

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจากการทดสอบความแข็งและ CBR ของวัสดุชั้นทางในบล็อทดสอบ

Relationship of Parameter for Stiffness and CBR Test of Pavement Materials in Test Box

ณัฐกฤษ น้อยก้อน

คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น
600 มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น ต.สระลงเรือ อ.ห้วยกระเจา จ.กาญจนบุรี 71170
E-mail : noikon_ae@hotmail.com

วิไลลักษณ์ สระมูล¹ สุภกร วชิราภรณ์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
² บัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
E-mail : wilailakk@gmail.com, wachiraporn08@gmail.com

อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
ถนนศรีอยุธยา แขวงพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
E-mail : sawangsuriya@gmail.com

สกุล ห่อวโนทยาน

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
E-mail : khsakul@gmail.com

Manuscript received September 3, 2013

Revised October 1, 2013

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาหาความสัมพันธ์ของค่าความแข็ง
และค่า *California Bearing Ratio (CBR)* ของดินบดอัดโดยค่า

ความแข็งนั้นจะเน้นไปที่ค่า *Elastic Modulus* วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็น
ดินบดอัดประเภทวัสดุโครงสร้างทางในงานก่อสร้างทางหลวง โดย
มีการวิเคราะห์ผลทดสอบระหว่างดินบดอัดในสนาม และดินที่บด
อัดในบล็อทดสอบ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบคือ *Soil Stiffness Gauge*

(SSG), Dynamic Cone Penetrometer (DCP) และ Nuclear Density Gauge (NDG) งานวิจัยนี้ได้ทำการควบคุมการบดอัดดินในบล็อกลทดสอบ โดยมีการควบคุมพลังงานและความชื้นของดิน บล็อกลทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้มีขนาด $0.60 \times 0.60 \times 0.25$ เมตร ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นแห้ง จาก NDG ค่า Stiffness Parameter (K) จาก SSG, ค่า DPI จาก DCP, ค่า E-Modulus (E) และค่า CBR พบว่าค่าความแปรปรวนของข้อมูลทดสอบในบล็อกลทดสอบมีค่าน้อยกว่าการทดสอบในสนาม พิจารณาผลการทดสอบในบล็อกลทดสอบ และในสนามจากเครื่องมือ SSG และ DCP ผลการศึกษาพบว่าพารามิเตอร์ที่เป็นผลทดสอบจากเครื่องมือทดสอบเหล่านี้มีความสัมพันธ์กัน โดยความสัมพันธ์มีแนวโน้มแปรผันโดยตรง ซึ่งค่าในสนามมีค่า $K_{SSG} = -2.67DPI + 26.92$ ค่าในบล็อกลทดสอบมีค่า $K_{SSG} = -2.67DPI + 51.64$ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการค่า CBR จากเครื่องมือ Field CBR มีความสัมพันธ์กับค่า CBR ที่ได้จากการ DCP มีความสัมพันธ์มีแนวโน้มแปรผันโดยตรงเฉลี่ยมีค่า $CBR_{field(box)} = 1.82CBR_{DCP}$ จากผลการศึกษาวิจัยเครื่องมือ SSG, DCP และ NDG ได้แสดงถึงศักยภาพที่คาดว่าจะสามารถนำมาพัฒนาเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพงานบดอัดวัสดุโครงสร้างชั้นทางในงานก่อสร้างทาง

ABSTRACT

This research presents the relationship of stiffness and California Bearing Ratio (CBR) for the compacted soil. The stiffness is focused to the form of Elastic Modulus. The tested materials were collected from highway construction. The tested results were analyzed for both soils compacted in the field and in the test box. The testing apparatus were employed by Soil Stiffness Gauge (SSG), Dynamic Cone Penetrometer (DCP) and Nuclear Density Gauge (NDG). The compacted soil in test boxes were controlled by energy of compaction and moisture content. The area of test box in this study was 0.60×0.60 square meter and 0.25 meter in height. The results showed that the deviation of dry density by NDG, the stiffness (K) by SSG, DPI by DCP, and CBR could be reduced for test box, comparing to soil test in the field. This outcome indicated that controlling soil properties, moisture content and compaction could reduce the deviation of test results. Considering to the soil test results applied by both SSG and DCP in the test box and in the field, the relationships between

parameters of test results from these apparatuses were shown significantly. The trend of directly correlations are proposed as; in the field test, $K_{SSG} = -2.67DPI + 26.92$ and in the test box also indicated $K_{SSG} = -2.67DPI + 51.64$. The relationships between Field CBR and DCP operated in test box for all selected materials could be exhibited as; $CBR_{field(box)} = 1.82CBR_{DCP}$. From this study, the apparatuses of SSG, DCP and NDG exhibited the potential to develop for compaction control in highway construction.

Keywords : soil stiffness gauge; dynamic cone penetrometer; nuclear density gauge; test box, CBR

1. บทนำ

การบดอัดดินเป็นการปรับปรุงคุณภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เช่น กำลังของวัสดุ (Strength) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus หรือ E-Modulus) เป็นต้น สำหรับตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบงานก่อสร้างชั้นทางคือค่าโมดูลัสและค่า CBR แต่การติดตั้งเครื่องมือและการตรวจวัดค่าต่างๆ เหล่านี้ค่อนข้างจะยุ่งยากและใช้เวลานาน หลักสำคัญในการตรวจสอบงานในสนามจะต้องมีความรวดเร็ว สะดวก ติดตั้งง่าย ไม่ยุ่งยาก ได้ข้อมูลที่ทันต่อการดำเนินงานอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันการหาค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของดินด้วยวิธี Sand Cone Test เป็นวิธีการตรวจสอบการควบคุมการบดอัดดินตามมาตรฐานกรมทางหลวง เนื่องจากวิธีทดสอบไม่ซับซ้อน ทำงานง่าย ถึงแม้ว่าค่าความหนาแน่นแห้งจะไม่ใช้ค่าที่นำมาใช้ออกแบบโดยตรง แต่เนื่องจากเป็นวิธีที่ทดสอบได้ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีความสัมพันธ์กับค่า CBR ซึ่งเป็นค่าที่นำมาใช้ออกแบบโดยตรง แต่อย่างไรก็ตามการหาค่าความชื้นของดินที่ได้จากการทดสอบ Sand Cone Test นั้น ต้องใช้เวลานาน ประมาณ 16 ชั่วโมงถึง 1 วัน จึงจะประเมินการบดอัดดินเพื่อดำเนินงานขั้นต่อไปได้ถือว่าเป็นจุดอ่อนที่ทำให้การดำเนินงานล่าช้า ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องมือ Soil Stiffness Gauge ที่สามารถพกพาได้ ใช้งานง่าย และทดสอบได้รวดเร็ว มาใช้ตรวจวัดค่าโมดูลัสของดินบดอัดในสนาม และได้ศึกษาเปรียบเทียบค่าโมดูลัสที่วัดได้กับตัวแปรอื่นๆ ในสนาม อาทิ เช่น Resilient Modulus Test (RM), California Bearing Ratio (CBR), Dynamic Cone Penetrometer (DCP) และ Sand Cone Test โดยงานวิจัยที่ผ่านมา Sawangsurriya et al. [1] และ Yonguyth et al.

[2] ได้ทำการศึกษาค่าคุณสมบัติของดินในสนาม ได้แก่ ความหนาแน่นแห้งและค่าสติเฟนส โดยใช้เครื่องมือ Soil Stiffness Gauge (SSG), Dynamic Cone Penetrometer (DCP) และ Nuclear Density Gauge มาทำการทดสอบวัสดุต่าง ๆ ในภาคสนาม จากผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าเครื่องมือ SSG และเครื่องมือ DCP ทดสอบแล้วมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วงประมาณ 0.8 – 2.4 ส่วนเครื่องมือ DCP ทดสอบแล้วมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วงประมาณ 0.3 – 3.2 ส่วนค่าความหนาแน่นแห้งของดินสุกกร [3] ได้ทำการทดสอบกับดินบดอัดในสนามด้วยเครื่องมือและ Sand cone พบว่าค่า Dry Density ที่ได้จาก Sand Cone Test มีค่าสูงกว่าค่า ที่ได้จาก Nuclear Gauge ประมาณ 3.4 %

แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยเครื่องมือ Soil Stiffness Gauge ในสนามยังมีค่าความแปรปรวนสูง อันเนื่องมาจากการควบคุมความชื้นในการบดอัดดินในสนามยังทำได้ยาก ในการศึกษาวิจัยนี้จึงได้ทำการจำลองการทดสอบสภาพในสนาม โดยการเก็บตัวอย่างวัสดุในสนามมาควบคุมความชื้น ควบคุมพลังงานการบดอัดทดสอบในบล็อกทดสอบที่มีขนาดความกว้าง 60 เซนติเมตร ความยาว 60 เซนติเมตร ความสูง 25 เซนติเมตร ในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุชั้นทาง โดยนำเครื่องมือ Soil Stiffness Gauge (SSG), เครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) มาตรวจวัดค่า E-Modulus และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ค่า CBR ส่วนเครื่องมือ Nuclear Density Gauge (NDG) ใช้ตรวจวัดค่าความหนาแน่นและความชื้นของวัสดุบดอัดในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความสัมพันธ์ของข้อมูลทำการทดสอบด้วยเครื่องมือต่างๆ สำหรับประเด็นสำคัญในการศึกษามีดังนี้ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับ γ_d , ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า DPI กับ γ_d , ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{SSG} กับ DPI_w และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า $CBR_{field(box)}$ กับ CBR_{DCP} โดยการไปประยุกต์ใช้งานนั้น คือ การนำค่า K หรือค่า DPI ที่สัมพันธ์กับค่า CBR ในบล็อกทดสอบ เพื่อไปทำควบคุมการทดสอบวัสดุในสนาม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 Soil Stiffness Gauge (SSG)

Soil Stiffness Gauge (SSG) ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยความร่วมมือระหว่าง The Federal Highway Administration (FHWA)

กับ The U.S. Department of Defenses Advanced Research Programs Administration (ARPA) เพื่อพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดคุณภาพการบดอัดในสนาม (Compaction Quality Control) โดยมีหลักการที่ว่าจะต้องตรวจวัดวัสดุชั้นทางได้อย่างรวดเร็ว ปลอดภัย และสามารถตรวจสอบงานบดอัดวัสดุชั้นทางได้อย่างถูกต้อง เครื่องมือ Soil Stiffness Gauge (รูปที่ 1) สามารถตรวจวัดค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุชั้นทางในสนามใช้ความเร็วประมาณ 1 จุดทดสอบต่อนาที น้ำหนักของเครื่องมือประมาณ 11.4 กิโลกรัม เส้นผ่านศูนย์กลาง 28 ซม. ความสูง 25.4 ซม. วางตั้งอยู่ผิวน้ำดิน โดยขาตั้งรูปวงแหวน (Ring shaped foot) สามารถพกพาเคลื่อนย้ายได้สะดวก มีน้ำหนักเบา ปลอดภัยในการใช้งาน

เครื่องมือ Soil Stiffness Gauge เป็นเครื่องมือวัดค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของชั้นดินถมคันทาง (Subgrade) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) และชั้นพื้นทาง (Base) โดยมีหลักการทำงานโดยอาศัยการสร้างแรงสั่นสะเทือน (Vibrating Force) ซึ่งแรงที่กระทำเกิดขึ้นด้วย Harmonic Oscillator ที่มีความถี่ระหว่าง 100 - 196 Hz ทำให้เกิดการทรุดตัว (Displacement) ของดิน ณ ตำแหน่งที่ขาตั้งรูปวงแหวน (Ring Foot) สัมผัสกับผิวดิน ขาตั้งรูปวงแหวนมีหน้าที่ถ่ายแรงลงสู่ผิวดิน ส่วนที่เหนือขึ้นไปเป็นเครื่องสั่น (Shaker หรือ Vibrating Mass) สร้างแรงกดในแนวตั้งต่อขาตั้งรูปวงแหวน เครื่องส่งสัญญาณ (Sensor) ที่ติดอยู่กับเครื่องสั่น (Shaker) และขาตั้ง (Footing) จะทำหน้าที่วัดค่าแรง (Force) และการทรุดตัว (Displacement) เพื่อนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาค่า Stiffness โดยคิดจากค่าเฉลี่ย 25 ค่า Lenke *et al.* [4]



รูปที่ 1 Soil Stiffness Gauge (GeoGauge™)

Sawangsurriya *et al.* [5] พบว่า เครื่องมือ Soil Stiffness Gauge (SSG) สามารถวัดค่า Stiffness ของดินได้ระดับความลึกประมาณ

300 – 400 มม. Sawangsurriya and Edil [6] ค่า Stiffness ที่ตรวจวัดได้จะสามารถนำมาหาค่า Modulus ของวัสดุชั้นทางได้ดังสมการ:

$$K_{SSG} = \frac{1.77E_{SSG}R}{(1 - \nu^2)} \quad (1)$$

โดยที่ K_{SSG} = ค่า Stiffness หน่วยเป็น MN/m, E_{SSG} = ค่า E-Modulus หน่วยเป็น MPa, R = รัศมีภายนอกของวงแหวน (57.2 มม.), ν = ค่า Poisson's ratio ของวัสดุ

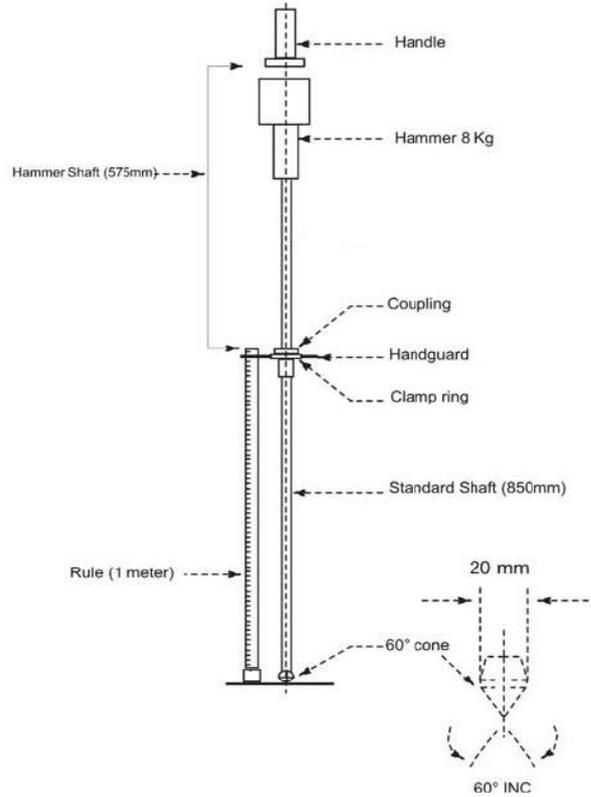
2.2 Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

Dynamic Cone Penetrometer หรือ DCP ดังรูปที่ 2 เป็นเครื่องมือทดสอบที่ใช้ประเมินค่าความแข็งแรง ได้แก่ ค่า CBR และค่า E-Modulus ของวัสดุชั้นทางในสนาม การใช้เครื่องมือ DCP ทดสอบชั้นดินระหว่างงานก่อสร้างช่วยให้ผู้ควบคุมงานสามารถตรวจสอบค่า CBR ของวัสดุชั้นทางบดอัดแน่นระหว่างก่อสร้างได้ทันทีและสามารถเปรียบเทียบกับค่า CBR ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด และหากจำเป็นต้องมีการแก้ไข ผู้ควบคุมงานสามารถสั่งการได้ทันเวลา การทดสอบ DCP อาศัยการวัดค่าความต้านทานต่อการจมของหัวค้อนเหล็ก (Piston) ซึ่งเรียกว่าค่า DCP Penetration Index (DPI) มีหน่วยเป็น mm/blow ค่า DPI ตลอดความลึกของการจมสามารถหาได้สองวิธี คือ วิธี Arithmetic Average และ วิธี Weighted Average ค่า DPI จำนวนโดยวิธี Arithmetic Average และ Weighted Average หาได้จากสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ Sawangsurriya and Edil [7]

$$DPI_{avg} = \frac{\sum_i^N (DPI)_i}{N} \quad (2)$$

$$DPI_{wt\ avg} = \frac{1}{H} \sum_i^N [(DPI)_i \times (z)_i] \quad (3)$$

โดยที่ N = จำนวน DPI ทั้งหมดที่บันทึกได้ตลอดความลึกที่ทดสอบ, Z = ความลึกที่จมต่อจำนวน blow ที่บันทึกได้หนึ่งครั้ง H = ความลึกของการทดสอบ



รูปที่ 2 Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาวิจัยพัฒนาสมการแสดงความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างค่า DPI และค่า CBR ของวัสดุชั้นทางทั้ง Granular และ Cohesive ได้ดังนี้

$$\log(CBR) = \alpha + \beta \log(DPI) \quad (4)$$

US Army Corps of Engineers ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ α และ β เท่ากับ 2.46 และ -1.12 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ได้รับการยอมรับแล้วจากหลายองค์กรและนักวิจัยหลายท่าน Sawangsurriya and Edil [6] ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E-Modulus และ ค่า CBR ที่ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวางคือ สมการของ Powell et al. [8] :

$$E = 17.6 \times CBR^{0.64} \tag{5}$$

2.3 Nuclear Density Gauge (NDG)

หลักการทั่วไปของ Nuclear Density Gauge (NDG) ดังรูปที่ 3 เป็นเครื่องมือตรวจวัดหาค่าปริมาณความชื้น (Moisture Content) ค่าความหนาแน่นเปียก (Wet Density) ค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) และค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัด (Percent Compaction) ในสนามของวัสดุชั้นทางหรือวัสดุอื่นๆ เครื่องมือ NDG วัดค่าความหนาแน่นของวัสดุโดยใช้รังสีแกมมาหรือโพตรอนจากต้นกำเนิดรังสี คือ ซีเซียม 137 (Cs-137) ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีชนิดที่มีความแรงของรังสีในระดับที่ต่ำ ความแรงรังสี 8 มิลลิวูรี่ ส่วนการวัดหาปริมาณความชื้นในวัสดุใช้รังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี คือ อเมอริเซียม 241 และเบอริลเลียม (Am 241 :Be) ความแรงรังสี 40 มิลลิวูรี่ วิธีการทดสอบได้ผ่านการรับรองให้เป็นเครื่องมือในการควบคุมการบดอัดตามมาตรฐาน ASTM D2922, D3017 และ C1040 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นในสนามโดยใช้วิธี Nuclear Gauge Method สามารถทดสอบหาค่าความหนาแน่นและปริมาณความชื้นในดินทรายเดียวกันได้ ข้อดีของเครื่องมือ NDG ใช้เวลาในการทดสอบน้อย สะดวกรวดเร็ว



รูปที่ 3 Nuclear Density Gauge

3. คุณสมบัติของวัสดุและโปรแกรมการทดสอบ

การศึกษานี้ได้เลือกโครงการก่อสร้างทางใน อ.บ้านไร่ จ. อุทัยธานี การศึกษานี้ได้นำตัวอย่างวัสดุชนิดเดียวกับในสนามมาทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการทดสอบในบดอัดทดสอบ

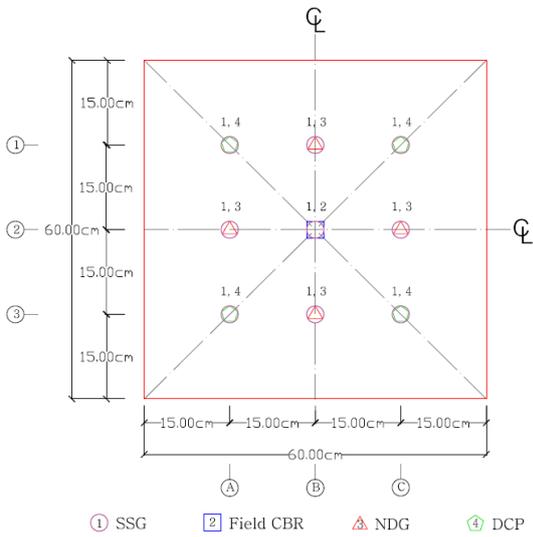
ตัวอย่างวัสดุชั้นทางแบบไม่คงสภาพจะถูกเก็บจากในสนามมาทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการทดสอบในบดอัดทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ โดยค่าคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญได้สรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของวัสดุชั้นทาง

คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม	Subgrade (ดินถมกันทาง)	Selected Material (หินลูกรัง)	Selected Material (หินลูกรัง)	Soil-Aggregate Subbase (ดินลูกรัง)	Crushed Rock Base (หินคลุกเกรด C)
AASHTO Classification	A-7-5	A-2-6	A-2-4	A-2-6	A-1-a
% Passing					
75.0 (3")	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
50.0 (2")	100.00	100.00	95.82	93.07	100.00
25.0 (1")	95.77	80.37	88.10	71.95	100.00
19.0 (3/4")	-	-	-	65.78	86.20
9.5 (3/8")	88.25	66.87	62.03	-	65.46
#4	85.16	54.15	47.13	27.24	52.41
#10	78.63	44.31	39.27	20.37	34.50
#40	54.48	31.35	30.22	11.38	14.25
#200	41.27	22.93	18.38	8.99	9.84
LL (%)	41.00	23.20	24.60	27.00	19.50
PI (%)	14.00	10.68	8.08	19.26	8.39
O.M.C. (%)	13.20	7.70	9.60	8.50	6.80
γ_{dmax} (t/m^3) (Modified Proctor)	1.90	2.12	2.13	2.11	2.40
Specific Gravity	2.65	2.64	2.65	2.68	2.77
Swell (%)	6.59	2.51	2.95	2.51	0.26

ในการทดสอบในสนามจะทำการทดสอบตามบริเวณที่ทำการก่อสร้างในส่วนที่สามารถจะทำการวัดข้อมูลได้โดยจะทำการทดสอบบนแปลงทดสอบที่งานก่อสร้างได้จัดให้ซึ่งจะมีระยะทางยาวประมาณไม่เกิน 3 กิโลเมตร จำนวนจุดที่วัดข้อมูลจะขึ้นอยู่กับช่วงความยาวของแปลงทดสอบ โดยจะวัดข้อมูลทุกระยะประมาณ 500 เมตร สำหรับการทดสอบในบดอัดทดสอบเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ SSG, DCP, Nuclear Density Gauge และ Field CBR การทดสอบได้ทำการบดอัดวัสดุชั้นพื้นทางโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำให้อยู่ในช่วงความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, O.M.C.) ของวัสดุชั้นทางแต่ละชนิด มีการบดอัดวัสดุในบดอัดทดสอบที่พลังงานต่าง ๆ เพื่อหาพลังงานการบดอัดที่ความ

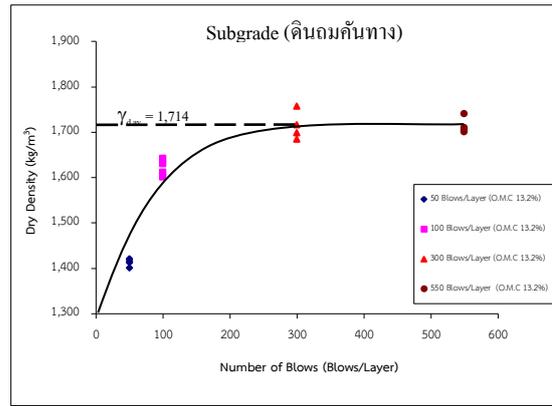
หนาแน่นเริ่มคงที่ผลการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 3 โดยก้อนที่ใช้บดอัดมีน้ำหนัก 13.87 กิโลกรัม บดอัดวัสดุจำนวน 5 ชั้น จำนวนครั้งในการบดอัดต่อชั้นคือ 50, 100, 300, 550, 700 ครั้ง/ชั้น แต่ด้วยข้อจำกัดของพื้นที่หน้าตัดของบล็อกลทดสอบจึงต้องทำการเรียงลำดับเครื่องมือที่จะนำมาใช้ทดสอบ โดยนำเครื่องมือ SSG มาทดสอบเป็นลำดับแรก เนื่องจากมีการรบกวนดินน้อยที่สุด ลำดับที่ 2 ทดสอบด้วยเครื่องมือ Field CBR ลำดับที่ 3 ทดสอบด้วยเครื่องมือ Nuclear Density Gauge และลำดับสุดท้ายทดสอบด้วยเครื่องมือ DCP ในส่วนของตำแหน่งการทดสอบเครื่องมือแต่ละชนิดได้สรุปไว้ดังรูปที่ 4



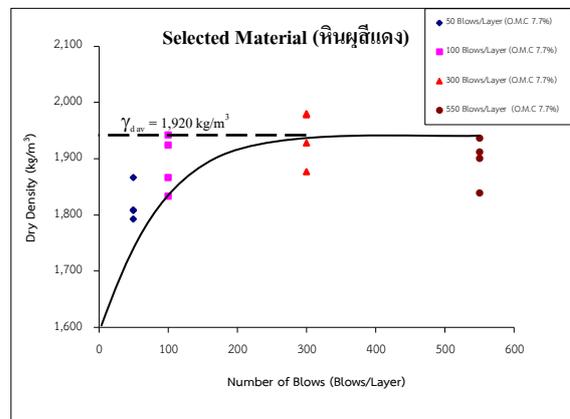
รูปที่ 4 ตำแหน่งการทดสอบในบล็อกลทดสอบด้วยเครื่องมือต่าง ๆ

4. ผลการวิเคราะห์และทดสอบวัสดุด้วยเครื่องมือต่าง ๆ

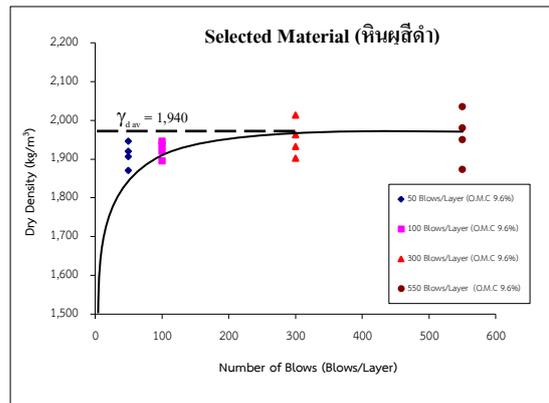
จากการทดสอบวัสดุในบล็อกลทดสอบที่พลังงานต่าง ๆ ด้วยเครื่องมือ NDG พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งของดินถมคันทาง ดินลูกรัง หินผุสีแดง และหินผุสีดำในบล็อกลทดสอบเริ่มคงที่ ๆ การบดอัด 300 ครั้งต่อชั้น มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1,714, 1,920, 1,940 และ 1,953 kg/m³ ตามลำดับ ส่วนหินคลุกเกรด C ค่าความหนาแน่นแห้งเริ่มคงที่ ๆ การบดอัด 550 ครั้งต่อชั้น มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2,244 kg/m³ ดังรูปที่ 5 (a), (b), (c), (d) และ (e)



(a)

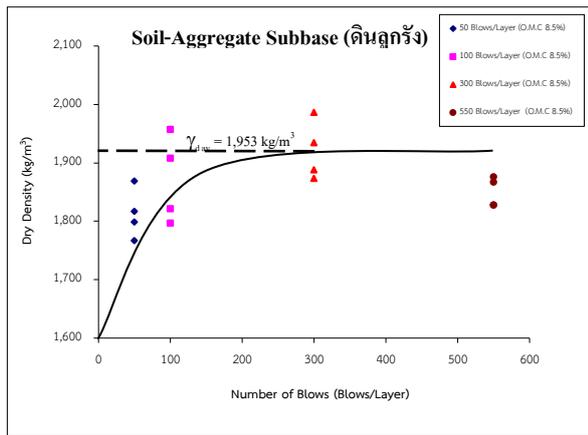


(b)

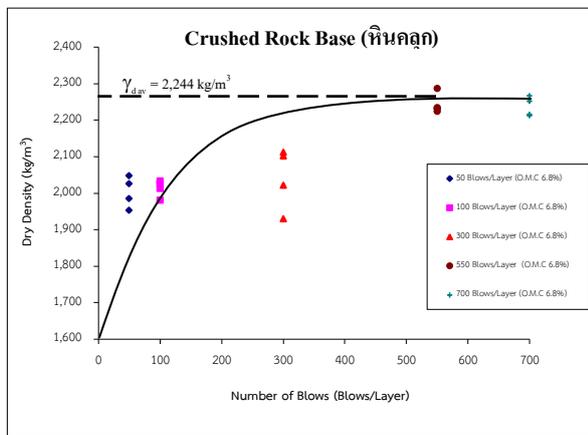


(c)

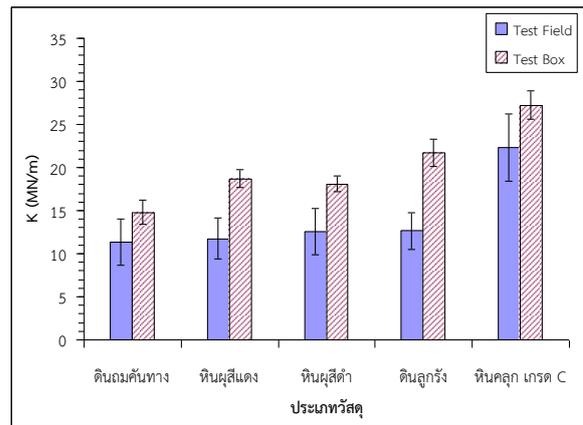
รูปที่ 5 ค่าความหนาแน่นแห้งกับพลังงานที่ใช้บดอัดวัสดุชั้นทางในบล็อกลทดสอบ (a) Subgrade (ดินถมคันทาง) (b) Selected Material (หินผุสีแดง) (c) Selected Material (หินผุสีดำ) (d) Soil-Aggregate Subbase (ดินลูกรัง) (e) Crushed Rock Base (หินคลุก)(ต่อ)



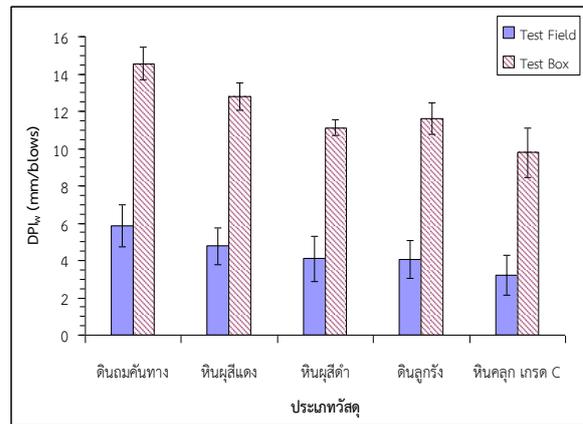
(d)



(e)



รูปที่ 6 ค่า Stiffness จาก SSG สำหรับวัสดุรวมในสนามและในบล็อกลทดสอบ



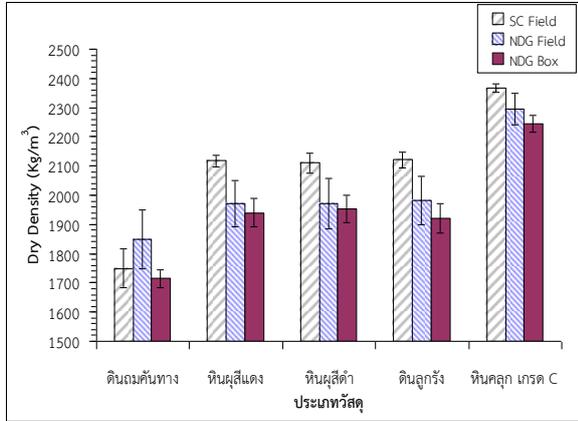
รูปที่ 5 ค่าความหนาแน่นแห้งกับพลังงานที่ใช้บดอัดวัสดุชั้นทางในบล็อกลทดสอบ (a) Subgrade (ดินถมคันทาง) (b) Selected Material (หินผุสีแดง) (c) Selected Material (หินผุสีด้า) (d) Soil-Aggregate Subbase (ดินลูกรัง) (e) Crushed Rock Base (หินคลุก)

รูปที่ 7 ค่า DPI_w จาก DCP สำหรับวัสดุรวมในสนามและในบล็อกลทดสอบ

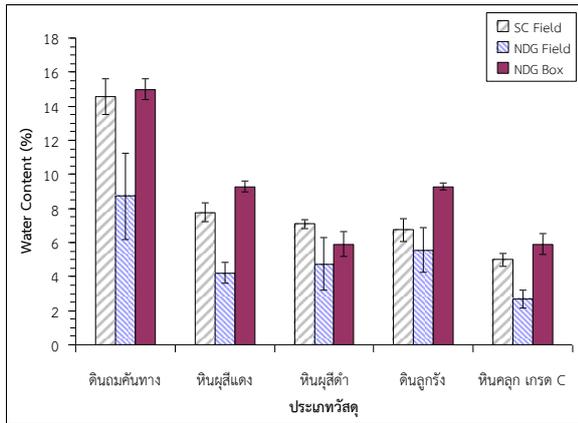
จากรูปที่ 6 และ 7 ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ SSG และ DCP พบว่าค่า K และค่า DPI ในสนามมีเบี่ยงเบนค่าสูงสุดและต่ำสุดต่างจากค่า Mean มาก และเมื่อเทียบกับการทดสอบในบล็อกลทดสอบพบว่า การทดสอบในบล็อกลทดสอบสามารถลดค่าความแปรปรวนของข้อมูลได้ เมื่อพิจารณาขนาดของวัสดุจะเห็นว่าวัสดุที่มีขนาดเม็ดละเอียดมาก (Fine-grained Soil) ค่าความแปรปรวนก็จะมากตามไปด้วย

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบค่า Dry Density และ Water Content ของวัสดุแต่ละประเภท ดังรูปที่ 8 และ 9 จะเห็นว่ากลุ่มวัสดุที่มีขนาดเม็ดเล็กหรือที่เรียกว่า Fine-grained Soil จะมีค่า Water Content แตกต่างกันสูงในแต่ละจุดที่วัดข้อมูล ได้นำไปวิเคราะห์ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าค่า Dry Density ในบล็อกลทดสอบเฉลี่ยประมาณ 41.48 ในสนามเฉลี่ยประมาณ 80.16 จะแปรผันโดยตรงกับความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Water Content จากผลการทดสอบพบว่า ความแปรปรวนและความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ของค่า Water Content สูงจะส่งผลให้ค่า Dry Density มีความแปรปรวนและความเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงตามไปด้วย



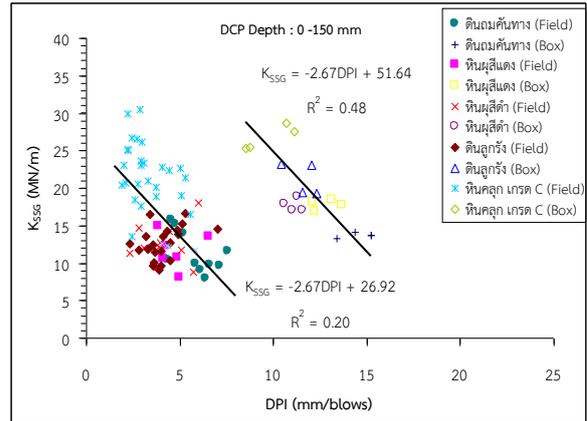
รูปที่ 8 ค่า Dry Density จาก NDG สำหรับวัสดุรวมในสนามและในบล็อกลทดสอบ



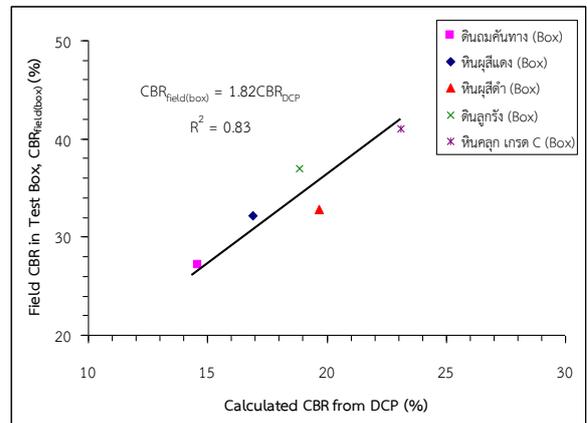
รูปที่ 9 ค่า Water Content จาก NDG สำหรับวัสดุรวมในสนามและในบล็อกลทดสอบ

จากการทดสอบจะทำการวัดที่จุดเดียวกันทั้งเครื่องมือ SSG และ DCP ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stiffness (K) และค่า DPI_w ดังรูปที่ 10 พบว่าค่า Stiffness (K) มีแนวโน้มเป็นปฏิภาคผกผันกับค่า DPI_w คือค่า Stiffness (K) มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า DPI_w ที่ลดลง โดยค่า Stiffness (K) ในสนามแตกต่างกับค่าในบล็อกลทดสอบอยู่ 49.52%

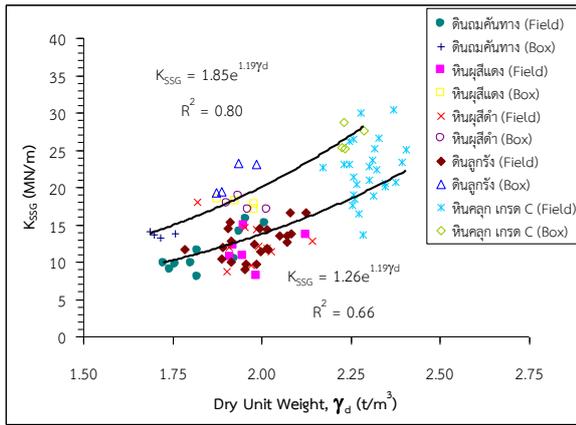
จากผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ Field CBR และ DCP ในบล็อกลทดสอบ โดยใช้วัสดุชนิดเดียวกับในสนาม ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $CBR_{field(box)}$ กับค่า Calculated CBR_{DCP} ของวัสดุแต่ละประเภท ดังรูปที่ 11 พบว่าค่า $CBR_{field(box)}$ มีแนวโน้มเป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่า Calculated CBR_{DCP} คือค่า $CBR_{field(box)}$ มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่า Calculated CBR_{DCP} เพิ่มขึ้น



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{SSG} กับค่า DPI สำหรับวัสดุรวมในสนามและในบล็อกลทดสอบ

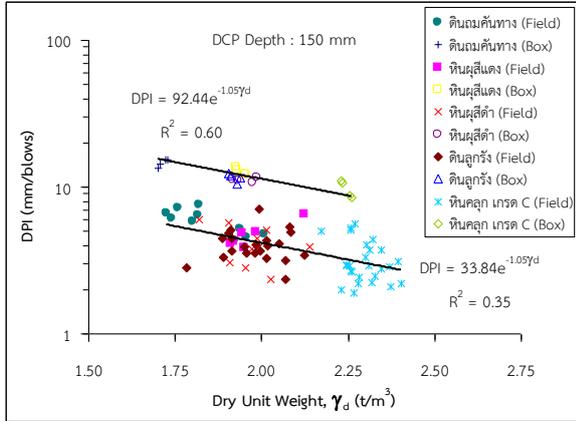


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $CBR_{field(box)}$ กับค่า Calculated CBR_{DCP} สำหรับวัสดุรวมในบล็อกลทดสอบ



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{SSG} และค่า Dry Unit Weight สำหรับวัสดุรวมในสนามและในบล็อกลทดสอบ

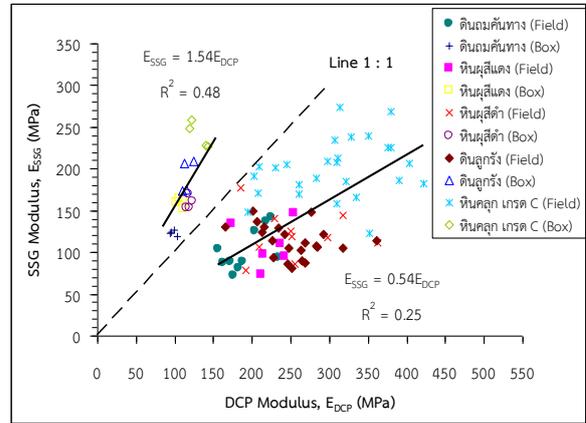
จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{SSG} กับค่า Dry Density ดังรูปที่ 12 พบว่าค่า K_{SSG} มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับค่า Dry Density คือค่า K_{SSG} มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของค่า Dry Density โดยสรุปค่า K_{SSG} จะขึ้นอยู่กับค่า Dry Density และชนิดของวัสดุ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DPI และค่า Dry Unit Weight สำหรับวัสดุรวมในสนามและในบล็อกลทดสอบ

ผลการทดสอบค่า DPI ที่ความลึก 150 mm ที่วัดได้จาก เครื่องมือ DCP ที่วัดจุดเดียวกันกับการวัดค่า Dry Unit Weight โดย เครื่องมือ Nuclear Density Gauge นำค่า DPI_w มาสร้างกราฟแสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DPI_w กับค่า Dry Density และค่า DPI_w ดังรูปที่ 13 พบว่าค่า DPI_w มีแนวโน้มเป็นปฏิภาคผกผันกับค่า Dry Density คือค่า DPI_w มีค่าลดลงตามค่า Dry Density ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{SSG} และค่า E_{DCP} สำหรับวัสดุรวมในสนามและในบล็อกลทดสอบ

จากผลการทดสอบเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าค่า $E_{SSG(field)}$, $E_{SSG(box)}$, $E_{DCP(field)}$, $E_{DCP(box)}$ ของวัสดุดินถมกันทางดังรูปที่ 14 จะมีค่าเรียงจากวัสดุที่ความความแข็งแรงน้อยไปมาก อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยมีความเห็นว่าตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อค่า Elastic Modulus ในสนามก็คือขนาดผล (Gradation) ของวัสดุในขณะที่ทำการตีผสมในสนามก่อนบดอัด ซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างทาง ถ้าประสิทธิภาพของการทำงานโดยเครื่องจักรตีผสมในสนามทำให้ได้ขนาดผล (Gradation) ไม่ดีพอถึงแม้จะบดอัดได้ความแน่นตามข้อกำหนดก็ตามก็ได้ค่า Elastic Modulus ที่ต่ำ อีกประการหนึ่ง การวัดด้วยเครื่องมือ SSG เป็นการวัดที่บริเวณผิวของชั้นโครงสร้างทางนั้นๆ อาจทำให้ได้ค่า Elastic Modulus ที่ต่ำกว่าความเป็นจริงได้ ส่วนในบล็อกลทดสอบบัจจยอยู่ที่ค่าการบดอัดวัสดุให้แน่นเทียบเท่าในสนามนั้นทำได้ยาก เนื่องจากเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการบดอัดแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในภาพรวมระหว่างค่า E_{DCP} ในบล็อกลทดสอบ ค่า Elastic Modulus ที่วัดโดยเครื่องมือ DCP สามารถใช้ในการทดสอบค่า Elastic Modulus ของวัสดุชั้นโครงสร้างทางในระหว่างก่อสร้างได้

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือ SSG, เครื่องมือ DCP และเครื่องมือ NDG ที่ได้จากการทดสอบในสนาม เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในบล็อทดสอบ เพื่อนำไปศึกษาและพัฒนาแนวทางการใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น ค่า E-Modulus และค่า CBR ในงานควบคุมคุณภาพการบดอัดในสนามระหว่างการก่อสร้างทางหลวงนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

- ค่า K จาก SSG มีความสัมพันธ์กับค่า DPI จาก DCP โดยความสัมพันธ์มีแนวโน้มแปรผกผัน ซึ่งค่าในสนามมีค่าเฉลี่ย $K_{SSG} = -2.67DPI + 26.92$ ค่าในบล็อทดสอบมีค่าเฉลี่ย $K_{SSG} = -2.67DPI + 51.64$

- ค่า E_{SSG} จาก SSG มีความสัมพันธ์กับค่า E_{DCP} จาก DCP โดยความสัมพันธ์มีแนวโน้มแปรผันโดยตรง ซึ่งค่าในสนามมีค่าเฉลี่ย $E_{SSG} = 0.54E_{DCP}$ ค่าในบล็อทดสอบมีค่าเฉลี่ย $E_{SSG} = 1.54E_{DCP}$

- ในบล็อทดสอบค่า CBR จาก Field CBR มีความสัมพันธ์กับค่า CBR จาก DCP โดยความสัมพันธ์มีแนวโน้มแปรผันโดยตรง เฉลี่ยมีค่า $CBR_{Field(box)} = 1.8193CBR_{DCP}$

- การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{SSG} กับค่า Dry Unit Weight สำหรับวัสดุรวมในสนามและในบล็อทดสอบ พบว่ามีค่า ratio ในสนามเทียบกับบล็อทดสอบเท่ากับ 0.68

- การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า DPI และค่า Dry Unit Weight สำหรับวัสดุรวมในสนามและในบล็อทดสอบ พบว่ามีค่า ratio ในสนามเทียบกับบล็อทดสอบเท่ากับ 0.37

- จากการศึกษาวิจัย เครื่องมือ DCP, SSG และ Nuclear Density Gauge ในบล็อทดสอบมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ในการควบคุมคุณภาพการบดอัดในงานก่อสร้างทางในสนามได้ แต่เครื่องมือ SSG จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีความรู้ในการใช้เครื่องชนิดนี้เป็นพิเศษ

- ข้อสังเกต ผลการทดสอบจากเครื่องมือต่างๆ ในบล็อทดสอบจะมีค่าสูงกว่าในสนาม อาจเนื่องจากขนาดของบล็อทดสอบ (boundary effect) หรือเกิดจากความแตกต่างระหว่างเทคนิคการบดอัดและเครื่องมือบดอัด ซึ่งผลยังไม่ชัดเจนควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป แต่พบว่าค่าความแปรปรวนในบล็อทดสอบมีค่าลดลงจากในสนาม โดยความสัมพันธ์ของค่าที่ทดสอบด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ในบล็อทดสอบเป็นไปในทางเดียวกันกับใน

สนาม และเมื่อดินที่ขนาดละเอียดมากจะมีความแปรปรวนสูง เพราะถ้าดินมีฝุ่นมากก็就会有ความแปรปรวนมากตามไปด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.Sawangsuriya, W. Sramoon, and S. Wachiraporn., (2009). "Innovative Tool for Highway Construction Quality Control". Research and Development Journal, The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King's Patronage, Vol. 20, No.3, pp. 37-42
- [2] Y.Teasiri, A.Sawangsuriya, W. Sramoon, and S. Wachiraporn., (2009). "Assessment of In-situ Tests for Stiffness and Strength Characteristics of Pavement Materials". 13th Conference of the Road Engineering Association of Asia and Australia (REAAA), Incheon, Korea, No.9-03
- [3] สุภกร วชิราภรณ์, (2551). การศึกษาเบื้องต้นในการใช้ค่าโมดูลัสของดินในการควบคุมงานบดอัดถนน, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, ณ โรงแรมจอมเทียน ปาร์ม บีช พัทยา
- [4] L.R. Lenke, R.G. Mckeen, and M. Grush, (2001). "Evaluation of a Mechanical Stiffness Gauge for Compaction Control of Granular Media". Research Bureau, New Mexico State Highway & Transportation Department, Albuquerque, USA.
- [5] A. Sawangsuriya, T.B. Edil and P.J.Bosscher, (2004). Assessing Small-Strain Stiffness of Soils Using the Soil Stiffness Gauge.Proceedings of the 15th Southeast Asian Geotechnical Conference.Bangkok, Thailand, 101-106.
- [6] A. Sawangsuriya และ T.B. Edil, (2005). Earthwork quality controlusing soil stiffness. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanic and Geotechnical Engineering. Osaka, Japan.
- [7] A. Sawangsuriya and T.B. Edil, (2005). Evaluating stiffness and strength of pavement materials. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering 158, Issue GE24, 217-230.

[8] Powell, W. D., Potter, J. F., Mayhew, H. C., and Nunn, M. E., The Structural Design of Bituminous Roads, TRRL Laboratory Report 1132, Transportation and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, 1984, 62 pp.

ณัฐกฤษ น้อยก้อน ไม่สามารถหารูปและประวัติได้ก่อนตีพิมพ์

วิไลลักษณ์ สระมูล ไม่สามารถหารูปและประวัติได้ก่อนตีพิมพ์

ศุภกร วจิราภรณ์ ไม่สามารถหารูปและประวัติได้ก่อนตีพิมพ์

อัศภพัฒน์ สว่างสุรีย์ ไม่สามารถหารูปและประวัติได้ก่อนตีพิมพ์

สฤล ห่อวโนทยาน ไม่สามารถหารูปและประวัติได้ก่อนตีพิมพ์