



การประเมินกำลังในสนามของชั้นพื้นทางรีไซเคิลโดยการทดสอบทะลุทะลวงด้วยกรวยแบบพลวัต

จิระยุทธ สืบสุข* ศิวตล ดิงาม คมกร ไชยเดชธร และ เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์

ศูนย์วิจัยเพื่อความก้าวหน้าด้านวิศวกรรมโยธาและวัสดุก่อสร้าง สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-3739-8434 อีเมล: jirayut.su@rmu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.03.006

รับเมื่อ 28 มีนาคม 2559 ตอรับเมื่อ 17 พฤษภาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 31 มีนาคม 2560

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ในการฟื้นฟูผิวทางมีความจำเป็นที่จะต้องประเมินกำลังในสนามของชั้นพื้นทางเพื่อการควบคุมคุณภาพวิธีการอ้อมในการดำเนินการคือการทดสอบความหนาแน่นในสนามด้วยวิธีการกรวยทรายและการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างที่บดอัดในสนาม อย่างไรก็ตามกำลังในสนามและในห้องปฏิบัติการแตกต่างกันเนื่องจากผลของขนาดผลและพลังงานการบดอัด การทดสอบทะลุทะลวงด้วยกรวยแบบพลวัต (Dynamic Cone Penetration: DCP) เป็นการทดสอบทะลุทะลวงในสนามซึ่งใช้อย่างแพร่หลายในประเมินกำลังต้านทานของชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบ DCP ในการประเมินกำลังในสนามของชั้นพื้นทางรีไซเคิลจากการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ การทดสอบ DCP และกำลังอัดแกนเดียว (q_u) ทำในแบบจำลองชั้นพื้นทางที่ทำจากวัสดุที่ปริมาณผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) ซีเมนต์และความชื้นต่างๆ ดัชนีการทะลุทะลวงดัดแปลง (Modified Penetration Index, PI^*) ได้ถูกนำเสนอขึ้นใหม่เพื่อใช้กับการทดสอบ DCP ของวัสดุผสมบดอัดระหว่างดิน RAP และซีเมนต์ สมการความสัมพันธ์ระหว่าง PI^* และ q_u ถูกนำเสนอและอภิปราย การทดสอบในสนามในงานวิจัยนี้ทำเพื่อประเมินชั้นพื้นทางจากการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ด้วยการทดสอบ DCP สำหรับโครงการซ่อมแซมทางหลวงหมายเลข 24 ในเขตจังหวัดนครราชสีมา การประเมินกำลังในสนามโดยการทดสอบ DCP ถูกเสนอเปรียบเทียบกับกำลังจากการบดอัดตัวอย่างในสนามและกำลังตามมาตรฐานสำหรับชั้นพื้นทางดินซีเมนต์

คำสำคัญ: กำลังในสนาม, การทดสอบทะลุทะลวงด้วยกรวยแบบพลวัต, ชั้นพื้นทาง, การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่

การอ้างอิงบทความ: จิระยุทธ สืบสุข ศิวตล ดิงาม คมกร ไชยเดชธร และ เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์, "การประเมินกำลังในสนามของชั้นพื้นทางรีไซเคิลโดยการทดสอบทะลุทะลวงด้วยกรวยแบบพลวัต," วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 27, ฉบับที่ 2, หน้า 219–230 เม.ย.–มิ.ย. 2560.



Field Strength Assessment of Recycled Base Course by Dynamic Cone Penetration (DCP) Test

Jirayut Suebsuk*, Sivadol Deengam, Komkorn Chaidachatorn and Cherdsak Suksiripattanapong

Research Center for Advances in Civil Engineering and Construction Materials (RACECOM), Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08-3739-8434, E-mail: jirayut.su@rmuti.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.03.006

Received 28 March 2016; Accepted 17 May 2016; Published online: 31 March 2017

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

During pavement rehabilitation, there is a need to assess the field strength of base course for quality inspection. The indirect approach for controlling the strength is field density test by sand cone method and unconfined compression test on field compacted sample. However the field and laboratory strengths are different due to the effects of gradation and compaction energy. The Dynamic Cone penetration (DCP) has been extensively used to evaluate the field penetration resistance of base and subbase layers. In this research, the DCP was investigated and used to assess the field strength of recycled base course from pavement in-place recycling. The calibration of DCP and unconfined compression tests were performed on base course model under various Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), cement and moisture contents. A new modified Penetration index (PI^*) have been proposed for DCP test of compacted soil–RAP–cement. The correlation equation between PI^* and q_u have presented and discussed. The field tests were performed for investigating the performance of pavement recycling of base course by using DCP test. The pavement rehabilitation of Highway 24 in Nakhon Ratchasima, Thailand has assessed by DCP test. The field strength by DCP test has reported and compared with those of field hand compaction strength and strength requirement for soil cement base.

Keywords: Field Strength, Dynamic Cone Penetration Test, Base Course, Pavement Recycling

Please cite this article in press as: J. Suebsuk, S. Deengam, K. Chaidachatorn, and C. Suksiripattanapong, "Field strength assessment of recycled base course by Dynamic Cone Penetration (DCP) test," *The Journal of KMUTNB.*, vol. 27, no. 2, pp. 219–230, Apr.–Jun. 2017 (in Thai).

1. บทนำ

กระบวนการซ่อมผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีตในอดีต ทำโดยการรื้อผิวทางเดิมออกจนถึงชั้นพื้นทางแล้วแทนที่ชั้นพื้นทางด้วยวัสดุใหม่ทั้งหมด กระบวนการนี้ใช้เวลาในการดำเนินการมากและสิ้นเปลืองงบประมาณสูง ในปัจจุบันวิธีการที่นิยมซ่อมบำรุงถนนแอสฟัลต์คอนกรีตได้แก่ กระบวนการหมุนเวียนวัสดุผิวทางและชั้นพื้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) [1] ทำโดยใช้เครื่องจักรกัดผิวแอสฟัลต์บางส่วนออกก่อนแล้วจึงกัดผสมวัสดุชั้นพื้นทางเดิมกับผิวทางบางส่วนเข้าด้วยกัน ทำการปรับปรุงกำลังด้วยการผสมซีเมนต์ จากนั้นบดอัดวัสดุผสมเป็นชั้นพื้นทางใหม่โดยไม่มี การนำวัสดุออกนอกพื้นที่ วิธีการนี้สามารถช่วยประหยัด ค่าดำเนินการซ่อมบำรุงและเวลาในการดำเนิน อีกทั้ง กระบวนการนี้สามารถควบคุมคุณสมบัติของวัสดุคัดเลือกได้ ตลอดจนวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ที่ต้องรื้อออกทั้งยังสามารถ นำกลับมาใช้เป็นวัสดุคัดเลือกสำหรับชั้นพื้นทางใหม่ ซึ่งช่วยลดปริมาณของขยะของเสียจากกระบวนการ ก่อสร้างและบำรุงทางได้ วัสดุผิวทางเดิมที่นำมาใช้ใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) ประกอบด้วย หินคลุกและยางแอสฟัลต์ซึ่งเสื่อมสภาพหรือเสียหาย [2] การนำ RAP มาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการต่างๆ เป็น ที่นิยมแพร่หลายในทศวรรษที่ผ่านมา การทดสอบในห้องปฏิบัติการและในสนามสำหรับการใช้วัสดุ RAP ในงาน ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางมีการศึกษาในหลายประเทศ [3]–[7] เมื่อนำ RAP มาผสมกับดินชั้นพื้นทางเดิมสามารถ ช่วยเพิ่มคุณสมบัติการบดอัดและกำลังอัดได้ อีกทั้ง ถ้าต้องการกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นยังสามารถปรับปรุงคุณภาพ ได้ง่ายด้วยซีเมนต์ กำลังของวัสดุที่จะต้านทานการเสียรูป ของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณ ซีเมนต์และอายุบ่ม [8], [9] การก่อสร้างชั้นพื้นทางวัสดุ ผสมระหว่างดินกับ RAP ด้วยกระบวนการหมุนเวียน วัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ นั้น การตรวจสอบกำลังอัด ของวัสดุในสนามเพื่อควบคุมคุณภาพการก่อสร้างนั้น มักทำเช่นเดียวกับการตรวจสอบการก่อสร้างชั้นพื้น ทางดินซีเมนต์ ซึ่งทำโดยการเตรียมตัวอย่างบดอัดใน สนามด้วยพลังงานบดอัดเดียวกับที่ออกแบบไว้ในห้อง

ปฏิบัติการและตรวจสอบหน่วยน้ำหนักแห้งในสนาม จากการทดสอบด้วยกรวยทรายให้เท่ากับที่ออกแบบไว้ ผลการเปรียบเทียบกำลังที่ได้จากการบดอัดในสนาม กับกำลังที่ได้จากการ Coring ชั้นพื้นทางจากการบดอัด จริงนั้น มีค่าต่างกันเนื่องจากผลของวิธีการบดอัดและ พลังงานการบดอัด [10] นอกจากนี้การเก็บตัวอย่าง Coring จากสนามเพื่อตรวจสอบกำลังอัดมีกระบวนการ ดำเนินการที่ยุ่งยากไม่เหมาะแก่การใช้ในการควบคุม งานจริงในทางปฏิบัติ อีกทั้งการเคลื่อนย้ายตัวอย่างจาก สนามไปทดสอบในห้องปฏิบัติการอาจมีการรบกวน ตัวอย่างส่งผลต่อกำลังอัดที่อาจลดลงต่ำกว่าค่าที่ ออกแบบไว้ การทดสอบในสนามเพื่อตรวจสอบกำลัง จึงเหมาะสมว่าการเก็บตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบทะลุทะลวงด้วยกรวยแบบพลวัต (Dynamic Cone Penetration: DCP) เป็นวิธีที่นิยมใช้ ประเมินกำลังแบกทานอันได้แก่ California Bearing Ratio (CBR) ในสนามของชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง โดยไม่จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างไปทดสอบในห้องปฏิบัติ การซึ่งช่วยประหยัดเวลาและงบประมาณ Harison [11] และ Livneh [12] ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง CBR และผลทดสอบ DCP ซึ่งในการควบคุมความหนาและ คุณภาพของชั้นพื้นโดยวิธีการทดสอบนี้มีความน่าเชื่อถือสูง สำหรับประเมินคุณภาพการก่อสร้าง หน่วยงานภาครัฐ ทั้งในและต่างประเทศมีการศึกษาและใช้งานการทดสอบ DCP เพื่อประเมินกำลังของชั้นโครงสร้างทาง [13]–[15] อย่างไรก็ตามการศึกษาที่ผ่านมาแล้วยังคงใช้ DCP ในการ พิจารณาโครงสร้างชั้นพื้นทางจากวัสดุตามมาตรฐาน ทั่วไปแต่ยังไม่มีการศึกษาชั้นพื้นทางจากการใช้วัสดุ รีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ซึ่งมีกำลังอัดสูงกว่าชั้น พื้นทางปกติมาก

ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินกำลังในสนาม ของชั้นพื้นทางจากการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมา ใช้ใหม่ด้วยการทดสอบ DCP โดยนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบ DCP และกำลังอัดแกน เดียวของชั้นพื้นทางรีไซเคิลปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในห้อง ปฏิบัติการ ตลอดจนนำเสนอผลของสัดส่วนผสมของ ชั้นพื้นทางต่อผลการทดสอบ DCP อันได้แก่ ปริมาณ

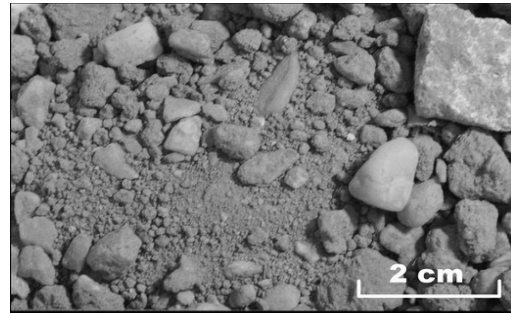
RAP ปริมาณซีเมนต์และปริมาณความชื้นบดอัด จากนั้นจึงนำเสนอผลการทดสอบในสนามโดย DCP เทียบกับกำลังจากการบดอัดก่อนตัวอย่างในสนามและค่ากำลังที่ต้องการตามมาตรฐานชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ทล.ม. 204/2556 [16]

2. วิธีการวิจัย

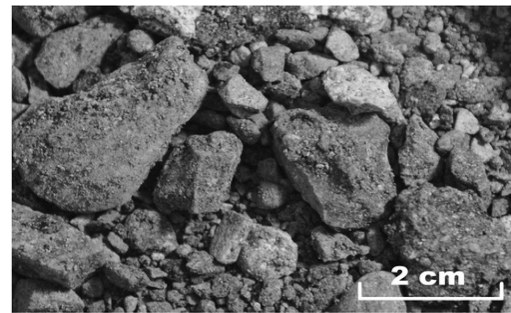
งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณ RAP ปริมาณซีเมนต์ และความชื้นเริ่มต้นต่อความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบ DCP กับกำลังอัดแกนเดียวของชั้นพื้นทางดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสร้างจากผลการทดสอบของแบบจำลองชั้นพื้นทางที่ทำขึ้นในห้องปฏิบัติการและกำลังอัดแกนเดียวของก้อนตัวอย่างที่เตรียมที่สัดส่วนผสมและความหนาแน่นเท่ากัน การดำเนินการวิจัยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างและ RAP

ดินตัวอย่างที่นำมาใช้ศึกษาเป็นดินลูกรังที่ผ่านมาตรฐานสามารถนำมาใช้เป็นชั้นพื้นทางได้ตามเกณฑ์มาตรฐานสำหรับชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ มีส่วนละเอียดไม่เกินร้อยละ 25 ตัวอย่างดินนี้ได้จากบ่อขุดในจังหวัดนครราชสีมา เก็บตัวอย่างที่ระดับความลึก 2 ถึง 3 เมตร ดินตัวอย่างประกอบด้วย กรวดร้อยละ 10 หยากรวดร้อยละ 67 ส่วนละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ร้อยละ 18 ดินมีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.68 พิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับร้อยละ 23 และร้อยละ 5 ตามลำดับ ดินนี้ถูกจำแนกเป็นกรวดที่มีขนาดละเอียด (GP) ตามระบบ USCS ส่วน RAP ได้จากการรื้อผิวทางแอสฟัลต์ในซ่อมแซมผิวทางในเขตจังหวัดนครราชสีมา วัสดุ RAP ประกอบด้วยวัสดุหลักคือ หินคลุกและยางแอสฟัลต์ (Asphalt Binder) ตัวอย่าง RAP ที่นำมาศึกษานี้มีปริมาณยางแอสฟัลต์ประมาณร้อยละ 5 มีปริมาณกรวดร้อยละ 50 ส่วนที่เหลือเป็นหยากรวดร้อยละ 50 ความถ่วงจำเพาะรวมของ RAP มีค่าเท่ากับ 2.62 ดินตัวอย่างและ RAP ถูกนำมาตากให้แห้งก่อนนำมาทำการบดอัดและเตรียมชั้นพื้นทางจำลองในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างดินลูกรังและ RAP ที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 1 หน่วย



(a) ดินลูกรัง



(b) RAP

รูปที่ 1 ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

น้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นต่างๆ จากการบดอัดของวัสดุผสมแสดง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นจากการบดอัด

Mix Proportion		0.8OMC		1.0OMC		1.2OMC	
Soil	RAP	wn	γd	wn	γd	wn	γd
100	0	5.4	21.5	6.8	21.7	8.2	21.0
70	30	4.8	21.4	6.0	21.7	7.2	21.4
50	50	5.4	21.3	6.7	21.5	8.0	21.1
30	70	6.6	20.5	8.2	20.8	9.8	20.2
10	90	6.5	18.6	8.1	19.1	9.7	18.9

2.2 แบบจำลองชั้นพื้นทางและการทดสอบกำลังอัด

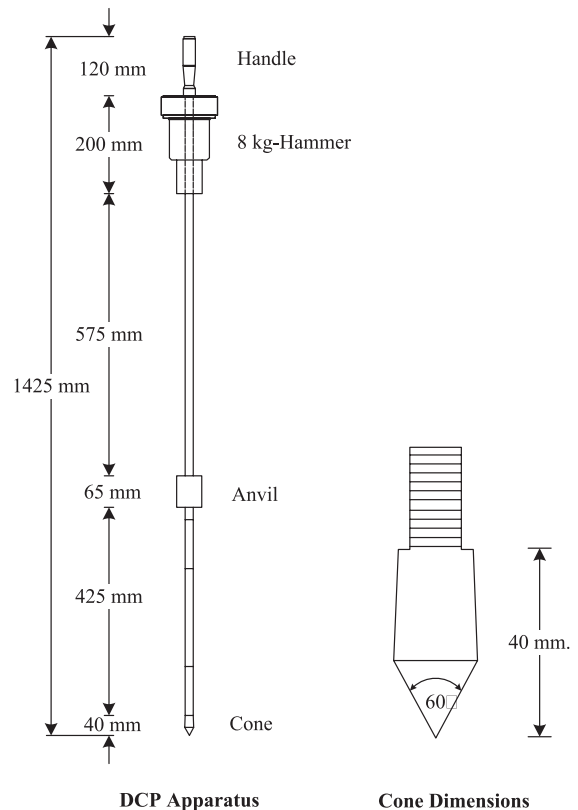
แบบจำลองชั้นพื้นทางและก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดแกนเดียวถูกเตรียมที่สัดส่วนผสม ปริมาณความชื้นและพลังงานบดอัดเดียวกัน สัดส่วนผสมระหว่างดินลูกรัง RAP และซีเมนต์ถูกปรับเปลี่ยนเพื่อให้ได้กำลังที่แตกต่างกัน ปริมาณ RAP มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0 ถึง 90 โดยน้ำหนักของดินแห้งทั้งหมด



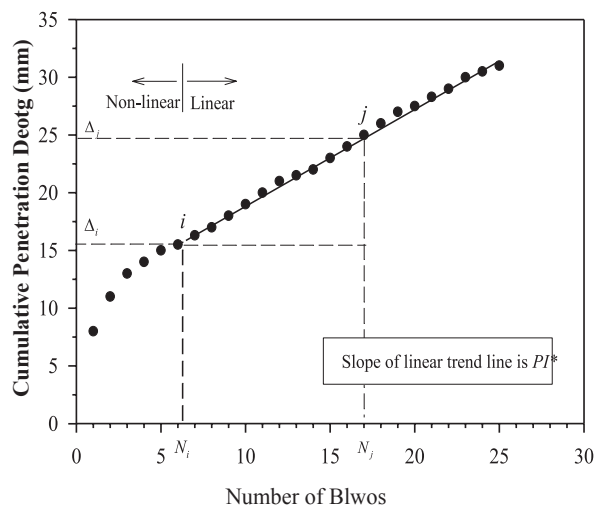
รูปที่ 2 แบบจำลองชั้นพื้นทาง

ในขณะที่ปริมาณซีเมนต์ปรับเปลี่ยนอยู่ระหว่างร้อยละ 1 ถึง 5 ของน้ำหนักแห้งของดินและ RAP ปริมาณความชื้นของวัสดุมีค่าเท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสมจากการบดอัดตามตารางที่ 1

แบบจำลองชั้นพื้นทางเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มิลลิเมตร สูง 175 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 ส่วนตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดแกนเดียวเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 116 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D5102 [17] Method B แบบจำลองชั้นพื้นทางและก้อนตัวอย่างถูกเตรียมในห้องปฏิบัติการ การเตรียมแบบจำลองและก้อนตัวอย่างทำโดยชั่งดินลูกรัง RAP และซีเมนต์ตามสัดส่วนผสมที่ต้องการ นำส่วนผสมทั้งหมดให้ผสมเข้ากันในสภาวะแห้งให้เข้ากัน ค่อยๆ เพิ่มน้ำในส่วนผสมและกวนผสมจนวัสดุผสมดินลูกรัง RAP และซีเมนต์เพลสเข้ากันดีปริมาณน้ำที่เพิ่มในวัสดุคำนวณจากปริมาณความชื้นเป้าหมายจากการบดอัดและน้ำหนักแห้งของดินผสม RAP เมื่อผสมวัสดุเข้ากันดีแล้วทำการบดอัดวัสดุผสมเข้าแบบจำลองชั้นพื้นทางและแบบหล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดด้วยค้อนบดอัดที่พลังงานตามมาตรฐาน ASTM D1557 [18] หรือเทียบเท่า ทล.-ท. 108/2517 [19] ดังแสดงในรูปที่ 2 บ่มแบบจำลองชั้นพื้นทางและก้อนตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศเพื่อทดสอบด้วย DCP และกำลังรับแรงอัดแกนเดียว [17] ต่อไป



(a) เครื่องทดสอบตามมาตรฐาน [20]



(b) ข้อมูลผลการทดสอบ

รูปที่ 3 การทดสอบ DCP

2.3 การทดสอบ DCP

ในวิศวกรรมปฐพี การทดสอบตอกหยั่งในสนามเป็นวิธีที่นิยมอย่างแพร่หลายสำหรับการสำรวจชั้นดินเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบ สำหรับการทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test: SPT) และการทะลุทะลวงแบบกรวย (Cone Penetration Test: CPT) เป็น 2 วิธีพื้นฐานที่นิยมการทดสอบ SPT ทำโดยการตอกกระบอกผ่าสี่กลลงในชั้นดินแล้วนับจำนวนครั้งที่การตอกที่ทำให้กระบอกจม 300 มิลลิเมตร ส่วนการทดสอบ CPT ทำโดยการกดหัวเจาะทรงกรวยลงในชั้นดินอย่างต่อเนื่องแล้ววัดแรงดันที่ปลายกรวยและแรงเสียดทานรอบก้านเจาะ การทดสอบ DCP เป็นการผสมผสานจุดเด่นของการทดสอบ SPT และ CPT ซึ่งช่วยปรับปรุงจุดอ่อนของการทดสอบทั้งสองให้สามารถตกลงในชั้นดินหรือวัสดุชั้นพื้นทางได้จากการกระแทกด้วยค้อน เครื่องมือ DCP ออกแบบให้ง่ายต่อการใช้งานและพารามิเตอร์จากการทดสอบสามารถสอบเทียบเป็นพารามิเตอร์กำลังของวัสดุได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ

การทดสอบ DCP ใช้ในการวัดกำลังต้านการทะลุทะลวงของกรวยผ่านวัสดุชั้นพื้นทางในมิติของระยะจมต่อการตอกหนึ่งครั้ง โดยทั่วไป DCP ประกอบด้วยก้านเจาะที่มีหัวเจาะทรงกรวยและค้อนน้ำหนัก 8 กิโลกรัม ซึ่งมีระยะยกก่อนปล่อยตอกอย่างอิสระเท่ากับ 576 มิลลิเมตร พลังงานการทะลุทะลวงตามทฤษฎีเท่ากับ 45 จูล หรือ 14.3 จูลต่อตารางเซนติเมตร โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะทรงกรวยเท่ากับ 20 มิลลิเมตร มุมกรวยมีค่าเท่ากับ 60 องศา [20] เครื่องมือทดสอบ DCP แสดงดังรูปที่ 3 (a) ก้านทดสอบทำจากเหล็กแข็งยึดติดกับหัวเจาะทรงกรวยโดยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ซึ่งเล็กกว่าหัวเจาะเพื่อลดแรงเสียดทาน การทดสอบ DCP สำหรับชั้นดินแต่ละชนิดมีการทดสอบและคำนวณหาระยะจมต่อการตอกที่ต่างกัน งานวิจัยในอดีตจำนวนมากได้เสนอวิธีการคำนวณค่าระยะจมของกรวย [11]–[14], [20]–[22] อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอดีตเสนอวิธีการคำนวณหาระยะจมต่อการตอกที่แตกต่างกัน แต่วิธีที่เสนอนั้นเหมาะสมกับดินชั้นทางที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวดิน เมื่อนำมาใช้กับชั้นพื้นทางดินบดอัด

ระดับดินหรือชั้นพื้นทางดินซีเมนต์บดอัดมักเกิดปัญหากับการใช้งานเนื่องจากดินชั้นพื้นทางบดอัดมีความแข็งแรงแรงมาก ระยะจมในการตอกตอครั้งน้อยการตอกที่จำนวนครั้งมากๆ ก้านเจาะอาจคดหรือหัวเจาะที่ทำจากเหล็กอาจบิดเบี้ยวทำให้ค่าที่วัดผิดเพี้ยนไป การวิจัยนี้จึงได้ปรับปรุงความแข็งแรงของหัวเจาะโดยการชุบแข็งหัวเจาะและลดความยาวของก้านเจาะให้เหมาะกับการใช้งานสำหรับชั้นพื้นทาง การวิจัยนี้การวัดระยะจมของการทดสอบ DCP สำหรับชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ทำโดยการตอก 25 ครั้ง และวัดระยะจมของการตอกแต่ละครั้งโดยเสนอค่าดัชนีระยะการทะลุทะลวงดัดแปลง (Modified Penetration Index, PI^*) ซึ่งคำนวณจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอกครั้งที่ i ถึง j และระยะจม (ในหน่วยมิลลิเมตรต่อครั้งที่ตอก) ตามสมการดังนี้

$$PI^* = \frac{\Delta_j - \Delta_i}{N_j - N_i} \quad (\text{mm/Blow}) \quad (1)$$

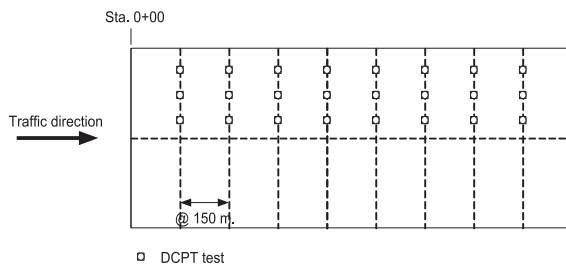
เมื่อ Δ_i คือ ระยะจมสะสมที่การตอกใดๆ ที่ผลการทดสอบเริ่มเป็นเส้นตรง Δ_j คือระยะจมสะสมที่การตอกสุดท้ายที่พิจารณา N_i คือจำนวนครั้งที่การตอกที่ระยะจมเริ่มต้น และ N_j คือจำนวนครั้งที่การตอกที่ระยะจมสุดท้ายที่พิจารณา ค่าพารามิเตอร์นี้สามารถหาได้จากข้อมูลผลการทดสอบตามรูปที่ 3 (b)

2.4 การทดสอบในสนาม

การศึกษาการทดสอบในสนามทำที่โครงการปรับปรุงผิวทางโดยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ของทางหลวงหมายเลข 24 ตอน สีแยกโชคชัย–หนองมัน (กม. 61+485 – กม. 61+800) ช่วงอำเภอนองบุญมาก จ.นครราชสีมา ตำแหน่งโครงการและจุดเก็บข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4 การปรับปรุงชั้นพื้นทางทำโดยการกัดผิวทางแอสฟัลต์ผสมกับชั้นพื้นทางดินลูกรังเดิม ความลึกของการกัดผสมเท่ากับ 20 เซนติเมตรที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อผิวทางเท่ากับ 1 ต่อ 1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงเท่ากับ 3.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักวัสดุแห้ง ที่การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานตามมาตรฐาน ทล.-ท 108-17 [19] เทียบเท่ามาตรฐาน ASTM



(a) ตำแหน่งโครงการ



DCPT test locations on Highway 24 in Nong Bunmak districts

(b) ตำแหน่งที่เก็บข้อมูล

รูปที่ 4 การทดสอบในสนาม

D1557 [18] โดยมีปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 8.5 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 21.3 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร การเก็บข้อมูลทำทุกๆ 150 เมตร จำนวน 8 สถานี การทดสอบ DCP ทำที่ 3 ตำแหน่งต่อสถานี ที่ช่องจราจรด้านเลนซ้ายของถนน การเก็บข้อมูลทำหลังจากบดอัดแล้วเสร็จ 2 ชั่วโมง 24 ชั่วโมงและ 5 วัน ตามลำดับ

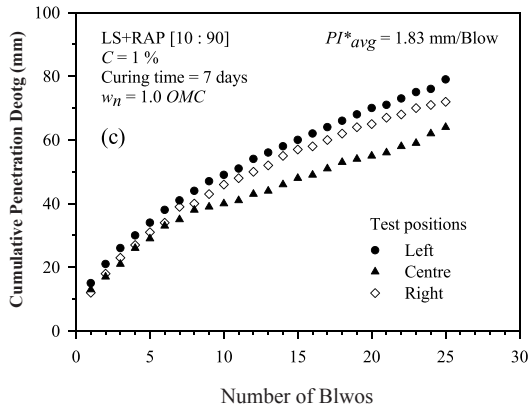
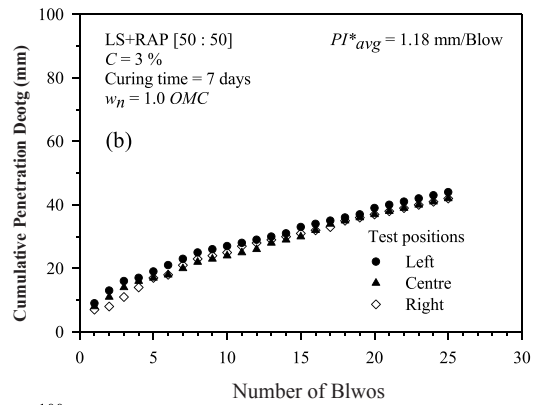
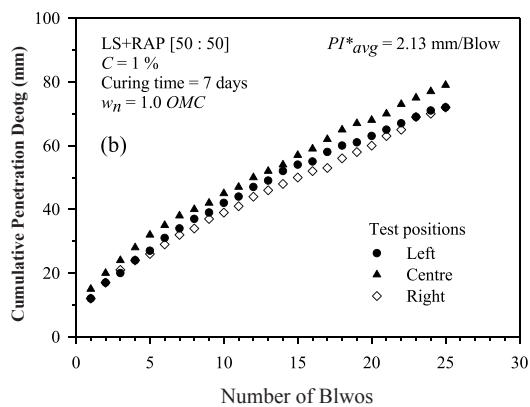
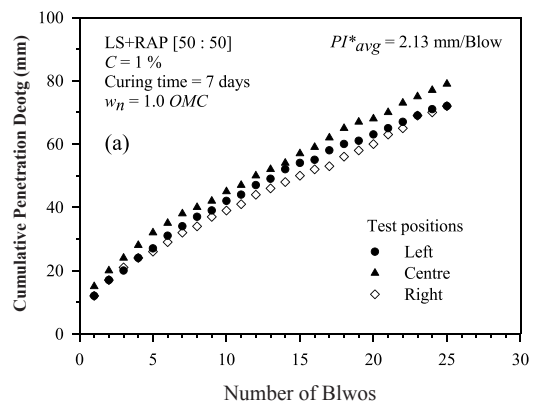
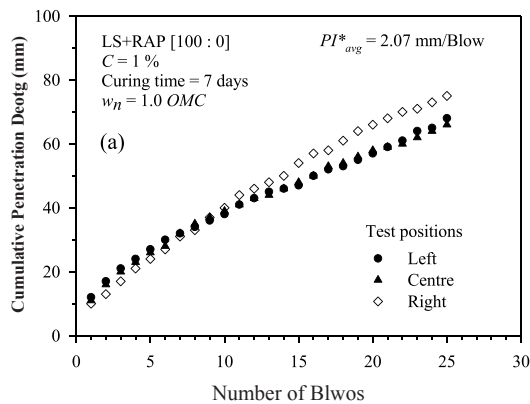
3. ผลการสอบเทียบในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบทั่วไปของ DCP กับแบบจำลองชั้นพื้นทางที่ใช้วัสดุส่วนต่างๆ ค่า PI^* ของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 ถึง 7 ค่า PI^* คำนวณจากผลการทดสอบในแบบจำลองชั้นพื้นทางแต่ละตัวอย่างโดยใช้สมการที่ (1) ผลการทะลุทะลวงจากการทดสอบ DCP ขึ้นกับกำลังของวัสดุในการต้านทานการทะลุทะลวงด้วยกรวย ดังนั้นค่า PI^* จึงเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าพารามิเตอร์กำลังต้านทานแรงเฉือนซึ่งในที่นี้พิจารณาในสถานะไม่มีความเค้นโอบริดด้านข้างหรือกำลังอัดแกนเดียว

รูปที่ 5 แสดงผลของปริมาณ RAP ต่อค่า PI^* ของ

การทดสอบ DCP บนแบบจำลองชั้นพื้นทางที่ปริมาณซีเมนต์อายุบ่ม และปริมาณความชื้นเดียวกันค่า Cumulative Penetration Depth บนชั้นพื้นทางดินผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีค่าเพิ่มตามจำนวนครั้งการตอก ค่า PI^* เฉลี่ยของชั้นพื้นทางดินลูกรังผสมซีเมนต์ร้อยละ 1 ไม่ผสม RAP มีค่าเท่ากับ 2.4 มิลลิเมตรต่อครั้ง ค่าระยะจุ่มสูงสุดที่การตอกครั้งที่ 25 มีค่าอยู่ระหว่าง 70 ถึง 75 มิลลิเมตร ค่า PI^* เฉลี่ยของชั้นพื้นทางดินลูกรังผสม RAP ที่ร้อยละ 50 และ 90 ผสมซีเมนต์ร้อยละ 1 ค่าเท่ากับ 2.2 และ 2.05 มิลลิเมตรต่อการตอกหนึ่งครั้งตามลำดับ เมื่อพิจารณาว่าค่า PI^* เฉลี่ยของการทดสอบแต่ละตัวอย่างจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่า PI^* มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ RAP ในส่วนผสม แสดงว่าชั้นพื้นทางของวัสดุที่มีปริมาณ RAP เพิ่มขึ้นกำลังอัดจะมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินผสม Suebsuk *et al.* [8]

ผลของปริมาณซีเมนต์ต่อผลการทดสอบ DCP ในแบบจำลองชั้นพื้นทางดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์แสดงดังรูปที่ 6 วัสดุชั้นพื้นทางเตรียมที่ปริมาณ RAP อายุบ่มและปริมาณความชื้นเดียวกัน จากรูปจะเห็นได้ว่าค่า Cumulative Penetration Depth ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นค่า PI^* เฉลี่ยของชั้นพื้นทางดินลูกรังผสม RAP ร้อยละ 50 และซีเมนต์ร้อยละ 1 มีค่าเท่ากับ 2.2 มิลลิเมตรต่อครั้ง ค่า PI^* เฉลี่ยของชั้นพื้นทางดินลูกรังผสม RAP ที่ร้อยละ 50 ผสมซีเมนต์ร้อยละ 3 และ 5 ค่าเท่ากับ 1.25 และ 0.7 มิลลิเมตรต่อครั้งตามลำดับ ค่าระยะจุ่มสูงสุดของชั้นพื้นทางที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 ที่การตอกครั้งที่ 25 มีค่าอยู่ระหว่าง 26 ถึง 28 มิลลิเมตร ซึ่งลดลงอย่างมากเมื่อปรับปรุงชั้นพื้นทางด้วยปริมาณซีเมนต์ที่สูงขึ้นสอดคล้องกับผลการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการปรับปรุงกำลังอัดวัสดุด้วยซีเมนต์ [5], [8], [10] เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น สารเชื่อมประสาน (Binder) ระหว่างเม็ดดินและ RAP เพิ่มขึ้นสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเม็ดดินและ RAP เมื่อซีเมนต์เพสต์แข็งตัวโดยที่ปริมาณซีเมนต์น้อยกว่าร้อยละ 10 วัสดุดิน-RAP-ซีเมนต์ถูกควบคุมโดยพันธะระหว่างเม็ดวัสดุและสารเชื่อมประสาน [8] การทดสอบ DCP กับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์



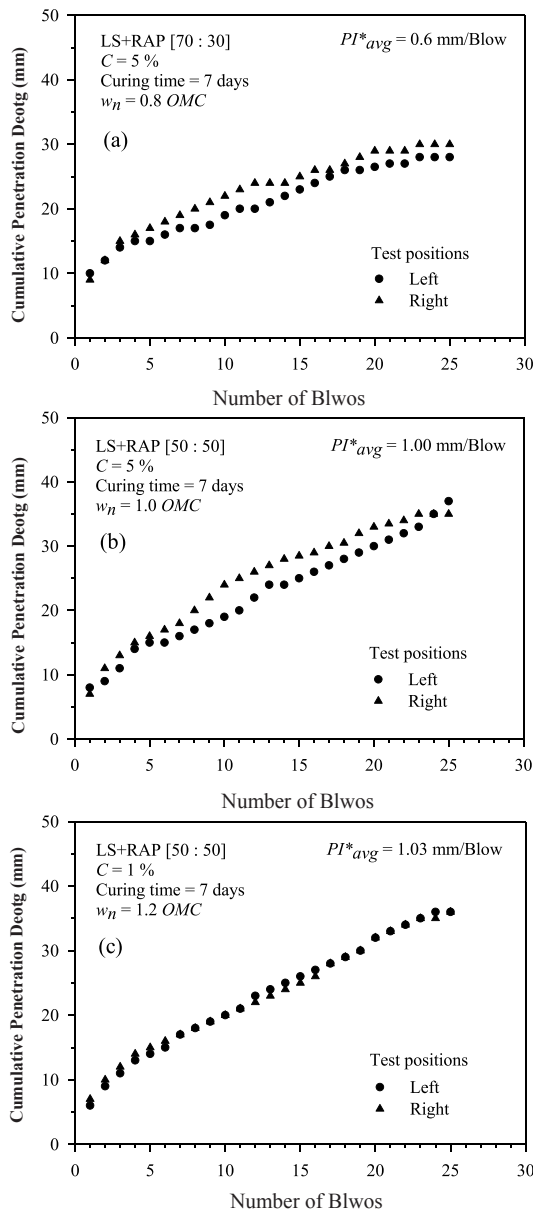
รูปที่ 5 ผลการทดสอบ DCP ของดินผสม RAP ที่สัดส่วนต่าง ๆ

รูปที่ 6 ผลการทดสอบ DCP ของดินผสม RAP ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ

สามารถประเมินกำลังของแรงยึดเหนี่ยวของเม็ดวัสดุจากผลของสารเชื่อมประสานได้จากค่า PI^* ที่เปลี่ยนแปลงไป

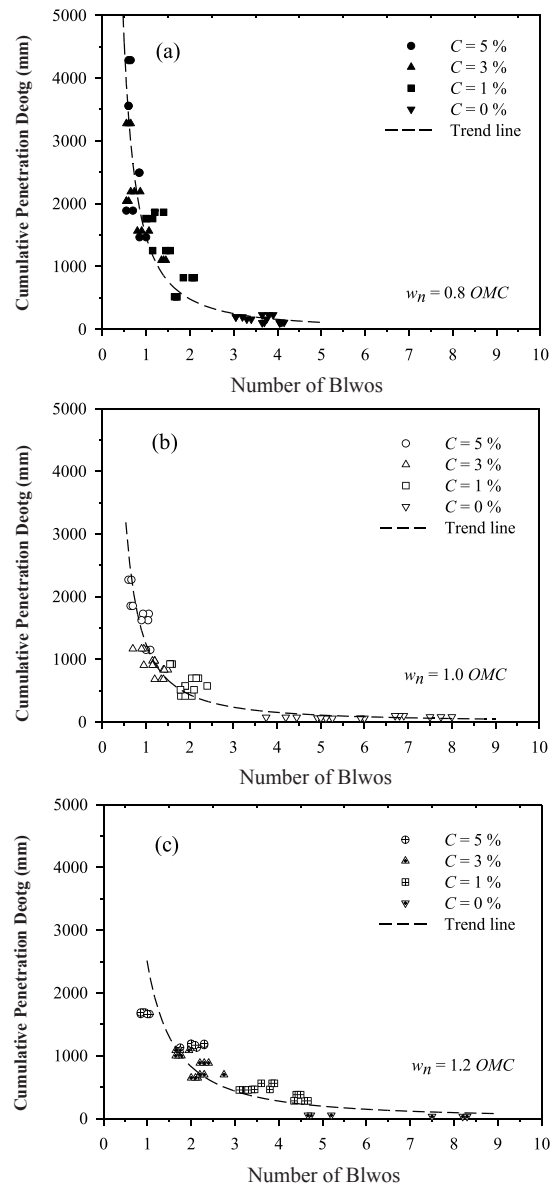
ผลของปริมาณความชื้นบดอัดต่อค่า PI^* แสดงดังรูปที่ 7 ตัวอย่างดินลูกรังผสม RAP ร้อยละ 30 และซีเมนต์ร้อยละ 5 ถูกเตรียมที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ตัวอย่าง

ที่เตรียมที่ปริมาณความชื้นบดอัดด้านแห้ง (0.8 เท่าของความชื้นเหมาะสม) มีค่า PI^* ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงถึงกำลังอัดของวัสดุสูงที่สุดด้วยเมื่อเทียบกับสัดส่วนผสมอื่นๆ เท่ากัน ผลการทดสอบนี้เป็นเช่นเดียวกับรายงานผลการทดสอบของ Suebsuk *et al.* [8] ซึ่งได้อธิบายไว้ว่าปริมาณความชื้น



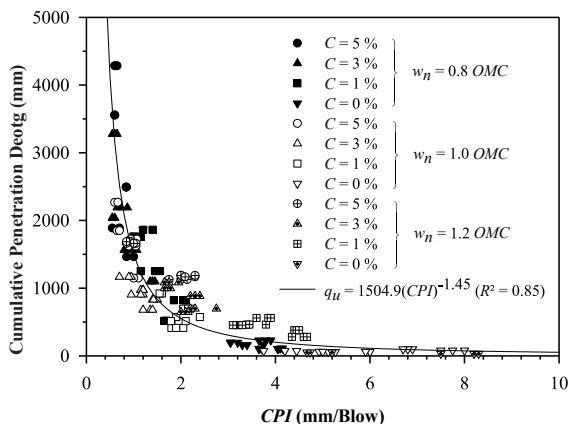
รูปที่ 7 ผลการทดสอบ DCP ของดินผสม RAP ที่ปริมาณน้ำเริ่มต้นต่างๆ

เพิ่มขึ้นกำลังของตัวอย่างจะลดลงเนื่องจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ (w/C) เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่า PI^* แปรผกผันกับกำลังอัดโดยไม่ขึ้นกับปริมาณความชื้นบดอัด รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับค่า PI^* จากการทดสอบก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับผลการทดสอบ DCP ที่แต่ละปริมาณความชื้นเริ่มต้น ปริมาณซีเมนต์และสัดส่วนดินต่อ RAP

และแบบจำลองชั้นพื้นทางที่ปริมาณสัดส่วนผสมและสถานะการบดอัดต่างๆ ที่ปริมาณน้ำด้านหักกำลังอัดมีค่าสูงสุดที่ 4,284 กิโลปาสคาล ที่ค่า PI^* เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตรต่อครั้ง ค่า PI^* ที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับกำลังอัดที่ลดลงอย่างชัดเจนในช่วง PI^* ระหว่าง 0.5 ถึง 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างกำลังอัดแกนเดียว กับผลการทดสอบ DCP

ต่อครั้ง สำหรับแบบจำลองชั้นดินที่เตรียมที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและปริมาณความชื้นด้านเปียกความสัมพันธ์ระหว่างค่า PI^* กับกำลังอัดมีลักษณะเหมือนกับด้านแห้ง แต่มีกำลังอัดต่ำกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาว่าค่า PI^* แปรผกผันกับกำลังอัดโดยไม่ขึ้นกับปริมาณความชื้นบดอัดแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PI^* และกำลังอัดถูกนำมาพิจารณารวมกันดังแสดงในรูปที่ 9

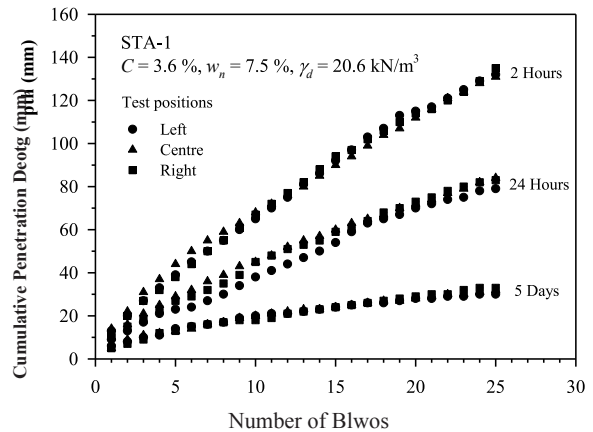
จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดตามรูปที่ 9 โดยการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) โดยใช้รูปแบบความสัมพันธ์แบบสมการกำลัง (Power Function) สำหรับค่า PI^* (มิลลิเมตรต่อครั้ง) และกำลังอัดแกนเดียว (q_u) ตามสมการดังนี้

$$q_u = A \times CPI^{-B} \quad (2)$$

เมื่อ A และ B คือ พารามิเตอร์จากการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้น จากความสัมพันธ์ข้างต้นค่าพารามิเตอร์ A และ B จากผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 1504.9 และ 1.45 ตามลำดับ โดยที่ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.85 ซึ่งค่อนข้างสูงและยอมรับได้ทางวิศวกรรม สมการความสัมพันธ์นี้ถูกนำไปใช้ในการประเมินกำลังในสนามต่อไป

4. ผลการทดสอบในสนาม

ตัวอย่างผลการทดสอบ DCP ในสนามของสถานที่ 1

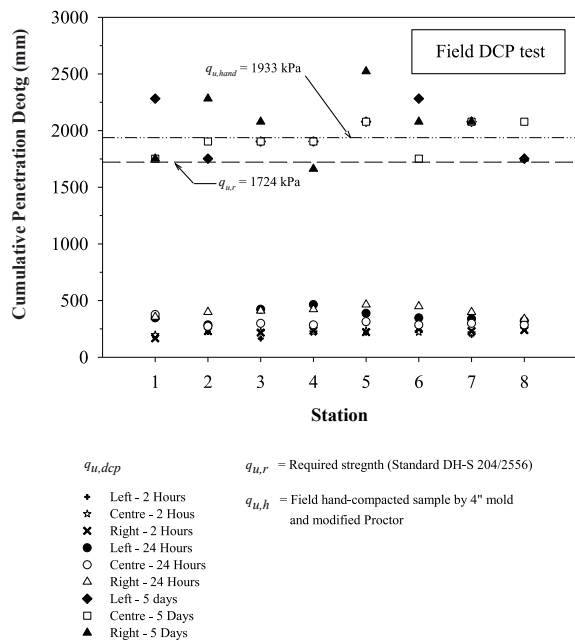


รูปที่ 10 ผลการทดสอบ DCP ในสนามสำหรับ STA-1

แสดงดังรูปที่ 10 การทดสอบที่ตำแหน่ง Left, Centre และ Right มีค่าความสัมพันธ์ระหว่าง PI^* กับระยะจมของการตอกแต่ละครั้งใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาการทดสอบที่อายุบ่มต่างๆ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าดินลูกรังผสม RAP บดอัดปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีระยะจมสะสมลดลงอย่างชัดเจนที่อายุบ่ม 2 ชั่วโมงหลังการบดอัดมีระยะจมที่การตอกครั้งที่ 25 เท่ากับ 135 มิลลิเมตร แต่เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 24 ชั่วโมง และ 5 วัน ระยะจมที่การตอกครั้งที่ 25 ลดลงเป็น 84 และ 33 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะจมจากการทดสอบ DCP แปรผกผันกับอายุบ่มหรืออีกนัยหนึ่งคืออายุบ่มเพิ่มขึ้นระยะจมลดลง

รูปที่ 11 แสดงผลกำลังอัดแกนเดียวจากการทดสอบ DCP ($q_{u, dcp}$) ที่สถานี ตำแหน่งและอายุบ่มต่างๆ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มโดยที่อายุบ่ม 2 และ 24 ชั่วโมง กำลังอัดในสนามจากการทดสอบ DCP มีค่าประมาณร้อยละ 10 ถึง 25 ของค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วันของก้อนตัวอย่างที่บดอัดด้วยแบบหล่อในสนาม ($q_{u, h}$) แต่จากผลการทดสอบที่อายุบ่มเท่ากับ 5 วัน ค่า $q_{u, dcp}$ มีค่าใกล้เคียงกับ $q_{u, h}$ อีกทั้งยังมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานดินซีเมนต์บดอัดสำหรับชั้นพื้นทาง ($q_{u, r}$) โดยมีค่าอัตราส่วนปลอดภัยอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 1.45

ค่ากำลังอัดในสนามมีแนวโน้มสูงกว่ากำลังอัดจากตัวอย่างบดอัดในแบบหล่อที่อายุบ่มเดียวกัน เนื่องจากกำลังอัดในสนามขนาดผลของวัสดุมีขนาดใหญ่กว่าการ



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบกำลังอัดจากการทดสอบ DCP และตัวอย่างที่บดด้วยมือในสนามที่อายุบ่มต่างๆ

บดอัดวัสดุในแบบหล่อซึ่งคัตวส์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 19 มิลลิเมตรออกตามมาตรฐานกรมทางหลวง [19] ตลอดจนพลังงานการบดอัดด้วยรถบดในสนามให้พลังงานสูงกว่าการบดอัดด้วยค้อนในห้องปฏิบัติการ กำลังอัดในสนามจึงมีค่าสูงกว่าการทดสอบ DCP ในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นเช่นเดียวกันนี้กับการทดสอบในสนามจากผลงานวิจัยอื่นๆ [10]

5. สรุป

การประเมินกำลังในสนามของชั้นพื้นทางจากการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่สามารถทำได้โดยการทดสอบ DCP ค่าดัชนีที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบ DCP ในชั้นทางหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์คือค่าดัชนีระยะการทะลุทะลวงดัดแปลง (PI^*) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1 ค่า PI^* ขึ้นกับกำลังต้านทานการทะลุทะลวงของวัสดุอย่างเดียวกันโดยไม่มีผลของปริมาณ RAP ปริมาณซีเมนต์ และปริมาณความชื้นบดอัดความสัมพันธ์ระหว่างค่า PI^* กับกำลังอัดแกนเดียวเป็นไปตามสมการที่ 2 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ A และ B มีค่าเท่ากับ 1504.9 และ 1.45 ตามลำดับ สมการความ

สัมพันธ์ที่นำเสนอสามารถประมาณกำลังอัดในสนามได้โดยกำลังอัดในสนามจากการทดสอบ DCP มีค่าสูงกว่ากำลังอัดจากวิธีทางอ้อมโดยการบดอัดตัวอย่างในสนามตามวิธีที่กรมทางหลวงใช้ตรวจสอบซึ่งเป็นผลจากขนาดคละตัวอย่างที่แตกต่างกัน แต่ข้อดีของการทดสอบ DCP คือสามารถใช้ประเมินกำลังอัดในสนามที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ตามต้องการซึ่งวิธีดั้งเดิมไม่สามารถนำมาใช้ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย เลขที่สัญญา MSD5610108

เอกสารอ้างอิง

- [1] *Pavement Recycling*, Standard No. DH-S 213/2543, 2000.
- [2] P.J. Cosentino, E. H. Kalajian, C. H. Shieh, W. J. K. Mathurin, F. A. Gomez, E. D. Cleary, and A. Treeratrakoon, *Developing Specifications for Using Recycled Asphalt Pavement as Base, Subbase or General Fill Materials, Phase II*, Florida Institute of Technology, Florida, USA, FL/DOT/RMC/06650-7754, July 10, 2003.
- [3] *Recycled Asphalt Pavement as Base and Subbase Material*, ASTM STP 1275, 1997.
- [4] L. R. Hoyos, A. J. Puppala, and C. A. Ordonez, "Characterization of cement-fiber-treated reclaimed asphalt pavement aggregate: preliminary investigation," *Journal of Material in Civil Engineering*, vol. 23, no. 7, pp. 977-989, July 2011.
- [5] R. Taha, A. Al-Harthy, K. Al-Shamsi, and M. Al-Zubeidi, "Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 239-245, June 2002.
- [6] A. J. Puppala, L.R. Hoyos, and A.K. Potturi,



- “Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, no. 7, pp. 990–998, July 2011.
- [7] A. J. Puppala, S. Saride, and R. Williammee, “Sustainable reuse of limestone quarry fines and rap in pavement base/subbase layers,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24, no. 4, pp. 418–429, April 2012.
- [8] J. Suebsuk, A. Suksan, and S. Horpibulsuk, “Strength assessment of cement treated soil/reclaimed asphalt pavement (RAP) mixture,” *International Journal of GEOMATE*, vol. 6, no. 2, pp. 878–884, June 2014.
- [9] D. Yuan, S. Nazarian, L. R. Hoyos, and A. J. Puppala, “Cement treated rap mixes for roadway bases,” Department of Civil Engineering, University of Texas at Arlington, Texas, USA, FHWA/TX-10/0-6084-1, October 2010.
- [10] S. Horpibulsuk, W. Katkan, W. Sirilerdwattana, and R. Rachan, “Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils: laboratory and field study,” *Soils and Foundations*, vol. 46, no. 3, pp. 351–366, 2006.
- [11] J. A. Harrison, “Correlation of CBR and dynamic cone penetrometer strength measurement of soils,” *Australian Road Research*, vol. 16, no. 2, pp. 130–136, 1986.
- [12] M. Livneh, “Validation of correlations between a number of penetration tests and in situ california bearing ratio tests,” *Transportation Research Record*, no. 1219, pp. 56–67, 1989.
- [13] D.-H. Chen, J.-N. Wang, and J. Bilyeu, “Application of dynamic cone penetrometer in evaluation of base and subgrade layers,” *Journal of the Transportation Research Board*, no. 1764, pp. 1–10, 2001.
- [14] F. Amini, “Potential applications of dynamic and static cone penetrometers in MDOT pavement design and construction,” Final report for Mississippi Department of Transportation, Jackson State University, Mississippi, USA, FHWA/MS-DOT-RD-03-162, September 2003.
- [15] S. Wu and S. Sargand, “Use of dynamic cone penetrometer in subgrade and base acceptance,” Ohio Research Institute for Transportation and the Environment (ORITE), Ohio, USA, FHWA/ODOT-2007/01, April 2007.
- [16] *Soil Cement Base*, Standard No. DH-S204/2556, 2013.
- [17] *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures*, ASTM D5102-09, 2009.
- [18] *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*, ASTM D1557-12e1, 2012.
- [19] *Compaction Test a Higher Standard*, Test Number DH-T 108/1974, 1974.
- [20] *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*, ASTM D6951 / D6951M-09, 2015.
- [21] M. Livneh, I. Ishai, and N. A. Livneh, “Effect of vertical confinement on dynamic cone penetrometer strength values in pavement and subgrade evaluations,” *Transportation Research Record*, vol. 1473, pp. 1–8, 1994.
- [22] R. Salgado and S. Yoon, “Dynamic Cone Penetration Test (DCPT) for subgrade assessment,” Joint Transportation Research Program, Purdue University, FHWA/IN/JTRP-2002/30, SPR-2362, February 2003.