พฤติกรรมเชิงวัฏจักรของโครงข้อแข็งระนาบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของแกนคอนกรีต-เหล็กเสริมตามยาว-เหล็กเสริมตามขวาง

นาย จารึก ถีระวงษ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546
ISBN 974-17-3742-4
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CYCLIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE PLANE FRAMES CONSIDERING CONCRETE CORE-LONGITUDINAL BAR-TRANSVERSE STEEL INTERACTION

Mr. Jaruek Teerawong

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2003

ISBN 974-17-3742-4

Thesis Title	Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Plane Frames Considering Concrete core-Longitudinal bar-Transverse Steel Interaction
By	Mr. Jaruek Teerawong
Field of Study	Civil Engineering
Thesis Advisor	Professor Panitan Lukkunaprasit, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Assistant Professor Teerapong Senjuntichai, Ph.D.

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

.....Dean of Faculty of Engineering

(Professor Somsak Panyakeow, D.Eng.)

THESIS COMMITTEE

.....Chairman

(Professor Thaksin Thepchatri, Ph.D.)

.....Thesis Advisor

(Professor Panitan Lukkunaprasit, Ph.D.)

.....Thesis Co-advisor

(Assistant Professor Teerapong Senjuntichai, Ph.D.)

.....Member

(Professor Ekasit Limsuwan, Ph.D.)

.....Member

(Assistant Professor Chadchart Sittipunt, Ph.D.)

.....Member

(Assistant Professor Nares Pantaratorn, Ph.D.)

จารึก ถีระวงษ์ : พฤติกรรมเชิงวัฏจักรของโครงข้อแข็งระนาบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของแกนคอนกรีต-เหล็กเสริมตามยาว-เหล็กเสริมตามขวาง. (CYCLIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE PLANE FRAMES CONSIDERING CONCRETE CORE-LONGITUDINAL BAR-TRANSVERSE STEEL INTERACTION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศ. ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธ์, 63 หน้า. ISBN 974-17-3742-4.

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวแกนคอนกรีตกับการเปลี่ยนรูปของเหล็กปลอกรอบนอกมีผลสำคัญต่อการโอบรัดประสิทธิผลของเสาสี่เหลี่ยมคอนกรีตเสริมเหล็ก การศึกษานี้ได้นำเสนอวิธีการหากำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งถูกโอบรัดโดยเหล็กปลอกแบบสี่เหลี่ยมที่มีการจัดเรียงรูปแบบต่างๆ โดยพิจารณาอิทธิพลโดยตรงของเฟลกซิบิลิตีของการดัดของเหล็กปลอกและการแปรเปลี่ยนของความเค้นเนื่องจากการโอบรัดในแนวดิ่งซึ่งไม่ได้ถูกพิจารณาโดยตรงในแบบจำลองอื่นๆส่วนใหญ่ที่มีอยู่ แนวคิดเกี่ยวกับความสอดคล้องของพื้นที่ถูกใช้เพื่อกำหนดความสอดคล้องของการเปลี่ยนรูปโดยรวมของแกนคอนกรีตและเหล็กปลอกรอบนอก แบบจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวในเสาคอนกรีตเสรมเหล็กที่เสนอโดย Dhakal (2000) ถูกนำมาใช้ร่วมกับแบบจำลองการโอบรัดที่เสนอเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับการเปลี่ยนแปลงความโค้งของเสารับแรงกระทำแนวราบแบบวัฏจักร แบบจำลองการโอบรัดที่เสนอได้ถูกผนวกเข้าไปในโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนนต์โดยไม่ได้พิจารณาผลของการโก่งเดาะของเหล็กยืน โปรแกรมที่ปรับปรุงนี้ถูกนำไปใช้ศึกษาพฤติกรรมของเสาและโครงข้อแข็งระนาบคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของแบบจำลองไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบง่ายโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์จากโครงข้อแข็งระนาบที่ถูกจำลองด้วยชิ้นส่วนความเค้นระนาบสองมิติกับผลลัพธ์จากการจำลองแบบง่ายซึ่งมีบางส่วนของโครงสร้างใช้ชิ้นส่วนคานอิลาสติกแทน ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกตรวจสอบกับผลทดสอบของนักวิจัยอื่นๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อนิสิต จารึก ถีระวงษ์
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2546	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4171802921: MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEY WORD: REINFORCED CONCRETE / COLUMNS / PLANE FRAMES / CONFINED CONCRETE / REINFORCEMENT BUCKLING / TIE FLEXIBILITY

JARUEK TEERAWONG : CYCLIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE PLANE FRAMES CONSIDERING CONCRETE CORE-LONGITUDINAL BAR-TRANSVERSE STEEL INTERACTION. THESIS ADVISOR: PROF. PANITAN LUKKUNAPRASIT, Ph. D., 63 pp. ISBN 974-17-3742-4

The interaction between concrete core expansion and deformation of perimeter ties has been known to have a significant effect on the effective confinement of rectangular reinforced concrete (RC) tied columns. This study presents a procedure for determining the confined strength of RC square columns confined by rectilinear ties with various tie configurations considering directly the influence of flexural flexibility of the ties and the variation of confining stress along the vertical direction, which are not directly considered in most existing models. The concept of area compatibility is employed to ensure compatibility of the concrete core and steel hoop in a global sense. The buckling model of the longitudinal reinforcement inside a RC column as proposed by Dhakal (2000) is used together with the proposed confinement model to obtain the envelope moment-curvature relationships of columns under cyclic lateral loadings. The proposed confinement model is incorporated into the finite element program without consideration of rebar buckling and the modified program is used to study the behavior of selected reinforced concrete columns and plane frames. The effectiveness of a simplified finite element modeling is explored by comparing the result of a plane frame fully modeled by 2-D plane stress elements with that of a simplified model with part of the structure represented by an elastic beam element. The results are verified against the experimental results from various researchers.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Civil Engineering. Student's Signature จารึก ธีระวงศ์
Field of study Civil Engineering. Advisor's Signature
Academic year 2003. Co-advisor's Signature

ACKNOWLEDGEMENTS

The author wishes to express his deep appreciation to his advisor, Professor Dr. Panitan Lukkunaprasit, for his kindness, helpful suggestions and careful supervision throughout this study. Sincere thanks are extended to his co-advisor, Assistant Professor Dr. Teerapong Senjuntichai, for his comments on this dissertation. Acknowledgement is also given to the author's thesis committee, Professor Dr. Thaksin Thepchatri, Professor Dr. Ekasit Limsuwan, Assistant Professor Dr. Chadchart Sittipunt and Assistant Professor Dr. Nares Pantaratorn. Special thanks go to Mr.Assawin Warnitkorkul, Mr.Somboon Shaingshin, Mr.Wissawa Chakpaisarn and Mr.Sayan Sirimontri and also to everyone who have been involved directly and indirectly in the preparation of this dissertation. The author is also grateful to the Thailand Research Fund (TRF) and Khon Kaen University for their supports of this dissertation.

Finally, the author would like to express his gratitude and indebtedness to his parents for their support and encouragement.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTENTS

Pages

Abstract (Thai) iv

Abstract (English) v

Acknowledgments vi

Contents vii

List of tables ix

List of figures xii

Chapter 1 Introduction 1

1.1 General 1

1.2 Literature review 2

1.2.1 Confinement model for normal- and high-strength concrete 2

1.2.2 Buckling of longitudinal reinforcement 3

1.3 Objectives and scope of study 5

1.4 Assumptions 5

Chapter 2 Confinement and reinforcement buckling models 7

2.1 Confinement model with consideration of concrete core-transverse steel interaction 7

2.1.1 The concept 7

2.1.2 Relationship between peak and average stresses and strains 8

2.1.3 Deformation of concrete under triaxial stress state 10

2.1.4 Equilibrium condition 11

2.1.5 Modeling of hoop 13

2.1.6 Compatibility of concrete-tie system 14

2.1.7 Procedure for determining stress-strain relation 15

2.2 Reinforcing buckling 15

Chapter 3 Verification of proposed confinement models 25

3.1 Stress-strain relation for confined concrete 25

Chapter 4 Behavior of reinforced concrete columns and plane frames 35

4.1 Introduction 35

4.1.1 Procedure for determining moment-curvature relationship 35

CONTENTS (continued)

4.1.2 Comparison of analytical and experimental envelope moment-curvature relationships 36
4.2 Cyclic behavior of reinforced concrete columns and plane frames 37
4.2.1 Finite element analysis 37
4.2.2 Material models for finite element analysis 38
4.2.3 Load-displacement relationship for reinforced concrete columns 40
4.2.4 Load-displacement relationship for reinforced concrete plane frames 40
Chapter 5 Summary and conclusions 54
5.1 Summary 54
5.2 Conclusions 54

References 56
Appencices 60
Appendix A 61
Appendix B 62
Biography 67

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIST OF FIGURES

Figure	Title	Page
2.1 (a)	Column core under consideration	18
2.1 (b)	Deformation of Portion A	18
2.2 (a)	Interactive confining forces at hoop level acting on concrete	18
2.2 (b)	Interactive confining forces at hoop level acting on perimeter tie	18
2.3	Internal stress distribution in the concrete core at section 1-1	19
2.4	Results from finite element analyses	20
2.5	Equilibrium condition	21
2.6	Tensile strength-crack width relationship	21
2.7	Distribution of interactive line forces and resultant forces on part of perimeter tie at transverse restraints	22
2.8	Equilibrium condition of hoop leg after flexural failure mechanism	22
2.9	Concept of area compatibility	23
2.10	Typical stress-strain relation for reinforcement under compression [Dhakal (2000)]	23
3.1	Variation of normalized hoop strains with volumetric ratios	27
3.2	Typical arrangements of transverse steel	27
3.3	Comparison of $\sigma_{eff,prop}$ with $\sigma_{eff,RS}$	28
3.4	Comparison of predicted confined compressive strength with experimental results	28
3.5	Stress-strain relationship for column CS-24 [Razvi and Saatcioglu (1999)]	29
3.6	Sress-strain relationship for column Unit 3 [Nishiyama et al. (1993)]	29
3.7	Stress-strain relationship for column 2A5-14 [Sheikh and Uzumeri (1980)]	30
3.8	Stress-strain relationship for column 4B6-21 [Sheikh and Uzumeri (1980)]	30

LIST OF FIGURES (continued)

3.9	Stress-strain relationship for column 4D6-24 [Sheikh and Uzumeri (1980)]	31
4.1 (a)	Reinforced concrete column section	42
4.1 (b)	Strain distribution	42
4.2	Comparison of predicted envelope moment-curvature relationship with experimental results for column CFL90/0.37	43
4.3	Comparison of predicted envelope moment-curvature relationship with experimental results for column CF135/0.30	43
4.4	Comparison of predicted envelope moment-curvature relationship with experimental results for column CFL90/0.30	44
4.5	Comparison of predicted envelope moment-curvature relationship with experimental results for column CF135/0.37	44
4.6	Comparison of predicted moment-curvature relationship with enveloped experimental results for column AS-17 [Sheikh and Khoury (1993)]	45
4.7	Comparison of predicted moment-curvature relationship with enveloped experimental results for column AS-18 [Sheikh and Khoury (1993)]	45
4.8	Analytical stress-strain relationships for longitudinal bars under compressive strain	46
4.9	Tension stiffening model [Sittipunt and Wood (1993)]	46
4.10	Schematic representation of crack closing and reopening in FINITE [Sittipunt and Wood (1993)]	47
4.11	Compressive cyclic stress-strain relationship in FINIT [Sittipunt and Wood (1993)]	47
4.12	The cyclic shear model in FINITE [Sittipunt and Wood (1993)]	48
4.13	Finite element model for a reinforced concrete column	49
4.14	Comparison of experimental with analytical load-displacement curves for column CF135/0.30	49
4.15	Dimensions and details for the RC plane frames (Frame I and II) used in the finite element study	50
4.16	Finite element model for Frame type I and type II	50

LIST OF FIGURES (continued)

4.17 Load-displacement relationships for the Frame I and Frame II 51
4.18 Simplified finite element model for Frame type II 51
4.19 Comparison of solutions from full finite element model with simplified model 52

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIST OF TABLES

Table	Title	Page
2.1	Required equivalent stiffness for different buckling modes [Dhakal (2000)]	24
3.1	Strength enhancement in square columns tested by Sun et al. (1996)	32
3.2	Strength enhancement in square columns tested by Razvi and Saatcioglu (1999)	32
3.3	Strength enhancement in square columns tested by Nishiyama et al. (1993)	33
3.4	Strength enhancement in square columns tested by Nagashima et al. (1992)	33
3.5	Strength enhancement in square columns tested by Sheikh and Uzumeri (1980)	34
4.1	Details of columns tested at Chulalongkorn University by Lukkunaprasit and Sittipunt (2003)	53
4.2	Details of columns tested by Sheikh and Khoury (1993)	53
B-1	Details on determination peak confined compressive strength for column CS-24	62
B-2	Details on determination peak confined compressive strength for column Unit 3	63
B-3	Details on determination peak confined compressive strength for column 2A5-14	64
B-4	Details on determination peak confined compressive strength for column 4B6-21	65
B-5	Details on determination peak confined compressive strength for column 4D6-24	66