

การศึกษาคุณลักษณะของหลุมการแอ่นตัวจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบเพื่อ
ประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง

นายสรายุทธ กำไล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

A STUDY OF DEFLECTION BASIN CHARACTERISTICS USING FALLING WEIGHT
DEFLECTOMETER TO EVALUATE PAVEMENT STRUCTURAL STRENGTH

Mr. Sarayoot Kumlai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาคุณลักษณะของหลุมการแ่นตัวจากการ
ทดสอบการแ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบเพื่อ
ประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง

โดย นายสรายุทธ กำไล

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก อาจารย์

ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกษม ชูจารุกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม.)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์.ดร.)

สรายุทธ กำไล : การศึกษาคุณลักษณะของหลุมการแอ่นตัวจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบเพื่อประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง. (A STUDY OF DEFLECTION BASIN CHARACTERISTICS USING FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER TO EVALUATE PAVEMENT STRUCTURAL STRENGTH)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดรบุญชัย แสงเพชรงาม., 146 หน้า.

ในงานซ่อมบำรุงทางมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการทดสอบความแข็งแรงของชั้นวัสดุในโครงสร้างทางเพื่อประเมินความสามารถในการรองรับปริมาณจราจรและนำไปสู่การกำหนดวิธีการซ่อมบำรุงหรือปรับปรุงทางที่เหมาะสม ในปัจจุบันการทดสอบวัดการแอ่นตัวบนผิวทางภายใต้น้ำหนักตกกระทบได้ถูกนำมาใช้ เพื่อประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างทางได้อย่างรวดเร็ว , ประหยัด ไม่ทำลายผิวทาง และครอบคลุมจำนวนจุดทดสอบมากขึ้น ผลการทดสอบที่ ได้รับโดยตรงคือ ข้อมูลหลุมการแอ่นตัวบนผิวทาง แต่การวิเคราะห์ข้อมูลการแอ่นตัวนี้ยังขาดวิธีการวิเคราะห์ที่ให้ผลลัพธ์ค่าความแข็งแรงของชั้นวัสดุทางได้อย่างถูกต้องและแน่นอนสำหรับรูปแบบโครงสร้างทางที่ใช้ในประเทศไทย งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นวัสดุทางด้วยชุดสมการตัวแปรค่าการแอ่นตัว ซึ่งพัฒนามาจากพฤติกรรมการแอ่นตัวของโครงสร้างทางในแบบจำลองทางทฤษฎีอีลาสติคซิติ ผลการทดสอบชุดสมการกับรูปแบบโครงสร้างทางที่ใช้ทั่วไปในประเทศไทยพบว่าสามารถบ่งบอกความแข็งแรงของชั้นผิวทาง, พื้นทาง, รองพื้นทาง และดินเดิมได้อย่างถูกต้อง

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา..... 2554.....

5270640721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER / FWD / DEFLECTION BASIN /
PAVEMENT STRUCTURAL STRENGTH

SARAYOOT KUMLAI : A STUDY OF DEFLECTION BASIN CHARACTERISTICS
USING FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER TO EVALUATE PAVEMENT
STRUCTURAL STRENGTH. ADVISOR : BOONCHAI SANGPETNGAM, Ph.D.,
146 pp.

Road maintenance obviously needs a pavement structural strength testing for evaluating its capacity of supporting traffic loads and determining a proper restoration or improvement. At present, the Falling Weight Deflectometer (FWD) is used for evaluating pavement structural strength in the field. The FWD is fast, cost saving, nondestructive and covering more testing locations. The FWD test yields the surface deflection basin data. There are many analysis programs in the market for interpreting the data into the pavement strength results. However, applying those programs to the pavement patterns used in Thailand have been unsuccessful on giving the correct results comparing to the actual pavements. This research proposes a newly-developed method for determining the elastic modulus of pavement layers in term of equations of surface deflection parameters. The equations were developed based on the surface deflection data generated from the layered-elastic model using the Everstress computer program. The developed equations were evaluated with the FWD deflection data conducted on the actual rural roads in Thailand. It was found that the equations were able to indicate the structural strength of surface, base, subbase and subgrade of the tested roads correctly.

Department: Civil Engineering Student's Signature.....
Field of Study: Civil Engineering Advisor's Signature.....
Academic Year: 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณา เป็นอย่างยิ่งจาก อาจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่อง ในการทำวิทยานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จเสร็จสิ้น นอกจากนี้ข้าพเจ้ายังได้เรียนรู้หลักการทำงาน วิจัยต่างๆนอกเหนือจากวิทยานิพนธ์ รวมทั้งโอกาสในการพัฒนาตนเองในการก้าวสู่ความเป็น ผู้ใหญ่ ซึ่งเป็นความรู้และประสบการณ์อันมีค่าอย่างยิ่งที่ข้าพเจ้าได้เรียนรู้จากท่าน จึงขอกราบ ขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกษม ชูจารุกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ กัณวีร์.ดร. กนิษฐพงศ์ที่ได้ให้คำปรึกษาคำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้ง แนวคิดและวิสัยทัศน์ที่ข้าพเจ้าได้รับในการทำวิทยานิพนธ์ และความรู้ทางด้านวิศวกรรมการขนส่ง ข้าพเจ้าขอขอบคุณท่านคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งและจราจร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้งคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความรู้พื้นฐานในระดับปริญญาบัณฑิตทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้อันเป็นประโยชน์ทั้งในการทำวิจัยและ ประกอบอาชีพแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณสกันธ์ พิทักษ์วินัย วิศวกรโยธาปฏิบัติกร สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท และคณะ ที่เป็นผู้คอยช่วยเหลือ อในด้านการทดสอบโครงสร้างชั้นทางใน ภาคสนาม ตลอดจนสนับสนุน รวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวทุกคน ที่คอยอบรมสั่งสอนให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้ามาโดยตลอด ขอขอบคุณแรงผลักดันต่างๆที่ทำให้ข้าพเจ้ามีเส้นทางที่ดีมาจนถึงทุกวันนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย	3
1.6 องค์ประกอบของรายงาน	3
บทที่ 2 การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ผิวทางแบบยืดหยุ่น(Flexible pavement).....	5
2.1.1 ชั้นผิวทาง(Surface course).....	6
2.1.2 ชั้นพื้นทาง(Base course)	6
2.1.3 ชั้นรองพื้นทาง(Subbase course)	6
2.1.4 ชั้นดินเดิมหรือชั้นดินคั่นทาง(Subgrade)	7
2.2 ความเค้น ความเครียด และการแอ่นตัว ของโครงสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่น (Stress Strain and Deflection in Flexible pavement).....	7
2.2.1 ทฤษฎีของ Boussinesq	7
2.2.2 ทฤษฎีของ Burmister	8
2.3 การทดสอบวัดความแข็งแรงของวัสดุโครงสร้างทาง	10
2.3.1 Dynamic Cone Penetrometer(DCP)	10
2.3.2 California Bearing Ratio(CBR)	14
2.3.3 Resilient Modulus(M_R)	14

2.3.4	ทฤษฎี Seismic-refraction	16
2.4	การทดสอบโครงสร้างชั้นทางด้วยการวัดการแอ่นตัวของผิวทาง	18
2.4.1	Benkelman beam	18
2.4.2	เครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบ (Falling Weight Deflectometer)	19
2.5	การตั้งค่าการทดสอบเครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบที่เกี่ยวข้อง	21
2.5.1	ขนาดของน้ำหนักและระยะเวลาในการตกกระทบ	21
2.5.2	จำนวนและระยะห่างของจีโอโฟน	21
2.5.3	ความถี่ในการทดสอบ	21
2.5.4	ความสามารถในการวัดซ้ำและความสามารถในการทำซ้ำ	22
2.6	ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อการแอ่นตัว	22
2.6.1	อุณหภูมิมาตรฐานของถนนของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย	24
2.6.2	การปรับแก้ผลกระทบเนื่องจากผลของอุณหภูมิ	25
2.7	การวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวเพื่อประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างทาง	25
2.7.1	การคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation)	25
2.7.2	การคำนวณหาค่าอิลาสติกโมดูลัสโดยใช้การวิเคราะห์ Time-History	27
2.7.3	วิธีพารามิเตอร์หุลุมการแอ่นตัว	28
2.7.4	ข้อจำกัดของแต่ละวิธีการ	29
บทที่ 3	การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
3.1	การใช้ SCI, BDI และ BCI ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง	32
3.2	ค่าแนะนำมาตรฐานของพารามิเตอร์หุลุมการแอ่นตัว	34
3.3	การใช้พารามิเตอร์หุลุมการแอ่นตัวของกระทรวงคมนาคมแห่งมลรัฐแท็กซัส	36
3.3.1	Statistical Structural Strength Index (SSI)	36
3.3.2	Structural Condition Index (SCI)	36
3.4	การประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง	40
3.5	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
บทที่ 4	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	44
4.1	การศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	45
4.2	การจำลองสภาพหุลุมการแอ่นตัว	47

4.2.1 โปรแกรม Everstress	48
4.2.2 การออกแบบการทดลอง	49
4.3 การสร้างพารามิเตอร์หลุมการแ่นตัว	50
4.3.1 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์(Correlation Coefficient)	51
4.3.2 การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น(Linear Regression Analysis).....	52
4.3.3 การแปลงรูปสมการความถดถอยให้อยู่ในรูปเชิงเส้น(Regression Transformation).....	53
4.4 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับข้อมูลในภาคสนาม	56
4.4.1 การปรับแก้ค่าการแ่นตัวเนื่องจากระดับแรงที่กระทำแตกต่างกัน	56
4.4.2 การคำนวณค่าอิลาสติกโมดูลัสจากข้อมูล Time-History	56
4.4.3 การคำนวณค่าอิลาสติกโมดูลัสจากการทดสอบ DCP ของแต่ละสายทาง..	58
4.4.4 การประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิม	59
4.4.5 การทดสอบความสัมพันธ์	59
บทที่ 5 ผลการจำลองสภาพหลุมการแ่นตัวและการวิเคราะห์พารามิเตอร์	61
5.1 การออกแบบการทดลองและจำลองสภาพหลุมการแ่นตัว	61
5.1.1 การกำหนดชนิดและจำนวนของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	61
5.1.2 การกำหนดขนาดต่ำสุด-สูงสุดของแต่ละปัจจัยและจำนวนการทดลอง	62
5.1.3 การจำลองสภาพหลุมการแ่นตัว	63
5.2 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)	64
5.2.1 กลุ่มพารามิเตอร์ผลต่างการแ่นตัวในช่วงระยะ 0-30 ซม.	65
5.2.2 กลุ่มพารามิเตอร์ผลต่างการแ่นตัวในช่วงระยะ 30-60 ซม.	65
5.2.3 กลุ่มพารามิเตอร์ผลต่างการแ่นตัวในช่วงระยะ 60-180 ซม.	65
5.3 การวิเคราะห์สมการความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis)	68
5.3.1 ชั้นผิวทาง	68
5.3.2 ชั้นพื้นทาง	72
5.3.3 ชั้นรองพื้นทาง.....	74
5.3.4 ชั้นดินเดิม.....	77
5.3.5 โมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทาง	78

บทที่ 6 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับข้อมูลในภาคสนาม	81
6.1 สายทางที่คัดเลือกเพื่อใช้ทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง	81
6.2 การประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทางในภาคสนาม	82
6.2.1 ชั้นพื้นทาง	83
6.2.2 ชั้นรองพื้นทาง.....	83
6.2.3 ชั้นดินเดิม.....	83
6.2.4 โมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทาง	84
6.2.5 ชั้นผิวทาง	84
6.2.5 พิจารณารวมทุกสายทาง	84
6.3 การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางด้วยการทดสอบวิธีอื่น.....	84
6.3.1 การวิเคราะห์ค่าอิลาสติกโมดูลัสจากข้อมูล Time-History	85
6.3.2 การวิเคราะห์ค่าอิลาสติกโมดูลัสจากการทดสอบ DCP	86
6.3.3 การวิเคราะห์ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิม	86
6.4 การทดสอบความสัมพันธ์	95
6.4.1 ชั้นผิวทาง	95
6.4.2 ชั้นพื้นทาง และรองพื้นทาง	96
6.4.3 ชั้นดินเดิม.....	98
บทที่ 7 สรุปผลการศึกษา	101
7.1 การจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัว.....	101
7.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว	102
7.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับข้อมูลในภาคสนาม	104
7.4 การใช้งานและข้อจำกัดของสมการที่ได้จากการศึกษา	105
รายการอ้างอิง.....	107
ภาคผนวก.....	111
ภาคผนวก ก	112
ภาคผนวก ข	122
ภาคผนวก ค	131
ภาคผนวก ง.....	138
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	146

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ช่วงอุณหภูมิของถนนในแต่ละภาคในช่วงปี พ.ศ.2534-2536..... 24
2.2	อุณหภูมิวิกฤตของถนนในแต่ละภาคในช่วงปี พ.ศ.2534-2536..... 25
2.3	สรุปรายละเอียดการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง 30
3.1	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ $y = a_0 * x^{a1}$ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ SCI, BDI และ BCI กับ E_{eq} 33
3.2	ค่ามาตรฐานของพารามิเตอร์หตุ้มการแอ่นตัวที่แบ่งประเภทถนนตามสภาพความแข็งแรง 35
3.3	สัมประสิทธิ์ของสมการความถดถอยระหว่างSN กับ SIP 39
3.4	รายละเอียดโดยสรุปของพารามิเตอร์แต่ละตัว 43
4.1	รายละเอียดโดยสรุปของพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย 47
4.2	การแปลงรูปสมการความถดถอยให้อยู่ในรูปเชิงเส้น 55
5.1	รายละเอียดค่าต่ำสุด-สูงสุด และค่าพารามิเตอร์ α ของแต่ละปัจจัย 62
5.2	รายละเอียดค่าเริ่มต้นที่ต้องป้อนในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทาง 63
5.3	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์(Correlation Coefficient) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ผลต่อการแอ่นตัวในแต่ละช่วง 67
5.4	รายละเอียดทางสถิติการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นผิวทาง 68
5.5	รายละเอียดทางสถิติการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นพื้นทาง 72
5.6	รายละเอียดทางสถิติการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นรองพื้นทาง 74
5.7	รายละเอียดทางสถิติการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นดินเดิม 77
5.8	รายละเอียดทางสถิติการวิเคราะห์สมการความถดถอยของโมดูลัสเทียบเท่า 79
6.1	รายละเอียดโครงสร้างชั้นทางกลุ่มสายทางใหม่ที่เปิดใช้งานไม่เกิน6 เดือน (New) 82
6.2	รายละเอียดโครงสร้างชั้นทางกลุ่มสายทางเก่าที่เปิดใช้งานเกิน6 เดือน (Old) 82
6.3	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ E_{FWD} กับ E_{Wave} ของชั้นผิวทาง 95
6.4	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่า E_{FWD} กับ E_{DCP} ของชั้นพื้นทางรวมทุกสายทาง 97
6.5	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่า E_{FWD} กับ E_{DCP} ของชั้นพื้นทางไม่รวมสายทาง N3,N4 ... 97
6.6	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่า E_{FWD} กับ E_{DCP} ของชั้นรองพื้นทาง..... 97
6.7	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่า E_{FWD} กับ E_{AASHTO} ของชั้นดินเดิม 99

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 4
2.1	การกระจายน้ำหนักของผิวทางแบบยึดหยุ่น 5
2.2	น้ำหนักกระทำแผ่สม่ำเสมอขนาด σ_0 เป็นพื้นที่วงกลมรัศมี a บนวัสดุแบบ Semi-Infinite Half Space 8
2.3	กราฟแสดงการแ่นตัวของระบบชั้นทาง 2 ชั้น..... 9
2.4	ความเค้นที่จุดสัมผัสแต่ละชั้นของระบบผิวทาง 3 ชั้น 10
2.5	เครื่อง Dynamic Cone Penetrometer 11
2.6	กราฟผลการทดสอบ DCP และการหาค่าเฉลี่ย DPI..... 13
2.7	ตัวอย่างการประมาณความหนาของชั้นโครงสร้างทาง..... 14
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและการแ่นตัวของตัวอย่าง 15
2.9	การเรียงตัวของGeophone และกราฟระหว่างความเร็วกับระยะทาง 17
2.10	เครื่องมือ Benkelman beam 19
2.11	แผ่นรับน้ำหนักและตัวรับสัญญาณของเครื่อง FWD 20
2.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Correction Factor กับอุณหภูมิที่กึ่งกลาง ความหนาของชั้นแอสฟัลต์เปรียบเทียบกับในแต่ละผู้วิจัย 24
2.13	แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณย้อนกลับ 26
2.14	ตัวอย่างแรงที่กระทำและการแ่นตัวที่ระยะเวลาต่างๆ 27
2.15	หลุมการแ่นตัวและการแ่นตัวที่ระยะต่างๆ..... 28
2.16	การแบ่งพื้นที่คำนวณค่าพารามิเตอร์พื้นที่หลุมการแ่นตัว..... 29
3.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างSCI กับ E_{eq} 33
3.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างBDI กับ E_{eq} 34
3.3	ตัวอย่างผลของพารามิเตอร์หลุมการแ่นตัว 35
3.4	การกระจายตัวของความเค้นและการวัดหลุมการแ่นตัวใต้แผ่นน้ำหนัก..... 39
3.5	กราฟระหว่างค่าการแ่นตัวที่จุดศูนย์กลางน้ำหนักกับค่า SNC..... 40
3.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_{ac} กับ SCI ของโครงสร้างชั้นทางแบบชั้น แอสฟัลต์ทั้งหมด 41

ภาพที่	หน้า
3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_{ac} กับ SCI ของโครงสร้างชั้นทางแบบชั้น พื้นทางเป็นมวลรวม.....	41
3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_{ac} ที่ได้จากสมการข้างต้นกับโปรแกรม คำนวณย้อนกลับ Modulus 5.1	42
4.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย	44
4.2 หลุมการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางที่ระดับค่า E ของชั้นผิวทางต่างๆกัน	45
4.3 หลุมการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางที่ระดับค่า E ของชั้นพื้นทางต่างๆกัน.....	46
4.4 หลุมการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางที่ระดับค่า E ของชั้นรองพื้นทางต่างๆกัน	46
4.5 หลุมการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางที่ระดับค่า E ของชั้นดินเดิมต่างๆกัน	46
4.6 การออกแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ $k=2$ และ $k=3$	50
4.7 ตัวอย่างกราฟแสดงค่า r ที่มีค่าในช่วง $-1 < r < 1$	51
4.8 กราฟระหว่างพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวกับค่าอิลาสติกโมดูลัสชั้นผิวทาง	53
4.9 กราฟระหว่างพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวกับค่าอิลาสติกโมดูลัสชั้นพื้นทาง	53
4.10 กราฟระหว่างพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวกับค่าอิลาสติกโมดูลัสชั้นรองพื้นทาง	54
4.11 กราฟระหว่างพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวกับค่าอิลาสติกโมดูลัสชั้นดินเดิม	54
4.12 รูปแบบกราฟของการแปลงให้อยู่ในรูปเส้นตรง	55
4.13 กราฟการแอ่นตัวในโดเมนของเวลา	57
4.14 กราฟแสดงความเร็วคลื่นที่ผ่านชั้นผิวทาง	57
4.15 กราฟการวิเคราะห์ค่า DPI.....	58
5.1 รูปแสดงแนวแกนจุดวิเคราะห์การแอ่นตัว (a) และลักษณะของโครงสร้างชั้นทาง (b).....	64
5.2 แผนผังแสดงการเลือกตัวแปรในการวิเคราะห์สมการความถดถอย	66
5.3 รูปอธิบายค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางเมื่อโครงสร้างทางมีการแอ่นตัวเท่ากัน ในสภาพที่ความหนาชั้นผิวทางเปลี่ยนแปลงไป.....	69
5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ Δd_{10-20} กับค่าอิลาสติกโมดูลัส ของชั้นพื้นทาง(a) รองพื้นทาง(b) และดินเดิม(c).....	70
5.5 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ Δd_{10-20} กับค่าอิลาสติกโมดูลัส ของชั้นพื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม	71

ภาพที่	หน้า
5.6 รูปอธิบายค่าอิลาสติกโมดูลส์ของชั้นพื้นทางเมื่อโครงสร้างทางมีการแอ่นตัวเท่ากัน ในสภาพที่ความหนาชั้นผิวทาง (a) และชั้นพื้นทาง (b) เปลี่ยนแปลงไป	73
5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ Δd_{45-60} กับค่าอิลาสติกโมดูลส์ ของชั้นพื้นทาง(a) และดินเดิม(b).....	76
5.8 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ Δd_{45-60} กับค่าอิลาสติกโมดูลส์ ของชั้นพื้นทางและดินเดิม	76
6.1 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลส์ของชั้นผิวทาง จากสมการความถดถอย.....	87
6.2 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลส์ของชั้นผิวทาง จากการวิเคราะห์ความเร็วคลื่น.....	87
6.3 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลส์ของชั้นพื้นทาง จากสมการความถดถอย.....	88
6.4 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลส์ของชั้นพื้นทาง จากการทดสอบ DCP.....	88
6.5 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลส์ของชั้นรองพื้นทาง จากสมการความถดถอย.....	89
6.6 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลส์ของชั้นรองพื้นทาง จากการทดสอบ DCP.....	89
6.7 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลส์ของชั้นดินเดิม จากสมการความถดถอย.....	90
6.8 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลส์ของชั้นดินเดิม ที่คำนวณตามคู่มือการออกแบบผิวทางโดย AASHTO	90
6.9 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลส์เทียบเท่า ที่คำนวณตามคู่มือการออกแบบผิวทางโดย AASHTO	91
6.10 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลส์ จากสมการความถดถอยในแต่ละชั้นทาง.....	91
6.11 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยของค่าอิลาสติกโมดูลส์ของชั้นผิวทาง จากสมการความถดถอย.....	92

ภาพที่	หน้า
6.12 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากความเร็วคลื่น กับสมการความถดถอย	92
6.13 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบ DCP กับสมการความถดถอยของชั้นพื้นทาง	93
6.14 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบ DCP กับสมการความถดถอยของชั้นรองพื้นทาง	93
6.15 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าอิลาสติกโมดูลัสที่คำนวณตามคู่มือ การออกแบบผิวทางโดย AASHTO กับสมการความถดถอยของชั้นดินเดิม	94
6.16 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยของค่าอิลาสติกโมดูลัสจากสมการความถดถอย ในแต่ละชั้นทาง	94
6.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิลาสติกโมดูลัสจากสมการความถดถอย กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของความเร็วคลื่นของชั้นผิวทาง	96
6.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิลาสติกโมดูลัสจากสมการความถดถอย กับค่าอิลาสติกโมดูลัสจากการทดสอบ DCP ของชั้นพื้นทางรวมทุกสายทาง	97
6.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิลาสติกโมดูลัสจากสมการความถดถอย กับค่าอิลาสติกโมดูลัสจากการทดสอบ DCP ของชั้นพื้นทางไม่รวมสายทาง N3, N4	98
6.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิลาสติกโมดูลัสจากสมการความถดถอย กับค่าอิลาสติกโมดูลัสจากการทดสอบ DCP ของชั้นรองพื้นทาง	98
6.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิลาสติกโมดูลัสจากสมการความถดถอย กับค่าโมดูลัสการคืนตัวที่แนะนำโดย AASHTO ของชั้นดินเดิม	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ถนนเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีความสำคัญในการพัฒนาประเทศ ทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคมและวัฒนธรรม นอกจากนี้ยังเป็นการกระจายความเจริญไปสู่ชนบท หรือพื้นที่ห่างไกล โดยการเชื่อมต่อพื้นที่ต่างๆครอบคลุมกันทั้งประเทศซึ่งโดยทั่วไปถนนในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible pavement) โดยมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นของวัสดุแต่ละประเภทซ้อนทับกันให้มีความหนาและความแข็งแรงเพียงพอในการรองรับน้ำหนักและปริมาณการจราจร แต่ในการใช้งาน น้ำหนักและปริมาณการจราจรยังคงสร้างความเสียหายต่อผิวทางและวัสดุ ด้านล่างทีละเล็กทีละน้อย สะสมจนเกิดเป็นความเสียหายใหญ่ ซึ่งส่งผลต่อความเรียบของผิวถนน ทำให้เกิดปัญหาต่อการจราจรของยานพาหนะ ทั้งในด้านความปลอดภัย การสึกหรอของ ชิ้นส่วนยานพาหนะ และการชะลอความเร็วของยานพาหนะ ด้วยเหตุนี้เองจึงมีความจำเป็นต้อง ซ่อมบำรุงถนนอยู่เสมอ ซึ่งในการซ่อมบำรุงโครงสร้างชั้นวัสดุและผิวทาง จำเป็นต้องประเมิน สภาพของวัสดุโครงสร้างถนนในปัจจุบัน ว่ามีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับรองรับปริมาณจราจร ในอนาคตได้อีกหรือไม่ ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถตอบได้โดยการตรวจสอบสภาพความแข็งแรงของ โครงสร้างชั้นทาง

ในอดีตการตรวจสอบสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางทำการเจาะถนน เก็บ ตัวอย่างมาทดสอบความแข็งแรงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Testing) ข้อจำกัดของวิธีทดสอบนี้คือ ไม่สามารถทำได้ถี่มากนักในถนนแต่ละสาย ทาง เพราะอาจสร้างความเสียหายจนนำไปสู่การพังของถนนได้ จึงได้มีการนำวิธีการทดสอบแบบ ไม่ทำลาย (Nondestructive Testing) มาใช้ทดสอบ เพื่อให้สามารถประเมินความแข็งแรงของ โครงสร้างชั้นทางได้อย่างละเอียดและรวดเร็วมากขึ้น ซึ่งเครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ (Falling Weight Deflectometer, FWD) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ โดยตรงจากการทดสอบนี้คือ การแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทาง (Deflection)

การประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบแบบน้ำหนัก ตกกระทบนั้นโดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation) เพื่อคำนวณหา ค่าอิลาสติคโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งวิธีนี้ทำได้ยาก มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย และยังไม่มีความแน่นอนสำหรับโครงสร้างชั้นทางของประเทศไทยในขณะนี้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้วิธีอื่นใน การประเมิน ซึ่งวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ได้คือ การประเมินจากการแอ่นตัวตรงตำแหน่งที่ น้ำหนัก

กระทำ (D_0) ซึ่งวิธีนี้สามารถประเมินความแข็งแรง และแบ่งแยกโครงสร้างที่แข็งแรงกับอ่อนแอออกจากกันได้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ในเรื่องของความแตกต่างของชั้นดินเดิม เนื่องด้วยการแอนตัวตรงตำแหน่งที่นำหน้ากระทำเป็นการแอนตัวที่รวมผลการแอนตัวของทุกชั้นของโครงสร้างทางเข้าด้วยกัน ในกรณีที่ชั้นดินเดิมต่างกัน แต่โครงสร้างทางเหมือนกัน ค่าการแอนตัวก็จะแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ในการประเมินสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางนั้น การทราบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางโดยรวมอาจไม่เพียงพอในการใช้กำหนดแผนงาน และวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างชั้นทางที่ได้รับความเสียหายนั้นๆ เนื่องด้วยโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยวัสดุทางที่แตกต่างกันเป็นชั้นๆ และด้วยเหตุที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ทางผู้วิจัยจึงต้องทำการศึกษาการแอนตัวของโครงสร้างชั้นทาง และคุณลักษณะของหลุมการแอนตัวที่มีความแข็งแรงของวัสดุทางในแต่ละชั้นที่แตกต่างกัน เพื่อนำไปสู่การพัฒนา สมการ ที่สามารถ ประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสเพื่อประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละชั้นได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักด้วยกัน 2 ประการคือ

- 1) เพื่อศึกษาคุณลักษณะของหลุมการแอนตัวของโครงสร้างชั้นทาง และของชั้นดินเดิมภายใต้หน้าหน้ากระทำเดียวกัน
- 2) เพื่อพัฒนาสมการที่สามารถประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละชั้นที่มีวัสดุทางแตกต่างกันได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์หลุมการแอนตัวของโครงสร้างชั้นทางกับสภาพความแข็งแรงของวัสดุทาง ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาสมการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัส ของโครงสร้างทางในแต่ละชั้น ซึ่งข้อมูลที่ต้องใช้ในการศึกษาคือ ข้อมูลหลุม การแอนตัวและข้อมูล Time-History จากการทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ และข้อมูลหลุมเจาะการทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่พัฒนากับ ผลการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างทางในภาคสนามได้ใช้การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ในการทดสอบหาพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของวัสดุทางในแต่ละชั้น เพื่อใช้เป็นเกณฑ์คัดเลือกตัวแปรที่นำไปวิเคราะห์ ความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษากับค่าอิลาสติกโมดูลัส

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ได้แก่

- 1) ทราบถึงความสัมพันธ์ของการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทาง เมื่อสภาพความแข็งแรงของวัสดุทางและชั้นดินเดิมเปลี่ยนแปลงไป
- 2) พัฒนาสมการที่สามารถ ประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสเพื่อ บอกความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละชั้นได้

1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยเรื่องการศึกษาคุณลักษณะของหลุมการแอ่นตัวจากการทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ เพื่อประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง เริ่มจากการกำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา การทบทวนงานศึกษาวิจัยและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้อง การจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัว การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของแต่ละชั้นทาง การเปรียบเทียบผลการศึกษากับข้อมูลในภาคสนาม สรุปผลการศึกษา และการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ดังแสดงในรูปที่ 1.1

1.6 องค์ประกอบของรายงาน

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์แบ่งหัวข้อในการนำเสนอเป็น 7 ส่วน ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ นำเสนอความเป็นมาและปัญหาของงานวิจัย วัตถุประสงค์การวิจัย ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และแนวทางการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2 การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เป็นการศึกษาและทำความเข้าใจกับลักษณะโครงสร้างชั้นทาง เครื่องมือทดสอบการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบ และการทดสอบอื่นๆที่ใช้ในภาคสนาม ตลอดจนศึกษาทฤษฎีอิลาสติกซิติเพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างชั้นทาง

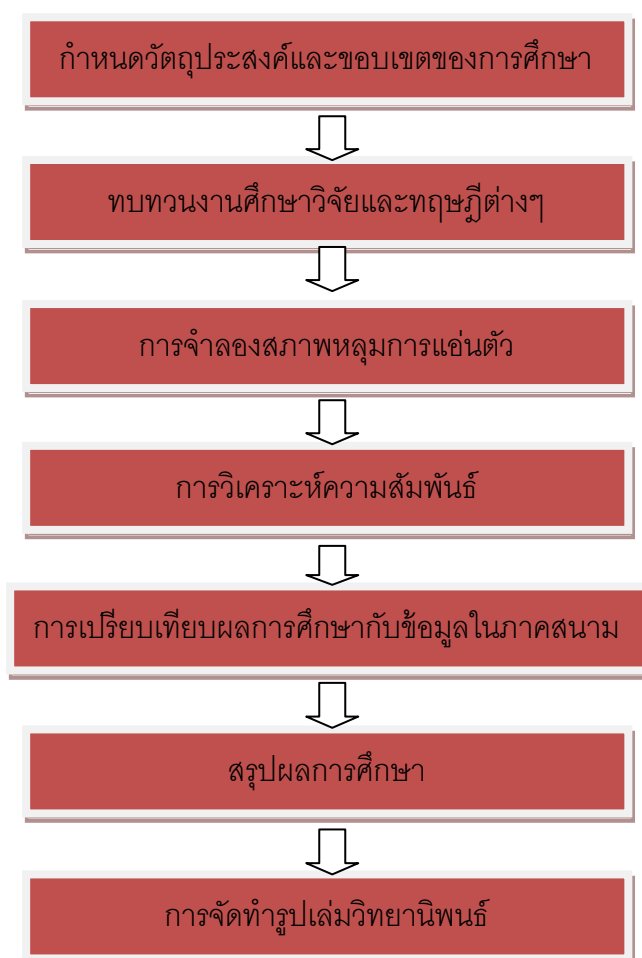
บทที่ 3 การทบทวน งานวิจัย ที่เกี่ยวข้อง เป็นการนำเสนอผลที่ได้จากการทบทวนแนวทางการวิเคราะห์ สำหรับ งานวิจัยในอดีต ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ข้อมูลหลุมการแอ่นตัวในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ในส่วนนี้จะแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน วิจัยโดยละเอียด ซึ่งประกอบด้วย การศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การวางแผนจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัว แนวทาง การวิเคราะห์ พารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว และแนวทาง การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษากับข้อมูลในภาคสนาม

บทที่ 5 ผลการจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัวและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ ในส่วนนี้เป็น การอธิบายผลการจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัว และ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ กับค่าอิลาสติคโมดูลัสและความหนาของแต่ละชั้นทาง

บทที่ 6 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับข้อมูลในภาคสนาม เนื้อหาส่วนนี้เป็น การวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบโครงสร้างชั้นทางในภาคสนามกับผลที่ได้จาก การศึกษา

บทที่ 7 สรุปผลการศึกษา เป็นการสรุปผลก ารศึกษา และแนะนำ ข้อเสนอแนะ สำหรับ งานวิจัยในอนาคต



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

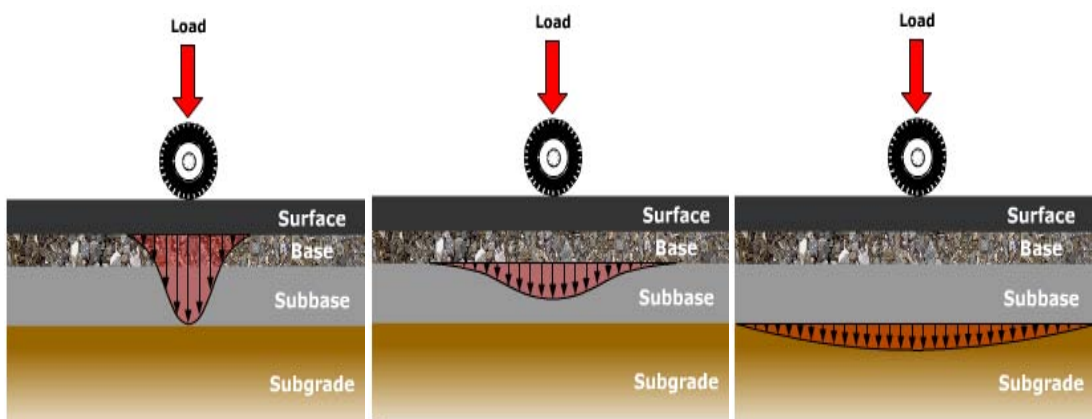
บทที่ 2

การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง จึงมีความจำเป็นที่ต้องทราบเกี่ยวกับลักษณะของโครงสร้างชั้นทางแบบยืดหยุ่น และพฤติกรรมของการเกิดการแอ่นตัวเมื่อมีน้ำหนักกระทำ ตลอดจนลักษณะและมาตรฐานการใช้งานเครื่องทดสอบการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบ (Falling Weight Deflectometer, FWD) และการทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer ที่ใช้ในการทดสอบโครงสร้างชั้นทางในภาคสนาม นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ข้อมูลหตุ้มการแอ่นตัววิธีต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงข้อดี -ข้อเสีย และแนวทางในการวิเคราะห์ของแต่ละวิธี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible pavement)

ถนนในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่จะเป็นถนนแอสฟัลต์ติกคอนกรีต ซึ่งเป็นผิวทางแบบยืดหยุ่น โดยปกติแล้วโครงสร้างทางแบบนี้จะประกอบด้วยโครงสร้างชั้นทับกันของวัสดุหลายๆ ชนิด ซึ่งแต่ละชั้นจะรับน้ำหนักจากชั้นที่อยู่เหนือกว่าแล้วกระจายออกไป แล้วจึงส่งผ่าน น้ำหนักนี้ไปยังชั้นที่อยู่ด้านล่างต่อไปดังรูปที่ 2.1 และเพื่อให้โครงสร้างแข็งแรงและเกิดประโยชน์สูงสุด จึงต้องเรียงลำดับความแข็งแรงของแต่ละชั้น โดยชั้นที่แข็งแรงกว่ามีความสามารถในการรับ น้ำหนักดีกว่าจะอยู่เหนือกว่าชั้นที่อ่อนแอกว่าหรือมีความสามารถในการรับ น้ำหนักต่ำกว่า โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างทางจะประกอบด้วยชั้นทางจำนวน 4 ชั้นได้แก่ ชั้นผิวทาง พื้นทาง รองพื้นทาง และชั้นดินเดิม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 การกระจายน้ำหนักของผิวทางแบบยืดหยุ่น (Huang, 1993)

2.1.1 ชั้นผิวทาง (Surface course)

เป็นชั้นบนสุดของโครงสร้างชั้นทาง และเป็นชั้นเดียวที่สัมผัสกับ น้ำหนักโดยตรง โดยส่วนใหญ่แล้วชั้นนี้จะเป็นชั้นที่ใช้วัสดุที่ดีที่สุด มีความแข็งแรงที่สุดเมื่อเทียบกับชั้นอื่นๆ ในการก่อสร้าง ซึ่งวัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่ก็คือ แอสฟัลท์ติกคอนกรีต เนื่องด้วยชั้นนี้สัมผัสกับการจราจรด้วยตรง จึงมีคุณลักษณะหลายอย่างที่ต้อคำนึงถึง เช่น ความราบเรียบ ความต้านทานต่อการลื่นไถล การควบคุมเสียง การระบายน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้ชั้นผิวทางยังสามารถแบ่งเป็นชั้นย่อยๆ ได้อีกดังนี้

- Wearing course เป็นชั้นที่สัมผัสกับการจราจรโดยตรง ซึ่งวัสดุชั้นนี้สามารถถูกทำให้หลุดออกได้เนื่องจากการจราจร การออกแบบที่เหมาะสมจึงต้องออกแบบให้สามารถจำกัดความเสียหายที่เกิดขึ้นบนชั้นนี้เท่านั้น และด้วยเหตุนี้จึงสามารถซ่อมแซมชั้นนี้ได้ก่อน และบ่อยกว่าชั้นอื่นๆ
- Intermediate/Binder Course ชั้นนี้คือชั้นที่เป็นแอสฟัลท์ติกคอนกรีตทั้งหมด มีหน้าที่หลักในการกระจายน้ำหนัก

2.1.2 ชั้นพื้นทาง (Base course)

ชั้นนี้อยู่ถัดลงมาจากชั้นผิวทาง มีหน้าที่ในการช่วยกระจาย น้ำหนัก สนับสนุนการระบายน้ำ และต้านทานความเสียหายเนื่องจากการแข็งตัว (Frost resistance) โดยส่วนใหญ่ชั้นนี้สร้างโดยใช้วัสดุ 2 ชนิดคือ

- วัสดุมวลรวม (ไม่ปรับปรุง) ต้องเป็นวัสดุที่มีความทนทาน อาจจะมีการปรับปรุงด้วยซีเมนต์หรือแอสฟัลท์ก็ได้ ในประเทศไทยส่วนใหญ่ใช้ลูกรัง
- วัสดุปรับปรุง ในสถานการณ์ที่ต้องการความแข็งแรงมากๆ อาจมีการใช้แอสฟัลท์ติกคอนกรีตกับชั้นนี้ โดยใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า และมีเกรดที่หลวมกว่าชั้นผิวทาง

2.1.3 ชั้นรองพื้นทาง (Subbase course)

ชั้นรองพื้นทางเป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นพื้นทางกับชั้นดินเดิม มีหน้าที่หลักเพื่อสนับสนุนโครงสร้างชั้นทาง แต่นอกจากนี้ยังมีหน้าที่อื่นอีกเช่น ปรับปรุงการระบายน้ำ ลดการรูกูล้าของมวลรวมละเอียดจากชั้นดินเดิม หรือการสร้างเป็นฐานสำหรับการก่อสร้างชั้นอื่นๆ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่ใช้สำหรับชั้นนี้จะมีคุณสมบัติที่อ่อนแอกว่าชั้นพื้นทาง แต่แข็งแรงกว่าดินเดิม และไม่จำเป็นต้องมีชั้นนี้เสมอไป ในกรณีที่ดินเดิมมีความแข็งแรงมาก ชั้นรองพื้นทางก็ไม่มีมีความจำเป็นแต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่ดินเดิมอ่อนแอ หรือมีคุณภาพแย่อย่างดินเหนียว ก็ควรจะมมีชั้นรองพื้นทางเพื่อช่วยกระจายน้ำหนัก

2.1.4 ชั้นดินเดิมหรือชั้นดินคั่นทาง (Subgrade)

คือดินเดิมในบริเวณที่ถนนวางพาดผ่านไป ทำหน้าที่รับน้ำหนักที่ถ่ายจากชั้นรองพื้นทาง ความหนาของโครงสร้างชั้นทางทั้งหมดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นดินเดิมนี้

2.2 ความเค้น ความเครียด และการแอ่นตัว ของโครงสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่น (Stress Strain and Deflection in Flexible pavement)

ผิวทางแบบยืดหยุ่นสร้างขึ้นโดยมีลักษณะเป็นระบบชั้นทาง (Layered system) ซึ่งวัสดุที่ดีกว่า แข็งแรงกว่า จะอยู่ด้านบน ซึ่งผิวทางแบบนี้จะแบ่ง เป็นชั้น ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในช่วงเริ่มต้น ทฤษฎีของ Boussinesq (1885) เป็นเพียงทฤษฎีเดียวที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และการแอ่นตัวได้ ซึ่งน้ำหนักที่กระทำจะ กระจายออกไปตามพื้นที่รอบๆแบบวงกลม แต่ทฤษฎีนี้ใช้ได้กับชั้นทางเพียงชั้นเดียว ต่อมาได้มีทฤษฎีของ Burmister (1943) ที่สามารถใช้ได้กับชั้นทางแบบ 2 และ 3 ชั้น ซึ่งมีความเหมาะสมกว่า และได้ถูกพัฒนาจนสามารถใช้ได้กับชั้นทางหลายชั้น โดยมีสมมติฐานที่เกี่ยวข้องดังนี้

- แต่ละชั้นต้องมีลักษณะเป็น Homogeneous ,Isotropic และ Linear elastic โดยจะต้องมีค่า elastic modulus (E) และค่า Poisson ratio (v)
- วัสดุถือว่าไม่มีน้ำหนัก และมีขอบเขตไม่สิ้นสุด
- แต่ละชั้นต้องมีความหนาที่จำกัดแน่นอน (h) ยกเว้นชั้นล่างสุดที่มีความหนาไม่จำกัด
- มีน้ำหนักกระทำสม่ำเสมอ (q) บนพื้นผิวของชั้นทางเหนือพื้นที่ที่แรงกระทำเป็นวงกลมรัศมี a
- คุณสมบัติที่ต่อเนื่องนี้จะยอมรับจนถึงผิวสัมผัสระหว่างชั้น (Layer interfaces)

2.2.1 ทฤษฎีของ Boussinesq

ทฤษฎีของ Boussinesq เป็นทฤษฎีที่เหมาะสมทฤษฎีแรกที่สามารถใช้คำนวณหาค่าความเค้น ความเครียด และการแอ่นตัวได้ โดยสมการของ Boussinesq ถูกพัฒนาให้อยู่ในรูปที่ใช้ง่ายขึ้นโดย Ahlvin และ Ulery (1968) แสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Vertical stress} \quad \sigma_z = \rho[A + B] \quad (2.1a)$$

$$\text{Radial horizontal stress} \quad \sigma_r = \rho[2\mu A + C + (1 - 2\mu)F] \quad (2.1b)$$

$$\text{Tangential horizontal stress} \quad \sigma_t = \rho[2\mu A - D + (1 - 2\mu)F] \quad (2.1c)$$

$$\text{Vertical strain} \quad \epsilon_z = \frac{\rho(1 + \mu)}{E_1} [(1 - 2\mu)A + B] \quad (2.1d)$$

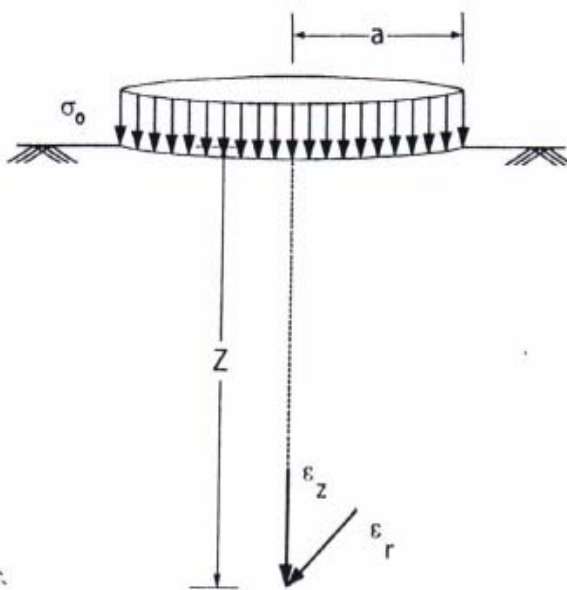
$$\text{Radial horizontal strain} \quad \epsilon_r = \frac{\rho(1 + \mu)}{E_1} [(1 - 2\mu)F + C] \quad (2.1e)$$

$$\text{Tangential horizontal strain} \quad \epsilon_t = \frac{\rho(1 + \mu)}{E_1} [(1 - 2\mu)E - D] \quad (2.1f)$$

$$\text{Vertical deflection} \quad \Delta_z = \frac{\rho(1 + \mu)a}{E_1} \left[\frac{z}{a} A + (1 - \mu)H \right] \quad (2.1g)$$

โดยที่	σ	คือ ความเค้น (psi)
	ϵ	คือ ความเครียด
	Δ_z	คือ การแอ่นตัวในแนวตั้ง (inch)
	ρ	คือ น้ำหนักที่กระทำ (psi)
	a	คือ รัศมีของแผ่นรับน้ำหนัก (inch)
	μ	คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio)
	z	คือ ระยะในแนวตั้งจากจุดที่น้ำหนักกระทำถึงจุดที่สนใจ (inch)
	E_1	คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัส (psi)

A, B, C, D, E, F, H คือ ค่าสัมประสิทธิ์จากการคำนวณของ Ahlvin และ Ulery



รูปที่ 2.2 น้ำหนักกระทำแผ่นม้วนขนาด σ_0 เป็นพื้นที่วงกลมรัศมี a บนวัสดุแบบ Semi-Infinite Half Space (Huang, 1993)

2.2.2 ทฤษฎีของ Burmister

ทฤษฎีของ Burmister เป็นทฤษฎีแรกๆ ที่พัฒนาขึ้นให้สามารถใช้ได้กับชั้นทางที่มี 2 ชั้นได้ในปี ค.ศ.1943 และได้พัฒนาต่อให้ใช้ได้กับชั้นทางที่มี 3 ชั้นได้ในปี ค.ศ.1945 โดยมีรายละเอียดดังนี้

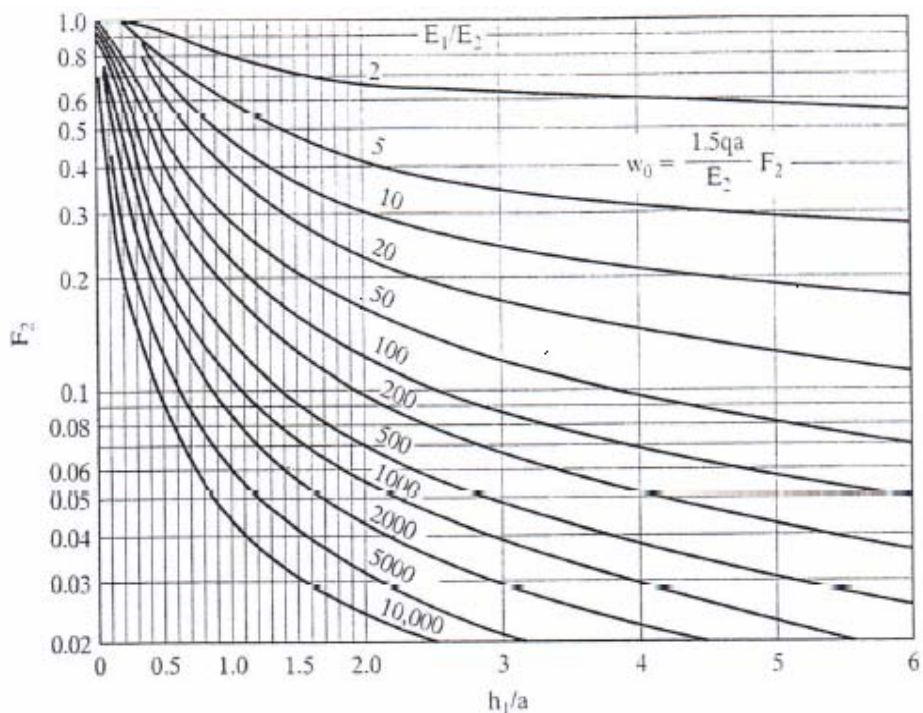
1.) ระบบ 2 ชั้นทาง

ทฤษฎีนี้ใช้กับชั้นทาง 2 ชั้น ซึ่งชั้นแรกเป็นชั้นของแอสฟัลต์ทั้งชั้น (Full-depth asphalt) วางทับอยู่บนชั้นดินเดิม โดยที่ค่าความเค้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโมดูลัสของทั้งสองชั้น (E_1/E_2) กับค่าความหนาส่วนด้วยรัศมีการกระจายของแรง (z/a) และสมมติว่า อัตราส่วนบัวของ มีค่า 0.5 สำหรับการแอนตัว (Δ) สามารถหาได้จากสมการด้านล่างนี้ โดยที่ค่า F_2 หาได้จากรูปที่ 2.3

Rigid plate $\Delta = 1.18 \frac{\rho a}{E_2} F_2$ (2.2a)

Flexible plate $\Delta = 1.50 \frac{\rho a}{E_2} F_2$ (2.2b)

โดยที่ E_2 คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทางที่ต่ำกว่า
 F_2 คือ ปัจจัยเนื่องจากผลของอัตราส่วนโมดูลัสของทั้งสองชั้น (E_1/E_2) กับค่าความหนาส่วนด้วยรัศมีการกระจายของแรง (z/a)



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงการแอนตัวของระบบชั้นทาง 2 ชั้น (Huang, 1993)

2.) ระบบ 3 ชั้นทาง

แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นที่จุดสัมผัสแต่ละชั้นดังในรูปที่ 2.4 และสมการหาค่าความเค้นในแนวตั้ง (σ_{zi}) รัศมีความเค้นที่ก้นของแต่ละชั้น (σ_{ri}) และรัศมีความเค้นที่ยอดของแต่ละชั้น (σ'_{ri}) แสดงไว้ดังสมการด้านล่างนี้

$$\sigma_{z1} = q(ZZ1) \quad (2.3a)$$

$$\sigma_{z2} = q(ZZ2) \quad (2.3b)$$

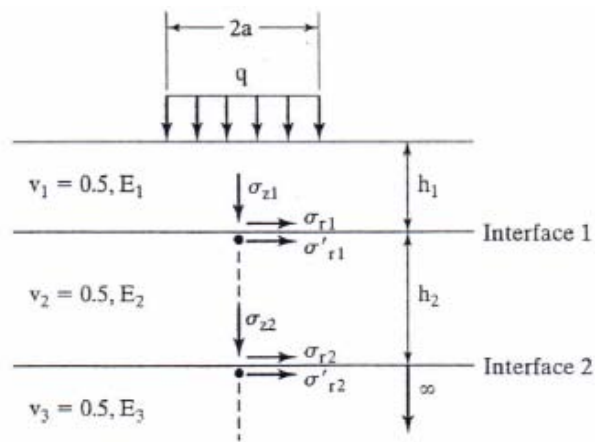
$$\sigma_{z1} - \sigma_{r1} = q(ZZ1 - RR1) \quad (2.3c)$$

$$\sigma_{z2} - \sigma_{r2} = q(ZZ2 - RR2) \quad (2.3d)$$

$$\sigma_{z2} - \sigma_{r3} = \rho(ZZ2 - RR3) \quad (2.3e)$$

โดยที่ ZZ1 และ ZZ2 คือ ค่าปัจจัยความเค้น

ZZ1-RR1, ZZ2-RR2 และ ZZ2-RR3 คือ ค่าความแตกต่างของความเค้น



รูปที่ 2.4 ความเค้นที่จุดสัมผัสแต่ละชั้นของระบบผิวทาง 3 ชั้น (Huang, 1993)

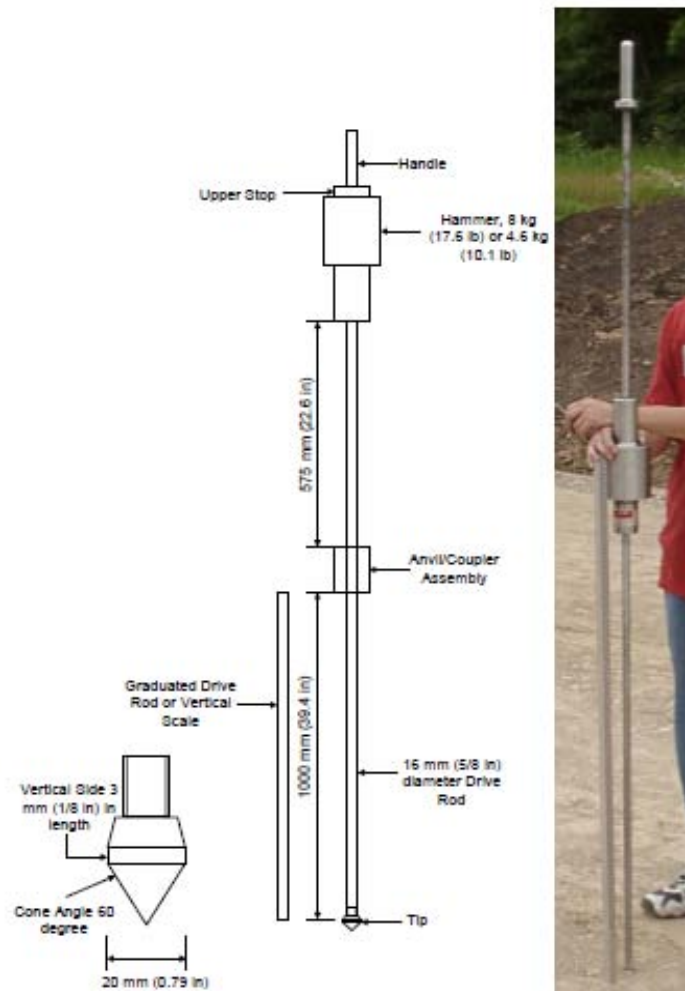
2.3 การทดสอบวัดความแข็งแรงของวัสดุโครงสร้างทาง

ความแข็งแรงของวัสดุโครงสร้างทางสามารถวัดได้หลายวิธี ซึ่งผลลัพธ์โดยตรงที่ได้จากแต่ละวิธีก็แตกต่างกัน แต่ทุกๆผลลัพธ์จะแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของวัสดุชั้นๆ ซึ่งแต่ละผลลัพธ์ก็มีผู้วิจัยที่หาความสัมพันธ์ของผลลัพธ์นั้นๆกับค่าอิลาสติกโมดูลัส ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานทางวิศวกรรมที่แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของวัสดุ และสำหรับงานวิจัยนี้ได้สนใจวิธีการทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer และ California Bearing Ratio โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

วิธี DCP ถูกพัฒนามาจากวิธี Scala penetrometer ซึ่งคิดค้นโดย Scala (1956) ซึ่งใช้เพื่อหาค่า CBR และค่าอิลาสติกโมดูลัส วิธีการนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในแอฟริกาใต้ สหราชอาณาจักร สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย และประเทศอื่นๆ ด้วยเหตุที่เครื่องนี้ใช้งานง่าย มีความแข็งแรง คุ้มราคา และสามารถหาค่าของดัชนีความแข็งแรงได้รวดเร็ว และค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิมได้โดยอ้อม

วิธีนี้ถูกใช้วัดค่าความต้านทานต่อการจมตัวของวัสดุในขณะที่เครื่องนี้กระทบกับโครงสร้างชั้นทางหรือชั้นดินเดิม ในหน่วยของมิลลิเมตรต่อการตอก (mm/blow) โดยเครื่องนี้ประกอบด้วย ค้อนหนัก 8 kg ซึ่งปล่อยมาจากความสูง 575 mm ซึ่งทำให้เกิดพลังงาน 45 J หรือ 14.3 J/cm^2 และหัวเจาะทรงกรวยมุม 60° ใต้ผ่านศูนย์กลาง 20 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.5 นอกจากนี้แท่งเหล็กที่ติดกับหัว กรวยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเพื่อลดแรงเสียดทาน ในการใช้งานค่าที่ถูกเก็บบันทึกคือ จำนวนครั้งในการตอก และความลึกของ กรวย ซึ่งความชัน (Slope) ของความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างจำนวนครั้งในการตอกกับความลึกของกรวย (mm/blow) เรียกว่า DCP Penetration Index (DPI) นอกจากนี้ข้อมูลความหนา และชนิดของวัสดุในแต่ละชั้น และข้อมูล DCP จะถูกนำมาหาความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างชั้นทางตัวอื่น เช่น CBR ความแข็งแรงในการรับแรงเฉือน (Shear Strength) และอิลลาสติซิโมดูลัส



รูปที่ 2.5 เครื่อง Dynamic Cone Penetrometer (Edil and Sawangsuriya ,2005)

1.) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP Penetration Index (DPI) กับค่า CBR

เพื่อการประเมินคุณสมบัติทางโครงสร้างของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง ค่า DPI ได้ถูกนำมาหาความสัมพันธ์กับค่า CBR งานวิจัยส่วนนี้ได้ถูกศึกษาขยายต่อไปโดยหลายท่าน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$\log(\text{CBR}) = \alpha + \beta \log(\text{DPI}) \quad (2.4)$$

โดยที่ α และ β คือ ค่าสัมประสิทธิ์อยู่ในช่วง 2.44 ถึง 2.56 และ -1.07 ถึง -1.16 ตามลำดับ

CBR คือ California Bearing Ratio (%)

DPI คือ DCP Penetration Index (mm/blow)

2.) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR หรือ DPI กับค่าอิลาสติคโมดูลัสจากวิธีต่างๆ

ความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (Empirical) ระหว่างค่าอิลาสติคโมดูลัสกับค่า CBR หรือ DPI ถูกเสนอโดยนักวิจัยหลายท่าน หนึ่งในนั้นคือความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Heukelom และ Foster (1960) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในแอฟริกาเหนือ และต่อมาได้รับการยอมรับจาก American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ให้ใช้ในคู่มือแนะนำแนวทางการออกแบบโครงสร้างชั้นทาง นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า DPI กับค่าอิลาสติคโมดูลัสจากการคำนวณย้อนกลับ ด้วยการทดสอบแบบน้ำหนัตกกระทบ ซึ่งเสนอโดย Chen และคณะ (2005) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_{RM} = 10 \times \text{CBR} \quad (2.5a)$$

$$E_s = 537.76 \times \text{DPI}^{-0.6645} \quad (2.5b)$$

โดยที่ E_{RM} คือ ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)

E_s คือ ค่าโมดูลัสจากการทดสอบแบบน้ำหนัตกกระทบ (MPa)

3.) การคำนวณค่า DPI

การประเมินความแข็งแรง ของโครงสร้าง ชั้นทางจำเป็นต้องเลือกใช้ค่า DPI ที่เหมาะสมที่สามารถเป็นตัวแทนของโครงสร้างทางชั้นนั้นได้ ซึ่งการหาค่า DPI ที่เป็นตัวแทนของวัสดุทางสามารถใช้ค่าเฉลี่ยซึ่งคำนวณได้ 2 วิธีคือ

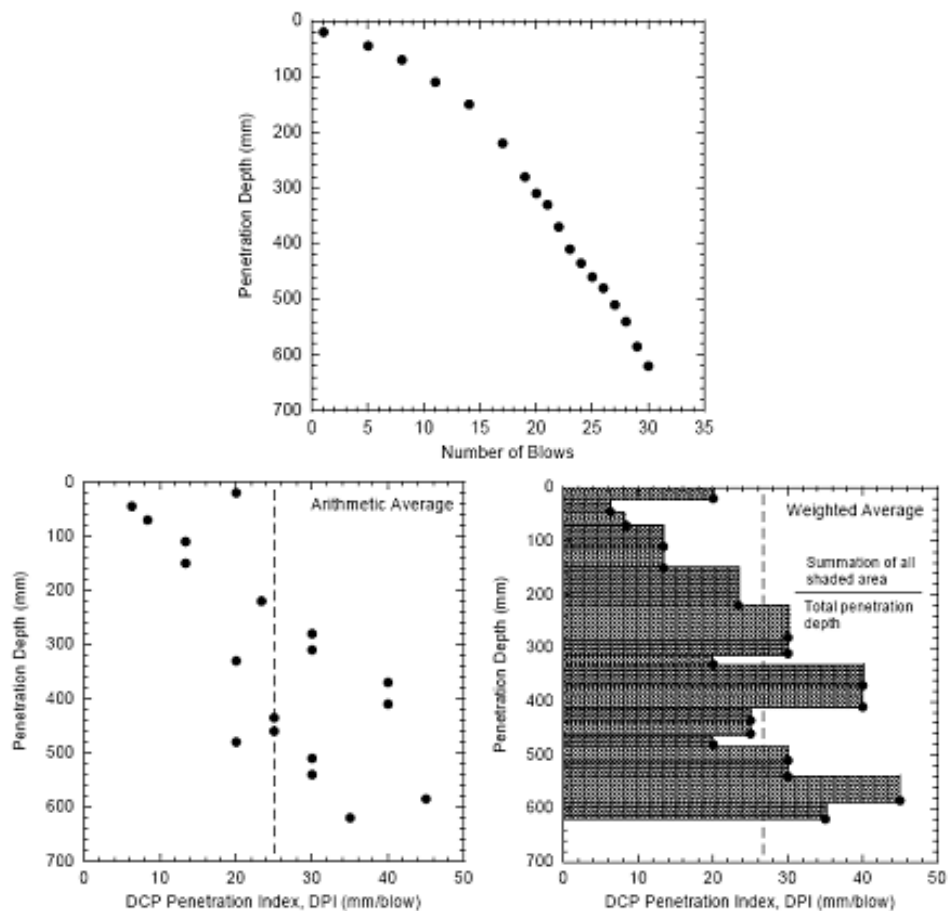
$$\text{ค่าเฉลี่ยพื้นฐาน (Arithmetic Average) : } \text{DPI}_{\text{avg}} = \frac{\sum_i^N (\text{DPI})_i}{N} \quad (2.6a)$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) : } \text{DPI}_{\text{wavg}} = \frac{1}{H} \sum_i^N [(\text{DPI})_i \cdot (z)_i] \quad (2.6b)$$

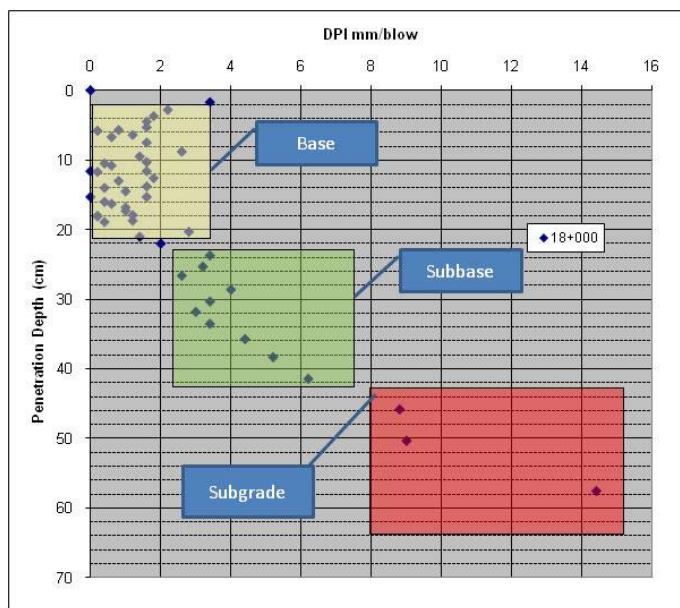
โดยที่ z คือ ระยะจมน้ำขณะที่ตอกแต่ละครั้ง
 H คือ ระยะจมน้ำทั้งหมดในช่วงที่สนใจ

Edil และ Sawangsuriya (2005) ระบุว่า การใช้ค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักทำให้ค่า DPI ตัวแทนมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแคบกว่า และมีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบในสนามด้วยวิธีทดสอบอื่นๆ ดีกว่า การใช้ค่าเฉลี่ยแบบพื้นฐาน

นอกจากนี้แล้ว ข้อมูลจากการทดสอบ DCP ยังสามารถนำมาใช้ประมาณความหนาของชั้นโครงสร้างทางได้ โดยใช้การพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการจมน้ำ DPI กับ การจมน้ำ ซึ่งวัสดุชั้นพื้นทางย่อมมีค่า DPI ต่ำกว่าชั้นรองพื้นทาง และชั้นรองพื้นทางควรมีค่า DPI ต่ำกว่าชั้นดินเดิม ทำให้สามารถแยกความหนาของชั้นโครงสร้างทางในกราฟได้ โดยสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของค่า DPI ตามระยะจมน้ำ ที่ขอบระหว่างชั้นของวัสดุที่แตกต่างกัน ชนิดจะ 2 เป็นแนวแบ่งแยกค่า DPI ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 2.6 กราฟผลการทดสอบ DCP และการหาค่าเฉลี่ย DPI (Edil and Sawangsuriya ,2005)



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการประมาณความหนาของชั้นโครงสร้างทาง

2.3.2 California Bearing Ratio (CBR)

การทดสอบ CBR เป็นการทดสอบหาความสามารถในการรับแรงแบกทานของวัสดุประเภทไม่มีแรงประสาน (Unbound Material) เช่น ดิน เป็นต้น ซึ่งถูกพัฒนาโดยกรมทางหลวงแห่งมลรัฐแคลิฟอร์เนียในช่วงปี ค.ศ.1930 ต่อมาได้รับการยอมรับจาก U.S. Corps of Engineers และได้ใช้เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับออกแบบความหนาถนนและลานบินตลอดมา โดยค่า CBR นี้มีความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักที่กระทำ ต่อหน่วยหรือแรงดันที่รับได้ของวัสดุเทียบกับของหินบดที่มีขนาดละเอียด (Well graded crushed stone) ซึ่งทดสอบโดยการให้น้ำหนักกับแท่งทดสอบตัวอย่างด้วยอัตรา 1.3 mm ต่อนาที แล้วบันทึกโหลดที่กระทำในช่วงระยะจมนตัว 0.64 mm ถึง 7.62 mm เพื่อนำไปหาค่าร้อยละ CBR ตามความสัมพันธ์ด้านล่างนี้

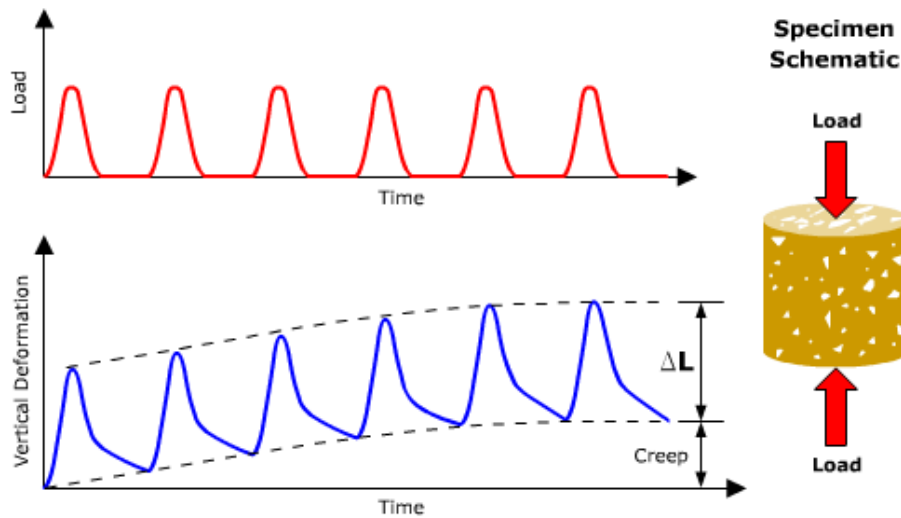
$$\text{CBR}(\%) = 100 \left(\frac{X}{Y} \right) \quad (2.7)$$

โดยที่ X คือ น้ำหนักต่อหน่วยที่ใช้กดวัสดุให้มีระยะจมนตัว 2.54 mm หรือ 5.08 mm
 Y คือ น้ำหนักต่อหน่วยมาตรฐานที่ใช้กดหินบดที่มีขนาดละเอียด ให้มีระยะจมนตัว 2.54mm หรือ 5.08 mm ซึ่งมีขนาด 6.9 MPa และ 10.3 MPa ตามลำดับ

2.3.3 Resilient Modulus (M_R)

โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M_R) เป็นค่าสัดส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียด ซึ่งคล้ายกับค่าอีลาสติกโมดูลัส (Elastic Modulus, E) แต่แตกต่างกันตรงที่การคืนตัวของวัสดุที่

ทดสอบ โมดูลัสการคืนตัวจะไม่กลับมาสมบูรณ์ดังรูปที่ 2.8 ทำให้ความเครียดเป็นความเครียดคืนตัว (Recoverable axial strain) หรือก็คือพฤติกรรมไม่เป็นอีลาสติกนั่นเอง



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและการหดตัวของตัวอย่าง (WSDOT, 2010)

ในการประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่น Heukelom และ Klomp (1962) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า โมดูลัสคืนตัว กับ CBR เพื่อใช้ในการประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ซึ่งต่อมาได้รับการยอมรับและตีพิมพ์ในคู่มือการออกแบบของ AASHTO (1993) มีความสัมพันธ์ดังนี้

British Unit : $M_R = 1500 \times CBR$ (2.8a)

SI Unit : $M_R = 10 \times CBR$ (2.8b)

โดยที่ M_R คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (psi, MPa)
 CBR คือ California Bearing Ratio (%)

และใน คู่มือการออกแบบ โครงสร้างชั้นทางโดย AASHTO(1993) ยังได้แนะนำการประมาณหาค่าโมดูลัส คืนตัว ของชั้นดินเดิมโดยใช้ข้อมูลการแอนตัวที่ได้จากการทดสอบ แบบ น้ำหนักตกกระทบ ดังนี้

$$M_R = \frac{0.24P}{d_r r} \tag{2.9}$$

โดยที่ M_R คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินเดิม (psi)
 P คือ โหลดที่กระทำ (lb)
 d_r คือ การแอนตัวที่ระยะ r (inch)
 r คือ ระยะห่างจากจุดที่โหลดกระทำ (inch)

นอกจากค่าโมดูลัสคั้นตัวของชั้นดินเดิมแล้ว AASHTO ยังได้แนะนำสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอิลาสติกโมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของชั้นทางทั้งหมดที่อยู่เหนือชั้นดินเดิม สามารถบอกความแข็งแรงของโครงสร้างโดยรวมได้ มีความสัมพันธ์ดังนี้

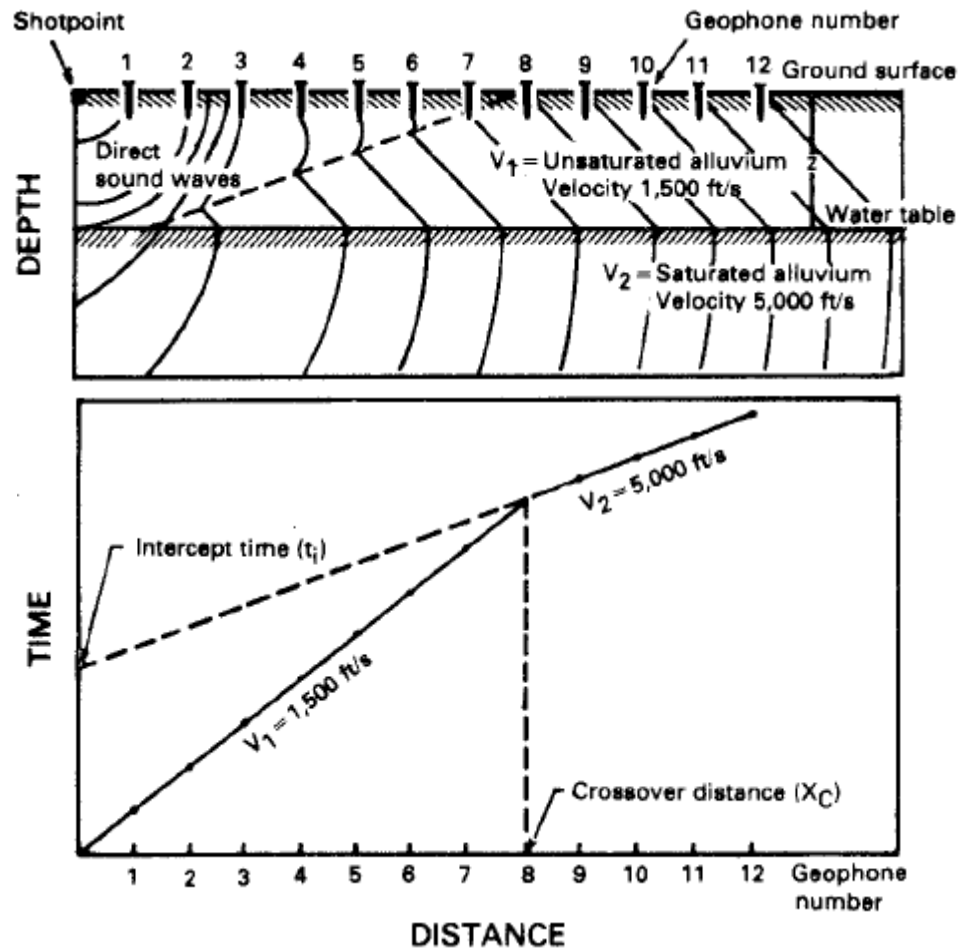
$$d_0 = 1.5pa \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D^3 E_p}{a \sqrt{M_R}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\} \quad (2.10)$$

โดยที่	d_0	คือ	การแอ่นตัวที่จุดศูนย์กลาง (inch)
	p	คือ	แรงดันที่กระทำ (psi)
	a	คือ	รัศมีของแผ่นรับน้ำหนัก (inch)
	D	คือ	ความหนาโครงสร้างชั้นทาง (inch)
	M_R	คือ	โมดูลัสคั้นตัวของชั้นดินเดิม (psi)
	E_p	คือ	โมดูลัสเทียบเท่า (psi)

2.3.4 ทฤษฎี Seismic-refraction

วิธีการหนึ่งที่ใช้ในงานสำรวจสภาพทางธรณีวิทยาเพื่อหาความลึกของชั้นหิน หรือของระดับน้ำใต้ดิน และใช้ในการประเมินความแข็งแรงของสภาพดิน หรือวัสดุที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน วิธีการนั้นคือ Seismic-refraction ซึ่งเป็นกรวัดการมาถึงของคลื่นพลังงานซีสมิกที่เดินทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นผ่านตัวกลางจนมาถึงตัวรับสัญญาณ (Geophone) โดยเวลาที่ตัวรับสัญญาณจับการมาถึงของคลื่นได้ และระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณกับแหล่งกำเนิดคลื่น เป็นสิ่งที่ต้องทำการวัดเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเร็วที่คลื่นใช้เดินทางผ่านชั้นดินหรือตัวกลางนั้นๆ

การวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วคลื่นสามารถทำได้โดยการพลอตกราฟระหว่างเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดมาถึงตัวรับสัญญาณกับระยะห่างของตัวรับสัญญาณกับแหล่งกำเนิดดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งส่วนกลับความชันของกราฟดังในรูปคือ ความเร็วที่คลื่นเดินทางในชั้นดิน และจากในรูปจะเห็นว่ากราฟมีความชันที่แตกต่างกัน โดยระยะทางที่กราฟเริ่มเปลี่ยนความชันถูกเรียกว่า ระยะข้ามพ้น (Crossover distance) และเมื่อลากเส้นกราฟของความชันที่เปลี่ยนแปลงไปมาตัดแกนตั้งจะได้จุดตัดแกนที่เรียกว่า เวลาที่จุดตัด (Intercept time) ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้ต่างก็มีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นที่เดินทางผ่านชั้นดินทั้ง 2 ชั้น และมีความสัมพันธ์กับความหนาของชั้นดินชั้นแรก ดังนั้นจึงสามารถใช้ความสัมพันธ์เหล่านี้ในการหาความหนาของชั้นดินได้



รูปที่ 2.9 การเรียงตัวของGeophone และกราฟระหว่างความเร็วกับระยะทาง (Haeni, 1988)

$$Z = \frac{t_i}{2} \frac{V_2 V_1}{\sqrt{(V_2)^2 - (V_1)^2}} \tag{2.11a}$$

$$Z = \frac{X_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \tag{2.11b}$$

- โดยที่ z คือ ความลึกจากผิวถึงชั้นดินชั้นที่สอง
- t_i คือ Intercept time
- X_c คือ Crossover distance
- V_1 คือ ความเร็วคลื่นในชั้นดินชั้นที่1
- V_2 คือ ความเร็วคลื่นในชั้นดินชั้นที่2

คลื่นซึ่มิคหรือคลื่นแผ่นดินไหวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆได้แก่ คลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- คลื่นปฐมภูมิ (P-wave) หรือคลื่นความดัน (Pressure wave) เป็นคลื่นตามยาวที่เกิดจากความไหวสะเทือนในตัวกลาง โดยอนุภาคของตัวกลางนั้นเกิดการเคลื่อนไหวแบบอัดขยายในแนวเดียวกับที่คลื่น ส่งผ่านไป คลื่นนี้สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และ ก๊าซ สามารถตรวจเจอได้ก่อนคลื่นชนิดอื่น โดยมีความเร็วประมาณ 6 – 8 กิโลเมตร/วินาที คลื่นปฐมภูมิทำให้เกิดการอัดหรือขยายตัวของชั้นหิน

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (2.12a)$$

$$M = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.12b)$$

โดยที่ V_p คือ ความเร็วของคลื่นปฐมภูมิ (m/s)

ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

ν คือ Poisson's ratio

M คือ โมดูลัสคลื่นปฐมภูมิ (Pa)

E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (Pa)

- คลื่นทุติยภูมิ (S-wave) หรือคลื่นเฉือน (Shear wave) เป็นคลื่นตามขวางที่เกิดจากความไหวสะเทือนในตัวกลางโดยอนุภาคของตัวกลางเคลื่อนไหวตั้งฉากกับทิศทางที่คลื่นผ่าน มีทั้งแนวตั้งและแนวนอน คลื่นชนิดนี้ผ่านได้เฉพาะตัวกลางที่เป็นของแข็งเท่านั้น ไม่สามารถเดินทางผ่านของเหลว คลื่นทุติยภูมิมีความเร็วประมาณ 3 – 4 กิโลเมตร/วินาที

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.13a)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.13b)$$

โดยที่ V_s คือ ความเร็วของคลื่นทุติยภูมิ (m/s)

G คือ โมดูลัสเฉือน (Pa)

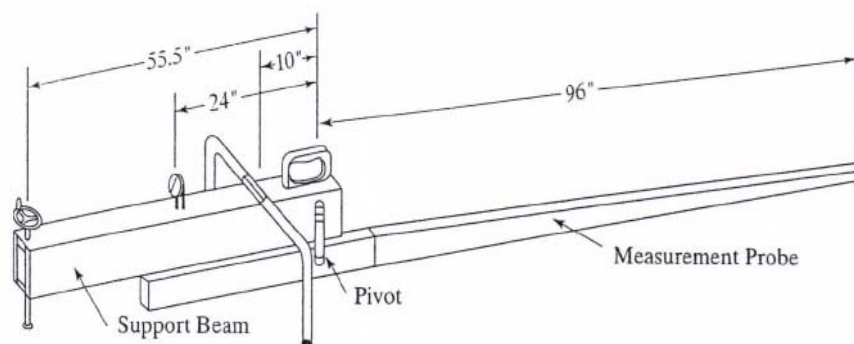
2.4 การทดสอบโครงสร้างชั้นทางด้วยการวัดการแอ่นตัวของผิวทาง

การวัดการแอ่นตัวถูกใช้มานานแล้วในการประเมินความจุ ทางโครงสร้าง (Structural capacity) ของชั้นทางในภาคสนาม ใช้ในการคำนวณย้อนกลับหาค่าอิลาสติกโมดูลัสใน ส่วนประกอบของชั้นทางนั้น ใช้ประเมินประสิทธิภาพการถ่ายแรง (Load transfer efficiency) ระหว่าง รอยต่อ กับรอยแตกกว้างในผิวทางคอนกรีต และใช้ในการหาตำแหน่งของโพรงอากาศใต้ แผ่นพื้นคอนกรีตด้วย อุปกรณ์มากมายได้ถูกนำมาใช้สำหรับวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยใน ภายวิจัยนี้สนใจเพียงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการแอ่นตัวเท่านั้น ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการแอ่นตัว

นี้สามารถแบ่งได้ 3 ประเภทขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำหนักที่กระทำ ได้แก่แบบน้ำหนักคงที่หรือเคลื่อนที่ช้าๆ (Static or Slowly Moving Loads) เครื่องมือแบบนี้ได้แก่ Benkelman beam, California traveling deflectometer และ LaCroix deflectometer แบบสั่นสะเทือน (Steady – State Vibration) ได้แก่ Dynaflect และ Road Rater และแบบสุดท้ายคือ แบบน้ำหนักตกกระทบบ (Impulse Loads) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะสนใจเพียง Benkelman beam และ Falling Weight Deflectometer (FWD) เท่านั้น มีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 Benkelman beam

Benkelman beam ถูกพัฒนาโดย A.C.Benkelman และอาจจะเป็นเครื่องมือในการวัดการแอ่นตัวที่แพร่หลายที่สุดในโลก เครื่องมือนี้ประกอบได้ขา 3 ขาดังรูปที่ 2.9 โดยจะวางอยู่ระหว่างล้อหลังของรถบรรทุกพลาเดียว ซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 18 kip (80 kN) วิธีนี้ง่ายต่อการวัดแต่ใช้เวลานาน และมีข้อจำกัดใช้ได้กับผิวทางแบบแข็งเท่านั้น ปัญหาสำคัญของอุปกรณ์ประเภทนี้คือ ยากต่อการเคลื่อนย้าย และการที่ใช้น้ำหนักคงที่ หรือเคลื่อนที่ช้าๆ ไม่ได้แสดงถึงน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงบนผิวทางที่ส่วนใหญ่เป็นน้ำหนักแบบชั่วคราว และไม่สามารถนำไปใช้ออกแบบหรือประเมินผิวทางได้โดยตรงโดยปราศจากการปรับแก้



รูปที่ 2.10 เครื่องมือ Benkelman beam (Huang, 1993)

2.4.2 เครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบบ (Falling Weight Deflectometer)

เครื่องมือทุกประเภทที่ถ่ายแรงแบบชั่วคราวลงบนผิวทางอย่างเช่น เครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบบถูกรวมไว้ในเครื่องมือประเภทนี้ ความแตกต่างในเรื่องของน้ำหนักและความสูงที่ปล่อยตกกระทบบจะส่งผลให้ เกิดแรงกระทำที่แตกต่างกัน โดยการทำงานของเครื่องมือทดสอบนี้คือ ลากเครื่องมือไปยังสถานที่ที่ทำการทดสอบ เลื่อนแผ่นรับน้ำหนักและตัวรับสัญญาณลงมาบนผิวทาง แล้วปล่อยน้ำหนักตามจำนวนและระยะที่ได้เลือกไว้ จากนั้นตัวรับสัญญาณจะวัดค่าการแอ่นตัว และเมื่อเสร็จการทดสอบ ตัวเครื่องก็จะยกแผ่นรับน้ำหนักเก็บ แล้วเคลื่อนที่ไปยังสถานที่ทดสอบอื่นต่อไป

ข้อได้เปรียบหลักของเครื่องมือประเภทนี้คือ ความสามารถในการจำลองน้ำหนักแบบพลวัตได้อย่างแม่นยำทั้งขนาดและระยะเวลา และยังสามารถใช้น้ำหนักคงที่ขนาดเล็กเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งมีเครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปอยู่ 3 ประเภทคือ Dynatest, KUAB และ Phoenix



รูปที่ 2.11 แผ่นรับน้ำหนัก และตัวรับสัญญาณของเครื่อง FWD (WSDOT, 2010)

Dynatest Falling Weight Deflectometer เป็นเครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยแรงที่กระทำถูกสร้างขึ้นโดยการปล่อยน้ำหนักขนาด 110,220,440 หรือ 660 lb (50,100,200 หรือ 300 kg) จากระยะความสูง 0.8 ถึง 15 in. (20 ถึง 381 mm) ซึ่งทำให้เกิดแรงตกกระทบ 1500 ถึง 24000 lb (6.7 ถึง 107 kN) โดยน้ำหนักจะส่งผ่านไปยังแผ่นรับน้ำหนักขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.8 in. (300 mm) ทำให้เกิดคลื่นแบบ Half-Sine เป็นระยะเวลา 25 ถึง 30 ms. ขนาดของน้ำหนักจะวัด ด้วย Load cell การแอ่นตัววัดด้วยตัวตรวจจับความเร็ว 7 ตัว ซึ่งติดอยู่บนแท่งที่วางลงบนพื้นผิวทาง โดยมีอันหนึ่งติดอยู่ที่แผ่นรับน้ำหนัก ส่วนอีก 6 ตัวจะติดห่างกันไปไม่เกิน 7.4 ft (2.25 m) จากศูนย์กลาง และเครื่องนี้ยังเชื่อมต่อกับฐานควบคุมที่เป็นไมโครคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งอยู่บนยานพาหนะที่ใช้ลากเครื่องนี้ด้วย

KUAB Falling Weight Deflectometer สร้างแรงที่กระทำโดยการปล่อยแท่งน้ำหนัก 2 แท่งจากระยะที่แตกต่างกัน โดยความแตกต่างของระยะปล่อยและ ขนาด น้ำหนักทำให้เกิดแรงกระทำในช่วง 2698 ถึง 35000 lb (12 ถึง 156 kN) และน้ำหนักจะส่งผ่านไปยังแผ่นรับน้ำหนักขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.8 in. (300 mm) ระบบการปล่อยแท่งน้ำหนัก 2 แท่งนี้ทำให้เกิดแรงกระทำที่ราบเรียบกว่าบนผิวทางทั้งแบบที่ดินเดิมแข็งและอ่อน และการแอ่นตัวถูกวัดด้วยตัวรับสัญญาณ 5 ตัว

Phoenix Falling Weight Deflectometer เป็นรูปแบบที่ใหม่กว่าที่ใช้ในยุโรปและสหรัฐอเมริกา โดยใช้แท่งน้ำหนัก 1 แท่งปล่อยจากระยะที่แตกต่างกันเพื่อสร้างน้ำหนักกระแทกขนาด 2248 ถึง 11240 lb (10 ถึง 50 kN) น้ำหนักจะถูกถ่ายเทสู่ผิวทางผ่านแผ่นรับน้ำหนักขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลาง 11.8 in. (300 mm) การแ่นตัวจะถูกวัดด้วยตัวรับสัญญาณ 3 ตัว โดย 1 ตัว ติดที่ใต้แผ่นรับน้ำหนักตรงศูนย์กลางที่น้ำหนักกระทำ และอีก 2 ตัวติดที่ระยะ 11.8 ถึง 29.5 in. (300 ถึง 750 mm) ตามลำดับจากศูนย์กลาง

2.5 การตั้งค่าการทดสอบเครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบที่เกี่ยวข้อง

เครื่องทดสอบการแ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบเป็นเครื่องมือทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางที่มีประสิทธิภาพ และได้มาตรฐานรับรองการใช้งานจากสมาคม American Society for Testing and Materials (ASTM) ซึ่งมีมาตรฐานในการใช้งานเครื่องทดสอบชนิดนี้ด้วยกันหลายส่วน รายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 ขนาดของน้ำหนัก และระยะเวลาในการตกกระทบ

เครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ เป็นการทดสอบแบบโหดกระตุ้น (Impulse Load) ซึ่งจะปล่อย น้ำหนักมากระทบกับพื้นถนน ทำให้เกิดเป็นแรงกระตุ้น (Force pulse) ในรูป Haversine หรือ Half-sine ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM D4695-03 “Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements” ได้กำหนดให้มี ขนาดของ แรงอยู่ในช่วง 7-105 kN (1,500-24,000 lbf) และตามมาตรฐาน ASTM D4694-96 “Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device” ได้กำหนดขนาดของแรงที่แน่นอนคือ 50 kN (11,000 lbf) โดยมีระยะเวลาตกกระทบอย่างน้อย 60 ms ซึ่งเครื่องทดสอบแบบ น้ำหนักตกกระทบของแต่ละผู้ผลิตก็ให้แรงกระตุ้นในช่วงนี้

2.5.2 จำนวนและระยะห่างของจีโอโฟน

จีโอโฟน (Geophone) เป็นเครื่องจับแรงสั่นสะเทือนใต้ดิน ซึ่งเป็น ตัวรับสัญญาณ วัดการแ่นตัวแบบหนึ่งที่ ASTM แนะนำให้ใช้ โดยตามมาตรฐาน ASTM D4695-03 ได้แนะนำให้ใช้ จำนวนตัวรับสัญญาณอย่างน้อย 7 ตัวในการทดสอบ มีความละเอียด 0.002 mm (0.0001 in.) โดยจำนวนตัวรับสัญญาณที่ต่างกันจะส่งผลต่อระยะห่างระหว่าง ตัวรับสัญญาณแต่ละอัน ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM D4695-03 ได้แนะนำให้มีระยะห่างกัน 300 mm (12 in.)

2.5.3 ความถี่ในการทดสอบ

ตามมาตรฐาน ASTM D4695-03 ได้แบ่งความถี่ในการทดสอบตามระดับขนาด และ ความสำคัญของโครงการได้ 4 ประเภท ดังนี้

1.) การทดสอบระดับพื้นที่ (Location Testing) ระดับนี้จะทำการทดสอบตามจุดต่างๆที่เกิดความเสียหาย โดยจะทดสอบบริเวณที่มีรอยแตก (Cracking) หรือรอยแตกร้าวแบบต่างๆ (Distress)

2.) การทดสอบระดับโครงข่าย (Network Level Testing) ทำการทดสอบทุกระยะ 100-500 m (250-1,000 ft.) โดยกำหนดให้ทดสอบอย่างน้อย 7 จุดต่อ section

3.) การทดสอบระดับโครงการทั่วไป (General Project Level Testing) ทำการทดสอบทุกระยะ 50-200 m (100-500 ft.) โดยกำหนดให้ทดสอบอย่างน้อย 15 จุดต่อ section

4.) การทดสอบระดับโครงการโดยละเอียด (Detailed Project Level Testing) ทำการทดสอบทุกระยะ 10-100 m (25-250 ft.)

2.5.4 ความสามารถในการวัดซ้ำ และความสามารถในการทำซ้ำ

ความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability) คือ ความสามารถในการวัดซ้ำ ของเครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ ในการวัดการแอ่นตัวแต่ละครั้งของการปล่อยน้ำหนัก ควรมีความแตกต่างกันน้อยมาก เมื่อใช้วัดโครงสร้างชั้นทางเดียวกันหรือมีสภาพเหมือนกัน โดยในการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องมีอุณหภูมิไม่แตกต่างกันมากนัก และสภาพของโครงสร้างชั้นทางนั้นไม่แยจจนเกินไปจนทำให้น้ำหนักที่ปล่อยกระทบทำให้โครงสร้างชั้นทางเปลี่ยนแปลงถาวร

ความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) คือ ความแม่นยำหรือความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากเครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบในการทดสอบโครงสร้างชั้นทางเดียวกัน แม้ว่า จะใช้เครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบเครื่องอื่น หรือผู้ทดสอบคนอื่นก็ตาม

ค่าทั้ง 2 นี้ อาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าความแม่นยำ (Accuracy) แบบหนึ่ง ซึ่งจากการศึกษาของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทยได้แนะนำค่าความแปรปรวน (Deviation) สำหรับ น้ำหนักที่กระทำ และค่าการแอ่นตัวคือ $\pm 5\%$ และมีระดับความแม่นยำ (Level of Accuracy) สำหรับ น้ำหนักที่กระทำต้องน้อยกว่า 20 kPa และสำหรับการแอ่นตัวต้องน้อยกว่า 0.002 mm

นอกจากนี้ตามมาตรฐาน ASTM D4694-96 "Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device" ได้แนะนำค่าความแม่นยำสำหรับน้ำหนักที่กระทำและค่าการแอ่นตัวคือ $\pm 2\%$ และความเที่ยงตรง (Precision) สำหรับการแอ่นตัว $\pm 2 \mu\text{m}$

2.6 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อการแอ่นตัว

การแอ่นตัวเป็นค่าที่วัดได้โดยตรงจากการทดสอบ แบบน้ำหนักตกกระทบ โดยไม่จำเป็นต้องมีการคำนวณย้อนกลับที่ยุ่งยากอย่างค่าโมดูลัส แต่ก็มีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัส จึงทำให้มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเช่นกัน ซึ่งอุณหภูมิที่แตกต่างกันก็จะทำให้ค่าการแอ่นตัวที่วัดได้มีค่าที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดอุณหภูมิอ้างอิงในการทดสอบ และแปลงค่าที่ได้ให้กลับมาเป็นอุณหภูมิมาตรฐานนี้เช่นเดียวกับค่าโมดูลัส เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับการนำไปออกแบบ และหลีกเลี่ยงผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันในขณะที่ทำการทดสอบ

จากคู่มือแนะนำการออกแบบโดย AASHTO ฉบับปี ค.ศ. 1986 ได้แนะนำกระบวนการปรับแก้ค่าการแอ่นตัวเนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิไว้ดังสมการ ด้านล่างนี้ ซึ่งปัจจัยการปรับแก้ (Correction Factor) จะแตกต่างกันไปตามงานวิจัยต่างๆ ซึ่ง Chang และคณะ (2002) ได้เสนอสมการสำหรับปรับแก้ค่าการแอ่นตัวไว้ดังนี้

$$(D_r)_i = F_i \times (D_0)_i \quad (2.14a)$$

$$F_i = f_i(T, L, H), \quad i = 1 \sim 7 \quad (2.14b)$$

โดยที่	D_r	คือ	ค่าการแอ่นตัวที่ปรับแก้ตามอุณหภูมิ (mm)
	D_0	คือ	ค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการวัด (mm)
	F_i	คือ	Correction Factor
	T	คือ	อุณหภูมิที่วัดจากกึ่งกลางของชั้นแอสฟัลต์ขณะทำการทดสอบ ($^{\circ}\text{C}$)
	L	คือ	ระดับของน้ำหนักที่กระทำ (kN)
	H	คือ	ความหนาของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (mm)

นอกจากนี้ยังได้มีผลการศึกษาอื่นๆอีกได้แก่ Kim และคณะ (1995) และ Chen และคณะ (2000) โดยมีอุณหภูมิอ้างอิงที่ 20 และ 25 $^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ และใช้น้ำหนักทดสอบ 40 kN

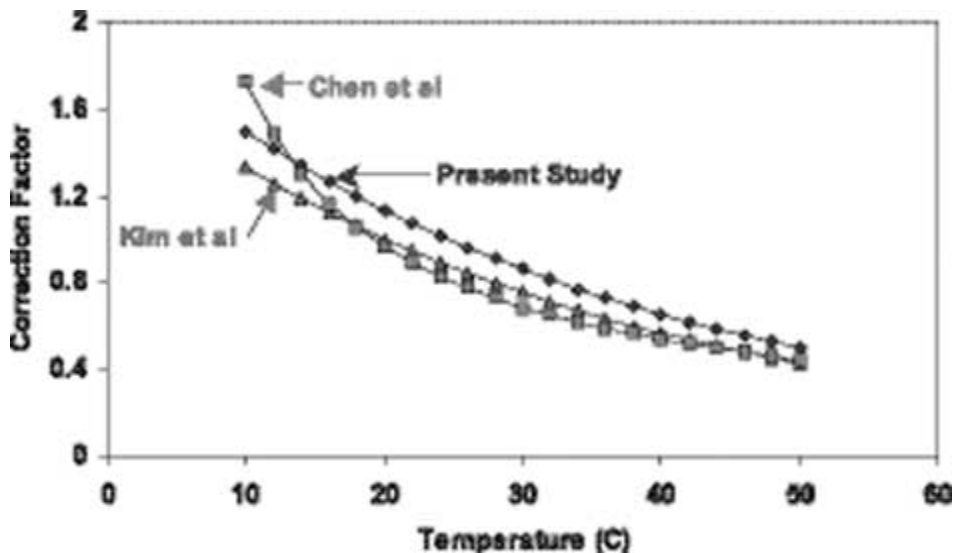
$$D_{68} = D_T \times [10^{\alpha(68-T)}] \quad (2.15)$$

โดยที่	D_{68}	คือ	ค่าการแอ่นตัวที่ได้รับการปรับแก้ที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}\text{C}$ (68 $^{\circ}\text{F}$) (inch)
	D_T	คือ	ค่าการแอ่นตัวที่อุณหภูมิ T (inch)
	α	คือ	$3.67 \times 10^{-4} \times t^{1.4635}$ สำหรับร่องล้อ และ $3.65 \times 10^{-4} \times t^{1.4241}$ สำหรับกึ่งกลางเลน
	t	คือ	ความหนาของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (inch)
	T	คือ	อุณหภูมิที่วัดจากกึ่งกลางของชั้นแอสฟัลต์ ขณะทำการทดสอบ ($^{\circ}\text{F}$)

$$W_{Tw}^1 = W_{Tc}^1 \times \left[\frac{1.0823^{-0.0098 \times t}}{0.8631} \times T_w^{0.8316} \times T_c^{-0.8419} \right] \quad (2.16)$$

โดยที่	W_{Tw}^1	คือ	ค่าการแอ่นตัวที่ได้รับการปรับแก้ที่อุณหภูมิ T_w (mm)
	W_{Tc}^1	คือ	ค่าการแอ่นตัวที่อุณหภูมิ T_c (mm)
	t	คือ	ความหนาของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (mm)
	T_c	คือ	อุณหภูมิที่วัดจากกึ่งกลางของชั้นแอสฟัลต์ ขณะทำการทดสอบ ($^{\circ}\text{C}$)
	T_w	คือ	อุณหภูมิของชั้นผิวทางที่ต้องการจะปรับแก้ ($^{\circ}\text{C}$)

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ของแต่ละผู้วิจัยมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะผู้วิจัยแต่ละท่านพัฒนางานวิจัยภายใต้สภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน และความหนาของชั้นแอสต์ที่ทดสอบต่างกัน โดย Kim และ Chen ใช้ความหนา 200 mm ขณะที่ Chang ใช้ 400 mm



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Correction Factor กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางความหนาของชั้นแอสต์เปรียบเทียบกันในแต่ละผู้วิจัย (Chen et al. ,2000)

2.6.1 อุณหภูมิมาตรฐานของถนนของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

จากการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิของถนนในประเทศไทยโดยกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย ซึ่งทำการศึกษาโดยคุณประสิทธิ์ ภูประทุม(2539) พบว่า ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของถนนทั้ง 4 ภาคของกรมทางหลวง คือ 37.8°C หรืออุณหภูมิให้มีค่าเป็น 38°C ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า อุณหภูมิมาตรฐานของถนนของกรมทางหลวงคือ 38°C โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.95 และมีค่าอุณหภูมิที่ 80 Percentile คือ 41.9°C – 34.2°C

ตารางที่ 2.1 ช่วงอุณหภูมิของถนนในแต่ละภาคในช่วงปี พ.ศ.2534-2536 (กรมทางหลวง, 2539)

ภาค	ระดับการเปลี่ยนแปลงของช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย ; °C	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ; °C	
		สูงสุด	ต่ำสุด
เหนือ	9.8	43.3	33.5
อีสาน	8.0	41.7	33.7
ใต้	6.9	40.9	34
กลาง	6.1	41.5	35.4

ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิวิกฤตของถนนในแต่ละภาคช่วงปี พ.ศ.2534-2536 (กรมทางหลวง, 2539)

ภาค	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ; °C	
	สูงสุด	ต่ำสุด
เหนือ	56	14
อีสาน	56	22
กลาง	53	22
ใต้	53	26

2.6.2 การปรับแก้ผลกระทบเนื่องจากผลของอุณหภูมิ

เมื่อพิจารณาผลการวิจัยอื่น ๆ จะเห็นว่า สมการในการปรับแก้ค่าการแอ่นตัวจากผลของอุณหภูมิมีช่วงการปรับแก้ของอุณหภูมิไม่เกิน 50°C ซึ่งเมื่อพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยของถนนในประเทศไทยก็มีอุณหภูมิลอยอยู่ในช่วงการปรับแก้ของสมการ แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิวิกฤตพบว่า อุณหภูมิสูงสุดมีค่าสูงกว่าช่วงของสมการ และข้อมูลหุลุมการแอ่นตัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ก็ได้รับการทดสอบถนนในช่วงเดือน มี.ค.-พ.ค. ซึ่งเป็นฤดูร้อนของประเทศไทย ทำให้อุณหภูมิของถนนสูงกว่า 50°C จึงไม่สามารถใช้สมการปรับแก้ค่าการแอ่นตัวเหล่านี้ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ไม่คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากผลของอุณหภูมิ

2.7 การวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวเพื่อประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างทาง

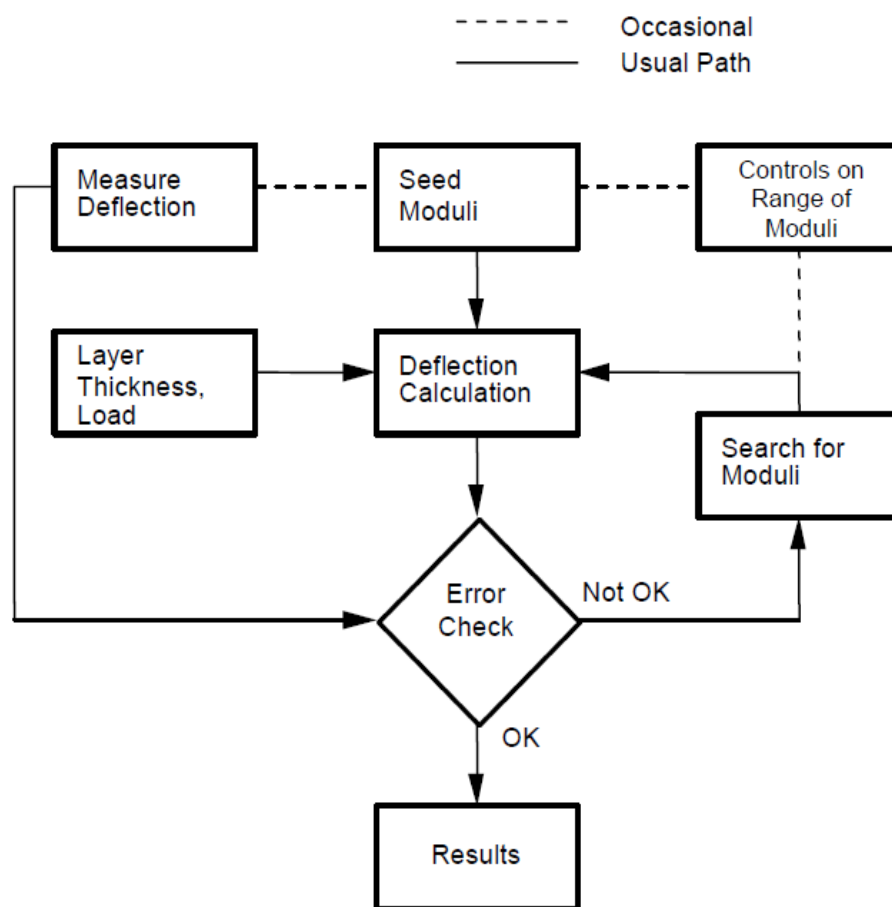
ความแข็งแรงของโครงสร้างทางสามารถใช้การวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวในการประเมินความแข็งแรงได้ ซึ่งการวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวมีแนวทางโดยสรุป 3 แนวทาง ซึ่งแต่ละแนวทางก็มีวิธีการและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.7.1 การคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation)

การคำนวณย้อนกลับเป็นกระบวนการสำคัญในการคำนวณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทาง โดยใช้ค่าหุลุมการแอ่นตัวและค่าอิลาสติกโมดูลัสที่แตกต่างกันในการคำนวณ เพื่อให้ได้ค่าการแอ่นตัวที่ตรงกันที่สุดระหว่างค่าจากการคำนวณและค่าที่ได้จากการวัด โดยโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์นี้สามารถใช้ได้กับ ไมโครคอมพิวเตอร์ และมีซอฟต์แวร์ที่ใช้คำนวณย้อนกลับมากมาย โดยที่แต่ละโปรแกรมก็มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับทฤษฎี และหลักการที่ใช้ โดยวิธีการในการวิเคราะห์ด้วย ไมโครคอมพิวเตอร์ สามารถแสดงได้ดัง แผนผังใน รูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงกระบวนการในการคำนวณย้อนกลับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.) วัดการแอ่นตัว (Measured deflection) ของผิวทางตามระยะต่างๆ ห่างจากตำแหน่งที่นำหน้ากระทำ

- 2.) หาค่าความหนาของแต่ละชั้นและน้ำหนักที่กระทำ (Layer thickness and load) หา ลักษณะของโครงสร้างทางที่ทำการทดสอบ ขนาดของน้ำหนักกระทำ และสภาพพื้นที่ภายใต้น้ำหนักกระทำ
- 3.) สมมติค่าโมดูลัสเริ่มต้น (Seed moduli) เพื่อใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับหาค่า การแอ่นตัว โดยค่าโมดูลัสนี้ได้จากการประมาณของผู้มีประสบการณ์ หรือจากสมการต่างๆ
- 4.) การคำนวณค่าการแอ่นตัว (Deflection calculation) โปรแกรมคอมพิวเตอร์หลายๆ โปรแกรมสามารถใช้คำนวณค่าการแอ่นตัวได้ เช่น CHEVRON, BISAR หรือ ELSYM5 เป็นต้น
- 5.) ตรวจสอบความผิดพลาด (Error check) โดยจะเปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่ ได้จากการคำนวณ
- 6.) หาค่าโมดูลัสใหม่ (Search for new moduli) เพื่อให้ไม่มีความแตกต่าง หรือมีความ แตกต่างในระดับที่ยอมรับได้ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดกับค่าที่ได้จากการคำนวณ
- 7.) ควบคุมขอบเขตของค่าโมดูลัส (Control on the range of moduli) สำหรับโปรแกรม คำนวณย้อนกลับบางโปรแกรม สามารถควบคุมขอบเขตของค่าโมดูลัสให้อยู่ในระดับที่มีเหตุผลได้



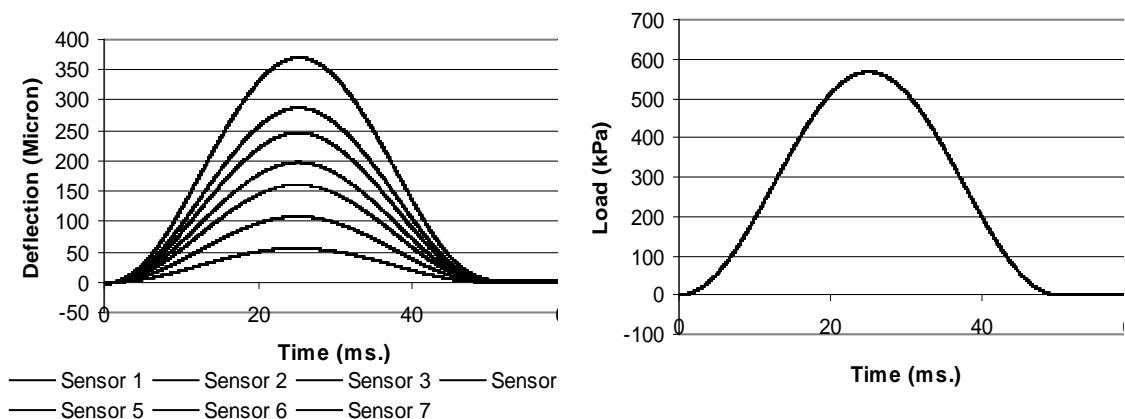
รูปที่ 2.13 แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณย้อนกลับ (WSDOT, 2005)

2.7.2 การคำนวณหาค่าฮิสตริกโมดูลัสโดยใช้การวิเคราะห์ Time-History

การทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ เป็นการทดสอบแบบพลวัต (Dynamic) ซึ่งมีความยุ่งยากในการคำนวณหาค่าฮิสตริกโมดูลัสมากกว่าแบบสถิต (Static) โดยการวิเคราะห์ Time-History เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับ โดยใช้วิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ ซึ่งข้อมูลนี้เป็นข้อมูลของ น้ำหนักที่กระทำและการแอ่นตัว ณ ตัวรับสัญญาณแต่ละตัวที่ระยะเวลาต่างๆดังรูปที่ 2.14 แบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์ แม้จะมีข้อดีในการจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของวัสดุ แต่จะมีข้อจำกัดในเรื่องจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ซึ่งจะมีจำนวนมาก รวมไปถึงการจำลองสภาพขอบเขตซึ่งจะต้องทำการพิจารณาเป็นพิเศษ ในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนของคลื่นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง ต่อมา Dong และคณะ (2002) ได้นำเสนอการใช้ Ritz vectors เพื่อลดขนาดของเมทริกซ์ และสมการที่ใช้ในการคำนวณลง ซึ่งวิธีการนี้มีประสิทธิภาพ ความถูกต้อง และความเสถียรมากกว่าเดิม

แบบจำลองลักษณะ Multi-Layered Viscoelastic Media ที่นำเสนอโดย Kausel และ Roesset (1981) ได้ถูกใช้ในการคำนวณย้อนกลับ แต่ค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองนี้จะอยู่ในรูปโดเมนของความถี่และเป็นจำนวนเชิงซ้อน ทำให้การคำนวณค่อนข้างจะยุ่งยากและซับซ้อน โดยจำเป็นต้องใช้การแปลงฟูเรียร์มาช่วย เพื่อให้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวที่บันทึกได้จากในสนามซึ่งอยู่ในรูป โดเมนของเวลา ซึ่งการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางได้ถูกเสนอโดย Rajapakse และ Wang (1995) โดยการสร้างโกลบอลสติฟเนสเมทริกซ์ (Global stiffness matrix) สำหรับวัสดุยืดหยุ่นหลายชั้น ให้อยู่ในโดเมนของลาปลาซ (Laplace domain) และจากนั้นจึงคำนวณหาค่าการทรุดตัวในโดเมนของเวลาดังด้วยวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสม

Ji และคณะ (2006) ได้เสนอวิธีการใหม่ โดยใช้โปรแกรม SSSM-SIM ซึ่งสามารถคำนวณย้อนกลับหาค่าฮิสตริกโมดูลัสได้โดยใช้ ข้อมูลในรูปโดเมนของความถี่ และเวลา ผลจากการใช้โปรแกรมนี้แสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพในการคำนวณย้อนกลับของโปรแกรมที่ทำได้รวดเร็วกว่า



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างแรงที่กระทำและการแอ่นตัวที่ระยะเวลาต่างๆ (Ji et.al, 2006)

2.7.3 วิธีพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว

หลุมการแอ่นตัวเป็นข้อมูลที่แสดงให้เห็นถึงสภาพของโครงสร้างชั้นทาง โดยที่พารามิเตอร์เหล่านี้จะช่วยบ่งบอกความแข็งแรงโครงสร้างชั้นทางได้ ซึ่งได้ถูกศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยในหลายๆเรื่อง โดยมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ดังนี้

1.) การแอ่นตัวที่จุดศูนย์กลาง (Deflection at center)

การทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบได้ให้ผลออกมาเป็นกลุ่มของการแอ่นตัว โดยที่การแอ่นตัวจะมีค่าเรียงต่อกันในลักษณะของหลุมการแอ่นตัว ซึ่งค่าการแอ่นตัวตรงจุดศูนย์กลาง (D_0) ที่แรงกระทำจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งค่านี้จะสะท้อนให้เห็นถึงความแข็งแรงโดยรวมของโครงสร้างชั้นทาง

2.) Surface Curvature Index (SCI)

คือ ค่าผลต่างระหว่างการแอ่นตัวที่จุดศูนย์กลางกับการแอ่นตัวที่ระยะ 12 inch (30 mm) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความแข็งแรงของชั้นผิวทาง

$$SCI = D_0 - D_{12"} \quad (2.17a)$$

3.) Base Damage Index (BDI)

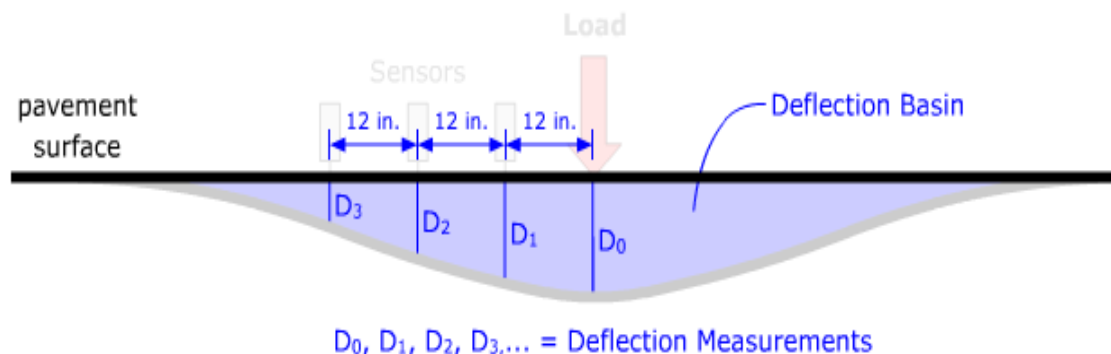
คือ ค่าผลต่างระหว่างการแอ่นตัวที่ระยะ 12 inch (30 mm) กับการแอ่นตัวที่ระยะ 24 inch (60 mm) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความแข็งแรงของชั้นพื้นทาง

$$BDI = D_{12"} - D_{24"} \quad (2.17b)$$

4.) Base Curvature Index (BCI)

คือ ค่าผลต่างระหว่างการแอ่นตัวที่ระยะ 24 inch (60 mm) กับการแอ่นตัวที่ระยะ 36 inch (90 mm) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความแข็งแรงของชั้นรองพื้นทางหรือชั้นดินเดิม

$$BCI = D_{24"} - D_{36"} \quad (2.17c)$$



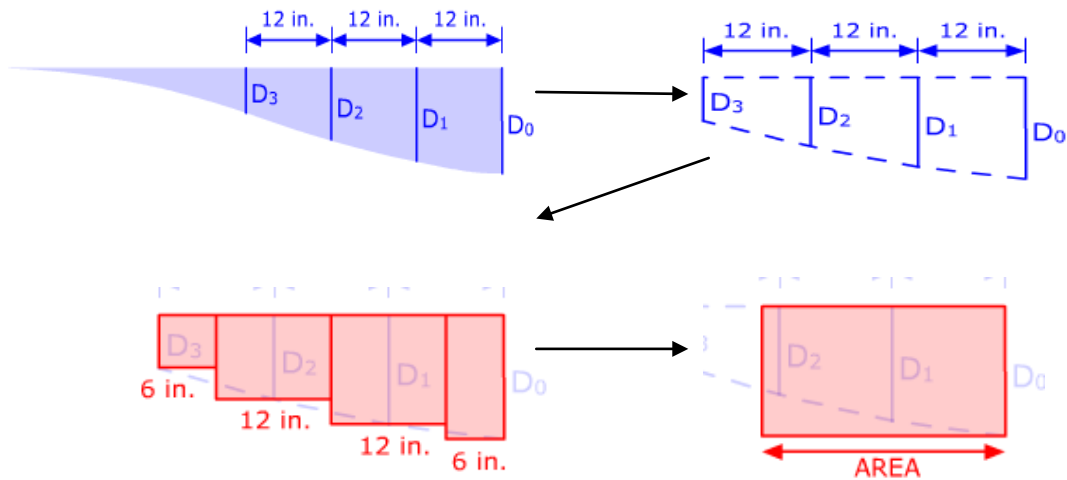
รูปที่ 2.15 หลุมการแอ่นตัวและการแอ่นตัวที่ระยะต่างๆ (WSDOT, 2010)

5.) พารามิเตอร์พื้นที่หลุมการแอ่นตัว (Area Parameter)

จากการทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ ทำให้ได้กลุ่มของค่าการแอ่นตัวซึ่งแสดงให้เห็นถึงรูปร่างของหลุมการแอ่นตัว แต่ตัวเลขเหล่านี้เป็นค่าแบบพรรณนา ซึ่งในการใช้งานต้องการค่าเพียงค่าเดียวที่เป็นดัชนีแสดงรูปร่างของหลุมการแอ่นตัว ซึ่งค่าพารามิเตอร์พื้นที่หลุมการแอ่นตัว นี้แสดงให้เห็นถึงพื้นที่ปกติในแนวตั้งของหลุมการแอ่นตัวที่ห่างจากจุดที่น้ำหนักกระทำออกไป 3 ft. โดยพื้นที่นี้เกิดจากการแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนย่อยๆตามจุดที่วัดการแอ่นตัว แล้วรวมเข้าด้วยกันเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังรูปที่ 2.16 มีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$AREA = \frac{6(D_0+2D_1+2D_2+D_3)}{D_0} \tag{2.18}$$

- เมื่อ AREA คือ พารามิเตอร์พื้นที่หลุมการแอ่นตัว (inch)
- D_0 คือ การแอ่นตัวใต้จุดศูนย์กลางที่แรงกระทำ (inch)
- D_1 คือ การแอ่นตัวที่ระยะ 12 inch จากจุดศูนย์กลางที่แรงกระทำ (inch)
- D_2 คือ การแอ่นตัวที่ระยะ 24 inch จากจุดศูนย์กลางที่แรงกระทำ (inch)
- D_3 คือ การแอ่นตัวที่ระยะ 36 inch จากจุดศูนย์กลางที่แรงกระทำ (inch)



รูปที่ 2.16 การแบ่งพื้นที่คำนวณค่าพารามิเตอร์พื้นที่หลุมการแอ่นตัว (WSDOT, 2010)

2.7.4 ข้อจำกัดของแต่ละวิธีการ

แต่ละวิธีที่ใช้ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ต่างก็มีข้อจำกัดในการใช้งาน โดยแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.) การคำนวณย้อนกลับ

ข้อดี : สามารถคำนวณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้นได้ ซึ่งง่ายต่อการประเมินความแข็งแรงของชั้นทาง การคำนวณอายุคงเหลือ และการออกแบบเสริมผิวทาง

ข้อเสีย : กระบวนการคำนวณมีความซับซ้อน มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย และทำได้ยากมากขึ้น เมื่อจำนวนของชั้นทางมีจำนวนมาก และโปรแกรมวิเคราะห์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันยังมีข้อจำกัด ไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องได้ เช่น โปรแกรม Evercalc ระบุว่าไม่แนะนำให้ใช้กับ โครงสร้างชั้นทางที่ชั้นกลางเป็นชั้นแข็ง ชั้นบนและล่างอ่อนกว่า โปรแกรมนี้จะคำนวณได้ไม่แม่นยำ เช่นในกรณีของแอสฟัลต์ปูทับชั้นซีเมนต์

2.) การวิเคราะห์ข้อมูล Time-History

ข้อดี : สามารถคำนวณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้นได้เช่นเดียวกับการคำนวณย้อนกลับ

ข้อเสีย : กระบวนการคำนวณมีความซับซ้อน และสำหรับเครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถตรวจจับคลื่นที่แสดงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้

3.) การใช้พารามิเตอร์หาค่าการแอ่นตัว

ข้อดี : สามารถใช้บอกความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้ ทำได้ง่ายและสะดวกกว่า 2 วิธีแรก

ข้อเสีย : ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ใช่ค่าอิลาสติกโมดูลัส เป็นค่าพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้บ่งบอกความแข็งแรง และแยกแยะสายทางที่ดีและเสียหายออกจากกัน เพื่อประโยชน์ในการประเมินสายทาง

ตารางที่ 2.3 สรุปรายละเอียดการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง

วิธีการ	แนวทางการวิเคราะห์	ข้อดี-ข้อเสีย
การคำนวณย้อนกลับ	เป็นการใช้ทฤษฎีอิลาสติกซิตี้ในการหาค่าการแอ่นตัว โดยกำหนดค่าโมดูลัสเริ่มต้นแล้วทำการคำนวณจนได้ค่าการแอ่นตัว ซึ่งจะนำค่าการแอ่นตัวที่คำนวณได้นี้ไปเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงจนได้ผลลัพธ์ที่ตรงกัน หรือแตกต่างกันในช่วงที่รับได้	ข้อดี : - คำนวณค่าอิลาสติกโมดูลัสได้ ข้อเสีย : - วิธีการยุ่งยากซับซ้อน - โปรแกรมมีข้อจำกัด
การวิเคราะห์ข้อมูล Time-History	เป็นการคำนวณย้อนกลับแบบหนึ่งที่ใช้การวิเคราะห์ในลักษณะ ไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยใช้ข้อมูลการแอ่นตัวในโดเมนของเวลาในการคำนวณ ซึ่งจะแปลงเวลาให้อยู่ในโดเมนของลาปลาซ และแปลงระยะทางให้อยู่ในโดเมนของฮันเกล แล้วสร้าง โกลบัล สติเฟเนสเมทริกซ์หาค่าการแอ่นตัว	ข้อดี : - คำนวณค่าอิลาสติกโมดูลัสได้ ข้อเสีย : - วิธีการยุ่งยากซับซ้อน - มีปัญหาในการเก็บข้อมูล

พารามิเตอร์หลุม การแอ่นตัว	เป็นการวิเคราะห์การแอ่นตัวตามตำแหน่ง ต่างๆที่ห่างจากจุดที่น้ำหนักกระทำ โดยใช้ คณิตศาสตร์เบื้องต้นอย่างพิชคณิตในการ วิเคราะห์ ผลลัพธ์ที่ได้จึงเป็นดัชนีหรือ พารามิเตอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถประเมิน ความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้	ข้อดี : - วิเคราะห์ได้ง่าย ไม่ซับซ้อน ข้อเสีย : - บอกความแข็งแรงในเชิง คุณภาพ
-------------------------------	--	---

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว เพื่อพัฒนาดัชนีชี้วัดที่สามารถประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง ตลอดจนพัฒนาสมการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้นเพื่อบอกความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ซึ่งวิธีการนี้มีความเรียบง่ายและซับซ้อนน้อยกว่าวิธีการอื่น จึงง่ายต่อความเข้าใจและการนำไปใช้งาน

บทที่ 3

การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางโดยใช้ข้อมูลหุลุมการแอ่นตัวจากการทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบได้มีงานวิจัยหลายงานที่กล่าวถึงและมีหลายแนวทางด้วยกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจด้านการใช้พารามิเตอร์หุลุมการแอ่นตัว โดยเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลหุลุมการแอ่นตัวด้วยคณิตศาสตร์เบื้องต้นที่มีความซับซ้อนไม่มากนัก ทำให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจและนำไปใช้งานได้สะดวก ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถบ่งบอกถึงความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละชั้น หรือความแข็งแรงโดยรวมได้ในลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การใช้ SCI, BDI และ BCI ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง

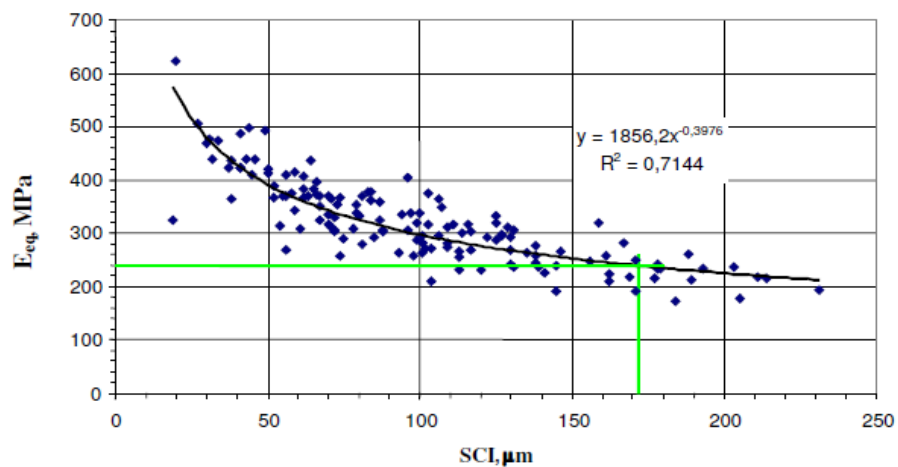
ได้มีตัวอย่างการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์หุลุมการแอ่นตัวที่ได้จากเครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ กับค่าอิลาสติกโมดูลัสเทียบเท่า (E_{eq}) ซึ่งเป็นค่าอิลาสติกโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทางทั้งหมดที่อยู่เหนือชั้นดินเดิม โดยเป็นผลการศึกษาของ Talvik และ Aavik (2006) กับถนนแบบยึดหยุ่นของประเทศเอสโตเนีย ซึ่งได้ทำการทดสอบถนนด้วยเครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ กับถนนหลายประเภท ที่แตกต่างกัน และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้พารามิเตอร์ SCI, BDI และ BCI เทียบกับค่าอิลาสติกโมดูลัสเทียบเท่า ซึ่งคำนวณจากสมการด้านล่างนี้ ที่พัฒนาจากสมการของ Boussinesq ได้ผลดังตารางที่ 3.1 โดยเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์แต่ละตัวเทียบกับ ค่าอิลาสติกโมดูลัสเทียบเท่า ในลักษณะความสัมพันธ์แบบเพาเวอร์ และจากการศึกษานี้ทำให้ทราบว่าพารามิเตอร์ SCI, BDI และ BCI มีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสเทียบเท่า แบบไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าเหล่านี้สามารถบอกความแข็งแรงโดยรวมของโครงสร้างชั้นทางได้

$$E_{eq} = 0.25\pi FS(1 - v^2)/d_0 \quad (3.1)$$

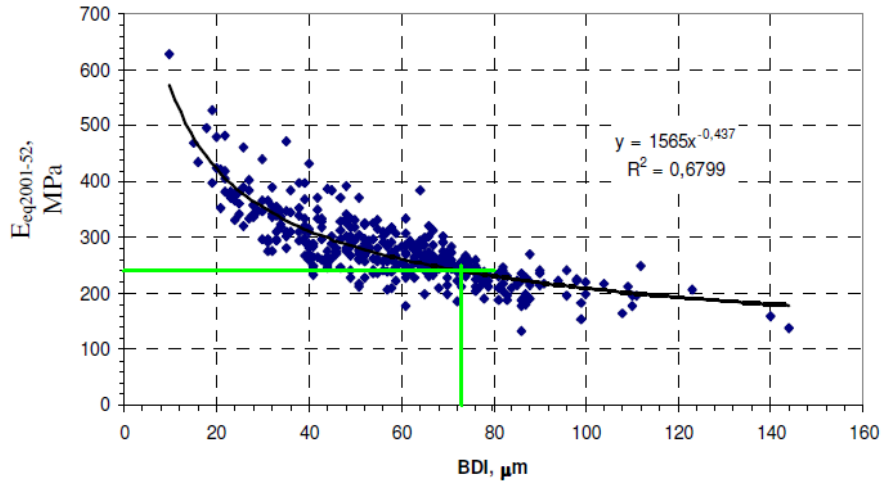
โดยที่	E_{eq}	คือ	ค่าอิลาสติกโมดูลัสเทียบเท่า (MPa)
	F	คือ	แรงดันสัมผัสใต้แผ่นรับน้ำหนัก (kPa)
	S	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นรับน้ำหนัก (mm)
	v	คือ	อัตราส่วนปัวซอง
	d_0	คือ	ค่าการแอ่นตัวที่จุดใต้แผ่นรับน้ำหนัก (um)

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ $y = a_0 \cdot x^{a_1}$ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ SCI, BDI และ BCI กับ E_{eq} (Talvik and Aavik,2006)

Type of pavement (based on Estonian Road Data Bank)	Deflection basin parameter y	Value of constants		R ²
		a ₀	a ₁	
Asphalt concrete pavement on top of existing pavement	SCI	1 795 660	-1,70	0,83
	BDI	1 265 966	-1,74	0,78
	BCI	51 220	-1,36	0,68
Asphalt concrete pavement on top of leveling milling	SCI	655 780 050	-2,76	0,87
	BDI	15 319 713 999	-3,47	0,93
	BCI	11 182	-1,13	0,09
Asphalt concrete pavement on top of leveling layer	SCI	169 150 407	-2,54	0,92
	BDI	104 111	-1,27	0,38
	BCI	-	-	-
Asphalt concrete pavement on bitumen-stabilized base	SCI	88 410	-1,113	0,54
	BDI	62 337	-1,161	0,51
	BCI	985 977	-1,909	0,35
Asphalt concrete pavement on complex-stabilized base	SCI	1 225 980	-1,63	0,53
	BDI	137 949	-1,307	0,85
	BCI	497,43	-0,492	0,14
Asphalt concrete on crushed stone base	SCI	498 577	-1,45	0,87
	BDI	10 645	-0,84	0,21
	BCI	51 984	-1,31	0,61
Cold bituminous mix	SCI	834 463	-1,55	0,97
	BDI	2 055 457	-1,84	0,94
	BCI	983 446	-1,99	0,84
Oil shale ash stabilized pavement	SCI	2 491	-0,44	0,14
	BDI	1 325 498	-1,80	0,75
	BCI	12 473 680	-2,43	0,44
Surface-dressed gravel pavement	SCI	13 705	-0,72	0,66
	BDI	258 341 445	-2,83	0,96
	BCI	255 760	-1,87	0,95



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง SCI กับ E_{eq} (Talvik and Aavik,2006)



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง BDI กับ E_{eq} (Talvik and Aavik,2006)

3.2 ค่าแนะนำมาตรฐานของพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว

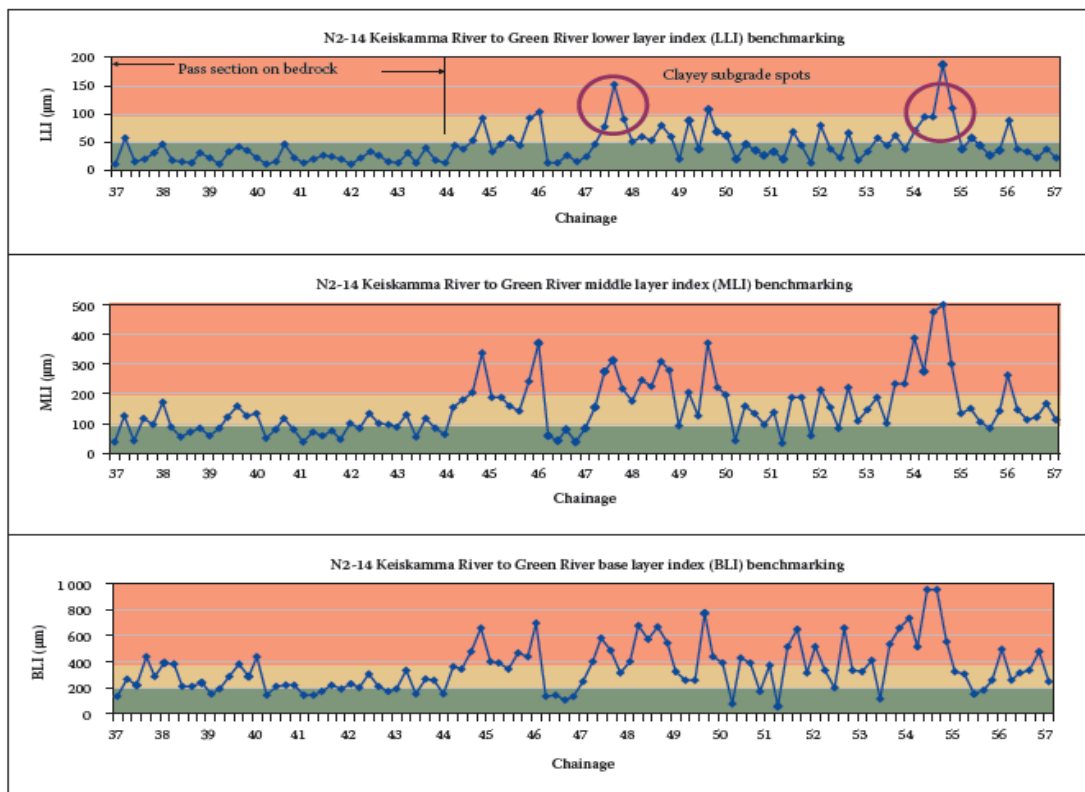
จากการศึกษาของ Horak (2008) ได้แนะนำค่ามาตรฐานของพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว ได้แก่ การแอ่นตัวที่จุดศูนย์กลาง (D_0), Base Layer Index (BLI), Middle Layer Index (MLI) และ Lower Layer Index (LLI) โดยได้ทำการศึกษากับถนนแบบยึดหยุ่นชนิดที่ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุเม็ดละเอียด (Granular base) บิทูมินัส และซีเมนต์ โดยได้ใช้น้ำหนักตกกระทบขนาด 40 kN หรือแรงดันสัมผัส (Contact pressure) ขนาด 565.9 kPa ซึ่งได้แบ่งระดับความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางเป็น 3 ระดับ คือ ระดับดี (Sound) ระดับเฝ้าระวัง (Warning) และระดับแย่ (Severe) ดังตารางที่ 3.2

ตามผลการศึกษาของ Horak (2008) ได้ทดลองใช้ผลนี้กับถนนแบบยึดหยุ่นชนิดที่ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุเม็ดละเอียดบริเวณริมแม่น้ำ Keiskamma ถึงแม่น้ำ Green ซึ่งเป็นถนนที่เพิ่งได้รับการสร้างใหม่บนพื้นที่ที่มีลักษณะของชั้นดินเดิมต่างกัน โดยส่วนหนึ่งของสายทางนั้นเป็นลักษณะชั้นหิน และอีกส่วนเป็นชั้นดินเหนียว ซึ่งผลที่ได้เมื่อพิจารณาจากชั้นล่างขึ้นมาคือ ค่า BCI ของถนนจะมีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยบริเวณที่มีชั้นดินเดิมเป็นชั้นดินเหนียวจะมีค่า BCI ที่สูงอยู่ในช่วงระดับแย่ ส่วนบริเวณที่ชั้นดินเดิมเป็นชั้นหินจะมีค่า BCI ที่ต่ำอยู่ในระดับดี และแนวโน้มนี้ก็ไปในทิศทางเดียวกันเมื่อพิจารณากับชั้นที่อยู่ถัดขึ้นมา โดยที่ BDI และ SCI ของถนนบริเวณที่ดินเดิมเป็นชั้นดินเหนียวอยู่ในช่วงระดับแย่ และ BDI และ SCI ของถนนบริเวณที่ดินเดิมเป็นชั้นหินอยู่ในช่วงระดับดี ดังในรูปที่ 3.3 ซึ่งผลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในลักษณะตรงกันข้าม โดยแปรผกผันต่อกัน

ตารางที่ 3.2 ค่ามาตรฐานของพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวที่แบ่งประเภทถนนตามสภาพความแข็งแรง (Horak, 2008)

	Structural condition rating	Deflection bowl parameters			
		D_0 (μm)	BLI (μm)	MLI (μm)	LLI (μm)
Granular base	Sound	<500	<200	<100	<50
	Warning	500-750	200-400	100-200	50-100
	Severe	>750	>400	>200	>100
Cementitious base	Sound	<200	<100	<50	<40
	Warning	200-400	100-300	50-100	40-80
	Severe	>400	>300	>100	>80
Bituminous base	Sound	<400	<200	<100	<50
	Warning	400-600	200-400	100-150	50-80
	Severe	>600	>400	>150	>80

Note : These criteria can be adjusted to improve sensitivity of benchmarking



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างผลของพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว (Horak, 2008)

3.3 การใช้พารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวของกระทรวงคมนาคมแห่งมลรัฐแท็กซัส

กระทรวงคมนาคมแห่งมลรัฐ แท็กซัส (TxDOT) ได้เก็บข้อมูล การทดสอบแบบน้ำหนักตก กระแทบไว้ในระบบจัดการข้อมูลโครงสร้างชั้นทาง (Pavement Management Information System ,PMIS) โดยข้อมูลการทดสอบแบบน้ำหนักตกกระแทบ ประกอบไปด้วยค่าการแอ่นตัว และ น้ำหนักที่กระทำ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าอิลาสติคโมดูลส์ย้อนกลับ แต่การคำนวณย้อนกลับไม่สามารถทำได้เนื่องจากระบบจัดการข้อมูลโครงสร้างชั้นทางไม่ได้จัดเก็บข้อมูลความหนาแต่ละชั้นของโครงสร้างชั้นทางไว้ ซึ่งเป็นข้อมูลหนึ่งที่สำคัญในการคำนวณย้อนกลับ จึงเป็นเหตุให้ ทางกระทรวงคมนาคมแห่งมลรัฐ แท็กซัส ซึ่งทำการวิจัยโดย Zhang และคณะ (2003) ได้พัฒนาดัชนีชี้วัดที่ใช้บอกคุณภาพของ โครงสร้าง ชั้นทางโดยไม่ต้องใช้ค่าอิลาสติคโมดูลส์ที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับ ซึ่งตัวชี้วัดนั้นก็คือ Statistical Structural Strength Index (SSI) และ Structural Condition Index (SCI) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 Statistical Structural Strength Index (SSI)

พารามิเตอร์นี้มีพื้นฐานมาจากค่า Surface Curvature Index (SCI) และค่าการแอ่นตัวของตัวรับสัญญาณ ตัวที่ 7 ซึ่งเป็นตัวสุดท้าย มีระยะห่าง 72 inch จากจุดศูนย์กลางของแผ่นรับน้ำหนัก โดยค่า SSI สำหรับชั้นทางที่มีคุณภาพดี จะต้องมีค่าน้อยกว่า -0.49 ในขณะที่ถ้าค่าเกิน 0.72 ถือว่าชั้นทางนั้นมีคุณภาพแย่มาก สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$SSI = -1.945 - 0.021X_{12} + 0.52X_{67} \quad (3.2)$$

โดยที่ SSI คือ Statistical Structural Strength Index

X_{12} คือ ผลรวมของการแอ่นตัวของ ตัวรับสัญญาณ ตัวที่ 1 กับ 2 โดยที่ ตัวรับสัญญาณ ตัวที่ 1 อยู่ใต้จุดที่น้ำหนักกระทำ และตัวที่ 2 อยู่ห่างจากจุดที่น้ำหนักกระทำ 12 inch (mm)

X_{67} คือ ผลรวมของการแอ่นตัวของ ตัวรับสัญญาณ ตัวที่ 6 กับ 7 โดยที่ ตัวรับสัญญาณตัวที่ 6 อยู่ห่างจากจุดที่น้ำหนักกระทำ 60 inch และตัวที่ 7 อยู่ห่าง 72 inch (mm)

3.3.2 Structural Condition Index (SCI)

นอกจากค่า SSI แล้วทางกระทรวงคมนาคมแห่งมลรัฐ แท็กซัสยังได้มีการใช้ ดัชนีชี้วัด Structural Condition Index (SCI) ในการจำแนกชั้นทางที่จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุง ซ่อมแซม ออกจากชั้นทางที่มีสภาพดี แสดงได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$SCI = \frac{SN_{eff}}{SN_{req}} \quad (3.3)$$

โดยที่ SCI คือ Structural Condition Index

SN_{eff} คือ Structural Number ที่เป็นอยู่

SN_{req} คือ Structural Number ที่ต้องการ

ส่วนใหญ่ค่า Structural Number ที่ต้องการคำนวณมาจากการประมาณปริมาณ เพลาเดี่ยวเทียบเท่า (ESALs) สำหรับ 20 ปีต่อมา ซึ่งอาจต่างไปจากนี้ได้ขึ้นอยู่กับนโยบายการซ่อมแซมและการตัดสินใจขององค์กรที่รับผิดชอบโครงสร้างชั้นทาง โดยค่า SCI ที่มีค่ามากกว่าหนึ่งแสดงให้เห็นว่า ชั้นทางนั้นยังไม่จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุง แต่ถ้าต่ำกว่าหนึ่งต้องได้รับการปรับปรุง ซึ่งในการคำนวณค่า Structural Number มีด้วยกัน 2 แนวทาง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การประมาณค่า Structural Number (SN) โดยใช้สัดส่วนโมดูลัสและสัดส่วนการแอ่นตัว

วิธีการประมาณ ค่า Structural Number นี้ถูกพัฒนามาจากสมการ ความถดถอย (Regression) ของ Wimsatt (1999) ซึ่งใช้สัดส่วนโมดูลัสของโครงสร้าง ชั้นทางเทียบกับของดินเดิม ($E_p/E_{subgrade}$) และสัดส่วนการแอ่นตัวที่ระยะ 72 นิ้วจากแผ่นรับน้ำหนักเทียบกับการแอ่นตัวใต้แผ่นรับน้ำหนัก (W_7/W_1) โดยที่การแอ่นตัวใต้แผ่นรับน้ำหนัก (W_1) ให้ค่าความแข็งแรง ของโครงสร้างชั้นทางและชั้นดินเดิม แต่การแอ่นตัวที่ระยะ 72 นิ้วจากแผ่นรับน้ำหนัก (W_7) ให้ค่าความแข็งแรงเฉพาะชั้นดินเดิมเท่านั้น นอกจากนี้ในการหาค่าโมดูลัสของชั้นดินเดิม ($E_{subgrade}$) จะหาจากสมการที่แนะนำให้ใช้ในคู่มือแนะนำการออกแบบโครงสร้างชั้นทางของ AASHTO ดังนี้

$$E_{Subgrade} = 0.192 \times P / (W_7 \times 72) \quad (3.4)$$

โดยที่ $E_{subgrade}$ คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินเดิม (psi)

P คือ น้ำหนักที่กระทำ (pounds)

W_7 คือ การแอ่นตัวที่ตัวรับสัญญาณตัวที่ 7 (mm)

นอกจากนี้ยังมีสมการ ความถดถอย ของ Wimsatt ที่ใช้คำนวณสัดส่วนโมดูลัสของโครงสร้างทางเทียบกับชั้นดินเดิม ($E_p/E_{subgrade}$) สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่หนาไม่เกิน 21 นิ้ว ดังนี้

$$\frac{E_p}{E_{Subgrade}} = 516.94 \left(\frac{W_7}{W_1}\right)^{5/2} - 214.46 \left(\frac{W_7}{W_1}\right)^2 + 159.56 \left(\frac{W_7}{W_1}\right)^{3/2} - 6.143 \left(\frac{W_7}{W_1}\right) + 1.0826 \left(\frac{W_7}{W_1}\right)^{1/2} \quad (3.5)$$

โดยที่ E_p/E_{subgrade} คือ สัดส่วนโมดูลัสของโครงสร้างทางเทียบกับของดินเดิม
 W_7/W_1 คือ สัดส่วนการแอ่นตัวของตัวรับสัญญาณตัวที่ 7 เทียบกับตัวที่ 1

จากสมการข้างต้นทั้ง 2 สมการทำให้สามารถหาค่าโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทางได้ ซึ่งจากความสัมพันธ์ที่แนะนำในคู่มือแนะนำการออกแบบโครงสร้างชั้นทางของ AASHTO ทำให้สามารถหาค่า Structural Number ที่มีประสิทธิภาพดังนี้

$$SN_{\text{eff}} = 0.0045 \times D \times E_p^{0.33} \quad (3.6)$$

โดยที่ D คือ ความหนาทั้งหมดของโครงสร้างชั้นทาง (inch)
 E_p คือ โมดูลัสของโครงสร้างชั้นทาง (psi)

2) การประมาณค่า Structural Number (SN) โดยตรงจากการทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ

การแอ่นตัวสูงสุดที่วัดได้แผ่นรับน้ำหนักจาก การทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ เป็นการรวมกันของการแอ่นตัวของชั้นดินเดิมกับโครงสร้างชั้นทาง โดย Irwin (1983) ได้แนะนำกฎ “สองส่วนสาม” ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานความจริงที่ว่า 95% ของการแอ่นตัวที่วัดบนผิวของชั้นทางนั้นทำมุม 34° กับแนวราบดังรูปที่ 3.4 ซึ่ง Rhode (1994) ได้เสนอให้ใช้ Structural Index of Pavement (SIP) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงขนาดของการแอ่นตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง โดยเสนอว่าการแอ่นตัวที่ระยะ 1.5 เท่าของความหนาโครงสร้างชั้นทางคือ การแอ่นตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นในชั้นดินเดิม ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$SIP = D_0 - D_{1.5Hp} \quad (3.7)$$

โดยที่ SIP คือ Structural Index of Pavement
 D_0 คือ การแอ่นตัวสูงสุดที่วัดภายใต้ น้ำหนักกระทำ 9000 lb
 $D_{1.5Hp}$ คือ การแอ่นตัวที่วัดจากระยะ 1.5Hp ภายใต้ น้ำหนักกระทำ 9000 lb
 Hp คือ ความหนาทั้งหมดของโครงสร้างชั้นทาง

และสำหรับการคำนวณค่า Structural Number จำเป็นจะต้องรู้ค่า SIP และความหนาทั้งหมดของโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$SN = k_1 SIP^{k_2} Hp^{k_3} \quad (3.8)$$

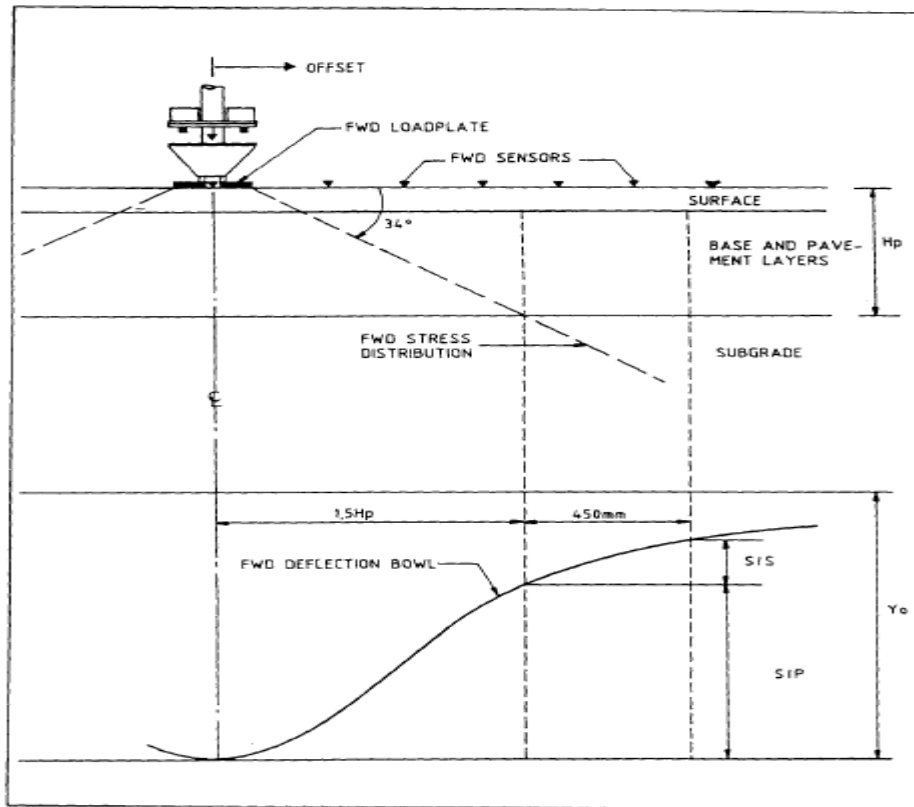
โดยที่ SN คือ Structural Number (inch)
 SIP คือ Structural Index of Pavement (microns)
 Hp คือ ความหนาทั้งหมดของโครงสร้างชั้นทาง (mm)
 k_1, k_2, k_3 คือ สัมประสิทธิ์ของสมการความถดถอยดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สัมประสิทธิ์ของสมการความถดถอยระหว่าง SN กับ SIP (Rhode,1994)

Surface Type	k1	k2	k3	r ^{2*}	n**
Surface Seals	0.1165	-0.3248	0.8241	0.984	1944
Asphalt Concrete	0.4728	-0.4810	0.7581	0.957	5832

* Coefficient of Determination

** Sample Size



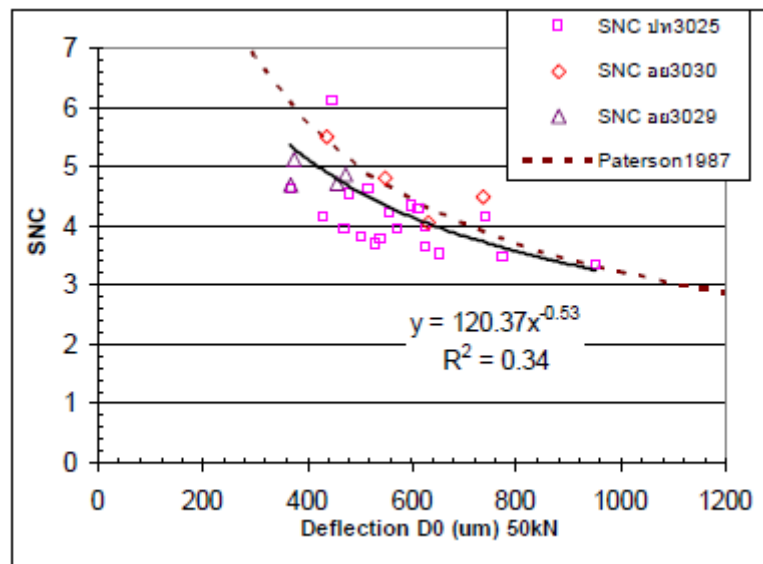
รูปที่ 3.4 การกระจายตัวของความเค้นและการวัดหลุมการแอ่นตัวใต้แผ่นน้ำหนัก (Rhode,1994)

นอกจากนี้ค่า Structural Number ยังมีการใช้ในอีกลักษณะหนึ่ง โดยจากการศึกษาของ Paterson (1987) ได้ทำให้อยู่ในรูป Modified Structural Number (SNC) ซึ่งใช้ในการบ่งบอกสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางโดยรวม ซึ่งใช้ผลของค่า Structural Number รวมกับผลความแข็งแรงของชั้นดินเดิม และจากการศึกษาของบุญชัยและคณะ (2553) ได้ใช้ค่าการแอ่นตัวที่จุดศูนย์กลาง (D_0) จากการทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบในการบอกลักษณะความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางโดยรวม โดยนำค่าการแอ่นตัวที่จุดศูนย์กลางเทียบเคียงกับค่า SNC ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ทั้งคู่มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม

$$SNC = SN + 3.51(\log CBR_s) - 0.85(\log CBR_s)^2 - 1.43 \tag{3.9a}$$

$$SN = \sum_{i=1}^n a_i h_i \tag{3.9b}$$

- โดยที่ SNC คือ Modified Structural Number ของโครงสร้าง
 CBR_s คือ ค่า %CBR ของดินถมหรือดินเดิมในสนาม
 N คือ จำนวนชั้นของโครงสร้างชั้นทาง
 a_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นที่ i
 h_i คือ ความหนาของชั้นที่ i



รูปที่ 3.5 กราฟระหว่างค่าการแอ่นตัวที่จุดศูนย์กลางน้ำหนักกับค่า SNC (บุญชัยและคณะ, 2553)

3.4 การประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง

ค่าอิลาสติกโมดูลัสเป็นค่าทางวิศวกรรมที่แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของวัสดุ ดังนั้นจึงมีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางหากทราบค่าอิลาสติกโมดูลัสของวัสดุทางแต่ละชั้น จากการศึกษาของ Xu และคณะ (2002) สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางได้ โดยพัฒนาจากพารามิเตอร์หุ้มการแอ่นตัว ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสมการสำหรับโครงสร้างทางแบบชั้นแอสฟัลต์ทั้งหมด (Full-depth) และแบบชั้นพื้นทางเป็นมวลรวม (Aggregate base) โดยมีรายละเอียดดังนี้

Full-depth pavement :

$$\log(E_{ac}) = -1.0831 * \log(SCI) - 2.6210 * \log(H_{ac}) + 0.0482 * H_{ac} + 5.2961 \quad (3.10a)$$

Aggregate base pavement :

$$\log(E_{ac}) = -1.7718 * \log(SCI) + 0.8395 * \log(BDI) - 2.5124 * \log(H_{ac}) + 0.0756 * H_{ac} + 4.888 \quad (3.10b)$$

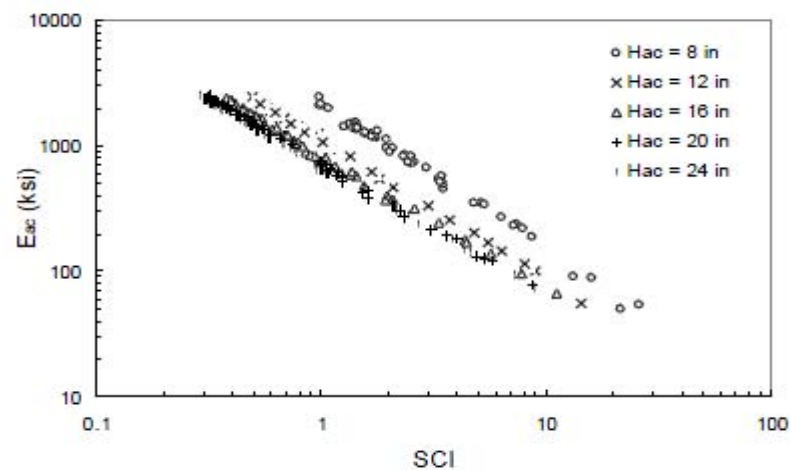
โดยที่ E_{ac} คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง (ksi)

H_{ac} คือ ความหนาของชั้นผิวทาง (inch)

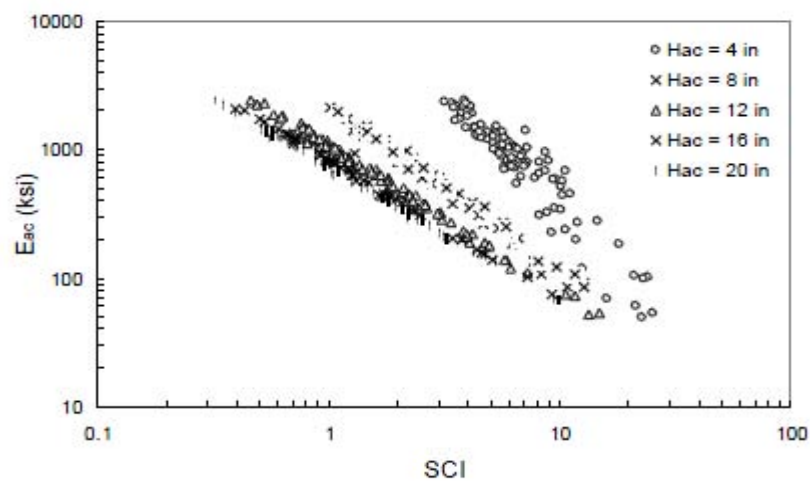
SCI คือ Surface Curvature Index (mm)

BDI คือ Base Damage Index (mm)

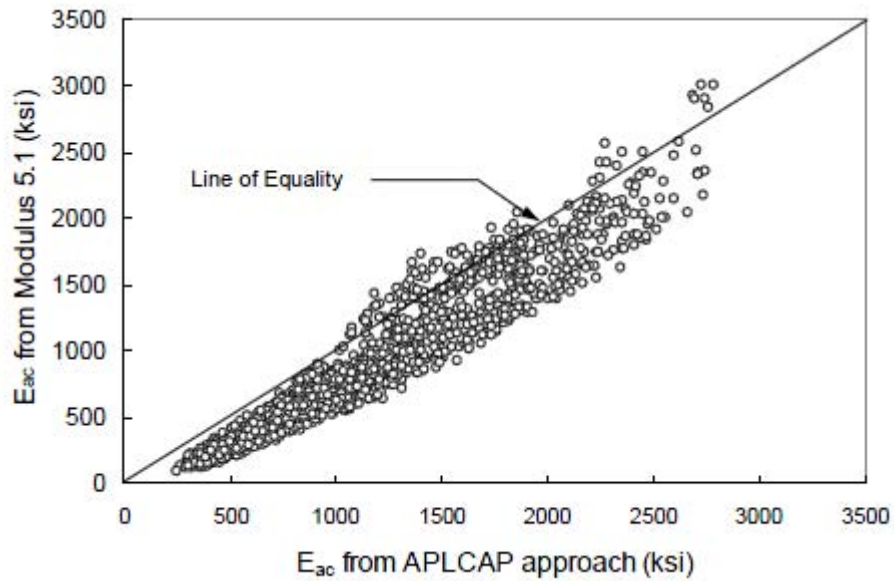
ผลลัพธ์จากการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางด้วยสมการข้างต้นนี้ มีค่าค่อนข้างสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าจากการคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม Modulus 5.1



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_{ac} กับ SCI ของโครงสร้างชั้นทางแบบชั้นแอสฟัลต์ทั้งหมด (Xu et al., 2002)



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_{ac} กับ SCI ของโครงสร้างชั้นทางแบบชั้นพื้นทางเป็นมวลรวม (Xu et al., 2002)



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_{ac} ที่ได้จากการข้างต้นกับโปรแกรมคำนวณย้อนกลับ Modulus 5.1 (Xu et al., 2002)

3.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง โดยพารามิเตอร์เหล่านี้ได้แก่ การแอ่นตัวที่จุดศูนย์กลาง (Deflection at center, D_0), Surface Curvature Index (SCI), Base Damage Index (BDI), Base Curvature Index (BCI) และพารามิเตอร์พื้นที่หลุมการแอ่นตัว (Area Parameter) ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์มีความสามารถในการบ่งบอกสภาพของโครงสร้าง ชั้นทางแตกต่างกันไป โดยผลการศึกษาของ Talvik และ Aavik (2006) แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ SCI, BDI และ BCI มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง และจากการศึกษาของ Horak (2008) ได้แนะนำค่ามาตรฐานของพารามิเตอร์ SCI, BDI และ BCI ซึ่งค่าที่แนะนำนี้ควรใช้เพื่อเป็นแนวทางและต้องมีการปรับเปลี่ยนตามสภาพงาน นอกจากนี้ยังมีการใช้พารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวอื่น ๆ ในการประเมินความแข็งแรงของถนน โดยกระทรวงคมนาคมแห่งมลรัฐ แท็กซัส ได้ใช้ Statistical Structural Strength Index (SSI), Structural Condition Index (SCI) และ Structural Number (SN) สำหรับบุญชัยและคณะ (2553) ได้ใช้การแอ่นตัวที่จุดศูนย์กลางเทียบเคียงกับค่า Modified Structural Number (SNC) ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้าง และจากการศึกษาของ Xu (2002) ได้แนะนำสมการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง โดยพัฒนาจากพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางและค่าแนะนำในการประเมินความแข็งแรงได้

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดโดยสรุปของพารามิเตอร์แต่ละตัว

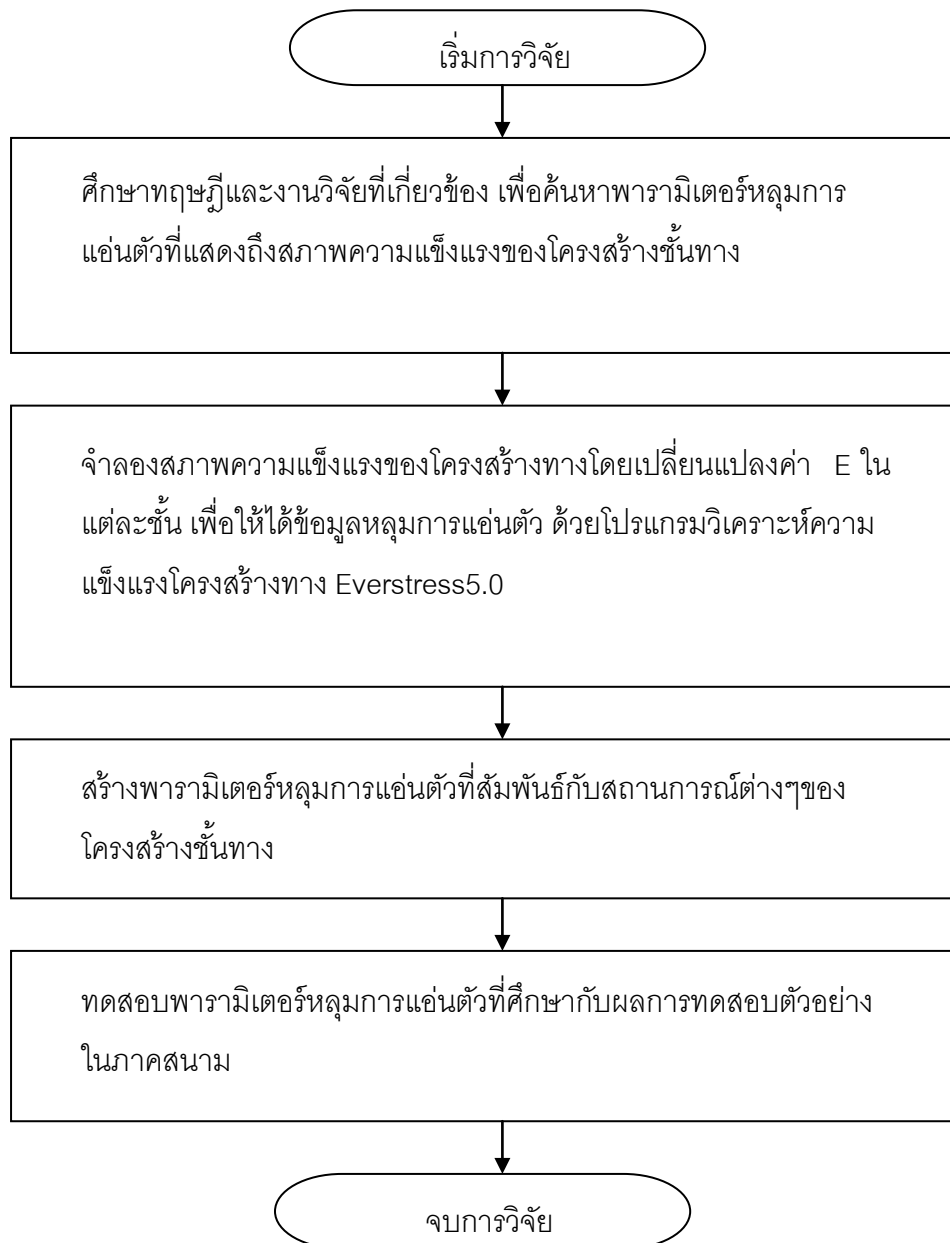
พารามิเตอร์	ผู้วิจัย	รายละเอียด
การแอ่นตัวที่จุดศูนย์กลาง (D_0)	Horak (2008) WSDOT (2010) บุญชัยและคณะ (2553)	บอกความแข็งแรงของ โครงสร้างชั้นทางโดยรวม
Surface Curvature Index (SCI)	Xu et al. (2002) Talvik and Aavik (2006) Horak (2008) WSDOT (2010)	บอกความแข็งแรงของชั้น ผิวทาง
Base Damage Index (BDI)	Talvik and Aavik (2006) Horak (2008) WSDOT (2010)	บอกความแข็งแรงของชั้น พื้นทาง
Base Curvature Index (BCI)	Talvik and Aavik (2006) Horak (2008) WSDOT (2010)	บอกความแข็งแรงของชั้น รองพื้นทาง
พารามิเตอร์พื้นที่หลุมการแอ่นตัว (Area Parameter)	WSDOT (2010)	บอกความแข็งแรงของ โครงสร้างชั้นทางโดยรวม
Statistical Structural Strength Index (SSI)	Zhang et al. (2003)	บอกความแข็งแรงของ โครงสร้างชั้นทางโดยรวม
Structural Condition Index (SCI)	Zhang et al. (2003)	บอกความแข็งแรงของ โครงสร้างชั้นทางโดยรวม
Structural Number (SN)	Zhang et al. (2003) Rhode (1994) Wimsatt (1999)	บอกความแข็งแรงของ โครงสร้างชั้นทางโดยรวม

จากตารางสรุปรายละเอียดของพารามิเตอร์แต่ละตัวจะเห็นว่า พารามิเตอร์ส่วนใหญ่ใช้สำหรับบอกความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางโดยรวม แต่ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาดัชนีชี้วัดที่สามารถบอกความแข็งแรงของโครงสร้างทางในแต่ละชั้น ดังนั้นพารามิเตอร์ Surface Curvature Index (SCI), Base Damage Index (BDI) และ Base Curvature Index (BCI) จึงเป็นพารามิเตอร์ที่ทางผู้วิจัยเลือกใช้เป็นแนวทางในการศึกษา

บทที่ 4

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

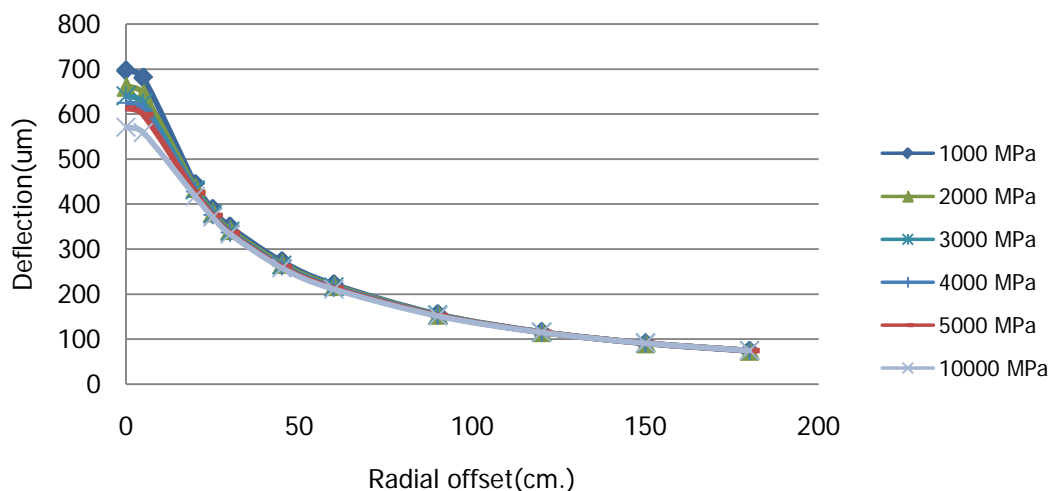
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย การศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การจำลองสภาพหตุการแอนตัว การสร้างพารามิเตอร์หตุการแอนตัวที่สัมพันธ์กับสถานการณ์ต่างๆ การเปรียบเทียบผลการศึกษากับข้อมูลในภาคสนาม โดยมีรายละเอียดดังนี้



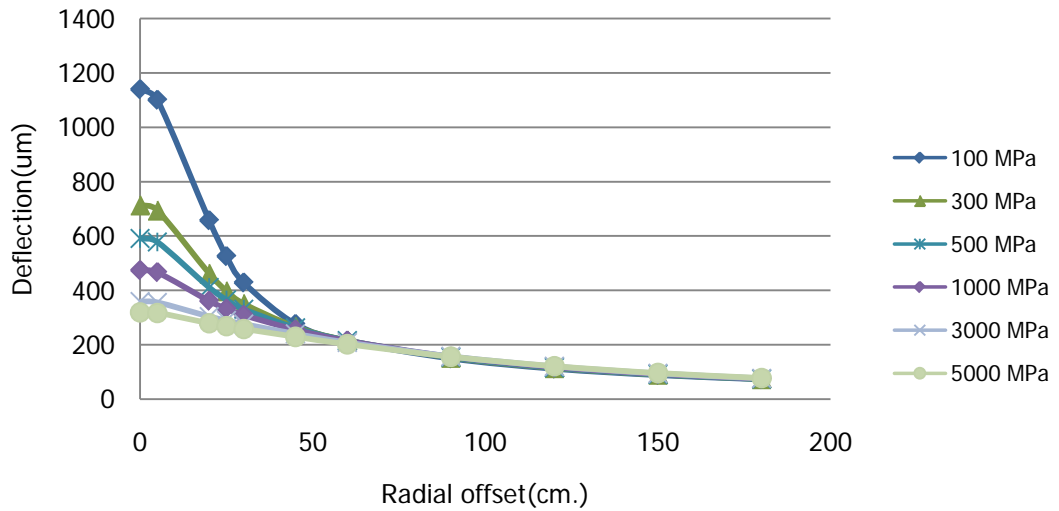
รูปที่ 4.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

4.1 การศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

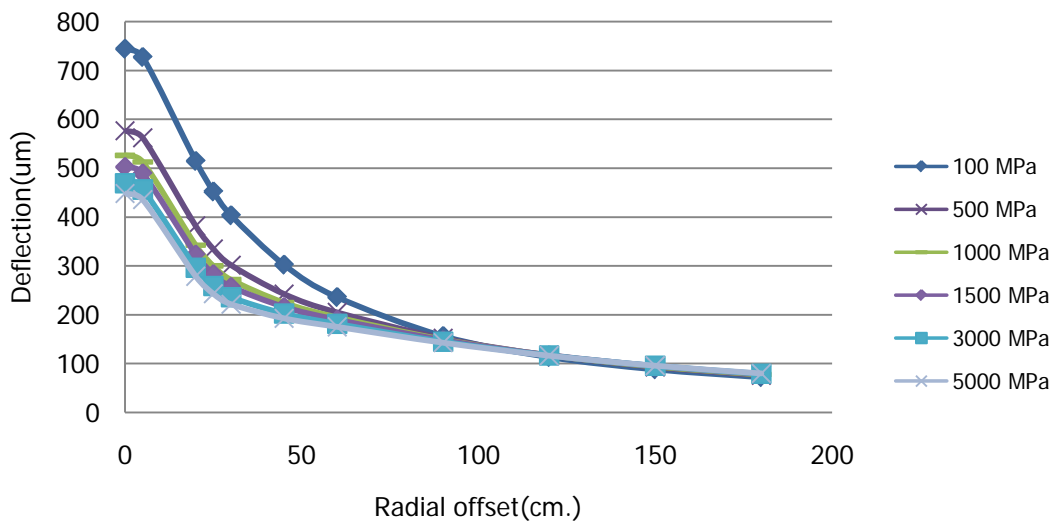
สำหรับงานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษา ทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีอิลาสติก เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับสภาพหลุมการแอ่นตัวมากขึ้น ซึ่งข้อมูลหลุมการแอ่นตัวนี้ เป็นกลุ่มของการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆที่ห่างจากจุดที่น้ำหนักกระทำ ซึ่งการแอ่นตัวเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของวัสดุทางในแต่ละชั้น โดยจะสังเกตได้จากกราฟหลุมการแอ่นตัวในรูปที่ 4.2-4.5 ซึ่งเป็นกราฟหลุมการแอ่นตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง พื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิมตามลำดับ ซึ่งผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าอิลาสติกโมดูลัสในแต่ละชั้น จะสังเกตเห็นว่า หลุมการแอ่นตัวจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยแปรผกผันกับค่าอิลาสติกโมดูลัสคือ ค่าการแอ่นตัวจะลดลงเมื่อความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางแข็งแรงขึ้น และจะเปลี่ยนแปลงในช่วงใดช่วงหนึ่งของกราฟหลุมการแอ่นตัว ซึ่งช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงนี้จะสัมพันธ์กับชั้นทางที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าอิลาสติกโมดูลัส และความหนาของชั้นทางในแต่ละชั้น โดยเมื่อสังเกตรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง พบว่ากราฟหลุมการแอ่นตัวจะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงต้นๆ ประมาณช่วง 0-30 ซม.จากจุดที่แรงกระทำ และช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้จะขยับออกไปมากขึ้นเรื่อยๆตามชั้นของโครงสร้างชั้นทางที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าอิลาสติกโมดูลัส โดยในรูปที่ 4.3 เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง มีระยะในการเปลี่ยนแปลงขยายออกไปอยู่ในช่วง 0-60 ซม. ซึ่งแนวโน้มของการขยายของระยะเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นกับชั้นรองพื้นทาง และชั้นดินเดิมด้วยดังในรูปที่ 4.3 และ 4.4 โดยชั้นรองพื้นทางอยู่ในช่วง 0-120 ซม. และชั้นดินเดิมอยู่ในช่วง 0-180 ซม.ตามลำดับ และสำหรับชั้นดินเดิมจะสังเกตเห็นว่า มีการเปลี่ยนแปลงของกราฟหลุมการแอ่นตัวตลอดทั้งกราฟ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิมส่งผลต่อค่าการแอ่นตัวในทุกจุดของหลุมการแอ่นตัว



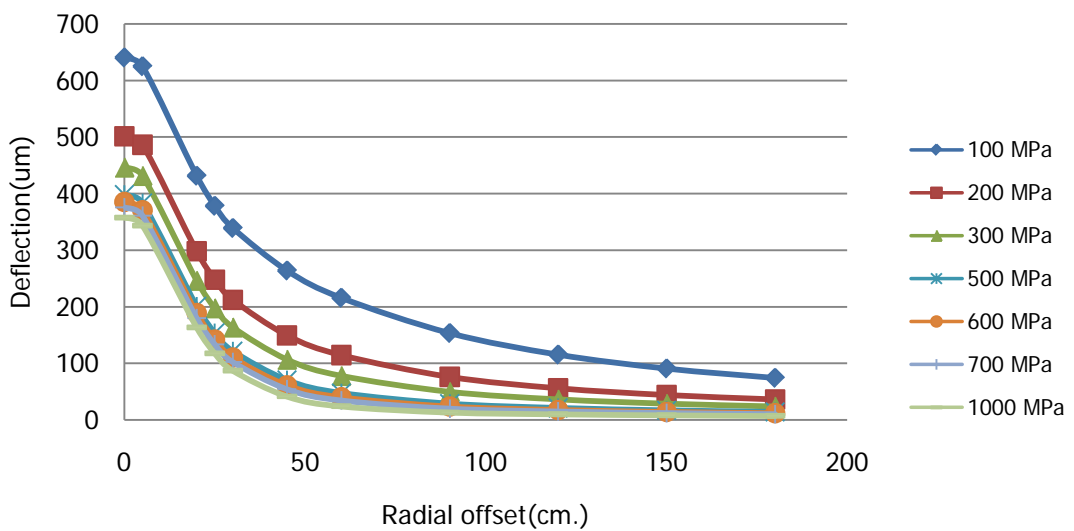
รูปที่ 4.2 หลุมการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางที่ระดับค่า E ของชั้นผิวทางต่างๆกัน



รูปที่ 4.3 หลุมการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางที่ระดับค่า E ของชั้นพื้นทางต่างๆกัน



รูปที่ 4.4 หลุมการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางที่ระดับค่า E ของชั้นรองพื้นทางต่างๆกัน



รูปที่ 4.5 หลุมการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางที่ระดับค่า E ของชั้นดินเดิมต่างๆกัน

เมื่อพิจารณางานวิจัยหลายชิ้นที่ผ่านมา ที่ใช้ข้อมูลหลุมการแอ่นตัวในการบ่งบอกสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว 3 ชนิด คือ Surface Curvature Index (SCI), Base Damage Index (BDI) และ Base Curvature Index (BCI) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สามารถบอกความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละชั้นได้ และมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของหลุมการแอ่นตัวดังที่อธิบายไว้แล้วข้างต้น โดยที่พารามิเตอร์เหล่านี้คือผลต่างของค่าการแอ่นตัวในช่วงใดช่วงหนึ่งของกราฟหลุมการแอ่นตัว ซึ่งมีระยะของผลต่างในช่วง 0-30 ซม., 30-60 ซม. และ 60-90 ซม. ใช้บ่งบอกความแข็งแรงของชั้นผิวทาง พื้นทาง และรองพื้นทางตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของกราฟหลุมการแอ่นตัว ที่ระยะของการเปลี่ยนแปลงหลุมการแอ่นตัวจากการเปลี่ยนค่าอิลาสติกโมดูลัสจะมากขึ้นตามประเภท และความหนาของชั้นทาง โดยในการศึกษานี้ได้ใช้พารามิเตอร์เหล่านี้เป็นแนวทางในการศึกษา ซึ่งได้เพิ่มเติมและเปลี่ยนแปลงระยะของผลต่างของค่าการแอ่นตัวใหม่ โดยได้ทำการเพิ่มเติมช่วงต้นให้ถี่มากขึ้น และขยายระยะของช่วงปลายออกไป เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะหลุมการแอ่นตัวตามสภาพโครงสร้างถนนของประเทศไทย ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างชั้นทางแบบยึดหยุ่นที่มีชั้นผิวทางบางๆปูทับด้วยวัสดุประเภทไร้แรงประสาน (Unbound material) อีก 2 ชั้น วางอยู่บนชั้นดินเดิม ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.2-4.5 โดยระยะของผลต่างของหลุมการแอ่นตัวที่สนใจ คือ 0-30 ซม., 0-10 ซม., 10-20 ซม., 20-30 ซม., 30-60 ซม., 30-45 ซม., 45-60 ซม., 60-120 ซม., 60-90 ซม., 90-120 ซม., 120-180 ซม. และ 150-180 ซม.

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดโดยสรุปของพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว	สมการ	หน่วย	วัตถุประสงค์ของพารามิเตอร์
Surface Curvature Index (SCI)	$SCI = D_0 - D_{12}$	$\mu\text{m}, \text{mm}$	บ่งบอกความแข็งแรงของชั้นผิวทาง
Base Damage Index (BDI)	$BDI = D_{12} - D_{24}$	$\mu\text{m}, \text{mm}$	บ่งบอกความแข็งแรงของชั้นพื้นทาง
Base Curvature Index (BCI)	$BCI = D_{24} - D_{36}$	$\mu\text{m}, \text{mm}$	บ่งบอกความแข็งแรงของชั้นรองพื้นทาง

4.2 การจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัว

ในส่วนนี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Everstress5.0 ซึ่งถูกพัฒนาโดยกระทรวงคมนาคม แห่งมลรัฐวอชิงตัน (WSDOT,2005) ในการวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวตรงตำแหน่งต่างๆ ตามสภาพ

ความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางที่แตกต่างกัน โดยจะทำการจำลองสภาพความแข็งแรง และความหนาของวัสดุทางในแต่ละชั้น คือ ชั้นผิวทาง พื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม ให้มีค่าอิลาสติกโมดูลัสแตกต่างกัน และมีความหนาของชั้นผิวทาง พื้นทาง และรองพื้นทางที่แตกต่างกัน โดยใช้หลักการในการออกแบบการทดลอง (ปารเมศ ชูติมา ,2545) ในการกำหนดขนาดและจำนวนของการทดลองที่เหมาะสมที่สามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติได้ เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะของหลุมการแอ่นตัว และใช้ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ที่จะใช้บ่งบอกความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละชั้นได้ ซึ่งมีรายละเอียดของโปรแกรมและการออกแบบการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.1 โปรแกรม Everstress

โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทาง ซึ่งสามารถบอกค่าความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และการแอ่นตัว (Deflection) ในระบบโครงสร้างชั้นทางที่ประพฤติตัวในลักษณะอิลาสติกแบบกึ่งอนันต์ (Semi-infinite) ภายใต้น้ำหนักกระทำแบบพื้นผิววงกลม โดยพัฒนามาจากโปรแกรม WESLEA ซึ่งถูกพัฒนาโดยหน่วยทหารช่างแห่งกองทัพสหรัฐ (U.S. Army Corps of Engineers) โดยเป็นโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางด้วยทฤษฎีเลเยอร์อิลาสติกซิติ์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางได้หลายชั้นโดยใช้โมเดลอิลาสติกแบบหลายชั้น (Multi-layered elastic) และสามารถวิเคราะห์น้ำหนักที่กระทำได้หลายๆจุดพร้อมกัน โดยสามารถวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางที่มีจำนวนชั้นได้มากที่สุด 5 ชั้น จำนวนจุดที่น้ำหนักกระทำ 20 จุด และจำนวนจุดประเมิน 50 จุด โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ ค่าอิลาสติกโมดูลัส อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ความหนาของแต่ละชั้น ขนาดของน้ำหนักที่กระทำ ความดันสัมผัสหรือรัศมีของแผ่นรับน้ำหนัก และตำแหน่งหรือระยะห่างของจุดที่น้ำหนักกระทำ นอกจากนี้โปรแกรมยังได้เพิ่มเติมรูปแบบการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของความเค้น (Stress sensitivity) ของวัสดุประเภทไรแรงประสานซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ วัสดุประเภทเนื้อหยาบ และวัสดุเนื้อละเอียด โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการด้านล่างนี้

$$\text{วัสดุเม็ดหยาบ : } E_b = K_1 \theta^{K_2} \quad (4.1a)$$

$$\text{วัสดุเม็ดละเอียด : } E_s = K_3 \sigma_d^{K_4} \quad (4.1b)$$

โดยที่ E_b คือ โมดูลัสการคืนตัวของวัสดุเม็ดหยาบ (ksi หรือ MPa)

E_s คือ โมดูลัสการคืนตัวของวัสดุเม็ดละเอียด (ksi หรือ MPa)

θ คือ Bulk stress (ksi หรือ MPa)

σ_d คือ Deviator stress (ksi หรือ MPa)

K_1, K_2, K_3, K_4 คือ ค่าคงที่ของสมการ

สำหรับค่าคงที่ K_1 และ K_3 ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามฤดูกาล ส่วนค่าคงที่ K_2 และ K_4 ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ โดยแบ่งเป็นวัสดุเนื้อหยาบ และเนื้อละเอียด โดย K_2 มีค่าเป็นบวก และ K_4 มีค่าเป็นลบ และมีค่าคงที่ไม่แปรเปลี่ยนตามฤดูกาล

4.2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) คือ กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ โดยการทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลหมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ยกตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เพลทิกेट (Replicate) หรือการทดลองซ้ำ จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง

สำหรับการทดลองที่มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย การแบ่งระดับของปัจจัยที่สนใจให้ละเอียดเกินไปทำให้ต้องทำการทดลองเป็นจำนวนมาก จึงได้มีการนำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k มาใช้ ซึ่งใช้ในกรณีที่ปัจจัยที่สนใจ k ปัจจัย และแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ดังนั้นในการออกแบบการทดลอง 1 เพลทิกेटจะประกอบด้วย การทดลองทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ การทดลอง โดยการออกแบบ 2^k มีประโยชน์มากในการทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิด โดยมีสมมติฐานว่าผลตอบหรือผลลัพธ์ที่ได้ (Response) จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง

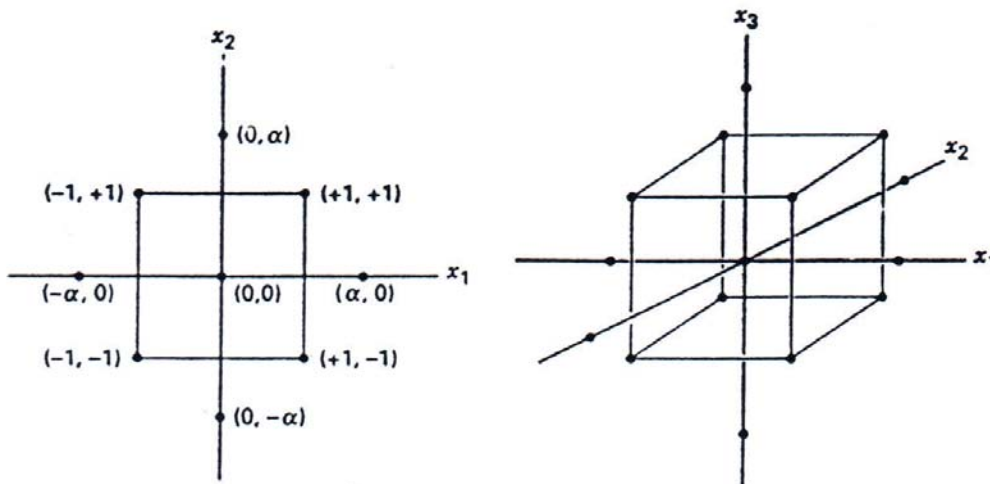
ในกรณีที่ผลตอบมีความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง จึงต้องทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติม เพื่อให้ผลตอบที่ได้แสดงผลแบบควอดราติก (Quadratic Effect) ซึ่งเรียกแบบจำลองแบบนี้ว่า แบบจำลองพื้นผิวของผลตอบอันดับที่สอง (Second-Order Response Surface Model) โดยการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมนี้ทำได้โดยการเพิ่มการทดลองที่จุดศูนย์กลาง (Central Run) 3-5 การทดลอง และการทดลองตามแนวแกน (Axial Run) อีกจำนวน $2k$ การทดลอง โดยการออกแบบตามแนวแกนจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ α ซึ่งเป็นระยะทางของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ โดยมีค่าประมาณ \sqrt{k} เราเรียกการออกแบบเพิ่มเติมแบบนี้ว่า การออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลาง (Central Composite Design, CCD) ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.6

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลได้แบ่งปัจจัยที่ศึกษาออกเป็นระดับต่างๆ ซึ่งสำหรับการออกแบบ 2^k สามารถกำหนดระดับของปัจจัยที่ศึกษาออกได้เป็น 2 ระดับ คือ “สูง” และ “ต่ำ” โดย

ต้องทำการเข้ารหัสตัวแปร ซึ่งแสดงไว้ดังสมการด้านล่างนี้ โดยอาจจะกำหนดเป็นตัวเลขง่าย ๆ คือ “1” และ “-1” แทนความหมาย “สูง” และ “ต่ำ” ตามลำดับ

$$X_i = \frac{C \frac{(C_{High} + C_{Low})}{2}}{\frac{(C_{High} - C_{Low})}{2}} \quad (4.2)$$

โดยที่ X_i คือ ตัวแปรของปัจจัย i โดยที่ทำการเข้ารหัสแล้ว
 C คือ ตัวแปรของปัจจัย i โดยที่ยังไม่ได้ทำการเข้ารหัส
 C_{High} คือ ค่าของปัจจัย i โดยที่มีค่าสูงสุดในช่วงที่สนใจ
 C_{Low} คือ ค่าของปัจจัย i โดยที่มีค่าต่ำสุดในช่วงที่สนใจ



รูปที่ 4.6 การออกแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ $k=2$ และ $k=3$ (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

4.3 การสร้างพหามิตอร์หลุมการแอ่นตัว

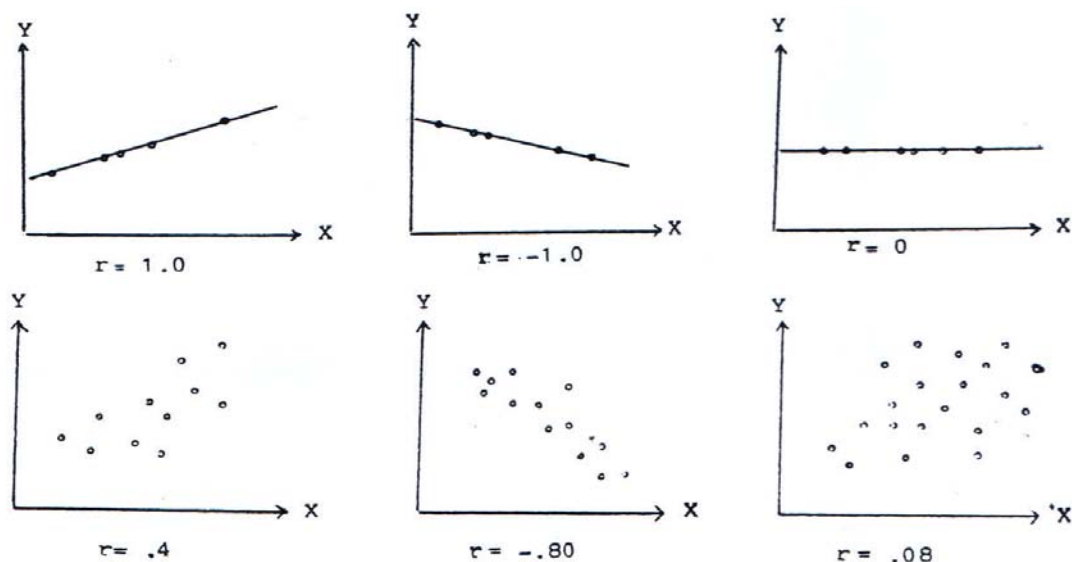
จากการจำลองสภาพของโครงสร้างชั้นทางก่อนหน้า ทำให้ได้ข้อมูลหลุมการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางที่มีสภาพความแข็งแรง หรือค่าอิลาสติกโมดูลัสของวัสดุทางในแต่ละชั้นแตกต่างกัน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำมาหาค่าพหามิตอร์หลุมการแอ่นตัวที่สามารถระบุความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างทางในสถานการณ์ต่างๆที่จำลองขึ้นมาได้ โดย ต้องทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ระหว่างพหามิตอร์หลุมการแอ่นตัวแต่ละตัว เพื่อเป็นการจัดกลุ่มพหามิตอร์ที่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันสูงให้อยู่กลุ่มเดียวกัน จากนั้นจึงทำการคัดเลือกพหามิตอร์หลุมการแอ่นตัวจากกลุ่มเหล่านี้เป็นตัวแปรอิสระที่นำไปวิเคราะห์สมการ ความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพหามิตอร์ที่ทำการศึกษากับค่าอิลาสติกโมดูลัส และในกรณีที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิลาสติกโมดูลัสกับพหามิตอร์หลุมการแอ่นตัวมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรงก็มีความจำเป็นต้องทำ การแปลงรูปสมการความถดถอยไม่

เชิงเส้นให้อยู่ในรูปเชิงเส้น (Regression Transformation) โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตาม หรือตัวแปรอิสระให้สอดคล้องกับรูปแบบของกราฟ เพื่อให้ได้สมการที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิสระกับพหุนามหรือพหุนามการแปรผันได้ ซึ่งมีรายละเอียดของกระบวนการทั้งหมดดังต่อไปนี้

4.3.1 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)

สำหรับสถิติที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X และ Y ว่ามากหรือน้อยนั้นจะเรียกว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) โดยที่ ρ จะไม่มีหน่วย จึงสามารถใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X ได้ว่ามีความสัมพันธ์มากหรือน้อยเพียงใด เนื่องจากค่า ρ จะมีค่าสูงสุดเป็น 1 และต่ำสุดเป็น -1 โดยสามารถประมาณค่า ρ ด้วยค่า r โดยที่ r คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตัวอย่าง และสามารถอธิบายความหมายของค่า r ได้ดังต่อไปนี้

- 1.) ค่า r เป็นลบ แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม คือถ้า X เพิ่ม Y จะลด แต่ถ้า X ลด Y จะเพิ่ม
- 2.) ค่า r เป็นบวก แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน คือถ้า X เพิ่ม Y จะเพิ่มด้วย แต่ถ้า X ลด Y จะลดลงด้วย
- 3.) ถ้า r เข้าใกล้ 1 หมายถึง X และ Y สัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์กันมาก
- 4.) ถ้า r เข้าใกล้ -1 หมายถึง X และ Y สัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามและมีความสัมพันธ์กันมาก
- 5.) ถ้า $r = 0$ แสดงว่า X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กัน
- 6.) ถ้า r เข้าใกล้ 0 แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างกราฟแสดงค่า r ที่มีค่าในช่วง $-1 < r < 1$ (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2540)

4.3.2 การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis)

เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ที่มีความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้นดังนี้

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_i \quad ; i = 1, 2, \dots, N \quad (4.3)$$

โดยที่ Y คือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable)
 X คือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)
 e คือ ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม (Random error)
 β_0 คือ ส่วนตัดแกน Y หรือค่าของ Y เมื่อ X เป็นศูนย์
 β_1 คือ ความชัน (Slope) ของเส้นตรง

สำหรับการประมาณค่า β_0 และ β_1 สามารถใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) ในการประมาณค่า โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า Y_i ด้วย Y_i ค่าต่ำสุด ที่ทำให้ผลบวกของค่าคลาดเคลื่อนยกกำลังสองมีค่าน้อยที่สุดดังนี้

$$\beta_0 = a = \frac{\sum Y_i}{n} - b \frac{\sum X_i}{n} \quad (4.4a)$$

$$\beta_1 = b = \frac{\sum X_i Y_i - \frac{(\sum X_i)(\sum Y_i)}{n}}{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}} \quad (4.4b)$$

นอกจากนี้การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่า β_1 เป็นการทดสอบว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นหรือไม่ โดยเป็นการทดสอบสมมติฐานแบบ 2 ข้าง จากสมการความถดถอย ถ้า $\beta_1 = 0$ แสดงว่า X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

สมมติฐานเพื่อการทดสอบ

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

$$\text{สถิติทดสอบ : } t = \frac{b-0}{S_b} = \frac{b}{S/\sqrt{SS_{XX}}} \quad (4.5)$$

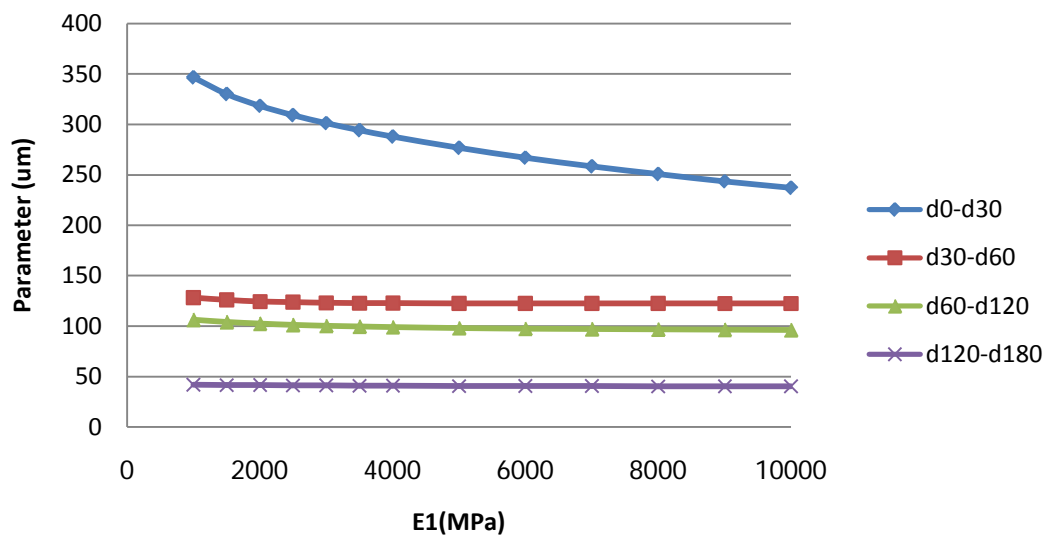
เขตปฏิเสธ : จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $t < -t_{1-\alpha/2; n-2}$ หรือ $t > t_{1-\alpha/2; n-2}$

หรือจะปฏิเสธ H_0 ถ้า $|t| > t_{1-\alpha/2; n-2}$

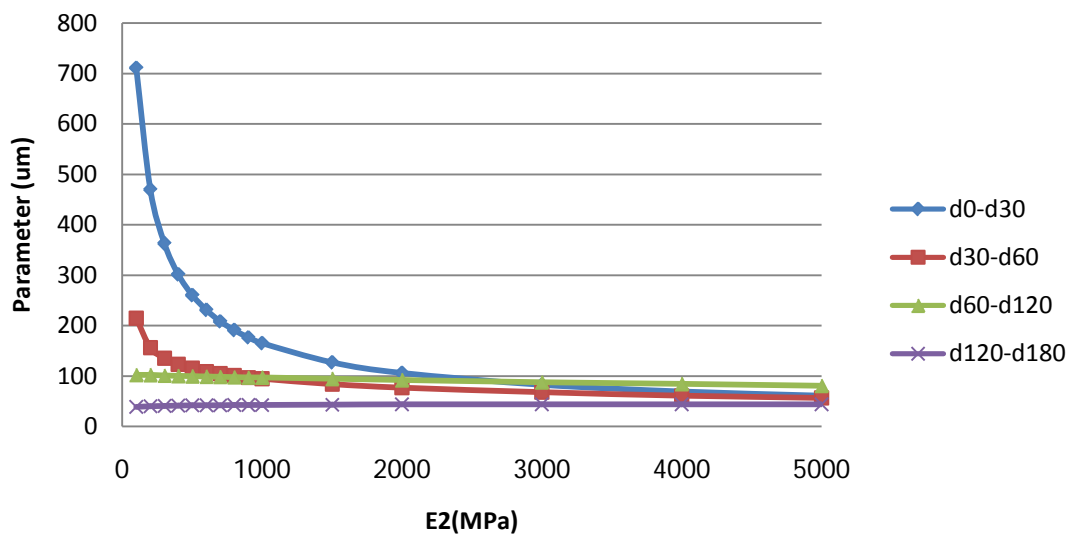
ถ้าปฏิเสธ H_0 แสดงว่า X และ Y สัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้นหรือ การเปลี่ยนแปลงของ X จะมีอิทธิพลต่อค่าของ Y ในรูปเชิงเส้นนั่นเอง แต่ถ้าไม่ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 หรือยอมรับ H_0 แสดงว่า X และ Y ไม่ได้มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น

4.3.3 การแปลงรูปสมการความถดถอยให้อยู่ในรูปเชิงเส้น (Regression Transformation)

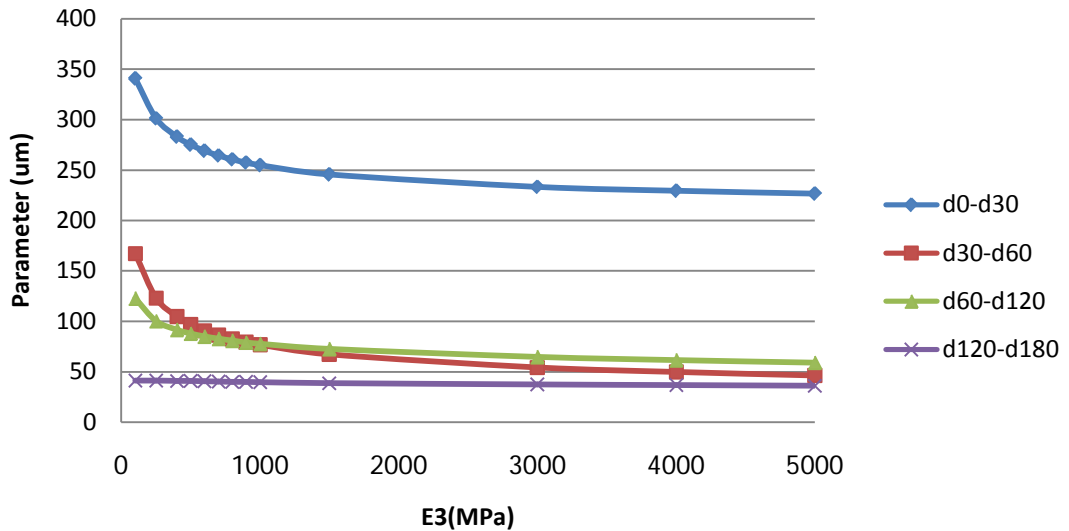
สมการความถดถอยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นสมการที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิลาสติกโมดูลัสกับพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว ซึ่งเมื่อทำการพลอตกราฟระหว่างค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้นกับพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวต่างๆพบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะไม่เป็นเส้นตรงดังในรูปที่ 4.8-4.11 โดยมีลักษณะเป็นเส้นโค้งลงแบบควอดราติก



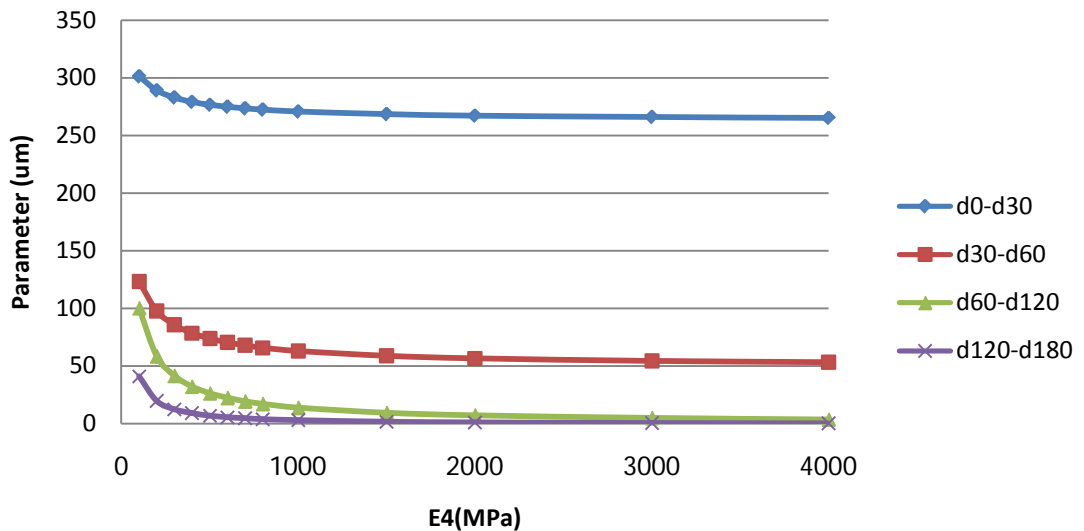
รูปที่ 4.8 กราฟระหว่างพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวกับค่าอิลาสติกโมดูลัสชั้นผิวทาง



รูปที่ 4.9 กราฟระหว่างพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวกับค่าอิลาสติกโมดูลัสชั้นพื้นทาง



รูปที่ 4.10 กราฟระหว่างพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวกับค่าอิลาสติกโมดูลัส ชั้นรองพื้นทาง

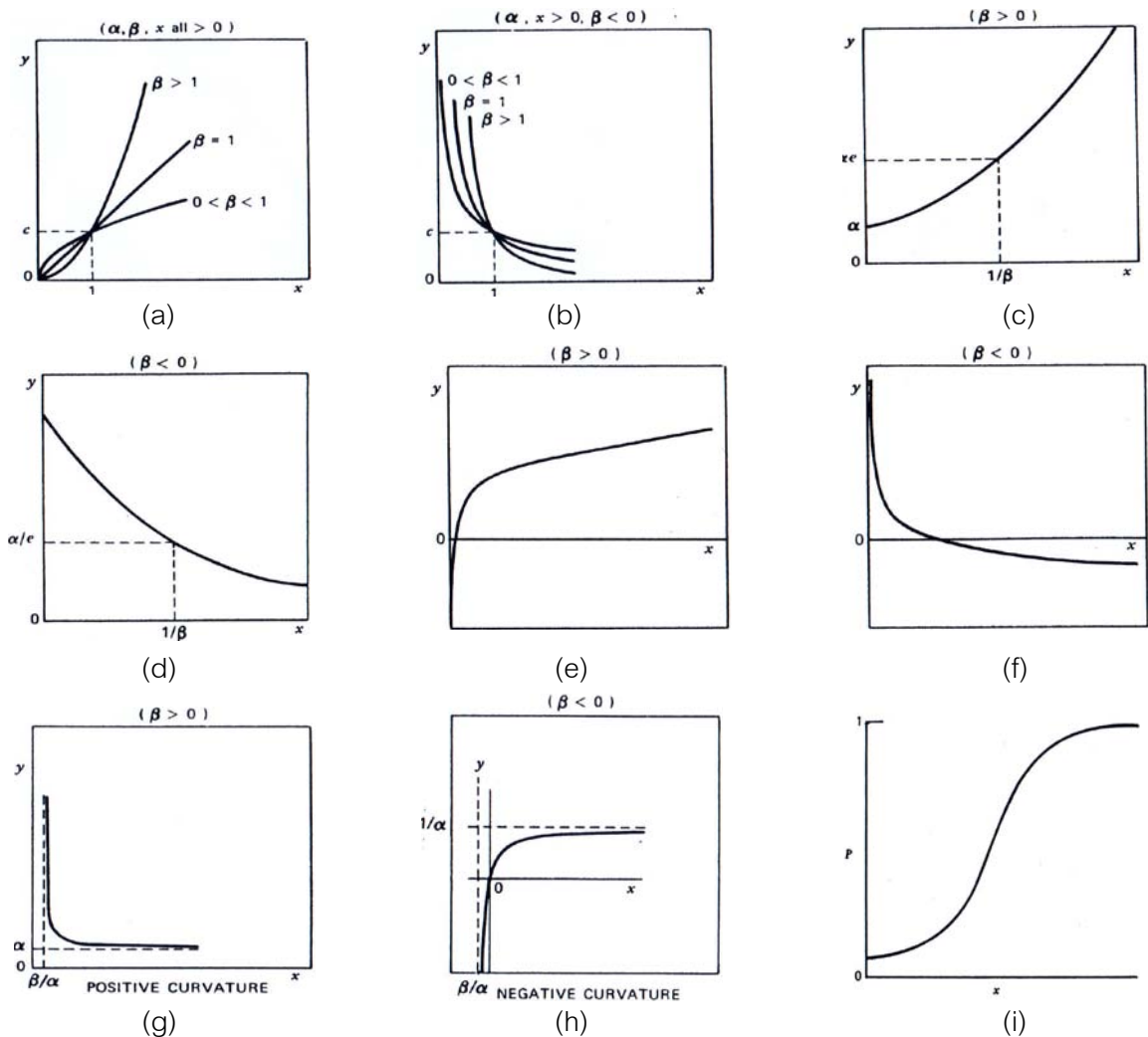


รูปที่ 4.11 กราฟระหว่างพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวกับค่าอิลาสติกโมดูลัส ชั้นดินเดิม

ด้วยลักษณะความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรงนี้จึงต้องทำการแปลงรูปสมการความถดถอยไม่เชิงเส้นให้อยู่ในรูปเชิงเส้น โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตาม (Y) หรือตัวแปรอิสระ (X) ตัวใดตัวหนึ่ง หรือทั้งคู่ เพื่อให้สมการมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรสามารถทำได้หลายวิธีตามการแนะนำของ Chatterjee และ Price (1991) ดังในตารางที่ 4.2 และรูปแบบของกราฟสำหรับการแปลงตัวแปรในรูปแบบต่างๆดังในรูปที่ 4.12 ซึ่งเมื่อพิจารณาตารางและรูปนี้กับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้นกับพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวต่างๆพบว่า ควรทำการแปลงตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระด้วยการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปลอการิทึมฐานสิบ เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะของกราฟแบบควอดราติก

ตารางที่ 4.2 การแปลงรูปสมการความถดถอยให้อยู่ในรูปเชิงเส้น (Chatterjee and Price,1991)

Function	Transformation	Linear Form	Graph Shown in Figure
$Y = \alpha X^\beta$	$Y' = \log Y, X' = \log X$	$Y' = \log \alpha + \beta X'$	4.12(a,b)
$Y = \alpha e^{\beta X}$	$Y' = \ln Y$	$Y' = \ln \alpha + \beta X$	4.12(c,d)
$Y = \alpha + \beta \log x$	$X' = \log X$	$Y = \alpha + \beta X'$	4.12(e,f)
$Y = \frac{X}{\alpha X - \beta}$	$Y' = \frac{1}{Y}, X' = \frac{1}{X}$	$Y' = \alpha - \beta X'$	4.12(g,h)
$Y = \frac{e^{\alpha + \beta X}}{1 + e^{\alpha + \beta X}}$	$Y' = \ln \frac{Y}{1 - Y}$	$Y' = \alpha + \beta X$	4.12(i)



รูปที่ 4.12 รูปแบบกราฟของการแปลงให้อยู่ในรูปเส้นตรง (Chatterjee and Price,1991)

4.4 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับข้อมูลในภาคสนาม

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบทางสถิติ ในขั้นตอนก่อนหน้า คือ สมการความสัมพันธ์ที่สามารถประมาณค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นทางโนแต่ละชั้นได้ และเพื่อเป็นการยืนยันผลของสมการที่ได้ จึงต้องนำสมการ ความถดถอยนี้ไปทดลองใช้กับข้อมูลหลุมการแ่นตัวในภาคสนาม เพื่อประมาณค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้น และในขณะเดียวกันก็ได้มีการ ทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางด้วย การทดสอบ วิธีอื่น เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบเหล่านั้นมาเปรียบเทียบกับค่าอิลาสติคโมดูลัสที่ประมาณได้จากสมการที่ผู้วิจัยพัฒนา โดยใช้การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ข้อมูล Time-History จากการทดสอบการแ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบมาแปรผลหาค่าอิลาสติคโมดูลัสจากความเร็วคลื่น โดยใช้หลักการเดียวกันกับการทดสอบ Seismic-Refraction เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทาง และใช้การทดสอบแบบ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) ในการเปรียบเทียบค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นพื้นทางและรองพื้นทางกับค่าอิลาสติคโมดูลัสที่แปลงจากค่า DPI และสำหรับชั้นดินเดิมใช้สมการประมาณค่าอิลาสติคโมดูลัสที่แนะนำโดย AASHTO ในการเปรียบเทียบ โดยการที่จะนำข้อมูลหลุมการแ่นตัวจากภาคสนามมาใช้ จำเป็นต้องมีการปรับแก้เนื่องจากผลของระดับแรงที่กระทำแตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.1 การปรับแก้ค่าการแ่นตัวเนื่องจากระดับแรงที่กระทำแตกต่างกัน

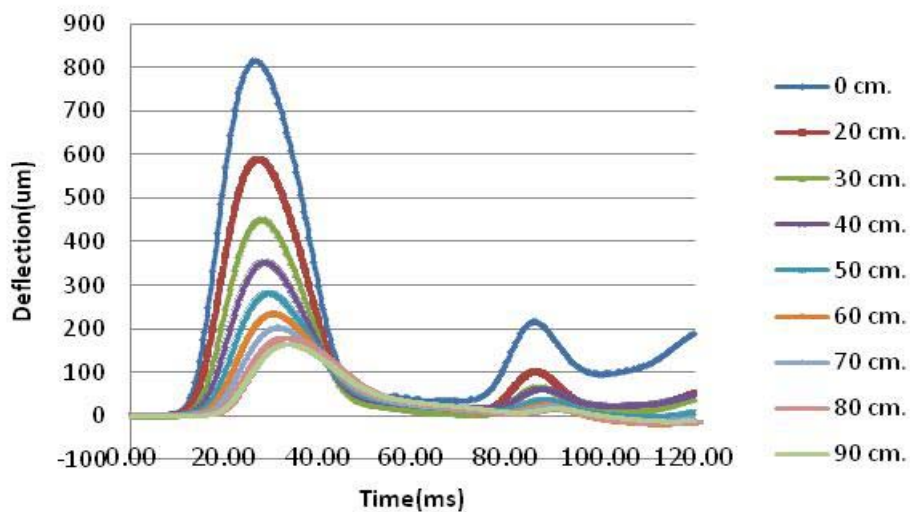
แม้ว่าจะมีการกำหนดแรงที่ใช้ในการทดสอบ แต่ในทางปฏิบัติการจะปล่อยแรงให้ได้ตามขนาดที่กำหนดพอตินั้นเป็นไปได้ยาก มักจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น และการที่แรงต่างกันนี้เองส่งผลให้ค่าการแ่นตัวที่ได้แตกต่างกันด้วยแม้ว่าจะมีลักษณะและความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางเหมือนกัน จึงต้องมีการปรับแก้ค่าการแ่นตัวให้ได้ตามระดับแรงที่กำหนดคือ 50 kN ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D4694-96 “Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device” เพื่อให้ได้ค่าการแ่นตัวที่สามารถแสดงให้เห็นถึงสภาพของโครงสร้างชั้นทางได้ และตามมาตรฐาน ASTM D5858-96 (2003) “Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory” ได้แนะนำการปรับแก้ไว้ดังนี้

$$\text{Normalized deflection} = \text{Actual deflection} \times \frac{\text{Reference load}}{\text{Actual load}}$$

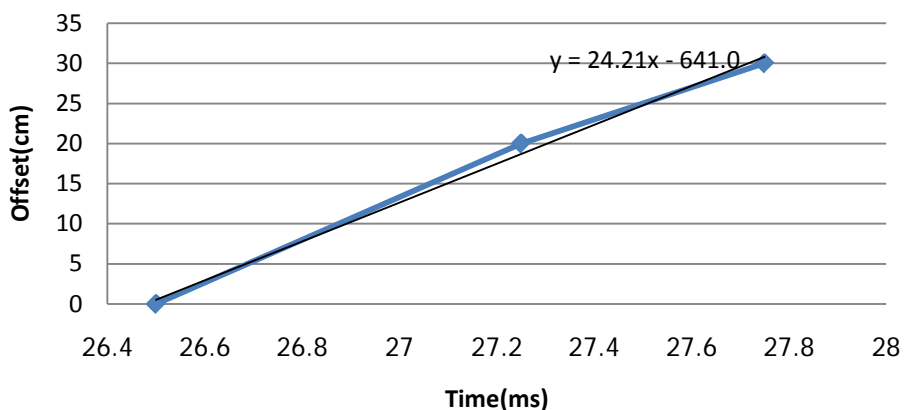
4.4.2 การคำนวณค่าอิลาสติคโมดูลัสของความเร็วคลื่นจากข้อมูล Time-History

ข้อมูล Time-History เป็นข้อมูลของการแ่นตัวในโดเมนของเวลา โดยการแ่นตัว ณ ตัวรับสัญญาณใดๆจะมีลักษณะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป จนถึงจุดๆหนึ่งที่มีค่าการ

แอมพลิจูดมากที่สุด แล้วจึงมีค่าลดต่ำลงในลักษณะของรูปประฆังคว่ำดังรูปที่ 4.13 โดยที่จุดยอดของกราฟการแอมพลิจูดในโดเมนของเวลานี้ จะอยู่เหลื่อมกันในแต่ละตัวรับสัญญาณซึ่งวางเรียงตัวห่างจากจุดที่น้ำหนักระทำได้แตกต่างกัน และเมื่อนำระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณมาพลอตกราฟกับผลต่างของเวลาระหว่างจุดยอดของกราฟการแอมพลิจูดแต่ละตัวรับสัญญาณก็จะได้ความเร็วของคลื่นที่เดินทางผ่านวัสดุชั้นทางดังในรูปที่ 4.14 โดยจะเลือกใช้ตัวรับสัญญาณในระยะใกล้ๆ ไม่ห่างจากจุดที่น้ำหนักระทำได้มากนัก เพราะตามหลักการ Seismic-Refraction คลื่นที่เกิดขึ้นจะมี 2 ลักษณะคือ คลื่นโดยตรง (Direct wave) และคลื่นสะท้อน (Refraction wave) โดยที่ตัวรับสัญญาณใกล้ๆ จะมีคลื่นโดยตรงเท่านั้นที่เดินทางมาถึงจึงทำให้สามารถจำแนกความเร็วได้ ซึ่งความเร็วนี้จะเป็นความเร็วของคลื่นที่เดินทางในชั้นผิวทาง และเมื่อสังเกตค่าความเร็วที่ได้พบว่ามีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นความเร็วที่ได้นี้จึงเป็นความเร็วของคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) จากนั้นจึงทำการแปลงความเร็วให้อยู่ในรูปค่าอีลาสติกโมดูลัส แล้วจึงนำไปใช้เปรียบเทียบกับค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางที่ได้จากสมการความถดถอย



รูปที่ 4.13 กราฟการแอมพลิจูดในโดเมนของเวลา



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความเร็วคลื่นที่ผ่านชั้นผิวทาง

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4.6a)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.6b)$$

โดยที่ V_s คือ ความเร็วของคลื่นทุติยภูมิ

G คือ โมดูลัสเฉือน

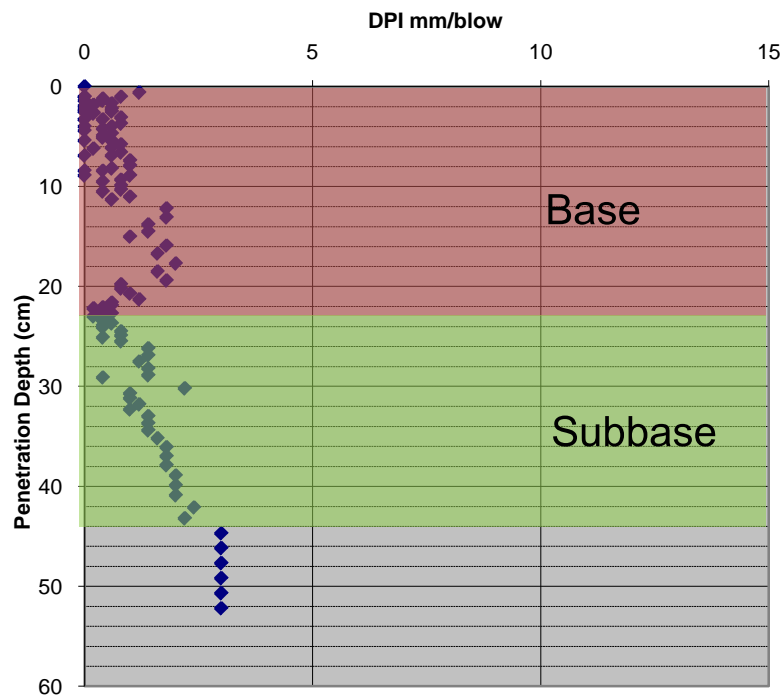
ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ

ν คือ Poisson's ratio

E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น

4.4.3 การคำนวณค่าอิลาสติกโมดูลัสจากการทดสอบ DCP ของแต่ละสายทาง

การทดสอบ DCP ให้ผลโดยตรงคือค่า DPI โดยเป็นค่าที่ใช้วัดค่าความต้านทานต่อการจมตัวของวัสดุในหน่วยของมิลลิเมตรต่อการตอก (mm/blow) ซึ่งจากค่า DPI นี้สามารถเปลี่ยนเป็นค่าอิลาสติกโมดูลัสของ ความแข็งแรงของ ชั้นพื้นทางและรองพื้นทางได้ จากนั้นจึงนำไปเปรียบเทียบกับค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากสมการความถดถอย สำหรับค่า DPI สามารถหาได้โดยการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการเฉลี่ยพื้นที่ใต้กราฟของค่า DPI กับความลึกจากพื้นผิว และได้ใช้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า DPI กับค่าอิลาสติกโมดูลัสจากการศึกษาของ Chen และคณะ (2005) ในการคำนวณหาค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง



รูปที่ 4.15 กราฟการวิเคราะห์ค่า DPI

$$DPI = \frac{1}{H} \sum_i^N [(DPI)_i \cdot (Z)_i] \quad (4.7)$$

โดยที่ Z คือ ระยะจมน้ำขณะที่ยอดแต่ละครั้ง
 H คือ ระยะจมน้ำทั้งหมดในช่วงที่สนใจ
 N คือ จำนวนครั้งในการตอก

$$E_s = 537.76 \times DPI^{-0.6645} \quad (4.8)$$

โดยที่ E_s คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัส
 DPI คือ ดัชนีวัดค่าความต้านทานต่อการจมน้ำของวัสดุ

4.4.4 การประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิม

ชั้นดินเดิมเป็นชั้นทางสุดท้ายของโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งมีคุณสมบัติต่างจากชั้นอื่นคือ มีความหนาไม่จำกัด และความแข็งแรงของชั้นนี้จะส่งผลต่อการออกแบบโครงสร้างชั้นทางโดยรวม สำหรับการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสด้วยข้อมูลหลุมการแ่นตัวได้ถูกแนะนำโดยคู่มือการออกแบบโครงสร้างชั้นทางโดย AASHTO และหลายๆมาตรฐานของ ASTM โดยแนะนำให้ใช้ค่าการแ่นตัวที่วัดได้จากเครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบที่ระยะห่างจากน้ำหนักกระทำมากๆ ซึ่งการแ่นตัวที่ระยะนี้แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของชั้นดินเดิมเพียงชั้นเดียว และไม่ได้รับผลกระทบจากขนาดของแผ่นรับน้ำหนัก โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการด้านล่างนี้

$$M_R = \frac{0.24P}{d_r r} \quad (4.9)$$

โดยที่ M_R คือ ค่าโมดูลัสการคั้นตัวของชั้นดินเดิม (psi)
 P คือ น้ำหนักที่กระทำ (lb)
 d_r คือ ค่าการแ่นตัวที่ระยะ r จากจุดที่แรงกระทำ (inch)
 r คือ ระยะจากจุดที่แรงกระทำ (inch)

4.4.5 การทดสอบความสัมพันธ์

สำหรับแนวทางวิเคราะห์ที่นำมาใช้ในการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการความถดถอยกับค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างชั้นทางในภาคสนามคือ การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เดียวกันกับการใช้ทดสอบพารามิเตอร์หลุมการแ่นตัว โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผลของสมการถดถอย ซึ่งจะใช้สถิติทดสอบ Pearson ในการทดสอบ โดยวิธีนี้

เป็นสถิติที่ใช้ทดสอบกับตัวแปรประเภทปริมาณ ซึ่งสอดคล้องกับตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

- 1.) ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง ทดสอบความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของความเร็วคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล Time-History
- 2.) ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง ทดสอบความสัมพันธ์กับ ค่าอิลาสติกโมดูลัสจากการทดสอบ DCP ของชั้นพื้นทาง
- 3.) ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นรองพื้นทาง ทดสอบความสัมพันธ์กับ ค่าอิลาสติกโมดูลัสจากการทดสอบ DCP ของชั้นรองพื้นทาง
- 4.) ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิม ทดสอบความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ประมาณได้จากสมการที่แนะนำโดย AASHTO

ผลการจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัวและการวิเคราะห์พารามิเตอร์

บทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการในการออกแบบการทดลอง เพื่อกำหนดจำนวนและขนาดของการทดลอง ซึ่งจะใช้ในการจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัว และนำข้อมูลหลุมการแอ่นตัวนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละชั้น โดยทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันระหว่างพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวทั้งหมด ที่ทำการศึกษาด้วยวิธีการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) และใช้การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสและความหนาของชั้นทางแต่ละชั้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การออกแบบการทดลองและจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัว

การจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัวเป็นกระบวนการทดลองหนึ่งเพื่อให้ได้ข้อมูลไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวกับค่าอิลาสติกโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละชั้น โดยก่อนการทดลองจะต้องมีการวางแผน เพื่อให้การทดลองที่ออกมาสะท้อนถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษากับผลการทดลองที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงได้นำการออกแบบการทดลองมาใช้ในการวางแผนการทดลอง โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวของผลตอบรับที่สอง (Second-Order Response Surface Model) เนื่องด้วยความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษา (Factor) กับผลลัพธ์ที่ได้ (Response) มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง แต่มีลักษณะความสัมพันธ์แบบควอดราติกดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.3.3 สำหรับหลักการในการออกแบบการทดลองต้องเริ่มที่การกำหนดชนิดและจำนวนของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังต้องกำหนดขนาดต่ำสุด และสูงสุดของแต่ละปัจจัย เพื่อใช้ในการกำหนดขอบเขตโดยรวมของการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.1 การกำหนดชนิดและจำนวนของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อให้ได้ค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทาง ดังนั้นปัจจัยที่ต้องพิจารณาจึงต้องเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งจากการศึกษาทฤษฎีอิลาสติกซิติ์ทำให้ทราบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการแอ่นตัวคือ ค่าความแข็งแรงของชั้นทางหรือค่าอิลาสติกโมดูลัส ความหนาและจำนวนของชั้นทาง อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของวัสดุทาง ขนาด จำนวน และตำแหน่งที่นำหนักกระทำบนโครงสร้างชั้นทาง แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาถึงการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางแบบยึดหยุ่นในประเทศไทย ซึ่งมีจำนวนชั้นทาง

ค่อนข้างคองที่คือ 4 ชั้น ได้แก่ ผิวทาง พื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม และด้วยเหตุที่เป็นการทดสอบโครงสร้างชั้นทาง จึงได้มีการกำหนดขนาดของน้ำหนักที่กระทำให้คองที่คือ 50 kN เพียงจุดเดียว ซึ่งเป็นขนาดน้ำหนักที่ถูกแนะนำในมาตรฐาน ASTM D4694-96 นอกจากนี้วัสดุทางที่ใช้ก็มักจะเป็นวัสดุแบบเดิม จึงทำให้อัตราส่วนบัวของมีค่าค่อนข้างคองที่ ด้วยเหตุที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จึงทำให้ปัจจัยที่ต้องพิจารณาสำหรับการออกแบบการทดลองคือ ค่าอิลาสติกโมดูลัส และความหนาของชั้นทางในแต่ละชั้น และสำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตการศึกษาเฉพาะโครงสร้างชั้นทางแบบ 4 ชั้น ดังนั้นปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการทดลองนี้คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทางทั้ง 4 ชั้น และความหนาของชั้นทาง 3 ชั้น รวมทั้งสิ้นมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาทั้งหมด 7 ปัจจัย โดยใช้ตัวอักษร A-G แทนปัจจัยเหล่านี้ รายละเอียดดังตารางที่ 5.1

5.1.2 การกำหนดขนาดต่ำสุด-สูงสุดของแต่ละปัจจัยและจำนวนการทดลอง

จากหลักการออกแบบการทดลองดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ได้กำหนดให้มีการกำหนดค่าต่ำสุดและสูงสุดของแต่ละปัจจัย เพื่อให้สามารถกำหนดขอบเขตโดยรวมของการทดลอง โดยค่าต่ำสุดและสูงสุดนี้จะแทนด้วยตัวเลข -1 และ 1 ตามลำดับ และสำหรับการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบพื้นผิวของผลตอบรับที่สอง จึงต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ α ซึ่งเป็นระยะทางของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ ซึ่งสามารถประมาณค่าได้เท่ากับ $\sqrt{7} = 2.64$ (ปารเมศ ชูติมา, 2545) แต่เพื่อให้สะดวกต่อการออกแบบและจำลองสภาพหลุมการแอนตัว จึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 2$ โดยค่านี้ถูกใช้ในการกำหนดขอบเขตที่สูง-ต่ำกว่าค่าในการออกแบบ เพื่อใช้ในการพิสูจน์และกำหนดจุดที่ทำให้สมการมีลักษณะแบบควอดราติก ซึ่งค่าต่ำสุด-สูงสุด และค่าพารามิเตอร์ α ของแต่ละปัจจัยจะถูกกำหนดอยู่ในช่วงที่เป็นไปได้สำหรับโครงสร้างชั้นทางของประเทศไทย รายละเอียดดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดค่าต่ำสุด-สูงสุด และค่าพารามิเตอร์ α ของแต่ละปัจจัย

ปัจจัยที่พิจารณา	หน่วย	ขอบเขตของแต่ละปัจจัย				
		-2	-1	0	1	2
ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง (A)	MPa	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000
ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (B)	MPa	100	400	700	1,000	1,300
ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นรองพื้นทาง (C)	MPa	100	400	700	1,000	1,300
ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิม (D)	MPa	50	100	150	200	250
ความหนาของชั้นผิวทาง (E)	cm	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5
ความหนาของชั้นพื้นทาง (F)	cm	10.0	15.0	17.5	20.0	25.0
ความหนาของชั้นรองพื้นทาง (G)	cm	10.0	15.0	17.5	20.0	25.0

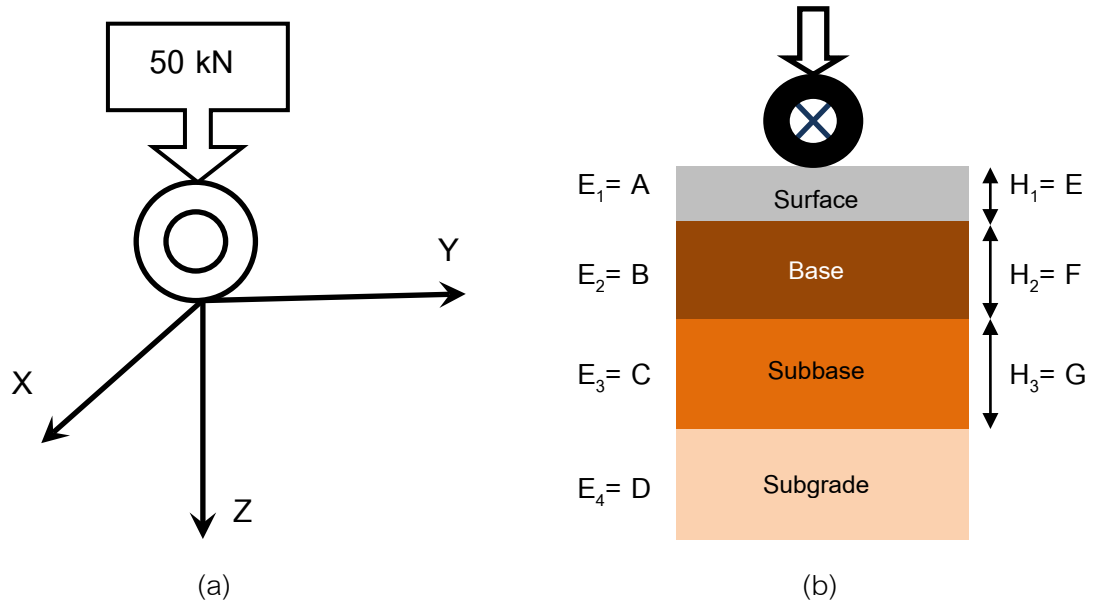
สำหรับจำนวนการทดลองได้ใช้การออกแบบ 2^k ซึ่งงานวิจัยนี้มีจำนวนปัจจัยที่พิจารณาทั้งสิ้น 7 ปัจจัย จึงมีจำนวนการทดลอง $2^7 = 128$ การทดลอง แต่การออกแบบการทดลองนี้เป็น การทดลองแบบพหุคูณของผลตอบรับที่ซ้อน จึงต้องเพิ่มการทดลองที่จุดศูนย์กลางอีกเพียง 1 การทดลอง ทั้งนี้ที่ตามทฤษฎีแนะนำให้เพิ่มอีก 3-5 การทดลอง เพราะว่าการทดลองในงานวิจัยนี้เป็น การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งจะให้ผลลัพธ์เหมือนเดิมทุกครั้งภายใต้สภาพเงื่อนไข เดียวกัน และเพิ่มการทดลองตามแนวแกนอีกจำนวน $2k = 2 \times 7 = 14$ การทดลอง รวมแล้วมี จำนวนการทดลองที่ต้องทำการจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัวทั้งสิ้น 143 การทดลอง โดยมี รายละเอียดของการทดลองแต่ละการทดลองกับผลลัพธ์หรือหลุมการแอ่นตัวที่ได้แสดงไว้ในตาราง ที่ ก1 ในภาคผนวก ก

5.1.3 การจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัว

การออกแบบการทดลองก่อนหน้าทำให้ทราบถึงจำนวนและรายละเอียดขนาดของแต่ละ ปัจจัยในการทดลอง โดยขั้นตอนต่อมาคือการจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัว ซึ่งใช้โปรแกรม วิเคราะห์โครงสร้างชั้นทาง Everstress5.0 ในการวิเคราะห์ และจากขอบเขตของงานวิจัยที่ ทำการศึกษาโครงสร้างชั้นทางแบบ 4 ชั้น ทำให้มีค่าเริ่มต้นที่ต้องป้อนให้แก่โปรแกรมคือ ความหนาของชั้นทาง ค่าอิลาสติกโมดูลัส อัตราส่วนปริมาตรของวัสดุทาง ขนาดและตำแหน่งที่น้ำหนัก กระทำบนโครงสร้างชั้นทาง รวมทั้งตำแหน่งของจุดที่ต้องทำการวิเคราะห์ประเมินสภาพการแอ่น ตัว โดยค่าอิลาสติกโมดูลัสและความหนาของชั้นทางแต่ละชั้นได้ป้อนตามการออกแบบการทดลอง ดังที่กล่าวในหัวข้อก่อนหน้า แต่อัตราส่วนปริมาตรของวัสดุทางได้กำหนดให้มีค่าคงที่ แต่จะมีค่า แตกต่างกันในแต่ละชั้น รายละเอียดดังตารางที่ 5.2 สำหรับน้ำหนักและตำแหน่งที่แรงกระทำจะ กำหนดให้มีค่าคงที่คือ 50 kN และพิกัด (X,Y,Z) คือ (0,0,0) และในส่วนของตำแหน่งจุดวิเคราะห์ การแอ่นตัวจะประเมินที่ตำแหน่งผิวทางที่ห่างจากน้ำหนักกระทำ ซึ่งก็จะมีพิกัด (X,Z) คงที่คือ (0,0) และพิกัด Y จะแตกต่างกันออกไป โดยจะห่างจากตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำออกไปจำนวน 10 จุด ได้แก่ 0, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 ซม. ดังนั้นใน 1 การทดลองจะมีจำนวน ข้อมูลการแอ่นตัวทั้งหมด 10 จุด รวมกันเป็นข้อมูลหลุมการแอ่นตัว 1 ชุด

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดค่าเริ่มต้นที่ต้องป้อนในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทาง

ประเภทผิวทาง	อิลาสติกโมดูลัส (MPa)	ความหนา (cm.)	Poisson's ratio
ผิวทาง	1,000-5,000	2.5-12.5	0.35
พื้นทาง	100-1,300	10.0-25.0	0.35
รองพื้นทาง	100-1,300	10.0-25.0	0.35
ดินเดิม	50-250	-	0.45



รูปที่ 5.1 รูปแสดงแนวแกนของจุดวิเคราะห์การแอ่นตัว (a) และลักษณะของโครงสร้างชั้นทาง (b)

5.2 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัวคือ ข้อมูลหลุมการแอ่นตัวจำนวน 143 ชุดข้อมูล ซึ่งในเบื้องต้นจะนำข้อมูลเหล่านี้มาวิเคราะห์ด้วยการคำนวณหาพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษาคือ ผลต่างของการแอ่นตัวช่วงใดช่วงหนึ่ง ซึ่งมีแนวคิดมาจากพารามิเตอร์ Surface Curvature Index (SCI), Base Damage Index (BDI) และ Base Curvature Index (BCI) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สามารถบอกความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละชั้นได้ โดยในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ 12 ชนิด ซึ่งเป็นผลต่างของการแอ่นตัวใน 12 ช่วงคือ 0-30 ซม., 0-10 ซม., 10-20 ซม., 20-30 ซม., 30-60 ซม., 30-45 ซม., 45-60 ซม., 60-120 ซม., 60-90 ซม., 90-120 ซม., 120-180 ซม และ 150-180 ซม ซึ่งจะกำหนดแทนด้วยสัญลักษณ์ Δd_{i-j} โดย i คือการแอ่นตัวที่ระยะเริ่มต้นและ j คือการแอ่นตัวที่ระยะสิ้นสุดในช่วงที่สนใจ

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นการวิเคราะห์เพื่อบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษาว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตัวอย่าง (r) ในการบอกความสัมพันธ์ สำหรับการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวต่างๆ ทั้ง 12 ชนิดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อให้ทราบว่าพารามิเตอร์แต่ละตัวมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันมากน้อยเพียงใด แล้วจึงจัดกลุ่มพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กันมากอยู่ในกลุ่มเดียวกันเพื่อแก้ปัญหาการที่ตัวแปรในสมการมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันสูง (High Multicollinearity) จากนั้นจึงนำพารามิเตอร์ในกลุ่มเหล่านั้นไปใช้ในการสร้างสมการความถดถอยเพื่อประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสต่อไป

สำหรับผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในแต่ละพารามิเตอร์พบว่า พารามิเตอร์แต่ละตัวมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากน้อยแตกต่างกันไป สำหรับการศึกษานี้ได้จัดกลุ่มพารามิเตอร์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงเกิน 0.7 (กรีซ แร่งสูงเนิน, 2554) ให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งสามารถแบ่งพารามิเตอร์ออกได้เป็น 3 กลุ่ม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2.1 กลุ่มพารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวในช่วงระยะ 0-30 ซม.

เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวในช่วงระยะไม่เกิน 30 ซม พบว่าพารามิเตอร์ Δd_{0-30} , Δd_{0-10} , Δd_{10-20} และ Δd_{20-30} มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ซึ่งกันและกันในกลุ่ม 4 ตัวนี้สูงมาก โดยมีค่าเกิน 0.9 และมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์อื่นๆไม่สูงมากนัก ซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.7 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ลดต่ำลงเรื่อยๆตามระยะการแอ่นตัวที่ห่างออกไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ในกลุ่มระยะการแอ่นตัวไม่เกิน 30 ซม มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันสูง จึงสามารถจัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันได้

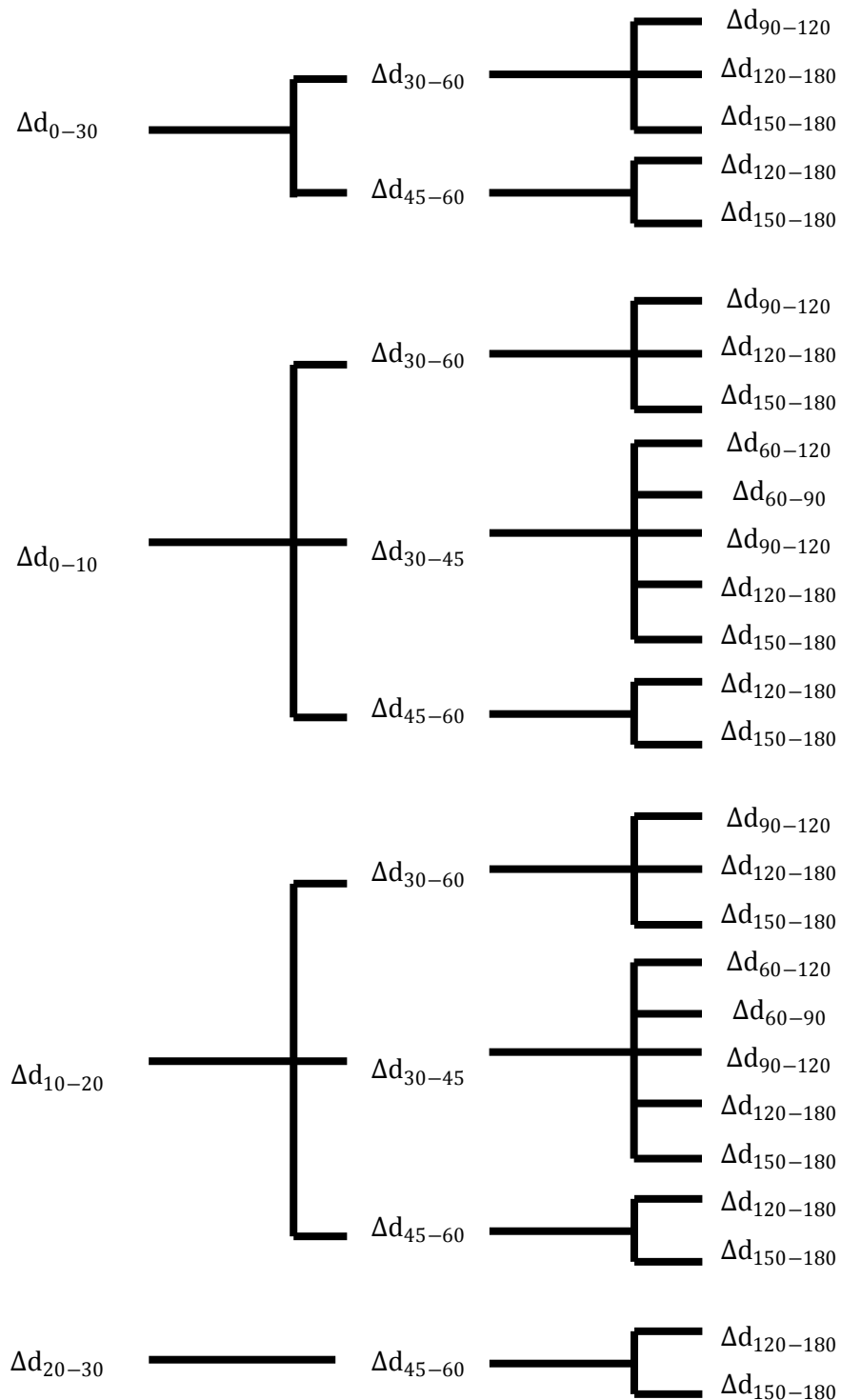
5.2.2 กลุ่มพารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวในช่วงระยะ 30-60 ซม.

สำหรับพารามิเตอร์ในกลุ่มนี้ เมื่อพิจารณาตารางค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่า พารามิเตอร์ Δd_{30-60} , Δd_{30-45} และ Δd_{45-60} มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ซึ่งกันและกันในกลุ่ม 3 ตัวนี้สูงมาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.8-0.9 และมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์อื่นๆไม่สูงมากนัก ซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.7 แต่มีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์บางตัวที่สูงมาก คือ Δd_{20-30} และ Δd_{60-120} ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ก็ไม่ได้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับพารามิเตอร์ในกลุ่มระยะ 30-60 ซม. นี้ แต่เพราะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ในกลุ่มอื่นมากกว่า ดังนั้นพารามิเตอร์ Δd_{30-60} , Δd_{30-45} และ Δd_{45-60} จึงถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน

5.2.3 กลุ่มพารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวในช่วงระยะ 60-180 ซม.

จากตารางค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะเห็นว่า พารามิเตอร์ Δd_{60-120} , Δd_{60-90} , Δd_{90-120} , $\Delta d_{120-180}$ และ $\Delta d_{150-180}$ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ซึ่งกันและกันในกลุ่ม 5 ตัวนี้สูงมาก ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.8-0.9 และมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์อื่นๆไม่สูงมากนัก โดยมีความสัมพันธ์ลดต่ำลงเรื่อยๆจากพารามิเตอร์ในกลุ่มระยะต้นๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ในกลุ่มระยะการแอ่นตัว 60-180 ซม มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันสูง จึงสามารถจัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันได้ แต่อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์กลุ่มนี้ก็มีปัญหาพารามิเตอร์ที่เชื่อมต่อกันระหว่างกลุ่มมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันสูงเช่นกัน ซึ่งก็คือ Δd_{60-120} และ Δd_{60-90} มีความสัมพันธ์กับ Δd_{45-60} ในกลุ่มก่อนหน้าสูง โดยเฉพาะ Δd_{60-90} มีความสัมพันธ์สูงเกินกว่าในกลุ่มเดียวกัน

เสียอีก ดังนั้นในการเลือกพารามิเตอร์เป็นตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์สมการความถดถอยจึงต้องไม่เลือกพารามิเตอร์เหล่านี้ใช้วิเคราะห์ร่วมกัน เนื่องจากตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันสูง จึงทำให้สมการความถดถอยที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น



รูปที่ 5.2 แผนผังแสดงการเลือกตัวแปรในการวิเคราะห์สมการความถดถอย

ตารางที่ 5.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ผลต่างการแอนด์ตัวในแต่ละช่วง

		Δd_{0-30}	Δd_{0-10}	Δd_{10-20}	Δd_{20-30}	Δd_{30-60}	Δd_{30-45}	Δd_{45-60}	Δd_{60-120}	Δd_{60-90}	Δd_{90-120}	$\Delta d_{120-180}$	$\Delta d_{150-180}$
Δd_{0-30}	Pearson Correlation	1	.992	.990	.962	.683	.744	.533	.288	.353	.190	.067	.035
	Sig. (2-tailed)		.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.023	.428	.676
Δd_{0-10}	Pearson Correlation	.992	1	.985	.939	.615	.681	.463	.238	.299	.147	.035	.007
	Sig. (2-tailed)	.000		.000	.000	.000	.000	.000	.004	.000	.080	.678	.933
Δd_{10-20}	Pearson Correlation	.990	.985	1	.916	.612	.668	.476	.262	.323	.170	.050	.020
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.000	.000	.000	.000	.002	.000	.043	.549	.817
Δd_{20-30}	Pearson Correlation	.962	.939	.916	1	.816	.881	.652	.355	.427	.246	.115	.082
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000		.000	.000	.000	.000	.000	.003	.170	.328
Δd_{30-60}	Pearson Correlation	.683	.615	.612	.816	1	.984	.956	.717	.783	.607	.455	.411
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000		.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
Δd_{30-45}	Pearson Correlation	.744	.681	.668	.881	.984	1	.888	.593	.666	.477	.328	.287
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000	.000		.000	.000	.000	.000	.000	.001
Δd_{45-60}	Pearson Correlation	.533	.463	.476	.652	.956	.888	1	.871	.921	.777	.631	.585
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000	.000	.000		.000	.000	.000	.000	.000
Δd_{60-120}	Pearson Correlation	.288	.238	.262	.355	.717	.593	.871	1	.992	.984	.916	.887
	Sig. (2-tailed)	.000	.004	.002	.000	.000	.000	.000		.000	.000	.000	.000
Δd_{60-90}	Pearson Correlation	.353	.299	.323	.427	.783	.666	.921	.992	1	.953	.857	.822
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000		.000	.000	.000
Δd_{90-120}	Pearson Correlation	.190	.147	.170	.246	.607	.477	.777	.984	.953	1	.971	.953
	Sig. (2-tailed)	.023	.080	.043	.003	.000	.000	.000	.000	.000		.000	.000
$\Delta d_{120-180}$	Pearson Correlation	.067	.035	.050	.115	.455	.328	.631	.916	.857	.971	1	.998
	Sig. (2-tailed)	.428	.678	.549	.170	.000	.000	.000	.000	.000	.000		.000
$\Delta d_{150-180}$	Pearson Correlation	.035	.007	.020	.082	.411	.287	.585	.887	.822	.953	.998	1
	Sig. (2-tailed)	.676	.933	.817	.328	.000	.001	.000	.000	.000	.000	.000	

5.3 การวิเคราะห์สมการความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis)

ก่อนหน้านี้นี้เราได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวแต่ละตัวที่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้นั้นจะถูกนำมาใช้ในการแบ่งกลุ่มตัวแปร ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม แล้วจึงคัดเลือกตัวแปรจากกลุ่มเหล่านั้นไปใช้ในการวิเคราะห์สมการความถดถอย โดยคัดเลือกพารามิเตอร์เพียง 1 ตัวในแต่ละกลุ่มไปใช้ในการวิเคราะห์สมการความถดถอย เพื่อให้สมการความถดถอยที่ได้ไม่มีปัญหาตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน (Multicollinearity) โดยสมการความถดถอยนี้ใช้ในการประมาณค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้น แต่การวิเคราะห์สมการความถดถอยเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวกับค่าอิลาสติคโมดูลัสมีลักษณะเป็นเส้นโค้งแบบควอดราติก จึงต้องมีการเปลี่ยนรูปตัวแปรเพื่อให้สมการอยู่ในรูปเส้นตรง โดยในการศึกษานี้ใช้การเปลี่ยนรูปตัวแปรให้อยู่ในรูปลอการิทึมฐานสิบ โดยมีรายละเอียดแยกตามชั้นทางแต่ละชั้นดังต่อไปนี้

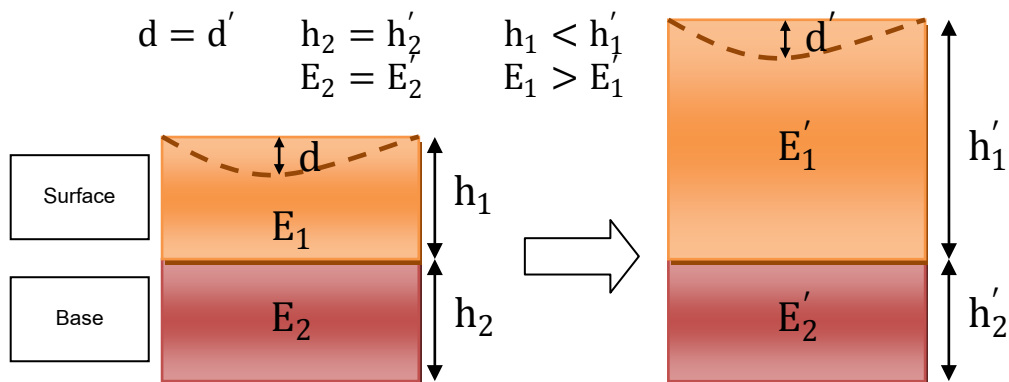
5.3.1 ชั้นผิวทาง

จากการเลือกพารามิเตอร์แต่ละตัวจากกลุ่มตัวแปร 3 กลุ่มมาวิเคราะห์สมการความถดถอยหาความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทาง พบว่าพารามิเตอร์ Δd_{10-20} , Δd_{30-45} และ $\Delta d_{150-180}$ ให้ผลการวิเคราะห์สมการความถดถอยที่ดีที่สุด คือ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่ปรับแก้แล้วสูงสุด ดังจะเห็นได้จากตารางที่ ข 1 ในภาคผนวก ข และผ่านเงื่อนไขเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อน โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 รายละเอียดทางสถิติการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นผิวทาง

Model Summary					
R	R ²	Adjusted R ²	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson	
0.620	0.385	0.367	0.11894	2.050	
Coefficients					
Model 1		Unstandardized	Standardized	t	Sig.
Variable		Coefficients	Coefficients		
Dependent	Independent	B	Beta		
log($E_{Surface}$)	(Constant)	4.674		23.596	0.000
	log(Δd_{10-20})	-1.165	-1.144	-9.097	0.000
	log(Δd_{30-45})	0.901	0.703	6.439	0.000
	log($\Delta d_{150-180}$)	-0.202	-0.210	-2.824	0.005
	$H_{Surface}$	-0.033	-0.547	-6.046	0.000

พิจารณาในส่วนสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองจะเห็นว่า ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรแต่ละตัวจะแสดงอยู่ในคอลัมน์ B ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าสัมประสิทธิ์ส่วนใหญ่มีค่าเป็นลบ ยกเว้นสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร Δd_{30-45} ที่มีค่าเป็นบวก ซึ่งจากรูป 4.8-4.11 ในบทที่ 4 พบว่าพารามิเตอร์แปรผกผันกับค่าอีลาสติคโมดูลัส ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรจึงควรมีค่าเป็นลบ แต่ผลการวิเคราะห์นี้สัมประสิทธิ์บางตัวมีค่าเป็นบวก ที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะว่าพารามิเตอร์หลัก Δd_{10-20} ที่มีความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทาง กลับมีความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นอื่นด้วย ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 5.4-5.5 ซึ่งจะเห็นว่าพารามิเตอร์ Δd_{10-20} มีความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นพื้นทางมาก มีความสัมพันธ์กับชั้นรองพื้นทางเล็กน้อย และแทบจะไม่มีความสัมพันธ์กับชั้นดินเดิมเลย ซึ่งส่งผลให้เมื่อค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นพื้นทางเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้พารามิเตอร์ Δd_{10-20} เปลี่ยนแปลงตาม ซึ่งมีผลกระทบต่อการทำนายค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทาง พารามิเตอร์ Δd_{30-45} จึงถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อชดเชยผลกระทบจากค่าโมดูลัสของชั้นพื้นทางที่มีต่อพารามิเตอร์ Δd_{10-20} ค่าสัมประสิทธิ์หน้าพารามิเตอร์ Δd_{30-45} จึงมีค่าเป็นบวก และสำหรับสัมประสิทธิ์หน้าพารามิเตอร์ $\Delta d_{150-180}$ มีค่าเป็นลบ เนื่องจากพารามิเตอร์นี้มีความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นดินเดิมมาก ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อพารามิเตอร์ Δd_{10-20} จึงทำให้สัมประสิทธิ์มีค่าเป็นลบ สำหรับตัวแปรความหนาพบว่าความหนาของชั้นผิวทางแปรผกผันกับค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทาง เหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้โดยรูปที่ 5.3 ประกอบ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อโครงสร้างทางมีการแอนตัวที่เท่ากัน ในสภาพที่ชั้นทางอื่นมีค่าอีลาสติคโมดูลัสที่เท่ากัน โครงสร้างที่มีความหนาของชั้นผิวทางหนากว่าจะมีค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทางที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นไปตามหลักการของ Burmister (1943)

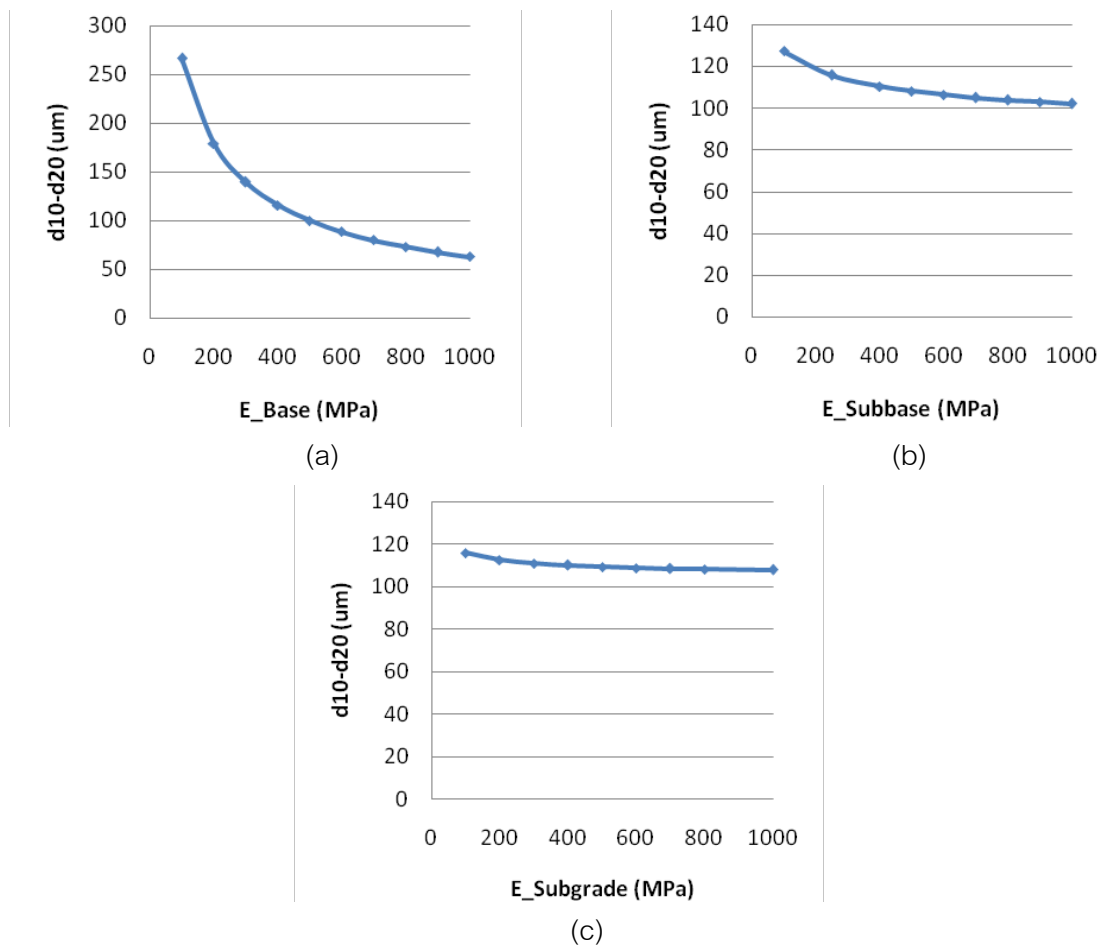


หมายเหตุ : d คือ การแอนตัว, E คือ ค่าอีลาสติคโมดูลัส, h คือ ความหนา

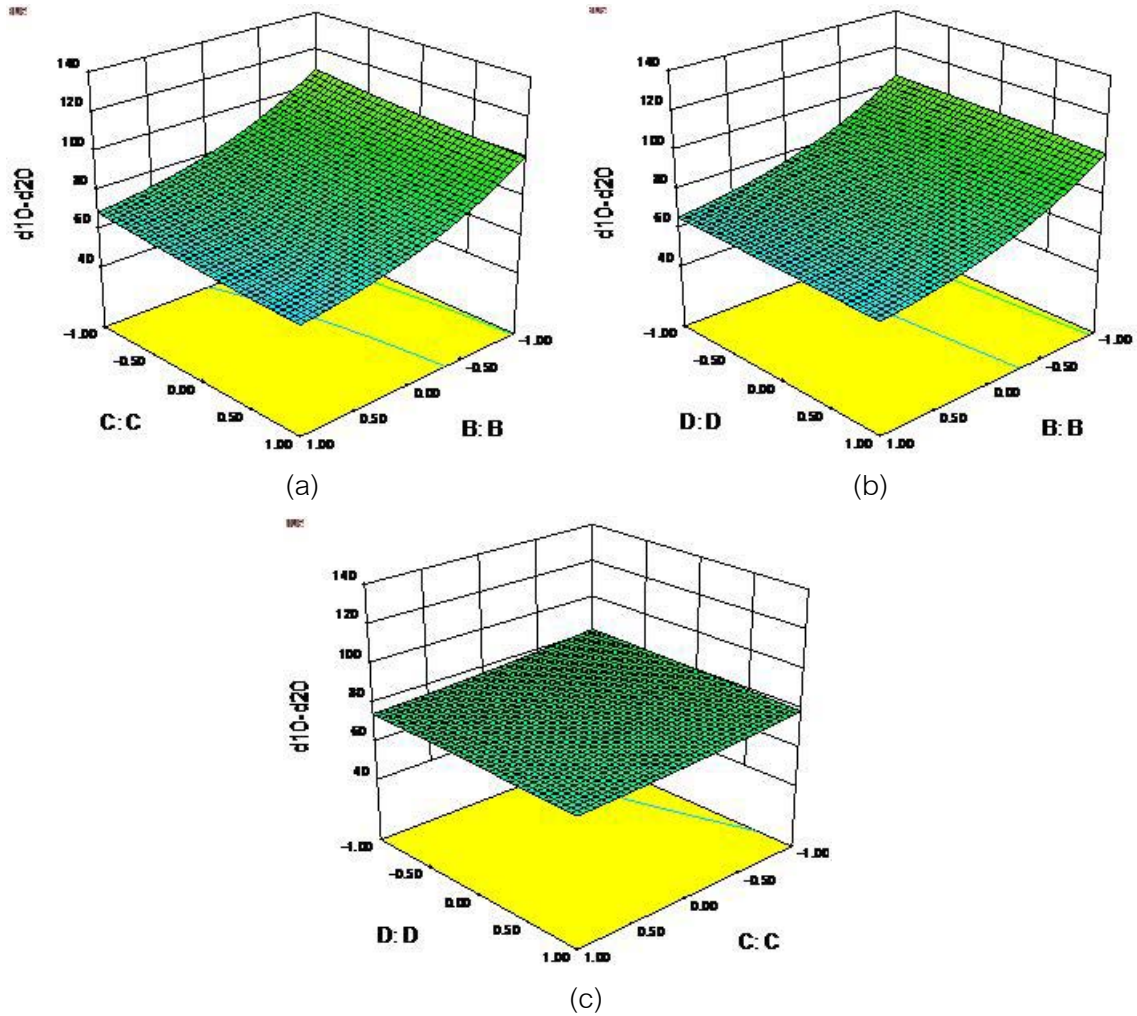
รูปที่ 5.3 รูปอธิบายค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทางเมื่อโครงสร้างทางมีการแอนตัวเท่ากันในสภาพที่ความหนาชั้นผิวทางเปลี่ยนแปลงไป

เมื่อพิจารณาในส่วนของสัมประสิทธิ์ความถดถอยมาตรฐาน (Beta) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใดพบว่า ตัวแปร Δd_{10-20} มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามมากที่สุด ในส่วนของการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระแต่ละตัวจะถูกแสดงในรูปของค่า t และ Sig. โดยในตารางที่ 5.4 จะเห็นว่าค่า $|t|$ และ P-value ของตัวแปรแต่ละตัวมีค่ามากกว่า $t_{0.975; 141}(1.9771)$ และน้อยกว่า 0.05 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ Δd_{10-20} , Δd_{30-45} , $\Delta d_{150-180}$ และ $H_{Surface}$ มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม $E_{Surface}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สำหรับบทสรุปของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ต่ำ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้วคือ 0.367 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ Δd_{10-20} , Δd_{30-45} , $\Delta d_{150-180}$ และ $H_{Surface}$ อธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางได้ 36.7% มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ $\log(E_{Surface})$ คือ 0.11894 และมีค่าสถิติ Durbin-Watson คือ 2.050 ซึ่งมีค่าใกล้ 2 จึงแสดงให้เห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ Δd_{10-20} กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (a) รองพื้นทาง (b) และดินเดิม (c)



รูปที่ 5.5 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ Δd_{10-20} กับค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม

$$\log(E_{\text{Surface}}) = 4.674 - 1.165 \log(\Delta d_{10-20}) + 0.901 \log(\Delta d_{30-45}) - 0.202 \log(\Delta d_{150-180}) - 0.033 H_{\text{Surface}} \quad (5.1)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.367$$

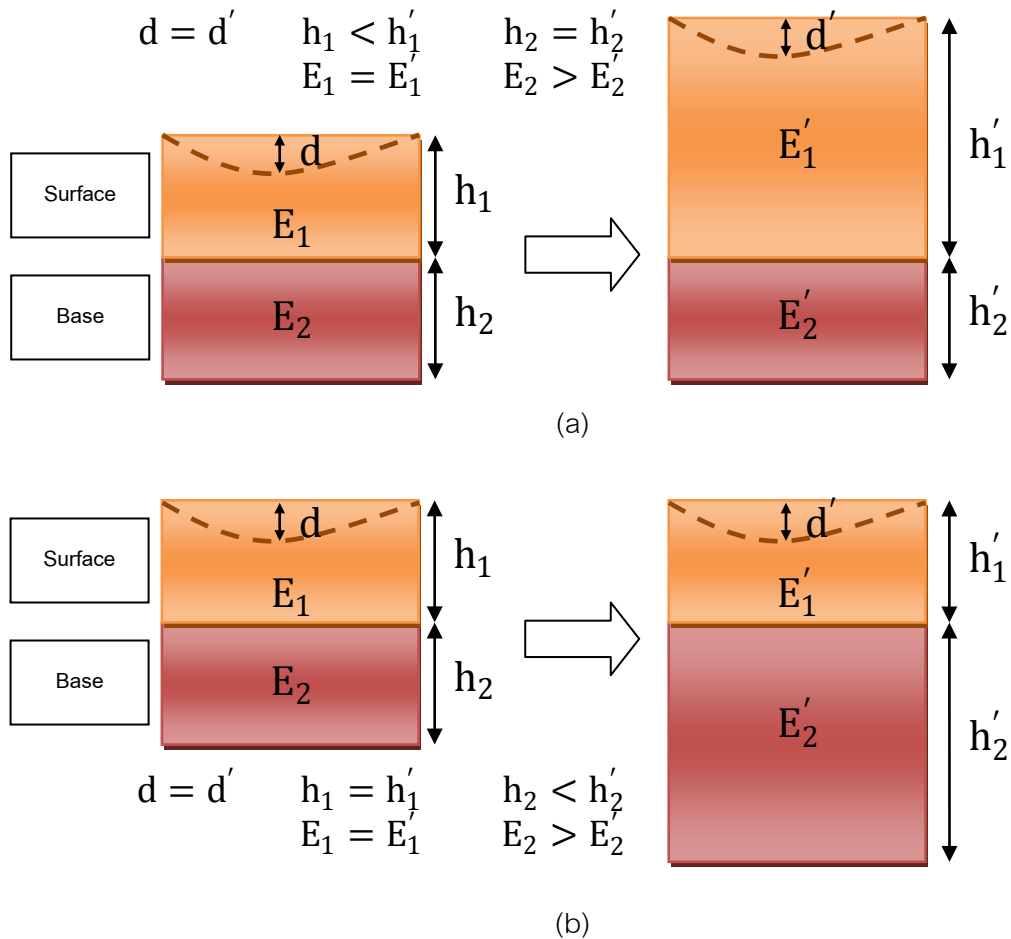
โดยที่	E_{Surface}	คือ ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง(MPa)
	Δd_{i-j}	คือ พารามิเตอร์ผลต่างการแน่นตัว (μm)
	i	คือ ระยะเริ่มต้นของตัวรับสัญญาณการแน่นตัวที่สนใจ (cm)
	j	คือ ระยะสิ้นสุดของตัวรับสัญญาณการแน่นตัวที่สนใจ (cm)
	H_{Surface}	คือ ความหนาของชั้นผิวทาง (cm)

5.3.2 ชั้นพื้นทาง

ชั้นพื้นทางเป็นชั้นที่อยู่ถัดลงมาจากรั้วผิวทาง ไม่สัมผัสกับการจราจรโดยตรง และมีความแข็งแรงน้อยกว่าชั้นผิวทาง และจากการเลือกพารามิเตอร์แต่ละตัวจากกลุ่มตัวแปร 3 กลุ่มมาวิเคราะห์สมการความถดถอยหาความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นพื้นทาง พบว่าพารามิเตอร์ Δd_{20-30} เพียงตัวเดียวก็ให้ผลการวิเคราะห์สมการความถดถอยที่ดีคือ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง ดังจะเห็นได้จากตารางที่ ข 2 ในภาคผนวก ข และผ่านเงื่อนไขเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์สมการความถดถอย โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.5 ตารางที่ 5.5 รายละเอียดทางสถิติการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นพื้นทาง

Model Summary					
R	R ²	Adjusted R ²	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson	
0.904	0.817	0.813	0.08772	2.062	
Coefficients					
Model 2		Unstandardized	Standardized	t	Sig.
Variable		Coefficients	Coefficients		
Dependent	Independent	B	Beta		
log(E _{Base})	(Constant)	5.629		44.415	0.000
	log(Δd_{20-30})	-1.450	-0.987	-24.879	0.000
	H _{Surface}	-0.032	-0.389	-9.841	0.000
	H _{Base}	-0.007	-0.083	-2.263	0.025

พิจารณาในส่วนสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองจะเห็นว่า สัมประสิทธิ์ทั้งหมดมีค่าเป็นลบ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีอิลาสติคซิตี้และสอดคล้องกับรูป 4.8-4.11 ในบทที่ 4 ซึ่งสรุปได้ว่าค่าการแอ่นตัวแปรผกผันกับค่าอิลาสติคโมดูลัส และในส่วนของสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรความหนาพบว่ามีค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นผิวทางและพื้นทางแปรผกผันกับค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นพื้นทาง เหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้โดยดูรูปที่ 5.6 ประกอบ โดยในรูป 5.6a จะเห็นว่าเมื่อโครงสร้างทางมีการแอ่นตัวที่เท่ากัน ในสภาพที่ชั้นทางอื่น ๆ มีค่าอิลาสติคโมดูลัสที่เท่ากัน โครงสร้างที่มีความหนาของชั้นผิวทางหนากว่าจะมีค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นพื้นทางที่ต่ำกว่า ในอีกด้านหนึ่งถ้าความหนาของชั้นพื้นทางเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความหนาของชั้นผิวทางเท่ากัน โครงสร้างทางที่มีความหนาของชั้นพื้นทางหนากว่าจะมีค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นพื้นทางที่ต่ำกว่า เช่นกันดังรูปที่ 5.6b



รูปที่ 5.6 รูปอธิบายค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางเมื่อโครงสร้างทางมีการแอนด์ตัวเท่ากันในสภาพที่ความหนาชั้นผิวทาง (a) และชั้นพื้นทาง (b) เปลี่ยนแปลงไป

เมื่อพิจารณาในส่วนของสัมประสิทธิ์ความถดถอยมาตรฐานพบว่า ตัวแปร Δd_{20-30} มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามมากที่สุด ในส่วนของการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระแต่ละตัวจะเห็นว่าค่า $|t|$ และ P-value ของตัวแปรที่มีค่ามากกว่า $t_{0.975; 141}$ (1.9771) และน้อยกว่า 0.05 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ Δd_{20-30} และ H_{Surface} มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม E_{Base} อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สำหรับบทสรุปของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง โดยมีความสัมพันธ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้วคือ 0.813 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ Δd_{20-30} และ H_{Surface} อธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางได้ 81.3% มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ $\log(E_{\text{Base}})$ คือ 0.08772 และมีค่าสถิติ Durbin-Watson คือ 2.062 ซึ่งมีค่าใกล้ 2 จึงแสดงให้เห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

$$\log(E_{\text{Base}}) = 5.629 - 1.450 \log(\Delta d_{20-30}) - 0.032H_{\text{Surface}} - 0.007H_{\text{Base}} \quad (5.2)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.813$$

โดยที่ E_{Base} คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (MPa)

5.3.3 ชั้นรองพื้นทาง

ชั้นรองพื้นทางเป็นชั้นที่อยู่ถัดลงมาจากชั้นพื้นทาง มีความแข็งแรงน้อยกว่าชั้นผิวทางและพื้นทาง และจากการเลือกพารามิเตอร์แต่ละตัวจากกลุ่มตัวแปร 3 กลุ่มมาวิเคราะห์สมการความถดถอยหาความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นรองพื้นทางพบว่า พารามิเตอร์ Δd_{20-30} , Δd_{45-60} และ $\Delta d_{150-180}$ ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุด คือ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 3 ในภาคผนวก ข และสมการนี้ผ่านเงื่อนไขเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์สมการความถดถอย โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 รายละเอียดทางสถิติการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นรองพื้นทาง

Model Summary					
R	R ²	Adjusted R ²	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson	
0.900	0.810	0.803	0.08996	1.886	
Coefficients					
Model 3		Unstandardized	Standardized	t	Sig.
Variable		Coefficients	Coefficients		
Dependent	Independent	B	Beta		
log(E_{Subbase})	(Constant)	5.355		34.533	0.000
	log(Δd_{20-30})	1.172	0.798	12.982	0.000
	log(Δd_{45-60})	-3.427	-1.862	-22.735	0.000
	log($\Delta d_{150-180}$)	1.371	1.054	18.269	0.000
	H_{Base}	-0.028	-0.349	-8.730	0.000
	H_{Subbase}	-0.027	-0.343	-8.592	0.000

พิจารณาในส่วนสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองจะเห็นว่า สัมประสิทธิ์มีค่าทั้งเป็นลบและเป็นบวก โดยที่พารามิเตอร์ Δd_{45-60} มีค่าเป็นลบ ส่วนพารามิเตอร์ Δd_{20-30} และ $\Delta d_{150-180}$ มีค่าเป็นบวก ซึ่งขัดแย้งกับผลที่ได้จากรูป 4.8-4.11 ในบทที่ 4 ที่แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์แปรผกผันกับค่าอิลาสติกโมดูลัส เหตุที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะว่าพารามิเตอร์หลัก Δd_{45-60} ที่มีความสัมพันธ์

กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นรองพื้นทางมีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นอื่นด้วย ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 5.7-5.8 ซึ่งจะเห็นว่าพารามิเตอร์ Δd_{45-60} มีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางและดินเดิมมาก ซึ่งส่งผลให้พารามิเตอร์ Δd_{45-60} ต้องชดเชยผลกระทบจากพารามิเตอร์ Δd_{20-30} และ $\Delta d_{150-180}$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางและดินเดิมตามลำดับ จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์หน้าพารามิเตอร์ Δd_{20-30} และ $\Delta d_{150-180}$ มีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายความว่าพารามิเตอร์แปรผันตรงกับค่าอิลาสติกโมดูลัส เมื่อพารามิเตอร์ Δd_{20-30} และ $\Delta d_{150-180}$ มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าอิลาสติกโมดูลัสก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งดูขัดแย้งกับทฤษฎีอิลาสติกซิตี แต่ในความเป็นจริงพารามิเตอร์ Δd_{20-30} และ $\Delta d_{150-180}$ แปรผันตรงกับพารามิเตอร์ Δd_{45-60} เช่นกัน จึงทำให้เมื่อพารามิเตอร์ Δd_{20-30} และ $\Delta d_{150-180}$ มีค่าสูงขึ้น พารามิเตอร์ Δd_{45-60} ก็มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งเป็นพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อค่าอิลาสติกโมดูลัส จึงทำให้ผลโดยรวมของพารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวยังคงแปรผกผันกับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นรองพื้นทางซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี สำหรับสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรความหนาพบว่ามีค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นพื้นทางและรองพื้นทางแปรผกผันกับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นรองพื้นทาง เหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับเหตุผลของชั้นพื้นทาง

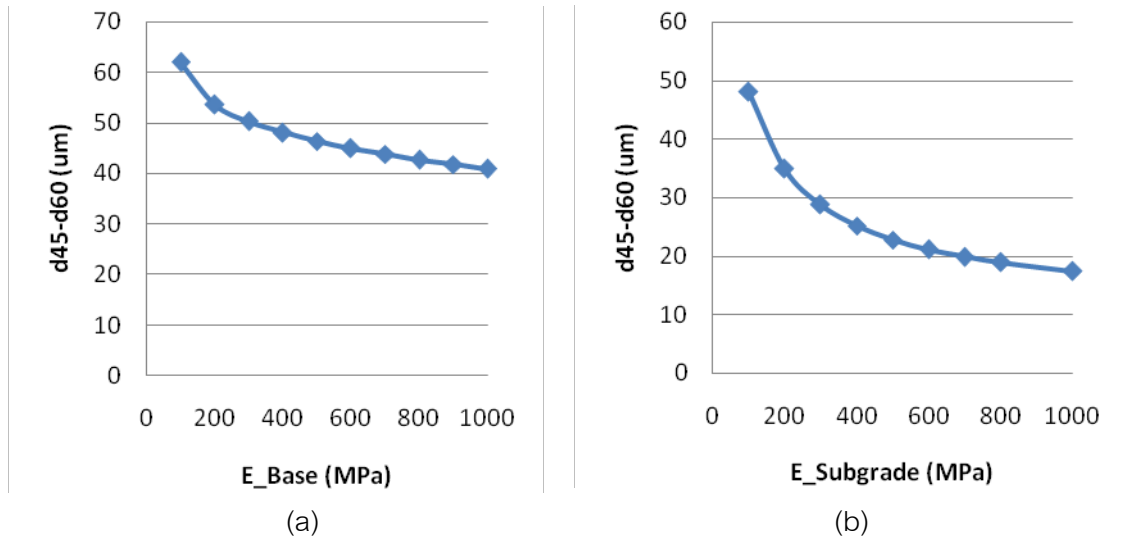
เมื่อพิจารณาในส่วนของสัมประสิทธิ์ความถดถอยมาตรฐานพบว่า ตัวแปร Δd_{45-60} มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามมากที่สุด ในส่วนของการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระแต่ละตัวจะเห็นว่าค่า $|t|$ และ P-value ของตัวแปรมีค่ามากกว่า $t_{0.975; 141}(1.9771)$ และน้อยกว่า 0.05 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ Δd_{20-30} , Δd_{45-60} , $\Delta d_{150-180}$, H_{Base} และ $H_{Subbase}$ มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม $E_{Subbase}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สำหรับบทสรุปของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง โดยมีความสัมพันธ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้วคือ 0.803 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ Δd_{20-30} , Δd_{45-60} , $\Delta d_{150-180}$, H_{Base} และ $H_{Subbase}$ อธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นรองพื้นทางได้ 80.3% มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ $\log(E_{Subbase})$ คือ 0.08996 และมีค่าสถิติ Durbin-Watson คือ 1.886 ซึ่งมีค่าใกล้ 2 จึงแสดงให้เห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

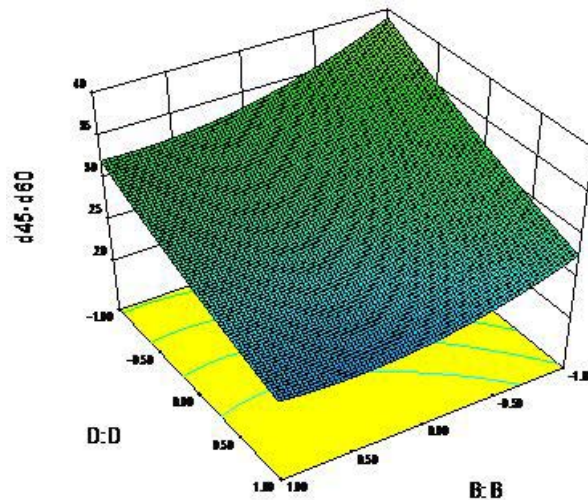
$$\log(E_{Subbase}) = 5.355 + 1.172 \log(\Delta d_{20-30}) - 3.427 \log(\Delta d_{45-60}) + 1.371 \log(\Delta d_{150-180}) - 0.028H_{Base} - 0.027H_{Subbase} \quad (5.3)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.803$$

โดยที่ E_{Subbase} คือ ค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นรองพื้นทาง (MPa)
 H_{Base} คือ ความหนาของชั้นพื้นทาง (cm)
 H_{Subbase} คือ ความหนาของชั้นรองพื้นทาง (cm)



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ Δd_{45-60} กับค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นพื้นทาง(a) และดินเดิม(b)



รูปที่ 5.8 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ Δd_{45-60} กับค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นพื้นทางและดินเดิม

5.3.4 ชั้นดินเดิม

ชั้นดินเดิมเป็นชั้นที่อยู่ล่างสุดของโครงสร้างชั้นทาง เป็นชั้นดินตามธรรมชาติของสถานที่นั้นๆ มีความแข็งแรงน้อยน้อยที่สุด และจากการเลือกพารามิเตอร์แต่ละตัวจากกลุ่มตัวแปร 3 กลุ่ม มาวิเคราะห์สมการความถดถอยหาความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นดินเดิม พบว่า

พารามิเตอร์ $\Delta d_{150-180}$ เพียงตัวเดียวก็ให้ผลการวิเคราะห์สมการความถดถอยที่ดี คือให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง และผ่านเงื่อนไขเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์สมการความถดถอย โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 รายละเอียดทางสถิติการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นดินเดิม

Model Summary					
R	R ²	Adjusted R ²	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson	
0.996	0.993	0.993	0.01288	1.930	
Coefficients					
Model 4		Unstandardized	Standardized	t	Sig.
Variable		Coefficients	Coefficients		
Dependent	Independent	B	Beta		
log(E _{Subgrade})	(Constant)	3.176		422.762	0.000
	log($\Delta d_{150-180}$)	-0.956	-0.996	-137.795	0.000

พิจารณาในส่วนสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองจะเห็นว่าสัมประสิทธิ์มีค่าเป็นลบ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีอิลาสติกซิตี และเมื่อพิจารณาในส่วนของสัมประสิทธิ์ความถดถอยมาตรฐานพบว่า ตัวแปร $\Delta d_{150-180}$ มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงมาก ในส่วนของการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระจะเห็นว่าค่า $|t|$ และ P-value ของตัวแปรแต่ละตัวมีค่ามากกว่า $t_{0.975; 141}$ (1.9771) และน้อยกว่า 0.05 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ $\Delta d_{150-180}$ มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม E_{Subgrade} อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สำหรับบทสรุปของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูงมาก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้วคือ 0.993 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ $\Delta d_{150-180}$ อธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิมได้ 99.3% มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ $\log(E_{\text{Subgrade}})$ คือ 0.01288 และมีค่าสถิติ Durbin-Watson คือ 1.930 ซึ่งมีค่าใกล้ 2 จึงแสดงให้เห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

$$\log(E_{\text{Subgrade}}) = 3.176 - 0.956 \log(\Delta d_{150-180}) \quad (5.4)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.993$$

โดยที่ E_{Subgrade} คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิม (MPa)

5.3.5 โมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทาง

โมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้นที่อยู่เหนือชั้นดินเดิมสามารถคำนวณออกมาได้ในรูปของโมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางโดยรวม โดยค่าโมดูลัสเทียบเท่านี้สามารถคำนวณได้ตามสมการที่แนะนำโดยคู่มือการออกแบบโครงสร้างชั้นทางโดย AASHTO ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งคำนวณโดยใช้ข้อมูลการแอ่นตัว น้ำหนักที่กระทำ และรัศมีแผ่นรับน้ำหนักจากการทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ ซึ่งค่าโมดูลัสเทียบเท่านี้มีความสัมพันธ์กับค่า Structural Number (AASHTO,1993) ซึ่งก็คือผลรวมของสัมประสิทธิ์คูณกับความหนาของชั้นทางแต่ละชั้น โดยค่าสัมประสิทธิ์แปรผันตรงกับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้น ในส่วนนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์สมการความถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยความสัมพันธ์ในลักษณะผลคูณของค่าโมดูลัสกับความหนาในแต่ละชั้น ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง และผ่านเงื่อนไขเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์สมการความถดถอย โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.8

$$d_0 = 1.5pa \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D^3 E_p}{a \sqrt{M_R}} \right)^2}} + \frac{\left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\} \quad (5.5)$$

โดยที่	d_0	คือ	การแอ่นตัวที่จุดศูนย์กลาง (inch)
	p	คือ	แรงดันที่กระทำ (psi)
	a	คือ	รัศมีของแผ่นรับน้ำหนัก (inch)
	D	คือ	ความหนาโครงสร้างชั้นทาง (inch)
	M_R	คือ	โมดูลัสคืนตัวของชั้นดินเดิม (psi)
	E_p	คือ	โมดูลัสเทียบเท่า (psi)

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (5.6)$$

โดยที่	SN	คือ	Structural Number
	D_i	คือ	ความหนาของชั้นทางแต่ละชั้น (inch)
	a_i	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของชั้นผิวทาง(1) พื้นทาง(2) และรองพื้นทาง(3)
	m_i	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำของชั้นพื้นทาง(2) และรองพื้นทาง(3)

ตารางที่ 5.8 รายละเอียดทางสถิติการวิเคราะห์สมการความถดถอยของโมดูลัสเทียบเท่า

Model Summary					
R	R ²	Adjusted R ²	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson	
0.959	0.920	0.918	2,756.70389	1.957	
Coefficients					
Model 5		Unstandardized	Standardized	t	Sig.
Variable		Coefficients	Coefficients		
Dependent	Independent	B	Beta		
E _p H _T	(Constant)	-4467.933		-4.903	0.000
	E ₁ H ₁	0.490	0.543	22.549	0.000
	E ₂ H ₂	1.229	0.698	29.016	0.000
	E ₃ H ₃	0.653	0.371	15.409	0.000

เมื่อพิจารณาในส่วนสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองจะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรทุกตัวมีค่าเป็นบวก ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของค่าโมดูลัสเทียบเท่าที่ค่าโมดูลัสและความหนาของชั้นทางแต่ละชั้นจะมีผลกับค่าโมดูลัสเทียบเท่าไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งความสัมพันธ์ลักษณะนี้ใกล้เคียงกับค่า Structural Number ที่ผลคูณของความหนาและสัมประสิทธิ์ที่มีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสสะท้อนให้เห็นถึงสภาพความแข็งแรงของชั้นทางแต่ละชั้น และเมื่อพิจารณาในส่วนของสัมประสิทธิ์ความถดถอยมาตรฐานพบว่า ตัวแปร E₂H₂ มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงสุด ในส่วนของการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระจะเห็นว่า |t| และ P-value ของตัวแปรแต่ละตัวมีค่ามากกว่า t_{0.975; 141} (1.9771) และน้อยกว่า 0.05 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ E₁H₁, E₂H₂ และ E₃H₃ มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม E_pH_T อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สำหรับบทสรุปของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูงมาก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้วคือ 0.918 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ E₁H₁, E₂H₂ และ E₃H₃ อธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม E_pH_T ได้ 99.3% มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ E_pH_T คือ 2,757 และมีค่าสถิติ Durbin-Watson คือ 1.957 ซึ่งมีค่าใกล้ 2 จึงแสดงให้เห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

$$E_p H_T = -4467.933 + 0.490E_1 H_1 + 1.229E_2 H_2 + 0.653E_3 H_3 \quad (5.7)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.918$$

โดยที่	E_p	คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทาง(MPa)
	H_T	คือ ความหนาของโครงสร้างชั้นทางทุกชั้น (cm)
	E_i, H_i	คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสและความหนาของชั้นทางแต่ละชั้น
	i	คือ ชั้นทางแต่ละชั้น โดย 1=ผิวทาง, 2=พื้นทาง, 3=รองพื้นทาง

จากการวิเคราะห์สมการความถดถอยข้างต้นพบว่า แบบจำลองที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ 1 อธิบายความเปลี่ยนแปลงค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางได้ไม่ดี ในขณะที่แบบจำลองอื่นๆมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง จึงสามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นอื่นๆได้ดี ดังนั้นเพื่อให้สามารถประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางได้ถูกต้องมากขึ้น จึงได้สร้างแบบจำลองที่ 5 ขึ้น ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทางกับค่าอิลาสติกโมดูลัสและความหนาของชั้นทางแต่ละชั้น โดยค่าโมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทางสามารถคำนวณได้จากสมการที่แนะนำโดย AASHTO และสามารถประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง รองพื้นทาง และชั้นดินเดิมได้จากแบบจำลองที่ 2 ถึง 4 และจากค่าต่างๆเหล่านี้ทำให้สามารถประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางได้โดยใช้แบบจำลองที่ 5 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง และเพื่อเป็นการยืนยันผลของสมการ จึงต้องทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากสมการความถดถอยกับข้อมูลการทดสอบอื่นๆในภาคสนาม ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 6

การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับข้อมูลในภาคสนาม

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึง การนำสมการความถดถอยประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการศึกษาในบทก่อนหน้ามาทดสอบใช้ประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทางจริง โดยใช้ข้อมูลหลุมการแอ่นตัวจริงที่ทดสอบจากสายทางจริงในภาคสนาม และในขณะเดียวกันก็ได้มีการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางด้วย การทดสอบ วิธีอื่น เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบเหล่านั้นมาเปรียบเทียบกับค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ประมาณได้จากสมการที่ผู้วิจัยพัฒนา ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ข้อมูล Time-History จากการทดสอบการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบ การทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) และใช้สมการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิมที่แนะนำโดย AASHTO มาใช้ในการร่วมพิจารณา โดยใช้การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 สายทางที่คัดเลือกเพื่อใช้ทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง

ขอบเขตของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางแบบยืดหยุ่นที่มีจำนวนชั้นทาง 4 ชั้น ได้แก่ ชั้นผิวทาง พื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม ซึ่งถนนในประเทศไทยส่วนใหญ่มีรูปแบบโครงสร้างชั้นทางเป็นอย่างที่ได้กล่าว และมีการพิจารณาประเด็นของอายุสายทาง โดยแบ่งเป็นสายทางใหม่ที่เพิ่งเปิดใช้งานไม่เกิน 6 เดือน และสายทางเก่าที่เปิดใช้งานนานกว่านั้น นอกจากนี้ประเภทของงานก่อสร้างหรือการซ่อมบูรณะก็เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ถูกนำมาร่วมพิจารณาในการคัดเลือกสายทาง เนื่องด้วยกระบวนการและวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างหรือการซ่อมบูรณะที่แตกต่างกันมีผลต่อความแข็งแรงหรือค่าอิลาสติกโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยถนน 4 ประเภทคือ ถนนประเภทที่มีการก่อสร้างใหม่ตั้งแต่ชั้นดินเดิมขึ้นมา (New Construction) ถนนประเภทที่มีการบูรณะก่อสร้างใหม่ตั้งแต่ชั้นพื้นทางหรือรองพื้นทาง (Reconstruction) ถนนประเภทที่มีการหมุนเวียนวัสดุเดิมมาใช้ใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพวัสดุเดิมด้วยซีเมนต์ (Cement Mixed Cold-In Place Recycling) และถนนประเภทที่มีการปูเสริมผิวทางด้วยวัสดุแอสฟัลท์ติกคอนกรีต (AC Overlay) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกสายทางจำนวน 12 สายทาง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่มคือ กลุ่มสายทางใหม่ และกลุ่มสายทางเก่า โดยแต่ละสายทางจะมีการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางด้วยเครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ (FWD) และมีการเจาะหลุมทดสอบชั้นพื้นทางและรองพื้นทางด้วย

วิธี Dynamic Cone Penetrometer (DCP) ซึ่งมีจำนวนจุดทดสอบทั้งสิ้นจำนวน 76 จุดทดสอบ รายละเอียดดังตารางที่ 6.1 และ 6.2

ตารางที่ 6.1 รายละเอียดโครงสร้างชั้นทางกลุ่มสายทางใหม่ที่เปิดใช้งานไม่เกิน 6 เดือน (New)

รหัสสายทาง	ประเภทงานก่อสร้าง	ความหนาชั้นทางเฉลี่ย(ซม.)			จำนวนจุดทดสอบ
		ผิวทาง	พื้นทาง	รองพื้นทาง	
N1	Reconstruction	5.0	20.0	20.0	4
N2	New Construction	5.0	17.5	17.5	20
N3	Cold-In Place Recycling	6.0	20.0	20.0	7
N4	Cold-In Place Recycling	12.5	17.5	17.5	4
N5	AC Overlay	12.0	17.5	17.5	5
จำนวนจุดทดสอบทั้งหมด					40

ตารางที่ 6.2 รายละเอียดโครงสร้างชั้นทางกลุ่มสายทางเก่าที่เปิดใช้งานเกิน 6 เดือน (Old)

รหัสสายทาง	ประเภทงานก่อสร้าง	ความหนาชั้นทางเฉลี่ย(ซม.)			จำนวนจุดทดสอบ
		ผิวทาง	พื้นทาง	รองพื้นทาง	
O1	New Construction	5.0	20.0	20.0	6
O2	New Construction	5.5	20.0	15.0	5
O3	New Construction	6.0	20.0	20.0	5
O4	New Construction	8.0	16.0	17.5	6
O5	New Construction	8.0	17.5	17.5	6
O6	New Construction	7.0	15.0	17.5	6
O7	New Construction	9.0	17.5	22.5	2
จำนวนจุดทดสอบทั้งหมด					36

6.2 การประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทางในภาคสนาม

ในส่วนนี้จะทำการนำข้อมูลหลุมการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบกับถนนจริงในประเทศไทย ซึ่งจะนำข้อมูลหลุมการแอ่นตัวเหล่านี้มาประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของแต่ละชั้นทางด้วยสมการความถดถอยดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 5 ซึ่งได้เลือกสมการ (5.2) ถึง (5.4) มาใช้ในการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง รองพื้นทาง และชั้นดินเดิมตามลำดับ และใช้สมการที่ (5.7) ในการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง

โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเทียบเท่ากับค่าอิลาสติกโมดูลัสและความหนาของชั้นทางแต่ละชั้นในการประมาณค่า ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสในแต่ละชั้นทางของสายทางแต่ละเส้น ได้ถูกนำเสนอในรูปแบบของแผนภาพกล่อง (Box plot) เพื่อดูการกระจายตัวของข้อมูล และนำเสนอในรูปแบบของแผนภูมิแท่งของค่าเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าอิลาสติกโมดูลัสในแต่ละสายทาง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.2.1 ชั้นพื้นทาง

จากการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางด้วยสมการถดถอยแล้วนำเสนอด้วยแผนภาพกล่องพบว่า ค่าอิลาสติกโมดูลัสส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในช่วง 250-800 MPa แต่มีสายทางบางสายทางที่มีการกระจายตัวในช่วงที่สูงกว่านี้มาก และเมื่อพิจารณาแผนภูมิแท่งร่วมด้วยจะเห็นว่า ค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงนี้ ยกเว้นบางสายทางที่มีค่าเฉลี่ยสูงมากอย่างชัดเจน ซึ่งสายทางเหล่านั้นคือ N3 และ N4 ซึ่งเป็นสายทางแบบหมุนเวียนวัสดุเดิมมาใช้ใหม่ที่มีการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุด้วยซีเมนต์ จึงทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น แตกต่างจากสายทางอื่นๆอย่างชัดเจน โดยมีค่าอิลาสติกโมดูลัสอยู่ในช่วง 1,000-3,000 MPa

6.2.2 ชั้นรองพื้นทาง

สำหรับชั้นรองพื้นทางเมื่อพิจารณาแผนภาพกล่องพบว่า มีการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลัสอยู่ในช่วง 100-600 MPa ซึ่งเป็นค่าที่เป็นไปได้ สอดคล้องกับความแข็งแรงของวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้คือ ลูกกรัง แต่มีบางสายทางที่มีค่าอิลาสติกโมดูลัสต่ำผิดปกติคือ สายทาง O4 และ O7 มีค่าเฉลี่ยที่ต่ำผิดปกติ โดยที่ถนนทั้ง 2 สายทางนี้เป็นถนนก่อสร้างใหม่ที่ไม่เคยได้รับการซ่อมบำรุงมาก่อน และมีการเปิดใช้งานมาแล้วหลายปี จึงเป็นเหตุผลสนับสนุนความเป็นไปได้ที่ถนนทั้ง 2 สายทางมีค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ต่ำ แสดงให้เห็นถึงความเสียหายและความเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้น

6.2.3 ชั้นดินเดิม

ชั้นนี้เป็นชั้นที่อยู่ล่างสุด และเป็นชั้นที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุดของโครงสร้างชั้นทาง โดยเมื่อพิจารณาแผนภูมิแท่งจะเห็นว่า ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิมมีค่าไม่สูงมาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 100-200 MPa ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวัสดุ และเมื่อพิจารณาแผนภาพกล่องร่วมด้วยพบว่า ถนนแต่ละสายทางมีการกระจายตัวของข้อมูลไม่มากนัก โดยมีค่าใกล้เคียงกันในถนนแต่ละสายทาง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของดินธรรมชาติตามภูมิภาคนี้ๆที่ไม่แตกต่างกันมากนักในพื้นที่เดียวกัน

6.2.4 โมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทาง

ค่าโมดูลัสนี้แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางที่อยู่เหนือชั้นดินเดิม โดยมีความแข็งแรงเทียบเท่ากับชั้นผิวทาง พื้นทาง และรองพื้นทางรวมกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลพบว่า มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 250-1,000 MPa และจะเห็นว่าสายทาง N3 และ N4 มีค่าที่สูงกว่าสายทางอื่นอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของโครงสร้างและค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง

6.2.5 ชั้นผิวทาง

เมื่อพิจารณาแผนภาพกล่องของชั้นผิวทางจะเห็นว่า ค่าอิลาสติกโมดูลัสจะกระจายตัวอยู่ในช่วง 2,000-5,000 MPa ซึ่งอาจจะมีค่าที่ต่ำ หรือสูงกว่านี้ในแต่ละสายทาง และเมื่อพิจารณาแผนภูมิแท่งร่วมด้วยจะเห็นว่า ค่าเฉลี่ยของแต่ละสายทางก็กระจายตัวอยู่ในช่วงนี้ ซึ่งจากการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางในช่วงดังกล่าวสอดคล้องกับค่าอิลาสติกโมดูลัสของแอสฟัลต์ติกคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับชั้นผิวทางของโครงสร้างชั้นทางส่วนใหญ่ในประเทศไทย และจากการที่ค่าอิลาสติกโมดูลัสมีการกระจายไม่เท่ากันในแต่ละสายทาง แสดงให้เห็นถึงคุณภาพในการก่อสร้างที่ไม่สม่ำเสมอ

6.2.6 พิจารณารวมทุกสายทาง

เมื่อพิจารณาค่าอิลาสติกโมดูลัสของทุกสายทางรวมกันพบว่า การกระจายตัวของข้อมูลของชั้นผิวทางมีการกระจายตัวในช่วงที่ยาวกว่าชั้นอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด ด้วยเหตุที่ชั้นนี้มีความแข็งแรงมากกว่าชั้นอื่นมาก โดยมีค่าอิลาสติกโมดูลัสอยู่ในช่วงหลักพัน ในขณะที่ชั้นอื่นอยู่ในช่วงหลักร้อย และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของชั้นพื้นทางและรองพื้นทางพบว่า มีการกระจายตัวในช่วงที่ใกล้เคียงกัน แต่จะสังเกตเห็นว่าชั้นพื้นทางจะมีข้อมูลที่หลุดออกจากรุ่นอยู่เป็นจำนวนมาก โดยข้อมูลเหล่านี้คือค่าอิลาสติกโมดูลัสของสายทางแบบหมุนเวียนวัสดุเดิมมาใช้ใหม่ที่มีการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุด้วยซีเมนต์ จึงทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าปกติ ข้อมูลเหล่านี้จึงหลุดจากรุ่น และสำหรับชั้นดินเดิมมีการกระจายตัวที่แคบมากๆ เมื่อเทียบกับชั้นอื่นๆ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของค่าอิลาสติกโมดูลัสในแต่ละชั้นทางพบว่า ชั้นผิวทางมีความแข็งแรงมากที่สุด รองลงมาด้วยชั้นพื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิมตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของโครงสร้างชั้นทาง ที่แต่ละชั้นจะมีความแข็งแรงลดหลั่นลงไปตามลำดับการวางซ้อนทับกัน

6.3 การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางด้วยการทดสอบวิธีอื่น

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสด้วยสมการความถดถอย จึงต้องมีการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางด้วยวิธีอื่นๆ โดย

ในการศึกษานี้เลือกใช้ข้อมูล Time-History จากการทดสอบการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบ มาแปรผลหาความเร็วของคลื่น โดยใช้หลักการเดียวกันกับการทดสอบ Seismic-Refraction แล้วแปลงเป็นค่าอิลาสติกโมดูลัสเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง และใช้การทดสอบแบบ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) ในการเปรียบเทียบค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง และรองพื้นทางกับค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการแปลงค่า DPI ซึ่งเป็นดัชนีที่แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของวัสดุทาง และสำหรับชั้นดินเดิมจะใช้สมการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสที่แนะนำโดย AASHTO มาใช้ในการเปรียบเทียบ โดยการทดสอบเหล่านี้ได้กระทำกับถนนสายทางเดียวกัน และตำแหน่งตรงกันกับการทดสอบการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบดังที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

6.3.1 การวิเคราะห์ค่าอิลาสติกโมดูลัสของความเร็วคลื่นจากข้อมูล Time-History

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 และ 4 ข้อมูล Time-History คือข้อมูลของการแอ่นตัวในโดเมนของเวลา โดยมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ ซึ่งจุดยอดของกราฟการแอ่นตัวในโดเมนของเวลานี้ จะอยู่เหลื่อมกันในแต่ละตัวรับสัญญาณซึ่งวางเรียงตัวห่างจากจุดที่น้ำหนักกระทำแตกต่างกัน และเมื่อนำระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณมาพลอตกราฟกับผลต่างของเวลาระหว่างจุดยอดของกราฟการแอ่นตัวแต่ละตัวรับสัญญาณก็จะได้ความเร็วของคลื่นที่เดินทางผ่านวัสดุชั้นทาง โดยจะเลือกใช้ตัวรับสัญญาณในระยะใกล้ๆไม่ห่างจากจุดที่น้ำหนักกระทำมากนัก เพื่อให้ความเร็วที่ได้เป็นความเร็วของคลื่นโดยตรง (Direct wave) ที่เดินทางผ่านชั้นผิวทางเพียงชั้นเดียว และไม่ได้รับผลกระทบจากคลื่นสะท้อน (Refraction wave) ที่เดินทางผ่านชั้นอื่นๆ ซึ่งความเร็วที่ได้นี้เป็นความเร็วของคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) จึงได้เปลี่ยนความเร็วให้อยู่ในรูปค่าโมดูลัสเฉือนก่อน จากนั้นจึงเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของค่าอิลาสติกโมดูลัส และด้วยเหตุความขัดข้องในการเก็บข้อมูลทำให้มีข้อมูลการทดสอบกับถนน 2 สายทางคือ N1 และ N2 โดยมีจำนวนจุดทดสอบทั้งหมด 36 จุด

จากผลการวิเคราะห์ค่าอิลาสติกโมดูลัสจากความเร็วคลื่นพบว่า สายทาง N1 มีการกระจายตัวของข้อมูลที่แคบกว่าของสายทาง N2 และมีค่าเฉลี่ยของค่าอิลาสติกโมดูลัสต่ำกว่าสายทาง N2 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ประมาณจากสมการความถดถอยร่วมด้วย จะเห็นว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นมีค่าที่ต่ำกว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากสมการความถดถอยอย่างชัดเจน เนื่องด้วยความเร็วคลื่นที่ได้เป็นความเร็วคลื่นทุติยภูมิ ซึ่งมีความเร็วที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความเร็วคลื่นปฐมภูมิ ค่าโมดูลัสที่คำนวณได้จึงมีค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มที่ได้ก็เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากสมการความถดถอยของสายทาง N1 ต่ำกว่าของสายทาง N2 เช่นกัน ซึ่งจะเห็นว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นมีผลสอดคล้องกับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางที่ได้จากสมการความถดถอย โดยแปรผันตรงต่อกัน

6.3.2 การวิเคราะห์ค่าอิลาสติคโมดูลัสจากการทดสอบ DCP ของแต่ละสายทาง

สำหรับส่วนนี้ได้ใช้วิธี Dynamic Cone Penetrometer (DCP) ในการทดสอบความแข็งแรงของชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง โดยใช้กับถนนสายทางเดียวกันกับที่มีการทดสอบการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบ และได้ใช้สมการที่ (2.5b) ที่ศึกษาโดย Chen และคณะ (2005) ในการคำนวณค่าอิลาสติคโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบ DCP โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.) ชั้นพื้นทาง

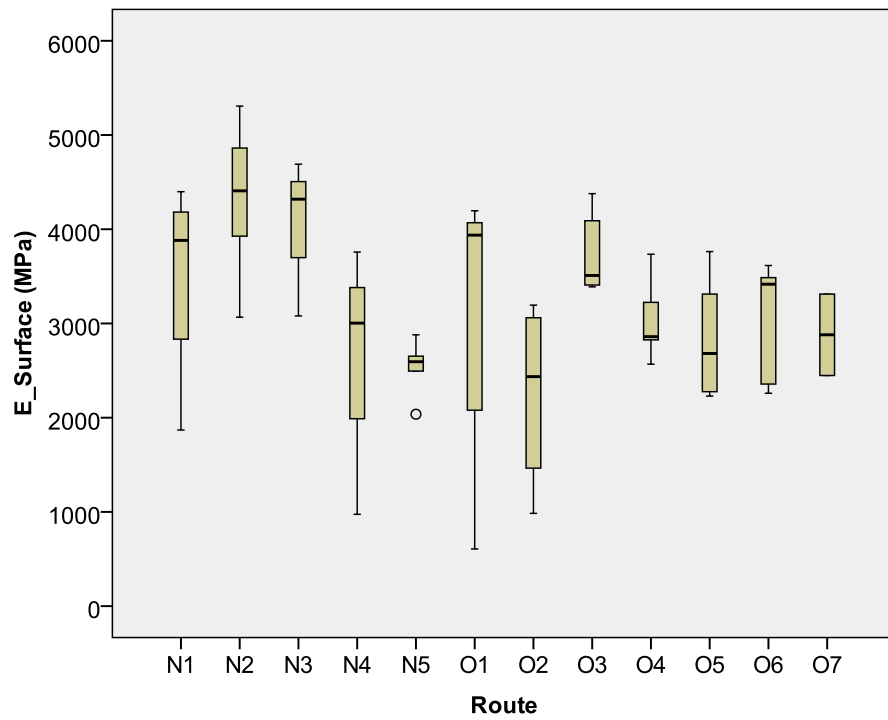
เมื่อพิจารณาแผนภาพกล่องพบว่า ค่าอิลาสติคโมดูลัสส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในช่วง 200-600 MPa และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยในแต่ละสายทางจะเห็นว่า ค่าอิลาสติคโมดูลัสของสายทาง N3 และ N4 ไม่ได้สูงที่สุดทั้งๆที่เป็นสายทางแบบหมุนเวียนวัสดุเดิมมาใช้ใหม่ ซึ่งขัดแย้งกับค่าอิลาสติคโมดูลัสที่ประมาณได้จากสมการความถดถอย เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นไปได้ว่า สายทาง N3 และ N4 ได้รับผลกระทบจากน้ำที่ใช้ในการเจาะเปิดผิวถนนมากกว่าสายทางอื่นๆ เพราะมีความแข็งแรงมากจึงต้องใช้น้ำช่วยในการเจาะมากขึ้นตามไปด้วย ค่า DPI ที่ได้จากการทดสอบจึงมีค่าสูง จึงทำให้ได้ค่าอิลาสติคโมดูลัสต่ำกว่าความเป็นจริง

2.) ชั้นรองพื้นทาง

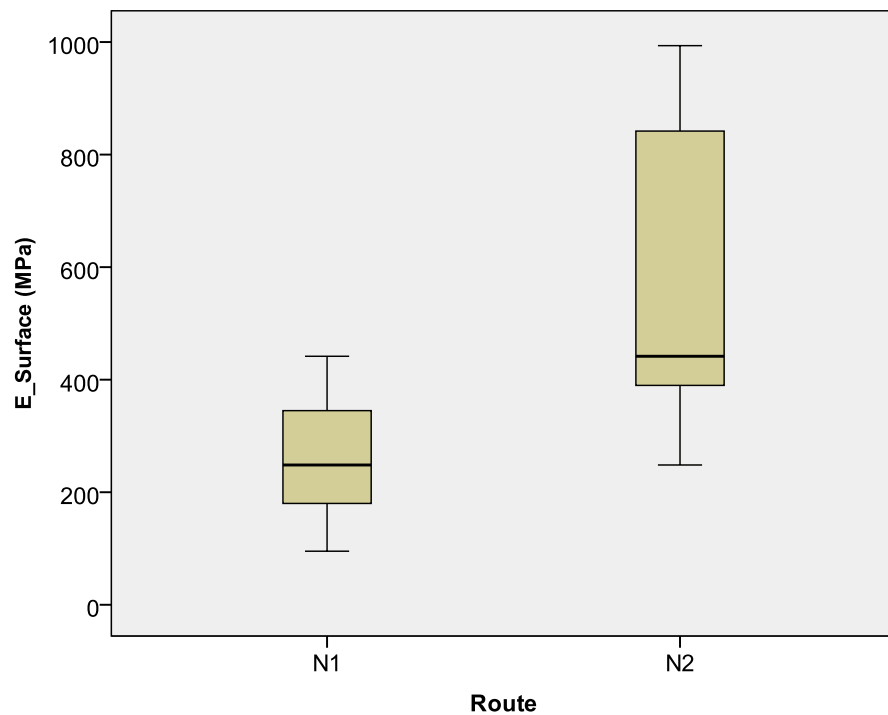
สำหรับชั้นรองพื้นทางพบว่า มีการกระจายตัวของค่าอิลาสติคโมดูลัสอยู่ในช่วง 100-400 MPa และจากแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบ ค่าเฉลี่ยของค่าอิลาสติคโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบ DCP กับสมการความถดถอยของชั้นรองพื้นทางพบว่า ค่าอิลาสติคโมดูลัสที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีค่าแตกต่างกัน เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะการทดสอบ DCP ได้รับผลกระทบจากน้ำที่ใช้ในการเจาะเปิดผิวถนน จึงทำให้ค่าโมดูลัสที่ได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

6.3.3 การวิเคราะห์ค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นดินเดิม

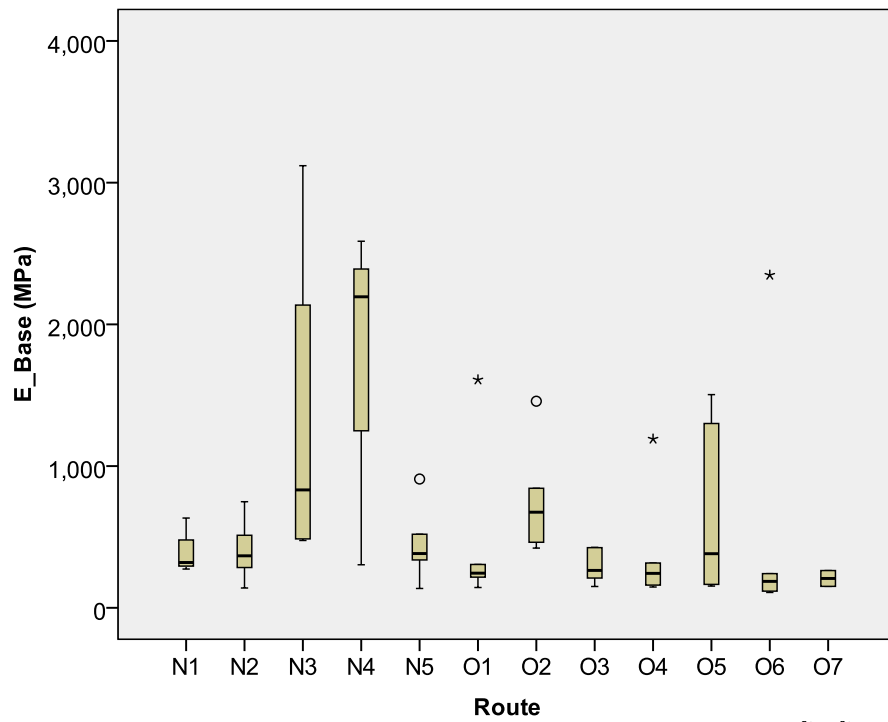
สำหรับในส่วนนี้เป็นการคำนวณหาค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นดินเดิม โดยใช้สมการประมาณค่าโมดูลัสการคืนตัวของชั้นดินเดิมที่แนะนำโดย AASHTO ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ก่อนหน้านี้ โดยชั้นดินเดิมเป็นชั้นที่อยู่ล่างสุดของโครงสร้างชั้นทาง มีความแข็งแรงไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นอื่นๆ เนื่องด้วยเป็นวัสดุตั้งเดิมตามธรรมชาติในพื้นที่นั้นๆ แต่มีความสำคัญมากเพราะความแข็งแรงของชั้นนี้จะส่งผลต่อการออกแบบโครงสร้างชั้นทางโดยรวม เมื่อพิจารณาแผนภาพกล่องของค่าอิลาสติคโมดูลัสพบว่า มีการกระจายตัวของข้อมูลไม่มากนัก โดยกระจายตัวอยู่ในช่วง 80-200 MPa ซึ่งเป็นช่วงที่ต่ำกว่าค่าอิลาสติคโมดูลัสที่ประมาณจากสมการความถดถอยเล็กน้อย แต่มีบางสายทางที่ค่าอิลาสติคโมดูลัสที่คำนวณตามคำแนะนำของ AASHTO มีค่าสูงกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งสายทางเหล่านั้นคือ O4 และ O5 แต่ถึงอย่างไรก็ตามก็มีค่าสูงกว่าไม่มากนัก โดยจะมีการพิสูจน์ความสัมพันธ์ที่ถูกต้องตามวิธีการทางสถิติต่อไป



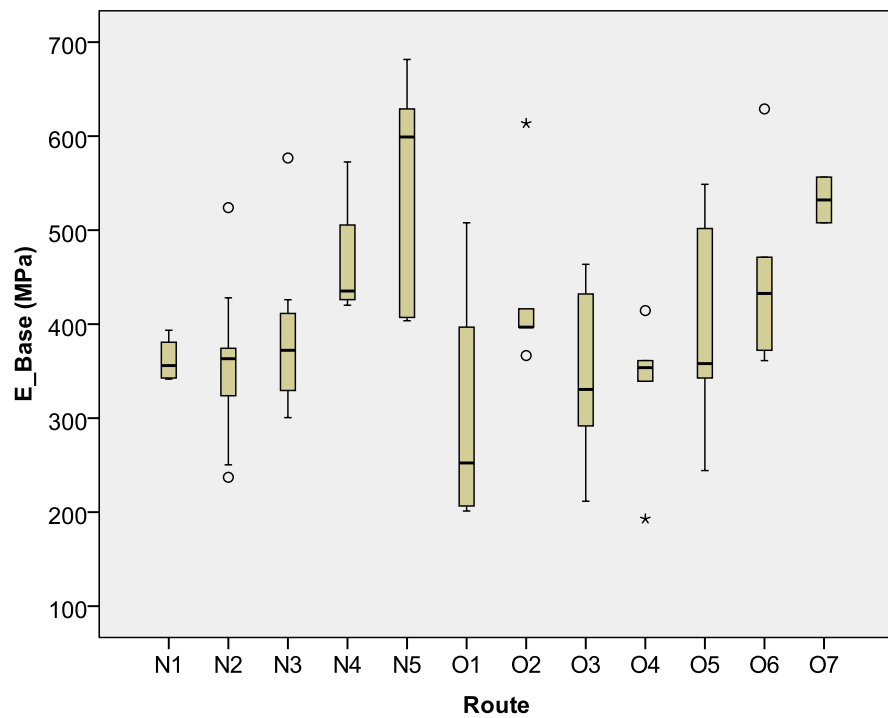
รูปที่ 6.1 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของข้อมูลค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทางจากสมการความถดถอย



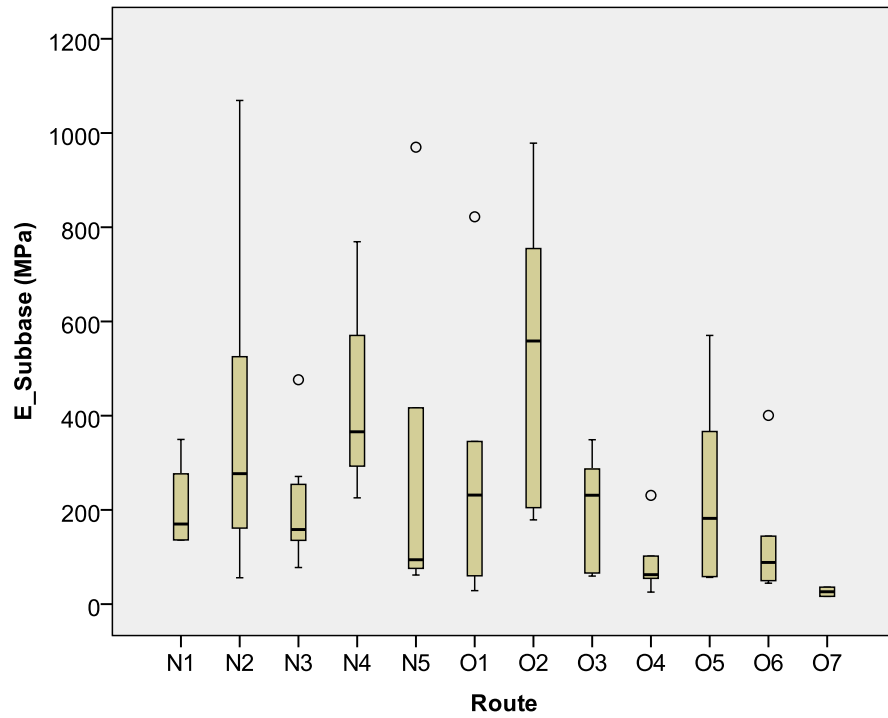
รูปที่ 6.2 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทางจากการวิเคราะห์ความเร็วคลื่น



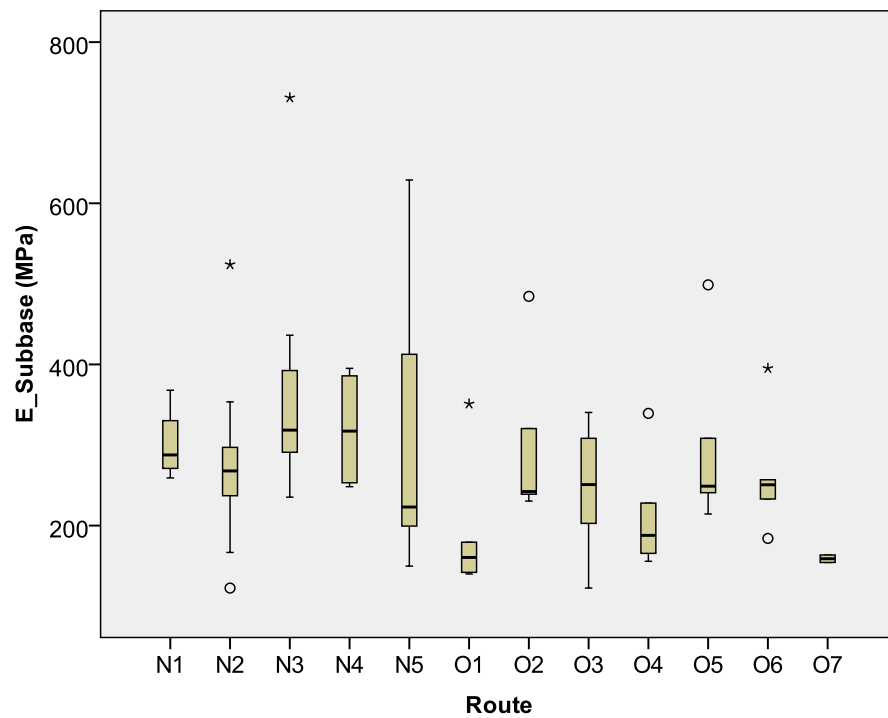
รูปที่ 6.3 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของข้อมูลค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง จาก
สมการความถดถอย



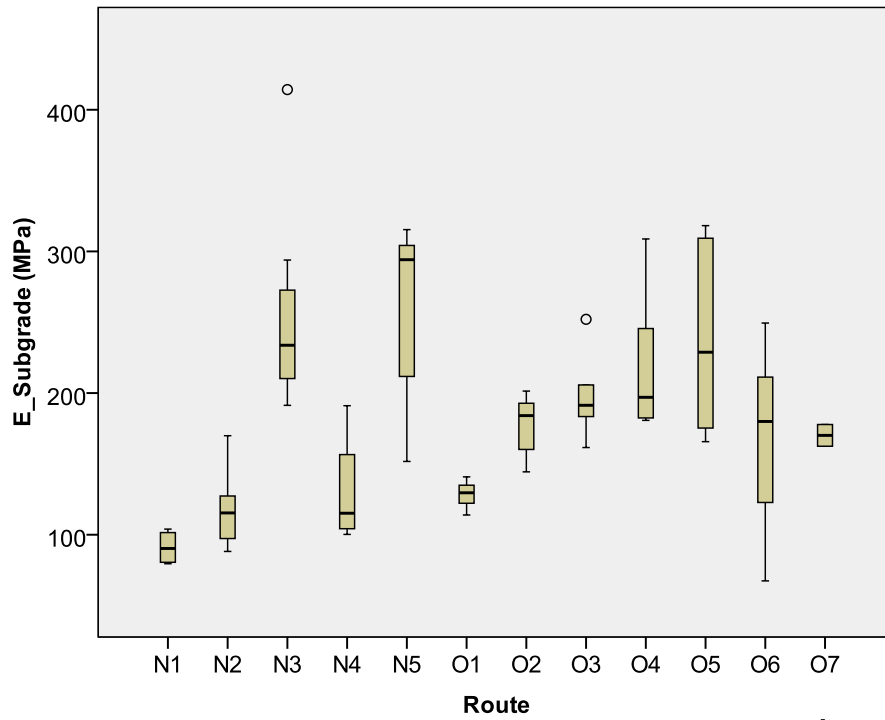
รูปที่ 6.4 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางจากการ
ทดสอบ DCP



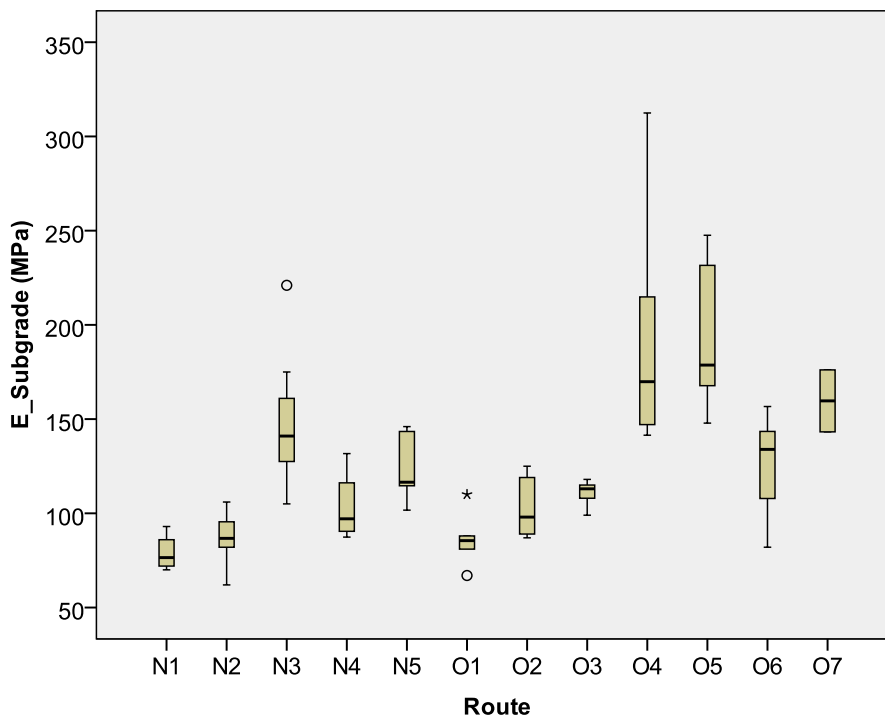
รูปที่ 6.5 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของข้อมูลค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นรองพื้นทาง จากสมการความถดถอย



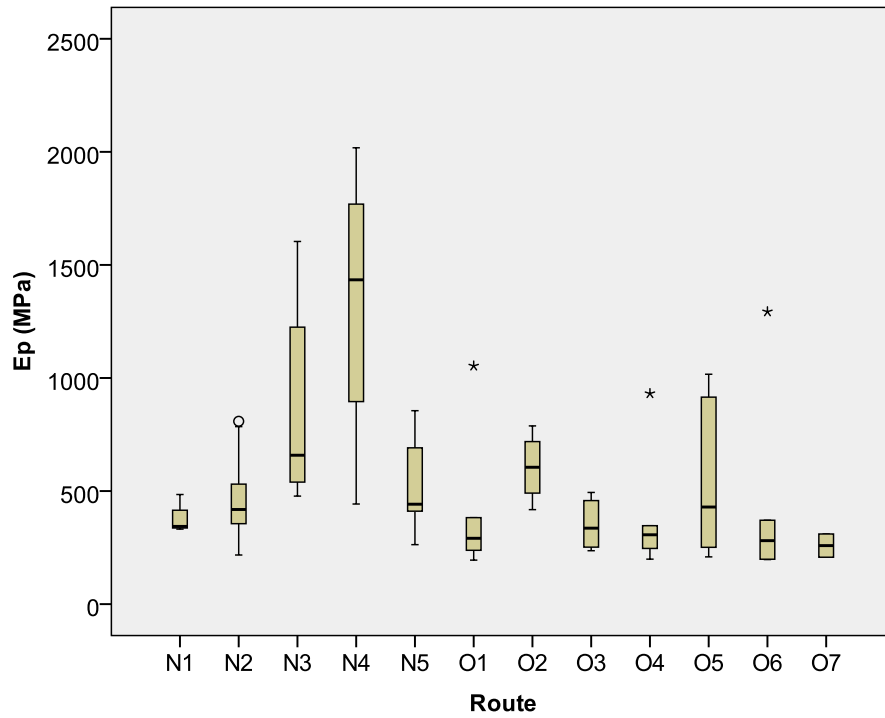
รูปที่ 6.6 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นรองพื้นทางจากการทดสอบ DCP



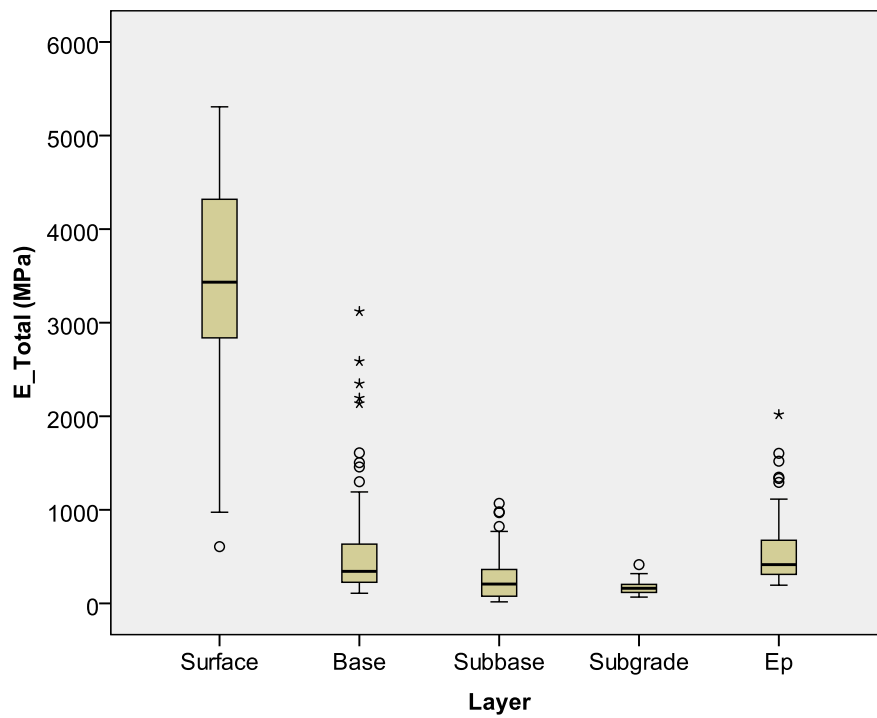
รูปที่ 6.7 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของข้อมูลค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นดินเดิมจากสมการความถดถอย



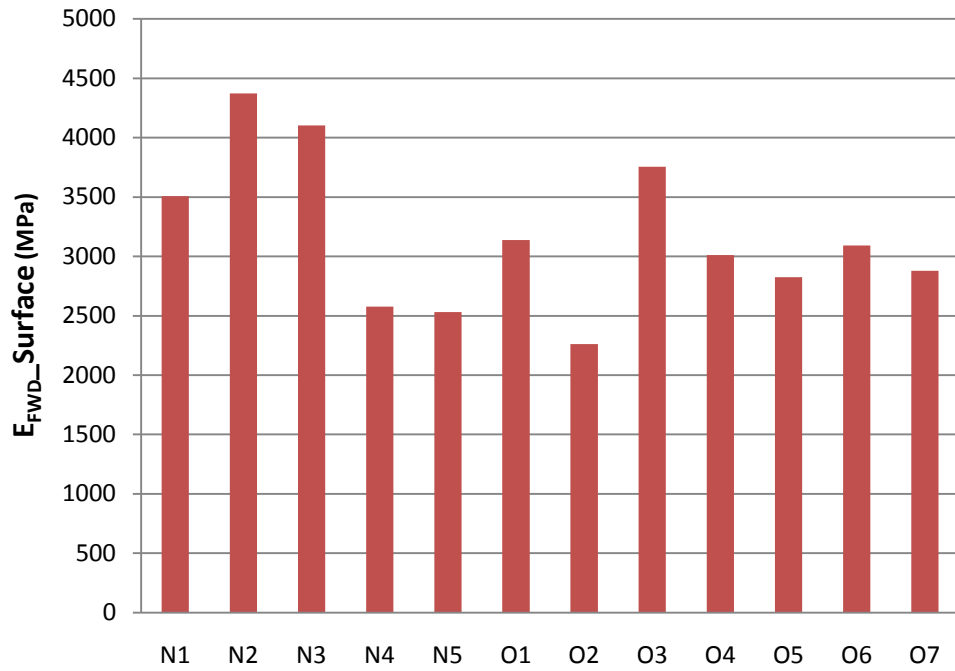
รูปที่ 6.8 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของข้อมูลค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นดินเดิมที่คำนวณตามคู่มือการออกแบบผิวทางโดยAASHTO



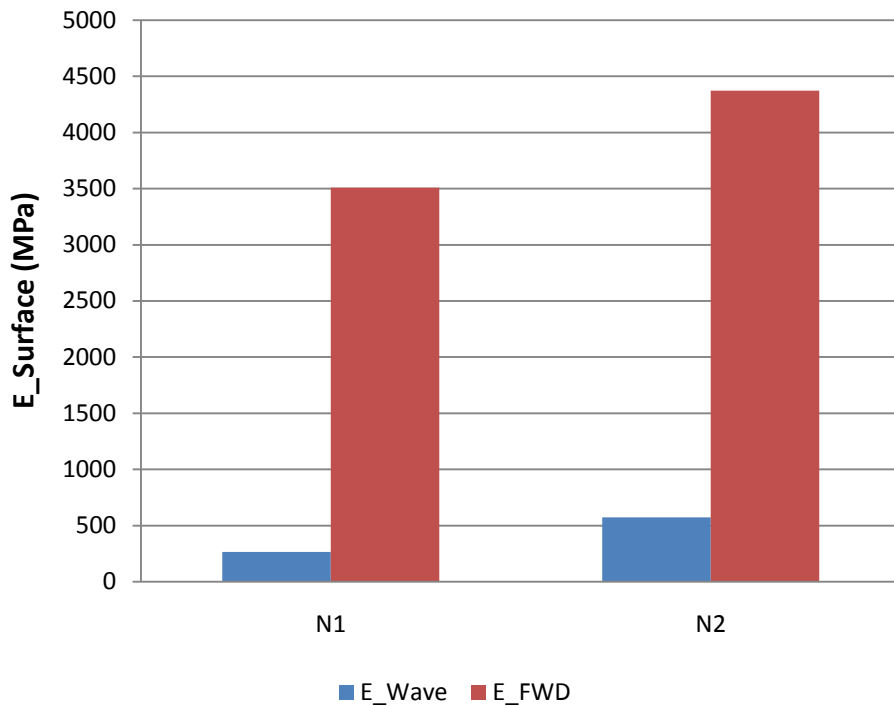
รูปที่ 6.9 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของข้อมูลค่าอีลาสติคโมดูลัสเทียบเท่าที่คำนวณตามคู่มือการออกแบบผิวทางโดย AASHTO



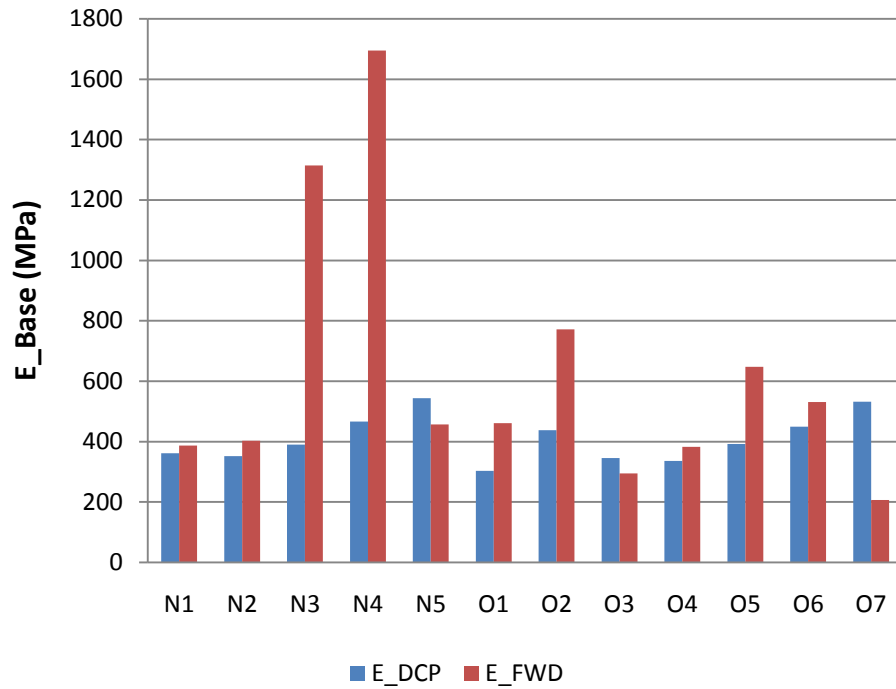
รูปที่ 6.10 แผนภาพกล่องแสดงการกระจายตัวของข้อมูลค่าอีลาสติคโมดูลัสจากสมการความกดรอยในแต่ละชั้นทางรวมตัวอย่างทั้งหมดทุกสายทาง



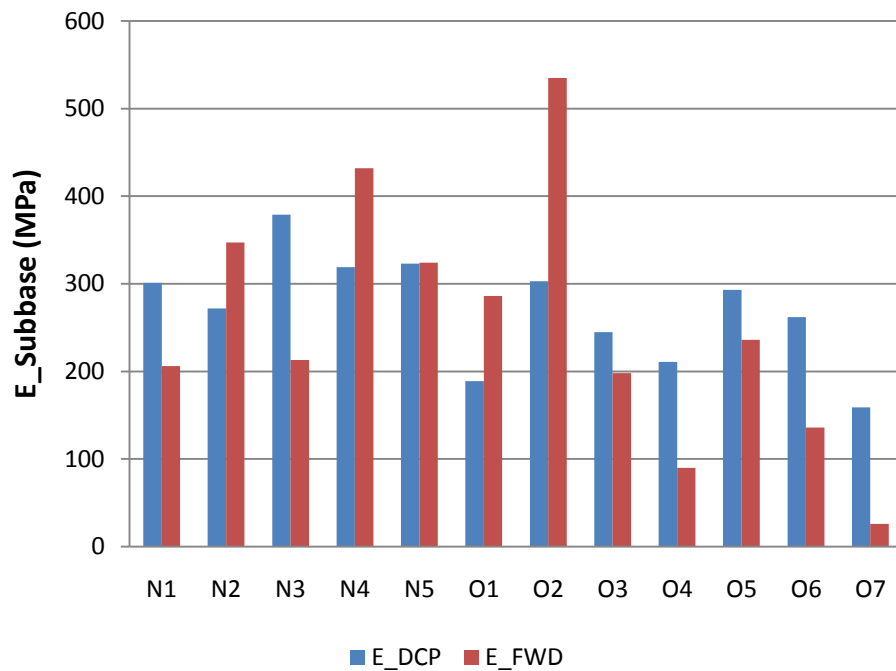
รูปที่ 6.11 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยของค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทาง จากสมการความถดถอย



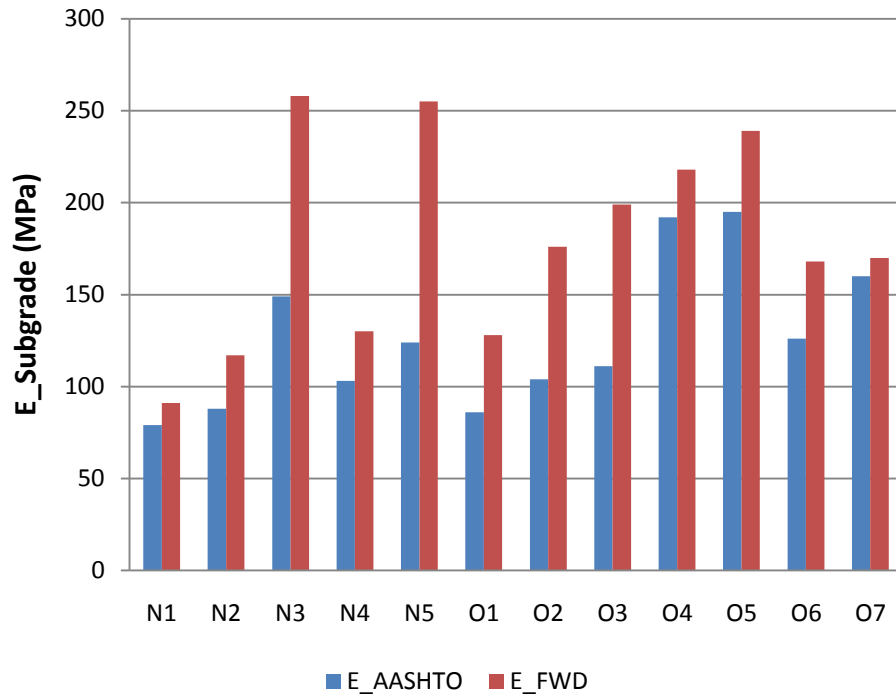
รูปที่ 6.12 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ ค่าอีลาสติคโมดูลัสที่ได้จากความเร็วคลื่นกับสมการความถดถอย



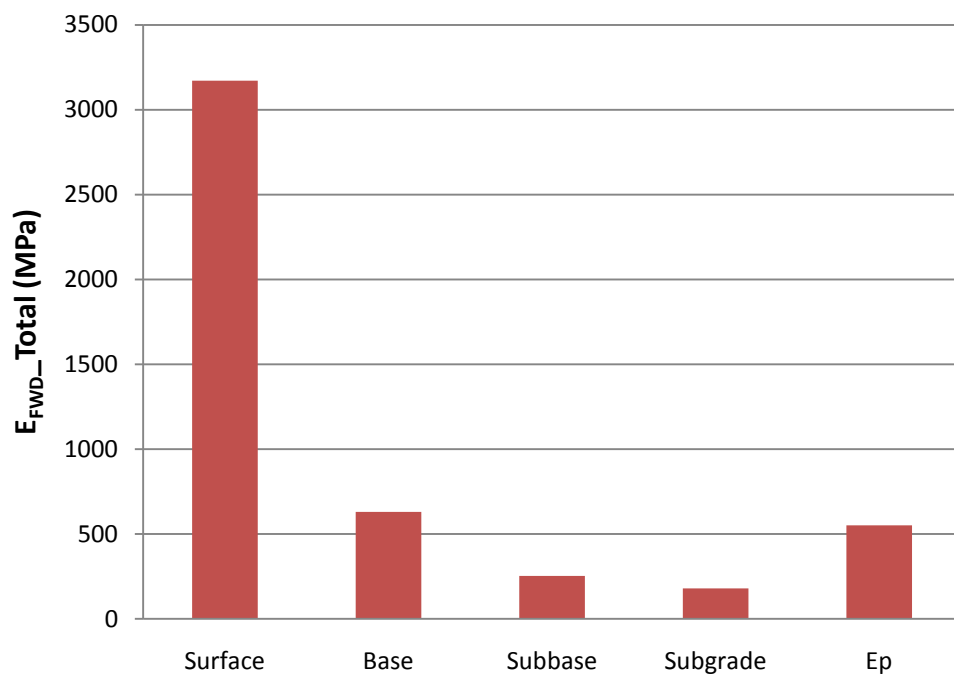
รูปที่ 6.13 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าอีลาสติคโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบ DCP กับ สมการความถดถอยของชั้นพื้นทาง



รูปที่ 6.14 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าอีลาสติคโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบ DCP กับ สมการความถดถอยของชั้นรองพื้นทาง



รูปที่ 6.15 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าอีลาสติคโมดูลัสที่คำนวณตามคู่มือการออกแบบผิวทางโดย AASHTO กับสมการความถดถอยของชั้นดินเดิม



รูปที่ 6.16 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยของค่าอีลาสติคโมดูลัสจากสมการความถดถอยในแต่ละชั้นทางรวมตัวอย่างทั้งหมดทุกสายทาง

6.4 การทดสอบความสัมพันธ์

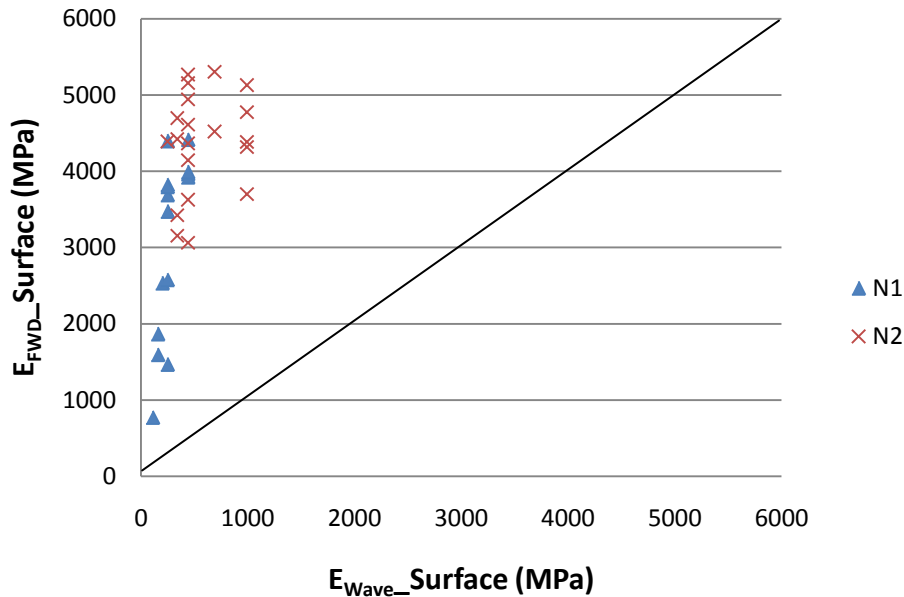
ก่อนหน้านี้นี้เราได้ทำการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสด้วยสมการความถดถอย และการวิเคราะห์ผลการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในภาคสนาม โดยผลการวิเคราะห์เบื้องต้นจากสถิติเชิงพรรณนาด้วยการดูการกระจายตัว และค่าเฉลี่ยพบว่า มีความสอดคล้อง และแตกต่างกันบ้างในแต่ละชั้น หรือในแต่ละสายทาง และเพื่อเป็นการพิสูจน์ความสัมพันธ์ของผลที่ได้จากสมการความถดถอยกับผลการทดสอบในภาคสนามนี้เอง จึงได้ใช้การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ในการยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากสมการความถดถอยกับค่าอิลาสติกโมดูลัสจากการทดสอบในภาคสนามในแต่ละชั้นทาง ซึ่งทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์แบ่งตามชั้นทางดังต่อไปนี้

6.4.1 ชั้นผิวทาง

การทดสอบในภาคสนามที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงของชั้นผิวทางคือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของความเร็วคลื่นจากการวิเคราะห์ข้อมูล Time-History โดยเลือกใช้ความเร็วในช่วงระยะ 20 ซม จากจุดที่น้ำหนักกระทำ แล้วจึงเปลี่ยนให้เป็นค่าอิลาสติกโมดูลัส ซึ่งได้ใช้ค่าอิลาสติกโมดูลัสของความเร็วคลื่นนี้มาวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ร่วมกับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางที่ประมาณได้จากสมการความถดถอย โดยมีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 6.3 ซึ่งจะเห็นว่ามีค่านัยสำคัญ 0.001 ซึ่งน้อยกว่า 0.050 จึงแสดงให้เห็นว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสของความเร็วคลื่นจากการวิเคราะห์ข้อมูล Time-History มีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่ามีค่า 0.539 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสของความเร็วคลื่นจากการวิเคราะห์ข้อมูล Time-History มีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางไปในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์ในระดับปานกลาง เพราะสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 1 และ 0 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางที่ประมาณจากสมการความถดถอยสามารถแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของชั้นผิวทางได้

ตารางที่ 6.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ E_{FWD} กับ E_{Wave} ของชั้นผิวทาง

	Surface	E_{Wave}
E_{FWD}	Pearson correlation	.539
	Sig.(2-tailed)	.000



รูปที่ 6.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติคโมดูลัสจากสมการความถดถอยกับค่าอีลาสติคโมดูลัสของความเร็วคลื่นของชั้นผิวทาง

6.4.2 ชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง

สำหรับชั้นทางสองชั้นนี้ได้ใช้การทดสอบแบบเดียวกันในการทดสอบความแข็งแรงของชั้นทาง ซึ่งวิธีการทดสอบที่ใช้คือ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) โดยมีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 6.4, 6.5 และ 6.6 ซึ่งจะเห็นว่าค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นพื้นทางและรองพื้นทางมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.050 จึงแสดงให้เห็นว่าค่าอีลาสติคโมดูลัสจากการทดสอบ DCP ของทั้ง 2 ชั้นทางนี้มีความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นพื้นทางและรองพื้นทางที่ประมาณได้จากสมการความถดถอยทางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์สหสัมพันธ์พบว่ามีค่า 0.361 และ 0.389 สำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทางตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าอีลาสติคโมดูลัสจากการทดสอบ DCP ของทั้ง 2 ชั้นทางนี้มีความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติคโมดูลัสที่ประมาณได้จากสมการความถดถอยไปในทิศทางเดียวกัน และจะเห็นว่าความสัมพันธ์สหสัมพันธ์มีความสัมพันธ์ค่อนข้างต่ำเพราะสหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ 0.000 เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นไปได้เนื่องจาก ได้รับผลกระทบจากน้ำที่ใช้ในการเจาะเปิดผิวถนน ซึ่งบางสายทางมีชั้นผิวทางที่แข็งแรงมาก ทำให้ต้องใช้น้ำช่วยในการเจาะมากกว่าถนนสายทางอื่นๆ จึงทำให้วัสดุทางในชั้นรองลงมาอ่อนตัวลง ค่า DPI จึงสูงกว่าความเป็นจริง ทำให้ได้ค่าอีลาสติคโมดูลัสที่คลาดเคลื่อน โดยเมื่อตัดสายทาง N3 และ N4 ซึ่งเป็นสายทางประเภทที่มีการปรับปรุงวัสดุชั้นพื้นทางออกพบมีความสัมพันธ์ที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของน้ำที่ใช้ในการเจาะผิวทางรวมทั้งชั้นวัสดุที่มีการปรับปรุงส่งผลต่อค่า DPI ของวัสดุชั้นถัดมา

ตารางที่ 6.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่า E_{FWD} กับ E_{DCP} ของชั้นพื้นทางรวมทุกสายทาง

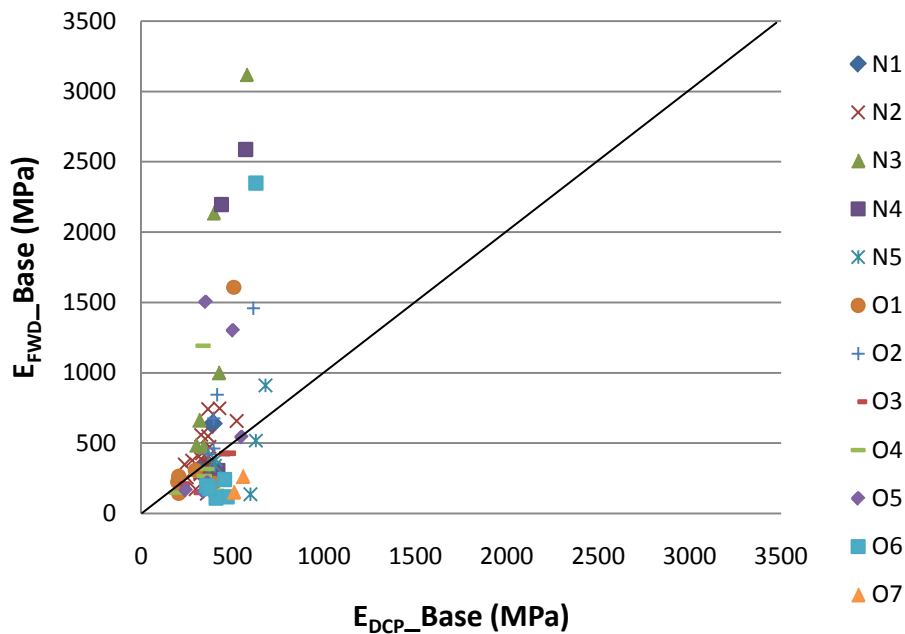
Base		E_{DCP}
E_{FWD}	Pearson correlation	.361
	Sig.(2-tailed)	.007

ตารางที่ 6.5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่า E_{FWD} กับ E_{DCP} ชั้นพื้นทางที่ไม่รวมสายทาง N3, N4

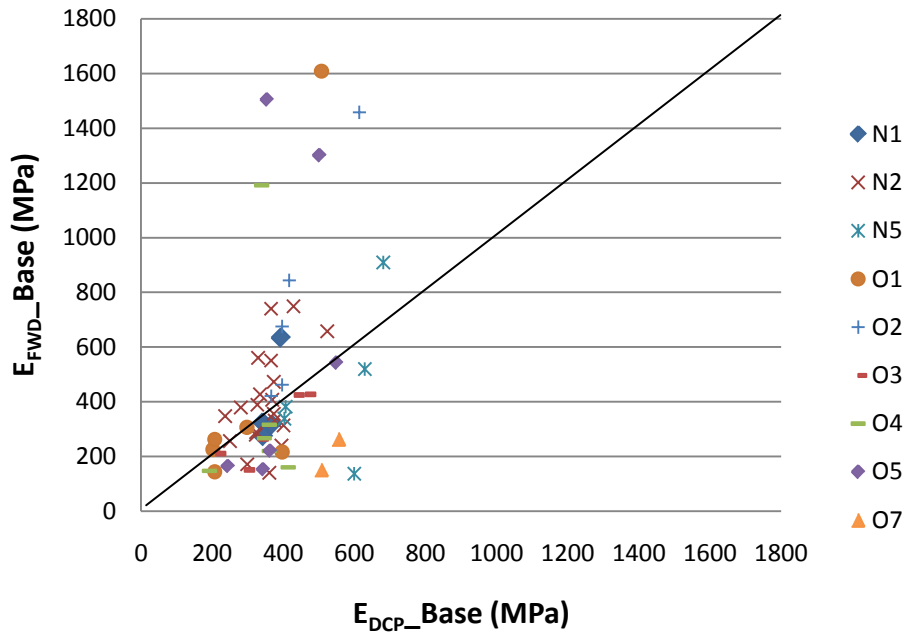
Base		E_{DCP}
E_{FWD}	Pearson correlation	.485
	Sig.(2-tailed)	.000

ตารางที่ 6.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่า E_{FWD} กับ E_{DCP} ของชั้นรองพื้นทาง

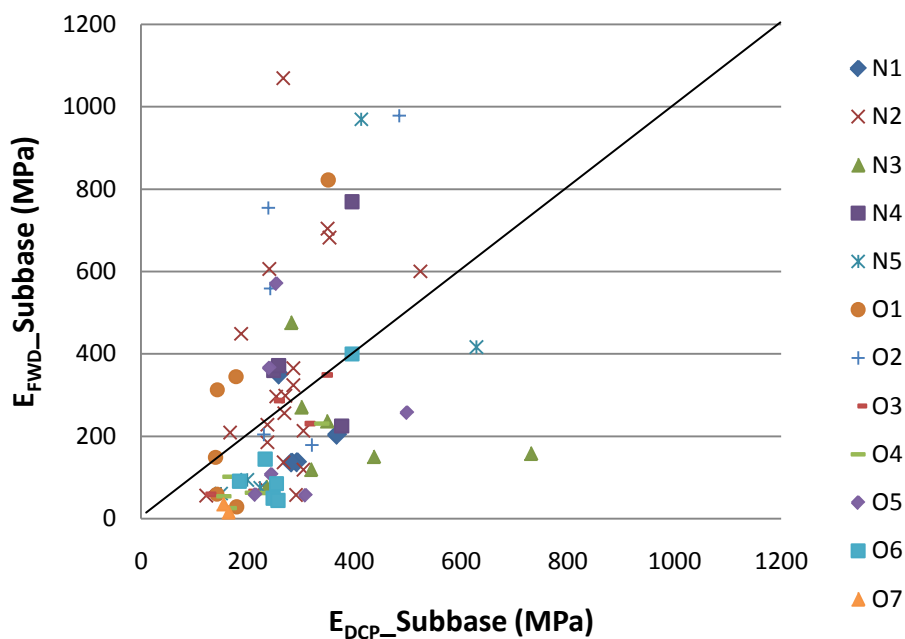
Subbase		E_{DCP}
E_{FWD}	Pearson correlation	.389
	Sig.(2-tailed)	.001



รูปที่ 6.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติคโมดูลส์จากสมการความถดถอยกับค่าอีลาสติคโมดูลส์จากการทดสอบDCP ของชั้นพื้นทางรวมทุกสายทาง



รูปที่ 6.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติคโมดูลัสจากสมการความถดถอยกับค่าอีลาสติคโมดูลัสจากการทดสอบ DCP ของชั้นพื้นทางที่ไม่รวมสายทาง N3, N4



รูปที่ 6.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติคโมดูลัสจากสมการความถดถอยกับค่าอีลาสติคโมดูลัสจากการทดสอบ DCP ของชั้นรองพื้นทาง

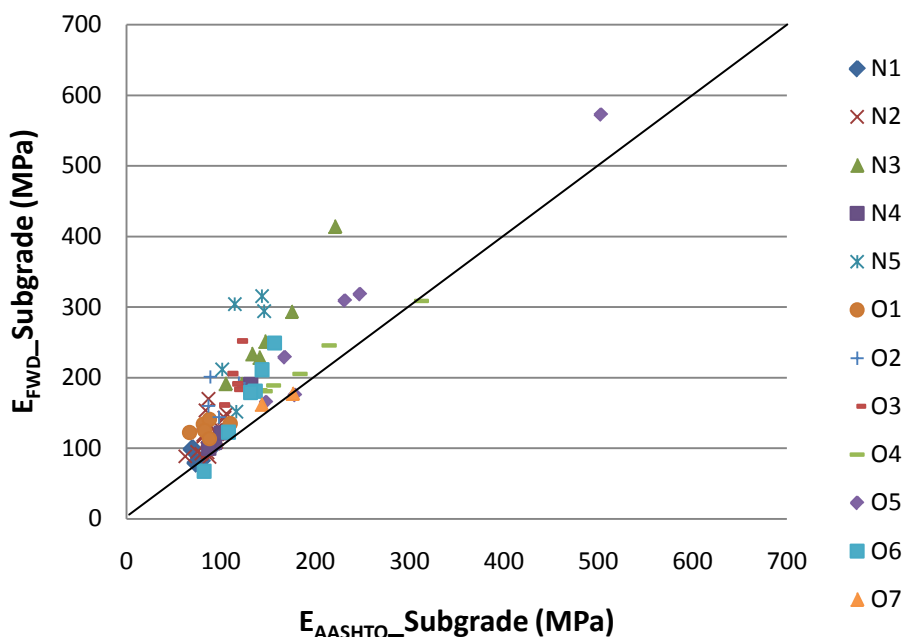
6.4.3 ชั้นดินเดิม

ชั้นนี้เป็นเพียงชั้นเดียวที่ใช้ข้อมูลหตุ้มการแอนตัวจากการทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบในการเปรียบเทียบ โดยใช้สมการคำนวณค่าโมดูลัสการคืนตัวที่แนะนำโดย AASHTO และหลายๆมาตรฐานของ ASTM ในการคำนวณ เพื่อนำค่านั้นมาวิเคราะห์สัมพันธ์ที่สัมพันธ์ร่วมกันกับ

ค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นดินเดิมที่ประมาณได้จากสมการความถดถอย โดยมีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 6.5 ซึ่งจะเห็นว่าค่าโมดูลัสการคืนตัวมีค่านัยสำคัญ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.050 จึงแสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสการคืนตัวนี้มีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นดินเดิมที่ประมาณได้จากสมการความถดถอยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่า มีค่า 0.855 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสการคืนตัวมีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นดินเดิมที่ประมาณได้จากสมการความถดถอยไปในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์ค่อนข้างสูงเพราะสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ 1.000 และจากเหตุผลต่างๆ เหล่านี้จึงสรุปได้ว่า ค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นดินเดิมที่ประมาณจากสมการความถดถอยสามารถแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของชั้นดินเดิมได้

ตารางที่ 6.7 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่า E_{FWD} กับ E_{AASHTO} ของชั้นดินเดิม

	Subgrade	E_{AASHTO}
E_{FWD}	Pearson correlation	.855
	Sig.(2-tailed)	.000



รูปที่ 6.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิลาสติคโมดูลัสจากสมการความถดถอยกับค่าโมดูลัสการคืนตัวที่แนะนำโดย AASHTO ของชั้นดินเดิม

จากผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าอิลาสติคโมดูลัสที่ประมาณจากสมการความถดถอยร่วมกับผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชั้นทางต่างๆพบว่า ค่าอิลาสติคโมดูลัส

ของชั้นดินเดิมมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ค่อนข้างสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสมีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบโครงสร้างทางในภาคสนามมาก แต่ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง พื้นทาง และรองพื้นทางมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ปานกลางจนถึงค่อนข้างต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสมีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบโครงสร้างทางในภาคสนามน้อย แต่อย่างไรก็ตามค่าอิลาสติกโมดูลัสมีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบในภาคสนามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทุกชั้นทาง จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ประมาณจากสมการความถดถอยสามารถแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้ทุกชั้นทาง

บทที่ 7

สรุปผลการศึกษา

เนื้อหาในบทนี้เป็นการสรุปผลการศึกษาทั้งหมดในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในงานวิจัยเพื่อศึกษาคุณลักษณะของหลุมการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางภายใต้น้ำหนักกระทำเดียวกัน และเพื่อพัฒนาดัชนีชี้วัดที่สามารถประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละชั้นที่มีวัสดุทางแตกต่างกันได้ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงของข้อมูลหลุมการแอ่นตัวในช่วงใดช่วงหนึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของชั้นทางแต่ละชั้นได้ โดยแสดงอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัว และจากพารามิเตอร์นี้สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้นได้ ซึ่งสามารถใช้สมการเหล่านี้ในการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสเพื่อใช้เป็นดัชนีในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง โดยสามารถสรุปผลการศึกษาออกได้เป็น 3 ส่วนคือ การจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัว การวิเคราะห์พารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว และการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับข้อมูลในภาคสนาม มีรายละเอียดโดยสรุปดังต่อไปนี้

7.1 การจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัว

หลุมการแอ่นตัวเป็นกลุ่มข้อมูลของการแอ่นตัวที่ระยะต่างๆจากจุดที่น้ำหนักกระทำ ซึ่งได้จากการทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบ (Falling Weight Deflectometer, FWD) และเพื่อให้เข้าใจคุณลักษณะของหลุมการแอ่นตัว จึงต้องทำการจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างชั้นทาง โดยทำการศึกษาโครงสร้างชั้นทางแบบยึดหยุ่นที่มีจำนวนชั้นทาง 4 ชั้น ได้แก่ ชั้นผิวทาง พื้นทาง รองพื้นทาง และชั้นดินเดิม ซึ่งเป็นโครงสร้างชั้นทางส่วนใหญ่ที่สร้างอย่างแพร่หลายในประเทศไทย และกำหนดให้มีน้ำหนักตกกระทบ 50 kN เพื่อให้สอดคล้องกับคำแนะนำตามมาตรฐาน ASTM โดยใช้ โปรแกรมวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้าง ชั้นทาง Everstress5.0 ในการศึกษา

ในการจำลองสภาพหลุมการแอ่นตัวเพื่อให้ผลการจำลองออกมาสะท้อนถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษากับผลการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น จึงได้นำการออกแบบการทดลองมาใช้ในการวางแผนการจำลอง โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวของผลตอบรับที่สอง (Second-Order Response Surface Model) เนื่องด้วยความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษากับพารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวมีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น แต่มีลักษณะความสัมพันธ์แบบควอดราติก ซึ่งปัจจัยในการศึกษาที่ส่งผลต่อค่าการแอ่นตัวมีจำนวน 7 ปัจจัย โดยแบ่งเป็น

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางหรือก็คือค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้นจำนวน 4 ปัจจัย และปัจจัยด้านความหนาของชั้นทางในแต่ละชั้นอีกจำนวน 3 ปัจจัย ซึ่งมีจำนวนข้อมูลหลุมการแอ่นตัวที่ได้จากการจำลองตามหลักการออกแบบการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 143 ชุดข้อมูล

7.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัว

พารามิเตอร์หลุมการแอ่นตัวที่ใช้ในการศึกษานี้คือ ผลต่างของการแอ่นตัวช่วงใดช่วงหนึ่ง ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาผลต่างของการแอ่นตัวจำนวน 12 ช่วง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เพื่อบอกความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ว่ามีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพารามิเตอร์แต่ละตัวมีความสัมพันธ์ต่อกัน แต่มีความสัมพันธ์มากน้อยต่างกันไป โดยสามารถจัดกลุ่มพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กันสูงเกิน 0.7 ได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มพารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวในช่วงระยะ 0-30 ซม. ระยะ 30-60 ซม. และระยะ 60-180 ซม. โดยได้ทำการคัดเลือกตัวแปรจากกลุ่มพารามิเตอร์ .

เหล่านี้ไปใช้ในการวิเคราะห์สมการความถดถอย โดยคัดเลือกพารามิเตอร์เพียง 1 ตัวในแต่ละกลุ่มไปใช้ในการวิเคราะห์สมการความถดถอย เพื่อให้สมการความถดถอยที่ได้ไม่มีปัญหาตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน (Multicollinearity) ซึ่งจากการวิเคราะห์สมการความถดถอยพบว่าพารามิเตอร์ Δd_{10-20} , Δd_{20-30} , Δd_{30-45} , Δd_{45-60} และ $\Delta d_{150-180}$ ให้ผลค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงสุด แต่สมการความถดถอยจากพารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวเหล่านี้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางได้ไม่ดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวที่ศึกษานี้ไม่สามารถใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางบางๆได้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางได้ถูกต้องมากขึ้น จึงได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิลาสติกโมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทางทั้งหมดที่อยู่เหนือชั้นดินเดิมซึ่งแนะนำโดย AASHTO กับค่าอิลาสติกโมดูลัสและความหนาของชั้นทางแต่ละชั้น พบว่าสมการมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง จึงสามารถใช้ความสัมพันธ์นี้ในการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางได้

$$\log(E_{\text{Base}}) = 5.629 - 1.450 \log(\Delta d_{20-30}) - 0.032H_{\text{Surface}} - 0.007H_{\text{Base}} \quad (7.1)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.807$$

$$\begin{aligned} \log(E_{\text{Subbase}}) = & 5.355 + 1.172 \log(\Delta d_{20-30}) - 3.427 \log(\Delta d_{45-60}) \\ & + 1.371 \log(\Delta d_{150-180}) - 0.028H_{\text{Base}} - 0.027H_{\text{Subbase}} \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.803$$

$$\log(E_{\text{Subgrade}}) = 3.176 - 0.956 \log(\Delta d_{150-180}) \quad (7.3)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.993$$

$$E_p H_T = -4467.933 + 0.490 E_1 H_1 + 1.229 E_2 H_2 + 0.653 E_3 H_3 \quad (7.4)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.918$$

โดยที่	E_{xxx}	คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้น(MPa)
	T_{xxx}	คือ ความหนาของชั้นทางแต่ละชั้น (cm)
	Δd_{i-j}	คือ พารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัว (μm)
	i	คือ ระยะเริ่มต้นของตัวรับสัญญาณการแอ่นตัวที่สนใจ (cm)
	j	คือ ระยะสิ้นสุดของตัวรับสัญญาณการแอ่นตัวที่สนใจ (cm)
	E_p	คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทาง(MPa)
	H_T	คือ ความหนาของโครงสร้างชั้นทางทุกชั้น (cm)

จากทฤษฎีอิลาสติกซิตีที่แสดงให้เห็นว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสแปรผกผันกับการแอ่นตัว ซึ่งสมการที่ 7.2 และ 7.4 เป็นสมการที่ใช้พารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวในการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางและดินเดิมต่างก็มีสัมประสิทธิ์หน้าพารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวเป็นลบ แต่สมการที่ 7.3 ซึ่งเป็นสมการของชั้นรองพื้นทาง ซึ่งจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรพารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวบางตัวมีค่าเป็นบวกซึ่งขัดแย้งกับทฤษฎี โดยเกิดจากการที่พารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน สัมประสิทธิ์จึงมีเครื่องหมายที่ผิดไปแต่อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์หลักที่มีเครื่องหมายเป็นลบก็มีผลต่อค่าอิลาสติกโมดูลัสมากกว่าพารามิเตอร์ที่มีเครื่องหมายเป็นบวก ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ผลต่างการแอ่นตัวกับค่าอิลาสติกโมดูลัสจึงยังคงมีทิศทางตรงกันข้ามตามทฤษฎี สำหรับสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรความหนามีเครื่องหมายเป็นลบ โดยแสดงให้เห็นว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสแปรผกผันกับความหนา ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางแบบ 2 ชั้นของ Burmister และสำหรับชั้นดินเดิมจะเห็นว่าไม่มีความสัมพันธ์กับความหนาเลย ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของชั้นทางที่มีความหนาไม่จำกัด

ในส่วนของสมการที่ 7.4 มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับค่า Structural Number ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลคูณของความหนากับค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นทางแต่ละชั้นรวมกันจะบ่งบอกถึงความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางที่อยู่เหนือชั้นดินเดิมทั้งหมด โดยความสัมพันธ์ลักษณะนี้ทำให้สัมประสิทธิ์มีค่าเป็นบวกทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับนิยามของค่าอิลาสติกโมดูลัสเทียบเท่าที่แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางโดยรวม

7.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับข้อมูลในภาคสนาม

จากการศึกษาก่อนหน้าทำให้ได้สมการความถดถอยประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของแต่ละชั้นทาง และเพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของสมการที่ได้จากการศึกษาจึงได้นำสมการมาทดสอบกับข้อมูลหลุมการแอนตัวจริง และในขณะเดียวกันก็ได้มีการ ทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางด้วย การทดสอบ วิธีอื่น ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ข้อมูล Time-History จากการทดสอบการแอนตัวแบบน้ำหนักตกกระทบ การทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) และใช้สมการประมาณค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิมที่แนะนำโดย AASHTO มาใช้ในการร่วมพิจารณา เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบเหล่านั้นมาเปรียบเทียบกับค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ประมาณได้จากสมการความถดถอย โดยใช้การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์

ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ประมาณจากสมการความถดถอยร่วมกันกับค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบวิธีอื่นๆสามารถสรุปได้ดังนี้

1.) ชั้นผิวทาง

สำหรับความสัมพันธ์ของชั้นผิวทางจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระดับปานกลาง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสจากสมการความถดถอยมีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสของความเร็วคลื่นไม่สูงมากนัก สืบเนื่องมาจากตัวรับสัญญาณที่รับข้อมูล Time-History มีความละเอียดไม่เพียงพอ ไม่สามารถรับคลื่นที่มีความถี่สูงๆได้ จึงทำให้ความเร็วคลื่นที่ได้มีความคลาดเคลื่อน

2.) ชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง

สำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทางจะสังเกตเห็นว่าค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสจากสมการความถดถอยมีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบ DCP น้อย เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นไปได้เนื่องจากผลกระทบจากน้ำที่ใช้ในการเจาะเปิดผิวถนน ซึ่งบางสายทางมีชั้นผิวทางที่แข็งแรงมาก ทำให้ต้องใช้น้ำช่วยในการเจาะมากกว่าถนนสายทางอื่นๆ จึงทำให้วัสดุทางในชั้นรองลงมาอ่อนตัวลง ค่า DPI จึงสูงกว่าความเป็นจริง ค่าโมดูลัสที่ได้จึงคลาดเคลื่อนตามไปด้วย

3.) ชั้นดินเดิม

ค่าอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินเดิมมีค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ที่สูง แต่อย่างไรก็ตามสมการความถดถอยจากการศึกษานี้ให้ค่าอิลาสติกโมดูลัสที่สูงกว่าความสัมพันธ์ที่แนะนำโดย AASHTO เช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสจากสมการความถดถอยมีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลัสจากความสัมพันธ์ที่แนะนำโดย AASHTO มาก แต่มีค่าไม่เท่ากัน โดยสมการความถดถอยให้ค่าอิลาสติกโมดูลัสที่สูงกว่า

จากผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะเห็นว่า ค่าอิลาสติคโมดูลัสที่ได้จากสมการความถดถอยมีความสัมพันธ์กับการทดสอบวิธีอื่น ๆ ไม่มากนัก ด้วยเหตุความขัดข้องในการทดสอบในภาคสนาม แต่อย่างไรก็ตามค่าอิลาสติคโมดูลัสจากสมการความถดถอยมีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติคโมดูลัสจากผลการทดสอบโครงสร้างทางในภาคสนามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทุกชั้นทาง จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าอิลาสติคโมดูลัสที่ประมาณจากสมการความถดถอยสามารถแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้ทุกชั้นทาง

7.4 การใช้งานและข้อจำกัดของสมการที่ได้จากการศึกษา

สมการที่ได้จากการศึกษานี้สามารถใช้ในการประมาณค่าอิลาสติคโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละชั้น โดยต้องใช้ข้อมูลหลุมการแ่นตัวจากการทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบและความหนาของชั้นทางแต่ละชั้นเป็นตัวแปรหลัก ซึ่งการแ่นตัวที่ใช้ต้องเป็นการแ่นตัวที่ระยะ 20, 30, 45, 60, 150 และ 180 ซม. จากจุดที่แรงกระทำ และต้องทำการปรับแก้ค่าการแ่นตัวเนื่องจาก

ผลของแรงกระทำที่ไม่เท่ากันก่อนนำไปใช้วิเคราะห์ด้วยสมการความถดถอย โดยกำหนดให้แรงกระทำมาตรฐานคือ 50 kN สำหรับการศึกษานี้ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากผลของอุณหภูมิ ดังนั้นค่าอิลาสติคโมดูลัสที่ประมาณได้จึงเป็นค่าอิลาสติคโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทาง ณ อุณหภูมิทดสอบ ซึ่งค่าอิลาสติคโมดูลัสที่ได้จากสมการความถดถอยนี้สามารถใช้ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้ โดยนำค่าที่ประมาณได้เทียบเคียงกับค่าอิลาสติคโมดูลัสมาตรฐานของวัสดุทาง

ในการใช้งานสมการประมาณค่าอิลาสติคโมดูลัสที่ได้จากการศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่คือ ไม่สามารถประมาณโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าอิลาสติคโมดูลัสหรือความหนามากหรือต่ำเกินกว่าช่วงที่ได้ทำการจำลองเอาไว้ได้ โดยมีค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทางอยู่ในช่วง 1,000-5,000 MPa พื้นทาง,รองพื้นทางอยู่ในช่วง 100-1,300 MPa และชั้นดินเดิม 50-250 MPa สำหรับความหนากำหนดให้ชั้นผิวทางอยู่ในช่วง 2.5-12.5 ซม. พื้นทางและรองพื้นทางอยู่ในช่วง 10-25 ซม. โดยค่าที่ประมาณได้อาจจะมีค่าที่สูงเกินขีดปกติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างชั้นนั้นมีความแข็งแรงมาก สามารถแสดงให้เห็นในเชิงพรรณนาได้ว่าโครงสร้างชั้นนั้นแข็งแรง แต่ไม่อาจทำนายค่าโมดูลัสที่ถูกต้องแม่นยำในเชิงปริมาณได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการประมาณค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทาง เนื่องจากการประมาณค่าโมดูลัสของชั้นนี้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างชั้นทางกับค่าอิลาสติคโมดูลัสและความหนาของชั้นทางแต่ละชั้น ซึ่งจะเห็นว่าหากค่าโมดูลัสของชั้นพื้นทางและรองพื้นทางคลาดเคลื่อนไป ค่าอิลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทางก็จะคลาดเคลื่อนตามไปด้วย

นอกจากนี้สมการจากการศึกษานี้ยังถูกจำกัดด้วยขนาดของแรงที่กระทำและจำนวนชั้นทาง โดยกำหนดให้มีแรงกระทำ 50 kN และมีจำนวนชั้นทาง 4 ชั้น ซึ่งหากแรงกระทำคลาดเคลื่อนไปจะส่งผลให้ค่าการแอ่นตัวที่ได้คลาดเคลื่อนตามไปด้วย ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้ค่าการแอ่นตัวก่อนที่จะนำไปประมาณค่าอิลาสติกโมดูลส์ต่อด้วยสมการความถดถอย และหากมีจำนวนชั้นทางผิดไปจากที่ได้ทำการจำลองไว้ก็จะไม่สามารถใช้สมการความถดถอยที่ได้จากศึกษานี้ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้ เนื่องด้วยระยะของผลต่างการแอ่นตัวที่มีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกโมดูลส์ในแต่ละชั้นเปลี่ยนแปลงไป

การศึกษานี้ได้กำหนดให้วัสดุทุกชั้นทางมีพฤติกรรมแบบอิลาสติกเชิงเส้น ซึ่งด้วยขนาดของแรงกระทำที่ไม่สูงมากนักจะทำให้วัสดุยังคงมีพฤติกรรมตามสมมติฐาน แต่หากมีแรงกระทำสูงกว่าที่กำหนดไว้มากๆจะทำให้วัสดุมีพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอาจจะมีลักษณะเป็นอิลาสติกไม่เชิงเส้นหรือมีพฤติกรรมแบบพลาสติก ซึ่งอาจทำให้เกิดการเสียรูปร่างถาวร ส่งผลให้โครงสร้างชั้นทางเสียหายได้ ดังนั้นในการประเมินความแข็งแรงด้วยการทดสอบแบบน้ำหนักตกกระทบจึงไม่ควรให้นำหนักกระทำที่สูงมากเกินไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรีซ แรงสูงเนิน .การวิเคราะห์ปัจจัยด้วย SPSS และ AMOS เพื่อการวิจัย พิมพ์ครั้งที่ .1.

กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2554.

กัลยา วานิชย์บัญชา. หลักสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย, 2540.

คมนาคม, กระทรวง. กรมทางหลวง. อุณหภูมิมาตรฐานของถนนของกรมทางหลวง. กรุงเทพฯ:

สำนักพิมพ์กรมทางหลวง, 2539

บุญชัย แสงเพชรงาม, ทวี แสงสุวรรณโณ และแก่นวิทย์ วงศ์ชูศิริการ ใช้ค่าการแอ่นตัวของผิวทาง .

ในการประเมินความแข็งแรงของถนนสร้างใหม่ .เอกสารการประชุมวิชาการการขนส่ง
แห่งชาติครั้งที่ 7. (ตุลาคม 2553) : 67.

ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์

แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ภาษาอังกฤษ

Ahlvin, R.G., and Ulery, H.H. Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains and Deflections Beneath Uniform Circular Load on a Homogeneous Half Space. Bulletin of National Research Council 342 (1968) : 1-13.

American Society for Testing and Material. Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements. [ASTM], D4695-03, West Conshohocken, PA, 2005.

American Society for Testing and Material. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. [ASTM], D1883-07, West Conshohocken, PA, 2005.

American Society for Testing and Material. Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device. [ASTM], D4694-96, West Conshohocken, PA, 2005.

Boussinesq, J.V. Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, Paris: Gauthier-Villars, 1885.

- Burmister, D.M. The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Application to the Design of Airport Runways. Proceedings of Highway Research Board 23 (1943) : 126-148
- Chang, J.R., Lin, J.D., Chung, W.C., and Chen, D.H. Evaluating the Structural Strength of Flexible Pavements in Taiwan Using the Falling Weight Deflectometer. The International Journal of Pavement Engineering 3 (2002) : 131–141.
- Chatterjee, S., and Price, B. Regression Analysis By Example. 2nded. New York : Wiley-Interscience, 1993.
- Chen, D.H., Bilyeu, J., and Murphy, M.R. Temperature correction on FWD measurements. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1716 (2000) : 30–39.
- Chen, D. H., Lin, D. F., Pen-Hwang Liau, P. H., and Bilyeu, J. A correlation between Dynamic Cone Penetrometer values and pavement layer moduli, Geotechnical Testing Journal (28)1 (2005) : 42-49
- Dong, Q.X., Hachiya, Y., Takahashi, O., Tsubokawa, Y., and Matsui, K. An efficient backcalculation algorithm of time domain for large-scale pavement structures using Ritz vectors. Finite Elements in Analysis and Design 38 (2002) : 1131-1150.
- Edil, T.B., and Sawangsuriya, A. Investigation of the DCP and the SSG as Alternative Methods to Determine Subgrade Stability. Report No. 0092-01-05, Wisconsin Department of Transportation, Wisconsin, 2005.
- Haeni, F.P. Application of Seismic-Refraction techniques to hydrologic studies. Washington : United states government printing office, 1988.
- Heukelom, W., and Foster, C.R. Dynamic Testing of Pavements. Journal of the soil mechanics and foundations division 86(1) (1960) : 1-28.
- Heukelom, W., and Klomp, A.J.G. Dynamic testing as a means of controlling pavement during and after construction. Proceedings of the 2nd international conference on the structural design of asphalt pavement (1962) : 667-679.
- Horak, E. Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. Journal of the South African Institution of Civil Engineering 50(2) (2008) : 2–9.

- Huang, Y.H. Pavement Analysis and Design. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- Irwin, L.H. User's guide to Modcomp2. Version 2.1. Local Roads Program. Report No. 83-8, Cornell University, New York, 1983.
- Ji, Y., Wang, F., Luan, M., and Guo, Z. A Simplified Method for Dynamic Response of Flexible Pavement And Applications in Time domain Backcalculation. The Journal of American Science 2(2) (2006) : 70-81.
- Kausel, E., and Roesset, J.M. Stiffness matrices for layered soils. Bulletin of the Seismological Society of America 71 (1981) : 1743-1761.
- Kim, Y.R., Hibbs, B.O., and Lee, Y.C. Temperature correction of deflections and backcalculated asphalt concrete moduli. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1473 (1995) : 55-62.
- National Cooperative Highway Research Program. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington, D.C. : The American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- Odemark, N. Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of pavements According to the Theory of Elasticity. Meddlande 77, Statens Vaginstitut, Stockholm, 1949.
- Paterson, W.D.O. Road Deterioration and Maintenance Effects. Washington, D.C.: World Bank Publications, 1987.
- Rajapakse, R.K.N.D., and Wang, Y. Transient Response of A Layered Pavement. Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering (1995) : 423-431.
- Rohde, G.T. Determining Pavement Structural Number from FWD Testing. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1448 (1994) : 61-68.
- Scala, A. J. Simple Methods of Flexible Pavement Design Using Cone Penetrometers. New Zealand Engineering 11(2) (1956) : 34-44.
- Talvik, O., and Aavik, A. Use of Fwd Deflection Basin Parameters (SCI, BDI, BCI) for Pavement Condition Assessment. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 4(4) (2006) : 196-202.

- Transport and Communications, Ministry. Department of Highways. Repeatability & Reproducibility of FWD Measurements. Bangkok, 2001.
- Washington State Department of Transportation. EVERSERIES[®] User's Guide Pavement Analysis Computer Software and Case studies. Washington, D.C., 2005.
- Washington State Department of Transportation. WSDOT Pavement guide[Online]. Available from: <http://training.ce.washington.edu/wsdot/> [2010, January 25]
- Wimsatt, A. Direct Analysis Methods for Falling Weight Deflectometer Deflection Data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1655 (1999) : 135-144.
- Xu, B., Ranjithan, S.R., and Kim, Y.R. Case studies: Using APLCAP for asphalt pavement layer condition assessment . Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1860 (2003) : 66–75.
- Zhang, Z.C., Claros, G., Manuel, L., and Damnjanovic, I. Development of Structural Condition Index to Support Pavement Maintenance and Rehabilitation Decisions at Network Level. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1827 (2003) : 10–17.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รายละเอียดข้อมูลการทดสอบในภาคสนามแต่ละสายทาง

ตารางที่ ก1 รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สัมพัทธ์การความถดถอย

No.	Factor							Response										
	A	B	C	D	E	F	G	Deflection (um) & Radial offset (cm)										
	Elastic Modulus (MPa)				Thickness (cm)			0	10	20	30	45	60	90	120	150	180	
	Surface	Base	Subbase	Subgrade	Surface	Base	Subbase	d0	d10	d20	d30	d45	d60	d90	d120	d150	d180	
1	3000	700	700	250	7.5	17.5	17.5	290.69	262.30	188.38	144.50	109.46	88.28	61.68	45.93	36.01	29.44	
2	2000	1000	400	200	5.0	15.0	15.0	371.11	340.14	249.50	197.73	149.17	116.63	77.33	56.17	43.79	35.93	
3	2000	400	1000	100	10.0	20.0	15.0	475.98	440.32	343.81	283.21	230.35	196.82	149.80	117.17	94.04	77.34	
4	3000	700	700	50	7.5	17.5	17.5	616.48	586.00	506.02	452.81	399.53	357.47	288.34	234.28	192.28	159.81	
5	4000	400	400	100	5.0	20.0	20.0	581.29	525.45	393.73	310.84	246.68	206.43	151.69	116.23	92.31	75.64	
6	3000	700	100	150	7.5	17.5	17.5	484.46	448.91	356.13	287.66	216.49	167.05	106.84	75.54	58.18	47.62	
7	2000	400	1000	100	5.0	15.0	20.0	551.01	496.96	358.36	290.10	242.23	207.67	154.83	118.72	93.83	76.40	
8	2000	1000	400	100	5.0	15.0	15.0	526.13	493.24	397.13	337.22	273.70	225.41	158.24	116.69	90.49	73.42	
9	4000	400	1000	100	10.0	15.0	20.0	408.93	383.23	316.75	267.85	220.68	189.78	146.52	116.06	94.05	77.85	
10	4000	1000	400	200	5.0	20.0	15.0	322.93	295.41	223.11	179.51	140.21	113.13	78.07	57.53	44.84	36.57	
11	2000	1000	1000	200	5.0	20.0	20.0	289.05	264.10	188.26	153.53	125.67	106.02	77.78	59.03	46.40	37.73	
12	4000	400	1000	200	10.0	15.0	15.0	317.84	292.33	226.46	178.73	134.58	108.19	76.38	57.40	45.25	37.06	
13	4000	400	1000	200	5.0	15.0	20.0	397.11	348.07	233.25	170.21	131.00	108.15	76.87	57.70	45.41	37.14	
14	2000	400	400	200	5.0	15.0	20.0	490.70	431.03	279.74	199.62	144.51	113.14	76.37	56.24	44.11	36.23	
15	4000	400	1000	100	5.0	15.0	15.0	556.86	504.94	382.24	308.16	250.74	211.25	154.42	117.50	92.70	75.58	
16	4000	400	400	100	10.0	20.0	15.0	468.94	440.63	367.20	309.05	248.07	206.54	151.60	116.29	92.38	75.69	

ตารางที่ ก1(ต่อ) รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการความถดถอย

No.	Factor							Response									
	A	B	C	D	E	F	G	Deflection (um) & Radial offset (cm)									
	Elastic Modulus (MPa)				Thickness (cm)			0	10	20	30	45	60	90	120	150	180
	Surface	Base	Subbase	Subgrade	Surface	Base	Subbase	d0	d10	d20	d30	d45	d60	d90	d120	d150	d180
17	4000	400	1000	100	5.0	20.0	20.0	512.71	460.89	339.48	269.32	221.86	192.51	148.11	116.65	94.16	77.72
18	4000	400	400	100	10.0	20.0	20.0	451.12	423.28	351.14	294.88	237.26	198.96	148.67	115.71	92.80	76.45
19	4000	1000	400	200	10.0	20.0	20.0	261.28	243.74	195.27	162.63	130.09	107.52	77.28	58.34	45.92	37.48
20	2000	1000	1000	200	10.0	20.0	15.0	268.94	248.52	185.05	152.92	124.82	105.32	77.51	59.00	46.46	37.82
21	2000	400	400	200	10.0	20.0	20.0	387.05	350.77	252.85	191.14	139.04	109.70	76.19	57.02	44.94	36.87
22	4000	1000	1000	100	5.0	15.0	15.0	429.59	402.45	330.66	286.50	243.06	208.69	156.16	119.61	94.19	76.42
23	2000	1000	400	200	5.0	15.0	20.0	361.41	330.93	241.57	191.53	145.55	114.98	77.56	56.77	44.29	36.25
24	4000	400	400	200	10.0	15.0	20.0	345.93	318.68	248.26	194.77	142.86	111.52	76.16	56.65	44.58	36.59
25	4000	1000	1000	200	10.0	15.0	15.0	252.70	235.75	188.78	158.02	127.94	106.89	77.65	58.71	46.12	37.53
26	2000	400	1000	100	5.0	20.0	20.0	544.85	488.79	346.25	275.65	229.31	198.70	151.57	118.18	94.48	77.43
27	4000	1000	400	100	10.0	15.0	20.0	392.18	372.87	319.58	280.24	236.36	202.62	152.68	118.17	93.94	76.75
28	2000	400	400	200	10.0	20.0	15.0	394.41	357.86	259.19	196.41	142.55	111.67	76.41	56.70	44.55	36.54
29	2000	1000	1000	200	10.0	20.0	20.0	258.04	237.95	175.42	144.63	118.80	101.34	76.24	58.98	46.91	38.35
30	4000	1000	1000	100	10.0	20.0	20.0	317.72	301.07	254.88	225.06	195.92	174.59	141.12	115.28	95.19	79.59
31	2000	1000	400	100	10.0	20.0	20.0	399.33	377.00	308.36	269.05	229.07	198.32	151.61	118.41	94.60	77.44
32	2000	1000	1000	200	10.0	15.0	20.0	268.94	248.52	185.05	152.92	124.82	105.32	77.51	59.00	46.46	37.82

ตารางที่ ก1(ต่อ) (รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการความถดถอย

No.	Factor							Response									
	A	B	C	D	E	F	G	Deflection (um) & Radial offset (cm)									
	Elastic Modulus (MPa)				Thickness (cm)			0	10	20	30	45	60	90	120	150	180
	Surface	Base	Subbase	Subgrade	Surface	Base	Subbase	d0	d10	d20	d30	d45	d60	d90	d120	d150	d180
33	4000	1000	400	200	5.0	15.0	20.0	342.43	312.82	235.67	187.09	142.94	113.70	77.51	57.02	44.53	36.42
34	2000	400	1000	200	5.0	20.0	15.0	444.82	388.90	246.93	177.60	134.99	110.13	77.28	57.54	45.09	36.83
35	4000	1000	400	100	5.0	20.0	20.0	431.70	403.59	329.56	283.17	238.03	203.77	153.12	118.25	93.89	76.65
36	2000	400	400	100	5.0	15.0	15.0	672.22	609.07	448.20	354.58	276.86	224.48	155.81	115.09	89.73	73.15
37	4000	400	1000	200	5.0	20.0	20.0	402.16	351.22	232.33	166.03	125.96	104.79	76.07	57.77	45.76	37.52
38	4000	1000	400	200	5.0	20.0	20.0	315.99	288.73	217.13	174.53	136.84	111.14	77.76	57.83	45.25	36.92
39	4000	400	1000	200	10.0	20.0	15.0	316.08	290.21	223.53	175.09	130.83	105.30	75.47	57.39	45.52	37.39
40	2000	400	1000	200	10.0	15.0	15.0	362.06	327.95	235.48	180.12	135.34	109.43	77.03	57.53	45.17	36.92
41	4000	400	1000	200	10.0	20.0	20.0	303.95	278.47	212.90	166.06	124.50	101.37	74.44	57.42	45.89	37.82
42	3000	700	700	150	7.5	17.5	12.5	379.04	349.22	271.31	221.70	176.72	145.92	103.97	77.74	60.79	49.46
43	2000	1000	1000	200	10.0	15.0	15.0	282.37	261.44	196.59	162.55	131.40	109.32	78.42	58.68	45.82	37.21
44	4000	400	400	200	5.0	15.0	20.0	462.33	407.32	278.04	199.05	142.82	111.94	76.02	56.23	44.20	36.32
45	2000	400	400	100	5.0	20.0	20.0	615.28	554.71	400.72	316.32	252.51	210.90	153.72	116.85	92.23	75.31
46	3000	700	1300	150	7.5	17.5	17.5	331.22	303.86	232.38	190.97	157.51	135.03	101.79	78.79	62.70	51.25
47	2000	400	400	100	10.0	15.0	15.0	547.95	509.34	404.86	333.46	263.98	217.15	155.03	116.35	91.25	74.36
48	3000	700	700	150	2.5	17.5	17.5	429.67	392.38	277.34	224.42	179.90	148.15	104.62	77.69	60.52	49.19

ตารางที่ ก1(ต่อ) (รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการความถดถอย

No.	Factor							Response										
	A	B	C	D	E	F	G	Deflection (um) & Radial offset (cm)										
	Elastic Modulus (MPa)				Thickness (cm)			0	10	20	30	45	60	90	120	150	180	
	Surface	Base	Subbase	Subgrade	Surface	Base	Subbase	d0	d10	d20	d30	d45	d60	d90	d120	d150	d180	
49	4000	1000	1000	200	5.0	15.0	15.0	303.41	277.43	208.94	169.75	135.62	111.42	78.43	58.15	45.28	36.82	
50	2000	1000	1000	100	5.0	20.0	15.0	421.51	395.09	315.12	274.28	235.35	204.20	155.21	120.01	94.97	77.18	
51	2000	1000	400	100	10.0	15.0	20.0	432.26	408.35	335.64	291.25	244.17	208.01	154.73	118.49	93.54	76.15	
52	2000	400	1000	200	10.0	15.0	20.0	346.28	312.87	222.28	169.51	128.72	105.92	76.61	57.99	45.78	37.45	
53	2000	400	400	200	5.0	15.0	15.0	502.77	442.36	289.12	206.50	147.97	114.34	75.90	55.61	43.65	35.93	
54	4000	400	1000	100	10.0	20.0	20.0	400.89	374.83	307.55	258.04	211.17	181.88	142.39	114.30	93.60	78.09	
55	4000	1000	400	100	10.0	15.0	15.0	409.39	389.65	335.14	294.00	246.98	210.17	155.65	118.65	93.34	75.83	
56	2000	400	400	100	10.0	20.0	15.0	524.34	486.55	384.34	316.14	251.92	209.64	153.12	116.71	92.29	75.42	
57	4000	400	1000	200	5.0	20.0	15.0	418.37	366.67	245.74	176.69	132.46	108.18	76.51	57.38	45.20	37.02	
58	4000	400	1000	200	10.0	15.0	20.0	303.40	278.44	214.11	168.53	127.85	104.33	75.64	57.66	45.77	37.57	
59	4000	400	400	200	10.0	20.0	15.0	345.93	318.68	248.26	194.77	142.86	111.52	76.16	56.65	44.58	36.59	
60	4000	1000	1000	100	10.0	15.0	20.0	336.96	319.90	272.55	241.02	208.84	184.49	146.28	117.43	95.61	79.11	
61	2000	1000	400	100	5.0	20.0	15.0	475.53	446.17	358.64	308.47	256.85	216.52	157.47	118.45	92.50	74.97	
62	2000	400	400	200	10.0	15.0	20.0	394.41	357.86	259.19	196.41	142.55	111.67	76.41	56.70	44.55	36.54	
63	4000	1000	1000	200	10.0	20.0	20.0	230.24	213.98	168.95	140.95	115.50	98.61	74.88	58.52	46.92	38.57	
64	4000	400	400	200	5.0	15.0	15.0	473.88	418.21	287.18	205.90	146.44	113.36	75.70	55.66	43.74	36.01	

ตารางที่ ก1(ต่อ) (รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการความถดถอย

No.	Factor							Response										
	A	B	C	D	E	F	G	Deflection (um) & Radial offset (cm)										
	Elastic Modulus (MPa)				Thickness (cm)			0	10	20	30	45	60	90	120	150	180	
	Surface	Base	Subbase	Subgrade	Surface	Base	Subbase	d0	d10	d20	d30	d45	d60	d90	d120	d150	d180	
65	2000	400	400	200	10.0	15.0	15.0	403.33	366.39	266.65	202.39	146.21	113.48	76.37	56.23	44.10	36.22	
66	2000	400	400	100	5.0	20.0	15.0	640.47	578.89	422.17	334.02	264.32	217.90	155.22	116.29	91.13	74.26	
67	3000	700	700	150	7.5	22.5	17.5	345.14	316.58	242.09	197.22	159.83	135.43	101.21	78.16	62.21	50.94	
68	4000	1000	400	100	5.0	15.0	20.0	473.63	442.80	362.14	308.21	253.83	213.26	155.55	117.77	92.50	75.23	
69	3000	700	700	150	7.5	12.5	17.5	379.04	349.22	271.31	221.70	176.72	145.92	103.97	77.74	60.79	49.46	
70	4000	1000	1000	100	10.0	20.0	15.0	336.96	319.90	272.55	241.02	208.84	184.49	146.28	117.43	95.61	79.11	
71	4000	400	400	200	5.0	20.0	15.0	462.33	407.32	278.04	199.05	142.82	111.94	76.02	56.23	44.20	36.32	
72	4000	400	1000	100	10.0	15.0	15.0	436.81	410.26	341.42	289.16	236.35	200.43	150.67	117.08	93.62	76.86	
73	4000	400	400	200	5.0	20.0	20.0	453.09	398.52	270.41	193.02	139.21	110.19	76.04	56.65	44.62	36.64	
74	2000	1000	400	200	10.0	20.0	20.0	291.76	270.09	203.35	167.05	133.12	109.53	77.90	58.33	45.71	37.25	
75	4000	400	1000	200	5.0	15.0	15.0	417.13	366.96	249.15	182.24	137.64	111.18	76.91	57.06	44.73	36.60	
76	2000	1000	400	200	5.0	20.0	15.0	340.78	312.70	228.84	184.25	143.30	114.79	78.23	57.25	44.53	36.35	
77	4000	400	1000	100	5.0	15.0	20.0	518.89	468.69	350.57	282.57	234.10	201.34	151.71	117.69	93.93	76.97	
78	4000	400	400	100	5.0	15.0	20.0	605.38	548.64	414.45	328.14	258.52	213.73	153.65	116.03	91.40	74.66	
79	4000	1000	1000	200	10.0	15.0	20.0	240.34	223.80	177.98	148.83	121.41	102.68	76.41	58.78	46.63	38.11	
80	3000	700	700	150	12.5	17.5	17.5	303.13	284.54	230.26	195.11	159.76	135.19	101.08	78.18	62.27	51.00	

ตารางที่ ก1(ต่อ) (รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการความถดถอย

No.	Factor							Response										
	A	B	C	D	E	F	G	Deflection (um) & Radial offset (cm)										
	Elastic Modulus (MPa)				Thickness (cm)			0	10	20	30	45	60	90	120	150	180	
	Surface	Base	Subbase	Subgrade	Surface	Base	Subbase	d0	d10	d20	d30	d45	d60	d90	d120	d150	d180	
81	4000	400	400	200	10.0	20.0	20.0	339.20	312.16	242.36	189.76	139.37	109.41	75.77	56.87	44.92	36.90	
82	4000	400	400	100	5.0	15.0	15.0	635.66	577.52	439.61	348.33	271.29	220.84	154.81	115.18	90.14	73.55	
83	4000	1000	400	100	5.0	15.0	15.0	497.42	465.74	382.75	325.59	266.01	220.94	157.50	117.28	91.30	74.07	
84	2000	1000	400	100	10.0	15.0	15.0	451.35	426.88	352.63	306.03	255.19	215.49	157.22	118.51	92.65	75.11	
85	4000	400	1000	100	10.0	20.0	15.0	424.27	397.60	328.61	276.61	225.39	192.01	146.84	115.83	93.67	77.49	
86	4000	1000	1000	100	5.0	20.0	20.0	373.76	348.45	281.64	244.36	211.95	187.20	147.74	118.05	95.74	78.99	
87	4000	400	400	100	10.0	15.0	20.0	468.94	440.63	367.20	309.05	248.07	206.54	151.60	116.29	92.38	75.69	
88	4000	1000	1000	200	5.0	20.0	15.0	287.00	261.79	195.33	158.83	128.70	107.57	77.86	58.70	46.04	37.45	
89	4000	400	400	200	10.0	15.0	15.0	353.96	326.39	255.14	200.45	146.57	113.55	76.32	56.27	44.16	36.27	
90	4000	1000	400	200	5.0	15.0	15.0	351.47	321.45	243.16	193.07	146.60	115.53	77.46	56.50	44.05	36.08	
91	2000	400	400	100	10.0	20.0	20.0	504.95	467.73	367.11	301.20	240.91	202.27	150.64	116.51	92.96	76.30	
92	2000	1000	1000	200	5.0	15.0	15.0	320.24	293.90	214.31	174.56	139.11	113.52	78.80	57.88	44.90	36.51	
93	4000	1000	400	200	10.0	20.0	15.0	266.50	248.82	199.95	166.72	133.14	109.58	77.92	58.30	45.65	37.18	
94	4000	1000	400	200	10.0	15.0	15.0	285.90	267.14	215.46	178.71	140.27	113.26	78.20	57.60	44.86	36.58	
95	2000	1000	1000	200	5.0	15.0	20.0	302.82	277.34	200.02	163.26	132.19	109.90	78.57	58.65	45.73	37.13	
96	2000	400	1000	100	5.0	15.0	15.0	590.69	534.74	391.10	316.22	258.75	217.07	156.75	117.88	92.24	74.89	

ตารางที่ ก1(ต่อ) (รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการความถดถอย

No.	Factor							Response									
	A	B	C	D	E	F	G	Deflection (um) & Radial offset (cm)									
	Elastic Modulus (MPa)				Thickness (cm)			0	10	20	30	45	60	90	120	150	180
	Surface	Base	Subbase	Subgrade	Surface	Base	Subbase	d0	d10	d20	d30	d45	d60	d90	d120	d150	d180
97	2000	1000	1000	100	10.0	15.0	20.0	372.75	351.70	286.41	251.45	217.73	191.66	150.12	118.99	95.83	78.66
98	2000	1000	400	100	10.0	20.0	15.0	414.32	391.63	321.99	281.21	238.61	205.27	154.57	119.07	94.20	76.67
99	2000	400	1000	200	5.0	20.0	20.0	428.03	372.94	233.17	166.80	128.57	106.94	77.08	58.10	45.73	37.35
100	4000	1000	1000	200	5.0	20.0	20.0	274.01	249.28	184.16	149.50	122.28	103.59	76.82	58.88	46.60	38.03
101	4000	1000	400	100	10.0	20.0	15.0	375.68	357.31	306.41	270.02	230.12	199.14	152.04	118.54	94.58	77.33
102	4000	1000	400	100	10.0	20.0	20.0	362.07	343.99	293.91	258.73	221.03	192.28	148.78	117.50	94.68	77.93
103	2000	1000	1000	100	5.0	20.0	20.0	395.13	369.53	291.76	254.03	220.24	193.70	151.14	119.34	95.82	78.49
104	2000	1000	400	100	5.0	15.0	20.0	500.36	468.47	375.07	318.90	261.28	217.98	156.86	117.61	91.88	74.60
105	2000	1000	1000	100	5.0	15.0	15.0	454.94	427.26	343.85	298.38	252.24	215.04	158.36	119.65	93.41	75.51
106	2000	400	1000	200	5.0	15.0	20.0	422.12	369.35	234.39	171.60	133.93	110.31	77.71	57.85	45.26	36.91
107	2000	1000	1000	100	10.0	20.0	15.0	372.75	351.70	286.41	251.45	217.73	191.66	150.12	118.99	95.83	78.66
108	3000	700	700	150	7.5	17.5	17.5	360.26	331.20	255.33	208.52	167.90	140.68	102.84	78.17	61.63	50.26
109	2000	400	1000	100	10.0	15.0	20.0	458.56	424.28	331.20	274.60	226.40	195.30	149.84	117.57	94.46	77.68
110	2000	400	1000	100	5.0	20.0	15.0	576.84	519.53	373.57	298.30	244.69	208.21	154.35	118.15	93.42	76.16
111	2000	400	400	200	5.0	20.0	20.0	481.09	421.90	271.89	193.50	140.98	111.54	76.53	56.75	44.56	36.54
112	4000	1000	1000	100	5.0	20.0	15.0	398.39	372.36	303.59	263.54	226.54	197.64	152.27	119.28	95.33	77.93

ตารางที่ ก1(ต่อ) (รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการความถดถอย

No.	Factor							Response										
	A	B	C	D	E	F	G	Deflection (um) & Radial offset (cm)										
	Elastic Modulus (MPa)				Thickness (cm)			0	10	20	30	45	60	90	120	150	180	
	Surface	Base	Subbase	Subgrade	Surface	Base	Subbase	d0	d10	d20	d30	d45	d60	d90	d120	d150	d180	
113	4000	1000	1000	200	5.0	15.0	20.0	287.00	261.79	195.33	158.83	128.70	107.57	77.86	58.70	46.04	37.45	
114	3000	100	700	150	7.5	17.5	17.5	724.00	643.94	455.72	310.45	193.60	143.26	99.22	74.28	58.74	48.53	
115	3000	700	700	150	7.5	17.5	22.5	345.14	316.58	242.09	197.22	159.83	135.43	101.21	78.16	62.21	50.94	
116	4000	400	400	100	10.0	15.0	15.0	490.32	461.37	386.15	325.41	260.01	214.42	154.08	116.33	91.55	74.71	
117	2000	1000	1000	100	10.0	15.0	15.0	398.50	376.70	309.36	271.48	232.87	202.34	154.45	119.87	95.11	77.40	
118	2000	1000	400	200	10.0	15.0	15.0	319.08	295.81	225.00	183.67	142.98	114.64	78.26	57.31	44.57	36.38	
119	4000	1000	1000	200	10.0	20.0	15.0	240.34	223.80	177.98	148.83	121.41	102.68	76.41	58.78	46.63	38.11	
120	4000	1000	400	100	5.0	20.0	15.0	449.79	421.17	345.69	297.24	248.60	211.09	155.81	118.55	93.20	75.72	
121	2000	400	400	100	5.0	15.0	20.0	640.47	578.89	422.17	334.02	264.32	217.90	155.22	116.29	91.13	74.26	
122	2000	400	400	200	5.0	20.0	15.0	490.70	431.03	279.74	199.62	144.51	113.14	76.37	56.24	44.11	36.23	
123	4000	400	400	100	5.0	20.0	15.0	605.38	548.64	414.45	328.14	258.52	213.73	153.65	116.03	91.40	74.66	
124	2000	1000	400	200	10.0	15.0	20.0	311.86	288.86	218.80	178.51	139.53	112.66	78.04	57.68	45.02	36.73	
125	2000	1000	1000	100	10.0	20.0	20.0	351.90	331.35	267.45	234.52	204.35	181.70	145.38	117.38	95.89	79.48	
126	2000	400	1000	200	5.0	15.0	15.0	442.92	388.90	250.69	183.74	140.39	113.05	77.47	57.04	44.53	36.39	
127	2000	400	1000	100	10.0	20.0	20.0	450.87	415.95	321.50	263.86	216.02	187.03	145.96	116.19	94.39	78.22	
128	4000	1000	400	200	10.0	15.0	20.0	279.37	260.82	209.74	173.85	136.85	111.15	77.78	57.85	45.26	36.93	

ตารางที่ ก1(ต่อ) (รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการความถดถอย

No.	Factor							Response									
	A	B	C	D	E	F	G	Deflection (um) & Radial offset (cm)									
	Elastic Modulus (MPa)				Thickness (cm)			0	10	20	30	45	60	90	120	150	180
	Surface	Base	Subbase	Subgrade	Surface	Base	Subbase	d0	d10	d20	d30	d45	d60	d90	d120	d150	d180
129	2000	400	1000	200	10.0	20.0	20.0	348.00	313.76	221.26	166.67	124.84	102.75	75.55	57.90	46.03	37.79
130	4000	400	1000	100	5.0	20.0	15.0	543.42	490.45	365.91	291.45	237.20	202.32	151.48	117.19	93.49	76.65
131	2000	1000	400	100	5.0	20.0	20.0	455.92	427.16	341.30	293.49	245.86	209.18	155.16	118.54	93.44	76.02
132	1000	700	700	150	7.5	17.5	17.5	413.53	379.38	266.66	216.87	175.17	145.81	104.58	78.23	61.07	49.60
133	2000	400	400	100	10.0	15.0	20.0	524.34	486.55	384.34	316.14	251.92	209.64	153.12	116.71	92.29	75.42
134	3000	1300	700	150	7.5	17.5	17.5	305.40	286.05	230.37	197.33	164.64	139.94	103.61	79.03	62.23	50.59
135	2000	1000	400	200	10.0	20.0	15.0	297.47	275.63	208.41	171.40	136.26	111.54	78.38	58.17	45.36	36.92
136	4000	1000	1000	100	5.0	15.0	20.0	398.39	372.36	303.59	263.54	226.54	197.64	152.27	119.28	95.33	77.93
137	2000	1000	400	200	5.0	20.0	20.0	333.35	305.56	222.50	179.03	139.88	112.88	78.08	57.65	44.98	36.70
138	5000	700	700	150	7.5	17.5	17.5	338.78	313.24	249.72	205.39	165.08	138.44	101.87	77.93	61.72	50.46
139	2000	1000	1000	200	5.0	20.0	15.0	302.82	277.34	200.02	163.26	132.19	109.90	78.57	58.65	45.73	37.13
140	2000	400	1000	200	10.0	20.0	15.0	361.10	326.38	232.55	176.07	131.14	106.43	76.31	57.68	45.55	37.31
141	2000	1000	1000	100	5.0	15.0	20.0	421.51	395.09	315.12	274.28	235.35	204.20	155.21	120.01	94.97	77.18
142	2000	400	1000	100	10.0	15.0	15.0	488.83	453.49	357.50	296.84	242.08	205.43	153.22	117.94	93.59	76.46
143	4000	1000	1000	100	10.0	15.0	15.0	360.64	342.96	293.92	259.96	223.61	195.32	151.27	119.01	95.41	78.13

ภาคผนวก ข

รายละเอียดการวิเคราะห์สมการความถดถอยของทุกพารามิเตอร์ในแต่ละชั้นทาง

ตารางที่ ข1 รายละเอียดแบบจำลองทั้งหมดจากการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นผิวทาง

No.	Surface : Model Summary										
	Constant	Deflection parameter						Thickness			Adjusted R ²
		1	Coef.	2	Coef.	3	Coef.	H _{Surface}	H _{Base}	H _{Subbase}	
1	4.466	Δd_{0-30}	-0.917	Δd_{30-60}	0.975	Δd_{90-120}	-0.445	-0.024	-	-	0.188
2	4.396	Δd_{0-30}	-0.813	Δd_{30-60}	0.728	$\Delta d_{120-180}$	-0.238	-0.020	-	-	0.154
3	4.291	Δd_{0-30}	-0.787	Δd_{30-60}	0.675	$\Delta d_{150-180}$	-0.193	-0.020	-	-	0.145
4	4.352	Δd_{0-30}	-0.366	Δd_{45-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	-	-0.012	-	-	0.077
5	4.352	Δd_{0-30}	-0.366	Δd_{45-60}	-	$\Delta d_{150-180}$	-	-0.012	-	-	0.077
6	3.704	Δd_{0-10}	-0.169	Δd_{30-60}	-	Δd_{90-120}	-	-	-	-	0.029
7	3.704	Δd_{0-10}	-0.169	Δd_{30-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	-	-	-	-	0.029
8	3.704	Δd_{0-10}	-0.169	Δd_{30-60}	-	$\Delta d_{150-180}$	-	-	-	-	0.029
9	3.704	Δd_{0-10}	-0.169	Δd_{30-45}	-	Δd_{60-120}	-	-	-	-	0.029
10	3.704	Δd_{0-10}	-0.169	Δd_{30-45}	-	Δd_{60-90}	-	-	-	-	0.029
11	3.704	Δd_{0-10}	-0.169	Δd_{30-45}	-	Δd_{90-120}	-	-	-	-	0.029
12	3.704	Δd_{0-10}	-0.169	Δd_{30-45}	-	$\Delta d_{120-180}$	-	-	-	-	0.029
13	3.704	Δd_{0-10}	-0.169	Δd_{30-45}	-	$\Delta d_{150-180}$	-	-	-	-	0.029
14	3.704	Δd_{0-10}	-0.169	Δd_{45-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	-	-	-	-	0.029
15	3.704	Δd_{0-10}	-0.169	Δd_{45-60}	-	$\Delta d_{150-180}$	-	-	-	-	0.029
16	4.534	Δd_{10-20}	-1.083	Δd_{30-60}	1.026	Δd_{90-120}	-0.478	-0.032	-	-	0.342

ตารางที่ ข1(ต่อ) รายละเอียดแบบจำลองทั้งหมดจากการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นผิวทาง

No.	Surface : Model Summary										
	Constant	Deflection parameter						Thickness			Adjusted R ²
		1	Coef.	2	Coef.	3	Coef.	H _{Surface}	H _{Base}	H _{Subbase}	
17	4.498	Δd_{10-20}	-1.007	Δd_{30-60}	0.806	$\Delta d_{120-180}$	-0.273	-0.029	-	-	0.304
18	4.387	Δd_{10-20}	-0.987	Δd_{30-60}	0.759	$\Delta d_{150-180}$	-0.229	-0.028	-	-	0.295
19	5.212	Δd_{10-20}	-1.316	Δd_{30-45}	1.292	Δd_{60-120}	-0.579	-0.040	-	-	0.332
20	5.182	Δd_{10-20}	-1.370	Δd_{30-45}	1.472	Δd_{60-90}	-0.747	-0.043	-	-	0.358
21	4.896	Δd_{10-20}	-1.255	Δd_{30-45}	1.107	Δd_{90-120}	-0.406	-0.037	-	-	0.303
22	4.790	Δd_{10-20}	-1.187	Δd_{30-45}	0.943	$\Delta d_{120-180}$	-0.241	-0.033	-	-	0.358
23	4.674	Δd_{10-20}	-1.165	Δd_{30-45}	0.901	$\Delta d_{150-180}$	-0.202	-0.033	-	-	0.367
24	4.666	Δd_{10-20}	-0.756	Δd_{45-60}	0.518	$\Delta d_{120-180}$	-0.243	-0.023	-	-	0.221
25	4.564	Δd_{10-20}	-0.740	Δd_{45-60}	0.467	$\Delta d_{150-180}$	-0.196	-0.022	-	-	0.214
26	-	Δd_{20-30}	-	Δd_{45-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	-	-	-	-	-
27	-	Δd_{20-30}	-	Δd_{45-60}	-	$\Delta d_{150-180}$	-	-	-	-	-

ตารางที่ ๒2 รายละเอียดแบบจำลองทั้งหมดจากการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นพื้นทาง

No.	Base : Model Summary										Adjusted R ²
	Constant	Deflection parameter						Thickness			
		1	Coef.	2	Coef.	3	Coef.	H _{Surface}	H _{Base}	H _{Subbase}	
1	6.201	Δd_{0-30}	-1.514	Δd_{30-60}	-	Δd_{90-120}	0.221	-0.047	-	-	0.814
2	6.252	Δd_{0-30}	-1.487	Δd_{30-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	0.140	-0.047	-	-	0.805
3	6.320	Δd_{0-30}	-1.483	Δd_{30-60}	-	$\Delta d_{150-180}$	0.119	-0.047	-	-	0.803
4	6.321	Δd_{0-30}	-1.623	Δd_{45-60}	0.307	$\Delta d_{120-180}$	-	-0.049	-	-	0.814
5	6.321	Δd_{0-30}	-1.623	Δd_{45-60}	0.307	$\Delta d_{150-180}$	-	-0.049	-	-	0.814
6	5.060	Δd_{0-10}	-1.379	Δd_{30-60}	-	Δd_{90-120}	0.143	-0.054	-	-	0.849
7	5.114	Δd_{0-10}	-1.367	Δd_{30-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	0.090	-0.054	-	-	0.845
8	5.243	Δd_{0-10}	-1.364	Δd_{30-60}	-	$\Delta d_{150-180}$	-	-0.054	-	-	0.842
9	4.898	Δd_{0-10}	-1.179	Δd_{30-45}	-0.391	Δd_{60-120}	0.362	-0.047	-	-	0.860
10	4.918	Δd_{0-10}	-1.124	Δd_{30-45}	-0.548	Δd_{60-90}	0.496	-0.044	-	-	0.868
11	5.086	Δd_{0-10}	-1.235	Δd_{30-45}	-0.243	Δd_{90-120}	0.233	-0.050	-	-	0.853
12	5.114	Δd_{0-10}	-1.367	Δd_{30-45}	-	$\Delta d_{120-180}$	0.090	-0.054	-	-	0.845
13	5.243	Δd_{0-10}	-1.364	Δd_{30-45}	-	$\Delta d_{150-180}$	-	-0.054	-	-	0.842
14	5.111	Δd_{0-10}	-1.421	Δd_{45-60}	0.152	$\Delta d_{120-180}$	-	-0.055	-	-	0.846
15	5.111	Δd_{0-10}	-1.421	Δd_{45-60}	0.152	$\Delta d_{150-180}$	-	-0.055	-	-	0.846
16	5.811	Δd_{10-20}	-1.167	Δd_{30-60}	-0.557	Δd_{90-120}	0.422	-0.043	-	-	0.745

ตารางที่ ข2(ต่อ) รายละเอียดแบบจำลองทั้งหมดจากการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นพื้นทาง

No.	Base : Model Summary										
	Constant	Deflection parameter						Thickness			Adjusted R ²
		1	Coef.	2	Coef.	3	Coef.	H _{Surface}	H _{Base}	H _{Subbase}	
17	5.939	Δd_{10-20}	-1.436	Δd_{30-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	-	-0.050	-	-	0.709
18	5.939	Δd_{10-20}	-1.436	Δd_{30-60}	-	$\Delta d_{150-180}$	-	-0.050	-	-	0.709
19	5.269	Δd_{10-20}	-0.968	Δd_{30-45}	-0.858	Δd_{60-120}	0.592	-0.036	-	-	0.781
20	5.288	Δd_{10-20}	-0.906	Δd_{30-45}	-1.058	Δd_{60-90}	0.776	-0.033	-	-	0.799
21	5.602	Δd_{10-20}	-1.036	Δd_{30-45}	-0.658	Δd_{90-120}	0.404	-0.039	-	-	0.762
22	5.718	Δd_{10-20}	-1.110	Δd_{30-45}	-0.487	$\Delta d_{120-180}$	0.230	-0.042	-	-	0.742
23	5.831	Δd_{10-20}	-1.128	Δd_{30-45}	-0.450	$\Delta d_{150-180}$	0.192	-0.043	-	-	0.737
24	5.939	Δd_{10-20}	-1.436	Δd_{45-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	-	-0.050	-	-	0.709
25	5.939	Δd_{10-20}	-1.436	Δd_{45-60}	-	$\Delta d_{150-180}$	-	-0.050	-	-	0.709
26	5.247	Δd_{20-30}	-1.996	Δd_{45-60}	1.045	$\Delta d_{120-180}$	-0.216	-0.036	-	-	0.909
27	5.166	Δd_{20-30}	-1.994	Δd_{45-60}	1.031	$\Delta d_{150-180}$	-0.204	-0.036	-	-	0.909
28	5.629	Δd_{20-30}	-1.450	-	-	-	-	-0.032	-0.007	-	0.813

ตารางที่ ข3 รายละเอียดแบบจำลองทั้งหมดจากการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นรองพื้นทาง

No.	Subbase : Model Summary										
	Constant	Deflection parameter						Thickness			Adjusted R ²
		1	Coef.	2	Coef.	3	Coef.	H _{Surface}	H _{Base}	H _{Subbase}	
1	4.346	Δd_{0-30}	1.324	Δd_{30-60}	-2.957	Δd_{90-120}	1.021	0.024	-0.016	-0.016	0.588
2	4.350	Δd_{0-30}	1.340	Δd_{30-60}	-2.829	$\Delta d_{120-180}$	0.879	0.021	-0.019	-0.019	0.647
3	4.709	Δd_{0-30}	1.335	Δd_{30-60}	-2.789	$\Delta d_{150-180}$	0.839	0.020	-0.020	-0.020	0.661
4	4.275	Δd_{0-30}	0.868	Δd_{45-60}	-3.026	$\Delta d_{120-180}$	1.322	-	-0.025	-0.025	0.766
5	4.779	Δd_{0-30}	0.875	Δd_{45-60}	-2.943	$\Delta d_{150-180}$	1.232	-	-0.026	-0.026	0.777
6	5.327	Δd_{0-10}	1.145	Δd_{30-60}	-2.848	Δd_{90-120}	1.037	0.028	-0.017	-0.017	0.607
7	5.341	Δd_{0-10}	1.140	Δd_{30-60}	-2.688	$\Delta d_{120-180}$	0.877	0.024	-0.019	-0.019	0.661
8	5.694	Δd_{0-10}	1.130	Δd_{30-60}	-2.641	$\Delta d_{150-180}$	0.833	0.023	-0.020	-0.020	0.673
9	4.130	Δd_{0-10}	1.250	Δd_{30-45}	-2.559	Δd_{60-120}	0.667	0.034	-0.012	-0.013	0.504
10	4.332	Δd_{0-10}	1.200	Δd_{30-45}	-2.508	Δd_{60-90}	0.614	0.033	-0.012	-0.012	0.476
11	4.375	Δd_{0-10}	1.281	Δd_{30-45}	-2.538	Δd_{90-120}	0.656	0.034	-0.014	-0.014	0.540
12	4.382	Δd_{0-10}	1.295	Δd_{30-45}	-2.484	$\Delta d_{120-180}$	0.612	0.032	-0.016	-0.016	0.586
13	4.638	Δd_{0-10}	1.291	Δd_{30-45}	-2.462	$\Delta d_{150-180}$	0.595	0.031	-0.016	-0.017	0.598
14	4.822	Δd_{0-10}	0.791	Δd_{45-60}	-2.928	$\Delta d_{120-180}$	1.308	0.009	-0.025	-0.025	0.765
15	5.467	Δd_{0-10}	0.702	Δd_{45-60}	-2.785	$\Delta d_{150-180}$	1.192	-	-0.026	-0.025	0.770
16	4.611	Δd_{10-20}	1.047	Δd_{30-60}	-2.504	Δd_{90-120}	0.865	0.021	-0.015	-0.015	0.537

ตารางที่ ข3(ต่อ) รายละเอียดแบบจำลองทั้งหมดจากการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นรองพื้นทาง

No.	Subbase : Model Summary										
	Constant	Deflection parameter						Thickness			Adjusted R ²
		1	Coef.	2	Coef.	3	Coef.	H _{Surface}	H _{Base}	H _{Subbase}	
17	4.602	Δd_{10-20}	1.082	Δd_{30-60}	-2.431	$\Delta d_{120-180}$	0.777	0.019	-0.017	-0.017	0.596
18	4.917	Δd_{10-20}	1.086	Δd_{30-60}	-2.407	$\Delta d_{150-180}$	0.749	0.018	-0.018	-0.018	0.611
19	4.009	Δd_{10-20}	0.557	Δd_{30-45}	-1.383	Δd_{60-120}	-	-	-	-	0.351
20	4.009	Δd_{10-20}	0.557	Δd_{30-45}	-1.383	Δd_{60-90}	-	-	-	-	0.351
21	3.727	Δd_{10-20}	1.087	Δd_{30-45}	-2.104	Δd_{90-120}	0.485	0.024	-0.012	-0.012	0.452
22	3.668	Δd_{10-20}	1.134	Δd_{30-45}	-2.115	$\Delta d_{120-180}$	0.503	0.023	-0.013	-0.014	0.498
23	3.870	Δd_{10-20}	1.143	Δd_{30-45}	-2.112	$\Delta d_{150-180}$	0.501	0.023	-0.014	-0.014	0.511
24	4.512	Δd_{10-20}	0.748	Δd_{45-60}	-2.801	$\Delta d_{120-180}$	1.238	-	-0.024	-0.023	0.739
25	4.985	Δd_{10-20}	0.761	Δd_{45-60}	-2.733	$\Delta d_{150-180}$	1.161	-	-0.025	-0.024	0.752
26	4.785	Δd_{20-30}	1.186	Δd_{45-60}	-3.559	$\Delta d_{120-180}$	1.493	-	-0.027	-0.027	0.798
27	5.355	Δd_{20-30}	1.172	Δd_{45-60}	-3.427	$\Delta d_{150-180}$	1.371	-	-0.028	-0.027	0.803
28	4.285	-	-	Δd_{45-60}	-1.007	-	-	-	-	-	0.294

ตารางที่ ๗4 รายละเอียดแบบจำลองทั้งหมดจากการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นดินเดิม

No.	Subgrade : Model Summary										
	Constant	Deflection parameter						Thickness			Adjusted R ²
		1	Coef.	2	Coef.	3	Coef.	H _{Surface}	H _{Base}	H _{Subbase}	
1	3.834	Δd_{0-30}	-0.103	Δd_{30-60}	0.321	Δd_{90-120}	-1.300	-0.009	-0.004	-0.004	0.969
2	3.770	Δd_{0-30}	-0.033	Δd_{30-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	-1.001	-0.003	-0.002	-0.002	0.992
3	3.349	Δd_{0-30}	-	Δd_{30-60}	-0.084	$\Delta d_{150-180}$	-0.930	-0.001	-0.001	-0.001	0.995
4	3.770	Δd_{0-30}	-0.033	Δd_{45-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	-1.001	-0.003	-0.002	-0.002	0.992
5	3.348	Δd_{0-30}	-0.034	Δd_{45-60}	-0.052	$\Delta d_{150-180}$	-0.933	-0.002	-0.001	-0.001	0.995
6	3.756	Δd_{0-10}	-0.109	Δd_{30-60}	0.337	Δd_{90-120}	-1.311	-0.010	-0.004	-0.004	0.970
7	3.750	Δd_{0-10}	-0.034	Δd_{30-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	-1.002	-0.003	-0.002	-0.002	0.992
8	3.349	Δd_{0-10}	-	Δd_{30-60}	-0.084	$\Delta d_{150-180}$	-0.930	-0.001	-0.001	-0.001	0.995
9	4.586	Δd_{0-10}	-0.190	Δd_{30-45}	0.608	Δd_{60-120}	-1.539	-0.015	-0.007	-0.007	0.938
10	4.354	Δd_{0-10}	-0.237	Δd_{30-45}	0.856	Δd_{60-90}	-1.754	-0.019	-0.009	-0.008	0.896
11	3.873	Δd_{0-10}	-0.118	Δd_{30-45}	0.288	Δd_{90-120}	-1.262	-0.010	-0.005	-0.005	0.968
12	3.750	Δd_{0-10}	-0.034	Δd_{30-45}	-	$\Delta d_{120-180}$	-1.002	-0.003	-0.002	-0.002	0.992
13	3.324	Δd_{0-10}	-	Δd_{30-45}	-0.078	$\Delta d_{150-180}$	-0.938	-0.001	-0.001	-0.001	0.996
14	3.732	Δd_{0-10}	-0.045	Δd_{45-60}	0.032	$\Delta d_{120-180}$	-1.016	-0.004	-0.001	-0.001	0.992
15	3.324	Δd_{0-10}	-0.032	Δd_{45-60}	-0.053	$\Delta d_{150-180}$	-0.934	-0.002	-0.001	-0.001	0.995
16	3.798	Δd_{10-20}	-0.056	Δd_{30-60}	0.260	Δd_{90-120}	-1.278	-0.008	-0.005	-0.005	0.967

ตารางที่ ข4(ต่อ) (รายละเอียดแบบจำลองทั้งหมดจากการวิเคราะห์สมการความถดถอยของชั้นดินเดิม)

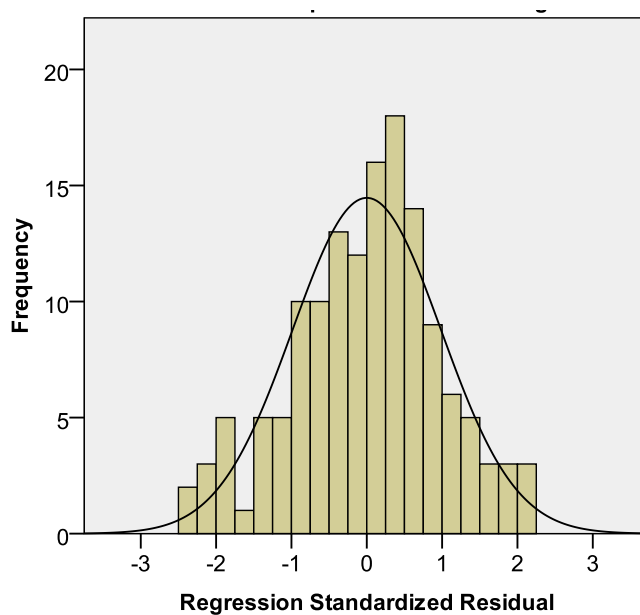
No.	Subgrade : Model Summary										
	Constant	Deflection parameter						Thickness			Adjusted R ²
		1	Coef.	2	Coef.	3	Coef.	H _{Surface}	H _{Base}	H _{Subbase}	
17	3.747	Δd_{10-20}	-0.027	Δd_{30-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	-1.001	-0.003	-0.002	-0.002	0.992
18	3.349	Δd_{10-20}	-	Δd_{30-60}	-0.084	$\Delta d_{150-180}$	-0.930	-0.001	-0.001	-0.001	0.995
19	4.596	Δd_{10-20}	-0.095	Δd_{30-45}	0.471	Δd_{60-120}	-1.482	-0.012	-0.007	-0.007	0.930
20	4.374	Δd_{10-20}	-0.119	Δd_{30-45}	0.672	Δd_{60-90}	-1.666	-0.014	-0.009	-0.009	0.885
21	3.847	Δd_{10-20}	-	Δd_{30-45}	0.156	Δd_{90-120}	-1.222	-0.006	-0.005	-0.005	0.964
22	3.744	Δd_{10-20}	-	Δd_{30-45}	-0.036	$\Delta d_{120-180}$	-0.993	-0.002	-0.002	-0.002	0.992
23	3.324	Δd_{10-20}	-	Δd_{30-45}	-0.078	$\Delta d_{150-180}$	-0.938	-0.001	-0.001	-0.001	0.996
24	3.747	Δd_{10-20}	-0.027	Δd_{45-60}	-	$\Delta d_{120-180}$	-1.001	-0.003	-0.002	-0.002	0.992
25	3.334	Δd_{10-20}	-0.023	Δd_{45-60}	-0.066	$\Delta d_{150-180}$	-0.928	-0.002	-0.001	-0.001	0.995
26	3.737	Δd_{20-30}	-0.078	Δd_{45-60}	0.081	$\Delta d_{120-180}$	-1.032	-0.003	-0.001	-0.001	0.993
27	3.290	Δd_{20-30}	-0.062	Δd_{45-60}	-	$\Delta d_{150-180}$	-0.951	-0.002	-	-	0.995
28	3.176	-	-	-	-	$\Delta d_{150-180}$	-0.956	-	-	-	0.993

ภาคผนวก ค

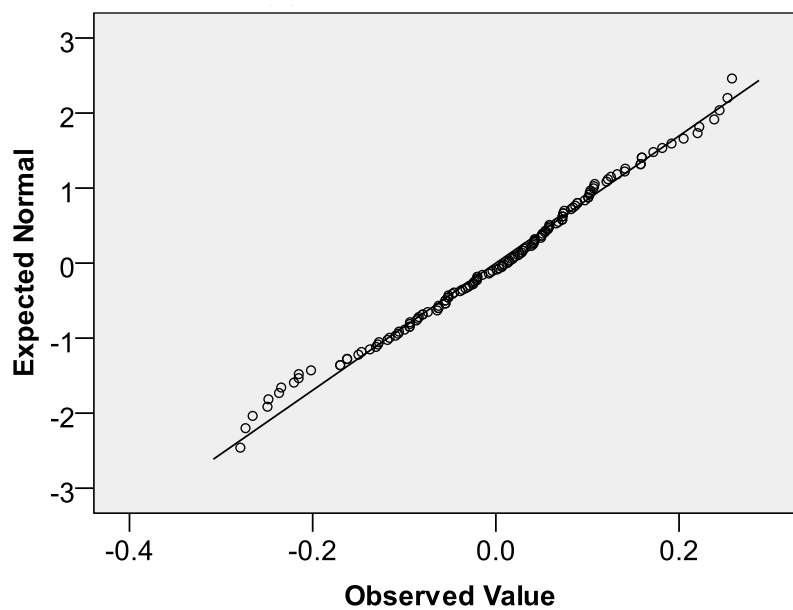
รายละเอียดการทดสอบการแจกแจงและความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน

1. การทดสอบการแจกแจงของค่าความคลาดเคลื่อน

Model 1 : Dependent variable : $\log(E_{\text{Surface}})$



รูปที่ ค1 ฮิสโตแกรมแสดงการแจกแจงของค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลองที่ 1

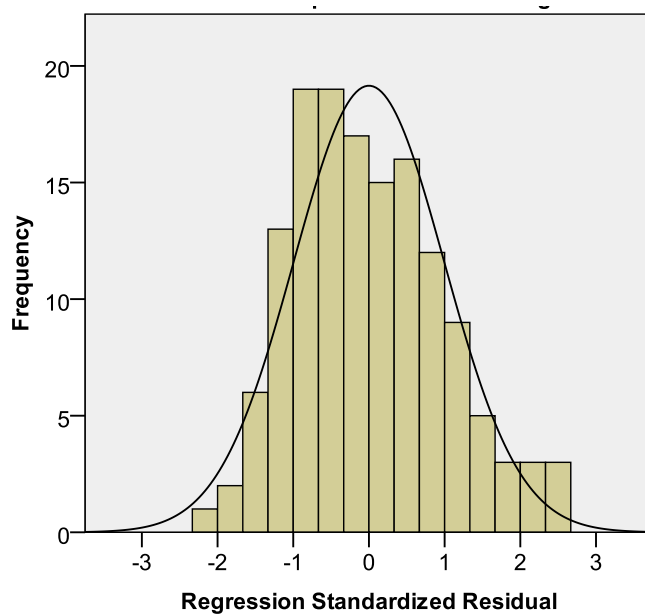


รูปที่ ค2 Normal Probability Plot ของแบบจำลองที่ 1

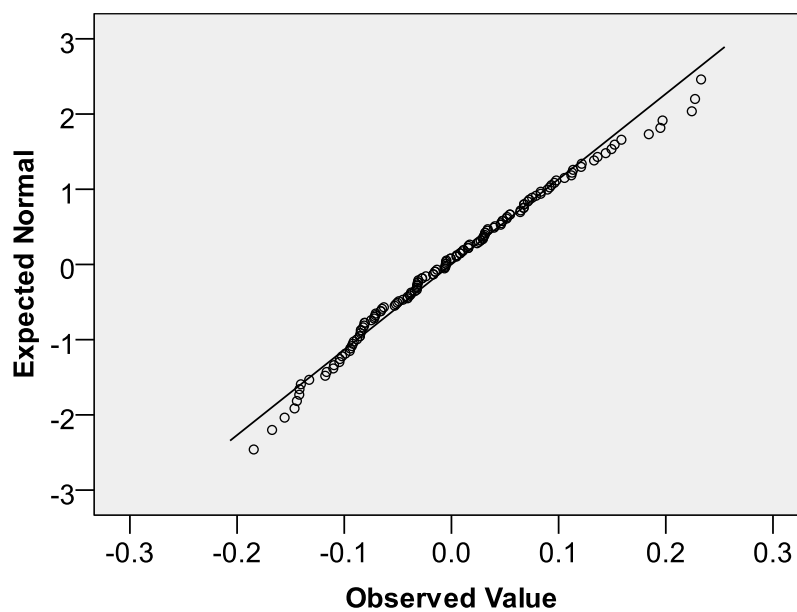
ตารางที่ ค1 รายละเอียดการทดสอบการแจกแจงของค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ 1

	Kolmogorov-Smirnov		
	Statistic	df	Sig.
Unstandardized Residual	.047	143	.200

Model 2 : Dependent variable : $\log(E_{\text{Base}})$



รูปที่ ค3 ฮิสโตแกรมแสดงการแจกแจงของค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลองที่ 2

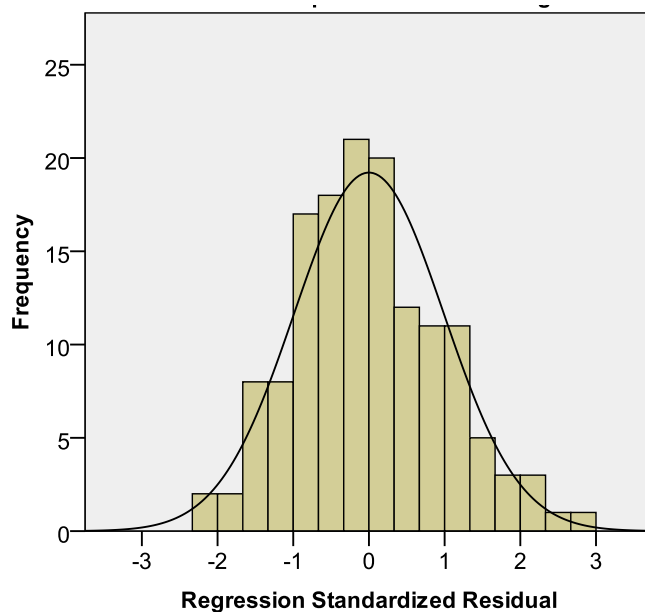


รูปที่ ค4 Normal Probability Plot ของแบบจำลองที่ 2

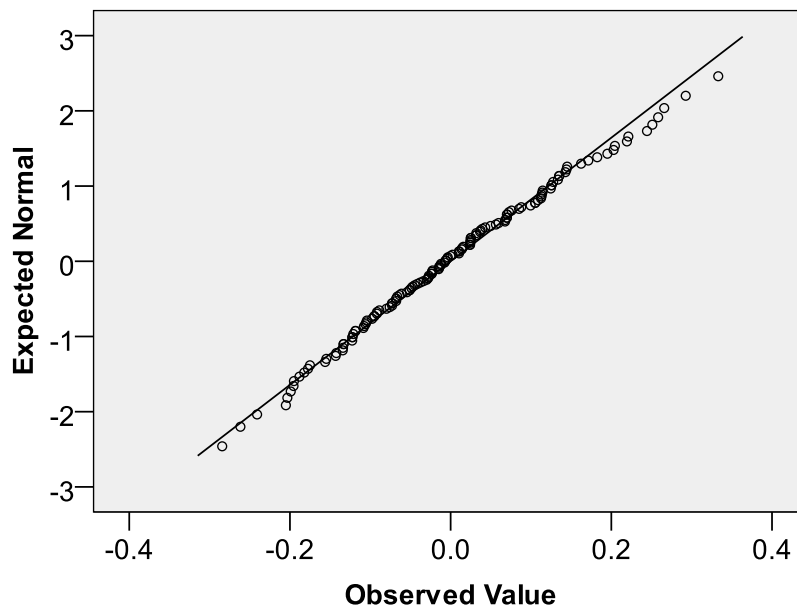
ตารางที่ ค2 รายละเอียดการทดสอบการแจกแจงของค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ 2

	Kolmogorov-Smirnov		
	Statistic	df	Sig.
Unstandardized Residual	.057	143	.200

Model 3 : Dependent variable : $\log(E_{\text{Subbase}})$



รูปที่ ค5 ฮิสโตแกรมแสดงการแจกแจงของค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลองที่ 3

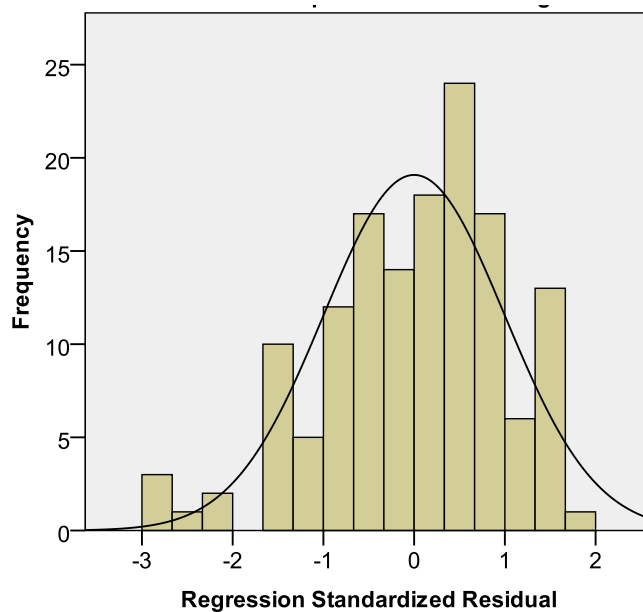


รูปที่ ค6 Normal Probability Plot ของแบบจำลองที่ 3

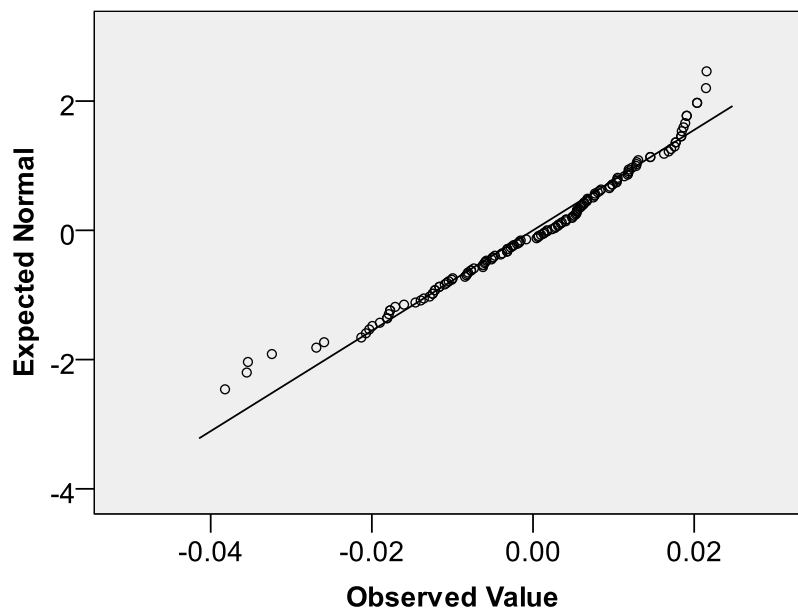
ตารางที่ ค3 รายละเอียดการทดสอบการแจกแจงของค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ 3

	Kolmogorov-Smirnov		
	Statistic	df	Sig.
Unstandardized Residual	.048	143	.200

Model 4 : Dependent variable : $\log(E_{\text{Subgrade}})$



รูปที่ ค7 ฮิสโตแกรมแสดงการแจกแจงของค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลองที่ 4

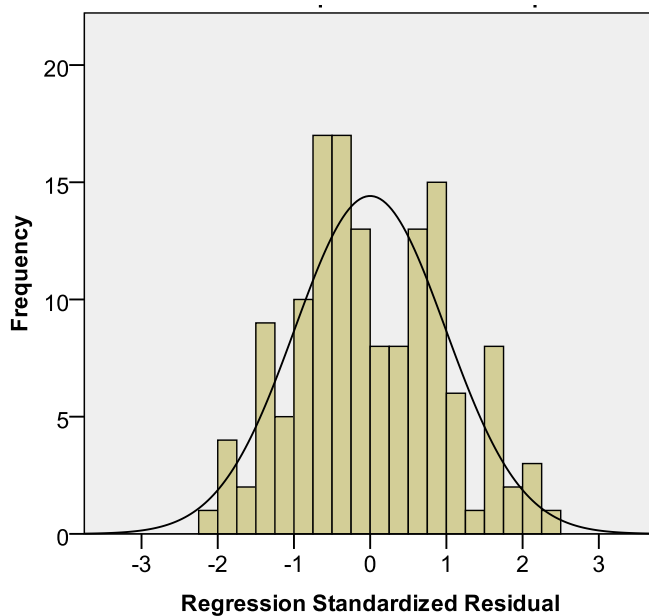


รูปที่ ค8 Normal Probability Plot ของแบบจำลองที่ 4

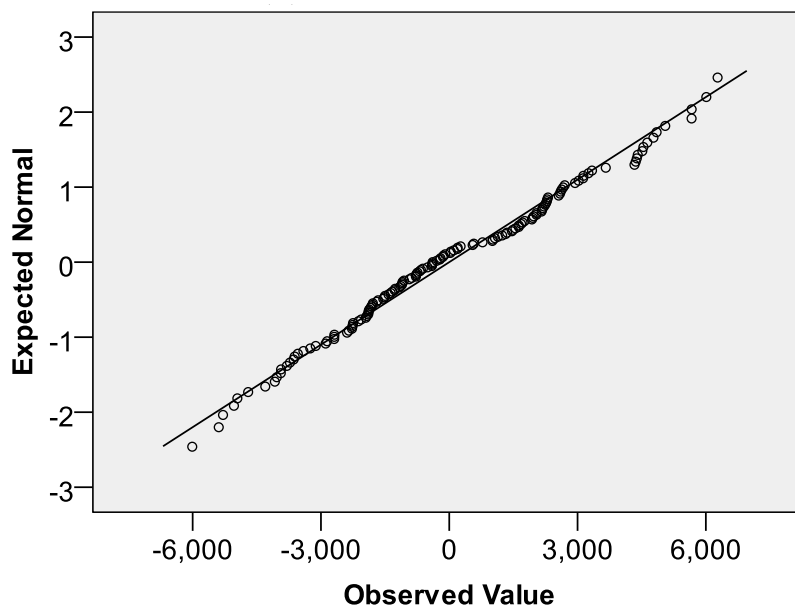
ตารางที่ ค4 รายละเอียดการทดสอบการแจกแจงของค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ 4

	Kolmogorov-Smirnov		
	Statistic	df	Sig.
Unstandardized Residual	.074	143	.056

Model 5 : Dependent variable : $E_p H_T$



รูปที่ ค9 ฮิสโตแกรมแสดงการแจกแจงของค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลองที่ 5



รูปที่ ค10 Normal Probability Plot ของแบบจำลองที่ 5

ตารางที่ ค5 รายละเอียดการทดสอบการแจกแจงของค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ 5

	Kolmogorov-Smirnov		
	Statistic	df	Sig.
Unstandardized Residual	.047	143	.200

2. การทดสอบความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน

สถิติทดสอบ Breusch-Pagan

สมมติฐานเพื่อการทดสอบ

$H_0: \gamma_1 = 0$ ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนคงที่), Homoscedasticity(

$H_1: \gamma_1 \neq 0$ ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนไม่คงที่), Heteroscedasticity(

สถิติทดสอบ : $X_{BP}^2 = \frac{SSR^*/2}{SSE/n}$

เขตปฏิเสธ : จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $X_{BP}^2 > X_{1-\alpha; 1}^2$

กำหนดให้ทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้น $X_{0.95; 1}^2 = 3.84$

ตารางที่ ค6 รายละเอียดการทดสอบความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนของแต่ละแบบจำลอง

Model	SSR [*]	SSE	X_{BP}^2	
1	1.693E-05	1.977E+00	0.044284	ยอมรับ H_0
2	7.299E-05	1.103E+00	0.612888	ยอมรับ H_0
3	1.180E-04	1.110E+00	0.980104	ยอมรับ H_0
4	3.073E-09	2.353E-02	0.056751	ยอมรับ H_0
5	2.697E+12	1.056E+09	0.024718	ยอมรับ H_0

ภาคผนวก ง
รายละเอียดข้อมูลการทดสอบในภาคสนามแต่ละสายทาง

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลความหนาและโมดูลัสของถนนแต่ละสายทาง

Route	No.	Thickness (cm)			Elastic modulus (MPa)				
		Surface	Base	Subbase	Surface	Base	Subbase	Subgrade	Ep
N1	1	5	25	20	3,965	324	137	80	342
	2	5	25	20	4,399	274	136	82	332
	3	5	25	20	3,798	315	203	99	346
	4	5	25	20	1,869	633	350	104	485
N2	1	5	15	20	3,158	390	606	119	462
	2	5	20	15	3,704	140	56	89	217
	3	5	20	20	4,366	331	299	117	408
	4	5	20	20	4,615	313	58	154	342
	5	5	15	15	4,320	172	209	88	327
	6	5	15	15	4,519	280	229	109	403
	7	5	15	15	5,307	551	704	120	734
	8	5	15	15	5,267	657	601	107	758
	9	5	20	20	5,160	427	297	107	503
	10	5	20	20	5,129	355	119	143	411
	11	5	15	20	3,066	378	186	170	314
	12	5	20	15	3,628	288	324	117	370
	13	5	20	20	4,388	240	74	95	294
	14	5	20	20	4,426	347	137	99	373
	15	5	15	15	4,149	256	449	93	426
	16	5	15	15	4,946	407	257	114	507
17	5	15	15	3,426	749	1,069	149	809	
18	5	15	15	4,696	741	682	94	785	
19	5	20	20	4,389	560	365	126	554	
20	5	20	20	4,778	472	214	129	483	
N3	1	6	20	20	4,317	478	475	151	234
	2	6	20	20	-21,010	1,604	5,439	476	192
	3	6	20	20	9	1,114	2,136	237	191
	4	6	20	20	-4,908	1,335	3,120	271	251

ตารางที่ 1(ต่อ) รายละเอียดข้อมูลความหนาและโมดูลัสของถนนแต่ละสายทาง

Route	No.	Thickness (cm)			Elastic modulus (MPa)				
		Surface	Base	Subbase	Surface	Base	Subbase	Subgrade	Ep
	5	6	20	20	3,080	658	1,000	78	229
	6	6	20	20	4,321	570	664	120	414
	7	6	20	20	4,691	510	486	158	294
N4	1	11	15	20	3,004	304	226	191	443
	2	13	15	20	3,758	2,195	360	108	1,349
	3	13	20	15	974	2,587	769	100	1,520
	4	13	15	20	-20,053	12,157	371	122	2,018
N5	1	13	15	10	2,880	519	417	294	691
	2	10	20	15	2,594	383	76	304	411
	3	14	20	15	2,494	338	62	152	442
	4	12	15	15	2,037	137	94	212	263
	5	11	15	20	2,653	909	970	315	855
O1	1	5	20	20	4,196	226	60	134	272
	2	5	20	20	4,042	263	150	141	310
	3	5	20	20	607	1,609	822	135	1,053
	4	5	20	20	3,833	216	29	122	238
	5	5	20	20	4,069	306	313	125	382
	6	5	20	20	2,080	143	345	114	195
O2	1	5	20	15	984	675	979	201	605
	2	5	20	15	2,927	462	559	160	491
	3	6	20	15	1,945	843	755	144	719
	4	6	20	15	3,195	421	179	193	418
	5	6	20	10	1,505	1,458	205	184	788
O3	1	6	20	20	3,408	210	60	252	252
	2	5.5	20	20	4,378	427	349	206	494
	3	6	20	20	3,509	264	231	183	336
	4	5.5	20	20	4,090	425	287	191	458
	5	6.5	20	20	3,388	150	66	162	236

ตารางที่ 1(ต่อ) รายละเอียดข้อมูลความหนาและโมดูลัสของถนนแต่ละสายทาง

Route	No.	Thickness (cm)			Elastic modulus (MPa)				
		Surface	Base	Subbase	Surface	Base	Subbase	Subgrade	Ep
O4	1	9	15	25	2,826	160	62	189	246
	2	10	15	20	2,870	266	55	205	340
	3	7	18	12	2,568	220	102	181	273
	4	8	15	20	3,224	316	63	309	347
	5	9	15	15	3,735	1,191	231	246	931
	6	7	20	20	2,850	147	26	182	199
O5	1	8	20	20	2,229	1,504	570	309	1,017
	2	8	15	20	2,858	221	58	166	271
	3	8	15	15	2,505	165	107	175	251
	4	8	20	20	3,312	1,301	257	573	915
	5	8	15	15	2,276	154	57	229	209
	6	7	10	15	3,763	542	366	318	587
O6	1	8	15	15	3,433	195	144	67	371
	2	8	15	15	2,259	118	91	181	198
	3	9	15	20	2,357	108	50	211	197
	4	7	15	20	3,615	241	86	179	324
	5	6	15	20	3,486	178	44	249	238
	6	3	15	20	3,400	2,348	401	123	1,293
O7	1	7.5	20	20	3,312	263	36	178	310
	2	8.8	20	20	2,448	151	16	162	207

ตารางที่ 2 รายละเอียดข้อมูลการทดสอบ DCP และค่าโมดูลัสโดย AASHTO

Route	No.	Base		Subbase		Subgrade
		DPI (mm/blow)	E (MPa)	DPI (mm/blow)	E (MPa)	E _{AASHTO} (MPa)
N1	1	1.98	342	2.50	293	74
	2	1.96	344	2.63	283	79
	3	1.77	368	1.77	368	70
	4	1.60	394	3.00	259	93
N2	1	2.12	326	3.35	241	81
	2	1.82	361	9.27	122	62
	3	1.72	375	2.81	271	82
	4	1.56	400	2.53	290	84
	5	2.42	299	5.83	167	88
	6	2.15	323	3.43	237	95
	7	1.79	365	1.91	350	96
	8	1.04	524	1.04	524	92
	9	2.04	335	3.11	253	86
	10	1.73	374	2.36	304	104
	11	2.66	281	3.43	237	87
	12	2.14	324	2.59	286	82
	13	1.59	395	3.53	233	75
	14	3.43	237	2.87	267	86
	15	3.16	250	4.87	188	79
	16	1.76	369	2.84	269	96
17	1.41	428	2.88	266	106	
18	1.79	365	1.88	354	86	
19	2.09	329	2.59	286	94	
20	1.73	374	2.36	304	98	
N3	1	1.99	340	1.37	436	133
	2	1.74	372	2.65	281	105
	3	1.58	397	1.92	349	122
	4	0.9	577	2.4	301	147

ตารางที่ 2(ต่อ) รายละเอียดข้อมูลการทดสอบ DCP และค่าโมดูลัสโดย AASHTO

Route	No.	Base		Subbase		Subgrade
		DPI (mm/blow)	E (MPa)	DPI (mm/blow)	E (MPa)	E _{AASHTO} (MPa)
	5	1.42	426	3.47	235	141
	6	2.2	318	2.2	318	221
	7	2.4	301	0.63	731	175
N4	1	1.45	420	1.71	376	132
	2	1.36	438	3.2	248	94
	3	0.91	573	1.59	395	87
	4	1.39	432	3.02	258	101
N5	1	0.79	629	0.79	629	146
	2	1.52	407	3.76	223	115
	3	1.54	404	6.85	150	117
	4	0.85	599	4.45	199	102
	5	0.70	682	1.49	413	143
O1	1	4.39	201	7.42	142	81
	2	4.22	207	7.58	140	88
	3	1.09	508	1.9	351	110
	4	1.58	397	5.22	179	67
	5	2.43	298	7.38	142	83
	6	4.22	207	5.26	178	88
O2	1	1.58	397	1.17	484	89
	2	1.58	397	3.32	242	87
	3	1.47	416	3.39	239	98
	4	1.78	367	2.18	320	119
	5	0.82	614	3.58	230	125
O3	1	4.07	212	9.27	122	118
	2	1.25	464	1.99	340	108
	3	2.08	331	2.31	308	115
	4	1.39	432	3.15	251	113
	5	2.51	292	4.34	203	99

ตารางที่ 2(ต่อ) รายละเอียดข้อมูลการทดสอบ DCP และค่าโมดูลัสโดย AASHTO

Route	No.	Base		Subbase		Subgrade
		DPI (mm/blow)	E (MPa)	DPI (mm/blow)	E (MPa)	E _{AASHTO} (MPa)
O4	1	1.48	414	3.64	228	156
	2	1.94	346	6.46	156	184
	3	1.82	361	5.82	167	147
	4	1.82	361	4.15	209	312
	5	2.00	339	2.00	339	215
	6	4.68	193	5.89	166	141
O5	1	1.88	354	3.10	254	232
	2	1.81	363	3.99	214	148
	3	3.28	244	3.28	244	179
	4	1.11	502	1.12	499	503
	5	1.97	343	2.31	308	168
	6	0.97	549	3.35	241	248
O6	1	1.82	361	3.52	233	82
	2	1.22	471	5.02	184	137
	3	1.51	409	3.21	248	143
	4	1.28	456	3.10	254	131
	5	1.74	372	3.04	257	157
	6	0.79	629	1.59	395	108
O7	1	0.95	556	6.55	154	176
	2	1.09	508	6.00	163	143

ตารางที่ 3 รายละเอียดข้อมูลการวิเคราะห์ข้อมูล Time-History

กำหนดให้ : Poission's ratio = 0.35

AC-density = 2,300 kg/m³

Route	No.	Velocity	Elastic Modulus	Route	No.	Velocity	Elastic Modulus
		m/s ²	MPa			m/s ²	MPa
N1	1	267	442	N2	1	233	338
	2	267	442		2	400	994
	3	200	248		3	267	442
	4	267	442		4	267	442
	5	267	442		5	400	994
	6	200	248		6	333	690
	7	200	248		7	333	690
	8	124	95		8	267	442
	9	200	248		9	267	442
	10	160	159		10	400	994
	11	200	248		11	267	442
	12	133	110		12	267	442
	13	180	201		13	400	994
	14	200	248		14	233	338
	15	200	248		15	267	442
	16	160	159		16	267	442
					17	233	338
					18	233	338
					19	200	248
					20	400	994

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสรายุทธ กำไล เป็นบุตรของ นายสายัณห์ กำไล และนางผกา กำไล เป็นบุตรคนที่สอง จากจำนวนบุตรทั้ง 3 คน เกิดเมื่อวันที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2530 ณ โรงพยาบาลวชิระภูเก็ต จังหวัดภูเก็ต ได้สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาล พังงา และสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและปลายจากโรงเรียน จุฬารัตนราชวิทยาลัยตรัง และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมขนส่งและจราจร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552

ขณะศึกษาอยู่ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บทความของผู้เขียนวิทยานิพนธ์ได้ถูกตีพิมพ์ในเอกสารรวมการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16 (16th National Convention on Civil Engineering) ซึ่งจัดขึ้นที่จังหวัดชลบุรี ระหว่างวันที่ 18-20 พฤษภาคม พ.ศ. 2553 ดังนี้

สรายุทธ กำไล, บุญชัย แสงเพชรงาม, สกนธ์ พิทักษ์วินัย, 2553. การศึกษาคุณลักษณะของหลุมการแอ่นตัวจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระทบ เพื่อประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง (A STUDY OF DEFLECTION BASIN CHARACTERISTICS USING FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER TO EVALUATE PAVEMENT STRUCTURAL STRENGTH). เอกสารรวมการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16. ชลบุรี.