บทที่ 3
การวิเคราะห์การเสียรูปของผิวทางจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระแทก เพื่อประเมินสภาพผิวทาง

ชื่อโครงการวิจัย การวิเคราะห์การเสียรูปของผิวทางจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระแทกเพื่อประเมินสภาพของผิวทาง

Analysis of the deformation from falling weight deflectometer for evaluation of pavement condition

ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยประจำปี 2554 จำนวนเงิน 720,500 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 13 กันยายน 2554 ถึง 13 กันยายน 2555

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
โทรศัพท์ 02-470-9141 โทรสาร 02-427-9063

ผู้ร่วมวิจัยคนที่ 1 ผศ. ดร. พรเกษม จงประดิษฐ์
หมายเลขบัตรประชาชน 3700500561204
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
โทร. 02-470-9141 0813027482

ผู้ร่วมวิจัยคนที่ 2 ดร. คุณมาศ พันธุเตชะ
หมายเลขบัตรประชาชน 3101701919277
สำนักบำรุงทาง
กรมทางหลวงชนบท
โทร. 0-2551-5268 โทรสาร 0-2972-9319

บทคัดย่อ

งานศึกษานี้เป็นการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์อย่างง่ายสำหรับประเมินสภาพของผิวทางจากค่าการเสียรูปของผิวทางจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระแทก ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของชุดโครงการ สมการอย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นได้จากการวิคราะห์เชิงถดถอยของชุดข้อมูลเทียมที่เป็นผลของการวิเคระห์เชิงตัวเลขของ การเสียรูปของผิวทางที่จำลองการตกกระแทกโดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ผลการศึกษาได้พัฒนาสมการเชิงเส้นอย่างง่ายที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสริมผิวทางกับผลต่างของการเสียรูปที่จุดD_0 และจุดD_{150}ในรูปของลอกการิธึม อย่างไรก็ตามเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในการใช้สมการนี้ ควรมีการศึกษาต่อในอนาคตด้วยการนำไปประยุกต์ใช้งานกับถนนจริง

Abstract

This study developed an empirical analytical method for pavement condition evaluation by using the displacement values obtained from FWD tests as a part of a research project. The empirical equations for evaluation are developed from regression analysis of artificial data of pavement displacement values, which in turn, are obtained from FEA of FWD simulation. The obtained equations are simple linear relation between the pavement overlay and difference of pavement deformations at center and 150 mm away from FWD impact point. However, to enhance the reliability of using this equation, the future study on using this equation in actual application is necessary.

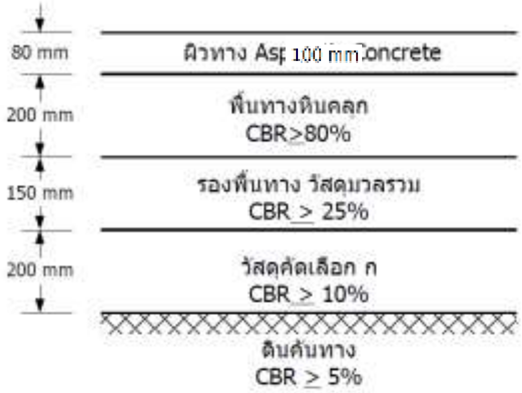
3.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นส่วนของงานวิเคราะห์เพื่อนำผลจากการทดสอบผิวทางโดยใช้เครื่องมือการวัดตัวแบบตกกระแทกไปใช้ในการประเมินสภาพของผิวทาง วิธีที่จะนำเสนอเป็นวิธีอย่างง่ายเพื่อให้ผู้ใช้เทคโนโลยี คือ กรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวงสามารถนำสมการที่นำเสนอไปใช้ประเมินได้สะดวกและรวดเร็ว โดยไม่ต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล บทนี้จะประกอบด้วยทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การวิเคราะห์การเสียรูปของผิวทางโดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ การนำเสนอสมการเพื่อใช้ประเมินผิวทางและการนำไปประยุต์ใช้งานโดยเทียบกับถนนจริง

3.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รูปแบบของโครงสร้างชั้นทางถนนแบบยืดหยุ่นในประเทศไทย

โดยทั่วไปถนนแบบยืดหยุ่น(Flexible Pavements) จะมีโครงสร้างชั้นทางเป็นแบบมาตราฐาน ซึ่งประกอบด้วยชั้นผิวทางเป็นแอสฟัลต์คอนกรีต ชั้นพื้นทางเป็นหินคลุก ชั้นรองพื้นทางเป็นพวกดินมวลเม็ดที่มีคุณภาพดี ชั้นวัสดุคัดเลือกเป็นพวกดินมวลเม็ดที่มีคุณภาพต่ำลงมา โดยมีความแข็งแรงมากกว่าชั้นคันทางไม่มากนัก และสุดท้ายคันทาง(ดินเดิม) ดังแสดงในรูปที่ 3.2-1 และตารางที่ 3.2-1 และ 3.2-2



รูปที่ 3.2-1 รูปตัดแสดงความหนาชั้นทางของถนนแบบยืดหยุ่น
(ที่มา: สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง 2554)

ตารางที่ 3.2-1 ค่า E-Modulus และ ค่า CBR ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง
(ที่มา :ดร. ยงยุทธ แต้ศิริ, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง)

ชนิดของวัสดุชั้นทาง	E-Modulus (MPa)	CBR (%)
พื้นทางหินคลุก	300-400	80
รองพื้นทางวัสดุมวลรวม	150-200	25
ชั้นวัสดุคัดเลือก ก	80-110	10
ชั้นวัสดุคัดเลือก ข	40-70	6
ทรายถมคันทาง	10 x CBR(%)	10
ดินถมคันทาง	10 x CBR(%)	2-5

ตารางที่ 3.2-2 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ
(ที่มา : ดร. ธันวิน สวัสดิศานต์ และนายกฤษณะ จันทรโชติ, สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง)

อุณหภูมิ	ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)		
° C	เกรด 60/70	เกรด 40/50	PMA
5	14,936	20,060	16,472
20	6,611	8,803	7,658
35	1,462	2,311	1,985
50	266	401	445
60	175	225	303

วิธีการออกแบบชั้นทางแบบยืดหยุ่น(Flexible Pavements)
วิธีการออกแบบชั้นทางแบบยืดหยุ่นแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ

-การออกแบบด้วยวิธี Empirical Design
การออกแบบด้วยวิธี Empirical Design เป็นการออกแบบโดยใช้วิธีการสร้างถนนจริงขึ้นมา แล้วทำการศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นร่วมกับการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุในสนามและในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนตัวแปรอื่นๆ ที่ใช้ในการออกแบบ เช่น การทดสอบหาค่า CBR และ Plate Bearing Test เป็นต้น

โดยทั่วไปวิธี Empirical Design เป็นวิธีต้องอาศัยประสบการณ์เดิมที่ผ่านมาและการสร้างถนนจริง (Full-scale Road Test) ให้รถวิ่งจริง แล้วทำการศึกษาพฤติกรรมของถนนนั้นจนกระทั่งวิบัติ ทดลองเช่นนี้หลายๆครั้ง ทำให้สามารถสรุปเป็นข้อมูลต่างๆ ออกมาในรูปกราฟ ตาราง สมการ และค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุแต่ละชนิด ทำให้ทราบพฤติกรรมของถนนในขณะวิบัติว่าเป็นอย่างไร วิธี Empirical Design จะได้

ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแน่นอน ต่อเมื่อข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ เช่นปริมาณการจราจร น้ำหนักรถ คุณสมบัติวัสดุ และสภาพแวดล้อมไม่ต่างจากประสบการณ์ และสมมติฐานที่กำหนดไว้
วิธีการออกแบบด้วยวิธี Empirical Design มีอยู่หลายวิธีได้แก่วิธีของ California Bearing Ratio(CBR), วิธีของ State of California, วิธีของ The Asphalt Institute (AI), วิธีของ Nation Crushed Stone Association(NCSA) และวิธีของ AAHSTO

กรมทางหลวงได้ยึดเอาวิธีของ The Asphalt Institute มาใช้ออกแบบจนถึงปัจจุบัน โดยการออกแบบใช้ค่า CBR ของดิน Subgrade และปริมาณการจราจรในรูปแบบของจำนวนเที่ยวของน้ำหนักเพลามาตรฐาน (Equivalent Standard Axle Loads; ESALs) ขนาด 8,200 กก(18,000 ปอนด์) เป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบ ความหนาของชั้นทางที่ออกแบบได้เป็นความหนาของชั้นแอสฟัลท์คอนกรีตทั้งหมดที่วางอยู่บนชั้นดินเดิม TAI เรียกชั้นทางนี้ว่า Full-Depth Pavement ซึ่งมีความหนาเท่ากับ TA อย่างไรก็ตามเราอาจจะเปลี่ยน Full-Depth Pavement ซึ่งมีความหนาเท่ากับTA ให้เป็นชั้นทางแบบธรรมดาทั่วๆไปที่ประกอบด้วย ผิวทาง พื้นทาง และรองพื้นทาง โดยใช้วัสดุอื่นเช่น หินคลุก ดินลูกรัง แทนแอสฟัลท์คอนกรีต ซึ่ง TAI กำหนดอัตราส่วนไว้ดังนี้

Hot Mix Sand Asphalt Base	=	1.3 : 1
Liquid Emulsified Asphalt Base	=	1.4 : 1
Untreated Granular Base	=	2 : 1
Untreated Granular Subbase	=	2.7 : 1

-การออกแบบด้วยวิธี Analytic Design
การออกแบบด้วยวิธี Analytic Design เป็นการออกแบบโดยใช้ทฤษฎีและรูปแบบทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการแก้ปัญหา โดยการแบ่งโครงสร้างถนนออกเป็นชั้นๆ และใช้วัสดุที่ต่างกัน จากนั้นจึงวิเคราะห์หาค่าความเค้น ความเครียดและการยุบตัวที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นแล้วตรวจสอบความสามารถของวัสดุแต่ละชั้นว่าสามารถต้านทานได้หรือไม่ ถ้าไม่ได้ก็ให้เปลี่ยนความหนาหรือเปลี่ยนชนิดของวัสดุ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการออกแบบโครงสร้างอาคาร โดยต้องเปลี่ยนรูปโครงสร้างจริงให้เป็นโครงสร้างคณิตศาสตร์ แล้วจึงวิเคราะห์หาหน่วยแรงต่างๆที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างโดยวิธีทางคณิตศาสตร์ จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ไปออกแบบให้โครงสร้างแต่ละชั้นให้สามารถรับหน่วยแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ปลอดภัย แล้วจึงนำเอาผลที่ได้จากการออกแบบไปก่อสร้างจริง

การออกแบบชั้นทางแบบยืดหยุ่นสมัยใหม่ สำหรับการใช้งานนาน 20 ปี หรือมากกว่าจะต้องออกแบบให้สามารถรองรับปริมาณการจราจรได้จำนวนมากกว่า 50 ล้านคัน ตลอดช่วงอายุการใช้งาน เกณฑ์ที่ใช้กำหนดการวิบัติคือ การเปลี่ยนรูปร่างสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผิวทางในลักษณะความลึก ของร่องล้อ (Rut Depth) มีค่าเท่ากับ 25 มม. ซึ่งหมายความว่าเกิดการผิดรูปอย่างถาวร โดยเฉลี่ยแล้วแล้วความลึกของรอยร่องล้อจากยวดยานแต่ละคันต้องน้อยกว่า 0.5×10^{-6} มม. จากการที่พฤติกรรมของชั้นทางมีความใกล้เคียงกับคุณสมบัติความเป็นอีลาสติกของวัสดุประกอบชั้นทาง และชั้นฐานรากเนื่องจากน้ำหนักกดของล้อยวดยาน จึงสามารถประเมินได้อย่างใกล้เคียงโดยใช้ทฤษฎีอีลาสติก แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติอีลาสติกของชั้นวัสดุที่ประกอบเป็นชั้นทางทั้งหมด

การทำนายคุณสมบัติที่เหมาะสมของชั้นทาง ภายใต้น้ำหนักการจราจรในเทอมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการแตกร้าวนั้น สิ่งแรกที่จำเป็นต้องทราบคือ ประวัติการเกิดความเค้นในแต่ละชั้นของวัสดุที่ประกอบเป็นชั้นทาง ซึ่งสามารถประเมินได้จากทฤษฎีอีลาสติก ถ้ารู้น้ำหนักของล้อที่กระทำและรู้ปริมาณการจราจร ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของจำนวนยานพาหนะสมมูลย์ หรือตรวจสอบจากการที่คุณสมบัติอีลาสติกของวัสดุ แต่ละชั้นแปรผันตามอุณหภูมิ หรือแปรผันตามสภาพความชื้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงสภาพแวดล้อม ซึ่งย่อมมีผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นทางโดยส่วนรวม เมื่อทราบความเค้นที่มีอยู่ในชั้นทางแล้ว ก็จะพิจารณาถึงส่วนประกอบชั้นทางที่เหมาะสม โดยพิจารณาอยู่ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้นอย่างถาวร ซึ่งมักจะเกิดขึ้นระหว่างอายุการใช้งาน และรอยแตกที่อาจจะเกิดขึ้นจากความล้าภายใต้ความเค้นที่เกิดขึ้นอย่างซ้ำซากจากนั้นรวมผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากความล้าว่าอยู่ในพิกัดที่กำหนดโดยเกณฑ์การวิบัติหรือไม่

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง

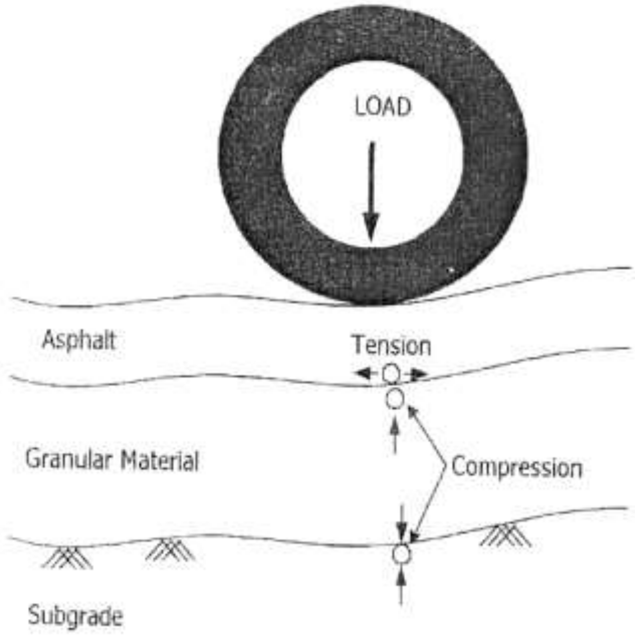
หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางดังแสดงในรูปที่ 3.2-2 มีดังนี้

Horizontal Tensile Strain ที่ใต้ผิวทางแอสฟัลต์ เกิดขึ้นเนื่องจากชั้นแอสฟัลต์แอ่นตัว เนื่องจากน้ำหนักกระทำ เมื่อมีรถบรรทุกแล่นผ่าน เมื่อจำนวนเที่ยวสะสมมากขึ้น จะเกิดการสะสมของ Strain เกินกว่าที่แอสฟัลต์จะรับได้จะทำให้แอสฟัลต์เกิดรอยแตก (Crack) โดยจะเริ่มเกิดที่ผิวด้านล่างก่อน แล้วค่อนลามขึ้นไปสู่ผิวด้านบน Horizontal Tensile Strain จะเกิดในชั้นวัสดุที่มีการเชื่อมแน่น แต่จะไม่เกิดในชั้นวัสดุที่ไม่มีการเชื่อมแน่น (Unbound Materials) เช่น หินคลุกหรือวัสดุมวลรวม

Vertical Compressive Strain บนผิววัสดุที่ไม่มีการเชื่อมแน่น เช่น ชั้นหินคลุกหรือวัสดุมวลรวม เกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุถูกกดทับจากน้ำหนักล้อรถ การเกิด Vertical Compressive Strain มากเกินกำหนดทำให้โครงสร้างชั้นทางวิบัติในลักษณะของรอยร่องล้อ เนื่องจากดิน Subgrade มีความแข็งแรงน้อยที่สุด ค่าโมดูลัสต่ำที่สุด สัดส่วนของ Vertical Compressive strain ในชั้น Subgrade จึงมากที่สุด ดังนั้นบางครั้งจึงใช้ Vertical Compressive Strain ที่เกิดขึ้นในชั้น Subgrade เพียงชั้นเดียวในการวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์ระบบชั้นทาง (Analysis of Layer System)

ถึงแม้ว่าการออกแบบโครงสร้างชั้นทางเชิงวิเคราะห์ มีความจำเป็นต้องวิเคราะห์หาทั้ง Stress Strain และ Deflection แต่การออกแบบโครงสร้างชั้นทางโดยทั่วไปนิยมใช้ Strain เป็นตัวควบคุมและกำหนดอายุการใช้งานของถนน และมักพิจารณา Strain ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางในสองลักษณะคือ Horizontal Tensile Strain และ Vertical Compressive Strain



รูปที่ 3.2-2 แสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง (ที่มา: เอกสารการอบรม กรมทางหลวง)

-ระบบทางชั้นเดียว (One Layer System)

ระบบทางชั้นเดียว หมายถึง ชั้นทางที่ประกอบไปด้วยวัสดุเพียงชนิดเดียวและแรงภายนอกที่มากระทำกับระบบชั้นทางชั้นเดียวมี 2 แบบคือ

น้ำหนักที่มากระทำเป็นจุด

น้ำหนักที่มากระทำเป็นลักษณะแผ่กระจายเป็นพื้นที่วงกลม

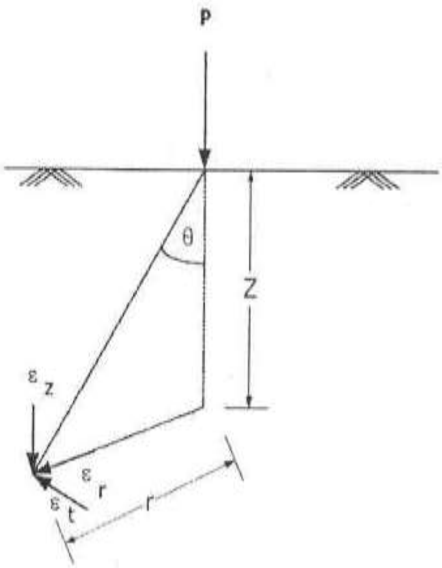
โดยสูตรต่างๆที่ใช้วิเคราะห์หาหน่วยแรงในระบบชั้นทางชั้นเดียวได้จากทฤษฎีของ Boussinesq โดยการพิจารณาให้วัสดุชั้นทางเป็นวัสดุกึ่งอนันต์ (Semi-Infinite Half Space) เนื้อเดียว (Homogeneous) มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) และมีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic) ตามกฎของ Hook's Law

ในปี ค.ศ. 1885 Boussinesq ได้เสนอสมการเพื่อคำนวณหน่วยแรงในแนวดิ่งและแนวราบที่เกิดขึ้นกับวัสดุ Semi-Infinite Halfspace , Isotropic ซึ่งมีค่าโมดูลัสเท่ากับ E และอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ υ เมื่อได้รับแรงกระทำจากน้ำหนักกระทำเป็นจุด P ดังแสดงในรูปที่ 3.2-3

Horizontal Strain, $$\varepsilon r = \frac{(1+\nu)\,P}{2\pi R^2 E}\left[-3\cos^3\theta + (3-2\nu)\cos\theta - \frac{1-2\nu}{1+\cos\theta}\right] \qquad (1)$$

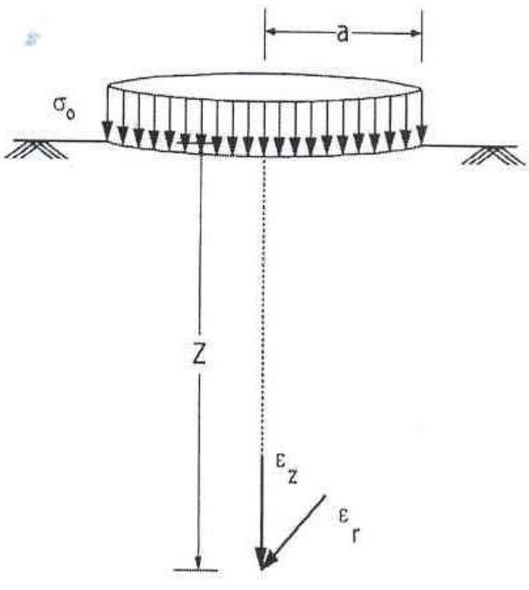
$$\varepsilon r = \frac{(1+\nu)\,P}{2\pi R^2 E}\left[-\cos\theta + \frac{1-2\nu}{1+\cos\theta}\right] \qquad (2)$$

Vertical Strain, $$\varepsilon z = \frac{(1+\nu)\,P}{2\pi R^2 E}\left[3\cos^3\theta - 2\nu\cos\theta\right] \qquad (3)$$



รูปที่ 3.2-3 แสดงน้ำหนักกระทำเป็นจุดที่กระทำบนพื้นผิววัสดุ Semi-Infinite Half Space

จากสมการสำหรับน้ำหนักกระทำเป็นจุด เมื่อนำมา Integrate จะได้สมการสำหรับน้ำหนักกระทำแผ่สม่ำเสมอขนาด σ_0 เป็นพื้นที่วงกลมรัศมี a ดังแสดงในรูปที่ 3.2-4 ดังนี้



รูปที่ 3.2-4 แสดงน้ำหนักกระแผ่สม่ำเสมอเป็นพื้นที่วงกลมบนผิววัสดุ Semi-Infinite Half Space
(ที่มา: เอกสารการอบรม กรมทางหลวง)

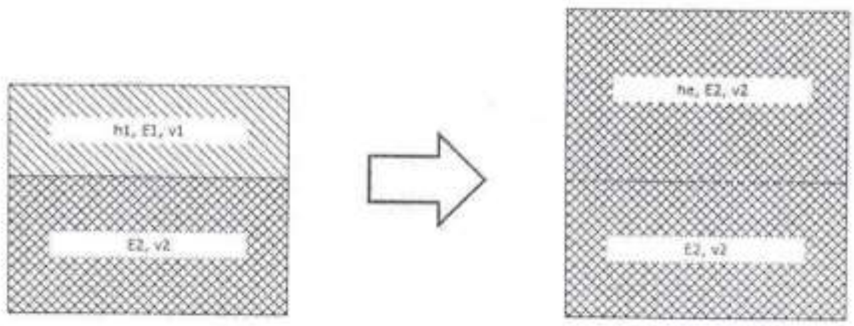
Horizontal Strain, εr, εt = $$\frac{(1+\nu)\sigma_0}{2E}\left[\frac{-\frac{Z}{a}}{\left(\sqrt{1+\left(\frac{Z}{a}\right)^2}\right)^3}-(1-2\nu)\left(\frac{\frac{Z}{a}}{\sqrt{1+\left(\frac{Z}{a}\right)^2}}\right)\right] \quad (4)$$

Vertical Strain, εz = $$\frac{(1+\nu)\sigma_0}{E}\left[\frac{\frac{Z}{a}}{\left(\sqrt{1+\left(\frac{Z}{a}\right)^2}\right)^3}-(1-2\nu)\left(\frac{\frac{Z}{a}}{\sqrt{1+\left(\frac{Z}{a}\right)^2}}\right)\right] \quad (5)$$

สำหรับสมการของ Boussinesq นี้ใช้คำนวณเฉพาะวัสดุที่เป็นเนื้อเดียว และสมการสำหรับน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอเป็นพื้นที่วงกลมนั้น ใช้วิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแนวจุดศูนย์กลางของน้ำหนักกระทำนั้น

-ระบบชั้นทางหลายชั้น (Multi-Layer System)
การวิเคราะห์ Pavement Response สำหรับระบบชั้นทางที่ประกอบด้วยวัสดุซ้อนกันเป็นชั้นๆ ไม่สามารถใช้สมการของ Boussinesq ได้ เพื่อแก้ปัญหานี้ Burmister ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์สำหรับระบบที่ประกอบด้วยวัสดุ Linear Elastic จำนวน 2 ชั้นและ 3 ชั้นขึ้นในปี ค.ศ.1943 และ ค.ศ.1945 ตามลำดับ วิธีการนี้ได้รับการพัฒนาต่อมาจนมีวิธีที่สามารถวิเคราะห์ระบบชั้นทางที่มีจำนวนชั้นไม่จำกัด แต่ วิธีการดังกล่าวต้องใช้การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ที่ยุ่งยาก

วิธีการอีกทางเลือกหนึ่งคือการใช้วิธีประมาณโดยวิธี Method of Equivalent Thickness (MET) ซึ่ง Odemark ได้เสนอในปี 1949 เพื่อแก้ปัญหาในระบบที่เป็นชั้นๆ ได้โดยง่าย ดังแสดงในรูป 3.2-5



รูปที่ 3.2-5 แสดงการแปลงความหนาของวัสดุตามวิธีของ Odemark
(ที่มา: เอกสารการอบรม กรมทางหลวง)

Odemark มีสมมุติฐานว่าการแปลงความหนาของวัสดุดังที่แสดงไว้ในรูปจะไม่มีผลต่อค่า Stress หรือ Strain ของวัสดุที่อยู่ใต้เส้นรอยต่อ ถ้าหากว่าสมการต่อไปนี้เป็นจริง

$$\frac{h_1^3 \mathrm{E}_1}{1-\nu_1^2} = \frac{h_e^3 \mathrm{E}_2}{1-\nu_2^2} \quad \text{หรือ} \quad he = h_1 \sqrt[3]{\frac{\mathrm{E}_1}{\mathrm{E}_2} x \frac{1-\nu_2^2}{1-\nu_1^2}} \tag{6}$$

เมื่อ h_e คือ ความหนาเทียบเท่าหรือ Equivalent Thickness
สมมุติฐานของ Odemark ยังไม่ถูกต้องนัก ค่าที่ได้จากการคำนวณยังคลาดเคลื่อนจากค่าที่คำนวณได้โดยวิธี Multi-Layered Elastic อยู่ ดังนั้นจึงต้องคุณปรับแก้ค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (6) ด้วยสัมประสิทธิ์การปรับแก้ (Correction Factor) f ก่อน นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนปัวซอง (υ) ซึ่งมีผลน้อยต่อค่า Strain ที่วิเคราะห์ได้และเป็นค่าที่ทดสอบได้ค่อนข้างยาก ในทางปฏิบัติจึงมักสมมุติให้วัสดุทุกชั้นมีค่า υ เท่ากัน ดังนั้นสมการที่ (6) สามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

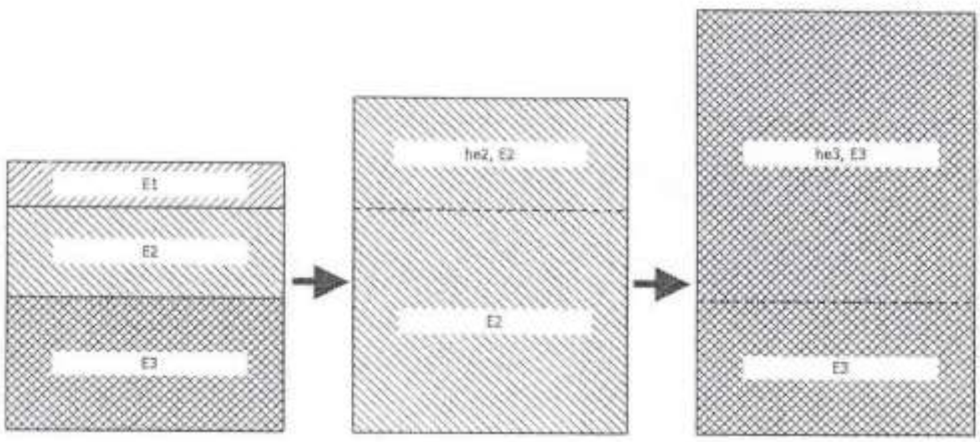
$$\mathrm{h_e} = f \mathrm{xh}_1 \sqrt[3]{\frac{\mathrm{E}_1}{\mathrm{E}_2}} \tag{7}$$

เมื่อ	f	=	0.8 ในชั้นวัสดุทั่วไป
ยกเว้นในวัสดุชั้นบนสุด	f	=	0.9 (ถ้าระบบมีวัสดุเพียง 2 ชั้น)
	f	=	1.0 (ถ้าระบบมีวัสดุมากกว่า 2 ชั้น)

และในกรณีที่ความหนาของวัสดุชั้นบนสุดน้อยกว่ารัศมีของน้ำหนักกระทำ

$$f = 1.1(a / h_1)^{0.3}$$

สำหรับระบบที่มี n ชั้น ก็คำนวณตามวิธีข้างต้นทีละชั้นดังแสดงในรูปที่ 3.2-6



รูปที่ 3.2-6 แสดงความหนาเทียบเท่าของวัสดุในกรณีที่มีหลายชั้น
(ที่มา: เอกสารการอบรม กรมทางหลวง)

ความหนาเทียบเท่าของวัสดุชั้นที่ n สามารถคำนวณจาก

$$\mathbf{h}_{e,n} = f\mathbf{x}\sum_{i=1}^{n-1}\mathbf{h}_i\sqrt[3]{\frac{\mathbf{E}_1}{\mathbf{E}_n}} \tag{8}$$

หรือ
$$\mathbf{h}_{e,n} = f\mathbf{x}\left\{\ldots\left[\left(\mathbf{h}_1\sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} + \mathbf{h}_2\right)\mathbf{x}\sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} + \mathbf{h}_3\right]\mathbf{x}\ldots + \mathbf{h}_{n-1}\right\} \tag{9}$$

หลังจากแปลงความหนาชั้นวัสดุแล้ว วัสดุทั้งระบบจะเสมือนว่าเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน สามารถใช้สมการของ Boussinesq คำนวณ Stress และ Strain ต่อไปได้ แต่ต้องเป็นค่าในชั้นวัสดุใต้เส้นรอยต่อเท่านั้น นอกจากนี้ผลวิเคราะห์ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับวิธี Multi-Layered Elastic ถ้าโมดูลัสของชั้นวัสดุมีค่าลดลงตามความลึก (อัตราส่วน $E_i + E_{i+1} > 2$) และความหนาเทียบเท่าควรจะมากกว่ารัศมีของแรงกระทำ

3.3 การพัฒนาการคำนวนย้อนกลับโดยใช้วิธี Finite Element

วิธีการศึกษาในโครงงานศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของผิวทางแบบยืดหยุ่นจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระแทก โดยใช้แบบจำลอง Linear Elastic Model โดยใช้โปรแกรม Plaxis 8.2 ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติ แทนการจำลองตามสภาพความเป็นจริง สำหรับในการวิเคราะห์แบ่งโครงสร้างทางออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ชั้นดินเดิม ชั้นรองพื้นทาง ชั้นพื้นทางและชั้นผิวทาง ค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษาอ้างอิงจากโครงสร้างผิวทางที่ใช้ออกแบบและงานวิจัยของกรมทางหลวง ได้แก่ ค่าความหนาของชั้นผิวทาง, อัตราส่วนปัวซอง (Poisson’s Ratio, ν) และค่าความแข็งแรงของดิน (Young’s Modulus, E)

สมการในการประเมินสภาพผิวทางจะใช้วิธี Deflection method จะสร้างโดยการใช้วิธี parametric study โดยใช้วิธี Finite Element โดยจะศึกษาให้ครอบคลุมกับสภาพผิวทางที่ใช้งานในประเทศไทย เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานของผู้ตรวจสอบถนนวิธี Deflection จึงเป็นวิธี ที่จะนำเสนอเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน โดยจะใช้หลักการความหนาเทียบเท่า (Equivalent thickness) จากสมการด้านล่าง

$$T_A = -C_1 \log(D_{50} - D_0) + C_2 \qquad (3.3\text{-}1)$$

โดยT_A คือการประเมินเป็นความหนาของชั้นผิวทางที่เหลืออยู่
D_0 และ D_{50} คือการเสียรูปของผิวทางที่ค้อนตกกระทบและวัดออกมาก 50 cm ตามลำดับ
C_1 และ C_2 คือค่าคงที่ในสมการขึ้นกับสภาพของถนนในแต่ละประเทศ

ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการสร้างสมการอย่างง่ายเพื่อหาค่า C1 และ C2 ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในประเทศไทย

ปัจจัยและพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการศึกษา

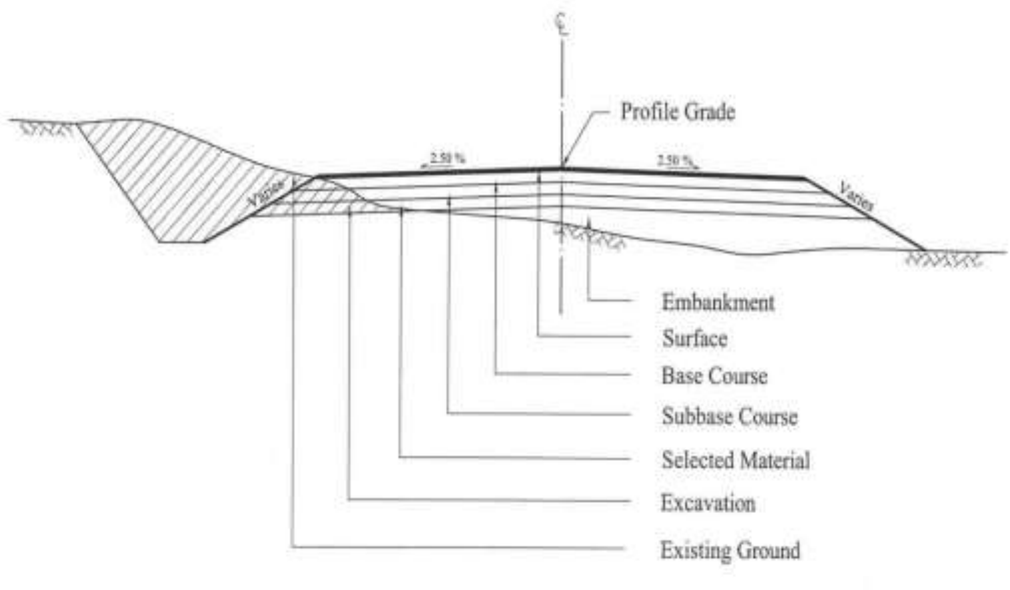
ในการศึกษาได้นำค่าพารามิเตอร์หลักและความหนาของโครงสร้างทางมาจากแบบมาตรฐานและงานวิจัยของกรมทางหลวง ดังตารางที่ 3.3-1 และตารางที่ 3.3-2 และรูปที่ 3.3-1

ตารางที่ 3.3-1 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ
(ที่มา : ดร. ธันวิน สวัสดิศานต์ และนายกฤษณะ จันทรโชติ, สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง)

อุณหภูมิ	ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)		
° C	เกรด 60/70	เกรด 40/50	PMA
5	14,936	20,060	16,472
20	6,611	8,803	7,658
35	1,462	2,311	1,985
50	266	401	445
60	175	225	303

ตารางที่ 3.3-2 ค่า E-Modulus และ ค่า CBR ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง
(ที่มา :ดร. ยงยุทธ แต้ศิริ, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง)

ชนิดของวัสดุชั้นทาง	E-Modulus (MPa)	CBR (%)
พื้นทางหินคลุก	300-400	80
รองพื้นทางวัสดุมวลรวม	150-200	25
ชั้นวัสดุคัดเลือก ก	80-110	10
ชั้นวัสดุคัดเลือก ข	40-70	6
ทรายถมคันทาง	10 x CBR(%)	10
ดินถมคันทาง	10 x CBR(%)	2-5



รูปที่ 3.3-1 แสดงรูปตัดแบบคันทางมาตรฐานของกรมทางหลวง

การวิเคราะห์ปัจจัยและพารามิเตอร์ที่มีผล

ในการศึกษานี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อทำให้แบบจำลองมีค่าการแอ่นตัวใกล้เคียงกับการแอ่นตัวตัวจริงที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Falling Weight Deflectometer ในสนาม

พารามิเตอร์

1. อัตราส่วนปัวซอง, ν
2. ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทาง, E
3. ความหนาของชั้นผิวทาง

- ขั้นตอนในการศึกษา

1. เลือก Soil Model ที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ Linear Elastic Model ค่าพารามิเตอร์หลักของ Linear Elastic Model มีด้วยกัน 2 ค่า ได้แก่

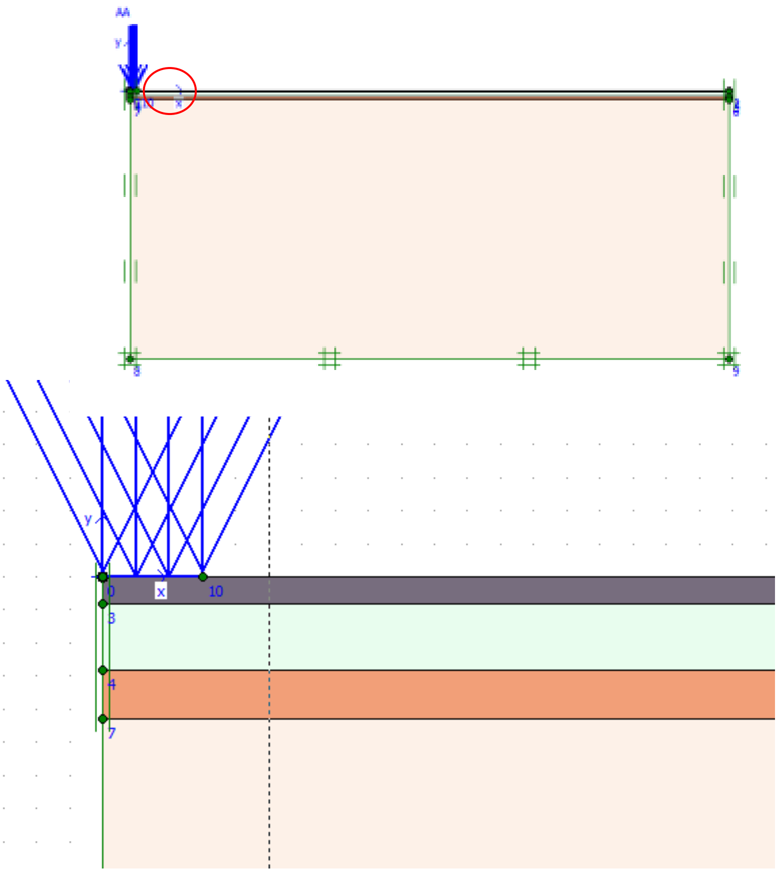
E : อีลาสติกโมดูลัส(Elastic Modulus)

ν : อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

2. จากนั้นใส่ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นลงใน Linear Elastic Model ของโปรแกรม Plaxis เพื่อศึกษาลักษณะการแอ่นตัวของผิวถนนแบบยืดหยุ่น ซึ่งจะใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 3.3-1 ตารางที่ 3.3-2 และรูปที่ 3.3-1 แรงที่กระทำต่อผิวทาง0.566 MPa (82 Psi) ตามรูปที่ 3.3-2

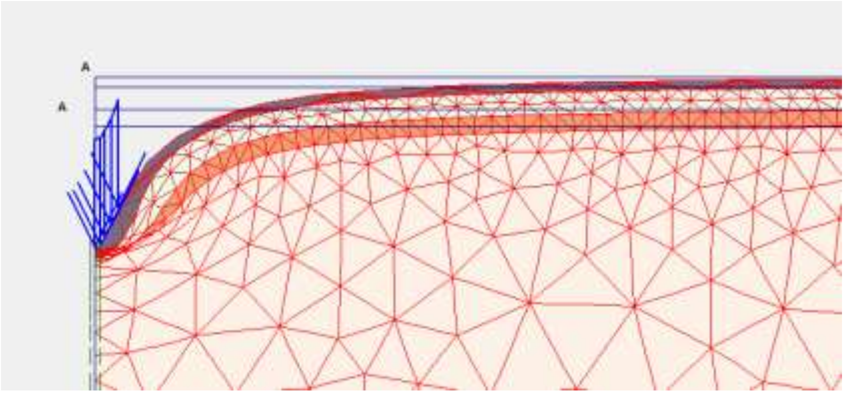
3.บันทึกผลค่าการแอ่นตัวที่0 200 300 500 600 900 1200 1500 และ 1800 มม. จากศูนย์กลางของแรง

4. ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์โดยเปลี่ยนค่า E ของผิวทางแบบยืดหยุ่น เท่ากับ 1500, 1400, 1300,...100 Mpa และเปลี่ยนค่าความหนาของผิวทางแต่ละพารามิเตอร์E เท่ากับ 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3,และ2ซม.



รูปที่ 3.3-2 แสดงการจำลอง Soil Model ในโปรแกรม Plaxis

5. นำค่าการทรุดตัวจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์แต่ละกรณี มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นผิวทาง และผลต่างของการเสียรูปที่จุดD_0 และจุดD_{50}ในรูปของลอกการิธึม - Log (D_{50}-D_0) ค่าการแอ่นตัว



รูปที่ 3.3-3 แสดงการเสียรูปของแบบจำลอง Soil Model ในโปรแกรมPlaxis

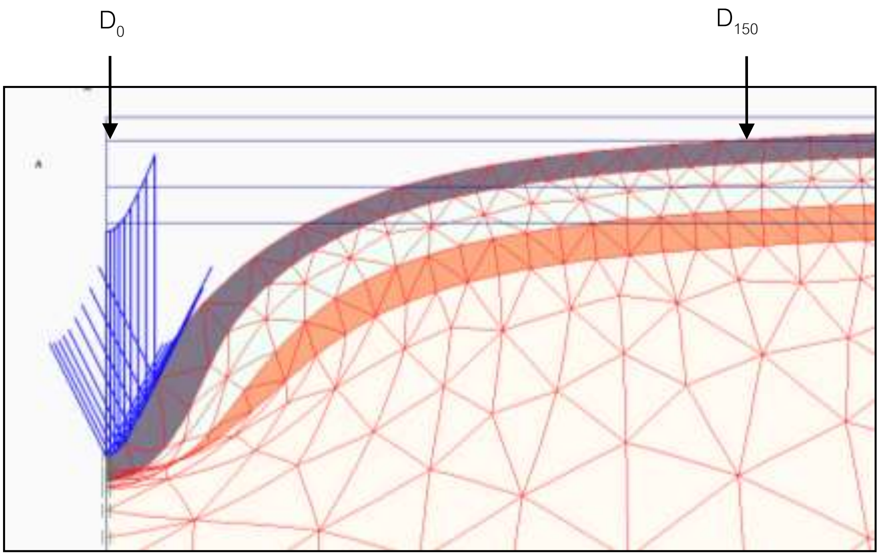
ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการจำลองรูปแบบการทดสอบเพื่อศึกษาการเสียรูปของผิวทางแบบยืดหยุ่นจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระทบ โดยค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา อ้างอิงมาจากโครงสร้างผิวทางที่ใช้ออกแบบและงานวิจัย ของกรมทางหลวง ได้แก่ ค่าความหนาของชั้นผิวทาง, อัตราส่วนปัวซอง (Poisson’s Ratio, ν) และค่า ความแข็งแรงของดินและชั้นผิวทาง (Elastic Modulus, E) การศึกษาได้เลือกใช้ Soil Model เป็น Linear Elastic Mode เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้มีสองค่าคืออัตราส่วนปัวซองและค่าอีลาสติคโมดูลัส
ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเค้นในมวลดิน (Stress) กับความเครียด (Strain)จะสัมพันธ์กันโดยตรง
ซึ่งจะสามารถศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัวของผิวทางแบบยืดหยุ่นจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระทบ แล้วนำค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นที่จุดที่ค้อนตกกระทบและระยะห่าง50 ซม.ออกจากจุดตกกระทบมาใช้สร้างสมการเพื่อใช้ในการประเมินความแข็งแรงของถนน โดยจะประเมินความแข็งแรงของถนนเป็นค่าความหนาที่เหลืออยู่ (T_A) โดยใช้สมการ T_A= -C_1log(D_{50}-D_0)+C_2 (คู่มือปฏิบัติงานศูนย์ซ่อมถนน ญี่ปุ่น 1996) ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองได้ 144 กรณี

3.4 ผลการศึกษาการแอ่นตัวของผิวทางจาก Finite Element

ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการจำลองรูปแบบการทดสอบเพื่อศึกษาการเสียรูปของผิวทางแบบยืดหยุ่นจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระทบ โดยค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการศึกษา อ้างอิงมาจากโครงสร้างผิวทางที่ใช้ออกแบบของกรมทางหลวง ได้แก่ ค่าความหนาของชั้นผิวทาง, อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, ν) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินและชั้นผิวทาง (Elastic Modulus, E) (ธันวิน และกฤษณะ, 2544, ยงยุทธ, 2544) การศึกษาได้เลือกใช้ Soil Model เป็น Linear Elastic Model เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ และพฤติกรรมของชั้นทางมีความใกล้เคียงกับ คุณสมบัติความเป็นอีลาสติก(บุญธรรม, 2547) โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้มีสองค่าคืออัตราส่วนปัวซองและค่าอีลาสติกโมดูลัส ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเค้นในมวลดิน กับความเครียดจะสัมพันธ์กันโดยตรง(จีรพัฒน์, 2543) ซึ่งจะสามารถศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัวของผิวทางแบบยืดหยุ่นจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระทบ แล้วนำค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นที่จุดที่ค้อนตกกระทบและระยะห่าง150 ซม.ออกจากจุดตกกระทบมาใช้สร้างสมการเพื่อใช้ในการประเมินความแข็งแรงของถนนในประเทศไทย โดยจะประเมินความแข็งแรงของถนนเป็นค่าความหนาที่เหลืออยู่ของถนน (T_A)

3.4.1 แบบจำลองการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระทบโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนท์

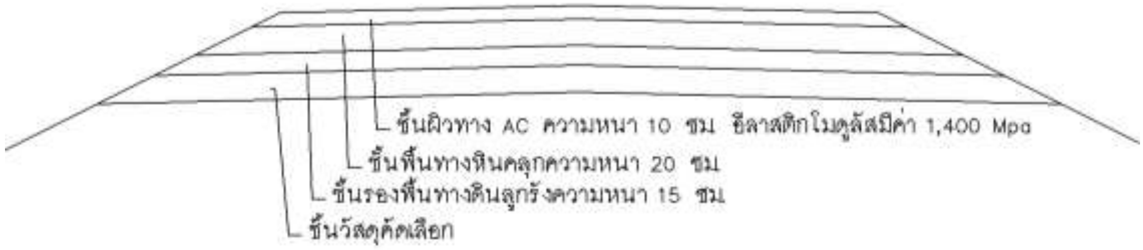
การจำลองการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระทบ จะจำลองโดยการกำหนดค่าความหนาในแต่ละชั้นให้ได้ตามมาตรฐานโครงสร้างทางของกรมทางหลวง จากนั้นใส่แรงกระทำจากภายนอกซึ่งเป็นการจำลองน้ำหนักที่ตกกระทบกับผิวทางแบบเดียวกับการทดสอบFWD โครงสร้างทางจะเกิดการเสียรูปตามรูปที่ 3.3-1 แล้ววัดค่าการเสียรูปของผิวทางที่จุดที่แรงภายนอกกระทำ (D_0) และค่าการเสียรูปที่วัดออกมาจากจุดที่แรงกระทำเป็นระยะ 150 ซม. (D_{150}) เพื่อการเปรียบเทียบกับสมการของประเทศญี่ปุ่น(RMC Japan, 1996) และค่าการเสียรูปที่ไกลออกจากจุดศูนย์กลางแรง (150 ซม.) จะมีผลเนื่องจากอิทธิพลค่าความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างทางที่อยู่ชั้นล่าง(Horak E, 2006) ต่อมาให้เปลี่ยนเฉพาะค่าความหนาของชั้นผิวทางลงมาตั้งแต่ 10 ซม.จนถึง 2 ซม.แล้วจึงวัดค่าการเสียรูปในแต่ละกรณีที่เปลี่ยนค่าความหนาตามแบบที่กล่าวมาข้างต้นแล้วจึงนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของชั้นผิวทาง (Effective Equivalent thickness, T_A)กับผลต่างของการเสียรูปที่จุดD_0 และจุดD_{150}ในรูปของลอกการิธึม Log (D_0-D_{150})เพื่อการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับสมการของประเทศญี่ปุ่น(RMC Japan, 1996) จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง T_A และ Log (D_0-D_{150})จึงสามารถหาค่าสมการสำหรับประเมินความแข็งแรงของถนนได้ต่อไป



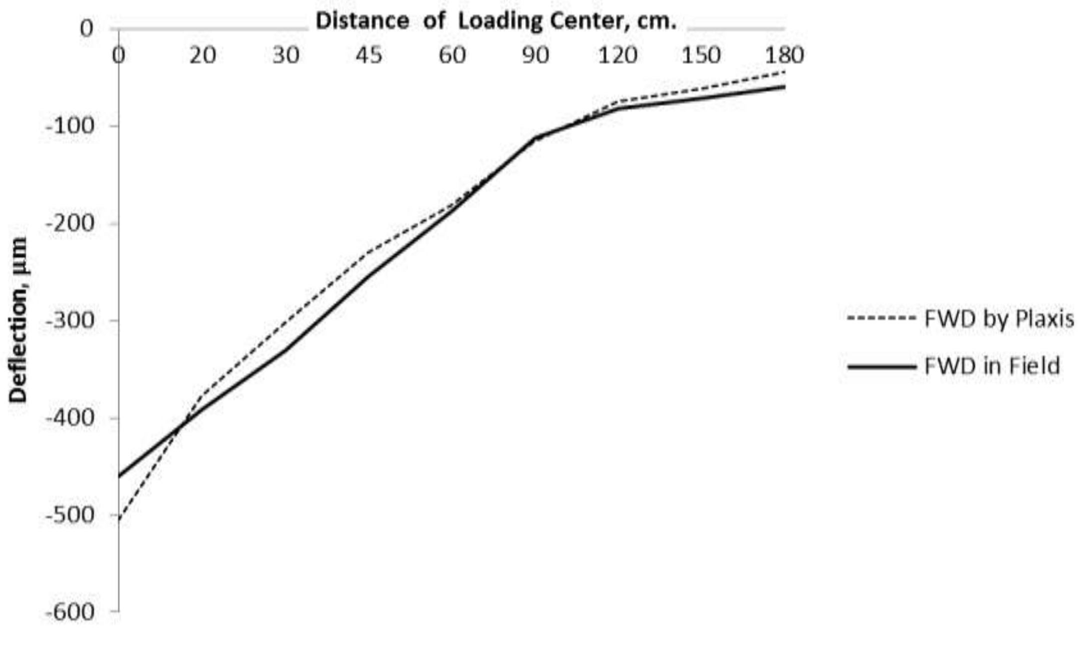
รูปที่ 3.4-1 แสดงการจำลองการเสียรูปของพื้นทางแบบยืดหยุ่น ในโปรแกรมPlaxis และตำแหน่งที่วัดค่าการเสียรูปD_0และD_{150}

3.4.2 การประเมินความถูกต้องของการจำลองการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระทบโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนท์

เนื่องจากการวิจัยนี้จำเป็นต้องมีการจำลองการทดสอบFWDโดยใช้โปรแกรมPlaxis ผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของการจำลอง โดยการเปรียบเทียบค่าการเสียรูปที่เกิดจากการจำลองFWDโดยใช้โปรแกม PlaxisกับการทดสอบFWD จากการทดสอบจริงบนถนนของกรมทางหลวงโดยเลือกข้อมูลการทดสอบ FWD ของสายทางหมายเลข 218 ตอน บุรีรัมย์ – นางรอง ตามรูปที่ 3.4.2 โดยเปรียบเทียบเฉพาะข้อมูลที่ความหนาของผิวทางแอสฟัลท์ติกคอนกรีตเท่ากับ 10 ซม.และค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางประมาณ 1,200 – 1,500 Mpa ซึ่งจากการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการจำลอง FWD โดยโปรแกรมPlaxis ดังรูปที่ 3.4-3



รูปที่ 3.4-2 รูปแสดงหน้าตัดถนนสายทางหมายเลข 218 ตอน บุรีรัมย์ – นางรอง

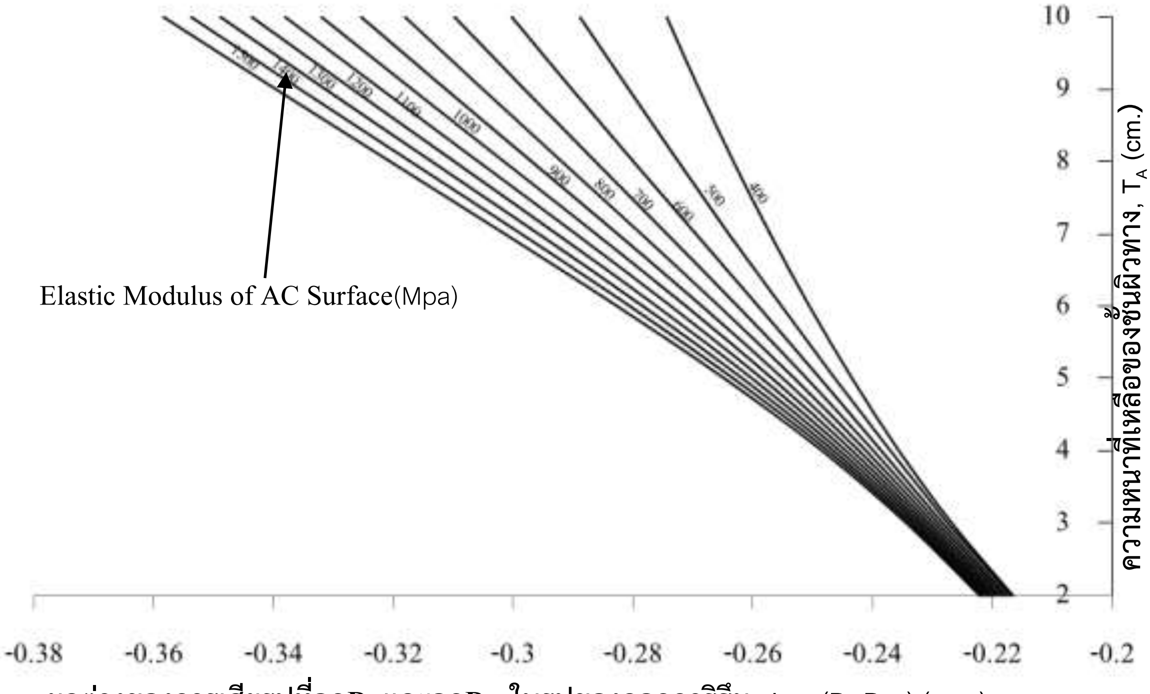


รูปที่ 3.4-3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการเสียรูปของผิวทางแอสฟัลท์ติกคอนกรีตระหว่างการจำลอง FWDโดยใช้PlaxisกับการทดสอบFWD ที่หน้างานจริง

3.4.3 การเสียรูปของผิวทางแบบยืดหยุ่นจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระทบโดยการจำลองโดยการใช้โปรแกรมPlaxisในกรณีที่เปลี่ยนค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง

เมื่อนำค่าการเสียรูปที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาของชั้นผิวทาง (T_A)และผลต่างของการเสียรูปที่จุด D_0 และจุด D_{150} ในรูปของลอกการิธึมในทุกกรณีจะได้กราฟตามรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าอีลาสติกโมดูลัสที่มีค่าน้อยส่งผลให้ค่าความชันมากขึ้นและค่าอีลาสติกโมดูลัสที่มีค่ามากส่งผลให้ค่าความชันน้อยลง ในกรณีที่ค่าความหนาของชั้นแอสฟัลท์ติกเท่ากัน ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางที่มากจะทำให้ผลต่างของการเสียรูปที่จุดD_0 และจุดD_{150} ในรูปของลอกการิธึมมีค่ามากขึ้นด้วย

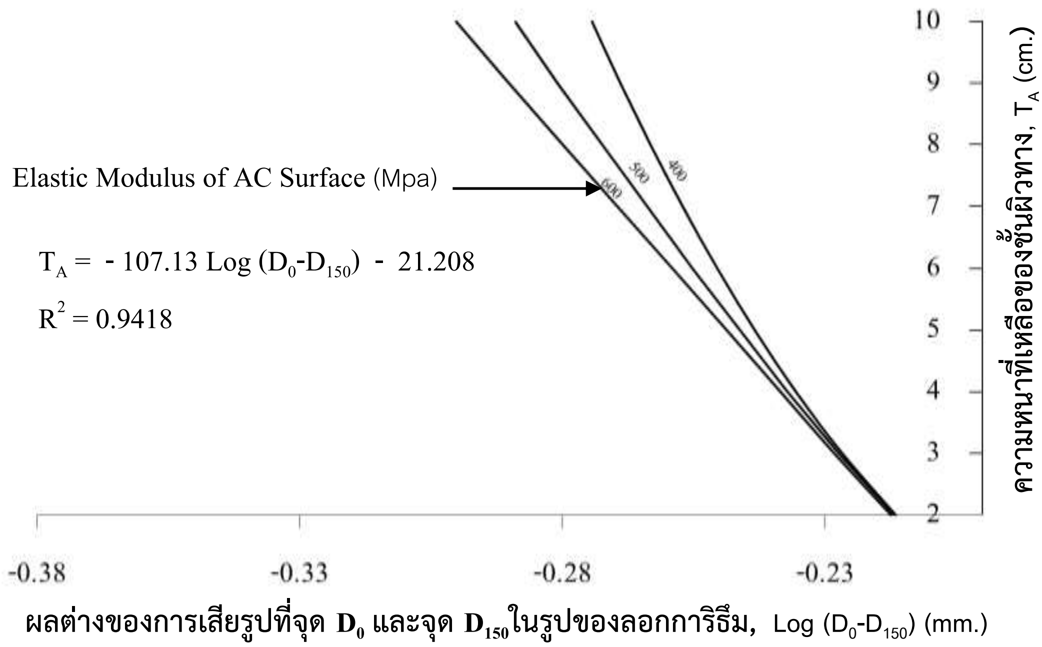
จากกราฟรูปที่ 3.4-4 จะเห็นได้ว่าไม่สามารถสร้างสมการได้เพียงสมการเดียวเพื่อใช้กับค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางทุกค่า ผู้วิจัยจึงได้แบ่งค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางเป็น 4 กลุ่มคือ ค่าอีลาสติกโมดูลัสชั้นผิวทางตั้งแต่ 400 – 600 MPa ค่าอีลาสติกโมดูลัสชั้นผิวทางตั้งแต่ 600-900 MPa ค่าอีลาสติโมดูลัสชั้นผิวทางตั้งแต่ 900 – 1,200 MPa และค่าอีลาสติกโมดูลัสชั้นผิวทางตั้งแต่ 1,200-1,500 MPa เพื่อใช้กับสภาพของผิวถนนที่แตกต่างกันไป ตามรูปที่ 3.4-5 ถึง รูปที่ 3.4-6



รูปที่ 3.4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาที่เหลือของชั้นผิวทาง (T_A)และผลต่างของการเสียรูปที่จุดD_0 และจุดD_{150} ในรูปของลอกการิธึมในกรณีค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางตั้งแต่ 400 Mpaถึง 1,500 MPa

กรณีการเปลี่ยนค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางเท่ากับ 400 - 600 MPa จากการสร้างกราฟแล้วจะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งสมการสำหรับประเมินความแข็งแรงของถนนที่ได้คือ

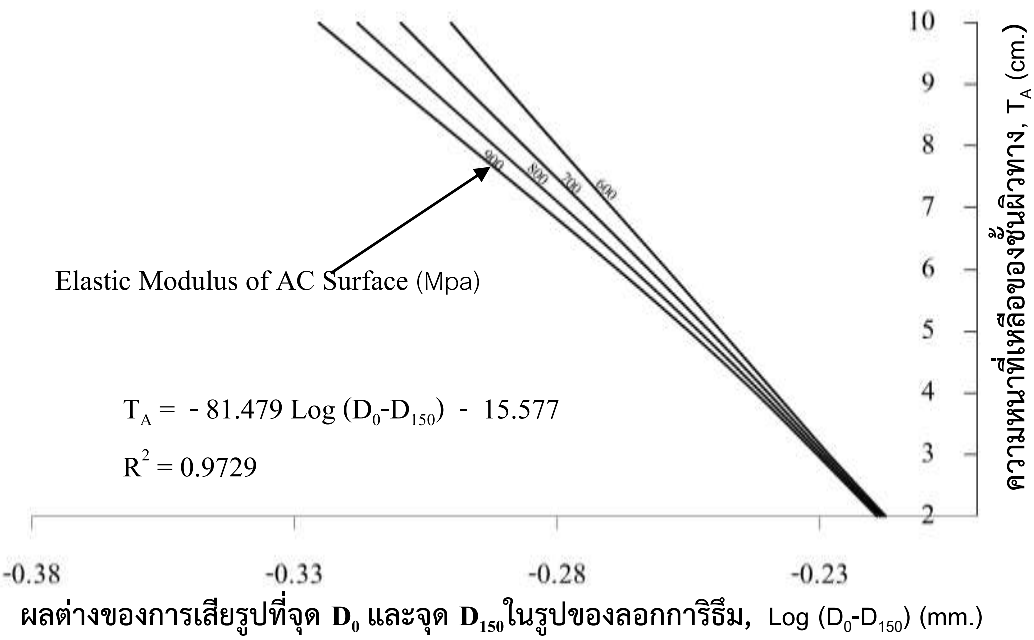
$T_A = -107.13 \text{ Log } (D_0\text{-}D_{150}) - 21.208$ ดังแสดงในรูปที่ 3.4-5



รูปที่ 3.4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาที่เหลือของชั้นผิวทาง (T_A)และผลต่างของการเสียรูปที่จุด D_0 และจุด D_{150} ในรูปของลอกการิธึม ในกรณีค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางตั้งแต่ 400 MPa ถึง 600 MPa

กรณีการเปลี่ยนค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางเท่ากับ 600 - 900 MPa จากการสร้างกราฟแล้วจะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งสมการสำหรับประเมินความแข็งแรงของถนนที่ได้คือ

$T_A = -81.479 \text{ Log } (D_0\text{-}D_{150}) - 15.577$ ดังแสดงในรูปที่ 3.4-6



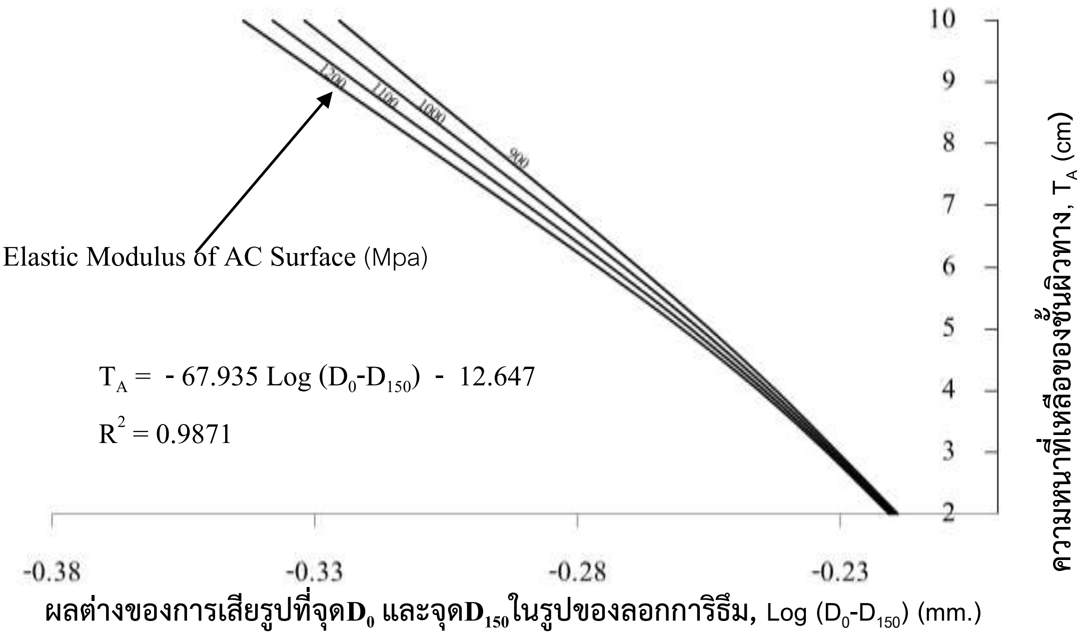
รูปที่ 3.4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาที่เหลือของชั้นผิวทาง (T_A)และผลต่างของการเสียรูปที่จุด D_0 และจุด D_{150} ในรูปของลอกการิธึม ในกรณีค่าอีลาสติกโมดูลลัสของชั้นผิวทางตั้งแต่ 600 MPa ถึง 900 MPa

กรณีการเปลี่ยนค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางเท่ากับ 900 – 1,200 MPa จากการสร้างกราฟแล้วจะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งสมการสำหรับประเมินความแข็งแรงของถนนที่ได้คือ

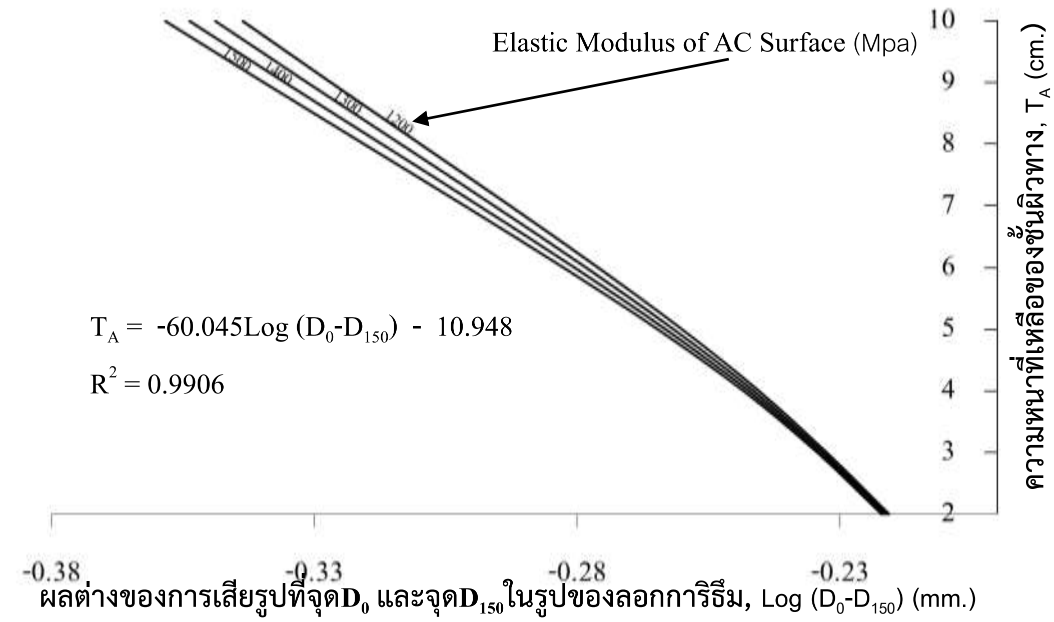
$T_A = -67.935 \text{ Log } (D_0\text{-}D_{150}) - 12.647$ ดังแสดงในรูปที่ 3.4-7

กรณีการเปลี่ยนค่าอีลาสติกโมดูลัสเท่ากับ 1,200 – 1,500 MPa จากการสร้างกราฟแล้วจะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งสมการสำหรับประเมินความแข็งแรงของถนนที่ได้คือ

$T_A = -60.045 \text{ Log } (D_0\text{-}D_{150}) - 10.948$ ดังแสดงในรูปที่ 3.4-8

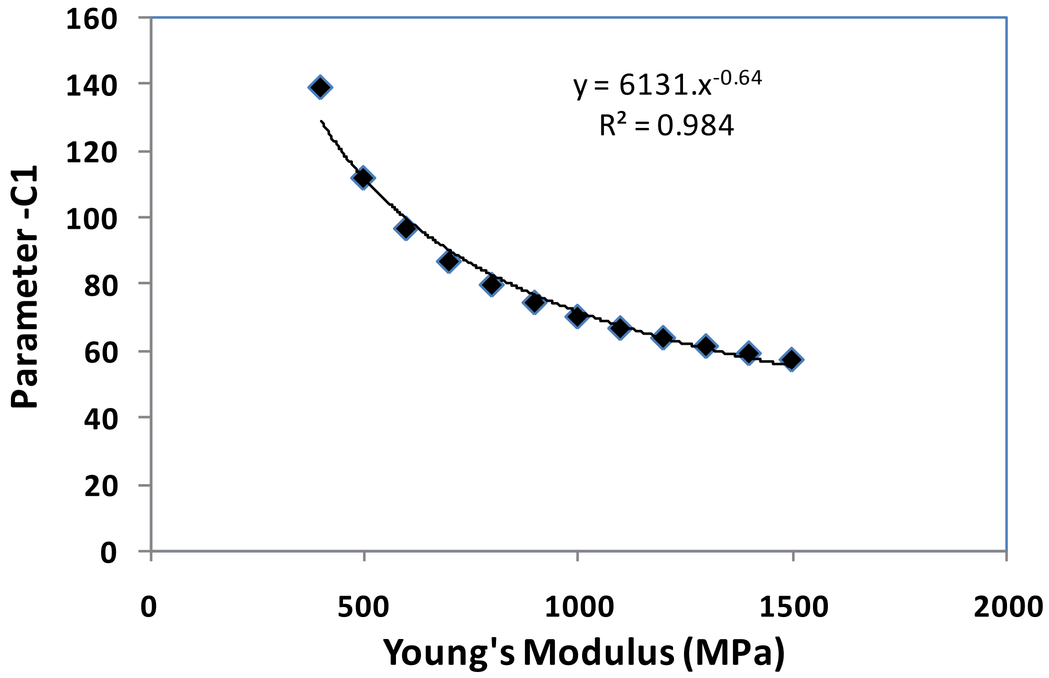


รูปที่ 3.4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาที่เหลือของชั้นผิวทาง (T_A)และผลต่างของการเสียรูปที่จุด D_0 และจุด D_{150} ในรูปของลอกการิธึม ในกรณีค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางตั้งแต่ 900 MPa ถึง 1,200 MPa

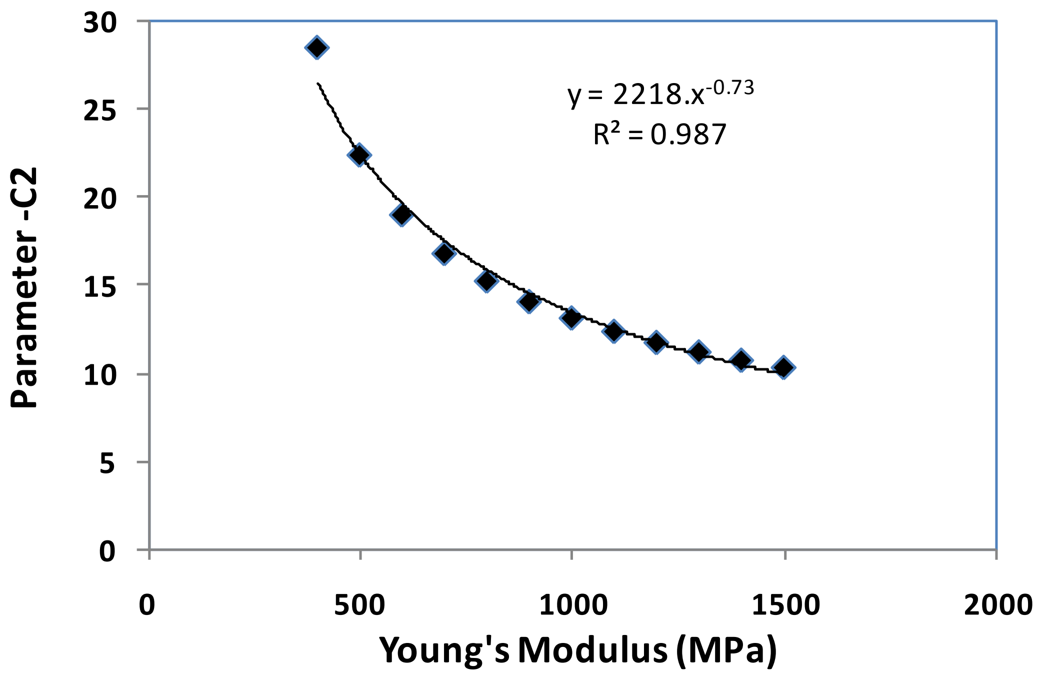


รูปที่ 3.4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาที่เหลือของชั้นผิวทาง (T_A)และผลต่างของการเสียรูปที่จุด D_0 และจุดD_{150} ในรูปของลอกการิธึมในกรณีค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางตั้งแต่ 1,200 MPaถึง 1,500 MPa

อย่างไรก็ตามหากต้องการให้ละเอียดขึ้น สามารถพิจารณาได้ว่า ความหนาที่เหลือของชั้นผิวทาง, T_A (cm.) มีความสัมพันธ์กับ ผลต่างของการเสียรูปที่จุดD_0 และจุดD_{150}ในรูปของลอกการิธึม, Log (D_0-D_{150}) (mm.) ในลักษณะประมาณเป็นเชิงเส้นได้ด้วยค่าความชัน (ค่า C1) และจุดตัดแกน y (ค่า C2) ที่ค่าต่างๆกันขึ้นอยู่กับค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง ดังนั้นสามารถแยกทำ regression analysis ของแต่ละค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง พบว่าให้ค่า coefficient of determination ไม่น้อยกว่า 0.989 เมื่อนำค่า C1 และ C2 มาสร้างความสัมพันธ์กับ ค่าอีลาสติกโมดูลัส, E พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์กับ ค่าอีลาสติกโมดูลัส, E แบบเชิงยกกำลังดังรูปที่ 3.4-9 และ 3.4-10 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พารามิเตอร์ C1 (ค่าลบ) กับ ค่าอีลาสติกโมดูลัส



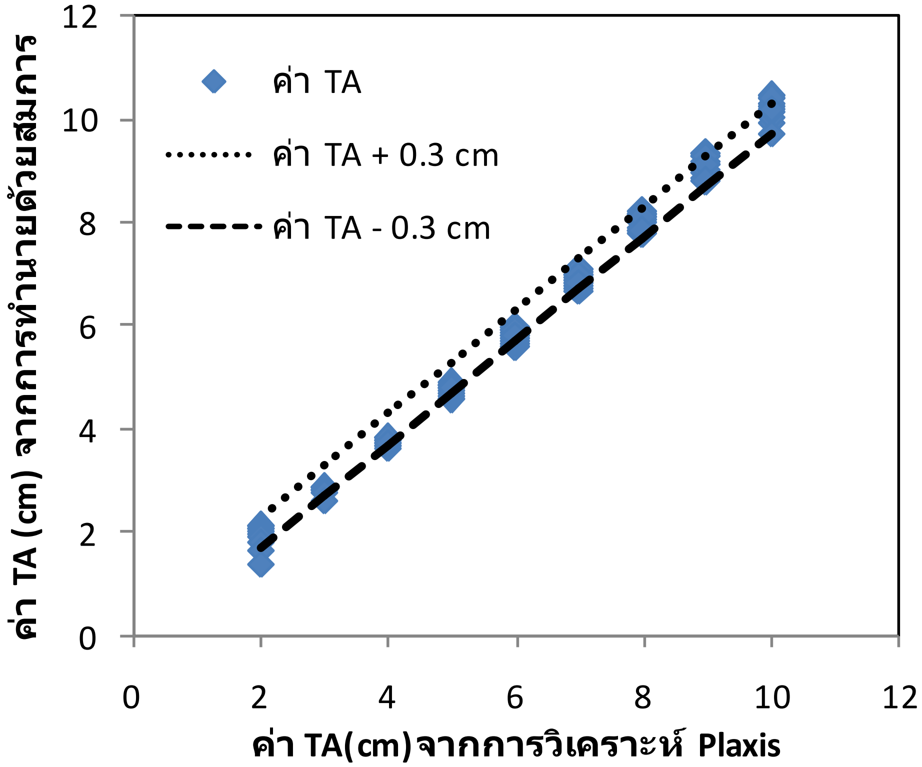
รูปที่ 3.4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พารามิเตอร์ C2 (ค่าลบ) กับ ค่าอีลาสติกโมดูลัส

เมื่อนำความสัมพันธ์แบบเชิงยกกำลังดังกล่าวในเทอมของ ค่าอีลาสติกโมดูลัส, E มาแทนที่ตัวแปร C1 และ C2 ในสมการเชิงเส้นของความหนาที่เหลือของชั้นผิวทาง, T_A (cm.) มีความสัมพันธ์กับ ผลต่างของการเสียรูปที่จุดD_0 และจุดD_{150}ในรูปของลอกการิธึม, Log (D_0-D_{150}) (mm.) จะได้สมการสุดท้ายดังสมการ 3.4-1

$$TA = -6131*\text{Log}\,(D_0-D_{150})*E^{-0.6385} - 2218*E^{-0.73} \qquad (3.4\text{-}1)$$

โดยที่ TA หน่วยเป็น cm ; D_0 และ D_{150} หน่วยเป็น mm; และ E หน่วยเป็น MPa

โดยการนำสมการสุดท้ายที่ได้มาทำนายค่าความหนาที่เหลือของชั้นผิวทาง, T_A (cm.) จากค่าผลต่างของการเสียรูปที่จุดD_0 และจุดD_{150} แล้วเปรียบเทียบกับค่าตั้งต้นที่ได้จากการจำลองFWDโดยใช้โปรแกม Plaxis แสดงดังรูปที่ 3.4.11



รูปที่ 3.4-11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของค่า TA จากค่าจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Plaxis กับค่าทำนายจากสมการที่ 3.4-1

จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าทำนายส่วนมากจะอยู่ในช่วงความถูกต้อง ±0.3 cm ถือได้ว่ามีความแม่นยำค่อนข้างดี อย่างไรก็ตามที่ค่า TA ต่ำๆโดยเฉพาะ ค่าเท่ากับ 2 cm การทำนายด้วยสมการจะไม่ค่อยดีนัก

3.4.4 สรุปสมการหาค่าความหนาที่เหลืออยู่ T_A ที่ได้จากการจำลองการทดสอบFWD

จาการจำลองพฤติกรรมการแอ่นตัวของผิวทางแบบยืดหยุ่นจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระทบโดยใช้โปรแกรม Plaxis แล้วนำค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นที่จุดที่ค้อนตกกระทบและระยะห่าง 150 ซม.จากจุดตกกระทบมาใช้สร้างสมการเพื่อใช้ในการประเมินความแข็งแรงของถนน โดยจะประเมินประสิทธิภาพของถนนเป็นค่าความหนาที่เหลืออยู่ (T_A) ได้รูปแบบของสมการดังนี้

$T_A = C_1 \text{ Log } (D_0 - D_{150}) + C_2$ จากการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ สามารถสรุปค่าได้ตามตารางที่ 3.4-1 หรือจะใช้การทำนายจากสมการ 3.4-1 ก็ได้หากทราบค่าอีลาสติกโมดูลัส, E ที่ค่อนข้างแม่นยำเช่นการทดสอบจากตัวอย่างที่ coring ไป

ตารางที่ 3.4-1 สรุปค่าC_1 , C_2และสมการหาค่าความหนาที่เหลืออยู่ T_A

ความแข็งแรงของชั้นผิวทาง (Young's Modulus, E)	ค่า C1	ค่า C2	สมการหาค่า T_A
400 - 600 Mpa	- 107.13	- 21.208	T_A = - 107.13 Log (D_0-D_{150}) - 21.208
600 - 900 Mpa	- 81.479	- 15.577	T_A = - 81.479 Log (D_0-D_{150}) - 15.577
900 – 1,200 Mpa	- 67.935	- 12.647	T_A = - 67.935 Log (D_0-D_{150}) - 12.647
1,200 – 1,500 Mpa	- 60.045	- 10.948	T_A = - 60.045 Log (D_0-D_{150}) - 10.948

ค่าอีลาสติกโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิประมาณ 35 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 1,400 MPa (ธันวินและกฤษณะ ,2544) ผู้วิจัย จึงใช้สมการจากตารางที่ 3.4-1 ที่ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทาง 1,200-1,500 MPa ซึ่งเป็นค่าอีลาสติกโมดูลัสของผิวทางถนนแอสฟัลท์ติกคอนกรีตที่ใช้ในงานถนนสายหลักของกรมทางหลวง(ชยธันว์ และคณะ, 2546)

สมการคือ T_A = - 60.045 Log (D_0-D_{150}) - 10.948 ซึ่งสมการที่ได้จะต่างจากสมการที่ใช้ในประเทศญี่ปุ่นคือ T_A = -25.8 Log (D_0-D_{150}) + 11.11 (RMC Japan, 1996) สังเกตจากค่าความชันจากสมการของประเทศญี่ปุ่นซึ่งมีค่า -25.8 ซึ่งมีค่าความชันน้อยกว่าสมการที่ได้จากงานวิจัย จากรูปที่ 3.4-1 จากกราฟผลการจำลองFWDแสดงให้เห็นว่าค่าอีลาสติกโมดูลัสของผิวทางที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ ค่าความชันยิ่งมีค่าน้อยลง แสดงถึงผิวทางของถนนมีค่าความแข็งแรงสูงขึ้นด้วย จากการวิเคราะห์ค่าคงที่ในสมการที่ได้ไม่เท่ากับสมการของประเทศญี่ปุ่นจึงอาจเกิดจากวัสดุที่ใช้ก่อสร้างถนนของประเทศญี่ปุ่นมีค่าอีลาสติกโมดูลัสที่สูงกว่าของไทยและค่าความหนาของชั้นผิวทางของถนนในประเทศญี่ปุ่นที่มีความหนามากกว่าพื้นทางของประเทศไทย โดยค่าความหนาพื้นทางหลวงแห่งชาติประเทศญี่ปุ่นมี ความหนา 15 ซม. ชั้นรองพื้นทางมีความหนา 30 ซม.และชั้นพื้นทางมีความหนา 15 ซม. โดยทั้งชั้นพื้นทางและรองพื้นทางใช้วัสดุหินบดในการก่อสร้าง(NHRM, 2004) ซึ่งสมการที่ได้จากงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์โดยใช้ค่าความหนาและค่าอีลาสติกโมดูลัสวัสดุของถนนในประเทศไทยจึงทำให้ค่าที่ออกมาได้ไม่เท่ากัน

3.4.5 การประเมินความถูกต้องของสมการที่ได้จากการวิจัย

สมการที่ได้จากงานวิจัยมีค่าต่างจากสมการของศูนย์ซ่อมบำรุงประเทศญี่ปุ่น ทั้งนี้อาจเกิดจากค่าความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ต่างกัน ผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของสมการโดยการเปรียบเทียบการเสริมผิวทางจากการใช้สมการที่ได้จากการจำลอง FWD เทียบกับโปรแกรม ELMOD ของกรมทางหลวงโดยเปรียบเทียบจากการทดสอบจริงในเส้นทางกรมทางหลวงหมายเลข 218 ตอน บุรีรัมย์ – นางรอง เฉพาะผลข้อมูลที่ค่าผิวทางแอสฟัลท์ติกมีค่าอีลาสติกโมดูลัสประมาณ 1,200 MPa ถึง 1,500 MPaและความหนา 10 ซม. เพื่อให้ตรงกับค่าอีลาสติกโมดูลัสที่ใช้ในการวิจัยและค่าความหนาของโครงสร้างทางที่ตรงกับการจำลอง FWD

ซึ่งค่าการเสริมผิวทางหาได้จากสมการ T_A(Overlay) = Initial T_A - T_A

โดย Initial T_A คือ ค่าความหนาของผิวทางแอสฟัลท์ติกเริ่มต้น 10 ซม.

T_A คือ ค่าความหนาที่เหลืออยู่จากการใช้สมการที่ได้จากการวิจัย

ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่าจากการใช้สมการที่ได้จากงานวิจัย ค่าการเสริมผิวทางมีค่าที่ได้ใกล้เคียงกับสมการELMOD โดยที่ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางและรองพื้นทางจากการทดสอบและวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม ELMOD จะต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าสมมติฐานในการจำลองFWDโดยการใช้โปรแกรม Plaxis ซึ่งสรุปได้ตามตารางที่ 3.4-2

ตารางที่ 3.4-2 การเปรียบเทียบค่าการเสริมผิวทางที่ได้จากงานวิจัยและค่าการเสริมผิวทางที่ได้จากโปรแกรมELMOD

case	1	2
Thickness Pavement	10	10
D0(μm)	562.8	310.7
D150(μm)	64.1	46.2
E1(Mpa)	1424.4	1542.9
E2(Mpa)	425.1	421.8
E3(Mpa)	109.6	233.9
E4(Mpa)	101.0	226.2
ELMOD(Overlay) (cm)	2.0	0
T_A(Overlay) (cm)	2.8	0

3.4.6 การนำสมการที่ได้จากการวิจัยไปใช้งาน

สมการที่ได้จากการวิจัย จะสามารถประเมินประสิทธิภาพของถนนในประเทศไทยเป็นค่าความหนาที่เหลืออยู่ (T_A) โดยอาจตั้งเป็นเกณฑ์ข้อกำหนดเบื้องต้นตามรูปแบบการประเมินของศูนย์ซ่อมทางประเทศญี่ปุ่น ยกตัวอย่างดังดังตารางที่ 3.4-3

ตารางที่ 3.4-3 ข้อกำหนดเพื่อการประเมินผลจาก ข้อมูลจาการทดสอบ FWD

Lack $T_A \leq 0$	Non Repair
$0 <$ Lack $T_A \leq 5$	V:Over lay
$5 <$ Lack $T_A \leq 10$	III: Asphalt Repair, II:All layer Repair
$10 <$ Lack T_A	II:All layer Repair

โดยค่า Lack T_A = Initial T_A – T_A

Initial T_A คือ ค่าความหนาของผิวทางแอสฟัลท์ติกเริ่มต้น 10 ซม.

T_A คือ ค่าความหนาที่เหลืออยู่จากการใช้สมการที่ได้จากการวิจัย

ถ้าค่า Lack T_A มีค่าน้อยกว่าศูนย์แสดงว่าถนนยังมีความแข็งแรงไม่ต้องทำการซ่อมแซม (Non Repair) แต่ถ้าถนนมีค่า Lack T_A มากว่า ศูนย์แต่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความหนาของผิวทางเริ่มต้นให้ทำการเสริมผิวทาง (Over lay) ตามค่าLack T_A และสุดท้ายถ้าค่า Lack T_A มีค่าเกินกว่าครึ่งของความหนาของผิวทางเริ่มต้นให้พิจารณาเป็นการซ่อมแซมผิวทางใหม่ทั้งหมด (Asphalt Repair) หรือเสริมความแข็งแรงจนถึงชั้นโครงสร้างทาง (All layer Repair)

ตัวอย่างการนำค่าไปใช้งาน จากตารางที่ 3.7-1 คือ ข้อมูลค่าการแอ่นตัวที่วัดได้จากการทดสอบFWDในสนาม ต่อมาจึงคำนวณหาค่า (T_A) โดยใช้สมการ T_A = - 60.045 Log (D_0-D_{150}) - 10.948 เมื่อได้ค่า T_A แล้วจึงนำไป หักออกจากค่าเริ่มต้นของความหนาถนน จึงได้ค่าที่ Lack T_A ตามตารางที่ 3.7-1แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับข้อกำหนดที่ตั้งไว้

ยกตัวอย่างเช่น ในจุดLoading Point ที่1 มีค่า Lack (T_A) = 5.7 cm ผลการประเมินก็คือ ต้องทำการซ่อมแซมชั้นผิวทางแอสฟัลท์ติกคอนกรีต (III: Asphalt Repair)

ตารางที่ 3.4-4 ข้อมูลค่าการแอ่นตัวจริงที่ได้จากการทดสอบ FWD

Loading Point	Deflection										Thickness of asphalt
	D0	D20	D30	D45	D60	D75	D90	D120	D150	D200	
	(µm)										(cm)
1	611	491	374	328	289	251	221	168	53	80	10
2	543	454	243	212	184	156	126	93	61	30	10
3	574	477	262	232	202	177	139	114	87	57	10
4	623	560	343	223	200	180	164	136	110	83	10
5	508	416	312	210	201	192	185	165	64	48	10
6	645	548	366	244	225	197	152	59	49	40	10

ตารางที่ 3.4-5 การวิเคราะห์และประเมินผลข้อมูลค่าการแอ่นตัวโดยใช้สมการ

$T_A = -60.045 \text{ Log } (D_0 - D_{150}) - 10.948$ ที่ได้จากงานวิจัย

Loading Point	Deflection		Residual T_A	Lack:T_A= Initial:T_A - T_A	Repair Measure
	D0	D150			
	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	
1	0.611	0.053	4.3	5.7	III: Asphalt Repair
2	0.543	0.061	8.1	1.9	V:Over lay
3	0.574	0.087	7.8	2.2	V:Over lay
4	0.623	0.11	6.5	3.5	V:Over lay
5	0.508	0.064	10.2	-0.2	Non Repair
6	0.645	0.049	2.5	7.5	II:All layer Repair

บรรณานุกรม

AASHTO (1993): Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Vol. 2, Washington D.C.

ASTM (2004) “Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device”, D 4649-09, ASTM International.

Boussinesq, J., 1885, Application of Potential to the Study of the Equilibrium and Movements in Elastic soils, Gauthier-Villars, Paris.

Bush, A.J. and Baladi, G.Y. (1989): Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP 1026, American Society for Testing and Materials, Maryland, USA, 1989.

FDOT (1998): Manual of Florida Sampling and Testing Methods, Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida

George, K.P. (2003): Falling Weight Deflectometer for Estimating Subgrade Resilient Moduli, Publication FHWA/MS-DOT-RD-03-153. U.S. Department of Transportation.

Hirakawa, D., Masuda, N., Tatsuoka, F., and Kawasaki, H. (2008): “Investigation of Relationship between Sand Ground Stiffness Values from FWD and from Plate Loading Tests”, Jiban Kogaku Janaru (Japanese Geotechnical Journal), Vol.3, No.4, pp.307-320 (in Japanese).

Kongkitkul, W., Punthutaecha, K., Moryadee, S., Posribink, T., Youwai, S., Jongpradist, P., Bumrungwong, C. and Hirakawa, D. (2010): “Evaluation of static-equivalent stiffness by a simple falling weight deflectometer”, Journal of Asian Transportation Research Society, Vol.2 (to appear).

Loizos, A., Boukovalas, G., and Karlaftis, A. (2003): “Dynamic Stiffness Modulus for Pavement Subgrade Evaluation, Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, No. 4, pp.434-443.

Masuda, N. (2007): “Investigation of Relationship between Sand Ground Stiffness Values from FWD and Plate Loading Tests”, M.Eng. Thesis, Tokyo University of Science (in Japanese).

National Highway and Risk Management Division, 2004, Inspection Manual, Road Bureau, Ministry of Land Infrastructure, Transport and Tourism, Japan.

Ping, W.V., Yang, Z., and Gao, Z. (2002): "Field and Laboratory Determination of Granular Subgrade Moduli", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 16, No.4, pp. 149-159.

Posribink, T., Kongkitkul, W., Youwai, S., and Jongpradist, P. (2012b) "Comparison of LWD and PLT for Surface Modulus", International Symposium on Sustainable Geosynthetics and Green Technology for Climate Change (SGCC 2011), Bangkok, Thailand, 20-21 June 2012.

Posribink, T., Kongkitkul, W., Youwai, S., and Jongpradist, P., and Punthutaecha, K. (2012a) "Influence of Falling Height and Plate Size on Surface Stiffness Evaluated by LWD", Proceedings International Conference on Highway Engineering 2012, Bangkok, Thailand, 18-20 April 2012, pp. 361-368

RMC, 1996, Operation Manual FWD, Road Maintenance Management Center, Road Bureau, Ministry of Land Infrastructure, Transport and Tourism , Japan.

จีรพัฒน์ โชติกไพร, 2543, การออกแบบทาง Pavement Design, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ.

ฐิติกร โพธิ์ศรีบิ้ง, วรัช ก้องกิจกุล, สมโพธิ อยู่ไว และคุณมาศ พันธุเตชะ (2553). "การประเมินค่าความแข็งแรงอย่างง่ายด้วยเครื่อง FWD ในสนามกับพื้นผิวที่ต่างกัน", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, GTE047, pp.127

ธนศักดิ์ ใฝ่กระโทก และ สมัคร สนทอง, 2541, "ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอิลาสติคโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จาการทดสอบด้วย FALLING WEIGHT DEFLECTOMETERZ(FWD)", ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง,หน้า 34-37

ธรรมมา เจียรธราวานิช (2546) การเปรียบเทียบการออกแบบเสริมผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ BENKELMANBEAM และ FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER , วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธันวิน สวัสดิศานต์ และ กฤษณะ จันทรโชติ, "การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 60/70 เกรด 40/50 และยางโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์" บทความโครงการวิจัยสำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง, หน้า 11-14.

ธันวิน สวัสดิศานต์ และ กฤษณะ จันทรโชติ, "การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 60/70 เกรด 40/50 และยางโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต, สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, หน้า 15

ยงยุทธ แต้ศิริ, พิชญ รุ่งเรืองวิโรจน์ และปิติศักดิ์ จันทรนิมิ , "ผลกระทบของน้ำหนักรถบรรทุกที่มีต่อโครงสร้างชั้นทาง", บทความสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง , หน้า 1-10.

ยงยุทธ แต้ศิริ, พิชญ รุ่งเรืองวิโรจน์, ปิติศักดิ์ จันทรนิมิ พรพจน์ , ผลกระทบของน้ำหนักรถบรรทุกที่มีต่อโครงสร้างชั้นทาง, ส่วนออกแบบและแนะนำโครงสร้างชั้นทาง สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง , หน้า 3-13

สราวุธ หมอยาดี, การันต์ คล้ายฉ่ำ, วรัช ก้องกิจกุล, สมโพธิ อยู่ไว และคุณมาศ พันธุเตชะ (2552). “Evaluation of stiffness values of ground base and asphaltic concrete by Falling Weight Deflectometer (FWD) and Plate Load Test (PLT)”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 13-15 พฤษภาคม 2552, Vol.1, pp.425-430.

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง, 2544, “การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และวิจัย”, บทความทางวิชาการประจำปี 2544, กรมทางหลวง, หน้า 1-15.

แสงชัย เทพสิทธิทราภรณ์, ประเสริฐ บุญธรักษา, ไพบูลย์ รติวิริยะพงศ์ (2534) “การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างชั้นทางโดยโปรแกรม ELMOD”, ส่วนสำรวจและประเมินสภาพทาง สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบกรมทางหลวง, หน้า4-5

อัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์, 2544, “การประเมินค่าโมดูลัสและค่า CBR ของวัสดุชั้นทาง”, ส่วนออกแบบและแนะนำโครงสร้างชั้นทาง สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, หน้า 4