

พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์และประสิทธิภาพของการสร้างรอยร้าวขนาดเล็กในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์

Mechanistic Behavior and Effectiveness of Microcracking Process in Soil-Cement Base

พุทธรพล ทองอินทร์ดำ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์: 0-2549-4697 โทรสาร: 0-2549-3412

E-mail: puttapon.t@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งทดสอบประสิทธิภาพของการลดรอยร้าวหลักในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ด้วยวิธีการสร้างรอยร้าวขนาดเล็กโดยสร้างแปลงทดสอบและแปลงควบคุมในจังหวัดฉะเชิงเทรา ด้วยดินลูกรังผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก เป็นพื้นทางดินซีเมนต์หนา 15 เซนติเมตร กว้าง 3 เมตร และยาว 10 เมตร จำนวน 2 แปลง และทดสอบคุณสมบัติวัสดุในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานกรมทางหลวง รวมทั้งวิเคราะห์โครงสร้างเชิงกลศาสตร์ด้วยทฤษฎีชั้นทางยืดหยุ่น ผลการศึกษาพบว่ากำลังของดินซีเมนต์หลังการสร้างรอยร้าวลดลงร้อยละ 37 แต่ยังคงสามารถพัฒนากำลังได้ดี ทั้งนี้ไม่พบรอยร้าวหลักในแปลงทดสอบที่สร้างรอยร้าวขนาดเล็กเลย และอัตราการขยายตัวของรอยร้าวของแปลงทดสอบมีค่าน้อยกว่าแปลงควบคุมร้อยละ 25 โดยภายใต้น้ำหนักบรรทุกเดียวกันพบว่าค่าความเครียดดึงแนวราบสูงสุดในวันที่ 7 จะน้อยกว่าวันที่ 3 ประมาณร้อยละ 15 ผลที่ได้นี้สามารถนำไปพัฒนาวิธีการปฏิบัติงานภาคสนามเพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวหลักในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้

Abstract

This research focused on evaluating the effectiveness of major cracks reduction in soil-cement base using the microcracking method. Two test sections, control and microcracking were constructed. The cement content used was 8% by weight of Lateritic soil. Each base section is 3 m width, 10 m length and 15 cm thick. Materials were tested according to standards of Department of Highway and the structures were analyzed using layered elastic theory. It has been found that the soil-cement strength after microcracking process was reduced by 37% and well recovered. Only minor cracks have been found in the microcracked section and its growth rate was 25% less than those in the control section. Under the same load condition the maximum horizontal tensile strain on day 7 decreased about 15% from day 3. These results should lead to improvement of field practice to prevent the major cracks in soil-cement base.

1. บทนำ

ถนนที่ใช้ดินซีเมนต์เป็นชั้นพื้นทางช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนวัสดุหินคลุกในหลายพื้นที่และให้ผลลัพธ์ที่ดีในด้านความคงทนแข็งแรง มีการกระจายน้ำหนักการจราจรที่ดีทำให้ลดหน่วยแรงที่จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชั้นดินเดิม จึงมีการออกมาตราฐานโดยกรมทางหลวง [1] ทั้งนี้ยังพบว่าพื้นทางดินซีเมนต์สามารถก่อสร้างให้รับน้ำหนักสูงกว่าพื้นทางหินคลุกได้ [2] ทำให้สามารถนำไปใช้กับสายทางที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกมากได้

ในอีกด้านหนึ่งกับพบปัญหาการเกิดรอยร้าวในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ในช่วงระยะเวลาเพียงไม่นานภายหลังการก่อสร้าง และลุกลามขึ้นสู่ชั้นผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีตที่เรียกว่า รอยร้าวแบบสะท้อน (reflective crack) ซึ่งไม่ได้มีสาเหตุหลักจากน้ำหนักของการจราจร แต่เป็นพฤติกรรมการร้าวเนื่องจากการหดตัว (shrinkage crack) ที่รุนแรงและเป็นสาเหตุของรอยร้าวหลัก (major crack) ซึ่งมีความกว้างมากกว่า 3 มิลลิเมตร [3] เกิดขึ้นในชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และสะท้อนขึ้นมาถึงชั้นผิวทาง

ด้วยความต้องการแก้ปัญหาการเกิดรอยร้าวแบบสะท้อนนี้ ทำให้มีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในประเทศแถบยุโรปและอเมริกา โดยหัวใจหลักของการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการเหล่านี้คือ ควรจะมีผลกระทบน้อยที่สุดต่อค่าความแข็งแรงในระยะยาว (long-term stiffness) มีการนำเสนอแนวทางการลดปัญหาดังกล่าวหลากหลายวิธีการ ซึ่งพบว่าวิธีการสร้างรอยร้าวขนาดเล็ก (microcracking process) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพดีและใช้ต้นทุนต่ำ

[4][5][6] เหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการก่อสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ในประเทศไทย

โดยได้มีการนำวิธีการก่อสร้างที่ได้จากผลวิจัยที่ประสบความสำเร็จในต่างประเทศมาทดลองก่อสร้างถนนในประเทศไทย [8] และพบว่าให้ผลลัพธ์ที่ดี แต่การนำวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวที่ได้จากผลงานวิจัยต่างประเทศเหล่านั้นมาใช้โดยตรงไปตรงมากับการก่อสร้างถนนในประเทศไทยโดยทั่วไป อาจไม่สามารถช่วยลดปัญหาไปได้มากนัก เนื่องจากความแตกต่างในหลายองค์ประกอบ เช่น ข้อจำกัดด้านงบประมาณวัสดุหินจากต่างแหล่ง ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง สภาพอากาศ รวมทั้งมาตรฐานการก่อสร้างที่แตกต่างกัน และที่สำคัญคือ เครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมงานก่อสร้างที่มีราคาสูงมาก ดังจะเห็นได้ว่าถึงแม้ว่ากรมทางหลวงจะมีมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ [1] และมีรายงานการศึกษาถึงความสำเร็จของถนนที่ก่อสร้างด้วยวิธีดังกล่าว แต่กลับไม่มีการบรรจุให้วิธีการดังกล่าวอยู่ในมาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงว่าความยุ่งยากในการเข้าถึงเครื่องมือควบคุมการก่อสร้างที่มีราคาแพงมากนั้นจะกลายเป็นปัญหาทับซ้อนกับการปฏิบัติงานจริง

สำหรับเครื่องมือหลักที่ใช้ในการควบคุมการก่อสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ในต่างประเทศ คือ เครื่องวัดค่าการทรุดตัวด้วยตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีราคาสูง (ประมาณ 15-20 ล้านบาท) และมีใช้อยู่เพียงบางหน่วยงานหลักเท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่หน่วยงานสาขา เช่น แขวงทางหลวง หรือหน่วยงานท้องถิ่น และบริษัทเอกชน ที่รับเหมาก่อสร้างถนน

ทั่วไปจะสามารถจัดหาเครื่องมือดังกล่าวไว้ใช้อย่างทั่วถึงได้

แม้กระทั่งทีมผู้วิจัยในสหรัฐอเมริกาเอง [4][5][6][7] ก็ตระหนักถึงปัญหาความยุ่งยากในการจัดหาเครื่องมือนี้ จึงเสนอแนวทางเบื้องต้นของวิธีการก่อสร้างเพื่อแก้ปัญหาจราจรแบบสะท้อน โดยไม่ต้องมีเครื่องมือพิเศษ ซึ่งขั้นตอนหลักของการสร้างรอยร้าวขนาดเล็กในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์นั้น กระทำโดยการบดอัดชั้นพื้นทางเพิ่มเติมในช่วงเวลาที่กำหนดด้วยรถบด โดยมีเป้าหมายเพื่อลดแรงดึงรั้งจากการหดตัวของดินซีเมนต์ให้มีค่าน้อยลงจนไม่เกิดรอยร้าวหลัก ที่จะลุกลามสะท้อนขึ้นไปถึงผิวทางชั้นบนสุดได้ แต่ในทางกลับกันหากรอยร้าวขนาดเล็กนี้มีมากเกินไป อาจส่งผลเสียให้ดินซีเมนต์ไม่สามารถพัฒนากำลังให้ เป็นไปตามที่วิศวกรออกแบบไว้ ซึ่งจะทำให้โครงสร้างถนนนั้นเสียหายก่อนอายุการใช้งานเช่นกัน

จึงเกิดคำถามสำคัญว่าขั้นตอนวิธีการก่อสร้างแบบไม่ใช้เครื่องมือพิเศษดังกล่าว จะเหมาะสมกับโครงการก่อสร้างภายใต้สภาพแวดล้อมและบริบทของประเทศไทยได้ดีเพียงใด หรือจำเป็นต้องมีการประยุกต์ในแง่มุมใดหรือไม่ อย่างไร จึงเป็นวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ เพื่อพัฒนางานภาคปฏิบัติในประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

2. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2006 Sebesta [4] ได้สรุปผลการศึกษาค้นคว้าจากชุดโครงการวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการแก้ปัญหาจราจรแบบสะท้อนของทีมวิจัยจากสถาบันขนส่งของรัฐเท็กซัส (Texas Transportation

Institute, TTI) โดยพบปัญหาการนำองค์ความรู้การสร้างรอยร้าวขนาดเล็กไปประยุกต์ใช้ในงานภาคปฏิบัติคือ ปัญหาการขาดแคลนเครื่องมือพิเศษ เช่น เครื่องวัดค่าการทรุดตัวด้วยดรัมกระแทก ที่จำเป็นต้องใช้ในการควบคุมการลดกำลังของชั้นทางดินซีเมนต์ให้เหมาะสมภายหลังการเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก จึงได้สรุปเป็นข้อเสนอแนะ (TTI recommendation) เกี่ยวกับการก่อสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ด้วยวิธีการสร้างรอยร้าวขนาดเล็ก ในกรณีที่ไม่มีเครื่องมือ FWD ไว้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) ให้ออกแบบหาปริมาณซีเมนต์จากผลทดสอบจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้ค่ากำลังและความชื้นเป็นเกณฑ์

ขั้นตอนที่ 2) ภายหลังการการปูชั้นพื้นทางและบดอัดตามเกณฑ์แล้ว ให้ทำการบ่มเปียก 48 ชั่วโมง ก่อนการสร้างรอยร้าวขนาดเล็ก

ขั้นตอนที่ 3) เตรียมรถบดล้อเหล็กแบบสั่นสะเทือน (vibratory steel wheel roller) ซึ่งควรมีขนาดอย่างน้อย 12 ตัน

ขั้นตอนที่ 4) ทำการบดอัดเพิ่มเติม จำนวน 3 รอบ (1 รอบ เท่ากับ การวิ่งเดินหน้าและถอยกลับ) ด้วยความเร็วประมาณ 2-5 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยใช้กำลังบดอัดสูงสุดของรถบด และ

ขั้นตอนที่ 5) ทำการบ่มโดยการพ่นน้ำตามข้อกำหนด

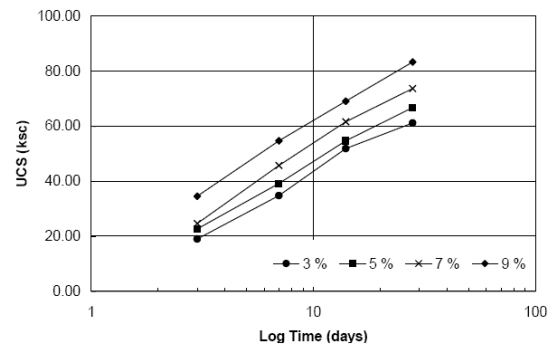
โดยภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างรอยร้าวขนาดเล็ก แนะนำว่าสามารถก่อสร้างชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตปิดทับ และเปิดการจราจรได้ตามปกติ

ในส่วนของการวิเคราะห์โครงสร้างผิวทางที่มีชั้นพื้นทางเป็นดินซีเมนต์ด้วยทฤษฎีชั้นทางยืดหยุ่น (Layered Elastic Theory, LET) ซึ่งจำเป็นต้องทำการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแต่ละชั้นทางเพื่อใช้เป็นค่านำเข้า โดยในปี ค.ศ. 2012 Jaritngam et al. [9] ได้แสดงผลการทดสอบ UCS จากการแปรผันตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นที่ชัดเจนว่าค่า UCS ของดินซีเมนต์มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นเมื่อพล็อตเทียบกับค่า logarithmic ของเวลา

โดยที่ UCS คือ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว [ksc] C_c คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ในดินซีเมนต์ [ร้อยละโดยน้ำหนัก] T คือ ระยะเวลาการบ่ม [วัน] DD คือ ความหนาแน่นแห้ง [T/m^3] ES คือโมดูลัสยืดหยุ่น (คิดที่ร้อยละ 50 ของกำลังประลัย) [ksc]

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่า UCS ของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่สภาวะต่าง ๆ [9]

Test #	C_c	T	DD	UCS	ES
C3T3	3	3	2.133	18.97	3548
C5T3	5	3	2.133	34.77	6400
C7T3	7	3	2.212	51.85	9010
C9T3	9	3	2.152	61.14	12014
C3T7	3	7	2.132	22.65	4332
C5T7	5	7	2.195	39.19	6900
C7T7	7	7	2.194	54.66	9710
C9T7	9	7	2.141	66.75	12838
C3T14	3	14	2.150	24.69	4963
C5T14	5	14	2.184	45.73	8100
C7T14	7	14	2.230	61.61	11515
C9T14	9	14	2.139	73.69	14716
C3T28	3	28	2.175	34.57	6680
C5T28	5	28	2.184	54.68	9702
C7T28	7	28	2.203	69.06	12690
C9T28	9	28	2.154	83.30	15544



รูปที่ 1 อัตราการเพิ่มค่า UCS ของดินซีเมนต์ในลักษณะเชิงเส้นเทียบกับค่า log ของเวลา [9]

ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์กับระยะเวลาในการบ่มดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับสมการคาดการณ์ค่า UCS ของดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน ซึ่งเสนอโดย Mitchell [10] ดังสมการที่ (1)

$$UCS = (300 \text{ to } 600) C_c \quad (1)$$

นอกจากนั้น Jaritngam et al. [9] ยังได้นำเสนอผลการศึกษาเป็นแบบจำลองในการทำนายค่า UCS และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพื้นทางดินซีเมนต์โดยพิจารณาความแปรผันของปริมาณปูนซีเมนต์ระยะเวลาในการบ่ม และความหนาแน่นแห้ง ดังนี้

แบบจำลองทำนายค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวแบบไม่จำกัดด้านข้าง (UCS) และแบบจำลองทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่น แบบจำลองความสัมพันธ์ของโมดูลัสยืดหยุ่นและค่า UCS ดังสมการที่ (2), (3) และ (4) ตามลำดับ

$$UCS = -6.045 + 7.68C_c + 0.713T \quad (2)$$

$$ES = -1298.470 + 1467.375C_c + 131.584T \quad (3)$$

$$ES = -71.83 + 188.28UCS \quad (4)$$

โดยชุดสมการนี้จะใช้ในการทำนายค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ในแปลงทดสอบของงานวิจัยนี้ เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์แบบจำลองด้วยทฤษฎียืดหยุ่นชั้นทางต่อไป

3. ขั้นตอนวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เลือกพื้นที่ในการสร้างแปลงทดสอบบริเวณลานอเนกประสงค์ บ้านกระบกเตี้ย ตำบลท่ากระดาน อำเภอสนามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยมีขั้นตอนวิธีวิจัยดังนี้

1. เลือกวัสดุดินที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (soil-cement base) มาตรฐานที่ ทล.-ม. 204/2556 [1] สำหรับก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์

2. เตรียมพื้นที่แปลงทดสอบ 2 แปลง ขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 10 เมตร ทำการปรับเตรียมชั้นดินคันทางดังรูปที่ 2 โดยกำหนดให้แปลงที่ 1 เป็นแปลงทดสอบ (microcracking section) และแปลงที่ 2 เป็นแปลงควบคุม (control section)

3. ผสมดินกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ปริมาณส่วนผสมซีเมนต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักดินแห้ง เพื่อให้มีแนวโน้มในการเกิดการร้าวของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ และทำการก่อสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การก่อสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ในแปลงทดสอบ

4. ทำการปูชั้นพื้นทางดินซีเมนต์หนา 15 เซนติเมตร ทั้ง 2 แปลงทดสอบ และทำการบ่มเปียกด้วยการฉีดพ่นน้ำ 3 วัน โดยกำหนดให้ไม่มีการลาดแอสฟัลต์ Prime coat ปิดทับ เนื่องจากต้องการเปิดผิวหน้าชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ให้ชัดเจนสำหรับการสังเกตและจดบันทึกพฤติกรรมของการขยายตัวของร้าว

5. ในวันที่ 3 ดำเนินการสร้างรอยร้าวขนาดเล็กตามข้อแนะนำของ TTI recommendation โดยใช้รถบดล้อเหล็กขนาด 19 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 3 จำนวน 3 รอบ (ไป-กลับ) ซึ่งรถบดเป็นคันเดียวกับที่ใช้ในการก่อสร้างและบดอัดชั้นพื้นทาง เพื่อให้สอดคล้องกับการก่อสร้างจริง



รูปที่ 3 การสร้างรอยร้าวขนาดเล็กบนแปลงทดสอบด้วยรถบดล้อเหล็กขนาด 19 ตัน

6. ที่อายุแปลง 3 วัน ภายหลังการสร้างรอยร้าวขนาดเล็ก ตรวจสอบรอยร้าวในพื้นที่สี่เหลี่ยมขนาด 1x1 ตารางเมตร ด้วยการบันทึกภาพและวัดความกว้างของรอยร้าวโดยเวอร์เนีย จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์จากทั้ง 2 แปลงทดสอบ นำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) ในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์จากพื้นที่แปลงทดสอบเพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ

7. ที่อายุแปลง 7 วัน ทำซ้ำขั้นตอนที่ 8

8. ทำการพล็อตตำแหน่งและแยกประเภท

รอยร้าวหลักและรองตามขนาดความกว้าง โดยใช้วิธีวิเคราะห์จากข้อมูลดิจิทัลในรูปแบบไฟล์รูปภาพรอยร้าว (image processing) และความยาวและโครงข่ายของรอยร้าว รวมทั้งทำการวิเคราะห์แนวโน้มการขยายตัวของรอยร้าวตามแต่ละช่วงอายุ

9. ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงกับเวลาดังสมการที่ (2), (3) และ (4) วิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นพื้นทางดินซีเมนต์โดย ที่อายุ 3 และ 7 วัน เพื่อจำลองสถานการณ์ในช่วงเวลาการก่อสร้าง (construction state) ก่อนและหลังการปูชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต และที่อายุ 28 และ 90 วัน เพื่อจำลองสถานการณ์ช่วงเปิดใช้งานอย่างสมบูรณ์ (in-service state)

10. วิเคราะห์พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของพื้นทางดินซีเมนต์ โดยกำหนดให้ต้องรองรับน้ำหนักบรรทุกจากรถเป็นน้ำหนักคงที่ขนาด 50 kN และกำหนดค่า Shear spring compliance (SSC) ตามข้อเสนอแนะที่เหมาะสม [11][12] โดยสรุปเป็นคุณสมบัติชั้นทาง ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 แบบจำลองโครงสร้างทางระหว่างก่อสร้าง

Layer	1	2
Mat.	Soil cement	Subgrade
h [m]	0.15	Inf.
E [MPa]	varies (day 3&7)	50
μ	0.20	0.40
SSC [m ³ /N]	2.00E-09	-

ตารางที่ 3 แบบจำลองโครงสร้างทางระหว่างใช้งาน

Layer	1	2	3
Mat.	Asphalt concrete	Soil cement	Sub grade
h [m]	0.10	0.15	Inf.
E [MPa]	3,000	varies (day28&90)	50
μ	0.35	0.20	0.40
SSC	1.25E-09	2.00E-09	-

4. ผลการทดสอบและบทวิเคราะห์

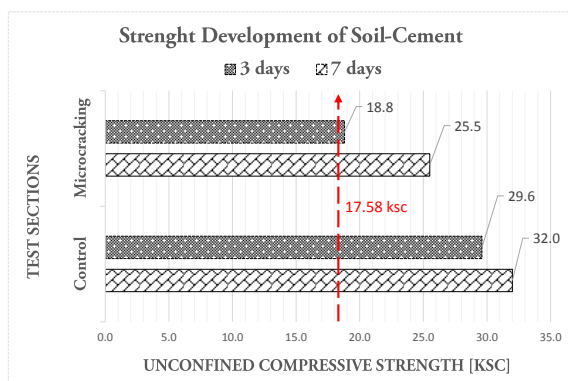
4.1 ผลทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุดินซีเมนต์

ส่วนผสมดินซีเมนต์ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำประปา ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐาน ส่วนผลการทดสอบดินลูกรัง พบว่าผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมทางหลวง [1] จึงไม่จำเป็นต้องผสมปูนขาวเพิ่ม และสามารถจำแนกดินตามระบบ AASHTO ได้เป็น A-1-a ชนิด Well-graded gravel with Sand (GW) มีกรวดผสมทรายเม็ดละเอียดปนบ้าง โดยผ่านตะแกรงเบอร์

200 น้อยกว่าร้อยละ 5 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะของดินลูกรังที่ทดสอบได้คือ $G.S. = 2.74$ และทดสอบได้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมระหว่างร้อยละ 8.1 ถึง 9.2 ซึ่งทดสอบโดยวิธี Modified Proctor Compaction Test ซึ่งค่าความชื้นที่เหมาะสมนี้จะใช้กำหนดปริมาณน้ำที่ใช้จริงในการก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ของโครงการวิจัยนี้

4.2 ผลการสร้างรอยร้าวขนาดเล็กและการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์

จากการสร้างรอยร้าวขนาดเล็กในช่วงบ่ายของวันที่ 3 ด้วยรถบดคันเดิม เสร็จแล้วทำการเก็บแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์จากทั้ง 2 แปลง และเจาะเก็บแท่งตัวอย่างอีกครั้งเมื่ออายุครบ 7 วัน เพื่อทำการทดสอบ UCS ได้ผลดังรูปที่ 5 ซึ่งได้ข้อสังเกตที่สำคัญดังนี้



รูปที่ 5 การพัฒนากำลังของดินซีเมนต์จากแปลงทดสอบที่สร้างรอยร้าวขนาดเล็กและแปลงควบคุม

การสร้างรอยร้าวขนาดเล็กในวันที่ 3 ด้วยรถบดขนาด 19 ตัน จำนวน 3 เที่ยว (ไป-กลับ) ตามข้อแนะนำของ TTI โดยไม่ใช้เครื่องมือพิเศษควบคุม ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว หรือ UCS ลดลงจาก 29.6 เหลือ 18.8 ksc หรือลดลงร้อยละ 36.5 ซึ่ง

เป็นผลโดยตรงจากรอยร้าวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นภายในชั้นทาง

วิเคราะห์ตามสมการที่ (4) ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นวัสดุดินซีเมนต์ที่ 29.6 และ 18.8 ksc เท่ากับ 5,501 และ 3,468 ksc ตามลำดับ หรือลดลงร้อยละ 37 เท่านั้น ซึ่งจากที่ TTI ให้บดอัดเพิ่มเติมจนกว่าค่าโมดูลัสจะลดลงร้อยละ 60 นั้น แสดงว่าในกรณีนี้หากมีการใช้เครื่องมือ FWD หรือ LWD ควบคุม ควรต้องมีการบดอัดเพิ่มเติมด้วยจำนวนรอบที่มากขึ้น

ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 7 วันจากทั้ง 2 แปลงทดสอบมีค่าเกินกว่าเกณฑ์กำหนดของกรมทางหลวง คือ 17.58 ksc (หรือ 250 psi) และเกินกว่า ค่าจำกัดขีดบน (upper limit) คือ 20.13 ksc [1][2] ค่อนข้างมาก แสดงว่าสัดส่วนของปริมาณปูนซีเมนต์ที่กำหนดไว้เป็นไปตามวัตถุประสงค์คือมากกว่าเกณฑ์ เพื่อให้มีแนวโน้มการเกิดรอยร้าวที่สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้การสังเกตและบันทึกพฤติกรรมรอยร้าวเป็นไปได้อย่างชัดเจน

ถึงแม้ค่า UCS ของแปลงทดสอบจะลดลงร้อยละ 36 เทียบกับแปลงควบคุมดังสรุปในข้อที่ 1 แต่เมื่ออายุครบ 7 วัน ดินซีเมนต์ในแปลงทดสอบยังคงมีการพัฒนากำลังขึ้นอย่างต่อเนื่อง ยิ่งไปกว่านั้นในกรณีศึกษานี้กลับพบว่าแปลงทดสอบมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS ร้อยละ 35.6 ซึ่งมากกว่าของแปลงควบคุมที่เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 8 เท่านั้น จึงเป็นข้อยืนยันว่าวิธีการสร้างรอยร้าวขนาดเล็กในกรณีศึกษานี้ไม่ได้สร้างความเสียหายให้แก่คุณสมบัติการพัฒนากำลังในช่วงแรกของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์

ค่า UCS ของแปลงควบคุมที่อายุ 3 วันมีค่าประมาณ 30 ksc พิจารณาเทียบกับสมการที่ 2 จะ

ได้ค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมใน
ห้องปฏิบัติการที่ 4.36 % หรือกล่าวอีกอย่างได้ว่า มี
ค่าปริมาณปูนซีเมนต์ประสิทธิผลโดยประมาณ 5%
เท่านั้น ซึ่งค่ากำลังที่ต่ำกว่าคาดการณ์ของดินซีเมนต์
ในแปลงทดสอบอาจเกิดจากหลายปัจจัย เช่น
คุณภาพในการผสมดินและซีเมนต์ที่มีปริมาณมากทำ
ให้ไม่ทั่วถึง หรือ ปริมาณความชื้นของดินขณะผสม
อาจสูงเกินไป เป็นต้น

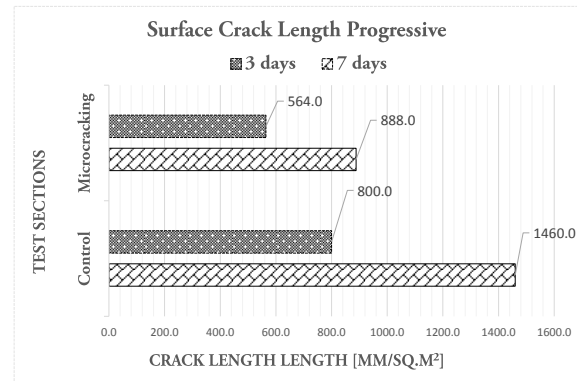
และจากผลในตารางที่ 1 จะสามารถ
คาดการณ์ค่าโมดูลัสของดินซีเมนต์ที่ 5% ที่อายุ 28
วันได้เท่ากับ 6,400 ksc (หรือ 628 MPa)

4.3 พฤติกรรมของรอยร้าวในชั้นพื้นทางดิน ซีเมนต์

การศึกษาวงจรการร้าวร้าวที่ผิวชั้นพื้นทางดิน
ซีเมนต์แบ่งเป็น 2 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 1 คือ การสุ่ม
ตรวจสอบรอยร้าวขนาดเล็ก (ความกว้างน้อยกว่า 3
มิลลิเมตร) ในพื้นที่ขนาด 1x1 ตารางเมตร กระทำใน
วันที่ 3 (หลังการสร้างรอยร้าวขนาดเล็ก) และรูปแบบ
ที่ 2 คือ การตรวจสอบรอยร้าวหลัก (ความกว้าง
มากกว่า 3 มิลลิเมตร) และความเสียหายรุนแรง
ลักษณะอื่นโดยผลการตรวจสอบรูปแบบที่ 1 ได้ข้อมูล
สรุปความยาวรอยร้าวดังรูปที่ 6 ซึ่งได้ข้อสังเกตดังนี้

ในแปลงทดสอบที่มีการสร้างรอยร้าวขนาด
เล็กและแปลงควบคุม ยังคงมีรอยร้าวขนาดเล็กเกิดขึ้น
และขยายตัวต่อเนื่อง ดังนั้นรอยร้าวจึงในชั้นพื้นทาง
ดินซีเมนต์จึงเป็นปรากฏการณ์ที่เป็นพื้นฐานทาง
ธรรมชาติที่หลีกเลี่ยงได้ยาก แต่พบว่าถึงแม้ว่าความ
ยาวโดยรวมของรอยร้าวในแปลงที่สร้างรอยร้าวขนาด
เล็ก ที่อายุ 7 วันจะเพิ่มขึ้นจาก 3 วัน ในปริมาณรอย

ละ 57.4 แต่ก็เห็นได้ชัดว่าน้อยกว่าการขยายตัวของ
รอยร้าวในแปลงควบคุมอย่างชัดเจน ซึ่งเพิ่มขึ้นมากถึง
ร้อยละ 82.5 หรือแตกต่างกันร้อยละ 25
โดยประมาณ



รูปที่ 6 ผลการสุ่มตรวจรอยร้าวที่ผิวชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ อายุ
3 และ 7 วัน ทั้ง 2 แปลงทดสอบ

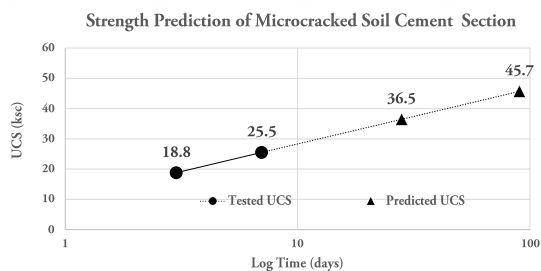
สำหรับผลการตรวจสอบความเสียหายบนผิว
ชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ โดยเฉพาะความเสียหายที่
รุนแรงและเด่นชัด รวมทั้งรอยร้าวที่มีขนาดความกว้าง
กว่า 3 มิลลิเมตร ซึ่งจัดเป็นรอยร้าวหลักที่จะสามารถ
เป็นต้นเหตุของรอยร้าวแบบสะท้อนที่จะเกิดบนชั้นผิว
ทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้ โดยผลการตรวจสอบสรุปได้
ดังนี้

1. ที่อายุ 3 วัน ไม่พบรอยร้าวหลักและความ
เสียหายรุนแรงใน 2 แปลงทดสอบ
2. ที่อายุ 7 วัน ยังคงไม่พบรอยร้าวหลักและ
ความเสียหายรุนแรงใน 2 แปลงทดสอบ
3. ที่อายุแปลงทดสอบ 28 วัน ยังคงไม่พบ
รอยร้าวในแปลงที่สร้างรอยร้าวขนาดเล็ก แต่เริ่มพบ
รอยร้าวในแปลงควบคุมที่มีขนาดกว้างขึ้นในหลาย
ตำแหน่ง มีขนาดใกล้เคียง 3 มิลลิเมตร ซึ่งมีความยาว
ไม่มากนักและกระจายกันไปทั่วพื้นที่แปลงทดสอบ ซึ่ง

แสดงว่าการขยายตัวเป็นรอยร้าวหลักอาจเกิดขึ้นในภายหลังได้

4.4 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของโครงสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์

โดยอาศัยผลศึกษาของ Jaritngam et al. [9] ดังรูปที่ 1 ทำให้คาดการณ์ค่า UCS ของวัสดุดินซีเมนต์ในแปลงที่สร้างรอยร้าวขนาดเล็ก แบบเชิงเส้นเทียบกับ log ของเวลา ได้ดังรูปที่ 8 และจากสมการที่ 4 ทำให้สามารถประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นดินซีเมนต์ที่อายุต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4 ซึ่งจะใช้เป็นค่านำเข้าสำหรับการวิเคราะห์แบบชั้นทางยืดหยุ่น

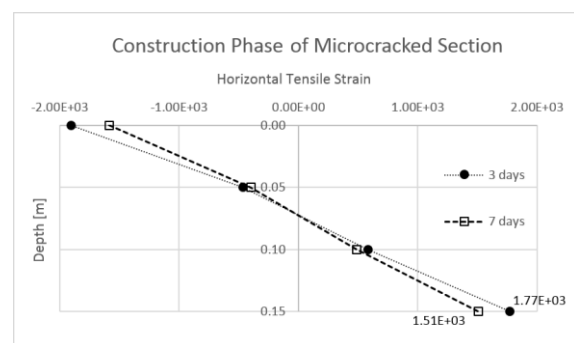


รูปที่ 8 ผลทดสอบและผลคาดการณ์ค่า UCS ของพื้นทางดินซีเมนต์ที่สร้างรอยร้าวขนาดเล็ก

ตารางที่ 4 ผลการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นดินซีเมนต์แปลงที่สร้างรอยร้าวขนาดเล็ก

Days	UCS [ksc]	E [ksc]	E [MPa]
3	18.8	3,468	340
7	25.5	4,729	464
28	36.5	6,793	666
90	45.7	8,532	837

ผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดดึงแนวราบตลอดความลึกชั้นพื้นทางดินซีเมนต์บนชั้นดินเดิมในช่วงก่อนปูชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตปิดทับ เมื่อต้องรับน้ำหนักล้อขนาด 50 kN แสดงในรูปที่ 9 โดยค่าความเครียดดึงสูงสุด $1.77E+03$ เกิดขึ้นที่อายุ 3 วัน ตามคาดหมาย เนื่องจากมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำที่สุด และหากใช้ค่านี้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบที่ร้อยละ 100 จะพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปที่อายุ 7 วัน ค่าความเครียดสูงสุดลดลงอย่างชัดเจนเหลือเพียง $1.51E+03$ หรือลดลงร้อยละ 15 โดยประมาณ

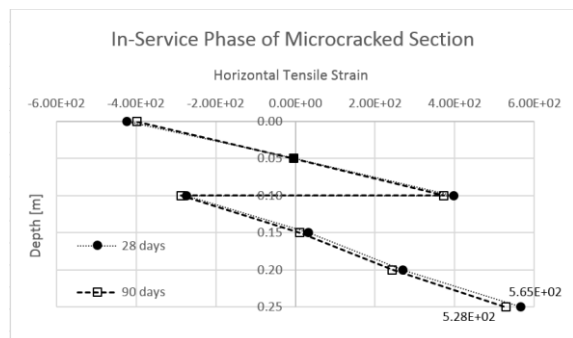


รูปที่ 9 ความเครียดดึงแนวราบ แปลงที่สร้างรอยร้าวขนาดเล็ก ช่วงก่อสร้าง อายุ 3 และ 7 วัน

ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดดึงแนวราบตลอดความลึกของโครงสร้างผิวทางที่มีการปูชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตปิดทับเรียบร้อยแล้วและเปิดใช้งานสำหรับการจราจรแล้ว เมื่อต้องรับน้ำหนักล้อขนาด 50 kN แสดงในรูปที่ 10

โดยมีข้อสังเกต 2 ประการคือ ค่าความเครียดดึงสูงสุดที่ได้ชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วันและ 90 วัน ค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือ $5.65E+02$ และ $5.28E+02$ ตามลำดับ โดยแตกต่างกันเพียงร้อยละ 6.5 เท่านั้น แสดงให้เห็นอิทธิพลของเวลา

ต่อการพัฒนากำล้างของดินซีเมนต์ที่ตอบสนองต่อน้ำหนักบรรทุกทุกจรรยาที่น้อยลง



รูปที่ 10 ความเครียดดึงแนวราบ ในแปลงที่สร้างรอยร้าวขนาดเล็ก ช่วงเปิดใช้งาน อายุ 28 และ 90 วัน

ข้อสังเกตประการที่ 2 คือ ค่าความเครียดดึงสูงสุดลดลงจากกรณียังไม่ปูชั้นผิวแอสฟัลต์อย่างชัดเจน โดยที่ 28 วัน ลดลงจากวันที่ 3 มากถึงร้อยละ 68 โดยประมาณ ซึ่งเกิดจากการพัฒนากำล้างของดินซีเมนต์เอง และจากการที่ตำแหน่งของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์อยู่ลึกมากขึ้น และถูกคั่นกลางจากน้ำหนักด้วยชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าอย่างมาก

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

โดยตลอดกระบวนการศึกษาวิจัยนี้สามารถสรุปผลการศึกษาที่สำคัญได้ดังนี้

1. ผลทดสอบวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ที่ใช้ในโครงการนี้ คือ ปูนซีเมนต์ น้ำ และโดยเฉพาะดินลูกรัง มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง การสร้างรอยร้าวขนาดเล็ก ตามข้อเสนอแนะของ TTI กรณีไม่สามารถจัดหาเครื่องมือ FWD หรือ LWD ได้นั้น ในขอบเขตของ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการบดอัดพื้นทางดินซีเมนต์เพิ่มเติมในช่วงบ่าของวันที่ 3 ด้วยรถบดขนาด 19 ตัน จำนวน 3 รอบ ทำให้กำล้างของดินซีเมนต์ลดน้อยลงประมาณร้อยละ 37 ซึ่งต่ำกว่าที่กำหนดคือ ร้อยละ 60 แต่ก็พิจารณาได้ว่าเป็นไปในทางปลอดภัย (conservative) ต่อความเสียหายที่เกิดกับดินซีเมนต์โดยยืนยันได้จากผลการพัฒนากำล้างอย่างต่อเนื่องของพื้นทางดินซีเมนต์ในช่วงเวลาต่อมา

2. ผลการตรวจสอบพฤติกรรมรอยร้าวพบว่า ในช่วงอายุแรก ไม่พบรอยร้าวหลักในทั้ง 2 แปลง แต่ในวันที่ 7 รอยร้าวในแปลงควบคุมมีอัตราการเพิ่มความยาวมากกว่าในแปลงที่สร้างรอยร้าวขนาดเล็กถึงร้อยละ 25 และในวันที่ 20 ยังคงไม่พบรอยร้าวหลักในแปลงที่สร้างรอยร้าวขนาดเล็กเลย แต่กลับเริ่มพบในแปลงควบคุมในหลายตำแหน่ง ทำให้สรุปในเบื้องต้นได้ว่าการสร้างรอยร้าวขนาดเล็กช่วยลดการขยายตัวของรอยร้าวในพื้นทางดินซีเมนต์ และลดปัญหาการร้าวแบบสะท้อนในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตได้ ในขณะที่ค่า UCS ของดินซีเมนต์ในกรณีศึกษานี้ต่ำกว่าค่าที่คาดการณ์ ทั้งนี้ปัจจัยต่างๆ เช่น ความชื้นของดิน และการควบคุมวิธีการผสมดินซีเมนต์ เป็นตัวแปรสำคัญที่แตกต่างอย่างมากระหว่างห้องปฏิบัติการและสภาพแวดล้อมจริงในการก่อสร้าง

3. ผลวิเคราะห์ค่าความเครียดดึงแนวราบจากน้ำหนักบรรทุกทุกจรรยา ซึ่งเป็นปัจจัยหลักของการเกิดรอยร้าว พบว่าการพัฒนากำล้างของดินซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน ช่วยลดค่าความเครียดดึงจากวันที่ 3 ลงได้ประมาณร้อยละ 15 ในขณะที่การจำลองการปูทับหน้าด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในกรณีศึกษานี้ทำให้ค่าความเครียดลดลงจากที่วันที่ 3 ประมาณร้อยละ

68 แต่ความแตกต่างระหว่างค่าที่ 28 วัน และ 90 วัน เพียงร้อยละ 6.5 เท่านั้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้สนับสนุนงบประมาณแผ่นดินประจำปีพุทธศักราช 2559-2560 ให้เป็นทุนวิจัยเพื่อดำเนินโครงการ “การใช้ค่าหลุดตัวจากตุ้มกระแทกขนาดเบาเพื่อควบคุมรอยร้าวขนาดเล็กในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์เพื่อลดรอยร้าวแบบสะท้อน” และขอบคุณหน่วยงานท้องถิ่นของจังหวัดฉะเชิงเทราในการอำนวยความสะดวกให้ใช้พื้นที่ก่อสร้างแปลงทดสอบของโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมทางหลวง (2556). มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base). มาตรฐานที่ ทล.-ม. 204/2556. กรมทางหลวง 2556.

[2] ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ สถิตพงษ์ อภิเมธีอำรง (2541). รายงานวิจัยการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างถนนลาดยางที่มีดินซีเมนต์ปอลิโดรอยแตกเป็นพื้นทางกับถนนลาดยางที่มีหินคลุกเป็นพื้นทางและวัสดุผสมรวมเป็นรองพื้นทาง. รายงานฉบับที่ วพ.169, ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง.

[3] Adaska, W. S., and Luhr, D. R. (2004). Control of Reflective Cracking in Cement Stabilized Pavement, paper presented in the 5th international RILEM Conference, Limoges, France.

[4] Sebesta S., (2006). Microcracking for Reduced Shrinkage in Cement-Treated Base, Project Summary Report 0-4502-S, Texas Transportation Institute (TTI), The Texas A&M University System.

[5] Sebesta S. and Scullion T. (2004). Effectiveness of Minimizing Reflective Cracking in Cement-Treated Base by Microcracking, Report No. FHWA/TX-05/0-4502-1, The Texas A&M University System.

[6] Sebesta S. (2005). Continued Evaluation of Microcracking in Texas, Report No. FHWA/TX-06/0-4502-2, The Texas A&M University System.

[7] Scullion, T. (2001). Field Investigation: Pre-Cracking of Soil-Cement Base to Reduce Reflection Cracking, paper presented in the 2002 Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington D. C.

[8] Suntisakul J. et al., (2007). Microcracks to Reduce Reflective Crack in Soil Cement Road in Thailand, Department of Highway Thailand.

[9] Jaritngam, S., Yandell, W. O., and Taneerananon, P. (2013). Development of Strength Model of Lateritic Soil-Cement, Engineering Journal, vol. 17, January 2013, pp. 69-77.

[10] Mitchell, J. K. (1981). Soil improvement: State-of-the-art”, Proc. 10th International

- Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, vol. 4, 1981.
- [11] Thongindam, P. (2009). Enhancement of Backcalculation Techniques for Assessing Flexible Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms, Doctoral Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz University of Hannover, Hannover, Germany
- [12] Hariyadi, E. S., Aurum, K. P. and Subagio B. S. (2013). Theoretical Study of Bonding Condition at the Interface between Asphalt Pavement Layers, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 10, pp. 1590-1597.