

การหาน้ำหนักของรถยนต์เคลื่อนที่จากโมเมนต์ตัดของสะพาน

นาย ธีระชัย ดีสมสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IDENTIFICATION OF MOVING VEHICLE LOADS FROM BRIDGE BENDING MOMENTS

Mr. Teerachai Deesomsuk

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

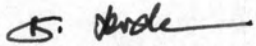
Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511903

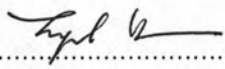
Thesis Title IDENTIFICATION OF MOVING VEHICLE LOADS FROM BRIDGE
BENDING MOMENTS
By Mr. Teerachai Deesomsuk
Field of Study Civil Engineering
Thesis Advisor Associate Professor Tospol Pinkaew, D.Eng.


Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment
of the Requirements for the Doctoral Degree

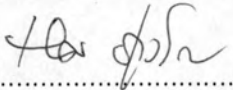

..... Dean of the Faculty of Engineering
(Associate Professor Boonsom Lerdhirunwong, Dr.Eng.)

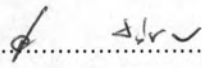
THESIS COMMITTEE


..... Chairman
(Professor Thaksin Thepchatri, Ph.D.)


..... Advisor
(Associate Professor Tospol Pinkaew, D.Eng.)


..... Examiner
(Assistant Professor Chatpan Chintanapakdee, Ph.D.)


..... External examiner
(Associate Professor Nakhorn Poovarodom, Ph.D.)


..... External examiner
(Chaloeiphon Lorattanasane, Ph.D.)

ธีระชัย ดีสมสุข : การหาน้ำหนักของรถขณะเคลื่อนที่จากโมเมนต์ดัดของสะพาน (IDENTIFICATION OF MOVING VEHICLE LOADS FROM BRIDGE BENDING MOMENTS)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 152 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการหาน้ำหนักของรถขณะเคลื่อนที่จากค่าโมเมนต์ดัดของสะพาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะประเมินประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักบรรทุกของวิธีที่ใช้ทั้งสองวิธีคือ (ก) วิธีที่ 1 สมมติฐานแบบน้ำหนักเพลาคงที่ โดยใช้วิธีการออดมิเมชันยกกำลังสองน้อยที่สุดด้วยเส้นอิทธิพล (ข) วิธีที่ 2 สมมติฐานแบบน้ำหนักเพลาลื่นเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้วิธีไดนามิกโปรแกรมมิ่งและเรกูลาร์ไรเซชันร่วมกับเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาดูการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในคอมพิวเตอร์ และทำการทดสอบแบบจำลองย่อยส่วนในห้องปฏิบัติการ และทำการทดสอบภาคสนามโดยใช้รถบรรทุกและสะพานจริง โดยทำการศึกษาดูประสิทธิภาพของวิธีการหาน้ำหนักของรถภายใต้สภาพการเคลื่อนที่ของรถแบบต่างๆ จากนั้นจะพัฒนาระบบการชั่งน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน (B-WIM) ขึ้นจากสะพานที่ใช้ในการทดสอบเพื่อทำการเก็บข้อมูลรถบรรทุกจริงที่วิ่งผ่านเส้นทางนั้น และจะนำข้อมูลที่ได้มาทำการศึกษาร่วมกับแบบจำลองน้ำหนักบรรทุกของสะพานที่ใช้ในมาตรฐานการออกแบบในประเทศไทย ได้แก่ HS20-44 และ Design Thai truck โดยใช้วิธีการทางสถิติและหลักการของวิธีความน่าจะเป็นในการเปรียบเทียบ

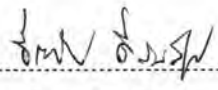
จากผลการทดสอบโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในคอมพิวเตอร์พบว่า ความเร็วของรถ ความขรุขระของผิวถนน และความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการวัดระยะเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความถูกต้องของวิธีการหาน้ำหนักของรถทั้งสองวิธีมากกว่าตัวแปรอื่นๆ และจากผลการทดสอบโดยแบบจำลองย่อยส่วนทั้ง 81 รูปแบบ รวมถึงการทดสอบภาคสนามทั้ง 47 รูปแบบ พบว่าทั้งสองวิธีสามารถหาน้ำหนักรถได้ภายใต้สภาพความเร็วและน้ำหนักรถต่างๆ รวมทั้งสามารถลดผลกระทบจากแนวทางการวิ่งของรถได้ เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองวิธีพบว่าวิธีที่ 2 ให้ผลความถูกต้องที่ดีกว่าวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สามารถหาแรงทางพลศาสตร์ในเพลารองรถขณะเคลื่อนที่บนสะพานได้ด้วย และจากผลการทดสอบในภาคสนามพบว่าวิธีที่ 2 สามารถหาน้ำหนักรถรวมได้ถูกต้องในระดับคลาดเคลื่อนไม่เกิน 6%

สำหรับการประยุกต์ใช้ระบบการชั่งน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน (B-WIM) ได้ข้อมูลรถบรรทุกหนักจำนวน 5,049 คัน จากข้อมูลพบว่าค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุกที่บันทึกมาได้ยังไม่เกินค่าที่กฎหมายกำหนด แต่อย่างไรก็ตามจากข้อมูลที่บันทึกมาได้พบว่ามีรถบรรทุกมากกว่า 16% ที่มีการบรรทุกน้ำหนักเกินที่กีดกฏหมายวิ่งผ่านในเส้นทางที่เก็บข้อมูล ในการศึกษาเปรียบเทียบกับแบบจำลองน้ำหนักบรรทุกของสะพานที่ใช้ในมาตรฐานการออกแบบในประเทศไทย ได้แก่ HS20-44 และ Design Thai truck เปรียบเทียบสำหรับสะพานที่มีช่วงความยาวสั้นถึงปานกลาง (5-30 เมตร) พบว่าแบบจำลองน้ำหนักบรรทุก Design Thai truck สามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้อย่างปลอดภัยด้วยตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุก 2.17 สำหรับอายุการใช้งาน 75 ปี ในขณะที่ HS20-44 ไม่ปลอดภัยตามเกณฑ์การออกแบบ ดังนั้นแบบจำลองน้ำหนักบรรทุก Design Thai truck จะเหมาะสมสำหรับการออกแบบในประเทศไทย และในการวิเคราะห์เพิ่มเติมทางทฤษฎีพบว่าแบบจำลองน้ำหนักบรรทุก Design Thai truck นั้นสามารถลดน้ำหนักลงได้ประมาณ 10% โดยอ้างอิงจากข้อมูลรถบรรทุกที่บันทึกมาได้จริง

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา.....2551.....

ลายมือชื่อนิสิต..... 

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... 

4771843121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: VEHICLE AXLE LOAD/ LOAD IDENTIFICATION/ B-WIM/ BRIDGE LOAD MODEL

TEERACHAI DEESOMSUK: IDENTIFICATION OF MOVING VEHICLE LOADS FROM BRIDGE BENDING MOMENTS. ADVISOR: ASSOC. PROF. TOSPOL PINKAEW, D.Eng., 152 pp.

The axle loads identification of a moving vehicle from bridge bending moments is studied. The objectives are to investigate the effectiveness of two moving load identification methods which are (a) Method I: Constant magnitude of moving axle loads assumption using least-square optimization with influence line and (b) Method II: Time-varying magnitude of moving axle loads assumption using dynamic programming and regularization with updated static component technique (USC).

In this dissertation, both small-scale and full-scale tests of moving vehicle on the bridge are performed besides the numerical study on computer simulation. The effectiveness of two identification methods is intensively evaluated under various passing conditions of vehicles. Moreover, the application of the B-WIM to monitor and record the actual truck information in the road network is conducted. Bridge live load models from design code such as the HS20-44 and design Thai truck are compared with this measured truck database from B-WIM using statistical and probabilistic approach.

From the numerical study results, vehicle speed, surface roughness level and measurement error seem to have stronger effects on the weight estimation accuracy than other parameters. About 81 and 47 conditions of passing vehicles are conducted for small-scale and full-scale investigations, respectively. The obtained results indicate that the two methods can estimate the axle loads of vehicle under various speeds and weights regardless of its traveling paths. Comparing between the two methods, it is found that the identification accuracy obtained from the regularization with USC technique is much better. Moreover, the method also provides the identified dynamic axle loads which are very useful information for dynamic load assessment. Based on the full-scale tested results, the gross weight estimation error within $\pm 6\%$ can be achieved which using USC technique.

For B-WIM application, approximately 5,049 heavy trucks are monitored and recorded. The results show that the mean value of truck weight data does not exceed the legal limit. However, it is found that there are certain amounts (more than 16%) of overloaded trucks traveling in the transportation network. By comparing the design Thai truck and HS20-44 based on the short to medium span bridges (5-30 m), it is observed that the design Thai truck load can conservatively be used with a live load factor of 2.17 for 75 years life time, while HS20-44 is not conservative. It is also found that the design Thai truck load seems to be more suitable than HS20-44 and its weight could be theoretically reduced by 10% for the existing live load factor based on the obtained truck records.

Department :..... CIVIL ENGINEERING

Student's Signature : 

Field of Study :..... CIVIL ENGINEERING

Advisor's Signature : 

Academic Year :..... 2008

ACKNOWLEDGEMENTS

This dissertation cannot be completely achieved without helps and supports from many persons. First, I would like to express thankfulness to my research supervisor, Associate Professor Tospol Pinkaew for very helpful suggestions, his time, financial support, kindness and continuous support throughout this research and study. Sincere appreciation to dissertation committee members, Professor Thaksin Thepchatri, Assistant Professor Chatpan Chintanapakdee and Associate Professor Nakhorn Poovarodom, who gave valuable suggestions for research completeness.

Thanks to Ratchadapiseksompot foundation who offered financial support with 90th year Chulalongkorn University grant in research experiment. Also thanks to graduate school of Chulalongkorn University for partially support for expense in participating research presentation in an international conference at Kyoto, Japan.

Great appreciation goes to Dr. Chalophon Lorattanasane for his kind support in instruments for experiment. Thanks to my colleagues and friends for their help in research work and our friendship.

Finally, special thanks go to my family for their endless support, dedication and love throughout this endeavor.

CONTENTS

	page
Abstract (Thai).....	iv
Abstract (English).....	v
Acknowledgements.....	vi
Contents.....	vii
List of Tables.....	x
List of Figures.....	xi
Chapter I Introduction.....	1
1.1 Background and Research Motivation.....	1
1.2 Objectives.....	3
1.3 Methodology.....	4
1.4 Scope of Research.....	4
1.4.1 Computer Simulation.....	4
1.4.2 Small-Scale Investigation.....	5
1.4.3 Full-Scale Investigation and B-WIM Application.....	5
1.5 Dissertation Organization.....	5
Chapter II Literature Review.....	7
2.1 General.....	7
2.2 Weigh-In-Motion.....	7
2.2.1 Traditional Weigh-In-Motion.....	8
2.2.2 Bridge Weigh-In-Motion (B-WIM).....	9
2.2.3 Accuracy Classification of WIM.....	10
2.3 Vehicle-Bridge Interaction.....	12
2.4 Moving Loads Identification.....	16
2.5 Bridge Live Load Models.....	24
2.6 Summary.....	26
Chapter III Vehicle-Bridge Interaction and Axle Loads Identification.....	28
3.1 General.....	28
3.2 Vehicle-Bridge Interaction System.....	28
3.2.1 Finite Element Method of Structural Formulation.....	29
3.2.2 Vehicle Model.....	29
3.2.3 Bridge Model.....	34

	page
3.2.4 Bridge Surface Roughness.....	39
3.2.5 Vehicle-Bridge Interaction.....	40
3.3 Relationship of Axle Loads and Bridge Bending Moments.....	44
3.4 Axle Loads Identification.....	45
3.4.1 Method I: Constant Magnitude of Moving Axle Loads	
Assumption.....	46
3.4.2 Method II: Time-Varying Magnitude of Moving Axle Loads	
Assumption.....	48
Chapter IV Numerical Investigation Using Computer Simulation.....	55
4.1 General.....	55
4.2 Vehicle-Bridge Interaction Responses Simulation.....	55
4.3 Effects of Various Parameters on Axle Load Identification.....	59
4.3.1 Effects of Bridge Discretization and Sampling Frequency.....	59
4.3.2 Effects of Vehicle Speed and Bridge Surface Roughness.....	61
4.3.3 Effects of Number of Measuring Sections and Noise Level.....	64
4.3.4 Effects of Axle Spacing and Axle Weight Distribution.....	67
4.3.5 Robustness of Methods from the Error of Measurement.....	70
4.3.6 Random Simulation.....	71
4.4 Summary.....	77
Chapter V Experimental Investigation Using Small-Scale Tests.....	79
5.1 General.....	79
5.2 Experimental Setup.....	79
5.3 Strain and Bending Moments of the Bridge.....	85
5.4 Axle Weight Estimations.....	89
5.4.1 Effect of Vehicle Weight and Moving Speed.....	89
5.4.2 Effect of Travelling Paths of Vehicle.....	90
5.4.3 Effectiveness of Estimation Methods.....	90
5.5 Dynamic Axle Loads Identification.....	95
5.5.1 Effect of Vehicle Weight and Moving Speed.....	95
5.5.2 Effect of Travelling Paths of Vehicle.....	96
5.5.3 Effectiveness of the Identification Method.....	96
5.6 Summary.....	96

	page
Chapter VI Field Investigation Using Full-Scale Tests.....	99
6.1 General.....	99
6.2 Description of the Tested Bridge.....	99
6.3 Full-Scale Test Setup.....	101
6.4 Full-Scale Test Configuration.....	105
6.5 Strains and Bending Moments of the Bridge.....	107
6.6 Axle Weight Estimations.....	111
6.6.1 Effect of Vehicle Weight and Moving Speed.....	113
6.6.2 Effect of Travelling Paths of Vehicle.....	114
6.6.3 Effectiveness of Estimation Methods.....	114
6.7 Summary.....	115
Chapter VII Bridge Weigh-In-Motion Application.....	120
7.1 General.....	120
7.2 Bridge Weigh-In-Motion System.....	120
7.3 Bridge Weigh-In-Motion Records.....	125
7.3.1 Thailand Legal Limitations and Design Truck Loads.....	125
7.3.2 Axle Weights.....	126
7.3.3 Axle Spacing.....	129
7.3.4 Truck Speed and Travelling Paths.....	129
7.4 Truck Load Models.....	131
7.4.1 Cumulative Distribution Function (CDFs).....	132
7.4.2 Maximum Truck Moments and Shears.....	133
7.5 Summary.....	141
Chapter VIII Conclusions and Recommendations.....	142
8.1 Conclusions.....	142
8.1.1 Numerical Investigation Using Computer Simulation.....	142
8.1.2 Experimental and Field Test Study of Axle Loads Identification.....	144
8.1.3 Bridge Weigh-In-Motion Application.....	145
8.2 Recommendations for Further Study.....	146
References.....	147
Vita.....	152

LIST OF TABLES

	page
Table 2.1 Width of the accuracy classes (COST 323).....	10
Table 2.2 Classification and criteria of WIM sites (COST 323).....	11
Table 2.3 ASTM E1318-02, WIM system classification.....	12
Table 2.4 Functional performance requirements for WIM systems, ASTM E1318-02.....	12
Table 4.1 Vehicle-bridge system parameters.....	56
Table 4.2 Percentage errors of the axle weight estimations for different sampling rates and number of beam elements.....	60
Table 4.3 Relative percentage errors of the axle load identification for different sampling rates and number of beam elements.....	61
Table 4.4 Measuring point arrangement.....	67
Table 4.5 The parameters of bridge and vehicle system for random simulation..	73
Table 4.6 Error of vehicle weight from estimation results.....	74
Table 4.7 Correlation coefficients between the estimated vehicle axle weight and the various parameters.....	76
Table 4.8 The vehicle axle weight estimation error from 500 cases random simulations at 95% probability.....	77
Table 5.1 Estimation errors of axle weights using Method I and Method II.....	94
Table 5.2 Statistical values of axle weight estimation errors using Method I and Method II.....	95
Table 5.3 Identification errors of axle loads using the Method II.....	98
Table 6.1 Configuration of truck weight case.....	106
Table 6.2 Calibrated coefficients of the full-scale bridge model.....	107
Table 6.3 Estimation errors of axle weights using Method I and Method II.....	118
Table 6.4 Statistical values of axle weight estimation errors using Method I and Method II.....	119
Table 6.5 Comparison on CPU processing times from full-scale tests.....	119
Table 7.1 Example of B-WIM databases.....	124
Table 7.2 Criteria for truck parameters.....	125
Table 7.3 Behavior of moving truck on the various travelling paths.....	131
Table 7.4 Number of trucks, as time period and inverse normal z for various ADTT.....	134

LIST OF FIGURES

		page
Figure 1.1	Diagram of research methodology	6
Figure 2.1	Bridge WIM system	10
Figure 2.2	Schematic block diagram of dynamic bridge-vehicle interaction (Green and Cebon, 1997)	14
Figure 3.1	Vehicle-bridge system	29
Figure 3.2	Free body diagram of vehicle-bridge system	31
Figure 3.3	A finite beam element with 4 degrees of freedom	34
Figure 3.4	Nodal loads from external load	38
Figure 3.5	Measuring point of strain in beam element	44
Figure 3.6	Simplified vehicle-bridge model used for weight estimation with constant magnitude of moving loads assumption	47
Figure 3.7	Computational diagram of load identification through regularization with update static component (USC) technique	54
Figure 4.1	Typical bending moment histories of the bridge under a passage of the vehicle with a speed of 15m/s and roughness surface of level 3 ...	57
Figure 4.2	Actual axle loads and corresponding axle weight estimations (a) using Method I (b) using Method II	58
Figure 4.3	Estimation errors of the axle weights under various roughness levels and vehicle speeds for (a) front axle weight (b) rear axle weight and (c) gross weight	63
Figure 4.4	Identification errors of the axle loads of Method II under various roughness levels and vehicle speeds for (a) front axle load (b) rear axle load	64
Figure 4.5	Estimation errors of the axle weights under various number of measuring points and noise levels for (a) front axle weight (b) rear axle weight and (c) gross weight	66
Figure 4.6	Identification errors of the axle loads of Method II under various measuring points and noise levels for (a) front axle load (b) rear axle load	67

	page
Figure 4.7 Estimation errors of the axle weights under various axle spacings and axle weight distributions for (a) front axle weight (b) rear axle weight and (c) gross weight.....	69
Figure 4.8 Identification errors of the axle loads of Method II under various axle spacings and axle weight distributions for (a) front axle load (b) rear axle load.....	70
Figure 4.9 Estimation errors of the axle weights under different errors of position and errors of axle spacing for (a) front axle weight (b) rear axle weight and (c) gross weight.....	72
Figure 4.10 Identification errors of the axle loads of Method II under different errors of position and errors of axle spacing for (a) front axle load (b) rear axle load.....	73
Figure 4.11 The relationships between the actual and the estimated weights of the front axle, rear axle and gross weight of the vehicle from the two methods.....	75
Figure 5.1 Set-up for experimental test.....	81
Figure 5.2 Photographs of instruments used in experimental test: (a) 48-channel data logger, (b) completion bridge box, (c) optical sensor, (d) black/white stripes.....	84
Figure 5.3 Typical measured signal of the optical sensor reading used for vehicle's position measurement.....	84
Figure 5.4 Typical measured strains at section $L/2$ under various travelling paths of a vehicle: (a) left lane and (b) middle lane and (c) right lane.....	86
Figure 5.5 Typical measured strain distributions across section $L/2$ under various travelling paths of vehicle.....	87
Figure 5.6 Typical measured bending moments (Z) of bridge under various travelling paths of vehicle at sections: (a) $L/3$ (b) $L/2$ and (c) $2L/3$	88
Figure 5.7 Identification results of axle loads of vehicle for, (a) front axle, (b) rear axle.....	91
Figure 5.8 Estimation errors of axle weights under various vehicle weights and vehicle speeds using (a) Method I and (b) Method II.....	92

	page
Figure 5.9 Estimation errors of axle weights under various vehicle weights and vehicle travelling paths using (a) Method I and (b) Method II.....	93
Figure 5.10 Identification errors of axle loads under various vehicle weights and vehicle moving speeds using Method II.....	97
Figure 5.11 Identification errors of axle loads under various vehicle weights and vehicle travelling paths using Method II.....	98
Figure 6.1 Photographs of tested bridge in the west outer-ring roads at KM28+170.31 crossing Bang-Noi canal.....	100
Figure 6.2 Configuration of tested bridge.....	100
Figure 6.3 Construction of control room under the bridge.....	101
Figure 6.4 Photographs of the instrument system in control room.....	102
Figure 6.5 Strain gauges, Axle detector and CCTV camera locations.....	102
Figure 6.6 Photographs of instruments used in full-scale test: (a) strain gauge, (b) completion bridge box, (c) 48-channel data logger, (d) computer, (e) axle detector and (f) CCTV camera.....	103
Figure 6.7 Diagram chart of the data acquisition system.....	104
Figure 6.8 Configuration of 10-wheel tested trucks.....	105
Figure 6.9 Typical measured strains at section $L/2$ under various travelling paths of a truck: (a) left lane and (b) middle lane.....	108
Figure 6.10 Typical measured strain distributions across section $L/2$ under a passage of truck on left and middle lanes.....	109
Figure 6.11 Typical measured bending moments (Z) of bridge under a passage of truck on left and middle lanes at sections: (a) $L/3$ (b) $L/2$ and (c) $2L/3$	110
Figure 6.12 Identification results of the axle loads of truck for (a) front axle load and (b) rear axle load.....	112
Figure 6.13 Plot of estimation error of axle weight from various order of regularization parameter.....	113
Figure 6.14 Estimation errors of axle weights under various vehicle weights and vehicle speeds using (a) Method I and (b) Method II.....	116
Figure 6.15 Estimation errors of axle weights under various vehicle weights and vehicle travelling paths using (a) Method I and (b) Method II.....	117
Figure 7.1 Typical measured bending moments and axle detector signals.....	122

	page
Figure 7.2 Typical axle loads identification from B-WIM system.....	123
Figure 7.3 Photographs of truck which are recorded from CCTV camera.....	124
Figure 7.4 Sketches of truck load models.....	127
Figure 7.5 Histogram of axle weights (a) front axle (b) middle and rear axle (c) gross weight.....	128
Figure 7.6 Histogram of axle spacing (S1) from B-WIM database.....	129
Figure 7.7 Histogram of measured truck speed from B-WIM database.....	130
Figure 7.8 Relationship between truck gross weights and measured truck speeds.....	130
Figure 7.9 Cumulative distribution function for (a) moment and (b) shear due to surveyed trucks with respect to design Thai truck.....	134
Figure 7.10 Cumulative distribution function for (a) moment and (b) shear due to surveyed trucks with respect to HS20-44.....	135
Figure 7.11 Mean maximum (a) moments and (b) shears to design Thai truck load model versus span lengths.....	137
Figure 7.12 Mean maximum (a) moments and (b) shears to HS20-44 load model versus span lengths.....	138
Figure 7.13 Comparison of design Thai truck and HS20-44 for (a) moments and (b) shears versus span lengths.....	139
Figure 7.14 CDFs of ratio of mean maximum shears with the design Thai truck load model.....	140
Figure 7.15 Proposed truck load model.....	140