

การเปรียบเทียบการออกแบบเสริมผิวทางแบบยึดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ  
BENKELMAN BEAM และ FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER

นาย ธรรมมา เจียรธรวานิช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2546  
ISBN 974-17-5012-9  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARISON OF FLEXIBLE PAVEMENT OVERLAY DESIGN  
FROM BENKELMAN BEAM AND FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER

Mr. Thamma Jairtalawanich

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 2003

ISBN 974-17-5012-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบการออกแบบเสริมผิวทางแบบยึดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ  
BENKELMAN BEAM และ FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER

โดย

นาย ธรรมมา เจียรธรวานิช

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา


อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

นาย แสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(นาย แสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์)

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

ธรรมดา เจียรธรวานิซ : การเปรียบเทียบการออกแบบเสริมผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ได้จาก เครื่องมือ BENKELMAN BEAM และ FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER.

(COMPARISON OF FLEXIBLE PAVEMENT OVERLAY DESIGN FROM BENKELMAN BEAM AND FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER)

อ. ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : นาย แสงชัย เทพสิทธิทรา กรณ์, 131 หน้า. ISBN 974-17-5012-9.

การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิจัยผลการออกแบบเสริมผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer โดยเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของผิวทาง ค่าความหนาเสริมผิวทาง และคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ได้ขณะทำการทดสอบด้วยเครื่องมือทั้งสองนี้

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการแอ่นตัวของผิวทางภายใต้น้ำหนักกระทำของโครงสร้างทางที่ได้เปิดการจราจรแล้วเฉพาะผิวทางชนิดแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเป็นสายทางที่มีความแตกต่างกันในด้าน ส่วนประกอบของโครงสร้างทาง สภาพของผิวทางที่ปรากฏ อายุการใช้งานและสภาพของโครงสร้างชั้นทาง โดย ทำการศึกษาในพื้นที่ภาคกลางทั้งหมด โดยมีการจัดแยกกลุ่ม Test Section ตามปริมาณการจราจร ความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตและอายุการให้บริการ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบวัดค่าการแอ่นตัวของผิว ทางภายใต้น้ำหนักกระทำในการศึกษานี้ ได้ใช้ Benkelman Beam (BB) และ Falling Weight Deflectometer (FWD) Model 8000 ของ DYNATEST ประเทศแคนาดา โดยทำการเก็บข้อมูลค่าการแอ่นตัว ประกอบกับวิธีการ อื่น ๆ เช่น การเก็บข้อมูลทางด้านความหนา ประเภทวัสดุชั้นต่าง ๆ ของโครงสร้างทาง อุณหภูมิ ขนาดของร่อง ล้อ ร้อยละการแตกร้าว และปริมาณการจราจร ซึ่งสามารถนำข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้มาทำการวิเคราะห์โดยเครื่องมือ Benkelman Beam ใช้วิธีมาตรฐานของกรมทางหลวง (DOH Standard) และเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ใช้วิธี Analytical Overlay Design โดยใช้โปรแกรม ELMOD (Evaluation of Layer Moduli and Design) ซึ่งใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back-Calculation) ช่วยในการคำนวณ และนำค่าที่ได้จากการเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์หาค่าทางสถิติและสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวของ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer

ดังนั้นสำหรับผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ใช้ในการศึกษาพบว่าการใช้วิธี Falling Weight Deflectometer ออกแบบเสริมผิวทางจะช่วยให้ได้ค่าการแอ่นตัวและค่าความหนาเสริมผิวทางมีการกระจายตัวและค่าผิดพลาดมาตรฐานน้อยลง ทำให้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางและออกแบบถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ถนนมีคุณภาพดี ลดความเสียหายของโครงสร้างชั้นทาง ช่วยประหยัดงบประมาณในการดูแลซ่อมแซมถนนของประเทศลงได้

ภาควิชา .....วิศวกรรมโยธา.....  
สาขาวิชา .....วิศวกรรมโยธา.....  
ปีการศึกษา ...2546.....

ลายมือชื่อนิสิต..... *จรรยา เจียรธรวานิซ* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *DR* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... *สมชาย* .....

## 4570349121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER / BENKELMAN BEAM / OVERLAY DESIGN / FLEXIBLE PAVEMENT / COMPARISON

THAMMA JAIRTALAWANICH : COMPARISON OF FLEXIBLE PAVEMENT OVERLAY DESIGN FROM BENKELMAN BEAM AND FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER. THESIS ADVISOR : PROF. DIREK LAVANSIRI, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : SANGCHAI TEPSITITRAKORN, 131 pp. ISBN 974-17-5012-9.

This study aims to compare the performances of the overlay of flexible pavement in terms of deflection, thickness and serviceability using pavement data obtained by two different instruments, the Benkelman Beam and Falling Weight Deflectometer as inputs into the design methods.

Flexible type of pavement which has been in service only was chosen for the study. Ten routes of different deflections under structural loading, appearances of surface condition, length of services and the conditions of structural layers in central Thailand were chosen. The test sections were grouped according to the traffic volume, pavement thickness and length of service, Benkelman Beam (BB) and Falling Weight Deflectometer (FWD) Model 8000 of DYNATEST, Denmark were used to measure pavement deflections in conjunction with other methods to measure thickness, ruts depth, temperatures, thickness of different structural layers, traffic volume and percentage of cracks. The data from Benkelman Beam was employed in the design based on the Department of Highways Standard (DOH Standard) and Analytical Overlay Design method employing ELMOD (Evaluation of Layer Moduli and Design) with Back-Calculation was used for the data from Falling Weight Deflectometer. After that, correlation analysis was calculated to show the relationship between pavement deflections obtained by Benkelman Beam and Falling Weight Deflectometer respectively.

It was found that the pavement data obtained by Falling Weight Deflectometer when used as inputs in the design of overlay gave a better spread of deflections and overlay thickness with lower values of standard deviation which led to better quality of design result, better road surface, less damage lower construction and maintenance costs.

Department.....CIVIL..ENGINEERING...

Student's signature..... *J. Th* .....

Field of study....CIVIL..ENGINEERING...

Advisor's signature..... *D. Lavasiri* .....

Academic year ...2003.....

Co-advisor's signature..... *Sangchai Trak* .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงสำเร็จลุล่วงลงด้วยดีไม่ได้หากขาดความช่วยเหลือจากบุคคลต่าง ๆ ต่อไปนี้

ศาสตราจารย์ ดร.ศิริก ลาวณิชย์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยเอาใจใส่ดูแลช่วยเหลือและให้คำปรึกษาตลอดการทำวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลงได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ อนุภักย์ อิศรเสนา ณ อยุธยา ประธานกรรมการ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ นฤปิติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ช่วยดูแลแนะนำและให้คำปรึกษาต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

คุณ แสงชัย เทพสิทธิธารกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำในการทำงาน และช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดสอบและข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลงได้

คุณ ประเสริฐ บุญรักษา ผู้ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการทำงาน และช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดสอบและข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์ในการศึกษาครั้งนี้

ส่วนสำรวจและประเมินสภาพทาง สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง สำหรับความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทดสอบ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ ๆ ทุกคนที่ให้การสนับสนุนด้านการเงิน ให้กำลังใจและเข้าใจตลอดการศึกษานจนกระทั่งผู้วิจัยสำเร็จการศึกษาลงได้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 การศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	6
2.2 Benkelman Beam.....	15
2.3 Falling Weight Deflectometer.....	20
2.4 ประสิทธิภาพในการใช้งานเครื่อง FWD ในประเทศอินโดนีเซีย.....	24
3 วิธีการในการศึกษา.....	27
3.1 การเก็บข้อมูล.....	27
3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ.....	41
3.3 การทดสอบสมมติฐานโดยวิธีการทางสถิติ.....	46

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 การวิเคราะห์ผล.....	54
4.1 การพิจารณาคุณสมบัติของช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบ.....	54
4.2 การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบ.....	59
4.3 การทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทาง.....	61
4.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากการทดสอบ.....	66
4.5 การวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของโครงสร้างทางในชั้นต่าง ๆ.....	72
4.6 การออกแบบค่าความหนาเสริมผิวทาง.....	74
4.7 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากการออกแบบ.....	78
4.8 การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยสำหรับหลายกลุ่มตัวอย่าง.....	80
4.9 การวิเคราะห์เปรียบเทียบ โดยพิจารณาคุณสมบัติของช่วงทดลองที่ใช้ในการทดสอบ.....	82
4.10 การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม (Discriminant Analysis).....	91
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	96
5.1 สรุปผล.....	96
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	101
รายการอ้างอิง.....	102
ภาคผนวก.....	104
ภาคผนวก ก.....	105
ภาคผนวก ข.....	123
ภาคผนวก ค.....	128
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	131



## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ค่าคงที่ในความสัมพันธ์ระหว่าง Strain และจำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำ ของแต่ละสถาบัน.....	15
2.2	ระยะห่างจากขอบถนนในการกำหนดจุดทดลองของกรมทางหลวง.....	20
3.1	รายละเอียดของสายทางที่ทำการทดสอบ.....	28
3.2	รายละเอียดการจัดกลุ่ม Test Section.....	30
3.3	ระยะห่างจากขอบถนนในการกำหนดจุดทดลอง.....	35
3.4	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง.....	50
4.1	รายละเอียดของช่วงทดลอง.....	54
4.2	คุณสมบัติต่าง ๆ ของช่วงทดลองที่ทำการทดสอบ.....	56
4.3	สรุปผลการทดสอบสมมติฐานการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ ของคุณสมบัติต่าง ๆ ในช่วงทดลอง.....	60
4.4	ค่าทางสถิติในเบื้องต้นของค่าการแอ่นตัวของผิวทางทุกจุดทดสอบ.....	62
4.5	ค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากการทดสอบภายในสนามทั้ง 2 วิธี.....	63
4.6	ค่าทางสถิติในเบื้องต้นของค่าการแอ่นตัวของผิวทาง.....	65
4.7	สรุปผลการทดสอบสมมติฐานการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ของค่าการแอ่นตัว.....	68
4.8	สรุปผลการทดสอบสมมติฐานการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ ของค่าการแอ่นตัว.....	71
4.9	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของโครงสร้างทางในชั้นต่าง ๆ ที่ทดสอบ.....	72
4.10	ค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากการออกแบบของทั้ง 2 วิธี.....	75
4.11	ค่าทางสถิติในเบื้องต้นของค่าความหนาเสริมผิวทาง.....	77
4.12	สรุปผลการทดสอบสมมติฐานการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ของ ค่าความหนาเสริมผิวทาง.....	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบและออกแบบสำหรับแต่ละค่า.....	80
4.14 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง ของค่าการแอ่นตัว.....	81
4.15 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง ของค่าความหนาเสริมผิวทาง.....	82
4.16 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการแอ่นตัว.....	92
4.17 สรุปค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในการจำแนกกลุ่มค่าการแอ่นตัว.....	92
4.18 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ ค่าความหนาเสริมผิวทาง.....	94
4.19 สรุปค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในการจำแนกกลุ่มค่าความหนาเสริมผิวทาง.....	94
5.1 เปรียบเทียบการทำงานของเครื่องมือ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer.....	96

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง.....	8
2.2 น้ำหนักกระทำแผ่สม่ำเสมอขนาด $\sigma_0$ เป็นพื้นที่วงกลมรัศมี $a$ บนวัสดุ Semi-Infinite Half Space.....	9
2.3 การแปลงความหนาของวัสดุตามวิธีของ Odemark.....	10
2.4 ความหนาเทียบเท่าของวัสดุในกรณีที่มีหลายชั้น.....	11
2.5 ลักษณะของแรงกระทำและตำแหน่งที่ตรวจสอบ Critical Strain.....	12
2.6 Benkelman Beam.....	16
2.7 วิธีการวัดแบบ WASHO.....	17
2.8 วิธีการวัดแบบ CGRA.....	18
2.9 Falling Weight Deflectometer รุ่น Dynatest 8000.....	21
2.10 ลักษณะการทำงานของเครื่อง FWD.....	22
2.11 แผนผังแสดงการคำนวณย้อนกลับเพื่อพิจารณาหาค่า Elastic Modulus ของโครงสร้างถนน.....	25
3.1 รายละเอียดของสายทางที่ทำการทดสอบ.....	29
3.2 Benkelman Beam.....	31
3.3 เหล็กนำ.....	32
3.4 Benkelman Beam Data Sheet.....	34
3.5 Falling Weight Deflectometer (FWD) Model 8000.....	36
3.6 ลักษณะการแอนตัวของถนนที่ทดสอบด้วยเครื่อง FWD.....	37
3.7 ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าการแอนตัว (Geophone) ที่ใช้ในการทดสอบ.....	38
3.8 Borescope.....	39
3.9 ขั้นตอนการศึกษา.....	53

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.1 แผนภูมิแสดงการจัดกลุ่ม Test Section .....	56
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดร่องลือกับค่าร้อยละการแตกร้าว.....	59
4.3 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากเครื่อง BB และ FWD ....	65
4.4 แผนภูมิแสดงผลต่างค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จาก BB และ FWD .....	67
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวของ BB และ FWD ทุกจุดทดสอบ.....	69
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของ BB และ FWD ทุกช่วงทดลอง .....	69
4.7 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในแต่ละชั้น .....	74
4.8 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จากเครื่อง BB และ FWD ....	76
4.9 แผนภูมิแสดงผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางที่ได้จาก BB และ FWD .....	78
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าการแอ่นตัวโดยพิจารณาจากขนาดร่องลือ.....	83
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางโดยพิจารณาจากขนาดร่องลือ.....	84
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าการแอ่นตัวโดยพิจารณาจากการแตกร้าว .....	85
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางโดยพิจารณาจากการแตกร้าว.....	86
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าการแอ่นตัวโดยพิจารณาจากความหนา AC.....	87
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางโดยพิจารณาจากความหนา AC.....	88
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าการแอ่นตัวโดยพิจารณาจากความหนาทั้งหมด.....	89
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างค่าความหนาเสริมผิวทางโดยพิจารณาจากความหนาทั้งหมด ..	90