



รายงานการวิจัย

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์บดอัดสำหรับงานถนน

(Factors Influencing Strength Development of Cement Stabilized Soils for Road Construction)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2547

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2548



รายงานการวิจัย

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์บดอัดสำหรับงานถนน

(Factors Influencing Strength Development of Cement Stabilized Soils for Road Construction)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2547

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2548

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะสำเร็จล่วงมิได้ หากปราศจากการช่วยเหลือจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง การกล่าวขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้ครบทุกท่านเป็นอาจเป็นไปมิได้ ผู้เขียนต้องขอกล่าวขอขมา มา ณ ที่นี้ด้วย หากมิได้กล่าวนามของท่าน

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ปีงบประมาณ 2547

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ. ดร.สุเทพ อุสาหะ ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งอำนวยความสะดวกกับการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการทุกด้าน งานวิจัยนี้จะไม่สามารถเสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ได้ ถ้าปราศจากความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการอย่างแข็งขัน การวิเคราะห์ผลทดสอบ และคำปรึกษาในด้านการนำเสนอผลงาน จากอาจารย์รุ่งลาวัลย์ ราชัน คุณวรรัชย์ เกษกัน และคุณวันชัย ศิริเลิศวัฒนา

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อำนาจ อภิชาติवलลภ เป็นอย่างสูง ซึ่งเป็นผู้ตรวจทานบทความชิ้นหนึ่งที่ได้นำเสนอในวารสารระดับนานาชาติ

สุขสันต์ หอพิบูลสุข
หัวหน้าโครงการวิจัย
กุมภาพันธ์ 2548

บทคัดย่อ

การซ่อมแซมถนนที่ชำรุดเนื่องจากการใช้งานมาเป็นเวลานานโดยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างมากในประเทศไทยขณะนี้ แต่การศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและในสนามยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จะนำเสนอลักษณะทางวิศวกรรมและลักษณะกราฟการบดอัดของดินบดอัดและดินผสมซีเมนต์บดอัด และท้ายสุดจะสร้างแบบจำลองทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและในสนาม

จากการศึกษาลักษณะกราฟการบดอัดของดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ พบว่า เส้นกราฟการบดอัดทางด้านแก๊งของดินบดอัดชนิดหนึ่งๆ ถูกควบคุมโดยตัวแปร $m/S^{0.5}$ ถึงแม้ว่าดินบดอัดจะมีปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำแก๊งต่างกัน แต่ตัวแปร $m/S^{0.5}$ จะมีค่าคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด ตัวแปร $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_u$ ถูกสร้างขึ้นเพื่อจัดอิทธิพลของชนิดของดิน โดยอาศัยตัวแปรดังกล่าว ผู้วิจัยได้นำเสนอแบบจำลองจากการสังเกต ซึ่งนอกจากจะสามารถใช้สร้างกราฟการบดอัดได้กับดินทุกชนิดและทุกพลังงานการบดอัดแล้ว ยังสามารถประมาณค่าพลังงานการบดอัดที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแก๊งสูงสุดที่ต้องการ อีกทั้งยังสามารถใช้ตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้อีกด้วย

ผลทดสอบการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแก๊งและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์มีลักษณะที่เหมือนกันโดยไม่แปรผันตามปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้นที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดคือปริมาณความชื้นเหมาะสมก่อนผสมซีเมนต์ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นมีลักษณะสมมาตรในช่วงปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 80 ถึง 120 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม และที่อายุบ่มหนึ่งๆ กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดแปรผันตามอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ พลังงานการบดอัดมิได้มีอิทธิพลโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด เพียงแต่ช่วยลดปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากนี้ ยังพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแปรผันตามอายุบ่มเพียงอย่างเดียว โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ จากความรู้ทั้งหมดนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอแบบจำลองทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด ซึ่งสามารถทำนายกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ พลังงานการบดอัด และอายุบ่มใดๆ ได้ เพียงมีผลทดสอบกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่อายุบ่มและปริมาณความชื้นที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมเพียงค่าเดียว จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ร่วมกับผลทดสอบในสนาม ผู้วิจัยได้นำเสนอขั้นตอนการทำงานการปรับปรุงถนนด้วยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ โดยพิจารณาอิทธิพลของวิธีการบดอัดและสภาพการบ่มต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในสนาม

ABSTRACT

In Thailand, the pavement recycling technique is a well-known method for repairing damaged roads due to overloaded for a long time. However, studies on the laboratory and field strength development in cement stabilized soils are still limited. This research thus presents engineering behavior and characteristics of compaction curves of compacted soil and cement stabilized soil (compacted cement-soil). Finally, a model for predicting laboratory and field strength development in cement stabilized soils would be introduced.

From the study on characteristics of compaction curves of fine and coarse grained soils, it is found that for a given soil compacted on the dry side of optimum, the $m/S^{0.5}$ is practically constant for a particular compaction energy, even with the change in moisture content and dry unit weight. The parameter, $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_o$, is introduced to take the effect of soil type into account. Using this parameter, the phenomenological model is developed. It is useful not only for predicting compaction curves wherein the compaction energy varies over a wide range, but also for justifying the laboratory test results.

It is revealed from laboratory compaction and unconfined compression tests of cement stabilized soils, that dry unit weight and water content relationship is similar and irrespective of cement content. Water content corresponding to the maximum compressive strength is the optimum water content of the compacted soil. In the range of water content between 80 to 120 percentages of optimum water content, the relationship between compressive strength and water content of the cement stabilized soil is symmetry. At wet side of optimum and a particular curing time, the strength of cement stabilized soil is dependent upon the soil-water/cement ratio, w/C . The compaction energy does not directly impart the strength, but its role is to reduce the optimum water content. The rate of strength development depends on only curing time, regardless of soil type, water content, cement content and compaction energy. Based on the knowledge gained from this study, the model for predicting strength of cement stabilized soil is proposed. It can assess the strength of cement stabilized soil in which the water content, cement content and compaction energy vary over a wide range using a trial test. From this proposed model and the field test, a suggested procedure for repairing the damaged road by the pavement recycling technique is introduced taking the effect of the effect of compaction method and curing condition into account.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทัศนัวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงดินด้วยสารผสมเพิ่ม.....	5
2.2 ประเภทของดินซีเมนต์.....	6
2.3 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement).....	6
2.3.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์.....	6
2.3.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7
2.4 ปฏิกริยาทางเคมีของดินซีเมนต์.....	8
2.5 โครงสร้างดินซีเมนต์	9
2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังของดินซีเมนต์.....	10
2.7 ความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดดินซีเมนต์.....	13
2.8 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์.....	13
2.9 บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน.....	16
2.9.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน.....	16
2.9.2 การอัดตัวคายน้ำ.....	17
2.9.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน.....	17
2.10 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์.....	19
บทที่ 3 กำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์	
3.1 บทนำ.....	22

3.2 ดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....	23
3.3 วิธีการทดสอบ.....	23
3.4 ผลทดสอบ.....	24
3.5 การวิเคราะห์ผลทดสอบการบดอัด.....	28
3.6 การทำนายกราฟการบดอัด.....	33

บทที่ 4 กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด

4.1 บทนำ.....	36
4.2 ดินตัวอย่าง.....	36
4.3 วิธีการทดสอบ.....	37
4.4 ผลทดสอบ.....	39
4.5 ลักษณะทางวัสดุของดินเม็ดหยาบและดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด.....	43
4.6 ทฤษฎีกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด.....	47
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะบ่ม.....	52
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม.....	57
4.9 การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดใน สนาม.....	60
4.10 ข้อเสนอแนะในการทำงานทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม.....	65

บทที่ 5 บทสรุป

เอกสารอ้างอิง.....	70
ประวัตินักวิจัย.....	75

สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 ออกไชต์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
4.1 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินลูกรัง (1) และหินคลุก...	38
4.2 การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด (LL = 36%, PL = 16%) (ธีรชาติและสมบัติกระแสน, 2544).....	59
4.3 การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด ที่มีอัตราส่วนดินลูกรัง (2) : หินคลุก 80 : 20.....	60

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 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของทรายที่มีขนาดคละสมำเสมอ และดินตะกอนปนดินเหนียว (Grimer และ Krawczyk ,1963).....	11
2.6 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Loamy Sand (Felt, 1965).....	13
2.7 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Medium Clay (Felt, 1965).....	14
2.8 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay (Felt, 1965).....	15
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล (Horpibulsuk et al., 2004).....	16
2.11 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพไร้พันธะเชื่อมประสาน (สุขสันต์ และ รุ่งลาวัลย์, 2546).....	17
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันต์ และ รุ่งลาวัลย์, 2546).....	17
2.13 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003).....	20
3.1 การกระจายขนาดเม็ดดินของดินตัวอย่างทดสอบ.....	24
3.2 ผลทดสอบการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนที่พลังงานการบดอัดต่างๆ	25
3.3 ผลทดสอบการบดอัดของดินลูกรังที่พลังงานการบดอัดต่างๆ	25
3.4 ผลทดสอบการบดอัดของหินคลุกที่พลังงานการบดอัดต่างๆ	26
3.5 ผลทดสอบการบดอัดของดินเม็ดละเอียดต่างๆ ภายใต้พลังงานการบดอัดที่ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	27

3.6 รูปแบบจำลองเส้นกราฟการบดอัดรูปตัววีกลับหัว.....	27
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดของดินเหนียวปนดิน ตะกอนและเส้น Normalization.....	28
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดของหินคลุกและเส้น Normalization	29
3.9 ตัวแปร $m/S^{0.5}$ และพลังงานของดินทั้งสามชนิดและอัตราส่วนของ $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_{st}$ ที่ พลังงานต่างๆ.....	30
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง OMC และพลังงานการบดอัด ร่วมกับ Normalization.....	32
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง γ_{dmax} พลังงานการบดอัด ร่วมกับ Normalization.....	33
3.12 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินลูกรัง.....	34
3.13 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน	35
4.1 การกระจายตัวของดินลูกรังและหินคลุก.....	37
4.2 กราฟการบดอัดของดินลูกรัง (1).....	38
4.3 กราฟการบดอัดของหินคลุก.....	39
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณชื้น-ความหนาแน่นแห้ง-กำลังอัดแกนเดียวของ ดินลูกรัง ที่อายุบ่ม 14 วัน ภายใต้พลังงานการบดอัดครั้งหนึ่งของพลังงานการบดอัดแบบ มาตรฐาน.....	40
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณชื้น-ความหนาแน่นแห้ง-กำลังอัดแกนเดียวของหินคลุก ที่ อายุบ่ม 28 วัน ภายใต้พลังงานการบดอัดครั้งหนึ่งของพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่า มาตรฐาน.....	41
4.6 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด ที่อายุบ่มต่างๆ ภายใต้ พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน.....	42
4.7 อิทธิพลของพลังงานการบดอัดต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	42
4.8 อิทธิพลของชนิดดินต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	43
4.9 ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังบดอัด ที่บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูล ต่อลูกบาศก์เมตร.....	44
4.10 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของดินลูกรังบดอัดและดินลูกรังซีเมนต์บดอัด (อายุบ่ม 7 วัน) ภายใต้พลังงานการบดอัดที่ 293.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	45
4.11 (a) แบบจำลองโครงสร้างดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด (b) แรงที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ด ดินหลังผสมซีเมนต์.....	46
4.12 โชนการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์บดอัด.....	47

4.13 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของหินคลุกผสมซีเมนต์บดอัด ที่ค่า w/C ต่างกันสามค่า คือ 0.5, 2.0 และ 4.0 ภายใต้พลังงานการบดอัดที่ 1346.6 กิโลปาสกาล	48
4.14 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของหินคลุกผสมซีเมนต์บดอัด ที่ค่า w/C เท่ากัน แต่ พลังงานการบดอัดและปริมาณความชื้นต่างกัน ที่อายุบ่ม 14 วัน.....	49
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ w/C ของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด ที่อายุบ่ม 14 และ 60 วัน	50
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินลูกรังซีเมนต์บดอัด.....	51
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของหินคลุกซีเมนต์บดอัด.....	52
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรัง (1) ซีเมนต์บดอัด ด้านเปียก ที่พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	53
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังซีเมนต์บดอัดด้าน เปียก ที่พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	53
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังซีเมนต์บดอัดที่พลังงาน การบดอัดต่างๆ และการ Normalization.....	55
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของหินคลุกซีเมนต์บดอัดที่พลังงาน การบดอัดต่างๆ และการ Normalization.....	56
4.22 Normalized strength development ของดินลูกรังและหินคลุกซีเมนต์บดอัด.....	57
4.23 แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด.....	58
4.24 หน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์บดอัดในสนาม	61
4.25 อัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งที่สถานีต่างๆ	62
4.26 กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ได้จากการผสมในสนามและทำการบดอัดใน ห้องปฏิบัติการและโดยรถบดอัดที่อายุบ่ม 7 วัน.....	63
4.27 ผลเปรียบเทียบกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ได้จากการผสมในสนามและบดอัดด้วย รถบดอัดกับกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ได้จากการผสมในสนามและบดอัดใน ห้องปฏิบัติการ ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	64
4.28 การทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดด้วยรถบดอัด	65
4.29 สรุปขั้นตอนการทำงานการปรับปรุงถนนด้วยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่..	67

บทที่ 1

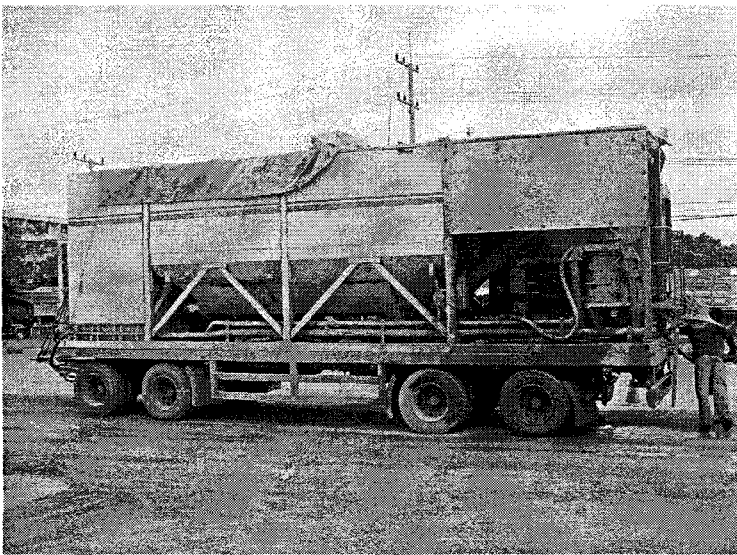
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

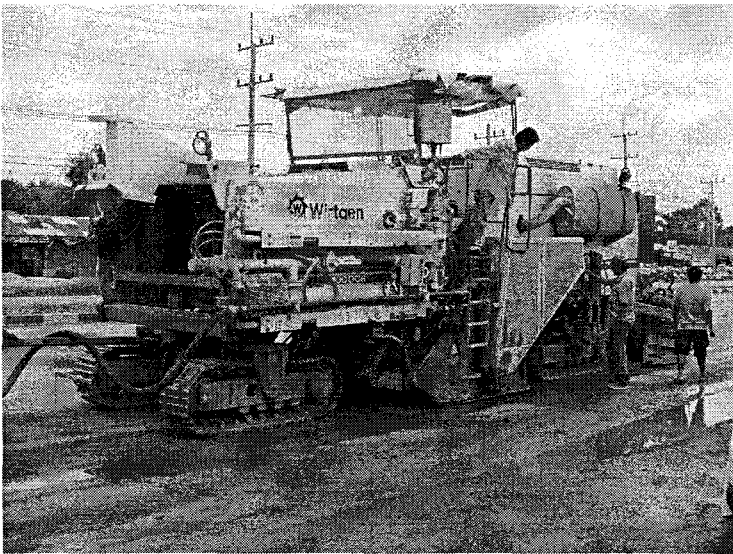
งานก่อสร้างถนนตามมาตรฐานกรมทางหลวงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมที่ดีและเหมาะสมสำหรับการบดอัดเพื่อทำชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทาง ในบางพื้นที่ที่จำเป็นต้องทำการก่อสร้าง แต่ขาดแคลนแหล่งวัสดุ หรือห่างไกลจากแหล่งวัสดุที่มีคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน จะเป็นการสิ้นเปลืองอย่างมากสำหรับผู้รับจ้างที่จะต้องหาแหล่งดินที่เหมาะสม และทำการขนส่งมายังพื้นที่ก่อสร้าง ทางเลือกอีกทางที่เหมาะสมคือการผสมดินที่สามารถหาได้ในพื้นที่ก่อสร้างนั้นกับซีเมนต์และทำการบดอัด วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ประหยัดและสามารถกำหนดและควบคุมคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินซีเมนต์ให้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง โดยกำลังของดินซีเมนต์นี้จะมีกำลังเพิ่มขึ้นกับเวลา ปัจจุบันจึงได้มีการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์เพื่อรองรับปัญหาดังกล่าว นอกจากนี้ กรมทางหลวงยังได้คิดค้นและใช้วิธีการหนึ่งในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของถนนที่ชำรุดและไม่สามารถใช้งานได้ โดยการนำวัสดุชั้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนำมาใช้ใหม่ เพื่อให้มีคุณภาพตามรูปแบบและข้อกำหนด ในการนี้อาจจะเพิ่มเติมวัสดุผสมเพื่อปรับปรุงขนาดผลและเพิ่มปริมาณ เช่นหิน ทราย soil aggregate และอื่นๆ และวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แอสฟัลต์ เป็นต้น การซ่อมแซมถนนของกรมทางหลวงนิยมใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม วิธีการนี้เรียกว่า “การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement recycling)” รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถอ้างอิงได้จากมาตรฐานที่ ทล.ม 213/2543 ข้อดีของวิธีการนี้คือประหยัดเมื่อเทียบกับการปรับปรุงและซ่อมแซมถนนโดยวิธีการอื่น และซีเมนต์ยังเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศ ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์ นอกจากนี้การซ่อมแซมสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว รถเครื่องจักรที่ใช้ในงานซ่อมแซมประกอบด้วยส่วนประกอบสองส่วน ได้แก่ (1) ห้องควบคุม ซึ่งทำการควบคุมปริมาณซีเมนต์ ปริมาณน้ำ และความเร็วรถ ดังรูปที่ 1ก (2) ตัวกลัดชั้นทางเดิม ขณะที่รถเครื่องจักรเคลื่อนที่ไป ตัวกลัดนี้จะทำการกลัดดินจากชั้นทางเดิมและในขณะเดียวกันก็ผสมดินนี้กับซีเมนต์และน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 1ข ต่อจากนั้นดินซีเมนต์ก็จะถูกบดอัดด้วยรถบดอัดให้ได้ความแน่นตามมาตรฐาน

ประวัติความเป็นมาของการใช้ดินซีเมนต์ในงานก่อสร้างอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้ Davidson (1961) กล่าวถึงเรื่องวิวัฒนาการของดินซีเมนต์ที่ได้กำเนิดขึ้นในโลกไว้ว่า กิจการรับเหมาก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับการสร้างถนนในเมือง Sarasota รัฐ Florida ได้ก่อตั้งในปี 1915 น่าจะเป็นการเริ่มต้นครั้งแรกในโลกเกี่ยวกับถนนดินซีเมนต์ จากหลักฐานพบว่าถนน Oak ได้ถูกสร้างขึ้นจากการขุดเอาดิน Shell จากอ่าวมาผสมกับทรายและซีเมนต์ ต่อจากนั้นก็มีส่วนผสมที่ได้ไถเกลี่ยและบดอัดด้วยรถบดไอน้ำ

ที่มีน้ำหนัก 10 ตัน ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีก่อสร้างที่ไม่เป็นไปตามแผนที่ได้วางเอาไว้เนื่องจากการเสียหายของเครื่องผสมคอนกรีต ในช่วงศตวรรษที่ 1920 State Highway Department ต่างๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกา อันประกอบด้วยรัฐ Iowa, South Dakota, Ohio, California และ Texas ได้มีการทดสอบดินผสมซีเมนต์ทำถนน แต่เนื่องจากขณะนั้นยังขาดความรู้และความเข้าใจทางวิทยาศาสตร์ทำให้ไม่สามารถทำนายและอธิบายผลได้ ยังได้อ้างรายงานของ Mills (1935 และ 1936) ว่าปี ค.ศ. 1932 South California State Department ได้ทำการศึกษาส่วนผสมของดินและซีเมนต์ ภายใต้การดูแลของ ดร. C.H. Moorefield หลายรูปแบบการทดลอง ซึ่งได้รายงานผลการทดสอบว่า ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุที่สามารถผสมเข้ากันได้และนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางของถนนที่มีราคาถูกลงได้



ก) ห้องควบคุม



ข) ตัวกลัดชั้นทางเดิม

รูปที่ 1 ก) รถเครื่องจักรสำหรับงานการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement recycling)

Terrel et al. (1979) และ Davidson (1961) ได้บันทึกตรงกันว่า เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองของ South Carolina State Highway ได้เกิดความร่วมมือกันระหว่าง Bureau of Public Roads และ PCA ก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ยาว 1.5 ไมล์ขึ้นในเมือง Johnsoville ขึ้นในปี ค.ศ. 1935 ถนนสายนี้ต่อมากลายเป็นที่รู้จักว่าเป็นโครงการแรกของวิศวกรรมถนนดินซีเมนต์ Davidson (1961) ได้รายงานความสำเร็จของ South California State Highway Department และการขยายเขตของการทดลองขึ้นอีกในหลายรัฐของประเทศสหรัฐอเมริกา ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ถนนดินซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้กับการก่อสร้างสนามบินอย่างมาก ระหว่างปี 1941-1944 พบว่ามีปริมาณการใช้มากถึง 22 ล้านตารางหลา ในประเทศไทย การประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์เพื่อการสร้างถนนได้ถูกบันทึกโดย Marshall (1965) นอกเหนือจากการก่อสร้างถนนแล้ว ยังมีการใช้ดินซีเมนต์เป็นวัสดุรองพื้นทางของถนนคอนกรีต ไหล่ทางของถนน ที่จอดรถ คลังเก็บสินค้า วัสดุรองพื้นอ่างเก็บน้ำของคูและคลอง

คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม (Basic and engineering properties) ของดินซีเมนต์ได้ถูกศึกษาอย่างจริงจังโดย Terashi et al. (1979) และต่อมาก็ได้มีการศึกษาทางด้านนี้มากขึ้นเรื่อยๆ อาทิเช่น Kawasaki et al. (1981), Kamon and Bergado (1992), Kamaluddin and Balasubramaniam (1995) และ Nontananandh and Yupakorn (2002) งานวิจัยเหล่านี้สรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์คือปริมาณน้ำ และปริมาณซีเมนต์ งานวิจัยล่าสุดอันหนึ่งที่ถูกเสนอโดย Horpibulsuk et al. (2005) และ Miura et al. (2001) แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทั้งสองนี้สามารถรวมไว้ในตัวแปรตัวเดียวได้ ตัวแปรตัวนั้นเรียกว่า Clay-water/cement ratio (w/C) และถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนักแห้งแห้ง นอกจากนี้ Horpibulsuk et al. (2003) ยังได้สร้างสมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น และระยะบ่มต่างๆ โดยอาศัยผลทดสอบเพียงผลการทดสอบเดียว แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาของนักวิจัยเหล่านี้ก็ยังไม่สมบูรณ์ เนื่องจากว่าไม่มีการพิจารณาผลของพลังงานการบดอัดต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม ผลของพลังงานการบดอัดนี้ได้ถูกศึกษาอย่างละเอียดโดยธีรชาติและสมบัติกระแสด (2544) จากการศึกษาสรุปได้ว่าพลังงานการบดอัดมีผลอย่างมากต่อกำลังของดินซีเมนต์ แต่การศึกษานี้ไม่ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมที่ปริมาณความชื้นต่างๆ นอกเหนือจากที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) และไม่สามารถทำนายกำลังกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ ระยะบ่ม และพลังงานการบดอัดได้ การศึกษาดังกล่าวทำการศึกษาเพียงแค่ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) เท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติบางครั้งอาจมีข้อกำหนดบางประการที่ไม่สามารถทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาคูสมบัติเชิงวิศวกรรมที่ปริมาณความชื้นต่างๆ นอกเหนือจากปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) เพื่อให้วิศวกรผู้ออกแบบ/วิศวกรโครงการ และผู้ที่เกี่ยวข้องสามารถเลือกปริมาณความชื้นควบคู่กับพลังงานการบดอัดเพื่อให้ได้คุณสมบัติเชิงวิศวกรรม

เป็นไปตามมาตรฐานและข้อกำหนด งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่ออธิบายอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อ กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด และท้ายสุดจะสร้างแบบจำลองทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด ในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ จะทำการศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในสนาม และนำผลทดสอบที่ได้ร่วมกับแบบจำลองทำนายกำลัง เพื่อนำเสนอขั้นตอนการทำงานและ ตรวจสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในสนาม

1.2 วัตถุประสงค์

1. สร้างแบบจำลองทำนายกราฟการบดอัดของดิน
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของความละเอียด สภาพความเป็นพลาสติก ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ พลังงานการบดอัด และอายุบ่ม ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์
3. เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และพลังงานการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ผสมซีเมนต์
4. เพื่อให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถตรวจสอบความถูกต้องของผลทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ
5. เพื่อนำเสนอขั้นตอนการทำงานปรับปรุงถนนที่ชำรุดด้วยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีแนวทางหลักสี่อย่างคือ (1) การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกราฟการบดอัด และนำเสนอแบบจำลองทำนายกราฟการบดอัด (2) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังของดินซีเมนต์บดอัด และสร้างทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการหาลำดับของดินซีเมนต์บดอัด (3) การประยุกต์ทฤษฎีพื้นฐานนี้มาสร้างแบบจำลองทำนายกำลังของดินบดอัดผสมซีเมนต์ และ (4) การประยุกต์ใช้แบบจำลองทำนายกำลังอัดในการประมาณกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในสนาม พร้อมทั้งนำเสนอขั้นตอนการทำงานอย่างเป็นลำดับ

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงดินด้วยสารผสมเพิ่ม

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

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

Davidson (1961) กล่าวถึงวิวัฒนาการของดินซีเมนต์ที่ได้กำเนิดขึ้นในโลกว่า กิจการรับเหมาก่อสร้างที่เกี่ยวกับถนนในเมือง Sarasota รัฐ Florida ได้ก่อสร้างในปี 1915 น่าจะเป็นการเริ่มต้นครั้งแรกในโลกเกี่ยวกับถนนซีเมนต์ จากหลักฐานพบว่าถนน Oak ได้ถูกสร้างขึ้นจากการขุดเอาดิน Shell จากอ่าวมาผสมกับทราย และซีเมนต์ จากนั้นก็นำส่วนผสมที่ได้ไปเกลี่ย 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 Bureau of Public Road และ Portland Cement Association (PCA) ได้ร่วมมือกันสร้างถนนดินซีเมนต์ยาว 1.5 ไมล์ ใกล้เมือง Johnsonville ขึ้น ถนนสายนี้ต่อมา กลายเป็นที่รู้จักว่าเป็นโครงการแรกของวิศวกรรมถนนซีเมนต์

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

2.2 ประเภทของดินซีเมนต์

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

2.2.1 Soil-Cement เป็นการนำดินและซีเมนต์มาผสมกันแล้วบดอัดโดยวิธีทางกลศาสตร์ แล้วทำการบ่มให้แข็งตัว ซีเมนต์มีปริมาณสูงพอจนทำให้มีกำลังอัด หรือกำลังแบกทานตามที่กำหนด และมากพอที่จะทำให้ดินซีเมนต์กลายเป็นวัสดุก่อสร้างที่แข็งแรงทนทาน มีความชื้นเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีความหล่อลื่นเพียงพอในการบดอัดให้ได้ความแน่นสูงสุด

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

2.2.3 Cement Modified Silt-Clay Soil ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้น้อยมาก โดยมีจุดประสงค์ในการปรับปรุงคุณสมบัติการบวมตัวและหดตัวของดินที่อ่อนมาก หรือเป็นพื้นที่ที่ดินเปียกน้ำ

2.2.4 Cement - Treated Soil Slurries and Grouts เป็นการนำเอาดินและซีเมนต์ผสมน้ำให้มีสภาพเหลวพอประมาณ ดินซีเมนต์ประเภทนี้จะใช้ในการบำรุงรักษาดิน 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) หรือคิลแลง (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 ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0.5-0.6
<u>ออกไซด์รอง</u>	
MgO	0.1-5.5
Na ₂ + K ₂ O	0.5-1.3
TiO ₂	0.1-0.4
P ₂ O ₅	0.1-0.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล, 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) เป็น

ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไป ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขียว

2.3.2.2 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะ

สำหรับใช้ในงานที่เกิดความร้อนปานกลาง ทนซัลเฟตได้ปานกลาง ปัจจุบันไม่มีผลิตในประเทศไทย

2.3.2.3 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland

Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือถอดแบบในเวลาอันสั้น ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง ข้อควรระวัง คือ ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงมากในช่วงต้น อาจก่อให้เกิดการแตกร้าวได้

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

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

2.4 ปฏิกริยาทางเคมีของดินซีเมนต์

เมื่อผสมซีเมนต์เข้ากับเม็ดดินและน้ำ ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้ได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน และได้ Hydrate Lime ที่แยกตัวออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 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) ได้ศึกษาปฏิกิริยาของซีเมนต์กับดินเหนียวและพบว่า การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อให้เกิด CSH และ CAH เป็นกระบวนการแรก ส่วนกระบวนการที่สองเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา และอลูมินากับ Calcium Ion ที่เกิดจาก Hydrate Lime ทำให้ได้ CSH และ CAH เช่นกัน แต่ต้องใช้ระยะเวลาการเกิดนานกว่ากระบวนการแรก จึงทำให้กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น

Moh (1965) พบว่าปฏิกิริยาของดินซีเมนต์สามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



Michell and Jack (1966) อธิบายว่า เมื่อผสมซีเมนต์ลงไปดิน จะเกิดปฏิกิริยาและได้สารสุดท้ายเป็น CSH ปฏิกิริยาช่วงสั้นๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อผสมซีเมนต์ลงไปดิน ประกอบด้วย

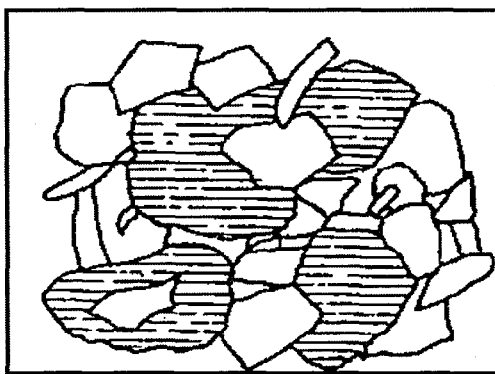
แทนที่หรือการแลกเปลี่ยน Valency โดยการดูดซับ Cation ของแคลเซียม และเมื่อดินจะดูดซับเอา $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เข้าไว้ เกิดสารประกอบที่ทำให้มีการเชื่อมยึดติดกันของเม็ดดิน

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

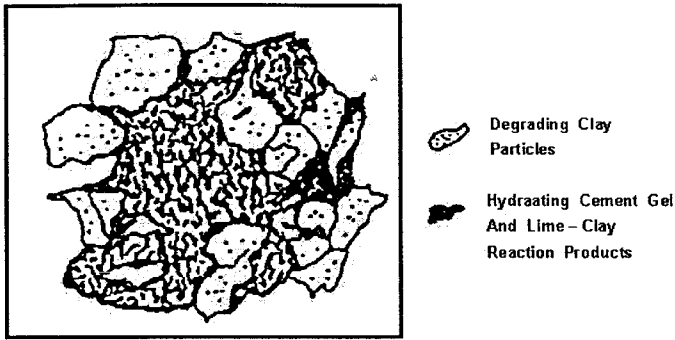
เกษม และพินิต (2536) ได้ศึกษาพบว่า ดินเหนียวปกติเป็นดินที่มีแร่ซิลิกาผสมอยู่สูง ซึ่งแร่เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ได้ดี ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งทำให้ดินเปลี่ยนคุณสมบัติไป สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่ม และการยุบตัวน้อยลง

2.5 โครงสร้างดินซีเมนต์

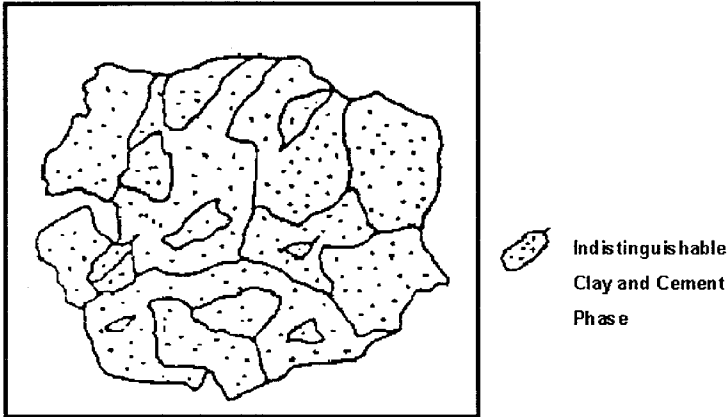
Michell and Jack (1966) ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินหลังจากผสมปูนซีเมนต์แล้ว โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบและโครงสร้างดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.1 ภายใต้การบดอัด ซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน อนุภาคของปูนซีเมนต์จะผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1(ก) ภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของซีเมนต์เริ่มทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาที่มีอยู่ในดิน เป็นผลให้เกิดวัสดุเชื่อมประสาน จากนั้นซีเมนต์เจลและวัสดุเชื่อมประสานจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดินดังรูปที่ 2.1(ข) ภายใต้การบ่มระยะยาว การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ มีผลทำให้ซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วดังรูปที่ 2.1(ค) เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น



(ก) AS - COMPACTED CONDITION



(ข) AFTER SHORT CURING PERIOD

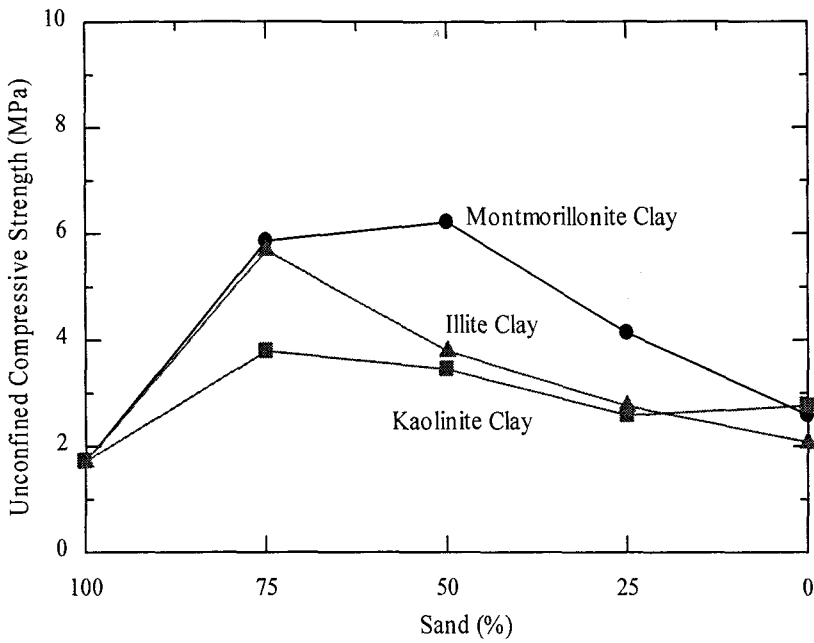


(ค) AFTER LONG CURING PERIOD

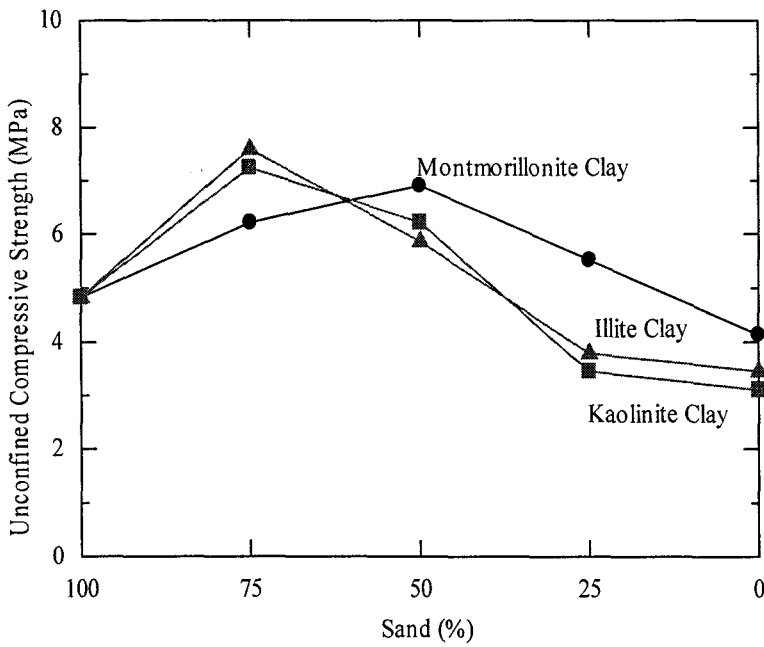
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Michell และ Jack ,1966)

2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังของดินซีเมนต์

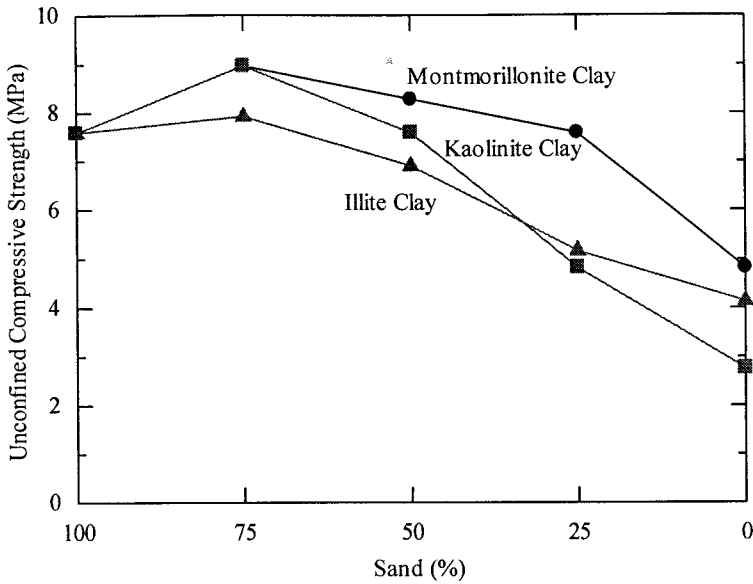
Davidson et al. (1962) ได้ทำการทดลองโดยใช้ทรายผสมดินเหนียวในอัตราส่วนทรายต่อดินเหนียว 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ดินเหนียวที่ใช้เป็นพวก Kaolinite, Illite และ Montmorillonite ดังแสดงผลในรูปที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณดินเหนียวที่มากเกินไป (เกินกว่าร้อยละ 25) เมื่อผสมกับดินจำพวกที่ไม่มีความเชื่อมแน่น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



รูปที่ 2.2 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8 (Davidson, 1962)

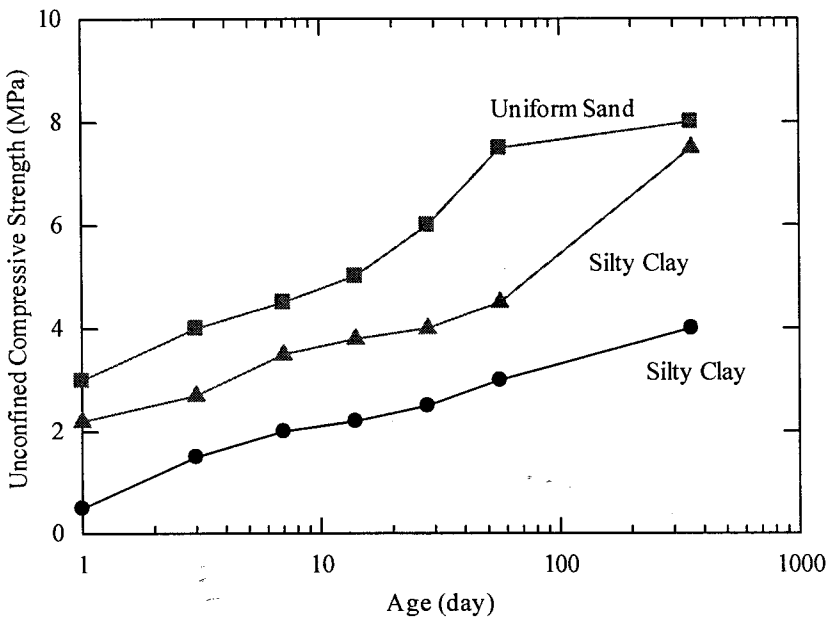


รูปที่ 2.3 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 12 (Davidson, 1962)



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 16 (Davidson, 1962)

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



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของทรายที่มีขนาดละเอียดสม่ำเสมอ และดินตะกอนปนดินเหนียว (Grimer และ Krawczyk, 1963)

Bell (1976) พบว่าแร่ดินเหนียว Montmorillonite เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาวจะทำให้ Aqueous Phase ลดลง ทำให้สาร Cementious ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะอยู่ในปูนขาวไม่เพียงพอสอดคล้อง การแก้ไขคือ การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ลงไปเพื่อเพิ่ม Free Lime ให้มากขึ้น โดยปกติ การเพิ่มซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 15 จะทำให้ดินจำพวก Montmorillonite มีคุณภาพดีสามารถนำมาใช้งานได้

2.7 ความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดดินซีเมนต์

การบดอัด คือ การเพิ่มความแน่นของดิน โดยการไล่อากาศออกจากมวลดินด้วยกระบวนการทางกล การบดอัดทำให้อากาศที่มีอยู่ในมวลดินถูกขับออกไป เมื่อดินที่มีขนาดเล็กจะทำหน้าที่สอดแทรกตามช่องว่างต่างๆ ของมวลดินในลักษณะเรียงตัวอัดแน่น ปริมาณความชื้นจะมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของมวลดิน ในช่วงแรกความหนาแน่นจะสูงขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ปริมาณความชื้นทำให้ความหนาแน่นมีค่าสูงสุด เรียกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) จากนั้นค่าความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะเต็มไปด้วยน้ำ เม็ดดินที่มีขนาดเล็กไม่สามารถเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้ ความหนาแน่นของมวลดินจึงลดลง

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

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

Ruenkraairergsa (1982) พบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมไม่เพียงแต่จะทำให้ดินซีเมนต์มีความหนาแน่นสูงสุดเท่านั้น แต่ยังทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไปอย่างสมบูรณ์อีกด้วย 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

$$q_u \text{ (MPa)} = 1.1654 C + 0.4832$$

สำหรับ Sandy Gravel

(2.4)

$$q_u \text{ (MPa)} = 0.3953 C + 1.0995$$

สำหรับ Silty Clay

(2.5)

$$q_u \text{ (MPa)} = 0.3785 C + 0.3598$$

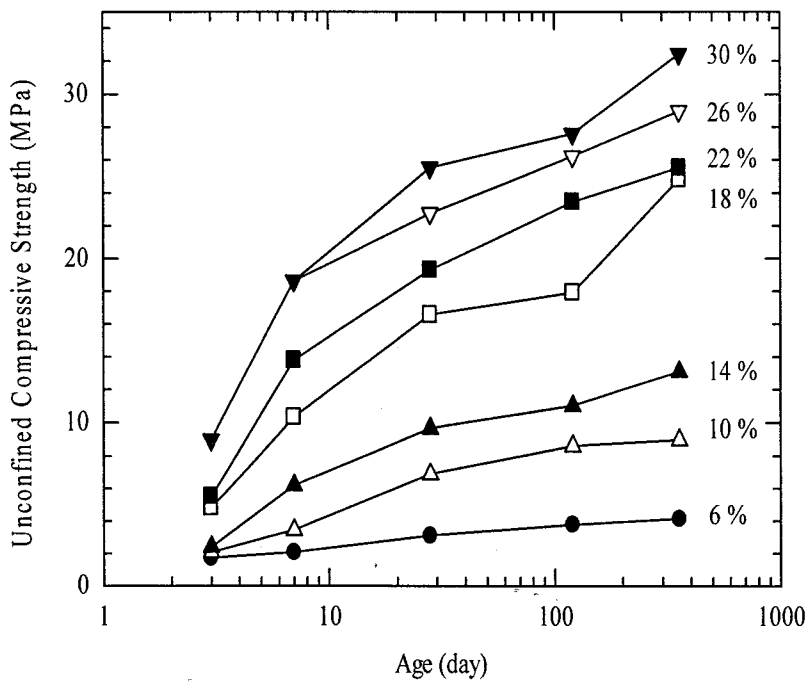
สำหรับ Sandy Clay

(2.6)

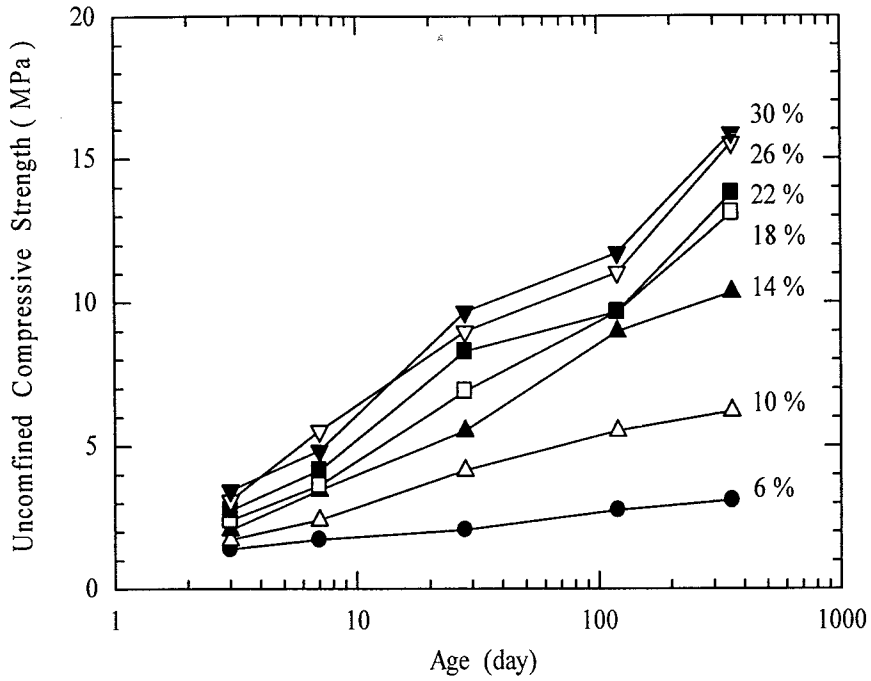
$$q_u \text{ (MPa)} = 0.042 C^2 - 0.031C - 0.027$$

สำหรับ Uniform Sand

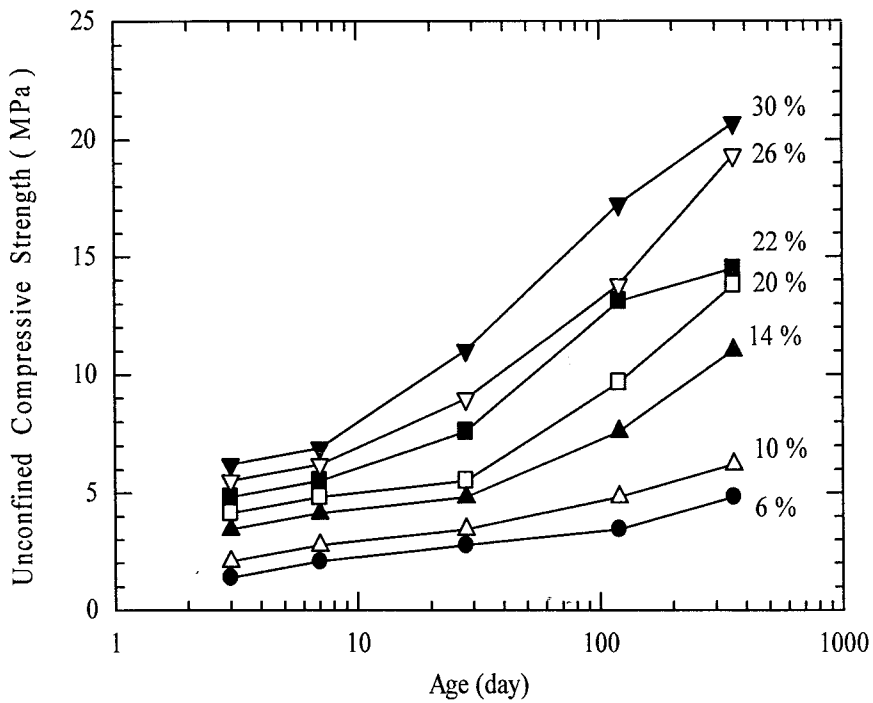
(2.7)



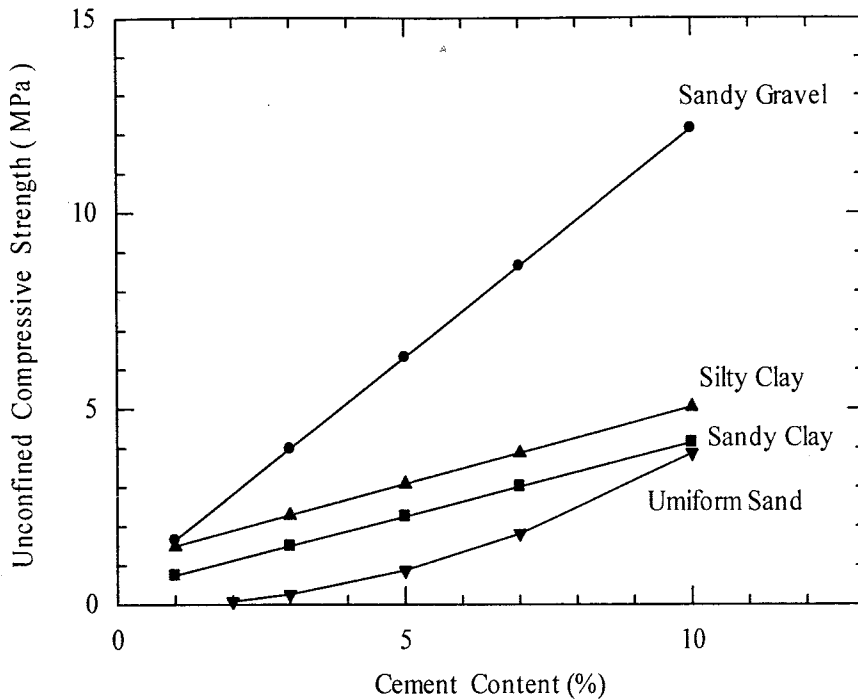
รูปที่ 2.6 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Loamy Sand (Felt, 1965)



รูปที่ 2.7 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Medium Clay
(Felt, 1965)



รูปที่ 2.8 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay
(Felt, 1965)



รูปที่ 2.9 ปริมาณซีเมนต์กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้ตามชนิดของดิน (Metcalf, 1977)

2.9 บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

2.9.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน

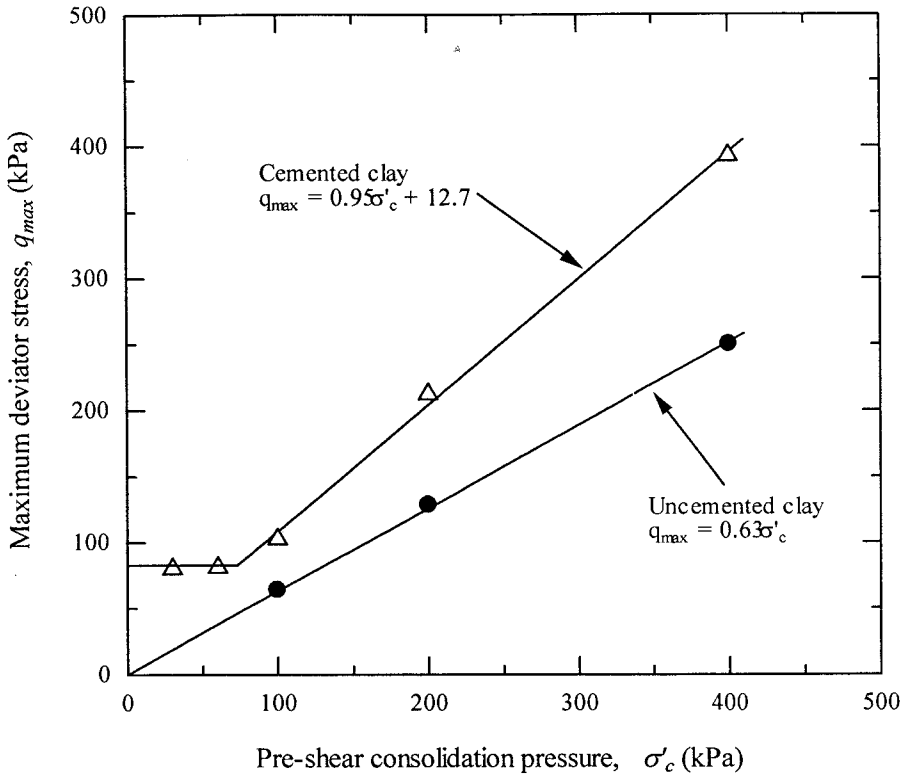
Horpibulsuk et al. (2004) กล่าวว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์ จะขึ้นอยู่กับ การจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสาน เมื่อเฉือนดินประเภทนี้ ภายใต้สภาวะที่ความเค้นประสิทธิผลน้อยกว่าความเค้นครากประสิทธิผล (σ'_v) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของเม็ดดินน้อยมาก ในช่วงนี้ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) แต่เมื่อความเค้นประสิทธิผลมากกว่าความเค้นครากประสิทธิผล ทั้งการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสานจะมีอิทธิพลต่อ กำลังต้านทานแรงเฉือน (รูปที่ 2.10) และเสนอความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

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

เมื่อ $q_{\max}$ คือ ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (ที่จุดวิบัติ)

q_{bond} คือ ความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน

q_{fabric} คือ ความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล

(Horpibulsuk et al., 2004)

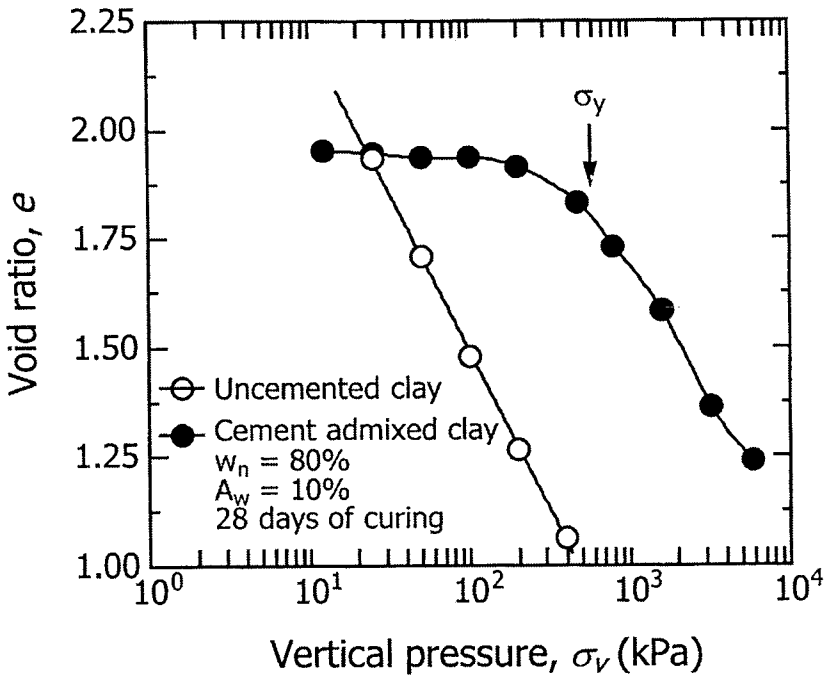
2.9.2 การอัดตัวคายน้ำ

สุขสันต์ และรุ่งลาวัลย์ (2546) แสดงผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพมหานคร ดักรูปที่ 2.11 จากรูปเห็นว่า การอัดตัวคายน้ำมีค่าน้อยมากในช่วงก่อนจุดคราก (Yield stress) เป็นเพราะอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน แต่การอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงหลังจุดคราก ซึ่งสภาวะหลังจุดครากนี้ ดัชนีการอัดตัว (Compression index) มีค่าค่อนข้างคงที่กับการเพิ่มขึ้นของความเค้นในแนวดิ่ง นอกจากนี้ ดินเหนียวซีเมนต์ (ดินพันธะเชื่อมประสาน) สามารถที่จะเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงสูงๆ เมื่อเทียบกับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน

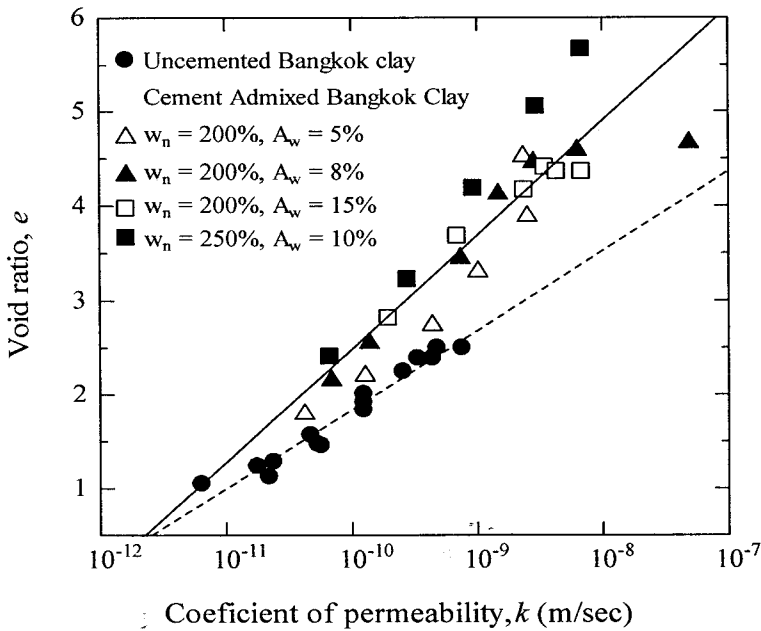
2.9.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

สุขสันต์ และรุ่งลาวัลย์ (2546) แสดงผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวซีเมนต์ ดักรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่า พันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวอย่างมาก ที่อัตราส่วนโพรงที่เท่ากัน ดินเหนียวซีเมนต์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่า ดังนั้น พันธะเชื่อมประสานนอกจากจะเสริมกำลังด้านทานแรง

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



รูปที่ 2.11 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพฯไร้พันธะเชื่อมประสาน (สุขสันต์ และรุ่งลาวัลย์, 2546)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันต์ และรุ่งลาวัลย์, 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

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

- 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 และสามารถแสดงในฟังก์ชันของลอการิทึม ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และในรูปสมการที่ (2.10) คือ

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

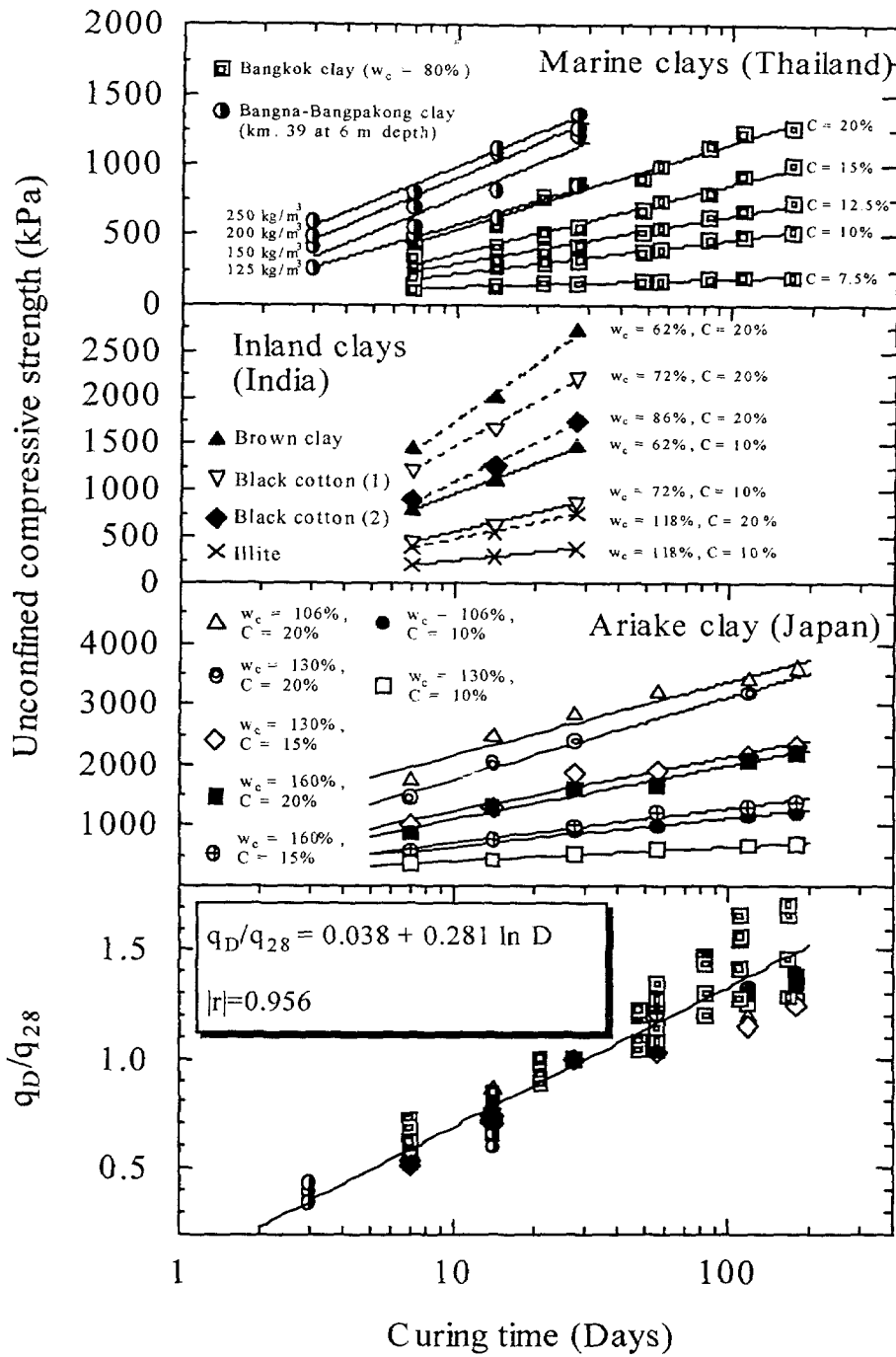
- เมื่อ q_D คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม D ใดๆ
 q_{28} คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 28 วัน
 D คือ ระยะการบ่ม

โดยการรวมสมการที่ 2.9 และ 2.10 จะได้สมการที่สามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และระยะบ่มใดๆ โดยอาศัยเพียงแค่ผลการทดสอบเดียวที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในสมการ

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

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

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



รูปที่ 2.13 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)

บทที่ 3

แบบจำลองทำนายกราฟการบดอัด

3.1 บทนำ

ในงานก่อสร้างถนน เชื้อดิน และโครงสร้างต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการงานทางด้านวิศวกรรม เราจำเป็นต้องทำการบดอัดดินเพื่อเพิ่มหน่วยน้ำหนักของดิน การบดอัดจะเป็นการเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน และส่งผลให้กำลังรับแรงแบกทานของดินเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การบดอัดยังช่วยลดการทรุดตัวของชั้นดิน และเพิ่มเสถียรภาพความลาดให้กับดินถม

นักวิจัยหลายท่าน อาทิเช่น Davidson and Gardiner (1962) และ Turnbull (1948) ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างจุดเหมาะสม)ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (และคุณสมบัติพื้นฐานของดิน เช่น ชนิดของดินและการจำแนกประเภทดิน (Soil Classification) ค่าพิทักต์เตอร์เบอร์ก (Atterberg's Limit) และการกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Distribution) Kofiatidis and Manikopolous (1982) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและขนาดของดินเม็ดหยาบ Ramiah et al. (1970) ได้สร้างสมการประมาณปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในพจน์ของขีดจำกัดเหลว Jeng and Strohm (1976) ได้สร้างสมการทำนายปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินบดอัดแบบวิธีมาตรฐานจากคุณสมบัติทางกายภาพของดิน Blotz et al. (1998) ทำการทดสอบดินเม็ดละเอียด 22 ชนิด และเสนอสมการคำนวณปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในพจน์ของขีดจำกัดเหลวและพลังงานการบดอัด Gurtug and Sridharan (2002) ได้สร้างสมการทำนายปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเม็ดละเอียดบดอัดแบบวิธีมาตรฐานจากค่าพิทักต์พลาสติก

จนถึงปัจจุบัน มีงานวิจัยเพียงไม่กี่ชิ้นที่ทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองทำนายเส้นกราฟการบดอัด เส้นกราฟการบดอัดเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง เนื่องจากมันสามารถบ่งบอกพฤติกรรมที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ลักษณะของกราฟจะเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการควบคุมปริมาณความชื้นสำหรับการบดอัดในสนาม แบบจำลองกราฟการบดอัดได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Joslin (1959) จากการทดสอบการบดอัดดิน 26 ชนิด ด้วยการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) และได้สร้างแบบจำลองที่เรียกว่ากราฟการบดอัดโอไฮโอ (Ohio Curves) กราฟดังกล่าวสามารถประมาณค่าเส้นกราฟการบดอัดได้อย่างรวดเร็วเพียงแต่ใช้ข้อมูลปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งเพียงจุดเดียวจากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน ต่อมา Nagaraj and Bindumadhava (1992) และ Pandian et al. (1997) ได้เสนอแบบจำลองจากการสังเกต (Phenomenological Model) สำหรับสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาณความชื้นของดินเม็ดละเอียดทางด้านแห้งและทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จากค่าขีดจำกัดเหลวและความถ่วงจำเพาะ แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้ใช้ได้เฉพาะกับการทดสอบ

การบดอัดแบบมาตรฐานเท่านั้น จุดสูงสุดของเส้นกราฟเกิดจากจุดตัดของเส้นกราฟทางด้านแห้งและทางด้านเปียก ทำให้กราฟมีลักษณะเป็นรูปตัววีกลับหัว (Inverted V Shape)

แม้ว่าจะมีแบบจำลองที่ใช้ในการสร้างกราฟการบดอัดแล้วก็ตาม แต่แบบจำลองเหล่านั้นใช้ได้กับเฉพาะการบดอัดแบบมาตรฐาน ในทางปฏิบัติ การสุ่มทดสอบ (Trail Test) เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งก่อนที่จะเริ่มต้นทำการบดอัดในสนาม ดังนั้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะนำเสนอแบบจำลองการบดอัดดิน ซึ่งสามารถประมาณกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดต่างๆ โดยอาศัยเพียงผลทดสอบการบดอัดพลังงานเดียว

3.2 ดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

การศึกษานี้ทำการทดสอบดินหลายชนิดซึ่งครอบคลุมขนาดของเม็ดดินทั้งดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด ได้แก่ หินคลุก ดินลูกรัง และดินเหนียวปนดินตะกอน โดยดินเหนียวปนดินตะกอนถูกเก็บที่ความลึก 3 เมตร จากระดับผิวดิน ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีปริมาณดินเหนียว 53 เปอร์เซ็นต์ ดินตะกอน 44 เปอร์เซ็นต์ และดินทรายเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ ดินเหนียวมีค่าความเป็นพลาสติกปานกลาง และมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ 18.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับ 51 และ 26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ กำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำมีค่าเท่ากับ 100 กิโลปาสคาล

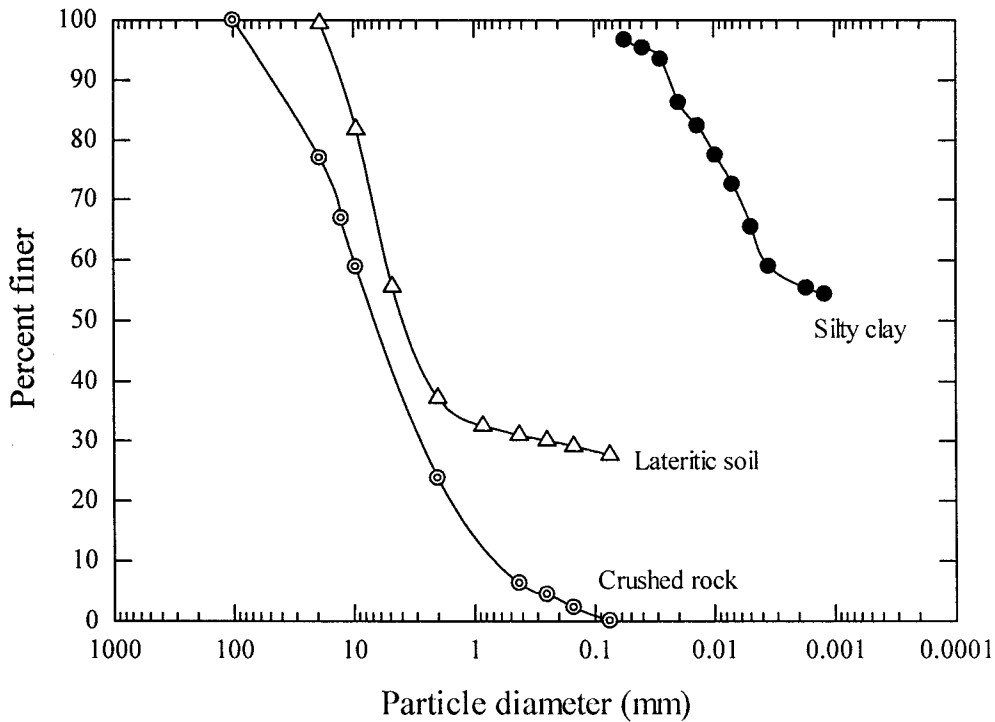
ตัวอย่างดินลูกรังและหินคลุกเก็บจากจังหวัดเพชรบูรณ์ ดินลูกรังประกอบด้วยดินเม็ดหยาบ 70 เปอร์เซ็นต์ ค่าขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับ 53 และ 37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จัดเป็นดินทรายที่มีดินเหนียวปน (SC) ตามระบบ USCS หินคลุกจำแนกตามระบบ USCS ได้เป็นกรวดที่มีขนาดคละกันดี (GW) การกระจายตัวของดินตัวอย่างทั้งสามแสดงดังรูปที่ 1

3.3 วิธีการทดสอบ

ตัวอย่างดินทั้งสามชนิดถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 19 มิลลิเมตร เพื่อขจัดส่วนผสมที่มีขนาดใหญ่ อันจะก่อให้เกิดความไม่เหมาะสมทางด้านขนาดของวัสดุทดสอบ (Size Effect) ดินตัวอย่างที่ผ่านการร่อนจะถูกนำมาผึ่งแห้งในอากาศอย่างน้อย 3 วัน จากนั้นหาปริมาณความชื้น และเตรียมทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ กันจำนวน 5 ถึง 6 จุดปริมาณความชื้น โดยในแต่ละจุดปริมาณความชื้น ทำการเติมน้ำใส่ตัวอย่างและห่อเก็บไว้ในถุงพลาสติก เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อให้ดินตัวอย่างมีปริมาณความชื้นทั่วถึงกัน จากนั้นวัดปริมาณความชื้นก่อนทำการบดอัด และทำการบดอัดตัวอย่างในแบบหล่อ (Mould) มาตรฐานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ตามมาตรฐาน ASTM D 698 ด้วยพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร เทียบเท่ากับพลังงานการบดอัดที่ครึ่งหนึ่งของพลังงานการบดอัดมาตรฐาน พลังงานการบดอัดมาตรฐาน

ของพลังงานการบดอัดที่สูงกว่ามาตรฐาน และพลังงานการบดอัดที่สูงกว่ามาตรฐาน ตามลำดับ ในแต่ละจุดปริมาณความชื้น ใช้จำนวนตัวอย่างอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบความสอดคล้อง (Consistency) ของผลทดสอบ

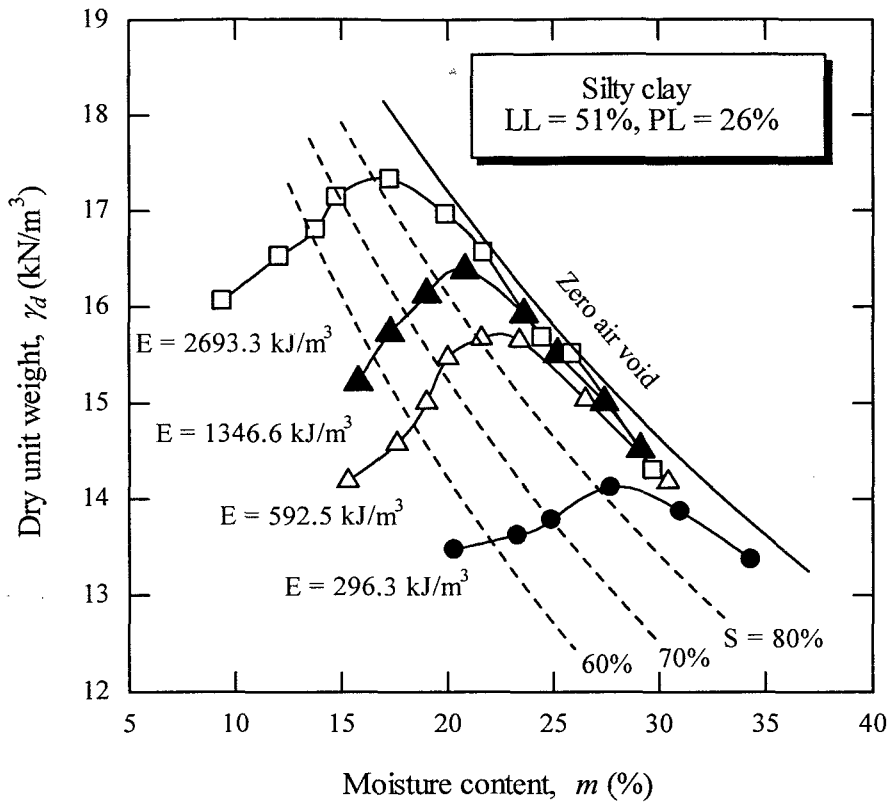
นอกจากการทดสอบดังอธิบายข้างต้นแล้ว ผลทดสอบดินลูกรัง (ธีรชาติและสมบัติกระแสน, 2544) และดินเหนียวปนดินตะกอน (Turnbull, 1950) ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของการทำนายกราฟการบดอัด



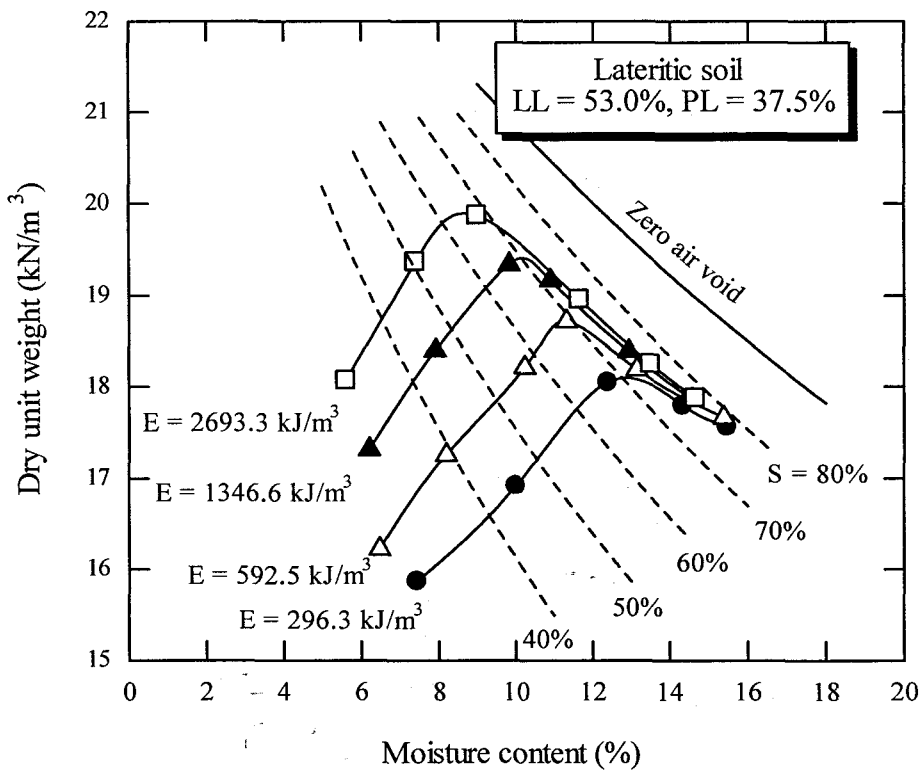
รูปที่ 3.1 การกระจายขนาดเม็ดดินของดินตัวอย่างทดสอบ

3.4 ผลการทดสอบ

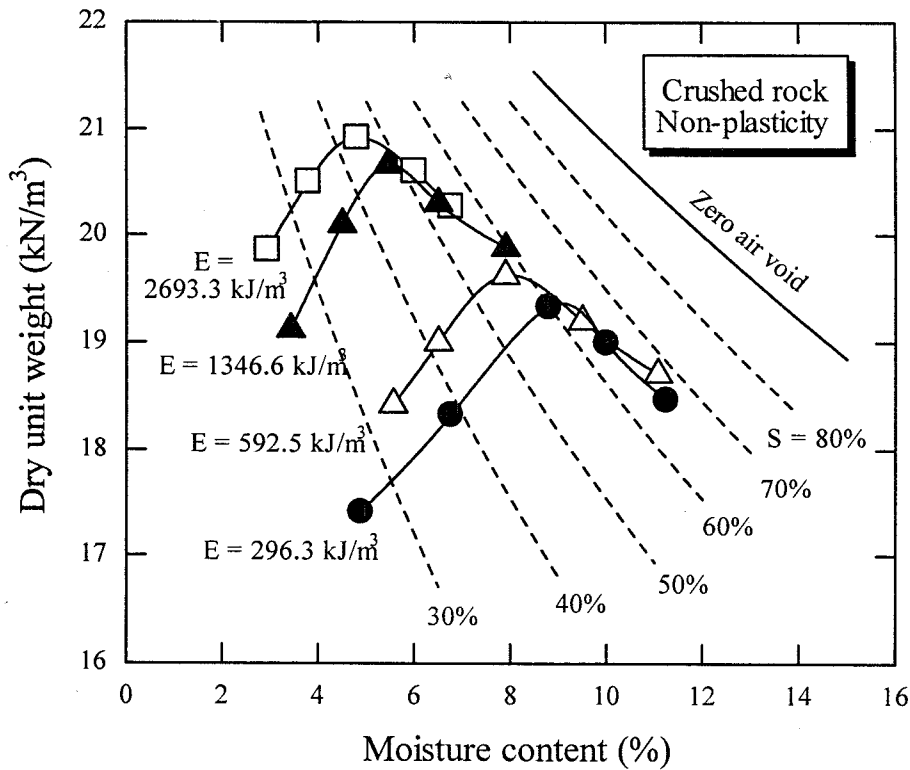
รูปที่ 3.2 ถึง 3.4 แสดงผลการทดสอบการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน ดินลูกรัง และหินคลุก ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ กัน ตามลำดับ จะเห็นว่าที่พลังงานการบดอัดเดียวกัน ดินเหนียวปนดินตะกอนจะให้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) สูงที่สุด และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) ต่ำที่สุด ในขณะที่ หินคลุกจะให้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) ต่ำที่สุด และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) สูงที่สุด สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณของดินเม็ดละเอียดในมวลดินเป็นปัจจัยที่ควบคุมลักษณะทางวิศวกรรมของดินบดอัด ดินที่มีปริมาณดินเม็ดละเอียดมากจะให้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมสูงกว่า และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดต่ำกว่า ทั้งนี้เพราะการบดอัดดินเม็ดละเอียดถูกควบคุมด้วยค่าขีดจำกัดเหลว และพิกัดพลาสติก (Gurtug and Sridharan, 2002 และ Pandian et al., 1997)



รูปที่ 3.2 ผลทดสอบการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนที่พลังงานการบดอัดต่างๆ



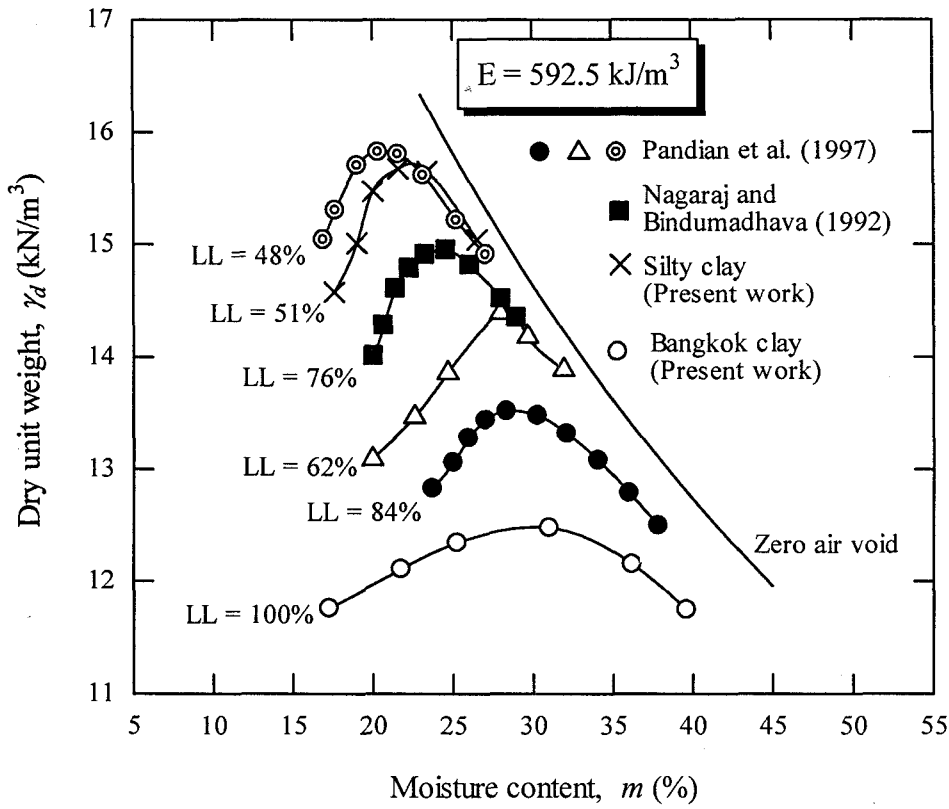
รูปที่ 3.3 ผลทดสอบการบดอัดของดินลูกรังที่พลังงานการบดอัดต่างๆ



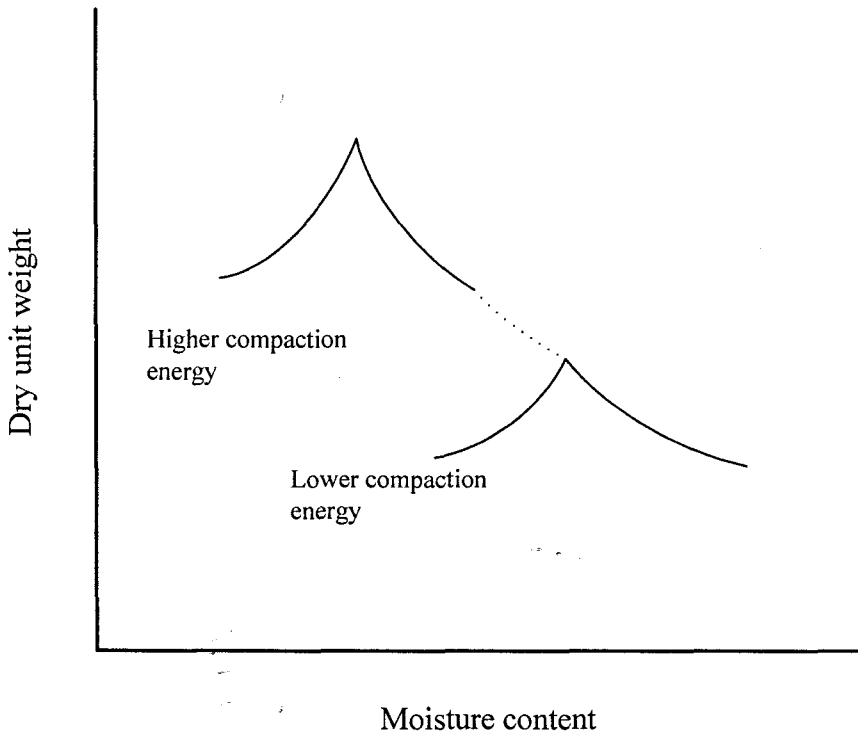
รูปที่ 3.4 ผลทดสอบการบดอัดของหินคลุกที่พลังงานการบดอัดต่างๆ

รูปที่ 3.5 แสดงผลทดสอบการบดอัดดินเม็ดละเอียดหลายชนิดภายใต้พลังงานการบดอัดที่ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งรวบรวมจาก Pandian et al. (1997) และ Nagaraj and Bindumadhava (1992) และผลทดสอบของผู้เขียน จะเห็นว่าลักษณะทางวิศวกรรมของดินเม็ดละเอียดบดอัดขึ้นกับค่าขีดจำกัดเหลว ซึ่งเป็นผลเนื่องจากปริมาณของเหลวในช่องว่างระหว่างมวลดิน (Pore Fluid) และแร่ดินเหนียว (Clay Mineral) ค่าขีดจำกัดเหลวที่สูงกว่าจะมีผลทำให้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมสูงกว่าและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดต่ำกว่า

จากผลทดสอบในรูปที่ 3.2 ถึง 3.4 และงานวิจัยในอดีต (Turnbull, 1950; Mitchell et al., 1965; Nagaraj et al., 1994; และ Santucci De Magistris and Tatsuoka, 2004) แสดงให้เห็นว่าเส้นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้ง ที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม มีลักษณะเป็นเส้นโค้งเดียวกันสำหรับทุกพลังงานการบดอัด ดังนั้นผู้เขียนขอเสนอแบบจำลองทำนายเส้นกราฟการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ผลการทดสอบการบดอัดของดินเม็ดละเอียดต่างๆ
ภายใต้พลังงานการบดอัดที่ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

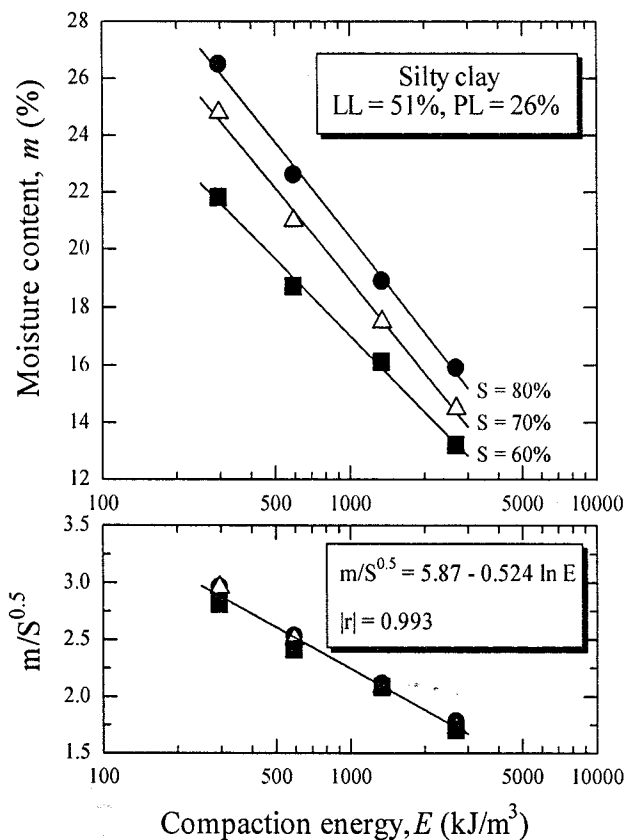


รูปที่ 3.6 รูปแบบจำลองเส้นกราฟการบดอัดรูปตัววีกลับหัว

3.5 การวิเคราะห์ผลทดสอบการบดอัด

Nagaraj and Srinivasa Murthy (1985) และ Nagaraj and Tiwari (1985) ได้อธิบายว่ากราฟการบดอัดที่พลังงานหนึ่งๆ จะถูกควบคุมโดยคุณสมบัติพื้นฐาน กล่าวคือ ปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน โดยการใช้ตัวแปรทั้งสองเป็นตัวแปรหลัก Pandian et al. (1997) ได้นำเสนอแบบจำลองที่ได้จากสังเกต (Phenomenological model) เพื่อทำนายเส้นกราฟการบดอัด ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานเท่านั้น งานวิจัยนี้จะขยายแนวคิดดังกล่าวเพื่อนำเสนอแบบจำลองกราฟการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดบนสเกลล็อกการรithmetic พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งแปรผันตามค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงนี้แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณความชื้นเดียวกัน ปริมาณอากาศในดินบดอัดจะถูกไล่ออกได้ง่าย เมื่อให้พลังงานการบดอัดที่สูงขึ้นและมีผลให้ระดับความอิ่มตัวของดินสูงตามไปด้วย ลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้จะไม่ปรากฏกับดินบดอัดที่มีปริมาณความชื้นมากกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (ด้านเปียก) ทั้งนี้เพราะมวลดินมีสภาพใกล้เคียงกับสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ

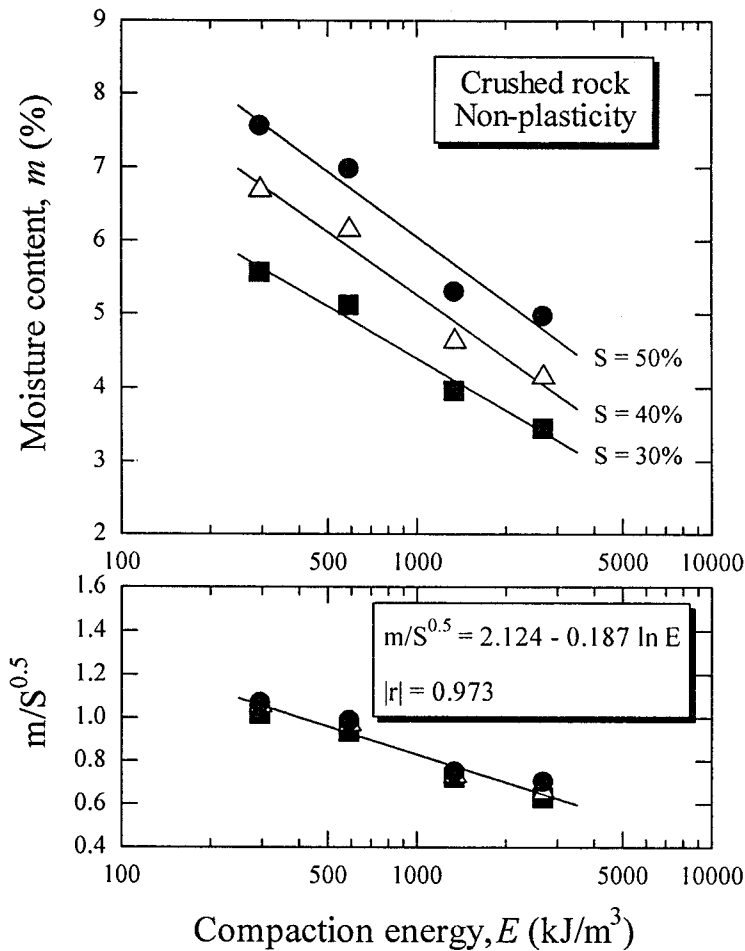


รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน และเส้น Normalization

จากการ Normalization ปริมาณความชื้นด้วยระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่า $m/S^{0.5}$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับพลังงานการบดอัดบนสเกลลอการิทึม ดังสมการที่ 3.1

$$\frac{m}{S^{0.5}} = a - b \ln E \quad (3.1)$$

เมื่อ m คือปริมาณความชื้น S คือระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ a และ b คือค่าคงที่ ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของดินแต่ละประเภท



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดของหินคลุก และเส้น Normalization

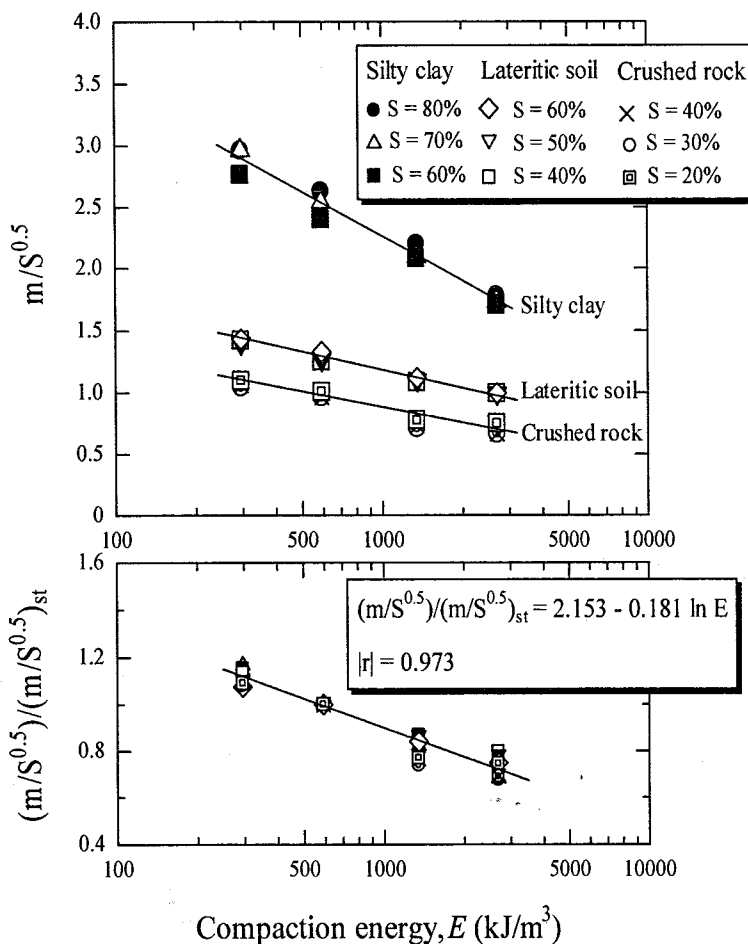
สมการข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณความชื้นน้อยกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (ด้านแห้ง) $m/S^{0.5}$ เป็นค่าเฉพาะสำหรับพลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ไม่แปรผันตามระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ปริมาณความชื้น และหน่วยน้ำหนักแห้ง จากรูปที่ 3.7 พบว่า a และ b มีค่าเท่ากับ 5.87 และ 0.524

ตามลำดับ สำหรับดินเหนียวปนดินตะกอน ในทำนองเดียวกัน a และ b สำหรับหินคลุก (รูปที่ 3.8) มีค่าเท่ากับ 2.124 และ 0.187 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างจากค่าของดินเหนียวปนดินตะกอน

รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $m/S^{0.5}$ และ $\log E$ ของดินทั้งสามชนิด จะเห็นได้ว่าเส้นความสัมพันธ์ของดินที่มีปริมาณดินเหนียวมากที่สุด จะมีความชันสูงที่สุด สิ่งที่น่าสนใจที่สังเกตได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวคือ ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงของ $m/S^{0.5}$ ภายใต้การเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัด จะมีความแตกต่างกันตามแต่นชนิดของดิน แต่อัตราส่วนของ $m/S^{0.5}$ มีค่าคงที่ หรือกล่าวมีนัยหนึ่งว่า

$$\left[\frac{(m/S^{0.5})_1}{(m/S^{0.5})_2} \right]_{\text{silty clay}} = \left[\frac{(m/S^{0.5})_1}{(m/S^{0.5})_2} \right]_{\text{lateritic soil}} = \left[\frac{(m/S^{0.5})_1}{(m/S^{0.5})_2} \right]_{\text{Crushed rock}}$$

เมื่อ $(m/S^{0.5})_1$ คือค่าของ $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดค่าใดๆ $(m/S^{0.5})_2$ คือค่าของ $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดค่าใดค่าหนึ่ง



รูปที่ 3.9 ตัวแปร $m/S^{0.5}$ และพลังงานของดินทั้งสามชนิด และอัตราส่วนของ $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_{st}$ ที่พลังงานต่างๆ

ในที่นี้ ถ้าเลือกใช้ค่า $(m/S^{0.5})_2$ เท่ากับ $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) และเขียนเป็น $(m/S^{0.5})_{st}$ ความสัมพันธ์ที่เป็นเอกภาพ (Unique Relationship) ระหว่าง $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_{st}$ ซึ่งรวมอิทธิพลของชนิดดินสามารถนำเสนอด้วยรูปที่ 3.9 และดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{(m/S^{0.5})}{(m/S^{0.5})_{st}} = 2.153 - 0.181 \ln E \quad (3.2)$$

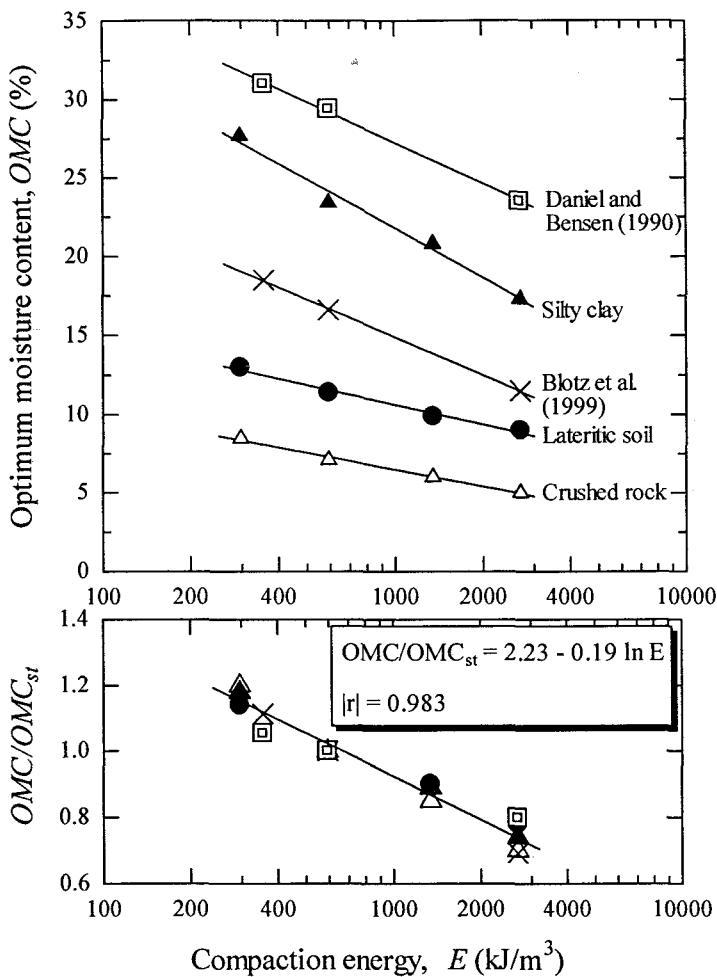
เมื่อ $(m/S^{0.5}) = (m/S^{0.5})_{st}$ และ $E = 592.5$ กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร พจน์ทางซ้ายมือจะกลายเป็นหนึ่ง ขณะที่พจน์ทางขวามือจะเป็น 0.997 สิ่งนี้ยืนยันความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ของสมการนี้ในการประมาณ $(m/S^{0.5})$ ที่พลังงานการบดอัดค่าอื่นๆ สมการที่ได้นี้มีประโยชน์อย่างมากในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมภายใต้พลังงานการบดอัดใดๆ เมื่อทราบค่าตัวแปร $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดค่าใดค่าหนึ่ง

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงการสร้างเส้นโค้งการบดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จากรูปที่ 3.6 ในทางปฏิบัติ เราสามารถสมมติว่าเส้นโค้งของหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมเป็นเส้นโค้งเดียวกันสำหรับทุกพลังงานการบดอัด ดังนั้น เราสามารถสร้างเส้นโค้งการบดอัดได้ทันที เมื่อทราบค่า OMC และ γ_{dmax} ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง OMC และพลังงานการบดอัดของดินบดอัดทั้งสามชนิดร่วมกับดินบดอัดอีกสองชนิดที่ได้จากผลทดสอบของ Daniel and Benson (1990) และ Blotz et al. (1998) จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสมการเชิงเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบของ Boutwell (1996)

จากการศึกษาของ Blotz et al. (1998) ทำให้ทราบว่า เราสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized OMC และพลังงานการบดอัดได้ โดยการเลือก OMC ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานเป็นค่าอ้างอิง ผู้เขียนขอเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized OMC และพลังงานการบดอัดดังนี้

$$\frac{OMC}{OMC_{st}} = c + d \ln E \quad (3.3)$$

เมื่อ OMC_{st} คือปริมาณความชื้นเหมาะสมที่พลังงานการบดอัดมาตรฐาน (592.5 kJ/m^3) E คือพลังงานการบดอัดใดๆ และตัวแปร c และ d มีค่าคงที่ เท่ากับ 2.23 และ -0.19 ตามลำดับ (จากรูปที่ 3.10) ซึ่งให้ค่า Degree of Correlation สูงถึง 0.983

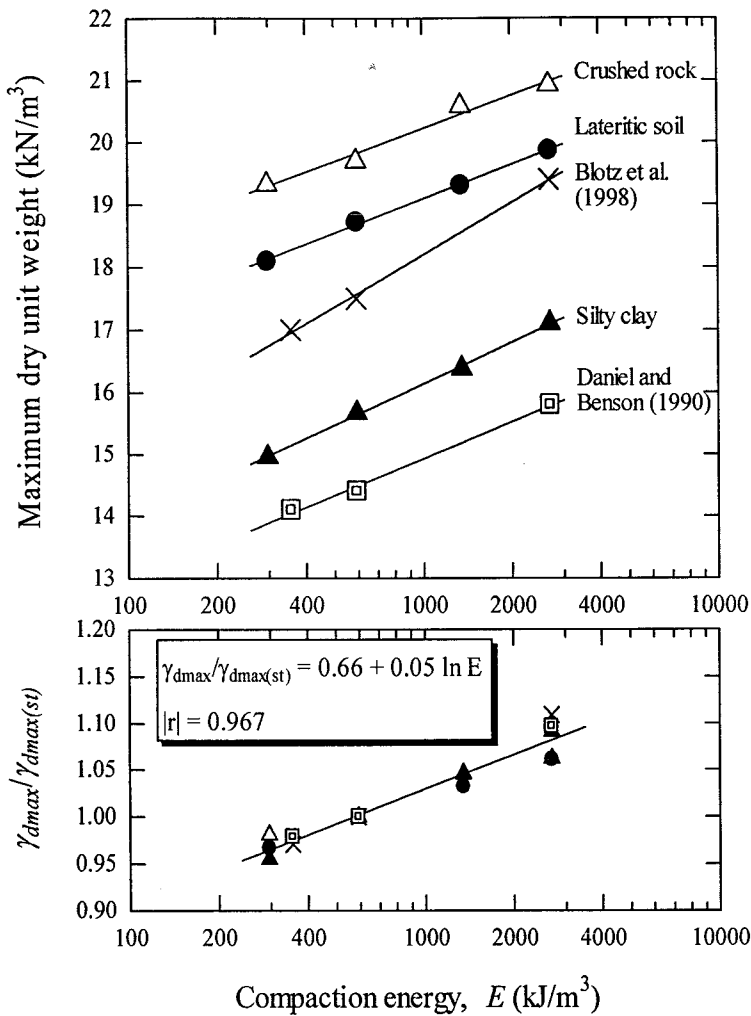


รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง OMC และพลังงานการบดอัด ร่วมกับ Normalization

เนื่องจาก γ_{dmax} มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ OMC (Blotz et al, 1998, Gurtug and Sridharan, 2002 และ Boutwell, 1996) ดังนั้น γ_{dmax} จึงควรมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานการบดอัดด้วยเช่นกัน ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized γ_{dmax} และพลังงานการบดอัด แสดงในรูปที่ 3.11 และสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\gamma_{dmax}}{(\gamma_{dmax})_{st}} = 0.70 + 0.05 \ln E \quad (3.4)$$

เมื่อ $(\gamma_{dmax})_{st}$ คือหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่พลังงานการบดอัดมาตรฐาน



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง γ_{dmax} และพลังงานการบดอัด ร่วมกับ Normalization

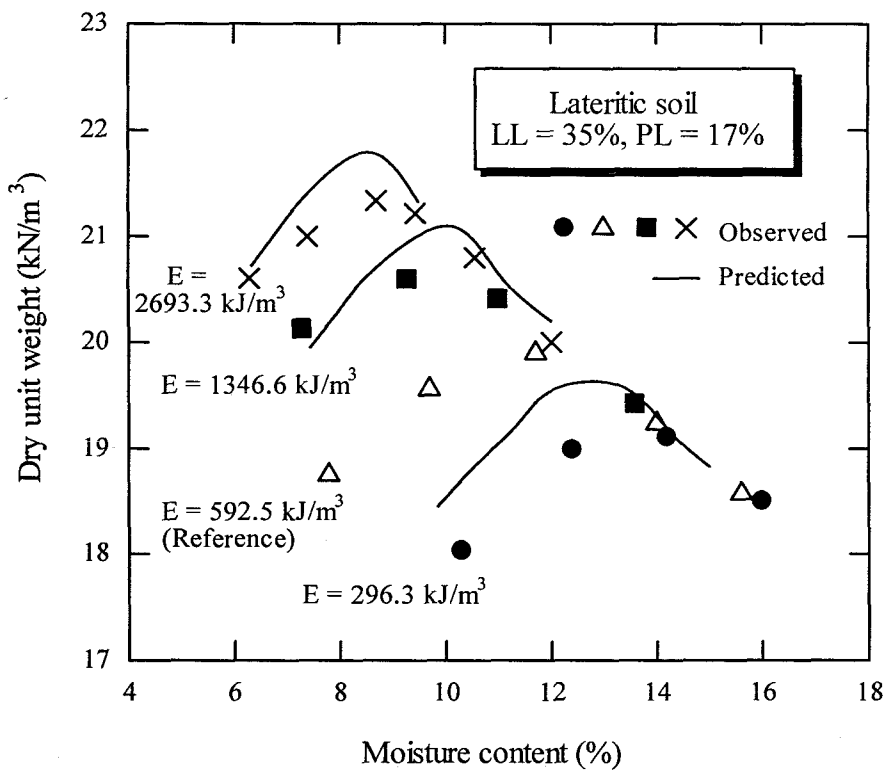
3.6 การทำนายเส้นกราฟการบดอัด

จากหัวข้อที่แล้ว ลักษณะของกราฟการบดอัดของดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดได้ถูกวิเคราะห์ เส้นโค้งการบดอัดที่ด้านแก่งของปริมาณความชื้นเหมาะสมสามารถลากโดยอาศัยสมการที่ (3.2) ส่วนเส้นโค้งการบดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมสามารถวาดโดยอาศัยสมการที่ (3.3) และ (3.4) ดังนั้น เราสามารถทำนายเส้นกราฟการบดอัด ภายใต้พลังงานการบดอัดค่าต่างๆ จากข้อมูลกราฟการบดอัดของดินชนิดหนึ่ง ภายใต้พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ได้ดังวิธีต่อไปนี้

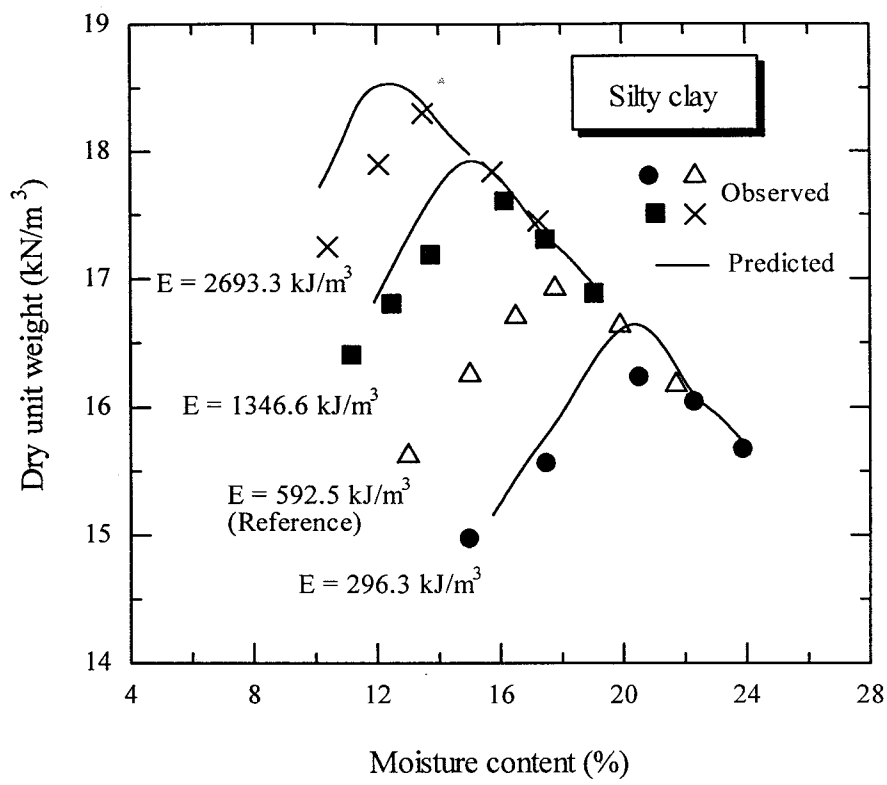
1. จากข้อมูลกราฟการบดอัด ภายใต้พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง หาค่าเฉลี่ยของ $m/S^{0.5}$ ที่ปริมาณความชื้นน้อยกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (ด้านแก่ง)
2. คำนวณหา $m/S^{0.5}$ ของพลังงานการบดอัดที่ต้องการทราบโดยอาศัยสมการที่ (3.2)
3. คำนวณหาจุดเหมาะสมของเส้นกราฟการบดอัด (Optimum Point, OMC และ γ_{dmax}) ที่พลังงานที่ต้องการทราบ โดยอาศัยสมการที่ (3.3) และ (3.4)

4. วาดเส้นกราฟการบดอัดดินทางด้านพลังงานถึงจุดเหมาะสม
 5. คำนวณหาจุดเหมาะสม (Optimum Point, OMC และ γ_{dmax}) ที่พลังงานการบดอัดค่าต่างๆ
 6. สมมติว่าเส้นโค้งการบดอัดที่ด้านเปียกเป็นเส้นเดียวกันสำหรับทุกพลังงานการบดอัด
- ลากเส้นโค้งเชื่อมจุดเหมาะสมที่ได้จากการคำนวณในข้อที่ 5

จากวิธีการทำนายตามขั้นตอนที่นำเสนอ ผู้เขียนได้แสดงผลการทำนายกราฟการบดอัด ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และ 3.13 ซึ่งเป็นผลการทดสอบดินลูกรังและดินเหนียวปนดินตะกอน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากราฟการบดอัดดินที่ได้จากการทำนายให้ผลที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมาก



รูปที่ 3.12 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินลูกรัง



รูปที่ 3.13 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน

บทที่ 4

แบบจำลองทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด

4.1 บทนำ

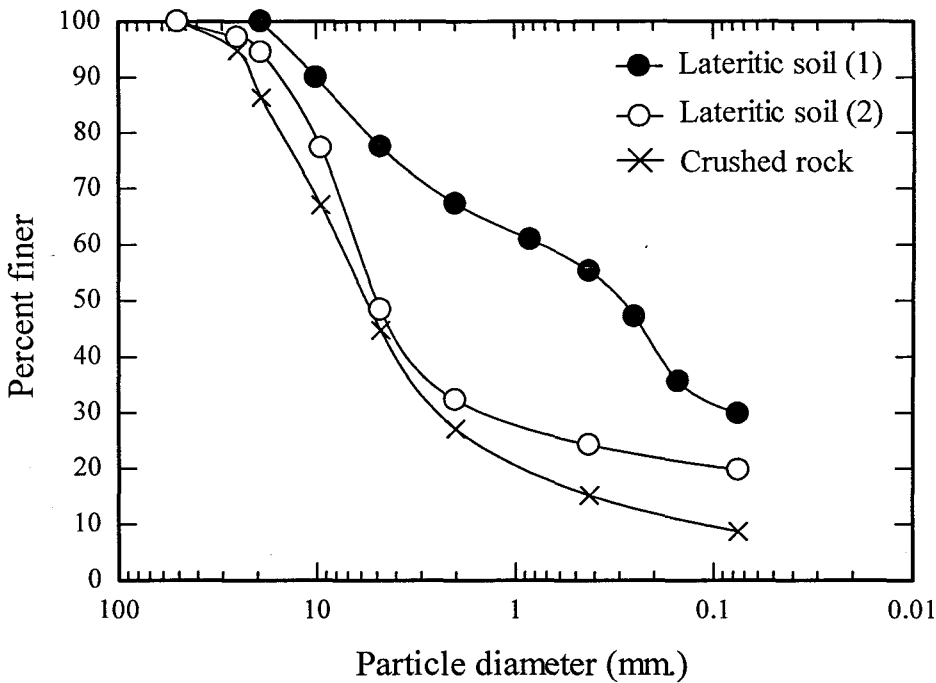
การซ่อมแซมถนนที่ชำรุดเนื่องจากการใช้งานมาเป็นเวลานานโดยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling Technique) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างมากในประเทศไทยขณะนี้ แต่การศึกษาการพัฒนากำลังอัดยังมีอยู่อย่างจำกัด และยังไม่ปรากฏทฤษฎีดินซีเมนต์บดอัด ดังนั้น บทนี้จะนำเสนอลักษณะทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์บดอัด และท้ายสุดจะสร้างทฤษฎีกำลังอัดและสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด

4.2 ดินตัวอย่าง

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง : การศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติพื้นฐานที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินบดอัดผสมซีเมนต์และไม่ผสมซีเมนต์ และสร้างทฤษฎีกำลังอัดและสมการทำนายกำลังอัด ส่วนที่สอง : การตรวจสอบความถูกต้อง (Verification) ของสมการที่นำเสนอ การศึกษาในส่วนแรกจะดำเนินการโดยใช้ดินตัวอย่างสองชนิด (ดินลูกรังและหินคลุก) ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการก่อสร้างถนน ดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบจะนำมาจากแหล่งดินสองแหล่ง ดินลูกรัง (1) เป็นวัสดุที่เก็บมาจากบ่อขุดบริเวณสวนสัตว์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ที่ความลึกประมาณ 4-5 เมตร ซึ่งเป็นบ่อขุดที่ใช้สำหรับก่อสร้างถนนสายสวนสัตว์-โชคชัย ดินตัวอย่างมีสีแดง ประกอบด้วยกรวดและทรายเป็นมวลรวมหลักในปริมาณ 32.7 และ 38.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนประกอบที่เหลือเป็นดินตะกอนในปริมาณ 28.5 เปอร์เซ็นต์ ดินตัวอย่างมีขีดจำกัดเหลวเท่ากับ 22.5 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก (Non-plasticity) และจัดเป็นทรายปนดินตะกอน (SM) ตามการจำแนกระบบ USCS ดินลูกรัง (2) เป็นวัสดุที่เก็บจากจังหวัดเพชรบูรณ์ มีปริมาณดินเม็ดหยาบมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 38.9 และ 20.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจัดเป็นกรวดที่มีดินเหนียวปน (GC) ตามระบบการจำแนกแบบ USCS

หินคลุกเป็นวัสดุที่เก็บมาจากโครงการก่อสร้างซ่อมแซมปรับปรุงถนนสายหลักระหว่าง จังหวัดเพชรบูรณ์ – วิเชียรบุรี หินตัวอย่างมีสีเทาดำ ประกอบด้วยปริมาณดินเม็ดหยาบเกินกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก โดยอาศัยการจำแนกระบบ USCS หินคลุกจัดเป็นกรวดปนดินตะกอน (GM) การกระจายตัวของทั้งดินลูกรังและหินคลุกแสดงดังรูปที่ 4.1 ดินทั้งสามนี้จึงถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบอิทธิพลของความคละและสภาพความเป็นพลาสติกต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

ในส่วนที่สอง ซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนายกำลังอัดที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้รวบรวมผลทดสอบกำลังอัดดินซีเมนต์บดอัดของธีรชาติและสมบัติกระแสด (2544) และทำการผสมดินลูกรัง (2) และหินคลุกในอัตราส่วน 20:80 และผสมกับซีเมนต์บดอัดที่พลังงานการบดอัดเท่ากับ 2963.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อหาลำกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 และ 14 วัน และทำการเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลการทำนาย

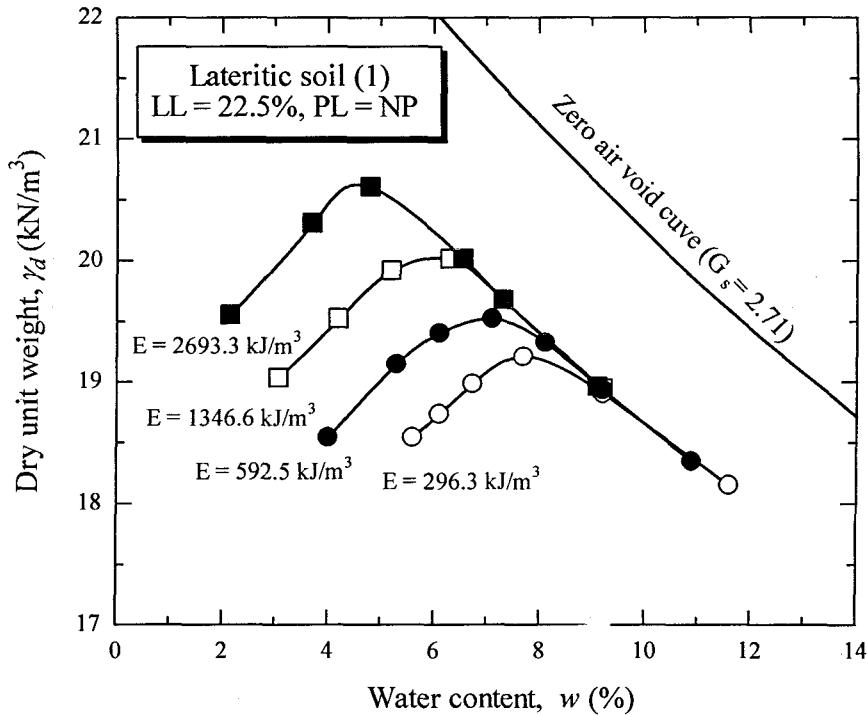


รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของดินลูกรังและหินคลุก

4.3 วิธีการทดสอบ

ตัวอย่างดินทั้งหมดถูกนำมาบดผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 19 มิลลิเมตร เพื่อขจัดส่วนผสมที่มีขนาดใหญ่ อันจะก่อให้เกิดความไม่เหมาะสมทางด้านขนาดของวัสดุทดสอบ (Size Effect) ดินตัวอย่างที่ผ่านการบดจะถูกนำมาผึ่งแห้งในอากาศอย่างน้อย 3 วัน จากนั้นหาปริมาณความชื้น และเตรียมทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ กันจำนวน 5 ถึง 6 จุดปริมาณความชื้น โดยในแต่ละจุดปริมาณความชื้น ทำการเติมน้ำใส่ตัวอย่างและห่อเก็บไว้ในถุงพลาสติก เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อให้ดินตัวอย่างมีปริมาณความชื้นทั่วถึงกัน จากนั้นวัดปริมาณความชื้นก่อนทำการบดอัด และทำการบดอัดตัวอย่างในแบบหล่อมาตรฐาน (Mould) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ตามมาตรฐาน ASTM D 698 ด้วยพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร เทียบเท่ากับพลังงานการบดอัดที่ครึ่งหนึ่งของพลังงานการบดอัดมาตรฐาน พลังงานการบดอัดมาตรฐาน ครึ่งหนึ่งของพลังงานการบดอัดที่สูงกว่ามาตรฐาน และพลังงานการบดอัดที่สูงกว่า

ตามลำดับ กราฟการบดอัดดินลูกรัง (1) และหินคลุก ที่พลังงานการบดอัดสี่ค่าแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ตารางที่ 4.1 แสดงค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินลูกรัง (1) และหินคลุก ที่พลังงานการบดอัดทั้งสี่ค่า



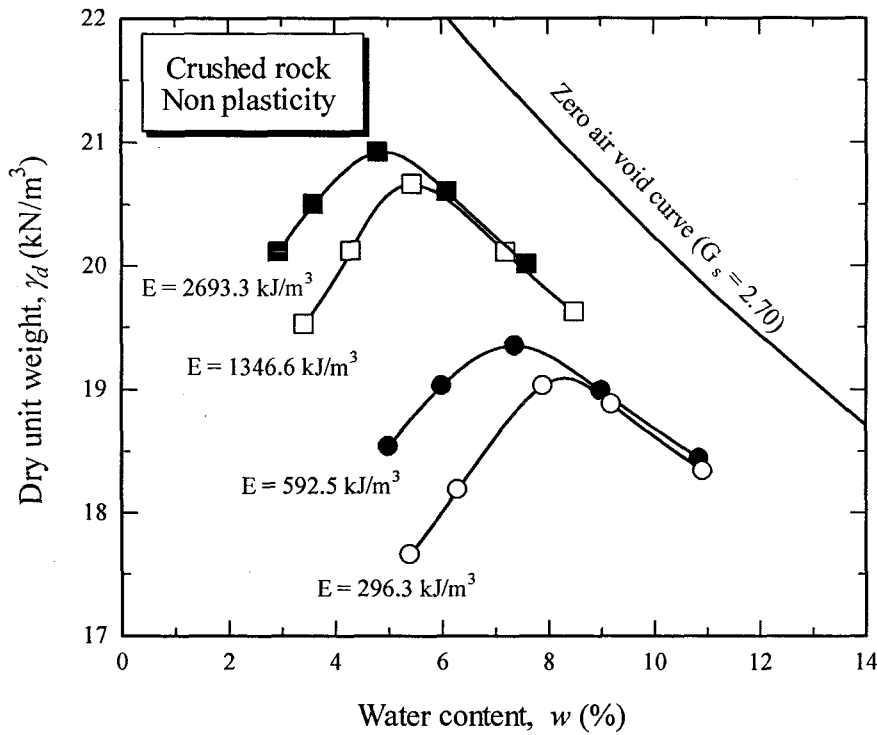
รูปที่ 4.2 กราฟการบดอัดของดินลูกรัง (1)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินลูกรัง (1) และหินคลุก

พลังงานต่อหน่วยปริมาตร(Energy per unit volume)	Lateritic soil (1)		Crushed rock	
	OMC (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	OMC (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
1. Half standard proctor (E = 296.3 kJ/m ³)	8.00	19.20	8.30	19.05
2. Standard proctor (E = 592.5 kJ/m ³)	6.80	19.50	7.40	19.35
3. Half modified proctor (E = 1346.6 kJ/m ³)	6.20	20.00	5.50	20.65
4. Modified proctor (E = 2693.3 kJ/m ³)	5.40	20.55	4.80	20.90

เมื่อได้กราฟการบดอัด ทำการบดอัดส่วนผสมระหว่างดินและซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้นในดินเท่ากับ 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม ภายใต้พลังงานการบดอัดทั้ง 4 ค่าดังกล่าวข้างต้น ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้คือ 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์ การเตรียมตัวอย่างดินขึ้นก่อนผสมซีเมนต์ทำเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างดินบดอัดที่ไม่ผสมซีเมนต์ หลังจากบดอัดได้ 24

ชั่วโมง คั่นดินตัวอย่างออกจากแบบหล่อ ห่อตัวอย่างด้วยฟิล์มพลาสติก และเก็บไว้ในห้องควบคุมปริมาณความชื้นและอุณหภูมิ เมื่อได้อายุบ่มครบ 7, 14, 28, 60 และ 120 วัน ทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียวด้วยอัตราเร็วการเคลื่อนตัวในแนวตั้งเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อนาที ในแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ พลังงานการบดอัด และอายุบ่ม ใช้จำนวนตัวอย่างอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบความสอดคล้อง (Consistency) ของผลทดสอบ

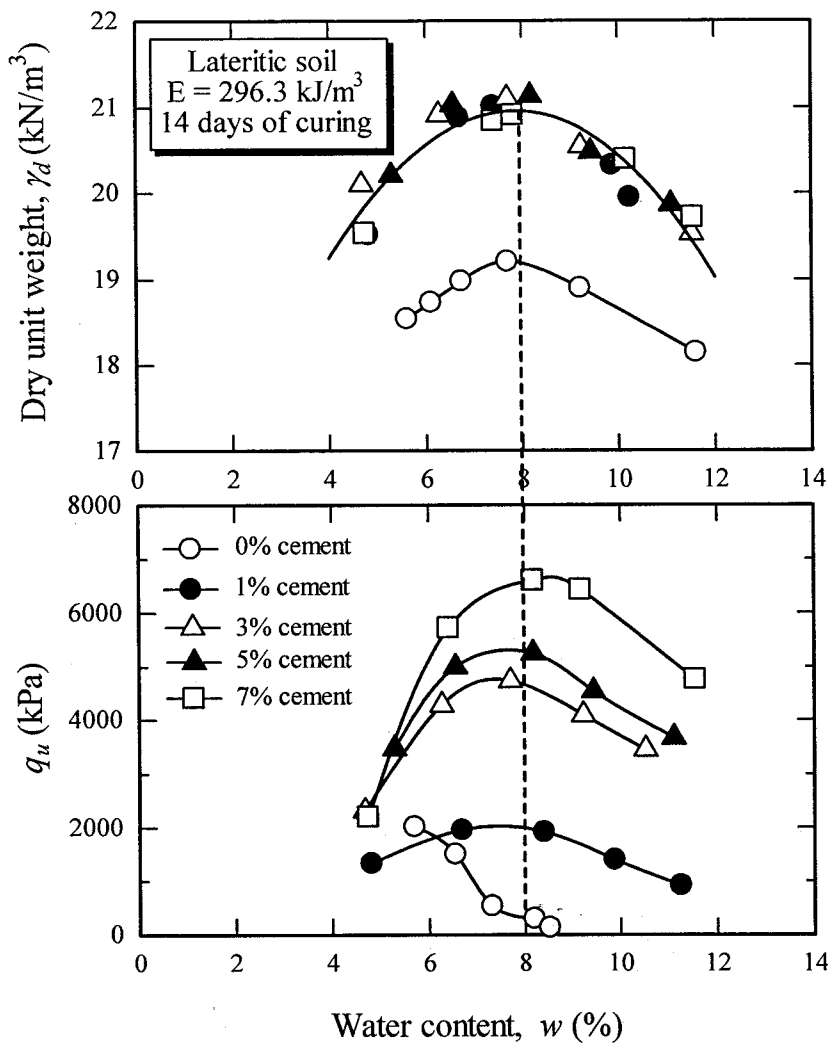


รูปที่ 4.3 กราฟการบดอัดของหินคลุก

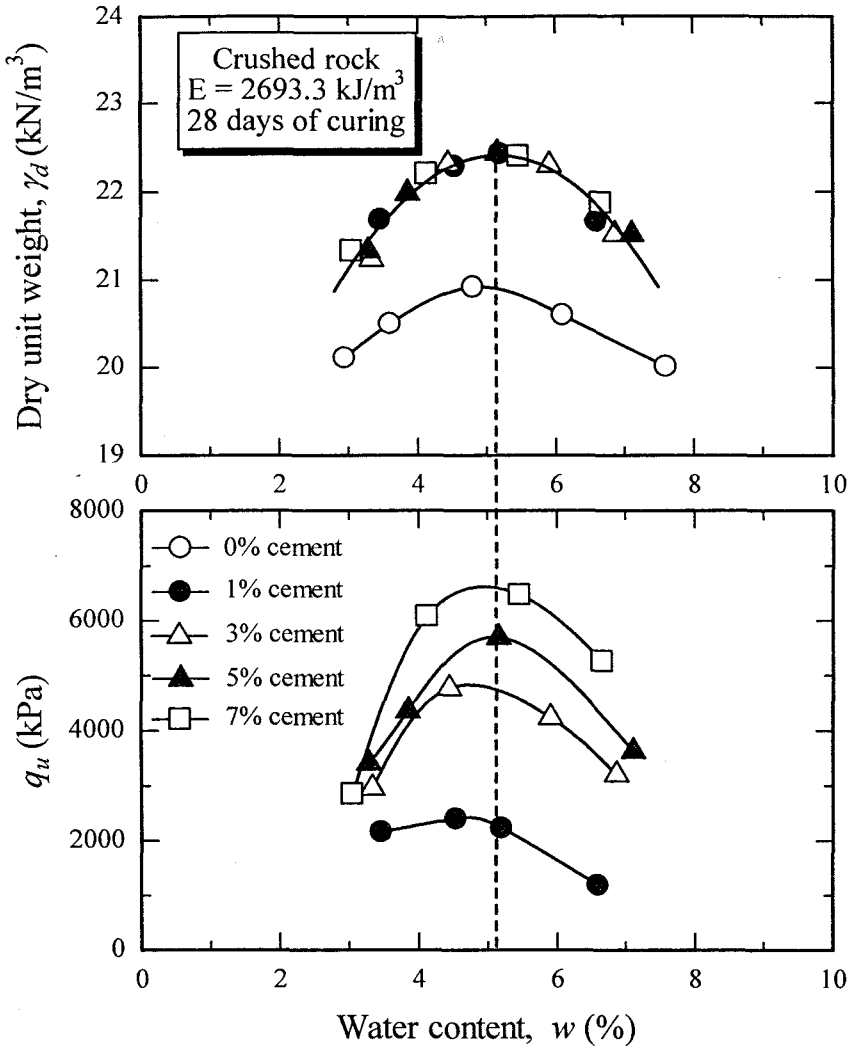
4.4 ผลทดสอบ

ลักษณะทั่วไปของกราฟการบดอัดหลังการบดอัดทันทีและแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งเป็นผลทดสอบของดินลูกรัง (1) และหินคลุก ตามลำดับ ที่ได้รับการบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดเท่ากับ 293.3 และ 2963.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณซีเมนต์มีอิทธิพลต่อกราฟการบดอัดอย่างมาก ดังจะเห็นได้ว่า ในช่วงปริมาณซีเมนต์ระหว่าง 1 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ กราฟการบดอัดของดินซีเมนต์มีลักษณะเหมือนกัน และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์มีค่าเท่ากันและสูงกว่าของดินบดอัด แต่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าประมาณคงที่ กราฟการบดอัดสามารถแสดงได้โดยอาศัยฟังก์ชันพาราโบลา ซึ่งมีความสมมาตรรอบแกนที่ผ่านจุดสูงสุดของกราฟ ในขณะที่ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและกำลังอัดแกนเดียว จะมีความสมมาตรจนกระทั่งถึงปริมาณความชื้นค่าหนึ่งเท่านั้น ซึ่งมีค่าประมาณ 80

เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่า ปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่านี้ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์ ดังจะเห็นได้ว่า ที่ปริมาณความชื้น 60 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม กำลังอัดมีค่าประมาณเท่ากันสำหรับทุกปริมาณซีเมนต์ และมีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดของดินบดอัด (ดูรูปที่ 4.4) จึงไม่มีประโยชน์ในการผสมซีเมนต์ในช่วงปริมาณความชื้นดังกล่าว ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ จึงควรมีค่าประมาณ 80 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม จากผลทดสอบเราสามารถสรุปได้ว่า ในทางปฏิบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นที่ด้านแห้งมีความสมมาตรกับด้านเปียก ในช่วงที่ปริมาณความชื้นมีค่าอยู่ระหว่าง 80 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากนี้ยังเห็นได้อีกว่า ปริมาณความชื้นที่ให้กำลังอัดแกนเดียวและหน่วยน้ำหนักแห้งของดินซีเมนต์มีค่าสูงสุด คือปริมาณความชื้นเหมาะสม



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณชื้น-ความหนาแน่นแห้ง-กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรัง ที่อายุ บ่ม 14 วัน ภายใต้พลังงานการบดอัดครึ่งหนึ่งของพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

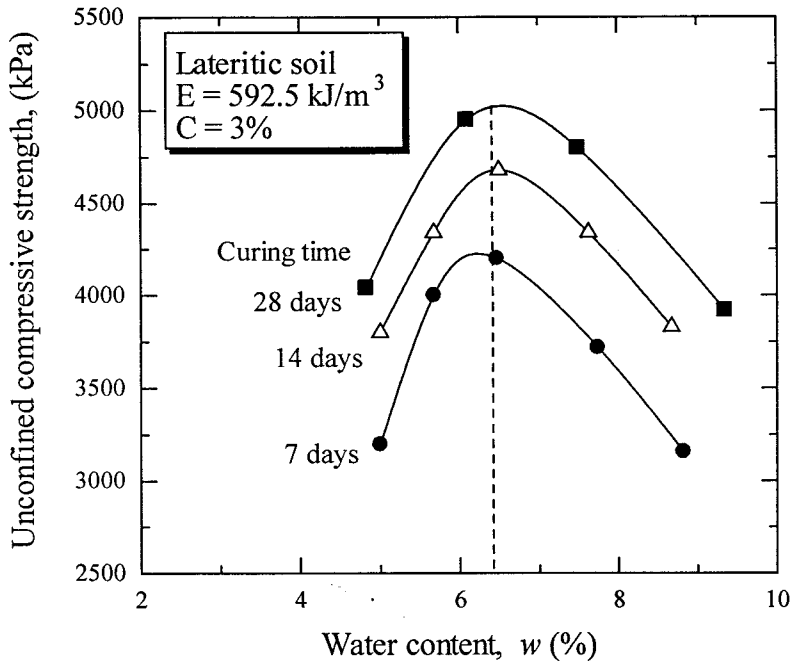


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น-ความหนาแน่นแห้ง-กำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกที่อายุบ่ม 28 วัน ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

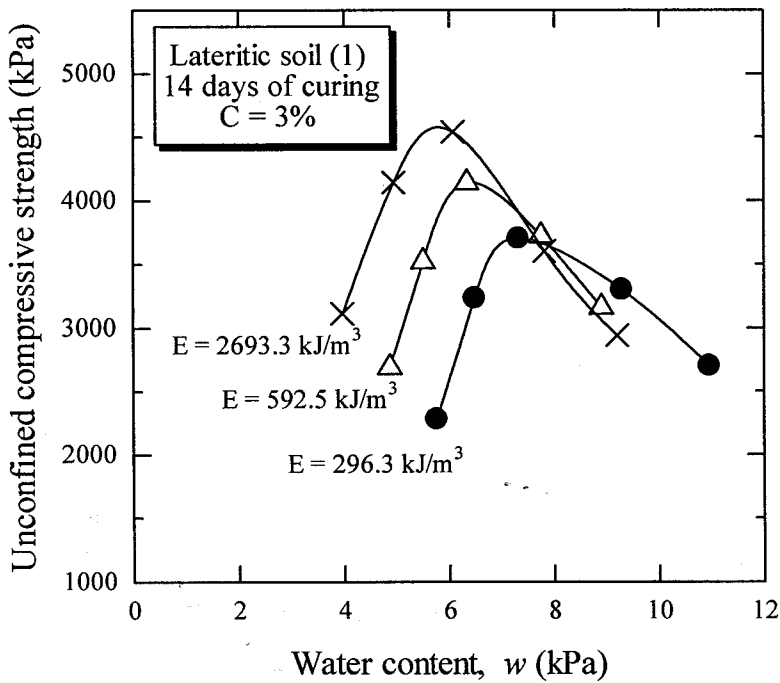
อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นผลทดสอบของดินลูกรังที่มีปริมาณความชื้น 80 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับซีเมนต์ปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน และอายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จะเห็นได้ชัดว่าอายุบ่มมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดแกนเดียว ปริมาณความชื้นที่ให้กำลังอัดสูงสุดจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามอายุบ่ม และมีค่าเท่ากับปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินบดอัด

อิทธิพลของพลังงานการบดอัดต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.7 พลังงานการบดอัดมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินที่ด้านแห้ง (ในช่วง 0.8 ถึง 1.0 เท่าของ OMC) ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นมีค่าใกล้เคียงกันและสามารถประมาณเป็นความสัมพันธ์เส้นเดียวกันได้ สำหรับทุกพลังงานการบดอัด สิ่งนี้แสดง

ให้เห็นว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ผสมด้วยปริมาณความชื้นพอเพียง จะแปรผันตามปริมาณความชื้นและปริมาณซีเมนต์ พลังงานการบดอัดเพียงมีส่วนช่วยให้ปริมาณความชื้นที่พอเพียงสำหรับการผสมมีค่าลดลง อันนำมาซึ่งความสามารถในการลดปริมาณซีเมนต์

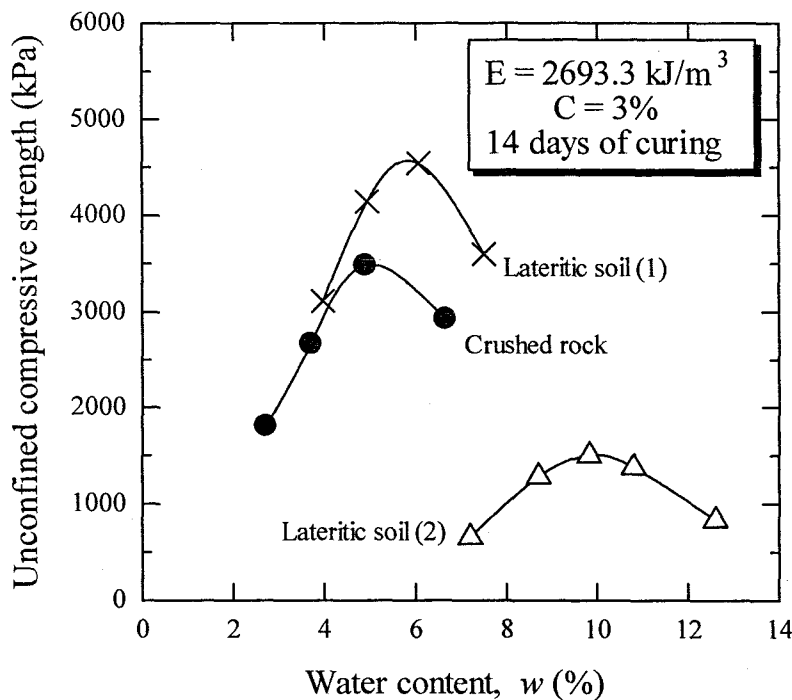


รูปที่ 4.6 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด ที่อายุบ่มต่างๆ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของพลังงานการบดอัดต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินทั้งสามชนิดผสมซีเมนต์ปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร อายุบ่ม 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของดินซีเมนต์สองชนิด : ดินลูกรัง (2) และหินคลุก ซึ่งมีความคล้ายคลึงกัน แต่มีสภาพความเป็นพลาสติกต่างกัน เราสามารถกล่าวได้ว่าสภาพความเป็นพลาสติกมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดและปริมาณความชื้นเหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจากสภาพความเป็นพลาสติกเป็นตัวหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในดินที่ไม่มีความเป็นพลาสติก ขนาดของดินจะมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์บดอัด ดังจะเห็นได้ว่า ดินลูกรัง (1) จะให้กำลังอัดที่สูงกว่าหินคลุก หลังจากผสมซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากัน ภายใต้พลังงานการบดอัดเดียวกัน ทั้งนี้ ที่เป็นที่ทราบกันดีว่า หินคลุกจะให้กำลังอัดสูงกว่าดินลูกรัง เมื่อถูกบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดเท่ากัน ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากดินลูกรังมีปริมาณดินเม็ดเล็กมากกว่าหินคลุก จึงทำให้พันธะเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินมีการยึดเกาะกันได้ดีกว่าดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่อย่างหินคลุก เมื่อผสมซีเมนต์ด้วยปริมาณที่เท่ากัน ภายใต้พลังงานการบดอัดเดียวกัน

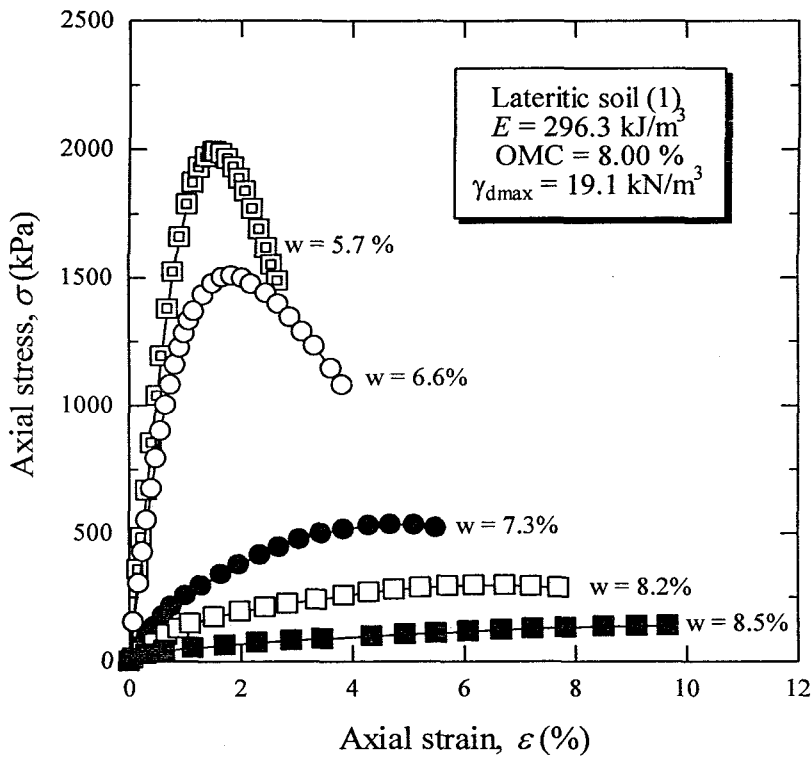


รูปที่ 4.8 อิทธิพลของชนิดดินต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

4.5 ลักษณะทางวัสดุของดินเม็ดหยาบและดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด

ในดินเม็ดหยาบ แรงระยะสั้นเป็นตัวแปรที่บทบาทสำคัญควบคุมลักษณะด้านกำลังและการเสียดรูป ความเสียดทานที่จุดสัมผัสระหว่างเม็ดดินและ Matric suction จะก่อให้เกิดแรงต้านทานการลื่นไถล ด้วยเหตุนี้เอง เมื่อปริมาณความชื้นของดินบดอัดเพิ่มขึ้น กำลังต้านทานแรงเฉือนและ

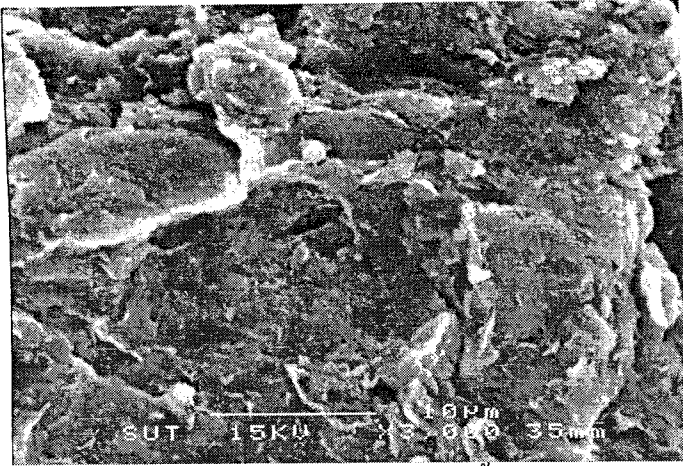
ความสามารถในการต้านทานการเสีรูปจึงมีค่าลดลง เนื่องจากการลดลงของ Matric suction ดังแสดงได้จากผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด ดังรูปที่ 4.9



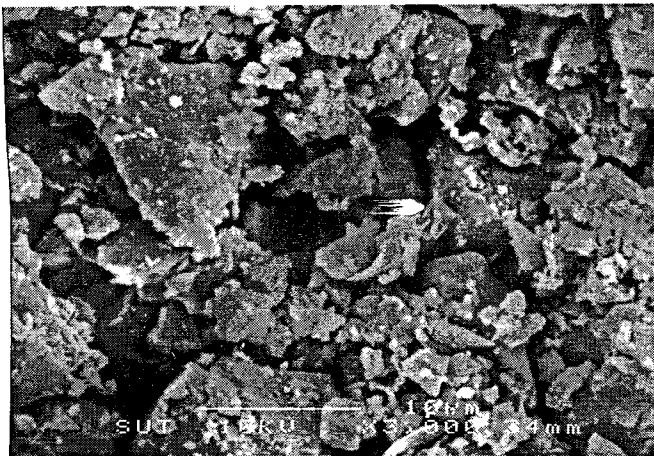
รูปที่ 4.9 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด
 ที่บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

เมื่อดินเม็ดหยาบผสมกับซีเมนต์และน้ำ ซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะก่อให้เกิดพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bonds) และทำให้โครงสร้างเกิดความต่อเนื่องและแข็งแรง ด้วยเหตุนี้เอง ปริมาณความชื้นในดินเม็ดหยาบจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด อิทธิพลของปริมาณความชื้นต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนโดยรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์บดอัดที่ด้านข้าง (60 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม) และที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม เปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของดินบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (รูปถ่ายทั้งสามมีกำลังขยาย 3000 เท่า) รูปที่ 4.10ค แสดงพันธะเชื่อมประสานที่เกิดขึ้นระหว่างช่องว่างของกลุ่มของเม็ดดิน (Pore space) อย่างชัดเจน ซึ่งมีลักษณะเหมือนใบมีด ในขณะที่ ไม่ปรากฏร่องรอยพันธะเชื่อมประสานในดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำ (ดูรูปที่ 4.10ข) ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณความชื้นที่ต่ำเกินไปทำให้ไม่สามารถบดอัดได้ดีและเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดดินสูง อีกทั้งปริมาณความชื้นดังกล่าวอาจไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์ ดังนั้น พันธะเชื่อมประสานจึงเพียงแค่อ้อมรอบเม็ดดินเท่านั้น

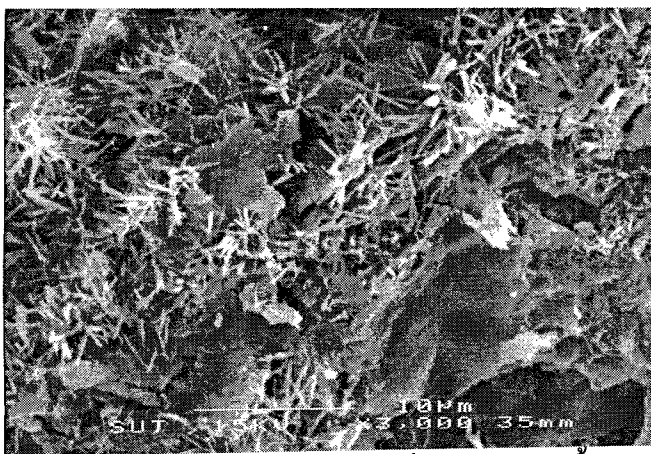
จะเห็นได้ว่าอนุภาคของดินซีเมนต์บดอัดมีขนาดใหญ่กว่าดินบดอัดที่ไม่ผสมซีเมนต์ (เปรียบเทียบรูปที่ 4.10ก และ 4.10ข)



(ก) ดินลูกรังบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม



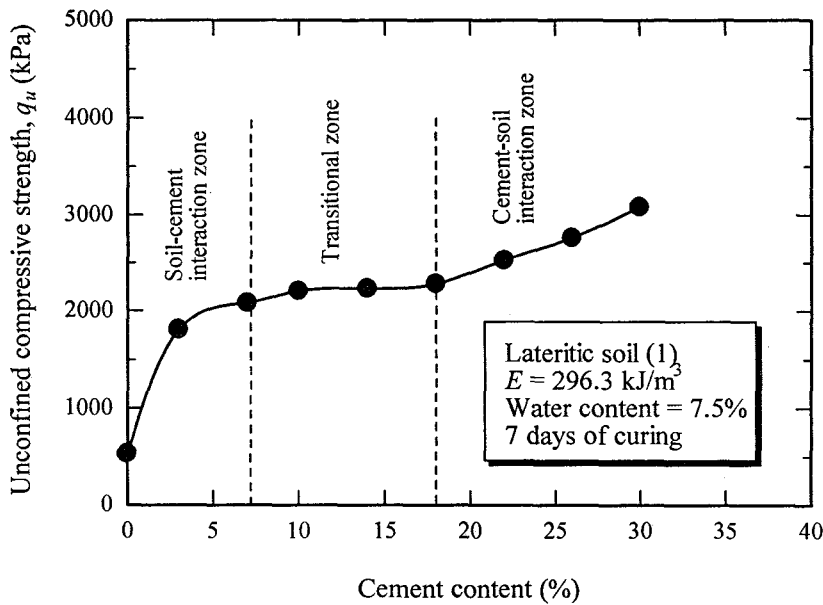
(ข) ดินลูกรังซีเมนต์ (5% ซีเมนต์) บดอัดที่ปริมาณความชื้น 60% ของปริมาณความชื้นเหมาะสม



(ค) ดินลูกรังซีเมนต์ (5% ซีเมนต์) บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของดินลูกรังบดอัดและดินลูกรังซีเมนต์บดอัด (อายุบ่ม 7 วัน)
ภายใต้พลังงานการบดอัดที่ 293.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

พันธะเชื่อมประสานระหว่างจุดสัมผัส งานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมของดินซีเมนต์ในช่วงโซนที่หนึ่งและสองเท่านั้น



รูปที่ 4.12 โซนการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์บดอัด

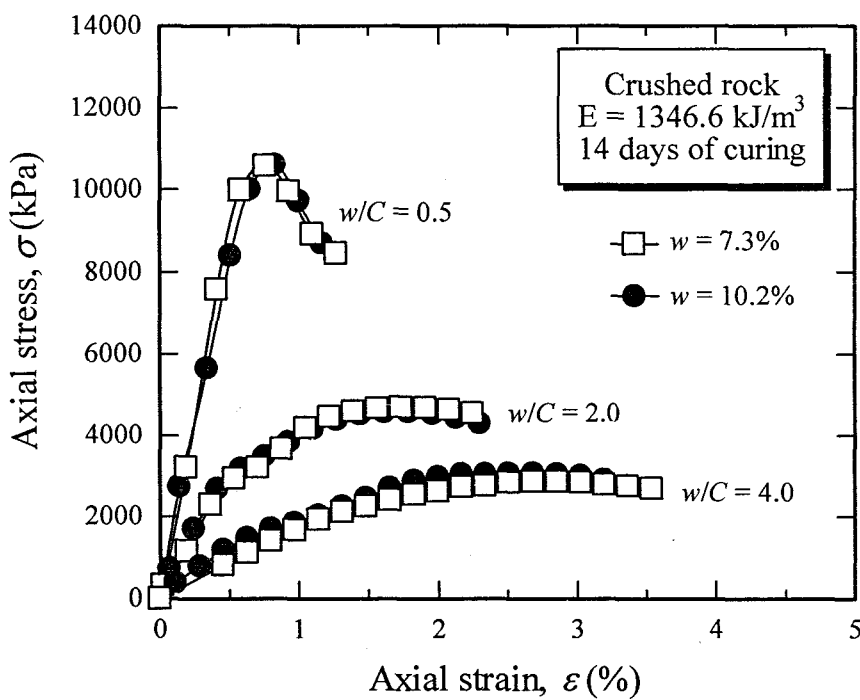
4.6 ทฤษฎีกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด

งานวิจัยล่าสุดที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นสูงพอในการทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003 และ 2005) กล่าวว่า “ที่อายุบ่มค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินซีเมนต์แปรผันตามปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์เพียงอย่างเดียว” ทฤษฎีดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยการสมมติว่าหน่วยแรงตั้งฉากที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพันธะเชื่อมประสานแปรผันตามอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ (Soil-water/cement ratio, w/C) การทดสอบกระทำโดยการบดอัดหินคลุกผสมซีเมนต์ ที่พลังงานการบดอัดสามค่า ได้แก่ 296.3, 592.5, และ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปริมาณความชื้นสามค่า ได้แก่ 10.2, 8.3 และ 7.3 เปอร์เซ็นต์ ด้วยปริมาณซีเมนต์ที่ต่างกัน เพื่อให้ได้ค่า w/C สี่ค่า คือ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่มี w/C เท่ากัน ที่พลังงานการบดอัดเท่ากันและต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

รูปที่ 4.13 แสดงผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของหินคลุกที่ปริมาณความชื้นสองคือ 7.3 และ 10.2 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างทั้งสองนี้ถูกบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดเท่ากันคือ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุบ่ม 14 วัน และ w/C สามค่า คือ 0.5, 2.0, และ 4.0 จะเห็นได้ว่า ถึงแม้ว่าดิน

ตัวอย่างจะถูกผสมด้วยปริมาณความชื้นและปริมาณซีเมนต์ที่ต่างกัน แต่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวแกนของดินตัวอย่างมีลักษณะเหมือนกันและมีค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากัน คราบไคที่ w/C เท่ากัน

รูปที่ 4.14 แสดงผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของหินคลุกซีเมนต์ที่ได้รับการบดอัดด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่อายุบ่ม 14 วัน ด้วยพลังงานการบดอัดสามค่า ได้แก่ 296.3, 592.5 และ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 10.2, 8.3, และ 7.3 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดแปรผันตาม w/C เท่านั้น w/C ยิ่งน้อย กำลังอัดแกนเดียวยิ่งมีค่ามาก



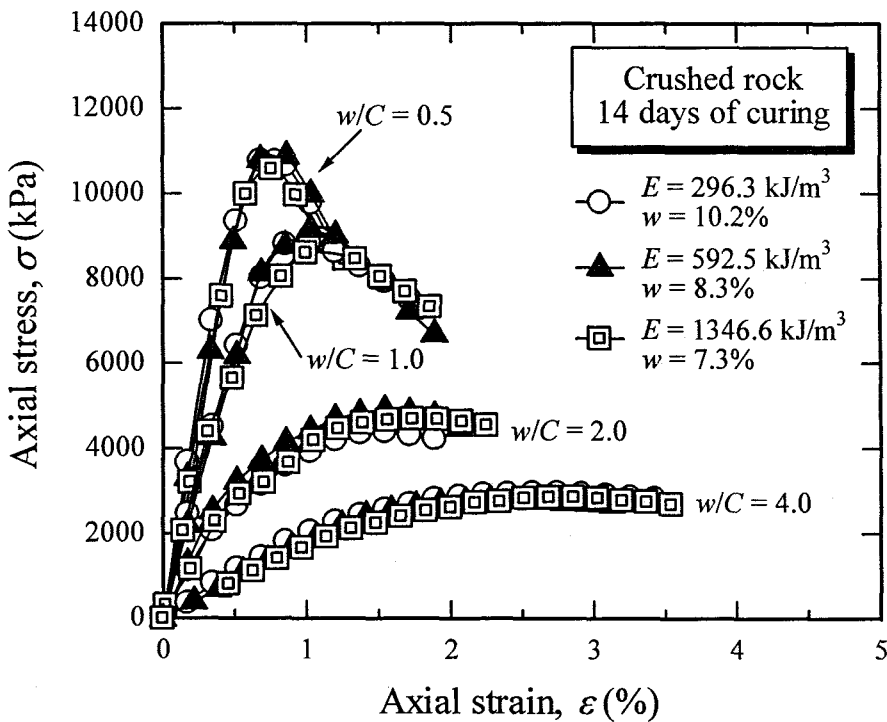
รูปที่ 4.13 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของหินคลุกผสมซีเมนต์บดอัด ที่ค่า w/C ต่างกันสามค่า คือ 0.5, 2.0 และ 4.0 ภายใต้พลังงานการบดอัดที่ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 เราสามารถสรุปได้ว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดด้านเปียกแปรผันตามอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์เท่านั้น เพื่อให้ได้กำลังอัดสูง เราต้องผสมดินและซีเมนต์ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ต่ำ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการใส่ปริมาณซีเมนต์มาก หรือลดปริมาณความชื้นในดิน แต่อย่างไรก็ตาม ที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดที่สามารถบดอัดได้คือปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังนั้น ถ้าต้องการลดปริมาณความชื้นให้น้อยลงจำเป็นต้องเพิ่มพลังงานการบดอัดให้สูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เอง เราอาจกล่าวได้ว่าพลังงานการบดอัดมิได้มีผลโดยตรงต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดด้านเปียก แต่เป็น

เพียงตัวแปรที่ช่วยลดปริมาณความชื้นในดินให้สามารถบดอัดได้เท่านั้น เพื่อให้ได้กำลังอัดเท่ากัน เราอาจใช้พลังงานการบดอัดที่สูง ด้วยปริมาณซีเมนต์ที่ต่ำ หรือใช้พลังงานการบดอัดที่ต่ำ ด้วยปริมาณซีเมนต์ที่มาก จากผลงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2004) เราสามารถประมาณค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมที่พลังงานการบดอัดใดๆ ได้ ถ้ามีผลทดสอบการบดอัดที่พลังงานการบดอัดใดๆ ค่าหนึ่ง ดังนี้

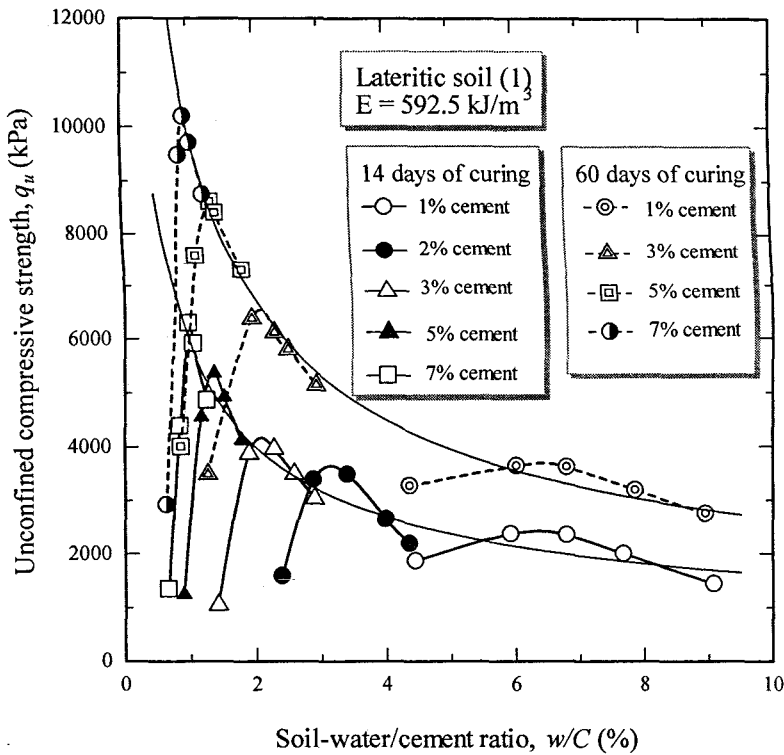
$$\frac{OMC}{OMC_{st}} = 2.23 - 0.19 \ln E \quad (4.1)$$

เมื่อ OMC_{st} คือปริมาณความชื้นเหมาะสมที่พลังงานการบดอัดมาตรฐาน (592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) และ E คือพลังงานการบดอัด (เมื่อแทนค่า $E = 592.5$ กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร พจน์ทางซ้ายมือจะเป็น 1.0 และทางขวาจะเป็น 1.02 ซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้สมการนี้เพื่อทำนายปริมาณความชื้นเหมาะสมที่พลังงานอื่นๆ)



รูปที่ 4.14 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของหินคลุกผสมซีเมนต์บดอัด ที่ค่า w/C เท่ากัน แต่พลังงานการบดอัดและปริมาณความชื้นต่างกัน ที่อายุบ่ม 14 วัน

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ w/C ของดินลูกรัง (1) ผสมซีเมนต์บดอัด ที่พลังงานการบดอัด 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุบ่ม 14 และ 60 วัน เมื่อลากเส้นเชื่อมต่อดูความสัมพันธ์ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก จะได้ความสัมพันธ์ที่เป็นเอกภาพ (Unique) สำหรับอายุบ่มหนึ่งๆ สิ่งนี้เป็นการยืนยันความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียกด้วยพารามิเตอร์ w/C

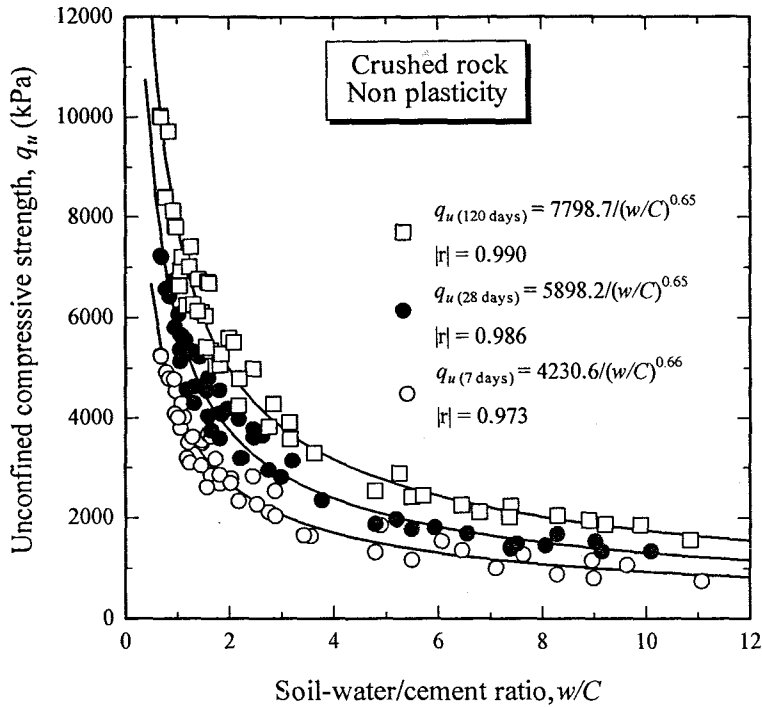


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ w/C ของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด ที่อายุบ่ม 14 และ 60 วัน

รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ ที่พลังงานการบดอัดตั้งแต่ 296.3 ถึง 2963.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ของดินลูกรังและหินคลุกผสมซีเมนต์บดอัด ตามลำดับ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในฟังก์ชันกำลัง (Power Function) ดังต่อไปนี้

$$q_u = \frac{A}{(w/C)^B} \quad (4.2)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ ซึ่งแปรผันตามชนิดของดิน B จะเป็นตัวแปรที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ w/C ต่อกำลังอัด ค่า B ยิ่งมาก การเปลี่ยนแปลงจะมีค่ามากตาม ขณะที่ A จะทำให้



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินหินคลุกซีเมนต์บดอัด

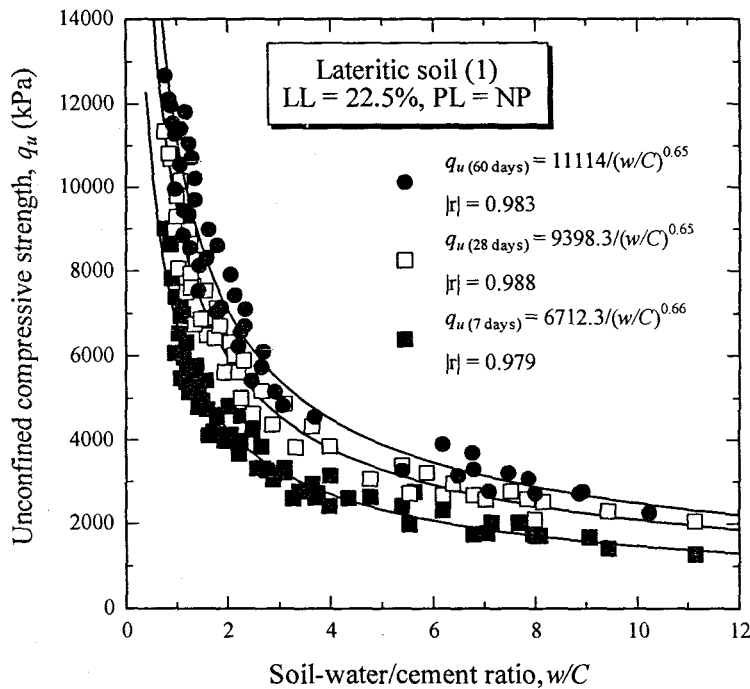
ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้ทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก ที่พลังงานและอัตราส่วนความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ใดๆ ได้ เมื่อทราบกราฟการบดอัดของดินที่พลังงานการบดอัดต่างๆ และค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก ที่อายุบ่มและ (w/C) ค่าหนึ่ง กราฟการบดอัดสามารถประมาณได้ อย่างง่าย โดยอาศัยแบบจำลองจากการสังเกตที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2004)

ข้อจำกัดของความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นคือไม่สามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่อายุบ่มใดๆ ได้ ซึ่งในทางปฏิบัติ อาจมีสถานการณ์ที่เราจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณซีเมนต์ เพื่อลดอายุบ่ม แต่ยังคงได้กำลังอัดตามต้องการ ด้วยเหตุนี้ จำเป็นต้องมีการศึกษาอิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียว พร้อมทั้งสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณน้ำในดิน และอายุบ่ม

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะบ่ม

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม ที่พลังงานการบดอัด ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ของดินลูกรังซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก ความสัมพันธ์เช่นเดียวกันสำหรับหินคลุกซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและ

ความสัมพันธ์เคลื่อนตัวขึ้นตามแนวแกน y ดังนั้น A จึงเป็นค่าที่แปรผันตามแต่ชนิดของดิน ดินที่ทำปฏิกิริยาได้ดีกับปูนซีเมนต์ (มีสภาพความเป็นพลาสติกต่ำ) จะมีค่า A สูง สำหรับดินชนิดหนึ่งผสมซีเมนต์บดอัด A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม อัตราการเปลี่ยนแปลงของ w/C ต่อกำลังอัด จะแปรผันอย่างมากกับประเภทของปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003) เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง ดังนั้น B จึงมีค่าประมาณคงที่ สำหรับดินทุกชนิด

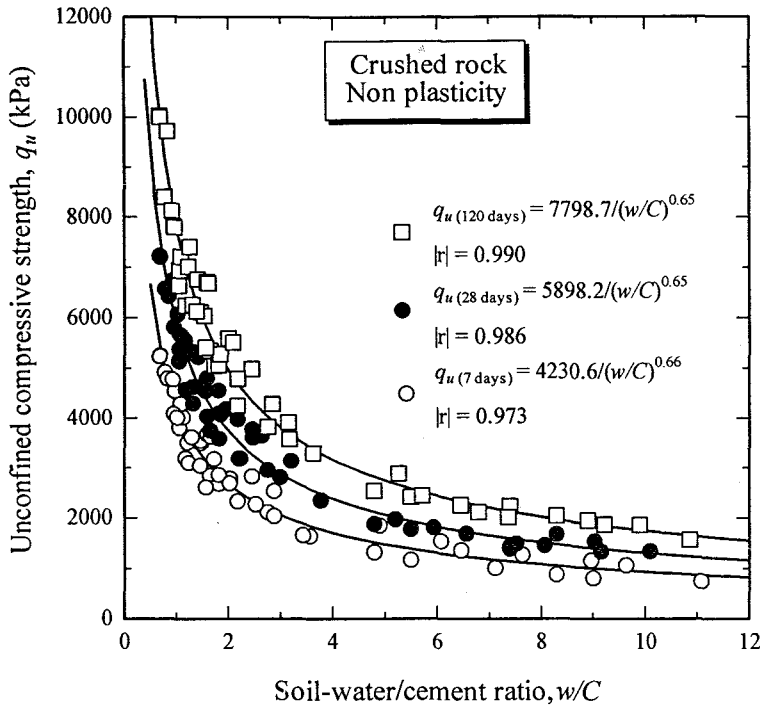


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินลูกรังซีเมนต์บดอัด

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 B มีค่าประมาณคงที่และมีค่าเท่ากับ 0.65 ด้วยเหตุนี้เอง อัตราส่วนกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก ที่ระยะบ่มค่าหนึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\left\{ \frac{q_{(w/C)_1}}{q_{(w/C)_2}} \right\} = \left[\frac{A/(w/C)_1^{0.65}}{A/(w/C)_2^{0.65}} \right] = \left[\frac{(w/C)_2}{(w/C)_1} \right]^{0.65} \quad (4.3)$$

เมื่อ $q_{(w/C)_1}$ คือกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ $(w/C)_1$ และ $q_{(w/C)_2}$ คือกำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่าที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ $(w/C)_2$



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินหินคลุกซีเมนต์บดอัด

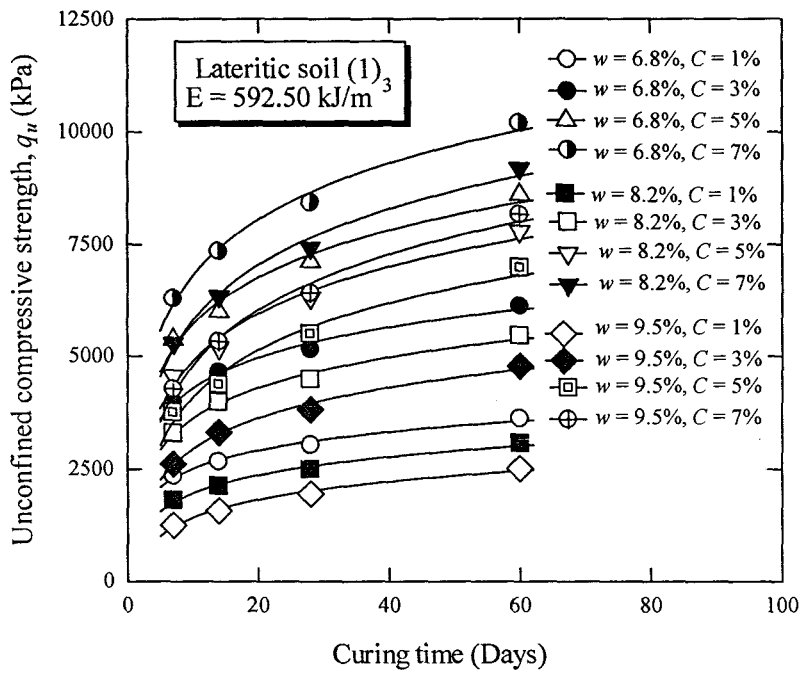
ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้ทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก ที่พลังงานและอัตราส่วนความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ใดๆ ได้ เมื่อทราบกราฟการบดอัดของดินที่พลังงานการบดอัดต่างๆ และค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก ที่อายุบ่มและ (w/C) ค่าหนึ่ง กราฟการบดอัดสามารถประมาณได้อย่างง่าย โดยอาศัยแบบจำลองจากการสังเกตที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2004)

ข้อจำกัดของความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นคือไม่สามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่อายุบ่มใดๆ ได้ ซึ่งในทางปฏิบัติ อาจมีสถานการณ์ที่เราจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณซีเมนต์ เพื่อลดอายุบ่ม แต่ยังคงได้กำลังอัดตามต้องการ ด้วยเหตุนี้ จำเป็นต้องมีการศึกษาอิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียว พร้อมทั้งสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณน้ำในดิน และอายุบ่ม

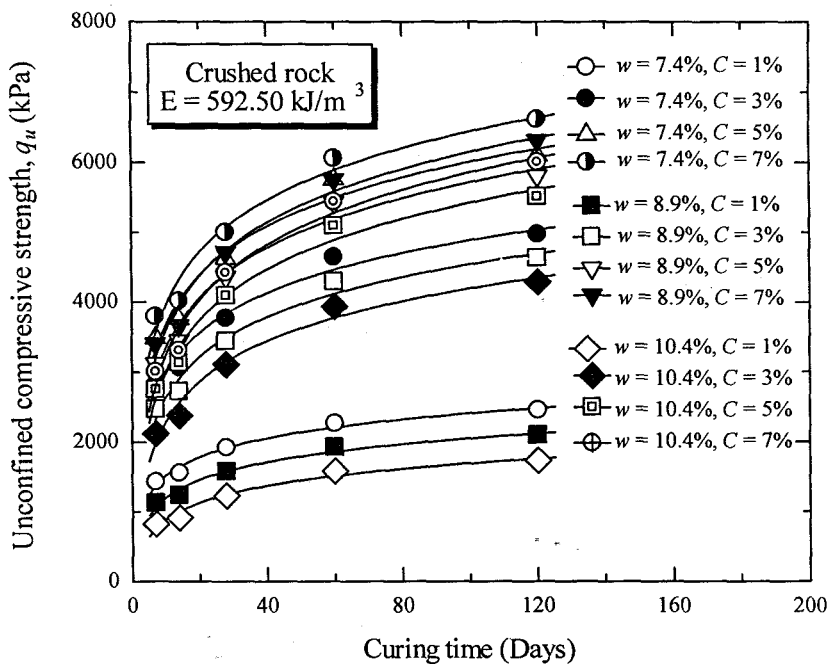
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะบ่ม

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม ที่พลังงานการบดอัด ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ของดินลูกรังซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก ความสัมพันธ์เช่นเดียวกันสำหรับหินคลุกซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและ

ด้านเปียกแสดงดังรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม (ในช่วง 7 ถึง 120 วัน) เป็นฟังก์ชันลอการิทึม



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรัง (1) ซีเมนต์บดอัดด้านเปียก ที่พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังซีเมนต์บดอัดด้านเปียก ที่พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 จะเห็นได้ว่า ที่ค่า w/C ค่าหนึ่ง การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียว ถูกควบคุมด้วยตัวแปร A เนื่องจากตัวแปร B มีค่าประมาณคงที่ ด้วยเหตุนี้เอง ความสัมพันธ์ทั่วไป ระหว่างการพัฒนาำลังและอายุบ่มสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{q_{D1}}{q_{D2}} = \frac{A_{D1}}{A_{D2}} \quad (4.4)$$

เมื่อ q_{D1} คือกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าที่อายุบ่ม D_1 วัน q_{D2} คือกำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่าที่อายุบ่ม D_2 วัน และ A_{D1} และ A_{D2} คือค่าของ A ที่สอดคล้องกับ D_1 และ D_2 ตามลำดับ

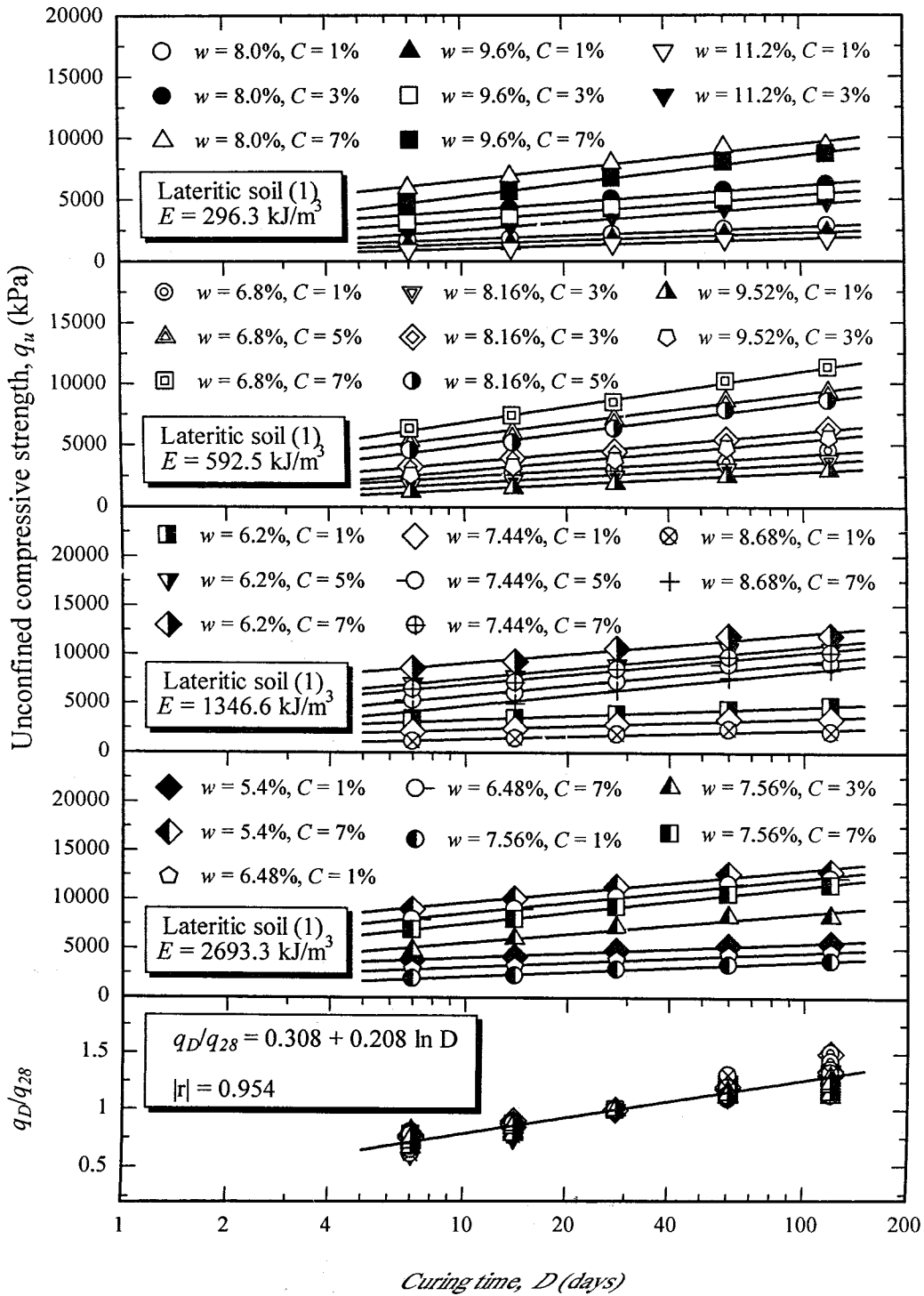
ดังได้กล่าวแล้วข้างต้นว่า ค่าของ A จะมีความแตกต่างกันตามแต่ละชนิดของดินบดอัด และอายุบ่ม แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดต่อเวลาควรจะต้องมีค่าเท่ากันสำหรับดินซีเมนต์บดอัดทุกชนิด เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นตัวแปรหลักในการควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด ด้วยเหตุนี้เอง สมการดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นสมการเอกภาพสำหรับดินซีเมนต์บดอัดทุกชนิด ในทางปฏิบัติ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ถ้าเราสามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่เวลาใดๆ ในพจน์ของอายุบ่มเพียงอย่างเดียว ความพยายามดังกล่าวได้รับการจัดทำขึ้นโดยอาศัยสมมติฐานข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและลอการิทึมของอายุบ่ม ของดินลูกรัง (1) และหินคลุกผสมซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก ถึงแม้ว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ได้จะมีความชันแตกต่างกัน ตามแต่พลังงานการบดอัด ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม แต่อย่างไรก็ตาม โดยอาศัยการ Normalization อิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวจะได้รับการพิจารณาและสามารถแสดงโดยสมการเส้นตรงเพียงเส้นเดียว ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{q_D}{q_{28}} = a + b \ln D \quad (4.5)$$

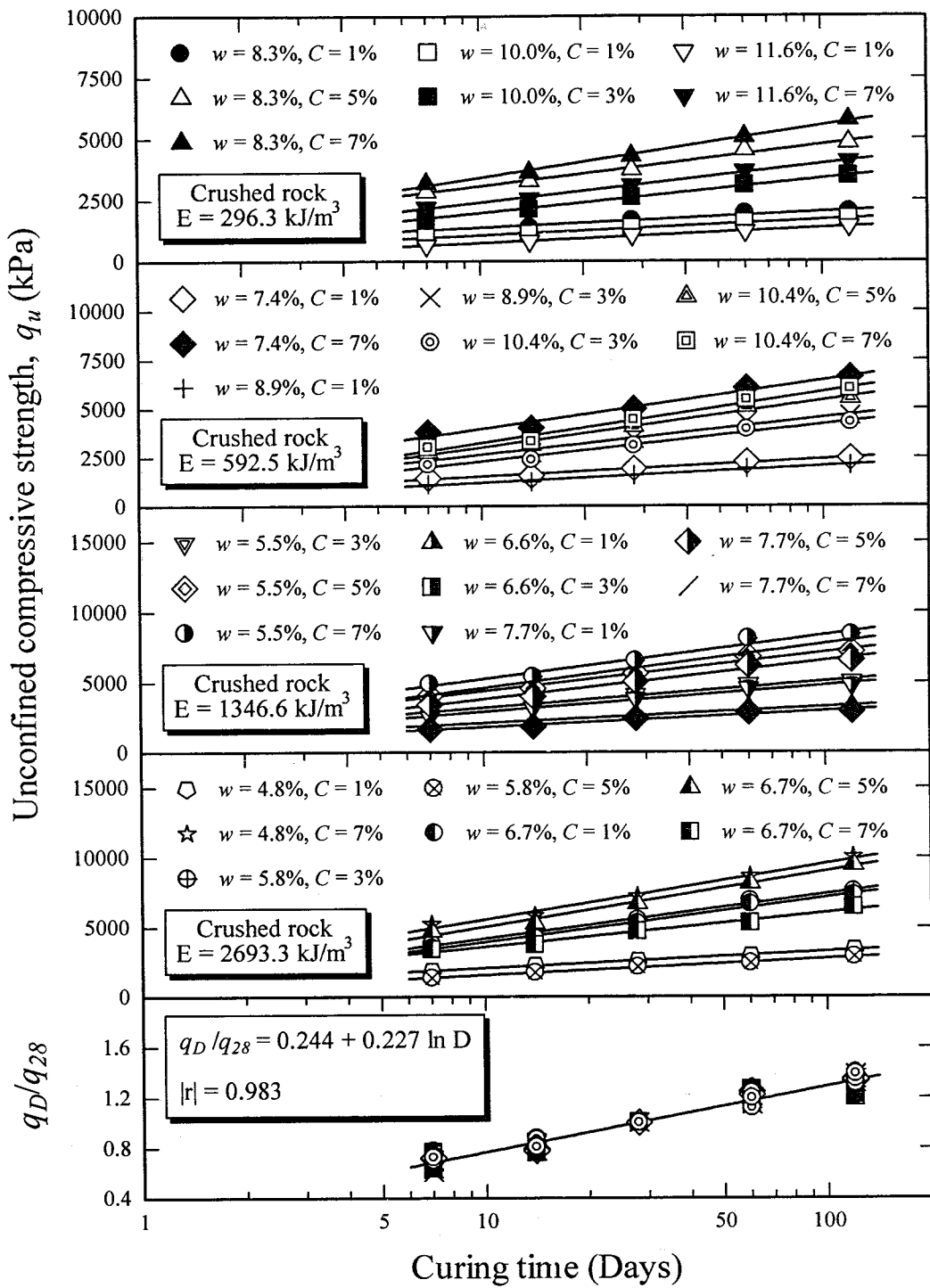
เมื่อ q_D คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม D วันใดๆ q_{28} คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 28 วัน a และ b เป็นค่าคงที่ จากการศึกษาคพบว่า a และ b มีค่าเท่ากับ 0.308 และ 0.208 ตามลำดับ สำหรับดินลูกรังซีเมนต์ และ 0.244 และ 0.277 ตามลำดับ สำหรับหินคลุกซีเมนต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าสมการดังกล่าวสามารถกำจัดอิทธิพลของชนิดของดินได้จากการใช้ Linear regression ของผลทดสอบทั้งหมด เราจะได้สมการการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดดังต่อไปนี้ (ดูรูปที่ 4.22)

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.269 + 0.219 \ln D$$

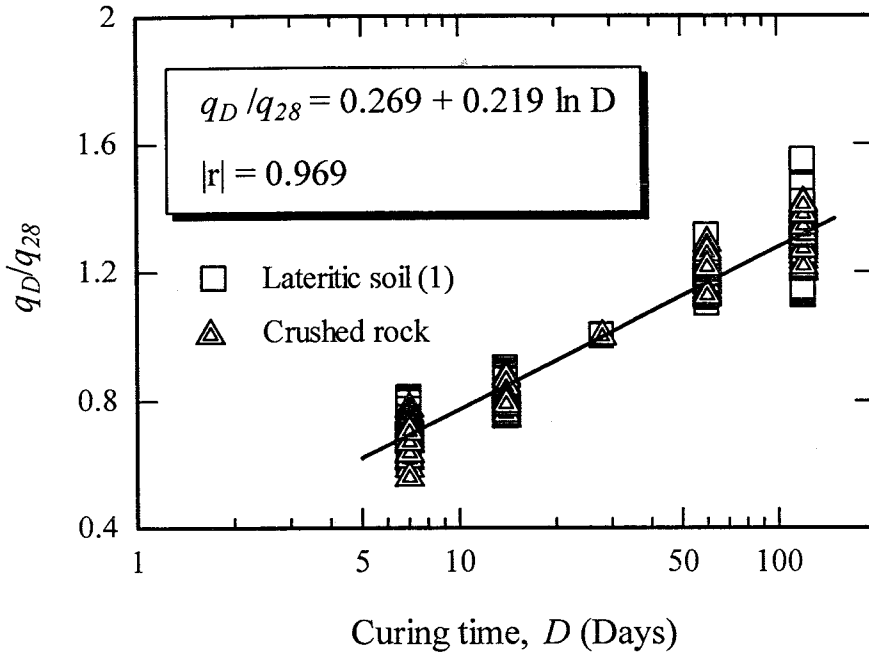
(4.6)



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังซีเมนต์บดอัดที่พลังงานการบดอัดต่างๆ และการ Normalization



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแกนเดียวและอายุบ่มของหินคลุกซีเมนต์บดอัดที่พลังงานการบดอัดต่างๆ และการ Normalization



รูปที่ 4.22 Normalized strength development ของดินลูกรังและหินคลุกซีเมนต์บดอัด

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด อัตราส่วนปริมาตรน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม

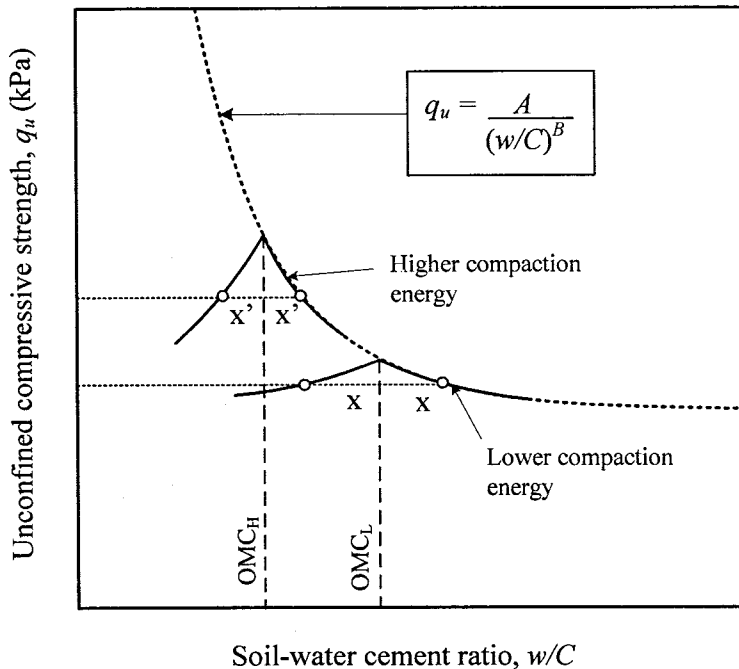
จากการศึกษา เราพบว่าค่าของ B มีค่าประมาณ 0.65 ด้วยเหตุนี้เอง ทำให้เราได้สมการอัตราส่วนกำลังที่อายุบ่มใดๆ ซึ่งค่าของ A จะถูกตัดทอนออกไป จากการรวมสมการดังกล่าวนี้กับสมการอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด ซึ่งแปรผันตามอายุบ่มเท่านั้น เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาตรความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม ในช่วงที่ w/C มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 10 ดังนี้

$$\left\{ \frac{q_{(w/C)_D}}{q_{(w/C)_{28}}} \right\} = \left[\frac{(w/C)_{28}}{(w/C)_D} \right]^{0.65} (0.269 + 0.219 \ln D) \quad (4.7)$$

เมื่อ $q_{(w/C)_{1,D}}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบ ที่ w/C หลังจากอายุบ่ม D วัน
 $q_{(w/C)_{28}}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทราบค่า ที่ระยะบ่ม 28 วัน

เมื่อ $(w/C)_D = (w/C)_{28}$ พจน์ทางซ้ายมือของสมการที่ (4.7) จะมีค่าเท่ากับ 1.0 และพจน์ทางขวามือจะมีค่าเท่ากับ 0.999 สิ่งนี้ยืนยันการความเป็นไปได้ในการใช้สมการนี้เพื่อทำนายกำลังอัดที่อายุบ่ม และ (w/C) ค่าอื่นๆ

แต่อย่างไรก็ดี สมการดังกล่าวนี้ใช้ได้เฉพาะกับดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียกเท่านั้น ถึงแม้ว่าสมการนี้จะไม่ได้แสดงตัวแปรพลังงาน แต่อิทธิพลของพลังงานการบดอัดแฝงอยู่ในสมการนี้ เนื่องจากพลังงานจะทำให้ปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินลดลง ก่อนที่จะใช้สมการดังกล่าวต้องตรวจสอบให้แน่ใจเสียก่อนว่า กำลังอัดที่ต้องการทราบค่าที่ปริมาณความชื้นใดๆ ต้องเป็นปริมาณความชื้นที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียกเท่านั้น ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่พลังงานการบดอัดที่ต้องการทราบค่า (โดยอาจประมาณได้จากสมการที่ 4.1) กำลังอัดของดินซีเมนต์ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม ในช่วง 0.8 ถึง 1.0 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม สามารถประมาณได้โดยอาศัยสมมติฐานที่ได้จากการสังเกต ที่ว่า ในช่วงปริมาณความชื้นดังกล่าว กำลังอัดของดินซีเมนต์ด้านแห้งและด้านเปียกมีความสมมาตรรอบปริมาณความชื้นเหมาะสม แบบจำลองจากการสังเกต (Phenomenological model) แสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด

ผลการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยอาศัยแบบจำลองในรูปที่ 4.23 และสมการที่ (4.7) แสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 สำหรับดินลูกรังซีเมนต์บดอัด (ซีระชาติและสมบัติกระแสด 2544) และดินลูกรัง (2) ผสมกับหินคลุก ในอัตราส่วน 80:20 ผสมซีเมนต์บดอัด ตามลำดับ ผลทดสอบของซีระชาติและสมบัติกระแสด เป็นผลทดสอบดินลูกรังที่มีขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับ 36 และ 16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเป็นผลทดสอบกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่านั้น

ตารางที่ 4.2 การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด ($LL = 36\%$, $PL = 16\%$)
(ธีระชาติ และสมบัติกระแสน, 2544)

Compaction Energy, E (kJ/m ³)	Optimum moisture content, OMC (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	Moisture content, w (%)	Water/cement ratio, w/C	Laboratory strength, q_u (kPa)	Predicted strength, q_{up} (kPa)
296.3	13.5	3	3	13.5	4.5	986	791
296.3	13.5	3	5	13.5	2.7	1185	1102
296.3	13.5	3	7	13.5	1.9	1843	1372
296.3	13.5	7	3	13.5	4.5	1200	1079
296.3	13.5	7	5	13.5	2.7	1562	1504
296.3	13.5	7	7	13.5	1.9	2048	1871
296.3	13.5	14	3	13.5	4.5	1265	1314
296.3	13.5	14	5	13.5	2.7	1718	1832
296.3	13.5	14	7	13.5	1.9	2279	2280
296.3	13.5	28	3	13.5	4.5	1479	1550
296.3	13.5	28	5	13.5	2.7	2248	2160
296.3	13.5	28	7	13.5	1.9	2868	2688
592.5	11.5	3	3	11.5	3.8	1354	878
592.5	11.5	3	5	11.5	2.3	1651	1223
592.5	11.5	3	7	11.5	1.6	2169	1522
592.5	11.5	7	3	11.5	3.8	1536	1197
592.5	11.5	7	5	11.5	2.3	2107	1669
592.5	11.5	7	7	11.5	1.6	2415	2077
592.5	11.5	14	3	11.5	3.8	1682	1459
592.5	11.5	14	5	11.5	2.3	2281	2033
592.5	11.5	14	7	11.5	1.6	2807	2530
592.5	11.5	28	3	11.5	3.8	1786	1720
592.5	11.5	28	5	11.5	2.3	2551	2397
592.5	11.5	28	7	11.5	1.6	3039	Reference

ตารางที่ 4.3 การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด
ที่มีอัตราส่วนดินลูกรังต่อหินคลุก 80: 20

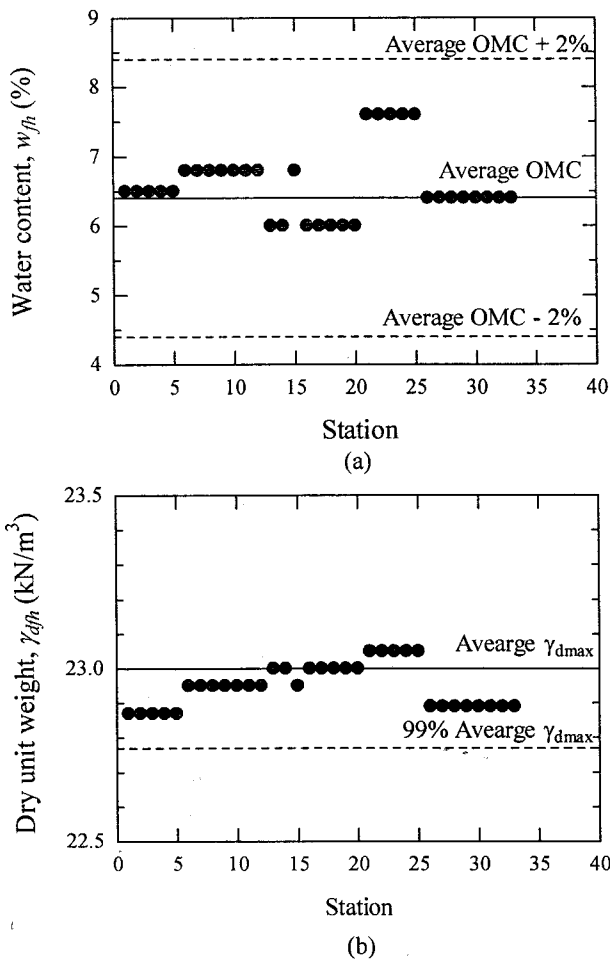
Compaction Energy, E (kJ/m ³)	Optimum moisture content, OMC (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	Moisture content, w (%)	Water/cement ratio, w/C	Laboratory strength, q_u (kPa)	Predicted strength, q_{up} (kPa)
2963.3	8.0	7	1	8.8	8.8	526	613
2963.3	8.0	7	1	11.2	11.2	311	524
2963.3	8.0	7	3	8.4	2.8	1761	1290
2963.3	8.0	7	5	9.3	1.9	1930	1683
2963.3	8.0	7	7	10.6	1.5	1578	1924
2963.3	8.0	14	1	8.2	8.2	676	782
2963.3	8.0	14	1	10.7	10.7	378	658
2963.3	8.0	14	3	8.1	2.7	1688	1609
2963.3	8.0	14	3	10.8	3.6	1419	1335
2963.3	8.0	14	5	8.6	1.7	2034	2158
2963.3	8.0	14	5	9.7	1.9	1755	1995
2963.3	8.0	14	7	9.1	1.3	2599	2588
2963.3	8.0	14	7	11.2	1.6	2261	Reference

จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 เราสามารถสรุปได้ว่าสมการทำนายกำลังอัดและแบบจำลองที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณความชื้นก่อนผสม ด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ภายใต้พลังงานในช่วง 293.3 ถึง 2963.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร และอายุบ่ม 7 ถึง 120 วัน ผลการคำนวณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบมาก ($0.8 < q_{up}/q_{ul} < 1.2$) ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในงานวิศวกรรม

4.9 การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในสนาม

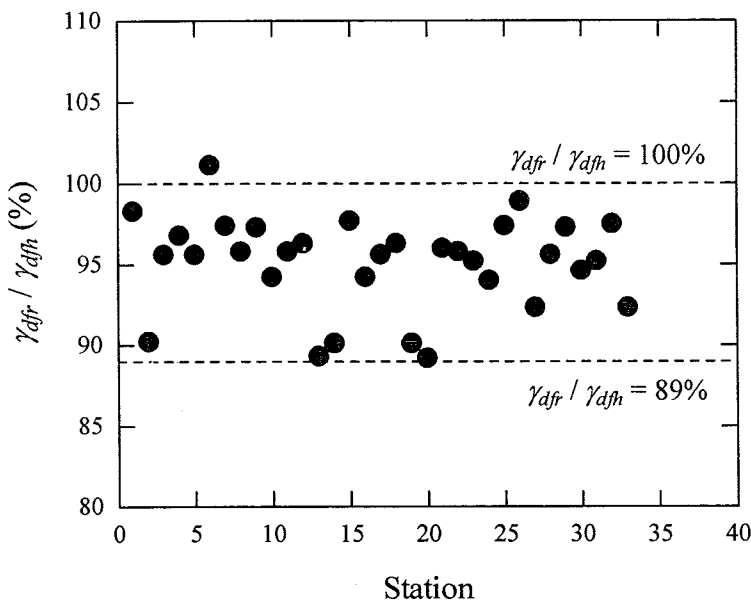
เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดจากงานวิจัยนี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าวในการทำนายการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในสนาม ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในสนาม คือความแปรปรวนของวัสดุผิวทาง ปริมาณความชื้น วิธีการบดอัด และความไม่สม่ำเสมอของการผสมดินกับซีเมนต์ ปัจจัยเหล่านี้ได้รับการศึกษาโดยการเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์จากถนนที่ได้รับการปรับปรุงด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement recycling technique) สายหนึ่งในจังหวัดเพชรบูรณ์ ที่สถานี (Station) ต่างๆ จำนวน 33

สถานี โดยแต่ละสถานีมีระยะห่างกันเท่ากับ 150 เมตร ตัวอย่างดินซีเมนต์ในสนามจะถูกเก็บโดยใช้ Coring cutter และตัดแต่งให้มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงเท่ากับ 1.0 ซึ่งเท่ากับก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในการทดสอบจะควบคุมให้ปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์บดอัดที่ได้จากการผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Field roller-compacted sample) มีค่าอยู่ระหว่าง $OMC \pm 2$ และหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าระหว่าง 98 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินบดอัด โดยที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดนั้นเป็นค่าเฉลี่ยของผลทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินตัวอย่างที่เก็บจากบริเวณก่อสร้าง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.4 เปอร์เซ็นต์ และ 23.05 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ การผสมในสนามจะกระทำโดยเครื่องจักร ซึ่งจะขุดลอกผิวทางเดิมที่ชำรุด (ความหนาประมาณ 20 เซนติเมตร) ผสมกับน้ำและปูนซีเมนต์ในปริมาณที่กำหนด ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ได้จากการสุ่มทดสอบ (Trial test) ในห้องปฏิบัติการจนได้กำลังอัดเท่ากับ 2800 กิโลปาสกาล ที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของดินซีเมนต์บดอัดที่สถานีต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.24 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด



รูปที่ 4.24 หน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์บดอัดในสนาม

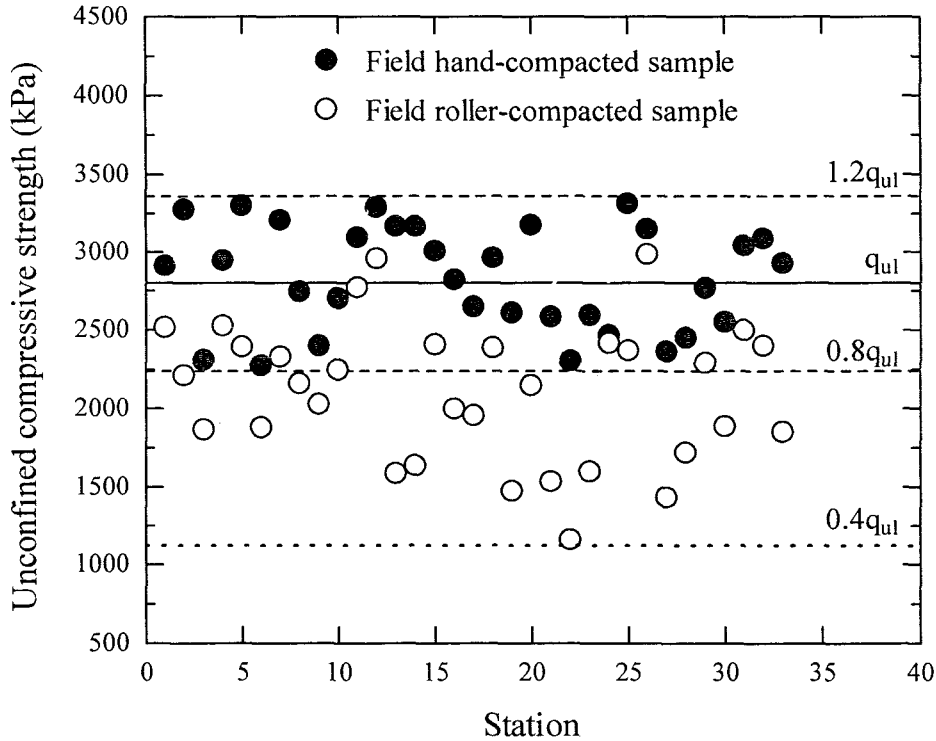
ประสิทธิภาพการบดอัดดินซีเมนต์ในสนามด้วยรถบดอัดถูกควบคุมโดยกำหนดว่าอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าไม่ต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 4.25 แสดงอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งของดินซีเมนต์บดอัดที่สถานีต่างๆ โดยที่ γ_{dfr} คือหน่วยน้ำหนักแห้งของดินตัวอย่างที่ได้จากการผสมในสนามและทำการบดอัดโดยรถบดอัด ซึ่งได้จากการผลทดสอบกรวยทราย (Sand cone test) และ γ_{dfh} คือหน่วยน้ำหนักแห้งของดินตัวอย่างที่ได้จากการผสมในสนามและทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ จะเห็นได้ชัดว่าอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าประมาณ 89 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ด้วยข้อมูลส่วนใหญ่ที่มีอัตราส่วนน้ำหนักแห้งสูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ สิ่งนี้ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการบดอัดของดินในสนามเป็นไปตามที่กำหนด



รูปที่ 4.25 อัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งที่สถานีต่างๆ

รูปที่ 4.26 แสดงกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ได้จากการผสมในสนามและทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Field hand-compacted strength, q_{ufh}) และกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ได้จากการผสมในสนามและทำการบดอัดโดยรถบดอัด (Field roller-compacted strength, q_{ufr}) เปรียบเทียบกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory strength, q_{ul}) จะเห็นได้ว่ากำลังอัดที่ได้จากการผสมในสนามและทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการมีค่าระหว่าง 0.8 ถึง 1.2 เท่าของกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาจเกิดจากความแปรปรวนของอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (Soil-water/cement ratio) ในสนาม เนื่องจากการปรับปรุงถนนที่ชำรุด ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำที่ใช้มีค่าคงที่ตลอดสถานีทดสอบ แต่อาจมีการแปรปรวนของปริมาณความชื้นและสภาพชั้นดินอันเกิดจากอัตราส่วนผสมระหว่างหินคลุก (ชั้นทาง) และดินลูกรัง (ชั้นรองพื้นทาง) ในแต่ละสถานีทดสอบ อัตราส่วนกำลังอัดนี้มีค่าประมาณเท่ากับ

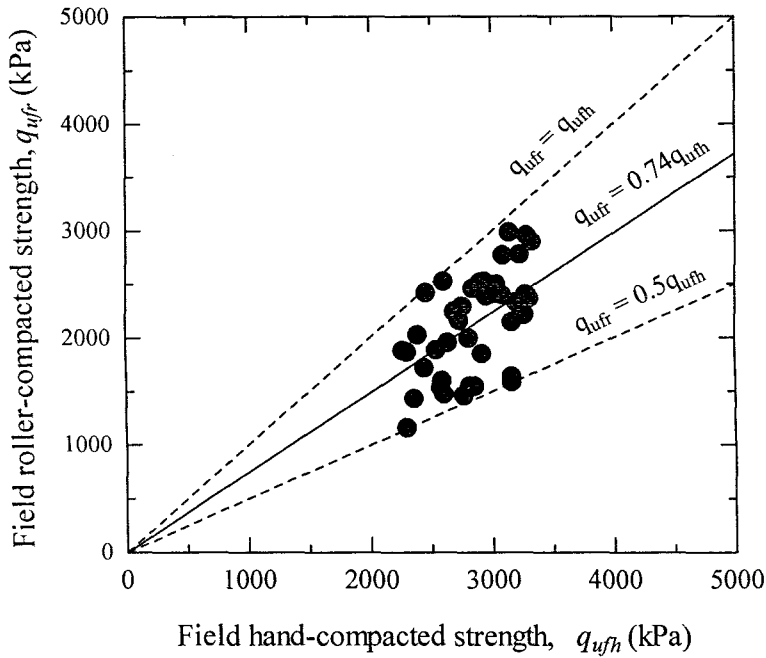
อัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ได้จากการทำนายและที่ได้จากห้องปฏิบัติการ สิ่งนี้เป็นการยืนยันให้เห็นว่าในทางปฏิบัติ เราสามารถใช้สมการทำนายกำลังอัดที่นำเสนอข้างต้นในการประมาณกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด โดยมีความผิดพลาดที่ยอมรับได้



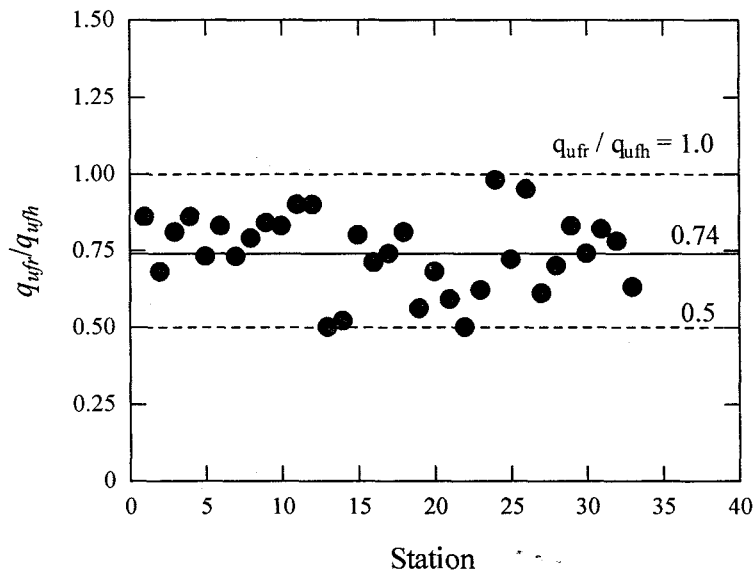
รูปที่ 4.26 กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ได้จากการผสมในสนามและทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการและโดยรถบดอัดที่อายุบ่ม 7 วัน

ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการบดอัดดินในสนามมีค่าสูงพอสมควรในทางปฏิบัติ แต่ผลทดสอบ (รูปที่ 4.26) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมในสนามและบดอัดโดยรถบดอัดและโดยการบดอัดในห้องปฏิบัติการ กำลังอัดของดินตัวอย่างที่ได้จากการผสมในสนามและบดอัดด้วยรถบดอัด (q_{ufr}) มีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของดินตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบห้องปฏิบัติการมาก ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 1.0 เท่าของกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และมีค่าประมาณ 0.5 ถึง 1.0 เท่าของกำลังอัดที่ได้จากการผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการเก็บจากเครื่องผสมดินในส่วนท้ายของเครื่องยนต์ ส่วนตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดด้วยรถบดอัดได้จากตัวอย่างที่เจาะเก็บด้วย Coring cutter ที่ตำแหน่งเดียวกับที่เก็บตัวอย่างสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังนั้น ดินตัวอย่างที่ได้จะมีปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์เท่ากัน แต่มีวิธีการบดอัดและสภาพการบ่มที่ความแตกต่างกัน ลักษณะการบดอัดที่ต่างกันทำให้ได้ลักษณะของแฟบริก

(Fabric) ที่แตกต่างกัน ดังได้อธิบายโดย Day and Daniel (1985) และ Prapaharan et al. (1991) การบ่มในสนามจะเกิดการสูญเสียน้ำมากกว่าในห้องปฏิบัติการเนื่องจากสภาพที่ร้อนชื้นของประเทศไทย ปัจจัยทั้งสองนี้ทำให้กำลังอัดของดินตัวอย่างที่เก็บจากถนนดินซีเมนต์มีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ได้รับการผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ



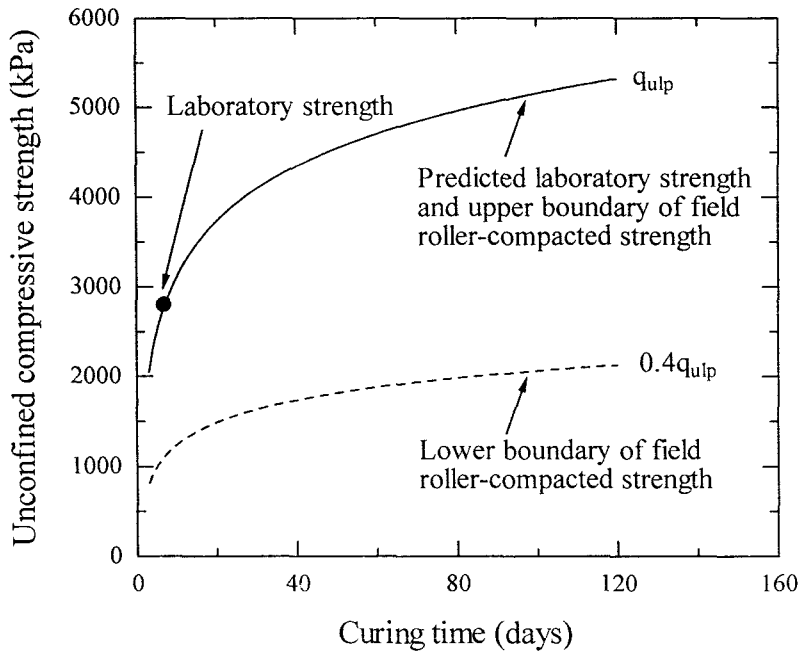
(a)



(b)

รูปที่ 4.27 ผลเปรียบเทียบกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ได้จากการผสมในสนามและบดอัดด้วยรถบดอัดกับกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ได้จากการผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ที่อายุบ่ม 7 วัน

จากความรู้ที่ได้ข้างต้น (กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่บดอัดโดยรถบดอัดจะมีค่าประมาณ 40 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังอัดในห้องปฏิบัติการ) เราสามารถประมาณกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในสนามตลอดถนนที่ปรับปรุง ได้โดยอาศัยผลทดสอบกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ได้จากดินตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ การประมาณกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดโดยรถบดอัดที่อายุบ่มใดๆ สามารถกระทำได้ดังแสดงในรูปที่ 4.28 โดยอาศัยสมการที่ (4.6) ดังนั้น กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในสนามจะมีค่าอยู่ระหว่างเส้นทึบและเส้นประ



รูปที่ 4.28 การทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดด้วยรถบดอัด

4.10 ข้อเสนอแนะในการทำงานทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม

การปรับปรุงผิวจราจรที่เสียหายโดยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ จะเริ่มต้นจากการกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับปริมาณความชื้นในสนาม เพื่อให้ได้กำลังอัดที่ต้องการ (Target strength) ในระยะเวลาที่กำหนด จากการศึกษา กำลังอัดที่ต้องการในสนามควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของกำลังอัดที่ต้องการในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากความแปรปรวนของสภาพชั้นดิน ปริมาณความชื้น วิธีการบดอัด และสภาพการบ่ม

เพื่อให้ได้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่สอดคล้องกับกำลังอัดที่ต้องการ จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างดินในสนามหลายๆ ตำแหน่ง และทำการทดสอบหลายครั้ง (Trial test) จนได้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม การทำงานสามารถทำได้ง่ายขึ้นโดยการใช้กำลังอัดที่อายุบ่ม ปริมาณซีเมนต์ และปริมาณน้ำค่าหนึ่ง เป็นค่าอ้างอิง เพื่อทำนายอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (Soil-water/cement

ratio, w/C) ภายใต้พลังงานและอายุบ่มที่ต้องการ โดยที่ความแปรปรวนของผลทำนายมีค่าอยู่ระหว่าง 80 ถึง 120 เปอร์เซ็นต์

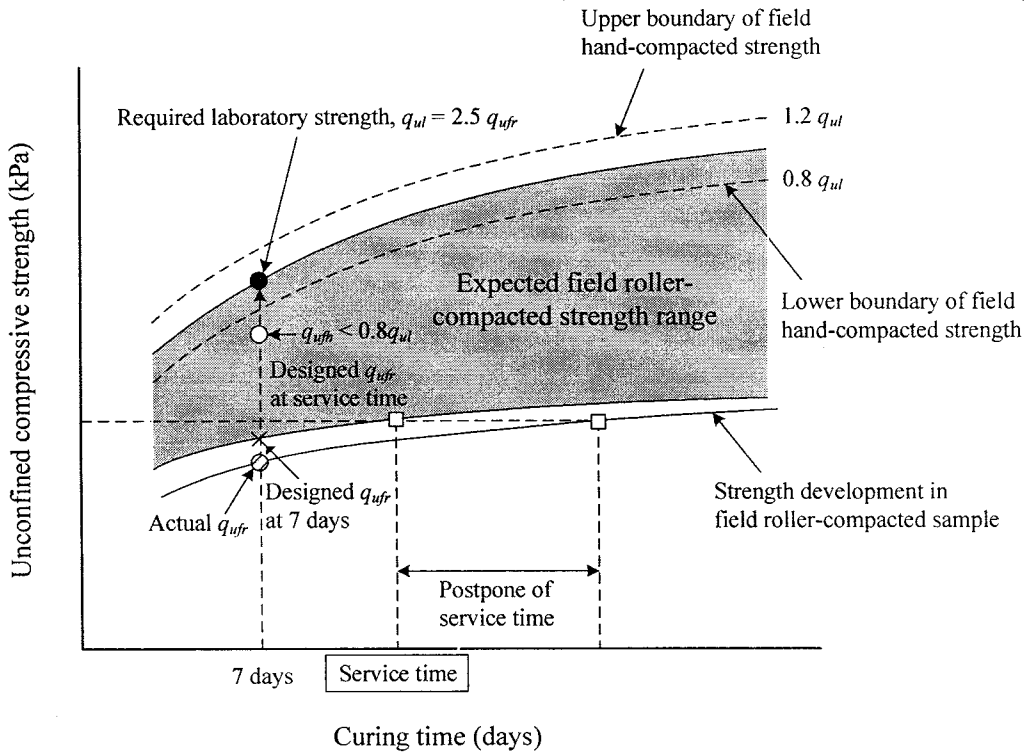
เมื่อได้ปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับถนนทั้งเส้นที่ต้องการปรับปรุงแล้ว ก็เริ่มทำการปรับปรุงถนนด้วยปริมาณน้ำและซีเมนต์ที่หาได้จากห้องปฏิบัติการและบดอัดด้วยรถบดจนได้พลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน การควบคุมประสิทธิภาพการบดอัดสามารถกระทำโดยการตรวจสอบอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้ง (ภายในเวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง หลังการปรับปรุงถนน) ให้มีค่าไม่น้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่สถานะนี้ กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดโดยรถบดอัดมีค่าระหว่าง 80 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ เมื่อบดอัดถนนแล้วเสร็จ ก็ต้องทำการตรวจสอบกำลังอัดของถนนดินซีเมนต์ว่าเป็นไปตามที่กำหนดในวันที่เปิดใช้ถนน (Service time) หรือไม่ โดยการเก็บตัวอย่างจากถนนมาทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ขั้นตอนการทำงานและตรวจสอบคุณสมบัติของถนนที่ได้รับปรับปรุงด้วยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ เมื่อทราบค่ากำลังอัดที่ต้องการสำหรับวันเปิดใช้ถนน (Service time) สามารถสรุปได้ดังนี้ (รูปที่ 4.29)

1. ประมาณกำลังอัดที่ต้องการในสนามที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งอาจหาจากการทดสอบหรือการประมาณจากสมการที่ (4.6)
2. ประมาณกำลังอัดที่ต้องการในห้องปฏิบัติการที่อายุบ่ม 7 วัน โดยใช้อัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2.5
3. หาอัตราส่วนปริมาณซีเมนต์ที่ให้กำลังอัดที่ต้องการตามข้อ 2 ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม และพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน
4. ทำการปรับปรุงถนนด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ โดยการควบคุมอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งให้มีค่าไม่น้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์
5. เก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมในสนาม เพื่อนำมาทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานในห้องปฏิบัติการ
6. ทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน
7. ถ้ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังอัดที่ต้องการในห้องปฏิบัติการ เราสามารถสรุปได้ว่า ถนนที่สถานีนี้นี้มีความแข็งแรงตามเกณฑ์
8. ถ้าพบว่ากำลังอัดมีค่าน้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังอัดที่ต้องการในห้องปฏิบัติการ ต้องทำการเก็บตัวอย่างจากถนน เพื่อนำตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ
- 8.1 ถ้าได้กำลังอัดตามต้องการ แสดงว่าถนนมีความแข็งแรงตามเกณฑ์

8.2 ถ้าพบว่าการกำลังอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์จากถนนมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไม่มากนัก อาจเลื่อนเวลาการเปิดใช้ถนนในช่วงสถานที่ที่มีปัญหาออกไปอีก ดังแสดงในรูปที่ 4.28

8.3 ถ้าพบว่าการกำลังอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์จากถนนมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดมาก ทำการปรับปรุงถนนเฉพาะสถานที่ที่มีปัญหา



รูปที่ 4.29 สรุปขั้นตอนการทำงานการปรับปรุงถนนด้วยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่

บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองส่วนประกอบหลัก อันได้แก่ การศึกษาลักษณะและการทำนายกราฟการบดอัด และการศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ พลังงานการบดอัด และอายุบ่ม ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด รวมถึงการสร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในห้องปฏิบัติการและในสนาม บทสรุปของงานวิจัยนี้สามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

แบบจำลองทำนายกราฟการบดอัด

1. เส้นกราฟการบดอัดทางด้านแห้งของดินบดอัดชนิดหนึ่งๆ ถูกควบคุมโดยตัวแปร $m/S^{0.5}$ ถึงแม้ว่าดินบดอัดจะมีปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำแห้งต่างกัน แต่ตัวแปร $m/S^{0.5}$ จะมีค่าคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด ตัวแปร $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_s$ ถูกสร้างขึ้นเพื่อขจัดอิทธิพลของชนิดของดิน
2. ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและปริมาณความชื้นทางด้านเปียก เส้นกราฟการบดอัดจะเป็นเส้นโค้งเดียวกันสำหรับทุกพลังงานการบดอัด
3. แบบจำลองที่เสนอในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้นอกจากจะสามารถใช้สร้างกราฟการบดอัดได้กับดินทุกชนิดและทุกพลังงานการบดอัดแล้ว ยังสามารถประมาณค่าพลังงานการบดอัดที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ต้องการ อีกทั้งยังสามารถใช้ตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้อีกด้วย

แบบจำลองทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด

4. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้น ของดินซีเมนต์บดอัดในช่วงปริมาณความชื้นระหว่าง 80 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum moisture content) มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ปริมาณความชื้นที่ให้กำลังอัดสูงสุด คือปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินก่อนผสมซีเมนต์
5. ตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดด้านเปียก คืออัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ (Soil-water/cement ratio, w/C) พลังงานการบดอัดเพียงแคมีส่วนช่วยในการลดปริมาณความชื้นเหมาะสม
6. สมการทำนายกำลังอัดของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์ทุกชนิด ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก ที่อายุบ่มใดๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\left\{ \frac{q_{(w/C)_D}}{q_{(w/C)_{28}}} \right\} = \left[\frac{(w/C)_{28}}{(w/C)_D} \right]^{0.65} (0.269 + 0.219 \ln D)$$

7. โดยอาศัยแบบจำลองจากการสังเกต (Phenomenological model) เราสามารถประมาณกำลังอัดของดินซีเมนต์ด้านข้างได้ทันทีหลังจากทราบค่ากำลังทางด้านเปียกแบบจำลองที่น่าเสนอนี้ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องแล้ว และพบว่าค่าที่ประมาณมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบ
8. ภายใต้อายุบ่มเดียวกัน พลังงานการบดอัดที่ใกล้เคียงกัน และปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ที่เท่ากัน กำลังอัดของถนนดินซีเมนต์มีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในห้องปฏิบัติการประมาณ 0.4 ถึง 1.0 เท่า ดังนั้น กำลังอัดที่กำหนดในห้องปฏิบัติการต้องมีค่ามากกว่ากำลังอัดที่ต้องการในสนามอย่างน้อย 2.5 เท่า
9. ขั้นตอนการทำงานและตรวจสอบคุณสมบัติของถนนที่ได้รับการปรับปรุงด้วยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ เมื่อทราบค่ากำลังอัดที่ต้องการสำหรับวันเปิดใช้ถนน ได้นำเสนอในรายงานฉบับสมบูรณ์ โดยอาศัยผลทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม

ประวัตินักวิจัย

นายสุขสันต์ หอพิบูลสุข เกิดเมื่อวันที่ 28 พฤศจิกายน พ.ศ. 2518 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2539 ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ในปี พ.ศ. 2541 และระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัย Saga ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2544

นายสุขสันต์ หอพิบูลสุข ได้เริ่มปฏิบัติงานในตำแหน่งอาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2545 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มีความชำนาญทางด้านลักษณะทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ การพัฒนาแบบจำลองดินเหนียว และการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินด้วยการผสมซีเมนต์ ปัจจุบันมีผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารและสัมมนาวิชาการระดับนานาชาติและระดับประเทศกว่า 50 เรื่อง

- 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.
- Turnbull, W.J. (1948). Computation of the Optimum Moisture Content in the Moisture-Density Relationship of Soils. Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Vol.4, pp.256-262.
- Turnbull, W.J. (1950). Compaction and Strength Tests on Soil. Annual Meeting ASCE (January), 1950.
- 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.

- Nagaraj, T.S. and Srinivasa Murthy, B.R. (1985). Compressibility of partly saturated soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111, No.7, pp.937-942.
- Nagaraj, T.S. and Tiwari, S.S. (1985). Prediction of strength of partly saturated soils. Proceedings of 1st International Conference on Geomechanics in Tropical Laterite and Saprolitic Soils, Sao Paulo, Brazil, pp.359-370.
- Nagaraj, T.S., Srinivasa Murthy, B.R. and Vatasala, A. (1994), Analysis and Prediction of Soil Behavior, Wiley Eastern Limited, 294p.
- 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. Vol.40, No.2, pp.303-305.
- Nontananandh, S., and Yupakorn, A. (2002). Influence of cement content and water content on strength of lateritic soil cement. Proc. Symposium on Soft Ground Improvement and Geosynthetic Applications, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 281-294.
- 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.
- Prapaharan, S., White, D.M., and Altschaeffl, A.G. (1991). Fabric of field- and laboratory-compacted clay. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 117. No. 12. pp. 1934-1940.
- Ruennkraiengsa, T. (1982). Principal of Soil Stabilization. Group Training in Road Construction. Bangkok. Thailand. pp. 17 – 26.
- Ramiah, B.K., Viswanath, V. and Krihnamurthy, H.V. (1970). Interrelationship of Compaction and Index Properties. Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, 1970, pp.577-587.
- Santucci De Magistris, F. and Tatsuoka, F. (2004). Effects of moulding water content on the stress-strain behavior of a compacted silty sand. Soils and Foundations, Vol.44, No.2, pp.85-101.
- Terashi, M., Tanaka, H. and Okumura, T. (1979). Engineering properties of lime treated marine soils and DMM. Proceedings of 6th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.191-194.

- Horpibulsuk, S., Rachan, R. and Katkan, W. (2004). Phenomenological modeling of compaction curve. Proc. 5th International Symposium on Ground Improvement and Geosynthetics, Bangkok, Thailand, pp.131-137.
- Jeng, Y.S. and Strokm, W.E. (1976). Prediction of the Shear Strength and Compaction Characteristics of Compacted Fine-Grained Cohesive Soils, United States Waterways Experiment Station, Soil and Pavement Laboratory, Vicksburg, Miss.
- Joslin, J.C. (1959). Ohio's typical moisture-density curves. American Society for testing and materials, Special Technical Publication, STP 239, pp.111-118.
- Kamaluddin, M. and Balasubramaniam, A.S. (1995). Overconsolidated behavior of cement treated soft clay. Proceedings of 10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Thailand, 407-412.
- Kamom, M. and Bergado, D.T. (1992). Ground Improvement Techniques. Proceedings of 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, 2: 526-546.
- Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Honjo, Y. (1981). Deep mixing method using cement hardening agent. Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 721-724.
- Korfiatis, G.P. and Manikopoulos, C.N. (1982). Correlation of maximum dry density and grain size. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.108, No.GT9, pp.1171-1176.
- 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 14th National Conference on Clay and Clay Minerals. Vol 26. pp. 279 – 305.
- Mitchell, J.K., Hooper, D.R. and Campanella, R.G. (1965). Permeability of compacted clay. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.91, No.4, pp.41-65.
- Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T.S. (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content. Soils and Foundations, 41(5): 33-45.
- Moh, Z.C. (1965). Reaction of soil minerals with cement and chemical. Highway Research Board. pp. 39 – 61.
- Nagaraj, T.S. and Bindumadhava. (1992). Analysis of compaction characteristics of fine grained soils. Proceedings of Indian Geotechnical Engineering Conference, Calcutta, Vol.1, pp.441-444.

- Davidson, D.T. and Gardiner, W.F. (1962) Calculation of Standard Proctor Density and Optimum Moisture Content from Mechanical, Analysis, Shrinkage and Factors and Plasticity Index. Highway Research Board, Proceedings of the Annual Meeting, Vol.29, pp.447-481.
- 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.
- Day, S.R. and Daniel, D.E. (1985). Hydraulic conductivity of two prototype clay liners. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol. 111. No. 8. pp. 957-970.
- Digioia, A.M., Mclearn, 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 Krawczyk, J. (1963). Relative between strength and age for soil – cement with particular reference to the prediction of later strength from earlier strength. Magazine Concrete Research. pp. 21 – 30.
- Gurtug, Y. and Sridharan. (2002). Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils. Geotechnique, Vol.52, No.10, pp.761-763.
- 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. Vol.130, No.10, pp.1096-1105.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. (2005). Clay-water/cement ratio identity of cement admixed soft clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.131, No.2, pp.187-192.

เอกสารอ้างอิง

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

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

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแสน์ จรัสกร (2544). กำลังรับแรงอัดของดินที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน. รายงานวิจัยฉบับที่ วพ. 188, ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง. กรมทางหลวง.

มนสิข สาริกะภูมิ และ วุฒ จินตนาวัน (2539). คุณสมบัติทางแร่ภูเขาของเถ้าลอย (Fly Ash), Slag และ Silica Fume. โยธาสาร. หน้า 26–32.

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน (2546). ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา. หน้า 25–31.

สมชัย กกก้าแหง (2539). ศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้ประโยชน์. โยธาสาร. หน้า 31 –39.

ASTM, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, 2001.

Akoto, B.K.A. (1988). Influence of Fly Ash on the Strength Characteristics of Lime Lateritic 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.

Blotz, L.R., Benson, C.H. and Boutwell, G.P. (1998). Estimating Optimum Water Content and Maximum Dry Unit Weight for Compacted Clays. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.124, pp.907-912.

Boutwell, G. (1996). Effects of variation of fill construction on the material properties and the subsequent fill performance. Independent Study Rep., School of Civil engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Ga., 1996.

Daniel, D. and Benson, C. (1990). Water content-density criteria for compacted soil liners. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.116, No.12, pp.1181-1130.

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