

การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างพื้นทางผสมซีเมนต์
โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ANALYSIS OF STRENGTH OF CEMENT TREATED BASE
USING GENETIC ALGORITHM

ปรีชา สาลี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างพื้นทางผสมซีเมนต์
โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ความแข็งแรง โครงสร้างพื้นทางผสมซีเมนต์ โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
ชื่อ - นามสกุล	นายปรีชา สาลี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, ปร.ค.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล ทองอินทร์ดำ, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

แม้ว่าถนนที่มีพื้นทางดินซีเมนต์จะตอบสนองต่อการใช้งานเป็นอย่างดี แต่กลับพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปปรากฏให้เห็นว่าถนนดังกล่าวเกิดความเสียหายในบางช่วงของสายทาง ในการประเมินความแข็งแรงของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์และชั้นทางอื่นๆในทางวิศวกรรมที่ต้องการทราบความแข็งแรงที่แท้จริงในแต่ละชั้นทางไม่สามารถทำได้โดยง่าย จำเป็นต้องอาศัยวิธีการคำนวณย้อนกลับซึ่งมีหลากหลาย

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการประเมินความแข็งแรง โครงสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ด้วยการประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวจากเครื่องมือเบนเคนแมนบีม และเครื่องตุ้มกระแทกแบบเบาโดยใช้การคำนวณย้อนกลับด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยการสร้างแปลงทดสอบและบดอัดด้วยจำนวนเที่ยวและวันที่บดอัดแตกต่างกัน

พบว่าแอมการยุบตัวจากเครื่องมือเบนเคนแมนบีมถึงแม้จะปรับปรุงด้วยสมการลดรอย แต่ยังคงไม่เพียงพอต่อการคำนวณย้อนกลับซึ่งได้ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 20 ในขณะที่ผลการทดสอบจากเครื่องตุ้มกระแทกแบบเบาไม่จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์แบบลดรอย และลดค่าความคลาดเคลื่อนลงเหลือเพียงร้อยละ 6

คำสำคัญ: ค่าโมดูลัสชั้นทาง พื้นทางดินซีเมนต์ ระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Thesis Title	Analysis of Strength of Cement Treated Base Using Genetic Algorithm
Name - Surname	Mr. Preecha Salee
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Mr. Boonchai Phungpaigam, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Assistant Professor Puttapon Thongindam, Dr.-Ing.
Academic Year	2015

ABSTRACT

Although roads or highways with soil-cement base layer show a success case for serviceability, damages have been found on some parts of the roads with time. Furthermore, the strength of all layers in the pavement structure cannot be easily evaluated and needs different ways of backcalculation process for solving this problem.

This research studied the evaluation of soil-cement base stiffness using Benkelman beam and lightweight deflectometer. Full scale test sections were constructed and implemented according to different number of compaction times and dates. The test results were input data for backcalculation process based on genetic algorithm.

It was found that the deflection basin resulting from Benkelman beam could be improved by regression analysis, but the accuracy level was not high enough for backcalculation process – resulting in over 20 percent of errors. On the other hand, the test results from lightweight deflectometer were not necessarily analyzed by regression procedure, and error occurrence could be reduced to 6 percent.

Keywords: layer moduli, soil-cement base, genetic algorithm

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.บุญชัย ผึ้งไฝงาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธพล ทองอินทร์คำ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต กรรมการสอบ และ ดร.รัฐพล สมณา ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือ แก่ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เนื่องด้วยงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย “การประเมินความแข็งแรงในที่ของชั้น พื้นทางดินซีเมนต์ด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรมขนาดเล็ก” ซึ่งมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประกาศ ทองประไพ เป็นหัวหน้าโครงการฯ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธพล ทองอินทร์คำ เป็นผู้ร่วมวิจัย เข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทร.ธัญบุรี) และสำนักงาน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่อนุมัติทุนสนับสนุนทุนวิจัยโครงการดังกล่าว

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาบ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถ นำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยขั้นตอนนี้

ขอขอบคุณบุคลากร สำนักงานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือแนะนำตลอดจนให้คำปรึกษา ตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีชีวทางถนนและท่าอากาศยาน (RAPTR) ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ และซอฟต์แวร์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ตลอดจนสถานที่ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัว พี่น้อง เพื่อนที่ แสนดีและคณะครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ จนสามารถดำเนินการวิจัยและ จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจหาก งานวิจัยฉบับนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยกราบขอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ปรีชา สาลี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 วัตถุประสงค์.....	13
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	14
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	14
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 ประวัติและความเป็นมาชั้นพื้นทางดินซีเมนต์.....	16
2.2 ลักษณะโครงสร้างของดินซีเมนต์.....	17
2.3 ทฤษฎีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทางชั้นสูง.....	20
2.4 การประเมินความแข็งแรงโดยการทดสอบแบบไม่ทำลาย.....	21
2.5 การคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทาง.....	25
2.6 กระบวนการคำนวณแบบเดินหน้า (Forward Mechanistic Process).....	26
2.7 กระบวนการคำนวณผกผัน (Inverse Algorithms).....	31
2.8 ระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA).....	34
2.9 โปรแกรมคำนวณย้อนกลับแกมเล็ต (GAMLET).....	37
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
3.2 วิธีการดำเนินงาน	48
3.3 วิธีการดำเนินงานทดสอบ FWD-Sim . ในแปลงทดสอบพื้นทางดินซีเมนต์.....	52
3.4 วิธีการดำเนินงานทดสอบค่าแอมป์การยุบตัวจากเครื่องมือ LWD.....	53
3.5 การคำนวณย้อนกลับด้วย โปรแกรมเกมเล็ต (GAMLET).....	55
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์	57
4.1 การวิเคราะห์ค่าการยุบตัวจากการทดสอบในสนาม.....	57
4.2 ผลการวิเคราะห์โมดูลัสพื้นผิวจากเครื่อง LWD	60
4.3 ผลการคำนวณย้อนกลับหาค่าความแข็งแรง	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลการวิจัย	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดสอบจากเครื่องเบนเคลแมนบีม ในแปลงทดสอบ	73
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดสอบ LWD ในแปลงทดสอบ	75
ภาคผนวก ค ผลการคำนวณย้อนกลับ	79
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	121
ประวัติผู้เขียน.....	142

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดของการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์	18
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างเครื่อง FWD และเครื่องเบนเคลแมนบีม	22
ตารางที่ 2.3 ค่าอัตราส่วนปิวซ์ชอง (μ) โดยทั่วไปของวัสดุชั้นทางที่แนะนำโดย AASHTO	32
ตารางที่ 2.4 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) โดยทั่วไปของวัสดุชั้นทางที่แนะนำโดย AASHTO	32
ตารางที่ 2.5 ค่าความเป็นไปได้ของโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางในงานศึกษาของ พุทธรพล และนิรชร	39
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดชุดพารามิเตอร์ที่ใช้ตั้งค่าการคำนวณย้อนกลับสำหรับ โปรแกรม GAMLET	55
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางจากการทดสอบด้วยเครื่อง BB ด้วยค่าแอมป์ การยุบตัวโดยตรงจากในสนาม	63
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางจากการทดสอบด้วยเครื่อง BB ด้วยค่าแอมป์ การยุบตัวจากการปรับแก้ด้วยสมการถอดอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	64
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางจากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD	65



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของดินซีเมนต์	17
รูปที่ 2.2 ลักษณะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง.....	20
รูปที่ 2.3 เครื่องมือเบนเคลแมนบีม	22
รูปที่ 2.4 เครื่องเบนเคลแมนบีมด้วยการจำลองตำแหน่งตัวรับสัญญาณของ FWD	23
รูปที่ 2.5 ค่าหน่วยแรงจากแนวคิดที่ความลึกใด ๆ ของทฤษฎีของบูซิเนค.....	26
รูปที่ 2.6 หน่วยแรงเค้นที่เกิดจากแรงกระทำบนพื้นที่วงกลมมีรัศมี r.....	27
รูปที่ 2.7 แสดงการแปลงความหนาของวัสดุตามวิธีของ Odemark.....	28
รูปที่ 2.8 ความหนาเทียบเท่าของวัสดุในกรณีที่มีหลายชั้น	30
รูปที่ 2.9 หลักการของทฤษฎียืดหยุ่นหลายชั้นทาง (MLET)	31
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างพื้นผิวคำตอบของระบบชั้นทาง 2 ชั้น ที่ใช้ค่า <i>RMSE</i> เป็นดัชนีชี้วัดคำตอบ	34
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างพื้นผิวคำตอบของระบบชั้นทาง 3 ชั้นที่ใช้ค่าเป็นดัชนีชี้วัดคำตอบ.....	36
รูปที่ 3.1 รถเกรด (Grader)	43
รูปที่ 3.2 รถบดสั้นสะเทือน (Dynapac).....	44
รูปที่ 3.3 รถบรทุกน้ำ	44
รูปที่ 3.4 รถบรทุก 6 ล้อ 2 เพลาแบบเพลาหลังเป็นเพลาเดี่ยวล้อคู่.....	45
รูปที่ 3.5 รถบรทุกซีเมนต์ผง	45
รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งน้ำหนักรถบรทุก	46
รูปที่ 3.7 เครื่องมือเบนเคลแมนบีม	47
รูปที่ 3.8 เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวด้วยลูกค้อนกระแทกแบบเบา รุ่น TC-351F	47
รูปที่ 3.9 ขนาดแปลงทดสอบ.....	48
รูปที่ 3.10 แสดงการดำเนินการเคลียร์พื้นที่ก่อนก่อสร้างแปลงทดสอบ.....	49
รูปที่ 3.11 แสดงการก่อสร้างแปลงทดสอบ.....	49
รูปที่ 3.12 การดำเนินการปล่อยปูนซีเมนต์ลงแปลงทดสอบ	50
รูปที่ 3.13 แสดงการดำเนินการผสมแห้ง ดินกับซีเมนต์ในแปลงทดสอบ.....	50
รูปที่ 3.14 แสดงการฉีดพ่นน้ำผสม	51
รูปที่ 3.15 แสดงการดำเนินการผสมเปียกดินกับซีเมนต์ในแปลงทดสอบ	51

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.16 แสดงการซึ่งน้ำหนักลงเพลาารถบรรทุกและการทำความเข้าใจกับพนักงานขับรถ.....	52
รูปที่ 3.17 การทดสอบด้วยเบนเคลแมนบีมตามวิธีทดสอบ FWD-Sim.....	53
รูปที่ 3.18 วิธีการวัดค่าการยุบตัว Superpos-Def	54
รูปที่ 3.19 การทดสอบหาค่าการยุบตัวด้วยเครื่องดุ่มกระแทกแบบเบา	54
รูปที่ 3.20 โครงสร้างชั้นทางที่ใช้ในการพิจารณากรณีทดสอบด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีม	55
รูปที่ 3.21 โครงสร้างชั้นทางที่ใช้ในการพิจารณากรณีทดสอบด้วยเครื่องดุ่มกระแทกแบบเบา.....	56
รูปที่ 4.1 ค่าแองการยุบตัวจากการทดสอบด้วยเครื่อง BB ในแต่ละสถานีทดสอบ	57
รูปที่ 4.2 ค่าแองการยุบตัวจากการทดสอบด้วยเครื่อง BB หลังปรับแก้ด้วยสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	58
รูปที่ 4.3 ค่าแองการยุบตัวจากการทดสอบด้วย LWD	58
รูปที่ 4.4 ค่าโมดูลัสผิวพื้นทางดินซีเมนต์จากเครื่อง BB.....	59
รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแองการยุบตัวในรูปสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	60
รูปที่ 4.6 ค่าโมดูลัสผิวดินลูกรังถมเฉลี่ย.....	61
รูปที่ 4.7 ค่าโมดูลัสผิวพื้นทางดินซีเมนต์เฉลี่ย.....	61
รูปที่ 4.8 ค่าการยุบตัวและ โมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนครั้งทดสอบ	62
รูปที่ 4.9 ค่า RMSE จากผลทดสอบด้วย BB และ LWD	63
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบความแข็งแรงของพื้นทางดินซีเมนต์จากเครื่อง BB.....	64
รูปที่ 4.11 ค่า $RMSE$ ที่ดีที่สุดจากการทดสอบด้วยเครื่องเบนเคลแมนบีมและเครื่องดุ่มกระแทกแบบเบา	66

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

μ	ค่าอัตราส่วนปัวซองของของวัสดุชั้นทางที่ i
d_i	ค่าการยุบตัวของผิวทางที่ที่วัดได้จริงที่อุปกรณ์วัดค่าที่ i
D_i	ค่าการยุบตัวของผิวทางที่คำนวณได้ที่อุปกรณ์วัดค่าที่ i
E_i	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางที่ i
H_i	ความหนาของวัสดุชั้นทางที่ i
<i>ibstmold</i>	การปิด-เปิด การคัดเลือกผู้นำ
<i>icreep</i>	การปิด-เปิด การกลายพันธุ์แบบคืบ
<i>iuniform</i>	การปิด-เปิด การผสมข้ามแบบสม่ำเสมอ
<i>maxgen</i>	จำนวนรุ่นสูงสุด
N	จำนวนอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว
<i>niching</i>	การปิด-เปิด วิธีกลุ่มเฉพาะ
<i>numpop</i>	ขนาดของประชากร
<i>pcreepmu</i>	อัตราความเป็นไปได้ของการกลายพันธุ์แบบคืบ
<i>pcross</i>	อัตราความเป็นไปได้ของการผสมข้ามแบบจุดเดียว
<i>pjumpmu</i>	อัตราความเป็นไปได้ของการกลายพันธุ์แบบกระโดด
RMSE	ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยสุด
E_{LWD}	ค่าโมดูลัสของชั้นทาง โดยรวม, เมกะปาสคาล
BB	เครื่องมือเบนเคลแมนบีม
FWD	เครื่องทดสอบการยุบตัวด้วยลูกค้อนกระแทก
GA	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
GAMLET	โปรแกรมคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางแกมเล็ต
LWD	เครื่องทดสอบการยุบตัวด้วยลูกค้อนกระแทกแบบเบา
MLET	ทฤษฎียืดหยุ่นหลายชั้นทาง
NDT	การทดสอบแบบไม่ทำลาย
SGA	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย
Superpos-Def	การวัดค่าการยุบตัวแบบทับซ้อน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างพื้นทางถือได้ว่าเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักสำคัญต่อโครงสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) และผิวทางแบบแกร่ง (Rigid Pavement) ทำหน้าที่ในการรับน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้างผิวทาง การระบายน้ำ รวมถึงการป้องกันความเสียหายต่างๆ เช่น การอัดทะลัก (Pumping) ในถนนคอนกรีต เป็นต้น [1] โดยทั่วไปชั้นพื้นทางจะก่อสร้างด้วยวัสดุหินคลุก ตามมาตรฐานงานทางของกรมทางหลวง ทล.-ม. 201/2544 แต่กลับพบว่าในปัจจุบันวัสดุหินคลุกเริ่มขาดแคลนอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในพื้นที่บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ประกอบกับการลำเลียงขนส่งวัสดุจากแหล่งวัสดุชั้นทางในพื้นที่ห่างไกลส่งผลให้ถนนต้องรองรับการสัญจรของรถบรรทุกหนักและเกิดความเสียหายอย่างรวดเร็วได้ และยังเป็นการทำลายทรัพยากรธรรมชาติอีกด้วย [2] จากปัญหานี้จึงทำให้จำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุในท้องถิ่นที่คุณภาพต่ำเข้ามาทดแทน และเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของพื้นทางปรับปรุงคุณภาพให้ดียิ่งขึ้น

เป็นระยะเวลามากกว่าครึ่งศตวรรษที่ได้มีการนำเอาปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของพื้นทาง ในปี พ.ศ. 2508 [3] กรมทางหลวงและบริษัทปูนซีเมนต์ไทยได้ร่วมกันก่อสร้างถนนที่มีพื้นทางเป็นดินซีเมนต์ ได้แก่สายทางวารินชำราบ – เฉลิมสุขม ตั้งอยู่บริเวณพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีระยะทางประมาณ 5 กม. ซึ่งในการก่อสร้างนั้นแสดงพฤติกรรมของถนนที่ดีจึงทำให้ได้มีการก่อสร้างถนนดังกล่าวเพิ่มขึ้นอีกในหลายสายทาง รวมระยะทางทั้งสิ้นประมาณ 1,400 กม.

ในขณะที่ปัญหาในทางวิศวกรรมที่ต้องการทราบความแข็งแรงที่แท้จริงในแต่ละชั้นทางไม่สามารถทำได้โดยง่าย จำเป็นต้องอาศัยวิธีการคำนวณย้อนกลับซึ่งมีหลากหลายวิธีการทางตัวเลขจึงจำเป็นต้องมีโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณซึ่งสมรรถนะและประสิทธิภาพของแต่ละโปรแกรมขึ้นอยู่กับระเบียบวิธีขั้นคำสั่ง ซึ่งวิธีที่กำลังถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างประสบความสำเร็จและกำลังเป็นที่นิยมและแพร่หลายคือขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) [4] โดยระเบียบวิธีดังกล่าวเข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาการคำนวณย้อนกลับ เนื่องจากพบว่าปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อนเพราะสามารถแก้ปัญหาพื้นที่คำตอบที่มีหลายจุดสูงสุดและต่ำสุด (Multimodal Problems) ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั่วไปอาจสร้างชุดคำตอบที่ขัดแย้งกับความเป็นไปได้ในทางวิศวกรรม ทั้งนี้จากการพัฒนาระเบียบวิธีขั้นตอนวิธีพันธุกรรมได้มีการพัฒนาอย่าง

ต่อเนื่องทำให้มีการพัฒนาเทคนิคใหม่ เช่น การผสมข้ามแบบสม่ำเสมอ (uniform crossover) และการกลายพันธุ์แบบคืบ (creep mutation) และ วิธีกลุ่มเฉพาะ (niche method) เป็นต้น [5] จากคุณสมบัติเด่นหลายประการนี้น่าจะนำมาประยุกต์ใช้กับการประเมินความแข็งแรงของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์และชั้นทางอื่นๆ ได้ แต่ทั้งนี้กลับไม่พบรายงานวิจัยการนำเทคนิคใหม่เหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในลักษณะนี้เลย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบชั้นทางด้วยเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งในต่างประเทศมีการใช้เครื่องวัดค่าการยุบตัวด้วยคัมกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง ทำให้มีใช้เฉพาะในหน่วยงานหลักด้านงานทางของประเทศไต้หวัน เท่านั้น จากปัจจัยด้านราคาดังกล่าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีการทดสอบด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีม (Benkelman Beam, BB) มาใช้ในการทดสอบแทนที่เครื่องมือดังกล่าว โดยอาศัยวิธี FWD-Sim ที่พัฒนาโดย พุทธพล และ นิรชร [6] และเลือกเครื่องมือวัดค่าการยุบตัวด้วยคัมกระแทกแบบเบา (Lightweight Deflectometer, LWD) ชนิดมีเซ็นเซอร์ภายในและภายนอกอย่างละ 1 ตัว เพื่อให้ได้แ่งการยุบตัวที่สามารถนำไปคำนวณย้อนกลับ ที่วิจัยจึงได้ทดลองพัฒนาวิธีการวัดค่าการยุบตัวแบบทับซ้อน (Superposition in deflection) หรือเรียกโดยย่อว่า “Superpos-Def” โดยขั้นตอนการทดสอบจะใช้ระบบวัดทีละคู่โดยการวัดชุดที่ 1 ซึ่งเซ็นเซอร์ตัวที่ 1 อยู่กึ่งกลางแผ่นเหล็กส่วนตัวที่ 2 วางที่ตำแหน่งตามระยะที่ต้องการทดสอบซึ่งในขั้นนี้ได้วางเซ็นเซอร์ตัวที่ 2 ตามระยะที่นิยมใช้ทั่วไปของเครื่อง FWD เพื่อนำมาใช้ศึกษาหาความแข็งแรงของแต่ละชั้นทางในแปลงทดสอบพื้นทางดินซีเมนต์ โดยใช้โปรแกรมเกมเล็ตในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความแข็งแรง ซึ่ง พุทธพล [7] ได้เคยศึกษาการใช้โปรแกรมเกมเล็ตกับแบบจำลองโครงสร้างชั้นทางที่สอดคล้องกับของประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยุบตัวของพื้นทางดินซีเมนต์ภายใต้การทดสอบด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีม และเครื่องวัดค่าการยุบตัวด้วยคัมกระแทกแบบเบา

1.2.2 เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัส

1.2.3 เพื่อพัฒนาวิธีการประเมินความแข็งแรงของพื้นทางดินซีเมนต์ด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีมและเครื่องมือวัดค่าการยุบตัวด้วยคัมกระแทกแบบเบา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้โครงสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ที่สอดคล้องกับมาตรฐานของถนนในประเทศไทยตาม ทล.-ม 204/2556 [8] โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 8 ของน้ำหนักดิน

1.3.2 ใช้ลักษณะของโครงสร้างชั้นทางแบบ 3 ชั้นทางในการวิเคราะห์

1.3.3 ใช้เครื่องมือเบนเคลแมนบีมและเครื่องมือวัดค่าการยุบตัวด้วยตุ้มกระแทกแบบเบาในการทดสอบแบบไม่ทำลาย

1.3.4 ใช้โปรแกรมเกมเล็ทที่มีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการคำนวณย้อนกลับเพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1.4.1 ศึกษารวบรวมทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาลักษณะ โครงสร้างชั้นทางดินซีเมนต์และวิธีการก่อสร้างที่สอดคล้องกับที่ใช้ในประเทศไทย

1.4.3 ก่อสร้างแปลงทดสอบชั้นทางดินซีเมนต์ตาม ทล.-ม 204/2556 [8] ที่ได้กำหนดไว้

1.4.4 ทดสอบความแข็งแรงของชั้นทางดินซีเมนต์ โดยใช้เครื่องมือเบนเคลแมนบีมด้วยวิธี FWD-Sim

1.4.5 ทดสอบความแข็งแรงของชั้นทางดินซีเมนต์ โดยใช้เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวด้วยตุ้มกระแทกแบบเบา ด้วยวิธี Superpos-Def

1.4.6 นำข้อมูลแองการยุบตัวจากการทดสอบเครื่องมือเบนเคลแมนบีม และเครื่องตุ้มกระแทกแบบเบา ไปคำนวณย้อนกลับหาค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง

1.4.7 สรุปผลข้อมูลและรวบรวมผลการศึกษา

1.4.8 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์และตีพิมพ์เพื่อเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ หรือวารสารวิชาการระดับชาติ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงพฤติกรรมของโครงสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ภายใต้กระบวนการทดสอบแบบไม่ทำลาย

1.5.2 สามารถใช้เครื่องมือเบนเคลแมนบีมและเครื่องมือวัดค่าการยุบตัวด้วยคัมกระแทกแบบเบาในการตรวจสอบความแข็งแรงของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ และความเหมาะสมในการปรับแก้ค่าแองการยุบตัว

1.5.3 สามารถนำเครื่องมือเบนเคลแมนบีม และเครื่องมือวัดค่าการยุบตัวด้วยคัมกระแทกแบบเบามาประเมินสภาพชั้นทางใต้ได้อย่างถูกต้องแม่นยำทำให้การซ่อมบำรุงรักษาทางใต้มีความแข็งแรง ปลอดภัย เป็นไปอย่างถูกวิธี ส่งผลให้สามารถใช้งบประมาณในการซ่อมบำรุงทางอย่างเกิดประสิทธิภาพ

1.5.4 ได้พัฒนาวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายในโครงสร้างพื้นทางดินซีเมนต์แบบใหม่ที่เหมาะสม



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการประเมินความแข็งแรงพื้นทางดินซีเมนต์ด้วยการประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีมและเครื่องดัมกระแทกแบบเบา ในการคำนวณย้อนกลับด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้โปรแกรมแกมเล็ต (GAMLET) โดยมีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

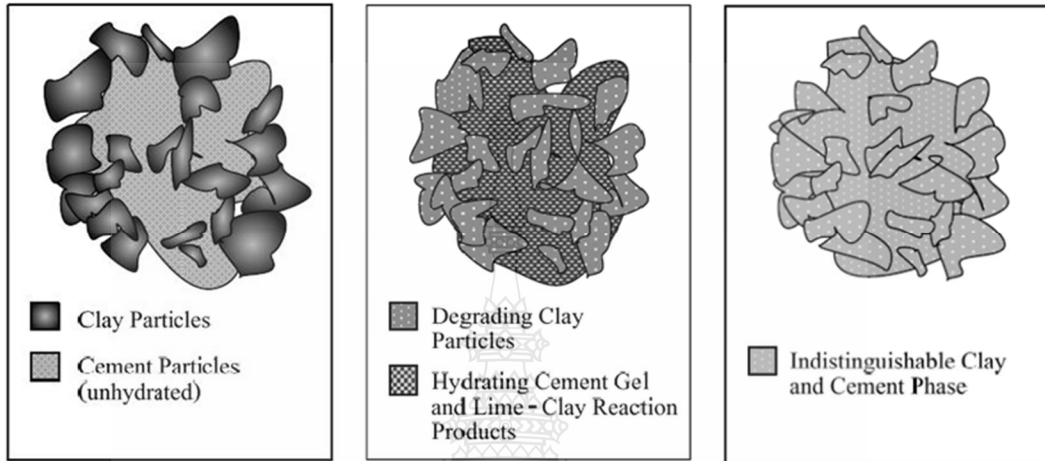
2.1 ประวัติและความเป็นมาชั้นพื้นทางดินซีเมนต์

การก่อสร้างถนนที่มีชั้นทางเป็นดินซีเมนต์เริ่มต้นครั้งแรกในประเทศไทยเมื่อปี พ.ศ.2508 [2] โดยกรมทางหลวงร่วมกับบริษัทปูนซีเมนต์ไทยได้จัดสร้างถนนโดยได้นำดินซีเมนต์มาก่อสร้างเป็นชั้นพื้นทางสายวารินชำราบ - เดชอุดม ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สายทางมีความยาวประมาณ 5 กิโลเมตร เนื่องจากถนนที่มีชั้นทางเป็นดินซีเมนต์สายแรกนี้แสดงพฤติกรรมที่ดี กรมทางหลวงจึงได้ทำการก่อสร้างถนนที่มีชั้นทางเป็นดินซีเมนต์เพิ่มอีกหลายสายทางในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รวมความยาวทั้งสิ้น 1,400 กิโลเมตร การที่กรมทางหลวงต้องก่อสร้างชั้นทางเป็นดินซีเมนต์ เพราะพื้นที่ส่วนใหญ่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือขาดแคลนวัสดุหินคลุกที่มีคุณสมบัติพอที่จะนำมาใช้เป็นพื้นทางของถนนและเนื่องจากเป็นการนำดินซีเมนต์เข้ามาใช้งานทางครั้งแรก เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องยังไม่มีความรู้และเข้าใจพฤติกรรมของดินซีเมนต์ดีพอ เป็นเหตุให้ถนนบางช่วงของบางสายทางเกิดความเสียหายในลักษณะของรอยแตกสะท้อนเนื่องจากการหดตัวของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (Reflective Crack) เป็นจำนวนมาก ซึ่งความเสียหายนี้จะเป็นปัญหาในการบำรุงทาง ทำให้กรมทางหลวงระงับโครงการก่อสร้างถนนที่ใช้ดินซีเมนต์เป็นวัสดุชั้นทางไว้ในปี พ.ศ.2515 เพื่อศึกษาปัญหาให้ละเอียดลงไปก่อนตัดสินใจนำกลับมาใช้ใหม่

การศึกษาพฤติกรรมของถนนดินซีเมนต์ที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการและสร้างถนนทดลองรวมทั้งการศึกษารายงานข้อมูลจากต่างประเทศซึ่งทำให้เข้าใจธรรมชาติของถนนดินซีเมนต์ได้ดียิ่งขึ้น ถนนดินซีเมนต์โดยทั่วไปจะแสดงพฤติกรรมที่ดีในด้านความแข็งแรงทนทาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปิดใช้งานไปหลายปีก็ยังไม่เกิดร่องล้อ (Rut) หรือหลุมบ่อ (Pothole) บนผิวหน้าของถนนตรงกันข้ามกับถนนที่ใช้หินคลุกเป็นชั้นพื้นทางซึ่งจะปรากฏร่องล้อและหลุมบ่อชัดเจนเมื่อเปิดใช้งานไปนานๆการที่ถนนดินซีเมนต์ไม่เกิดร่องล้อเป็นเพราะความสามารถในการรับน้ำหนักของดินซีเมนต์สูงกว่าถนนพื้นทางหินคลุกมากแม้เผชิญกับการบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดมากก็ตาม

2.2 ลักษณะโครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell และ Jack ในปี ค.ศ.1996 [10] ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของดินซีเมนต์โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบในโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



(a) หลังบดอัดเสร็จ

(b) หลังระยะบ่มสั้น ๆ

(c) หลังระยะบ่มนาน ๆ

รูปที่ 2.1 ลักษณะ โครงสร้างของดินซีเมนต์ [10]

เมื่อถูกบดอัดอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดินรูปที่ 2.1 (a) ในช่วงอายุบ่มอันสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันกับน้ำ เป็นผลให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินและปล่อยปูนขาวออกมา ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่ในดินและเกิดการแยกตัวหลังจากนั้นซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดิน รูปที่ 2.1(b) สำหรับช่วงอายุบ่มยาวนานปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันจะเกิดอย่างสมบูรณ์ทำให้ซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วทั้งก้อนของดินซีเมนต์ เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.1(c)

เมื่อพิจารณาถึงการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์ ข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์มีอยู่หลายข้อกำหนดในต่างประเทศสหรัฐอเมริกาจะออกแบบโดยยึดเอาข้อกำหนด Portland Cement Association ซึ่งจะยึดเอาการทดลอง Freezing and Thawing เป็นหลัก เนื่องจากสภาพอากาศแตกต่างกันมากในแต่ละฤดูกาล

สำหรับประเทศไทย กรมทางหลวงได้ยึดเอาข้อกำหนด Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน จะต้องมีย่านไม่น้อยกว่า 250 ปอนด์/นิ้ว² ข้อกำหนดดังกล่าวเป็นข้อเสนอแนะ

ของ Road Research Laboratory (RRL) ซึ่งภายหลังจากการศึกษาวิจัยโดยการผสมซีเมนต์กับดินลูกรังในประเทศต่างๆ ในทวีปแอฟริกา ก็พบว่าดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่บดอัดแน่นและมีอายุการบ่มนาน 7 วัน มีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 250 ปอนด์/นิ้ว² จะสามารถใช้เป็นพื้นทางของถนนได้อย่างเหมาะสม การที่กรมทางหลวงได้ยึดเอาข้อกำหนดของ RRL เป็นหลักในการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ในประเทศไทย ก็เพราะว่ากรมทางหลวงก่อสร้างถนนดินซีเมนต์เป็นครั้งแรกมาแล้วในภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยใช้ลูกรังเป็นวัสดุดิบ ซึ่งดินลูกรังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีลักษณะทางกายภาพคล้ายกับดินลูกรังในทวีปแอฟริกา โดยข้อกำหนดของการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ของสถาบันต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดของการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์ [2]

สถาบัน	Design Criteria
กรมทางหลวง ประเทศไทย	กำลังรับแรงอัดเมื่ออายุ 7 วัน ไม่น้อยกว่า 250 ปอนด์/นิ้ว ²
บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย	CBR ไม่น้อยกว่าร้อยละ 120
British Road Research Laboratory	กำลังรับแรงอัดเมื่ออายุ 7 วัน ไม่น้อยกว่า 250 ปอนด์/นิ้ว ²
กรมทางหลวง ประเทศกานา	CBR ไม่น้อยกว่าร้อยละ 120
ประเทศแอฟริกา (ส่วนมาก)	CBR ไม่น้อยกว่าร้อยละ 180
National Association of Australia State Roads Authority (NAASRA), Australia	1. กำลังรับแรงอัดเมื่ออายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 150-250 ปอนด์/นิ้ว ² 2. CBR เมื่อบ่ม 7 วัน และแช่น้ำ 4 วัน ไม่น้อยกว่าร้อยละ 120

ในปี พ.ศ.2550 เรวัชชัย [11] ได้ทำการศึกษาทดลองนำดินลูกรังในเขตพื้นที่อำเภอน้ำพอง มาศึกษาพฤติกรรมเพื่อพิจารณาคุณสมบัติเบื้องต้นทางวิศวกรรมถึงอิทธิพลของปริมาณดินลูกรังโดยทดสอบ Compaction ของดินลูกรังเปล่า นำผลจากตัวอย่างของดินไปหาความหนาแน่นสูงสุดแล้วนำไปผสมกับทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60 และ 80 ซึ่งพบว่าปริมาณทรายร้อยละ 20 เหมาะสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรัง ดินดังกล่าวจะถูกนำมาปรับปรุงคุณภาพให้มีกำลังรับแรงอัด UCS มากกว่า 17.5 กก/ซม² เพื่อใช้ในงานก่อสร้างถนนดินซีเมนต์โดยนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักทั้งหมดของตัวอย่างและบ่มด้วยอากาศ 7 วันก่อนนำไปพิจารณากำหนดอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยนำดินตัวอย่างไปทดสอบหาลำดับรับแรงอัด UCS พบว่าอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 สามารถรับแรงอัด UCS มากกว่า 17.5 กก/ซม²และสรุปได้ว่าการนำดินลูกรังทรายปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะใช้ปูนซีเมนต์น้อยกว่าการนำดินลูกรังผสมซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

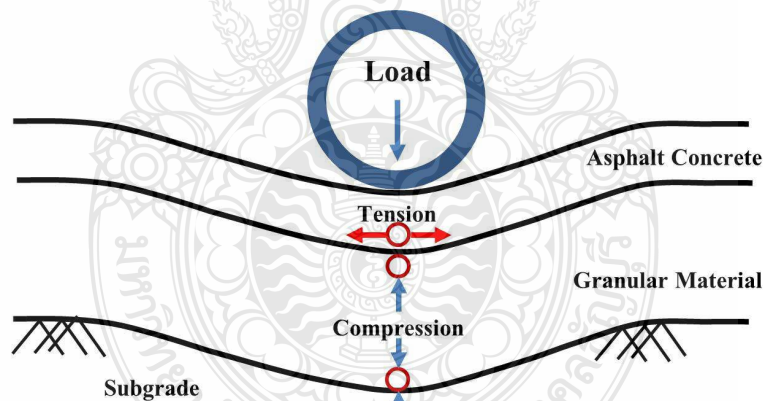
ต่อมาในปี พ.ศ.2555 ชวลิต [12] ได้ศึกษาปัญหาของถนนที่ใช้วัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยดินซีเมนต์บางเส้นทางเกิดรอยแตกร้าวแบบสะท้อน (Reflective Crack) ก่อนอายุการใช้งานที่ได้ ออกแบบไว้โดยศึกษาผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่ผ่านกระบวนการการบ่มแบบแห้งสลับเปียกโดยใช้ก้อนตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 15 ซม. แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยใช้วิธีการที่มีความละเอียดสูงและทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง ผลการศึกษาสรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของก้อนตัวอย่างคือประเภทของดิน ปริมาณซีเมนต์ในสัดส่วนผสมและความชื้นบดอัด โดยวัสดุที่ใช้แร่ดินเหนียวประเภท Bentonite, Kaolinite และ Limestone Dust ในสัดส่วนผสมโดยการแทนที่วัสดุมวลรวมละเอียดเดิมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากมากไปน้อยตามลำดับส่วนปริมาณซีเมนต์และความชื้นบดอัดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรลดลงในด้านคุณสมบัติด้านกำลังของวัสดุปรับปรุงเมื่อผ่านกระบวนการบ่มแบบแห้งสลับเปียกครบทั้ง 12 รอบแล้วพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังอย่างเห็นได้ชัดที่สุดคือปริมาณซีเมนต์ซึ่งปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลให้กำลังวัสดุเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2.3 ทฤษฎีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทางชั้นสูง

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นสูงมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีดังนี้

2.3.1 ความเครียดในแนวราบ (Horizontal Tension Strain, ϵ_x) ที่ได้จากผิวทางแอสฟัลต์เกิดขึ้นเนื่องจากชั้นผิวทางแอสฟัลต์เกิดการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักกระทำ เมื่อมีรถบรรทุกแล่นผ่านจำนวนที่เยอะระดมมากเข้า จะเกิดการสะสมของความเครียดเกินกว่าที่แอสฟัลต์จะรับได้จะทำให้แอสฟัลต์เกิดรอยแตก (Crack) โดยจะเริ่มเกิดที่ผิวล่างก่อนแล้วค่อยตามขึ้นไปสู่ผิวด้านบน หน่วยแรงดึงในแนวนอนจะเกิดในชั้นวัสดุที่มีการเชื่อมแน่น เช่น วัสดุคินซีเมนต์แต่จะไม่เกิดในชั้นวัสดุที่ไม่มีการเชื่อมแน่น (Unbound Materials) เช่น หินคลุกหรือวัสดุมวลรวม

2.3.2 ความเครียดในแนวตั้ง (Vertical Compressive Strain, ϵ_z) บนผิววัสดุที่ไม่มีการเชื่อมแน่น เช่น ชั้นหินคลุกหรือวัสดุมวลรวม เกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุถูกกดทับจากน้ำหนักล้อรถ การเกิดความเครียดอัดในแนวตั้งมากเกินไปที่กำหนดให้โครงสร้างชั้นสูงวิบัติในลักษณะของรอยร่องล้อเนื่องจากดินคันทาง มีความแข็งแรงน้อยที่สุดค่า โมดูลัสต่ำที่สุด สัดส่วนของความเครียดอัดในแนวตั้งในชั้นดินคันทาง จึงเกิดขึ้นมากที่สุดดังนั้นบางครั้งจึงใช้ความเครียดอัดในแนวตั้งที่เกิดขึ้นในชั้นดินคันทาง เพียงชั้นเดียวในการออกแบบ



รูปที่ 2.2 ลักษณะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นสูง

นอกจากนั้นค่าโมดูลัสชั้นสูงได้ยังสามารถนำไปคำนวณหาอายุคงเหลือและการออกแบบเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างทางได้ แต่ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสชั้นสูงต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณย้อนกลับ โดยรายละเอียดของการคำนวณย้อนกลับจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

2.4 การประเมินความแข็งแรงโดยการทดสอบแบบไม่ทำลาย

การประเมินความเสียหายของโครงสร้างทางจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ความเสียหายด้านการใช้งาน (Functional Failure) เช่น การยัดเคาะ การสะท้อนแสง เป็นต้น และความเสียหายด้านโครงสร้าง (Structural Failure) เช่น การเกิดโพรงใต้ผิวทาง การสูญเสียกำลังรับน้ำหนักของชั้นทาง เป็นต้น การประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อชี้บ่งว่าสภาพของชั้นทางยังสามารถรองรับน้ำหนักจากปริมาณการจราจรที่ใช้งานได้อยู่หรือไม่ โดยในปัจจุบันหน่วยงานที่รับผิดชอบด้านงานทางเริ่มหันมาใช้เครื่องมือสมัยใหม่ในการประเมินกำลังรับน้ำหนักหรือความแข็งแรง โดยแปรค่าออกมาในรูปของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง ซึ่งได้มาจากการทดสอบด้วยการใช้เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) การทดสอบหาค่าการยุบตัวด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีม (Benkelman Beam, BB) เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing, NDT) โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือชนิดนี้จะได้ค่าการยุบตัวของผิวทาง ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับความหนาของชั้นทางและตัวแปรอื่น ๆ จะคำนวณหาค่าโมดูลัสชั้นทางได้ และสามารถนำมาวิเคราะห์ต่อหาค่าความเปลี่ยนแปลงทางกลศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างชั้นทางได้

2.4.1 การทดสอบหาค่าการยุบตัวด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีม (Benkelman Beam) ในสนาม

เครื่องมือเบนเคลแมนบีม เป็นหนึ่งในเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลาย ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นโดย A.C. Benkelman ใช้ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างทางโดยรวม หลักการทำงานเป็นการหาค่าการยุบตัวของถนน ภายใต้มาตรฐานของน้ำหนักเพลารถบรรทุก ขนาดของยาง ความดันภายในล้อ และระยะช่องว่างของล้อหน้า โดยโครงสร้างชั้นทางใดมีการแอ่นตัวน้อย แสดงว่ามีความแข็งแรงมากหรือมีการแอ่นตัวมาก แสดงว่าโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงน้อย ซึ่งความแข็งแรงที่ได้จะเป็นค่าความแข็งแรงโดยรวมของจุดทดสอบ

เครื่องมือเบนเคลแมนบีม มีรูปร่างลักษณะเสมือนคัน 2 ชั้น โดยคันขึ้นหลังตั้งอยู่บนขาทั้งสอง ซึ่งสามารถปรับระดับได้ โดยขาหน้าเป็นขาคู่ และขาด้านหลังเป็นขาเดี่ยว คานดังกล่าวทำหน้าที่หิ้วคันขึ้นหน้า ทั้ง 2 จุด ที่ปลายคานหน้ามีปลายเดือย (Probe) จะวางอยู่บนจุดทดลองเพื่อวัดค่าการยุบตัวของถนน ตัวคานหน้ายาวเรียวสามารถสอดเข้าไปในระหว่างล้อคู่หลัง ที่ปลายคานอีกด้านหนึ่งมี Dial Gage สำหรับวัดระยะขึ้น – ลง ตามแนวตั้งของปลายคาน บนคานหลังมีฆดลวดแม่เหล็กสั่นสะเทือน (Buzzer) เพื่อลดความผิดพลาดของจุดสัมผัสต่างๆ ในขณะทดลอง เครื่องมือเบนเคลแมนบีมแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เครื่องมือเบนเคลแมนบีม [14]

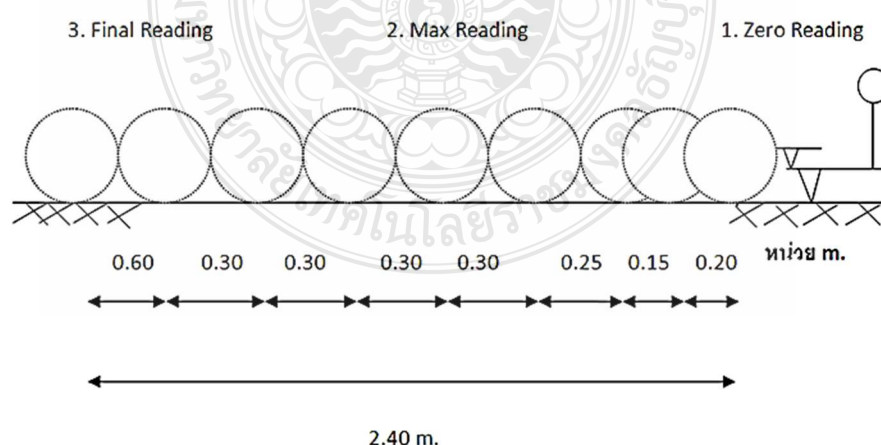
ทั้งนี้กรมทางหลวงได้รวบรวมข้อดีและข้อเสียของเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลายระหว่างเครื่อง FWD และเครื่องเบนเคลแมนบีม โดยสรุปไว้ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างเครื่อง FWD และเครื่องเบนเคลแมนบีม [6]

Falling Weight Deflectometer (FWD)	Benkelman Beam (BB)
1.สามารถทำงานได้รวดเร็วและมีความแม่นยำสูงหากไม่เกิด Error ขึ้นในโปรแกรมจะเร็วมาก	1.สามารถทำงานได้เร็วและความแม่นยำขึ้นกับผู้ปฏิบัติงานในสนาม
2. เครื่องมือมีความซับซ้อนใช้เทคโนโลยีขั้นสูง	2. เครื่องมือไม่มีความซับซ้อนมากนัก
3. ผู้ปฏิบัติต้องมีการฝึกอบรมอย่างชำนาญ	3. ผู้ปฏิบัติมีการฝึกอบรมแต่ใช้เวลาน้อยกว่า
4. หากอุปกรณ์ขัดข้องต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญแก้ไข	4. การแก้ไขไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญมากนัก
5. เครื่องมือมีความละเอียดอ่อนต้องมีการดูแลและมีค่าบำรุงรักษาสูง การส่งอะไหล่ทำได้ช้า	5. ค่าบำรุงและการดูแลรักษาต่ำ อะไหล่สามารถหาได้จากภายในประเทศ
6. ต้องทำรายงานในสำนักงานโดยผู้เชี่ยวชาญ	6. ต้องทำรายงานในสำนักงานโดยผู้เชี่ยวชาญ
7. สามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆของวัสดุโครงสร้างชั้นทางได้เพื่อใช้ในการออกแบบโดยวิธี Analytical Design Method	7. ไม่สามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆของโครงสร้างชั้นทางได้ หากต้องการพารามิเตอร์ต้องเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม

Falling Weight Deflectometer (FWD)	Benkelman Beam (BB)
8. ต้องใช้ข้อมูลจากเครื่องมือ Borecope เพื่อหาความหนาของโครงสร้างชั้นทาง (หรือรูปตัดมาตรฐาน) ในการคำนวณ	8. ไม่ต้องใช้ประกอบกับเครื่องมือชนิดอื่นในการคำนวณ
9. เครื่องมือมีราคาแพงมาก	9. เครื่องมือมีราคาถูก
10. มีการปรับเทียบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกตัว และมีขั้นตอนมากและต้องมีการปรับเทียบเครื่องมืออยู่เสมอก่อนการออกสนามแต่ละครั้ง	10. การปรับเทียบอุปกรณ์ทดลองง่าย ขั้นตอนน้อยกว่า

ในปี พ.ศ. 2553 พุทธิพล และนิรชร [6] ได้ทำการพัฒนาวิธีการทดสอบแบบใหม่ ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาให้เครื่องมือเบนเคลแมนบีมสามารถวัดค่าการยุบตัวได้หลายตำแหน่ง เช่นเดียวกับเครื่อง FWD ซึ่งค่าที่ได้จะถูกนำมาไปสร้างแอ่งการยุบตัว (Deflection Basin) เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณย้อนกลับหาความแข็งแรงของแต่ละชั้นทางได้ โดยนำเสนอวิธี FWD-Sim ซึ่งอาศัยน้ำหนักจากเพลาลังของรถบรรทุกและทำการสอดปลายคานเบนเคลแมนบีมเข้าร่องล้อ โดยทำการตั้งศูนย์ Dial Gauge หลังจากนั้นทำการขยับรถบรรทุกไปตามระยะของเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งกับเครื่อง FWD ได้แก่ 0.20, 0.35, 0.60, 0.90, 1.20, 1.50, 1.80 และ 2.40 ม. หรือจนกระทั่งค่าการยุบตัวที่อ่านได้ในแต่ละระยะทดสอบไม่เปลี่ยนแปลง หลังจากนั้นจึงนำค่าการยุบตัวที่ได้ไปสร้างแอ่งการยุบตัว รายละเอียดการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เครื่องเบนเคลแมนบีมด้วยการจำลองตำแหน่งตัวรับสัญญาณของ FWD [6]

2.4.2 การทดสอบหาค่าการยุบตัวด้วยเครื่องมือ LWD ในสนาม

เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวจากตุ้มกระแทกแบบเบา (Light Weight Deflectometer, LWD) เป็นเครื่องมือทดสอบความแข็งแรงของชั้นทางในสนาม โดยมีหลักการเดียวกับเครื่องมือวัดค่าการยุบตัวจากตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) แต่มีขนาดเล็กกว่ามากซึ่งโดยทั่วไปนิยมนำมาใช้ในการทดสอบชั้นดินคันทางโดยให้ค่าความแข็งแรงในรูปของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าสัมประสิทธิ์แรงปฏิกิริยาของดินเดิม โดยเครื่องมือนี้มีขนาดเล็กสามารถทำการทดสอบโดยใช้ผู้ปฏิบัติงานเพียงคนเดียวและสามารถเคลื่อนย้ายได้โดยสะดวก โดยส่วนประกอบหลักๆของเครื่องนั้นประกอบไปด้วยตุ้มน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัม ตัวเครื่องพร้อมแผ่นกระจายแรงขนาด 10 กิโลกรัม แบตเตอรี่พร้อมหน้าจอแสดงผลขนาด 3 กิโลกรัม และเซ็นเซอร์วัดค่าการยุบตัวของชั้นทางเสริมตัวละประมาณ 1.5 กิโลกรัม โดยรวมแล้ว เครื่องมือ LWD มีน้ำหนักประมาณ 20 กิโลกรัม ซึ่งต่างจาก FWD ที่มีขนาดใหญ่ที่ต้องใช้รถพ่วงในการเคลื่อนย้าย

ในการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงของชั้นทางด้วยเครื่องมือ LWD นั้นสามารถทดสอบได้หลายวัสดุ เช่น ชั้นดินคันทางหรือวัสดุที่เป็นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นมาก ๆ เช่น สนามบิน ชั้นผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตที่มีความหนาไม่มาก โดยในการคำนวณค่าความแข็งแรงของชั้นทางคำนวณดังสมการต่อไปนี้ [15]

$$E_{LWD} = \frac{2(1-\mu^2)P}{\pi RD} \quad (2.1)$$

โดยที่

E_{LWD} = ค่าโมดูลัสของชั้นทางโดยรวม, เมกะปาสคาล

P = น้ำหนักกระทำ, นิวตัน

R = รัศมีของแผ่นกระจายน้ำหนัก, เมตร

D = ค่าการยุบตัว, มิลลิเมตร

μ = ค่าอัตราส่วนปัวซอง (ค่าเริ่มต้นเป็น 0.30 และสามารถปรับได้)

2.4.3 การปรับแก้ค่าการยุบตัวที่วัดได้จากในสนาม

การปรับแก้ค่าการแอ่งการยุบตัวที่วัดได้จากในสนามนั้น Hossain ได้เสนอสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลสำหรับปรับแก้ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.2) [16]

$$D_{(r)} = Ae^{Br} \quad (2.2)$$

โดยที่

$D_{(r)}$ = ค่าการยุบตัวที่ปรับแก้แล้ว

A, B = ค่าสัมประสิทธิ์เชิงตัวเลข

r = ระยะตามแนวรัศมี

2.5 การคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทาง

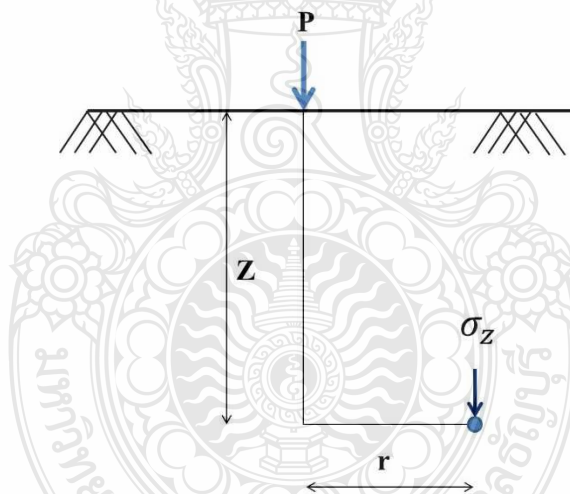
การคำนวณย้อนกลับเป็นการประเมินกำลังรับน้ำหนักโครงสร้างทางของแต่ละชั้นซึ่งแสดงในรูปของค่าโมดูลัสชั้นทางโดยการคำนวณหาค่าโมดูลัสชั้นทางจากวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Test, NDT) นิยมใช้ค่าแอ่งการยุบตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง FWD เป็นข้อมูลนำเข้าซึ่งจำเป็นต้องมีโปรแกรมหรือซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณย้อนกลับ กระบวนการคำนวณจะเริ่มจากการกำหนดค่าโมดูลัสตั้งต้นให้กับโปรแกรมพร้อมกับนำเข้าข้อมูลของคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของแต่ละชั้นทาง (ความหนาและค่าปัวซองของของแต่ละชั้นทาง) รวมถึงค่าการยุบตัวของผิวทาง น้ำหนักและรัศมีของน้ำหนักกระทำ จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณแบบเดินหน้าเพื่อสร้างแอ่งการยุบตัว และนำไปเปรียบเทียบกับค่าการยุบตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง FWD หากค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการยุบตัวที่ได้จากการคำนวณน้อยกว่าค่าที่ยอมให้ กระบวนการก็จะสิ้นสุดลง แต่ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าค่าที่ยอมให้ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการคำนวณย้อนกลับเพื่อกำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใหม่อีกครั้ง กระบวนการทั้งหมดจะวนซ้ำจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะน้อยกว่าค่าที่ยอมให้ กระบวนการจึงจะสิ้นสุดลง และถือว่าค่าโมดูลัสนั้นเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

2.6 กระบวนการคำนวณแบบเดินหน้า (Forward Mechanistic Process)

กระบวนการคำนวณแบบเดินหน้าเป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้ในการคำนวณแ่งการยุบตัวของโปรแกรมคำนวณย้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบกับแ่งการยุบตัวที่วัดได้ในสนามจากเครื่องมือ FWD โดยทฤษฎีของกระบวนการคำนวณแบบเดินหน้าที่มักใช้ในโปรแกรมคำนวณย้อนกลับ เช่นสมการของ Boussinesq ที่ใช้ร่วมกับทฤษฎีความหนาเทียบเท่า ทฤษฎียึดหยุ่นหลายชั้นทาง เป็นต้น

2.6.1 สมการของบูซิเนค (Boussinesq 's Equation)

บูซิเนคได้พัฒนาสมการเพื่อใช้วิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงเค้น ความเครียด และการยุบตัวที่เกิดขึ้นในมวลดิน จากน้ำหนักบรรทุกทุก กระทำแบบวงกลมในระบบชั้นเดียวภายใต้สมมุติฐานของวัสดุชั้นทางที่เป็นวัสดุชั้นทางที่เป็นวัสดุกึ่งอนันต์ (Semi-Infinite Half Space) เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) จากทฤษฎีของบูซิเนค ค่าหน่วยแรงจากแ่งดิ่งที่ความลึกใดๆ ภายใต้แรงกระทำที่เป็นจุด (Point load) ดังรูปที่ 2.5 หน่วยแรงในแ่งดิ่งที่ความลึกและระยะตามแนวรัศมีใดๆ จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3)



รูปที่ 2.5 ค่าหน่วยแรงจากแ่งดิ่งที่ความลึกใด ๆ ของทฤษฎีของบูซิเนค

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi(r^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (2.3)$$

โดยที่

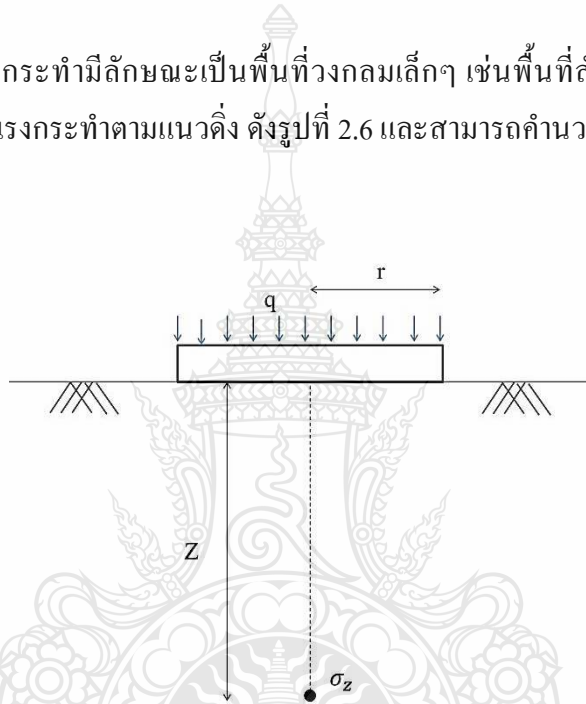
σ_z = แรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่ๆเกิดจากแรงกระทำที่เป็นแบบจุด

P = ค่าน้ำหนักกระทำ

z = ความลึก

r = ระยะตามแนวรัศมี

ถ้าแรงกระทำมีลักษณะเป็นพื้นที่วงกลมเล็กๆ เช่นพื้นที่สัมผัสภายใต้ล้อรถมีรัศมีกระทำเท่ากับ r จะได้แรงกระทำตามแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.6 และสามารถคำนวณหน่วยแรงในแนวตั้งได้จากสมการที่ (2.4)



รูปที่ 2.6 หน่วยแรงเค้นที่เกิดจากแรงกระทำบนพื้นที่วงกลมมีรัศมี r

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{1}{\left[\left(\frac{r}{z^2} + 1 \right)^{3/2} \right]} \right] \quad (2.4)$$

โดยที่

σ_z = แรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่ๆเกิดจากแรงกระทำที่เป็นวงกลม

q = หน่วยแรงคั้นในลมยาง

z = ความลึก

r = รัศมีของวงกลม

เนื่องจากเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลายอย่างเช่น เครื่องมือเบนเคลแมนบีมสามารถวัดค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งปลายคานได้ ดังนั้นจากทฤษฎีของบูซิเนสสามารถหาค่าโมดูลัสโดยรวมของโครงสร้างชั้นทางโดยอาศัยค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางน้ำหนักกระทำบริเวณผิวทางทดสอบ กรณีแรงดันกระทำจากล้อยาง (Flexible Plate) ได้ดังสมการที่ (2.5)

$$E = \frac{2(1-\mu^2)qr}{D_0} \quad (2.5)$$

โดยที่

E = โมดูลัสชั้นทางรวมที่ตำแหน่ง D_0

q = หน่วยแรงคั้นในลมยาง

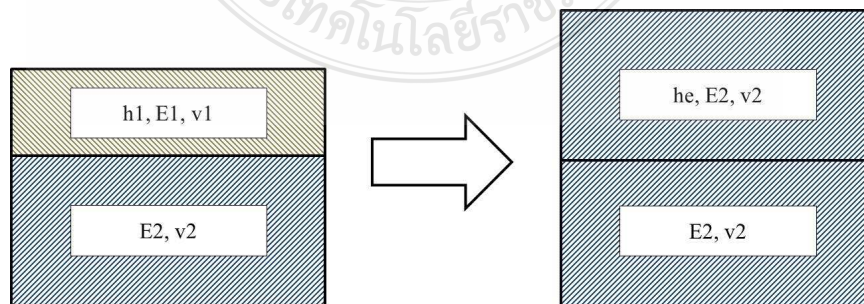
μ = ค่าอัตราส่วนปัวซอง

r = รัศมีของวงกลม

D_0 = ค่าการยุบตัวรวมที่ตำแหน่ง

2.6.2 Odemark's method of Equivalent Thickness

สำหรับระบบชั้นทางที่ประกอบด้วยวัสดุซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ ไม่สามารถใช้สมการของ Boussinesq ได้เพื่อแก้ไขปัญหานี้ Burmister ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ สำหรับระบบที่ประกอบด้วยวัสดุ Liner Elastic จำนวน 2 ชั้น และ 3 ชั้น ขึ้นในปี ค.ศ.1943 และ ค.ศ.1945 ตามลำดับ วิธีการนี้ได้รับการพัฒนาต่อมาจนมีวิธีที่สามารถวิเคราะห์ระบบชั้นทาง ที่มีจำนวนชั้นไม่จำกัด อย่างไรก็ตามวิธีการอีกทางเลือกหนึ่งคือ การใช้วิธีประมาณโดยวิธี Method of Equivalent Thickness (MET) ซึ่ง Odemark ได้เสนอในปี ค.ศ.1949 เพื่อแก้ปัญหาระบบที่เป็นชั้นๆ ได้โดยง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการแปลงความหนาของวัสดุตามวิธีของ Odemark

สมมุติฐานของ Odemark บอกว่า ความหนาของวัสดุตั้งที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 จะไม่มีผลต่อค่าหน่วยแรงเค้น หน่วยแรงเฉือน ของวัสดุที่อยู่ใต้เส้นของรอยต่อ ความหนาเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทางสามารถคำนวณ ได้ดังสมการที่ (2.6)

$$\frac{h_1^3}{1-\mu_1^2} = \frac{h_e^3}{1-\mu_2^2} \quad \text{หรือ} \quad h_e = h_1 \left[\frac{E_1}{E_2} \frac{1-\mu_2^2}{1-\mu_1^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.6)$$

ด้วยสัมประสิทธิ์การปรับแก้ (Correction Factor) f ก่อน ค่าอัตราส่วนปัวซอง (μ) ซึ่งมีผลน้อยต่อค่า หน่วยแรงความเครียด ที่วิเคราะห์ได้ และเป็นค่าที่ทดสอบได้ค่อนข้างยากในทางปฏิบัติจึงสมมุติให้วัสดุทุกชั้นมีค่า μ เท่ากัน จึงเขียนสมการที่ (2.7) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$h_e = f \times h_1 \left[\frac{E_1}{E_2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.7)$$

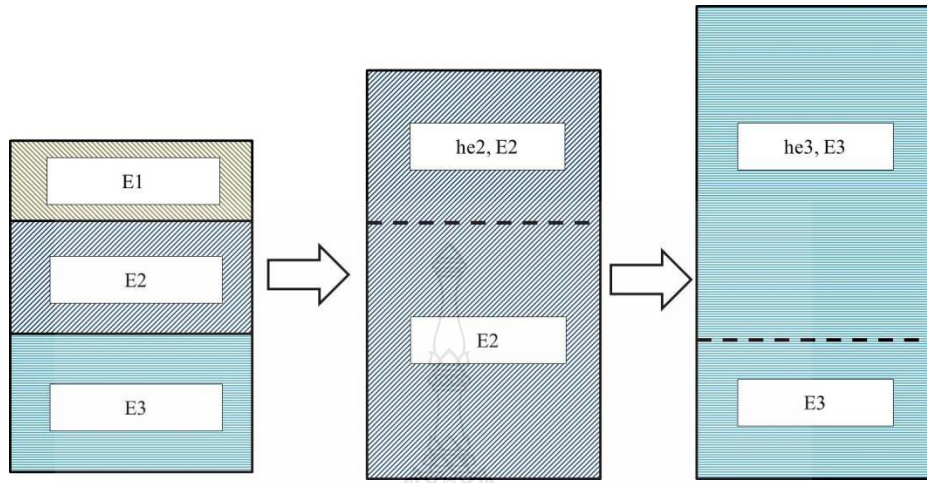
โดยที่

- $f = 0.8$ ในชั้นวัสดุทั่วไป
- $= 0.9$ ในชั้นวัสดุบนสุด (ถ้าระบบมีวัสดุเพียง 2 ชั้น)
- $= 1.0$ ในชั้นวัสดุบนสุด (ถ้าระบบมีวัสดุเพียง 3 ชั้น)

และในกรณีที่ความหนาของวัสดุชั้นบนสุดน้อยกว่ารัศมีของน้ำหนักระทำค่าสัมประสิทธิ์การปรับแก้จะเป็นไปตามสมการที่ (2.8)

$$f = 1.1 \left(\frac{a}{h_1} \right)^{0.3} \quad (2.8)$$

สำหรับระบบที่มี n ชั้นสามารถคำนวณตามวิธีข้างต้นทีละชั้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความหนาเทียบเท่าของวัสดุในกรณีที่มีหลายชั้น

ความหนาเทียบเท่าของวัสดุชั้นที่ n สามารถคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

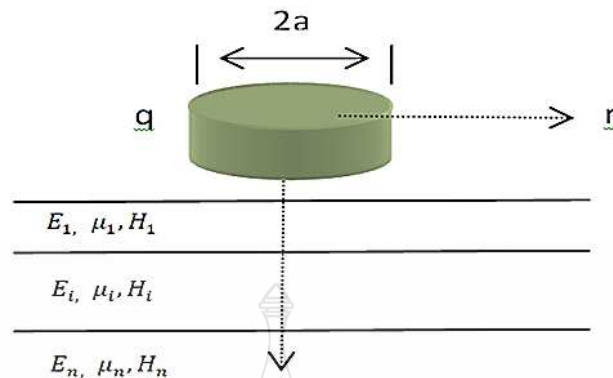
$$h_{e,n} = f \sum_{i=1}^{n-1} h_i \left[\frac{E_1}{E_2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.9)$$

$$h_{e,n} = f \left\{ \dots \left[h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2} + h_2} \right] \times \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3} + h_3} \times \dots + h_{n-1} \right\} \quad (2.10)$$

หลังจากแปลงความหนาชั้นวัสดุแล้ววัสดุทั้งระบบจะเสมือนว่าเป็นวัสดุเนื้อเดียวกันสามารถใช้สมการ Boussinesq กำหนดหาแรงเค้นและแรงเครียดต่อไปได้ แต่ต้องเป็นค่าในชั้นวัสดุรอยต่อเท่านั้น

2.6.3 ทฤษฎียืดหยุ่นหลายชั้นทาง (Multi-Layered Elastic Theory, MLET)

ทฤษฎียืดหยุ่นหลายชั้นทางหรือรู้จักกันในชื่อ MLET ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Burmister ในปี ค.ศ. 1943 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเค้น และค่าการยุบตัวของระบบ 2 ชั้นทาง และได้รับการพัฒนาต่อจนสามารถวิเคราะห์ได้ในระบบ 3 ชั้นทางได้ในปี ค.ศ. 1945 จนกระทั่งเข้าสู่ยุคคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาให้สามารถคำนวณได้หลายชั้นทางมากยิ่งขึ้นโดยมีหลักการดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 หลักการของทฤษฎียึดหยุ่นหลายชั้นทาง (MLET)

โดย MLET ได้มีการนำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณความเค้น ความเครียดและค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นในชั้นทางให้สามารถวิเคราะห์ได้หลายชั้นทางมากยิ่งขึ้น และโปรแกรม BISAR ที่พัฒนาโดย Shell International Oil Products เป็นหนึ่งในโปรแกรมที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีนี้ซึ่งกำลังได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง

2.7 กระบวนการคำนวณผกผัน (Inverse Algorithms)

กระบวนการคำนวณย้อนกลับนับเป็นขั้นตอนสำคัญที่ใช้ในขั้นตอนการคำนวณย้อนกลับ ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาโปรแกรมที่สามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสชั้นทางจำนวนมาก โดยแต่ละโปรแกรมจะใช้ระเบียบขั้นตอนในการคำนวณย้อนกลับที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้ [17]

วิธีความหนาเทียบเท่า (เช่น โปรแกรม ELMOD, RoSy DESIGN)

วิธีการคำนวณวนซ้ำ (เช่น โปรแกรม MODCOMP, EVERCALC)

วิธีหาค่าความเหมาะสม (เช่น โปรแกรม BACKGA, GAPAVE)

วิธีความหนาเทียบเท่า (MET) นั้น เป็นวิธีที่มีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ห้อยู่ค่อนข้างมาก ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.6.3 แต่เนื่องจากวิธีการนี้ใช้ระยะเวลาในการประมวลผลน้อย จึงทำให้ยังคงมีการนำวิธีการนี้ไปพัฒนาเป็นโปรแกรมคำนวณย้อนกลับ ซึ่งบางโปรแกรมมีการพัฒนาจนสามารถออกแบบเสริมผิวทางและคำนวณหาอายุคงเหลือของชั้นทางได้

ในปัจจุบันวิธีการที่นิยมนำมาใช้ในขั้นตอนวิธีคำนวณผกผันสำหรับโปรแกรมคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสชั้นทางคือ วิธีการคำนวณวนซ้ำ (Iteration) ซึ่งวิธีการนี้จำเป็นจะต้อง

กำหนดค่าโมดูลัสตั้งต้นโดยสามารถกำหนดได้เองจากผู้ใช้งานหรือมาจากการสุ่มเลือกขึ้นเองของโปรแกรม และค่าอัตราส่วนปัวซงของ โดย American Association of State Highway and Transportation Officials หรือ AASHTO ซึ่งเป็นหน่วยงานด้านการขนส่งและทางหลวงของประเทศสหรัฐอเมริกาได้แนะนำค่าโมดูลัสชั้นทางและค่าอัตราปัวซงของโดยทั่วไปไว้ดังตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าแองการยวบตัวแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าการยวบตัวที่ได้จากการวัด

ตารางที่ 2.3 ค่าอัตราส่วนปัวซงของ (μ) โดยทั่วไปของวัสดุชั้นทางที่แนะนำโดย AASHTO [18]

Materials	Range	Remarks	Typical Value
Portland Cement Concrete	0.10 - 0.20	-	0.15
Hot Mixed Asphalt / Asphalt Treated Base	0.15 - 0.45	For Temperatures < 30°C use 0.15; For Temperatures > 50°C use 0.45.	0.35
Cement Stabilized Base	0.15 - 0.30	When Sound Free Of Cracks Use 0.15; With Crack Use 0.30.	0.20
Granular Base / Subbase	0.30 - 0.40	Crushed Material Use Low Value ; Unprocessed Rounded Gravel / Sand Use High Values	0.35
Subgrade Soils	0.30 - 0.50	For Cohesiveless Soils Use Value Near 0.30 ; For Very Plastic / Cohesive Clays Use 0.50.	0.40

ตารางที่ 2.4 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) โดยทั่วไปของวัสดุชั้นทางที่แนะนำโดย AASHTO [18]

Pavement Material	Range [MPa]	Typical Value [MPa]
Hot Mixed Asphalt	1,500 - 3,500	3,000
Portland Cement Concrete	20,000 - 50,000	30,000
Asphalt Treated Base	500 - 3,000	1,000
Cement Treated Base	3,500 - 7,000	5,000
Lean Concrete	7,000 - 20,000	10,000
Granular Base	100 - 350	200
Granular Subgrade Soils	50 - 150	100
Fine - Grained Subgrade Soils	20 - 50	30

จากนั้น โปรแกรมจะค้นหาค่าโมดูลัสชั้นทางที่ทำให้แองการยวบตัวที่คำนวณได้มีความสอดคล้องกับแองการยวบตัวที่ได้จากการวัด ซึ่งจะมีการค้นหาโดยวนซ้ำไปเรื่อย ๆ โดยกระบวนการนี้จะเป็นการหาค่าคำตอบโดยใช้การวนซ้ำเพื่อลดค่าความแตกต่างระหว่างค่ายวบตัวที่ได้จากการคำนวณและจากการวัดจริง ค่าความแตกต่างของค่ายวบตัวโดยส่วนใหญ่มักใช้ค่าความคลาดเคลื่อนหรือค่า Root Mean Square Error (*RMSE*) เป็นดัชนีชี้วัด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.11) [17]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i - D_i}{D_i} \right)^2} \quad (2.11)$$

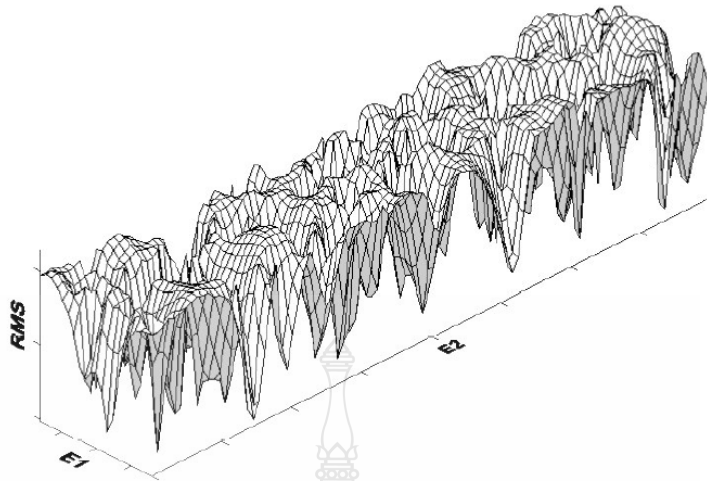
โดยที่

N = จำนวนของข้อมูลค่าการยวบตัว

d_i = ค่าการยวบตัวที่ได้จากการคำนวณในตำแหน่งของค่าการยวบตัวที่ i

D_i = ค่าการยวบตัวที่ได้จากการวัดในตำแหน่งของค่าการยวบตัวที่ i

ซึ่งจากข้างต้นพบว่าการกำหนดค่าโมดูลัสชั้นทางตั้งต้น มีผลเป็นอย่างมากต่อการค้นหาค่าโมดูลัสชั้นทาง และในทางปฏิบัติมักเกิดปัญหาเมื่อคำตอบที่ได้จากโปรแกรมขัดแย้งกับมุมมองทางวิศวกรรม [7] โดยปัญหานี้เกิดจากหลายสาเหตุ และหนึ่งในสาเหตุหลักก็คือพื้นผิวคำตอบของปัญหานั้นมีความซับซ้อนและประกอบด้วยจุดต่ำสุดเฉพาะที่ (Local Minimum) หลายจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับและค่า *RMSE* ซึ่งแสดงเป็นพื้นผิวดำตอบ โดยบริเวณที่มีจุดต่ำสุดคือตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะเป็นคำตอบ โดยจากรูปจะพบว่ามีจุดต่ำสุดอยู่หลายแห่ง ซึ่งเรียกจุดเหล่านี้ว่าจุดต่ำสุดเฉพาะที่ ส่วนตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะเป็นคำตอบมากที่สุดเรียกว่าจุดต่ำสุดองค์รวม (Global Minimum) ซึ่งเป็นจุดที่ต่ำที่สุดและมีอยู่เพียงจุดเดียวของพื้นที่ผิวดำตอบ ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้มีนักวิจัยหลายท่านที่ได้พยายามนำเอาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทาง โดยผลที่ได้พบ GA มีศักยภาพที่ดีในการค้นหาจุดต่ำสุดองค์รวม แต่ GA ก็ยังมีข้อจำกัด เช่น ปัญหาในการเลือกตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์เหมาะสมซึ่งรายละเอียดของ GA จะขอกกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างพื้นผิวคำตอบของระบบชั้นทาง 2 ชั้น ที่ใช้ค่า $RMSE$ เป็นดัชนีชี้วัดคำตอบ [17]

2.8 ระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA)

ปี ค.ศ 1975 John Holland ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิวัฒนาการทางธรรมชาติโดยกระบวนการทางชีววิทยาประกอบด้วยการคัดเลือกทางธรรมชาติ โดยมีแรงบันดาลใจมาจาก ทฤษฎีวิวัฒนาการของ Charles Darwin ในปี ค.ศ. 1859 ซึ่งเป็นการเลียนแบบกลไกการคัดเลือกทางธรรมชาติ นั่นคือ สิ่งมีชีวิตที่แข็งแรงกว่าย่อมมีโอกาสอยู่รอดกว่าสิ่งมีชีวิตที่อ่อนแอ นั่นคือ โครโมโซมที่มีลักษณะที่ดีสามารถอยู่รอดได้มากกว่าโดยโครโมโซมที่อยู่รอดได้ก็จะถ่ายทอดลักษณะที่ดีไปยังลูกหลานได้มากกว่า โดยผ่านกระบวนการทางพันธุกรรม คือ การกำเนิดโครโมโซมใหม่จากการสลับสายพันธุ์ หรือ การกลายพันธุ์ กระบวนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เมื่อกำหนดรูปแบบโครโมโซมและฟังก์ชันความเหมาะสมได้แล้วขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมซึ่งจะสร้างวิวัฒนาการของกลุ่มคำตอบในรุ่นต่อไป ซึ่งมีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม คือการกำหนดฟังก์ชันความเหมาะสมรวมทั้งรูปแบบโครโมโซมจากนั้นจึงเริ่มสร้างประชากรเริ่มต้นกำเนิดตามรูปแบบโครโมโซมที่กำหนดไว้ เมื่อได้ประชากรเริ่มต้นแล้วก็ทำการประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมเพื่อคัดเลือกเข้าสู่กระบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Operation หรือ Reproduction Operation) โดยทำการคัดเลือกเอาเฉพาะ โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมเป็นที่น่าพอใจชุดหนึ่งเก็บไว้แล้วนำมาทำการสลับสายพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) จะได้โครโมโซมชุดใหม่ซึ่งจะนำโครโมโซมชุดใหม่มาประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness Evaluation) เพื่อทำการคัดเลือก (Selection) และดำเนินการต่อไปจนสิ้นสุดตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ จะได้โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมเป็นที่น่าพอใจหรือได้คำตอบของปัญหาที่ต้องการ

จุดเด่นของระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมคือการค้นหาคำตอบจากชุดข้อมูลจำนวนมาก แทนการพิจารณาข้อมูลที่ละคำตอบในวิธีการค้นหาแบบอื่นๆ โดยหลักการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมคือการคัดเลือกคำตอบที่ดีกว่าจากจุดคำตอบหรือกลุ่มประชากรและการผสมผสานรายละเอียดข้อมูลย่อยในชุดคำตอบเพื่อค้นหาคำตอบที่ดียิ่งขึ้นร่วมกับการสุ่มเปลี่ยนข้อมูลย่อยหรือการกลายพันธุ์เพื่อป้องกันการยึดติดกับคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ (Local Minima/Local Maxima)

2.8.1 ระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการคำนวณย้อนกลับ

ความสำเร็จของกระบวนการวิวัฒนาการในธรรมชาติในการคัดเลือกสิ่งมีชีวิตที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม การกลายพันธุ์เพื่อเปิดโอกาสในการพัฒนาสายพันธุ์และการอยู่รอดของเผ่าพันธุ์ด้วยการปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปรวมถึงการส่งต่อลักษณะทางพันธุกรรมของเผ่าพันธุ์ที่เหมาะสมในลักษณะของการถ่ายทอดและผสมยีนส์ของรุ่นพ่อแม่ไปยังรุ่นลูกหลานได้และกลายเป็นแรงบันดาลใจของมนุษย์ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหา

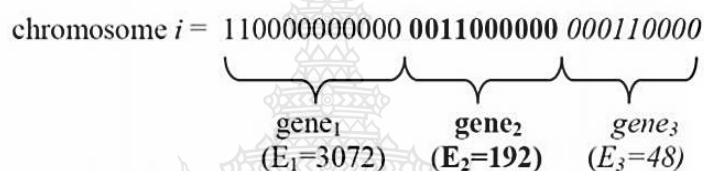
วิธีทางพันธุกรรมได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมอย่างมากมา จนในปี ค.ศ.1997 Fwa และคณะ [19] ได้นำเสนอบทความชิ้นแรกที่มีการนำเสนอการนำ GA มาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผิวทางโดยได้พัฒนาโปรแกรม NUS-GABACK ต่อมาในปี ค.ศ. 1998 Kameyama และคณะ [20] ได้พัฒนาโปรแกรมคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางทั้งผิวทางแบบยึดหยุ่นและผิวทางแบบแข็งจนกระทั่ง ในปี ค.ศ.2002 Reddy และคณะ [21] ได้พัฒนาโปรแกรม BACKGA และทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางขึ้น ต่อจากนั้น Tsai และคณะ [22] ในปี ค.ศ.2004 ก็ได้ตีพิมพ์บทความแสดงการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมกับปัญหาด้านวิศวกรรมงานทาง ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 Park และคณะ [23] ได้พัฒนาโปรแกรม GAPAVE ในปี ค.ศ 2007 Alkasawneh [24] ก็ได้พัฒนาโปรแกรมคำนวณย้อนกลับชื่อ BACKGENETIC3D ในปี ค.ศ. 2009 Park ศึกษาการหาค่าพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการคำนวณย้อนกลับ และในปี ค.ศ.2009 Puttapon [16] ได้พัฒนาโปรแกรมคำนวณย้อนกลับชื่อ GAMLET และในปี พ.ศ.2556 จักรพงษ์ [9] ได้ทำการศึกษาการเลือกชุดพารามิเตอร์สำหรับระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับโปรแกรมเกมเล็ท

หลักการทำงานของโปรแกรมส่วนใหญ่ใช้ วิธีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย (Simple Genetic Algorithm,SGA) ในการคำนวณย้อนกลับ เมื่อกำหนดรูปแบบโครโมโซมและฟังก์ชันความเหมาะสมแล้วขั้นตอนต่อไปในการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมซึ่งจะสร้าง

วิวัฒนาการของกลุ่มคำตอบในรุ่นต่อไปโดยจะมีตัวแปรต่างๆเป็นตัวกำหนดการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การสร้างประชากรเริ่มต้น

กำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ของคำตอบ ค่าโมดูลัสชั้นทางแต่ละชั้น (ตัวแปร E) จะถูกสุ่มแล้วแปลงเป็นเลขฐานสองเพื่อแทนเป็นยีนส์แต่ละชุดซึ่งนั่นหมายความว่าสายโครโมโซมหนึ่งสายแทนลักษณะโครงสร้างชั้นทางหนึ่งแบบและจะถูกนำไปเรียงต่อกันเป็นสายโครโมโซมโดยจำนวนลักษณะโครงสร้างชั้นทางคือจำนวนประชากรของสายโครโมโซมที่ผู้ใช้เป็นผู้กำหนด (ตัวแปร *numpop*) ดังรูปที่รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างพื้นผิวคำตอบของระบบชั้นทาง 3 ชั้นที่ใช้ค่าเป็นดัชนีชี้วัดคำตอบ [16]

2.8.2 การประเมินความเหมาะสม

ประชากรแต่ละรุ่นจะมีการประเมินค่าความเหมาะสมมากกว่าไปยังรุ่นต่อไปโดยทำอย่างนี้เพื่อให้สามารถเข้าหาคำตอบของปัญหาได้มากยิ่งขึ้นซึ่งค่าความเหมาะสมส่วนใหญ่จะถูกประเมินจากค่า *RMSE* ของการยุบตัวของผิวทางที่ได้จากการทดสอบจริงในสนามโดยทั่วไปจะได้จากทดสอบด้วยเครื่อง FWD และจากการคำนวณแบบเดินหน้าของโปรแกรมโดยประชากรที่มีค่า *RMSE* น้อยก็จะมีค่าความเหมาะสมมาก

2.8.3 การคัดเลือกประชากร

การคัดเลือกประชากรที่มีความเหมาะสมในการสร้างประชากรรุ่นถัดไปของประชากรที่มีค่าความเหมาะสมมากก็จะมีโอกาสในการสืบพันธุ์มากในทางกลับกันประชากรที่มีค่าความเหมาะสมน้อยก็จะมีโอกาสในการสืบพันธุ์น้อย

2.8.4 การผสมข้ามแบบจุดเดียว

เป็นการนำเอาประชากรที่ได้จากการสืบพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกประชากรที่เหมาะสมแล้วมาดำเนินการสืบพันธุ์โดยจับคู่ประชากรแล้วทำการผสมข้ามแบบจุดใดจุดหนึ่งบนสาย

โครโมโซมเพื่อผลิตประชากรรุ่นต่อไปตามอัตราความเป็นไปได้ของการผสมข้ามตามที่กำหนด (ตัวแปร $pcross$)

2.8.5 การกลายพันธุ์แบบกระโดด

เป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะของประชากรโดยมีการเปลี่ยนจากค่า 0 เป็น 1 หรือกลับกัน ในตำแหน่งใดๆที่สุ่มขึ้นบนสายโครโมโซมตามอัตราความเป็นไปได้ของการผสมข้ามแบบกระโดดที่ผู้ใช้กำหนด (ตัวแปร $pjumpmu$)

จากนั้นกระบวนการค้นหาคำตอบจะดำเนินการไปเรื่อยๆ จนกว่าจะครบจำนวนรุ่นที่กำหนดไว้ (ตัวแปร $pjumpmu$) หรือจนกว่าจะพบคำตอบที่เหมาะสมตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ เช่น $RMSE$ ที่คำนวณได้ $< RMSE$ ที่ยอมให้ ขบวนการค้นหาคำตอบจึงจะหยุดทำงาน เป็นต้น

2.9 โปรแกรมคำนวณย้อนกลับแกมเล็ต (GAMLET)

ในปี ค.ศ.2009 พุทธพล [16] ได้พัฒนาโปรแกรม GAMLET ซึ่งเป็น โปรแกรมคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสชั้นทางด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ Digital Fortran โดยใช้การคำนวณค่าขุบตัวตามทฤษฎียืดหยุ่นของชั้นทาง (Multilayered Elastic Theory, MLET) เป็นแบบจำลองของการคำนวณแบบเดินหน้าและใช้ GA คำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางด้วยเทคนิคแบบใหม่ โดยหลักการทำงานของ GAMLET อาศัยข้อมูลค่าแองการขุบตัวที่ได้จากการทดสอบในสนามด้วยเครื่อง FWD ตามระยะห่างของตำแหน่งที่วัดการขุบตัวจากหน้าหน้ากระทำแรงดันและรัศมีของหน้าหน้ากระทำร่วมกับข้อมูลของวัสดุชั้นทางคือความหนาแต่ละชั้นทางในตำแหน่งที่ทำการทดสอบและค่าอัตราส่วนปัวส์ซองของแต่ละชั้นทาง โดยโปรแกรม GAMLET สามารถวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางได้มากถึงสามสิบชั้นแต่ในงานวิจัยนี้ใช้ GAMLET 308 ที่สามารถคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางได้ 3 ชั้น จากค่าการขุบตัวของผิวทาง 8 ตำแหน่ง โดยโปรแกรม GAMLET มีคุณลักษณะโดดเด่นที่สำคัญสรุปได้ดังนี้

2.9.1 การคัดเลือกประชากร

ในปี ค.ศ. 1992 Goldberg และ Deb [25] ได้ทำการศึกษาวิธีการคัดเลือกประชากรแบบ Tournament พบว่ามีประสิทธิภาพในการหาคำตอบและต้องการกลุ่มประชากรน้อยกว่าวิธี Roulette-Wheel ที่ใช้ใน SGA ทัวไปซึ่งโปรแกรม GAMLET ได้ใช้วิธีการคัดเลือกดังกล่าวไว้ในโปรแกรมด้วย

2.9.2 การประเมินค่าความเหมาะสม

สมการที่ใช้ประเมินค่าความเหมาะสมเพื่อเพิ่มศักยภาพในการคำนวณย้อนกลับสำหรับ โปรแกรม GAMLET ใช้มากถึง 3 สมการ แต่ใน SGA ทั่วไป ใช้เพียงสมการเดียว ซึ่งทั้ง 3 สมการมีดังนี้

$$\text{ค่าน้อยสุดของ} \quad f_1 = \max .of \left| \frac{(d_i - D_i)}{D_i} \times 100 \right| \quad (2.12)$$

$$\text{ค่าน้อยสุดของ} \quad f_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i - D_i}{D_i} \right)^2} \times 100\% \quad (2.13)$$

$$\text{ค่ามากที่สุดของ} \quad f_3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{OBJ}{10^6} \right)} \quad (2.14)$$

$$\text{โดย} \quad OBJ = \sum_{i=1}^N (d_i - D_i)^2 \quad (2.15)$$

โดยที่

N = จำนวนอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว

d_i = ค่าการยุบตัวที่ได้จากการคำนวณในตำแหน่งที่ i

D_i = ค่าการยุบตัวที่ได้จากการวัดจริงในตำแหน่งที่ i

โดยที่สมการที่ (2.12) เป็นสมการที่ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนเฉพาะตำแหน่งที่เกิดความคลาดเคลื่อนมากที่สุดบนเส้นการยุบตัวของผิวทงส่วนสมการที่ (2.13) คือค่า *RMSE* และสมการที่ (2.14) คือค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวมของเส้นการยุบตัวทั้งหมดโดยค่าที่สมบูรณ์แบบทั้งสามสมการคือ 0.0, 0.0 และ 1.0 ตามลำดับ

2.9.3 การผสมข้าม

โปรแกรม GAMLET ได้บรรจุ การผสมข้ามทั้งแบบสม่ำเสมอ (ตัวแปร *iunifrm*) และแบบจุดเดียว (ตัวแปร *pcross*) ในขณะที่โปรแกรมคำนวณย้อนกลับทั่วไป ใช้วิธีการผสมเพียงวิธีเดียวคือการผสมข้ามแบบจุดเดียว

2.9.4 การกลายพันธุ์

GAMLET ได้บรรจุการกลายพันธุ์ทั้งแบบคืบ (ตัวแปร *pcreepmu*) และแบบกระโดด (ตัวแปร *pjumpmu*) ซึ่งในโปรแกรมคำนวณย้อนกลับทั่วไป ใช้เพียงวิธีเดียวคือการกลายพันธุ์แบบกระโดด ซึ่งในโปรแกรม GAMLET สามารถใช้ร่วมกันหรือแยกกันก็ได้

2.9.5 การคัดเลือกผู้นำ (Elitism Technique)

การคัดเลือกผู้นำ (ตัวแปร *ibstmodl*) เป็นเทคนิคใหม่ที่เพิ่มเข้ามา จาก SGA ทัวไป เพื่อใช้สำหรับเลือกผู้นำของประชากรแต่ละรุ่นที่มีค่าความเหมาะสมสูงสุดเก็บไว้เพื่อการดำรงอยู่ในรุ่นถัดไปโดยอัตโนมัติโดยสามารถเลือกเปิดหรือปิดการใช้งานได้

2.9.6 วิธีกลุ่มเฉพาะ (Niche Method)

GAMLET ได้บรรจุวิธีกลุ่มเฉพาะ (ตัวแปร *niching*) เป็นอีกหนึ่งเทคนิคใหม่ที่เพิ่มเข้ามา จาก SGA ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สำหรับแบ่งพื้นที่คำตอบออกเป็นหลาย ๆ ส่วนด้วยวิธีแบ่งแบบสามเหลี่ยม เพื่อค้นหาจุดค่าสุดหลาย ๆ ตำแหน่งพร้อมกัน โดยสามารถเลือกเปิดหรือปิดการใช้งานได้เช่นกัน นอกจากนี้ GAMLET ยังมีคุณสมบัติเด่นอื่น ๆ อีกเช่น FWDLine, Micro GA, CSCM [16] แต่เนื่องจากอยู่นอกเหนือขอบเขตที่ได้ทำการศึกษา จึงไม่ขอกกล่าวถึงรายละเอียดในที่นี่

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2553 พุทธพล และนิรชร [6] ได้ทำการประยุกต์ใช้เครื่องมือ Benkelman Beam ตามวิธีใหม่ FWD-Sim ในการวัดค่าแอมการยุบตัว ในการประเมินความแข็งแรงโครงสร้างถนนลาดยาง โดยทดสอบเปรียบเทียบกับมาตรฐานการทดสอบแบบ WASHO และ Thai Highway จากการทดสอบให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.074, 0.046 และ 0.299 ตามลำดับ ซึ่ง FWD-Sim อยู่ในเกณฑ์เชื่อถือได้ และเมื่อนำค่าแอมการยุบตัวที่ได้จากการทดสอบ ไปคำนวณย้อนกลับโดยใช้โปรแกรม GAMLET โดยเลือกความเป็นไปได้ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแต่ละชั้นทางดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.5 ค่าความเป็นไปได้ของโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางในงานศึกษาของ พุทธพล และนิรชร [6]

	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำสุด (เมกะปาสคาล)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุด (เมกะปาสคาล)
ชั้นทางที่ 1	500	10,000
ชั้นทางที่ 2	10	500
ชั้นทางที่ 3	10	500
ชั้นทางที่ 4	10	300

โดยได้นำชุดค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม GAMLET (numpop = 210, จำนวนรุ่นประชากรสูงสุด maxgen = 200, pcross = 0.9, pjumpmu = 0, pcreepmu = 0.4, Niche method = on, Elitism = on) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากค่าแองการยุดตัวของเครื่องมือเบนเคลแมนบีมให้ค่า RMSE มากกว่าร้อยละ 3 จึงไม่สามารถหาชุดค่าตอบได้

ในปี พ.ศ.2543 พิพัฒน์ [26] ได้นำเอาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างเสาโทรมนาคมน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และยึดอยู่กับที่ด้วยตัวโครงสร้างเอง โดยพิจารณาเพียงเฉพาะโครงสร้างส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน และไม่คำนึงถึงอุปกรณ์สำหรับติดตั้งบนเสา ลักษณะของโครงสร้างพิจารณาให้เป็นโครงข้อมุมแบบยึดหยุ่นเชิงเส้น โดยมีแรงที่กระทำกับโครงสร้างเป็นไปตามมาตรฐาน EIA/TIA-222-E (1991) ซึ่งระเบียบวิธีดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบโครงสร้างเสาโทรมนาคมน้ำตัดได้ โดยโครงสร้างที่ได้มีน้ำหนักต่ำกว่าโครงสร้างอ้างอิงตั้งแต่ร้อยละ 13 – 26 โดยประมาณ

ในปี พ.ศ.2550 ยศ [27] ได้ทำการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรสำหรับออกแบบโครงหลังคาโครงข้อมุมรูปจั่ว เพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้าง โดยตัวแปรสำหรับออกแบบจะอยู่ในรูปของความลึกของโครงหลังคา จำนวนการแบ่งช่วงภายใน การจัดเรียงชิ้นส่วน ตลอดจนขนาดของหน้าตัดชิ้นส่วนภายใน น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างหลังคาจะอยู่ในรูปแบบของน้ำหนักแผ่กระจาย (Distributed Load) ตามแนวดิ่ง โดยผลการวิจัยพบว่าวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถหาค่าตอบของโครงข้อมุมที่ศึกษาในความยาวช่วง 40 และ 50 ม. ซึ่งลดต้นทุนการก่อสร้างได้ร้อยละ 12 – 15

ในปี พ.ศ.2556 พุทธิพล [7] นำเสนอรายละเอียดการพัฒนาโปรแกรม GAMLET และประยุกต์ใช้เพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย ผลชี้ให้เห็นว่าโปรแกรมสามารถประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางลาดยางที่ใช้ในประเทศไทยได้อย่างดีเยี่ยม โดยค่า $RMSE < 0.1\%$ เทียบกับข้อมูลตั้งต้นที่ใช้ในการทดสอบและยังมีศักยภาพในหลายๆด้านดีกว่าโปรแกรมคำนวณย้อนกลับแบบดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่สำหรับค่าเริ่มต้นการคำนวณย้อนกลับสามารถทำได้ทันทีหลังจากกำหนดช่วงความเป็นไปได้ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ (numpop = 210, maxgen = 200, pcross = 0.9, pjumpmu = 0, pcreepmu = 0.4, Niche method = on, Elitism = on) ผลทดสอบมีความเหมาะสมกับการคำนวณย้อนกลับโดยโปรแกรมสำหรับการทดสอบนี้ให้ค่า $fl=0.01\%$

จากนั้นในปี พ.ศ.2556 จักรพงษ์ [9] ได้ศึกษาการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับโปรแกรม GAMLET โดยใช้โครงสร้างชั้นทางและน้ำหนักบรรทุกที่สอดคล้องกับถนนที่ใช้อยู่ใน

ประเทศไทยโดยสร้างแบบจำลองวิเคราะห์การยุบตัวด้วยโปรแกรม BISAR 3.0 และสร้างชุดพารามิเตอร์จากการสุ่มเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการคำนวณซึ่งจากผลการศึกษาลำหรับโปรแกรม GAMLET แบบ 3 ชั้นทาง ซึ่งมีการเลือก 2 ครั้ง โดยใช้แบบจำลองชั้นทางที่แตกต่างกันมีระดับความถูกต้องของคำตอบและค่า CE เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกได้ชุดพารามิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับโครงสร้างชั้นทางเป็นแอสฟัลต์ติกคอนกรีต คือ (numpop = 40, maxgen = 100, pcross = 0.77, pjumpmu = 0.016, pcreepmu = 0.14, Niche method = on, Elitism = on) และนำไปตั้งค่าการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางจากแบบจำลองโครงสร้างชั้นทางที่สมมติขึ้น และจากข้อมูลการทดสอบจริงในสนามด้วยเครื่อง FWD ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ชุดนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือค่า *RMSE* อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน LTPP ในประเทศสหรัฐอเมริกาใช้ค่า *RMSE* ไม่เกินร้อยละ 3

สำหรับในส่วนของการทดสอบ โดยใช้ LWD ปี ค.ศ.2011 Benedetto และคณะ [28] ได้ศึกษาการใช้แบบจำลองรูปไข่สำหรับการทำนายค่าการยุบตัวของชั้นทางโดยใช้ LWD ในการทดสอบ เนื่องจากพบว่าตำแหน่งที่ทำการทดสอบบางตำแหน่งมีค่าการยุบตัวที่ไม่สอดคล้องกับทฤษฎีซึ่งมีสาเหตุความแปรปรวนของชนิดและชั้นดินตามทฤษฎีที่คิดค้นขึ้นมาใหม่นี้มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีของ Boussinesq โดยจะนำมาใช้สำหรับการปรับปรุงแก้ค่าการยุบตัวของชั้นทางเพื่อให้สามารถคำนวณค่าการกระจายตัวของความเค้นในชั้นดินได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

ต่อมาปี ค.ศ.2013 Christopher และคณะ [29] ได้ศึกษาการนำเครื่อง LWD มาทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในชั้นทางสองชั้นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณแบบเดินหน้า และเปรียบเทียบการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรมและการค้นหาโดยใช้ความลาดชันผลการเปรียบเทียบพบว่าระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาได้ในขณะที่การค้นหาโดยใช้ความลาดชันไม่สามารถค้นหาคำตอบได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

โครงการศึกษาวิจัยนี้เป็นการใช้เครื่องเบนเคลแมนบีม และเครื่องตุ้มกระแทกแบบเบาวัดค่าการแอ่นตัวของถนนชั้นพื้นทางดินซีเมนต์เพื่อเป็นค่านำเข้าสำหรับการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางเพื่อประเมินความแข็งแรงโครงสร้างชั้นทางดินซีเมนต์

วิธีการดำเนินงานในการศึกษาวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นวิธีการวิจัยในเชิงวิเคราะห์และทดลองซึ่งวิธีที่ใช้ในการวิจัยทั้งหมดเป็นไปตามขั้นตอนการวิจัยดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ดังนี้

1. ศึกษารวบรวมทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาลักษณะโครงสร้างชั้นทางดินซีเมนต์และวิธีการก่อสร้างที่สอดคล้องกับที่ใช้ในประเทศไทย
3. ก่อสร้างแปลงทดสอบชั้นทางดินซีเมนต์ตามที่ได้กำหนดไว้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงตาม ทล.-ม 204/2556 [8]
4. ทดสอบหาค่าการยุบตัวของชั้นทางดินซีเมนต์โดยใช้เครื่องมือเบนเคลแมนบีม และเครื่องตุ้มกระแทกแบบเบา
5. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีม และเครื่องตุ้มกระแทกแบบเบาเพื่อสร้างแองการยุบตัว
6. นำชุดพารามิเตอร์ที่ได้รับการคัดเลือกมาตั้งค่าให้กับโปรแกรม GAMLET จากนั้นทำการคำนวณย้อนกลับกับข้อมูลที่ได้จากทดสอบจริงในสนามด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีม และเครื่องตุ้มกระแทกแบบเบา
7. สรุปผลข้อมูลและรวบรวมผลการศึกษา
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์และตีพิมพ์เพื่อเผยแพร่ในการประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการระดับชาติ

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 รถเกรด (Grader)

รถเกรดใช้สำหรับเคลียร์พื้นที่และเตรียมพื้นที่แปลงทดสอบให้เรียบและใช้สำหรับผสมดินกับซีเมนต์ให้เข้ากันทั้งการผสมแบบแห้งและแบบเปียกแล้วทำเกรดเกลี่ยดินซีเมนต์ให้เต็มพื้นที่แปลงทดสอบให้ได้ความหนาเฉลี่ยเท่าๆกันก่อนทำการบดอัดด้วยรถบดล้อเหล็กแบบสันสะเทือน



รูปที่ 3.1 รถเกรด (Grader)

3.1.2 รถบดสันสะเทือน (Dynapac)

รถบดสันสะเทือนใช้สำหรับบดอัดพื้นถนนแปลงทดสอบซึ่งสามารถบดทับโดยการเดินหน้าและถอยหลังได้ การขับเคลื่อนไปข้างหน้า การหยุดและการถอยหลังจะต้องเรียบสม่ำเสมอ ล้อทั้ง 2 ล้อ จะต้องตรงและ ต้องมีถังน้ำ มีระบบฉีดน้ำ มีอุปกรณ์คราดผิวล้อ เพื่อไม่ให้ดินซีเมนต์ติดล้อขณะบดทับ มีระบบการสันสะเทือนที่อยู่ในสภาพดีทำการบดอัดให้ได้ความแน่นและให้เรียบหลังจากที่รถเกรดได้ดำเนินการผสมแห้งและผสมเปียกเข้ากันดีแล้วเกรดเกลี่ยดินซีเมนต์ให้เต็มพื้นที่แปลงทดสอบให้ได้ความหนาเฉลี่ยเท่า ๆ กัน



รูปที่ 3.2 รถบดสันสะท้อน (Dynapac)

3.1.3 รถบรรทุกน้ำ

รถบรรทุกน้ำ ใช้สำหรับฉีดพ่นน้ำผสมหลังจากที่รถเกรดผสมดินกับซีเมนต์แบบแห้งแล้วเสร็จเพื่อทำการผสมดินกับซีเมนต์ให้เข้ากันดีเรียกว่าการผสมเปียกและใช้ฉีดน้ำบ่มแปลงทดสอบ



รูปที่ 3.3 รถบรรทุกน้ำ

3.1.4 รถบรรทุก 6 ล้อ 2 เพลาแบบเพลาหลังเป็นเพลาเดี่ยวล้อคู่ (Single dual tires)

รถบรรทุก 6 ล้อ 2 เพลาแบบเพลาหลังเป็นเพลาเดี่ยวล้อคู่ ใช้สำหรับบรรทุกน้ำหนักในการทดสอบโดยชั่งน้ำหนักลงเพลา 18,000 ปอนด์ หรือ 8,240 กิโลกรัม ขนาดของยาง 10 x 20 ม.

แรงดันลมในล้อ 85 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีช่องว่างระหว่างแก้มยางของคู่ล้อ 25 - 40 มิลลิเมตรและช่องว่างระหว่างพื้นผิวสัมผัสของคู่ล้อ 100 – 150 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 รถบรรทุก 6 ล้อ 2 เพลาแบบเพลาหลังเป็นเพลาเดี่ยวล้อคู่

3.1.5 รถบรรทุกซีเมนต์ผง (Trailer Cement Tank)

รถบรรทุกซีเมนต์ผงเป็นเครื่องจักรที่ใช้ปล่อยปูนซีเมนต์ เพื่อผสมกับดินลูกรังลงแปลงทดสอบ



รูปที่ 3.5 รถบรรทุกซีเมนต์ผง

3.1.6 เครื่องชั่งน้ำหนักรถบรรทุก

เครื่องชั่งน้ำหนักรถบรรทุกใช้สำหรับชั่งน้ำหนักบรรทุกลงเพลาหลังให้ได้น้ำหนักบรรทุกตามที่กำหนด



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งน้ำหนักรถบรรทุก

3.1.7 เครื่องมือเบนเคลแมนบีม

เครื่องมือเบนเคลแมนบีมหรือเครื่อง BB สำหรับทดสอบการยุบตัวในสนามตามวิธี FWD-Sim มีรูปร่างลักษณะเสมือนคัน 2 ชั้น โดยคันชั้นหลังตั้งอยู่บนขาทั้งสอง ซึ่งสามารถปรับระดับได้ โดยขาหน้าเป็นขาคู่ และขาด้านหลังเป็นขาเดี่ยว คานดังกล่าวทำหน้าที่หิ้วคันชั้นหน้า ทั้ง 2 จุด ที่ปลายคานหน้ามีปลายเดือยสามารถสอดเข้าไปในระหว่างล้อคู่หลัง ที่ปลายคานอีกด้านหนึ่งมี Dial Gauge สำหรับวัดระยะขึ้น - ลง ตามแนวตั้งของปลายคาน บนคานหลังมีขดลวดแม่เหล็ก สั่นสะเทือน (Buzzer) เพื่อลดความฝืดของจุดสัมผัสต่างๆ ในขณะทดลองเครื่องมือเบนเคลแมนบีม



รูปที่ 3.7 เครื่องมือเบนเคลแมนบีม

3.1.8 เครื่องมือทดสอบการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทกแบบเบา (LWD)

เครื่องมือทดสอบการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทกแบบเบาเป็นเครื่องมือทดสอบการยุบตัวในสนามโดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือทดสอบที่ รุ่น TC-351F ดังรูปที่ 3.8



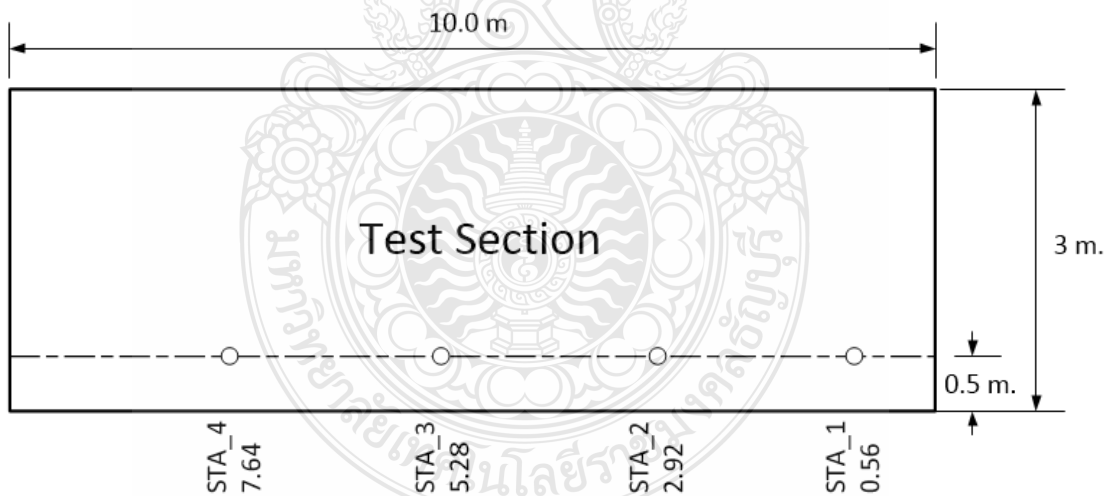
รูปที่ 3.8 เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทกแบบเบา รุ่น TC-351F

3.1.9 เครื่องมือและอุปกรณ์อื่น ๆ

1. เทปวัดระยะ
2. หมุดเหล็ก (Pin)
3. โปรแกรม GAMLET 308
4. เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (Notebook)

3.2 วิธีการดำเนินงาน

3.2.1 แปลงทดสอบพื้นทางดินซีเมนต์ถูกสร้างขึ้นโดยจำลองวิธีการและเทคนิคการก่อสร้างที่ผู้รับเหมาทั่วไปนิยมใช้ในการก่อสร้างจริง คือ การกรูยและครูดหน้าดิน (Scarify) ที่ความลึกตามความหนาของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ คือ 0.15 ม. และทำการผสมซีเมนต์ในที่ (In-place mixing) ซึ่งเป็นที่คาดการณ์ว่าความหนาที่แท้จริงของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์จะแปรผันค่อนข้างมาก ที่ลานอเนกประสงค์ บ้านกระบอกเตี้ย ต.ท่ากระดาน อ.สนามชัยเขต จ.ฉะเชิงเทรา โดยเลือกใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8 แปลงทดสอบมีขนาดความกว้าง 3 ม. ยาว 10 ม. โดยรูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของแปลงทดสอบพื้นทางดินซีเมนต์และสถานีทดสอบสำหรับเครื่อง BB วิธี FWD-Sim



รูปที่ 3.9 ขนาดแปลงทดสอบ

3.2.2 ก่อนดำเนินการก่อสร้างแปลงทดสอบจะต้องดำเนินการเคลียร์พื้นที่โดยทำการปรับระดับหน้าดินให้เรียบก่อนรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงการดำเนินการเคลียร์พื้นที่ก่อนก่อสร้างแปลงทดสอบ

3.2.3 ใช้ไบบมีตรถเกรดจิกดินในแปลงทดสอบขึ้นมาแล้วเกรดเกลี่ยดินไป-มา หลายๆรอบ จนเม็ดดินแยกออกจากกัน ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงการก่อสร้างแปลงทดสอบ

3.2.4 ปล่อยปูนซีเมนต์ผงปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่เตรียมไว้ลงในแปลงทดสอบให้ทั่วแปลงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การดำเนินการปล่อยปูนซีเมนต์ลงแปลงทดสอบ

3.2.5 ใช้รถเกรดผสมดินกับซีเมนต์ให้เข้ากันและเกรดเกลี่ยดินซีเมนต์ให้เต็มพื้นที่แปลงทดสอบดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงการดำเนินการผสมแห้ง ดินกับซีเมนต์ในแปลงทดสอบ

3.2.6 ใช้รถบรรทุกน้ำ ฉีดพ่นน้ำผสมหลังจากที่รถเกรดผสมดินกับซีเมนต์แบบแห้งแล้วเสร็จเพื่อทำการผสมดินกับซีเมนต์ให้เข้ากันดีเรียกว่าการผสมเปียกและใช้นิ้ดน้ำบ่มแปลงทดสอบ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงการฉีดพ่นน้ำผสม

3.2.7 ใช้รถเกรดผสมดินกับซีเมนต์ให้เข้ากันหลังจากฉีดพ่นน้ำแล้วและเกรดเกลี่ยดินซีเมนต์ให้เต็มพื้นที่แปลงทดสอบดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงการดำเนินการผสมเปียกดินกับซีเมนต์ในแปลงทดสอบ

3.3 วิธีการดำเนินงานทดสอบ FWD-Sim .ในแปลงทดสอบพื้นทางดินซีเมนต์

3.3.1 ชั่งรถบรรทุก 6 ล้อ 2 เพลา แบบเพลาหลังเป็นเพลาเดี่ยวล้อคู่ (Single dual tires) และทำการปรับแรงดันลมยางของทุกล้อในเพลาหลังให้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ 80 ปอนด์/นิ้ว² และทำการชั่งน้ำหนักบรรทุกลงเพลาหลังรถบรรทุกให้ได้ 18,000 ปอนด์ หรือ 8,240 กิโลกรัม รวมทั้งทำความเข้าใจกับพนักงานขับรถในการควบคุมรถให้หยุดตรงตามตำแหน่งเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวตามวิธีการทดสอบดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงการชั่งน้ำหนักลงเพลาหลังรถบรรทุกและการทำความเข้าใจกับพนักงานขับรถ

3.3.2 ทำการทดสอบด้วยเครื่องเบนเคลแมนบีบตามวิธีทดสอบ FWD-Sim ที่จำลองระยะตัวรับสัญญาณของเครื่องวัดค่าการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก FWD เพื่อนำค่าที่ได้ไปสร้างแองการยุบตัวตามตำแหน่งของสถานีที่กำหนดไว้แล้วสอดปลายคานหน้าเข้าไปวางอยู่บนจุดทดลองระหว่างแก้มล้อ เพื่อวัดค่าการยุบตัวของถนนระหว่างล้อคู่หลังที่ปลายคานอีกด้านหนึ่งมี Dial Gange สำหรับวัดระยะขึ้น – ลง ตามแนวคิงของปลายคาน ในขณะที่ทดลอง ทำการตั้งค่า Dial Gauge ที่ 0 ให้สัญญาณรถบรรทุกที่ได้ชั่งน้ำหนักไว้แล้วเคลื่อนตัวออกไปและหยุดตามตำแหน่งที่กำหนดแล้วจดบันทึกค่าดำเนินการทดสอบทุกจุดจนครบเป็นเสร็จขั้นตอนการทดสอบ

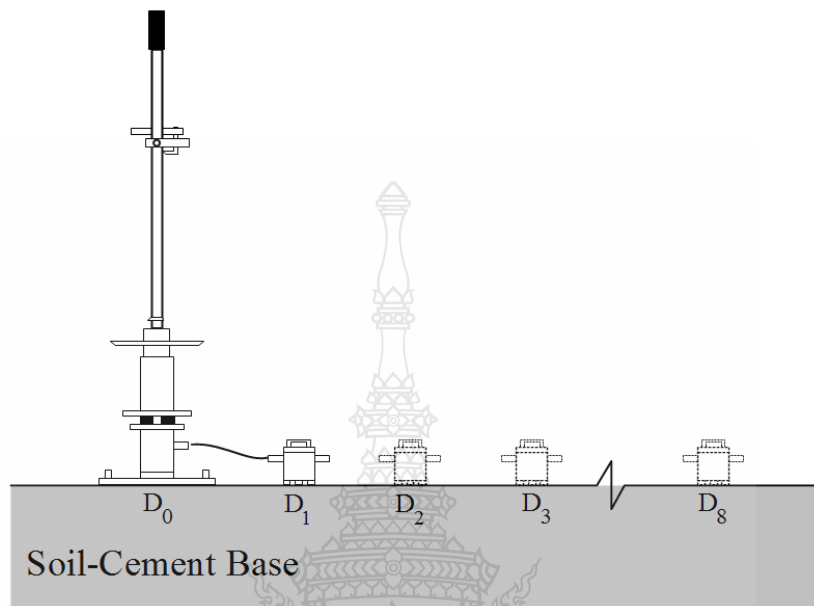


รูปที่ 3.17 การทดสอบด้วยเบนเคลแมนบีมตามวิธีทดสอบ FWD-Sim

3.4 วิธีการดำเนินงานทดสอบค่าแอมการยุบตัวจากเครื่องมือ LWD

เนื่องจากเครื่อง LWD ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นระบบที่มีเซ็นเซอร์ภายในและภายนอกอย่างละ 1 ตัว ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าแอมการยุบตัวที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณย้อนกลับได้ งานวิจัยนี้จึงได้ทดลองพัฒนาวิธีการวัดค่าการยุบตัวแบบทับซ้อน (Superposition in deflection) หรือเรียกโดยย่อว่า “Superpos-Def” โดยขั้นตอนการทดสอบจะใช้ระบบการวัดค่าแบบทีละคู่ โดยการวัดชุดที่ 1 ซึ่งเซ็นเซอร์ตัวที่ 1 อยู่ที่กึ่งกลางแผ่นเหล็ก ส่วนตัวที่ 2 วางที่ตำแหน่งตามระยะที่ต้องการทดสอบ ซึ่งในที่นี้ได้วางเซ็นเซอร์ตัวที่ 2 ตามระยะที่นิยามใช้ทั่วไปของเครื่อง FWD เช่นเดียวกับการทดสอบในขั้นตอนที่ 3.3 ค่าการยุบตัวที่ได้ในแต่ละตำแหน่งในแปลงทดสอบพื้นทางดินซีเมนต์จะนำมาพิจารณาและหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำไปใช้คำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม GAMLET รายละเอียดการทดสอบด้วย

วิธี Superpos-Def แสดงดังรูปที่ 3.18 และ 3.19 ใช้ขนาดตุ้มน้ำหนัก 15 กก. แผ่นเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 ม. และระยะตกกระทบที่ 500 มม.



รูปที่ 3.18 วิธีการวัดค่าการยุบตัว Superpos-Def



รูปที่ 3.19 การทดสอบหาค่าการยุบตัวด้วยเครื่องตุ้มกระแทกแบบเบา

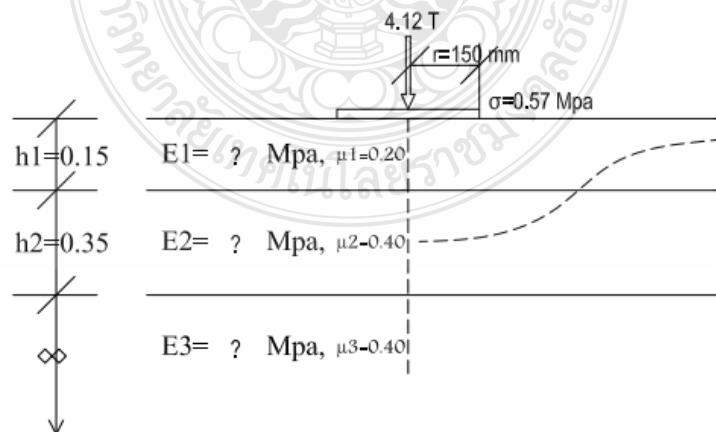
3.5 การคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรมแกมเล็ต (GAMLET)

3.5.1 เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์จากงานวิจัย จักรพงษ์ [9] ที่ได้แนะนำ ในการตั้งค่าโปรแกรม GAMLET ตามตารางที่ 3.1 และนำค่าแ่งการยุบตัวจากการทดสอบด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีม วิธี FWD-Sim และเครื่องตุ้มกระแทกแบบเบา เป็นข้อมูลนำเข้าเพื่อหาค่าโมดูลัสชั้นทางต่อไป

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดชุดพารามิเตอร์ที่ใช้ตั้งค่าการคำนวณย้อนกลับสำหรับโปรแกรม GAMLET

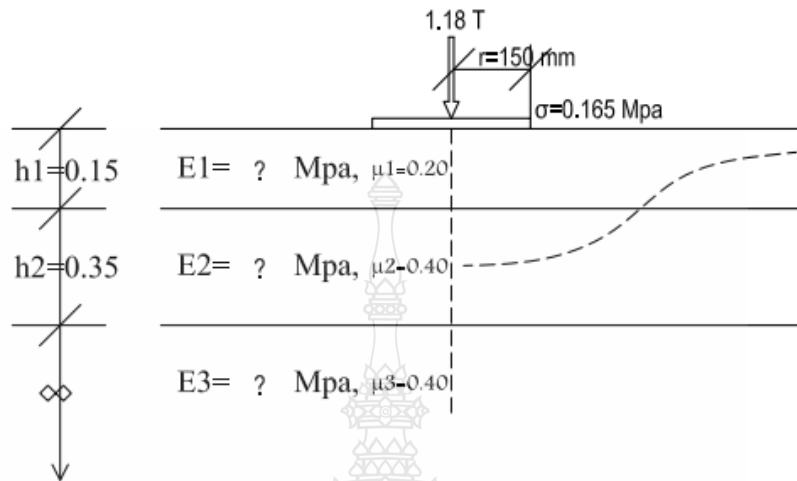
พารามิเตอร์	พารามิเตอร์
จำนวนรุ่นสูงสุด (maxgen)	100
ขนาดของประชากร (numpop)	40
อัตราความเป็นไปได้ของการผสมข้ามแบบจุดเดียว (pcross)	0.77
อัตราความเป็นไปได้ของการกลายพันธุ์แบบกระโดด (pjumpmu)	0.016
การปิด-เปิด การผสมข้ามแบบสม่ำเสมอ (iuniform)	on
การปิด-เปิด การกลายพันธุ์แบบคืบ (icreep)	on
อัตราความเป็นไปได้ของการกลายพันธุ์แบบคืบ (pcreepmu)	0.14
การปิด-เปิด การคัดเลือกผู้นำ (ibstmold)	on
การปิด-เปิด วิธีกลุ่มเฉพาะ (niching)	on

3.5.2 ชุดตัวแปรและค่านำเข้าในการคำนวณกรณีทดสอบด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีม ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 โครงสร้างชั้นทางที่ใช้ในการพิจารณากรณีทดสอบด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีม

3.5.3 ชุดตัวแปรและค่านำเข้าในการคำนวณกรณีทดสอบด้วยเครื่องดัดกระดูกแบบเบา
 ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 โครงสร้างชั้นทางที่ใช้ในการพิจารณากรณีทดสอบด้วยเครื่องดัดกระดูกแบบเบา

ช่วงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เป็นไปได้ของแต่ละชั้นทางเพื่อเริ่มต้นการทำงาน ในการทดสอบครั้งนี้ได้เลือกใช้ค่าความเป็นได้ของแต่ละชั้นทางดังนี้

$$\text{Min.E1-Max.E1}=5-10,000 \text{ Mpa}$$

$$\text{Min.E2-Max.E2}=5-1,000 \text{ Mpa}$$

$$\text{Min.E3-Max.E3}=5-1,000 \text{ Mpa}$$

จะเห็นได้ว่าการใช้เพียงช่วงค่าความเป็นไปได้ดังกล่าวจะทำให้การทำงานง่ายขึ้นกว่าการกำหนดชุดโมดูลัสเพียงชุดเดียวให้ใกล้เคียงค่าจริง

3.5.4 คำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม GAMLET 308 เพื่อหาค่าโมดูลัสชั้นทาง

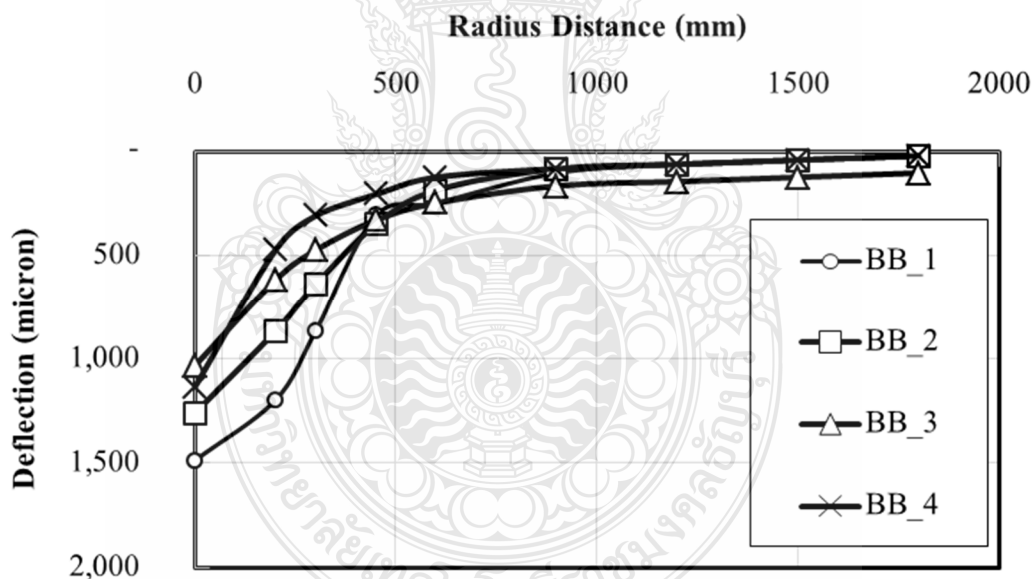
3.5.5 สรุปวิเคราะห์ผลการคำนวณย้อนกลับจากการวัดแองการขยับตัวด้วยเครื่องเบนเคลแมนบีม และเครื่องดัดกระดูกแบบเบา

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

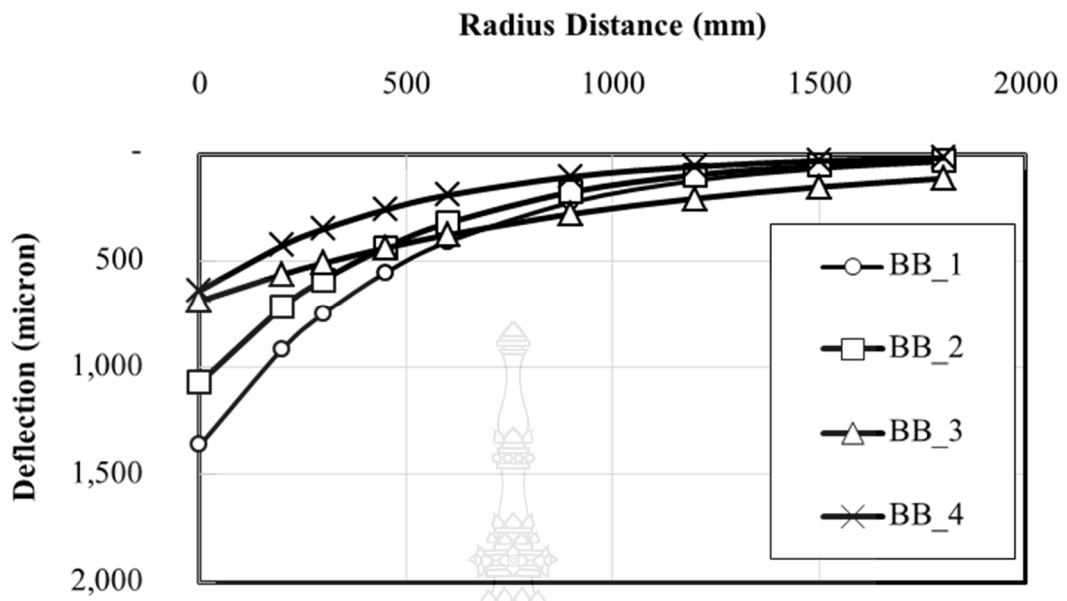
4.1 การวิเคราะห์ค่าการยุบตัวจากการทดสอบในสนาม

จากการทดสอบค่าแอมการยุบตัวจากโครงสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ด้วยเครื่อง BB ที่อายุ 3 วัน และเครื่อง LWD ที่อายุ 20 วัน พิจารณาจากผลการทดสอบด้วยเครื่อง BB ทั้งหมด 4 สถานี โดยใช้วิธี FWD-Sim ดังรูปที่ 4.1 ปรากฏว่าการปรับแก้ค่าแอมการยุบตัวด้วยสมการลดรอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลของ Hossain ทำให้ค่าการยุบตัวโดยเฉพาะตำแหน่งใกล้ปลายคานเครื่อง BB มีค่าลดน้อยลงในทุกสถานีทดสอบดังรูปที่ 4.2 เช่นเดียวกับการทดสอบค่าแอมการยุบตัวด้วยเครื่อง LWD ดังรูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของค่าการยุบตัวที่บริเวณตำแหน่งดังกล่าวสามารถส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างในแต่ละชั้นทางเกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเพิ่มขึ้นได้อย่างมาก



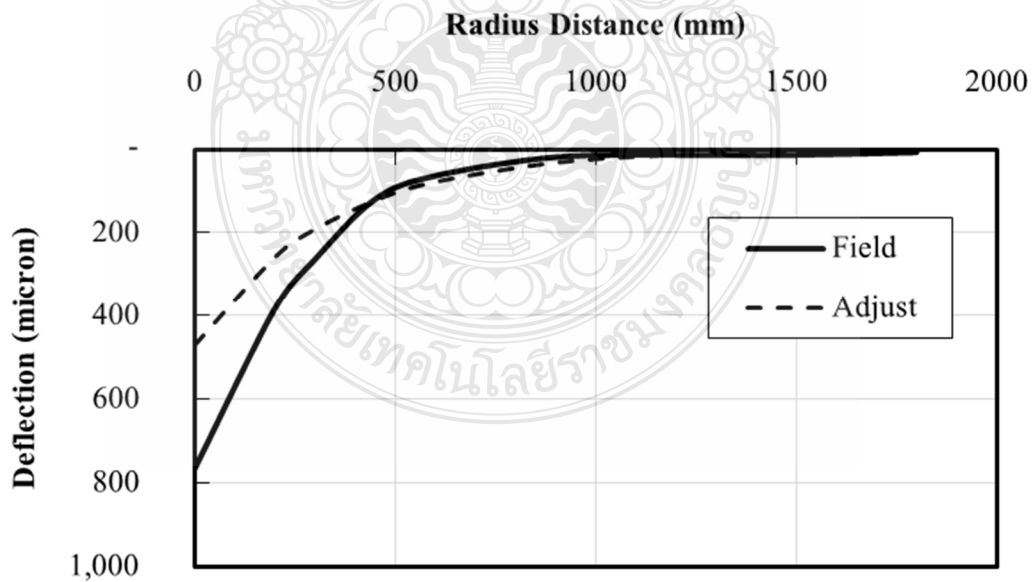
(a) ค่าแอมการยุบตัวในสนาม

รูปที่ 4.1 ค่าแอมการยุบตัวจากการทดสอบด้วยเครื่อง BB ในแต่ละสถานีทดสอบ



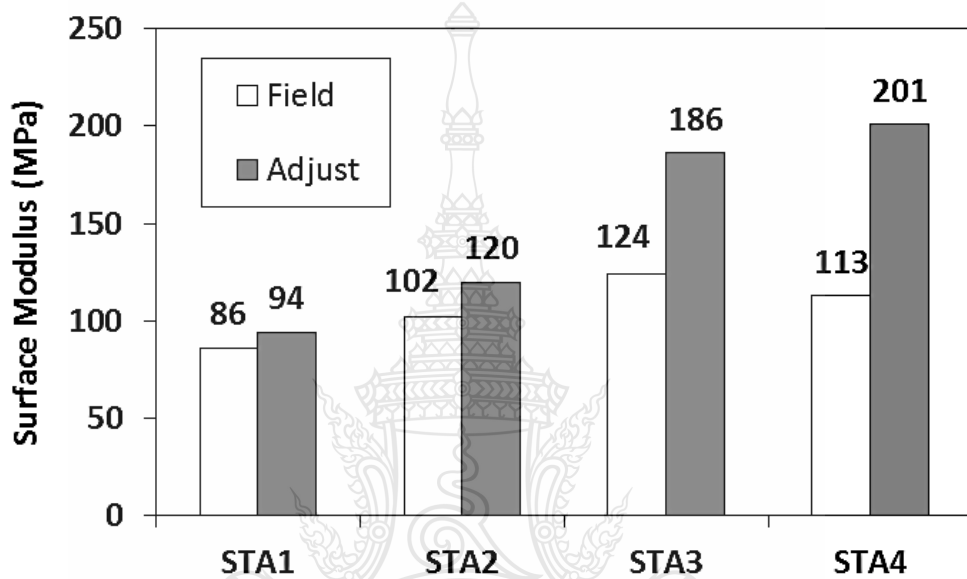
(b) ค่าแ่งการขุดตัวจากการปรับแก้

รูปที่ 4.2 ค่าแ่งการขุดตัวจากการทดสอบด้วยเครื่อง BB หลังปรับแก้ด้วยสมการลดรอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล



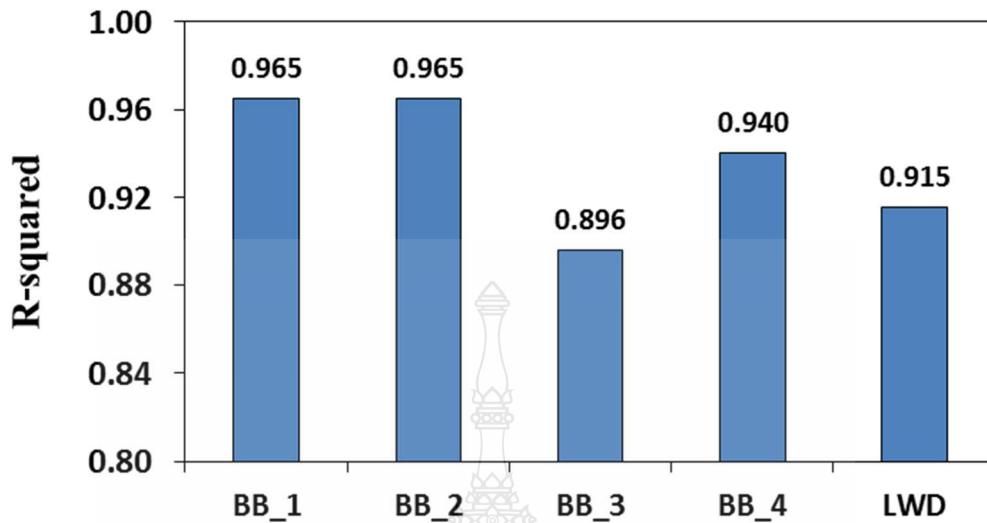
รูปที่ 4.3 ค่าแ่งการขุดตัวจากการทดสอบด้วย LWD

เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงของค่าแองการยวบตัวจากเครื่องมือ BB ที่กล่าวมาข้างต้นโดยการคำนวณค่าโมดูลัสโดยรวมของโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งได้จากทฤษฎีของบุงิเนค ดังสมการที่ (2.5) พบว่าค่าโมดูลัสโดยรวมหลังการปรับแก้สามารถเปลี่ยนแปลงจากเดิมได้มากถึง 1.7 เท่า (สถานีทดสอบที่ 4) ซึ่งผลการปรับแก้ในทุกสถานีแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าโมดูลัสผิวพื้นทางดินซีเมนต์จากเครื่อง BB

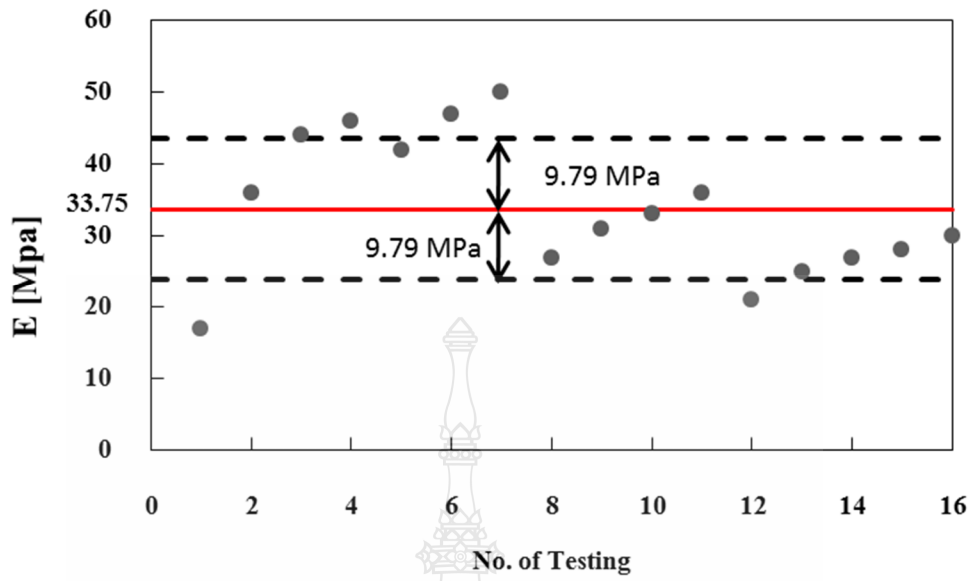
สิ่งที่พบได้อย่างชัดเจนจากการปรับแก้ค่าแองการยวบตัวด้วยสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเมื่อพิจารณาผลทดสอบจากเครื่อง BB และ LWD ทุกชุดทดสอบ พบว่าข้อมูลแองการยวบตัวและสมการถดถอยมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 ที่ได้จากการปรับแก้มีค่าค่อนข้างสูง (ค่า R^2 ต่ำสุด เท่ากับ 0.896 และสูงสุดเท่ากับ 0.970 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB) ในขณะที่ค่าแองการยวบตัวที่ได้จากการทดสอบ LWD ตามวิธี Superpos-Def พบว่ามีความสอดคล้องกับสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเช่นเดียวกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ต่ำกว่าการทดสอบด้วยเครื่อง BB เพียงเล็กน้อย และมีค่าสูงกว่า 0.900 แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นเครื่องยืนยันว่าการใช้สมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่ให้ค่า R^2 อยู่ในเกณฑ์ที่ดีนั้น ไม่ได้เป็นตัวชี้วัดว่าความแข็งแรงที่ได้จะมีความถูกต้อง



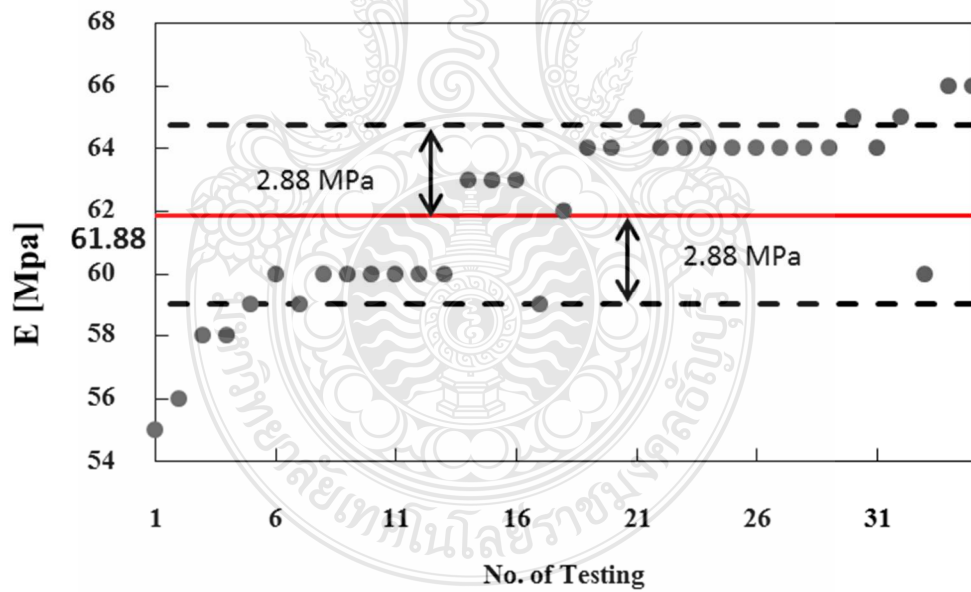
รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแองการยวบตัวในรูปสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

4.2 ผลการวิเคราะห์โมดูลัสพื้นผิวจากเครื่อง LWD

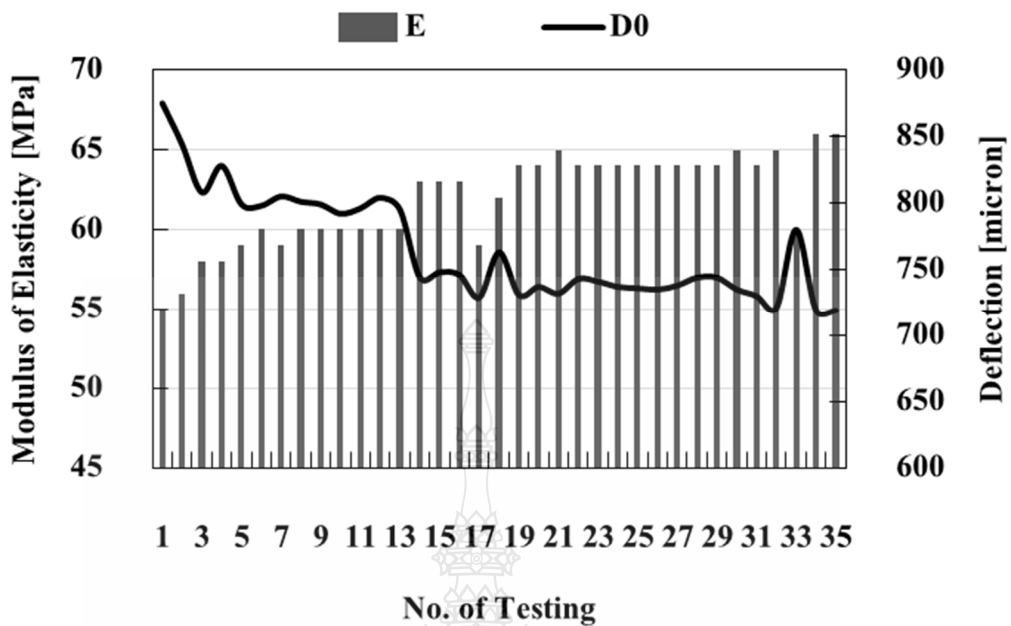
จากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD พบว่าค่าโมดูลัสพื้นผิวดินลูกรังถมจากการทดสอบ 4 ตำแหน่ง 16 ชุดทดสอบ ได้ค่าโมดูลัสพื้นผิวดินลูกรังถมเฉลี่ยเท่ากับ 33.75 เมกะปาสกาล ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 9.79 เมกะปาสกาล ดังรูปที่ 4.6 เมื่อนำผลของค่าโมดูลัสที่ผิวพื้นทางดินซีเมนต์จากแปลงทดสอบพื้นทางดินซีเมนต์วิธีการทดสอบ Superpos-Def มาวิเคราะห์พบว่าจากรูปที่ 4.7 วิธีการทดสอบดังกล่าวให้ค่าโมดูลัสพื้นผิวทางดินซีเมนต์เฉลี่ยเท่ากับ 61.88 เมกะปาสกาล ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.88 เมกะปาสกาล จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสจะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดอันเนื่องมาจากปัญหาจากวิธีการทดสอบ Superpos-Def ที่ได้รับอิทธิพลมาจากเสถียรภาพของชั้นดิน การให้น้ำหนักจากคัมกระแทกกระทำซ้ำๆ ที่ตำแหน่ง D_0 มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการยวบตัวที่วัดได้เกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางต่ำลง ซึ่งแปรผกผันกับความแข็งแรงที่ได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.6 ค่าโมดูลัสผิวดินลูกรังถมเฉลี่ย



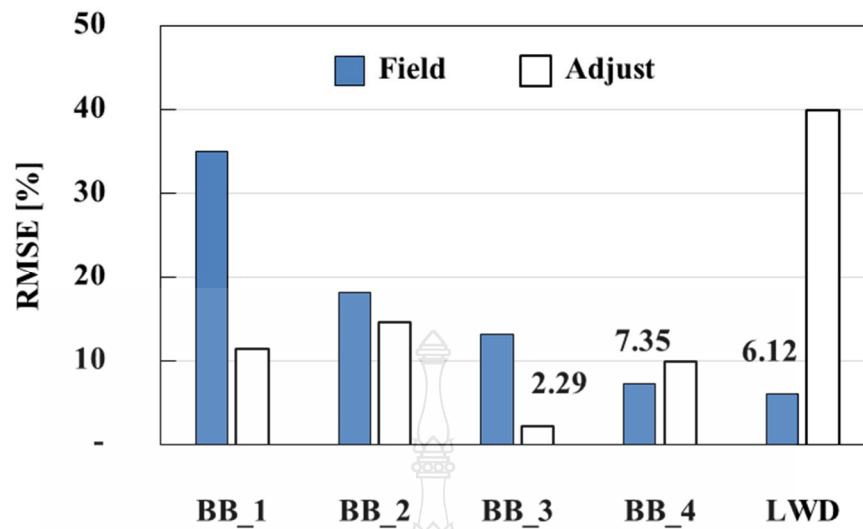
รูปที่ 4.7 ค่าโมดูลัสผิวพื้นทางดินซีเมนต์เฉลี่ย



รูปที่ 4.8 ค่าการยุบตัวและ โมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนครั้งทดสอบ

4.3 ผลการคำนวณย้อนกลับหาค่าความแข็งแรง

จากผลการทดสอบค่าแองการยุบตัวจากเครื่อง BB ด้วยวิธี FWD-Sim และเครื่อง LWD ด้วยวิธี Superpos-Def คำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม GAMLET 308 ด้วยชุดพารามิเตอร์จากงานศึกษาของจักรพงษ์ [9] ในเทอมของค่า *RMSE* แสดงดังรูปที่ 4.9 โดยค่าประกอบไปด้วยข้อมูล 2 ส่วน ได้แก่ กรณีค่าแองการยุบตัวโดยตรงจากในสนาม และกรณีจากการวิเคราะห์ถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล จากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการปรับแก้ค่าแองการยุบตัวด้วยสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลทำให้ค่า *RMSE* มีทั้งเพิ่มสูงขึ้นและลดลงมีเพียงชุดข้อมูลจากการทดสอบด้วยเครื่อง BB ที่สถานีทดสอบที่ 3 เท่านั้นที่แสดงค่า *RMSE* ที่ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 2.29 และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งโครงการ LTPP (Long Term Pavement Performance) ประเทศสหรัฐอเมริกาที่กำหนดให้ค่า *RMSE* อยู่ระหว่างร้อยละ 1 ถึง 3 ในขณะที่ค่า *RMSE* กรณีไม่ได้ปรับแก้ค่าแองการยุบตัวพบว่าเป็นสถานีทดสอบที่ 4 ให้ค่า *RMSE* ต่ำสุด ซึ่งเท่ากับร้อยละ 7.35 เท่านั้น ในขณะที่ผลจากเครื่อง LWD สามารถให้ค่า *RMSE* ได้ต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 6.12



รูปที่ 4.9 ค่า *RMSE* จากผลทดสอบด้วย BB และ LWD

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลของค่าโมดูลัสชั้นทางที่ได้จากระบวนการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ค่าแอมป์การยุบตัวจากเครื่อง BB ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแต่ละชั้นทางแสดงความไม่สอดคล้องของลักษณะทางกายภาพของแปลงทดสอบ และผลการทดสอบอื่นๆเช่น การทดสอบความแข็งแรงที่ผิวโดยตรงจากเครื่อง LWD เป็นต้น ดังแสดงให้เห็นถึงความผิดปกติในสถานีทดสอบที่ 3 ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นพื้นทางคินซีเมนต์ (E_1) ควรมีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในชั้นดินลูกรังถม (E_2) และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินเดิมอัดแน่น (E_3) ควรมีค่าสูงขึ้นไปกว่าชั้นดินลูกรังถม

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางจากการทดสอบด้วยเครื่อง BB ด้วยค่าแอมป์การยุบตัวโดยตรงจากในสนาม

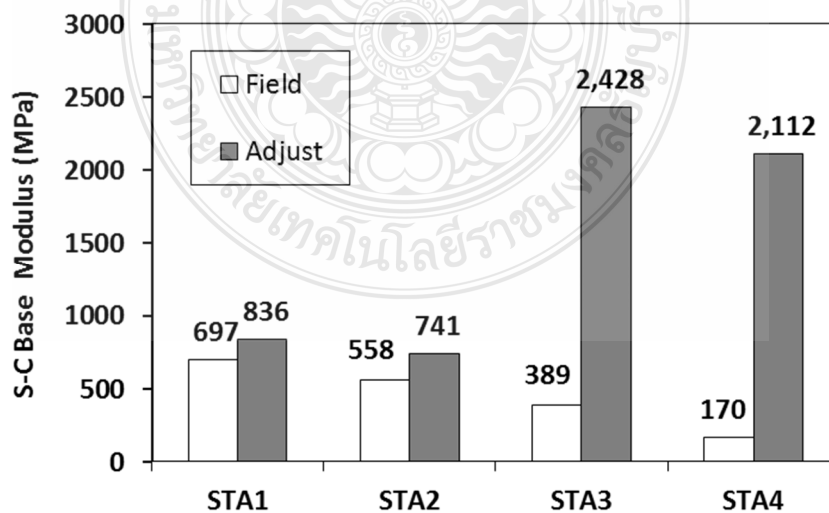
Layer Moduli	STA1	STA2	STA3	STA4
E1	697	558	389	170
E2	24	35	126	132
E3	177	166	86	174
RMSE	35.11	18.09	13.20	7.35

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงข้อมูลความแข็งแรงของแต่ละชั้นทางจากกระบวนการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ค่าแองการยูปตัวที่ปรับแก้ด้วยสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลพบว่า ในแปลงทดสอบสถานีทดสอบที่ 3 ที่แสดงค่า *RMSE* อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้มีความไม่สอดคล้องในเชิงลักษณะทางกายภาพของแต่ละชั้นทาง

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางจากการทดสอบด้วยเครื่อง BB ด้วยค่าแองการยูปตัวจากการปรับแก้ด้วยสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

Layer Moduli	STA1	STA2	STA3	STA4
E1	836	741	2428	2112
E2	38	61	185	67
E3	77	95	53	167
RMSE	11.49	14.57	2.29	9.88

จากรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพื้นทางดินซีเมนต์จากการคำนวณย้อนกลับด้วยแองการยูปตัวจากเครื่อง BB ก่อนและหลังการปรับแก้ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความแข็งแรงของพื้นทางดินซีเมนต์เมื่อปรับแก้ด้วยสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกลับเพิ่มสูงขึ้นในทุกชุดข้อมูลทดสอบ ทำให้สรุปได้ว่าวิธีการทดสอบด้วยเครื่อง BB และการปรับแก้ค่าแองการยูปตัวด้วยสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลมีความไม่เหมาะสมกับการทดสอบพื้นทางดินซีเมนต์



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบความแข็งแรงของพื้นทางดินซีเมนต์จากเครื่อง BB

ในขณะที่ผลการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ค่าแอมการยวบตัวจากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD ดังตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาผลลัพธ์จากกระบวนการดังกล่าวร่วมกับผลจากการทดสอบหาค่าเฉลี่ย โมดูลัสผิวดินลูกรังถมจากรูปที่ 4.6 พบว่าแนวโน้มของค่าโมดูลัสของชั้นดินลูกรังถมที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับทั้งหมดมีค่าสอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกันกับค่าโมดูลัสผิวดินลูกรังถม นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาจากผลค่าเฉลี่ยโมดูลัสผิวพื้นทางดินซีเมนต์จากวิธี Superpos-Def ดังรูปที่ 4.7 พบว่ามีความใกล้เคียงกับค่าโมดูลัสยึดหยุ่นของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์จากการคำนวณย้อนกลับด้วยค่าแอมการยวบตัวโดยตรง ซึ่งให้ค่า *RMSE* ต่ำกว่าการทดสอบด้วยเครื่อง BB แม้ว่าจะต้องพบกับปัญหาเสถียรภาพของดินขณะทดสอบด้วยวิธี Superpos-Def

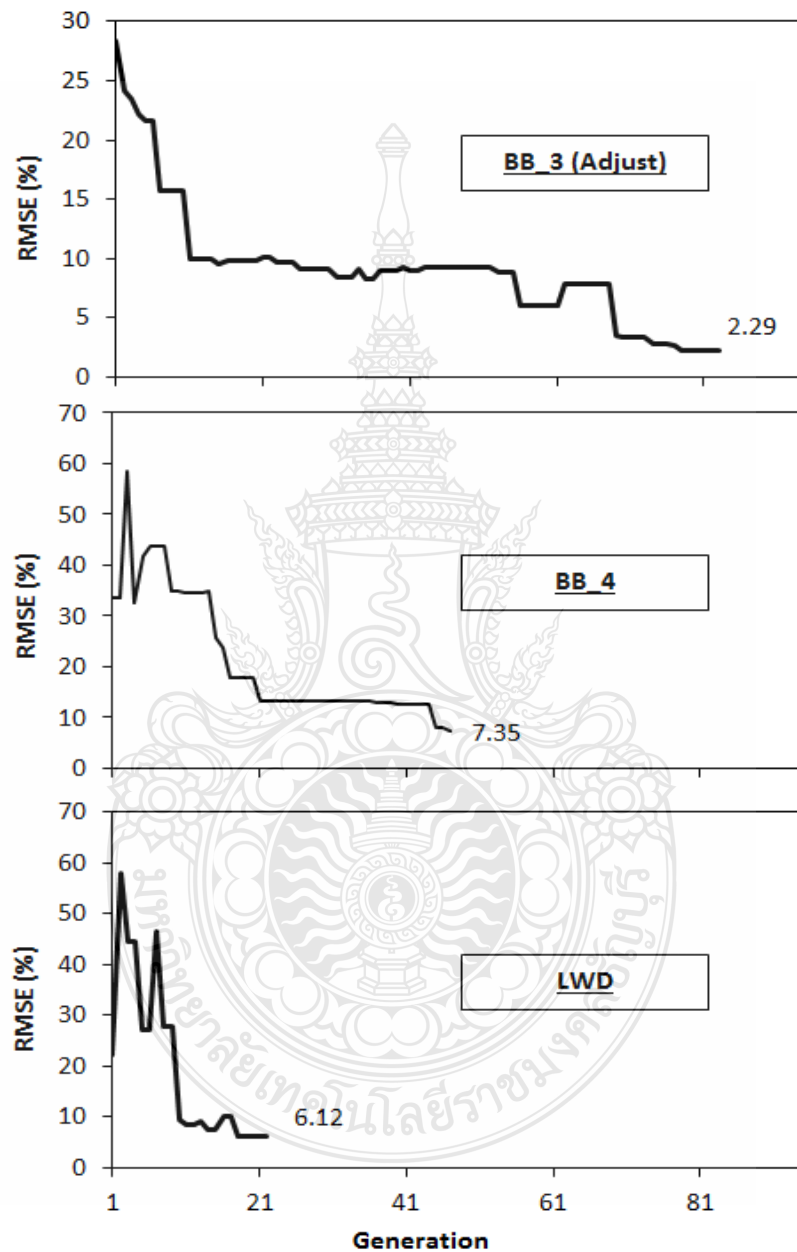
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางจากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD

Layer Moduli	Field	Exponential
E1	123	469
E2	28	28
E3	141	172
RMSE	6.12	28.81

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลค่าเฉลี่ยโมดูลัสผิวดินลูกรังถมและค่าเฉลี่ยโมดูลัสผิวพื้นทางดินซีเมนต์ พบว่าค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบค่าการยวบตัวที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงของแต่ละชั้นทางที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับด้วยแอมการยวบตัวจาก LWD ด้วยวิธี Superpos-Def แสดงให้เห็นว่ากระบวนการคำนวณย้อนกลับสามารถแสดงแนวโน้มของความแข็งแรงแต่ละชั้นทางได้ดีกว่าการทดสอบค่าความแข็งแรงที่ผิวชั้นทางโดยตรง

ทั้งนี้จากกระบวนการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดพารามิเตอร์จำนวน 100 รุ่น พบว่าผลของค่า *RMSE* ที่ดีที่สุดจากกรณีการทดสอบด้วย BB, การทดสอบด้วย BB พร้อมปรับแก้ด้วยสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และการทดสอบด้วย LWD ดังรูปที่ 4.11 สามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในการทดสอบด้วย LWD วิธี Superpos-Def ที่พบคำตอบในจำนวนรุ่นที่ 22 เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการหาคำตอบของค่าโมดูลัสชั้นทางจากเครื่อง LWD มีความเหมาะสมในการประเมินและวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ นอกจากนี้ยังพบว่าผลการทดสอบด้วย BB ยังคงแสดงพฤติกรรมตอบสนองของโครงสร้างชั้นทางโดยเฉพาะพื้นทางดินซีเมนต์ได้ดีกว่าการทดสอบด้วยวิธีหากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ซึ่งผลที่

ได้จากแท่งตัวอย่างไม่ได้เกิดจากสภาพที่แท้จริงจากในสนาม และพฤติกรรมการรับแรงของดิน
 ซึ่เมนต์ยังไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบในสนามด้วย
 เครื่อง BB และ LWD



รูปที่ 4.11 ค่า $RMSE$ ที่ดีที่สุดจากการทดสอบด้วยเครื่องเบนเคลแมนบีมและเครื่องตุ้มกระแทกแบบ
 เปา

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเพื่อประเมินความแข็งแรงของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ด้วยเครื่องมือ BB และ LWD ในงานวิจัยนี้ ทีมวิจัยได้ทดลองวิธีวัดค่าแอมการยุบตัวแบบใหม่ เรียกว่า Superposition in deflection หรือ “Superpos-Def” และวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยใช้โปรแกรม GAMLET308 ที่อาศัยชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากงานศึกษาในอดีต จากผลการทดสอบหาค่าแอมการยุบตัวในแปลงทดสอบพื้นทางดินซีเมนต์ด้วยเครื่องมือ BB และ LWD แสดงให้เห็นว่าการปรับแก้ค่าแอมการยุบตัวด้วยสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเพิ่มสูงขึ้นและลดลงได้ โดยพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองที่น้อยกว่าร้อยละ 3 ในการทดสอบด้วยเครื่องมือ BB แสดงความผิดปกติของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในแต่ละชั้นทางไม่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างชั้นทาง แม้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวและระยะตามแนวรัศมีในรูปของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 มากกว่า 0.9 ก็ตาม

เมื่อพิจารณาการทดสอบหาค่าแอมการยุบตัวจากเครื่อง LWD ด้วยวิธี Superpos-Def แม้ว่าจะเกิดปัญหาของเสถียรภาพของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์จากกระบวนการทดสอบด้วยน้ำหนักกระแทกที่ตำแหน่งเดิมซ้ำๆ แต่พบว่าวิธีดังกล่าวยังคงมีข้อดีหลายประการ โดยที่วิธี Superpos-Def สามารถแก้ปัญหาการมีอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวน้อย ทำให้ยังคงสามารถหาค่าแอมการยุบตัวได้เช่นเดียวกับ การทดสอบด้วยเครื่อง BB วิธี FWD-Sim รวมถึงการทดสอบด้วยเครื่อง FWD และยังให้ผลการคำนวณย้อนกลับอยู่ในระดับที่ดีกว่าการทดสอบด้วยเครื่องมือ BB โดยค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองลดลงเหลือเพียงร้อยละ 6 ซึ่งยังสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างชั้นทาง ทั้งนี้ กระบวนการคำนวณย้อนกลับรวมถึงการหาค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางโดยตรงมีความเหมาะสม รวดเร็ว และน่าเชื่อถือกว่าการทดสอบด้วยวิธีการแบบทำลาย ซึ่งอาศัยระยะเวลาในการทดสอบที่ยาวนานกว่า และยังให้ผลการทดสอบที่ไม่สอดคล้องกับสภาวะจริงของโครงสร้าง ณ ขณะเก็บตัวอย่าง ดังนั้นการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง โดยเฉพาะกับพื้นทางดินซีเมนต์ควรทำการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย และกระบวนการคำนวณย้อนกลับให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความแข็งแรงของ โครงสร้างพื้นทางผสมซีเมนต์โดยใช้ เครื่องมือเบนเคลแมนบีบควรทำการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับวัดค่าการยุบตัวที่มีความละเอียดในการวัด ค่าสูงติดตั้งเพิ่มเติมตามแนวคานของเครื่อง เพื่อทดแทนการอ่านค่าด้วยนาฬิกาวัด ในขณะที่การ ทดสอบด้วยเครื่อง LWD วิธีการทดสอบแบบ Superpos-Def อาจทำการศึกษาเพิ่มเติมเมื่อ โครงสร้าง พื้นทางผสมซีเมนต์มีการพัฒนากำลังอย่างเต็มที่ เพื่อสังเกตการลดลงของผลกระทบจากเสถียรภาพ ของดินเมื่อทดสอบด้วยค้อนน้ำหนักกระแทกที่บริเวณตำแหน่งเดิมซ้ำกันเป็นระยะเวลาานาน



บรรณานุกรม

- [1] จิรพัฒน์ โชติกไกร, การออกแบบทาง, พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549.
- [2] ชีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสถิตย์พงษ์ อภิเมธีธารง. “รายงานวิจัยการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างถนนลาดยางที่มีดินซีเมนต์ปลอครอยแตกเป็นพื้นทางกับถนนลาดยางที่มีหินคลุกเป็นพื้นทางและวัสดุมวลรวมเป็นรองพื้นทาง,” รายงานฉบับที่ วพ.169, 2541.
- [3] กลุ่มงานตรวจสอบและแนะนำวัสดุสร้างทาง. “การออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์,” 2557.
- [4] De Jong, K.A. and Spears, W.M. “An Analysis of the Interacting Roles Population Size and Crossover in Genetic Algorithms,” Parallel Problem Solving from Nature (Electronic), vol. 16, 1990, pp. 38- 47, Available: CiteSeerX (20 September 2013).
- [5] Goldberg, D. E. , Deb, K. and Clark, J. H. “ Genetic algorithms noise, and the sizing of populations”, in Complex Systems 6, 1992, pp. 333-362.
- [6] พุทธิพล ทองอินทร์ดำ, และ นิรชร นกแก้ว. การพัฒนาระบบตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางในท้องถิ่นโดยวิธีตรง, ปทุมธานี: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2553.
- [7] พุทธิพล ทองอินทร์ดำ. “วิศวกรรมงานทางแบบบูรณาการในการประเมินสภาพถนนลาดยางไทยแบบมีชีวิต.” วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม, 14, นน. 43.56, มกราคม-มิถุนายน 2556.
- [8] กรมทางหลวง. มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base). กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ, 2556.
- [9] จักรพงษ์ นามหาไชย. “การเลือกชุดพารามิเตอร์สำหรับระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีต,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2556.
- [10] Mitchell, J.K. and El Jack, S. A. (1966). The fabric of soil-cement and its formation. Proceedings of 14th National Conference Clay and Clay Minerals. 26: 297-305.
- [11] เรวัชชัย รอดเจริญ, “การศึกษาพฤติกรรมของดินลูกรังทรายที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ซีเมนต์,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] ขวลิต ชูสุวรรณ, “การเปลี่ยนแปลงปริมาณของวัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยคินซีเมนต์เมื่อผ่านกระบวนการบ่มแห้งสลับเปียก,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [13] Tom Scullion, “Pre – Cracking of Soil – Cement Base to Reduce Reflection Cracking” , Transportation Research Board, Washington, D.C., 2001
- [14] Benkelman Beam (online), Available: <http://www.impact-test.co.uk> (20 June 2016).
- [15] TML Small FWD system FWD-Light (online), Available: http://www.tml.jp/e/product/special_ins/fwd-light/ (20 June 2016).
- [16] Puttapon. Thongindam. “Enhancement of Backcalculation Techniques for Assessing Flexible Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms,” Ph. D Thesis, Pavement Engineering, Gottfried Wilhelm Leibniz University of Hannover, Hannover, 2009.
- [17] Alkasawneh W. “Backcalculation of Pavement Moduli Using Genetic Algorithms.” Ph.D. Thesis, The University of Akron, Akron. 2007.
- [18] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, Washington D.C.: AASHTO, 1993.
- [19] Fwa, T.F., Tan, C.Y. and Chan, W.T. “Backcalculation analysis of pavement layer moduli using genetic algorithms” , in Transportation Research Board 1570. TRB, National Research Council, Washington DC, 1997, pp. 134-142.
- [20] Kameyama, S., Himeno, K., Kasahara, A. and Maruyama, T. “Backcalculation of pavement layer moduli using genetic algorithms” , in 8th International conference on Asphalt Pavements. University of Washington, Seattle, Washington, 1998, pp. 1375-1385.
- [21] Raddy, M.A., Murthy, M.S., Reddy, K.S. and Pendey, B.B. “Backcalculation of Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms” . in Journal of Highway Research Board 66, 2002, pp. 1.10
- [22] Tsai, B., Kanekanti, V., and Harvey, J.T. “Application of Genetic Algorithm in Asphalt Pavement Design” , in Transportation Research Board, Washington, D.C., 2004, pp. 112-120.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] Park, H.M., Park, S.W. and Hwang, J.J. “Use of Genetic Algorithm and Finite Element for Backcalculating Layer Moduli in Asphalt Pavements” , present at the Transportation Research Board No. 07-2614, Washington D.C. 2006.
- [24] Alkasawneh W. “Backcalculation of Pavement Moduli Using Genetic Algorithms.” Ph.D. Thesis, The University of Akron, Akron. 2007.
- [25] Goldberg, D. E. , Deb, K. and Clark, J.H. “ Genetic algorithms noise, and the sizing of populations”, in Complex Systems 6, 1992, pp. 333-362.
- [26] พิพัฒน์ ทองป่อ, “การพัฒนาเจเนติกอัลกอริทึมส์สำหรับการออกแบบโครงสร้างเสาโทรคมนาคม,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
- [27] ยศ มีอนันต์, “การประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึมส์สำหรับการออกแบบโครงข้อมุน,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.
- [28] A. Benedetto, F. Tosti, L. Di Domenico. “Elliptic model for prediction of deflections induced by a Light Falling Weight Deflectometer”. in Journal of Elsevier Ltd, Volume 49, 2012, pp. 1-12
- [29] Christopher T. Senseney; Richard A. Krahenbuhl; and Michael A. Mooney. “ Genetic Algorithm to Optimize Layer Parameters in Light Weight Deflectometer Backcalculation”. in Journal of International Journal of Geomechanics American Society of Civil Engineers, Volume 13, 2013, pp. 473-476
- [30] Von Quintus, H.L. and Simpson, A.L., *Back-Calculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections, Volume II: Layered Elastic Analysis for Flexible and Rigid*, (Final Report May 1997 – August 2001 FHWA), Virginia: Office of Engineering R&D Federal Highway Administration, 2002.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดสอบจากเครื่องเบนเคลแมนบีมีในแปลงทดสอบ



ตารางที่ ก.1 ค่าการยุบตัวจากการทดสอบ BB ที่อ่านจากมาตรวัดแบบนาฬิกา

STA	Dial Gauge Surface deflection [μm] at a radial distance of [mm]									
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800	MAX
BB_1	0.00	7.00	15.00	28.50	30.00	33.50	34.50	35.00	35.50	36.00
BB_2	0.00	9.50	15.00	22.00	26.00	28.50	29.00	29.50	30.00	30.50
BB_3	0.00	10.00	13.50	17.00	19.00	21.00	21.50	22.00	22.50	25.00
BB_4	0.00	16.00	20.00	22.50	24.50	25.50	26.00	26.50	27.00	27.50

ตารางที่ ก.2 ค่าแองการยุบตัวจากการทดสอบ BB โดยตรงและปรับแก้ด้วยสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

STA	Surface deflection [μm] at a radial distance of [mm]								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
BB_1	1486.8	1197.7	867.3	309.75	247.8	103.25	61.95	41.3	20.65
BB_2	1259.65	867.3	640.15	351.05	185.85	82.6	61.95	41.3	20.65
BB_3	1032.5	619.5	474.95	330.4	247.8	165.2	144.55	123.9	103.25
BB_4	1135.75	474.95	309.75	206.5	123.9	82.6	61.95	41.3	20.65
Exponential Equation Deflection Basin									
BB_1	1361.6	912.71	747.26	553.59	410.11	225.07	123.52	67.79	37.2
BB_2	1070.1	717.31	587.28	435.07	322.31	176.89	97.08	53.28	29.24
BB_3	687.67	563.02	509.44	438.48	377.4	279.59	207.12	153.44	113.67
BB_4	638.09	427.72	350.19	259.43	192.19	105.48	57.89	31.77	17.43

ตารางที่ ก.3 ค่าสัมประสิทธิ์จากการปรับแก้ค่าแองการยุบตัวสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

STA	A	B	R-Square
BB_1	1361.6	-0.002	0.9653
BB_2	1070.1	-0.002	0.9652
BB_3	687.67	-0.001	0.8961
BB_4	638.09	-0.002	0.9404



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบ LWD ในแปลงทดสอบ

ตารางที่ ข.1 ค่าการยุบตัวจากการทดสอบ LWD ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Superpos-Def

No.	P ₀	D ₀	K	E	D ₁
	[N]	[micron]	[kPa/mm]	[Mpa]	[micron]
1	11715	875	189	55	400
2	11698	844	196	56	382
3	11512	808	202	58	370
4	11752	828	201	58	378
5	11578	799	205	59	292
6	11703	798	207	60	257
7	11737	805	206	59	256
8	11770	801	208	60	257
9	11809	799	209	60	255
10	11757	792	210	60	121
11	11781	796	209	60	119
12	11790	804	207	60	119
13	11724	795	209	60	118
14	11479	744	218	63	62
15	11615	748	220	63	63
16	11521	746	218	63	62
17	10550	729	205	59	62
18	11608	763	215	62	68
19	11450	731	222	64	18
20	11655	737	224	64	19
21	11666	732	225	65	18
22	11639	743	222	64	18
23	11608	741	222	64	14
24	11556	737	222	64	14
25	11629	736	224	64	12
26	11490	735	221	64	13
27	11597	738	222	64	13
28	11644	744	221	64	13
29	11635	744	221	64	14
30	11640	735	224	65	13
31	11419	730	221	64	5
32	11536	721	226	65	8
33	11562	780	210	60	11
34	11676	719	230	66	8
35	11628	719	229	66	6

ตารางที่ ข.2 ค่าการยุบตัวจากการทดสอบ LWD ในชั้นดินเดิม

No.	P_0 [N]	D_0 [micron]	K [kPa/mm]	E [Mpa]
1	4571	3.312	59	17
2	5114	1.722	126	36
3	5271	1.459	153	44
4	5360	1.423	160	46
5	5347	1.557	146	42
6	5443	1.418	163	47
7	5499	1.333	175	50
8	4686	2.137	93	27
9	4863	1.943	106	31
10	4955	1.832	115	33
11	5039	1.697	126	36
12	4524	2.67	72	21
13	4747	2.335	86	25
14	4871	2.236	92	27
15	4916	2.139	98	28
16	5054	2.027	106	30

ตารางที่ ข.3 ค่าแอมการยุบตัวจากเครื่อง LWD

STA	Surface deflection [μm] at a radial distance of [mm]								
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
LWD	766.27	382.50	263.40	119.25	63.40	18.25	13.33	13.20	7.00
Exponential Equation Defection Basin									
LWD	470.83	258.4	191.43	122.06	77.83	31.64	12.86	5.23	2.13

ตารางที่ ข.4 ค่าสัมประสิทธิ์จากการปรับแก้ค่าแอมการยุบตัวสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

STA	A	B	R-Square
LWD	470.83	-0.003	0.9154



ภาคผนวก ค
ผลการคำนวณย้อนกลับ



ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทาง จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB และเครื่อง LWD

0	Ae ^{Bx}		Backcalculation							
			Field				Exponential Equation			
	A	B	RMSE	E1	E2	E3	RMSE	E1	E2	E3
BB_1	1361.6	-0.002	35.11	697	24	177	11.49	836	38	77
BB_2	1070.1	-0.002	18.09	558	35	166	14.57	741	61	95
BB_3	687.67	-0.001	13.2	389	126	86	2.29	2428	185	53
BB_4	638.09	-0.002	7.35	170	132	174	9.88	2112	67	167
LWD	470.83	-0.003	6.12	123	28	141	28.81	469	28	172



ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 1

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
1	40	0	0	-73.86	45.92	6650	55	189
2	80	0	0	-73.86	45.92	6650	55	189
3	120	0	0	-94.68	50.86	4716	15	529
4	160	0	0.00001	-98.27	56.69	1481	12	202
5	200	0	0.00001	-98.27	56.69	1481	12	202
6	240	0	0.00001	-98.27	56.69	1481	12	202
7	280	0	0.00001	-98.27	56.69	1481	12	202
8	320	0	0.00001	-70.41	39.87	760	22	189
9	360	0	0.00001	-61.86	35.11	697	24	177
10	400	0	0.00001	-72.39	40.42	695	22	190
11	440	0	0.00002	-92.57	50.25	512	22	237
12	480	0	0.00002	-77.88	42.6	569	22	197
13	520	0	0.00002	-77.88	42.6	569	22	197
14	560	0	0.00002	-77.88	42.6	569	22	197
15	600	0.00001	0.00002	-77.88	42.6	569	22	197
16	640	0.00001	0.00002	-77.88	42.6	569	22	197
17	680	0.00001	0.00002	-92.91	50.4	508	21	229
18	720	0.00001	0.00002	-72.23	39.62	502	23	188
19	760	0.00001	0.00002	-87.92	47.79	537	21	215
20	800	0.00001	0.00002	-64.68	36.14	502	23	173
21	840	0.00001	0.00002	-65.22	36.38	502	23	174
22	880	0.00001	0.00002	-65.22	36.38	502	23	174
23	920	0.00001	0.00002	-86.53	47.5	582	20	206
24	960	0.00001	0.00002	-86.53	47.5	582	20	206
25	1000	0.00001	0.00002	-86.53	47.5	582	20	206

ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 1 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
26	1040	0.00001	0.00002	-86.53	47.5	582	20	206
27	1080	0.00001	0.00002	-86.53	47.5	582	20	206
28	1120	0.00001	0.00002	-86.53	47.5	582	20	206
29	1160	0.00001	0.00002	-86.53	47.5	582	20	206
30	1200	0	0.00002	-86.53	47.5	582	20	206
31	1240	0	0.00002	-86.53	47.5	582	20	206
32	1280	0	0.00002	-86.13	47.32	582	20	205
33	1320	0.00001	0.00002	-86.13	47.32	582	20	205
34	1360	0.00001	0.00002	-86.13	47.32	582	20	205
35	1400	0.00001	0.00002	-86.13	47.32	582	20	205
36	1440	0.00001	0.00002	-86.13	47.32	582	20	205
37	1480	0.00001	0.00002	-86.13	47.32	582	20	205
38	1520	0.00001	0.00002	-86.13	47.32	582	20	205
39	1560	0.00001	0.00002	-86.13	47.32	582	20	205
40	1600	0.00001	0.00002	-83.99	46.34	587	20	200
41	1640	0.00001	0.00002	-83.99	46.34	587	20	200
42	1680	0.00001	0.00002	-83.99	46.34	587	20	200
43	1720	0.00001	0.00002	-83.99	46.34	587	20	200
44	1760	0.00001	0.00002	-83.97	46.33	588	20	200
45	1800	0.00001	0.00002	-83.97	46.33	588	20	200
46	1840	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203
47	1880	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203
48	1920	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203
49	1960	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203
50	2000	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203

ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 1 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
51	2040	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203
52	2080	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203
53	2120	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203
54	2160	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203
55	2200	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203
56	2240	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203
57	2280	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203
58	2320	0.00001	0.00002	-85.27	46.92	585	20	203
59	2360	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
60	2400	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
61	2440	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
62	2480	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
63	2520	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
64	2560	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
65	2600	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
66	2640	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
67	2680	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
68	2720	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
69	2760	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
70	2800	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
71	2840	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
72	2880	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
73	2920	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
74	2960	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
75	3000	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202

ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 1 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
76	3040	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
77	3080	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
78	3120	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
79	3160	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
80	3200	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
81	3240	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
82	3280	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
83	3320	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
84	3360	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
85	3400	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
86	3440	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
87	3480	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
88	3520	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
89	3560	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
90	3600	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
91	3640	0.00001	0.00002	-84.86	46.73	585	20	202
92	3680	0.00001	0.00002	-84.84	46.73	586	20	202
93	3720	0.00001	0.00002	-84.84	46.73	586	20	202
94	3760	0.00001	0.00002	-84.84	46.73	586	20	202
95	3800	0.00001	0.00002	-84.84	46.73	586	20	202
96	3840	0.00001	0.00002	-84.84	46.73	586	20	202
97	3880	0.00001	0.00002	-84.84	46.73	586	20	202
98	3920	0.00001	0.00002	-84.84	46.73	586	20	202
99	3960	0.00001	0.00002	-84.84	46.73	586	20	202
100	4000	0.00001	0.00002	-84.84	46.73	586	20	202

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 2

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
1	40	0.00001	0.0001	-56.74	27.65	581	35	198
2	80	0.00002	0.00028	-61.69	29.74	581	31	198
3	120	0.00004	0.00028	-61.69	29.74	581	31	198
4	160	0.00007	0.00037	-40.78	18.13	586	35	166
5	200	0.00009	0.00037	-40.78	18.13	586	35	166
6	240	0.00008	0.00037	-40.78	18.13	586	35	166
7	280	0.00009	0.00037	-40.78	18.13	586	35	166
8	320	0.00009	0.00037	-40.78	18.13	586	35	166
9	360	0.0001	0.00037	-40.78	18.13	586	35	166
10	400	0.00008	0.00037	-40.78	18.13	586	35	166
11	440	0.00009	0.00038	-41.39	18.42	581	35	167
12	480	0.00008	0.00044	-41.91	18.78	586	34	166
13	520	0.00011	0.00044	-41.91	18.78	585	34	166
14	560	0.00011	0.00044	-41.91	18.78	585	34	166
15	600	0.00009	0.00044	-42.51	19.07	584	34	167
16	640	0.00011	0.00044	-42.51	19.07	584	34	167
17	680	0.00013	0.00044	-42.51	19.07	584	34	167
18	720	0.00013	0.00044	-42.51	19.07	584	34	167
19	760	0.00014	0.00044	-42.51	19.07	584	34	167
20	800	0.00014	0.00044	-42.51	19.07	584	34	167
21	840	0.00013	0.00044	-42.51	19.07	584	34	167
22	880	0.00012	0.00044	-42.51	19.07	584	34	167
23	920	0.00013	0.00044	-42.51	19.07	584	34	167
24	960	0.00016	0.00044	-42.51	19.07	584	34	167
25	1000	0.00015	0.00044	-42.51	19.07	584	34	167

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 2 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
26	1040	0.0002	0.00044	-42.51	19.07	584	34	167
27	1080	0.00021	0.00044	-42.52	19.07	582	34	167
28	1120	0.00018	0.00044	-42.52	19.07	581	34	167
29	1160	0.00022	0.00044	-42.52	19.07	581	34	167
30	1200	0.00022	0.00044	-42.52	19.07	581	34	167
31	1240	0.00022	0.00044	-42.52	19.07	581	34	167
32	1280	0.00023	0.00044	-42.52	19.07	581	34	167
33	1320	0.00022	0.00044	-42.52	19.07	581	34	167
34	1360	0.00021	0.00044	-42.52	19.07	581	34	167
35	1400	0.00025	0.00044	-42.52	19.07	581	34	167
36	1440	0.00025	0.00044	-42.52	19.07	581	34	167
37	1480	0.00024	0.00044	-42.52	19.07	581	34	167
38	1520	0.00023	0.00044	-42.52	19.07	581	34	167
39	1560	0.00019	0.00044	-42.52	19.07	581	34	167
40	1600	0.00021	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
41	1640	0.00021	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
42	1680	0.00018	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
43	1720	0.00021	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
44	1760	0.0002	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
45	1800	0.0002	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
46	1840	0.00023	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
47	1880	0.00021	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
48	1920	0.0002	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
49	1960	0.00019	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
50	2000	0.0002	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 2 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
51	2040	0.00022	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
52	2080	0.00022	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
53	2120	0.00021	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
54	2160	0.00022	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
55	2200	0.00024	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
56	2240	0.00027	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
57	2280	0.00023	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
58	2320	0.00029	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
59	2360	0.00032	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
60	2400	0.00029	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
61	2440	0.00028	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
62	2480	0.00032	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
63	2520	0.00027	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
64	2560	0.00022	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
65	2600	0.00024	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
66	2640	0.00022	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
67	2680	0.00025	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
68	2720	0.00023	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
69	2760	0.00027	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
70	2800	0.00022	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
71	2840	0.00025	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
72	2880	0.0002	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
73	2920	0.00023	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
74	2960	0.00022	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
75	3000	0.0002	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 2 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
76	3040	0.00024	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
77	3080	0.00026	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
78	3120	0.00023	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
79	3160	0.00018	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
80	3200	0.00022	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
81	3240	0.00025	0.00044	-43.11	19.36	581	34	168
82	3280	0.00023	0.00044	-43.11	19.36	580	34	168
83	3320	0.00019	0.00044	-43.11	19.36	580	34	168
84	3360	0.00019	0.00044	-43.11	19.36	580	34	168
85	3400	0.00021	0.00044	-43.11	19.36	580	34	168
86	3440	0.00021	0.00044	-43.11	19.36	580	34	168
87	3480	0.00021	0.00044	-43.11	19.36	580	34	168
88	3520	0.00021	0.00044	-43.11	19.36	580	34	168
89	3560	0.0002	0.00044	-43.11	19.36	580	34	168
90	3600	0.00015	0.00044	-43.11	19.36	580	34	168
91	3640	0.00011	0.00044	-43.11	19.36	580	34	168
92	3680	0.00013	0.00044	-43.11	19.36	580	34	168
93	3720	0.00013	0.00044	-43.11	19.36	580	34	168
94	3760	0.00015	0.00045	-40.84	18.09	558	35	166
95	3800	0.00018	0.00045	-40.84	18.09	558	35	166
96	3840	0.0002	0.00045	-40.84	18.09	558	35	166
97	3880	0.0002	0.00045	-40.84	18.09	558	35	166
98	3920	0.00018	0.00045	-40.84	18.09	558	35	166
99	3960	0.00018	0.00045	-40.84	18.09	558	35	166
100	4000	0.00021	0.00045	-40.84	18.09	558	35	166

ตารางที่ ค.4 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 3

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
1	40	0.00001	0.00002	-70.19	42.15	577	66	171
2	80	0.00001	0.00002	-70.19	42.15	577	66	171
3	120	0.00001	0.00002	-69.88	41.73	577	65	169
4	160	0.00001	0.00002	-69.88	41.73	577	65	169
5	200	0.00001	0.00002	-69.88	41.73	577	65	169
6	240	0.00001	0.00002	-69.88	41.73	577	65	169
7	280	0.00001	0.00003	-69.3	40.91	565	62	165
8	320	0.00002	0.00004	-60.76	33.51	577	67	135
9	360	0.00002	0.00004	-60.76	33.51	577	67	135
10	400	0.00002	0.00004	-60.76	33.51	577	67	135
11	440	0.00002	0.00004	-60.76	33.51	577	67	135
12	480	0.00003	0.00004	-60.76	33.52	573	67	135
13	520	0.00003	0.00004	-60.76	33.52	573	67	135
14	560	0.00003	0.00004	-60.76	33.52	573	67	135
15	600	0.00003	0.00005	-60.51	33.32	563	66	134
16	640	0.00003	0.00005	-60.31	33.21	561	68	134
17	680	0.00003	0.00005	-59.97	32.92	563	68	133
18	720	0.00003	0.00005	-59.96	32.93	558	68	133
19	760	0.00003	0.00005	-59.96	32.93	558	68	133
20	800	0.00003	0.00005	-59.96	32.93	558	68	133
21	840	0.00003	0.00005	-59.96	32.93	558	68	133
22	880	0.00003	0.00005	-59.96	32.93	558	68	133
23	920	0.00003	0.00005	-59.96	32.93	558	68	133
24	960	0.00003	0.00005	-59.62	32.64	559	68	132
25	1000	0.00003	0.00005	-59.62	32.64	559	68	132

ตารางที่ ค.4 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 3 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
26	1040	0.00002	0.00005	-58.92	32.05	565	68	130
27	1080	0.00002	0.00005	-57.27	30.92	522	69	126
28	1120	0.00002	0.00005	-58.31	31.85	521	74	130
29	1160	0.00002	0.00005	-58.31	31.85	521	74	130
30	1200	0.00002	0.00005	-58.31	31.85	521	74	130
31	1240	0.00002	0.00005	-58.31	31.85	521	74	130
32	1280	0.00002	0.00005	-58.31	31.85	521	74	130
33	1320	0.00002	0.00005	-58.31	31.85	521	74	130
34	1360	0.00002	0.00011	-40.85	19.23	528	96	98
35	1400	0.00002	0.00011	-38.49	17.83	528	100	95
36	1440	0.00003	0.00011	-34.68	16.15	519	100	90
37	1480	0.00002	0.00011	-34.68	16.15	519	100	90
38	1520	0.00002	0.00011	-34.68	16.15	517	100	90
39	1560	0.00003	0.00011	-34.68	16.15	517	100	90
40	1600	0.00003	0.00011	-35.54	16.53	519	99	91
41	1640	0.00003	0.00011	-35.54	16.53	519	99	91
42	1680	0.00004	0.00011	-35.54	16.53	519	99	91
43	1720	0.00004	0.00011	-35.54	16.53	519	99	91
44	1760	0.00004	0.00011	-35.54	16.53	519	99	91
45	1800	0.00006	0.00011	-35.54	16.53	519	99	91
46	1840	0.00006	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92
47	1880	0.00006	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92
48	1920	0.00006	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92
49	1960	0.00006	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92
50	2000	0.00007	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92

ตารางที่ ค.4 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 3 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
51	2040	0.00007	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92
52	2080	0.00006	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92
53	2120	0.00005	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92
54	2160	0.00006	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92
55	2200	0.00006	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92
56	2240	0.00006	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92
57	2280	0.00006	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92
58	2320	0.00006	0.00012	-36.19	16.67	518	101	92
59	2360	0.00004	0.00012	-37.58	17.27	503	103	94
60	2400	0.00005	0.00012	-37.58	17.27	503	103	94
61	2440	0.00005	0.00012	-37.58	17.27	503	103	94
62	2480	0.00004	0.00012	-37.58	17.27	503	103	94
63	2520	0.00004	0.00012	-37.58	17.27	503	103	94
64	2560	0.00005	0.00012	-37.58	17.27	503	103	94
65	2600	0.00004	0.00012	-37.58	17.27	503	103	94
66	2640	0.00004	0.00015	-36.86	16.96	408	104	93
67	2680	0.00005	0.00015	-36.86	16.96	408	104	93
68	2720	0.00005	0.00015	-36.86	16.96	408	104	93
69	2760	0.00004	0.00015	-36.86	16.96	408	104	93
70	2800	0.00005	0.00015	-36.86	16.96	408	104	93
71	2840	0.00005	0.00021	-35.71	16.14	391	111	92
72	2880	0.00006	0.00021	-35.69	16.11	407	111	92
73	2920	0.00006	0.00021	-35.69	16.11	407	111	92
74	2960	0.00006	0.00021	-35.69	16.11	407	111	92
75	3000	0.00005	0.00021	-35.69	16.11	407	111	92

ตารางที่ ค.4 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 3 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
76	3040	0.00005	0.00021	-35.69	16.11	407	111	92
77	3080	0.00005	0.00021	-35.69	16.11	407	111	92
78	3120	0.00005	0.00021	-35.47	15.91	412	115	92
79	3160	0.00005	0.00022	-35.47	15.91	407	115	92
80	3200	0.00006	0.00022	-33.83	15.07	412	116	90
81	3240	0.00005	0.00022	-34.69	15.51	408	115	91
82	3280	0.00006	0.00023	-33.83	15.07	408	116	90
83	3320	0.00007	0.00023	-33.83	15.07	408	116	90
84	3360	0.00009	0.00023	-30.99	13.71	407	122	87
85	3400	0.00011	0.00023	-32.96	14.66	406	117	89
86	3440	0.00011	0.00023	-32.86	14.55	406	119	89
87	3480	0.00012	0.00025	-32.94	14.62	390	118	89
88	3520	0.00012	0.00025	-32.94	14.62	390	118	89
89	3560	0.00013	0.00025	-32.94	14.62	390	118	89
90	3600	0.00013	0.00025	-32.73	14.43	392	122	89
91	3640	0.00012	0.00025	-32.73	14.43	392	122	89
92	3680	0.00012	0.00025	-32.73	14.43	392	122	89
93	3720	0.00012	0.00025	-32.73	14.43	392	122	89
94	3760	0.00012	0.00026	-32.73	14.43	390	122	89
95	3800	0.00013	0.00026	-32.73	14.43	390	122	89
96	3840	0.00012	0.00026	-32.73	14.43	390	122	89
97	3880	0.00012	0.00026	-30	13.25	389	125	86
98	3920	0.00012	0.00026	-29.95	13.2	389	126	86
99	3960	0.00014	0.00026	-29.95	13.2	389	126	86
100	4000	0.00015	0.00026	-29.95	13.2	389	126	86

ตารางที่ ค.5 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 4

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
1	40	0	0.00002	55.23	33.5	390	114	124
2	80	0	0.00002	55.23	33.5	390	114	124
3	120	0.00001	0.00002	-78.96	58.41	138	123	604
4	160	0.00001	0.00004	54.61	32.52	139	373	120
5	200	0.00001	0.00004	-60.02	41.86	138	131	346
6	240	0.00001	0.00004	73.05	43.89	139	371	108
7	280	0.00001	0.00004	73.05	43.89	139	371	108
8	320	0.00001	0.00004	73.05	43.89	139	371	108
9	360	0.00001	0.00006	-58.2	34.78	276	75	287
10	400	0.00001	0.00006	-58.2	34.78	276	75	287
11	440	0.00001	0.00008	-55.59	34.65	209	98	296
12	480	0.00002	0.00001	-56.26	34.7	209	92	296
13	520	0.00002	0.00001	-56.26	34.7	209	92	296
14	560	0.00003	0.00001	-56.5	35.01	192	91	298
15	600	0.00003	0.00013	-42.14	25.63	149	122	245
16	640	0.00004	0.00021	-40.4	23.76	170	118	237
17	680	0.00004	0.00024	-32.67	17.8	182	122	213
18	720	0.00003	0.00024	-32.67	17.8	182	122	213
19	760	0.00004	0.00024	-32.67	17.8	182	122	213
20	800	0.00004	0.00024	-32.67	17.8	182	122	213
21	840	0.00004	0.00038	-26.5	13.3	183	123	197
22	880	0.00003	0.00038	-26.5	13.3	183	123	197
23	920	0.00004	0.00038	-26.5	13.3	183	123	197
24	960	0.00005	0.00038	-26.5	13.3	183	123	197
25	1000	0.00005	0.00038	-26.5	13.3	183	123	197

ตารางที่ ค.5 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 4 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
26	1040	0.00007	0.00056	-26.52	13.35	171	122	197
27	1080	0.00006	0.00056	-26.52	13.35	171	122	197
28	1120	0.00005	0.00056	-26.52	13.35	171	122	197
29	1160	0.00006	0.00056	-26.52	13.35	171	122	197
30	1200	0.00006	0.00056	-26.52	13.35	171	122	197
31	1240	0.00007	0.00056	-26.52	13.35	171	122	197
32	1280	0.00006	0.00056	-26.52	13.35	171	122	197
33	1320	0.00008	0.00058	-26.45	13.31	170	123	197
34	1360	0.00009	0.00062	-26.39	13.28	171	124	197
35	1400	0.0001	0.00062	-26.39	13.28	171	124	197
36	1440	0.00011	0.00062	-26.39	13.28	171	124	197
37	1480	0.00011	0.00063	-25.97	12.99	171	124	196
38	1520	0.00011	0.00063	-25.97	12.99	171	124	196
39	1560	0.00012	0.00063	-25.97	12.99	171	124	196
40	1600	0.00015	0.00063	-25.55	12.71	172	124	195
41	1640	0.00016	0.00063	-25.55	12.71	172	124	195
42	1680	0.00019	0.00063	-25.55	12.71	172	124	195
43	1720	0.00015	0.00063	-25.55	12.71	172	124	195
44	1760	0.00017	0.00063	-25.55	12.71	172	124	195
45	1800	0.00016	0.00075	-17.25	8.11	169	130	178
46	1840	0.00015	0.00075	-17.25	8.11	169	130	178
47	1880	0.0002	0.00075	-15.02	7.35	170	132	174
48	1920	0.00022	0.00081	-18.26	8.51	169	130	180
49	1960	0.00026	0.00083	-16.08	7.61	170	132	176
50	2000	0.00025	0.00094	-18.13	8.4	169	132	180

ตารางที่ ค.5 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 4 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
51	2040	0.00024	0.00094	-18.13	8.4	169	132	180
52	2080	0.00027	0.00094	-18.13	8.4	169	132	180
53	2120	0.00023	0.00095	-18.63	8.63	169	132	181
54	2160	0.00025	0.00095	-18.63	8.63	169	132	181
55	2200	0.00031	0.00095	-18.63	8.63	169	132	181
56	2240	0.00031	0.00095	-18.63	8.63	169	132	181
57	2280	0.00041	0.00095	-18.63	8.63	169	132	181
58	2320	0.00041	0.00095	-18.63	8.63	169	132	181
59	2360	0.00042	0.00095	-18.63	8.63	169	132	181
60	2400	0.00048	0.00095	-18.63	8.63	169	132	181
61	2440	0.00039	0.00095	-18.63	8.63	169	132	181
62	2480	0.00037	0.00095	-18.63	8.63	169	132	181
63	2520	0.00038	0.00095	-18.63	8.63	169	132	181
64	2560	0.00039	0.00095	-18.63	8.63	169	132	181
65	2600	0.00037	0.00096	-18.63	8.64	167	132	181
66	2640	0.00033	0.00096	-18.63	8.64	167	132	181
67	2680	0.00042	0.00096	-18.63	8.64	167	132	181
68	2720	0.00036	0.00096	-18.63	8.64	167	132	181
69	2760	0.00039	0.00096	-18.63	8.64	167	132	181
70	2800	0.00041	0.00096	-18.63	8.64	167	132	181
71	2840	0.00049	0.00103	-19.05	8.84	167	133	182
72	2880	0.00047	0.00103	-19.05	8.84	167	133	182
73	2920	0.00037	0.00103	-19.05	8.84	167	133	182
74	2960	0.00046	0.00103	-19.05	8.84	167	133	182
75	3000	0.00031	0.00103	-19.05	8.84	167	133	182

ตารางที่ ค.5 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
สถานีทดสอบที่ 4 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
76	3040	0.00036	0.00103	-19.05	8.84	167	133	182
77	3080	0.00031	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
78	3120	0.00026	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
79	3160	0.00022	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
80	3200	0.00023	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
81	3240	0.0002	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
82	3280	0.00019	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
83	3320	0.00017	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
84	3360	0.00023	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
85	3400	0.00026	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
86	3440	0.00032	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
87	3480	0.00022	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
88	3520	0.00018	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
89	3560	0.00022	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
90	3600	0.00015	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
91	3640	0.00018	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
92	3680	0.00023	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
93	3720	0.00025	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
94	3760	0.00021	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
95	3800	0.00027	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
96	3840	0.00022	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
97	3880	0.00025	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
98	3920	0.00018	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
99	3960	0.00023	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182
100	4000	0.00026	0.00106	-18.99	8.8	167	134	182

ตารางที่ ค.6 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 1

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
1	40	0	0	-61.21	44.07	309	69	147
2	80	0	0	-60.25	43.25	311	69	144
3	120	0	0.00001	-64.15	42.01	373	46	148
4	160	0	0.00001	-64.15	42.01	373	46	148
5	200	0	0.00001	-64.15	42.01	373	46	148
6	240	0	0.00001	-61.08	39.43	381	46	139
7	280	0	0.00001	-60.53	38.36	309	44	135
8	320	0	0.00001	-60.66	37.87	387	40	135
9	360	0	0.00001	-59.89	37.23	387	40	133
10	400	0	0.00001	-59.89	37.23	387	40	133
11	440	0	0.00001	-59.89	37.23	387	40	133
12	480	0.00001	0.00001	-60.3	37.26	387	38	133
13	520	0.00001	0.00002	-43.32	25.23	507	44	104
14	560	0.00001	0.00002	-43.8	24.95	507	40	104
15	600	0.00001	0.00002	-43.8	24.95	507	40	104
16	640	0.00001	0.00002	-43.8	24.95	507	40	104
17	680	0.00001	0.00002	-43.8	24.95	507	40	104
18	720	0.00001	0.00003	-41.81	23.4	515	39	101
19	760	0.00001	0.00003	-41.81	23.4	515	39	101
20	800	0.00001	0.00004	35.56	13.54	1015	38	72
21	840	0.00001	0.00005	43.12	16.11	962	39	69
22	880	0.00001	0.00006	25.63	11.95	836	40	77
23	920	0.00001	0.00006	25.63	11.95	836	40	77
24	960	0.00001	0.00007	25.81	14.59	512	48	79
25	1000	0.00001	0.00007	25.81	14.59	512	48	79

ตารางที่ ค6 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB
(ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 1 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
26	1040	0.00002	0.00007	24.39	11.49	836	38	77
27	1080	0.00001	0.00008	40.39	16.1	511	49	72
28	1120	0.00001	0.00008	40.39	16.1	511	49	72
29	1160	0.00002	0.00008	24.96	11.77	803	39	77
30	1200	0.00002	0.00008	33.97	14.98	511	49	75
31	1240	0.00002	0.0001	41.61	16.55	499	52	72
32	1280	0.00002	0.0001	41.61	16.55	499	52	72
33	1320	0.00002	0.0001	41.61	16.55	499	52	72
34	1360	0.00003	0.0001	41.61	16.54	500	52	72
35	1400	0.00003	0.0001	41.61	16.54	500	52	72
36	1440	0.00002	0.0001	41.61	16.54	500	52	72
37	1480	0.00002	0.00011	48.66	18.4	516	52	69
38	1520	0.00003	0.00011	48.66	18.4	516	52	69
39	1560	0.00004	0.00011	48.66	18.4	516	52	69
40	1600	0.00003	0.00011	48.66	18.4	516	52	69
41	1640	0.00003	0.00011	41.61	16.49	515	52	72
42	1680	0.00003	0.00011	41.61	16.49	515	52	72
43	1720	0.00003	0.00011	41.61	16.49	515	52	72
44	1760	0.00002	0.00011	41.61	16.49	515	52	72
45	1800	0.00003	0.00011	41.61	16.49	515	52	72
46	1840	0.00004	0.00011	41.61	16.49	515	52	72
47	1880	0.00003	0.00011	41.61	16.48	516	52	72
48	1920	0.00003	0.00011	41.61	16.48	516	52	72
49	1960	0.00003	0.00011	41.61	16.48	516	52	72
50	2000	0.00003	0.00011	48.4	18.68	495	58	70

ตารางที่ ค.6 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 1 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
51	2040	0.00004	0.00011	48.4	18.68	495	58	70
52	2080	0.00004	0.00011	48.4	18.68	495	58	70
53	2120	0.00004	0.00011	48.4	18.68	495	58	70
54	2160	0.00004	0.00011	48.4	18.68	495	58	70
55	2200	0.00004	0.00011	48.4	18.68	495	58	70
56	2240	0.00005	0.00012	51.17	19.53	498	59	69
57	2280	0.00005	0.00013	47.73	18.31	513	56	70
58	2320	0.00005	0.00014	50.16	19.01	513	56	69
59	2360	0.00005	0.00014	50.16	19.01	513	56	69
60	2400	0.00004	0.00014	50.17	19	515	56	69
61	2440	0.00004	0.00014	50.17	19	516	56	69
62	2480	0.00004	0.00014	50.17	19	516	56	69
63	2520	0.00005	0.00014	50.17	19	516	56	69
64	2560	0.00006	0.00014	50.17	19	516	56	69
65	2600	0.00005	0.00014	50.17	19	516	56	69
66	2640	0.00006	0.00014	50.17	19	516	56	69
67	2680	0.00006	0.00014	50.17	19	516	56	69
68	2720	0.00006	0.00014	50.17	19	516	56	69
69	2760	0.00006	0.00015	65.97	24.84	513	63	64
70	2800	0.00006	0.00015	65.97	24.84	513	63	64
71	2840	0.00006	0.00016	65.9	24.8	489	63	64
72	2880	0.00005	0.00016	65.9	24.8	489	63	64
73	2920	0.00004	0.00016	65.9	24.8	489	63	64
74	2960	0.00003	0.00016	65.9	24.8	489	63	64
75	3000	0.00002	0.00016	65.9	24.8	489	63	64

ตารางที่ ค.6 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 1 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
76	3040	0.00003	0.00016	65.9	24.8	489	63	64
77	3080	0.00003	0.00016	65.9	24.8	489	63	64
78	3120	0.00003	0.00016	65.9	24.8	489	63	64
79	3160	0.00003	0.00016	65.9	24.8	489	63	64
80	3200	0.00004	0.00016	65.9	24.8	489	63	64
81	3240	0.00004	0.00016	65.9	24.8	489	63	64
82	3280	0.00004	0.00016	65.9	24.8	489	63	64
83	3320	0.00004	0.00016	65.89	24.8	485	63	64
84	3360	0.00004	0.00016	65.89	24.8	485	63	64
85	3400	0.00004	0.00016	65.89	24.8	485	63	64
86	3440	0.00003	0.00016	65.89	24.8	485	63	64
87	3480	0.00003	0.00016	65.89	24.8	485	63	64
88	3520	0.00003	0.00016	65.89	24.8	485	63	64
89	3560	0.00003	0.00016	65.89	24.8	485	63	64
90	3600	0.00003	0.00016	65.89	24.8	485	63	64
91	3640	0.00003	0.00016	65.89	24.8	485	63	64
92	3680	0.00003	0.00016	65.58	24.65	487	62	64
93	3720	0.00004	0.00017	65.3	24.53	507	61	64
94	3760	0.00004	0.00017	65.3	24.53	507	61	64
95	3800	0.00005	0.00017	65.3	24.53	507	61	64
96	3840	0.00006	0.00017	65.31	24.53	508	61	64
97	3880	0.00005	0.00017	65.31	24.53	508	61	64
98	3920	0.00006	0.00017	65.31	24.53	508	61	64
99	3960	0.00007	0.00017	65.31	24.53	508	61	64
100	4000	0.00006	0.00017	65.31	24.53	508	61	64

ตารางที่ ค.7 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 2

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
1	40	0	0.00004	33.51	16.08	503	63	96
2	80	0	0.00004	33.51	16.08	503	63	96
3	120	0.00001	0.00004	33.51	16.08	503	63	96
4	160	0.00001	0.00005	34.1	16.13	503	65	96
5	200	0.00001	0.00006	37.89	16.6	506	67	94
6	240	0.00001	0.00006	37.89	16.6	506	67	94
7	280	0.00001	0.00006	37.89	16.6	506	67	94
8	320	0.00001	0.00006	37.89	16.6	506	67	94
9	360	0.00002	0.00006	37.89	16.6	506	67	94
10	400	0.00002	0.0001	69.55	26.74	997	62	78
11	440	0.00003	0.00017	34.22	14.57	741	61	95
12	480	0.00003	0.00018	35.52	14.68	741	60	94
13	520	0.00003	0.00018	35.52	14.68	741	60	94
14	560	0.00004	0.00018	35.52	14.68	741	60	94
15	600	0.00004	0.00018	35.52	14.68	741	60	94
16	640	0.00005	0.00022	58.96	21.97	766	67	83
17	680	0.00006	0.00022	58.96	21.97	766	67	83
18	720	0.00008	0.00022	58.96	21.97	766	67	83
19	760	0.00009	0.00022	58.96	21.97	766	67	83
20	800	0.00008	0.00022	58.96	21.97	766	67	83
21	840	0.00008	0.00022	58.97	21.97	768	67	83
22	880	0.00008	0.00022	58.97	21.97	768	67	83
23	920	0.00008	0.00022	58.97	21.97	768	67	83
24	960	0.0001	0.00022	58.97	21.97	768	67	83
25	1000	0.00009	0.00023	59.25	22.08	748	68	83

ตารางที่ ค.7 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 2 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
26	1040	0.0001	0.00023	59.25	22.08	748	68	83
27	1080	0.0001	0.00023	59.26	22.08	752	68	83
28	1120	0.0001	0.00023	56.78	21.12	758	67	84
29	1160	0.00011	0.00024	55	20.45	764	68	85
30	1200	0.00012	0.00024	57.09	21.24	748	68	84
31	1240	0.00013	0.00024	57.09	21.24	748	68	84
32	1280	0.00013	0.00025	54.97	20.45	748	68	85
33	1320	0.00009	0.00025	57.39	21.36	742	69	84
34	1360	0.00011	0.00025	57.39	21.36	742	69	84
35	1400	0.0001	0.00025	57.39	21.36	742	69	84
36	1440	0.00009	0.00025	57.39	21.36	742	69	84
37	1480	0.00007	0.00025	57.39	21.36	742	69	84
38	1520	0.00007	0.00025	57.39	21.36	742	69	84
39	1560	0.00006	0.00025	57.39	21.36	742	69	84
40	1600	0.00007	0.00025	57.39	21.36	742	69	84
41	1640	0.00007	0.00025	57.39	21.36	742	69	84
42	1680	0.00006	0.00025	57.39	21.36	742	69	84
43	1720	0.00006	0.00025	60.11	22.43	709	71	83
44	1760	0.00007	0.00025	60.11	22.43	709	71	83
45	1800	0.00005	0.00025	60.11	22.43	709	71	83
46	1840	0.00006	0.00025	60.11	22.43	709	71	83
47	1880	0.00008	0.00025	60.11	22.43	709	71	83
48	1920	0.00007	0.00026	58.23	21.73	709	72	84
49	1960	0.00009	0.00026	58.23	21.73	709	72	84
50	2000	0.00009	0.00026	57.94	21.6	712	71	84

ตารางที่ ค.7 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 2 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
51	2040	0.00011	0.00026	57.94	21.6	712	71	84
52	2080	0.00012	0.00026	57.94	21.6	712	71	84
53	2120	0.00013	0.00026	57.94	21.6	709	71	84
54	2160	0.00015	0.00026	57.94	21.6	709	71	84
55	2200	0.00017	0.00026	57.94	21.6	709	71	84
56	2240	0.00014	0.00026	60.4	22.55	709	72	83
57	2280	0.00015	0.00026	60.4	22.55	709	72	83
58	2320	0.00016	0.00026	60.4	22.55	708	72	83
59	2360	0.00012	0.00026	60.4	22.55	708	72	83
60	2400	0.00015	0.00026	60.4	22.55	708	72	83
61	2440	0.00014	0.00026	60.4	22.55	708	72	83
62	2480	0.00016	0.00026	61.13	22.88	645	75	83
63	2520	0.00016	0.00026	61.14	22.88	649	75	83
64	2560	0.00016	0.00027	61.16	22.89	661	75	83
65	2600	0.00014	0.00027	61.16	22.89	661	75	83
66	2640	0.00015	0.00027	61.16	22.89	661	75	83
67	2680	0.00018	0.00027	61.16	22.89	661	75	83
68	2720	0.00019	0.00027	61.16	22.89	661	75	83
69	2760	0.00019	0.00027	61.16	22.89	661	75	83
70	2800	0.00016	0.00027	61.16	22.89	661	75	83
71	2840	0.00016	0.00027	61.16	22.89	661	75	83
72	2880	0.00015	0.00027	61.16	22.89	661	75	83
73	2920	0.00015	0.00027	61.16	22.89	661	75	83
74	2960	0.00018	0.00027	61.16	22.89	661	75	83
75	3000	0.00016	0.00027	61.16	22.89	661	75	83

ตารางที่ ค.7 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 2 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
76	3040	0.00014	0.00027	61.16	22.89	663	75	83
77	3080	0.00015	0.00027	61.16	22.89	662	75	83
78	3120	0.00015	0.00027	61.16	22.89	662	75	83
79	3160	0.00015	0.00027	61.16	22.89	662	75	83
80	3200	0.00014	0.00027	61.16	22.89	662	75	83
81	3240	0.00015	0.00027	61.16	22.89	662	75	83
82	3280	0.00015	0.00027	61.16	22.89	662	75	83
83	3320	0.00012	0.00027	63.68	23.87	670	76	82
84	3360	0.00013	0.00027	63.68	23.87	670	76	82
85	3400	0.00014	0.00027	63.68	23.87	670	76	82
86	3440	0.00014	0.00027	63.67	23.86	666	76	82
87	3480	0.00016	0.00027	63.67	23.86	666	76	82
88	3520	0.00017	0.00027	63.9	23.97	647	77	82
89	3560	0.00016	0.00027	63.9	23.97	647	77	82
90	3600	0.00018	0.00027	63.9	23.97	647	77	82
91	3640	0.00014	0.00027	63.9	23.97	647	77	82
92	3680	0.0001	0.00027	63.9	23.97	647	77	82
93	3720	0.00013	0.00027	63.9	23.97	647	77	82
94	3760	0.00014	0.00027	63.9	23.97	647	77	82
95	3800	0.00015	0.00027	63.9	23.97	647	77	82
96	3840	0.00014	0.00027	63.9	23.97	647	77	82
97	3880	0.00016	0.00027	63.9	23.97	647	77	82
98	3920	0.00015	0.00027	63.9	23.97	647	77	82
99	3960	0.00014	0.00027	63.9	23.97	648	77	82
100	4000	0.00014	0.00027	63.9	23.97	648	77	82

ตารางที่ ค.8 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 3

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
1	40	0	0.00002	-38.73	28.36	685	203	82
2	80	0.00001	0.00004	-40.4	24.17	2728	78	82
3	120	0.00001	0.00004	-39.75	23.4	2792	74	81
4	160	0.00001	0.00005	-38.22	22.22	2736	72	79
5	200	0.00001	0.00005	-37.31	21.64	2727	72	78
6	240	0.00002	0.00005	-36.99	21.66	2727	76	78
7	280	0.00002	0.00009	-25.51	15.73	2727	107	69
8	320	0.00003	0.00009	-25.51	15.73	2727	107	69
9	360	0.00003	0.00009	-25.51	15.73	2727	107	69
10	400	0.00004	0.00009	-25.51	15.73	2727	107	69
11	440	0.00005	0.00015	-20.97	9.94	7918	18	75
12	480	0.00005	0.00015	-20.97	9.94	7918	18	75
13	520	0.00005	0.00015	-20.97	9.94	7918	18	75
14	560	0.00006	0.00015	-20.97	9.94	7918	18	75
15	600	0.00005	0.00016	-20.46	9.59	8166	18	75
16	640	0.00005	0.00016	-21.13	9.81	8166	19	75
17	680	0.00005	0.00016	-21.13	9.81	8166	19	75
18	720	0.00004	0.00016	-21.13	9.81	8166	19	75
19	760	0.00005	0.00016	-21.13	9.81	8166	19	75
20	800	0.00005	0.00016	-21.13	9.81	8166	19	75
21	840	0.00006	0.00017	-20.61	10.1	6887	33	69
22	880	0.00006	0.00017	-20.61	10.1	6887	33	69
23	920	0.00006	0.00018	-19.87	9.68	7143	31	69
24	960	0.00005	0.00018	-19.87	9.68	7143	31	69
25	1000	0.00007	0.00018	-19.87	9.68	7143	31	69

ตารางที่ ค.8 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 3 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
26	1040	0.00007	0.00018	-19.07	9.07	7846	23	71
27	1080	0.00007	0.00018	-19.07	9.07	7846	23	71
28	1120	0.00009	0.00018	-19.07	9.07	7846	23	71
29	1160	0.00008	0.00018	-19.07	9.07	7846	23	71
30	1200	0.00007	0.00018	-19.07	9.07	7846	23	71
31	1240	0.00007	0.00018	-17.22	8.41	7943	22	70
32	1280	0.0001	0.00018	-17.22	8.41	7943	22	70
33	1320	0.00009	0.00018	-17.16	8.37	7975	22	70
34	1360	0.00009	0.00018	-18.99	9.09	7592	25	70
35	1400	0.00009	0.00018	-16.9	8.25	7847	24	69
36	1440	0.00009	0.00018	-16.9	8.25	7847	24	69
37	1480	0.00011	0.00019	-18.5	8.97	7336	26	69
38	1520	0.00012	0.00019	-18.5	8.97	7336	26	69
39	1560	0.00012	0.00019	-18.5	8.97	7336	26	69
40	1600	0.0001	0.00019	-19.07	9.23	7172	27	69
41	1640	0.00011	0.00019	-18.44	8.94	7364	26	69
42	1680	0.0001	0.00019	-18.44	8.94	7364	26	69
43	1720	0.0001	0.00019	-19.29	9.3	7171	28	69
44	1760	0.00011	0.00019	-19.29	9.3	7171	28	69
45	1800	0.00009	0.00019	-19.29	9.3	7171	28	69
46	1840	0.00011	0.00019	-19.29	9.3	7171	28	69
47	1880	0.0001	0.00019	-19.29	9.3	7171	28	69
48	1920	0.00009	0.00019	-19.29	9.3	7171	28	69
49	1960	0.00008	0.00019	-19.29	9.3	7171	28	69
50	2000	0.00008	0.00019	-19.29	9.3	7171	28	69

ตารางที่ ค.8 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 3 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
51	2040	0.00009	0.00019	-19.29	9.3	7171	28	69
52	2080	0.00008	0.00019	-19.29	9.3	7171	28	69
53	2120	0.0001	0.00019	-18.17	8.85	7171	29	68
54	2160	0.0001	0.00019	-18.17	8.85	7171	29	68
55	2200	0.00009	0.00019	-18.17	8.85	7171	29	68
56	2240	0.0001	0.00021	-10.75	6.09	7684	33	63
57	2280	0.0001	0.00021	-10.75	6.09	7684	33	63
58	2320	0.00009	0.00021	-10.75	6.09	7684	33	63
59	2360	0.0001	0.00021	-10.75	6.09	7684	33	63
60	2400	0.00006	0.00021	-10.75	6.09	7684	33	63
61	2440	0.00006	0.00021	-10.75	6.09	7684	33	63
62	2480	0.00008	0.00023	15.61	7.85	4611	156	48
63	2520	0.00006	0.00023	15.61	7.85	4611	156	48
64	2560	0.00005	0.00023	15.61	7.85	4611	156	48
65	2600	0.00006	0.00023	15.61	7.85	4611	156	48
66	2640	0.00004	0.00023	15.61	7.85	4611	156	48
67	2680	0.00004	0.00023	15.61	7.85	4611	156	48
68	2720	0.00003	0.00023	15.61	7.85	4611	156	48
69	2760	0.00005	0.0007	7.91	3.47	3179	186	51
70	2800	0.00008	0.00082	7.83	3.37	3185	182	51
71	2840	0.00005	0.00082	7.83	3.37	3185	182	51
72	2880	0.00006	0.00082	7.83	3.37	3185	182	51
73	2920	0.00007	0.00082	7.83	3.37	3185	182	51
74	2960	0.00012	0.00088	5.14	2.75	3409	155	52
75	3000	0.00011	0.00088	5.14	2.75	3409	155	52

ตารางที่ ค.8 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 3 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
76	3040	0.00012	0.00088	5.15	2.75	3410	155	52
77	3080	0.00019	0.0009	5.19	2.71	3427	156	52
78	3120	0.00028	0.00179	-3.53	2.29	2410	185	53
79	3160	0.00038	0.00179	-3.57	2.31	2410	186	53
80	3200	0.00028	0.00179	-3.57	2.31	2410	186	53
81	3240	0.00024	0.00179	-3.57	2.31	2410	186	53
82	3280	0.00024	0.00179	-3.57	2.31	2410	186	53
83	3320	0.00033	0.00179	-3.53	2.29	2419	185	53
84	3360	0.00036	0.0018	-3.53	2.29	2426	185	53
85	3400	0.00031	0.0018	-3.53	2.29	2428	185	53
86	3440	0.0003	0.0018	-3.53	2.29	2428	185	53
87	3480	0.00019	0.0018	-3.53	2.29	2428	185	53
88	3520	0.00022	0.0018	-3.53	2.29	2428	185	53
89	3560	0.00032	0.0018	-3.53	2.29	2428	185	53
90	3600	0.00025	0.0018	-3.53	2.29	2428	185	53
91	3640	0.00027	0.0018	-3.53	2.29	2428	185	53
92	3680	0.00042	0.0018	-3.53	2.29	2428	185	53
93	3720	0.00044	0.0018	-3.53	2.29	2428	185	53
94	3760	0.0005	0.0018	-3.53	2.29	2428	185	53
95	3800	0.00063	0.00197	5.17	2.36	2541	187	52
96	3840	0.00062	0.00197	5.17	2.36	2541	187	52
97	3880	0.00058	0.00197	5.17	2.36	2541	187	52
98	3920	0.00061	0.00197	5.17	2.36	2541	187	52
99	3960	0.0005	0.00197	5.17	2.36	2541	187	52
100	4000	0.0007	0.00197	5.17	2.36	2541	187	52

ตารางที่ ค.9 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 4

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
1	40	0	0	397.24	180.71	2429	187	53
2	80	0	0	-53.35	40.2	2371	442	181
3	120	0	0.00001	-38	27.96	2496	182	183
4	160	0	0.00001	-37.4	28.01	2358	186	183
5	200	0	0.00002	99.52	41.24	2421	195	122
6	240	0	0.00002	99.52	41.24	2421	195	122
7	280	0.00001	0.00004	-32.82	22.99	415	186	181
8	320	0.00001	0.00017	34.98	13.74	2498	68	151
9	360	0.00003	0.00017	34.98	13.74	2498	68	151
10	400	0.00004	0.00017	36.63	14.6	2429	67	149
11	440	0.00005	0.00022	-20.1	11.08	2198	64	181
12	480	0.00008	0.00022	-20.1	11.08	2198	64	181
13	520	0.00009	0.00022	-20.1	11.08	2198	64	181
14	560	0.00009	0.00022	-20.1	11.08	2198	64	181
15	600	0.00013	0.00024	-20.04	11.24	2146	61	181
16	640	0.00013	0.00024	-20.68	11.48	2138	61	182
17	680	0.00015	0.00025	-20.52	11.53	2077	61	181
18	720	0.00014	0.00026	17.58	9.88	2112	67	167
19	760	0.00014	0.00026	17.58	9.88	2112	67	167
20	800	0.00015	0.00026	17.58	9.88	2112	67	167
21	840	0.00018	0.00026	17.58	9.88	2112	67	167
22	880	0.00019	0.00026	-16.09	10.03	2074	65	171
23	920	0.00019	0.00027	-16.22	10.02	2073	66	171
24	960	0.00017	0.00027	15.76	9.95	2076	67	169
25	1000	0.00014	0.00027	15.76	9.95	2076	67	169

ตารางที่ ค.9 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 4 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
26	1040	0.00014	0.00027	18.8	10.04	2074	68	166
27	1080	0.00015	0.00027	18.8	10.04	2074	68	166
28	1120	0.00017	0.00027	-15.84	9.99	2069	67	170
29	1160	0.00018	0.00027	-16.01	10.04	2060	68	170
30	1200	0.00018	0.00027	18.29	10.03	2069	69	167
31	1240	0.00017	0.00027	16.13	10.01	2061	68	169
32	1280	0.00017	0.00027	16.13	10.01	2061	68	169
33	1320	0.00016	0.00028	17.38	10.04	2057	69	168
34	1360	0.00017	0.00028	17.38	10.04	2057	69	168
35	1400	0.00018	0.00028	17.38	10.04	2057	69	168
36	1440	0.00017	0.00028	19.15	10.11	2053	69	166
37	1480	0.00018	0.00028	19.15	10.11	2053	69	166
38	1520	0.00016	0.00028	19.15	10.11	2053	69	166
39	1560	0.00014	0.00028	19.15	10.11	2053	69	166
40	1600	0.00011	0.00028	19.15	10.11	2053	69	166
41	1640	0.00013	0.00028	19.15	10.11	2053	69	166
42	1680	0.00014	0.00028	19.15	10.11	2053	69	166
43	1720	0.00015	0.00028	19.15	10.11	2052	69	166
44	1760	0.00014	0.00028	19.15	10.11	2052	69	166
45	1800	0.00014	0.00028	19.15	10.11	2052	69	166
46	1840	0.00012	0.00033	21.77	12.8	1505	90	170
47	1880	0.00012	0.00033	21.77	12.8	1505	90	170
48	1920	0.0001	0.00033	21.77	12.8	1505	90	170
49	1960	0.00012	0.00033	21.77	12.8	1505	90	170
50	2000	0.00013	0.00033	21.77	12.8	1505	90	170

ตารางที่ ค.9 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 4 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
51	2040	0.00015	0.00033	21.77	12.81	1501	90	170
52	2080	0.00012	0.00033	21.77	12.81	1501	90	170
53	2120	0.00014	0.00033	21.77	12.81	1501	90	170
54	2160	0.00015	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
55	2200	0.00014	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
56	2240	0.00014	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
57	2280	0.00011	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
58	2320	0.00011	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
59	2360	0.00014	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
60	2400	0.00011	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
61	2440	0.00013	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
62	2480	0.00013	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
63	2520	0.00012	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
64	2560	0.00014	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
65	2600	0.00016	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
66	2640	0.00014	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
67	2680	0.0001	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
68	2720	0.00012	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
69	2760	0.00011	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
70	2800	0.0001	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
71	2840	0.00011	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
72	2880	0.0001	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
73	2920	0.0001	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
74	2960	0.00009	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
75	3000	0.00009	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170

ตารางที่ ค.9 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง BB (ปรับแก้) สถานีทดสอบที่ 4 (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
76	3040	0.00011	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
77	3080	0.0001	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
78	3120	0.00011	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
79	3160	0.00013	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
80	3200	0.00014	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
81	3240	0.00014	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
82	3280	0.00011	0.00038	21.78	13.06	1373	90	170
83	3320	0.00011	0.00042	25.25	12.93	1373	90	166
84	3360	0.00011	0.00042	25.25	12.93	1373	90	166
85	3400	0.00009	0.00042	25.25	12.93	1373	90	166
86	3440	0.0001	0.00042	25.25	12.93	1373	90	166
87	3480	0.0001	0.00049	63.47	23.82	1051	122	137
88	3520	0.00011	0.00076	65.07	24.45	1050	132	137
89	3560	0.0001	0.00076	65.07	24.45	1050	132	137
90	3600	0.00012	0.00076	65.07	24.45	1050	132	137
91	3640	0.00012	0.00076	65.07	24.45	1050	132	137
92	3680	0.00016	0.00076	65.08	24.45	1051	132	137
93	3720	0.00014	0.00076	65.08	24.45	1051	132	137
94	3760	0.00012	0.00076	65.08	24.45	1051	132	137
95	3800	0.00015	0.00076	65.08	24.45	1052	132	137
96	3840	0.00018	0.00076	65.08	24.45	1052	132	137
97	3880	0.0002	0.00076	65.08	24.45	1052	132	137
98	3920	0.00019	0.00076	65.09	24.46	1060	132	137
99	3960	0.00023	0.00076	66.46	25	1061	132	136
100	4000	0.00026	0.00076	66.46	25	1061	132	136

ตารางที่ ค.10 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
1	40	0	0.00002	38.33	22.42	65	28	124
2	80	0.00001	0.00019	-96.7	57.88	123	25	355
3	120	0.00002	0.00024	88.88	44.62	156	28	97
4	160	0.00002	0.00024	88.88	44.62	156	28	97
5	200	0.00004	0.00048	-40.96	27.16	121	27	198
6	240	0.00007	0.00048	-40.96	27.16	121	27	198
7	280	0.00006	0.0005	93.55	46.48	121	34	99
8	320	0.00006	0.00061	-43.28	27.83	121	26	198
9	360	0.00011	0.00061	-43.28	27.83	121	26	198
10	400	0.00011	0.00069	-16.44	9.4	122	26	153
11	440	0.00016	0.00116	-14.64	8.67	122	28	153
12	480	0.00018	0.00116	-14.64	8.67	122	28	153
13	520	0.0002	0.00122	-16.15	9.25	122	27	154
14	560	0.00021	0.0013	-13.6	7.52	123	27	150
15	600	0.00019	0.0013	-13.6	7.52	123	27	150
16	640	0.00027	0.0013	-17.56	10.19	124	27	156
17	680	0.00033	0.0013	-17.56	10.19	124	27	156
18	720	0.0003	0.00144	-10.03	6.35	123	28	146
19	760	0.00033	0.00144	-10.03	6.35	123	28	146
20	800	0.00043	0.00145	-10.22	6.38	121	28	146
21	840	0.00033	0.00145	-10.22	6.38	121	28	146
22	880	0.00033	0.00163	11.45	6.12	123	28	141
23	920	0.00039	0.00163	11.45	6.12	123	28	141
24	960	0.00044	0.00163	11.45	6.12	123	28	141
25	1000	0.00046	0.00167	21.55	9.11	124	28	133

ตารางที่ ค.10 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD
(ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
26	1040	0.00061	0.00167	21.55	9.11	124	28	133
27	1080	0.00063	0.00171	15.08	6.79	124	28	138
28	1120	0.0006	0.00172	16.34	7.15	124	28	137
29	1160	0.00052	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
30	1200	0.00053	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
31	1240	0.00049	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
32	1280	0.00044	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
33	1320	0.0005	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
34	1360	0.00038	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
35	1400	0.00053	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
36	1440	0.00061	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
37	1480	0.00057	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
38	1520	0.00061	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
39	1560	0.0006	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
40	1600	0.00076	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
41	1640	0.00083	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
42	1680	0.00079	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
43	1720	0.00065	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
44	1760	0.00065	0.00172	17.61	7.57	124	28	136
45	1800	0.00064	0.00172	20.2	8.52	125	28	134
46	1840	0.00073	0.00172	20.2	8.52	125	28	134
47	1880	0.00072	0.00172	20.2	8.52	125	28	134
48	1920	0.00076	0.00172	20.2	8.52	125	28	134
49	1960	0.00076	0.00172	20.2	8.52	125	28	134
50	2000	0.00079	0.00173	18.88	8.01	125	28	135

ตารางที่ ค.10 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD
(ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
51	2040	0.00052	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
52	2080	0.00053	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
53	2120	0.0006	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
54	2160	0.0006	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
55	2200	0.00058	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
56	2240	0.0007	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
57	2280	0.00039	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
58	2320	0.00043	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
59	2360	0.00059	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
60	2400	0.00056	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
61	2440	0.00067	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
62	2480	0.00077	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
63	2520	0.00073	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
64	2560	0.00062	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
65	2600	0.0007	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
66	2640	0.00068	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
67	2680	0.00076	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
68	2720	0.00079	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
69	2760	0.00093	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
70	2800	0.0008	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
71	2840	0.00083	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
72	2880	0.00077	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
73	2920	0.00071	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
74	2960	0.00066	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
75	3000	0.00051	0.00173	18.88	8.01	125	28	135

ตารางที่ ค.10 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD
(ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
76	3040	0.00053	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
77	3080	0.00057	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
78	3120	0.00066	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
79	3160	0.00056	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
80	3200	0.00069	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
81	3240	0.00074	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
82	3280	0.00089	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
83	3320	0.00083	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
84	3360	0.00069	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
85	3400	0.0008	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
86	3440	0.00068	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
87	3480	0.00064	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
88	3520	0.0007	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
89	3560	0.00046	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
90	3600	0.00043	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
91	3640	0.00039	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
92	3680	0.00026	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
93	3720	0.00046	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
94	3760	0.00045	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
95	3800	0.0005	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
96	3840	0.00048	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
97	3880	0.0007	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
98	3920	0.00071	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
99	3960	0.00072	0.00173	18.88	8.01	125	28	135
100	4000	0.00069	0.00173	18.88	8.01	125	28	135

ตารางที่ ค.11 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD (ปรับแก้)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
1	40	0.00001	0.00004	78.46	31.02	1237	24	139
2	80	0.00001	0.00018	44.64	28.88	466	24	166
3	120	0.00003	0.00018	44.64	28.88	466	24	166
4	160	0.00004	0.00021	50.16	29.15	455	25	166
5	200	0.00005	0.00025	-65.65	32.8	471	24	201
6	240	0.00006	0.00026	56.05	29.42	453	26	165
7	280	0.00008	0.00032	53.5	28.74	469	27	169
8	320	0.0001	0.00032	53.5	28.74	469	27	169
9	360	0.00013	0.00034	53.2	28.81	469	28	172
10	400	0.00013	0.00034	53.2	28.81	469	28	172
11	440	0.00016	0.00036	58.89	30.38	420	28	170
12	480	0.00016	0.00036	58.89	30.38	420	28	170
13	520	0.00021	0.00036	54.28	29.29	451	28	172
14	560	0.00018	0.00036	57.29	29.64	445	28	170
15	600	0.00017	0.00036	57.29	29.64	445	28	170
16	640	0.0002	0.00038	66.08	30.61	446	29	166
17	680	0.00019	0.00038	66.08	30.61	446	29	166
18	720	0.00019	0.00039	59.62	30.05	440	29	171
19	760	0.0002	0.0004	64.33	30.75	429	29	168
20	800	0.00022	0.00055	85.5	36.4	319	34	167
21	840	0.00021	0.00055	85.5	36.4	319	34	167
22	880	0.00023	0.00055	85.5	36.4	319	34	167
23	920	0.00021	0.00055	85.5	36.4	319	34	167
24	960	0.00023	0.00057	87.96	37.09	311	35	167
25	1000	0.00019	0.00057	87.96	37.09	311	35	167

ตารางที่ ค.11 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD (ปรับแก้) (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
26	1040	0.00022	0.00057	87.96	37.09	311	35	167
27	1080	0.00021	0.00057	87.96	37.09	311	35	167
28	1120	0.0002	0.00057	87.96	37.09	311	35	167
29	1160	0.00018	0.00057	87.89	37.07	312	35	167
30	1200	0.00019	0.00058	87.5	36.9	318	35	167
31	1240	0.00027	0.00058	89.43	37.06	332	35	165
32	1280	0.00025	0.00059	92.14	37.94	318	36	165
33	1320	0.00021	0.0006	92.64	38.15	310	36	165
34	1360	0.00019	0.0006	92.64	38.15	310	36	165
35	1400	0.00019	0.0006	92.64	38.15	310	36	165
36	1440	0.00024	0.0006	92.64	38.15	310	36	165
37	1480	0.00025	0.0006	92.64	38.15	310	36	165
38	1520	0.00023	0.0006	92.64	38.15	310	36	165
39	1560	0.00029	0.0006	92.64	38.15	310	36	165
40	1600	0.00034	0.0006	92.64	38.15	310	36	165
41	1640	0.00027	0.0006	92.64	38.15	310	36	165
42	1680	0.00029	0.0006	92.64	38.15	310	36	165
43	1720	0.00026	0.0006	94.33	38.55	306	36	164
44	1760	0.00024	0.0006	94.33	38.55	306	36	164
45	1800	0.00022	0.0006	94.33	38.55	306	36	164
46	1840	0.00025	0.0006	94.33	38.55	306	36	164
47	1880	0.00031	0.0006	94.33	38.55	306	36	164
48	1920	0.00026	0.0006	94.27	38.52	307	36	164
49	1960	0.00021	0.0006	94.27	38.52	307	36	164
50	2000	0.00026	0.0006	94.27	38.52	307	36	164

ตารางที่ ค.11 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD
(ปรับแก้) (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
51	2040	0.00027	0.00061	95.79	38.85	306	36	163
52	2080	0.00027	0.00061	95.79	38.85	306	36	163
53	2120	0.00026	0.00061	95.79	38.85	306	36	163
54	2160	0.00027	0.00062	96.69	38.93	315	36	162
55	2200	0.00024	0.00062	96.69	38.93	315	36	162
56	2240	0.00028	0.00062	96.69	38.93	315	36	162
57	2280	0.00032	0.00062	96.69	38.93	315	36	162
58	2320	0.00025	0.00063	98.18	39.26	315	36	161
59	2360	0.00019	0.00063	98.18	39.26	315	36	161
60	2400	0.00022	0.00063	98.18	39.26	315	36	161
61	2440	0.00023	0.00063	98.18	39.26	315	36	161
62	2480	0.00027	0.00063	98.18	39.26	315	36	161
63	2520	0.0003	0.00063	98.18	39.26	315	36	161
64	2560	0.00032	0.00063	98.18	39.26	315	36	161
65	2600	0.00024	0.00063	98.18	39.26	315	36	161
66	2640	0.00022	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
67	2680	0.00021	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
68	2720	0.00014	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
69	2760	0.00018	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
70	2800	0.00021	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
71	2840	0.00024	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
72	2880	0.00025	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
73	2920	0.00028	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
74	2960	0.00031	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
75	3000	0.00033	0.00063	99.57	39.55	317	36	160

ตารางที่ ค.11 ผลการคำนวณย้อนกลับในโปรแกรม GAMLET 308 จากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD
(ปรับแก้) (ต่อ)

Gen.	Eval.	Avg.Fitn.	Best Fitn.	Max Err	RMSE	E1	E2	E3
76	3040	0.00031	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
77	3080	0.00025	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
78	3120	0.00022	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
79	3160	0.00023	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
80	3200	0.00024	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
81	3240	0.00021	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
82	3280	0.00027	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
83	3320	0.00028	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
84	3360	0.00031	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
85	3400	0.00028	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
86	3440	0.00033	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
87	3480	0.00029	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
88	3520	0.00027	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
89	3560	0.00024	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
90	3600	0.00024	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
91	3640	0.00029	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
92	3680	0.00032	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
93	3720	0.00032	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
94	3760	0.00028	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
95	3800	0.00032	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
96	3840	0.00028	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
97	3880	0.00021	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
98	3920	0.00027	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
99	3960	0.00026	0.00063	99.57	39.55	317	36	160
100	4000	0.00025	0.00063	99.57	39.55	317	36	160



ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



“60ปี เทคโนโลยีพระจอมเกล้าสู่ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีและโลจิสติกส์”

ESTA CON

Engineering , Science , Technology and Architecture Coference 2016 ^{The 7th}



ประชุมวิชาการและนำเสนอ
ผลงานวิจัย ครั้งที่ 7

วันที่ 25-26 กรกฎาคม 2559
ณ โรงแรมดุสิตปริ้นเซส นครราชสีมา

วิทยาการบรรยายพิเศษ/ ประจํากลุ่ม และผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย

วิทยาการบรรยายพิเศษ (Key Note Speaker)

นายนคร จันทกร ที่ปรึกษาสำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
อดีตผู้ว่าการการรถไฟแห่งประเทศไทย

วิทยาการบรรยายพิเศษประจํากลุ่ม (Invited Speaker)

รศ.ดร.เอนก	ศิริพานิชกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ปรีชา	กอเจริญ	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รศ.ดร.พิรพงษ์	อุฑารสกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.สมิทธิ	เอี่ยมสอาด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ประมวล	จารุวัฒน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.วรวัฒน์	มีวาสนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
ดร.วิรัตน์ ใจมีปรีชา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.มนตรี บุญเรืองเศษ
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธนะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ
ผศ.ดร.พัชระ กัญจนกาญจน์
ผศ.ดร.ประมุข อุณหเลขกะ
ดร.สมพงษ์ พิริยานต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.จตุพร ใจดำรง
ผศ.ดร.ปภัศรีชกรณ์ อารีกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผศ.ดร.ธวัชชัย ปัญญาดี
ดร.บรรเจิด แสงจันทร์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

รศ.ดร.พงษ์พันธุ์

ฤกษ์ชุมทรัพย์

ผศ.ดร.ประยูร

สุรินทร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

รศ.ดร.วิเชียร

ชาลี

ดร.วัชรินทร์

ดงบัง

ดร.จักรพันธ์

น่านวม

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รศ.ดร.วันชัย

สะตะ

ผศ.ดร.ธนัญชัย

ดาศรี

ผศ.ดร.ธเนศ

เสถียรนาม

ผศ.ดร.กิตติเวช

ขันตยวิชัย

ผศ.ดร.คำสิงห์

นนเลาพล

ผศ.ดร.คณิต

มุกดาใส

ผศ.ดร.ธงชัย

บทมาตย์

ผศ.ดร.วุฒิชัย

ศรีไสดาพล

ดร.จารุพล

สุริยวนากุล

ดร.ณัญฉวีวัฒน์

พลดี

ดร.พงศกร

ยศแก้ว

ดร.เปรม

จันทร์สว่าง

มหาวิทยาลัยนเรศวร

รศ.ดร.ปิยะนันท์

เจริญสุวรรณค์

ผศ.ดร.เกตุจันทร์

จำปาไชยศรี

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผศ.ดร.ธีระศักดิ์

หุดากร

ผศ.ดร.ทสพล

เขตเงินการ

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผศ.ดร.อำไพศักดิ์

ทีบุญมา

ผศ.ดร.กฤษณ์

ศรีวรรมาศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภิตติพิชญ์
รศ.ดร.สิงห์ทอง	พัฒนเศรษฐานนท์
ผศ.ดร.พุทธพล	ทองอินทร์ดำ
ผศ.ดร.บุญยฤทธิ์	ประสาธแก้ว
ผศ.ดร.ชัยยะ	ประณีตพลกรัง
ผศ.ดร.ศิริชัย	ต่อสกุล
ผศ.ดร.บุญยง	ปลั่งกลาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผศ.ดร.ปวีร์	ศิริรักษ์
ดร.ธีทัต	ดลวิชัย
ดร.จنگล	ศรีธรร

มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ผศ.ดร.ศิวา	แก้วปลั่ง
ดร.ประกรณ์ชัย	พลรัตน์ศักดิ์

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

รศ.ดร.เสมอขวัญ	ตันติกุล
ผศ.ดร.ธนศิษฐ์	วงศ์ศิริอำนวย

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร.อนุสรณ์	แสงประจักษ์
---------------	-------------

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผศ.ดร.นิตติ	คำเมืองลือ
ผศ.ดร.ธนะศักดิ์	หมวกทองหลาง

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ดร.สุวิน	สลีสองสม
----------	----------

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

ดร.ยวดี	แช่ตั้ง
---------	---------

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.เจษฎา	ธารีบุญ
ผศ.ดร.ภฤตธี	เอียดเหตุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์

ดร.ดวงฤดี โฆษิตกิตติวงศ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ดร.จักรพันธ์ วงษ์พา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

ผศ.ดร.วิฑูรย์ พึ่งรัตนนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

ดร.อำนาจ วัฒนกรศิริ

มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

ผศ.ดร.สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.ชนิด ชงทอง

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทราชภัฏวชิราวุธราช

นาวาอากาศเอก ศาสตราจารย์ ดร.สรกฤษ ศรีเกษม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

รศ.ดร.พิพัฒน์ อมตฉายา

รศ.กาญจนา ต้นสุวรรณรัตน์

รศ.ดร.กานต์ เกิดชื่น

รศ.ดร.บัณฑิต กฤตาคม

ผศ.ดร.ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ

ผศ.ดร.จิระยุทธ สืบสุข

ผศ.ดร.เพลงพิน เพ็ญภูมิพงศ์

ผศ.ดร.เกียรติสุดา สมณา

ผศ.ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์

ผศ.นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา

ผศ.วัชรพล นาคทอง

ผศ.วุฒิชัย ส่ง่างาม

ดร.สุจิตรา อุ่นเรือน

ดร.สมพินิจ เหมืองทอง

ดร.จารีณี จงปลื้มปิติ

ดร.พลเทพ	เวงสูงเนิน
ดร.ธวัชชัย	จารุวงศ์วิทยา
ดร.ไมตรี	พลสงคราม
ดร.จักษดา	ธำรงวุฒิ
ดร.ธนพล	เฉลิมกิติ
นายรัฐพล	สมนา
ดร.จิตติวัฒน์	นธิกาญจนธาร
ดร.รัตนันท์	เหลื่อมพล
ดร.ประจวบ	อินระวงค์
ดร.ณรงค์ศักดิ์	โยธา
อ.อนุชา	กล้าน้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

ผศ.ดร.สายันต์	โพธิ์เกิด
ผศ.ดร.ศิริวัฒน์	วสุนธราเจริญ
ผศ.ดร.เจริญชัย	ฤทธิรุธ
ผศ.ดร.ปณัสชัย	เชษฐโชติศักดิ์
ดร.สุระ	ตันดี
ดร.ภูษิสส์	ต้นวานิชกุล
ดร.ณรงค์	สีหาจ่อง
ดร.ศุภฤกษ์	ชามงคลประดิษฐ์
ดร.ปฐมภรณ์	ชัยกุล
ดร.อภิชาติ	คำภาห้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

ดร.ชุตินา	ถนอมสิทธิ์
-----------	------------

คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ ESTACON 2016

คณะกรรมการอำนวยการ

ผศ.ดร.ณรงค์ศักดิ์	ธรรมโชติ	ประธานกรรมการ
ผศ.สุรพจน์	วิษโรภากุล	กรรมการ
ผศ.สุรินทร์	ออนน้อม	กรรมการ
ผศ.ดร.เกียรติสุดา	สมนา	กรรมการ
รศ.ดร.บัณฑิต	กฤตาคม	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการเครือข่ายทางวิชาการ

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ดร.ดวงธิดา	โคตรโยธา
ดร.วรุทัย	เดชตานนท์

มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ผศ.ดร.ศิวา	แก้วปลั่ง
ว่าที่ร้อยตรีไกรวิทย์	แสนพงษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เรืออากาศเอก รศ.ดร. กนต์ธร	ชำนาญประศาสน์
รศ.ดร.พรศิริ	จنگล

มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

รศ.ดร.สงวน	วงษ์ชวลิตกุล
ดร.ประยงค์	กิริติอุไร

วิทยาลัยบัณฑิตเอเชีย

นายเดโช	แสนภักดี
ดร.อาทิตย์	ฉัตรชัยพลรัตน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

นายปริญญ	นาชัยสิทธิ์
ผศ.ดร.ศักดิ์ระวี	ระวีกุล
ดร.ศุภฤกษ์	ชามงคลประดิษฐ์
นายบุญยกิจ	อุ่นพิกุล

คณะกรรมการดำเนินงาน

รศ.ดร.บัณฑิต	กฤตาคม	ประธานกรรมการ
ผศ.ดร.เกียรติสุดา	สมนา	กรรมการ
ผศ.ดร.วรรณรีย์	วงศ์ไตรรัตน์	กรรมการ
ดร.ถนอมศักดิ์	โสภณ	กรรมการ
ดร.จิตติวัฒน์	นธิกาญจนธาร	กรรมการ
ดร.รัฐพล	สมนา	กรรมการ
ดร.อภิญา	อินทร์นอก	กรรมการ
ผศ.วุฒิชัย	สง่างาม	กรรมการ
ผศ.อภิชาติ	ติระประเสริฐสิน	กรรมการ
ผศ.พรภัสสร	อ่อนเกิด	กรรมการ
นายพงษ์ศักดิ์	ลอยฟ้า	กรรมการ
นางสาวสิริกานต์	ไชยสิทธิ์	กรรมการ
นายจตุพล	บ้องกัน	กรรมการ
นายสุรเดช	สินจะโป๊ะ	กรรมการ
นางฉนวนวรรณ	วัฒน์ะกุล	กรรมการ
นางสาวอัญชลี	จินดาภิ	กรรมการ
นางสาวนิภาพร	อาศัยป่า	กรรมการ
นางสาวมะลิวัลย์	เหวชัยภูมิ	กรรมการ
นางสาวจริยา	นากลาง	กรรมการ
นางเสริมพร	เนาบุตร	กรรมการ
นางสาวพรพรรณ	รัชนำลักษณ์	กรรมการ
นางสาวจิราภา	พร้อมสันเทียะ	กรรมการ
นางสาวรัชนิกร	โยธาหุล	กรรมการ
นางสาวพัชชาพร	พลชนะ	กรรมการ
นายโยธิน	หล้าสกุล	กรรมการ
นายพิสิษฐ์	กลอนค่างพลู	กรรมการ
นางสาวนงนุช	ไพบุลย์	กรรมการ
นางสาวนุสรรา	มูลตรี	กรรมการ
นางเพลินพิศ	มณีศรี	กรรมการและเลขานุการ

กำหนดการประชุมวิชาการ
วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 7 ประจำปี 2559
วันที่ 25 - 26 กรกฎาคม 2559
ณ โรงแรมดุสิตปริ้นเซส จังหวัดนครราชสีมา

กำหนดการ วันที่ 25 กรกฎาคม 2559

เวลา 08.00 – 09.00 น. ลงทะเบียน

เวลา 09.00 – 09.30 น. พิธีเปิด โดยรองอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
 ราชมนังคศิลา

- มอบโล่รางวัลแก่บทความวิจัยดีเด่นในกลุ่มสาขาวิชาต่าง ๆ
- มอบโล่แก่เครือข่ายทางวิชาการ

เวลา 09.30 – 11.00 น. บรรยายพิเศษ ในหัวข้อ “งานวิจัยของประเทศไทยในอนาคต
 ทางด้านโลจิสติกส์และระบบขนส่งทางราง” โดย คุณนคร จันทพร

เวลา 11.00 – 11.20 น. พักรับประทานอาหารว่าง

เวลา 11.20 – 12.20 น. นำเสนอบทความวิจัย (ช่วงที่ 1)

เวลา 12.20 – 13.20 น. พักรับประทานอาหารกลางวัน

เวลา 13.20 – 15.05 น. นำเสนอบทความวิจัย (ช่วงที่ 2)
 และบรรยายพิเศษจากวิทยากรประจำห้อง

เวลา 15.05 – 15.40 น. พักรับประทานอาหารว่าง

เวลา 15.40 – 17.20 น. นำเสนอบทความวิจัย (ช่วงที่ 3)
 และบรรยายพิเศษจากวิทยากรประจำห้อง

เวลา 17.20 – 18.00 น. พักร่อนตามอัธยาศัย

เวลา 18.00 – 21.00 น. งานเลี้ยงต้อนรับ

หมายเหตุ : เวลา 17.00 – 18.00 น. นำเสนอผลงานวิจัยภาคโปสเตอร์

วันจันทร์ที่ 25 กรกฎาคม 2559 (Parallel session 3)

ห้องเรียนที่ 1 (15.40-17.40 น.)	ห้องเรียนที่ 2 (15.40-17.40 น.)	ห้องเรียนที่ 3 (15.40-17.40 น.)	ห้องเรียนที่ 4 (15.40-17.40 น.)	ห้องเรียนที่ 5 (15.40-17.40 น.)
<p>กลุ่มวิศวกรรมไฟฟ้า (EE)</p> <p>Chair : ดร.วชิระพงษ์ อุขาวสกุล</p> <p>Co-chair : ดร.ศักดิ์ระวี วัชรวิจิตร</p> <p>Invited (พิเศษ): พรีระพงษ์ อุขาวสกุล</p> <p>EE001 : ตัวควบคุม พีโอดี สำหรับทำระบบควบคุมแบบเชิงเส้นแบบอาร์ดีโน</p> <p>EE002 : DPL script ในโปรแกรม DigSILENT สำหรับการบริหารกระแสบนไฟฟ้า</p> <p>EE004 : การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบอัตโนมัติ แรงดันต่อความถี่คงที่ ด้วยบอร์ดคอมพิวเตอร์</p> <p>EE005 : การศึกษาเสาอากาศแบบทรงแท่ง การบ่งชี้สัญญาณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับการประยุกต์ใช้งานการสื่อสาร</p> <p>EE007 : การออกแบบการเข้ารหัสและการถอดรหัสด้วยไลบรารี LDPC โดยใช้หลายสมบัตินา</p>	<p>กลุ่มวิศวกรรมโยธา (CE)</p> <p>Chair : ดร.ศุภณัฐ สิวา... ม้วนอึ้ง</p> <p>Co-chair : ดร.ศุภณัฐ สิวา... สิบสุ</p> <p>CE002 : วิธีการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของฐานราก</p> <p>CE004 : การทดสอบและประเมินผลเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดรอยร้าวคอนกรีตมวลเบา</p> <p>CE006 : การทำหน้าตัดกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมเหล็ก</p> <p>CE008 : พฤติกรรมแรงเฉือนแบบรวมของน้ำของดินลูกรังรับแรงด้วยผิวทาง</p> <p>CE009 : การศึกษาเชิงทดลองแบบเร่งความเร็วความถี่ที่มีคอนกรีตเสริมเหล็กสูงสองช่องจราจรในประเทศไทย</p> <p>CE014 : การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างที่รับแรงดึงแบบไดนามิกด้วยวิธีเชิงตัวเลข</p> <p>CE017 : การออกแบบการเข้ารหัสและการถอดรหัสด้วยไลบรารี LDPC โดยใช้หลายสมบัตินา</p>	<p>กลุ่มวิศวกรรมโยธา (SR)</p> <p>Chair : ดร.ศุภณัฐ สิวา... ม้วนอึ้ง</p> <p>Co-chair : ดร.ศุภณัฐ สิวา... สิบสุ</p> <p>Invited (พิเศษ): ดร.ศุภณัฐ สิวา... ม้วนอึ้ง</p> <p>SR002 : วิธีการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของฐานราก</p> <p>SR004 : การทดสอบและประเมินผลเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดรอยร้าวคอนกรีตมวลเบา</p> <p>SR006 : การทำหน้าตัดกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมเหล็ก</p> <p>SR008 : พฤติกรรมแรงเฉือนแบบรวมของน้ำของดินลูกรังรับแรงด้วยผิวทาง</p> <p>SR009 : การศึกษาเชิงทดลองแบบเร่งความเร็วความถี่ที่มีคอนกรีตเสริมเหล็กสูงสองช่องจราจรในประเทศไทย</p> <p>SR014 : การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างที่รับแรงดึงแบบไดนามิกด้วยวิธีเชิงตัวเลข</p> <p>SR017 : การออกแบบการเข้ารหัสและการถอดรหัสด้วยไลบรารี LDPC โดยใช้หลายสมบัตินา</p>	<p>กลุ่มวิศวกรรมเครื่องกล (ME)</p> <p>Chair : ดร.ศุภณัฐ สิวา... ม้วนอึ้ง</p> <p>Co-chair : ดร.ศุภณัฐ สิวา... สิบสุ</p> <p>ME002 : การศึกษาความเป็นไปได้ในการอัดก้อนเชื้อเพลิงแบบบวมในตัวโปรแกรม</p> <p>ME003 : การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเกิดรอยร้าวคอนกรีตเสริมเหล็ก</p> <p>ME004 : อิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเครื่องที่มีผลต่อความแม่นยำ</p> <p>ME005 : การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเกิดรอยร้าวคอนกรีตเสริมเหล็ก</p> <p>ME006 : การศึกษาเชิงทดลองแบบเร่งความเร็วความถี่ที่มีคอนกรีตเสริมเหล็กสูงสองช่องจราจรในประเทศไทย</p> <p>ME009 : อิทธิพลต่อแรงการถ่ายเทความร้อนของเครื่องจักรขนาดใหญ่ของเชื้อเพลิงเหลวในหัวเผาไฟฟอสฟอรัสแบบสองชั้น</p> <p>ME023 : คุณสมบัติทางกายภาพ เจริญ และอากาศศาสตร์ของข้าวเหนียวสีม่วง</p> <p>ME024 : ปริมาณพลังงาน ความหนาแน่น และความถี่ ในน้ำมันข้าวโพดเข้มข้นที่ผลิตจากข้าวโพดหวานพันธุ์สตาร์ที่ 3 ช่วง</p>	<p>ห้องเรียนที่ 5 (15.40-17.40 น.)</p> <p>กลุ่มวิศวกรรมเครื่องกล (ME)</p> <p>Chair : ดร.ศุภณัฐ สิวา... ม้วนอึ้ง</p> <p>Co-chair : ดร.ศุภณัฐ สิวา... สิบสุ</p> <p>Invited (พิเศษ): ดร.ศุภณัฐ สิวา... ม้วนอึ้ง</p> <p>ME002 : การศึกษาความเป็นไปได้ในการอัดก้อนเชื้อเพลิงแบบบวมในตัวโปรแกรม</p> <p>ME003 : การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเกิดรอยร้าวคอนกรีตเสริมเหล็ก</p> <p>ME004 : อิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเครื่องที่มีผลต่อความแม่นยำ</p> <p>ME005 : การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเกิดรอยร้าวคอนกรีตเสริมเหล็ก</p> <p>ME006 : การศึกษาเชิงทดลองแบบเร่งความเร็วความถี่ที่มีคอนกรีตเสริมเหล็กสูงสองช่องจราจรในประเทศไทย</p> <p>ME009 : อิทธิพลต่อแรงการถ่ายเทความร้อนของเครื่องจักรขนาดใหญ่ของเชื้อเพลิงเหลวในหัวเผาไฟฟอสฟอรัสแบบสองชั้น</p> <p>ME023 : คุณสมบัติทางกายภาพ เจริญ และอากาศศาสตร์ของข้าวเหนียวสีม่วง</p> <p>ME024 : ปริมาณพลังงาน ความหนาแน่น และความถี่ ในน้ำมันข้าวโพดเข้มข้นที่ผลิตจากข้าวโพดหวานพันธุ์สตาร์ที่ 3 ช่วง</p>

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 7 วันที่ 25 - 26 กรกฎาคม 2559 ณ โรงแรมดิพลิมปรีนเซส จันทราวิเศษ

การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างพื้นทางดินซีเมนต์
โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Analysis of Strength of Soil-Cement Base Using Genetic Algorithm

ปรีชา สาลี*, บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, และ พุทธิพล ทองอินทร์คำ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี
* preecha_sa@mail.rmutt.ac.th, boonchai.p@en.rmutt.ac.th, puttapon.t@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

แม้ว่าถนนที่มีพื้นทางดินซีเมนต์จะตอบสนองต่อการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างทางโดยรวม แต่ในทางวิศวกรรมผิวทางยังคงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบความแข็งแรงแต่ละชั้นทาง จึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีการคำนวณย้อนกลับซึ่งมีหลากหลายงานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการประเมินความแข็งแรงโครงสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ด้วยการประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดค่าการทรุดตัวจากเครื่องมือเบนเคลแมน บีม และเครื่องดัมกระแทกแบบเบาโดยใช้การคำนวณย้อนกลับด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้เทคนิคใหม่ 3 วิธีได้แก่ การผสมข้ามแบบสม่ำเสมอ การกลายพันธุ์แบบคิบบ์ และวิธีเฉพาะกลุ่ม โดยการสร้างแปลงทดสอบขนาดจริงและบดอัดด้วยจำนวนเที่ยวและวันที่กำหนด พบว่าแอ่งการยุบตัวจากเครื่องมือเบนเคนแมนบีมสามารถปรับปรุงด้วยสมการถดถอย แต่ยังคงไม่เพียงพอต่อการคำนวณย้อนกลับซึ่งได้ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 20 ในขณะที่ผลการทดสอบจากเครื่องดัมกระแทกแบบเบาไม่จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์แบบถดถอย และลดค่าความคลาดเคลื่อนลงเหลือเพียงร้อยละ 9 ทั้งนี้การผสมข้ามแบบสม่ำเสมอและการกลายพันธุ์แบบคิบบ์ทำให้ประสิทธิภาพการคำนวณดีขึ้น ในขณะที่วิธีเฉพาะกลุ่มไม่มีอิทธิพลมากนัก

คำหลัก: ค่าโมดูลัสชั้นทาง พื้นทางดินซีเมนต์ ระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

CE014

การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างพื้นทางดินซีเมนต์โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
Analysis of Strength of Soil-Cement Base Using Genetic Algorithm

ปรีชา สาาลี* บุญชัย ผึ้งไผ่งาม และ พุทธิพล ทองอินทร์คำ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี

* preecha_sa@mail.rmutt.ac.th, boonchai.p@en.rmutt.ac.th, puttapon.t@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

แม้ว่าถนนที่มีพื้นทางดินซีเมนต์จะตอบสนองต่อการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างทางโดยรวม แต่ในทางวิศวกรรมผิวทางยังคงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบความแข็งแรงแต่ละชั้นทาง จึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีการคำนวณย้อนกลับซึ่งมีหลากหลาย งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการประเมินความแข็งแรงโครงสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ด้วยการประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดค่าการทรุดตัวจากเครื่องมือเบนเคลแมนบีม และเครื่องดุ่มกระแทกแบบเบาโดยใช้การคำนวณย้อนกลับด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้เทคนิคใหม่ 3 วิธีได้แก่ การผสมข้ามแบบสม่ำเสมอ การกลายพันธุ์แบบคิ๊บ และวิธีเฉพาะกลุ่ม โดยการสร้างแปลงทดสอบขนาดจริงและבודัดด้วยจำนวนเที่ยวและวันที่กำหนด พบว่าแองการยุบตัวจากเครื่องมือเบนเคนแมนบีมสามารถปรับปรุงด้วยสมการถดถอย แต่ยังคงไม่เพียงพอต่อการคำนวณย้อนกลับซึ่งได้ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 20 ในขณะที่ผลการทดสอบจากเครื่องดุ่มกระแทกแบบเบาไม่จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์แบบถดถอย และลดค่าความคลาดเคลื่อนลงเหลือเพียงร้อยละ 9 ทั้งนี้การผสมข้ามแบบสม่ำเสมอและการกลายพันธุ์แบบคิ๊บทำให้ประสิทธิภาพการคำนวณดีขึ้น ในขณะที่วิธีเฉพาะกลุ่มไม่มีอิทธิพลมากนัก

คำหลัก: ค่าโมดูลัสชั้นทาง พื้นทางดินซีเมนต์ ระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Abstract

Even though roads with soil-cement base layer show a success case for overall strength improvement, we need to know the strength of each layers in the pavement structure. Backcalculation is the main process for solving this problem. This research studies about the evaluation of soil-cement base stiffness using Benkelman beam and lightweight deflectometer. The test results are input data for backcalculation process based on genetic algorithm with 3 new techniques, i.e. uniform crossover, creep mutation and niche method. Full scale test sections have been constructed and tested. It has been found that even if the results from Benkelman beam can be improved significantly with regression method but the accuracy is not enough for backcalculation process and showing error more than 20 percent. On the other hands, the results from lightweight deflectometer do not need any regression

method by reducing the error to about 9 percent. Furthermore, it has been found that uniform crossover and creep mutation have major impact on calculation process.

Keywords: Layer moduli, Soil-cement base, Genetic algorithm

1. บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุหินคลุกเริ่มขาดแคลนในหลายพื้นที่ของประเทศไทย ประกอบกับการลำเลียงขนส่งวัสดุจากแหล่งวัสดุขึ้นทางในพื้นที่ห่างไกลส่งผลให้ถนนต้องรองรับการสัญจรของรถบรรทุกหนักและเกิดความเสียหายอย่างรวดเร็วได้ และยังเป็นการทำลายทรัพยากรธรรมชาติอีกด้วย [1] จากปัญหานี้จึงทำให้จำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุในท้องถิ่นที่คุณภาพต่ำเข้ามาทดแทนและเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของพื้นทางปรับปรุงคุณภาพให้ดียิ่งขึ้น เป็นระยะเวลาเวลามากกว่าครึ่งศตวรรษที่ได้มีการนำเอาปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของพื้นทาง ซึ่งในช่วงแรกของการก่อสร้างนั้นแสดงพฤติกรรมของถนนที่ดีจึงทำให้ได้มีการก่อสร้างถนนดังกล่าวเพิ่มขึ้นอีกในหลายสายทาง รวมระยะทางทั้งสิ้นประมาณ 1,400 กม. แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปไม่นานกลับความเสียหายในบางช่วงของสายทางในลักษณะรอยแตกแบบสะท้อน (Reflective crack) จำนวนมาก

กระบวนการแก้ไขปัญหารอยแตกแบบสะท้อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ทางดินซีเมนต์ที่เรียกว่า “การสร้างรอยร้าวขนาดเล็ก (Microcracking)”

[2] เป็นวิธีการที่อาศัยการบดอัดชั้นพื้นทางเพิ่มเติมเพื่อสร้างรอยร้าวขนาดเล็กขึ้น และบดอัดจนกระทั่งความแข็งแรงโดยรวมของโครงสร้างลดลง 60 % วิธีการดังกล่าวยังถูกนำมาใช้ในประเทศไทยเช่นเดียวกันในเวลาต่อมา []

ในขณะที่ปัญหาทางวิศวกรรมที่ต้องการทราบความแข็งแรงที่แท้จริงในแต่ละชั้นทางไม่สามารถทำได้โดยง่ายต้องอาศัยวิธีการคำนวณย้อนกลับซึ่งมีหลากหลายวิธีการทางตัวเลข จึงจำเป็นต้องมีโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณซึ่ง

สมรรถนะและประสิทธิภาพของแต่ละโปรแกรมขึ้นอยู่กับระเบียบวิธีหาค่าซึ่งวิธีที่กล่าวถึงถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างประสบความสำเร็จและกำลังเป็นที่นิยมและแพร่หลายคือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) [17] โดยระเบียบวิธีดังกล่าวเข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาการคำนวณย้อนกลับเนื่องจากพบว่าปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อนเพราะสามารถแก้ปัญหาพื้นที่ค่าตอบที่มีหลายจุดสูงสุดและต่ำสุด (Multimodal Problems)

ทั้งนี้จากการพัฒนาระเบียบวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรมได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้มีการพัฒนาเทคนิคใหม่

[18] จากคุณสมบัติเด่นหลายประการนี้ก็นำมาประยุกต์ใช้กับการประเมินความแข็งแรงของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ และชั้นทางอื่นๆได้ ซึ่งในต่างประเทศมีการใช้เครื่องวัดค่าการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงทำให้มีใช้เฉพาะในหน่วยงานหลักด้านงานทางของประเทศไทยเท่านั้น จากปัจจัยด้านราคาดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีการทดสอบด้วยเครื่องมือ 2 ชนิด คือ 1) เบนเคลแมนบีม (Benkelman Beam, BB) มาใช้ในการทดสอบแทนที่เครื่องมือดังกล่าวโดยอาศัยวิธี FWD-Sim ที่พัฒนาโดย พุทธิพล และนิรชร

[19] และ 2) เครื่องเครื่องวัดค่าการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทกแบบเบา (Light Weight Deflectometer, LWD) เพื่อนำมาใช้ศึกษาหาความแข็งแรงของแต่ละชั้นทางหลังจากผ่านกระบวนการสร้างรอยร้าวขนาดเล็กในพื้นที่ทางดินซีเมนต์

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทดสอบความแข็งแรงแบบไม่ทำลาย

เพื่อให้ทราบถึงความเสียหายของโครงสร้างผิวทางทั้งจากการใช้งาน (Functional Failure) และด้านโครงสร้าง (Structural Failure) วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing, NDT) เป็นวิธีการทดสอบที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน โดยเฉพาะในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทางที่ต้องเผชิญกับความผันผวนจากปัจจัยของวัสดุและสิ่งแวดล้อม เครื่องมือทดสอบ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องมือทดสอบมาอย่างต่อเนื่อง

เครื่องเบนเคลแมนบีบ หรือ BB คือเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลายในยุคแรกๆ ที่ถูกพัฒนาโดย A.C. Benkelman ใช้สำหรับประเมินความแข็งแรงโดยรวมของโครงสร้างผิวทางจากการอ่านค่าด้วยมาตรวัดแบบนาฬิกา (Dial Gauge) ทั้งนี้แม้ว่าการทดสอบด้วยเครื่อง BB จะมีขั้นตอนการทดสอบที่ไม่ซับซ้อน และมีราคาบำรุงรักษาของเครื่องมือที่ถูกลง แต่พบว่ามีข้อจำกัดในการหาพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ของชั้นทาง ซึ่งต้องอาศัยการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม

[19]

ในขณะที่เครื่อง LWD เป็นเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลายที่มีหลักการการทำงานที่คล้ายคลึงกับเครื่อง FWD ที่อาศัยแรงกระตุ้น (Impulse) แต่มีข้อดีคือน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายได้สะดวก และมีราคาถูกกว่า โดยปกติจะสามารถวัดค่าการยุบตัวของโครงสร้างได้ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของน้ำหนักโดยใช้ Geophone ที่ติดตั้งอยู่ที่กึ่งกลางแผ่นเหล็กด้วยทฤษฎีของ Boussinesq หรือ Burmister นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการคำนวณย้อนกลับหาความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้จากการสร้างค่าแองการยุบตัวด้วย Geophone ที่ติดตั้งเพิ่มเติม 1-2 ชุด

2.2 ระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) และ GAMLET

ระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) คิดค้นขึ้นโดย John Holland (1975) เพื่อหาคำเฉลยที่เหมาะสม โดยพื้นฐาน GA ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนคือ การสร้างกลุ่มประชากร (creation of population) การประเมินความเหมาะสม (evaluation) การคัดเลือก (selection) การจับคู่ผสมข้าม (crossover) และการกลายพันธุ์ (mutation)

[20]

การทำงานของ GA อย่างง่ายจะเริ่มจากสุ่มสร้างชุดรหัสเลขฐานสองเรียกว่า โครโมโซม ซึ่งสามารถแปลงรหัสกลับไปเป็นค่าพารามิเตอร์เลขฐานสิบใช้ในการคำนวณวิเคราะห์ และทำการประเมินค่าความเหมาะสม (fitness evaluation) แล้วนำมาคัดเลือกเพื่อนำไปเป็นกลุ่มประชากรรุ่นพ่อแม่ จากนั้นประชากรที่ถูกเลือกในรูปแบบของโครโมโซมจะถูกนำมาดำเนินการทางพันธุกรรม (genetic operation หรือ reproduction operation) คือการผสมข้ามและการกลายพันธุ์ เพื่อสร้างประชากรรุ่นลูกหรือทายาท และเมื่อนำประชากรกลุ่มนี้มาประเมินค่าความเหมาะสมแล้วพบค่าต่อที่เหมาะสมกับปัญหากระบวนการทำงานก็จะสิ้นสุดลง แต่หากยังไม่พบคำตอบที่ต้องการ กระบวนการทำงานก็จะดำเนินต่อไป โดยมีการแทนที่ของประชากรรุ่นพ่อแม่ด้วยรุ่นลูกซึ่งพิจารณาโอกาสในการแทนที่จากค่าความเหมาะสม สายรหัสโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากก็จะมีโอกาสที่จะถูกเลือกมาก ในทางตรงข้ามสายรหัสที่มีความเหมาะสมน้อยก็จะมีโอกาสถูกเลือกน้อยและอาจสูญพันธุ์ไปในที่สุด เมื่อแทนที่เสร็จก็จะกลับเข้าสู่กระบวนการคัดเลือกใหม่ โดยกระบวนการเหล่านี้จะดำเนินการไปเรื่อย ๆ เมื่อผ่านไปหลาย ๆ รุ่น ลักษณะทางพันธุกรรมที่ดีของรุ่นบรรพบุรุษ

จะถูกถ่ายทอดไปยังรุ่นทายาท ซึ่งจะทำให้รุ่นถัดไปมีค่าความเหมาะสมสูงขึ้นจนนำไปสู่การค้นพบคำตอบที่เหมาะสม

จุดเด่นของ GA อยู่ที่การค้นหาคำตอบที่มีความเหมาะสมโดยรวม ซึ่งเป็นผลมาจากการจับคู่ผสมพันธุ์ของประชากรที่มีค่าความเหมาะสมต่างกันทำให้มีโอกาสในการค้นหาพื้นที่คำตอบที่กว้างขึ้น

[20] และการกลายพันธุ์ทำให้การค้นหาคำตอบไม่ติดอยู่กับหรือจุดต่ำสุดเฉพาะที่ แต่การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมโดยรวมจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการกำหนดตัวดำเนินการทางพันธุกรรมหรือพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งเปรียบเสมือนการกำหนดสภาพแวดล้อมให้กับกลุ่มประชากร ในทางกลับกันการเลือกชุดพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมก็จะทำให้คำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ติดอยู่กับจุดต่ำสุดเฉพาะที่ของพื้นที่คำตอบเท่านั้น โดย Fwa และคณะ

[21] เป็นยุคแรกๆที่ได้นำ GA มาใช้ในด้านวิศวกรรมชีวภาพ โดยพัฒนาโปรแกรม NUS-GABACK

โปรแกรมเกมเล็ทเป็นโปรแกรมสำหรับคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสชั้นทางที่พัฒนาขึ้นโดย พุทธิพล

[22] โดยอาศัยกระบวนการคำนวณ 2 ส่วนได้แก่ การคำนวณแบบเดินหน้าด้วยทฤษฎียืดหยุ่นหลายชั้นทาง (Multilayered Elastic Theory, MLET) ร่วมกับการคำนวณย้อนกลับด้วยระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยมีคุณลักษณะที่โดดเด่นสำคัญดังต่อไปนี้

- 1) ประเมินค่าความเหมาะสมด้วยสมการดังต่อไปนี้

ค่าน้อยสุดของ $f_1 = \max \left(\frac{d_i - D_i}{D_i} \right) \times 100$ (1)

ค่าน้อยสุดของ $f_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i - D_i}{D_i} \right)^2} \times 100\%$ (2)

ค่ามากที่สุดของ $f_3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{OBJ}{10^6} \right)}$ (3)

โดย $OBJ = \sum_{i=1}^N (d_i - D_i)^2$ (4)

เมื่อ N คือจำนวนอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว

d_i คือค่าการยุบตัวที่ได้จากการคำนวณในตำแหน่งที่ i

D_i คือค่าการยุบตัวที่ได้จากการวัดจริงในตำแหน่งที่ i

- 2) คัดเลือกประชากร โดยใช้วิธีแบบ Tournament
- 3) การผสมข้ามแบบจุดเดียว และแบบสม้าเสมอ
- 4) การกลายพันธุ์แบบกระโดดและแบบสืบ
- 5) การคัดเลือกผู้นำ
- 6) วิธีกลุ่มเฉพาะ

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการปรับแก้ค่าแองการยุบตัวเพื่อนำไปคำนวณย้อนกลับ Hossain

[22] ได้เสนอสมการถดถอยเอ็กซ์โพเนนเชียลสำหรับปรับแก้แองการยุบตัว ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 5 โดยที่ r คือระยะตามแนวรัศมี A และ B คือค่าสัมประสิทธิ์เชิงตัวเลข

ค่าน้อยสุดของ $D(r) = Ae^{Br}$ (5)

ในขณะที่ Lin และคณะ [23] ได้ศึกษาผลกระทบจากการคำนวณย้อนกลับ โดยโมดูลัสชั้นทางของดินชนิดต่างๆ จากการคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม MODULUS แสดงให้เห็นว่าแผ่นเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 มม. ให้ความคลาดเคลื่อนของโมดูลัสต่ำสุด ในขณะที่ผลของความสูงระยะตกกระทบไม่มีผลต่อการทดสอบมากนัก

ในปี พ.ศ. 2553 พุทธิพล และนิรชร

[19] ได้ประยุกต์ใช้เครื่องมือ Benkelman Beam วัดค่าแองการยุบตัวด้วยวิธีใหม่ที่เรียกว่า “FWD-SIM” เพื่อประเมินความแข็งแรงโครงสร้างถนนลาดยาง และได้แนะนำชุดค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม GAMLET ดังนี้ จำนวนประชากร=210,

จำนวนรุ่นสูงสุด=200, การผสมข้ามแบบจุดเดียว 0.9, การกลายพันธ์แบบกระโดด=0, การกลายพันธ์แบบคืบ=0.4, วิถีกลุ่มเฉพาะ=on, การคัดเลือกผู้นำ=on ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากค่าแองการยุดตัวของเครื่องมือเบนเคลแมนบีมในการทดสอบนั้นให้ค่า RMSE มากกว่าร้อยละ 3 จึงไม่สามารถหาชุดค่าตอบที่เหมาะสมได้

ต่อมาในปี พ.ศ. 2556 จักรพงษ์ และ พุทธิพล [24] ได้ทำการศึกษาเลือกชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับคำนวณย้อนกลับค่าโมดูลัสชั้นทางยึดหยุ่นแบบ 3 ชั้นทาง ด้วยโปรแกรม GAMLET ผลที่ได้พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ จำนวนรุ่นสูงสุด 100 รุ่น ขนาดประชากร 40 การผสมข้ามแบบสม่ำเสมอ การกลายพันธ์แบบกระโดดและแบบคืบเท่ากับ 0.77, 0.016 และ 0.140 ตามลำดับ และเปิดใช้การคัดเลือกผู้นำและวิถีกลุ่มเฉพาะ โดยพบว่าพารามิเตอร์ชุดดังกล่าวให้ค่า RMSE อยู่ในเกณฑ์ดี จึงจะใช้เป็นตัวแปรเพื่อวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แปลงทดสอบพื้นทางดินซีเมนต์

แปลงทดสอบพื้นทางดินซีเมนต์ถูกสร้างขึ้นโดยจำลองวิธีการและเทคนิคการก่อสร้างที่ผู้รับเหมาทั่วไปนิยมใช้ในการก่อสร้างจริง คือ การกรดยและครูดหน้าดิน (Scarify) ที่ความลึกตามความหนาของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ คือ 0.15 ม. และทำการผสมซีเมนต์ในที (In-place mixing) ซึ่งเป็นที่คาดการณ์ว่าความหนาที่แท้จริงของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์จะแปรผันค่อนข้างมาก ที่ลานอเนกประสงค์ บ้านกระบกเตี้ย ต.ท่ากระดาน อ.สนามชัยเขต จ.ฉะเชิงเทรา โดยแบ่งแปลงทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ แปลงทดสอบควบคุม (Control Test Section, CTS) และ แปลงทดสอบที่สร้างรอยร้าวขนาดเล็ก (Microcracking Test Section, MTS) โดยเพื่อให้มีแนวโน้มการเกิดรอยร้าวแบบหดตัวที่สูงจึงเลือกใช้

ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 8 แปลงทดสอบมีขนาดความกว้าง 3 ม. ยาว 10 ม โดยจะทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสผิวดินเดิม (Surface modulus) ด้วยเครื่อง LWLD เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณย้อนกลับด้วย

3.2 ค่าแองการยุดตัวจากเครื่องมือเบนเคลแมนบีม

การทดสอบค่าการยุดตัวในแปลง CTS และแปลง MTS ด้วยเครื่อง BB สามารถแสดงสถานีทดสอบทั้ง 4 สถานีได้ดังรูปที่ 1 โดยที่แนวการทดสอบด้วยเครื่อง BB ตามวิธี FWD-sim ห่างจากขอบแปลงทดสอบ 0.50 ม. โดยประมาณ และมีระยะการอ่านค่าการยุดตัวที่ 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1,200, 1,500 มม. การทดสอบแสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 16 สถานีทดสอบพื้นทางดินซีเมนต์



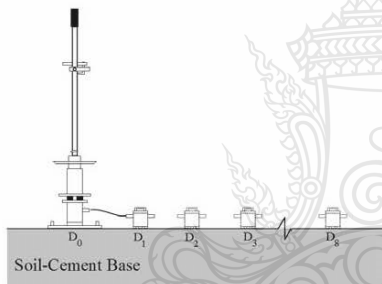
รูปที่ 17 การทดสอบค่าการยุดตัวด้วยวิธี FWD-sim

3.3 ค่าแองการยุดตัวจากเครื่องมือ LWLD

เนื่องจากเครื่อง LWLD ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นระบบที่มีเซ็นเซอร์ภายในและภายนอกอย่างละ 1 ตัว ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าแองการยุดตัวที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณย้อนกลับได้ ทีมวิจัยจึงได้ทดลองพัฒนาวิธีการวัด

ค่าการทรุดตัวแบบทับซ้อน (Superposition in deflection) หรือเรียกโดยย่อว่า “Superpos-Def” โดยขั้นตอนการทดสอบจะใช้ระบบการวัดค่าแบบทีละคู่ โดยการวัดชุดที่ 1 ซึ่งเซ็นเซอร์ตัวที่ 1 อยู่ที่กึ่งกลางแผ่นเหล็ก ส่วนตัวที่ 2 วางที่ตำแหน่งตามระยะที่ต้องการทดสอบ ซึ่งในขั้นนี้ได้วางเซ็นเซอร์ตัวที่ 2 ตามระยะที่นิยมใช้ทั่วไปของเครื่อง FWD เช่นเดียวกับการทดสอบในขั้นตอนที่ 3.2

ค่าการยุบตัวที่ได้ในแต่ละตำแหน่งในแปลง CTS และ MTS จะนำมาพิจารณาและหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำไปใช้คำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม GAMLET รายละเอียดการทดสอบด้วยวิธี Superpos-Def แสดงดังรูปที่ 18 และใช้ขนาดตุ้มน้ำหนัก 15 กก. แผ่นเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 ม. และระยะตกกระทบที่ 500 มม.



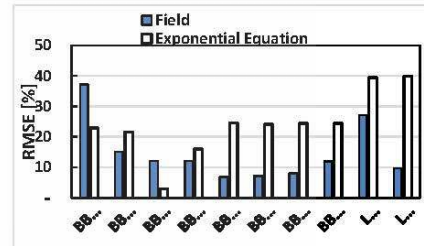
รูปที่ 18 การวัดค่าการยุบตัวด้วยวิธี Superpos-Def

ในการวิเคราะห์หาค่าความแข็งแรงของชั้นทางในโปรแกรมแกมเล็ตได้เลือกใช้พารามิเตอร์จากงานวิจัยของจักรพงษ์ [24] โดยใช้โปรแกรมรุ่น GAMLET308 ซึ่งวิเคราะห์หาค่าความแข็งแรงของชั้นทางแบบ 3 ชั้นทางจากค่าการยุบตัว 8 ตำแหน่ง

4. ผลการวิเคราะห์

เมื่อนำผลทดสอบแ่งการยุบตัวของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์จากเครื่องมือ BB และ LWD วิเคราะห์ถดถอด้วยสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลของ Hossain ดังสมการที่ 5

พบว่าได้ค่า R^2 อยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่เมื่อนำแ่งการยุบตัวที่ปรับแก้แล้วไปใช้คำนวณย้อนกลับด้วย GA กลับพบว่าค่า RMSE สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 19 RMSE จากผลทดสอบด้วย BB และ LWD

นอกจากนั้น จากรูปที่ 4 และตารางที่ 1 พบว่าค่า RMSE ต่ำสุดจากเครื่อง BB แสดงความไม่สอดคล้องของค่าความแข็งแรงของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์จากแปลง CTS และ MTS รวมถึงไม่สอดคล้องกับสภาพทางกายภาพของแปลงทดสอบและผลทดสอบอื่น โดยแนวโน้มความแข็งแรงที่น่าจะเป็นตามลักษณะทางกายภาพคือ E_1 ซึ่งเป็นชั้นดินซีเมนต์ควรมีค่าสูงกว่า E_2 ซึ่งเป็นชั้นดินลูกรังใหม่ และ E_2 ควรมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่า E_3 ซึ่งเป็นชั้นดินเดิมอัดแน่น (Consolidated)

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางจากการทดสอบด้วยเครื่อง BB

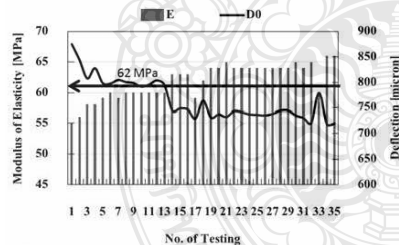
STA	Field			Exponential Equation		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3
BB_CTS_1	554	22	172	551	57	65
BB_CTS_2	557	36	158	717	71	84
BB_CTS_3	330	141	84	2055	207	53
BB_CTS_4	171	126	193	1305	102	152
BB_MTS_1	115	99	152	808	99	103
BB_MTS_2	255	83	145	824	98	104
BB_MTS_3	197	104	148	883	105	111
BB_MTS_4	319	68	165	1083	130	137

สำหรับกรณีการวิเคราะห์ผลจาก LWD เมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นดินลูกรัง จากการคำนวณย้อนกลับด้วยค่าแองการยวบตัวจาก LWD ตั้งตารางที่ 2 พบว่าแนวโน้มของค่าโมดูลัสตั้งกล่าวทั้งหมดมีค่าสอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกันกับค่าโมดูลัสผิวดินลูกรังรวม โดยค่าเฉลี่ยโมดูลัสผิวดินลูกรังรวมจากการทดสอบ 4 ตำแหน่ง 16 ชุดทดสอบได้ค่าโมดูลัสเฉลี่ยเท่ากับ 33 MPa

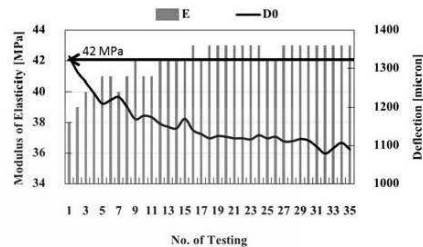
ตารางที่ 5 ผลการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางจากการทดสอบด้วยเครื่อง LWD

STA	Field			Exponential Equation		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3
LWD_CTS	122	28	131	291	37	161
LWD_MTS	56	26	86	209	24	107

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากผลค่าเฉลี่ยโมดูลัสผิวพื้นทางดินซีเมนต์ด้วยวิธี Superpos-Def ดังรูปที่ 5 และ 6 รวมถึงค่าโมดูลัสของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์จากการคำนวณย้อนกลับพบว่าค่า LWD สามารถแสดงแนวโน้มการลดลงของค่าโมดูลัสจากแปลง CTS และ MTS ได้อย่างชัดเจนทั้งหมด



รูปที่ 20 ผลการทดสอบค่าการยุบตัวและค่าโมดูลัสที่ผิวพื้นทางดินซีเมนต์จาก LWD ด้วยวิธี Superpos-Def ในแปลง CTS



รูปที่ 21 ผลการทดสอบค่าการยุบตัวและค่าโมดูลัสที่ผิวพื้นทางดินซีเมนต์จาก LWD ด้วยวิธี Superpos-Def ในแปลง MTS

โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลค่าเฉลี่ยโมดูลัสผิวดินลูกรังรวมและค่าเฉลี่ยโมดูลัสผิวพื้นทางดินซีเมนต์ พบว่าค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงของแต่ละชั้นทางที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับด้วยแองการยวบตัวจาก LWD ด้วยวิธี Superpos-Def แสดงให้เห็นว่ากระบวนการคำนวณย้อนกลับสามารถแสดงแนวโน้มของความแข็งแรงแต่ละชั้นทางได้ดีกว่า

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาเพื่อประเมินความแข็งแรงของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ด้วยเครื่องมือ BB และ LWD ในงานวิจัยนี้ ทีมวิจัยได้ทดลองวิธีวัดค่าแองการยวบตัวแบบใหม่ เรียกว่า Superposition in deflection หรือ “Superpos-Def” และวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมโดยใช้โปรแกรม GAMLET ผลวิเคราะห์กรณีเครื่อง BB และเครื่อง LWD ให้ค่า RMSE ที่ยังคงค่อนข้างสูงและแปรผัน โดยพบว่าวิธีวิเคราะห์ลดถอยแบบเอ็กโพเนนเชียลไม่เหมาะสมกับการสร้างแองการยวบตัวจากข้อมูลสนาม ถึงแม้จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 ที่สูงมากแต่กลับทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น

จากการทดสอบค่าโมดูลัสที่ผิวแต่ละชั้นทางและการคำนวณย้อนกลับด้วยเครื่อง LWD ให้ความแข็งแรงที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทางดินซีเมนต์และชั้นดินลูกรังถม โดยผลการคำนวณย้อนกลับด้วยค่าแอมป์การยุบตัวจากเครื่อง LWD สามารถแสดงพฤติกรรมความแข็งแรงของโครงสร้างได้ดีกว่าการทดสอบด้วยเครื่อง BB เนื่องมาจากความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) ที่ดี

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทีมงานในหน่วยวิจัยเทคโนโลยีถนนและท่าอากาศยาน (Road and Airfield Pavement Technology Research Unit, RAPTRU) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อำนวยความสะดวกเรื่องเครื่องมือทดสอบ โปรแกรมการวิเคราะห์และสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[15] ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ สลัดพงษ์ อภิเมธีอารัง (2541). การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างถนนลาดยางที่มีดินซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นพื้นทางกับถนนลาดยางที่มีหินคลุกเป็นพื้นทางและวัสดุรวมเป็นรองพื้นทาง, รายงานฉบับที่วพ.169.

[16] Sebest S. and Scullion T., Effectiveness of Minimizing Reflective Cracking in Cement-Treated Bases by Microcracking (2004). Report 0-4502-1.

[3] Sunitakul J., Sawatpanich A., Apimeteetamrong S. and Faikatok T. (2550). Microcracks to Reduce Reflective Crack in Soil Cement Road in Thailand, *การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และตรวจสอบ ประจำปี*

งบประมาณ 2550, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบกรมทางหลวง.

[17] Dejong K.A., and Spears W.M. (1990). An Analysis of the Interacting Roles Population Size and Crossover in Genetic Algorithms, *Parallel Problem Solving from Nature (Electronic)*, vol. 26, pp. 38 - 47.

[18] Goldberg D.E., Deb K. and Clark J.H. (1992). Genetic algorithms noise, and the sizing of populations, in *Complex Systems* 6.

[19] พุทธิพล ทองอินทร์คำ และ นิรชร นกแก้ว (2553). การพัฒนาระบบตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางในท้องถิ่นโดยวิธีตรง, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[20] Reddy M., Amarnatha R., Sudhakar K. and Pandey B.B. (2004). Selection of Genetic Algorithm Parameters for Backcalculation of Pavement Moduli, *International Journal of Pavement Engineering (Electronic)*, pp. 37 - 44.

[21] Fwa T.F., Tan C.Y. and Chan W.T. (1997). Backcalculation analysis of pavement layer moduli using genetic algorithms, *Transportation Research Record 1570 (TRB, National Research Council, Washington DC)*, pp. 134 - 142.

[22] Thongindam P. (2009). *Enhancement of Backcalculation Techniques for Assessing Flexible Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms*, Doctoral Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz University of Hannover, Hannover, Germany.

- [23] Lin D.F., Liao C.C. and Lin J.D. (2006). Factors Affecting Portable Falling Weight Deflectometer Measurements, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132(6), June 2006, pp. 804 – 808.
- [24] จักรพงษ์ นามหาชัย (2556). การเลือกชุดพารามิเตอร์สำหรับระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางแอสฟัลต์คอกกรีต, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายปรีชา สาลี
วัน เดือน ปีเกิด	14 พฤษภาคม 2514
ที่อยู่	43 ถนนคำสายทองวิทยา ตำบลมุกดาหาร อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร 49000
การศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)
ประสบการณ์การทำงาน	ผู้อำนวยการกองช่างเทศบาลเมืองกันทรลักษ์ ตั้งแต่ พ.ศ. 2556 - ถึง ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	090-272-9889
อีเมล	preecha_salee@hotmail.com

