

การใช้ดินซีเมนต์แทนหินคลุกในการก่อสร้างถนน

Using Soil-cement Instead of Crushed Rock in Road Construction

พิษณุ ช่วยเวช¹ สราวุธ จริตงาม^{2*} ปฐเมศ ผาณิตพจมาน² และโอภาส สมใจนึก³
 Pisanu Chuaiwate¹, Saravut Jaritngam^{2*}, Pattamad Panedpojaman²
 and Opas Somchainuek³

บทคัดย่อ

เนื่องจากปัจจุบันมีการขาดแคลนปริมาณหินคลุกในพื้นที่ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญและเร่งด่วนสำหรับการหาแหล่งวัสดุในการก่อสร้างถนน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำดินลูกรังผสมซีเมนต์มาใช้เป็นวัสดุพื้นทางทดแทนการใช้หินคลุก การใช้ดินซีเมนต์แทนหินคลุกจะทำให้ได้วัสดุทำถนนที่มีราคาถูก เนื่องจากใช้วัสดุจากพื้นที่ก่อสร้าง งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์สำหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทางแทนชั้นหินคลุก เพื่อช่วยลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุจากการขนส่งวัสดุจากแหล่งหินคลุกที่อยู่ห่างไกลมายังพื้นที่ก่อสร้าง และจากผลการทดสอบดินซีเมนต์พบว่าค่ากำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์มีค่ามากกว่า 17.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐานของกรมทางหลวง คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์มีความแข็งแรงและทนทานเมื่ออัดแน่นแล้ว จากผลการศึกษาโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินซีเมนต์พบว่าค่าการทรุดตัวของถนนน้อยกว่า 3 เซนติเมตร ช่วยลดปัญหาการทรุดตัวของถนน

คำสำคัญ: ดินซีเมนต์ หินคลุก การก่อสร้างถนน

¹ สำนักพัฒนาแหล่งน้ำขนาดใหญ่ กรมชลประทาน

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

³ สำนักงานทางหลวงที่ 18 กรมทางหลวง

* Corresponding author e-mail: jaritngam@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2025.v44i1.264030>

Received: 15 July 2024, Revised: 3 September 2024, Accepted: 5 September 2024

Abstract

Due to shortage of crushed rock in the area, which is a significant and urgent problem for finding materials for road construction. It is necessary to use cement-stabilized soil as a substitute material for the base course instead of using crushed rock. Using soil-cement instead of crushed rock will provide a low-cost road construction material, as it utilizes materials from the construction site area. This article studies the engineering properties of soil-cement to be used as a base course material instead of the crushed rock layer. It would help reduce the possibility of accidents from transporting materials from distant crushed rock sources to the construction site. From the soil-cement testing results, it was found that the compressive strength of cement-stabilized soil exceeds 17.50 ksc after 7 days of curing, meeting the specifications set by the Department of Highways. The engineering properties of soil-cement are strong and durable when compacted. From the study using a computer program to analyze the movement of soil-cement, it was found that the road settlement value is less than 3 cm, helping to reduce road settlement problems.

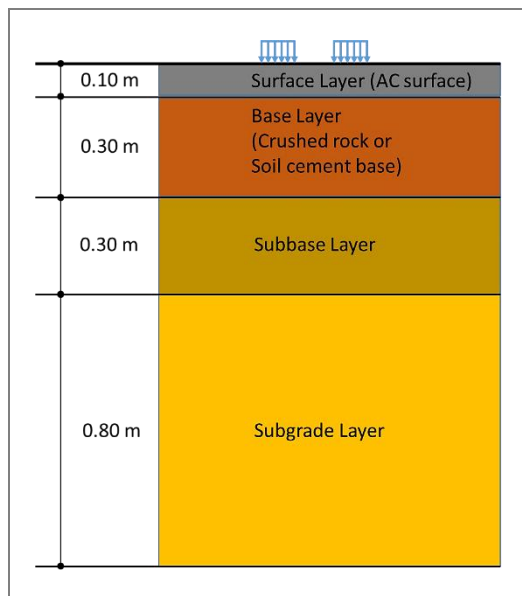
Keywords: Soil-cement, Crushed rock, Road construction

บทนำ

จากความเจริญก้าวหน้าด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในปัจจุบัน ส่งผลให้งานด้านวิศวกรรมโยธามีการพัฒนาตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการพัฒนาในแต่ละด้านจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรธรรมชาติเป็นจำนวนมาก อาจส่งผลให้เกิดการขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติ เช่น วัสดุพื้นทางสำหรับงานด้านวิศวกรรมการทางในปัจจุบันที่มีจำกัด เช่น หินคลุกและกรวด เป็นต้น ตัวอย่างลักษณะการออกแบบพื้นทางที่นิยมใช้ในปัจจุบันดังภาพที่ 1 นิยมใช้หินคลุกเป็นวัสดุรองพื้นทาง

ปัจจุบันหน่วยงานของราชการที่รับผิดชอบในงานด้านการจราจรและการขนส่งของประเทศไทย เช่น กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท และองค์การบริหารส่วนท้องถิ่น เป็นต้น ได้เร่งรัดให้มีการพัฒนาและขยายงานก่อสร้างระบบขนส่งทางถนนเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดภาวะขาดแคลนวัสดุสำหรับการก่อสร้างถนน เช่น วัสดุรองพื้นทางชนิดต่าง ๆ เช่น หินคลุก และในบางพื้นที่การจัดหาวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุกมีความยากลำบาก เนื่องจากในพื้นที่ไม่มีแหล่งหินคลุกซึ่งต้องลำเลียงจากพื้นที่อื่น อันเป็นการเพิ่มต้นทุนในงานก่อสร้างด้วย นอกจากนี้เหมืองหินคลุกเป็นกิจการที่ทำลายสิ่งแวดล้อม ทำลายทรัพยากรธรรมชาติ และทำลายสุขภาพจากการหายใจสูดฝุ่นละอองบริเวณเหมือง จากปัญหาการขาดแคลนและต้นทุนที่สูงขึ้นของหินคลุก การหาวัสดุทดแทนจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยวัสดุที่เหมาะสมที่นำมาทดแทนต้องเป็นวัสดุที่หาง่าย มีราคาถูก และคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ ดินลูกรังเป็นหนึ่งในวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก ราคาถูก และเป็นวัสดุที่นิยมนำมาเป็นวัสดุ

พื้นทางและนำมาเป็นวัสดุทดแทนหินคลุกได้ แต่ดินลูกรังยังมีข้อด้อยด้านการรับน้ำหนักบรรทุก และปัญหาการอ่อนตัวเมื่อสัมผัสกับความชื้น เช่น ในสภาวะน้ำท่วมขัง การพัดพาจากการไหลของน้ำ เป็นต้น



ภาพที่ 1 โครงสร้างชั้นทางที่ใช้ในการวิเคราะห์

หินคลุกที่นิยมนำมาใช้เป็นชั้นพื้นทางมีขนาดเม็ดใหญ่และไม่แยกตัวออกจากกันเมื่อเติมน้ำ ดังนั้นจึงไม่ทำให้สูญเสียความแข็งแรงเมื่อโดนน้ำ ส่วนดินลูกรังเป็นดินเม็ดละเอียดที่มีก้อนกรวดและดินจับตัวแน่นปะปนอยู่ โดยระดับความยึดเหนี่ยวภายในอาจแตกต่างกันตั้งแต่เป็นวัสดุร่วนหลวม ๆ ไปจนถึงเม็ดละเอียดแน่นหนา มีโทสนี เช่น สีแดง สีน้ำตาล และสีเหลือง เนื่องมาจากการมีออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของธาตุเหล็กและอะลูมิเนียมปะปนอยู่ในเนื้อดิน เมื่อผสมซีเมนต์สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น กำลังอัดแกนเดียว (unconfined compressive strength: UCS) ให้สูงขึ้นได้ โดยดินซีเมนต์ที่แข็งตัวช่วยลดค่าดัชนีความเป็นพลาสติกของดิน (plasticity index: PI) เพิ่มขีดจำกัดการหดตัว (shrinkage limit) เพิ่มกำลังอัดแกนเดียวและโมดูลัสยืดหยุ่น (Little and Nair, 2009) กระบวนการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์จะช่วยเพิ่มความทนทานและความแข็งแรงของดิน (Winterkorn and Fang, 1991) ดินที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์จะมีคุณสมบัติแบบกึ่งแข็งตัวเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักและทำให้ชั้นโครงสร้างดินมีความแข็งแรงขึ้น เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นสารช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคภายในมวลดิน ในขณะเดียวกันก็ลดค่าความชื้นในชั้นดิน (ASTM, 2017) การวิจัยก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงดินเป็นแนวทางที่ประหยัดในการเสริมกำลังดินในการก่อสร้างและลดปริมาณการขนส่งดิน (McCarthy, 1994; Kukko, 2000)

ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ คือ ปริมาณซีเมนต์ ชนิดของดิน ขนาดผลของเม็ดดิน ขั้นตอนการก่อสร้างหรือการผสมดินซีเมนต์และวิธีการบ่ม (Mitchell *et al.*, 1972) นอกจากนี้ปัจจัยหลายประการ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ความพรุน และปริมาณ

ความชื้นในเวลาที่ยอดดินส่งผลต่อพฤติกรรมของดินซีเมนต์ (Clough *et al.*, 1981; Consoli *et al.*, 2011) ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ซีเมนต์เพื่อให้ดินมีเสถียรภาพพบว่าความผันผวนของคุณสมบัติด้านกำลังขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและคุณสมบัติทางวิศวกรรมเนื่องจากความแตกต่างในองค์ประกอบของดิน ตลอดจนความแตกต่างในทางกายภาพและปฏิกิริยาเคมีระหว่างดินกับปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม (Little and Nair, 2009)

เมื่อใช้วัสดุดินซีเมนต์เป็นชั้นบดอัดแน่นเหนือดินเดิมที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกต่ำ พบว่าการพิบัติของดินจะเกิดขึ้นเนื่องจากหน่วยแรงตั้งใต้ฐานของชั้นที่ได้รับการปรับปรุง (Consoli *et al.*, 2003) ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าหน่วยแรงตั้งเป็นการวัดถึงความแข็งแรงของวัสดุดินซีเมนต์ อย่างไรก็ตามจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าความต้านทานแรงดึงของดินซีเมนต์โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างร้อยละ 9 ถึง 14 ของกำลังอัดแกนเดียว (Clough *et al.*, 1981; Consoli *et al.*, 2011; Consoli *et al.*, 2003; Ingles and Metcalf, 1972; Dass *et al.*, 1994; Consoli *et al.*, 2001) ด้วยเหตุผลดังกล่าวการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวจึงนิยมนำมาใช้ในการทดสอบ เพราะเป็นวิธีที่สะดวกที่สุดสำหรับการกำหนดความแข็งแรงของดินซีเมนต์ (Consoli *et al.*, 2007) กำลังอัดแกนเดียวของดินหาได้จากน้ำหนักกดต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินทรงกระบอกเพราะจะพิบัติในการทดสอบแรงอัดอย่างง่าย ความแข็งแรงของวัสดุดินซีเมนต์มักได้รับการประเมินผ่านการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยการเตรียมและการบ่มตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM D 1632 (Advance Standards Transforming Markets (ASTM), 2007) ซึ่งแนะนำให้บ่มแบบชื้นสำหรับตัวอย่างวัสดุที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ในดิน แล้วทำการแช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลาสองชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ (Advance Standards Transforming Markets (ASTM), 2007; Consoli *et al.*, 2003) การนำไปใช้ต้องพิจารณาค่ากำลังอัดแกนเดียวแบบเปียกสำหรับดินชนิดต่าง ๆ ที่แนะนำโดยสถาบันมาตรฐานคอนกรีตของสหรัฐอเมริกา (American concrete institute: ACI) (Jaritngam *et al.*, 2013) โดยใช้ระบบจำแนกดินวิธี AASHTO soil classification system (AASHTO) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่ากำลังอัดแกนเดียวสำหรับดินชนิดต่าง ๆ ที่แนะนำโดยสถาบันมาตรฐานคอนกรีตของสหรัฐอเมริกา

ลักษณะชั้นดิน	ระบบจำแนกดิน วิธี AASHTO	กำลังอัดแกนเดียว (กิโลปาสคาล)	
		7 วัน	28 วัน
กรวดและทราย	A-1 A-2 A-3	30,000-60,000	40,000-10,000
ทราย	A-4 A-5	25,000-50,000	30,000-90,000
ดินเหนียว	A-6 A-7	20,000-40,000	25,000-60,000

ที่มา: Jaritngam *et al.* (2013)

จากการศึกษาค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังและหินคลุกที่ผสมซีเมนต์ในพื้นที่จังหวัดสงขลา พบว่าหินคลุกใช้ปริมาณซีเมนต์ที่น้อยกว่าดินลูกรัง ตามมาตรฐานควรได้ค่าประมาณ 1,716 กิโลปาสกาล (17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)) ที่เวลาบ่ม 7 วัน นั่นคืออัตราส่วนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินลูกรังประมาณร้อยละ 3 (Jaritngam *et al.*, 2014) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่ากำลังอัดแกนเดียวสำหรับดินชนิดต่าง ๆ

การทดสอบ	อัตราส่วนซีเมนต์	เวลา (วัน)	กำลังอัดแกนเดียว (กิโลปาสกาล)	
			ดินลูกรัง (A-2-7)	หินคลุก (A-2-4)
C0T0	0	0	-	-
C3T7	3	7	2,220	2,444
C5T7	5	7	3,841	5,408
C7T7	7	7	5,357	7,032
C9T7	9	7	6,542	7,750
C3T28	3	28	3,388	3,444
C5T28	5	28	5,359	7,069
C7T28	7	28	6,769	12,084
C9T28	9	28	8,164	14,212

ที่มา: Jaritngam *et al.* (2014)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของดินลูกรังปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยปูนซีเมนต์ (เรียกว่า ดินซีเมนต์) เพื่อให้สามารถเป็นวัสดุทดแทนหินคลุกได้ และการหลุดตัวของถนนที่ใช้ดินลูกรังปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นของพื้นผิวถนนยืดหยุ่น โดยอาศัยทฤษฎีชั้นวัสดุของเบอร์มิสเตอร์ (Burmister) เนื่องจากการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุชั้นพื้นทางส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกและความมั่นคงของถนน จึงจำเป็นต้องจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของถนนเพื่อตรวจสอบความมั่นคงแข็งแรงก่อนนำไปใช้งาน

วิธีดำเนินการวิจัย

การสำรวจเพื่อหาสถานที่ที่เป็นการทดสอบในภาคสนาม ความเหมาะสมของการทำวิจัยแหล่งข้อมูลสำหรับวิจัย และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการวิจัย การลงพื้นที่ได้ดำเนินการแล้ว 1 จุด คือ โครงการบรรเทาอุทกภัยอำเภอหาดใหญ่ (ระยะที่ 2) จังหวัดสงขลา โดยโครงการใช้ระยะเวลาดำเนินการ 7 ปี (พ.ศ. 2558-2564) วงเงินงบประมาณ 6,500 ล้านบาท โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันและบรรเทาปัญหาอุทกภัยในตัวเมืองหาดใหญ่ และเก็บกักน้ำไว้สำหรับการเพาะปลูกด้านการเกษตร ผลิตน้ำประปาเพื่ออุปโภค อุตสาหกรรม สนองความต้องการใช้น้ำในด้านต่าง ๆ ในจังหวัดสงขลาที่กำลังขยายตัวขึ้น

โครงการดังกล่าวมีปัญหาการวิบัติของถนนริมคันคลอง ดังภาพที่ 2 และแก้ปัญหาการวิบัติโดยใช้ดินซีเมนต์แทนหินคลุกในการก่อสร้างถนน เนื่องจากการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจของการนำดินลูกรังปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไปใช้งานก่อสร้างถนน พบว่าการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์เนื่องจากต้นทุนของหินคลุกมีราคาสูงมากและมีการขาดแคลนในพื้นที่ ต้องมีการขนส่งวัสดุทำให้เกิดความสิ้นเปลืองเนื่องจากราคาน้ำมันมีราคาสูง และโอกาสที่เกิอุบัติเหตุเนื่องจากขนส่งวัสดุได้



ภาพที่ 2 สภาพการทรุดตัวของดินบริเวณโครงการบรรเทาอุทกภัยอำเภอหาดใหญ่ (ระยะที่ 2) จังหวัดสงขลา

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความมั่นคงและแข็งแรงของถนนที่ใช้ดินลูกรังปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ โดยเลือกใช้โปรแกรม KENPAVE ซึ่งเป็นหนึ่งในแอปพลิเคชันที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการวิเคราะห์วิศวกรรมถนนแบบยืดหยุ่น ซึ่งได้รับการพัฒนาโดย Huang (2004) ดังภาพที่ 3 โปรแกรมที่ใช้งานเป็นเวอร์ชัน Microsoft-Windows ที่รวมโปรแกรม KENLAYER สำหรับการออกแบบถนนแบบยืดหยุ่น และโปรแกรม KENSLABS สำหรับการออกแบบแบบคอนกรีต ในงานวิจัยนี้โปรแกรม KENLAYER จะถูกใช้เพื่อหาค่าการโก่งตัวของถนนที่ตำแหน่งผิวถนน โดยการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของชั้นพื้นทางเพื่อเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของถนน โปรแกรมใช้คุณสมบัติวัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) ไม่เชิงเส้น (nonlinear) และความหนืด (viscoelastic) สำหรับวัสดุที่แตกต่างกัน โปรแกรมสามารถทำการวิเคราะห์ได้ถึง 19 ชั้น (layer) โดยแต่ละชั้นสามารถกำหนดให้วัสดุมีคุณสมบัติแตกต่างกันได้ และทำการวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายได้ (performs damage analysis) สามารถใช้กับการวิเคราะห์แรงภายใต้แรงจากเพลาดียว-ล้อเดี่ยว (single axle-single tire) เพลาดียว-ล้อคู่ (single axle-dual tire) เพลาคู่-ล้อคู่ (tandem axles-dual tires) หรือสามเพลาล้อคู่ (tridem axles-dual tires) สำหรับกรณีกลุ่มแรงเดี่ยวและหลายกลุ่มแรงสามารถหาการทรุดตัวในชั้นวัสดุต่าง ๆ ความเครียดในแนวตั้งบนพื้นผิวถนนและความเครียดแรงดึงในแนวรัศมี (tangential) ที่ด้านล่างของชั้นยางมะตอยสามารถใช้สำหรับการวิเคราะห์ความเสียหายของถนนได้ (Huang, 2004)

พารามิเตอร์ป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์ความยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic analysis) คือ ปริมาณการจราจร (traffic load) คุณสมบัติของวัสดุ ความหนาของแต่ละชั้น จำนวนกลุ่มของแรง เป็นต้น



ภาพที่ 3 การใช้งานโปรแกรม KENPAVE

ที่มา: Huang (2004)

กำลังอัดแกนเดียวที่เวลาบ่ม 7 วันของตัวอย่างดินสามารถใช้ตารางที่ 1 และ 2 ในการเป็นแนวทางในการวางแผนและออกแบบส่วนผสมซึ่งค่าที่ได้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดิน การวิเคราะห์โดยโปรแกรม KENLAYER เพื่อศึกษาโดยการสร้างแบบจำลอง 2 มิติของถนนจะต้องใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus: E) เป็นตัวแปรหลักสำคัญต่อการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของค่าการแอ่นตัวหรือค่าการทรุดตัวของผิวถนน การพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสามารถพิจารณาจากตารางที่ 3 หรือใช้วิธีแปลงค่ากำลังอัดแกนเดียวเป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

ตารางที่ 3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทั่วไป (young's modulus)

ลักษณะของดิน	โมดูลัสยืดหยุ่น (กิโลปาสคาล)
1. ดินทราย	5,000-81,000
1.1 ตะกอนทราย	5,000-20,000
1.2 หลวม	10,000-25,000
1.3 แน่นปานกลาง	30,000-50,000
1.4 แน่น	50,000-81,000

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ลักษณะของดิน	โมดูลัสยืดหยุ่น (กิโลปาสกาล)
2. กรวดและทราย	30,000-320,000
2.1 หลวม	30,000-80,000
2.2 แน่นปานกลาง	80,000-160,000
2.3 แน่น	160,000-320,000
3. ตะกอนทราย	7,000-21,000
4. ดินเหนียว	2,000-250,000
4.1 อ่อนมาก	2,000-15,000
4.2 อ่อน	5,000-25,000
4.3 ปานกลาง	15,000-40,000
4.4 แข็ง	40,000-100,000
4.5 ทราย	25,000-250,000

ที่มา: Kulhawy and Mayne (1990)

การวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสมดินและซีเมนต์มีมากมาย เช่น โมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสมดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์และแปรผันจาก 689,000 กิโลปาสกาล ถึง 13,790,000 กิโลปาสกาล สำหรับส่วนผสมดินซีเมนต์สำหรับดินเม็ดหยาบ และจาก 1,790,000 กิโลปาสกาล ถึง 5,240,000 กิโลปาสกาล สำหรับส่วนผสมดินเม็ดละเอียด (Balmer, 1958) งานวิจัยล่าสุดเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านกำลังอัดแกนเดียวมีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Uddin *et al.*, 1997; Lee *et al.*, 2005; Lorenzo and Bergado, 2006)

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสมดินซีเมนต์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับกำลังอัดแกนเดียว (Lee *et al.*, 2005) ดังสมการ (1)

$$E = 145q_u \quad (1)$$

ส่วนผสมดินซีเมนต์สามารถเทียบได้กับคอนกรีตคุณภาพต่ำที่มีค่ากำลังอัดไม่มาก โดยอ้างอิงจากการทดสอบการผสมดินและทดสอบติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าที่มหาวิทยาลัยเท็กซัสเอแอนด์เอ็ม โดย Briaud *et al.* (2000) แนะนำว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของส่วนผสมดินซีเมนต์สามารถประมาณได้จากสมการ (2)

$$E = 12,900q_u^{0.41} \quad (2)$$

เมื่อ E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น ของส่วนผสมดินซีเมนต์ (กิโลปาสกาล)

q_u คือ ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ได้จากทดสอบมีหน่วย (กิโลปาสกาล)

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากสมการ (2) ถือเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ (Rutherford *et al.*, 2005) โมดูลัสยืดหยุ่น ของส่วนผสมดินซีเมนต์สามารถคำนวณได้คล้ายกับคอนกรีต (Wang *et al.*, 2014) และสามารถคำนวณโดยใช้สมการ (3)

$$E = 30,000 \sqrt{q_u} \quad (3)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดแกนเดียว พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่น ที่คำนวณจากสมการ (2) และ (3) มีแนวโน้มต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากวิธีอื่น ๆ แต่ค่าที่คำนวณจากสมการ (3) จะสูงกว่าช่วงเฉลี่ยของค่าเหล่านั้นเล็กน้อย ในทางปฏิบัติวิศวกรรม จึงอาจใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของส่วนผสมดินซีเมนต์อยู่ในช่วงของค่าที่คำนวณจากสมการ (1) (2) และ (3) (Wang *et al.*, 2014)

จากการศึกษาผลการเจาะสำรวจดินในโครงการบรรเทาอุทกภัย อำเภอลำดวน จังหวัดสงขลา ระยะที่ 2 งานปรับปรุงคลองระบายน้ำ รัชกาลที่ 1 จังหวัดสงขลา เพื่อวางแผนการปรับปรุงคุณภาพถนนในโครงการโดยใช้ดินซีเมนต์ จากการรวบรวมผลการทดสอบค่ากำลังของดินฐานรากที่ได้ทดสอบในบริเวณที่ทำการก่อสร้างสรุปได้ดังตารางที่ 4 โดยทดลองปรับเปลี่ยนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นพื้นทาง ซึ่งกำหนดให้มีค่าระหว่าง 115,000-1,200,000 กิโลปาสคาล

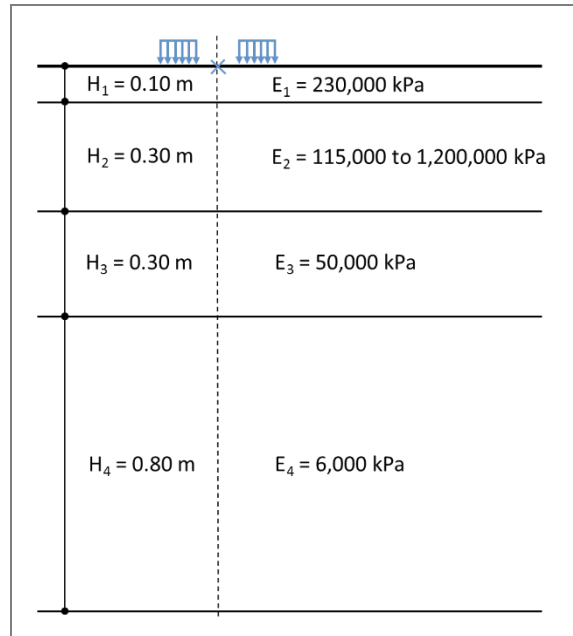
ตารางที่ 4 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ

วัสดุชั้น	โมดูลัสยืดหยุ่น (กิโลปาสคาล)	อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)	น้ำหนักหน่วย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
ชั้นผิวทาง	230,000	0.35	2,400
ชั้นพื้นทาง	115,000-1,200,000	0.30	2,300
ชั้นรองพื้นทาง	50,000	0.30	2,250
ชั้นดินคันทาง	6,000	0.40	1,800

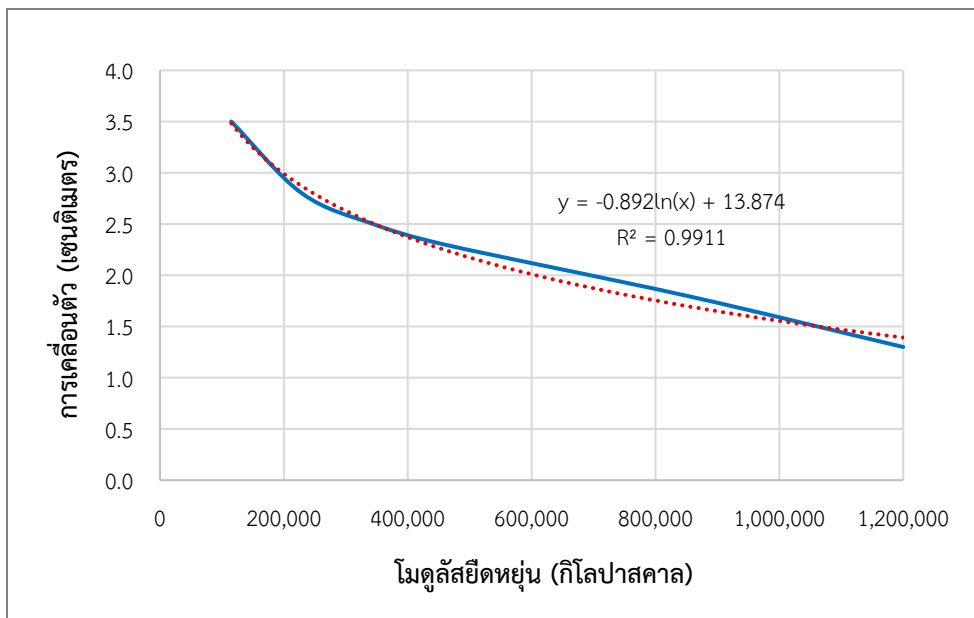
ผลการวิจัย

จากการศึกษาการทรุดตัวของถนนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจราจรโดยใช้โปรแกรม KENLAYER เพื่อศึกษาการสร้างแบบจำลอง 2 มิติของถนน ดังภาพที่ 4 และใช้ค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินดังตารางที่ 4 โดยทดลองปรับเปลี่ยนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นพื้นทาง พบว่าการทรุดตัวของดินในโครงการ มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ ดังภาพที่ 5

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นพื้นทางที่ 350,000 กิโลปาสคาล จากสมการ (1) ค่าอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อกำลังอัดแกนเดียวประมาณ 145 สามารถให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 2,413 กิโลปาสคาล จะให้ค่าการทรุดตัวของถนนประมาณ 2.5 เซนติเมตร เทียบเท่ากับดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่ร้อยละ 3 (จากตารางที่ 2) สูงกว่าค่ามาตรฐาน 1,716 กิโลปาสคาล (17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ที่แนะนำโดยกรมทางหลวง ซึ่งอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อกำลังอัดแกนเดียวประมาณ 204



ภาพที่ 4 แบบจำลอง 2 มิติของถนนสำหรับการวิเคราะห์



ภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินในโครงการ

การอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ส่วนผสมของดินลูกรังซีเมนต์เพื่อทดแทนหินคลุก เนื่องจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าส่วนผสมของดินและปูนซีเมนต์สามารถผ่านข้อกำหนดด้านกำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น โดยการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่ม แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการบ่มเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างดินและปูนซีเมนต์ ทำให้มีค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์มากกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบ การทำการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อให้โครงการมีความแข็งแรงลดการทรุดตัว และการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินจะต้องมีการออกแบบ ตรวจสอบการทำงานและการควบคุมคุณภาพงานอย่างเป็นระบบ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสามารถนำซีเมนต์มาปรับปรุงดินในโครงการได้โดยไม่ต้องขนย้ายวัสดุด้วยคุณภาพออกนอกพื้นที่โครงการฯ ซึ่งทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด เป็นการลดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากกระบวนการขนส่งดิน และสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้เนื่องจากราคาของหินคลุกถูกผลักดันให้สูงขึ้นจากราคาพลังงานที่สูงและค่าใช้จ่ายด้านสิ่งแวดล้อมจะต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมที่ค้นหาวิธีการใหม่ ๆ ในการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่นในด้านความแข็งแรง ต้นทุน การใช้พลังงาน สถานที่ผลิต การขนส่ง และการพิจารณาด้านสิ่งแวดล้อม

สรุปผลการวิจัย

การคำนวณโดยการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นของพื้นผิวถนนยึดหยุ่น โดยอาศัยทฤษฎีชั้นวัสดุของเบอร์มิสเตอร์แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดแกนเดียวกับค่าการทรุดตัว เมื่อเพิ่มกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุหรือเพิ่มค่าโมดูลัสยึดหยุ่นจะทำให้ค่าการทรุดตัวของถนนในโครงการฯ ลดลง

การเติมปูนซีเมนต์ลงในดินลูกรังเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินสามารถทำได้วัสดุที่ให้ความแข็งแรงและการกระจายน้ำหนักที่ดีขึ้น จากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมเช่น กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังที่ผสมซีเมนต์เพียงร้อยละ 3 ก็เพียงพอสำหรับการทำตัวอย่างดินซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งชี้ให้เห็นถึงข้อได้เปรียบด้านเศรษฐศาสตร์ของวิธีนี้ทั้งในเรื่องของต้นทุนที่ลดลงและประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม

ข้อเสนอแนะ

การใช้ส่วนผสมของดินลูกรังซีเมนต์เพื่อทดแทนหินคลุกควรใช้ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมจะลดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรัง คือ ซีเมนต์ ดังนั้นควรทำการตรวจสอบคุณภาพงานระหว่างการก่อสร้างและหลังการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์เพื่อควบคุมคุณภาพงานด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานก่อสร้างชลประทานขนาดกลางที่ 16 กรมชลประทาน ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Advance Standards Transforming Markets (ASTM). (2007). *ASTM D1632-07: Standard practice for making and curing soil-cement compression and flexure test specimens in the laboratory*. Pennsylvania: ASTM International.
- Advance Standards Transforming Markets (ASTM). (2017). *ASTM D1633-17: Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders*. Pennsylvania: ASTM International.
- Balmer, G.G. (1958). Shear strength and elastic properties of soil-cement mixtures under triaxial loading. In *Proceedings of American Society for Testing Materials* (pp. 1187-1204). Illinois: Portland Cement Association Research and Development Laboratories.
- Briaud, J.L., Smith, B.E. and Meyer, B.R. (2000). Behavior of pile foundations under cyclic loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 333-344.
- Clough, G.W., Sitar, N., Bachus, R.C. and Rad, N.S. (1981). Cemented sands under static loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(6), 799-817, doi: <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001152>.
- Consoli, N.C., Foppa, D., Festugato, L. and Heineck, K.S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 197-205, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:2\(197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197)).
- Consoli, N.C., Rosa, A.D., Corte, M.B., Lopes, L.D.S. and Consoli, B.S. (2011). Porosity-cement ratio controlling strength of artificially cemented clays. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), 1249-1254, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000283](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000283).
- Consoli, N.C., Vendruscolo, M.A. and Prietto, P.D.M. (2003). Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(1), 96-101, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:1\(96\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:1(96)).
- Dass, R.N., Yen, S.C., Puri, V.K., Das, B.M. and Wright, M.A. (1994). Tensile stress-strain characteristics of lightly cemented sand. *Geotechnical Testing Journal*, 17(3), 305-314, doi: <https://doi.org/10.1520/GTJ10105J>.
- Huang, Y.H. (2004). *Pavement analysis and design*. New Jersey: Pearson, Prentice Hall.
- Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972). *Soil stabilization principles and practice*. Sydney: Butterworths.

- Jaritngam, S., Somchainuek, O. and Taneerananon, P. (2014). Feasibility of laterite-cement mixture as pavement base course aggregate. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 38(C1), 275-284.
- Jaritngam, S., Yandell, W.O. and Taneerananon, P. (2013). Development of strength model of lateritic soil-cement. *Engineering Journal*, 17(1), 69-78.
- Kukko, H. (2000). Stabilization of clay with inorganic by-products. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12(4), 307-309, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:4\(307\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:4(307)).
- Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design*. California: Electric Power Research Institute.
- Lee, F.H., Lee, Y., Chew, S.H. and Yong, K.Y. (2005). Strength and modulus of marine clay-cement mixes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(2), 178-186, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:2\(178\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(178)).
- Little, D.N. and Nair, S. (2009). *Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials (NCHRP Report 20-07)*. Texas: Texas Transportation Institute.
- Lorenzo, G. and Bergado, D.T. (2006). Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2), 161-174, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:2\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(161)).
- McCarthy, J.E. (1994). *Soil stabilization for pavements*. Washington, DC: Department of the Army and Air Force of the United States.
- Mitchell, J.K., Ueng, T.S. and Monismith, C.L. (1972). *Behavior of stabilized soils under repeated loading: Report 5, performance evaluation of cement-stabilized soil layers and its relationship to pavement design*. California: University of California.
- Rutherford, C., Biscontin, G. and Briaud, J.L. (2005). *Design manual for excavation support using deep mixing technology*. Texas: Texas A&M University.
- Uddin, K., Balasubramaniam, A.S. and Bergardo, D.T. (1997). Engineering behaviors of cement treated Bangkok soft clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 28(1), 89-119.
- Wang, D., Olowokere, D. and Zhang, L. (2014). Interpretation of soil-cement properties and application in numerical studies of ground settlement due to tunneling under existing metro line. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(5), 1275-1289, doi: <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9803-2>.
- Winterkorn, H.F. and Fang, H.Y. (1991). Soil technology and engineering properties of soils. In Fang, H.Y. (Ed.). *Foundation engineering handbook*, pp. 88-143. New York: Springer.