การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสของชั้นถนนจากข้อมูลการทดสอบด้วยเครื่อง FWD โดยการวิเคราะห์ในลักษณะพลวัต

นายวิเชียร พัวรุ่งโรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1542-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 20646239 31 S.A. 2546

BACKCALCULATION FOR PAVEMENT LAYER MODULI FROM FWD DATA USING DYNAMIC ANALYSIS

Mr. Wichean Puarungroj

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 2001

ISBN 974-03-1542-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสของชั้นถนนจากข้อมูลการทดสอบด้วยเครื่อง FWD โดยการวิเคราะห์ในลักษณะพลวัต
โดย	นายวิเชียร พัวรุ่งโรจน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม สุริยะมงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

วิเชียร พัวรุ่งโรจน์ : การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสของชั้นถนนจากข้อมูลการทดสอบด้วยเครื่อง FWD โดยการวิเคราะห์ในลักษณะพลวัต. (BACKCALCULATION FOR PAVEMENT LAYER MODULI FROM FWD DATA USING DYNAMIC ANALYSIS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย, 123 หน้า. ISBN 974-03-1542-9.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการวิเคราะห์ในลักษณะพลวัต เพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุในแต่ชั้นของโครงสร้างถนนจากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยเครื่องทดสอบชนิด Falling Weight Deflectometer (FWD) โดยการจำลองโครงสร้างชั้นถนนให้เป็นวัสดุยืดหยุ่นหลายชั้น ที่มีคุณสมบัติและความหนาต่างกัน วางอยู่บนบนชั้นดินยืดหยุ่น หรือ ชั้นหินแข็ง วิธีวิเคราะห์ทำโดยการสร้างสติฟเนสเมตริกซ์ ของแต่ละชั้นให้อยู่ในโดเมนของลาปลาซและฮันเคล จากนั้นจึงทำการรวมสติฟเนสเมตริกซ์ โดยพิจารณาเงื่อนไขของความต่อเนื่องของแต่ละชั้น แล้วจึงคำนวณหาค่าการทรุดตัวในโดเมนของเวลา โดยวิธีการผกผันเชิงตัวเลขที่เหมาะสม ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต้องการจะสามารถหาได้โดยการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยใช้หลักการของ nonlinear least square optimization ด้วยวิธี Modified Levenberg-Marquardt Algorithm เปรียบเทียบการทรุดตัวที่คำนวณได้กับค่าการทรุดตัวที่บันทึกได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง FWD ผลการศึกษาพบว่าค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์แบบพลวัต และการวิเคราะห์แบบสถิตมีความแตกต่างกัน ทำให้การทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบสถิตที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีความคลาดเคลื่อน วิธีการคำนวณที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการประเมินสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนและสนามบิน ทั้งในขณะใช้งานและกำลังก่อสร้างได้

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2544

4271818021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER / LAYERED PAVEMENT / BACKCALCULATION / DYNAMIC ANALYSIS / STIFFNESS MATRIX

WICHEAN PUARUNGROJ : BACKCALCULATION FOR PAVEMENT LAYER MODULI FROM FWD DATA USING DYNAMIC ANALYSIS. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. TEERAPONG SENJUNTICHAI, Ph.D. 123 pp. ISBN 974-03-1542-9.

This thesis is concerned with the development of a dynamic backcalculation program for estimating for elastic moduli of layered pavement from the nondestructive test by the Falling Weight Deflectometer (FWD). A layered pavement is modeled as a multi-layered elastic medium underlain by a rigid bedrock or a semi-infinite elastic soil. The analytical solutions for classical elastodynamics are used to derive the stiffness matrices of a typical layer in Laplace-Hankel transform domain. The assembly of layer stiffness matrices on the basis of interlayer continuity conditions results in the global equilibrium equations of the layered pavement. The global stiffness matrix is obtained and then solved for the time domain deflections by employing a numerical Laplace-Hankel inversion scheme. Elastic moduli are determined by using the nonlinear least square optimization method namely, modified Levenberg-Marquardt algorithm, to minimize the objective function, which is the difference between predicted and measured surface deflections. The results show that the vertical surface displacements from static analysis are higher than those obtained using the dynamic analysis. This indicates that the static analysis of the FWD overestimates the stiffnesses of the pavement layers. In addition, the backcalculation program developed in this thesis can be applied in the evaluation of structural capability of existing and newly road and runway pavement.

Department/Program Civil Engineering Student's signature .....

Field of study Civil Engineering Advisor' s signature .....

Academic year 2001

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือสนับสนุนอย่างดียิ่งจากท่านเหล่านี้ ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์มากที่สุด รองศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม สุริยะมงคล ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาในการตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ และ ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัลย์ศิริ ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาในการตรวจแก้ และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ Professor R.K.N.D. Rajapakse แห่ง University of British Columbia ประเทศแคนาดา ที่ได้ให้ข้อมูลและเอกสารที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ และได้ช่วยเหลือให้คำแนะนำในการทำการศึกษาวิจัย เจ้าหน้าที่ของทางกรมทางหลวง และ บุคคลที่เกี่ยวข้องทุกท่าน รวมทั้งการสนับสนุนด้านเงินทุนผู้ช่วยวิจัยจากมูลนิธิโทเร เพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยของกราบขอบพระคุณ มารดา พี่น้อง และ เพื่อนๆ ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านรวมทั้งได้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยในการศึกษาตั้งแต่เด็กจนถึงปัจจุบัน และหากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นประโยชน์ทางการศึกษาอยู่บ้าง ผู้วิจัยขออุทิศให้แก่ คุณตา คุณยาย และบิดาของผู้วิจัยผู้ล่วงลับ

วิเชียร พัวรุ่งโรจน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 สมมติฐานและขอบเขตของการวิจัย..... 2

1.4 ขั้นตอนในการวิจัย..... 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4

2.1 การทดสอบแบบไม่ทำลาย..... 4

2.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณย้อนกลับ..... 5

2.3 การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตกับพฤติกรรมเชิงสถิต..... 5

2.4 การคำนวณย้อนกลับ..... 6

2.5 การทดสอบด้วยเครื่อง FWD ในประเทศไทย..... 7

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 10

3.1 เครื่องมือทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) 10

3.1.1 ลักษณะทั่วไป..... 10

3.1.2 พฤติกรรมของโครงสร้างถนนขณะทดสอบ..... 11

3.1.3 ลักษณะการทำงาน..... 11

3.2 การคำนวณย้อนกลับ..... 13

3.3 แบบจำลองของโครงสร้างถนนที่รับแรงกระทำแบบพลวัต..... 13

3.3.1 รูปคำตอบทั่วไป..... 14

3.3.2 ลมการสติฟเนสเมทริกซ์..... 19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3 วิธีการหาส่วนผกผันของลาปลาซเชิงตัวเลข..... 22
3.3.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด..... 23

บทที่ 4 การคำนวณและวิเคราะห์ผลด้วยแบบจำลองของโครงสร้างถนน
ภายใต้น้ำหนักกระทำจากเครื่อง FWD..... 32
4.1 วิธีการแก้ปัญหาและการคำนวณเชิงตัวเลข..... 32
4.1.1 การหาค่าสติฟเนสเมทริกซ์ของโครงสร้างถนน..... 32
4.1.2 การหาปริพันธ์เชิงตัวเลข..... 35
4.1.3 การหาส่วนผกผันของลาปลาซเชิงตัวเลข..... 36
4.2 การหาค่าการทรุดตัวที่ผิวบนของโครงสร้างถนนโดยใช้แบบ
จำลองในลักษณะพลวัต..... 37
4.2.1 โครงสร้างถนนและน้ำหนักกระทำที่ใช้ในการคำนวณ..... 37
4.2.2 ผลตอบสนองทางพลวัตของโครงสร้างถนนภายใต้
น้ำหนักกระทำจากเครื่อง FWD..... 38
4.3 การคำนวณย้อนกลับ..... 43
4.3.1 การจัดเตรียมข้อมูล..... 43
4.3.2 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น..... 46
4.3.3 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเมื่อ
กำหนดความหนาใหม่..... 46
4.3.4 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและ
ความหนา..... 46
4.3.5 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น
และความหนาเมื่อกำหนดจำนวนชั้นขึ้นใหม่..... 47
4.4 การคำนวณย้อนกลับจากข้อมูลการทดสอบในสนามด้วย
เครื่อง FWD..... 48

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... 116
5.1 สรุปผลการศึกษา..... 116
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 118

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง..... 119

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 123

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นถนน (บางส่วน).....	8
ตารางที่ 4.1	ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ของฮันเกลในการอินทิเกรต.....	51
ตารางที่ 4.2	คุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนนมาตรฐาน 3 ชั้นที่ใช้ในการวิจัย.....	51
ตารางที่ 4.3	ลักษณะหรือคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนนที่ถูกเปลี่ยนแปลงในการคำนวณ.....	51
ตารางที่ 4.4	การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการวิเคราะห์แบบสถิตและพลวัต.....	52
ตารางที่ 4.5	การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นพื้นทางโดยการวิเคราะห์แบบสถิตและพลวัต.....	52
ตารางที่ 4.6	การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นดินเดิมโดยการวิเคราะห์แบบสถิตและพลวัต.....	53
ตารางที่ 4.7	การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการวิเคราะห์แบบสถิตและพลวัต.....	53
ตารางที่ 4.8	การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นพื้นทางโดยการวิเคราะห์แบบสถิตและพลวัต	54
ตารางที่ 4.9	ค่าการทรุดตัวสูงสุด ณ. ตำแหน่งน้ำหนักกระทำที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการเปลี่ยนค่าลักษณะหรือคุณสมบัติของโครงสร้างถนน.....	54
ตารางที่ 4.10	การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของช่วงเวลาในการให้น้ำหนักกระทำระหว่างการวิเคราะห์แบบพลวัตและการวิเคราะห์แบบสถิต.....	55
ตารางที่ 4.11	พิจารณาผลของค่าโมดูลัสของชั้นดินเดิมขณะเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาในการให้น้ำหนักกระทำระหว่างการวิเคราะห์แบบพลวัตและสถิต.....	55

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง หน้า

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับกรณีเลือกใช้เวลาในการพิจารณา 3 ค่า ... 56

ตารางที่ 4.13 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับกรณีเลือกใช้เวลาในการพิจารณา 5 ค่า ... 56

ตารางที่ 4.14 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับกรณีเลือกใช้เวลาในการพิจารณา 10 ค่า ... 56

ตารางที่ 4.15 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 3 ชั้นเมื่อใช้ข้อมูลค่าทรุดตัวและเวลา 3 ค่าในแต่ละ Geophone ... 57

ตารางที่ 4.16 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 3 ชั้นเมื่อใช้ข้อมูลค่าทรุดตัวและเวลา 5 ค่าในแต่ละ Geophone ... 57

ตารางที่ 4.17 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 3 ชั้นเมื่อใช้ข้อมูลค่าทรุดตัวและเวลา 10 ค่าในแต่ละ Geophone ... 58

ตารางที่ 4.18 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 3 ชั้น เมื่อพิจารณาผลของค่าเริ่มต้นที่ใช้ ... 58

ตารางที่ 4.19 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 3 ชั้น เมื่อกำหนดความหนาของวัสดุ ... 59

ตารางที่ 4.20 ค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนา ... 59

ตารางที่ 4.21 ผลการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนา ... 60

ตารางที่ 4.22 คุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของถนนเมื่อกำหนดให้โครงสร้างถนนมี 4 ชั้น ... 60

ตารางที่ 4.23 คุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของถนนเมื่อกำหนดให้โครงสร้างถนนมี 5 ชั้น ... 60

ตารางที่ 4.24 ผลการคำนวณย้อนกลับเมื่อกำหนดให้โครงสร้างถนนมี 4 ชั้น ... 61

ตารางที่ 4.25 ผลการคำนวณย้อนกลับเมื่อกำหนดให้โครงสร้างถนนมี 5 ชั้น ... 62

ตารางที่ 4.26 ผลการคำนวณย้อนกลับจากข้อมูลการทดสอบจริงจากเครื่อง FWD ... 63

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 2.1 เครื่องทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) รุ่น dynatest 8000 9
รูปที่ 2.2 ลักษณะของน้ำหนักและค่าการทรุดตัวจากเครื่อง FWD 9
รูปที่ 3.1 รูปแสดงตัวอย่างเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) 26
รูปที่ 3.2 รูปแสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) 27
รูปที่ 3.3 ลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นพลังงานขณะทำการทดสอบด้วยเครื่อง FWD 27
รูปที่ 3.4 ลักษณะทั่วไปของข้อมูลการทรุดตัวที่บันทึกได้จากเครื่อง FWD 28
รูปที่ 3.5 ลักษณะการทรุดตัวที่ระยะต่างๆ ในแต่ละเวลาขณะทดสอบด้วยเครื่อง FWD 28
รูปที่ 3.6 ลักษณะสัญญาณค่าการทรุดตัวจากเครื่อง FWD และล้อรถหนักที่สัญจรบนถนนเมื่อพิจารณาเทียบกับเวลา 29
รูปที่ 3.7 รูปแบบปัญหาการคำนวณย้อนกลับ 29
รูปที่ 3.8 ภาพแสดงแบบจำลองโครงสร้างถนนหลายชั้น 30
รูปที่ 3.9 แผนผังแสดงการคำนวณย้อนกลับเพื่อพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างถนน 31
รูปที่ 4.1 การรวมสติฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้างถนนที่วางตัวอยู่บนกึ่งปริภูมิ 64
รูปที่ 4.2 การรวมสติฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้างถนนที่วางตัวอยู่บนชั้นหินแข็ง 64
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวในโดเมนของฮันเกลในแต่ละรอบของการหาส่วนผกผันของลาปลาซเมื่อเวลา 16 มิลลิวินาที 65
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวในโดเมนของฮันเกลในแต่ละรอบของการหาส่วนผกผันของลาปลาซเมื่อเวลา 50 มิลลิวินาที 65
รูปที่ 4.5 การอินทิเกรตโดยใช้ทฤษฎีสี่เหลี่ยมคางหมู 66
รูปที่ 4.6 น้ำหนักกระทำชนิด half sinusoidal load 66
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบวิธีหาส่วนผกผันเชิงตัวเลขกับน้ำหนักกระทำชนิด half sinusoidal load 67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าคงที่ N ที่ใช้ในการหาส่วนผกผันเชิงตัวเลขที่เสนอ
โดย Stehfest..... 67
รูปที่ 4.9 ลักษณะของโครงสร้างถนนและน้ำหนักกระทำที่ใช้ในการคำนวณ..... 68
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำจากเครื่อง FWD ที่มีค่าหน่วยแรงสูงสุด
เท่ากับ 400 กิโลปาสคาลกับน้ำหนักกระทำที่จำลองขึ้นในการคำนวณ..... 68
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำจากเครื่อง FWD ที่มีค่าหน่วยแรงสูงสุด
เท่ากับ 600 กิโลปาสคาล กับน้ำหนักกระทำที่จำลองขึ้นในการคำนวณ..... 69
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำจากเครื่อง FWD ที่มีค่าหน่วยแรงสูงสุด
เท่ากับ 800 กิโลปาสคาล กับน้ำหนักกระทำที่จำลองขึ้นในการคำนวณ..... 69
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบน้ำหนักกระทำจากเครื่อง FWD ที่มีค่าหน่วยแรงสูงสุด
เท่ากับ 1000 กิโลปาสคาล กับน้ำหนกกระทำที่จำลองขึ้นในการคำนวณ..... 70
รูปที่ 4.14 การทรุดตัวที่ผิวบนของโครงสร้างถนนมาตรฐาน ณ. ตำแหน่งต่างๆ
ที่วัดจากศูนย์กลาง..... 70
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของ
ค่าโมดูลัสในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการวิเคราะห์แบบสถิตและพลวัต..... 71
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของ
ค่าโมดูลัสในชั้นพื้นทางโดยการวิเคราะห์แบบสถิตและพลวัต..... 71
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของ
ค่าโมดูลัสในชั้นดินเดิมโดยการวิเคราะห์แบบสถิตและพลวัต..... 72
รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของ
ค่าความหนาในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการวิเคราะห์แบบสถิตและพลวัต..... 72
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของ
ค่าความหนาในชั้นพื้นทางโดยการวิเคราะห์แบบสถิตและพลวัต..... 73
รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของ
ค่าโมดูลัสในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำโดยการ
วิเคราะห์แบบพลวัต..... 73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่ง 300 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 74
รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่ง 600 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 74
รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่ง 900 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 75
รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่ง 1200 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 75
รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่ง 1500 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 76
รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่ง 1800 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 76
รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 77
รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่ง 300 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 77
รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่ง 600 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่ง 900 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 78
รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่ง 1200 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 79
รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่ง 1500 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 79
รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่ง 1800 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 80
รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นดินเดิมที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 80
รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นดินเดิมที่ตำแหน่ง 300 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 81
รูปที่ 4.36 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นดินเดิมที่ตำแหน่ง 600 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 81
รูปที่ 4.37 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นดินเดิมที่ตำแหน่ง 900 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 82
รูปที่ 4.38 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นดินเดิมที่ตำแหน่ง 1200 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.39 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นดินเดิมที่ตำแหน่ง 1500 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 83
รูปที่ 4.40 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าโมดูลัสในชั้นดินเดิมที่ตำแหน่ง 1800 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 83
รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 84
รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้น แอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่ง 300 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 84
รูปที่ 4.43 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่ง 600 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 85
รูปที่ 4.44 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่ง 900 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 85
รูปที่ 4.45 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่ง 1200 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 86
รูปที่ 4.46 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่ง 1500 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 86
รูปที่ 4.47 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ตำแหน่ง 1800 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 87
รูปที่ 4.49 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่ง 300 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 88
รูปที่ 4.50 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่ง 600 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 88
รูปที่ 4.51 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่ง 900 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 89
รูปที่ 4.52 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่ง 1200 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 89
รูปที่ 4.53 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่ง 1500 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 90
รูปที่ 4.54 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาในชั้นพื้นทางที่ตำแหน่ง 1800 มม. จากน้ำหนักกระทำโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต..... 90
รูปที่ 4.55 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการทรุดตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ระยะต่างๆ..... 91
รูปที่ 4.56 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการทรุดตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของชั้นพื้นทางที่ระยะต่างๆ..... 91
รูปที่ 4.57 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการทรุดตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของชั้นดินเดิมที่ระยะต่างๆ..... 92

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.58 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการทรุดตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ระยะต่างๆ..... 92

รูปที่ 4.59 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการทรุดตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของพื้นทางที่ระยะต่างๆ..... 93

รูปที่ 4.60 การทรุดตัวที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำ..... 93

รูปที่ 4.61 ค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่ง 300 มม.จากน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำ..... 94

รูปที่ 4.62 ค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่ง 600 มม.จากน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำ..... 94

รูปที่ 4.63 ค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่ง 900 มม.จากน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำ..... 95

รูปที่ 4.64 ค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่ง 1200 มม.จากน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำ..... 95

รูปที่ 4.65 ค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่ง 1500 มม.จากน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำ..... 96

รูปที่ 4.66 ค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่ง 1800 มม.จากน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำ..... 96

รูปที่ 4.67 การทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำเปรียบเทียบกับการทรุดตัวแบบสถิต..... 97

รูปที่ 4.68 การทรุดตัวที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำกรณีค่าโมดูลัสของชั้นดินเดิมเท่ากับ 25 Mpa..... 97

รูปที่ 4.69 การทรุดตัวที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำกรณีค่าโมดูลัสของชั้นดินเดิมเท่ากับ 50 Mpa. 98

รูปที่ 4.70 การทรุดตัวที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำกรณีค่าโมดูลัสของชั้นดินเดิมเท่ากับ 75 Mpa..... 98

รูปที่ 4.71 การทรุดตัวที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำกรณีค่าโมดูลัสของชั้นดินเดิมเท่ากับ 100 Mpa..... 99

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.72 การทรุดตัวที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำกรณีค่าโมดูลัสของชั้นดินเดิมเท่ากับ 200 Mpa..... 99

รูปที่ 4.73 การทรุดตัวที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำเมื่อเปลี่ยนช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำกรณีเปลี่ยนค่าโมดูลัสของชั้นดินเดิม..... 100

รูปที่ 4.74 เปรียบเทียบการทรุดตัวของโครงสร้างถนนมาตรฐานกับการทรุดตัวที่ได้จากผลการคำนวณย้อนกลับเมื่อกำหนดความหนาของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตและชั้นพื้นทางเป็น 18 และ 24 เซนติเมตร..... 100

รูปที่ 4.75 เปรียบเทียบการทรุดตัวของโครงสร้างถนนมาตรฐานกับการทรุดตัวที่ได้จากผลการคำนวณย้อนกลับเมื่อกำหนดความหนาของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตและชั้นพื้นทางเป็น 12 และ 36 เซนติเมตร..... 101

รูปที่ 4.76 เปรียบเทียบการทรุดตัวของโครงสร้างถนนมาตรฐานกับการทรุดตัวที่ได้จากผลการคำนวณย้อนกลับจากข้อมูลชุดที่ 7..... 102

รูปที่ 4.77 ลักษณะของโครงสร้างถนนกรณีที่มีชั้นหินแข็งและน้ำหนักกระทำที่ใช้ในการคำนวณ..... 103

รูปที่ 4.78 การทรุดตัวของโครงสร้างถนนมาตรฐานที่มีชั้นหินแข็งเมื่อเปลี่ยนแปลงความลึกของชั้นหินแข็ง..... 103

รูปที่ 4.79 อัตราส่วนการทรุดตัวของโครงสร้างถนนเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของชั้นดินเดิม..... 105

รูปที่ 4.80 ข้อมูลของน้ำหนักกระทำและการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบในสนามด้วยเครื่อง FWD..... 107

รูปที่ 4.81 ลักษณะของโครงสร้างถนนที่ถูกกำหนดขึ้นในการคำนวณย้อนกลับ..... 108

รูปที่ 4.82 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่บันทึกจากเครื่อง FWD และจากผลการคำนวณย้อนกลับ กรณีที่กำหนดให้ถนนมี 3 ชั้น..... 109

รูปที่ 4.83 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่บนทึกจากเครื่อง FWD และจากผลการคำนวณย้อนกลับ กรณีที่กำหนดให้ถนนมี 4 ชั้น..... 112