การพัฒนาโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นถนนในโดเมนของความถี่

สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายพัฒน์รพี เชื้อเล็ก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-2108-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF BACKCALCULATION PROGRAM FOR ELASTIC MODULI OF LAYERED PAVEMENT IN FREQUENCY DOMAIN

Mr. Patrapee Chuerlek

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2005
ISBN 974-14-2108-7

481844

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นถนนในโดเมนของความถี่
โดย	นาย พัฒน์รพี เชื้อเล็ก
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย)

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิทธากร)

พัฒน์รพี เชื้อเล็ก : การพัฒนาโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นถนนในโดเมนของความถี่. (DEVELOPMENT OF BACKCALCULATION PROGRAM FOR ELASTIC MODULI OF LAYERED PAVEMENT IN FREQUENCY DOMAIN) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย, 123 หน้า. ISBN 974-14-2108-7.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการวิเคราะห์ในลักษณะพลวัต เพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุในแต่ชั้นของโครงสร้างถนนจากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยเครื่องทดสอบชนิด Falling Weight Deflectometer (FWD) โดยการจำลองโครงสร้างชั้นถนนให้เป็นวัสดุยืดหยุ่นหลายชั้น มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง วิธีวิเคราะห์ทำโดยการสร้างสติฟเนสเมตริกซ์ ของแต่ละชั้นให้อยู่ในโดเมนของความถี่และฮันเกล จากนั้นจึงทำการรวมสติฟเนสเมตริกซ์ โดยพิจารณาเงื่อนไขของความต่อเนื่องของแต่ละชั้น แล้วจึงคำนวณหาค่าการทรุดตัวในโดเมนของเวลา โดยใช้การแปลงฮันเกลและวิธีการหาส่วนผกผันของการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์ จากนั้นนำค่าการทรุดตัวที่ได้มาคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้โดยการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยใช้หลักการ nonlinear least square ด้วยวิธี Modified Levenberg-Marquardt Algorithm เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์ในโดเมนของความถี่และในโดเมนของลาปลาซ ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองนี้สามารถจำลองน้ำหนักกระทำและพฤติกรรมของโครงสร้างถนนได้ดีกว่าการวิเคราะห์ในโดเมนของลาปลาซ ตัวอย่างการคำนวณย้อนกลับหาคุณสมบัติของโครงสร้างชั้นถนนได้ถูกแสดงไว้สำหรับชั้นถนนบนชั้นดินยืดหยุ่นและชั้นหินแข็ง

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....

ปีการศึกษา 2548

4570442821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER / LAYERED PAVEMENT / BACKCALCULATION / FAST FOURIER TRANSFORM / STIFFNESS MATRIX

PATRAPEE CHUERLEK : DEVELOPMENT OF BACKCALCULATION PROGRAM FOR ELASTIC MODULI OF LAYERED PAVEMENT IN FREQUENCY DOMAIN. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. TEERAPONG SENJUNTICHAI, Ph.D. 123 pp. ISBN 974-14-2108-7.

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. The analytical solutions for classical elastodynamics are used to derive the stiffness matrices of a typical layer in Frequency-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 displacements by employing a numerical Hankel inversion scheme together with Fast Fourier Tranform (FFT). 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 Laplace domain displacement. It is found that modulus of applied loading and behavior of layered pavement is improved by frequency domain analysis using FFT when compared to the results from Laplace domain analysis. Selected numerical results for back calculation for elastic moduli of layered pavement on an elastic soil and a rigid bedrock are also presented.

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

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

Academic year ....2005....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือสนับสนุนอย่างดียิ่งจากท่านเหล่านี้ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์มากที่สุด ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ และ อาจารย์ ดร. วัฒนชัย สมิทธากร ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งกรุณาให้คำแนะนะในการทำวิทยานิพนธ์นี้ และ อาจารย์ ดร. สัญชัย มิตรเอม ที่ได้ให้ความกรุณาเข้าร่วมเป็นกรรมการในการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ คุณวิเชียร พัวรุ่งโรจน์ คุณยโสธร ทรัพย์เสถียร และเพื่อนๆ ที่ได้ช่วยเหลือให้คำแนะนำในการทำการศึกษาวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยของกราบขอบพระคุณ มารดา และ พี่สาว ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านรวมทั้งได้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยในการศึกษาตั้งแต่เด็กจนถึงปัจจุบัน และหากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นประโยชน์ทางการศึกษาอยู่บ้าง ผู้วิจัยขออุทิศให้แก่ คุณปู่ คุณย่า คุณตา คุณยาย และบิดาของผู้วิจัยผู้ล่วงลับ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 สมมติฐานและขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 ขั้นตอนในการวิจัย 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 การทดสอบแบบไม่ทำลาย 4

2.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณย้อนกลับ 5

2.3 การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างถนน 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 12

3.3 แบบจำลองของโครงสร้างถนนที่รับแรงกระทำแบบพลวัต 13

3.3.1 รูปคำตอบทั่วไป 14

3.3.2 สมการสติฟเนสเมทริกซ์ 19

หน้า

3.3.3 การหาค่าสติฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้างถนน 22
3.3.4 วิธีการหาส่วนผกผันของฟาสต์ฟูเรียร์ 24
3.3.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด 25
บทที่ 4 การคำนวณและวิเคราะห์ผลด้วยแบบจำลองของโครงสร้างถนน ภายใต้น้ำหนักกระทำจากเครื่อง FWD 35
4.1 วิธีการแก้ปัญหาและการคำนวณเชิงตัวเลข 35
4.1.1 การหาปริพันธ์เชิงตัวเลข 35
4.1.2 การหาส่วนผกผันของของฟาสต์ฟูเรียร์ 36
4.2 การหาค่าการทรุดตัวที่ผิวบนของโครงสร้างถนนโดยใช้แบบจำลองในลักษณะ พลวัต 37
4.2.1 โครงสร้างถนนและน้ำหนักกระทำที่ใช้ในการคำนวณ 37
4.2.2 ผลตอบสนองทางพลวัตของโครงสร้างถนนภายใต้น้ำหนักกระทำ จากเครื่อง FWD 38
4.3 การคำนวณย้อนกลับ 39
4.3.1 การจัดเตรียมข้อมูล 39
4.3.2 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างถนน 2 ชั้น 40
4.3.3 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างถนน 2 ชั้น ในกรณีที่วางตัวอยู่บนชั้นหินแข็ง 41
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 52
5.1 สรุปผลการศึกษา 52
5.2 ข้อเสนอแนะ 53
รายการอ้างอิง 54
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 58

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นถนน (บางส่วน) 8
ตารางที่ 4.1 ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ของฮันเกลในการอินทิเกรต 42
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนนมาตรฐาน 3 ชั้นที่ใช้ในการวิจัย 42
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนน 1 ชั้น ที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับ 42
ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนน 2 ชั้น ที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับ 42
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับกรณีเลือกใช้เวลาในการพิจารณา 3 ค่า 43
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับกรณีเลือกใช้เวลาในการพิจารณา 5 ค่า 43
ตารางที่ 4.7 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับกรณีเลือกใช้เวลาในการพิจารณา 7 ค่า 43
ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 1 ชั้นเมื่อใช้ข้อมูลค่าทรุดตัวในกรณีใช้เวลาในการพิจารณา 3 ค่าในแต่ละ Geophone 44
ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 1 ชั้นเมื่อใช้ข้อมูลค่าทรุดตัวในกรณีใช้เวลาในการพิจารณา 5 ค่าในแต่ละ Geophone 44
ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 1 ชั้นเมื่อใช้ข้อมูลค่าทรุดตัวในกรณีใช้เวลาในการพิจารณา 7 ค่าในแต่ละ Geophone 45
ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 2 ชั้น 45
ตารางที่ 4.12 คุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนน 2 ชั้น ที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับ ในกรณีที่วางตัวอยู่บนชั้นหินแข็ง 46
ตารางที่ 4.13 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 2 ชั้น ในกรณีที่วางตัวอยู่บนชั้นหินแข็ง 46

สารบัญภาพ

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) 28
รูปที่ 3.2 รูปแสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) 29
รูปที่ 3.3 ลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นพลังงานขณะทำการทดสอบด้วยเครื่อง FWD 29
รูปที่ 3.4 ลักษณะทั่วไปของข้อมูลการทรุดตัวที่บันทึกได้จากเครื่อง FWD 30
รูปที่ 3.5 ลักษณะสัญญานค่าการทรุดตัวจากเครื่อง FWD และล้อรถหนักที่สัญจรบนถนน เมื่อพิจารณาเทียบกับเวลา 31
รูปที่ 3.6 รูปแบบปัญหาการคำนวณย้อนกลับ 31
รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงการคำนวณย้อนกลับเพื่อพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของโครงสร้างถนน 32
รูปที่ 3.8 ภาพแสดงแบบจำลองโครงสร้างถนนหลายชั้น 33
รูปที่ 3.9 การรวมสติฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้างถนนที่วางตัวอยู่บนกึ่งปริภูมิ 34
รูปที่ 3.10 การรวมสติฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้างถนนที่วางตัวอยู่บนชั้นหินแข็ง 34
รูปที่ 4.1 การอินทิเกรตโดยใช้ทฤษฎีสี่เหลี่ยมคางหมู 47
รูปที่ 4.2 น้ำหนักกระทำชนิด half sinusoidal load 47
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบช่วงของความถี่ที่ใช้ในการหาส่วนผกผันฟาสต์ฟูเรียร์ 48
รูปที่ 4.4 ลักษณะของโครงสร้างถนนและน้ำหนักกระทำที่ใช้ในการคำนวณ 49
รูปที่ 4.5 การทรุดตัวที่ผิวบนของโครงสร้างถนน ณ. ตำแหน่งต่างๆที่วัดจากศูนย์กลาง เมื่อให้น้ำหนักกระทำ 50
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวระหว่างโครงสร้างที่วางตัวอยู่บนชั้นหินแข็ง และโครงสร้างที่วางตัวอยู่บนชั้นดินยืดหยุ่น 50