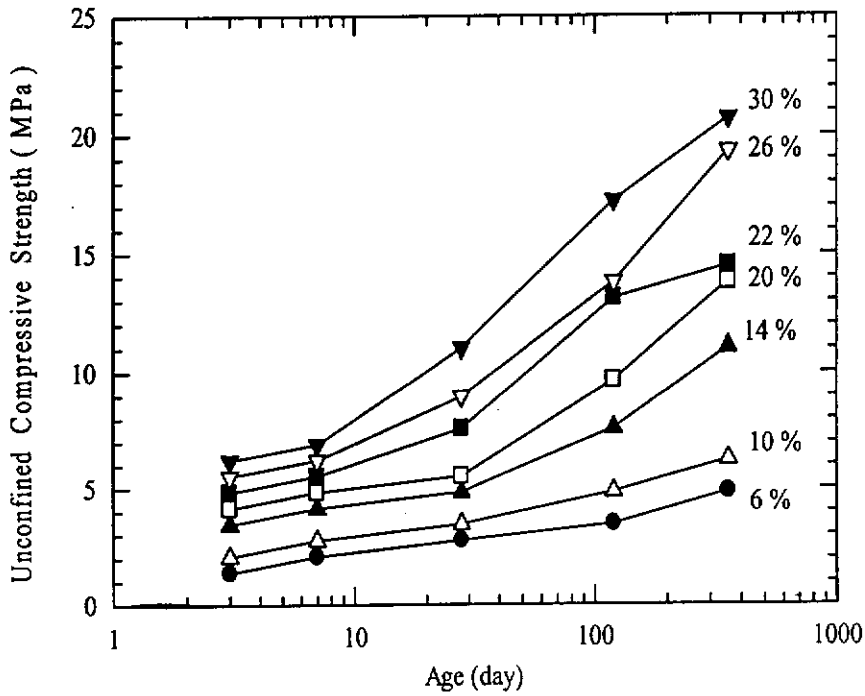
q_u (MPa) = 0.042 C^2 – 0.031C – 0.027 สำหรับ Uniform Sand (2.7)



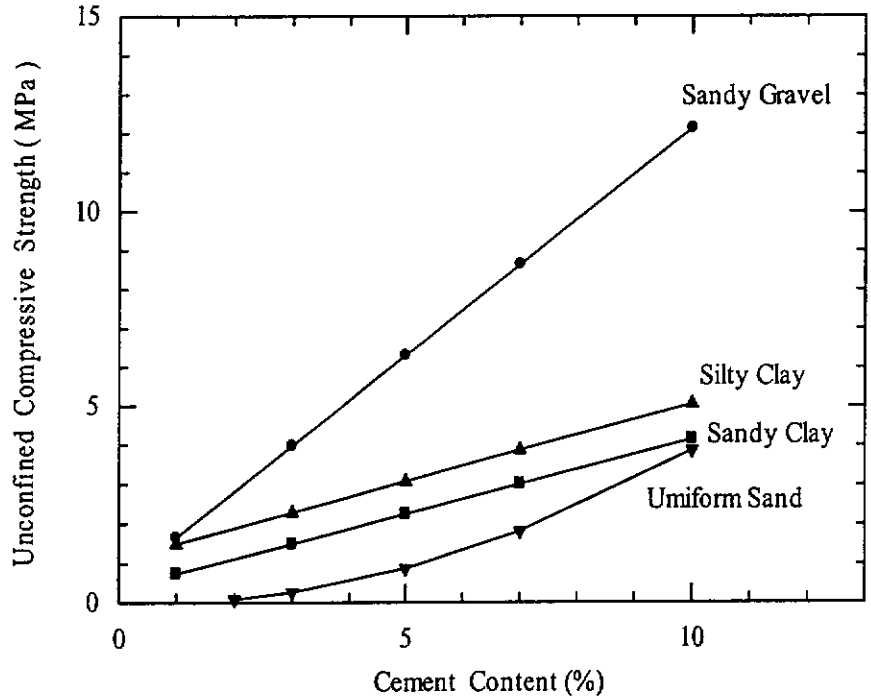
รูปที่ 2.6 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Loamy Sand (Felt, 1965)



รูปที่ 2.7 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดินMedium Clay (Felt, 1965)



รูปที่ 2.8 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay (Felt, 1965)



รูปที่ 2.9 ปริมาณซีเมนต์กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้ตามชนิดของดิน (Metcalf, 1977)

2.9 บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

2.9.1 กำลังต้านทางแรงเฉือนของดิน

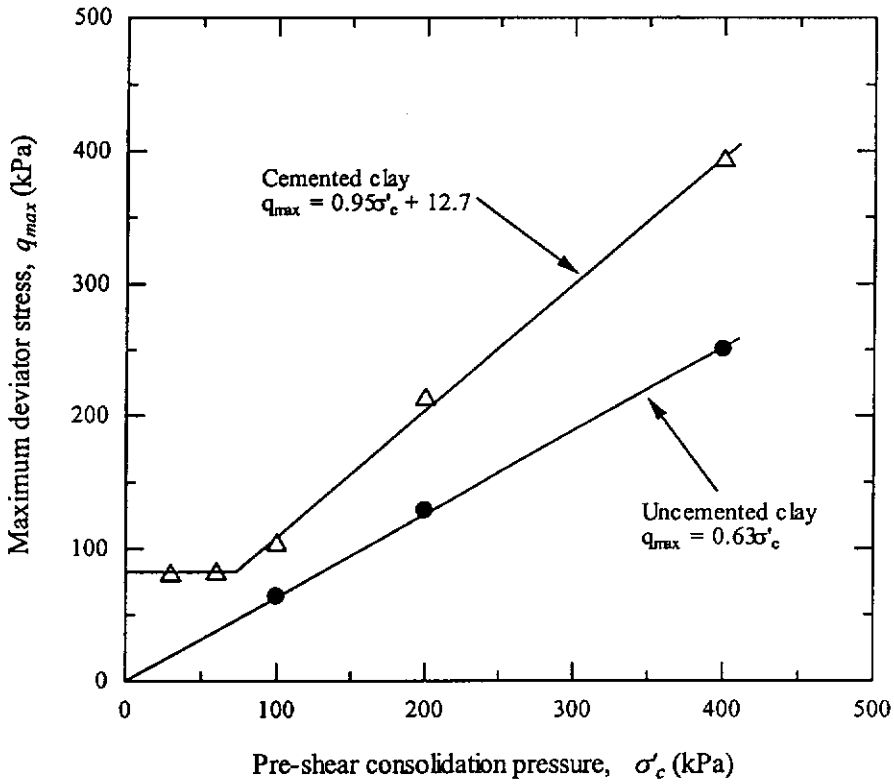
Horpibulsuk et al. (2004) กล่าวว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์ จะขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสาน เมื่อเฉือนดินประเภทนี้ภายใต้สภาวะที่ความเค้นประสิทธิผลน้อยกว่าความเค้นครากประสิทธิผล (σ'_y) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของเม็ดดินน้อยมาก ในช่วงนี้ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) แต่เมื่อความเค้นประสิทธิผลมากกว่าความเค้นครากประสิทธิผล ทั้งการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสานจะมีอิทธิพลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือน (รูปที่ 2.10) และเสนอความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

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

เมื่อ q_{max} คือ ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (ที่จุดวิบัติ)

q_{bond} คือ ความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน

q_{fabric} คือ ความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล (Horpibulsuk et al., 2004)

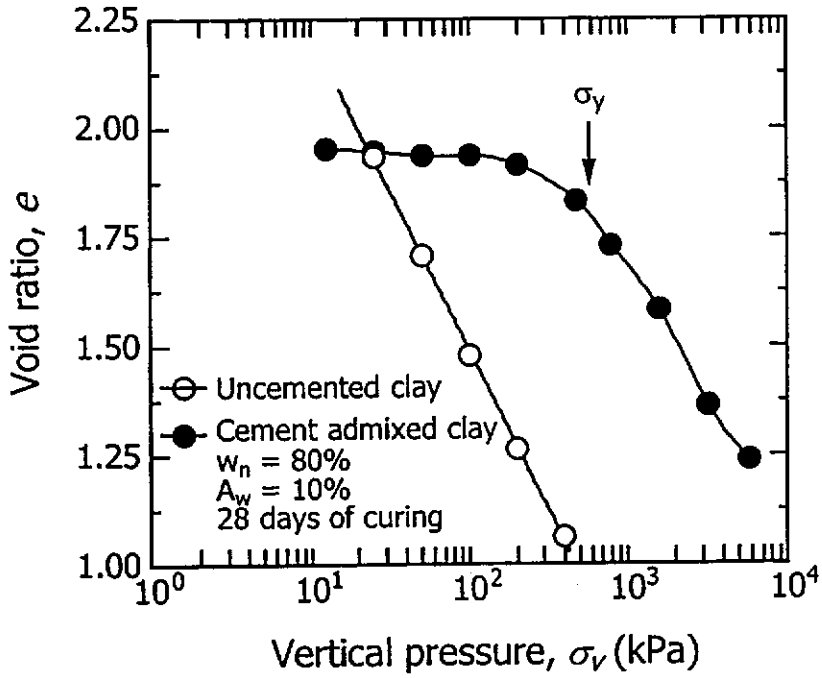
2.9.2 การอัดตัวคายน้ำ

สุขสันติ์ และรุ้งลาวัลย์ (2546) แสดงผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.11 จากรูปเห็นว่า การอัดตัวคายน้ำมีค่าน้อยมากในช่วงก่อนจุดคราก (Yield stress) เป็นเพราะอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน แต่การอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงหลังจุดคราก ซึ่งสภาวะหลังจุดครากนี้ ดัชนีการอัดตัว (Compression index) มีค่าค่อนข้างคงที่กับการเพิ่มขึ้นของความเค้นในแนวดิ่ง นอกจากนี้ ดินเหนียวซีเมนต์ (ดินพันธะเชื่อมประสาน) สามารถที่จะเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงสูงๆ เมื่อเทียบกับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน

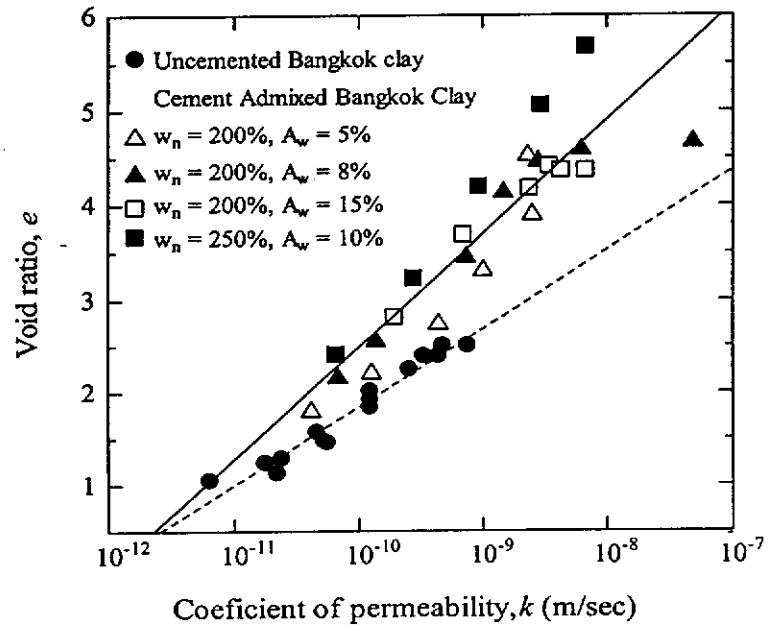
2.9.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

สุขสันติ์ และรุ้งลาวัลย์ (2546) แสดงผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่า พันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวอย่างมาก ที่อัตราส่วนโพรงที่เท่ากัน ดินเหนียวซีเมนต์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่า ดังนั้น พันธะเชื่อมประสานนอกจากจะเสริมกำลังต้านทานแรง

เฉือน และลดการทรุดตัวแล้ว ยังลดการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับงานโครงสร้างทึบน้ำ เช่น งานซ่อมแซมเขื่อนที่แตกร้าว และ Cut - off wall เป็นต้น



รูปที่ 2.11 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพไร้พันธะเชื่อมประสาน (สุขสันติ์ และรุ้งลาวัลย์ , 2546)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันติ์ และรุ้งลาวัลย์ , 2546)

2.10 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์

โดยอาศัยกรอบความคิดของการศึกษาโครงสร้างจุลภาค และพันธะซีเมนต์เชื่อมประสานของดิน Horpibulsuk et al. (2003) ได้ทำการทดสอบ และวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยละเอียด โดยได้สร้างสมมติฐานขึ้นเรียกว่า Clay – water/cement ratio hypothesis ซึ่งกล่าวว่า กำลังของดินชนิดหนึ่งที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียว คือ Clay–water / cement ratio

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

เมื่อ q_u คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง

A คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

B คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน มีค่าอยู่ระหว่าง 1.22 ถึง 1.24

w_c/C คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์

นอกจากนี้ Horpibulsuk et al. (2003) ยังได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์การเพิ่มขึ้นของกำลังของดินซีเมนต์ชนิดต่างๆ กับระยะบ่ม และสรุปได้ว่า อัตราการเพิ่มของกำลังของดินซีเมนต์ทุกชนิดมีค่าคงที่ โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และสามารถแสดงในฟังก์ชั่นของล็อคกาลิทึม ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และในรูปสมการที่ (2.10) คือ

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.038 + 0.281 \ln D \tag{2.10}$$

เมื่อ q_D คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม D ใดๆ

q_{28} คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 28 วัน

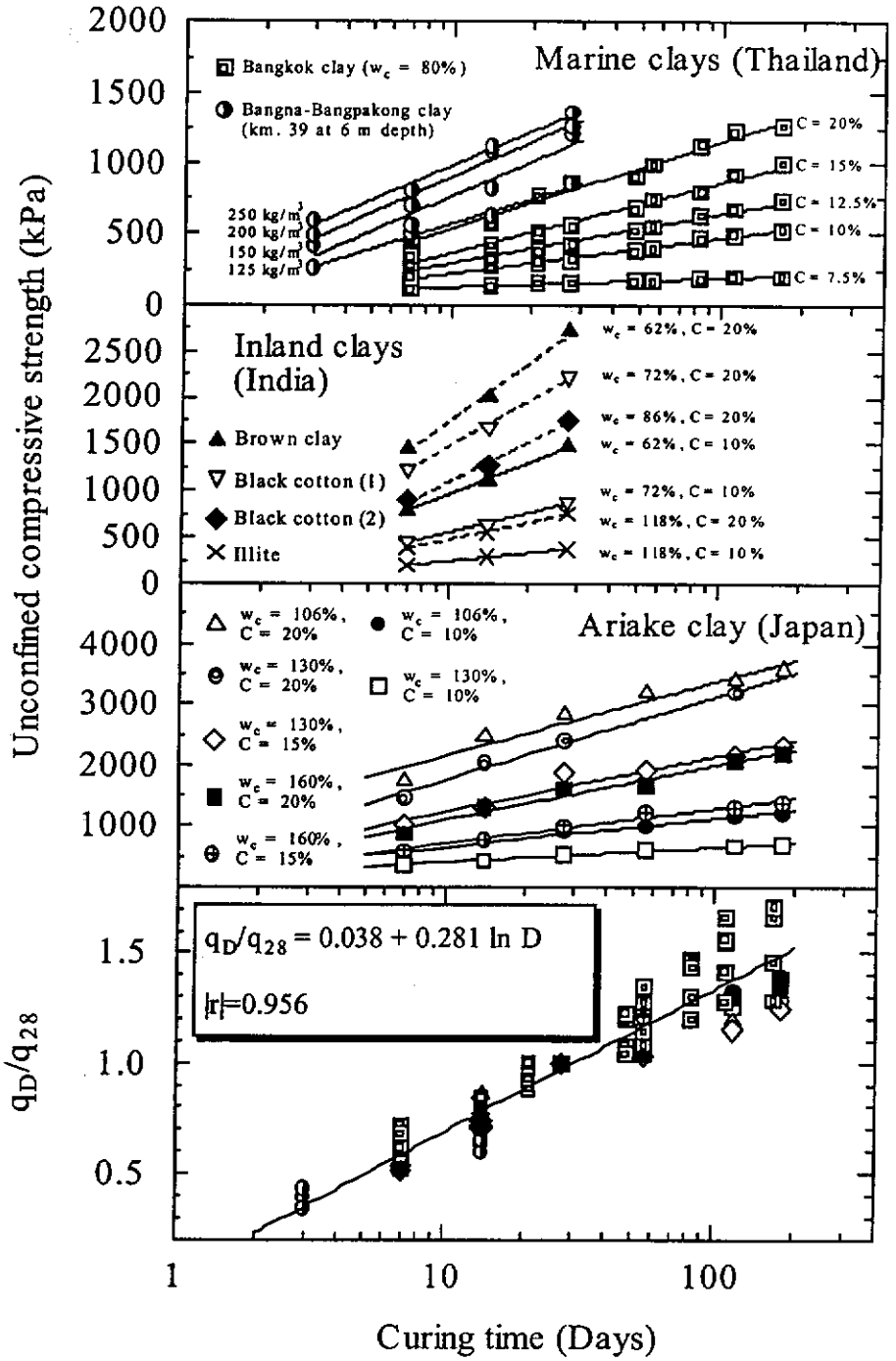
D คือ ระยะการบ่ม

โดยการรวมสมการที่ 2.9 และ 2.10 จะได้สมการที่สามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และระยะบ่มใดๆ โดยอาศัยเพียงแค่ผลการทดสอบเดียวที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในสมการ

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

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

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



รูปที่ 2.13 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)

บทที่ 3
กำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์

3.1 บทนำ

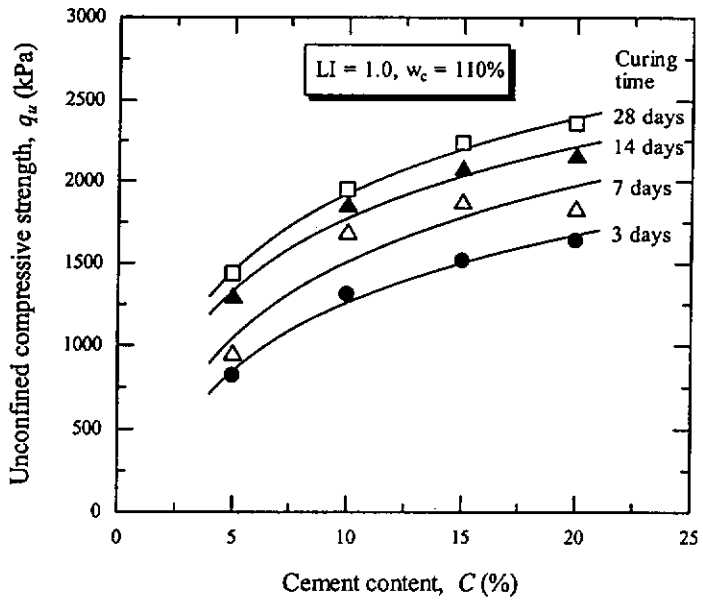
เนื่องจากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพเป็นดินที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำ และมีการทรุดตัวอย่างมากเมื่อมีน้ำหนักกระทำ ซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในการก่อสร้าง การผสมดินเหนียวอ่อนนี้กับซีเมนต์เพื่อทำเป็นเสาเข็มดินเหนียว (Soil-cement column) กำลังเป็นที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากการก่อสร้างสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วหลังจากที่ซีเมนต์ทำปฏิกิริยา เพื่อให้การออกแบบมีประสิทธิภาพมาก วิศวกรควรต้องมีความรู้เกี่ยวกับการพัฒนากำลังของดินเหนียวผสมซีเมนต์ บทนี้จะกล่าวถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ และนำเสนอสมการทำนายกำลังอัดของดินกรุงเทพผสมซีเมนต์ รวมทั้งการประยุกต์ใช้สมการนี้ในการทำนายกำลังของดินเหนียวกรุงเทพบริเวณบางนา-บางประกงผสมซีเมนต์

3.2 ดินตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

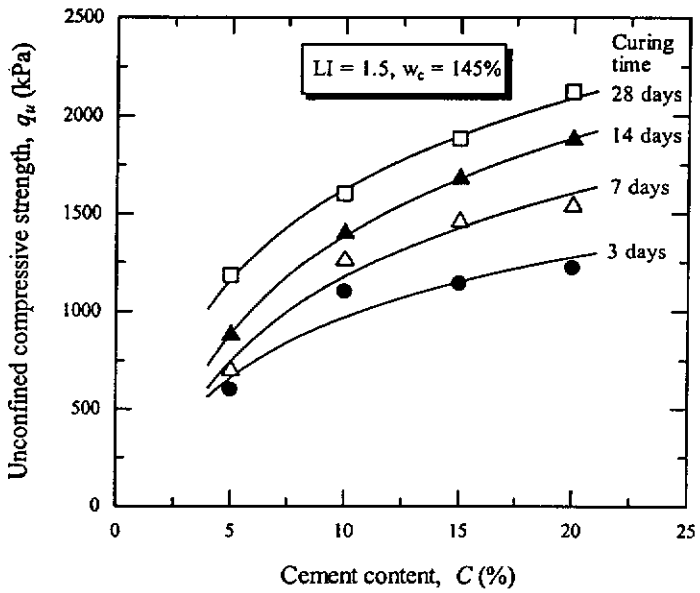
ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบถูกเก็บจากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology) ที่ความลึกประมาณ 3 เมตร จากผิวดิน ดินเหนียวนี้มีความชื้นธรรมชาติ (Natural moisture content) ประมาณ 110 เปอร์เซ็นต์ ขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 110 เปอร์เซ็นต์ และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่าความถ่วงจำเพาะของดินเท่ากับ 2.67 ปริมาณความชื้นของดินถูกเปลี่ยนแปลงโดยการเติมน้ำเพื่อให้ได้ดัชนีสภาพพลาสติก (Liquidity Index, *LI*) ระหว่าง 1 ถึง 2 การเพิ่มปริมาณความชื้นกระทำเพื่อจำลองการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นในดิน เมื่อมีการปรับปรุงดินด้วยเทคนิคผสมลึก (Deep Mixing technique) แบบเปียก (Wet method) หลังจากได้ปริมาณความชื้นตามต้องการแล้ว ทำการผสมดินเหนียวกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ประเภทหนึ่ง ด้วยปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ในการผสมจะทำการผสมด้วยเครื่องผสมดินเป็นเวลาประมาณ 10 นาที เพื่อให้ปูนซีเมนต์และดินเหนียวผสมกันอย่างสม่ำเสมอ ตามคำแนะนำของ Miura et al. (2001) เทส่วนผสมระหว่างดินเหนียวและซีเมนต์ใส่แบบหล่อขนาด 5 x 10 เซนติเมตร ให้เสร็จภายในเวลา 45 นาที (ก่อนที่ซีเมนต์จะเริ่มทำปฏิกิริยาตัว) ส่วนผสมที่ใส่ในแบบหล่อจะถูกห่ออย่างดีด้วยแผ่นพลาสติก และเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้นที่มีอุณหภูมิ 21 องศา เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ตามระยะบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน และทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)

3.3 ผลทดสอบและการอธิบาย

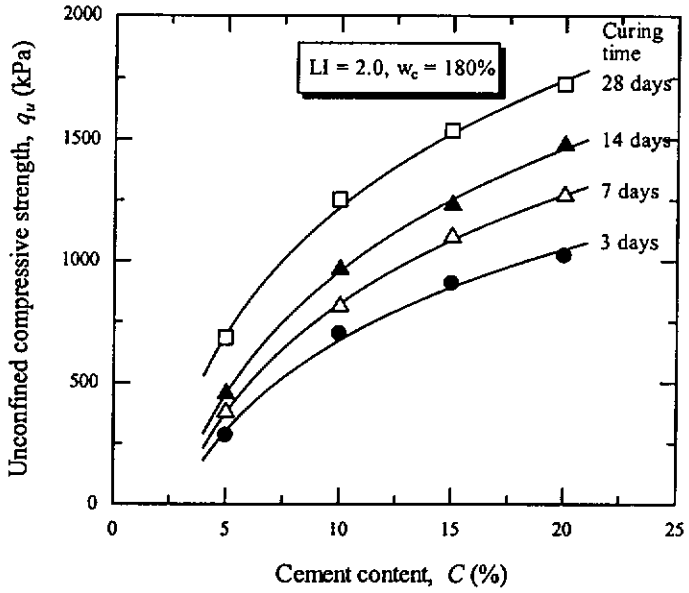
รูปที่ 3.1 ถึง 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์และกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ ที่ระยะบ่ม และปริมาณความชื้นต่างๆ จะเห็นว่า ปริมาณซีเมนต์ (C) ปริมาณความชื้น (w_c) และระยะเวลาการบ่ม เป็นตัวแปรที่ควบคุมกำลังอัด (q_u) กล่าวคือกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณซีเมนต์และระยะบ่มที่เพิ่มขึ้น และตามปริมาณความชื้นที่ลดลง



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้น 100% และระยะบ่มต่างๆ

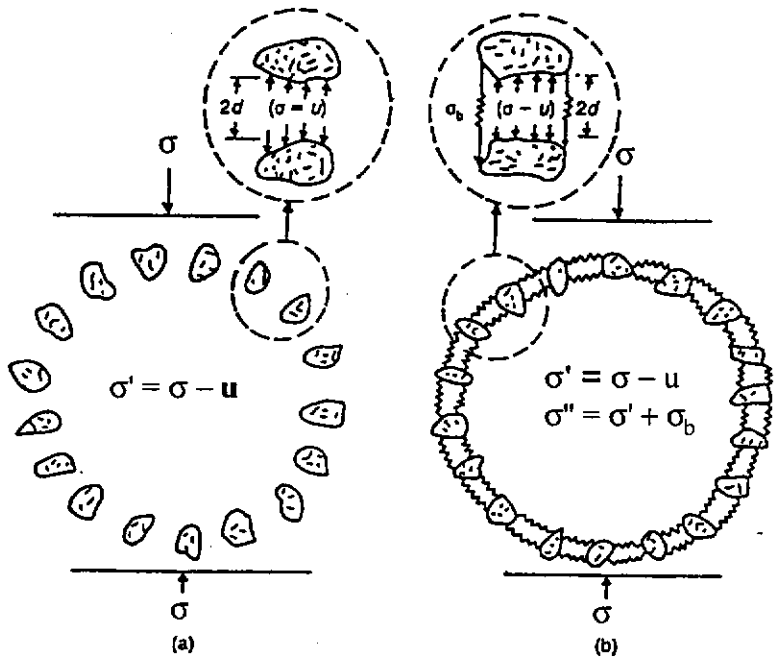


รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้น 145% และระยะบ่มต่างๆ



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้น 145% และระยะบ่มต่างๆ

พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและปริมาณซีเมนต์สามารถอธิบายได้ โดยอาศัยแบบจำลองโครงสร้างดินซีเมนต์ที่เสนอโดย Horpibulsuk (2003) ดังรูปที่ 3.4 ดังนี้



รูปที่ 3.4 (a) โครงสร้างของดินเหนียว (b) โครงสร้างของดินเหนียวซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)

1. ปริมาณความชื้นมาก ทำให้ระยะห่างระหว่างเม็ดดิน (Particles) และกลุ่มของเม็ดดิน (Clay clusters) มาก ส่งผลให้กำลังอัดต่ำ
2. ปริมาณซีเมนต์มาก ทำให้พันธะเชื่อมประสานแข็งแรง ส่งผลให้กำลังอัดสูง
3. การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเมื่อระยะบ่มเพิ่มขึ้น เกิดเนื่องจากการพัฒนากำลังของพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond)

3.4 การวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์

Miura et al. (2001) ได้ทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ กำลังอัดแกนเดียว และแรงอัดสามแกน ของดินเหนียวอะริเอเคะผสมซีเมนต์ และแสดงให้เห็นว่าตัวแปรหลักที่ควบคุมการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ คืออัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio, w_c/C) ซึ่งมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินเหนียวต่อปริมาณซีเมนต์ การที่ตัวแปรนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์ได้ เนื่องจากตัวแปรนี้เป็นตัวแปรโครงสร้าง (Structural parameter) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแฟบริค (Fabric) และความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสาน (Cemenattion bond) ของดินซีเมนต์ถูกสะท้อนด้วยปริมาณความชื้นและปริมาณซีเมนต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้สร้างสมมติฐานที่เรียกว่า Clay-water/cement ratio hypothesis ซึ่งมีใจความสำคัญว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์มีค่าแปรผันตามอัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ อัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ยิ่งน้อย กำลังอัดของดินซีเมนต์ยิ่งมีค่ามาก

Horpibulsuk et al. (2003) จึงได้ใช้สมมติฐานดังกล่าวข้างต้นสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ ดังนี้

$$q_u = \frac{A}{B^{w_c/C}} \tag{3.1}$$

เมื่อ q_u คือกำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มใดๆ และ A และ B คือค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดินและระยะบ่ม

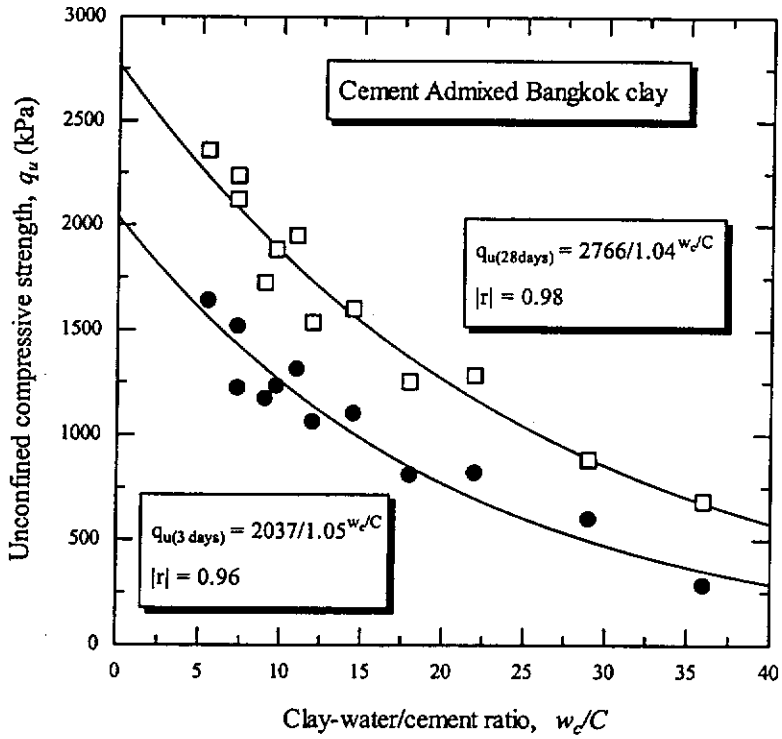
รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์และอัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ ที่ดัชนีสภาพพลาสติกมีค่าระหว่าง 1.0 ถึง 2.0 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ที่มีความเป็นไปได้สูง โดยสังเกตจากค่า Coefficient of correlation ที่สูงเกินกว่า 0.96 จะเห็นได้ว่าค่าของ B มีค่าอยู่ระหว่าง 1.04 และ 1.05 ซึ่งไม่แปรผันตามระยะบ่ม

ตัวแปร A เป็นตัวแปรที่มีค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่ระยะบ่ม โดยไม่แปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ จากสิ่งที่พบนี้ เมื่อพิจารณาการพัฒนาของกำลังของดินเหนียว

กรุงเทพผสมซีเมนต์ตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ (w_c/C) ที่ระยะบ่มเดียวกัน และแทนค่า $B = 1.05$ จะได้

$$\frac{q_{(w_c/C)1}}{q_{(w_c/C)2}} = \left[\frac{A/B^{(w_c/C)_1}}{A/B^{(w_c/C)_2}}\right] = 1.05^{(w_c/C)_2-(w_c/C)_1} \tag{3.2}$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)1}$ คือกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการประมาณ ที่อัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์เท่ากับ w_c/C_1 และ $q_{(w_c/C)2}$ คือกำลังอัดแกนเดียวทราบค่า ที่อัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์เท่ากับ w_c/C_2



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์

สมการที่ (3.2) สามารถใช้ทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ ที่ระยะบ่มเดียวกัน เมื่อทราบผลทดสอบกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้นและปริมาณซีเมนต์ค่าหนึ่ง เพื่อทำให้สมการนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จำเป็นต้องรวมผลของระยะบ่มต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด ดังจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป

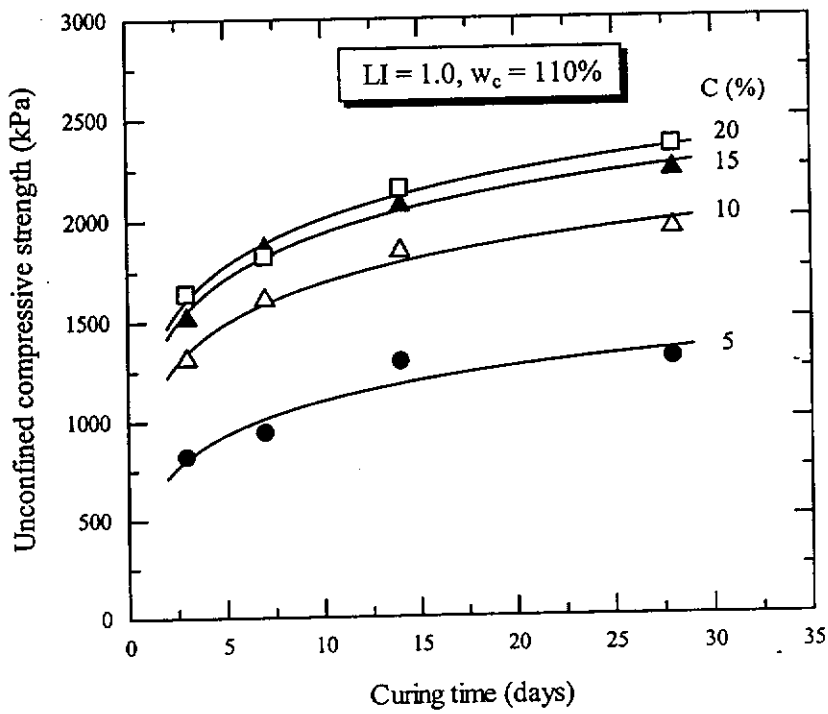
3.5 อิทธิพลของระยะบ่มต่อการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์

กำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ถึงรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวกรุงเทพที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1 เท่า 1.5 เท่า และ 2.0 เท่าของดัชนีสภาพพลาสติก ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ลักษณะการเพิ่มขึ้นของกำลังกับระยะบ่มมีความคล้ายคลึงกัน ถึงแม้ว่าปริมาณความชื้นในดินจะมีความแตกต่างกันมาก (จาก 110% ถึง 180%)

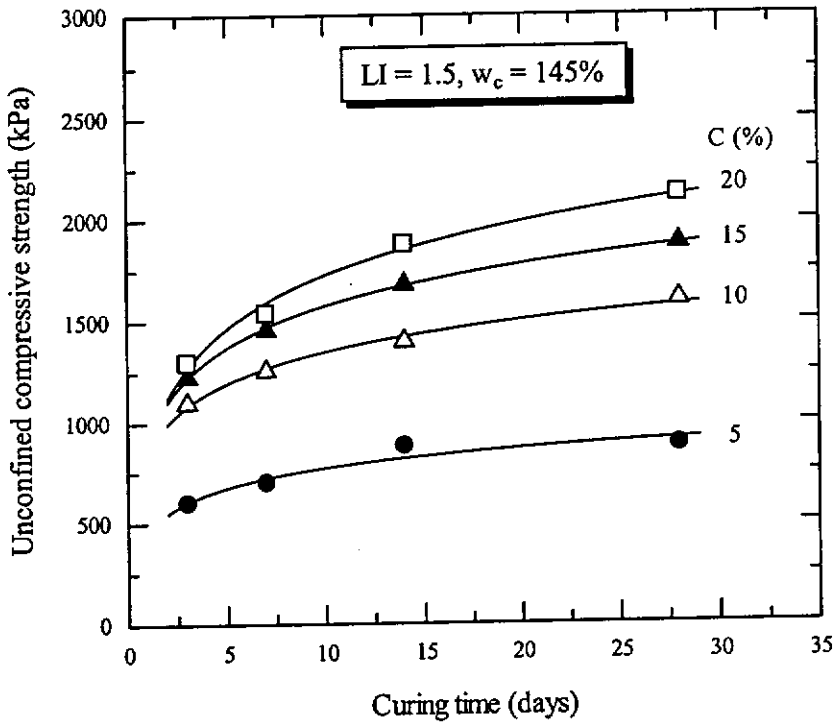
รูปที่ 3.3 และสมการที่ (3.1) แสดงให้เห็นว่า ที่ตัวแปร w_c/C ค่าหนึ่งๆ ตัวแปร A เป็นเพียงตัวแปรเดียวในการควบคุมการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดกับเวลา เนื่องจากตัวแปร B มีค่าคงที่ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดกับเวลาสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{q_{D1}}{q_{28}} = \frac{A_{D1}}{A_{D2}} \tag{3.3}$$

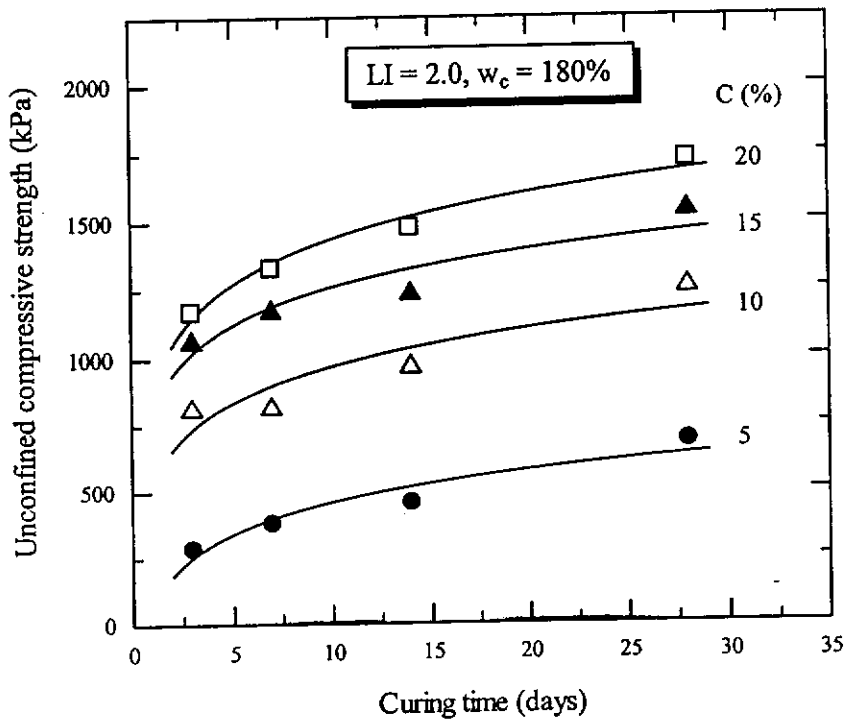
เมื่อ q_{D1} คือกำลังอัดที่ต้องการประมาณที่ระยะบ่ม D_1 วัน q_{D2} คือกำลังอัดที่ทราบค่าที่ระยะบ่ม D_2 วัน และ A_{D1} และ A_{D2} คือค่าของตัวแปร A ที่ระยะบ่ม D_1 และ D_2 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระยะบ่ม ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับดัชนีสภาพความเหลว



รูปที่ 3.7 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระยะบ่ม ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.5 เท่าของดัชนีสภาพความเหลว



รูปที่ 3.8 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระยะบ่ม ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 2.0 เท่าของดัชนีสภาพความเหลว

ค่าของตัวแปร A อาจมีความผันแปรตามปริมาณความชื้นในดิน แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดกับเวลาควรเป็นค่าเดียวกัน เนื่องจากปริมาณน้ำในมวลดินมีมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังนั้น สมการที่ (3.3) ก็น่าจะเป็นสมการทั่วไปสำหรับดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นต่างๆ

ความพยายามที่สร้างสมการทั่วไปนี้กระทำขึ้นโดยใช้ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน เป็นค่าอ้างอิง Horpibulsuk et al. (2003) แสดงให้เห็นว่า โดยการพล็อตระยะบ่ม (วัน) ในสเกลล็อคการิทึม ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะบ่มจะเป็นเส้นตรง ในกรณีของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ เราก็พบเช่นกันว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.9 นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัด (Strength ratio, q_D/q_{28}) แสดงร่วมกันในรูปที่ 3.9 ด้วย ความสัมพันธ์นี้ไม่แปรผันตามปริมาณความชื้นและปริมาณซีเมนต์ และมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.491 + 0.504 \ln D \qquad (3.4)$$

เมื่อ q_D คือกำลังอัดที่ระยะบ่ม D วันใดๆ และ q_{28} คือกำลังอัดที่ระยะบ่ม 28 วัน ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีค่า Correlation coefficient สูงถึง 0.97

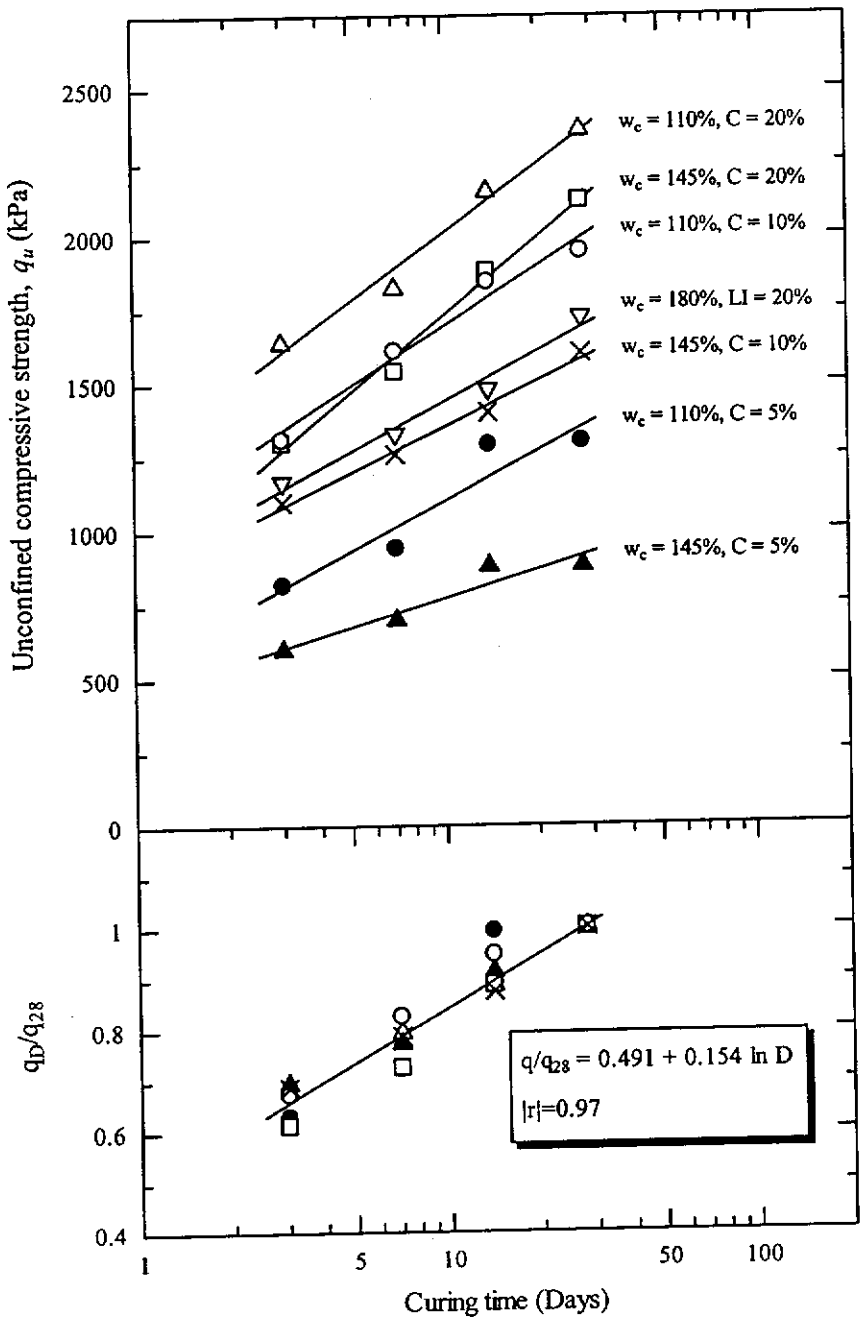
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด อัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ และระยะบ่ม

จากการศึกษากำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์พบว่า ค่าของ B มีค่าคงที่ประมาณ 1.05 ที่ปริมาณความชื้นระหว่างดัชนีสภาพพลาสติกระหว่าง 1.0 ถึง 2.0 และอัตราส่วนกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์ยังมีค่าแปรผันตามระยะบ่มเพียงอย่างเดียว โดยไม่แปรผันตามปริมาณความชื้นและปริมาณซีเมนต์ ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด อัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ และระยะบ่ม สามารถถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพ ภายใต้ขอบเขตของ w_c/C ในช่วง 5-35 และระยะบ่มในช่วง 3-28 วัน โดยการรวมสมการที่ (3.2) และ (3.5) เข้าด้วยกัน จะได้

$$\left\{\frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}}\right\} = 1.05^{\{(w_c/C)_{28}-(w_c/C)_D\}}(0.491 + 0.154 \ln D) \qquad (3.6)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_D}$ คือกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ที่ต้องการทราบค่า ที่ค่าอัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์เท่ากับ $(w_c/C)_D$ ที่ระยะบ่ม D วัน

$q_{(w_c/C)_{28}}$ คือกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ที่ทราบค่า ที่ค่าอัตราส่วนดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์เท่ากับ $(w_c/C)_{28}$ ที่ระยะบ่ม D วัน



รูปที่ 3.9 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดและอัตราส่วนกำลังกับเวลา

เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องสมการที่นำเสนอนี้ ผู้เขียนจึงได้นำสมการนี้มาทำนายผลทดสอบกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ ที่บริเวณบางนา-บางประกง ซึ่งเป็น

ผลทดสอบของ Soralump (1996) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดที่ได้จากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบ และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในมุมมองของงานวิศวกรรม

ตารางที่ 3.1 การทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ บริเวณบางนา-บางประกง ที่ระดับความลึก 12 เมตร

ระยะบ่ม (วัน)	ซีเมนต์ (กก. ต่อ ลบม.)	w_n (%)	ความหนาแน่น (ตัน ต่อ ลบ.ม.)	w_c (%)	C (%)	w_c/C	กำลังอัด (กิโลปาสคาล)	กำลังอัด (ทำนาย) (กิโลปาสคาล)
28	125	99.5	1.44	125.4	17.2	7.3	262	ค่าอ้างอิง
3	150	99.5	1.44	130.5	20.7	6.3	155	181
7	150	99.5	1.44	130.5	20.7	6.3	180	217
14	150	99.5	1.44	130.5	20.7	6.3	185	246
28	150	99.5	1.44	130.5	20.7	6.3	282	276
3	200	99.5	1.44	140.9	27.6	5.1	161	192
7	200	99.5	1.44	140.9	27.6	5.1	207	230
14	200	99.5	1.44	140.9	27.6	5.1	218	261
28	200	99.5	1.44	140.9	27.6	5.1	345	293

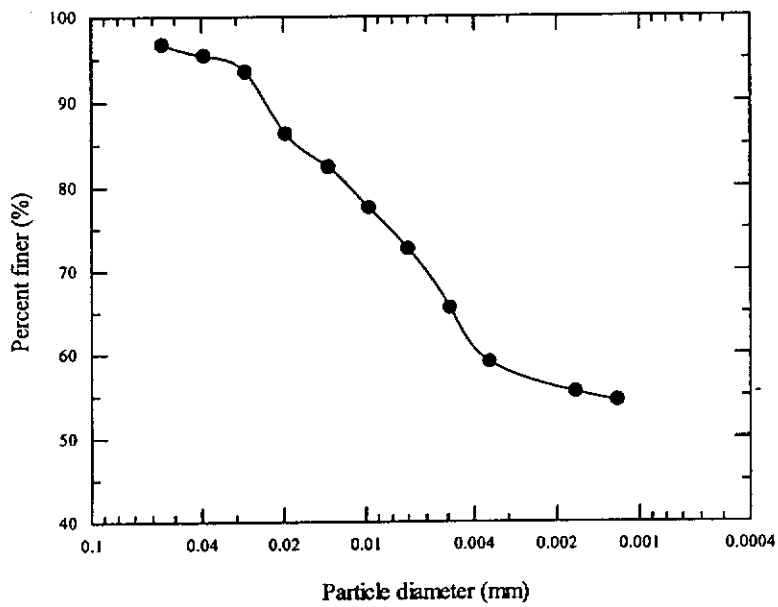
บทที่ 4
กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด

4.1 บทนำ

ดินในจังหวัดนครราชสีมาส่วนใหญ่เป็นดินตะกอนปนดินเหนียวและดินเหนียวปนดินตะกอน ที่เกิดจากการพัดพาของลม (Wind blown deposit) ดินประเภทนี้มีกำลังต้านทานแรงเฉือนและความต้านทานการทรุดตัวที่สูงในสภาพแห้ง แต่เมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น จะเกิดการยุบตัวและการสูญเสียกำลังต้านทานแรงเฉือนอย่างมาก เนื่องจากดินประเภทนี้มีโครงสร้างที่หลวม ซึ่งก่อความเสียหายให้กับโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนดินประเภทนี้อย่างมาก ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวด้วยการผสมกับซีเมนต์และบดอัด

4.2 ดินตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

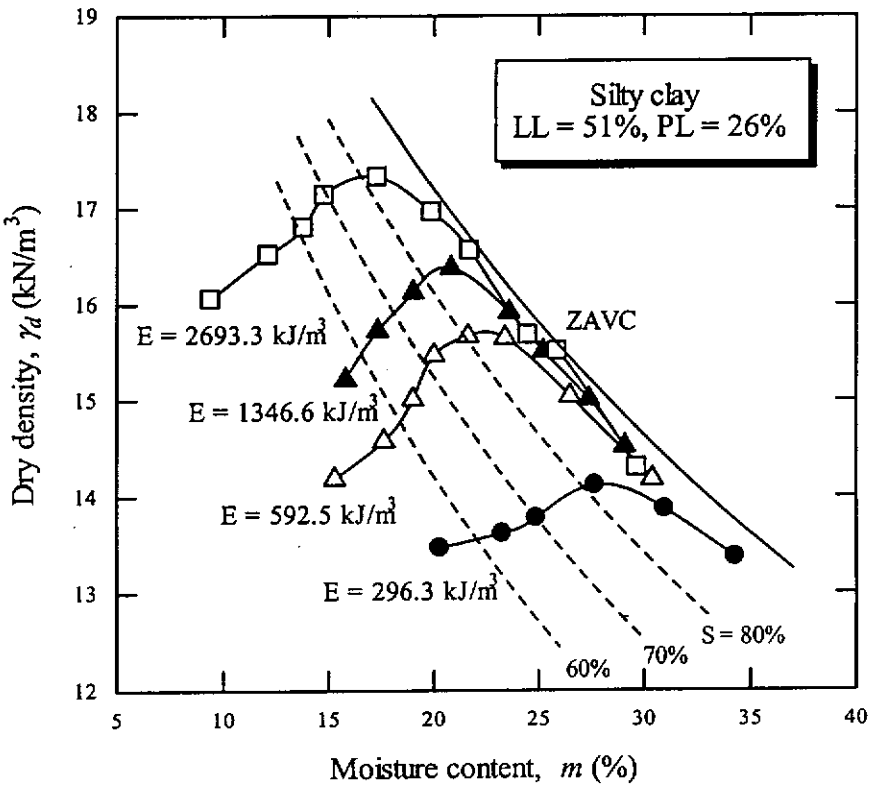
ตัวอย่างดินเหนียวปนดินตะกอนเก็บจากบริเวณอาคารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ระดับความลึกประมาณ 3 เมตร ดินดังกล่าวมีขนาดคละดังแสดงในรูปที่ 4.1 ปริมาณทราย:ดินตะกอน:ดินเหนียว เท่ากับ 2:45:53 ปริมาณความชื้นในช่วงเก็บดินตัวอย่างทดสอบ (กันยายน 2546) มีค่าเท่ากับ 18.5 เปอร์เซ็นต์ ขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 50.9 และ 26.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้น ดัชนีพลาสติกมีค่าเท่ากับ 34.7 เปอร์เซ็นต์ โดยการจำแนกดินระบบ Unified (Unified Soil Classification System, USCS) ดินนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกสูง (CH) กำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำมีค่าเท่ากับ 5 ตันต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.1 ขนาดคละของดินเหนียวปนดินตะกอน

4.2 ลักษณะเส้นกราฟการบดอัดและการรับน้ำหนักของดินบดอัด

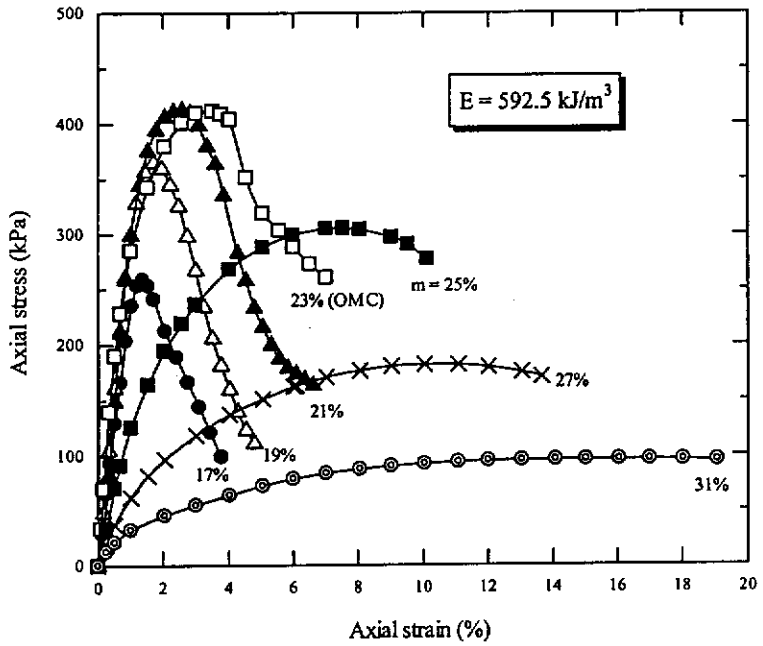
Pandian et al. (1997) ได้ทำการทดสอบการบดอัดเหนียวสามชนิด ที่มีค่าขีดจำกัดเหลวแตกต่างกัน พวกเขาพบว่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียวที่มีปริมาณขีดจำกัดเหลวสูง จะมีค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมสูง และมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดต่ำ รูปที่ 4.2 แสดงอิทธิพลพลังงานการบดอัดต่อลักษณะการบดอัด จะเห็นว่าปริมาณความชื้นมีค่าน้อยลง และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ตามพลังงานการบดอัด ดินที่มีปริมาณเม็ดละเอียดอยู่มาก จะมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยของ Pandian et al. (1997) นอกจากนี้ ยังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้น หลังปริมาณความชื้นเหมาะสม มีแนวโน้มจะเป็นเส้นเดียวกัน และขนานกับเส้นช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ (Zero air void) (Nagaraj et al., 1997)



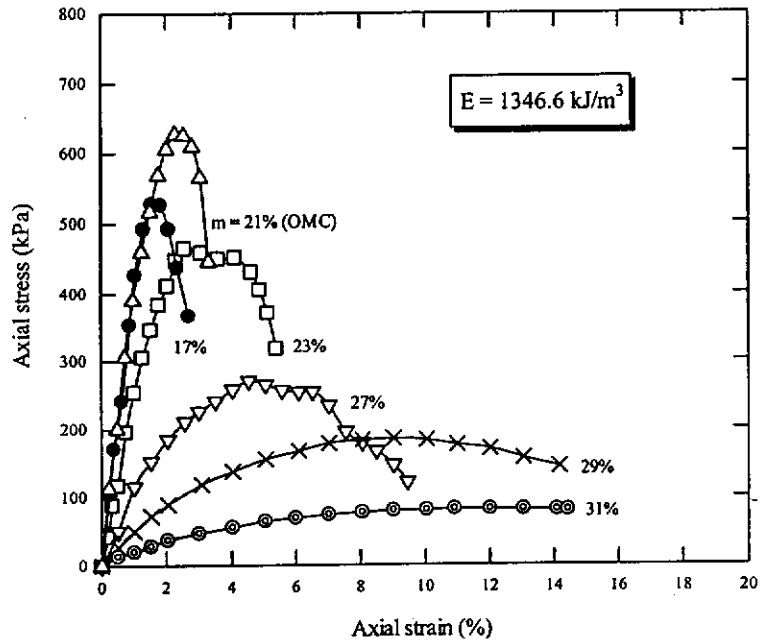
รูปที่ 4.2 ผลทดสอบการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน

รูปที่ 4.3 ถึง 4.5 แสดงผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินบดอัด ด้วยพลังงานการบดอัดสามค่าคือ 592.5 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ที่ปริมาณความชื้นต่างๆ จะเห็นว่าในช่วงปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม กำลังอัดและความเป็นวัสดุยืดหยุ่น (Ductile) ของดินบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้น ในขณะที่ กำลังอัดแกนเดียวของดินบดอัด

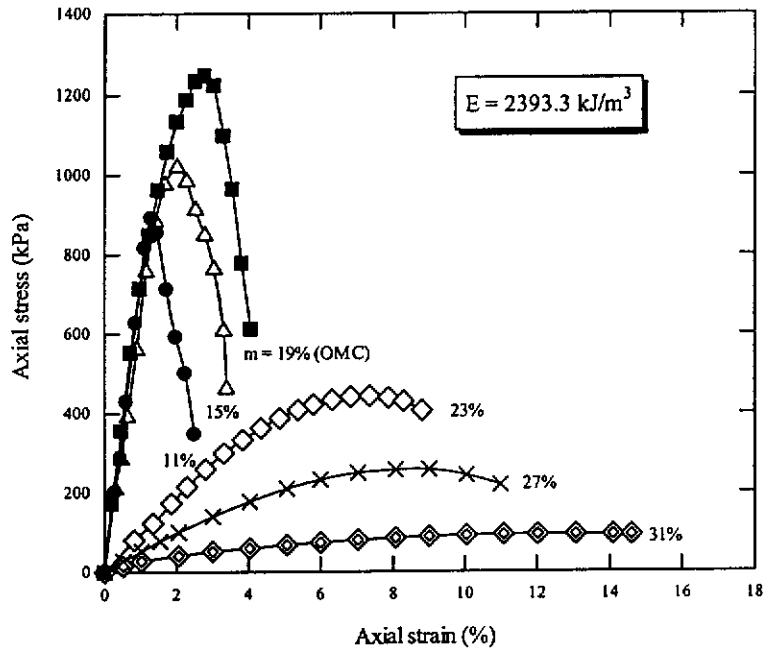
มีค่าน้อยลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นมีค่าสูงเกินกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม กำลังอัดแกนเดียวมีค่าสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ากำลังอัดของดินบดอัดมีค่าแปรผันตามความแน่นของมวลดิน (ความหนาแน่นแห้ง)



รูปที่ 4.3 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่บดอัดด้วยพลังงานบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.4 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่บดอัดด้วยพลังงานบดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



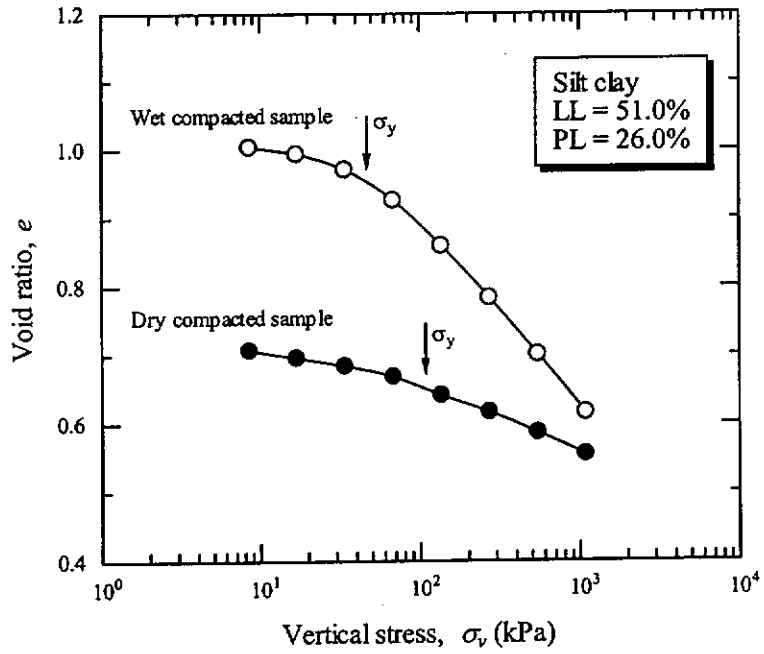
รูปที่ 4.5 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่บดอัดด้วยพลังงานบดอัดเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

รูปที่ 4.6 แสดงอิทธิพลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อการทรุดตัวของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัดสองตัวอย่างที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน (95 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด) ตัวอย่างหนึ่งบดอัดที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม อีกตัวอย่างบดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จากผลทดสอบพบว่า ดินที่บดอัดด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมมีความสามารถต้านการทรุดตัวมากกว่า ดังจะเห็นได้จากความชันของกราฟมีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ ดินที่บดอัดที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมยังมีค่าความเค้นคราก (σ_y) สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ดินบดอัดที่ด้านแห้งจะได้รับผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (Expansive due to wetting) ในขณะที่ ดินบดอัดด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมะสม จะเกิดการอัดตัวเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น แต่อิทธิพลของการเพิ่มขึ้นปริมาณความชื้นมีน้อยมาก เนื่องจากดินบดอัดด้านเปียกมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5b

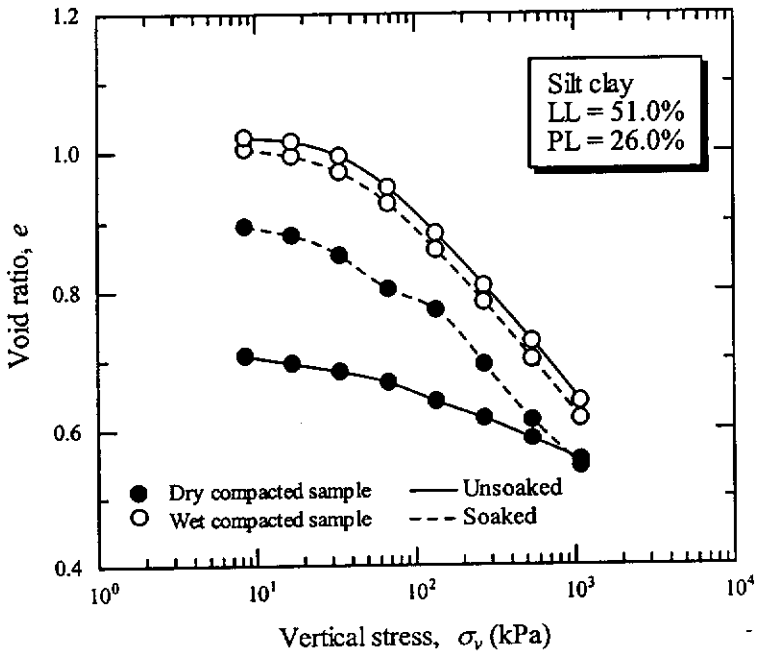
4.5 กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด

ในการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด ผู้เขียนได้เลือกใช้ดินลูกรังที่เก็บจากจังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งมีขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับ 53.0 และ 37.5 เปอร์เซ็นต์

ตามลำดับ เพื่ออธิบายอิทธิพลของปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด รูปที่ 4.7 แสดงกราฟการบดอัดของดินลูกรัง ที่พลังงานการบดอัดสี่ค่า

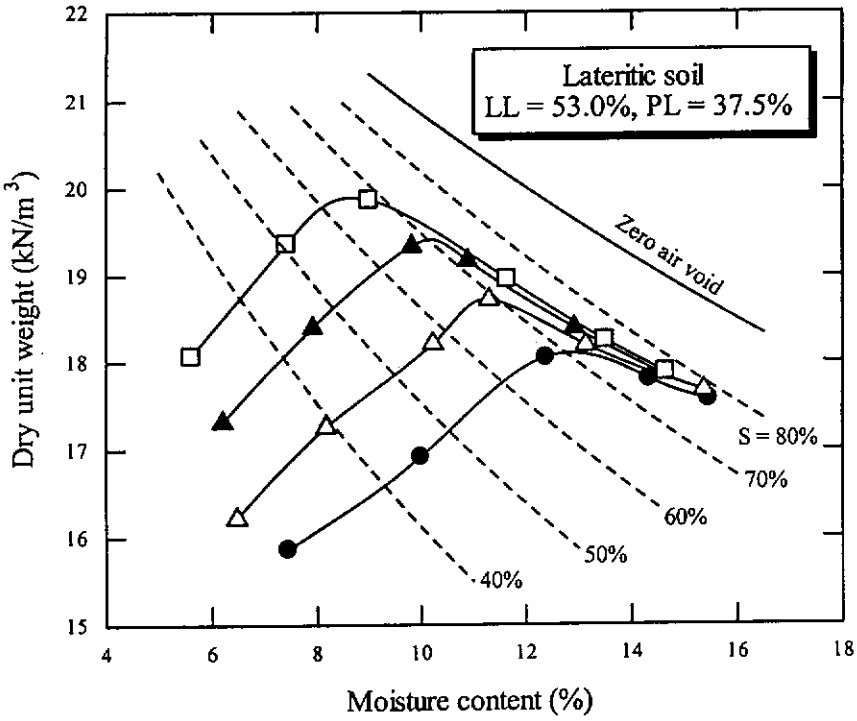


(a)



(b)

รูปที่ 4.6 (a) ลักษณะการอัดตัวของดินตะกอนปนดินเหนียวบดอัดที่ด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น

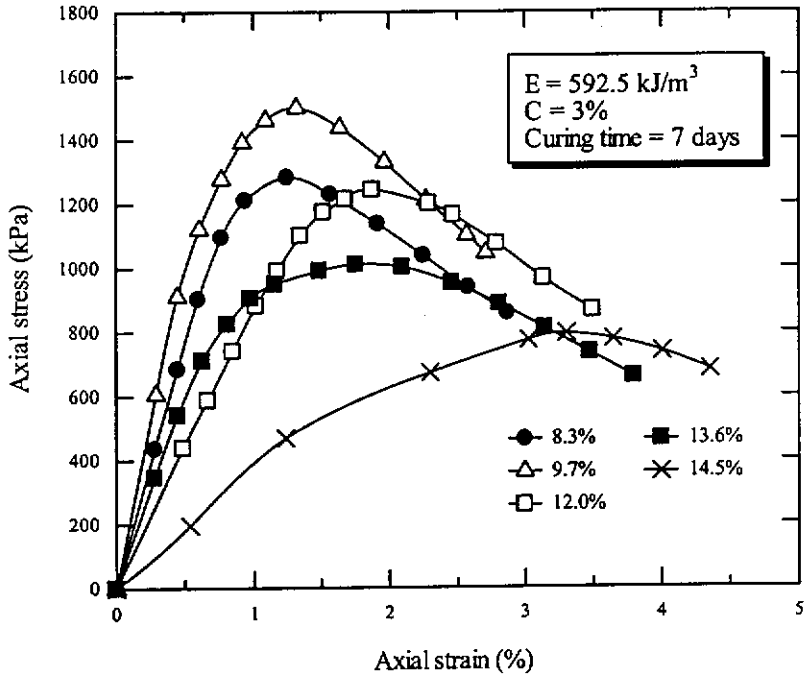


รูปที่ 4.7 ผลทดสอบการบดอัดของดินลูกรัง

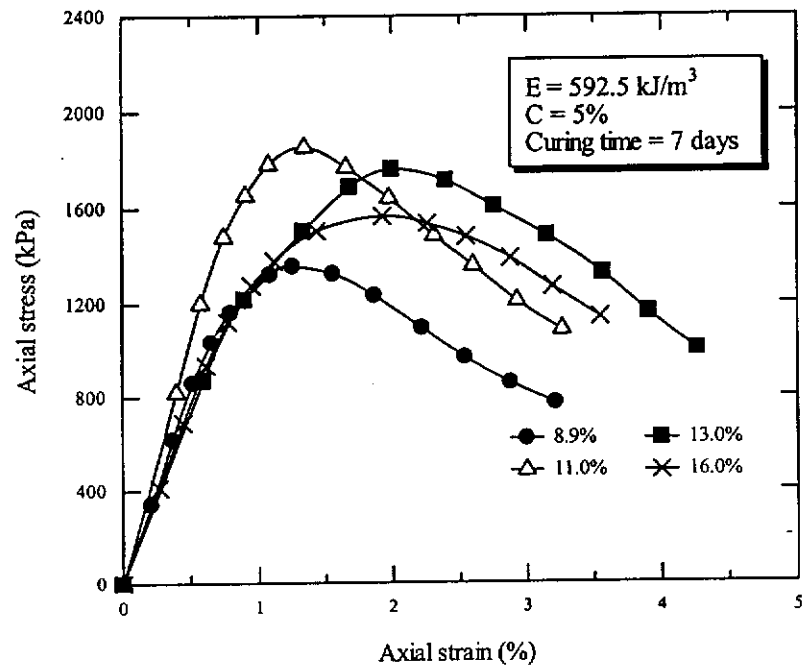
รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดของดินลูกรังบดอัดที่พลังงานเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปริมาณความชื้นก่อนผสมซีเมนต์ต่างๆ จะเห็นได้ว่า ในช่วงแรก กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้น จนถึงปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้น นอกจากนี้ ยังพบอีกว่าค่าโมดูลัสมีความแปรผันตามกำลังอัด จากการเปรียบเทียบผลทดสอบในรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะพบว่าปริมาณความชื้นที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นของดินก่อนทดสอบ และกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นของดินก่อนทดสอบ จะเห็นได้ชัดว่าปริมาณความชื้นที่ให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุดด้วย ปริมาณความชื้นนี้เรียกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณความชื้นเหมาะสมนี้มีค่าแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ยิ่งมาก ปริมาณความชื้นเหมาะสมก็ยิ่งมาก เนื่องจากในการผสมซีเมนต์ลงในดินที่มีปริมาณความชื้น ปูนซีเมนต์เปรียบเสมือนวัสดุแห้งที่ต้องการน้ำเพื่อทำให้ของผสมระหว่างดินและซีเมนต์มีปริมาณความชื้นเท่ากัน ดังนั้น ที่ปริมาณความชื้นในดินเท่ากัน ถ้าใส่ปูนซีเมนต์จำนวนมาก ปริมาณน้ำที่ปูนซีเมนต์ต้องการดูดซับก็ยิ่งมากตาม นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า ปริมาณซีเมนต์ที่ใส่ลงไปในดินไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นแห้งสูงสุด ทั้งนี้เนื่องมาจากในการบดอัดกระทำทันทีหลังจากผสมดินกับซีเมนต์ ดังนั้น ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างดินและน้ำยัง

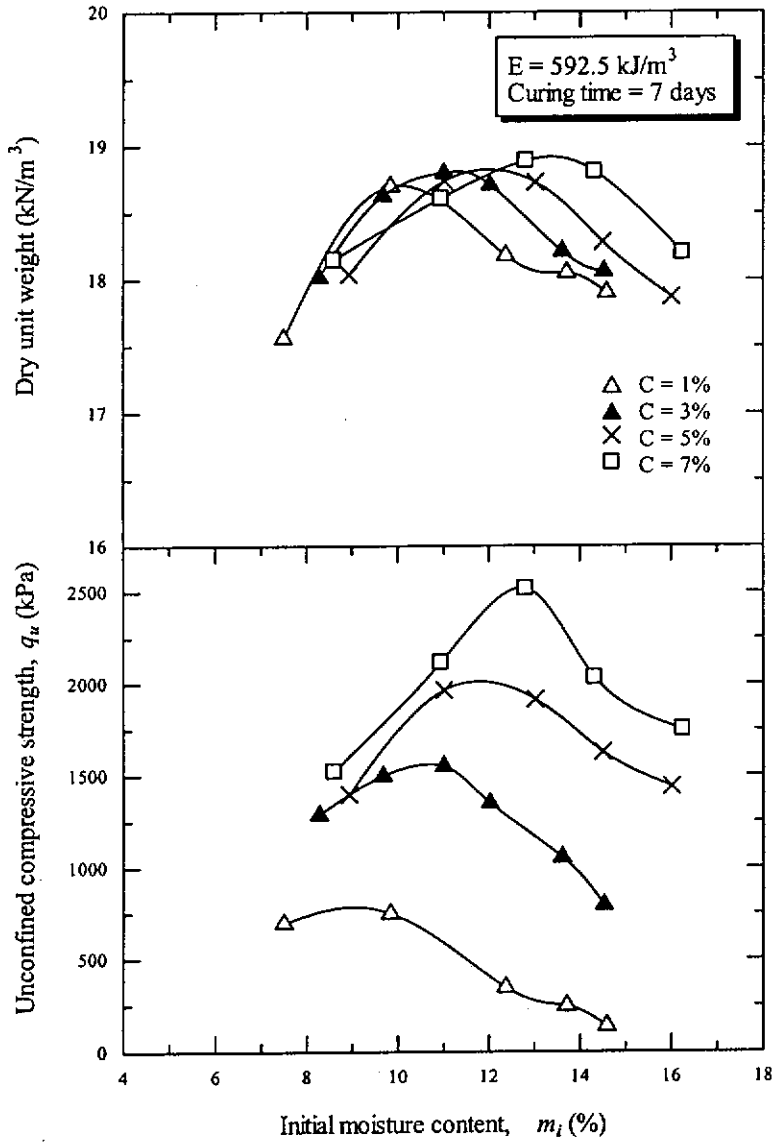
ไม่เกิด (ระยะเวลาการบดอัดแล้วเสร็จอยู่ในช่วงเซตตัวของซีเมนต์) และเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมกับดินในมีปริมาณไม่มาก อิทธิพลของขนาดของปูนซีเมนต์ต่อความหนาแน่นแห้งจึงมีไม่มาก



รูปที่ 4.8 ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังบดอัดที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 3% ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

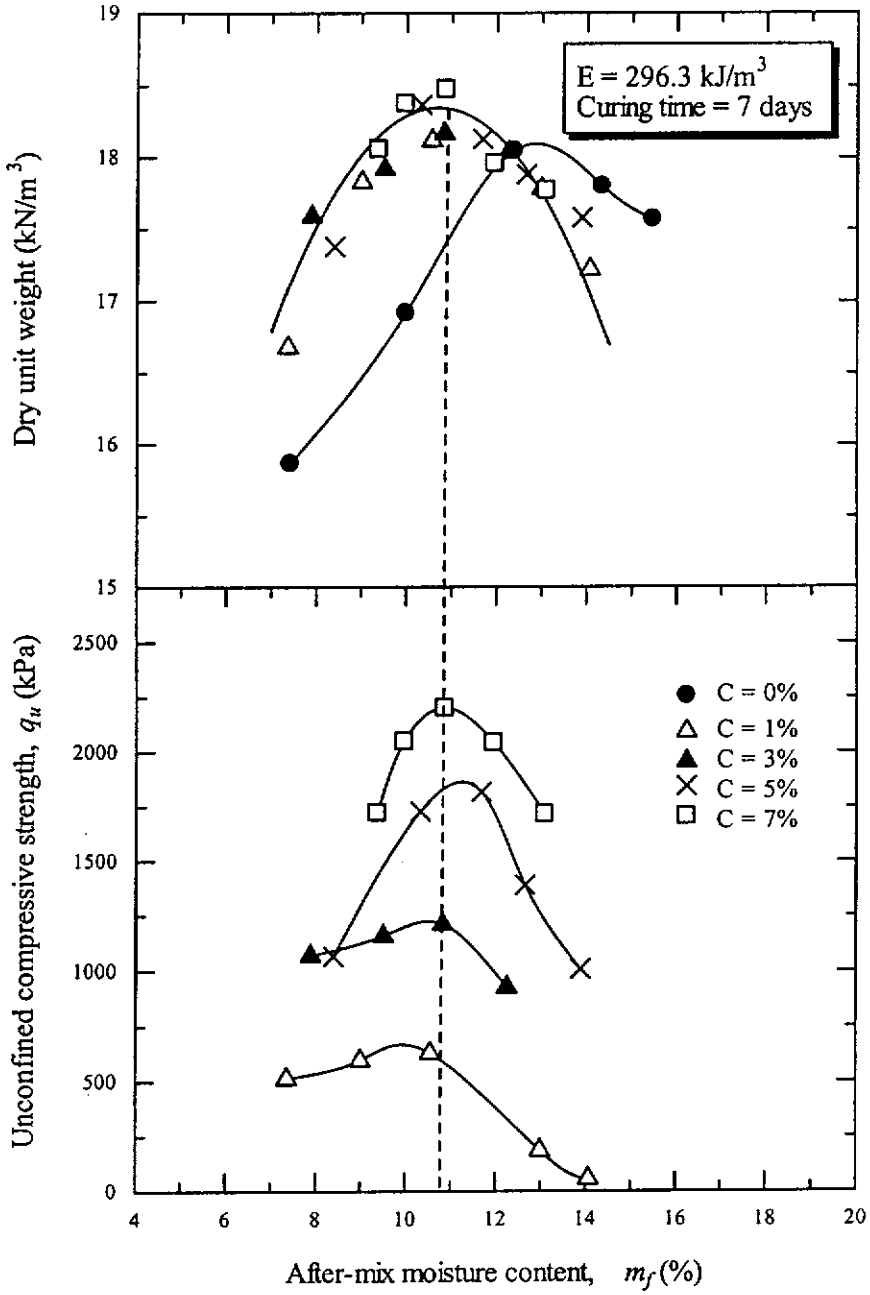


รูปที่ 4.9 ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังบดอัดที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 3% ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

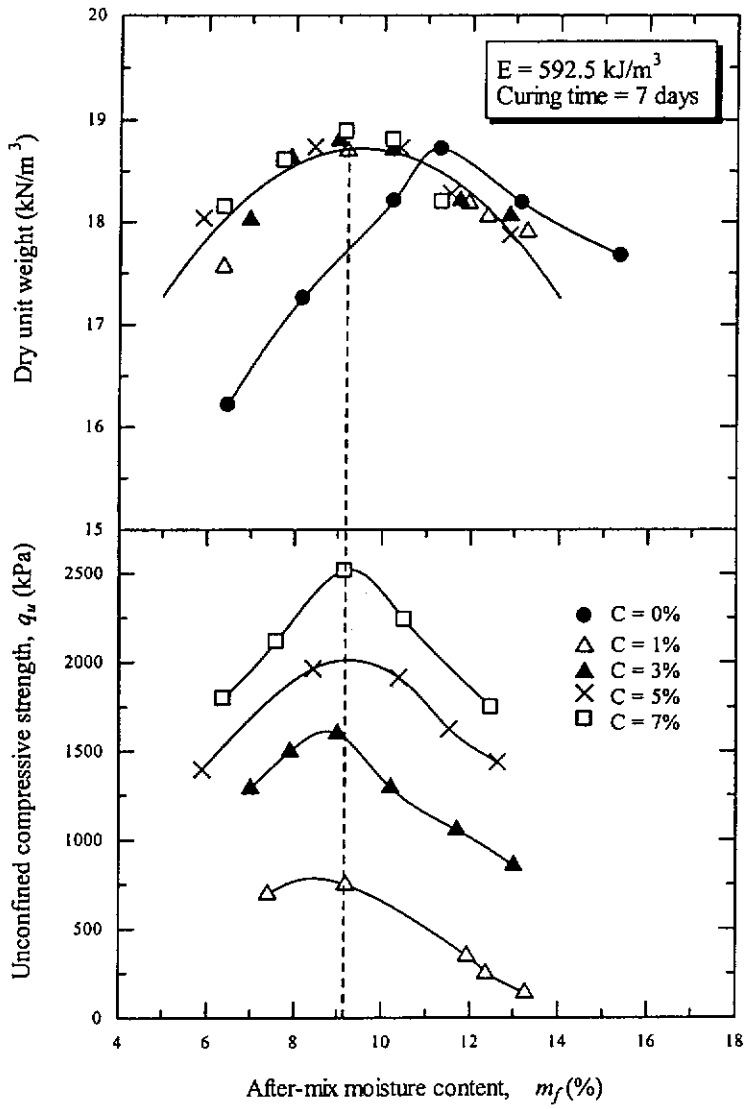


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเริ่มต้นทดสอบกับหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดแกนเดียว

หลังจากทิ้งตัวอย่างให้เกิดการบ่มตัว ปริมาณน้ำในก้อนตัวอย่างจะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ในขณะที่ ความหนาแน่นแห้งยังคงเหมือนเดิม ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นหลังผสม (ที่ระยะบ่ม 7 วัน) และกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นหลังผสม แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 สำหรับพลังงานการบดอัดที่ 296.3 และ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นหลังผสมเป็นความสัมพันธ์เดียวกัน ถึงแม้ว่าปริมาณซีเมนต์จะมีค่าแตกต่างกัน และปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสม (ปริมาณความชื้นที่ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุด) จะเป็นค่าเดียวกันสำหรับทุกปริมาณซีเมนต์ โดยจะมีค่าน้อยลงตามพลังงานการบดอัด



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นหลังผสมกับหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดแกนเดียว ที่พลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

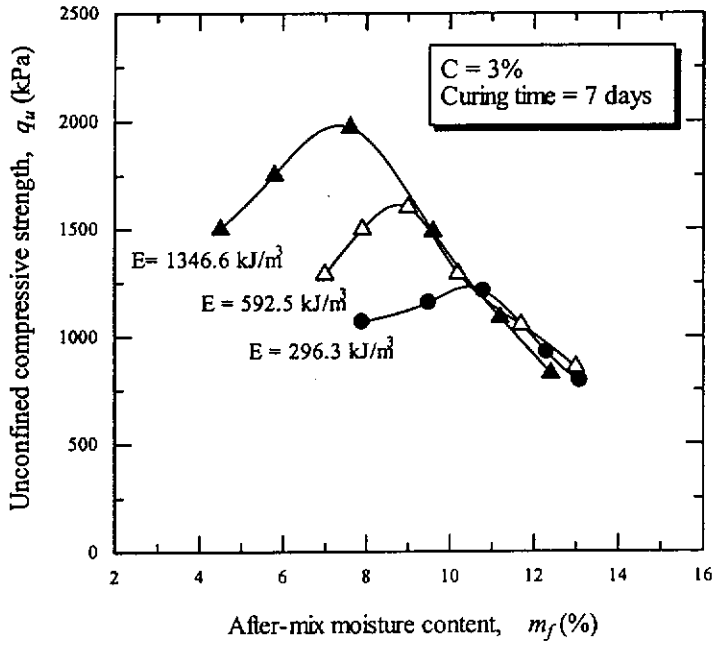


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเริ่มต้นทดสอบกับหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดแกนเดียว ที่พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

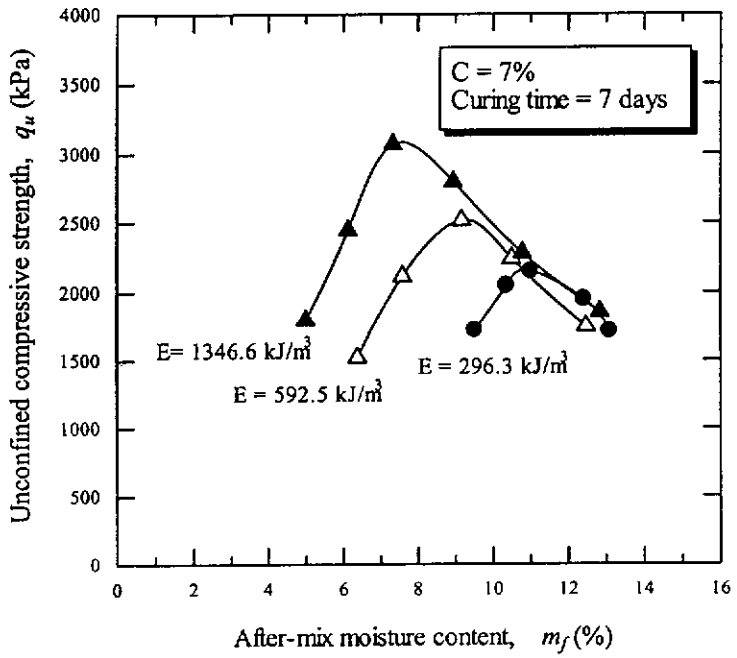
อิทธิพลของพลังงานการบดอัดต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 จะเห็นได้ว่าในด้านแห้งของปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสม กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัด ขณะที่ กำลังอัดไม่แปรผันตามพลังงานการบดอัดเมื่อปริมาณความชื้นหลังผสมมีค่าสูงกว่าปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสม แต่จะแปรผันตามปริมาณความชื้นหลังผสมเพียงอย่างเดียว พฤติกรรมดังกล่าวนี้เหมือนกับพฤติกรรมของดินผสมซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นสูง ดังได้ศึกษาโดย Horpibulsuk et al. (2003) ดังนั้น กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสมจึงควรจะแปรผันตามอัตราส่วนของปริมาณความชื้นหลังผสมต่อปริมาณซีเมนต์ ดังสมการต่อไปนี้

$$q_u = \frac{A}{B^{m_f/C}} \tag{4.3}$$

เมื่อ A และ B คือค่าคงที่ ซึ่งแปรผันตามชนิดของดิน

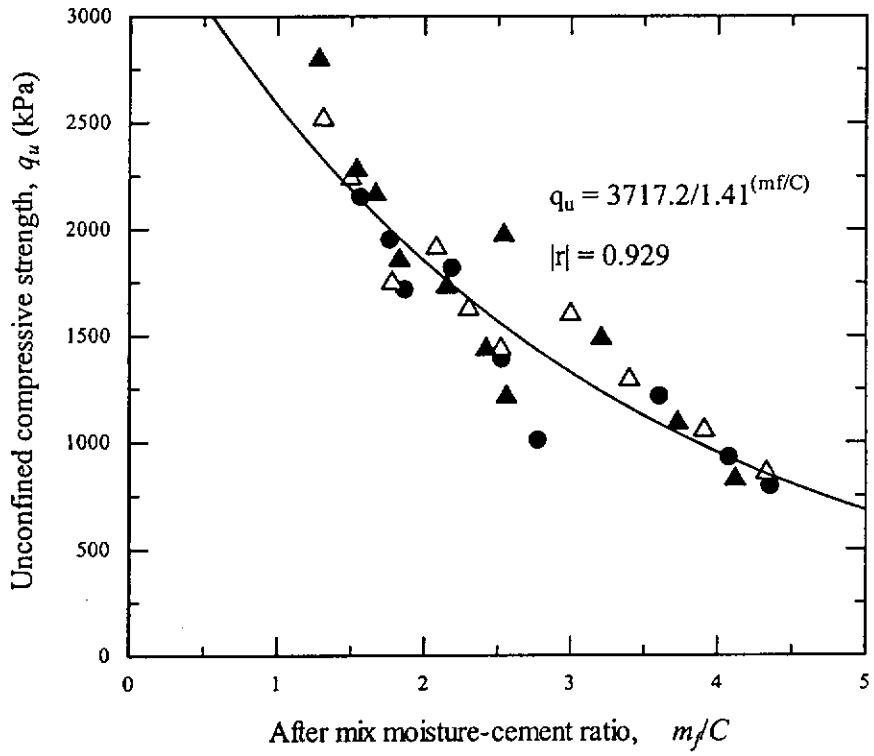


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นหลังผสม ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 3%



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นหลังผสม ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 7%

รูปที่ 4.15 แสดงความเป็นไปได้ของความสัมพันธ์ที่เสนอโดยสมการที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดแกนเดียวแปรผันตามอัตราส่วนปริมาณความชื้นหลังผสมต่อปริมาณซีเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตาม พลังงานการบดอัดจะเป็นตัวกำหนดปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสม (ปริมาณความชื้นที่ต่ำที่สุดที่ดินตัวอย่างสามารถถูกบดอัดให้มีพลังงานสูงสุดได้)



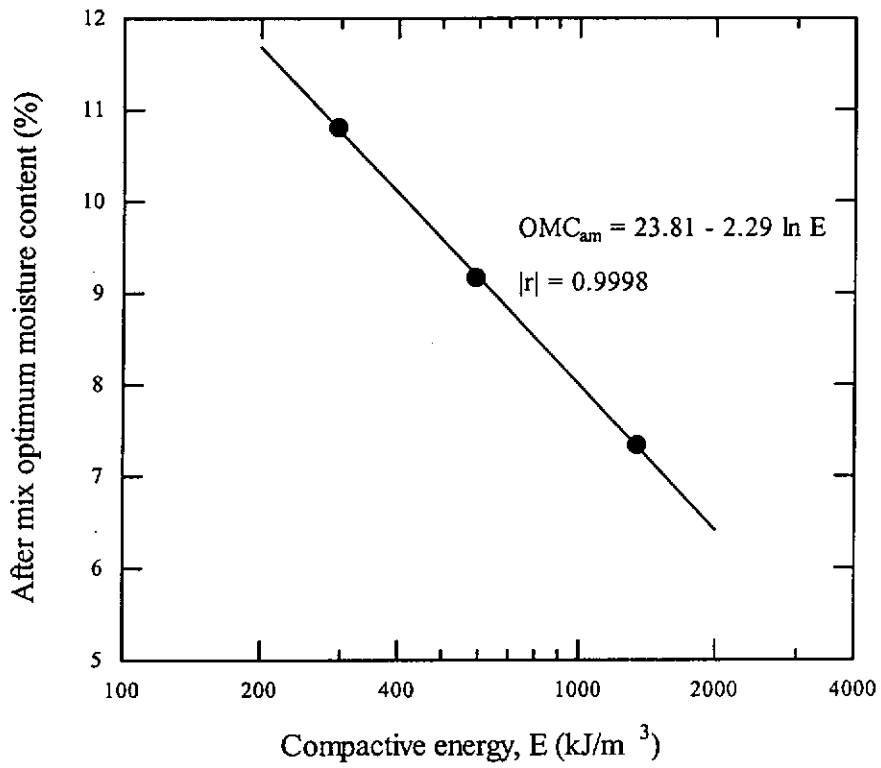
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นหลังผสมที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม

เนื่องจากในการบดอัดดินและซีเมนต์กระทำในช่วงที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังนั้นหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสมหลังผสมควรจะแปรผันตามพลังงานการบดอัด ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ด้วยเหตุนี้เอง ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นหลังผสมและพลังงานการบดอัดของดินซีเมนต์บดอัดจึงสามารถถูกสร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์ในรูปของล็อคการิทึม ดังสมการต่อไปนี้

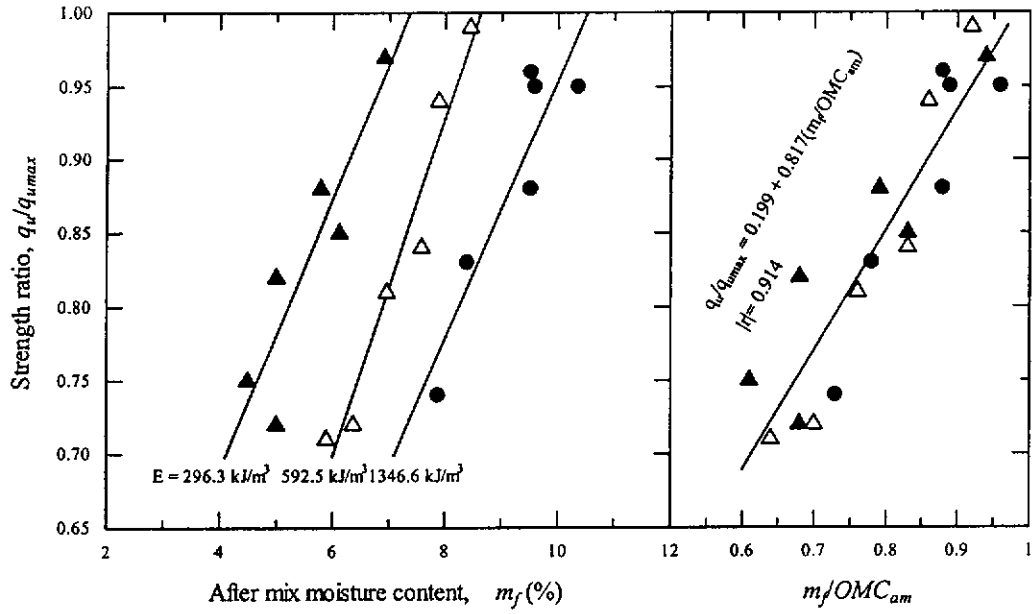
$$OMC_{am}(\%) = 23.81 - 2.29 \ln E \qquad (4.4)$$

เมื่อ OMC_{am} คือปริมาณความชื้นเหมาะสมหลังผสม

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นหลังผสมจนกระทั่งถึงปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสม เนื่องจากที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในดินไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังนั้นอัตราการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ของดินซีเมนต์บดอัดที่พลังงานการบดอัดต่างๆ เมื่อเทียบกับกำลังอัดสูงสุด (ที่ปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสม) จึงควรมีค่าคงที่ และแปรผันตามปริมาณความชื้น ดังจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.17(a) จะเห็นได้ว่าอัตราการพัฒนากำลังอัดของดินบดอัดมีค่าแปรผันตามพลังงานการบดอัด ซึ่งเป็นตัวควบคุมปริมาณความชื้นเหมาะสมหลังผสม เพื่อสร้างความสัมพันธ์สากลสำหรับการศึกษาการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์บดอัด ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพัฒนากำลังและอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นหลังผสมต่อปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสมแสดงดังรูปที่ 4.17(b)



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสมหลังผสมและพลังงานการบดอัด



รูปที่ 4.17 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพัฒนากำลังและปริมาณความชื้นหลังผสม
(b) Generalization

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพัฒนากำลังและอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นหลังผสมต่อปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสมแสดงดังได้สมการต่อไปนี้

$$\frac{q_u}{q_{u\max}} = 0.199 + 0.817\left(\frac{m_f}{OMC_{am}}\right) \tag{4.5}$$

เมื่อ q_u คือกำลังอัดแกนเดียวที่ปริมาณความชื้นด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม

q_{umax} คือกำลังอัดแกนเดียวสูงสุด (ที่ปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสม)

ความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.15 จนถึง 4.17 มีประโยชน์อย่างมากในการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. จากสมการที่ 4.5 วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ m_f ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการทราบ ด้านหลังปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสม
2. หาค่าปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสมได้จากสมการที่ 4.4
3. จากสมการที่ 4.5 วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ m_f ที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสม
4. เชื่อมต่อความสัมพันธ์ด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นหลังผสมเหมาะสม

บทที่ 5
บทสรุป

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองส่วนประกอบหลัก อันได้แก่ การศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวของดินผสมซีเมนต์โดยปราศจากการบดอัด และการเพิ่มขึ้นของดินบดอัดผสมซีเมนต์ งานวิจัยในส่วนแรกนี้เป็นการศึกษาที่เหมาะสมกับงานที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก ซึ่งปริมาณความชื้นในดินมีค่าสูงประมาณขีดจำกัดเหลว ในส่วนที่สองจะเหมาะสำหรับงานดินถม ซึ่งดินมีปริมาณความชื้นต่ำใกล้เคียงพิกัดพลาสติก ดินประเภทนี้จะมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจากมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอที่จะก่อตัวเป็นแฟบริค ดังนั้น ในการปรับปรุงดินประเภทนี้จึงจำเป็นต้องทำการบดอัดก่อน บทสรุปของงานวิจัยนี้สามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

1. ตัวแปร w_c/C เป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมการพัฒนาของกำลังของดินเหนียวผสมซีเมนต์ เนื่องจากเป็นตัวแปรที่พิจารณาผลของแฟบริค (Fabric) และพันธะเชื่อมประสาน
2. จากการศึกษาลักษณะการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพ โดยอาศัยพารามิเตอร์ w_c/C และพิจารณาการพัฒนากำลังอัดกับเวลา ผู้วิจัยได้เสนอสมการที่ใช้ในการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และระยะบ่มต่างๆ ดังนี้

$$\left\{\frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}}\right\} = 1.05^{\{(w_c/C)_{28}-(w_c/C)_D\}}(0.491 + 0.154\ln D)$$

สมการนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการทำนายผลทดสอบของกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ที่บริเวณบางนา-บางประกง และได้ผลใกล้เคียงกับผลทดสอบอย่างมาก

3. การผสมซีเมนต์กับดินไม่ทำให้กราฟการบดอัดของดินเปลี่ยนแปลง เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังไม่เกิดในช่วงที่ทำการบดอัด ดังนั้น การใส่ปูนซีเมนต์ลงในดินจึงเปรียบเสมือนการใส่วัสดุเม็ดละเอียดลงในดิน
4. กำลังอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าแปรผันตามอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และสามารถอธิบายได้โดยสมการที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2003) ดังนั้น การทำนายกำลังของดินบดอัดด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม สำหรับดินลูกรัง ที่ระยะบ่ม 7 วัน จึงสามารถกระทำได้โดยอาศัยสมการ

$$q_u = \frac{3717.2}{1.41^{(w_f/C)}}$$

5. กำลังอัดที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมสามารถทำนายได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{q_u}{q_{\max}} = 0.199 + 0.817\left(\frac{m_f}{OMC_{am}}\right)$$

6. การสร้าง Code of practice ในการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์จำเป็นต้องมีการวิจัยในแง่ต่างๆ อาทิเช่น การออกแบบความหนาผิวจราจร กำลังอัดแกนเดียวที่จำเป็นสำหรับปริมาณจราจร เป็นต้น เพื่อให้ได้มาซึ่ง Code of practice ที่สมบูรณ์ จำเป็นต้องมีการศึกษาแบบบูรณาการและมีการประชุมร่วมกันระหว่างนักวิชาการและผู้ที่เกี่ยวข้องหลายฝ่าย งานวิจัยนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งในนำเสนอลักษณะการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ และการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกำลังอัดในสนามและกำลังอัดในห้องปฏิบัติการ ในอัตราส่วนผสมเดียวกัน ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากการประมาณอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมกับกำลังอัดที่ต้องการในสนาม
7. ในทางปฏิบัติ การจะหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม ต้องคำนึงถึงกำลังอัดที่ต้องการ ปริมาณน้ำในดิน และอายุบ่ม ซึ่งจำเป็นต้องมีการทดสอบตัวอย่างจำนวนมากมาย โดยแปรผันตัวแปรต่างๆ ดังกล่าว ซึ่งเป็นการเสียเวลาและค่าใช้จ่ายพอประมาณ ดังนั้น ในรายงานนี้ ผู้เขียนมีจุดประสงค์เพื่อจะเสนอสมการทำนายกำลังอัดของดินทุกชนิดที่ผสมซีเมนต์ สมการนี้จะสามารถช่วยประมาณปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการได้อย่างคร่าวๆ อันจะนำมาซึ่งการวางแผนการทดสอบที่มีประสิทธิภาพ
8. การออกแบบในทางวิศวกรรมโดยปกติจะปฏิบัติตาม Design Code ซึ่งได้อธิบายขั้นตอนการคำนวณอย่างเป็นระเบียบ แต่ประเด็นสำคัญประการหนึ่งในการออกแบบนอกเหนือจากขั้นตอนการคำนวณแล้ว คือการเลือกใช้พารามิเตอร์กำลังที่เหมาะสม ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานนี้จะนำมาซึ่งความเข้าใจในลักษณะทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ ตลอดจนการเลือกใช้พารามิเตอร์กำลังที่เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

เกษม เพชรเกตุ และ พินิต ตั้งบุญเติม. (2540). การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. โยธาสาร. หน้า 30 – 39.

ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2536). คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ :บริษัทคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.

มนสิช สาริกะภูมิ และ วฤช จินตนาวัน. (2539) . คุณสมบัติทางแร่วิทยาของเถ้าลอย (Fly Ash), Slag และ Silica Fume. โยธาสาร. หน้า 26 – 32.

สุขสันติ์ หอพิบูลสุข และ รุ้งลาวัลย์ ราชัน. (2546) . ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา. หน้า 25 – 31.

สมชัย กกกำแหง. (2539) .ศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้ประโยชน์. โยธาสาร. หน้า 31 -39.

Akoto, B.K.A. (1988). Influence of Fly Ash on the Strength Characterise of Lime Laterite Soil Mixture. Australian Road Research. pp. 224 – 231.

American Society for Testing Material. (1989). ASTM C 618 – 89: Specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete :ASTM.

Bell, F.G. (1976) .The influence of the mineral content of clay on their stabilization with cement. Association of Engineering Geologists. pp. 267 – 278.

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

Davidson, D.T., Pitre, G.L., Mateos, M. and Kalankamary, P.G. (1962) . Moisture – density, Moisture – strength and compaction characteristic of cement – treated soil mixture. Highway Research Board. pp. 42 – 63.

Digioa, A.M., Mcleam, R.J., Burn, D.D.L. and Miller, D.E. (1986). Fly ash design manual for road and site application. Interim Report CS – 4419 Research Project 2422 – 2. Electric Power Research Institute.

Felt, E.J. (1955) . Factors influencing physical properties of soil – cement mixture. Highway Research Board. pp. 138 – 163.

Griffith, F.J. and Joshi, R.C. (1989) .Change in pore size distribution due to consolidation of clay. Geotechnique. Vol. 39. No. 1. pp. 159 – 167.

Grimer, F.L. and Krawezyk, J. (1963). Relative Between Strength and Age for Soil – Cement with Particular reference to the Prediction of Later Strength from earlier Strength.

Magazine Concrete Research. pp. 21 – 30.

Herzog, A. and Mitchell, J.K. (1963). Reaction accompanying stabilization of clay with cement. Highway Research Record. pp. 146 – 171.

Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S. (2003) .Assessment of strength development in cement – admixed high water content clay with Abrams's law as a basic. Geotechnique. Vol. 53. No. 4. pp. 439 – 444.

Horpibulsuk, S., Miura, N. and Bergado, D.T. (2004) . Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. (in press)

Metcalf, J.B. (1977) .Principle and application of cement and lime stabilization. Australian Road Research Board. 20 p.

Michell, J.K. and Jack, E.K. (1966) .The fabric of soil – cement and its formation. Proceeding 14 th National Conference on Clay and Clay Minerals. Vol 26. pp. 279 – 305.

Moh, Z.C. (1965). Reaction of soil minerals with cement and chemical. Highway Research Board. pp. 39 – 61.

Nagaraj, T.S., Vatasala, A., Srinivasa Murthy, B.R. (1990) .Discussion on " Change in pore size distribution due to consolidation of clay " by Griffiths, F.J. and Joshi, R.C. Geotechnique. 40. No. 2. pp. 303 – 305.

Pandian, N.S., Nagaraj, T.S. and Manoj, M. (1997). Re-examination of compaction characteristics of fine-grained soil. Geotechnique. Vol. 47. No. 2. pp. 363-366.

Parker, D.G. and Thornton, S.I. (1976). Permeability of Fly Ash and Fly Ash Stabilized Soil. Federal Highway Administration. Report No.FWHA / RD / M – 0356.

Portland Cement Association. (1959). Soil – Cement Laboratory Handbook. Illinois: Portland Cement Association.

Ruenmkrairergsa, T. (1982) . Principal of Soil Stabilization. Group Training in Road Construction. Bangkok. Thailand. pp. 17 – 26.

Terrel, R.L., Barenberg, E.J., Michell, J.M. and Thomson, M.R. (1979). Soil Stabilization in Pavement Structure a User 's Manual Mixture Design Consideration. Washington : Government Printing Office.

Washburn, E.W. (1921) .A note on a method of determining the distribution of pore size in a porous material. Proc. Nat. Acad. Sci. 7. pp. 115 – 116.

Wood, L. and Yoder, E.J. (1952) . Soil – cement and construction practices in Geotechnical Engineering. Highway Research Board.

ประวัตินักวิจัย

นายสุขสันต์ หอพิบูลสุข เกิดเมื่อวันที่ 28 พฤศจิกายน พ.ศ. 2518 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์ (เกียรตินิยม) สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2539 วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปฐพี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ในปี พ.ศ. 2541 และวิศวกรรมศาสตร์ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเทคนิคธรณี จากมหาวิทยาลัย Saga ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2544

นายสุขสันต์ หอพิบูลสุข ได้เริ่มปฏิบัติงานในตำแหน่งอาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2545 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผลงานวิจัยที่ดำเนินการอยู่ ได้แก่ การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ลักษณะทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพ และการศึกษาหาแนวทางแก้ไขการวิบัติของอาคารด้วยการเสริมฐานราก ปัจจุบันมีผลงานวิจัยตีพิมพ์ในระดับนานาชาติและระดับประเทศกว่า 40 เรื่อง และมีส่วนร่วมในโครงการก่อสร้างและในงานออกแบบหลายโครงการ