



รายงานฉบับที่ วพ. 327

REPORT NO. RD 327

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง

BUREAU OF ROAD RESEARCH AND DEVELOPMENT

---

การคืนค่าโมดูลัสของวัสดุหินคลุก  
ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ในงานกรมทางหลวง

DOH Autogenous Healing in Cement Treated Base

โดย

จุฑา

ชัยรัตน์

สุนิตย์สกุล

ศุภชวโรจน์

---

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

DEPARTMENT OF HIGHWAYS, MINISTRY OF TRANSPORT

RATCHATHEWI, BANGKOK 10400, THAILAND

---

การคืนค่าโมดูลัสของวัสดุหินคลุก  
ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ในงานกรมทางหลวง

โดย

จตุทา

ชัยรัตน์

สุนิตย์สกุล

ศุภชวโรจน์

รายงานฉบับที่ วพ. 327

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง

กรมทางหลวง

กรกฎาคม 2568

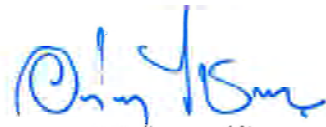
รายงานนี้เป็นแนวความคิดของผู้เขียนเท่านั้น กรมทางหลวงไม่มีส่วนผูกพันแต่อย่างใด

# คำนำ

เนื่องจากทรัพยากรทางธรรมชาติในปัจจุบันที่สามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนนได้ลดน้อยลงอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ราคาวัสดุก่อสร้างงานทางมีราคาสูงขึ้น ในขณะที่การซ่อมแซมถนน การขยายถนน หรือการก่อสร้างถนนใหม่จำเป็นต้องดำเนินการต่อไป ซึ่งในบางพื้นที่ของประเทศในปัจจุบัน วัสดุมวลรวมที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงที่ใช้ในการก่อสร้างถนนมีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งยังมีปัจจัยในเรื่องของพลังงานเชื้อเพลิงที่มีราคาสูงขึ้น การขนส่งทางรถบรรทุกส่งผลกระทบต่อทางจราจรและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งการขนส่งที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างถนน ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้ล้วนเป็นผลให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจและงบประมาณของประเทศ ดังนั้น การก่อสร้างถนนใหม่และ/หรือการซ่อมแซมถนนด้วยการนำวัสดุด้วยคุณภาพที่มีในพื้นที่ท้องถิ่นหรือวัสดุคืนทางเดิมที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) มาปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้เป็นไปตามมาตรฐานวัสดุงานทางของกรมทางหลวงนั้น จะเป็นการประหยัดทรัพยากรทางธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด ลดการใช้พลังงาน ลดปริมาณการจราจร และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะส่งผลดีต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศและคุณภาพชีวิตของประชาชนโดยรวม

กรมทางหลวงได้นำวิธีการปรับปรุงคุณภาพทางวิศวกรรมของดินและหินคลุกมาใช้ โดยการผสมปูนซีเมนต์ผง (Cement Stabilization) เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง (Base) และวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) เป็นระยะเวลามากกว่า 50 ปี และพบปัญหาหลักของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตบนชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ คือ การแตกร้าวของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จากการศึกษาโดย ดร.ธีระชาติและคณะพบว่า การแตกร้าวดังกล่าวเกิดจากการแตกสะท้อน (Reflective Cracks) จากชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ กรมทางหลวงจึงยุติการนำดินซีเมนต์มาใช้เป็นชั้นพื้นทางภายหลังปี พ.ศ. 2514 และในช่วงเวลาปี พ.ศ. 2515-2525 ดร.ธีระชาติและคณะได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของดินซีเมนต์ทั้งในห้องปฏิบัติการและในการก่อสร้างที่ใช้พื้นทางดินซีเมนต์ เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์มากขึ้น หลังจากนั้นดินซีเมนต์จึงได้รับการนำมาก่อสร้างเป็นชั้นพื้นทางอีกครั้งในปี 2525 จวบจนปัจจุบัน

วิธีการที่ทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Microcrack) บนชั้นพื้นทางซีทีบีพีจะทำให้เกิดรอยแตกสะท้อนน้อยกว่าชั้นพื้นทางซีทีบีพีที่ได้ประยุกต์ใช้วิธีการนี้ ภายหลังจากที่ทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กในชั้นทางวัสดุมวลรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ วัสดุโครงสร้างชั้นทางยังคงสามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดและค่าโมดูลัสได้ เนื่องจากปฏิกิริยา Hydration ที่ยังคงเกิดขึ้น จึงเป็นการ Autogenously Healing ของชั้นทางวัสดุมวลรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์อีกด้วย



(นายอภิรัฐ ไชยวงศ์น้อย)

อธิบดีกรมทางหลวง

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช วิศวกรใหญ่ด้านวิจัยและพัฒนา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการ ให้คำแนะนำ แก่ในงานวิจัยนี้ และขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุน ทั้งการทดสอบในภาคสนามและผู้เกี่ยวข้องในส่วนกลาง

การคืนค่าโมดูลัสของวัสดุหินคลุก  
ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ในงานกรมทางหลวง

\*\*\*\*\*

จตุธา สุนิตย์สกุล

ชัยรัตน์ ศุภชวโรจน์

สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ

กรมทางหลวง

บทคัดย่อ

กรมทางหลวงได้ดำเนินการก่อสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตบนพื้นทางปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากกว่า 50 ปี โดยกรมทางหลวงเริ่มต้นก่อสร้างแปลงทดลองดินซีเมนต์ที่สายวารินชำราบ - เดชอุดม ในปัจจุบันกรมทางหลวง ได้จัดทำมาตรฐานทางหลวงวัสดุงานทางปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลายชนิดเช่น รองพื้นทางดินซีเมนต์ พื้นทางดินซีเมนต์ พื้นทางหินคลุกซีเมนต์ และวัสดุหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากการหดตัวและแตกร้าวในพื้นที่ดังกล่าว วัสดุทั้งหมดมีกำลังต้านแรงอัดน้อยกว่า 24.5 ksc

ในปัจจุบัน ปริมาณรถบรรทุกมีการเพิ่มขึ้นและงบประมาณที่ได้รับในการก่อสร้างและบำรุงรักษามีอย่างจำกัด สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ จึงได้ดำเนินการพิจารณาแนวทางการเพิ่มความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างทางและงบประมาณที่ใช้ในการก่อสร้างไม่เพิ่มสูงขึ้นมาก ด้วยการใช้ พื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ (Cement Treated Base: CTB)

วัสดุ Cement Treated Base เป็นวัสดุที่มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงมากกว่า Cement Modified Crushed Rock Base ประมาณ 63 เปอร์เซ็นต์จึงจำเป็นต้องมีการใช้ปูนซีเมนต์ประมาณ 3 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำหนักแห้งของวัสดุหินคลุก ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกสะท้อนของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้ จึงจำเป็นต้องมีขบวนการทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Microcrack) ในชั้น Cement Treated Base ซึ่งขบวนการนี้ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงชั่วคราวแต่ Cement Treated Base มีคุณสมบัติ Autogenously Healing ทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นสามารถคืนค่ากลับได้

# DISCLAIMER

The contents of this report reflect only the views of the authors, who are responsible for the facts and the accuracy of the data presented herein. The contents do not necessarily reflect the official views or policies of the Department of Highways, Thailand. Department of Highways does not endorse products or manufacturers. Trademarks or manufacturers' names appear in this report only because they are considered essential to the objectives of the document. This report does not constitute any standard, specification, or regulation.

# สารบัญ

หน้า

สารบัญ

สารบัญประกอบ

สารบัญตาราง

บทคัดย่อ

บทที่ 1 บทนำ

1.1	ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3	ประโยชน์ของการวิจัย	2

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม 3

2.1	การปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทางด้วยวิธีการบดทับ	3
2.2	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานทางด้วยปูนซีเมนต์	3
2.3	การทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Microcrack)	4
2.4	การคืนกำลัง Autogenous Healing ของวัสดุมวลรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์	5
2.5	การศึกษา Autogenous Healing ของวัสดุหินซีเมนต์ด้วยการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดแกนเดียวที่ผ่านมาของกรมทางหลวง	12
2.6	การศึกษา Autogenous Healing วัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ของกรมทางหลวง	17

บทที่ 3 การศึกษา Autogenous Healing ของ Cement Treated Base 21

3.	สรุปสาระสำคัญ ขั้นตอนการดำเนินการ และเป้าหมายของงาน	21
3.1	สรุปสาระสำคัญ	21
3.2	โครงการก่อสร้างที่ทำการศึกษา Autogenous Healing	22
3.2.1	การศึกษา Autogenous Healing จากการใช้ Microcracking บนชั้น CTB หมายเลข 206 ตอน อ.พิมาย - บ.หินดาด	22

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 (ต่อ)	
3.2.2 การศึกษา Autogenous Healing จากการใช้ Microcracking บนชั้น CTB โครงการก่อสร้างทางหลวง หมายเลข 3376 ตอน อ.บ้านฉาง – ถนนซอย 13 นิคมสร้างตนเอง จ.ระยอง	22
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการ	22
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	25
4.1 ผลการดำเนินงาน Autogenous Healing โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 206	25
4.2 ผลการดำเนินงาน Autogenous Healing โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3376	25
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย ปัญหาและอุปสรรค และข้อเสนอแนะ	32
5.1 สรุปผลการวิจัย	32
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินการ	32
5.3 ข้อเสนอแนะ	33

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4-1	ตารางแสดงคุณสมบัติ วัสดุหินคลุกที่ใช้ในการก่อสร้างชั้น Cement Treated Base	27

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่นแห้ง และปริมาณความชื้นที่พลังงานในการบดทับที่แตกต่างกัน (Seed and Chan, 1959)	6
2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่พลังงานในการบดทับที่แตกต่างกัน(Pandianet. al., 1997)	7
3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้ง และปริมาณความชื้นพลังงานในการบดทับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตรของวัสดุผสมรวมที่มีค่าขีดจำกัดความเหลวแตกต่างกัน (Pandianet. al., 1997)	7
4	ผลการทดสอบการบดทับวัสดุผสมรวมแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Ruenkrairegsa and Eamchoey, 1990)	8
5	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของวัสดุงานทางดินซีเมนต์ (Ingle and Metcalf, 1972)	8
6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านแรงอัดและค่า CBR/(W/C) (จุฑา สุนิตย์สกุล และอรรณสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช, 2550)	9
7	ภาพแสดงรอยแตกขนาดเล็กในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3510	9
8	ภาพแสดงอุปกรณ์ Falling Deflectometer (FWD) ในระหว่างการทดสอบชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3510	10
9	ค่า Modulus เฉลี่ยของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 201	10
10	ค่า Modulus เฉลี่ยของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3510	11
11	ค่า Modulus ภายหลังการก่อสร้างของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ทางหลวงหมายเลข 3510	11
12	ผลการตรวจวัดค่า Stiffness ของชั้นพื้นทางรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ (Louw and Jones, 2015)	12
13	Retained strength increase with increasing cement content. (Scullion et.al., 2005)	12
14	ขนาดคละของวัสดุผสมรวมจากพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	13
15	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมดินซีเมนต์	13

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
16.1	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 2 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 1.5%	14
16.2	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 3 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 1.5%	14
16.3	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 1.5%	14
17.1	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 2 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 3%	15
17.2	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 3 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 3%	15
17.3	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 3%	15
18.1	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 2 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 4.5%	16
18.2	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 3 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 4.5%	16
18.3	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 4.5%	16
19	ขนาดคละของวัสดุมวลรวมจากพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	17
20.1	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์	17
20.2	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ที่อายุ 1 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 1 เปอร์เซ็นต์	18

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
20.3	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่อายุ 2 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 1 เปอร์เซ็นต์	18
20.4	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่อายุ 3 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 1 เปอร์เซ็นต์	18
21.1	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่อายุ 1 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 2 เปอร์เซ็นต์	19
21.2	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่อายุ 2 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 2 เปอร์เซ็นต์	19
21.3	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่อายุ 3 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 2 เปอร์เซ็นต์	19
22.1	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่อายุ 1 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์	20
22.2	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่อายุ 2 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์	20
22.3	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่อายุ 3 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์	20
23	ผลการวิเคราะห์ความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงดึงใต้ผิวทางแอสฟัลต์สูงสุด	23
24	ภาพตัดแบบแนะนำโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 206 อ.พิมาย - บ.หินดาด ระหว่าง กม.8+147 - กม.36+200	24
25	ภาพตัดแบบแนะนำโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 3376 ตอน อ.บ้านฉาง - ถนนซอย 13 นิคมสร้างตนเอง จ.ระยอง	24
26	ภาพแสดงผลการออกแบบส่วนผสม Cement Treated Base	26
27	ภาพแสดงรอยแตกขนาดเล็กบนชั้น CTB ที่เกิดขึ้นจากการ Microcracking ด้วยรถบดล้อเหล็กแบบสันสะเทือน	26
28.1	ภาพแสดงค่าการทรุดตัวเฉลี่ยของชั้น CTB ได้จุดทดสอบ FWD กม. 8+400 - 8+500 และพื้นที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ภายหลังจากก่อสร้างแล้วเสร็จ 24 ชั่วโมง กม. 8+500 - 8+610 โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 206	28

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
28.2	ภาพแสดงค่าการทรุดตัวเฉลี่ยของชั้น CTB ได้จุดทดสอบ FWD กม. 8+400 – 8+500 และพื้นที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ 48 ชั่วโมง กม. 8+610 – 8+690 โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 206	28
29.1	ภาพแสดงค่า Elastic Modulus เฉลี่ยของชั้น CTB ได้จุดทดสอบ FWD กม. 8+400 – 8+500 และพื้นที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ 24 ชั่วโมง กม. 8+500 – 8+610 โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 206	29
29.2	ภาพแสดงค่า Elastic Modulus เฉลี่ยของชั้น CTB ได้จุดทดสอบ FWD กม. 8+400 – 8+500 และพื้นที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ 48 ชั่วโมง กม. 8+610 – 8+690 โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 206	29
30.1	พื้นที่ชั้นทาง CTB ก่อนการดำเนินการ Microcracking	30
30.2	พื้นที่ชั้นทาง CTB ที่ใช้เป็น Control Section	30
30.3	การดำเนินการ Microcracking พื้นที่ชั้นทาง CTB ด้วยรถดัดล้อเหล็กแบบสันสะเทือน	30
30.4	รอยแตกขนาดเล็กบนชั้น CTB ที่เกิดขึ้นจากการ Microcracking ด้วยรถดัดล้อเหล็กแบบสันสะเทือน	
30	ภาพแสดงรถดัดล้อเหล็กและ Falling Weight Deflectometer สำหรับทำการ Microcracking ชั้น CTB ทางหลวงหมายเลข 3376	30
31	ภาพแสดงค่าการทรุดตัวเฉลี่ยของชั้น CTB ได้จุดทดสอบ FWD กม 6+820 – 6+940 และพื้นที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcrack ภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ 24 ชั่วโมง กม. 6+940 – กม. 7+080 โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3376	31
32	ภาพแสดงค่า Elastic Modulus เฉลี่ยของชั้น CTB ได้จุดทดสอบ FWD กม. 6+820 – 6+940 และพื้นที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ภายหลังการก่อสร้าง กม. 6+940 – กม. 7+080 โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3376	31

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

ทรัพยากรทางธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนนได้ลดน้อยลงไปมาก ส่งผลให้ในปัจจุบันวัสดุก่อสร้างงานทางมีราคาสูงขึ้น ในขณะที่การซ่อมแซมถนน ขยายถนน หรือสร้างใหม่จำเป็นต้องดำเนินการต่อไป ในปัจจุบันบางพื้นที่ของประเทศ วัสดุมวลรวมที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงที่ใช้ในการก่อสร้างถนนมีจำกัด อีกทั้งพลังงานเชื้อเพลิงมีราคาสูงขึ้น การขนส่งทางถนนโดยรถบรรทุกส่งผลกระทบต่อทาง การจราจรและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งการขนส่งส่งผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างถนน สิ่งต่างๆ เหล่านี้เป็น ผลให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ และงบประมาณของประเทศ ดังนั้นการก่อสร้างถนนใหม่และ/หรือการ ซ่อมแซมถนน โดยที่สามารถนำวัสดุด้วยคุณภาพที่มีในท้องถิ่น หรือวัสดุคั่นทางเดิมที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) โดยการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้เป็นไปตามมาตรฐานวัสดุงานทางของกรมทางหลวง จะเป็นการประหยัดทรัพยากรทางธรรมชาติที่เหลืออยู่น้อย ลดการใช้พลังงาน ลดการขนส่งวัสดุและลด ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะส่งผลดีต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศและคุณภาพชีวิตของประชาชนโดยรวม

กรมทางหลวงได้นำวิธีการปรับปรุงคุณภาพทางวิศวกรรมของดินและหินคลุกโดยการผสมปูนซีเมนต์ ผง (Cement Stabilization) เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง (Base) และวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) เป็น ระยะเวลามากกว่า 50 ปี ปัญหาหลักของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตบนชั้นพื้นทางดินซีเมนต์คือการแตกร้าวของ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จากการศึกษาโดย ดร.ธีระชาติและคณะ พบว่าการแตกร้าวบนผิวทางเกิดขึ้นจาก การแตกสะท้อน(Reflective Cracks) จากชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ปัญหาจากการแตกร้าวบนผิวทางจากชั้นพื้น ทางดินซีเมนต์ ส่งผลให้กรมทางหลวงยุติการนำดินซีเมนต์มาใช้เป็นชั้นพื้นทางในปี พ.ศ. 2514 ระหว่างปี พ.ศ. 2515 - 2525 ดร.ธีระชาติและคณะ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของดินซีเมนต์ ทั้งในห้องปฏิบัติการและในงาน ก่อสร้างที่ใช้พื้นทางดินซีเมนต์ ทำให้มีความเข้าใจในพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์มากขึ้น ภายหลังจาก การศึกษาของดร.ธีระชาติและคณะ ดินซีเมนต์ได้รับการนำมาก่อสร้างเป็นชั้นพื้นทางอีกครั้งตั้งแต่ปี 2525 จวบจนปัจจุบัน โดยมีการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้างและมีการแนะนำให้ ทำการเปิดการจราจรชั่วคราวเมื่อก่อสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์แล้วเสร็จ เพื่อให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กในชั้น พื้นทางดินซีเมนต์ ซึ่งจะช่วยลดการเกิดรอยแตกสะท้อนได้ (Rananand et al., 1983 และ Dheeragool and Ruenkairergsa, 1994)

Sebesta (2005) ได้ประยุกต์ใช้วิธีการที่ทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Microcracks) บนชั้นพื้นทาง ซีทีบี และพบว่าชั้นพื้นทางซีทีบีที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ทำให้เกิดรอยแตกสะท้อนน้อยกว่าชั้นพื้น ทางซีทีบีที่มีได้ประยุกต์ใช้วิธีการนี้ ภายหลังจากที่ทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กในชั้นทางวัสดุมวลรวมปรับปรุง คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ วัสดุโครงสร้างชั้นทางยังคงสามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดและค่าโมดูลัสได้ เนื่องจากปฏิกิริยา Hydration ยังคงเกิดขึ้น จึงเป็นการคืนกำลัง Autogenous Healing ของชั้นทางวัสดุมวล รวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาดังต่อไปนี้

- เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการคืนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ Cement Treated Base
- เพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการ Microcracking ของกรมทางหลวงต่อไป

## 1.3 ประโยชน์ของการวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษามีดังต่อไปนี้

- ทราบถึงพฤติกรรมการคืนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ Cement Treated Base
- เสนอแนวทางการดำเนินการป้องกันการแตกสะท้อนของผิวทางแอสฟัลต์ด้วยวิธีการ Microcracking สำหรับงานกรมทางหลวง

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 การปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทางด้วยวิธีการบดทับ

การบดทับเป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพวัสดุพื้นฐานสำหรับการก่อสร้างถนน เพื่อให้ได้ถนนที่มีอายุการใช้งานตามที่ออกแบบไว้ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการบดทับส่งผลต่อคุณภาพของงานดังนี้ (1) ปริมาณความชื้นที่ทำให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content: OMC) (2) ความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Dry Density: MDD) และ (3) คุณสมบัติด้านกำลัง อาทิเช่น ค่ากำลังต้านแรงเฉือน, ค่า CBR เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 1 และภาพที่ 2 โดยเมื่อใช้พลังงานในการบดทับเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นสูงสุดที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นและปริมาณความชื้นที่ทำให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดมีค่าลดลง อีกทั้งค่ากำลังรับแรงอัดและค่า CBR (ไม่แช่น้ำ) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นในดินในขณะบดทับมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าปริมาณความชื้นที่ทำให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด

วัสดุมวลรวมที่มีขนาดคละกันดี (Well-Graded) จะมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่สูงกว่าวัสดุมวลรวมที่มีขนาดคละกันไม่ดี (Poorly-Graded) อีกทั้งวัสดุมวลรวมที่มีมวลละเอียดมาก จะมีค่าปริมาณความชื้นที่ทำให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content: OMC) ที่สูงกว่าวัสดุมวลรวมที่มีมวลละเอียดน้อยกว่า และ Pandian และคณะ (1997) ได้ทำการทดสอบการบดทับ และพบว่าค่าปริมาณความชื้นที่ทำให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดมีค่าลดลง และค่าความหนาแน่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) มีค่าลดลง โดยที่พลังงานที่ใช้ในการบดทับคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 3 และจากการศึกษาโดย Ruenkrairegsa และ Eamchoey (1990) พบว่าในการทดสอบการบดทับแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Compaction Test: Modified Procter) การผสมปูนซีเมนต์ในวัสดุมวลรวมไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นที่ทำให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด และความหนาแน่นสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 4 การทำงานในระหว่างการก่อสร้างในความเป็นจริงควรที่จะทำการบดทับ เมื่อมวลดินมีปริมาณความชื้นใกล้เคียงกับปริมาณความชื้นที่ทำให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด เพื่อให้ได้ความหนาแน่นของคันทางมีค่าสูงสุดและจากภาพที่ 1 และ 2 อย่างไรก็ตามพบว่าพลังงานที่ใช้ในการบดทับนั้น มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของวัสดุมวลรวมที่ด้านเปียกน้อยมาก (ค่าปริมาณความชื้นที่ใช้ในการผสมวัสดุมวลรวมมีค่ามากกว่าค่าปริมาณความชื้นที่ทำให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด)

#### 2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานทางด้วยปูนซีเมนต์

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า คุณสมบัติของวัสดุงานทางก่อนที่จะทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยปูนซีเมนต์ ที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังต้านแรงอัดของวัสดุงานทางดินซีเมนต์ มีดังต่อไปนี้ ค่าขีดจำกัดทางความชื้นเหลว ปริมาณมวลละเอียดปริมาณมวลหยาบ ความแข็งแรงแรงของวัสดุมวลรวม ขนาดคละ California Bearing Ratio (CBR) เป็นต้น ดังที่ได้แสดงไว้ใน

Ruenkrairegsa (1976) รวมทั้ง Ruenkrairegsa and Sanguandeekul (1977) และ Horpibulsuk et. al. (2007) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความน้ำและปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมและกำลังรับต้านทานแรงอัด โดยค่ากำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุงานทางดินซีเมนต์ลดลงเมื่อสัดส่วนปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์ (W/C) มีค่าเพิ่มขึ้น

Ingle and Metcalf (1972) ได้ทำการสรุปถึงขบวนการ Soil Stabilization และสรุปถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของวัสดุงานทางดินซีเมนต์ดังนี้ (1) ปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำที่ใช้ในการผสม (2) อายุของวัสดุงานทางดินซีเมนต์ การผสมและการบดทับ และ (4) ประเภทและลักษณะของดินดังแสดงในภาพที่ 5 และอิทธิพลของการแช่ก้อนตัวอย่างในน้ำก่อนการทดสอบนั้น สัดส่วนค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่แช่น้ำและไม่แช่น้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัดส่วนของปูนซีเมนต์ที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้น

จุฑา สุนิตย์สกุล และอรรณสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช (2550) ได้เสนอแนวทางการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุงานทางดินซีเมนต์ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยในการใช้แบบจำลองที่นำเสนอ นั้น การเตรียมก้อนตัวอย่างวัสดุงานทางผสมซีเมนต์จะต้องมีปฏิบัติตามมาตรฐานของกรมทางหลวง และก้อนตัวอย่างจะต้อง (1) ค่าความหนาแน่นแห้งต้องไม่น้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) (2) ก่อนการทดสอบ Unconfined Compression Test (CBR) จะต้องทำการแช่ก้อนตัวอย่างในน้ำเป็นอย่างน้อย 2 ชั่วโมง และ (3) จะต้องทำการเตรียมก้อนตัวอย่างที่ปริมาณความชื้นที่ก่อให้เกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐาน ในแบบจำลองทำนายกำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุผสมรวมดินซีเมนต์ที่นำเสนอ ค่า CBR ที่ใช้ในจะต้องเป็นค่า CBR ที่ความหนาแน่น 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) และที่ค่าการยุบตัว 0.1 นิ้ว อีกทั้งยังได้พบว่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์ที่ต่ำเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เช่นเดียวกันกับในกรณีของ Cement Concrete

### 2.3 การทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Microcracking)

กรมทางหลวง ได้ยุติการใช้งานพื้นทางดินซีเมนต์ในช่วงปี 2514 ถึงปี พ.ศ. 2525 เนื่องจากตรวจพบรอยแตกบนชั้นผิวทางแอสฟัลต์โดยลักษณะของรอยแตกคล้ายกับที่เกิดขึ้นในตัวยอดของผิวทางซีเมนต์คอนกรีต ซึ่งรอยแตกที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจาก Reflective Cracks จากรอยแตกร้าวของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์เนื่องจากเกิด Shrinkage Crack ซึ่งวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวนั้น Ruenkrairegsa (1994) ได้แนะนำให้เปิดการจราจรภายหลังการก่อสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ก่อนการปูผิวทางแอสฟัลต์ และ/หรือให้ยี่ดระยะเวลาการปูผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

Sebesta (2005) ได้ประยุกต์ใช้วิธีการที่ทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Microcracks) บนชั้นพื้นทางซีทีบี (Cement Treated Base: CTB) ด้วยการใช้รถบดล้อเหล็กแบบสันสะเทือน โดยแนะนำให้ทำการบดชั้นพื้นทางวัสดุผสมรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่อายุ หนึ่ง ถึง สาม วัน โดยจำนวนรอบที่ทำการบดนั้นคือจำนวนรอบที่ก่อให้เกิดค่า Modulus ของชั้นพื้นทางซีทีบีลดลงของประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น

Sebesta (2005) รายงานว่าชั้นพื้นทางซีทีบีที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking เกิดรอยแตกสะท้อนน้อยกว่าชั้นพื้นทางซีทีบีที่ไม่ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking

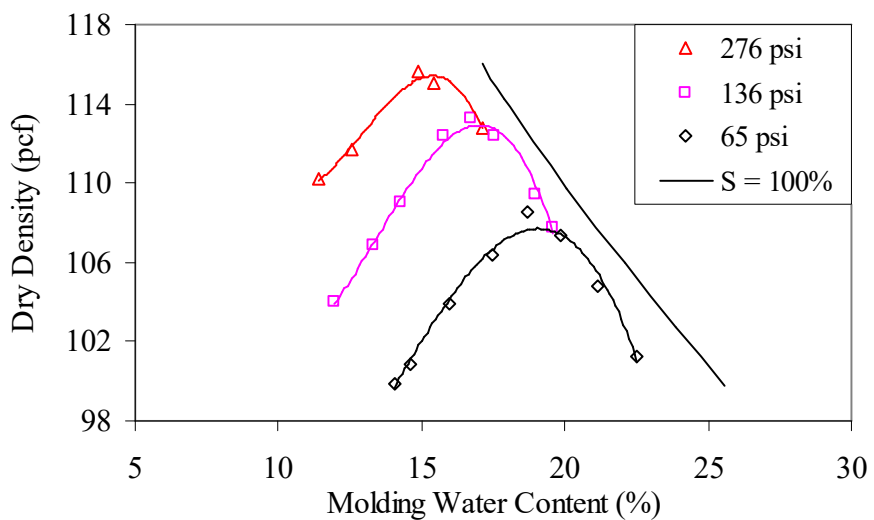
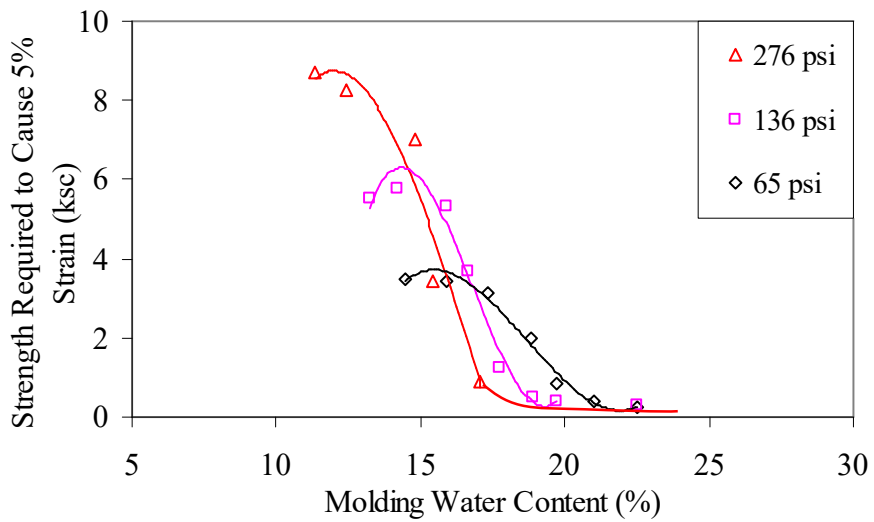
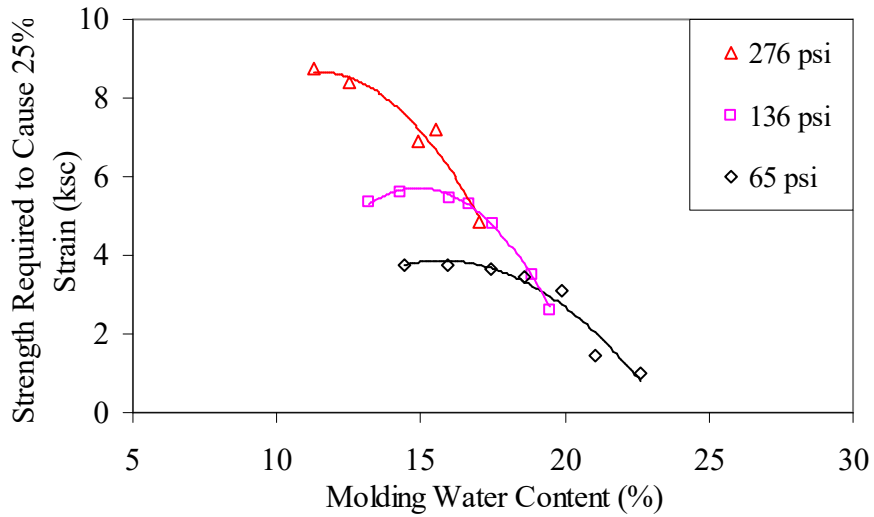
สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ได้ริเริ่มการประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking บนชั้นพื้นทางดินซีเมนต์เพื่อลดรอยแตกบนชั้นผิวทาง Asphalt Concrete โดยได้รับการร่วมมือจากสำนักก่อสร้างทางประสานงานกับผู้รับจ้าง ให้ดำเนินการ Microcracking ที่ก่อสร้างบนชั้นพื้นดินซีเมนต์ในโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 201 (อ.หนองบัวโคก-จ.ชัยภูมิ และ 3510 (บ.หนองหญ้าป้อง-จ.เพชรบุรี) ตามภาพที่ 7 (Sunitsakul et. al., 2007) วิธีการที่ก่อให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์นั้น จะใช้วิธีการที่แนะนำโดย Sebesta (2005) ในการประยุกต์ใช้ Microcracks ครั้งนั้นการประเมินค่า Modulus ของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ได้ทำการประเมินด้วยอุปกรณ์ Falling Deflectometer (FWD) (ภาพที่ 8)

จากการประเมินผล FWD พบว่าค่า Elastic Modulus มีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังจากการทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กบนชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ดังแสดงในภาพที่ 9 และภาพที่ 10 สำหรับพื้นทางดินซีเมนต์โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 201 และ 3510 ตามลำดับ

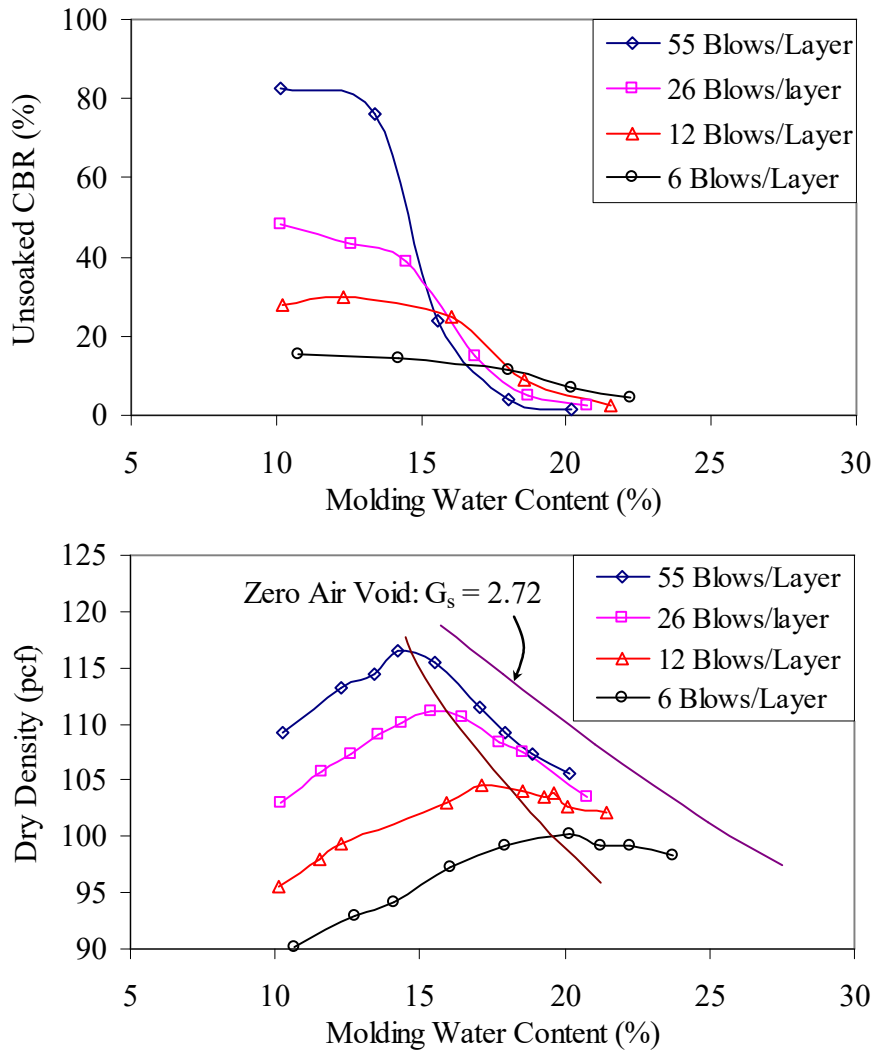
การประเมินสภาพผิวทางภายหลังการเปิดจราจรในทั้งสองแปลงทดลองของทางหลวงหมายเลข 201 และ 3510 ประมาณแปดเดือน พบว่าสภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งสองแปลงทดลอง มีสภาพไม่แตกต่างจากจุดอื่นๆ ในทั้งสองสายทาง และไม่ปรากฏรอยแตกบนชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ผลการประเมินค่า Modulus จากการทดสอบ FWD ของแปลงทดลองทางหลวงหมายเลข 3510 นั้นพบว่าค่า Modulus ของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ในบริเวณที่มีการที่การประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ไม่มีความแตกต่างจากบริเวณอื่นๆ (ภาพที่ 11) ซึ่งสอดคล้องได้กับรายงานของ Louw and Jones (2015)

#### 2.4 การคืนกำลัง Autogenous Healing ของวัสดุมวลรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

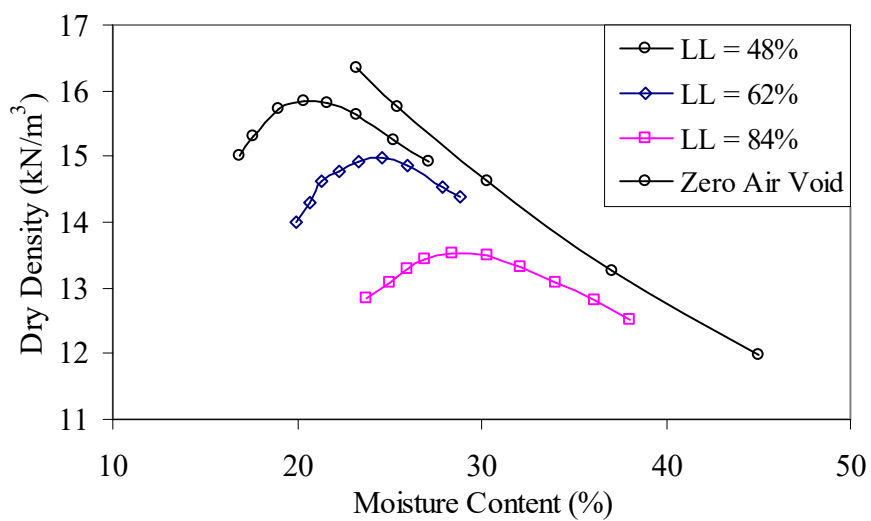
แนวความคิด Autogenous Healing ของวัสดุมวลรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ โดย Scullion et al. (2005) ซึ่งได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างดินซีเมนต์ โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวให้พ้นจุดที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดที่อายุก้อนตัวอย่างที่อายุ 7 วัน จากนั้นทำการบ่มก้อนตัวอย่างดินซีเมนต์ต่ออีก 14 วัน จากนั้นได้ทำการสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว เพื่อทำการศึกษา Autogenous Healing พบว่าที่อายุก้อนตัวอย่าง 21 วัน กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของก้อนตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวให้พ้นจุดที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดมีค่าประมาณ 80 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ของของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของก้อนตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีได้ผ่านการทดสอบฯ (ภาพที่ 13) เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในก้อนตัวอย่างที่ได้รับการทดสอบแรงอัดแกนเดียวที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด ยังคงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างได้



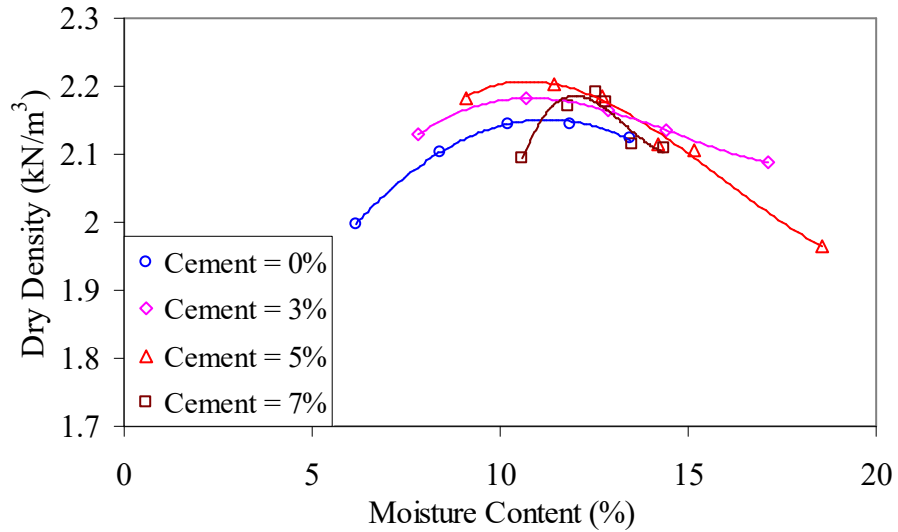
ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่นแห้ง และปริมาณความชื้น  
ที่พลังงานในการบดทับที่แตกต่างกัน (Seed and Chan, 1959)



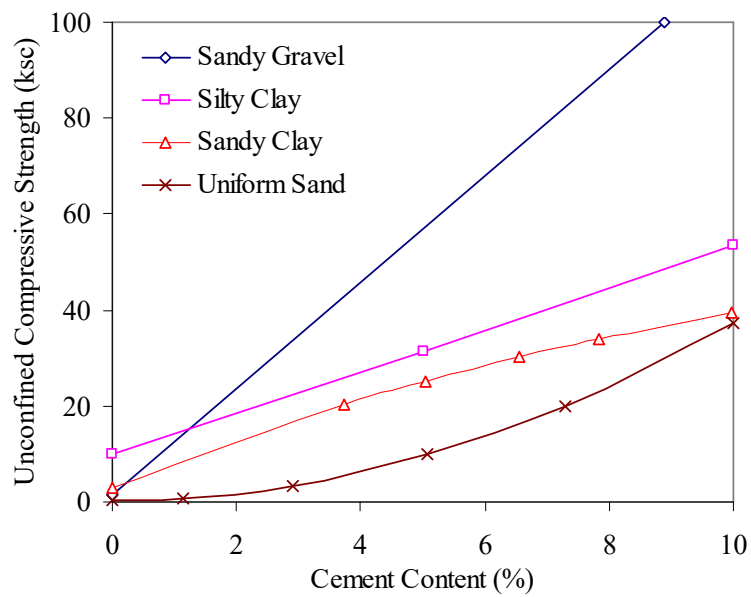
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่พลังงานในการบดทับที่แตกต่างกัน (Pandianet. al., 1997)



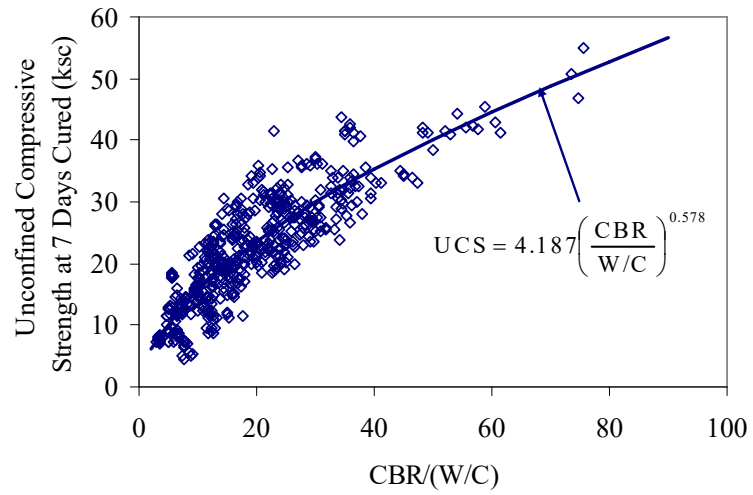
ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้ง และปริมาณความชื้นที่พลังงานในการบดทับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตรของวัสดุรวมที่มีค่าขีดจำกัดความเหลวแตกต่างกัน (Pandianet. al., 1997)



ภาพที่ 4 ผลการทดสอบการบดทับวัสดุมวลรวมแบบสูงกว่ามาตรฐาน  
(Ruenkrairegsa and Eamchoey, 1990)



ภาพที่ 5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของวัสดุงานทางดินซีเมนต์  
(Ingle and Metcalf, 1972)



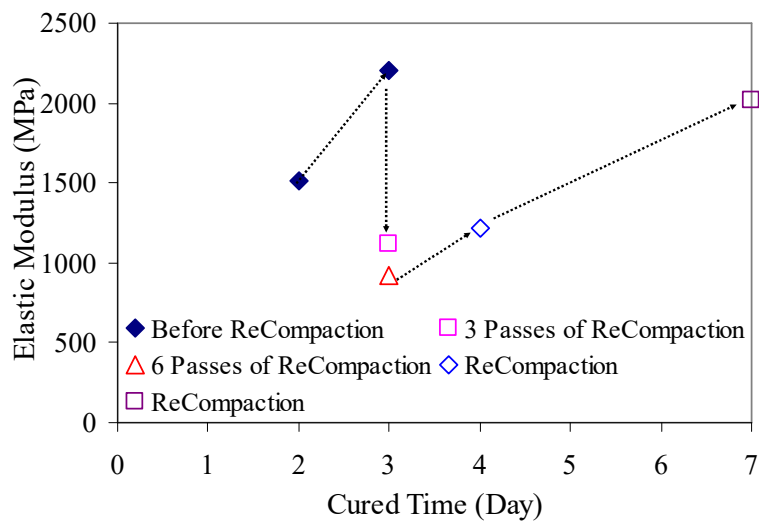
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านแรงอัดและค่า CBR/(W/C)  
(จุฑา สุนิตย์สกุล และอรรณสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช, 2550)



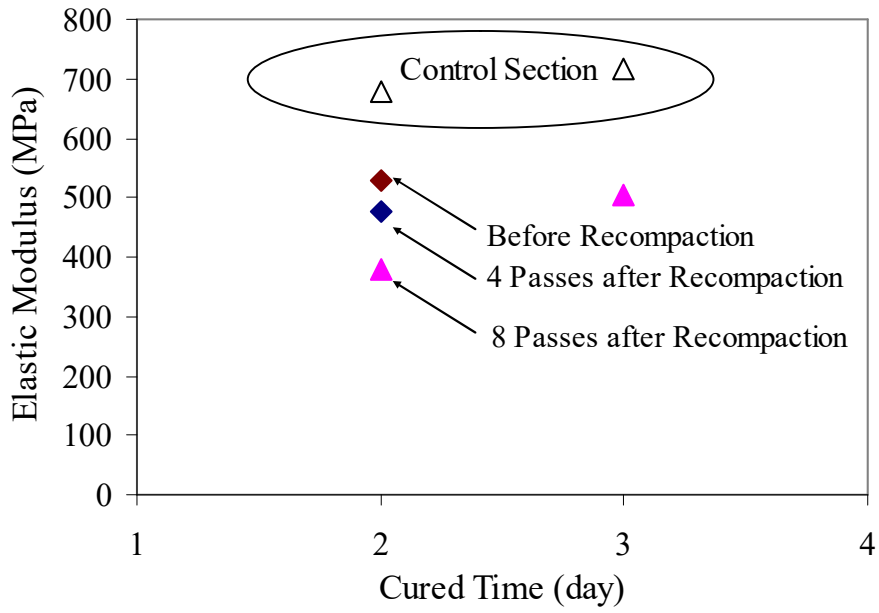
ภาพที่ 7 ภาพแสดงรอยแตกขนาดเล็กในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3510



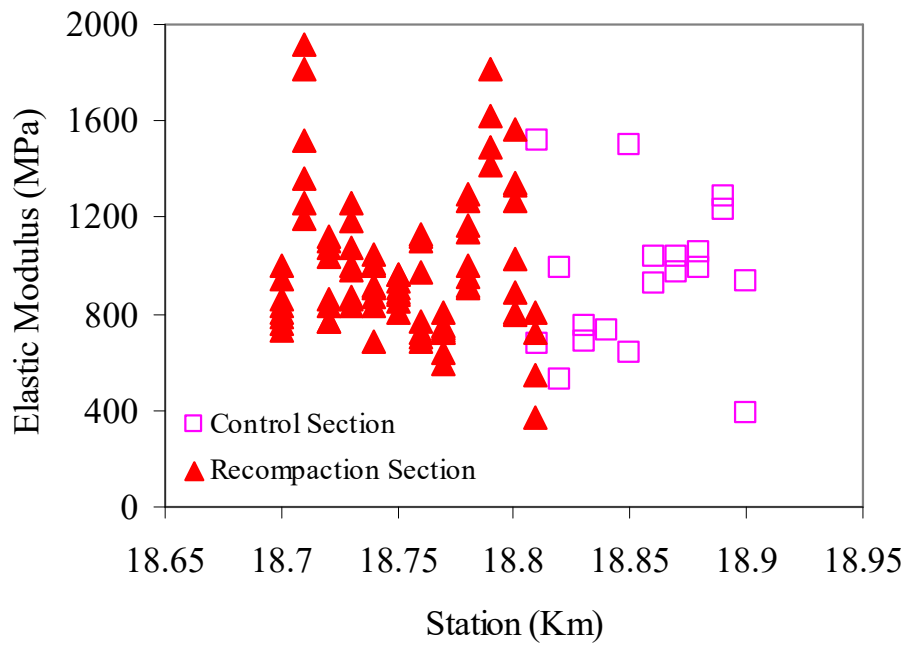
ภาพที่ 8 ภาพแสดงอุปกรณ์ Falling Deflectometer (FWD) ในระหว่างการทดสอบชั้นพื้นทางดินซีเมนต์  
โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3510



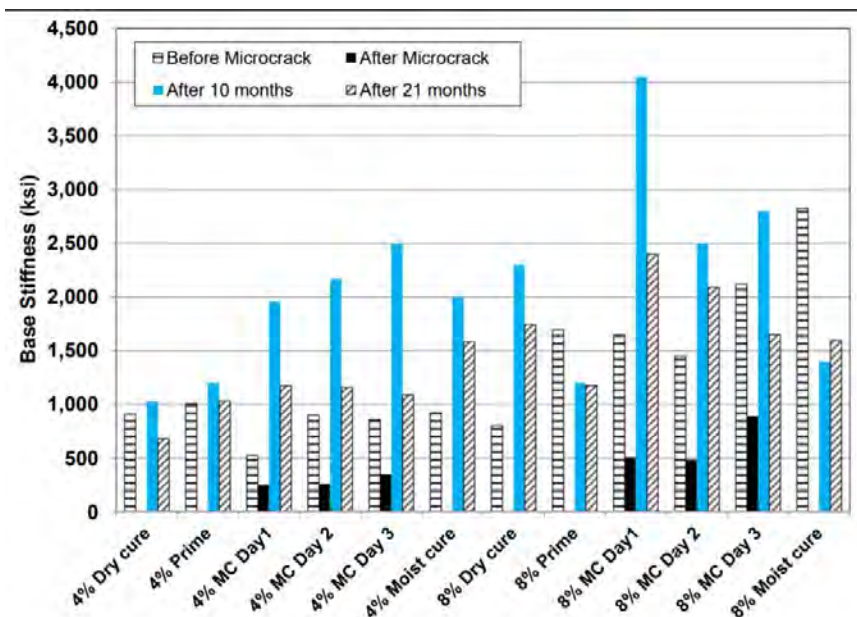
ภาพที่ 9 ค่า Modulus เกลี่ยของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 201



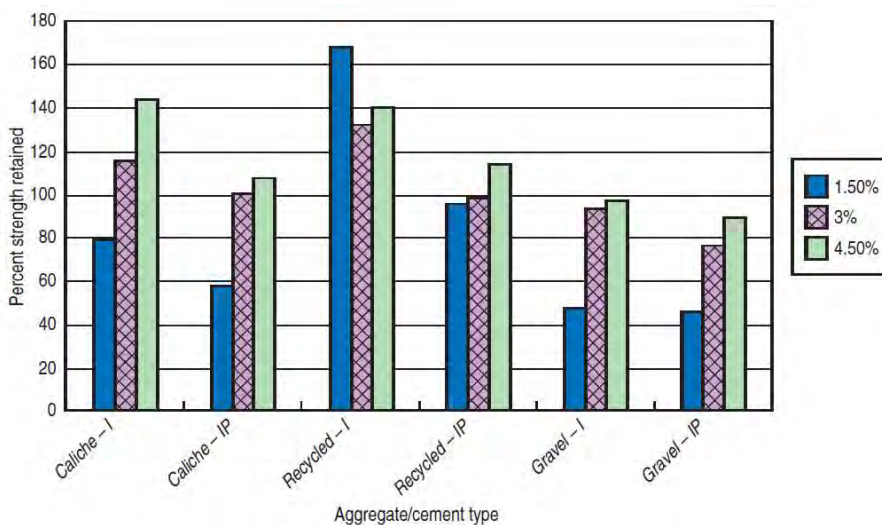
ภาพที่ 10 ค่า Modulus เฉลี่ยของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3510



ภาพที่ 11 ค่า Modulus ภายหลังการก่อสร้างของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ทางหลวงหมายเลข 3510



ภาพที่ 12 ผลการตรวจวัดค่า Stiffness ของชั้นพื้นทางมวลรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ (Louw and Jones, 2015)



ภาพที่ 13 Retained strength increase with increasing cement content. (Scullion et.al., 2005)

2.5 การศึกษา Autogenous Healing ของวัสดุหินซีเมนต์ด้วยการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดแกนเดียวที่ผ่านมาของกรมทางหลวง

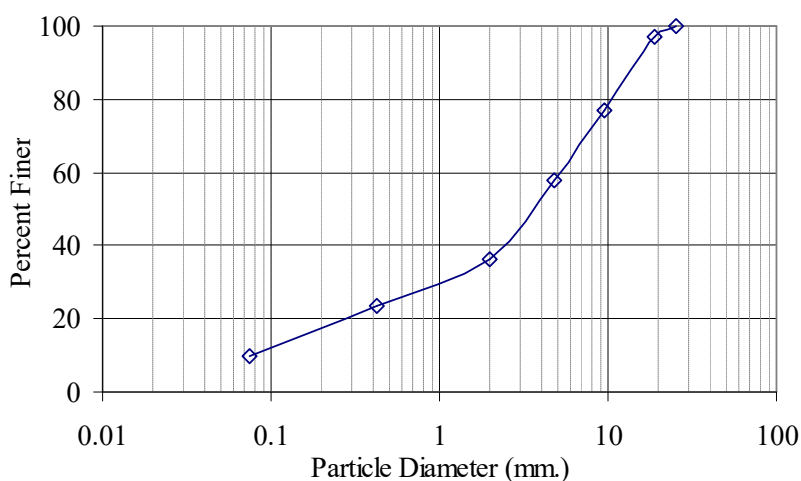
การศึกษา Autogenous Healing ด้วยการทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของกรมทางหลวงมีดังนี้

○ ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวก่อนตัวอย่างวัสดุงานทางดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นที่ทำให้เกิดความหนาแน่นสูงสุด (จากผลการทดสอบการบดทับแบบสูงกว่ามาตรฐาน) ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ และทดสอบก่อนตัวอย่าง 2, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

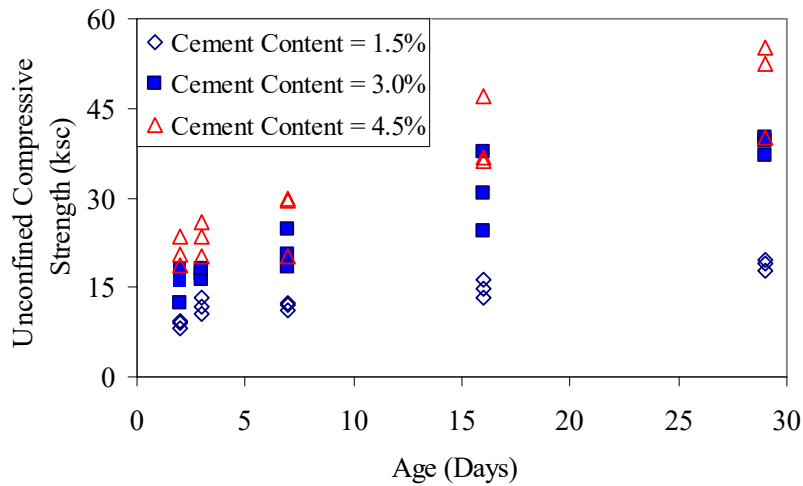
○ ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวอีกครั้งของก้อนตัวอย่างที่ได้รับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุภายหลังการบดทับต่างๆ กัน

วัสดุผสมรวมที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นวัสดุจากพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ค่าขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) มีค่า 14 เปอร์เซ็นต์ ค่า Plastic Limit มีค่า 8 เปอร์เซ็นต์ ขนาดคละ (Gradation) ดังแสดงในภาพที่ 14 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่ทำให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดจากการทดสอบการบดทับแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่า 2.216 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และ 9.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่า CBR 28 เปอร์เซ็นต์

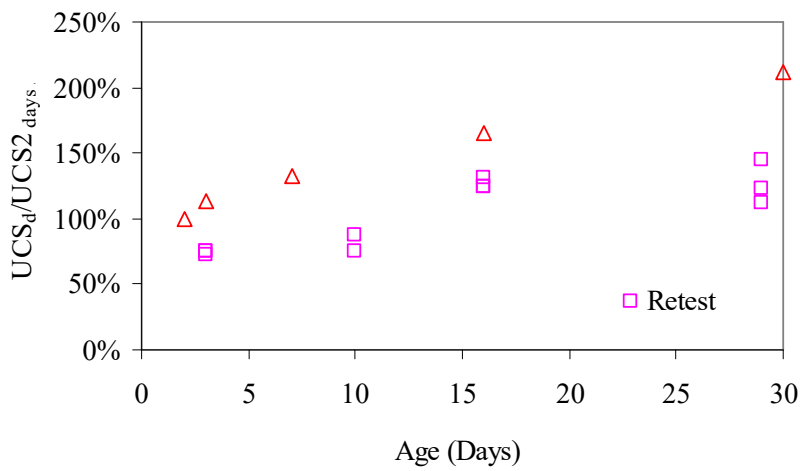
ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดก่อนตัวอย่างวัสดุงานทางดินซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้นที่ทำให้เกิดความหนาแน่นสูงสุดที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 1.5, 3.0 และ 4.5 ที่อายุก่อนตัวอย่าง 1, 2, 3, 7, 14 และ 28 วัน แสดงในภาพที่ 14 และส่วนหนึ่งของผลทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวอีกครั้งของก้อนตัวอย่างที่ได้รับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 2 3 และ 7 วัน แสดงในภาพที่ 15 ถึงภาพที่ 18



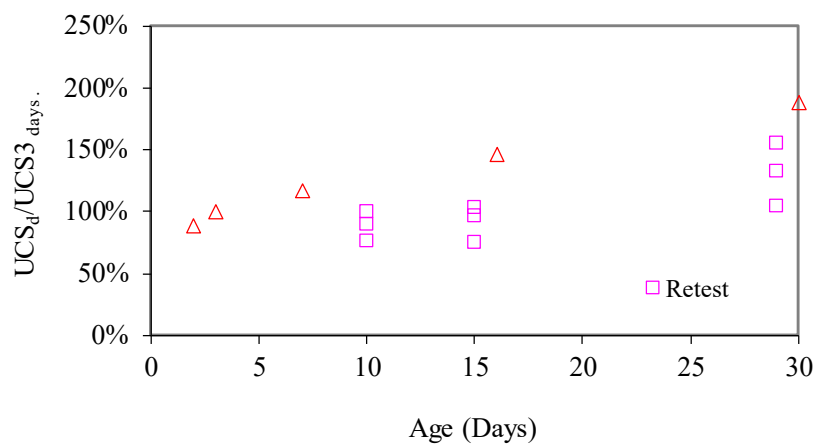
ภาพที่ 14 ขนาดคละของวัสดุผสมรวมจากพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



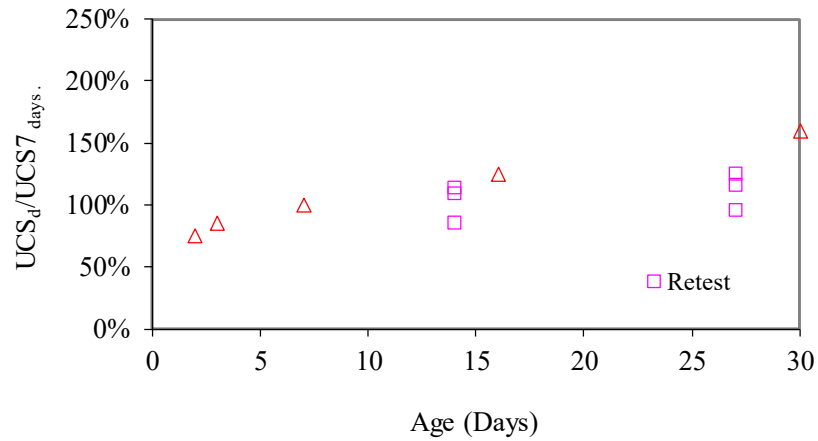
ภาพที่ 15 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์



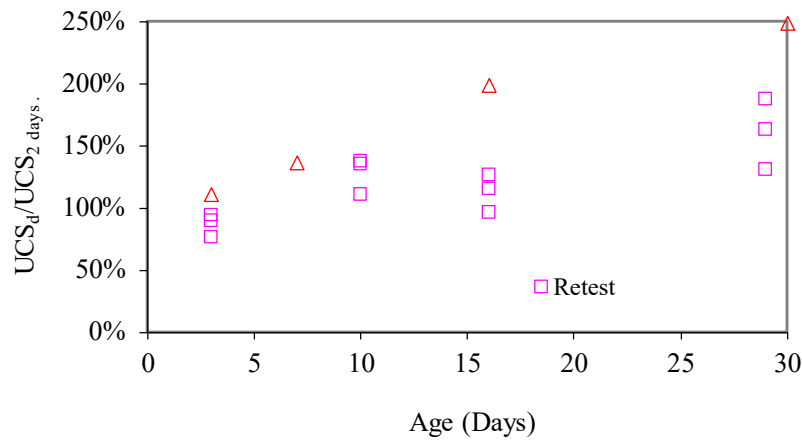
ภาพที่ 16.1 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 2 วัน  
ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 1.5%



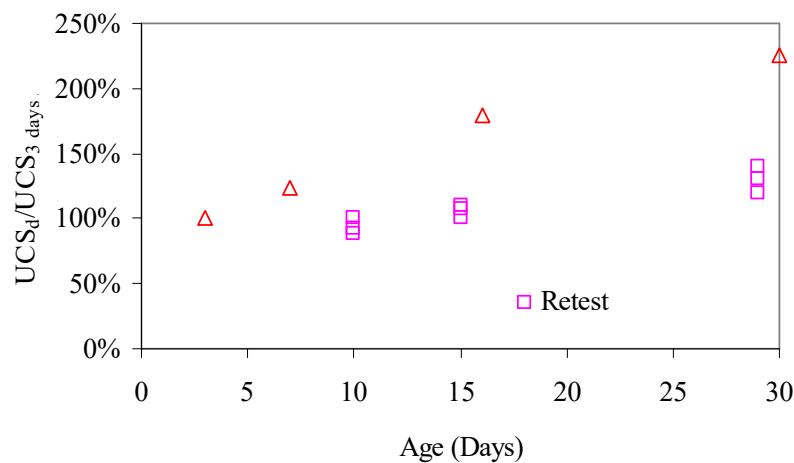
ภาพที่ 16.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 3 วัน  
ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 1.5%



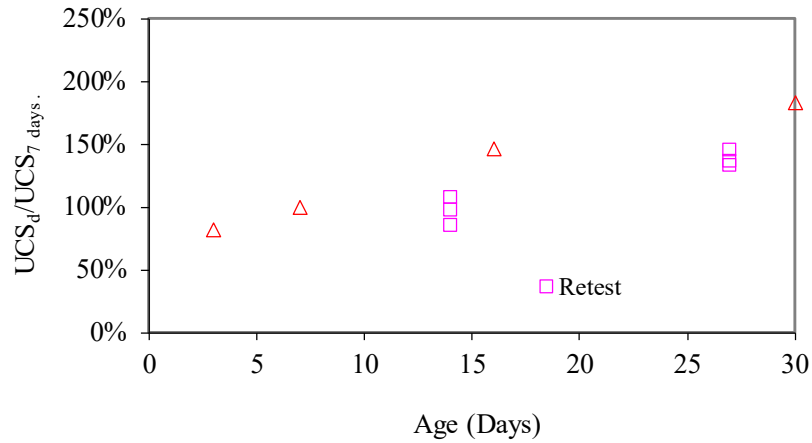
ภาพที่ 16.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน  
ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 1.5%



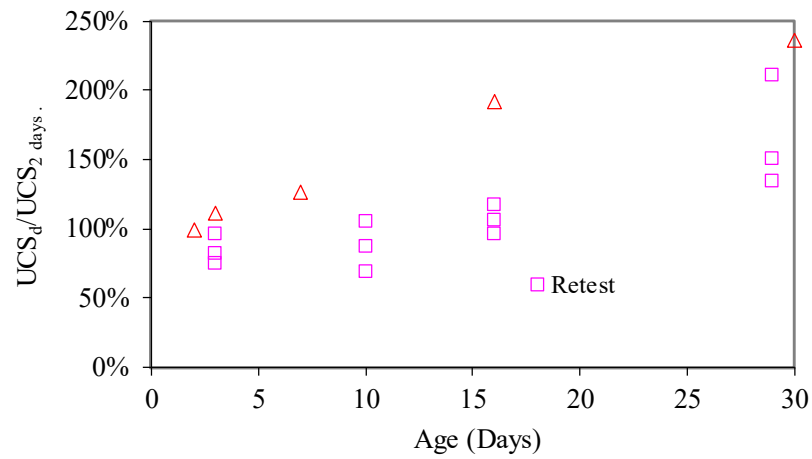
ภาพที่ 17.1 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 2 วัน  
ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 3%



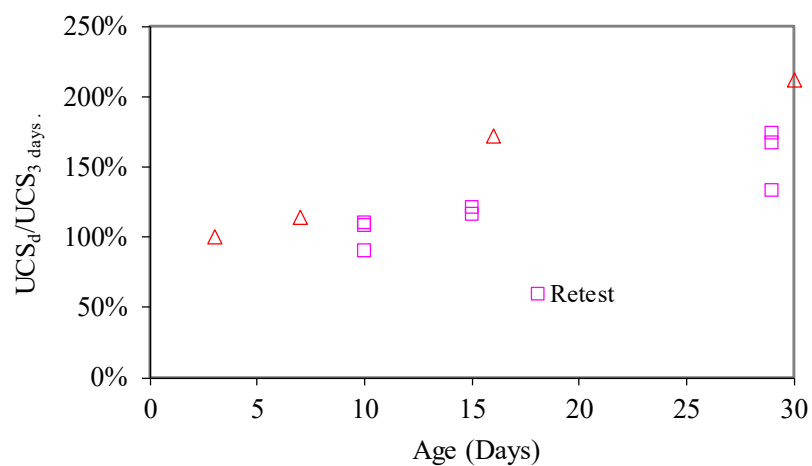
ภาพที่ 17.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 3 วัน  
ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 3%



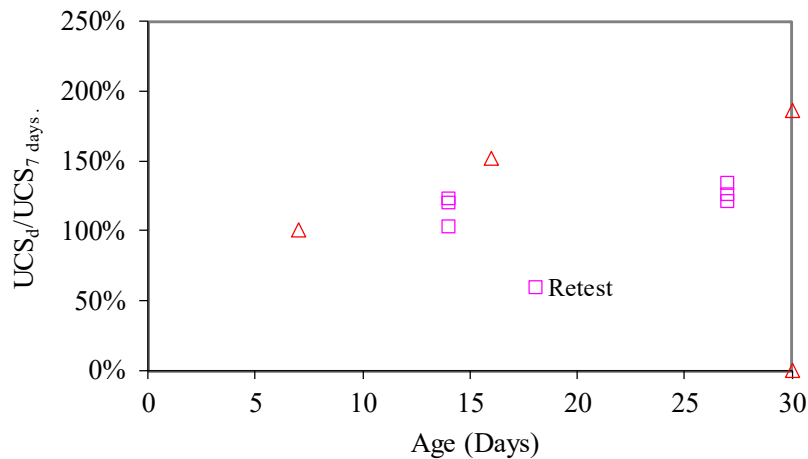
ภาพที่ 17.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน  
ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 3%



ภาพที่ 18.1 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 2 วัน  
ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 4.5%



ภาพที่ 18.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 3 วัน  
ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 4.5%

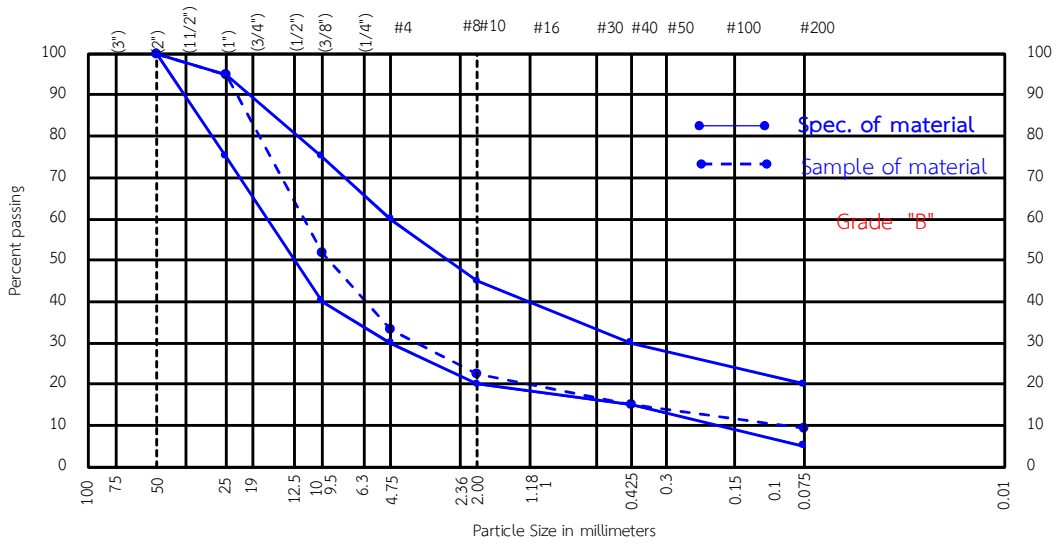


ภาพที่ 18.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมดินซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน  
ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 4.5%

## 2.6 การศึกษา Autogenous Healing ของวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ของ กรมทางหลวง

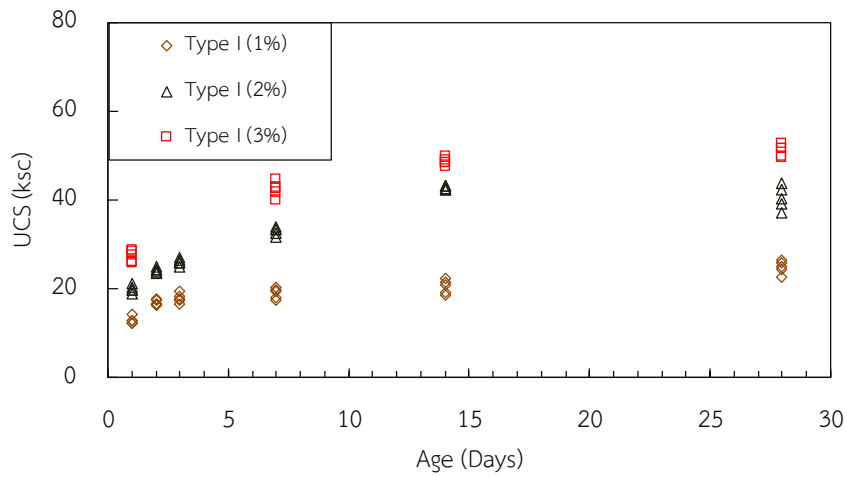
วัสดุมวลรวมหินคลุกที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นวัสดุจากพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีขนาดคละ (Gradation) ดังแสดงในภาพที่ 19 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่ทำให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดจากการทดสอบการบดทับแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่า 2.253 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และ 6.1 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และมีค่า CBR 88.0 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดก้อนตัวอย่างวัสดุงานทางดินซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้นที่ทำให้เกิดความหนาแน่นสูงสุดที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 1.5, 3.0 และ 4.5 ที่อายุก้อนตัวอย่าง 1, 2, 3, 7, 14 และ 28 วัน แสดงอยู่ในภาพที่ 14 และส่วนหนึ่งของผลทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวอีกครั้งของก้อนตัวอย่างที่ได้รับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 2, 3 และ 7 วัน แสดงอยู่ในภาพที่ 20 ถึงภาพที่ 22

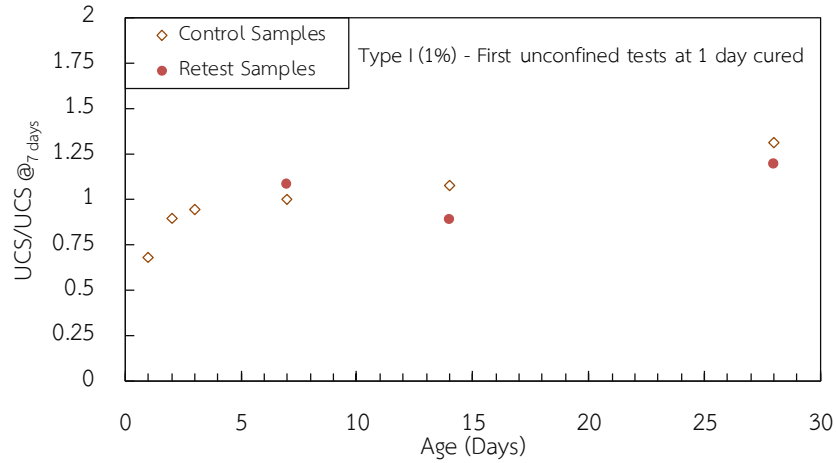


GRAVEL	ASTM	SOIL CLASS	SAND			SILT	CLAY
			COARSE	MEDIUM	FINE		

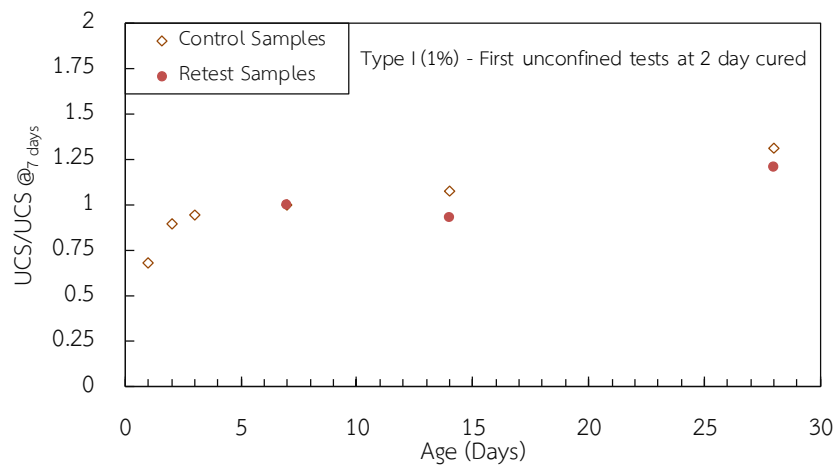
ภาพที่ 19 ขนาดคละของวัสดุผสมรวมจากพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



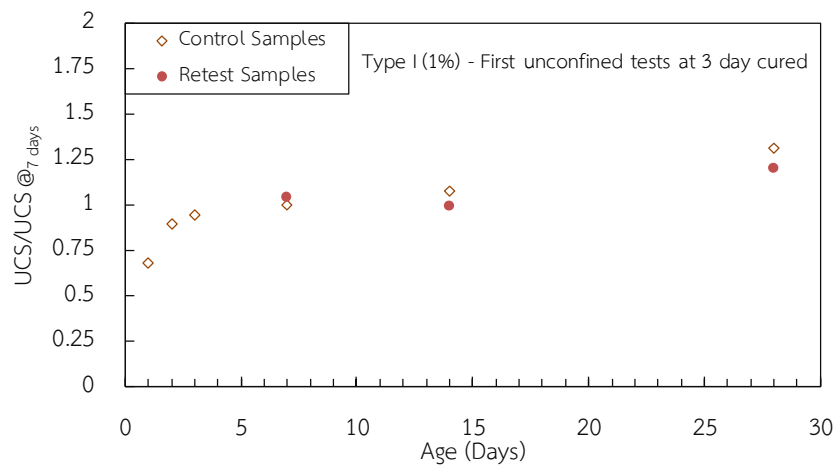
ภาพที่ 20.1 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุผสมรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์



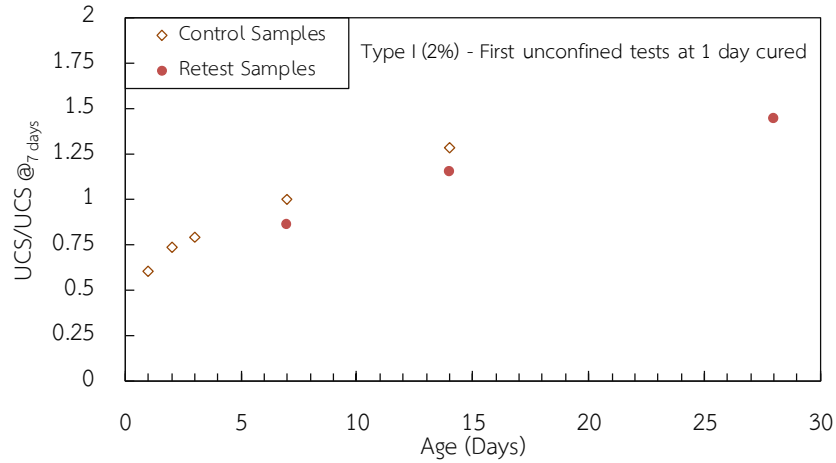
ภาพที่ 20.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์  
ที่อายุ 1 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 1 เปอร์เซ็นต์



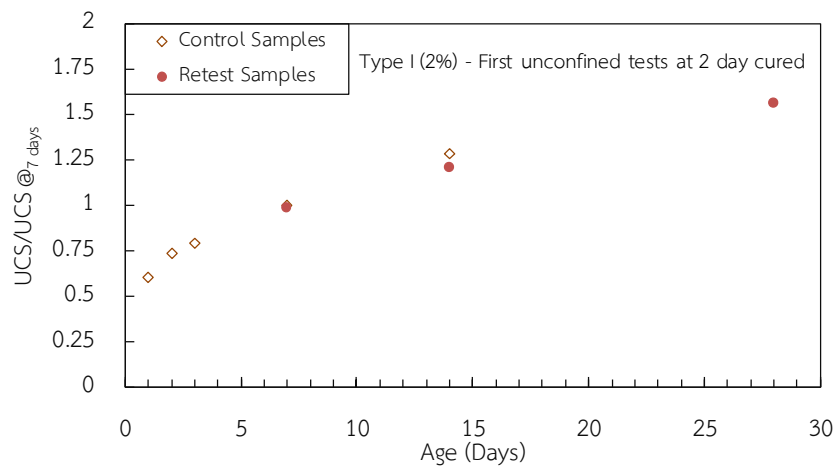
ภาพที่ 20.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์  
ที่อายุ 2 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 1 เปอร์เซ็นต์



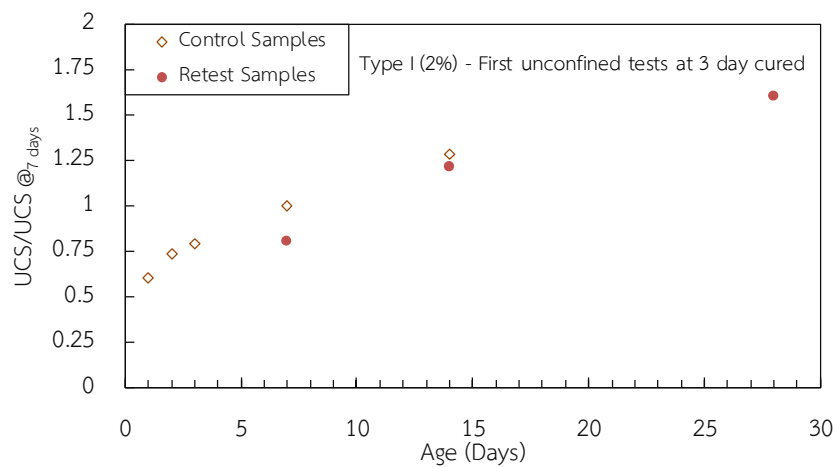
ภาพที่ 20.4 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์  
ที่อายุ 3 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 1 เปอร์เซ็นต์



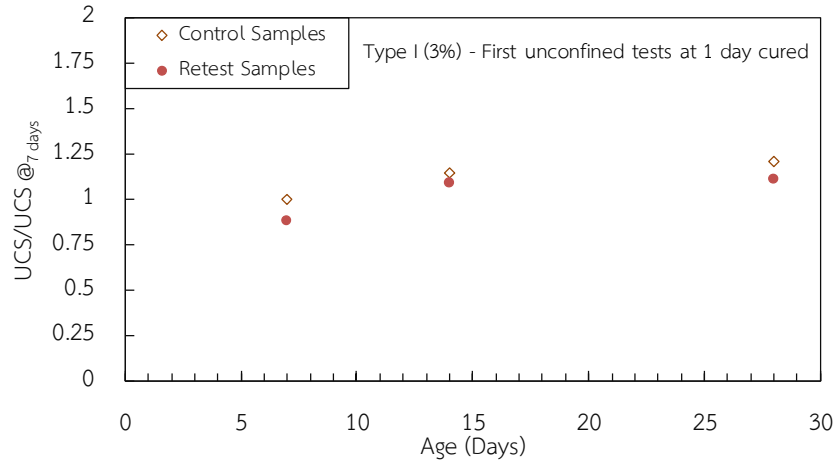
ภาพที่ 21.1 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์  
ที่อายุ 1 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 2 เปอร์เซ็นต์



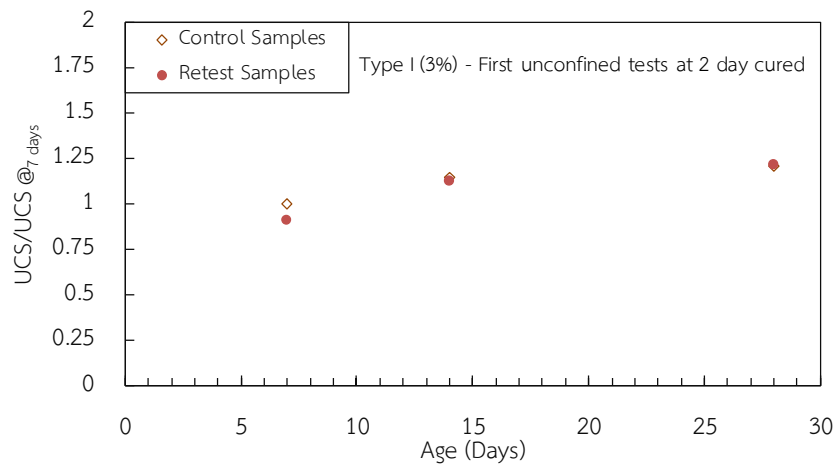
ภาพที่ 21.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์  
ที่อายุ 2 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 2 เปอร์เซ็นต์



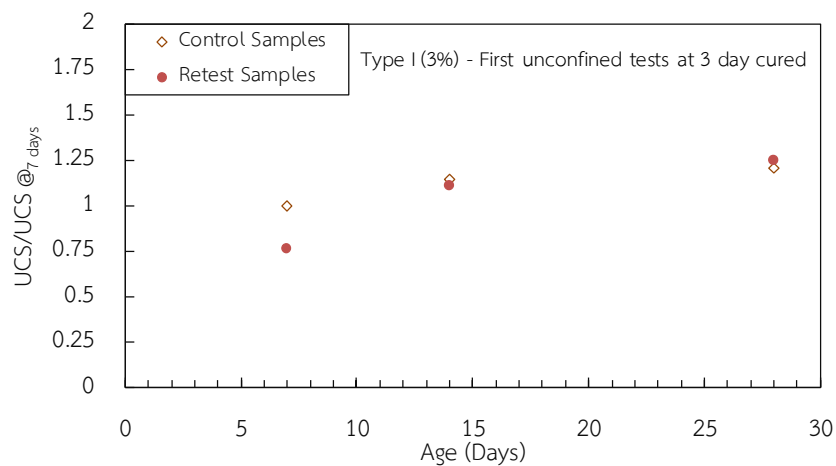
ภาพที่ 21.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์  
ที่อายุ 3 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 2 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 22.1 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์  
ที่อายุ 1 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 22.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์  
ที่อายุ 2 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 22.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์  
ที่อายุ 3 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์

## บทที่ 3

### การศึกษา Autogenous Healing ของ Cement Treated Base

#### 3. สรุปสาระสำคัญ ขั้นตอนการดำเนินการ และเป้าหมายของงาน

##### 3.1 สรุปสาระสำคัญ

ในกรมทางหลวง การปรับปรุงคุณภาพวัสดุมวลรวมด้วยปูนซีเมนต์ มีใช้มานานมากกว่า 50 ปี โดยในช่วงแรกใช้เพื่อเป็นวัสดุพื้นทางเทียบเท่าวัสดุพื้นทางหินคลุกในพื้นที่ขาดแคลนวัสดุหินคลุก ต่อมาพบรอยแตกสะท้อนจากการแตกร้าวของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์สู่ชั้นพื้นทางสู่ชั้นผิวทาง (Reflective Cracking) กรมทางหลวงจึงได้ยุติการใช้งานพื้นทางดินซีเมนต์ในช่วงปี 2514 ถึงปี พ.ศ. 2525 วิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวนั้น Ruenkraitersa (1994) ได้แนะนำให้เปิดการจราจรภายหลังการก่อสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ก่อนการปูผิวทางแอสฟัลต์และให้ยี่ดระยะเวลาการปูผิวทางแอสฟัลต์

ต่อมากรมทางหลวง ได้ดำเนินการประยุกต์การใช้หินคลุกซีเมนต์ คือวัสดุมวลหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ โดยมีค่ากำลังต้านทางแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 7 วันต้องไม่น้อยกว่า 24.5 ksc และปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องไม่น้อยกว่า 1 แต่ไม่มากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผู้ขอรับการประเมินคาดว่าจะเพื่อป้องกันการแตกร้าวที่อาจจะเกิดในชั้นพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ (Cement Modified Crushed Rock Base : CMB) แต่การใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ชั้นพื้นทาง มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นสูงขึ้น ถนนสามารถรองรับการจราจรได้ปริมาณมากขึ้นและมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น โดยมีมูลค่าก่อสร้างเพิ่มขึ้นไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับราคาก่อสร้างชั้นพื้นทางหินคลุก อย่างไรก็ตามในต่างประเทศมีการใช้ชั้นพื้นทางที่มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดไม่น้อยกว่า 40 ksc หรือที่เรียกว่า Cement Treated Base โดยมีราคาเพิ่มขึ้นจากชั้นพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ไม่มากแต่สามารถรองรับปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งภาพที่ 23 แสดงให้เห็นถึงค่าความเครียดแรงดึงใต้ชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตบนชั้นพื้นทาง CTB มีค่าลดลงมากกว่าของชั้น CMB จึงเป็นการคุ้มค่าในการลงทุน

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ได้ดำเนินการออกแบบโครงสร้างชั้นทางที่ใช้ชั้น CTB เป็นพื้นทางในโครงการบูรณะก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 344 สาย ตอน อ.บ้านบึง – บรรจบทางหลวงหมายเลข 331 (แยกหนองปรือ) รวมสะพานลอยข้ามแยกหนองซาก ระหว่าง กม.24+500 – 25+000 เป็นสายแรกของกรมทางหลวง โดยได้จัดทำข้อกำหนดพิเศษพื้นทางซีทีบี (Cement Treated Base) ตามที่แสดงในภาคผนวก ค1 โดยได้นำแนวทางการแก้ไขการแตกสะท้อนบนชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งเป็นความกังวลของบุคลากรกรมทางหลวง ดังนี้ (1) ภายหลังที่แอสฟัลต์ Prime Coat แห้ง ให้ทำการเปิดการจราจรให้รถของผู้รับจ้างที่ใช้ในการก่อสร้างใช้สัญจร เป็นระยะเวลาพอสมควร (2) หลังจากเปิดการจราจร หากพบรอยแตกให้เปิดการจราจรทิ้งไว้จนรอยแตกไม่เกิดขึ้นเพิ่มเติม แล้วทำการลาดแอสฟัลต์อีกรอบหนึ่ง แล้วทิ้งไว้ให้แห้งก่อนทำการปูผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ภายหลังได้มีการออกแบบโครงสร้างชั้นทาง โดยใช้พื้นทาง CTB อีกหลายสาย แต่โดยมากจะได้รับการเปลี่ยนแปลงเป็นพื้นทางหินคลุกซีเมนต์

เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการใช้งาน Cement Treated Base ของบุคลากรกรมทางหลวง สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ จึงได้ดำเนินจัดทำมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ (Cement Treated Base : CTB) .ในปีงบประมาณ 2561 โดยท่าน อธิบดีกรมทางหลวงได้ลงนามในมาตรฐานในปีงบประมาณ 2566

### 3.2 โครงการก่อสร้างที่ทำการศึกษาศึกษา Autogenous Healing

การทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Microcracking) บนชั้นพื้นทางซีทีบี สามารถทำให้เกิดได้ด้วยการใช้รถบดล้อเหล็กแบบสันสะเทือนที่อายุชั้น CTB 1 ถึง 3 วัน โดยในการประยุกต์ใช้นี้ จะใช้ Falling Weight Deflector (FWD)ทำการตรวจวัดค่าการยุบตัว เพื่อใช้ในการประมาณค่า Elastic Modulus ของชั้น CTB ซึ่ง จะทำการตรวจวัดทุกรอบภายหลังการบดทับทุก 1 รอบการบดทับ ซึ่งหมายถึงรถบดเคลื่อนไปและกลับ การศึกษาศึกษา Autogenous Healing ของ Cement Treated Base จากการประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking นี้จะใช้เป็นฐานข้อมูลในการจัดทำมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ (Cement Treated Base : CTB)ซึ่งได้ดำเนินการ ณ โครงการก่อสร้างจำนวน 2 โครงการดังนี้

#### 3.2.1 การศึกษาศึกษา Autogenous Healing จากการใช้ Microcracking บนชั้น CTB โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 206 ตอน อ.พิมาย - บ..หินดาด

โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 206 ตอน อ.พิมาย - บ..หินดาด เป็นการขยายช่องจราจรจาก 2 ช่องจราจรเป็น 4 ช่องจราจร เกาะกลางแบบยก ในตอนแรกกรมทางหลวง ได้ออกแบบเป็นถนนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต แต่ต่อมาได้ปรับเปลี่ยนรูปแบบเป็นถนนแอสฟัลต์คอนกรีตตามที่สำนักสำรวจและออกแบบต้องการให้เปลี่ยนแปลงและได้ออกแบบใหม่เป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีชั้นพื้นทางเป็น CTB ความหนา 20 เซนติเมตร ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 7 วัน ไม่น้อยกว่า 40 ksc โดยมีคุณสมบัติตามข้อกำหนดพิเศษ ซึ่งได้จัดทำรูปตัดแนะนำโครงสร้างชั้นทางตามภาพที่ 24

หินคลุกที่นำมาใช้ในการก่อสร้างในโครงการฯ นี้ มีคุณสมบัติตามตารางที่ 1 การออกแบบส่วนผสมได้ผลการออกแบบตามภาพที่ 24 โดยกำหนดให้ปริมาณปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ใช้ในโครงการฯ นี้ต้องไม่น้อยกว่า 5.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อมวลมวลรวมแห้ง

#### 3.2.2 การศึกษาศึกษา Autogenous Healing จากการใช้ Microcracking บนชั้น CTB โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3376 ตอน อ.บ้านฉาง - ถนนซอย 13 นิคมสร้างตนเอง จ.ระยอง

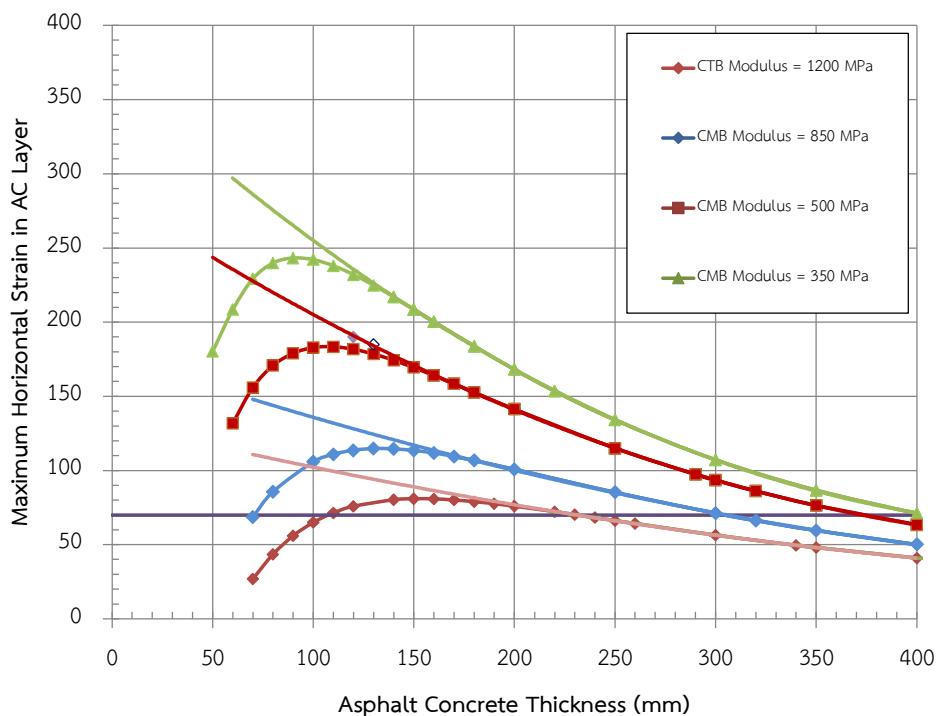
โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3376 ตอน อ.บ้านฉาง - ถนนซอย 13 นิคมสร้างตนเอง จ.ระยอง เป็นการขยายช่องจราจรจาก 2 ช่องจราจรเป็น 4 ช่องจราจร เกาะกลางแบบยก กรมทางหลวง ได้ออกแบบชั้นพื้นทางเป็น Cement Treated Base ความหนา 20 เซนติเมตร ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 7 วัน ไม่น้อยกว่า 40 ksc. โดยภาพที่ 25 แสดงแบบแนะนำโครงสร้างชั้นทาง

หินคลุกที่นำมาใช้ในการก่อสร้างในโครงการฯ นี้ มีคุณสมบัติตามตารางที่ 1 การออกแบบส่วนผสมได้ผลการออกแบบตามภาพที่ 24 ปริมาณปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ใช้ในโครงการฯ นี้ต้องไม่น้อยกว่า 45 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อมวลมวลรวมแห้ง

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการ

ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา Augenous Healing วัสดุ CTB มีดังต่อไปนี้

1. ดำเนินการ Microcracking บนชั้น CTBแปลงทดสอบโครงการก่อสร้างฯ ที่มีอายุ 1 วัน ถึง 3 วัน จำนวน 1 ถึง 3 รอบ
2. ดำเนินการสำรวจสภาพรอยแตกชั้น CTB และดำเนินการทดสอบและแปรผลการทดสอบ FWD ภายหลังจากบดทับด้วยรถบดล้อเหล็กแบบสันสะเทือนทุกรอบการบดทับ
3. ดำเนินการ Microcracking จนผลการทดสอบ FWD ให้ค่าโมดูลัสชั้น CTB ลดลงมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์
4. ดำเนินการสรุปผลดำเนินการ Microcracking
5. จัดทำการแก้ไขร่างมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ (Cement Treated Base : CTB)



ภาพที่ 23 ผลการวิเคราะห์ความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงดิ่งใต้ผิวทางแอสฟัลต์สูงที่สุด



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

#### 4.1 ผลการดำเนินงาน Autogenous Healing โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 206

การดำเนินการประยุกต์ใช้ Microcracking บนชั้น CTB ในโครงการฯ โดยการใช้อุณหภูมิเหล็กแบบ สันสะท้อนบดทับภายหลังจากการก่อสร้างชั้น CTB แล้ว 1 ถึง 3 วัน ตามที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดพิเศษ โดยใช้ CTB กม. 8+400 – 8+500 เป็นพื้นที่ควบคุม (Control Section) และได้ดำเนินการ Microcracking ภายหลังจากการก่อสร้างชั้น CTB แล้วเสร็จ 1 วัน ที่ กม. 8+500 – 8+610 และภายหลังจากการก่อสร้างชั้น CTB แล้วเสร็จ 2 วัน ที่ กม. 8+610 – 8+690

การบดทับอีกครั้งภายหลังจากการก่อสร้างชั้น CTB แล้วเสร็จเป็นระยะเวลา 1 วัน และ 2 วันตามลำดับ จนเกิดรอยแตกขนาดเล็กตามภาพที่ 27 โดยค่าการยุบตัวและค่า Modulus ของชั้น CTB จากการทดสอบ FWD แสดงในภาพที่ 26 และ 27 ซึ่งค่าการทรุดตัวบริเวณที่ทดสอบ FWD มีค่าเพิ่มขึ้นและค่า Elastic Modulus มีค่าลดลงของชั้น CTB หลังจากการบดทับภายหลังจากการก่อสร้าง

ผลการทำการทดสอบ FWD และค่าการยุบตัวและค่า Modulus ของชั้น CTB จากการทดสอบ FWD ภายหลังจาก Microcracking แล้วเสร็จระยะเวลา 5 วัน แสดงในภาพที่ 28 และ 29 ตามลำดับ ซึ่งภายหลังจากการประยุกต์วิธีการ Microcracking พบว่าค่า Modulus ของชั้น CTB มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าการทรุดตัวจุดทดสอบ FWD มีค่าลดลง

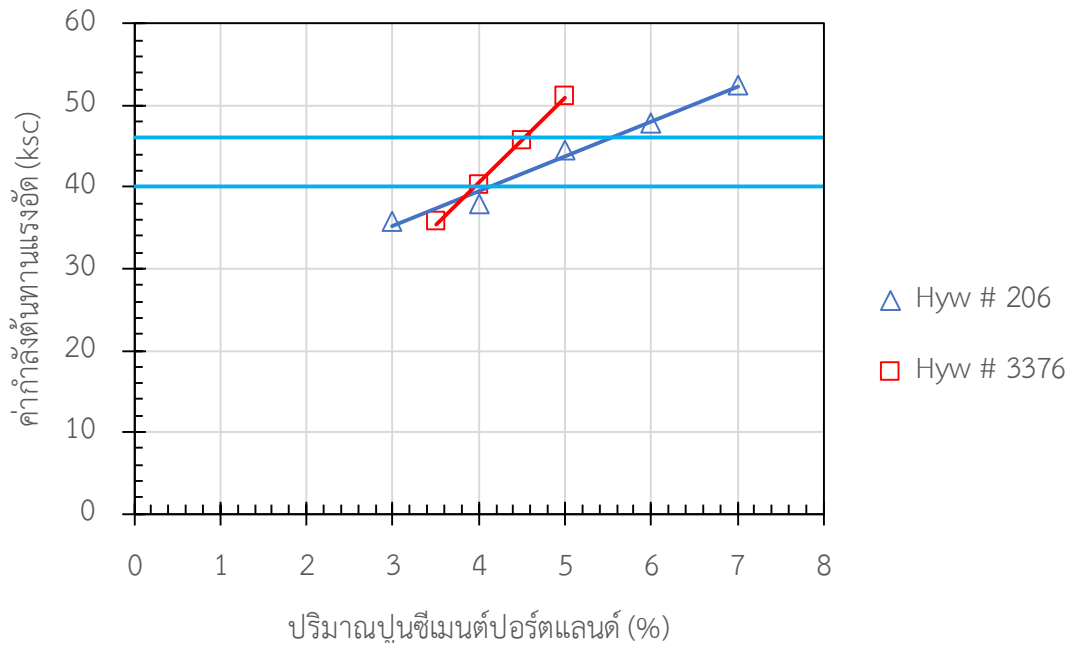
#### 4.2 ผลการดำเนินงาน Autogenous Healing โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3376

การดำเนินการประยุกต์ใช้ Microcracking บนชั้น CTB ในโครงการฯ โดยการใช้อุณหภูมิเหล็กแบบ สันสะท้อนบดทับจนเกิดรอยแตกขนาดเล็กในชั้น CTB ตามภาพที่ 30 ภายหลังจากการก่อสร้างชั้น CTB แล้ว เสร็จระยะเวลา 2 วัน โดยได้ดำเนินการที่ กม. 6+940 – กม. 7+080 ซึ่งชั้น CTB บริเวณ กม. 6+820 – 6+940 เป็นพื้นที่ควบคุม (Control Section) การใช้ FWD เป็นเครื่องในการตรวจสอบค่า Modulus ของชั้น CTB ที่ผ่านการบดทับที่จำนวนรอบต่างๆ ค่าการยุบตัวและค่า Modulus ของชั้น CTB

ผลการทดสอบ FWD แสดงในภาพที่ 31 และ ภาพที่ 32 ภายหลังจากการประยุกต์ใช้ Microcracking ได้ทำการทดสอบ FWD และค่าการยุบตัวและค่า Modulus ของชั้น CTB จากการทดสอบ FWD ซึ่งค่าการ ทรุดตัวบริเวณที่ทดสอบ FWD มีค่าเพิ่มขึ้นและค่า Elastic Modulus มีค่าลดลงของชั้น CTB หลังจากการบด ทับภายหลังจากการก่อสร้างเช่นเดียวกันกับพื้นที่ทำการ Microcracking โครงการตามข้อ 4.4

ภายหลังจากการประยุกต์วิธีการ Microcracking เป็นระยะเวลา 5 วันพบว่าค่า Modulus ของชั้น CTB มี ค่าเพิ่มขึ้นและค่าการยุบตัวมีค่าลดลง ทั้งนี้ผลการทดสอบ FWD ในวันที่ 2 หลังการก่อสร้างชั้น CTB แล้วเสร็จ ก่อนการ Microcracking พบว่าชั้น CTB บริเวณที่ทำให้เกิด Microcracks นั้นมีความแข็งแรงน้อยกว่า

Control Section เนื่องจากในขณะที่ทำการทดสอบ FWD ได้มีการบ่มชั้น CTB ด้วยน้ำ และแห้งช้ากว่าพื้นที่ Control Section ดังแสดงในภาพที่ 28 ทำให้ชั้น CTB มีความชื้นมากกว่า ส่งผลให้ค่าการทรุดตัวจากการทดสอบ FWD จึงสูงกว่าบริเวณที่ความชื้นต่ำกว่า



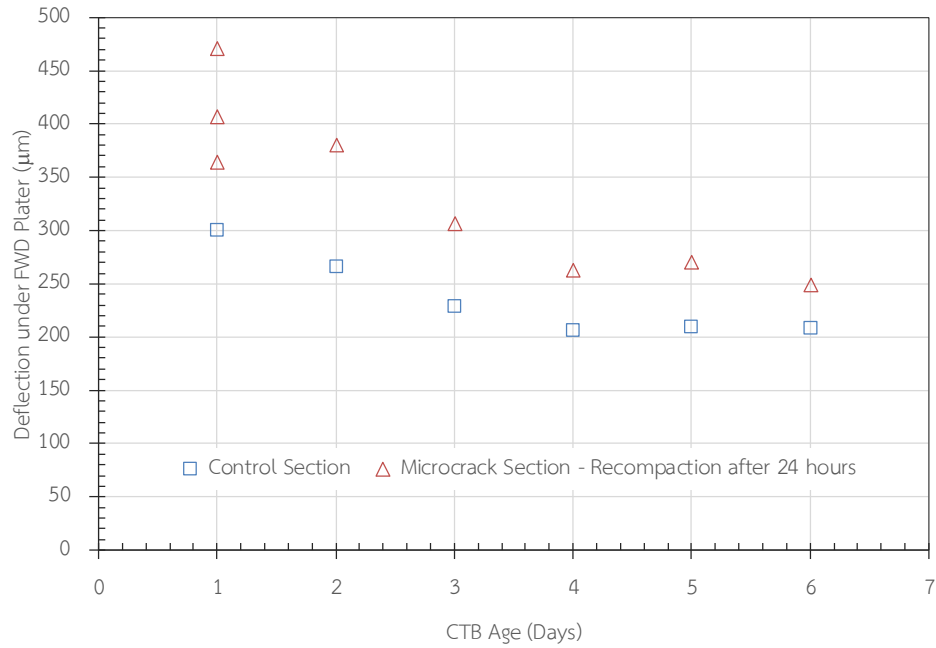
ภาพที่ 26 ภาพแสดงผลการออกแบบส่วนผสม Cement Treated Base



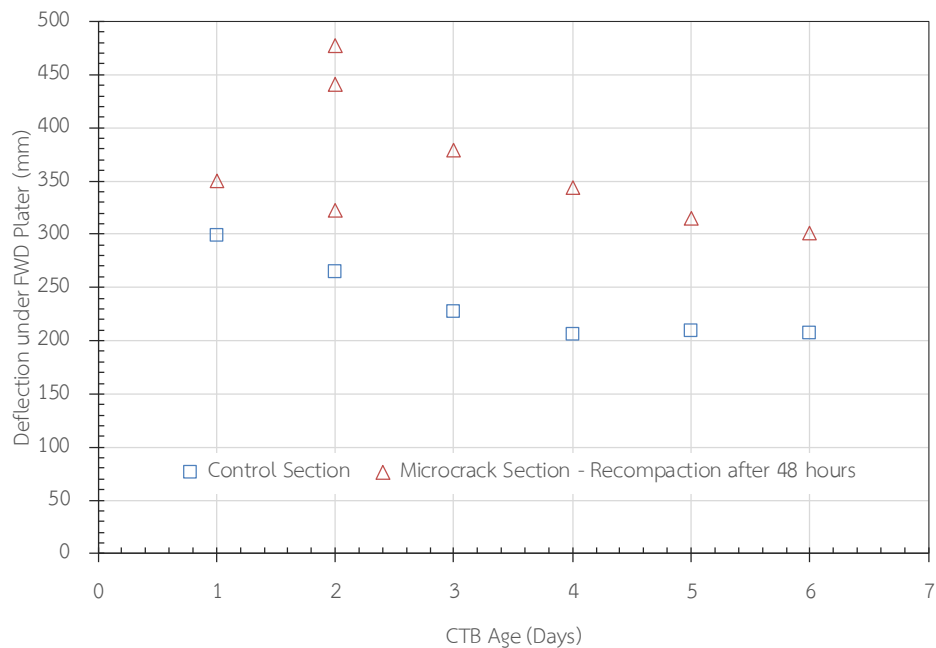
ภาพที่ 27 ภาพแสดงรอยแตกขนาดเล็กบนชั้น CTB ที่เกิดขึ้นจากการ Microcracking ด้วยรถดล้อเหล็กแบบสันสะเทือน

ตารางที่ 1 ตารางแสดงคุณสมบัติวัสดุหินคลุกที่ใช้ในการก่อสร้างชั้น Cement Treated Base

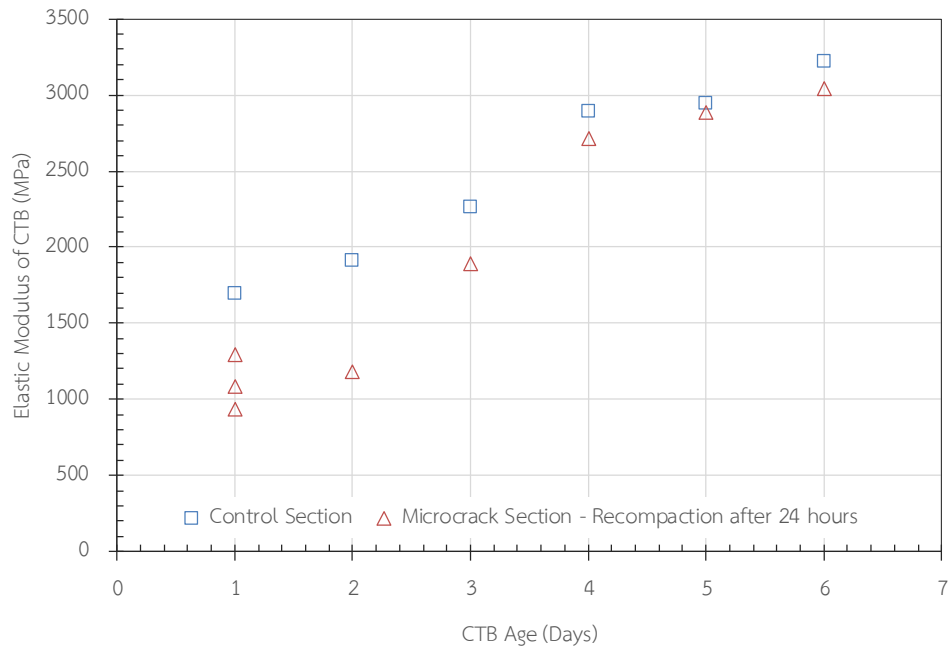
คุณสมบัติ		โครงการ ทางหลวงหมายเลข ๒๐๖	โครงการ ทางหลวงหมายเลข ๓๓๗๖
ชนิดของมวลรวม		Basalt	Limestone
Gradation (%Passing Sieve)	๕๐.๐ mm.	๑๐๐.๐	๑๐๐.๐
	๒๕.๐ mm.	๙๗.๕	๙๑.๒
	๑๙.๐ mm.	๘๗.๕	๘๐.๓
	๙.๕ mm.	๖๙.๓	๕๕.๒
	#๔	๕๖.๖	๓๘.๖
	#๑๐	๓๘.๑	๒๘.๕
	#๔๐	๑๘.๕	๑๗.๔
	#๒๐๐	๑๐.๘	๑๒.๑
Bulk Specific Gravity (SSD: g/cc)		๒.๖๔๕	๒.๗๑
Water Absorption (%)		๒.๒๐๒	๐.๔๗๗
LAA (%)		๒๔.๗	๒๒.๓
Modified Compaction Test Optimum Moisture Content (%)		๘.๑	๖.๐
Maximum Dry Density (g/cc)		๒.๒๔๘	๒.๓๔๒
CBR (%) @๙๕% Maximum Density (Modified Compaction Proctor)		๘๑.๗	๙๐.๒



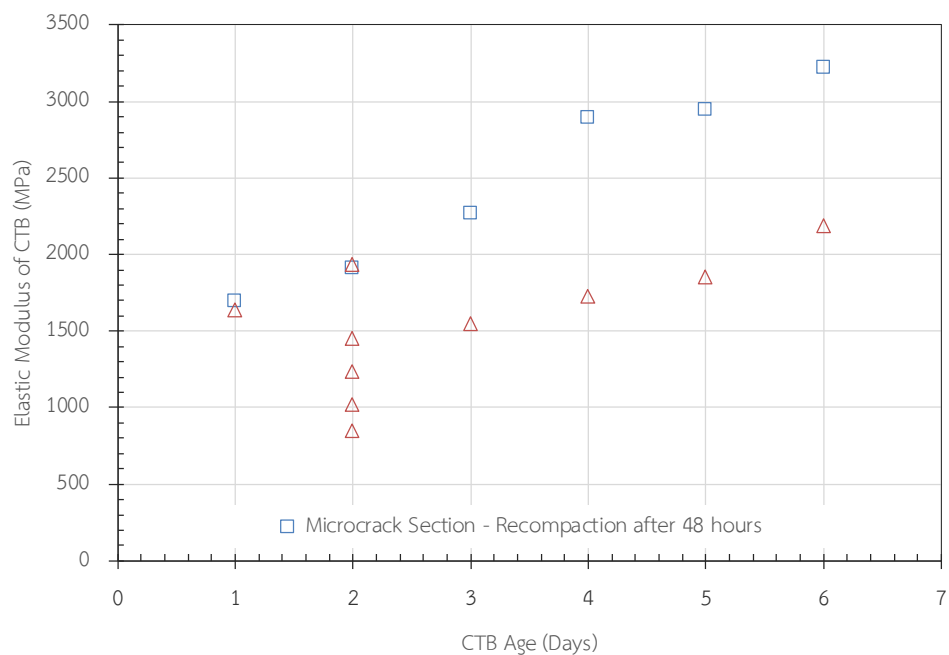
ภาพที่ 28.1 ภาพแสดงค่าการทรุดตัวเฉลี่ยของชั้น CTB ได้จุดทดสอบ FWD กม. 8+400 – 8+500 และพื้นที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ภายหลังจากก่อสร้างแล้วเสร็จ 24 ชั่วโมง กม. 8+500 – 8+610 โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 206



ภาพที่ 28.2 ภาพแสดงค่าการทรุดตัวเฉลี่ยของชั้น CTB ได้จุดทดสอบ FWD กม. 8+400 – 8+500 และพื้นที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ภายหลังจากก่อสร้างแล้วเสร็จ 48 ชั่วโมง กม. 8+610 – 8+690 โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 206



ภาพที่ 29.1 ภาพแสดงค่า Elastic Modulus เฉลี่ยของชั้น CTB ใต้จุดทดสอบ FWD กม. 8+400 – 8+500 และพื้นที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ 24 ชั่วโมง กม. 8+500 – 8+610 โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 206



ภาพที่ 29.2 ภาพแสดงค่า Elastic Modulus เฉลี่ยของชั้น CTB ใต้จุดทดสอบ FWD กม. 8+400 – 8+500 และพื้นที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ 48 ชั่วโมง กม. 8+610 – 8+690 โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 206



ภาพที่ 30.1 พื้นที่ชั้นทาง CTB  
ก่อนการดำเนินการ Microcracking



ภาพที่ 30.2 พื้นที่ชั้นทาง CTB  
ที่ใช้เป็น Control Section

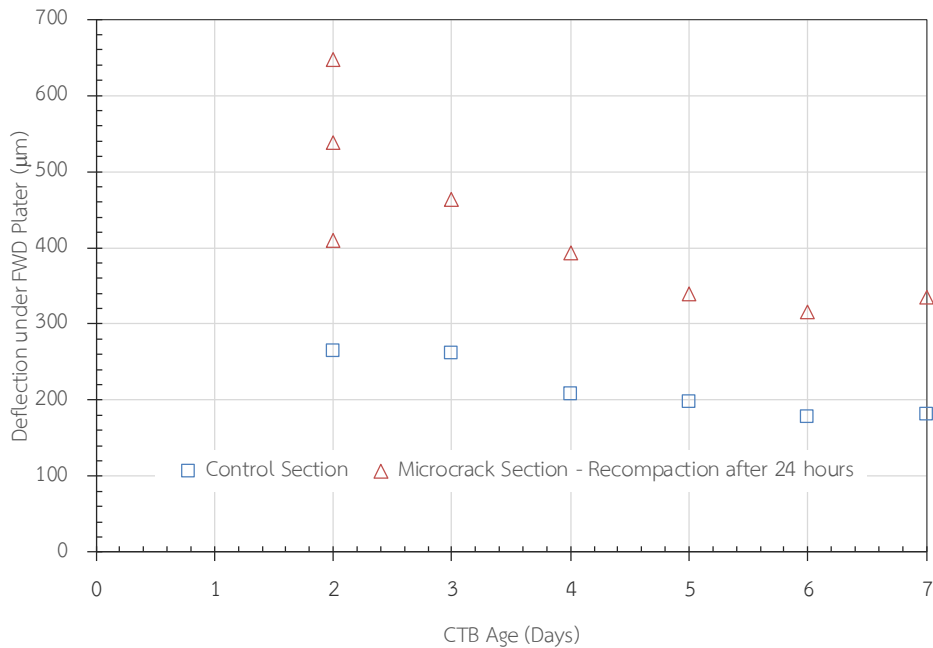


ภาพที่ 30.3 การดำเนินการ Microcracking  
พื้นที่ชั้นทาง CTB ด้วยรถบดล้อเหล็กแบบสันสะเทือน

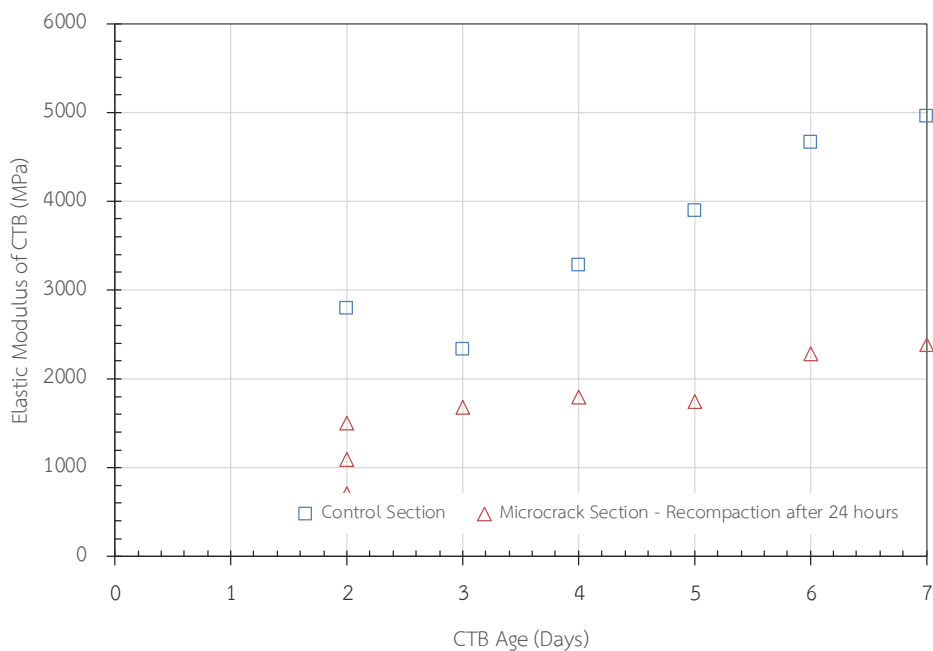


ภาพที่ 30.4 รอยแตกขนาดเล็กบนชั้น CTB  
ที่เกิดขึ้นจากการ Microcracking  
ด้วยรถบดล้อเหล็กแบบสันสะเทือน

ภาพที่ 30 ภาพแสดงรถบดล้อเหล็กและ Falling Weight Deflectometer  
สำหรับการทำกร Microcracking ชั้น CTB ทางหลวงหมายเลข 3376



ภาพที่ 31 ภาพแสดงค่าการทรุดตัวเฉลี่ยของชั้น CTB ได้จุดทดสอบ FWD กม. 6+820 – 6+940 และพื้นที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ 24 ชั่วโมง กม. 6+940 – กม. 7+080 โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3376



ภาพที่ 32 ภาพแสดงค่า Elastic Modulus เฉลี่ยของชั้น CTB ได้จุดทดสอบ FWD กม. 6+820 – 6+940 และพื้นที่ประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ 24 ชั่วโมง กม. 6+940 – กม. 7+080 โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3376

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย ปัญหาและอุปสรรค และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 วัสดุ Cement Treated Base (CTB) มีคุณสมบัติในการคืนกำลัง Autogenous Healing ได้เช่นเดียวกับกับ Soil Cement Base และ Cement Modified Crushed Base ของกรมทางหลวง

5.1.2 สามารถประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ในการตรวจสอบจุดอ่อนตัวของโครงสร้างชั้นทางได้ โดยพิจารณาทางพินิตผิวชั้น CTB การสันสะท้อนในระหว่างการบดทับด้วยรถบดล้อเหล็กแบบสันสะท้อน ซึ่งระหว่างการใช้อุปกรณ์ Microcracking เพื่อดำเนินการเปลี่ยนแปลงทดสอบ หากพบจุดอ่อนตัวจะมีการสันสะท้อนมาก เมื่อรถบดล้อเหล็กแบบสันสะท้อนเคลื่อนตัวผ่าน

5.1.3 สามารถประยุกต์ใช้วิธีการ Microcracking ในการตรวจสอบชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ที่การก่อสร้าง Fine Grade แบบที่เสริมชั้นบางๆ ซึ่งชั้นบางๆ นี้จะแตกในระหว่างการทำ Microcracking

5.1.4 สามารถใช้ประโยชน์วิธีการ Microcracking สำหรับชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ เพื่อที่กำหนดค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 7 วัน ให้สูงกว่า 17.5 ksc เช่น ค่ากำลังต้านทานแรงอัดดินซีเมนต์ไม่น้อย 24.5 ksc ที่อายุ 7 วัน

5.1.5 การใช้วัสดุ CTB สำหรับถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตและผิวทางซีเมนต์คอนกรีต เพื่อให้ถนนที่อายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้นจากการใช้วัสดุพื้นทางมวลรวมหินคลุกหรือพื้นทางหินคลุกซีเมนต์

#### 5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินการ

เนื่องจากเป็นโครงสร้างพื้นทางรูปแบบใหม่ที่ยังไม่ได้มีการดำเนินการมาก่อน รวมทั้งภาพทรงจำในอดีต ที่เกี่ยวข้องกับการแตกสะท้อนในผิวทางแอสฟัลต์ที่ก่อสร้างบนชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินการ มีดังต่อไปนี้

5.2.1 การดำเนินการศึกษาการคืนกำลัง Autogenous Healing ของวัสดุหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์โดยการขอความร่วมมือกับโครงการก่อสร้างฯ โดยไม่มีค่าใช้จ่ายในการใช้รถบดล้อเหล็กแบบสันสะท้อนบดทับชั้นทาง CTB ดังนั้นถ้าหากเปลี่ยนแปลงทดสอบมีความเสียหาย ผู้รับจ้างจะต้องดำเนินการก่อสร้างใหม่ ด้วยประการนี้ทำให้ในช่วงประสานงานแรก ผู้รับจ้างจึงไม่ให้ความประสงค์ที่จะดำเนินการศึกษา

5.2.2 ตามมาตรฐานวัสดุมวลรวมหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ กำหนดให้ค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวมหินคลุกไม่มากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ทำให้วัสดุมวลรวมหินคลุกในบางพื้นที่ไม่สามารถนำใช้งานได้ก่อสร้างชั้น CTB

5.2.3 วัสดุมวลรวมหินคลุกในบางพื้นที่ เช่น ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีความพรุนสูง เพื่อให้ได้กำลังต้านทานแรงอัดตามที่กำหนดในแบบก่อสร้าง ทำให้ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูง ส่งผลต่อการหด

ตัวแบบแห้งสูง (Drying Shrinkage) ดังนั้นการป้องกันรอยแตกสะท้อนจาก CTB ด้วยการเปิดจราจรในระหว่างการก่อสร้างอาจจะไม่เพียงพอ

5.2.4 การออกแบบโครงสร้างชั้นทาง โครงการก่อสร้างบูรณะของกรมทางหลวง ถ้าหากออกแบบให้ใช้พื้นที่ทาง CTB จะไม่ได้รับการพิจารณาเป็นรูปแบบการก่อสร้าง ทำให้หาโครงการฯ ที่จะทำการศึกษาได้ยาก

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 สามารถเพิ่มค่ากำลังต้านทานแรงอัดวัสดุพื้นทางดินซีเมนต์ ซึ่งในปัจจุบัน สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบได้ดำเนินการออกแบบโครงสร้างชั้นทาง โดยใช้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดวัสดุพื้นทางดินซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 24.5 ksc ที่อายุ 7 วัน

5.3.2 สามารถเพิ่มค่ากำลังต้านทานแรงอัดวัสดุรองพื้นทางดินซีเมนต์ ซึ่งในปัจจุบัน สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบได้ดำเนินการออกแบบโครงสร้างชั้นทาง โดยใช้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดวัสดุพื้นทางดินซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 14.0 ksc ที่อายุ 7 วัน

5.3.3 เพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุโครงสร้างชั้นทางเดิมหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ โดยมีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพสำหรับเป็นโครงสร้างพื้นทางใหม่ เป็นไม่น้อยกว่า 35 ksc

5.3.4 ใช้กำแพงกันดินแบบแรงโน้มถ่วง (GravityWall) วัสดุมวลรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างคอสะพานและแก้ไขบริเวณขาดเสถียรภาพในพื้นที่ลาดชัน

5.3.5 ใช้วัสดุมวลรวมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ในงานแก้ไขเสถียรภาพคันทางในพื้นที่ดินอ่อนและใช้เป็นวัสดุถมใต้ชั้นทรายถมคันทางเพื่อเป็น Load Distribution Layer เช่นเดียวกับการใช้เป็น Shallow Cement Stabilized Layer ทางหลวงหมายเลข 3113 คลองด่าน – บางป่อ แต่กำหนดให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดไม่น้อยกว่า 14.0 ksc ที่อายุ 7 วัน (มีใช้ 6.9ksc)

## เอกสารอ้างอิง

- Dheeragool, S. and Ruenkrairergsa, T. 1994. Experience of soil cement roads in Thailand. REAAA Journal: 7-12.
- Horpibulsuk, S., Sirilerdwattna, W., Rachan, R., and Katkan, W., 2007 “Analysis of Strength Development in Pavement Stabilization: A Field Investigation” Proceedings of the 16th Southeast Asian Geotechnical Conference, pp.579-583
- Ingles, O.G. and Metcalf, J.B., 1972 “Soil Stabilization: Principles and Practice” Butterworths, Australia, 374p.
- Louw S. and Jones D. (2015) “Pavement Recycling: Literature review on shrinkage crack mitigation in cement stabilized pavement layers” UCPRC-TM-2015-02.
- Pandian, N.S., Nagaraj, T.S., and Manoj, M., 1997. “Reexamination of Compaction Characteristics of Fine-Grained Soils” Geotechnique, Vol.47. No.2, pp.363-366.
- Rananand, N., Ruenkrairergsa, T. and Yossombat, S. 1983. Performance of lateric soil-cement roads in Thailand. Proc. 4th REAAA Conf.
- Ruenkrairegsa, T., 1976. Materials of construction and material improvement for low cost roads in Thailand, Proceedings of the regional seminar on low cost roads, Bandung, Indonesia.
- Ruenkrairegsa, T., and Eamchoey, S., 1990. “Durability of Lateritic Soil-Cement” Proceedings of the 10th Southeast Asian Geotechnical Conference, Taipei., pp.125-128.
- Ruenkrairegsa, T., and Sanguandeeikul S., 1977. Cement stabilization of some selected weathered rock, Proceedings of the Southeast Asian conference on soil engineering, Bangkok, Thailand.
- Sebesta, S. 2005. Use of microcracking to reduce shrinkage cracking in cement treated bases. Proc. 84th TRB Annual Meeting
- Scullion, T., Sebesta, S., Harris, J.P., and Syed, I., 2005. “Evaluating the Performance of Soil-Cement and Cement-Modified Soil for Pavements: A Laboratory Investigation” RD120, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2005, 142p.
- Seed, H.B. and Chan, C.K., 1959. “Structure and Strength Relationship for compacted soils” Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.85. No.SM5, pp.87-128.

Sunitsakul, J., Sawatparnich, A., Apimeteetamrong, S., and Faikatok, T., 2007 “Microcracks to Reduce Reflective Cracks in Soil Cement Road in Thailand.” Proceedings of the 16th Southeast Asian Geotechnical Conference, pp.499-503.

กรมทางหลวง 2553 ทล.-ม 204/2533, มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)

กรมทางหลวง 2566 ทล.-ม 214/2566, มาตรฐานพื้นทางหินคลุกปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ซีเมนต์ (Cement Treated Base : CTB)

จุฑา สุนิตย์สกุล และอรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช 2550 “วิธีการออกแบบส่วนผสมวัสดุงานทางที่ปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมสำหรับวัสดุที่ใช้ในงานทางด้วยซีเมนต์: New Mix Design Method of the Cement Stabilized Material” Highway Journal, Vol. 44(6), pp.23-29.

รายงานฉบับที่ : วพ. 327 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง  
 ผู้เขียน : นายจุฑา สุณิตย์สกุล และนายชัยรัตน์ ศุภชวโรจน์  
 ชื่อเรื่อง : การคืนค่าโมดูลัสของวัสดุหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ในกรมทางหลวง  
 บทคัดย่อ : กรมทางหลวงได้ดำเนินการก่อสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตบนพื้นทางปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มากกว่า 50 ปี โดยกรมทางหลวงเริ่มต้นก่อสร้างแปลงทดลองดินซีเมนต์ที่สายวารินชำราบ – เดชอุดม ในปัจจุบันกรมทางหลวง ได้จัดทำมาตรฐานทางหลวงวัสดุงานทางปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์หลายชนิดเช่น รองพื้นทางดินซีเมนต์ พื้นทางดินซีเมนต์ พื้นทางหินคลุกซีเมนต์ และวัสดุหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากการหดตัวและแตกร้าวในพื้นที่ดังกล่าว วัสดุทั้งหมดมีกำลังต้านแรงอัดน้อยกว่า 24.5 ksc

ในปัจจุบัน ปริมาณรถบรรทุกมีการเพิ่มขึ้นและงบประมาณที่ได้รับในการก่อสร้างและบำรุงรักษามีอย่างจำกัด สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ จึงได้ดำเนินการพิจารณาแนวทางการเพิ่มความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างทางและงบประมาณที่ใช้ในการก่อสร้างไม่เพิ่มสูงขึ้นมาก ด้วยการใช้ พื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ (Cement Treated Base: CTB)

วัสดุ Cement Treated Base เป็นวัสดุที่มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงมากกว่า Cement Modified Crushed Rock Base ประมาณ 63 เปอร์เซ็นต์จึงจำเป็นต้องมีการใช้ปูนซีเมนต์ประมาณ 3 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำหนักแห้งของวัสดุหินคลุก ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกสะท้อนของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้ จึงจำเป็นต้องมีขบวนการทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Microcracking) ในชั้น Cement Treated Base ซึ่งขบวนการนี้ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงชั่วคราวแต่ Cement Treated Base มีคุณสมบัติ Autogenous Healing ทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นสามารถคืนค่ากลับได้

ศัพท์เฉพาะเรื่อง : Cement Treated Base, Microcracking, Resilient Modulus,  
 Unconfined Compressive Strength

ทล.วพ./ว./2568/ท.