



รายงานฉบับที่ วพ. 170 ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง
REPORT NO. 170 ROAD RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอีลาสติคโมดูลัสของผิวทาง
แอสฟัลต์คอนกรีตจากการทดสอบด้วย
FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)

โดย

นายธนศักดิ์ ไร่กระโทก
นายสมัคร สนทอง

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

DEPARTMENT OF HIGHWAYS, MINISTRY OF TRANSPORT AND COMMUNICATIONS,

RATCHATHEWI, BANGKOK 10400, THAILAND

**ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอีลาสติคโมดูลัสของผิวทาง
แอสฟัลต์คอนกรีต
จากการทดสอบด้วย FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)**

โดย

**นายธนศักดิ์ ไร่กระโทก
นายสมัคร สันทอง**

รายงานวิจัย ฉบับที่ วท. 170

**ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง
กรมทางหลวง**

กันยายน 2541

ISSN 0125-8044

รายงานฉบับนี้เป็นแนวความคิดของผู้เขียนเท่านั้น กรมทางหลวงไม่มีส่วนผูกพันแต่อย่างใด

คำนำ

ในงานวิศวกรรมการทาง การทราบค่าอีลาสติคโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทางสภาพที่เป็นจริงในสนาม สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการกำหนดความสามารถในการรับน้ำหนักของถนน, การกำหนดความหนาของการเสริมผิวทาง รวมทั้งการประเมินวิธีการที่ใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างทางที่เหมาะสม เพื่อให้การบริหารจัดการงานทางเกิดประโยชน์สูงสุด ในปัจจุบันการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing) หลายวิธีได้ถูกพัฒนาเพื่อให้การตรวจสอบโครงสร้างชั้นทางมีความละเอียดถูกต้องและรวดเร็ว สำหรับ Falling Weight Deflectometer (FWD) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีการหนึ่ง ซึ่งกรมทางหลวงได้นำมาใช้งานเพื่อพัฒนาวิธีการตรวจสอบโครงสร้างชั้นทางให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ปัจจุบันยังอยู่ในระหว่างการศึกษาวิจัยโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการตรวจสอบโครงสร้างชั้นทางโดยใช้ Falling Weight Deflectometer (FWD) จะมีส่วนช่วยให้การพัฒนา วิธีการประเมินสภาพทาง, การบริหารจัดการงานออกแบบ, ก่อสร้างและบำรุงรักษาทางของกรมทางหลวงในอนาคตให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



(นายศรีสุช จันทรางศุ)
อธิบดีกรมทางหลวง

**ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอีลาสติคโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต
จากการทดสอบด้วย FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)**

* * * * *

ชนศักดิ์ ใฝ่กระโทก
ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง
กรมทางหลวง

สมัคร สันทอง
ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง
กรมทางหลวง

บทคัดย่อ

คุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์หรือแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเฉพาะอีลาสติคโมดูลัสเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการประเมินความแข็งแรงของถนน แต่ค่าอีลาสติคโมดูลัสนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ณ ขณะใดขณะหนึ่ง ดังนั้นการวัดค่าอีลาสติคโมดูลัสของวัสดุแอสฟัลต์ในสนามที่อุณหภูมิต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่าอีลาสติคโมดูลัสจากอุณหภูมิที่ทำการทดสอบในสนามให้เป็นค่าที่อุณหภูมิมาตรฐานตามที่กำหนด แล้วจึงใช้ค่าอีลาสติคโมดูลัสที่ปรับแก้ค่าแล้วนั้นในการประเมินอายุการใช้งานและการออกแบบความหนาของการเสริมผิวทาง

ดังนั้นการทราบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าอีลาสติคโมดูลัสของวัสดุแอสฟัลต์ที่เป็นจริง จะทำให้การประเมินความแข็งแรงของถนน, การประเมินอายุการใช้งาน, การออกแบบเสริมผิวทาง รวมทั้งการศึกษาวิจัยอื่น ๆ เป็นไปอย่างถูกต้อง

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของการศึกษาวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	1
1.4 แผนการดำเนินงานศึกษาวิจัยและวิธีทดสอบ	2
บทที่ 2 การศึกษาวิจัยในอดีต	3
2.1 การตรวจสอบโครงสร้างทางแบบ NONDESTRUCTIVE TESTING (NDT)	3
2.2 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล (BACKCALCULATION)	5
2.3 คุณสมบัติทั่วไปของโครงสร้างชั้นทาง	21
บทที่ 3 แผนการศึกษาวิจัย	32
3.1 ข้อกำหนดในการศึกษาวิจัย	32
3.2 อุปกรณ์ เครื่องมือ ในการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ	32
3.3 ข้อมูลเบื้องต้น	33
3.4 แนวทางการวิเคราะห์ผลการสอบ	33
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย	41
4.1 คุณสมบัติของโครงสร้างชั้นทาง	41
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS และอุณหภูมิ	41
4.3 เปรียบเทียบผลการศึกษาวิจัยนี้กับการศึกษาวิจัยอื่น ๆ	70
บทที่ 5 สรุปและเสนอแนะ	82
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของการศึกษาวิจัย

ผิวทางชนิดยืดหยุ่น (FLEXIBLE PAVEMENT) ของถนน โดยเฉพาะผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณสมบัติเป็นทั้ง FLEXIBLE หรือ SEMI-RIGID เนื่องจากแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นวัสดุประเภท VISCOUS MATERIAL ซึ่งจะแปรเปลี่ยนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยเฉพาะค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีต (AC MODULUS) จะแปรเปลี่ยนค่อนข้างมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิต่ำไปสู่อุณหภูมิสูง ในขณะที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ ค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตอาจมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าโมดูลัสของคอนกรีต โดยมีค่าประมาณ 1×10^6 ถึง 2×10^6 PSI. ในขณะที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงอาจจะมีค่าประมาณ 50,000 ถึง 200,000 PSI.

ค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีต เป็นองค์ประกอบตัวหนึ่งซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าการแอ่นตัวของผิวทางเมื่อทำการทดสอบวัดค่าการแอ่นตัวของถนน ซึ่งนอกจากค่าโมดูลัสแล้ว ความหนาของโครงสร้างชั้นทางก็เป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งซึ่งมีผลต่อค่าการแอ่นตัวของผิวทางเช่นเดียวกัน ดังนั้นในกรณีของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาไม่มากนัก ค่าการแอ่นตัวจะเกิดขึ้นน้อยมากในชั้นผิวทาง แต่ในกรณีของชั้นผิวทางที่หนามาก ๆ จะมีค่าการแอ่นตัวค่อนข้างสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีต (AC MODULUS) ที่ใช้เป็นผิวทาง

1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

โดยทั่วไปการศึกษาจะต้องประกอบด้วยการศึกษาวิจัยทั้งในห้องปฏิบัติการและการศึกษาวิจัยในสนาม สำหรับการศึกษานี้จะเป็นการศึกษาวิจัยที่ได้จากการศึกษาวิจัยในสนามเท่านั้น

การศึกษาในสนามประกอบด้วย การเก็บรวบรวมข้อมูลค่าการแอ่นตัวของผิวทางในสายทางที่คัดเลือกไว้แล้ว จากข้อมูลค่าการแอ่นตัวของผิวทางจะนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าโมดูลัสของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่แปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ

1.4 แผนการดำเนินงานศึกษาวิจัยและวิธีทดสอบ

การศึกษาวิจัยนี้จะใช้เครื่องมือ FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD) ซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (NONDESTRUCTIVE TESTING, NDT) วัดค่าการแอ่นตัวของผิวทางในการเก็บรวบรวมข้อมูล สำหรับการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์ในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม ELMOD 3 ในการวิเคราะห์ แล้วจึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าแอสฟัลต์คอนกรีตโมดูลัส

บทที่ 2

การศึกษาวิจัยในอดีต

2.1 การตรวจสอบโครงสร้างชั้นทางแบบ NONDESTRUCTIVE TESTING (NDT)

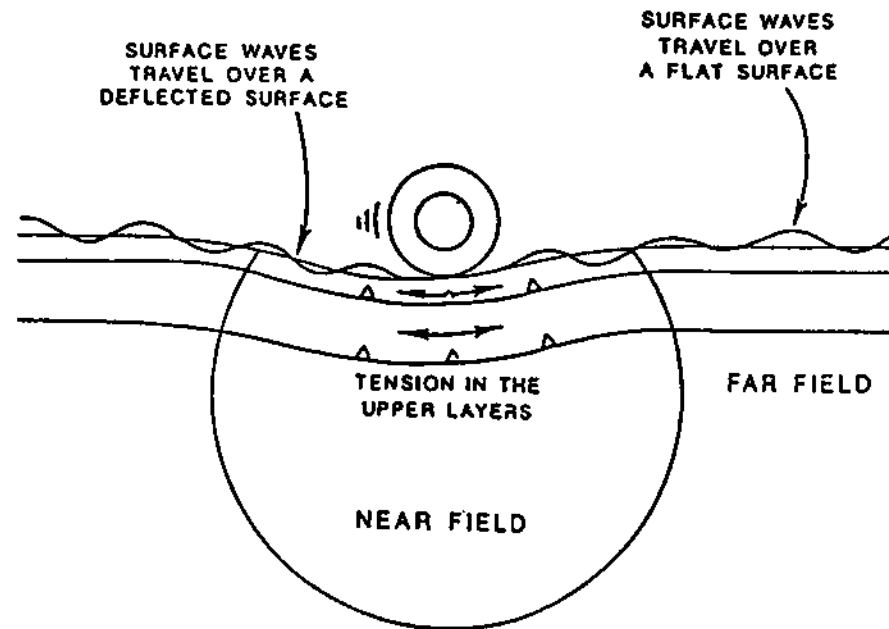
LYTTON [1989] ได้สรุปเกี่ยวกับการทดสอบแบบ NONDESTRUCTIVE TESTING (NDT) ไว้ว่า ในการประเมินสภาพทาง, การออกแบบและการบริหารจัดการเกี่ยวกับงานทางนั้น คุณสมบัติของชั้นทางจำเป็นต้องมีความถูกต้องมากกว่าผลที่ได้จากการทดสอบ NDT ที่มีอยู่ในปัจจุบัน คุณสมบัติเหล่านี้ได้แก่ ความหนา, ปริมาณส่วนผสมของยางแอสฟัลต์, คุณสมบัติ ELASTIC STIFFNESS หรือ ELASTIC MODULUS ของโครงสร้างชั้นทางแต่ละชั้น, RESIDUAL STRESS ที่เกิดขึ้นในสภาพจริงและคุณสมบัติอื่น ๆ การทราบคุณสมบัติเหล่านี้จะทำให้การคาดการณ์อายุการใช้งาน, การออกแบบเสริมผิวทางและ RECYCLING เป็นไปอย่างถูกต้อง ซึ่งคุณสมบัติส่วนใหญ่เหล่านี้ยังไม่สามารถตรวจสอบได้

คุณสมบัติของวัสดุที่หาได้จากการทดสอบ NDT ส่วนใหญ่มักจะเป็นค่า ELASTIC STIFFNESS ของโครงสร้างทางแต่ละชั้น ซึ่งวิธีการที่เลือกใช้ควรจะต้องสอดคล้องกับวิธีการที่ใช้ในการออกแบบ ตลอดจนวิธีที่ใช้ประมาณการอายุการใช้งาน, การตรวจสอบคุณสมบัติของชั้นทางที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและการกำหนดมาตรฐานการทดสอบต่าง ๆ

โดยทั่วไปเครื่องมือทดสอบ NDT สามารถจำแนกตามวิธีการให้นำหนักกระทำได้ดังนี้

1. แบบน้ำหนักคงที่ (STATIC) หรือ นำหนักกระทำที่เคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ BENKELMANN BEAM, LACROIX DEFLECTOGRAPH และ CURVIAMETER
2. แบบสั่นสะเทือน (VIBRATION) ได้แก่ อุปกรณ์ DYNAFLECT, ROAD RATER, CORPS OF ENGINEERS 71-KN VIBRATOR, FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION'S COX VAN
3. นำหนักตกกระทบบนที่พิจารณาในบริเวณใกล้กับจุดนำหนักกระทำ ("NEAR FIELD" IMPULSE METHOD) ได้แก่ อุปกรณ์ DYNATEST FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER, KUAB FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER, PHOENIX FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER
4. วิธีการแผ่กระจายของคลื่น โดยอาจทำการวัดที่ผิวทางหรือที่ระดับความลึกใด ๆ และวัดห่างจากบริเวณที่นำหนักกระทำ ซึ่งใช้วิธี SPECTRAL ANALYSIS OF SURFACE WAVE TECHNIQUE ได้แก่ SHELL VIBRATOR

สำหรับการแบ่งพื้นที่ระหว่างบริเวณที่อยู่ใกล้กับนำหนักกระทำ (NEAR FIELD) และบริเวณที่อยู่ห่างจากนำหนักกระทำ (FAR FIELD) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะพิจารณาจากขนาดของการ



รูปที่ 2.1 พื้นที่ที่อยู่ใกล้กับน้ำหนักระทำและห่างจากน้ำหนักระทำของโครงสร้างชั้นทางเมื่อมีน้ำหนักระทำ [LYTTON, 1989]

แอนตัวที่เกิดขึ้น บริเวณที่ถือว่าอยู่ใกล้หน้าหนักกระทำ คือ บริเวณที่อยู่ภายใน DEFLECTION BASIN รอบ ๆ จุดที่หน้าหนักกระทำซึ่งเป็นการแอนตัวในแนวตั้ง นอกจากนั้นในส่วนของโครงสร้างทาง ชั้นบน ๆ จะอยู่ในสภาวะแรงดึงและมีขนาดของ STRESS ต่ำกว่าสูง ขณะที่บริเวณที่ห่างจากหน้าหนักกระทำค่า STRESS จะมีค่าน้อยมากและเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของคลื่น

2.2 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล (BACKCALCULATION)

มีหลายแนวทาง LYTTON [1989] ได้สรุปผลการศึกษาวิจัยของนักวิจัยหลายท่านพอสรุปได้ดังนี้

2.2.1 วิธีการดั้งเดิม

2.2.1.1 วิธีแรกสุด ถูกพัฒนาขึ้นโดย F.H.SCRIVNER ซึ่งอยู่ในรูปแบบปิด โดยสมมุติฐาน ให้ค่า POISSON'S RATIO สำหรับวัสดุโครงสร้างทางแต่ละชั้นมีค่าคงที่เท่ากับ 0.5 และพัฒนาสมการขึ้นจากสมการของ BURMISTER โดยมีสมการดังนี้

$$\frac{4\pi wr}{3p} E_1 = 1 + \int_0^{a/r/h} (V-1) J_0(x) dx \quad (2.1)$$

โดยที่

w = ค่าการแอนตัวของผิวทางที่ระยะทางตามแนวรัศมี (r) จากจุดหน้าหนักกระทำ (P)

E_1 = ELASTIC MODULUS ของชั้นผิวทาง

h = ความหนาของชั้นผิวทาง

$J_0(x)$ = ฟังก์ชัน BESSEL ที่ ORDER เท่ากับศูนย์

x = mx/h โดยที่ m เป็นตัวแปรที่มีลักษณะเป็น CONTINUOUS VARIABLE ในการ INTEGRATE

V = $(1+4Ne^{-2m} - N^2e^{-4m}) / [1-2N(1+2m)e^{-2m} + N^2e^{-4m}]$

N = $(E_1 - E_2) / (E_1 + E_2)$

SCRIVNER พบว่าอัตราส่วนของ w_{r_1}/w_{r_2} มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลการแอ่นตัวจากอุปกรณ์ DYNAFLECT และได้พัฒนากราฟซึ่งแสดงผลของสมการดังรูปที่ 2.2 จากสมการและจากกราฟดังแสดงจะเห็นได้ว่า w_{r_1}/w_{r_2} เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับค่า MODULUS เท่านั้นแต่ค่า MODULUS ที่แตกต่างกันสองค่าสามารถให้ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัวที่เท่ากันได้ การวิเคราะห์จึงต้องเลือกใช้ค่าที่สมเหตุผล สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทางหลายชั้นจะต้องมีการหาค่า MODULI ที่เหมาะสมทำให้เกิดค่าการแอ่นตัวมีคผลาดน้อยที่สุดในการวิเคราะห์

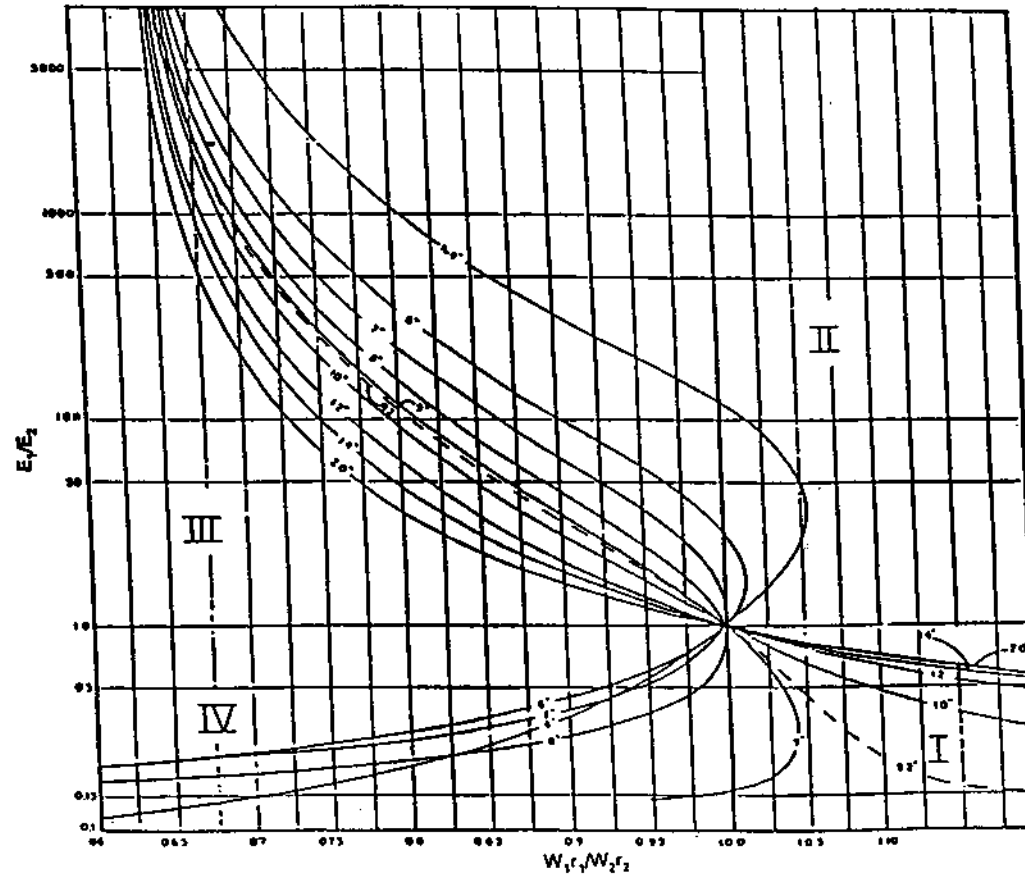
2.2.1.2 วิธี GRAPHICAL TWO-LAYER F.H. SCRIVNER และ G. SWIFT ได้ร่วมกันพัฒนาวิธี GRAPHICAL TWO-LAYER ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 ในรูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของ r/h กับ wrE_2/P (ซึ่งไม่มีหน่วย) ที่อัตราส่วนของค่า E_1/E_2 ที่แตกต่างกัน กราฟที่ได้จะมีลักษณะรูปร่างของการแอ่นตัวคล้ายกัน และที่ระยะห่างจากจุดน้ำหนักกระทำมากกว่า $r(r=h)$ จะทำให้ได้ค่าอัตราส่วน MODULUS สองค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ความรู้จากผู้เชี่ยวชาญในการพิจารณาว่าค่าใดเป็นค่าที่ถูกต้อง วิธีการนี้กระทำได้โดยการหาการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นบนชั้นเสริมผิวทาง (OVERLAY) แล้วเขียนกราฟแสดงการแอ่นตัวที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยเส้นตั้งในรูปที่ 2.4 ที่ r เท่ากับ h เท่ากับ 19 นิ้ว จะเป็นเส้นเดียวกันกับเส้นตั้งที่ r/h เท่ากับ 1 ในรูปที่ 2.3 รูปร่างของการแอ่นตัวในรูปที่ 2.4 เมื่อทาบลงในรูปที่ 2.3 เข้ากับเส้นกราฟเส้นใดจะเป็นเส้นที่มีค่า E_1/E_2 ที่เหมาะสม และที่เส้นซึ่งมีค่า wr/p เท่ากับ 0.01 ในรูปที่ 2.4 จะได้ค่า wrE_2/P เป็นค่าที่ถูกต้องค่า E_1 และ E_2 จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ทั้งสองนี้

2.2.1.3 วิธี EMPIRICAL TWO-LAYER G.SWIFT ยังได้พัฒนาสมการซึ่งเป็นวิธี EMPIRICAL สำหรับโครงสร้างทางสองชั้น แต่ค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการใช้สมการยังไม่ดีเพียงพอสมการมีดังนี้

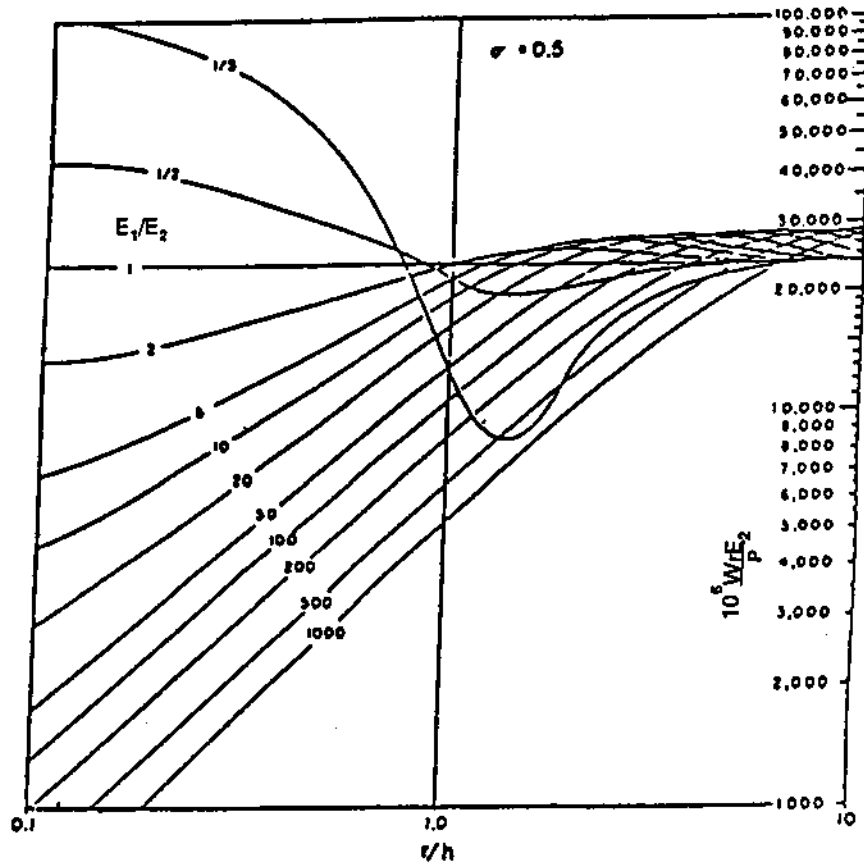
$$w = \frac{3P}{4\pi} \cdot \frac{1}{r} \cdot \left[\frac{1}{E_1} + \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) \left(\frac{r}{L} + \frac{rx^2}{2L^3} + \frac{3rx^4}{5L^5} \right) \right] \quad (2.2)$$

โดยที่

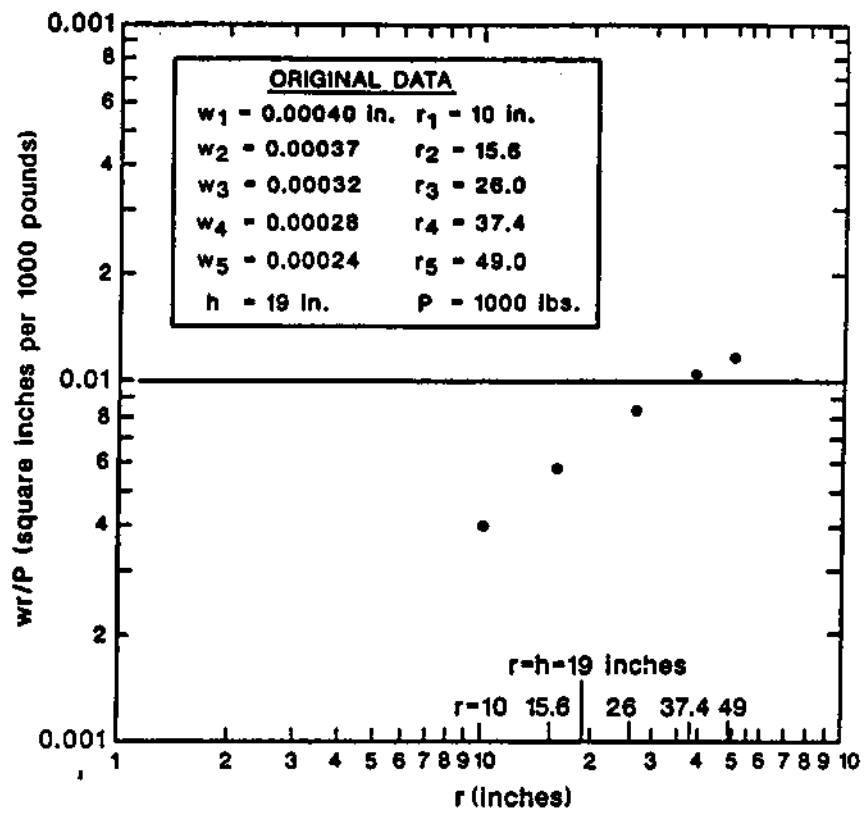
$$\begin{aligned} L^2 &= r^2 + x_1^2 \\ x^2 &= 4h^2 \left[\frac{E_1 + 2E_2}{3E_2} \right]^{2/3} \end{aligned}$$



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงอัตราส่วนของการแน่นตัวของผิวทางสำหรับ TWO-LAYERED ELASTIC PAVEMENT [LYTTON, 1989]



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง r/h กับอัตราส่วน E_1/E_2 สำหรับโครงสร้างทางสองชั้น
[LYTTON, 1989]



รูปที่ 2.4 แสดงค่าการแอ่นตัวที่วัดได้บนโครงสร้างทางสองชั้นเมื่อนำมาเขียนกราฟ [LYTTON, 1989]

ทำนองเดียวกันจะเห็นได้ว่าอัตราส่วน E_1/E_2 อยู่ในรูปของตัวแปรยกกำลังสอง (x^2) ซึ่งจะให้มีคำตอบได้สองค่าเช่นกัน ดังนั้นการเลือกค่าใดจำเป็นต้องใช้ความชำนาญจากผู้เชี่ยวชาญในการพิจารณา

2.2.1.4 วิธี CLOSED-FORM MULTILAYERED SOLUTION วิธีนี้แรกเริ่มถูกพัฒนาขึ้นโดย YIH HOU ใช้สำหรับโครงสร้างทางหลายชั้น โดยหลักสำคัญของวิธีนี้อยู่ที่การใช้ LEAST SQUARE METHOD ที่จะนำไปใช้หาชุดของค่า MODULI ที่จะทำให้ผลรวมของความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่วัดได้จริงมีค่าน้อยที่สุด วิธีการนี้ใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์, แคลคูลัส และเมตริก่วมในการแก้สมการความสัมพันธ์ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ให้คำตอบสองค่าเช่นเดียวกันและหากการวัดค่าการแอ่นตัวไม่ใกล้กับจุดที่น้ำหนักกระทำเพียงพอจะทำให้มีคำตอบของค่า MODULI ได้หลายชุด

2.2.1.5 วิธี EQUIVALENT LAYER METHOD N. ODEMARK เป็นผู้พัฒนาวิธีการนี้ขึ้นเพื่อหาการแอ่นตัวที่ผิวทางสำหรับโครงสร้างทางหลายชั้นโดยมีสมมุติฐานว่า สำหรับโครงสร้างทางหลายชั้นที่มีค่า MODULI (E_j) และความหนา (h_j) หลายค่า นั้น สามารถแทนที่ด้วยโครงสร้างทางชั้นเดียวที่มีความหนา H และมีค่า MODULUS ค่าเดียวเป็น E_0 โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$H = \sum_{i=1}^m Ch_i \left(\frac{E_i}{E_0} \right)^{1/3} \quad (2.3)$$

C = ค่าคงที่มีค่าประมาณ 0.8 ถึง 0.9

การมีสมมุติฐานเช่นนี้สามารถนำไปใช้กับทฤษฎีของ BOUSSINESQ ในการหาค่า STRESS, STRAIN และ DISPLACEMENT ที่จุดกึ่งกลางชั้นสำหรับโครงสร้างทางแบบชั้นเดียว ซึ่งจะเหมือนกับที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทางหลายชั้นที่มีระยะตามแนวรัศมีเท่ากันและที่ตำแหน่งความลึกที่สมมูลย์กันในการคำนวณ วิธีการนี้ได้ถูกพัฒนาต่อมาในสองแนวทางคือ

แนวทางแรกเป็นของ PULLIDTS ซึ่งมีการใช้ความสัมพันธ์แบบ NONLINEAR STRESS STRAIN ในชั้น SUBGRADE การหาค่า RUTTING และ FATIGUE LIFE ของผิวทางจะใช้ค่า STRAIN และ DEFLECTION ผลที่ได้จากวิธีการนี้พบว่าให้ค่าที่เป็นจริงรวมทั้งการวิเคราะห์

หาค่า MODULI จะได้ค่าที่สมเหตุสมผลสำหรับโครงสร้างทางที่มีค่า STIFFNESS ลดลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น

แนวทางที่สองเป็นของ R.L. LYTTON และ C.H. MICHALAK ได้พัฒนาขึ้นโดยมีความซับซ้อนมากกว่าสมมติฐานของ ODEMARK โดยเปลี่ยนโครงสร้างทางหลายชั้นให้เป็นโครงสร้างทางชั้นเดียวที่วางอยู่บนชั้นรองลักษณะ RIGID โดยแทนที่สมการจะอยู่ในรูปของ $(E_1/E_0)^{1/3}$ ค่า n เลขยกกำลังจะหามาจากวิธี NONLINEAR REGRESSION ANALYSIS โดยขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นที่มีความแข็งแรงมากกว่าด้านบน จากการศึกษาในการทำแปลงทดสอบ 22 แห่ง โดยใช้อุปกรณ์ DYNAFLECT และทำการวัดค่าการแอ่นตัวที่ผิวทางและที่ระดับความลึกต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวเพื่อหาค่า MODULI โดยการปรับปรุงสมการของ V.Z. VLASOVE และ N.N. LEONT'VEV ที่ใช้หาค่าการแอ่นตัวในแนวตั้ง ซึ่งมีสมการดังนี้

$$w(r,z) = \frac{CP (1 + V_0)(2m+1)}{\pi E_0 H'} K_0(\alpha r) \cdot \left(\frac{H' - z}{H'} \right)^n \quad (2.4)$$

$$\alpha = \frac{mB}{H'} \left[\frac{2(2mb + 1)}{(2mB - 1)(1 - V_0)} \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

โดยที่

H' = ความหนาของชั้นโครงสร้างทางหลายชั้นที่แปลงค่าแล้วบนชั้นรองแบบ RIGID

Z = ตำแหน่งที่คำนวณหาการแอ่นตัวในแนวตั้งใกล้ผิวทาง ที่ระยะความลึกที่แปลงค่ามาแล้ว

$K_0(\alpha r)$ = ฟังก์ชัน BESSEL ที่ขึ้นกับ αr

B, C, m, n, H' เป็นค่าคงที่ที่หามาด้วยวิธี REGRESSION ANALYSIS จากลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางแต่ละแปลงทดสอบ ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้สมการสอดคล้องกับลักษณะการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจริง โดยส่วนมากจะใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณหา ข้อดีของวิธีนี้คือ เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก, สามารถใช้ความสัมพันธ์แบบ NONLINEAR ในการวิเคราะห์ได้ และสามารถจำแนกโครงสร้างทางได้ค่อนข้างถูกต้อง

2.2.2 MICROCOMPUTER METHOD

วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ เป็นวิธีการหาค่า MODULI สำหรับโครงสร้างชั้นทางสามชั้น หรือมากกว่าโดยมีชั้นตอนทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งสามารถอธิบายชั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังนี้

MEASURED DEFLECTION ค่าการแอ่นตัวที่วัดได้ของผิวทางที่ระยะต่าง ๆ จากตำแหน่งของน้ำหนักกระทำ

LAYER THICKNESS AND LOAD ลักษณะของโครงสร้างทางที่ทำการทดสอบ, ขนาดของน้ำหนักกระทำ และสภาพพื้นที่ภายใต้น้ำหนักกระทำ

SEED MODULI ค่าเริ่มต้นของ MODULI ที่ใช้ในการคำนวณอาจเป็นค่าสมมุติขึ้นหรือค่าที่หาได้จากการวัดการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจริงโดยใช้สมการ REGRESSION โดยที่ทุกวิธีจะมีการสมมุติค่า POISSON'S RATIO

DEFLECTION CALCULATION ค่าการแอ่นตัวที่คำนวณได้จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ข้อมูล ความหนาของโครงสร้างชั้นทาง, น้ำหนัก, ค่า MODULI ที่ปรับแก้ค่าใหม่ และระยะทางตามแนวรัศมีถึงตำแหน่งที่วัดการแอ่นตัวแต่ละจุด สำหรับวิธีอื่น ๆ ซึ่งมีการปรับแก้ในกรณี NONLINEARITY, STRESS หรือ STRAIN ที่ตำแหน่งอื่นก็คำนวณในลักษณะเช่นเดียวกัน

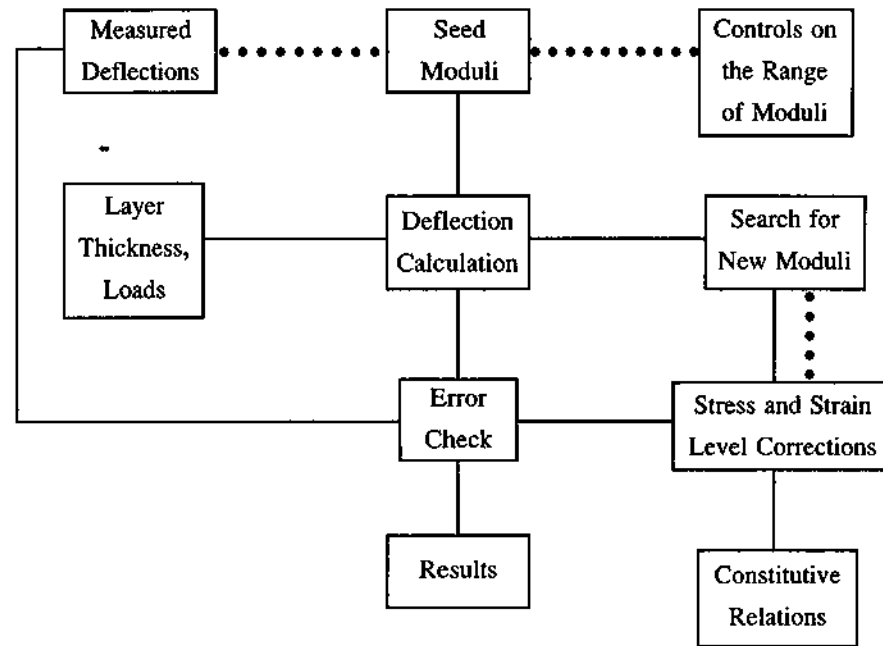
ERROR CHECK การตรวจสอบความผิดพลาดระหว่างค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ มีด้วยกันหลายวิธี เช่น SUM OF SQUARED DIFFERENCE, SUM OF ABSOLUTE DIFFERENCES และ THE SUM OF SQUARED RELATIVE ERROR เมื่อค่าความแตกต่างมีค่าภายในระดับที่ยอมรับได้ ผลการคำนวณจะถูกแสดงออกมา ถ้าไม่จะดำเนินการซ้ำใหม่ต่อไป

RESULT ผลการทดสอบ แสดงผลที่ได้จากการวัดและการคำนวณ, ความแตกต่าง, เปอร์เซนต์ความแตกต่าง, ค่า MODULI ของแต่ละชั้นและผลรวมของความผิดพลาด

CONSTITUTIVE RELATION แสดงความสัมพันธ์ตามสมมุติฐานที่ใช้ระหว่าง STRESS และ STRAIN กับค่า MODULUS ภายใต้น้ำหนักกระทำ อาจแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นต่อชั้น, ระหว่างชนิดวัสดุ FINE-GRAINED SOIL และ COARSE-GRAINED SOIL

STRESS AND STRAIN LEVEL CORRECTION จากความสัมพันธ์ในหัวข้อก่อนนี้จะถูกคำนวณเพื่อหาค่า STRESS หรือ STRAIN แล้วใช้ค่า STRESS หรือ STRAIN นี้ในการคำนวณหาค่า MODULI ชุดใหม่ที่จะใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบต่อไป

SEARCH FOR NEW MODULI จากวิธีวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดจะเป็นการพิจารณาค่าความผิดพลาดในการคำนวณทั้งหมด โดยพิจารณาที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุดและให้ลักษณะของการแอ่นตัวสอดคล้องกับการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด รวมทั้งให้ค่า MODULI ของโครงสร้างทางแต่ละชั้นเหมาะสมที่สุด



Transfer of Information or Directions :

..... occasional

— usual

รูปที่ 2.5 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีไมโครคอมพิวเตอร์ [LYTTON, 1989]

CONTROLS OF RANGE OF MODULI เป็นการกำหนดค่า MODULI เพื่อให้การคำนวณเป็นไปด้วยความรวดเร็ว และหลีกเลี่ยงค่าที่ไม่ต้องการ เช่น ในการวิเคราะห์จะใช้ค่า MODULI มีค่าลดลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น หรือค่า MODULUS ของชั้น SUBGRADE ให้มีค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง เป็นต้น

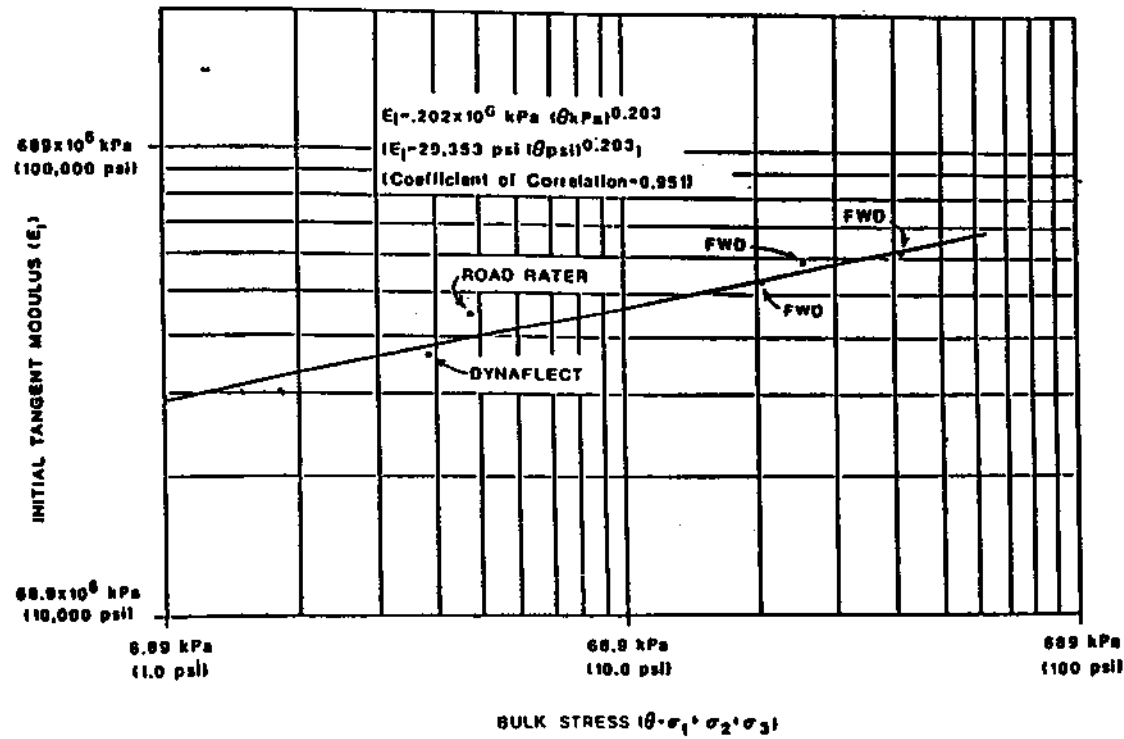
โปรแกรมเหล่านี้มีมากมาย เช่น MODCOMP, MODULUS, CHEVDEF, BISDEF, CHEVRON และ ELSDEF เป็นต้น

ความสัมพันธ์ลักษณะ NONLINEARITY

เป็นที่ทราบกันดีว่า ความสัมพันธ์ลักษณะ NONLINEAR นี้จะเกิดขึ้นระหว่างค่า MODULUS ของวัสดุกับค่า STRESS ที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์โดยทั่วไปจะวิเคราะห์จากความสัมพันธ์โดยใช้ทฤษฎี LINEAR ELASTIC METHOD และ FINITE ELEMENT METHOD สำหรับโปรแกรมที่ใช้ทฤษฎี LINEAR ELASTIC METHOD ถึงแม้ว่าค่า MODULUS ของโครงสร้างชั้นทางจะแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะของ STRESS โดยการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบต่อเนื่องจากจุดภายใต้น้ำหนักกระทำจนถึงจุดใด ๆ ที่ห่างจากจุดน้ำหนักกระทำ แต่วิธี LINEAR ELASTIC METHOD นี้ อาจใช้ค่า MODULUS ค่าเดียวแทนค่า MODULUS ของชั้นโครงสร้างทางนั้นทั้งหมด แต่ค่า MODULUS ซึ่งสามารถใช้ได้ดีกับค่า DEFLECTION ที่เกิดขึ้นจริงนั้น จะเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งสอดคล้องกับสภาวะของ STRESS ที่ตำแหน่ง ใด ๆ ซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามโครงสร้างชั้นทาง

รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์โดยใช้ LINEAR ELASTIC PROGRAM ที่ได้จากการทำการทดสอบด้วย DYNAFLECT, ROAD RATER และ DYNATEST FWD สำหรับ DYNATEST FWD ได้ทำการทดสอบด้วยระดับน้ำหนักทดสอบ 3 ค่า การวิเคราะห์หาค่า INITIAL TANGENT MODULUS จากความสัมพันธ์ STRESS-STRAIN ของชั้นพื้นทาง โดยให้แปรเปลี่ยนตามค่า MEAN PRINCIPAL STRESS ที่ระยะกึ่งกลางความหนาของชั้นที่จุดภายใต้น้ำหนักกระทำ จากผลการทดสอบซ้ำ ๆ หลายครั้งพบว่า INITIAL TANGENT MODULUS กับค่า MEAN PRINCIPAL STRESS จะอยู่ในรูปของค่า STRESS ยกกำลังด้วย 0.203 สำหรับขนาดของ STRESS ที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่าเพียงครึ่งเดียวของค่าที่ได้จากการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ค่าเฉลี่ยของ MODULUS ในการวิเคราะห์ และเป็นที่ทราบกันดีว่า จะไม่ใช่ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการในการหาสมการความสัมพันธ์เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจริง

วิธีที่จะสามารถใช้ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ คือ การวิเคราะห์ด้วยวิธี FINITE ELEMENT METHOD (F.E.M.) ซึ่งจะยอมให้ค่า MODULUS แปรเปลี่ยนไปตามจุดต่าง ๆ ได้



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง INITIAL TANGENT MODULUS กับ BULK STRESS ของวัสดุ CRUSHED LIMESTONE
 [LYTTON, 1989]

รูปที่ 2.7 แสดงวิธี F.E.M. ที่มีการแปรเปลี่ยนของค่า MODULUS ไปตามจุดต่าง ๆ จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่า MODULUS มีค่าไม่คงที่ตามความลึกและระยะทางตามแนวรัศมี สำหรับรูปที่ 2.7 เป็นกรณีของชั้นพื้นทางที่มีความแข็งแรงมากกว่าชั้น SUBGRADE รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ของวัสดุประเภท ELASTOPLASTIC STRESS-STRAIN ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุจำพวก UNBOUND MATERIAL ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\left[\frac{1-a}{\left(\frac{E}{E_i} - a \right)} \right]^m - \left[\frac{(1-a)\mathcal{E}}{b} \right]^m = 1 \quad (2.6)$$

โดยที่

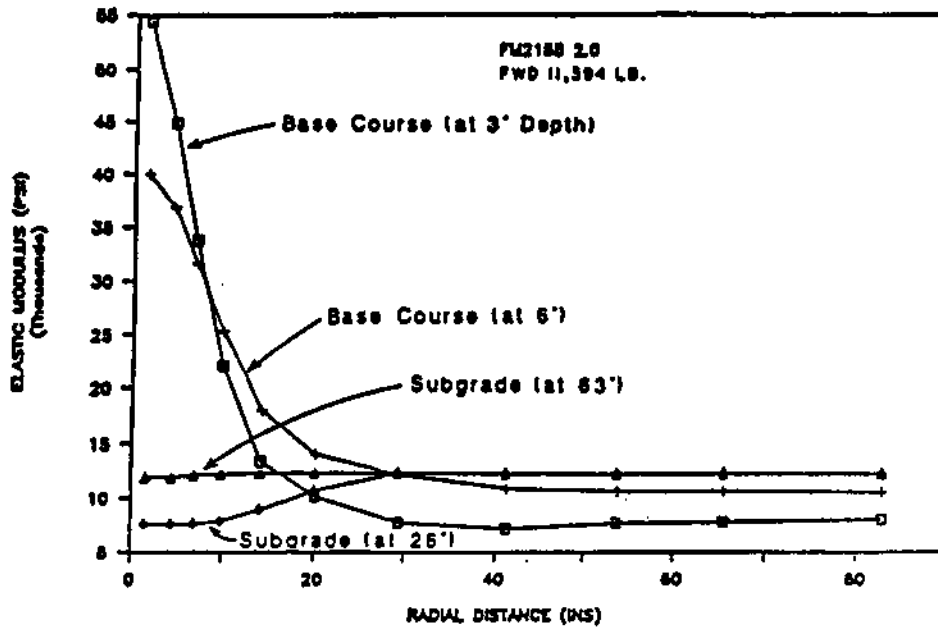
- E_i = INITIAL TANGENT MODULUS ที่ขึ้นกับสภาวะของค่า STRESS
- a = อัตราส่วนของ PLASTIC MODULUS ต่อ INITIAL TANGENT MODULUS (E_p/E_i)
- b = อัตราส่วนของ MAXIMUM PLASTIC YIELD STRESS ต่อ INITIAL TANGENT MODULUS (σ_y/E_i)
- \mathcal{E} = STRAIN
- E = SECANT MODULUS
- m = ค่าเลขยกกำลัง

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า a , b และ m ซึ่งหาจากการทำสอบ TORSIONAL REASONANT COLUMN TEST ในรูปที่ 2.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่า SECANT MODULUS ต่อค่า INITIAL TANGENT MODULUS กับค่า STRAIN (\mathcal{E}) ซึ่งจะใช้ในการหาค่า a ในสมการต่อไป

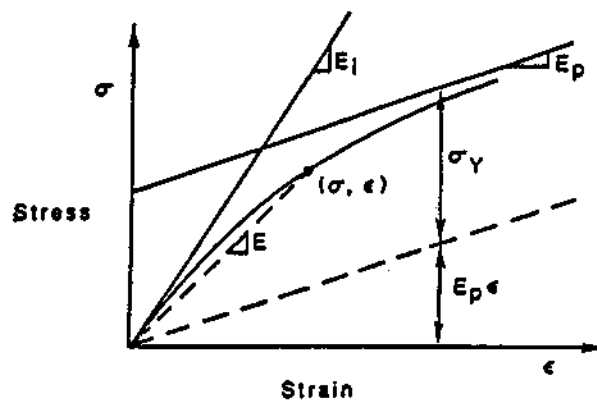
โดยสมมุติฐานที่ว่าค่าของ INITIAL TANGENT MODULUS จะแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะของ STRESS และชนิดของวัสดุ ความสัมพันธ์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_i = K_1(\theta)^{K_2} \quad (2.7)$$

$$E_i = K_3(\sigma_y)^{K_4} \quad (2.8)$$



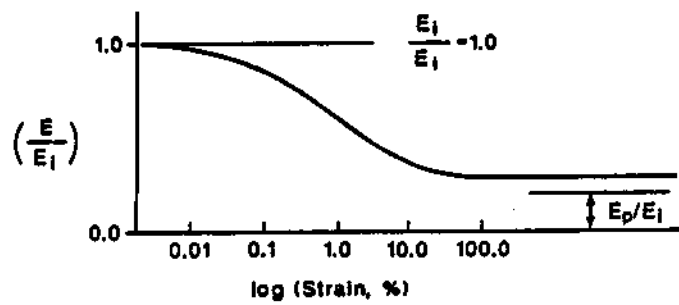
รูปที่ 2.7 แสดงค่าโมดูลัสที่เปลี่ยนแปลงไปตามความลึกและระยะทาง [LYTTON, 1989]



รูปที่ 2.8 ลักษณะของ ELASTOPLASTIC HYPERBOLIC STRESS-STRAIN CURVE ของวัสดุ UNBOUND MATERIAL [LYTTON, 1989]

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ ELASTOPLASTIC HYPERBOLIC STRESS-STRAIN CURVE [LYTTON, 1989]

Type of Soil	Dimensionless Constants		
	a	b	m
Fine-grained	0.0529	0.0435	1.002
Granular	0.0749	0.0261	0.915



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงอัตราส่วนของค่าโมดูลัสกับ LOG STRAIN [LYTTON, 1989]

$$E_i = K_5 (\sigma_d)^{K_6} \quad (2.9)$$

โดยที่

K_1 ถึง K_6 = ค่า COEFFICIENT ของวัสดุ และค่ายกกำลังของวัสดุ

θ = MEAN PRINCIPAL STRESS

σ_3 = ค่าน้อยสุดของ MEAN PRINCIPAL STRESS

σ_d = ค่าความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าสุดของ PRINCIPAL STRESS

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า K_1 ถึง K_6 ของวัสดุชั้น BASE และชั้น SUBGRADE จะเห็นได้ว่า ในกรณีของวัสดุ FINE-GRAINED SOIL จะมีความแข็งแรงน้อยกว่า (ค่ายกกำลังมีค่าติดลบ) ส่วน วัสดุ COARSE-GRAINED SOIL จะมีความแข็งแรงมากกว่า (ค่ายกกำลังมีค่าบวก) ซึ่งความสัมพันธ์ ในลักษณะ NONLINEAR เช่นนี้จะใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล (BACKCALCULATION) เพื่อหาค่า MODULI ของโครงสร้างชั้นทาง และ SENSITIVITY ของ STRESS และ STRAIN ในกรณีที่ใช้ โปรแกรม FINITE ELEMENT PROGRAM ในการคำนวณหาค่าการแอ่นตัว จากค่ายกกำลังสำหรับ GRANULAR BASE ดังแสดงในตารางที่ 2.2 พบว่ามีค่ามากกว่าประมาณ 2 เท่าของค่าที่ได้จากการ วิเคราะห์โดยโปรแกรม LAYER ELASTIC PROGRAM ดังแสดงในรูปที่ 2.6

จากการศึกษาวิจัยในปัจจุบันแสดงให้เห็นว่า ทั้งวิธีการในแนว EMPIRICAL และ THEORETICAL ซึ่งค่า MODULUS ของวัสดุทุกชนิดจะขึ้นอยู่กับทั้งค่า MEAN PRINCIPAL STRESS กับ DEVIATOR STRESS รวมทั้งระดับของค่า STRESS

2.2.3 วิธี IMPULSE AND RESPONSE ANALYSIS METHOD IN THE NEAR FIELD

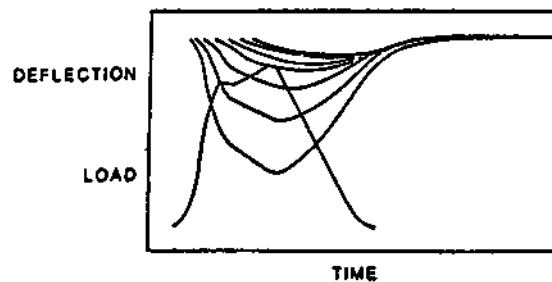
เมื่อน้ำหนักตกกระทบบนผิวทางจะทำให้เกิดลักษณะคล้ายคลื่นต่อผิวทาง GEOPHONE SENSOR จะตรวจจับความเร็วการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของผิวทาง ซึ่งข้อมูลที่ได้เป็นการเคลื่อนตัว ในแนวตั้งของผิวทางกับระยะเวลา

รูปที่ 2.10 แสดงขนาดของน้ำหนักตกกระทบบนผิวทาง, เวลา และค่าการแอ่นตัวที่เวลาต่าง ๆ ซึ่ง ข้อมูลสัญญาณเหล่านี้ใช้ในการหาค่าแรงกระทำสูงสุด และค่าการแอ่นตัวสูงสุด แต่ข้อมูลที่ได้จากสัญญาณ เหล่านี้ไม่ใช่เฉพาะน้ำหนักกระทำและการแอ่นตัวสูงสุดแต่ยังสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการ ของคลื่นและคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์คุณสมบัติอื่น ๆ ได้ด้วย ในที่นี้จะไม่กล่าวถึง

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ K_1 ถึง K_6 ของวัสดุที่เป็น BASE COURSE และ SUBGRADE (โมดูลัสมีหน่วยเป็น PSI) [LYTTON, 1989]

Material	K_1	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
Crushed stone	max	...	...	15000	0.45	...	...
	min	...	...	5000	0.63	...	...
Crushed gravel	max	25000	0.38	...	...	...	...
	min	7800	0.60	...	...	...	...
Crushed limestone	max	11000	0.40	...	...	...	...
	min	2600	0.65	...	...	...	...
Granitic gneiss	max	34000	0.19	...	...	...	...
	min	1500	0.73	...	...	...	...
Basalt	max	8900	0.47	...	...	...	...
	min	4700	0.65	...	...	...	...
Sand	max	...	...	13000	0.35	...	...
	min	...	...	6700	0.55	...	...
Silty sand	max	3100	0.37	...	...	...	...
	min	1900	0.61	...	...	...	...
Clayey sand	max	...	...	...	...	25000	-0.80
	min	...	...	...	...	...	...
Silty clay	max	...	...	...	...	66000	-0.38
	min	...	...	...	...	24000	-0.11
Lean clay	max	...	...	...	...	27000	-0.50
	min	...	...	...	...	...	...
Highly plastic clay	max	...	...	...	...	25000	-0.77
	min	...	...	...	...	...	...

Note 1 psi = 6.895 kPa.



รูปที่ 2.10 ลักษณะการแอ่นตัวของผิวทางเมื่อน้ำหนักกระทำกับเวลา [LYTTON, 1989]

2.2.4 วิธี SYSTEM IDENTIFICATION METHOD

เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นโดยวิศวกรไฟฟ้า ซึ่งใช้หลักการของคลื่นโดยการให้สัญญาณผ่านตัวกลาง ซึ่งก็คือโครงสร้างชั้นทาง แล้วตรวจวัดสัญญาณคลื่นที่ได้แล้ววิเคราะห์คุณสมบัติของโครงสร้างชั้นทาง โดยใช้ทฤษฎี DYNAMIC ANALYSIS ซึ่งในที่นี้จะไม่กล่าวถึง

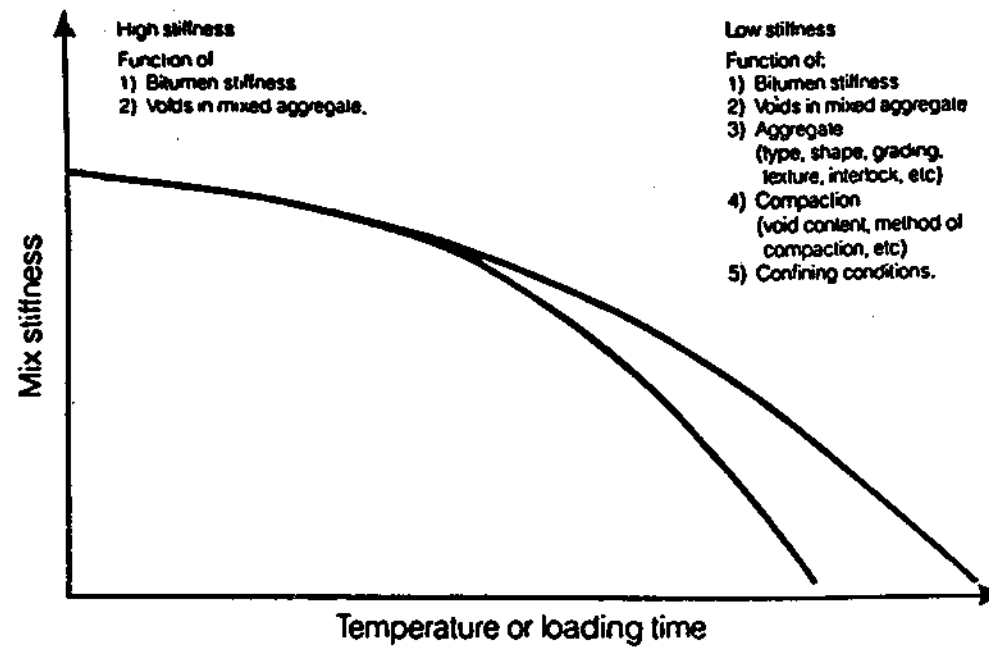
2.3 คุณสมบัติทั่วไปของโครงสร้างชั้นทาง

ในการออกแบบโครงสร้างชั้นทางของถนนลาดยางที่ใช้วิธี ANALYTICAL METHOD จะต้องเกี่ยวข้องกับกาวิเคราะห์หาค่า STRESS, STRAIN และ DEFLECTION ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งจะต้องทราบค่า ELASTIC MODULUS และ POISSON'S RATIO ของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างชั้นทาง สำหรับค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาวิธีการหาค่าโมดูลัส โดยอาจเรียกเป็น STIFFNESS MODULUS หรือ DYNAMIC MODULUS, RESILIENT MODULUS หรือ COMPLEX MODULUS ซึ่งการหาค่า STIFFNESS MODULUS อาจหาได้จาก NOMOGRAPH ซึ่งเป็นที่เชื่อถือได้จากการศึกษาวิจัยต่าง ๆ

BARKSDALE และ HICKS [1973] ได้ทำการทดสอบตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวิธี REPEATED TRIAXIAL LOADING TEST แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและ LOADING TIME (FREQUENCY) ที่มีต่อค่า DYNAMIC MODULUS นอกจากนั้นตัวแปรอื่น ๆ เช่น ชนิด, ปริมาณยางแอสฟัลต์, VOID และชนิดของ AGGREGATE จะมีอิทธิพลน้อยมากต่อค่า DYNAMIC MODULUS

ทำนองเดียวกับ SHELL [1990] ได้แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับค่า STIFFNESS ของยางแอสฟัลต์, ปริมาณของยางแอสฟัลต์ และปริมาณวัสดุผสมรวม จากการศึกษพบว่า การเสีรูปร่างอย่างถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตจะต้องพิจารณาในช่วงที่ค่า STIFFNESS มีค่าต่ำ ๆ คือในช่วงที่อุณหภูมิสูงหรือช่วงที่น้ำหนักกระทำเป็นเวลานาน และเมื่อค่า STIFFNESS ของแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าน้อยกว่า 5×10^5 Pa แอสฟัลต์คอนกรีตจะมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนมากกว่าในช่วงของอีลาสติก ทั้งนี้นอกจากจะขึ้นกับปัจจัยดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังขึ้นกับขนาดของวัสดุผสมรวม, รูปร่างและการยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดวัสดุ รวมทั้งคุณภาพของการบดอัด ดังแสดงในรูปที่ 2.11

ASSHTO [1986] แนะนำว่า เมื่อทำการทดสอบแบบ NONDESTRUCTIVE TESTING (NDT) เพื่อวัดค่าการแอ่นตัวในสนามเพื่อหาค่า MODULULI ของโครงสร้างทางแต่ละชั้นด้วยการวิเคราะห์จากลักษณะของการแอ่นตัว (DEFLECTION BASIN ANALYSIS) สำหรับชั้นวัสดุแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิที่ทำการทดสอบค่า MODULULI ที่ได้ในสนาม จำเป็นต้องปรับแก้เพื่อให้ได้เป็นค่ามาตรฐานที่อุณหภูมิ 70°F



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตโมดูลัสกับอุณหภูมิหรือระยะเวลาของการถูกน้ำหนักกระทำ [SHELL, 1990]

คุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์โดยเฉพาะค่า MODULUS OF ELASTICITY จะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง จึงจำเป็นต้องปรับแก้เพื่อให้ได้เป็นค่ามาตรฐานที่อุณหภูมิ 70° F โดยการใช้ข้อมูลดังนี้

1. อุณหภูมิที่ผิวทางที่ทำการทดสอบ NDT
2. ค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ย 5 วัน ณ จุดที่ทำการทดสอบ
3. ความหนาของชั้นวัสดุแอสฟัลต์

แล้วใช้กราฟดังรูปที่ 2.12 ในการประมาณค่าอุณหภูมิของชั้นวัสดุแอสฟัลต์ จากกราฟดังกล่าว อุณหภูมิที่ใช้ในการหาเป็นค่าของอุณหภูมิที่ผิวทางบวกกับค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ย 5 วัน ณ จุดที่ทำการทดสอบ จากกราฟแนะนำให้ทำการหาอุณหภูมิของชั้นวัสดุแอสฟัลต์อย่างน้อย 3 จุด คือ (1) ที่บริเวณใกล้ผิว (น้อยกว่า 1 นิ้ว) ของชั้นวัสดุแอสฟัลต์, (2) ที่กึ่งกลางชั้นวัสดุแอสฟัลต์ และ (3) ที่ด้านล่างของชั้นวัสดุแอสฟัลต์ แล้วใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่าของชั้นวัสดุแอสฟัลต์ในขณะทำการทดสอบ NDT ค่ามาตรฐานที่อุณหภูมิ 70° F สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$E_{70^{\circ}F} = F_e \times E_{tp} \quad (2.10)$$

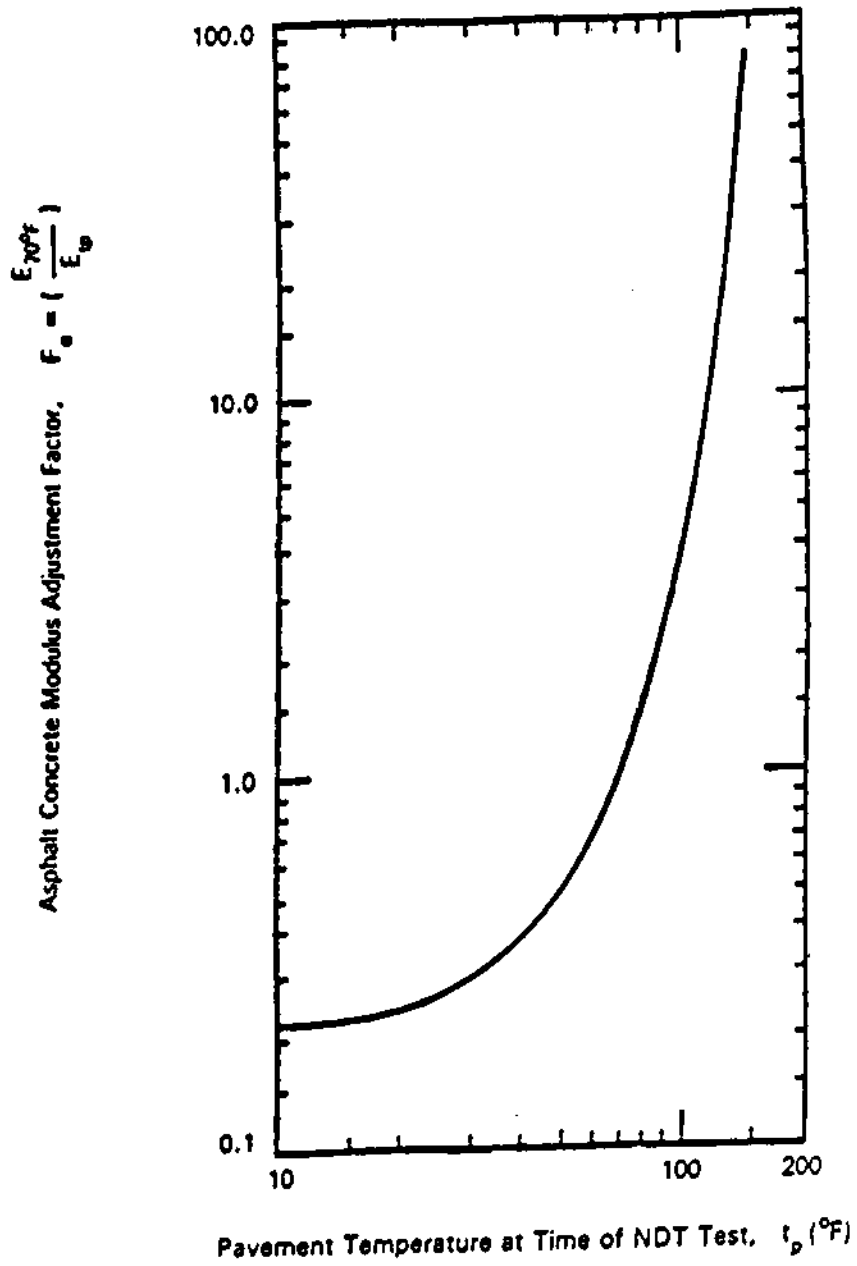
โดยที่

$E_{70^{\circ}F}$ = ค่า MODULUS ของชั้นวัสดุแอสฟัลต์ประสิทธิภาพในสนามที่ปรับแก้แล้ว

F_e = แฟกเตอร์สำหรับปรับแก้ค่าแอสฟัลต์ MODULUS ดังแสดงในรูปที่ 12

E_{tp} = ค่า MODULUS ของชั้นวัสดุแอสฟัลต์ที่คำนวณหาจากรูปร่างของการแอ่นตัวที่วัดได้ (DEFLECTION BASIN ANALYSIS) ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ NDT, t_p

ABI และ KHOSLA [1987] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการวิเคราะห์ข้อมูลจากการสำรวจค่าการแอ่นตัวของถนนด้วย FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD) โดยได้ทำการเปรียบเทียบการแปลความหมายของข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมการวิเคราะห์ 4 โปรแกรม คือ VESYS, ELMOD, OAF และ MODCOMP2 จากการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างคุณสมบัติของวัสดุในท้องปฏิบัติการและจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมดังกล่าว พบว่า VESYS และ ELMOD มีศักยภาพอย่างมากในการใช้วิเคราะห์ประเมินค่า RESILIENT MODULUS ของวัสดุในแต่ละชั้นของถนน ทั้งนี้เนื่องจากสอดคล้องกับพฤติกรรมตามทฤษฎีได้ดีกว่า ถึงแม้ว่าค่า MR_{AC} (RESILIENT MODULUS OF ASPHALT CONCRETE) ในแต่ละโปรแกรมจะให้ค่าทำนองเดียวกัน ตามสมมุติฐานและตัวแปร



รูปที่ 2.12 ค่าปรับแก้ของสฟัลต์คอนกรีตโมดูลัสที่ทดสอบอุณหภูมิต่าง ๆ ให้เป็น ค่ามาตรฐานที่ 70°F [ASSHTO, 1986]

ของแต่ละโปรแกรมที่ใช้โดยแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สำหรับค่า MR_{SOIL} (RESILIENT MODULUS OF SOIL) โปรแกรม VESYS, ELMOD และ MODCOMP2 จะให้ค่าที่สอดคล้องมากกว่าเมื่อเทียบกับโปรแกรม OAF โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้น

จากการศึกษา TEST SECTION พบว่า MR_{AC} มีค่าอยู่ระหว่าง 119,750 PSI. ถึง 600,200 PSI. โดยค่า MR ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการกับค่าจากการวิเคราะห์ (Mr_{LAB}/Mr_{PRED}) อยู่ระหว่าง 0.54 ถึง 1.56 โดยค่าส่วนมากจะอยู่ที่ 0.80 ถึง 1.26

การคำนวณหาค่า MODULUS จากการใช้โปรแกรม ELMOD ค่า SURFACE MODULUS จะคำนวณหาจากสมการ

$$E_o = C_o (\sigma/\sigma')^N \quad (2.11)$$

โดยที่

E_o = SURFACE MODULUS

σ = MAJOR PRINCIPAL STRESS

σ' = REFERENCE STRESS

C_o, N = CONSTANTS

ค่า SURFACE MODULUS (ในที่นี้จะหมายถึงค่า MODULUS ที่ระยะกึ่งกลางความหนา โดยวิธี EQUIVALENT LAYER METHOD ซึ่งจะทำให้เกิดการแอ่นตัวของผิวทางเท่ากับการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทางหลายชั้น) ที่คำนวณได้ที่ระยะ r สำหรับสภาวะที่รู้ลักษณะการกระทำของน้ำหนัก และการแอ่นตัวดังนี้

$$E_o = [(1 - r^2) \sigma_o a^2] / [r d(r)] \quad (2.12)$$

โดยที่

r = RADIAL DISTANCE

σ_o = CONSTANT STRESS

a = RADIUS OF LOADED AREA

จากสมการที่ (2.11) จะได้ค่า RESILIENT MODULUS ของชั้น SUBGRADE ดังนี้

$$MR = C (\sigma/\sigma')^N \quad (2.13)$$

$$C = [C_0/(1-2N)] \quad (2.14)$$

สำหรับการคำนวณ DEFLECTION BASIN จากการทดสอบด้วย FWD สามารถแสดงได้
ในรูปสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{AREA} = & [(1/2)(D_0 + D_1)/D_0*(7.87) + (D_1 + D_2)/2*(3.93) + (D_2 + D_3)/2*(11.8) \\ & + (D_3 + D_4)/2*(15.7) + (D_4 + D_5)/2*(15.8) + (D_5 + D_6)/2*(15.7)] \quad (2.15) \end{aligned}$$

โดยที่

D_0 = ค่าแอมพลิจูดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นถ้ำน้ำหนั (PLATE)

$D_1 - D_6$ = ค่าแอมพลิจูดที่ระยะกำหนด 7.87, 11.8, 23.6, 39.3, 55.1 และ 70.7 นิ้ว จากจุด
กึ่งกลางของแผ่นถ้ำน้ำหนั (ในการศึกษาวิจัยนี้)

AREA = NORMALIZED DEFLECTION BASIN (IN.²)

MAHONEY และคณะ [1989] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการประมาณค่า ELASTIC MODULUS โดยใช้ FWD จากการทำการวิเคราะห์ที่กลับโดยเปรียบเทียบกันใน 5 โปรแกรม คือ ELMOD, ELSDEF, EVERCALC, ISSEM4 และ MODCOMP2 ร่วมกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี INDIRECT TENSION TEST FOR RESILIENT MODULUS OF BITUMINOUS MIXTURES (D 4123-82) สำหรับผิวทาง ส่วน BASE และ SUBGRADE (T 274-82) ใช้วิธี STANDARD METHOD OF TEST FOR RESILIENT MODULUS OF SUBGRADE SOILS โดยให้น้ำหนักกระทำในช่วงเวลา 100 ms. ที่อุณหภูมิ 5, 25 และ 40 องศาเซลเซียส เหตุที่ใช้ FWD ในการวัดค่าการแอมพลิจูดเนื่องจาก FWD สามารถให้แรงกระทำต่อผิวทางได้หลายขนาด และมีลักษณะคล้ายกับการกระทำของรถบรรทุกที่กระทำจริงต่อโครงสร้างถนน

สำหรับโปรแกรม ELMOD ใช้ทฤษฎี BOUSSINESQ-ODEMARK ในการวิเคราะห์ โดยแต่ละชั้นของโครงสร้างชั้นทางจะถูกเปลี่ยนไปเป็น EQUIVALENT BOUSSINESQ SYSTEM ของชั้นที่อยู่เหนือชั้น SUBGRADE ซึ่งทฤษฎีพื้นฐานมีที่มาจาก CONVENTIONAL ELASTIC LAYERED ANALYSIS แต่ ELMOD ใช้วิธีการประมาณการในการเปลี่ยนโครงสร้างทาง ซึ่งมีข้อดีในการใช้กับวัสดุประเภท NONLINEAR MATERIAL ทำให้ขั้นตอนการคำนวณเป็นไปด้วยความรวดเร็ว

สำหรับค่า MODULI ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตและชั้นพื้นทางจะหาจากการคำนวณและตรวจสอบ จากค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางและลักษณะของการแอ่นตัว ค่า MODULUS ของ SUBGRADE ที่กึ่งกลางของแผ่นถ้ำน้ำหนักจะถูกปรับตามขนาดของ STRESS และตรวจสอบค่าการแอ่นตัว ที่อยู่ด้านนอก

โปรแกรม ELMOD สามารถวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางได้ 4 ชั้น MAHONEY และคณะ ได้ทำการศึกษาในกรณีโครงสร้างทาง 3 ชั้น สำหรับ SUBGRADE MODULUS สามารถหาได้จาก ค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นที่ด้านนอก ๆ จากจุดกึ่งกลางที่แผ่นถ้ำน้ำหนักกระทำ สำหรับผิวทางแอสฟัลต์ และชั้นพื้นทางจะวิเคราะห์หาได้จากค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางแผ่นถ้ำน้ำหนักและลักษณะของการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น (DEFLECTION BASIN) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ ในสนามกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ได้ทำการปรับอุณหภูมิให้เท่ากับขณะที่ทำการทดสอบด้วย FWD แต่ในห้องปฏิบัติการจะให้น้ำหนักกระทำด้วยระยะเวลา 100 ms. ซึ่งมากกว่า FWD ประมาณ 3-4 เท่า สำหรับการวิเคราะห์หาค่า MODULI จากแปลงทดสอบจำนวน 5 แห่ง โดยการใช้วิธีวิเคราะห์ ทั้ง 5 โปรแกรม และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งการวิเคราะห์การเสริมผิวทาง ผลที่ได้จะเป็น ไปในแนวทางเดียวกันภายใต้เงื่อนไขที่พิจารณา อย่างไรก็ตามในการแปลความหมายของข้อมูลจะต้อง มีความเข้าใจพื้นฐานของโครงสร้างทางในสภาพการใช้งานจริงและวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างด้วย

GREENSTEIN และ BERGER [1989] ได้อธิบายถึงวิธี SIMPLIFIED MULTILAYER MODEL (ODEMARK-ULLIDTZ) ว่าเป็นวิธีซึ่งมีที่มาจาก ODEMARK'S METHOD และได้ถูก พัฒนาต่อมาโดย ULLIDTZ การคำนวณหาค่าการแอ่นตัวของผิวทางใช้สมการของ BOUSSINESQ สำหรับโครงสร้างทางที่ถูกแปลงค่าตามวิธี ODEMARK (EQUIVALENT THICKNESS) และใน กรณีของน้ำหนักกระทำเป็นวงกลม ค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของน้ำหนักกระทำ (D_0) และกรณีของ น้ำหนักกระทำแบบจุดที่ระยะต่าง ๆ (DR) โดยทราบความหนาและค่า POISSON'S RATIO แต่ ไม่ทราบค่า MODULUS ดังนั้นถ้าวัดค่า D_0 และ DR ที่ระยะต่าง ๆ (R) ได้ และจากการทดสอบ NDT ทราบค่าน้ำหนักกระทำ P บนแผ่นถ้ำน้ำหนักวงกลมรัศมี a ขบวนการจะเป็นการหาความสัมพันธ์ โดยแรกเริ่มจะไม่ทราบค่า MODULI ของชั้นต่าง ๆ ของโครงสร้างชั้นทาง อาจจะใช้ค่าเริ่มต้นค่าใดค่าหนึ่ง และคำนวณหาผลการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของน้ำหนักกระทำและที่ระยะต่าง ๆ (R) เทียบกับค่าที่วัดได้ จากการทดสอบ NDT แล้ว ค่า MODULUS นี้จะถูกเปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งทำให้ค่าการแอ่นตัวที่ได้ จากการวัดและการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันจนยอมรับได้

ZANIEWSKI และ HOSSAIN [1992] กล่าวว่า โดยทั่วไปการวัดค่าการแอ่นตัวจะถูกใช้ สำหรับการประเมินความแข็งแรงของถนน (STRUCTURAL CAPACITY) การคาดการณ์ สภาพการใช้งานของถนนจากการวัดค่านี้จำเป็นที่จะต้องประมาณค่า MODULUS OF ELASTICITY ของชั้นทางแต่ละชั้นจากการวิเคราะห์ย้อนกลับ (BACKCALCULATION) การประมาณค่าพารามิเตอร์

สำคัญ และการใช้ข้อกำหนดที่เป็นขอบเขต (LIMITING CRITERIAL) เพื่อหาอายุการใช้งานของถนน โดยนอกจากข้อมูลค่าการแอ่นตัวแล้วจะต้องทราบความหนาของโครงสร้างถนนแต่ละชั้นด้วยรวมทั้งชนิดของวัสดุแต่ละชั้น เพื่อช่วยในการเลือกใช้ค่า MODULI ที่เหมาะสม ตัวแปรสองชนิดที่มีผลโดยตรงต่อการทำนายสภาพของถนน คือ หนึ่งความหนาของโครงสร้างทางแต่ละชั้น และสองค่าแก้ไขอุณหภูมิ (TEMPERATURE CORRECTION FACTOR) ที่ใช้สำหรับปรับแก้ค่า MODULUS ของวัสดุ BITUMINUS MATERISLS จากอุณหภูมิที่ทดสอบไปสู่อุณหภูมิมาตรฐาน จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากรณีที่โครงสร้างชั้นทางที่หนาจะไม่มีผลต่อการวิเคราะห์สภาพการใช้งานของถนนมากนัก ในทางตรงกันข้ามกับความไวอย่างมากกับ TEMPERATURE CORRECTION FACTOR ดังที่มีการแสดงใน AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES การทดสอบเพื่อแสดงให้เห็นถึงความไวของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่า MODULUS ของ ASPHALT CONCRETE MODULUS ในห้องปฏิบัติการนั้นอาจให้ค่าที่สูงกว่าความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในสนามได้

จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการพิจารณาค่าความแข็งแรงของถนนเมื่อพิจารณาถึงความหนาของโครงสร้างชั้นทางและ TEMPERATURE CORRECTION FACTOR สำหรับ ASPHALT LAYER MODULI พอสรุปได้ว่า

ความหนาของชั้น AC (ASPHALT CONCRETE) และ AB (AGGREGATE BASE) ที่เปลี่ยนแปลงมีความสัมพันธ์ต่อการประมาณค่าสภาพความแข็งแรงของถนนแต่ไม่มีผลมากนัก ทั้งนี้เนื่องด้วยค่าของการแอ่นตัวจะสอดคล้องกับวิธีการวิเคราะห์ (BACKCALCULATION SCHEME) โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาจะมีผลที่เท่าเทียมสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่า MODULUS สำหรับถนนที่มี AC หนา 4 นิ้ว หรือมากกว่า ในผลการวิเคราะห์ข้อมูลของ FWD จะไม่เปลี่ยนแปลงจากความหนาจริงเกินกว่า 1 นิ้ว สำหรับความหนา AC ที่น้อยกว่า 4 นิ้ว ควรที่จะทราบความหนาที่มีความละเอียดถึง 0.5 นิ้ว และสำหรับชั้นของ AB สำหรับความหนา AC ที่น้อยกว่า 4 นิ้ว ควรจะทราบความหนาที่มีความละเอียดถึง 1.0 นิ้ว ของความหนาที่แท้จริง สำหรับความหนา AC ที่มากกว่า 6 นิ้ว ความหนาของชั้น AB ควรมีความละเอียดถึง 2.0 นิ้ว ของความหนาที่แท้จริง ดังนั้นการเจาะแหว่ตัวอย่างจากจุดทดสอบ FWD จึงมีความสำคัญสำหรับหาความหนาของชั้น AC ในกรณีที่ชั้น AC หนา 4 นิ้ว หรือมากกว่า และหาความหนาของชั้น AC และ AB ในกรณีที่ชั้น AC หนาน้อยกว่า 4 นิ้ว

จากการแนะนำของ AASHTO ค่าการปรับแก้อุณหภูมิสำหรับชั้นวัสดุแอสฟัลต์จะมีผลอย่างมากต่อการประมาณค่าความแข็งแรงของถนน

JAMESON และคณะ [1992] ได้ทำการศึกษา FATIGUE LIFE ของวัสดุผสมแอสฟัลต์ชนิด DENSE GRADE ASPHALT โดยพิจารณาจากพฤติกรรมความล้าของยางแอสฟัลต์กับ CEMENT-TREATED CRUSHED ROCK จากสภาพจริงในสนาม แล้วเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงกับการวิเคราะห์ประมาณการ ด้วยวิธี ACCELERATED LOADING FACILITY (ALF) จากการศึกษาเกี่ยวกับผิวทางหลายชนิดแบบ FULL DEPTH ASPHALT (FDA) ที่มีความหนา 120 มม. จากการศึกษาได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ASPHALT STIFFNESS ซึ่งหาจากลักษณะการแอ่นตัว (DEFLECTION BOWL) จากการวัดด้วย FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (DYNATEST 8000) กับ อุณหภูมิของผิวทาง, ลักษณะความเสียหายและขนาดการแตกร้าวของผิวทาง พบว่า ASPHALT STIFFNESS จะลดลงตามจำนวนครั้งของน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้น ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความล้าซึ่งพิจารณาจากขนาดและการแตกร้าวของผิวทางพบว่า ภายใต้การทดสอบ ALF ในความสัมพันธ์กับวิธีการของ SHELL

จากการศึกษาวิเคราะห์ค่า ASPHALT STIFFNESS กับค่าอุณหภูมิของผิวทาง จากทั้งสภาพที่มีการแตกร้าวและไม่แตกร้าวของผิวทาง โดยการวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางความหนาของผิวทาง ซึ่งตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมินี้พบว่า ให้ผลที่ดีกับความสัมพันธ์ระหว่าง STIFFNESS กับอุณหภูมิมากกว่าการวัดที่ตำแหน่งอื่น ๆ สำหรับค่า MODULI ของแต่ละชั้นใช้การคำนวณจากโปรแกรม EFROMD2 ร่วมกับโปรแกรม CIRCLY สมการแสดงความสัมพันธ์ในกรณีที่ไม่มีความเสียหายที่ผิวทางมีดังนี้

$$\text{LOG}(E) = 4.059 - 0.00259T^{1.7} \quad (r^2 = 0.70) \quad (2.16)$$

โดยที่

E = ค่า ASPHALT STIFFNESS (MPa)

T = ASPHALT TEMPERATURE °C วัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความหนา

สำหรับสมการความสัมพันธ์ของโปรแกรม Shell มีดังนี้

$$\text{LOG}(E) = 4.289 - 0.00213T^{1.7}$$

จากการศึกษาพบว่า ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของวิธี SHELL แต่ลักษณะของกราฟที่ได้ไม่มีความแตกต่างกัน ในช่วง 15 ถึง 30 °C สำหรับช่วงที่มากกว่า 30 °C เมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟคาดว่าจะมีลักษณะแนวเส้นกราฟค่อนข้างตรง นอกจากนั้นพบว่า ค่าความสัมพันธ์

ระหว่าง ASPHALT STIFFNESS กับอุณหภูมิ จะมีค่าลดลงเมื่อการแตกตัวของผิวทางเพิ่มขึ้น

DYNATEST [1989] โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลจาก FWD เรียกว่า ELMOD 3 ซึ่งใช้วิเคราะห์หาค่า MODULUS ของโครงสร้างทางแต่ละชั้น โดยสามารถวิเคราะห์ได้ 4 ชั้น โดยใช้วิธี METHOD OF EQUIVALENT THICKNESS (MET) ร่วมกับสมการของ BOUSSINESQ

CHOU [1989] กล่าวถึงวิธี EQUIVALENT THICKNESS ว่า วิธีนี้เป็นวิธีร่วมกันระหว่างวิธี ANALYTICAL และ EMPIRICAL โดยมีความสัมพันธ์ทั่วไปดังนี้

$$\frac{h_1^3 \cdot E_1}{1 - \mu_1^2} = \frac{h_2^3 \cdot E_2}{1 - \mu_2^2} \quad (2.18)$$

โดยที่

E = ELASTIC MODULUS

h_1, h_2 = ความหนาของชั้นทางชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

μ = POISSON'S RATIO

DYNATEST [1989] จากการศึกษาวิจัยพบว่า MET ให้ผลของการประมาณค่าได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การคำนวณโดยใช้ทฤษฎีของ BURMISTER เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะ 2 อย่าง คือ

1. ความหนาของชั้นโครงสร้างทางมีขนาดมากกว่า $1/2$ ของรัศมีของแผ่นถ้ำน้ำหนัก (LOADING PLATE)

2. ค่า MODULUS ของชั้นวัสดุที่ติดกันอัตราส่วน E_i/E_{i+1} จะต้องไม่น้อยกว่า 2

ข้อจำกัดในการใช้โปรแกรม ELMOD 3 จะขึ้นอยู่กับ

1. โครงสร้างชั้นทางจะต้องประกอบด้วยชั้นที่เป็น STIFFNESS LAYER เพียงชั้นเดียว หากมีมากกว่าหนึ่งชั้น จะต้องรวมเป็นชั้นเดียวในการคำนวณ

2. ค่าโมดูลัสจะต้องมีค่าลดลงตามความลึก

3. ความหนาของชั้นบนสุด (H_1) ควรค่ามากกว่า $1/2$ ของรัศมีของแผ่นถ้ำน้ำหนัก สำหรับโครงสร้างทางที่เป็น 3 ชั้น ชั้นบนสุดควรมีความหนาน้อยกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นถ้ำน้ำหนัก และความหนาของชั้นแรกควรน้อยกว่าชั้นที่สอง ($H_1 < H_2$)

4. เมื่อทดสอบใกล้กับรอยต่อหรือรอยแตกกว้างขนาดใหญ่ หรือทดสอบบน GRAVEL ROAD ควรวิเคราะห์ในลักษณะที่เป็นระบบโครงสร้างสองชั้น

ในการคำนวณหาค่า MODULUS จากค่าการแอ่นตัวของ DEFLECTION BASIN ของชั้นวัสดุแอสฟัลต์ นอกเหนือจากอุณหภูมิแล้วยังขึ้นอยู่กับสภาพการแตกร้าวของชั้นวัสดุด้วยความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของชั้นวัสดุแอสฟัลต์กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม ELMOD มีดังนี้

$$E_T/E_C = A - B \cdot LGT(T/C) \quad (2.19)$$

โดย A และ B เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1 และ 3 ตามลำดับ

C = REFERENCE TEMPERATURE 25 °C

และสมการความสัมพันธ์ดังกล่าว ใช้สำหรับหาค่า MODULUS ของชั้นวัสดุแอสฟัลต์กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 5 °C ถึง 40 °C ในการคำนวณโดยโปรแกรม ELMOD วัสดุทุกชั้นจะสมมุติให้คุณสมบัติเป็น HOMOGENEOUS, ISOTROPIC และ LINEAR ELASTIC นอกจากชั้น SUBGRADE ซึ่งสมมุติให้เป็น NONLINEAR ELASTIC และใช้ค่า POISSON'S RATIO เท่ากับ 0.35 ซึ่งค่าที่ใช้จะมีผลน้อยมากต่อการคำนวณค่าการแอ่นตัว, STRESS และ STRAIN

การวิเคราะห์หาค่า MODULI สำหรับโครงสร้างทางสี่ชั้น อัตราส่วนของค่า MODULUS ของชั้นที่ 2 และ 3 (E_2/E_3) อาจจะใช้เป็นค่าคงที่หรือคำนวณจากความหนาของชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ในกรณีใช้การคำนวณโปรแกรม ELMOD จะใช้วิธีของ DORMON และ METCALF ["DESIGN CURVES FOR FLEXIBLE PAVEMENTS BASED ON LAYERED SYSTEM THEORY" HRR NO.71, 1965] ดังนี้

$$E_g/E_s = 0.2 \cdot h_g^{0.45} \quad (2.20)$$

โดยที่

E_g = MODULUS ของชั้น GRANULAR ซึ่งมีความหนา h_g มม.

E_s = SUBGRADE MODULUS

จากความสัมพันธ์ดังสมการจะนำไปใช้คำนวณหาค่า E_2/E_3 ต่อไป

บทที่ 3

แผนการศึกษาวิจัย

3.1 ข้อกำหนดในการศึกษาวิจัย

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่า MODULUS ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในโครงสร้างชั้นทาง จะกระทำภายใต้เงื่อนไขดังนี้

3.1.1 สายทางที่ทำการทดสอบจะต้องเป็นสายทางที่มีผิวทางเป็นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ค่อนข้างใหม่ โดยมีอายุการใช้งานมาประมาณ 1-2 ปี และมีความเสียหายเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

3.1.2 ความหนาของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ทดสอบจะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 100 มม.

3.1.3 ลักษณะทางเรขาคณิตของทางในช่วงที่ทำการทดสอบ จะต้องมิลักษณะเป็นทางตรงและราบ ไม่อยู่ในทางโค้งหรือมีส่วนประกอบของทางที่จะทำให้ความหนาของโครงสร้าง ชั้นทางเกิดการเปลี่ยนแปลงไป

3.1.4 การทดสอบจะกระทำในช่วงระยะทางที่กำหนด 100 เมตร โดยทดสอบที่ทุก ๆ 25 เมตร การทดสอบกระทำทุก ๆ 1 ชั่วโมง โดยเริ่มทดสอบโดยประมาณตั้งแต่ เวลา 06.00 น. จนถึงเวลา 18.00 น.

3.2 อุปกรณ์, เครื่องมือ ในการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.2.1 อุปกรณ์เก็บรวบรวมข้อมูลในสนาม อุปกรณ์ที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูลในสนามเพื่อวัดการแอ่นตัวของผิวทางเมื่อถูกน้ำหนักกระทำใช้ FWD ของ DYNATEST MODEL 8000 สำหรับอุณหภูมิของผิวทางใช้เครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์แบบ PORTABLE และวัดที่ระยะกึ่งกลางของความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

3.2.2 การให้น้ำหนักกระทำในการศึกษานี้กำหนดให้น้ำหนักกระทำด้วยขนาด 580 KPa. โดยกระทำผ่านแผ่นถ่วงน้ำหนักชนิด SEGMENT-LOADING-PLATE ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 มม. ซึ่งเทียบเท่ากับน้ำหนักเพลา 8200 กก. กระทำผ่านล้อเดี่ยวที่หนัก 4100 กก.

3.2.3 การวิเคราะห์หาค่า MODULUS ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ในการศึกษาวิจัยนี้ไม่มี การเจาะเก็บตัวอย่าง ดังนั้นความหนาของแต่ละชั้นและชนิดของวัสดุ ของโครงสร้าง จึงใช้ข้อมูลจากแบบ ที่ใช้ทำการก่อสร้างเป็นหลัก สำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนด ใน STANDARD THAI 1 ดังแสดงในภาคผนวก

3.3 ข้อมูลเบื้องต้น

สายทางที่เลือกสำหรับการศึกษาวิจัยนี้มีจำนวน 4 สายทาง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยมีรูป ลัดโครงสร้างทางแสดงในรูปที่ 3.1 ถึง 3.4

ตารางที่ 3.1 สายทางที่ทำการทดสอบ

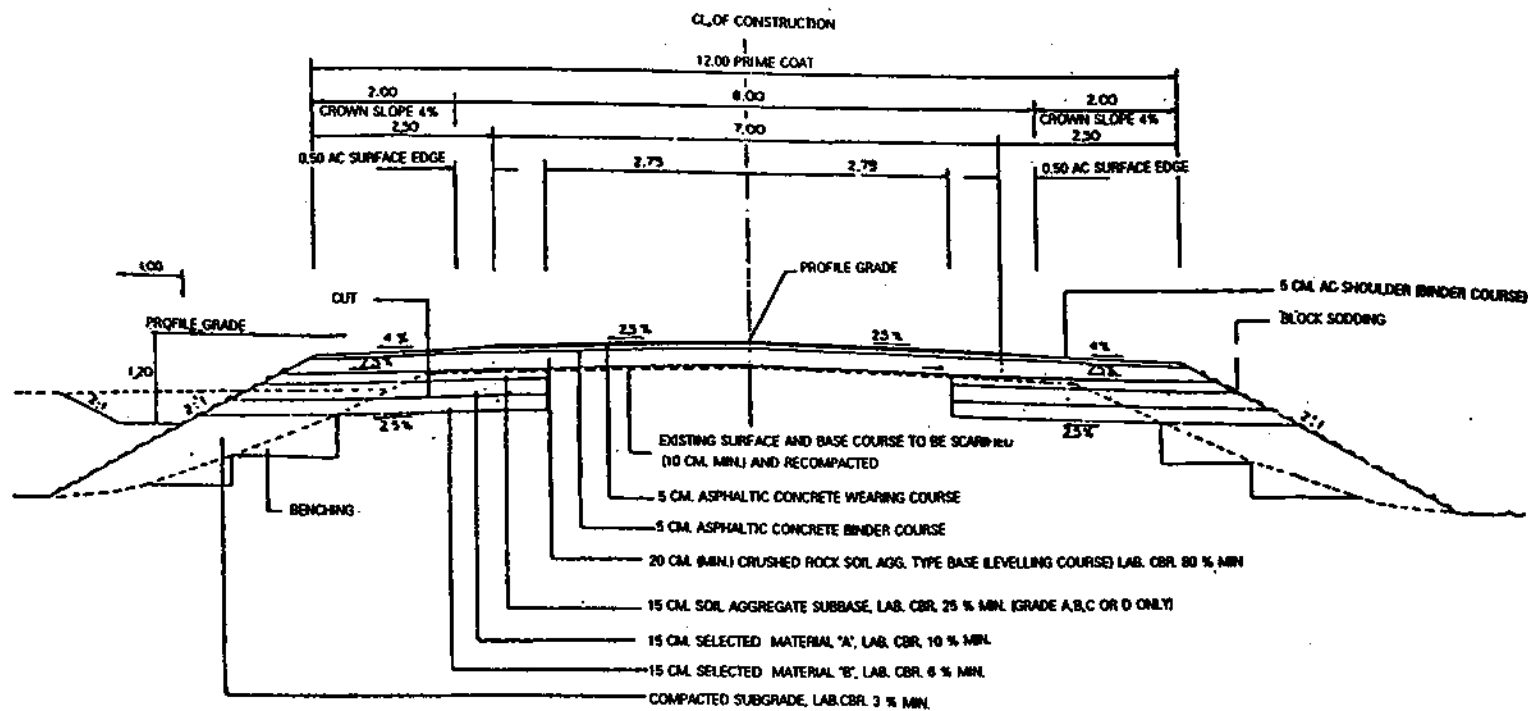
ทางหลวงหมายเลข	ตอน	กม.-กม.	หมายเหตุ
3264	ดอนเจดีย์-สระกระโจม	5+220-5+320	ด้านซ้ายทาง
333	สระกระโจม-ด่านช้าง	38+250-38+350	ด้านซ้ายทาง
4	กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์	298+900-298+800	ด้านขวาทาง
4	ชะอำ-ปราณบุรี	2+900-3+000	ด้านซ้ายทาง

3.4 แนวทางการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

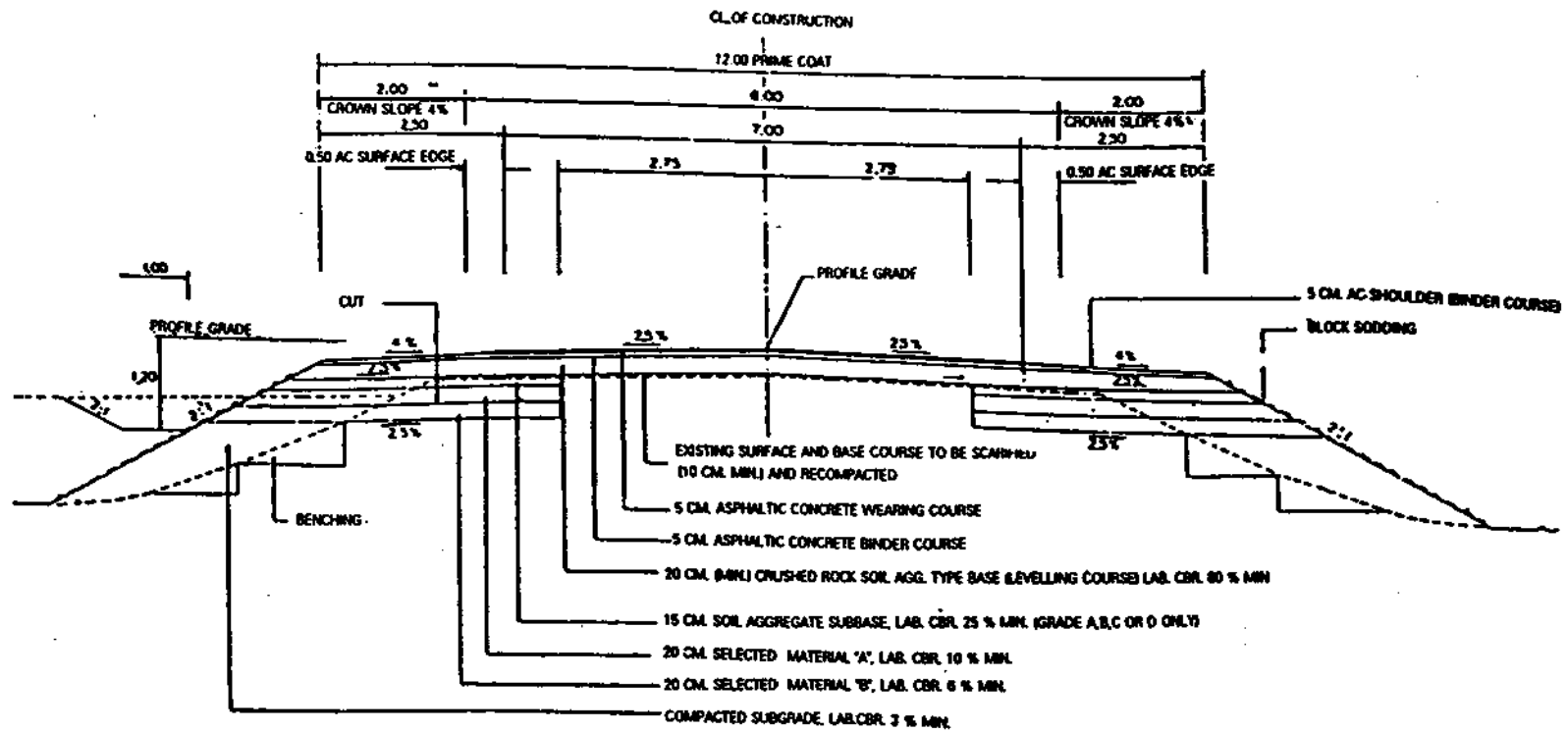
ในการศึกษาวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงที่มีต่อค่า AC MODULUS ที่เกิดขึ้นจริงในสนามของโครงสร้างทาง โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย (REGRESSION ANALYSIS) หาความสัมพันธ์ในรูปแบบต่าง ๆ โดยจัดแบ่งแนวทางการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

3.4.1 กรณีโครงสร้างทางที่ก่อสร้างบนคันทางเดิม ซึ่งได้แก่ ทางหลวงหมายเลข 3264 และ ทางหลวงหมายเลข 333

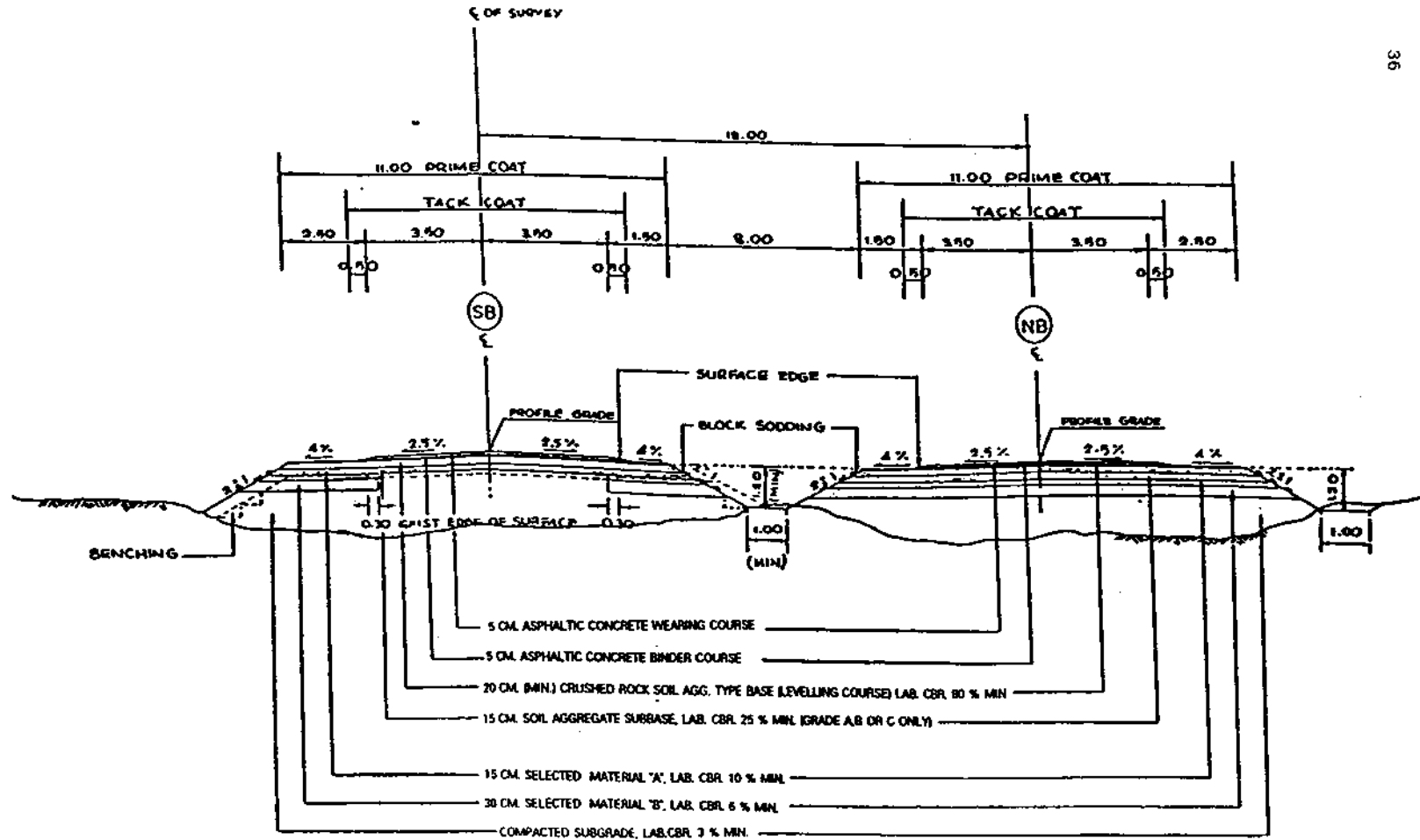
3.4.2 กรณีโครงสร้างทางที่เป็นทางก่อสร้างใหม่ ซึ่งได้แก่ ทางหลวงหมายเลข 4 ทั้งสองตอน



รูปที่ 3.1 รูปตัดโครงสร้างทางของทางหลวงหมายเลข 3264 ตอน ดอนเจดีย์-สระกระโจม

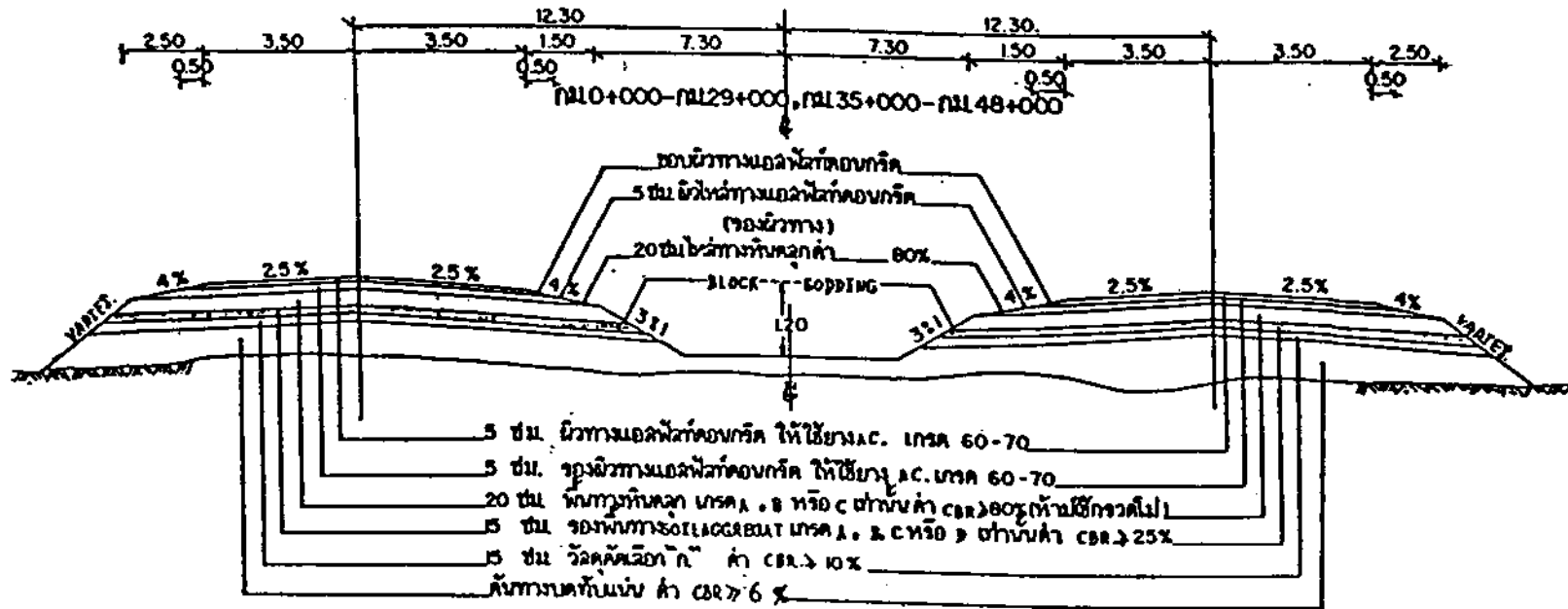


รูปที่ 3.2 รูปตัดโครงสร้างทางของทางหลวงหมายเลข 333 ตอน สระกระโจม-ด่านช้าง



รูปที่ 3.3 รูปตัดโครงสร้างทางของทางหลวงหมายเลข 4 ตอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์

TYPICAL CROSS SECTION



รูปที่ 3.4 รูปตัดโครงสร้างทางของทางหลวงหมายเลข 4 ตอน ชะอำ-ปราณบุรี

ทั้งสองกรณีที่ทำการศึกษาจะได้วิเคราะห์ใน 2 ลักษณะ คือ วิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น และวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น โดยมีรายละเอียดการแบ่งชั้น ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3 ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลของการแบ่งชั้นโครงสร้างทางที่มีต่อค่า AC MODULUS ด้วย

ตารางที่ 3.2 การแบ่งโครงสร้างชั้นทางในการวิเคราะห์กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น

ทางหลวง หมายเลข	ตอน	ชั้นที่	ชนิดวัสดุ	ความหนา (มม.)
3264	ดอนเจดีย์-สระ กระโจม	1	AC	100
		2	CRUSHED ROCK	200
		3	SOIL AGG.+SELECTED MAT. A, B	450
		4	SUBGRADE	-
333	สระกระโจม- ด่านช้าง	1	AC	100
		2	CRUSHED ROCK	200
		3	SOIL AGG.+SELECTED MAT. A, B	550
		4	SUBGRADE	-
4	กุดนบุรี-ประจวบ คีรีขันธ์	1	AC	100
		2	CRUSHED ROCK	200
		3	SOIL AGG.+SELECTED MAT. A, B	600
		4	SUBGRADE	-
4	ชะอำ-ปราณบุรี	1	AC	100
		2	CRUSHED ROCK	200
		3	SOIL AGG.+SELECTED MAT. A, B	300
		4	SUBGRADE	-

ตารางที่ 3.3 การแบ่งโครงสร้างชั้นทางในการวิเคราะห์กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น

ทางหลวง หมายเลข	ตอน	ชั้นที่	ชนิดวัสดุ	ความหนา (มม.)
3264	ดอนเจดีย์-สระ กระโจม	1	AC	100
		2	CRUSHED ROCK+SOIL AGG. +SELECTED MAT. A, B	650
		3	SUBGRADE	-
333	สระกระโจม- ด่านช้าง	1	AC	100
		2	CRUSHED ROCK+SOIL AGG. +SELECTED MAT. A, B	750
		3	SUBGRADE	-
4	กุดบรี-ประจวบ คีรีขันธ์	1	AC	100
		2	CRUSHED ROCK+SOIL AGG. +SELECTED MAT. A, B	800
		3	SUBGRADE	-
4	ชะอำ-ปราณบุรี	1	AC	100
		2	CRUSHED ROCK+SOIL AGG. +SELECTED MAT. A, B	500
		3	SUBGRADE	-

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

4.1 คุณสมบัติของโครงสร้างชั้นทาง

ผลการวิเคราะห์ทั่วไปจากข้อมูลการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในสนามด้วยโปรแกรม ELMOD 3 เพื่อหาค่า MODULUS ของโครงสร้างชั้นทางแต่ละชั้นของสายทางที่ทดสอบทั้งหมด สำหรับกรณี ที่วิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น และ 3 ชั้น แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และ 4.2 รูปที่ 4.1 ถึง 4.8 แสดงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงค่า MODULUS ที่เกิดขึ้นในระหว่างวันที่ทำการทดสอบ (ในรูป ที่ 4.1 ถึง 4.8 ค่าโมดูลัสของโครงสร้างทางแต่ละชั้นสามารถอ่านจากรูปนั้น ๆ โดยไม่ต้องหักลบ ค่าโมดูลัสของชั้นที่อยู่ข้างใต้)

จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า สำหรับโครงสร้างทางชั้นอื่น ๆ นอกจากชั้นผิวทางแอสฟัลต์ คอนกรีต (AC) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวทางซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ระหว่างวันของถนนจะมีผลน้อยมาก แต่สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (AC) การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิระหว่างวันมีผลอย่างมากต่อค่า AC MODULUS โดยค่า AC MODULUS ในช่วงเช้าที่ อุณหภูมิไม่สูงอาจมีค่ามากกว่า 4000 MPa. และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นระหว่างวันค่า AC MODULUS จะค่อย ๆ ลดลง แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิเริ่มลดลงในช่วงเวลาเย็น ในระหว่างวันจากการ ทดสอบพบว่า อุณหภูมิจะมีค่าสูงสุด ในช่วงเวลาประมาณ 13:00 น. ถึง 15:00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ค่า AC MODULUS มีค่าลดต่ำมากที่สุด

สำหรับการแบ่งชั้นของโครงสร้างทางที่จะใช้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 ทั้งกรณี 4 ชั้น และ 3 ชั้น ในการศึกษาพบว่า ไม่มีความแตกต่างในผลการวิเคราะห์ค่า AC MODULUS ที่เด่นชัด ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งสองกรณีแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและบางจุดให้ค่าที่เท่ากัน ทำนองเดียวกันในชั้น SUBGRADE การแบ่งชั้นของโครงสร้างทางก็ไม่มีผลต่อค่า SUBGRADE MODULUS แต่อย่างใด แต่สำหรับชั้นที่อยู่ระหว่างชั้น SUBGRADE และผิวทาง AC ในการ วิเคราะห์จะมีผลต่อค่า MODULUS ตามที่ได้จัดแบ่งไว้ซึ่งจะขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างชั้นทางนั้น ๆ

4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS และอุณหภูมิ

การศึกษาวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (REGRESSION ANALYSIS) ในการหา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า AC MODULUS และอุณหภูมิ (T) ใน 5 ลักษณะ คือ LINEAR REGRESSION, LOGARITHMIC REGRESSION, POLYNOMIAL REGRESSION, POWER

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 สำหรับโครงสร้างชั้นทาง 4 ชั้น

ทางหลวงหมายเลข 3284					ทางหลวงหมายเลข 383					ทางหลวงหมายเลข 4					ทางหลวงหมายเลข 4					หมายเหตุ
ดอน คองเจตีย์-บ.สระกระโจม					ดอน บ.สระกระโจม-ด่านช้าง					ดอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์					ดอน ชะอำ-ปราณบุรี					
ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					
อุณหภูมิ C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	
27.7	4060	497	299	274	29.5	3820	834	510	442						28.3	3768	281	163	128	เวลาทดสอบ ประมาณ 06.00 น.
27.7	2887	488	294	272	29.5	3295	1162	710	642						28.3	5828	270	157	123	
27.7	2717	495	298	242	29.5	4412	924	565	403						28.3	4548	293	170	117	
27.7	3892	543	327	254	29.5	3259	1147	701	333						28.3	4915	297	172	137	
27.7	2571	410	247	245	29.5	2744	1721	1051	621						28.3	5289	252	146	99	
25.2	3022	489	295	258	29.4	3627	800	489	421	29.4	2791	287	176	161	28.9	4014	286	166	126	เวลาทดสอบ ประมาณ 07.00 น.
25.2	3144	489	294	257	29.4	3514	1178	720	609	29.4	3912	266	163	147	28.9	6181	257	149	120	
25.2	3965	430	259	244	29.4	3545	1043	637	336	29.4	1759	198	122	116	28.9	4569	288	167	115	
25.2	3667	471	293	238	29.4	3435	1026	627	327	29.4	2816	214	132	128	28.9	5087	287	166	139	
25.2	3057	393	237	225	29.4	2869	1533	937	656	29.4	3476	281	172	133	28.9	4973	252	146	99	
26.4	5523	458	275	268	30.5	3370	819	500	422	31.5	1871	268	165	154	29.6	3652	285	165	129	เวลาทดสอบ ประมาณ 08.00 น.
26.4	3630	496	298	269	30.5	3514	1178	720	609	31.5	2925	270	166	145	29.6	5980	249	145	118	
26.4	3364	459	276	233	30.5	4204	888	543	389	31.5	1592	179	110	131	29.6	3967	297	172	115	
26.4	4303	442	266	240	30.5	3446	1046	639	327	31.5	2367	196	120	125	29.6	4527	291	169	136	
26.4	3106	393	237	238	30.5	3397	1459	891	711	31.5	2783	272	167	136	29.6	4246	259	150	95	

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 สำหรับโครงสร้างชั้นทาง 4 ชั้น

ทางหลวงหมายเลข 3264					ทางหลวงหมายเลข 333					ทางหลวงหมายเลข 4					ทางหลวงหมายเลข 4					หมายเหตุ
ดอนเจดีย์-บ.สระกระโจม					ดอน บ.สระกระโจม-คำช้าง					ดอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์					ดอน ระอ่า-ปรางบุรี					
ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					
อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	
27.2	2935	477	287	253	34.9	3019	880	537	451	34.4	1880	267	164	156	35.1	3193	276	160	133	เวลาทดสอบ ประมาณ ๐๑.๐๐ น.
27.2	3960	486	293	265	34.9	2994	1150	702	627	34.4	2209	260	160	144	35.1	4003	261	152	126	
27.2	3257	444	268	235	34.9	3419	985	602	345	34.4	1133	183	112	117	35.1	3307	284	165	122	
27.2	3438	449	271	245	34.9	3255	1048	640	319	34.4	2207	185	114	126	35.1	3831	282	163	144	
27.2	3442	376	226	239	34.9	2829	1472	899	709	34.4	1778	286	176	134	35.1	5527	223	129	97	
29.0	3504	449	271	264	38.4	2724	795	486	428	38.2	2060	259	159	163	38.5	2782	263	153	144	เวลาทดสอบ ประมาณ 10.๐๐ น.
29.0	2501	497	299	254	38.4	2470	1180	721	601	38.2	2313	257	158	155	38.5	3160	262	152	127	
29.0	2702	444	267	232	38.4	2953	981	599	326	38.2	1580	165	101	124	38.5	2942	288	167	126	
29.0	1374	447	269	237	38.4	3010	1072	655	305	38.2	1968	195	120	129	38.5	3266	297	172	138	
29.0	2747	370	222	243	38.4	2708	1555	950	630	38.2	2379	274	168	136	38.5	4707	217	126	106	
30.0	2920	472	284	260	45.2	2031	781	477	422	39.6	1360	241	148	151	42.5	2340	250	145	150	เวลาทดสอบ ประมาณ 11.๐๐ น.
30.0	2426	499	300	255	45.2	1964	1139	696	629	39.6	2016	267	164	149	42.5	3339	254	147	128	
30.0	2591	442	266	234	45.2	2297	968	591	324	39.6	1048	175	108	127	42.5	2568	277	161	127	
30.0	3449	430	259	242	45.2	2018	994	607	296	39.6	1733	180	110	131	42.5	2564	293	170	141	
30.0	3057	367	221	243	45.2	2599	1379	843	706	39.6	1344	300	184	131	42.5	4617	202	117	103	

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 สำหรับโครงสร้างชั้นทาง 4 ชั้น

ทางหลวงหมายเลข 3264					ทางหลวงหมายเลข 333					ทางหลวงหมายเลข 4					ทางหลวงหมายเลข 4					หมายเหตุ
คอน คอนกรีต-บ.สระกระโจม					คอน บ.สระกระโจม-ด้านข้าง					คอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์					คอน ชะอำ-ปราณบุรี					
ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					
อุณหภูมิ: C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ: C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ: C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ: C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	
34.2	2182	456	274	258	49.4	1638	819	501	415	47.9	1492	299	184	161	47.5	2260	249	144	149	เวลาทดสอบ ประมาณ 12.00 น.
34.2	1710	484	291	249	49.4	2168	1141	697	625	47.9	1728	285	175	149	47.5	2786	259	150	129	
34.2	2234	428	257	221	49.4	2093	982	600	322	47.9	996	193	119	111	47.5	2640	257	149	132	
34.2	2343	424	255	231	49.4	1789	972	594	290	47.9	1299	200	123	127	47.5	2621	261	151	160	
34.2	2160	392	236	211	49.4	1961	1350	824	737	47.9	1357	290	178	130	47.5	3302	210	122	110	
41.3	1690	444	268	254	51.5	1548	827	505	440	48.3	1562	313	192	163	52.5	1914	253	147	155	เวลาทดสอบ ประมาณ 13.00 น.
41.3	1529	512	308	264	51.5	1607	1211	740	571	48.3	1536	262	161	154	52.5	2546	250	145	134	
41.3	1355	428	258	223	51.5	1825	959	586	317	48.3	1105	176	108	129	52.5	2189	271	157	137	
41.3	1742	396	239	226	51.5	1540	982	600	284	48.3	1271	199	122	132	52.5	2471	273	158	156	
41.3	1191	395	238	211	51.5	1612	1575	962	594	48.3	1326	285	175	130	52.5	1959	254	147	112	
43.5	1699	456	275	246	52.5	1430	824	503	401	48.3	1201	303	186	163	52.3	1945	255	148	148	เวลาทดสอบ ประมาณ 14.00 น.
43.5	1554	490	295	255	52.5	1603	1090	666	627	48.3	1542	269	165	151	52.3	2170	257	149	134	
43.5	1395	425	256	225	52.5	2128	813	497	398	48.3	1005	170	105	119	52.3	2089	280	162	133	
43.5	1384	404	243	226	52.5	1412	977	597	278	48.3	1163	192	118	132	52.3	2023	293	170	144	
43.5	1340	365	220	225	52.5	1388	1526	932	599	48.3	1147	295	181	128	52.3	1779	237	138	109	

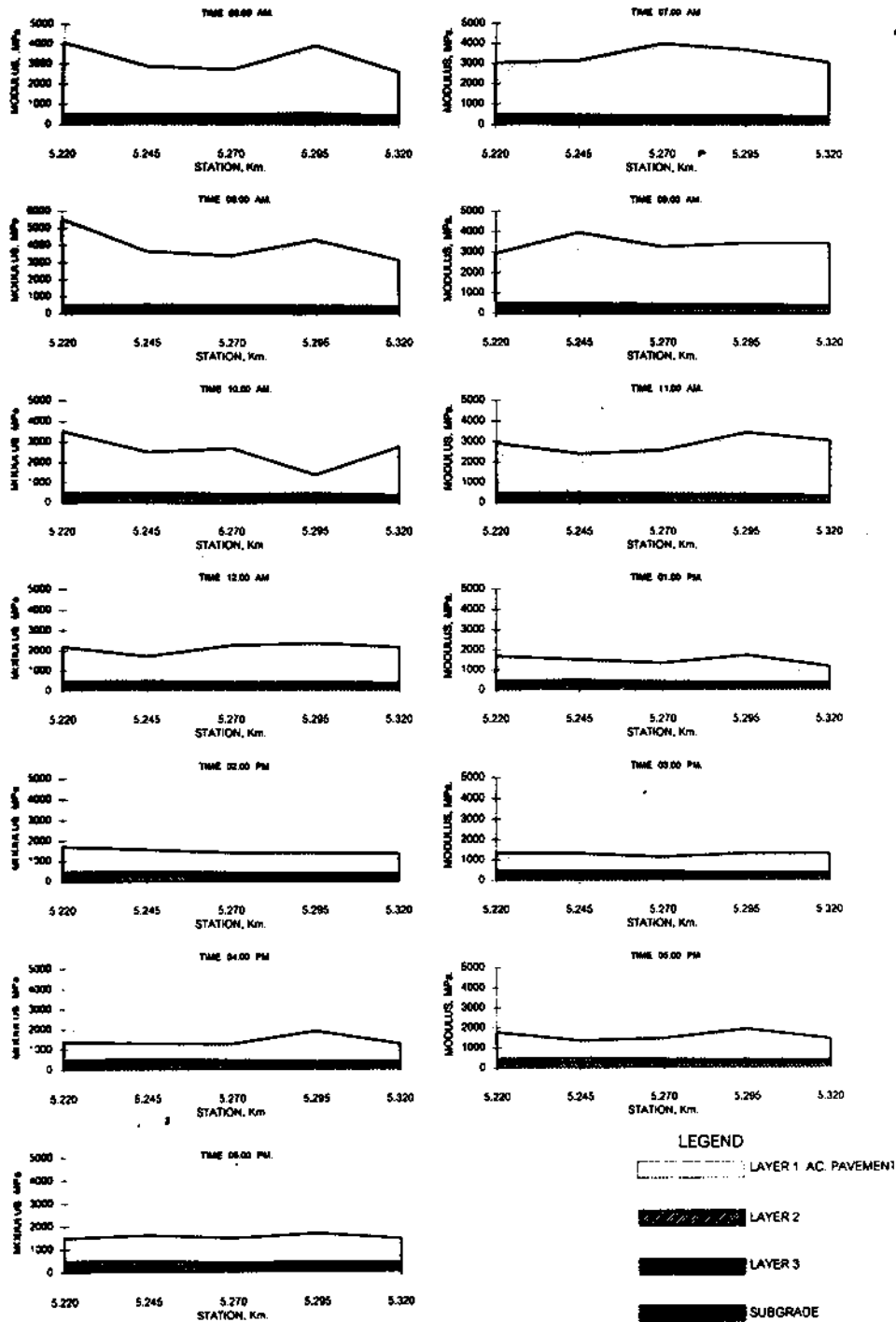
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 สำหรับโครงสร้างชั้นทาง 4 ชั้น

ทางหลวงหมายเลข 3264					ทางหลวงหมายเลข 333					ทางหลวงหมายเลข 4					ทางหลวงหมายเลข 4					หมายเหตุ
ตอน ดอนเจดีย์-บ.สระกระโจม					ตอน บ.สระกระโจม-ด่านช้าง					ตอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์					ตอน ชะอำ-ปราณบุรี					
ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					
อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	
44.0	1327	472	284	248	47.4	1482	843	515	427	46.5	1630	271	166	155	52.3	1825	253	147	153	เวลาทดสอบ ประมาณ 15.00 น.
44.0	1318	488	294	252	47.4	1757	1135	694	642	46.5	1443	266	163	150	52.3	2162	270	156	124	
44.0	1149	431	259	221	47.4	1721	979	598	310	46.5	990	182	112	121	52.3	2071	271	157	131	
44.0	1321	392	236	217	47.4	1434	1000	611	287	46.5	1294	201	124	133	52.3	2423	268	156	151	
44.0	1292	383	231	227	47.4	1618	1280	782	755	46.5	1560	288	177	134	52.3	2847	206	120	105	
43.0	1356	464	280	248	44.2	1653	793	485	434	42.9	1559	307	188	162	48.3	1612	274	159	147	เวลาทดสอบ ประมาณ 16.00 น.
43.0	1296	529	318	270	44.2	1813	1093	668	644	42.9	1542	261	161	145	48.3	2319	263	153	132	
43.0	1257	456	274	226	44.2	1963	971	593	328	42.9	1285	167	103	130	48.3	2078	281	163	130	
43.0	1901	402	242	241	44.2	1596	979	598	297	42.9	1483	194	119	130	48.3	2318	271	157	157	
43.0	1284	386	232	215	44.2	1601	1584	955	590	42.9	1905	278	171	137	48.3	1893	251	145	110	
40.0	1784	445	268	259	42.7	1739	804	491	446	39.1	1797	276	169	159	46.1	1825	277	161	148	เวลาทดสอบ ประมาณ 17.00 น.
40.0	1354	491	296	254	42.7	1950	1114	680	635	39.1	1674	275	169	148	46.1	2358	268	156	128	
40.0	1463	421	254	220	42.7	1725	993	607	327	39.1	1010	188	116	118	46.1	2132	312	181	127	
40.0	1928	401	242	235	42.7	1707	1043	637	297	39.1	1612	199	122	131	46.1	2442	278	161	151	
40.0	1441	374	225	223	42.7	1991	1336	816	724	39.1	1727	295	181	140	46.1	3814	206	120	104	

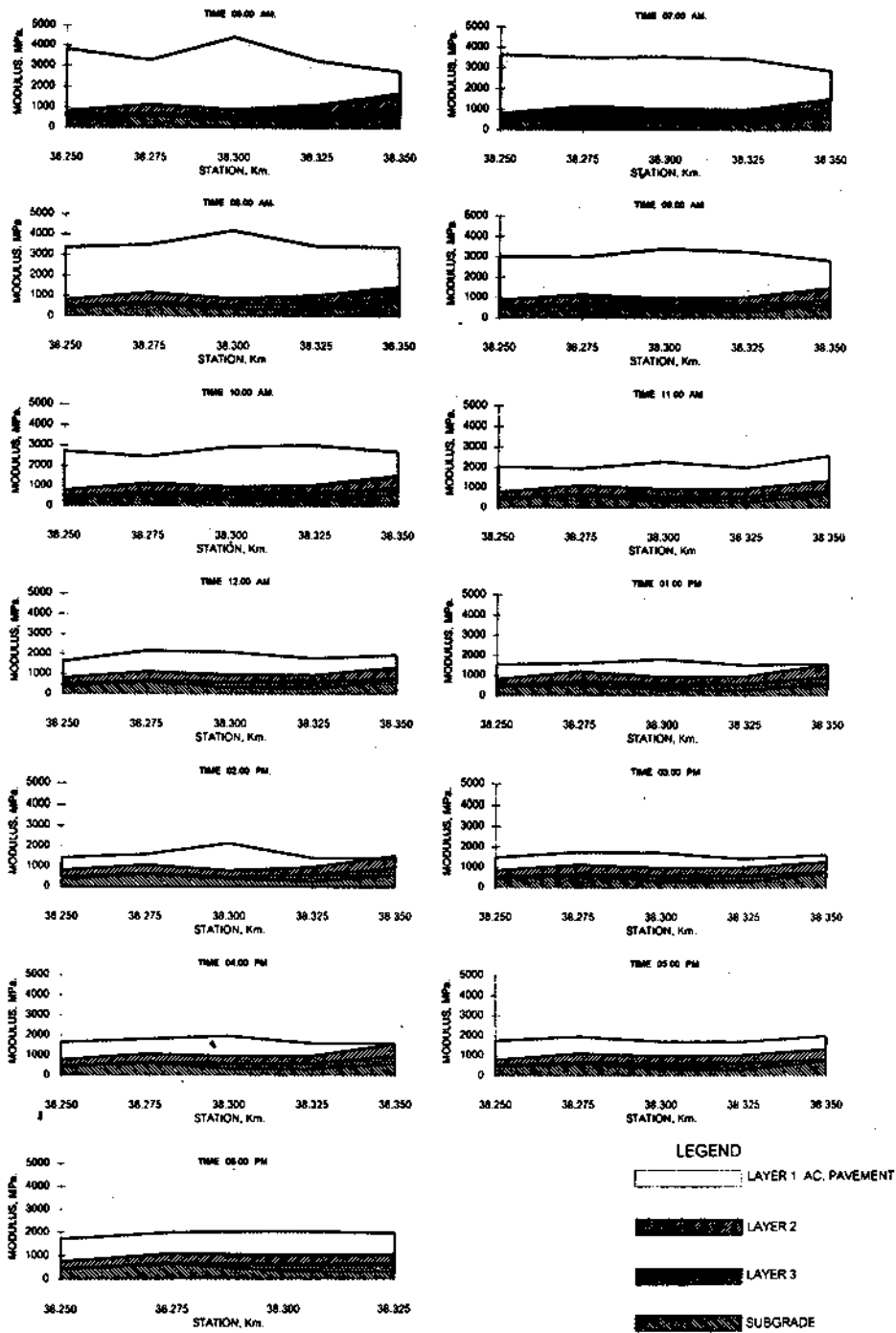
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 สำหรับโครงสร้างชั้นทาง 4 ชั้น

ทางหลวงหมายเลข 3284					ทางหลวงหมายเลข 333					ทางหลวงหมายเลข 4					ทางหลวงหมายเลข 4					หมายเหตุ
คอนกรีตเสริมเหล็ก-บ.สระกระโจม					คอนกรีตเสริมเหล็ก-คานช้าง					คอนกรีตเสริมเหล็ก-ประจวบคีรีขันธ์					คอนกรีตเสริมเหล็ก-ปราจีนบุรี					
ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					
อุณหภูมิ°C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ°C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ°C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ°C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	
37.0	1475	473	285	244	40.6	1709	752	459	432						43.2	1964	272	158	146	
37.0	1610	479	288	250	40.6	1988	1098	671	648						43.2	2490	274	159	127	
37.0	1464	412	248	231	40.6	2048	1018	622	331						43.2	2169	292	169	134	
37.0	1672	423	254	226	40.6	1961	1048	640	296						43.2	2432	281	163	152	
37.0	1437	386	232	216	40.6	1687	1512	923	622						43.2	2502	241	140	107	

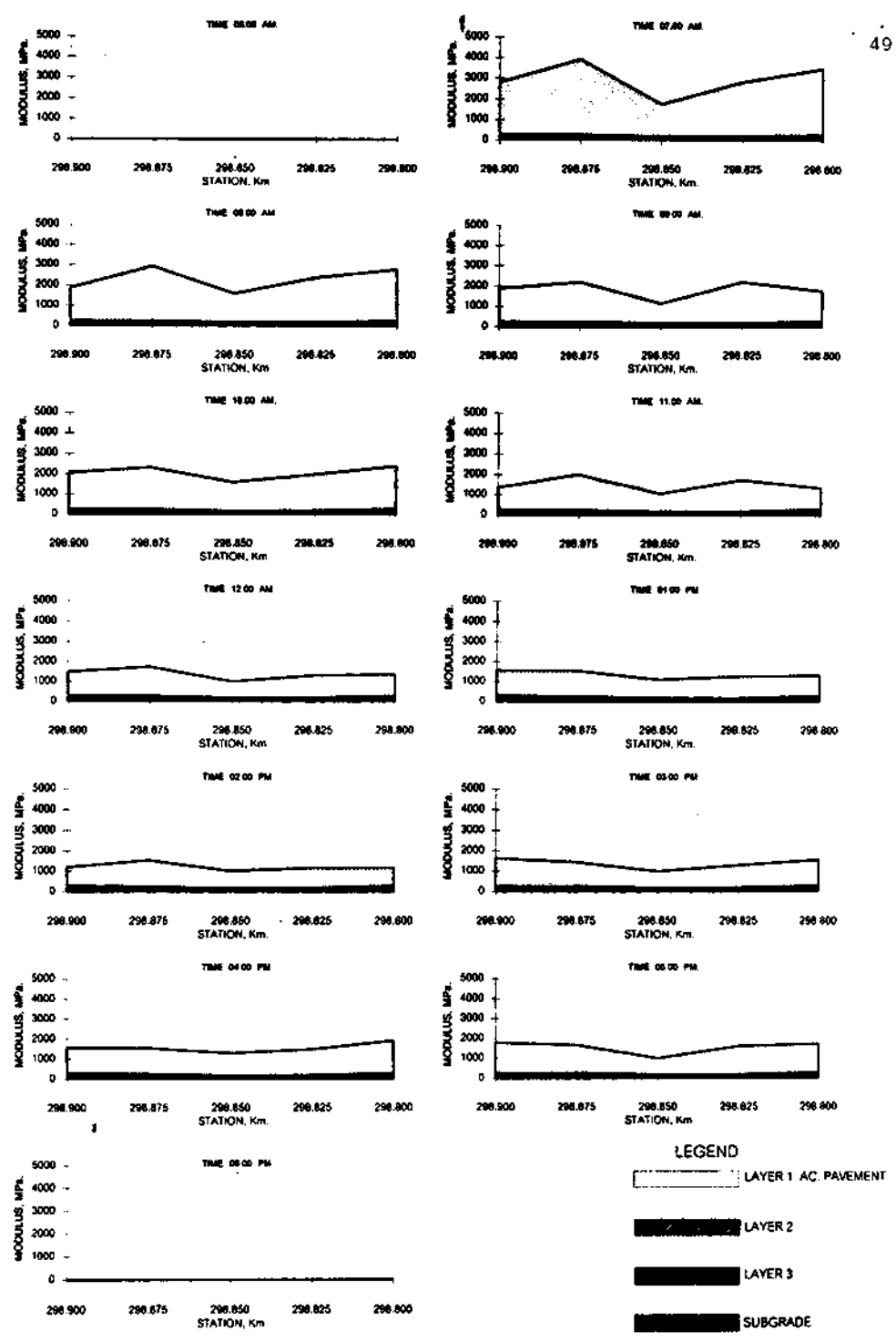
เวลาทดสอบ
ประมาณ
18.00 น.



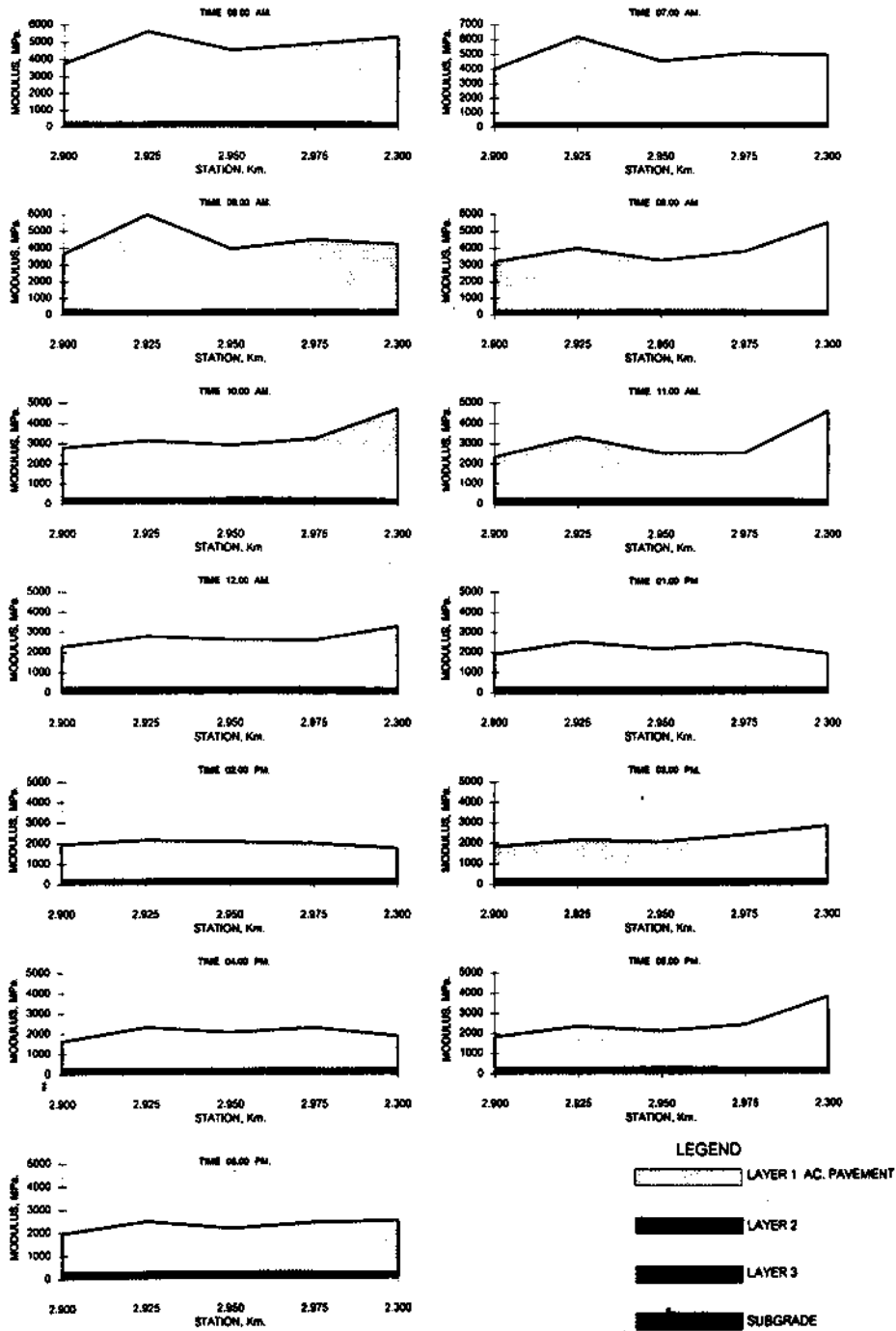
รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลง MODULUS ของโครงสร้างชั้นทาง ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ในวันที่ทดสอบ ทางหลวงหมายเลข 3264 ตอน ดอนเจดีย์-สระกระโจม กรมวิเคราะห้ เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น



รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลง MODULUS ของโครงสร้างชั้นทาง ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ในวันที่ทดสอบ ทางหลวงหมายเลข 333 ตอน สระกระโจม-ด่านช้าง กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น



รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลง MODULUS ของโครงสร้างชั้นทาง ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในวันที่ทดสอบ ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์ กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น



รูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลง MODULUS ของโครงสร้างชั้นทาง ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในวันที่ทดสอบ ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน ชะอำ-ปราณบุรี กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 สำหรับโครงสร้างชั้นทาง 3 ชั้น

ทางหลวงหมายเลข 3264					ทางหลวงหมายเลข 333					ทางหลวงหมายเลข 4					ทางหลวงหมายเลข 4					หมายเหตุ
คอน คอนกรีต-บ.สระกระโจม					คอน บ.สระกระโจม-คาน้ำ					คอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์					คอน ชะอำ-ปรางมณี					
ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					
อุณหภูมิ C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	
27.7	4059	341	274		29.5	3820	580	442							28.3	3757	195	128		เวลาทดสอบ ประมาณ 06.00 น.
27.7	2887	339	272		29.5	3297	824	642							28.3	5614	183	123		
27.7	2716	345	242		29.5	3908	712	357							28.3	4532	202	116		
27.7	3890	374	254		29.5	3259	814	333							28.3	4902	203	137		
27.7	2569	284	245		29.5	2744	1244	621							28.3	5244	168	98		
25.2	3021	339	257		29.4	3627	557	421		29.4	2789	192	161		28.9	4001	197	125		เวลาทดสอบ ประมาณ 07.00 น.
25.2	3142	338	257		29.4	3515	834	609		29.4	3907	175	147		28.9	6152	170	120		
25.2	3956	288	244		29.4	3545	736	336		29.4	1722	131	115		28.9	4552	198	115		
25.2	3665	323	238		29.4	3435	724	327		29.4	2810	141	128		28.9	5075	195	139		
25.2	3055	270	225		29.4	2869	1103	656		29.4	3473	186	133		28.9	4929	168	98		
26.4	5516	302	267		30.5	3370	572	422		31.5	1870	182	154		29.6	3641	198	129		เวลาทดสอบ ประมาณ 08.00 น.
26.4	3629	341	269		30.5	3515	834	609		31.5	2922	180	145		29.6	5951	165	117		
26.4	3362	315	233		30.5	3736	682	345		31.5	1588	119	131		29.6	3953	206	115		
26.4	4301	300	240		30.5	3446	739	327		31.5	2364	130	125		29.6	4516	199	136		
26.4	2850	289	218		30.5	2973	1155	622		31.5	2782	182	136		29.6	4231	178	95		

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 สำหรับโครงสร้างชั้นทาง 3 ชั้น

ทางหลวงหมายเลข 3264					ทางหลวงหมายเลข 333					ทางหลวงหมายเลข 4				ทางหลวงหมายเลข 4				หมายเหตุ		
คอน คอนกรีต-บ.สระกระโจม					คอน บ.สระกระโจม-คานข้าง					คอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์				คอน ชะอำ-ปราณบุรี						
ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS				ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS						
อุณหภูมิ:°C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ:°C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ:°C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ:°C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2		ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4
27.2	2935	331	253		34.9	3020	620	451		34.4	1879	182	156		35.1	3185	192	133		เวลาทดสอบ ประมาณ 09.00 น.
27.2	3958	333	265		34.9	2996	618	627		34.4	2207	175	143		35.1	3996	179	125		
27.2	3255	306	235		34.9	3419	685	345		34.4	1133	125	117		35.1	3299	198	121		
27.2	3437	309	245		34.9	3255	741	319		34.4	2204	123	125		35.1	3823	194	144		
27.2	3436	252	239		34.9	2475	1190	621		34.4	1778	196	134		35.1	5463	147	96		
29.0	3502	304	264		38.4	2724	560	428		38.2	2060	172	163		38.5	2745	180	143		เวลาทดสอบ ประมาณ 10.00 น.
29.0	2501	347	254		38.4	2541	829	619		38.2	2313	170	155		38.5	3155	181	127		
29.0	2701	308	232		38.4	2959	695	326		38.2	1574	109	124		38.5	2937	201	125		
29.0	1374	319	237		38.4	3010	760	305		38.2	1641	136	121		38.5	3633	178	153		
29.0	2744	250	243		38.4	2708	1121	630		38.2	2379	185	136		38.5	4689	146	105		
30.0	2919	328	260		45.2	2032	556	423		39.6	1360	166	151		42.5	2335	174	149		เวลาทดสอบ ประมาณ 11.00 น.
30.0	2426	349	255		45.2	1995	816	639		39.6	2015	181	149		42.5	3335	175	128		
30.0	2590	307	234		45.2	2297	692	324		39.6	1048	121	127		42.5	2564	195	126		
30.0	3448	290	242		45.2	2018	713	296		39.6	1732	121	130		42.5	2559	205	141		
30.0	3055	247	243		45.2	2599	993	706		39.6	1344	208	131		42.5	4598	136	102		

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 สำหรับโครงสร้างชั้นทาง 3 ชั้น

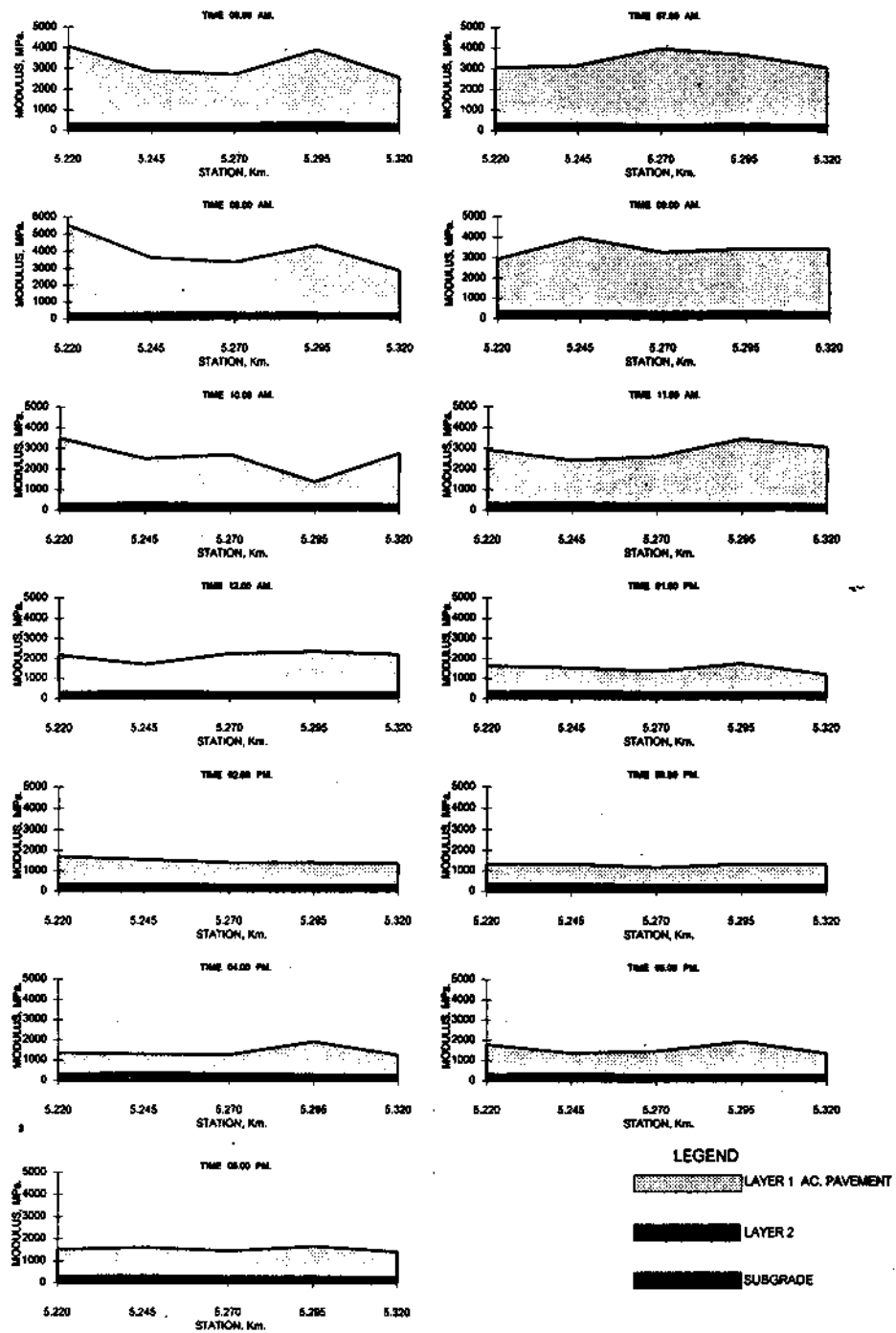
ทางหลวงหมายเลข 3264					- ทางหลวงหมายเลข 333					ทางหลวงหมายเลข 4					ทางหลวงหมายเลข 4					หมายเหตุ
ตอน ดอนเจดีย์-บ.สระกระโจม					ตอน บ.สระกระโจม-ด่านช้าง					ตอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์					ตอน ชะอำ-ปราณบุรี					
ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					
อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	
34.2	2182	320	256		49.4	1638	589	415		47.9	1492	207	161		47.5	2255	174	148		เวลาทดสอบ ประมาณ 12.00 น.
34.2	1710	343	249		49.4	2226	808	642		47.9	1727	195	149		47.5	2784	180	129		
34.2	2234	298	221		49.4	2093	704	322		47.9	1035	126	117		47.5	2634	178	131		
34.2	2343	296	231		49.4	1789	699	290		47.9	1299	136	127		47.5	2618	178	160		
34.2	2188	269	213		49.4	1961	980	737		47.9	1357	201	130		47.5	3294	144	110		
41.3	1627	323	245		51.5	1549	595	440		48.3	1562	216	163		52.5	1733	200	139		เวลาทดสอบ ประมาณ 13.00 น.
41.3	1529	365	264		51.5	1607	881	571		48.3	1536	180	154		52.5	2544	171	134		
41.3	1355	304	223		51.5	1825	690	317		48.3	1105	121	129		52.5	2185	190	136		
41.3	1742	279	226		51.5	1540	710	284		48.3	1271	136	132		52.5	2467	188	156		
41.3	1192	283	211		51.5	1612	1151	594		48.3	1326	197	130		52.5	1948	176	112		
43.5	1699	323	246		52.5	1430	594	401		48.3	1201	212	163		52.3	1941	180	148		เวลาทดสอบ ประมาณ 14.00 น.
43.5	1554	349	255		52.5	1603	790	626		48.3	1542	185	151		52.3	2169	178	133		
43.5	1396	302	225		52.5	1667	707	312		48.3	1005	117	119		52.3	2074	194	133		
43.5	1384	287	226		52.5	1412	707	278		48.3	1163	132	131		52.3	2020	207	143		
43.5	1340	259	225		52.5	1388	1119	599		48.3	1147	206	128		52.3	1776	167	109		

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 สำหรับโครงสร้างชั้นทาง 3 ชั้น

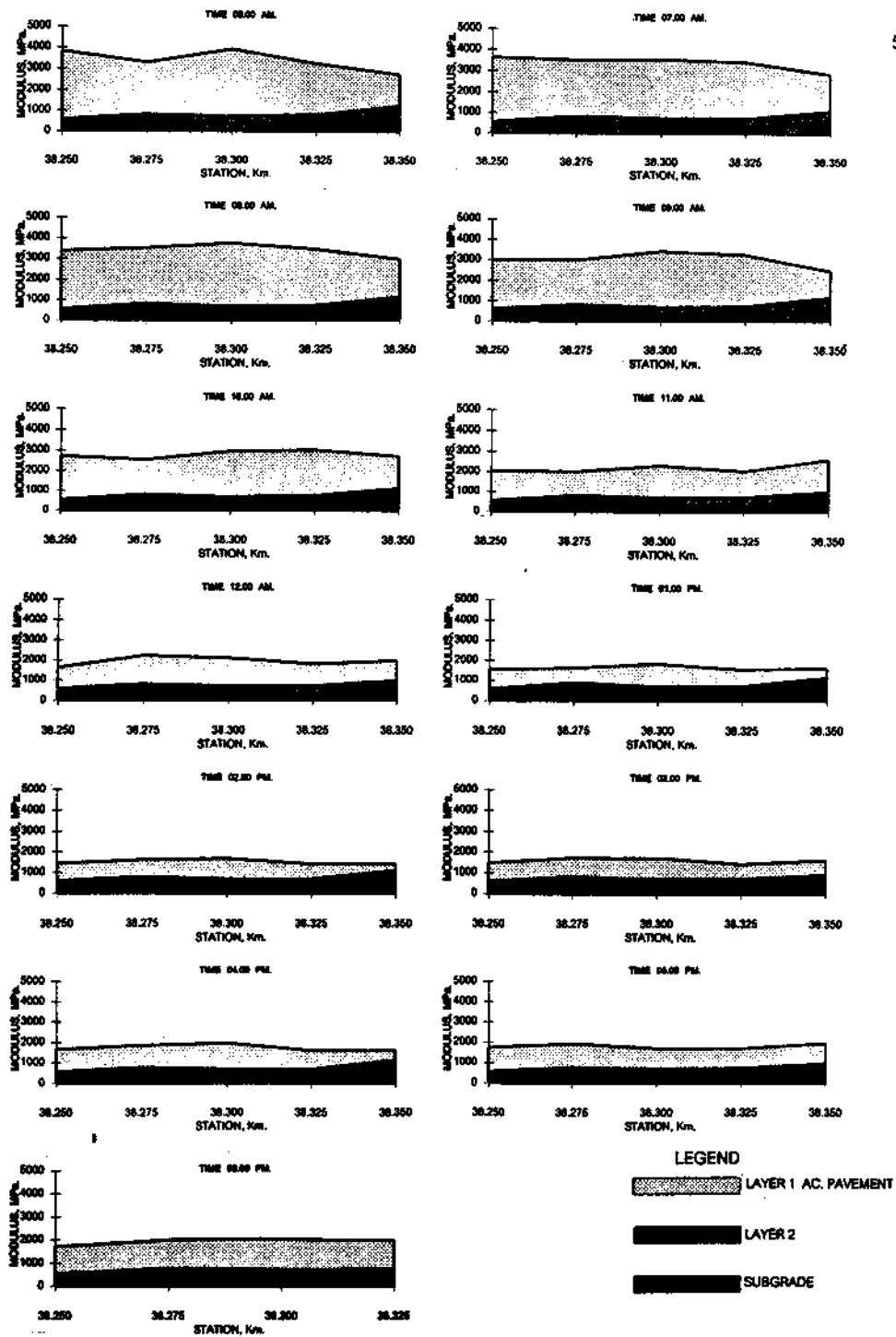
ทางหลวงหมายเลข 3264					ทางหลวงหมายเลข 333					ทางหลวงหมายเลข 4					ทางหลวงหมายเลข 4					หมายเหตุ
คอน คอนกรีต-บ.สระกระโจม					คอน บ.สระกระโจม-ด้านข้าง					คอน กุยมูรี-ประจวบคีรีขันธ์					คอน ทราย-ปราณบุรี					
ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					
อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	
44.0	1328	337	249		47.4	1482	608	427		46.5	1629	185	155		52.3	1623	179	153		เวลาทดสอบ ประมาณ 15.00 น.
44.0	1318	350	252		47.4	1716	839	627		46.5	1443	183	150		52.3	2160	190	124		
44.0	1150	308	221		47.4	1721	705	310		46.5	989	125	121		52.3	2054	188	131		
44.0	1321	279	217		47.4	1434	724	287		46.5	1294	138	133		52.3	2419	185	151		
44.0	1292	272	227		47.4	1618	932	755		46.5	1560	199	134		52.3	2840	142	105		
43.0	1357	331	248		44.2	1654	569	434		42.9	1559	212	162		48.3	1597	192	146		เวลาทดสอบ ประมาณ 16.00 น.
43.0	1297	380	270		44.2	1848	783	656		42.9	1541	179	145		48.3	2318	185	132		
43.0	1257	326	226		44.2	1963	697	328		42.9	1282	111	130		48.3	2076	199	130		
43.0	1901	282	241		44.2	1596	707	297		42.9	1482	131	130		48.3	2315	187	157		
43.0	1252	271	214		44.2	1601	1143	590		42.9	1905	190	137		48.3	1883	174	110		
40.0	1784	314	259		42.7	1740	576	446		39.1	1796	188	159		46.1	1807	193	147		เวลาทดสอบ ประมาณ 17.00 น.
40.0	1355	351	254		42.7	1950	804	636		39.1	1674	188	147		46.1	2357	188	128		
40.0	1463	299	220		42.7	1725	716	327		39.1	1010	129	118		46.1	2129	221	127		
40.0	1928	282	235		42.7	1707	753	297		39.1	1611	134	131		46.1	2440	195	150		
40.0	1361	276	211		42.7	1972	976	717		39.1	1727	202	140		46.1	3801	140	104		

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 สำหรับโครงสร้างชั้นทาง 3 ชั้น

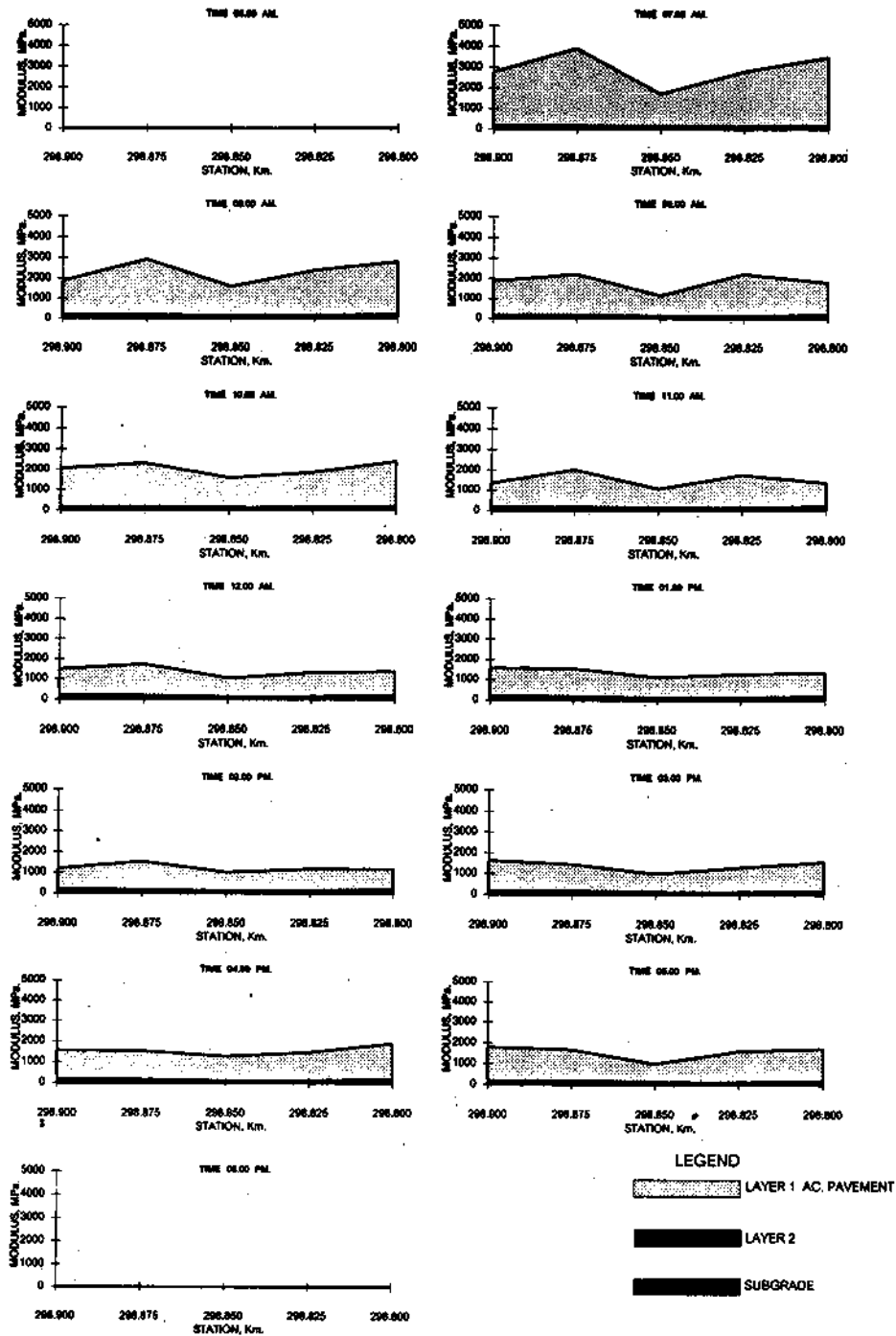
ทางหลวงหมายเลข 3264					ทางหลวงหมายเลข 333					ทางหลวงหมายเลข 4					ทางหลวงหมายเลข 4					หมายเหตุ
ตอน ดอนเจดีย์-บ.สระกระโจม					ตอน บ.สระกระโจม-คำห้าง					ตอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์					ตอน ชะอำ-ปราณบุรี					
ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					ผลการวิเคราะห์ค่า MODULUS					
อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	อุณหภูมิ °C	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	
37.0	1530	328	253		40.6	1710	538	432							43.2	1943	189	145		
37.0	1610	340	250		40.6	2004	791	653							43.2	2488	192	127		
37.0	1464	292	231		40.6	2048	731	331							43.2	2154	203	133		
37.0	1672	298	226		40.6	1961	753	296							43.2	2430	197	152		
37.0	1423	268	216		40.6	1687	1104	622							43.2	2485	165	106		



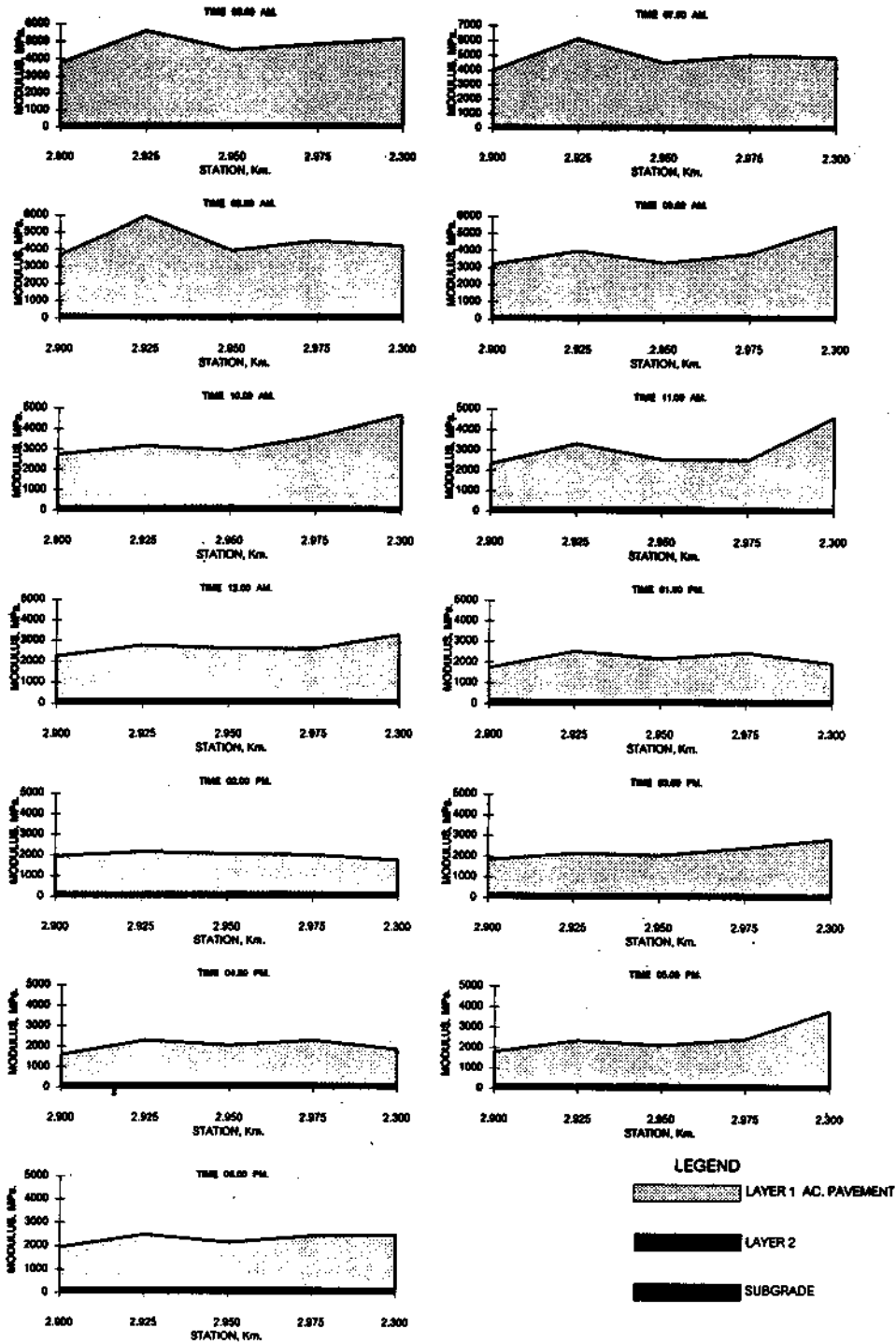
รูปที่ 4.5 แสดงการเปลี่ยนแปลง MODULUS ของโครงสร้างชั้นทาง ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในวันที่ทดสอบ ทางหลวงหมายเลข 3264 ตอน ดอนเจดีย์-สระกระโจม กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น



รูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลง MODULUS ของโครงสร้างชั้นทาง ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในวันที่ทดสอบ ทางหลวงหมายเลข 333 ตอน สระกระโจม-ด่านช้าง กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น



รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลง MODULUS ของโครงสร้างชั้นทาง ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในวันที่ทดสอบ ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์ กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น



รูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลง MODULUS ของโครงสร้างชั้นทาง ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในวันที่ทดสอบ ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน ชะอำ-ปราณบุรี กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น

REGRESSION และ EXPONENTIAL REGRESSION ผลการวิเคราะห์ได้ตรวจสอบโดยใช้ค่า COEFFICIENT OF DETERMINATION (R^2) ซึ่งเสนอแนะโดย DRAPER และ SMITH (1966) โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณา ดังนี้

$R^2 < 0.25$	แสดงว่า	มีความสัมพันธ์กันน้อย
$R^2 = 0.25-0.55$	แสดงว่า	มีความสัมพันธ์กันพอใช้
$R^2 = 0.55-0.80$	แสดงว่า	มีความสัมพันธ์กันดี
$R^2 > 0.80$	แสดงว่า	มีความสัมพันธ์กันดีมาก

สำหรับข้อมูล AC MODULUS ที่จะนำไปหาความสัมพันธ์ในการศึกษาวิจัยนี้จะตัดค่า AC MODULUS ที่สูงสุดและต่ำสุดของแต่ละอุณหภูมิที่ทดสอบได้ออก ทั้งนี้ เพื่อให้ได้ค่า AC MODULUS ที่เป็นตัวแทนของแต่ละอุณหภูมิที่เหมาะสมและเป็นการลดความผิดพลาดจากเครื่องมือทดสอบ

4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS กับอุณหภูมิของแต่ละสายทาง

รูปที่ 4.9 ถึง รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป และในตารางที่ 4.3 แสดงค่า R^2 ของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในทุกลักษณะที่ทำการวิเคราะห์ ในกรณีทีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น และ 3 ชั้น ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า R^2 จะเห็นได้ว่า กรณีทีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น และ 3 ชั้น ทุกลักษณะความสัมพันธ์ที่ทำการวิเคราะห์จะมีค่า R^2 มากกว่า 0.8 ซึ่งถือว่าสมการความสัมพันธ์ที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS และอุณหภูมิ ได้ค่อนข้างดีมาก ยกเว้น ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งมีค่า R^2 มากกว่า 0.7 แต่ไม่ต่ำกว่า 0.8 เพียงสายทางเดียว แต่ก็ถือได้ว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับดี

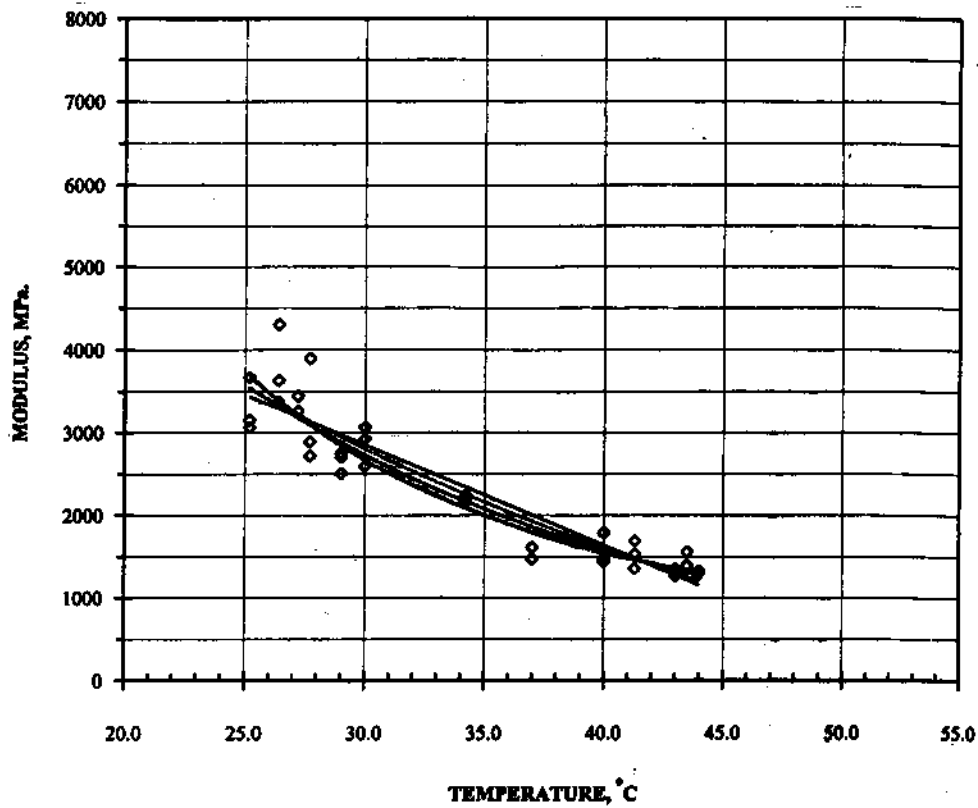
จากความสัมพันธ์ทั้ง 5 ลักษณะที่ทำการวิเคราะห์ ถึงแม้ว่าค่า R^2 ที่สูงสุดของสายทางที่ทำการทดสอบทั้ง 4 สายทางจะมีหลายลักษณะ คือ POWER REGRESSION, POLYNOMIAL REGRESSION และ LOGARITHMIC REGRESSION แต่ก็ไม่แตกต่างจากการวิเคราะห์ในลักษณะอื่นอย่างเด่นชัด เมื่อพิจารณาลักษณะความสัมพันธ์โดยรวม จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ลักษณะ POLYNOMIAL จะเป็นความสัมพันธ์ที่สามารถใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS และอุณหภูมิได้ค่อนข้างดีในทุกสายทาง ซึ่งแสดงว่า การเปลี่ยนแปลงของขนาดอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยจะมีผลทำให้ค่า AC MODULUS เปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ทั้งนี้ เนื่องจากสมการความสัมพันธ์ลักษณะ POLYNOMIAL ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ใช้ในการศึกษาขึ้นอยู่กับสมการยกกำลังสองของค่าอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.3 ค่า COEFFICIENT OF DETERMINATION (R^2) ของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS กับอุณหภูมิ ของแต่ละสายทาง

ชนิดสมการ ถดถอย	ทางหลวงหมายเลข 3264 ตอน ดอนเจดีย์- สระกระโจม		ทางหลวงหมายเลข 333 ตอน สระกระโจม- ด่านช้าง		ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน ภูยบุรี- ประจวบคีรีขันธ์		ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน ชะอำ- ปราณบุรี	
	จำนวนชั้นโครงสร้างทาง ที่ทำการวิเคราะห์		จำนวนชั้นโครงสร้างทาง ที่ทำการวิเคราะห์		จำนวนชั้นโครงสร้างทาง ที่ทำการวิเคราะห์		จำนวนชั้นโครงสร้างทาง ที่ทำการวิเคราะห์	
	4 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	3 ชั้น
LINEAR	0.8725	0.8748	0.8606	0.8616	0.7298	0.7278	0.8662	0.8795
LOGARITHMIC	0.8865	0.8883	0.8818	0.8825	0.7603	0.7592	0.8961	0.9031
POLYNOMIAL	0.8979	0.8993	0.8958	0.8961	0.8019	0.8043	0.8662	0.8765
POWER	0.9256	0.9274	0.8635	0.864	0.7972	0.7986	0.9014	0.8985
EXPONENTIAL	0.9205	0.9226	0.853	0.8539	0.7796	0.7793	0.8845	0.8848

ตารางที่ 4.4 ค่า COEFFICIENT OF DETERMINATION (R^2) ของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS กับอุณหภูมิ กรณีถนนที่ก่อสร้างบนคันทางเดิมและถนนที่ก่อสร้างใหม่

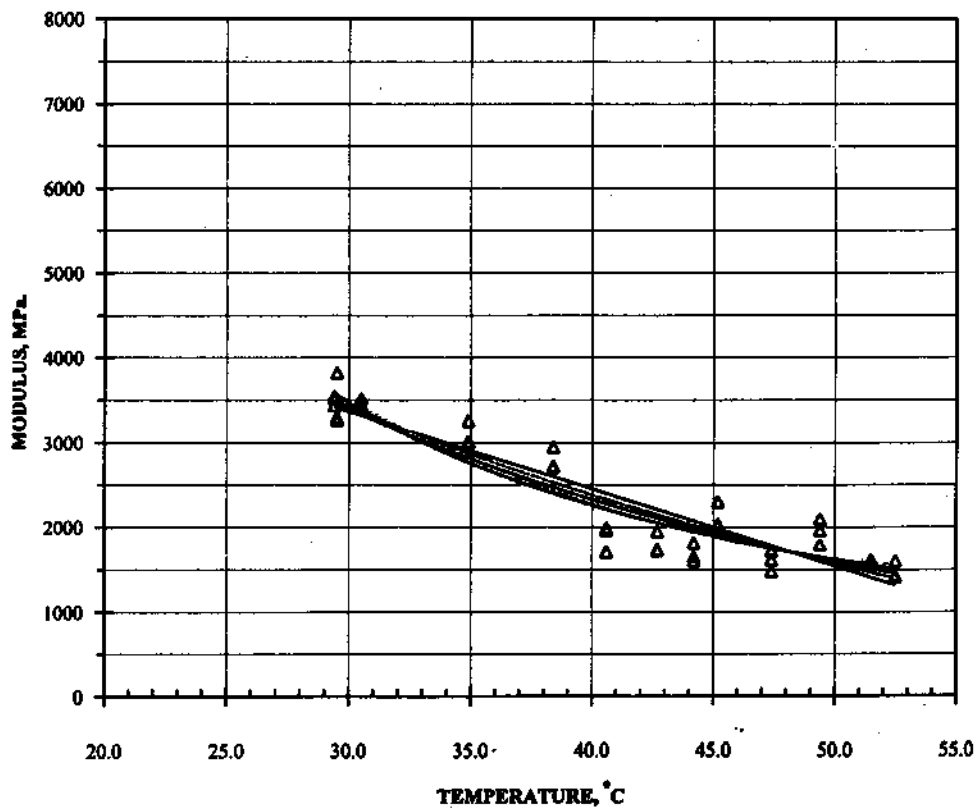
ชนิดสมการ ถดถอย	ถนนที่ก่อสร้างใหม่บนคันทางเดิม		ถนนที่ก่อสร้างใหม่	
	ทางหลวงหมายเลข 3264 ตอน ดอนเจดีย์-สระกระโจมและ ทางหลวงหมายเลข 333 ตอน สระกระโจม-ด่านช้าง		ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน ภูยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์และ ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน ชะอำ-ปราณบุรี	
	จำนวนชั้นโครงสร้างทางที่ทำการวิเคราะห์		จำนวนชั้นโครงสร้างทางที่ทำการวิเคราะห์	
	4 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	3 ชั้น
LINEAR	0.69	0.6894	0.4456	0.4445
LOGARITHMIC	0.7199	0.7193	0.4885	0.4862
POLYNOMIAL	0.7522	0.7517	0.5998	0.5914
POWER	0.7022	0.7007	0.4308	0.427
EXPONENTIAL	0.6759	0.6743	0.3951	0.3922



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R ²
LINEAR	$E = -121.05T + 6480.8$	0.8725
LOGARITHMIC	-----	$E = -4163.4 \ln(T) + 16961$	0.8865
POLYNOMIAL	$E = 5.0642T^2 - 473.7T + 12375$	0.8979
POWER	-----	$E = 2E + 06T^{-1.8545}$	0.9256
EXPONENTIAL	-----	$E = 13977e^{-0.0345T}$	0.9205

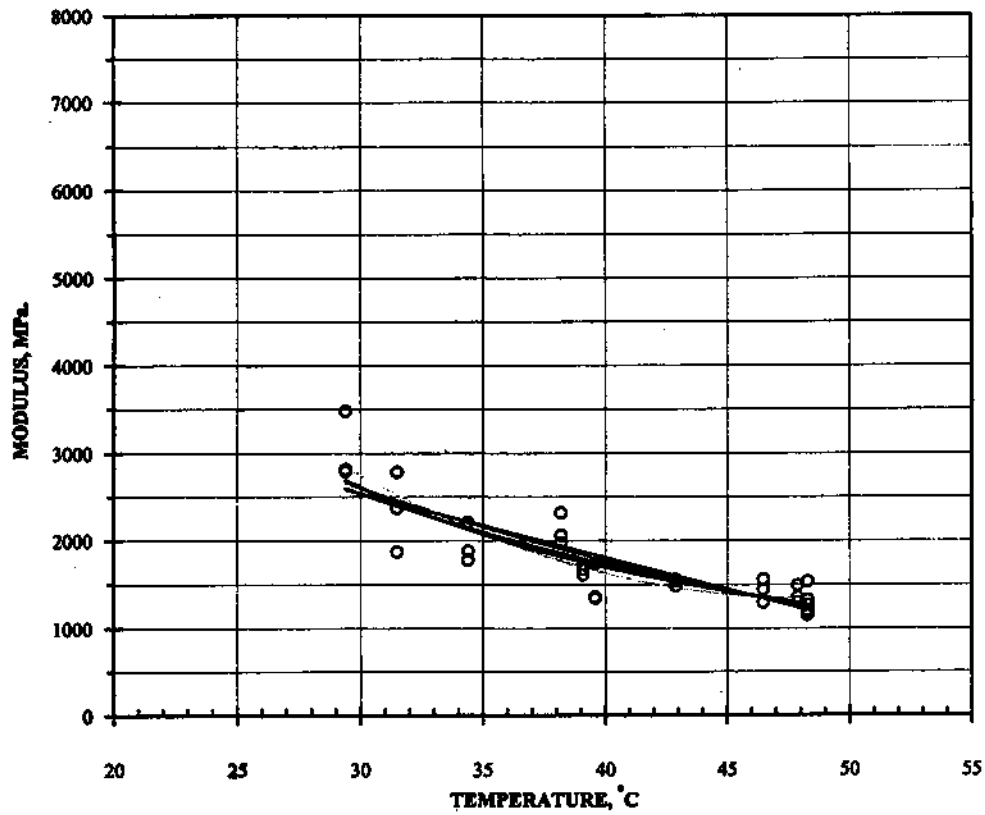
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ทางหลวงหมายเลข 3264 ตอน ดอนเจดีย์-สระกระโจม กรมวิเทศฯ เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R ²
LINEAR	$E = -90.935T + 6090.2$	0.8606
LOGARITHMIC	-----	$E = -3621.4 \ln(T) + 15739$	0.8818
POLYNOMIAL	$E = 2.8065T^2 - 317.45T + 10485$	0.8958
POWER	-----	$E = 553738T^{-1.4916}$	0.8636
EXPONENTIAL	-----	$E = 10501e^{-0.0377T}$	0.853

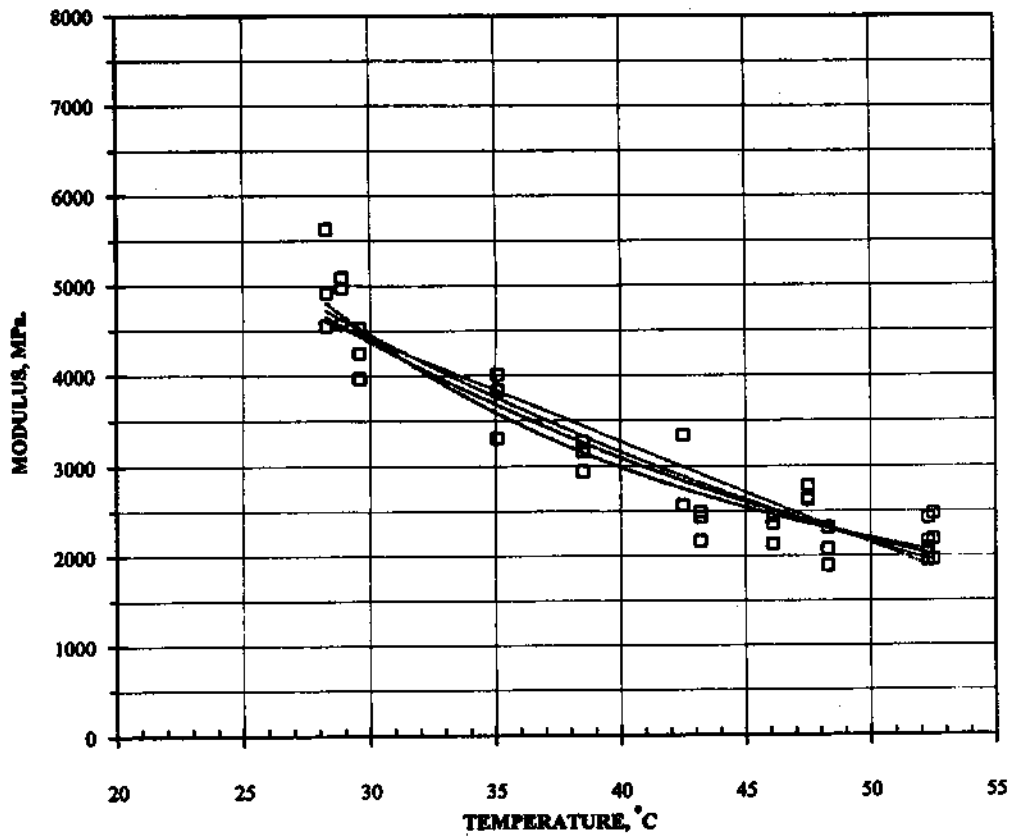
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของคิวกทาง AC กับอุณหภูมิ ทางหลวงหมายเลข 333 ตอน สระกระโจม-ด่านช้าง กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R^2
LINEAR	$E = -72.325T + 4703.8$	0.7298
LOGARITHMIC	-----	$E = -2874 \ln(T) + 12373$	0.7603
POLYNOMIAL	$E = 4.1984T^2 - 405.39T + 11128$	0.8019
POWER	-----	$E = 414603T^{-1.4903}$	0.7977
EXPONENTIAL	-----	$E = 7878.9e^{-0.0378T}$	0.7796

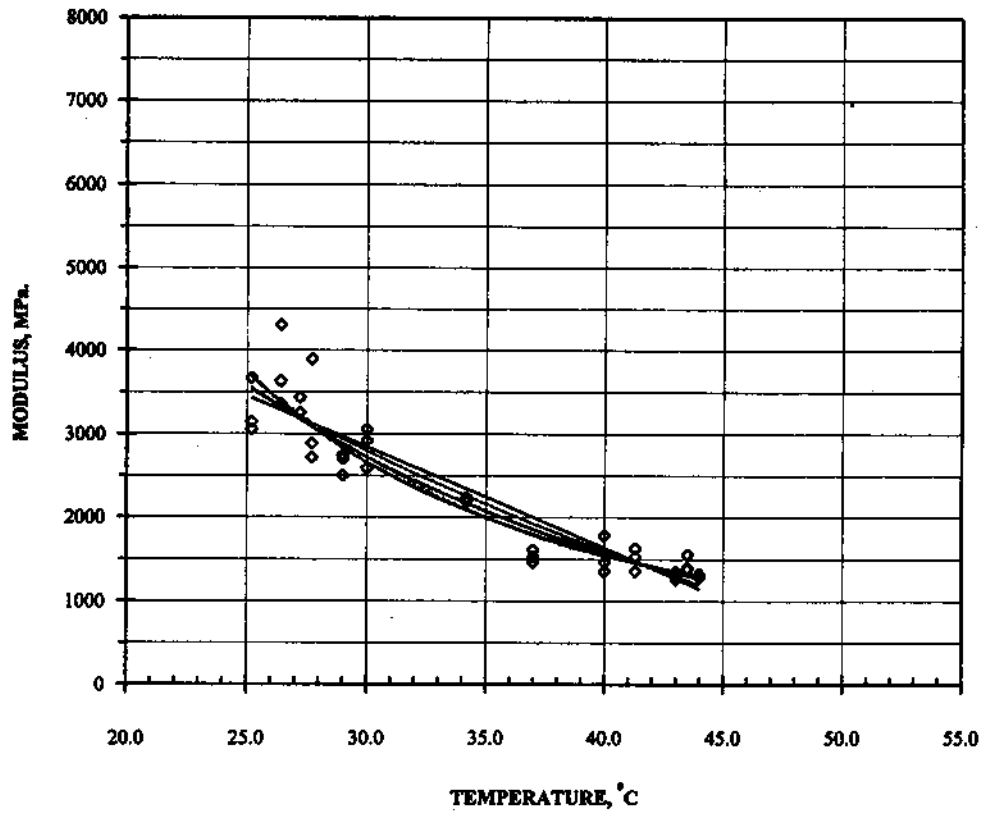
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของมีวทาง AC กับอุณหภูมิ ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์ กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R ²
LINEAR	—	$E = -112.59T + 7775.7$	0.8662
LOGARITHMIC	- - - - -	$E = -4490.4 \ln(T) + 19725$	0.8961
POLYNOMIAL	$E = -112.59T + 7775.7$	0.8662
POWER	- · - · - ·	$E = 469865T^{-1.3709}$	0.9014
EXPONENTIAL	- · - · - ·	$E = 12368e^{-0.0346T}$	0.8845

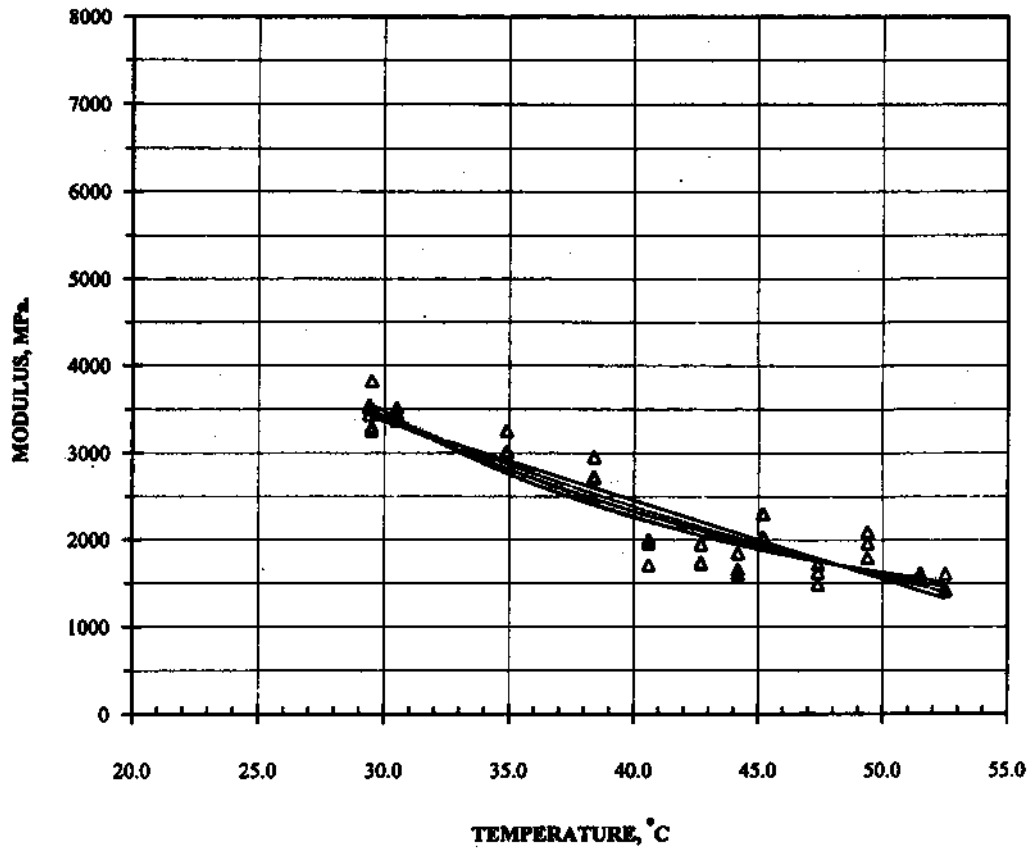
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน ชะอำ-ปราณบุรี กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R^2
LINEAR	$E = -121.36T + 6488.9$	0.8745
LOGARITHMIC	-----	$E = -4173.3 \ln(T) + 16994$	0.8883
POLYNOMIAL	$E = 5.0049T^2 - 469.88T + 12314$	0.8993
POWER	-----	$E = 2E+06T^{-1.8727}$	0.9274
EXPONENTIAL	-----	$E = 14075e^{-0.0547T}$	0.9226

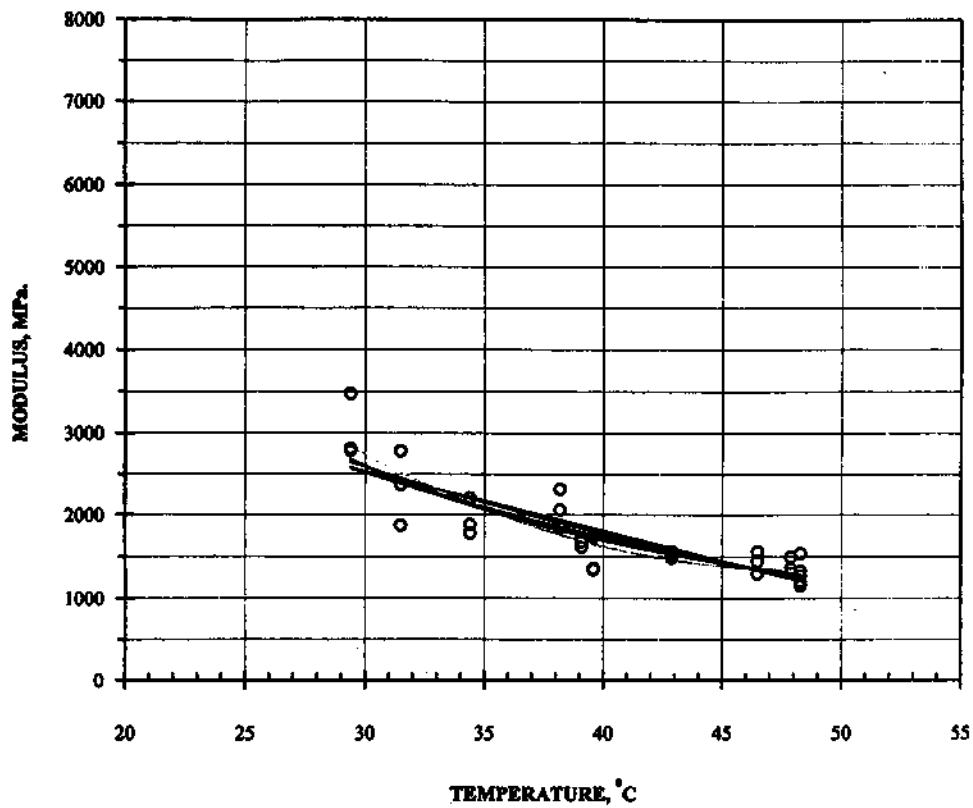
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ทางหลวงหมายเลข 3264 ตอน ดอนเจดีย์-สระกระโจม กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R ²
LINEAR	$E = -90.808T + 6085.7$	0.8616
LOGARITHMIC	-----	$E = -3615.8 \ln(T) + 15719$	0.8825
POLYNOMIAL	$E = 2.7719T^2 - 314.53T + 10426$	0.8961
POWER	-----	$E = 549720T^{-1.4895}$	0.864
EXPONENTIAL	-----	$E = 10487e^{-0.0376T}$	0.8539

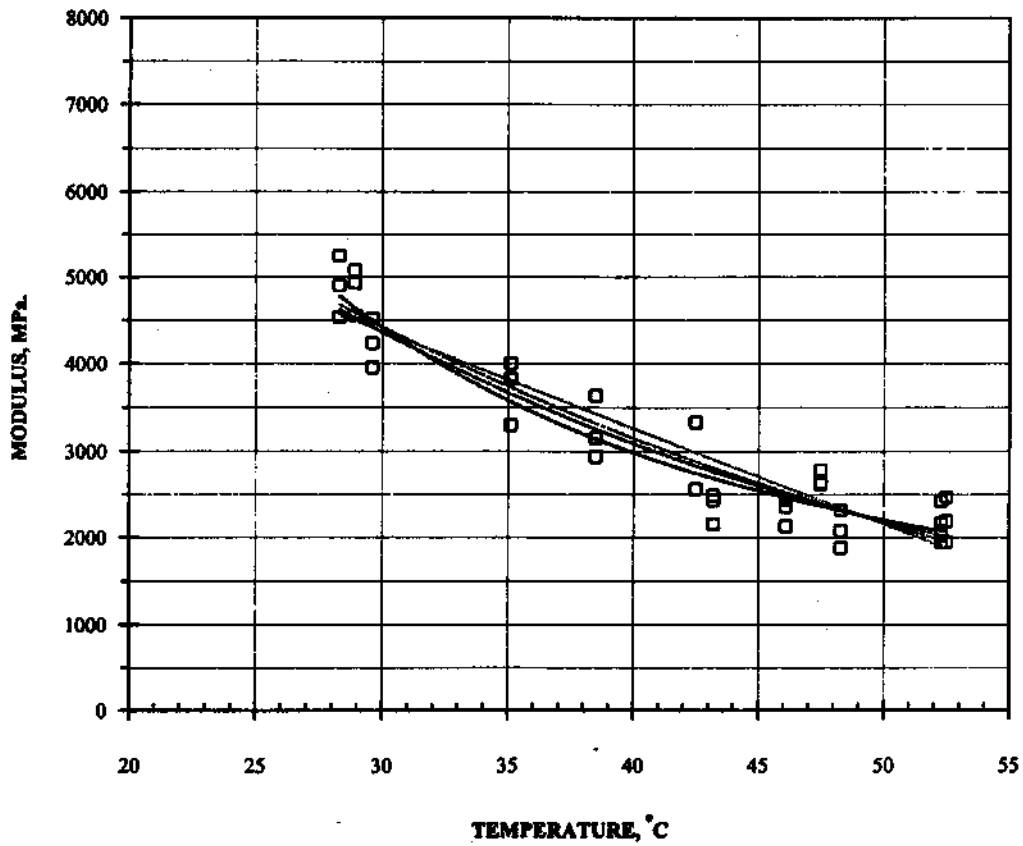
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ทางหลวงหมายเลข 333 ตอน สะระเกษ-ด่านช้าง กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R^2
LINEAR	$E = -71.976T + 4685.1$	0.7278
LOGARITHMIC	-----	$E = -2862.2 \ln(T) + 12325$	0.7592
POLYNOMIAL	$E = 4.3113T^2 - 414T + 11282$	0.8043
POWER	-----	$E = 405549T^{-1.4849}$	0.7986
EXPONENTIAL	-----	$E = 7808.8e^{-0.0377T}$	0.7793

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของฉนวนทาง AC กับอุณหภูมิ ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์ กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R ²
LINEAR ¹	$E = -110.86T + 7694.8$	0.8765
LOGARITHMIC	-----	$E = -4412.1 \ln(T) + 19426$	0.9031
POLYNOMIAL	$E = -110.86T + 7694.8$	0.8765
POWER	-----	$E = 450559T^{-1.3601}$	0.8985
EXPONENTIAL	-----	$E = 12238e^{-0.0344T}$	0.8848

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน ชะอำ-ปราณบุรี กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น

4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS กับอุณหภูมิของถนนที่ก่อสร้างบนคันทางเดิม และถนนที่ก่อสร้างใหม่

กรณีที่เป็นกรก่อสร้างทางใหม่บนคันทางเดิม ได้แก่ ทางหลวงหมายเลข 3264 ตอน ดอนเจดีย์-สระกระโจม และทางหลวงหมายเลข 333 ตอน สระกระโจม-ด่านช้าง จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ค่า AC MODULUS ที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า AC MODULUS กับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ในตารางที่ 4.4 แสดงค่า R^2 ของความสัมพันธ์ดังกล่าว เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 จะพบว่า ลักษณะความสัมพันธ์แบบ POLYNOMIAL จะเป็นความสัมพันธ์ที่สามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS กับอุณหภูมิ ได้ดีกว่า ความสัมพันธ์ลักษณะอื่น ๆ โดยมีค่า R^2 ทั้งที่วิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น และ 3 ชั้น ประมาณ 0.75 ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าความสัมพันธ์อื่น ๆ

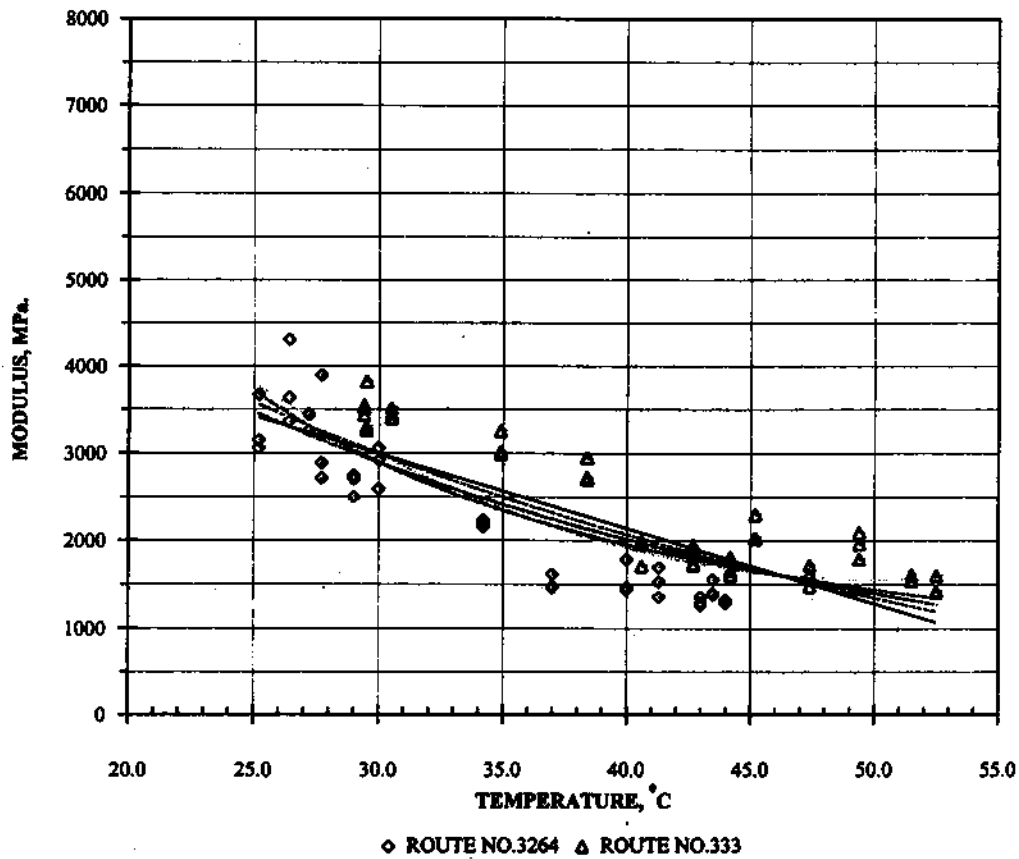
สำหรับกรณีที่เป็นกรก่อสร้างถนนใหม่ ได้แก่ ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์ และทางหลวงหมายเลข 4 ตอน พระอภัย-ปราณบุรี จากการวิเคราะห์ข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น และ 3 ชั้น ตามลำดับ พบว่า ค่า AC MODULUS ที่ได้มีค่าค่อนข้างแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะของโครงสร้างชั้นทางแต่ละชั้นที่แตกต่างกัน แต่ถึงอย่างไรก็ตามเมื่อนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์พบว่า ความสัมพันธ์ที่ให้ค่า R^2 สูงที่สุดจากความสัมพันธ์ทั้ง 5 ลักษณะที่ทำกรวิเคราะห์ยังคงเป็นความสัมพันธ์ลักษณะ POLYNOMIAL เช่นเดิม โดยมีค่า R^2 ประมาณ 0.59 ซึ่งยังถือได้ว่าความสัมพันธ์ลักษณะ POLYNOMIAL ดังกล่าวสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ได้ในเกณฑ์ที่ดี

4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS กับอุณหภูมิ ของการทดสอบทั้งหมด

จากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS กับอุณหภูมิ ของถนนทั้งที่เป็นถนนที่ก่อสร้างบนคันทางเดิมและที่เป็นการก่อสร้างใหม่ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.21 สำหรับกรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น และรูปที่ 4.22 สำหรับกรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น ผลกรวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ได้จะเป็นไปทำนองเดียวกัน โดยความสัมพันธ์ที่ให้ค่า R^2 สูงที่สุดในการวิเคราะห์ทั้ง 5 ลักษณะ จะเป็นความสัมพันธ์แบบ POLYNOMIAL โดยมีค่า R^2 ประมาณ 0.57 ซึ่งถือได้ว่าสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS กับอุณหภูมิได้ในเกณฑ์ที่ดี

4.3 เปรียบเทียบผลการศึกษาวิจัยนี้กับการศึกษาวิจัยอื่น ๆ

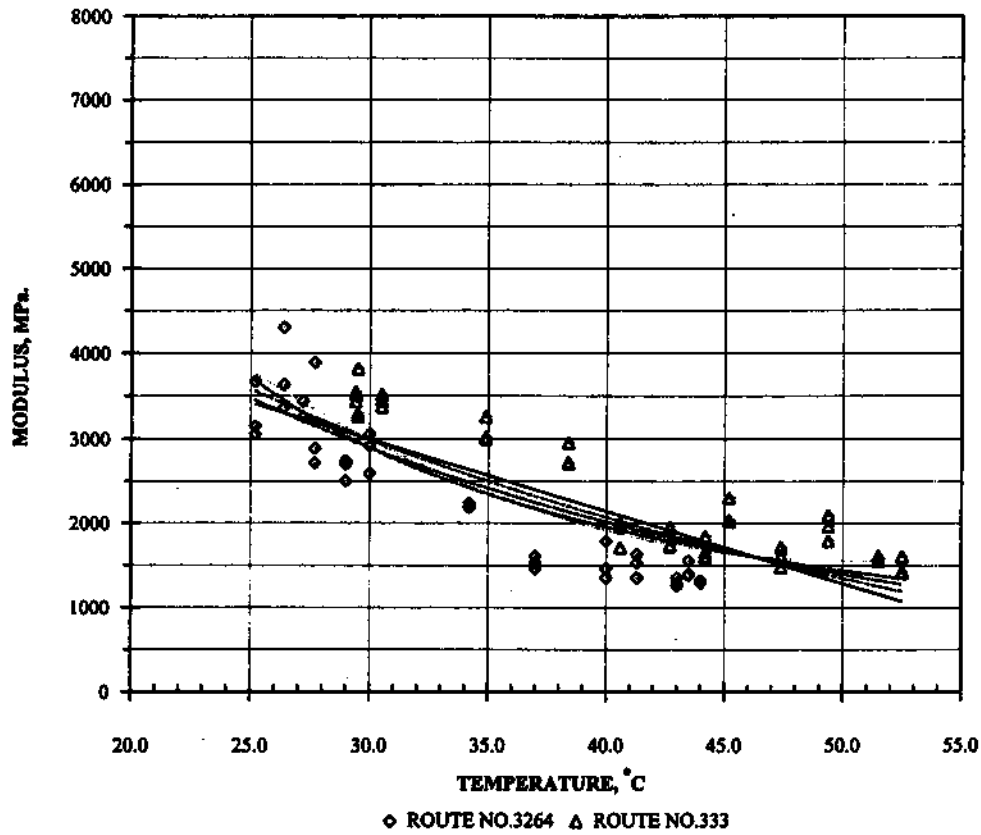
รูปที่ 4.23 และ 4.24 แสดงเส้นกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ กรณีที่วิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น และ 3 ชั้น ตามลำดับ กับเส้นกราฟที่ JAMESON และคณะ [1992] ซึ่งได้ทำ



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R^2
LINEAR	$E = -85.441T + 5558$	0.69
LOGARITHMIC	-----	$E = -3220.3 \ln(T) + 13948$	0.7199
POLYNOMIAL	$E = 3.5727T^2 - 357.62T + 10504$	0.7522
POWER	-----	$E = 302104T^{-1.3685}$	0.7022
EXPONENTIAL	-----	$E = 8614.4e^{-0.0363T}$	0.6759

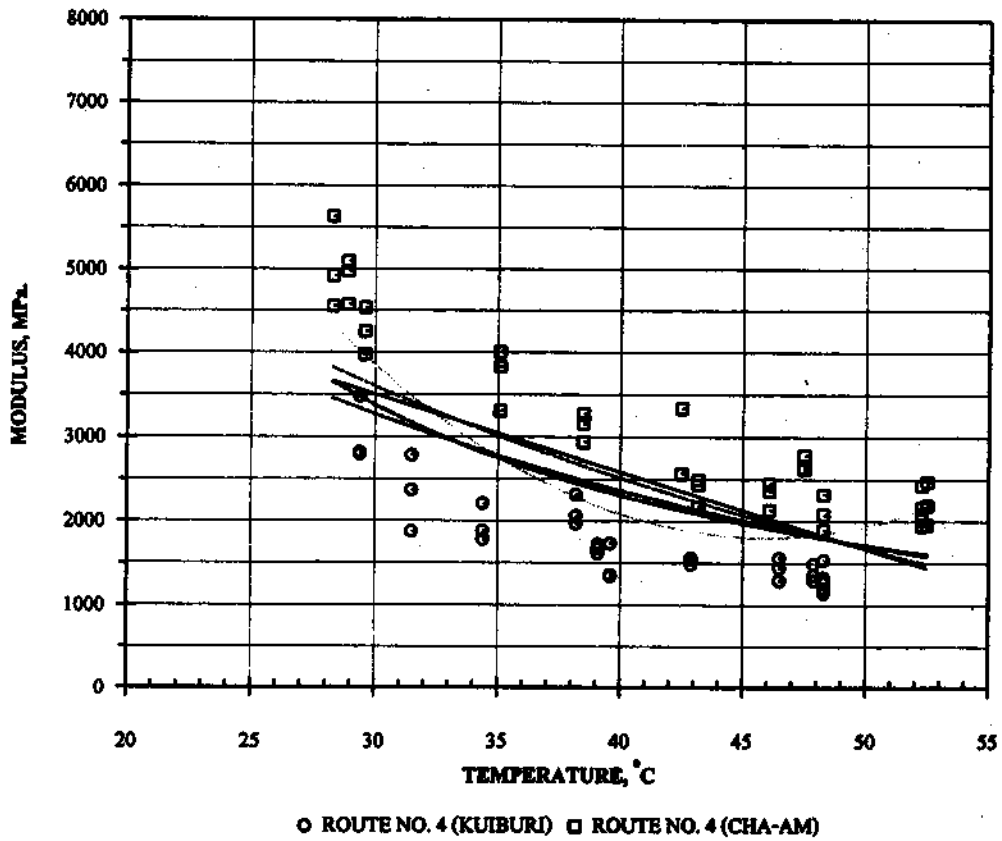
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ทางหลวงหมายเลข 3264 ตอน ดอนเจดีย์-สระกระโจม และทางหลวงหมายเลข 333 ตอน สระกระโจม-ด่านช้าง กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R^2
LINEAR	$E = -85.409T + 5555.9$	0.6894
LOGARITHMIC	-----	$E = -3219.1 \ln(T) + 13943$	0.7193
POLYNOMIAL	$E = 3.5744T^2 - 357.71T + 10504$	0.7517
POWER	-----	$E = 302639T^{-1.3671}$	0.7007
EXPONENTIAL	-----	$E = 8614.6e^{-0.0863T}$	0.6743

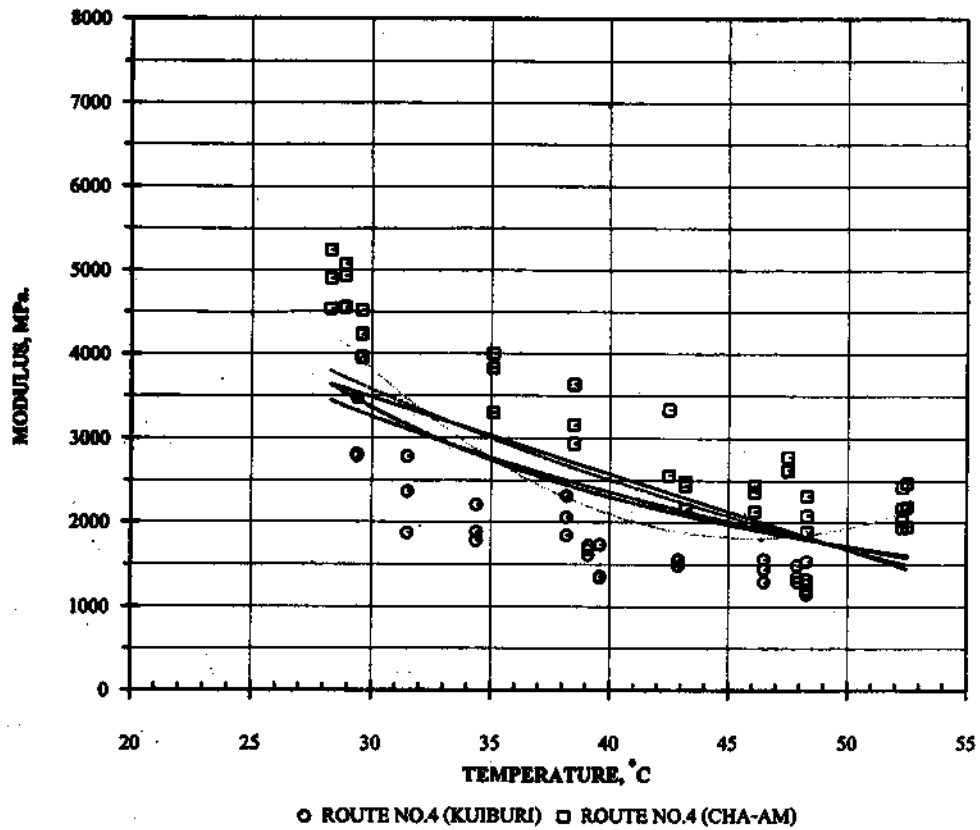
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ทางหลวงหมายเลข 3264 ตอน ดอนเจดีย์-สระกระโจม และทางหลวงหมายเลข 333 ตอน สระกระโจม-ด่านช้าง กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R ²
LINEAR	$E = -91.651T + 6251.3$	0.4456
LOGARITHMIC	-----	$E = -3762.1 \ln(T) + 16392$	0.4885
POLYNOMIAL	$E = 8.0614T^2 - 740.54T + 18809$	0.5998
POWER	-----	$E = 307588T^{-1.3265}$	0.4308
EXPONENTIAL	-----	$E = 8642.5e^{-0.0924T}$	0.3951

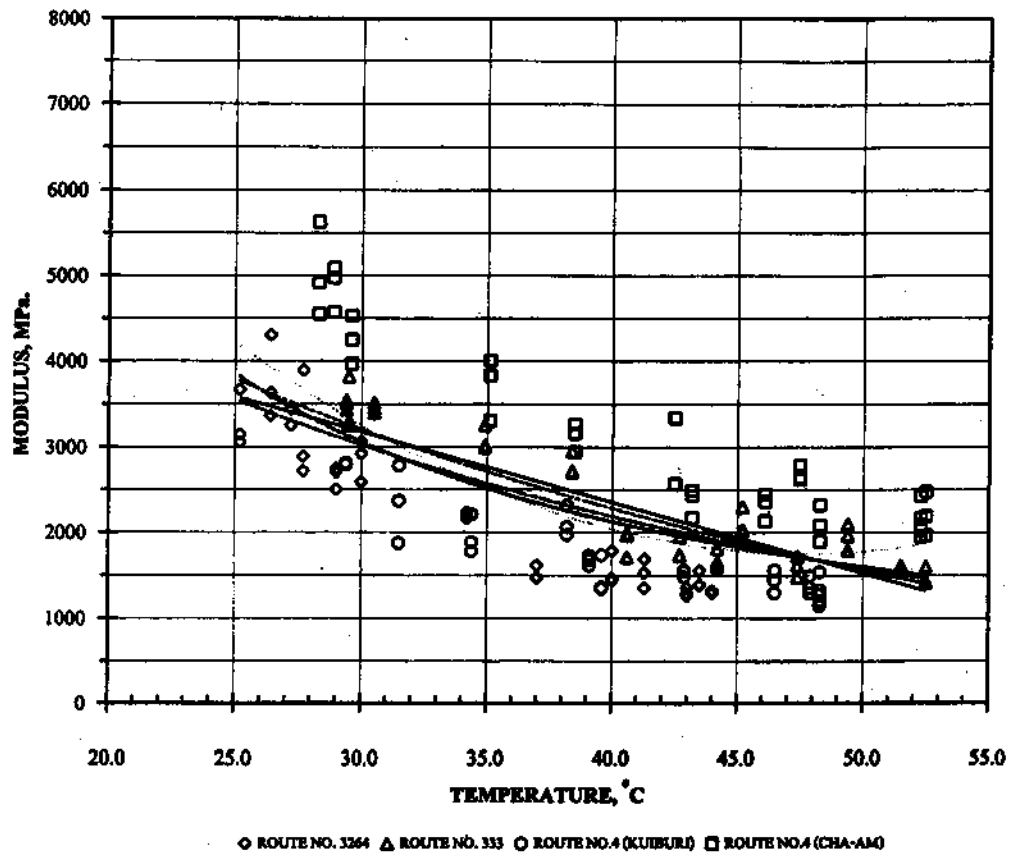
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์ และทางหลวงหมายเลข 4 ตอน ชะอำ-ปราณบุรี กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R^2
LINEAR	$E = -90.395T + 6192.9$	0.4445
LOGARITHMIC	-----	$E = -3706.2 \ln(T) + 16179$	0.4862
POLYNOMIAL	$E = 7.7715T^2 - 715.96T + 18299$	0.5914
POWER	-----	$E = 296771T^{-1.317}$	0.427
EXPONENTIAL	-----	$E = 8555e^{-0.0322T}$	0.3922

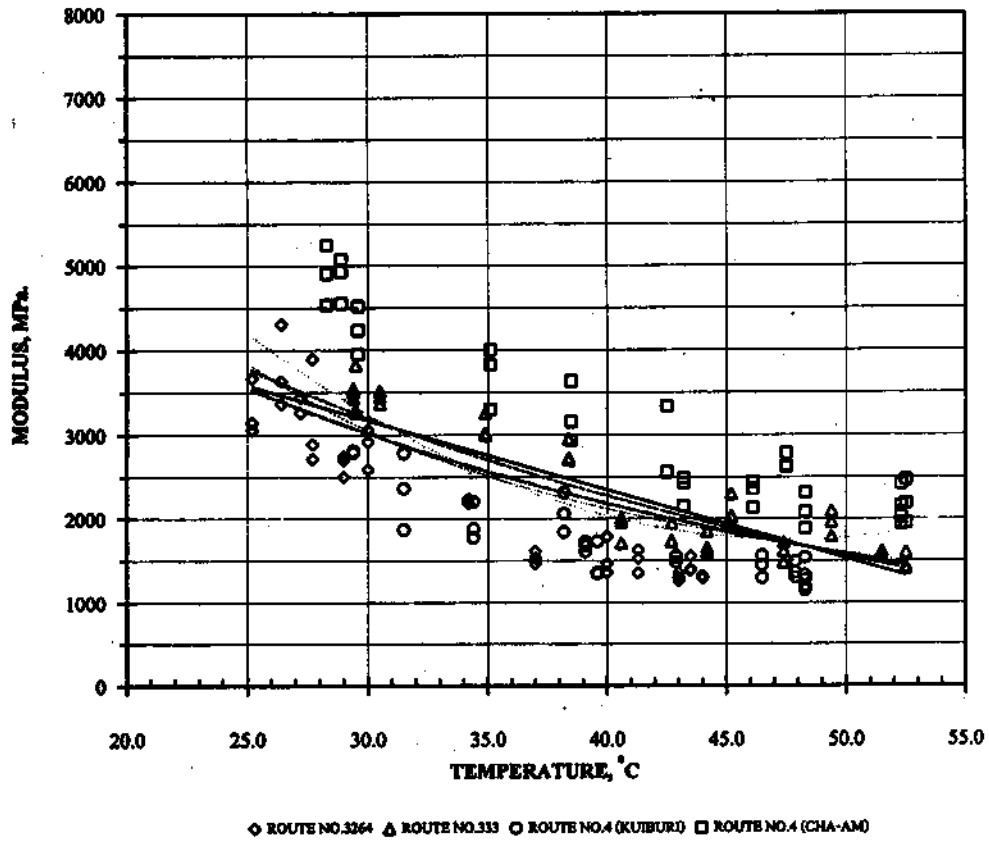
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ทางหลวงหมายเลข 4 ตอน กุยบุรี-ประจวบคีรีขันธ์ และทางหลวงหมายเลข 4 ตอน ชะอำ-ปราณบุรี กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น



REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R ²
LINEAR	$E = -82.566T + 5654.1$	0.4934
LOGARITHMIC	-----	$E = -3226.7 \ln(T) + 14182$	0.5251
POLYNOMIAL	$E = 4.8024T^2 - 457.78T + 12661$	0.5781
POWER	-----	$E = 228833T^{-1.2687}$	0.5139
EXPONENTIAL	-----	$E = 8013.1e^{-0.0325T}$	0.4837

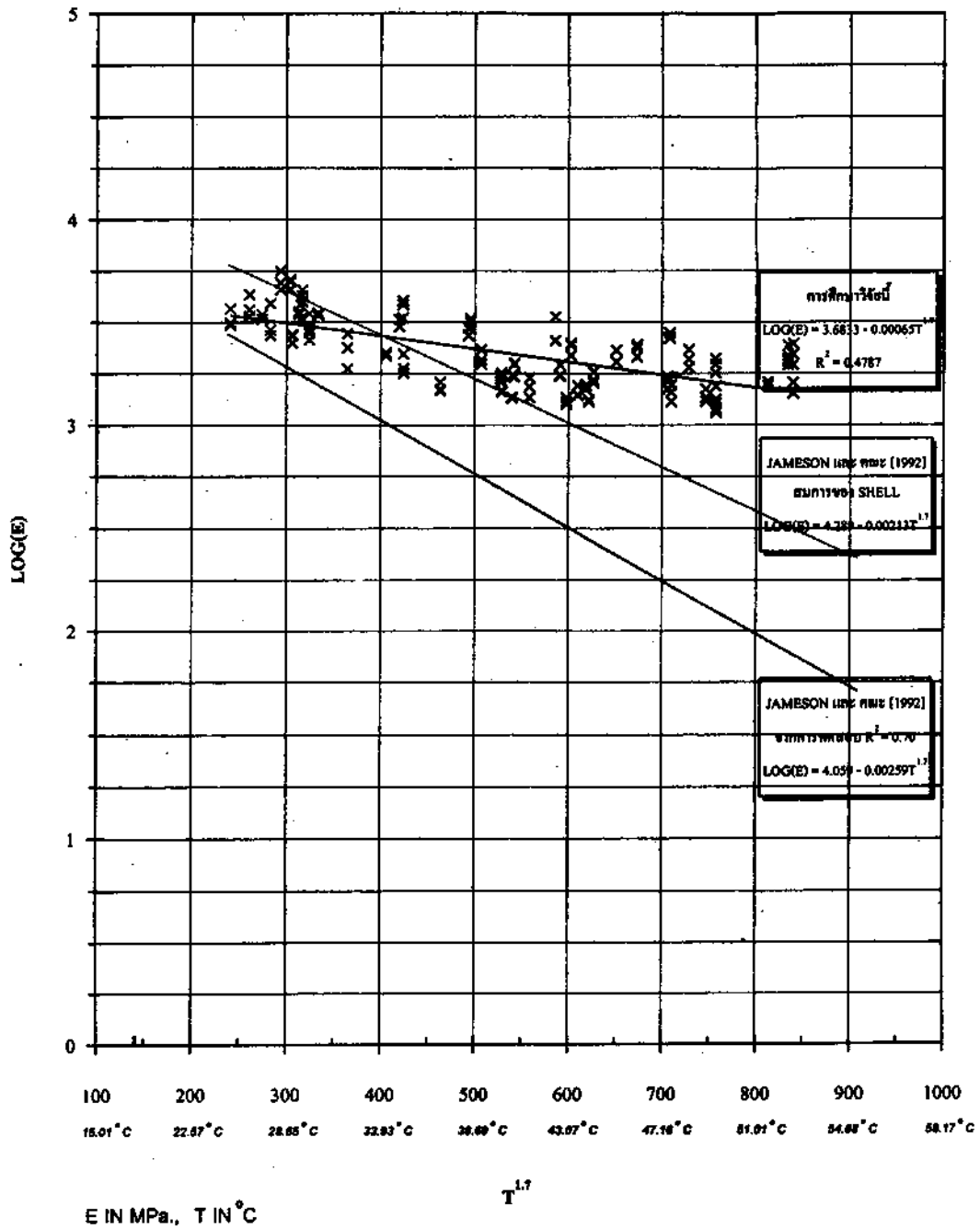
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ของทุกสายทาง กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น



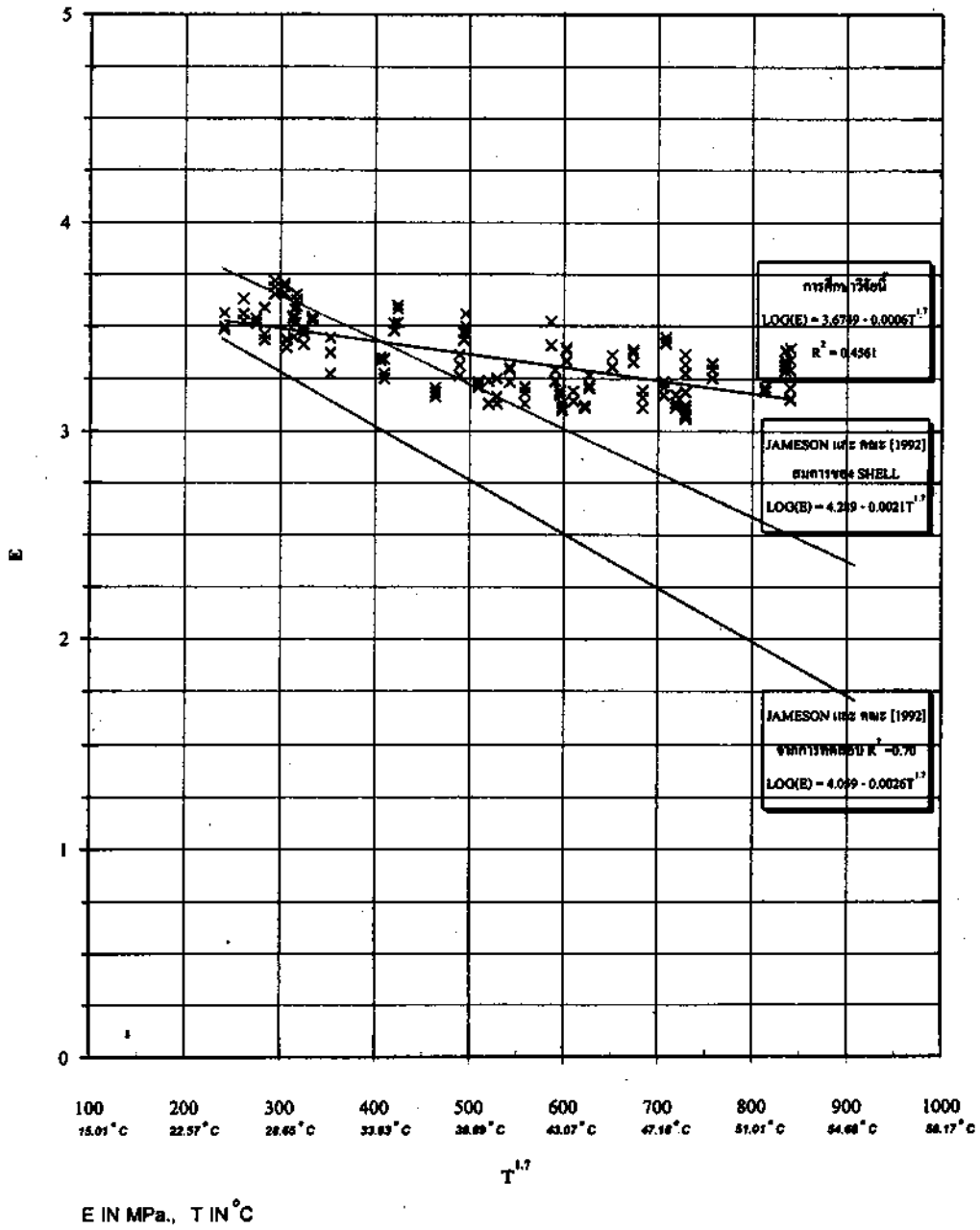
REGRESSION ANALYSIS

TYPE	SYMBOL	EQUATIONS	COEFFICIENT OF DETERMINATION, R ²
LINEAR	$E = -82.071T + 5630.9$	0.4951
LOGARITHMIC	-----	$E = -3205.9 \ln(T) + 14103$	0.5263
POLYNOMIAL	$E = 4.7172T^2 - 450.63T + 12514$	0.5781
POWER	-----	$E = 226312T^{-1.266}$	0.5124
EXPONENTIAL	$E = 7983.9e^{-0.0324T}$	0.4826

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ของทุกสายทาง กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ของทุกสายทาง ที่ทดสอบในรูปแบบของสมการ LOGARITHMIC ของ MODULUS กรณีวิเคราะห์เป็น โครงสร้างทาง 4 ชั้น

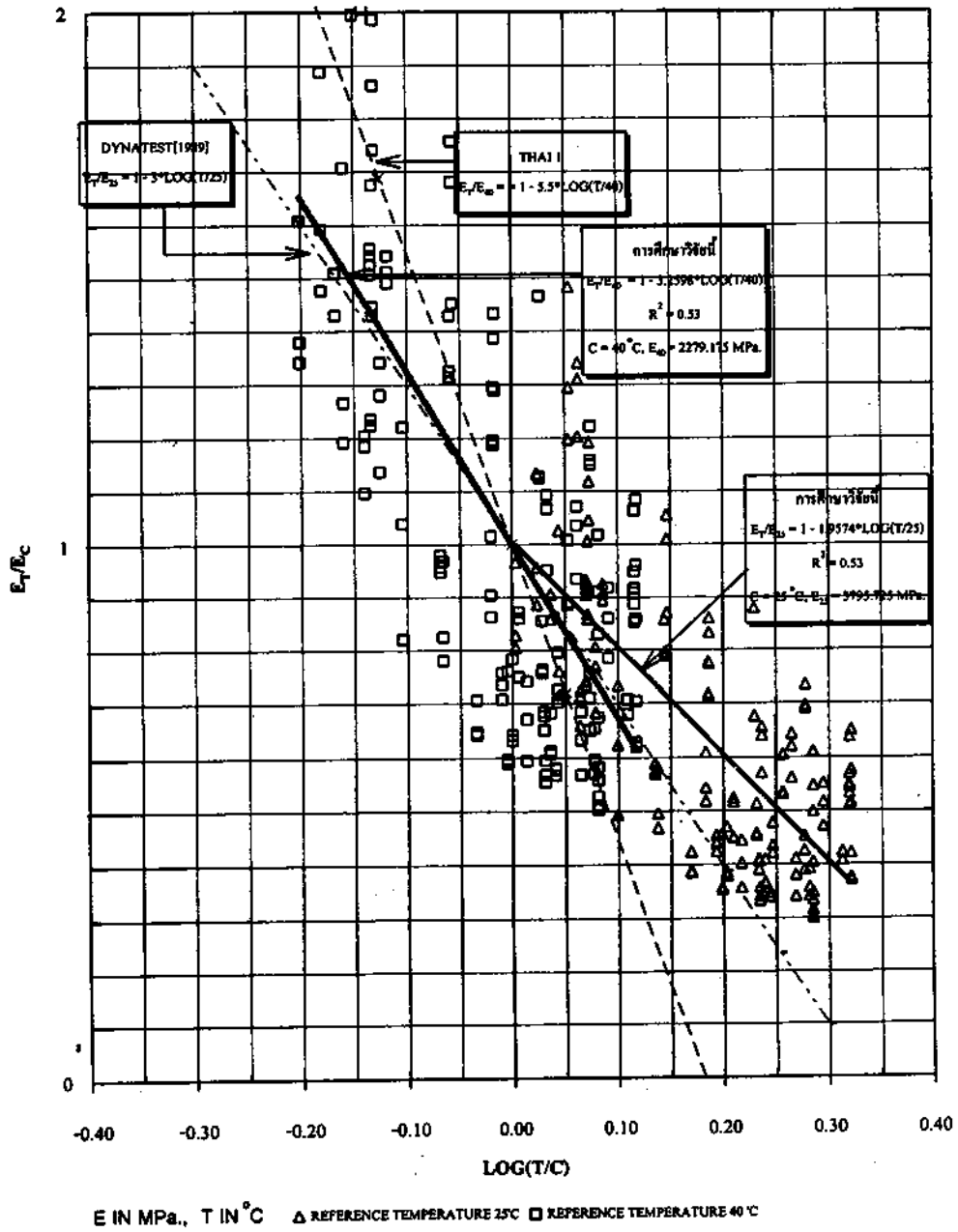


รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของฉนวนทาง AC กับอุณหภูมิ ของทุกสายทาง ที่ทดสอบในรูปแบบของสมการ LOGARITHMIC ของ MODULUS กรณีวิเคราะห์เป็น โครงสร้างทาง 3 ชั้น

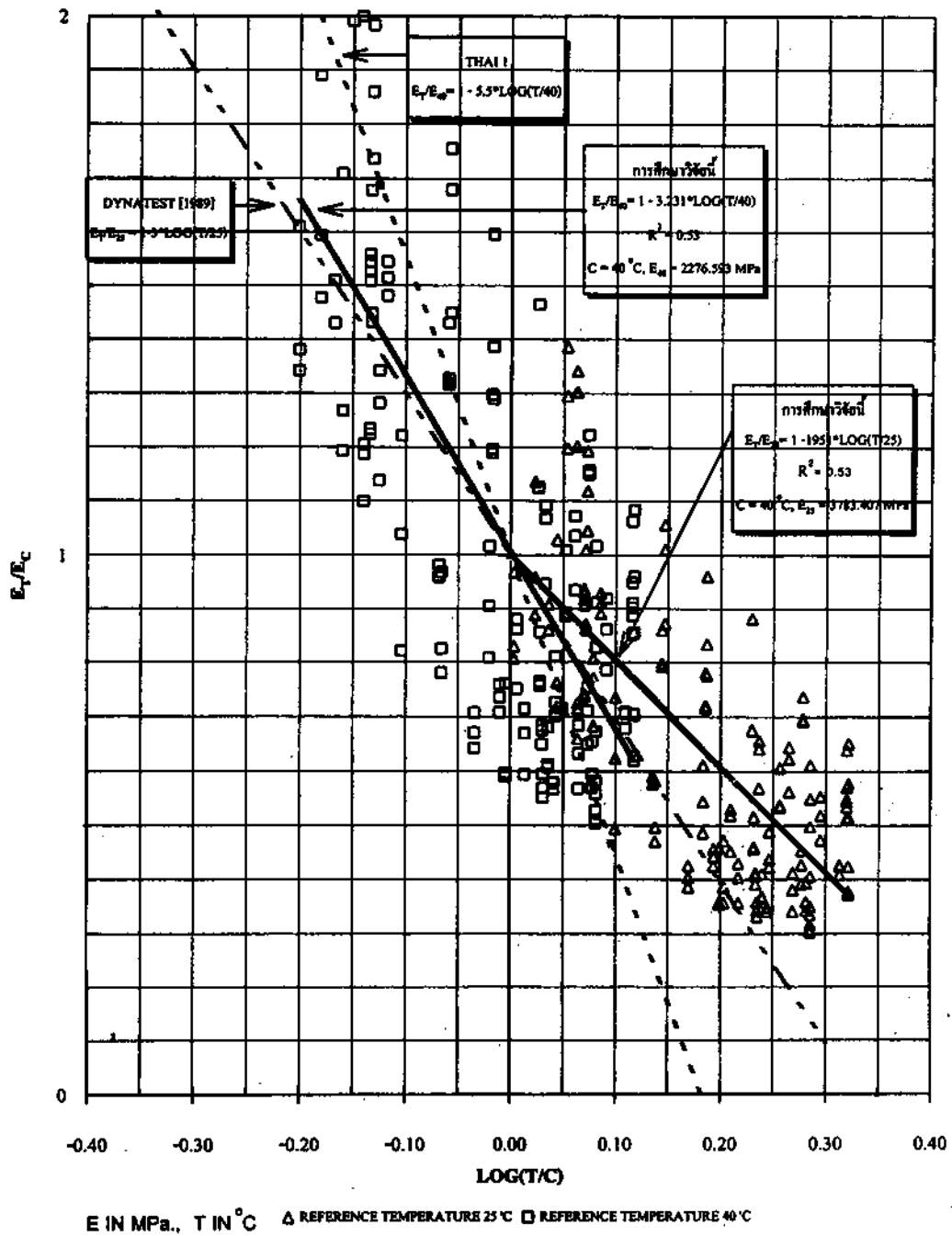
การวิเคราะห์ข้อมูลจาก FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER เช่นเดียวกัน โดยใช้โปรแกรม EFROMD 2 ร่วมกับโปรแกรม CIRCLY และโปรแกรม SHELL โดยมีสมการความสัมพันธ์ในรูปของ LOGARITHMIC ของค่า MODULUS กับอุณหภูมิของผิวทางยกกำลัง 1.7 ($T^{1.7}$) เมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า AC MODULUS มีค่าลดลง แต่ในการศึกษาวิจัยนี้ การลดลงของค่า AC MODULUS จะเป็นไปได้ด้วยอัตราที่น้อยกว่า สำหรับเส้นกราฟความสัมพันธ์ในการศึกษานี้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.4787 ซึ่งถือว่าเป็นความสัมพันธ์ที่พอใช้ได้เท่านั้น ความแตกต่างดังกล่าวอาจเนื่องมาจากชนิดของแอสฟัลต์คอนกรีตและลักษณะของโครงสร้างชั้นทาง รวมทั้งสาเหตุอื่น ๆ ซึ่งควรจะได้มีการศึกษาวิจัยต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ที่ใช้โดย DYNATEST [1989] ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 สำหรับกรณีทีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น และ 3 ชั้น ตามลำดับ ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ในรูปของ LOGARITHMIC ของค่า อุณหภูมิ (T) สมการความสัมพันธ์จากการศึกษาวิจัยนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.5251 ซึ่งถือว่าเป็นสมการความสัมพันธ์ที่พอใช้ได้เท่านั้น ที่แตกต่างกันค่อนข้างชัดเจนก็คือ อัตราการลดลงของค่า AC MODULUS เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในการศึกษาวิจัยนี้จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าของ DYNATEST ซึ่งอาจมีสาเหตุจากหลายประการ ซึ่งควรจะได้มีการศึกษาวิจัยต่อไป

สำหรับความสัมพันธ์ที่กำหนดไว้ใน THAI 1 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ในสมการ คือ A และ B เท่ากับ 1 และ 5.5 ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับอุณหภูมิมาตรฐานที่ 40°C นั้น จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 จะเห็นได้ว่า จากการศึกษาที่ผลที่ได้ทำนองเดียว โดยอัตราการลดลงของค่า MODULUS จากการวิเคราะห์ข้อมูลในสนามจะลดลงค่อนข้างช้ากว่าความสัมพันธ์ที่กำหนดไว้ใน THAI 1



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ของทุกสายทาง ที่ทดสอบในรูปแบบของสมการ LOGARITHMIC ของอุณหภูมิ กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น



รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า MODULUS ของผิวทาง AC กับอุณหภูมิ ของทุกสายทาง
 ที่ทดสอบในรูปแบบของสมการ LOGARITHMIC ของอุณหภูมิ กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง
 3 ชั้น

บทที่ 5

สรุปและเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่า AC MODULUS จากการทำการทดสอบจริงในสนาม โดยใช้ FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER ร่วมกับโปรแกรม ELMOD 3 ในการวิเคราะห์ พอสรุปได้ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของผิวทางระหว่างวันจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า AC MODULUS ของผิวทางค่อนข้างมาก แต่ไม่มีผลต่อโครงสร้างทางชั้นอื่น ๆ
2. ความสัมพันธ์ระหว่างค่า AC MODULUS และอุณหภูมิ (T) ในการศึกษาวิจัยนี้ พบว่า ส่วนใหญ่จะเป็นความสัมพันธ์ในลักษณะ POLYNOMIAL (ในการศึกษาวิจัยนี้พิจารณาที่ ORDER=2 เท่านั้น) ซึ่งจะให้ค่า COEFFICIENT OF DETERMINATION (R^2) ที่สูงกว่าความสัมพันธ์ในลักษณะอื่น ๆ ที่ทำการวิเคราะห์
3. การแบ่งจำนวนโครงสร้างชั้นทางเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่า AC MODULUS มีผลน้อยมากต่อค่า AC MODULUS ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ELMOD 3 (แต่อาจจะมีผลต่อการวิเคราะห์ค่า MODULUS ของโครงสร้างทางชั้นอื่น ๆ ซึ่งการทดสอบอาจจำเป็นต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของการใช้โปรแกรม)
4. สำหรับโครงสร้างทางที่เป็นทางก่อสร้างบนคันทางเดิมผลที่จากการวิเคราะห์ค่า AC MODULUS จะค่อนข้างใกล้เคียงกันและสมการความสัมพันธ์ที่ได้มีค่า R^2 ค่อนข้างสูงอยู่ในเกณฑ์ดี แต่กรณีของทางก่อสร้างใหม่ค่า AC MODULUS ที่วิเคราะห์ได้ค่อนข้างแตกต่างกันค่า R^2 ที่ได้มีค่าน้อยกว่ากรณีโครงสร้างทางที่เป็นทางก่อสร้างบนคันทางเดิม แต่ก็อยู่ในเกณฑ์ที่ดีเช่นกัน
5. จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดในการศึกษาวิจัยนี้ สมการความสัมพันธ์ระหว่าง AC MODULUS (E, MPa.) และอุณหภูมิของผิวทาง (T, C) มีดังนี้

$$E=4.8024T^2-457.78T+12661 \quad \text{กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 4 ชั้น}$$

$$E=4.7172T^2-450.63T+12514 \quad \text{กรณีวิเคราะห์เป็นโครงสร้างทาง 3 ชั้น}$$

6. การศึกษาวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาวิจัยอื่น ๆ มีความแตกต่างกัน ซึ่งมีสาเหตุได้หลายประการ ซึ่งควรจะได้มีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมรวมทั้งการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้เป็นแนวทางในการตรวจสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางถนนต่อไป

เนื่องจากการศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาจากสภาพจริงในสนามการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความหนาของชั้นวัสดุ, ชนิดของวัสดุ เป็นต้น ไม่อาจควบคุมได้ ซึ่งอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ได้ยังไม่ดีเท่าที่ควร ดังจะเห็นได้จากความสัมพันธ์ของสายทางแต่ละแห่งจะให้ความสัมพันธ์ที่ดีมาก แต่เมื่อพิจารณารวมทั้งหมดความสัมพันธ์ที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดีเท่านั้น ดังนั้นในการศึกษาวิจัยต่อไป หากสามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ที่อาจมีผลในการวิเคราะห์ข้อมูลจะทำให้ได้ข้อมูลต่าง ๆ ที่ จะทำให้การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างทางมีความถูกต้องมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structure, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1986.
- ALI, N.A. and KHOSLA, N.P., "Pavement Evaluation and Rehabilitation," Transp. Res. Rec. 1117, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1987, pp.1-10.
- BARKSDALE, R.D. and HICK, R.G., "Material Characterization and Layered Theory for Use in Fatigue Analysis," Spec. Rept. 40, Highway Research Board, National Academy of Science, Washington D.C., 1973, pp. 20-48.
- CHOU, K.M., "Evaluation of Moduli Backcalculation Programs for Low-Volume Roads," Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli," A.J. Bush III and G.Y. Baladi, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 7-38.
- DRAPER, N.R. and SMITH, H., Application Regression Analysis, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1966, 407 p.
- DYNATEST, User's Manual for ELMOD on IBM Compatible Version 3.1, Dynatest Engineering A/S, 1989.
- GREENSTEIN, J. and BERGER, L., "Using NDT Aided by and Airport and Highway System," Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli," A.J. Bush III and G.Y. Baladi, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 525-539.
- JAMESON, G.W., SHARP, K.G. and VERTESSEY, N.J., "Full-Depth Asphalt Pavement Fatigue Under Accelerated Loading," Proceeding of the 7th International Conference on Asphalt Pavement, Vol. 2, The International Society of Asphalt Pavement, Derry and Sons Ltd., Nottingham, 1992, pp. 180-200.
- LYTTON, R.L., "Backcalculation of Pavement Layer Properties," Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli," A.J. Bush III and G.Y. Baladi, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 7-38.

- MAHONEY, J.P., COETZEE, N.F., STUBSTAD, R.N. and LEE, S.W., "A Performance Comparison of Selected Backcalculation Computer Programs," *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*, A.J. Bush III and G.Y. Baladi, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 452-467.
- SHELL, *The Shell Bitumen Handbook*, Shell Bitumen U.K., Surrey, 1990.
- ZANIEWSKI, J.P. and HOSSAIN, M., "Effect of Thickness and Temperature Corrections on Prediction of Pavement Structural Capacity Using Falling Weight Deflectometer Data," *Transp. Res. Rec. 1377*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1992, pp. 193-199.

ภาคผนวก
พารามิเตอร์ THAI 1.

PARAMETER VALUES

Version : THAI 1

Date : 03-17-1997

Last changes to the parameters by : Thai 1/7-94

1. UNITS, METHODS AND PAVEMENT TYPE

SI units are used

Evaluation is based on the Analytical/Emperical Method

Input is for flexible (continuous) pavements

2. CALCULATION OF E-VALUES

For 4-layer structures the ratio E_2/E_3 is calculated

If the modulus of the asphalt is estimated (thin layers), then the estimated value will be reduced by a factor of :

1.5 with moderate cracking and

3.0 with severe cracking

In the asphalt modulus vs temperature relationship :

$$E_t/E_c = A - B \cdot LGT(t/c)$$

the constants are : $A = 1.0$ $B = 5.5$ $C = 40$ C

The minimum and maximum temperatures are :

Min = 25 C Max = 50 C

The current seasonal parameters are :

Season	Number of weeks	Characteristic week in season	Week number in the year
1	52	26	26 (6/28)

Seasonal variation applies to all unbound materials

The yearly minimum and maximum asphalt temperatures are :

Minimum : 25 C

Maximum : 50 C

The week of maximum temperature is 35 (8/30)

The week of minimum modulus is 13 (3/29)

Subgrade modulus is determined as measured

Seasonal values :

Season	Temperature (C)	Reduc. factor
1	40.0	1.000

The reference stress (S') in the subgrade modulus formula :

$$E_m = CO * (S_1/S')^N$$

Where E_m = the composite subgrade modulus

S_1 = the major principal stress and

CO and N are constants ($N \leq 0$)

is equal to 0.100 MPa

3. STRUCTURAL DESIGN

1 standard load is used :

	Standard load no. 1 8.2 tons axle ld
The standard gear load is :	41000.00 N
Ratio between dynamic and static load is :	1.20
The tyre pressure is :	0.58 MPa
The design load is :	an equivalent single wheel
Distance between center- lines of wheels is :	Not Applicable
Distance between axles :	Not Applicable

Please notice that all criteria are based on the present condition of the pavement materials and structure Strural failure is a criteria

Critical strain is transverse

For asphalt strain the relationship $A * N^B * (E/E')^C$ is used

with $A = 0.00357$

$B = -0.200$

$E' = 3000.00 \text{ MPa}$

$C = 0.000$

For stabilized materials the critical value is stress

For (cement) stabilized materials the permissible stress is :

$Z_p = A * N^B * (E/E_0)^C$, where $C = c_1$ for $E > E_0$ else $C = c_2$

Present parameters are :

$A = 195.00 \text{ MPa}$

$B = -0.333$

$E_0 = 35000 \text{ MPa}$

$c_1 = 1.000$ and $c_2 = 1.000$

For unbound materials the critical value is vertical strain

For unbound materials the permissible strain is :

$A * N^B * (E/E_0)^C$, where $C = c_1$ for $E > E_0$ else $C = c_2$

Present parameters are :

$A = 0.01$

$B = -0.140$

$E_0 = 160.00 \text{ MPa}$

$c_1 = 0.000$ and $c_2 = 0.000$

The number of years in the design period is : 7

A standard overlay material is used

Modulus of season 1 is : 2000.00 MPa (= Overlay modulus)

- รายงานฉบับที่** : วพ. 170 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง
- ผู้เขียน** : ธนศักดิ์ ใฝ่กระโทก
: สมัคร สนทอง
- ชื่อเรื่อง** : ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอีลาสติคโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จากการทดสอบด้วย FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)
- บทคัดย่อ** : คุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์หรือแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเฉพาะอีลาสติคโมดูลัส เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการประเมินความแข็งแรงของถนน แต่ค่าอีลาสติคโมดูลัสนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ณ ขณะใดขณะหนึ่ง ดังนั้นการวัดค่าอีลาสติคโมดูลัสของวัสดุแอสฟัลต์ในสนาม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่าอีลาสติคโมดูลัสจากอุณหภูมิที่ทำการทดสอบในสนามให้เป็นค่าที่อุณหภูมิมาตรฐานตามที่กำหนด แล้วจึงใช้ค่าอีลาสติคโมดูลัสที่ปรับแก้ค่าแล้วนั้น ในการประเมินอายุการใช้งานและการออกแบบความหนาของการเสริมผิวทาง ดังนั้นการทราบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าอีลาสติคโมดูลัสของวัสดุแอสฟัลต์ที่เป็นจริงจะทำให้การประเมินความแข็งแรงของถนน, การประเมินอายุการใช้งาน, การออกแบบเสริมผิวทาง รวมทั้งการศึกษาวิจัยอื่น ๆ เป็นไปอย่างถูกต้อง

ศัพท์เฉพาะเรื่อง : การทดสอบในสนาม การทดสอบแบบไม่ทำลาย การแอ่นตัวของผิวทางชนิดยึดหยุ่น การวิเคราะห์ อีลาสติคโมดูลัส อุณหภูมิ

ทอ. วพ./ฐ/2541/ท.

ISSN 1025-8044

Report No. : RD. 170 Road Research and Development Center, Department of Highways

Authors : Tanasak Faikratok
: Samak Sontong

Title : Relationship between Temperature and Elastic Modulus of Asphalt Concrete Pavement Surface by Falling Weight Deflectometer (FWD)

Abstract : The property of asphalt material or asphalt concrete especially elastic modulus, is one of the most parameters that was used in road structure capacity evaluation. In-situ asphalt concrete pavement modulus at various temperatures should be adjusted to standard temperature before estimation of remaining life and overlay thickness. If we know the field relationship between temperature and asphalt material modulus exactly, the prediction of road structure capacity, remaining life of pavement, thickness of overlay design and others investigation will be more accurate.

Keywords : Field Testing, Nondestructive Testing, Flexible Pavement Deflection, Pavement Analysis, Elastic Modulus, Temperature

DH RD/F/1998/T.

ISSN 1025-8044

คณะกรรมการบริหาร ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง

- | | |
|---|---------------------|
| 1. รองอธิบดีฝ่ายวิชาการ | ประธานกรรมการ |
| 2. ผู้อำนวยการสำนักสำรวจและออกแบบ | กรรมการ |
| 3. ผู้อำนวยการสำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง | กรรมการ |
| 4. ผู้อำนวยการกองบำรุง | กรรมการ |
| 5. ผู้อำนวยการกองวิศวกรรมจราจร | กรรมการ |
| 6. ผู้อำนวยการสำนักเครื่องกลและสื่อสาร | กรรมการ |
| 7. นายสุนทร กังวานพลินชัย | กรรมการ |
| 8. นายอร่าม ก้อนสมบัติ | กรรมการ |
| 9. ดร.ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ | กรรมการและเลขานุการ |