Engng.J.CMU.(2010) 17 (3), 9-18

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดในสนาม กับในห้องปฏิบัติการของดินซีเมนต์ในงานก่อสร้างชั้นทางถนน

Relationship between Field and Laboratory Compressive Strength of Soil Cement in Road Pavement Construction

วิชัย ทัพหนิรันดร์ และ อนิรุทธ์ ธงไชย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Wichai Tanhaniran and Aniruth Thongchai

Department of Civil Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200 Thailand

E-mail: wichai_tr@hotmail.com and aniruth@eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เสนอผลการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่เตรียมขึ้นในสภาวะห้องปฏิบัติการ กับที่ผสมบดอัดในสนามในสภาพการก่อสร้างจริง ในการศึกษาได้ทำการเตรียมแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์อัดแน่นสำหรับนำไปใช้ทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดด้วยดินมวลรวมที่เก็บมาจากงานก่อสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ในโครงการก่อสร้างจริง โดยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธีคือ วิธีนำดินมวลรวมในสนามมาผสมซีเมนต์และบดอัดในห้องปฏิบัติการ วิธีนำดินมวลรวมที่ผสมซีเมนต์ด้วยเครื่องจักรก่อสร้างในสนามมาบดอัดเป็นแท่งตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และวิธีเจาะเก็บแท่งตัวอย่างจากชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ที่ผสมบดอัดด้วยเครื่องจักรในสนาม ทำการเลือกเก็บตัวอย่างดินมวลรวมจากโครงการก่อสร้างที่มีสภาพการทำงานแตกต่างกัน 5 โครงการ เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดเครื่องจักรและวัสดุต่อคุณสมบัติกำลังรับแรงอัด โดยมีลักษณะเครื่องจักรก่อสร้างในโครงการที่ทำการศึกษาแตกต่างกัน 2 ระบบคือ ระบบเครื่องจักรรีไซเคิลและระบบโรงผสม ส่วนดินมวลรวมในโครงการที่ทำการศึกษามีส่วนหนึ่งที่เป็นวัสดุจากบ่อยืม และอีกส่วนหนึ่งเป็นวัสดุรีไซเคิลจากชั้นทางเดิม

ผลการศึกษาการพบว่า ปัจจัยสำคัญสองประการที่มีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์คือ ความแปรปรวนในคุณสมบัติของดินมวลรวม กับระบบเครื่องจักรที่ใช้ทำการผสมบดอัดในสนาม ทั้งนี้พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์จากการผสมในสนามมีค่าใกล้เคียงกับที่ผสมในห้องปฏิบัติการ เฉพาะกรณีการใช้เครื่องจักรระบบโรงผสม และเครื่องจักรระบบรีไซเคิลเมื่อดินมวลรวมเป็นชนิดไม่มีแรงเชื่อมแน่น สำหรับกรณีการใช้เครื่องจักระบบรีไซเคิลเมื่อดินมวลรวมเป็นดินชนิดมีแรงเชื่อมแน่น ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมซีเมนต์ในสนามมีค่าต่ำกว่าในห้องปฏิบัติการมาก สำหรับแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ที่เจาะเก็บจากชั้นพื้นทางบดอัดแน่นในสนามนั้นพบว่า ส่วนใหญ่มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าตัวอย่างในห้องปฏิบัติการระหว่าง 30-40% นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน มีค่าเป็นประมาณ 1.2 เท่าของตัวอย่างที่อายุ 7 วัน

ผลของการวิเคราะห์ข้อมูลค่ากำลังรับแรงอัดโดยวิธีทางสถิติ นำไปสู่แนวทางการกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดออกแบบของดินซีเมนต์ในงานก่อสร้างชั้นรองพื้นทางถนน โดยพิจารณาถึงความแปรปรวนของคุณสมบัติดินมวลรวม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright©by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Rights Reserved

เครื่องจักร ขั้นตอน และวิธีการทำงานก่อสร้างในสนาม ด้วยสมการ $q_d = q_r + a\sigma$ โดย q_d คือค่ากำลังรับแรงอัดออกแบบ q_r คือค่ากำลังรับแรงอัดต่ำสุดที่ต้องการ σ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมบดอัดในห้องปฏิบัติการจำนวนหนึ่ง และ a คือค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่ใช้ทำงานผสมบดอัดในสนาม โดยพบว่า กรณีการใช้เครื่องจักรก่อสร้างระบบโรงผสม จะมีค่า a = 0.90 ส่วนกรณีการใช้ที่เครื่องจักรก่อสร้างระบบรีไซเคิลจะได้ a = 0.80 - 1.40 ถ้าดินมวลรวมเป็นชนิดที่ไม่มีความเชื่อมแน่น แต่ถ้าเดินมวลรวมเป็นชนิดที่มีความเชื่อมแน่น จะได้ a = 2.10

ABSTRACT

This paper presents results of a study to compare strength behaviors of soil cement samples prepared under laboratory conditions with those placed in actual road pavement construction. Compacted soil cement samples for strength test were prepared using road base aggregates collected from actual construction sites by three different procedures: (1) field collected soil aggregate samples mixed with cement and compacted under laboratory conditions, (2) soil cement aggregates mixed by construction equipment in the field compacted under laboratory conditions and (3) core drilled samples from actual constructed soil cement road base. Five different construction projects were selected for this study to investigate the influence of materials and construction machinery on the strength behaviors. Two different types of soil-cement construction machinery were involved in the selected projects: recycling system and plant mix system. And two different types of materials were involved: recycling material from old road base and fresh new soil aggregate from borrow pits.

Results of the strength tests lead to the conclusion that main factors causing variations of strength values of the soil cement samples are variation in soil aggregate properties and the types of machinery and construction procedures. It was found that average strength values of field mixed soil-cement samples were in good comparison with laboratory mixed samples in the case of construction project with plant mix machinery or recycling machinery with non cohesive soil aggregates. Where a recycling machine was used with cohesive soil aggregate, the average strength values of the field mixed soil-cement samples were found to be much lower than those of the laboratory mixed samples. The core drilled samples were found to have strength values lower that the laboratory mixed and compacted sample by approximately 30-40%. The 28 days strength values were found to be about 1.2 time the 7 days strength values.

Statistical analysis were performed to establish relationships between strength values of laboratory and field mixed samples This leads to an equation for determining design strength values of soil-cement for road base construction considering the inherent variations from encountered materials and the adopted construction machinery and construction procedure. The equation is $q_d = q_r + a\sigma$ where q_d = design strength value, q_r = required minimum strength value in the field, σ is standard deviation of the strength values of a specific number of laboratory tested samples and a is a parameter depending on construction machinery and field conditions. The parameter a = 0.9 was established for construction projects with plant mix machinery. For projects using recycling machinery, a = 0.80-1.40 was established when encountering with noncohesive soil aggregates and a = 2.10 was established for the case of cohesive soil aggregates.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Rights Reserved

1. บทนำ

ในงานก่อสร้างชั้นทางถนนโดยเฉพาะชั้นพื้นทางและรองพื้นทางอาจนำเอาเทคนิคการปรับปรุงคุณสมบัติดินมาใช้เพื่อทำให้วัสดุมีคุณภาพดีขึ้นตามที่ต้องการ หรือเพื่อช่วยให้สามารถลดระยะเวลาการก่อสร้างลงได้ ซึ่งการปรับปรุงคุณสมบัตินี้อาจทำได้โดยวิธีทางกายภาพ เช่นการปรับปรุงขนาดคละของเม็ดดิน หรือโดยวิธีทางเคมี ด้วยการใช้สารผสมเพิ่ม เช่น ปูน ซีเมนต์ ปูนขาว แอสฟัลต์ หรือสารปอซโซลานพวกเถ้าลอย ผสมกับดิน เป็นต้น ในประเทศไทยก็ได้นำเทคนิคนี้มาใช้กับงานก่อสร้างถนน

ตั้งแต่ปี พ.ศ.2508 และต่อมาได้นำมาใช้ในการปรับปรุงชั้นพื้นทางถนนที่เกิดความเสียหายโดยใช้เครื่องจักรรีไซเคิล (Recycle) ซึ่งทำการขุดตัดและย่อยวัสดุชั้นผิวทางและพื้นทางเดิมผสมกับปูนซีเมนต์ และนำกลับมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางใหม่

ในการปรับปรุงคุณสมบัติดินสำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้างพื้นทางนั้น คุณสมบัติหลักที่ต้องการปรับปรุงคือคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรง ซึ่งผลจากงานวิจัยหลายๆ ชิ้นบ่งชี้ว่า ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ ได้แก่ ปริมาณ ชนิด และประเภทของซีเมนต์ (Davidson and Bruns [1], Felt [2], Taha,et al. [3], Terrel, et al [4]) อายุการบ่ม (สุขสันต์ หอพิบูลสุข [5], Felt [6], Shihata and Baghdadi [7]) ปริมาณน้ำและพลังงานการบดอัด อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (สุขสันต์ หอพิบูลสุข [5]) ความล่าช้าในการผสม (อติมนต์ ยุพกรณ์ [7]) คุณสมบัติของดิน (Davidson, et al [8]) นอกจากนี้ยังมีผลการศึกษาที่บ่งชี้ถึงอิทธิพลทางด้านโครงสร้างจุลภาค และพันธะเชื่อมประสานอีกด้วย (สุขสันต์ หอพิบูลสุข [5], Mitchell and Jack [9], Moh [10])

เป็นธรรมชาติของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานก่อสร้างพื้นทางถนนโดยทั่วไป ที่จะมีความแปรปรวนในคุณสมบัติทางกายภาพในด้านต่างๆ เช่นขนาดคละ ปริมาณความชื้นในมวลดิน ความเป็นพลาสติก ฯลฯ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญแรกๆที่สามารถส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด นอกจากนี้ยังจะพบอีกว่า ความแตกต่างในประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่ทำการผสม วิธีการบดอัด และการบ่มในสนาม รวมถึงวิธีการเก็บตัวอย่างดินมวลรวมในสนามเพื่อนำมาวิเคราะห์ออกแบบ ก็สามารถส่งผลให้เกิดความแปรปรวนต่อค่ากำลังอัดได้อีกด้วย

ในทางปฏิบัติ ดินซีเมนต์ที่ทำการก่อสร้างในสนามจะมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าตัวอย่างที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ดินมวลรวมชนิดเดียวกันและปริมาณการผสมซีเมนต์เท่ากัน ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดในสนามจากกำลังรับแรงอัดในห้องปฏิบัติการ โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัด แนวปฏิบัติวิธีหนึ่งคือกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 15% จากค่ากำลังรับแรงอัดที่ต้องการ แล้วนำไปหาปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้ในสนาม

Hausman, Manfred R [11] ได้เสนอแนวทางในการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างที่เกี่ยวกับการบดอัดดิน โดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation) มีค่าไม่เกิน 5% สำหรับความหนาแน่นแห้งจากการบดอัด และไม่เกิน30% สำหรับปริมาณความชื้นการบดอัด นอกจากนี้ยังได้แสดงตัวอย่างการตรวจสอบความหนาแน่นของดินบดอัดในสนามโดยคำนึงถึงความแปรปรวนด้วยปัจจัยต่าง ๆ ด้วยวิธีใช้สมการทางสถิติ $R_c = R\text{-}ks$ เมื่อ R_c = ระดับความหนาแน่นสำหรับใช้ตรวจสอบเกณฑ์ผ่าน R และ k เป็นค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับความแน่นจากการทดสอบตามจำนวนกำหนด ส่วน k เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดให้เหมาะสมกับชนิดและสภาพการทำงานบดอัดดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์กำหนดความแน่นการบดอัดโดยวิธีทางสถิติ

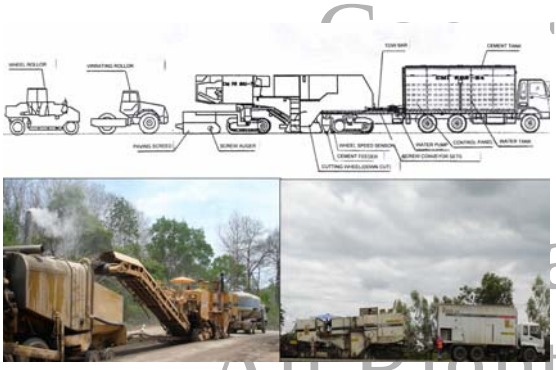
Works component	Number of tests per lot	Multiplier k	Characteristic dry density ratio Rc (%)	Quality level
Embankment foundation			88.0 or greater	Accept
and levees	6	0.5	87.9 or less	Reject
Embankment			91.0 or greater	Accept
construction	6	0.5	90.0 or less	Reject
			92.0 or greater	Accept
Subgrade preparation	6	0.5	91.9 or less	Reject
Subase incl. bride				
abutment embankment				
to within 600 mm of			94.0 or greater	Accept
top surface	9	0.6	93.9 or less	Reject
Base course and top				
600 mm of bridge			97.0 or greater	Accept
abutment embankment	9	0.6	96.9 or less	Reject
Cement-modified			95.0 or greater	Accept
base course	9	0.6	94.9 or less	Reject

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Rights Reserved

2. วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ข้อมูลจากโครงการก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน 5 โครงการ เป็นโครงการในพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย 3 และ 2 โครงการ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยทำการเก็บตัวอย่างดินมวลรวมจากโครงการก่อสร้างมาทำการเตรียมแท่งตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธีคือ (1) วิธีนำดินมวลรวมในสนามมาผสมซีเมนต์และบดอัดในห้องปฏิบัติการ (2) วิธีนำดินมวลรวมที่ผสมซีเมนต์ด้วยเครื่องจักรก่อสร้างในสนามมาบดอัดเป็นแท่งตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และ(3) วิธีเจาะเก็บแท่งตัวอย่างจากชั้นพื้นทางที่ผสมบดอัดด้วยเครื่องจักรในสนาม

โครงการก่อสร้างในการศึกษาทั้ง 5 โครงการ ถูกคัดเลือกให้มีมีสภาพการทำงานที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดเครื่องจักรและวัสดุต่อคุณสมบัติกำลังรับแรงอัด โดยมีลักษณะเครื่องจักรก่อสร้างที่ใช้ในโครงการที่ทำการศึกษาแตกต่างกัน 2 ระบบคือ ระบบเครื่องจักรรีไซเคิลดังแสดงในรูปที่ 1 และระบบโรงผสมแสดงในดังรูปที่ 2 ส่วนดินมวลรวมในโครงการที่ทำการศึกษามีส่วนหนึ่งที่เป็นวัสดุจากบ่อยืม และอีกส่วนหนึ่งเป็นวัสดุรีไซเคิลจากชั้นทางเดิม ซึ่งขั้นตอนการวิจัยโดยรวมแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 1 เครื่องจักรการก่อสร้างระบบหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (รีไซเคิล)

รูปที่ 2 เครื่องจักรการก่อสร้างระบบโรงผสม

ส่วนที่ 1 สำหรับโครงการก่อสร้างที่ใช้ระบบเครื่องจักรรีไซเคิลที่ทำการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (มาตรฐานทล.-ม.213/2543) จะเป็นการเก็บตัวอย่างดินในสนามจากสถานีต่างๆ ตามสายทางก่อนที่จะเริ่มการก่อสร้างในแต่ละโครงการ เพื่อใช้เป็นตัวอย่างวัสดุมวลรวมก่อนการผสมกับปูนซีเมนต์ ซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุต่างๆ เช่น ผิวทางแอสฟัลต์ วัสดุชั้นพื้นทางเดิม รวมไปถึงวัสดุมวลรวมใหม่ที่จะนำมาผสมเพิ่ม สำหรับโครงการก่อสร้างโดยใช้เครื่องจักรระบบโรงผสม (มาตรฐาน ทล.-ม.204/2533) จะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างจากกองวัสดุก่อนที่จะทำการผสมปูนซีเมนต์ที่โรงผสม

ตัวอย่างดินมวลรวมที่เก็บมาจากในสนาม ได้ถูกนำมาทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ทดสอบคุณสมบัติการจำแนกประเภทดินสองประการ คือทดสอบกระจายขนาดคละของเม็ดดิน และทดสอบหาค่าพิกัดความข้นเหลว
- ทดสอบคุณสมบัติการบดอัดแน่นของดินก่อนผสมปูนซีเมนต์ โดยใช้วิธีการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน
- ทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินผสมซีเมนต์บดอัดแน่น ที่อายุ 7 และ 28 วัน อย่างละ 3 ตัวอย่างต่อตำแหน่ง โดยใช้อัตราการผสมซีเมนต์ตามที่ได้ออกแบบไว้ในแต่ละโครงการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All Rights Reserved

ส่วนที่ 2 เป็นการเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามด้วยเครื่องจักรขณะทำการก่อสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ในสนาม ดังแสดงในรูปที่ 3 นำมาทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานในแบบหล่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว บ่มในถุงพลาสติก จำนวน 3 ตัวอย่างต่อตำแหน่ง และนำไปทดสอบหากำลังรับแรงอัด ที่อายุ 28 วัน โดยในระหว่างการเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์นี้จะต้องสังเกตขั้นตอนการทำงานต่างๆ รวมทั้งปัญหาในการทำงานที่อาจมีผลทำให้คุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์เปลี่ยนแปลงได้

รูปที่ 3 การเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมด้วยเครื่องจักรขณะทำการก่อสร้างชั้นพื้นทาง

ส่วนที่ 3 เป็นการเจาะเก็บตัวอย่าง (Core Drilling) จากชั้นพื้นทางดินซีเมนต์อัดแน่นในสนามหลังการก่อสร้างเสร็จสิ้นไปแล้วดังแสดงในรูป 4 จำนวนไม่น้อยกว่า 1 ตัวอย่างต่อตำแหน่ง และนำมาทดสอบหากำลังรับแรงอัดทางเดียวที่อายุการบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4 การเจาะเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ในสนามหลังการก่อสร้างเสร็จ

ตารางที่ 2 สรุปจำนวนและประเภทของตัวอย่างที่ทำการทดสอบกำลับรับแรงอัดรวมทั้งหมดในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในแต่ละโครงการ

โครงการที่	จำนวนตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง	ตัวอย่างทดสอบในแต่ละตำแหน่ง				หมายเหตุ
		ผสมซีเมนต์ในสนาม	เจาะเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์บดอัดแน่น	ผสมซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ	รวมจำนวนตัวอย่าง	
1	7	3	1	6	70	การเก็บตัวอย่างในห้องปฏิบัติการจะทำการทดสอบ ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน สำหรับตัวอย่างในสนามจะทำการทดสอบที่ 28 วัน
2	9	3	1	6	90	
3	16	3	1	6	160	
4	12	3	1	6	120	
5	10	3	1	6	100	

3. วัสดุและเครื่องมือการก่อสร้าง

ตารางที่ 3 สรุปรายละเอียดเกี่ยวกับวัสดุและเครื่องจักรที่ใช้ในโครงการก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ทำการศึกษา โดยโครงการที่ 1, 2 และ 3 ใช้เครื่องจักรก่อสร้างระบบรีไซเคิลและวัสดุมวลรวมจากการรีไซเคิลชั้นทางเดิมซึ่งในขั้นตอนการก่อสร้างนั้น ผิวทางและพื้นทางเดิมจะถูกขุดกัด ผสมปูนซีเมนต์ แล้วปูพื้นกลับลงใหม่และบดอัดอัดในสนามทันที จากนั้นจึงทำการบ่มโดยการลาดน้ำเป็นเวลาประมาณ 3 วัน และสามารถเปิดการจราจรทันทีหลังทำการบดอัด วัสดุมวลรวมรีไซเคิลซึ่งได้จากการขุดตัดชั้นทางเดิมในที่นี้ อาจมีคุณสมบัติแปรปรวนได้มากเนื่องจากการซ่อมบำรุงที่ผ่านมา ทั้งการเสริมผิวทางแอสฟัลต์ที่ทำให้มีความหนาไม่เท่ากัน การเปลี่ยนวัสดุชั้นพื้นทางที่เกิดความเสียหาย รวมทั้งการทรุดตัวของชั้นโครงสร้างถนนที่ไม่เท่ากันซึ่งทำให้ความหนาที่ทำการขุดตัดไม่เท่ากันตามไปด้วย

สำหรับโครงการที่ 4 และ 5 วัสดุมวลรวมที่ใช้เป็นวัสดุประเภทดินลูกรังที่ได้จากบ่อยืม โดยเครื่องจักรก่อสร้างเป็นระบบโรงผสมสำหรับโครงการที่ 4 และเป็นระบบรีไซเคิลสำหรับโครงการที่ 5 ซึ่งกรณีการใช้เครื่องจักรรีไซเคิลทำการผสมในโครงการที่ 5 นั้น ดินมวลรวมที่

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All rights Reserved

ขนมาจากบ่อยืมจะถูกเทกอง ปาดเกลี่ย และบดอัดในสนามเป็นชั้นก่อน แล้วจึงใช้เครื่องรีไซเคิลขุดตัดและผสมดินกับปูนซีเมนต์ สำหรับกรณีการใช้เครื่องจักรระบบโรงผสมในโครงการที่ 4 จะผสมดินกับปูนซีเมนต์ให้เข้ากันแล้วขนส่งวัสดุไปที่หน้างานด้วยรถบรรทุก เทเป็นกอง และทำการปาดเกลี่ย ผสมน้ำแล้วคลุกให้เข้ากันแล้วปาดเกลี่ย บดอัดเป็นชั้นๆ จนได้ความหนาของชั้นพื้นทางตามต้องการ

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของตัวอย่างวัสดุมวลรวมที่เก็บจากตำแหน่งก่อสร้างต่าง ๆ ของแต่ละโครงการพบว่า วัสดุมวลรวมมีธรรมชาติความแปรปรวนในคุณสมบัติที่แตกต่างกันได้มาก แม้แต่วัสดุมวลรวมที่ได้จากการรีไซเคิลผิวทางและพื้นทางถนนเดิมในโครงการที่ 1, 2 และ 3 ดังจะสามารถสังเกตได้จากสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าผลคูณปริมาณผ่านตะแกรงเบอร์ 40 กับดัชนีพลาสติก (PI x #40) ในตารางที่ 3 ที่มีค่าเป็นศูนย์ในโครงการที่ 3 แต่สูงถึง 56 และ 106 ในโครงการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งคือ วัสดุรีไซเคิลในทุกโครงการมีคุณสมบัติเป็นแบบไม่เหนียว (nonplastic) ทั้งหมด ในขณะที่วัสดุมวลรวมที่ได้มาจากบ่อยืมในโครงการที่ 4 และ 5 มีทั้งที่มีความเหนียว (cohesive) และไม่เหนียว (nonplastic)

ตารางที่ 3 รายละเอียดต่างของตัวอย่างที่ทำการศึกษา

โครงการที่	วัสดุพื้นทาง	Design Cement Stabilize		หมายเหตุ
		MMD. (kg./cum.)	OMC. (%)	
1	ผิวทาง(AC.) +หินคลุก	2,233	5.2	ใช้เครื่องจักร Recycling In-Place
2		2,220	5.5	
3	ผิวทาง(AC.) +หินคลุก	2,122	8.8	ใช้เครื่องจักร Recycling In-Place (บวกเพิ่มCement 15%)
		2,166	9.3	
4	ดินลูกรังปนหินผุ	2,111	7.5	ใช้โรงผสมวัสดุ
5	ดินลูกรังปนทราย	2,187	9.2	ใช้เครื่องจักร Recycling In-Place (บวกเพิ่มCement 15%)

4. ผลการทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 4 เป็นตารางสรุปค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยจากการทดสอบที่เงื่อนไขต่างๆ ของแต่ละโครงการที่ทำการศึกษา ซึ่งสามารถนำไปสู่ข้อสรุปการศึกษาต่างๆ ได้ดังจะกล่าวถึงในต่อไปนี้

ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน เพิ่มขึ้นจากกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน ประมาณ 1.3 เท่า สำหรับมวลรวมที่เป็นมวลรวมรีไซเคิลที่เป็นหินคลุกผสมกับแอสฟัลต์ และประมาณ 1.2 เท่า สำหรับมวลรวมที่เป็นดินลูกรังซีเมนต์

ตารางที่ 4 สรุปค่าต่างๆที่ทดสอบได้

Project	Required Strength at 7 day (ksc.)	Use Portland Cement (%)	Strength Average (UCS. (ksc.))				Ratio Strength Average			ชนิดดิน	หมายเหตุ
			LU-7	LU-28	FU-28	CU-28	LU-28 /LU-7	FU-28 /LU-28	CU-28 /FU-28		
1	21.00	3.40	20.20	24.91	25.68	15.94	1.23	1.03	0.62	GW	เครื่องจักร Recycling In-Place
2	21.00	3.20	20.48	26.95	27.59	16.10	1.32	1.02	0.58	GW, SM	
3	28.80	5.04	31.13	41.04	40.59	48.21	1.32	0.99	1.19	GW	เครื่องจักร Recycling In-Place (บวกเพิ่ม Cement 15%)
4	17.50	5.00	20.83	24.66	29.68	21.82	1.18	1.20	0.74	GP,GM SM, ML	โรงผสมวัสดุ
5	20.10	4.60	23.83	28.32	15.13	11.23	1.19	0.53	0.74	SM, ML	เครื่องจักร Recycling In-Place (บวกเพิ่ม Cement 15%)

กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจากการผสมโดยเครื่องจักรในสนามส่วนใหญ่มีค่าไม่แตกต่างกันมากจากตัวอย่างที่ผสมในห้องปฏิบัติการ ยกเว้นในโครงการที่ 5 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยในโครงการนี้ใช้เครื่องจักรก่อสร้างระบบรีไซเคิล และวัสดุมวลรวมเป็นดินจากบ่อยืมที่บางส่วนเป็นดินที่มีความเหนียว

กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เจาะเก็บจากชั้นทางหลังก่อสร้าง และบ่มในสนาม มีค่าต่ำกว่าของตัวอย่างที่บดอัดและบ่มในห้องปฏิบัติการประมาณ 30 – 40 %

จากตารางที่ 5 ซึ่งแสดงความแปรปรวนในค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นแห้ง ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) พบว่า ระดับความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมในห้องปฏิบัติการกับที่ผสมด้วยเครื่องจักรในสนามไม่ได้มีแนวโน้มสูงหรือต่ำกว่ากันอย่างชัดเจน จึงอาจสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของการผสมดินซีเมนต์ด้วยเครื่องจักรในสนามมีอิทธิพลต่อความ

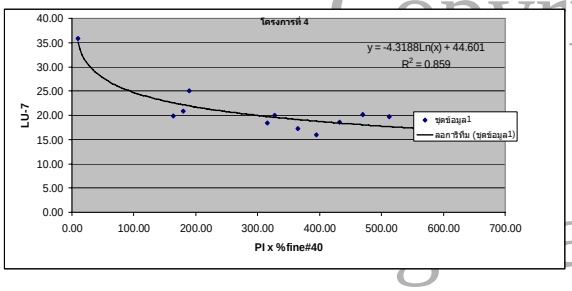
ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Rights Reserved

แปรปรวนในค่ากำลังรับแรงอัดค่อนข้างน้อย ความแปรปรวนส่วนใหญ่ที่พบในค่าทดสอบน่าจะเป็นผลมาจากความแปรปรวนในคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลตามธรรมชาติ หรือจากการเก็บตัวอย่างในสนามไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ที่ไม่สามารถเก็บให้ได้ตัวแทนที่ดี อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์ CV ของค่าความหนาแน่นแห้งก็ยังอยู่ในเกณฑ์กำหนดตามที่แนะนำไว้โดย Hausman, Manfred R [11] คือไม่เกิน 5%

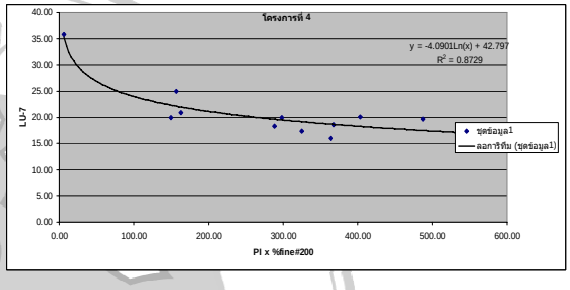
อิทธิพลของคุณสมบัติของมวลละเอียดในวัสดุมวลรวมต่อค่ากำลังรับแรงอัด สามารถแสดงได้ในรูปแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่า PIx%Fine #40 หรือ PIx%Fine #200 กับค่ากำลังรับแรงอัด ดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อวัสดุมวลรวมมีความละเอียดและความเหนียวเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง และการลดลงจะมีอัตราส่วนที่รวดเร็วในระยะต้นจากนั้นจะมีแนวโน้มที่ช้าลงและคงที่

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนกำลังรับแรงอัด

Project	CV 0f	CV of Strength (%)				CV of dry density (%)			
	PI*#40 (%)	LU-7	LU-28	FU-28	CU-28	LD-7	LD-28	FD-28	CD-28
1	56.41	17.60	19.49	30.77	19.57	1.81	2.45	2.02	0.59
2	105.79	33.19	32.66	26.24	32.29	3.02	2.96	1.12	2.13
3	0	16.88	20.23	12.56	22.24	2.20	2.16	1.29	1.98
4	49.65	25.82	31.64	15.47	26.61	4.23	2.91	3.14	4.47
5	73.76	20.22	17.51	48.54	34.71	2.23	2.27	2.67	3.45

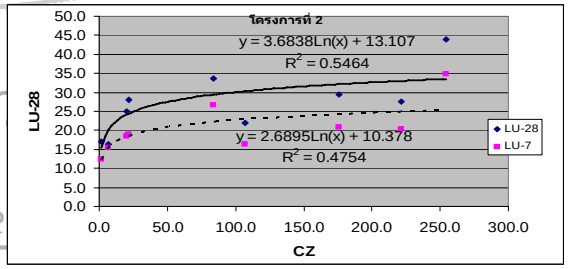


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่า PI x % fine #40 ของวัสดุมวลรวม โครงการที่ 4



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่า PI×% fine #200 ของวัสดุมวลรวมของโครงการที่ 4

รูปที่ 9 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับคุณสมบัติการกระจายขนาดคละของวัสดุมวลรวมในรูปค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (D_{60}/D_{10}) สำหรับกรณีที่วัสดุมวลรวมมีคุณสมบัติเป็นแบบไม่เหนียว (nonplastic) ซึ่งแม้ว่าแนวโน้มความสัมพันธ์จะไม่ค่อยชัดเจนนักจากค่า R^2 ที่ค่อนข้างต่ำ แต่ก็สามารถแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของขนาดคละมวลรวมต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (D_{60}/D_{10}) กับค่ากำลังรับแรงอัดของโครงการที่ 2

ในโครงการที่ 5 ที่ใช้เครื่องจักรก่อสร้างระบบรีไซเคิลและวัสดุมวลรวมเป็นดินจากบ่อยืมที่บางส่วนเป็นดินที่มีความเหนียว นั้นพบว่ากำลังรับแรงอัดในสนามมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดในห้องปฏิบัติการถึงประมาณ 0.5 เท่า ทั้งที่ในโครงการที่ 4 ที่ใช้เครื่องจักรก่อสร้างระบบโรงผสม ก็ใช้วัสดุมวลรวมเป็นดินจากบ่อยืมเช่นเดียวกันทั้งยังมีความเป็นเหนียวสูงกว่าอีกด้วย แต่ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจากการผสมโดยเครื่องจักรในสนามแทบจะไม่แตกต่างกับตัวอย่างที่ผสมในห้องปฏิบัติการเลย เป็นการแสดงให้เห็น

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ว่าเครื่องจักรก่อสร้างระบบรีไซเคิลไม่เหมาะสมที่จะใช้กับวัสดุที่มีความเหนียว

5. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดต่ำสุดและกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย

ตามหลักการทางสถิติ ถ้าสมมติให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ตำแหน่งต่างๆ ของการก่อสร้างในโครงการหนึ่งมีความแปรปรวนตามรูปแบบการแจกแจงความถี่แบบปกติ มี μ เป็นค่าเฉลี่ย และ σ เป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ก็จะสามารถระบุค่ากำลังรับแรงอัดต่ำสุดที่น่าจะเป็น X ได้ตามสมการ $X = \mu - a\sigma$ โดย a เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมั่นของความน่าจะเป็น หลักการนี้สามารถนำมาใช้กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดออกแบบ q_d ที่จะต้องเผื่อไว้เพื่อไม่ให้เกิดมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าเกณฑ์ที่ต้องการ q_r ในการทำงานก่อสร้างจริง โดยการแทนค่ากำลังรับแรงอัดต่ำสุดที่น่าจะเป็น X ด้วยเกณฑ์กำลังรังแรงอัดที่ต้องการ q_r และแทนค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย μ ด้วยค่ากำลังรับแรงอัดออกแบบ q_d ซึ่งจะทำให้สามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$q_d = q_r + a\sigma \quad \text{.....1}$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 1 อาจมองได้ว่าตัวแปร 2 ตัวที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดออกแบบ q_d คือ σ ได้รับอิทธิพลจากความแปรปรวนในคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมซึ่งเป็นไปตามธรรมชาติ หรือเกิดขึ้นจากขบวนการเก็บตัวอย่างวัสดุมวลรวมนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ส่วนค่าสัมประสิทธิ a นั้นได้รับอิทธิพลจากความแปรปรวนจากการทำงานผสมบดอัดในสนาม ดังนั้นจึงควรจะต้องควบคุมความแปรปรวนทั้งสองส่วนนี้ให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้มีความจำเป็นต้องกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดออกแบบสูงเกินไป ซึ่งการควบคุมค่า σ ให้อยู่ในระดับต่ำอาจทำได้โดยการลดช่วงการก่อสร้างที่ต้องการกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดออกแบบให้สั้นลงเพื่อลดความแปรปรวนในคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ a นั้น หากต้องการให้เกณฑ์กำลังรับแรงอัดต่ำสุดที่ต้องการมีระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ตามหลักทางสถิติ a จะมีค่าเท่ากับ 1.65 และจากชุดข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของแต่ละโครงการที่ทำการศึกษา ก็จะสามารถประเมินสัมประสิทธิ์ค่าสัมประสิทธิ์ a ได้ดังนี้

$$a = \frac{(q_r - q_{\min})}{\sigma} \quad \text{.....2}$$

โดย q_r เป็นค่าเฉลี่ย $q_{\min}$ เป็นค่าต่ำสุด และ σ เป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของแต่ละชุดข้อมูลกำลังรับแรงอัด

จากตารางที่ 6 ซึ่งสรุปค่าสัมประสิทธิ์ a ของแต่ละโครงการที่ทำการศึกษา คำนวณโดยใช้สมการที่ 2 จะเห็นได้ว่า a มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 – 1.4 สำหรับดินมวลรวมที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (โครงการที่ 1, 2 และ 3) และระหว่าง 0.9 – 2.1 สำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น เป็นการบ่งบอกว่าดินที่มีความเชื่อมแน่นจะมีค่าแปรปรวนจากการทำงานผสมบดอัดในสนามมากกว่าดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น โดยเฉพาะกรณีการใช้เครื่องจักรรีไซเคิลผสมดินมวลรวมที่มีความเชื่อมแน่นในโครงการที่ 5 พบว่ามีค่า a สูงถึง 2.12 ในขณะที่กรณีการใช้เครื่องจักรระบบโรงผสมดินมวลรวมที่มีความเชื่อมแน่นในโครงการที่ 4 มีค่า a เท่ากับ 0.92 เท่านั้น

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์ a ที่คำนวณได้จากการผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดในโครงการที่ศึกษา

Project	Required Strength at 7 day (ksc.)	Strength Avg. at 7 day (ksc.)	LU-7			Strength Avg. at 28 day (ksc.)	LU-28		
			min.	σ	a		min.	σ	a
1	21.00	20.2	17.35	3.43	**0.83**	25.9	21.69	4.18	**1.00**
2	21.00	20.5	12.47	6.68	**1.20**	26.5	16.24	7.55	**1.36**
3	28.80	31.1	23.25	5.72	**1.38**	41.3	27.52	8.72	**1.58**
4	17.50	20.8	16.04	5.22	**0.92**	24.7	17.95	7.70	**0.87**
5	20.10	23.8	13.81	4.72	**2.12**	28.3	21.96	4.69	**1.36**

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Copyright©by Faculty of Engineering Chiang Mai All Rights

6. สรุปและเสนอแนะ

6.1 อิทธิพลของความแปรปรวนในคุณสมบัติดิน

จากการศึกษาพบว่าความแปรปรวนในคุณสมบัติของดินมวลรวม กับระบบเครื่องจักรที่ใช้ทำการผสมบดอัดในเป็นปัจจัยสำคัญสองประการที่มีอิทธิพลต่อความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ในสนาม เมื่อดินมวลรวมมีคุณสมบัติสม่ำเสมอ การออกแบบส่วนผสมเพื่อให้การใช้ซีเมนต์อย่างมีปะสิทธิภาพ และการทำงานก่อสร้างให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดสม่ำเสมอ เป็นไปได้ง่าย

ในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ การเก็บตัวอย่างดินมวลรวมสำหรับใช้เป็นตัวแทนในการทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการ จะมีผลอย่างมากต่อค่ากำลังรับแรงอัดออกแบบที่จะทำการประเมิน ถ้าจำนวนตัวอย่างที่เก็บน้อยเกินไป อาจส่งผลให้ได้ข้อมูลทดสอบที่ไม่สะท้อนสภาพจริงและประเมินค่ากำลังรับแรงอัดการออกแบบได้ไม่เหมาะสม ในการเก็บตัวอย่างทดสอบสำหรับการออกแบบส่วนผสมจึงควรทำการตรวจสอบความแปรปรวนเป็นช่วงๆ และให้ได้ข้อมูลตลอดทั้งโครงการ

6.2 อิทธิพลของความแปรปรวนจากเครื่องจักรและวิธีการก่อสร้าง

การใช้เครื่องจักรระบบรีไซเคิลผสมดินมวลรวมที่ไม่มีความเชื่อมแน่น หรือที่เป็นวัสดุเม็ดหยาบนั้นมีประสิทธิภาพค่อนข้างดี แต่ในกรณีที่ดินมวลรวมมีความเชื่อมแน่น หรือมีมวลละเอียดที่มีค่าความเหนียวสูง เครื่องจักรรีไซเคิลจะมีประสิทธิภาพในการผสมต่ำ ส่วนการใช้เครื่องจักระบบโรงผสมพบว่ามีประสิทธิภาพการผสมค่อนข้างดี แม้ว่าดินมวลรวมจะเป็นชนิดมีความเชื่อมแน่น

กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้จากการเจาะเก็บจากชั้นพื้นทางหลังการก่อสร้างและบ่มในสนาม มีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมบดอัดและบ่มในห้องปฏิบัติการประมาณ 30 – 40 % ดังนั้นการจะใช้ตัวอย่างจากการเจาะเก็บในสนามเพื่อวัตถุประสงค์การตรวจสอบกำลังรับแรงอัดซ้ำ ควร จะต้องมีการพิจารณาและกระทำอย่างระมัดระวัง

การใช้เครื่องจักรระบบโรงผสมจะมีประสิทธิภาพดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องจักรรีไซเคิล โดยเฉพาะในกรณีที่มีความแปรปรวนในคุณสมบัติของดินมวลรวมสูง ทั้งนี้เพราะจะมีการผสมดินซีเมนต์ถึงสองรอบ คือการผสมที่โรงผสม และการผสมขณะลำเลียงวัสดุไปเทกอง ปาดเกลี่ย และบดอัด ที่หน้างาน ต่างจากกรณีการผสมในระบบเครื่องจักรรีไซเคิลที่มีการผสมเพียงครั้งเดียวในที่ก่อนทำการปูใหม่และบดอัด

6.3 การกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดออกแบบ

จากการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดต่ำสุดกับค่าเฉลี่ยของแต่ละโครงการศึกษา สามารถสรุปแนวทางการกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดออกแบบของดินซีเมนต์ในงานก่อสร้างพื้นทาง โดยพิจารณาถึงความแปรปรวนที่จะเกิดขึ้นจากคุณสมบัติวัสดุดินมวลรวม และประสิทธิภาพการผสมดินซีเมนต์ในสนาม ได้ตามสมการ

$$q_d = q_r + a\sigma$$

โดย q_d คือกำลังรับแรงอัดออกแบบ q_r คือกำลังรับแรงอัดต่ำสุดที่ต้องการ σ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ากำลังรับแรงอัดจากการผสมบดอัดในห้องปฏิบัติการ และ a คือค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการทำงานผสมบดอัดในสนาม โดยพบว่า a มีค่าจากต่ำสุดไปสูงสุดดังนี้ กรณีที่ผสมด้วยโรงผสม มีค่าเท่ากับ 0.90 กรณีที่ผสมด้วยเครื่องจักรรีไซเคิลและดินมวลรวมเป็นดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น มีค่าอยู่ระหว่าง 0.80 - 1.40 และการผสมด้วยเครื่องจักรรีไซเคิลและดินมวลรวมเป็นดินที่มีความเชื่อมแน่น มีค่าเท่ากับ 2.10

7. กิตติกรรมประกาศ

เจ้าหน้าที่ สำนักทางหลวงที่ 1 (เชียงใหม่) สำนักทางหลวงที่ 7 (อุบลราชธานี) และสำนักก่อสร้างที่ 2 กรมทางหลวง ที่เอื้อเฟื้อให้คำแนะนำ พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Rights Reserved

เอกสารอ้างอิง

[1] สุขสันติ์ หอพิบูลสุข. รายงานการวิจัยเรื่อง ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์บดอัดสำหรับงานถนน, รายงานวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี กุมภาพันธ์ 2548, หน้า 54-57

[2] อติมนต์ ยุพกรณ์ "ผลกระทบของความล่าช้าในการบดอัดดินลูกรังผสมซีเมนต์" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตร ศาสตร์, 2544.

[3] Davidson,D.T. and Bruns, B.W., Comparison of Type I and Type III Portland Cement for Soil-Stabilization, "Highway Research Board, Bulletin. 267, 1960, pp.28-45.

[4] Davidson,D.T.,Pitre, G.L., Matoes, M. and Kalankamary, P.G., "Moisture-Density, Moisture-Strength and Compaction Characteristics of Cement Treated Soil Mixtures," Highway Research Board, Bulletin. 353, 1962, pp. 42-63.

[5] Felt, E.J., "Factors Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures," Highway Research Board, Bulletin. 108, 1955, pp. 138-163

[6] Hausmann, Manfred R (1990) "Engineering Principles of Ground Modification" Mcgraw-Hill Book Company: New York, 1990.; 114-121

[7] Mitchell. J.K. and E.L. Jack, S.A., "The Fabric of Soil-Cement and Its Formation," Proceedings 14th National Conference on Clay and Clay Minerals, Vol.26, 1966, pp. 297-305.

[8] Moh, Z.C. "Soil Stabilization with Cement and Sodium Additives," Journal of SMFD, 88(6): December 1962; 81-105.

[9] Shihata, Sabry A. and Zaki A. Baghdadi. " Long-Term Strength and Durability of Soil Cement." Journal of Materials in Civil Engineering. 13(3) : May-June 2001; 161-165.

[10] Taha, Ramzi and other. "Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Base and Subbases." Journal of Materials in Civil Engineering, 14(3): June 2002 ; 239-245.

[11] Terrel, R.L., Barenberg, E.J.,Mitchell, J.M. and Thomson, M.R., Soil Stabilization in Pavement Structure A User's Manual Mixture Design Consideration, Vol.2, Washington, D.C., Government Printing Office, 1979, 120 p.

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright©by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Rights Reserved