

รูปแบบรอยร้าวและกำลังของคอนกรีตที่เสียหายจากไฟ

Crack Formation and Strength of Fire Damaged Concrete Beam

นางสาวกานต์สินี แก้วเพชร

นางสาวพรพรรณ อริยะสุข

นายอัครา โชคเจริญมหาศาล

อ.ดร.วรพงศ์ ศรีโสพล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. 0-2549-3429, 0-2549-3420 โทรสาร 0-2549-3422

บทคัดย่อ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างอาคารต่างๆ ซึ่งอาคารดังกล่าวมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายของโครงสร้างได้มากมาย และสาเหตุหนึ่งที่มีความสำคัญต่อความเสียหายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือ การเกิดไฟไหม้ ในอดีตจึงมีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมเมื่อถูกไฟเผา แต่การวิเคราะห์ด้วยการทดสอบนั้นมีความยุ่งยากและมีข้อจำกัดมาก ดังนั้น โครงงานนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางวัสดุเพื่อศึกษาพฤติกรรมและรอยแตกร้าวภายในโครงสร้างคอนกรีตที่ถูกไฟเผา ซึ่งอาศัยหลักการของ Rigid Body Spring Model (RBSM) โดยจะทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างคานคอนกรีตล้วนและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่สภาวะอุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการเกิดรอยแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานและน้ำหนักบรรทุกมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง รวมถึงรูปแบบรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลอง

คำสำคัญ: คอนกรีตเสริมเหล็กเผาไฟ, การพัฒนาโปรแกรม RBSM, รูปแบบการแตกร้าว

Abstract

Reinforced concrete structures that extensively used of many building construction, have damage from several risks. The most important cause of damage to reinforced concrete structure is conflagration. In the past, the test of fire-damage reinforced concrete structure were performed to study the mechanical properties of concrete and reinforcement. However, the test of fire-damage reinforced concrete structure are analyzed with testing that complicated and limited. Therefore, Rigid-Body-Spring-Model were developed for analyzing the behavior and crack in concrete structures. The objective of this project is to study and develop the material model for analyze fracture in fire-damage concrete and reinforced concrete beams. The numerical results were compared with the experimental results of ordinary concrete and reinforced concrete beams at elevated temperature 400°C, 600°C and 800°C. The analysis shows that model can predict the behavior of reinforced concrete beams with cracks. The relationship between load and deflection (at middle span) of the beam and the maximum load is close to experimental results. Moreover, crack patterns were consistent with the experimental results.

Keywords: Fire-Damaged Reinforced Concrete, Rigid-Body-Spring-Model, Crack Pattern

1. บทนำ

การก่อสร้างส่วนใหญ่นิยมใช้คอนกรีตเป็นวัสดุหลัก และยังมี ความสามารถในการรับแรงอัดได้สูง แต่คอนกรีตก็ยังมีขีดความสามารถ ในการรับแรงดึงจึงมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเสริมเหล็กเพื่อทำ หน้าที่ในการรับแรงดึงให้กับโครงสร้าง แม้ว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็กจะมีความแข็งแรงทนทานเป็นอย่างมาก แต่ในปัจจุบันอุบัติเหตุที่ เกิดขึ้นบ่อยครั้งกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ ประสิทธิภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตกลงคือ อักเสบ ดังเช่น เหตุการณ์ช่วงเพลิงไหม้การถล่มสะพานเวสต์เวสต์

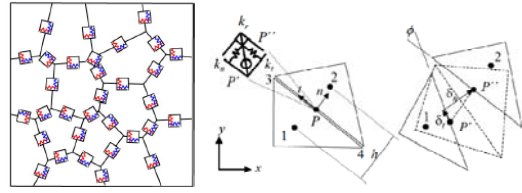
เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กถูกเผาไหม้ โครงสร้างก็จะ เกิดการสูญเสียกำลังทำให้ส่วนของเนื้อคอนกรีตตลอดจนแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตซึ่งเป็นผลให้เกิดความเสียหายต่อ โครงสร้างของอาคาร ความรุนแรงของเพลิงไหม้ และระยะเวลาในการ เกิดเพลิงไหม้มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของ โครงสร้างจึงต้องมีการ ตรวจสอบวิเคราะห์โครงสร้างว่ายังมีความมั่นคงแข็งแรงที่จะสามารถใ้ งานต่อได้หรือไม่หรือมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

ในการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของส่วนของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผาไหม้ เราสามารถวิเคราะห์ได้จากพฤติกรรม การเกิดรอยแตกร้าวซึ่งเป็นสิ่งที่ซับซ้อนยุ่งยากและมีข้อจำกัดหลายอย่าง หากวิเคราะห์จากโครงสร้างจริง โครงงานนี้จึงเป็นการศึกษาและพัฒนา โปรแกรมเบื้องต้นสำหรับใช้วิเคราะห์การเกิดรอยแตกร้าวภายในคาน คอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อให้ใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้นในการออกแบบ โครงสร้างใหม่หรือประเมินความสามารถในการรับแรงของโครงสร้าง เดิม และงานอื่นๆ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 STRUCTURAL MODEL

การศึกษาถึงกระบวนการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต อาศัยทฤษฎี Rigid-Body-Spring Model (RBSM) ซึ่งพัฒนาขึ้น โดย Kawai ในปี ค.ศ.1978 (Kawai,T.1978) ในการวิเคราะห์รอยร้าวที่เกิดขึ้น ในโครงสร้างเพื่อให้มีความสมบูรณ์และใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก ยิ่งขึ้น จึงแบ่งโครงสร้างคอนกรีตออกเป็นชิ้นเล็กๆ ที่เรียกว่า Voronoi ซึ่ง ในแต่ละหน้าสัมผัส (Interface) ของแต่ละชิ้นส่วน ประกอบไปด้วย สปริงที่ไม่มีขนาด 3 สปริงด้วยกัน (Zero size spring) คือ สปริงใน แนวตั้งฉาก (Normal spring) แสดงถึงกำลังในการรับแรงดึงและแรงอัด ของคอนกรีต สปริงในแนวสัมผัส (Tangential spring) แสดงถึงกำลังใน การรับแรงเฉือนของคอนกรีต และสปริงแบบหมุน (Rotational spring) แสดงถึงการหมุนของชิ้นส่วนนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 Rigid-Body-Spring-Model (RBSM)

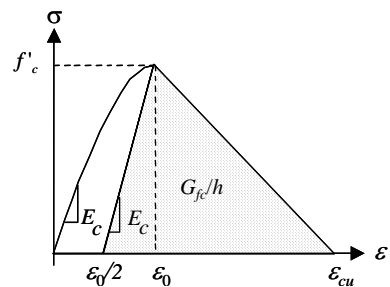
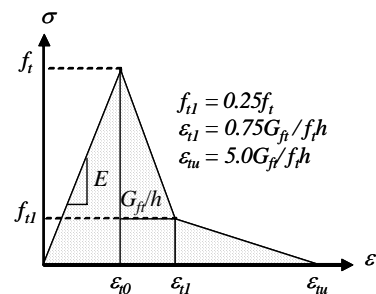
2.2 MATERIAL MODEL

2.2.1 คอนกรีต

กรณีของ RBSM จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของความเค้นที่ผิวของ แต่ละชิ้นส่วนย่อยๆ (Particle interface) ซึ่งแสดงในรูปของสปริงใน แนวตั้งฉาก (normal spring) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมในการรับแรงดึงและ แรงอัดของคอนกรีตดังรูปที่ 2 ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ค่าพลังงานการ แตกร้าว G_f เท่ากับ 0.1 N/mm. ความสัมพันธ์ของความเค้นและ ความเครียดกำหนดให้มีความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\sigma = f'_c \left\{ \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right\} \quad (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0)$$

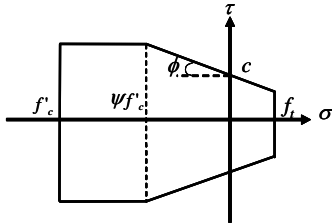
$$\sigma = f'_c \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{cu})}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{cu})} \quad (\varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu})$$



รูปที่ 2 Tension and Compression Model

ส่วนสปริงในแนวสัมผัสแสดงถึงพฤติกรรมในการรับแรงเฉือนของ คอนกรีตความสามารถในการรับแรงเฉือนของคอนกรีตอาศัย ความสัมพันธ์แบบ Mohr-Coulomb ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งค่า Cohesion

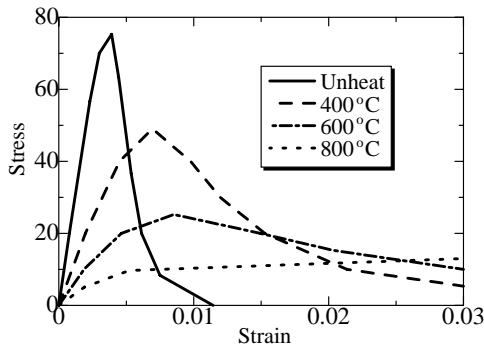
c, Internal friction angle f และ y มีค่าเท่ากับ $0.138f_c$, 37° และ 0.5 ตามลำดับ



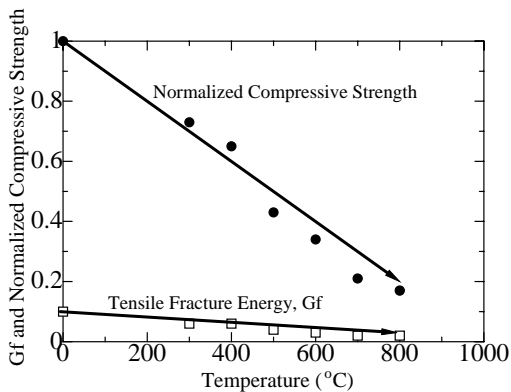
รูปที่ 3 Mohr-Coulomb Criterion

2.2.2 คอนกรีตเผาไฟ

จากผลการทดสอบของ Masashi MATSUDO และคณะโดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด $\varnothing 50 \times 100$ มิลลิเมตรกำลังอัดสูงสุด (f_c) เท่ากับ 430 ksc เสาไฟที่อุณหภูมิ 20, 400, 600 and 800°C ซึ่งได้ผลการทดสอบเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress และ Strain ดังแสดงในรูปที่ 4 กราฟแสดง Normalized Compressive Strength และ พลังงานการแตกร้าว ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งคุณสมบัติทางกลนี้จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับแบบจำลองทางวัสดุของโปรแกรม



รูปที่ 4 Compressive stress-strain curves



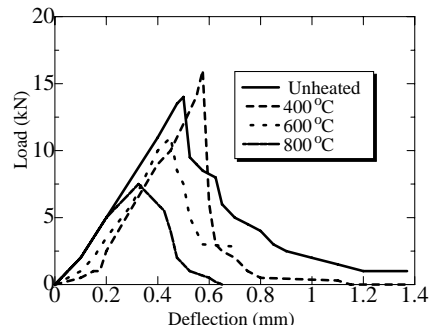
รูปที่ 5 Normalized compressive strength และพลังงานการแตกร้าว

3.ผลการศึกษา

3.1 คานคอนกรีตส่วนที่ถูกเผาไฟ

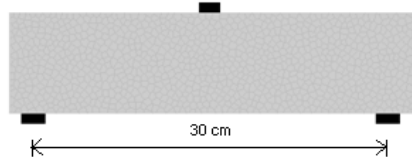
3.1.1 ผลจากการทดสอบของคอนกรีตส่วน

ตัวอย่างนี้เป็นคานคอนกรีตธรรมดาที่มีฐานรองรับมาตรฐาน และมีความยาวทั้งหมด 350 มม. ซึ่งมีขนาดหน้าตัด กว้าง 100 มม. สูง 100 มม. ตัวอย่างทั้ง 12 ตัวอย่างนี้ แบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ถูกทดสอบโดย วรเชษฐ์ ป้อมเชียงพิณ ในปีพ.ศ.2550 โดยแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวของคอนกรีต

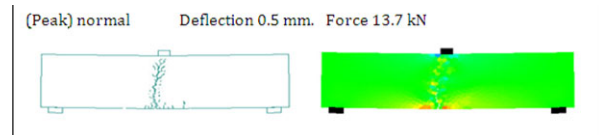
3.1.2 ผลจากโปรแกรมของคอนกรีตส่วน



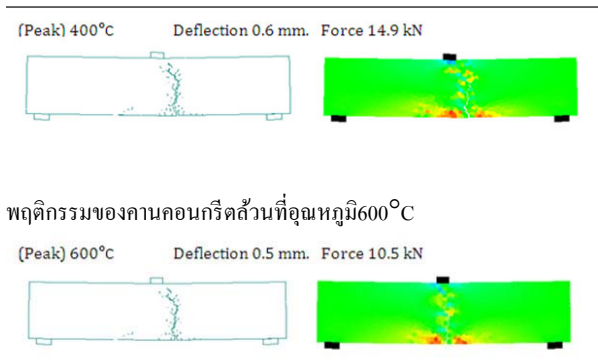
รูปที่ 7 รูปแบบคานที่ใช้วิเคราะห์โดยโปรแกรม

ขนาดคาน $100 \times 100 \times 350$ มม. โดยมีช่วงความยาวระหว่างฐานรองรับเท่ากับ 300 มม. ทดสอบโดยวิธี Third-Point Method และทำการทดสอบการทนไฟด้วยเตาเผาสถานะการเผาไหม้ตามมาตรฐาน ISO/TR 834 และการทดสอบกำลังคัต (Flexural Strength) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 78 แบ่งอิลิเมนต์ในแบบจำลองเป็น 1000 ส่วน

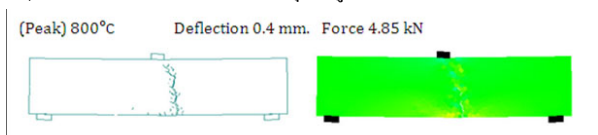
พฤติกรรมของคานคอนกรีตส่วนที่อุณหภูมิปกติ



พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมที่อุณหภูมิ 400°C



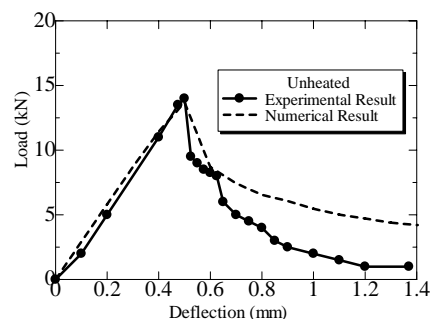
พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมที่อุณหภูมิ 600°C



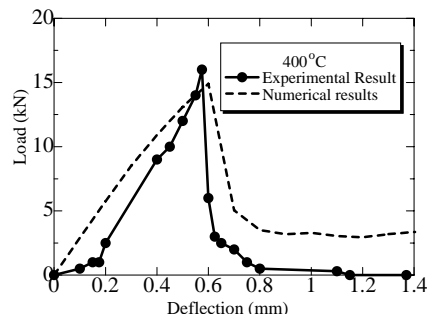
รูปที่ 8 รูปแบบ Crack และ Stress ที่เกิดขึ้นของคานคอนกรีตเสริม จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 8 แสดงลักษณะรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นเมื่อระยะโค้งที่กึ่งกลางคานมากขึ้น คานจะเริ่มแตกร้าวมากขึ้นเรื่อยๆ โดยทิศทางของรอยแตกร้าวจะเริ่มจากกึ่งกลางคานรอยร้าวจะมีความกว้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากการคด (Flexural Crack) จนเกิดการวิบัติของคานคอนกรีตที่ระยะการโค้งตัวที่กึ่งกลางคานสูงสุด และพฤติกรรมการเกิดหน่วยแรงบนคานเป็นไปตามทฤษฎี กล่าวคือ ที่เหนือแกนสะเทิน (Neutral Axis) จะเกิดหน่วยแรงอัดและที่ใต้แกนสะเทินจะเกิดหน่วยแรงดึง

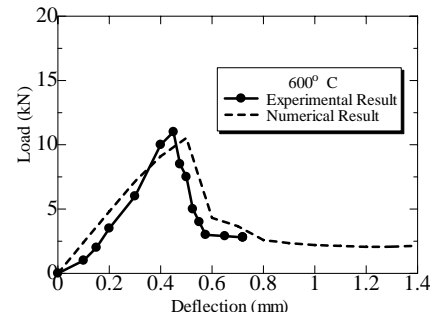
3.1.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม



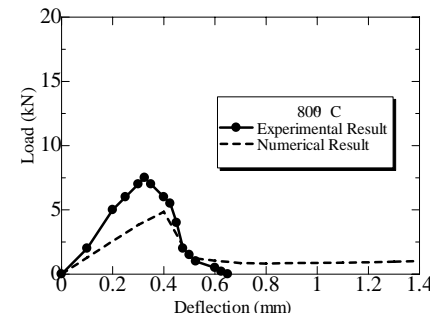
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบผลระหว่าง ผลการทดสอบและผลจากโปรแกรมของคานคอนกรีตเสริมที่อุณหภูมิปกติ



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบผลระหว่าง ผลการทดสอบและผลจากโปรแกรมของคานคอนกรีตเสริมที่อุณหภูมิ 400°C



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบผลระหว่าง ผลการทดสอบและผลจากโปรแกรมของคานคอนกรีตเสริมที่อุณหภูมิ 600°C



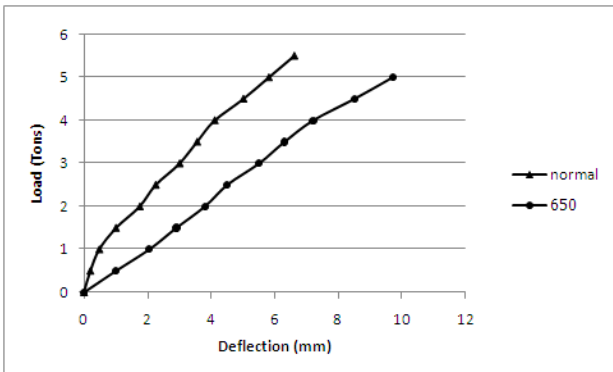
รูปที่ 12 การเปรียบเทียบผลระหว่าง ผลการทดสอบและผลจากโปรแกรมของคานคอนกรีตเสริมที่อุณหภูมิ 800°C

จากรูปที่ 9-12 แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของคานคอนกรีตได้ใกล้เคียงกับค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของคานคอนกรีตที่ได้จากการทดลองมาก นอกจากนี้ระยะโค้งที่กึ่งกลางคานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับระยะโค้งที่กึ่งกลางคานที่ได้จากการทดลองด้วย

3.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผาไฟ

3.2.1 ผลจากการทดสอบของคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในปี ค.ศ. 1996 Moetaz M.E. และคณะได้ทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยกำหนดขนาดตัวอย่างให้มีความลึก 200 มิลลิเมตร ความกว้าง 120 มิลลิเมตร และความยาวคาน 1800 มิลลิเมตร กำลังอัดสูงสุด (f_c') เท่ากับ 210 ksc โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม (E) เท่ากับ 2.20×10^4 กำลังรับแรงดึงของเหล็กบนและเหล็กปลอกเท่ากับ 2600 ksc และกำลังรับแรงดึงของเหล็กล่างเท่ากับ 3600 ksc



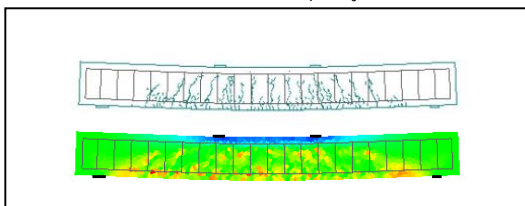
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะโก่งที่กึ่งกลางคานจากการทดลอง

3.2.2 ผลจากโปรแกรมของคอนกรีตเสริมเหล็ก



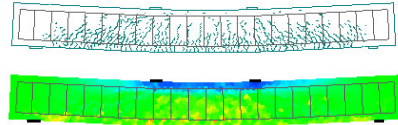
รูปที่ 11 การแบ่งอิลิเมนต์ในแบบจำลองสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดคาน $120 \times 200 \times 1800$ มม. ทำการทดสอบเผาไฟตามมาตรฐาน ASTM E 119 คือ เผาไฟที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลานาน 30 นาที หลังจากนั้นจึงนำมาทดสอบโดยวิธี Four-Point Method and Tested to Failure แบ่งอิลิเมนต์ในแบบจำลองเป็น 1024 ส่วน

พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิปกติ



พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิ 650°C

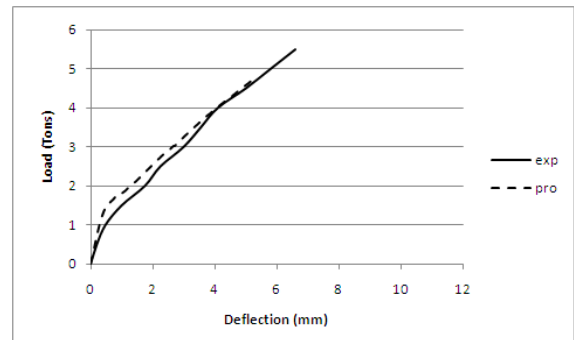
Peak Deflection 5.22 mm. Force 2.97 tons



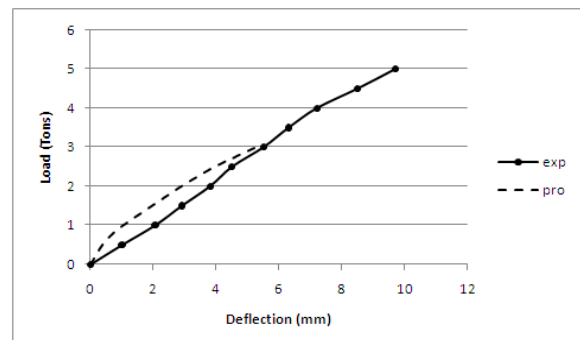
รูปที่ 13 รูปแบบ Crack และ Stress ที่เกิดขึ้นของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมที่อุณหภูมิปกติ (บน) และที่ 650°C (ล่าง)

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าลักษณะการเกิดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิปกติน้อยกว่าการแตกร้าวที่อุณหภูมิ 650°C แต่หน่วยแรงที่เกิดขึ้นนั้นมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 650°C

3.6 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบผลระหว่าง ผลการทดสอบและผลจากโปรแกรมของคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิปกติ



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบผลระหว่าง ผลการทดสอบและผลจากโปรแกรมของคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิ 650°C

จากรูปที่ 14 และ รูปที่ 15 แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมาก เส้นกราฟทั้งสองเส้นของแต่ละอุณหภูมิเกือบเป็นเส้นเดียวกัน แต่ค่ากำลังสูงสุดที่ทำให้คานคอนกรีตเสริม

เหล็กเกิดการวิบัติที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังสูงสุดที่ทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการวิบัติซึ่งได้จากการทดลอง

4.สรุป

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบคานคอนกรีตและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกไฟไหม้กับการวิเคราะห์จากโปรแกรม RBSM พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรม RBSM สามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมทั้งก่อนและหลังการแตกร้าวของคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกไฟไหม้ได้

โดยคานที่เสียหายจากไฟจะมีความสามารถในการรับแรงลดลงและลักษณะรอยแตกร้าวจะเกิดเร็วขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น

5.ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตที่เสียหายจากไฟต้องทราบข้อมูลการทดสอบที่ครบถ้วนและอ้างอิงจากหลายแหล่งข้อมูลสำหรับใช้เป็นฐานข้อมูลเทียบ มิฉะนั้นค่าที่ได้จากโปรแกรมอาจมีความคลาดเคลื่อน

6.เอกสารอ้างอิง

วรเชษฐ์ ป้อมเชิงพิณ. คุณสมบัติเชิงกลของคานคอนกรีตผสมเส้นใยหลังการเผาไหม้. 2550.

Kawai T (1978). *New discrete models and their application to seismic response analysis of structures*. Nuclear Engineering and Design, 48, pp. 207-229.

Moetaz, M.E., Ahmed, M.R., and Shadia, E. *Effect of Fire on Flexural Behavior of RC Beams*. Construction and Building Materials, Vol. 10 No. 2:147-150.

Masashi MATSUDO, Hirokazu NISHIDA, Takahiro OHTSUKA, Takeo HIRASHIMA, Takeo ABE. *Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperatures (Fire Performance of High Strength Concrete Part1)*. 2008.