การทำนายการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นายสุรสิทธิ์ เหล่าสายเชื้อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREDICTION OF CRACK PROPAGRATION IN REINFORCED CONCRETE BEAMS BY FINITE ELEMENT METHOD

Mr.Surasit Laosaichue

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511738

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
โดย	นายสุรสิทธิ์ เหล่าสายเชื้อ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิทธากร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิทธากร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤดายุทธ์ ชมภูมิ่ง)

สุรสิทธิ์ เหล่าสายเชื้อ : การทำนายการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(PREDICTION OF CRACK PROPAGRATION IN REINFORCED CONCRETE BEAMS BY FINITE ELEMENT METHOD) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.วัฒนชัย สมิทธากร, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์, 52 หน้า.

งานวิจัยนี้ ศึกษาการทำนายการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยอาศัยหลักการกลศาสตร์การแตกร้าวแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น การจำลองพฤติกรรมของคอนกรีตใช้ชิ้นส่วนความเค้นระนาบ ส่วนพฤติกรรมเหล็กเสริมใช้ชิ้นส่วนโครงถักที่รับแรงเฉพาะในแนวแกน ในการพิจารณาพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าว ในที่นี้จะทำการพัฒนาชิ้นส่วนปลายรอยร้าวขึ้น เพื่อใช้สำหรับคำนวณหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นของแบบเปิดและแบบเฉือน และเพื่อใช้ในการทำนายทิศทางการเติบโตของรอยร้าว

จากการวิเคราะห์กรณีศึกษาต่างๆ พบว่าชิ้นส่วนปลายรอยร้าวที่พัฒนาขึ้น สามารถใช้คำนวณหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น ได้ผลที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นตรง โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 0.5 ส่วนการวิเคราะห์การเติบโตของรอยร้าวในคานคอนกรีตล้วนและคานคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่า ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการเติบโตของรอยร้าว ใกล้เคียงกับผลการทดลองของงานวิจัยในอดีต ทั้งนี้แบบจำลองของงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดคือ คุณสมบัติของวัสดุทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริม จะพิจารณาเฉพาะในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น และลักษณะการเติบโตของรอยร้าวจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของชิ้นส่วนที่ใช้ในแบบจำลอง

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต สุรสิทธิ์ เหล่าสายเชื้อ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2551 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

4870535821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : CRACK / FRP / STRENGTHENING/ CONCRETE / PROPAGRATION

SURASIT LAOSAICHUE : PREDICTION OF CRACK PROPAGRATION IN REINFORCED CONCRETE BEAMS BY FINITE ELEMENT METHOD. ADVISOR : ASSOC. Doctor. Watanachai Smittakorn, CO-ADVISOR : Doctor. Jaroon Rungamornrat, 52 pp.

This research studies the prediction of crack propagation in reinforced concrete beams by finite element method, based on the theory of linear-elastic fracture mechanics. The behavior of concrete material is represented by a plane stress element, whereas steel reinforcement by an axially loaded truss element. In order to predict the crack propagation, a crack tip element is developed. The stress intensity factors can then be evaluated, and the direction of crack propagation can be predicted.

Results from case studies have shown that the developed crack tip element is capable of determining the stress intensity factors. A discrepancy of 0.5 percent was found when comparing to an exact solution. Also, the prediction of crack propagation in plain concrete beams and reinforced concrete beams, by the method in this study, was found to have fairly good agreement with the experimental results from previous studies. It is noted here that the properties of concrete and steel are considered only within the linear-elastic range, and the predicted results of crack propagation are dependent on the size and shape of the elements used in analysis models.

Department : CIVIL ENGINEERING Student's Signature .....

Field of Study : CIVIL ENGINEERING Advisor's Signature .....

Academic Year : 2008 Co-Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

กระผมขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และครูบาอาจารย์ที่อบรมสั่งสอน ให้การอุปถัมภ์จนกระผมได้มีการศึกษาเล่าเรียนและมีหน้าที่การงานจนถึงบัดนี้

วิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้วิชาพื้นฐานภาคทฤษฎีก่อนทำงานวิจัย หากปราศจากการให้คำปรึกษา แนะนำวิธีการศึกษาและแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ โดยอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิทธากร และ ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบรูณ์ ความกรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์โดยศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรีและความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์โดย ดร.กฤดายุทธ์ ชมพูมิ่ง ขอขอบคุณเพื่อนๆนิสิตปริญญาโท และปริญญาเอก รหัสปีการศึกษา 2548 และรุ่นพี่รุ่นน้องสาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างทุกคน ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ ในการศึกษาตลอดจนการทำงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้กระผมหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่กำลังสนใจศึกษาหรือจุดประกายแนวคิดต่อไป

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ญ

บทที่

1. บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา..... 1

1.3 วัตถุประสงค์..... 6

1.4 ขอบเขตการวิจัย..... 6

1.5 การดำเนินงานวิจัย..... 7

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 8

2.1 การวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... 8

2.1.1 ชิ้นส่วนโครงถัก..... 8

2.1.2 ชิ้นส่วนไอโซพาราเมทริกซ์สำหรับชิ้นส่วนสองมิติ..... 9

2.2 กลศาสตร์การแตกร้าว..... 13

2.2.1 ตัวประกอบความเค้น..... 14

2.2.2 กลศาสตร์การแตกร้าวแบบผสม..... 15

2.2.3 เอลิเมนต์เอกฐาน..... 17

2.2.4 วิธีขยายรอยร้าวสมมุติ..... 18

2.2.5 สมการสำหรับปัญหาการร้าวแบบผสมโดยใช้วิธีการแยกตัวประกอบ..... 19

2.4 แบบจำลองพฤติกรรมของเหล็กเสริม..... 22

2.5 การทำนายทิศทางการเติบโตของรอยร้าว..... 23

3. ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม 26

บทที่ หน้า

3.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม 27
4. กรณีศึกษา 32
4.1 กรณีศึกษาที่ 1 32
4.2 กรณีศึกษาที่ 2 34
4.3 กรณีศึกษาที่ 3 37
4.4 กรณีศึกษาที่ 4 39
4.5 กรณีศึกษาที่ 5 40
4.6 กรณีศึกษาที่ 6 43
5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 46
5.1 สรุปผลการวิจัย 46
5.2 ข้อเสนอแนะ 47
รายการอ้างอิง 48
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 52

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนขั้นเสรี ตัวประกอบความเข้มของความเค้นและทิศทางการเติบโตของรอยร้าว..... 36

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ชิ้นส่วนโครงถัก 8
รูปที่ 2.2 ชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมแปดจุดและชิ้นส่วนสามเหลี่ยมหกจุดในพิกัดธรรมชาติ 10
รูปที่ 2.3 รูปแบบการเสียรูปทั้งสามแบบเนื่องจากแรงที่กระทำสำหรับการร้าว 13
รูปที่ 2.4 นิยามของแกนพิกัดเหนือรอยร้าว 14
รูปที่ 2.5 ชิ้นส่วนที่มีจุดที่ระยะหนึ่งส่วนสี่ 18
รูปที่ 2.6 ชิ้นส่วนปลายรอยร้าว 19
รูปที่ 2.7 ชิ้นส่วนปลายรอยร้าว 20
รูปที่ 2.8 ชิ้นส่วนที่มีการแยก 22
รูปที่ 2.9 ลักษณะการประมาณทิศทางการเติบโตของรอยร้าว 24
รูปที่ 2.10 แบบจำลองชิ้นส่วนสำหรับการทำนายรอยร้าว 24
รูปที่ 2.11 แบบจำลองชิ้นส่วนเมื่อเกิดรอยร้าวเกิดขึ้น 24
รูปที่ 2.12 แบบจำลองชิ้นส่วนเมื่อรอยร้าวมีการเติบโต 25
รูปที่ 3.1 ผังลำดับชั้นของคลาสที่สำคัญ 26
รูปที่ 3.2 แผนผังโปรแกรม 29
รูปที่ 3.2 แผนผังโปรแกรม(ต่อ) 30
รูปที่ 3.2 แผนผังโปรแกรม(ต่อ) 31
รูปที่ 4.1 แผ่นระนาบความเค้น 33
รูปที่ 4.2 ชิ้นส่วนระนาบความเค้นแบบแปดจุด 33
รูปที่ 4.3 ชิ้นส่วนระนาบความเค้นแบบหกจุด 33
รูปที่ 4.4 แผ่นระนาบที่มีรอยร้าวเริ่มต้นตรงกลาง 34
รูปที่ 4.5 แบบจำลองปัญหาของแผ่นระนาบที่มีรอยร้าวเริ่มต้นตรงกลาง 35
รูปที่ 4.6 ชิ้นส่วนปัญหาของแผ่นระนาบที่มีรอยร้าวเริ่มต้นตรงกลาง 35
รูปที่ 4.7 รูปแบบการเสียรูปของปัญหาแผ่นระนาบ 35
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนขั้นเสรีกับค่าความคลาดเคลื่อนของ KI 36
รูปที่ 4.9 รูปร่างและลักษณะของคานที่ใช้ทดสอบของ Arrea และ Ingraffea 37
รูปที่ 4.10 รูปร่างและแรงกระทำของคานที่ใช้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 38
รูปที่ 4.11 รูปร่างและลักษณะทิศทางรอยร้าวของคานที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 38

หน้า

รูปที่ 4.12 ลักษณะการเติบโตของรอยร้าวในคานคอนกรีต 38
รูปที่ 4.13 รูปร่างและลักษณะของคานที่ใช้ทดสอบโดย M.V.K.V. Prasad และ C.S. Krishnamoorthy 39
รูปที่ 4.14 รูปร่างและแรงกระทำของคานที่ใช้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 40
รูปที่ 4.15 รูปร่างและลักษณะทิศทางรอยร้าวของคานที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 40
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งกับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ 41
รูปที่ 4.17 รูปร่างและลักษณะของคานที่ใช้ทดสอบโดย Jacinto 42
รูปที่ 4.18 รูปร่างและแรงกระทำของคานที่ใช้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 42
รูปที่ 4.19 รูปร่างและลักษณะทิศทางรอยร้าวของคานที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 42
รูปที่ 4.20 ลักษณะของรอยร้าวจากคานที่ใช้ทดสอบโดย Jacinto R. Carmona, Gonzalo Ruiz and Javier R. del Viso(2007) 42
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งกับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำรูปร่าง... 42
รูปที่ 4.22 รูปร่างและลักษณะของคานที่ใช้ทดสอบโดย Huy Pham และ Riadh Al-Mahaidi 43
รูปที่ 4.23 แบบจำลองปัญหาของคานที่ใช้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 44
รูปที่ 4.24 รูปร่างและแรงกระทำของคานที่ใช้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 44
รูปที่ 4.25 รูปร่างและลักษณะทิศทางรอยร้าวของคานที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 44
รูปที่ 4.26 รูปร่างและและลักษณะทิศทางรอยร้าวของคาน Huy Pham, Riadh Al-Mahaidi(2004) 44
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งกับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ 45