

กำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด

นายวรรัช เกษกัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-533-395-6

**UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF
CEMENT STABILIZED COARSE GRAINED SOIL**

Mr. Wanchai Katkan

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 2004

ISBN 974-533-395-6

กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด

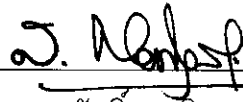
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ)

ประธานกรรมการ



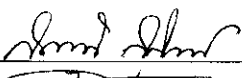
(ผศ. ดร.สุขสันติ หอพูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ



(รศ. น.ท. ดร.สรวิภา สุธิจจร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ชำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์


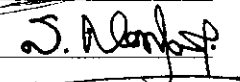
วรรณชัย เกษกัน : กำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด
(UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT STABILIZED
COARSE GRAINED SOIL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์
หอพิบูลสุข, 95 หน้า. ISBN 974-533-395-6

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ การเสนอแบบจำลองการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ และแบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด จากผลทดลองการบดอัด พบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินที่บดอัดทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสมจะแปรผันตามพลังงานและระดับความอึดตัวด้วยน้ำ แต่ตัวแปรทั้งสองมีอิทธิพลต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของดินที่บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสมน้อยมาก สำหรับการบดอัดด้านแห้ง ตัวแปร $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_s$ ได้ถูกนำเสนอเพื่อรวมอิทธิพลชนิดของดิน ตัวแปรนี้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับล็อกการิทึมของพลังงานการบดอัด ส่วนการบดอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสมและด้านเปียก กราฟการบดอัดที่พลังงานต่างๆ จะเป็นเส้นโค้งที่ต่อเนื่องกันและต่อกันที่จุดเหมาะสม หรืออาจกล่าวได้ว่าเส้นกราฟที่บดอัดด้านเปียกทุกๆ พลังงานเป็นเส้น โค้งเดียวกัน เมื่อนำทั้งสองส่วนดังกล่าวมาต่อกันที่จุดเหมาะสม (จุดที่มีค่าปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด) ของแต่ละพลังงาน จะได้แบบจำลองการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์มีลักษณะเป็นรูปตัววีกลับหัว (Inverted V Shape)

แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด ถูกสร้างขึ้นโดยแยกพิจารณาทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม ซึ่งสมการทำนายกำลังอัดทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม สร้างขึ้นจากทฤษฎีกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด ที่กล่าวว่า “กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่ง จะแปรผันตามอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (Soil-water/cement ratio, w/C) เท่านั้น” การทำนายกำลังอัดทางด้านแห้งจะอาศัยลักษณะความสัมพันธ์ของกำลังอัดในช่วงปริมาณน้ำ 0.8 ถึง 1.2 เท่าของปริมาณน้ำเหมาะสม

แบบจำลองทั้งสองได้รับการตรวจสอบความถูกต้องจากข้อมูลการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของดินหลายชนิด ที่นักวิจัยอื่นเคยเสนอไว้และจากข้อมูลของผู้วิจัย ผลการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ และความผิดพลาดของผลการทำนายอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนักศึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

WANCHAI KATKAN : UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF
CEMENT STABILIZED COARSE GRAINED SOIL. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D. 95 PP.
ISBN 974-533-395-6

UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH/ COMPACTION CURVE

This thesis aims to develop models for compaction of uncemented soils and unconfined compressive strength of cement stabilized coarse grained soils. It is found from the compaction test results that the dry unit weight of soils compacted on the dry side of optimum moisture content is dependent upon the compaction energy and the degree of saturation. These two parameters insignificantly affect the dry unit weight of the soils compacted on the wet side of optimum. On the dry side of optimum, the normalized variable $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_{st}$ is introduced to take into account the effect of soil type. This variable is linearly related to the logarithm of compaction energy. At the optimum moisture content and on the wet side of optimum, the compaction points for all compaction energies practically form a single curve. Combination of these two portions for each compaction energy leads to an inverted V graph which can predict the compaction of coarse and fine grained soils.

The model for unconfined compressive strength of cement stabilized coarse grained soils is divided into the dry and the wet sides of optimum. On the wet side of optimum, the strength equation is based on the empirical finding that “the unconfined compressive strength of cement stabilized soils at a particular curing time is dependent only upon the soil-water/cement ratio, w/C ”. Also from the empirical

finding it is proposed that the relationship between strength and water content is symmetrical for water content ranging from 0.8 to 1.2 times optimum water content. The strength on the dry side of the optimum can thus be assessed.

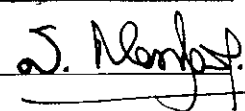
The two models are verified using test results compiled from the literature as well as results conducted by the author. The predicted and the observed values are in good agreement within acceptable engineering error.

School of Civil Engineering

Academic Year 2004

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคล ต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ และให้กำลังใจอย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและ ด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และ ตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ ให้ความช่วยเหลือทางด้านวิชาการ แนะนำ และตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจสอบเนื้อหา วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา คุณณัฐญา กิ่งโคกกรวด และคุณพรรณพิจิตร มานิมนต์ ที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือด้าน งานเอกสาร และงานธุรการ

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ชายทุกท่าน ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมสั่งสอน และส่งเสริมในทุกๆด้านด้วยดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตจนถึงปัจจุบัน

วรรัชย์ เกษกัน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญรูป.....	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๗

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	4
2 ปรัชมนวัตกรรมกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์.....	5
2.2 ประเภทของดินซีเมนต์.....	6
2.3 ปฏิกริยาเมื่อผสมซีเมนต์กับดินและน้ำ.....	7
2.4 โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	8
2.5 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	9
2.5.1 ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์.....	9
2.5.2 คุณสมบัติของดิน.....	13
2.5.3 ปริมาณดินเหนียวและชนิดของแร่ดินเหนียว.....	14
2.5.4 คุณสมบัติทางเคมีของดิน.....	16
2.5.5 การผสมและการบดอัด.....	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.6	การบ่ม.....	20
2.5.7	สารผสมร่วม	21
2.6	การปรับปรุงกำลังอัดแกนเดียวของดินด้วยซีเมนต์.....	22
2.6.1	ดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง	22
2.6.2	ดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำ.....	24
3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	27
3.1	การสร้างสมการหน่วยน้ำหนักแห้งของดินไม่ผสมซีเมนต์.....	27
3.1.1	ความเข้าใจปัญหาและแนวทางการวิจัยที่เลือก.....	28
3.1.2	วิธีการวิจัย	34
3.1.3	การบดอัดดิน.....	34
3.1.4	วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร	35
3.2	การสร้างสมการกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด	35
3.2.1	ความเข้าใจปัญหาและแนวทางการวิจัยที่เลือก.....	36
3.2.2	วิธีการวิจัย	44
3.2.3	การหาลำดับกำลังอัดแกนเดียวของดินบดอัด	44
3.2.4	วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร	47
3.3	ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	48
3.3.1	กราฟการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์.....	48
3.3.2	สมการกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด	48
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	49
4.1	กราฟการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์.....	49
4.1.1	คุณสมบัติของดินที่ศึกษา	49
4.1.2	กราฟการบดอัดดิน	50
4.1.3	วิเคราะห์ผลการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์	53
4.1.4	วิธีสร้างกราฟการบดอัด	60

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด	62
4.2.1	คุณสมบัติของดินตัวอย่าง.....	62
4.2.2	กราฟการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของดินไม่ผสมซีเมนต์	63
4.2.3	กราฟการบดอัด และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว กับปริมาณน้ำของดินซีเมนต์.....	66
4.2.4	อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด.....	69
4.2.5	เปรียบเทียบดินเม็ดหยาบกับดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด.....	70
4.2.6	ทฤษฎีกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด	73
4.2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม.....	77
4.2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาณน้ำ ต่อปริมาณซีเมนต์และอายุบ่ม	81
4.2.9	กำลังอัดแกนเดียวทางด้านแข็งของปริมาณความชื้นเหมาะสม.....	82
4.2.10	การตรวจสอบแบบจำลอง	84
5	บทสรุป.....	89
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	89
5.1.1	แบบจำลองการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์.....	89
5.2.2	ทฤษฎีกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด	90
5.2.3	แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด	90
5.2	ข้อเสนอแนะการใช้สมการและ งานวิจัยต่อไป.....	91
	รายการอ้างอิง.....	92
	ประวัติผู้เขียน.....	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	กำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน..... 13
3.1	รูปแบบการบดอัดและพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน..... 35
4.1	คุณสมบัติของดินเหนียวปนดินตะกอน ดินลูกรังแหล่งที่ 1 และหินคลุกแหล่งที่ 1 49
4.2	ปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเหนียวปนดินตะกอน ดินลูกรังแหล่งที่ 1 และหินคลุกแหล่งที่ 1..... 52
4.3	คุณสมบัติของดินลูกรังแหล่งที่ 2 และหินคลุกแหล่งที่ 2 62
4.4	ปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินลูกรังแหล่งที่ 2 และหินคลุกแหล่งที่ 2..... 64
4.5	ค่าพารามิเตอร์ A และ B สำหรับดินซีเมนต์ตัวอย่างบดอัด ที่อายุบ่มต่างๆ..... 77
4.6	เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังแหล่งที่ 3 ผสมซีเมนต์บดอัด จากแบบจำลองและจากการวัด 85
4.7	เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังแหล่งที่ 4 ผสมซีเมนต์บดอัด จากแบบจำลองและจากการวัด 86
4.8	เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังแหล่งที่ 5 ผสมซีเมนต์บดอัด จากแบบจำลองและจากการวัด 87
4.9	เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกแหล่งที่ 3 ผสมซีเมนต์บดอัด จากแบบจำลองและจากการวัด 87
4.10	เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด ที่ใช้อัตราส่วนดินลูกรังแหล่งที่ 5 ต่อหินคลุกแหล่งที่ 3 เท่ากับ 4:1 จากแบบจำลองและจากการวัด..... 88

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของดินซีเมนต์ 9
2.2	อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Sandy Loam 10
2.3	อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay 10
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์..... 11
2.5	เปรียบเทียบกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Soil 2a-6) และ Silty Clay Loam (Soil 4d) ผสมซีเมนต์ประเภท 1 และประเภท 3 เมื่อผสมเสร็จแล้วทดสอบทันที 11
2.6	ขอบเขตปฏิสัมพันธ์ของดินเหนียวผสมซีเมนต์..... 12
2.7	อิทธิพลของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์..... 14
2.8	อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อค่า Modulus of Elasticity ของดินซีเมนต์..... 15
2.9	อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ 15
2.10	อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ปริมาณซีเมนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ 16
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่า pH ของดินผสมซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:10 17
2.12	ผลของระยะเวลาที่ใช้ในผสมต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ 18
2.13	การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้ระยะเวลาการบดอัดนานขึ้น 18
2.14	อิทธิพลของความหนาแน่นต่อกำลังอัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน 19
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิที่ใช้บ่มดินซีเมนต์..... 20
2.16	อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ 21
2.17	อิทธิพลของปริมาณปูนขาวต่อกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ 22
2.18	ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ 23
2.19	ตัวอย่างดินซีเมนต์สำหรับใช้ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว 23
3.1	แผนภาพขั้นตอนและการวิเคราะห์ดินบดอัดไม่ผสมซีเมนต์..... 28
3.2	ผลทดสอบการบดอัดดินเม็ดละเอียดที่มีขีดจำกัดเหลวแตกต่างกัน ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร 29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ตัวแปร $m/S^{0.5}$ และ m/S^2 และขีดจำกัดเหลวของดินเม็ดละเอียด 3 ชนิด ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร 30
3.4	กราฟการบดอัดรูปตัววีกลับหัว (Inverted V Shape) ของดินเม็ดละเอียดที่มีขีดจำกัดเหลวแตกต่างกัน ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน 31
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง OMC และพลังงานการบดอัด 32
3.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\gamma_{d,max}$ และพลังงานการบดอัด 33
3.7	แผนภาพขั้นตอนและการวิเคราะห์ดินซีเมนต์บดอัด 36
3.8	อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ 37
3.9	อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียว Ariake ตามอายุบ่มที่กำหนด 38
3.10	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของดินเหนียว Ariake ผสมซีเมนต์ที่มีค่า LI 1.0 ถึง 2.5 39
3.11	การพัฒนากำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของดินเหนียวความชื้นสูง 40
3.12	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณซีเมนต์ของดินลูกรังตามอายุบ่มที่กำหนด ที่บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร 41
3.13	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของดินลูกรัง ตามปริมาณซีเมนต์ที่กำหนด ที่บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร 42
3.14	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับพลังงานบดอัดของดินลูกรัง ตามอายุบ่มที่กำหนด ที่ปริมาณซีเมนต์ 3 และ 7 เปอร์เซ็นต์ 42
3.15	กราฟกำลังอัดแกนเดียวสัมพันธ์กับปริมาณซีเมนต์ 43
3.16	แผนงานบดอัดดินซีเมนต์ 45
3.17	ลักษณะการผสมดินกับซีเมนต์ 45
3.18	การเก็บตัวอย่างหาความชื้นของดินซีเมนต์ 46
3.19	ลักษณะดินซีเมนต์บดอัด 46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM).....	47
3.21 ลักษณะการวิบัติของดินซีเมนต์.....	47
4.1 การกระจายขนาดคละของเม็ดดินของดินตัวอย่าง.....	50
4.2 กราฟการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนที่พลังงานการบดอัดต่างๆ	51
4.3 กราฟการบดอัดของดินลูกรังแหล่งที่ 1 ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ	51
4.4 กราฟการบดอัดของหินคลุกแหล่งที่ 1 ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ	52
4.5 กราฟการบดอัดรูปตัววีกลับหัว	53
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและพลังงานการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน และเส้น Normalization	54
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและพลังงานการบดอัดของดินลูกรังแหล่งที่ 1 และเส้น Normalization	55
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและพลังงานการบดอัดของหินคลุกแหล่งที่ 1 และเส้น Normalization	55
4.9 ตัวแปร $m/S^{0.5}$ และพลังงานการบดอัดสำหรับดินทั้งสามชนิดและอัตราส่วน ของ $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_{st}$ ที่พลังงานต่าง ๆ	57
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง OMC และพลังงานการบดอัด และความสัมพันธ์ แบบ Normalized.....	58
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\gamma_{d,max}$ และพลังงานการบดอัด และความสัมพันธ์ แบบ Normalized.....	59
4.12 กราฟการบดอัดดินลูกรังที่ได้จากผลทดสอบและการทำนาย.....	61
4.13 กราฟการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอนที่ได้จากผลทดสอบและการทำนาย.....	61
4.14 การกระจายขนาดคละของดินลูกรังแหล่งที่ 2 และหินคลุกแหล่งที่ 2.....	62
4.15 กราฟการบดอัดดินลูกรังแหล่งที่ 2.....	63
4.16 กราฟการบดอัดหินคลุกแหล่งที่ 2	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของดินลูกรังแหล่งที่ 2 บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	65
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของดินลูกรังแหล่งที่ 2 บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	65
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น - กำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณน้ำของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ที่บดอัดด้วยพลังงาน 4 ค่า.....	66
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ อายุบ่ม 14 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบครึ่งมาตรฐาน	67
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังแหล่งที่ 2 อายุบ่ม 14 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบครึ่งสูงกว่ามาตรฐาน	67
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ อายุบ่ม 28 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน	68
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ อายุบ่ม 28 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	68
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ และกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ที่ปริมาณซีเมนต์ 7 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน	69
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ และกำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกแหล่งที่ 2 ที่ปริมาณซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	70
4.26 โครงสร้างของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ไม่ผสมซีเมนต์ บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปริมาณน้ำ 8.5 เปอร์เซ็นต์	71
4.27 โครงสร้างของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ปริมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำ 8.5 เปอร์เซ็นต์ อายุบ่ม 7 วัน บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	71
4.28 โครงสร้างของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ปริมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำ 5.0 เปอร์เซ็นต์ อายุบ่ม 7 วัน บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	72
4.29 แบบจำลองโครงสร้างดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัดและแรงที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดดิน	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของหินคลุกแหล่งที่ 2 ที่ค่า w/C เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 บดอัดด้วยพลังงาน 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	73
4.31 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของหินคลุกแหล่งที่ 2 ที่ค่า w/C เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 ภายใต้พลังงานการบดอัดที่แตกต่างกัน	74
4.32 กำลังอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนปริมาตรน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ที่บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุบ่ม 7 และ 60 วัน	75
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินลูกรังแหล่งที่ 2	76
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของหินคลุกแหล่งที่ 2	76
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม	79
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของหินคลุกแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม	80
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์ ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ และการ Normalization	81
4.38 อิทธิพลพลังงานการบดอัดต่อกำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกแหล่งที่ 2 ที่ปริมาณซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์ อายุบ่ม 14 วัน	83
4.39 แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด	84

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	= American Society for Testing Material
C	= ปริมาณซีเมนต์ (Cement Content)
CAH	= Calcium Aluminate Hydrate
CSH	= Calcium Silicate Hydrate
D	= อายุบ่ม (Curing)
E	= พลังงานบดอัด (Energy)
E_1	= พลังงานการบดอัดที่ครั้งหนึ่งของพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน
E_2	= พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน
E_3	= พลังงานการบดอัดที่ครั้งหนึ่งของพลังงานการบดอัดที่สูงกว่าแบบมาตรฐาน
E_4	= พลังงานการบดอัดที่สูงกว่าแบบมาตรฐาน
LI	= ดัชนีสภาพเหลว (Liquidity Index)
LL	= จีดจำกัดเหลว (Liquid Limit)
m	= ปริมาณน้ำ (Moisture Content)
OMC	= ปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Moisture Content)
OMC_{st}	= ปริมาณน้ำเหมาะสมของพลังงานบดอัดแบบมาตรฐาน
PI	= ดัชนีสภาพพลาสติก (Plastic Index)
PL	= จีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)
q_u	= กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)
S	= ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation)
USCS	= Unified Soil Classification
UTM	= Universal Testing Machine
w/C	= ปริมาณน้ำในมวลดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Soil - water/cement ratio)
w/C	= ปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปริมาณซีเมนต์ (Cay - water/cement ratio)
γ_d	= หน่วยน้ำหนักดินแห้ง (Dry Unit Weight)
$\gamma_{d,max}$	= หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด (Maximum Dry Unit Weight)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินด้วยการผสมกับซีเมนต์ได้เข้ามามีบทบาทในการก่อสร้างอย่างมาก งานก่อสร้างถนนตามมาตรฐานกรมทางหลวงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมที่ดีและเหมาะสมสำหรับการบดอัดเพื่อทำชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทาง ในบางพื้นที่ที่จำเป็นต้องทำการก่อสร้าง แต่ขาดแคลนแหล่งวัสดุ หรืออยู่ห่างไกลจากแหล่งวัสดุที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ซึ่งจะสิ้นเปลืองอย่างมากสำหรับผู้รับจ้างถ้าต้องหาแหล่งดินที่เหมาะสมและทำการขนส่งมายังพื้นที่บริเวณก่อสร้าง ทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมคือ การผสมดินที่สามารถหาได้ในพื้นที่ก่อสร้างกับซีเมนต์และทำการบดอัด วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ประหยัดและสามารถกำหนดควบคุมคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินซีเมนต์ให้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง โดยกำลังอัดของดินซีเมนต์นี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลา ปัจจุบันจึงได้มีการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์โดยใช้วิธีดังกล่าว นอกจากนี้ กรมทางหลวงยังนิยมใช้วิธีนี้ในการซ่อมแซมถนนที่ชำรุดและไม่สามารถใช้งานได้ โดยการนำวัสดุชั้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ในกรณีนี้จะเพิ่มเติมวัสดุผสม เช่น หินคลุก ดินลูกรัง ทราย และอื่นๆ เพื่อปรับปรุงขนาดคละและเพื่อเพิ่มปริมาณ และอาจเติมวัสดุผสมเพิ่ม เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว และแอสฟัลต์ เป็นต้น วิธีการนี้เรียกว่า “การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement recycling)” ข้อดีของวิธีนี้คือ ประหยัดเมื่อเทียบกับการปรับปรุงและซ่อมแซมถนนโดยวิธีการอื่นๆ เช่น การขุดลอกเอาวัสดุเดิมที่ชำรุดออกและนำวัสดุใหม่มาไถเกลี่ยแล้วบดอัดให้ได้ความแน่นตามต้องการ เป็นต้น นอกจากนี้ ซีเมนต์ยังเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย และการปรับปรุงซ่อมแซมยังสามารถทำได้รวดเร็ว

Miura et al. (2001) ได้จำแนกการปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยซีเมนต์ออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ คือ การปรับปรุงคุณสมบัติของดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง (ปริมาณน้ำในมวลดินใกล้เคียงหรือสูงกว่าขีดจำกัดเหลว) และการปรับปรุงคุณสมบัติของดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำ (ปริมาณน้ำในมวลดินใกล้เคียงหรือต่ำกว่าขีดจำกัดพลาสติก) ดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง มวลดินจะประกอบด้วยกลุ่มเม็ดดินและน้ำที่แทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน การผสมซีเมนต์ลงไปดินซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ และผลของปฏิกิริยาจะเกิดพันธะเชื่อมประสานกลุ่มของเม็ดดินซีเมนต์ ซึ่งไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน การที่จะทำให้กลุ่มเม็ดดินซีเมนต์รวมเป็นเนื้อเดียวกัน

กลายเป็นวัสดุทางวิศวกรรมได้จำเป็นต้องใช้พลังงานการบดอัด

สำหรับการปรับปรุงดินซีเมนต์ที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง Horpibulsuk et al. (2003) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียว และสรุปว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่งจะแปรผันเป็นปฏิภาคกลับกับอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay - water/cement ratio, w/C) และได้เสนอสมการสำหรับทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณน้ำ และอายุบ่มต่างๆ โดยอาศัยผลการทดสอบเพียงจุดเดียว แต่อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยนี้ยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากการวิจัยจะครอบคลุมแต่เฉพาะดินเม็ดละเอียดที่มีค่าดัชนีความเหลว (Liquidity Index, LI) อยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 2.5 เท่านั้น ส่วนการปรับปรุงคุณสมบัติของดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำที่พลังงานการบดอัดต่างๆ ธีระชาติและสมบัติกระแสด (2544) พบว่า พลังงานการบดอัดมีผลอย่างมากต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ แต่การศึกษานั้นไม่ได้ครอบคลุมดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณน้ำสูงกว่าหรือต่ำกว่าปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) และไม่สามารถทำนายกำลังอัดแกนเดียวเมื่อกำหนดพลังงานการบดอัด ปริมาณน้ำในมวลดิน ปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และชนิดของดินได้ในทางปฏิบัติแล้ว บางครั้งอาจมีข้อกำหนดบางประการที่ทำให้ไม่สามารถทำการบดอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสม ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณน้ำอื่นๆ เพื่อให้วิศวกรผู้ออกแบบ/วิศวกรโครงการ สามารถเลือกใช้ปริมาณน้ำควบคู่กับพลังงานการบดอัดเพื่อให้ได้กำลังอัดของดินซีเมนต์ตามต้องการ

ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีความประสงค์ที่จะปรับปรุงวิธีทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ เมื่อแปรผันพลังงานการบดอัด ปริมาณน้ำ ปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และชนิดของดิน และเสนอสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด สมการนี้จะสามารถใช้ในการประมาณปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และพลังงานการบดอัด ให้สอดคล้องกับค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการ และปริมาณน้ำที่แปรเปลี่ยนในสนาม อีกทั้งยังสามารถใช้ตรวจสอบความถูกต้องของกำลังอัดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ เนื่องจากการบดอัดดินผสมซีเมนต์ต้องใช้ข้อมูลปริมาณน้ำและพลังงานจากการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จะเสนอกราฟการบดอัดของดินไม่ผสมซีเมนต์ ที่สามารถใช้ประมาณปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดสำหรับดินทุกๆชนิด และทุกๆพลังงานการบดอัด ซึ่งจะมีประโยชน์ในการตรวจสอบค่าที่วัดได้จากห้องปฏิบัติการ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ เพื่อเสนอแบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดซีเมนต์บดอัด โดยมีวัตถุประสงค์รองดังนี้

1.2.1 เพื่อเสนอแบบจำลองสมการการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ ในเทอมของพลังงานการบดอัด และปริมาณน้ำในมวลดิน

1.2.2 เพื่อเสนอทฤษฎีกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด

1.2.3 เพื่อเสนอสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด ในเทอมของพลังงานการบดอัด ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณน้ำในมวลดิน อายุบ่ม และชนิดของดิน โดยอาศัยทฤษฎีที่เสนอ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การสร้างสมการการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ จะศึกษาดิน 3 ชนิด คือ ดินเหนียวปนดินตะกอน (Silty Clay) ดินลูกรังแหล่งที่ 1 (Lateritic Soil, L_1) และหินคลุกแหล่งที่ 1 (Crushed Rock, C_1) และตรวจสอบ (Verify) กับดิน 2 ชนิด คือ ดินลูกรังแหล่งที่ 3 (ข้อมูลจาก ชีระชาติและสมบัติกระแสด, 2544) และดินเหนียวปนดินตะกอน (ข้อมูลจาก Tumbull, 1950) ส่วนการสร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด จะศึกษาดิน 2 ชนิด คือ ดินลูกรังแหล่งที่ 2 (Lateritic Soil, L_2) และหินคลุกแหล่งที่ 2 (Crushed Rock, C_2) และตรวจสอบกับดิน 5 ชนิด คือ ดินลูกรังแหล่งที่ 3 (ข้อมูลจาก ชีระชาติและสมบัติกระแสด, 2544) ดินลูกรังแหล่งที่ 4 (ข้อมูลของผู้วิจัย) ดินลูกรังแหล่งที่ 5 (ข้อมูลของผู้วิจัย) หินคลุกแหล่งที่ 3 (ข้อมูลของผู้วิจัย) และหินคลุกแหล่งที่ 3 ผสมกับดินลูกรังแหล่งที่ 5 ในอัตราส่วน 1:4 (ข้อมูลของผู้วิจัย) และซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็น ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายล้าง โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์ที่ 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักดินแห้ง และการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1.3.1 การหาคุณสมบัติเบื้องต้นและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตัวอย่าง

1.3.2 การบดอัดดินตัวอย่างไม่ผสมซีเมนต์ เพื่อศึกษาลักษณะกราฟการบดอัด และหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum Dry Unit Weight, $\gamma_{d,max}$) และปริมาณน้ำเหมาะสมของดินตัวอย่าง โดยแปรผันพลังงานบดอัด 4 ค่า ได้แก่ 296.3, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อสร้างแบบจำลองกราฟการบดอัดดิน

1.3.3 การบดอัดดินตัวอย่างผสมซีเมนต์ เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัดแกนเดียว และปริมาณน้ำในมวลดิน ตามอายุบ่มที่แปรผัน 5 ค่า ได้แก่ 7, 14, 28, 60 และ 120 วัน พลังงานที่ใช้สำหรับการบดอัดจะเหมือนกับพลังงานการบดอัดดินตัวอย่างที่ไม่ผสมซีเมนต์ ส่วนปริมาณน้ำที่ใช้ผสมมี 5 ค่า ได้แก่ 60, 80, 100, 120 และ 140 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสมจากการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์

1.3.4 การหาค่ากำลังอัดแกนเดียว นำตัวอย่างดินบดอัดที่ไม่ผสมซีเมนต์ หรือดินซีเมนต์บดอัดที่ครบกําหนดอายุบ่ม มาหาค่ากำลังอัดแกนเดียวด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) โดยใช้อัตราการกดทดสอบ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงดินตัวอย่างต่อนาที จนกระทั่งดินตัวอย่างวิบัติ บันทึกผลทดสอบในรูปของความเค้นและความเครียด จากนั้น นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวที่แปรผันกับตัวแปรการบดอัดต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

งานวิจัยนี้จะสร้างแบบจำลองกราฟการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ ซึ่งพิจารณาผลของพลังงานการบดอัด และชนิดของดิน และสร้างทฤษฎีการปรับปรุงกำลังของดินด้วยซีเมนต์เพื่อใช้สร้างแบบจำลองสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด โดยรวมปัจจัยหลักต่างๆที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียว ได้แก่ ชนิดของดิน พลังงานการบดอัด ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณน้ำในมวลดิน และอายุบ่ม การศึกษานี้จัดเป็นงานบุกเบิกเพื่อให้ นักวิจัยที่สนใจได้นำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยระดับสูงต่อไป ในส่วนนี้จะมีประโยชน์ต่อสถาบันวิจัยและมหาวิทยาลัยต่างๆ และสมการที่นำเสนอมีประโยชน์อย่างมากต่อวิศวกรในด้านการออกแบบ การวางแผนเลือกปริมาณซีเมนต์ พลังงานการบดอัด และอายุบ่ม ให้สอดคล้องกับปริมาณน้ำของดินในสนามและกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ตรวจสอบความถูกต้องของผลทดสอบจากห้องปฏิบัติการซึ่ง จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกิจการงานด้านการก่อสร้าง เช่น บริษัทรับจ้าง กรมโยธาธิการ และกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย เป็นต้น

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์ ทบทวนการศึกษาปฏิบัติการที่เกิดขึ้นระหว่างการผสมดินกับซีเมนต์และน้ำ โครงสร้างของดินซีเมนต์ ปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ วิธีการปรับปรุงกำลังอัดของดินด้วยซีเมนต์ และท้ายสุดจะทบทวนการศึกษาพฤติกรรมและลักษณะกราฟการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์

2.1 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์

แนวความคิดเรื่องการปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นโดยผสมกับวัสดุอื่นได้เกิดขึ้นมาหลายพันปีแล้ว Terrel et al. (1979) บันทึกไว้ว่าเมื่อประมาณ 5,000 ปีก่อน ได้มีการผสมดินกับปูนขาวหรือกับสาร Pozzolans สารนี้จะทำให้ค่าดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index, *PI*) ของดินลดลง ซึ่งส่งผลให้ดินรับแรงอัดได้สูงขึ้น และแนวทางนี้ได้ถูกนำมาใช้ปฏิบัติสืบต่อกันมาหลายศตวรรษ

Portland Cement Association (1959) ได้บันทึกไว้ว่า Development Department ของ Portland Cement Association ในปี 1935 ได้ศึกษาค้นคว้าจนได้ส่วนผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์กับดินหลายๆชนิด และจากการศึกษาครั้งนั้นได้เสนอวิธีทดสอบและระเบียบวิธีการก่อสร้างที่ให้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือ รูปแบบของวิธีการทดสอบสำหรับดินซีเมนต์ที่ได้พัฒนาขึ้น ได้แก่ Moisture - Density, Wet - Dry Test และ Freeze - Thaw Test เป็นต้น วิธีการทดสอบต่างๆเหล่านี้ ต่อมาได้ถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานการทดสอบของ American Society for Testing Material (ASTM) ในปี 1944 และ American Association of State Highway Officials (AASHTO) ในปี 1945

Davidson (1961) กล่าวถึงวิวัฒนาการของดินซีเมนต์ไว้ว่า กิจการรับเหมาก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับการสร้างถนนในเมือง Sarasota มลรัฐ Florida ได้ก่อตั้งในปี 1915 น่าจะเป็นการเริ่มต้นครั้งแรกในโลกเกี่ยวกับถนนดินซีเมนต์ จากหลักฐานพบว่าถนน Oak ได้ถูกสร้างขึ้นจากการขุดเอาดิน Shell จากอ่าวเม็กซิโกมาผสมกับทรายและซีเมนต์ แล้วนำส่วนผสมที่ได้มาไถเกลี่ยและบดอัดด้วยรถบดไอน้ำขนาด 10 ตัน วิธีดังกล่าวเป็นวิธีการก่อสร้างที่ไม่เป็นไปตามแผนที่วางเอาไว้ตอนแรก เนื่องจากเครื่องผสมคอนกรีตเสียหาย Davidson (1961) ยังได้อ้างรายงานของ Mills (1935, 1936) ว่า ในปี 1932 South California State Highway Department ได้ศึกษาส่วนผสมของดินและซีเมนต์

ภายใต้การดูแลของ Dr C.H. Morefield การทดลองหลายเรื่อง ได้ถูกพัฒนาขึ้นในปี 1933 และ 1934 และได้รายงานผลการทดสอบว่า ดินกับซีเมนต์เป็นวัสดุที่สามารถผสมเข้ากันได้ดี และสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางที่มีราคาถูกได้

Terrel et al. (1979) และ Davidson (1961) ได้บันทึกตรงกันว่า เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองของ South California State Highway หน่วยงาน Bureau of Public Roads และ Portland Cement Association ได้ร่วมมือกันก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ยาว 1.5 ไมล์ ใกล้กับเมือง Johnsonville ขึ้นในปี 1935 ถนนสายนี้ต่อมากลายเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นโครงการแรกของวิศวกรรมถนนดินซีเมนต์

Davidson (1961) ได้รายงานว่าความสำเร็จของ South California State Highway ทำให้อีกหลายรัฐของสหรัฐอเมริกา นำวิธีนี้ไปใช้ ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ดินซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ก่อสร้างสนามบินจำนวนมาก ระหว่างปี 1941 ถึง 1944 มีปริมาณการใช้มากถึง 22 ล้านตารางหลา แม้ในช่วงนั้นจะมีการก่อสร้างถนนปริมาณน้อย แต่หลังสงครามโลกยุติ การใช้ถนนดินซีเมนต์ก็กลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง นอกเหนือจากการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์แล้ว ยังมีการใช้ดินซีเมนต์เป็นชั้นรองพื้นทางของถนนคอนกรีต ไหล่ทางของถนน ที่จอดรถ คลังเก็บสินค้า และทำเป็นชั้นรองพื้นอ่างเก็บน้ำและคูคลอง นอกจากการใช้ถนนดินซีเมนต์จะแพร่หลายในสหรัฐอเมริกาแล้วยังมีการนำไปใช้ในประเทศอังกฤษ แอฟริกาใต้ ตะวันออกกลาง อเมริกาใต้ และเยอรมันในเวลาต่อมา

2.2 ประเภทของดินซีเมนต์

Highway Research Board Committee on Soil - Cement Stabilization (1959) ได้ให้คำจำกัดความของ Cement - Treated Soil ว่าเป็นการนำเอาดินและซีเมนต์ในปริมาณที่ต้องการมาผสมกับน้ำให้เข้ากันแล้วบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด และในระหว่างการบดดินซีเมนต์ต้องทำการป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียน้ำ นอกจากนี้ยังได้จัดแบ่งดินผสมซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภท ตามปริมาณซีเมนต์ที่ผสมและลักษณะการใช้งาน ดังนี้

2.2.1 Cement Modified Silty Clay Soil ปริมาณของซีเมนต์ที่ใช้สำหรับปรับปรุงคุณภาพของดินประเภทนี้มีปริมาณน้อยมากประมาณ 1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อ ปรับปรุงคุณสมบัติของผิวหน้าดินเดิมที่เป็นดินเหนียวที่มีลักษณะเปียกและ และมีความอ่อนตัวมาก ให้มีความแข็งแรงพอที่ยานพาหนะผ่านได้โดยผิวหน้าดินไม่ยุบตัว

2.2.2 Cement Modified Granular Soil ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้กับดินประเภทนี้มีเพียงแค่ว่าประมาณ 1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ เพื่อลดคุณสมบัติทางด้าน Plasticity และการดูดซึมน้ำ ซึ่งมักจะใช้ทำเป็นพื้นทางของ Flexible Pavement และ Rigid Pavement ปริมาณซีเมนต์ที่ใส่เข้าไปนี้กำลังอัดของ

ดินอาจจะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่โดยทั่วไป Cement Modified Granular Soil จะมีค่ากำลังแบกทาน (California Bearing Ratio) เพิ่มขึ้น ทำให้พื้นทางมีค่า Stiffness เพิ่มมากขึ้น อันจะทำให้การแอ่นตัวของชั้นทางภายใต้น้ำหนักบรรทุกลดลง

2.2.3 Soil Cement เป็นดินผสมซีเมนต์ที่ได้รับออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังอัด หรือมีความแข็งแรงทนทานตามมาตรฐานของ Portland Cement Association (PCA) หรือ ASTM ปริมาณซีเมนต์ที่ผสมลงในดินต้องสูงพอจนทำให้กำลังอัดมีค่าตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งปริมาณซีเมนต์อาจสูงถึง 5 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ สำหรับดินที่ขนาดละเอียด และจะสูงกว่านั้นถ้าดินมีขนาดละเอียด หรือเป็นดินที่มีค่าดัชนีสภาพพลาสติก (Plastic Index, *PI*) สูง ซึ่งอาจจะต้องผสมปูนขาวเพื่อลดค่า *PI* ของดินเดิมลง

2.2.4 Plastic Soil Cement เป็นดินผสมซีเมนต์ที่มีปริมาณน้ำสูง เพื่อต้องการให้ส่วนผสมมี Workability สูงพอที่จะนำมาใช้สำหรับงานลาด หรือปูลงบนพื้นที่มีความลาดเอียงต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การลาดท้องคลองชลประทาน การลาดผิวหน้าคันทาง เป็นต้น

2.2.5 Cement Treated Slurry เป็นซีเมนต์ที่ผสมกับวัสดุประเภททรายและน้ำ ซึ่งมีปริมาณน้ำที่สูงมาก และอาจมีการเพิ่มส่วนผสมอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของส่วนผสมให้มี Workability สูง ปกติจะใช้เป็นวัสดุอัดเชื่อมประสานในงานซ่อมแซมถนน

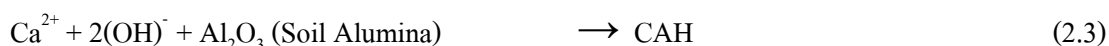
2.3 ปฏิกริยาเมื่อผสมซีเมนต์กับดินและน้ำ

เมื่อซีเมนต์ผสมกับดินและน้ำจะเกิดปฏิกริยาเคมีทำให้ดินมีกำลังเพิ่มขึ้น ซึ่งได้มีการศึกษาและบันทึกไว้โดยนักวิจัยหลายท่าน

Davidson (1961) ได้บันทึกไว้ว่า ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมซีเมนต์กับดินเหนียวขึ้น จะทำให้ค่า Plasticity ของดินลดลง โดยอธิบายว่าการลดลงของค่า Plasticity น่าจะมาจากการแยกตัวของไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) ในระหว่างเกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน ทำให้เม็ดดินยึดเกาะกันเป็นก้อน การยึดเกาะกันนี้เนื่องมาจากแรงยึดเกาะทางเคมีที่มีอยู่ในดิน หรือการยึดเกาะกันระหว่างผิวของอนุภาคซีเมนต์ที่อยู่ใกล้กัน

Lambe et al. (1959) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ และอธิบายไว้ว่า ซีเมนต์เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากผลึกของ Tricalcium Silicate, Dicalcium Silicate, Tricalcium Aluminate และ Tetracalcium Aluminate Ferrite เมื่อซีเมนต์ผสมเข้ากับดินและน้ำจะเกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน ในระหว่างการเกิดปฏิกริยา จะได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Hydrated Lime หรือ Calcium Hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แยกตัวออกมา สารประกอบสองตัวแรกมีคุณสมบัติเชื่อมประสานที่ได้จากปฏิกริยาหลักของซีเมนต์ นอกจากนี้

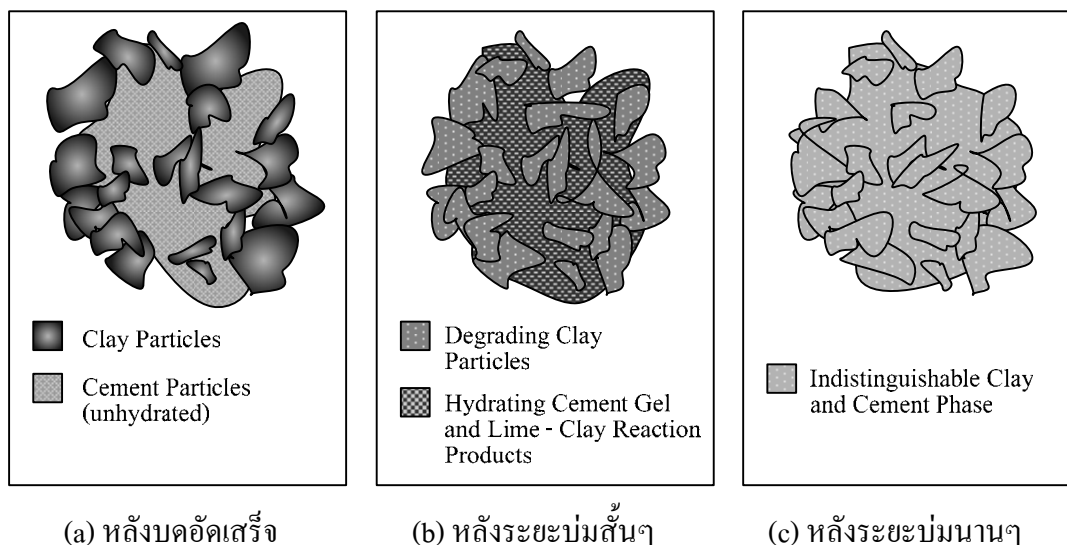
Hydrated Lime ที่ได้จะแตกตัวเป็น Ca^{2+} และเข้าไปทำปฏิกิริยากับ Silica และ Alumina ในแร่ดินเหนียว เกิดสารประกอบ CSH และ CAH ขึ้นมาอีก ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์และน้ำในมวลดิน จะทำให้ค่า pH ในดินเพิ่มขึ้น ซึ่งเชื่อว่าการเพิ่มขึ้นของ pH เกิดเนื่องมาจากการแตกตัวของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ Hydrated Lime ทำให้ Silica และ Alumina ซึ่งเป็นแร่ประกอบในดินเหนียวเกิดการแตกตัวเข้าไปทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} ก่อให้เกิดวัสดุเชื่อมประสานขึ้นอีก ซึ่งจะต้องใช้เวลานานขึ้น สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์จะเป็นไปดังสมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3



การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เกิดจากการที่ซีเมนต์ผสมกับน้ำแล้วเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบ CSH, CAH และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไป โดย $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จะแตกตัวออกเป็น Ca^{2+} และทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นแร่ในดินเหนียวได้สารประกอบ CSH และ CAH ออกมาอีก สารประกอบเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานทำให้อนุภาคของเม็ดดินเกิดการรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีกำลังสูงขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการ 2.1 และ 2.2 เรียกว่า Primary Reaction และ 2.3 เรียกว่า Secondary Reaction

2.4 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell and Jack (1966) อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของดินซีเมนต์โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบในโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อถูกบดอัด อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1(a) ในช่วงอายุบ่มอันสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันกับน้ำ เป็นผลให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อยปูนขาวออกมา ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่ในดินและเกิดการแยกตัว หลังจากนั้นซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1(b) สำหรับช่วงอายุบ่มยาวนานปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันจะเกิดอย่างสมบูรณ์ทำให้ซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วทั้งก้อนของดินซีเมนต์ เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.1(c)

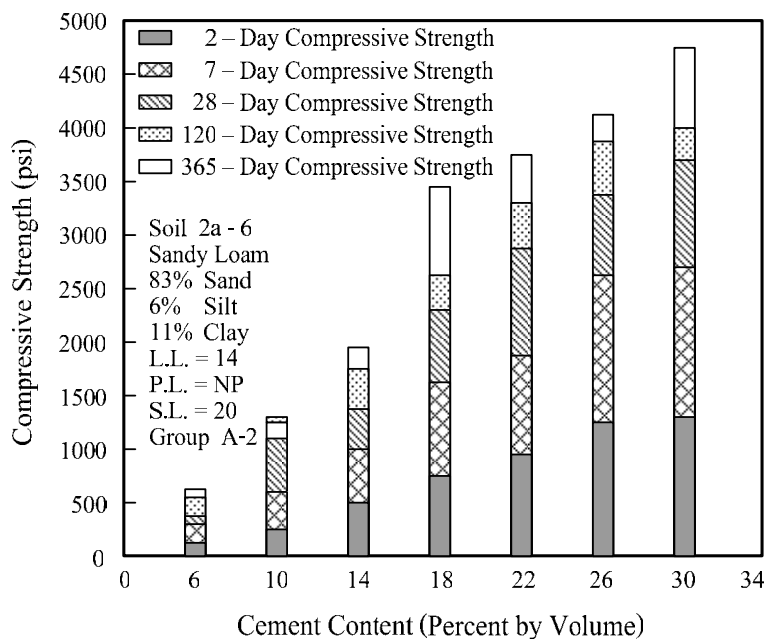


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell and Jack, 1966)

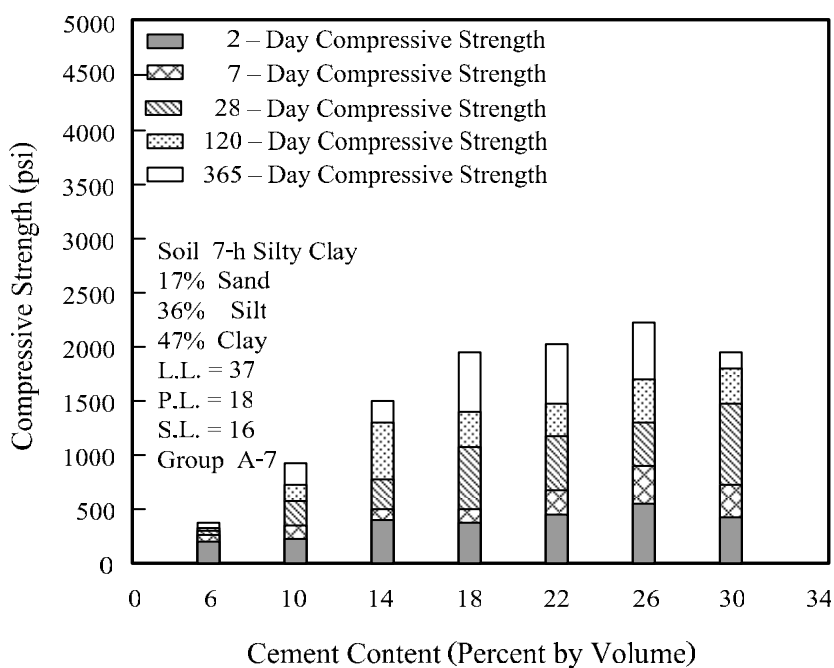
2.5 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

2.5.1 ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์ Ruenkairergsa (1982) อธิบายว่า ปัจจัยหลักที่มีต่อคุณภาพของดินซีเมนต์ คือ ปริมาณซีเมนต์ เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นกำลังอัดของดินซีเมนต์ก็จะเพิ่มขึ้น และอัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเบื้องต้นของดินด้วย โดยดินซีเมนต์ที่มีมวลเม็ดหยาบมากกว่าจะมีค่าเพิ่มสูงกว่าดินซีเมนต์ที่มีมวลเม็ดละเอียดกว่า

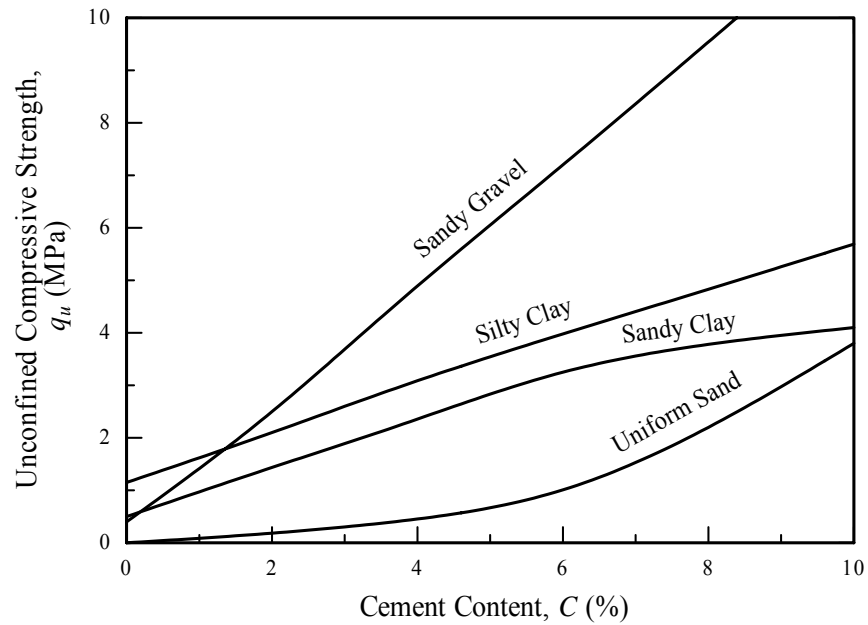
Felt (1955) ได้นำดิน Sandy Loam และ Silty Clay มาผสมกับซีเมนต์ โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ 6 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร นำมาทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 5 ค่า ตั้งแต่ 2 วัน ถึง 1 ปี ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม และดินที่มีดินเหนียวในปริมาณสูงกว่าจะมีกำลังอัดต่ำกว่าดินที่มีดินเหนียวต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Metcalf (1977) ซึ่งสรุปว่า ปริมาณซีเมนต์มีผลโดยตรงกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ โดยเฉพาะกับดินเม็ดหยาบ โดยกำลังอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ แต่สัดส่วนการเพิ่มจะแตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของดิน ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ Felt (1955) ยังได้ทดลองหาอิทธิพลของซีเมนต์ประเภทหนึ่ง และซีเมนต์ประเภทสามต่อกำลังอัดของดินสองชนิด คือ Sandy Loam และ Silty Clay Loam ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.5 และสรุปว่า ดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทสามมีกำลังอัดสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มเดียวกัน



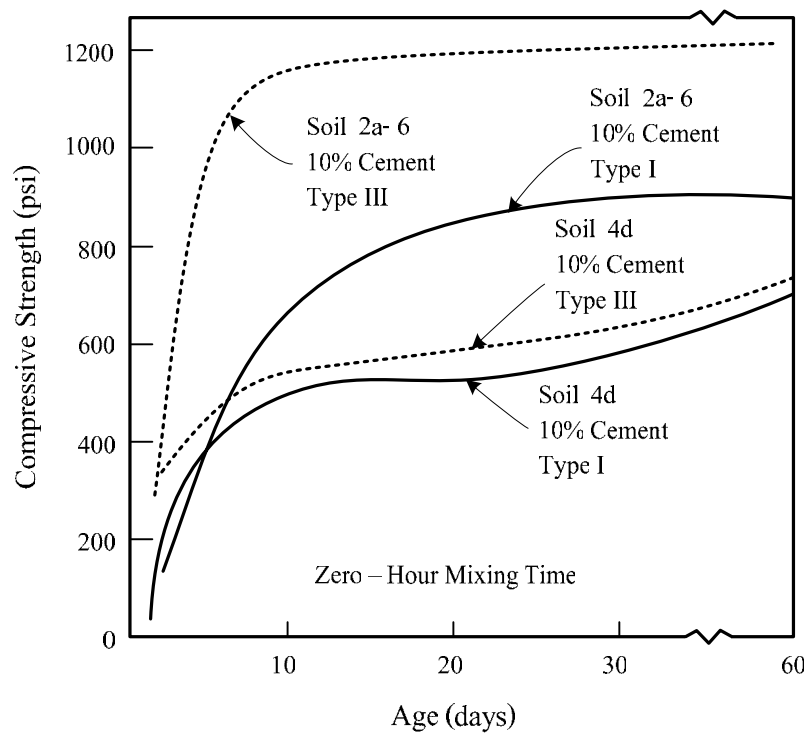
รูปที่ 2.2 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Felt, 1955)



รูปที่ 2.3 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay (Felt, 1955)

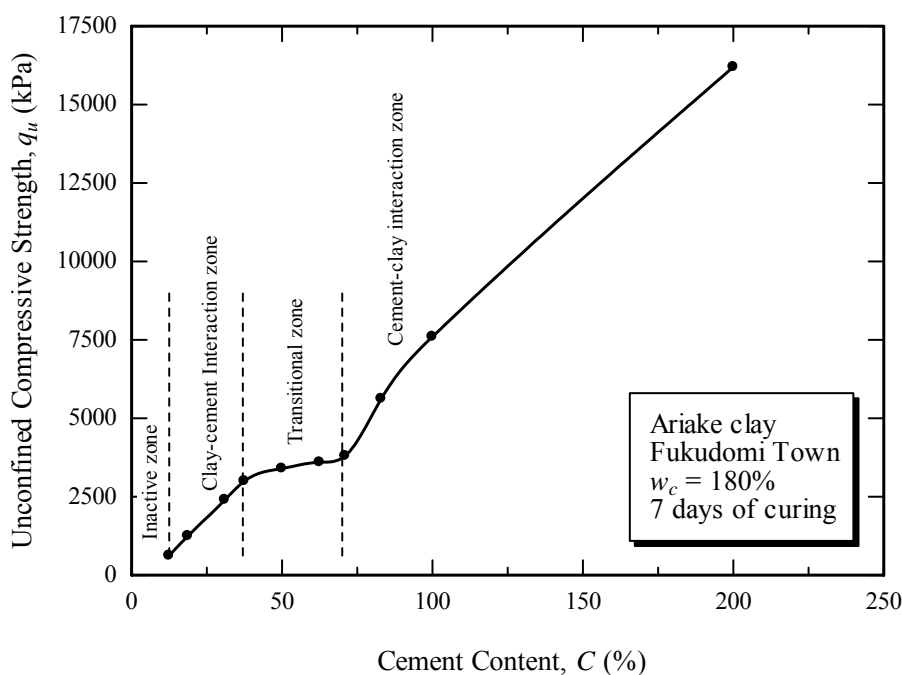


รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์ (Metcalf, 1977)



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Soil 2a-6) และ Silty Clay Loam (Soil 4d) ผสมซีเมนต์ประเภท 1 และประเภท 3 เมื่อผสมเสร็จแล้วทดสอบทันที (Felt, 1955)

Horpibulsuk et al. (2003) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง และพบว่าสำหรับดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินตัวอย่างแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 กราฟของกำลังอัดแกนเดียว สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรกซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำๆ เรียกว่า Clay - cement interaction zone ในช่วงนี้กำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ ช่วงที่สองกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าค่อนข้างคงที่ โซนนี้เรียกว่า Transitional zone และถัดจากช่วงนี้ไปเป็น Cement - clay interaction zone ซึ่งกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าสูงขึ้นอีก นอกจากนี้ Horpibulsuk et al. (2003) ยังพบอีกว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay - water/cement ratio, w_c/C) เท่านั้น แต่การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือ ไม่ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำ และต้องการพลังงานการบดอัดเพื่อให้มวลดินรวมกันเป็นก้อนดินซีเมนต์



รูปที่ 2.6 ขอบเขตปฏิสัมพันธ์ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)

ทรงพล (2529) ได้ศึกษากำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัดด้วยพลังงานแบบมาตรฐาน และแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ปริมาณซีเมนต์ 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์

และอายุบ่ม โดยกำลังอัดจะมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุบ่ม 7 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มของกำลังอัดจะลดลง

ตารางที่ 2.1 กำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน (ทรงพล, 2529)

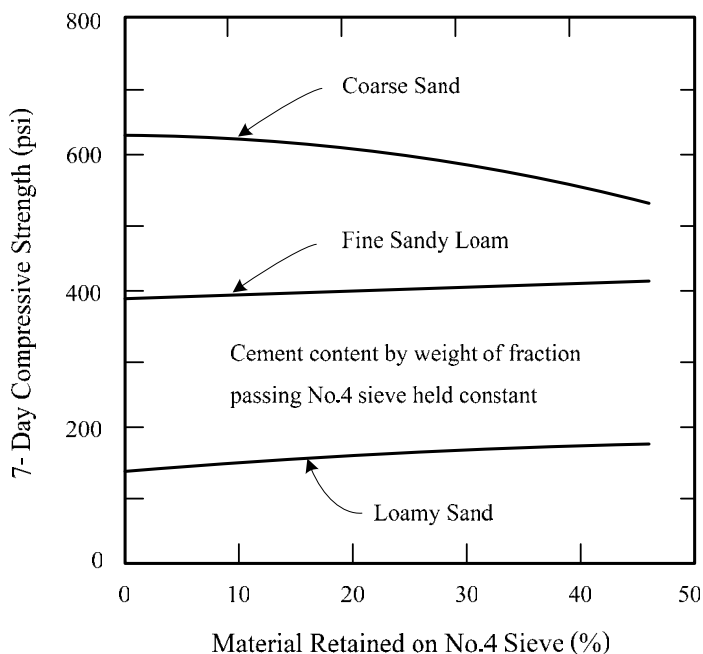
พลังงาน บดอัด	ปริมาณ ซีเมนต์, %	กำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน เทียบกับกำลังอัดของดินที่ไม่ผสมซีเมนต์, %				
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
มาตรฐาน	1	66	68	66	67	77
	3	240	333	544	603	725
	5	603	711	799	944	1252
	7	653	755	836	1100	1252
สูงกว่า มาตรฐาน	1	5	5	15	15	15
	3	7	100	112	145	220
	5	182	259	302	330	365
	7	254	348	382	445	557

2.5.2 คุณสมบัติของดิน แร่ธาตุที่ประกอบอยู่ในมวลดินตามธรรมชาติ หรือชนิดของดินมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมดินเข้ากับซีเมนต์และน้ำ และมีผลต่อกำลังอัดและความคงทนของดินซีเมนต์ ส่วนประกอบเหล่านี้ได้แก่ ดินจำพวก ทราย, ดินตะกอน, ดินเหนียว และสารประกอบอินทรีย์ เป็นต้น

Winterkorn และ Chandrasekhar (1951) ได้รายงานผลการทดสอบกำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ว่าจะได้ผลดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณมวลเม็ดหยาบและปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน

Norling และ Peckard (1958) ได้ศึกษาอิทธิพลของมวลหยาบโดยใช้เปอร์เซ็นต์ที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ 3 ชนิด คือ ทรายหยาบ (Coarse Sand), ทรายละเอียดปนอินทรีย์สาร (Fine Sand Loam) และ ทรายปนอินทรีย์สาร (Loamy Sand) โดยผสมด้วยปริมาณซีเมนต์ที่เท่ากัน แต่เพิ่มปริมาณมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 แตกต่างกันไป ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.7 และพบว่า Loamy Sand และ Fine Sand Loam จะมีกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีของ Coarse Sand จะมีกำลังอัดลดลง แต่การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือ เป็นการศึกษากำลังอัดที่อัตราส่วนผสมของปริมาณน้ำต่อปริมาณ

ซีเมนต์ค่าเดียวเท่านั้น ซึ่งค่ากำลังอัดของดินทั้ง 3 ชนิด อาจแตกต่างกันถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์

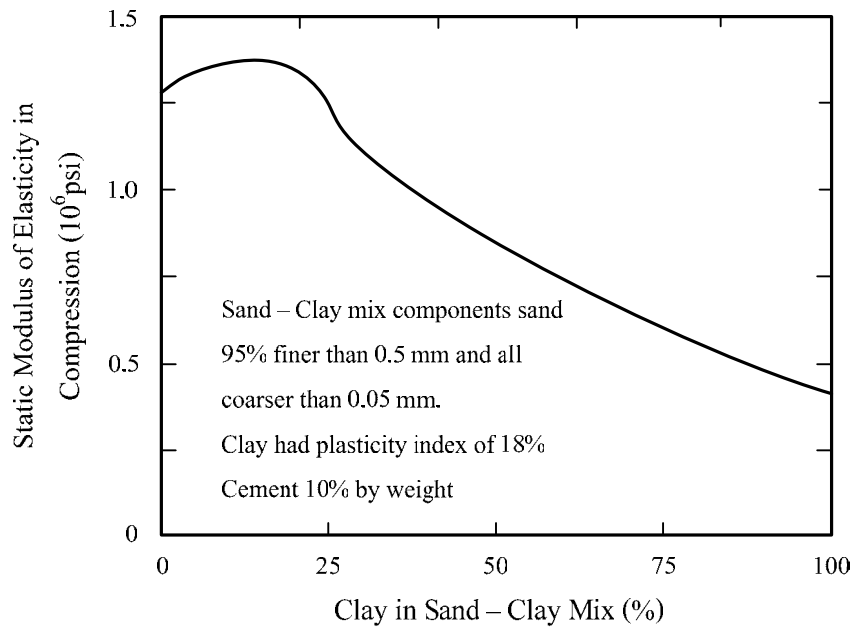


รูปที่ 2.7 อิทธิพลของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

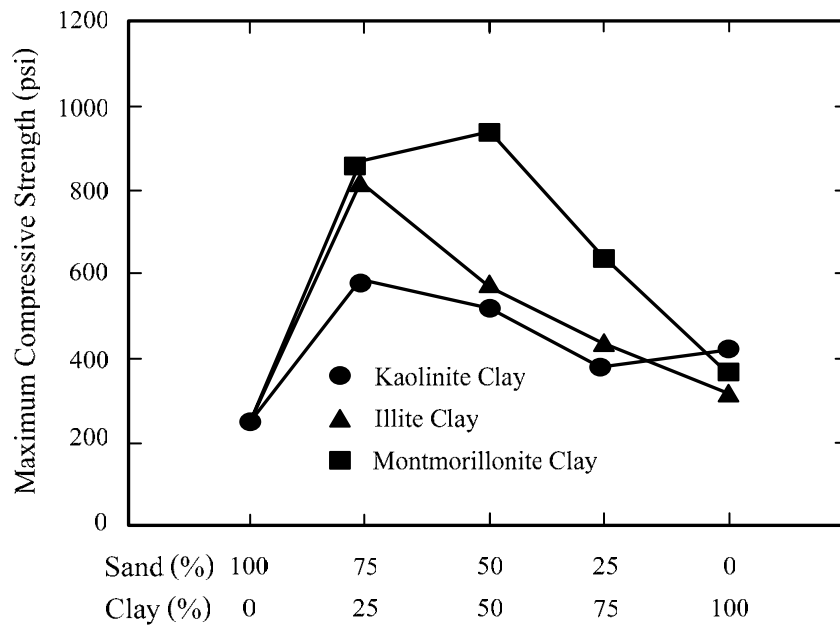
(Norling and Peckard, 1958)

2.5.3 ปริมาณดินเหนียวและชนิดของแร่ดินเหนียว Reinhold (1955) ได้นำเอาทรายมาผสมกับดินเหนียวและซีเมนต์ โดยเปลี่ยนปริมาณดินเหนียวที่ใช้ผสมตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของกำลังอัดกับปริมาณดินเหนียวที่ใช้ผสม ผลแสดงในรูปที่ 2.8 พบว่า เมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลง ซึ่งหมายความว่าค่ากำลังอัดก็จะลดลงด้วย

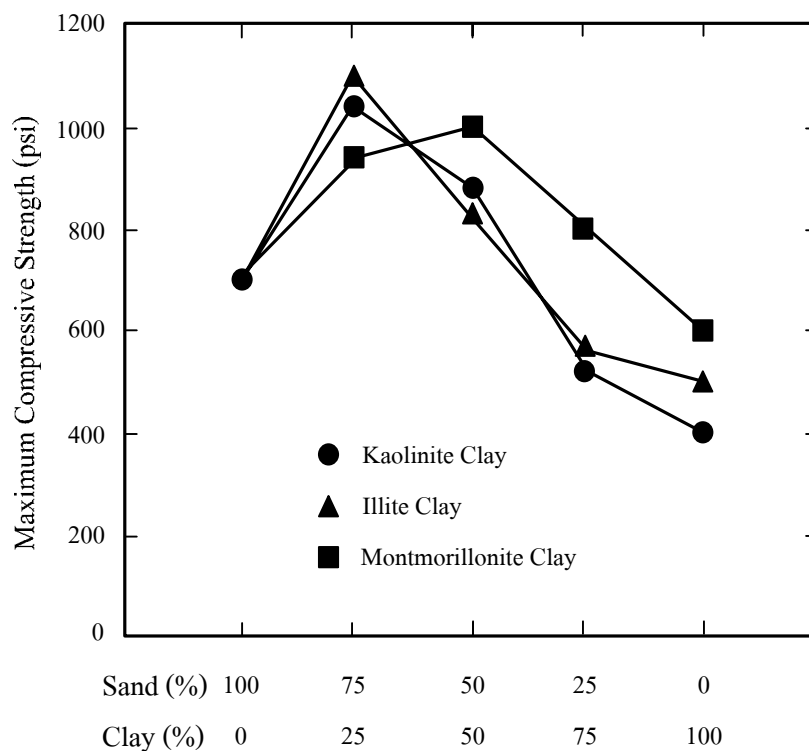
Davidson et al. (1962) ได้ศึกษากำลังอัดดินเหนียว 3 ชนิด คือ Kaolinite, Illite และ Montmorillonite ผสมกับทรายและซีเมนต์ โดยเพิ่มอัตราส่วนผสมของดินเหนียวที่ละ 25 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ ใช้อัตราส่วนทรายต่อดินเหนียวดังนี้ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, และ 0:100 ผลแสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10 พบว่า เมื่อปริมาณดินเหนียวมากเกินกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับดินพวก Cohesionless Soil จะทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ลดลงอย่างชัดเจน และดินเหนียวจำพวก Montmorillonite ยังให้ค่ากำลังอัดที่มีแนวโน้มสูงกว่าดินเหนียวจำพวก Kaolinite และ Illite



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อค่า Modulus of Elasticity ของดินซีเมนต์ (Reinhold, 1955)



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ (Davidson et al., 1962)

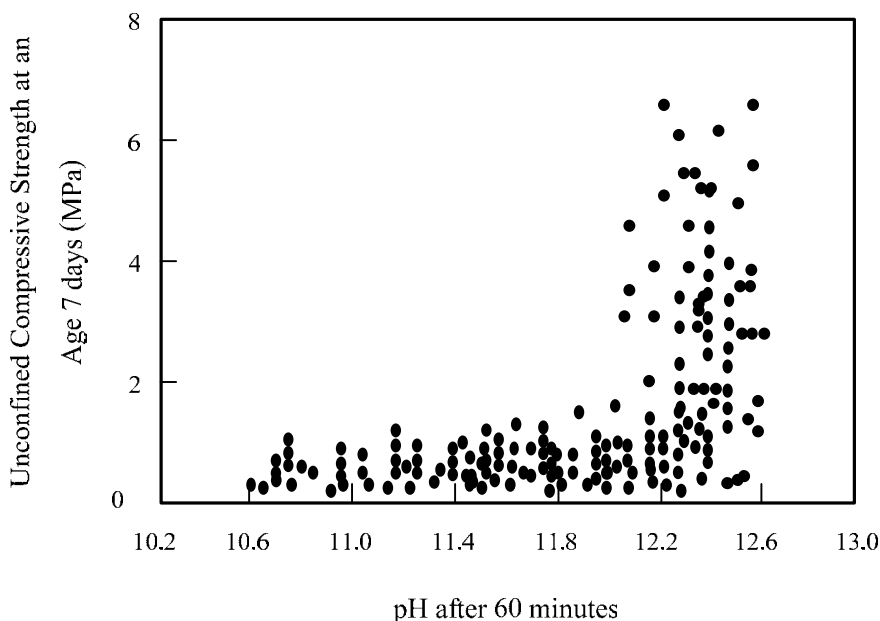


รูปที่ 2.10 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12 เปอร์เซ็นต์
(Davidson et al., 1962)

2.5.4 คุณสมบัติทางเคมีของดิน Davidson (1961) ได้รายงานว่า ส่วนประกอบทางเคมีของดินจะทำให้ดินทำปฏิกิริยากับซีเมนต์แตกต่างกัน และจะขึ้นอยู่กับประจุลบ (Cation) ที่มีอยู่ในอนุภาคของดิน โดยเฉพาะดินที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่จะทำให้ปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป เช่น เกิดการแข็งตัวช้า ส่วนดินที่มีสารซัลเฟตผสมอยู่จะเกิดการบวมตัวและทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

Terrel et al. (1979) อธิบายว่า ดินไม่ว่าจะมีสถานะเป็น กรด ค่าง และกลาง ยังมีความเหมาะสมที่จะนำมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการผสมซีเมนต์ สารอินทรีย์จำพวกที่ย่อยสลายจากพืช อาจจะไม่มมีผลต่อการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ แต่ถ้าเป็นพวกสารประกอบอินทรีย์ เช่น กรด Nucleic และ กรด Dextrose จะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน และกำลังอัดที่ได้จะลดลง

Sherwood (1958) ได้ศึกษาอิทธิพลของสารอินทรีย์ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่า pH ของดินซีเมนต์ที่ได้จากการผสมดินและซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:10 ดังแสดงในรูปที่ 2.11 พบว่า ถ้าค่า pH ต่ำกว่า 12.1 แสดงว่าดินที่นำมาใช้ผสมมีสารอินทรีย์ผสมอยู่จึงทำให้ดินซีเมนต์แข็งตัวช้า และเป็นผลทำให้กำลังอัดลดลงเมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ที่เท่ากัน

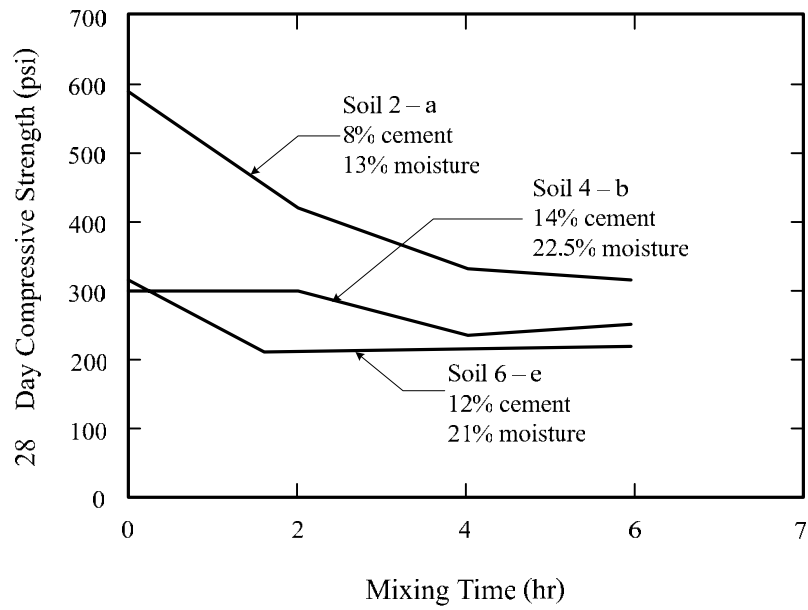


รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่า pH ของดินผสมซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:10 (Sherwood, 1958)

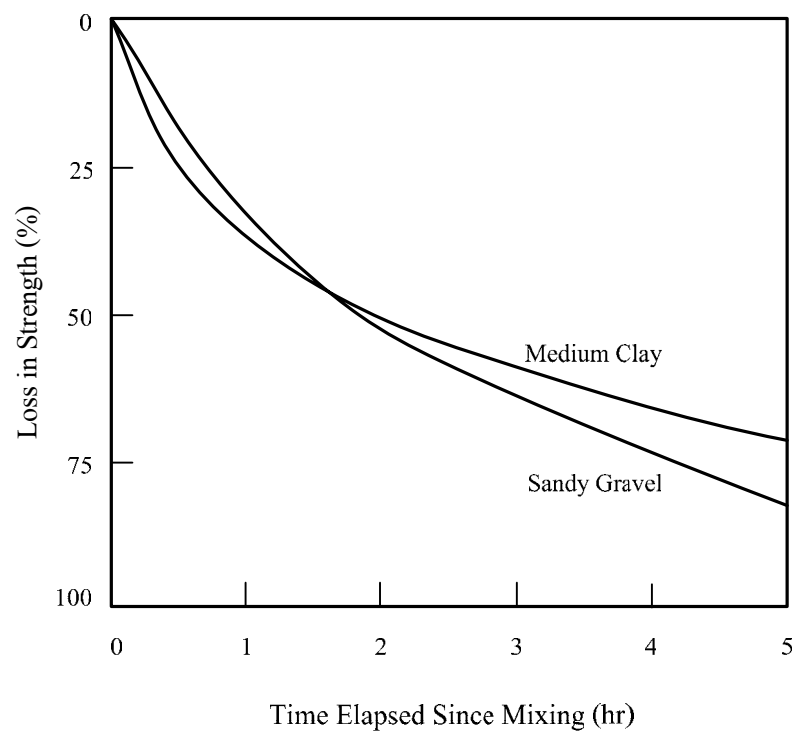
2.5.5 การผสมและการบดอัด

2.5.5.1 ระยะเวลาในการผสม Felt (1955) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการหน่วงเวลาในการผสมดินกับซีเมนต์ให้นานขึ้น และหยุดผสม ที่มีผลต่อกำลังอัดของดิน 3 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A - 2 Sandy Loam ($LL = 26, PI = 11$) ดินกลุ่ม A - 4 Silty Clay Loam ($LL = 35, PI = 12$) และดินกลุ่ม A - 6 - 7 Clay ($LL = 47, PI = 26$) ความสัมพันธ์ของผลการทดสอบระหว่างการหน่วงเวลาผสมให้ช้าลงกับกำลังอัด แสดงในรูปที่ 2.12 พบว่า ดินทั้งสามชนิดมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อการหน่วงเวลาในการผสมแบบทิ้งไว้นานขึ้น และการหน่วงเวลาในการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราวที่ใช้เวลานานขึ้นมีผลเสียน้อยกว่าการหยุดผสมเลย

Ingles และ Metcalf (1972) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่ใช้ผสมดินซีเมนต์ โดยใช้ดิน 2 ชนิด คือ ดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) และ ทรายปนกรวด (Sandy Gravel) ผลแสดงในรูปที่ 2.13 พบว่า ถ้าระยะเวลาในการผสมที่นาน 1 ถึง 2 ชั่วโมง กำลังอัดของดินเหนียวแข็งปานกลาง และทรายปนกรวด จะลดลงมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าใช้เวลาในการผสมนานกว่า 2 ชั่วโมง ขึ้นไป เปอร์เซ็นต์การลดลงของกำลังอัดในดินทรายปนกรวดจะมากกว่าดินเหนียวแข็งปานกลางเล็กน้อย



รูปที่ 2.12 ผลของระยะเวลาที่ใช้ผสมต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Felt, 1955)

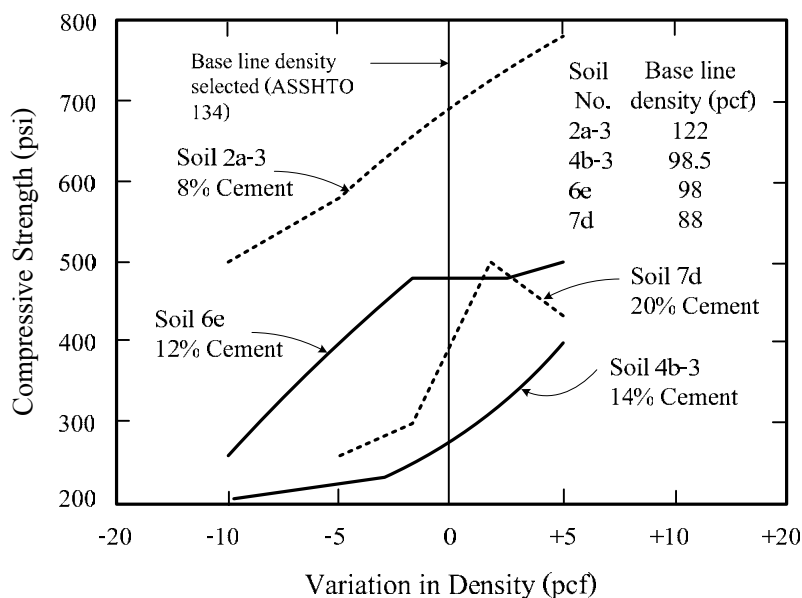


รูปที่ 2.13 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้ระยะเวลาการบดอัดนานขึ้น (Ingles and Metcalf, 1972)

2.5.5.2 ปริมาณน้ำในมวลดิน Felt (1955) and Davidson et al. (1962) ทำการทดลองได้ผลตรงกันว่าปริมาณน้ำและความหนาแน่นมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทรายควรรบอัดให้อยู่ทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด ส่วนดินเหนียวต้องบดอัดให้อยู่ทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด

Davidson (1961) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเหมาะสมกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ กับดิน 6 ชนิด ได้แก่ ดินกลุ่ม A-2 (Sandy Loams), A-3 (Sands), A-4 (Silt and Loams), A-5 (Silt), A-6 (Medium Clays) และ A-7 (Heavy Clays) พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการผสมให้นานขึ้นหรือทำการบดอัดซ้ำจะมีผลทำให้ค่าปริมาณน้ำเหมาะสมเพิ่มขึ้นขณะเดียวกันความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลงและทำให้กำลังอัดลดลงด้วย

2.5.5.3 ความหนาแน่น Felt (1955) ได้ศึกษาดิน 4 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A - 2 Sandy Loam ($LL = 26, PI = 11$), A - 4 Silty Clay Loam ($LL = 35, PI = 12$), A - 6 - 7 Clay ($LL = 47, PI = 26$) และ A - 7 ($LL = 118, PI = 83$) มาทดสอบ เพื่อประเมินผลกำลังอัดจากความหนาแน่น โดยใช้การบดอัดแบบมาตรฐานตามมาตรฐาน ASSHTO กำหนดเป็นเส้นความหนาแน่นพื้นฐาน ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.14 พบว่า ทุกตัวอย่างการผสมเมื่อความหนาแน่นของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นด้วย



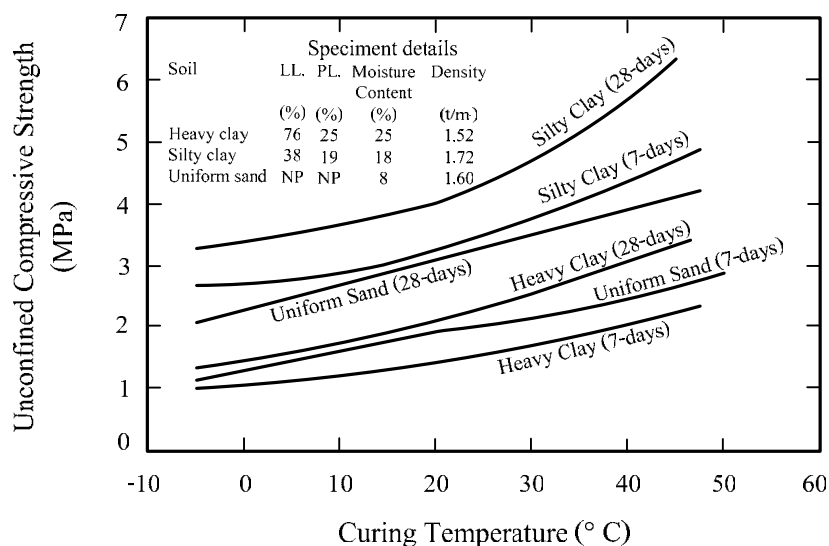
รูปที่ 2.14 อิทธิพลของความหนาแน่นต่อกำลังอัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (Felt, 1955)

2.5.6 การบ่ม Clare และ Pollard (1954) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ พบว่า งานก่อสร้างดินซีเมนต์ในระหว่างอากาศอบอุ่น จะให้กำลังอัดสูงกว่างานก่อสร้างที่มีลักษณะคล้ายกัน ในระหว่างอากาศหนาวเย็นกว่า 50 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่อายุบ่ม 3 เดือนแรก ภายหลังจากก่อสร้าง

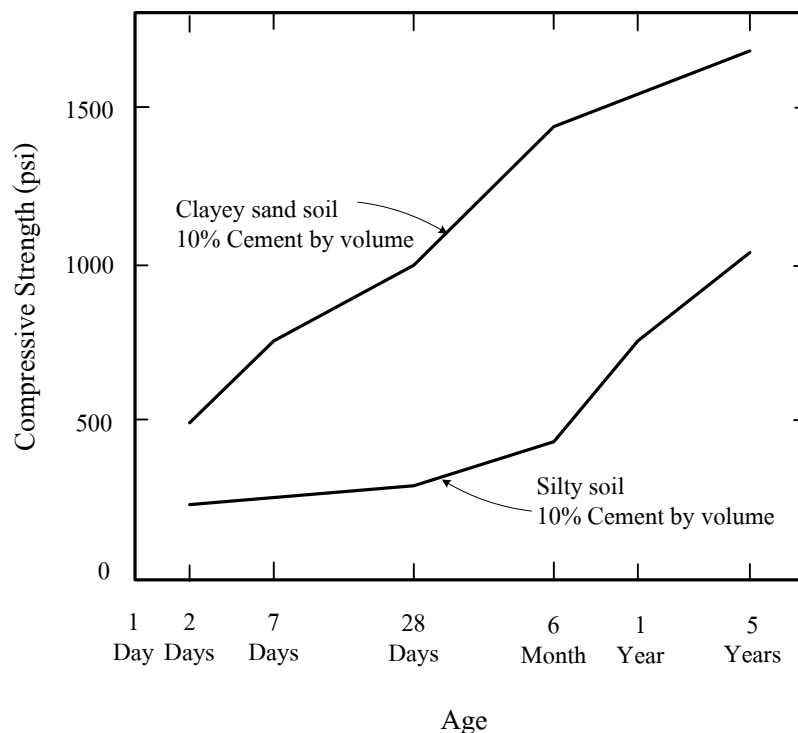
Ng (1966) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อดินลูกรัง 3 ชนิด ผสมซีเมนต์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 21 เป็น 38 องศาเซลเซียส กำลังอัดจะเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Clare และ Pollard (1954) ที่พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์แปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้บ่ม โดยให้เหตุผลว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำในมวลดิน ผลแสดงดังในรูปที่ 2.15

Leadabrand (1956) ได้ศึกษากำลังอัดของดิน 2 ชนิด คือ ดินเหนียวปนทราย (Clayey Sand) และดินตะกอน (Silt) ผสมกับซีเมนต์ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุบ่มตั้งแต่ 2 วัน ถึง 5 ปี พบว่า กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุบ่มคล้ายกับคอนกรีต ผลแสดงดังในรูปที่ 2.16

Maner (1952) ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุในการบ่มดิน โดยนำวัสดุต่างๆ ได้แก่ Waterproof Paper, RC-2 Asphalt, Tar และ Asphalt Emulsion มาบ่มดินซีเมนต์ที่ใช้เป็นชั้นรองพื้นทางพบว่า วัสดุที่มีส่วนผสมของดินน้ำมัน (Bituminous Materials) ทั้ง 3 ชนิด และ Waterproof Paper มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้บ่มดินซีเมนต์



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิที่ใช้บ่มดินซีเมนต์ (Clare and Pollard, 1954)

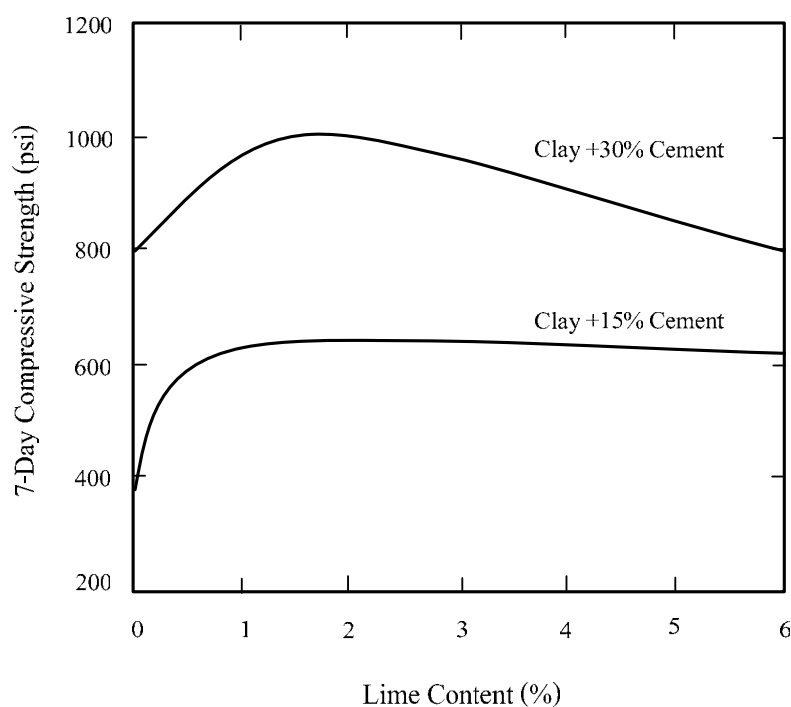


รูปที่ 2.16 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Leadabrand, 1956)

2.5.7 สารผสมร่วม Ruenkrairergsa (1982) ได้รายงานว่าจำนวนปูนขาวเพียงเล็กน้อยที่เพิ่มเข้าไปผสมในดินที่มีค่าดัชนีสภาพพลาสติกสูงก่อนที่จะผสมกับซีเมนต์จะช่วยลดค่าดัชนีสภาพพลาสติกของดินเดิมลงได้มาก และทำให้ดินผสมกับซีเมนต์ได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ปูนขาวที่เพิ่มเข้าไปจะช่วยลดอิทธิพลของสารอินทรีย์ที่จะมีผลต่อปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันได้อีกด้วย

Maclean et al. (1952) ได้นำดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวอยู่ระหว่าง 70 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ และค่าดัชนีสภาพพลาสติกอยู่ระหว่าง 45 ถึง 53 เปอร์เซ็นต์ มาทดลองผสมร่วมกับซีเมนต์โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์ระหว่าง 15 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มปูนขาวลงไปอีก 2 เปอร์เซ็นต์ ผลแสดงในรูปที่ 2.17 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น และสามารถต้านทานการสูญเสียกำลังเมื่อแช่น้ำได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าหากผสมปูนขาวมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ผลลัพธ์อาจเปลี่ยนแปลงไปได้

Lambe et al. (1959) ได้ทดลองนำสารประกอบจำพวกโซเดียม และเถ้าลอย (Fly - Ash) มาผสมร่วมกับดินและซีเมนต์ พบว่า การใช้สารประกอบจำพวกโซเดียมจะช่วยทำให้ดินซีเมนต์มีกำลังอัดและความคงทนเพิ่มขึ้น ส่วนเถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน ซึ่งจะทำการกำลังอัดของดินซีเมนต์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ เถ้าลอยยังช่วยลดปริมาณซีเมนต์ทำให้การก่อสร้างงานดินซีเมนต์มีราคาถูก



รูปที่ 2.17 อิทธิพลของปริมาณปูนขาวต่อกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์
(Maclean et al., 1952)

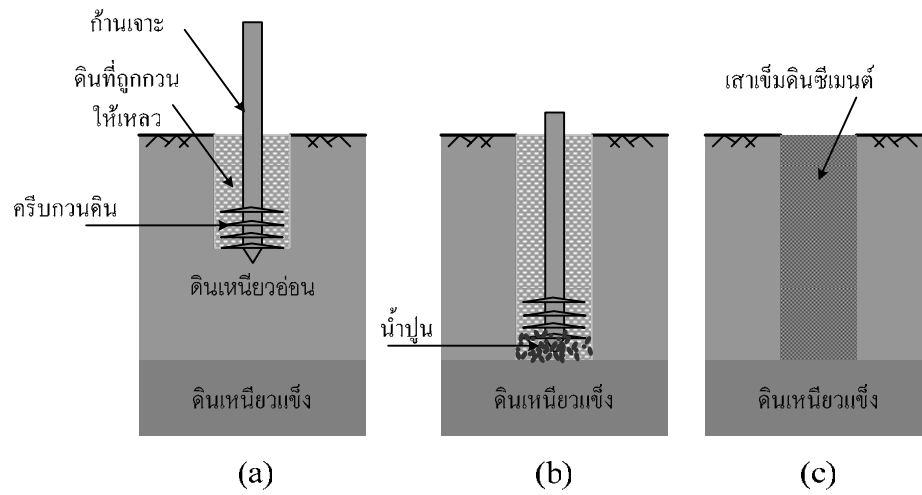
2.6 การปรับปรุงกำลังอัดแกนเดียวของดินด้วยซีเมนต์

โดยทั่วไปดินที่ต้องการนำมาปรับปรุงคุณภาพสามารถจำแนกออกได้เป็นสองประเภท ตามปริมาณน้ำในมวลดิน ดังนี้คือ ดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินใกล้เคียงหรือมากกว่าขีดจำกัดเหลวจัดว่าเป็นดินที่มีปริมาณน้ำสูง ส่วนดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินใกล้เคียงหรือน้อยกว่าขีดจำกัดพลาสติกจัดว่าเป็นดินที่มีปริมาณน้ำต่ำ (Miura et al., 2001)

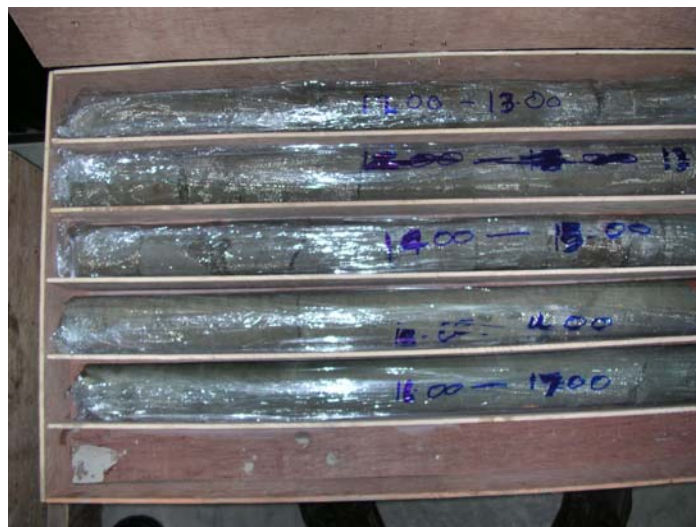
2.6.1 ดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง ในประเทศไทยการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูงด้วยเทคนิคผสมลึก (Deep Mixing Technique) เป็นที่นิยมแพร่หลายอย่างมากในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งมีชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 12 ถึง 15 เมตร เป็นวิธีเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนให้กับดินเหนียวอ่อน โดยพ่นน้ำปูน (Injection) ลงไปผสมกับดินที่ความลึกตามต้องการ รอนดินซีเมนต์แข็งตัวกลายเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil - Cement Column)

รูปที่ 2.18 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นดินอ่อน ชั้นแรกทำการเจาะดินด้วยก้านเจาะให้ถึงระดับความลึกของชั้นดินแข็ง ในระหว่างการเจาะดินเหนียวอ่อนจะถูกกววให้เหลวด้วยครีบทึ่ติดอยู่ปลายก้านเจาะ แสดงในรูปที่ 2.18(a) เมื่อเจาะดินจนถึงความลึกที่ต้องการทำการฉีดน้ำปูนผ่านรูก้านเจาะผสมกับดินพร้อมกับถอนก้านเจาะขึ้น แสดงในรูปที่ 2.18(b) รอน

ดินซีเมนต์แข็งตัวเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil - Cement Column) จึงจะสามารถใช้งานได้ แสดงดัง
 ในรูปที่ 2.18(c) กำลังต้านทานแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่งจะบ่งบอกอยู่ในรูป
 ของค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, q_u) ซึ่งได้จากการเจาะดินตัวอย่างมา
 ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างดินซีเมนต์สำหรับใช้ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

Horpibulsuk et al. (2005) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียว Ariake ที่มีค่า LI อยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 2.5 โดยนำดินผสมกับซีเมนต์ในปริมาณ 10 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุบ่มตั้งแต่ 7 ถึง 180 วัน พบว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ชนิดใดๆ ที่อายุบ่มค่าหนึ่งจะแปรผันเป็นปฏิภาคกลับกับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay - water/cement ratio, w/C) โดยกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ w/C ลดลง

Horpibulsuk et al. (2005) ได้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียว Ariake ผสมซีเมนต์กับอายุบ่ม ตั้งแต่อายุบ่ม 7 ถึง 180 วัน พบว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์มีค่าแปรผันเป็นปฏิภาคกลับกับ w/C และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม นอกจากนี้ Horpibulsuk et al. (2005) ยังได้รวบรวมข้อมูลการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียว Marine clays และ Inland clays กับอายุบ่ม เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ที่ใช้ได้กับดินเหนียวทุกชนิด โดยอาศัยแค่เพียงผลการทดสอบเดี่ยวที่อายุบ่ม 28 วัน สมการดังกล่าวมีประโยชน์ในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ดังกล่าวข้างต้น แต่สมการนี้ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือ ไม่สามารถนำมาใช้กับดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์ เนื่องจากสมการนี้พัฒนามาจากข้อมูลดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง การผสมซีเมนต์ลงไปดิน ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำและผลของปฏิกิริยาจะเกิดพันธะเชื่อมประสานกลุ่มของเม็ดดินเข้าด้วยกัน กลายเป็นวัสดุทางวิศวกรรมได้โดยไม่ต้องทำการบดอัดตรงกันข้าม ดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำจำพวกดินเม็ดหยาบที่ใช้สำหรับก่อสร้างถนน การที่จะทำให้กลุ่มเม็ดดินซีเมนต์รวมเป็นเนื้อเดียวกันกลายเป็นวัสดุทางวิศวกรรมได้จำเป็นต้องใช้พลังงานการบดอัด

2.6.2 ดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำ ปัจจุบันการก่อสร้างดินซีเมนต์ที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เช่น การก่อสร้างถนน เป็นต้น กรมทางหลวงใช้ค่ากำลังอัดแกนเดียวเป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบถนนดินซีเมนต์ ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดแกนเดียวของการปรับปรุงดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำ คือชนิดของดิน พลังงานการบดอัด ปริมาณน้ำ ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม

ธีระชาติ และสมบัติกระแสด (2544) ได้ศึกษากำลังอัดของดินลูกรังผสมกับซีเมนต์ โดยนำดินตัวอย่างมาผสมกับซีเมนต์ในปริมาณ 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง และบดอัดด้วยพลังงาน 4 ค่า ได้แก่ 292.2, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมเป็นปริมาณน้ำเหมาะสมของดินไม่ผสมซีเมนต์บดอัดในแต่ละพลังงาน ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า พลังงานการบดอัดมีอิทธิพลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ และที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมที่สอดคล้องกับพลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างจะแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม แต่การศึกษานี้ไม่ได้ครอบคลุมดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณ

น้ำสูงกว่าหรือต่ำกว่าปริมาณน้ำเหมาะสม และไม่สามารถทำนายกำลังอัดแกนเดียวเมื่อกำหนดพลังงานการบดอัด ปริมาณน้ำในมวลดิน ปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และชนิดของดินได้

จากข้อจำกัดทั้งการปรับปรุงดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง (Horpiulsuk et al., 2005) และการปรับปรุงดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำ (ธีระชาติ และสมบัติกระแสด, 2544) ดังกล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงคิดที่จะสร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด เมื่อแปรผันพลังงานการบดอัด ปริมาณน้ำ ปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และชนิดของดิน โดยนำหลักการอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (Horpiulsuk et al., 2005) มาใช้ร่วมกับพลังงานการบดอัด (ธีระชาติ และสมบัติกระแสด, 2544)

เนื่องจากกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและพลังงานการบดอัด และปริมาณน้ำเหมาะสม (ปริมาณน้ำที่ให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด) หาได้จากการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ ดังนั้นจึงต้องศึกษาการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์

สำหรับการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ นักวิจัยหลายท่าน อาทิเช่น Gurtug and Sridharan (2002) และ Pandian et al. (1997) ได้เสนอผลการบดอัดดินเม็ดละเอียด สรุปว่าปริมาณของดินเม็ดละเอียดในมวลดินเป็นปัจจัยที่ควบคุมปริมาณน้ำและหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_d) ของดินบดอัด มวลดินที่มีปริมาณดินเม็ดละเอียดมากจะให้ค่า OMC สูงกว่า และ $\gamma_{d,max}$ ต่ำกว่ามวลดินที่มีปริมาณดินเม็ดละเอียดน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะการบดอัดดินเม็ดละเอียดถูกควบคุมด้วยค่าขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติก ซึ่งตรงกับผลการทดลองของ Nagaraj and Bindumadhava (1992) ซึ่งพบว่าค่า OMC และ $\gamma_{d,max}$ ของดินเม็ดละเอียดบดอัดขึ้นกับค่าขีดจำกัดเหลว ซึ่งเกิดจากปริมาณของเหลวในช่องว่างระหว่างมวลดิน และแร่ดินเหนียว

Daniel and Benson (1990) และ Blotz et al. (1998) ได้ทำการบดอัดดินเม็ดละเอียดด้วยพลังงาน 3 ค่า ได้แก่ 292.2, 592.5 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเหมาะสมและพลังงานการบดอัดที่พล็อตบนกราฟกึ่งล็อกการิทึมของดินชนิดต่างๆ เป็นสมการเชิงเส้นตรง นอกจากนี้ Daniel and Benson (1990) และ Blotz et al. (1998) ยังพบอีกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและพลังงานการบดอัด ที่พล็อตบนกราฟกึ่งล็อกการิทึมของดินชนิดต่างๆ เป็นสมการเชิงเส้นตรงเช่นกัน

Nagaraj et al. (1994) และ Santucci De Magistris and Tatsuoka (2004) พบว่า สำหรับดินทุกชนิดที่บดอัดทางด้านแห้ง (ปริมาณน้ำน้อยกว่าปริมาณน้ำเหมาะสม) หน่วยน้ำหนักแห้งจะมีค่าแปรผันตามพลังงานการบดอัดและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation, S) แต่ตัวแปรทั้งสองจะมีอิทธิพลต่อหน่วยน้ำหนักแห้งที่บดอัดทางด้านเปียก (ปริมาณน้ำมากกว่าปริมาณน้ำเหมาะสม) น้อยมาก

Pandian et al. (1997) ได้เสนอแบบจำลองการบดอัดดินจากสังเกต (Phenomenological Model) ของดินเม็ดละเอียดที่มีค่าขีดจำกัดเหลวแตกต่างกันที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน โดยแบบจำลองการบดอัดมีลักษณะเป็นรูปตัววีกลับหัว (Inverted V Shape)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

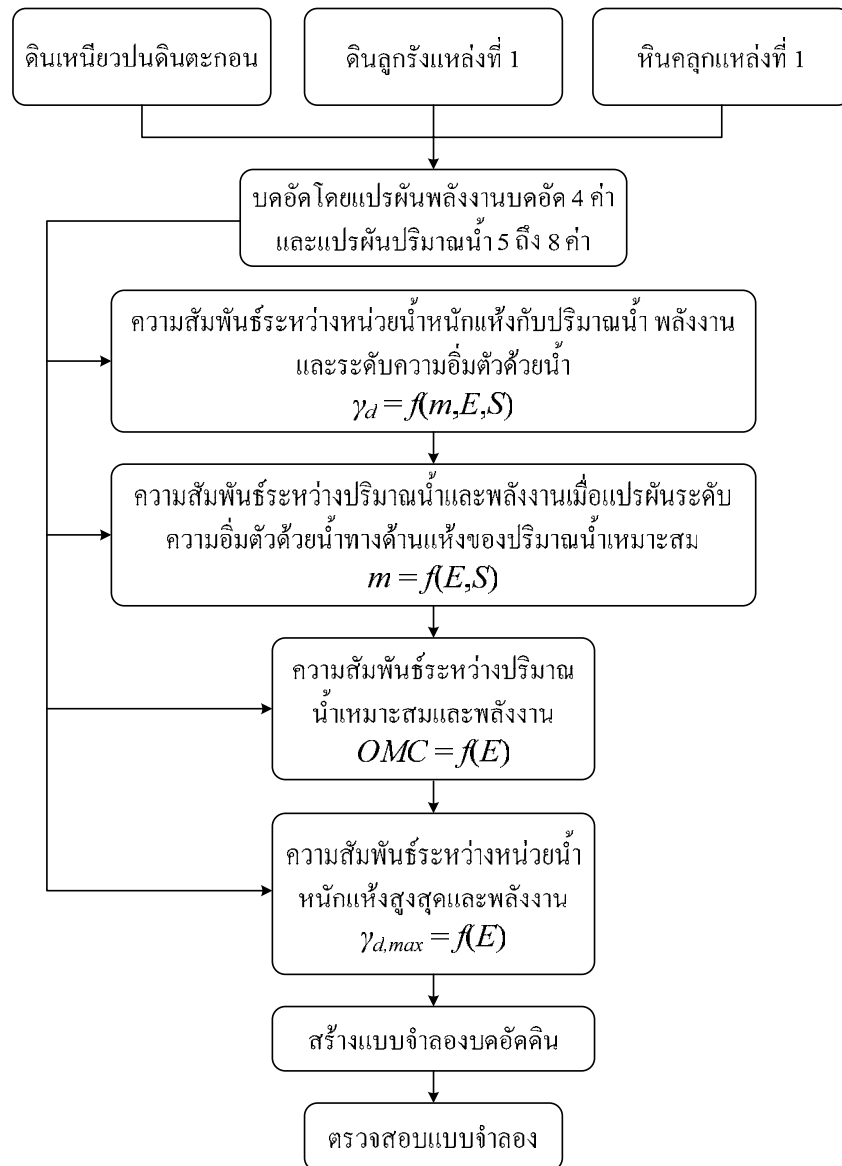
ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและขั้นตอนการสร้างสมการกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด และขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง จากนั้นจะเสนอวิธีบดอัดดินและวิธีหาค่ากำลังอัดแกนเดียว และเนื่องจากกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและพลังงานการบดอัด และปริมาณน้ำเหมาะสมหาได้จากการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ ดังนั้นจึงต้องศึกษาการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์

ดังนั้น แนวทางในการสร้างสมการกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด จะเริ่มด้วยการศึกษาการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ เพื่อให้ได้สมการหน่วยน้ำหนักแห้งในเทอมของปริมาณน้ำและพลังงานการบดอัด ผลการศึกษาในขั้นนี้จะให้ปริมาณน้ำเหมาะสม (ปริมาณน้ำที่ให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด) ซึ่งจะนำไปใช้ในการบดอัดดินผสมซีเมนต์ในขั้นที่สอง

3.1 การสร้างสมการหน่วยน้ำหนักแห้งของดินไม่ผสมซีเมนต์

จะศึกษาการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอน ดินลูกรังแหล่งที่ 1 และหินคลุกแหล่งที่ 1 โดยแปรผันปริมาณน้ำ 5 ถึง 8 ค่า และพลังงานการบดอัด 4 ค่า (296.3, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) และพล็อตกราฟของหน่วยน้ำหนักแห้งสัมพันธ์กับปริมาณน้ำ พลังงานการบดอัด และระดับความอึดตัวด้วยน้ำ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ จะใช้ข้อมูลจากผลทดสอบของผู้วิจัยร่วมกับข้อมูลจากนักวิจัยในอดีต ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณน้ำในมวลดินที่พลังงานการบดอัดต่างๆ ปริมาณน้ำในมวลดินและพลังงานการบดอัดที่ระดับความอึดตัวด้วยน้ำต่างๆ ปริมาณน้ำเหมาะสมกับพลังงานการบดอัด และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดกับพลังงานการบดอัด หลังจากนั้นจะทำการ Normalized ความสัมพันธ์ของตัวแปรการบดอัดต่างๆ เพื่อรวมอิทธิพลชนิดของดิน รายละเอียดต่างๆจะแสดงในหัวข้อ 4.1 แผนภาพขั้นตอนและการวิเคราะห์ แสดงในรูปที่ 3.1

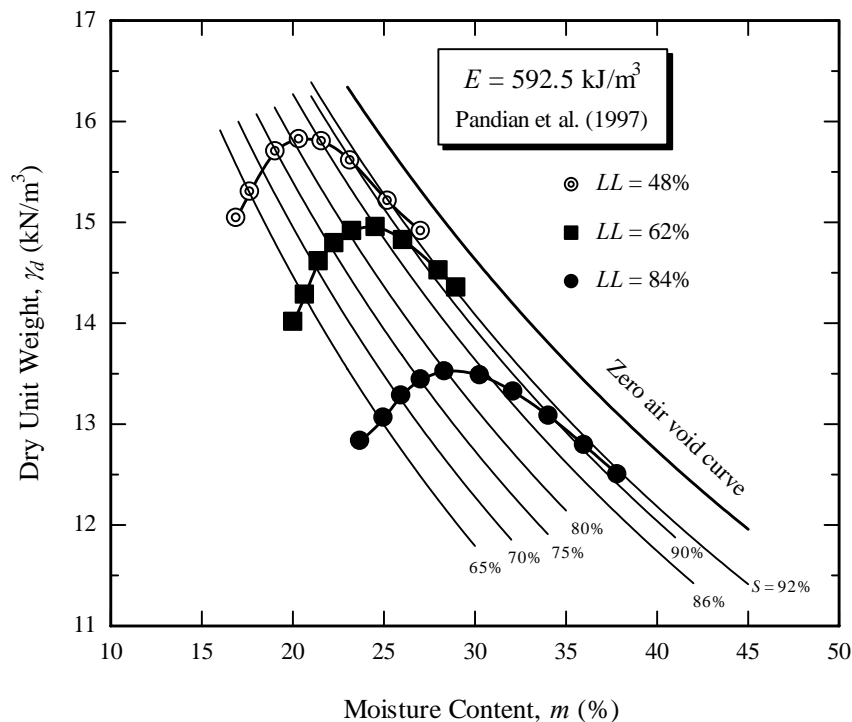
สำหรับการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ความถูกต้องของเส้นโค้งความสัมพันธ์จะพิจารณาจากค่า Degree of Correlation, $|r|$



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนและการวิเคราะห์ดินบดอัดไม่ผสมซีเมนต์

3.1.1 ความเข้าใจปัญหาและแนวทางการวิจัยที่เลือก สำหรับกราฟการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ Nagaraj et al. (1994) และ Santucci De Magistris and Tatsuoka (2004) พบว่า สำหรับดินทุกชนิดที่บดอัดทางด้านแห้ง (ปริมาณน้ำน้อยกว่าปริมาณน้ำเหมาะสม) หน่วยน้ำหนักแห้งจะมีค่าแปรผันตามพลังงานการบดอัดและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation, S) แต่หน่วยน้ำหนักแห้งที่บดอัดทางด้านเปียก (ปริมาณน้ำมากกว่าปริมาณน้ำเหมาะสม) จะแปรผันตามพลังงานการบดอัด แต่จะแปรผันเป็นปฏิภาคกลับกับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยเส้นกราฟที่บดอัดด้านเปียกของพลังงานต่างๆ จะเป็นเส้นโค้งที่ต่อเนื่องกันและต่อกันที่จุดเหมาะสม

Pandian et al. (1997) ทำการบดอัดดินเม็ดละเอียดที่มีค่าขีดจำกัดเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิด ด้วยพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (592.5 kJ/m^3) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และสรุปว่า ปริมาณของดินเม็ดละเอียดในมวลดินเป็นปัจจัยที่ควบคุมปริมาณน้ำและหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัด มวลดินที่มีปริมาณดินเม็ดละเอียดมากจะให้ค่า OMC สูงกว่า และ $\gamma_{d,max}$ ต่ำกว่ามวลดินที่มีปริมาณดินเม็ดละเอียดน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะการบดอัดดินเม็ดละเอียดถูกควบคุมด้วยค่าขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติก



รูปที่ 3.2 ผลทดสอบการบดอัดดินเม็ดละเอียดที่มีขีดจำกัดเหลวแตกต่างกัน ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Pandian et al., 1997)

นอกจากนี้ Pandian et al. (1997) ยังพบอีกว่า ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำค่าหนึ่ง ปริมาณน้ำในมวลดินมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับขีดจำกัดเหลวเมื่อพล็อตบนกราฟสเกลปกติ ผลแสดงดังในรูปที่ 3.3 เมื่อ Normalization โดยหารปริมาณน้ำด้วยระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่า ตัวแปร $m/S^{0.5}$ สำหรับการบดอัดทางด้านแห้งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับขีดจำกัดเหลว ดังสมการที่ 3.1

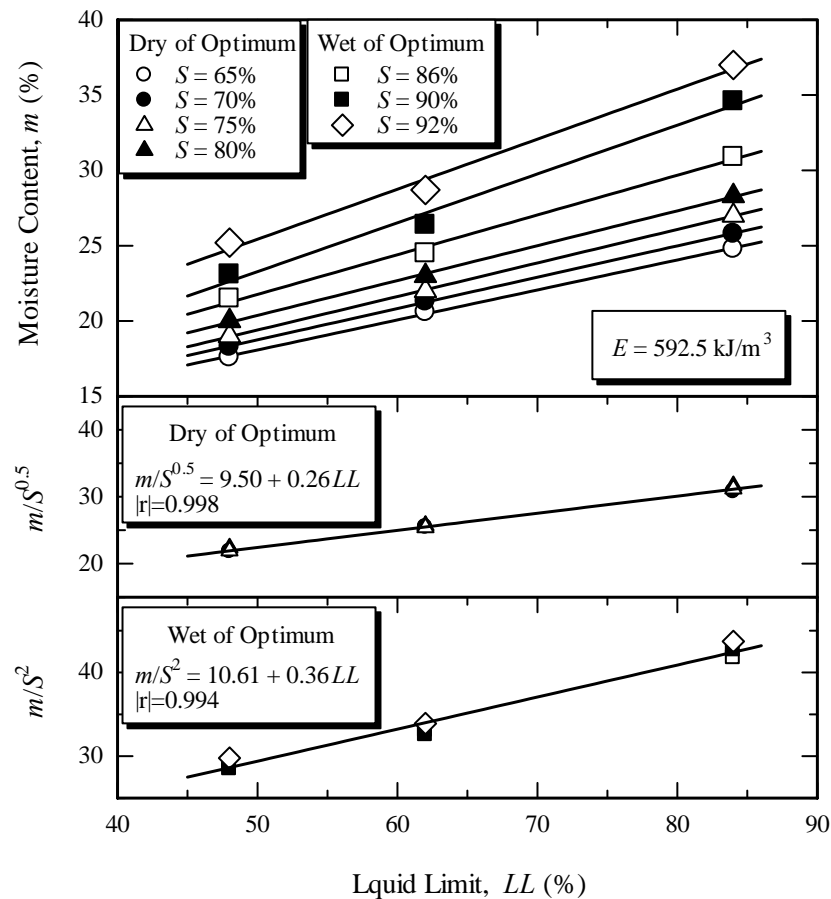
$$\frac{m}{S^{0.5}} = 9.50 + 0.26LL \quad (3.1)$$

เมื่อ m คือ ปริมาณน้ำในมวลดินมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ และ S คือระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเป็นจุดทัศนียม

ทำนองเดียวกัน ตัวแปร m/S^2 ที่บดอัดทางด้านเปียกจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับขีดจำกัดเหลว ดังสมการที่ 3.2

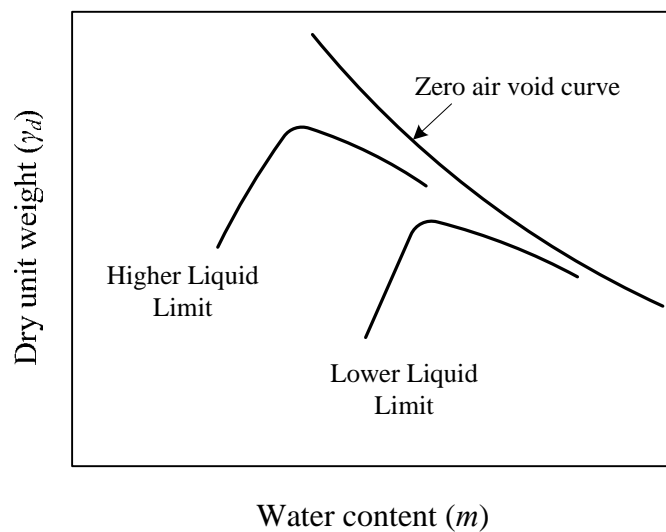
$$\frac{m}{S^2} = 10.61 + 0.36LL \quad (3.2)$$

สมการที่ 3.1 และ 3.2 ให้กราฟการบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานของดินเม็ดละเอียดชนิดใดๆ โดยทราบเพียงค่าขีดจำกัดเหลว



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ตัวแปร $m/S^{0.5}$ และ m/S^2 และขีดจำกัดเหลวของดินเม็ดละเอียด 3 ชนิด ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Pandian et al., 1997)

Pandian et al. (1997) เสนอกราฟการบดอัดดินจากสังเกต (Phenomenological Model) ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน โดยเส้นกราฟการบดอัดทางด้านแห้งได้จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $m/S^{0.5}$ และขีดจำกัดเหลว ตามสมการที่ 3.1 ส่วนเส้นกราฟการบดอัดทางด้านเปียกได้จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร m/S^2 และขีดจำกัดเหลว ตามสมการที่ 3.2 ส่วนจุดเหมาะสม (จุดที่ให้ค่าปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด) เป็นจุดที่เส้นกราฟทั้งสองตัดกันแบบจำลองกราฟการบดอัดที่เสนอจึงเป็นรูปตัววีกลับหัว (Inverted V Shape) แสดงดังในรูปที่ 3.4



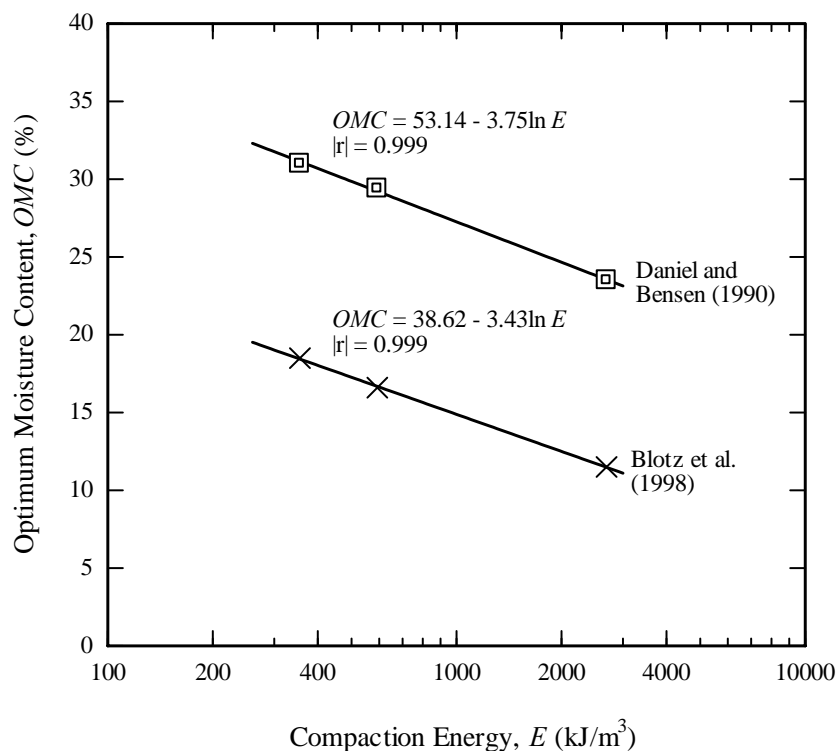
รูปที่ 3.4 กราฟการบดอัดรูปตัววีกลับหัว (Inverted V Shape) ของดินเม็ดละเอียดที่มีขีดจำกัดเหลวแตกต่างกัน ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (Pandian et al., 1997)

ถึงแม้ว่าจะมีแบบจำลองการบดอัดดินแล้วก็ตาม (Pandian et al., 1997) แต่แบบจำลองนี้ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือ ไม่สามารถใช้ได้กับพลังงานการบดอัดค่าอื่นๆ นอกเหนือจากพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน นอกจากนี้ กราฟการบดอัดดินดังกล่าวยังใช้ได้เฉพาะกับดินเม็ดละเอียดที่มีค่าสภาพความเป็นพลาสติกเท่านั้น ในงานก่อสร้างที่ดินฐานรากต้องรับน้ำหนักบรรทุกสูงๆ จึงมีความจำเป็นต้องทำการบดอัดดินด้วยพลังงานการบดอัดที่สูงขึ้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะเสนอกราฟการบดอัดดินที่รวมเทอมของพลังงานการบดอัดด้วย และสามารถใช้ได้ทั้งกับดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด

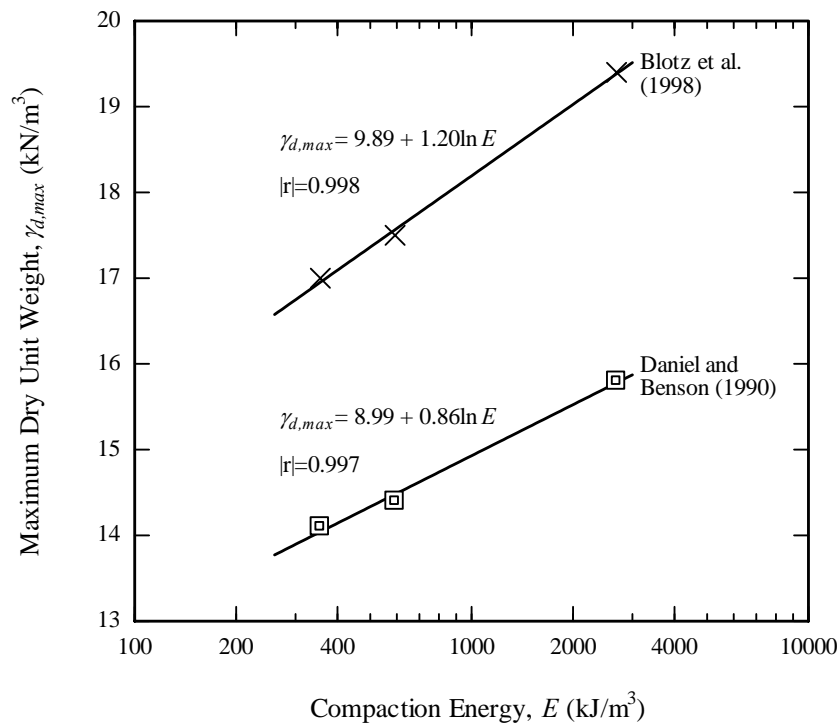
การวิเคราะห์จะพิจารณาแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กราฟการบดอัดทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม กรณีกราฟการบดอัดทางด้านแห้ง เนื่องจากพลังงานการบดอัดเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อหน่วยน้ำหนักแห้งนอกเหนือจากขีดจำกัดเหลว

(Nagaraj et al., 1994; Santucci De Magistris and Tatsuoka, 2004 และ Pandian et al., 1997) ดังนั้น ตัวแปร $m/S^{0.5}$ จึงน่าจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับพลังงานการบดอัดเช่นเดียวกับขีดจำกัดเหลว และกราฟการบดอัดทางด้านเปียก เนื่องจากเส้นกราฟที่บดอัดด้านเปียกของพลังงานต่างๆจะเป็นเส้น โค้งที่ต่อเนื่องกันและต่อกันที่จุดเหมาะสม (Nagaraj et al., 1994; Santucci De Magistris and Tatsuoka, 2004) ดังนั้น ถ้าทราบจุดเหมาะสมของพลังงานการบดอัดต่างๆ ก็จะสามารถสร้างกราฟการบดอัดได้ทันที

Daniel and Benson (1990) และ Blotz et al. (1998) ได้ทำการบดอัดดินเม็ดละเอียดด้วยพลังงาน 3 ค่า ได้แก่ 292.2, 592.5, และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเหมาะสม และพลังงานการบดอัดที่พล็อตบนกราฟกึ่งล็อกการิทึม เป็นสมการเชิงเส้นตรง ดังในรูปที่ 3.5 นอกจากนี้ Daniel and Benson (1990) และ Blotz et al. (1998) ยังพบอีกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และพลังงานการบดอัดที่พล็อตบนกราฟกึ่งล็อกการิทึม เป็นสมการเชิงเส้นตรงเช่นกัน ดังในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง OMC และพลังงานการบดอัด (ข้อมูลนักวิจัยอื่น)



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\gamma_{d,max}$ และพลังงานการบดอัด (ข้อมูลนักวิจัยอื่น)

จากรูปที่ 3.5 และ 3.6 ถึงแม้ว่า ปริมาณน้ำเหมาะสม หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และพลังงานการบดอัด จะมีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรง แต่ก็ยังไม่สามารถใช้กับดินชนิดอื่นได้ นอกเหนือจากดินที่ทำการทดสอบ เนื่องจากปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด เป็นคุณสมบัติเฉพาะสำหรับดินชนิดหนึ่งๆเท่านั้น นอกจากนี้ ปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินชนิดหนึ่งๆขึ้นอยู่กับพลังงานการบดอัด (Nagaraj et al., 1994; Santucci De Magistris and Tatsuoka, 2004) ดังนั้น ผู้วิจัยคิดว่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำเหมาะสมที่พลังงานการบดอัดใดๆ และปริมาณน้ำเหมาะสมที่พลังงานการบดอัดอ้างอิงค่าหนึ่ง น่าจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับพลังงานการบดอัด และทำนองเดียวกัน อัตราส่วนของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดก็น่าจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับพลังงานการบดอัดเช่นกัน และจะเป็นประโยชน์อย่างมากถ้าสามารถทำให้การหาจุดเหมาะสมสามารถใช้ได้กับดินทุกชนิด ดังนั้น ผู้วิจัยจะตรวจสอบแนวคิดดังกล่าวกับดินที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันทั้งขนาดและค่าความเป็นพลาสติก และข้อมูลของ Daniel and Benson (1990) และ Blotz et al. (1998)

จากแนวคิดกราฟการบดอัดในเทอมของพลังงานการบดอัดทั้งด้านแห้งและด้านเปียก ดังกล่าวข้างต้น เส้นกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่งจะคล้ายรูปตัววีกลับหัว (Invert V Shape)

3.1.2 วิธีการวิจัย ดินตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์มี 3 ชนิด ซึ่งครอบคลุมทั้งดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ ได้แก่ ดินเหนียวปนดินตะกอนเป็นดินภายในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ที่ความลึก 3 เมตรจากระดับผิวดิน มีค่าความเป็นพลาสติกปานกลาง ดินลูกรังแหล่งที่ 1 เป็นดินจากบ่อขุดจังหวัดเพชรบูรณ์ ที่ความลึกประมาณ 3 เมตร ดินตัวอย่างมีสีน้ำตาลออกสีแดง และมีค่าความเป็นพลาสติกปานกลาง และหินคลุกแหล่งที่ 1 เป็นดินจากสำนักทางหลวงที่ 8 จังหวัด เพชรบูรณ์ มีสีเทาดำและไม่มีค่าสภาพพลาสติก (Non - Plasticity) ดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด จะถูกนำมาหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมต่างๆในห้องปฏิบัติการ ดังต่อไปนี้

1) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) การหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กลงกว่า 4.75 มิลลิเมตร) ทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM D 854

2) การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) ทดสอบโดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบล้าง ตามมาตรฐานของ ASTM D 422

3) การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM D 422 - 63

4) การหาค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, *LL*) ทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM D 4318

5) การหาค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, *PL*) ทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM D 4318

3.1.3 การบดอัดดิน ดินทั้ง 3 ชนิด จะบดอัดโดยใช้พลังงานการบดอัด 4 ค่า คือ 296.3, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเทียบเท่ากับพลังงานการบดอัดที่ครั้งหนึ่งของพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (E_1) พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (E_2) ครึ่งหนึ่งของพลังงานการบดอัดที่สูงกว่าแบบมาตรฐาน (E_3) และพลังงานการบดอัดที่สูงกว่าแบบมาตรฐาน (E_4) ตามลำดับ รูปแบบการบดอัดและพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน แสดงในตารางที่ 3.1 แบบหล่อ (Mould) ที่ใช้ทดสอบทุกรูปแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร สูง 116.8 มิลลิเมตร ตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดจะถูกนำมาผึ่งให้แห้งในอากาศอย่างน้อย 3 วัน แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 19.0 มิลลิเมตร เพื่อขจัดส่วนผสมที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความไม่เหมาะสมทางด้านขนาดของวัสดุทดสอบ (Size Effect) จากนั้นหาปริมาณความชื้นของดินผึ่งแห้ง และเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทำการบดอัด โดยที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่งจะแปรผันปริมาณน้ำ 5 ถึง 6 ค่า โดยเติมน้ำใส่ดินตัวอย่างและห่อเก็บไว้ในถุงพลาสติก เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำในดินตัวอย่างแผ่กระจายทั่วถึงกัน จากนั้นวัดปริมาณน้ำของดินเปียกและทำการบดอัด โดยที่พลังงานการบดอัดและปริมาณน้ำค่าหนึ่งใช้ดิน 3 ตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบความสอดคล้อง (Consistency) ของผล

ตารางที่ 3.1 รูปแบบการบดอัดและพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน

Compaction Energy	Weight of Hammer (N)	Number of Layer	Number of Blows/Layer	Height of Hammer drop (m)	Energy per Volume (kJ/m ³)
E_1	24.46	3	13	0.3048	296.3
E_2	24.46	3	25	0.3048	592.5
E_3	44.48	5	13	0.4572	1346.6
E_4	44.48	5	25	0.4572	2693.3

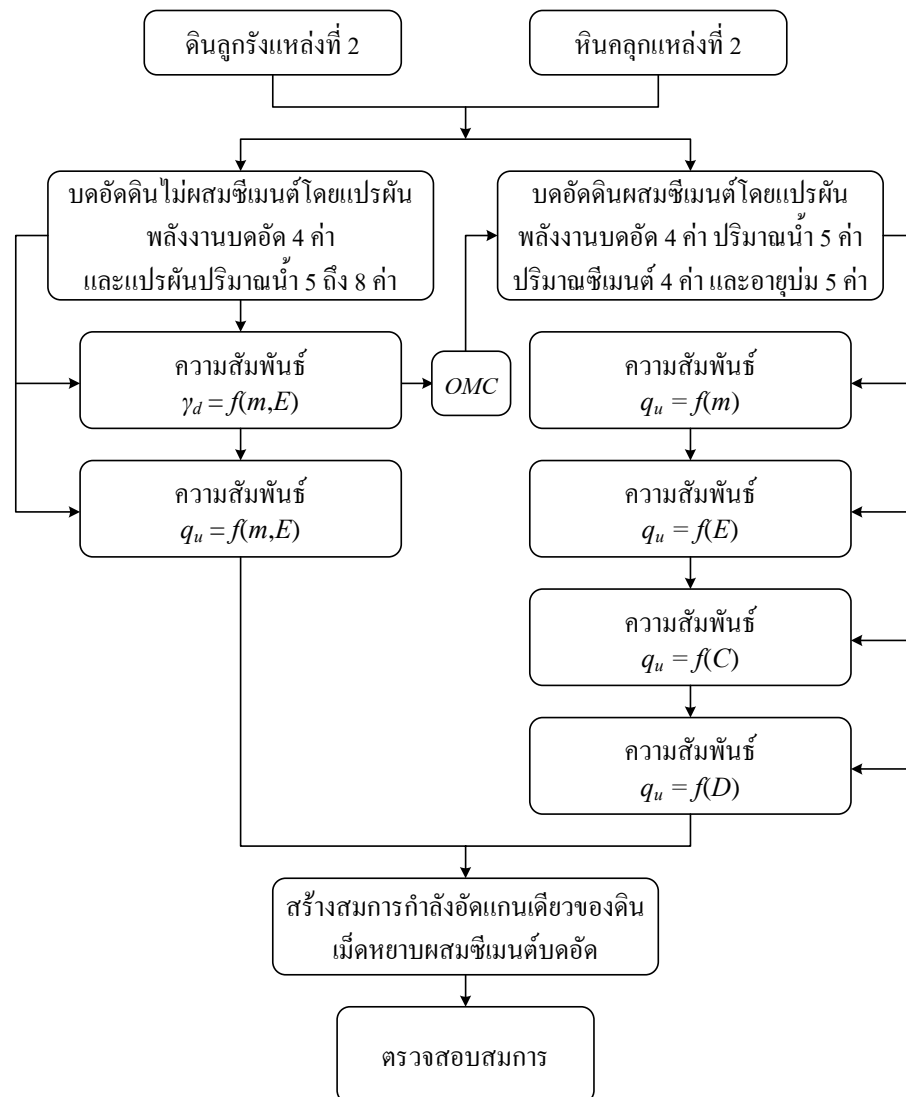
3.1.4 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร การวิเคราะห์กราฟของความสัมพันธ์ต่างๆ ตามแนวทางที่เลือกในหัวข้อ 3.1 (รูปที่ 3.1) ความถูกต้องของเส้นโค้งความสัมพันธ์ต่างๆจะต้องมีค่า Degree of Correlation ไม่น้อยกว่า 0.8 (Draper and Smith, 1966)

3.2 การสร้างสมการกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด

จะศึกษาการบดอัดดินลูกรังแหล่งที่ 2 และหินคลุกแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์ 5 ค่า (1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง) ปริมาณน้ำ 5 ค่า (60, 80, 100, 120 และ 140 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสมของดินบดอัดไม่ผสมซีเมนต์) พลังงาน 4 ค่า (296.3, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) และอายุบ่ม 5 ค่า (7, 14, 28, 60 และ 120 วัน) แล้วหาค่ากำลังอัดแกนเดียว

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร จะพล็อตกราฟระหว่างกำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างแต่ละชนิดกับตัวแปรการบดอัดต่างๆ ได้แก่ พลังงานการบดอัด ปริมาณน้ำ ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม หลังจากนั้นจะทำการ Normalized ความสัมพันธ์ของตัวแปรการบดอัดต่างๆ เพื่อรวมอิทธิพลชนิดของดิน และจากผลงานของ Horpibulsuk et al. (2005) ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะเสนอสมการกำลังอัดแกนเดียวในเทอมของอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ รายละเอียดต่างๆ จะแสดงในหัวข้อ 4.2 แผนภาพขั้นตอนวิเคราะห์ แสดงในรูปที่ 3.7

สำหรับความถูกต้องของเส้นโค้งความสัมพันธ์ต่างๆ จะพิจารณาจากค่า Degree of Correlation, |r|



รูปที่ 3.7 แผนภาพขั้นตอนและการวิเคราะห์ดินซีเมนต์บดอัด

3.2.1 ความเข้าใจปัญหาและแนวทางการวิจัยที่เลือก Horpibulsuk et al. (2005) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียว Ariake ที่มีค่าดัชนีสภาพพลาสติก (LI) อยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 2.5 โดยนำดินผสมกับซีเมนต์ในปริมาณ 10 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง แล้วหาค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่อายุบ่มตั้งแต่ 7 ถึง 180 วัน พบว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ที่อายุบ่มค่าหนึ่งจะแปรผันเป็นปฏิภาคกลับกับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay - water/cement ratio, w_c/C) โดยกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ w_c/C ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 และ Horpibulsuk et al. (2005) ยังอธิบายการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดแกนเดียว ที่อายุบ่มใดๆ โดยใช้กฎของ Abrams (1918) ดังสมการที่ 3.3

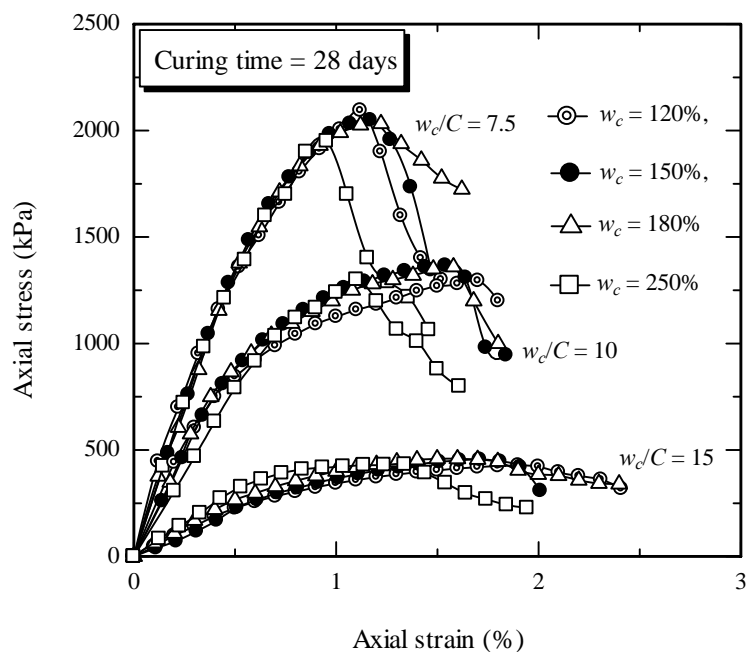
$$q_u = \frac{A}{B^{(w_c/C)}} \quad (3.3)$$

เมื่อ q_u เป็นกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวผสมซีเมนต์ที่อายุบ่มกำหนด w_c/C เป็นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ A และ B เป็นค่าคงที่จากการทดสอบ โดยที่ A มีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของดิน อายุบ่ม และประเภทของซีเมนต์ ส่วน B เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับประเภทของซีเมนต์ และมีค่าคงที่เท่ากับ 1.24 สำหรับดินเหนียวทุกชนิด

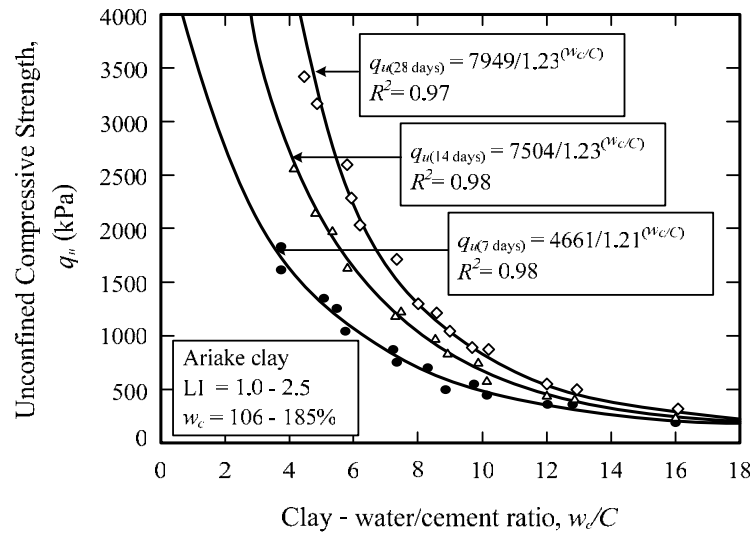
เมื่อพิจารณาอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวที่ w_c/C ใดๆ ที่อายุบ่มค่าหนึ่ง พบว่า A จะถูกตัดทอนออกไป ดังสมการที่ 3.4

$$\left\{ \frac{q_{(w_c/C)_1}}{q_{(w_c/C)_2}} \right\} = \left[\frac{A/B^{(w_c/C)_1}}{A/B^{(w_c/C)_2}} \right] = B^{\{(w_c/C)_2 - (w_c/C)_1\}} \quad (3.4)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_1}$ และ $q_{(w_c/C)_2}$ เป็นกำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ $(w_c/C)_1$ และ $(w_c/C)_2$ ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2005)



รูปที่ 3.9 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียว Ariake ตามอายุบ่มที่กำหนด (Horpibulsuk et al., 2005)

Horpibulsuk et al. (2005) ได้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียว Ariake ผสมซีเมนต์กับอายุบ่ม ตั้งแต่อายุบ่ม 7 ถึง 180 วัน ได้ผลดังรูปที่ 3.10 และสรุปว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์มีค่าแปรผันเป็นปฏิภาคกลับกับ w_c/C และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม

นอกจากนี้ Horpibulsuk et al. (2005) ยังได้รวบรวมข้อมูลการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียว Marine clays และ Inland clays กับอายุบ่ม เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ แสดงดังรูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่ม ของดินเหนียวที่มีค่า LI ระหว่าง 1.0 ถึง 2.5 ผสมซีเมนต์ แสดงดังในสมการที่ 3.5

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.038 + 0.28 \ln D \quad (3.5)$$

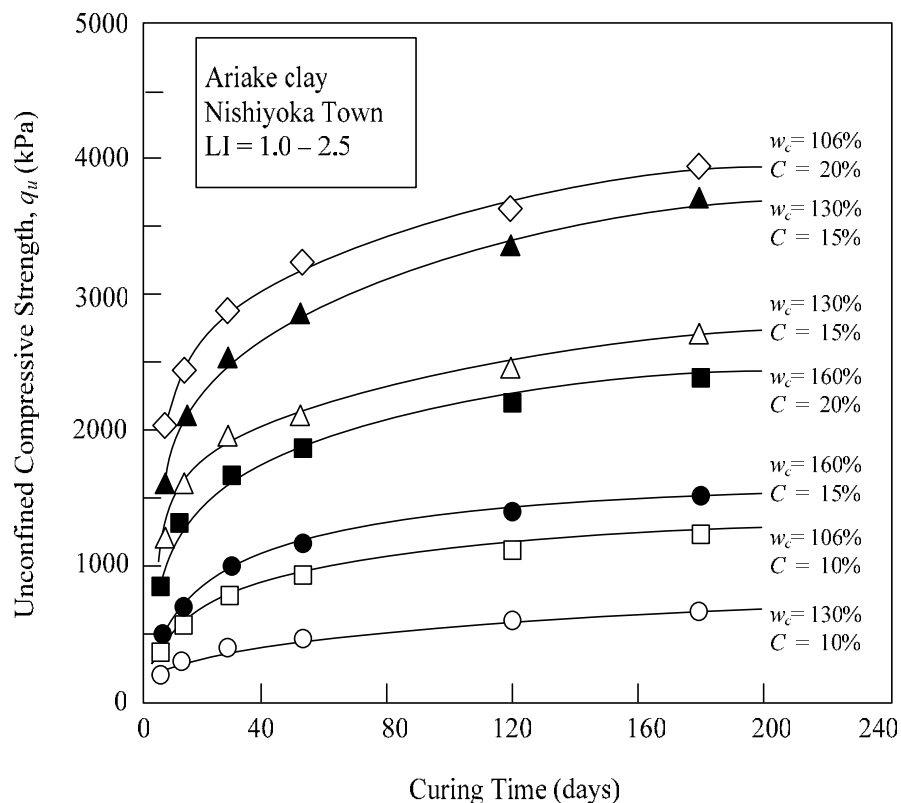
เมื่อ q_D และ q_{28} เป็นกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม D วัน และ 28 วัน ตามลำดับ

เมื่อรวมสมการที่ 3.4 และ 3.5 เข้าด้วยกัน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (w_c/C) อายุบ่ม (D) และกำลังอัดแกนเดียว (q_u) ดังสมการที่ 3.6

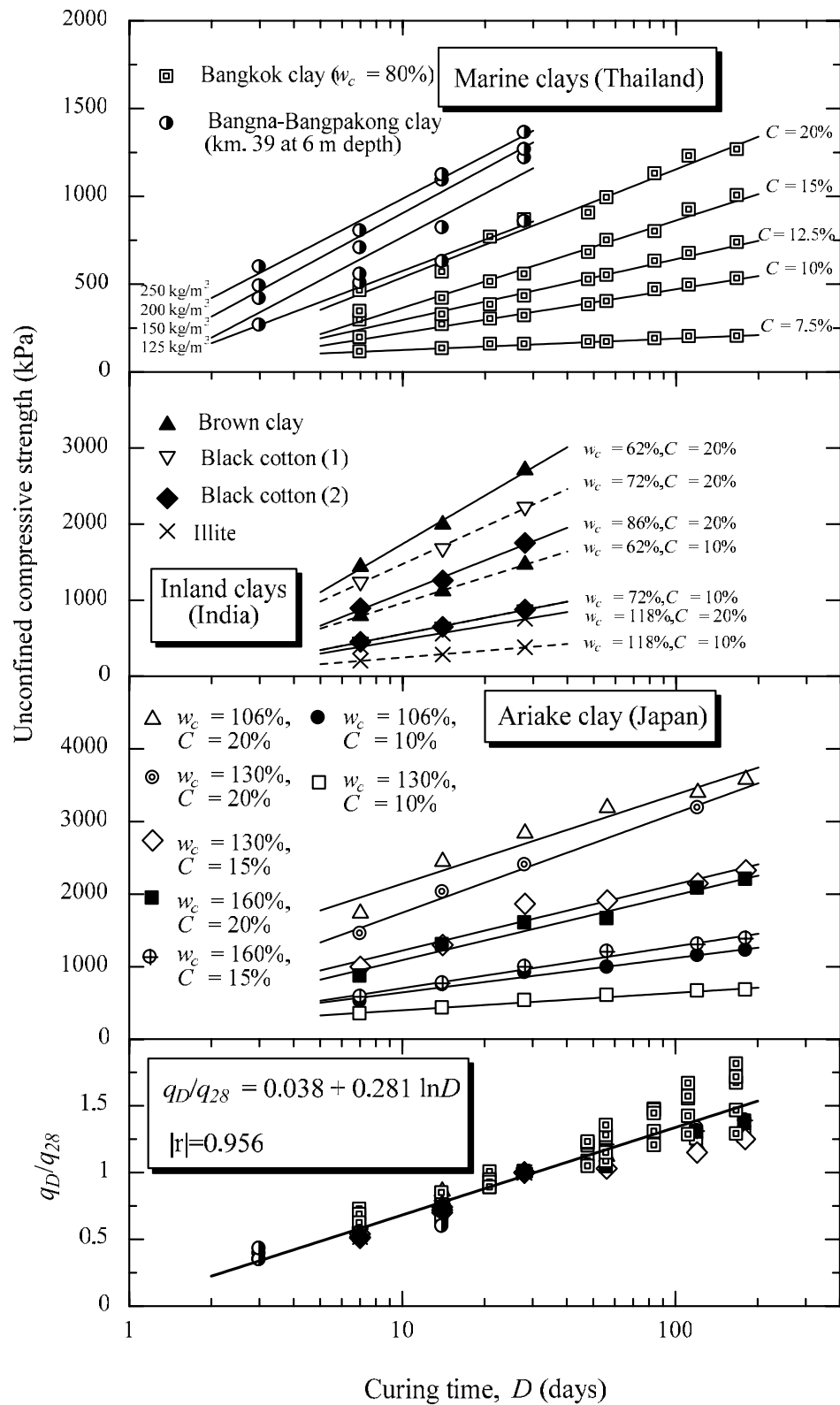
$$\left\{ \frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}} \right\} = \left[\frac{A/B^{(w_c/C)_1}}{A/B^{(w_c/C)_2}} \right] = 1.24^{\{(w_c/C)_2 - (w_c/C)_1\}} (0.038 + 0.281 \ln D) \quad (3.6)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_D}$ เป็นกำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ $(w_c/C)_D$ ที่อายุบ่ม D วัน และ $q_{(w_c/C)_{28}}$ เป็นกำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ $(w_c/C)_{28}$ ที่อายุบ่ม 28 วัน

สมการที่ 3.6 เป็นสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวที่มีค่า LI ระหว่าง 1.0 ถึง 2.5 ผสมซีเมนต์ ที่ใช้ได้กับดินเหนียวทุกชนิด โดยอาศัยแค่เพียงผลการทดสอบเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน แต่อย่างไรก็ตาม สมการนี้ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือ ไม่สามารถนำมาใช้กับดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัดได้ เนื่องจากสมการนี้ถูกสร้างมาจากข้อมูลดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง การผสมซีเมนต์ลงไปดินเหนียวจะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำและผลของปฏิกิริยาจะเกิดพันธะเชื่อมประสานกลุ่มของเม็ดดินเข้าด้วยกัน กลายเป็นวัสดุทางวิศวกรรมได้โดยไม่ต้องทำการบดอัดตรงกันข้าม ดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำจำพวกดินเม็ดหยาบที่ใช้สำหรับก่อสร้างถนน การที่จะทำให้กลุ่มเม็ดดินซีเมนต์รวมเป็นเนื้อเดียวกันกลายเป็นวัสดุทางวิศวกรรมได้จำเป็นต้องใช้พลังงานการบดอัด



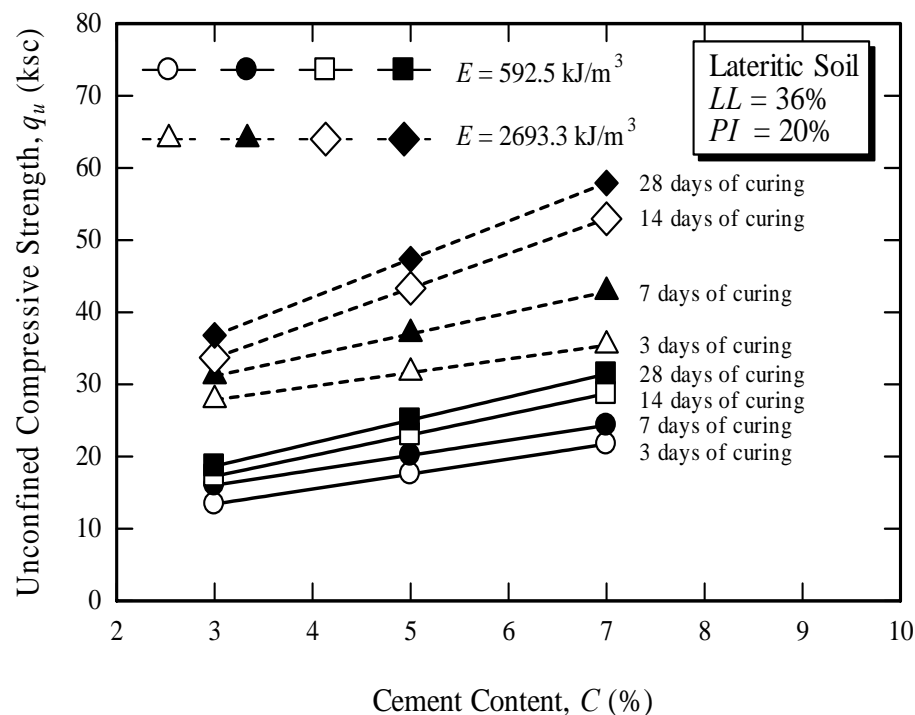
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของดินเหนียว Ariake ผสมซีเมนต์ที่มีค่า LI 1.0 ถึง 2.5 (Horpibulsuk et al., 2005)



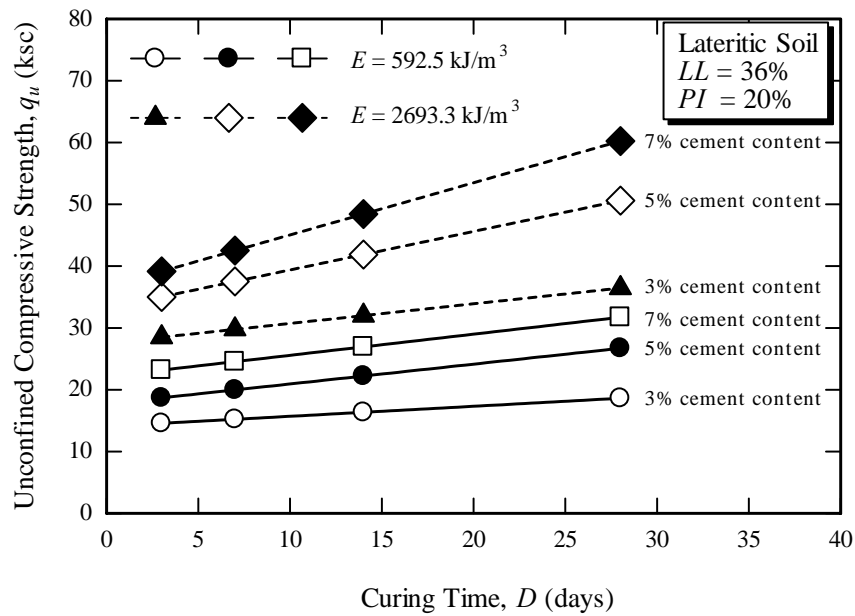
รูปที่ 3.11 การพัฒนากำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของดินเหนียวความชื้นสูง

(Horpibulsuk et al., 2005)

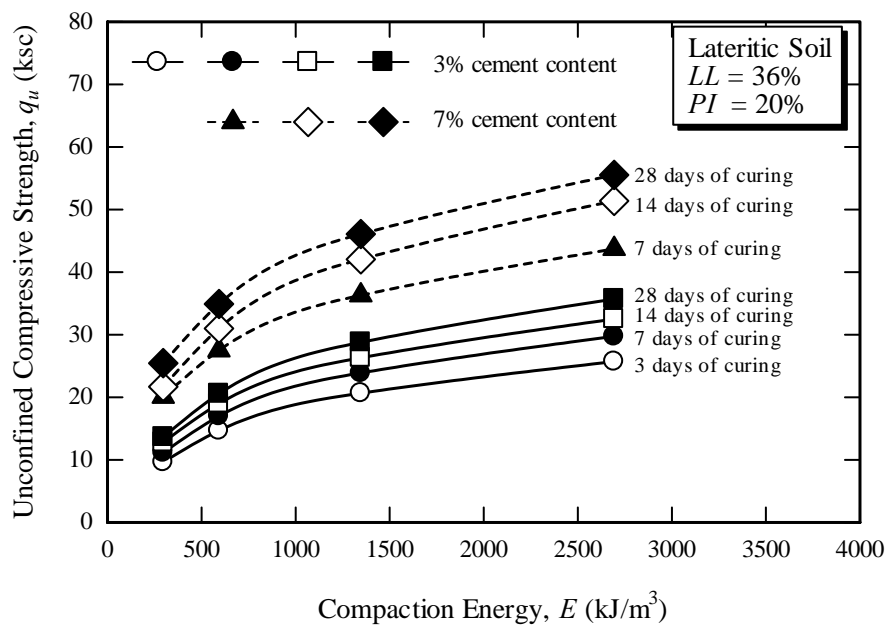
ถึงแม้ว่า การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำจะได้รับความนิยมน้อยกว่าหลายแห่งงานวิจัยทางด้านนี้ยังมีข้อจำกัด ธีระชาติ และสมบัติกระแสด (2544) ได้รายงานผลการทดลองนำดินลูกรังมาผสมกับซีเมนต์แล้วทำการบดอัด โดยนำดินตัวอย่างมาผสมกับซีเมนต์ในปริมาณ 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง และบดอัดด้วยพลังงาน 4 ค่า ได้แก่ 292.2, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมเป็นปริมาณน้ำเหมาะสมของดิน ไม่ผสมซีเมนต์บดอัดในแต่ละพลังงาน เมื่อครบอายุบ่มที่กำหนด คือ 3, 7, 14 และ 28 วัน จึงนำตัวอย่างดินซีเมนต์ไปหาค่ากำลังอัดแกนเดียว ได้ผลดังในรูปที่ 3.12 ถึง 3.14 และสรุปว่า พลังงานการบดอัดมีอิทธิพลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ และที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมที่สอดคล้องกับพลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างจะแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม แต่การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือไม่ครอบคลุมดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณน้ำสูงกว่าหรือต่ำกว่าปริมาณน้ำเหมาะสม และไม่สามารถทำนายกำลังอัดแกนเดียวเมื่อกำหนดพลังงานการบดอัด ปริมาณน้ำในมวลดิน ปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และชนิดของดินได้



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณซีเมนต์ของดินลูกรัง ตามอายุบ่มกำหนด ที่บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (ธีระชาติ และสมบัติกระแสด, 2544)



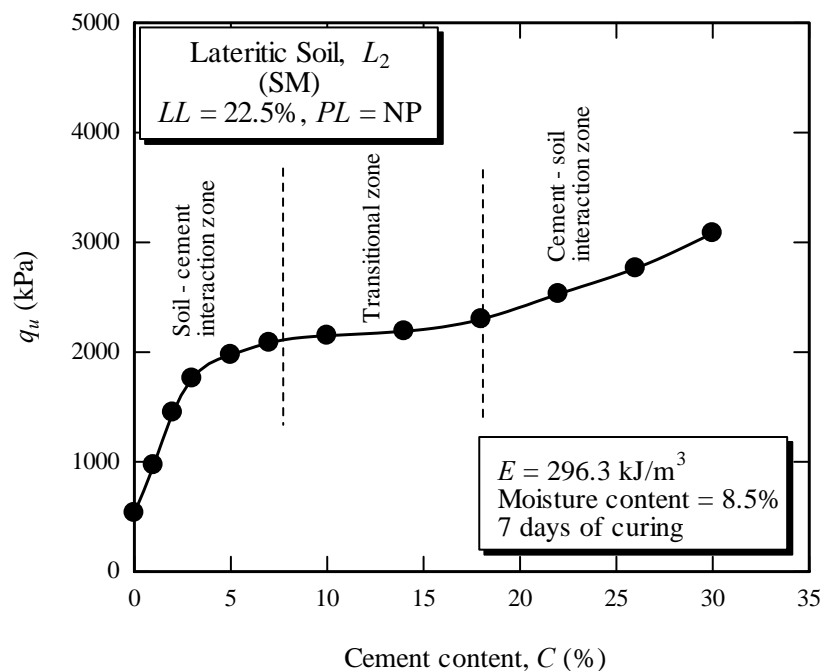
รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่มของดินลูกรัง ตามปริมาณซีเมนต์ กำหนด ที่บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (ซีระชาติ และสมบัติกระแส, 2544)



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับพลังงานบดอัดของดินลูกรัง ตามอายุบ่ม กำหนด ที่ปริมาณซีเมนต์ 3 และ 7 เปอร์เซ็นต์ (ซีระชาติ และสมบัติกระแส, 2544)

จากข้อจำกัดทั้งการปรับปรุงดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง (Horpibulsuk et al., 2005) และการปรับปรุงดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำ (ธีระชาติ และสมบัติกระแสด, 2544) ดังกล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะเสนอสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด เมื่อแปรผันพลังงานการบดอัด ปริมาณน้ำ ปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และชนิดของดิน โดยนำแนวคิด w/C (Horpibulsuk et al., 2005) ร่วมกับแนวคิดพลังงานการบดอัด (ธีระชาติ และสมบัติกระแสด, 2544) นั่นคือ ที่ค่า w/C เดียวกัน กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่งก็น่าจะมีค่าเท่ากัน แม้ว่าจะบดอัดด้วยพลังงาน ปริมาณน้ำ และปริมาณซีเมนต์แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อหาขอบเขตและข้อจำกัดของ w/C และเพื่อเป็นการยืนยันว่าสามารถนำมาใช้ร่วมกับพลังงานการบดอัดได้ ผู้วิจัยจะทำการหาค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่ง ที่บดอัดด้วยพลังงาน ปริมาณน้ำ และปริมาณซีเมนต์แตกต่างกัน แต่จำกัดให้มีค่า w/C เท่ากัน สำหรับสร้างทฤษฎีกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด

สำหรับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งใช้ดินลูกรังแหล่งที่ 2 จะเห็นได้ว่า ในช่วงปริมาณซีเมนต์ 0 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดจะมีค่าสูง ดังนั้น งานวิจัยนี้จะกำหนดปริมาณซีเมนต์ในช่วงนี้เท่านั้น เนื่องจากมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงที่สุด แต่ใช้ปริมาณซีเมนต์ต่ำสุด



รูปที่ 3.15 กราฟกำลังอัดแกนเดียวสัมพันธ์กับปริมาณซีเมนต์

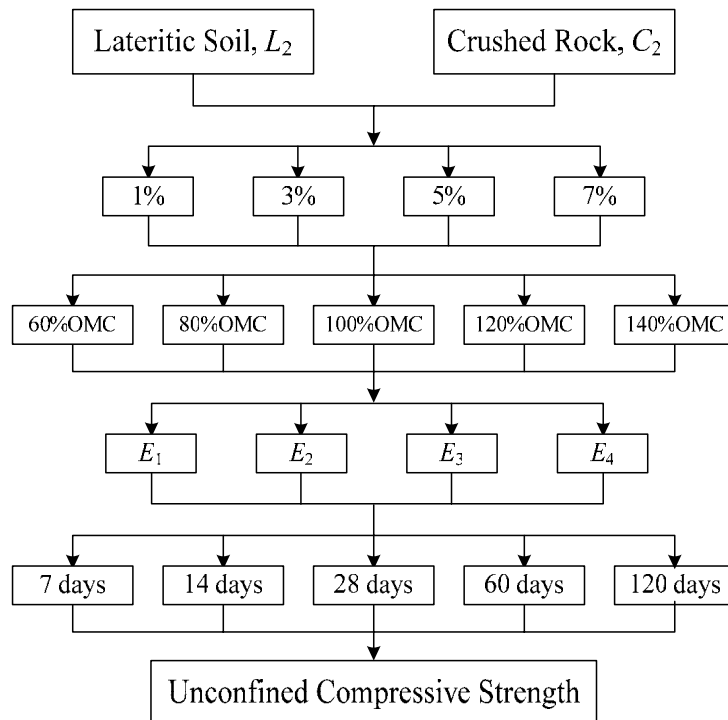
3.2.2 วิธีการวิจัย วัสดุที่ใช้ประกอบด้วยซีเมนต์ และดิน ซีเมนต์ที่ใช้เป็นซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราช้าง ส่วนดินที่ใช้เป็นดินเม็ดหยาบ 2 ชนิดที่นิยมใช้ก่อสร้างถนน ได้แก่ ดินลูกรังแหล่งที่ 2 และหินคลุกแหล่งที่ 2 ดินลูกรังแหล่งที่ 2 เป็นดินจากบ่อขุดบริเวณสวนสัตว์อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ที่ความลึกประมาณ 4 ถึง 5 เมตร ซึ่งเป็นบ่อขุดที่ใช้สำหรับก่อสร้างถนนสายสวนสัตว์ ถึงอำเภอโชคชัย ดินมีสีแสด ซึ่งอาจเนื่องจากมีแร่เหล็กผสมอยู่ในปริมาณที่สูง และเป็นดินที่ไม่มีค่าสภาพพลาสติก (Non - Plasticity) ส่วนหินคลุกแหล่งที่ 2 มาจากโครงการก่อสร้างซ่อมแซมปรับปรุงถนนสายหลักระหว่างจังหวัดเพชรบูรณ์ ถึงอำเภอวิเชียรบุรี มีสีเทาดำและไม่มีค่าสภาพพลาสติก (Non - Plasticity) ดินตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด จะถูกนำมาหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมต่างๆในห้องปฏิบัติการ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.1.2

3.2.3 การหาค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินบดอัด การสร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด จะใช้ข้อมูลจากการบดอัดดิน 2 กรณี คือ การบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ และการบดอัดดินผสมซีเมนต์ ดังนั้น การหาค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินบดอัดจึงมีขั้นตอน ดังนี้

3.2.3.1 การบดอัดดินตัวอย่างไม่ผสมซีเมนต์ เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณน้ำเปรียบเทียบกับกราฟการบดอัดดินผสมซีเมนต์ และปริมาณน้ำเหมาะสมของการบดอัดแต่ละพลังงานจะนำไปใช้เป็นข้อกำหนดปริมาณน้ำในการบดอัดดินผสมซีเมนต์ นอกจากนี้ ตัวอย่างดินบดอัดจะนำไปหาค่ากำลังอัดแกนเดียวเพื่อใช้เปรียบเทียบค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินผสมซีเมนต์ วิธีการและพลังงานการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.1.3

3.2.3.2 การบดอัดดินผสมซีเมนต์ เป็นการเตรียมดินตัวอย่างเพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด หลังจากร่อนดินตัวอย่างผ่านตะแกรง เตรียมดินตัวอย่างแต่ละชนิดโดยเติมน้ำให้กับดินตัวอย่างตามปริมาณที่กำหนด แล้วคลุกเคล้าเข้าด้วยกัน ห่อหุ้มด้วยถุงพลาสติกทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นนำดินตัวอย่างไปหาปริมาณน้ำดินเปียก แผนงานการบดอัดดินผสมซีเมนต์ แสดงในรูปที่ 3.16 ที่พลังงานการบดอัด ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มค่าหนึ่งจะแปรผันปริมาณน้ำ 5 ค่า ได้แก่ 60, 80, 100, 120 และ 140 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสมจากการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ เตรียมซีเมนต์ตามปริมาณที่กำหนด ที่พลังงานการบดอัด และอายุบ่มค่าหนึ่งจะแปรผันปริมาณซีเมนต์ 4 ค่า ได้แก่ 1, 3, 5, และ 7 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักดินแห้ง ผสมดินตัวอย่างและซีเมนต์ให้เข้ากันจนวัสดุที่ผสมกลมกลืนเป็นสีเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 3.17 จากนั้นเก็บตัวอย่างส่วนผสมไปหาปริมาณน้ำพร้อมกับการบดอัดส่วนผสมที่เหลือทันที ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ และที่พลังงานบดอัด ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณน้ำ และอายุบ่มค่าหนึ่ง จะบดอัดดินจำนวน 3 ตัวอย่าง หลังการบดอัดดินซีเมนต์จะชั่งน้ำหนักและห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติก

ทันที ปั่นดินซีเมนต์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7, 14, 28, 60, และ 120 วัน และเมื่อครบอายุบ่มตามกำหนด จะหาค่ากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินทันที



รูปที่ 3.16 แผนงานบดอัดดินซีเมนต์



รูปที่ 3.17 ลักษณะการผสมดินกับซีเมนต์



รูปที่ 3.18 การเก็บตัวอย่างหาความชื้นของดินซีเมนต์



รูปที่ 3.19 ลักษณะดินซีเมนต์บดอัด

3.2.3.3 การหาลำกล้องอัดแกนเดี่ยว นำตัวอย่างดินออกจากฟิล์มพลาสติก ทำการชั่งน้ำหนัก วัดขนาดความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางให้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้ Vernier Caliper ทำการทดสอบหาลำกล้องอัดแกนเดี่ยวด้วยเครื่อง UTM แสดงดังรูปที่ 3.20 โดยใช้อัตราการกดทดสอบเท่ากับ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงดินตัวอย่างต่อนาที จนกระทั่งดินตัวอย่างวิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 บันทึกข้อมูลลำนกล้องอัดแกนเดี่ยวในรูปของหน่วยความเค้นและหน่วยความเครียด

ของดินตัวอย่างทั้ง 3 ชุด ในสภาวะการบดอัดและอายุบ่มเดียวกัน เก็บตัวอย่างดินซีเมนต์หลังการทดสอบไปหาปริมาณความชื้นทุกตัวอย่าง



รูปที่ 3.20 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)



รูปที่ 3.21 ลักษณะการวิบัติของดินซีเมนต์

3.2.4 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เมื่อได้ข้อมูลหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณน้ำ และข้อมูลกำลังกำลังอัดแกนเดียวทั้งดินไม่ผสมซีเมนต์และดินผสมซีเมนต์บดอัด จะนำไปพล็อตกราฟของความสัมพันธ์ต่างๆ ตามแนวทางที่เลือกในหัวข้อ 3.2 (รูปที่ 3.7) ความถูกต้องของ

เส้นโค้งความสัมพันธ์ต่างๆ จะต้องมามีค่า Degree of Correlation ไม่น้อยกว่า 0.8 (Draper and Smith, 1966)

3.3 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ความถูกต้องของกราฟการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ และสมการกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด ที่เสนอตามหัวข้อ 3.1 และ 3.2 จะเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดดังนี้

3.3.1 กราฟการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ ตรวจสอบโดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดของดิน 2 ชนิด ที่มีขนาดและสภาพความเป็นพลาสติกแตกต่างกันได้แก่ ดินเหนียวปนดินตะกอน (Turnbull, 1950) และ ดินลูกรัง (ธีระชาติและสมบัติกระแสน, 2544)

3.3.2 สมการกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด ตรวจสอบโดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดของดิน 5 ชนิด ที่มีขนาดและสภาพความเป็นพลาสติกแตกต่างกันได้แก่ ดินลูกรังแหล่งที่ 3 (ข้อมูลจาก ธีระชาติและสมบัติกระแสน, 2544) ดินลูกรังแหล่งที่ 4 (ข้อมูลของผู้วิจัย) ดินลูกรังแหล่งที่ 5 (ข้อมูลของผู้วิจัย) หินคลุกแหล่งที่ 3 (ข้อมูลของผู้วิจัย) และ หินคลุกแหล่งที่ 3 ผสมกับดินลูกรังแหล่งที่ 5 ในอัตราส่วน 1:4 (ข้อมูลของผู้วิจัย)

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

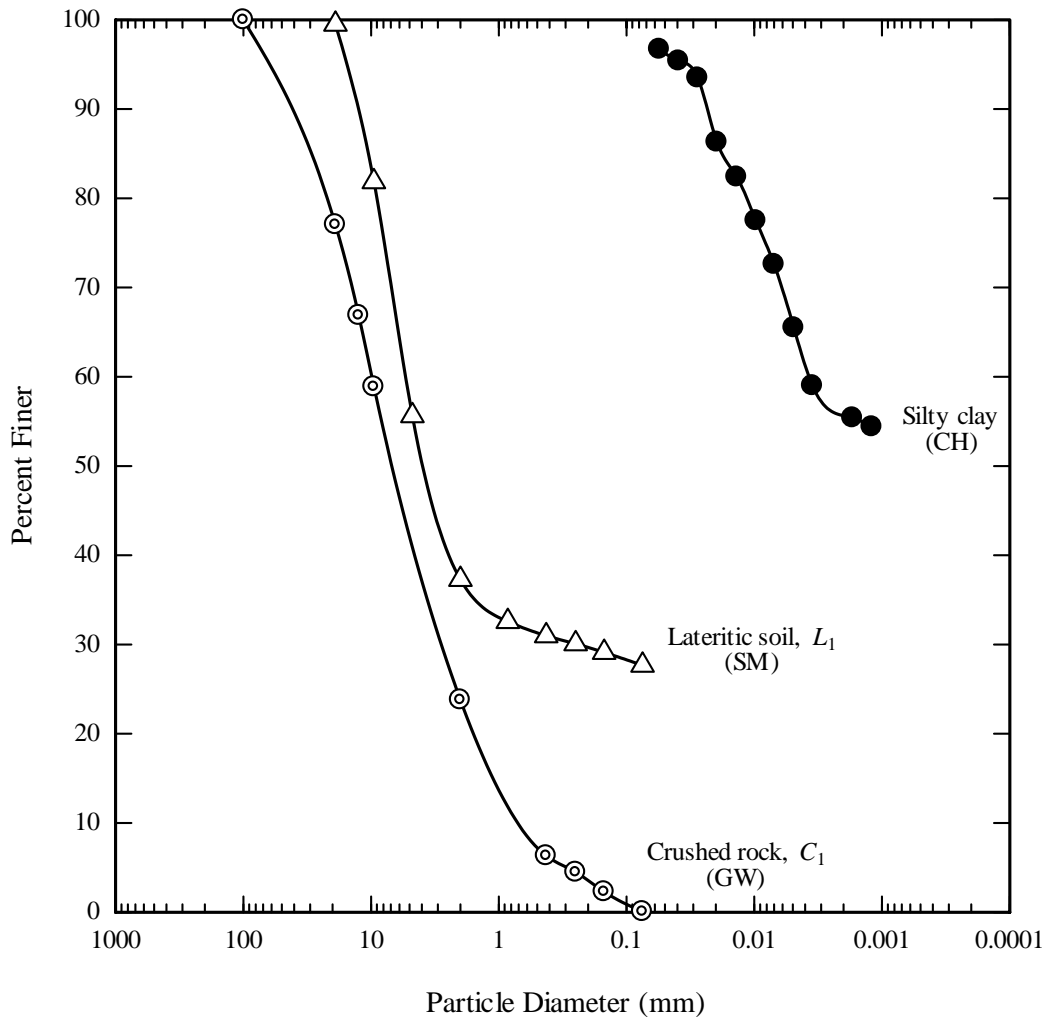
ในบทนี้จะเสนอผลการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์จนได้กราฟการบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดต่างๆ ที่สามารถสร้างได้โดยอาศัยเพียงข้อมูลการบดอัดพลังงานเดียว จะเสนอผลการตรวจสอบแนวคิดทฤษฎีกำลังอัดและสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์ที่ตัวแปรการบดอัดต่างๆ ได้แก่ ชนิดของดิน พลังงานการบดอัด ปริมาณน้ำในมวลดิน ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม และท้ายสุดจะเสนอการเปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวจากสมการและจากการวัด

4.1 กราฟการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์

4.1.1 คุณสมบัติของดินที่ศึกษา เมื่อดำเนินตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.2.2 พบว่า ดินเหนียวปนดินตะกอน ประกอบด้วยดินเหนียว 53 เปอร์เซ็นต์ ดินตะกอน 44 เปอร์เซ็นต์ และดินทรายเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ 18.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 51 และ 26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ กำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำมีค่าเท่ากับ 100 กิโลปาสคาล ดินลูกรังแหล่งที่ 1 ประกอบด้วยดินเม็ดหยาบในปริมาณที่สูงถึง 64 เปอร์เซ็นต์ ค่าขีดจำกัดเหลวและพิคคพลาสติกเท่ากับ 53 และ 37.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนหินคลุกแหล่งที่ 1 ประกอบด้วยดินเม็ดหยาบในปริมาณที่สูงถึง 76 เปอร์เซ็นต์ และเป็นดินที่ไม่มีค่าสภาพพลาสติก โดยอาศัยการจำแนกในระบบเอกภาพ (USCS) ดินเหนียวปนดินตะกอน ดินลูกรังแหล่งที่ 1 และหินคลุกแหล่งที่ 1 จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าความเป็นพลาสติกสูง (CH) ทรายปนดินตะกอน (SM) และกรวดที่มีขนาดคละกันดี (GW) ตามลำดับ คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินตัวอย่าง ดังในตารางที่ 4.1 และลักษณะการกระจายขนาดคละของเม็ดดิน ดังในรูปที่ 4.1

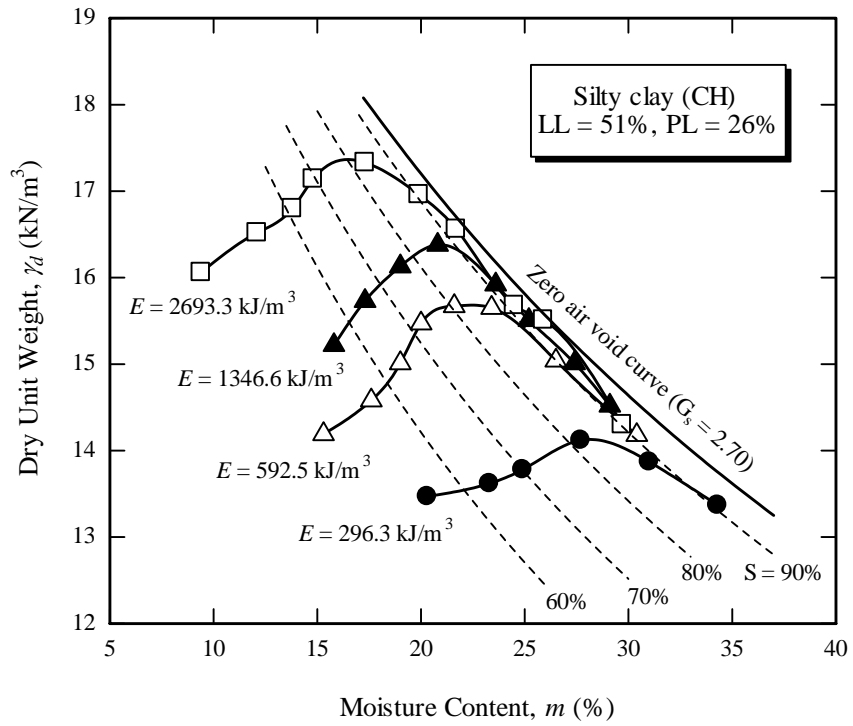
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของดินเหนียวปนดินตะกอน ดินลูกรังแหล่งที่ 1 และหินคลุกแหล่งที่ 1

Soil Properties	Silty Clay	Lateritic Soil, L_1	Crushed Rock, C_1
1. Specific Gravity	2.70	2.70	2.71
2. Liquid Limit, %	51	53	-
3. Plastic Limit, %	26	37.5	NP
4. Unified Soil Classification System	CH	SM	GW

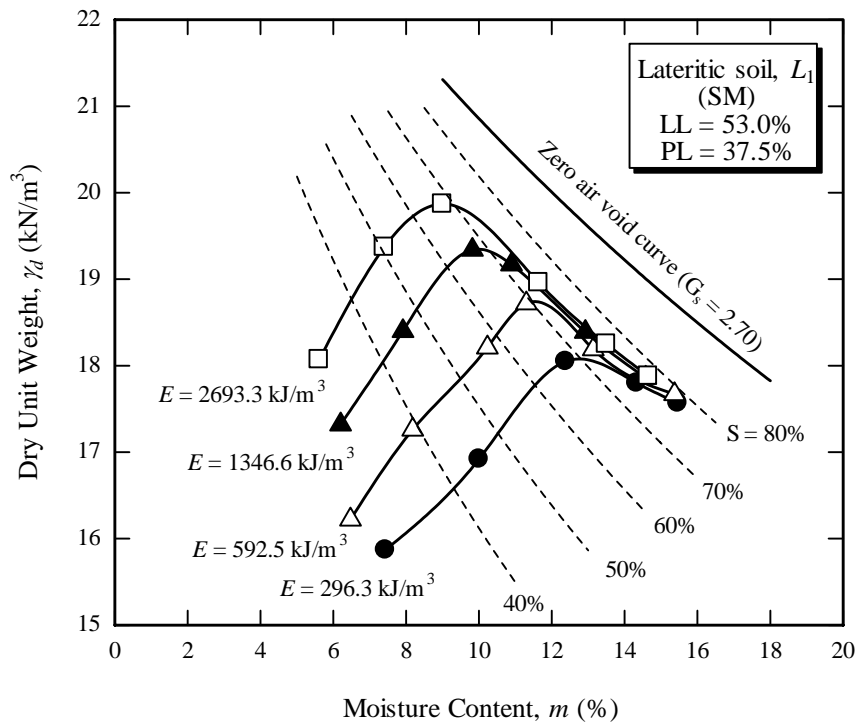


รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดคละของเม็ดดินของดินตัวอย่าง

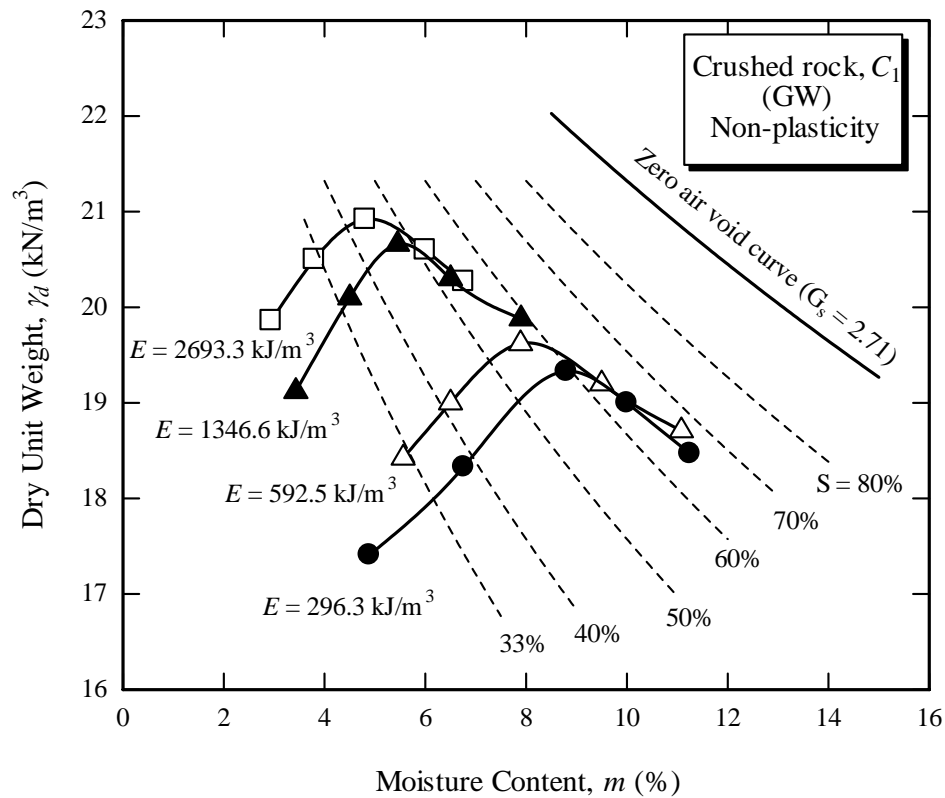
4.1.2 กราฟการบดอัดดิน รูปที่ 4.2 ถึง 4.4 แสดงกราฟการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนดินลูกรังแหล่งที่ 1 และหินคลุกแหล่งที่ 1 ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ ตามลำดับ ค่าปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด ดังในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าที่พลังงานการบดอัดเดียวกัน ดินเหนียวปนดินตะกอนจะมีค่าปริมาณน้ำเหมาะสม (OMC) สูงที่สุด และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$) ต่ำที่สุด ขณะที่หินคลุกแหล่งที่ 1 จะมีค่า OMC ต่ำที่สุด และ $\gamma_{d,max}$ สูงที่สุด แสดงว่าปริมาณของดินเม็ดละเอียดในมวลดินเป็นปัจจัยที่ควบคุมปริมาณน้ำและหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัด มวลดินที่มีปริมาณดินเม็ดละเอียดมากจะให้ค่า OMC สูงกว่า และ $\gamma_{d,max}$ ต่ำกว่าดินที่มีปริมาณดินเม็ดละเอียดน้อย ทั้งนี้เพราะการบดอัดดินเม็ดละเอียดถูกควบคุมด้วยค่าขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติก (Gurtug and Sridharan, 2002 และ Pandian et al., 1997)



รูปที่ 4.2 กราฟการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนที่พลังงานการบดอัดต่างๆ



รูปที่ 4.3 กราฟการบดอัดของดินลูกรังแหล่งที่ 1 ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ



รูปที่ 4.4 กราฟการบดอัดของหินคลุกแหล่งที่ 1 ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ

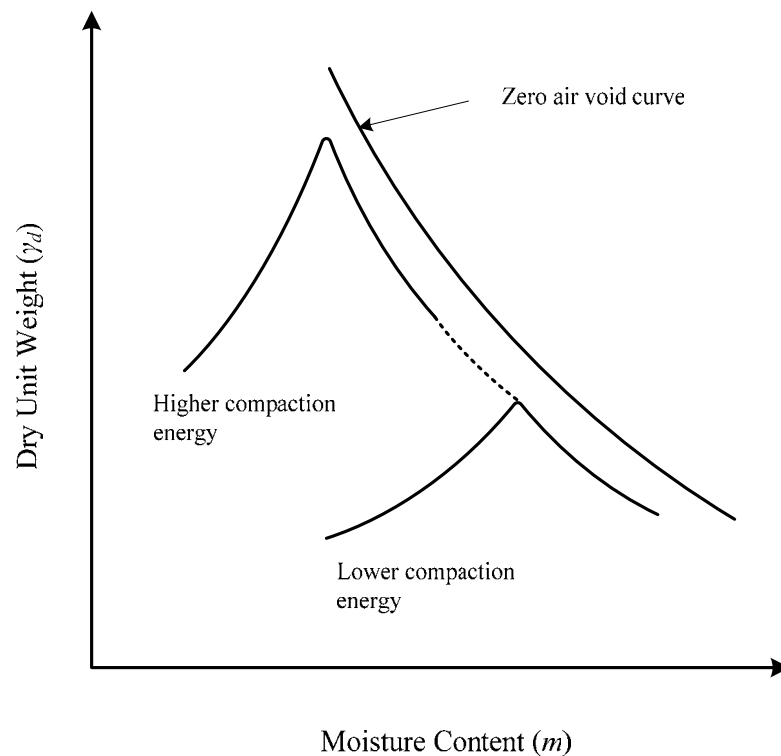
ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเหนียวปนดินตะกอน
ดินลูกรังแหล่งที่ 1 และหินคลุกแหล่งที่ 1

Energy per unit volume	Silty Clay (CH)		Lateritic Soil, L_1 (SM)		Crushed Rock, C_1 (GM)	
	OMC (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)	OMC (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)	OMC (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)
1. Half standard proctor	28.4	14.1	12.7	18.1	8.8	19.3
2. Standard proctor	22.5	15.7	11.5	18.7	8.0	19.6
3. Half modified proctor	20.8	16.4	10.0	19.4	5.5	20.6
4. Modified proctor	16.6	17.4	8.9	19.9	4.8	20.9

จากกราฟรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 สรุปได้ว่า สำหรับดินทุกชนิดที่บดอัดทางด้านแห้ง หน่วยน้ำหนักแห้งจะมีค่าแปรผันตามพลังงานการบดอัดและระดับความอึดด้วยน้ำ (Degree of

Saturation, S) แต่ตัวแปรทั้งสองจะมีอิทธิพลต่อหน่วยน้ำหนักแห้งที่บดอัดทางด้านเปียกน้อยมาก โดยเส้นกราฟที่บดอัดด้านเปียกของพลังงานต่างๆจะเป็นเส้นโค้งที่ต่อเนื่องกัน

จากกราฟความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักแห้ง ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำและพลังงานการบดอัดของดินทั้ง 3 ชนิด กราฟการบดอัดสำหรับดินชนิดใดๆที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่งจะคล้ายรูปตัววีกลับหัว ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ในช่วงที่บดอัดทางด้านแห้งหน่วยน้ำหนักแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ และจะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณน้ำเท่ากับ OMC และที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำค่าหนึ่ง พลังงานการบดอัดที่สูงกว่าจะมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงกว่าพลังงานการบดอัดที่ต่ำกว่า ส่วนกราฟการบดอัดทางด้านเปียกของ OMC ทุกๆพลังงานการบดอัด เส้นกราฟจะอยู่บนเส้นโค้งเดียวกัน ต่อกันที่จุดเหมาะสม



รูปที่ 4.5 กราฟการบดอัดรูปตัววีกลับหัว

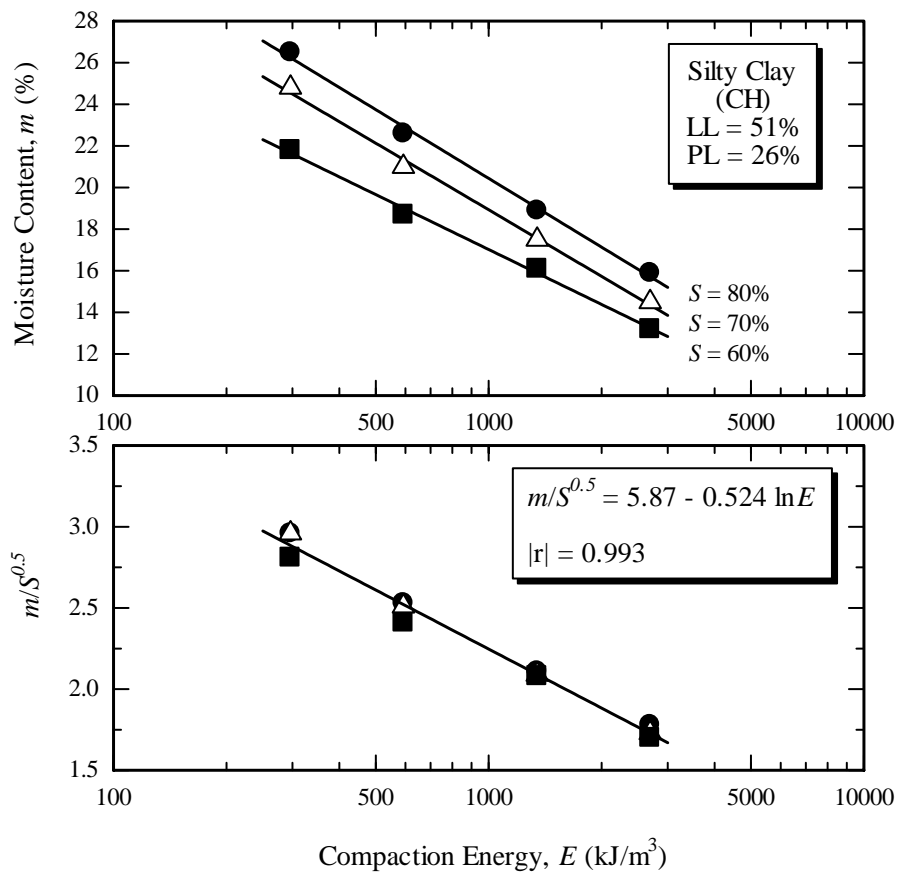
4.1.3 วิเคราะห์ผลการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในมวลดินและพลังงานการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน ดินลูกรังแหล่งที่ 1 และหินคลุกแหล่งที่ 1 ที่บดอัดทางด้านแห้ง โดยพล็อตบนกราฟกึ่งล็อกการิทึม พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นเส้นตรงที่แปรผันตามค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่

ปริมาณน้ำเดียวกันเมื่อให้พลังงานการบดอัดที่สูงขึ้นปริมาณอากาศในดินบดอัดจะถูกไล่ออกได้ง่าย ทำให้ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินสูงตามไปด้วย แต่พฤติกรรมเช่นนี้จะไม่เกิดกับดินที่บดอัดทางด้านเปียก ทั้งนี้เพราะมวลดินมีสภาพใกล้อิ่มตัวด้วยน้ำ

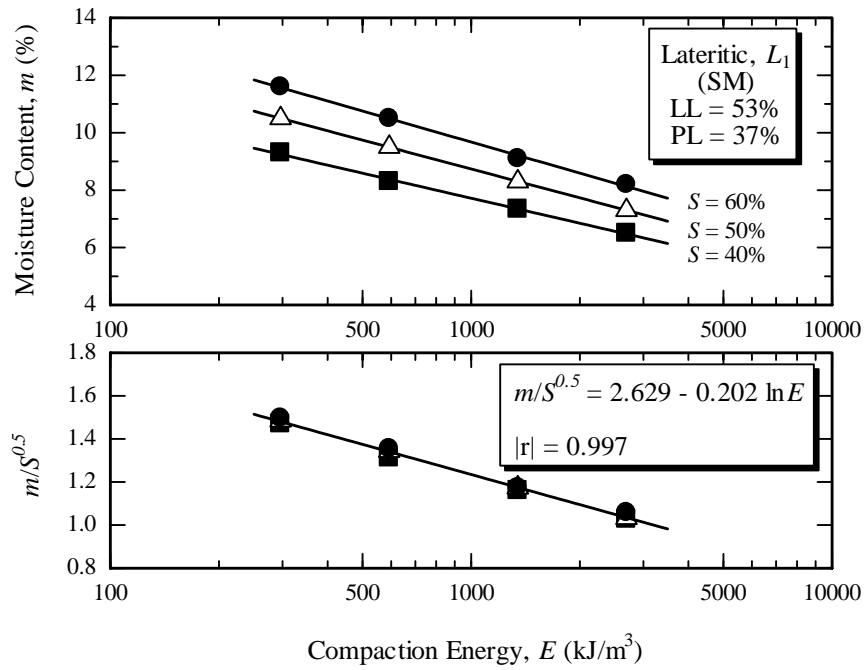
เมื่อ Normalize โดยหารปริมาณน้ำด้วยระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่า ตัวแปร $m/S^{0.5}$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับพลังงานการบดอัดเมื่อพล็อตบนกราฟกึ่งล็อกการิทึม ดังสมการที่ 4.1

$$\frac{m}{S^{0.5}} = a - b \ln E \tag{4.1}$$

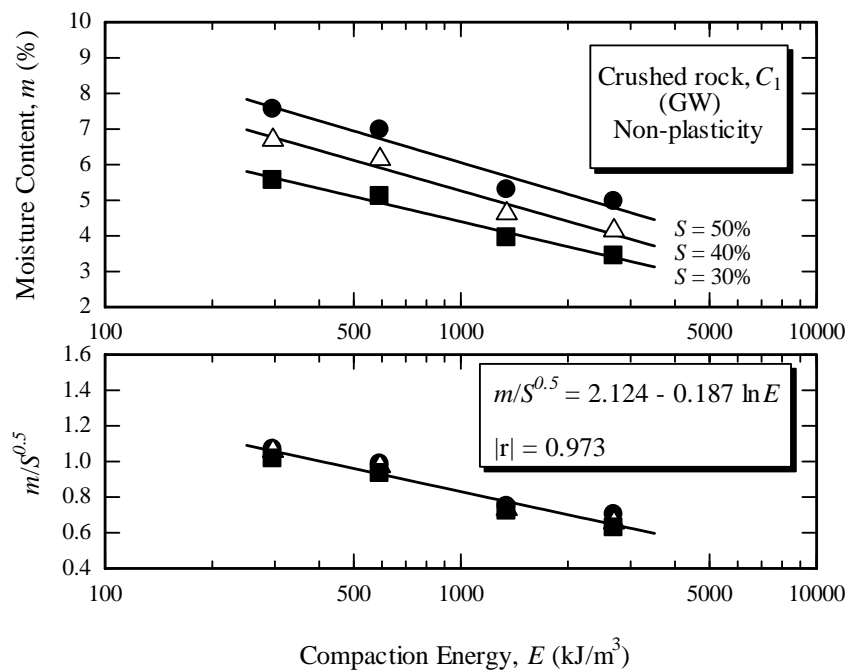
เมื่อ m คือปริมาณน้ำในมวลดิน S คือระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ E คือพลังงานการบดอัด a และ b คือค่าคงที่ ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของดินแต่ละชนิด



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและพลังงานการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนและเส้น Normalization



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและพลังงานการบดอัดของดินลูกรังแหล่งที่ 1 และเส้น Normalization



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและพลังงานการบดอัดของหินคลุกแหล่งที่ 1 และเส้น Normalization

จากสมการที่ 4.1 พบว่า ที่ปริมาณน้ำทางด้านแห้ง ตัวแปร $m/S^{0.5}$ จะขึ้นอยู่กับพลังงานการบดอัดเท่านั้น ไม่แปรผันตามระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ปริมาณน้ำ และหน่วยน้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นไปตามที่ผู้เขียนคาดไว้ จากรูปที่ 4.6 พบว่า a และ b มีค่าเท่ากับ 5.870 และ 0.524 ตามลำดับ สำหรับดินเหนียวปนดินตะกอน ในทำนองเดียวกัน a และ b มีค่าเท่ากับ 2.629 และ 0.202 สำหรับดินลูกรังแหล่งที่ 1 (รูปที่ 4.7) และมีค่าเท่ากับ 2.124 และ 0.187 ตามลำดับ สำหรับหินคลุกแหล่งที่ 1 (รูปที่ 4.8)

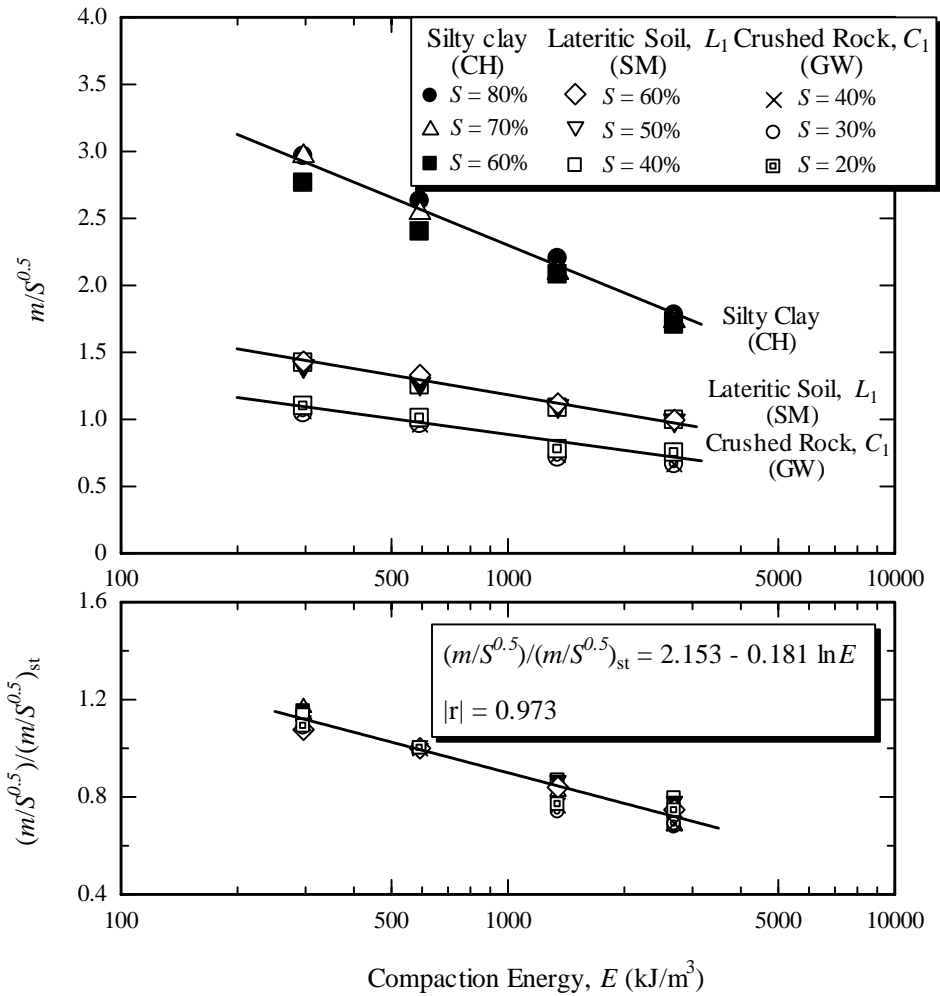
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $m/S^{0.5}$ และ $\log E$ ของดินทั้งสามชนิด จะเห็นว่า กราฟความสัมพันธ์ของดินที่มีปริมาณดินเม็ดละเอียดมากที่สุดจะมีความชันสูงที่สุด สิ่งที่น่าสนใจที่สังเกตได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวคือ ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงของ $m/S^{0.5}$ ภายใต้อการเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัดของดินแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน แต่อัตราส่วนของ $m/S^{0.5}$ ของดินทุกชนิดจะมีค่าคงที่ ดังนี้

$$\left[\frac{(m/S^{0.5})}{(m/S^{0.5})_{\text{ref.}}} \right]_{\text{Silty clay}} = \left[\frac{(m/S^{0.5})}{(m/S^{0.5})_{\text{ref.}}} \right]_{\text{Lateritic soil}} = \left[\frac{(m/S^{0.5})}{(m/S^{0.5})_{\text{ref.}}} \right]_{\text{Crushed rock}}$$

เมื่อ $(m/S^{0.5})$ คือค่าของตัวแปร $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดค่าใดๆ $(m/S^{0.5})_{\text{ref.}}$ คือค่าของตัวแปร $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดอ้างอิง ในที่นี้ ถ้าเลือกใช้ค่า $(m/S^{0.5})_{\text{ref.}}$ เท่ากับค่าของตัวแปร $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) และเขียนเป็น $(m/S^{0.5})_{\text{st}}$ ความสัมพันธ์ที่เป็นเอกภาพระหว่าง $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_{\text{st}}$ ซึ่งรวมอิทธิพลชนิดของดินสามารถนำเสนอได้ในรูปที่ 4.9 และดังสมการที่ 4.2

$$\frac{(m/S^{0.5})}{(m/S^{0.5})_{\text{st}}} = 2.153 - 0.181 \ln E \quad (4.2)$$

จะเห็นว่า เมื่อ $(m/S^{0.5}) = (m/S^{0.5})_{\text{st}}$ และ $E = 592.5$ กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร เทอมทางซ้ายมือของสมการจะกลายเป็นหนึ่ง ขณะที่เทอมทางขวามือจะเป็น 0.997 สิ่งนี้ยืนยันความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สมการนี้ในการประมาณ $(m/S^{0.5})$ ที่พลังงานการบดอัดค่าอื่นๆ สมการที่ได้นี้สามารถใช้ทำนายหน่วยน้ำหนักแห้งเมื่อบดอัดด้วยปริมาณน้ำทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสม ภายใต้อพลังงานการบดอัดใดๆ เมื่อทราบค่าตัวแปร $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดค่าใดค่าหนึ่ง



รูปที่ 4.9 ตัวแปร $m/S^{0.5}$ และพลังงานการบดอัดสำหรับดินทั้งสามชนิดและอัตราส่วน
ของ $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_{st}$ ที่พลังงานต่าง ๆ

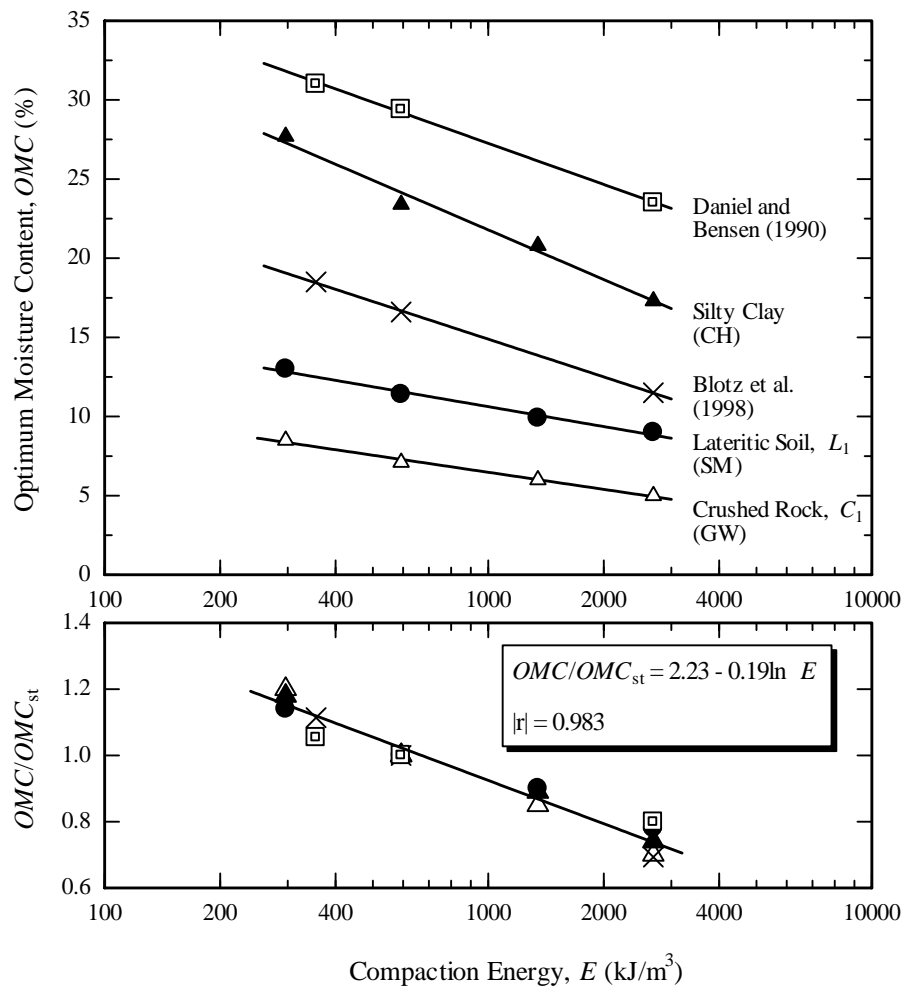
สำหรับกราฟการบดอัดที่ด้านเปียก จากรูปที่ 4.5 อาจสรุปได้ว่ากราฟของหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณน้ำทางด้านเปียกเป็นเส้นโค้งต่อเนื่องกันสำหรับทุกพลังงานการบดอัด และต่อกันที่จุดเหมาะสม ดังนั้น เราสามารถสร้างเส้นโค้งการบดอัดได้ทันที เมื่อทราบค่า OMC และ $\gamma_{d,max}$ ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง OMC และพลังงานการบดอัด และ $\gamma_{d,max}$ และพลังงานการบดอัด ตามลำดับ ของดินบดอัดทั้งสามชนิด พบว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสมการเชิงเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบของ Daniel and Benson (1990) และ Blotz et al. (1998) เพื่อรวมอิทธิพลชนิดของดิน ผู้วิจัยได้ Normalized OMC ของดินทั้ง 3 ชนิด ร่วมกับดินอีก 2 ชนิดที่เป็นผลทดสอบของ Daniel and Benson (1990) และ Blotz et al. (1998) โดยการหาร OMC ที่

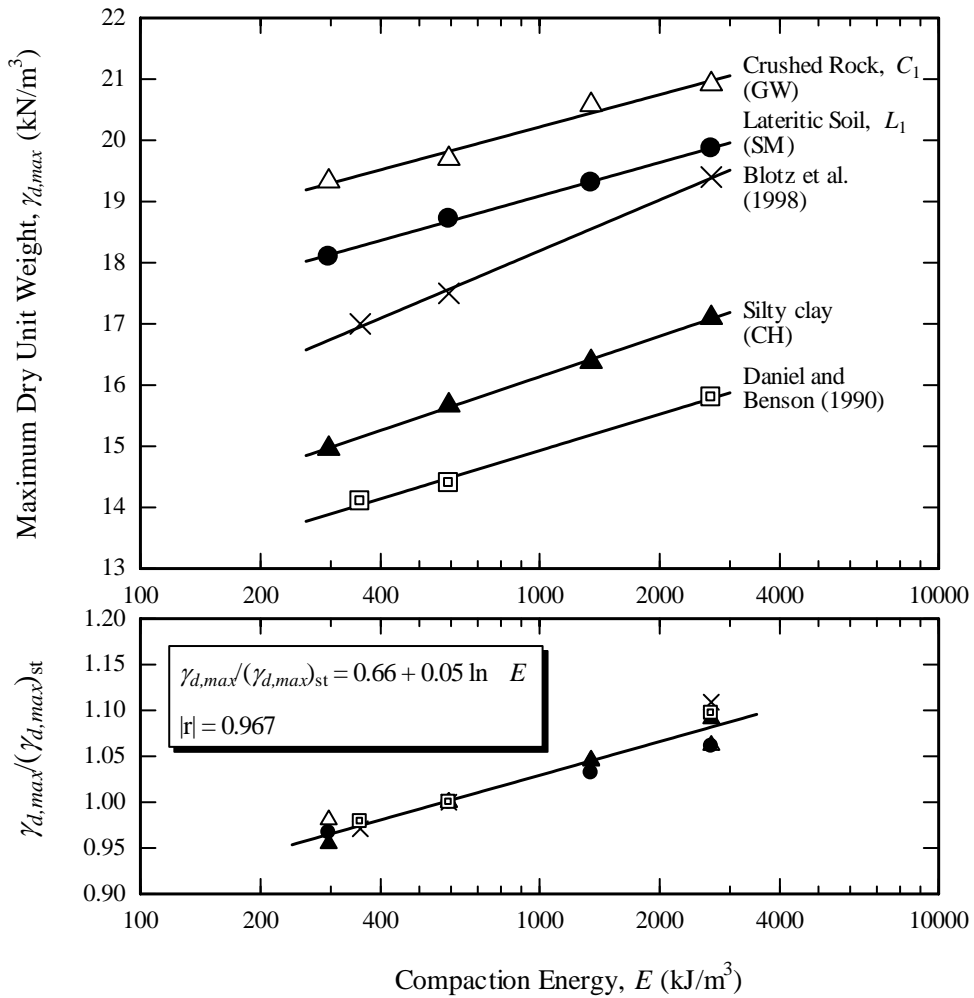
พลังงานการบดอัดใดๆ ด้วย OMC ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน และเขียนเป็น OMC_{st} พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร OMC/OMC_{st} และพลังงานการบดอัดเป็นเส้นตรงโดยพล็อตบนกราฟกึ่งล็อกการิทึม ดังนั้นผู้วิจัยขอเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized OMC และพลังงานการบดอัดของดินชนิดใดๆ ดังนี้

$$\frac{OMC}{OMC_{st}} = 2.23 - 0.19 \ln E \quad (4.3)$$

เมื่อ OMC_{st} คือปริมาณน้ำเหมาะสมที่พลังงานการบดอัดมาตรฐาน (592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) และ E คือพลังงานการบดอัดใดๆ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง OMC และพลังงานการบดอัด และความสัมพันธ์แบบ Normalized



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\gamma_{d,max}$ และพลังงานการบดอัด และความสัมพันธ์แบบ Normalized

เนื่องจาก $\gamma_{d,max}$ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ OMC และ OMC มีความสัมพันธ์กับพลังงานการบดอัด ดังนั้น $\gamma_{d,max}$ จึงควรมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานการบดอัดด้วยเช่นกัน ผู้วิจัยได้ Normalized $\gamma_{d,max}$ ของดินทั้ง 3 ชนิด ร่วมกับดินอีก 2 ชนิดที่เป็นผลทดสอบของ Daniel and Benson (1990) และ Blotz et al. (1998) โดยการหาร $\gamma_{d,max}$ ที่พลังงานการบดอัดใดๆ ด้วย $\gamma_{d,max}$ ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน และเขียนเป็น $(\gamma_{d,max})_{st}$ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\gamma_{d,max}/(\gamma_{d,max})_{st}$ และพลังงานการบดอัดเป็นเส้นตรงโดยพล็อตบนกราฟกึ่งล็อกการิทึม ดังนั้นผู้วิจัยขอเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized $\gamma_{d,max}$ และพลังงานการบดอัดของดินชนิดใดๆ ดังนี้

$$\frac{\gamma_{d,max}}{(\gamma_{d,max})_{st}} = 0.70 + 0.05 \ln E \quad (4.4)$$

เมื่อ $(\gamma_{d,max})_{st}$ คือ หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่พลังงานการบดอัดมาตรฐาน

สมการที่ 4.3 และ 4.4 เป็นสมการเอกภาพที่รวมอิทธิพลชนิดของดิน สามารถใช้หา OMC และ $\gamma_{d,max}$ ของดินที่พลังงานการบดอัดใดๆ เมื่อทราบค่า OMC และ $\gamma_{d,max}$ ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามลำดับ

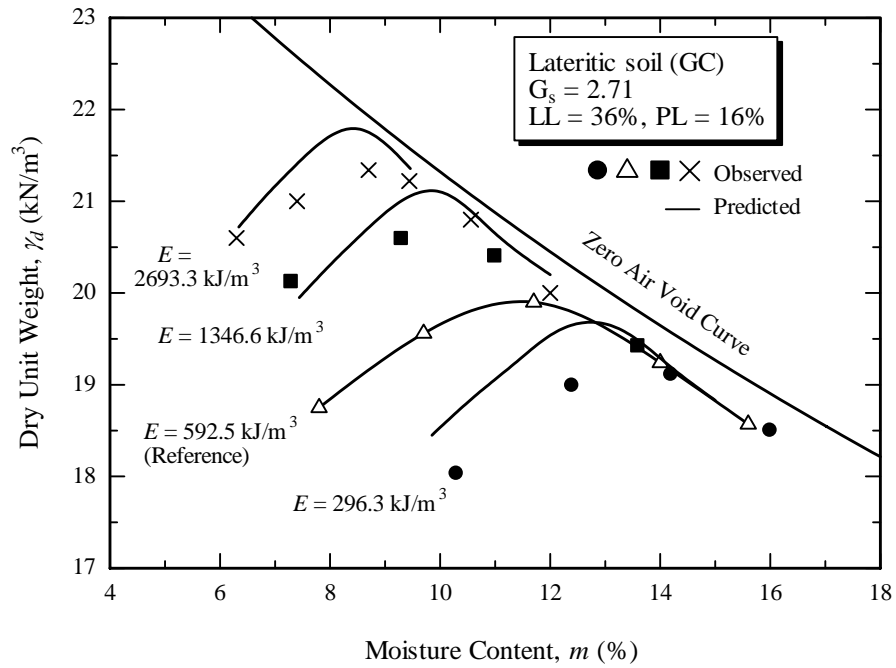
4.1.4 วิธีสร้างกราฟการบดอัด จากหัวข้อที่แล้ว ลักษณะของกราฟการบดอัดของดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดได้ถูกวิเคราะห์ เส้นโค้งการบดอัดทางด้านแห้งสามารถวาดโดยอาศัยสมการที่ 4.2 ส่วนเส้นโค้งการบดอัดทางด้านเปียกสามารถวาดโดยอาศัยสมการที่ 4.3 และ 4.4 ดังนั้น เราสามารถทำนายเส้นกราฟการบดอัด ภายใต้พลังงานการบดอัดค่าต่างๆ จากข้อมูลกราฟการบดอัดของดินชนิดหนึ่ง ภายใต้พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ได้ดังวิธีต่อไปนี้

1. จากข้อมูลการบดอัดดินภายใต้พลังงานการบดอัดอ้างอิงค่าหนึ่ง (อาจใช้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน) จะทราบจุดเหมาะสม (OMC และ $\gamma_{d,max}$) และหาปริมาณน้ำ (m) ที่ค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (S) ทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสม 2 ถึง 3 ค่า หาค่าเฉลี่ยของ $(m/S^{0.5})_{st}$
2. คำนวณหาปริมาณน้ำ (m) ของพลังงานการบดอัดที่ต้องการทราบโดยอาศัยสมการที่ 4.2
3. คำนวณหาจุดเหมาะสมของกราฟการบดอัดที่พลังงานที่ต้องการทราบ โดยอาศัยสมการที่ 4.3 และ 4.4
4. เขียนกราฟการบดอัดดินทางด้านแห้งจนถึงจุดเหมาะสม หน่วยน้ำหนักดินแห้ง (γ_d) ที่สอดคล้องกับปริมาณน้ำ (m) และระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (S) ใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

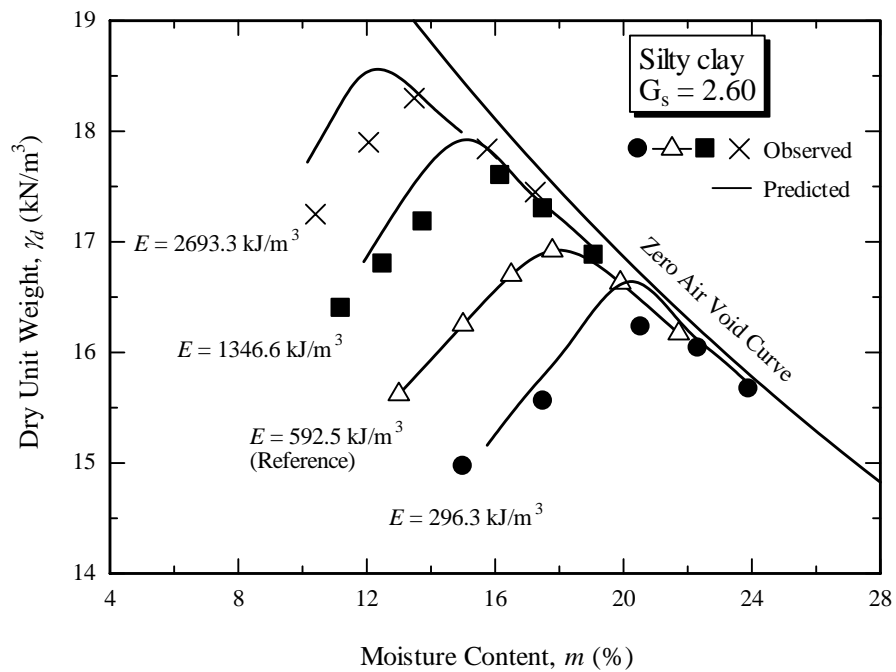
$$\gamma_d = \left(\frac{\gamma_w}{1/G_s + m/S} \right)$$

5. สมมติว่าเส้นโค้งการบดอัดที่ด้านเปียกสำหรับทุกพลังงานการบดอัดต่อเนื่องกัน ลากเส้นโค้งเชื่อมจุดเหมาะสมที่ได้จากการคำนวณในข้อที่ 3

ผลการทำนายกราฟการบดอัดเปรียบเทียบกับข้อมูลดินลูกรัง (ศิรชาติและสมบัติกระแสด, 2544) และดินเหนียวปนดินตะกอน (Turnbull, 1950) แสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากราฟการบดอัดดินที่ได้จากการทำนายให้ผลที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมาก



รูปที่ 4.12 กราฟการบดอัดดินลูกรังที่ได้จากผลทดสอบและการทำนาย
 (ธีรชาติและสมบัติกระแส, 2544)



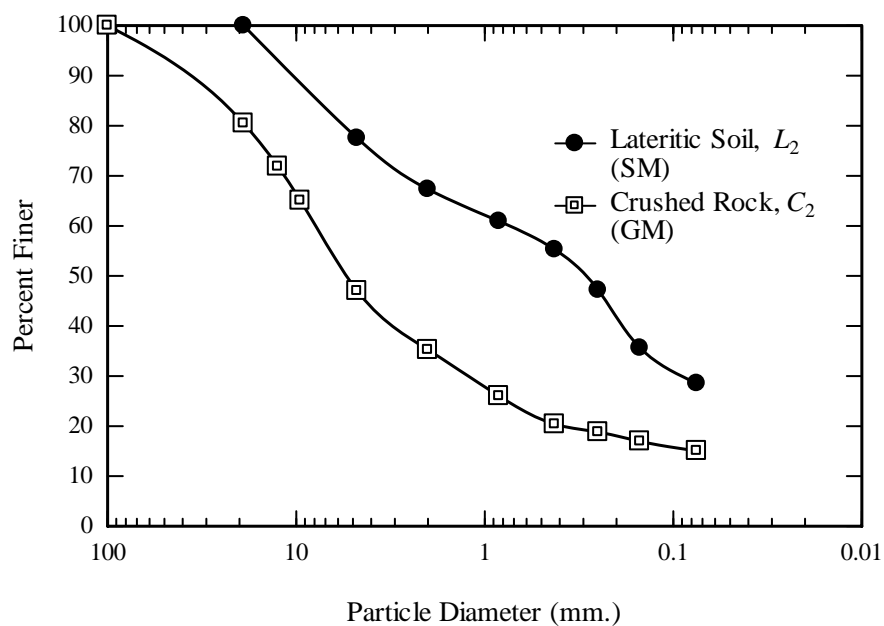
รูปที่ 4.13 กราฟการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอนที่ได้จากผลทดสอบและการทำนาย
 (Turnbull, 1950)

4.2 แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด

4.2.1 คุณสมบัติของดินตัวอย่าง ผลการวัดคุณสมบัติของดินทั้งสองชนิด พบว่า ดินลูกรังแหล่งที่ 2 ประกอบด้วยกรวดและทรายในปริมาณ 33 และ 39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนประกอบที่เหลือเป็นดินตะกอน ในปริมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก ส่วนหินคลุกแหล่งที่ 2 ประกอบด้วยกรวดในปริมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประกอบที่เหลือเป็นทราย และดินตะกอนในปริมาณ 20 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก โดยอาศัยการจำแนกในระบบเอกภาพ ดินลูกรังแหล่งที่ 2 และหินคลุกแหล่งที่ 2 จัดเป็นทรายปนดินตะกอน (SM) และกรวดปนดินตะกอน (GM) ตามลำดับ คุณสมบัติของดินตัวอย่าง ดังในตารางที่ 4.3 และลักษณะการกระจายขนาดคละของเม็ดดิน ดังในรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของดินลูกรังแหล่งที่ 2 และหินคลุกแหล่งที่ 2

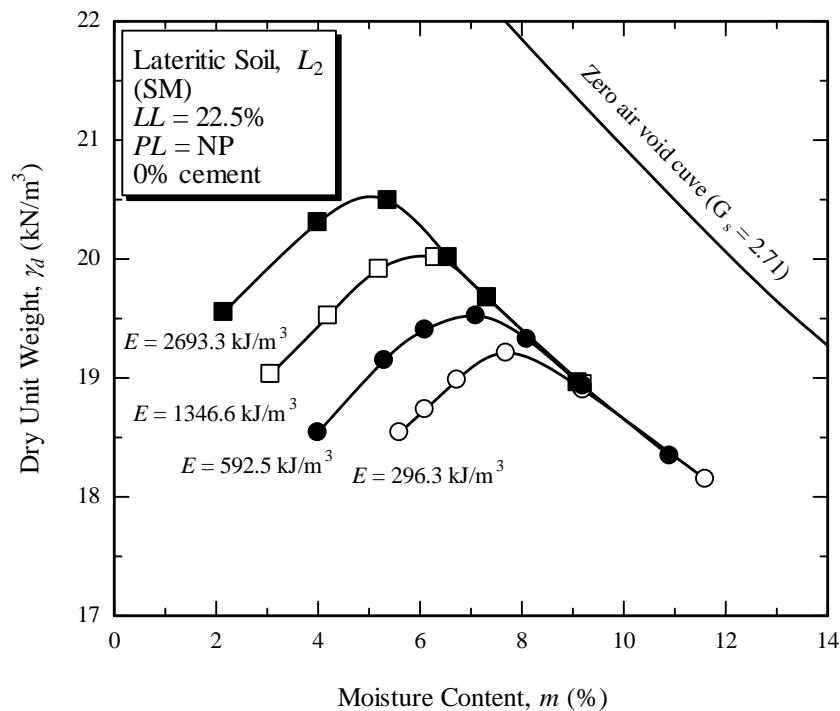
Soil Properties	Lateritic Soil, L_2	Crushed Rock, C_2
1. Specific Gravity	2.71	2.70
2. Liquid Limit, %	22.5	-
3. Plastic Limit, %	NP	NP
4. Unified Soil Classification System	SM	GM



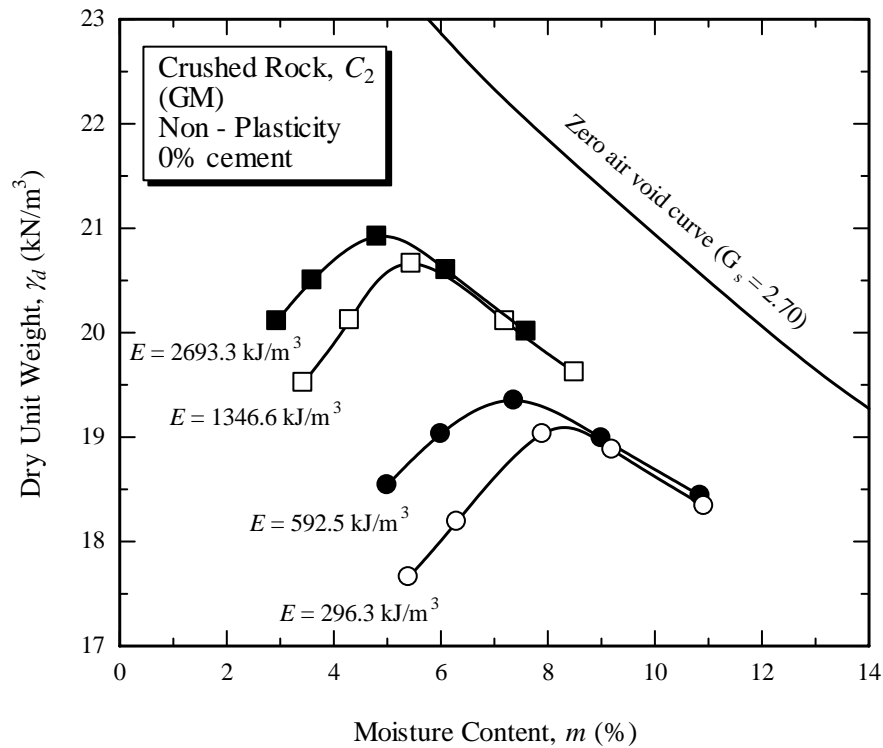
รูปที่ 4.14 การกระจายขนาดคละของดินลูกรังแหล่งที่ 2 และหินคลุกแหล่งที่ 2

4.2.2 กราฟการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของดินไม่ผสมซีเมนต์ รูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเหมาะสม (OMC) และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$) ของดินลูกรังแหล่งที่ 2 และหินคลุกแหล่งที่ 2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า สำหรับดินแต่ละชนิด เมื่อใช้พลังงานการบดอัดที่สูงกว่าจะให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดสูงกว่า แต่ให้ค่าปริมาณน้ำเหมาะสมน้อยกว่าการใช้พลังงานการบดอัดที่ต่ำ ค่าปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินลูกรังแหล่งที่ 2 และหินคลุกแหล่งที่ 2 ที่พลังงานการบดอัดทั้ง 4 ค่า ดังตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าดินตัวอย่างทั้งสองชนิดมีค่าปริมาณน้ำเหมาะสม และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าจะมีขนาดคละแตกต่างกันก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากว่าดินทั้งสองชนิดต่างเป็นดินที่ไม่มีค่าสภาพพลาสติก (Non - plasticity)

รูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ที่บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 และ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และจะเห็นว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่บดอัดด้วยปริมาณน้ำทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสมจะมีค่าแปรผันตามพลังงานที่บดอัดและมีค่าลดลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น แต่สำหรับกำลังอัดแกนเดียวทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสมกำลังอัดของดินบดอัดจะมีค่าแปรผันเป็นปฏิภาคกลับกับปริมาณน้ำในมวลดิน แม้ว่าจะทำการบดอัดด้วยพลังงานที่แตกต่างกันก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.19



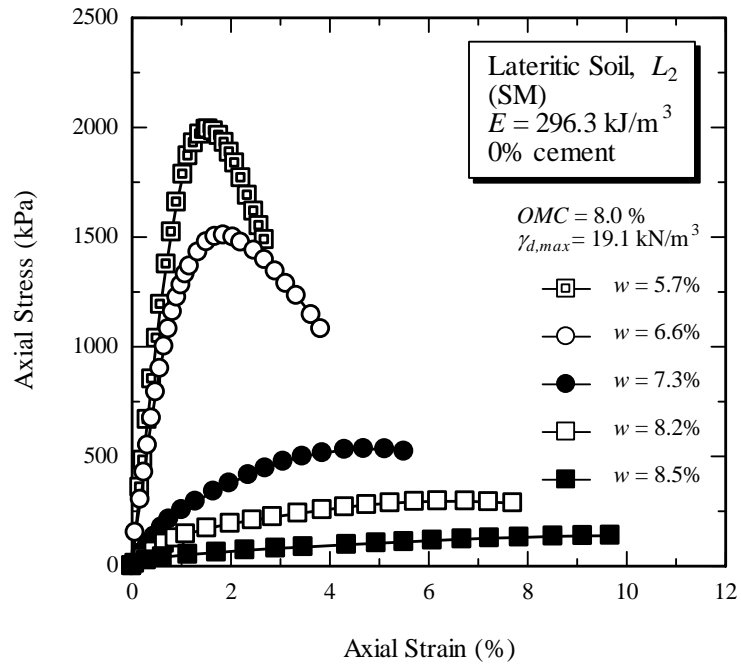
รูปที่ 4.15 กราฟการบดอัดดินลูกรังแหล่งที่ 2



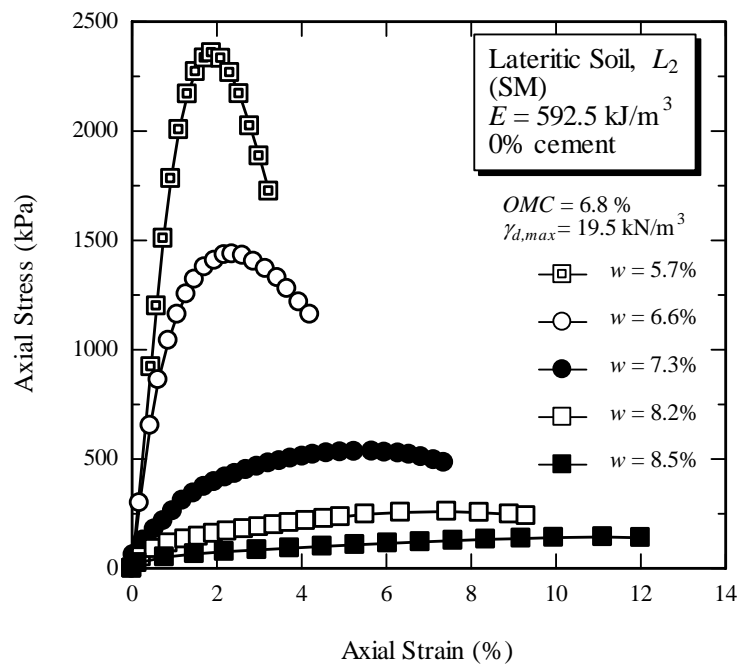
รูปที่ 4.16 กราฟการบดอัดหินคลุกแหล่งที่ 2

ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินลูกรังแหล่งที่ 2 และหินคลุกแหล่งที่ 2

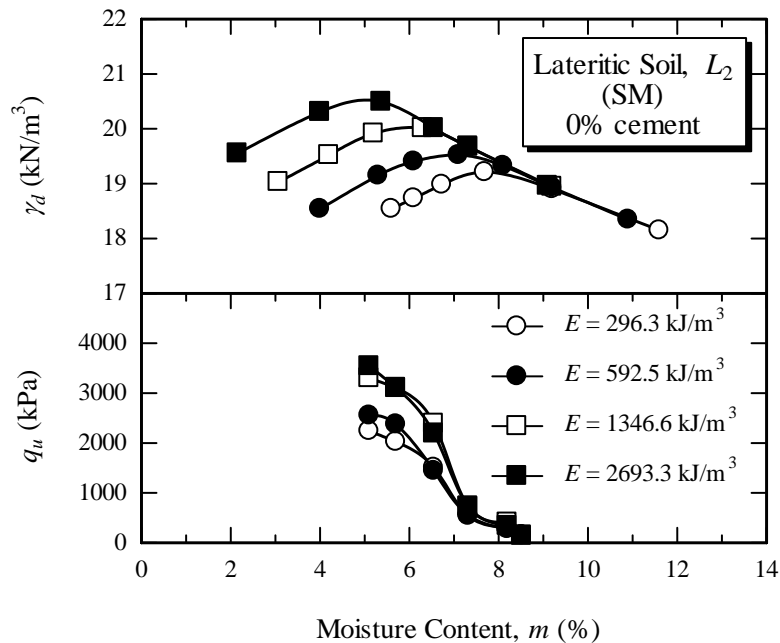
Energy per unit volume	Lateritic Soil, L_2 (SM)		Crushed Rock, C_2 (GM)	
	OMC (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	OMC (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)
1. Half standard proctor ($E = 296.3 \text{ kJ/m}^3$)	8.0	19.2	8.3	19.1
2. Standard proctor ($E = 592.5 \text{ kJ/m}^3$)	6.8	19.5	7.4	19.4
3. Half modified proctor ($E = 1346.6 \text{ kJ/m}^3$)	6.2	20.0	5.5	20.6
4. Modified proctor ($E = 2693.3 \text{ kJ/m}^3$)	5.4	20.6	4.8	20.9



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของดินลูกรังแหล่งที่ 2 บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

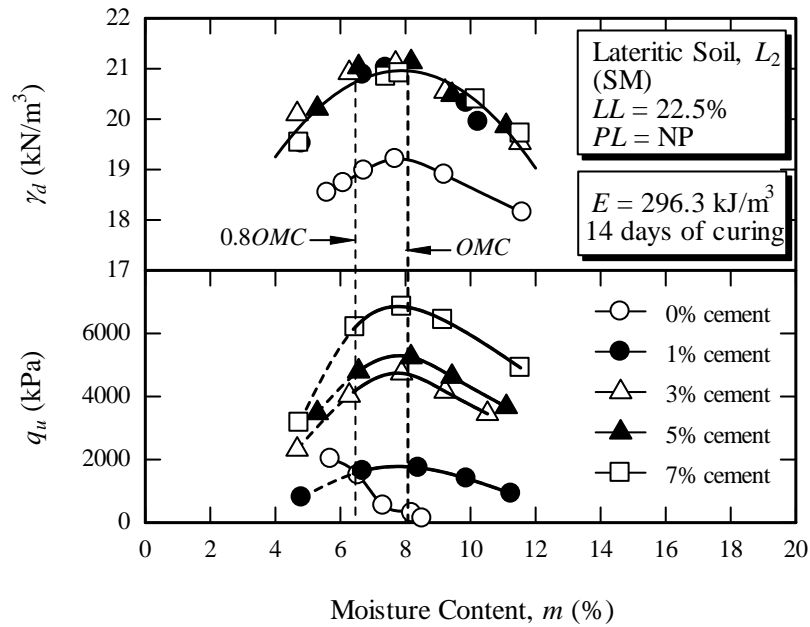


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของดินลูกรังแหล่งที่ 2 บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

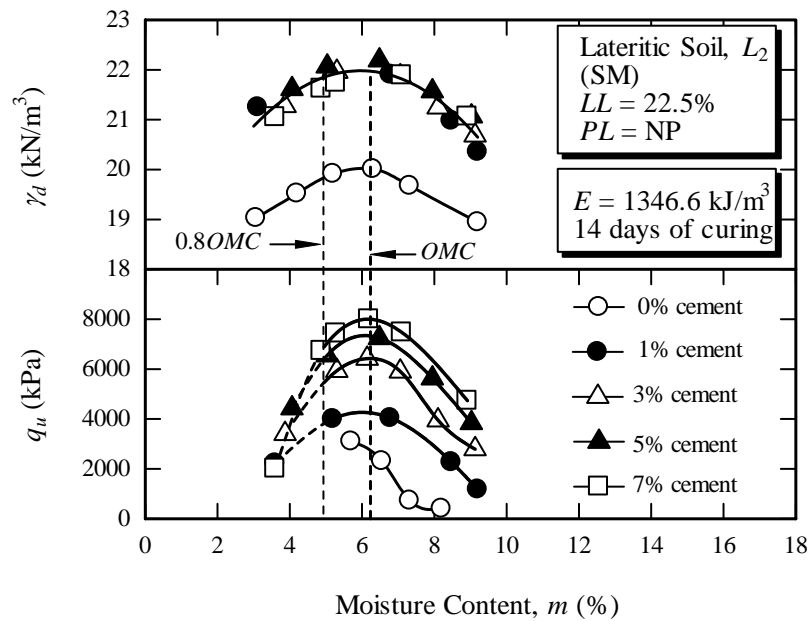


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น - กำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณน้ำของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ที่บดอัดด้วยพลังงาน 4 ค่า

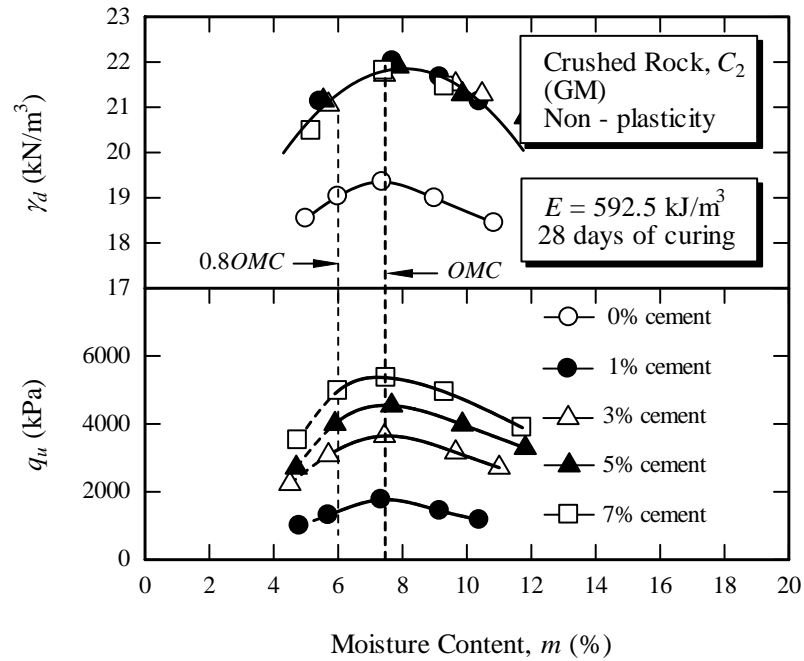
4.2.3 กราฟการบดอัดและความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณน้ำของดินซีเมนต์ กราฟการบดอัดของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ แสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ที่พลังงานแบบครึ่งมาตรฐาน และแบบครึ่งสูงกว่ามาตรฐาน ตามลำดับ อายุบ่ม 14 วัน ส่วนรูปที่ 4.22 และ 4.23 เป็นกราฟการบดอัดของหินคลุกแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ ที่พลังงานแบบมาตรฐาน และแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามลำดับ อายุบ่ม 28 วัน จะเห็นว่า กราฟการบดอัดของดินผสมซีเมนต์และดินไม่ผสมซีเมนต์จะมีค่าปริมาณน้ำเหมาะสมใกล้เคียงกันมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าเดียวกัน แต่หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินผสมซีเมนต์จะมีค่าสูงกว่าดินไม่ผสมซีเมนต์ และมีค่าใกล้เคียงกันทุกๆปริมาณซีเมนต์ กราฟการบดอัดสามารถแทนด้วยฟังก์ชันพาราโบลา (Parabolic Function) ซึ่งมีความสมมาตรรอบแกนที่ผ่านจุดสูงสุดของกราฟ ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณน้ำ จะมีความสมมาตรจนกระทั่งถึงปริมาณน้ำมีค่าประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำเหมาะสมเท่านั้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่า ถ้าปริมาณน้ำในมวลดินมีค่าน้อยกว่านี้จะทำให้ปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณน้ำทางด้านหนึ่งมีความสมมาตรกับด้านเปือก ในช่วงที่ปริมาณน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 80 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสม นอกจากนี้ปริมาณน้ำที่ทำให้กำลังอัดแกนเดียวและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์มีค่าสูงสุด คือปริมาณน้ำเหมาะสม



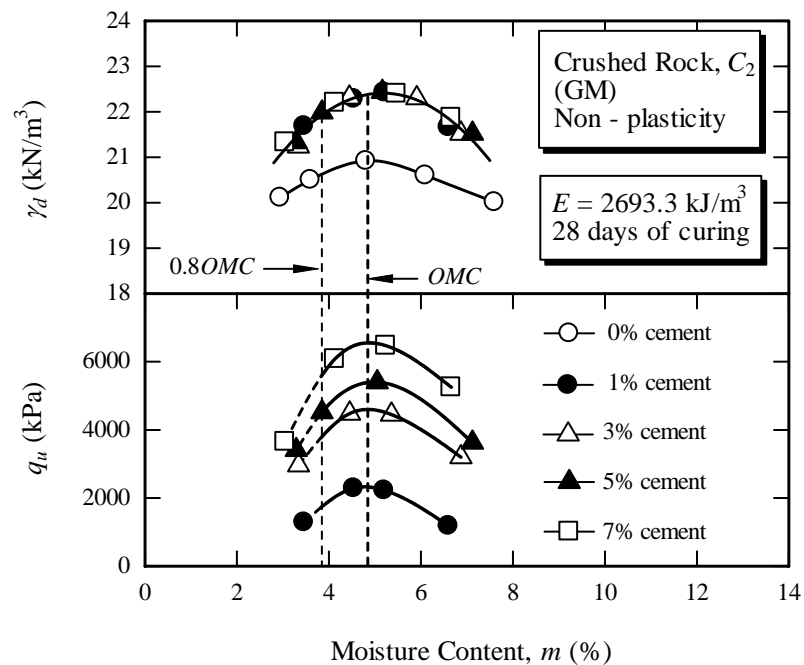
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรัง แหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ อายุบ่ม 14 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบครึ่งมาตรฐาน



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรัง แหล่งที่ 2 อายุบ่ม 14 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบครึ่งสูงกว่ามาตรฐาน



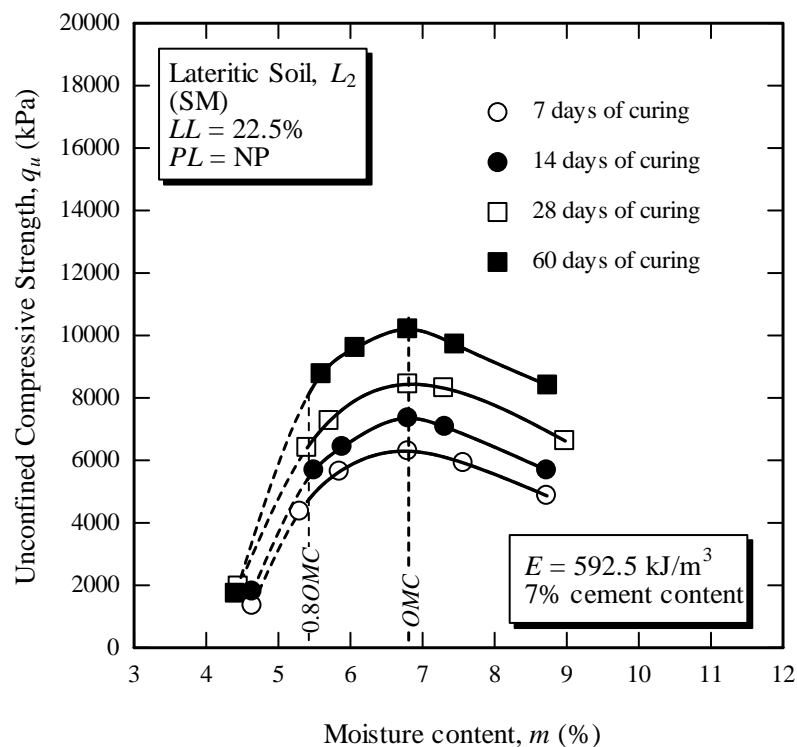
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของหินคลุก แหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ อายุบ่ม 28 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน



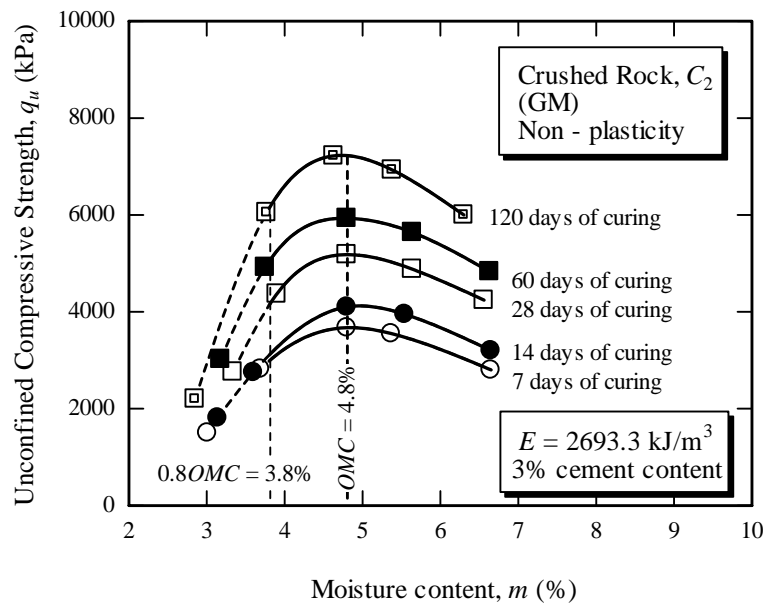
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของหินคลุก แหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ อายุบ่ม 28 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

4.2.4 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดแสดงในรูปที่ 4.24 สำหรับดินลูกรังแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ในปริมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7, 14, 28 และ 60 วัน และรูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณน้ำของหินคลุกแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ในปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7, 14, 28, 60 และ 120 วัน ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.24 และ 4.25 จะเห็นว่า ที่พลังงานการบดอัดและปริมาณซีเมนต์ค่าหนึ่ง กำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม นอกจากนั้นยังพบอีกว่า แม้ว่าอายุบ่มของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณน้ำที่ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุดยังคงเป็นปริมาณน้ำเหมาะสม และในช่วงระหว่างปริมาณน้ำ 80 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสม กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านหนึ่งจะยังคงมีลักษณะสมมาตรกับทางด้านเป็ยกรอบแกนที่ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุด



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ และกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ที่ปริมาณซีเมนต์ 7 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

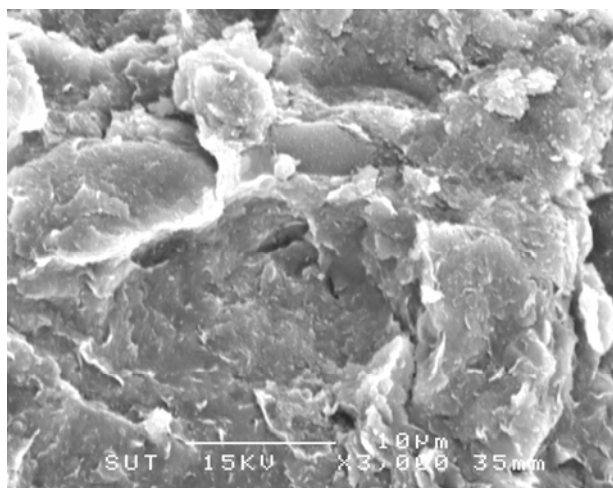


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ และกำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกแหล่งที่ 2 ที่ปริมาณซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

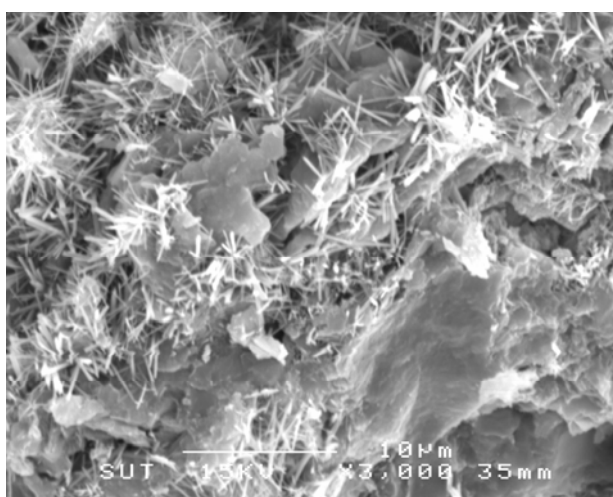
4.2.5 เปรียบเทียบดินเม็ดหยาบกับดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ไม่ผสมซีเมนต์บดอัด แสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 จะเห็นว่า สำหรับดินเม็ดหยาบ แรงเสียดทานเนื่องจากการขัดกัน (Interlocking) ที่จุดสัมผัสระหว่างเม็ดดิน และแรง Matrix Suction เป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมกำลังและการเสียรูป เมื่อปริมาณน้ำในมวลดินเพิ่มขึ้น กำลังต้านทานแรงเฉือนและการต้านทานการเสียรูปจะมีค่าลดลง เนื่องจากแรง Matrix Suction ลดลง

รูปที่ 4.26 ถึง 4.28 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างเม็ดดินจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ของดินลูกรังแหล่งที่ 2 โดยรูปที่ 4.26 และ 4.27 แสดงโครงสร้างเม็ดดินไม่ผสมซีเมนต์ และผสมซีเมนต์ปริมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ อายุบ่ม 7 วัน ตามลำดับ ที่บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำ 8.5 เปอร์เซ็นต์ เท่ากัน จะเห็นว่า ดินที่ผสมเข้ากับซีเมนต์และน้ำเม็ดดินจะเชื่อมกันด้วยซีเมนต์เจล เมื่อซีเมนต์เจลเกิดการแข็งตัวจะมีรูปร่างเป็นแท่งสี่เหลี่ยม แต่ละแท่งยาวประมาณ 3 ไมครอน แทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินทำให้เม็ดดินมีจุดสัมผัสกันมากขึ้น โครงสร้างของมวลดินจึงมีความต่อเนื่องกันและแข็งแรง ส่วนรูปที่ 4.28 แสดงโครงสร้างเม็ดดินผสมซีเมนต์ ปริมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ อายุบ่ม 7 วัน ที่บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำ 5 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า จะไม่พบแท่งซีเมนต์เจลตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เนื่องจากปริมาณน้ำมีไม่เพียงพอที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดได้สมบูรณ์ โครงสร้าง

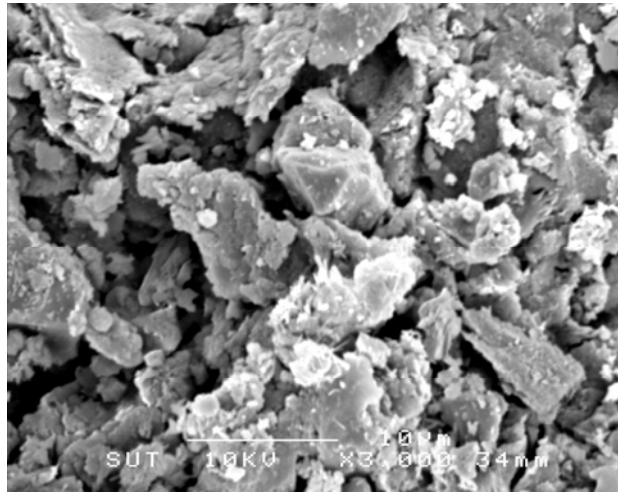
ของมวลดินจึงไม่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากเดิม และเนื่องจากซีเมนต์เจลเกิดจากการรวมตัวของซีเมนต์และน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม ดังนั้น ปริมาณน้ำในมวลดินจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด



รูปที่ 4.26 โครงสร้างของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ไม่ผสมซีเมนต์ บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปริมาณน้ำ 8.5 เปอร์เซ็นต์ (ขยาย 2000 เท่า)

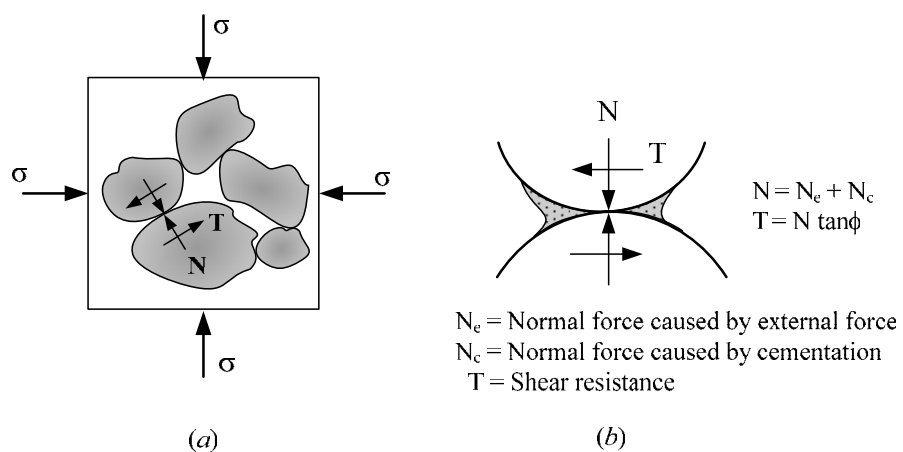


รูปที่ 4.27 โครงสร้างของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ ในปริมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำ 7.5 เปอร์เซ็นต์ อายุบ่ม 7 วัน บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (ขยาย 2000 เท่า)



รูปที่ 4.28 โครงสร้างของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ ในปริมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำ 5.0 เปอร์เซ็นต์ อายุบ่ม 7 วัน บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (ขยาย 2000 เท่า)

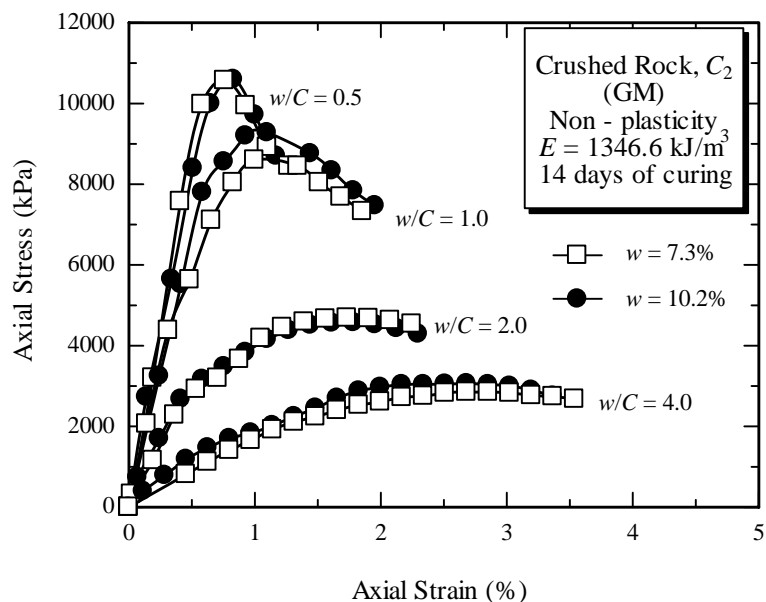
รูปที่ 4.29 แสดงจุดต่อระหว่างเม็ดดินและแรงที่จุดต่อ พันธะเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำทำให้หน่วยแรงตั้งฉากเพิ่มขึ้น และทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.29(b) ความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานนี้จะแปรผันตามปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม



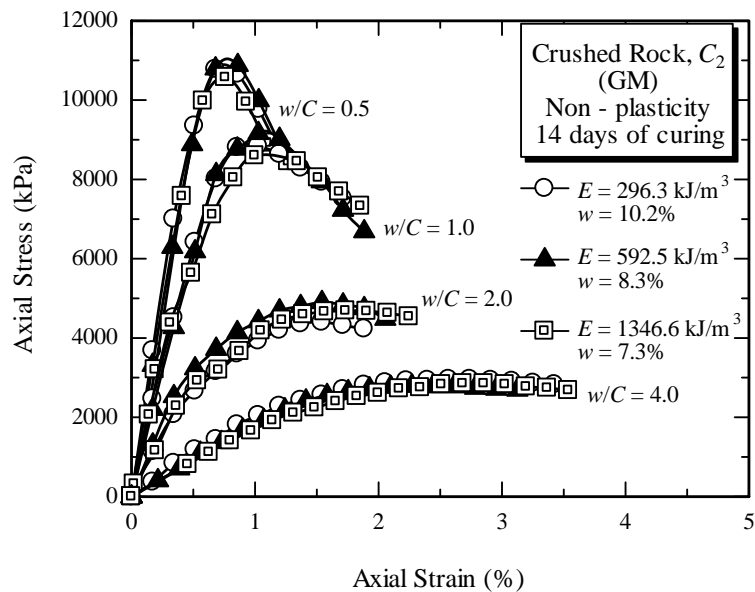
รูปที่ 4.29 แบบจำลองโครงสร้างดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัดและแรงที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดดิน

4.2.6 ทฤษฎีกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด การศึกษาพฤติกรรมกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดจะใช้หินคลุกแหล่งที่ 2 บดอัดด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม ด้วยพลังงาน 3 ค่า ได้แก่ 296.3, 592.5, และ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมมี 3 ค่า ได้แก่ 7.3, 8.3 และ 10.2 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาณน้ำเหมาะสมของพลังงานการบดอัดทั้งสามค่า แสดงในตารางที่ 4.4) โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์ให้ได้ w/C เท่ากัน 4 ค่า ได้แก่ 4.0, 2.0, 1.0 และ 0.5 ผลแรงอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่ใช้พลังงานการบดอัดเท่า และต่างกัน แต่มี w/C เท่ากัน แสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ

รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดตามแนวแกนของหินคลุกแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 14 วัน โดยแปรผันปริมาณน้ำ 2 ค่า คือ 7.3 และ 10.2 เปอร์เซ็นต์ และบดอัดด้วยพลังงาน 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่ w/C เท่ากัน 4 ค่า จะเห็นว่า แม้ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์จะแตกต่างกัน ถ้าอัตราส่วน w/C มีค่าเท่ากันกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวแกนของดินตัวอย่างจะมีลักษณะเดียวกันและมีค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากัน ส่วนรูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดตามแนวแกนของหินคลุกแหล่งที่ 2 ที่พลังงานการบดอัดและปริมาณน้ำต่างกัน แต่ค่า w/C เท่ากัน จะเห็นว่า กำลังอัดแกนเดียวมีค่าเท่ากัน แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านเปียกไม่แปรผันตามพลังงาน พลังงานที่ใช้บดอัดเพียงแค่มีส่วนช่วยลดปริมาณน้ำเหมาะสมเท่านั้น



รูปที่ 4.30 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของหินคลุกแหล่งที่ 2 ที่ค่า w/C เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 บดอัดด้วยพลังงาน 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



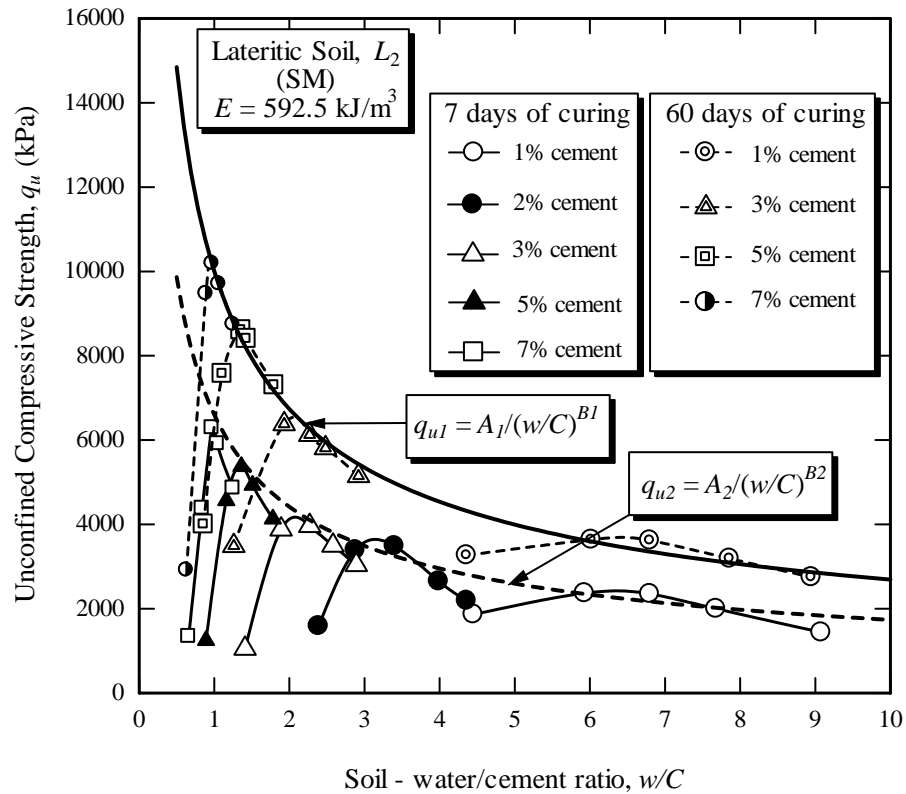
รูปที่ 4.31 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของหินคลุกแหล่งที่ 2 ที่ค่า w/C เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 ภายใต้พลังงานการบดอัดที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.30 และ 4.31 สามารถสรุปได้ว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านเปียกจะแปรผันเป็นปฏิภาคกลับกับค่า w/C เท่านั้น ดังนั้น เพื่อให้ได้กำลังอัดแกนเดียวที่สูง เราต้องผสมดินเข้ากับซีเมนต์และน้ำที่ค่า w/C ต่ำๆ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณซีเมนต์หรือลดปริมาณน้ำในมวลดิน เมื่อลดปริมาณน้ำจำเป็นต้องเพิ่มพลังงานการบดอัดให้สูงขึ้น เราอาจกล่าวได้ว่า พลังงานการบดอัดมิได้มีผลโดยตรงต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านเปียก แต่เป็นเพียงตัวแปรที่ช่วยให้สามารถบดอัดดินซีเมนต์ที่ปริมาณน้ำน้อยๆ ได้เท่านั้น ด้วยสมการที่ 4.3 เราสามารถประมาณค่าปริมาณน้ำเหมาะสมที่พลังงานการบดอัดใดๆ ได้ ถ้ามีผลทดสอบการบดอัดที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง

รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับค่า w/C ของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ที่บดอัดทางด้านเปียกด้วยพลังงานแบบมาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 และ 60 วัน โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์ระหว่าง 1 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ ความสัมพันธ์นี้สามารถแทนด้วยฟังก์ชันกำลัง (Power Function) ดังสมการที่ 4.5

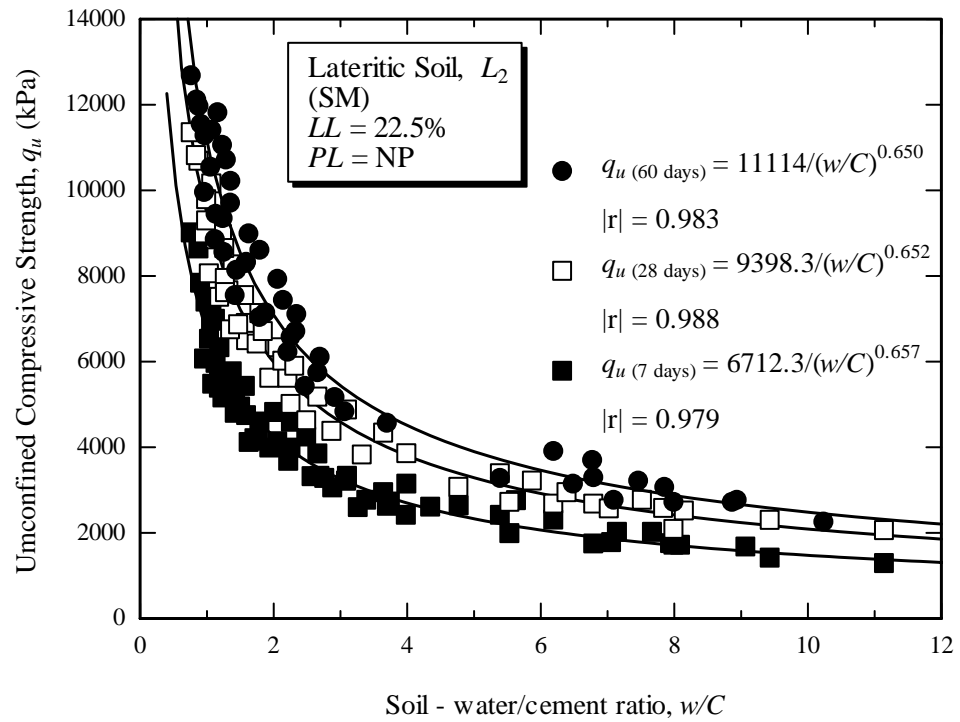
$$q_u = \frac{A}{(w/C)^B} \quad (4.5)$$

เมื่อ A และ B เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการเทียบปรับข้อมูล (Curve Fitting)

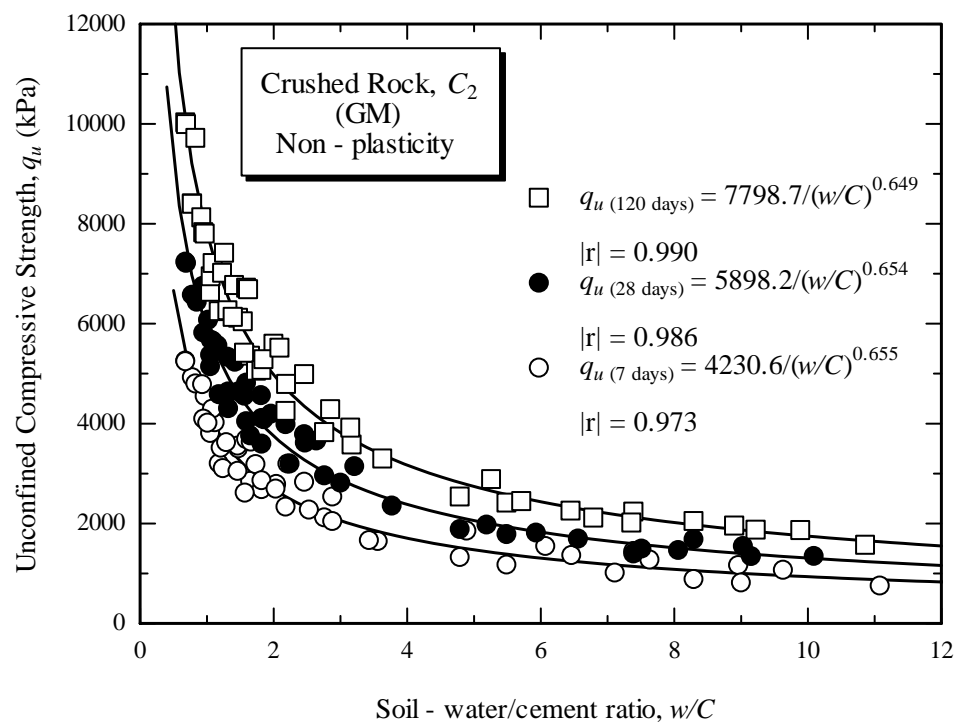


รูปที่ 4.32 กำลังอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ที่บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร อายุบ่ม 7 และ 60 วัน

รูปที่ 4.33 และ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ ในช่วงปริมาณน้ำระหว่าง 100 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสม ที่อายุบ่ม 7, 28 และ 60 วัน สำหรับดินลูกรังแหล่งที่ 2 และที่อายุบ่ม 7, 28 และ 120 วัน สำหรับหินคลุกแหล่งที่ 2 ตามลำดับ ภายใต้พลังงานการบดอัด 296.3, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยปริมาณซีเมนต์ระหว่าง 1 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า พารามิเตอร์ A เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ดินที่ทำปฏิกิริยาได้ดีกับซีเมนต์จะมีค่า A สูง และสำหรับดินชนิดหนึ่งๆ A จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ขณะที่พารามิเตอร์ B จะเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์เท่านั้น และเนื่องจากซีเมนต์ที่ใช้เป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ดังนั้น B จึงมีค่าค่อนข้างคงที่สำหรับดินทุกชนิด ตารางที่ 4.3 แสดงค่าของพารามิเตอร์ A และ B ของดินที่ใช้ในการทดสอบ ตามอายุบ่มต่างๆ



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินลูกรังแหล่งที่ 2



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของหินคลุกแหล่งที่ 2

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ A และ B สำหรับดินซีเมนต์ตัวอย่างบดอัด ที่อายุบ่มต่างๆ

Curing Time (Days)	Lateritic Soil, L_2 (SM)		Crushed Rock, C_2 (GM)	
	A	B	A	B
7	6712.3	0.66	4230.6	0.65
14	7877.7	0.66	4768.0	0.66
28	9398.3	0.65	5808.2	0.65
60	11114.0	0.65	7146.1	0.65
120	12881.0	0.64	7798.7	0.65

จากตารางที่ 4.5 ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ B มีค่าประมาณ 0.65 ดังนั้น ถ้าเขียนอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสมที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง จะได้สมการที่ 4.6

$$\left\{ \frac{q_{(w/C)_1}}{q_{(w/C)_2}} \right\} = \left[\frac{A / (w/C)_1^{0.65}}{A / (w/C)_2^{0.65}} \right] = \left[\frac{(w/C)_2}{(w/C)_1} \right]^{0.65} \quad (4.6)$$

เมื่อ $q_{(w/C)_1}$ และ $q_{(w/C)_2}$ คือกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าและกำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่าที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ $(w/C)_1$ และ $(w/C)_2$ ตามลำดับ สมการที่ 4.6 จะให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ค่า w/C และที่พลังงานการบดอัดตามต้องการได้ เมื่อทราบค่า w/C และกำลังอัดที่บดอัดด้านเปียกด้วยพลังงานบดอัดค่าใดค่าหนึ่ง ที่อายุบ่มเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม สมการที่ 4.6 ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือ ไม่สามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่อายุบ่มใดๆ ได้ ซึ่งในทางปฏิบัติ อาจมีสถานการณ์ที่เราจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณซีเมนต์เพื่อลดอายุบ่ม แต่ยังคงการกำลังอัดเท่าเดิม ดังนั้นจึงต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณน้ำในมวลดิน และอายุบ่ม

4.2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม ที่พลังงานการบดอัด ปริมาณน้ำ ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์บดอัดด้านเปียก ความสัมพันธ์เช่นเดียวกันสำหรับหินคลุกแหล่งที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.35 จากการสังเกต พบว่า ที่ค่า w/C ค่าหนึ่ง กำลังอัดแกนเดียวขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์

A เนื่องจากพารามิเตอร์ B มีค่าเกือบคงที่ ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.7

$$\frac{q_{D1}}{q_{D2}} = \frac{A_{D1}}{A_{D2}} \quad (4.7)$$

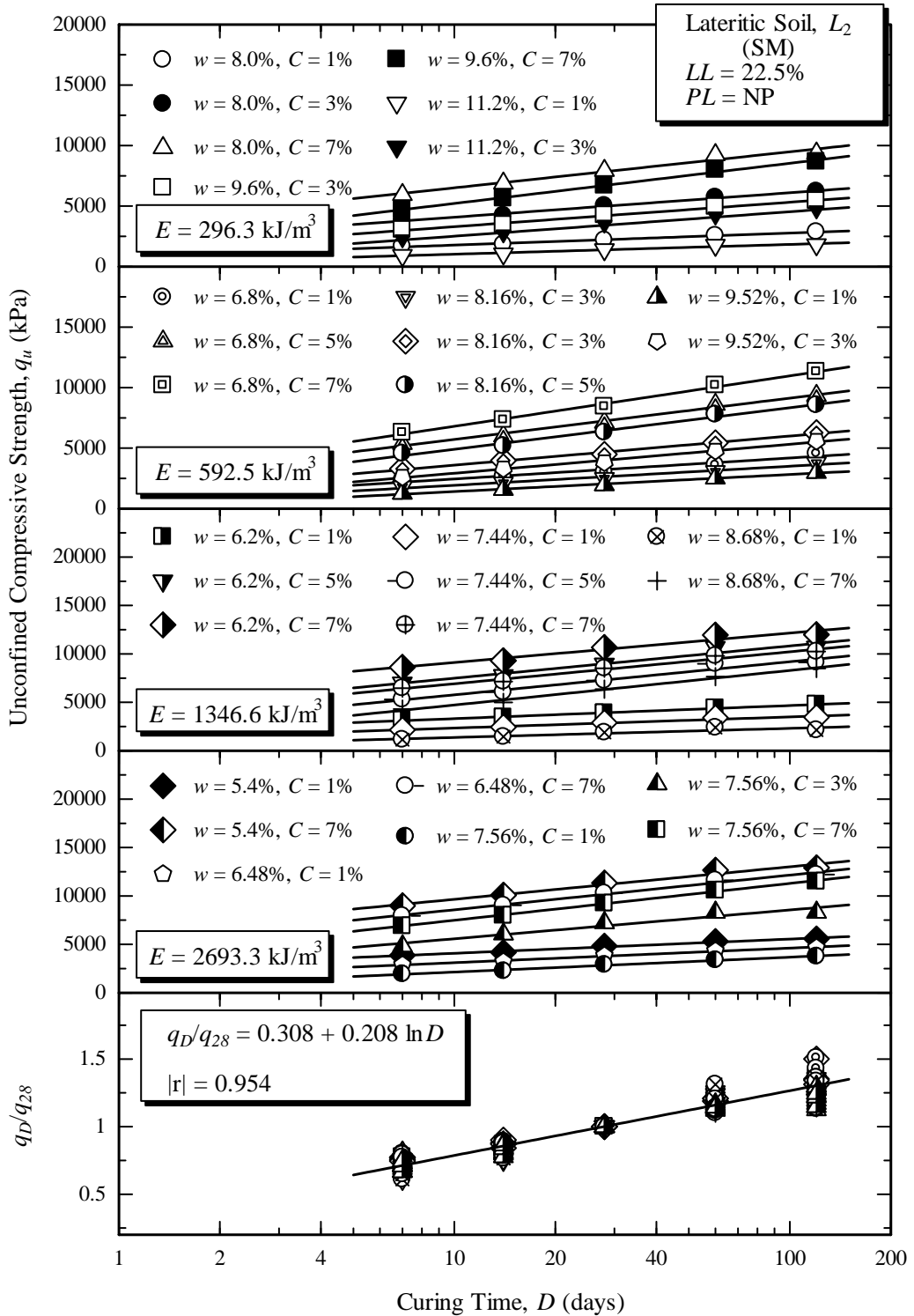
เมื่อ q_{D1} คือกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าที่อายุบ่ม D_1 วัน และ q_{D2} คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่าที่อายุบ่ม D_2 วัน และ A_{D1} และ A_{D2} คือค่าของพารามิเตอร์ A ที่สอดคล้องกับ D_1 และ D_2 ตามลำดับ

เนื่องจากค่าของพารามิเตอร์ A จะขึ้นอยู่กับชนิดของดินบดอัด และอายุบ่ม แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวต่อเวลาควรจะต้องมีค่าเท่ากันสำหรับดินซีเมนต์บดอัดทุกชนิด ที่ผสมซีเมนต์ชนิดเดียวกัน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้กำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น ดังนั้น สมการที่ 4.7 จึงน่าจะใช้ได้สำหรับดินซีเมนต์บดอัดทุกชนิดที่ผสมซีเมนต์ชนิดเดียวกัน ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ถ้าเราสามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดเมื่อระบุอายุบ่มเพียงอย่างเดียว

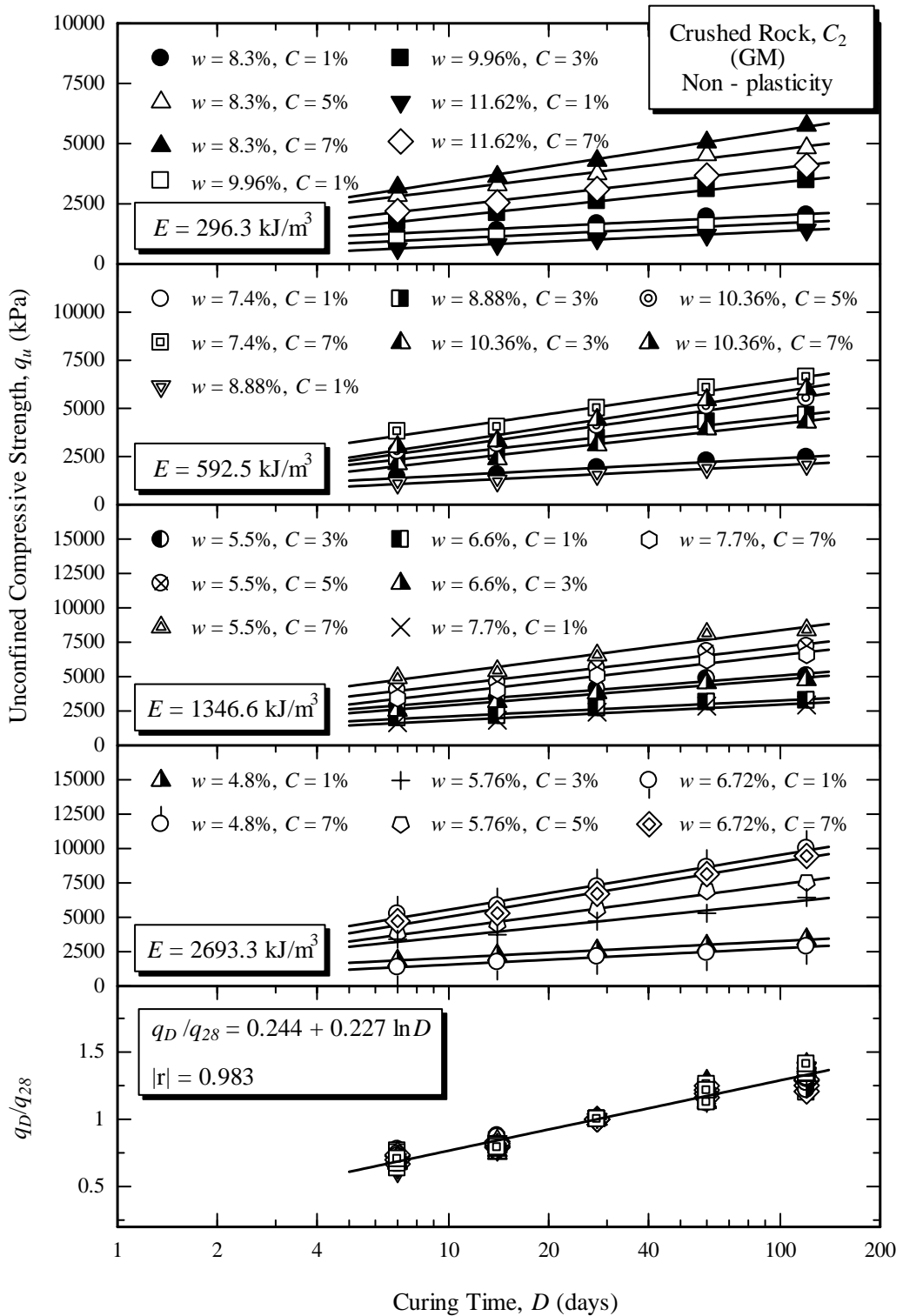
จากแนวคิดข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการ Normalization ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว (q_u) กับอายุบ่ม (D) ของดินลูกรังแหล่งที่ 2 และหินคลุกแหล่งที่ 2 ภายใต้สภาวะตัวแปรการบดอัดต่างๆ ได้แก่ พลังงานการบดอัด ปริมาณน้ำ และปริมาณซีเมนต์ โดยใช้กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน เป็นค่าอ้างอิง ดังในรูปที่ 4.34 และ 4.35 ผลการ Normalization ดินทั้งสองชนิด ดังในรูปที่ 4.36 จะได้สมการอัตรากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดดังสมการที่ 4.8

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.269 + 0.219 \ln D \quad (4.8)$$

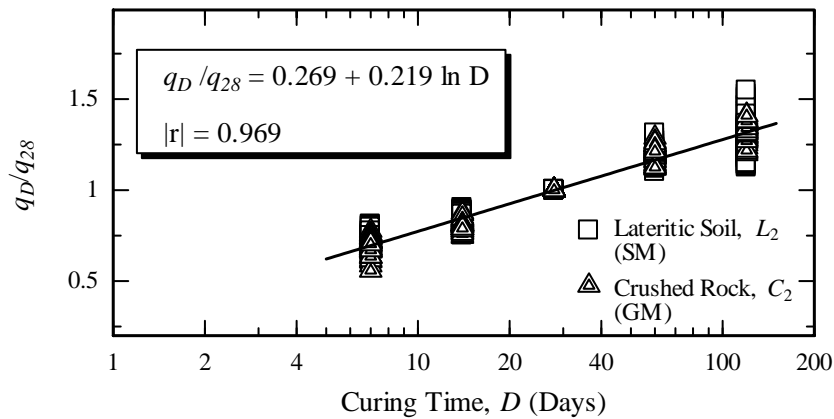
เมื่อ q_D และ q_{28} คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม D ใดๆ และกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของหินคลุกแหล่งที่ 2 ผสมซีเมนต์บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์ ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ และการ Normalization

4.2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม เนื่องจากค่าของพารามิเตอร์ B มีค่าประมาณ 0.65 สำหรับดินทุกชนิดทำให้เราได้สมการอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสมที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ใดๆ ที่อายุบ่มค่าหนึ่ง (สมการที่ 4.6) และจากการรวมสมการดังกล่าวนี้ กับสมการอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่มใดๆ ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ค่าหนึ่ง (สมการที่ 4.8) เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม ของดินซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ในช่วงที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 10 ดังต่อไปนี้

จากสมการที่ 4.6 เมื่อเขียนสมการอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่อายุบ่ม D ที่ค่า $(w/C)_1$ และ $(w/C)_2$ ใดๆ และที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ค่า $(w/C)_1$ และ $(w/C)_3$ ใดๆ จะได้ดังสมการที่ 4.6ก และ 4.6ข ตามลำดับ

$$q_{(w/C)_1,D} = q_{(w/C)_2,D} \left[\frac{(w/C)_{2,D}}{(w/C)_{1,D}} \right]^{0.65} \quad (4.6ก)$$

$$q_{(w/C)_1,28} = q_{(w/C)_3,28} \left[\frac{(w/C)_{3,28}}{(w/C)_{1,28}} \right]^{0.65} \quad (4.6ข)$$

เมื่อหารสมการที่ 4.6 ด้วยสมการที่ 4.6x จะได้

$$\frac{q_{(w/C)1,D}}{q_{(w/C)1,28}} = \left\{ \frac{q_{(w/C)2,D}}{q_{(w/C)3,28}} \right\} \frac{\left[\frac{(w/C)_{2,D}}{(w/C)_{1,D}} \right]^{0.65}}{\left[\frac{(w/C)_{3,D}}{(w/C)_{1,28}} \right]^{0.65}}$$

แต่ $(w/C)_{1,D}$ และ $(w/C)_{1,28}$ มีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$\frac{q_{(w/C)1,D}}{q_{(w/C)1,28}} = \left\{ \frac{q_{(w/C)2,D}}{q_{(w/C)3,28}} \right\} \left[\frac{(w/C)_{2,D}}{(w/C)_{3,D}} \right]^{0.65} \quad (4.6ก)$$

เทอมทางซ้ายมือของสมการที่ 4.6ก เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม D วัน ต่อกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ค่า w/C เดียวกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับสมการที่ 4.8 ดังนั้น เมื่อจัดให้อยู่ในรูปทั่วไปจะได้ดังสมการที่ 4.9

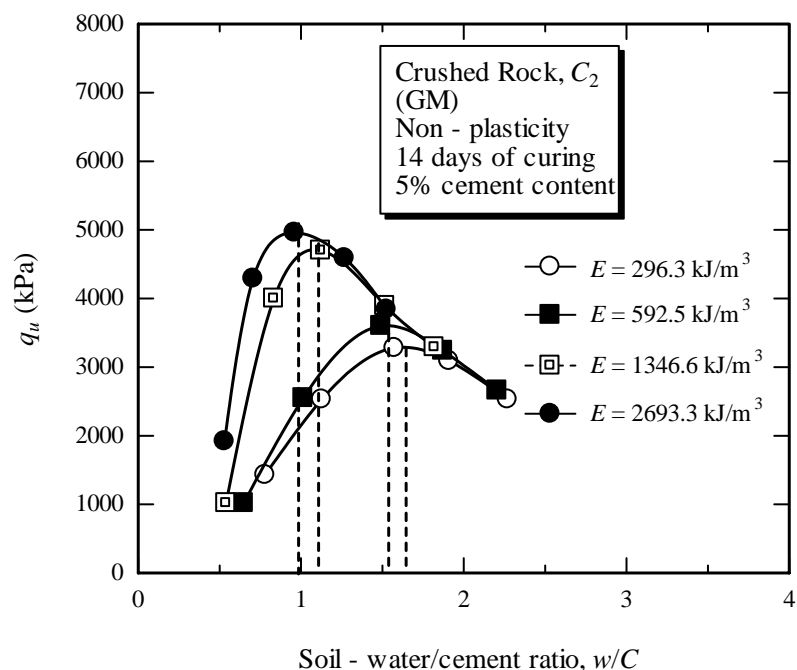
$$\left\{ \frac{q_{(w/C)D}}{q_{(w/C)28}} \right\} = \left[\frac{(w/C)_{28}}{(w/C)_D} \right]^{0.65} (0.269 + 0.219 \ln D) \quad (4.9)$$

เมื่อ $q_{(w/C)D}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบ ที่มีค่า (w/C) ใดๆ ที่อายุบ่ม D วัน และ $q_{(w/C)28}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทราบค่า ที่มีค่า w/C ใดๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน

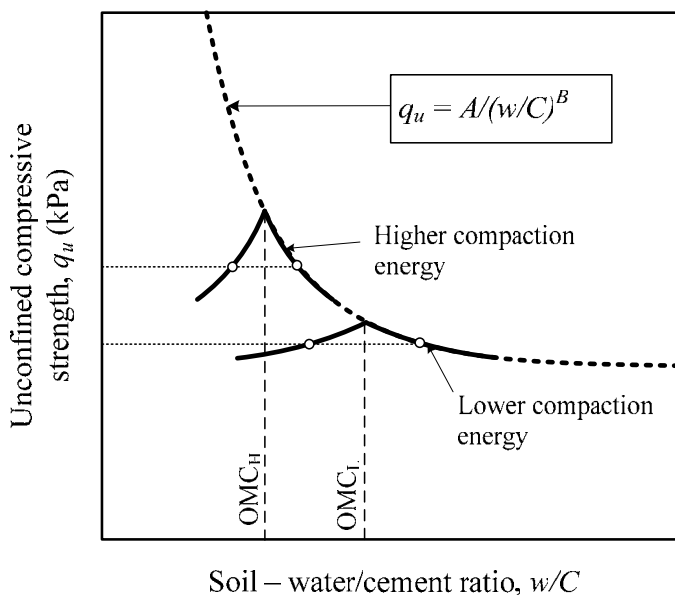
4.2.9 กำลังอัดแกนเดียวทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสม หัวข้อที่ผ่านมาระบุได้นำเสนอทฤษฎีกำลังอัด และสร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม โดยปริมาณน้ำที่ใช้สำหรับการบดอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสม ซึ่งกำลังอัดแกนเดียวขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาถึงกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสม

จากรูปที่ 4.31 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่บดอัดด้วยพลังงานแบบมาตรฐานทั้งทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม ตามปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มกำหนด จะเห็นว่ากำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ และที่ปริมาณ

ซีเมนต์ใดๆ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์จะเป็นรูปตัววีกลับหัว (Inverted V Shape) โดยกำลังอัดแกนเดียวทางด้านหนึ่งจะมีความสมมาตรกับด้านเป็ยกของปริมาณน้ำเหมาะสมในช่วงปริมาณความชื้นระหว่าง 80 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสม ทำนองเดียวกัน รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ ที่บดอัดภายใต้พลังงาน 296.3, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปริมาณซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์ และอายุบ่ม 14 วัน จะพบว่า พลังงานมีอิทธิพลต่อกำลังอัดแกนเดียวที่บดอัดทางด้านหนึ่งของปริมาณน้ำเหมาะสมอย่างมาก โดยกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์จะมีค่าสูงขึ้นตามพลังงาน และจะเห็นว่า ที่พลังงานการบดอัดใดๆ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์จะเป็นรูปตัววีกลับหัว ซึ่งด้านหนึ่งจะมีความสมมาตรกับด้านเป็ยก ในช่วงปริมาณน้ำประมาณ 80 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสม ผู้วิจัยจึงเสนอแบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวดังในรูปที่ 4.38 แบบจำลองจะให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านหนึ่งในช่วงปริมาณน้ำระหว่าง 80 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสม สมมาตรกับด้านเป็ยกที่พลังงานการบดอัดปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มที่สอดคล้องกัน ตามสมการที่ 4.3, 4.6, 4.8, และ 4.9



รูปที่ 4.38 อิทธิพลพลังงานการบดอัดต่อกำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกแหล่งที่ 2 ที่ปริมาณซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์ อายุบ่ม 14 วัน



รูปที่ 4.39 แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด

4.2.10 การตรวจสอบแบบจำลอง ในหัวข้อนี้ จะตรวจสอบความแม่นยำของสมการกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์ ที่บดอัดทางด้านเปียกและด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสมเมื่อใช้กับดินซีเมนต์บดอัดชนิดต่างๆ ดังนี้

1. ดินลูกรังแหล่งที่ 3 (ข้อมูลจาก ธีระชาติและสมบัติกระแสน, 2544) ชิดจำกัดเหลวและชิดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 36 และ 16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จัดเป็นกรวดปนดินเหนียว (GC) (จำแนกตามระบบ USCS) ปริมาณน้ำเหมาะสมเมื่อบดอัดด้วยพลังงาน 296.3 และ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ 13.5 และ 11.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2. ดินลูกรังแหล่งที่ 4 (ข้อมูลของผู้วิจัย) ชิดจำกัดเหลวและชิดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 53 และ 37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จัดเป็นทรายปนดินตะกอน (SM) (จำแนกตามระบบ USCS) ปริมาณน้ำเหมาะสมเมื่อบดอัดด้วยพลังงาน 296.3, 592.5 และ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ 12.6, 11.1 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3. ดินลูกรังแหล่งที่ 5 (ข้อมูลของผู้วิจัย) ชิดจำกัดเหลวและชิดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 39 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณน้ำเหมาะสมเมื่อบดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ 9.3 เปอร์เซ็นต์

4. หินคลุกแหล่งที่ 3 (ข้อมูลของผู้วิจัย) ไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก ปริมาณน้ำเหมาะสมเมื่อบดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ 6.0 เปอร์เซ็นต์

5. หินคลุกแหล่งที่ 3 ผสมกับดินลูกรังแหล่งที่ 5 ในอัตราส่วน 1:4 (ข้อมูลของผู้วิจัย) ชิดจำกัดเหลวและชิดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 35 และ 19 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ ปริมาณน้ำเหมาะสมเมื่อบดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ 8.0 เปอร์เซนต์

ผลการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ทั้ง 5 ชนิด แสดงในตารางที่ 4.6 ถึง 4.10 ซึ่งให้ผลใกล้เคียงมากกับกำลังอัดที่วัดได้ ทางวิศวกรรมความผิดพลาดของผลการทำนายอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังแหล่งที่ 3 ($LL = 36\%$, $PL = 16\%$)

ผสมซีเมนต์บดอัด จากแบบจำลองและจากการวัด (ข้อมูลของ ธีระชาติ และสมบัติ กระแส, 2544)

Energy (kJ/m ³)	OMC (%)	Moisture content, w (%)	Curing Time, D (days)	Cement content, C (%)	w/C	Predicted strength, q_{up} (kPa)	Observed strength, q_u (kPa)
296.3	13.5	13.5	3	3	4.5	791	986
296.3	13.5	13.5	3	5	2.7	1102	1185
296.3	13.5	13.5	7	3	4.5	1079	1200
296.3	13.5	13.5	7	5	2.7	1504	1562
296.3	13.5	13.5	7	7	1.9	1871	2048
296.3	13.5	13.5	14	3	4.5	1314	1265
296.3	13.5	13.5	14	5	2.7	1832	1718
296.3	13.5	13.5	14	7	1.9	2280	2279
296.3	13.5	13.5	28	3	4.5	1550	1479
296.3	13.5	13.5	28	5	2.7	2160	2248
296.3	13.5	13.5	28	7	1.9	2688	2868
592.5	11.5	11.5	7	3	3.8	1197	1536
592.5	11.5	11.5	14	5	2.3	2033	2281
592.5	11.5	11.5	14	7	1.6	2530	2807
592.5	11.5	11.5	28	3	3.8	1720	1786
592.5	11.5	11.5	28	5	2.3	2397	2551
592.5	11.5	11.5	28	7	1.6	Reference	3039*

หมายเหตุ * ค่าอ้างอิง

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังแหล่งที่ 4 ($LL = 53\%$, $PL = 37\%$)

ผสมซีเมนต์บดอัด จากแบบจำลองและการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย)

Energy (kJ/m ³)	Moisture content, w (%)	Curing Time, D (days)	Cement content, C (%)	w/C	Predicted strength, q_{up} (kPa)	Observed strength, q_u (kPa)	
OMC (%)							
296.3	12.6	13.3	7	1	13.3	539	460
296.3	12.6	12.0	7	1	13.2	542	597
296.3	12.6	13.9	7	3	4.6	1069	1212
296.3	12.6	15.2	7	3	5.1	1009	926
296.3	12.6	12.0	7	3	4.4	1106	1159
296.3	12.6	15.9	7	5	3.2	1366	1388
296.3	12.6	12.4	7	5	2.6	1573	1470
296.3	12.6	12.0	7	7	1.9	1919	1723
592.5	11.1	12.4	7	1	12.4	565	546
592.5	11.1	9.8	7	1	12.4	565	749
592.5	11.1	12.0	7	3	4.0	1176	1262
592.5	11.1	13.6	7	3	4.5	1085	1054
592.5	11.1	9.7	7	3	4.2	1145	1498
592.5	11.1	11.0	7	5	2.2	1735	1964
592.5	11.1	13.0	7	5	2.6	1556	1613
592.5	11.1	11.0	7	5	2.2	1717	1964
592.5	11.1	12.8	7	7	1.8	1957	2217
592.5	11.1	10.9	7	7	1.6	2128	2116
592.5	11.1	14.3	28	5	2.9	Reference	2087*
1346.6	10.0	9.5	7	3	3.2	1367	1673
1346.6	10.0	9.5	7	3	4.2	1135	1573
1346.6	10.0	12.1	7	5	2.4	1633	1549
1346.6	10.0	8.8	7	5	2.7	1527	1738

หมายเหตุ * ค่าอ้างอิง

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังแหล่งที่ 5 ($LL = 38.9\%$, $PL = 20.4\%$)

ผสมซีเมนต์บดอัด จากแบบจำลองและการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย)

Energy (kJ/m ³)	Moisture content, w (%)	Curing Time, D (days)	Cement content, C (%)	w/C	Predicted strength, q _{up} (kPa)	Observed strength, q _u (kPa)	
OMC (%)							
2693.3	9.3	11.6	7	1	11.6	505	517
2693.3	9.3	10.8	7	3	3.6	1080	706
2693.3	9.3	10.9	7	5	2.2	1496	1035
2693.3	9.3	12.8	7	5	2.6	1348	737
2693.3	9.3	9.6	7	7	1.4	2022	1204
2693.3	9.3	11.2	7	7	1.6	1829	915
2693.3	9.3	11.3	14	1	11.3	626	665
2693.3	9.3	10.8	14	3	3.6	1316	1378
2693.3	9.3	12.6	14	3	4.2	1190	835
2693.3	9.3	11.6	14	5	2.3	1751	1758
2693.3	9.3	10.0	14	7	1.4	2399	2686
2693.3	9.3	11.8	14	7	1.7	Reference	2143*
			28		1.7		2530

หมายเหตุ * ค่าอ้างอิง

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกแหล่งที่ 3 (Non - Plasticity)

ผสมซีเมนต์บดอัด จากแบบจำลองและการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย)

Energy (kJ/m ³)	Moisture content, w (%)	Curing Time, D (days)	Cement content, C (%)	w/C	Predicted strength, q _{up} (kPa)	Observed strength, q _u (kPa)	
OMC (%)							
2693.3	6.0	7.1	7	1	7.1	1246	1031
2693.3	6.0	6.8	7	3	2.3	2617	2130
2693.3	6.0	6.4	7	5	1.3	3795	3415
2693.3	6.0	6.4	14	3	2.1	3317	2994
2693.3	6.0	6.7	14	5	1.3	4488	4471
2693.3	6.0	8.1	14	5	1.6	3967	3441

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

Energy (kJ/m ³)	Moisture content, w (%)	Curing Time, D (days)	Cement content, C (%)	w/C	Predicted strength, q _{up} (kPa)	Observed strength, q _u (kPa)
2693.3	6.0	14	7	0.9	5874	5640
2693.3	6.0	14	7	1.1	Reference	5102.2*
		28		1.1		6045

หมายเหตุ * ค่าอ้างอิง

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด ที่ใช้อัตราส่วนดินลูกรังแหล่งที่ 5 ต่อหินคลุกแหล่งที่ 3 เท่ากับ 4: 1 (LL = 34.4%, PL = 19.1%) จากแบบจำลองและจากการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย)

Energy (kJ/m ³)	Moisture content, w (%)	Curing Time, D (days)	Cement content, C (%)	w/C	Predicted strength, q _{up} (kPa)	Observed strength, q _u (kPa)
2693.3	8.0	7	1	8.8	613	526
2693.3	8.0	7	5	1.9	1683	1930
2693.3	8.0	14	1	8.2	782	676
2693.3	8.0	14	3	3.6	1335	1419
2693.3	8.0	14	5	1.7	2158	2034
2693.3	8.0	14	5	1.9	1995	1755
2693.3	8.0	14	7	1.3	2588	2599
2693.3	8.0	14	7	1.6	Reference	2261*
		28		1.6		2670

หมายเหตุ * ค่าอ้างอิง

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาพฤติกรรมการบดอัดดิน เพื่อเสนอกราฟการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ และศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด เปรียบเทียบกับดินบดอัดไม่ผสมซีเมนต์ และเสนอสมการกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด โดยแปรผันชนิดของดิน พลังงานการบดอัด ปริมาณน้ำ ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม จากงานวิจัยมีข้อมูลที่สนับสนุนว่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์บดอัด ขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักแห้งและพันธะเชื่อมประสานของดินและซีเมนต์ และสรุปผลการวิจัยได้ตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

5.1.1 แบบจำลองการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ ผลการศึกษาหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัด โดยไม่ผสมซีเมนต์ พบว่า หน่วยน้ำหนักแห้งขึ้นอยู่กับการบดอัดและพลังงานการบดอัด นอกจากนี้ยังพบอีกว่า สำหรับดินทุกชนิดที่บดอัดทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสม หน่วยน้ำหนักแห้งจะแปรผันตามพลังงานการบดอัดและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่หน่วยน้ำหนักแห้งที่บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสมแปรผันตามพลังงานการบดอัดและแปรผันเป็นปฏิภาคกลับกับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ และกราฟหน่วยน้ำหนักแห้งสัมพันธ์กับปริมาณน้ำเป็นเส้นโค้งเดียวกันสำหรับทุกพลังงานการบดอัด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเสนอเส้นกราฟการบดอัดเป็นรูปตัววีกลับหัว ดังแสดงในรูปที่ 4.5

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและพลังงานที่บดอัดทางด้านแห้ง ที่พล็อตบนกราฟกึ่งล็อกการิทึม พบว่า สำหรับดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด พบว่าตัวแปร $(m/S^{0.5})/(m/S^{0.5})_{st}$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับพลังงานการบดอัด ดังสมการที่ 4.2

$$\frac{(m/S^{0.5})}{(m/S^{0.5})_{st}} = 2.153 - 0.181 \ln E \quad (4.2)$$

สมการนี้สามารถใช้ทำนายหน่วยน้ำหนักแห้งที่ปริมาณน้ำด้านแห้ง ภายใต้พลังงานการบดอัดใดๆ เมื่อทราบค่าตัวแปร $m/S^{0.5}$ ที่พลังงานการบดอัดค่าใดค่าหนึ่ง

ส่วนกราฟการบดอัดที่ด้านเปียกสำหรับทุกพลังงานการบดอัด สรุปได้ว่าเป็นเส้นโค้งเดียวกัน และต่อกันที่จุดเหมาะสม ดังนั้น เราสามารถสร้างกราฟการบดอัดได้ทันที เมื่อทราบค่า OMC และ d_{max} ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ โดยใช้สมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

$$\frac{OMC}{OMC_{st}} = 2.23 - 0.19 \ln E \quad (4.3)$$

$$\frac{\gamma_{d,max}}{(\gamma_{d,max})_{st}} = 0.70 + 0.05 \ln E \quad (4.4)$$

5.2.2 ทฤษฎีกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด ผู้วิจัยเสนอว่า “กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสมจะแปรผันเป็นปฏิภาคกลับกับอัตราส่วนปริมาณน้ำในมวลดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Soil - water/cement ratio, w/C) เท่านั้น จะไม่ขึ้นอยู่กับพลังงานการบดอัด การเพิ่มพลังงานจะช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้บดอัดเท่านั้น” ที่ปริมาณซีเมนต์และพลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดที่สามารถบดอัดดินซีเมนต์เพื่อให้ได้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุดคือปริมาณน้ำเหมาะสม

5.2.3 แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด โดยอาศัยทฤษฎีกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด ผู้วิจัยเสนอแบบจำลองกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, q_u) ในรูปของฟังก์ชันกำลัง (Power Function) ดังสมการที่ 4.5

$$q_u = \frac{A}{(w/C)^B} \quad (4.5)$$

เมื่อ A และ B เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ โดย A จะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และอายุบ่ม ในขณะที่ B มีค่าคงที่เท่ากับ 0.65

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม ของดินซีเมนต์ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ สำหรับ w/C ในช่วง 0.5 ถึง 10 ดังสมการที่ 4.9

$$\left\{ \frac{q_{(w/C)_D}}{q_{(w/C)_{28}}} \right\} = \left[\frac{(w/C)_{28}}{(w/C)_D} \right]^{0.65} (0.269 + 0.219 \ln D) \quad (4.9)$$

เมื่อ $q_{(w/C)_D}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่กำหนดค่า w/C ใดๆ ที่อายุบ่ม D วัน และ $q_{(w/C)_{28}}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ค่า w/C นั้น ที่อายุบ่มบ่ม 28 วัน

สำหรับกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านหนึ่ง พบว่า มีความสมมาตรกับด้านเป็ยกในช่วงปริมาณน้ำระหว่าง 80 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสม ดังนั้น จึงใช้เส้นโค้งด้านเป็ยกทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านหนึ่งได้

แบบจำลองที่เสนอ เมื่อใช้ทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ 5 ชนิด ให้ผลใกล้เคียงกับกำลังอัดที่วัดได้

5.2 ข้อเสนอแนะการใช้สมการและงานวิจัยต่อไป

5.2.1 การใช้สมการที่ 4.2 เพื่อสร้างกราฟการบดอัดจะต้องตรวจสอบให้แน่ใจก่อนว่า ปริมาณน้ำ หรือ เส้นระดับความอึดด้วยน้ำของกราฟการบดอัดอ้างอิงอยู่ทางด้านหนึ่งของปริมาณน้ำเหมาะสม และหน่วยน้ำหนักแห้งต้องแปรผันตามระดับความอึดด้วยน้ำ

5.2.2 การใช้สมการแบบจำลองทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด จะต้องตรวจสอบให้แน่ใจก่อนว่า ปริมาณน้ำของดินบดอัด มีค่าระหว่าง 100 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสม และถ้าเป็นการบดอัดทางด้านหนึ่งปริมาณน้ำของดินบดอัดต้องไม่น้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสม

5.2.3 เนื่องจากสภาพใช้งานในสนามอาจมีกรณีที่ดินซีเมนต์ถูกน้ำท่วมขังทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ลดลง จึงต้องทำการวิจัยกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดในสภาพถูกแช่น้ำ

5.2.4 เนื่องจากพารามิเตอร์ B เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์ และงานวิจัยนี้ศึกษาซีเมนต์เพียงชนิดเดียว ดังนั้น เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ B จึงต้องทำการวิจัยกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด โดยเปลี่ยนชนิดของปูนซีเมนต์ หรือเติมสารผสมเพิ่มอื่นๆ เช่น จีเถ้าลอย จีเถ้าแกลบ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- Blotz, L.R., Benson, C.H., and Boutwell, G.P. (1998). Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 124, pp. 907-912.
- Clare, K.E. and Pollard, A.E. (1954). The effect of curing temperature the compressive strength of soil-cement mixture. **Geotechnique**, Vol. 4, No. 3, pp. 97-107.
- Daniel, D. and Benson, C. (1990). Water content-density criteria for compacted soil liners. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 116(12), pp. 1181-1130.
- Davidson, D.T. (1961). Soil stabilization with portland cement. **Highway Research Board, Bulletin**. 292, 200 p.
- Davidson, D.T., Pitre, G.L., Matoes, M. and Kalankamary, P.G. (1962). Moisture-density, moisture-strength and compaction characteristics of cement treated soil mixtures. **Highway Research Board, Bulletin**. 353, pp. 42-63.
- Draper, N.R. and Smith H. (1966). **Application regression analysis**, Newyork, John Wiley& Son, 407 p.
- Felt, E.J. (1955). Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures. **Highway Research Board, Bulletin**. 108, pp. 38-63.
- Gurtug, Y, and Sridharan, A. (2002). Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils. **Geotechnique**, 52(10), pp. 761-763.
- Highway Research Board Committee on Soil – Cement Stabilization, (1959). Definition of terms relating to soil-portland cement stabilization. **Highway Research Abstracts**, Vol. 29, No. 6, pp. 28-29.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S. (2003). Assessment of strength development in cement - admixed high water content clays with Abrams' law as a basis. **Geotechnique**, Vol. 53, No. 4, pp. 439-444.

- Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. (2005). Clay-water/cement ratio identity of cement admixed soft clay. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, Vol. 131, No. 2, pp. 187-192.
- Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972). Soil stabilization. **Sydney, Butterworths**, pp. 64-69.
- Jeng, Y.S., and Strokm, W.E. (1976). Prediction of the shear strength and compaction characteristics of compacted fine-grained cohesive soils. **United States Waterways Experiment Station, Soil and Pavement Laboratory**, Vicksburg, Miss.
- Lambe, T.W., Mitchaels, A.S. and Moh, Z.C. (1959). Improvements of soil-cement with alkali compounds. **Highway Research Board, Bulletin**. 241, pp. 67-103.
- Leadabrand, J.A., (1956). Some engineering aspects of soils-cement mixture. **Mid-South Section, ASCE**, April 27, pp. 64-69.
- 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**, Vol. 30, No. 358, pp. 287-292.
- Maner, A.W. (1952). Curing soil cement base. **Proceeding of Highway Research Board**, Vol. 31, Washington, D.C., National Research Council, pp. 540-548.
- Metcalf, J.B. (1977). Principles and application of cement and lime stabilization. **Australian Road Research Board**, No. 49, 20 p.
- Mitchell. J.K. and E.L. Jack, S.A. (1966). The fabric of soil-cement and its formation. **Proceeding 14th National Conference on Clay and Clay Minerals**, Vol. 26, pp. 297-305.
- Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T.S. (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content. **Soils and Foundations, Japan Geotechnical Society (JGS)**, Vol.41, No.5, pp. 33-45.
- Nagaraj, T.S., Srinivasa Murthy, B.R., and Vatasala, A. (1994). Analysis and prediction of soil behavior. **Wiley Eastern Limited**, 294p.
- Nagaraj, T.S. and Bindumadhava, (1992). Analysis of compaction characteristics of fine grained soils. **Proceedings of Indian Geotechnical Engineering Conference**, Calcutta, 1: pp. 441-444.

- Ng, S.C. (1966). Cement stabilization of lateritic soils, **Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program**, No. 125, Seato Graduate School of Engineering, pp. 55-65.
- Norling, L.T. and Peckard, R.G. (1958). Expedited short - cut test method for determining cement factors for sandy soils. **Highway Research Board, Bulletin**. 198, pp. 20-31.
- Pandian, N.S., Nagaraj, T.S., and Manoj, M. (1997). Re-examination of compaction characteristics of fine-grained soils. **Geotechnique**, 47(2), pp. 363-366.
- Portland Cement Association, (1959). **Soil - Cement Laboratory Handbook**, Illinois, Skokie, 60p.
- Reinhold, F. (1955). Elastic behavior of soil-cement mixtures. **Highway Research Board, Bulletin**. 108, pp. 128-137.
- Ruenkrairergsa, Teerachat. (1982). Principle of soil stabilization. **Group Training in Road Construction**, Bangkok, Thailand, pp. 17-26.
- Santucci De Magistris, F. and Tatsuoka, F. (2004). Effects of moulding water content on the stress-strain behavior of a compacted silty sand. **Soils and Foundations**, 44(2), pp. 85-101.
- Sherwood, P.T. (1958). The effect of sulphates on cement stabilization clay. **Highway Research Board, Bulletin**. 198, pp. 45-54.
- Terrel, R.L., Barenberg, E.J., Mitchel, 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, 120 p.
- Turnbull, W.J. (1950). Compaction and strength tests on soil. **Annual Meeting ASCE (January)**.
- Winterkorn, H.F. and Chandrasekharn, E.C. (1951). Lateritic soils and their stabilization. **Highway Research Board, Bulletin**. 44, pp. 10-29.
- ทรงพล บุญมาดี, 2529 ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength กับ Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์, **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันพระจอมเกล้าธนบุรี**, 196 หน้า.
- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแส จรัสกร, 2544 กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน, **รายงานวิจัยฉบับที่ วพ. 188 ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง**, 170 หน้า.

ประวัติผู้เขียน

นายวรรัช เกษกัน เกิดเมื่อวันที่ 22 กันยายน พ.ศ. 2512 ที่จังหวัดยโสธร จบชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3 ที่ศูนย์การศึกษานอกโรงเรียนจังหวัดยโสธร เมื่อปี พ.ศ. 2534 และชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ที่โรงเรียนตระกูลประเทืองวิทยาคม เมื่อปี พ.ศ. 2538 ปัจจุบันสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2542 หลังจากจบการศึกษาแล้วได้เข้าทำงานทั้งงานบริษัทรับเหมาก่อสร้าง และผู้ช่วยวิจัยเป็นเวลา 4 ปี จากนั้นจึงเข้ารับการศึกษาคือต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2546