

ผลกระทบของความผันแปรตามฤดูกาลที่มีต่อการออกแบบและประเมินทางลาดยางในประเทศไทย



นายนवल พรหมจารีย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

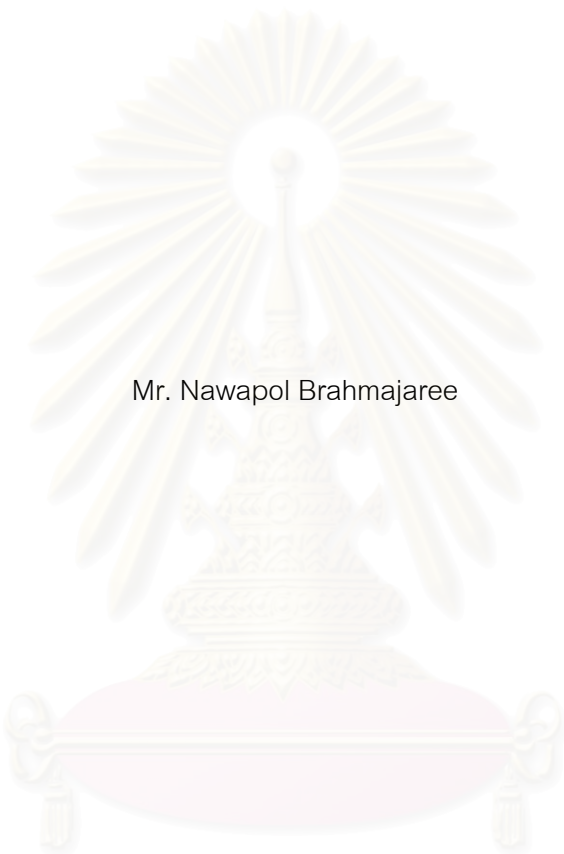
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1525-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF SEASONAL VARIATION ON THE DESIGN AND EVALUATION OF
FLEXIBLE PAVEMENT IN THAILAND



Mr. Nawapol Brahmajaree

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1525-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของความผันแปรตามฤดูกาลที่มีต่อการออกแบบและประเมิน
ทางลาดยางในประเทศไทย
โดย นายนवल พรหมจารี
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวณิชย์ศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม นายแสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวณิชย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อนุศักดิ์ อิศรเสนา ณ อยุธยา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวณิชย์ศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(นายแสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ นฤปิติ)

นวนพล พรหมจารีร์ย์ : ผลกระทบของความผันแปรตามฤดูกาลที่มีต่อการออกแบบและ
ประเมินทางลาดยางในประเทศไทย. (EFFECTS OF SEASONAL VARIATION ON
THE DESIGN AND EVALUATION OF FLEXIBLE PAVEMENT IN THAILAND)
อ.ที่ปรึกษา: ศ. ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ, อ.ที่ปรึกษาร่วม: นายแสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์,
151 หน้า. ISBN 974-53-1525-7.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของสภาพภูมิอากาศต่อพฤติกรรม
ของทางลาดยาง โดยหาความผันแปรตามฤดูกาลของความแข็งแรงโครงสร้างทาง และคุณสมบัติ
ของวัสดุในชั้นทาง อันได้แก่ อีลาสติกโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีต โมดูลัสชั้นพื้นทาง และโมดูลัส
คืนตัวของดินคันทาง ซึ่งจะผันแปรไปตามอุณหภูมิ ความชื้น หรือผลรวมของทั้งสองตัว
แปร และนอกจากนี้ยังศึกษาถึงวิธีการที่จะนำผลของความผันแปรตามฤดูกาลที่ได้มาประยุกต์ใช้
ในการออกแบบงานทางให้มีความเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย

การสำรวจข้อมูล ใช้วิธีทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) บน
ผิวทางลาดยางของทางหลวงหมายเลข 309 โดยทำการทดสอบทุกเดือนรวมเป็นเวลา 1 ปี ตั้งแต่
เดือนเมษายน 2547 ถึงมีนาคม 2548 ในขณะที่ทดสอบอุณหภูมิที่ชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตและ
ความชื้นในโครงสร้างทางจะถูกเก็บไปพร้อมกัน ส่วนข้อมูลการแอนตัวของทางทดสอบจะนำมา
คำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม ELMOD เพื่อหาค่าโมดูลัสของชั้นทางต่างๆ

ผลการวิจัยพบว่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตและโมดูลัสดินคันทางมีความผันแปรตาม
ฤดูกาล อันเนื่องมาจากอุณหภูมิและความชื้นตามลำดับ โดยจะเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา
เป็นเส้นโค้งแบบไซน์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบตามวิธีเชิงกลอย่างง่ายได้ และยังพบว่า
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตต่อโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตที่
อุณหภูมิ 35 °ซ กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางแอสฟัลต์คอนกรีตมีสมการความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับค่า
ปรับแก้อุณหภูมิสำหรับโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตที่พัฒนาโดย Pavement Technology
Project (PTP) อย่างยิ่ง นอกจากนี้ยังได้หาค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อนำไปหาโมดูลัสดินคันทางตัวแทนที่
ใช้ในการออกแบบงานทางด้วยวิธี AASHTO

ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2547	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4570380521 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: SEASONAL VARIATION / FLEXIBLE PAVEMENT / MODULUS / TEMPERATURE

NAWAPOL BRAHMAJAREE: EFFECTS OF SEASONAL VARIATION ON THE DESIGN AND EVALUATION OF FLEXIBLE PAVEMENT IN THAILAND

THESIS ADVISOR: PROF. DIREK LAVANSIRI, Ph.D., THESIS COADVISOR: SAENGCHAI TEPSITTITARAKORN, Mr., 151 pp. ISBN 974-53-1525-7.

The primary objective of the research is to study of the impacts of climatic condition on flexible pavement behavior by finding seasonal variations in both of pavement strength and its layer materials properties such as asphalt concrete elastic modulus, granular base modulus and subgrade resilient modulus which vary throughout a year caused by temperature itself, moisture itself or the combination of both. In addition, the research came out with a method to incorporate the effects of seasonal variation into the design of pavement according to the Thai climate.

Data collection was conducted by Falling Weight Deflectometer (FWD) testing on the flexible pavement of the highway number 309. The test was done monthly, over one year, from April 2004 to March 2005. Simultaneously, asphalt concrete layer temperatures and moisture content in pavement structure were measured. The deflection data of the testing were backcalculated by ELMOD program, in order to find the pavement layers moduli.

Results reveal that both asphalt concrete modulus and subgrade modulus vary according to season caused by changing in temperature and moisture respectively, plotted results in time series functions that show the sinusoidal shaped curves, which can be applied into the mechanistic-empirical design. Secondly, the relationship between ratio of asphalt concrete modulus to asphalt concrete modulus at 35 °C and the middepth asphalt concrete temperature is close to the temperature correction for asphalt concrete modulus developed by the Pavement Technology Project (PTP). In addition, the weighting factor was determined for investigating the representative subgrade modulus that used in the pavement design by AASHTO method.

Department	Civil Engineering	Student's signature.....
Field of study	Civil Engineering	Advisor's signature.....
Academic year	2004	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย ที่ให้โอกาสแก่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา พร้อมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ และเสนอแนะแนวทางการศึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณ คุณแสงชัย เทพสิทธิพรภรณ์ ผู้อำนวยการส่วนสำรวจและประเมินสภาพทาง กรมทางหลวง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมของผู้วิจัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบ เก็บรวบรวมข้อมูล และให้คำแนะนำอันมีค่าในการวิเคราะห์ข้อมูล ลำดับต่อไป ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ อนุศักดิ์ อิศรเสนา ณ อยุธยา และ รองศาสตราจารย์ ดร. สรวิต นฤปิติ ที่ได้กรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนแล้วเสร็จสมบูรณ์ทุกประการ

ผู้วิจัยขอสำนึกในพระคุณของผู้มีพระคุณ และครูบาอาจารย์ทุกท่าน ทั้งที่ได้กล่าวถึง และไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ซึ่งเคยให้ความช่วยเหลือ และประสิทธิประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้วิจัย ตั้งแต่ในอดีต จนถึงปัจจุบัน และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับโอกาสทางการศึกษาที่ดีสำหรับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณประเสริฐ บุญรักษา คุณชาโอน พยงค์ศรี และคุณชาญชัย แสงผล ส่วนสำรวจและประเมินสภาพทาง กรมทางหลวง รวมทั้งทีมงานทดสอบด้วยเครื่อง FWD ทุกท่านที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิธีการทดสอบ และช่วยเหลือในการทดสอบ จนกระทั่งการทดสอบที่ต้องทำทุกเดือน ตลอดหนึ่งปีที่ผ่านมา สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณ คุณพรชัย ศิลารมย์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับเทคนิคและแนวคิดเบื้องต้นอันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้องนิสิตทุกคนในสาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งและการจราจร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอบอุ่นและเป็นกันเอง ตลอดที่อยู่ด้วยกันมา โดยเฉพาะเพื่อน นิสิตร่วมชั้นปีทุกคนที่ช่วยเหลือ และแนะนำความรู้และข้อมูลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ทั้งในการศึกษา และในการส่งงาน

ท้ายสุดนี้อันเป็นสิ่งสำคัญสูงสุด ผู้วิจัยขอสำนึกในพระคุณของบิดา มารดา และขอขอบคุณ พี่สาวของข้าพเจ้า ที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 การทบทวนแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในสนาม.....	33
3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากเอกสารประกอบ.....	41
3.3 การวิเคราะห์หาโมดูลัสของชั้นทางด้วยการคำนวณย้อนกลับ.....	44
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	45
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....	48
4.1 ตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของทางลาดยาง.....	48
4.2 การวิเคราะห์ผลของลักษณะทดสอบที่ต่างกัน.....	53
4.3 การวิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาล.....	57
4.4 ผลของความผันแปรตามฤดูกาลกับการออกแบบและประเมินทางลาดยางใน ประเทศไทย.....	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	98
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	99
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	102

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รายการอ้างอิง.....	103
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก การทดสอบและเก็บข้อมูลในสนาม.....	108
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา.....	112
ภาคผนวก ค ผลการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสของชั้นทางจากการทดสอบตามแนวร่องล้อ ที่น้ำหนัก 566 kPa.....	119
ภาคผนวก ง กราฟความผันแปรของโมดูลัสชั้นผิวทางและโมดูลัสดินคันทาง.....	143
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	151



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ผลของช่วงเวลาในการทดสอบ FWD ต่อโมดูลัสดินคันทาประสิทธิผล.....	29
3.1 สายทางที่ PTP ทำการทดสอบ.....	42
3.2 อายุใช้งานของสายทางที่ศึกษา.....	44
4.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	48
4.2 ส่วนประกอบของโครงสร้างชั้นทาง.....	49
4.3 น้ำหนักเพลามาตรฐานและน้ำหนักเพลามาตรฐานต่อปีของแต่ละสายทาง.....	50
4.4 ลักษณะทางกายภาพขณะทดสอบในสายทางหมายเลข 309.....	60
4.5 ค่าทางสถิติของค่าแอนตัวกลางในหน่วยไมครอนของการทดสอบในทุก ฤดูกาลและทุกค่าน้ำหนักทดสอบ.....	60
4.6 ค่าทางสถิติของค่าแอนตัวกลางที่ผันแปรตามฤดูกาลในหน่วยไมครอนของการ ทดสอบตามแนวร่องล้อและแนวระหว่างร่องล้อของทุกน้ำหนักทดสอบ.....	62
4.7 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนตัวกลางที่ได้จากการทดสอบตามแนว ร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa ในสายทางต่างๆ กับปัจจัยแวดล้อม.....	64
4.8 ตัวบ่งชี้ความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนตัวกลางในแต่ละสายทาง.....	66
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวบ่งชี้ความผันแปรตามฤดูกาลกับปัจจัยต่างๆ.....	67
4.10 ค่าทางสถิติของโมดูลัสชั้นผิวทางของการทดสอบในทุกฤดูกาลและทุกค่า น้ำหนักทดสอบ.....	70
4.11 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของโมดูลัสชั้นผิวทางกับอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ใน แต่ละสายทาง.....	71
4.12 ค่าทางสถิติของโมดูลัสชั้นพื้นทางของการทดสอบในทุกฤดูกาลและทุกค่า น้ำหนักทดสอบ.....	75
4.13 ค่าทางสถิติของโมดูลัสชั้นพื้นทางที่ผันแปรตามฤดูกาลของการทดสอบตาม แนวร่องล้อและแนวระหว่างร่องล้อของทุกค่าน้ำหนักทดสอบ.....	75
4.14 ค่าทางสถิติของโมดูลัสชั้นรองพื้นทางของการทดสอบในทุกฤดูกาลและทุกค่า น้ำหนักทดสอบ.....	77
4.15 ค่าทางสถิติของโมดูลัสของดินคันทาของการทดสอบในทุกฤดูกาลและทุกค่า น้ำหนักทดสอบ.....	78
4.16 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของโมดูลัสดินคันทา ปริมาณน้ำฝน และปริมาณ ความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ ในโครงสร้างทาง.....	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.17	ค่าสัมประสิทธิ์(α) ของแต่ละสายทาง.....	83
4.18	ค่าถ่วงน้ำหนักของโมดูลัสดินคันทางที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับด้วย โปรแกรม ELMOD.....	94
4.19	ค่าถ่วงน้ำหนักของโมดูลัสดินคันทางที่ได้จากวิธีของ AASHTO.....	95
4.20	ผลของคาบการทดสอบ FWD ที่มีต่อโมดูลัสดินคันทางประสิทธิผล.....	97



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจากทดสอบหาโมดูลัสคืบตัว.....	4
2.1 แผนภาพใช้หาโมดูลัสคืบคั่นทางประสิทธิผลสำหรับการออกแบบทางลาดยางด้วย Serviceability Criteria.....	9
2.2 ตัวอย่างการคำนวณหาโมดูลัสคืบคั่นทางประสิทธิผลสำหรับการออกแบบทางลาดยางด้วย Serviceability Criteria.....	10
2.3 ค่าถ่วงน้ำหนักและสภาพฤดูกาลที่ใช้ออกแบบ(Design Season).....	13
2.4 การหาค่า Proile Area Ratio (PAR).....	26
2.5 ค่าถ่วงน้ำหนักสายทางกลุ่มที่ 1 จากการทดสอบของ Guan et al. (1998).....	30
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมดูลัสและอุณหภูมิของแอสฟัลต์คอนกรีต.....	31
2.7 เปรียบเทียบแบบจำลองของ Marshall et al. (2001) กับ Lukanen et al. (2000).....	32
3.1 เครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) ที่ใช้ในการวิจัย.....	34
3.2 สภาพสายทางหมายเลข 309 ที่ทำการทดสอบโดยผู้วิจัย.....	35
3.3 การทำสัญลักษณ์ด้วยสีไว้ที่จุดทดสอบ.....	36
3.4 การทดสอบด้วย FWD ตามวิธีทดสอบของ PTP.....	36
3.5 เทอร์มิเตอร์แบบใช้แสงอินฟราเรดที่ติดตั้งอยู่กับ FWD.....	37
3.6 การวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางด้วยเทอร์มิเตอร์แบบดิจิตอล.....	38
3.7 เครื่องวัดความชื้นในดิน Soilmoisture Meter.....	39
3.8 หัววัดความชื้นในดิน (Gypsum Block).....	39
3.9 ผังแสดงหลุมฝังเครื่องวัดความชื้นในโครงสร้างทาง.....	40
3.10 รูปตัดแสดงการติดตั้งเครื่องวัดความชื้นในโครงสร้างทาง.....	41
3.11 การฝังหัววัดความชื้นและบดอัดดินในโครงสร้างทาง.....	41
4.1 สถิติอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนตลอดทั้งปีในรอบ 5 ปี (2543-2547) ในบริเวณสายทางหมายเลข 309.....	51
4.2 สถิติปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนตลอดทั้งปีในรอบ 5 ปี (2543-2547) ในบริเวณสายทางหมายเลข 309.....	51
4.3 สถิติความยาวนานแสงอาทิตย์และความเข้มเมฆเฉลี่ยรายเดือนตลอดทั้งปีในรอบ 5 ปี(2543-2547) ในบริเวณสายทางหมายเลข 309.....	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.4 ค่าโมดูลัสชั้นผิวทางจากการทดสอบตามแนวร่องล้อและระหว่างร่องล้อ.....	54
4.5 โมดูลัสชั้นพื้นทางจากการทดสอบตามแนวร่องล้อและระหว่างร่องล้อ.....	54
4.6 โมดูลัสชั้นรองพื้นทางจากการทดสอบตามแนวร่องล้อและระหว่างร่องล้อ.....	54
4.7 โมดูลัสดินคั่นทางจากการทดสอบตามแนวร่องล้อและระหว่างร่องล้อ.....	55
4.8 ผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อโมดูลัสชั้นผิวทาง.....	55
4.9 ผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อโมดูลัสชั้นพื้นทาง.....	56
4.10 ผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อโมดูลัสชั้นรองพื้นทาง.....	56
4.11 ผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อโมดูลัสดินคั่นทาง.....	57
4.12 ผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อค่าแอนต์วักกลางจากการทดสอบตามแนวร่องล้อในเดือนธันวาคม (ฤดูหนาว).....	58
4.13 กราฟค่าแอนต์วักกลางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa ในฤดูกาลร้อน ฝน และหนาว.....	59
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนต์วักกลางกับอุณหภูมิในแต่ละน้ำหนักทดสอบ.....	61
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนต์วักกลางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง.....	63
4.16 ความระหว่างค่าแอนต์วักกลางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa กับปริมาณน้ำฝน.....	63
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนต์วักกลางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa กับปริมาณความชื้นที่ความลึกตำแหน่งต่างๆ ในชั้นทาง.....	64
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนต์วักกลางกับอุณหภูมิในสายทางหมายเลข 309...	66
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความผันแปรกับความหนาของโครงสร้างทางทั้งหมด.....	68
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความผันแปรกับอายุการใช้งานของถนน.....	69
4.21 ผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อโมดูลัสชั้นผิวทางจากการทดสอบตามแนวร่องล้อในเดือนธันวาคม (ฤดูหนาว).....	69
4.22 กราฟโมดูลัสของชั้นผิวทางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa ในฤดูกาลร้อน ฝน และหนาว.....	70
4.23 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสชั้นผิวทางกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางในสายทางหมายเลข 309.....	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ผลเนื่องจากอุณหภูมิกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง.....	73
4.25 ความผันแปรของโมดูลัสชั้นผิวทางที่ปรับแก้ผลของอุณหภูมิในสายทางหมายเลข 309.....	73
4.26 ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นพื้นทางในสายทางหมายเลข 309.....	74
4.27 ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นพื้นทางในแต่ละสายทาง.....	76
4.28 ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางจากการทดสอบที่ 566 kPa ในสายทางหมายเลข 309.....	77
4.29 กราฟโมดูลัสดินคันทางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa ในฤดูกาลร้อน ฝน และหนาว.....	79
4.30 ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางในสายทางหลายเลข 309.....	79
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสดินคันทางกับปริมาณน้ำฝนในสายทางหลายเลข 309.....	80
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสดินคันทางกับปริมาณความชื้นที่ความลึกต่างๆในโครงสร้างสายทางหมายเลข 309.....	80
4.33 ค่าปรับแก้ผลของอุณหภูมิสำหรับค่าการแอ่นตัวของ AASHTO (1993).....	82
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสชั้นผิวทางกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางในแต่ละสายทาง.....	84
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสชั้นผิวทางกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางในสายทางหมายเลข 309.....	85
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน E_{AC}/E_{35} กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง (T_{AC}) ในสายทางหมายเลข 309.....	85
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน E_{AC}/E_{35} กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางในแต่ละสายทาง.....	86
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน E_{AC}/E_{35} และอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางของทุกสายทาง.....	86
4.39 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน E_{AC}/E_{35} กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางที่ได้ในการวิจัยนี้กับการศึกษาของ PTP.....	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.40 ฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลส์ชั้นผิวทางในสายทาง หมายเลข 309.....	89
4.41 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลส์ชั้นผิวทาง กับอุณหภูมิอากาศรายเดือนในสายทางหมายเลข 309.....	90
4.42 ฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลส์ดินคันทางในสายทาง หมายเลข 309.....	92
4.43 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลส์ดินคันทาง กับปริมาณน้ำฝนในสายทางหมายเลข 309.....	93
4.44 กราฟค่าถ่วงน้ำหนักของโมดูลส์ดินคันทางสำหรับสายทางหมายเลข 309.....	96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทางหรือถนนเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญและมีมูลค่าสูงในระบบขนส่ง ในอดีตประเทศไทยต้องใช้งบประมาณจำนวนมากไปกับการก่อสร้างถนนเพื่อรองรับการพัฒนาของประเทศ และส่วนหนึ่งต้องเสียไปในการดูแลรักษาและซ่อมบำรุงทางที่มีสภาพชำรุด แม้ว่าจากงบประมาณในปี 2546 ที่กรมทางหลวงได้รับเฉพาะกิจกรรมบูรณะและปรับปรุงทางรวมทั้งกิจกรรมบำรุงพิเศษ และบูรณะผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งอยู่ร้อยละ 88 ของทางในความรับผิดชอบ คิดเป็นเงินเกือบ 4,000 ล้านบาท (กรมทางหลวง, 2546) แต่ก็ยังไม่เพียงพอแก่การดูแลให้ครอบคลุมปริมาณความเสียหาย ดังนั้นทางหลวงที่ได้รับการซ่อมบำรุงไม่เพียงพอจึงเกิดความเสียหายลุกลามมากขึ้นจนเกินกว่าที่จะซ่อมแซมได้ ถึงขั้นที่จะต้องทำการบูรณะก่อสร้างใหม่ในบางสายทาง

สาเหตุสำคัญที่ทำให้ผิวทางเสื่อมสภาพหรือชำรุดเร็วกว่าอายุการใช้งานที่ได้ทำการออกแบบไว้มีหลายประการ เช่น ปริมาณการจราจรที่เพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะปริมาณรถบรรทุก สภาพแวดล้อมของทาง วิธีการออกแบบ เทคนิคและวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง และเทคนิคที่ใช้ในการบำรุงรักษา เป็นต้น ในส่วนตัวแปรด้านสภาพแวดล้อมของทาง (Environmental Variables) นั้นยังแบ่งออกได้เป็น (Hossain, Long และ Kotdwala, 1996)

1. ความชื้น (Moisture)
2. อุณหภูมิ (Temperature)
3. รังสีแสงอาทิตย์ (Solar Radiation)
4. สภาพภูมิประเทศ (Geological Conditions)

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าอุณหภูมิและความชื้นที่แปรเปลี่ยนจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของทาง (Pavement Performance) และถูกนำมาพิจารณาเป็นปัจจัยหนึ่งในการออกแบบงานทาง โดยความชื้นจะส่งผลโดยตรงต่อสภาพของดินคันทาง ส่วนอุณหภูมิจะส่งผลโดยตรงต่อผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต อย่างไรก็ตามการพิจารณาปัจจัยดังกล่าวในการประเมินสภาพทางและการ

ออกแบบงานทางยังเป็นไปอย่างจำกัด และมักจะถูกมองข้ามไปเนื่องจากยังขาดความรู้ความเข้าใจที่แน่นอนว่าปัจจัยนี้ส่งผลอย่างไรต่อสภาพทางจริงนอกเหนือจากห้องทดลอง

ในต่างประเทศ โดยเฉพาะในสหรัฐอเมริกา เนื่องจากต้องเสียงบประมาณจำนวนมากในการซ่อมแซมถนนให้อยู่ในสภาพดี รัฐบาลสหรัฐโดยสภาของเกรสตระหนักถึงปัญหานี้เป็นอย่างดี จึงได้ออกบทบัญญัติว่าด้วยการขนส่งทางบก (Surface Transportation Act of 1978) ผลักดันให้มีการเก็บข้อมูลสภาพของถนนในระยะยาว เพื่อศึกษาความสัมพันธ์อันเนื่องมาจากน้ำหนักจราจรและสภาพแวดล้อมของทาง ต่อมาการศึกษานี้ได้กลายมาเป็น Long-Term Pavement Performance (LTPP) ของ Strategic Highway Research Program (SHRP) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

"ทำให้ถนนมีอายุใช้งานนานยิ่งขึ้น ด้วยการออกแบบและการซ่อมแซมงานทางให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับแต่ละชนิดของวัสดุที่ใช้ น้ำหนักจราจร สภาพแวดล้อมของทาง สภาพดินคันทาง และเทคนิคการบำรุงรักษาทาง" (Rada, 1994)

สำหรับในประเทศไทยนั้น การศึกษาผลของน้ำหนักจราจรและสภาพแวดล้อมของทางต่อพฤติกรรมของถนนยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในการศึกษาต้องใช้เวลาและงบประมาณสูง และข้อจำกัดในด้านเครื่องมือทดสอบ อย่างไรก็ตาม ในปี 2537 กรมทางหลวงได้มีโครงการนำร่องเพื่อประเมินสภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต และพัฒนาวิธีการออกแบบโครงสร้างชั้นทางโดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) และต่อมาได้มีการนำเสนอโครงการพัฒนาวิธีการออกแบบและตรวจสอบประเมินสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างทาง (Pavement Technology Project) ขึ้น มีการเก็บข้อมูลสภาพทางตามภาคต่างๆ ทั่วประเทศด้วยเครื่องมือ FWD ทั้งหมด 5 ชุด (Department of Highways, 2002)

จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาใช้ศึกษาผลของความผันแปรตามฤดูกาลที่มีต่อพฤติกรรมของทางลาดยางในประเทศไทยได้ และจากผลการศึกษาจะทำให้ทราบพฤติกรรมของทางลาดยางตามลักษณะภูมิอากาศของประเทศไทยมากยิ่งขึ้น เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและการบำรุงซ่อมแซมโครงสร้างทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งานของทางและช่วยลดงบประมาณที่ต้องเสียไปกับการซ่อมบำรุงทางในแต่ละปี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

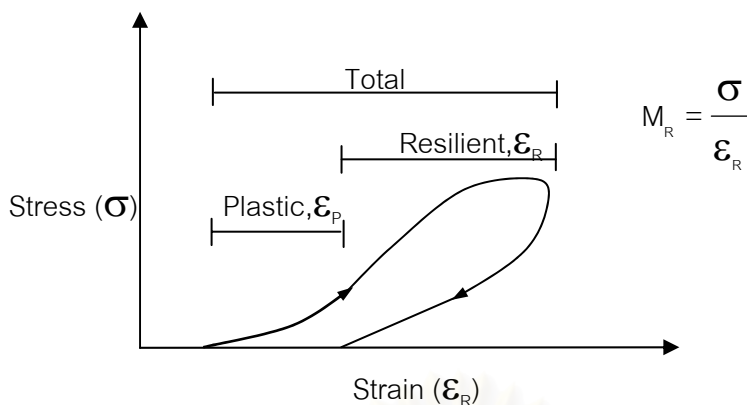
1. เพื่อทบทวนทฤษฎี แนวความคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความผันแปรตามฤดูกาลของพฤติกรรมของโครงสร้างทางลาดยาง
2. เพื่อศึกษาว่าสภาพภูมิอากาศของไทยมีผลต่อความผันแปรตามฤดูกาลของพฤติกรรมของโครงสร้างทางลาดยางมากน้อยเพียงใดและอย่างไร
3. ประยุกต์ใช้ข้อมูลและความรู้เกี่ยวกับความผันแปรตามฤดูกาลของพฤติกรรมโครงสร้างทางลาดยาง เข้ากับการออกแบบและประเมินสภาพทางลาดยางในประเทศไทย
4. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาผลของความผันแปรตามฤดูกาลต่อพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของทางลาดยางในประเทศไทยต่อไป

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. สายทางที่จะศึกษามีผิวทางลาดยางซึ่งจัดเป็นผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement)
2. ใช้เครื่องทดสอบสภาพทางแบบไม่ทำลาย Falling Weight Deflectometer (FWD) ของกรมทางหลวงทดสอบสภาพถนนจริงโดยประยุกต์ตามวิธีทดสอบของ Strategic Highway Research Program (SHRP) สหรัฐอเมริกา (Department of Highways, 2001)
3. ทดสอบสภาพทางด้วย FWD ในทางหลวงหมายเลข 309 โดยทำการทดสอบทุกเดือนเป็นระยะเวลารวม 1 ปี ตั้งแต่เมษายน 2547 ถึง มีนาคม 2548 และรวบรวมข้อมูลการทดสอบในลักษณะเดียวกันของ Pavement Technology Project (PTP) ซึ่งทดสอบโดยกรมทางหลวงในช่วงปี 2543-2544 เข้าร่วมในการวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกับข้อมูลจากการทดสอบในสนามของผู้ศึกษา
4. ทำการคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation) หาค่าโมดูลัสในชั้นทางต่างๆ ด้วยโปรแกรม ELMOD

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ มีลักษณะคล้ายกับอีลาสติกโมดูลัส กล่าวคือ หาได้จากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด แต่ค่าโมดูลัสคืนตัว นั้นจะได้อาจจากการทดสอบด้วยแรงกระทำแบบซ้ำๆ (Repeated Load) และจะพิจารณาเฉพาะส่วนของความเครียดคืนรูปได้ (Recoverable)



รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุจากทดสอบหาโมดูลัสคืนตัว

จากรูปที่ 1.1 พิจารณาถึงพฤติกรรมของดินเมื่อให้แรงกระทำ ความเค้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้นและเมื่อความเค้นลดลงความเครียดจะลดลงเช่นกัน แต่เมื่อไม่มีความเค้นวัสดุยังมีความเครียดส่วนหนึ่งเหลืออยู่ ดังนั้นความเครียดทั้งหมด (Total Strain) จะประกอบด้วย ส่วนที่เปลี่ยนรูปถาวรหรือ Plastic และส่วนที่คืนรูปได้หรือ Resilient

$$\text{โมดูลัสคืนตัว } (M_R) = \text{ความเค้น } (\sigma) / \text{ความเครียดคืนรูปได้ } (\epsilon_R)$$

$$\text{ส่วน อีลาสติกโมดูลัส} = \text{ความเค้น } (\sigma) / \text{ความเครียด } (\epsilon_p)$$

เนื่องจากอีลาสติกโมดูลัสเป็นคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุในชั้นผิวทางของโครงสร้างทางลาดยาง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ โมดูลัสชั้นผิวทางจะหมายถึงอีลาสติกโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีต และเช่นเดียวกันโมดูลัสดินคันทางจะหมายถึงโมดูลัสคืนตัวของดินคันทาง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความเข้าใจถึงแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความผันแปรตามฤดูกาลของพฤติกรรมของโครงสร้างทางลาดยาง
2. มีความเข้าใจถึงผลกระทบของสภาพภูมิอากาศ อันได้แก่ อุณหภูมิ และความชื้นหรือปริมาณน้ำฝน ที่มีต่อความผันแปรตามฤดูกาลของคุณสมบัติชั้นทางลาดยางในประเทศไทย
3. เพิ่มประสิทธิภาพของการประเมินสภาพทางลาดยางให้สะท้อนถึงความผันแปรตามฤดูกาลของสภาพทางมากยิ่งขึ้น เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบเสริมผิวทาง
4. ใช้พิจารณาในการออกแบบทางลาดยางให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย และเป็นแนวทางในการศึกษาพฤติกรรมและการเสื่อมสภาพของทางลาดยางในประเทศไทยต่อไป

บทที่ 2

การทบทวนแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะโดยทั่วไปและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของโครงสร้างทางที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาดังต่อไปนี้

2.1.1 โมดูลัสดินคั่นทาง (Subgrade Resilient Modulus, M_R) กับการออกแบบงานทาง

โมดูลัสดินคั่นทางเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบงานทาง ผลของความผันแปรตามฤดูกาลของค่านี้ต่อการออกแบบสามารถอธิบายได้จากสมการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นหรือทางลาดยาง ตามวิธีของ AASHTO (1993) ดังนี้

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 9.36 \log(SN+1) - 0.20 + \frac{\log[\Delta PSI / (4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094 / (SN+1)^{5.19}} + 2.32 \log M_R - 8.07 \quad (2.1)$$

โดยที่

W_{18} = จำนวนของน้ำหนักเพลามาตรฐาน (18-kip)

S_0 = ความเชื่อมั่น (Reliability) หรือ Standard Error ของการคาดการณ์ปริมาณ

จราจร

Z_R = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเชื่อมั่น S_0

SN = ดัชนีโครงสร้างทาง

ΔPSI = ดัชนีการให้บริการ (Serviceability Index) ที่ลดลงในช่วงให้บริการ (Performance Period) ของทาง

M_R = โมดูลัสดินคั่นทาง

เมื่อสมมติให้ในช่วงเวลาที่ออกแบบทางมีค่า Present Serviceability Index (PSI) ลดลงจาก 4.4 ถึง 2.5 และกำหนดให้ S_0 และ Z_R เท่ากับ 95 และ 0.35 จะพิจารณาได้ว่าสำหรับปริมาณการจราจรทั้งหมด N เท่ากับ 5×10^6 ESALs เมื่อค่าโมดูลัสลดลงจาก 106 (เมกกะปาสคาล, MPa)

เป็น 77 MPa จะทำให้ดัชนีโครงสร้างทางที่ต้องการเพิ่มขึ้นจาก 3.4 เป็น 4.2 ดังนั้นหากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (AC) มีค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นทาง (Layer Coefficient) เท่ากับ 0.35 ค่าดัชนีโครงสร้างทางที่เพิ่มขึ้นนี้ ทำให้ต้องเพิ่มความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตประมาณ 55 มิลลิเมตร (2.2 นิ้ว)

เนื่องจากปริมาณความชื้นมีผลต่อโมดูลัสดินคันทาง แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อมูลแน่นอนที่ยืนยันว่าค่าโมดูลัสที่ได้ในห้องปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้นอย่างไร Drumm, Reeves, Madgett และ Trolinger (1997) ได้เสนอวิธีประมาณค่าโมดูลัสของดิน AASHTO A-4 จากปริมาณความชื้น พบว่าค่าโมดูลัสจะลดลงประมาณ 1.520 MPa ต่อปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 0.1 หน่วย จากตัวอย่างข้างต้นสมมติให้ที่ความชื้น 12.6 % หน่วยดิน A-4 จะมีโมดูลัส 106 MPa ค่าโมดูลัสที่ลดลงจาก 106 MPa เป็น 77 MPa เป็นผลมาจากความชื้นที่เพิ่มขึ้น 1.9 หน่วย หรือจาก 12.6 % เป็น 14.5 % และจากตัวอย่างการออกแบบที่ความชื้น 14.5 จะต้องใช้ความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหนาว่าออกแบบที่ความชื้น 12.6 % การออกแบบทางตามฤดูกาลที่ความชื้นต่ำจะทำให้ทางที่ออกแบบมีอายุใช้งานลดลงเนื่องจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นในระหว่างปีหลังจากการก่อสร้าง ดังนั้นการออกแบบทางตามฤดูกาลที่ความชื้นสูงหรือต่ำที่สุด จะทำให้ทางไม่มีประสิทธิภาพหรือมีค่าก่อสร้างสูงตามลำดับ

2.1.2 ค่าโมดูลัสดินคันทางประสิทธิผล (Effective Roadbed Soil Resilient Modulus, $(M_R)_{\text{eff}}$)

ใช้เป็นตัวแทนของค่าโมดูลัสของดินคันทางทั้งหมดที่ผันแปรไปในแต่ละฤดูกาลตลอดทั้งปี เพื่อใช้ในการออกแบบงานทาง เนื่องจากในแต่ละฤดูกาลดินคันทางจะมีโมดูลัสแตกต่างกันและทำให้ถนนมีความเสื่อมสภาพสัมพัทธ์ (Relative Damage) แตกต่างไป ค่า M_R นี้สามารถหาได้ทั้งจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในสนาม ในห้องปฏิบัติการจะทดสอบตาม (AASHTO T 274) โดยจำลองสภาพความเค้นและความชื้นของตัวอย่างให้ใกล้เคียงกับสภาพจริงในแต่ละฤดูกาล ส่วนในสนามจะทดสอบในแต่ละฤดูกาลแล้วทำการคำนวณย้อนกลับ (AASHTO, 1993)

หลักการพื้นฐานของการหา M_R เริ่มจาก 1) หาความเสื่อมสภาพสัมพัทธ์จากกำลังรับน้ำหนักของคันทางในแต่ละฤดูกาล 2) อาศัยสมมติฐานความเสื่อมสภาพเชิงเส้นของ Miner (Miner's Linear Damage) ว่าผลรวมของความเสื่อมสภาพสัมพัทธ์เท่ากับความเสื่อมสภาพทั้งหมดของทาง 3) ความเสื่อมสภาพเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับความเสื่อมสภาพทั้งหมดของทางหารด้วยจำนวนฤดูกาลในหนึ่งปี และ 4) หาค่า M_R ตามความเสื่อมสภาพเฉลี่ยทั้งปีที่ได้ สมการของ M_R ที่

ได้จากสมการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นและความเสื่อมสภาพเชิงเส้นของ Miner จะอธิบายเป็นลำดับดังนี้

จากสมการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นที่แสดงในสมการที่ 2.1 จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วน T_i ที่แสดงถึงผลของ M_{R_i} ทั้งหมดต่อพฤติกรรมของทาง และส่วน Q ที่เป็นผลเนื่องมาจาก M_R

$$T_i = 2.32 \times \log_{10} [M_{R_i}] - 8.07 \quad (2.2)$$

$$Q = 9.36 \times \log_{10} (SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} [\Delta PSI / (4.2 - 1.5)]}{0.40 + 1094 / (SN + 1)^{5.19}} \quad (2.3)$$

โดยที่ i ของ T_i ในสมการ 2.2 เป็นช่วงเวลาที่ i ในแต่ละปี และ M_{R_i} เป็นโมดูลัสดินคันทางระหว่างช่วงเวลาที่ i ดังนั้นฤดูกาลต่างๆ จึงถูกกำหนดในรูปของช่วงเวลาแทนสมการเหล่านี้ก็กลับลงในสมการที่ 2.1 เดิมจะได้

$$W_{18_i} = 10^Q \times 10^{T_i} \quad (2.4)$$

โดย 10^{T_i} แทนผลของความเสื่อมสภาพสัมพัทธ์ (Relative Damage, u_f) ต่อพฤติกรรมของทาง

ถ้าสมมติให้สมมติฐานความเสื่อมสภาพเชิงเส้นของ Miner เป็นจริง และปริมาณจราจรในแต่ละฤดูกาลในปีที่ศึกษาคงที่ จะได้ว่าความเสื่อมสภาพทั้งหมด (Total Damage) ตลอดอายุการใช้งานของถนน เป็นดังสมการ

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{(W_{18_{TOT}} / n)}{W_{18_i}} = 1.0 \quad (2.5)$$

โดย $W_{18_{TOT}}$ = น้ำหนักเพลามาตรฐานทั้งหมด (18-kip ESAL) ที่คาดการณ์ไว้
 n = ช่วงเวลาที่แบ่งออกเป็นฤดูกาล

แทนค่า Q และ u_f (เท่ากับ 10^{-T_i}) และดึงตัวแปรในเทอม i ออกจากผลรวมในสมการที่ 2.5 จะได้ว่า

$$D = \frac{W_{18_{TOT}}}{n \times 10^Q} \sum_{i=1}^n u_{f_i} = 0 \quad (2.6)$$

และ

$$W_{18_{TOT}} = \frac{10^Q}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{f_i}} \quad (2.7)$$

เมื่อพิจารณาในพจน์ทางด้านขวาของสมการ 2.7 จะเห็นว่าผลของความผันแปรตามฤดูกาลของคันทางทั้งหมดจะอยู่ในรูปของความเสื่อมสภาพสัมพัทธ์เฉลี่ย

$$\bar{u}_f = \frac{\sum_{i=1}^n u_{f_i}}{n} \quad (2.8)$$

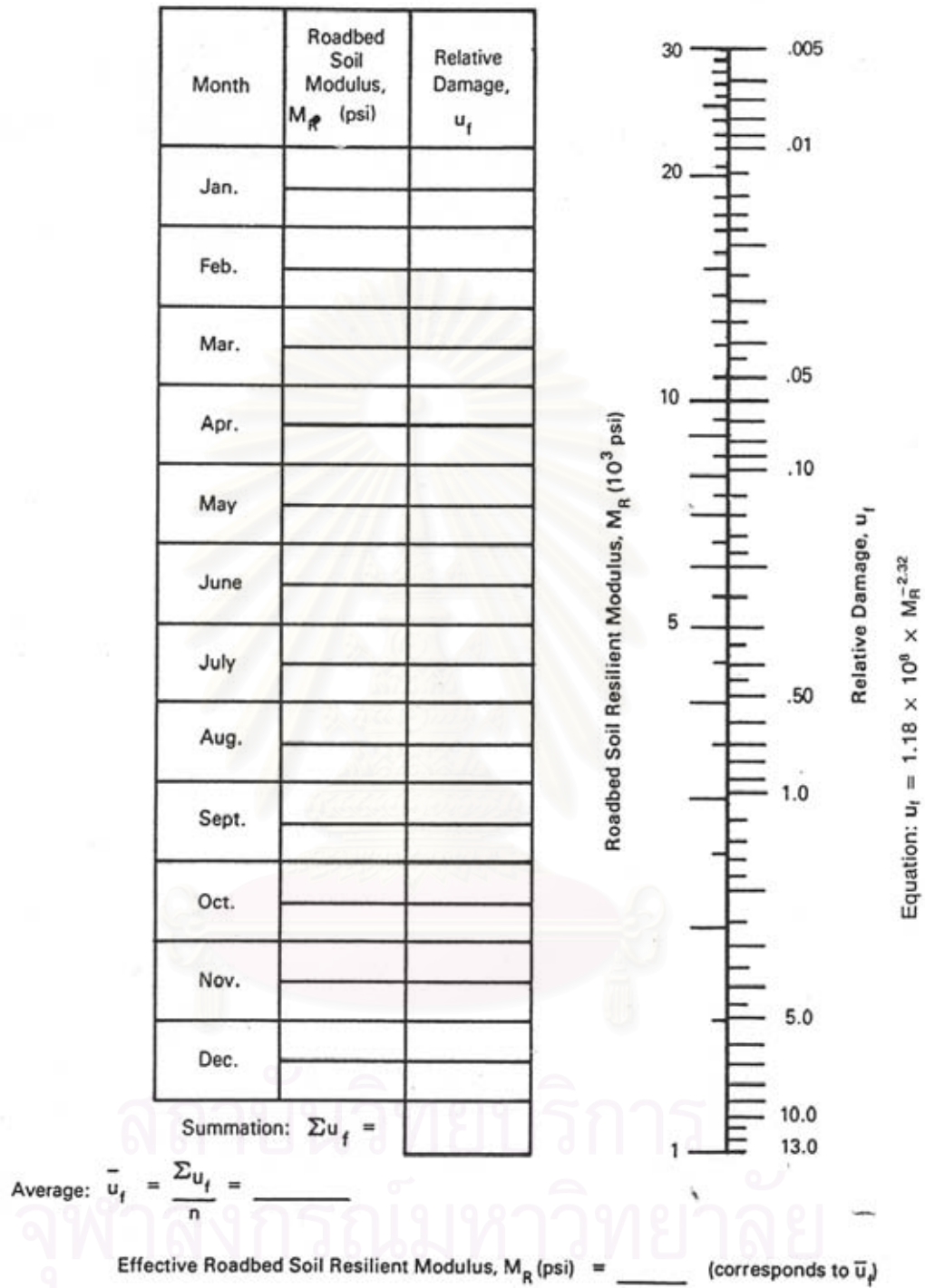
และจะได้

$$u_{f_i} = 10^{-T_i} = 1.18 \times 10^8 \times M_{R_i}^{-2.32} \quad (2.9)$$

เนื่องจาก $(M_R)_{eff}$ เป็นค่าที่ได้จากผลรวมของความเสื่อมสภาพทั้งหมดแทนการรวมผลของค่าโมดูลัสในแต่ละฤดูกาล ดังนั้นจะหา $(M_R)_{eff}$ ได้จากสมการ 2.10

$$(M_R)_{eff} = 3005 \times (\bar{u}_f)^{-0.431} \quad (2.10)$$

การแบ่งช่วงเวลาหรือฤดูกาลควรแบ่งให้มีความเหมาะสมตามค่าโมดูลัสที่ผันแปรตามฤดูกาล ไม่ควรแบ่งช่วงเวลาน้อยกว่าครึ่งเดือนครึ่งแทนหนึ่งฤดูกาล จากรูปที่ 2.1 ถ้าฤดูกาลที่สั้นที่สุดมีระยะเวลาเดือนครึ่ง จะต้องกรอกข้อมูลทุกๆ ช่องของตาราง แต่ถ้าฤดูกาลที่สั้นที่สุดมีระยะเวลาหนึ่งเดือนจะต้องกรอกข้อมูลเพียงหนึ่งช่องต่อเดือน เมื่อกรอกข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้วจะประมาณ u_f ตามแต่ละค่าโมดูลัส โดยใช้สเกลทางด้านขวามือ หรือคำนวณจากสมการโดยตรง จากรูปที่ 2.2 u_f จะเท่ากับ 0.51 เมื่อโมดูลัสของดินคันทางมีค่า 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) จากนั้นจะหาค่า $(M_R)_{eff}$ ได้จากผลรวมของ u_f ทั้งหมดหารด้วยจำนวนช่วงเวลา (12 หรือ 24) ค่า $(M_R)_{eff}$ นี้ใช้ได้กับการออกแบบผิวทางแบบยึดหยุ่นโดยอาศัยเกณฑ์ของการให้บริการ (Serviceability Criteria) เท่านั้น



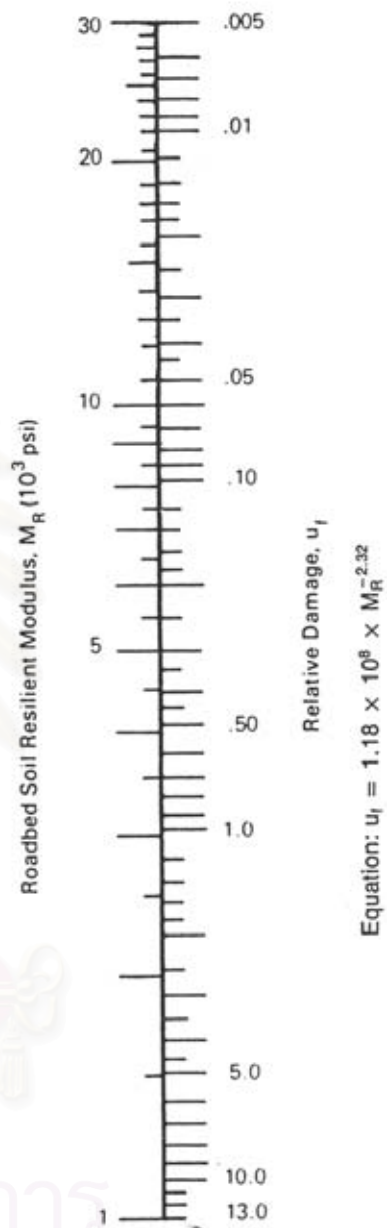
รูปที่ 2.1 แผนภาพใช้หาโมดูลัสดินคันทางประสิทธิผลสำหรับการออกแบบทางลาดยางด้วย

Serviceability Criteria

ที่มา : AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993)

Month	Roadbed Soil Modulus, M_R (psi)	Relative Damage, u_f
Jan.	20,000	0.01
Feb.	20,000	0.01
Mar.	2,500	1.51
Apr.	4,000	0.51
May	4,000	0.51
June	7,000	0.13
July	7,000	0.13
Aug.	7,000	0.13
Sept.	7,000	0.13
Oct.	7,000	0.13
Nov.	4,000	0.51
Dec.	20,000	0.01
Summation: $\sum u_f =$		3.72

Average: $\bar{u}_f = \frac{\sum u_f}{n} = \frac{3.72}{12} = 0.31$



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการคำนวณหาโมดูลัสดินคันทางประสิทธิภาพสำหรับการออกแบบทางลาดยางด้วย Serviceability Criteria

ที่มา : AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993)

2.1.3 ค่าถ่วงน้ำหนักโมดูลัสดินคันทาง (Weighting Factor)

วิธีการออกแบบงานทางให้มีประสิทธิภาพ (Cost-Effective Design) ควรจะพิจารณาตามค่าโมดูลัสระหว่างฤดูกาลที่มีความชันสูงสุดและต่ำสุด Weighting Factor จึงถูกนำมาใช้เป็นทฤษฎีพื้นฐานในการเลือกค่าโมดูลัสของดินคันทางที่เหมาะสม ทำให้การออกแบบงานทางมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ค่านิยามของ Weighting Factor

Gomez-Azhecar และ Thompson (1984) เสนอการใช้ Weighting Factor เพื่อหาผลของสภาพแวดล้อมของทางที่มีต่ออายุใช้งานของทาง Weighting Factor (WF_i) สำหรับเดือนหนึ่งๆ แสดงด้วยสมการได้ดังนี้

$$WF_i = \frac{N_f}{N_{ai}} \quad (2.11)$$

เมื่อ f = จำนวนปีก่อนถึงการวิบัติ (Failure)
 N_f = จำนวนน้ำหนักกระทำซ้ำก่อนถึงการวิบัติ
 N_{ai} = จำนวนน้ำหนักกระทำซ้ำในช่วงที่พิจารณา

ค่า N_{ai} สามารถคำนวณได้จาก Transfer Functions ของรูปแบบการวิบัติ (Failure Criteria) ที่กำหนด เช่น การวิบัติเนื่องมาจากความล้า (Fatigue Failure) การวิบัติตามร่องล้อ (Rutting Failure) หรือการวิบัติโดยรูปแบบทั่วไปตามที่กำหนดไว้ในสมการที่ 2.1 สำหรับการหาค่า N_f นั้น Gomez-Azhecar และ Thompson (1984) เสนอให้ใช้สมมติฐานความเสื่อมสภาพเชิงเส้นของ Miner ซึ่งถือว่าการวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนของความเสื่อมสภาพสะสม (Cumulative Damage Ratio) มีค่าเท่ากับ 1 นั่นก็คือ

$$\sum \frac{n}{N} = 1 \quad (2.12)$$

เมื่อ n คือ หรือเขียนสมการ 2.12 ใหม่ได้เป็น

$$\sum_{j=1}^f \sum_{i=1}^{12} \frac{n_{ij}}{N_{ai}} = 1 \quad (2.13)$$

เมื่อ n_{ij} เป็นทั้งหมดของเดือนที่ i ในปีที่ j ถ้าสมมติให้ปริมาณจราจรในแต่ละปีคงที่หรือไม่มี การเพิ่มของปริมาณจราจร (Traffic Growth) และการกระจายของการจราจรตลอดอายุการใช้งาน ที่ออกแบบไว้ (Design Period) เป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) จะได้ว่า

$$n_{ij} = \frac{N_f}{12f} \quad (2.14)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.14 ลงในสมการที่ 2.13 จะได้

$$\frac{N_f}{12f} \sum_{i=1}^f \sum_{i=1}^{12} \frac{1}{N_{ai}} = 1 \quad (2.15)$$

สมมติให้ในแต่ละปีมีสภาพฤดูกาลโดยเฉลี่ย (Average Seasonal Condition) และเป็นไป ตลอดอายุการใช้งานของทางจนถึงการวิบัติในปีที่ปีที่ f จะได้ว่า

$$\frac{N_f}{12} \sum_{i=1}^{12} \frac{1}{N_{ai}} = 1 \quad (2.16)$$

และ N_f จะคำนวณได้จาก

$$N_f = \frac{12}{\sum_{i=1}^{12} \frac{1}{N_{ai}}} = 1 \quad (2.17)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.16 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปใหม่ได้ตามสมการที่ 2.18 ซึ่งค่าเฉลี่ย ของค่าถ่วงน้ำหนักจะเท่ากับ 1

$$\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \frac{N_f}{N_{ai}} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} WF_i = 1 \quad (2.18)$$

Gomez-Azhecar และ Thompson (1984) ใช้ค่าถ่วงน้ำหนักประมาณสภาพฤดูกาล สำหรับการออกแบบงานทาง หรืออาจใช้ค่าถ่วงน้ำหนักนี้เพื่อหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของอุณหภูมิตลอดทั้งปี จากการศึกษาของ Elliott และ Thomson (1985) พบว่าค่าถ่วงน้ำหนักยังขึ้นอยู่กับความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตด้วย

Weighting Factor สำหรับโมดูลัสดินคันทาง

แม้ว่า Weighting Factor ที่เสนอโดย Gomez-Azhecar และ Thompson (1984) จะใช้วิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลในอุณหภูมิของทาง แต่วิธีนี้ก็ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับคุณสมบัติอย่างอื่นของทางได้ อย่างเช่นใช้ Weighting Factor เพื่อประเมินความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคันทางซึ่งทำให้ออกแบบงานทางได้เหมาะสมกับสภาพฤดูกาล จากรูปที่ 2.3 แสดงความผันแปรของค่า Weighting Factor ตลอดทั้งปี ค่าโมดูลัสของดินคันทางในเดือนที่มี WF_i เท่ากับ 1 จะถูกใช้เป็นค่าตัวแทนในการออกแบบ



รูปที่ 2.3 ค่าถ่วงน้ำหนักและสภาพฤดูกาลที่ใช้ออกแบบ(Design Season)

ที่มา : Guan, Drumm และ Jackson (1998)

เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.1 ใหม่จะคำนวณ N_{ai} ได้จาก

$$\frac{1}{N_{ai}} = \frac{1.18 \times 10^8 M_{Ri}^{-2.32}}{C} \quad (2.19)$$

เมื่อ C เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับ $SN \Delta PSI$ และระดับความเชื่อมั่นของการออกแบบงานทาง (Reliability Level) และ M_{Ri} คือโมดูลัสดินคันทางในเดือนที่ i ของปี และจากสมการที่ 2.17 จะได้ว่า

$$N_f = \frac{12C}{1.18 \times 10^8 \sum_{i=1}^{12} M_{Ri}^{-2.32}} \quad (2.20)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.19 และ 2.20 ลงในสมการที่ 2.11 จะได้ว่า

$$WF_i = \frac{12M_{Ri}^{-2.32}}{\sum_{i=1}^{12} M_{Ri}^{-2.32}} \quad (2.21)$$

เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักได้มาจากความผันแปรตามฤดูกาลของค่าโมดูลัสดินคันทาง 2.21 จากสมการที่ จะเห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการหาค่าโมดูลัสลงได้ เพราะความคลาดเคลื่อนนี้จะมีอยู่เท่าๆ กันทั้งในเศษและส่วนของสมการ นอกจากนี้ยังทำให้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงในชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางต่อความผันแปรตามฤดูกาลของคันทางมีมากขึ้น (Guan et al., 1998)

ค่า M_R ที่ผันแปรตามฤดูกาลสามารถหาได้ในห้องทดลองด้วยการทดสอบดินที่มีทำให้มีความชื้นโดยประมาณตามฤดูกาลจริง หรือได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายแล้วทำการคำนวณย้อนกลับ ซึ่งในที่นี้จะขอก้าวถึงในประเด็นหลัง

การหา Weighting Factor จากการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing, NDT)

สมการหาค่า M_R ด้วยการคำนวณย้อนกลับจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายที่เสนอโดย AASHTO (1993) เป็นดังนี้

$$M_{Ri} = \frac{0.24P}{d_{ri}} \quad (2.22)$$

โดยที่

P = น้ำหนักกระทำ

d_{ri} = ค่าการแอ่นตัวที่วัดได้จากระยะ r สำหรับเดือนที่ i

r = ระยะ r ที่วัดค่าการแอ่นตัว

เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อค่าการแอ่นตัวที่วัดได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลาย แต่อย่างไรก็ตามการหาค่า M_R จากสมการที่ 2.22 นั้นจะอาศัยข้อเท็จจริงที่ว่า ณ จุดที่มีระยะห่างระยะหนึ่งจากจุดศูนย์กลางของการกดน้ำหนัก (Loading) ค่าการแอ่นตัวที่วัดได้จะเป็นผลมาจากการแอ่นตัวของคันทางเกือบทั้งหมด ดังนั้นหากกำหนดระยะห่างที่เหมาะสมจากจุดศูนย์กลางของการกดน้ำหนักแล้วจะช่วยลดผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิได้ ซึ่ง AASHTO (1993) ได้แนะนำหลักในการเลือกระยะ r ที่น้อยที่สุดไว้

สมมติว่าใช้เครื่องทดสอบแบบไม่ทำลายเดียวกันทดสอบตลอดทั้งปี จะแทนสมการที่ ลงในสมการที่ซึ่งจะได้

$$WF_i = \frac{12d_{ri}^{2.32}}{\sum_{i=1}^{12} d_{ri}^{2.32}} \quad (2.23)$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าถ่วงน้ำหนักจะการทดสอบแบบไม่ทำลายตลอดปีได้ และการทดสอบควรจะทำในพื้นที่ต่างๆ กันในแต่ละภูมิภาคเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมในการออกแบบ

2.1.5 ค่าการแอ่นตัวของทาง (Pavement Deflection)

ค่าการแอ่นตัวของทาง คือ ลักษณะการยุบตัวในแนวตั้งแบบ Transient Deformation เมื่อทางถูกกระทำโดยน้ำหนักหรือแรง การแอ่นตัวนี้จะเกิดขึ้นสูงกับทางลาดยาง และหลังจากที่น้ำหนักผ่านไป การแอ่นตัวก็หายไปด้วย รูปร่างของถนนก็จะกลับสู่สภาวะเดิม หากทางมีโครงสร้างที่แข็งแรงไม่ถูกทำลายโดยน้ำหนักหรือแรงที่กระทำ เราเรียกลักษณะการแอ่นตัวแบบนี้ว่า Elastic Deflection

ค่าของ Elastic Deflection อันเกิดจากน้ำหนักของการจราจร จะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้คือ

1. ลักษณะ น้ำหนักและปริมาณของการจราจร
2. ลักษณะของโครงสร้างของทาง อันหมายถึงความแข็งแรงและความหนาของโครงสร้างทาง
3. ความแข็งแรงของคันทาง
4. ปัจจัยแวดล้อม (Environment) ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำและการระบายน้ำ เป็นต้น

2.1.6 อุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์

ความแข็ง (Stiffness) ของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญซึ่งมีผลต่อความสามารถรับน้ำหนักของโครงสร้างทางลาดยาง ความแข็งของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนี้เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิซึ่งผันแปรไปตามเวลา โดยเมื่ออุณหภูมิของผิวทางแอสฟัลต์เพิ่มขึ้นความแข็งจะลดลงและมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกลดลงตามไปด้วย ทำให้มีแรงเค้นสูงส่งผ่านไปยังชั้นพื้นทางและคันทางตามลำดับ เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นพื้นทางและคันทางจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนไปตามสภาพความเค้น โดยมวลรวม(Granular Materials) จะแข็งมากขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นมวลรวม แต่สำหรับดินเม็ดละเอียด(Cohesive Soil) จะอ่อนลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น (Huang,1993) จะเห็นว่าความแข็งของแต่ละชั้นทางจะผันแปรตามและผูกพันกับอุณหภูมิของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ในการออกแบบงานทาง ผลของอุณหภูมิต่างที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาต่อความแข็งแรงของโครงสร้างทาง แสดงว่าความเสียหายของทางจะไม่เป็นไปอย่างสม่ำเสมอหรือเท่ากันตลอดทั้งปี ดังนั้นถ้าจะออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นให้มีประสิทธิภาพดี ควรพิจารณาผลของอุณหภูมินี้ร่วมด้วย สำหรับงานบำรุงรักษาทาง การพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างทางในช่วงเวลาใดช่วงเวลานึง ต้องมีการปรับแก้ผลของอุณหภูมิต่างกันให้เปรียบเทียบกันได้ จึงมีความจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความแข็งแรงของแต่ละชั้นทาง และวิธีคำนวณหาอุณหภูมิของชั้นทางโดยตรงจากข้อมูลสภาพอากาศ

Shell (1990) ได้แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับค่าความแข็งของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และปริมาณวัสดุมวลรวม จากการศึกษาพบว่า การเสียรูปร่างอย่างถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตจะต้องพิจารณาในช่วงที่ความแข็งมีค่าต่ำๆ คือในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงหรือช่วงที่มีน้ำหนักกระทำเป็นเวลานาน และเมื่อค่าความแข็งของแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าน้อยกว่า 5×10^5 Pa แอสฟัลต์คอนกรีตจะมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนมากกว่าในช่วง

อีลาสติก ทั้งนี้เนื่องจากจะขึ้นกับปัจจัยดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังขึ้นกับขนาดของวัสดุรวมรวม รูปร่าง และการยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดวัสดุ รวมทั้งคุณภาพของการบดอัด

การปรับแก้อุณหภูมิ (Temperature Correction)

จากวิธีประมาณค่าอุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่กล่าวมาข้างต้น สิ่งสำคัญต่อมา ก็คือต้องหาความสัมพันธ์ที่จะทำให้ทราบถึงความแข็งของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิใด อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งจะได้ทั้งในห้องทดสอบและทดสอบในสนามด้วย FWD และเพื่อประโยชน์ในการออกแบบงานทาง จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่าที่วัดได้ เช่น ค่าอีลาสติกโมดูลัส และ ค่าการแอ่นตัว เป็นต้น ให้ตรงกับอุณหภูมิมาตรฐานหรืออุณหภูมิอ้างอิง

อุณหภูมิเทียบเท่า (Equivalent Temperature)

เป็นประเด็นที่ถกเถียงกันอย่างกว้างขวางว่าควรใช้อุณหภูมิใดเป็นตัวแทนของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมดบางวิธีก็ใช้อุณหภูมิที่ความลึกใดความลึกหนึ่ง ในขณะที่บางส่วนก็ใช้ อุณหภูมิเฉลี่ย ความลึกที่เหมาะสมในการวัดอุณหภูมิขึ้นอยู่กับความหนาของผิวแอสฟัลต์คอนกรีต การศึกษาในเบื้องต้นพบว่าอุณหภูมิค่าเดียวที่จะอธิบายอุณหภูมิของผิวทางทั้งหมดได้ดีที่สุดก็คืออุณหภูมิที่ความลึก 30-60% ของความหนาทั้งหมด

จากการศึกษาของ Baltzer และ Jansen (1994) พบว่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและ โมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตจะแตกต่างกันตามการร้อนขึ้น (Heating) และเย็นตัวลง (Cooling) ที่ความลึกประมาณหนึ่งในสามของความลึกทั้งหมดความสัมพันธ์นี้ในทั้งสองช่วงเวลาจะมี ลักษณะคล้ายกัน แสดงว่าอุณหภูมิที่ความลึกหนึ่งในสามเหมาะที่จะเป็นอุณหภูมิเทียบเท่าของ โมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีต อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาของ Inge และ Kim (1993) แย้งว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่ดีเท่ากับความสัมพันธ์ของโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตกับอุณหภูมิที่ กึ่งกลางความหนา

AASHTO (1986) แนะนำให้ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ผิว กึ่งกลาง และล่างสุดของ ชั้นผิวทางแอสฟัลต์ แต่ต่อมาเมื่อพิจารณาการแผ่ของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ร่วมด้วย Van Gurp (1994) จึงเสนอให้ใช้อุณหภูมิเทียบเท่าที่ได้ด้วยการหาผลรวมหรืออินทิเกรชัน (Integration) ของ Temperature Gradient และความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

แบบจำลองการปรับแก้ค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Modulus Correction Models)

ASSHTO (1986) แนะนำว่าเมื่อทำการทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อวัดค่าการแอ่นตัวในสนามเพื่อหาค่าโมดูลัสของโครงสร้างทางแต่ละชั้นด้วยการวิเคราะห์จากลักษณะของการแอ่นตัว (Deflection Basin Analysis) สำหรับชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิที่ทำการทดสอบค่าโมดูลัสที่ได้ในสนาม จำเป็นต้องปรับแก้เพื่อให้ได้เป็นค่ามาตรฐานที่อุณหภูมิ 70°F

คุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์โดยเฉพาะค่าอีลาสติกโมดูลัสจะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง จึงจำเป็นต้องปรับแก้เพื่อให้ได้เป็นค่ามาตรฐานที่อุณหภูมิ 70°F โดยการใช้ข้อมูลดังนี้

1. อุณหภูมิที่ผิวทางที่ทำการทดสอบแบบไม่ทำลาย
2. ค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ย 5 วัน ณ จุดที่ทำการทดสอบ
3. ความหนาของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต

Lee, Mahoney และ Jackson (1988) เสนอแบบจำลองยกกำลังเพื่อประมาณค่าโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตดังนี้

$$E_T = \frac{322,000}{E^{1.591}} \quad (2.24)$$

โดยที่

E_T = โมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (ksi)

T = อุณหภูมิของผิวทาง (°F)

ค่าปรับแก้โมดูลัสหาได้จากอัตราส่วนของโมดูลัสที่อุณหภูมิใดๆ ระหว่าง 30 °F – 120 °F ต่อโมดูลัสที่อุณหภูมิ 70°F

แบบจำลองอีกแบบหนึ่งของ Baltzer และ Jansen (1994) ซึ่งเหมาะจะใช้ปรับแก้อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 5-30 °C มีรูปแบบดังนี้

$$E_{ref} = 10^{-0.018(T_{ref}-T_{AC})} E_{AC} \quad (2.25)$$

โดยที่

T_{ref} = อุณหภูมิอ้างอิง (°ซ)

E_{ref} = ค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตอ้างอิง (MPa)

T_{AC} = อุณหภูมิของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ความหนาหนึ่งในสามขณะทดสอบด้วย FWD (°ซ)

E_{AC} = ค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตจากการคำนวณย้อนกลับ (MPa)

เช่นเดียวกับแบบจำลองของ Kim, Hibbs และ Lee (1995)

$$E_{68} = 10^{0.0153(T-T_{68})} E_T \quad (2.26)$$

เมื่อ

E_{68} = ค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตปรับแก้ที่อุณหภูมิ 20°ซ (68 °ฟ)

E_T = ค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตจากการคำนวณย้อนกลับที่อุณหภูมิ T (°ฟ)

T = อุณหภูมิที่กึ่งกลางความหนาของแอสฟัลต์คอนกรีต (°ฟ) ขณะทำการทดสอบด้วย FWD

มีความแตกต่างระหว่างสองแบบจำลองนี้อยู่บ้างเนื่องจากตำแหน่งของสายทางที่ทดสอบและชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์

แบบจำลองการปรับแก้ค่าการแอ่นตัว (Deflection Correction Model)

การหาค่าปรับแก้ค่าการแอ่นตัวมีความยุ่งยากมากกว่าการปรับแก้ค่าโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์เนื่องจากการแอ่นตัวเป็นผลมาจากโครงสร้างทางทั้งหมด จากการศึกษาของ Johnson และ Baus (1992) พบว่าค่าการแอ่นตัวที่ปรับแก้ตามวิธีของ AASHTO (1986) ยังคงแสดงผลของอุณหภูมิ Kim et al. (1995) ได้ใช้ Alternative Method เพื่อปรับแก้ค่าการแอ่นตัวสูงสุดให้เป็นที่อุณหภูมิมาตรฐาน ดังสมการ

$$D_{68} = 10^{\alpha(68-T)} D_T \quad (2.27)$$

เมื่อ

D_{68} = ค่าการแอนตัวรับแก้ที่อุณหภูมิ 20°C (68°F)

D_T = ค่าการแอนตัวที่วัดได้ที่อุณหภูมิ T (°F)

$\alpha = 3.67 \times 10^{-4} * t^{1.4635}$ สำหรับร่องล้อ หรือ $3.65 \times 10^{-4} * t^{1.4241}$ สำหรับกึ่งกลางช่องทาง

t = ความหนาของผิวทางแอสฟัลต์

T = อุณหภูมิที่กึ่งกลางความหนาของแอสฟัลต์คอนกรีต (°F) ขณะทดสอบด้วย FWD

2.1.7 ความชื้นในดินคันทาง

การเคลื่อนที่และการกระจายของความชื้นในดินใต้ผิวทาง

เมื่อผิวดินถูกปู้ทับด้วยผิวทาง จะทำให้การแทรกซึมของน้ำจากฝนที่ตกลงบนผิวทาง เป็นไปได้ได้น้อยลง และถ้าวัสดุที่ใช้ปูผิวทางสามารถกั้นการรั่วซึมของน้ำได้จะส่งผลให้ในวันที่ฝนตก ปริมาณความชื้นที่อยู่ตรงกลางใต้ผิวทางจะมีน้อยกว่าที่บริเวณขอบของผิวทาง แต่ในทางกลับกัน ในวันที่ฝนไม่ตกหรือมีอากาศแห้ง ปริมาณความชื้นที่อยู่ตรงกลางใต้ผิวทางจะมีมากกว่าที่บริเวณ ขอบของผิวทาง ความแตกต่างของความชื้นระหว่างสองบริเวณนี้จะขึ้นอยู่กับการนำความชื้น (Hydraulic Conductivity) ของดินแต่ละชนิด ซึ่งจะอธิบายได้จากผลการศึกษาคความผันแปรตาม ฤดูกาลของความชื้นในดินของ Russam (1970)

พีชริมทางก็ถือว่ามึบทบาทสำคัญต่อกระบวนการดูดความชื้นออกจากดิน ระบบรากของ ต้นไม้สามารถดูดความชื้นออกจากดินคันทางด้วยการแพร่ผ่านเข้าสู่ราก ความสามารถดูด ความชื้นนี้ขึ้นอยู่กับทั้งฤดูกาลและชนิดของต้นไม้

Russam (1970) เสนอการแบ่งประเภทของดินคันทางตามระดับน้ำใต้ดิน (Water Table Depth) และปริมาณน้ำฝนในรอบปี (Annual Rainfall) เช่นเดียวกับ Yoder และ Witczak (1975) ที่แบ่งดินคันทางออกเป็น 3 ประเภทด้วยกันดังนี้

ประเภทที่ 1 เป็นดินคันทางที่มีระดับน้ำใต้ดินใกล้เคียงกับระดับที่ผิวดิน หรือที่ความลึก น้อยกว่า 20 ฟุต 10 ฟุตและ 3 ฟุต สำหรับดินคันทางที่เป็นดินเหนียว (Clay) ดินเหนียวละเอียด (Silt) และดินทราย (Sand) ตามลำดับ ความผันแปรของความชื้นจะขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของ ระดับน้ำใต้ดิน

ประเภทที่ 2 เป็นดินคันทงที่มีระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าที่กำหนดไว้ในประเภทที่ 1 และมีปริมาณน้ำฝนในรอบปีมากกว่า 10 นิ้ว ความผันแปรของความชื้นในดินประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับความผันแปรตามฤดูกาลของปริมาณน้ำฝน

ประเภทที่ 3 เป็นดินคันทงที่มีระดับน้ำใต้ดินต่ำมากและมีปริมาณน้ำฝนในรอบปีน้อยกว่า 10 นิ้ว ความชื้นในดินประเภทนี้จะแตกต่างกันเล็กน้อยกับดินที่ไม่มีผิวทางปูทับเมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกเดียวกัน

การประมาณความชื้นในดินคันทงที่เป็นดินประเภทที่ 1 นั้นจะพิจารณาจากระดับน้ำใต้ดินเพียงอย่างเดียว โดยอาศัยสมมติฐานสำคัญที่ว่าผิวทางสามารถกั้นการซึมน้ำได้ อย่างไรก็ตามระดับน้ำใต้ดินนี้ก็มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนเช่นกัน และจากความเป็นจริงผิวทางส่วนใหญ่ที่ไม่สามารถกั้นน้ำซึมได้ทั้งหมด เนื่องจากอาจจะมีรอยแตกร้าว (Crack) อยู่บ้าง ซึ่งทำให้น้ำซึมผ่านได้

การวิเคราะห์ทางสถิติของความชื้นในดินคันทงโดยอาศัยปริมาณน้ำฝน

เนื่องจากมีข้อจำกัดหลายประการในการใช้แบบจำลองเพื่อหาปริมาณความชื้นในดิน การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลที่เกี่ยวข้องในสนามจึงถูกนำมาใช้แทนมากขึ้น นักวิจัยส่วนใหญ่จึงพยายามหาความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างปริมาณน้ำฝนและความผันแปรของความชื้น แต่ต่างก็ได้ข้อสรุปเหมือนกันว่าไม่มีใหญ่จึงพยายามหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนและความผันแปรของความชื้น เหตุผลส่วนหนึ่งเป็นเพราะไม่มีเครื่องมือที่ดีพอ และข้อมูลปริมาณน้ำฝนก็ได้มาจากสถานีวัดที่อยู่ใกล้เคียง ไม่ใช่ที่วัดได้ในสนามขณะนั้นโดยตรงซึ่งมีค่าแตกต่างกัน

นอกจากนี้พบว่ายังมีความเหลื่อม (Lag) ระหว่างเวลาที่ฝนตกและความชื้นที่ผันแปรตามซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3 สัปดาห์ไปจนถึง 2 เดือน Bandyopadhyay และ Frantzen (1983) จึงเสนอวิธี Cross-Correlation ซึ่งเป็นวิธีทางสถิติที่สามารถหาความเหลื่อมของเวลานี้ได้โดยมีค่าประมาณ 3 สัปดาห์ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความเหลื่อมนี้ ได้แก่

รอยแตกร้าว

จำนวนและขนาดของรอยแตกร้าวบนผิวทางจะมีผลต่ออัตราการไหลซึมของน้ำฝน

ความหนาของผิวทาง

ความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีผลต่อพฤติกรรมของคันทาง จากการศึกษาของ Elliott และ Thomson (1985) พบว่าผิวทางที่มีความหนามากกว่า 6 นิ้ว ฤดูฝนจะถือเป็นฤดูกาลวิกฤต (Critical Season) มีผลต่อพฤติกรรมของคันทางมากที่สุด ส่วนผิวทางที่มีความหนาน้อยกว่า 6 นิ้ว ฤดูฝนจะถือเป็น Critical Season

การระบายน้ำของพื้นทาง

วัสดุชั้นพื้นทางที่มีความสามารถในการระบายน้ำดี จะช่วยระบายน้ำจากการไหลซึมมาจากรอยแตกของผิวทาง และช่วยป้องกันไม่ให้มีน้ำเกาะอยู่บริเวณรอยต่อกับคันทาง จึงช่วยลดปริมาณน้ำที่จะซึมลงสู่คันทางได้

ความลาดเอียงของไหล่ทาง

ความลาดเอียงของไหล่ทางมีผลต่อปริมาณความชื้นของคันทาง ความลาดเอียงที่พอเหมาะจะระบายน้ำฝนออกจากผิวทางได้เร็ว และลดปริมาณน้ำที่จะซึมลงสู่คันทาง ทำให้คันทางมีความชื้นต่ำ และมีความเหลือมระหว่างเวลาที่ฝนตกกับการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดินคันทาง

สภาพภูมิประเทศ

น้ำฝน (Runoff) จะไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำเนื่องจากแรงโน้มถ่วง เป็นผลให้ดินในบริเวณแอ่งหรือที่ราบลุ่มส่วนใหญ่มีความชื้นสูงกว่าบริเวณอื่นๆ

ความเข้ม(Intensity) และระยะเวลา (Duration) ของฝน

ความเข้ม (Intensity) และระยะเวลา (Duration) ที่ฝนตกก็มีผลต่อความชื้นดินคันทาง เช่นเดียวกัน ฝนที่มีความเข้มสูงกว่าจะทำให้มีความแตกต่างมากขึ้นระหว่างความชื้นของดินที่อยู่ใต้ผิวทางและความชื้นของดินที่ไม่ถูกปกคลุม (Uncover Ground) และความแตกต่างนี้จะทำให้ดินใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นในการปรับความชื้นให้อยู่ในสภาพสมดุล

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Vaswani (1975) ได้ทำการศึกษาปริมาณความชื้นในดินคันทาง เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างทาง เขาได้ทำการวัดปริมาณความชื้นทั้งภายในดินคันทางของถนนที่แบ่งประเภทตั้งแต่ก่อสร้างเสร็จใหม่ถึงถนนที่มีอายุใช้งานมาแล้ว 10 ปี ทั้งนี้ได้พิจารณาถึงปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิของอากาศด้วย

ผลการศึกษารูปได้ว่าการบดอัดและความหนาแน่นของดินคันทางที่สูงจะทำให้ดินมีปริมาณความชื้นน้อย และสภาพภูมิอากาศ เช่น ฝนตก หิมะ และอุณหภูมิ มีผลต่อปริมาณความชื้นนี้ด้วย โดยความผันแปรของความชื้นในดินใต้ผิวถนนจะมีมากที่สุด รองลงไปที่คือ ไหล่ทางที่ปูด้วยหินคละหนา 10 ซม. และ ไหล่ทางที่ปูด้วยหินคละหนา 15-23 ซม. ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลของหิมะที่ปกคลุม และการนำความร้อนที่ดีกว่าของวัสดุพูนและวัสดุมวลรวมเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีต นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าใช้น้ำมันผิวทางถูกระบายออกทางด้านข้างจะทำให้ดินคันทางชั้นบนมีความชื้นน้อยกว่าดินคันทางในชั้นล่าง แต่ในทางกลับกันถ้าน้ำไหลซึมลงสู่ผ่านลงสู่ถนนจะทำให้ดินคันทางชั้นบนมีความชื้นมากกว่าดินคันทางในชั้นล่าง

สำหรับถนนที่สร้างเสร็จใหม่ ปริมาณน้ำฝนที่มีจะทำให้ความชื้นในดินคันทางจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงระดับหนึ่ง อัตราการเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่น การบดอัด และขนาดคละของดิน และหลังจากระดับที่ดินเกือบอิ่มตัวนี้อัตราการเพิ่มของความชื้นจะลดลง และความชื้นนี้จะแปรผันกับการแผ่ของอุณหภูมิ (Temperature Gradients) แทน และสำหรับถนนที่มีอายุมากกว่า 10 ปี ความชื้นในดินคันทางแทบจะเปลี่ยนแปลงและไม่ขึ้นกับความผันแปรของอุณหภูมิ

Lindy และ White (1989) ได้ทำการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วย FWD บนถนนลาดยาง 15 สายทางที่มีชนิดของดินคันทางเป็นดินเหนียว ไปจนถึงทรายในฤดูฝน (Spring Thaw) และฤดูร้อน และทำการวัดค่าการแอ่นตัวที่ระยะห่างจากแผ่นกดน้ำหนัก (Load Plate) เท่ากับ 5 ฟุต และ 7 ฟุต ตามลำดับ เพื่อหา M_R ตามวิธีของ AASHTO (1986)

จากการศึกษาพบว่าค่าโมดูลัสดินคันทาง (E_{sg}) ที่คำนวณจากสมการที่ 2.22 จากการทดสอบในฤดูร้อนมีค่าใกล้เคียงกับโมดูลัสดินคันทางประสิทธิผล (M_R) ที่คำนวณได้ตามหัวข้อที่ 2.1.2 โดยค่าเฉลี่ยทั้ง 15 สายทางของ M_R ที่ได้จากตัวเซนเซอร์ที่ระยะ 5 ฟุต คิดเป็น 96% ของค่าเฉลี่ยทั้ง 15 สายทางของ E_{sg} และที่ตัวเซนเซอร์ที่ระยะ 7 ฟุต ค่าเฉลี่ยของ M_R ที่ได้คิดเป็น 93% ของค่าเฉลี่ยของ E_{sg} จากความสัมพันธ์นี้ทำให้สามารถใช้ E_{sg} แทน M_R ได้ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลของ E_{sg} ในฤดูอื่น ทั้งนี้การใช้ควรคำนึงถึงปัจจัยอื่นด้วย

นอกจากนี้ผู้ศึกษายังพบว่าค่าเฉลี่ยของ E_{sg} ในฤดูฝนมีค่าประมาณ 79-87% ของค่าเฉลี่ยของ E_{sg} ในฤดูร้อน ไม่ไต่ 20-50% ดังที่ AASHTO แนะนำไว้

Newcomb, Lee, Mahoney และ Jackson (1989) ได้ทำการศึกษาพฤติภาพของถนนเพื่อใช้ในการออกแบบงานทาง ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาถึงผลกระทบของความผันแปรของฤดูกาลที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุชั้นทาง โดยใช้ FWD เพื่อเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้อง และจากการศึกษาสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

ความผันแปรตามฤดูกาลของดินชั้นรองพื้นทางมีมากกว่าความผันแปรของดินคันทาง ซึ่งผลที่ได้นี้ขัดกับแนวคิดเดิมที่ว่าความผันแปรตามฤดูกาลจะกระทบต่อพฤติกรรมของดินคันทางมากกว่า อย่างไรก็ตามความผันแปรตามฤดูกาลต่อโครงสร้างของทางจะมีมากในส่วนบนตั้งแต่ 1.5 เมตรขึ้นไปดังนั้นในการออกแบบควรจะต้องพิจารณาความผันแปรนี้ในดินชั้นนี้มากกว่าดินคันทางในชั้นต่ำกว่า 1.5 เมตร

เมื่อพล็อตข้อมูลระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโมดูลัสดินคันทาง พบว่าได้ความสัมพันธ์ในเชิงบวก (Increasing Relationship) นอกจากนี้ยังพบว่าความผันแปรของโมดูลัสดินคันทางตามระยะทางที่ทดสอบมากกว่าความผันแปรของโมดูลัสดินคันทางตามฤดูกาล

Noureldin (1994) ได้ทำการศึกษาในภาพรวมถึงผลกระทบของระดับความเค้น และความผันแปรตามฤดูกาลที่มีต่อพฤติกรรมของชั้นทางในประเทศซาอุดีอาระเบีย โดยทำการทดสอบด้วย FWD บนร่องล้อด้านนอก (Outer Wheelpath) ของช่องทางรถบรรทุกทั้งหมด 21 จุด ทดสอบช่วงละ 50 เมตรรวมเป็นระยะทาง 1 กิโลเมตร แล้วทำการวิเคราะห์ใน 3 ประเด็นหลักคือผลกระทบของระดับความเค้นและความผันแปรของอุณหภูมิ ผลกระทบของน้ำหนักจราจรสะสม (ESALs) และผลกระทบของความผันแปรของความชื้น ต่อตัวแปรต่าง ได้แก่

- ค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางน้ำหนัก (Center deflection, D_0)
- โมดูลัสรวมของชั้นทางทั้งหมด(E_0) โดยสมมติให้โครงสร้างทางเป็นแบบชั้นเดียว
- โมดูลัสของคันทาง (M_R)
- โมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์ (E_{AC})
- โมดูลัสของชั้นพื้นทาง(E_g)
- AASHTO Effective Structural Number, SN_{eff}

จากผลการศึกษาพบว่า

1. ระดับความเค้นมีผลกระทบต่อ M_R มากที่สุด รองลงมาคือ E_g , E_{AC} และ SN_{eff} ตามลำดับ ในทางกลับกันอุณหภูมิมีผลต่อ E_{AC} มากที่สุด รองลงมาคือ D_0 , SN_{eff} , E_g และ MR ตามลำดับ โดยที่ความไวต่ออุณหภูมิของ M_R และ E_g จะเป็นผลเนื่องมาจากความไวต่อความเค้นและการลดลงของ E_{AC} เนื่องจากอุณหภูมิ
2. น้ำหนักจรรยาจรสะสมในสภาพทางที่แห้งจะส่งผลกระทบต่อ E_{AC} , D_0 , E_g , SN_{eff} และ M_R
3. ส่วนปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อทั้ง MR , E_g , D_0 , E_{AC} และ SN_{eff} ในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน

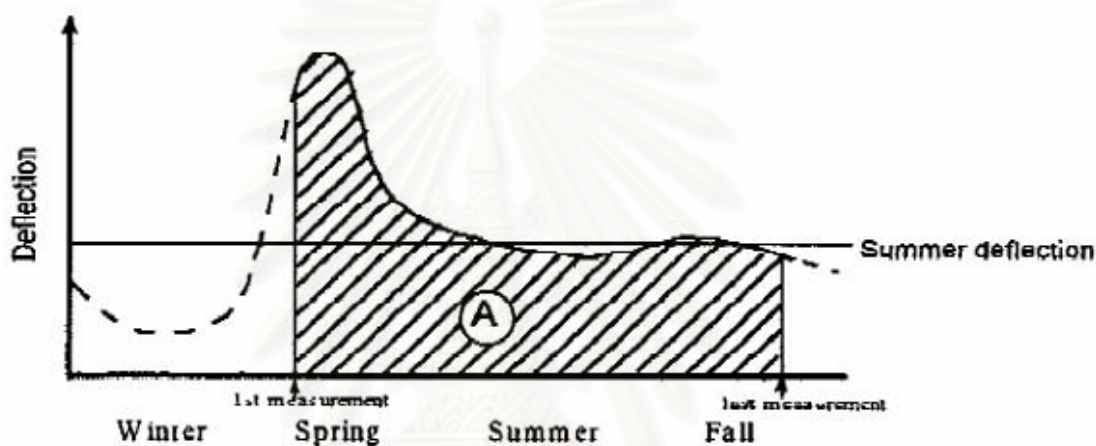
นอกจากนี้พฤติกรรมของชั้นทางที่ส่วนทดสอบ (Section) เดียวกันจะมีความแตกต่างกันเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิ ระดับความชื้น และน้ำหนักจรรยาจรสะสมที่เพิ่มขึ้น โดยในส่วนทดสอบเดียวกัน SN_{eff} จะมีความผันแปรต่ำสุดในขณะที่ E_g มีความผันแปรมากที่สุด

Samson และ Frechette (1995) ทำการศึกษาความผันแปรตามฤดูกาลของความสามารถในการรับน้ำหนัก (Bearing Capacity) และความแข็งแรง (Strength) ของโครงสร้างทางลาดยางทั้งสี่ 65 สายทางในประเทศแคนาดา และได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความผันแปรตามฤดูกาลของค่าการแอ่นตัวกับปัจจัยต่างๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างทาง โดยเสนอการใช้ตัวชี้วัดความผันแปรใน 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

1. Profile Area Ratio (PAR) หาได้จากอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟความผันแปรของค่าแอ่นตัวกลาง ต่อพื้นที่ใต้กราฟค่าแอ่นตัวอ้างอิงซึ่งวัดได้ในฤดูร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ ข้อดีของการใช้ค่า PAR คือ
 - ใช้แสดงความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอ่นตัวกลางโดยการใช้ค่าแอ่นตัวอ้างอิง ค่า PAR สูงแสดงว่าสายทางมีความผันแปรตามฤดูกาลมาก
 - แสดงถึงความคลาดเคลื่อนจากการใช้ค่าแอ่นตัวอ้างอิง ในการออกแบบและประเมินสภาพทาง เมื่อพิจารณาถึงความผันแปรตามฤดูกาล

ส่วนข้อเสียของการใช้ค่า PAR คือ

- บอกความแตกต่างระหว่างความผันแปรของค่าแอมป์กลางที่มีลักษณะโค้งสูงแต่แคบ(ระยะเวลาสั้น) กับโค้งสูงคุดน้อยแต่ฐานกว้าง(ระยะเวลานาน)ไม่ได้
- แสดงความแตกต่างระหว่างถนนที่เสื่อมสภาพ(ค่าการแอมป์ตัวมาก) กับถนนที่มีความแข็งแรง(ค่าการแอมป์ตัวน้อย) ไม่ได้
- ไม่มีการจำกัดขอบเขตช่วงเวลาที่จะเริ่มและสิ้นสุดการทดสอบ



รูปที่ 2.4 การหาค่า Proile Area Ratio (PAR)

ที่มา : Samson และ Frechette (1995)

- อัตราส่วนระหว่างค่าแอมป์สูงสุดต่อค่าแอมป์อ้างอิง (D_{max}/D_{summer}) เป็นตัวบ่งชี้ที่ไม่คำนึงถึงลักษณะความผันแปรของค่าแอมป์กลาง ว่าจะมีค่าสูงสุดเมื่อไหร่อย่างไร ข้อดีของตัวบ่งชี้ชนิดนี้คือ ง่ายต่อการหาการเสื่อมสภาพของสายทางในฤดูฝน ที่อัตราส่วนระหว่างค่าแอมป์ต่อค่าแอมป์อ้างอิงสูง แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถอธิบายถึงความผันแปรที่มีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป (ไม่มีจุดที่ค่าแอมป์กลางมีค่าสูงที่ชัดเจน)
- ดัชนีความผันแปร (VI) เป็นวิธีที่อาศัยค่าทางสถิติโดยการใช้ค่าแอมป์อ้างอิง ดัชนีความผันแปรเป็นส่วนกลับของค่า Modified Standard Deviation ซึ่งเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ใช้ค่าแอมป์อ้างอิงเป็นค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลแทน ดัชนีความผันแปรที่มีค่าน้อยแสดงว่ามีความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอมป์ตัวมาก แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือความถูกต้องที่ได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลและความถี่ของการทดสอบ

ผลการศึกษาพบว่าความผันแปรตามฤดูกาลของค่าการแอ่นตัวขึ้นกับความหนาของโครงสร้างทางทั้งหมด ความหนาของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต และความอ่อนไหวของดินคันทางจากการละลายของน้ำแข็ง (Frost Susceptibility) แต่ไม่ขึ้นกับปริมาณน้ำฝน และปริมาณจลาจลในรูปน้ำหนักเพลามาตรฐาน (ESALs)

Ali และ Parker (1996) อธิบายด้วยสมการกลศาสตร์ว่าเนื่องจากอีลาสติกโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพื่อขึ้น และอุณหภูมิของผิวทางก็จะขึ้นกับอุณหภูมิของอากาศอีกทีหนึ่งซึ่งผันแปรตลอดทั้งปีด้วยรูปแบบไซน์ (Sinusoidal Pattern) ดังแสดงในสมการที่ และอีลาสติกโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตก็น่าจะผันแปรไปในรูปแบบนี้ด้วย

$$E_{AC} = A + B\sin(2\pi fT + C) \quad (2.29)$$

โดยที่

E_{AC} = อีลาสติกโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีต

A = ค่าเฉลี่ย

B = Amplitude

T = ช่วงเวลาที่ทดสอบ (เช่น 1 เดือน หรือ 1 ปี)

f = ความถี่ของการทดสอบ (เช่น 1/12 สำหรับทุกเดือนในรอบ 1 ปี)

C = เฟสระหว่างจุดเริ่มและจุดยอดของเส้นโค้งไซน์

แต่สำหรับโมดูลัสดินคันทางจะอธิบายทางกลศาสตร์ยุ่งยากกว่าอีลาสติกโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีต เพราะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำฝน ระดับน้ำใต้ดิน การระบายน้ำของคันทาง อุณหภูมิ และการเกิดและละลายของน้ำแข็ง แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาของ Fredlund และ Rahardjo (1993) และ Ali และ Lopez (1996) พบว่าความผันแปรของโมดูลัสดินคันทางยังเป็นไปในรูปแบบไซน์เช่นเดียวกัน

เมื่อได้ความความผันแปรของอีลาสติกโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตและโมดูลัสดินคันทางในรูปแบบไซน์ดังกล่าว จึงได้แสดงการคำนวณหาความเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานของถนนด้วยเกณฑ์ความล้า (Fatigue Criteria) และเกณฑ์การเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent Deformation) ด้วยสมการการออกแบบของ Asphalt Institute (1982)

Hossain et al. (1996) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของความผันแปรของฤดูกาลที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุงานทางจากการวัดค่าแอนตัวด้วยเครื่องมือ FWD โดยทำการทดสอบทั้งสิ้น 7 สายทางซึ่งส่วนใหญ่มีชั้นคันทางเป็นดินเหนียว (Silty Clay) และเก็บข้อมูลเป็นเวลาหนึ่งปี (ตุลาคม 1993 ถึง กันยายน 1994)

จากการศึกษาสามารถสรุปผลการศึกษาว่าอุณหภูมิมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการแอนตัวที่วัดได้ และอุณหภูมิที่ผันแปรตลอดทั้งปีก็ส่งผลให้ค่าโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์เปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกัน เนื่องจากอุณหภูมิทำให้สภาพความเค้น (Stress) เปลี่ยนไปภายในโครงสร้างของทางขณะรับน้ำบรรทุก นอกจากนี้ยังพบว่าโมดูลัสของดินคันทาง (E_{sg}) มีค่าลดลงเมื่อทำการคำนวณย้อนกลับจากการทดสอบด้วย FWD ที่สภาพผิวทางร้อนจัด

และจากการทดสอบพบว่าเกือบทุกสายทางมีความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสและปริมาณความชื้นของดินคันทางเป็นไปในรูปโค้งแบบไซน์ (Sined-Shaped) แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิมีผลต่อโมดูลัสของดินคันทาง เนื่องจากดินมีพฤติกรรมที่ผันแปรตามความเค้น (Stress-Dependent) และความสัมพันธ์ของทั้งสองค่านี้ก็พบว่ามีความสัมพันธ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of Correlation) สูง

นอกจากนี้ยังพบว่าความผันแปรของปริมาณความชื้นในดินคันทางไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนเพียงอย่างเดียว เพราะจากข้อมูล มีหลายกรณีที่มีความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำฝนในแต่ละเดือนมากแต่กลับมีความแตกต่างระหว่างปริมาณความชื้นเพียงเล็กน้อย

ข้อเสนอแนะในการทดสอบของผู้ศึกษา

เนื่องจากผลที่ได้จากการทดสอบในแต่ละสายทาง มีความผันแปรระหว่างค่าการแอนตัวที่วัดได้ในผิวทางลาดยางจากค่าเฉลี่ยอยู่ถึง 9-36% แม้ว่าจะได้มีการปรับแก้อุณหภูมิ (Temperature Correction) แล้วก็ตาม แสดงว่ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอยู่จากการปรับแก้ด้วยค่าปรับแก้อุณหภูมิตามวิธีของ AASHTO (1986) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำมากๆ ผู้ศึกษาจึงได้ให้ใช้การปรับแก้ค่าการแอนตัว โดยเลือกเดือนกันยายนเป็นเดือนอ้างอิง เพราะมีอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวทางใกล้เคียง 20 องศาเซลเซียส ค่าปรับแก้นี้เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าการแอนตัวที่วัดได้จากเซนเซอร์ตัวแรกของ FWD ในเดือนอ้างอิงต่อค่าการแอนตัวที่วัดได้จากเซนเซอร์ตัวแรกของ FWD ในเดือนอื่นๆ

ค่าปรับแก้ที่เหมาะสมสำหรับใช้ศึกษาพฤติกรรมของถนนที่วัดค่าการแอนตัวได้สูงหรือต่ำมาก หรือใช้ตรวจสอบสภาพทางที่ออกแบบในแต่ละสภาพฤดูกาล อย่างไรก็ตาม การใช้วิธีนี้ควรคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ ด้วย

นอกจากนี้เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลกระทบบ่อน้ำข้างมากต่อค่าการแอ่นตัวของถนน เพื่อจะลดผลกระทบดังกล่าว ผู้ศึกษาจึงแนะนำว่าควรจะทำการศึกษา FWD ในตอนสายถึงบ่ายในช่วงปลายฤดูฝนถึงต้นฤดูหนาว และควรทดสอบในตอนเช้าถึงเที่ยงในช่วงฤดูร้อน หรือไม่ควรทดสอบเมื่อผิวทางลาดยางมีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 46 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า 19 องศาเซลเซียส และสำหรับผิวทางคอนกรีตไม่ควรทดสอบที่อุณหภูมิเกินกว่า 38 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า 24 องศาเซลเซียส

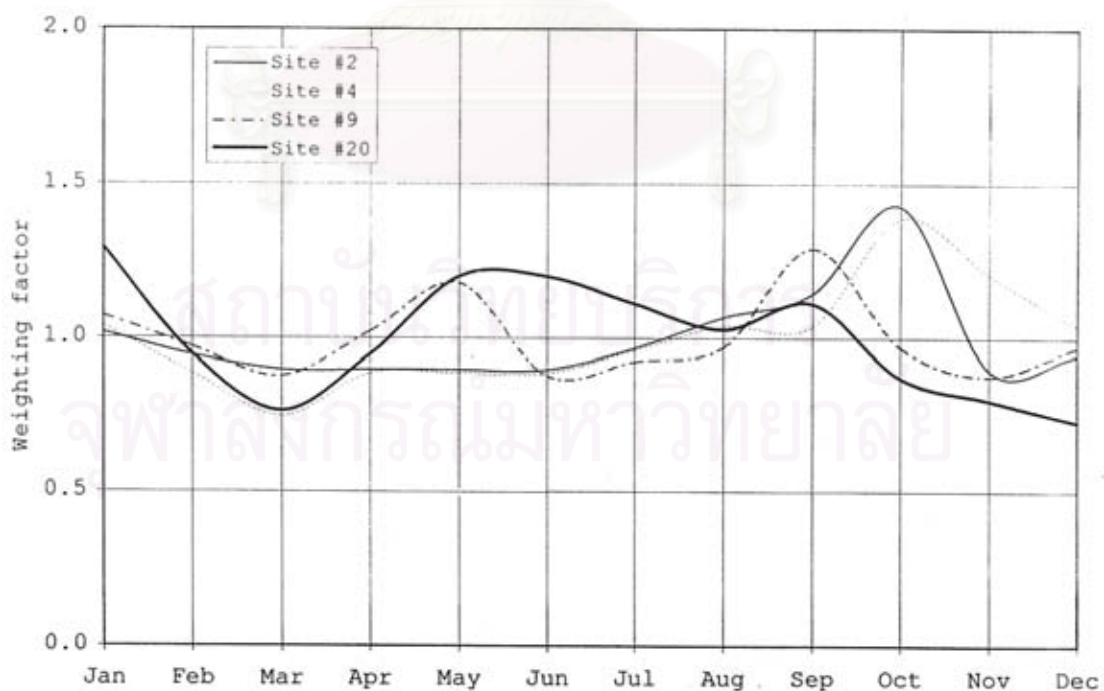
Long, Hossain และ Gisi (1997) ได้ทำการศึกษาความผันแปรตามฤดูกาลของค่าโมดูลัสดินคันทางที่คำนวณย้อนกลับจากการทดสอบด้วย FWD พบว่าค่าโมดูลัสของดินคันทางที่บดอัดแล้วมีความไว (Sensitive) ต่อความผันแปรตามฤดูกาลเนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นมากกว่าดินคันทางที่ไม่ได้รับการบดอัดหรือเป็นดินตามธรรมชาติ (Natural Soil)

ตารางที่ 2.1 ผลของช่วงเวลาในการทดสอบ FWD ต่อโมดูลัสดินคันทางประสิทธิผล

สายทาง	ช่วงเวลา (เดือน)	โมดูลัสดินคันทางประสิทธิผล (MPa)	
		MODULUS	AASHTO
K-18	1	86	92
	2	87	99
	3	88	92
	4	88	99
K-113	1	177	138
	2	170	132
	3	188	144
	4	170	122
US-160	1	108	99
	2	170	98
	3	106	114
	4	118	98
US-283	1	145	142
	2	143	140
	3	151	153
	4	145	157

และเนื่องผู้ศึกษาเห็นว่าการทดสอบด้วย FWD ในทุกๆ เดือน ต้องใช้งบประมาณ แรงงาน และเวลาค่อนข้างมาก จึงคำนวณค่า M_R โดยลดช่วงเวลาที่ทดสอบลงเป็น 2 3 และ 4 เดือน ผลการคำนวณแสดงตามตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าค่า M_R ที่ได้จากทั้งสี่ช่วงเวลาทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นผู้ศึกษาจึงแนะนำว่าในการศึกษาค่า M_R ควรทดสอบด้วย FWD ด้วยความถี่อย่างน้อยสาม ครั้งต่อปี หรือ 4 เดือนครั้ง

Guan et al. (1998) ได้ศึกษาถึงการนำค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับค่าโมดูลัสของดินคันทางเพื่อพิจารณาผลของความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคันทางเข้าไปในการออกแบบงานทาง โดยค่าถ่วงน้ำหนักนี้ได้มาจากการพิสูจน์แนวคิดของไมเนอร์ ร่วมกับสมการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นของ AASHTO (1993) ค่าโมดูลัสดินคันทางที่ได้จากการถ่วงน้ำหนัก และมีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 1 จะเป็นค่าเดียวที่สะท้อนถึงความสัมพันธ์ความผันแปรของโมดูลัสของดินคันทางตลอดทั้งปี และจะถูกนำมาใช้ออกแบบแทนการออกแบบงานทางโดยใช้โมดูลัสของดินคันทางหลายค่า เพราะสามารถรองรับการเสื่อมสภาพของถนนได้ในทุกฤดูกาลตลอดทั้งปี จากรูปที่ 2.5 การศึกษาของ Guan et al. (1998) พบว่าค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเข้าใกล้ 1 ในช่วงเดือนเมษายนถึงสิงหาคม แต่หลังจากเดือนสิงหาคมพบว่าค่าถ่วงน้ำหนักมีการแกว่งตัวไปจาก 1 มาก ดังนั้นจึงเลือกช่วงเดือนเมษายนถึงสิงหาคมเป็นสภาพฤดูกาลที่ใช้ออกแบบ (Design Season)



รูปที่ 2.5 ค่าถ่วงน้ำหนักสายทางกลุ่มที่ 1 จากการทดสอบของ Guan et al. (1998)

ที่มา : Guan et al. (1998)

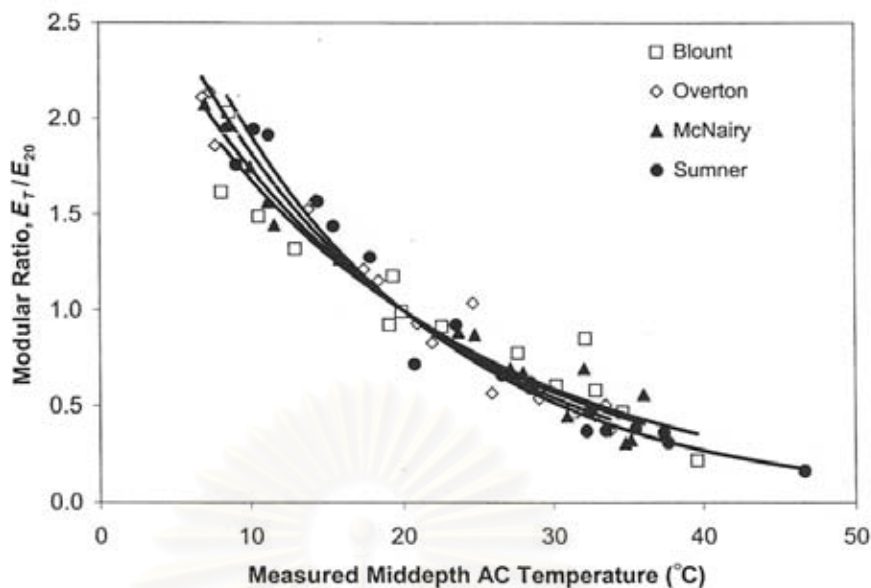
การใช้ค่าโมดูลัสดินคันทางที่ปรับแก้ด้วยค่าถ่วงน้ำหนักมีข้อดีอยู่ 2 ประการ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ค่าโมดูลัสดินคันทางที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) คือ

1. ช่วยลดความคลาดเคลื่อนในวิธีการหาค่า M_R ความคลาดเคลื่อนเหล่านี้จะปรากฏอยู่ในรูปเศษและส่วนของทศนิยมในค่าถ่วงน้ำหนัก
2. ถนนที่มีสภาพเดียวกัน อยู่ในภูมิประเทศและภูมิอากาศคล้ายกัน จะมีค่าถ่วงน้ำหนักใกล้เคียงกัน และถ้าภูมิอากาศมีผลต่อปริมาณความชื้นในดินคันทาง ค่าถ่วงน้ำหนักจะแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงทางภูมิอากาศ อย่างไรก็ตามควรใช้ค่าถ่วงน้ำหนักนี้กับข้อมูลที่มีอยู่ ไม่ใช่วิธีหาค่าโมดูลัสโดยตรง และควรใช้กับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วย FWD ที่ฤดูกาลและช่วงเวลาที่เหมาะสมด้วย

Marshall, Meier และ Welch (2001) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการทดสอบด้วย FWD โดยอุณหภูมิที่ใช้พิจารณานั้นวัดที่กึ่งกลางของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Middepth Temperature) จากผลการทดสอบใน 4 สายทางเป็นระยะเวลา 5 ปี พบว่าแต่ละสายทางมีความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสชั้นผิวทางกับอุณหภูมิของผิวทางเป็นฟังก์ชันแบบเอกซโพเนนเชียล

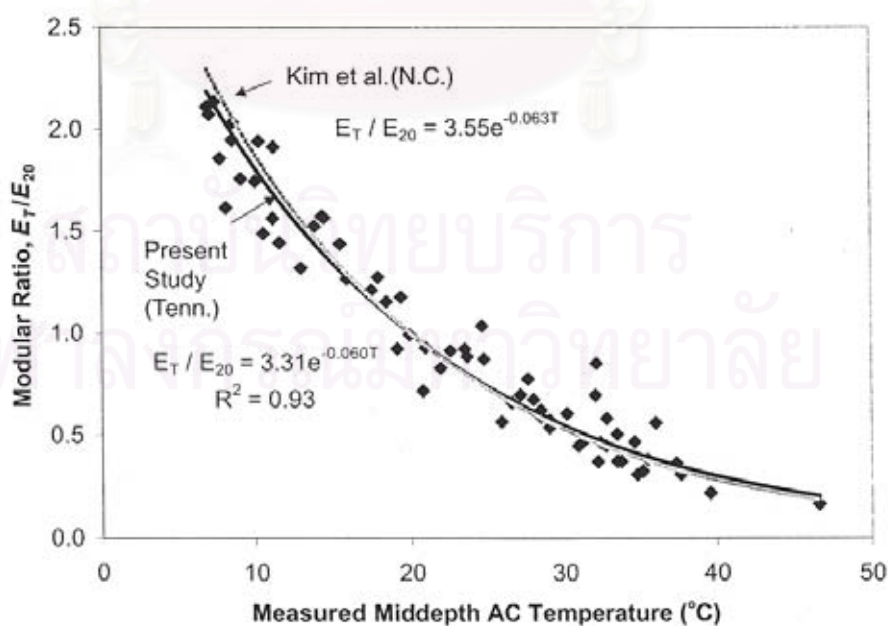
เนื่องจากแบบจำลองของทั้ง 4 สายทางนั้นมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.87 ถึง 0.98 แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างสองค่านี้มีระดับความเชื่อมั่นสูง อย่างไรก็ตามแบบจำลองมีความเหมาะสมกับแต่ละสายทางเท่านั้นเนื่องจากแต่ละสายทางมีสัดส่วนการออกแบบ (Mix Design) และวิธีการก่อสร้างแตกต่างกัน โมดูลัสของผิวทางจะขึ้นอยู่กับชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ปริมาณส่วนผสมและความหนาแน่น (Yoder และ Witczak, 1975) ซึ่งผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าโมดูลัสจะขึ้นกับชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ส่วนสองปัจจัยหลังจะมีผลให้ส่วนผสมมีค่าแตกต่างกันเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน

เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบระหว่างโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในแต่ละสายทาง จึงทำการหาอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยโมดูลัสที่อุณหภูมิอ้างอิง 20 องศาเซลเซียส (E_{20}) ของแต่ละสายทางแล้วหาความสัมพันธ์ใหม่อีกครั้ง พบว่าความสัมพันธ์ทั้งสี่มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเมื่อรวมความสัมพันธ์นี้เข้าด้วยกันจะได้ความสัมพันธ์ใหม่เป็นเส้นโค้งที่มีค่า R^2 ถึง 0.93 ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมดูลัสและอุณหภูมิของแอสฟัลต์คอนกรีต
ที่มา : Marshall et al. (2001)

นอกจากนี้ผลที่ได้ยังสนับสนุนผลการศึกษาร่วมของ Lukanen, Stubstad และ Briggs (2000) ที่หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมดูลัส (E_T/E_{20}) กับอุณหภูมิโดยพิจารณาผลของตำแหน่งละติจูด (Latitude) ร่วมด้วย เพราะเมื่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ที่ได้กับที่ได้จากการศึกษาที่ละติจูดเดียวกันของ Kim et al. (1995) พบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบแบบจำลองของ Marshall et al. (2001) กับ Lukanen et al. (2000)
ที่มา : Marshall et al. (2001)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ได้แก่ การเก็บรวบรวมรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในสนาม การเก็บรวบรวมข้อมูลจากเอกสารประกอบ การวิเคราะห์หาโมดูลัสของชั้นทางด้วยการคำนวณย้อนกลับ และการวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในสนาม

การวิจัยถึงผลของความผันแปรตามฤดูกาลที่มีต่อพฤติกรรมของโครงสร้างทางลาดยางในครั้งนี้ เพื่อให้ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับสภาพโครงสร้างทางจริงมากที่สุด ผู้วิจัยจึงจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสภาพทางในสนามจริงมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยข้อมูลดังกล่าวในการวิจัยนี้ได้มาจาก 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนแรกได้จากการทดสอบในสนามโดยผู้วิจัยเอง และในส่วนที่สองได้จากการรวบรวมผลการทดสอบโดย Pavement Technology Project (PTP) ของกรมทางหลวง ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.2.1 ส่วนการทดสอบในสนามโดยผู้วิจัยเองจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบในสนามเพื่อศึกษาผลของความผันแปรตามฤดูกาลที่มีต่อพฤติกรรมของโครงสร้างทางลาดยาง จะทำโดยการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing) ในสายทางที่ศึกษา ด้วยเครื่องมือทดสอบเพื่อประเมินสภาพถนน Falling Weight Deflectometer (FWD) เนื่องจาก FWD สามารถประเมิน และเฝ้าติดตามความผันแปรตามฤดูกาลของคุณสมบัติของวัสดุในโครงสร้างชั้นทางได้ (Newcomb et al., 1989)

ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบในสนามโดยใช้เครื่อง FWD จำนวน 1 เครื่องที่อยู่ในความดูแลของสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ซึ่งเป็น FWD แบบ Dynatest รุ่น Dynetest 8000 ดังรูปที่ 3.1 โดย FWD ที่ใช้มีลักษณะเป็นรถพ่วงที่สามารถใช้รถตู้ลากไปปฏิบัติงานในสนาม ซึ่งมีส่วนประกอบ 2 ส่วนหลัก (วิเชียร พัวรุ่งโรจน์, 2544) คือ

1. ส่วนที่ให้น้ำหนักกระทำ มีส่วนประกอบได้แก่ ก้อนน้ำหนัก แขนปล่อยน้ำหนัก แผ่นรองรับก้อนน้ำหนัก แผ่นโลหะถ่วงน้ำหนัก และแผ่นยางกันกระแทกทำหน้าที่คล้ายสปริง โดยมีแกนปล่อยน้ำหนักตั้งฉากกับผิวถนน และระยะความสูงในการปล่อยน้ำหนักก็สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมกับสภาพทางที่ต้องการทดสอบ
2. ส่วนที่ใช้วัดค่าการแอ่นตัว (Geophone) สามารถวัดค่าการแอ่นตัวที่เป็นผลมาจากแรงกระทำได้ในหน่วยไมโครเมตร โดยเครื่อง FWD นี้จะประกอบด้วย Geophone ตั้งแต่ 9 ตัวทำงานร่วมกัน โดยมี Geophone ตัวหนึ่งทำหน้าที่วัดค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางได้จุดที่แรงทดสอบกระทำ ขณะที่ Geophone ตัวอื่นๆ ที่เหลือจะกระจายตัวเรียงกันตามแนวหลัง Geophone ตัวแรก และห่างจาก Geophone ตัวแรกเป็นระยะ 20 30 45 60 90 120 150 และ 180 เซนติเมตร รวมระยะห่างของ Geophone ตัวแรกถึง Geophone ตัวสุดท้ายเท่ากับ 180 เซนติเมตร

โดยการทดสอบแต่ละครั้งจะใช้เครื่องเดิมที่มีการปรับแก้ (Calibrate) ก่อนการใช้งานเพื่อลดผลจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ



รูปที่ 3.1 เครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.2 สายทางที่ทำการทดสอบ

สายทางที่ผู้วิจัยได้เลือกทำการทดสอบ คือ ทางหลวงหมายเลข 0309 (วังน้อย - อัญญา) เพราะเป็นถนนที่มีการปรับปรุงใหม่ มีความเสียหายน้อย มีปริมาณจราจรพอสมควร และมีความ

เหมาะสมในด้านความปลอดภัย เนื่องจากมี 6 ช่องทางจราจร การทดสอบจึงไม่กีดขวางการจราจรมากนัก ดังรูปที่ 3.2 โดยตำแหน่งทดสอบ (Test Section) อยู่ที่ส่วน กม. 9+250 ถึง 9+400 ในช่องทางด้านซ้ายสุดและในทิศทางที่มุ่งไปยังอำเภอเมืองพระนครศรีอยุธยา



รูปที่ 3.2 สภาพสายทางหมายเลข 309 ที่ทำการทดสอบโดยผู้วิจัย

3.1.2 วิธีการทดสอบ

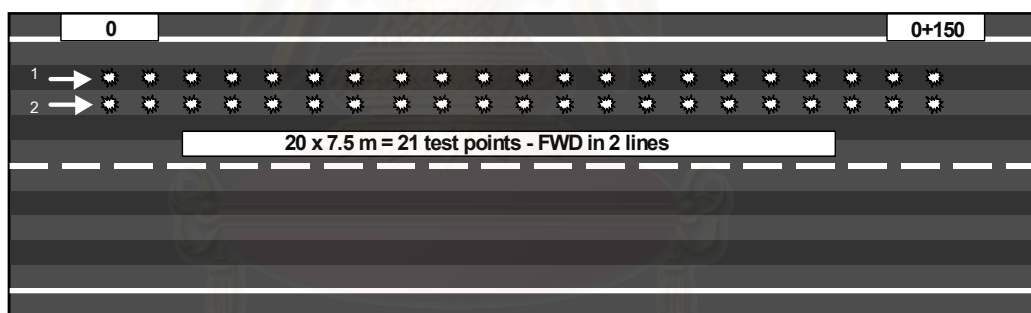
นับตั้งแต่ปี 1990 เป็นต้นมา SHRP ได้ทดสอบเพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของทางอันเนื่องมาจากน้ำหนักจราจรและความผันแปรของสภาพภูมิอากาศ (Climate Variation) ตามโครงการ Long Term Pavement Performance (LTPP) ที่เก็บข้อมูลระยะยาวของสภาพทางจำนวนมากในสหรัฐอเมริกา วิธีการทดสอบของ SHRP นี้ถือเป็นมาตรฐานปฏิบัติกัน ซึ่ง PTP ได้ใช้วิธีการทดสอบเช่นเดียวกับ SHRP (Department of Highways, 2001) เช่นเดียวในการทดสอบของผู้วิจัย จะใช้วิธีการทดสอบเช่นเดียวกับ PTP ในการทดสอบเพื่อศึกษาถึงผลของความผันแปรตามฤดูกาลต่อคุณสมบัติโครงสร้างชั้นทางในประเทศไทย

ในการทดสอบ แต่ละสายทางจะมีช่วงทดสอบ (Test Section) เป็นระยะทาง 150 เมตร และจะทดสอบด้วย FWD ที่ระยะ 7.5 เมตรในสองแนวขนานกัน คือ ตามแนวร่องล้อ (Wheeltracks) ของช่องทางด้านซ้ายสุด และระหว่างร่องล้อ (Between Wheeltracks) ของช่องทางด้านซ้ายสุด ที่แต่ละ 21 จุดทดสอบในทั้งสองแนวจะทำสัญลักษณ์ด้วยสีไว้เพื่อให้แน่ใจว่า จะการทดสอบครั้งต่อไปจะทำตรงจุดเดิมดังแสดงในรูปที่ 3.3 การทดสอบจะทำที่ 4 ระดับน้ำหนัก (Load Level) คือ 378 566 754 และ 1006 กิโลปาสคาล (kPa) ตามน้ำหนักเพลาจริงที่ 5.3 8.2

10.7 และ 14.2 ตัน ตามลำดับ หลังจากนั้นจะทำการวัดค่าการแอ่นตัว และคำนวณย้อนกลับเพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์อื่นต่อไป รูปที่ 3.4 แสดงรูปแบบการทดสอบของ PTP และในการวิจัยนี้



รูปที่ 3.3 การทำสัญลักษณ์ด้วยสีไว้ที่จุดทดสอบ



รูปที่ 3.4 การทดสอบด้วย FWD ตามวิธีทดสอบของ PTP

ที่มา : Department of Highways (2001)

3.1.4 ระยะเวลาการทดสอบ

เพื่อให้ผลการวิจัยที่ได้มาจากข้อมูลที่สะท้อนถึงผลของความผันแปรตามฤดูกาลมากที่สุด และโดยปกติฤดูกาลก็มีลักษณะวนซ้ำกันในรอบปี อีกทั้งพิจารณาถึงความเหมาะสมในด้านงบประมาณ การศึกษาจึงวางแผนให้มีการทดสอบด้วย FWD ทุกๆ เดือน โดยทำการทดสอบรวม

เป็นระยะเวลาหนึ่งปี เริ่มจากเดือนเมษายน 2547 และสิ้นสุดในเดือนมีนาคม 2548 แต่เว้นว่างการทดสอบในเดือนกันยายนไปเนื่องจากความไม่พร้อมของเครื่อง FWD

3.1.5 อุณหภูมิในขณะทดสอบ

เนื่องจากเป็นที่ทราบดีแล้วว่าอุณหภูมิมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุในโครงสร้างชั้นทาง โดยเฉพาะในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการวัดอุณหภูมิโดยตรงขณะทดสอบ ใน 3 ระดับ คือ อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิที่ผิวทาง และอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยอุณหภูมิอากาศ และอุณหภูมิที่ผิวทาง จะวัดจากเทอร์โมมิเตอร์แบบใช้แสงอินฟราเรด (Infrared Thermometer) ที่ติดตั้งอยู่กับ FWD ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และค่าที่ได้จะถูกส่งไปยังเครื่องประมวลผลข้อมูล (Data Logger)



รูปที่ 3.5 เทอร์โมมิเตอร์แบบใช้แสงอินฟราเรดที่ติดตั้งอยู่กับ FWD

ส่วนอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งถือเป็นอุณหภูมิของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมด จะทำการวัดโดยเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอลที่มีความละเอียดถึง 0.1 องศาเซลเซียสในรูที่เจาะไว้ในตำแหน่งใกล้กับจุดทดสอบทั้ง 21 จุด ที่เจาะโดยสว่านลึกลงไปประมาณครึ่งหนึ่งของความหนาของชั้นผิวทาง เพื่อให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางเป็นค่าที่ได้ในการทดสอบแต่ละจุดทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล

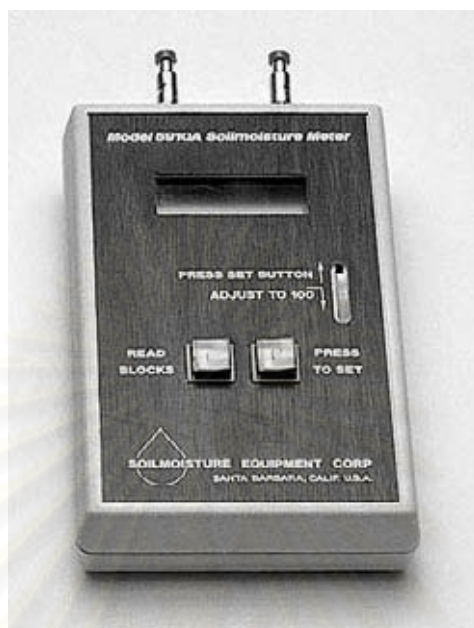
3.1.4 ข้อมูลความชื้นในโครงสร้างทาง

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างทาง ผู้วิจัยตระหนักดีถึงความสำคัญนี้ดี จึงทำการวัดค่าความชื้นในโครงสร้างทางมาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ด้วย และมีวิธีการเก็บข้อมูลดังต่อไปนี้

เครื่องมือวัดความชื้นในโครงสร้างทาง

ในการวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลความชื้นในโครงสร้างทางด้วยเครื่องวัดความชื้นในดิน Soilmoisture Meter สามารถวัดค่าความชื้นในดินออกมาเป็นปริมาณความชื้น (Moisture Content) ซึ่งประกอบด้วยตัวเครื่องวัด (Meter) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และหัววัด (Probe) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยตัวเครื่องวัดเมื่อต่อเข้ากับหัววัดและทำการปรับแก้แล้ว จะแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขในหน่วยปริมาณความชื้นเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนหัววัดจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.2 เซนติเมตร ทำจากยิปซัมหรือแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ห่อหุ้มขั้วโลหะ (Electrodes) สองแท่งซึ่งอยู่ข้างในที่จะส่งกระแสไฟฟ้าระหว่างกันผ่านยิปซัม โดยปริมาณที่กระแสไฟฟ้าจากขั้วโลหะไปยังอีกขั้วโลหะจะถูกแปลงเป็นปริมาณความชื้น เพราะเนื่องจากยิปซัมมีความพรุนและยอมให้น้ำผ่านเข้าออกได้ หากดินเปียกยิปซัมจะเปียกและมีความต้านทานต่ำ ทำให้กระแสไฟส่งผ่านระหว่างขั้วโลหะได้มากค่า

ปริมาณความชื้นในดินที่วัดได้จะสูง และในทางกลับกันหากดินแห้ง ยิปซั่มจะแห้ง ปริมาณความชื้นในดินจะต่ำ



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความชื้นในดิน Soilmoisture Meter

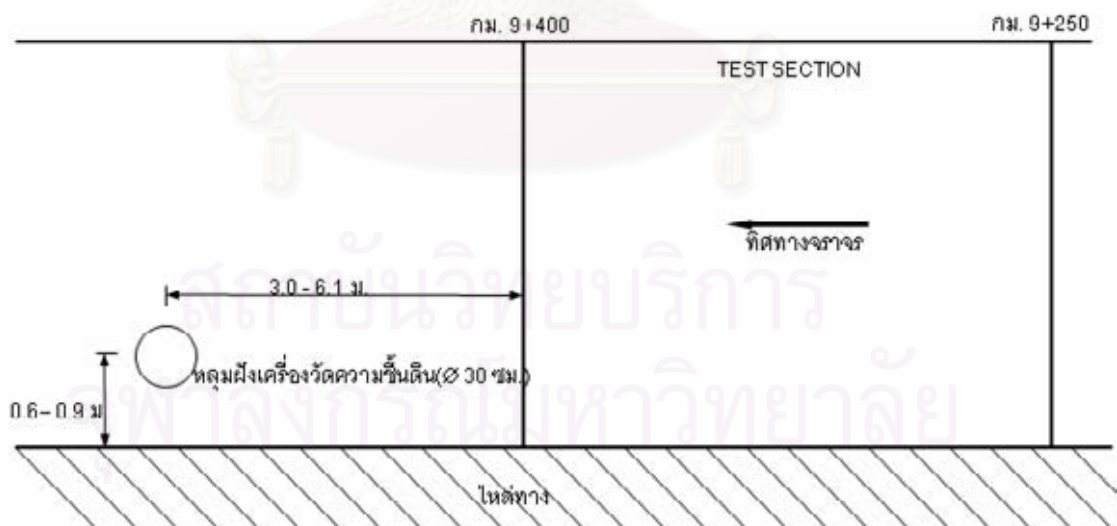


รูปที่ 3.8 หัววัดความชื้นในดิน (Gypsum Block)

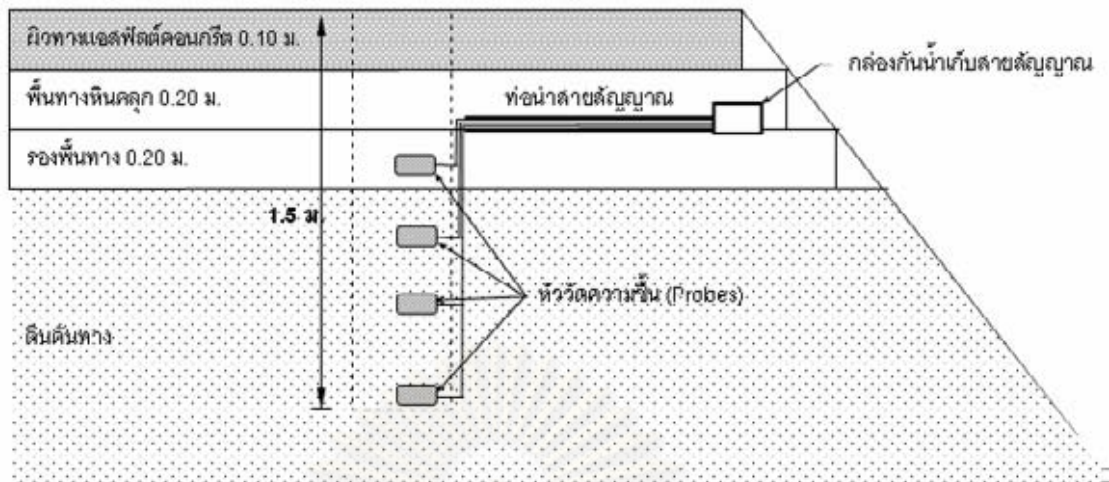
การติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นในโครงสร้างทาง

แผนผังการติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นในโครงสร้างทางจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.9 ซึ่งรูปแบบการติดตั้งนี้อ้างอิงตามการศึกษาของ Rada, Lopez, Elkins, Richter และ Henderson (1999) โดยตำแหน่งของหลุมที่จะฝังเครื่องมือวัดความชื้นลงไปจะอยู่ห่างจากส่วนที่ทดสอบเป็นระยะประมาณ 3.0-6.0 เมตร ห่างจากบริเวณที่มีรอยต่อหรือรอยแตกร้าว(Joint / Crack) อย่างน้อย 1.2 เมตร ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการซึมผ่านของน้ำจากผิวทาง และควรอยู่บนแนวร่องล้อของช่องทางริมสุดหรือประมาณ 0.6 – 0.9 เมตรจากขอบของช่องทาง แต่เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้ตระหนักถึงความปลอดภัยและระมัดระวังมิให้สายทางที่ทดสอบเสียหายมากนัก อีกทั้งข้อจำกัดของสายของหัววัดความชื้นที่มีความยาวเพียง 1.8 เมตร จึงทำให้ผู้ศึกษาต้องวางตำแหน่งหลุมฝังเครื่องมือวัดความชื้นห่างจากขอบทาง 0.6 เมตร

จำนวนหัววัดที่ฝังลงไปหลุมที่เจาะนั้นมีทั้งหมด 4 หัววัด โดยอยู่ที่ความลึก 4 ระดับคือ 0.4 0.7 1.0 และ 1.5 เมตร ซึ่งจะอยู่ในชั้นรองพื้นทาง และดินคันทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ส่วนวิธีการฝังหัววัดนั้นจะทำโดยการฝังหัววัดจากตัวกลางสุดก่อนแล้วจึงกลบด้วยวัสดุเดิมทีละชั้นประมาณ 30 เซนติเมตร แล้วบดอัดไปเรื่อยๆ จนครบทุกหัววัดเพื่อรักษาความหนาแน่นให้ได้เท่าเดิมก่อนการเจาะมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.9 ผังแสดงหลุมฝังเครื่องมือวัดความชื้นในโครงสร้างทาง



รูปที่ 3.10 รูปตัดแสดงการติดตั้งเครื่องวัดความชื้นในโครงสร้างทาง



รูปที่ 3.11 การฝังหัววัดความชื้นและบดอัดดินในโครงสร้างทาง

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากเอกสารประกอบ

ข้อมูลจากเอกสารประกอบนี้เป็นข้อมูลที่จะนำเข้าร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในสนามเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของคุณสมบัติโครงสร้างชั้นทางได้ หรือให้ผลการวิเคราะห์มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น ข้อมูลเหล่านี้ได้แก่ ข้อมูลการทดสอบของ PTP ความหนาของโครงสร้างชั้นทาง สถิติอุณหภูมิมหาวิทยาลัย และข้อมูลทั่วไปของสายทางที่ศึกษา โดยจะกล่าวในรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 ข้อมูลการทดสอบของ PTP

ในปี 2543 ถึง 2544 PTP ได้ศึกษาผลของความผันแปรตามฤดูกาลที่มีต่อคุณสมบัติของโครงสร้างชั้นทางลาดยาง โดยทดสอบด้วย FWD ตามวิธีการเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.2.1 ในสายทางทั้งหมด 7 สายทางดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สายทางที่ PTP ทำการทดสอบ

สายทาง	ส่วน กม.	ตำแหน่งที่ตั้ง	ภาค
0004	310+000 ถึง 209+850	เพชรบุรี	ตะวันตก
0009	15+650 ถึง 15+500	ปทุมธานี	กลาง
3087	16+150 ถึง 16+000	ราชบุรี	ตะวันตก
3144	3+900 ถึง 3+750	ชลบุรี	ตะวันออก
3145	24+000 ถึง 23+850	ระยอง	ตะวันออก
3222	4+150 ถึง 4+000	สระบุรี	กลาง
4009	12+150 ถึง 12+000	สุราษฎร์ธานี	ใต้

เนื่องจากการทดสอบของ PTP ทำในช่วงเวลาประมาณ 3 เดือนครั้ง ดังนั้นในการวิจัยนี้ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในสนามโดยผู้วิจัยเองจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เป็นหลัก เนื่องจากการทดสอบที่ทำในทุกเดือนตลอดระยะเวลาหนึ่งปีจะสะท้อนถึงผลของความผันแปรตามฤดูกาลได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของ PTP จะถูกนำเข้ามาช่วยยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบของผู้วิจัยเอง และช่วยอธิบายความผันแปรตามฤดูกาลตามสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากสายทางที่ PTP ทดสอบมีทั้งสิ้น 7 สายทาง ซึ่งครอบคลุมสายทางอยู่ตามภาคต่างๆ ของประเทศไทย

3.2.1 ความหนาของโครงสร้างชั้นทาง

ความหนาของโครงสร้างชั้นทางเป็นข้อมูลจำเป็นสำหรับการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสของชั้นทางต่างๆ จากข้อมูลการแ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วย FWD ด้วยโปรแกรม ELMOD จะได้อธิบายในรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งข้อมูลความหนาของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละสายทางจะได้จากข้อมูลที่รวบรวมโดย กรมทางหลวง

เนื่องจากใน 7 สายทางที่ PTP ทดสอบ PTP ได้ทำการวัดความหนาของโครงสร้างชั้นทางที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Borescope โดย PTP แต่เนื่องจากโครงสร้างชั้นทางที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Borescope นี้ความหนาของชั้นรองพื้นทางไม่ได้ถูกวัด และในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาถึงความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคันทางด้วย ซึ่งค่าโมดูลัสดินคันทางจะไม่สามารถคำนวณย้อนกลับได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม หากไม่มีข้อมูลความหนาของชั้นรองพื้นทาง ดังนั้นจะนำข้อมูลความหนาของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละสายทางจะได้จากข้อมูลที่รวบรวมโดยกรมทางหลวงนำมาประกอบในการศึกษาด้วย

3.2.3 สถิติอุตุนิยมวิทยา

สถิติอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือน ความยาวนานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือน และความชื้นเฉลี่ยรายเดือน มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาล เนื่องจากเป็นค่าที่แสดงถึงสภาพภูมิอากาศที่ผันแปรไปตลอดทั้งปีในบริเวณบริเวณสายทางที่ศึกษา สถิติอุตุนิยมวิทยานี้รวบรวมจากข้อมูลที่เก็บโดย กรมอุตุนิยมวิทยา สถิติอุตุนิยมวิทยาของสายทางหมายเลข 309 แสดงไว้ในภาคผนวก ข

ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของสถิติอุตุนิยมวิทยาในรอบห้าปีย้อนหลังนับแต่ปีที่ทดสอบ และค่าเฉลี่ยรายเดือนของสถิติอุตุนิยมวิทยาในรอบปีเดียวกันกับที่ทำการทดสอบ โดยรายเดือนของสถิติอุตุนิยมวิทยาในห้าปีย้อนหลังนับแต่ปีที่ทดสอบจะใช้พิจารณาแบ่งช่วงของฤดูกาล ส่วนค่าเฉลี่ยรายเดือนของสถิติอุตุนิยมวิทยาในรอบปีเดียวกันกับที่ทำการทดสอบจะใช้เปรียบเทียบคุณสมบัติของโครงสร้างทางกับสภาพภูมิอากาศ

3.2.3 ข้อมูลทั่วไปของสายทางที่ศึกษา

ข้อมูลทั่วไปของสายทางที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณจราจรในรูปของน้ำหนักเพลามาตรฐานต่อปี และอายุการใช้งานของถนนในรูปของจำนวนปีหลังจากการก่อสร้างหรือซ่อมบำรุงครั้งล่าสุด อาจมีผลต่อความรุนแรงของความผันแปรตามฤดูกาลของความแข็งแรงของทาง อายุการใช้งานของสายทางที่ศึกษาแสดงในตารางที่ 3.2 ส่วนปริมาณจราจรของสายทางที่ศึกษาซึ่งรวบรวมจากสำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง จะแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 3.2 อายุใช้งานของสายทางที่ศึกษา

สายทาง	ปีที่ก่อสร้างหรือซ่อมบำรุงครั้ง	อายุการใช้งาน (ปี)
0309	2545	2
0004	2543	1
0009	2541	3
3087	2537	7
3144	2540	4
3145	2537	7
3222	2542	2
4009	2541	3

3.3 การวิเคราะห์หาโมดูลัสของชั้นทางด้วยการคำนวณย้อนกลับ

ในการศึกษาจะใช้โปรแกรม ELMOD ในการคำนวณย้อนกลับจากข้อมูลการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วย FWD เพื่อหาค่าโมดูลัสของชั้นทางต่างๆ โปรแกรม ELMOD มีความสามารถในการวิเคราะห์โครงสร้างทางที่มีจำนวนชั้นทางได้ถึง 4 ชั้นทาง (Newcomb et al., 1989; วิเชียรพัชรุ่งโรจน์, 2544; แสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์, 2547) และมีวิธีการคำนวณค่าโมดูลัสอยู่ 2 วิธี คือ วิธีใช้ค่ารัศมีความโค้งของการแอ่นตัว (Radius of Curvature) และวิธีเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่วัดได้ (Deflection Basin Fit) (Newcomb et al., 1989; แสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์, 2547)

ในการศึกษานี้จะใช้วิธีเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่วัดได้มาคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสของชั้นทางต่างๆ ซึ่งวิธีนี้จะเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่วัดได้ กับค่าการแอ่นตัวที่คำนวณได้จากการประมาณค่าโมดูลัสของแต่ละชั้นทาง เมื่อค่าแอ่นตัวมีความแตกต่างโปรแกรมจะสมมุติแล้วคำนวณค่าการแอ่นตัวเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จนไม่มีความแตกต่าง (แสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์, 2547)

ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม ELMOD ประกอบด้วยข้อมูล 2 ส่วนคือ ข้อมูลการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทาง และข้อมูลความหนาของโครงสร้างทาง โดยข้อมูลการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางได้จากการทดสอบด้วย FWD ซึ่งจะถูกบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์ที่ต่อเข้ากับ FWD โดยจะอยู่ในไฟล์รูปแบบนามสกุล F25 ส่วนข้อมูลความหนาของโครงสร้างทางจะได้รับการเก็บรวบรวมในหัวข้อที่ 3.2.1

ผลที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับจะอยู่ในไฟล์รูปแบบนามสกุล DMS สำหรับค่าการแอ่นตัว และอยู่ในรูปแบบนามสกุล EMS สำหรับค่าโมดูลัสของชั้นทาง ไฟล์ทั้งสองจะเป็นไฟล์แบบ ASCII สามารถเปิดในโปรแกรม MS Excel เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ การวิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของคุณสมบัติโครงสร้างทาง และผลของความผันแปรตามฤดูกาลกับการออกแบบและประเมินสภาพทางลาดยางในประเทศไทย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 การวิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของคุณสมบัติโครงสร้างทาง

เป็นการวิเคราะห์ผลของปัจจัยแวดล้อมที่สำคัญที่จะส่งผลต่อคุณสมบัติของโครงสร้างทาง ได้แก่ ค่าการแอ่นตัว และค่าโมดูลัสของชั้นทางต่างๆ ปัจจัยแวดล้อมที่สำคัญนี้ ประกอบด้วย

- อุณหภูมิ ประกอบด้วย อุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง (Middepth Asphalt Concrete Temperature) อุณหภูมิผิวทาง (Surface Temperature) อุณหภูมิของอากาศ (Air Temperature) และอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน (Monthly Temperature)
- ความชื้น ประกอบด้วย ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ที่ระดับความลึกต่างๆ ในโครงสร้างทาง และปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือน (Monthly Rainfall)

การวิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของคุณสมบัติโครงสร้างทางจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ ความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอ่นตัวกลาง ความผันแปรตามฤดูกาลของอีลาสติกโมดูลัสชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคันทาง โดยมีแนวทางการศึกษาดังนี้

ความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนตัวกลาง

เนื่องจากค่าแอนตัวกลางเป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างทาง ที่ขึ้นกับความแข็งแรงของชั้นทางต่างๆ ด้วยการศึกษาค่าความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนตัวกลาง ก็เท่ากับการศึกษาความผันแปรตามฤดูกาลของความแข็งแรงของโครงสร้างทางด้วย

ความผันแปรตามฤดูกาลของอีลาสติกโมดูลส์ชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

จะวิเคราะห์เปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลกับพฤติกรรมของถนนซึ่งแบ่งออกเป็นชั้นทางต่างๆ โดยภาพรวมตลอดทั้งปี และโดยเฉพาะชั้นผิวทาง เนื่องจากอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุใช้ปูผิวทางอย่างชัดเจน ในการวิเคราะห์จะแบ่งข้อมูลออกเป็นฤดูร้อน(กุมภาพันธ์-เมษายน) และ ฤดูหนาว (พฤศจิกายน-มกราคม) มาวิเคราะห์ เพราะสองช่วงเวลานี้ในประเทศไทยจะมีอุณหภูมิแตกต่างกันมาก อีกทั้งเพื่อลดและควบคุมผลกระทบของความชื้นเพราะทั้งสองช่วงเวลาต่างก็มีความชื้นหรือปริมาณน้ำฝนน้อย และจัดเป็นฤดูแล้ง (Dry Season) เช่นเดียวกัน

ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลส์ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง

จะวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าโมดูลส์ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางในฤดูกาลต่างๆ ทั้งฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว เพื่อศึกษาว่าค่าโมดูลส์ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางผันแปรไปตามปัจจัยแวดล้อมอย่างไร

ความผันแปรตามฤดูกาลของดินคันทาง

จะวิเคราะห์เปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์ของความชื้น(ใช้ปริมาณน้ำฝนร่วมในการวิเคราะห์) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลกับพฤติกรรมของถนนซึ่งแบ่งออกเป็นชั้นทางต่างๆ โดยภาพรวมตลอดทั้งปี และโดยเฉพาะชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง และดินคันทาง เนื่องจากความชื้นเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของดินซึ่งเป็นวัสดุของชั้นนี้อย่างชัดเจน ในการวิเคราะห์จะแบ่งข้อมูลออกเป็นฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน) และฤดูฝนหรือ Rainy Season (พฤษภาคม-ตุลาคม) มาวิเคราะห์ เพราะสองช่วงเวลานี้ในประเทศไทยจะมีปริมาณน้ำฝนแตกต่างกันมาก ทั้งนี้ไม่ตัดข้อมูลในเดือนมีนาคมถึงพฤษภาคมออกไปแม้ว่าจะเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิสูงมาก เนื่องจากเป็นการพิจารณาถึงดินในชั้นล่าง อุณหภูมิที่สูงถูกดูดซับโดยชั้นผิวทางจึงส่งผลกระทบต่อดินในชั้นล่างน้อย

3.4.2 ผลของความผันแปรตามฤดูกาลกับการออกแบบและประเมินสภาพทางลาดยางในประเทศไทย

การวิเคราะห์ในส่วนนี้จะนำเอาเทคนิคและวิธีการต่างๆ มาเพื่อนำผลของความผันแปรตามฤดูกาลกับการออกแบบและประเมินสภาพทางลาดยางให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศทางลาดยางในประเทศไทย ดังต่อไปนี้

1. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างของที่อุณหภูมิทดสอบกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (T_{AC}) และหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของโมดูลัสชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิทดสอบต่อโมดูลัสชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิอ้างอิง 35°C (E_{35}) กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในทุกสายทาง
2. หาค่าถ่วงน้ำหนักโมดูลัสดินคันทาง (MR) เพื่อศึกษาว่าคันทางมีความผันแปรตามฤดูกาลหรือไม่ และฤดูกาลหรือช่วงเวลาใดที่มีค่าถ่วงน้ำหนักใกล้เคียงกับ 1 จะถือว่าฤดูกาลหรือช่วงเวลานั้นเป็น Design Season และเป็นช่วงเวลาที่เหมาะแก่การเก็บตัวอย่างดินคันทางมาทดสอบหรือทดสอบด้วย FWD แล้วนำค่าโมดูลัสดินคันทางมาออกแบบทางให้รองรับความผันแปรตามฤดูกาลตลอดทั้งปีได้
3. หาค่าโมดูลัสดินคันทางประสิทธิผล (MR_{eff}) ตามวิธีของ AASHTO (1993) เปรียบเทียบกับ MR ที่มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 1 หรือโมดูลัสดินคันทางของ Design Season
4. วิเคราะห์หาฟังก์ชันเวลาของโมดูลัสชั้นผิวทาง เพื่อใช้ในการออกแบบงานทางโดยเกณฑ์ความล้า (Fatigue Criteria) ตามวิธีการออกแบบเชิงกลอย่างง่าย และหาความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเวลานี้กับปัจจัยแวดล้อมด้านอุณหภูมิ
5. วิเคราะห์หาฟังก์ชันเวลาของโมดูลัสดินคันทาง เพื่อใช้ในการออกแบบงานทางโดยเกณฑ์การเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent Deformation) ตามวิธีการออกแบบเชิงกลอย่างง่าย และหาความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเวลานี้กับปัจจัยแวดล้อมด้านความชื้น

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของทางลาดยางในประเทศไทยในการวิจัยนี้ จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสายทางด้วย FWD เพื่อเฝ้าติดตามพฤติกรรมของทางลาดยางเป็นประจำตลอดระยะเวลาอย่างน้อย 1 ปี มาพิจารณาร่วมกับตัวแปรต่างๆ ที่จะมีผลต่อพฤติกรรมของทางลาดยางนี้ โดยการวิจัยนี้จะมุ่งศึกษาความผันแปรตามฤดูกาลของความแข็งแรงของโครงสร้างทาง และความผันแปรตามฤดูกาลของชั้นทางลาดยาง เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบงานทางให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย

4.1 ตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของทางลาดยาง

ตัวแปรที่ใช้ศึกษาความผันแปรตามฤดูกาลของทางลาดยาง แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

ลักษณะทางกายภาพของสายทางขณะทดสอบ	ลักษณะการทดสอบ	ค่าจากการทดสอบด้วย FWD และคำนวณย้อนกลับ	ข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศ
<ul style="list-style-type: none">• ความหนาของโครงสร้างชั้นทาง• ส่วนประกอบของโครงสร้างชั้นทาง• ปริมาณจราจร• อายุใช้งาน• อุณหภูมิอากาศ• อุณหภูมิผิวทาง และอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง• ความชื้นในโครงสร้างทาง	<ul style="list-style-type: none">• ตามแนวร่องล้อ และระหว่างร่องล้อ• ระดับน้ำหนักทดสอบได้แก่ 378 566 754 และ 1006 กิโลปาสคาล	<ul style="list-style-type: none">• ค่าการแอ่นตัว• ค่าโมดูลัสชั้นผิวทาง• ค่าโมดูลัสชั้นพื้นทาง• ค่าโมดูลัสชั้นรองพื้นทาง• ค่าโมดูลัสดินคันทาง	<ul style="list-style-type: none">• อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน• ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือน• ความยาวนานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือน• ความเข้มเมฆเฉลี่ยรายเดือน

ในเบื้องต้นจะขอนำเสนอตัวแปรพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของสายทาง และ ข้อมูลสภาพด้านภูมิอากาศ ก่อน ส่วนตัวแปรลักษณะการทดสอบ และค่าจากการทดสอบด้วย FWD และคำนวณย้อนกลับ จะอธิบายในการวิเคราะห์เชิงลึกในส่วนต่อไป

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของสายทาง

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษายางทางทั้งหมด 8 สายทางกระจายตามบริเวณภาคกลาง ภาคตะวันออก ภาคตะวันตก และภาคใต้ของประเทศไทย โดยผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเองในสายทางหมายเลข 309 ส่วนอีก 7 สายทางที่เหลือจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของกรมทางหลวง และนำเข้าร่วมในการศึกษาด้วย โดยส่วนประกอบของโครงสร้างทางจะแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะพบว่าสายทางที่ศึกษามีความหนาของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแตกต่างกันไป วัสดุชั้นพื้นทางส่วนใหญ่จะเป็นหินคลุก (Crushed Rock) ยกเว้นในสายทางหมายเลข 9 และ 3144 ซึ่งเป็น Soil Cement และ Steel Slag ตามลำดับ และวัสดุดินคันทางมีทั้งที่เป็นดินเหนียว (Clay) และทราย (Sand)

ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบของโครงสร้างชั้นทาง

สายทาง	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ดินคันทาง
309	100 mm AC	204 mm Crushed Rock	205 mm Sand + Clay	Sand
4	107 mm AC	200 mm Crushed Gravel	600 mm Sand + Clay	Clay
9	93 mm AC	267 mm Soil Cement	300 mm Sand	Sand
3087	49 mm AC	195 mm Mod. Crushed Rock	305 mm Sand	Clay
3144	57 mm AC	205 mm Steel Slag	311 mm Sand + Clay	Sand
3145	51 mm AC	215 mm Crushed Rock	154 mm Red Clay	Clay
3222	121 mm AC	120 mm Crushed Rock	390 mm Sand + Clay	Clay
4009	60 mm AC	170 mm Crushed Rock	309 mm Clay	Clay

และในตารางที่ 4.3 จะพบว่าสายทางที่ศึกษามีปริมาณจราจรซึ่งอยู่ในรูปน้ำหนักเพลามาตรฐาน (ESALs) และน้ำหนักเพลามาตรฐานเฉลี่ยต่อปี (ESALs/year) มากน้อยแตกต่างกันไป ดังนั้นการศึกษานี้ครอบคลุมสายทางที่มีปริมาณจราจรกระจายไปในทุกระดับ และทำให้ผลการวิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของคุณสมบัติของโครงสร้างชั้นทางสะท้อนถึงผลของตัวแปรด้านปริมาณจราจรได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักเพลามาตรฐานและน้ำหนักเพลามาตรฐานต่อปีของแต่ละสายทาง

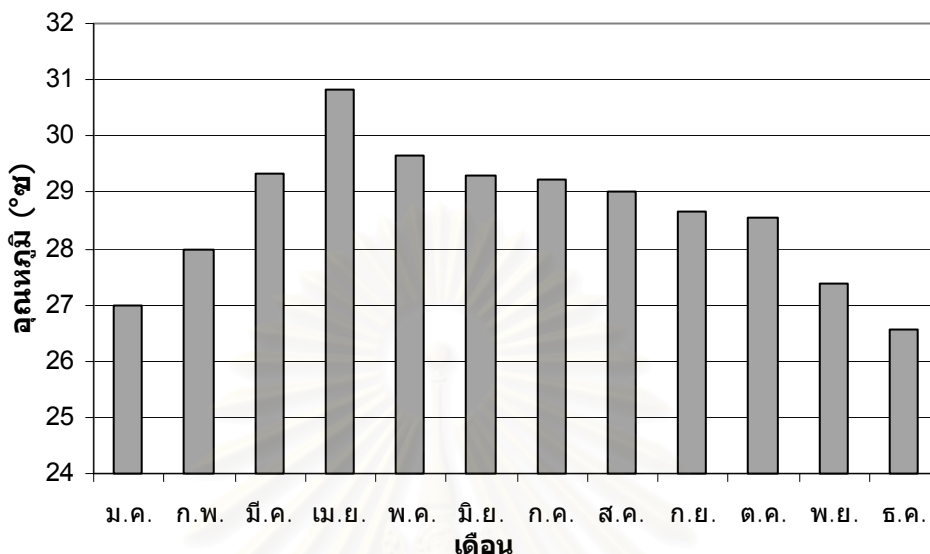
สายทาง	น้ำหนักเพลามาตรฐาน	น้ำหนักเพลามาตรฐานต่อปี
0309	7,012,348	1,001,764
0004	1,323,278	189,040
0009	11,806,820	1,686,689
3087	808,163	115,452
3144	647,801	92,543
3145	520,066	74,295
3222	10,389,370	1,484,196
4009	3,497,015	499,574

4.1.2 ข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศ

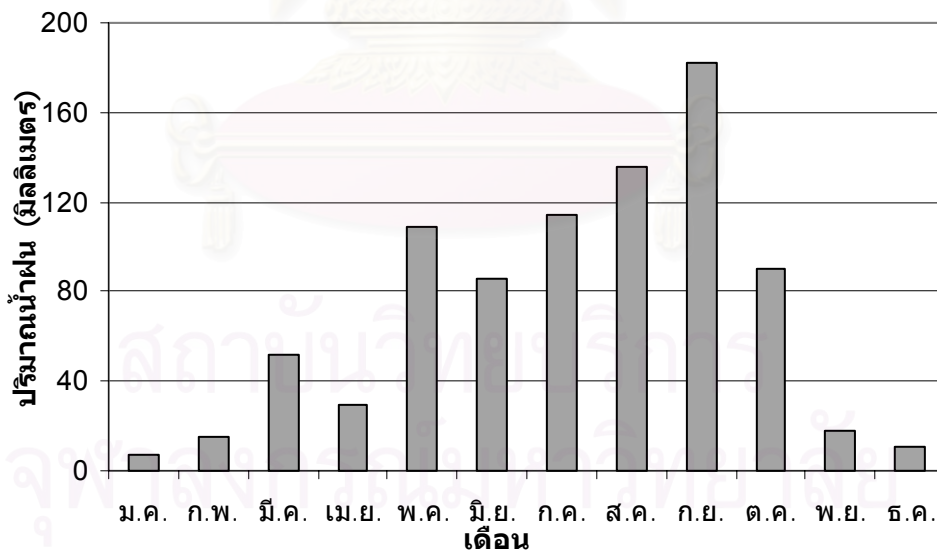
ในการศึกษาถึงความผันแปรตามฤดูกาลของโครงสร้างทางลาดยาง ในแต่ละสายทางนั้น เพื่อการวิเคราะห์มีความถูกต้องและชัดเจนมากยิ่งขึ้น มีความจำเป็นต้องนำข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศในบริเวณสายทางที่ทำการทดสอบนั้นๆ มาพิจารณาร่วมด้วย ซึ่งข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศที่ถือเป็นตัวแปรภายนอกหลักที่ผันแปรไปตามฤดูกาลและมีผลต่อของคุณสมบัติต่างๆ ของโครงสร้างทาง ได้แก่ อุณหภูมิ และ ปริมาณน้ำฝน การวิจัยครั้งนี้ได้รวบรวมข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศเหล่านี้ จากรายงานข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ของกรมอุตุนิยมวิทยา โดยจะแสดงสถิติอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนตลอดทั้งปีในรอบ 5 ปี ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนตลอดทั้งปีในรอบ 5 ปี และความยาวนานแสงอาทิตย์และความเข้มเมฆเฉลี่ยรายเดือนตลอดทั้งปีในรอบ 5 ปี (2543-2547) ในบริเวณสายทางหมายเลข 309 ซึ่งวัดจากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตรอยุธยา ที่ตั้งอยู่ห่างจากตำแหน่งทดสอบประมาณ 9 กิโลเมตร ดังรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

การที่นำเอาสถิติของสภาพภูมิอากาศในรอบ 5 ปีมาวิเคราะห์ในส่วนนี้ มีจุดประสงค์เพื่อใช้แบ่งฤดูกาลและนำไปวิเคราะห์ในส่วนต่อไป เพราะจะสะท้อนถึงสภาพภูมิอากาศในอดีตได้ด้วย และการใช้สถิติในรอบ 1 ปีที่ทำการทดสอบ FWD เพียงอย่างเดียว จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการแบ่งฤดูกาลได้ง่าย เพราะในรอบปีนั้นอาจมีความผิดปกติของสภาพอากาศ เช่น เกิดฝนทิ้งช่วงมีปริมาณน้ำฝนลดลง หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของลมมรสุมทำให้อากาศมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงหรือต่ำ แต่อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความผันแปรตามฤดูกาลของคุณสมบัติ

โครงสร้างชั้นทางกับตัวแปรด้านสภาพภูมิอากาศโดยตรง จะใช้สถิติในรอบ 1 ปีที่ทำการทดสอบ FWD เพื่อได้ผลที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงขณะทดสอบมากที่สุด



รูปที่ 4.1 สถิติอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนตลอดทั้งปีในรอบ 5 ปี (2543-2547) ในบริเวณสายทางหมายเลข 309

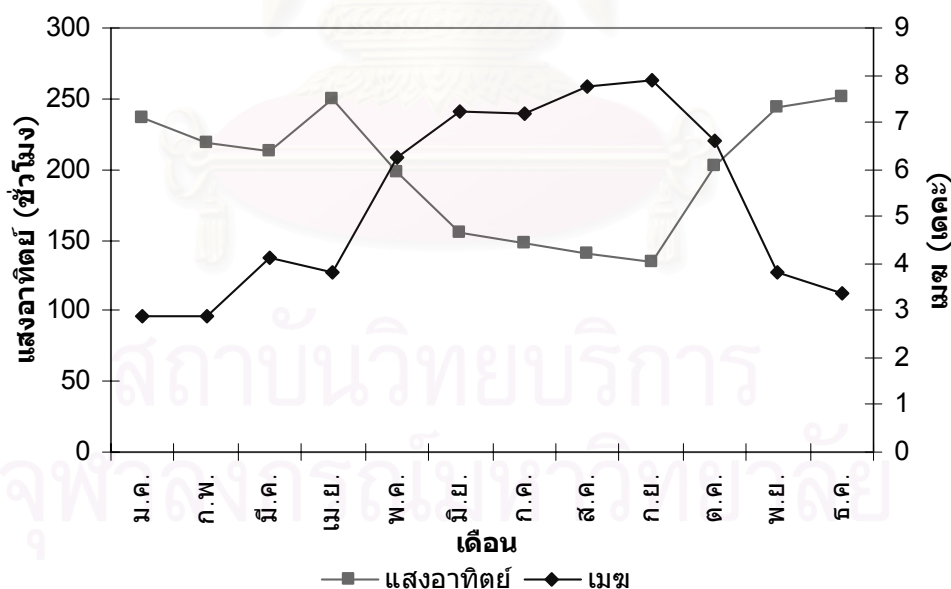


รูปที่ 4.2 สถิติปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนตลอดทั้งปีในรอบ 5 ปี (2543-2547) ในบริเวณสายทางหมายเลข 309

จากรูปที่แสดงข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในบริเวณสายทางหมายเลข 309 มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเดือนตลอดทั้งปีน้อย เพียง 3 - 4 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิ

เฉลี่ยสูงสุดในเดือนเมษายน และมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดในเดือนธันวาคม ซึ่งความผันแปรของอุณหภูมินี้ในสายทางอื่นๆ ก็มีลักษณะคล้ายกัน ถึงแม้จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในรอบปีน้อย แต่ในการวิจัยจะยังพิจารณาผลของตัวแปรนี้เพราะเป็นตัวแปรหลักดังที่กล่าวข้างต้น โดยจะจัดเดือนเมษายนหรือเดือนข้างเคียง เป็นฤดูร้อน (Hot) และจัดเดือนธันวาคมหรือเดือนข้างเคียง เป็นฤดูหนาว (Cool) และเมื่อดูสถิติปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนตลอดทั้งปีในรอบ 5 ปี ร่วมด้วยแล้วจะเห็นว่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยในแต่ละเดือนจะต่างกันอย่างชัดเจน โดยในเดือนมีนาคม และเดือนกันยายนซึ่งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แต่ในเดือนกันยายนจะมีปริมาณน้ำฝนสูงกว่าในเดือนมีนาคม ดังนั้นในการศึกษาจึงจะจัดเดือนมีนาคมหรือเดือนข้างเคียงเป็นฤดูร้อนหรือแล้ง (Dry Season) และจัดเดือนกันยายนหรือเดือนข้างเคียงเป็นฤดูฝน (Rainy Season) โดยแต่ละสายทางมีความผันแปรของปริมาณน้ำฝนเป็นไปดังรูปที่ 4.2 นี้ ยกเว้นสายทางหมายเลข 4009 ที่อยู่ในภาคใต้ ซึ่งจะมีฝนตกชุกตลอดทั้งปี

ส่วนในรูปที่ 4.3 จะพบว่าความยาวนานแสงอาทิตย์และความเข้มเมฆเฉลี่ยรายเดือนในบริเวณสายทางหมายเลข 309 เป็นไปในลักษณะผกผันกันและสอดคล้องกับอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน โดยในเดือนที่มีความยาวนานแสงอาทิตย์มากและมีความเข้มเมฆน้อย จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูง



รูปที่ 4.3 สถิติความยาวนานแสงอาทิตย์และความเข้มเมฆเฉลี่ยรายเดือนตลอดทั้งปีในรอบ 5 ปี (2543-2547) ในบริเวณสายทางหมายเลข 309

ส่วนในรูปที่ 4.3 จะพบว่าความยาวนานแสงอาทิตย์และความเข้มเมฆเฉลี่ยรายเดือนในบริเวณสายทางหมายเลข 309 เป็นไปในลักษณะผกผันกันและสอดคล้องกับอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน โดยในเดือนที่มีความยาวนานแสงอาทิตย์มากและมีความเข้มเมฆน้อย จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูง

4.2 การวิเคราะห์ผลของลักษณะทดสอบที่ต่างกัน

ลักษณะการทดสอบที่แตกต่างกันตามแนวการทดสอบและน้ำหนักทดสอบทำให้ค่าโมดูลัสของชั้นทางที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับแตกต่างกันดังนี้

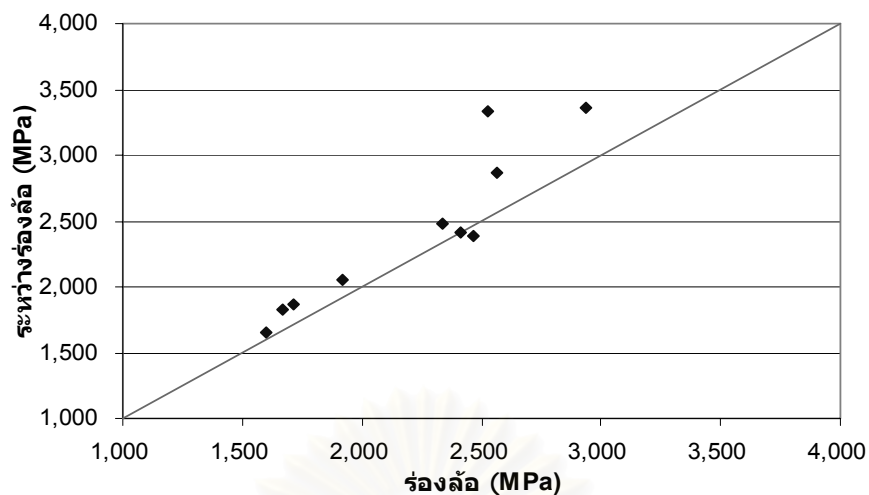
4.2.1 ความแตกต่างของค่าโมดูลัสของชั้นทางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อ (Wheeltracks) และระหว่างร่องล้อ (Between Wheeltracks)

โดยทั่วไปสภาพของโครงสร้างทางตามแนวร่องล้อ และระหว่างร่องล้อ และตลอดทั่วทั้งผิวทางจะเท่ากัน หากทำการทดสอบสภาพทางหลังจากที่ก่อสร้างหรือซ่อมบำรุงเสร็จใหม่ เมื่อทางถูกใช้ไประยะหนึ่งสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างตามแนวร่องล้อจะลดลงเนื่องจากผลของความเสื่อมสภาพเนื่องจากการใช้งานจากน้ำหนักบรรทุกที่สัญจรบนถนน อัตราการเสื่อมสภาพนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นทางที่ใช้ก่อสร้างเอง วิธีการออกแบบ และปริมาณของน้ำหนักระบบจราจร

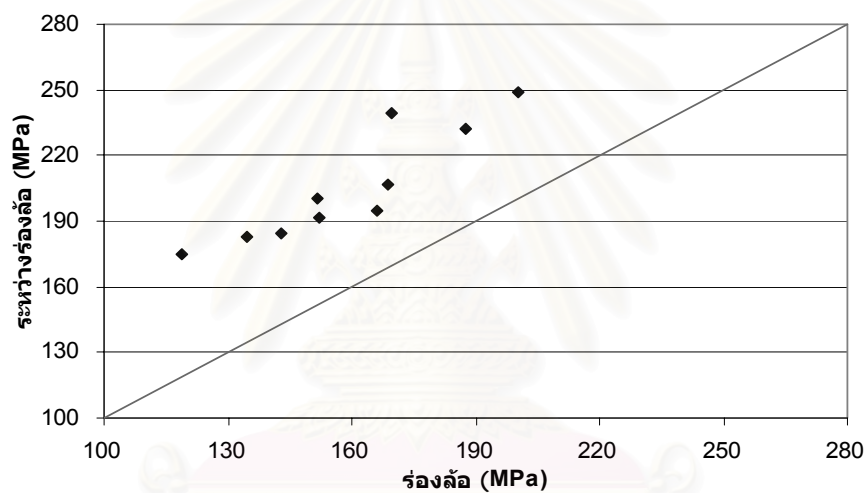
ในการศึกษาได้ทำการทดสอบด้วย FWD ด้วยน้ำหนักกดทับ (Load Level) ทั้ง 4 ระดับต่างๆ กัน ในสองแนวคือ ตามแนวร่องล้อ และระหว่างร่องล้อ โดยในรูปที่ 4.4 ถึง 4.7 จะแสดงถึงโมดูลัสของชั้นทางที่ได้จากการทดสอบด้วย FWD ทั้งสองแนวทดสอบที่น้ำหนัก 566 kPa หรือ 40 kN (เทียบเท่ากับน้ำหนักเพลา 8.2 ตัน) ในสายทางหมายเลข 309 โดยค่าโมดูลัสของชั้นทางที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับแสดงไว้ในภาคผนวก ค

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าโมดูลัสชั้นผิวทางที่ได้จากการทดสอบที่น้ำหนัก 566 kPa ตามแนวระหว่างร่องล้อจะมีค่าสูงกว่าตามแนวร่องล้อ และเช่นเดียวกันกับ โมดูลัสชั้นพื้นทาง โมดูลัสชั้นรองพื้นทาง และ โมดูลัสดินคันทาง ในรูปที่ 4.5 ถึง 4.7 ตามลำดับ

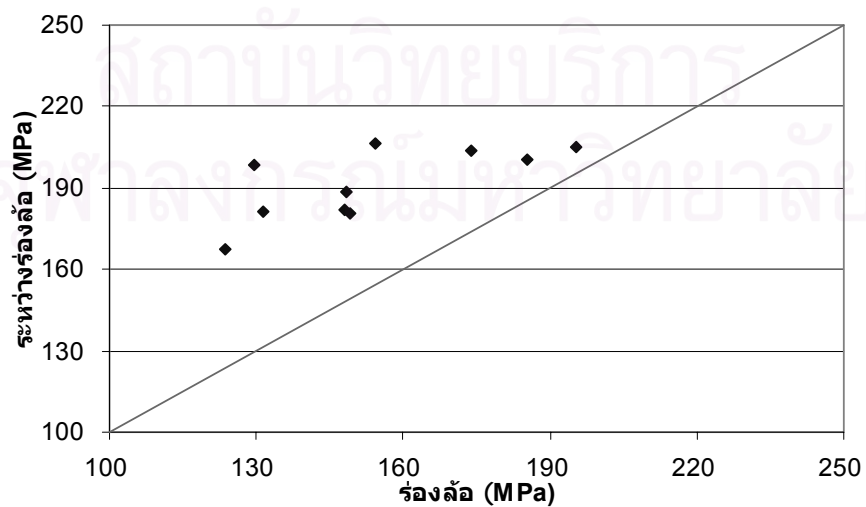
การที่ค่าโมดูลัสของชั้นทางต่างๆ ตามแนวระหว่างร่องล้อสูงกว่าตามแนวร่องล้อนี้ แสดงว่าสายทางมีการเสื่อมสภาพเกิดขึ้น และสายทางมีความผันแปรตามขวางแนวผิวทาง ดังนั้นในการศึกษาจะมุ่งวิเคราะห์ค่าโมดูลัสของชั้นทางต่างๆ ตามแนวร่องล้อซึ่งมีค่าต่ำกว่า เพราะจะสะท้อนถึงความเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางได้ดีกว่าเนื่องจากเป็นแนวที่น้ำหนักจากล้อรถสัมผัสกับผิวทางโดยตรง



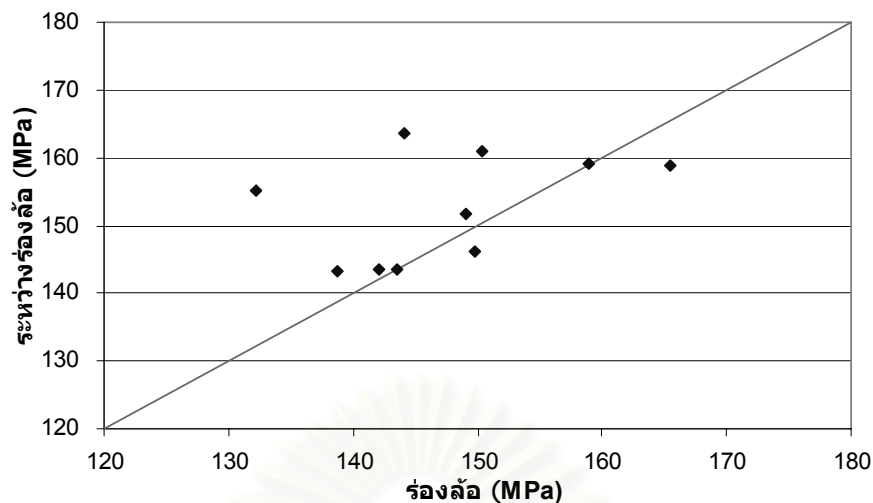
รูปที่ 4.4 โมดูลัสชั้นผิวทางจากการทดสอบตามแนวร็องล้ดและระหว่างร็องล้ด



รูปที่ 4.5 โมดูลัสชั้นพื้นทางจากการทดสอบตามแนวร็องล้ดและระหว่างร็องล้ด



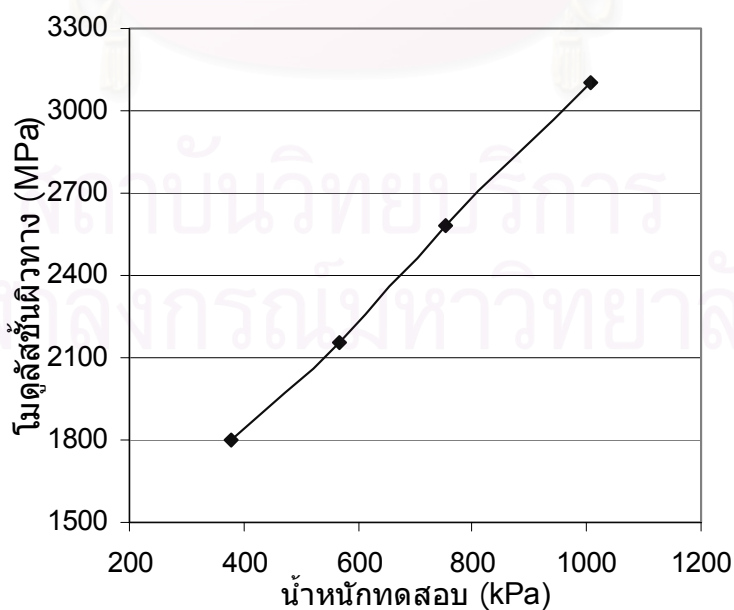
รูปที่ 4.6 โมดูลัสชั้นรองพื้นทางจากการทดสอบตามแนวร็องล้ดและระหว่างร็องล้ด



รูปที่ 4.7 โมดูลัสดินคั่นทางจากการทดสอบตามแนวร่งล้อและระหว่างร่งล้อ

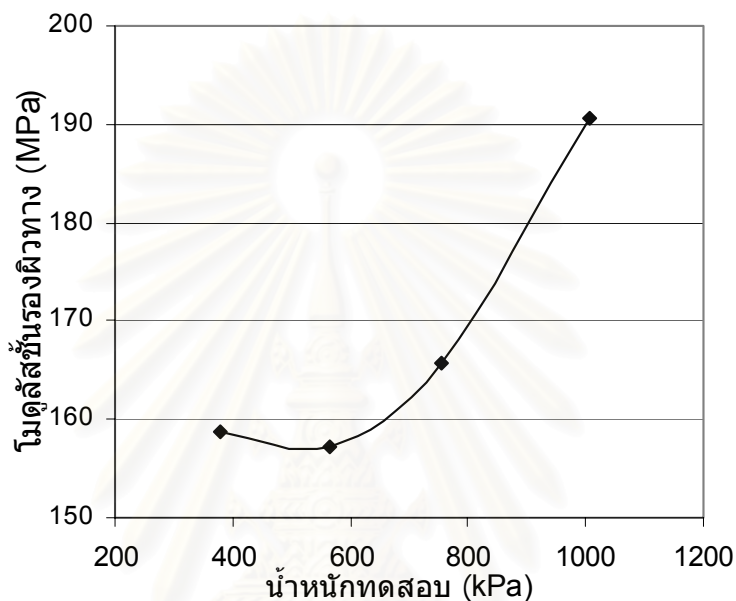
4.2.1 ผลจากน้ำหนักทดสอบ (Stress Dependency)

อย่างที่ได้อธิบายมาแล้วว่าการทดสอบด้วย FWD ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบที่ 4 ระดับน้ำหนัก เพื่อศึกษาถึงผลของความเค้นจากน้ำหนักทดสอบที่มีต่อโมดูลัสของชั้นทางต่างๆ ซึ่งจากการคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม ELMOD พบว่าค่าเฉลี่ยโมดูลัสของชั้นทางต่างๆ จากการทดสอบตลอดทั้งปีในสายทางหมายเลข 309 ที่แปรเปลี่ยนตามน้ำหนักทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.11

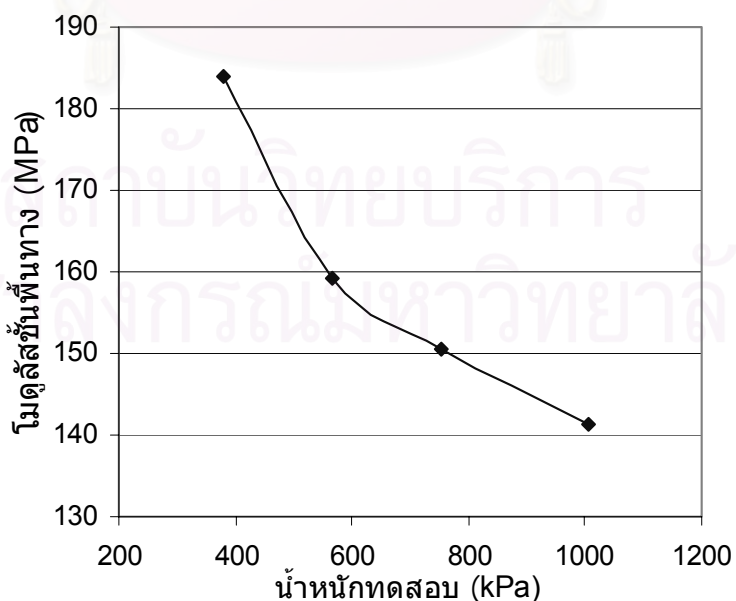


รูปที่ 4.8 ผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อโมดูลัสชั้นผิวทาง

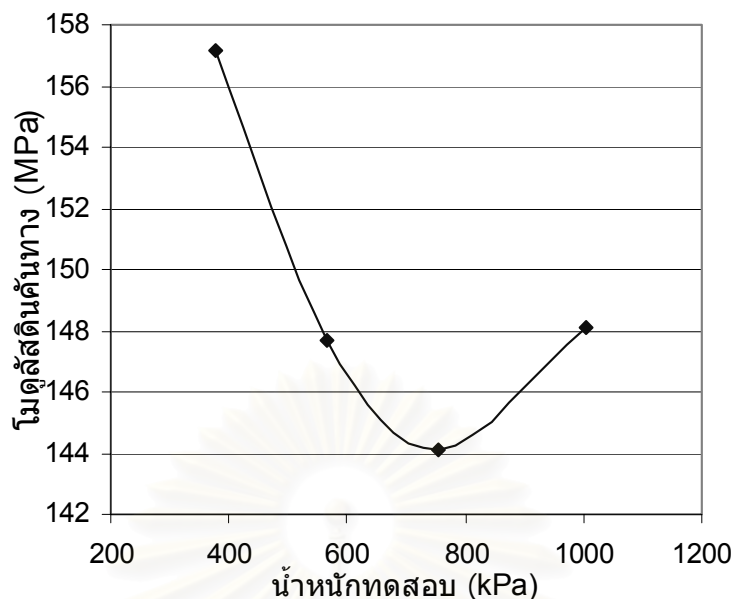
จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าค่าโมดูลัสของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักทดสอบเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสชั้นพื้นทางกับน้ำหนักทดสอบ ที่แสดงในรูปที่ 4.9 ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่เป็นพื้นทางของสายทางหมายเลข 309 นี้เป็นหินคลุก (Crushed Rock) ซึ่งจัดเป็นวัสดุประเภทอนุภาคใหญ่ (Granular Materials) ที่จะมีค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเค้นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 ผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อโมดูลัสชั้นพื้นทาง



รูปที่ 4.10 ผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อโมดูลัสชั้นรองพื้นทาง



รูปที่ 4.11 ผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อโมดูลัสดินคันทาง

และคุณสมบัตินี้จะมีความแตกต่างกับกับวัสดุประเภทอนุภาคเล็กหรือละเอียด (Fine-Grained Soil) ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคโดยค่าโมดูลัสจะลดลงเมื่อมีความเค้นเพิ่มขึ้น (Huang, 1993) ดังจะเห็นได้จากความสัมพันธ์ของโมดูลัสชั้นรองพื้นทางและโมดูลัสดินคันทางกับน้ำหนักทดสอบ ในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ทั้งนี้เพราะวัสดุที่เป็นรองพื้นทางและดินคันทางเป็นมวลรวมคลุก และ ดินเหนียวปนทรายตามลำดับ

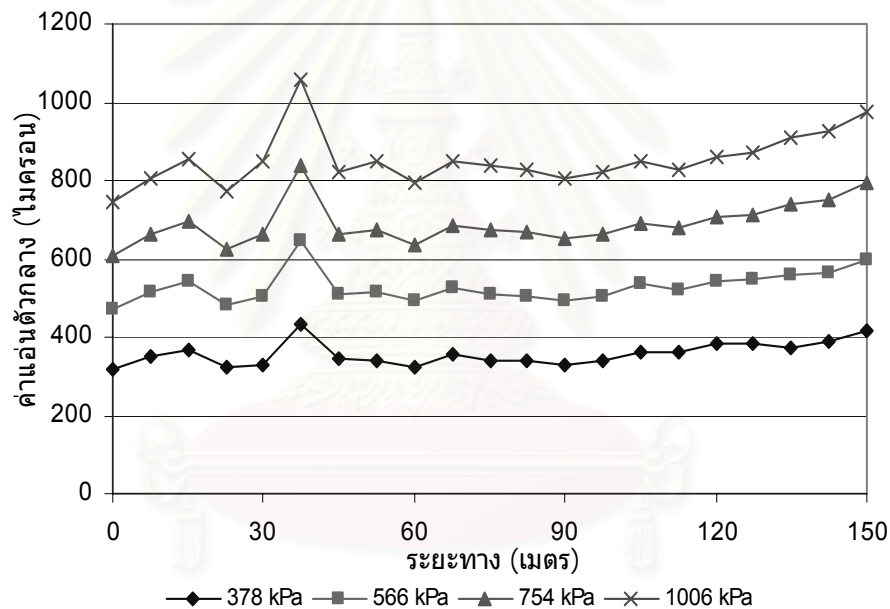
เนื่องจากในปัจจุบันโครงสร้างทางในประเทศไทยถูกออกแบบไว้รองรับน้ำหนักเพลามาตรฐานที่ 8.2 ตัน (Department of Highways, 2001) เช่นเดียวกับการออกแบบเสริมผิวทาง (Overlay Design) ที่อิงน้ำหนักเพลามาตรฐานเดียวกัน ดังนั้นในการวิจัยจะมุ่งวิเคราะห์ถึงผลที่ได้จากการทดสอบ FWD ที่ระดับน้ำหนัก 566 kPa ซึ่งจะเทียบได้กับแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักเพลามาตรฐาน 8.2 ตัน และกล่าวโดยสรุปรวมจากผลที่ได้ในหัวข้อ 4.2.1 การวิจัยจะมุ่งวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบในแนวร่องล้อ ที่น้ำหนักทดสอบ 566 kPa

4.3 การวิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาล

ในส่วนนี้จะวิเคราะห์ถึงความผันแปรตามฤดูกาลของคุณสมบัติของโครงสร้างทาง อันได้แก่ ค่าแอนตัวกลาง โมดูลัสชั้นผิวทาง โมดูลัสชั้นพื้นทาง โมดูลัสชั้นรองพื้นทาง และโมดูลัสดินคันทาง โดยมุ่งวิเคราะห์ข้อมูลในสายทางหมายเลข 309 ที่ผู้วิจัยทดสอบเป็นหลัก เนื่องจากการเก็บข้อมูลการทดสอบและตัวแปรอื่นๆ มีความละเอียดมากกว่า

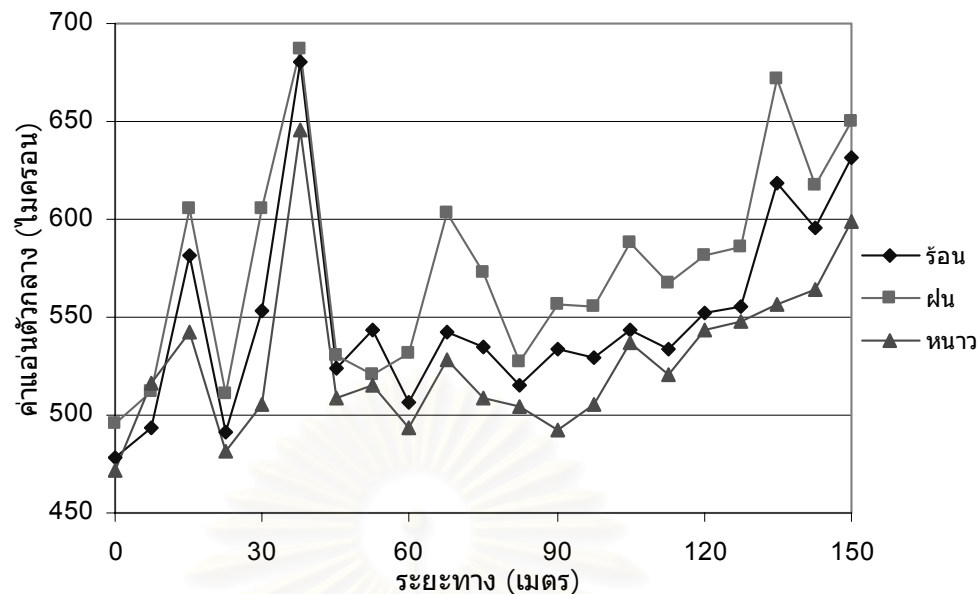
4.3.1 ความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนตัวกลาง (Center Deflection, D_0)

เนื่องจากค่าแอนตัวกลางซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จากการแอนตัวที่กึ่งกลางของแผ่นรับน้ำหนักทดสอบ (Loading Plate) ของ FWD ซึ่งโดยปกติจะมีค่าสูงสุดในแอ่งของการแอนตัว (Deflection Basin) ทำให้ค่าแอนตัวกลางจะเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นชั้นทางที่มีวัสดุเป็นตัวประสาน (Bound Materials) เช่น ชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต และวัสดุที่ไม่ใช่ตัวประสาน (Unbound Materials) ซึ่งได้แก่ ชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง และชั้นดินคันทาง ซึ่งต่างมีคุณสมบัติที่ขึ้นกับตัวแปร อุณหภูมิและความชื้นแตกต่างกันไป ดังนั้นการวิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนตัวกลาง จะเปรียบเหมือนการวิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของโครงสร้างชั้นทางทั้งหมดโดยรวมที่ขึ้นกับปัจจัยแวดล้อมต่างๆ



รูปที่ 4.12 ผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อค่าแอนตัวกลางจากการทดสอบตามแนวร่องล้อในเดือนธันวาคม (ฤดูหนาว)

จากรูปที่ 4.12 แสดงถึงผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อค่าแอนตัวกลาง ที่วัดได้จากการทดสอบในเดือนธันวาคม (ฤดูหนาว) ในสายทางหมายเลข 309 จะพบว่ากราฟของค่าแอนตัวกลางที่วัดได้ในตำแหน่งทุกๆ 25 เมตร ที่ทดสอบจากจุดเริ่มต้น (0 เมตร) จนถึงจุดสิ้นสุด (150 เมตร) มีลักษณะคล้ายกัน ทั้ง 4 ระดับน้ำหนักทดสอบ (378 566 754 และ 1006 kPa) รายละเอียดของลักษณะทางกายภาพขณะทดสอบในสายทางหมายเลข 309 จะแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.13 กราฟค่าแอนต์วกลางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องลื้อ
ที่น้ำหนัก 566 kPa ในฤดูกาลร้อน ฝน และหนาว

ในรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงผลของฤดูกาลที่มีต่อกราฟค่าแอนต์วกลางที่ได้จากการทดสอบที่น้ำหนัก 566 kPa บนสายทางหมายเลข 309 จะพบว่ากราฟค่าการแอนต์วกลางในฤดูฝนมีการกระจายตัว มากกว่าในฤดูร้อน และฤดูหนาวเล็กน้อยตามลำดับ ตรวจสอบได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปร (C.V.) ซึ่งเป็นค่าทางสถิติที่ไม่มีหน่วย เหมาะสำหรับการกระจายตัวของข้อมูลที่มีขนาดต่างกันได้ชัดเจน (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2541) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 มีค่าเท่ากับ 0.093 0.090 และ 0.076 ตามลำดับ นั้นแสดงว่าอิทธิพลของฤดูกาลแบ่งออกเป็นผลของอุณหภูมิและความชื้น โดยความแตกต่างระหว่างค่าการแอนต์วกลางในฤดูฝนและในฤดูร้อนจะเป็นผลมาจากอุณหภูมิ และ ความชื้น ส่วนความแตกต่างระหว่างค่าการแอนต์วกลางในฤดูร้อนและในฤดูหนาวเป็นผลมาจากอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เนื่องจากทั้งสองฤดูกาลมีสภาพอากาศแห้ง (Dry Season) ตรวจสอบจากปริมาณน้ำฝนที่มีค่าใกล้เคียงกันคือ 29.2 และ 0 มิลลิเมตร ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพขณะทดสอบในสายทางหมายเลข 309

ลักษณะทางกายภาพ	เมษายน 2547	สิงหาคม 2547	ธันวาคม 2547
อุณหภูมิ (°ซ)	31.0	29.2	25.6
- อากาศ	37.9	32.8	30.1
- ผิวทาง	48.5	38.7	33.3
- กึ่งกลางชั้นผิวทาง	50.8	41.3	35.7
ปริมาณน้ำฝน	29.2	176.4	0
แสงอาทิตย์ (ชั่วโมง)	9.1	4.8	8.8
ชั้นพื้นทาง			
- ความชื้น (%)	4	6	3
ชั้นรองพื้นทาง			
- ความชื้น (%)	4	10	4
ชั้นดินคันทาง			
- ความชื้น (%)	6	17	6

ตารางที่ 4.5 ค่าทางสถิติของค่าแอนตัวกลางในหน่วยไมครอนของการทดสอบ

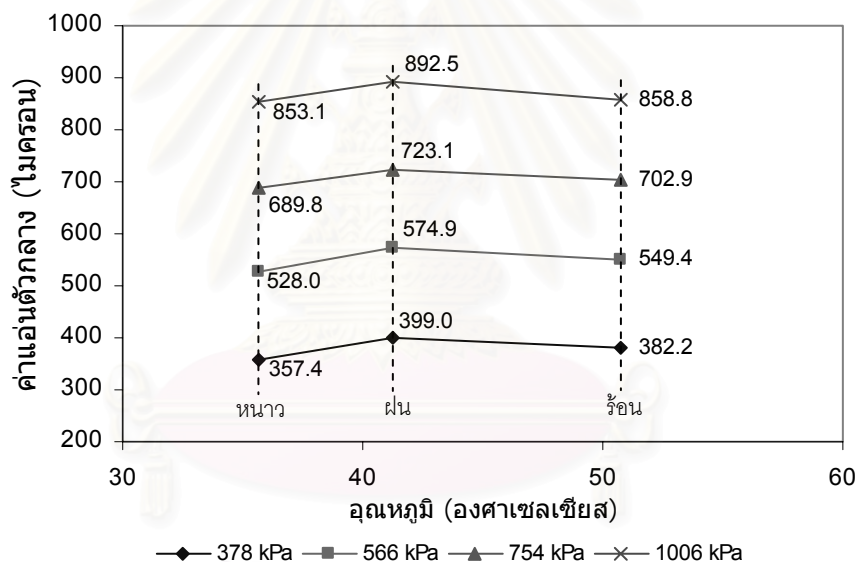
ในทุกฤดูกาลและทุกค่าน้ำหนักทดสอบ

		ค่าสถิติ	ฤดูกาล		
			เมษายน 2547	สิงหาคม 2547	ธันวาคม 2547
น้ำหนัก ทดสอบ	378 kPa	Mean	382.2	399.0	357.4
	5.3 ton	C.V.(%)	8.6	8.8	8.6
	566 kPa	Mean	549.4	574.9	528.0
	8.2 ton	C.V.(%)	9.0	9.3	7.6
	754 kPa	Mean	702.9	723.1	689.8
	10.7 ton	C.V.(%)	9.1	8.8	7.9
	1006	Mean	858.8	892.5	853.1
	14.2 ton	C.V.(%)	9.5	8.9	8.1

จากตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน ของค่าการแอนตัวกลางของการทดสอบในทุกฤดูกาลและทุกค่าน้ำหนักทดสอบ จะพบว่าค่าเฉลี่ยของค่าแอนตัวกลางในฤดูฝน (สิงหาคม 2547) มากกว่าฤดูร้อน (เมษายน 2547) และ ในฤดูหนาว (ธันวาคม 2547) ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากความชื้นในโครงสร้างทางที่ต่างกัน โดยในฤดูฝนที่มีความชื้นในโครงสร้างทางสูงกว่า จะมีค่าแอนตัวกลางสูงหรือมีความแข็งแรงของโครงสร้างทางต่ำกว่า ในฤดูร้อนและฤดูหนาวที่มีความชื้นต่ำกว่า สอดคล้องกับการศึกษาของ Kestler และ Berg (1995)

ที่ว่า ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นในโครงสร้างทางเป็นผลโดยตรงที่ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนัก (Bearing Capacity) ลดลง

และยังพบว่า การกระจายของค่าการแอนตัวกลางที่อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ความผันแปร ในฤดูฝน และฤดูร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน แต่มากกว่าในฤดูหนาว ในทุกน้ำหนักทดสอบ แสดงว่า อุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางในขณะทดสอบจะมีผลต่อการกระจายของค่าการแอนตัวกลาง โดยที่ค่าการแอนตัวกลางที่วัดได้จากการทดสอบอุณหภูมิที่สูงกว่าจะมีการกระจายสูงกว่าในการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Nouredin (1994) และในฤดูร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูง (50.8 °ซ) การกระจายของค่าการแอนตัวกลางจะสูงขึ้นเมื่อน้ำหนักทดสอบมากขึ้น แต่แนวโน้มนี้ไม่เป็นจริงสำหรับฤดูฝน และฤดูหนาว ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า (41.3 °ซ และ 35.7 °ซ) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเฉลี่ยการแอนตัวสูงสุดที่น้ำหนักทดสอบ 1006 kPa หรือ 14.2 ตัน จะมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยการแอนตัวสูงสุดที่น้ำหนักทดสอบ 378 kPa หรือ 5.3 ตัน ประมาณ 2.3 เท่า



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอนตัวกลางกับอุณหภูมิในแต่ละน้ำหนักทดสอบ

จากรูปที่ 4.14 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์จากข้อมูลในตารางที่ 4.5 โดยแทนแทนค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของชั้นผิวทางที่วัดจากตำแหน่งกึ่งกลางของชั้นผิวทาง ส่วนแทนค่าเฉลี่ยของการแอนตัวกลางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อ ของสายทางหมายเลข 309 จะพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิและน้ำหนักกดทับ ไม่มีผลต่อค่าการแอนตัวกลางที่วัดได้ในแต่ละฤดูกาล ดูได้จากกราฟแต่ละเส้นมีลักษณะขนานกัน

และยังพบว่า และมีการกระจายตัวใกล้เคียงกัน ดูจากค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปรของทั้งสองแนวทางการทดสอบในตารางที่ 4.6 อยู่ที่ 8.18% และ 8.50% ตามลำดับ แต่จะเห็นว่าค่าเฉลี่ย

ของค่าแอนตัวกลางที่วัดได้จากการทดสอบตามแนวระหว่างร่องล้อมีค่าน้อยกว่าค่าแอนตัวกลางที่วัดจากแนวร่องล้อ ประมาณ 13.0% แสดงว่าในส่วนทดสอบ (Section) เดียวกันความแข็งแรงของโครงสร้างทางในแนวร่องล้อจะมีค่าน้อยกว่าความแข็งแรงของโครงสร้างทางในแนวระหว่างร่องล้อ ดังนั้นในการพิจารณาถึงความผันแปรตามฤดูกาลของค่าการแอนตัวในการวิจัยนี้จะมุ่งไปที่ค่าการแอนตัวที่วัดได้ตามแนวร่องล้อเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสของชั้นทางต่างๆ เนื่องจากค่าการแอนตัวที่ได้จะสะท้อนถึงความเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางและพฤติกรรมการใช้งานของถนนจริง และค่าการแอนตัวตามแนวร่องล้อจะได้จากการทดสอบที่น้ำหนัก 566 kPa หรือ 8.2 ตัน เป็นตัวแทน เพราะน้ำหนักทดสอบนี้เสมือนจริงกับน้ำหนักเพลามาตรฐานที่กรมทางหลวงใช้ออกแบบงานทาง

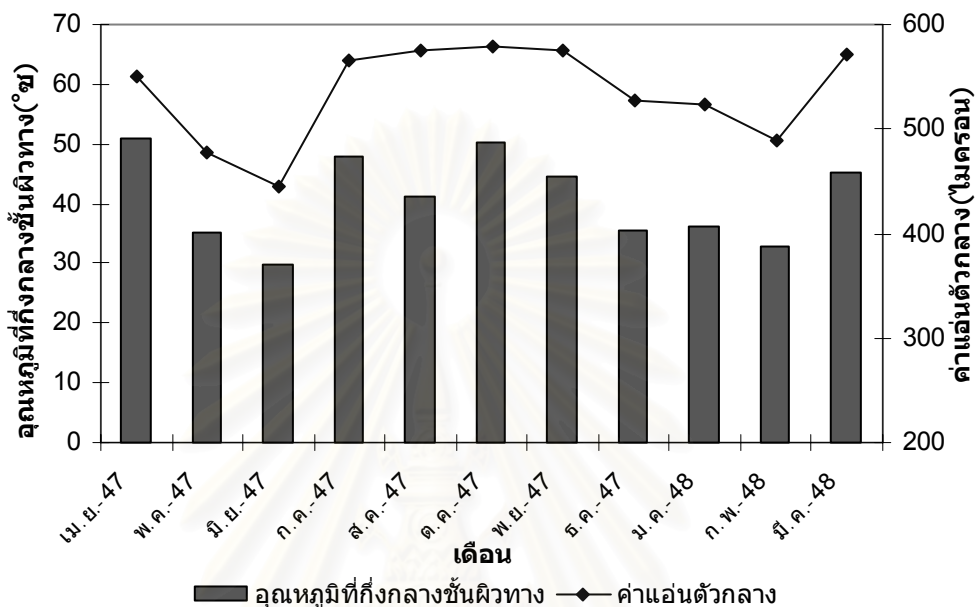
ตารางที่ 4.6 ค่าทางสถิติของค่าแอนตัวกลางที่ผันแปรตามฤดูกาลในหน่วยไมครอนของการทดสอบตามแนวร่องล้อและแนวระหว่างร่องล้อของทุกน้ำหนักทดสอบ

		ค่าสถิติ	แนวการทดสอบ		
			แนวร่องล้อ	ระหว่างร่องล้อ	ค่าต่าง (%)
น้ำหนัก ทดสอบ	378 kPa	Mean	361.7	315.5	14.7
	5.3 ton	C.V. (%)	8.52	9.49	-10.2
	566 kPa	Mean	530.7	469.6	13.0
	8.2 ton	C.V. (%)	8.18	8.50	-3.7
	754 kPa	Mean	685.8	617.1	11.1
	10.7 ton	C.V (%)	8.29	8.45	-1.9
	1006 kPa	Mean	846.5	774.3	9.3
	14.2 ton	C.V. (%)	8.46	8.33	1.5

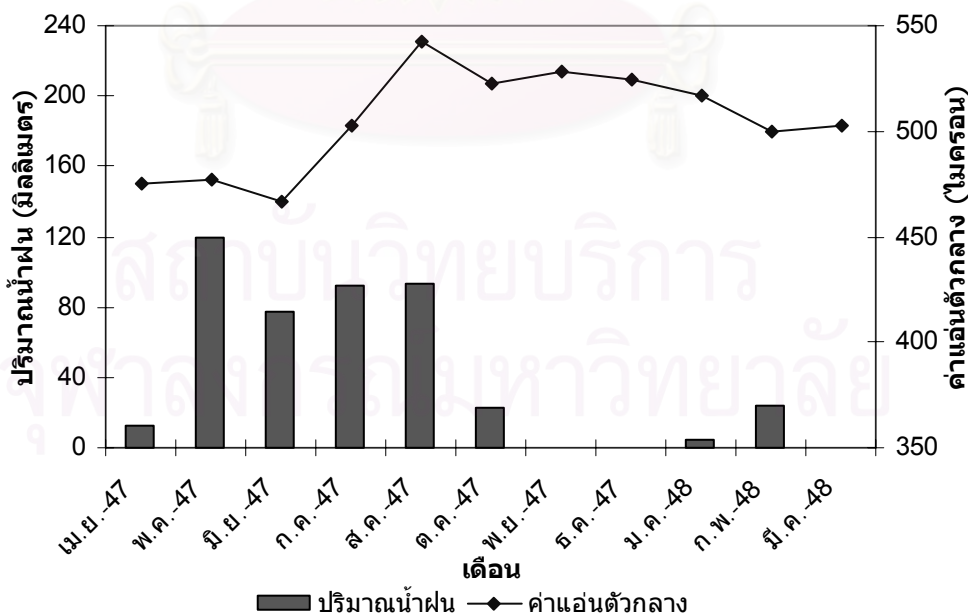
จากรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนตัวกลางกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางที่วัดได้ในขณะทดสอบ จะเห็นว่าค่าแอนตัวกลางจะผันแปรตามอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าแอนตัวกลางเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อดูค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 4.7 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.851 และมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าการแอนตัว และเป็นที่ยอมรับกันดีในการศึกษาทั่วไปโดยที่ AASHTO (1986) ได้เสนอวิธีปรับแก้ผลของอุณหภูมิสำหรับค่าการแอนตัว และพัฒนาต่อมาใน AASHTO (1993) ทำให้ผู้ศึกษาต้องทำการปรับแก้ค่าแอนตัวกลางโดยใช้ค่าปรับแก้ที่พัฒนาจากข้อมูลที่รวบรวมมาวิเคราะห์ในการศึกษานี้ใน

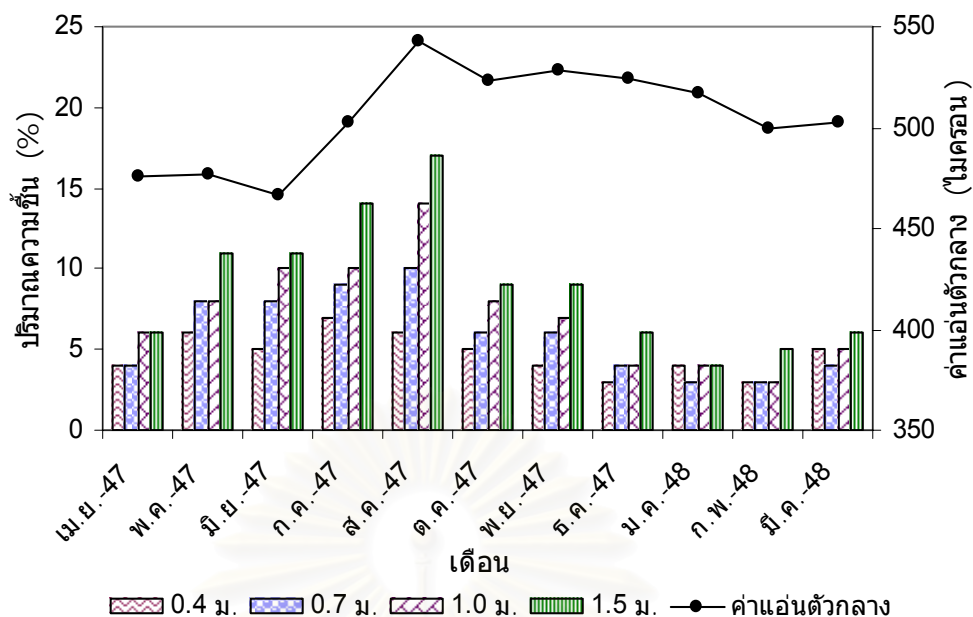
หัวข้อที่ 4.4.1 ที่จะกล่าวในรายละเอียดต่อไป ผลของการปรับแก้จะพบว่าความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนต์วากลางที่ได้จากการทดสอบในสายทางหมายเลข 309 มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนและปริมาณความชื้นในโครงสร้างทาง ดังแสดงในรูป 4.16 และ 4.17



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนต์วากลางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง



รูปที่ 4.16 ความระหว่างค่าแอนต์วากลางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa กับปริมาณน้ำฝน



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนตัวกลางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa กับปริมาณความชื้นที่ความลึกตำแหน่งต่างๆ ในชั้นทาง

จากรูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนตัวกลางที่ปรับแก้ผลของอุณหภูมิกับปริมาณความชื้นค่าแอนตัวกลางที่ปรับแก้ผลของอุณหภูมิลแล้วมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝน กล่าวคือในระหว่างเดือน พฤษภาคม ถึง สิงหาคม ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนสูงขึ้น ค่าแอนตัวกลางที่วัดได้จะมีค่าสูงขึ้น และในเดือนตุลาคม ถึง มีนาคม ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนลดน้อยลง ค่าแอนตัวกลางที่วัดได้จะค่อยๆ ลดค่าต่ำลงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนตัวกลางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa ในสายทางต่างๆ กับปัจจัยแวดล้อม

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์			
	อุณหภูมิชั้นผิวทาง	อุณหภูมิรายเดือน	ปริมาณน้ำฝน	ความชื้นที่ 1.5 ม.
ค่าแอนตัวกลาง	0.851**	0.078	0.072	0.154
ค่าแอนตัวกลางที่ปรับแก้แล้ว	0.238	-0.456	0.119	0.161

หมายเหตุ ** มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

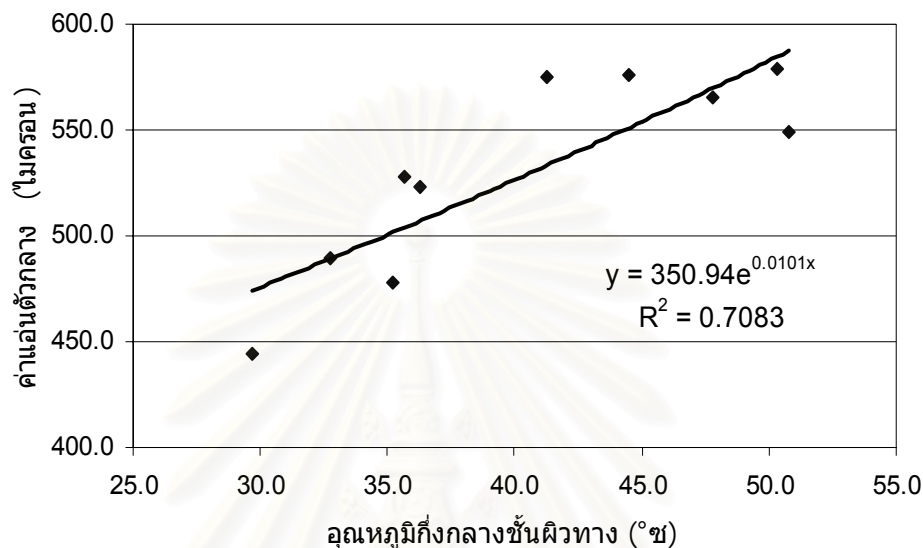
เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 4.7 พบว่าค่าแอมพลิจูดกลางที่ปรับแก้ผลของอุณหภูมิแล้วไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง ต่างไปจากค่าแอมพลิจูดกลางที่ยังไม่ปรับแก้ผลของอุณหภูมิที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง จะเห็นว่าการปรับแก้ผลของอุณหภูมิได้ขจัดผลของอุณหภูมิในขณะทดสอบออกไป นอกจากนี้ทั้งค่าแอมพลิจูดกลางและค่าแอมพลิจูดกลางที่ปรับแก้ผลของอุณหภูมิไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน ปริมาณน้ำฝน และปริมาณความชื้นที่ระดับความลึก 1.5 เมตรซึ่งอยู่ในชั้นดินเดิม อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นี้ใช้วัดความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นเท่านั้น ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่น้อยไม่ได้หมายความว่าไม่มีความสัมพันธ์กันเลย ค่าแอมพลิจูดกลางกับปัจจัยแวดล้อมนี้อาจมีความสัมพันธ์ในลักษณะอื่นๆ ก็ได้ (สุวิธาน มนแพวงศานนท์, 2547)

เนื่องจากค่าแอมพลิจูดกลางที่วัดได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วย FWD นั้นจะแสดงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างทางที่จะรับน้ำหนักใช้งาน ความแข็งแรงนี้จะผันแปรไปตามเวลาและจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลัก 5 ชนิด ด้วยกัน ได้แก่

1. ปริมาณจราจรในรูปน้ำหนักเพลามาตรฐานต่อปี เนื่องจากผลของน้ำหนักจากปริมาณจราจรที่มีต่อพฤติกรรม (Performance) ของถนนจะแสดงออกอย่างชัดเจนในถนนที่รองรับปริมาณจราจรมากๆ (Haas, Hudson และ Zaniewski, 1994)
2. ความหนาของชั้นผิวทาง เป็นค่าที่สะท้อนถึงความแข็งแรงของชั้นผิวทาง และความทนทานต่อการแตกร้าว (Haas et al., 1994)
3. ความหนาของโครงสร้างทางทั้งหมด เป็นปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของถนนได้ชัดเจนกว่าปัจจัยอื่นๆ (White และ Coree, 1990)
4. อายุการใช้งานของถนน ที่อยู่ในรูปของจำนวนปีหลังจากการก่อสร้างหรือซ่อมบำรุงครั้งล่าสุดจะสะท้อนถึงผลของจำนวนรอบของฤดูกาลที่ถนนผ่านมา (White และ Coree, 1990)
5. ปริมาณน้ำฝนในรอบปี เนื่องจากความผันแปรของค่าการแอมพลิจูดในบริเวณที่มีสภาพภูมิอากาศคล้ายกันจะมีลักษณะเหมือนกัน (Rutherford 1989)

เพื่อนำเอาความผันแปรตามฤดูกาลของความแข็งแรงของโครงสร้างทางวิเคราะห์เทียบกับปัจจัยต่างๆ ดังกล่าว และเพื่อความชัดเจนในการนำเสนอ ในการศึกษานี้จึงประยุกต์ใช้ตัวชี้วัดความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอมพลิจูดใน 2 ชนิดที่ Samson และ Frechette (1995) ได้นำเสนอไว้ให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของไทย ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างค่าแอมพลิจูดสูงสุดต่อค่า

แอมป์ค่าแอมป์ค่าที่ 35 °ซ (D_{max}/D_{35}) และดัชนีความผันแปร (Variation Index, VI) โดยรายละเอียดของตัวชี้วัดความผันแปรตามฤดูกาลจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2 และในที่นี่จะใช้ค่าแอมป์ค่าที่ 35 °ซ เป็นค่าการแอมป์ค่าอ้างอิง โดยจะหาได้จากความสัมพันธ์แบบเอกซโพเนนเชียลของค่าแอมป์ค่ากลางกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางของสายทางหมายเลข 309 ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมป์ค่ากลางกับอุณหภูมิในสายทางหลายเลข 309

ผลการคำนวณหาค่าของตัวชี้วัดความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอมป์ค่าทั้ง 2 ชนิด จะแสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ตัวบ่งชี้ความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอมป์ค่าในแต่ละสายทาง

สายทาง	ตัวชี้วัดความผันแปรตามฤดูกาล	
	D_{max}/D_{35}	Variation Index (VI)
309	1.082	0.0423
4	1.015	0.1087
9	1.037	0.1077
3087	1.056	0.0312
3144	1.030	0.0618
3145	1.065	0.0812
3222	1.104	0.0688
4009	1.068	0.0765

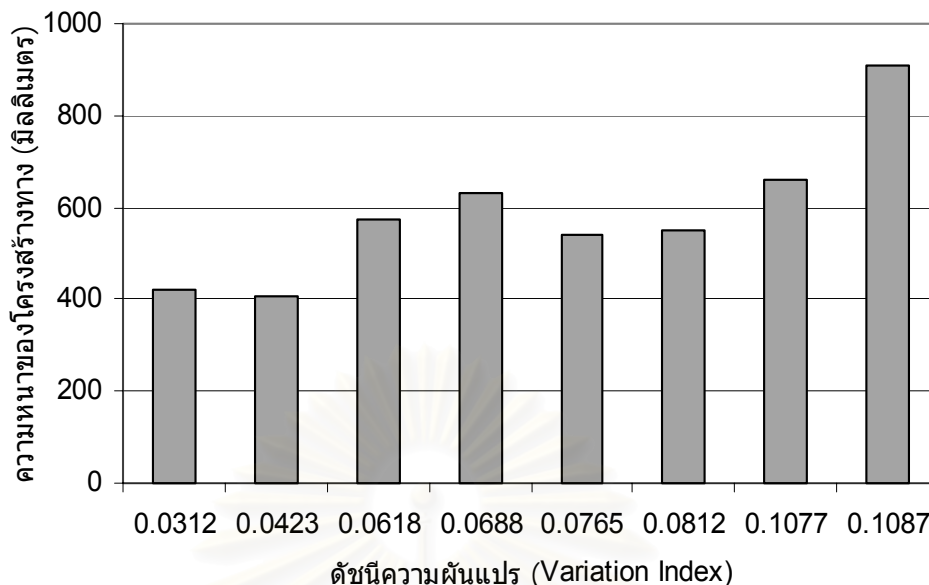
เมื่อได้ค่าของตัวชี้วัดความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนตัวกลางแล้ว จากนั้นจะวิเคราะห์ผลของตัวแปรทั้ง 5 ชนิดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 พบว่า

ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวบ่งชี้ความผันแปรตามฤดูกาลกับปัจจัยต่างๆ

ดัชนี	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์				
	น้ำหนักเพลามาตรฐานต่อปี	ความหนาชั้นผิวทาง	ความหนารวม	อายุการใช้งานของถนน	ปริมาณน้ำฝน
D_{max}/D_{35}	0.423	0.214	-0.546	0.022	0.100
VI	0.238	0.319	0.847**	-0.406	-0.046

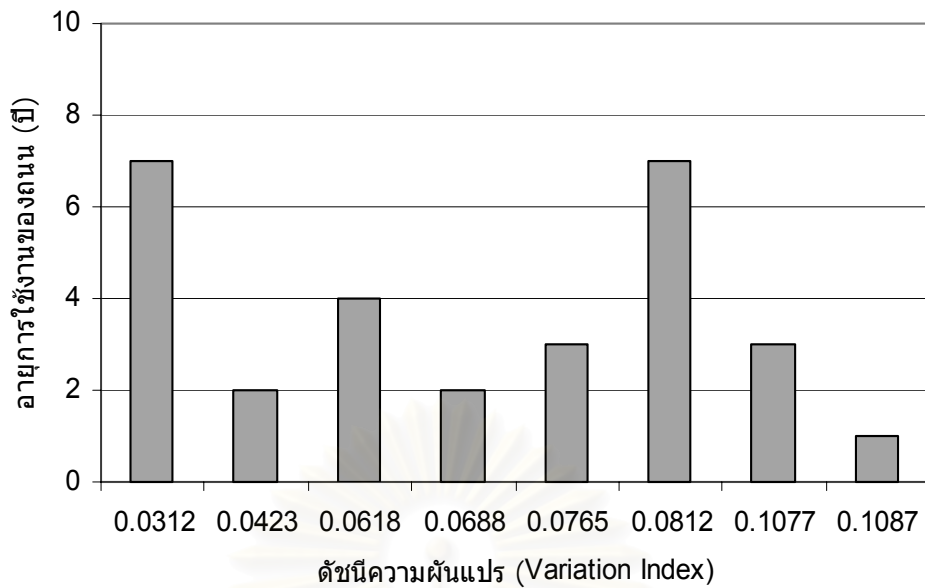
หมายเหตุ ** แทนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

1. ผลของปริมาณจราจรในรูปน้ำหนักเพลามาตรฐานต่อปี ดูเหมือนจะไม่มีความสัมพันธ์กับตัวชี้วัดความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนตัวกลาง เพราะเมื่อพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัดกับตัวแปรนี้มีค่า 0.423 และ 0.238 สำหรับ D_{max}/D_{35} และ VI ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9
2. ผลของความหนาของชั้นผิวทาง พบว่ามีไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับตัวชี้วัดความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนตัวกลาง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัดกับตัวแปรนี้มีค่า 0.214 และ 0.319 สำหรับ D_{max}/D_{35} และ VI ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Samson และ Frechette (1995)
3. ผลความหนาของโครงสร้างทางทั้งหมด พบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับตัวชี้วัด VI ที่ระดับ 0.01 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.847 ดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยที่ค่า VI (ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนตัวกลางมาก) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของโครงสร้างทางทั้งหมดเพิ่มขึ้น และจะเห็นความสัมพันธ์นี้ได้ชัดเจนในรูปที่ 4.19 ตรงตามแนวคิดทั่วไปที่ว่าโครงสร้างทางที่มีความหนามากกว่าย่อมมีความแข็งแกร่งต่อการสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนักได้ดีกว่าโครงสร้างทางที่มีความหนาน้อยกว่า สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Samson และ Frechette (1995)



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความผันแปรกับความหนาของโครงสร้างทางทั้งหมด

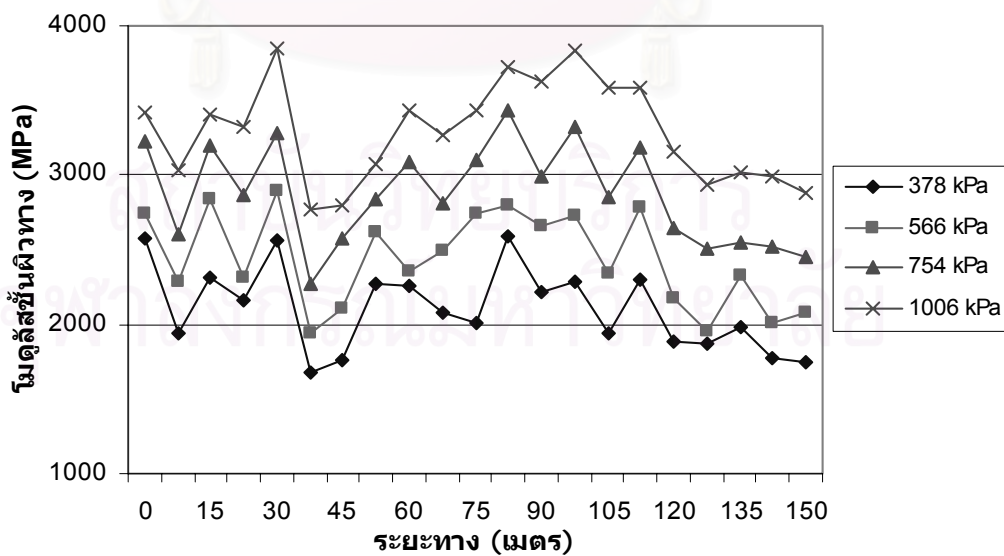
4. ผลอายุการใช้งานของถนนที่อยู่ในรูปของจำนวนปีหลังจากการก่อสร้างหรือซ่อมบำรุงครั้งล่าสุด พบว่ามีไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับตัวชี้วัดความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนต์วากลางโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัดกับตัวแปรนี้ที่มีค่า 0.022 และ -0.419 สำหรับ D_{max}/D_{35} และ VI ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.20 จะพบว่าความสัมพันธ์ของค่า VI กับอายุใช้งานของถนน มีแนวโน้มที่ VI จะมีค่าน้อยเมื่ออายุใช้งานของถนนมาก ทั้งนี้ถนนที่มีอายุใช้งานมากน่าจะมีความเสื่อมสภาพมากกว่าถนนที่ก่อสร้างหรือซ่อมบำรุงใหม่ เป็นผลให้มีความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนต์วากลางตามไปด้วย
5. ผลของปริมาณน้ำฝนในรอบปีพบว่ามีไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับตัวชี้วัดความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนต์วากลาง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัดกับตัวแปรนี้ที่มีค่า 0.100 และ -0.046 สำหรับ D_{max}/D_{35} และ VI ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Samson และ Frechette (1995) แม้ว่าปริมาณน้ำฝนในรอบปีน่าจะมีผลต่อความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนต์วากลาง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลของปัจจัยอื่นๆ ที่แฝงอยู่ด้วย



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความผันแปรกับอายุการใช้งานของถนน

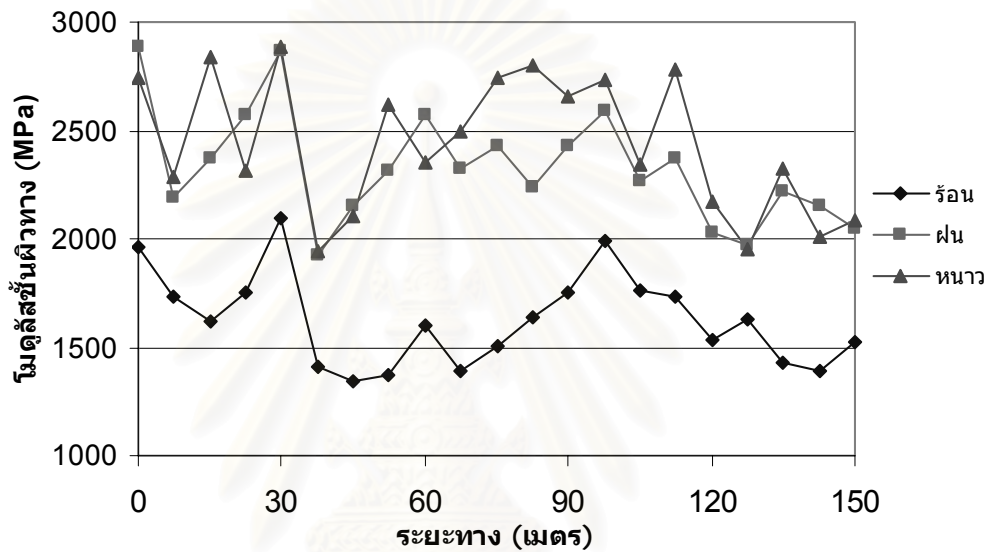
4.3.2 ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสของชั้นผิวทาง (Asphalt Concrete Modulus, E_{AC})

จากรูปที่ 4.21 แสดงถึงผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อโมดูลัสของชั้นผิวทาง ที่วัดได้จากการทดสอบในเดือนธันวาคม (ฤดูหนาว) ในสายทางหมายเลข 309 จะพบว่ากราฟของค่าแอนตัวกลางที่วัดได้ในตำแหน่งทุกๆ 25 เมตร ที่ทดสอบจากจุดเริ่มต้น (0 เมตร) จนถึงจุดสิ้นสุด (150 เมตร) มีลักษณะคล้ายกัน ทั้ง 4 ระดับน้ำหนักทดสอบ (378 566 754 และ 1006 kPa)



รูปที่ 4.21 ผลของน้ำหนักทดสอบที่มีต่อโมดูลัสชั้นผิวทางจากการทดสอบตามแนวร่องล้อในเดือนธันวาคม (ฤดูหนาว)

ในรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นถึงผลของฤดูกาลที่มีต่อกราฟโมดูลัสของชั้นผิวทาง ที่ได้จากการทดสอบที่น้ำหนัก 566 kPa บนสายทางหมายเลข 309 จะพบว่าโมดูลัสของชั้นผิวทางในฤดูฝนและฤดูหนาวซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยน้อยกว่า จะมีค่ามากกว่าโมดูลัสของชั้นผิวทางในฤดูร้อน และการกระจายของโมดูลัสของชั้นผิวทางในฤดูร้อนมีค่ามากกว่าในฤดูฝน ตรวจสอบได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (C.V.) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.10 มีค่าเท่ากับ 0.131 และ 0.113 ตามลำดับ นั้นแสดงว่าอิทธิพลของฤดูกาลแบ่งออกเป็นผลของอุณหภูมิ โดยความแตกต่างระหว่างโมดูลัสของชั้นผิวทาง ในแต่ละฤดูจะเป็นผลมาจากอุณหภูมิ



รูปที่ 4.22 กราฟโมดูลัสชั้นผิวทางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa ในฤดูกาลร้อน ฝน และหนาว

ตารางที่ 4.10 ค่าทางสถิติของโมดูลัสชั้นผิวทางของการทดสอบในทุกฤดูกาลและทุกค่าน้ำหนักทดสอบ

		ค่าสถิติ	ฤดูกาล		
			เมษายน 2547	สิงหาคม 2547	ธันวาคม 2547
น้ำหนักทดสอบ	378 kPa	Mean	1251.5	1918.2	2103.2
	5.3 ton	C.V. (%)	0.144	0.153	0.134
	566 kPa	Mean	1626.2	2329.9	2438.3
	8.2 ton	C.V. (%)	0.131	0.113	0.130
	754 kPa	Mean	2036.6	2721.3	2872.2
	10.7 ton	C.V. (%)	0.126	0.098	0.117
	1006	Mean	2558.7	3262.9	3292.8
	14.2 ton	C.V. (%)	0.153	0.102	0.102

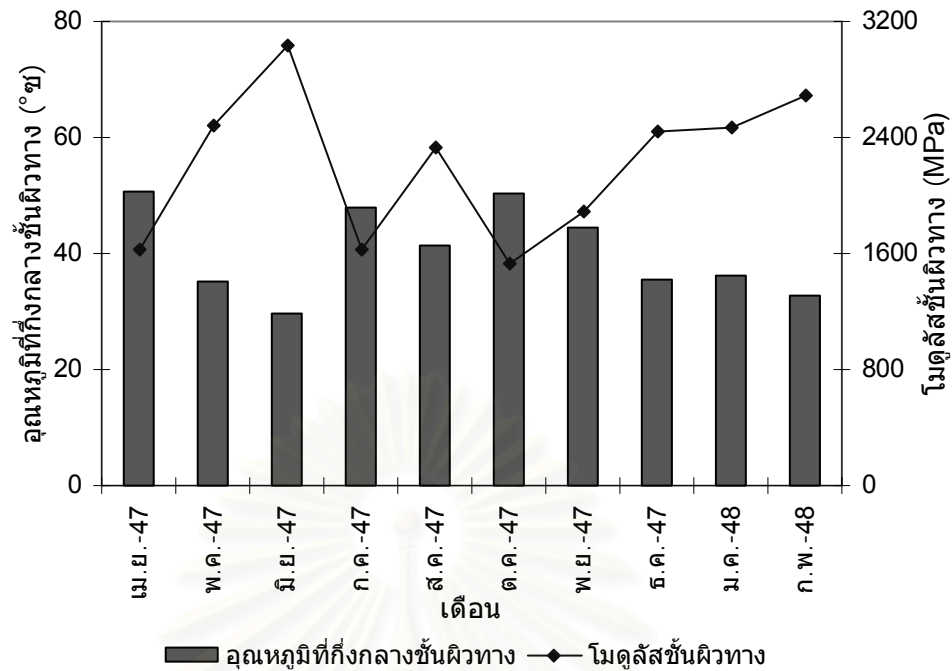
จากตารางที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของชั้นผิวทางกับอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ในแต่ละสายทาง จะเห็นว่าโมดูลัสชั้นผิวทางจะผันแปรแบบผกผันกับอุณหภูมิในทุกระดับ ได้แก่ อุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง อุณหภูมิที่ผิวชั้นผิวทาง อุณหภูมิอากาศ และอุณหภูมिरายเดือนที่ได้จากสถิติของกรมอุตุนิยมวิทยา ยกเว้นในความสัมพันธ์กับอุณหภูมिरายเดือน ในสายทางหมายเลข 3145 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนเนื่องจากอุณหภูมिरายเดือนไม่ได้วัดจากในสนามโดยตรง และยังพบว่าโมดูลัสชั้นผิวทางมีความสัมพันธ์อย่างมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 และ 0.05 กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง ในเกือบทุกสายทาง และความสัมพันธ์นี้ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ผิวชั้นผิวทาง อุณหภูมิอากาศ และอุณหภูมिरายเดือน ตามลำดับ แสดงว่าโมดูลัสชั้นผิวทางจะมีความผันแปรตามฤดูกาลไปตามแต่ละที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางขณะทดสอบดังจะเห็นได้จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของโมดูลัสชั้นผิวทาง
กับอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ในแต่ละสายทาง

สายทาง	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์			
	อุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง	อุณหภูมิที่ผิวชั้นผิวทาง	อุณหภูมิอากาศ	อุณหภูมिरายเดือน
309	-0.971**	-0.979**	-0.953**	-0.356
4	-0.966**	-0.960**	-0.778	-0.055
9	-0.992**	-0.994**	-0.982*	-0.818
3087	-0.987**	-0.982**	-0.922*	-0.876
3144	-0.956**	-0.616	0.338	-0.845*
3145	-0.866	-0.900*	-0.658	0.185
3222	-0.937*	-0.912*	-0.971**	-0.369
4009	-1.000**	-0.990*	-0.885	-0.747

หมายเหตุ ** แทนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

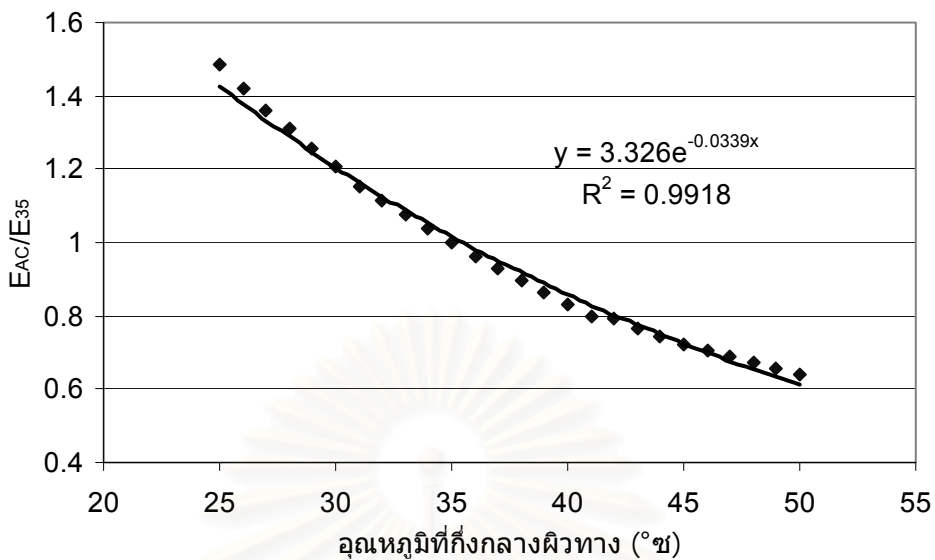
* แทนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05



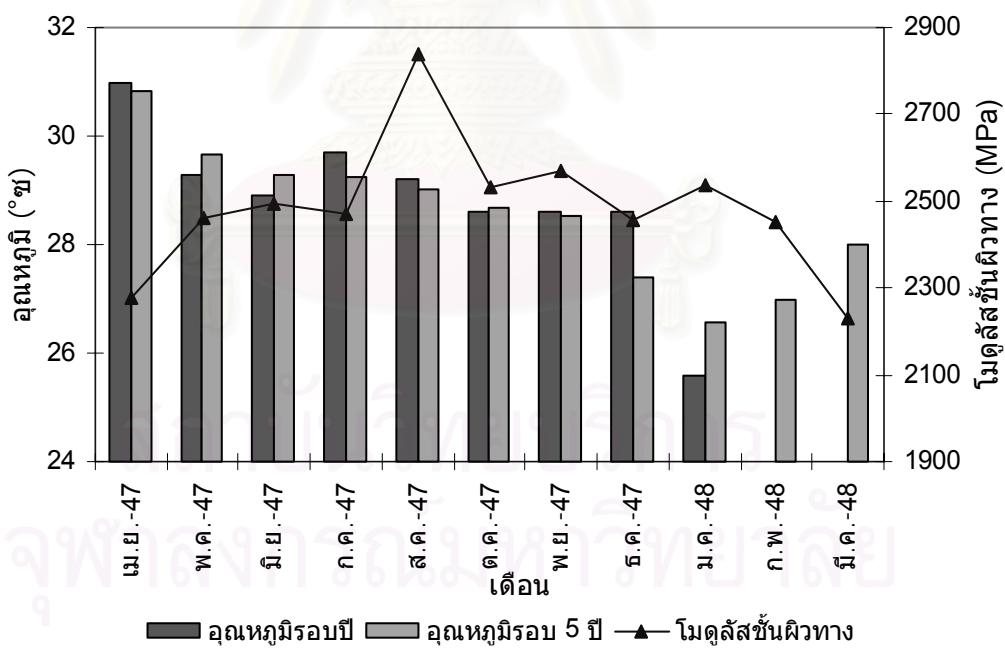
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสชั้นผิวทางกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง
ในสายทางหลายเลข 309

จากรูปที่ 4.23 ซึ่งโมดูลัสชั้นผิวทางกับอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายเดือนจากสถิติของกรมอุตุนิยมวิทยามีความสัมพันธ์อย่างไม่มีนัยสำคัญนั้น เมื่อทำการปรับแก้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การปรับแก้ผลเนื่องจากอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้นจากผลการวิจัยของ PTP (Department of Highways, 2001) เพื่อให้โมดูลัสชั้นผิวทางที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับ (E_{AC}) ให้กลายเป็นโมดูลัสชั้นผิวทางที่อุณหภูมิอ้างอิงที่ 35°ซ (E_{35}) การที่กำหนดอุณหภูมิอ้างอิง (Reference Temperature) ที่ 35°ซ (Department of Highways, 2001) ก็เพื่อให้สอดคล้องและเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศและถนนในประเทศไทย ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ผลเนื่องจากอุณหภูมิตั้งกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางมีความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.24

จากผลของการปรับแก้อุณหภูมิ จะพบว่าความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางมีความแปรผันแบบผกผันกับอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายเดือน กล่าวคือที่เดือนเมษายนและมีนาคมซึ่งอยู่ในฤดูร้อนและมีอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายเดือนสูง จะมีโมดูลัสชั้นผิวทางต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 4.25

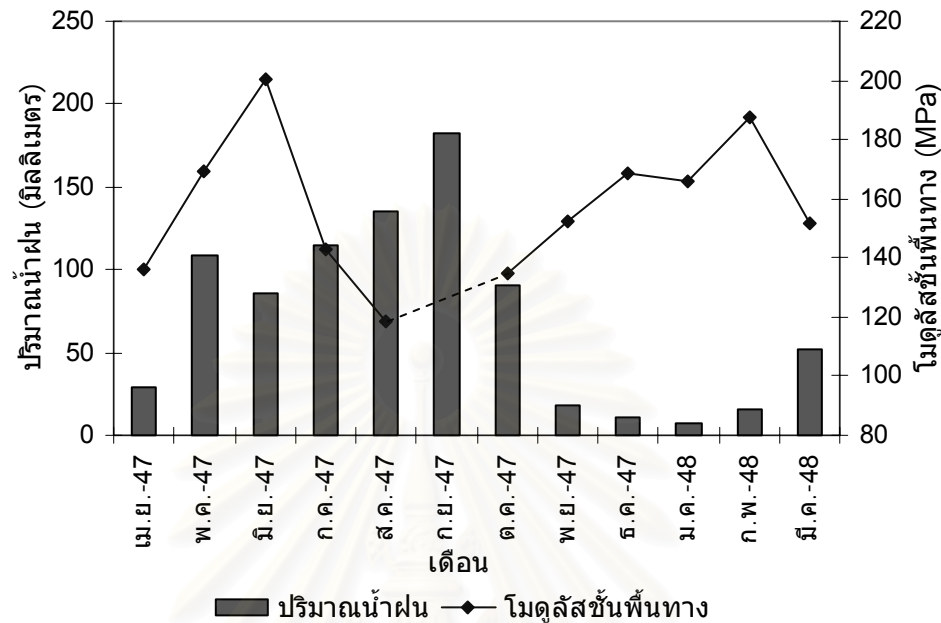


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ผลเนื่องจากอุณหภูมิ กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง



รูปที่ 4.25 ความผันแปรของโมดูลัสชั้นผิวทางที่ปรับแก้ผลของอุณหภูมิ ในสายทางหมายเลข 309

4.3.3 ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง (Base Modulus, E_b and Subbase Modulus, E_{sb})



รูปที่ 4.26 ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นพื้นทางในสายทางหมายเลข 309

จากรูปที่ 4.26 จะเห็นว่าโมดูลัสชั้นพื้นทางมีความผันแปรตามปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือน โดยจะสังเกตเห็นในเดือนกันยายนที่มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยค่าโมดูลัสชั้นพื้นทางจะตกลงอย่างรวดเร็ว และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นหลังจากนั้นเมื่อปริมาณน้ำฝนลดลง และตรวจสอบค่าทางสถิติได้จากตารางที่ 4.12 ซึ่งพบว่าค่าเฉลี่ยของโมดูลัสชั้นพื้นทางในเดือนสิงหาคมซึ่งเป็นฤดูฝน(Wet Season) มีค่าน้อยกว่าในเดือนเมษายนซึ่งเป็นฤดูร้อน และในเดือนธันวาคมซึ่งเป็นฤดูหนาว ตามลำดับ แสดงว่าความชื้นในชั้นพื้นทางมีผลต่อค่าโมดูลัสชั้นพื้นทาง โดยในเดือนที่มีความชื้นในชั้นพื้นทางสูงจะทำให้โมดูลัสชั้นพื้นทางต่ำ ตรวจสอบปริมาณความชื้นนี้ได้ในตารางที่ 4.4 ซึ่งในเดือนเมษายน สิงหาคม และธันวาคม มีค่าเท่ากับ 5.9 และ 3.0 % ตามลำดับ และยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของโมดูลัสชั้นพื้นทางในฤดูฝนมีค่าสูงกว่าในฤดูหนาวและในฤดูร้อนตามลำดับ แสดงว่าในฤดูฝนโมดูลัสชั้นพื้นทางมีการกระจายมากกว่าฤดูอื่น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความชื้นเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อทดสอบที่น้ำหนักกดทับสูงขึ้น ค่าโมดูลัสชั้นพื้นทางจะสูงขึ้นเช่นกัน แสดงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่มีอนุภาคใหญ่ซึ่งเป็นวัสดุในชั้นพื้นทาง

และในตารางที่ 4.13 พบว่าโมดูลัสชั้นพื้นทางจากการทดสอบตามแนวร่องล้อมีค่าสูงกว่าตามแนวร่องล้อด้วยค่าต่างที่ใกล้เคียงกันไม่ว่าจะทดสอบที่น้ำหนักกดทับระดับใด ในรูปที่

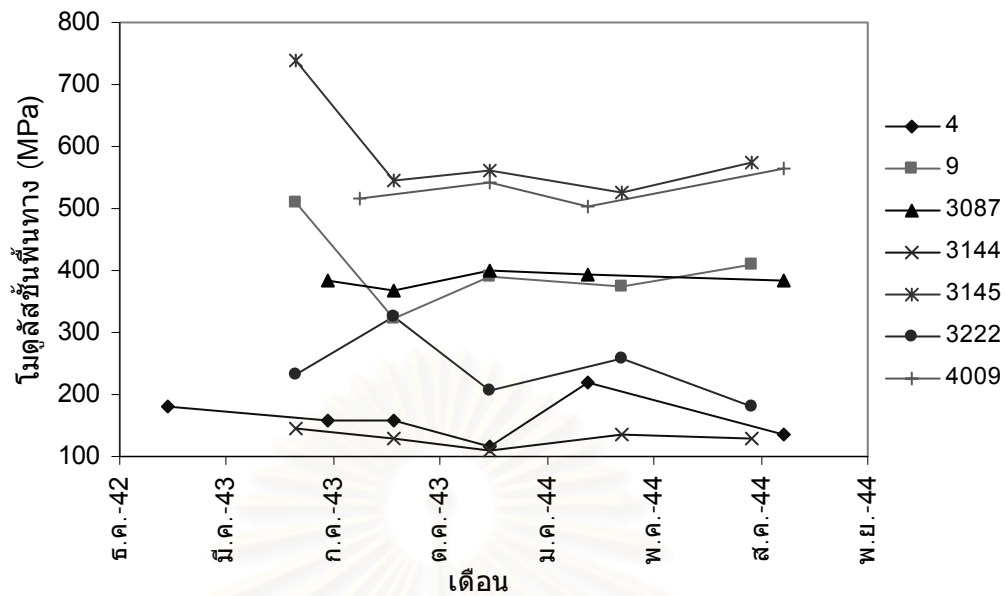
4.27 แสดงถึงความผันแปรของโมดูลัสชั้นพื้นทางในสายทางอื่นๆ ซึ่งแสดงแนวโน้มคล้ายกันคือมีค่าลดลงในช่วงเดือนกันยายนถึงตุลาคม

ตารางที่ 4.12 ค่าทางสถิติของโมดูลัสชั้นพื้นทางของการทดสอบในทุกฤดูกาล และทุกค่าน้ำหนักทดสอบ

		ค่าสถิติ	ฤดูกาล		
			เมษายน 2547	สิงหาคม 2547	ธันวาคม 2547
น้ำหนัก ทดสอบ	378 kPa	Mean	139.9	112.5	171.3
	5.3 ton	C.V. (%)	8.7	11.4	13.1
	566 kPa	Mean	136.0	118.8	168.7
	8.2 ton	C.V. (%)	6.8	11.3	11.3
	754 kPa	Mean	148.4	127.7	179.1
	10.7 ton	C.V. (%)	9.0	12.4	11.5
	1006 kPa	Mean	170.2	151.8	199.3
	14.2 ton	C.V. (%)	9.4	13.3	12.8

ตารางที่ 4.13 ค่าทางสถิติของโมดูลัสชั้นพื้นทางที่ผันแปรตามฤดูกาลของการทดสอบตามแนวร่องล้อและแนวระหว่างร่องล้อของทุกค่าน้ำหนักทดสอบ

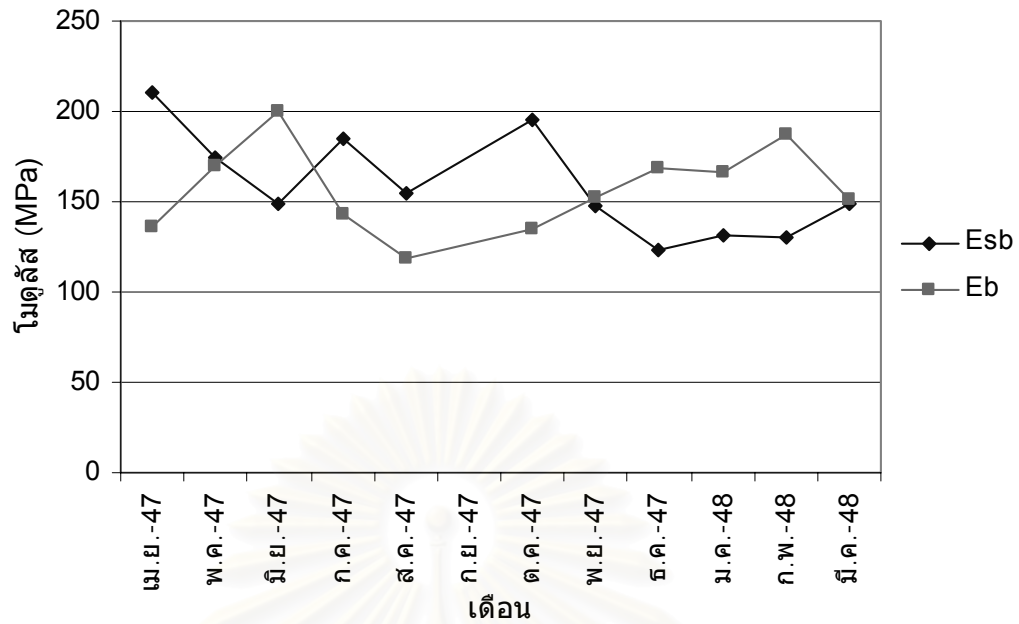
		ค่าสถิติ	แนวการทดสอบ		
			ร่องล้อ	ระหว่างร่องล้อ	ค่าต่าง (%)
น้ำหนัก ทดสอบ	378 kPa	Mean	158.8	210.4	32.5
	5.3 ton	C.V. (%)	11.29	17.01	50.8
	566 kPa	Mean	157.1	205.5	30.8
	8.2 ton	C.V. (%)	13.60	16.09	18.3
	754 kPa	Mean	165.7	223.0	34.6
	10.7 ton	C.V. (%)	11.72	16.05	36.9
	1006 kPa	Mean	190.6	250.1	31.2
	14.2 ton	C.V. (%)	11.46	13.27	15.8



รูปที่ 4.27 ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นพื้นทางในแต่ละสายทาง

วิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นพื้นทางเปรียบเทียบกับโมดูลัสดินคันทาง ซึ่งจัดเป็นวัสดุแบบ Unbound Material ด้วยการหาอัตราส่วนที่ได้จากการทดสอบด้วยน้ำหนัก 566 kPa ในสายทางหมายเลข 309 ของโมดูลัสในฤดูฝน (สิงหาคม) ซึ่งวัสดุชั้นพื้นทางและคันทาง จะมีความอ่อนแอ(Weak) มากที่สุด ต่อโมดูลัสในฤดูหนาว (ธันวาคม) ซึ่งเป็นฤดูที่เป็น Dry Season พบว่าอัตราส่วนนี้ของชั้นพื้นทางมีค่าเป็น 0.704 ส่วนชั้นดินคันทางมีค่าเป็น 0.931 แสดงว่าชั้นพื้นทางมีความผันแปรตามฤดูกาลมากกว่าดินคันทาง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Newcomb et al. (1989) ซึ่งขัดแย้งกับสามัญสำนึกที่ว่าดินคันทางที่อยู่ต่ำกว่าน่าจะมีความผันแปรตามฤดูกาลมากกว่า

ในส่วนของความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นรองพื้นทาง จากรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นรองพื้นทางเป็นแบบไม่แน่นอนและไม่ขึ้นกับปริมาณน้ำฝน เพราะในเดือนสิงหาคม กราฟของโมดูลัสชั้นรองพื้นทางไม่ลดต่ำลง แตกต่างกับความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นพื้นทาง และตรวจสอบได้จากค่าทางสถิติในตารางที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นว่าโมดูลัสชั้นรองพื้นทางในฤดูฝนมีค่ามากกว่าในฤดูฝน และฤดูหนาว แต่ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของแต่ละฤดูกาลมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการกระจายของโมดูลัสชั้นรองพื้นทางในแต่ละฤดูกาลไม่ต่างกัน



รูปที่ 4.28 ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง
จากการทดสอบที่ 566 kPa ในสายทางหมายเลข 309

ตารางที่ 4.14 ค่าทางสถิติของโมดูลัสชั้นรองพื้นทางของการทดสอบ
ในทุกฤดูกาลและทุกค่าน้ำหนักทดสอบ

		ค่าสถิติ	ฤดูกาล		
			เมษายน 2547	สิงหาคม 2547	ธันวาคม 2547
น้ำหนัก ทดสอบ	378 kPa	Mean	229.4	175.8	153.0
	5.3 ton	C.V. (%)	0.229	0.179	0.248
	566 kPa	Mean	210.9	154.5	123.5
	8.2 ton	C.V. (%)	0.214	0.186	0.191
	754 kPa	Mean	183.0	150.8	119.3
	10.7 ton	C.V. (%)	0.227	0.240	0.277
	1006 kPa	Mean	176.0	143.1	130.6
	14.2 ton	C.V. (%)	0.246	0.308	0.267

4.3.4 ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคั่นทาง (Subgrade Resilient Modulus, MR)

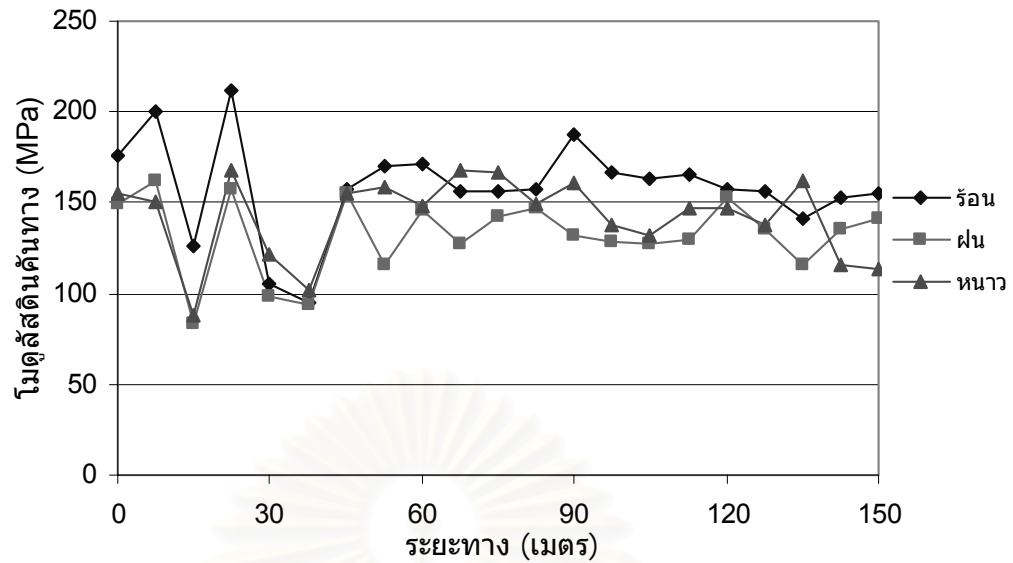
จากตารางที่ 4.15 จะพบว่าโมดูลัสดินคั่นทางในฤดูฝนซึ่งมีปริมาณน้ำฝนและความชื้นที่สูงกว่า จะมีค่ามากกว่าโมดูลัสดินคั่นทางในฤดูร้อนและฤดูหนาว แสดงว่าความชื้นในชั้นดินคั่นทางมีผลโดยตรงต่อค่าโมดูลัสดินคั่นทาง โดยในเดือนที่มีความชื้นในชั้นดินคั่นทางสูงจะทำให้โมดูลัสดินคั่นทางต่ำ ตรวจสอบปริมาณความชื้นนี้ได้ในตารางที่ 4.4 ซึ่งในเดือนเมษายน สิงหาคม และธันวาคม มีค่าเท่ากับ 6 17 และ 6 % ตามลำดับ

และสำหรับการกระจายตัวที่อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน พบว่าในฤดูร้อนโมดูลัสดินคั่นทางมีกระจายตัวมากกว่าฤดูฝนและฤดูหนาว ตามลำดับ สาเหตุหลักเป็นเพราะปัจจัยด้านอุณหภูมิ โดยในตารางที่ 4.4 อุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางในเดือนเมษายน สิงหาคม และธันวาคม มีค่าเท่ากับ 50.8 41.3 และ 35.7 °ซ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Nouredin (1994) ที่เมื่ออุณหภูมิของชั้นผิวทางเพิ่มขึ้นจะทำให้โมดูลัสชั้นผิวทางลดลง และความเค้นจากน้ำหนักทดสอบจะถูกส่งผ่านไปยังชั้นดินคั่นทางได้มากขึ้นทำให้โมดูลัสดินคั่นทางลดลงและมีการกระจายตัวมากขึ้นด้วย

ในรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นถึงผลของฤดูกาลที่มีต่อกราฟโมดูลัสของดินคั่นทาง ที่ได้จากการทดสอบที่น้ำหนัก 566 kPa บนสายทางหมายเลข 309 และกราฟโมดูลัสของดินคั่นทางในฤดูร้อนมีความผันแปร (Sensitivity) มากกว่าในฤดูฝนและฤดูหนาว ตรวจสอบได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.15 มีค่าเท่ากับ 17.0 และ 15.9 และ 15.8 % ตามลำดับ

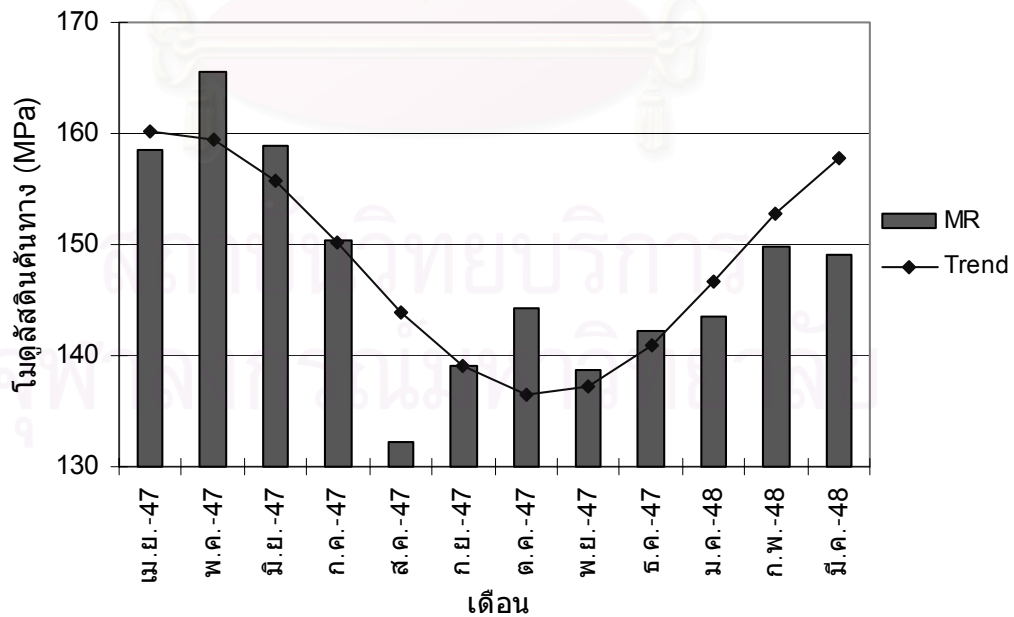
ตารางที่ 4.15 ค่าทางสถิติของโมดูลัสดินคั่นทางของการทดสอบ
ในทุกฤดูกาลและทุกค่าน้ำหนักทดสอบ

		ค่าสถิติ	ฤดูกาล		
			เมษายน 2547	สิงหาคม 2547	ธันวาคม 2547
น้ำหนัก ทดสอบ	378 kPa	Mean	171.1	142.4	141.1
	5.3 ton	C.V. (%)	18.8	17.3	17.0
	566 kPa	Mean	158.5	132.3	142.1
	8.2 ton	C.V. (%)	17.0	15.9	15.8
	754 kPa	Mean	157.4	130.5	140.5
	10.7 ton	C.V. (%)	15.4	16.6	15.4
	1006 kPa	Mean	162.3	136.2	133.5
	14.2 ton	C.V. (%)	18.7	15.3	16.4

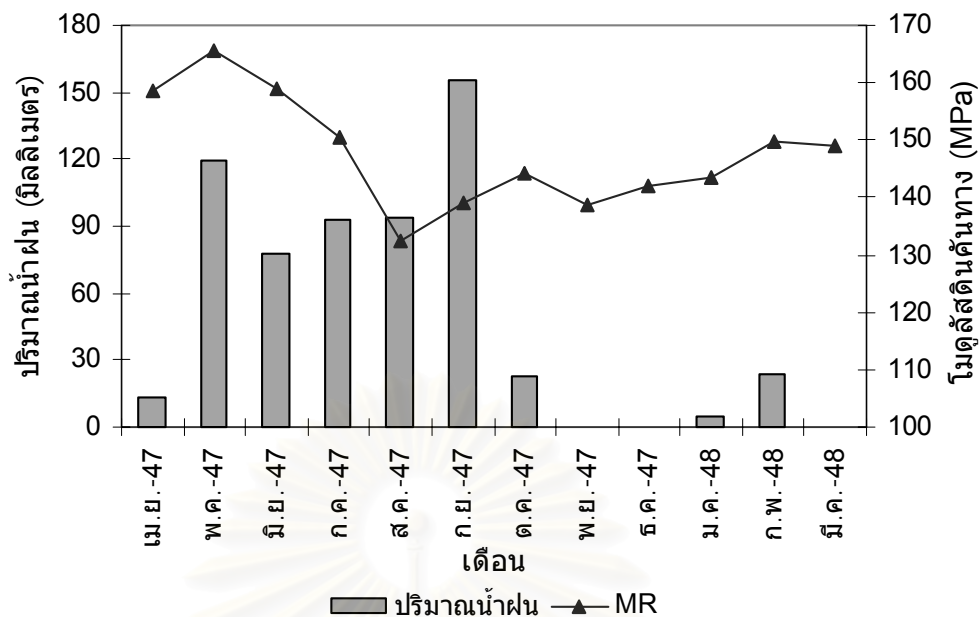


รูปที่ 4.29 กราฟโมดูลัสดินคันทางที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa ในฤดูกาลร้อน ฝน และหนาว

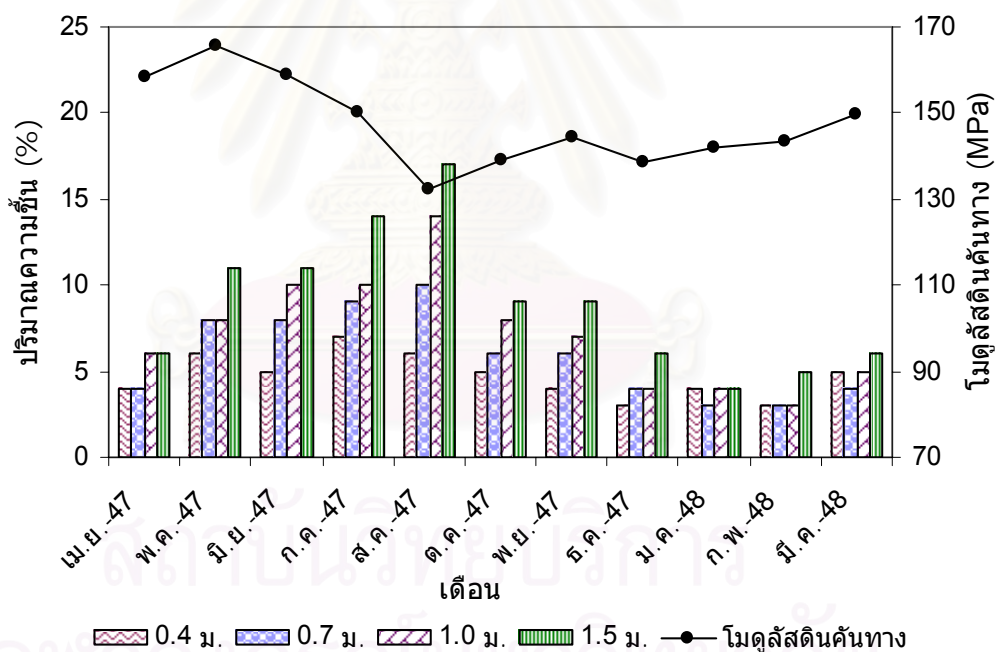
จากรูปที่ 4.30 จะเห็นความผันแปรนี้จะให้ค่าโมดูลัสชั้นผิวทาง ณ เดือนตุลาคม และจะให้ค่าสูงสุดที่เดือนเมษายน สอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปที่ 4.31 ซึ่งจะเห็นว่าโมดูลัสชั้นผิวทางมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนในแต่ละเดือน และในรูปที่ 4.32 ซึ่งจะเห็นว่าโมดูลัสชั้นผิวทางมีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นที่วัดได้ที่ระดับความลึกต่างๆ ในโครงสร้างทาง



รูปที่ 4.30 ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางในสายทางหมายเลข 309



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสดินคั่นทางกับปริมาณน้ำฝนในสายทางหมายเลข 309



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสดินคั่นทางกับปริมาณความชื้นที่ความลึกต่างๆ ในโครงสร้างสายทางหมายเลข 309

จากตารางที่ 4.16 จะพบว่าค่าโมดูลัสดินคั่นทางจะเปลี่ยนจากการผันแปรตามเป็นผันแปรแบบผกผันกับความชื้น เมื่อพิจารณาที่ปริมาณความชื้นที่ระดับลึกลงไปในโครงสร้างทาง แสดงว่าความชื้นที่ระดับลึกกว่าจะสะท้อนผลของความชื้นที่มีต่อโมดูลัสดินคั่นทางได้ดีกว่า เพราะเมื่อปริมาณความชื้นสูงโมดูลัสดินคั่นทางจะต่ำ และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนใน

รอบปีและปริมาณน้ำฝนในรอบ 5 ปี จะพบว่าความชื้นที่ระดับต่างๆ มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณน้ำฝน และที่ความลึกมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะยิ่งสูงขึ้น แสดงว่าความชื้นที่ระดับลึกกว่าจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นที่ระดับต่างๆ มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนรอบปีมากกว่าปริมาณน้ำฝน 5 ปี ทั้งนี้เพราะความชื้นในโครงสร้างทางขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนในปีนั้นๆ

ตารางที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของโมดูลัสดินคันทาง ปริมาณน้ำฝน และปริมาณความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ ในโครงสร้างทาง

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์			
	ความชื้นที่ 0.4 ม.	ความชื้นที่ 0.7 ม.	ความชื้นที่ 1.0 ม.	ความชื้นที่ 1.5 ม.
MR	0.156	-0.007	-0.145	-0.148
ปริมาณน้ำฝนรอบปี	0.834**	0.864**	0.903**	0.936**
ปริมาณน้ำฝน 5 ปี	0.807**	0.853**	0.888**	0.918**

หมายเหตุ ** แทนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

4.4 ผลของความผันแปรตามฤดูกาลกับการออกแบบและประเมินทางลาดยางในประเทศไทย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้รวบรวมการประยุกต์ผลของความผันแปรตามฤดูกาลเข้ากับการออกแบบและประเมินสภาพทางลาดยางให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ด้วยวิธีการและทฤษฎีดังจะกล่าวต่อไปนี้

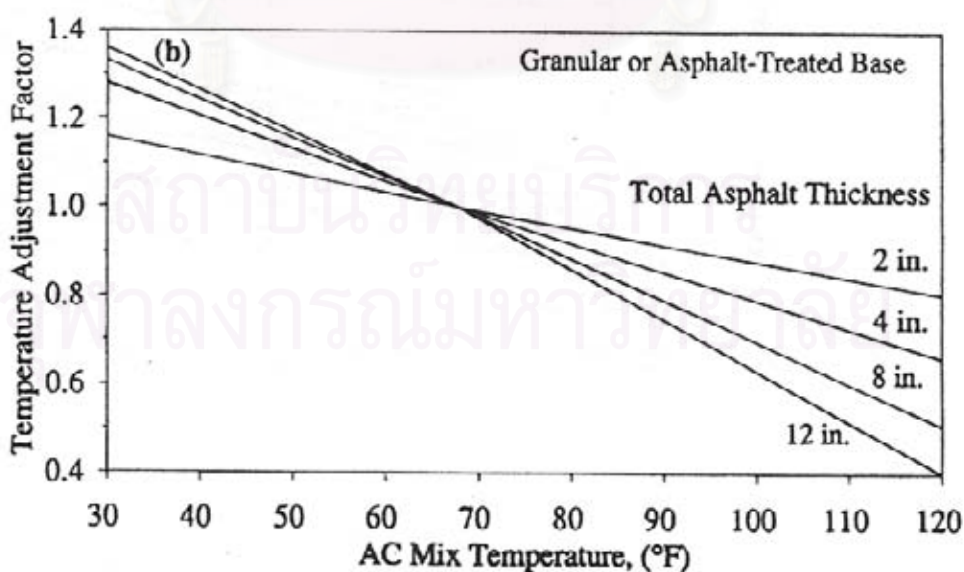
4.4.1 ค่าปรับแก้อุณหภูมิของค่าแอนตัวกลาง (Temperature Correction for Center Deflection)

ค่าแอนตัวกลางที่ได้จากการทดสอบด้วย FWD หาได้จากค่าแอนตัวที่กึ่งกลางของแผ่นกดน้ำหนัก (Loading Plate) ความแข็งแรงหรือความสามารถรับน้ำหนัก (Capacity) ของโครงสร้างทางโดยรวมทั้งหมดนับตั้งแต่ชั้นดินคันทางในรูปของโมดูลัสดินคันทาง ซึ่งค่าแอนตัวกลางนี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบเสริมผิวทางแต่ค่าแอนตัวกลางที่จะนำไปใช้ในการออกแบบเสริมผิวทางนั้นต้องถูกปรับแก้ให้เป็นค่าที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อการแอนตัวของผิวทางลาดยางนี้ก็คืออุณหภูมิของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

จากวิธีการของ AASHTO (1993) ซึ่งได้เสนอการปรับแก้อุณหภูมิสำหรับค่าการแอ่นตัว โดยใช้อุณหภูมิสัมประสิทธิ์ชั้นผิวทางที่ได้จากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ผิวทาง อุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง และอุณหภูมิที่ส่วนล่างสุดของชั้นผิวทาง โดยอุณหภูมิทั้งสามนี้หาได้จากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ผิวทางกับอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยก่อนหน้า 5 วัน ซึ่งจากการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน พบว่าวิธีการของ AASHTO (1993) มีความคลาดเคลื่อนโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 38 °ซ

จากการศึกษาของ Kim et al. (1995) โดยทำการทดสอบด้วย FWD ในวันเดียวแต่ทำในสองเวลา คือในเวลา 12.00 น. และ 16.02 น. เพื่อกำจัดผลของปัจจัยอื่นๆ อันได้แก่ สภาพทางและความชื้น เหลือไว้แต่ผลของอุณหภูมิ พบว่าค่าแอ่นตัวที่ทดสอบในทั้งสองเวลา หลังจากปรับแก้ด้วยวิธีของ AASHTO (1993) แล้ว พบว่ามีความแตกต่างระหว่างค่าแอ่นตัวที่ปรับแก้ทั้งสองมาก

ค่าปรับแก้อุณหภูมิสำหรับค่าแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วย FWD สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าการแอ่นตัวที่อุณหภูมิใดๆ ต่อกับค่าการแอ่นตัวที่อุณหภูมิอ้างอิงหรือที่ 35 °ซ สำหรับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย และนำไปหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง แล้วหาเส้นโค้งความสัมพันธ์ด้วยวิธี Regression ตามวิธีของ AASHTO (1993) ดังรูปที่ 4.33 บอกว่าความสัมพันธ์นี้เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Function) แต่จากการศึกษาของ Johnson และ Baus (1992) และ Kim et al. (1995) ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Function) จะอธิบายความสัมพันธ์นี้ได้ดีกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้อุณหภูมิกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางแสดงดังสมการที่ 2.27 โดยที่ค่าปรับแก้อุณหภูมิจึงอุณหภูมิอ้างอิงหรือที่ 35 °ซ จะมีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 4.33 ค่าปรับแก้ผลของอุณหภูมิสำหรับค่าการแอ่นตัวของ AASHTO (1993)

ที่มา: Kim et al. (1995)

จากสมการที่ 2.27 เมื่อหาความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างค่าปรับแก้คุณสมบัติของค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อด้วยน้ำหนัก 566 kPa กับคุณสมบัติที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง ของแต่ละสายทาง จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์(α) ของแต่ละสายทาง

สายทาง	สัมประสิทธิ์ (α)	R^2	ความหนาของชั้นผิวทาง (มม.)
4	4.77E-03	0.970	107
9	4.87E-03	0.966	93
3222	8.90E-03	0.818	121
309	4.62E-03	0.732	100
3144	2.53E-03	0.676	57
3145	5.34E-03	0.655	51
4009	2.17E-03	0.424	60
3087	1.02E-03	0.142	49

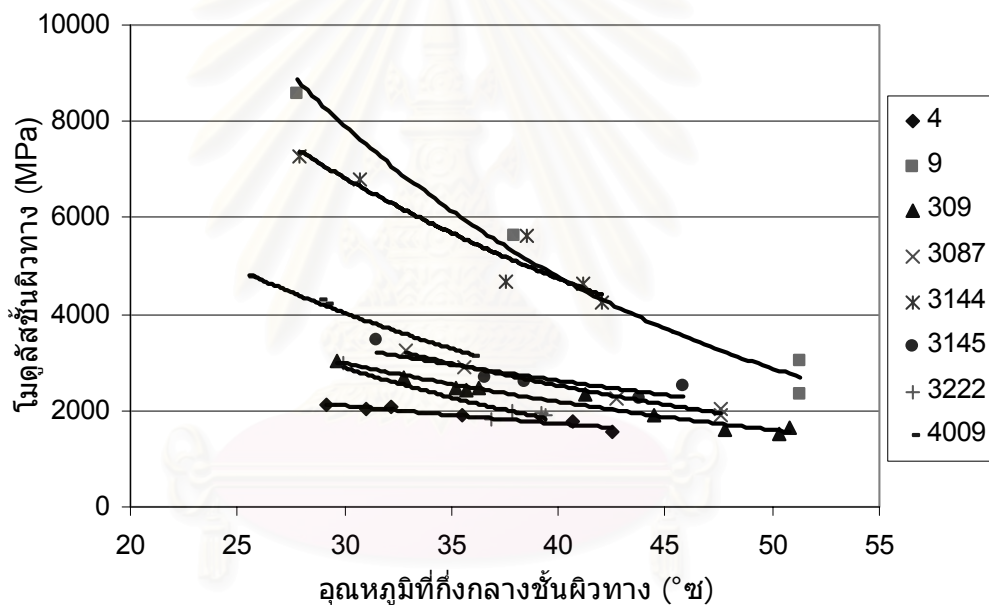
จากตารางที่ 4.17 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์(α) มีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละสายทาง แต่จะสังเกตได้ว่าค่า R^2 ของสมการความสัมพันธ์จะมีค่ามากน้อยตามความหนาของชั้นผิวทาง โดยสายทางที่มีชั้นผิวทางบาง (Thin AC Layer) ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.27 จะอธิบายข้อมูลค่าการแอ่นตัวได้ไม่ดี สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kim et al. (1995) ที่พบว่าค่าการแอ่นตัวที่วัดได้ในระหว่างการทดสอบของสายทางที่มีชั้นผิวทางบางจะมีความแตกต่างกันมาก

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa ทุกสายทาง มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้คุณสมบัติกับคุณสมบัติที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง จะได้ค่าสัมประสิทธิ์(α) เท่ากับ 3.978×10^{-3} โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.68

เนื่องจากข้อมูลค่าการแอ่นตัวที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของชั้นผิวทางกับอัตราส่วนค่าการแอ่นตัวนี้ เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วย FWD ในช่วงเวลาที่แตกต่างกันไปตลอดทั้งปี ดังนั้นค่าปรับแก้คุณสมบัติของค่าการแอ่นตัวจึงสามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาความผันแปรตามฤดูกาลของค่าการแอ่นตัว หรือนำไปปรับแก้ค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบในวันและเวลาที่แตกต่างกันให้เป็นค่าการแอ่นตัวที่อุณหภูมิอ้างอิงได้

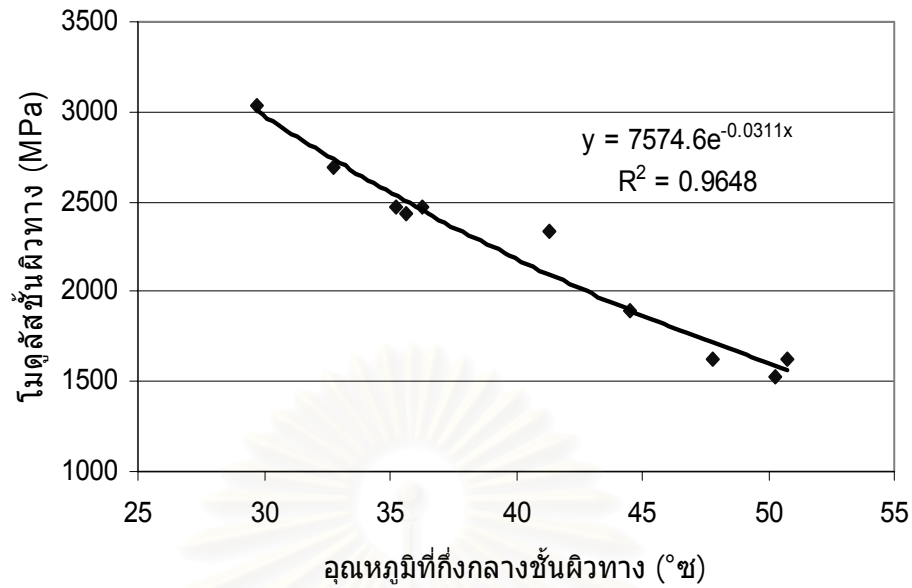
4.4.2 ค่าปรับแก้อุณหภูมิของโมดูลัสชั้นผิวทาง (Temperature Corection for Asphalt Concrete Modulus)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสชั้นผิวทางและอุณหภูมิของชั้นผิวทาง โดยในส่วนของอุณหภูมิของชั้นผิวทางนั้นจะใช้อุณหภูมิกึ่งกลางชั้นผิวทาง เนื่องจากเป็นค่าที่ได้ทำการวัดโดยตรงในสนาม และเมื่อพล็อตกราฟจะได้ความสัมพันธ์ในรูปเอกซโพเนนเชียลดังแสดงในรูปที่ 4.34 โดยความสัมพันธ์ของโมดูลัสชั้นผิวทางกับอุณหภูมิกึ่งกลางชั้นผิวทางในแต่ละสายทางจะมีลักษณะเฉพาะตัว และถูกจำกัดสำหรับแต่ละสายทางเท่านั้น เพราะแต่ละสายทางย่อมใช้ส่วนผสมต่างกัน ซึ่งค่าโมดูลัสชั้นผิวทางจะเป็นฟังก์ชันกับคุณสมบัติของตัวประสาน(แอสฟัลต์), สัดส่วนการผสม และความหนาแน่นจากการบดอัด



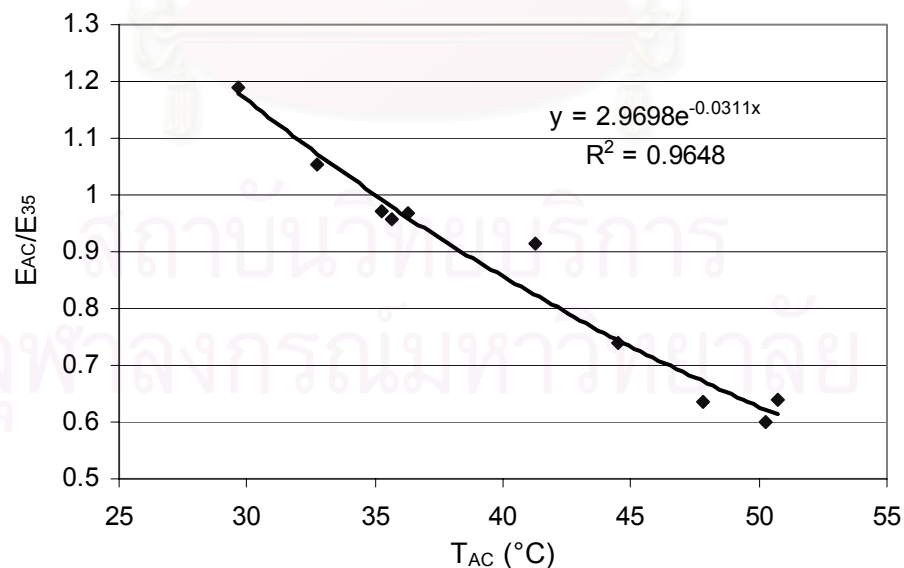
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสชั้นผิวทางกับอุณหภูมิกึ่งกลางชั้นผิวทางในแต่ละสายทาง

ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบระหว่างโมดูลัสชั้นผิวทางในแต่ละสายทางที่มีสัดส่วนการผสมและความหนาแน่นจากการบดอัดต่างๆ กัน ผู้วิจัยจะนำค่าโมดูลัสชั้นผิวทางที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับหารด้วยโมดูลัสชั้นผิวทางที่อุณหภูมิอ้างอิง (35 °C) โดยโมดูลัสชั้นผิวทางที่อุณหภูมิอ้างอิงนี้จะหาได้จากสมการสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสชั้นผิวทางกับอุณหภูมิกึ่งกลางชั้นผิวทางที่พัฒนาไว้ในรูปที่ 4.35



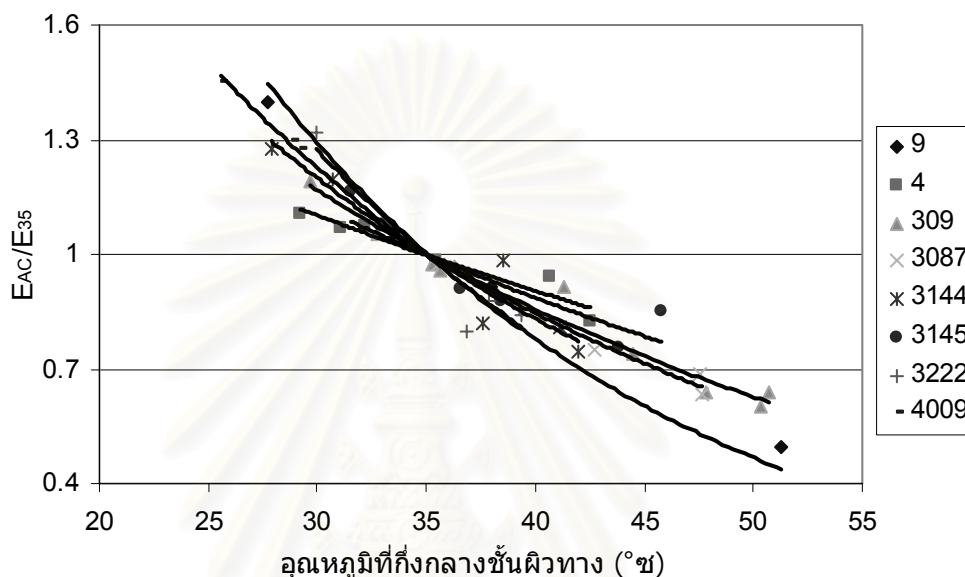
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสชั้นผิวทางกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง
ในสายทางหมายเลข 309

ผลจากกระบวนการดังกล่าวจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน E_{AC}/E_{35} กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง (T_{AC}) ในสายทางหลายเลข 309 ดังแสดงในรูปที่ 4.54 และจากความสัมพันธ์นี้จะได้นำไปเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์เช่นเดียวกันนี้ในสายทางอื่นๆ ต่อไป

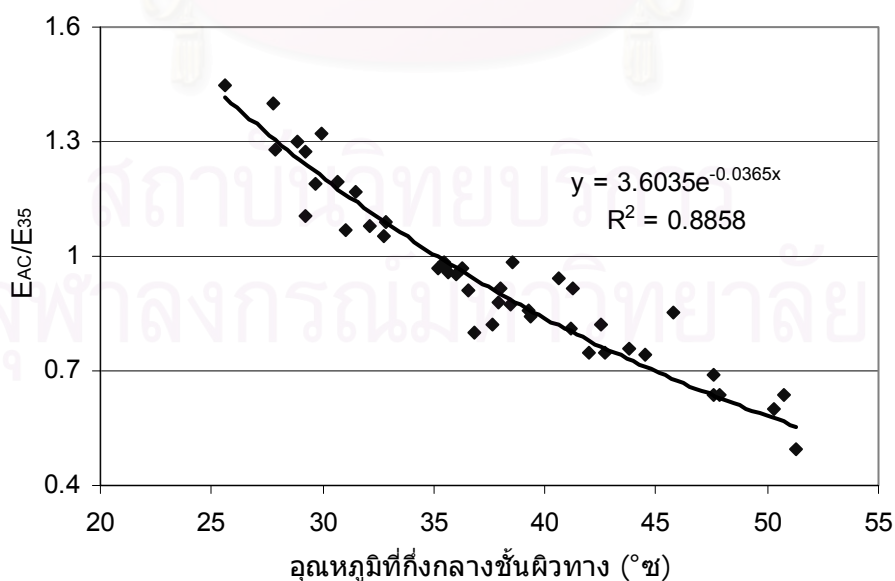


รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน E_{AC}/E_{35} กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง (T_{AC})
ในสายทางหมายเลข 309

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน E_{AC}/E_{35} กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางในสายทางอื่นและนำมาพล็อตกราฟพร้อมกันจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.37 และเมื่อหาความสัมพันธ์ซึ่งอยู่ในรูปเอกซโพเนนเชียลแล้วจะได้สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นสูงถึง 0.89 ดังแสดงในรูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปใช้กับสายทางทำการศึกษาค้นคว้าได้ และนอกจากนี้ยังพบว่าความสัมพันธ์มีความใกล้เคียงกับผลการศึกษาค้นคว้าของ Marshall et al. (2001)



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน E_{AC}/E_{35} กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางในแต่ละสายทาง



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์รวมระหว่างอัตราส่วน E_{AC}/E_{35} กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางของทุกสายทาง

4.4.3 พังกัชั้นเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทาง (Time Series of Asphalt Concrete Elastic Modulus)

ปัจจุบันการออกแบบงานทางมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนไปใช้การออกแบบด้วยวิธี Mechanistic Empirical ซึ่งในการออกแบบนอกจากจะคำนึงถึงน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน (Traffic Load) เป็นหลักแล้ว ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม ซึ่งได้แก่ ความผันแปรตามฤดูกาล การออกแบบด้วยวิธี Mechanistic Empirical นี้จะมุ่งหาปริมาณน้ำหนักที่กระทำจนถนนเกิดการวิบัติ (Failure) ซึ่งจะสามารถนำไปคาดการณ์อายุใช้งานของถนนต่อไปได้ ลักษณะของการวิบัติตามวิธีนี้แบ่งออกเป็น เกณฑ์การวิบัติเนื่องจากความล้า (Fatigue Criteria) และเกณฑ์การวิบัติเนื่องจากการเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent Deformation) เกณฑ์การวิบัติเนื่องจากความล้า จะมีความสัมพันธ์กับความเครียดแรงดึง (Horizontal Tensile Strain) ที่ผิวล่างของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต เกณฑ์การวิบัติเนื่องจากการเปลี่ยนรูปถาวรจะมีความสัมพันธ์กับความเครียดแรงอัด (Vertical Compressive Strain) ที่ผิวบนของชั้นดินคั่นทาง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเกณฑ์การวิบัติเนื่องจากความล้า ซึ่งเป็นผลโดยตรงของความผันแปรของโมดูลัสชั้นผิวทาง ส่วนเกณฑ์การวิบัติเนื่องจากการเปลี่ยนรูปถาวรซึ่งเป็นผลโดยตรงของความผันแปรของโมดูลัสชั้นดินคั่นทางจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.4.4

เนื่องจากปริมาณน้ำหนักบรรทุกซ้ำ (Repetition Load) ที่ทำให้ถนนเกิดการวิบัติ (N_f) ตามสมการของ The Asphalt Institute (AI) (1982) ซึ่งความสัมพันธ์กับความเครียดแรงดึงที่ผิวล่างของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นดังสมการที่ 4.1

$$N_f = \frac{0.0796}{\epsilon_t^{3.291} \times E^{0.854}} \quad 4.1$$

เมื่อความเสียหายเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกหนึ่งครั้ง (Single Load) เท่ากับ $D_i = 1/N_f$ จะได้ว่า

$$D_i = 12.563(\epsilon_t)^{3.291} \times E^{0.854} \quad 4.2$$

ถ้าปริมาณจราจรในรูป ESALs อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันของเวลา $f(t)$ ความเสียหายสะสม (Cumulative Damage) ใน N ปี จะเป็นดังสมการที่ 4.3

$$D = N(1+r)^{(N-1)} \int_a^b f(t) \cdot D(t) dt = 1.0 \quad 4.3$$

เมื่อ $D(t)$ = ฟังก์ชันของเวลาของความเสียหายเมื่อแทนความผันแปรของโมดูลัสชั้นผิวทาง (E) ในสมการที่ 4.3

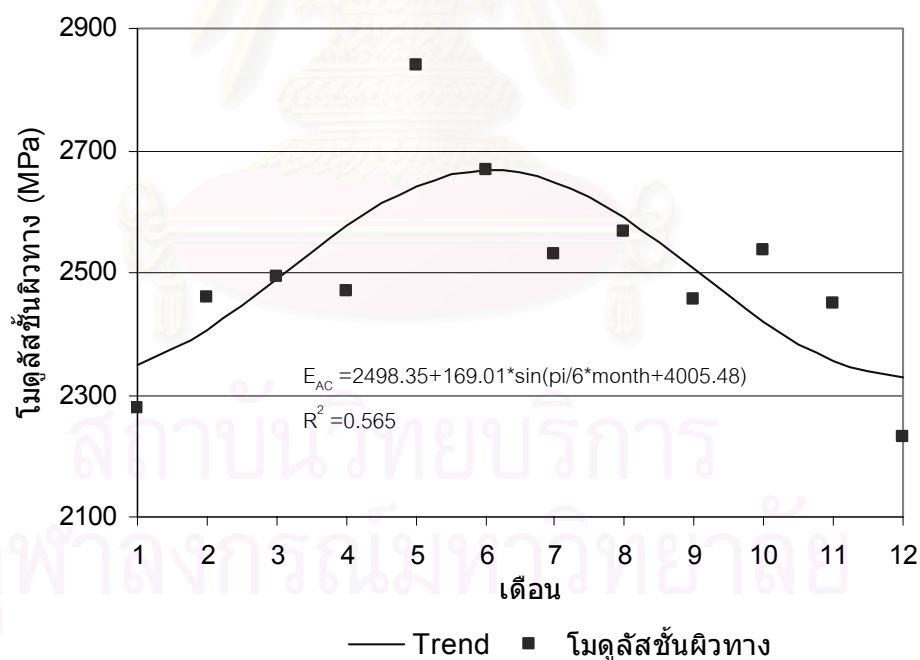
ε_t = ความเครียดแรงดึงที่ผิวล่างของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต

a และ b = ขอบเขตของช่วงเวลา (เช่น 1 และ 12 เมื่อการเพิ่มของช่วงเวลาเป็นเดือน)

r = อัตราการเพิ่มของปริมาณจราจรในหน่วยเปอร์เซ็นต์

เมื่อผลรวม (Integration) ของสมการที่ 4.3 มีค่าเท่ากับ 1 จะหาอายุใช้งานของถนน (N) ในหน่วยปีได้

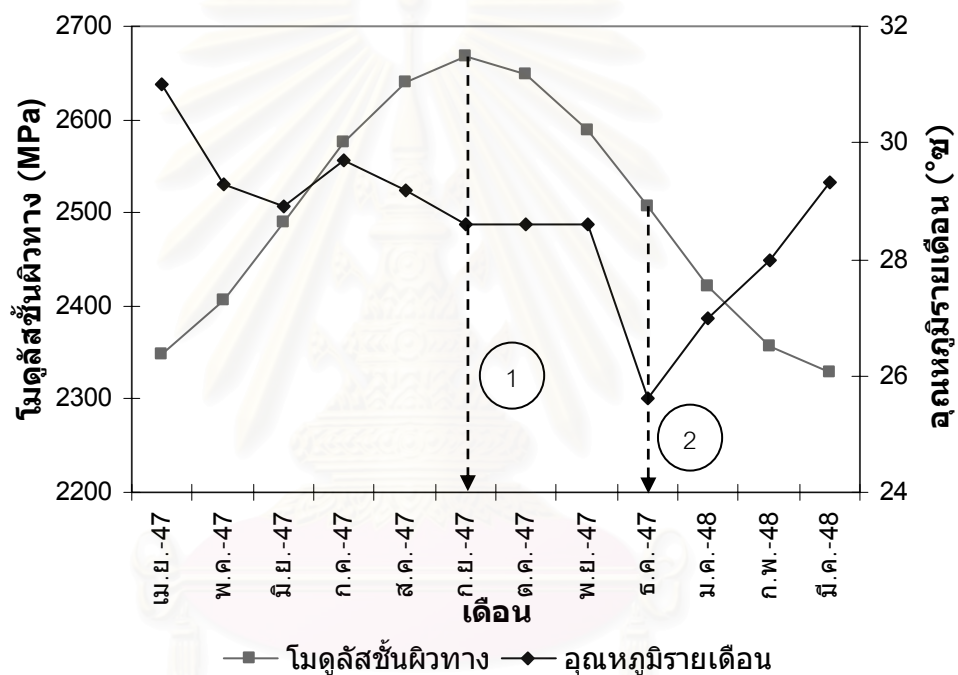
จากความหมายของสมการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางมีความสำคัญในการคาดการณ์อายุการใช้งานของถนนตามปริมาณจราจรที่ใช้ในการออกแบบ ในการศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางในรูปแบบฟังก์ชันของเวลา (Time Series) ในแต่ละสายทาง ฟังก์ชันของเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางในสายทางหมายเลข 309 จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa แสดงในรูปที่ 4.40



หมายเหตุ ส่วนที่ 1 ในแกนนอนแทนเดือนเมษายน

รูปที่ 4.40 ฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางในสายทางหมายเลข 309

จากรูปที่ 4.40 จะเห็นว่าความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางตลอดทั้งปี มีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งแบบไซน์ (Sinusoidal Curve) โดยจะมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายน ซึ่งตามสภาพอากาศของประเทศไทยถือเป็นฤดูร้อน ในขณะที่มีค่าสูงสุดประมาณช่วงเดือนกันยายนถึงตุลาคม ซึ่งอยู่ในฤดูฝน ซึ่งขัดกับสามัญสำนึกที่ว่าโมดูลัสชั้นผิวทางน่าจะมีค่าสูงสุดในฤดูหนาว หรือประมาณเดือนธันวาคมถึงมกราคม ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเดือนอื่นๆ ในรอบปี ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการประมาณเส้นโค้งแบบไม่เชิงเส้นซึ่งบังคับให้ความผันแปรของโมดูลัสชั้นผิวทางมีลักษณะเป็นรอบๆ (Cycle) และโมดูลัสชั้นผิวทางที่ได้จากการทดสอบในฤดูหนาวจะตกอยู่ระหว่างค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางอุณหภูมิอากาศรายเดือนในสายทางหมายเลข 309

จากรูปที่ 4.41 จะเห็นว่าในเดือนกันยายน (ตำแหน่งที่ 1) โมดูลัสชั้นผิวทางตามฟังก์ชันเวลาที่เป็นเส้นโค้งแบบไซน์ จะมีค่าสูงสุดในขณะที่อุณหภูมิรายเดือนยังไม่มีค่าต่ำสุด โดยในเดือนธันวาคม (ตำแหน่งที่ 2) ที่อุณหภูมิรายเดือนจะมีค่าต่ำสุด โมดูลัสชั้นผิวทางกลับมีค่าอยู่ที่ประมาณค่าเฉลี่ยของเส้นโค้งแบบไซน์ ดังนั้นเส้นโค้งแบบไซน์ยังไม่สะท้อนถึงผลของอุณหภูมิรายเดือนที่มีต่อความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางได้ดีนัก ความสัมพันธ์อาจอยู่ในรูปโพลีโนเมียล เอกซโพเนนเชียล หรือฟังก์ชันเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยฟังก์ชันมากกว่าหนึ่งฟังก์ชัน (Ali และ Parker, 1996) และเมื่อพิจารณากราฟความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางของ

สายทางอื่นๆ ที่แสดงไว้ในภาคผนวก ง จะเห็นว่าโมดูลัสชั้นผิวทางจะมีค่าสูงสุดที่ประมาณเดือนธันวาคม และมีค่าต่ำที่ประมาณเดือนมีนาคม

อย่างไรก็ตามเนื่องจากการทดสอบในสายทางหมายเลข 309 ได้ทำการทดสอบในทุกเดือนตลอดปี จำนวนข้อมูลที่ได้จึงมากกว่าในสายทางอื่นๆ ที่ PTP ทดสอบ ผลที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ของความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางในรูปแบบเส้นโค้งแบบไซน์นี้อย่างน้อยจะเป็นฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางสำหรับสายทางหมายเลข 309 อย่างไรก็ตามการนำฟังก์ชันนี้เข้าไปคาดการณ์อายุใช้งานของถนนในสมการที่ 4.3 ผู้ใช้ควรระมัดระวังและพิจารณาถึงผลของปัจจัยอื่นๆ ร่วมด้วย

จากฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางนี้ จะพบว่าโมดูลัสชั้นผิวทางของสายทางตัวอย่างในประเทศไทยมีความผันแปรตามฤดูกาลดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นในการออกแบบและคาดการณ์อายุการใช้งานของทางลาดยางในประเทศไทยด้วยการใช้ค่าโมดูลัสชั้นผิวทางเฉพาะค่าหนึ่งๆ จึงไม่เหมาะสมนัก แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดความชัดเจนของความผันแปรฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางนี้ในประเทศไทย ผู้ศึกษาจึงขอแนะนำให้มีการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วย FWD เพื่อติดตามพฤติกรรมของทางลาดยางในประเทศไทยให้มากยิ่งขึ้น

4.4.4 ฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคันทาง (Time Series of Subgrade Resilient Modulus)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.3 ว่าเกณฑ์การวิบัติเนื่องจากการเปลี่ยนรูปถาวรจะมีความสัมพันธ์กับความเครียดแรงอัดที่ผิวบนของชั้นดินคันทาง และจากสมการที่ 4.4 ของ The Asphalt Institute (1982) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแรงอัดที่ผิวบนของชั้นดินคันทางกับปริมาณน้ำหนักรถบรรทุกซ้ำที่ทำให้ถนนเกิดการวิบัติ (N_d)

$$N_d = \frac{1.365 \times 10^{-9}}{(\epsilon_c)^{4.477}} \quad 4.4$$

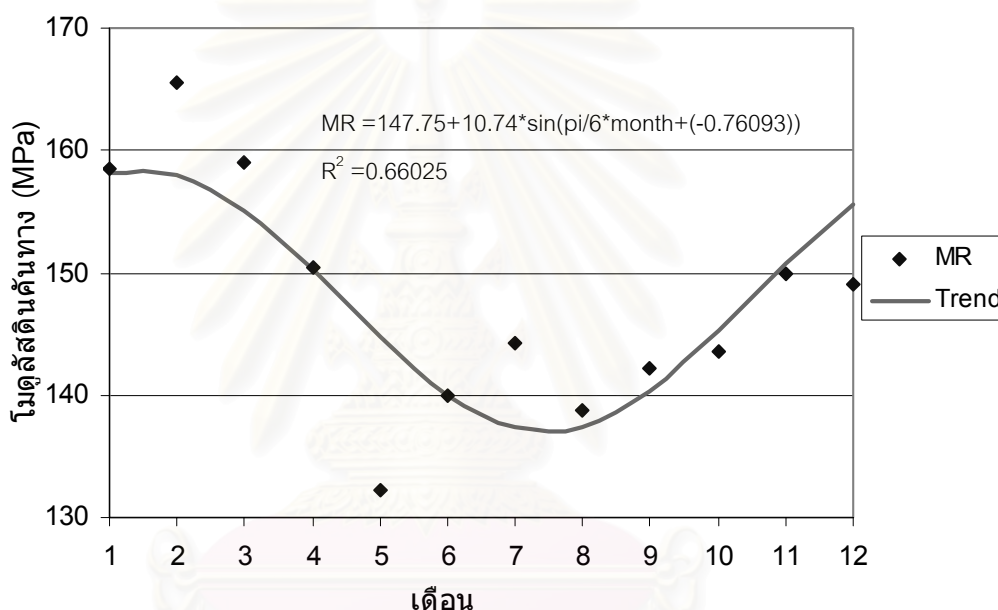
โดยที่ ϵ_c แทนความเครียดแรงอัดที่ผิวบนของชั้นดินคันทาง

เมื่อความเสียหายเนื่องจากรถบรรทุกหนึ่งครั้ง (Single Load) เท่ากับ $D_i = 1/N_d$ จะได้ว่า

$$D_i = \frac{10^9}{1.365} \times (\epsilon_c)^{4.477} \quad 4.5$$

และด้วยวิธีการเช่นเดียวกับการวิเคราะห์เช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.4.3 จะได้ความเสียหายสะสมตามเกณฑ์การวิบัติเนื่องจากการเปลี่ยนรูปถาวร ใน N ปี จะเป็นดังสมการที่ 4.5

ในการศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคันทาง ในรูปแบบฟังก์ชันของเวลา (Time Series) ด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม SPSS (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2544) ในแต่ละสายทาง ฟังก์ชันของเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคันทางในสายทางหมายเลข 309 จากการทดสอบตามแนวร่องล้อที่น้ำหนัก 566 kPa แสดงในรูปที่ 4.42 ซึ่งนำไปใช้เป็นแนวทางในการคาดการณ์อายุใช้งานของทางลาดยางเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์การวิบัติเนื่องจากการเปลี่ยนรูปถาวร

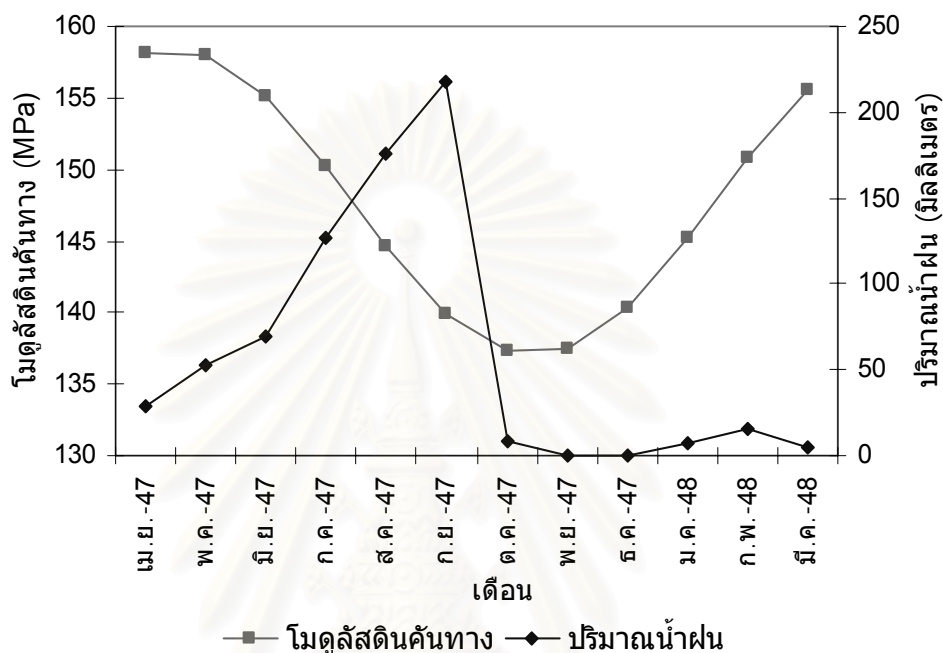


หมายเหตุ ส่วนที่ 1 ในแกนนอนแทนเดือนเมษายน

รูปที่ 4.42 ฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคันทางในสายทางหมายเลข 309

จากรูปที่ 4.42 จะเห็นว่าความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคันทางตลอดทั้งปี มีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งแบบไซน์ (Sinusoidal Curve) เช่นเดียวกับฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทาง แต่จะมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนตุลาคมถึงพฤศจิกายน ซึ่งตามสภาพอากาศของประเทศไทยถือเป็นช่วงเปลี่ยนฤดูจากฤดูฝนเป็นฤดูหนาว จะสังเกตเห็นว่าโมดูลัสดินคันทางของสายทางหมายเลข 309 จะไม่มีค่าต่ำสุดในฤดูฝน หรือในเดือนกันยายนที่มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยสูงสุด ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความเหลื่อม (Time Lag) ซึ่งจากการศึกษาของ Bandyopadhyay และ Frantzen (1983) ซึ่งเสนอว่าความเหลื่อมระหว่างเวลาที่ฝนตกกับความชื้นในดินที่จะผันแปรตามจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3 สัปดาห์ถึง 2 เดือน ในขณะที่มีค่าสูงสุดประมาณช่วง

เดือนมีนาคมถึงเมษายน ซึ่งอยู่ในฤดูแล้งหรือ Dry Season ซึ่งเป็นช่วงเวลาไม่มีฝนตกและมีปริมาณความชื้นในดินค่อนข้างต่ำ เพื่อความชัดเจนจะเปรียบเทียบฟังก์ชันของเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคั้นทางกับปริมาณน้ำฝนรายเดือนในรอบปีที่ทำการทดสอบ จะแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคั้นทางกับปริมาณน้ำฝนในสายทางหมายเลข 309

จากรูปที่ 4.43 จะเห็นในช่วงเดือนเมษายนถึงกันยายนที่ปริมาณน้ำฝนรายเดือนสูงขึ้นเรื่อยๆ กราฟของฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคั้นทางจะเป็นไปในทางผกผันคือลดลงเรื่อยๆ เช่นเดียวกัน และฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคั้นทางจะมีค่าต่ำสุดในเดือนตุลาคม หรือ 1 เดือน ถัดจากเดือนกันยายนที่มีปริมาณน้ำฝนรายเดือนสูงสุด ซึ่งน่าจะเป็นผลจากความเหลื่อมดังที่ได้อธิบายข้างต้น และหลังจากนั้นโมดูลัสดินคั้นทางจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น (Recover) ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงมีนาคม ซึ่งจัดอยู่ในฤดูหนาวและฤดูร้อนหรือ Dry Season ที่มีปริมาณน้ำฝนรายเดือนน้อยมาก

เมื่อพิจารณาแนวโน้มความผันแปรของโมดูลัสดินคั้นทางในสายทางอื่นๆ ที่แสดงไว้ในภาคผนวก ง พบว่ากราฟฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคั้นทางมีลักษณะที่สอดคล้องกันกับสายทางหมายเลข 309 ยืนยันความผันแปรตามฤดูกาลของดินคั้นทางตามสภาพถนนและสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย

4.4.5 โมดูลัสดินคั่นทางประสิทธิผลและค่าถ่วงน้ำหนัก (Effective Subgrade Resilient Modulus, MR_{eff} and Weighting Factor, WF)

จากวิธีการออกแบบทางลาดยางของ AASHTO (1993) ซึ่งจะอาศัยความสูญเสียความสามารถในการให้บริการ (Serviceability Loss) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.1 ตามวิธีการนี้จะพบว่า ค่าโมดูลัสดินคั่นทางที่ใช้ในการออกแบบจะเป็นค่าที่ถูกถ่วงน้ำหนักให้เป็นค่าเฉลี่ยและเป็นตัวแทนของโมดูลัสดินคั่นทางที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดทั้งปี ซึ่งเรียกว่าโมดูลัสดินคั่นทางประสิทธิผล (MR_{eff}) โดยวิธีการคำนวณหาค่าโมดูลัสดินคั่นทางประสิทธิผลนี้ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2

เนื่องจากโมดูลัสดินคั่นทางจะผันแปรตามปริมาณความชื้นในดิน ที่จะขึ้นอยู่กัปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ อีกมากมาย การออกแบบงานทางที่พิจารณาผลของปัจจัยแวดล้อมนี้จึงมีความยุ่งยาก Guan et al. (1998) จึงนำเสนอวิธีปรับแก้ค่าโมดูลัสดินคั่นทางค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งประยุกต์มาจากสมการของ AASHTO (1993) และทฤษฎีของ Miner ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1.3 ค่าถ่วงน้ำหนักจะสามารถนำไปหาค่าโมดูลัสดินคั่นทางตัวแทนที่ใช้ในการออกแบบงานทาง

เมื่อวิเคราะห์หาค่าถ่วงน้ำหนักของโมดูลัสดินคั่นทางที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม ELMOD และจากวิธี AASHTO (1993) ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.18 และ 4.19

ตารางที่ 4.18 ค่าถ่วงน้ำหนักของโมดูลัสดินคั่นทางที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับด้วย โปรแกรม ELMOD

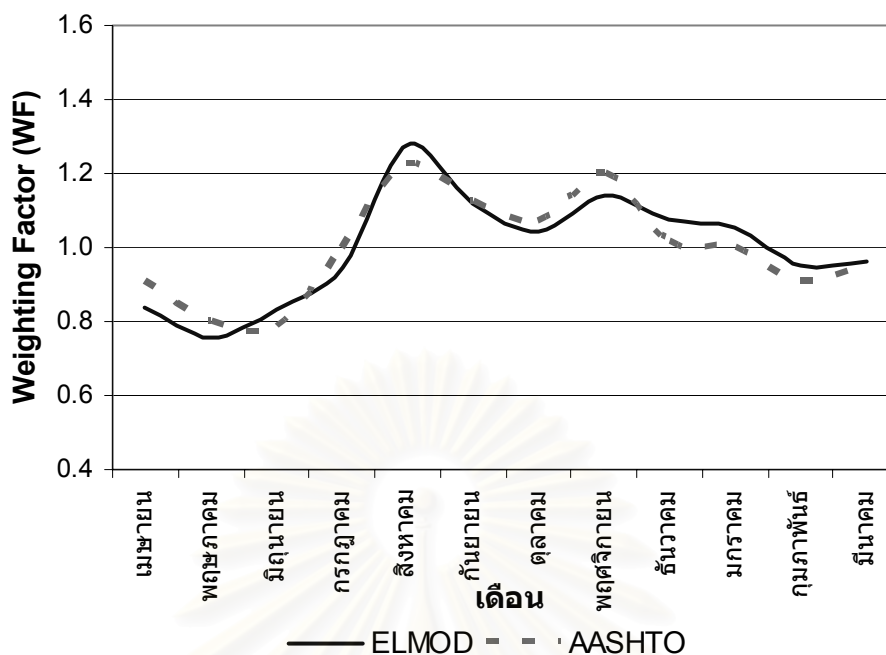
เดือน	M_{ri}	$M_{ri}^{-2.32}$	WF_i
เมษายน	158.5	7.872E-06	0.838
พฤษภาคม	165.5	7.117E-06	0.757
มิถุนายน	158.9	7.818E-06	0.832
กรกฎาคม	150.4	8.889E-06	0.946
สิงหาคม	132.3	1.197E-05	1.274
กันยายน	140.0	1.050E-05	1.117
ตุลาคม	144.2	9.802E-06	1.043
พฤศจิกายน	138.7	1.073E-05	1.141
ธันวาคม	142.1	1.013E-05	1.078
มกราคม	143.5	9.912E-06	1.055
กุมภาพันธ์	149.8	8.965E-06	0.954
มีนาคม	149.1	9.065E-06	0.965
	ผลรวม	1.128E-04	12

ตารางที่ 4.19 ค่าถ่วงน้ำหนักของโมดูลัสดินคันทางที่ได้จากวิธีของ AASHTO

เดือน	M_i	$M_i^{-2.32}$	WF_i
เมษายน	172.5	6.466E-06	0.910
พฤษภาคม	182.5	5.672E-06	0.798
มิถุนายน	183.2	5.622E-06	0.791
กรกฎาคม	165.6	7.108E-06	1.001
สิงหาคม	151.8	8.700E-06	1.225
กันยายน	157.5	7.987E-06	1.124
ตุลาคม	160.8	7.606E-06	1.071
พฤศจิกายน	153.2	8.511E-06	1.198
ธันวาคม	164.4	7.228E-06	1.017
มกราคม	165.6	7.112E-06	1.001
กุมภาพันธ์	172.6	6.461E-06	0.909
มีนาคม	169.1	6.772E-06	0.953
	ผลรวม	8.524E-05	12

Weighting Factor ที่มีค่าเท่ากับ 1 จะเป็นค่าเดียวที่สะท้อนถึงความสัมพันธ์ความผันแปรของโมดูลัสของดินคันทางตลอดทั้งปี และจะถูกนำมาใช้ออกแบบแทนการออกแบบงานทางโดยใช้โมดูลัสของดินคันทางหลายค่า เพราะสามารถรองรับการเสื่อมสภาพของทางได้ในทุกฤดูกาลตลอดทั้งปี จากรูปที่ 4.44 ซึ่งแสดงค่าถ่วงน้ำหนักของค่าโมดูลัสดินคันทางสำหรับสายทางหมายเลข 309 จะพบว่าในเดือนกรกฎาคมเป็นช่วงเวลาที่ค่าถ่วงน้ำหนัก จากทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากับ 1 จึงเหมาะสมจะเป็นฤดูกาลที่ใช้ในการออกแบบงานทาง

จากรูปที่ 4.44 แสดงการเปรียบเทียบกราฟค่าถ่วงน้ำหนักของค่าโมดูลัสดินคันทางจากสำหรับสายทางหมายเลข 309 โดยโมดูลัสดินคันทางที่ใช้หาถ่วงน้ำหนักนี้ได้จาก 2 วิธี คือ จากการคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม ELMOD และจากวิธีของ AASHTO (1993) ดังแสดงในสมการที่ 2.22 จะพบว่ากราฟค่าถ่วงน้ำหนักของค่าโมดูลัสดินคันทางที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้มีลักษณะคล้ายกันและเกือบทับกันสนิท แสดงว่าค่าโมดูลัสดินคันทางที่ได้จากโปรแกรม ELMOD และจากวิธีของ AASHTO (1993) จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อทำให้ไม่มีหน่วยด้วยการทำเป็นค่าถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 4.44 กราฟค่าถ่วงน้ำหนักของโมดูลัสดินคั่นทางสำหรับสายทางหมายเลข 309

และจากตารางที่ 4.18 และ 4.19 ค่าโมดูลัสดินคั่นทางที่ได้จากโปรแกรม ELMOD และจากวิธีของ AASHTO ที่เดือนกรกฎาคมซึ่งมีค่าถ่วงน้ำหนักใกล้เคียง 1 จะมีค่า 150.4 MPa และ 165.6 MPa ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับโมดูลัสดินคั่นทางประสิทธิภาพจากทั้งสองวิธีด้วยการทดสอบ FWD ทุกๆ 1 เดือนในตารางที่ 4.20 ซึ่งมีค่า 148.4 MPa และ 164.9 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าโมดูลัสดินคั่นทางจากวิธีถ่วงน้ำหนักของ Guan et al. (1998) และจากวิธีหาโมดูลัสดินคั่นทางประสิทธิภาพของ AASHTO (1993) ให้ค่าโมดูลัสดินคั่นทางตัวแทนที่ใช้ในการออกแบบงานทางแบบ Serviceability Loss ใกล้เคียงกัน

4.4.6 คาบการทดสอบด้วย FWD กับการโมดูลัสดินคั่นทางประสิทธิภาพ

เนื่องจากการทดสอบด้วย FWD เพื่อศึกษาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคั่นทางนั้น หากต้องการข้อมูลโดยละเอียดที่หาค่าตัวแทนของโมดูลัสดินคั่นทางที่ผันแปรไปตลอดทั้งปีเพื่อใช้ในการออกแบบงานทาง อาจจะต้องทำการทดสอบที่ถี่ขึ้น การทดสอบด้วยคาบการทดสอบ 1 เดือนน่าจะเหมาะสม แต่การทดสอบที่ถี่นี้คงต้องมีค่าใช้จ่ายที่สูง ดังนั้นหากเพิ่มคาบการทดสอบการทดสอบเป็น 2 3 หรือ 4 เดือนครั้ง และให้ข้อมูลที่ถูกต้องตามระดับการใช้งานน่าจะดีกว่า

ดังนั้นผู้วิจัยจึงวิเคราะห์หาผลกระทบของคาบการทดสอบ FWD ที่มีต่อโมดูลัสดินคันทางประสิทธิภาพ(MR_{eff}) แล้วพบว่า สำหรับสายทางหมายเลข 309 โมดูลัสดินคันทางประสิทธิภาพที่คำนวณจากโมดูลัสดินคันทางที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม ELMOD จะมีค่าเกือบจะเท่ากันในทุกคาบการทดสอบ แต่สำหรับวิธีของ AASHTO (1993) ค่าโมดูลัสดินคันทางประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบด้วยคาบการทดสอบสั้นกว่า (ความถี่สูงกว่า) จะมีค่ามากกว่าการทดสอบด้วยคาบการทดสอบยาวกว่า อย่างไรก็ตามค่าต่างระหว่างโมดูลัสดินคันทางประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบด้วยคาบการทดสอบ 1 ถึง 4 เดือน มีค่าน้อยมากเมื่อคิดเทียบเป็นร้อยละกับโมดูลัสดินคันทางประสิทธิภาพที่ทดสอบด้วยคาบ 1 เดือน จึงสามารถตัดผลของค่าต่างนี้ออกไปได้ และสรุปได้ว่าการทดสอบด้วย FWD ด้วยคาบการทดสอบมากที่สุด 4 เดือนต่อครั้ง จะให้หาโมดูลัสดินคันทางประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการทดสอบในทุกเดือนสำหรับทั้งการคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม ELMOD และด้วยวิธีของ AASHTO (1993) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าโมดูลัสดินคันทางประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีของ AASHTO (1993) จะมีค่ามากกว่าโปรแกรม ELMOD ทุกคาบการทดสอบ

ตารางที่ 4.20 ผลของคาบการทดสอบ FWD ที่มีต่อโมดูลัสดินคันทางประสิทธิภาพ

คาบการทดสอบ (เดือน)	โมดูลัสดินคันทางประสิทธิภาพ (MPa)	
	ELMOD	AASHTO
1	148.4	164.9
2	148.5	164.2
3	148.4	163.4
4	147.0	162.2

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า อุณหภูมิ และ ความชื้น เป็นปัจจัยแวดล้อมหลักที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของโครงสร้างทาง และปัจจัยแวดล้อมนี้ก็แปรเปลี่ยนไปตามสภาพอากาศที่เปลี่ยนไปในตลอดทั้งปีหรือแม้แต่เปลี่ยนไปในระหว่างวัน ด้วยเหตุที่ผลกระทบของความผันแปรนี้ทำให้ส่งผลต่อความแข็งแรง และพฤติกรรมของโครงสร้างทางอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงทำให้ผู้เชี่ยวชาญด้านงานทางหลายฝ่ายต้องเผชิญกับความท้าทายในการออกแบบงานทางให้มีความคุ้มค่าและประสิทธิภาพเมื่อพิจารณาถึงผลของความผันแปรตามฤดูกาลนี้

ในปัจจุบันการออกแบบงานทางมีแนวโน้มที่จะหันมาออกแบบตามวิธีเชิงกลอย่างง่าย (Mechanistic-Empirical) มากขึ้น ซึ่งการออกแบบตามวิธีนี้จะอาศัยข้อมูลทางด้านน้ำหนักบรรทุก อันเนื่องมาจากปริมาณจราจร คุณสมบัติของวัสดุ และปัจจัยทางด้านสภาพภูมิอากาศ ความผันแปรตามฤดูกาลของสภาพภูมิอากาศ อันได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ปริมาณน้ำฝน รวมไปถึงอุณหภูมิและปริมาณความชื้นที่โครงสร้างทางโดยตรง ในต่างประเทศนักวิจัยหลายท่านพยายามวิธีการที่จะนำเอาผลของความผันแปรตามฤดูกาลเข้าร่วมกับการออกแบบงานทาง แต่เนื่องจากการจะได้อะไรมาซึ่งความถูกต้องของผลการวิเคราะห์จำเป็นต้องมีการเฝ้าติดตามพฤติกรรมของสภาพทางอย่างจริงจัง จึงทำให้งานวิจัยจำนวนน้อยมีความสำเร็จและให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

สำหรับในประเทศไทยเริ่มมีความสนใจในการศึกษาผลของความผันแปรตามฤดูกาลของคุณสมบัติโครงสร้างชั้นทาง เมื่อกรมทางหลวงได้นำเครื่องมือทดสอบสภาพทางแบบไม่ทำลาย Falling Weight Deflector (FWD) มาทดสอบสายทางเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพทาง จากข้อมูลดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเข้าใจถึงความผันแปรตามฤดูกาลของคุณสมบัติโครงสร้างชั้นทางได้อย่างถูกต้อง

การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาว่าสภาพภูมิอากาศในประเทศไทยมีผลต่อความผันแปรตามฤดูกาลของโครงสร้างทางลาดอย่างไร และจะนำเอาผลการศึกษาที่ได้มาประยุกต์ใช้กับการออกแบบและประเมินสภาพทางลาดภายในประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพสะท้อนกับความเสื่อมสภาพของทางจริงอันเกิดจากผลของสภาพภูมิอากาศ อีกทั้งเพื่อเป็นแนวทางหรือเป็นข้อเสนอในการศึกษาความผันแปรตามฤดูกาลของโครงสร้างทางลาดภายในประเทศไทยต่อไป

วิธีดำเนินการศึกษาเริ่มจากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วย FWD จากความอนุเคราะห์ของกรมทางหลวงในสายทางตัวอย่าง คือ ทางหลวงหมายเลข 309 ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยทำการทดสอบติดตามพฤติกรรมของคุณสมบัติโครงสร้างทางในทุกเดือน ตลอดระยะเวลา

หนึ่งปี ตั้งแต่เมษายน 2547 ถึงมีนาคม 2548 และรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมจากการทดสอบในลักษณะเดียวกันของ Pavement Technology Project (PTP) ใน 7 สายทางตัวอย่างครอบคลุมตามภาคต่างๆ ของประเทศไทย ในระหว่างปี 2543 ถึง 2544 เพื่อยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของผู้ศึกษาเอง

ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะนำเอาปัจจัยแวดล้อมเข้าร่วมด้วย ได้แก่ สถิติอุณหภูมิอากาศ สถิติปริมาณน้ำฝน รวมถึงอุณหภูมิและปริมาณความชื้นที่วัดได้โดยตรงในสนาม โดยเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของโครงสร้างชั้นทาง ได้แก่ ค่าการแอ่นตัว และค่าโมดูลัสของชั้นทางต่างๆ เพื่อให้เกิดความเข้าใจว่าปัจจัยแวดล้อมมีผลต่อความผันแปรของคุณสมบัติของโครงสร้างชั้นทางอย่างไร

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล สามารถสรุปเป็นประเด็นได้ดังนี้

1. ค่าแอ่นตัวกลางที่ได้จากการทดสอบ FWD ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างทาง เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ได้ในฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว พบว่าค่าแอ่นตัวกลางในฤดูฝน มีค่ามากกว่าในฤดูร้อน และฤดูหนาวตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากความชื้นในโครงสร้างทางที่ในฤดูฝนมีค่ามากกว่าในฤดูร้อน และฤดูหนาวตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบการกระจายของค่าแอ่นตัวกลางในรูปของสัมประสิทธิ์ความแปรผัน พบว่าในฤดูร้อนและฤดูฝนมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่าในฤดูหนาว เป็นผลมาจากอุณหภูมิ ที่ในฤดูร้อนและฤดูฝนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าในฤดูหนาว
2. ค่าแอ่นตัวกลางจะผันแปรตามอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทางเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าแอ่นตัวกลางเพิ่มขึ้นด้วย แต่ค่าแอ่นตัวกลางที่ปรับแก้ผลของอุณหภูมิแล้วมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝน กล่าวคือในระหว่างเดือน พฤษภาคม ถึง สิงหาคม ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนสูงขึ้น ค่าแอ่นตัวกลางที่วัดได้จะมีค่าสูงขึ้น และในเดือนตุลาคม ถึง มีนาคม ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนลดน้อยลง ค่าแอ่นตัวกลางที่วัดได้จะค่อยๆ ลดค่าต่ำลงเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าในฤดูฝน สภาพทางลาดยางในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะมีความแข็งแรงหรือความสามารถในการรับน้ำหนักลดลง

3. ผลความหนาของโครงสร้างทางทั้งหมด พบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับตัวชี้วัด VI ที่ระดับ 0.01 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.847 โดยที่ค่า VI (ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนต์กลางมาก) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของโครงสร้างทางทั้งหมดเพิ่มขึ้น ตรงตามแนวคิดทั่วไปที่ว่าโครงสร้างทางที่มีความหนามากกว่าย่อมมีความแข็งแรงทนทานต่อการสูญเสียบรรยากาศในการรับน้ำหนักได้ดีกว่าโครงสร้างทางที่มีความหนาน้อยกว่า ส่วนผลของปริมาณจรรยาในรูปน้ำหนักเพลามาตรฐานต่อปี ผลของความหนาของชั้นผิวทาง ผลอายุการใช้งานของถนนที่อยู่ในรูปของจำนวนปีหลังจากการก่อสร้างหรือซ่อมบำรุงครั้งล่าสุด และผลของปริมาณน้ำฝนในรอบปี ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับตัวชี้วัดความผันแปรตามฤดูกาลของค่าแอนต์กลาง
4. โมดูลัสของชั้นผิวทางในฤดูฝนและฤดูหนาวซึ่งมีอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายเดือนน้อยกว่า จะมีค่ามากกว่าโมดูลัสของชั้นผิวทางในฤดูร้อน และพบว่าโมดูลัสชั้นผิวทางในฤดูร้อนมีการกระจายที่วัดจากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันมีค่ามากกว่าในฤดูฝน นั่นแสดงว่าอิทธิพลของฤดูกาลต่อโมดูลัสชั้นผิวทางจะเป็นผลของอุณหภูมิ
5. โมดูลัสชั้นผิวทางผันแปรตามอุณหภูมิที่วัดจากกึ่งกลางชั้นผิวทาง แต่เมื่อปรับแก้โมดูลัสชั้นผิวทางด้วยค่าปรับแก้ผลเนื่องจากอุณหภูมิ พบว่าความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางจะขึ้นกับอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายเดือน โดยมีค่าต่ำสุดในเดือนมีนาคมถึงเมษายนที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนสูงสุด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโมดูลัสชั้นผิวทางตามสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยไม่คงที่ แต่มีความผันแปรไปตลอดทั้งปีดังกล่าว
6. โมดูลัสชั้นพื้นทาง โมดูลัสชั้นรองพื้นทาง และโมดูลัสดินคั่นทางจะผันแปรตามความชื้น และมีความผันแปรตามฤดูกาลขึ้นกับปริมาณน้ำฝน โดยมีค่าต่ำสุดในเดือนกันยายนถึงตุลาคม โดยเฉพาะโมดูลัสชั้นรองพื้นทาง และโมดูลัสดินคั่นทางยังผันแปรตามอุณหภูมิ และเป็นไปในทางตรงกันข้ามกับโมดูลัสชั้นผิวทาง
7. โมดูลัสของดินคั่นทางในฤดูฝนซึ่งมีปริมาณน้ำฝนและความชื้นที่สูงกว่า จะมีค่าน้อยกว่าโมดูลัสของดินคั่นทางในฤดูร้อนและฤดูหนาว แสดงว่าโมดูลัสดินคั่นทางของสายทางตามสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยไม่คงที่ แต่มีความผันแปรไป

ตลอดทั้งปีดังกล่าว และสำหรับการกระจายตัวที่อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน พบว่าในฤดูร้อนโมดูลัสดินคันทางมีกระจายตัวมากกว่าฤดูฝนและฤดูหนาว ตามลำดับ สาเหตุหลักเป็นเพราะปัจจัยด้านอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิของชั้นผิวทางเพิ่มขึ้นจะทำให้โมดูลัสชั้นผิวทางลดลง และความเค้นจากน้ำหนักทดสอบจะถูกส่งผ่านไปยังชั้นดินคันทางได้มากขึ้นทำให้โมดูลัสดินคันทางลดลง และมีการกระจายตัวมากขึ้นด้วย

8. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นผิวทาง กับอัตราส่วนโมดูลัสชั้นผิวทางต่อโมดูลัสชั้นผิวทางอ้างอิงที่ 35 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทาง หรือนำไปปรับแก้ผลที่ได้จากการทดสอบด้วย FWD ที่เวลาต่างๆ กัน ทั้งนี้เมื่อเทียบกับค่าปรับแก้ผลของอุณหภูมิของโมดูลัสชั้นผิวทาง จากการศึกษาของ PTP พบว่ามีสมการที่ใกล้เคียงกันอย่างยิ่ง
9. สำหรับสายทางหมายเลข 309 ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางมีลักษณะเป็นโค้งแบบไซน์ (Sinusoidal Curve) โดยมีค่าต่ำสุดที่ประมาณเดือนมีนาคมถึงเมษายน และมีค่าสูงสุดที่เดือนสิงหาคม แต่อย่างไรก็ตามเส้นโค้งแบบไซน์ยังไม่สะท้อนถึงผลของอุณหภูมิต่อความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางได้ดีนัก และเมื่อพิจารณากราฟความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสชั้นผิวทางของสายทางอื่นๆ โมดูลัสชั้นผิวทางจะมีค่าสูงสุดที่ประมาณเดือนธันวาคม และมีค่าต่ำที่ประมาณเดือนมีนาคม ดังนั้นควรระมัดระวังหากจะนำฟังก์ชันเวลาแบบไซน์นี้ไปพิจารณาใน Fatigue Criteria ตามวิธี Mechanistic-Empirical
10. ความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคันทางมีลักษณะเป็นโค้งแบบไซน์ โดยมีค่าต่ำสุดที่ประมาณเดือนตุลาคมถึงธันวาคม และมีค่าสูงสุดที่เดือนมีนาคมถึงเมษายน สามารถนำไปพิจารณาในการออกแบบงานทางด้วยเกณฑ์ Permanent Deformation ตามวิธี Mechanistic-Empirical และเมื่อพิจารณาแนวโน้มความผันแปรของโมดูลัสดินคันทางในสายทางอื่นๆ พบว่ากราฟฟังก์ชันเวลาความผันแปรตามฤดูกาลของโมดูลัสดินคันทางมีลักษณะเป็นโค้งแบบไซน์ ที่สอดคล้องกัน

กับสายทางหมายเลข 309 ยืนยันมีว่าความผันแปรตามฤดูกาลของดินคันทางตามสภาพทางและสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย

11. ค่าถ่วงน้ำหนักของโมดูลัสดินคันทางที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม ELMOD และวิธีของ AASHTO (1993) มีค่าใกล้เคียง โดยสำหรับสำหรับสายทางหมายเลข 309 จะมีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 1 ที่เดือนกรกฎาคมและมกราคม ซึ่งจะได้โมดูลัสดินคันทางตัวแทนที่สะท้อนถึงความผันแปรตามฤดูกาลตลอดทั้งปี ตามวิธี Serviceability Loss นอกจากนี้ยังพบว่าโมดูลัสดินคันทางที่ค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 1 จะมีค่าใกล้เคียงกับโมดูลัสดินคันทางประสิทธิผลตามวิธีของ AASHTO (1993)
12. การทดสอบ FWD เพื่อหาโมดูลัสดินคันทางประสิทธิผลสามารถวางแผนการทดสอบด้วยความถี่อย่างน้อย 3 ครั้งต่อหนึ่งปี หรือมีคาบการทดสอบ 4 เดือน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาความผันแปรตามฤดูกาลของทางลาดยาง โดยทดสอบ FWD ในช่วงเวลาเดียวกัน ทุกครั้งของการทดสอบตลอดทั้งปี โดยช่วงเวลาที่เหมาะสมควรจะเป็นช่วงเช้าถึงก่อนเที่ยง เพราะอุณหภูมิของผิวทางไม่สูงมากนัก และไม่ควรรทำการทดสอบทางลาดยางเมื่ออุณหภูมิของผิวทางสูงเกินกว่า 46 °C ทั้งนี้เพื่อลดผลกระทบของอุณหภูมิที่สูงเกินไปต่อค่าการแอ่นตัวที่วัดได้ (Hossain et al., 1996) ซึ่งจะมีผลต่อค่าโมดูลัสของชั้นทางที่จะทำการคำนวณย้อนกลับต่อไป
2. ทำการทดสอบด้วย FWD เช่นเดียวกับการทดสอบในการวิจัยนี้ในสายทางหมายเลข 309 ต่อไปอย่างน้อย 1 ปี เพื่อรวบรวมชุดข้อมูลให้ได้มากขึ้น จะทำให้ผลการวิเคราะห์ห้มีน้ำหนักและชัดเจนมากยิ่งขึ้น
3. ศึกษาหาฟังก์ชันเวลาของโมดูลัสชั้นผิวทางด้วยความสัมพันธ์ในรูปแบบอื่น เช่น โพลีโนเมียล หรือฟังก์ชันเชิงซ้อน เนื่องจากความสัมพันธ์ในรูปแบบไซน์อธิบายความผันแปรของโมดูลัสชั้นผิวทางเทียบกับความผันแปรของอุณหภูมิอากาศรายเดือนได้ไม่ดีนัก

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กระทรวงคมนาคม. กรมทางหลวง, รายงานประจำปีกรมทางหลวง 2546. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

กัลยา วานิชย์บัญชา. หลักสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

กัลยา วานิชย์บัญชา. การวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวด้วย SPSS for Windows. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

กัลยา วานิชย์บัญชา. การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร : ซี เค แอนด์ เอส โฟโต้สตูดิโอ, 2544.

วิเชียร พัวรุ่งโรจน์. การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสของชั้นถนน จากข้อมูลการทดสอบด้วยเครื่อง FWD โดยการวิเคราะห์ในลักษณะพลวัต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

สุวิชาน มนแพวงศานนท์. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย SPSS for Windows. ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2547.

แสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์ , ประเสริฐ บุญรักษา และ ไพบุลย์ รัตวิริยะพงศ์. การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางโดยโปรแกรม ELMOD. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง, 2547. (อัดสำเนา)

ภาษาต่างประเทศ

AASHTO. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington D.C., 1986.

AASHTO. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington D.C., 1993.

Ali, H. A., and Parker, N. A. Using Time Series to Incorporate Seasonal Variation in Pavement Design. Transportation Research Record 1539 (1996): 33-43.

Ali H. A., and Lopez, A. Statistical Analyses of Temperature and Moisture Effects on Pavement Structural Based on Seasonal Monitoring Data. Transportation Research Record 1540 (1996): 48-55.

Asphalt Institute. Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual. (MS-1), 9th ed. Report 82-2, 1982.

- Baltzer S., and J. M. Jansen. Temperature Correction of Asphalt-Moduli for FWD Measurements. Proceedings, 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields. (1994): 754-768. Trondheim, Norway.
- Bandyopadhyay, S. S., and Frantzen, J. A. Investigation of Moisture-Induced Variation in Subgrade Modulus By Cross-Correlation Method. Transportation Research Record 945 (1983): 10-15.
- Cumberledge G., Hoffman G. L., Bhajandas A. C., and Cominsky R. J. Moisture Variation in Highway Subgrades and the Associated Change in Surface Deflections. Transportation Research Record 497 (1974): 40-49.
- Elliott, R. P., and Thompson, M. R. ILLI-PAVE Mechanistic Analysis of AASHO Road Test Flexible Pavements. Transportation Research Record 1043 (1985): 39-49.
- Fredlund, D. G, and H. Rahardjo. Soil Mechanics of Unsaturated Soils. John Wiley & Son, Inc. 1993.
- Guan, Y., Drumm, E. C., and Jackson, N. M. Weighting Factor for Seasonal Subgrade Resilient Modulus. Transportation Research Record 1619 (1998): 94-101.
- Gomez-Achecar, M., and Thompson, M. R. Mechanistic Design Concepts for Full-Depth Asphalt Concrete Pavements. Civil Engineering Studies, Transportation Engineering Series No. 41. (1984). Cited in Guan, y., Drumm, E. C., and Jackson, N. M. Weighting Factor for Seasonal Subgrade Resilient Modulus. Transportation Research Record 1619 (1998): 94-101.
- Haas, R., Hudson, W. R., and Zaniewski, J. Modern Pavement Management (ch. 16 Prediction Models for Pavement Deterioration), 1994. Cited in Samson, M., and Frechette, L. Seasonal Variation of Pavement Strength Based on Benkelman Beam Rebounds. Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP), 1995.
- Hossain M. B., Long B., and Kotdwala S. J. Seasonal and Hourly Variations of Deflections Measured with the Falling Weight Deflectometer (FWD). Final Report EES 277. Kansas Department of Transportation, 1996.
- Huang Y. H., Pavement Analysis and Design. Prentice Hall, N.j., 1993.
- Inge H. and Kim Y. R. Prediction of Effective Asphalt Layer Temperature. Transportation Research Record 1473 (1999): 93-100.

- Johnson, M., and Baus.,R. L. Alternative Method for Temperature Correction of Backcalculated Equivalent Pavement Moduli. Transportation Research Record 1355 (1992): 75-81.
- Kestler, M. A., and Berg, R. L. Spring Thaw at Minnesota Road Research Project Pavement Testing Facility, 1995.
- Kim, Y. R., Hibbs, B. O., and Lee, Y. C. Temperature Correction of Deflections and Backcalculated Asphalt Concrete Moduli. Transportation Research Record 1473 (1995): 55-62.
- Lee, S. W., Mahoney, J. P., and Jackson, N. C. Verification of Backcalculation of Pavement Moduli. Transportation Research Record 1196 (1988): 85-95.
- Lindly J. K., and White T. D. Using NDT to Calculate the 1986 AASHTO Guide Subgrade Resilient Modulus. Nondestructive Testing of Pavement and Backcalculation of Moduli, ASTM STP 1026 (1989): 683-691.
- Long B., Hossain M., Gisi A. J. Seasonal Variation of Backcalculated Subgrade Moduli. Transportation Research Record 1577 (1997): 70-80.
- Lukanen, E. O., Stubstad, R., and Briggs, R. C. Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavements. Report FHWA-RD-98-085. 2000. Cited in Marshall C., Meier R., and Welch M. Seasonal Temperature Effects on Flexible Pavement in Tennessee. Transportation Research Record 1764 (2001): 89-96.
- Marshall C., Meier R., and Welch M. Seasonal Temperature Effects on Flexible Pavement in Tennessee. Transportation Research Record 1764 (2001): 89-96.
- Ministry of Transport and Communication. Department of Highways. Final Report on Pavement Technology Project, 2002.
- Ministry of Transport and Communication. Department of Highways. Temperature Correction of Asphalt Concrete Moduli from Falling Weight Deflectometer Measurements. Pavement Technology Project: Technical Report No. 1 (2001)
- Ministry of Transport and Communication. Department of Highways. Evaluation of the Effect of Traffic and Seasonal Variations on the E-moduli of Pavement Layers. Pavement Technology Project: Technical Report No. 6 (2001)

- Newcomb D. E., Lee S. W., Mahoney J. P., and Jackson N. C. The Use of Falling Weight Deflectometer Data in Monitoring Flexible Pavement Systems. Nondestructive Testing of pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP 1026. (1989): 470-486.
- Noureldin A. S. Influence of Stress Levels and Seasonal Variations on In Situ Pavement Layer Properties. Transportation Research Record 1448 (1994): 16-24.
- Rada R. G. SHRP-LTPP Monitoring Data: Five-Year Report. SHRP-P-696. Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994.
- Rada R. G., Lopez A., Elkins E G., Richter A. C. And Henderson B. Long-Term Pavement Performance Seasonal Monitoring Program : Instrumentation Selection and Installation. Transportation Research Record 1432 (1999): 32-43.
- Russam, K. Subgrade Moisture Studies by the British Road Research Laboratory. Highway Research Record 301 (1970): 5-17.
- Rutherford, M. S. Pavement Response and Load Restrictions on Spring Thaw-Weakened Flexible Pavements. Transportation Research Board 1286 (1990).
- Samson, M., and Frechette, L. Seasonal Variation of Pavement Strength Based on Benkelman Beam Rebounds. Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP), 1995.
- Shell. Shell Bitumen Handbook. Surrey, Shell Bitumen U.K., 1990.
- van Gorp, C. Effect of Temperature Gradients and Season on Deflection Data. Minneapolis, Minnesota. The 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields 1 (1994): 199-214.
- Vaswani N. K. Case Studies of Variations in Subgrade Moisture and Temperature under Road Pavement in Virginia. Transportation Research Record 514 (1974): 30-42.
- White, T. D., and Coree, B. J. Threshold Pavement Thickness to Survive Spring Thaw. Third International Conference on Bearing Capacity of Road and Airfields Norway, 1990. Cited in Samson, M., and Frechette, L. Seasonal Variation of Pavement Strength Based on Benkelman Beam Rebounds. Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP), 1995.
- Yoder E. J., and Witczak M. W. Principles of Pavement Design. John Wiley & Sons, 1975.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
การทดสอบและเก็บข้อมูลในสนาม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก-1 เครื่องทดสอบสภาพทางแบบไม่ทำลาย Falling Weight Deflectometer (FWD) (บน) ประกอบด้วยส่วนให้น้ำหนักกระทำ (ล่างซ้าย) และส่วนวัดค่าการแอ่นตัว (ล่างขวา)



รูปที่ ก-2 คอมพิวเตอร์ประมวลผลการทดสอบของ FWD



รูปที่ ก-3 การเตรียมสายทางเพื่อทำการทดสอบ



รูปที่ ก-4 การทดสอบด้วย FWD

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก-5 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องวัดความชื้นในโครงสร้างทาง
และการวัดความชื้นจากเครื่อง Soilmoisture Meter



ภาคผนวก ข
ข้อมูลอุดมศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 อุณหภูมิสูงสุดรายเดือนในปี 2547 จากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตรอยุธยา

Station: 415301 Ayuttaya Agromet											Year: 2004	
DATE	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	34.1	34.4	36	36.9	37.5	35.7	35.1	32	34.4	31.7	34.7	32
2	34.5	35.6	37	37	37.5	36.5	35.5	32.1	31	33.2	33.9	33.1
3	34.8	36.5	37	36.8	37.4	36.7	35.8	32.6	32.6	31.5	33.8	33.5
4	35.3	35	37	36.5	36.4	35.5	36.5	32.1	32.5	32.5	34.2	33.6
5	35.1	34.3	35	36.1	32	37.2	37.1	34.4	32	32.9	35.6	31.4
6	34.5	32	35.7	37	32.2	35.7	35.2	31.2	34	33.5	36	32.5
7	34.4	29.7	32.5	37	35.5	34.5	35	33.5	32.4	34	35.7	30.2
8	34.6	26.8	32.4	37	34.5	33.5	36.2	32.4	31.2	34.2	36	29
9	34	29	33.1	36	36.3	34	35.9	33.4	31.9	34.4	36	31
10	33.8	30.1	37.5	35.4	36.4	31.4	34.4	32.7	30.4	33.4	36.2	31.1
11	34	34	36.2	37.2	34.7	33.6	32.3	31	33.9	34.1	36.5	31
12	28.1	33.8	35.5	38	34.4	34	32	33.5	32.2	33.5	36.3	31.5
13	32	30.8	36.5	37.7	35.2	34	34.5	33.8	31.6	34.4	37	30.8
14	33.4	31.5	36.4	37.3	34.5	30.4	35.5	32.8	32.2	34.6	36.4	32
15	32.6	33.3	34	39.4	35.5	30.8	34.5	31.5	32.8	33.4	38	32.3
16	33.2	34.5	36.3	38.1	35.6	31.3	36.5	32.5	34	33.5	35	33
17	33.9	35	36	37.8	33.5	31.7	36.7	34.4	30.7	33.6	34.9	34.5
18	34.5	35.7	36	38.5	35.9	30	35.8	34.1	32	33.7	34.3	33.8
19	34	34	34.4	38	34.8	31.6	35	32.4	33.2	34	33.2	33.8
20	34.5	33.5	35.3	38	32	32.5	34.4	33	31.2	34.6	33.6	33.3
21	34	34	35.8	38.2	27.5	33.5	32.5	34.5	32.9	34.4	31.9	34
22	31.7	34.6	35	37.9	28.4	33.3	32.8	33.1	34	34.4	31.5	33
23	32.1	33.8	36	38.6	35	33.3	32.5	34.8	35	33.5	32.1	33
24	30.5	35.5	37	38.4	35.3	33.7	33.7	34.8	35	33	33	34.5
25	29.6	35.2	36.4	38	34.5	33.5	32.3	34.8	35.2	34	32.5	34.5
26	32.4	35.1	37.6	37.4	33.6	33	31.9	34.5	34.4	32.5	30.8	34.8
27	34.1	35	37	38.3	33	33.3	32	34.9	34.6	33.4	32.5	35
28	34	34.9	37	29.3	34.6	33.5	32.4	34.7	33.8	34.4	34.4	33.5
29	34.5	35.7	37.1	35.8	36	33.6	33.6	34	34.3	35.4	33.7	32.8
30	34		37.1	38.3	36	35.8	34	34.4	32	35.3	33	34.4
31	34.7		36.7		35.2		34.2	34		35.4		30.5
N	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
MEAN	33.4	33.6	35.9	37.2	34.5	33.6	34.4	33.4	32.9	33.8	34.4	32.7
MAX.	35.3	36.5	37.6	39.4	37.5	37.2	37.1	34.9	35.2	35.4	38	35
DAY	4	3	26	15	1, 2	5	5	27	25	29,31	15	27
Extreme Maximum Temperature 39.4 Celcius on 15 April												

ตารางที่ ข-2 อุณหภูมิต่ำสุดรายเดือนในปี 2547 จากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตรอยุธยา

Station: 415301 Ayuttaya Agromet											Year: 2004	
DATE	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	17.6	22.5	21.6	24.5	25.6	24	26.2	24.8	26.3	24.4	23	21
2	17	23.6	21.7	23.9	25.5	24.6	25.6	25.5	24.1	23.5	23.6	22
3	18.1	23.5	21.9	24.3	24.2	25.2	26	24.7	22.9	23.2	23.4	20.8
4	17.4	24.5	22.6	24	24.3	24	26.4	24.8	23.1	24.2	21.8	20.5
5	18	23.9	24	24.2	23.5	23.6	27.2	23.8	24.3	24	22.3	19.8
6	19.1	21.3	22.5	25	23.4	23.2	26.6	23.6	24.8	24.4	22.4	20
7	20.5	19.5	24.6	24.9	23.6	24.6	26.4	25.3	24.9	23.8	22.1	20.4
8	18.6	19.2	21.3	25.2	25.2	23.2	24	25.3	24	23.7	22.2	19.7
9	20.8	17.6	21.3	24.9	24.9	24.4	21.8	24.9	24.5	23.8	23.1	18.3
10	20.6	18.6	19.6	25.2	24.6	22.3	21.7	24.8	23.8	24	23.8	20.7
11	22.2	19.2	23.1	24.7	23.6	21.8	25	24.6	25	22.7	23.6	20.3
12	21.5	17.7	24.1	25.3	24.2	23.4	24.8	25	25.8	24	23.8	18.8
13	19.9	19.5	24.5	24.8	23.4	23.6	25.8	24.8	22.3	23	24.2	21.2
14	20.2	18.1	24.7	25.8	23.8	23.6	25.2	24.3	23.8	22.7	23.5	18.4
15	21.5	15.6	24.5	24.3	23.2	23.4	24.8	24.4	24.3	23.7	23.8	16
16	21.1	16.3	23.7	25.8	24.2	24.4	26	24.8	24.5	23.5	24.5	16.5
17	22.2	17.9	23.6	24.1	24.3	24.2	25.5	24.6	24.3	22.7	23.3	17.6
18	21.4	19.9	22.7	25.3	24.5	24.4	24.8	25.2	25.3	21	22.9	17.2
19	21.6	21	24.3	25.5	24.3	23.6	25.6	25.3	23.6	22.3	22.2	17.3
20	20.2	22.5	24.3	24	24	24.2	25.3	24.8	24.8	21.6	21.5	15.8
21	21.3	22.4	25.3	24.2	23.7	25.6	26	23.8	23.8	22	21.3	15.7
22	21.4	22.6	24.9	24.8	22.6	24.7	25	24.5	23.3	24.2	20.7	17.5
23	21.3	22.3	25.2	25	21.6	25.3	24.2	23.6	23.5	23.2	21.3	17.4
24	20.7	22.6	24.8	25.8	23.2	25	23	24.3	24.5	23.1	21.4	18.3
25	17.3	22	24	25	23.3	24.6	23.5	25.3	25.9	24	24.2	17.8
26	19.2	20.8	22.8	25.1	24.4	24.5	25.1	25.5	25.1	22.4	23.2	16.7
27	17	20.4	23	24.8	23.9	25.4	25.3	25.8	25.2	22.2	22.5	17.2
28	17.5	20.8	23.4	25	24.2	24.3	25	26.3	24.3	23.1	23.3	17
29	18.8	21.7	24.9	22.7	24.5	25.3	24.9	25.4	22.3	24.5	22.8	16.7
30	21.2		24.6	24.9	25.6	24.1	24.7	26.3	24.8	23.8	23	16.8
31	24		24.8		25.1		25.1	26.1		23.2		18.5
N	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
MEAN	20	20.6	23.5	24.8	24.1	24.2	25	24.9	24.3	23.3	22.8	18.4
MIN.	17	15.6	19.6	22.7	21.6	21.8	21.7	23.6	22.3	21	20.7	15.7
DAY	2,27	15	10	29	23	11	10	6,23	13,29	18	22	21
Extreme Minimum Temperature 15.6 Celcius on 15 February												

ตารางที่ ข-3 อุณหภูมิสูงสุดรายเดือนในปี 2543 ถึง 2547 จากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตรอยุธยา

Station: 415301 Ayuttaya Agromet												Year: 2004
YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	33.1	33.6	35	34.2	33.9	33.4	32.9	33	32.3	32.9	31.6	33
2001	34.2	34.6	33.1	36.8	34.2	33.8	34	33	33.6	33.1	31	32
2002	33	34.6	35.3	37.1	34.5	34.7	34.4	33.5	33.4	33.1	32.7	33.4
2003	32.9	34.3	34.9	37.4	35.5	34.4	33.2	33.9	33.2	33.2	33.9	32
2004	33.4	33.6	35.9	37.2	34.5	33.6	34.4	33.4	32.9	33.8	34.4	32.7
Mean	33.3	34.1	34.8	36.5	34.5	34.0	33.8	33.4	33.1	33.2	32.7	32.6

ตารางที่ ข-3 อุณหภูมิต่ำสุดรายเดือนในปี 2543 ถึง 2547 จากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตรอยุธยา

Station: 415301 Ayuttaya Agromet												Year: 2004
YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	21.4	21.1	23.9	25.2	25	24.5	24.4	24.4	24.2	24.4	21.3	21.8
2001	22.2	22.4	23.7	25.8	25.2	24.8	24.8	25	24.9	24.2	21.2	21.3
2002	20.1	23.4	24.8	25.4	25	24.8	24.8	24.4	23.9	23.6	22.7	22
2003	19.4	21.8	23.2	24.3	24.8	24.7	24.5	24.8	24	23.8	22.2	19.1
2004	20	20.6	23.5	24.8	24.1	24.2	25	24.9	24.3	23.3	22.8	18.4
Mean	20.6	21.9	23.8	25.1	24.8	24.6	24.7	24.7	24.3	23.9	22.0	20.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในปี 2543 ถึง 2547 จากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตรอยุธยา

Station: 415301 Ayuttaya Agromet												
YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	0	18.6	21.2	154.4	96.4	102.5	78.9	164.2	157.4	97	8.6	0
2001	2.1	4.5	171.1	1.4	230.8	87.2	84.6	112.8	84.5	87.5	3.3	10.8
2002	49.4	5	13.7	9.8	95.8	52.2	36.6	195.8	304.4	54.3	94.7	104.5
2003	0	T	147.2	14.1	76.2	126.8	288.8	101.5	282	107.4	0	0
2004	15.1	30.9	0.4	29.2	52.5	69	127.2	176.4	217.5	8.3	0	0
Mean	13.3	14.8	70.7	41.8	110.3	87.5	123.2	150.1	209.2	70.9	21.3	23.1

ตารางที่ ข-5 ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในปี 2543 ถึง 2547 จากสถานีอุตุนิยมวิทยา อ.บางปะอิน

Station: 415002 Bang Pa-In												
YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	-	-	-	-	97.6	131.5	-	149	155	223.5	0	0
2001	21.2	14.5	70.4	0	49.6	70.3	35.8	154	108.4	43.6	0	0
2002	0	0	5.1	14.7	39.2	35.7	34.1	92	187.5	126	63.5	20.5
2003	0	T	13.3	0	100	80	229.5	301.2	195.9	60.5	0	0
2004	T	10	0	T	204.4	49.3	85.3	70.5	136.3	31.4	0	0
Mean	7.1	8.2	22.2	4.9	98.2	73.4	96.2	153.3	156.6	97.0	12.7	4.1

ตารางที่ ข-6 ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในปี 2543 ถึง 2547 จากสถานีอุตุนิยมวิทยา อ.วังน้อย

Station: 15013 Wang Noi												
YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	0	0	T	142.1	134.3	147.9	131.2	147.3	129.9	173.4	0	0
2001	T	63.3	164.1	0	122.3	56.5	217	166	225.6	132.3	0	0
2002	0	0	39.3	43.6	84.1	85	92.6	140.9	172	105.8	100.7	21
2003	0	T	44	10.5	152	80.4	116.1	26.1	265.8	73	0	0
2004	-	30	0	9.9	100	114.4	65.1	34.1	113.3	29.1	0	0
Mean	0.0	23.3	61.9	41.2	118.5	96.8	124.4	102.9	181.3	102.7	20.1	4.2

ตารางที่ ข-7 ความยาวนานแสงอาทิตย์รายเดือนในปี 2547 จากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตรอยุธยา

Station: 415301 Ayuttaya Agromet										Year: 2004		
Date	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	9.8	6.3	9.1	9.5	9.6	7.5	8.2	3	3.1	3.5	10.5	9.5
2	9.1	8.5	9.4	7.9	9.9	9.3	6.2	1	0	2.7	9.8	9.7
3	9.7	9.2	8.9	9.7	5.3	10.7	7.8	2.6	1	9.5	10.3	9.8
4	9.1	8.2	8.4	6.4	8.7	6.3	7.2	0.3	2.9	8.1	10.3	7.2
5	9	4.5	7.5	8.1	1.4	6	5.3	7	0.8	8.8	10.2	8.5
6	9.7	6.1	6.8	10.2	1.7	5.9	2.5	2.5	8	6.8	10.1	9.1
7	9.7	3.4	6.6	7.8	6.9	3.2	3.2	7.3	2.3	8.8	10.2	8.8
8	8.6	0.6	9.2	8	8.2	1.3	4	1.7	2	6.9	9.8	7.5
9	6.1	10.	6.4	7	8.5	3.6	5.6	2.8	0.7	8.6	9.5	8.6
10	1.7	10.	9.4	6.2	10.1	0.8	4.9	1.6	0	5.2	8.2	9.4
11	2.9	10.	9.3	9.9	7	6.5	1.1	1.2	5.1	4.5	9	9.3
12	0.4	10.	7.2	10.2	9	7.1	0	4.1	2	6.8	9.4	8.4
13	4.5	10.	7.4	10.2	5.9	1.7	4.9	5.4	5.3	9.1	9.8	9.5
14	6.9	9.7	8.6	10.5	7.1	0.4	6.2	2	3.7	8.8	10	9.3
15	4.8	9.7	1.7	10.7	9.1	1.5	7.1	3.1	6.2	9.2	9.7	9.4
16	7.1	9	8.9	10.8	6.9	0.9	8.5	2.1	4.9	9.1	8.5	9.3
17	6.5	9.2	9.5	10.7	2.5	3.1	8.6	6.7	1.3	9.2	10.1	9.3
18	9	9.1	4.1	10.5	9.6	1.7	8.9	6.3	2.2	10	9.5	8.8
19	7.4	7.9	5.6	9.3	6.4	1.8	4.9	2.7	6	8.4	10	8.2
20	8.6	5.6	4.1	9.7	0	1.8	5.8	3.6	2.4	9	9.9	8.4
21	7.2	8	6.7	9.9	0	8.1	0	7.5	2.8	9.2	9.8	8.8
22	4.4	8.7	7.8	9.2	0.3	4.6	0	6.9	8.1	8.1	9	6.5
23	9.1	6.5	8.2	10.2	10.6	4.4	2.8	10.2	9.9	9.4	9.4	8.8
24	9.6	8.2	9.9	10.6	10.5	4.3	7.4	9.3	9	10.2	9.4	8
25	9.4	10	9.8	9.9	5	6.1	3.9	10.7	4.3	10.1	3	8.2
26	9.8	10	9.8	9.5	6.4	4.3	2.9	9.2	9.6	8.8	3.7	8.7
27	9.4	10.	10.1	9.1	3.1	3.8	4.1	6.6	7	9.3	8.2	9.2
28	8.7	8.9	9.6	0	5.9	1.8	3.2	7.3	9.8	10.1	8.6	9.2
29	7.7	9.8	9.7	10.8	5.5	1.5	2.9	4	4.4	9.8	8.3	9.1
30	3.7		9.7	10.7	6.2	10.3	8.1	4.2	1.7	9.7	9.5	8.8
31	4.2		9.9		2		3.5	5.7		9.7		9.1
N	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Total	223.	239	249.	273.	189.	130.	149.	148.	126.	257.	273.	272.
Mean	7.2	8.2	8	9.1	6.1	4.3	4.8	4.8	4.2	8.3	9.1	8.8
Annual Total 2533.2 hrs						Annual Mean 2111.1 hrs.						

ตารางที่ ข-7 ความยาวนานแสงอาทิตย์รายเดือนในปี 2543 - 2547

จากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตรอยุธยา

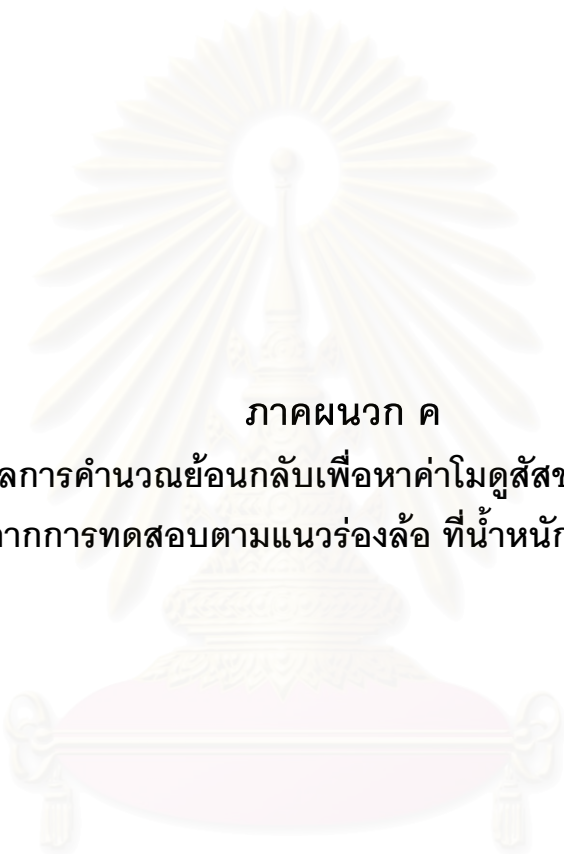
Station: 415301 Ayuttaya Agromet											หน่วย: ชั่วโมง	
Date	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	225.6	214.7	220.5	187.4	202.2	132.5	138.7	172.7	140.6	193.5	236.2	253
2001	223.5	223.5	186.8	273.7	207.7	167.8	175.3	138.7	150.8	180.3	235.7	238.9
2002	247.3	194.4	235.4	252.8	185.6	184.7	135.8	107.8	139.9	197.3	229.7	230.9
2003	267.4	229.6	208.3	282.3	235.8	166.9	158.7	143.4	125.4	210.9	254.1	254.1
2004	221.5	234.9	216.6	254.9	162.4	122	132.9	136.5	115.2	233.6	262.6	279.5
Mean	237.1	219.4	213.5	250.2	198.7	154.8	148.3	139.8	134.4	203.1	243.7	251.3

ตารางที่ ข-8 ความเข้มเมฆรายเดือนในปี 2543 - 2547

จากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตรอยุธยา

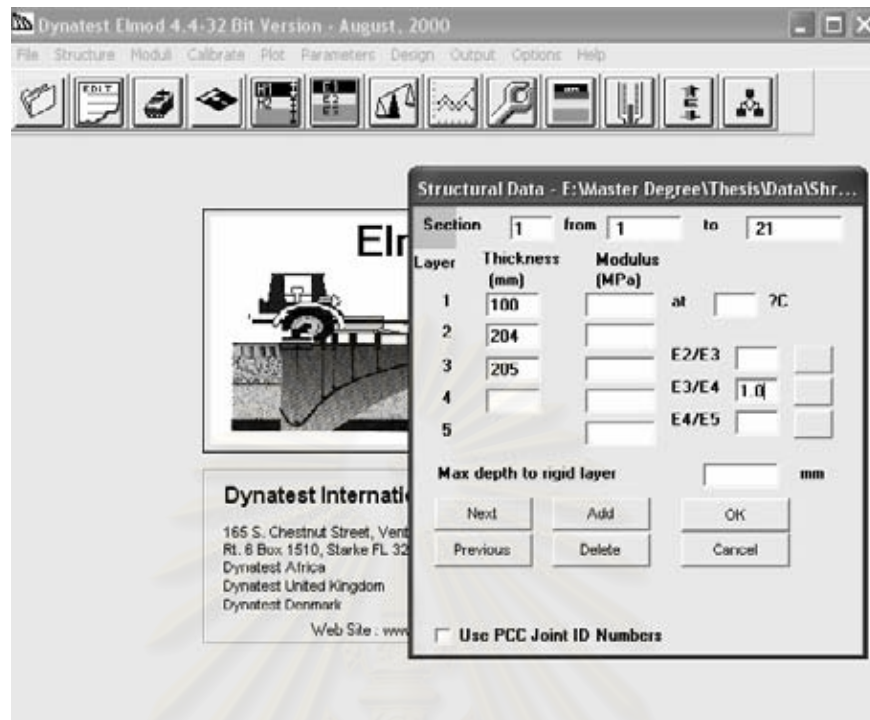
Station: 415301 Ayuttaya Agromet											หน่วย: Deca	
Date	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	3.5	3.4	5	6.3	6.7	8.1	7.8	7.4	8	7.5	3.7	4.1
2001	4.3	3.2	5.7	4	6.4	7.4	6.9	8.3	7.7	7.4	4.2	3
2002	1.8	3	3.2	3.8	6.2	7.2	6.6	8.3	7.9	5.2	5	4.1
2003	1.9	2.3	4.1	2.3	6	6.3	7.4	7	7.9	6.3	2.4	2.3
2004	2.9	2.4	2.6	2.6	6	7.1	7.3	-	-	-	-	-
Mean	2.88	2.86	4.12	3.8	6.26	7.22	7.2	7.75	7.875	6.6	3.825	3.375

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

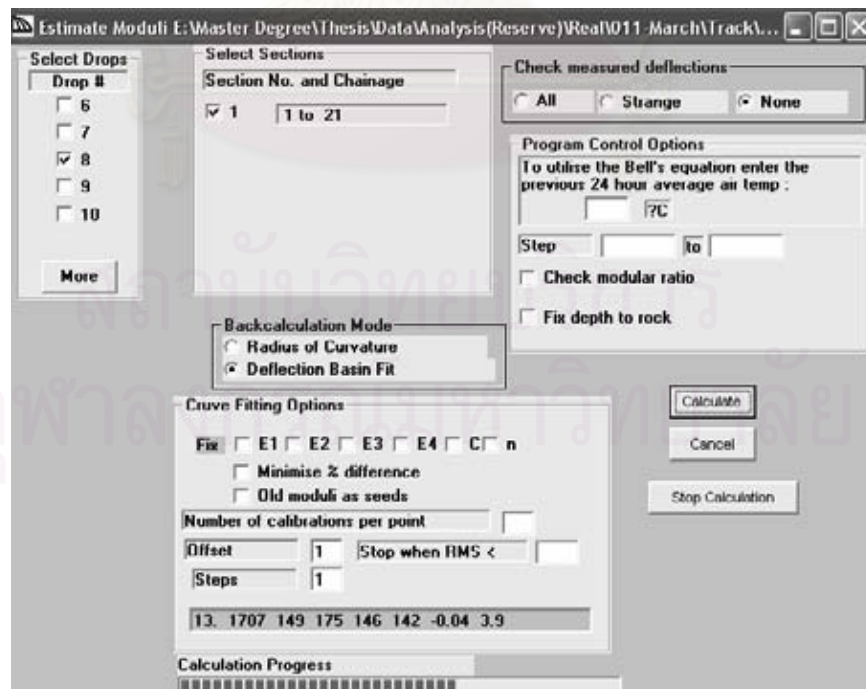


ภาคผนวก ค
ผลการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสของชั้นทาง
จากการทดสอบตามแนวร่องล้อ ที่น้ำหนัก 566 kPa

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-1 การป้อนข้อมูลความหนาโครงสร้างชั้นทางในคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่าโมดูลัสของชั้นทางด้วยโปรแกรม ELMOD



รูปที่ ค-2 การเลือกวิธี Deflection Basin Fit ในการคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่าโมดูลัสของชั้นทางด้วยโปรแกรม ELMOD

ตารางที่ ค-1 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 309

Station		Test#1 เมษายน 2547					Test#2 พฤษภาคม 2547					Test#3 มิถุนายน 2547				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	48.3	1959.2	137.7	305.3	176.4	35.9	2668.2	166.7	226.8	175.4	29.5	3366.0	222.1	151.9	176.1
2	7.5	48.3	1729.4	136.5	238.4	200.4	36.4	2412.9	132.8	270.0	182.7	29.5	2732.3	175.9	198.2	170.9
3	15	48.1	1622.0	150.3	139.7	126.7	36.3	2123.0	197.7	149.7	96.8	29	2761.2	238.3	138.1	99.2
4	22.5	47.5	1751.0	122.8	252.5	211.7	36.2	2529.9	154.8	211.5	213.2	28.8	3130.6	223.1	181.9	188.7
5	30	48.5	2091.4	128.4	234.7	105.5	36	2583.0	157.0	233.4	118.2	29.3	3240.7	213.8	191.1	135.0
6	37.5	49.1	1409.2	120.9	183.3	94.8	36.3	2030.5	131.6	140.3	109.7	29.3	2423.7	186.8	117.6	110.3
7	45	49.3	1340.6	145.8	266.9	157.3	36.2	2195.5	162.1	237.8	176.4	29.3	2847.3	193.3	181.0	171.7
8	52.5	49.5	1367.2	147.2	195.4	169.7	36.2	2185.8	193.3	155.2	167.3	29.4	3131.1	212.4	138.3	162.8
9	60	49.3	1603.2	133.3	270.2	171.8	36.9	2547.2	172.1	195.8	173.1	29.9	3449.3	209.4	165.7	173.2
10	67.5	49.7	1390.2	133.3	221.6	156.0	36.4	2183.9	161.4	166.2	169.3	29.7	2921.3	213.3	137.3	164.2
11	75	49.1	1509.0	146.4	184.2	156.4	36.1	2406.5	153.7	162.3	178.0	29.8	3149.2	186.8	182.2	142.4
12	82.5	51.0	1637.1	151.5	199.6	157.1	35.8	2562.3	193.6	158.6	167.4	30	3591.1	205.9	137.3	161.2
13	90	53.7	1748.0	130.3	210.4	188.0	33.8	2900.9	164.7	187.1	180.4	29.9	3302.7	222.7	143.4	168.1
14	97.5	52.5	1987.5	141.2	157.6	166.7	33.4	2826.1	195.1	157.5	160.1	29.9	3545.7	212.8	119.4	191.4
15	105	51.0	1762.2	133.0	211.2	162.9	34.2	2340.6	179.7	156.4	168.9	29.8	2810.4	185.2	142.3	163.6
16	112.5	52.2	1733.5	127.7	251.8	165.0	34.1	3166.2	163.9	167.7	183.8	30.2	3264.0	215.2	152.0	148.7
17	120	53.3	1536.4	146.5	204.9	157.4	34.1	2628.6	185.2	134.0	182.3	30.1	2756.6	196.0	131.4	159.0
18	127.5	54.1	1624.5	125.2	233.3	155.7	33.9	2333.5	174.7	163.3	164.1	30	2652.1	169.7	159.2	157.7
19	135	53.0	1429.5	135.5	161.1	141.2	34.2	2421.9	186.0	143.9	144.6	30.1	3150.3	177.4	117.8	166.9
20	142.5	55.3	1395.1	137.4	175.5	152.6	33.9	2591.4	172.3	146.9	162.7	30	2743.1	184.7	136.7	152.9
21	150	53.2	1523.7	126.0	130.9	154.9	33.7	2370.3	161.7	88.1	201.3	30	2702.7	162.1	95.0	173.9
Mean		50.8	1626.2	136.0	210.9	158.5	35.2	2476.6	169.5	173.9	165.5	29.7	3032.0	200.3	148.5	158.9
Std.		2.3	212.8	9.3	45.2	26.9	1.2	275.0	18.6	42.1	28.0	0.4	325.6	20.4	27.0	22.5
CV		0.05	0.13	0.07	0.21	0.17	0.03	0.11	0.11	0.24	0.17	0.01	0.11	0.10	0.18	0.14

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-1 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 309 (ต่อ)

Station		Test#4 กรกฎาคม 2547					Test#5 สิงหาคม 2547					Test#6 ตุลาคม 2547				
Pt.	Metre	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	49.3	1979.5	147.6	238.5	155.3	41	2886.4	126.2	183.5	149.1	50.3	1621.9	142.9	263.2	136.7
2	7.5	47.6	1749.8	130.6	264.3	152.5	40	2186.2	135.4	193.0	162.5	51.3	1745.6	106.9	284.5	155.4
3	15	48.4	1590.1	147.3	202.4	97.9	39.5	2376.1	139.5	132.6	83.9	51.3	1639.4	162.8	122.2	113.1
4	22.5	48.9	1805.6	107.9	304.6	194.6	39.5	2572.0	130.7	175.3	157.3	49.7	1628.4	125.0	268.6	144.7
5	30	47.5	1916.6	145.5	176.7	139.5	39.5	2869.7	98.8	178.6	98.9	50.7	1867.1	130.3	182.9	131.0
6	37.5	48.1	1275.5	132.1	125.4	118.7	40	1928.4	119.2	140.6	93.9	50.3	1273.1	108.6	189.0	93.3
7	45	47.8	1417.3	138.1	238.4	160.3	40	2154.3	124.7	210.0	155.0	50.2	1335.3	127.3	264.6	154.3
8	52.5	47.9	1354.1	146.0	187.1	148.7	40.2	2315.5	104.5	149.8	116.1	50.5	1244.7	141.5	189.4	154.4
9	60	46.5	1588.9	139.5	255.9	153.4	40	2569.6	128.4	155.2	145.8	50.4	1313.1	152.5	229.5	150.7
10	67.5	47.5	1485.9	131.8	211.1	143.3	41.2	2324.9	110.0	135.5	127.4	50.5	1342.5	132.8	208.9	145.6
11	75	48.3	1640.4	141.6	175.8	146.9	41.8	2427.6	101.4	148.8	142.0	49.8	1494.6	148.6	154.1	160.2
12	82.5	47.9	1775.1	150.9	160.7	155.7	42.5	2236.4	129.0	186.0	146.6	50.4	1420.1	142.8	189.6	140.2
13	90	48.1	1651.1	158.0	197.0	142.4	42.1	2428.9	125.5	146.9	131.6	50.6	1659.5	122.9	241.8	156.9
14	97.5	47.8	1915.6	161.5	155.8	145.0	43.1	2592.0	125.0	147.4	129.0	50.7	1966.2	137.3	160.2	155.2
15	105	46.9	1737.5	153.2	141.9	160.4	41.9	2268.5	115.0	142.1	127.2	50.1	1740.4	137.1	174.6	145.9
16	112.5	47.8	1667.7	141.9	198.6	135.7	42.8	2373.2	119.0	156.0	130.1	50.6	1633.2	129.4	198.6	143.4
17	120	47	1480.8	143.2	192.2	137.4	43	2024.4	139.3	125.4	153.3	49.8	1461.4	149.6	174.6	145.3
18	127.5	47.8	1545.0	156.5	121.9	177.0	42.7	1969.9	111.4	185.8	135.5	49.6	1417.8	131.3	207.9	135.0
19	135	47.2	1608.4	139.9	108.4	171.9	41.8	2222.9	99.9	102.5	116.0	50.2	1420.7	132.2	143.6	146.1
20	142.5	48.3	1517.0	129.5	153.0	151.9	42.6	2151.5	96.0	151.9	135.1	49.7	1594.4	137.0	120.8	176.9
21	150	47.7	1385.9	159.2	84.3	169.5	41.7	2050.0	114.9	97.4	141.4	49.6	1290.0	124.5	130.8	143.5
Mean		47.8	1623.2	142.9	185.4	150.4	41.3	2329.9	118.8	154.5	132.3	50.3	1529.0	134.5	195.2	144.2
Std.		0.6	192.1	12.4	55.1	20.2	1.3	262.6	13.4	28.8	21.1	0.5	203.0	13.5	49.1	17.2
CV		0.01	0.12	0.09	0.30	0.13	0.03	0.11	0.11	0.19	0.16	0.01	0.13	0.10	0.25	0.12

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-1 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 309 (ต่อ)

Station		Test#7 พฤศจิกายน 2547					Test#8 ธันวาคม 2547					Test#9 มกราคม 2548				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	41.9	2090.5	167.2	181.4	145.0	34.9	2743.7	178.5	148.3	155.6	34.3	3020.4	197.7	147.7	148.7
2	7.5	41.9	1954.3	140.0	188.4	141.0	35.6	2290.3	154.0	154.6	150.8	35.6	2410.3	140.2	170.9	155.4
3	15	43.7	1640.7	178.9	128.3	83.5	35.4	2839.9	205.9	105.3	88.5	35.2	2713.8	197.7	146.4	81.7
4	22.5	42.6	2007.3	146.6	175.2	155.1	35.7	2318.1	173.7	152.8	167.4	34.8	2606.2	183.6	151.6	163.9
5	30	44	2134.1	124.2	231.2	117.0	35.6	2887.5	155.7	179.5	121.9	35.1	2885.6	170.6	182.3	122.5
6	37.5	43.9	1498.8	116.4	157.2	101.3	33.6	1941.1	139.7	122.5	101.6	35.2	1902.5	142.0	127.6	105.8
7	45	44.3	1569.4	152.1	184.1	147.0	36	2105.6	175.3	142.0	155.6	35.7	2146.0	172.2	156.3	155.5
8	52.5	44.8	1764.2	165.5	158.1	125.6	35.7	2623.5	206.8	94.2	158.2	35.5	2297.2	186.7	124.4	144.1
9	60	44.6	1931.9	153.7	191.3	136.8	35.6	2352.0	176.9	149.7	148.4	35.8	2721.6	181.7	150.1	146.7
10	67.5	44.6	1792.9	135.4	184.4	126.9	35.8	2496.6	157.9	108.2	168.2	36.1	2241.9	158.8	142.9	146.8
11	75	45.1	1871.4	140.7	167.2	140.9	35.7	2742.6	178.1	98.6	167.2	36	2372.0	167.0	122.5	144.3
12	82.5	45.1	2109.3	163.8	121.0	144.9	35.7	2797.6	186.7	103.3	149.3	36.4	2932.0	163.9	116.7	145.7
13	90	44.8	1987.3	163.4	165.1	136.2	35.8	2661.3	193.9	113.3	160.8	36.7	2927.6	149.1	140.0	165.5
14	97.5	44.8	2371.9	153.2	125.3	154.9	35.8	2734.3	160.9	134.3	137.8	36.9	2677.7	179.9	156.0	105.0
15	105	44.7	2135.3	161.8	98.2	165.8	35.8	2347.2	161.5	128.0	131.9	36.9	2228.7	173.2	109.9	148.0
16	112.5	45	1921.3	153.9	151.4	129.8	35.8	2776.9	165.2	104.8	146.9	36.9	2809.7	177.5	85.6	173.9
17	120	45.3	1861.8	170.5	100.7	160.3	35.8	2171.6	166.7	107.7	146.7	37.5	2204.2	166.9	115.9	150.0
18	127.5	45.5	1774.1	149.9	132.4	141.2	36	1954.0	161.9	120.9	137.4	37.8	2268.7	155.6	94.7	172.8
19	135	45.6	1819.6	162.4	90.9	156.4	36.3	2324.8	158.6	90.5	162.0	37.4	2311.8	155.5	91.5	163.8
20	142.5	46	1837.7	144.4	107.5	144.6	36.2	2011.8	151.1	124.7	115.7	38.1	2023.6	143.1	127.7	134.5
21	150	46	1618.6	153.7	72.3	158.4	36.2	2084.3	134.3	111.0	113.2	37.7	2129.5	125.6	98.6	139.0
Mean		44.5	1890.1	152.3	148.2	138.7	35.7	2438.3	168.7	123.5	142.1	36.3	2468.1	166.1	131.4	143.5
Std.		1.2	213.2	15.2	40.6	19.9	0.6	316.5	19.0	23.6	22.5	1.1	333.9	19.2	26.5	23.2
CV		0.03	0.11	0.10	0.27	0.14	0.02	0.13	0.11	0.19	0.16	0.03	0.14	0.12	0.20	0.16

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-1 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 309 (ต่อ)

Station		Test#10 กุมภาพันธ์ 2548					Test#11 มีนาคม 2548				
Pt.	Metre	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	31.5	3301.5	193.1	138.2	156.2	44.4	1862.5	153.8	224.8	169.3
2	7.5	32.9	2479.6	198.1	133.4	148.9	46.3	1724.1	122.5	270.5	159.0
3	15	32.5	2739.5	231.7	106.6	93.8	45.7	1724.9	170.7	108.2	113.7
4	22.5	31.9	2773.6	182.0	156.9	164.5	45.1	1720.2	132.5	227.1	175.1
5	30	33	3290.6	194.6	154.8	125.6	44.5	1889.7	136.9	222.0	109.0
6	37.5	32.8	1997.6	162.8	111.1	106.4	46.6	1251.8	117.2	166.8	98.6
7	45	32.2	2462.9	198.7	163.5	145.7	46.3	1368.8	145.2	189.2	159.7
8	52.5	32.8	2514.9	203.4	126.9	157.7	45.5	1369.8	155.1	151.4	145.3
9	60	32.9	2886.4	186.6	170.3	156.0	44.7	1629.2	158.8	172.5	146.5
10	67.5	32.8	2534.0	172.0	143.2	152.4	45.7	1537.0	146.8	140.2	146.0
11	75	32.7	2525.9	152.8	190.9	135.4	45.5	1610.7	152.5	129.3	146.6
12	82.5	32.9	2779.8	205.2	138.6	137.0	45.1	1653.1	158.8	138.3	142.5
13	90	32.6	3083.9	190.5	116.8	183.4	45.6	1614.7	149.5	175.2	146.4
14	97.5	32.7	2908.6	199.4	102.4	182.1	45	1965.3	175.8	106.6	149.2
15	105	33	2788.0	175.6	102.2	177.5	44.1	1752.8	145.5	122.7	163.0
16	112.5	33.1	3072.7	190.4	99.7	182.4	45.4	1785.7	162.0	104.5	172.7
17	120	33	2296.9	204.4	130.1	128.2	45	1341.1	178.2	116.0	128.1
18	127.5	33.2	2588.1	173.0	109.9	172.5	44.5	1415.5	171.5	89.1	179.9
19	135	33	2595.6	186.1	91.7	173.6	45.8	1391.2	162.9	89.1	163.9
20	142.5	32.9	2385.5	175.9	119.7	144.6	44.7	1498.0	146.6	109.4	155.9
21	150	33	2406.8	159.0	117.3	122.6	45	1490.9	139.8	78.0	160.9
Mean		32.7	2686.3	187.4	129.7	149.8	45.3	1599.8	151.5	149.1	149.1
Std.		0.4	328.1	18.3	26.3	25.2	0.7	199.0	16.3	53.2	21.6
CV		0.01	0.12	0.10	0.20	0.17	0.01	0.12	0.11	0.36	0.14

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-2 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 4

Station		Test#1 กุมภาพันธ์ 2543					Test#2 กรกฎาคม 2543					Test#3 กันยายน 2543				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	30	2181.1	183.2	130.8	228.7	34.2	1877.7	209.6	178.8	162.2	30.7	1976.5	141.0	140.6	230.4
2	7.5	29.1	1916.7	166.2	157.2	251.7	33.5	1582.9	96.1	222.2	181.6	31.5	1686.4	120.3	213.7	174.7
3	15	29.8	1974.3	178.3	125.3	266.3	33.6	1904.5	176.3	132.2	271.8	31.5	1879.7	156.9	129.4	265.0
4	22.5	30.2	2896.7	232.2	101.2	259.1	33.7	2616.7	252.6	105.0	265.7	31.3	2484.2	232.5	107.5	257.6
5	30	30.4	2645.8	228.0	121.5	238.7	33.9	2340.9	174.0	132.7	238.9	31.3	2612.0	208.1	127.0	244.1
6	37.5	31.3	3129.2	251.5	163.4	139.5	34.3	2890.2	209.6	140.0	241.3	31.3	3174.0	207.9	140.7	242.4
7	45	31.8	3006.9	275.7	115.9	217.9	34.3	2604.1	235.2	158.4	118.5	31.4	2872.2	244.6	134.5	191.5
8	52.5	32.1	2588.8	240.7	116.4	246.2	34.8	2525.3	202.6	185.3	110.3	31	2660.9	258.0	123.1	249.0
9	60	32.2	2569.5	306.8	130.4	253.4	35.5	2331.3	223.5	146.8	249.8	31.2	2526.9	243.7	154.9	248.2
10	67.5	32	2357.7	201.7	123.0	238.3	35.7	2037.4	184.8	130.9	238.4	31.1	2224.4	175.9	134.8	233.4
11	75	32.3	1984.1	179.7	176.6	149.0	35.6	1839.9	155.5	153.0	217.4	30.5	2121.3	161.0	147.4	218.1
12	82.5	32.7	2023.0	145.0	122.5	183.2	35.8	1996.4	141.8	114.4	197.3	30.9	2006.4	115.3	174.9	197.7
13	90	32.4	2005.8	224.9	92.4	258.6	35.8	1859.2	178.6	243.0	205.6	31.1	1947.8	167.1	252.9	214.0
14	97.5	33	1715.5	154.6	103.2	162.1	36	1680.1	123.6	217.2	175.1	30.9	1700.3	151.9	96.4	206.4
15	105	33.5	1564.5	150.7	136.4	203.8	36.3	1341.4	170.6	116.4	241.4	31.1	1783.9	148.2	134.5	239.3
16	112.5	34	1579.7	156.6	123.7	160.8	36.4	1419.0	155.7	116.1	162.6	31.1	1792.9	146.4	121.4	191.9
17	120	33.9	1374.5	118.8	149.4	210.2	36.4	1536.4	126.5	213.5	147.6	30.8	1634.7	131.8	129.6	223.0
18	127.5	31.8	1754.7	104.1	189.3	176.7	37.2	1589.1	71.5	222.6	167.4	31	1801.1	81.5	205.7	181.0
19	135	33.8	1474.0	119.2	122.2	189.9	37.3	1318.9	102.2	123.9	152.1	30.9	1452.6	99.6	154.6	145.8
20	142.5	34.4	1321.8	93.3	142.2	165.7	37.3	1292.0	78.2	179.9	157.7	30.7	1340.6	72.7	204.0	190.3
21	150	34.7	1158.9	74.0	141.0	105.1	37.6	1015.8	67.9	157.4	101.3	30.7	1142.3	69.2	195.4	98.5
Mean		32.2	2058.3	180.2	132.6	205.0	35.5	1885.7	158.9	161.4	190.7	31.0	2039.1	158.7	153.5	211.5
Std.		1.6	575.4	62.0	24.2	46.4	1.3	510.0	54.7	42.1	51.5	0.3	521.3	56.9	39.8	40.2
CV		0.05	0.28	0.34	0.18	0.23	0.04	0.27	0.34	0.26	0.27	0.01	0.26	0.36	0.26	0.19

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-2 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 4 (ต่อ)

Station		Test#4 ธันวาคม 2543					Test#5 มีนาคม 2544					Test#6 กันยายน 2544				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	42.6	1745.6	124.8	162.2	175.2	31.1	2230.8	189.9	153.6	162.2	39	1993.6	122.5	157.8	185.3
2	7.5	42	1577.2	70.2	239.5	197.0	27.5	1839.1	156.3	156.2	195.1	38	1804.8	128.9	193.3	226.9
3	15	41.9	1556.0	131.6	152.2	243.0	27.5	2138.3	238.8	121.8	243.9	39.3	1806.5	152.3	137.8	254.7
4	22.5	42.3	1956.0	199.6	239.7	213.2	27.5	2432.1	381.0	105.7	235.6	39.4	2278.3	240.2	101.9	252.6
5	30	40.9	1830.6	153.7	147.3	217.8	27.6	2415.3	282.2	122.0	252.0	39.7	2234.9	166.0	129.5	233.4
6	37.5	40.9	2210.6	177.5	145.1	229.5	27.6	3132.2	327.7	141.9	245.2	40	2749.0	184.8	148.2	216.8
7	45	41.4	2150.7	155.1	121.4	233.9	28	3024.5	280.8	149.0	153.6	40.1	2533.9	162.7	139.9	181.0
8	52.5	42.1	1967.9	168.6	130.7	236.3	27.9	3039.8	256.6	131.8	249.2	40.4	2552.8	188.0	126.6	247.3
9	60	42.4	1939.2	151.0	149.7	233.3	28.5	2882.9	344.0	140.9	256.4	41.2	2214.8	183.9	146.2	241.1
10	67.5	42.7	1776.8	134.2	140.8	221.8	28.6	2507.6	276.2	117.8	252.2	41.5	1835.1	150.8	136.9	225.8
11	75	42.1	1649.2	86.5	229.5	149.5	28.6	2176.7	208.9	148.3	219.2	41.4	1951.2	120.4	204.0	162.1
12	82.5	42.5	1511.4	88.4	128.9	207.1	28.8	1923.9	184.7	111.1	210.4	41.5	1832.5	111.4	128.0	200.9
13	90	42.4	1470.5	113.1	195.5	214.4	29.2	2020.3	245.4	120.7	130.9	41.5	1530.1	177.6	225.8	206.3
14	97.5	42.7	1333.5	92.9	124.4	187.9	29.7	1864.8	166.3	122.5	113.3	41.6	1460.9	127.9	103.7	199.5
15	105	42.9	1311.1	117.0	121.0	233.3	29.9	1675.5	222.8	99.5	257.3	41.5	1511.1	138.2	121.0	224.7
16	112.5	42.2	1182.3	128.1	128.9	183.8	30.3	1606.8	190.8	119.8	159.4	41.8	1382.6	123.6	167.0	135.5
17	120	42.4	1219.9	103.2	168.1	205.7	30.7	1672.7	191.6	112.6	227.0	41.5	1334.8	121.2	171.1	196.6
18	127.5	42.5	1413.4	55.0	255.1	182.0	30.8	1647.8	167.7	154.2	171.9	41	1392.2	60.2	243.9	157.5
19	135	43.6	1149.7	73.6	182.3	136.0	31.4	1448.1	126.9	105.0	196.5	40.9	1225.9	90.1	159.8	175.7
20	142.5	44.8	1081.2	61.5	212.0	181.6	30.7	1567.9	74.2	188.0	194.5	40.9	1200.5	63.3	171.6	160.6
21	150	46.5	981.0	60.6	135.1	94.4	31.5	1218.0	106.9	191.5	170.6	41.1	901.7	50.9	135.2	173.5
Mean		42.6	1572.1	116.5	167.1	198.9	29.2	2117.4	220.0	134.0	204.6	40.6	1796.5	136.4	154.7	202.7
Std.		1.2	356.0	41.5	43.9	37.5	1.4	559.8	78.2	25.4	44.5	1.0	499.1	46.9	37.2	34.5
CV		0.03	0.23	0.36	0.26	0.19	0.05	0.26	0.36	0.19	0.22	0.03	0.28	0.34	0.24	0.17

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-3 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 9

Station		Test#1 มิถุนายน 2543					Test#2 กันยายน 2543					Test#3 ธันวาคม 2543				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	28.7	5162.3	417.5	250.5	165.1	49.8	2609.2	252.0	309.1	188.6	27.7	7600.1	319.8	268.0	199.9
2	7.5	28	5395.9	616.3	324.8	119.1	52.1	2899.7	297.3	265.2	183.9	27.5	8774.6	359.2	295.2	206.2
3	15	27.9	5812.6	485.3	270.0	160.7	52.3	3036.7	350.6	363.0	177.5	27.5	8175.2	499.0	301.4	201.7
4	22.5	27.9	5844.5	439.1	303.2	138.0	51.7	2965.7	298.1	340.8	170.4	27.5	8158.4	383.8	335.7	184.0
5	30	27.8	5062.5	515.4	322.5	156.2	51.9	2832.6	346.9	383.6	198.4	27.6	9018.9	325.5	425.1	199.4
6	37.5	28.2	6617.5	605.3	276.0	188.8	52	2582.6	426.2	285.8	190.0	26.7	9989.0	486.5	389.4	168.3
7	45	28	5890.0	513.3	235.0	239.9	51.9	3541.4	303.2	417.3	186.2	27.5	8845.8	539.0	340.0	205.4
8	52.5	27.8	5671.2	570.8	251.5	187.0	52.2	2907.8	329.4	293.4	198.8	27.2	9033.1	450.2	297.0	212.3
9	60	28.2	5913.2	508.6	304.1	136.2	52.3	3194.7	345.3	297.2	179.8	28	8672.9	371.9	299.3	197.9
10	67.5	28	4836.5	404.0	270.9	117.8	51.8	3033.1	311.1	228.1	168.7	28	7997.8	310.4	199.5	228.4
11	75	28.8	4793.3	432.7	252.6	124.6	52.2	3125.0	287.2	238.0	174.8	27.9	8800.2	282.1	257.8	174.5
12	82.5	28.5	5650.6	474.1	263.4	132.4	51.9	2589.5	346.1	252.6	190.9	27.9	9346.3	557.3	328.5	172.5
13	90	27.8	4375.6	554.6	210.5	150.7	52.3	3069.0	287.6	273.6	178.3	27.8	8395.0	325.5	213.9	244.6
14	97.5	29.3	5308.3	509.2	348.0	134.3	52.5	3052.9	309.2	310.6	192.4	28.3	8386.3	361.9	436.6	208.5
15	105	29	5019.9	596.5	390.9	121.1	52.1	2993.9	343.0	351.9	179.6	28.2	8781.0	412.6	371.8	197.1
16	112.5	29.2	4603.2	649.0	320.2	145.9	51.3	3176.5	398.1	487.8	166.6	27.9	8943.1	414.9	413.6	204.8
17	120	29.3	5143.5	533.7	321.8	129.0	51.3	3455.6	272.0	359.5	188.3	27.9	8125.6	285.6	362.4	211.0
18	127.5	29.7	4562.3	452.7	230.9	159.8	51.1	3022.0	308.5	391.5	176.9	27.9	8452.5	322.7	588.5	158.1
19	135	29.3	5095.4	510.0	251.9	148.8	50.2	3001.8	343.0	368.8	178.7	28.1	8384.6	323.4	369.0	187.0
20	142.5	29.4	4616.2	348.9	258.0	143.3	47.3	3279.4	289.4	320.2	167.1	27.8	6715.1	491.2	252.5	202.8
21	150	29.8	4971.2	538.3	305.6	155.4	47.4	3288.4	301.1	315.7	181.9	28	9676.2	370.0	215.7	221.7
Mean		28.6	5254.6	508.3	283.9	150.2	51.3	3031.3	321.2	326.4	181.8	27.8	8584.4	390.1	331.5	199.3
Std.		0.7	565.6	76.2	44.2	28.6	1.5	252.9	40.9	63.5	9.5	0.4	705.7	83.7	90.8	20.4
CV		0.02	0.11	0.15	0.16	0.19	0.03	0.08	0.13	0.19	0.05	0.01	0.08	0.21	0.27	0.10

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-3 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 9 (ต่อ)

Station		Test#4 (เมษายน 2544)					Test#5 (สิงหาคม 2544)				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	54.2	2179.5	270.6	306.9	210.2	36	6041.0	346.5	255.1	207.7
2	7.5	51.1	2447.3	318.6	296.1	201.6	34.3	6774.2	362.0	309.4	177.3
3	15	51.8	2313.9	372.8	356.6	202.9	36	6352.3	315.3	320.5	186.4
4	22.5	51.8	2348.4	324.0	337.5	218.3	36.7	6385.9	421.5	343.4	199.8
5	30	52.3	2345.8	370.5	415.8	218.5	36.7	5197.9	307.0	365.9	207.3
6	37.5	52.3	1962.2	435.9	278.8	245.7	37	6824.7	466.7	360.3	167.6
7	45	51.9	2734.2	367.1	416.8	216.1	37.5	5106.7	292.6	303.9	225.9
8	52.5	51.7	2340.0	392.9	355.6	206.1	37.6	6044.7	279.3	359.3	190.2
9	60	52	2300.5	368.3	293.7	210.2	37.6	5987.6	498.7	336.6	186.4
10	67.5	51.9	2300.0	322.1	288.4	184.6	37.6	5422.6	407.6	311.5	172.6
11	75	52	2026.7	352.9	275.2	189.9	37.8	5581.0	373.3	235.8	182.2
12	82.5	51.8	2342.6	424.5	324.6	205.1	37.6	5654.1	528.4	296.2	195.0
13	90	52.1	2498.4	358.6	278.0	197.9	38.3	5336.4	373.8	347.9	166.1
14	97.5	51.9	2041.3	440.2	337.6	201.8	39.1	5742.3	315.0	397.5	216.4
15	105	51.1	2859.7	496.8	614.5	179.0	39.7	5146.9	606.6	430.7	186.6
16	112.5	49.6	2572.2	420.0	511.9	185.6	39.3	5770.6	591.7	437.6	202.6
17	120	49.6	2540.9	357.7	410.1	197.2	39.8	5100.7	315.8	380.5	203.3
18	127.5	51.4	2217.7	361.6	363.1	201.8	40.5	5059.5	573.1	370.5	197.9
19	135	48.3	2281.5	388.8	351.6	200.0	39.6	5237.7	577.8	319.5	207.3
20	142.5	49.3	1969.9	360.2	312.1	190.3	39.1	4704.3	299.9	248.6	190.9
21	150	49.1	2307.5	356.1	362.1	200.3	39.4	4314.0	341.9	246.6	190.3
Mean		51.3	2330.0	374.3	356.5	203.0	38.0	5608.8	409.3	332.3	193.3
Std.		1.4	231.3	49.6	83.1	14.5	1.6	651.8	110.9	56.9	15.5
CV		0.03	0.10	0.13	0.23	0.07	0.04	0.12	0.27	0.17	0.08

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-4 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 3087

Station		Test#1 on กรกฎาคม คม 43					Test#2 on กันยายน คม 43					Test#3 on ธันวาคม คม 43				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	42.5	2339.6	506.3	260.0	172.4	50.7	1835.2	487.2	277.0	175.5	31.2	2686.6	517.9	229.9	151.3
2	7.5	40.3	2582.1	479.9	147.3	158.3	49	1848.4	410.6	138.6	206.0	31.6	3849.2	461.6	163.5	116.0
3	15	41.7	1992.4	489.7	145.5	178.3	48	1673.0	513.1	146.5	174.2	32.1	3277.2	459.1	131.2	128.9
4	22.5	41	2076.9	389.3	147.3	157.6	46.7	1893.7	414.4	139.2	157.8	31.9	2913.4	420.5	124.7	154.3
5	30	41.6	2373.6	388.9	143.1	175.2	47.2	1918.3	375.9	162.2	172.8	31.7	3283.6	397.7	114.8	160.3
6	37.5	41.8	2812.8	350.3	165.3	148.6	47	1808.1	375.9	161.1	154.8	32	3714.6	368.5	126.9	148.8
7	45	42.7	1902.0	366.7	136.8	157.6	46.5	2462.7	321.4	169.4	141.3	32.6	3058.7	351.4	127.3	155.9
8	52.5	41.9	2741.8	457.3	169.9	154.9	47.6	1739.9	412.8	189.2	153.4	32.9	3323.0	452.5	144.3	152.2
9	60	42.7	2179.0	300.0	138.0	124.0	47.8	1968.4	322.2	111.5	164.1	33.2	3525.4	399.7	100.5	130.0
10	67.5	43.5	2399.6	397.7	116.4	136.5	47.7	1995.9	371.3	121.3	132.8	33.1	3012.3	438.3	94.5	138.2
11	75	43.4	1974.7	386.6	118.1	143.6	48	1727.6	333.8	136.6	139.6	33.2	3649.6	353.3	141.0	96.7
12	82.5	43.3	2177.7	317.8	180.2	165.6	47.4	1592.7	359.3	172.4	179.7	32.8	3110.9	325.0	153.9	139.2
13	90	43.8	2161.5	318.8	153.4	116.1	46.9	-	320.1	153.8	132.7	32.6	4376.7	364.8	119.5	121.3
14	97.5	44.4	2177.1	322.3	165.8	235.2	47.2	2022.2	302.0	180.8	208.6	33.2	-	336.5	132.9	200.5
15	105	43.9	1939.4	353.5	227.1	181.6	47.2	1777.5	321.1	245.5	196.1	34	2551.5	393.8	168.4	193.5
16	112.5	43.9	1987.9	384.9	281.1	197.1	47.6	1938.1	354.7	324.4	189.7	34.4	2792.4	415.5	226.4	188.2
17	120	43.4	2018.5	335.4	250.4	206.0	47.7	1845.9	310.4	233.4	209.2	-	-	-	-	-
18	127.5	43.4	2018.5	412.4	222.0	206.6	48.4	1752.3	380.8	241.7	197.6	34.3	4015.4	417.5	205.5	195.9
19	135	42.9	2099.6	340.0	288.9	222.2	47.7	1855.7	321.4	295.8	217.7	34.5	2516.9	389.3	227.6	211.9
20	142.5	42	2395.2	356.8	244.9	227.9	47.5	1910.5	361.0	250.9	223.5	33.1	2645.0	340.7	242.7	201.1
21	150	42.5	2481.4	-	-	-	45.5	2271.3	-	-	-	33	3422.1	-	-	-
Mean		42.7	2230.1	382.7	185.1	173.3	47.6	1891.9	368.5	192.6	176.4	32.9	3248.7	400.2	156.6	157.1
Std.		1.1	263.9	60.1	55.5	33.8	0.9	197.7	56.9	61.8	28.9	1.0	518.9	50.8	47.0	33.0
CV		0.03	0.12	0.16	0.30	0.20	0.02	0.10	0.15	0.32	0.16	0.03	0.16	0.13	0.30	0.21

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-4 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 3087 (ต่อ)

Station		Test#4 มีนาคม 2544					Test#5 กันยายน 2544				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	34.2	3655.9	451.4	257.3	187.6	46.4	2595.4	565.4	223.7	180.1
2	7.5	33.8	2650.7	498.2	137.7	183.1	45.9	2140.1	498.2	155.6	148.8
3	15	34.1	2973.8	449.1	139.8	178.0	47	2051.6	495.8	149.9	171.1
4	22.5	34	2842.9	406.1	140.8	161.7	46.7	2429.3	439.3	153.9	146.5
5	30	34.3	2888.4	408.7	137.6	185.9	46.4	1749.3	401.3	167.4	177.1
6	37.5	34.4	2870.2	-	-	-	45.7	1993.0	349.4	155.0	170.7
7	45	35.1	3401.9	-	-	-	46.6	1901.9	389.9	140.6	174.3
8	52.5	35.3	2954.9	483.7	166.6	178.7	47.4	2355.4	392.4	190.8	174.4
9	60	34.8	-	302.9	106.9	185.2	47.9	2041.9	342.9	114.3	148.0
10	67.5	35	3406.4	391.2	110.4	163.4	47.9	2040.6	342.2	108.2	155.2
11	75	34.7	2531.3	363.7	126.1	166.6	47.6	1947.9	371.1	120.4	152.8
12	82.5	34.8	2558.9	364.3	159.7	196.5	47.9	1929.6	308.7	200.6	134.4
13	90	34.8	-	263.1	148.0	151.4	48	2088.3	280.5	133.4	135.4
14	97.5	35.6	3107.5	-	-	-	48	2241.1	-	-	-
15	105	36.8	2554.0	320.2	226.1	227.4	48.4	1817.2	366.5	213.5	214.6
16	112.5	36.8	2554.0	397.3	286.0	242.0	48.3	2173.1	-	-	-
17	120	37.2	2579.8	-	-	-	48.7	1740.5	331.8	224.1	245.4
18	127.5	37.5	3404.5	-	-	-	49	1621.9	355.9	239.5	228.5
19	135	37.6	2749.6	-	-	-	48.8	1905.7	340.0	261.9	260.5
20	142.5	37.2	2593.4	-	-	-	48.4	1921.8	336.3	259.6	241.6
21	150	37.3	2919.2	-	-	-	48.2	2342.6	-	-	-
Mean		35.5	2905.1	392.3	164.8	185.2	47.6	2049.0	383.8	178.5	181.1
Std.		1.0	346.6	69.7	56.1	25.4	1.0	244.2	73.2	49.6	39.8
CV		0.03	0.12	0.18	0.34	0.14	0.02	0.12	0.19	0.28	0.22

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-5 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 3144

Station		Test#1 ธันวาคม 2542					Test#2 มิถุนายน 2543					Test#3 กันยายน 2543				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	27.2	9017.2	131.4	193.1	332.5	39.4	5165.7	147.0	204.4	341.4	50.8	4271.4	126.8	286.0	230.5
2	7.5	27.2	7878.3	142.1	260.6	341.0	39.4	4052.4	159.2	225.4	367.3	48.1	3634.1	141.1	275.9	249.6
3	15	27.2	9884.1	165.4	335.8	276.7	39.4	6559.5	172.6	236.6	334.2	48.2	5165.8	148.0	322.0	237.8
4	22.5	27.2	6421.4	126.9	220.7	320.9	40	4366.9	142.4	325.2	323.7	48.8	4289.2	134.2	293.0	250.4
5	30	27.2	8383.4	123.7	202.7	326.5	40	5081.8	136.2	238.1	347.3	49	4096.6	127.8	284.5	253.2
6	37.5	27.2	6156.0	122.0	234.5	297.3	40.2	4428.9	139.5	229.5	322.7	48.8	3823.8	127.8	297.9	238.4
7	45	27.2	9198.6	119.6	190.5	299.6	40.5	5968.0	133.0	231.8	280.2	48.1	5286.4	116.8	247.4	245.7
8	52.5	27.2	9729.2	107.1	155.0	331.3	40.6	5678.0	117.0	176.6	342.9	48	3951.3	119.2	233.9	270.1
9	60	27.2	7779.9	114.0	150.1	354.5	40.2	4972.9	123.3	226.3	383.5	47.3	4713.2	113.2	204.4	303.2
10	67.5	27.2	8488.2	142.4	168.6	340.5	40.8	5023.8	145.7	229.6	363.6	44	3678.1	113.3	222.8	293.8
11	75	27.2	7979.4	109.9	186.1	344.9	41.2	5144.2	117.8	207.6	372.2	38	4812.4	110.0	228.3	305.6
12	82.5	27.2	6102.1	116.7	198.7	359.4	41.8	4205.3	125.1	256.2	409.1	37.9	3043.3	120.0	270.4	336.2
13	90	27.2	5329.0	125.5	295.8	365.0	41.8	4407.7	138.4	231.9	432.3	37.3	3885.4	126.5	313.4	362.7
14	97.5	27.2	7097.4	122.4	166.7	384.0	41.7	3879.6	142.6	226.9	418.7	36.9	4356.0	120.7	325.5	352.5
15	105	29	6127.8	149.7	208.6	387.5	41.4	3469.9	142.5	261.7	418.7	37.2	4930.6	116.8	222.0	351.7
16	112.5	29	6374.9	148.8	322.8	407.3	42.2	4226.9	164.3	319.5	462.0	36.5	4001.3	148.2	285.7	412.4
17	120	29	5069.1	132.7	226.2	428.7	41.8	3537.8	148.6	279.2	490.7	36.6	3115.3	134.4	340.8	418.3
18	127.5	29	5270.8	138.0	298.8	407.9	42.3	3498.1	161.1	282.8	442.9	36.5	3281.2	142.3	317.8	373.0
19	135	29	5556.8	169.8	373.3	392.3	42.6	3464.6	192.5	314.7	452.2	35.3	4181.8	155.5	414.5	366.2
20	142.5	30	6230.0	117.7	221.4	420.6	43.4	4913.2	134.4	198.5	476.9	34.5	4864.5	122.5	218.0	394.4
21	150	30	8648.0	127.2	228.1	407.1	43.7	4778.0	144.9	217.9	416.1	34.3	5776.7	113.9	194.6	382.8
Mean		27.9	7272.5	131.1	230.4	358.4	41.2	4610.6	144.2	243.8	390.4	42.0	4245.6	127.6	276.1	315.6
Std.		1.0	1541.0	16.9	62.2	43.1	1.3	845.9	18.3	40.3	57.5	6.1	724.9	13.2	53.8	63.7
CV		0.04	0.21	0.13	0.27	0.12	0.03	0.18	0.13	0.17	0.15	0.15	0.17	0.10	0.19	0.20

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-5 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 3144 (ต่อ)

Station		Test#4 ธันวาคม 2543					Test#5 เมษายน 2544					Test#6 สิงหาคม 2544				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	44.8	5717.1	108.9	206.2	351.6	35.5	4600.4	137.8	221.1	321.3	38.9	6779.8	125.5	271.7	316.9
2	7.5	43.4	5330.8	128.9	332.5	352.9	35.5	4782.8	140.2	251.9	344.3	37.1	4948.2	132.9	280.7	354.4
3	15	42.3	6402.3	116.5	280.2	328.3	36.1	6316.2	161.5	258.8	338.1	37	7270.5	151.6	253.2	327.0
4	22.5	42.6	5362.6	112.3	248.7	343.7	36.4	4016.1	136.5	288.6	341.1	37.4	4471.6	134.4	300.5	341.9
5	30	42.9	6339.2	99.6	248.9	356.1	36.5	4737.0	139.0	294.3	362.5	37.4	5764.9	127.8	268.1	368.4
6	37.5	42.7	5785.8	100.3	194.4	339.9	36.7	4503.2	134.2	301.5	341.7	37.7	5618.4	124.9	273.7	336.8
7	45	42.7	7553.6	90.0	206.1	321.5	37.2	6607.2	121.1	192.3	352.2	38.1	7219.3	114.1	192.4	344.5
8	52.5	42.9	5394.4	94.2	190.1	330.8	36.9	5901.1	111.7	192.9	360.4	37.5	6552.9	110.9	171.3	373.4
9	60	42.9	5800.8	94.8	215.8	359.6	37.2	4726.7	119.2	193.5	397.5	38.1	5614.8	113.0	228.2	396.7
10	67.5	42.8	5685.9	97.0	194.5	381.0	37.4	4932.8	131.5	201.4	414.9	38.1	5550.4	125.3	217.9	400.0
11	75	42.7	5947.5	91.6	182.9	361.5	37.6	5009.3	113.8	215.8	394.3	38.4	5227.3	111.5	221.5	396.5
12	82.5	43.1	4995.3	99.7	191.9	403.5	37.7	4140.4	123.0	219.7	450.1	38.8	4792.4	114.5	196.1	465.6
13	90	42.8	5765.8	100.8	226.9	428.2	38.2	4218.7	130.0	239.4	444.4	38.9	5155.0	124.6	226.1	467.0
14	97.5	42.4	5391.3	111.3	234.3	403.2	38.3	4218.4	127.2	206.8	438.5	39.2	4957.5	127.4	223.4	438.4
15	105	42.5	7450.7	100.8	220.7	430.9	38.4	5561.4	122.7	235.2	418.2	39	5513.1	117.0	213.9	430.9
16	112.5	42.6	4589.5	127.0	297.0	481.6	38.7	3666.1	155.1	333.6	460.0	39.2	5209.7	142.2	272.4	484.4
17	120	43.2	4522.6	121.7	279.5	495.3	39	3624.5	138.3	261.9	472.4	39.6	4655.5	136.8	270.9	502.2
18	127.5	43	5293.6	125.0	309.9	444.6	39	3492.4	147.0	294.3	469.8	39.1	4998.6	142.6	286.4	482.2
19	135	42.6	5449.0	133.2	387.1	429.4	39	3328.1	176.7	339.6	465.8	39.7	5512.8	157.6	391.6	481.6
20	142.5	42.3	5365.4	111.9	219.9	495.8	39	5505.5	123.7	255.0	489.2	39.7	6614.1	119.4	224.3	498.1
21	150	42.1	5617.1	107.4	202.0	443.8	39.2	4108.8	143.9	234.4	448.0	40.7	5367.6	150.8	243.0	467.8
Mean		42.8	5702.9	108.2	241.4	394.4	37.6	4666.5	134.9	249.1	405.9	38.6	5609.2	128.8	248.9	413.1
Std.		0.6	754.6	13.1	54.4	56.4	1.2	906.3	16.0	45.2	54.5	1.0	816.8	14.0	47.5	63.0
CV		0.01	0.13	0.12	0.23	0.14	0.03	0.19	0.12	0.18	0.13	0.03	0.15	0.11	0.19	0.15

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-6 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 3145

Station		Test#1 มิถุนายน 2543					Test#2 กันยายน 2543					Test#3 ธันวาคม 2543				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	37.8	2671.3	562.1	398.8	392.6	42.4	2032.1	-	-	-	46	2982.9	435.9	277.8	335.2
2	7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	15	36.9	2692.5	557.9	523.6	426.0	43	2214.6	525.7	366.5	342.8	46.4	2214.4	590.5	312.0	341.3
4	22.5	36.3	2787.5	594.7	444.2	415.4	43.2	2143.6	602.0	334.5	347.5	46.8	2653.3	674.8	307.8	308.0
5	30	37	2950.6	670.3	372.4	387.0	43	2213.2	563.6	346.1	313.0	46.9	1789.7	591.3	323.4	339.4
6	37.5	36.4	2605.9	733.8	400.0	374.1	42.9	2221.8	367.2	274.5	337.0	46.7	3225.7	405.6	245.9	346.5
7	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	52.5	37.9	2661.5	578.4	409.3	404.0	42.4	2551.6	-	-	-	47.9	2358.4	514.7	243.1	379.4
9	60	35.7	2596.5	614.1	458.2	408.3	42.6	2243.5	567.0	385.1	360.2	46	2236.0	586.9	266.8	374.7
10	67.5	35.1	2733.1	1117.6	545.1	399.3	42.5	2138.2	871.7	367.5	383.9	40.2	2142.8	910.4	365.8	378.3
11	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	82.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	90	36.9	2692.5	814.6	576.8	441.6	42.6	1908.1	657.7	527.4	424.5	44.6	1900.7	770.8	378.1	413.3
14	97.5	36.9	2692.5	-	-	-	44.6	2328.3	459.6	330.0	419.2	47.3	2069.2	447.3	253.3	439.1
15	105	35.9	2654.1	1000.2	429.1	381.7	44.5	2329.7	472.0	345.8	325.1	44.3	2976.8	492.6	270.7	354.3
16	112.5	36.6	2637.4	762.6	408.3	381.8	44.9	1884.3	-	-	-	46.9	2646.8	458.7	176.0	376.7
17	120	36.7	2577.1	844.9	573.7	463.9	45.1	2295.5	467.8	346.6	440.2	42.3	3014.9	519.4	264.1	460.1
18	127.5	37	2612.0	832.5	525.9	447.2	44.8	2934.5	522.4	325.9	413.9	45.5	2742.1	523.4	248.6	433.1
19	135	36.1	2773.3	619.6	483.6	432.8	45	2087.6	548.4	368.6	383.1	47	2291.1	517.4	274.3	387.6
20	142.5	36.3	2787.5	587.4	458.5	410.3	45.5	2498.5	511.3	288.6	385.5	47.2	3043.0	-	-	-
21	150	36.1	2634.7	919.5	525.6	424.5	45.4	2065.6	513.6	383.6	358.8	46.8	2532.7	-	-	-
Mean		36.6	2691.8	738.1	470.8	411.9	43.8	2240.6	546.4	356.5	373.9	45.8	2518.8	562.7	280.5	377.8
Std.		0.7	93.1	171.0	66.7	26.0	1.2	252.5	116.6	58.8	39.7	2.0	435.7	135.4	50.9	43.1
CV		0.02	0.03	0.23	0.14	0.06	0.03	0.11	0.21	0.16	0.11	0.04	0.17	0.24	0.18	0.11

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-6 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 3145 (ต่อ)

Station		Test#4 เมษายน 2544					Test#5 สิงหาคม 2544				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	37.2	2729.9	331.1	365.7	327.5	-	-	-	-	-
2	7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	15	38	2587.1	480.7	375.2	373.1	32.7	3805.3	475.6	318.5	367.7
4	22.5	37.8	2671.3	525.4	420.6	393.3	32.6	3227.7	501.6	391.5	389.3
5	30	37.4	2644.3	567.1	423.6	358.4	32	3216.6	616.0	345.8	357.6
6	37.5	37.2	2663.3	412.8	383.0	398.0	32.1	3205.3	403.7	420.2	397.0
7	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	52.5	38.4	2580.9	530.5	427.1	379.9	31.8	3563.6	513.5	355.8	410.8
9	60	37.7	2615.7	544.8	462.1	374.3	31.3	3116.0	560.6	376.8	391.6
10	67.5	38.3	2430.6	727.1	486.8	390.4	30.8	3279.7	834.1	417.9	392.9
11	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	82.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	90	38.6	2049.2	717.0	793.8	434.8	31.7	3218.7	-	-	-
14	97.5	39	2491.8	528.5	418.0	447.6	31.4	3285.9	624.2	474.0	471.6
15	105	38.6	2529.9	498.6	453.0	383.3	31.6	3908.5	570.5	434.8	408.8
16	112.5	39	2491.8	475.9	364.9	421.3	31.4	3031.2	618.4	369.0	434.7
17	120	39.2	2999.5	524.9	494.4	488.0	31.2	3648.1	-	-	-
18	127.5	39.1	2738.7	540.0	485.7	456.7	30	3665.4	-	-	-
19	135	39.5	2690.2	507.4	510.8	453.8	30.3	3891.0	584.0	484.9	455.9
20	142.5	39.1	2730.8	455.4	499.4	422.6	31	3498.7	454.6	418.0	454.4
21	150	39.9	2408.7	550.6	442.5	393.6	32.1	3614.0	696.1	399.4	417.2
Mean		38.5	2591.4	524.6	459.2	405.7	31.5	3448.5	573.3	400.5	411.5
Std.		0.8	198.2	93.9	98.5	41.1	0.7	285.1	112.2	48.3	34.5
CV		0.02	0.08	0.18	0.21	0.10	0.02	0.08	0.20	0.12	0.08

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-7 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 3222

Station		Test#1 มิถุนายน 2543					Test#2 กันยายน 2543					Test#3 ธันวาคม 2543				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	36.3	3187.3	395.0	192.0	342.8	29.3	4850.9	452.9	229.1	179.1	37.8	3294.4	337.5	184.0	235.6
2	7.5	36.3	2048.9	190.1	166.8	343.0	29.5	2771.8	184.6	149.5	316.4	37.8	2194.3	153.9	165.1	247.8
3	15	37.1	2123.3	254.4	178.2	214.8	29.5	3118.9	425.4	181.5	144.7	39.2	2339.9	301.7	159.4	143.4
4	22.5	37.7	2131.3	182.1	187.6	161.3	29.5	3639.4	340.4	147.8	144.9	39.2	2296.9	195.5	132.5	171.1
5	30	38.1	2140.9	292.8	181.7	181.9	29.7	3085.5	433.6	166.6	140.5	39.2	1736.5	242.6	155.6	134.4
6	37.5	38.3	2075.9	172.7	212.8	257.1	29.5	2842.0	150.3	226.0	186.0	38.8	2436.8	174.6	142.9	226.4
7	45	39.7	2143.3	241.3	183.5	183.4	29.6	3206.9	337.8	166.4	147.7	38.8	2094.8	223.9	146.1	152.6
8	52.5	38.6	2592.3	370.4	189.1	171.7	29.5	3960.7	358.3	195.6	141.5	38.7	2528.9	278.4	176.6	154.2
9	60	39.7	2048.6	318.1	185.5	175.1	29.7	3417.5	570.9	165.8	165.2	38.8	2094.4	419.4	150.9	158.7
10	67.5	39.4	3414.8	354.1	196.2	181.2	29.7	5069.6	526.9	195.5	146.3	39.2	3728.5	283.1	177.5	156.6
11	75	39.7	2056.9	316.1	193.1	160.2	30	3490.9	522.7	168.1	160.5	39.1	2359.5	275.2	155.9	160.8
12	82.5	40.3	1589.5	213.0	182.3	173.9	30.1	2671.0	421.6	157.7	178.4	39.8	1633.2	242.2	152.0	151.1
13	90	40.7	1484.3	204.1	151.4	250.8	30.1	2511.9	291.5	163.0	177.6	39.8	1550.5	102.9	188.5	190.8
14	97.5	40.8	1437.3	174.5	204.7	175.6	30.2	2449.6	257.1	168.2	212.9	39.2	1296.5	175.6	164.7	174.7
15	105	40.7	1636.2	111.5	195.1	230.1	30.1	2559.1	186.0	167.4	185.8	39.4	1434.3	133.3	164.8	168.3
16	112.5	40.6	1000.6	234.6	125.9	304.5	30.3	1900.2	137.3	155.0	183.8	39	1242.2	68.4	227.9	156.3
17	120	40.3	1286.3	237.8	194.0	285.0	30.4	1956.8	288.6	199.0	238.5	39.4	1111.5	237.3	183.3	270.4
18	127.5	40.8	1389.3	182.2	161.0	317.5	30.5	2613.1	150.7	165.7	260.2	40	1470.4	128.5	175.8	236.5
19	135	39.9	1074.4	162.6	156.6	209.1	30.5	1527.6	243.5	154.6	160.6	39.9	780.5	159.0	166.8	158.3
20	142.5	40.8	1445.0	129.8	271.1	315.7	30.7	2630.9	223.6	226.1	245.1	40.1	1600.6	105.7	232.4	384.3
21	150	41.5	1853.8	109.0	260.9	268.2	30.6	2701.1	305.8	194.5	195.8	40.5	1767.5	118.1	229.8	236.9
Mean		39.4	1912.4	230.8	189.0	233.5	30.0	2998.8	324.3	178.2	186.3	39.2	1952.0	207.5	173.0	193.8
Std.		1.6	618.0	83.4	32.3	63.7	0.4	874.1	132.1	25.4	45.8	0.7	708.5	88.7	27.8	59.4
CV		0.04	0.32	0.36	0.17	0.27	0.01	0.29	0.41	0.14	0.25	0.02	0.36	0.43	0.16	0.31

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-7 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 3222 (ต่อ)

Station		Test#4 on เมษายน 44					Test#5 on สิงหาคม 44				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	34	2528.8	422.3	179.2	250.3	37.7	3716.7	282.5	204.4	159.4
2	7.5	34	2013.7	178.1	147.8	312.9	34.6	1887.1	123.5	184.8	228.4
3	15	34.6	2088.4	353.3	161.7	160.5	36.6	2446.0	253.1	171.0	128.4
4	22.5	34.8	2487.9	196.1	161.5	132.2	36.9	2434.9	121.3	168.0	139.1
5	30	35.4	1737.0	265.7	163.4	151.8	37.5	2159.9	212.4	152.4	147.2
6	37.5	35.3	1948.6	155.6	184.4	233.8	37.4	1921.7	114.1	168.8	226.8
7	45	35.8	1917.9	286.6	144.5	190.2	37.5	2114.5	240.4	140.0	152.1
8	52.5	36.4	2657.7	311.9	173.8	157.5	37.7	2939.2	289.6	152.1	139.2
9	60	36.6	2004.9	388.1	150.1	152.8	37.7	2398.1	310.8	137.6	156.1
10	67.5	36.4	3204.4	367.9	194.0	160.1	37.8	3499.2	271.7	160.2	164.0
11	75	36.6	2007.0	372.0	174.5	149.1	37.9	2374.5	260.9	137.6	171.5
12	82.5	36.9	1727.5	227.8	164.7	162.1	38.3	1767.4	230.3	137.2	151.5
13	90	37.2	1447.3	211.6	140.5	216.8	38.3	1154.7	122.1	182.5	158.7
14	97.5	37.2	1466.7	161.5	162.2	192.8	38.7	1188.5	78.2	194.3	193.9
15	105	37.3	1755.9	213.7	112.8	314.9	38.8	1709.6	112.2	130.6	228.4
16	112.5	37.6	955.2	227.6	122.6	307.2	38.6	1104.5	108.3	149.0	176.4
17	120	38.6	1110.4	225.2	208.4	253.2	38.5	1105.6	184.4	198.8	222.4
18	127.5	39.5	1100.6	191.0	194.8	198.7	38.9	1360.6	126.7	165.4	250.3
19	135	39.4	765.4	180.6	184.3	157.5	38.6	785.2	117.2	173.9	175.7
20	142.5	40.1	1551.7	128.7	262.7	290.1	38.6	1829.2	92.3	237.5	338.5
21	150	40	1748.0	355.4	131.7	450.3	39	2064.0	128.7	209.0	186.4
Mean		36.8	1820.2	258.1	167.6	218.8	37.9	1998.2	180.0	169.3	185.4
Std.		1.9	592.2	88.2	32.7	79.9	1.0	769.8	77.0	28.2	49.4
CV		0.05	0.33	0.34	0.19	0.37	0.03	0.39	0.43	0.17	0.27

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-8 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 4009

Station		Test#1 สิงหาคม 2543					Test#2 ธันวาคม 2543					Test#3 มีนาคม 2544				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	27	27.0	4965.3	449.0	505.5	26.5	4528.4	522.8	164.6	473.8	30.1	3648.7	587.9	163.8	490.3
2	7.5	26.5	26.5	5102.8	555.0	527.4	25.5	4616.5	593.3	142.5	506.4	29.7	4816.8	601.3	164.5	528.0
3	15	26.5	26.5	4016.4	613.7	520.5	25.6	4711.4	526.0	169.2	490.2	29.1	4150.1	534.8	187.4	501.2
4	22.5	26.7	26.7	4378.6	617.7	510.6	25.2	4676.5	703.1	123.1	493.6	29.1	3454.5	623.1	150.4	381.1
5	30	26.7	26.7	5132.2	587.1	516.8	25.5	4616.5	705.1	165.5	496.1	29.1	3330.6	621.0	156.5	500.4
6	37.5	27.1	27.1	4847.5	666.0	548.5	25.6	4711.4	588.1	195.0	535.7	28.9	3458.4	576.8	201.2	477.2
7	45	27.6				474.2	25.5	4616.5	615.3	134.7	484.7	29.2	4154.7	539.1	169.0	469.9
8	52.5	28.3	28.3	4536.8	517.6	492.4	25.4	4868.3	587.0	123.2	472.6	29	4185.3	548.0	150.6	494.7
9	60	27.9	27.9	4603.7	462.2	498.4	25.6	4148.7	514.2	168.1	439.8	29	4185.3	474.9	156.4	487.9
10	67.5	27.9	27.9	4833.9	460.7	489.2	25.3	4656.5	594.4	152.7	469.8	29	4290.0	496.9	152.9	488.9
11	75	28.3	28.3	3927.9	466.1	470.1	25.4	5622.9	338.9	179.1	445.9	29.1	3971.4	425.9	194.0	459.7
12	82.5	30.2	30.2	4185.5	451.5	468.9	25.6	5194.3	420.7	173.1	453.0	29.2	5806.4	376.0	179.0	462.5
13	90	30.2	30.2	4185.5	483.2	496.0	25.7	4633.7	645.4	119.4	503.6	29	4614.3	499.8	153.1	489.7
14	97.5	30	30.0	3839.9	432.5	542.6				177.9	504.5	29.1	3700.7	403.1	218.1	506.0
15	105	30.2	30.2	3459.1	510.5	527.4	25.6	4596.5	498.9	183.9	504.0	29.1	4488.0	447.7	171.0	524.3
16	112.5	30.2	30.2	3286.1	572.8	511.4	25.7	5045.6	544.0	159.9	524.7				159.2	517.8
17	120	30.5	30.5	3411.5	522.3	540.9	26	4105.9	489.1	210.8	512.1	29.3	4356.2	401.2	245.7	459.3
18	127.5	30.8	30.8	4599.6	393.3	512.4	25.6	5194.3	428.5	187.0	462.2	29.2	4258.5	412.1	154.4	502.6
19	135	30.8	30.8	3885.2	515.3	474.7	25.9	5001.5	501.5	156.7	474.8	29.2	4154.7	492.9	173.6	457.6
20	142.5	30.7	30.7	4723.3	506.0	504.7	25.9	5001.5	550.7	422.1	467.8	29.3	5259.0	448.0	206.9	536.7
21	150	30.7	30.7	3464.2	519.4	456.0	25	4716.6	473.9	183.7	465.7	29.1	3429.9	543.1	168.0	492.6
Mean		28.8	28.9	4269.2	515.1	504.2	25.6	4763.2	542.0	175.8	484.8	29.2	4185.7	502.7	175.0	487.1
Std.		1.7	1.7	590.3	69.8	25.9	0.3	349.1	91.6	61.5	25.5	0.3	625.6	77.6	25.4	33.3
CV		0.06	0.06	0.14	0.14	0.05	0.01	0.07	0.17	0.35	0.05	0.01	0.15	0.15	0.15	0.07

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-8 ค่าโมดูลัสชั้นทางต่างๆ ของสายทางหมายเลข 4009 (ต่อ)

Station		Test#4 กันยายน 2544				
Pt.	Meter	T _{AC}	E _{AC}	E _b	E _{sb}	MR
1	0	35.8	2804.2	644.3	206.8	482.2
2	7.5	34	3811.5	571.8	198.5	521.2
3	15	35.1	3655.2	555.3	186.6	499.9
4	22.5	35.2	3468.6	680.5	181.0	197.4
5	30	35.7	2814.6	696.9	148.6	539.0
6	37.5	34.9	3682.7	560.5	214.7	521.5
7	45	35.1	3322.9	508.9	149.3	456.8
8	52.5	33.6	2965.5	603.3	168.2	477.2
9	60	34.1	2988.7	610.4	187.7	388.6
10	67.5	34.1	2839.3	587.0	167.9	462.9
11	75	35.4	3443.4	480.0	190.8	447.2
12	82.5	36.6	2995.1	527.4	207.6	438.6
13	90	36.9	2692.5	586.5	164.5	483.5
14	97.5	-	-	-	244.4	490.4
15	105	36	2922.6	524.7	215.1	507.9
16	112.5	37.6	2625.2	577.7	217.2	502.1
17	120	37.8	2866.8	574.8	218.2	538.7
18	127.5	37.7	3165.0	449.6	176.9	462.9
19	135	37.9	2713.5	580.0	179.4	468.6
20	142.5	38.3	3331.9	514.7	399.9	473.3
21	150	37.7	3655.6	426.2	227.4	478.0
Mean		36.0	3138.2	563.0	202.4	468.5
Std.		1.5	377.0	69.0	51.9	71.3
CV		0.04	0.12	0.12	0.26	0.15

หน่วย: MPa

ตารางที่ ค-9 ค่าแอมป์ตัวกลางที่นำหนักทดสอบต่างๆ ของสายทางหมายเลข 309

Station		Test#1 (เมษายน 2547)					Test#2 (27 พฤษภาคม 2547)					Test#3 (มิถุนายน 2547)				
Pt.	Meter	T _{AC}	L378	L566	L754	L1006	T _{AC}	L378	L566	L754	L1006	T _{AC}	L378	L566	L754	L1006
1	0	48.3	330	478	602	736	35.9	284	434	558	697	29.5	266	411	539	675
2	7.5	48.3	347	494	634	772	36.4	312	464	596	730	29.5	295	443	583	714
3	15	48.1	417	582	737	891	36.3	359	527	678	834	29	321	479	624	789
4	22.5	47.5	345	491	633	774	36.2	292	440	572	714	28.8	251	396	537	676
5	30	48.5	383	553	743	934	36	322	489	657	839	29.3	283	442	598	779
6	37.5	49.1	477	680	895	1113	36.3	420	622	814	1021	29.3	366	564	753	964
7	45	49.3	374	524	680	830	36.2	309	456	600	744	29.3	283	431	572	727
8	52.5	49.5	383	544	710	876	36.2	315	479	625	789	29.4	283	435	587	748
9	60	49.3	357	506	660	817	36.9	301	450	589	737	29.9	262	407	549	704
10	67.5	49.7	385	542	701	851	36.4	331	493	636	790	29.7	294	443	593	750
11	75	49.1	380	535	696	856	36.1	315	476	630	782	29.8	283	427	581	738
12	82.5	51	364	515	671	822	35.8	305	460	603	758	30	277	418	560	722
13	90	53.7	360	534	671	823	33.8	277	438	576	729	29.9	272	409	559	711
14	97.5	52.5	355	529	675	822	33.4	303	441	589	750	29.9	272	416	569	727
15	105	51	374	543	681	823	34.2	314	465	616	766	29.8	300	449	600	754
16	112.5	52.2	375	534	670	809	34.1	307	435	580	726	30.2	290	432	572	722
17	120	53.3	386	552	693	831	34.1	323	477	617	762	30.1	301	450	604	756
18	127.5	54.1	388	555	693	833	33.9	311	479	628	778	30	306	454	611	770
19	135	53	414	619	772	942	34.2	332	500	653	825	30.1	302	460	629	810
20	142.5	55.3	402	596	754	925	33.9	308	482	637	799	30	307	463	628	801
21	150	53.2	430	631	789	955	33.7	345	529	698	863	30	337	503	686	855
Mean		50.8	382.2	549.4	702.9	858.8	35.2	318.3	477.9	626.3	782.5	29.7	292.9	444.4	596.9	756.8
Std.		2.3	32.9	49.2	63.8	81.8	1.2	29.9	42.9	55.8	70.0	0.4	26.1	37.4	50.0	64.7
CV		0.05	0.09	0.09	0.09	0.10	0.03	0.09	0.09	0.09	0.09	0.01	0.09	0.08	0.08	0.09

หน่วย: ไมครอน

ตารางที่ ค-9 ค่าแอมป์ตัวกลางที่นำหนักทดสอบต่างๆ ของสายทางหมายเลข 309 (ต่อ)

Station		Test#4 (กรกฎาคม 2547)					Test#5 (สิงหาคม 2547)					Test#6 (ตุลาคม 2547)				
Pt.	Meter	T _{AC}	L378	L566	L754	L1006	T _{AC}	L378	L566	L754	L1006	T _{AC}	L378	L566	L754	L1006
1	0	49.3	344	496	636	771	41	344	496	625	773	50.3	380	546	676	820
2	7.5	47.6	363	524	661	801	40	339	512	659	800	51.3	389	561	697	836
3	15	48.4	407	579	728	886	39.5	413	605	728	910	51.3	425	607	758	907
4	22.5	48.9	353	514	650	791	39.5	351	511	647	800	49.7	388	556	692	837
5	30	47.5	379	554	728	908	39.5	408	605	721	961	50.7	399	583	746	927
6	37.5	48.1	480	708	897	1111	40	452	687	873	1087	50.3	510	716	925	1136
7	45	47.8	383	559	693	851	40	356	530	659	824	50.2	393	565	721	871
8	52.5	47.9	391	581	735	892	40.2	410	521	702	914	50.5	408	588	753	916
9	60	46.5	367	536	683	835	40	365	531	660	828	50.4	380	549	701	850
10	67.5	47.5	400	568	718	880	41.2	411	603	753	915	50.5	407	578	737	888
11	75	48.3	387	560	712	873	41.8	398	573	728	879	49.8	395	563	724	882
12	82.5	47.9	383	554	706	862	42.5	403	527	687	854	50.4	405	565	727	879
13	90	48.1	372	543	685	840	42.1	385	556	715	866	50.6	379	540	689	837
14	97.5	47.8	361	537	687	843	43.1	384	555	709	868	50.7	370	539	700	845
15	105	46.9	383	557	706	854	41.9	411	588	704	861	50.1	394	566	715	856
16	112.5	47.8	391	546	697	842	42.8	397	567	714	838	50.6	397	555	707	855
17	120	47	405	566	727	875	43	404	581	720	877	49.8	401	562	722	866
18	127.5	47.8	410	570	731	887	42.7	405	586	734	895	49.6	411	578	737	883
19	135	47.2	424	600	781	951	41.8	471	672	837	1029	50.2	423	603	781	950
20	142.5	48.3	419	596	771	937	42.6	419	617	788	959	49.7	415	590	770	931
21	150	47.7	446	633	820	993	41.7	454	650	823	1004	49.6	451	639	822	991
Mean		47.8	392.8	565.8	721.5	880.1	41.3	399.0	574.9	723.1	892.5	50.3	405.7	578.5	738.1	893.5
Std.		0.6	31.8	44.5	58.7	74.1	1.3	35.0	53.2	63.6	79.6	0.5	30.1	39.7	55.1	70.2
CV		0.01	0.08	0.08	0.08	0.08	0.03	0.09	0.09	0.09	0.09	0.01	0.07	0.07	0.07	0.08

หน่วย: ไมครอน

ตารางที่ ค-9 ค่าแอมป์ตัวกลางที่นำหนักทดสอบต่างๆ ของสายทางหมายเลข 309 (ต่อ)

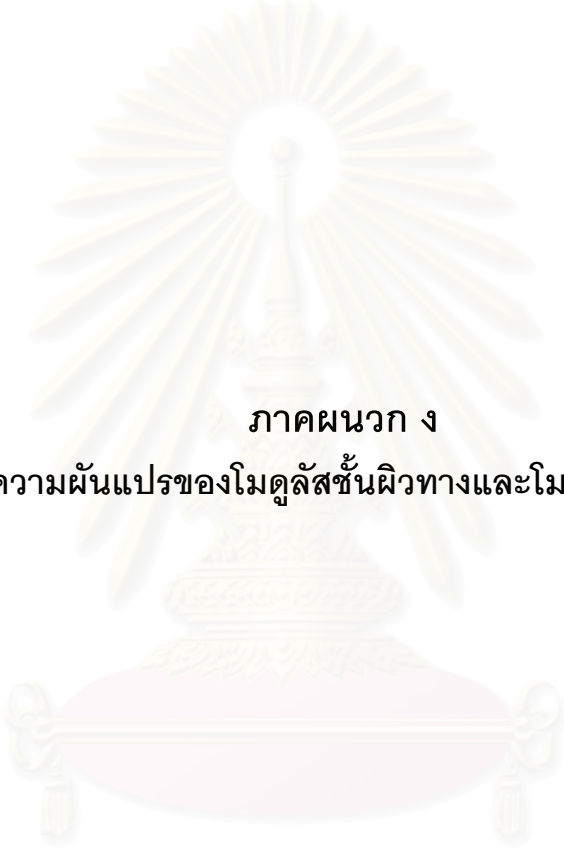
Station		Test#7 on (พฤศจิกายน 2547)					Test#8 (ธันวาคม 2547)					Test#9 (มกราคม 2548)				
Pt.	Meter	T _{AC}	L378	L566	L754	L1006	T _{AC}	L378	L566	L754	L1006	T _{AC}	L378	L566	L754	L1006
1	0	41.9	345	509	642	782	34.9	316	472	607	745	34.3	312	464	594	741
2	7.5	41.9	377	545	686	830	35.6	353	516	663	808	35.6	347	508	647	801
3	15	43.7	410	597	759	917	35.4	365	542	694	855	35.2	343	520	675	835
4	22.5	42.6	360	530	674	825	35.7	323	481	622	772	34.8	310	469	610	762
5	30	44	367	547	711	893	35.6	330	505	665	848	35.1	325	494	657	841
6	37.5	43.9	481	702	895	1098	33.6	435	646	839	1057	35.2	422	635	830	1044
7	45	44.3	376	555	705	857	36	345	509	664	821	35.7	337	504	656	816
8	52.5	44.8	390	575	730	893	35.7	342	515	675	848	35.5	340	511	672	843
9	60	44.6	365	536	678	831	35.6	326	493	638	797	35.8	312	483	632	791
10	67.5	44.6	392	579	725	884	35.8	355	528	686	850	36.1	346	516	668	834
11	75	45.1	379	563	711	869	35.7	339	509	675	841	36	348	514	675	841
12	82.5	45.1	381	564	707	861	35.7	340	504	666	825	36.4	343	506	667	832
13	90	44.8	362	539	682	837	35.8	330	492	651	805	36.7	329	488	641	799
14	97.5	44.8	363	546	698	851	35.8	342	505	665	823	36.9	337	495	660	821
15	105	44.7	392	575	719	867	35.8	359	537	691	848	36.9	370	539	699	859
16	112.5	45	392	564	721	861	35.8	361	521	678	829	36.9	351	520	674	828
17	120	45.3	406	588	732	881	35.8	381	544	709	860	37.5	367	540	696	855
18	127.5	45.5	412	600	744	900	36	382	548	712	871	37.8	376	551	710	872
19	135	45.6	424	627	794	968	36.3	375	557	738	910	37.4	373	557	738	925
20	142.5	46	416	606	779	949	36.2	388	564	752	926	38.1	377	564	737	915
21	150	46	451	650	833	1010	36.2	419	599	795	976	37.7	414	603	790	975
Mean		44.5	392.4	576.0	729.8	888.8	35.7	357.4	528.0	689.8	853.1	36.3	351.4	522.9	682.3	849.0
Std.		1.2	32.4	44.3	57.6	70.4	0.6	30.8	40.4	54.7	68.9	1.1	30.0	41.9	55.6	69.0
CV		0.03	0.08	0.08	0.08	0.08	0.02	0.09	0.08	0.08	0.08	0.03	0.09	0.08	0.08	0.08

หน่วย: ไมครอน

ตารางที่ ค-9 ค่าแอมป์ตัวกลางที่นำหนักทดสอบต่างๆ ของสายทางหมายเลข 309 (ต่อ)

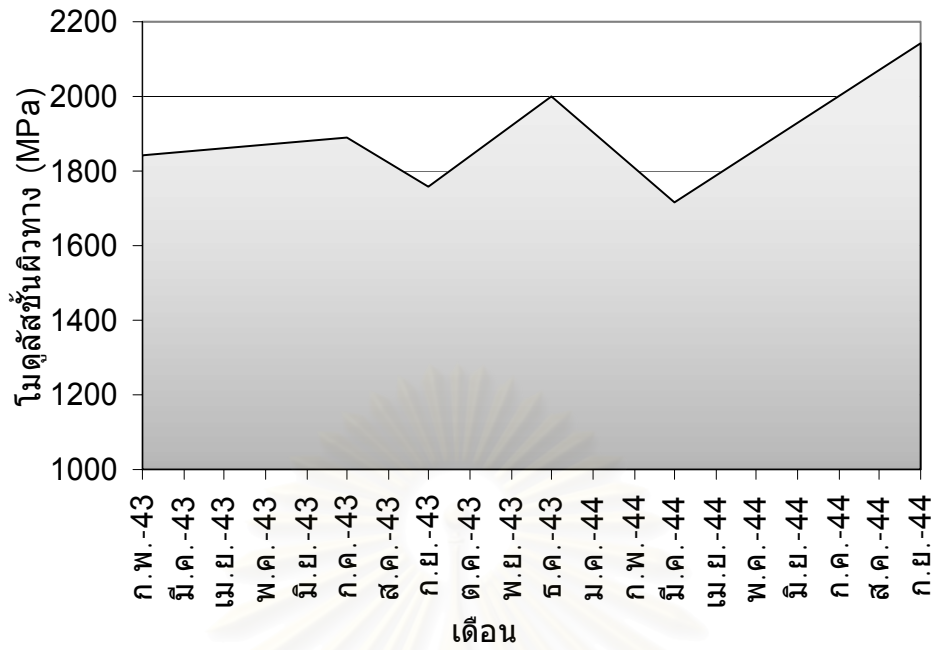
Station		Test#10 (กุมภาพันธ์ 48)					Test#11 (มีนาคม 48)				
Pt.	Meter	T _{AC}	L378	L566	L754	L1006	T _{AC}	L378	L566	L754	L1006
1	0	31.5	312	454	581	725	44.4	342	500	635	763
2	7.5	32.9	326	489	629	777	46.3	383	532	668	810
3	15	32.5	343	520	674	838	45.7	408	584	752	907
4	22.5	31.9	295	452	600	750	45.1	363	512	660	807
5	30	33	304	471	632	815	44.5	395	562	746	928
6	37.5	32.8	414	622	820	1030	46.6	494	705	922	1135
7	45	32.2	314	474	624	777	46.3	396	554	720	875
8	52.5	32.8	313	479	638	802	45.5	406	571	757	922
9	60	32.9	290	444	592	745	44.7	384	539	701	857
10	67.5	32.8	316	475	631	796	45.7	423	580	751	907
11	75	32.7	314	480	634	799	45.5	405	569	743	905
12	82.5	32.9	311	464	623	779	45.1	405	560	726	884
13	90	32.6	300	449	603	760	45.6	388	543	711	870
14	97.5	32.7	302	465	621	779	45	382	537	705	868
15	105	33	336	496	646	802	44.1	410	563	733	877
16	112.5	33.1	319	474	623	773	45.4	412	563	728	875
17	120	33	334	492	655	806	45	418	581	749	902
18	127.5	33.2	338	499	660	818	44.5	434	585	768	918
19	135	33	338	514	686	859	45.8	442	619	813	994
20	142.5	32.9	335	511	685	864	44.7	432	598	798	973
21	150	33	369	547	729	912	45	468	643	848	1019
Mean		32.7	324.9	489.1	647.0	809.8	45.3	409.0	571.4	744.5	904.6
Std.		0.4	27.8	39.9	52.7	66.5	0.7	33.7	44.9	63.8	79.4
CV		0.01	0.09	0.08	0.08	0.08	0.01	0.08	0.08	0.09	0.09

หน่วย: ไมครอน

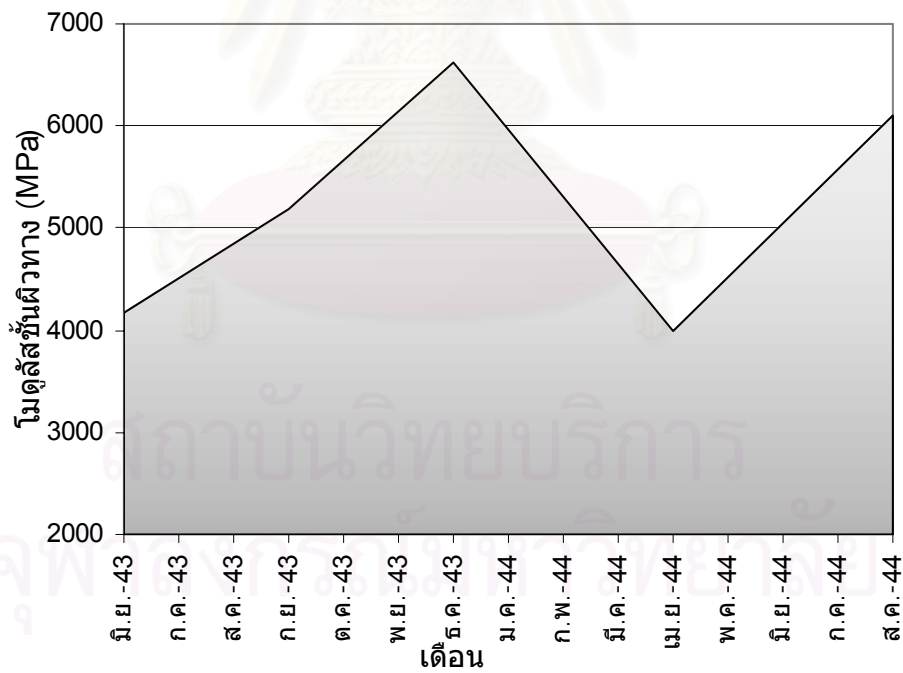


ภาคผนวก ง
กราฟความผันแปรของโมดูลัสชั้นผิวทางและโมดูลัสดินคันทาง

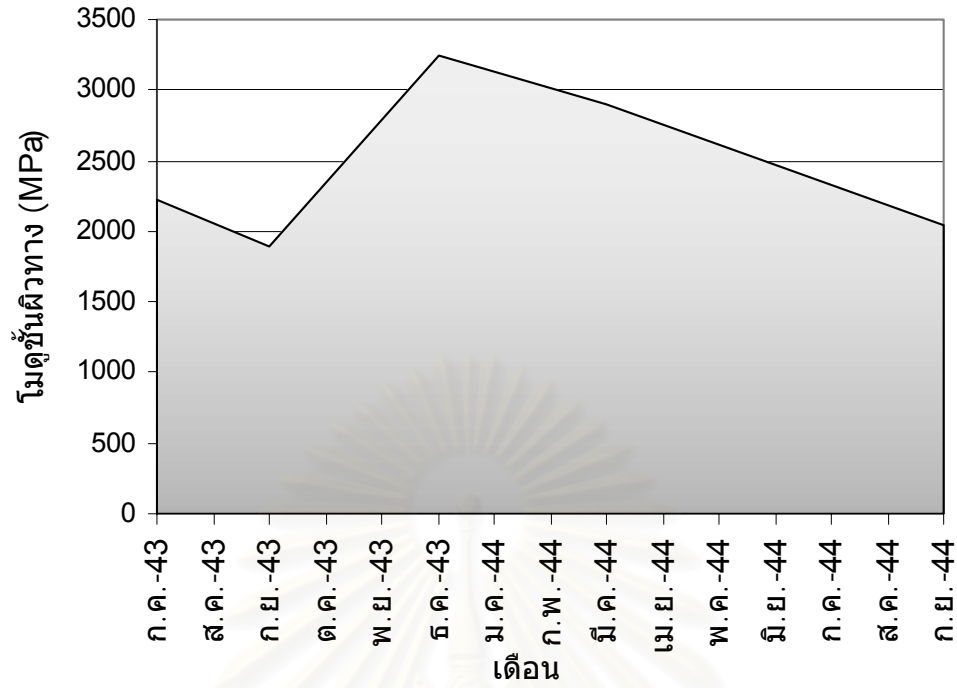
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



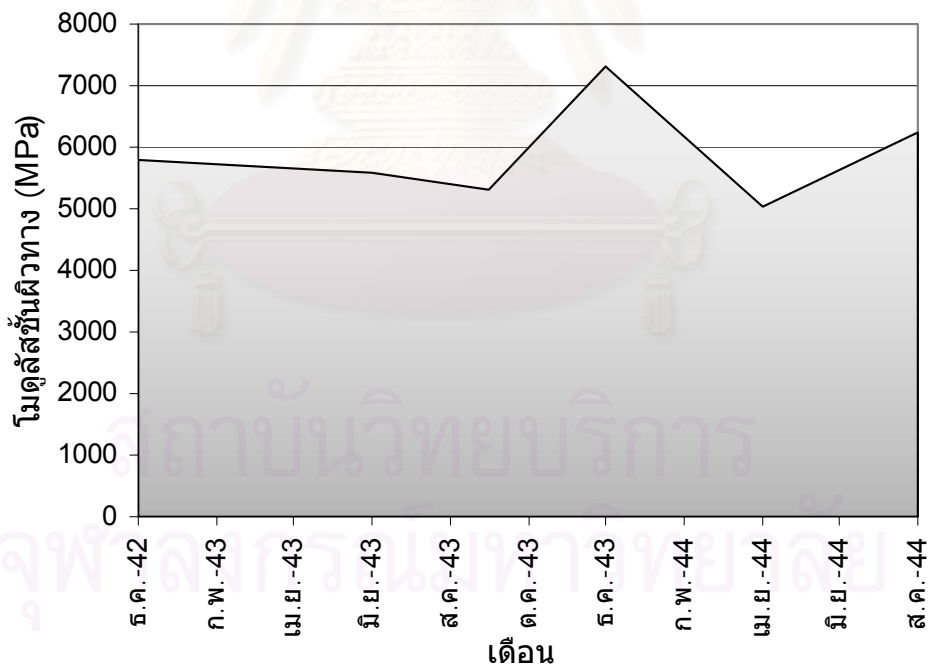
รูปที่ ง-1 ความผันแปรของโมดูลัสชั้นผิวทางของสายทางหมายเลข 4



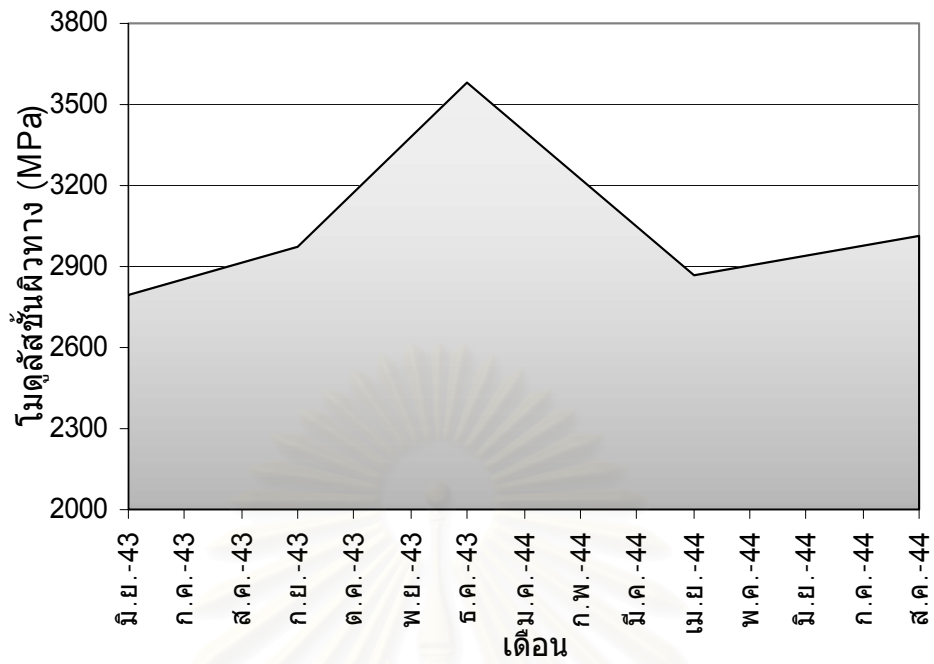
รูปที่ ง-2 ความผันแปรของโมดูลัสชั้นผิวทางของสายทางหมายเลข 9



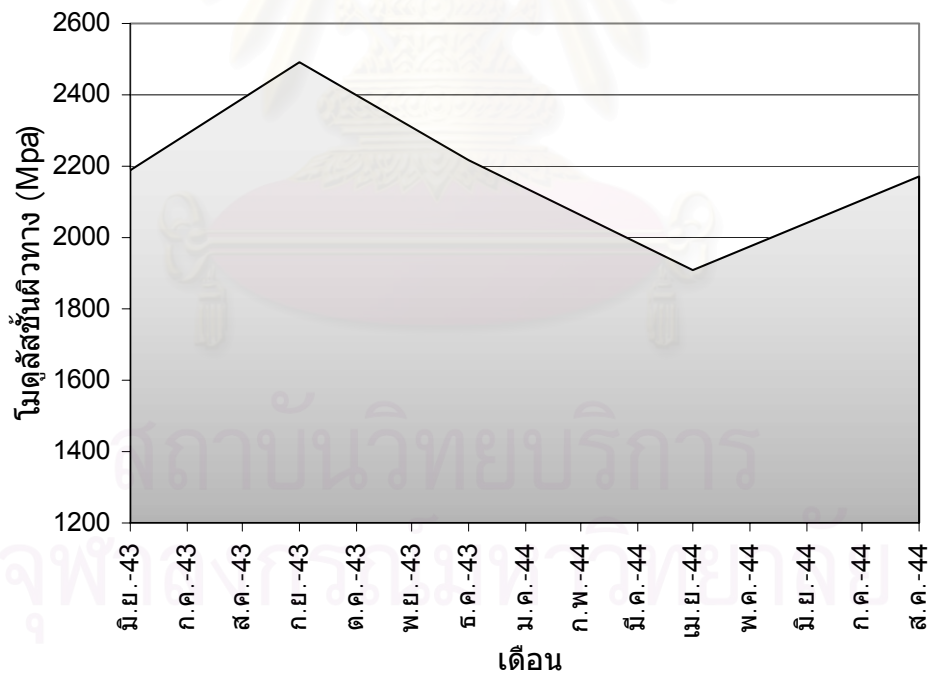
รูปที่ ง-3 ความผันแปรของโมดูลัสเส้นใยของสายทางหมายเลข 3087



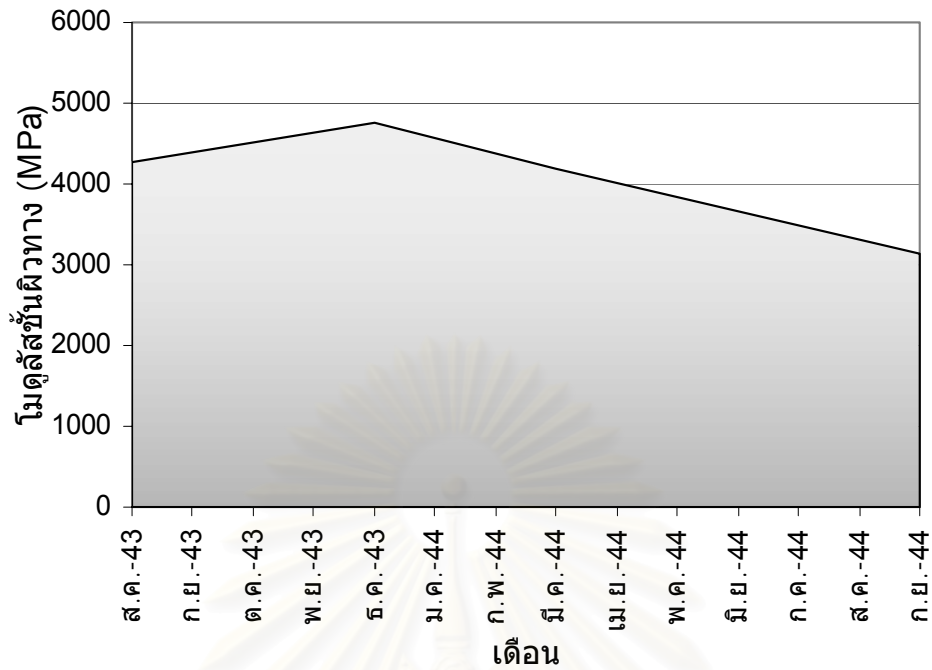
รูปที่ ง-4 ความผันแปรของโมดูลัสเส้นใยของสายทางหมายเลข 3144



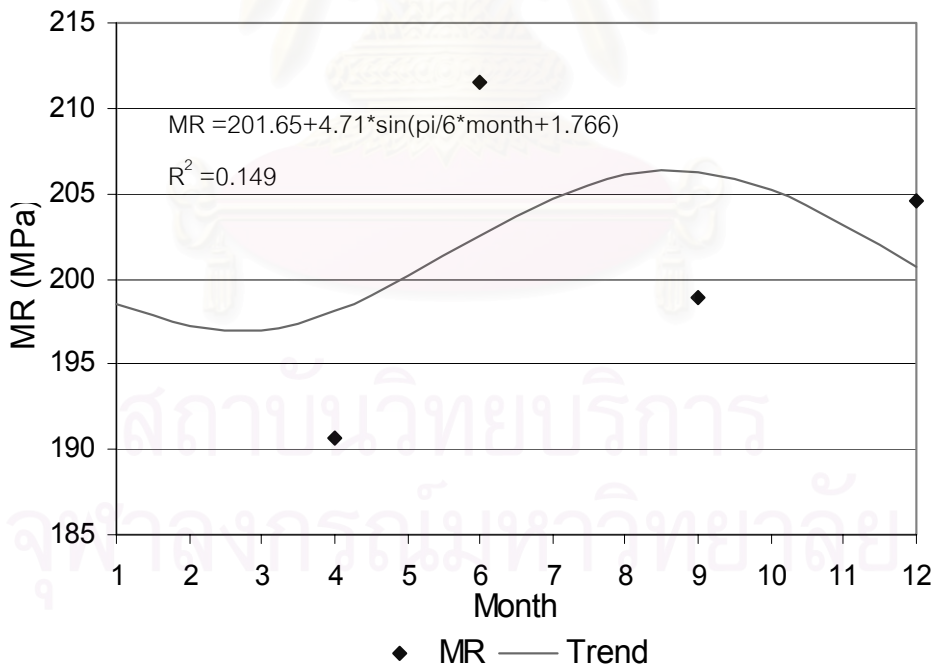
รูปที่ ง-5 ความผันแปรของไม้ดูลัดชั้นผิวทางของสายทางหมายเลข 3145



รูปที่ ง-6 ความผันแปรของไม้ดูลัดชั้นผิวทางของสายทางหมายเลข 3222

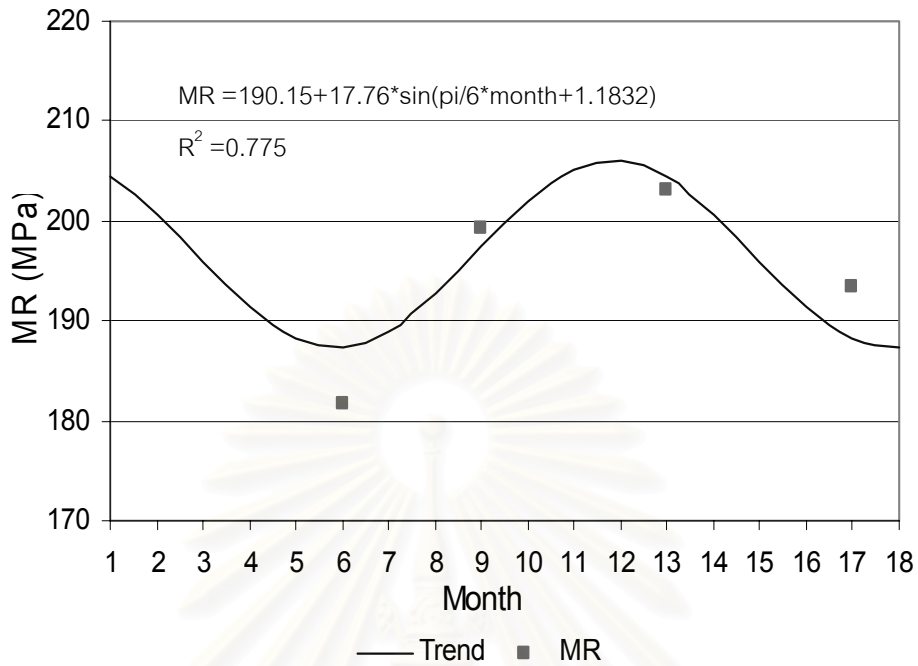


รูปที่ ง-7 ความผันแปรของโมดูลัสชันผิวทางของสายทางหมายเลข 4009



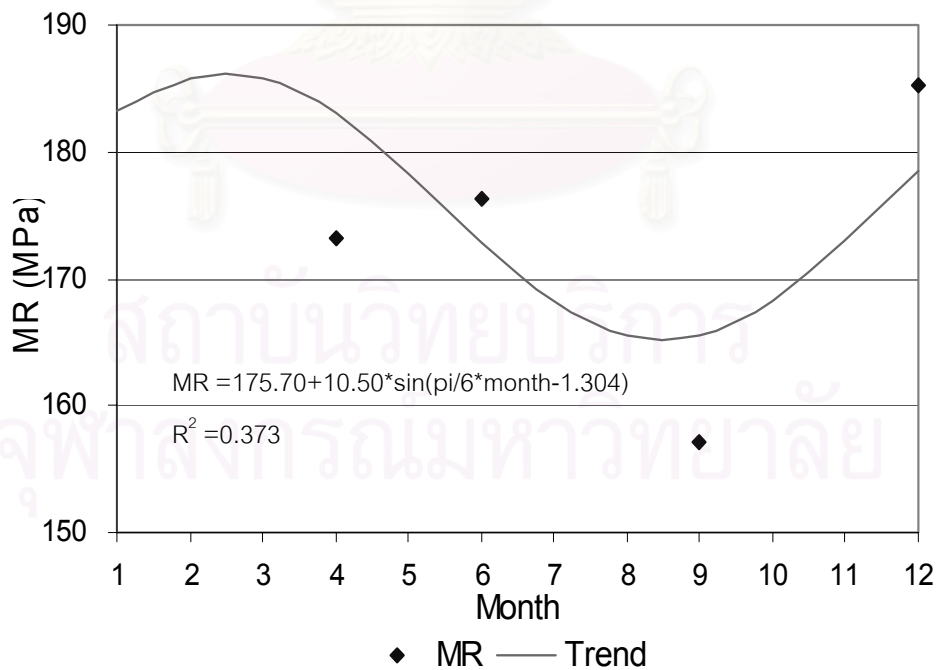
หมายเหตุ: 1 แทนเดือนเมษายน

รูปที่ ง-8 ความผันแปรของโมดูลัสดินทางของสายทางหมายเลข 4



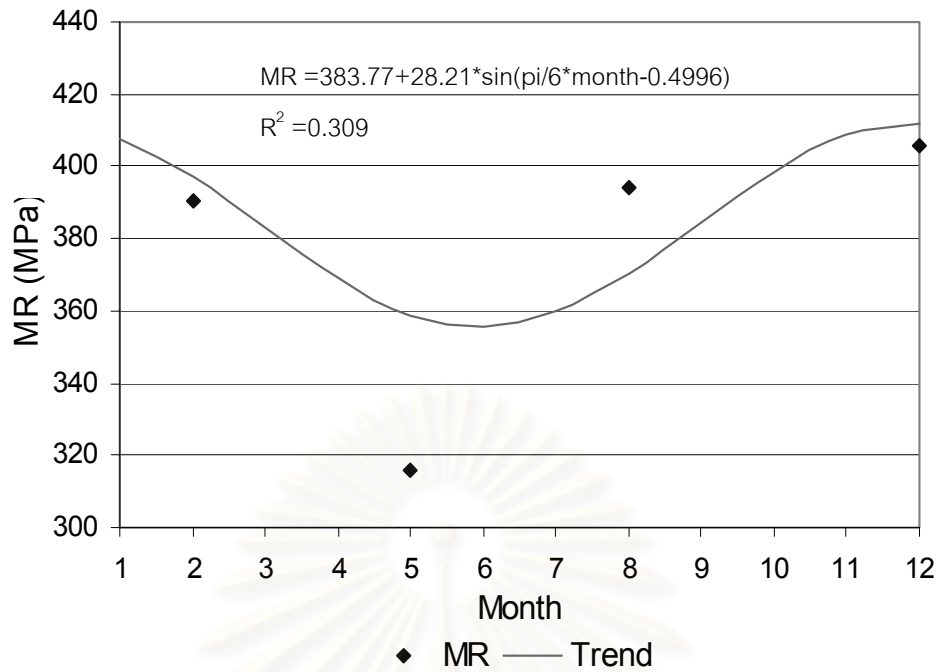
หมายเหตุ: 1 แทนเดือนเมษายน

รูปที่ ง-9 ความผันแปรของโมดูลัสดินทางของสายทางหมายเลข 9



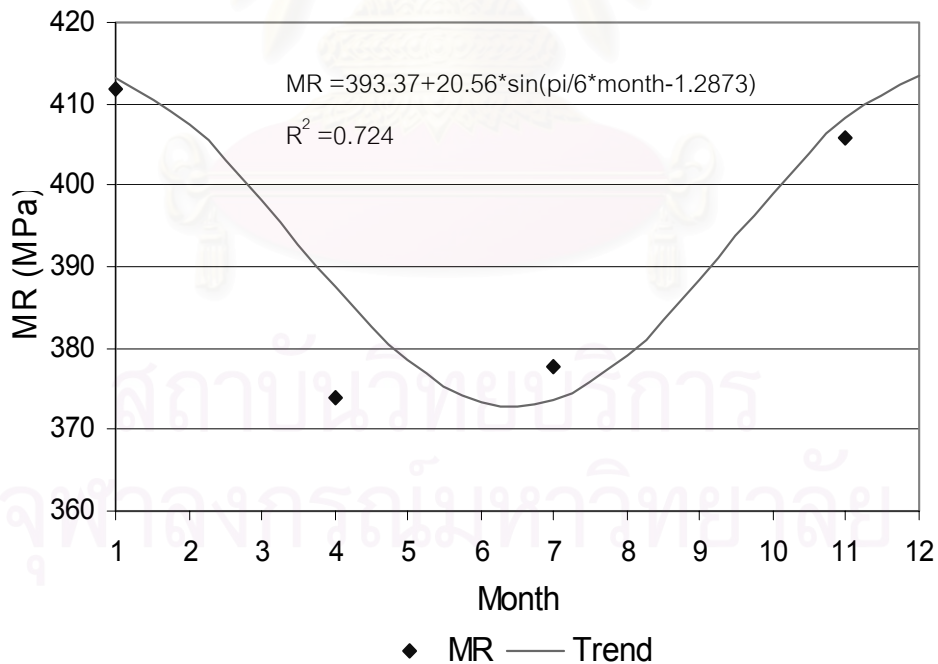
หมายเหตุ: 1 แทนเดือนเมษายน

รูปที่ ง-10 ความผันแปรของโมดูลัสดินทางของสายทางหมายเลข 3087



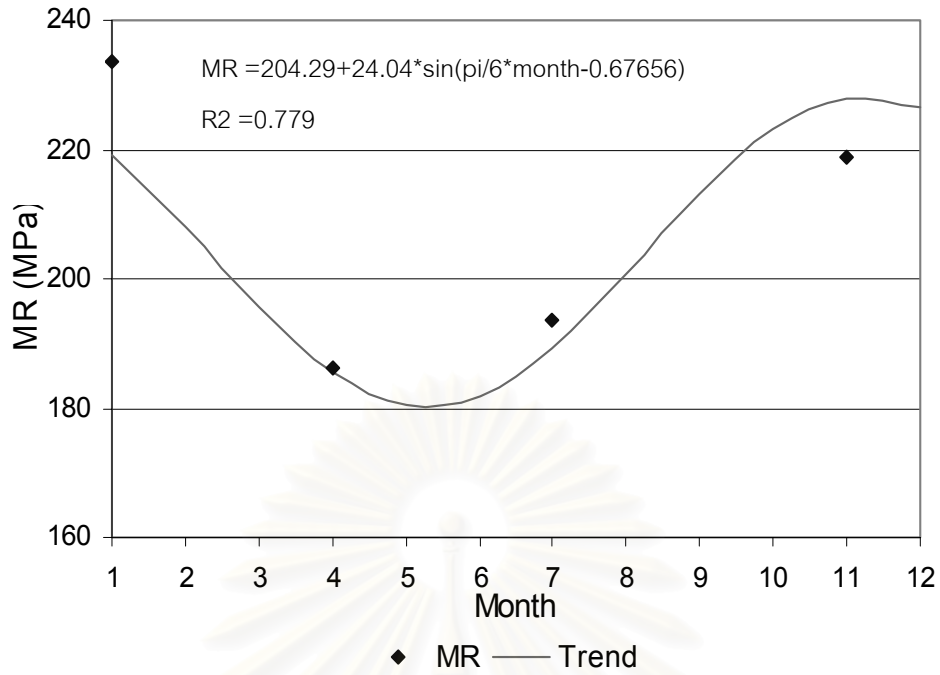
หมายเหตุ: 1 แทนเดือนพฤษภาคม

รูปที่ ง-11 ความผันแปรของโมดูลัสดินทางของสายทางหมายเลข 3144



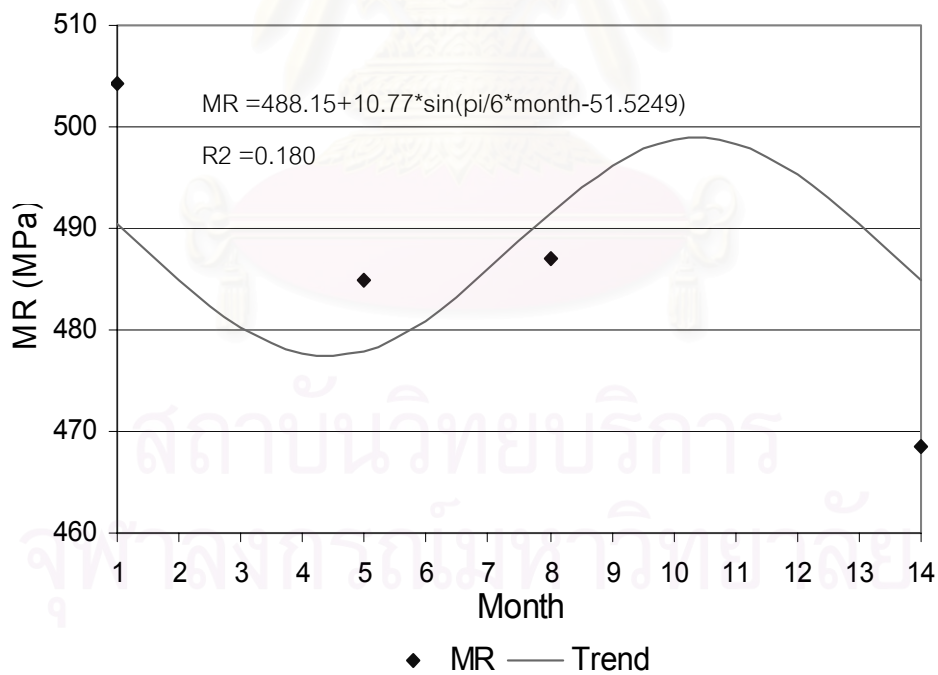
หมายเหตุ: 1 แทนเดือนมิถุนายน

รูปที่ ง-12 ความผันแปรของโมดูลัสดินทางของสายทางหมายเลข 3145



หมายเหตุ: 1 แทนเดือนมิถุนายน

รูปที่ ง-13 ความผันแปรของโมดูลัสดินทางของสายทางหมายเลข 3222



หมายเหตุ: 1 แทนเดือนสิงหาคม

รูปที่ ง-14 ความผันแปรของโมดูลัสดินทางของสายทางหมายเลข 4009

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย นวพล พรหมจารย์ เกิดวันที่ 8 กันยายน พ.ศ. 2523 ที่จังหวัด ยโสธร สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย เมื่อปีการศึกษา 2540 จากโรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย จังหวัด ศรีสะเกษ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เมื่อปี การศึกษา 2544 จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เมื่อปีการศึกษา 2547 จากจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย