

การศึกษาประเมินสมการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุสร้างทางผสมซีเมนต์

Study of Evaluation of UCS Prediction Equation of Cement Stabilized Materials

อัครพัฒน์ สว่างสุริย์ ธีรภัทร์ ศิริรัตนอักษร และ จิรโรจน์ สุกรัตน์

สำนักวิจัยและพัฒนาทางหลวง กรมทางหลวง

Email : sawangsuriya@gmail.com, teerapat.geotechnical@gmail.com, sjiraroht@hotmail.com

บทคัดย่อ

การประยุกต์ใช้วัสดุท้องถิ่นหรือวัสดุที่ด้อยคุณภาพผสมปูนซีเมนต์ เพื่อลดผลกระทบจากทรัพยากรธรรมชาติ และแก้ไขปัญหาวัสดุก่อสร้างขาดแคลน เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ และได้การยอมรับในงานก่อสร้าง และบูรณะทางหลวง หากผู้ปฏิบัติงานทราบปริมาณปูนซีเมนต์และประเมินค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน (7-Day Unconfined Compressive Strength, UCS) ได้ก่อนล่วงหน้า โดยไม่ต้องรอผลการออกแบบส่วนผสม จะเป็นแนวทางให้ผู้ปฏิบัติงานพิจารณาคัดเลือกวัสดุท้องถิ่นหรือวัสดุที่ด้อยคุณภาพควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ไม่ให้ มากจนเกินความพอดี และได้ค่า UCS ตามข้อกำหนดอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น บทความนี้เป็นการศึกษา ประเมินสมการทำนายค่า UCS ของวัสดุสร้างทางปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ (1) พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ (2) พื้นทางวัสดุหินฝุ่น และ (3) รองพื้นทางดินซีเมนต์ เนื่องจากปัจจุบันยัง ไม่มีมาตรฐานและวิธีการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน ของวัสดุสร้างทางปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นที่ยอมรับในประเทศไทย ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้ศึกษาจึงพิจารณาเลือกสมการทำนายของ Sunitsakul et al. และกษิตและคณะ ในการทำนายค่า UCS ของวัสดุสร้างทางผสมซีเมนต์ทั้งสามชนิด จากข้อมูลจำนวน 270 ชุด ผลการศึกษาเปรียบเทียบค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบในการศึกษาครั้งนี้ กับค่า UCS ที่ได้จาก สมการทำนายพบว่า สมการทำนายของ Sunitsakul et al. มีความเที่ยงตรง และแม่นยำกว่าสมการทำนาย ของกษิตและคณะ

คำสำคัญ :

สมการทำนาย ค่ากำลังรับแรงอัด ปริมาณปูนซีเมนต์ วัสดุสร้างทาง

Abstract

The use of local materials or off-specification materials stabilized with cement for minimizing natural resource and environmental impacts is one of the cost-effective solutions in highway construction and rehabilitation. If the cement content and the 7-day unconfined compressive strength (UCS) of cement stabilized materials can be estimated prior to the mix design process, this will provide the practitioners with a guideline for local material selection and suitable amount of cement to meet the UCS according to the design specification. This paper is to evaluate the

empirical equations for predicting the UCS of three types of cement stabilized materials e.g. (1) cement modified crushed rock base, (2) pavement recycling base, and (3) soil-cement subbase. Since there was no standard and acceptable method for predicting the 7-day UCS of cement stabilized materials at the present in Thailand, the prediction equations proposed by Sunitsakul et al. and Kasidit et al. were considered in this study to estimate the UCS of these three types of cement stabilized materials. Based on 270 test data, a comparison between the UCS obtained from the laboratory tests and that obtained from the prediction equations suggested that an equation by Sunitsakul et al. was more accurate and precise than that of Kasidit et al.

Keywords :

prediction equation, unconfined compressive strength, cement content, pavement material

1. บทนำ

การประยุกต์ใช้วัสดุท้องถิ่นหรือวัสดุที่ด้อยคุณภาพผสมปูนซีเมนต์ เพื่อลดผลกระทบจากทรัพยากรธรรมชาติ และแก้ไขปัญหาวัสดุก่อสร้างขาดแคลนเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ และได้การยอมรับในงานก่อสร้างและบูรณะทางหลวง หากผู้ปฏิบัติงานทราบปริมาณปูนซีเมนต์และประเมินค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน (7-Day Unconfined Compressive Strength, UCS) ได้ก่อนล่วงหน้า โดยไม่ต้องรอผลการออกแบบส่วนผสม จะช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถพิจารณาคัดเลือก คัดกรอง และคัดแยกวัสดุท้องถิ่น หรือวัสดุที่ด้อยคุณภาพ ก่อนนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมปูนซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นแนวทางจำกัดปริมาณส่วนละเอียดและควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ไม่ให้มากเกินไปจนเกินความเหมาะสมพอดีได้ค่า UCS ตามข้อกำหนด ช่วยป้องกันปัญหาความเสียหายก่อนเวลาอันควร และช่วยประหยัดงบประมาณก่อสร้างและบำรุงรักษาทางหลวง

นอกจากนี้ ในการบูรณะปรับปรุงถนนลาดยางเดิม ด้วยการนำวัสดุชั้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพ แล้วนำกลับมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) ตามทล.-ม. 213/2543 การจำกัดและควบคุมปริมาณส่วนผ่านตะแกรงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาพความเป็นจริงในปัจจุบัน ถนนเดิมอาจผ่านการซ่อมบำรุงหลายครั้งในลักษณะงานแก้ไขของสำนักบริหารบำรุงทาง ดังนั้นการบูรณะและปรับปรุงทางหลวงในลักษณะวัสดุหมุนเวียนรอบสอง อาจเพิ่มส่วนละเอียดของส่วนผสมระหว่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตกับพื้นทางวัสดุหมุนเวียนเดิม ทำให้ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จึงเพิ่มโอกาสเกิดปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage Crack) ได้ [1]

การคาดประมาณค่า UCS ของวัสดุสร้างทางปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์โดยใช้สมการทำนาย จะช่วยให้วิศวกรและผู้ควบคุมงานก่อสร้างสามารถประเมินค่า UCS ของวัสดุสร้างทางได้ก่อนออกแบบส่วนผสมจริง วิศวกรและผู้ควบคุมงานก่อสร้างสามารถตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของส่วนผสมขณะทำการก่อสร้างให้เป็นไปตามเงื่อนไขและข้อกำหนด

ของการออกแบบได้อย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การพิจารณาคุณสมบัติและความเหมาะสมของวัสดุสร้างทางก่อนออกแบบส่วนผสมยังเป็นการช่วยควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ไม่ให้มากเกินไป หรือน้อยจนเกินไป ช่วยคัดเลือกและหรือคัดกรองแหล่งวัสดุที่จะนำไปใช้ออกแบบส่วนผสมและก่อสร้างชั้นทางผสมซีเมนต์ เพื่อให้ฝ่ายก่อสร้างและฝ่ายวิเคราะห์ตรวจสอบมั่นใจในคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามที่ผู้ออกแบบแนะนำ และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการชำรุดเสียหายก่อนเวลาอันควร

บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเที่ยงตรงและแม่นยำของสมการทำนายค่า UCS ที่ 7 วัน ของวัสดุสร้างทางผสมซีเมนต์ 3 ชนิด ได้แก่ พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ พื้นทางวัสดุหุมนเวียน และรองพื้นทางดินซีเมนต์ โดยพิจารณาสมการทำนายของ Sunitsakul et al. [2] และสมการของกษิตติและคณะ [3]

2. การศึกษาที่ผ่านมา

2.1 สมการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุสร้างทางผสมดินซีเมนต์

Sunitsakul et al. [2] ได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS (ksc) ที่ 7 วัน ของวัสดุสร้างทางผสมซีเมนต์กับค่า CBR (%) ของวัสดุสร้างทางก่อนปรับปรุงคุณภาพและอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (Water to Cement Ratio, w/c) ไว้ดังนี้

$$UCS = 4.19 [CBR/(w/c)]^{0.58} \quad (1)$$

เมื่อ CBR คือ ค่า CBR ที่ได้จากการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soaked CBR) ที่ความแน่นแห้งร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุด จากการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามทล.-ท.108/2517 โดยกำหนดว่า ปริมาณปูนซีเมนต์ต้องไม่เกินร้อยละ 6

นอกจากนี้ จากงานศึกษาส่วนผสมของวัสดุหุมนเวียนระหว่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตกับพื้นทางหินคลุก กษิตติและคณะ [3] ได้พัฒนาและเสนอความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่า UCS (ksc) ที่ 7 วัน ของวัสดุสร้างทางผสมซีเมนต์ไว้ดังนี้

$$UCS = CBR (D/B)^{-0.6} \quad (2)$$

เมื่อ D/B คือ อัตราส่วนระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของส่วนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ของวัสดุก่อนปรับปรุงคุณภาพต่อร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณปูนซีเมนต์ (Dust to Binder Ratio) โดยกำหนดว่า ปริมาณปูนซีเมนต์ต้องไม่เกินร้อยละ 5

อนึ่ง ค่า UCS ของวัสดุสร้างทางผสมซีเมนต์จากสมการของกษิตติและคณะยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ก่อนปรับปรุงคุณภาพ อัคคพัฒน์ [4] และ อัคคพัฒน์และฉัตรชัย [5] แนะนำว่า สมการ (2) เหมาะสำหรับวัสดุจำพวก Non-plastic (NP) แต่หากเป็นวัสดุจำพวก Plastic หรือมีค่าดัชนีพลาสติกซิตี (Plasticity Index, PI) สมการ (2) จำเป็นต้องปรับค่าสัมประสิทธิ์ใหม่ให้เหมาะสมตามชนิดของวัสดุสร้างทาง

2.2 ความเที่ยงตรงและความแม่นยำของสมการทำนาย

ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วย ความเที่ยงตรง (Accuracy) และความแม่นยำ (Precision) โดยค่าความเที่ยงตรงแสดงได้จากค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูล (Central Tendency) ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าฐานนิยม เป็นต้น หากข้อมูลมีแนวโน้มที่คลาดเคลื่อนไปจากแนวโน้มสู่ศูนย์กลางน้อย แสดงว่าข้อมูลชุดนั้นมีความเที่ยงตรงสูง ดังนั้นค่าความเที่ยงตรงจึงหมายถึงความสามารถในการทำนายโดยเฉลี่ยของสมการทำนายที่ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด ในขณะที่ค่าความแม่นยำเป็นการแสดงถึงการกระจายตัว (Dispersion) ของข้อมูล

หรือข้อมูลมีการเกาะกลุ่มกัน (Repeatability) อย่างไร ข้อมูลที่แสดงถึงความแม่นยำ ได้แก่ พิสัย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความแปรปรวน เป็นต้น [6] ดังนั้นความสัมพันธ์ของข้อมูลทางสถิติสามารถแจกแจงได้ดังนี้ ไม่เที่ยงตรงและไม่แม่นยำ เที่ยงตรงแต่ไม่แม่นยำ ไม่เที่ยงตรงแต่แม่นยำ และเที่ยงตรงและแม่นยำ

ความแม่นยำของสมการทำนายสามารถประเมินได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าเอนเอียง (Coefficient of Variation, COV) ดังสมการ (3) ดังนั้นหากค่า COV สูง แสดงว่าสมการทำนายนั้นให้ข้อมูลที่มีการกระจายตัวมาก หรือมีความแม่นยำต่ำ

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3)$$

เมื่อ σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) และ μ คือ ค่าเฉลี่ย (Mean) [7]

Cherubini and Orr [8] และ Briaud and Tucker [9] ได้แนะนำค่า Ranking Distance (RD) และ Ranking Index (RI) ดังสมการ (4) และ (5) ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นค่าดัชนีชี้วัดความเที่ยงตรงและความแม่นยำของสมการทำนาย โดยทั้งค่า RD และค่า RI พิจารณาความเที่ยงตรงจากค่าเฉลี่ย (μ) และ

ความแม่นยำจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) กล่าวคือ ค่า RD และค่า RI ยิ่งน้อยหรือเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าสมการทำนายมีความเที่ยงตรงและมีความแม่นยำ

$$RD = \sqrt{\{[1-\mu_K]^2 + SD_K^2\}} \quad (4)$$

$$RI = |\mu_{\ln K}| + |SD_{\ln K}| \quad (5)$$

$$\text{เมื่อ } K = \frac{UCS_{\text{predicted}}}{UCS_{\text{measured}}}, \text{ } UCS_{\text{predicted}} \text{ คือ}$$

ค่า UCS ที่ได้จากสมการทำนาย และ UCS_{measured} คือ ค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบ

3. ตัวอย่างวัสดุสร้างทางและวิธีการทดลอง

ตัวอย่างวัสดุสร้างทางที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้มี 3 ชนิด ได้แก่ (1) พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ (2) พื้นทางวัสดุหินเวียโน และ (3) รองพื้นทางดินซีเมนต์ จาก 10 แหล่ง ต่อชนิดของวัสดุตั้งตารางที่ 1-3 เพื่อดำเนินการ ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรม ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลคุณสมบัติและแหล่งวัสดุสร้างทางประเภทหินคลุกผสมซีเมนต์

ลำดับที่	แหล่งวัสดุ	CBR (%)	Passing #200 (%)	OMC (%)	ปริมาณปูนซีเมนต์ 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก				ปริมาณปูนซีเมนต์ 3 ร้อยละโดยน้ำหนัก				ปริมาณปูนซีเมนต์ 5 ร้อยละโดยน้ำหนัก			
					UCS				UCS				UCS			
					W (%)	Predicted			W (%)	Predicted			W (%)	Predicted		
						Measured	กชิตและคณะ	Sunitsakul et al.		Measured	กชิตและคณะ	Sunitsakul et al.		Measured	กชิตและคณะ	Sunitsakul et al.
1	หินคลุกศิลาป่วน	130.70	6.55	6.60	5.27	21.59	42.32	26.98	4.89	61.64	81.81	53.27	4.59	102.65	111.15	74.36
2	หินคลุกโครงกราฯ พท.1280	89.30	11.71	7.58	6.23	11.73	20.40	19.62	5.94	31.71	39.44	38.18	5.31	43.79	53.59	54.77
3	หินคลุกโรงไม่หินบุรีรัมย์รัชดา	84.00	8.45	10.80	9.66	14.84	23.34	14.69	9.21	52.98	45.13	28.56	8.95	75.45	61.31	39.04
4	หินคลุกโรงไม่หินกิดดี	90.00	10.16	10.00	9.14	9.96	22.39	15.79	9.10	50.74	43.29	29.94	9.22	60.39	58.82	39.95
5	หินคลุกโรงไม่หินสทิสาลัย	81.30	8.94	5.50	5.33	18.76	21.84	20.35	5.53	25.67	42.22	37.69	4.77	51.70	57.37	55.20
6	หินคลุกโรงไม่หินอาเขียน	100.00	12.29	5.80	6.10	14.66	22.20	21.23	6.09	26.20	42.91	40.17	5.44	47.68	58.30	57.66
7	หินคลุกบริษัทบ้านเมืองวังไม้	120.00	8.05	7.80	6.54	10.14	34.33	22.65	5.83	35.33	66.37	45.80	5.28	72.53	90.17	65.23
8	หินคลุกโรงไม่หินสีอาทอง	80.70	7.18	6.90	6.09	16.13	24.73	18.75	5.50	40.83	47.80	37.83	5.57	56.10	64.95	50.23
9	หินคลุกโรงไม่หินอนันตศิลา	94.70	8.22	7.30	6.17	16.50	26.76	20.43	6.04	33.13	51.72	39.11	5.79	60.71	70.28	53.91
10	หินคลุกโรงไม่หินอมรพรรณ	80.00	9.39	8.30	7.83	13.44	20.87	16.13	6.98	29.31	40.34	32.62	6.80	45.83	54.81	44.54

ตารางที่ 2 ข้อมูลคุณสมบัติและแหล่งวัสดุสร้างทางประเภทวัสดุหมุนเวียน

ลำดับที่	แหล่งวัสดุ	CBR (%)	Passing #200 (%)	OMC (%)	ปริมาณปูนซีเมนต์ 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก				ปริมาณปูนซีเมนต์ 3 ร้อยละโดยน้ำหนัก				ปริมาณปูนซีเมนต์ 5 ร้อยละโดยน้ำหนัก			
					UCS				UCS				UCS			
					W (%)	Predicted			W (%)	Predicted			W (%)	Predicted		
						Measured	กชิตและคณะ	Sunitsakul et al.		Measured	กชิตและคณะ	Sunitsakul et al.		Measured	กชิตและคณะ	Sunitsakul et al.
1	Recycling พท.41 กม.183+700	44.00	12.98	5.80	5.16	14.90	9.45	14.52	4.94	27.70	18.27	28.16	6.10	42.59	24.82	33.53
2	Recycling พท.112 ตอนทางเลี่ยงเมือง กำแพงเพชร	14.00	8.74	6.90	4.86	13.26	3.81	7.74	5.52	28.05	7.37	13.59	5.34	40.54	10.01	18.63
3	Recycling พท.1109 ตอนวังเจ้า-โละโฌ	20.00	18.92	7.90	8.14	9.55	3.43	7.06	7.34	28.14	6.62	14.17	7.06	41.15	9.00	19.49
4	Recycling พท.43 ตอนจะนะ-ป่าแต	71.00	2.20	11.00	12.00	15.98	44.24	11.75	9.56	45.89	85.52	25.35	9.39	64.85	116.19	34.46
5	Recycling พท.43 ตอนป่ามา-ปอเกาะ	17.00	6.30	9.30	7.94	23.05	5.63	6.51	7.31	39.51	10.89	12.92	7.12	52.61	14.80	17.65
6	Recycling พท.323	84.00	7.73	7.42	5.87	13.67	24.62	19.62	6.22	30.28	47.60	35.86	4.98	64.76	64.68	54.89
7	Recycling สทท.สงขลา	80.00	8.33	10.00	9.10	11.63	22.42	14.79	8.71	36.67	43.35	28.67	8.73	57.09	58.90	38.52
8	Recycling พท.12 กม.168 สุโขทัย	16.00	12.27	8.60	7.84	12.78	3.55	6.34	7.44	25.05	6.87	12.35	7.04	40.82	9.34	17.16
9	Recycling พท.12 กม.619 มหาสารคาม	42.00	6.34	14.25	13.13	6.87	13.87	8.22	12.67	29.14	26.81	15.88	12.34	49.70	36.42	21.68
10	Recycling พท.12 กม.211+500 พิษณุโลก	78.00	12.24	8.70	7.12	21.91	17.36	16.80	6.98	44.43	33.55	32.12	6.58	53.01	45.58	44.73

ตารางที่ 3 ข้อมูลคุณสมบัติและแหล่งวัสดุสร้างทางประเภทพื้นทางดินซีเมนต์

ลำดับที่	แหล่งวัสดุ	CBR (%)	Passing #200 (%)	OMC (%)	ปริมาณปูนซีเมนต์ 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก				ปริมาณปูนซีเมนต์ 3 ร้อยละโดยน้ำหนัก				ปริมาณปูนซีเมนต์ 5 ร้อยละโดยน้ำหนัก			
					UCS				UCS				UCS			
					W (%)	Predicted			W (%)	Predicted			W (%)	Predicted		
						Measured	กชิตและคณะ	Sunitsakul et al.		Measured	กชิตและคณะ	Sunitsakul et al.		Measured	กชิตและคณะ	Sunitsakul et al.
1	ลูกรังบ้านดอนดี	19.00	25.63	10.50	10.40	5.61	13.57	5.94	8.83	12.49	26.23	12.36	9.10	29.06	35.63	16.33
2	ลูกรัง พท.11 สายลำปาง-เด่นชัย	10.00	21.19	16.10	16.82	2.42	8.00	3.10	16.86	7.00	15.47	5.85	16.83	19.10	21.02	7.88
3	ลูกรังบ้านเขว อ.เชียงแสน	21.00	31.33	14.22	15.34	1.24	13.29	5.03	14.04	9.89	25.70	10.01	13.56	24.85	34.91	13.74
4	ลูกรังโรงไม่หินมาลี	8.50	19.29	15.20	16.13	1.67	7.20	2.89	14.91	13.75	13.91	5.72	14.33	23.85	18.90	7.87
5	ลูกรังหนองเม็ก (อ.หนองหาน)	16.00	25.96	14.00	13.81	2.36	11.34	4.56	13.42	10.76	21.92	8.77	13.24	21.09	29.78	11.89
6	หินมูลทองทราย (อ.นาหว้า จ.สขส)	6.00	34.28	12.80	15.39	3.89	3.60	2.43	13.14	22.37	6.96	5.03	12.96	35.39	9.45	6.82
7	ลูกรัง พท.4 กระบี่-คลองท่อม	6.00	28.17	14.80	14.96	3.04	4.05	2.47	14.47	10.99	7.83	4.76	14.24	16.66	10.63	6.46
8	ลูกรังบ้านหิน อ.กระบุรี จ.ระนอง	44.00	15.63	7.70	7.85	14.15	42.27	11.38	7.18	29.62	81.72	22.68	6.66	38.49	111.03	31.85
9	ลูกรังบ้านเขตุ	9.50	18.66	8.50	8.03	9.40	8.21	4.62	8.96	34.11	15.86	8.20	8.13	48.69	21.55	11.66
10	ลูกรังบ่อผู้พัน	11.50	16.79	9.79	8.66	4.79	10.58	4.94	8.68	21.54	20.46	9.33	8.77	35.07	27.80	12.47

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของวัสดุสร้างทาง

คุณสมบัติวัสดุ	ชนิดของวัสดุสร้างทาง											
	พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์				พื้นทาง Pavement Recycling				รองพื้นทางดินซีเมนต์			
	Max	Min	μ	σ	Max	Min	μ	σ	Max	Min	μ	σ
Passing, %												
1"	100.00	100.00	100.00	0.00	100.00	95.37	99.54	1.46	100.00	100.00	100.00	0.00
3/4"	100.00	98.23	99.41	0.80	100.00	88.87	97.14	4.47	100.00	87.73	96.25	4.70
1/2"	86.53	74.45	80.94	4.13	94.27	67.82	84.35	8.86	96.36	76.76	87.44	5.86
3/8"	75.00	57.34	65.98	5.96	85.77	55.56	72.96	10.62	88.82	68.30	78.29	6.46
#4	52.73	37.48	46.99	5.34	69.94	37.81	52.67	10.29	69.80	36.90	56.88	9.14
#10	35.16	25.72	29.90	3.58	45.32	20.73	32.46	7.76	53.40	26.55	40.67	8.91
#16	26.93	18.93	23.16	2.96	37.91	14.17	24.52	6.83	50.31	24.66	36.93	8.25
#40	18.63	15.15	16.14	1.18	27.05	7.27	15.66	5.50	43.92	23.25	32.27	6.44
#100	14.05	10.05	11.61	1.22	21.01	3.32	11.18	4.89	35.66	19.32	26.75	6.30
#200	12.29	6.55	9.09	1.85	18.92	2.20	9.61	4.65	34.28	15.63	23.69	6.35
LL	NP	NP	N/A	N/A	NP	NP	N/A	N/A	39.00	NP	24.56	17.16
PI	NP	NP	N/A	N/A	NP	NP	N/A	N/A	18.62	NP	11.09	7.90
$\gamma_{d \max}$, t/m ²	2.36	2.11	2.23	0.08	2.21	1.91	2.09	0.10	2.12	1.89	2.01	0.09
OMC, %	10.80	5.50	7.66	1.69	14.25	5.80	8.99	2.39	16.10	7.70	12.36	3.00
Soak CBR, %	130.70	80.00	95.07	17.39	84.00	14.00	46.60	29.26	44.00	6.00	15.15	11.38
Swell, %	0.26	0.01	0.11	0.08	0.15	0.01	0.04	0.04	0.84	0.03	0.37	0.30
LAA, %	38.21	18.61	30.28	6.36	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Soundness, %	8.89	2.52	4.61	2.11	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ: NP = Non-plastic
N/A = Not Available

ตารางที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วัสดุ	สมการทำนาย									
	Sunitsakul et al.					กษิตติและคณะ				
	μ	σ	COV	RI	RD	μ	σ	COV	RI	RD
พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์	1.122	0.368	0.328	0.475	0.387	1.434	0.500	0.349	0.606	0.662
พื้นทาง Pavement Recycling	0.707	0.310	0.438	0.856	0.427	0.728	0.555	0.762	1.317	0.618
รองพื้นทางดินซีเมนต์	0.815	0.784	0.961	1.200	0.805	1.903	2.108	1.108	1.247	2.293

วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (LL) ของดินตามทล.-ท.102/2515 วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plasticity Index (PI) ของดินตามทล.-ท.103/2515 วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้างตามทล.-ท.205/2517 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐานตามทล.-ท.108/2517 วิธีการทดลองหาค่า CBR ตามทล.-ท.109/2517 วิธีการทดลองหาความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ตามทล.-ท.202/2515 วิธีการทดลองหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวมโดยการใช้โซเดียมซัลเฟตหรือแมกนีเซียมซัลเฟตตามทล.-ท.213/2531 และวิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compression Strength ของดินตามทล.-ท.105/2515 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างวัสดุสร้างทางสรุปไว้ในตารางที่ 4

ตัวอย่างวัสดุสร้างทางจากแหล่งต่างๆ จะนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก จำนวนแหล่งวัสดุละ 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งอัตราส่วนผสม เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ต้องทดสอบ Free-Free Resonance Test เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดกับค่าความถี่พ้องที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างเดียวกัน ดังนั้น จึงทำการบดอัดตัวอย่างแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) ในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว ซึ่งมีขนาดต่างจากมาตรฐานวิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compression Strength (ทล.-ท.105/2515) ของแท่งตัวอย่างวัสดุผสมซีเมนต์ โดยจะถูกบดอัดในแบบตามวิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามทล.-ท.108/2517 โดยอนุโลม

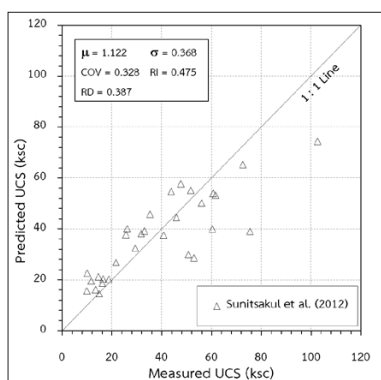
ภายหลังการบดอัดเสร็จแล้วจะบ่มตัวอย่างในถุงพลาสติกเป็นเวลา 7 วัน และนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทดสอบค่า UCS รายละเอียดการทดสอบและการเตรียมวัสดุเพื่อการทดสอบสามารถอ้างอิงได้จากรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการจ้างเหมาจัดทำเครื่องมือเพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านพลศาสตร์ของวัสดุโครงสร้างทาง สำนักวิจัยและพัฒนาทางกรมทางหลวง [10]

4. ผลการประเมินสมการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุสร้างทาง

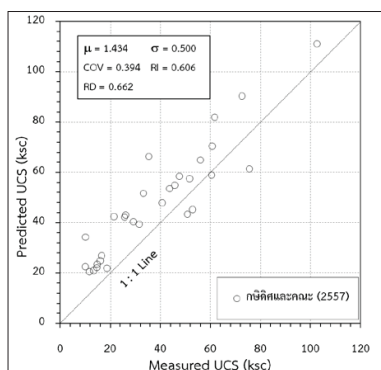
4.1 พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าค่า COV จากทั้งสองสมการทำนายค่า UCS ใกล้เคียงกัน กล่าวคือชุดข้อมูลที่ได้จากสมการทำนายทั้งสองมีการกระจายตัวใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่า RD และค่า RI จากสมการทำนายของ Sunitsakul et al. [2] พบว่ามีค่าน้อยกว่าสมการทำนายของกษิติศและคณะ [3] แสดงว่า สมการทำนายของ Sunitsakul et al. มีความเที่ยงตรงและแม่นยำกว่าสมการของกษิติศและคณะ

เมื่อนำชุดข้อมูลจากทั้งสองสมการทำนายไปสร้างกราฟความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อหนึ่งดังภาพที่ 1 และ 2 พบว่าสมการทำนายทั้งสองสามารถทำนายค่า UCS ได้ค่อนข้างเหมาะสม โดยสมการทำนายของ Sunitsakul et al. ซึ่งมีช่วงค่า UCS น้อยกว่า 50 ksc โดยประมาณ มีแนวโน้มให้ค่าสูงกว่าผลการทดสอบ แต่เมื่อช่วงค่า UCS เพิ่มขึ้น ค่า UCS ที่ได้จากสมการทำนายมีแนวโน้มต่ำกว่าค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบ ในขณะที่สมการทำนายของกษิติศและคณะมีแนวโน้มให้ค่า UCS สูงกว่าผลการทดสอบ



ภาพที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบกับค่า UCS ที่ได้สมการทำนายของ Sunitsakul et al. [2] สำหรับพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์



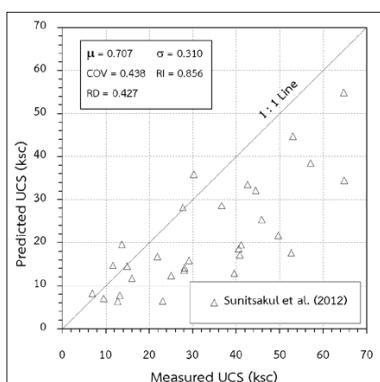
ภาพที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบกับค่า UCS ที่ได้จากการสมการทำนายของกษิตติและคณะ [3] สำหรับพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

4.2 พื้นทางวัสดุหินเวียน

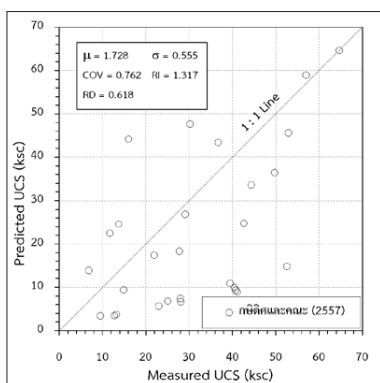
พื้นทางวัสดุหินเวียนเป็นวัสดุที่ไม่มีความเป็นพลาสติกเช่นเดียวกับพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ แต่มีส่วนละเอียดหรือส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่าพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ (ดูตารางที่ 4) จากตารางที่ 5 ค่า COV ที่คำนวณได้จากสมการของ Sunitsakul et al. น้อยกว่าค่า COV ที่คำนวณได้จากสมการของกษิตติและคณะ แสดงว่าชุดข้อมูลที่ได้จากสมการของ Sunitsakul et al. มีการกระจายตัวน้อยกว่าหรือมีความแม่นยำกว่าสมการของกษิตติและคณะ

ในขณะที่ค่า RD และค่า RI จากสมการของ Sunitsakul et al. น้อยกว่าค่า RD และค่า RI จากสมการของกษิตติและคณะ ดังนั้นสมการทำนายของ Sunitsakul et al. จึงมีความเที่ยงตรงและแม่นยำกว่าสมการทำนายของกษิตติและคณะ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS จากสมการทำนายจากทั้งสองสมการ กับค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบ พบว่า สมการทำนายของ Sunitsakul et al. จะให้ค่าที่ต่ำกว่าที่ได้จากการทดสอบ ส่วนสมการทำนายของกษิตติและคณะ จะให้ค่า UCS ที่มีการกระจายตัวสูง แต่กระจายตัวไปตามเส้นหนึ่งต่อหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 3 และ 4



ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบกับค่า UCS ที่ได้จากสมการทำนายของ Sunitsakul et al. [2] สำหรับพื้นทางวัสดุหินเวียน



ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบกับค่า UCS ที่ได้จากสมการทำนายของกษิตติและคณะ [3] สำหรับพื้นทางวัสดุหินเวียน

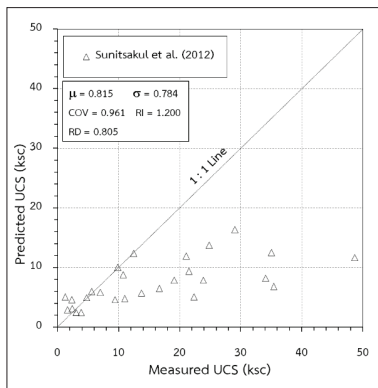
4.3 รองพื้นทางดินซีเมนต์

เนื่องจากรองพื้นทางดินซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีความเป็นพลาสติก และมีส่วนละเอียดมากกว่าพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์และพื้นทางวัสดุหินเวียน ดังนั้นสมการทำนายของกษิตติและคณะ [2] จำเป็นต้องมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ตามที่อัศคพัฒน์และฉัตรชัย [4] แนะนำไว้ข้างต้น ในกรณีนี้ได้เลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 5.0 ฉะนั้นสมการทำนายของกษิตติและคณะจึงปรับใหม่เป็นดังนี้

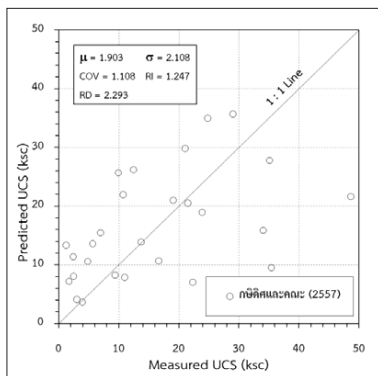
$$UCS = 5.0 \text{ CBR } (D/B) - 0.6 \quad (6)$$

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า ค่า COV จากทั้งสองสมการทำนายมีค่าค่อนข้างสูง กล่าวคือชุดข้อมูลมีการกระจายตัวกันมาก อย่างไรก็ตามค่า COV จากสมการทำนายของ Sunitsakul et al. ยังคงน้อยกว่าสมการทำนายของกษิตติและคณะ และค่า RD และ RI จากสมการทำนายของ Sunitsakul et al. [2] น้อยกว่าค่า RD และ RI จากสมการทำนายของกษิตติและคณะ [3] เช่นกัน จากข้อมูลทางสถิติ และดัชนีในข้างต้นจะเห็นว่าการประเมินค่า UCS ของชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์โดยสมการของ Sunitsakul et al. มีความเที่ยงตรงและแม่นยำกว่าสมการของกษิตติและคณะ

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อหนึ่ง ดังภาพที่ 5 และ 6 พบว่าค่า UCS ที่ได้จากการทำนายของ Sunitsakul et al. มีแนวโน้มที่ให้ค่าต่ำกว่าที่ได้จากการทดสอบ ในขณะที่ค่า UCS ที่ได้จากการทำนายของกษิตติและคณะมีการกระจายตัวสูง กระจายตัวไปตามเส้นหนึ่งต่อหนึ่ง



ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบกับค่า UCS ที่ได้จากการทำนายของ Sunitsakul et al. [2] สำหรับรองรับพื้นทางดินซีเมนต์



ภาพที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบกับค่า UCS ที่ได้จากการทำนายของ กษิตติและคณะ [3] สำหรับรองรับพื้นทางดินซีเมนต์

5. วิจัยรณผลการศึกษา

จากผลการศึกษาพบว่าค่า RD และจากสมการทำนายของ Sunitsakul et al. [2] มีค่าน้อยกว่าค่า RD และ RI จากสมการทำนายของกษิตติและคณะ [3] แสดงว่า สมการทำนายของ Sunitsakul et al. มีความเที่ยงตรงและแม่นยำกว่าสมการทำนายของกษิตติและคณะ จากผลการพิจารณาค่า COV ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้การกระจายตัว หรือความแม่นยำของการทำนาย พบว่าค่า COV จากสมการทำนายของ Sunitsakul et al. น้อยกว่าค่า COV จากสมการทำนายของกษิตติและคณะ ซึ่งแสดงว่าสมการทำนายของ Sunitsakul et al. มีความแม่นยำกว่าสมการทำนายของกษิตติและคณะ

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อหนึ่งระหว่างค่า UCS ที่ได้จากการทำนายและค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบ พบว่าค่า UCS ที่ได้จากการทำนายของ Sunitsakul et al. มีแนวโน้มที่ให้ค่าที่ต่ำกว่าที่ได้จากการทดสอบ ส่วนค่า UCS ที่ได้จากการทำนายของกษิตติและคณะมีแนวโน้มกระจายตัวตามเส้นหนึ่งต่อหนึ่ง

ทั้งนี้วิศวกรและผู้ควบคุมงานสามารถเลือกใช้สมการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุสร้างทางผสมซีเมนต์ที่ 7 วัน (UCS) ได้ทั้งสองสมการตามดุลยพินิจ สมการทั้งสองสามารถทำนายค่า UCS ของวัสดุสร้างทางปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์จำพวกพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ และพื้นทางวัสดุหมุนเวียนได้

6. สรุปผลการศึกษา

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาระเมินสมการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน ของวัสดุสร้างทางปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ โดยวัสดุสร้างทางที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 3 ชนิด ได้แก่ (1) พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ (2) พื้นทางวัสดุหมุนเวียน และ (3) รองพื้นทางดินซีเมนต์ ชนิดละ 10 แหล่งวัสดุ โดยทดสอบค่า UCS จากการนำวัสดุสร้างทางแต่ละแหล่งมาผสมกับปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก คิดเป็นข้อมูลรวมทั้งสิ้น 270 ชุด

ข้อมูลจากตัวอย่างวัสดุสร้างทางปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ได้แก่ พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ พื้นทางวัสดุหมุนเวียน และรองพื้นทางดินซีเมนต์ ที่นำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้ สรุปได้ว่า สมการทำนายของ Sunitsakul et al. มีความเที่ยงตรงและแม่นยำกว่าสมการทำนายของกษิตติค และคณะ

7. ข้อเสนอแนะ

การใช้สมการทำนายค่า UCS ของวัสดุสร้างทางปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์จำพวกรองพื้นทางดินซีเมนต์ วิศวกรและผู้ควบคุมงานต้องระมัดระวังเนื่องจากค่า UCS ที่ได้จากการสมการทำนายของ Sunit-sakul et al. [2] มีแนวโน้มต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ ในขณะที่การเลือกใช้สมการทำนายค่า UCS ของรองพื้นทางดินซีเมนต์ ซึ่งมีค่า PI ของกษิตติค และคณะ [3] จำเป็นต้องพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการความสัมพันธ์ให้เหมาะสมเช่นกัน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของสมการขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ก่อนปรับปรุงคุณภาพ อาทิ วัสดุจำพวก Non-plastic วัสดุจำพวก Plastic เป็นต้น

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] วสันต์ ปั่นสังข์, บารเมศ วรธนะภูติ, กฤษณะ เพ็ญสมบูรณ์ และจิรโรจน์ ศุกลรัตน์ (2553). คุณสมบัติด้านความคงทนและความแข็งแรงของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์. วารสารวิศวกรรมสาร มก. ปีที่ 23 ฉบับที่ 74 หน้า 75-86.
- [2] Sunitsakul, J, Sawatparnich, A, and Sawangsuriya, A. (2012). Prediction of Unconfined Compressive Strength of Soil-Cement at 7 days. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 30, No. 1, pp. 263-268.
- [3] กษิตติค วัฒนศัพท์, สถิตพงษ์ อภิเมธีธำรง และ อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์ (2557). ข้อควรคำนึงถึงปัจจัยต่อปริมาณปูนซีเมนต์ในงาน Pavement Recycling ทล.-ม. 213. วารสารทางหลวง. ปีที่ 51 ฉบับที่ 1 หน้า 44-53.
- [4] อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์ (2559). ข้อควรคำนึงถึงปริมาณปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุสร้างทาง. งานแสดงเทคโนโลยี และการประชุมวิศวกรรมปฐพีแห่งชาติ ครั้งที่ 3. โรงแรมเอส 31, กรุงเทพฯ. หน้า 98-111.
- [5] อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์ และฉัตรชัย จันท (2559). การศึกษาและประเมินปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุสร้างทาง. บทความทางวิชาการ การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ประจำปีงบประมาณ 2559. กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

[6] นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์. 2554. สถิติวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.

[7] สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง (2555). โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง. รายงานฉบับสุดท้าย (Final Report). กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

[8] Cherubini C, Orr TLL (2000). A rational procedure for comparing measured and calculated values in geotechnics. In Coastal Geotechnical

Engineering in Practice. A Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1 : 261-265.

[9] Briaud JL, Tucker LM (1998). Measured and predicted axial load response of 98 piles. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 114(9) : 984-1001.

[10] สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง (2559). โครงการจ้างเหมาจัดทำเครื่องมือเพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านพลศาสตร์ของวัสดุโครงสร้างทาง. รายงานฉบับสุดท้าย (Final Report). กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.