



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาความคงทนและกำลังของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์
ในประเทศไทย

Durability and Strength of Cement-Treated Base Highway Materials in Thailand

นามผู้วิจัย นายสันต์ ปั่นสังข์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์บารเมศ วรรณะภูติ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนานันท์, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์กฤษณะ เพ็ญสมบูรณ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์จิรโรจน์ สุกครัตน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาความคงทนและกำลังของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพ
ด้วยซีเมนต์ในประเทศไทย

Durability and Strength of Cement-Treated Base Highway Materials in Thailand

โดย

นายवंธันต์ ปั่นสังข์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วสันต์ ปั่นสังข์ 2553: การศึกษาความคงทนและกำลังของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุง
คุณภาพด้วยซีเมนต์ในประเทศไทย ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์บาร์เมศ วรธนะภูติ, Ph.D. 112 หน้า

วัสดุพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างทางใหม่ ขยายถนน หรือ
ซ่อมแซมถนน มากขึ้น เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนวัสดุและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น
แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นของการใช้วัสดุที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์คือการแตกร้าวที่ผิวทางเมื่อเปิด
การจราจรได้ไม่นาน ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากการละลายคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุ และ
ประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพงานระหว่างการก่อสร้าง ทำให้เกิดการแตกร้าวของชั้นพื้น
ทาง (Shrinkage Crack) และเกิดการแตกสะท้อนขึ้นไปยังชั้นผิวทาง (Reflective Cracks)

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในการใช้ปรับปรุงวัสดุชั้นพื้นทาง
ในด้านกำลังรับน้ำหนักบรรทุก รวมทั้ง ความคงทนของวัสดุ และพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่าง
กำลังวัสดุ และความคงทนของวัสดุ โดยทำการศึกษาจากแหล่งวัสดุ 6 แหล่ง ได้แก่ จากจังหวัด
กาญจนบุรี นครราชสีมา อุดรดิตถ์ เพชรบุรี ปราจีนบุรี และเพชรบูรณ์ ซึ่งอัตราส่วนของซีเมนต์
ในการทดสอบอยู่ในช่วง 1-8 % โดยน้ำหนัก และการทดสอบที่ใช้ประกอบด้วย unconfined
compressive test, wetting and drying test, slaking test, and wheel track test และผลการวิจัยทำให้
สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนกับค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุขึ้นมา โดย
สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกกำหนดปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในการออกแบบส่วนผสมของ
ดินซีเมนต์ให้กำลังรับน้ำหนักที่เพียงพอและทนทานต่อสภาวะการใช้งานทางรูปแบบต่างๆ อีกทั้ง
ยังสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมได้อีกด้วย

Wasan Pansang 2010: Durability and Strength of Cement-Treated Base Highway Materials in Thailand. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Mr. Barames Vardhanabhuti, Ph.D. 112 pages.

Cement treated base and subbase materials have been utilized increasingly for new highway construction projects as well as maintenance works in order to minimize a problem of decrease in good quality materials, and environmental concern from rock mining. However, in some cases, cracks are found on the highway pavement underneath with cement treated base and subbase after the highway was opened for few years. The damage could be due to low physical properties of the material, and poor quality control during construction, leading to shrinkage crack of base and subbase layers and reflecting to the pavement surface.

This research investigates influences of cement contents on compressive strength and durability of cement treated base and subbase materials. An Empirical relationship between compressive strength and durability properties is developed for crushed rock and soil aggregate. The crushed rock and soil aggregate samples were obtained from 6 locations representing borrowing materials from different parts of Thailand, including Kanchanaburi, Nakorn Ratchasima, Utharadit, Pechburi, Prachinburi, and Pechabul provinces. The cement content used in the research ranges from 1 to 8 percents by weight. Series of laboratory testing programs consist of unconfined compressive test, wetting and drying test, slaking test, and wheel track test. A cement content determination chart is established for different traffic load designs in which unconfined compressive strength and percent of weight loss were govern.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.बारเมศ วรรณะภูติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ.ดร.ศุภกิจ นนทนันทน์ ดร.กฤษณะ เพ็ญสมบูรณ์ และดร.จิรโรจน์ สุกรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา อันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ตลอดจนทำการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่และพนักงานกรมทางหลวงในการให้ข้อมูลและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ให้แล้วเสร็จสมบูรณ์

ท้ายที่สุด ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนทุนการศึกษาเสมอมา รวมถึง พี่ น้องและเพื่อนๆ ที่ได้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือมาโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนให้มีความรู้จนถึงปัจจุบัน

วสันต์ ปั่นสังข์
พฤษภาคม 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	21
ผลการศึกษา	31
สรุปและข้อเสนอแนะ	78
สรุป	78
ข้อเสนอแนะ	79
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	80
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก การทดสอบความคงทน	86
ภาคผนวก ข มาตรฐานและข้อกำหนดในการออกแบบวัสดุผสมซีเมนต์	95
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบความคงทน	99
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	112

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินประเภทต่างๆ	10
2	ค่า Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์จากดินชนิดต่างๆ	11
3	ข้อกำหนดด้านกำลังรับแรงอัดของวัสดุดินซีเมนต์สำหรับชั้นทางต่างๆ	15
4	ค่าความสึกหรอมาตรฐานสำหรับการใช้ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์	16
5	เกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์โดยประเทศต่างๆ	20
6	การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	29
7	แสดงปริมาณธาตุของวัสดุที่ผ่านการทดสอบด้วยวิธี X-ray	36
8	ผลการทดสอบหาขนาดคละแบบแห้งและแบบเปียก	39
9	ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ	40
10	มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์	44
11	ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์	45
12	มาตรฐานพื้นทางดินผสมซีเมนต์	45
13	มาตรฐานพื้นทางดินผสมซีเมนต์	74

ตารางผนวกที่

ก1	ค่าเฉลี่ยของร้อยละของน้ำที่ค้างอยู่ในตัวอย่างของดินชนิดต่างๆ	93
ข1	ข้อกำหนดในการเลือกวัสดุสำหรับนำมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์	98
ค1	ผลการทดสอบความคงทนของวัสดุหินคลุก	100
ค2	ผลการทดสอบความคงทนของวัสดุมวลรวม	100
ค3	ผลการทดสอบร่องล้อในแต่จำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำซ้ำ	101
ค4	ผลการทดสอบร่องล้อที่ 10,000 รอบ ในแต่ละระยะการเคลื่อนที่	105

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การแตกร้าวของผิวทางที่มีวัสดุผสมซีเมนต์เป็นชั้นพื้นทาง	2
2	แสดงโครงสร้างของดินซีเมนต์	8
3	อิทธิพลของระยะเวลาของการผสมหรือการบดอัดซ้ำกับการทดสอบความคงทน	12
4	วัสดุจากจังหวัดกาญจนบุรี	22
5	วัสดุจากจังหวัดนครราชสีมา	22
6	วัสดุจากจังหวัดอุดรดิตถ์	23
7	วัสดุจากจังหวัดเพชรบุรี	23
8	วัสดุจากจังหวัดปราจีนบุรี	23
9	วัสดุจากจังหวัดเพชรบูรณ์	24
10	เครื่องมือทดสอบ Slake Durability	24
11	ชุดเครื่องมือทดสอบ Wetting and Drying Test	25
12	ชุดเครื่องมือทดสอบ Wheel Track	25
13	ขั้นตอนการดำเนินวิจัย	30
14	ลักษณะของวัสดุจากจังหวัดกาญจนบุรี	31
15	ลักษณะของวัสดุจากจังหวัดนครราชสีมา	32
16	ลักษณะของวัสดุจากจังหวัดอุดรดิตถ์	32
17	ลักษณะของวัสดุจากจังหวัดเพชรบุรี	33
18	ลักษณะของวัสดุจากจังหวัดปราจีนบุรี	34
19	ลักษณะของวัสดุจากจังหวัดเพชรบูรณ์	34
20	ขนาดผลของวัสดุจากจังหวัดกาญจนบุรี	40
21	ขนาดผลของวัสดุจากจังหวัดนครราชสีมา	41
22	ขนาดผลของวัสดุจากจังหวัดอุดรดิตถ์	41
23	ขนาดผลของวัสดุจากจังหวัดเพชรบุรี	42
24	ขนาดผลของวัสดุจากจังหวัดปราจีนบุรี	42
25	ขนาดผลของวัสดุจากจังหวัดเพชรบูรณ์	43
26	ขนาดผลของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมซีเมนต์ตามมาตรฐานกรมทาง	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณซีเมนต์	47
28	เครื่องมือทดสอบและการทดสอบ Slake Durability	48
29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Slake Durability Index กับปริมาณซีเมนต์	49
30	การทดสอบความคงทนโดยใช้ Wetting and Drying Test	50
31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหลุดร่อนจากการทดสอบ Wetting and Drying Test กับปริมาณซีเมนต์	51
32	ก้อนตัวอย่างหลังทำการทดสอบ Wetting and Drying Test ของวัสดุจากจังหวัดกาญจนบุรี	51
33	ก้อนตัวอย่างหลังทำการทดสอบ Wetting and Drying Test ของวัสดุจากจังหวัดนครราชสีมา	52
34	ก้อนตัวอย่างหลังทำการทดสอบ Wetting and Drying Test ของวัสดุจากจังหวัดอุดรธานี	53
35	ก้อนตัวอย่างหลังทำการทดสอบ Wetting and Drying Test ของวัสดุจากจังหวัดเพชรบุรี	54
36	ก้อนตัวอย่างหลังทำการทดสอบ Wetting and Drying Test ของวัสดุจากจังหวัดปราจีนบุรี	55
37	ก้อนตัวอย่างหลังทำการทดสอบ Wetting and Drying Test ของวัสดุจากจังหวัดเพชรบูรณ์	56
38	ผลการทดสอบ Wheel Track Test จากแหล่งกาญจนบุรี	58
39	ผลการทดสอบ Wheel Track Test จากแหล่งเพชรบุรี	59
40	ลักษณะร่องล้อหลังการทดสอบ Wheel Track	60
41	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของร่องล้อเมื่อมีการปรับปรุงด้วยซีเมนต์	60
42	ความสัมพันธ์ระหว่างความคงทนกับกำลังรับน้ำหนัก	63
43	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกหรอกับ Slake Durability Index ของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} กับ Unconfined Compressive Strength ของวัสดุหินคลุก	65
45	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} กับ Unconfined Compressive Strength ของวัสดุมวลรวม	65
46	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกหรอกับกำลังรับแรงอัดของวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์	67
47	รอยแตกขนาดเล็กบนผิวทาง	69
48	รอยแตกตามขวางบริเวณไหล่ทาง	69
49	การป้องกันการพัฒนาของรอยแตกร้าว	70
50	รอยแตกร้าวที่ถนนที่มีการเพิ่มความหนาของผิวทางแอสฟัลต์	70
51	รอยแตกขนาดใหญ่	71
52	การติดตั้งก้อนตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ	72
53	การทดสอบหาลำดับรับน้ำหนักของวัสดุ Recycling	73
54	ผลการทดสอบหาลำดับรับน้ำหนักของวัสดุ Recycling	73
55	ลักษณะก้อนตัวอย่างเมื่อทำการทดสอบ Wetting and Drying Test	75
56	ผลการทดสอบ Wetting and Drying ของก้อนตัวอย่างวัสดุ Recycling	76
57	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกหรอกับกำลังรับแรงอัดของวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์และวัสดุ Recycling	77

ภาพผนวกที่

ค1	ผลการทดสอบ Slake Durability Index แหล่งกาญจนบุรี	106
ค2	ผลการทดสอบ Slake Durability Index แหล่งนครราชสีมา	106
ค3	ผลการทดสอบ Slake Durability Index แหล่งอุดรดิตถ์	107
ค4	ผลการทดสอบ Slake Durability Index แหล่งเพชรบุรี	107
ค5	ผลการทดสอบ Slake Durability Index แหล่งปราจีนบุรี	108

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ค6	ผลการทดสอบ Slake Durability Index แหล่งเพชรบูรณ์	108
ค7	ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} กับ UCS ของแหล่งกาญจนบุรี	109
ค8	ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} กับ UCS ของแหล่งนครราชสีมา	109
ค9	ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} กับ UCS ของแหล่งอุดรดิตถ์	110
ค10	ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} กับ UCS ของแหล่งเพชรบุรี	110
ค11	ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} กับ UCS ของแหล่งปราจีนบุรี	111
ค12	ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} กับ UCS ของแหล่งเพชรบูรณ์	111

การศึกษาความคงทนและกำลังของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ในประเทศไทย

Durability and Strength of Cement-Treated Base Highway Materials in Thailand

คำนำ

การคมนาคมทางบกเป็นการสัญจรที่มีความสำคัญต่อประเทศชาติเป็นอันมาก ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาด้านเศรษฐกิจ ด้านสังคม หรือด้านอื่นๆ ล้วนต้องอาศัยเส้นทางที่สร้างขึ้นมาเป็นสิ่งอำนวยความสะดวก และตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน การพัฒนาประเทศไม่สามารถหยุดอยู่กับที่ได้ เป็นเหตุให้ การสร้างทางใหม่ ขยายถนน หรือซ่อมแซมถนน ต้องมีการดำเนินการอยู่โดยตลอด ทำให้วัสดุงานทางซึ่งเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสมกับการใช้งาน ลดน้อยลง อีกทั้งข้อจำกัดของการขนส่งที่เพิ่มมากขึ้นจากราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น ทำให้จำเป็นต้องมีการปรับปรุงวัสดุที่ด้อยคุณภาพที่อยู่ใกล้ให้เหมาะสมกับการนำมาใช้งาน

กรมทางหลวงได้นำเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทางด้วยซีเมนต์มาใช้เป็นระยะเวลานานกว่า 30 ปี สำหรับใช้ในงานชั้นพื้นทาง (Base) เป็นหลัก และในปัจจุบันได้เริ่มนำวัสดุชั้นผิวทางและพื้นทางเดิมกลับมาใช้โดยการเติมซีเมนต์ หรือเรียกว่า Recycling Material เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนวัสดุและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการทำลายภูเขาหิน อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างทางโดยใช้วัสดุปรับปรุงคุณภาพโดยการเติมซีเมนต์ในบางสายทางพบ การแตกร้าวที่ผิวทางเมื่อเปิดการจราจรได้ไม่นาน และ เมื่อเวลาผ่านไป ความเสียหาย มีความรุนแรงสูงขึ้น เช่นการแตกร้าวแบบแผ่น (Block Crack) ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 1 เป็นต้น

สาเหตุของการแตกร้าวของผิวทาง ซึ่งใช้วัสดุปรับปรุงโดยซีเมนต์เป็นพื้นทางและรองพื้นทาง ได้แก่ ปริมาณซีเมนต์ที่ไม่เหมาะสม การควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง รวมทั้งการออกแบบโครงสร้างทางสำหรับดินซีเมนต์ เป็นต้น การวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในการใช้ปรับปรุงวัสดุชั้นพื้นทาง ในด้านกำลังรับน้ำหนักบรรทุก รวมทั้ง ความคงทนของวัสดุ เมื่อถนนเปิดใช้งาน และพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนซีเมนต์ต่อดิน กำลังวัสดุ และความคงทนของวัสดุ สำหรับดินต่างๆซึ่งใช้ในการก่อสร้างชั้นพื้นทาง ในประเทศไทย



ภาพที่ 1 การแตกร้าวของผิวทางที่มีวัสดุผสมซีเมนต์เป็นชั้นพื้นทาง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ และวัสดุพื้นทาง ต่อคุณสมบัติความคงทนและการรับน้ำหนักบรรทุก
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของวัสดุต่อซีเมนต์ในด้าน ความคงทน และกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของวัสดุที่ปรับปรุงซีเมนต์ สำหรับวัสดุชั้นพื้นทางของประเทศไทย
3. เสนอแนะแนวทางและวิธีการปรับปรุงวัสดุพื้นทาง และเกณฑ์การออกแบบของถนนที่ใช้วัสดุที่ปรับปรุงโดยซีเมนต์เป็นวัสดุพื้นทาง

ขอบเขตของการวิจัย

1. รวบรวมข้อมูลปัญหาการแตกร้าวของผิวทางแอสฟัลต์ ซึ่งใช้วัสดุที่ปรับปรุงโดยซีเมนต์เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ในประเทศไทยและต่างประเทศ รวมทั้งข้อกำหนดมาตรฐาน และเกณฑ์การออกแบบของถนนที่ใช้วัสดุผสมซีเมนต์เป็นวัสดุพื้นทาง
2. ทดสอบดัชนีและคุณสมบัติทางวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการของวัสดุที่ไม่ได้ปรับปรุงโดยซีเมนต์ และเปรียบเทียบกับวัสดุผสมซีเมนต์
 - 2.1 สำหรับวัสดุซึ่งใช้เป็นวัสดุพื้นทางและรองพื้นทางที่ใช้ในการวิจัยนี้ จะเก็บมาจากแหล่งวัสดุซึ่งใช้ในการก่อสร้างทางหลวง ทั้งสิ้น 6 แหล่ง ได้แก่ แหล่งวัสดุจากจังหวัดกาญจนบุรี นครราชสีมา อุดรดิตถ์ เพชรบุรี ปราจีนบุรี และเพชรบูรณ์ และอัตราส่วนของซีเมนต์ ในการทดสอบอยู่ในช่วง 1-8 %
 - 2.2 การทดสอบดัชนีทางวิศวกรรมประกอบด้วย Atterberg's Limits Test, Specific Gravity Test, Sieve Test, Compaction Test, California Bearing Ratio Test (CBR) และการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมนั้นประกอบด้วย คุณสมบัติการรับน้ำหนัก ได้แก่ Unconfined Compression Test และความคงทนของวัสดุได้แก่ Slaking Test, Wetting and Drying Test และ Wheel Track Test

3. รวบรวมข้อมูลโดยละเอียดของกรณีศึกษา 1 โครงการ ซึ่งใช้วัสดุที่ปรับปรุงโดยซีเมนต์ ในการก่อสร้างและพบปัญหาการแตกร้าวบนผิวทาง คือ โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 1

3.1 สำนวณสภาพความเสียหายภาคสนาม และเก็บตัวอย่างวัสดุชั้นพื้นทาง (Base) และ นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการตามหัวข้อ 2.2

3.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของวัสดุที่ปรับปรุงโดยซีเมนต์จาก กรณีศึกษา และวัสดุทั้ง 6 แหล่งตามหัวข้อ 2.1

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบปัจจัยที่ก่อให้เกิดปัญหาการแตกร้าวของผิวทางแอสฟัลต์ ซึ่งใช้วัสดุที่ปรับปรุง โดยซีเมนต์เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง
2. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัดและความคงทนของวัสดุ ที่ปรับปรุงโดยซีเมนต์ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบทางวิศวกรรมงานทาง
3. แนวทางการออกแบบส่วนผสมวัสดุงานทางที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ให้มี ประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งพิจารณาทั้งคุณสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนักและความคงทน
4. สนับสนุนการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพโดยการปรับปรุงวัสดุที่ด้อยคุณภาพ และ การนำวัสดุก่อสร้างเดิมกลับไปใช้ใหม่ในการก่อสร้างทางของประเทศไทย

การตรวจเอกสาร

การใช้ปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทาง

งานทางที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางด้วยการผสมซีเมนต์หรือเรียกว่า ดินซีเมนต์มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในหลายประเทศ เช่น ประเทศอังกฤษ แอฟริกาใต้ ตะวันออกกลาง อเมริกาใต้ เยอรมัน และประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นต้น (ธีรชาติ และอนันต์, 2543) ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศหนึ่งซึ่งมีการค้นคว้าวิจัยและออกมาตรฐานวัสดุ “ดินซีเมนต์” ใน การใช้ก่อสร้างทาง โดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับถนนในรัฐต่าง ๆ อันประกอบด้วย รัฐไอโอวา รัฐเซาท์ดาโคต้า รัฐโอไฮโอ รัฐแคลิฟอร์เนีย รัฐแท็กซัสได้เริ่มใช้การปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุคั่นทางโดยนำดินมาผสมซีเมนต์ตั้งแต่ว่าปี ค.ศ.1920 แต่ความรู้ความเข้าใจในเรื่องของคุณสมบัติของวัสดุคั่นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ยังมีไม่มากพอทำให้ผลที่ได้มีความแปรปรวนสูง ต่อมาได้มีการค้นคว้าในเรื่องวัสดุนี้อย่างละเอียด โดย Mills (1935) และ Catton (1938) ร่วมกับ South Carolina State Highway Department ผลงานการค้นคว้าและการทดลองสร้างถนนด้วยดินซีเมนต์แสดงว่า วัสดุดินซีเมนต์มีพฤติกรรมที่เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุสำหรับทำชั้นพื้นทางของถนนราคาถูกได้ และหลังจากนั้นการค้นคว้าเกิดขึ้นอย่างกว้างขวางโดยในปี ค.ศ.1935 Portland Cement Department (PCA) เป็นอีกหน่วยงานที่ทำให้ความก้าวหน้าในการใช้วัสดุดินซีเมนต์มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว Sheet and Catton (1938) เป็นผู้ดำเนินการทดสอบการบดอัดดินซีเมนต์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นมาปรับปรุงเพื่อให้สามารถหาปริมาณของ ดินซีเมนต์ และน้ำที่เหมาะสม ส่วนวิธีการทดลองหาความชื้น-ความหนาแน่น การทดลอง Wet-Dry การทดลอง Freeze-Thaw นั้นได้ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานโดย American Society for Testing and Materials (ASTM) และ American Association of State Highway Officials (AASHTO) ในปี ค.ศ.1936 การใช้ดินซีเมนต์ในงานก่อสร้างทางได้เกิดขึ้นมากมายโดย Portland Cement Association (PCA, 1959) รายงานว่าประมาณการในปี ค.ศ.1960 การใช้ดินซีเมนต์ในงานก่อสร้างของประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดามีมากถึง 46 ล้านตารางหลา (38.5 ตารางกิโลเมตร)

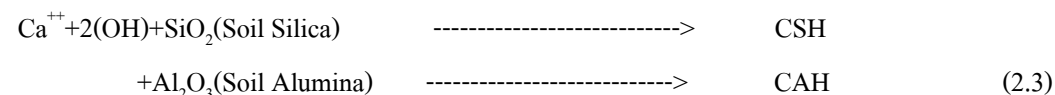
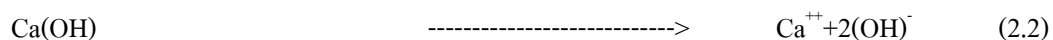
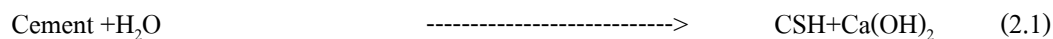
สำหรับประเทศไทยนั้น ธีรชาติ และสฤติย์พงษ์ (2543) ได้กล่าวถึงการใช้งานดินซีเมนต์ไว้ว่าการก่อสร้างถนนโดยดินซีเมนต์เริ่มต้นครั้งแรกในประเทศไทยโดยกรมทางหลวงเมื่อปี พ.ศ. 2508 โดยกรมทางหลวงร่วมกับบริษัทปูนซีเมนต์ไทยได้ดำเนินการก่อสร้างถนนโดยใช้วัสดุดินซีเมนต์เป็นชั้นพื้นทาง สายวาริน-เดชอุดม ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ความยาว 5 กิโลเมตร และ

ถนนสายนี้แสดงพฤติกรรมที่ดี ทำให้ในช่วงปี พ.ศ. 2508-2515 ได้มีการก่อสร้างถนนโดยวัสดุดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นอีกหลายสายทางในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รวมทั้งสิ้นประมาณ 1,400 กิโลเมตร แต่เมื่อมาถึง พ.ศ. 2519 การก่อสร้างทางด้วยดินซีเมนต์ต้องระงับการก่อสร้างเนื่องจากบางสายทางเกิดความเสียหายในลักษณะของรอยแตกสะท้อน (Reflected Crack) เป็นจำนวนมาก อันมีสาเหตุมาจากเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องยังไม่มีความรู้และเข้าใจในพฤติกรรมของดินซีเมนต์ที่ดีพอ จึงต้องมีการศึกษาปัญหาของถนนซึ่งก่อสร้างโดยดินซีเมนต์ให้ละเอียดลงไปก่อนตัดสินใจนำกลับมาใช้ใหม่ในปี พ.ศ.2515-2525 เป็นช่วงเวลาที่ได้มีการศึกษาพฤติกรรมของถนนดินซีเมนต์ที่มีอยู่เดิมเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่องโดยทำการวิจัยในห้องปฏิบัติการและสร้างถนนทดลองทำให้เข้าใจถึงธรรมชาติของถนนดินซีเมนต์ได้ดียิ่งขึ้น ตั้งแต่ปี พ.ศ.2525 เป็นต้นมาการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ได้ยึดเอาผลที่ได้จากการศึกษาเป็นแนวทาง ในการออกแบบก่อสร้างทางจนถึงปัจจุบัน

กลไกการปรับปรุงคุณสมบัติและโครงสร้างของดินซีเมนต์

วัสดุดินซีเมนต์เป็นวัสดุที่เกิดมาจาก ดิน ซีเมนต์ และน้ำ ที่เกิดปฏิกิริยาเคมี และความสัมพันธ์กันด้านทางกายภาพร่วมกัน Lambe *et al.*(1959) และ Terrel *et al.* (1979) ได้กล่าวถึงกลไกของการปรับปรุงวัสดุดินซีเมนต์ว่าเมื่อผสมดินกับซีเมนต์และน้ำเข้าด้วยกันจะทำให้เกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ขึ้นเป็นสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) เป็นตัวเชื่อมประสานโดยที่ในดินเม็ดทราย CSH และ CAH จะเชื่อมยึดติดกันบริเวณผิวอนุภาคของดินกับซีเมนต์เจล (Cement Gel) ที่เรียกว่า Mechanical Interlock ส่วนในดินเม็ดละเอียดจะมีการติดแน่นอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ Mechanical Interlock ที่เหมือนกับดินเม็ดละเอียดและ Chemical Cementation ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับ Silica และ Alumina ที่อยู่ตามผิวเม็ดดินเกิด CSH และ CAH เพิ่มขึ้นมา

Moh (1965) ได้แสดงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของแร่ประกอบดินกับซีเมนต์และสารผสมเพิ่มจำพวกโซเดียมและผลที่ได้เป็นไปดังสมการทางเคมีต่อไปนี้



จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาของวัสดุคินซีเมนต์นี้เกิดขึ้นอย่างมีกลไกจากสมการที่ 2.1 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยานี้เรียกว่า Primary Reaction เป็นปฏิกิริยาหลักที่ก่อให้เกิด CSH และ CAH ส่วนสมการที่ 2.2 และ 2.3 เรียกว่า Secondary Reaction เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องมาจากปฏิกิริยาหลักที่ก่อให้เกิด CSH และ CAH ด้วย แต่ปฏิกิริยาในขั้นนี้ต้องใช้ระยะเวลาที่นาน สอดคล้องกับ Herzog และ Mitchell (1963) ที่ได้อธิบายกลไกเอาไว้จึงทำให้ทราบว่าวัสดุคินซีเมนต์จะมีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้นเมื่อมีอายุการบ่มที่นานขึ้นด้วย

กระบวนการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของวัสดุคินซีเมนต์ Pendola *et al.* (1969) ได้กล่าวว่าสามารถแยกออกมาเป็น 4 กระบวนการ คือ

Cement Hydration เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อซีเมนต์รวมตัวกับน้ำและก่อให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และก่อรูปร่างเป็นโครงร่างที่แข็งแรงให้กับวัสดุพร้อมทั้งยังแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่าง ทำให้ค่าซึมผ่านและการบวมตัวลดลง อีกทั้งความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย

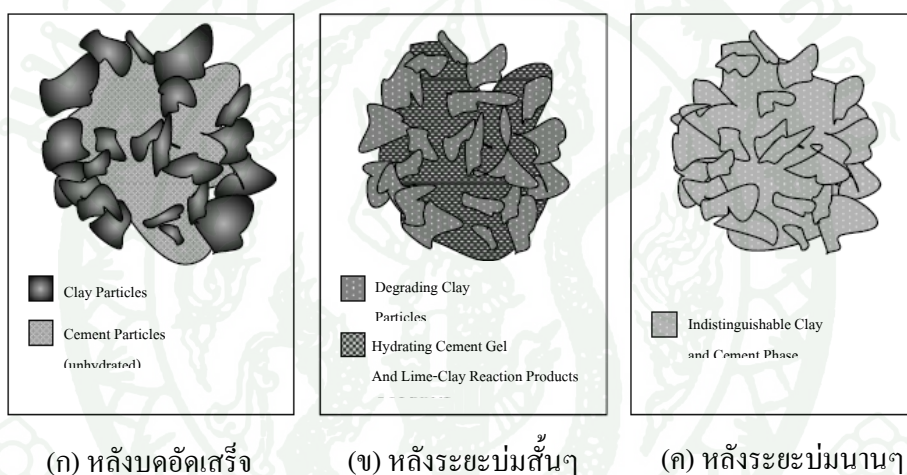
Cation Exchange เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยการแลกเปลี่ยน Cation บนผิวของเม็ดดิน ซึ่งจะเห็นกระบวนการนี้ได้เด่นชัดในดินเหนียว เมื่อเกิดกระบวนการนี้แล้วเป็นผลให้ค่า Plasticity Index ลดลง

Carbonation เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดจากปฏิกิริยา Cement Hydration แล้ว เหลือ Lime [Ca(OH)_2] จากนั้น เกิดปฏิกิริยาเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับ Lime ทำให้เกิดเป็น Calcium Carbonate เกิดเป็นสารเชื่อมแน่นเพิ่มเติมขึ้น

Pozzolanic Reaction เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อเหลือ Lime จากการเกิด ปฏิกิริยา Cement Hydration แล้วทำปฏิกิริยาเคมี กับ Silica และ Alumina ที่อยู่ในดินทำให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้นทำให้กำลังของวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งการเกิดปฏิกิริยานี้ต้องใช้ระยะเวลานาน

ลักษณะโครงสร้างของคินซีเมนต์ Mitchell and Jack (1966) ได้กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและโครงสร้างที่เกิดขึ้นตั้งแต่ขณะทำการก่อสร้างและการเปลี่ยนแปลงหลังจากการก่อสร้างเสร็จว่า การเปลี่ยนแปลงเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ขณะที่ทำการบดอัดคินซีเมนต์ อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยัง

ไม่เกิดปฏิกิริยา Hydration จะผสมกับอนุภาคของดินดังภาพที่ 2(ก) เมื่อระยะเวลาผ่านไปสักพักหนึ่งปฏิกิริยา Hydration จะค่อยๆเกิดขึ้นภายใต้การบ่มในระยะเวลาสั้นๆ อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่แทรกอยู่จะค่อยๆเปลี่ยนเป็นซีเมนต์เจล (Cement Gel) แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินและปล่อยอนุภาคปูนขาวออกมาโดยที่อนุภาคปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับ Soil Silica และ Alumina แพร่กระจายไปตามอนุภาคต่างๆของดินดังภาพที่ 2(ข) ปฏิกิริยา Hydration จะเกิดอย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์เมื่อมีการบ่มที่เหมาะสม ซีเมนต์เจลจะแทรกซึมกระจายไปทั่วดินซีเมนต์ ทำให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 2(ค)



ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างของดินซีเมนต์

ที่มา: Mitchell and Jack (1966)

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของวัสดุดินซีเมนต์

คุณสมบัติของวัสดุดินซีเมนต์ได้รับอิทธิพลจากหลายองค์ประกอบที่ทำให้เกิดความแปรปรวนขึ้นกับคุณสมบัติของตัววัสดุ ธีรชาติ และสุเชษฐ์ (2533); ดิเรก (2540); ศุภกิจ (2550); จุฑา และคณะ (2549) ได้กล่าวถึง องค์ประกอบเหล่านั้น คือ ชนิดของดิน ปริมาณและชนิดของซีเมนต์, ปริมาณความชื้น, การผสมและบดอัด, สภาพและระยะเวลาการบ่ม, และการใช้สารผสมเพิ่ม ล้วนเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความแปรปรวนขึ้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ปริมาณซีเมนต์ (Cement Content)

ปริมาณซีเมนต์เป็นองค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์ Felt (1955); Ruenkrairegsa (1982) ได้ทำการทดลองนำดิน มาผสมกับซีเมนต์ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณซีเมนต์แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัดที่มีอายุการบ่มที่แตกต่างกันและผลที่ได้คือ กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้และผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธี Wet-Dry และ Freeze-Thaw ของ Felt (1955) ยังแสดงให้เห็นว่าความคงทนของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้

2. คุณสมบัติทางด้านกายภาพและเคมีของดิน (Physical and Chemical Properties of Soil)

คุณสมบัติของดินตามธรรมชาติมีความแตกต่างกันทั้งทางด้านกายภาพและองค์ประกอบทางด้านเคมีขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของดินนั้นๆ ซึ่งคุณสมบัติทางด้านกายภาพและเคมีของดินมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อ การรับแรงและความคงทนของวัสดุดินซีเมนต์ Ruenkrairegsa (1982) ได้กล่าวว่าคุณสมบัติด้านกายภาพนั้นประกอบด้วย ขนาดคละ (Gradation) พื้นที่ผิว (Surface Area) จำนวนจุดสัมผัส (Number of Contact Points) และคุณสมบัติพลาสติกของเม็ดดินละเอียด (Plasticity of Fine) มีความสัมพันธ์กับปริมาณซีเมนต์ คือ ดินที่มีมวลหยาบและมีขนาดคละที่ดีจะใช้ปริมาณซีเมนต์ที่น้อยกว่าดินที่มีมวลดินเม็ดละเอียดและดินที่มีขนาดเม็ดละเอียดเท่าๆ กัน พื้นที่ผิวที่มากทำให้ต้องใช้ปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้น หรือประเภทของดินต่างๆ ที่มีการจำแนกออกมาอยู่ในกลุ่มการแบ่งตาม AASHTO หรือ Unified การใช้ปริมาณซีเมนต์ให้เหมาะสมกับการใช้งานมีความแตกต่างกัน PCA (1959) ได้เสนอการเลือกใช้ปริมาณซีเมนต์ให้เหมาะสมกับกลุ่มดินโดยมีความคงทนที่เหมาะสมดังตารางที่ 1

ดินแต่ละประเภทมีการเพิ่มของกำลังเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์สูงขึ้นและมีแนวโน้มเป็นลักษณะเส้นตรง แต่การเพิ่มจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับประเภทของดิน การบ่มและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น Bell(1993) ได้ทำการทดสอบกำลังของดินซีเมนต์ของดินประเภทต่างๆ โดยนำตัวอย่างไปทำการแช่น้ำก่อนการทดสอบและได้เสนอค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) ของวัสดุดินซีเมนต์ที่มาจากดินแต่ละประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นผลกระทบของประเภทของดินที่มีผลต่อกำลัง

ปริมาณดินเหนียวและสารอินทรีย์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งคุณสมบัติทางเคมีของแร่ดินเหนียวและประเภทของสารอินทรีย์ต่างๆมีผลต่อวัสดุดินซีเมนต์ Ruenkrairegsa (1982) ได้กล่าวว่าดินเหนียวที่มีประจุ Calcium เป็นส่วนประกอบของแร่ดินเหนียวจะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ดี ส่วนดินที่มีประจุ Sodium และ Hydrogen เป็นส่วนประกอบจะปรับปรุงคุณสมบัติได้ยาก โดยเฉพาะประจุ Hydrogen

ตารางที่ 1 ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินประเภทต่างๆ

AASHTO Soil Group	Usual Range in Cement Requirement (% by vol.)(% by wt.)	Estimated Cement Content and That Used in the Moisture Density Test (% by wt.)	Cement Content for Wet-Dry and Freeze-Thaw Tests (% by wt.)
A-1-a	5-7, 3-5	5	3-5-7
A-1-b	7-9, 5-8	6	4-6-8
A-2	7-10, 5-9	7	5-7-9
A-3	8-12, 7-11	9	7-9-11
A-4	8-12, 7-12	10	8-10-12
A-5	8-12, 8-13	10	8-10-12
A-6	10-14, 9-15	12	10-12-14
A-7	10-14, 10-16	13	10-13-15

ที่มา: Portland Cement Association (1959)

3. ปริมาณความชื้นที่เวลาทำการบดอัด (Moisture Content at Time of Compaction)

Ruenkrairegsa (1982) ได้อธิบายว่าการหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่บดอัดตามวิธีการของ Proctor (Procter, 1933) นำมาใช้กับงานซีเมนต์ พบว่าปริมาณความชื้นที่ OMC (Optimum Moisture Content) นั้นนอกจากจะทำให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดแล้วยังทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยา Hydration อย่างสมบูรณ์ด้วย ผลที่ได้ในงานก่อสร้างจริงพบว่า การบดอัดที่ความหนาแน่นสูงสุด ไม่ได้แสดงว่าความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์

จะสูงสุดตาม การทดลองหาความคงทนตามวิธี Freeze-Thaw ของดินตะกอนและดินเหนียวผสมซีเมนต์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้น OMC หรือมากกว่าเล็กน้อย แต่ถ้าความชื้นต่ำกว่า OMC ความคงทนจะลดลง แต่กรณีของดินทรายผสมซีเมนต์การบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่า OMC เล็กน้อยจะให้ค่าความคงทนสูงขึ้น ส่วนความแข็งแรงของดินทรายเกิดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่า OMC ประมาณร้อยละ 3 ถึง 6 แต่ถ้าเป็นดินเหนียวความแข็งแรงจะเกิดที่ปริมาณความชื้น เกิน OMC ไปเล็กน้อย ซึ่งมีความสอดคล้องกับการทดลองศึกษาหาผลของความชื้นที่มีต่อกำลังแรงอัดและความชื้น กับ Losses of Weight จากการทำให้ Wet-Dry และ Freeze-Thaw ของ Felt (1955); Davidson *et al.* (1962)

ตารางที่ 2 ค่า Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์จากดินชนิดต่างๆ

Soil Type	Soak Compressive Strength * (MN/m ²)	
	7 days	28 days
Sandy and Gravelly Soils:	2.07-4.14	2.76-6.90
Unified Groups GW, GC, GP, GM, SW, SC, SP, SM	(2,070-4,140 kPa) (300-600 psi)	(2760-6900 kPa) (400-1,000 psi)
Sandy Soils:	1.72-3.45	2.07-6.21
Unified Groups ML and CL	(1,720-3,450 kPa) (250-500 psi)	(2,070-6,210 kPa) (300-900 psi)
Clayey Soils:	1.38-2.76	1.72-4.14
Unified Groups MH and CH	(1,380-2,760 kPa) (200-400 psi)	(1,720-4,140 kPa) (250-600 psi)

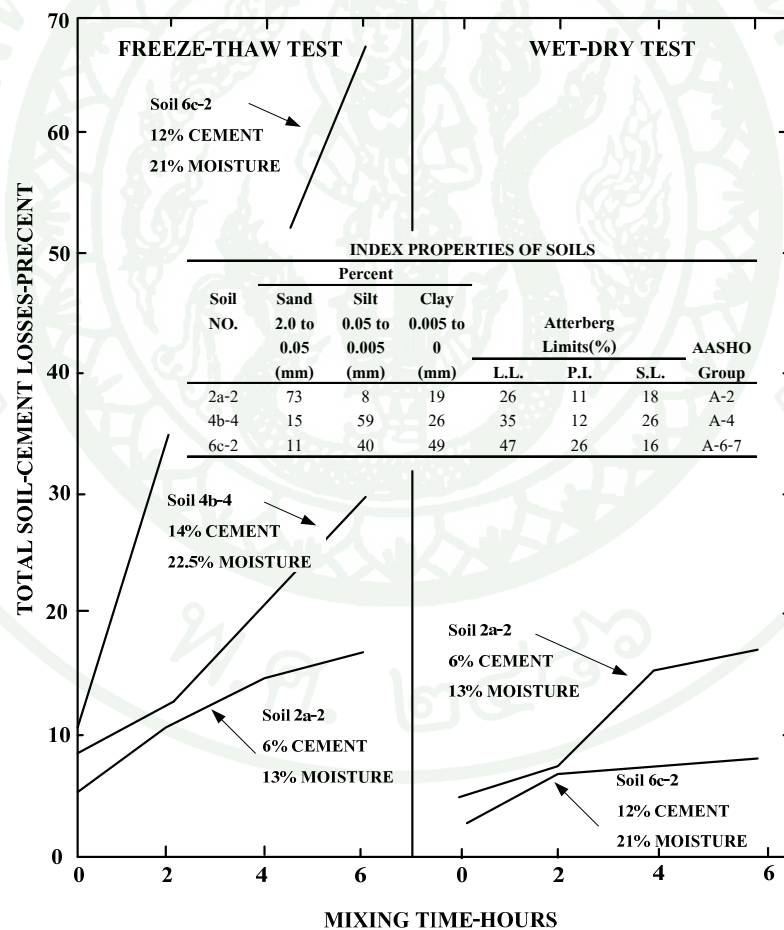
* Speciment Moist-Cured 7 or 28 days, Then Soaked in Water Prior to Strength Testing

ที่มา: Bell (1993)

4. ระยะเวลาการผสม (Mixing Time)

ระยะเวลาในการผสมเป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งที่มีผลต่อกำลังของวัสดุดินซีเมนต์ ผลงานวิจัยของ Ruenkrairegsa (1982); Marshall (1954) แสดงให้เห็นว่าการใช้เวลาในการผสมและ

บดอัดให้ข้างลงจะมีผลต่อการรับกำลังสูงสุดของดินซีเมนต์มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของดินด้วย ดินจำพวกเม็ดหยาบเวลาการผสมและบดอัดข้างลงจะมีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ส่วนดินเม็ดละเอียด เช่นดินตะกอน ดินเหนียวจะมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงเป็นอันมาก นอกจากนี้เวลาในการผสมยังมีผลต่อความคงทนอีกด้วย Davidson (1961) และ Felt (1955) ได้แสดงผลการทดสอบความคงทนเมื่อทดสอบวิธี Wet-Dry และ Freeze-Thaw จะมีค่า Loss of Weight ที่มากขึ้นซึ่งได้รับอิทธิพลของระยะเวลาของการผสมหรือการบดอัดข้างลงหรืออาจกล่าวได้ว่าความคงทน (Durability) ของดินซีเมนต์จะแปรผกผันกับเวลาที่ใช้ในการผสมแต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นยังขึ้นกับชนิดของดินและปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมด้วยดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 อิทธิพลของระยะเวลาของการผสมหรือการบดอัดข้างกับการทดสอบความคงทน

ที่มา: Felt (1955)

5. ระยะเวลาและวิธีการบ่ม (Duration and Method of Curing)

การพัฒนากำลังของวัสดุดินซีเมนต์จะสามารถพัฒนาได้ดีเมื่อได้รับการบ่มที่ดีและระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น Leadabrand (1956) ได้ทำการทดสอบหาคำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่มีอายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 5 ปีในห้องปฏิบัติการซึ่งปรากฏว่าพฤติกรรมของดินซีเมนต์จะคล้ายกับคอนกรีตคือคำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มและยังมีผลจากสนามจริงที่ได้มาจากโครงการก่อสร้างในรัฐต่างๆของประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีผลการทดสอบเป็นไปในทางเดียวกันกับในห้องปฏิบัติการ Ruenkrairergsa (1982) ได้เสนอว่าการวิเคราะห์หาค่าเสถียรภาพของดินซีเมนต์ให้ใช้ค่าคำลังของก้อนตัวอย่างใช้ที่อายุการบ่มที่ 7 วันส่วนคำลังที่พัฒนาเพิ่มขึ้นหลังจากการบ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน ถือเป็นค่า Factor of Safety ในระหว่างการบ่มนั้นจะต้องมีการป้องกันการสูญเสียความชื้นที่ดี โดยอาจใช้วัสดุประเภท Bitumen, Moist Earth หรือ Waterproof Paper ป้องกันการสูญเสียน้ำ Highway Research Board (1943, 1949); Maner (1952) ยังได้กล่าวถึงผลของข้อมูลที่ได้จากการก่อสร้างทางในประเทศสหรัฐอเมริกาและผลของการทดลองที่ใช้วัสดุเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำด้วยการปิดผิวหน้าโครงสร้างทางโดยใช้วัสดุ Cutback Asphalt MC-2 , Cutback Asphalt RC-1, Negative Oliensis Spot, Asphalt Emulsion , Waterproof Paper, Calcium Chloride และ Cutback Asphalt RC-2 เหล่านี้แล้วสามารถป้องกันน้ำให้ค้างอยู่ในดินซีเมนต์ตลอดช่วงการบ่ม 7 วัน ได้ผลดีมากซึ่งเป็นผลดีต่อคุณสมบัติของวัสดุดินซีเมนต์

6. สารผสมเพิ่ม (Additives)

สารผสมเพิ่มที่ใช้ในการปรับปรุงดินซีเมนต์มีหลายชนิดแต่ทั้งหมดนั้นล้วนมีวัตถุประสงค์หลัก คือ การปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาของซีเมนต์และสามารถลดปริมาณซีเมนต์ลงได้ เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) สารลดน้ำ ที่ทำให้สามารถลดปริมาณซีเมนต์ลงได้ช่วยให้เกิดการหดตัว (Shrinkage) ที่น้อยลงแต่ไม่กระทบต่อคำลัง (Strength) ปูนขาวใช้เพื่อลดความเป็นพลาสติกของดินในการผสมกับซีเมนต์ หรือลดผลกระทบของวัสดุจำพวกอินทรีย์ในปฏิกิริยา Hydration Maclean, Robinson and Webb (1952) และ Ruenkrairergsa (1982) ได้กล่าวว่าการใช้ปูนขาวเพิ่มเข้าไปในดินที่มี Plasticity Index สูงก่อนจะผสมซีเมนต์จะช่วยลดค่า Plasticity Index ของดินลงได้มากและทำให้ผสมกับซีเมนต์ง่ายขึ้น คำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้น และต้านทานการเสื่อกำลังเมื่อแช่น้ำได้ดียิ่งขึ้น Fuller and Dabney (1952) ได้กล่าวว่าการใส่ปูนขาวกับ

ดินที่มีค่า Plasticity Index สูงยังทำให้ความคงทนเพิ่มขึ้น จากการทดสอบ Wet-Dry จะทำให้ Loss of Weight ลดลง

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุดินซีเมนต์

การประยุกต์นำวัสดุดินซีเมนต์มาใช้งานให้คุ้มค่ามากที่สุดนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือความเหมาะสมของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์กับโครงสร้างทางที่ต้องการใช้งานให้มากที่สุดไม่ว่าจะเป็นด้านกำลังการรับน้ำหนักหรือความคงทน

1. กำลังรับแรงอัด

การใช้งานโครงสร้างทางในชั้นต่างๆล้วนต้องการคุณสมบัติในด้านกำลังที่แตกต่างกัน Ingles and Metcalf (1972) ได้เสนอลักษณะงานของวัสดุงานทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์โดยแบ่งตามช่วงคุณสมบัติของวัสดุดังตารางที่ 3

2. ความคงทน

การเลือกใช้วัสดุดินซีเมนต์ให้มีความคงทนต่อสภาพการใช้งาน Terrel *et al.* (1979) ได้นำเสนอความสึกหรอมาตรฐานของวัสดุโดยการใช้วิธี Wetting and Drying ที่เหมาะสมกับดินประเภทต่างๆไว้ดังตารางที่ 4

ในประเทศไทยนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุดินซีเมนต์โดยเริ่มตั้งแต่การคัดเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้งานรวมไปถึงข้อดีที่ได้เมื่อทำการปรับปรุงวัสดุทั้งด้านกำลังและด้านความคงทน ชีระชาติ และวุฒิชัย (2528) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของดินลูกรังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจาก 64 แหล่งซึ่งอยู่ในกลุ่ม A-1, A-2-4, A-2-6, A-2-7 ผลการวิจัยพบว่าดินลูกรังในประเทศไทยประกอบด้วย เม็ดลูกรังที่มีความแข็งแรงทนทานเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางของถนนที่มีการจราจรน้อยและสูงปานกลางได้ และเสนอว่ากรณีดินลูกรังมีคุณภาพต่ำควรใช้ซีเมนต์ ผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น

ศุภกิจ และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนผสมซีเมนต์ พบว่า ดินเหนียวมีค่าพลาสติกสูงเมื่อได้รับการปรับปรุงแล้วจะมีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในระยะแรกตั้งแต่เริ่มผสมจนถึง 28 วัน และหลังจากนั้นกำลังจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในระยะยาว

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดด้านกำลังรับแรงอัดของวัสดุดินซีเมนต์สำหรับชั้นทางต่างๆ

Purpose	UCS ksc (psi) (1)	CBR (2)	Swell (%)	Loss in wet/dry Test (%) (3)
Road sub-base, formation backfill for trenches etc.	3.5-10.5 (50-150)	20-80	2	7
Road sub-base, base for light traffic (4)	7-14 (100-200)	50-150	2	10
Base for heavy traffic (4)	14-56 (200-800)	200-600	2	14
Building blocks	(200-800)			
Embankment protection	>56	600	2	14
Floodways (too strong for general use under thin surfacing)	(800)			

(1) UCS cured seven days at constant moisture content. The loss of strength on soaking should not be more than 20 percent.

(2) CBR-Soaked four day.

(3) Durability test appropriate only where moisture penetration is like to likely to occur Higher cement contents may be required to meet this criterion

(4) Lower strengths may be adequate for well-drained areas in the tropics

ที่มา: Ingles and Metcalf (1972)

ธีระชาติ และชัยวัฒน์ (2543) ได้ทำการศึกษากำลักรับแรงอัดและกำลักรับแรงแตกของดินทรายผสมซีเมนต์โดยใช้ตัวอย่างดินทรายบริเวณทางหลวงหมายเลข 2228 และ 23 จังหวัดขอนแก่น พบว่าที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 1 ค่า UCS (Unconfined Compressive Strength) และค่า CBR ของดินทรายผสมซีเมนต์จะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด ค่า UCS และ CBR จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ปริมาณซีเมนต์ที่ผสมมีปริมาณร้อยละ 3 เป็นต้นไป ค่า UCS และ CBR ของ Silty Sand ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์(ตราช้าง)จะสูงกว่าค่าที่ผสมกับปูนซีเมนต์ผสม(ตราเสือ)ที่ปริมาณและอายุการบ่มเดียวกันความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และ CBR พบว่าเป็นเส้นตรง

ตารางที่ 4 ค่าความสึกหรอมาตรฐานสำหรับการใช้ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์

Soil Classification		Maximum allowable weight loss after 12 cycles of wet-dry or freeze-thaw test (%)
AASHTO	Unified	
A-1	GW, GP, GM, SW, SP, SM	14
A-2-4, A-2-5	GM, GC, SM, SC	
A-3	SP	
A-2-6, A-2-7	GM, GC, SM, SC	10
A-4	CL, ML,	
A-5	ML, MH, OH	
A-6	CL, CH	7
A-7	OH, MH, CH	

ที่มา: Terrel *et al.* (1979)

ธีระชาติ และสุเชษฐ์ (2533) ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติด้านความคงทนของวัสดุดินซีเมนต์จากบริเวณฝั่งขวาทางของถนนสายพังโคน-บึงกาฬซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม A-2-7 โดยได้ค่า Slake Durability Index ประมาณ ร้อยละ 95 และจากการทดสอบ Wet-Dry สามารถสรุปได้ว่าปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 6 และ 7 ทำให้มีค่าน้ำหนักสูญเสียร้อยละ 9 และ 8 ซึ่งผ่านเกณฑ์ ของ PCA

ธีระชาติ และสมบัติกระแสด (2544) ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติเบื้องต้นของดินลูกรังและดินทรายปนดินตะกอนโดยศึกษาค่า UCS ของดินซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันโดยใช้ตัวอย่างดินลูกรังจากโครงการสาย บ.เหล่า-ท่าชม และดินทรายปนดินตะกอนจากทางหลวงหมายเลข 23 (สายบ้านไผ่) พบว่าเมื่อนำตัวอย่างดินมาผสมกับซีเมนต์ที่ร้อยละ 3, 5 และ 7 จะทำให้ดินทั้งสอง

ประเภทมีค่า UCS เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นแห้งที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และความหนาแน่นแห้งมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง

ธนศักดิ์ (2538) ได้ทำการศึกษาแรงดึงของวัสดุดินซีเมนต์ด้วยการทดสอบ Indirect Tensile พบว่าดินลูกรังซีเมนต์มีกำลังรับแรงดึงประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงอัด และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงในลักษณะตามค่าของเปอร์เซ็นต์ CBR ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่น จากการทดสอบแรงอัด และการทดสอบแรงดึงสามารถบอกได้ว่าปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มมีผลต่อการพัฒนาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอย่างเห็นได้ชัด

แต่สาเหตุสำคัญที่ทำให้อายุการใช้งานของถนนที่ก่อสร้างด้วยวัสดุดินซีเมนต์ต่ำกว่าที่คาดการณ์ มักเกิดมาจากการแตกร้าวของดินซีเมนต์ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์มากเกินไปหรือการก่อสร้างที่ขาดการควบคุมที่ดี Portland Cement Association (2003) ได้กล่าวว่าการใช้ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม รอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นประมาณทุกๆ 2.4-6.0 เมตร และมีความกว้างน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร รอยแตกร้าวขนาดเล็กนี้จะไม่ผลกระทบต่อการรับน้ำหนักของโครงสร้างพื้นทาง และน้ำมีโอกาสซึมลงไปในโครงสร้างพื้นทางได้น้อย แต่หากมีการใช้ปริมาณซีเมนต์มากเกินไป ความกว้างของรอยแตกร้าวจะมากกว่า 6 มิลลิเมตรและมีผลทำให้น้ำและความชื้นลงไปได้ง่าย ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นทางได้และ PCA (2003) ยังได้กล่าวถึงข้อแนะนำในการลดรอยแตกสะท้อนของ Soil-cement ไว้ดังนี้

- ในขั้นตอนการก่อสร้างควรปฏิบัติตามคู่มือ โดยควบคุมตัวแปรต่างๆให้เป็นไปตามมาตรฐาน ทั้งการบดอัด ปริมาณน้ำ การบ่มหรือเวลาในการก่อสร้าง

- ควรบดอัดด้วยปริมาณน้ำที่ OMC หรือต่ำกว่า OMC เล็กน้อย (ไม่เกิน 2%) เพื่อให้เกิด Shrinkage ที่น้อยลง

- ใช้วัสดุก่อสร้างที่มีมวลละเอียดมากควรมีการปรับปรุงวัสดุเสียก่อนเพื่อลดการใช้ปริมาณการใช้น้ำเพื่อไม่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมาก เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรส่งผลทำให้รอยแตกจะมีขนาดกว้าง

- ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางวิศวกรรมตามต้องการ และไม่ก่อให้เกิดรอยแตกที่มีขนาดกว้าง

1. ใช้สารผสมเพิ่มเช่น ยิปซัม น้ำยาลดน้ำ etailoy เพื่อลดการเกิด Shrinkage ของพื้นทางดิน-ซีเมนต์ และยังช่วยลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ได้

2. เพิ่มชั้นทางระหว่างชั้นพื้นทางและผิวทางเพื่อลด Stress ที่จะทำให้ผิวทางแตก โดยสามารถทำได้ 3 วิธี

1) เพิ่มชั้น Surface Treatment, Chip Seal ให้มีความหนามากขึ้น

2) ปูแผ่นใยสังเคราะห์ระหว่างชั้นพื้นทางและผิวทางเพื่อทำหน้าที่ลด Stress ที่กระทำกับผิวทาง

3) เพิ่มชั้น Unbound Granular หนา 5-10 เซนติเมตร ระหว่างชั้นพื้นทางและผิวทาง

3. ต้องทำการบ่มให้ถูกขั้นตอนหลังการบดทับเสร็จและผิวหน้าของพื้นทางซีเมนต์ จะต้องรักษาความชื้นตลอดเวลา ห้ามปล่อยให้แห้ง ก่อนจะทำชั้นปิดทับ เช่น Prime Coat, Chip Seal

- ทำการปูผิวทางให้ช้าลงหลังจากการก่อสร้างชั้นพื้นทางรอยแตกจาก Shrinkage มักจะเกิดในช่วง 2 เดือนแรก หากยืดเวลาในการปูชั้นผิวทางได้ 14 ถึง 28 วัน เพื่อให้เกิดรอยแตกที่พื้นทางก่อน เมื่อปูผิวทางลงบนพื้นทางที่เกิดรอยแตกแล้ว จะทำให้รอยแตกสะท้อนที่ผิวทางน้อยและรอยแตกมีขนาดเล็กลง

- ทำการเร่งรอยแตกให้เกิดขึ้นโดยหลังจากการก่อสร้างชั้นพื้นทางเสร็จประมาณ 2 วัน ให้รถบดทำการวิ่งบนชั้นพื้นทางเพื่อให้เกิดรอยแตกเร็วเล็กน้อยก่อนปูผิวทางเพื่อลดรอยแตกสะท้อนให้น้อยลง

การออกแบบดินซีเมนต์และมาตรฐานของกรมทางหลวง

1. การออกแบบดินซีเมนต์

งานทางที่ใช้โครงสร้างทางเป็นวัสดุดินซีเมนต์ได้ถูกใช้งานในหลายหน่วยงานกันอย่างแพร่หลายโดย Rananan *et al.* (1983) ได้เสนอลักษณะการออกแบบในประเทศต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5

และในประเทศไทย ชีรชาติ และสฤตย์พงษ์ (2543) ได้กล่าวว่า การออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงจะใช้วิธีการของ Portland Cement Association แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา แต่จะใช้ Criteria ของ Transport and Road Research Laboratory (TRRL) แห่งประเทศอังกฤษ ตามวิธีดังกล่าวนี้ดินจะถูกผสมกับซีเมนต์ปริมาณต่างๆ กันแล้วนำมาบดอัดใน Proctor Mold โดยบดอัดแบบ Modified Proctor โดยใช้ปริมาณน้ำที่ OMC (Optimum Moisture Content) หลังจากนั้นนำไปทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) ที่อายุการบ่ม 7 วัน จากปริมาณซีเมนต์และค่า UCS ที่ทดลองได้ นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์ (%) กับค่า UCS ปริมาณซีเมนต์ที่ให้ค่า UCS เท่ากับ 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะเป็นปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการในการทำดินซีเมนต์

2. มาตรฐานของกรมทางหลวง

กรมทางหลวงได้จัดทำมาตรฐานเพื่อใช้ในการก่อสร้างทางที่ใช้วัสดุดินซีเมนต์เป็นโครงสร้างทาง ซึ่งได้แก่ มาตรฐานที่ ทล.-ม. 203/2532 และมาตรฐานที่ ทล.-ม. 204/2532 ที่ได้กำหนดถึงการเลือกวัสดุที่นำมาใช้งานเครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ในการทำงานขั้นตอนในการออกแบบขั้นตอนก่อสร้างและขั้นตอนการควบคุมงานโดยมีรายละเอียดดังในภาคผนวก ข

ตารางที่ 5 เกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์โดยประเทศต่างๆ

Institution	Design Criteria
Department of Highways Thailand	Unconfined Compressive Strength after 7 days Curing is not less than 250 psi (17.28 ksc)
Siam Cement Company Thailand	CBR not lower than 120 psi (8.30 ksc)
British Road Research Laboratory United Kingdom	Unconfined Compressive Strength after 7 days Curing is not less than 250 psi
Ghana Department of Highways Ghana	CBR not lower than 120 %
Most African Countries	CBR not lower than 180 %
National Association of Australian State Road Authority (NAASRA) Australia	1) Unconfined Compressive Strength after 7 days Curing is in the range of 150-250 psi 2) CBR after 7 days curing and 4 days soaking is not lower than 120%

ที่มา: Rananan *et al.* (1983)

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุใช้ในการวิจัยนี้ ประกอบด้วยหินคลุก (Crushed Rock) และดินลูกรัง (Soil Aggregate) โดยวัสดุนี้มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์เป็นวัสดุพื้นทาง (CBR สูงกว่า 80%) และ ต่ำกว่าเกณฑ์เป็นวัสดุพื้นทาง (CBR ต่ำกว่า 80%) และจำเป็นต้องปรับปรุงด้วยซีเมนต์ จากแหล่งวัสดุ 6 แหล่งของประเทศไทย ได้แก่

1. วัสดุหินและหินที่ผ่านเกณฑ์เป็นวัสดุพื้นทาง

- 1.1 Crushed Rock จากจังหวัดกาญจนบุรีแสดงในภาพที่ 4
- 1.2 Crushed Rock จากจังหวัดนครราชสีมาแสดงในภาพที่ 5
- 1.3 Crushed Rock จากจังหวัดอุดรดิต์แสดงในภาพที่ 6

2. วัสดุหินและหินไม่ผ่านเกณฑ์เป็นวัสดุพื้นทาง

- 2.1 Soil Aggregate จากจังหวัดเพชรบุรีแสดงในภาพที่ 7
- 2.2 Soil Aggregate จากจังหวัดปราจีนบุรีแสดงในภาพที่ 8
- 2.3 Soil Aggregate จากจังหวัดเพชรบูรณ์แสดงในภาพที่ 9

สำหรับซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณซีเมนต์ใช้ที่ร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 ค่อน้ำหนักดินแห้ง สำหรับ Crushed Rock ที่เป็นแหล่งวัสดุจาก จังหวัดกาญจนบุรี นครราชสีมา และ อุดรดิต์ และใช้ที่ร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 ค่อน้ำหนักดินแห้ง สำหรับ Soil Aggregate ที่เป็นแหล่งวัสดุจาก จังหวัด เพชรบุรี ปราจีนบุรี และ เพชรบูรณ์ น้ำที่ใช้ในการผสมเป็นน้ำประปา

อุปกรณ์ดำเนินวิจัย

อุปกรณ์สำหรับการดำเนินวิจัย ประกอบด้วย (1) เครื่องมือทดสอบหาดัชนีพื้นฐานของวัสดุ , (2) เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงอัด และ (3) เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติความคงทน ดังนี้

1. เครื่องมือทดสอบหาดัชนีพื้นฐานของวัสดุ ประกอบด้วย ชุดเครื่องมือทดสอบ Atterberg's Limit Test, Specific Gravity Test, Sieve and Hydrometer Test, Modified Compaction Test



ภาพที่ 4 วัสดุจากจังหวัดกาญจนบุรี



ภาพที่ 5 วัสดุจากจังหวัดนครราชสีมา



ภาพที่ 6 วัสดุจากจังหวัดอุดรธานี



ภาพที่ 7 วัสดุจากจังหวัดเพชรบุรี



ภาพที่ 8 วัสดุจากจังหวัดปราจีนบุรี



ภาพที่ 9 วัสดุจากจังหวัดเพชรบูรณ์

2. เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงอัด ได้แก่ ชุดเครื่องมือทดสอบ California Bearing Ratio Test และ Unconfined Compression Stress Test

3. เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติความคงทน คือ เครื่องมือทดสอบ Slake Durability Test, Wetting and Drying Test, และ Wheel Track Test ดังแสดงในภาพที่ 10, 11 และ 12 ตามลำดับ



ภาพที่ 10 เครื่องมือทดสอบ Slake Durability



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 11 ชุดเครื่องมือทดสอบ Wetting and Drying Test (ก) ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ และ (ข) ภาชนะสำหรับบ่มตัวอย่าง (ค) แปรงสำหรับขัดก้อนตัวอย่าง



ภาพที่ 12 ชุดเครื่องมือทดสอบ Wheel Track

ขั้นตอนการดำเนินวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินวิจัยแสดงในภาพที่ 13 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. เก็บรวบรวมข้อมูลและตัวอย่างวัสดุ

ศึกษารวบรวมข้อมูลวัสดุงานทางชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ และทำการเก็บวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาจากแหล่งที่ได้ทำการก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์จำนวน 6 แห่ง ตามหัวข้อ 3.1 รวมทั้งรวบรวมข้อมูลกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 1 ซึ่งมีการใช้วัสดุพื้นทางเดิมและนำมาปรับปรุงโดยซีเมนต์เป็นชั้นพื้นทาง (Base)

2. สำนวสภาพความเสียหายและเก็บตัวอย่างวัสดุพื้นทางของโครงการกรณีศึกษา

การสำวสภาพความเสียหายทางกายภาพของผิวทางโครงการกรณีศึกษา ได้แก่ ขนาด รอยแตก ความลึกรอยแตก เป็นต้น

3. การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

ก่อนทำการทดสอบนำวัสดุที่แยกเก็บมาทำการคลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วตากให้แห้งด้วยการผึ่งอากาศไว้ประมาณ 2 วัน และก่อนมีการทดสอบต้องทำการหาปริมาณน้ำที่มีอยู่จริงในวัสดุทุกครั้ง

4. การทดสอบวัสดุตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการสรุปในตารางที่ 6 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การทดสอบหาดัชนีทางวิศวกรรม

- Atterberg's Limit Test เพื่อหาค่า Liquid Limit (LL) และ Plastic Limit (PL) ของวัสดุตามมาตรฐานกรมทางหลวง การทดลองที่ ทล.-ท. 102/2515 และ ทล.-ท. 103/2515, ตามลำดับ

- Specific Gravity Test (G_s) โดยวิธีหาปริมาตรของเนื้อดินจากการแทนที่น้ำ ตามมาตรฐาน ASTM D854

- Sieve and Hydrometer Test เพื่อหาขนาดเม็ดดินของวัสดุทั้งชนิดเม็ดละเอียด และหยาบ ตามมาตรฐานกรมทางหลวง การทดลองที่ ทล.-ท. 205/2517

- Modified Compaction Test การทดสอบการบดอัดตามมาตรฐานกรมทางหลวง (2530) การทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 ซึ่งเป็นการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) และค่าความชื้นสูงสุด (Optimum Moisture Content)

4.2 การทดสอบคุณสมบัติการรับแรงกด

- California Baring Ratio Test (CBR) ตามมาตรฐานกรมทางหลวง(2530) การทดลองที่ ทล.-ท. 109/2517 ทั้งประเภทแบบแช่น้ำ (Soaked)และไม่แช่น้ำ (Unsoaked)

- Unconfined Compresion Test ตามมาตรฐาน ทล.-ม. 203/2533 สำหรับ Crushed Rock และ ตามมาตรฐาน ทล.-ม. 204/2533 สำหรับ Soil Aggregate โดยนำวัสดุตัวอย่างซึ่งมีปริมาณอัตราส่วนซีเมนต์ต่างๆ และมีระยะเวลาบ่มเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน มาทดสอบโดยใช้อัตรากด 0.1 นิวตัน/ม.ก. จนกระทั่งน้ำหนักไม่เพิ่มขึ้นแล้วเริ่มลดลงนำค่าน้ำหนักที่เกิดและระยะการยุบตัวไปเขียนกราฟหาค่า Unconfined Compressive Strength (UCS)

4.3 การทดสอบคุณสมบัติความคงทน

- Slake Durability Test ดินตัวอย่างซึ่งมีระยะเวลาบ่มเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน นำมาดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4644-08 เพื่อหาค่า Slake Durability Index (Id) รายละเอียดวิธีการทดสอบ และการคำนวณแสดงแสดงในภาคผนวก ก

- Wetting and Drying Test (Brush Test) วัสดุตัวอย่างซึ่งมีอายุการบ่มเป็นเวลา 7 วัน นำมาทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D559-03 เพื่อหาค่าความหลุดร่อนของดินซีเมนต์, การเปลี่ยนแปลงความชื้น และการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (บวมตัวและหดตัว) การทดสอบเริ่มจากการนำตัวอย่างที่ผ่านการบ่มในเวลาที่ต้องการแล้วไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องทดลองเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นมาชั่งน้ำหนัก เสร็จแล้วตัวอย่างไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 71°C . (160°F .) เป็นเวลา 42 ชั่วโมงแล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ต่อจากนั้นนำตัวอย่างไปถูด้วยแปรงลวดให้ทั่วตัวอย่าง โดยใช้แรงกดประมาณ 1.36 กิโลกรัม (3 ปอนด์) แล้วหาน้ำหนักอีกครั้งหนึ่งจึงเป็นการทดสอบ 1 รอบ ต้องทำซ้ำจนครบ 12 รอบ จึงอบตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิ 110°C . (230°F .) แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างทำการคำนวณ หาค่าความหลุดร่อนของดินซีเมนต์ รายละเอียดวิธีการทดสอบ และการคำนวณแสดงแสดงในภาคผนวก ก

- Wheel Track Test เตรียมวัสดุตัวอย่างซึ่งมีขนาด 305 มม. X 305 มม. สูง 100 มม. จากหินคลุกและดินลูกรังซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 19.0 มม. ($3/4$ นิ้ว) ผสมกับซีเมนต์และบดอัดตัวอย่างแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) และบ่มที่อายุ 7 วันก่อนนำมาทดสอบ โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก

4.4 การทดสอบ Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตัวอย่าง

5. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพและวัสดุซีเมนต์ที่ใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่างๆ รวมทั้งดินตัวอย่างซึ่งเก็บจากโครงการกรณีศึกษา โดยจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดและความคงทน และองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ การเปรียบเทียบระหว่าง UCS กับ Slake Durability Test, การเปรียบเทียบระหว่าง Wetting and Drying Test กับ Slake Durability Test, การเปรียบเทียบระหว่าง UCS และ Wheel Track เป็นต้น

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

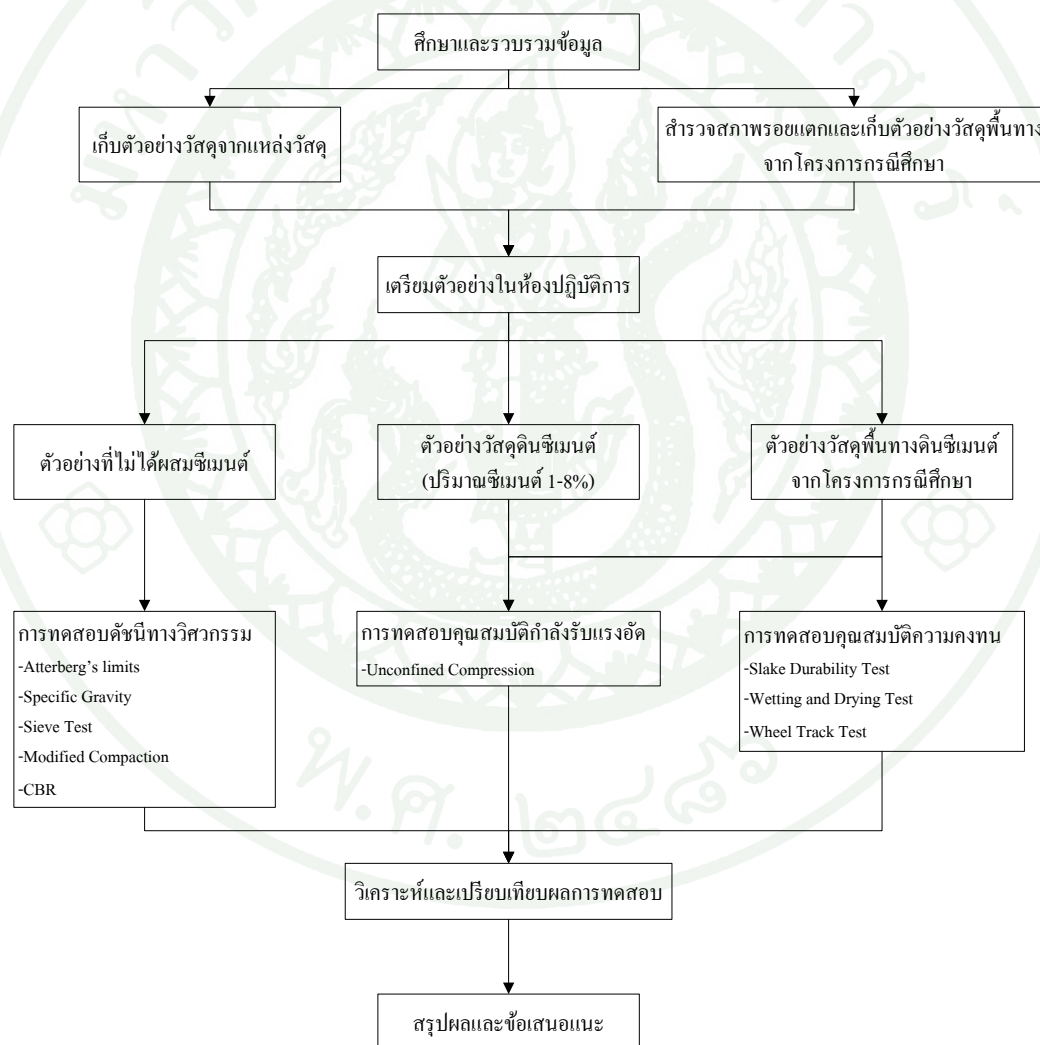
ข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะนำมาประมวลผลและเสนอความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังรับน้ำหนักและความคงทนของวัสดุที่ปรับปรุงโดยซีเมนต์เพื่อใช้ในการปรับปรุงวัสดุชั้นพื้นทาง

ตารางที่ 6 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบ	แหล่ง	ตัวอย่าง/ 1 ชุด	Vary % Cement	จำนวน ตัวอย่าง
ดัชนีทางวิศวกรรม				
- Atterberg's Limit Test	6	3	-	18
- Specific Gravity Test	6	3	-	18
- Sieve and Hydrometer Test	6	3	-	18
- Modified Compaction Test	6	3	-	18
- California Baring Ratio Test	6	3	-	18
คุณสมบัติการรับแรงกด				
- Unconfined Compresion Test	6	3	4	72
คุณสมบัติความคงทน				
- Slake Durability Test	6	3	4	72
- Wetting and Drying Test	6	2	4	48
- Wheel Track Test	2	3	4	24
รวมทั้งสิ้น				306

สถานที่ทำการวิจัย

การดำเนินการวิจัยได้ทำการเก็บวัสดุจากแหล่งวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างถนนที่มีการปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางด้วยซีเมนต์จาก จังหวัด นครราชสีมา กาญจนบุรี อุตรดิตถ์ เพชรบุรี ปราจีนบุรี และจังหวัดเพชรบูรณ์ โดยนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวงและห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 13 ขั้นตอนการดำเนินวิจัย

ผลการศึกษา

ผลของการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน คุณสมบัติทางด้านกำลังและความคงทนของวัสดุทั้ง 6 แหล่งที่ได้นำมาศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการ มีรายละเอียดดังนี้

คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุตัวอย่าง

1. ลักษณะทางกายภาพ

วัสดุจากจังหวัดกาญจนบุรี (CR1) มีส่วนประกอบหลักเป็นหินปูน (Limestone) มีเนื้อแน่น สีขาวเทา ประกอบด้วยแร่แคลเซียมคาร์บอเนต โดยมีขนาดคละของเม็ดหินค่อนข้างจะสม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 14



(ก) ลักษณะโดยทั่วไป

(ข) วัสดุเม็ดหยาบ

ภาพที่ 14 ลักษณะของวัสดุจากจังหวัดกาญจนบุรี (CR1)

วัสดุจากจังหวัดนครราชสีมา (CR2) มีส่วนประกอบหลักเป็นหินบะซอลต์ (Basalt) มีเนื้อละเอียดสีเข้ม สีออกน้ำตาลแก้มดำ แร่ที่สำคัญคือ แร่แพลจิโอเคลสเฟลด์สปาร์ ผลึกแร่เหล็ก และสามารถสังเกตเห็นรูพรุนในเนื้อหินเห็นได้อย่างชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 15



(ก) ลักษณะโดยทั่วไป



(ข) วัสดุเม็ดหยาบ



ภาพที่ 15 ลักษณะของวัสดุจากจังหวัดนครราชสีมา (CR2)

วัสดุจากจังหวัดอุดรธานี (CR3) เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีวัสดุประกอบไปด้วยหินปูน หินอัคนี หินไรโอไลต์ (Rhyolite) ที่มีเนื้อละเอียด สีขาว และสีชมพู อันประกอบไปด้วยแร่เฟลสปาร์ และควอร์ตซ์เป็นส่วนประกอบสำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 16



(ก) ลักษณะโดยทั่วไป



(ข) วัสดุเม็ดหยาบ



ภาพที่ 16 ลักษณะของวัสดุจากจังหวัดอุดรธานี (CR3)

วัสดุจากจังหวัดเพชรบุรี (AG1) เป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบหลักที่เป็นหินตะกอนอันได้แก่กรวดมน (Conglomerate) และกรวดเหลี่ยม (Breccia) ที่เกิดมาจากแร่ควอตซ์ เป็นแกนแล้วมีตะกอนดินเหนียวห่อหุ้มด้านนอก ดังแสดงในภาพที่ 17



(ก) ลักษณะโดยทั่วไป

(ข) วัสดุเม็ดหยาบ

ภาพที่ 17 ลักษณะของวัสดุจากจังหวัดเพชรบุรี (AG1)

วัสดุจากจังหวัดปราจีนบุรี (AG2) เป็นวัสดุที่มีหินทราย เป็นส่วนประกอบ สีออกน้ำตาลแดง เนื้อหยาบสามารถมองเห็นเม็ดทรายได้ และยังมีหินสีลาแลง (Laterite) อันมีเหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์จับตัวเป็นก้อนปะปนอยู่ด้วยดังแสดงในภาพที่ 18



(ก) ลักษณะโดยทั่วไป

(ข) วัสดุเม็ดยาบ

ภาพที่ 18 ลักษณะของวัสดุจากจังหวัดปราชินบุรี (AG2)

วัสดุจากจังหวัดเพชรบูรณ์ (AG3) เป็นวัสดุที่มีหินโคลน (Mudstone) เป็นส่วนประกอบ อันเกิดมาจากการพัดพาอนุภาคขนาดเล็กเช่น Clay หรือ Silt และยังมีหินทรายที่เรียกว่า Greywacke มีเกิดจากแร่หลายอนุภาคขนาดเล็กปะปนกันกับแร่ ควอตซ์ และ เฟลสปาร์ ดังแสดงในภาพที่ 19



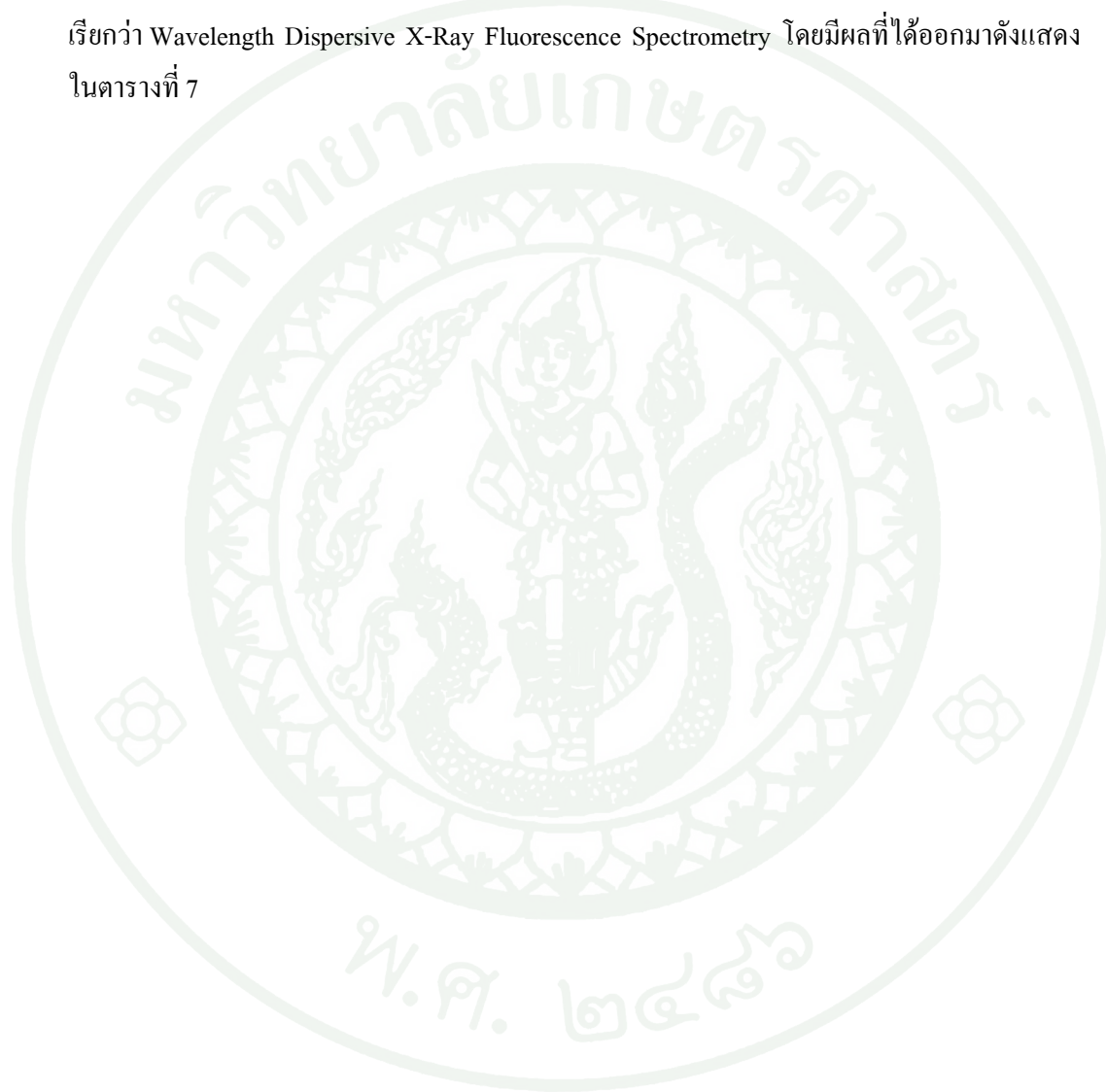
(ก) ลักษณะโดยทั่วไป

(ข) วัสดุเม็ดยาบ

ภาพที่ 19 ลักษณะของวัสดุจากจังหวัดเพชรบูรณ์ (AG3)

2. องค์ประกอบทางเคมี

วัสดุทั้ง 6 แหล่งได้ทำการสุ่มตัวอย่างไปทดสอบ X-Ray โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ที่เรียกว่า Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry โดยมีผลที่ได้ออกมาดังแสดงในตารางที่ 7



ตารางที่ 7 แสดงปริมาณธาตุของวัสดุที่ผ่านการทดสอบด้วยวิธี X-ray

ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)*																	
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	NiO	CuO	ZnO	SrO	ZrO ₂	BaO
กาญจนบุรี	0.08	5.58	8.94	25.43	0.07	1.12	3.39	40.49	0.71	<0.01	0.06	5.47	<0.01	<0.01	0.01	0.03	0.01	0.08
นครราชสีมา	3.19	3.03	13.72	44.57	0.69	0.03	1.68	7.94	2.47	0.09	0.31	14.69	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01	0.07
อุดรดิตถ์	0.47	5.41	4.59	34.17	0.62	0.69	1.52	38.79	0.31	0.08	0.13	3.16	0.03	<0.01	0.01	0.02	0.01	<0.01
เพชรบุรี	<0.01	0.83	10.57	68.68	0.12	0.06	3.01	0.21	0.60	0.04	0.04	11.44	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01
ปราจีนบุรี	<0.01	0.21	9.50	74.78	0.07	0.04	0.35	0.17	0.76	0.04	0.11	9.81	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	<0.01
เพชรบูรณ์	3.36	1.92	14.83	58.67	0.18	0.05	2.67	3.32	0.79	<0.01	0.27	6.45	<0.01	<0.01	0.01	0.02	0.02	0.10

*โดยปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical Formulas, “Fundamental Parameter Calculations” ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้คำนวณค่าให้อยู่ในรูป Oxide ของธาตุนั้นๆ

ตารางที่ 7 แสดงให้เห็นถึงปริมาณองค์ประกอบธาตุต่างๆที่ประกอบอยู่ในวัสดุที่ทำการศึกษาโดยองค์ประกอบที่มีค่ามากและแสดงลักษณะของวัสดุนั้น ได้แก่ Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , CaO และ Fe_2O_3 จากการวิเคราะห์ผลพบว่าวัสดุทั้ง 6 แหล่งที่ได้นำมาวิจัย แบ่งออกได้เป็น 2 วัสดุหลักนั่นคือหินคลุก(Crushed Rock, CR) กับวัสดุมวลรวม(Soil Aggregate, AG) และธาตุที่ทำให้เห็นถึงความแตกต่างของวัสดุทั้งสองประเภทคือ CaO ผลของการทดสอบพบว่าปริมาณ CaO ของวัสดุจากจังหวัด กาญจนบุรี(CR1) นครราชสีมา(CR2) และอุดรดิตถ์(CR3) มีค่ามากเมื่อเทียบกับวัสดุจากจังหวัด เพชรบุรี(AG1) ปราจีนบุรี(AG2) และเพชรบูรณ์(AG3) อันเป็นผลมาจากเนื้อของวัสดุที่เนื้อเป็นหิน มีการจับตัวกันเป็นผลึกโดยมี CaO เป็นส่วนเชื่อมประสาน โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ CaO ของหินทั้ง 3 แหล่งพบว่า แหล่งกาญจนบุรีและแหล่งอุดรดิตถ์มีปริมาณที่สูงกว่าแหล่งนครราชสีมาซึ่งสอดคล้องกับการจำแนกทางลักษณะทางกายภาพที่ระบุว่าแหล่งกาญจนบุรีและแหล่งอุดรดิตถ์มีหินปูนเป็นส่วนประกอบแต่แหล่งนครราชสีมาเป็นหินบะซอลต์

เมื่อพิจารณาวัสดุประเภทหินคลุก พบว่า หินคลุกจากแหล่งกาญจนบุรี (CR1) มีค่า CaO สูงที่สุดแตกต่างจากวัสดุจากแหล่งอื่นอย่างเห็นได้ชัดเพราะเป็นหินปูนส่วน Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , และ Fe_2O_3 ไม่ได้มีค่าเด่นชัดมากนัก ส่วนหินคลุกจากแหล่งนครราชสีมา (CR2) เป็นหินที่มี Al_2O_3 สูงเนื่องจากเป็นหินบะซอลต์มีแร่แฟลจิโอเคลส เฟลด์สปาร์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งแร่ประกอบเหล่านี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นแร่ดินเหนียว ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้หากนำวัสดุมาใช้ในระยะยาว และเมื่อพิจารณาปริมาณของ Fe_2O_3 จากแหล่งนครราชสีมาพบว่ามีความสูงเพราะเป็นธาตุที่พบได้มากในหินบะซอลต์อีกด้วย ส่วนวัสดุหินคลุกที่ได้จากอุดรดิตถ์ (CR3) มีค่า CaO น้อยกว่า กาญจนบุรี เพราะเป็นวัสดุที่มีหินหลายชนิดที่ต่างไปจากกาญจนบุรีที่มีหินปูนประเภทเดียวส่วนค่าของ Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , และ Fe_2O_3 ไม่ได้มีค่าสูงหรือเด่นมาก

หากพิจารณาวัสดุประเภทวัสดุมวลรวมพบว่าวัสดุจากจังหวัด เพชรบุรี (AG1) ปราจีนบุรี (AG2) และเพชรบูรณ์(AG3) มีค่า SiO_2 มากกว่าวัสดุจากกาญจนบุรี นครราชสีมา และอุดรดิตถ์ ซึ่ง SiO_2 แสดงถึงการมีวัสดุที่เกิดมาจากทรายหรือผลึก Quartz เล็กๆปะปนอยู่มากกว่า นอกจากนี้วัสดุจากแหล่ง เพชรบุรี ปราจีนบุรีและเพชรบูรณ์ ยังมี Al_2O_3 ที่เป็นธาตุที่เป็นส่วนประกอบของดินเหนียวที่ใกล้เคียงกับวัสดุของ นครราชสีมา แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบแร่ดินเหนียวที่ปะปนอยู่ในวัสดุ ซึ่งจะมีผลต่อค่าคุณสมบัติทางพลาสติกของวัสดุอีกด้วย

3. คุณสมบัติทางวิศวกรรมก่อนได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์

ผลการทดสอบวัสดุทั้ง 6 แหล่งประกอบไปด้วย Sieve Analysis, Atterburg's Limit, Modified Compaction, CBR(Soak), ความถ่วงจำเพาะ แสดงในตารางที่ 8 และ ตารางที่ 9 ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่ใช้ในการคัดเลือกวัสดุเพื่อนำมาใช้ในการงานทาง



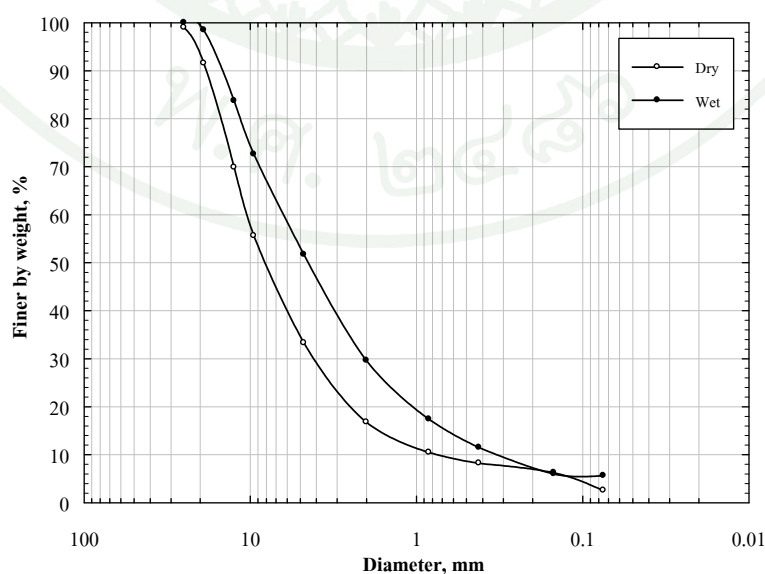
ตารางที่ 8 ผลการทดสอบหาขนาดคะแนนแห้งและแบบเปียก

SIEVE No.	Sieve Opening (mm.)	% Passing											
		CR1		CR2		CR3		AG1		AG2		AG3	
		Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet
1"	25	98.97	100.00	100.00	100.00	98.75	100.00	96.73	97.20	96.91	96.38	94.08	98.55
3/4"	19	91.51	98.43	99.10	98.79	90.89	92.40	91.04	93.87	92.89	90.83	88.39	93.93
1/2"	12.5	69.84	83.70	87.58	89.16	78.64	85.24	78.48	87.66	79.76	81.74	82.40	80.69
3/8"	9.5	55.56	72.55	74.22	76.82	68.86	76.01	59.95	76.63	55.92	66.09	75.24	72.28
#4	4.75	33.25	51.66	51.66	54.09	49.70	57.42	32.95	53.35	40.96	54.96	60.05	56.76
#10	2	16.74	29.60	27.38	31.91	30.62	39.57	12.76	34.91	30.93	48.15	44.33	42.43
#20	0.84	10.45	17.37	15.97	21.30	18.80	29.54	6.43	30.46	25.46	46.94	28.16	33.21
#40	0.42	8.21	11.47	9.94	17.33	11.42	24.34	3.23	28.42	18.15	46.00	18.07	27.35
#100	0.149	6.24	5.96	4.58	13.77	1.78	15.49	0.92	25.51	2.99	34.83	6.51	20.21
#200	0.075	2.53	5.61	2.53	12.26	1.08	12.23	0.27	24.81	0.68	27.90	3.43	17.75

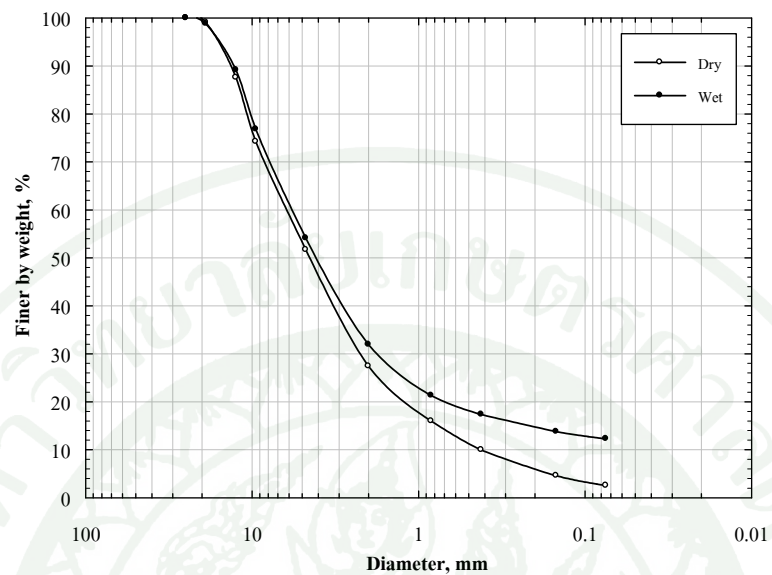
ตารางที่ 9 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

Test	CR1	CR2	CR3	AG1	AG2	AG3
LL (%)	29	NP	NP	39	29	30
PI (%)	22	NP	NP	27	4	10
OMC (%)	6	12	6	9	7.5	10
Maximum dry Density (g/cm ³)	2.36	2.16	2.26	2.22	2.32	2.1
CBR (%)	80	96	92	31.5	22.5	22
Swell%	0	0	0	0	0	0
G _s	2.78	2.82	2.52	2.63	2.7	2.64

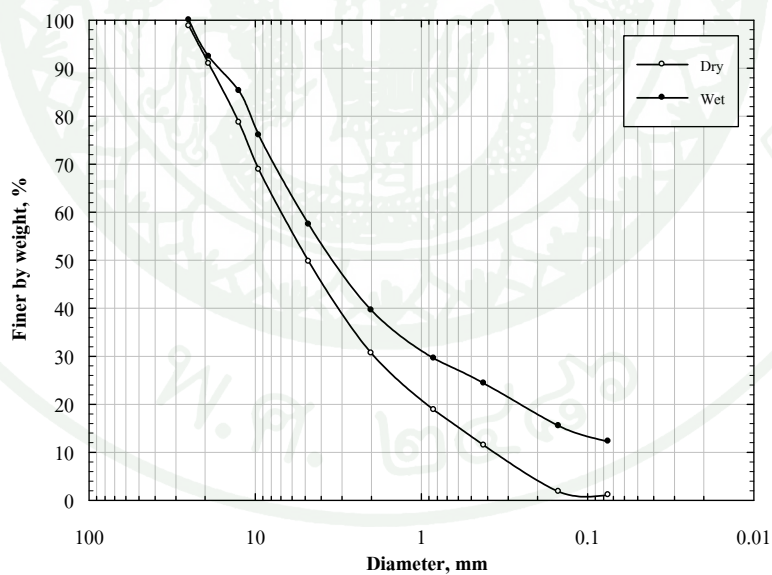
การทดสอบหาขนาดคละแบบแห้งและแบบเปียก ให้ผลการทดสอบที่แตกต่างอย่างชัดเจน จากตารางที่ 8 ขนาดคละที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มีความแตกต่างชัดเจน โดยเฉพาะวัสดุมวลรวมที่มีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อทำการทดสอบแบบเปียกซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญข้อหนึ่งที่ทางกรมทางหลวงกำหนดให้มาตรฐานในการหาขนาดคละเป็นแบบเปียกทั้งนี้เพื่อให้ได้ทราบถึงมวลและขนาดของเม็ดดินที่มีความถูกต้อง ภาพที่ 20 ถึงภาพที่ 25 แสดงถึงความแตกต่างของขนาดคละแบบแห้งและแบบเปียกของวัสดุทั้ง 6 แหล่ง



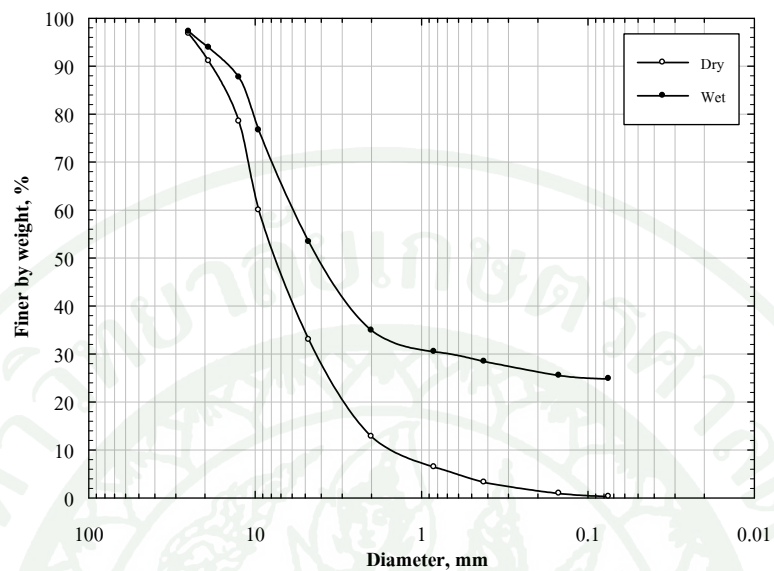
ภาพที่ 20 ขนาดคละของวัสดุจากจังหวัดกาญจนบุรี (CR1)



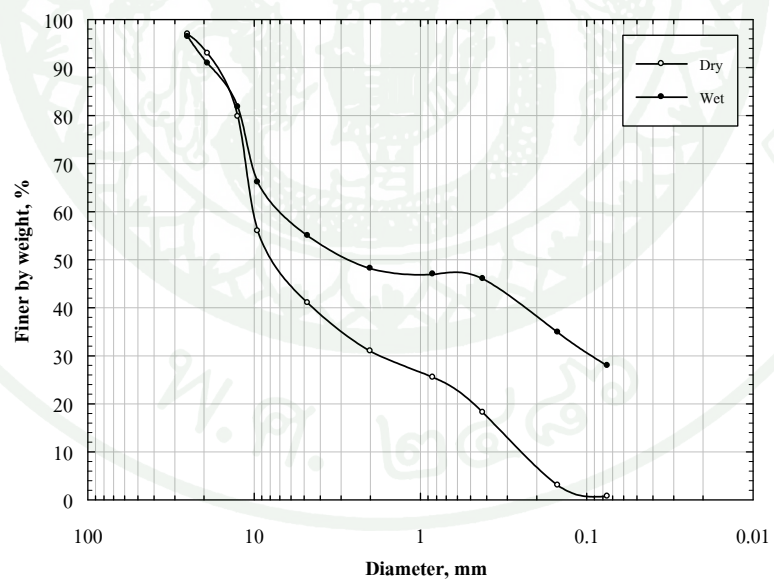
ภาพที่ 21 ขนาดคละของวัสดุจากจังหวัดนครราชสีมา (CR2)



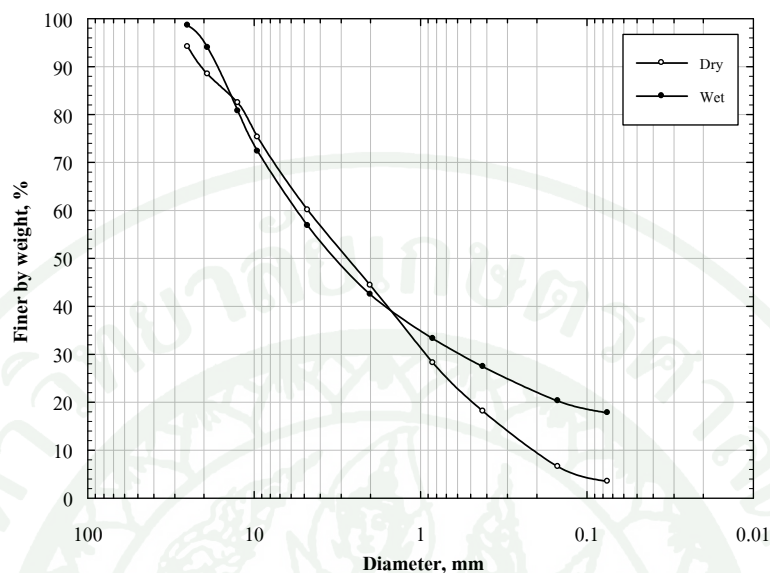
ภาพที่ 22 ขนาดคละของวัสดุจากจังหวัดอุดรดิตถ์ (CR3)



ภาพที่ 23 ขนาดคละของวัสดุจากจังหวัดเพชรบุรี (AG1)



ภาพที่ 24 ขนาดคละของวัสดุจากจังหวัดปราจีนบุรี (AG2)



ภาพที่ 25 ขนาดผลของวัสดุจากจังหวัดเพชรบูรณ์ (AG3)

เมื่อทำการจำแนกวัสดุจากผลการทดสอบในตารางที่ 8 และตารางที่ 9 โดยระบบ AASHTO พบว่า วัสดุหินคลุกจากจังหวัด กาญจนบุรีเป็นชนิด A-2-4(0) นกรราชสีมาเป็นชนิด A-1-a(0) และอุตรดิตถ์ เป็นชนิด A-1-a(0) วัสดุรวมรวมจากจังหวัด เพชรบุรีเป็นชนิด A-2-6(0) ปราจีนบุรีเป็นชนิด A-1-b(0) และเพชรบูรณ์เป็นชนิด A-2-4(0)

เมื่อพิจารณาค่า CBR ที่ได้จากการทดสอบพบว่า วัสดุหินคลุกมีค่ามากกว่า 80% ส่วนวัสดุรวมรวมมีค่าประมาณ 20-30% ซึ่งตามมาตรฐานกรมทางแล้ววัสดุหินคลุกสามารถใช้เป็นพื้นทางได้แต่วัสดุรวมรวมต้องใช้เป็นชั้นรองพื้นทางและเมื่อต้องการนำวัสดุรวมรวมเหล่านี้มาใช้เป็นชั้นพื้นทาง จำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์เพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดตามต้องการ

คุณสมบัติของวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์

กรมทางหลวงได้มีวิธีการปรับปรุงวัสดุที่ไม่ได้ตามมาตรฐานวัสดุงานทางโดยใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม ซึ่งสำหรับชั้นพื้นทาง กรมทางหลวงได้มีมาตรฐานพื้นทางดินผสมซีเมนต์ และมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ โดยมีรายละเอียดวัสดุที่สามารถนำมาใช้ปรับปรุงดังตารางที่ 10 และตารางที่ 11 นอกจากนี้ ยังได้มีการกำหนดขนาดผลของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 10 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

การทดสอบ	ข้อกำหนดที่ต้องการ
1. ขนาดคละ (ทล.-ท. 205/2517)	ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตารางที่ 11
2. Liquid Limit (ทล.-ท. 102/2515)	Liquid Limit ไม่เกินร้อยละ 25
3. Plasticity Index (ทล.-ท. 103/2515)	Plasticity Limit และ Plasticity Index ไม่เกินร้อยละ 6
4. CBR (ทล.-ท. 109/2517)	ค่า CBR ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ที่ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด(ทล.-ท. 108/2517)
5. ความสึกหรอ (ทล.-ท. 202/2515)	ความสึกหรอ ไม่เกินร้อยละ 40 (ด้วยเครื่อง Loss Angeles)
6. ความคงทน (ทล.-ท. 213/2531)	ใช้โซเดียมซัลเฟตทดสอบ 5 รอบ ค่าที่ได้ไม่เกินร้อยละ 9

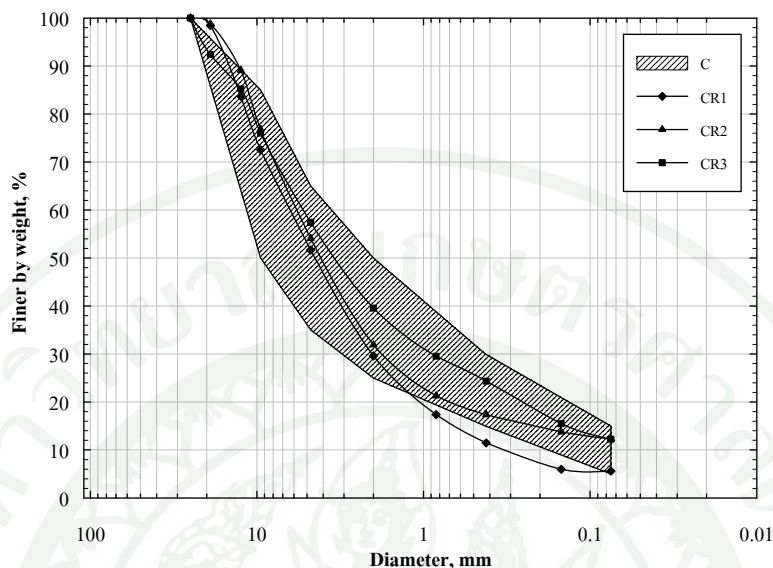
วัสดุทั้ง 6 แหล่งอันประกอบด้วยวัสดุหินคลุกและวัสดุรวมเมื่อได้ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานแล้วพบว่า วัสดุหินคลุกจากแหล่ง นครราชสีมา (CR2) อุดรดิตถ์ (CR3) ผ่านข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุงานทางโดยใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มของกรมทางหลวง อันได้แก่การทดสอบขนาดคละ, Liquid Limit, Plasticity Index, CBR ส่วนการทดสอบ ความสึกหรอด้วยเครื่อง Loss Angeles และความคงทนด้วยโซเดียมซัลเฟตนำมาทดสอบด้วย ในวัสดุหินคลุก มีวัสดุจากแหล่งกาญจนบุรี(CR1) ที่มี ค่า Liquid Limit และ Plasticity Index สูงกว่าข้อกำหนด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาขนาดคละตามข้อกำหนดในตารางที่ 11 วัสดุหินคลุกจากแหล่งนครราชสีมาและอุดรดิตถ์ จัดอยู่ในกลุ่ม C แต่วัสดุแหล่งกาญจนบุรีที่ขนาดวัสดุ 0.9 mm จะไม่อยู่ในช่วงกลุ่มใดๆ ดังแสดงในภาพที่ 26 ส่วนวัสดุรวมจากทั้ง 3 แหล่ง มีคุณสมบัติผ่านตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ในด้านขนาดคละ, Liquid Limit และ Plasticity Index ส่วนการทดสอบความสึกหรอด้วยเครื่อง Loss Angeles ไม่ได้ทำการทดสอบเนื่องมีข้อจำกัดเรื่องปริมาณวัสดุที่นำมาทดสอบไม่พอเพียงที่จะทดสอบ

ตารางที่ 11 ขนาดกะของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์

ขนาดตะแกรง (mm)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวลรวม		
	B	C	D
50.0 (2")	100	-	-
25.0 (1")	75-95	100	100
9.5 (3/8")	40-75	50-85	60-100
4.75 (เบอร์ 4)	30-60	35-65	50-85
2.00 (เบอร์ 10)	20-45	25-50	40-70
0.425 (เบอร์ 40)	15-30	15-30	25-45
0.075 (เบอร์ 200)	5-20	5-15	5-20

ตารางที่ 12 มาตรฐานพื้นทางดินผสมซีเมนต์

การทดสอบ	ข้อกำหนดที่ต้องการ
1. ขนาดกะ (ทล.-ท. 205/2517)	ขนาดเม็ดโตสุดไม่เกิน 50 mm ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 (2.00 mm) ไม่เกินร้อยละ 70 และ ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 mm) ไม่เกินร้อยละ 25
2. Liquid Limit (ทล.-ท. 102/2515)	Liquid Limit ไม่เกินร้อยละ 40
3. Plasticity Index (ทล.-ท. 103/2515)	Plasticity Limit และ Plasticity Index ไม่เกินร้อยละ 15
4. ความสึกหรอ (ทล.-ท. 202/2515)	ความสึกหรอ ไม่เกินร้อยละ 60 (ด้วยเครื่อง Loss Angeles)

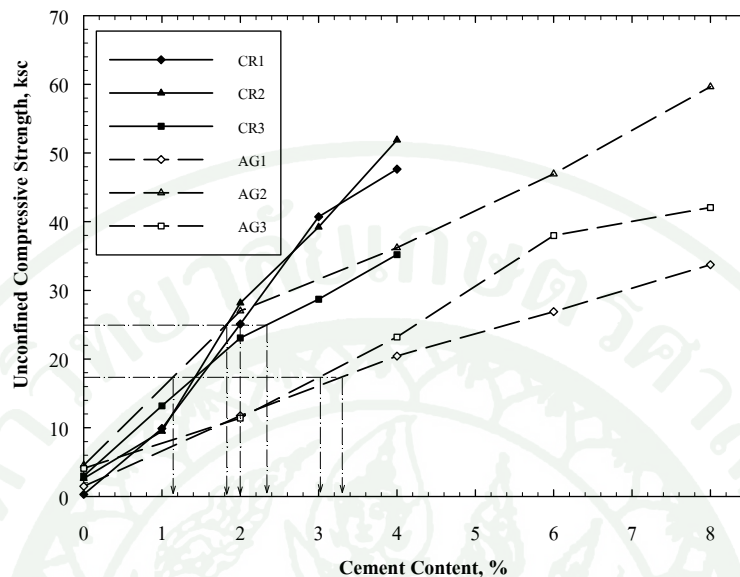


ภาพที่ 26 ขนาดละเอียดของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมซีเมนต์ตามมาตรฐานกรมทางหลวง

วัสดุที่ทำการทดสอบและปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์จะมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นทั้งในด้านความคงทนและกำลังรับน้ำหนักแต่ด้วยชนิดของวัสดุต่างๆที่นำมาปรับปรุงมีความแตกต่างกันทำให้ค่าที่ได้นั้นมีข้อแตกต่างกันไปด้วย

1. คุณสมบัติด้านกำลัง

การทดสอบด้านกำลังทำการทดสอบโดยการผสมวัสดุกับซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 สำหรับวัสดุหินคลุก และร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 สำหรับวัสดุมวลรวม ผสมน้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OMC) ที่ได้จากการทดสอบ Compaction Test จากนั้นทำการบดอัดตัวอย่างแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) ทำการบ่มก้อนตัวอย่างเป็นเวลา 7 วันแล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) เพื่อหาค่าปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยกำหนดค่าสำหรับวัสดุพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 24.5 ksc (2,400 kPa) ตามมาตรฐาน ทล.-ม. 203/2533 และค่าปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุพื้นทางดินซีเมนต์เท่ากับ 17.5 ksc (1,716 kPa) ตามมาตรฐาน ทล.-ม. 204/2533 ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบแสดงดังในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณซีเมนต์

เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานกรมทางหลวง ปริมาณซีเมนต์ของ วัสดุจากจังหวัด กาญจนบุรี (CR1) นครราชสีมา (CR2) อุตรดิตถ์ (CR3) ต้องการปริมาณซีเมนต์ที่ 2.0%, 1.8%, 2.3% ตามลำดับและ วัสดุจากจังหวัด เพชรบุรี (AG1) ปราจีนบุรี (AG2) เพชรบูรณ์ (AG3) ต้องการปริมาณ ซีเมนต์ที่ 3.3%, 1.1%, 3.0% ตามลำดับ

2. คุณสมบัติด้านความคงทน

การทดสอบความคงทนของวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ประกอบไปด้วย 2 ประเภทการทดสอบ คือ Slake Durability Test และ Wetting and Drying Test โดยผลของการ ทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การทดสอบความคงทนโดยวิธี Slake Durability Test

การทดสอบทำโดยการเตรียมตัวอย่างโดยการผสมปริมาณซีเมนต์เช่นเดียวกับการ ทดสอบ UCS พร้อมทั้งทำการบ่มก้อนตัวอย่างเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดการบ่ม นำตัวอย่างมาแยกให้เป็นก้อนโดยแต่ละก้อนมีน้ำหนักประมาณ 40-60 กรัม จากนั้นนำตัวอย่าง

ประมาณ 10 ก้อนมาอบที่อุณหภูมิ 105°C และดำเนินการทดสอบ Slake Durability Test ดังแสดงในภาพที่ 28 ตามมาตรฐาน ASTM 4644-08 เพื่อหาค่า Slake Durability Index จากสมการ

Slake-Durability Index, I_{d2} (ร้อยละ = $(W_3/W_1) \times 100$)

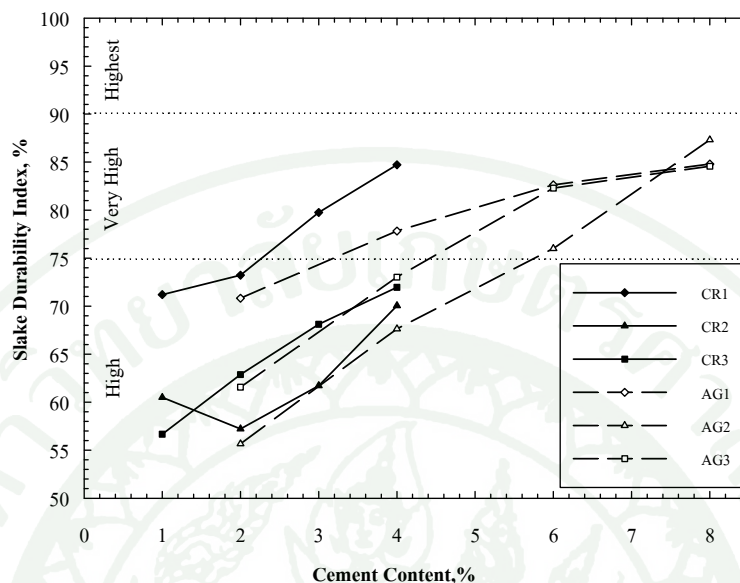
W_1 = น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มแรก

W_3 = น้ำหนักของตัวอย่างที่เหลือครั้งสุดท้าย



ภาพที่ 28 เครื่องมือทดสอบและการทดสอบ Slake Durability

ผลการทดสอบความคงทนของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์จากทั้ง 6 แหล่ง โดยวิธีการทดสอบ Slake Durability Test แสดงในภาพที่ 29 พบว่าปริมาณซีเมนต์มีผลในการเพิ่มค่าความคงทนของวัสดุ ทั้งนี้วัสดุแต่ละประเภทมีความคงทนแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความสามารถในการยึดจับตัวกันระหว่างเม็ดดินกับซีเมนต์ที่ผสมเพิ่ม



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Slake Durability Index กับปริมาณซีเมนต์

2.2 การทดสอบความคงทนโดยวิธี Wetting and Drying Test

การทดสอบทำโดยการเตรียมตัวอย่างโดยใช้ปริมาณซีเมนต์เช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ UCS พร้อมทั้งทำการบ่มก้อนตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน ซึ่งวิธีการทดสอบดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D599-03 เพื่อหาค่าความหลุดร่อนของวัสดุผสมซีเมนต์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นเป็นรอบ

การทดสอบเริ่มจากการนำตัวอย่างที่ผ่านการบ่มในเวลาที่ต้องการแล้วไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องทดลองเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นมาชั่งน้ำหนัก แล้วนำตัวอย่างไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 71°C เป็นเวลา 42 ชั่วโมงแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก นำตัวอย่างไปแปรงให้ทั่วตัวอย่าง โดยใช้แรงประมาณ 1.33 กิโลกรัม ต่อการแปรง 1 ครั้ง และแปรงให้รอบก้อนตัวอย่างดังภาพที่ 30 จำนวน 28 ครั้ง แล้วหาน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง และดำเนินการทดสอบอีกจนครบ 12 รอบ จึงอบตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 °C แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างทำการคำนวณ หาค่าความหลุดร่อนของวัสดุผสมซีเมนต์ โดย

$$\text{Weight Loss, \%} = (W_1/W_2) \times 100$$

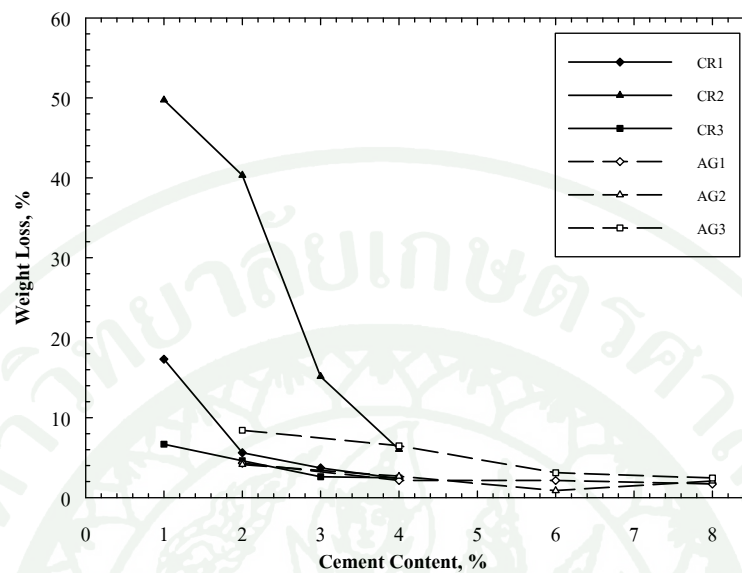
W_1 = น้ำหนักของดินซีเมนต์ที่สูญเสียน้ำหนัก (น้ำหนักตัวอย่างก่อนทำการทดลอง-น้ำหนักหลังการทดลอง)

W_2 = น้ำหนักเดิมก่อนทดลอง



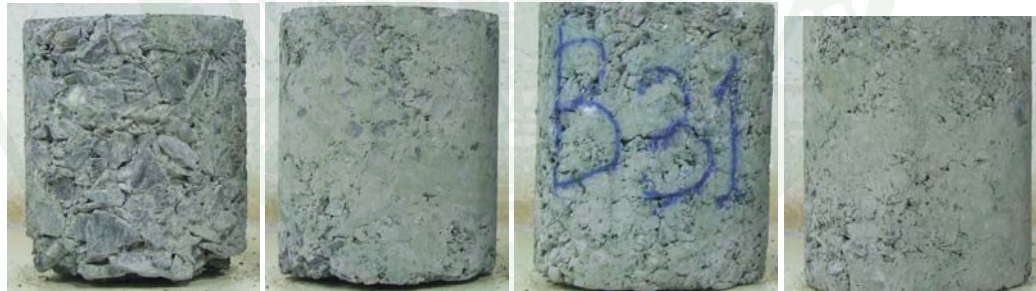
ภาพที่ 30 การทดสอบความคงทน โดยใช้ Wetting and Drying Test

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความหลุดร่อนของวัสดุผสมซีเมนต์ที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยลงตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นแสดงได้ดังภาพที่ 31 โดยมีค่าอยู่ที่ระดับประมาณ 20% เมื่อมีปริมาณซีเมนต์ 1% และมีค่าน้อยลงจนระดับความหลุดร่อนต่ำกว่า 5% เมื่อปริมาณซีเมนต์สูงขึ้น โดยรูปผลการทดสอบของวัสดุจากแหล่งต่างๆ แสดงดังภาพที่ 32-37 ข้อสังเกตที่เห็นได้ชัดจากภาพที่ 33 คือ การหลุดร่อนที่มีปริมาณสูงของวัสดุ CR2 ซึ่งจากการทดสอบพบว่า วัสดุมีเม็ดหยาบค่อนข้างสูง ทำให้การหลุดร่อนที่เกิดขึ้นจากการแปรงมีค่าสูงมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหลุดร่อนจากการทดสอบ Wetting and Drying Test กับ ปริมาณซีเมนต์

Control Specimen



Test Specimen



1% Cement

2% Cement

3% Cement

4% Cement

ภาพที่ 32 ก้อนตัวอย่างหลังทำการทดสอบ Wetting and Drying Test ของวัสดุจังหวัดกาญจนบุรี (CR1)

Control Specimen



Test Specimen



1% Cement

2% Cement

3% Cement

4% Cement

ภาพที่ 33 ก้อนตัวอย่างหลังทำการทดสอบ Wetting and Drying Test ของวัสดุจังหวัดนครราชสีมา (CR2)

Control Specimen



Test Specimen



1% Cement

2% Cement

3% Cement

4% Cement

ภาพที่ 34 ก่อนตัวอย่างหลังทำการทดสอบ Wetting and Drying Test ของวัสดุจังหวัดอุดรดิตถ์ (CR3)

Control Specimen



Test Specimen



2% Cement

4% Cement

6% Cement

8% Cement

ภาพที่ 35 ก่อนตัวอย่างหลังทำการทดสอบ Wetting and Drying Test ของวัสดุจังหวัดเพชรบุรี (AG1)

Control Specimen



Test Specimen



2% Cement

4% Cement

6% Cement

8% Cement

ภาพที่ 36 ก่อนตัวอย่างหลังทำการทดสอบ Wetting and Drying Test ของวัสดุจังหวัดปราจีนบุรี (AG2)

Control Specimen



Test Specimen



2% Cement

4% Cement

6% Cement

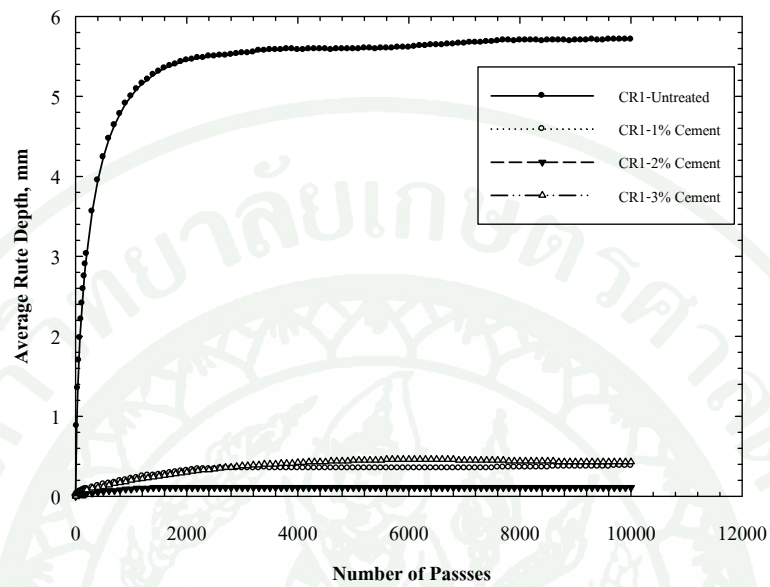
8% Cement

ภาพที่ 37 ก่อนตัวอย่างหลังทำการทดสอบ Wetting and Drying Test ของวัสดุจังหวัดเพชรบูรณ์ (AG3)

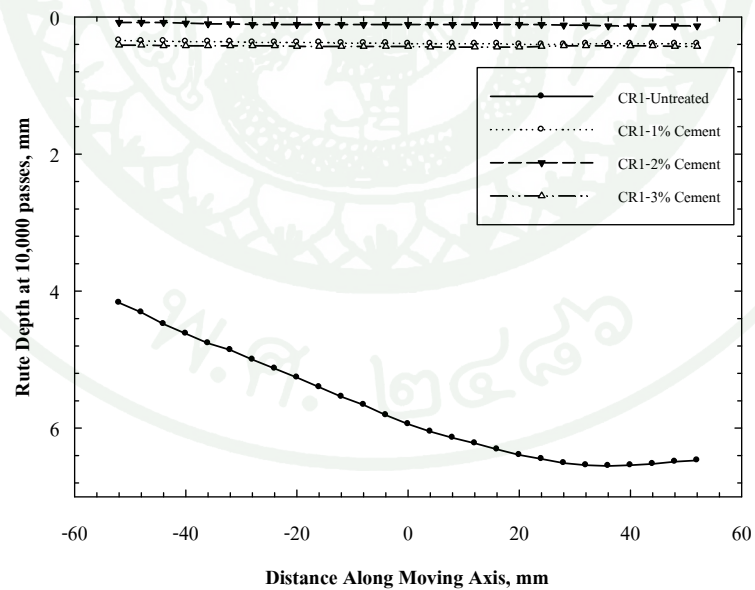
3. คุณสมบัติในการต้านทานการเกิดร่องล้อ

การทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อโดยวิธี Wheel Track Test เพื่อทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำซ้ำของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์สามารถทำได้โดยการจำลองน้ำหนักกระทำต่อตัววัสดุโดยใช้การทดสอบ Wheel Track ซึ่งเป็นการให้น้ำหนักเข้าไปมาเป็นจำนวนรอบของน้ำหนักกระทำ โดยมีน้ำหนักจำลองกระทำบนก้อนตัวอย่างประมาณ 2,000 กิโลกรัมโดยมีค่าเท่ากับน้ำหนักเพลามาตรฐาน และทำการวัดค่าการยุบตัวของวัสดุในการทดสอบ Wheel Track Test ได้เลือกทดสอบวัสดุจากแหล่ง กาญจนบุรี (CR1) และจากแหล่งเพชรบุรี (AG1) เป็นตัวแทนวัสดุหินและดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ การเตรียมตัวอย่างใช้แบบหล่อขนาด 305x305x100 มม. ใช้วัสดุผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม. ผสมกับซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 สำหรับวัสดุ CR1 และร้อยละ 0, 2, 4 และ 8 สำหรับวัสดุ AG1 ปริมาณความชื้นที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างอ้างอิงตามปริมาณน้ำที่เหมาะสม หลังจากทำการบดอัดเสร็จถอดแบบหล่อเหล็กออกแล้วประกอบแบบไม้แทนที่ จากนั้นทำการบ่มก้อนตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน

ผลการทดสอบ Wheel Track แสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้ง 2 แหล่งมีประสิทธิภาพความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่อมีเพิ่มปริมาณซีเมนต์ที่ผสมลงในก้อนตัวอย่าง ผลของการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ในวัสดุ CR1 และ AG1 แสดงในภาพที่ 38 และภาพที่ 39 ตามลำดับ และตัวอย่างลักษณะของการเกิดร่องล้อหลังจากการทดสอบ Wheel Track แสดงในภาพที่ 40

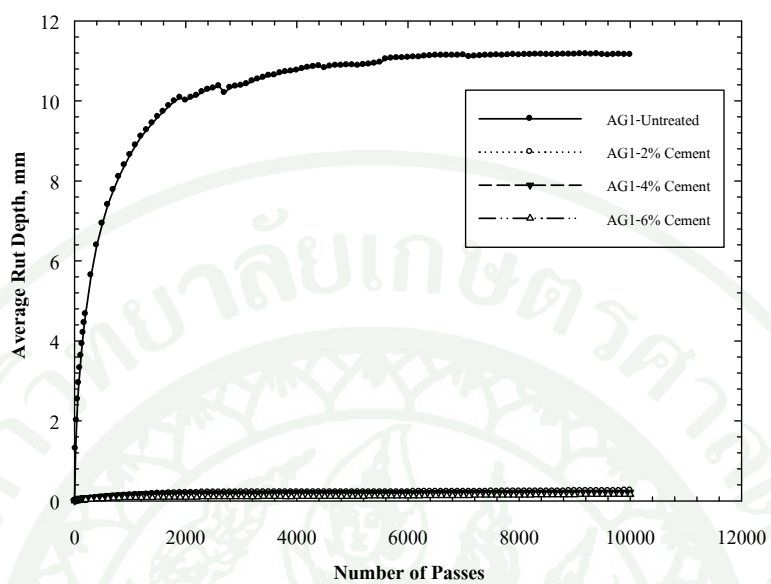


(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของร่องล้อ (Rut Depth) และ จำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำซ้ำ (Number of Passes)

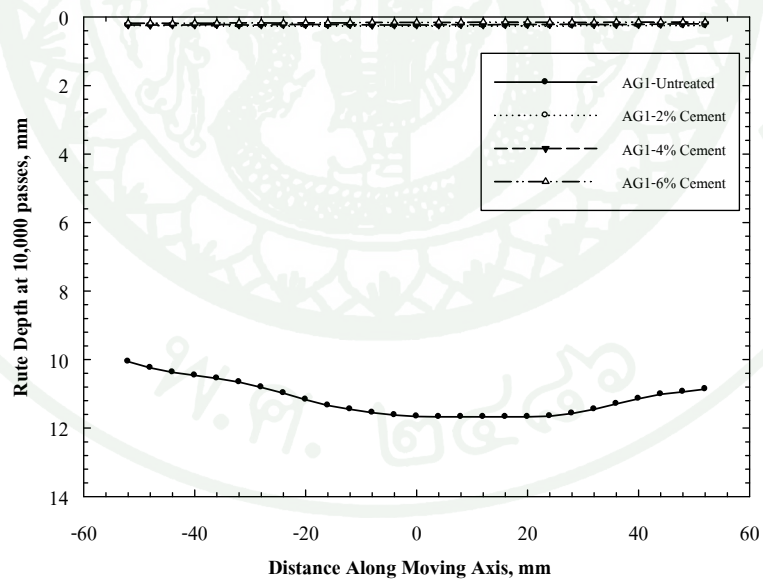


(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของร่องล้อ (Rut Depth) กับระยะทางที่ล้อทดสอบเคลื่อน (Distance Along Moving)

ภาพที่ 38 ผลการทดสอบ Wheel Track Test จากแหล่งกาญจนบุรี



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของร่องล้อ (Rut Depth) กับจำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำซ้ำ (Number of Passes)



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของร่องล้อ (Rut Depth) กับระยะทางที่ล้อทดสอบเคลื่อน (Distance Along Moving)

ภาพที่ 39 ผลการทดสอบ Wheel Track Test จากแหล่งเพชรบุรี (AG1)



(ก) แหล่งเพชรบุรีไม่มีการผสม



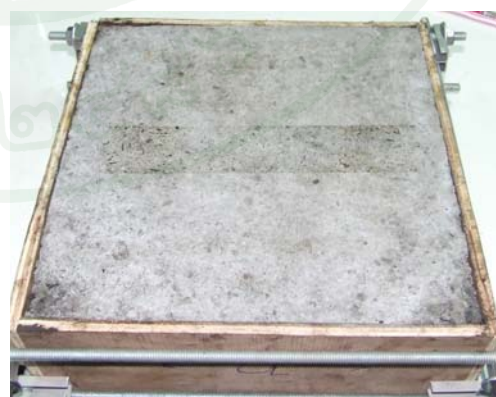
(ข) แหล่งกาญจนบุรีไม่มีการผสม

ภาพที่ 40 ลักษณะร่องล้อหลังการทดสอบ Wheel Track

จากผลการทดสอบพบว่าที่จำนวนรอบของน้ำหนักที่กระทำที่จำนวน 10,000 รอบ วัสดุ CR1 มีความลึกของร่องล้อเป็น 6 มม. เมื่อไม่มีการผสมซีเมนต์ แต่เมื่อมีการเพิ่มซีเมนต์เพียงประมาณ 1% ลงในวัสดุ CR1 ความลึกของร่องล้อลดลงไปเป็น 0.5 มม. วัสดุ AG1 เมื่อปราศจากซีเมนต์จะเกิดร่องล้อที่มีความลึกประมาณ 11 มม. และลดลงเหลือน้อยกว่า 0.5 มม. เมื่อมีการผสมซีเมนต์ประมาณ 2% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการใช้ปริมาณซีเมนต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความคงทนต่อการเกิดร่องล้อนั้นสามารถใช้ปริมาณซีเมนต์เพียงเล็กน้อยก็ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ภาพที่ 41 เป็นลักษณะของร่องล้อที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์



(ก) แหล่งกาญจนบุรีไม่มีการผสม



(ข) แหล่งกาญจนบุรีผสมซีเมนต์ 1 %

ภาพที่ 41 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของร่องล้อเมื่อมีการปรับปรุงด้วยซีเมนต์

การวิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ระหว่างความคงทนและกำลังรับน้ำหนัก

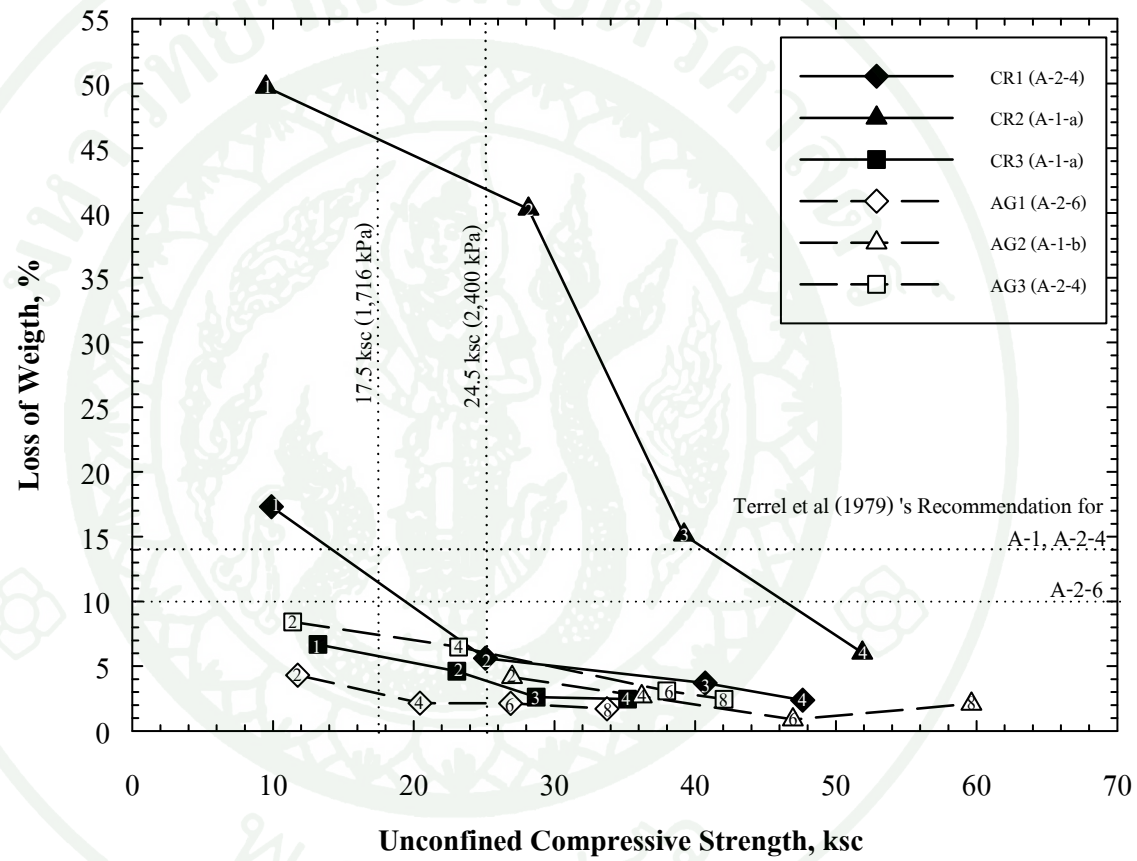
1. ความสัมพันธ์ระหว่างความคงทนกับกำลังรับน้ำหนัก

เกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์เพื่อนำมาใช้งานมักพิจารณาเพียงกำลังของวัสดุเป็นหลัก เพียงอย่างเดียวโดยพิจารณาเฉพาะค่า Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ ทำให้การเลือกปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมเพื่อทำการก่อสร้างจึงมุ่งเน้นที่จะทำให้กำลังของวัสดุแข็งแรงไม่น้อยกว่าข้อกำหนดจนทำให้มีการใช้ปริมาณซีเมนต์ที่สูงเกินความจำเป็น

การพิจารณาเพื่อเลือกปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม หากพิจารณาในด้านความคงทนเพิ่มเติมจะทำให้การเลือกใช้ปริมาณซีเมนต์มีความเหมาะสมกับตัววัสดุมากยิ่งขึ้น ความสัมพันธ์ที่สามารถสร้างขึ้นได้แสดงดังภาพที่ 42 โดยตัวเลขที่กำกับบนสัญลักษณ์ของแต่ละจุดในภาพดังกล่าวแสดงถึงปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองซึ่งทำให้เห็นถึงลักษณะของแหล่งวัสดุทั้ง 6 แหล่ง เมื่อมีการปรับปรุงด้วยปริมาณซีเมนต์ต่างมีลักษณะเป็นเช่นใด ทั้งในด้านความคงทนและกำลังรับน้ำหนัก

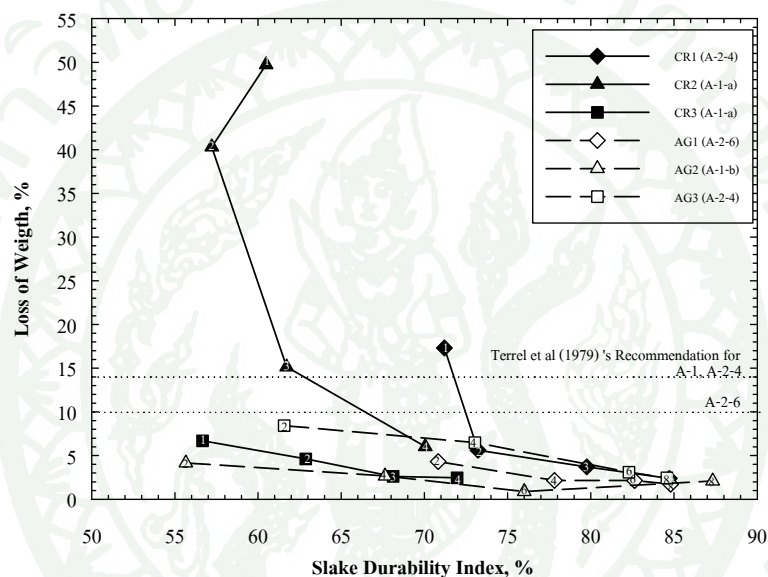
การพิจารณาเพื่อเลือกปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยพิจารณากำลังเพียงอย่างเดียวจะเห็นได้ว่าในบางวัสดุมีความสึกหรอมีมาก วัสดุแหล่งนครราชสีมา (CR2) ที่ 24.5 ksc ค่าความสึกหรอมีถึง 43 % ซึ่งจากตารางที่ 4 (Terrel *et al.*, 1979) วัสดุแหล่งนครราชสีมา (CR2) ควรมีความสึกหรอไม่เกิน 14 % ถึงจะมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้งาน และถ้าหากต้องการให้วัสดุแหล่งนครราชสีมา (CR2) มีความคงทนเหมาะสมกับการนำมาใช้งานควรเพิ่มปริมาณซีเมนต์ให้มากกว่า 3 % แต่ในด้านกำลังก็จะเพิ่มขึ้นมากขึ้นกว่าเกณฑ์ตามจากมาตรฐานกรมทางหลวง นอกจากนี้ วัสดุที่มีความคงทนผ่านจากข้อกำหนดในตารางที่ 4 นั่นคือแหล่ง เพชรบุรี (AG1) ปราจีนบุรี (AG2) เพชรบูรณ์ (AG3) กาญจนบุรี (CR1) และอุดรดิตถ์ (CR3) แม้กำลังยังไม่ถึงข้อกำหนดของมาตรฐานกรมทางหลวง ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 24.5 ksc (2,400 kPa) สำหรับวัสดุพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ (มาตรฐาน ทล.-ม. 203/2533) และเท่ากับ 17.5 ksc (1,716 kPa) สำหรับวัสดุพื้นทางดินผสมซีเมนต์ (มาตรฐาน ทล.-ม. 204/2533) ซึ่งอาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้การออกแบบสัดส่วนควรพิจารณาปัจจัยอื่นที่มากกว่ากำลังของวัสดุเพียงอย่างเดียว

เมื่อพิจารณาวิธีการทดสอบความคงทนของวัสดุพบว่า ถึงแม้การทดสอบความคงทนโดยวิธี Wetting and Drying Test สามารถบอกถึงความคงทนของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ได้ แต่ข้อเสียของการทดสอบความคงทนโดยใช้วิธี Wetting and Drying Test คือ การใช้เวลาทดสอบที่นาน(ประมาณ 25 วันต่อ 1 การทดสอบ) ดังนั้น ควรมีการพัฒนาวิธีการทดสอบความคงทนและเกณฑ์ความคงทนโดยวิธี Slake Durability Test เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดความคงทนของวัสดุดินซีเมนต์สำหรับงานทางในอนาคต



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างความคงทนกับกำลังรับน้ำหนัก

จากผลการทดลองสามารถแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Wetting and Drying Test และ Slake Durability Test ประกอบกับเกณฑ์ค่าความสึกหรอ (Loss of Weight) มีคำแนะนำดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งเสนอโดย Terrel *et al.* (1979) วัสดุหินคลุกและวัสดุมวลรวม มีค่า Slake durability index อยู่ระหว่าง 55% - 85% และมีข้อมูลที่ได้นั้นมีแนวโน้มที่จะสร้างความสัมพันธ์ขึ้นมาได้เพื่อใช้ในการย่นระยะเวลาการทดสอบ Wetting and Drying Test ดังแสดงในภาพที่ 43

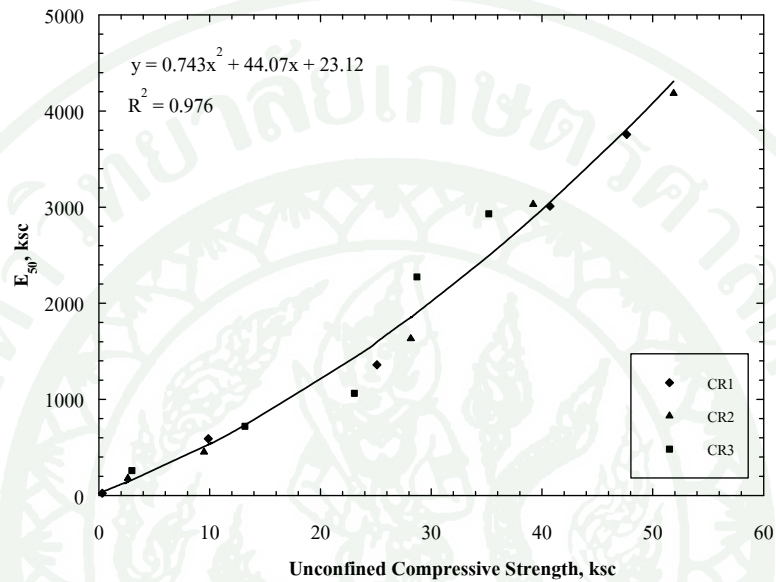


ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกหรอกับ Slake Durability Index ของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์

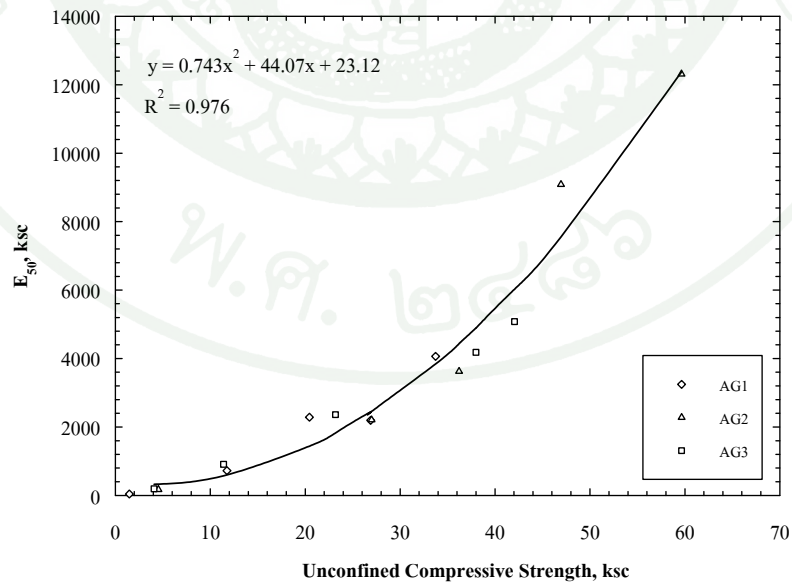
2. การประยุกต์ในการออกแบบ

การทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของวัสดุทั้ง 6 แหล่ง สามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอึลัสติกโมดูลัสที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบ USC (E_{50}) กับค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด โดยมีความสัมพันธ์ในลักษณะแบบโพลิโนเมียล ดังแสดงในภาพที่ 44 และภาพที่ 45 สำหรับวัสดุมวลรวมและวัสดุหินคลุก ตามลำดับ ซึ่งทำให้สามารถทำนายค่าของ E_{50} ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสำหรับตัวอย่างจากแหล่งที่ทำการทดสอบ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบเบื้องต้นได้ และจากการวิจัยของ จีรกุล บุญคำ (2546) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} กับค่าโมดูลัสการคืนตัว (M_r) ซึ่งเป็นค่าที่นำไปใช้ในการออกแบบ

โครงสร้างทาง โดยวิธีวิเคราะห์ (Analytical Design) ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นทำให้สามารถประมาณค่าของโมดูลัสการคืนตัวได้หากมีการสร้างสมการความสัมพันธ์ของวัสดุชนิดต่างๆ



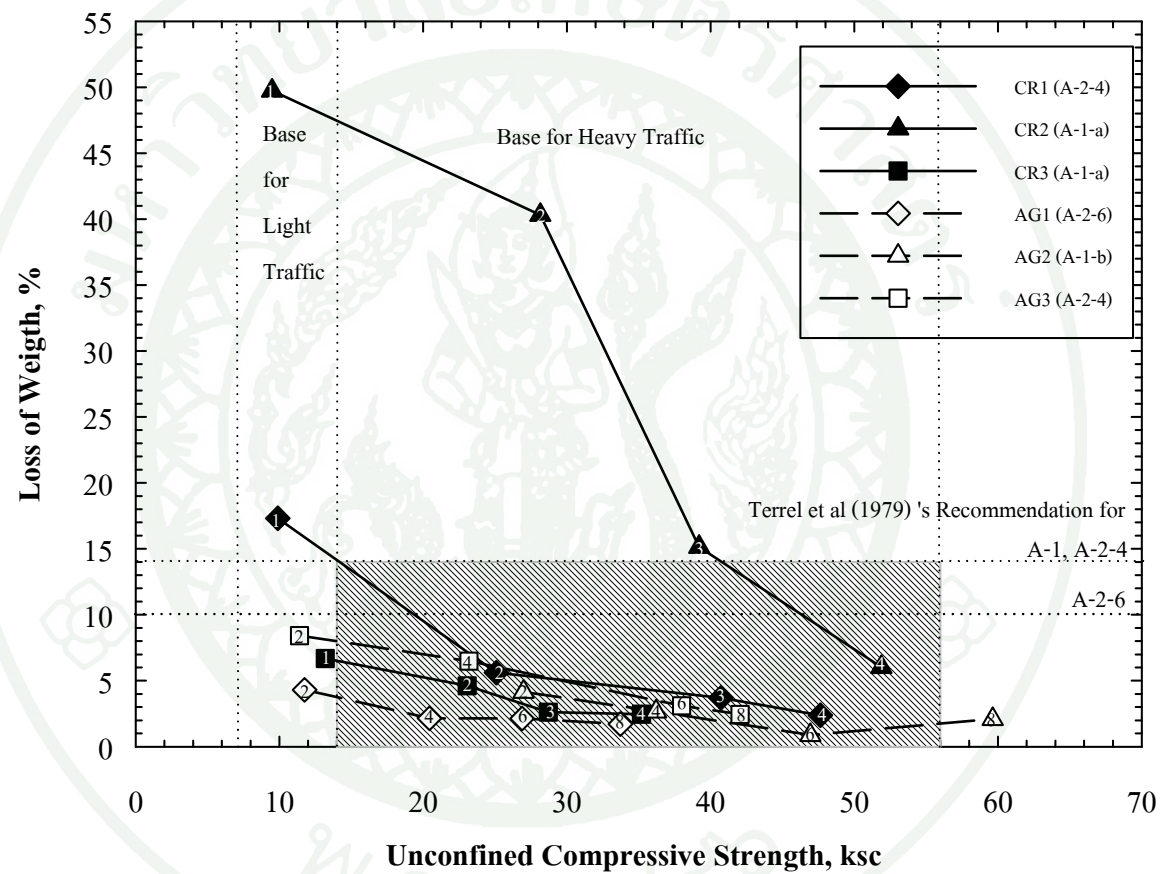
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} กับ Unconfined Compressive Strength ของวัสดุหินคลุก



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} กับ Unconfined Compressive Strength ของวัสดุมวลรวม

การประยุกต์ใช้ค่าความคงทนของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มาพัฒนาการออกแบบนั้น Terrel *et al.* (1979) ได้นำเสนอค่าความสึกหรอมาตรฐานของวัสดุโดยการใช้วิธี Wetting and Drying Test ไว้ดังแสดงในตารางที่ 4 และ Ingles and Metcalf (1972) ได้เสนอคุณสมบัติของวัสดุงานทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ โดยจำแนกตามลักษณะการใช้งาน ดังตารางที่ 3 เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 3 และ 4 มาพิจารณาความสัมพันธ์กับผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและค่าความสึกหรอจะทำให้สามารถกำหนดขอบเขตของการออกแบบเลือกปริมาณซีเมนต์เบื้องต้นได้ ดังแสดงในภาพที่ 46





ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกหรอกับกำลังรับแรงอัดของวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

โดยเมื่อพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัดเทียบกับค่าความสึกหรอจากการทดสอบ Wetting and Drying Test ภาพที่ 46 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติทั้งสองของวัสดุที่ใช้ทดสอบนั้น โดยเมื่อค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความสึกหรอมีค่าต่ำลง และเมื่อนำค่าความคงทนที่เหมาะสมที่แนะนำโดย Terrel *et al.* (1979) และมีกำลังรับน้ำหนักตามเกณฑ์ที่เสนอโดย Ingles and Metcalf (1972) สามารถใช้ในการตัดสินใจเลือกวัสดุ ปริมาณซีเมนต์ ให้เหมาะสมกับชนิดของโครงสร้าง ดังเช่นวัสดุ CR3, AG1 และ AG3 สามารถใช้เป็นโครงสร้างชั้นรองพื้นทางของถนนที่มีการจราจรไม่หนาแน่นมาก (Base for Light Traffic) ที่ปริมาณซีเมนต์ 1%, 2% และ 2% ตามลำดับ

อีกทั้งเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ขึ้นสามารถนำมาใช้เป็นโครงสร้างชั้นรองพื้นทางของถนนที่มีการจราจรหนาแน่น (Base for Heavy Traffic) และมีความคงทนต่อการใช้งานด้วยความสัมพันธ์ที่ได้นี้ยังสามารถคัดแยกวัสดุที่ไม่เหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ดั่งวัสดุ CR2 ที่มีค่าความหลุดล่อนที่สูงหากต้องการนำวัสดุนี้นี้มาใช้ต้องทำการผสมกับปริมาณซีเมนต์ที่สูงเพื่อให้มีความคงทนต่อสภาวะการใช้งานแต่ในด้านกำลังรับน้ำหนักสูงเกินความต้องการและเสี่ยงต่อความเสียหายที่เกิดจากการแตกร้าวด้วยปริมาณซีเมนต์ที่มากเกินไป

จากความสัมพันธ์ในภาพที่ 46 ยังพบอีกว่าในการออกแบบชั้นพื้นทางรับการจราจรสูง (Base for Heavy Traffic) อาจสามารถลดปริมาณซีเมนต์ให้น้อยลงกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานกรมทางหลวงโดยที่ความคงทนยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยสามารถใช้ค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยที่สุดของการออกแบบ นั่นคือ 14 ksc เป็นตัวกำหนดเลือกปริมาณซีเมนต์ได้โดยที่ กำลังรับน้ำหนักและความคงทนยังมีความเหมาะสมอยู่

การศึกษาสายทางกรณีตัวอย่าง

1. ผลการสำรวจ

สายทางที่ได้ทำการศึกษาเป็นทางหลวงแผ่นดินหมายเลขที่ 1 สายตาก-ลำปาง เป็นการก่อสร้างเพื่อปรับปรุงโดยใช้วิธีการนำวัสดุพื้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ เรียกว่า Recycling สายทางนี้เดิมที่ได้มีการก่อสร้าง โดยใช้วัสดุชั้นพื้นทางเป็นหินคลุก แต่ภายหลังได้รับความเสียหายจากการใช้งานทำให้ต้องมีการปรับปรุงสายทางโดยวิธีการนำวัสดุพื้นทางเดิมมาผสมซีเมนต์ (Recycling)

ซึ่งหลังจากก่อสร้างแล้วเสร็จเป็นเวลา 2 ปี เริ่มมีปัญหาเกิดขึ้น โดยมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กเกิดขึ้น และมีฝุ่นสีขาวอยู่บริเวณโดยรอบดังภาพที่ 47 หลังจากนั้นรอยแตกจะมีความกว้างใหญ่ขึ้น ซึ่งระยะห่างที่ได้ทำการสำรวจ มีระยะห่างประมาณ 4-6 เมตร ในแต่ละรอยแตก ภาพที่ 48



ภาพที่ 47 รอยแตกขนาดเล็กบนผิวทาง



ภาพที่ 48 รอยแตกตามขวางบริเวณไหล่ทาง

การป้องกันการพัฒนารอยแตกร้าวโดยทั่วไปทำโดยการใช้แอสฟัลต์อุดรอยแตกร้าวไม่ให้ น้ำลงไปด้านล่างได้ ดังภาพที่ 49 ทำให้รอยแตกร้าวไม่มีการขยายตัวซึ่งทำให้ความรุนแรงของปัญหาการแตกร้าวลดลง นอกจากนี้การเพิ่มความหนาของชั้นผิวทางจาก 5 เซนติเมตรเป็น 10 เซนติเมตร ในบางช่วงของสายทางทำให้ระยะห่างของรอยแตกกว้างเฉลี่ยประมาณ 80-120 เซนติเมตร ดังภาพที่ 50



ภาพที่ 49 การป้องกันการพัฒนารอยแตกร้าว



ภาพที่ 50 รอยแตกร้าวที่ถนนที่มีการเพิ่มความหนาของผิวทางแอสฟัลต์

หากไม่สามารถป้องกันการซึมของน้ำเข้าไปที่ตัวโครงสร้างที่มีรอยแตกร้าวได้ จะทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงมากขึ้นดังภาพที่ 51 จากรอยแตกร้าวเล็กๆจะพัฒนาเป็นรอยแตกร้าวที่มีขนาดใหญ่และก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งาน



ภาพที่ 51 รอยแตกขนาดใหญ่

2. การทดสอบความคงทนและกำลัง

หลังจากเกิดปัญหาการแตกร้าวขนาดใหญ่ขึ้น จนทำให้การใช้งานบนถนนในช่วงบริเวณนี้มีปัญหา ทางกรมทางหลวงได้ทำการลอกชั้นทางเดิมนี้ออกใหม่แล้วก่อสร้างใหม่ ซึ่งชั้นทางที่มีปัญหาได้ถูกนำมาศึกษาถึงคุณสมบัติในด้านความคงทนของตัวโครงสร้างเองโดยทำการทดสอบหาคุณสมบัติด้านความคงทนด้วยการทดสอบ UCS และทดสอบความคงทนด้วยวิธี Wetting and Drying Test

ก่อนตัวอย่างที่ได้นำมาทดสอบเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่ จึงต้องมีการเตรียมตัวอย่างโดยการตัดแต่งก้อนตัวอย่างให้มีขนาดใกล้เคียงกับก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ UCS ดังแสดงในภาพที่ 52



(ข) ย่อยขนาดชั้นพื้นทาง Recycling เพื่อทำการทดสอบ



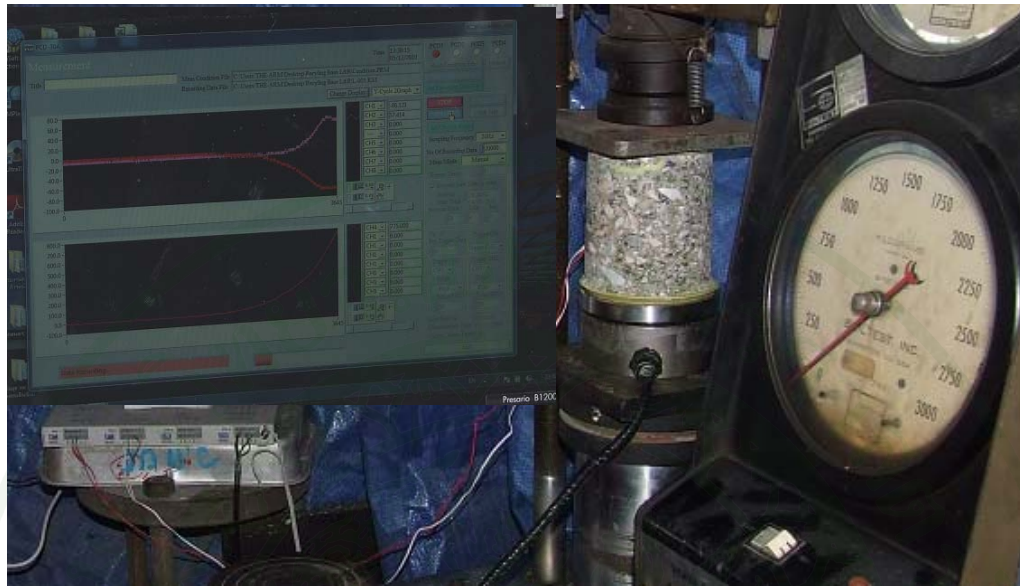
(ก) ชั้นพื้นทาง Recycling ที่ได้ทำการขุดออก

(ค) ตัดแต่งก้อนตัวอย่าง

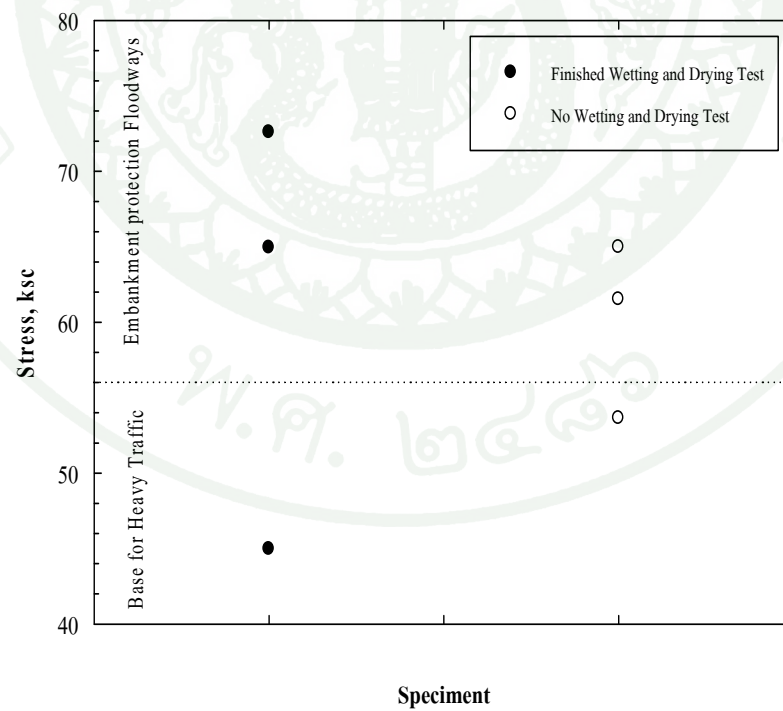
ภาพที่ 52 การตัดแต่งก้อนตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ

2.1 การทดสอบด้านกำลัง

การทดสอบด้านกำลังของวัสดุนั้นได้ทำการทดสอบในลักษณะของการทดสอบของ UCS Test โดยใช้เครื่องกดคอนกรีตเพื่อหาค่ากำลังอัดสูงสุดที่วัสดุนี้รับได้ดังแสดงในภาพที่ 53 ซึ่งผลของการทดสอบแสดงในภาพที่ 54 และยังมีการติดตั้ง Strain gage ในบางก้อนตัวอย่างเพื่อดูถึงพฤติกรรมของก้อนวัสดุเอง ดังแสดงในตารางที่ 13



ภาพที่ 53 การทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของวัสดุ Recycling



ภาพที่ 54 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของวัสดุ Recycling

การทดสอบนี้ได้นำเอาก้อนตัวอย่างของวัสดุที่ซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่ไม่ได้ผ่านการทดสอบ Wetting and Drying Test และผ่านการทดสอบ มาหาค่าลึงรับแรงดั่งภาพที่ 54 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าลึงของวัสดุประเภทนี้มีค่าลึงที่ดี แม้ผ่านการทดสอบความคงทนมาแต่ยังคงมีค่าลึงรับน้ำหนักที่สูงและเมื่อเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวง วัสดุพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์มีค่าลึงรับแรงอัดเท่ากับ 24.5 ksc (2,400 kPa) ก็ยังมีค่ามากกว่าเกือบ 3 เท่าและจากข้อมูล ในตารางที่ x1 ค่าของ Poisson's ratio ที่ใกล้เคียงของคอนกรีตที่เท่ากับ 0.2 แสดงถึงพฤติกรรมของวัสดุนี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงคอนกรีตไปด้วย

ตารางที่ 13 มาตรฐานพื้นทางดินผสมซีเมนต์

Specimen	Max Stress (ksc)	50% Stress (ksc)	E50		Poisson's ratio
			(ksc)	(psi)	
L2	67.38	33.69	19,875.92	282,635.65	0.17
L3	56.71	28.35	20,249.36	287,945.89	0.20
R1	71.58	35.79	35,900.38	510,503.38	0.03
R3	63.19	31.59	43,364.89	616,648.75	0.21

2.2 การทดสอบด้านความคงทน

เนื่องจากก้อนตัวอย่างที่ได้นำมาทดสอบมีจำนวนจำกัด การทดสอบได้ทดสอบก้อนตัวอย่างเป็นจำนวน 3 ก้อน โดยมีลักษณะของตัวอย่างหลังผ่านการทดสอบ Wetting and Drying Test ดังภาพที่ 55 ซึ่งทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่น้อยเมื่อเทียบกับวัสดุทั้ง 6 แหล่งที่นำมาวิจัย และผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 56

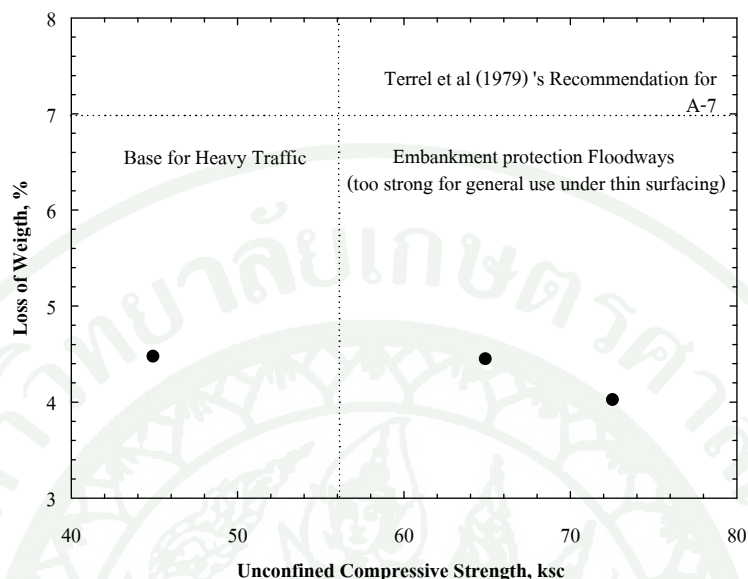


(ก) ก้อนตัวอย่างวัสดุ Recycling ก่อนการทดสอบ



(ข) ก้อนตัวอย่างวัสดุ Recycling หลังการทดสอบ

ภาพที่ 55 ลักษณะก้อนตัวอย่างเมื่อทำการทดสอบ Wetting and Drying Test

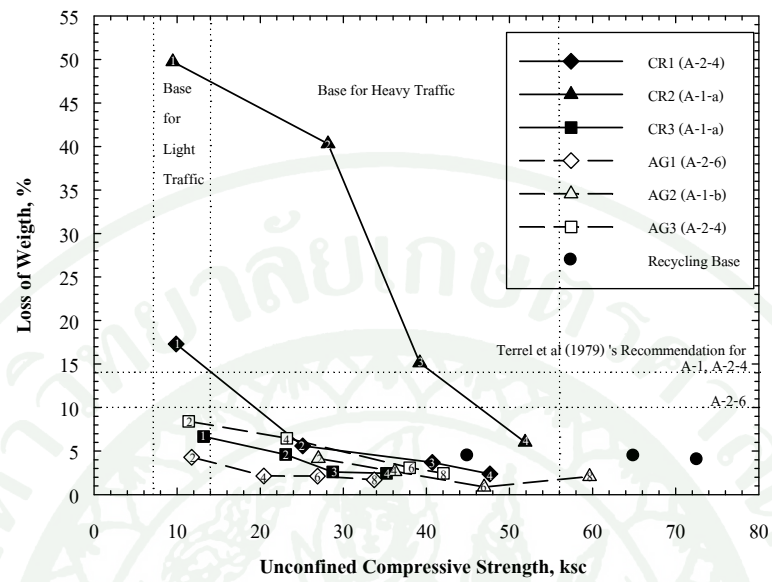


ภาพที่ 56 ผลการทดสอบ Wetting and Drying ของก้อนตัวอย่างวัสดุ Recycling

ผลของการทดสอบที่ได้ ค่าความสึกหรอที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมีค่าไม่เกิน 5% หากนำข้อมูลจากตารางที่ 3 และ 4 มาพิจารณา ค่าน้อยสุดของวัสดุ คือ 7 % (วัสดุ A-7) นั้นหมายความว่า วัสดุ Recycling นี้ มีความคงทนเหมาะสมดี ไม่ว่าจะจัดวัสดุนี้ให้เป็นดินประเภทใดก็ตาม

3. ผลเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของความคงทนกับกำลังรับน้ำหนักในห้องปฏิบัติการ

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักกับความคงทน ทำให้เห็นขอบเขตการใช้งานวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มากขึ้นดังภาพที่ 45 และเมื่อนำข้อมูลจากการทดสอบวัสดุ Recycling เข้าประกอบ ดังภาพที่ 57 ทำให้เห็นว่าวัสดุนี้มีความเหมาะสมทั้งในด้านกำลังและความคงทนแต่สายทางนี้พบปัญหาการแตกร้าวที่มีพฤติกรรมเหมือนวัสดุคอนกรีตซึ่งเกิดจากการผสมซีเมนต์ที่มากเกินไป (Shrinkages Crack) แสดงให้เห็นว่าในการออกแบบหากเราเลือกปริมาณซีเมนต์ที่มีค่าน้อยแล้วให้กำลังรับน้ำหนักและความคงทนเพียงพอต่อการใช้งาน นั้นย่อมทำให้ปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากปริมาณซีเมนต์จะน้อยลงไปได้



ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกหรอกับกำลังรับแรงอัดของวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์และวัสดุ Recycling

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สรุป

ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างทางโดยใช้วัสดุที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์คือการแตกร้าวที่ผิวทางเมื่อเปิดการจราจรได้ไม่นาน ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากการละเลยคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุ และประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพงานระหว่างการก่อสร้าง ทำให้เกิดการแตกร้าวของชั้นพื้นทาง (Shrinkage Crack) และเกิดการแตกสะท้อนขึ้นไปยังชั้นผิวทาง (Reflective Cracks)

การทดสอบความคงทนด้วยวิธี Wetting and Drying Test เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัด สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกกำหนดปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์โดยให้กำลังรับน้ำหนักที่เพียงพอและทนทานต่อสภาวะการใช้งาน อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น วัสดุ CR2 มีกำลังในการรับแรงอัดสูงแต่ความคงทนต่อการสึกหรอต่ำ ดังนั้นวัสดุ CR2 อาจไม่เหมาะกับการใช้เป็นวัสดุพื้นทางดินซีเมนต์ โดยการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุอาจใช้เทคนิคการปรับปรุงวิธีอื่น การเพิ่มปริมาณซีเมนต์เพียงเล็กน้อยในก้อนตัวอย่าง (ประมาณ 1-2%) สามารถลดความเสียหายที่เกิดจากการเกิดร่องล้อได้เป็นอย่างมาก โดยผลจากการทดสอบ Wheel Track แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยสามารถสรุปได้ว่า ในการออกแบบโครงสร้างพื้นทางผู้ออกแบบสามารถลดปริมาณซีเมนต์ให้น้อยลงได้ โดยควบคุมกำลังรับแรงอัดและความคงทนของวัสดุให้อยู่ในขอบเขตที่เหมาะสม อีกทั้งการลดปริมาณซีเมนต์ก็ยังมีแนวโน้มที่จะลดความเสียหายเนื่องจากการเกิดรอยแตกสะท้อน และผลของการทดสอบความคงทนด้วยวิธีการ Slake Durability Test เป็นการทดสอบความคงทนของวัสดุที่มีความรวดเร็วมากกว่าการทดสอบ Wetting and Drying Test โดยผลการทดสอบของวัสดุตัวอย่างทั้ง 6 แหล่งทำให้เห็นถึงแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่อาจสร้างขึ้นมาได้แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้ในตอนนี้อย่างชัดเจน เนื่องจากยังต้องอาศัยปริมาณข้อมูลการทดสอบที่เพียงพอจึงจะสามารถสร้างความสัมพันธ์ที่มีความน่าเชื่อถือขึ้นมาได้

ข้อเสนอแนะ

ปัญหาโครงสร้างถนนที่ใช้วัสดุปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์ คือการแตกร้าว อันเป็นผลมาจากพฤติกรรมของวัสดุที่มีซีเมนต์เป็นส่วนประกอบที่มีการหดตัวเกิดขึ้น และในงานทางของกรมทางหลวงได้กำหนดให้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เป็นส่วนผสมในการก่อสร้างทาง แต่หากสามารถนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการหดตัวต่ำมาใช้งานในการก่อสร้างได้ ปัญหาเรื่องการหดตัวของโครงสร้างจะมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งการที่จะนำปูนซีเมนต์ประเภทนี้มาใช้ควรต้องทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม ทั้งในด้านกำลังของวัสดุ ความคงทน และค่าใช้จ่าย ที่แตกต่างไปจากปูนซีเมนต์ที่ใช้อยู่

โครงสร้างถนนที่ใช้วัสดุปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์ แม้ว่าตัวของโครงสร้างเองจะแตกร้าวอันเนื่องมาจากการหดตัวแต่กำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างนั้นยังสูง แต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นเกิดมาจาก น้ำเข้าไปในตัวโครงสร้างได้ แล้วทำให้โครงสร้างชั้นทางที่อยู่ด้านล่างมีความแข็งแรงลดลง จนเกิดความเสียหายขึ้น ดังนั้นหากมีการออกแบบและก่อสร้างชั้นใต้โครงสร้างถนนที่ใช้วัสดุปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์เพื่อป้องกันน้ำไหลเข้าไปได้ก็จะทำให้ความเสียหายเกิดขึ้นได้น้อย หรือมีอายุการใช้งานที่มากขึ้น

การใช้งานถนนในแต่สายทางนั้นไม่เท่ากันบางสายทางการจราจรไม่หนาแน่นและรถบรรทุกหนักใช้งานไม่มาก การออกแบบโครงสร้างถนนควรลดกำลังแบกทานของโครงสร้างลงให้เหมาะสมกับการใช้งาน เมื่อปริมาณซีเมนต์ลดลงปัญหาของการแตกร้าวก็จะลดลงไปได้

การเพิ่มการทดสอบความคงทนเช่น Wetting and Drying, Slake Durability ในการคัดเลือกวัสดุ เพื่อนำมาใช้เป็นโครงสร้างถนนที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์นั้นจะทำให้ได้วัสดุที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้นในการใช้งาน ดังนั้นควรมีการวิจัยเพิ่มเติมในด้านความคงทนเพื่อจะได้ออกมาเป็นข้อกำหนดในมาตรฐานของกรมทางได้ในอนาคต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จุฬา สุณิทยสกุล, ศุภกร วชิราภรณ์ และธันวิน สวัสดิ์ศาสนต์. 2549. **คุณสมบัติของดินซีเมนต์**. รายงานฉบับที่ ว.พ.229 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.
- ดิเรก ลาวัณย์ศิริ. 2540. **การนำวัสดุท้องถิ่นมาใช้ในการก่อสร้างถนน**. เอกสารวิจัยส่วนบุคคล วิทยาลัย ป้องกันราชอาณาจักร. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ธนศักดิ์ ไฟ้กระโทก. 2538. **การประมาณค่าคุณสมบัติเกี่ยวกับแรงดึงของดินลูกรังซีเมนต์**. รายงานฉบับที่ ว.พ.140 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.
- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และชัยวัฒน์ มนัสกุล. 2543. **กำลังรับแรงอัดและกำลังแบกทานของดินทรายผสมซีเมนต์**. รายงานฉบับที่ ว.พ.178 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.
- _____. และวุฒิชัย วยวุฒิเกียรติ. 2528. **กลสมบัติของดินลูกรังในประเทศไทยศึกษาเน้นหนักใช้ประโยชน์ในงานทางหลวง**. รายงานฉบับที่ ว.ว.96 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.
- _____. และสมบัติกระแสน์ จรัสกร. 2544. **กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน**. รายงานฉบับที่ ว.พ.188 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.
- _____. และสถิตย์พงษ์ อภิเมธีธารัง. 2543. **การวิเคราะห์โครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Soil-Cement และรองพื้นทางเป็นวัสดุมวลรวมภายใต้้น้ำหนักบรรทุกทุกปกติถึงหนักมาก**. รายงาน ฉบับที่ ว.พ. 176 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสุเชษฐ์ เอี่ยมเชย. 2533. **ความคงทนของดินซีเมนต์**. รายงานฉบับวันที่ วว. 120 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

_____. และอนันต์ ทวีวรรณสดี. 2543. **คุณสมบัติความเค้นความเครียดภายใต้การทดสอบ กำลังรับแรงอัดแนวตั้ง**. รายงานฉบับที่ ว.พ. 179 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

ศุภกิจ นนทนันทน์. ม.ป.ป. **การปรับปรุงคุณภาพดิน**. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศุภกิจ นนทนันทน์, กมล สายฟ้า และทวีศักดิ์ จิรธนาถาวร. 2545. **คุณสมบัติทางวิศวกรรมของ ดินเหนียวอ่อนผสมซีเมนต์**. เอกสารสัมมนาทางวิชาการ เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพดิน และการใช้วัสดุเสริมแรงชนิดใยสังเคราะห์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ร่วมกับ Southeast Asia Geotechnical Society, กรุงเทพฯ.

Bell, F.G. 1993. **Engineering Treatment of Soils**. E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, London.

Catton, M. 1938. Soil-Cement Mixing for Roads. **Highway Research Board Proceeding** 18 (Part II): 314-321.

Davidson, D.T. 1961. **Soil Stabilization with Portland Cement**. Highway Research Council, Washington, D.C., U.S.A.

Davidson, D.T., G.L. Pitre, M. Mateos and K.P. George. 1962. **Moisture-Content, Moisture-Strength and Compaction Characteristics of Cement Treated Soil Mixtures**, Highway Research Board Bull.353, National Research Council, Washington, D.C. U.S.A.

Felt, E.J. 1955. **Factor Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixture**. Highway Research Board Bull.108, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A.

Fuller, M.G. and G.W. Dabney. 1952. Stabilizing Weak and Defective Base with Hydrated Lime. **Roads and Streets**. 95: 64-69.

Herzog, A. and J.K. Mitchell. 1963. Reactions Accompanying Stabilization of Clay with Cement. **Highway Research Record**. 36: 146-171.

Highway Research Board. 1943. Use of Soil-Cement Mixture for Base Coarses. **Wartime Road Problems**. 7: 30.

_____. 1949. **Provention of Moisture Loss in Soil-Cement With Bituminous Material**, Highway Research Board Report 8-F, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A.

Lambe, T.W., A.S. Mitchels and Z.C. Moh. 1959. **Improvements of Sil-Cement with Alkali Metal Compounds**. Highway Research Board Bill.241, National Reserch Council, Washington,D.C.,U.S.A.

Leadabrand, J.A. 1956. **Some Engineering** Aspects of Soil-Cement Mixtures. **Mid-South Section, ASCE**. (Apr. 27, 1956).

Maclean, D.J., P.J.M. Robinson and S.B. Webb. 1952. An Investigation of the Stabilization of a Heavy Clay Soil with Cement for Road Base Construction. **Roads and Road Construction**. 30 (358): 287-292.

Maner, A.W. 1952. Curing Soil-Cement Base, Proc. Highway Research Board. **National Research Council**. 31: 540-558.

Marshall, T.J. 1954. **Some Properties of Soil Treated with Portland Cement**. Symposium on Soil Stabilization, Australia.

Mills, W.Jr. 1935. Road Base Stabilization with Portland cement. **Engineering News Record.** 115 (22): 751-753

Mitchell, J.K. and S.A. EL Jack. 1966. **The Fabric of Soil-Cement and its Formation,** Proceeding of 14th National Conference Clay and Clay Minerals, Vol. 26, pp. 297-305.

Moh, Z.C. 1965. Reaction of Soil Minerals with Cement and Chemicals. **Highway Research Record.** 86: 39-61.

Pendola, H.J., T.W. Kendady and W.R. Hudson. 1969. Evalution of Factors Affecting the Tensile Properties of Cement-Treated Materials. **University of Texas at Austin, Research Report.** 98: 3, 99.

Portland Cement Association. 1959. **Soil-Cement Laboratory Handbook,** Illinois, Skokie.

Proctor, R.R. 1933. Fundamental Principles of Soil Compaction. **Engineering News Record 111.** 10: 286-289.

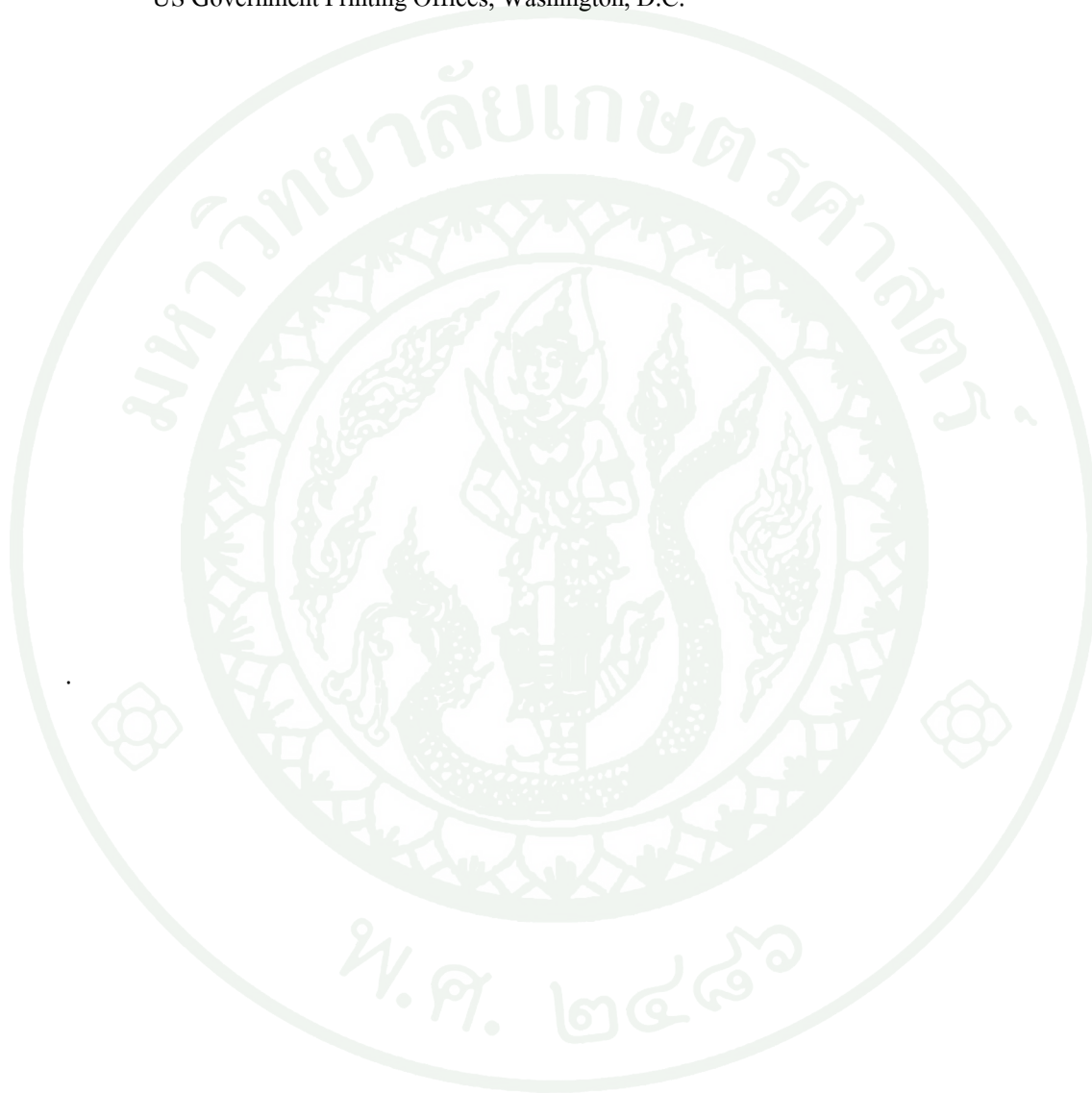
Rananand, N., T. Ruenkairergsa, and S. Yossombat. 1983. **Performance of Lateritic Soil-Cement Roads in Thailand.** Report No. 85, Materials & Research Division, Department of Highways, Bangkok.

Ruenkairergsa, Y. 1982. **A Research on Type of Soil for Stabilization Suitable for Cement or lime,** Bangkok, Thailand.

Sheets, F.T., and M.D. Catton. 1938. How to Process Soil-Cement Roads. **Engineering News Record.** 121 (1): 20-24.

Terrel, R.L., E.J. Barenberg, J.M. Mitchell and M.R. Thomson. 1979. **Soil Stabilization in Pavement Structures a User's Manual Mixture Design Consideration.**

US Government Printing Offices, Washington, D.C.





ภาคผนวก



การทดสอบความคงทน

Slake Durability Test

เป็นการทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานของมวลรวมต่อการแตกสลายหรือเสียหาย เมื่อต้องเจอกับสภาพที่เปียกและแห้งสลับกัน 2 รอบการทดลองดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM 4644-08

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ครอบทดลอง (Test Drum) ประกอบจากกลวดตาข่ายมาตรฐาน มีขนาดช่องเปิด 2 มม. ตัวครอบยาว 100 มม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 140 มม. ด้านหัวและท้ายปิดด้วยโลหะแข็งยึดแน่น และมีฝาสำหรับเปิด-ปิดได้ สามารถทนความร้อนได้ถึง 105°C .

2. อ่างน้ำเป็นตัวรับครอบทดลองทำให้แกนของครอบทดลองอยู่ในแนวราบ สามารถหมุนได้โดยอิสระสำหรับบรรจุน้ำได้ถึงระดับ 20 มม. ได้แกนกับพื้นอ่าง

- มอเตอร์ สามารถหมุนครอบทดลองได้ด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที
- เตาอบ สามารถตั้งอุณหภูมิได้ถึง 105°C .
- เครื่องชั่งที่สามารถชั่งได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
- เครื่องจับเวลา

วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่เตรียมไว้ (W1)
2. ใส่ตัวอย่างลงในครอบทดลองแล้วปิดฝา ยกให้แกนตั้งอยู่บนอ่างน้ำและต่อเข้ากับมอเตอร์
3. เติมน้ำลงในอ่างให้มีระดับต่ำกว่าแกนของครอบทดลอง 20 มม. เปิดมอเตอร์ให้ครอบทดลองหมุนด้วยความเร็ว 20 รอบ ต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที

4. ยกกระบอกทดลองขึ้นจากอ่างน้ำ ถอดฝาออก นำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 105°C . ชั่งน้ำหนักที่เหลือ (W_2)

5. ทำการทดลองซ้ำอีกโดยทำตามจากข้อ 2 ถึงข้อ 4 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือ (W_3)

การคำนวณ

Slake-Durability Index, I_{d2} (ร้อยละ $= (W_3/W_1) \times 100$)

W_1 = น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มแรก

W_3 = น้ำหนักของตัวอย่างที่เหลือครั้งสุดท้าย

Wetting and Drying Test

วิธีการทดลองนี้ดำเนินการตาม ASTM D559-57(1971) เพื่อหาค่าน้ำหนักสูญเสียน้ำของ Soil-Cement การเปลี่ยนแปลงความชื้น และการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (การบวมตัวและการหดตัว) วิธีการทดลองโดยให้ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่แข็งตัวผ่านสภาพความชื้นและแห้งสลับกัน ตัวอย่างจะถูกบดอัดในแบบหล่อก่อนที่ปฏิกิริยา Hydration ของดินซีเมนต์จะเสร็จสิ้น การบดอัดจะใช้ปริมาณน้ำที่ค่า OMC ที่ความหนาแน่นสูงสุดและบดอัดตามมาตรฐาน ASTM D558 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการบดอัดของตัวอย่างที่จะทดลองคือ

วิธีแรกเมื่อวัสดุดินมีขนาดผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) ร้อยละ 100

วิธีที่สองมีวัสดุดินผ่านตะแกรง 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) และค้างบนตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) ปนอยู่

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบหล่อ (Mold) ทำด้วยโลหะแข็งและเหนียว ลักษณะทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มม. (4 นิ้ว) สูง 116.4 มม. (4.584 นิ้ว) และมีปริมาตร 942.9 ลูกบาศก์เซนติเมตร (1/30 ลูกบาศก์ฟุต) เพื่อบดอัดตัวอย่างดินซีเมนต์ให้ได้ตามขนาดที่กล่าวนี้และต้องมีปลอก (Collar) ขนาดเดียวกันสูง 63.5 มม. (2 ½ นิ้ว)
2. ค้อน (Hammer) ทำด้วยโลหะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มม. (2 นิ้ว) มีน้ำหนักรวมด้ามถือ 2,498 กรัม (5.5 ปอนด์) มีปลอกที่ทำไว้อย่างเหมาะสมเป็นตัวบังคับให้ได้ระยะตกเท่ากับ 304.8 มม. (12 นิ้ว) เหนือระดับดินที่จะบดอัดมีรูระบายอากาศอย่างน้อย 4 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง รู 9.5 มม. (3/8 นิ้ว) เจาะห่างจากปลายทั้งสองข้างประมาณ 19 มม. (3/4 นิ้ว)
3. เครื่องดันตัวอย่าง (Sample Extruder) ใช้ดันตัวอย่างออกจากแบบภายหลังที่บดอัดเสร็จแล้ว ประกอบด้วย jack เป็นตัวดันและโครงเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวจับแบบ
4. ตาชั่งแบบ Balance หรือ Scale ที่สามารถชั่งได้อย่างน้อย 16 กิโลกรัม และชั่งละเอียดถึง 0.005 กิโลกรัมและเครื่องชั่งที่ชั่งได้อย่างน้อย 1000 กรัมละเอียดถึง 0.1 กรัม
5. เตาอบ ต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ 110°C สำหรับอบตัวอย่างดินซีเมนต์เพื่อหาความชื้น และอบตัวอย่างทดลอง
6. ที่เก็บตัวอย่างดินซีเมนต์หรือห้องเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีอุณหภูมิ 21°C และมีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 สำหรับเก็บตัวอย่างที่บดอัดแล้ว
7. อ่างน้ำ เพื่อใช้สำหรับแช่ตัวอย่างที่บดอัดแล้วในอุณหภูมิห้องธรรมดา
8. เหล็กปาด เป็นเหล็กกล้าไม่มีบรรทัดหนาและแข็งพอในการตบแต่งตัวอย่างที่ส่วนบนของแบบหล่อ มีความยาวไม่น้อยกว่า 304.8 มม. (12 นิ้ว) หนาประมาณ 3 มม.

9. ตะแกรงร่อน ขนาด 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4)

10. เครื่องผสม เป็นเครื่อง มือต่างๆ ที่จำเป็นในการผสมตัวอย่างได้แก่ ถาด ช้อน พลั่ว เกรียง ค้อนยาง ถ้วยตวงวัดปริมาณน้ำ

11. กระป๋องอบตัวอย่าง เพื่อใช้หาปริมาณน้ำในส่วนผสมดินซีเมนต์

12. แปรงลวดสำหรับใช้ดูตัวอย่าง

13. เกรียงขูด เป็นเหล็กทำเป็นซี่ๆ เพื่อใช้ขูดผิวที่บดอัดแต่ละชั้นเพื่อให้เกิดการเกาะติดกันระหว่างชั้นขนาดของซี่ กว้างประมาณ 3.2 มม. (1/8 นิ้ว) สูง 3.2 มม. (1/8 นิ้ว) ห่างกัน 6.4 มม. (1/4 นิ้ว)

การเตรียมตัวอย่าง

เมื่อมีวัสดุผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มม.)

1) เตรียมตัวอย่างดิน วิธีการเช่นเดียวกับการทดลองหาความหนาแน่น

2) ใส่ซีเมนต์ตามปริมาณที่ต้องการ แล้วผสมให้เข้ากันจนเป็นสีเดียวกันตลอด

3) เติมน้ำตามค่า OMC แล้วผสมให้เข้ากันทั่ว ถ้าตัวอย่างดินเกาะจับกันเป็นก้อนให้ใช้ค้อนยางบดให้แตกจากกัน เมื่อคลุกเข้ากันแล้วทิ้งไว้ประมาณ 5-10 นาที เพื่อให้ความชื้นกระจายไปทั่วส่วนผสมและให้เกิดการดูดซึมสมบูรณ์ขึ้น

4) หลังจากทิ้งไว้พอควรแล้ว ทำการคลุกใหม่อีกครั้งโดยให้ส่วนผสมมีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 4 ถ้ามีก้อนใหญ่อยู่ให้ใช้ค้อนยางทุบให้แตกจากกันแต่อย่าให้เม็ดดินตามธรรมชาติแตก

5) ทำการบดอัดดินลงในแบบหล่อที่มีปลอกติดอยู่ ตามวิธีเดียวกับการหาความหนาแน่นสูงสุด แต่ก่อนที่จะบดอัดชั้นต่อไปต้องทำการขุดผิวหน้าของชั้นที่บดอัดแล้วให้เป็นรอยขรุขระเพื่อเวลาบดอัดชั้นต่อไปจะได้ยึดติดกับชั้นเดิมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

6) ขณะทำการบดอัดให้นำตัวอย่างประมาณ 100 กรัม ใส่กระป๋องเก็บตัวอย่างไปอบหาปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ โดยอบที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 12 ชั่วโมงหรือน้ำหนักคงที่

7) เมื่อบดอัดเสร็จให้ดันตัวอย่างออกจากแบบโดยเครื่องดันตัวอย่างทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่างไว้ นำตัวอย่างไปบ่มในสภาพความชื้นห้องทดลองโดยไม่ให้น้ำ เมื่อครบ 7 วันแล้ววัดขนาดตัวอย่างใหม่อีกครั้งเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

เมื่อตัวอย่างดินผ่านตะแกรง 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) และล้างตะแกรงเบอร์ 4 ให้นำตัวอย่างมาผึ่งให้แห้งแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรง 3 ขนาดดังนี้

- ขนาดใหญ่กว่า 19.0 มม. (ล้างบนตะแกรง 19.0 มม.)
- ขนาดระหว่าง 19.0 มม. ถึงเบอร์ 4 (ผ่านตะแกรง 19.0 มม. ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4)
- ขนาดเล็กกว่าเบอร์ 4 (ผ่านตะแกรงเบอร์ 4)

ดินที่มีขนาดใหญ่กว่า ตะแกรงเบอร์ 4 มาแทนโดยมีน้ำหนักเท่ากับที่ทิ้งไป แล้วนำไปแช่น้ำจนอิ่มตัว ส่วนดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 นำไปผสมกับซีเมนต์และน้ำตามวิธีการ ข้อ 2 ถึง 4 จากนั้นนำดินที่แช่น้ำอิ่มตัวแล้วเขี่ยให้แห้งไม่มีน้ำเกาะผิว นำมาผสมลงไปแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน จึงเริ่มการบดอัดตามข้อ 5) ถึง ข้อ 7) แต่การหาปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในดินตัวอย่างใช้ประมาณ 300 กรัม

วิธีการทดลอง

1. ตัวอย่างเมื่อมีอายุการบ่มตามต้องการแล้ว นำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องทดลองเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก

2. นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 71°C . (160°F .) นาน 42 ชั่วโมงแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

3. ภูตัวอย่างด้วยแปรงลวด โดยตั้งตัวอย่างในแนวตั้งแล้วนำแปรงลวดมาถูขึ้นและลงให้รอบตัวอย่างจำนวนครั้งที่ถูประมาณ 18-20 ครั้ง ส่วนที่ผิวบนและล่างถูด้านละ 2-4 ครั้ง ให้ทั่วผิวการถูใช้แปรงประมาณ 1.33 กิโลกรัม (3 ปอนด์) เสร็จแล้วนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก

4. วิธีการจากข้อ 1 ถึง 3 เป็นการทำการครบ 1 รอบ ต้องทำการทดลองให้ครบ 12 รอบ แล้วนำตัวอย่างไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110°C (230°F). ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแห้งอีกครั้งเพื่อนำไปหาค่าความสูญเสียของดินลูกรังผสมซีเมนต์ (Soil-Cement losses)

การคำนวณ

การคำนวณค่าน้ำหนักสูญเสียของดินซีเมนต์มีค่าเป็นร้อยละ ของน้ำหนักแห้งของตัวอย่างก่อนทดลอง ซึ่งเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\text{น้ำหนักสูญเสีย, ร้อยละ} = (W_1/W_2) \times 100$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักของดินซีเมนต์ที่สูญเสียไป (น้ำหนักตัวอย่างก่อนทำการทดลอง-น้ำหนักหลังการทดลอง)

$$W_2 = \text{น้ำหนักเดิมก่อนทดลอง}$$

ก่อนคำนวณต้องปรับแก้ค่าน้ำหนักหลังทดลองเสร็จเสียก่อน เนื่องจากน้ำที่อยู่ในตัวอย่างมีบางส่วนไปช่วยทำปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์บางส่วนยังค้างอยู่ในตัวอย่างแม้ว่าจะอบที่อุณหภูมิ 110°C (230°F) แล้วก็ตาม ซึ่งจะทำเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\text{น้ำหนักที่อบแห้งจริง} = (A/B) \times 100$$

$$A = \text{น้ำหนักตัวอย่างอบแห้งที่อุณหภูมิ } 110^{\circ}\text{C} (230^{\circ}\text{F})$$

$$B = 100 - \text{ร้อยละของน้ำที่ค้างอยู่ในตัวอย่าง}$$

AASHTO ได้กำหนดค่าเฉลี่ยของร้อยละของน้ำที่ค้างอยู่ในตัวอย่างโดยแบ่งตามชนิดของดินที่นำมาผสมซีเมนต์ดังตารางผนวกที่ 1

ตารางผนวกที่ ก1 ค่าเฉลี่ยของร้อยละของน้ำที่ค้างอยู่ในตัวอย่างของดินชนิดต่างๆ

AASHTO Soil Classification	Average Water Retained After Drying at 230° F(110° C)
A-1, A-3	1.5
A-2	2.5
A-4, A-5	3.0
A-6, A-7	3.5

Wheel Track Test

การทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อใช้อุปกรณ์รุ่น CRT-WTEN1 ประกอบด้วยชุดโครงสร้างที่ผลิตจากอลูมิเนียมพ่นขึ้นรูปทั้งชิ้น เพื่อรองรับตู้ควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมและมีประตูเคลือบเงา 2 บาน สำหรับการเข้าไปทำงานได้อย่างเต็มที่ จะสามารถดำเนินการทดสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานของอังกฤษ หมายเลข BS598-Part110:1998 และมาตรฐานของ EN12697-22 ระยะทางในการเคลื่อนที่ (230+5 มิลลิเมตร) อัตราของการสร้างร่องการเดินทาง (42 ครั้งต่อนาทีตามมาตรฐาน BS และ 56 ครั้งต่อนาทีตามมาตรฐาน EN) และคุณสมบัติของล้อยาง จะเป็นไปตามรายละเอียดของมาตรฐาน BS598 โดยมีรายละเอียดของเครื่องทดสอบดังแสดงในตารางผนวกที่ 2

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ก่อนตัวอย่างทดสอบเตรียมโดยการบดอัดด้วยปริมาณน้ำที่ค่า OMC และปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการในแบบหล่อเหล็กหลังจากนั้นนำออกมาบ่มในแบบหล่อไม้เป็นเวลา 7 วัน ก่อนการทดสอบเมื่อครบกำหนดการบ่มนำก้อนตัวอย่างมาติดตั้งบนเครื่องทดสอบพร้อมติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการทดสอบ และนำหนักที่กระทำบนล้อซึ่งปรกติแล้วจะอยู่ที่ระดับ 520+5 นิวตันตามมาตรฐาน BS หรือที่ระดับ 700+5 นิวตัน ตามมาตรฐาน EN

การทดสอบ

โปรแกรมจะเป็นผู้ควบคุมการทดสอบด้วยการเริ่มต้นการสร้างร่องการเดินทางจากล้อยาง โดยอัตโนมัติโดยจะรักษาระดับอัตราเร็วไว้ที่ระดับที่ต้องการ จากนั้นจะทำการวัดค่าความลึกของร่องการเดินทางที่เกิดขึ้นด้วยหัววัด AC LVDT วัดในแนวเส้นตรงปกติที่ประมาณ 40 มิลลิเมตร เครื่องขยายสัญญาณของหัววัดจะช่วยให้การอ่านค่าความลึกนั้นสามารถวัดได้โดยมีความละเอียดสูงสุดถึง +0.05 มิลลิเมตรหรือดีกว่า และอุณหภูมิของชิ้นงานตัวอย่างซึ่งจะมีการแสดงผลล่าสุดอย่างต่อเนื่องบนจอภาพเป็นรูปกราฟระหว่างความลึกของร่องการเดินทางกับเวลาที่ผ่านไป และจะหยุดการทำงานเมื่อการทดสอบสิ้นสุดลง อัตราของการเกิดความลึกของร่องการเดินทางจะถูกคำนวณออกมาและรายงานผลการทดสอบจะถูกจัดพิมพ์ออกมาทางโปรแกรมในกรณีที่ต้องการข้อมูลการทดสอบที่ได้เก็บบันทึกไว้นั้นสามารถนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกับข้อมูลของการทดสอบครั้งอื่นๆได้โดยใช้โปรแกรมตารางคำนวณ

ตารางผนวกที่ ก2 ข้อกำหนดเฉพาะของอุปกรณ์ Wheel Tracker ของบริษัท ซอยล์เทสตั้งสยาม จำกัด

พิสัยของอัตราเร็ว	42 หรือ 53 ครั้งต่อนาที
น้ำหนักป้อนที่ล้อ	520 นิวตัน หรือ 700 นิวตัน
พิสัยของอุณหภูมิ	+30 ถึง +60 องศาเซลเซียส ความละเอียด + 1 องศาเซลเซียส
พิสัยของหัววัดความลึกของร่องการเดินทาง	40 มิลลิเมตร
การรับข้อมูล	เนชั่นแนล อินสทรูเมนต์
ภาษาสำหรับผู้ใช้งาน	อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน รัสเซีย โปแลนด์ เยอรมนี ฮังการี
การจ่ายไฟ	220-240 โวลต์ 50-60 เฮิรตซ์ ที่ 16 แอมป์ 110-120 โวลต์ 50-60 เฮิรตซ์ ที่ 32 แอมป์
น้ำหนัก	550 กิโลกรัม
มิติ	กว้าง 1580 ลึก 660 และสูง 1730 มิลลิเมตร



ภาคผนวก ข
มาตรฐานและข้อกำหนดในการออกแบบวัสดุผสมซีเมนต์

ข้อกำหนดในการเลือกวัสดุ

วัสดุงานทางที่นำมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์กรมทางหลวงได้กำหนดออกมาเป็นมาตรฐานประกอบไปด้วยอยู่ด้วยกัน 2 วัสดุ นั้นคือดินและหินคลุกโดยมาตรฐานที่ ทล.-204/2533 สำหรับพื้นทางดินซีเมนต์และมาตรฐานที่ ทล.- 203/2533 สำหรับพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ดังแสดงในตารางผนวกที่ 3

ปูนซีเมนต์

ต้องมีคุณสมบัติถูกต้องตามมาตรฐาน มอก. 15 ประเภท 1 ปูนซีเมนต์ที่ใช้บรรจุอยู่ในไซโล ถัง หรือโรงเก็บที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความชื้น ห้ามนำซีเมนต์ที่จับตัวเป็นก้อนมาใช้งาน

ปูนขาว

ปูนขาวจะใช้ปรับปรุงดิน ที่มีค่า L.L. P.I. เกินกว่าค่าที่กำหนด โดยต้องใช้ปูนขาวผสมกับดินก่อน จะผสมกับปูนซีเมนต์ ปูนขาวที่ใช้เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 205/2517 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง” ส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70

น้ำ

น้ำที่จะนำมาใช้ผสมหรือบ่มชั้นทางดินซีเมนต์จะต้องสะอาด ปราศจากสารต่างๆ เช่น เกลือ น้ำมัน กรด ต่าง และอินทรีย์วัตถุ หรือสารอื่นใด ที่เป็นอันตรายแก่ชั้นพื้นทางดินซีเมนต์

เครื่องจักรและเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการผสม

ผู้รับจ้างมีสิทธิที่จะเลือกใช้อุปกรณ์และวิธีการก่อสร้างได้แต่จะต้องได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานก่อน

ข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์

อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ น้ำ และปูนขาว ที่ใช้ผสมกับดินนั้น นายช่างผู้ควบคุมงานจะเป็นผู้กำหนดให้ที่หน้างาน และอาจสั่งเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับการทดลองหาค่ากำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ ทั้งในห้องทดลองและจากการทำพื้นที่ทางทดลองในสนาม

ในการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์เพื่อหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่จะผสมกับดิน และน้ำ ให้ถือเอาค่า Unconfined Compressive Strength ของแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 105/2515 “วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน” โดยอนุโลม ซึ่งแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ทดสอบจะถูกบดอัดในแบบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ภายหลังการบ่มในถุงพลาสติก เพื่อมิให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงนาน 7 วัน แล้วนำไปแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมง จะต้องมียุทธศาสตร์เท่ากับ 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (250 ปอนด์แรง ต่อตารางนิ้ว) หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ

ปริมาณน้ำในดินที่ใช้ในการเตรียมแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ เพื่อการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด ให้ใช้ปริมาณน้ำในดินที่ Optimum Moisture Content ซึ่งได้จากการทดลองการบดอัดดินตามวิธีการทดลอง ที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ปริมาณน้ำในดินปริมาณนี้ใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการบดทับในสนามขณะทำการก่อสร้างพื้นที่ทางดินซีเมนต์

หมายเหตุ หากต้องการหาปริมาณน้ำในดินที่ Optimum Moisture Content ที่แท้จริงของส่วนผสมดินซีเมนต์แล้ว ให้หาจากการทดลองบดอัดดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนของปูนซีเมนต์จากส่วนที่ให้กำลังรับแรงอัด 17.5 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ แล้วดำเนินการตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำในดินที่ Optimum Moisture Content ซึ่งได้จากการบดอัดดินซีเมนต์ จะให้ค่าไม่แตกต่างไปจากปริมาณน้ำในดินที่ Optimum Moisture Content ของดินเพียงอย่างเดียวมากนัก

ตารางผนวกที่ ข1 ข้อกำหนดในการเลือกวัสดุสำหรับนำมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์

ดินซีเมนต์	หินคลุกผสมซีเมนต์
มีขนาดกละ(ทล.-ท. 205/2517)ขนาดเม็ดโตสุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตรมีส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่เกินร้อยละ 25	ค่าความสึกหรอ Coarse Aggregate (ทล.-ท. 202/2515) ไม่เกินร้อยละ 40
Liquid Limit (ทล.-ท.102/2515) ไม่เกินร้อยละ40	มวลรวมหยาบทดลอง (ทล.-ท. 213/2531) ส่วนละเอียดต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับส่วนหยาบ
Plasticity Index (ทล.-ท.103/2515) ไม่เกินร้อยละ15	ขนาดกละ (ทล.-ท. 205/2517) ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรง เบอร์ 200 ต้องไม่มากกว่า 2/3 ของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40
ความสึกหรอ (ทล.-ท. 202/2515) เกินร้อยละ 60	มีค่า Liquid Limit เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 102/2515 “วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (L.L.) ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 25
กรณีที่มี Liquid Limit หรือ Plasticity Index เกินกว่าค่าที่กำหนดจะต้องใช้ปูนขาวผสม แต่ทั้งนี้ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของดิน	มีค่า Plasticity Index เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ท.ล.-ท. 103/2515 “วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit และ Plasticity Index” ไม่เกินร้อยละ 6
	ค่า CBR (ทล.-ท. 109/2517)ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80



ตารางผนวกที่ ค1 ผลการทดสอบความคงทนของวัสดุหินคลุก

Cement Content (%)	CR1			CR2			CR3		
	UCS	Id2	Weight Loss	UCS	Id2	Weight Loss	UCS	Id2	Weight Loss
	(ksc)	(%)	(%)	(ksc)	(%)	(%)	(ksc)	(%)	(%)
0	0.31	-	-	2.62	-	-	2.98	-	-
1	9.89	71.20	17.32	9.49	60.49	49.74	13.19	56.67	6.68
2	25.10	73.22	5.61	28.16	57.22	40.31	23.06	62.87	4.62
3	40.71	79.75	3.71	39.21	61.72	15.14	28.71	68.12	2.62
4	47.64	84.72	2.38	51.88	70.05	6.03	35.19	71.97	2.47

ตารางผนวกที่ ค2 ผลการทดสอบความคงทนของวัสดุมวลรวม

Cement Content (%)	AG1			AG2			AG3		
	UCS	Id2	Weight Loss	UCS	Id2	Weight Loss	UCS	Id2	Weight Loss
	(ksc)	(%)	(%)	(ksc)	(%)	(%)	(ksc)	(%)	(%)
0	1.47	-	-	4.53	-	-	4.08	-	-
2	11.75	70.83	4.30	26.99	55.66	4.14	11.40	61.57	8.42
4	20.44	77.82	2.15	36.21	67.63	2.67	23.20	73.03	6.48
6	26.90	82.63	2.14	46.94	76.00	0.87	37.99	82.29	3.10
8	33.73	84.80	1.71	59.64	87.32	2.08	42.05	84.57	2.45

ตารางผนวกที่ ๓ ผลการทดสอบร่องล้อในแต่จำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำซ้ำ

Pass No.	Rut Depth(mm)							
	CR1				AG1			
	0% Cement	1% Cement	2% Cement	3% Cement	0% Cement	2% Cement	4% Cement	6% Cement
0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0.88	0.03	0.02	0.03	1.31	0.02	0.02	0.01
40	1.35	0.04	0.02	0.04	2.01	0.02	0.03	0.01
60	1.7	0.05	0.02	0.05	2.54	0.03	0.04	0.01
80	1.98	0.06	0.03	0.05	2.95	0.03	0.04	0.01
100	2.21	0.06	0.03	0.06	3.32	0.03	0.05	0.02
120	2.41	0.07	0.03	0.07	3.63	0.03	0.06	0.02
140	2.59	0.08	0.03	0.07	3.92	0.04	0.06	0.02
160	2.75	0.08	0.03	0.07	4.2	0.04	0.07	0.02
180	2.9	0.09	0.03	0.07	4.45	0.04	0.07	0.02
200	3.03	0.09	0.04	0.08	4.67	0.04	0.08	0.03
300	3.56	0.11	0.04	0.1	5.64	0.06	0.09	0.04
400	3.95	0.13	0.05	0.11	6.39	0.07	0.11	0.05
500	4.24	0.15	0.06	0.12	6.93	0.08	0.12	0.05
600	4.47	0.16	0.07	0.14	7.4	0.1	0.13	0.06
700	4.64	0.17	0.07	0.16	7.77	0.11	0.14	0.07
800	4.78	0.19	0.08	0.17	8.1	0.12	0.15	0.07
900	4.91	0.2	0.09	0.18	8.39	0.13	0.16	0.08
1000	5	0.22	0.09	0.2	8.65	0.14	0.16	0.08
1100	5.09	0.23	0.1	0.21	8.89	0.15	0.17	0.08
1200	5.16	0.25	0.1	0.22	9.11	0.15	0.18	0.08
1300	5.21	0.26	0.1	0.23	9.27	0.16	0.18	0.08
1400	5.27	0.26	0.11	0.24	9.44	0.17	0.19	0.08
1500	5.31	0.27	0.11	0.25	9.6	0.18	0.19	0.09
1600	5.35	0.28	0.11	0.26	9.73	0.18	0.19	0.09
1700	5.38	0.29	0.11	0.27	9.87	0.19	0.2	0.09
1800	5.4	0.3	0.11	0.28	9.99	0.19	0.19	0.09
1900	5.43	0.31	0.11	0.29	10.08	0.2	0.2	0.09
2000	5.45	0.32	0.11	0.3	10.01	0.2	0.2	0.09
2100	5.46	0.33	0.11	0.31	10.08	0.2	0.2	0.09
2200	5.48	0.34	0.11	0.32	10.13	0.2	0.2	0.09

ตารางผนวกที่ ๓ (ต่อ)

Pass No.	Rut Depth(mm)							
	CR1				AG1			
	0% Cement	1% Cement	2% Cement	3% Cement	0% Cement	2% Cement	4% Cement	6% Cement
2300	5.48	0.34	0.11	0.33	10.22	0.21	0.2	0.1
2400	5.5	0.34	0.11	0.33	10.28	0.21	0.2	0.1
2500	5.5	0.34	0.11	0.34	10.31	0.21	0.2	0.1
2600	5.51	0.35	0.11	0.35	10.37	0.21	0.2	0.1
2700	5.51	0.35	0.11	0.36	10.2	0.21	0.2	0.1
2800	5.52	0.35	0.11	0.36	10.33	0.21	0.2	0.1
2900	5.53	0.35	0.11	0.37	10.36	0.21	0.2	0.1
3000	5.54	0.35	0.11	0.38	10.38	0.22	0.2	0.1
3100	5.54	0.35	0.11	0.38	10.42	0.22	0.2	0.1
3200	5.55	0.35	0.11	0.39	10.49	0.22	0.2	0.1
3300	5.57	0.35	0.11	0.39	10.54	0.22	0.2	0.1
3400	5.57	0.36	0.11	0.4	10.58	0.22	0.2	0.11
3500	5.58	0.35	0.11	0.4	10.63	0.22	0.2	0.11
3600	5.58	0.35	0.11	0.4	10.64	0.22	0.21	0.11
3700	5.58	0.35	0.11	0.41	10.69	0.22	0.21	0.11
3800	5.59	0.35	0.11	0.41	10.72	0.22	0.21	0.1
3900	5.59	0.35	0.11	0.41	10.74	0.22	0.21	0.1
4000	5.58	0.35	0.11	0.42	10.76	0.22	0.21	0.11
4100	5.58	0.35	0.11	0.42	10.8	0.22	0.21	0.11
4200	5.59	0.35	0.11	0.43	10.83	0.22	0.21	0.11
4300	5.59	0.35	0.11	0.43	10.85	0.22	0.21	0.11
4400	5.59	0.35	0.11	0.43	10.87	0.22	0.21	0.11
4500	5.59	0.35	0.11	0.43	10.82	0.22	0.21	0.11
4600	5.58	0.35	0.11	0.44	10.86	0.22	0.21	0.11
4700	5.59	0.35	0.11	0.44	10.88	0.22	0.21	0.11
4800	5.59	0.35	0.11	0.44	10.88	0.22	0.21	0.11
4900	5.59	0.35	0.11	0.44	10.89	0.22	0.21	0.11
5000	5.59	0.35	0.11	0.45	10.89	0.22	0.21	0.11
5100	5.59	0.35	0.11	0.45	10.88	0.22	0.21	0.11
5200	5.6	0.35	0.11	0.45	10.9	0.22	0.21	0.11
5300	5.6	0.35	0.11	0.45	10.91	0.22	0.21	0.12

ตารางผนวกที่ ๓ (ต่อ)

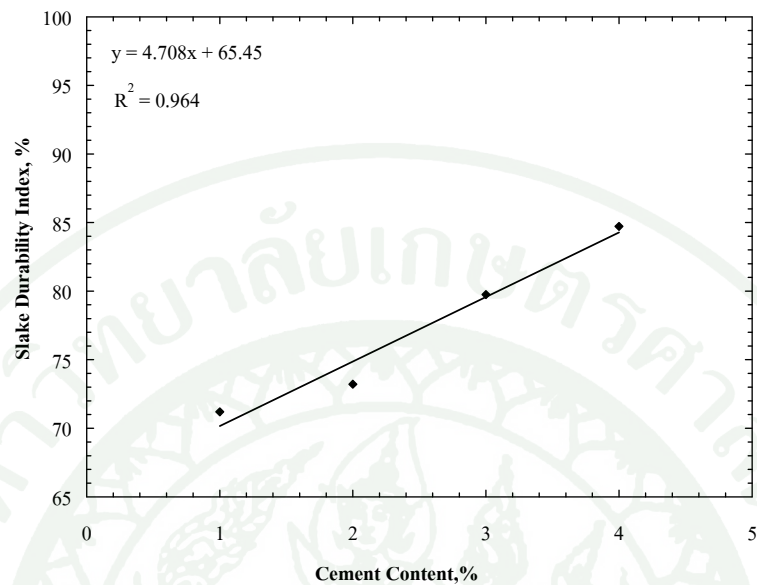
Pass No.	Rut Depth(mm)							
	CR1				AG1			
	0% Cement	1% Cement	2% Cement	3% Cement	0% Cement	2% Cement	4% Cement	6% Cement
5400	5.59	0.35	0.11	0.45	10.93	0.22	0.21	0.12
5500	5.6	0.35	0.11	0.45	10.96	0.22	0.21	0.12
5600	5.6	0.35	0.11	0.46	11.04	0.22	0.21	0.12
5700	5.6	0.35	0.11	0.46	11.06	0.22	0.21	0.12
5800	5.61	0.35	0.11	0.46	11.07	0.22	0.21	0.12
5900	5.61	0.35	0.11	0.46	11.07	0.22	0.21	0.12
6000	5.61	0.35	0.11	0.46	11.08	0.22	0.22	0.12
6100	5.62	0.35	0.11	0.46	11.09	0.23	0.21	0.12
6200	5.63	0.35	0.11	0.46	11.09	0.23	0.22	0.12
6300	5.63	0.35	0.11	0.46	11.11	0.23	0.21	0.13
6400	5.64	0.35	0.11	0.46	11.12	0.23	0.21	0.13
6500	5.64	0.35	0.11	0.46	11.13	0.23	0.21	0.13
6600	5.64	0.35	0.11	0.46	11.13	0.23	0.22	0.13
6700	5.65	0.35	0.11	0.46	11.13	0.23	0.22	0.13
6800	5.65	0.35	0.11	0.46	11.13	0.23	0.22	0.13
6900	5.66	0.35	0.11	0.45	11.13	0.23	0.22	0.13
7000	5.66	0.35	0.11	0.45	11.14	0.23	0.22	0.13
7100	5.67	0.35	0.11	0.45	11.1	0.23	0.22	0.13
7200	5.67	0.35	0.11	0.45	11.11	0.23	0.22	0.14
7300	5.67	0.35	0.11	0.45	11.12	0.23	0.22	0.14
7400	5.68	0.35	0.11	0.45	11.13	0.23	0.22	0.14
7500	5.68	0.35	0.11	0.45	11.13	0.24	0.21	0.14
7600	5.69	0.36	0.11	0.45	11.14	0.23	0.22	0.14
7700	5.7	0.36	0.11	0.45	11.13	0.24	0.22	0.14
7800	5.7	0.36	0.11	0.44	11.14	0.24	0.21	0.14
7900	5.69	0.36	0.11	0.44	11.15	0.24	0.22	0.14
8000	5.7	0.36	0.11	0.44	11.14	0.24	0.22	0.14
8100	5.7	0.36	0.11	0.44	11.15	0.24	0.22	0.14
8200	5.7	0.36	0.11	0.44	11.15	0.24	0.22	0.14
8300	5.7	0.36	0.11	0.44	11.16	0.24	0.22	0.15
8400	5.69	0.36	0.11	0.44	11.16	0.24	0.22	0.15

ตารางผนวกที่ ๓ (ต่อ)

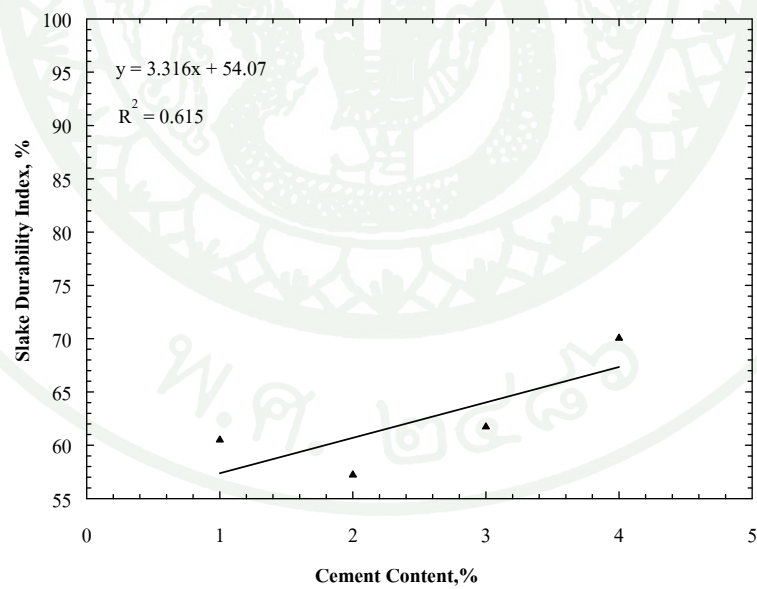
Pass No.	Rut Depth(mm)							
	CR1				AG1			
	0% Cement	1% Cement	2% Cement	3% Cement	0% Cement	2% Cement	4% Cement	6% Cement
8500	5.7	0.36	0.11	0.44	11.15	0.24	0.22	0.15
8600	5.7	0.37	0.11	0.44	11.15	0.24	0.22	0.15
8700	5.7	0.37	0.11	0.43	11.15	0.24	0.22	0.15
8800	5.7	0.37	0.11	0.43	11.16	0.24	0.22	0.15
8900	5.69	0.37	0.11	0.43	11.16	0.25	0.22	0.15
9000	5.7	0.37	0.11	0.43	11.16	0.25	0.22	0.15
9100	5.7	0.37	0.11	0.43	11.17	0.25	0.22	0.16
9200	5.7	0.37	0.11	0.43	11.17	0.25	0.22	0.16
9300	5.71	0.37	0.11	0.43	11.16	0.25	0.22	0.16
9400	5.7	0.37	0.11	0.43	11.17	0.25	0.22	0.16
9500	5.7	0.37	0.11	0.43	11.15	0.25	0.22	0.16
9600	5.71	0.37	0.11	0.43	11.14	0.25	0.22	0.16
9700	5.71	0.38	0.11	0.43	11.15	0.25	0.22	0.16
9800	5.71	0.38	0.11	0.43	11.16	0.25	0.22	0.16
9900	5.71	0.38	0.11	0.43	11.15	0.26	0.22	0.16
10000	5.71	0.38	0.11	0.43	11.15	0.26	0.22	0.16

ตารางผนวกที่ ค4 ผลการทดสอบร่องล้อที่ 10,000 รอบ ในแต่ละระยะการเคลื่อนที่

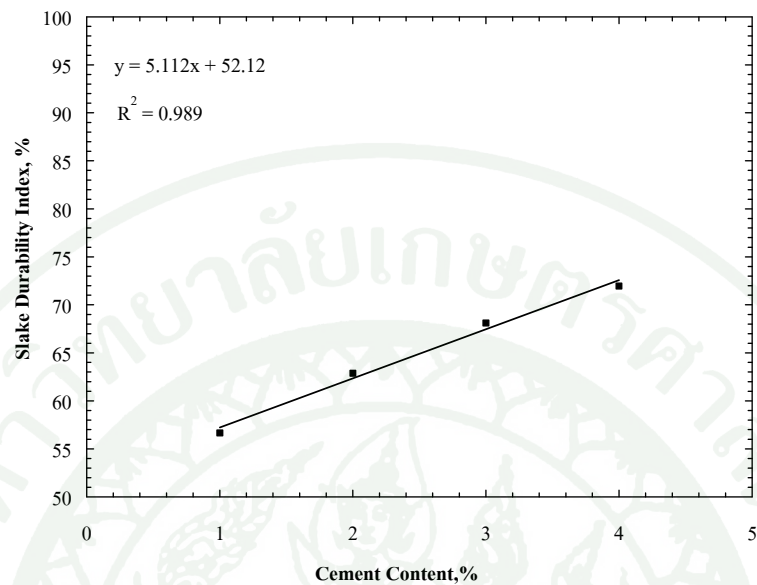
Distance Along Moving (mm)	Rut Depth(mm)							
	CRI				AGI			
	0%	1%	2%	3%	0%	2%	4%	6%
	Cement	Cement	Cement	Cement	Cement	Cement	Cement	Cement
-52	4.17	0.34	0.08	0.41	10.06	0.25	0.23	0.18
-48	4.31	0.35	0.08	0.41	10.24	0.25	0.24	0.18
-44	4.48	0.35	0.08	0.42	10.37	0.25	0.23	0.19
-40	4.62	0.36	0.09	0.42	10.46	0.25	0.23	0.18
-36	4.76	0.36	0.1	0.42	10.55	0.26	0.22	0.18
-32	4.86	0.36	0.1	0.42	10.66	0.26	0.23	0.17
-28	5	0.37	0.11	0.42	10.81	0.26	0.23	0.17
-24	5.13	0.37	0.11	0.42	10.98	0.26	0.22	0.18
-20	5.26	0.37	0.11	0.43	11.17	0.26	0.22	0.17
-16	5.4	0.37	0.11	0.43	11.34	0.26	0.22	0.17
-12	5.54	0.38	0.11	0.43	11.45	0.26	0.22	0.17
-8	5.66	0.38	0.11	0.43	11.55	0.26	0.24	0.16
-4	5.81	0.38	0.11	0.43	11.62	0.26	0.23	0.16
0	5.94	0.39	0.11	0.43	11.66	0.26	0.23	0.16
4	6.05	0.39	0.11	0.44	11.67	0.26	0.23	0.16
8	6.14	0.39	0.11	0.44	11.67	0.26	0.22	0.16
12	6.22	0.39	0.11	0.44	11.67	0.26	0.23	0.15
16	6.31	0.39	0.11	0.44	11.67	0.26	0.22	0.15
20	6.39	0.4	0.11	0.44	11.67	0.26	0.22	0.15
24	6.45	0.4	0.11	0.43	11.65	0.26	0.22	0.16
28	6.51	0.4	0.12	0.42	11.57	0.26	0.21	0.16
32	6.54	0.39	0.12	0.42	11.45	0.25	0.22	0.16
36	6.55	0.39	0.13	0.42	11.29	0.25	0.22	0.15
40	6.54	0.39	0.13	0.42	11.14	0.25	0.22	0.15
44	6.52	0.39	0.13	0.42	11.01	0.25	0.21	0.15
48	6.49	0.39	0.13	0.43	10.94	0.25	0.2	0.15
52	6.47	0.39	0.13	0.43	10.86	0.25	0.2	0.15



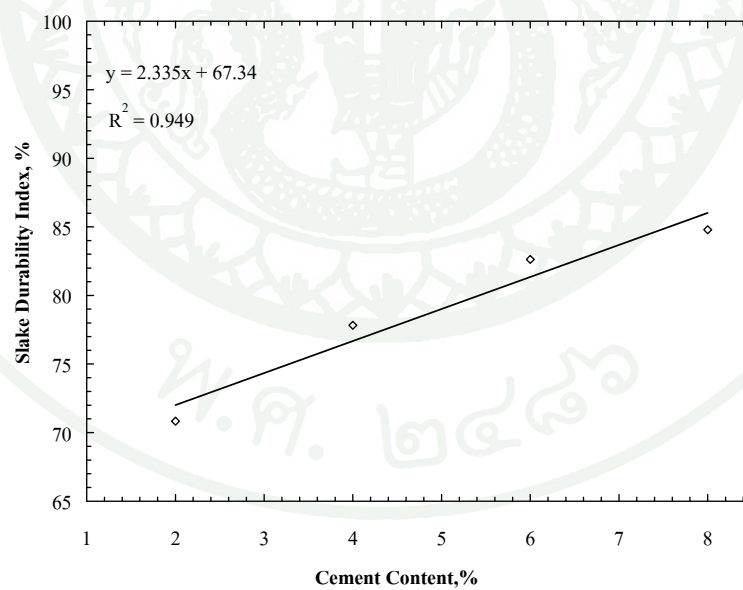
ภาพผนวกที่ ค1 ผลการทดสอบ Slake Durability Index แหล่งกาญจนบุรี



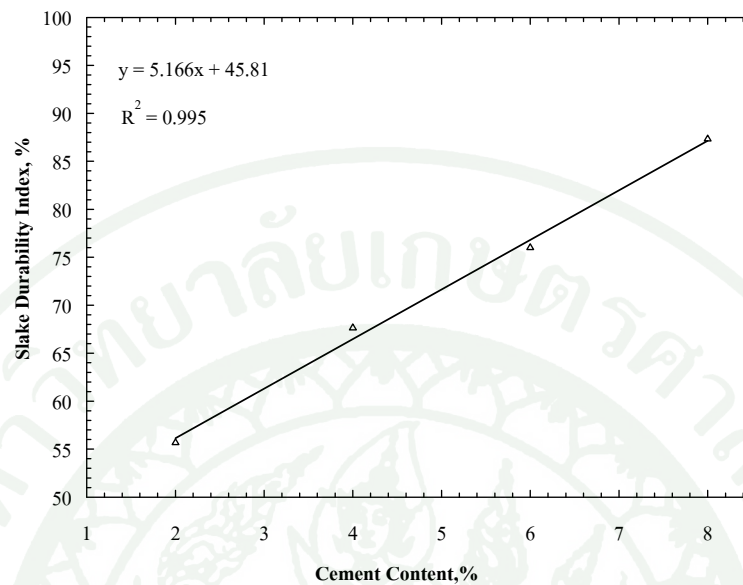
ภาพผนวกที่ ค2 ผลการทดสอบ Slake Durability Index แหล่งนครราชสีมา



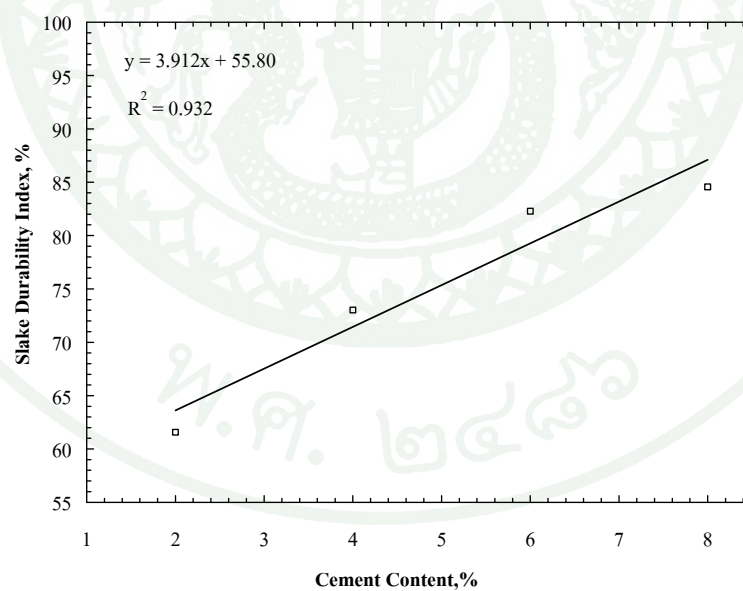
ภาพผนวกที่ ๓ ผลการทดสอบ Slake Durability Index แหล่งอุดรดิตถ์



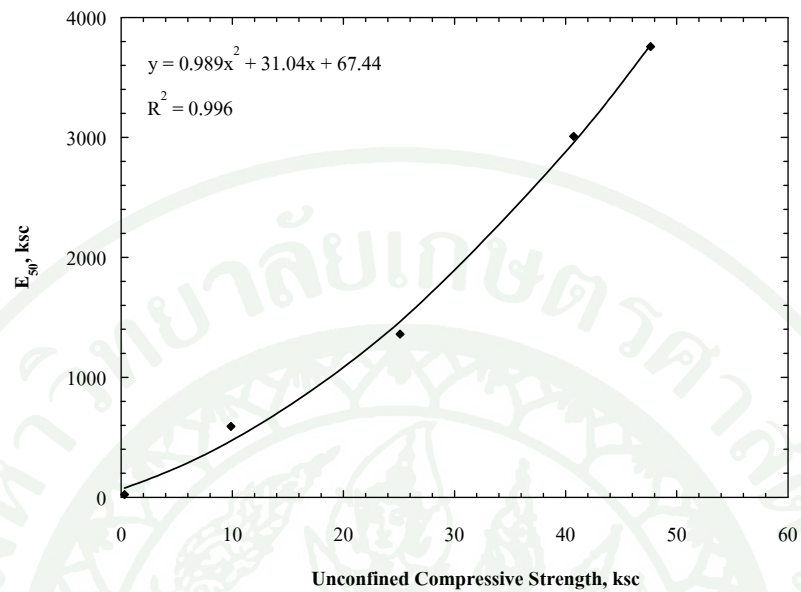
ภาพผนวกที่ ๔ ผลการทดสอบ Slake Durability Index แหล่งเพชรบุรี



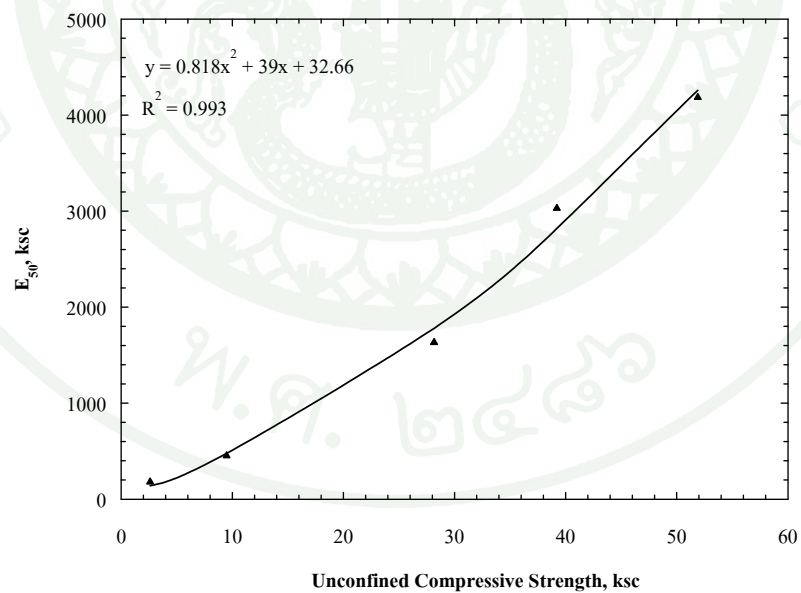
ภาพผนวกที่ ๕ ผลการทดสอบ Slake Durability Index แหล่งปราจีนบุรี



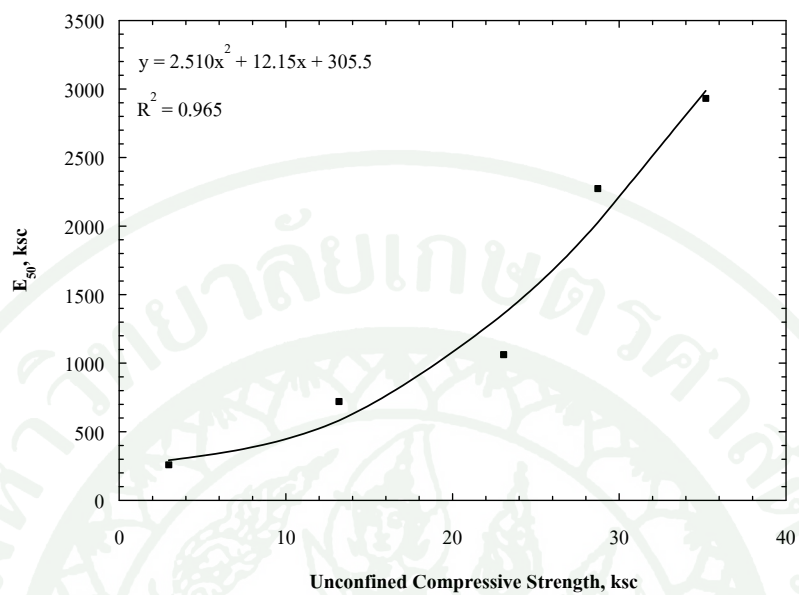
ภาพผนวกที่ ๖ ผลการทดสอบ Slake Durability Index แหล่งเพชรบูรณ์



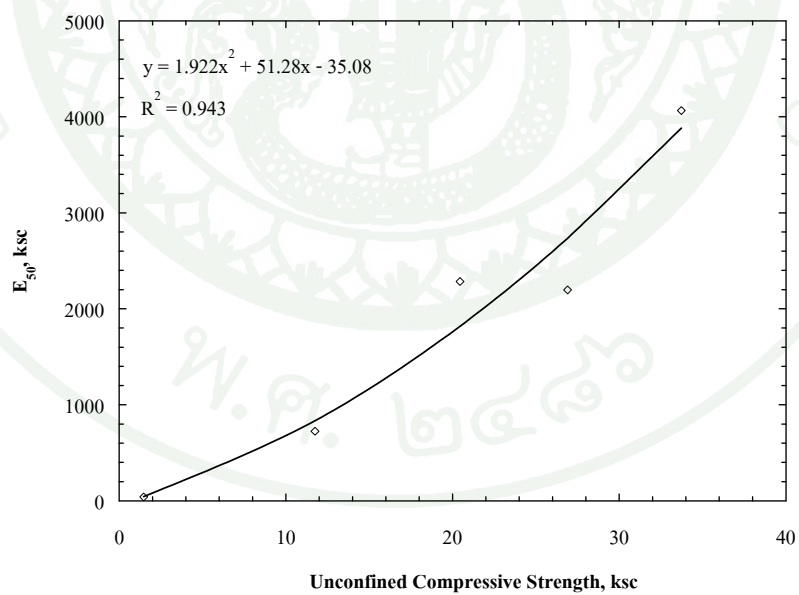
ภาพผนวกที่ ๗ ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} กับ UCS ของแหล่งกาณูจนบุรี



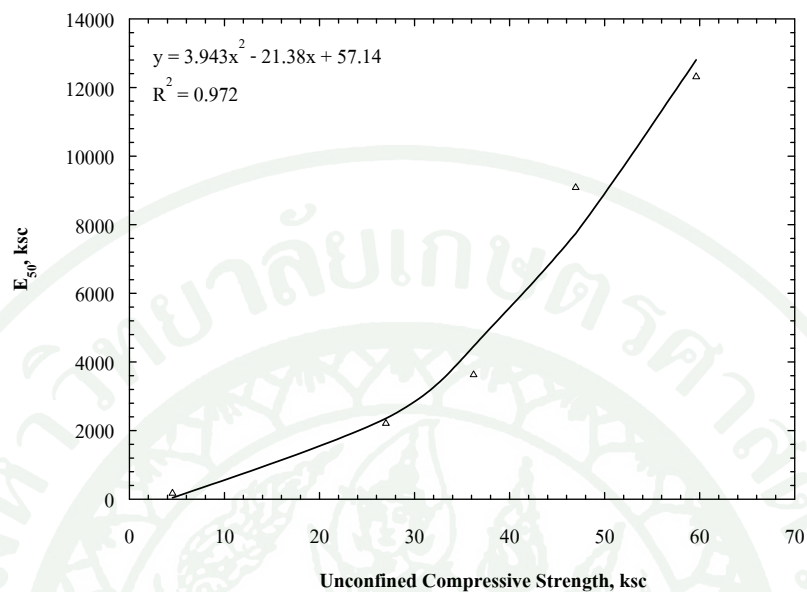
ภาพผนวกที่ ๘ ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} กับ UCS ของแหล่งนครราชสีมา



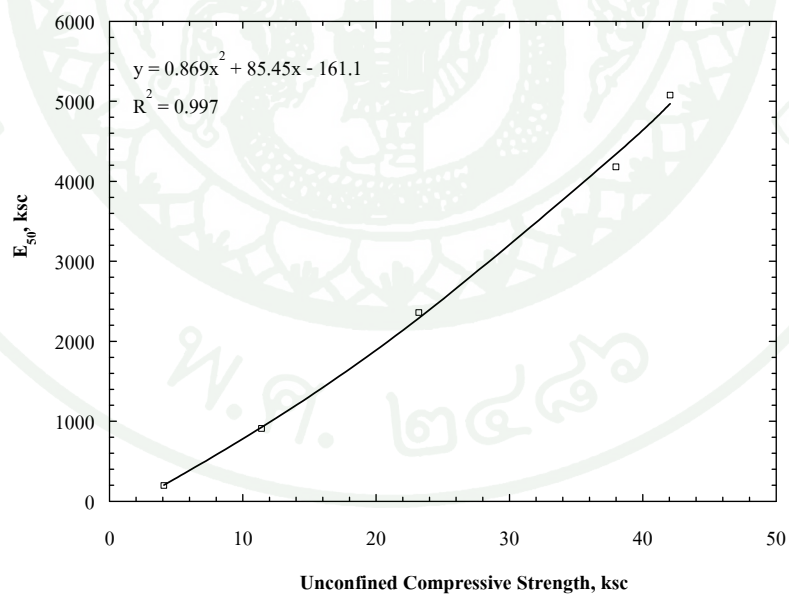
ภาพผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} กับ UCS ของแหล่งอุดรดิตถ์



ภาพผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} กับ UCS ของแหล่งเพชรบุรี



ภาพผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} กับ UCS ของแหล่งปราจีนบุรี



ภาพผนวกที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} กับ UCS ของแหล่งเพชรบูรณ์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อสกุล	นายวสันต์ ปั่นสังข์
เกิดวันที่	28 กรกฎาคม 2527
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(โยธา) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรโยธา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม