

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของถนนที่ซ่อมแซมโดยเทคนิคการหมุนเวียน
วัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่

นายวันชัย ศิริเลิศวัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-533-593-2

**FACTORS INFLUENCING COMPRESSIVE STRENGTH
OF REPAIRED ROADS BY RECYCLING TECHNIQUE
OF PAVEMENT MATERIALS**

Wanchai Sirilerdwattana

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2006

ISBN 974-533-593-2

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลัังอัดของถนนที่ซ่อมแซมโดยเทคนิคการหมุนเวียน
วัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่

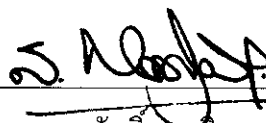
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



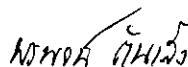
(รศ. ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ)

ประธานกรรมการ



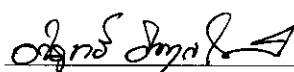
(ผศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



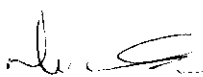
(อ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ



(อ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ



(รศ. ดร.เสาวณีย์ รัตนพานิ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วันชัย ศิริเลิศวัฒนา : ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของถนนที่ซ่อมแซมโดยเทคนิคการ
หมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (FACTORS INFLUENCING
COMPRESSIVE STRENGTH OF REPAIRED ROADS BY RECYCLING
TECHNIQUE OF PAVEMENT MATERIALS) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 66 หน้า. ISBN 974-533-593-2

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดของถนนดินซีเมนต์ที่ใช้วัสดุทางเดิมที่ประกอบด้วยดินเม็ดหยาบ
ผสมซีเมนต์ จากกราฟกำลังอัด ผู้เขียนจะเสนอแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายกำลังอัดของถนนดิน
ซีเมนต์ แบบจำลองนี้แบ่งแยกออกเป็นด้านแข็งและด้านเปื่อยของปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่ด้าน
เปื่อยของความชื้นเหมาะสม กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่อายุบ่มหนึ่งๆ แปรผันตามปริมาณน้ำ
ต่อปริมาณซีเมนต์ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความชื้นมีแนวโน้มสมมาตรในช่วงความชื้น
80-120 เปอร์เซ็นต์ ของความชื้นเหมาะสม แบบจำลองนี้สามารถทำนายกำลังอัด เมื่อกำหนด
ความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม โดยอาศัยผลทดสอบเพียงผลทดสอบเดียว

จากการศึกษาในสนาม พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมและบดอัดในสนาม (q_{ufr}) มีค่า
ต่ำกว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ (q_u) ที่หน่วยน้ำหนักแห้ง ปริมาณน้ำต่อ
ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มเดียวกัน โดยที่ อัตราส่วน q_{ufr} / q_u มีค่าระหว่าง 50 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์
ความไม่สม่ำเสมอของการผสมดินเข้ากับซีเมนต์เป็นผลให้ค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของดิน
ซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการและกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่เตรียมใน
ห้องปฏิบัติการ (q_{ufr} / q_u) มีค่าระหว่าง 0.75 ถึง 1.2 ข้อมูลส่วนใหญ่แสดงว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์
ที่ผสมและบดอัดในสนามมีค่าระหว่าง 55 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังอัดที่ผสมในสนามและบด
อัดในห้องปฏิบัติการ ความแตกต่างของกำลังอัดนี้อาจเกิดจากการบดอัดและสภาพการบ่มที่แตกต่างกัน
ในสนามและในห้องปฏิบัติการ จากผลทดสอบในสนามและแบบจำลองจากการสังเกต งานวิจัย
นี้ได้นำเสนอขั้นตอนการปรับปรุงถนนที่ชำรุดด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่
ซึ่งประกอบด้วยการประมาณปริมาณซีเมนต์ ขั้นตอนการทำงานในสนาม และการตรวจสอบกำลัง
อัดของดินซีเมนต์ในสนาม ขั้นตอนที่น่าเสนอนี้สามารถช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเก็บ
ตัวอย่างและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

WANCHAI SIRILERDWATTANA : FACTORS INFLUENCING
COMPRESSIVE STRENGTH OF REPAIRED ROADS BY RECYCLING
TECHNIQUE OF PAVEMENT MATERIALS) THESIS ADVISOR : ASST.
PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D. 66 PP. ISBN 974-533-593-2

PAVEMENT RECYCLING TECHNIQUE/CEMENT STABILIZED

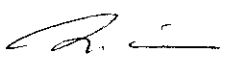
Laboratory and field strength development of cement stabilized coarse-grained soils is studied in this research. A phenomenological model to assess the laboratory strength development is developed. The model is divided into the dry and the wet sides of optimum water content. At the optimum and on the wet side of optimum, the strength development in cement stabilized soils at a particular curing time is dependent only upon the soil-water/cement ratio, w/C , which can reflect the combined effects of water content and cement content. It is moreover premised that the relationship between strength and water content is symmetrical for water content ranging from 0.8 to 1.2 times optimum moisture content. The proposed model is useful for assessing the strength development wherein water content, cement content and curing time vary over a wide range. Only the test result of a single laboratory trial is needed.

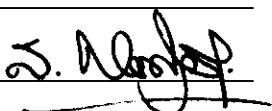
From the field study, it is found that the field roller-compacted strength, q_{ufr} is lower than the laboratory strength, q_{ul} under the same dry unit weight, soil-water/cement ratio and curing time due to several field factors. The ratio q_{ufr}/q_{ul} varies from 50 to 100%. Non-uniformity in mixing soil with cement is realized by the ratio of field hand-compacted strength to laboratory strength, q_{ufr}/q_{ul} ranging from

0.75 to 1.2. For most data, the field roller-compacted strength is 55 to 100% the field hand-compacted strength. This might be caused by the difference in compaction method and curing condition between laboratory and field stabilization. From this field observation and the proposed model, a practical procedure for repairing damaged roads using the pavement recycling technique is introduced. The procedure consists of the determination of cement content, the execution of the field stabilization and the examination of the field strength. It can save on sampling and laboratory testing and hence cost.

School of Civil Engineering

Academic Year 2006

Student's Signature 

Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณ กลุ่มบุคคลต่างๆ ที่กรุณาแนะนำ ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

รองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ อภิชาติवलลภ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำให้คำปรึกษา และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นบุคคลที่สำคัญอย่างมากที่คอยแนะนำ ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

อาจารย์ ดร.ทนงศักดิ์ พิศาลสิน, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวรรณเดช, รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์, อาจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร, อาจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง และอาจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ อาจารย์ผู้สอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณจิระยุทธ สืบสุข, คุณอภิชาติ คำภาหกล้า, คุณสิริฤทธิ์ หิรัญเรือง, คุณกรรณ คำลือ, คุณสนธยา แพพัฒน์ไทย์, คุณณรงค์เดช ยังสุขเกษม, คุณจัชดา ชำรงวุฒิ และคุณวรรณชัย เกษกัน เพื่อนและพี่ร่วมเรียนระดับปริญญาโท คุณพรรณพิจิตร สุรอภิรักษ์ และคุณณัฐญา กิ่งโคกกรวด เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือตลอดมา

นายช่างวันชัย รักเสนาะ ผู้อำนวยการส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำนักทางหลวงที่ 6 ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และสนับสนุนตลอดมา ตลอดจนถึงนายช่าง และเจ้าหน้าที่ประจำส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำนักทางหลวงที่ 6 ที่ช่วยเหลือในการเตรียมวัสดุ และเก็บข้อมูลในสนาม

บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยแห่งประเทศไทย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนเรื่องทุนและสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ นายกมล และนางวาสนาผู้เป็นบิดา มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมด้านการศึกษา เป็นอย่างดีตลอดมา อีกทั้งขอขอบคุณภรรยา และน้องๆ ในสกุลศิริเลิศวัฒนา ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

วันชัย ศิริเลิศวัฒนา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	

1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ประวัติความเป็นมาของถนนดินซีเมนต์	5
2.3 ประเภทของดินซีเมนต์.....	6
2.4 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์.....	7
2.5 โครงสร้างของดินซีเมนต์	9
2.6 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์	10
2.6.1 ปริมาณซีเมนต์และประเภทของซีเมนต์.....	10
2.6.2 ชนิดของดิน	12
2.6.3 ปริมาณความชื้นขณะทำการบดอัด.....	16
2.6.4 การบ่มดินซีเมนต์.....	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.5 ระยะเวลาในการผสม	19
2.6.6 สารผสมเพิ่ม	20
2.7 กำลังของดินซีเมนต์.....	21
2.8 การนำวัสดุเก่ามาใช้ใหม่ (recycling)	22
2.9 สมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	25
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	28
3.1 บทนำ.....	28
3.2 แผนงานวิจัย	28
3.2.1 การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ	28
3.2.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	29
3.2.3 การเก็บตัวอย่างในสนาม	31
3.2.4 แบบจำลองกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด.....	32
4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล	35
4.1 บทนำ.....	35
4.2 คุณสมบัติดินทดสอบ	35
4.3 การทดสอบในสนาม	37
4.4 ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	39
4.5 แบบจำลองกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด.....	43
4.6 ผลทดสอบในสนาม.....	54
4.7 ข้อเสนอแนะในการทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม.....	57
5 บทสรุป.....	59
รายการอ้างอิง	61
ประวัติผู้เขียน	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุง ตามการจำแนกแบบ ASSHTO.....	15
2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสม สำหรับวัสดุต่างๆ	16
2.3 แนวทางการเลือกวัสดุผสมเพิ่ม (additive) กับวัสดุแต่ละชนิด	22
2.4 เปรียบเทียบข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์ของ Cold recycling process กับ Conventional method.....	25
4.1 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินผสม	36
4.2 คุณสมบัติทั่วไปที่ใช้ทำนายกำลังอัดแกนเดียว (ดิเรก และคณะ, 2544)	51
4.3(a) การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด จากจังหวัดชลบุรี (ดิเรก และคณะ, 2544).....	52
4.3(b) การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด จากจังหวัดสระแก้ว (ดิเรก และคณะ, 2544)	52
4.3(c) การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด จากจังหวัดปราจีนบุรี (ดิเรก และคณะ, 2544)	52
4.4 การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินผสม Mix(A:B=20:80) ผสมซีเมนต์บดอัด.....	53

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1 ตัวอย่างความเสียหายของถนนที่ต้องทำการซ่อมแซม	1
1.2 ลักษณะทั่วไปของเครื่องจักรในงาน Pavement recycling	2
2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์	10
2.2 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติก (plasticity index) กับเวลา (time)	12
2.3 ค่าพิคคอตตะเบอร์ก (atterberg's limit) ของดินไอโอวา (iowa) หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง	13
2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8 %.....	14
2.5 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12 %.....	14
2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 16 %.....	15
2.7 อิทธิพลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างผสมขึ้นและการบดอัด ที่มีต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	19
2.8 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้เวลาในการบดอัดนานขึ้น	20
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial tangent modulus in tension กับกำลังดึง และกำลังอัดของดินซีเมนต์	23
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct tensile strength กับ Unconfined compressive strength ของดินซีเมนต์	23
2.11 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์	27
3.1 การแบ่งตัวอย่างด้วยเครื่องแบ่ง	29
3.2 การหาความถ่วงจำเพาะ	30
3.3 Universal Testing Machine (UTM).....	30
3.4 การทดสอบความแน่นในสนาม	32
3.5 ตัวอย่างจากการสุ่มตัด	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 แผนการวิจัยในห้องปฏิบัติการ	33
3.7 แผนการวิจัยในสนาม	34
4.1 การกระจายตัวของดินผสม.....	35
4.2 กราฟการบดอัดของหินคลุก ลูกกรงและดินผสมอัตราส่วนต่างๆ.....	36
4.3 หน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นของดินตัวอย่างในสนามที่บดอัด ในห้องปฏิบัติการ	38
4.4 อัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งที่สถานีทดสอบต่างๆ	39
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณชื้น-ความหนาแน่นแห้ง-กำลังอัดแกนเดียว ของดินลูกกรง ที่อายุบ่ม 7 วัน ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	40
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณชื้น-ความหนาแน่นแห้ง-กำลังอัดแกนเดียว ของหินคลุก ที่อายุ บ่ม 14 วัน ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	41
4.7 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินผสม (20:80) ผสมซีเมนต์ 3% ที่อายุบ่มต่างๆ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	42
4.8 อิทธิพลของชนิดดินต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	43
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ w/C ของดินลูกกรงผสมซีเมนต์บดอัด ที่อายุบ่ม 14 และ 100 วัน.....	44
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินซีเมนต์บดอัด Mix (A:B = 20:80)	45
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินหินคลุกซีเมนต์บดอัด	46
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์บดอัด Mix (A:B = 20:80) ด้านเปียก	47
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกกรงซีเมนต์บดอัด ด้านเปียก	47
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์บดอัด.....	49
4.15 Normalize strength development ของดินซีเมนต์บดอัดทุกส่วนผสม	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แบบจำลองของคินซีเมนต์บดอัด	50
4.17 กำลังอัดของคินซีเมนต์บดอัดที่ผสมและบดอัดในสนามและคินซีเมนต์ ในสนามบดอัดในห้องปฏิบัติการที่อายุบ่ม 7 วัน	54
4.18 ผลเปรียบเทียบกำลังอัดของคินซีเมนต์ผสมและบดอัดในสนามกับกำลังอัด ของคินซีเมนต์ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ที่อายุบ่ม 7 วัน	55
4.19 การทำนายกำลังอัดของคินซีเมนต์ผสมและบดอัดในสนาม ที่ถนนทดสอบเพชรบูรณ์ 2 สถานีที่ 5 และ 9	56
4.20 สรุปขั้นตอนการทำงานการปรับปรุงถนนด้วยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิม มาใช้ใหม่	57

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ทล.ท.	=	มาตรฐานวิธีการทดลอง กรมทางหลวง
A	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
ASSHTO	=	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
B	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
C	=	Cement content
CBR	=	California bearing ratio
D	=	อายุบ่ม, วัน
GC	=	กรวดที่มีดินเหนียวปน
GW-GM	=	กรวดปนดินตะกอนที่มีขนาดละเอียด
LL	=	ขีดจำกัดเหลว (liquid limit)
MDD	=	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry-density)
OMC	=	ปริมาณความชื้นเหมาะสม (optimum moisture content)
PCA	=	Portland Cement Association
pH	=	ดัชนีความเป็นกรดเป็นด่าง
PI	=	ดัชนีสภาพพลาสติก (plasticity index)
PL	=	ขีดจำกัดพลาสติก (plastic limit)
q_{28}	=	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน
q_D	=	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม D วัน
q_u	=	กำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง
q_{ul}	=	กำลังอัดแกนเดียวที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ
q_{up}	=	กำลังอัดแกนเดียวที่ทำนายได้โดยอาศัยสมการ
$q_{(w_c/C)1,D}$	=	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบที่ w_c/C หลังจากระยะบ่ม D วัน
$q_{(w_c/C)28}$	=	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบที่ w_c/C หลังจากระยะบ่ม 28 วัน
SC	=	ทรายที่มีดินเหนียวปน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

SM	=	ทรายปนดินตะกอน
SP	=	ทรายขนาดละเอียด
SW	=	ทรายขนาดละเอียด
SW-SM	=	ทรายปนดินตะกอนที่มีขนาดละเอียด
USCS	=	Unified Soil Classification System
UTM	=	เครื่องทดสอบแรงอัดแกนเดียว (universal testing machine)
w	=	Moisture content
w_c/C	=	อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay-water/Cement Ratio)
w_{fh}	=	ปริมาณความชื้นดินตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ
γ_{dfh}	=	หน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้อง ปฏิบัติการ
γ_{dfr}	=	หน่วยน้ำหนักแห้งของดินตัวอย่างที่เกิดจากการผสมในสนามและบดอัด ด้วยรถบดอัด
γ_{dmax}	=	หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด

บทที่ 1

บทนำ

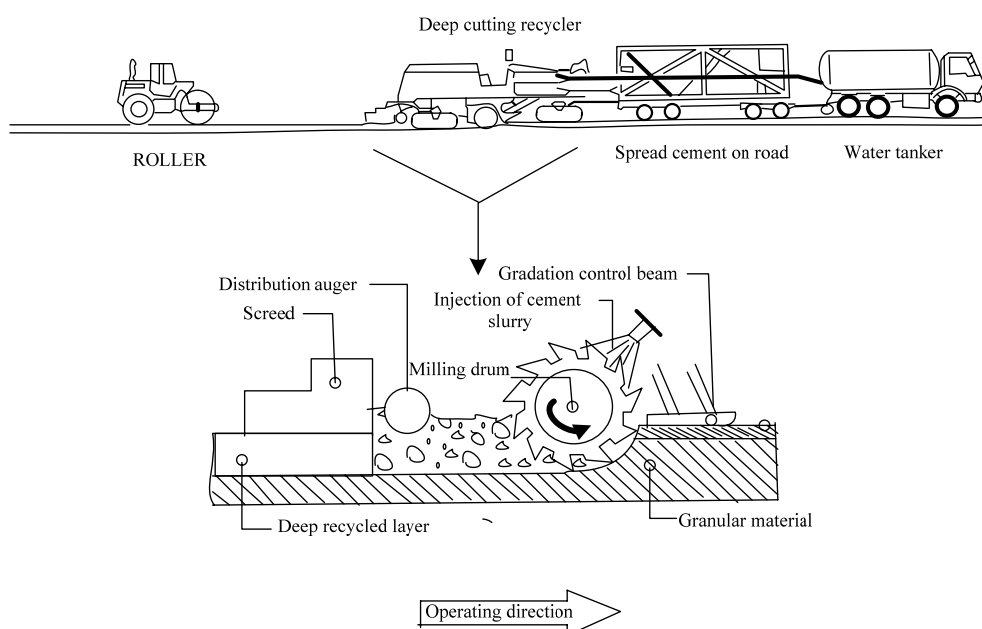
1.1 ความสำคัญของปัญหา

ถนนที่ก่อสร้างและถูกใช้งานมาระยะหนึ่ง มักจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการรับน้ำหนักของขดยาน หรือการเสื่อมสภาพของวัสดุเอง เช่น การหลุดร่อน การเกิดร่องล้อ และรอยแตกแบบต่างๆดังแสดงในรูปที่ 1.1 จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องได้รับการซ่อมแซม บำรุงรักษา เพื่อให้ถนนอยู่ในสภาพที่ดี และพร้อมใช้งานอยู่เสมอ งานซ่อมบำรุงแบ่งออกเป็น 2 งานหลักๆ คือการแก้ไข และการซ่อมบำรุง การซ่อมบำรุงทำให้นถนนกลับมาใช้งานได้ตามปกติ และมีอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น อันได้แก่ การลดแรงที่จะเกิดในถนน โดยการจำกัดแรงดันลมยาง และน้ำหนักของรถบรรทุก การเสริมผิวทางเพื่อทำให้ผิวทางเรียบไม่เป็นคลื่น และการเพิ่มความแข็งแรงของถนน โดยเพิ่มความหนา ส่วนการซ่อมแซม ปรับปรุงให้ถนนสามารถรับน้ำหนักได้สูงขึ้นหรือรองรับปริมาณการจราจรที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต ได้แก่ การรื้อผิวทางเก่า ขยายและออกแบบก่อสร้างใหม่ให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุก และปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้น ซึ่งวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้วัสดุที่มีคุณภาพสูง เช่น หินคลุก



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างความเสียหายของถนนที่ต้องทำการซ่อมแซม

เพื่อเป็นการลดต้นทุนการซ่อมแซมแบบรื้อผิวทางและปรับปรุงถนนให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต กรมทางหลวงได้นำวิทยาการใหม่มาทดลองปรับใช้วิธีการนี้เรียกว่า “การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่” (pavement recycling) โดยจะบดรีไซเคิลวัสดุในชั้นทางเดิมมาขนาดละเอียดใหม่โดยเพิ่มและเพิ่ม หินคลุก ทราย Soil aggregate แล้วเติมวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แอสฟัลต์ เครื่องจักรที่ใช้ประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ได้แก่ 1) ชุดห้องควบคุม ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมปริมาณซีเมนต์ ปริมาณน้ำ และความเร็วรถ 2) ชุดชุดตัดชั้นทางเดิม ขณะที่รถเคลื่อนที่ชุดชุดตัดจะทำการบดตัดชั้นทางเดิมปรับตั้งความลึกได้ ขณะเดียวกันก็จะผสมวัสดุที่บดตัดกับปูนซีเมนต์และน้ำ (cement slurry) แล้วปล่อยวัสดุที่ผ่านการผสมปูนซีเมนต์และน้ำออกจากด้านท้ายรถ จากนั้นวัสดุดังกล่าวก็จะเกลี่ยและถูกบดอัดทันทีเพื่อให้ได้ความแน่นตามมาตรฐานกรมทางหลวง ข้อดีของการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่คือประหยัดค่าใช้จ่าย และใช้เวลาสั้น สามารถลดการจราจรติดขัด ถนนเปิดใช้ได้เร็วขึ้น และไม่ต้องเพิ่มวัสดุชั้นทางใหม่ทำให้ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม การซ่อมแซมวิธีนี้จะต้องออกแบบส่วนประกอบของดินซีเมนต์ (ขนาดละเอียดของวัสดุ ปริมาณซีเมนต์ และระยะเวลาบ่ม) และทดสอบกำลังอัดในห้องปฏิบัติการรวมทั้งสุ่มตัดก้อนตัวอย่าง (core sampling) ของถนนที่บดอัดแล้วไปหา กำลังอัด รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถอ้างอิงได้จากมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 213/2543



รูปที่ 1.2 ลักษณะทั่วไปของเครื่องจักรในงาน Pavement recycling

(A.A.Loundon & Partner Consulting Engineers, 1995)

อย่างไรก็ตามการปฏิบัติงานที่ผ่านมาพบว่า ผู้ออกแบบไม่สามารถทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนามจากกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ได้จากในห้องทดลอง ทำให้ถนนที่ซ่อมแซมโดยวิธีนี้ยังไม่ได้คุณภาพเท่าที่ควร งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังอัดของถนนดินซีเมนต์ที่ซ่อมแซมโดยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ อันได้แก่ 1) ชนิดของดิน ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่ม 2) ความไม่สม่ำเสมอในการผสมดินกับซีเมนต์ ซึ่งก่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างกำลังของดินซีเมนต์ในสนาม และในห้องปฏิบัติการเพื่อหาอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, FS) ที่เหมาะสมในการออกแบบ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1) เพื่อหาลำดับกำลังอัดของดินซีเมนต์ในพจน์ของตัวแปรการบดอัด ได้แก่ ชนิดของดิน ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และระยะบ่ม (curing time)

1.2.2) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ และดินซีเมนต์ในสนาม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ส่วนแรกของงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นการสร้างทฤษฎีกำลังของดินซีเมนต์ กรอบความคิดที่จะใช้ในส่วนนี้จะมาจากผลงานวิจัยของกรมทางหลวง (ธีรชาติ และสมบัติกระแสด, 2544) สุขสันต์ และคณะ (Horpibulsuk and Miura, 2001; Horpibulsuk et al. 2003) และ Miura et al. 2001 จากงานวิจัยในส่วนนี้จะสามารถหาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ อันได้แก่ ชนิดของดิน (โดยการนำหินคลุกกับลูกรังมาผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้ได้ดินที่มีคุณสมบัติพื้นฐานแตกต่างกัน) ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และระยะบ่ม โดยใช้พลังงานบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ส่วนที่สองเป็นการศึกษาความแตกต่างระหว่างกำลังของดินซีเมนต์ในสนาม และในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมในการออกแบบ โดยทำการรวบรวมผลทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างซึ่งตัดจากถนนที่ซ่อมแซมด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ และผลทดสอบกำลังอัดของตัวอย่าง ที่ทำขึ้นในห้องปฏิบัติการของสำนักทางหลวงจำนวน 4 สายทาง แล้วเปรียบเทียบกับผลทดลองในห้องปฏิบัติการ จากนั้นดำเนินการหาอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1) องค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้จะเป็นการสร้างทฤษฎีของการปรับปรุงกำลังของดินด้วยซีเมนต์โดยอาศัยดินที่มีคุณสมบัติพื้นฐาน (basic properties) ที่แตกต่างกัน อันเกิดจากการผสมดินลูกรัง (lateritic soil) กับหินคลุก (crushed rock) ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ทฤษฎีที่จะสร้างขึ้นนี้จะเป็นทฤษฎีที่รวมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังดินซีเมนต์ ซึ่งได้แก่ ชนิดของดิน ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ ระยะเวลาในการบ่มและระยะเวลาในการผสม ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นต้นแบบเพื่อให้นักวิจัยที่สนใจได้นำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยระดับสูงต่อไป ซึ่งในส่วนนี้จะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับสถาบันวิจัย และมหาวิทยาลัยต่างๆ

1.4.2) ด้านเศรษฐศาสตร์

หลังจากได้ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผู้วิจัยจะนำเสนอทฤษฎีและสมการที่ใช้ในการทำนายกำลังของดินซีเมนต์ ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบในการกำหนดปริมาณส่วนผสมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น พร้อมทั้งวางแผนระยะเวลาในการก่อสร้างให้สอดคล้องกับข้อกำหนด อีกทั้งวิศวกรผู้ออกแบบสามารถประมาณกำลังของดินซีเมนต์จากข้อมูลที่มีอยู่อย่างจำกัดเพื่อใช้ออกแบบในเวลาที่ยากัด และยังสามารถใช้ตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ในส่วนนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง เช่น บริษัทผู้รับเหมาก่อสร้าง กรมทางหลวงชนบท และกรมทางหลวง เป็นต้น

1.4.3) ด้านเทคนิคการก่อสร้างในอนาคต

งานวิจัยนี้เป็นงานเริ่มต้นสำหรับการศึกษา และวิจัยการเพิ่มขึ้นของกำลังและประสิทธิภาพของถนนที่ทำการซ่อมบำรุงโดยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (pavement recycling) โดยอาศัยข้อมูลทั้งในห้องปฏิบัติการและข้อมูลในสนาม ผู้วิจัยจะนำเสนอข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่างๆ เพื่อกำหนดขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนผสมเพิ่ม สำหรับการซ่อมบำรุงถนนโดยวิธีวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (pavement recycling) ผลงานนี้จะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการสร้างข้อกำหนด และมาตรฐาน (code of practice) ในอนาคต ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง และซ่อมบำรุงถนน เช่น กรมทางหลวงชนบท และกรมทางหลวง เป็นต้น

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพของดินให้มีกำลังอัดสูงขึ้น สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่นการลดช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วยการบดอัด การลดความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดิน การทำให้อนุภาคดินจับตัวเป็นก้อนใหญ่ (flocculation) หรือการทำให้ดินมีขนาดผละที่ดีขึ้น และการเติมสารเชื่อมประสาน ในบทนี้จะทบทวนงานวิจัยการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์

2.2 ประวัติความเป็นมาของถนนดินซีเมนต์

กล่าวกันว่าความคิดเรื่องการปรับปรุงคุณภาพของดิน ด้วยการใส่สารผสมเพิ่มมีมานานกว่า 5000 ปีแล้ว โดยการผสมดินกับปูนขาว ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินให้ดีขึ้น (Terrel et al., 1979)

Davidson (1961) กล่าวถึงวิวัฒนาการของดินซีเมนต์ไว้ในคำนำใน Highway Research Bulletin ว่าเริ่มต้นในปี ค.ศ.1915 เมื่อการก่อสร้างถนน Oak ในเมือง Sarasota รัฐ Florida ประสบปัญหาเครื่องผสมคอนกรีตเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ ถนน Oak จึงถูกสร้างโดยการขุดเอาดิน Shell จากอ่าวขึ้นมาผสมกับทรายและซีเมนต์แล้วทำการบดอัดด้วยรถบดไอน้ำที่มีน้ำหนัก 10 ตัน แทนการทำถนนคอนกรีตราวๆ ปี ค.ศ.1920 หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับถนน ในประเทศรัฐ Iowa, South Dakota, Ohio, California และ Texas ได้เริ่มทดลองก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ แต่ผลการทดลองที่ได้มีความผันแปรอย่างมากจนไม่สามารถคาดการณ์ผลลัพท์ได้ เนื่องจากความรู้ความเข้าใจเรื่องคุณสมบัติทางวิทยาศาสตร์ของดินในขณะนั้นยังมีน้อยมาก

Mills (1935, 1936) ได้รายงานผลการค้นคว้าของ South Carolina State Highway Department ในปี ค.ศ.1932 โดย Dr. C.H. Moorefield ได้ทำการศึกษาส่วนผสมของดินกับซีเมนต์ที่ใช้ก่อสร้างถนนหลายสายในปี ค.ศ.1933 และปี ค.ศ.1934 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทางของถนนที่มีราคาถูก

Davidson (1961) และ Terrel et al. (1979) ได้บันทึกตรงกันว่าในปี ค.ศ.1935 South Carolina State Highway Department, Bureau of Public Roads และ Portland Cement Association ได้ร่วมกันก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ยาว 1.5 ไมล์ใกล้ๆ กับเมือง Jonhsonville เพื่อเป็นการยืนยัน

ผลการวิจัยของ South Carolina State Highway Department ต่อมาถนนดินซีเมนต์สายนี้เป็นที่รู้จักกันว่าเป็นโครงการแรกเกี่ยวกับวิศวกรรมถนนดินซีเมนต์ และจากความสำเร็จของโครงการนี้ทำให้มีการทดลองขึ้นในอีกหลายรัฐของสหรัฐอเมริกาโดยที่ Portland Cement Association เป็นผู้ทดลองสร้าง

Davidson (1961) รายงานว่า ในปี ค.ศ.1941-1944 ระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง ถนนดินซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสนามบินมากถึง 22 ล้านตารางหลา แต่ในขณะเดียวกัน การก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ก็มีปริมาณลดลงด้วย จนกระทั่งสงครามโลกครั้งที่สองยุติลง การก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ก็กลับมาเพิ่มปริมาณเพิ่มขึ้นอีก นอกจากดินซีเมนต์จะถูกใช้ทำถนนแล้ว ยังมีการใช้ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุรองพื้นทางของถนนคอนกรีต ที่จอดรถ คลังเก็บสินค้า วัสดุรองพื้นอ่างเก็บน้ำ และถูทดลองอีกด้วย

The Siam Cement Company Ltd. (1965) ได้ทดลองนำดินผสมซีเมนต์มาใช้เป็นพื้นทางของถนนสาย วารินชำราบ-เดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี เป็นสายแรกในประเทศไทยซึ่งมีความยาว 5 กิโลเมตร โดยดินที่ใช้เป็นดินลูกรังที่กำหนดค่า CBR ของดินซีเมนต์ไว้ไม่น้อยกว่า 120 สำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำ และกำหนดค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่า 852 กิโลปาสกาล สำหรับถนนประเภทต่ำกว่ามาตรฐาน

ธีรชาติ และสมบัติกระแสด (2544) ได้ทำการวิจัยโดยนำดินลูกรัง และดินทรายปนดินตะกอนมาผสมซีเมนต์ สรุปผลได้ว่าพลังงานในการบดอัดมีผลอย่างมากต่อกำลังของดินซีเมนต์ โดยมีความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (logarithm model) โดยที่ค่าแรงอัดแกนเดียวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงพลังงานบดอัดต่ำ และจะช้าลงเมื่อพลังงานบดอัดสูงขึ้น

2.3 ประเภทของดินซีเมนต์

Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization (1959) ให้คำจำกัดความของ Cement-treated soil ว่าเป็นการนำเอาดินและซีเมนต์มาผสมกับน้ำในปริมาณที่ต้องการแล้วทำการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด ป้องกันความชื้นไม่ให้สูญเสียในระหว่างการบ่ม จากลักษณะการใช้งานและปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม สามารถแบ่งดินผสมซีเมนต์ออกได้เป็น 5 ประเภทดังนี้

- 1) Soil-Cement เป็นดินที่ผสมซีเมนต์เพื่อให้ได้กำลังอัดตามมาตรฐานของ Portland Cement Association (PCA), ASSHTO หรือ ASTM ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้ดินซีเมนต์ดังกล่าวมีกำลังอัดหรือแรงแบกทานตามที่กำหนด สำหรับดินที่มีขนาดละเอียดจะใช้ปูนซีเมนต์ประมาณ 5-7 เปอร์เซ็นต์ และจะสูงกว่านี้

- หากดินมีขนาดละเอียดหรือมีค่าดัชนีพลาสติกสูง (Plasticity Index) กรณีที่ค่าดัชนีพลาสติกสูง ในการทำ Soil-Cement ควรทำการผสมปูนขาวเพื่อลดค่าดัชนีพลาสติกลง
- 2) Cement modified silty clay soil มักจะใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงของผิวหน้าดินเดิมที่เป็นดินเหนียว ที่มีลักษณะเปียกและมีความอ่อนตัวมากให้มีความแข็งแรงพอที่ขุดยานจะผ่านได้โดยไม่ลื่นไถล ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์
 - 3) Cement modified granular soil จะใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเป็นพลาสติก การบวมตัว และการดูดซึมน้ำบน Cement modified crush rock ที่มักจะใช้เป็นพื้นทางของถนนที่มีผิวทางทั้งแบบยึดหยุ่นและมีผิวทางเป็นคอนกรีต โดยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะมีค่าประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดิน
 - 4) Plastic soil-cement มักใช้ในงานลาดปูบนพื้นที่ลาดเอียง เช่น ปูด้านข้างถนนเพื่อการระบายน้ำ คัดท้องคลองชลประทานและกันอ่างเก็บน้ำ ดังนั้น Plastic soil-cement จะต้องมีสภาพเหลวมากพอที่จะนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
 - 5) Cement treated soil slurry and grouts เป็นซีเมนต์ที่ผสมกับวัสดุประเภททรายและน้ำ โดยมีปริมาณน้ำสูงมาก อาจมีส่วนผสมเพิ่มอื่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของส่วนผสมให้มีค่า Workability สูง โดยปกติวัสดุประเภทนี้จะใช้เป็น Mud jacking material ในงานซ่อมบำรุงถนนที่เกิดปัญหาการทรุดตัวของคันทางหรือถูกน้ำกัดเซาะ และใช้เป็น Grouting material สำหรับยาหรืออุดรอยรั่วที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ส่งน้ำ

2.4 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์

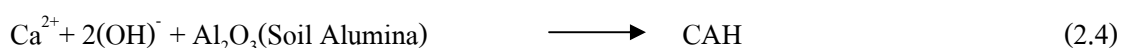
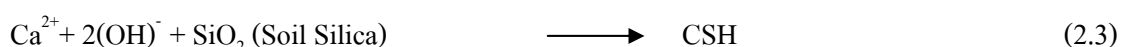
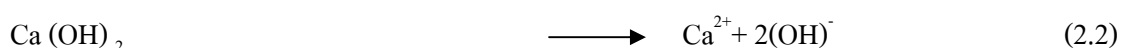
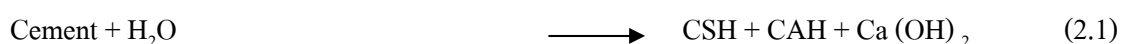
Lambe et al. (1959) อธิบายว่าซีเมนต์เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากผลึกของ Tricalcium Silicate (C_3S), Dicalcium Silicate (C_2S), Tricalcium Aluminate (C_3A), Tetracalcium Aluminate Ferrite (C_4AF) เมื่อผสมกับน้ำและดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Hydrate Lime ที่แยกตัวออกมาขณะเกิดปฏิกิริยา สารประกอบ CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานเมื่อน้ำระเหยออกไป นอกจากนั้น Released Hydrate Lime ที่เกิดขึ้นในขบวนการดังกล่าวยังทำให้ความเป็นด่างเพิ่มขึ้น ทำให้ Colloid gel หรือ Cement Gel ที่ประกอบไปด้วย CSH และ CAH เกิดการรวมตัว แล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ในดินเม็ดหยาบ เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การยึดเกาะกันของเม็ดจะคล้ายกับในคอนกรีต แต่ว่า Cement paste จะไม่อุดเต็มช่องว่างอนุภาคของเม็ดดิน แรงเชื่อมยึดติดจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทางด้าน Mechanical interlock ของอนุภาคเม็ดดินที่มี CSH และ CAH เกาะอยู่ที่ผิวอนุภาคของเม็ดดิน

สำหรับดินเม็ดละเอียด แรงยึดเกาะกันจะประกอบไปด้วยแรงทางด้าน Mechanical interlock และ Chemical cementation การยึดเกาะทางด้าน Chemical cementation นั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับ Silica และ Alumina ที่มีอยู่ตามผิวของเม็ดดิน โดยมีน้ำเป็นตัวกลาง การเกิดปฏิกิริยาทำให้ได้สารประกอบ CSH, CAH เพิ่มขึ้น และทำให้เม็ดดินเกิดการเชื่อมกัน

Davidson (1961) กล่าวว่า หลังการผสมซีเมนต์กับดินเหนียวขึ้น จะทำให้ค่าพลาสติก (plasticity) ลดลง เหตุผลน่าจะมาจากการแยกตัวของ Calcium ion ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กลไกที่เกิดขึ้นถ้าไม่มาจากการ Cation exchange ก็น่าจะมาจากการจับกลุ่มเพิ่มขึ้นของ Cation ในดินเหนียว กระบวนการทั้งสองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าที่มีอยู่อย่างหนาแน่นบริเวณอนุภาคดินเหนียว ส่งผลให้อนุภาคของดินเหนียวรวมตัวกันและตกตะกอนเป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นนี้ทำให้ดินเหนียวมีคุณสมบัติคล้ายดินตะกอนคือมีค่าพลาสติก (plasticity) ต่ำ

Herzog (1963) กล่าวถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันว่าเป็นการเกิดสารประกอบ CSH, CAH ซึ่งเป็นปฏิกิริยาในช่วงแรก ส่วนปฏิกิริยาช่วงที่สองซึ่งต้องใช้เวลาานาน เป็นปฏิกิริยาระหว่าง Calcium ion ที่เกิดจาก Released hydrated lime ของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica และ Alumina ที่มีอยู่ในเม็ดดิน มีผลทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่นานขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวรู้จักกันว่าปฏิกิริยาพอสโซลานิก

Moh (1965) ได้ศึกษาเรื่องปฏิกิริยาของแร่ประกอบดินเหนียว กับซีเมนต์และสารเคมีผสมเพิ่มจำพวกโซเดียม และได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีดังต่อไปนี้



Pendola et al. (1969) สรุปว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์นั้น เป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีระหว่างซีเมนต์ น้ำและดินซึ่งประกอบด้วยกลไก 4 ชนิด คือ

- 1) Hydration of cement คือกระบวนการที่สำคัญ โดยขณะที่ซีเมนต์รวมตัวกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และก่อรูปร่างเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องมากบ้างน้อยบ้างตามการละลายขนาดของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่ายที่กล่าวมาข้างต้นนอกจากจะเพิ่ม

ความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ถูกปรับปรุงแล้วยังแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดดิน ทำให้ลดการซึมผ่านและการบวมตัวของมวลดิน รวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบๆ อีกด้วย

- 2) Cation exchange การลดลงของค่าพลาสติกของดินหลังจากการผสมซีเมนต์กับดินประเภทที่มีความเชื่อมโยงกันที่มีความชื้น เชื่อว่าเกิดจากการเปลี่ยน Cat ion หรือการรวมตัวกันของ Cat ion บนผิวของเม็ดดิน ปฏิกริยาที่ว่าจะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังการผสมซีเมนต์
- 3) Carbonation คือขบวนการเชื่อมแน่นจากปฏิกิริยาเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับ Lime ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิด Calcium carbonate ส่งผลให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มมากขึ้น
- 4) Pozzolanic reaction คือกระบวนการระหว่าง Free lime ที่ถูกปลดปล่อยออกมา ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica หรือ Alumina ที่มีอยู่ในดิน ทำให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้น แต่ปฏิกิริยานี้จะต้องอาศัยระยะเวลาและมีผลทำให้กำลังของวัสดุสูงขึ้น

Terrel et al. (1979) กล่าวถึงปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ว่า การผสมซีเมนต์กับดินเม็ดหยาบ ซีเมนต์เฟส จะทำหน้าที่ยึดอนุภาคเม็ดดินเข้าด้วยกัน โดยทำการยึดเกาะที่ผิวระหว่างซีเมนต์เจล และผิวอนุภาค ส่วนดินเม็ดละเอียด แร่ดินเหนียวที่สลายออกมาในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า pH สูง จะทำปฏิกิริยากับ Free lime หรือ Hydrate lime ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิด CSH และ CAH

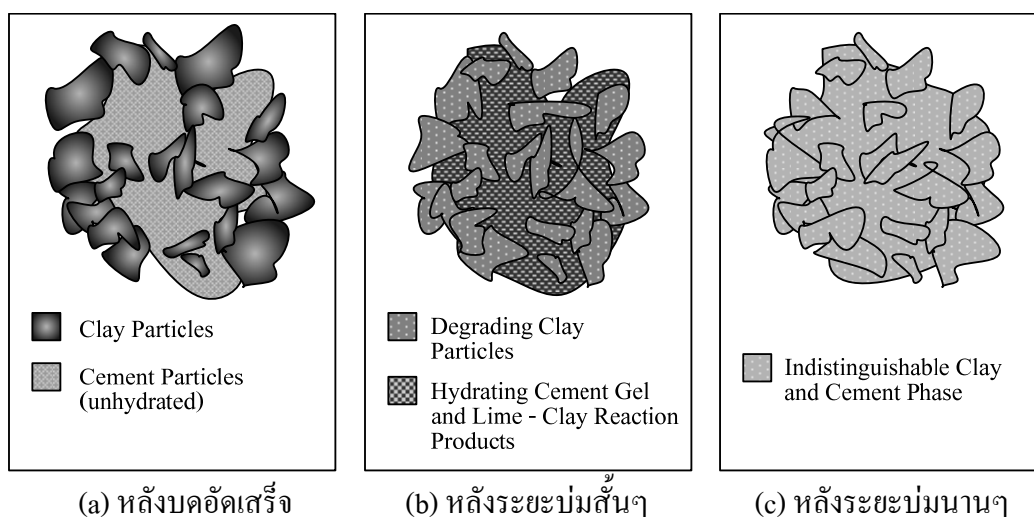
2.5 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Czernin (1962) กล่าวว่าหลังจากที่ผสมซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันทำให้เกิดสารประกอบ CSH ในรูปของเจลขึ้นในส่วนผสมของซีเมนต์และน้ำ ดังนั้นจึงสามารถที่จะเข้าใจได้ว่าภายใต้การบดอัด อนุภาคของปูนซีเมนต์มิได้ผสมกับดินเพียงอย่างเดียว แต่จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันด้วย

Mitchell and El Jack (1966) ได้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบและโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.1 โดยแบ่งเป็น 3 ระยะดังนี้

- 1) ภายใต้การบดอัด ช่วงนี้เป็นช่วงที่อนุภาคของปูนซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน แต่อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเข้าผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1 (a)
- 2) ภายใต้การบ่มในระยะเวลาสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันทำให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อย Lime ออกมาทำปฏิกิริยากับ Soil silica และ Soil alumina ที่มีอยู่ในดินทำให้เกิดการแยกตัวของ

สารทั้งสอง จากนั้นซีเมนต์เจลและสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาจะแทรกซึมไปตามอนุภาคของดิน จากรูปที่ 2.1 (b)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell และ El Jack, 1966)

- 3) ภายใต้การบ่มในระยะเวลายาว จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ อันมีผลทำให้ซีเมนต์เจลและขอบเขตของการแทรกซึมกระจายไปทั่วก่อนดินซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม จากรูปที่ 2.1 (c)

2.6 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์

2.6.1 ปริมาณซีเมนต์และประเภทของซีเมนต์

Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์โดยนำดินสามชนิดคือ Loamy sand, Medium clay และ Silty clay loam มาทดลองผสมซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 6 ถึง 30 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 1 ปี และผ่านสภาพภูมิอากาศ 2 แบบคือ Wet-dry และ Freeze-thaw ตั้งแต่ 12 รอบถึง 96 รอบ ผลการศึกษาสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินที่มีขนาดเม็ดเล็ก ดินที่มีปริมาณดินเหนียวผสมอยู่สูงจะมีกำลังอัดน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำ และค่าความคงทนของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้

นอกจากนั้น Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์โดยนำดินสองชนิดคือ Silty clay loam และ Sandy loam มาผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 พบว่าดินที่ผสมด้วยซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังที่สูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 แต่ซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะ

ไม่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินทุกชนิด เช่น ดิน Sandy loam ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังอัดเป็นสองเท่าของดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่ม 7 วันและเป็น 1.4 เท่า ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่สำหรับดิน Silty clay loam เมื่อผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

คุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินซีเมนต์ ถูกศึกษาอย่างจริงจัง โดย Terashi et al. (1979) และต่อมาก็มีการศึกษาด้านนี้มากขึ้นเรื่อยๆ เช่น Kawasaki et al. (1981), Nontananandh and Yupakorn (2002) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้สรุปว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์คือ ปริมาณน้ำ และปริมาณซีเมนต์

Ruenkairergsa (1982) อธิบายว่าปริมาณซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ อัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน พันธะเชื่อมประสานในดินเม็ดหยาบจะแข็งแรงกว่าในดินเม็ดละเอียด ดินที่มีดินเหนียวมากจะทำให้กำลังอัดต่ำ ดังนั้นปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมจึงควรหาจากการทดลองในห้องทดลอง

Lade and Overton (1989) ได้ศึกษาผลของพันธะเชื่อมประสาน (cementation) ในดินเม็ดหยาบ ภายใต้อุณหภูมิและความหนาแน่นที่เท่ากัน ปริมาณน้ำที่ผสมเท่ากัน และแรงดันรอบข้างต่ำ แต่แตกต่างกันที่ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม พบว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังดึง และค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (internal friction angle) จะเพิ่มขึ้น

Clare and Pollard (1951) ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์โดยนำดิน 3 ชนิดในประเทศอังกฤษมาผสมกับซีเมนต์ พบว่าที่อายุบ่ม 24 ชั่วโมงดินซีเมนต์จะมีกำลังอัดสูงมากเมื่อผสมดินกับซีเมนต์ประเภท High-alumina ขณะที่ซีเมนต์ประเภทอื่นต้องมีอายุการบ่ม 5 วัน และถ้าใช้ซีเมนต์ประเภท British rapid hardening ซึ่งเทียบได้กับซีเมนต์ประเภทที่สาม พบว่าที่อายุการบ่มเท่ากัน ค่ากำลังคราก (yield strength) ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมาก

Massachusetts Institute of Technology (1954) ได้นำดินตะกอนปนทราย และดินเหนียว (clayey sandy silt) ในรัฐไอโอวา มาผสมกับซีเมนต์ และพบว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่สามจะมีกำลังอัดสูงกว่า ดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง 1.5 เท่า และ 1.3 เท่า ที่ระยะบ่ม 7 วัน และ 28 วันตามลำดับ

Davidson and Bruns (1960) ได้รายงานผลเกี่ยวกับกำลังอัด โดยวิธีทดสอบ Freezethaw ของดินทราย ดินตะกอน และดินเหนียว บริเวณรัฐไอโอวา ประเทศสหรัฐอเมริกา และสรุปว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทสาม ในการก่อสร้างถนนจะประหยัดกว่าใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง เพราะว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งต้องใช้เวลาในการบ่มอย่างน้อย 7 วัน แต่ว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทที่สาม จะใช้เวลาในการบ่มน้อยกว่า ทำให้ได้เปรียบเรื่องระยะเวลาในการก่อสร้าง

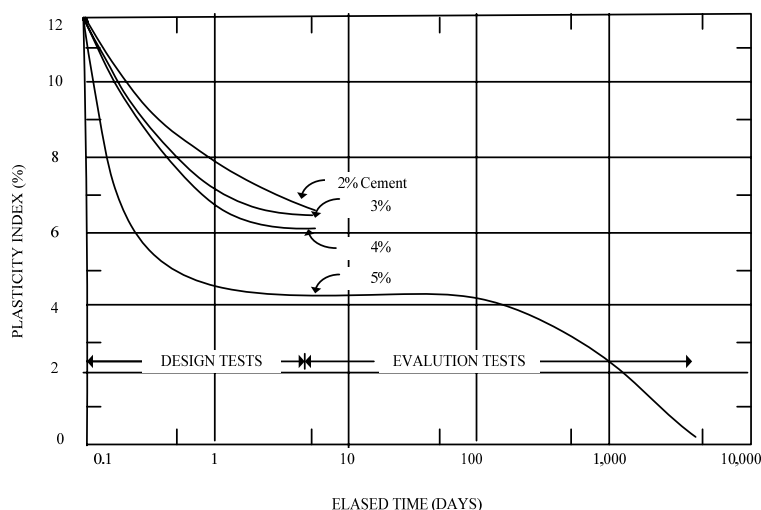
Horpibulsuk (2001), Miura et al. (2001) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์สามารถรวมไว้ในตัวแปรตัวเดียวได้ ตัวแปรนี้เรียกว่า Clay-water/cement Ratio (w_c/C) และถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนักฝั่งแห้ง และ Horpibulsuk (2001) ยังได้สร้างสมการที่สามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น ระยะเวลาบ่มต่างๆ โดยอาศัยผลการทดสอบเพียงค่าเดียว

ทรงพล (2529) ได้ทำการทดสอบกำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ และสรุปว่า กำลังอัดของดินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยที่ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มของกำลังอัดจะลดลง

2.6.2 ชนิดของดิน

Winterkorn and Chandrasekharn (1951) รายงานผลการทดสอบดินลูกรังผสมซีเมนต์ว่าจะได้ผลดีหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่ผสมอยู่ในดิน และ Degree of latterization ของดินลูกรัง

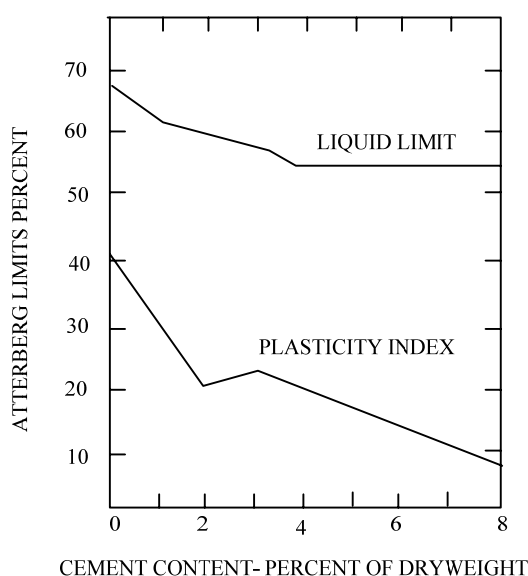
Reinhold (1955) ได้นำทรายมาผสมกับดินเหนียว โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินเหนียวที่ใช้ผสมตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่น ที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดกับปริมาณดินเหนียว พบว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น กำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าลดลง



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติกกับเวลา (Redus, 1958)

Redus (1958) ได้นำดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง (base course) ของสนามบินต่างๆ ซึ่งมีอายุการใช้งานนานหลายปี มาทำการทดสอบหาค่าพิกัดอัตราแบริก (attemberg's limit) พบว่าปริมาณซีเมนต์มี

ความสัมพันธ์ต่อการลดลงของดัชนีพลาสติก ดังรูปที่ 2.2 กล่าวคือถ้าปริมาณซีเมนต์ที่ผสมมาก ดัชนีพลาสติกจะลดลงอย่างรวดเร็ว และถ้าปริมาณซีเมนต์ที่ผสมน้อย ดัชนีพลาสติกจะลดลงอย่างช้าๆ นอกจากนี้ ระยะเวลาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก็มีผลต่อการลดลงของค่าดัชนีพลาสติก ผลการศึกษานี้ตรงกับผลการวิจัยของ Spangler and Patel (1949) ซึ่งพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพลาสติกกับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันใน 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.3

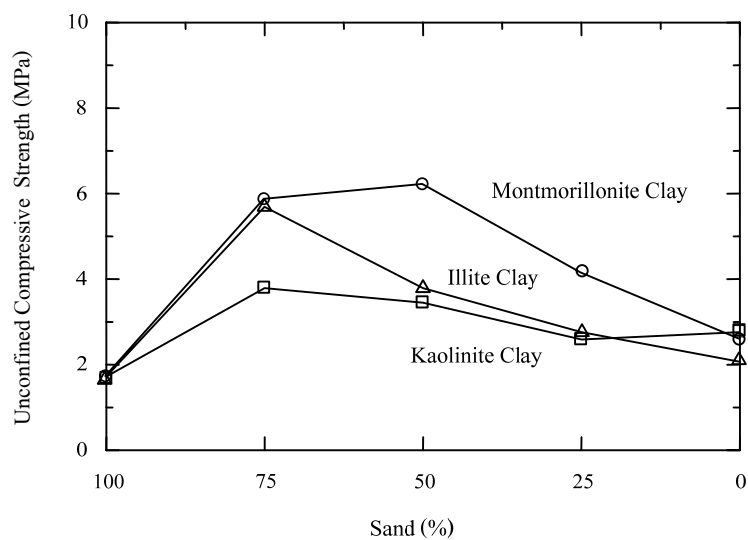


รูปที่ 2.3 ค่าพิกัดอัตราตะเปิร์กของดินไอโอวา (Iowa) หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง (Spanler et al., 1949)

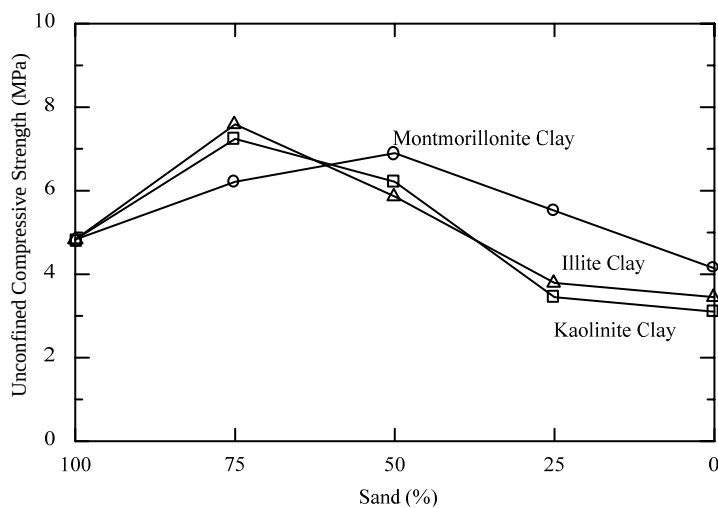
Norling and Peckard (1958) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณมวลรวมหยาบที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 โดยใช้ดิน 3 ชนิดคือ ทรายหยาบ ทรายละเอียด และทรายปนดินเหนียวผสมซีเมนต์ ในปริมาณที่เท่ากัน แต่แปรผันมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 แล้วทำการทดสอบหาค่าลึงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน และพบว่า Loamy sand และ Fine sand loam จะมีค่าลึงสูงขึ้น เมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 ลดลง สำหรับ Coarse sand จะมีค่าลึงอัดลดลง เมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้นเกินกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

Davidson et al. (1962) ทำการทดลองโดยใช้ทรายผสมกับดินเหนียว ในอัตราส่วน ทรายต่อดินเหนียว 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ดินเหนียวที่ใช้เป็นดินเหนียวจำพวก คาโอไลน์ท์ (kaolinite), อิลไลท์ (illite) และมอนโมริลโลไนท์ (montmorillonite) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.4 รูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 สรุปว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวมากไป (เกินกว่า 25

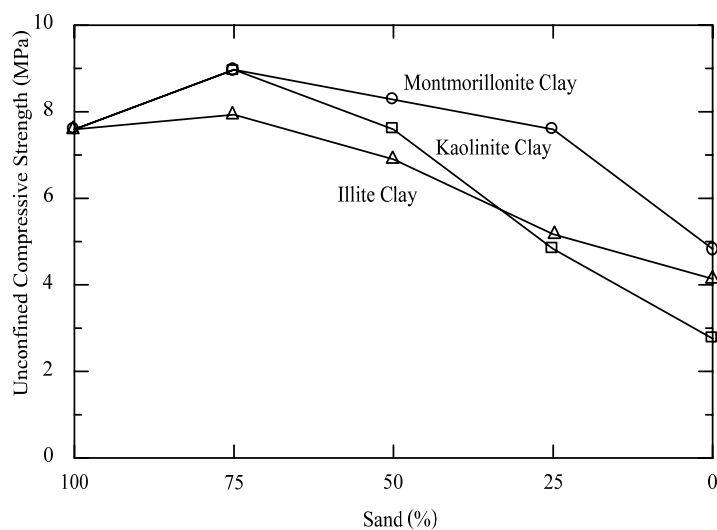
เปอร์เซ็นต์) จะทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ลดลงอย่างเด่นชัด โดยที่ดินเหนียวจำพวกมอนโมริลโลไนท์ มีแนวโน้มว่าจะมีกำลังสูงกว่าดินเหนียวจำพวกคาโอลิไนท์ และจำพวกอิลไลท์



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8 %
(Davidson et al., 1962)



รูปที่ 2.5 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12 %
(Davidson et al., 1962)



รูปที่ 2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 16 %
(Davidson et al., 1962)

Portland Cement Association (1959) ได้จำแนกความต้องการปริมาณซีเมนต์ของดินกลุ่มต่างๆตามระบบ ASSHTO ไว้ในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุง ตามการจำแนกแบบ ASSHTO (ข้อมูลจาก Portland Cement Association, 1959)

ASSHTO soil group	Usual range in cement requirement (% by vol.) (%by wt.)		Estimated cement content and that used in the moisture-density test (% by wt.)	Cement content for wet-dry and freeze-thaw test (% by wt.)
A-1-a	5-7	3-5	5	3-5-7
A-1-b	7-9	5-8	6	4-6-8
A-2	7-10	5-9	7	5-7-9
A-3	8-12	7-11	9	7-9-11
A-4	8-12	7-12	10	8-10-12
A-5	8-12	8-13	10	8-10-12
A-6	10-14	9-15	12	10-12-14
A-7	10-14	10-16	13	10-13-15

ตารางที่ 2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสม สำหรับวัสดุต่างๆ

(ข้อมูลจาก Portland Cement Association, 1959)

Type of miscellaneous material	Estimated cement contented and that used in moisture-density test		Cement contented for wet-dry and freeze-thaw Test (% by wt.)
	% by vol.	% by wt.	
Shell Soil		7	
Limestone screening	8	5	5-7-9
Red-dog	7	8	3-5-7
Shale or disintegrated Shale	9	10	6-8-10
Callche	11	7	8-10-12
Cinders	8	8	5-7-9
Chert	8	8	6-8-10
Chat	9	8	6-8-10
Marl	8	7	5-7-9
Scoria (Retaining No.4 material)	11	11	9-11-13
Scoria (Passing No.4 material only)	12	11	9-11-13
	8	7	5-7-9
Air-Cooled slag	9	7	5-7-9
Water-cooled slag	10	12	10-12-14

Moh et al. (1967) รายงานว่า ดินลูกรังในประเทศไทย ที่มีค่า PI ประมาณ 11 ถึง 19 เมื่อนำมาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 4 ถึง 7 จะให้ค่ากำลังอัดมากกว่า 852 กิโลปาสกาล ซึ่งเป็นข้อกำหนดของ British Road Research Laboratory ที่มีประสบการณ์ในการทดลองใช้ในแอฟริกา และยังเน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการบดอัดว่าถ้าค่าร้อยละของการบดอัดลดลงเพียงเล็กน้อย จะมีผลทำให้กำลังอัดลดลงอย่างเห็นเด่นชัด

Bell (1976) พบว่าแร่ดินเหนียว Montmorillonite เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาว จะทำให้ Aqueous phase ลดลง ทำให้สาร Cementitious ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะอยู่ในปูนขาวไม่เพียงพอต่อการแข็งตัว การแก้ไขคือ การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ลงไปเพื่อเพิ่ม Free lime ให้มากขึ้นโดยปกติการเพิ่มซีเมนต์ มากกว่าร้อยละ 15 จะทำให้ดินจำพวก Montmorillonite มีคุณภาพดีสามารถนำมาใช้งานได้

2.6.3 ปริมาณความชื้นขณะบดอัด

Felt (1955) และ Davidson et al. (1962) ศึกษาอิทธิพลของความชื้นต่อกำลังอัด และความชื้นกับน้ำหนักที่สูญเสียจากการทำ Wet-dry และ Freeze-thaw ได้ผลตรงกันว่า ปริมาณความชื้น และความหนาแน่นมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทรายควรทำการบดอัดดินด้วยปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม ส่วนดินเหนียวควรบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จึงจะให้กำลังอัดสูงสุด

Ruenkairergsa (1982) ได้อธิบายว่าการนำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่บดอัดตามวิธีการของพร็อกเตอร์ (proctor) มาใช้ในงานดินซีเมนต์นั้นพบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากจะให้ความหนาแน่นสูงสุดแล้ว ยังทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์อีกด้วย สำหรับดินซีเมนต์ ความหนาแน่นสูงสุดไม่จำเป็นว่าจะทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงและความคงทนมากที่สุดเสมอไป จากการทดลองหาความคงทนด้วยวิธี Freeze-thaw ของดินตะกอนและดินเหนียวผสมซีเมนต์พบว่า ความคงทนจะมีค่าสูงสุดเมื่อทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย ทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม จะทำให้ค่าความคงทนลดลง สำหรับดินทรายผสมซีเมนต์ ความแข็งแรงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 3-6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดินเหนียวเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จะให้ความแข็งแรงสูงสุด

Lightsey et al. (1970) ได้รายงานว่าบางครั้งการบดอัดดินซีเมนต์ให้มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry-density, MDD) ก็ไม่ได้ทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงมากที่สุดเสมอไป เนื่องจากการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด จากการศึกษาดินตัวอย่าง 4 ชนิดได้แก่ Silty loam, Sandy loam, silt และ Silty clay loam บดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (standard proctor test) ที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าและสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมร้อยละ เมื่อผสมเสร็จทิ้งไว้เป็นเวลา 0, 2, 4 และ 6 ชั่วโมงก่อนทำการบดอัด พบว่าปริมาณน้ำส่วนเกินที่ต้องการเพื่อให้ได้ความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์สูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของดินและเวลาระหว่างการผสมควบคู่กับการบดอัด สำหรับดินเม็ดหยาบ ปริมาณน้ำที่เพิ่มในการบดอัดจะเพิ่มการหล่อลื่นระหว่างเม็ดดินทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างเพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความคงทน เมื่อมีการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด ส่วนดินเม็ดละเอียด การเพิ่มปริมาณน้ำในการบดอัดจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสมบูรณ์ขึ้น เป็นผลทำให้คุณสมบัติของดินซีเมนต์ดีขึ้น โดยที่คงไม่มีการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด

2.6.4 การบ่มดินซีเมนต์

Highway Research Board (1949) ได้รายงานเกี่ยวกับการรักษาความชื้นของดินผสมซีเมนต์ในสนามโดยการฉาบผิวทางใน 4 รัฐด้วย Bituminous seal 4 ชนิดคือ MC-2, RC-1, MC-3 และ Asphalt emulsion ว่าวัสดุฉาบผิวทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการเก็บรักษาความชื้นระหว่างการบ่ม 7 วัน ในสนามได้เป็นอย่างดี

Clare and Pollard (1951) สรุปถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังของดินซีเมนต์ว่า ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 25 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วันจะสูงขึ้น 2-2.5 เปอร์เซ็นต์ต่ออุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น 1 องศา

เซลเซียส การก่อสร้างที่ใช้ดินซีเมนต์ในพื้นที่ที่มีอากาศอบอุ่นจะให้กำลังอัดที่อายุ 3 เดือนแรกหลังการก่อสร้างสูงกว่าการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีอากาศหนาวกว่าร้อยละ 50-100

Maner (1952) ได้ทดลองใช้วัสดุต่างๆ ได้แก่ Waterproof paper, Calcium chloride, RC-2 Asphalt, Tar และ Asphalt emulsion ในการบ่มพื้นทางดินซีเมนต์พบว่าวัสดุ Bituminous Asphalt ทั้ง 3 ชนิด และ Waterproof paper ใช้งานได้ผลดี นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นในอากาศมีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณความชื้นในดินซีเมนต์

Leadabrand (1956) นำดิน 2 ชนิด คือ Clayey sandy soil และ Silty soil มาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาลำดับอัดที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 5 ปี พบว่าลำดับอัดของดินซีเมนต์จะคล้ายกับลำดับอัดของคอนกรีต กล่าวคือ ลำดับอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุของดินซีเมนต์ และยังสามารถเจาะตัดดินซีเมนต์ในสนามจากโครงการก่อสร้างของรัฐต่างๆ 4 รัฐ ในประเทศสหรัฐอเมริกาโดยมีช่วงอายุตั้งแต่ 1 ปีถึง 20 ปี มาทดสอบหาลำดับอัดพบว่า ลำดับอัดของดินซีเมนต์ในสนามจะสอดคล้องกับลำดับอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ

Ng (1966) พบว่าลำดับอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์จะแปรผันกับอุณหภูมิที่ใช้บ่ม กล่าวคืออุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 70 ° F เป็น 100 ° F ลำดับอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 20

Wang and Huston (1972) รายงานว่าการลดอุณหภูมิในการบ่มจะทำลำดับอัดลดลงแต่จะเพิ่มความเครียดที่จุดวิบัติ ไม่ว่าจะทดสอบแรงดึง หรือแรงอัด

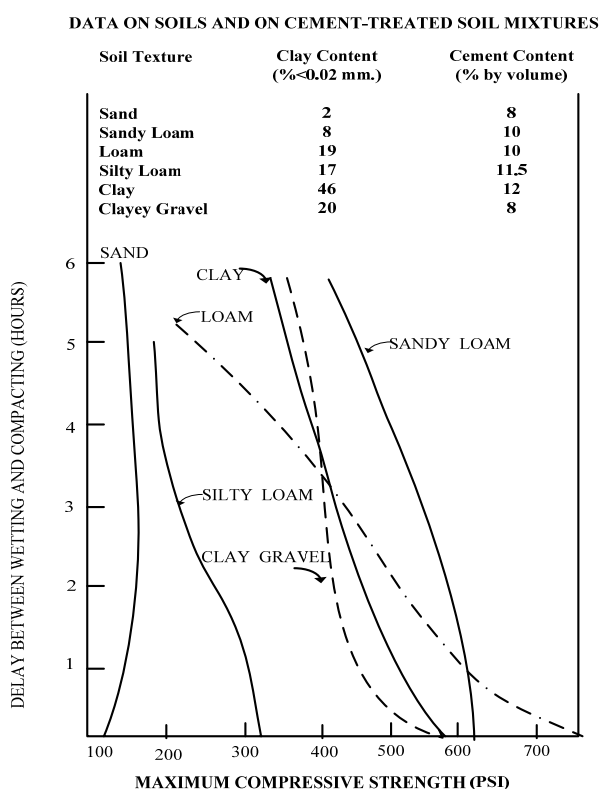
Shackel and Lee (1974) ทำการศึกษาเรื่องการบ่มดินซีเมนต์โดยใช้ตัวอย่าง Artificial soil ซึ่งได้จากการนำ Uniform sand จากเมือง Botany รัฐ New South Wales ประเทศออสเตรเลีย มาผสมกับ Commercial Air-floated China Clay (kaolin) ในอัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก และผสมซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 0, 3 และ 8 ทำการบ่ม 2 ลักษณะ คือบ่มในอากาศที่อุณหภูมิคงที่ 20°C และบ่มในอุ้งพลาสติกที่อุณหภูมิคงที่ 20°C โดยมีระยะบ่ม 0, 1, 3, 9, 23, 44 และ 81 วัน จากนั้นทดสอบหาค่าการหดตัว หรือค่าการขยายตัว ค่าลำดับอัด ค่าลำดับดึง และวัดการกระจายตัวของโพรง (pore size distribution) ของดินซีเมนต์จากการจำลองแทงตัวอย่างโดยใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Mercury intrusion porosimeter พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มจะทำให้ลำดับอัด และลำดับดึงเพิ่มขึ้น การบ่มในอากาศจะทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าการบ่มแบบชื้น และยังเพิ่มขนาดโพรง (pore size) และปริมาตร (pore volume) เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นด้วย ส่วนการบ่มแบบชื้น เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดโพรงลดลง

2.6.5 ระยะเวลาในการผสม

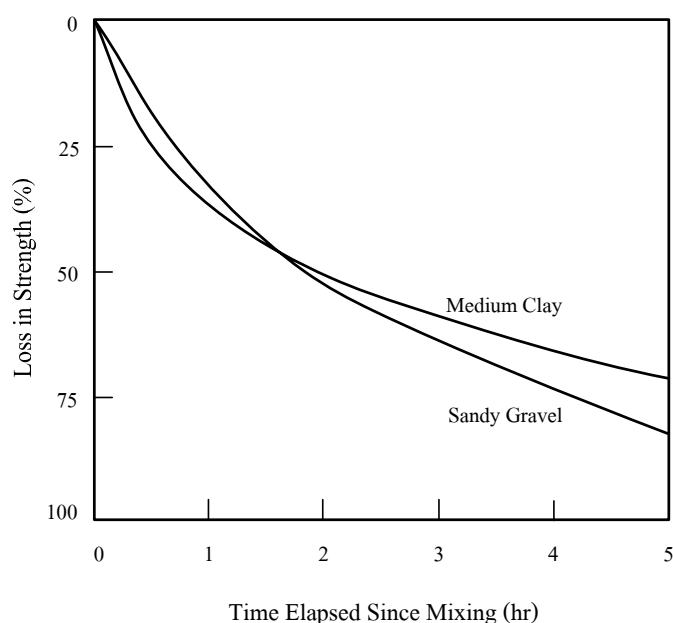
Marshall (1954) ศึกษาผลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างการผสมชั้น และการบดอัดที่มีผลต่อกำลังอัดของดินชนิดต่างๆ พบว่ากำลังอัดจะลดลงเมื่อเวลาการผสมนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7

Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของการหน่วงเวลาต่อกำลังอัด และความคงทนโดยผสมให้นานขึ้น แล้วทิ้งไว้ก่อนบดอัด ศึกษาดิน 3 ชนิดคือ ดินกลุ่ม A-2 ($LL = 26$, $PI = 11$) ดินกลุ่ม A-4 ($LL = 35$, $PI = 12$) ดินกลุ่ม A-6-7 ($LL = 47$, $PI = 26$) พบว่า ดินทุกชนิดจะมีกำลังอัดลดลงเมื่อหน่วงเวลาการผสมให้นานขึ้น การหน่วงเวลาการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราว จะมีผลเสียน้อยกว่าแบบหยุดผสมเลย

Ingles and Metcalf (1972) ทำการทดสอบดิน 2 ชนิดคือ Medium clay และ Sandy gravel เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่ใช้ในการผสมดินซีเมนต์ พบว่าเวลาการผสมที่นานขึ้น 1-2 ชั่วโมง กำลังอัดจะลดลงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเวลาการผสมนานเกินกว่า 2 ชั่วโมง กำลังอัดของ Sandy gravel จะน้อยกว่า Medium clay เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 อิทธิพลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างการผสมชั้น และการบดอัด
ที่มีต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Mashall, 1954)



รูปที่ 2.8 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้เวลาในการบดอัดนานขึ้น
(Ingles and Metcalf, 1972)

Horpibulsuk (2002) กล่าวว่า การที่ กำลังของดินซีเมนต์ในสนามมีค่าต่ำกว่ากำลังของดินซีเมนต์ที่หาได้จากห้องทดลอง มีสาเหตุจากความไม่สม่ำเสมอของการผสมดินซีเมนต์ในสนาม

2.6.6 สารผสมเพิ่ม

Clare and Pollard (1951) ทำการศึกษาเกี่ยวกับสารผสมเพิ่ม โดยทำการทดสอบดินทรายที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่ร้อยละ 0.3 พบว่าสารผสมเพิ่มจำพวกปูนขาว (lime) มีส่วนช่วยให้ดินซีเมนต์แข็งตัวเร็วในระยะแรก ดินชนิดนี้เมื่อผสมด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์อย่างเดียวจะก่อตัวเมื่ออายุ 7 วัน แต่เมื่อเพิ่มปูนขาว ประมาณร้อยละ 2 จะช่วยให้ดินซีเมนต์ดังกล่าวแข็งตัวเร็วขึ้น 2 วัน

Fuller and Dabney (1952) ได้อธิบายว่าการใส่ปูนขาวกับดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูง จะทำให้การผสม และการบดอัดง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

Maclean et al. (1952) ได้นำดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวระหว่าง 70-75 และมีค่าดัชนีพลาสติกประมาณ 45-53 มาทำการทดลอง โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 15-30 โดยที่เพิ่มปูนขาว ลงไปร้อยละ 2 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้น และมีความต้านทานการเสียน้ำได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าผสมปูนขาว (lime) เกินกว่าร้อยละ 2 ผลการทดลองอาจไม่เป็นตามที่กล่าวมาข้างต้น

Lambe and Moh (1957) ได้รายงานผลการทดสอบการใช้สารผสมเพิ่มจำนวน 29 ชนิดในกลุ่ม Dispersants, Synthetic resins, Waterproofing agents, Alkalies และเกลือ ในดินซีเมนต์

ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 และปริมาณสารผสมเพิ่มร้อยละ 0.5-1.0 ดินที่ใช้ทำการทดสอบได้แก่ ดินตะกอนจากรัฐ New Hampshire ดินเหนียวปนดินตะกอนจากรัฐ Massachusetts และดินฝุ่นแข็ง พูนจากเมือง Vicksburg พบว่ามีสารผสมเพิ่ม 4 ชนิด ที่เพิ่มความแข็งแรงถึงร้อยละ 100-150 ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต, โซเดียมไฮดรอกไซด์, โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมซิลเฟต

Davidson et al. (1958) ได้ศึกษาการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับเถ้าลอยลิกไนต์ (fly ash) ในการปรับปรุงคุณภาพของดินพบว่า การผสมเถ้าลอยลิกไนต์ลงในดินจะทำให้กำลังรับน้ำหนักของทรายผสมซีเมนต์เพิ่มขึ้น และยังพบว่าในดินเหนียวผสมซีเมนต์ ถ้าใส่เถ้าลอยลิกไนต์ ลงไป จะทำให้รอยแตกเนื่องจากการหดตัวลดลง แต่ไม่ช่วยเพิ่มความคงทน

Pinto et al. (1962) ได้ทำการศึกษาดินที่มีแรมอนโมริลโอไนท์ผสมอยู่ 5 ชนิด โดยแปรผันปริมาณปูนขาว ซีเมนต์ที่ผสม และอายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน โดยทำการแช่น้ำ 1 วันก่อน ทำการทดสอบอัดแกนเดียว พบว่าการผสมปูนขาวจะช่วยให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในกรณีที่ดิน ตัวอย่างมีปริมาณดินเหนียวสูง และถ้าดินไม่มีหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่จะยิ่งทำให้ ความแรงเพิ่มสูงขึ้นอีก

Wilmot (1995) กล่าวว่า ตั้งแต่ปี 1950 ในประเทศออสเตรเลียวัสดุผสมเพิ่ม ที่ใช้ใน งาน Pavement recycling มีเพียง Cement, Cement/fly-ash, Bitumen และ Hydrate lime เท่านั้น ต่อมาในปี 1980 มีการนำซีเมนต์ผสม มาใช้เพิ่มระยะเวลาการใช้งานให้นานขึ้น โดยที่ความ แข็งแรงในระยะยาวยังคงเท่าเดิม ซีเมนต์ผสมดังกล่าวได้แก่ Cement+Slag, Cement+Fly-ash, Cement+Lime และได้ให้แนวทางการเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.3

2.7 กำลังของดินซีเมนต์

Wang and Huston (1972) ทำการทดสอบหาค่ากำลังดึง และกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งกับดินตะกอนที่ได้จาก Glacial deposit ใน Rhode island พบว่า การเสีรูปที่จุดวิบัติจากการทดสอบทั้งแบบรับแรงอัดและรับแรงดึง จะมีค่าคงที่เสมอ ถ้าหากค่า ความหนาแน่นแห้ง ปริมาณความชื้น และสภาพการบ่มเหมือนกัน ค่ากำลังและค่าการเสีรูปที่ได้ จากการทดสอบแบบรับแรงดึงจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแบบรับแรงอัด ค่ากำลังรับ แรงดึง จะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 10-20 ของค่ากำลังรับแรงอัด ส่วนค่าการเสีรูปที่จุดวิบัติเนื่องจาก แรงดึง จะมีค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 1.0-2.5 ของค่าการเสีรูปที่จุดวิบัติเนื่องจากแรงอัด สำหรับทุก อายุการบ่มและปริมาณซีเมนต์ที่ศึกษา และยังพบอีกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแรงอัดกับค่าโมดูลัส ยืดหยุ่นของแรงดึง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลัง ตามรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10

ตารางที่ 2.3 แนวทางการเลือกวัสดุผสมเพิ่ม (additive) กับวัสดุแต่ละชนิด (Wilmot, 1995)

	Crushed rock	Well graded gravel	Silty-clay gravel	Sand*	Sandy silty clay	Heavy clay
Cement	A	A	A	B	B	N
Blend Cementations	A	A	A	A	A	N
Hydrate Lime	B	B	A	N	B	A
Hydrate Lime + Cement	N	N	B	N	B	A
Polymeric	B	A	A	B	A	B
Bitumen	A	A	B	B	B	N

Usually very suitable A

Usually satisfactory B

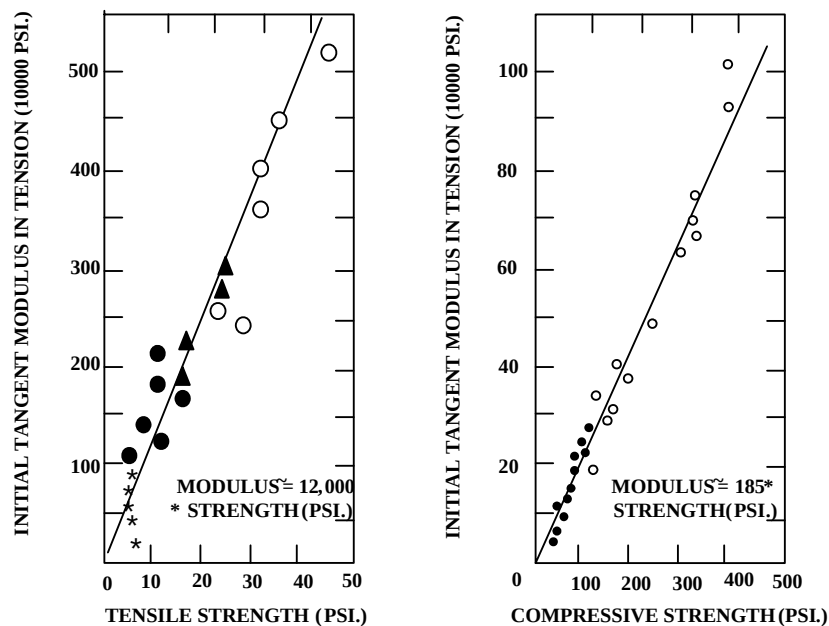
Usually not suitable N

* Depend Upon Grading (Single size sand require higher additive content)

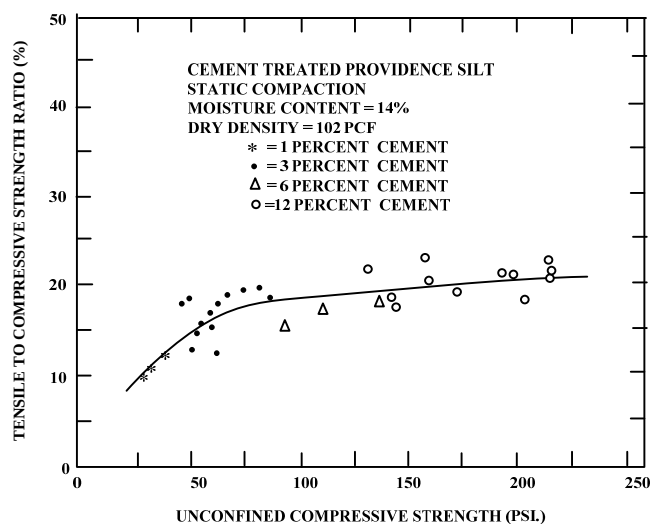
2.8 การนำวัสดุเก่ามาใช้ใหม่ (recycling)

Gordon (1984) กล่าวถึงการใช้สารผสมเพิ่มเพื่อสร้าง Modified materials และ Bound Materials modified โดยที่ Materials คือวัสดุที่เกิดจากการเติมสารผสมเพิ่มพอประมาณ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้น วัสดุประเภทนี้จะมีความต้านทานแรงดึงต่ำ Bound materials เป็นวัสดุที่เกิดจากการใส่สารผสมเพิ่ม ลงไปอย่างมาก เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกได้ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าสูง และอาจต้านทานหน่วยแรงดึงได้

Kuhlman (1989) กล่าวว่า ได้มีการปรับปรุงถนนเก่าใน 12 รัฐของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีพิจารณาจากขางมะตอย โดยการนำพิจารณาผสมกับซีเมนต์ แล้วใช้เป็นพื้นทางใหม่ ในช่วงปี 1942-1958 ต่อมาในปี 1970 การปรับปรุงวัสดุเก่านี้ถูกเรียกว่า Recycling ในเวลาต่อมาวิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้งาน ทั้งพิจารณาที่ยืดหยุ่นที่ชำรุดเสียหาย และพิจารณาคอนกรีตเก่าซึ่งพบว่าได้ผลดี



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus in Tension กับกำลังดึง
และกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Wang and Huston, 1972)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct tensile strength กับ Unconfined compressive strength
ของดินซีเมนต์ (Wang and Huston, 1972)

Tabensky (1990) กล่าวว่า การนำวัสดุเก่ามาใช้งานอีกครั้ง (recycling) ไม่ใช่เรื่องใหม่ แต่มีรายงานที่ Florida Department of Transportation ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพวัสดุเก่า ด้วยการผสม

ซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของถนน และ Orange county california ใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่นำกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้ง กับถนนจำนวน 20 สายระหว่างปี 1950-1960 โดยใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5-7 โดยน้ำหนัก และทำผิวทางแบบแอสฟัลท์หนา 75 มิลลิเมตร ในรัฐ Arizona ได้มีการใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่ผสมกันระหว่างแอสฟัลท์คอนกรีตเท่ากับวัสดุชั้นล่าง เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางวิ่งในสนามบิน 2 แห่งคือ Winslow municipal airport และ Mohave county airport.

Wirtgen (1992) บันทึกว่า Cold recycling ใช้ในการทำชั้นพื้นทางไว้รองรับ Surface treatment หรือ Wearing course โดยทั่วไปจะใช้ความหนาประมาณ 200-300 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของถนนที่ต้องการ ข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์ของ Cold in-place recycling เมื่อเปรียบเทียบกับ Conventional method ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

Atkinson (1995) กล่าวว่า ได้มีการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุใน Queensland มาตั้งแต่ปี 1980 กับถนนที่เป็นคันกรวดเมื่อปริมาณการจราจรสูงขึ้น หรือเกิดน้ำท่วมจะทำให้ถนนชำรุดเสียหาย และความแข็งแรงของถนนลดลง ได้แก้ปัญหาโดยปรับปรุงคุณภาพวัสดุ ซึ่งในช่วงแรกของการออกแบบต้องการความแข็งแรงที่ 2 เมกะปาสคาล สำหรับถนนที่มีคันทางอ่อนตัว (flexible subgrade)

Walton (1995) บันทึกไว้ว่าการนำวัสดุเก่ามาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (cold in-place recycling) เป็นที่ยอมรับกันว่าประหยัดมาก และได้เริ่มมีการใช้เป็นมาตรฐานในปี 1970 ในรัฐ Oregon, New Mexico, Kansas และ Florida ต่อมาวิธีการดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในหลายประเทศ เช่น ออสเตรเลีย อิตาลี รัสเซีย แคนาดา เยอรมัน ฝรั่งเศส และอังกฤษ โดยใช้กับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำถึงปานกลางในปี 1980 ปรากฏว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ในช่วง ดังกล่าวใช้ซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และยังใช้ Emulsion เป็นสารผสมเพิ่ม (additive)

A.A. Loundon & Partner Consulting Engineers (1995) กล่าวว่า การก่อสร้างด้วยวิธี Cold In-Place Recycling ต้องมีการสำรวจออกแบบตามเงื่อนไข และตามสภาพถนนที่จะทำการก่อสร้าง รวมทั้งประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่จะใช้งาน เพื่อที่จะสามารถวางแผนงานให้ได้ผลที่ดีที่สุด การก่อสร้างจะไม่ทำในขณะเปียก และหลีกเลี่ยงการทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นที่ใช้ควรหาจากการทดลอง ซึ่งถ้าใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพ ระหว่างการบดอัดความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 75 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุที่ไม่ผสมเพิ่ม แต่ถ้าไม่ผสมซีเมนต์หรือไม่ผสมอะไรเลย ปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดต้องไม่เกินปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมไม่เกินร้อยละ 1 หลังจากการบดอัด และแต่งรูปเรียบเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการบ่มเพื่อรักษาความชื้นทันทีซึ่งอาจใช้ยางแอสฟัลท์หรือวัสดุอย่างอื่นที่เหมาะสมก็ได้

ตารางที่ 2.4 ข้อเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ของ Cold recycling process กับ Conventional method (Wirtgen, 1992)

	Conventional method	Cold recycling method
รถขุดและการขนส่ง	ต้องการ	ไม่ต้องการ
การขนย้ายรถขุด	ต้องการ	ไม่ต้องการ
การใช้รถขนย้ายวัสดุถนนเดิม	ต้องการ	ไม่ต้องการ
สถานที่ทิ้งวัสดุ	ต้องการ (ค่าใช้จ่ายสูง)	ไม่ต้องการ
การใช้รถขนย้ายวัสดุถนนใหม่	ต้องการ (เป็นปัญหามาก)	ไม่ต้องการ
การตัดแต่งรูปในแต่ละชั้นทาง	ต้องการ (ค่าใช้จ่ายสูง)	ต้องการ (ในบางกรณี)
เครื่องจักรในการบดอัด	ต้องการ (ค่าใช้จ่ายสูง)	ต้องการ (กรณีไม่มีเครื่องปู)
ระยะเวลาในการก่อสร้าง	ยาว	สั้น
ปัญหาการจราจร	มาก	น้อย

2.9 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์

Horpibulsuk และคณะ (2003) ได้ทำการทดสอบ และวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยละเอียด โดยอาศัยสมมติฐาน Clay–water/cement ratio hypothesis (Miura et al., 2001 และ Horpibulsuk and Miura, 2001) พบว่า กำลังของดินแต่ละชนิดที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียว คือ Clay–water/cement ratio

$$q_u = \frac{A}{B^{(w_c/C)}} \quad (2.5)$$

เมื่อ q_u คือ กำลังต้านแรงอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง

A คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

B คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

w_c/C คือ Clay–water/Cement ratio และมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณ
ความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์

นอกจากนี้ Horpibulsuk et al. (2003) ยังพบว่า อัตราการเพิ่มของกำลังของดินซีเมนต์เป็น
ฟังก์ชันของล็อกกาลิทึมของอายุบ่ม ดังแสดงในสมการที่ 2.6 และรูปที่ 2.11

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.038 + 0.281 \ln D \quad (2.6)$$

เมื่อ q_D คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม D วัน

q_{28} คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน

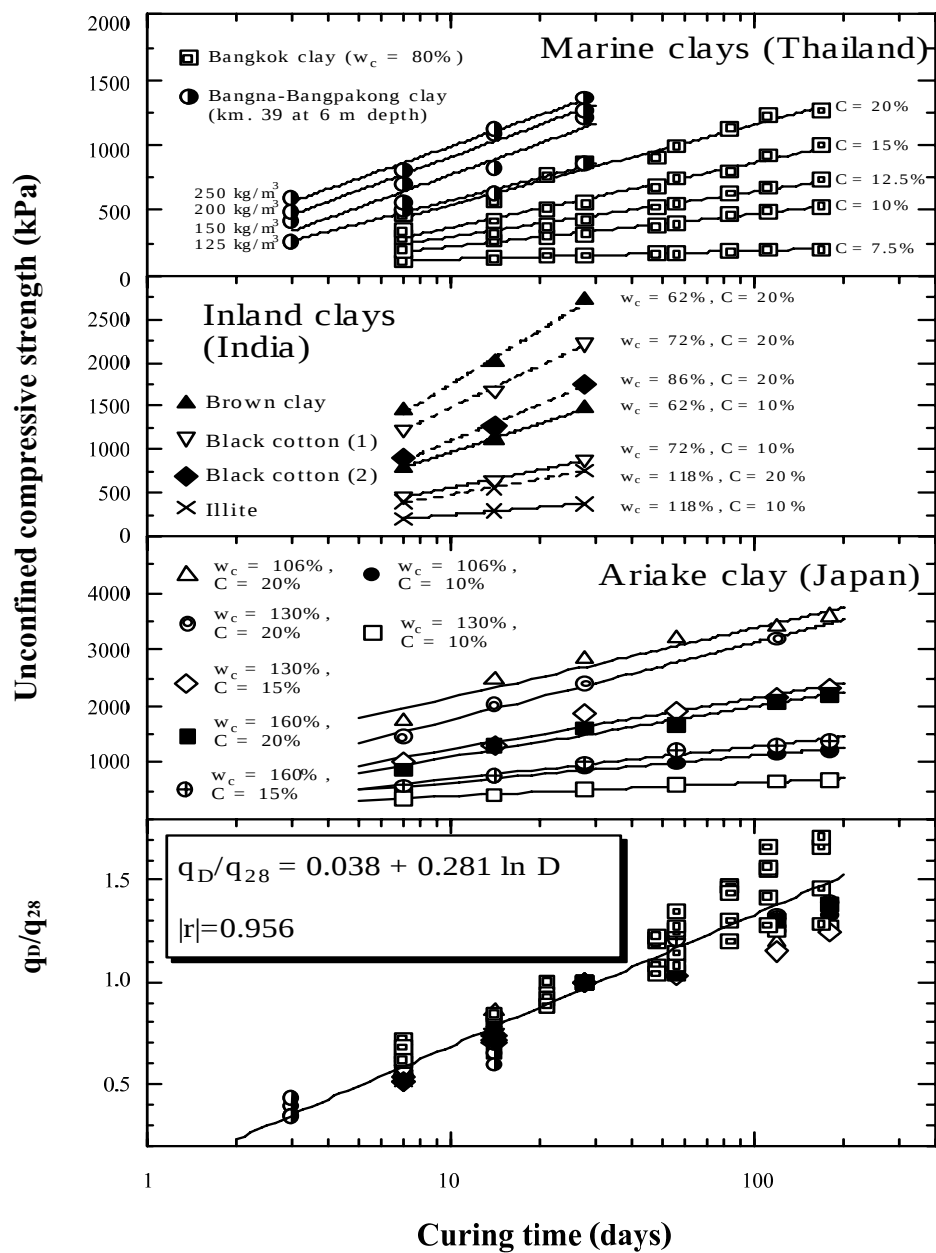
D คือ อายุบ่ม, วัน

เมื่อรวมสมการที่ 2.5 และ 2.6 และแทนค่า B เท่ากับ 1.24 จะได้สมการที่ 2.7 ซึ่งสามารถทำนาย
กำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มใดๆ โดยอาศัยเพียงแค่ผลการ
ทดสอบเดียวที่อายุการบ่ม 28 วัน

$$\left| \frac{q_{(w_c/C)1,D}}{q_{(w_c/C)28}} \right| = 1.24^{\{(w_c/C)_{28} - (w_c/C)_D\}} (0.038 + 0.281 \ln D) \quad (2.7)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)1,D}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบที่ w_c/C หลังจาก
ระยะบ่ม D วัน

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



รูปที่ 2.11 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

การแก้ไขถนนที่ชำรุดโดยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (pavement recycling technique) เป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทยขณะนี้ แต่การศึกษาการพัฒนาองค์ความรู้ในห้องปฏิบัติการ และในสนามยังมีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งที่ผ่านมาองค์ความรู้ของถนนที่แก้ไขตามวิธีนี้ยังไม่เป็นไปตามที่ออกแบบ มักต้องออกแบบให้ถนนมีกำลังอัดเพิ่มจากถนนเดิม โดยการเพิ่มความหนาแน่นทางจาก 15 เซนติเมตรเป็น 20 เซนติเมตร ทำให้พบปัญหาการผสมกันระหว่างวัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง บางครั้งต้องปรับขนาดผลโดยการโรยหินคลุกบนผิวทางก่อนทำการบดหรือด้วยเครื่องจักร ซึ่งการตรวจสอบขนาดผลต้องใช้กำลังคนและเวลามาก บางครั้งความชื้นเริ่มต้นและสภาพอากาศที่แปรปรวนค่อนข้างมาก ซึ่งมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนาม

ผู้เขียนขอเสนอแนวทางแก้ไข โดยไม่ต้องปรับขนาดผล การโรยหินคลุกอาจจะทำได้แต่เพียงเพื่อการปรับระดับในทางที่เสียรูปทรงมากๆ เท่านั้น และใช้กำลังอัดเป็นเกณฑ์ในการตรวจรับ จึงต้องสร้างสมการกำลังอัดสำหรับดินผสมซีเมนต์ และหาอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมสำหรับถนนเทียบกับดินผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นบทนี้จะนำเสนอ แผนงานการวิจัย และข้อสมมุติฐาน เพื่อให้งานวิจัยครอบคลุมปัญหาต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

3.2 แผนงานวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยการบดอัดในห้องปฏิบัติการและหาลำดับชั้นในสนาม เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและในสนาม และเพื่อนำเสนอขั้นตอนการปรับปรุงถนนที่ชำรุดด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาในห้องปฏิบัติการทำกับดินตัวอย่างสองชนิด คือดินลูกรังและหินคลุก ดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบนำมาจากจังหวัดเพชรบูรณ์ หินคลุกนำมาจากกองเก็บของหมวดการทางห้วยไร่ จังหวัดเพชรบูรณ์ หินตัวอย่างมีสีเทาน้ำตาล ตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดถูกนำมาผึ่งแห้งในอากาศอย่างน้อย 3 วัน จากนั้นนำมาหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

ก่อนจะนำมาผสมในอัตราส่วน 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 และ 0:100 การผสม การแบ่งตัวอย่างให้ใช้เครื่องแบ่งตัวอย่างเพื่อให้ได้ตัวแทนตัวอย่างที่แท้จริงแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การแบ่งตัวอย่างด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่าง

3.2.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ดินตัวอย่างจะถูกทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้น อันได้แก่ 1) การกระจายขนาดของอนุภาคดินตามมาตรฐานวิธีทดลองที่ ทล.ท.205/2517 (เทียบเท่ากับมาตรฐาน ASTM D422) 2) ค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐานวิธีทดลองที่ ทล.ท.207/2517, ทล.ท.209/2518 (เทียบเท่ากับมาตรฐาน ASTM D854) แสดงดังรูปที่ 3.2 3) พิกัดอัตราเตอร์เบอร์กตามมาตรฐานวิธีทดลองที่ ทล.ท.102-103/2515 (เทียบเท่ากับมาตรฐาน ASTM D4318) 4) หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและ 5) ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor) 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามมาตรฐานวิธีทดลองที่ ทล.ท.108/2517 (เทียบเท่ากับมาตรฐาน ASTM D698) ตัวอย่างดินจะถูกร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 19 มิลลิเมตร เพื่อขจัดส่วนผสมที่มีขนาดใหญ่เกิน อันจะก่อให้เกิดความไม่สม่ำเสมอทางด้านขนาดของวัสดุทดสอบ (size effect) ดินตัวอย่างที่ผ่านการร่อนจะเตรียมทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้น 5 ถึง 6 ค่า โดยเติมน้ำใส่ตัวอย่างและห่อเก็บไว้ในถุงพลาสติก เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายอย่างทั่วถึง จากนั้นวัดปริมาณความชื้นก่อนทำการบดอัด และทำการบดอัดตัวอย่างในแบบหล่อมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว



รูปที่ 3.2 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ

เมื่อได้กราฟการบดอัดหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมแล้ว ทำการบดอัดส่วนผสมระหว่างดินและซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้นในดินเท่ากับ 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 เท่า (โดยประมาณ) ของปริมาณความชื้นเหมาะสม ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ คือ 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.3 Universal testing machine (UTM)

การเตรียมตัวอย่างดินขึ้นก่อนผสมซีเมนต์ทำเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างดินบดอัดที่ไม่ผสมซีเมนต์ หลังจากบดอัด ห่อดินตัวอย่างที่อยู่ในแบบหล่อด้วยฟิล์มห่ออาหารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการดันดินตัวอย่างออกจากแบบหล่อ ห่อตัวอย่างด้วยฟิล์มห่ออาหาร และเก็บไว้ในห้องควบคุมปริมาณความชื้นและอุณหภูมิ เมื่ออายุบ่มครบ (7, 14, 28, และ 100 วัน) แซ่ดินตัวอย่างในถังน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียวด้วยเครื่องทดสอบ Universal testing machine (UTM) ดังรูปที่ 3.3 การทดสอบแรงอัดแกนเดียวใช้อัตราเร็วการเคลื่อนตัวในแนวตั้งเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ (1% ของความสูงก้อนตัวอย่าง)

3.2.3 การเก็บตัวอย่างในสนาม

การศึกษาภาคสนามเป็นการศึกษาการลดลงของกำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนาม ซึ่งเก็บตัวอย่างจากจังหวัดเพชรบูรณ์ (จำนวน 3 ถนนทดสอบ) และจังหวัดอุดรธานี (จำนวน 1 ถนนทดสอบ) ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาสำหรับแต่ละถนนทดสอบได้จากการสุ่มทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมจนได้กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน สำหรับถนนทดสอบเพชรบูรณ์ 1 เพชรบูรณ์ 2 เพชรบูรณ์ 3 และอุดรธานี ผิวจราจรที่ชำรุดจะถูกรื้อขึ้นมาหนาประมาณ 20 เซนติเมตรเพื่อผสมกับซีเมนต์และน้ำ ที่ทุกสถานีทดสอบ (ห่างกัน 150 เมตร) ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามโดยเครื่องจักรถูกเก็บเพื่อทำการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างที่ได้นี้เรียกว่า “ดินตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (field hand-compacted sample)” ปริมาณความชื้น (w_m) และหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_{dm}) ของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ถูกควบคุมให้มีค่าระหว่าง 2% ของปริมาณความชื้นเหมาะสม ($OMC \pm 2\%$) การบดอัดในสนามจะควบคุมให้ค่าอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_{df}/γ_{dm}) มีค่าไม่น้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ γ_{df} คือหน่วยน้ำหนักแห้งของดินตัวอย่างที่เกิดจากการผสมในสนามและบดอัดด้วยรถบดอัด รูปที่ 3.4 เป็นการทดสอบความแน่นในสนามโดยวิธีแทนที่ด้วยทราย (sand replacement test) ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.ท.603/2517 (เทียบเท่ากับมาตรฐาน ASTM D854) ภายในเวลา 1 ชั่วโมงหลังการบดอัด

สำหรับแต่ละสถานีทดสอบ ดินตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดด้วยรถบดอัดจะถูกเก็บขึ้นมาจากถนนด้วย Coring cutter ที่อายุบ่ม 7, 14, และ 28 วัน เพื่อทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (unconfined compression test) ตัวอย่างเหล่านี้จะถูกตัดแต่งให้มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงเท่ากับ 1:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนเดียวกันกับดินตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ ดินตัวอย่างนี้ถูกเรียกว่า “ดินตัวอย่างที่ผสมและบดอัดในสนาม (field roller-compacted sample)” แสดงในรูปที่ 3.5 กำลังอัดของดินตัวอย่างที่ผสมและบดอัดในสนามจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับกำลังอัดของดินตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ (laboratory strength) และกำลังอัดของดินตัวอย่างที่ผสมในสนาม และบดอัดในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.4 การทดสอบความแน่นในสนาม

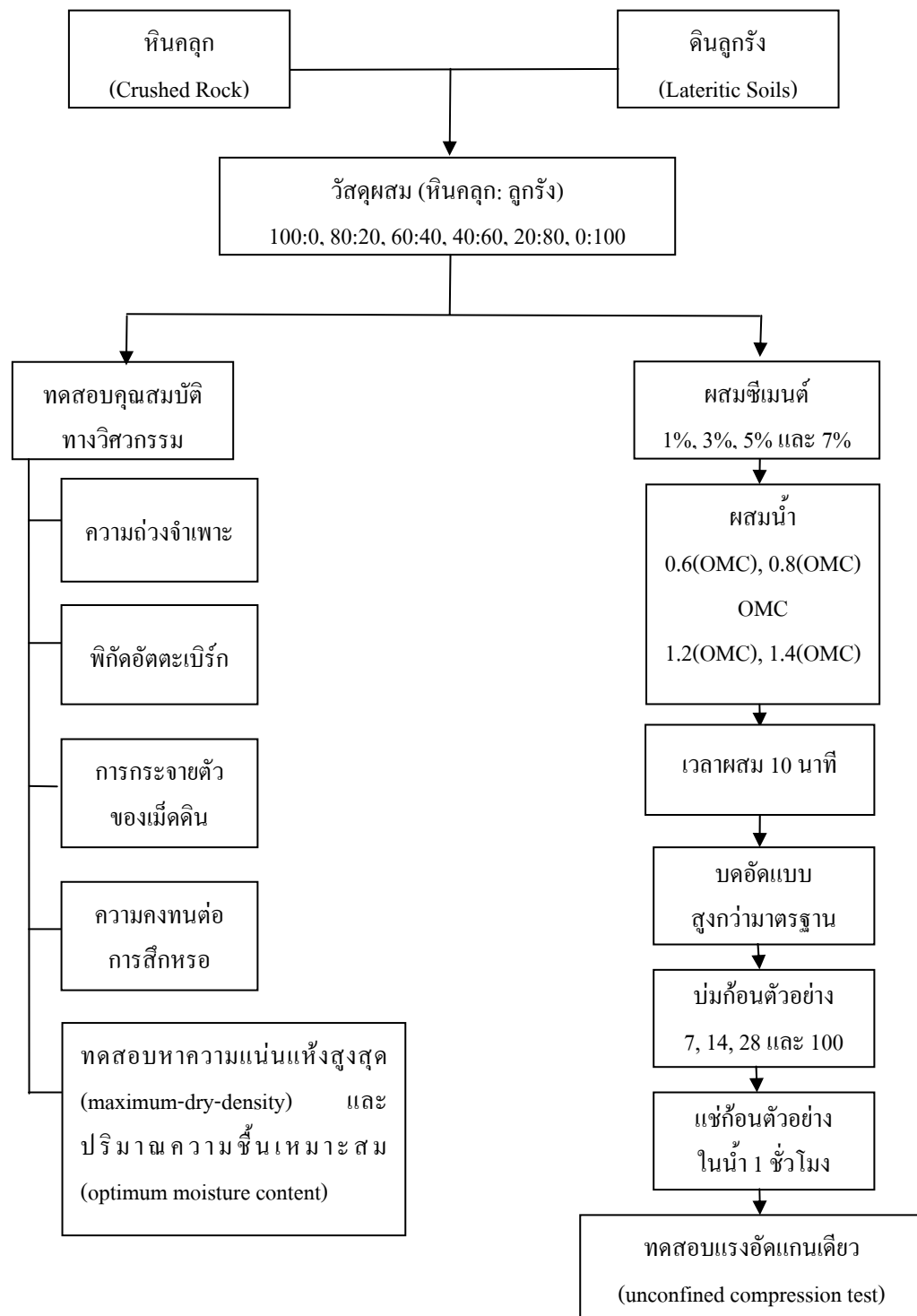


รูปที่ 3.5 ตัวอย่างจากการสุ่มตัด

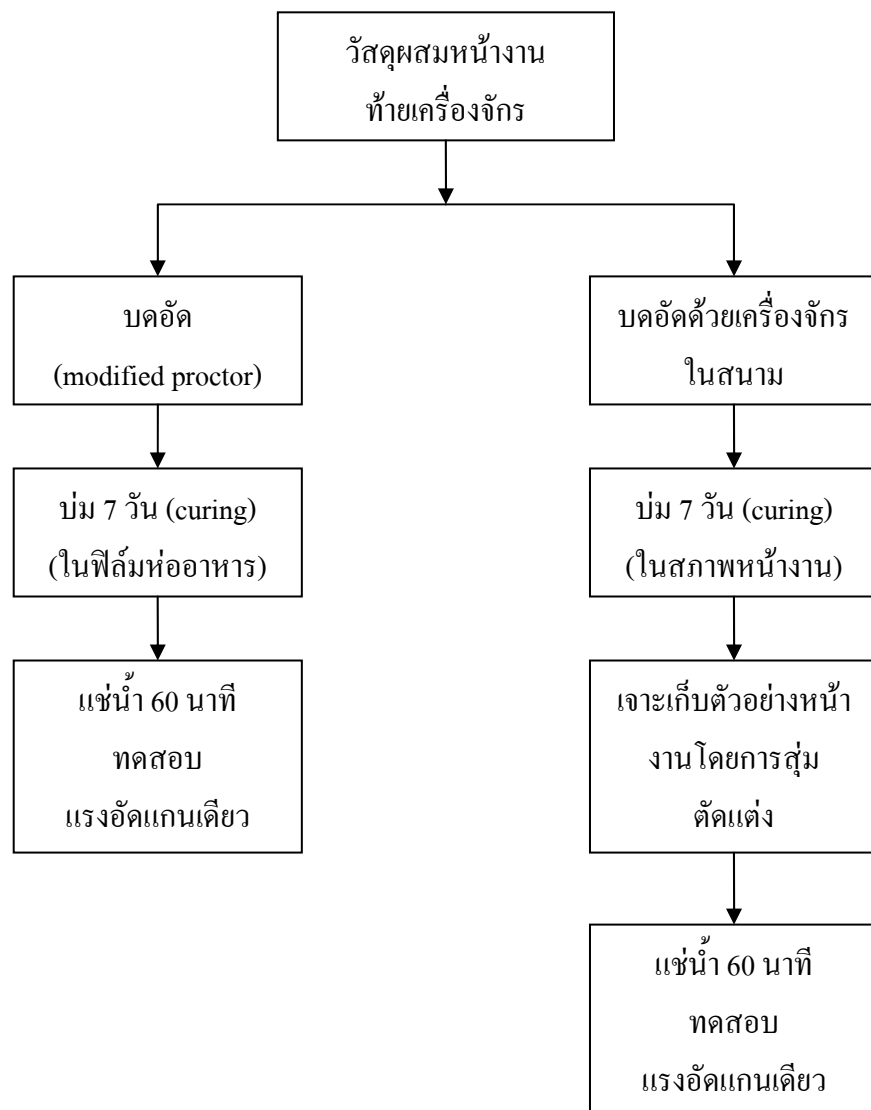
3.2.4 แบบจำลองกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด

การศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด (สุขสันต์ และคณะ 2548) กล่าวว่า “ที่อายุบ่มค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินซีเมนต์ทางด้านเปียก แปรผันตามปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์เพียงอย่างเดียว, w/C ” สมมติฐานดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมและสร้างแบบจำลองกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด และทำการตรวจสอบแบบจำลองโดยอาศัยผลการทดสอบกำลังอัดดินซีเมนต์ของนักวิจัยในอดีต เมื่ออาศัยแบบจำลองกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ได้กับผลการเปรียบเทียบของกำลังอัดของดินตัวอย่างที่ผสมและบดอัดในสนามกับกำลังอัดของดินตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ และกำลังอัดของดินตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดใน

ห้องปฏิบัติการในหัวข้อ 3.2.2 ผู้วิจัยจะนำเสนอขั้นตอนการปฏิบัติงานทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม



รูปที่ 3.6 แผนการวิจัยในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.7 แผนการวิจัยในสนาม

บทที่ 4

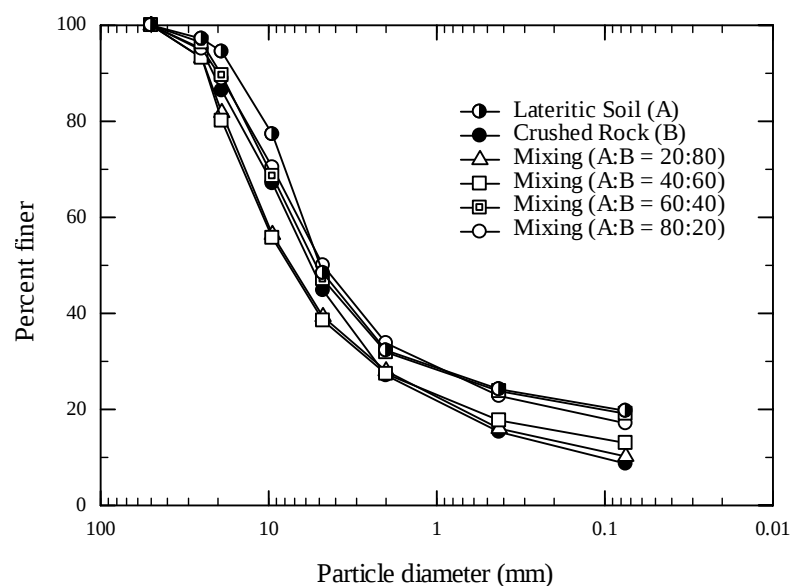
ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษาที่นำเสนอในบทที่ 3 ตั้งแต่คุณสมบัติพื้นฐานจนถึงกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด และจะสร้างทฤษฎีกำลังอัดและสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดท้ายสุดจะนำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าวในการประมาณกำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนาม พร้อมทั้งนำเสนอขั้นตอนการปรับปรุงถนนที่ชำรุดด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่อย่างมีประสิทธิภาพ

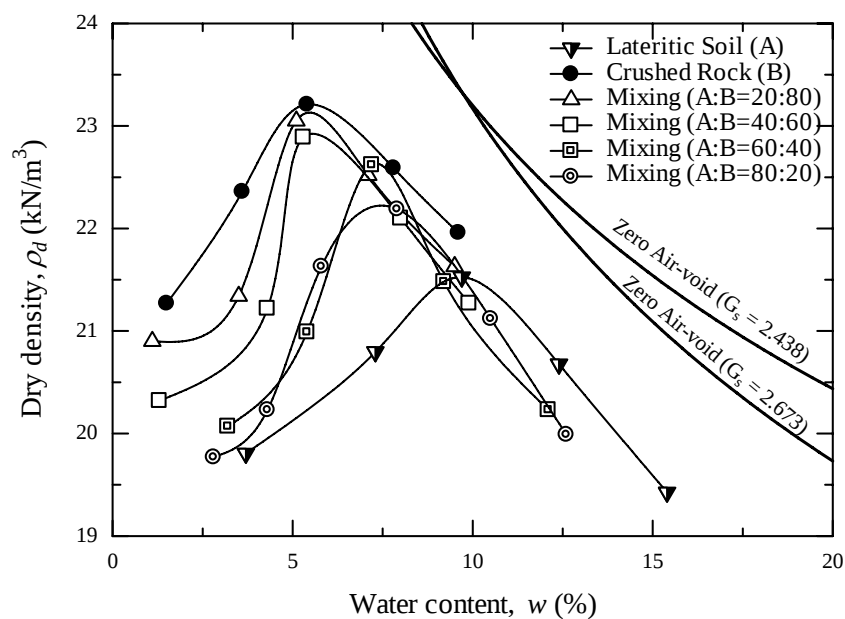
4.2 คุณสมบัติของดินทดสอบ

ดินลูกรังที่ใช้จากจังหวัดเพชรบูรณ์ มีปริมาณดินเม็ดหยาบมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ชัดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 36.6 และ 14.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจัดเป็นกรวดที่มีดินเหนียวปน (GC) ตามระบบการจำแนกแบบเอกภาพ (Unified soil classification system, USCS)



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของดินผสม (ลูกรังต่อหินคลุก)

หินคลุกจากกองเก็บของหมวดการทางห้วยไร่ มีสีเทาน้ำตาล ประกอบด้วยปริมาณดินเม็ดหยาบเกินกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก โดยอาศัยการจำแนกระบบ USCS หินคลุกจัดเป็นทรายปนดินตะกอนที่มีขนาดละเอียด (SW-SM) การกระจายตัวของทั้งดินลูกรังและหินคลุกแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.2 กราฟการบดอัดของหินคลุก ลูกรังและดินผสมอัตราส่วนต่างๆ

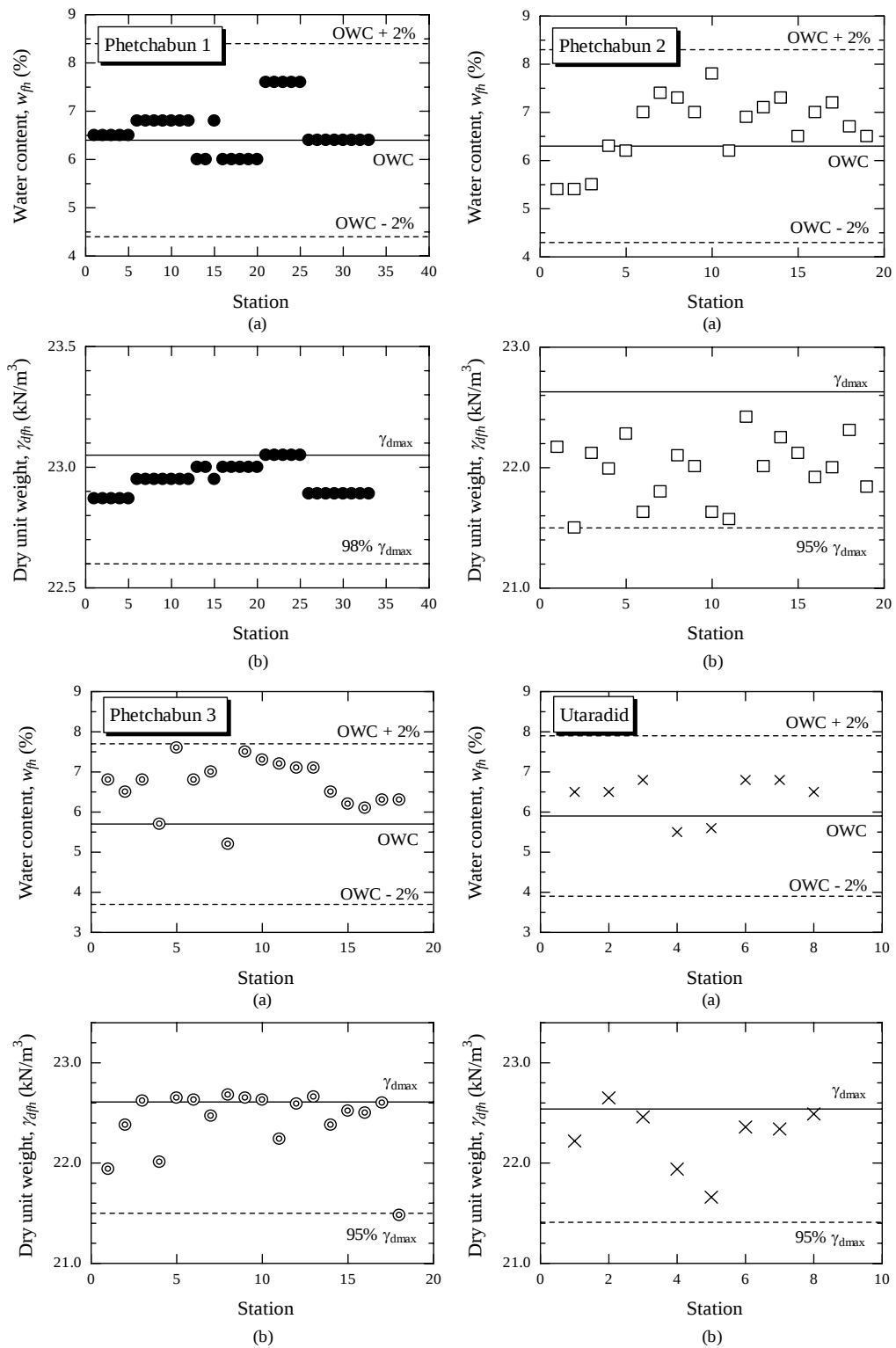
ตารางที่ 4.1 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินผสม (ลูกรัง: หินคลุก)

Materials	Classification		OMC	ρ_{dmax}	LL	PI	Specific gravity (G_s)		
	AASHTO	USCS	(%)	(kN/m^3)	(%)	(%)	Coarse	Fine	Combined
A: Lateritic soil	A-2-6	GC	9.3	21.21	36.6	14.9	2.538	2.100	2.438
B: Crushed rock	A-1-a	SW-SM	6.0	23.01	-	NP	2.684	2.568	2.673
Mix (A:B=20:80)	A-2-4	GW-GM	6.1	22.55	21.5	6.8	2.645	2.519	2.632
Mix (A:B=40:60)	A-2-4	GC	6.4	22.31	25.5	8.0	2.610	2.421	2.584
Mix (A:B=60:40)	A-2-6	SC	7.8	22.02	28.1	10.4	2.601	2.265	2.537
Mix (A:B=80:20)	A-2-6	GC	8.0	21.92	29.4	12.1	2.596	2.238	2.519

ตารางที่ 4.1 แสดงการจำแนกชนิดของดินโดยระบบ USCS และ ASSHTO ปริมาณความชื้นเหมาะสม หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และความถ่วงจำเพาะของดินผสมที่อัตราส่วนต่างๆ กราฟการบดอัดหินคลุก ลูกกรัง และดินผสมระหว่างลูกกรังและหินคลุกแสดงดังรูปที่ 4.2

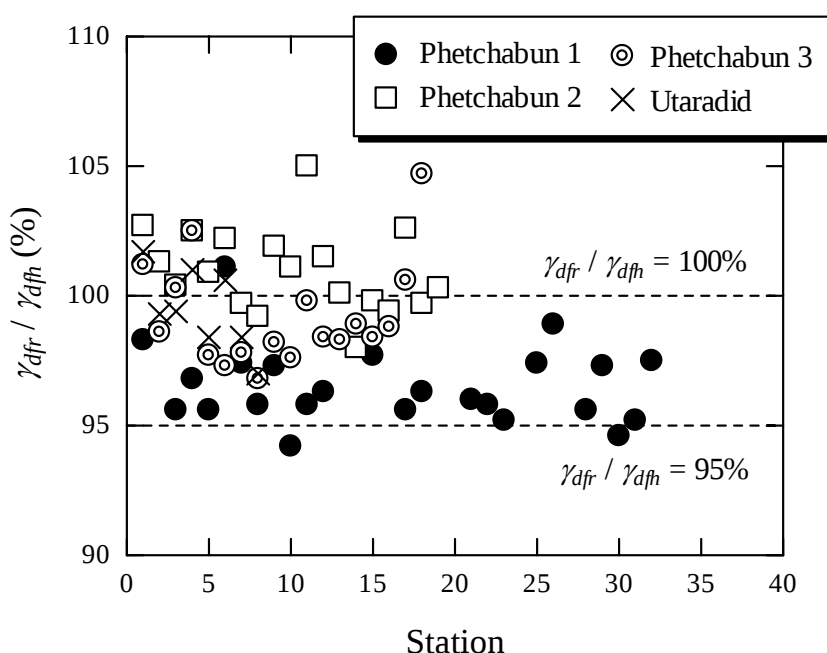
4.3 การทดสอบในสนาม

การทดสอบในสนามเป็นการศึกษาการลดลงของกำลังอัดเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสนามอันได้แก่ ความไม่สม่ำเสมอในการผสมดินเข้ากับซีเมนต์ และความแตกต่างของวิธีการบดอัดและสภาพการบ่มดินตัวอย่างในห้องปฏิบัติการและในสนาม การทดสอบในสนามกระทำที่จังหวัดเพชรบูรณ์ (จำนวน 3 ถนนทดสอบ) และจังหวัดอุดรดิตถ์ (จำนวน 1 ถนนทดสอบ) ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาสำหรับแต่ละถนนทดสอบได้จากการสุ่มทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมจนได้กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน เท่ากับ 2750 กิโลปาสกาล สำหรับถนนทดสอบเพชรบูรณ์ 1 เพชรบูรณ์ 3 และอุดรดิตถ์ และเท่ากับ 3500 กิโลปาสกาล สำหรับเพชรบูรณ์ 2 ผิวจราจรที่ขรุขระหนาประมาณ 20 เซนติเมตร จะถูกรื้อขึ้นมาและผสมกับซีเมนต์และน้ำ ที่ทุกสถานีทดสอบ (ห่างกัน 150 เมตร) ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามโดยเครื่องจักรถูกเก็บเพื่อทำการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างที่ได้นี้เรียกว่า “ดินตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (field hand-compacted sample)” ปริมาณความชื้น (w_{fn}) และหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_{dfn}) ของตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ถูกควบคุมให้มีค่าระหว่าง 2% ของปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) และมีค่าไม่น้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) (ดังแสดงในรูปที่ 4.3) ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 6.4% และ 23.05 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับเพชรบูรณ์ 1, 6.3% และ 22.63 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับเพชรบูรณ์ 2, 5.7% และ 22.61 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับเพชรบูรณ์ 3 และ 5.9% และ 22.54 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับอุดรดิตถ์ ทันทิที่ผสมดินเข้ากับซีเมนต์ ดินซีเมนต์จะถูกบดอัดด้วยรถบดอัด การบดอัดในสนามถูกควบคุมด้วยค่าอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_{df}/γ_{dfn}) มีค่าไม่น้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ γ_{df} คือหน่วยน้ำหนักแห้งของดินตัวอย่างที่เกิดจากการผสมในสนามและบดอัดด้วยรถบดอัด ซึ่งหาได้จากการทดสอบกรวยทราย (sand cone test) ภายในเวลา 1 ชั่วโมงหลังการบดอัด อัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งที่สถานีทดสอบต่างๆ ของทั้งสี่ถนนทดสอบแสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งของข้อมูลส่วนใหญ่มีค่าอยู่ระหว่าง 95 ถึง 105 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของการบดอัด



รูปที่ 4.3 หน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นของดินตัวอย่างในสนามที่บดอัดในห้องปฏิบัติการ

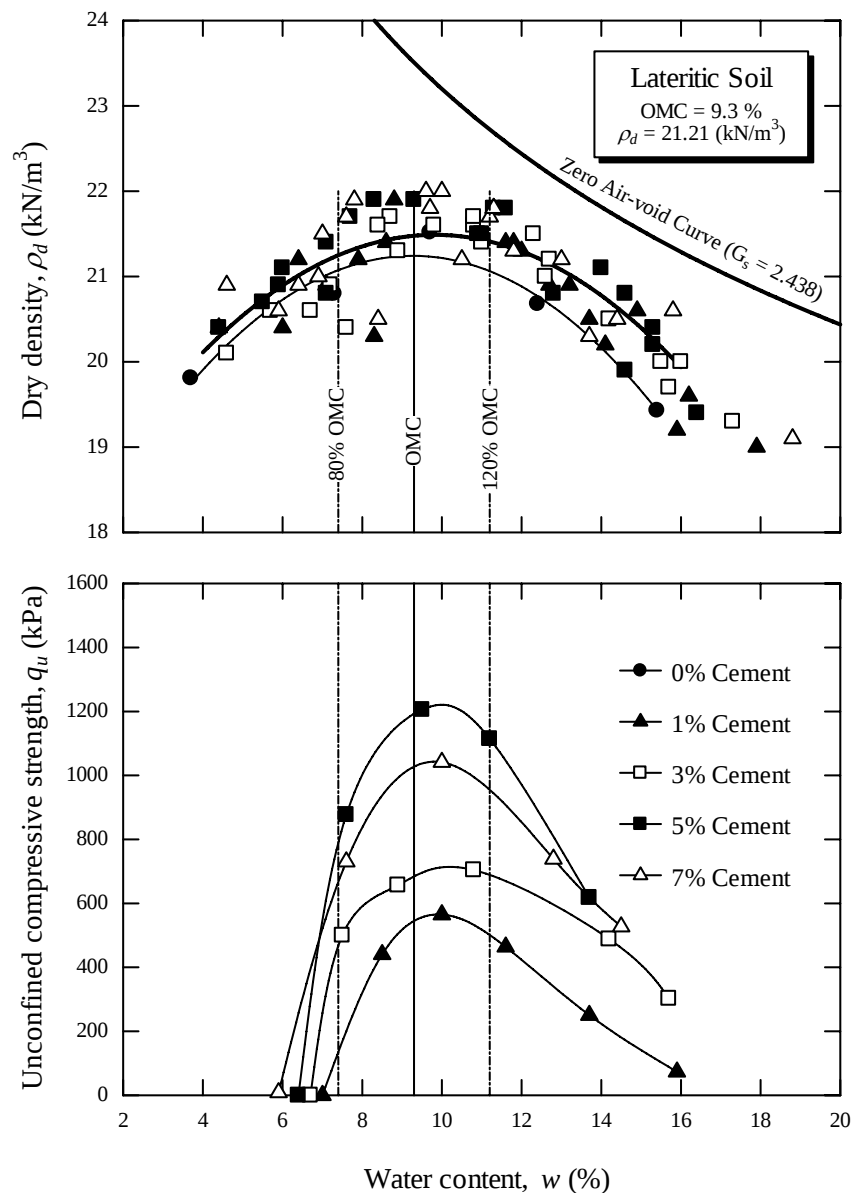
สำหรับแต่ละสถานีทดสอบ ดินตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดด้วยรถบดอัดจะถูกเก็บขึ้นมาจากถนนด้วย Coring cutter ที่อายุบ่ม 7, 14, และ 28 วัน เพื่อทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (unconfined compression test) ตัวอย่างเหล่านี้จะถูกตัดแต่งให้มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงเท่ากับ 1:1 ซึ่งเป็นขนาดเดียวกันกับดินตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ ดินตัวอย่างนี้ถูกเรียกว่า “ดินตัวอย่างที่ผสมและบดอัดในสนาม (field roller-compacted sample)” กำลังอัดของดินตัวอย่างที่ผสมและบดอัดในสนามจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับกำลังอัดของดินตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ และกำลังอัดของดินตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4.4 อัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งที่สถานีทดสอบต่างๆ

4.4 ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ

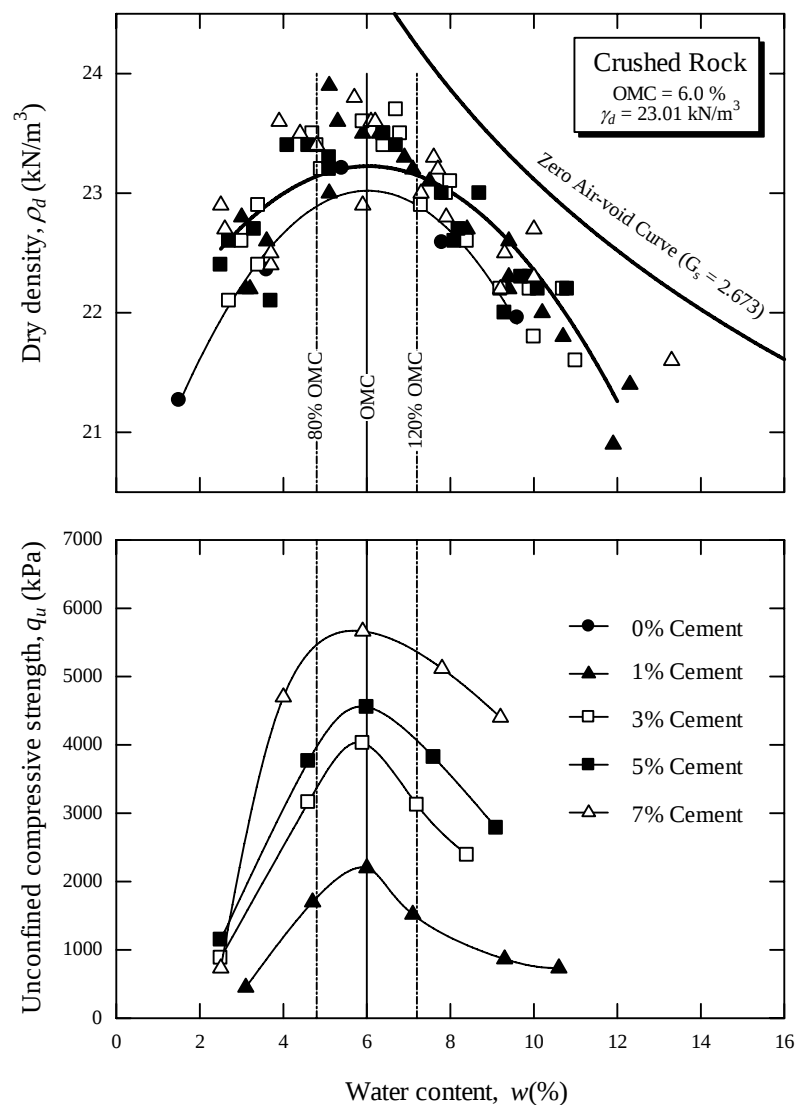
ลักษณะทั่วไปของกราฟการบดอัด และแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เป็นรูปประฆังคว่ำ ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าปริมาณซีเมนต์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดอย่างมาก ในขณะที่กราฟการบดอัดมีลักษณะคล้ายคลึงกัน และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์ค่อนข้างคงที่แม้จะแปรผันปริมาณซีเมนต์ แต่จะมีค่าสูงกว่าของดินบดอัดที่ไม่ผสมซีเมนต์ ขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าเกือบคงที่กราฟการบดอัดสามารถแทนด้วยกราฟพาราโบลา



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณชื้น-ความหนาแน่นแห้ง-กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรัง
ที่อายุบ่ม 7 วัน ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและกำลังอัดแกนเดียว จะมีสมมาตรในช่วงความชื้นเท่ากับ 80-120 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะไม่สมบูรณ์ที่ปริมาณความชื้นต่ำ อีกทั้งที่ปริมาณความชื้นดังกล่าวเราไม่สามารถกระทำการบดอัดให้ดินตัวอย่างมีค่าความแน่นแห้งสูงสุดได้ ดังจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณความชื้น 60 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณความชื้นเหมาะสม กำลังอัดมีค่าต่ำมากประมาณศูนย์ สำหรับทุกปริมาณซีเมนต์ (รูปที่ 4.5) จึงไม่มีประโยชน์ที่จะผสมซีเมนต์ในช่วงปริมาณความชื้นดังกล่าว

ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ จึงควรมีค่าประมาณ 80 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม

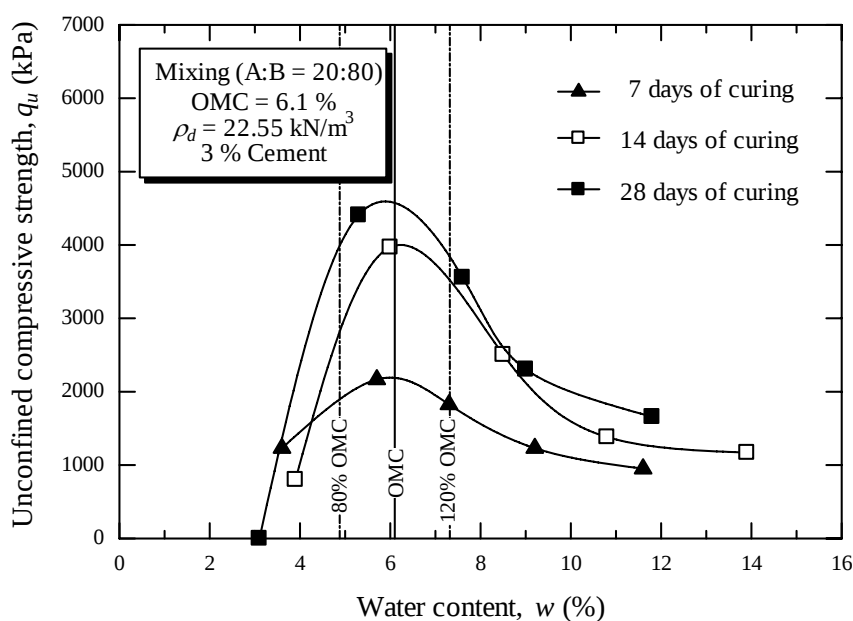


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณชื้น-ความหนาแน่นแห้ง-กำลังอัดแกนเดียวของหินคลุก
ที่อายุ บ่ม 14 วัน ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

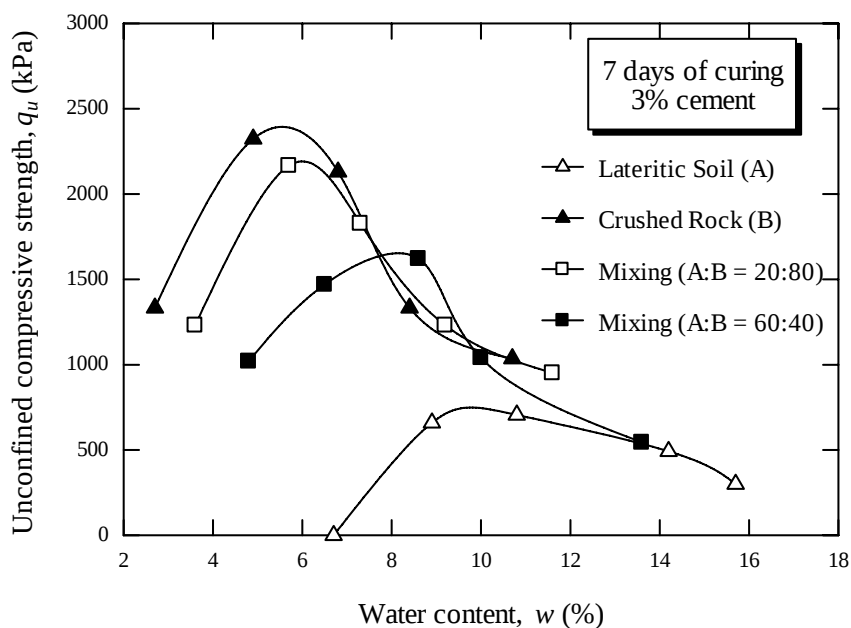
ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นที่ด้าน
แห้งมีความสมมาตรกับด้านเปียก ในช่วงที่ความชื้นประมาณ 80 ถึง 120 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณ
ความชื้นเหมาะสม นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ปริมาณความชื้นที่ให้กำลังอัดแกนเดียวและหน่วย
น้ำหนักแห้งของดินซีเมนต์มีค่าสูงสุด คือ ปริมาณความชื้นเหมาะสม

อิทธิพลของอายุบ่มต่อการอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดแสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นผลทดสอบของดินผสม (20:80) ผสมกับซีเมนต์ปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้อายุบ่ม 7, 14, และ 28 วัน จะเห็นได้ชัดว่าอายุบ่มเพิ่มขึ้นกำลังอัดจะเพิ่มขึ้น และปริมาณความชื้นที่ให้กำลังอัดสูงสุดจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามอายุบ่ม มีค่าเท่ากับปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินบดอัด

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดสัมพัทธ์กับปริมาณความชื้นของดินส่วนผสมต่างๆ จะเห็นได้ว่าหินคลุกให้กำลังอัดสูงสุด และดินลูกรังให้กำลังอัดต่ำสุด แม้หินคลุกและดินลูกรังจะมีขนาดผลเฉลยคลึงกัน แต่มีสภาพความเป็นพลาสติกต่างกัน อาจกล่าวได้ว่าปริมาณดินเม็ดละเอียด และสภาพความเป็นพลาสติกทำให้กำลังอัดและปริมาณความชื้นเหมาะสมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสภาพความเป็นพลาสติกเป็นตัวหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การกระจายขนาดของดินจะมีอิทธิพลต่อการอัดของดินผสมซีเมนต์บดอัด ดังจะเห็นได้ว่า หินคลุก จะให้กำลังอัดสูงกว่าเมื่อผสมซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากัน ภายใต้พลังงานการบดอัดเดียวกัน



รูปที่ 4.7 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินผสม (20:80) ผสมซีเมนต์ 3% ที่อายุบ่มต่างๆ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของชนิดดินต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

4.5 แบบจำลองกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด

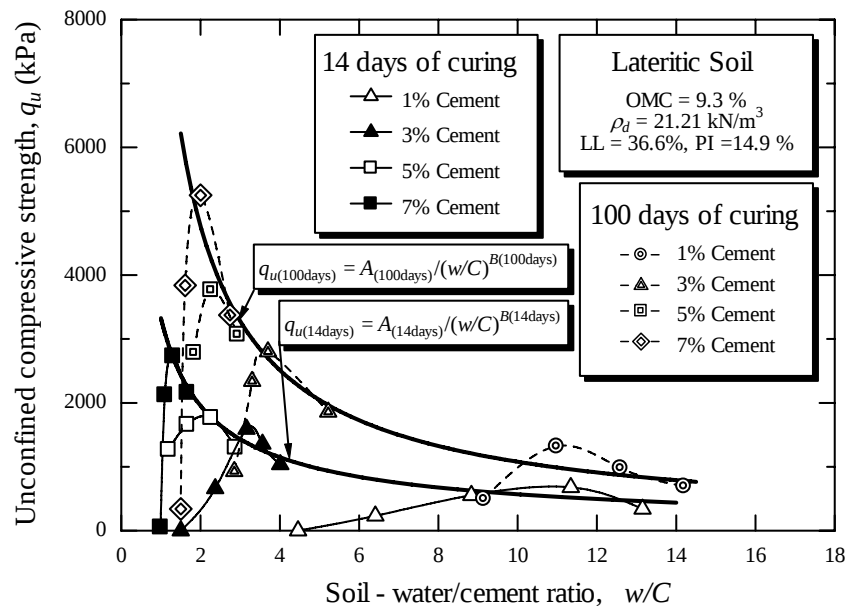
การศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด (สุขสันต์ และคณะ 2548) พบว่า “ที่อายุบ่มค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินซีเมนต์ทางด้านเปียก แปรผันตามปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์เพียงอย่างเดียว, w/C ” สมมติฐานดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมกำลังอัดของ ดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ w/C ของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัดที่อายุบ่ม 14 และ 100 วัน เมื่อลากเส้นแนวโน้มนำกำลังสำหรับปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก จะได้ความสัมพันธ์ที่เป็นเอกภาพ (unique) สำหรับอายุบ่มค่า ซึ่งยืนยันรูปแบบสมการของสุขสันต์ และคณะ (2548)

รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 แสดงกราฟกำลังอัดแกนเดียวสัมพันธ์กับอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ ของดินผสม 20:80 และหินคลุกผสมซีเมนต์บดอัดตามลำดับ สำหรับด้านเปียกของที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในฟังก์ชันกำลัง (power function) ดังต่อไปนี้

$$q_u = \frac{A}{(w/C)^B} \quad (4.1)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับชนิดของดิน ค่า B จะควบคุมอัตราการลดลงของกำลังอัดต่ออัตราส่วนของ w/C ค่า B ยิ่งมาก การเปลี่ยนแปลงจะมีค่ามากตาม ขณะที่ A จะทำให้ความสัมพันธ์เคลื่อนตัวขึ้นตามแนวแกน y ดินที่ทำปฏิกิริยาได้ดีกับปูนซีเมนต์ (มีสภาพความเป็นพลาสติกต่ำ) จะมีค่า A สูง สำหรับดินชนิดหนึ่งผสมซีเมนต์บดอัด A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม



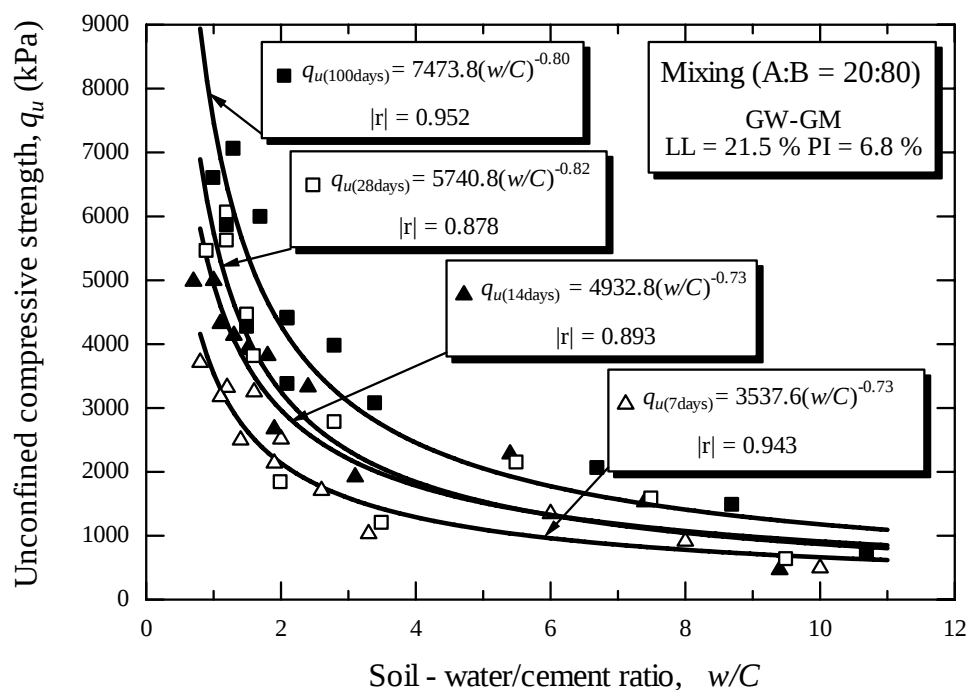
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ w/C ของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด ที่อายุบ่ม 14 และ 100 วัน

จากผลการศึกษาทั้งหมด พบว่า B มีค่าอยู่ระหว่าง 0.72 ถึง 0.82 และเมื่อแทนค่า B หลายๆ ค่าพบว่าค่า B เท่ากับ 0.75 ให้สมการกำลังอัดที่ทำนายได้แม่นยำที่สุด อัตราส่วนกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก ที่ระยะบ่มค่าหนึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\left\{ \frac{q_{(w/C)_1}}{q_{(w/C)_2}} \right\} = \left[\frac{A/(w/C)_1^{0.75}}{A/(w/C)_2^{0.75}} \right] = \left[\frac{(w/C)_2}{(w/C)_1} \right]^{0.75} \quad (4.2)$$

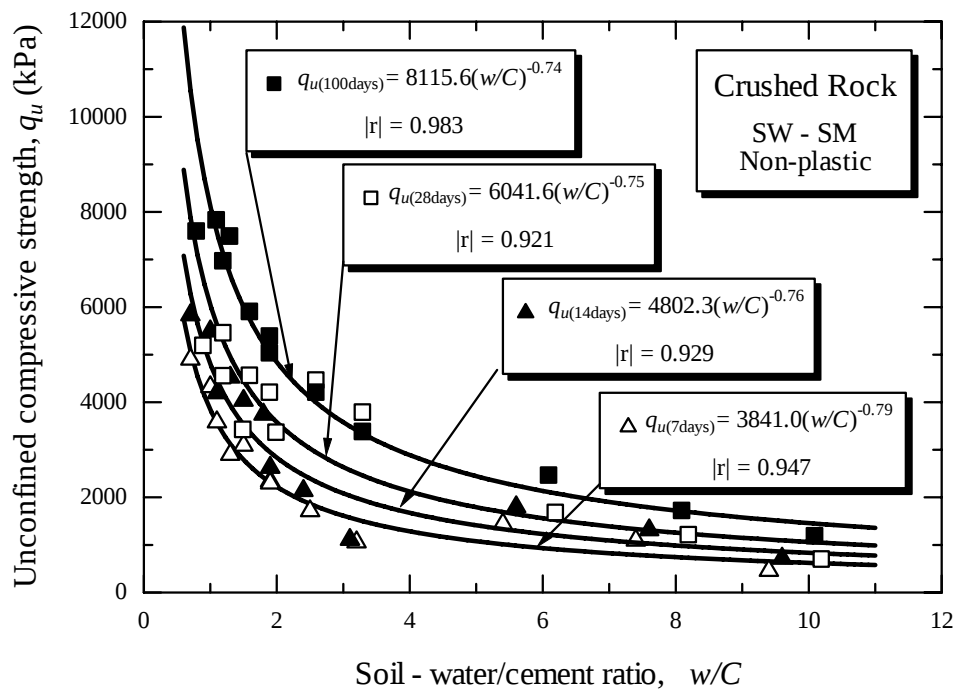
เมื่อ $q_{(w/C)1}$ คือกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ (w/C) และ $q_{(w/C)2}$ คือกำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่าที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ $(w/C)_2$

สมการที่ 4.2 สามารถใช้ทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียกที่อัตราส่วนความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ใดๆ ได้ เมื่อทราบค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียก ที่อายุบ่มและ (w/C) ค่าหนึ่ง ข้อจำกัดของสมการที่ 4.2 คือ ไม่สามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่อายุบ่มใดๆ ได้ ซึ่งในทางปฏิบัติอาจมีบางสถานการณ์ที่เราจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณซีเมนต์เพื่อลดอายุบ่มเพื่อให้ได้กำลังอัดตามต้องการ ด้วยเหตุนี้ จำเป็นต้องมีการศึกษาอิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียว พร้อมทั้งสร้างสมการกำลังอัดในพจน์ของปริมาณซีเมนต์ปริมาณน้ำในดิน และอายุบ่ม



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินซีเมนต์บดอัด

Mix (A:B = 20:80)



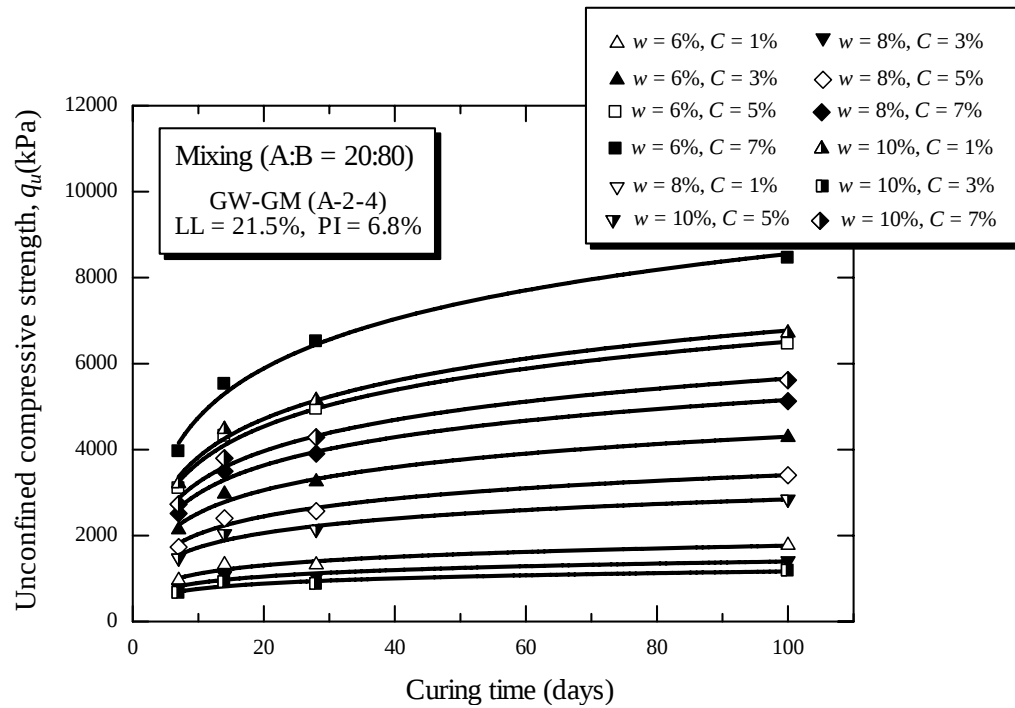
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินหินคลุกซีเมนต์บดอัด

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะเห็นได้ว่าที่ w/C ค่าหนึ่ง การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวถูกควบคุมด้วยตัวแปร A เนื่องจากตัวแปร B มีค่าประมาณคงที่ ด้วยเหตุนี้เอง ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างการพัฒนาำลังอัดและอายุบ่มสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

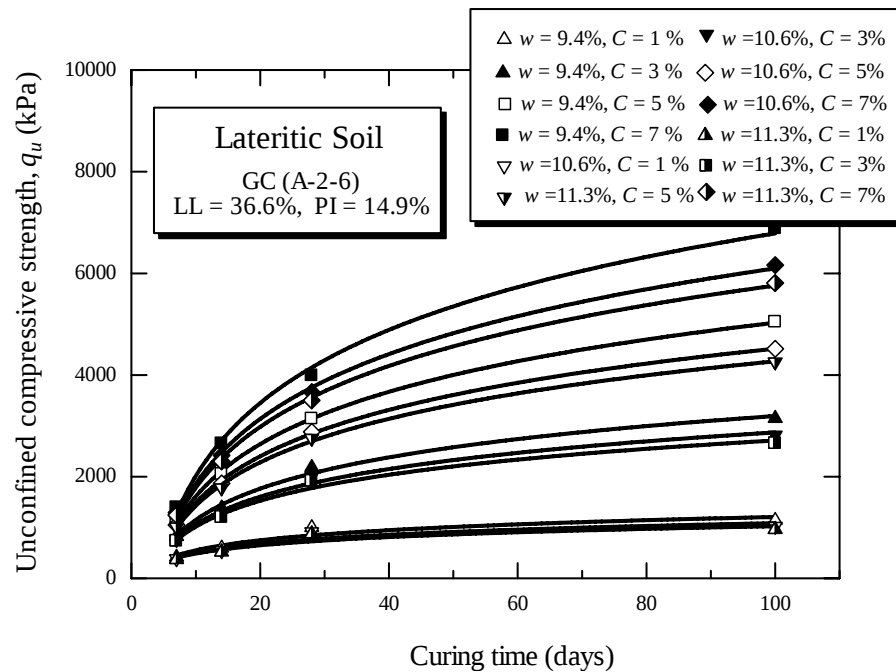
$$\frac{q_{D_1}}{q_{D_2}} = \frac{A_{D_1}}{A_{D_2}} \quad (4.3)$$

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

รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มสำหรับด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ของดินผสม 20:80 และดินลูกรังตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์อยู่ในรูปฟังก์ชันลอการิทึม



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์บดอัด
 Mix (A:B = 20:80) ด้านเปียก



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังซีเมนต์บดอัดด้านเปียก

ดังได้กล่าวแล้วว่า ค่าของ A จะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และอายุบ่ม อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดต่อเวลาควรจะต้องมีค่าเท่ากันสำหรับดินซีเมนต์บดอัดทุกชนิด เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นตัวแปรหลักในการควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด ด้วยเหตุนี้เองสมการดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นสมการเอกภาพสำหรับดินซีเมนต์บดอัดทุกชนิด ในทางปฏิบัติ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ถ้าเราสามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่เวลาใดๆ ในพจน์ของอายุบ่มเพียงอย่างเดียว ความพยายามดังกล่าวได้รับการจัดทำขึ้นโดยอาศัยสมมติฐานข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังอัด และลอการิทึมของอายุบ่ม ของดินลูกรัง หินคลุก และดินผสมที่อัตราส่วนต่างๆ ผสมซีเมนต์บดอัด และผลการ Normalization ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียกตามลำดับ

ถึงแม้ว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มจะมีความชันแตกต่างกันตามแต่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม แต่อย่างไรก็ตามโดยอาศัยการ Normalization อิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวจะได้รับการพิจารณาและสามารถแสดงโดยสมการเส้นตรงเพียงเส้นเดียว ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.074 + 0.261 \ln D \quad (4.4)$$

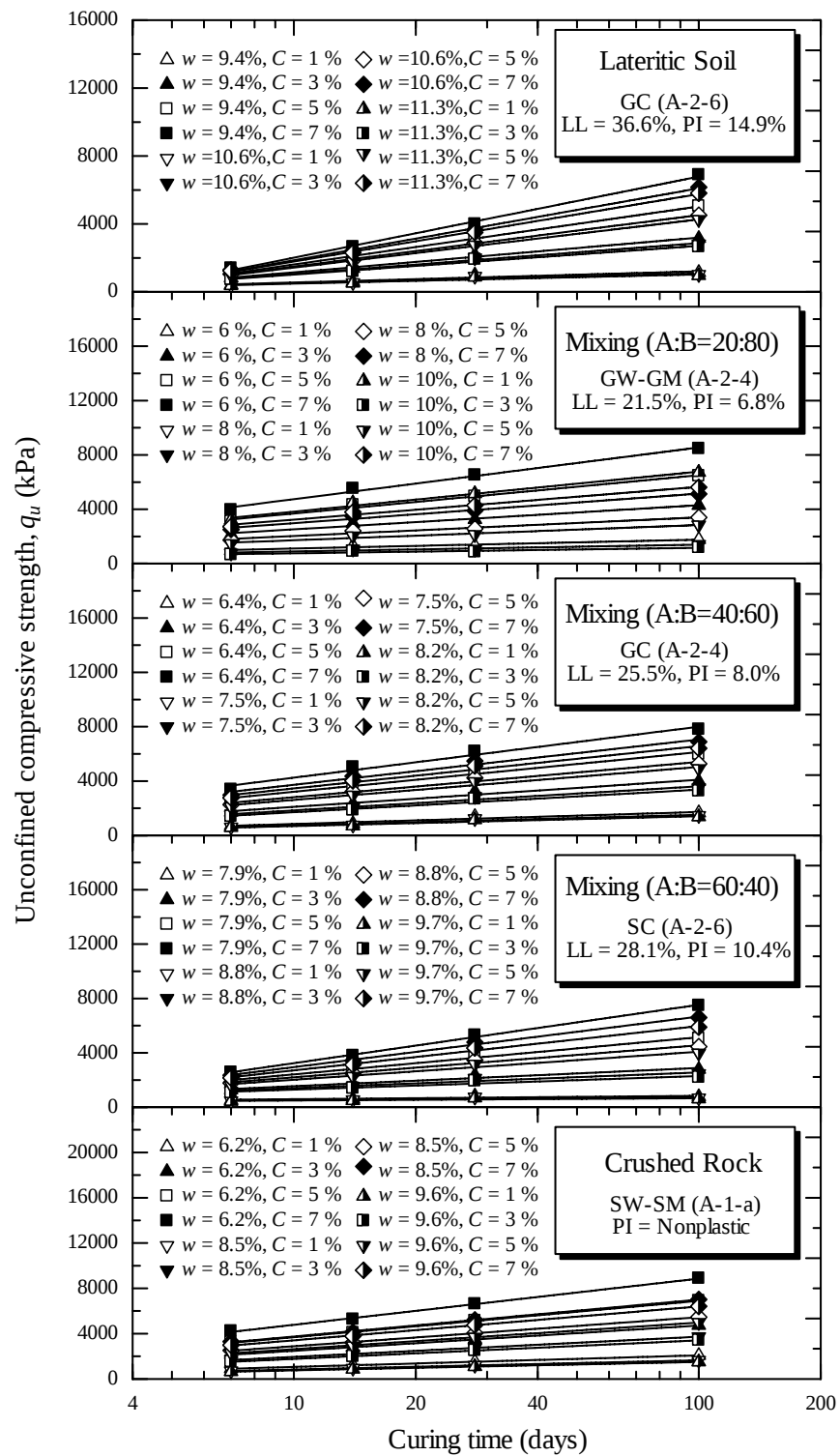
เมื่อ q_D คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม D วันใดๆ และ q_{28} คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 28 วัน

จากการรวมสมการที่ (4.2) และ (4.4) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม ในช่วงที่ w/C มีค่าระหว่าง 0.6 และ 11.0 ดังนี้

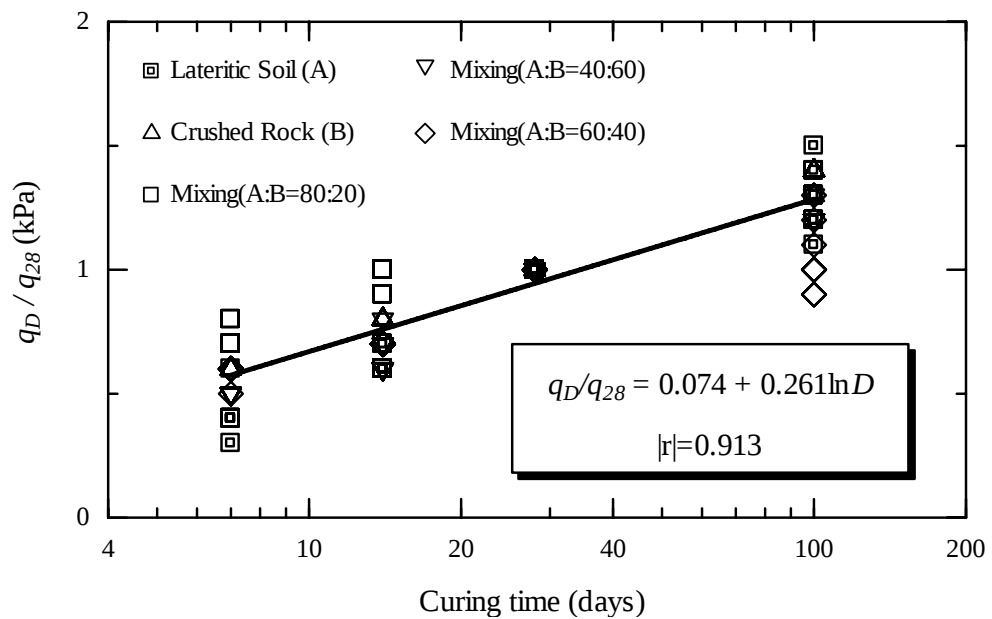
$$\left\{ \frac{q_{(w/C)_D}}{q_{(w/C)_{28}}} \right\} = \left[\frac{(w/C)_{28}}{(w/C)_D} \right]^{0.75} (0.074 + 0.261 \ln D) \quad (4.5)$$

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

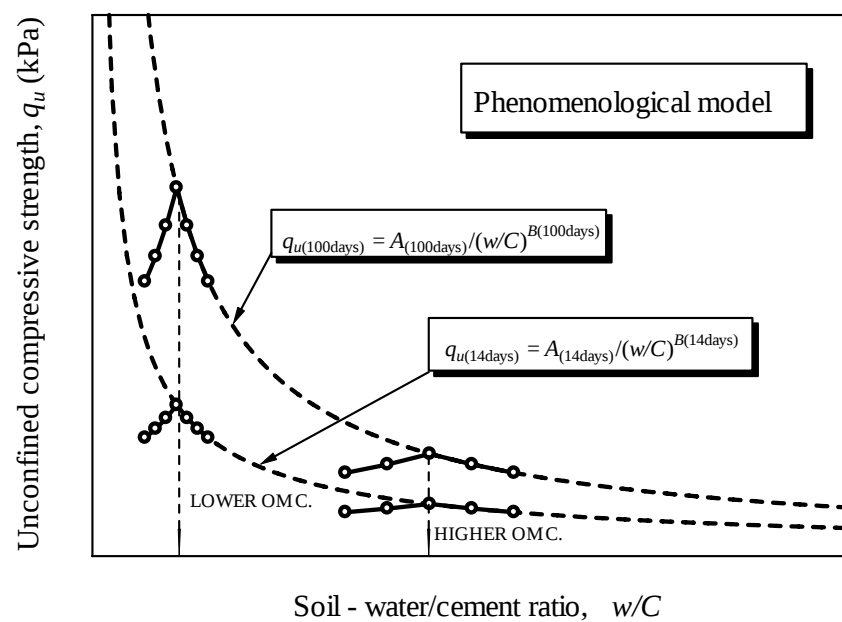
เมื่อ $(w/C)_D = (w/C)_{28}$ พจน์ทางซ้ายมือของสมการที่ (4.5) จะมีค่าเท่ากับ 1.0 และพจน์ทางขวามือจะมีค่าเท่ากับ 0.945 สิ่งนี้ยืนยันการนำใช้ของสมการในการทำนายกำลังอัดที่อายุบ่ม และ (w/C) ค่าอื่นๆ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์บดอัด



รูปที่ 4.15 Normalized strength development ของดินซีเมนต์บดอัดทุกส่วนผสม



รูปที่ 4.16 แบบจำลองของดินซีเมนต์บดอัด

สมการข้างต้นใช้ได้เฉพาะกับดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียกเท่านั้น กำลังอัดของดินซีเมนต์ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม สามารถประมาณได้โดย

อาศัยสมมติฐานที่ว่าในช่วงปริมาณความชื้นระหว่าง 80 ถึง 120 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม กำลังอัดของดินซีเมนต์ด้านข้างและด้านเปียกมีความสมมาตรรอบปริมาณความชื้นเหมาะสม แบบจำลองจากการสังเกต (phenomenological model) แสดงดังรูปที่ 4.16

เพื่อตรวจสอบว่าสมการที่ 4.5 และโค้งสมมาตรสามารถทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยอาศัยแบบจำลองที่เสนอในรูปที่ 4.16 และสมการที่ (4.5) ผู้วิจัยได้ลองกับดินลูกรังซีเมนต์บดอัด 3 แห่ (ดิเรก และคณะ, 2544) และดินผสม 20:80 ผสมซีเมนต์บดอัด คุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรังบดอัดที่รวบรวมโดยดิเรก และคณะ (2544) แสดงดังตารางที่ 4.2 ส่วนดินผสม 20:80 มีขีดจำกัดเหลว และพิกัดพลาสติกเท่ากับ 29.4 และ 12.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทั่วไปของดินลูกรังที่ใช้ทำนายกำลังอัดแกนเดียว (ดิเรก และคณะ, 2544)

คุณสมบัติ	แหล่งดิน		
	ชลบุรี	สระแก้ว	ปราจีนบุรี
คุณสมบัติทางฟิสิกส์			
ขีดจำกัดเหลว (LL)	NP	29.4	30.8
ขีดจำกัดพลาสติก (PL)	NP	20.7	19.8
ดัชนีสภาพพลาสติก (PI)	NP	8.7	11.0
คุณสมบัติทางวิศวกรรม			
การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน			
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กก./ม. ³)	2150	2158	2210
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม OMC.(%)	6.5	7.4	10.0
California Bearing Ratio (CBR)			
Unsoaked CBR, %	98.67	41.33	72.00
Soaked CBR, %	58.67	35.33	63.33
Swell, %	0.07	0.04	0.00
การจำแนกประเภทของดิน			
AASHTO	A-1-a(0)	A-2-4(0)	A-2-6(0)
Unified Soil Classification	SW	SP	SW

ตารางที่ 4.3 (a) การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัดจากจังหวัดชลบุรี
(ดิเรก และคณะ, 2544)

Optimum moisture content, OMC (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	Moisture content, w (%)	Soil-water/ cement ratio, w/C	Laboratory strength, q_{ul} (kPa)*	Predicted strength, q_{up} (kPa)**
6.5	7	2.0	6.5	3.3	1833.4	1541.9
6.5	14	2.0	6.5	3.3	2174.7	2021.6
6.5	28	2.0	6.5	3.3	2648.5	Reference

ตารางที่ 4.3 (b) การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัดจากจังหวัดสระแก้ว
(ดิเรก และคณะ, 2544)

Optimum moisture content, OMC (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	Moisture content, w (%)	Soil-water/ cement ratio, w/C	Laboratory strength, q_{ul} (kPa)*	Predicted strength, q_{up} (kPa)**
7.4	7	4.5	7.4	1.6	1963.1	1613.8
7.4	14	4.5	7.4	1.6	2491.8	2115.9
7.4	28	4.5	7.4	1.6	2772.1	Reference

ตารางที่ 4.3 (c) การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัดจากจังหวัดปราจีนบุรี
(ดิเรก และคณะ, 2544)

Optimum moisture content, OMC (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	Moisture content, w (%)	Soil-water/ cement ratio, w/C	Laboratory strength, q_{ul} (kPa)*	Predicted strength, q_{up} (kPa)**
10.0	7	6.6	10.0	1.5	2018.1	1406.1
10.0	14	6.6	10.0	1.5	2172.9	1843.6
10.0	28	6.6	10.0	1.5	2415.3	Reference

หมายเหตุ * กำลังอัดที่ทดสอบโดยดิเรก และคณะ (2544)

** กำลังอัดที่ทำนายได้โดยอาศัยสมการที่ 4.5

ตารางที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ เปรียบเทียบกับกำลังอัดจริงที่ได้จากห้องปฏิบัติการ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดจริงและผลการทำนายมีค่าใกล้เคียงกันมาก และสามารถสรุปได้ว่าสมการทำนายกำลังอัดที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ชนิดต่างๆ ที่อายุบ่ม 7 ถึง 100 วัน

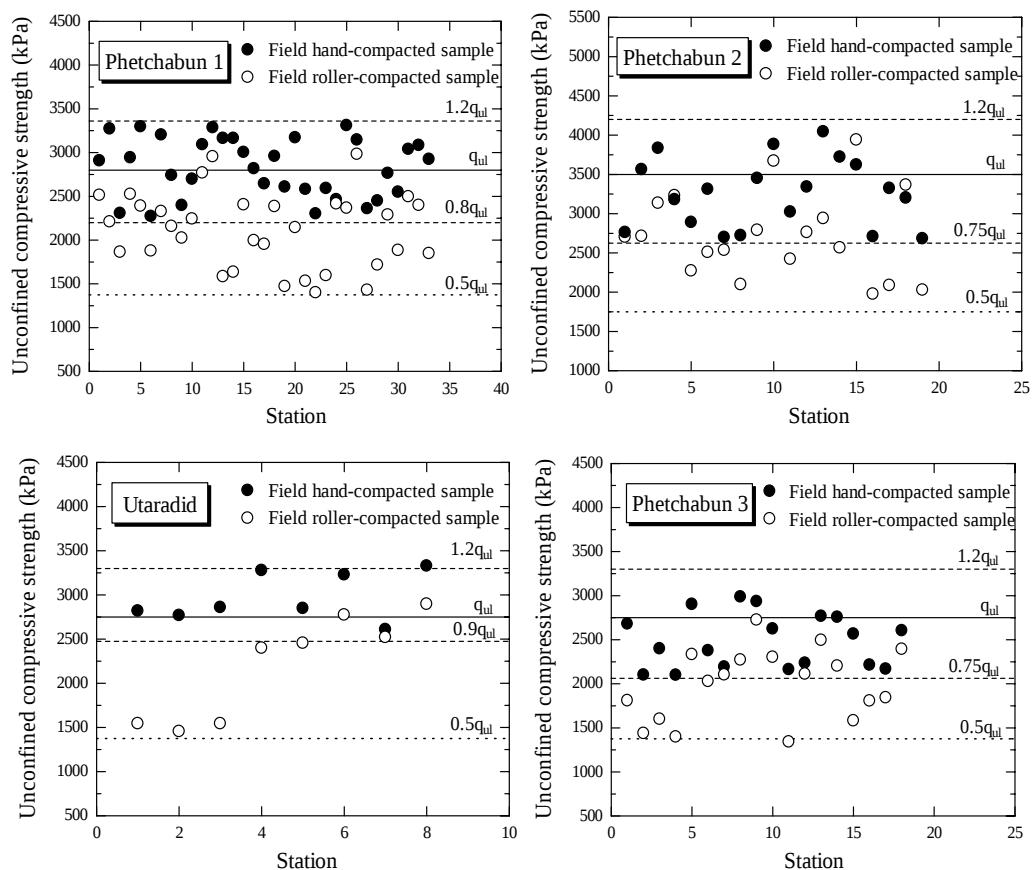
ตารางที่ 4.4 การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินผสม Mix (A:B = 20:80) ผสมซีเมนต์บดอัด

Optimum moisture content <i>OMC</i> (%)	Curing time <i>D</i> (days)	Cement content <i>C</i> (%)	Moisture content <i>w</i> (%)	Soil-water/ cement ratio <i>w/C</i>	Laboratory strength, q_{ul} (kPa)	Predicted strength(1), q_{up} (kPa)	q_{up}/q_{ul}
8.0	7	1.0	8.8	8.8	526.4	654.2	1.24
8.0	7	3.0	8.4	2.8	1760.9	1544.2	0.87
8.0	7	3.0	11.7	3.9	1138.8	1204.4	1.06
8.0	7	5.0	9.3	1.9	1929.7	2098.6	1.09
8.0	7	7.0	7.5	1.1	2311.6	3173.9	1.37
8.0	14	1.0	8.2	8.2	676.0	904.4	1.34
8.0	14	3.0	8.1	2.7	2087.7	2080.6	1.00
8.0	14	3.0	10.8	3.6	1818.9	1676.8	0.92
8.0	14	5.0	9.7	1.9	2755.1	2666.0	0.97
8.0	14	7.0	9.1	1.3	3598.5	3599.5	1.00
8.0	14	7.0	11.3	1.6	2261.0	3060.0	1.35
8.0	28	1.0	8.6	8.6	1469.5	1079.7	0.63
8.0	28	3.0	9.4	3.1	2703.2	2302.3	0.85
8.0	28	5.0	8.6	1.7	3822.7	Reference	-
8.0	28	7.0	9.3	1.3	3390.4	4381.6	1.29
8.0	28	7.0	11.6	1.7	3897.5	3712.4	0.95
8.0	100	1.0	9.7	9.7	1346.3	1333.9	0.99
8.0	100	3.0	12.3	4.1	2422.2	2544.7	1.05
8.0	100	5.0	10.2	2.0	4513.4	4295.3	0.95
8.0	100	7.0	9.3	1.3	5541.3	5924.9	1.07

หมายเหตุ ดินตัวอย่างที่ใช้ในการประมาณมีปริมาณความชื้นไม่เกิน 1.4 เท่าของ *OMC*

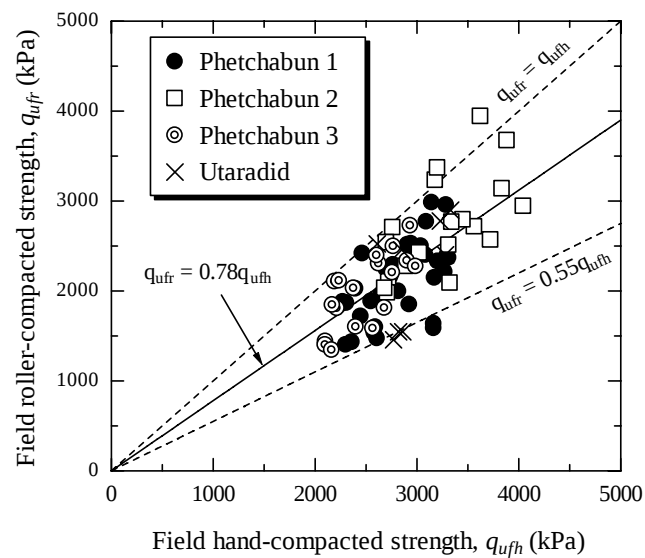
4.6 กำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนาม

รูปที่ 4.17 แสดงกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (field hand-compacted strength, q_{up}) และกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมและบดอัดในสนาม (field roller-compacted strength, q_{ul}) เปรียบเทียบกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ (laboratory strength, q_{ul}) จะเห็นได้ว่ากำลังอัดที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการมีค่าระหว่าง 0.75 ถึง 1.2 เท่าของกำลังอัดที่ได้เตรียมในห้องปฏิบัติการ ภายใต้พลังงานการบดอัดที่เท่ากัน ความแปรผันนี้อาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอในการผสมดินเข้ากับซีเมนต์ ในแต่ละสถานีทดสอบ อัตราส่วนกำลังอัดนี้มีค่าใกล้เคียงข้อมูลส่วนใหญ่ของอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ได้จากการทำนายและที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (q_{up}/q_{ul}) สิ่งนี้เป็นการยืนยันให้เห็นว่าในทางปฏิบัติ เราสามารถใช้สมการทำนายกำลังอัดที่นำเสนอข้างต้นในการประมาณกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ โดยมีความผิดพลาดที่ยอมรับได้

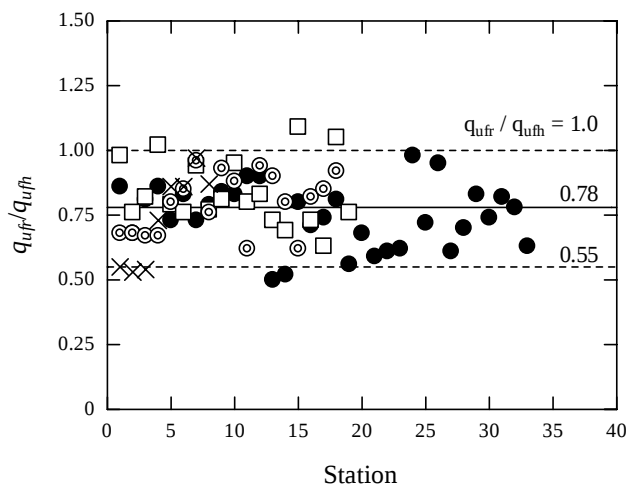


รูปที่ 4.17 กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมและบดอัดในสนามและดินซีเมนต์ในสนามบดอัดในห้องปฏิบัติการที่อายุบ่ม 7 วัน

แม้ประสิทธิภาพการบดอัดดินในสนามจะถูกควบคุมให้สูงพอสมควร ($\gamma_{dfr}/\gamma_{dfh} > 95\%$) แต่กำลังอัดของดินตัวอย่างผสมและบดอัดในสนาม (q_{ufr}) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.55 ถึง 1.0 เท่าของกำลังอัดที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $0.78 q_{ul}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.18



(a)

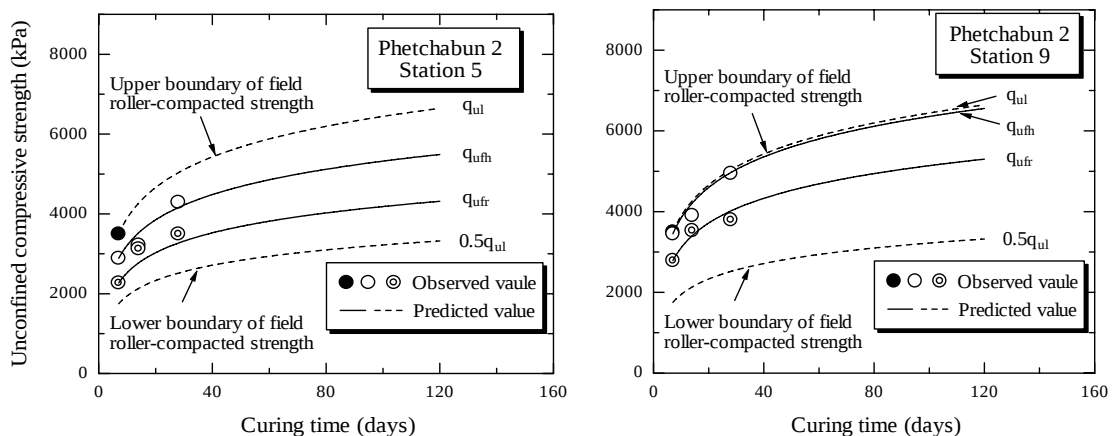


(b)

รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมและบดอัดในสนามกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ที่อายุบ่ม 7 วัน

ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการเก็บจากเครื่องผสมดินในส่วนท้ายของเครื่องจักร ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับที่จะเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมและบดอัดในสนาม ดังนั้น ดินตัวอย่างที่ได้จะมีปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์เท่ากัน และมีหน่วยน้ำหนักแห้ง

สูงสุดใกล้เคียงกัน ($95\% < \gamma_{df}/\gamma_{dfh} < 105\%$) แต่มีวิธีการบดอัดและสภาพการบ่มที่ความแตกต่างกัน ลักษณะการบดอัดที่ต่างกันจะให้โครงสร้างที่ต่างกัน Day and Daniel (1985) และ Prapaharan et al. (1991) ได้อธิบายว่าการบ่มในสนามจะเกิดการสูญเสียน้ำมากกว่าในห้องปฏิบัติการเนื่องจากสภาพที่ร้อนชื้นของประเทศไทย ซึ่งอาจเป็นเหตุทำให้กำลังอัดของดินตัวอย่างที่เก็บจากถนนดินซีเมนต์มีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ อาจสรุปได้ว่า กำลังอัดในสนามต่ำกว่าในห้องปฏิบัติการเพราะความไม่สม่ำเสมอในการผสมดินเข้ากับซีเมนต์ และความแตกต่างในการบดอัดและสภาพการบ่มของดินตัวอย่างในห้องปฏิบัติการและในสนาม เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้ อัตราส่วนกำลังอัด q_{ufr}/q_{ul} มีค่าระหว่าง 50 ถึง 100% ดังแสดงในรูปที่ 4.17

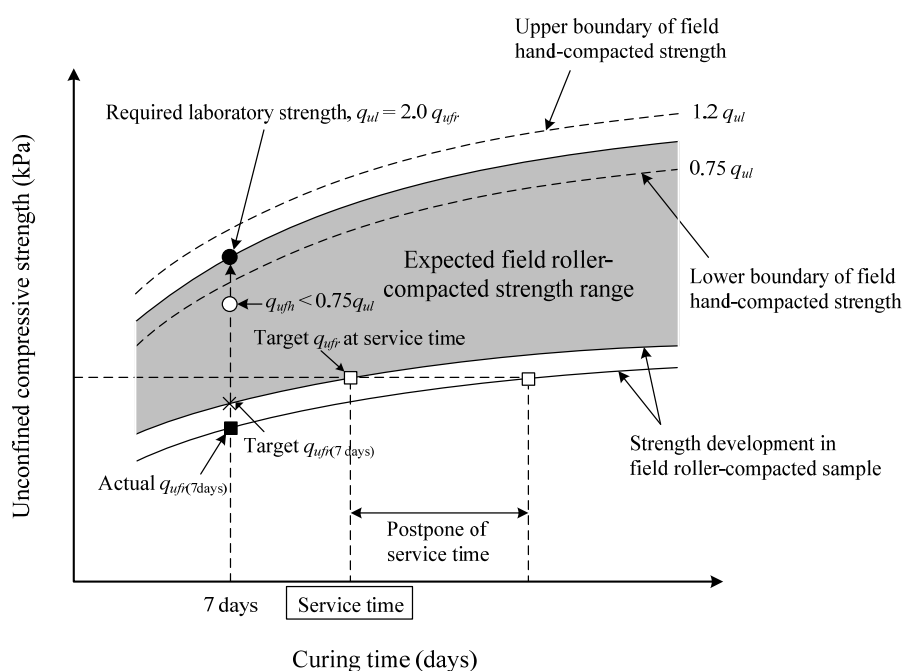


รูปที่ 4.19 การทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมและบดอัดในสนาม
ที่ถนนทดสอบเพชรบูรณ์ 2 สถานีที่ 5 และ 9

โดยการสมมติว่า การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมและบดอัดในสนาม (q_{ufr}) และของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (q_{ufh}) กับอายุบ่มก็พบความสัมพันธ์เช่นเดียวกับดินซีเมนต์ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมและบดอัดในสนาม และกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ สามารถประมาณได้โดยอาศัยสมการที่ (4.5) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ในการประมาณนี้ กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ถูกใช้เป็นค่าอ้างอิง และจากผลทดสอบที่ได้ ($q_{ufr} = 50-100\%q_{ul}$) ค่าสูงสุดและต่ำสุดของกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมและบดอัดในสนามจะเป็นค่าที่แสดงโดยเส้นประ ซึ่งสามารถประมาณได้จากกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ

4.7 ข้อเสนอแนะในการทำงานทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดในห้องปฏิบัติการและในสนาม ผู้วิจัยขอเสนอขั้นตอนการทำงานและตรวจสอบคุณสมบัติของถนนที่ได้รับแก้ไขด้วยเทคนิคหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่โดยกราฟในรูปที่ 4.20 ดังนี้ เมื่อทราบค่ากำลังอัดที่ต้องการสำหรับวันเปิดใช้ถนน (service time)



รูปที่ 4.20 สรุปขั้นตอนการทำงานการปรับปรุงถนนด้วยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่

การประมาณปริมาณซีเมนต์เพื่อชดเชยปัจจัยการลดลงของกำลังอัดในสนาม

- 1) จากกำลังอัดที่ต้องการสำหรับวันเปิดใช้ถนน (สัญลักษณ์สี่เหลี่ยมเปิด) ประมาณกำลังอัดที่ต้องการในสนามที่อายุบ่ม 7 วัน (Target $q_{ufr}(7\text{days})$) ซึ่งอาจหาจากการทดสอบหรือการประมาณจากสมการที่ (4.5)
- 2) ประมาณกำลังอัดที่ต้องการในห้องปฏิบัติการที่อายุบ่ม 7 วัน ($q_{ul}(7\text{days})$) โดยใช้อัตราส่วนการลดกำลังในสนาม (field strength reduction) เท่ากับ 2.0 ($q_{ufr}/q_{ul} = 0.5$) (สัญลักษณ์วงกลมสีดำ)
- 3) หาอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ที่ให้กำลังอัดที่ต้องการตามขั้นตอนที่ 2 ($q_{ul}(7\text{days})$) ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม และพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

- 4) นำตัวอย่างที่ได้จากการผสมในสนามมาทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ (ดินตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ) ปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของดินตัวอย่างถูกควบคุมให้มีค่าอยู่ระหว่าง $OMC \pm 2\%$ และสูงกว่า 95% ของ γ_{dmax} ตามลำดับ
- 5) ทำการบดอัดดินในสนามจนได้อัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งไม่น้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์
- 6) หาค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ($q_{ufh(7days)}$) ที่จัดเตรียมในขั้นตอนที่ (4) ที่อายุบ่ม 7 วัน
- 7) ถ้า $q_{ufh(7days)}$ มีค่ามากกว่า $0.75q_{ul(7days)}$ เราสามารถสรุปได้ว่าถนนที่สถานีนี้มีความแข็งแรงตามเกณฑ์
- 8) ถ้า $q_{ufh(7days)}$ มีค่าน้อยกว่า $0.75q_{ul(7days)}$ ต้องทำการเก็บตัวอย่างจากถนน เพื่อหาค่า $q_{ufr(7days)}$
 - 8.1) ถ้า $q_{ufr(7days)}$ มีค่ามากกว่า Target $q_{ufr(7days)}$ แสดงว่าถนนมีความแข็งแรงตามเกณฑ์
 - 8.2) ถ้า $q_{ufr(7days)}$ มีค่าต่ำกว่า Target $q_{ufr(7days)}$ ไม่มากนัก อาจเลื่อนเวลาการเปิดใช้ถนนในช่วงสถานีที่มีปัญหาออกไปอีก ดังแสดงในรูปที่ 4.20
 - 8.3) ถ้า $q_{ufr(7days)}$ มีค่าต่ำกว่า Target $q_{ufr(7days)}$ มาก ทำการปรับปรุงถนนเฉพาะสถานีที่มีปัญหา

บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดในห้องปฏิบัติการและในสนามได้ถูกนำเสนอ โดยอาศัยแบบจำลองดังกล่าวร่วมกับผลทดสอบในสนาม และนำเสนอขั้นตอนการแก้ไขถนนที่ชำรุดด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์บดอัดมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำในช่วง 80 ถึง 120 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยมีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม
- 2) กำลังอัดของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กัอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (soil-water/cement ratio, w/C) และอายุบ่ม สมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม ปริมาณซีเมนต์ และปริมาณความชื้นใดๆ ทางด้านเปียก อยู่ในรูป

$$\left\{ \frac{q_{(w/C)_D}}{q_{(w/C)_{28}}} \right\} = \left[\frac{(w/C)_{28}}{(w/C)_D} \right]^{0.75} (0.074 + 0.261 \ln D) \quad (5.1)$$

ส่วนกำลังอัดด้านแห้งของความชื้นที่เหมาะสมสามารถหาได้จากโค้งที่สมมาตรกับด้านเปียก โดยอาศัยแบบจำลองของดินซีเมนต์บดอัดในรูปที่ 4.16

- 3) กำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนามมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการผสมดิน ความแตกต่างของวิธีการบดอัดอีก และวิธีการบ่ม โดยที่กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมและบดอัดในสนามมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 เท่าของกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และพลังงานการบดอัดเดียวกัน
- 4) แบบจำลองที่นำเสนอสามารถใช้ในการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม ซึ่งแปรผันค่าปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มแบบจำลองดังกล่าวได้รับการตรวจสอบโดยผลทดสอบของนักวิจัยในอดีตและของผู้วิจัย

- 5) ขั้นตอนการปรับปรุงถนนที่ชำรุดด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ ซึ่งผู้วิจัยได้เสนอขั้นตอนไว้แล้วนั้นมีประโยชน์ในแง่ของวิศวกรรม และเศรษฐศาสตร์ ซึ่งช่วยประหยัดเวลา ค่าใช้จ่ายในการเก็บตัวอย่าง และการทดสอบในทางปฏิบัติ

รายการอ้างอิง

- กรมทางหลวง (2520). **วิธีการทดลองวัสดุก่อสร้าง เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กระทรวงคมนาคม.**
- ทรงพล บุญมาดี (2529). ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมโยธา สถาบันพระจอมเกล้าธนบุรี.**
- ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแสน จรัสกร (2544). กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน. **รายงานวิจัยฉบับที่ วพ.188 ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวงกระทรวงคมนาคม. 160-163.**
- A.A. Loundon & Partner Consulting Engineers. (1995). **Cold Deep In Place Recycling : Technical Recommendations and Application Specification. South Africa. A.A. Loundon.**
- Atkinson, P.W. (1995). Advacrete/Cement Additive for Stabilization. **Pavement Rehabilitation Workshop. 24 & 25 August 1995. Queensland. 1-38.**
- Bell, F.G. (1976) .The influence of the mineral content of clay on their stabilization with cement. **Association of Engineering Geologists . 267 – 278.**
- Circeo, L.T., Davidson, D.T. and David, H.T. (1962). Strength Maturity Relation of Soil-Cement Mixtures. **Iowa State University for 41th Annual Meeting of the Highway Research Board. 35-45.**
- Clare, K.E. and Pollard, A.E. (1951). The Relationship Between Compressive Strength and Age for Soil Stabilized with Four Type of Cement. **Magazine of Concrete Research. 3(8): 57-64.**
- Czernin, W. (1962). Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers. **New York Chemical Publishing. 36-50.**
- Davidson, D.T., Katti, R.K. and Welch, D.E. (1958). Use of Fly Ash with Portland Cement for Stabilization of Soil. **Highway Research Board. Bulletin 198. 1-11.**
- Davidson, D.T. and Bruns, B.W. (1960). Comparison of Type I and Type III Portland Cement for Soil Stabilization. **Highway Research Board. Bulletin 267. 28-45.**

- Davidson, D.T. (1961). Soil Stabilization with Portland Cement. **Highway Research Board. Bulletin** 292. 45-151.
- Davidson, D.T., Pitre, G.L., Matos, M. and Kalankamary, P.G. (1962). Moisture-Density, Moisture-Strength and Compaction Characteristics of Cement Treated Soil Mixtures. **Highway Research Board. Bulletin**. 353. 42-63.
- Felt, E.J. (1955). Factor Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures. **Highway Research Board. Bulletin** 108. 138-163.
- Fuller, M.G. and Dabney, G.W. (1952). Stabilizing Weak and Defective Bases with Hydrated Lime. **Roads and Streets**. 95: 64-69.
- Gordon, R.G. (1984). Recent Experiences and Developments in Design and Construction of Cement Stabilized Pavement. **Australian Road Research Board Symposium**.
- Herzog, A. and Mitchell, J.K. (1963). Reaction Accompanying the Stabilization of Clay with Cement. **Highway Research Record**. 36: 146-171.
- Highway Research Board, (1949). Prevention of Moisture Loss in Soil-Cement with Bituminous Material. **Highway Research Board. Research Report**. 353.
- Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization. (1959). Definition of Term Relating to Soil-Portland Cement Stabilization. **Highway Research Abstracts**, 29(6): 28-29.
- Horpibulsuk, S. and Miura, N. (2001). A new approach for studying behavior of cement stabilized clays. **Proceeding of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**. Turkey. 3: 1759-1762.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S. (2003). Assessment of strength development in cement admixed clays. **Geotechnique**. 53(4): 439-444.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. and Koga, H. (2002). Improvement of soft marine clays by deep mixing technique. **Proceeding of 12th International Conference Offshore and Polar Engineering**. Kitakyushu. Japan. 584-591.
- Hogentogler, C.A. (1938). Engineering Properties of the Soils. **New York**. McGraw-Hill. 9-18.
- Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972). Soil Stabilization. **Sydney**. Butterworths. 64-69.

- 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.
- Kuhlman, R.H. (1989). Soil-Cement from Recycled Pavement. **Concrete International Design and Construction**. 11(5): 35-38.
- Lade, P.V. and Overton, D.D. (1989). Cementation Effects in Frictional Material. **Journal of Geotechnical Engineering**. 115(9): 1373-1387.
- Lambe, T.W. and Moh, Z.C. (1957). Improvements of Strength of Soil-Cement with Additive. **Highway Research Board**. Bulletin. 183. 38-47.
- Lambe, T.W., Michaels, A.S. and Moh, Z.C. (1959). Improvement of Soil Cement with Alkali Metal Compounds. **Highway Research Board**. Bulletin 241. 67-103.
- Leadabrand, J.A. (1956). Some Engineering Aspects of Soils-Cement Mixture. **Mid-South Section. ASCE**. April 27. 64-69.
- Lightsey, G.R., Arman, A. and Callihan, C.D. (1970). Change in Characteristics of Cement Stabilized Soils By Addition of Excess Compaction Moisture. **Highway Research Record**. 315: 36-45.
- Maclean, D.J., Robinson, P.J.M. and Webb, S.B. (1952). An Investigation of the Stabilization of Heavy Clay Soil with Cement for Road Base Construction. **Roads and Road Construction**. 3(358): 287-292.
- Maner, A.W. (1952). Curing Soil Cement Base. **Proceeding of Highway Research Board**. Vol. 31. Washington. D.C., National Research Council, 540-558.
- Marshall, T.J. (1954). Some Properties of Soil Treated with Portland Cement. **Symposium on Soil Stabilization**. Australia. 28-34.
- Massachusetts Institute of Technology, (1954). Soil Stabilization for Highways. Massachusetts. **Massachusetts Department of Public Works and Joint Highway Research Project**. 81.
- Mills, W.H., Jr. (1935). Road Base Stabilization with Portland Cement. **Engineering News-Record**, 115(22): 751-753.
- Mills, W.H., Jr. (1936). Stabilizing soils with Portland cement, Experiments by South Carolina Highway Department. **Highway Research Board Proceedings**. 16: 322-347.

- Mitchell, J.K. and El Jack, S.A. (1966). The fabric of soil-cement and its formation. **Proceedings of 14th National Conference Clay and Clay Minerals**. 26: 297-305.
- 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 Chemicals. **Highway Research Record**. 86: 39-61.
- Moh, Z.C., Chin, Y.P., and Ng, S.C. (1967). cement stabilization of lateritic soil. **Proceeding 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. 42-46.
- Ng, S.C. (1966). Cement Stabilization of Lateritic Soils. **Master of Engineering Thesis**. Civil Engineering Program. No. 125. Seato Graduate School of Engineering. 55-65.
- Norling, L.T. and Packard, R.G. (1958). Expanded Short-Cut Test Method for Determining Cement Factors for Sandy Soil. **Highway Research Board**. Bulletin. 198. 20-31.
- Pendola, H.J., Kennady, T.W. and Hutson, W.R. (1969). Evaluation of Factors Affecting the Tensile Properties of Cement-Treated Materials. **University of Texas at Austin Research Report**. 98(3)
- Pinto, C.D.S., Davidson, D.T. and Laguros, J.G. (1962). Effect of Lime on Cement Stabilization of Monmorillonitic Soils. **Highway Research Board** . Bulletin 353. 64-83.
- Portland Cement Association, (1959). Soil-Cement Laboratory Handbook. **Illinois, Skokie**.
- Redus, J.F. (1958). Study of Soil-Cement Base Courses on Military Airfields. **Highway Research Board**. Bulletin. 198. 13-19.
- Reinhold, F. (1955). Elastic Behavior of Soil-Cement Mixtures. **Highway Research Board**. Bulletin. 108. 128-137.
- Ruenkairergsa, T. (1982). Principle of Soil Stabilization. **Group Training in Road Construction**. Bangkok. Thailand. 17-26.
- Ruenkairergsa, T. (1982). **Principle of Soil Stabilization**. **Bangkok**. Highways Department. 17-27.
- Shackel, B. and Lee, R.H.F. (1974). Some Aspect of Curing of Soil-Cement. **The 7th Conference of the Australian Road Research Board**. 7(7): 5-17.
- Tabensky, W. (1990). Road Recycling in US. **Shir of Buln Buln Memo**. 83: 66-73.

- Terrel, R.J., Barenberg, E.J., Mitchell, J.M. and Thomson, M.R.(1979). **Soil Stabilization in Pavement Structure A User's Manual Mixture Design Consideration**. Vol. 2. Washington D.C. Government Printing Office.
- 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**. 1: 191-194.
- The Siam Cement Company Ltd.(1965). **Demonstration Road Using Local Soil with Cement Stabilization. Bangkok**. Thailand. Siam Cement. 25-26.
- Walton, J.E. (1995). Cold In Place Recycling Result and Procedures Most Often Ask Question and Answers. **Pavement Rehabilitation Workshop**. 25 & 25 August 1995. Queensland. 1-15.
- Wang, M.C. and Huston, M.T. (1972). Direct-Tensile Stress and Strain of Cement Stabilize Soil. **Highway Research Record**. 351: 19-24.
- Winterkorn, H.F. and Chandrasekharn, E.C. (1951), "Lateritic Soil and Their Stabilization", **Highway Research Board**. Bulletin. 44, 10-29.
- Wilmot, T.D. (1995). Selection of Additive for Stabilization and Recycling of Road Pavement. **Pavement Rehabilitation Workshop**. 24&25 August 1995. Queensland. 1-14.
- Wirtgen. (1992). Cold Recycling. **An Economic and Ecologically Construction Process**. West Germany. Wirtgen.

ประวัติผู้เขียน

นายวันชัย สิริเลิศวัฒนา เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤศจิกายน พ.ศ. 2516 จบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้น และมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ ในปี พ.ศ.2535 เข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาตรีในสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2539 หลังจากจบการศึกษาได้ปฏิบัติงานในบริษัทเอกชนเป็นเวลาประมาณ 2 ปี จากนั้นได้บรรจุเป็นข้าราชการในตำแหน่งวิศวกรโยธา 3 ฝ่ายแผนงาน ส่วนแผนงาน สำนักทางหลวงที่ 6 กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม เมื่อปี พ.ศ.2540 ปัจจุบันปฏิบัติงานในตำแหน่งวิศวกรโยธา 5 ส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำนักทางหลวงที่ 6 กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ระหว่างปฏิบัติงาน มีความสนใจในงานด้านวิศวกรรมงานทางอันได้แก่งาน Pavement in-place recycling และการแก้ไขลาดในงานทางอย่างมาก ทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้ตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในการปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปี พ.ศ.2545