

BEHAVIOR OF SPIRALLY PRESTRESSED CONCRETE COLUMNS



Mr. Navapol Krishnamra

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

พฤติกรรมของเสาคอนกรีตอัดแรงแบบเกลียว

นาย นวพล กฤษณามระ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

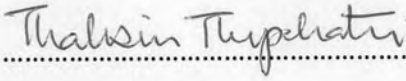
510757


Thesis Title BEHAVIOR OF SPIRALLY PRESTRESSED CONCRETE COLUMNS
By Mr.Navapol Krishnamra
Field of Study Civil Engineering
Advisor Professor Ekasit Limsuwan, Ph.D.

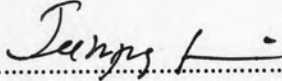
Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial
Fulfillment of the Requirements for the Doctoral Degree

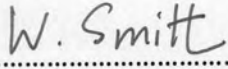
 Dean of the Faculty of Engineering
(Associate Professor Boonsom Lerdkhironwong, Dr.Ing.)

THESIS COMMITTEE

 Chairman
(Professor Thaksin Thepchatrri, Ph.D.)

 Advisor
(Professor Ekasit Limsuwan, Ph.D.)

 Examiner
(Associate Professor Teerapong Senjuntichai, Ph.D.)

 Examiner
(Assistant Professor Watanachai Smittakorn, Ph.D.)

..... External Examiner
(Professor John Lawrence Dawe, Ph.D.)

นาย นวพล กฤษณามระ : พฤติกรรมของเสาคอนกรีตอัดแรงแบบเกลียว. (Behavior of Spirally Prestressed Concrete Columns) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศ.ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ, 125 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงกักขังสมันต์โดยใช้ลวดอัดแรงแบบเกลียว โดยการประยุกต์ใช้วัสดุที่มีใช้อยู่ทั่วไปในงานก่อสร้าง ลวดเหล็กอัดแรงถูกใช้เพื่อสร้างแรงกักขังทางข้างและแรงอัดตามแนวแกน

เนื่องด้วยผลของแรงกักขังสมันต์โดยใช้ลวดอัดแรงแบบเกลียว งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการอธิบายทั้งในส่วนของแรงกระทำร่วมของแรงกักขังทางข้างและแรงอัดตามแนวแกน และยังมุ่งเน้นในการอธิบายแบบจำลองการรับแรงอัดตามแนวแกนของคอนกรีตทรงกระบอกภายใต้การอัดแรงกักขังแบบเกลียว

คอนกรีตทรงกระบอกอัดแรงแบบเกลียว 3 ชั้นตัวอย่าง ถูกทดสอบเพื่อการศึกษากำลังและพฤติกรรมของคอนกรีตทรงกระบอกภายใต้แรงกระทำกึ่งกลางช่วงห่าง ผลการทดสอบถูกเปรียบเทียบกับชั้นตัวอย่างควบคุมที่มีจำนวนลวดอัดแรงเท่ากันเรียงตัวตามแนวยาวของชั้นตัวอย่าง ชั้นทดสอบถูกออกแบบเพื่อศึกษาผลของ (1) การจัดเรียงตัวของลวดอัดแรง และ (2) กำลังของแรงอัด ทำการศึกษาเบื้องต้นเพื่อประมาณกำลังของชั้นทดสอบโดยสมมติแบบจำลองของคอนกรีตภายใต้แรงกักขังและยังใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์กำลังของชั้นทดสอบอีกทางหนึ่ง โดยกำลังที่เพิ่มขึ้นของชั้นทดสอบภายใต้แรงกักขังสมันต์เป็นผลจากความเค้นโดยรอบซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยการใช้การวิเคราะห์แรงกระทำร่วม

การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ถูกใช้เพื่อการศึกษาเชิงตัวแปรของการทดสอบแรงอัดตามแนวแกน ในการศึกษาเชิงตัวแปรนี้มุ่งเน้นในการบ่งชี้แบบจำลองการรับแรงอัดตามแนวแกนของคอนกรีตทรงกระบอกภายใต้การอัดแรงกักขังแบบเกลียว ชุดของตัวแปรถูกกำหนดเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆต่อการรับแรงอัดตามแนวแกนของคอนกรีตทรงกระบอกภายใต้การอัดแรงกักขังแบบเกลียว โดยกำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดตามแรงดันกักขัง ความเครียดที่กำลังสูงสุด และความเครียดสูงสุดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามกำลังที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีต และขอบเขตความปลอดภัยในการใช้งานเพิ่มขึ้นตามแรงดันกักขัง

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา...2551.....

✓

4771816221 : MAJOR Civil Engineering

KEYWORDS : concrete / cylinder / pipe / active confinement / post-tension / spiral

Navapol Krishnamra : BEHAVIOR OF SPIRALLY PRESTRESSED CONCRETE COLUMNS. ADVISOR : Prof.Ekasit Limsuwan, 125 pp.

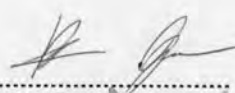
This research was performed to study the behavior of concrete under active confinement by using spiral prestressing system. Applying conventional material that widely used in construction, prestress steel was used to develop laterally confined stress and also longitudinal compressive prestress.

By the effects of active confinement by using spiral prestressing system, this dissertation attempts to determine both combined stress action of laterally confined stress and longitudinal compressive prestress and the mathematical stress-strain model for axially loaded concrete cylinders with spiral prestressing confinement.

Three spirally prestressed concrete pipes were tested to study their strength and behavior under mid-span loading. Results were compared to a control specimen consisting of a similar concrete pipe with the same number of longitudinally aligned post-tensioning strands. The specimens were designed to study the effect of: (1) the orientation of prestressing strands, and; (2) the magnitude of applied prestressing force. A preliminary analysis was prepared to estimate the capacity of specimens by assuming a confined concrete model and applying a finite element method to analyze the strength of specimens. The increasing in capacity of specimens under active confinement was effected by hoop stress and can be determined by combined stress action.

Finite element analysis was used to perform a parametric study for uniaxial compression tests. This parametric study focused on determining the uniaxial compressive model of concrete cylinders under spiral prestress confinement. A series of variables and parameters were set up to determine the relations of those parameters to the uniaxial compressive strength of concrete cylinders under spiral prestressed confinement. Ultimate strength improves significantly to a confining pressure, peak strain and ultimate strain increase with the increasing of strength of concrete, and safety margin or increasing of elastic range increase with the increasing of confining pressure.

Department : Civil Engineering.....

Student's Signature 

Field of Study : Structural Engineering...

Advisor's Signature 

Academic Year : 2008.....

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to express his profound gratitude to his research advisor Professor Ekasit Limsuwan and Professor John L. Dawe. They provided the author with advice, support, and encouragement during the course of this research.

The author is very grateful to DYWIDAG Systems International USA, (DSI-America) and their staff. Without their very generous support by providing invaluable guidance as well as post-tensioning equipment this research would not have been possible. This research was also supported by the National Research Council of Canada and the University of New Brunswick, Canada.

This research was supported by the Thailand research fund.

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 Research Background.....	1
1.2 Revision of Confinement Models	3
1.2.1 Active Confinement (Triaxial tests)	4
1.2.2 Passive Confinement Using Lateral Steel Reinforcement	5
1.2.3 Passive Confinement Using Steel Tubes.....	10
1.2.4 Available Models for FRP Wrapped Columns.....	12
1.3 Research Objective.....	16
1.4 Research Significance	17
1.5 Research Program	17
1.6 Thesis Overview	17
Chapter II Theoretical Approach.....	19
2.1 Prestressing Concept.....	19
2.2 Theory of Plasticity for Confinement	22
2.2.1 The Criterion of Yielding	23

2.2.2 Strain-Hardening Postulates.....	26
	page
2.2.3 The Rule of Plastic Flow.....	29
Chapter III Experimental Approach.....	33
3.1 Test Program	33
3.2 Test Specimens.....	34
3.2.1 Percentage of Prestressing Force	38
3.2.2 Orientation of Prestressing Strands	39
3.2.3 Stressing Method, Loading Method, and Instrumentation.....	39
3.3 Experimental results.....	42
3.3.1 Cracking Strength	47
3.3.2 Stiffness	49
3.3.3 Ultimate Strength	50
3.3.4 Ductility.....	53
3.3.5 Deflections.....	54
3.4 Discussion	54
3.5 Summary	58
Chapter IV Analytical Approach	63
4.1 Finite Difference Analysis	63
4.2 Finite Element Analysis	68
4.2.1 Finite Element Analysis of Confined Concrete	69
4.2.2 Modeling of Triaxial Test	75
4.2.3 Modeling of Test Specimens	80
4.2.4 Modeling of Uniaxial compression Tests.....	84
Chapter V Structural Model	87

5.1 Parametric Study by Finite Element Analysis.....	87
	page
5.2 Proposed Structural Model	98
Chapter VI Discussion and Conclusion	114
6.1 Conclusions.....	115
6.2 Proposed Structural model	118
6.3 Future Research direction	120
References	122
Biography	125

List of Tables

	page
Table 1.1 Proposed model for triaxially stressed concrete	5
Table 1.2 Models for passive confinement by lateral steel reinforcement	6
Table 1.3 Confinement models for FRP wrapped columns	12
Table 3.1 Specimen series.....	34
Table 3.2 Spitting and beam tension tests	38
Table 3.3 Summary of prestress forces	39
Table 3.4 Stressing records	41
Table 3.5 Measurement of friction loss.....	43
Table 3.6 Summary of test results	47
Table 3.7 Summary of cracking load.....	49
Table 3.8 Summary of failure load due to strand cutting through concrete.....	53
Table 4.1 Compare calculated ultimate capacity from FDM to the test results	68
Table 4.2 Compare calculated ultimate capacity to the test results	83
Table 5.1 Series of variables	88
Table 5.2 Series of parameters	89
Table 5.3 Acquired data from finite element analysis results	97

List of Figures

	page
Figure 1.1 Gripping and prestressing devices	2
Figure 1.2 Spirally prestressing system configuration	3
Figure 1.3 Stress-strain curves of confined concrete in various level of confinement	15
Figure 1.4 deformed shape of concrete element subjected to (a) active confinement and (b) passive confinement	16
Figure 1.5 Sawtooth model.....	16
Figure 2.1 Strands alignment	20
Figure 2.2 Prestress force along member length	22
Figure 2.3 Geometrical representation of yield criterion in principal stress space	24
Figure 2.4 Principal stresses on the element of concrete member under confined stresses	25
Figure 2.5 State of stresses corresponding to yield criterion of concrete	26
Figure 2.6 Yield surfaces in the deviatoric plane, with various values of K_c	32
Figure 3.1 Specimen dimensions	34
Figure 3.2 Fabrication – Monostrand [®] Installed in the mold.....	35
Figure 3.3 Fabrication – Installed anchorage devices.....	36
Figure 3.4 Fabrication – Inner core mold inserted	36
Figure 3.5 Tilted up and ready to pour concrete.....	37

Figure 3.6 Pouring and curing	37
Figure 3.7 Cylinder compression test	38
Figure 3.8 Post-tensioning number sequence	40
Figure 3.9 Twin ram jacks	40
Figure 3.10 Loading frame and Instrumentation.....	40
Figure 3.11 Data acquisition (DAQ)	42
Figure 3.12 Specimen failure precipitated by concrete shearing stress in 1 strand ...	44
Figure 3.13 Load vs. deformation curve of prototype specimen	45
Figure 3.14 Prototype specimen after loading	45
Figure 3.15 (a) Load vs. deflection curves, (b) load vs. longitudinal strain curves at bottom of specimen, and (c) longitudinal strain vs. deflection curves.....	46
Figure 3.16 State of stresses of diagonal shear cracking.....	48
Figure 3.17 Hoop stress effect represented by Mohr's circle	48
Figure 3.18 Cracking strength	49
Figure 3.19 Stiffness.....	50
Figure 3.20 Cracking load, ultimate capacity and calculated ultimate capacity	51
Figure 3.21 Schematic of strand cutting through concrete.....	52
Figure 3.22 Superimpose of a) transformed flexural stress at bottom of specimen to b) combined stress on strand direction	52
Figure 3.23 Deflection at ultimate	54
Figure 3.24 Finite element modeling.....	55

Figure 3.25 Load vs. deflection curves.....	56
Figure 3.26 First crack prediction by FEM.....	56
Figure 3.27 Principal stress distribution	57
Figure 3.28 Cracked pattern of Specimen	60
Figure 4.1 Discretization of a domain	64
Figure 4.2 Section parameters.....	65
Figure 4.3 Strain compatibility.....	66
Figure 4.4 $P - M$ diagram of test specimens.....	67
Figure 4.5 $M - \phi$ diagram for design specimens	67
Figure 4.6 Response of concrete to uniaxial loading in a) tension and b) compression	70
Figure 4.7 Yield surfaces in the deviatoric plane, with various values of K_c	74
Figure 4.8 Yield surface in plane stress.....	75
Figure 4.9 Mesh geometry and load pattern.....	76
Figure 4.10 Stress-plastic strain relations of concrete	76
Figure 4.11 Stress-total strain relations of concrete	78
Figure 4.12 Comparison of k_c from plastic model to the previously proposed tri-axial concrete model	79
Figure 4.13 Mesh geometry and loading pattern.....	80
Figure 4.14 6-node linear triangular prism element.....	81
Figure 4.15 Load vs deflection curves from FEM compare to the test results.....	82

Figure 4.16 Loading pattern and mesh geometry	84
Figure 4.17 10-node modified quadratic tetrahedron element.....	86
Figure 5.1 Mathematical model for axially loaded concrete cylinder with spiral prestressing confinement.....	92
Figure 5.2 stress-plastic strain relationship and stress-total strain relationship corresponding to assumed function	92
Figure 5.3 k_c vs f_l relation	99
Figure 5.4 k_c vs f'_c relation	99
Figure 5.5 $\sqrt{f'_c}^{-1} f_l^{-0.107}$ vs k_c relation	100
Figure 5.6 $\sqrt{f'_c}^{-1} f_l^{-0.107}$ vs k_c relation corresponding to s/D ratios.....	101
Figure 5.7 ϵ_{cco} vs f'_{cc}/f'_c relation.....	101
Figure 5.8 ϵ_{cc1} vs f'_{cc}/f'_c relation.....	102
Figure 5.9 ϵ_{ccu} vs f'_{cc} relation.....	103
Figure 5.10 ϵ_{ccu} vs f'_c relation	103
Figure 5.11 Z vs f'_c relation.....	104
Figure 5.12 Stress - total strain relationship corresponding to the effect of tendon diameter, D_s	105
Figure 5.13 Stress – total strain relationship, comparison with the proposed model	106
Figure 6.1 Strands Alignment.....	118
Figure 6.2 Proposed structural model for an axially loaded model of a cylindrical concrete member under spiral prestressed confinement	119