

พฤติกรรมแผ่นพื้นต่อเนื่องของคานสะพาน



นาย ทยากร จารุชัยมนตรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BEHAVIOR OF LINK SLAB FOR HIGHWAY GIRDERS

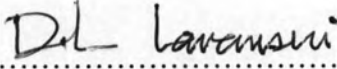
Mr. Tayagorn Charuchaimontri

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 2006

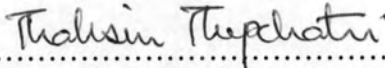
491883


Thesis Title Behavior of Link Slab for Highway Girders
By Mr. Tayagorn Charuchaimontri
Field of Study Civil Engineering
Thesis Advisor Professor Ekasit Limsuwan, Ph.D.

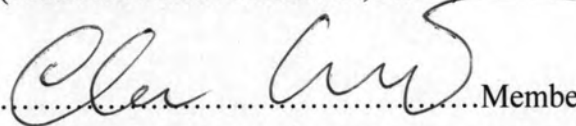
Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in
Partial Fulfillment of the Requirements for the Doctor's Degree


.....Dean of the Faculty of Engineering
(Professor Direk Lavansiri, Ph.D.)

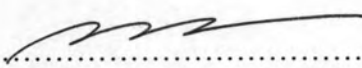
THESIS COMMITTEE

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

.....Thesis Advisor
(Professor Ekasit Limsuwan, Ph.D.)

.....Member
(Associate Professor Chesada Kasemset, D.Eng.)

.....Member
(Associate Professor Phoonsak Pheinsusom, D.Eng.)

.....Member
(Assistant Professor Chadchart Sittipunt, Ph.D.)

ทยากร จารุชัยมนตรี : พฤติกรรมแผ่นพื้นต่อเนื่องของคานสะพาน. (BEHAVIOR OF LINK SLAB FOR HIGHWAY GIRDERS) อ. ที่ปรึกษา ศ.ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ, จำนวน 141 หน้า.

แผ่นพื้นต่อเนื่องของคานสะพานสำเร็จรูปที่ไร้รอยต่อจะเอื้ออำนวยในการขบขันได้สบาย การเคลื่อนตัวของปลายคานสะพานจะมีส่วนต่อการยึดรั้งของแผ่นพื้นต่อเนื่อง จึงต้องพิจารณาน้ำตคานสะพานแบบต่างๆ ได้แก่ รูปตัวไอ รูปตัวที รูปตัวยู และแบบกล่อง โดยพิจารณาความยาวช่วงและขั้นตอนการก่อสร้างที่จะมีผลต่อการเคลื่อนตัวดังกล่าว พฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ของการยึดรั้งที่ปลายในแนวแกน จากการหมุน และจากการขบขันตัวร่วมกับน้ำหนักบรรทุกบนแผ่นพื้น การศึกษาด้วยการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์เอเลเมนต์ของแบบจำลองอนุระนาบ (Microplane, MASA) เพื่อหารูปแบบการแตกร้าว ความกว้างรอยแตกร้าว รูปแบบการวิบัติ รวมทั้งพฤติกรรมการตอบสนองทางโครงสร้างโดยพิจารณารูปแบบการยึดรั้ง รายละเอียดการเสริมเหล็ก และอัตราส่วนความหนาต่อความยาวของแผ่นพื้น การทดสอบโครงสร้างจริงของตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่าง ใช้น้ำหนักบรรทุกที่กกลางแผ่นพื้น ที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กแบบบานพับ(hinge) แบบกึ่งต่อเนื่อง(semi-continuity) และแบบต่อเนื่อง(fully-continuity) เพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบกับทฤษฎี นอกจากนี้การตรวจวัดตัวแปรหลักจากโครงสร้างจริงเพื่อยืนยันผลการศึกษาในพฤติกรรมหลักอีกด้วย

ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของปลายคานสะพาน แสดงให้เห็นว่าชนิดของน้ำตคานสะพานและขั้นตอนการก่อสร้างมีผลน้อยมากต่อการเคลื่อนตัว แต่ความยาวช่วงจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเปลี่ยนรูปร่างตามแนวแกนและการหมุนตัว ส่วนการขบขันตัวจะขึ้นอยู่กับความแข็งของจตุรรองรับในแนวตั้ง ผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวในระยะยาวจากการหดตัว การคืบตัวของคอนกรีต และความล้าของเหล็กเสริม จะมีอิทธิพลสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 พฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ของการยึดรั้งในแนวแกนและการหมุนตัวจะมีผลโดยตรงจากสภาพของบารองรับ ทั้งนี้อิทธิพลจากระดับจตุรรองรับ (x/H) ของบ่าแบบเลื่อนได้ (R-R) และระยะของจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (Cb/H) ของบ่าแบบยึด (H-H) จะมีอิทธิพลน้อยต่อพฤติกรรมภายใน ในกรณีของการใช้บารองรับแบบแผ่นรองรับแบบยึดหยุ่น การเปลี่ยนรูปร่างแนวแกนจะคุมพฤติกรรมทั้งหมดจากความยาวคานสะพานและจำนวนช่วงคาน ในขณะที่การหมุนจะมีอิทธิพลน้อยจากความแข็งสัมพัทธ์ของคานสะพานเทียบกับของแผ่นพื้น โดยเฉพาะที่มีค่าเกิน 10 และตำแหน่งของแผ่นพื้นต่อเนื่อง การขบขันตัวส่งผลให้เกิดแรงเฉือนและแรงคดซึ่งจะควบคุมพฤติกรรมด้วยความแข็งในแนวตั้งของแผ่นรองรับ ความหนาแผ่นพื้น และความยาวของแผ่นพื้น

การออกแบบแผ่นพื้นต่อเนื่องจะต้องรู้ความยาวช่วงสะพานและจำนวนช่วงสะพาน เพื่อนำไปสู่การหาแรงและการเสียรูปจากพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ในกรณีสูงสุด แล้วการออกแบบด้านกำลังจะพิจารณาจากแรงคดแรงคดและแรงเฉือน ในขณะที่การออกแบบเพื่อการให้บริการจะยึดความแข็งของแผ่นรองรับ การกระจายรอยแตกร้าวและการทำรายละเอียดเสริมเหล็กเป็นหลัก มีตัวอย่างการออกแบบของโครงสร้างจริงที่แสดงถึงหลักการและขั้นตอนตามสภาพการณ์ประกอบวิชาชีพด้วย

ภาควิชา _____ วิศวกรรมโยธา _____ ลายมือชื่อนิสิต _____
 สาขาวิชา _____ วิศวกรรมโยธา _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
 ปีการศึกษา _____ 2549 _____

4271802021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: LINK SLAB / HIGHWAY GIRDER / END MOVEMENT /
REINFORCEMENT DETAILING / INTERACTION.

TAYAGORN CHARUCHAIMONTRI : BEHAVIOR OF LINK SLAB FOR
HIGHWAY GIRDERS. THESIS ADVISOR : EKASIT LIMSUWAN, Ph.D., 141 pp.

A Link slab of continuous bridge deck over its adjacent span of simply supported precast girders is desirable for smooth riding due to jointless construction. Since end movements of the girders have become restraints of the slab associated with some other actions, the movements of typical highway girders of I, T, U and Box sections with different span length and their construction sequences have been investigated. The interaction behavior of end restraints; axial, rotational and translational with mid-span loading, will be determined in the study. The finite element method of the microplane model (MASA) will be a tool for the structural analyses of crack patterns, crack width, modes of failure and structural responses of each action with different details and thickness-to-span ratios. Full-scale experimental investigation of 3 specimens of different reinforcing details of hinge, semi-continuity and full continuity with mid-span loading has been conducted to verify the results of the analyses. Monitoring of actual behaviors of real structures has also been done for comparison of some essential behaviors.

End movements of typical girders have shown to be less significant on the cross-section and its construction sequences. Span length has played a major role on axial deformation and the rotation, as the translation is influenced by vertical stiffness of the support. Long-term effects due to creep, shrinkage and relaxation have shown indication of the extreme cases of 20% increase. The interaction behaviors for axial deformation and end rotation due to end movements of the girders have shown some influences of support conditions. However, the effects of the support level (x/H) in roller support (R-R) and centroid of girders (C_b/H) in hinged support (H-H) is less significant. For elastomeric bearing support, axial deformation is controlled by the number of spans and girder span length and show that rotation is less influenced by the relative stiffness of girders and link slabs of more than 10 and the location of the link slab in the structural system. Translation is subjected to shear and moment to be controlled by vertical stiffness, the slab thickness and its length.

To design a link slab, span length and the number of girder spans are required for interaction of restraints to determine forces and displacement of the extreme cases. Then design for strengths can be carried out by means of tension, flexure, and shear while design for serviceability would be governed by stiffness of elastomeric bearing and crack distribution as per reinforcing details. Design example has illustrated the concept and procedure of the real practice.

Department CIVIL ENGINEERING Student's signature Tayagorn Charuchaimontri
Field of study CIVIL ENGINEERING Advisor's signature Ekasit Limsuwan
Academic year 2006

ACKNOWLEDGEMENTS

No written words can express the continuous support, enduring patience and tremendous sacrifice of his kind parents and family. The author would like to dedicate this dissertation to all of them.

To Prof. Dr. Ekasit Limsuwan, his advisor, the author wishes to express his profound gratitude for the valuable guidance and understanding throughout the study at Chulalongkorn University. The special gratitude for the continuous advice and support from the dissertation committee members, i.e., Prof. Dr. Thaksin Thepchatri, Assoc. Prof. Dr. Phoonsak Pheinsusom, Assist. Prof. Dr. Chadchart Sittiphan, and especially Assoc. Prof. Dr. Chesada Kasemset from Chiang Mai University, is also recognized.

The author extends his deep appreciation to Assoc. Prof. Dr. Teerapong Senjuntichai for discussions and advice. Further, the cordial hospitality and worthwhile counseling of Prof. Werner Sobek during a six-month visit to the Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design, University of Stuttgart, Germany, and all members of this Institute, are admired.

Special thanks to Prof. Dr. Josko Ozbolt and Matthew Moehler at the Institute of Construction Material, University of Stuttgart, for giving advice on the finite element program MASA[®]. Hearty thanks to Seika Nakajima at the Institute of Structural Design, University of Stuttgart, for discussions and assistance.

The author also extends his deep appreciation to all teachers who have shed light on the different angles of his studies. The author is extremely grateful to the laboratory supervisors and staff of the Full-Scale Testing Laboratory for specimens testing and the Expressway and Rapid Transit Authority of Thailand (ETA) for site monitoring.

To his friends, the author would like to thank them for their support and help throughout the study period. Finally, this study has been financially supported by the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program, Thailand Research Fund (TRF) and German Academic Exchange Service (DAAD).

TABLE OF CONTENTS

	Page
ABSTRACT IN THAI	iv
ABSTRACT IN ENGLISH.....	v
ACKNOWLEDGEMENTS	vi
TABLE OF CONTENTS	vii
LIST OF TABLES	ix
LIST OF FIGURES.....	x
LIST OF NOTATIONS.....	xii
CHAPTER 1 INTRODUCTION	
1.1 Background.....	1
1.2 Review of Previous Studies.....	3
1.3 Research Objective	6
1.4 Research Program	7
1.5 Scopes and Limitations.....	8
CHAPTER 2 THEORETICAL APPROACH	
2.1 Moment-Curvature Relationship	16
2.1.1 Strain Compatibility	
2.1.2 Temperature Effect	
2.1.3 Time-Dependent Effect	
2.1.4 End Movements	
2.2 Cracking and Tension Stiffening	24
2.2.1 Crack Width and Crack Spacing	
2.2.2 Short-Term Deflection	
2.3 Finite Element Method	30
2.3.1 MASA Program	
2.3.2 Microplane Material Model for Concrete	
2.3.3 Constitutive Law for Reinforcement	
2.3.4 Localization limiters	

CHAPTER 3 ANALYTICAL MODEL

3.1 Girder End Movement	45
3.2 Finite Element Analysis of Link Slab.....	47
3.2.1 Modeling of Concrete Material and Reinforcing Steel	
3.2.2 Finite Element Solutions	
3.2.3 Effective Moment of Inertia of Link Slabs	
3.3 Interaction Model	53
3.3.1 Axial Deformation – End Rotation Restraint	
3.3.2 End Translation – Mid-span Loading Restraint	
3.3.3 Interaction of Restraints	

CHAPTER 4 EXPERIMENTAL INVESTIGATION

4.1 Full-Scale Testing.....	103
4.1.1 Test Program and Test Set-Up	
4.1.2 Test Results	
4.1.3 Comparison between Finite Element Analysis and Test Results	
4.2 On Site Monitoring.....	109
4.2.1 Instrument Installation	
4.2.2 Monitoring Result	

CHAPTER 5 DESIGN APPROACH

5.1 Design Criteria	124
5.2 Design Approach	125
5.3 Design Example.....	127

CHAPTER 6 CONCLUSION 133

REFERENCES 136

BIOGRAPHY..... 141

LIST OF TABLES

Tables	Page
2.1 Formula for end rotation of uncracked members.....	37
2.2 Multiplier for long-term deformations.....	38
3.1 Sectional properties of typical girders	65
3.2 Description of girder model	66
3.3 Axial deformation contributed from each source	67
3.4 Rotation contributed from each source	68
3.5 Maximum axial deformation cases	69
3.6 Maximum end rotation cases	70
3.7 Study program of link slab using MASA finite element analysis.....	71
3.8 Study program of link slab using interaction model.....	72
4.1 Test program	113
4.2 Properties of test specimens.....	114
4.3 Crack and failure loads	114

LIST OF FIGURES

Figures	Page
1.1 Typical cross-sections of precast highway girders	10
1.2 Some disadvantages of bridge deck with joints	11
1.3 Jointless bridge deck construction	12
1.4 Long span link slab and short span link slab (with debonding part).....	13
1.5 Load and end movement actions on link slab	14
1.6 Research program	15
2.1 Strain distribution in a composite cross-section	39
2.2 Temperature rise which varies non-linearly over the depth.....	39
2.3 Time-dependent strain distribution in a composite cross-section.....	40
2.4 Progressive development of primary cracks in a constant moment region.....	41
2.5 Progressive development of primary cracks in a varying moment region.....	42
2.6 Dependency of the local smeared crack FE analysis on the size of the finite elements	43
2.7 the concept of the microplane model	44
3.1 Time-dependent effects.....	73
3.2 End movements due to long-term effects of precast members	74
3.3 End movements due to long-term effect of composite members.....	75
3.4 End movements of typical girders	76
3.5 The favorable cases of end movements	77
3.6 Constitutive models employed in finite element analysis.....	78
3.7 Model of link slab	79
3.8 Boundary conditions for each action	80
3.9 Three types of reinforcement details.....	81
3.10 Numerical results for axial deformation case	82
3.11 Numerical results for end rotation case.....	84
3.12 Numerical results for end translation case	86
3.13 Numerical results for mid-span loading case.....	88
3.14 Determination of the exponent m (FEM).....	90
3.15 Beam nodal forces and displacement components	91

Figures	Page
3.16 Link slab model.....	91
3.17 Schematic structure and support condition	92
3.18 Relative stiffness of girder and link slab.....	92
3.19 Restraints of link slab per 1 unit elongation	93
3.20 Structural model for longitudinal movement with elastomeric bearing	95
3.21 Center of rotation of girder and link slab subjected to end rotation	95
3.22 Restraints of link slab per 1 unit end rotation	96
3.23 Structural model of translational restraint.....	98
3.24 Degree of translational restraint.....	98
3.25 Vertical stiffness to control moment and shear for translational restraint	99
3.26 Rotational restraint of 6-span jointless girder with R-R support and elastomeric bearing supports.....	99
3.27 End restraints per 1 unit elongation of girder (roller supports).....	100
3.28 End restraints per 1 unit end rotation of girder (roller supports)	100
3.29 Axial restraint due to maximum shortening case.....	101
3.30 Flexural restraint due to maximum downward case	102
4.1 Test set-up.....	115
4.2 Tensile stress in reinforcing steel comparison of FE analysis to experimental	116
4.3 Maximum crack width comparison of FE analysis to experimental.....	117
4.4 Crack pattern and mode of failure.....	118
4.5 Load and mid-span displacement comparison of FE analysis to experimental	119
4.6 Moment-curvature relationship comparison of FE analysis to experimental ..	120
4.7 Schematic of on-site monitoring and instrument setting-up	121
4.8 On-site monitoring and instrument setting-up	122
4.9 On-site monitoring records	123
5.1 Design approach.....	130
5.2 End restraint – moment design chart.....	132

LIST OF NOTATIONS

A	cross-section area
$\bar{A}, \bar{B}, \bar{I}$	area, first moment and moment of inertia of the age-adjusted transformed section, composed of area of concrete plus $\bar{\alpha}$ times area of reinforcement
b_w	width of the beam web or slab
B	first moment of area
Cb	distance from the bottom face to the centroid of girder section
E	modulus of elasticity
\bar{E}_c	age-adjusted elasticity modulus of concrete
e	eccentricity
F	force
f	stress related to strength of concrete or steel
H	composite girder height
I	moment of inertia
I_g	gross moment of inertia for the uncracked section
I_{cr}	moment of inertia for a cracked section
I_e	effective moment of inertia
K	stiffness
L	span length of main span or link slab
M	bending moment, positive moment produces tension at the bottom face
M_a	maximum bending moment ($M_a > M_{cr}$)
M_{cr}	cracking moment of the member
n	$=E_s/E_c$, modular ratio
N	normal force, positive when tensile
P	prestressing force or wheel load
S_0	slip length
S_p	primary crack spacing
S_{pm}	minimum primary crack spacing
S_{px}	maximum primary crack spacing
s_b	center-to-center spacing of reinforcing bars

T	temperature
t	time or age (generally in days)
V	shear force
w_c	unit weight of concrete (kg/m^3)
w_{cr}	crack width
x/H	ratio of support level and composite girder height
y	coordinate defining location of a fibre or a reinforcement layer, y is measured in the downward direction from a specified reference point
α	ratio of elasticity modulus of steel to elasticity modulus of concrete at age t_0
$\bar{\alpha}$	ratio of elasticity modulus of steel to the age-adjusted elasticity modulus of concrete
α_t	coefficient of thermal expansion (degree^{-1})
$\alpha_{A,B}$	$= K_V/[12EI/L^3]_{\text{link slab}}$, relative stiffness (elastomeric bearing vertical stiffness – to – link slab flexural stiffness ratio)
β	ratio between the distance from the extreme tension fiber to the neutral axis, and the distance from the centroid of the main reinforcement to the neutral axis
$\chi(t, t_0)$	aging coefficient of concrete (generally between 0.6 and 0.9)
χ_r	relaxation reduction coefficient for prestressed steel
ε	normal strain, positive for elongation
$\varphi(t, t_0)$	creep coefficient of concrete, ratio of creep to the instantaneous strain due to a stress applied at time t_0 and sustained to time t
θ	end rotation angle
ρ	reinforcement ratio
σ	normal stress, positive when tensile
ψ	curvature (length^{-1}), positive curvature corresponds to positive bending moment
Δ	deflection or deformation

Subscripts

c	concrete
cs	shrinkage
H	horizontal
O	reference point
0	initial or instantaneous
pr	relaxation in prestressed steel
ps	prestressed steel
s	steel
u	ultimate
V	vertical