

แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับพฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลวงที่สภาวะอุณหภูมิสูง

A Simplified Model for The Flexural Behavior of Hollow-core Concrete Slabs under elevated temperatures

นาย ศิรพล เอ็มทรัพย์¹, นาย เศรษฐพงษ์ จันทะทั้ง² และ ศาสตราจารย์ ดร. ธีรวัฒน์ โพธิศิริ³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลวงในภาวะเพลิงไหม้ ด้วยการสร้างแบบจำลองที่แสดงพฤติกรรมการรับแรงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลวง รวมถึงผลกระทบต่อสมรรถนะการทนไฟของแผ่นพื้น โดยพิจารณาความต้านทานโมเมนต์ดัดของแผ่นพื้น การแอ่นตัวของแผ่นพื้น รวมถึงอัตราการทนไฟของแผ่นพื้น อันเนื่องมาจากภาวะเพลิงไหม้ โดยจากผลการทำนาย พบว่า แผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลวงมีความต้านทานโมเมนต์ดัดที่ลดลงภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง รวมถึงมีระยะการแอ่นตัวที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการทนไฟของแผ่นพื้นที่ลดลง อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: แผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลวง , อัตราการทนไฟ , พฤติกรรมเชิงดัด , แบบจำลองอย่างง่าย

Abstract

Currently, the use of hollow-core concrete slabs has become widespread in construction projects. They offer several advantages, including easy and convenient installation as well as high-quality production processes. However, in the event of fire, hollow-core concrete slabs have a reduced capacity to support the load rapidly decreasing. This can lead to structural failure before the designated time, as the fire resistance rate depends on the decreased bending moment capacity to bending moment caused by the load.

The objective of this study is to investigate the flexural behavior of hollow-core concrete slabs in fire conditions by creating a model that demonstrates the flexural behavior of these slabs. Additionally, it examines the impact on the fire

resistance rate of the floor slabs, considering their bending moment capacity, deflection, and fire resistance rate resulting from fire exposure. Based on the predicted results, it was found that hollow-core concrete slabs exhibit decreased bending moments capacity at high temperatures, along with increased deflection. This significantly affects their fire resistance rate.

Keywords: Hollow-core concrete slab, Fire Resistance Rate, Flexural Behavior, Simplified Model

1. บทนำ

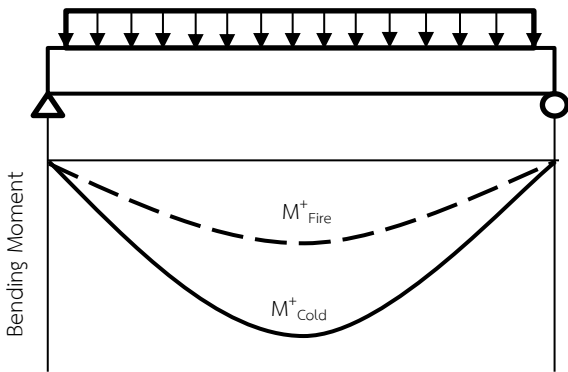
1.1 ที่มาและความสำคัญ

สำหรับการวิจัยของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลวงในสภาวะเพลิงไหม้จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1-5] พบว่าสมรรถภาพการรองรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นดังกล่าวส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้น โดยความต้านทานโมเมนต์ดัดของแผ่นพื้นแกนกลวงที่ลดลงตามเวลาภายใต้ผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีสาเหตุ ได้แก่ 1.กำลังของวัสดุลดลง 2. การเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการสูญเสียเนื้อของคอนกรีต 3.การหลุดร่อนของคอนกรีตบริเวณผิวด้านล่าง [2, 6, 7]

จากงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีต ณ สภาวะอุณหภูมิสูง [3] พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพฤติกรรมของคอนกรีตเป็นดังนี้ 1.ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง 2.กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง 3.โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง 4.เกิดการขยายตัวของคอนกรีต และจากงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมของลวดอัดแรง ณ สภาวะอุณหภูมิสูง [4, 8] พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพฤติกรรมของลวดอัดแรงเป็นดังนี้ 1.กำลังรับแรงดึงของลวดอัดแรงลดลง 2.การสูญเสียกำลังเนื่องจากการคลายตัวเพิ่มขึ้น 3. โมดูลัสความยืดหยุ่นของลวดอัดแรงลดลง

เกณฑ์การพิจารณาการวิบัติของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางจะพิจารณาว่าแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางเกิดการวิบัติเมื่อกำลังรับแรงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความจำเป็นที่จะศึกษาพฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางในสภาวะเพลิงไหม้ จากการพัฒนาแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อใช้สำหรับเป็นกรณีศึกษา ความต้านทานโมเมนต์ดัดที่ลดลงตามเวลาและระยะการโก่งตัวของแผ่นพื้นแกนกลาง รวมทั้งพิจารณาอัตราการทรุดของแผ่นพื้นแกนกลาง



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบแผนภาพโมเมนต์ดัดของคานที่มีจุดรองรับอย่างง่าย ณ อุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางในสภาวะเพลิงไหม้เพื่อใช้ในการประเมินอัตราการทรุดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางการศึกษานี้จะอ้างอิงข้อมูลผลทดสอบจากงานวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015) ที่ศึกษาผลการตอบสนองของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางภายใต้สภาวะเพลิงไหม้ [9] เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวมีการเผยแพร่ข้อมูลอุณหภูมิและระยะการโก่งตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางระหว่างการทดสอบ ซึ่งจำเป็นต้องการพัฒนาและตรวจสอบแบบจำลอง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุณหภูมิภายในหน้าตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางในภาวะเพลิงไหม้

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2, 7, 10] ที่มีการวัดอุณหภูมิบริเวณต่างๆ ในหน้าตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางโดยใช้ thermocouple ติดตั้งไว้บริเวณจุดต่างๆ ที่ต้องการวัดค่าอุณหภูมิและได้มีการนำค่าอุณหภูมิที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ผลที่ได้คือ บริเวณผิวด้านล่างของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางมีอุณหภูมิสูงที่สุดและบริเวณผิวบนมีอุณหภูมิต่ำที่สุด ณ จุดเวลาเดียวกัน ในขณะที่ thermocouple ที่ถูกติดตั้งในระดับเดียวกันอ่าน

ค่าอุณหภูมิที่ได้ไม่เท่ากัน โดยบริเวณที่มีแกนกลางมาขวางไว้จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณที่ไม่มีแกนกลางมาขวาง ซึ่งกล่าวคือการนำความร้อนของคอนกรีตมีประสิทธิภาพกว่าการพาความร้อนผ่านอากาศที่อยู่ในแกนกลาง

2.2 พฤติกรรมการดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางที่อุณหภูมิสูง

กำลังต้านทานการดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตและกำลังรับแรงดึงของลวดอัดแรง [5] ในสภาวะอุณหภูมิสูงพื้นที่รับแรงดัดและพื้นที่รับแรงดึงภายในหน้าตัดของแผ่นพื้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของอุณหภูมิ ซึ่งการกระจายของอุณหภูมิในแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางจะมีค่าไม่เท่ากันในระดับความหนาเดียวกัน เนื่องจากแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางมีโพรงอากาศซึ่งส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิในหน้าตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นคุณสมบัติทางวัสดุของคอนกรีตและลวดอัดแรงจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งส่งผลให้กำลังต้านทานการดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางลดลง [11]

การวิบัติของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางในสภาวะอุณหภูมิปกติจะเกิดขึ้นจากการเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งฉากกับแผ่นพื้นบริเวณใต้แผ่นพื้นเนื่องจากโมเมนต์ดัดจากน้ำหนักบรรทุก [5] และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่ส่งผลให้ลวดอัดแรงพัฒนากำลังถึงจุดคราก แผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางจะเกิดการแอ่นตัวมากขึ้น รอยแตกร้าวในแนวตั้งฉากมีขนาดใหญ่ขึ้นและแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางจะเกิดการวิบัติเมื่อลวดอัดแรงเกิดการฉีกขาด [12] แต่ในสภาวะอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้แผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางเกิดรอยร้าวตามยาวซึ่งขนานกับแผ่นพื้นและอาจทำให้เกิดการกระเทาะของคอนกรีต ซึ่งส่งผลทำให้ลวดอัดแรงมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจนทำให้สูญเสียกำลังอย่างมีนัยสำคัญ [4] โดยแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางจะเกิดการวิบัติเมื่อลวดอัดแรงเกิดการฉีกขาด

จากงานวิจัยของ Pothisiri, Thanyawat and Kositsornwanee, Chaiyatom [6] ได้ทำการทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง 9 ตัวอย่างโดย 3 ตัวอย่างแรก (HCT1, HCT2, HCT3) ให้ความร้อนแบบจำกัดเวลา มีความหนาอยู่ที่ 120 มิลลิเมตร และ 6 ตัวอย่างที่เหลือ (HCL1, HCL2, HCL3, HCL4, HCL5, HCL6) ให้ความร้อนจนถึงจุดวิบัติ มีทั้งหมด 3 ความหนา คือ 100, 120 และ 150 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยมีการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิในแต่ละส่วนของตัวอย่าง ได้แก่ ผิวบน ผิวล่าง และบริเวณแกนกลาง ซึ่งแสดงผลให้เห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละส่วน และผลการทดสอบของ 3 ตัวอย่างแรก (HCT1, HCT2, HCT3) ที่ให้ความร้อนแบบจำกัดเวลาพบว่า ตัวอย่างที่ให้ความร้อนนานกว่าจะเกิดรอยแตกร้าวที่ใหญ่กว่าและเกิดการกระเทาะของคอนกรีตเป็นบริเวณกว้างมากกว่า กล่าวคือ การแตกร้าวและการกระเทาะของคอนกรีตเป็นตรงกันกับอุณหภูมิในแผ่นพื้น และผลการทดสอบอีก 6 ตัวอย่าง (HCL1, HCL2, HCL3, HCL4, HCL5, HCL6) ที่ให้ความร้อนจนถึงจุดวิบัติพบว่า ความหนาของแผ่นพื้นและ น้ำหนักบรรทุก ล้วนมีผลต่ออัตราการทรุดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง

จากงานวิจัยของ Venkatesh K. R. Kodur and Anuj M. Shakya [2] ได้ทำการทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง 2 ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน (slab1, slab2) ขนาดเท่ากับ 4.3 x 1.2 x 0.2 m

ทดสอบโดยการให้ความร้อนจนแผ่นคอนกรีตเกิดการวิบัติ โดยผลการทดสอบพบว่า slab1 เกิดการวิบัติในนาที่ที่ 76 ซึ่งการวิบัติสาเหตุหลักมาจากแรงเฉือนเนื่องจากเกิดการกะเทาะของคอนกรีต จึงทำให้ความหนาโดยรวมของแผ่นคอนกรีตเปลี่ยนไปและทำให้เกิดการวิบัติ แต่ในตัวอย่าง slab2 เกิดการวิบัติในนาที่ที่ 90 โดยสาเหตุของการวิบัติเกิดจาก การแอ่นตัวของแผ่นพื้นเกินค่าที่ยอมรับได้ และในตัวอย่างที่สองนี้ไม่พบการกะเทาะของคอนกรีตของแผ่นพื้นจึงทำให้มีอัตราการทรานไฟที่นานกว่า ซึ่งค่าการแอ่นตัวของแผ่นพื้นตัวอย่าง ณ จุดวิบัติ มีค่าดังนี้ 45 มิลลิเมตร และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ

จากงานวิจัยของ V.K.R. Kodur and A.M. Shakya [7] ได้ทำการทดสอบการให้ความร้อนแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางที่มีความหนาต่างกัน โดยมีตัวอย่างคือ Slab 5 และ Slab 6 ที่มีความหนา 200 มิลลิเมตร และ Slab G6 มีความหนา 265 มิลลิเมตร ซึ่งทั้ง 3 ตัวอย่างมีกำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 75 MPa และนำผลการทดสอบจริงมาเปรียบเทียบกับการทำนายด้วยแบบจำลอง ANSYS การให้ความร้อนจะให้จนกระทั่งแผ่นพื้นเกิดการวิบัติ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของแผ่นพื้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางเสียวก้าลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งทำให้ตัวอย่าง Slab 6 เกิดการวิบัติเนื่องจากการโก่งตัว ที่นาที่ที่ 140 และ Slab 5 เกิดการวิบัติเนื่องจากการการแอ่นตัวที่นาที่ที่ 170 โดยที่ทั้งสองมีอัตราการทรานไฟที่แตกต่างกันเนื่องจากการกะเทาะของคอนกรีตในตัวอย่าง Slab 6 และเมื่อนำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายของแบบจำลอง ANSYS พบว่าแบบจำลองทำนายว่า Slab 5 และ Slab 6 จะวิบัติลงในนาที่ที่ 160 และ 130 ตามลำดับ กล่าวคือในการทดสอบจริงเกิดการวิบัติหลังจากการทำนาย 10 นาที่ ในขณะที่กับตัวอย่าง Slab G6 เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนโดยผลการทดสอบบอกว่าสามารถมีอัตราการทรานไฟมากกว่า 120 นาที่ แต่จะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน

3. ระเบียบวิธีวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมเชิงคดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง โดยใช้ข้อมูลอ้างอิงจากงานวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015) [9] และการใช้เครื่องมือต่างๆในการสร้างแบบจำลองขึ้นมาเพื่อให้ได้ผลของความต้านทานโมเมนต์คดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางที่ลดลงตามระยะเวลาและระยะโก่งตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง เพื่อนำผลที่ได้ทั้งสองค่าไปประเมินอัตราการทรานไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบจากงานวิจัยดังกล่าว เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และทำการเปลี่ยนคุณสมบัติของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางเพื่อการศึกษาพฤติกรรมเชิงคดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางในขนาดต่างๆ เพื่อนำไปประเมินอัตราการทรานไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางนั้นๆ โดยขั้นตอนในการสร้างและตรวจสอบแบบจำลองอย่างง่ายนี้ จะประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 การสร้างแบบจำลองพฤติกรรมเชิงคด โดยใช้ผลของพฤติกรรมเชิงคดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางเป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลอง รายละเอียดดังแสดงในหัวข้อที่ 3.1

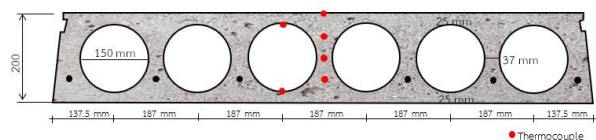
ส่วนที่ 2 การทำนายค่าการโก่งตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางโดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมเชิงคด รายละเอียดดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2

ส่วนที่ 3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงคดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง โดยการใช้ค่าที่ทำนายได้มาเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลอง รายละเอียดดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3

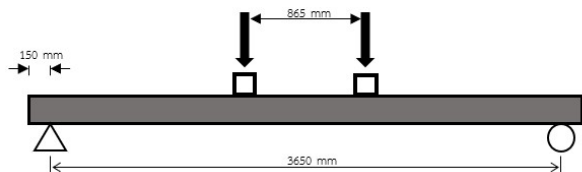
3.1. แบบจำลองพฤติกรรมเชิงคดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง

การศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางในสภาวะเพลิงไหม้จำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบความต้านทานโมเมนต์คดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางในสภาวะเพลิงไหม้ที่แปรเปลี่ยนตามระยะเวลาเพลิงไหม้ ด้วยเหตุดังกล่าวงานวิจัยจึงพัฒนาแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อทำนายพฤติกรรมเชิงคดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางในสภาวะเพลิงไหม้ ทั้งนี้ในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมเชิงคดของแผ่นพื้นใช้การอ้างอิงข้อมูลจากผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015) ที่ศึกษาผลการตอบสนองของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางภายใต้สภาวะเพลิงไหม้ โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยดังกล่าวมาอ้างอิงข้อมูลของอุณหภูมิ ซึ่งรายละเอียดของหน้าตัดแผ่นพื้นแสดงดังในรูปที่ 2 มีขนาด $4 \times 1.2 \times 0.2$ เมตร วัสดุที่ใช้เป็นคอนกรีตมวลรวมที่มีกำลังอัด 75 MPa และลวดเหล็กอัดแรงชนิดคลายแรงดึงค่าเกรด 1860 จำนวน 7 เส้น เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดขนาด 12.7 มิลลิเมตร โดยให้น้ำหนักบรรทุกกระทำบนแผ่นพื้นแบบจุดบนตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางที่ระดับน้ำหนักบรรทุก 60% ของความต้านทานโมเมนต์คดของหน้าตัดที่อุณหภูมิปกติ (50 kN-m) และแผ่นพื้นมีจุดรองรับอย่างง่ายดังที่แสดงในรูปที่ 3

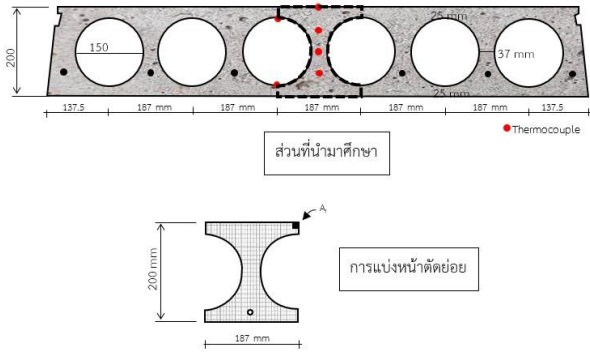
สำหรับแบบจำลองพฤติกรรมเชิงคดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางนี้ จะถูกศึกษาผ่านพื้นที่ส่วนหนึ่งของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางจากนั้นจะแบ่งออกเป็นพื้นที่หน้าตัดย่อยๆ ดังรูปที่ 4



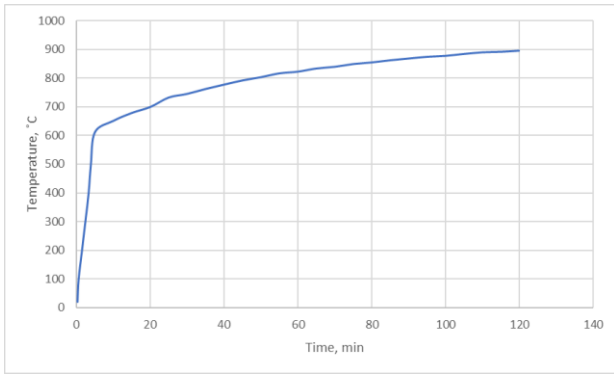
รูปที่ 2 รายละเอียดหน้าตัดของแผ่นคอนกรีตแกนกลางขนาด 200 มิลลิเมตรและตำแหน่งในการติดตั้ง Thermocouple (ที่มา: ดัดแปลงจาก A. Shakya and V. Kodur, 2015)



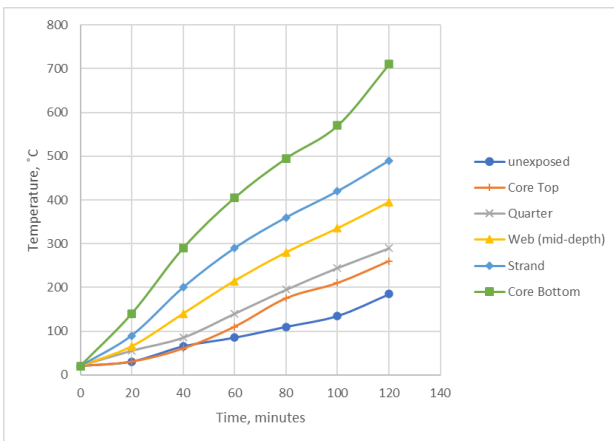
รูปที่ 3 น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนแผ่นพื้นแบบจุด (ที่มา: ดัดแปลงจาก A. Shakya and V. Kodur, 2015)



รูปที่ 4 กระบวนการพิจารณาแบบจำลองอย่างง่าย



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผากับเวลาตามเพลิงไหม้มาตรฐาน ASTM E119 (ที่มา: ดัดแปลงจาก A. Shakya and V. Kodur, 2015)

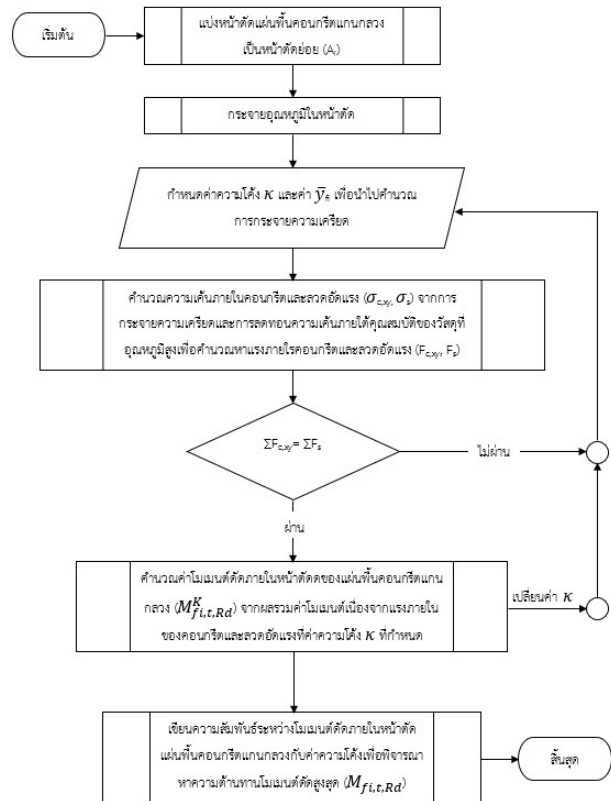


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่วัดได้จาก

Thermocouple ของตัวอย่างทดสอบที่นำมาใช้อ้างอิง (ที่มา: ดัดแปลงจาก A. Shakya and V. Kodur, 2015)

โดยขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมเชิงตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งจะแบ่งขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองเป็น 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การประมาณค่าอุณหภูมิของหน้าตัดที่แปรเปลี่ยนตามเวลาโดยอ้างอิงอุณหภูมิที่วัดค่าได้จาก Thermocouple ในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 6
2. กำหนดค่าความโค้ง K และค่า \bar{y}_n เพื่อนำไปคำนวณการกระจายความเค้นในหน้าตัดของแบบจำลอง
3. คำนวณความเค้นภายในคอนกรีตและลวดอัดแรง ($\sigma_{c,xy}$, σ_s) จากการกระจายความเค้นและการลวดอัดแรงความเค้นภายในคุณสมบัติของวัสดุที่อุณหภูมิสูงเพื่อคำนวณหาแรงภายในคอนกรีตและลวดอัดแรง ($F_{c,xy}$, F_s)
4. หายค่า \bar{y}_n ที่ค่าความโค้ง K เพื่อคำนวณหาสมดุลของแรงอัดในคอนกรีตและแรงดึงในลวดอัดแรง ($\Sigma F_{c,xy} = \Sigma F_s$)
5. คำนวณค่าโมเมนต์ดัดภายในหน้าตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง ($M_{f,l,c,Rd}^K$) จากผลรวมค่าโมเมนต์เนื่องจากแรงภายในของคอนกรีตและลวดอัดแรงที่ค่าความโค้ง K ที่กำหนด

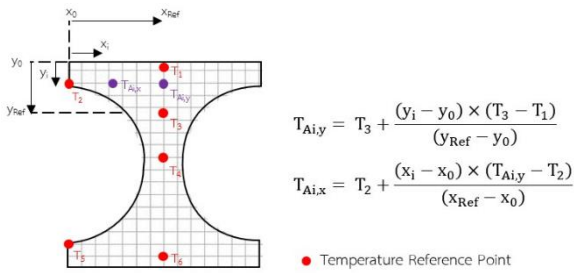


รูปที่ 7 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมเชิงตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง

ขั้นตอนที่ 1 การประมาณค่าอุณหภูมิของหน้าตัดที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

เมื่อแบ่งส่วนของหน้าตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางแล้วจะทำการแบ่งส่วนของหน้าตัดนั้นออกเป็นหน้าตัดย่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 และจุดตัดในแบบจำลองจะถือเป็นจุดของอุณหภูมิในหน้าตัด ซึ่งในหน้าตัดย่อยมีจุดที่ใช้ข้อมูลของอุณหภูมิที่วัดได้จาก Thermocouple แต่ละตำแหน่งใน

การทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 โดยข้อมูลดังกล่าวไม่ครอบคลุมอุณหภูมิทั้งหน้าตัดของแบบจำลองจึงจำเป็นต้องมีการประมาณค่าช่วง (Interpolation) ซึ่งจุดอุณหภูมิอ้างอิงนั้นกระจายอยู่ทั่วหน้าตัด ดังนั้นจึงทำการประมาณค่าใน 2 ทิศทาง คือทิศทางตามแนวแกน X และทิศทางตามแนวแกน Y โดยจะกำหนดให้ผิวบนสุดของแบบจำลองที่ไม่สัมผัสกับเพลิงไหม้มีอุณหภูมิเท่ากับตลอดทั้งผิวโดยอ้างอิงอุณหภูมิจาก Thermocouple ที่บริเวณผิวบนสุด ในทำนองเดียวกันกับบริเวณผิวด้านล่างสุดของแบบจำลองที่สัมผัสกับเพลิงไหม้โดยตรงจะให้มีอุณหภูมิเท่ากันตลอดทั้งผิว จากนั้นทำการประมาณค่าอุณหภูมิในทิศทางแกน Y จากจุดอุณหภูมิอ้างอิงก่อนแล้วจึงทำการประมาณค่าอุณหภูมิในทิศทางแกน X ดังตัวอย่างวิธีการประมาณค่าช่วงเพื่อหาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าตัดแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางดังแสดงในรูปที่ 8 และสาเหตุที่จำเป็นต้องมีการประมาณค่าอุณหภูมิแบบดังกล่าว เพราะจากการศึกษา งานวิจัย [11] พบว่าการกระจายของอุณหภูมิมบนหน้าตัดของแผ่นพื้นที่ระดับความลึกเดียวกันอุณหภูมิจะไม่คงที่เนื่องจากผลของการที่มีแกนกลางที่กลวงและเนื่องจากข้อมูลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอ้างอิงมีเพียงบางจุดเท่านั้น ตามที่ระบุไว้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 8 ตัวอย่างวิธีการประมาณค่าช่วงเพื่อกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง

| Temperature Distributions | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| y (mm) | 0 | 12 | 24 | 36 | 48 | 60 | 72 | 84 | 96 | 108 | 120 |
| 0 | 185.00 | 185.00 | 185.00 | 185.00 | 185.00 | 185.00 | 185.00 | 185.00 | 185.00 | 185.00 | 185.00 |
| 10 | 233.00 | 237.40 | 249.80 | 222.20 | 234.60 | 206.60 | 229.60 | 222.20 | 219.80 | 237.40 | 233.00 |
| 25 | 269.00 | 266.00 | 272.00 | 278.00 | 284.00 | 290.00 | 284.00 | 278.00 | 272.00 | 266.00 | 269.00 |
| 40 | N/A | N/A | 228.25 | 269.00 | 298.75 | 269.00 | 298.75 | 269.00 | 228.25 | N/A | N/A |
| 60 | N/A | N/A | N/A | 311.00 | 310.41 | 311.00 | 310.41 | 311.00 | N/A | N/A | N/A |
| 80 | N/A | N/A | N/A | N/A | 351.82 | 353.00 | 351.82 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 100 | N/A | N/A | N/A | N/A | 392.65 | 395.00 | 392.65 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 120 | N/A | N/A | N/A | N/A | 432.29 | 429.55 | 432.29 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 140 | N/A | N/A | N/A | N/A | 469.28 | 464.09 | 469.28 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 155 | N/A | N/A | N/A | 527.77 | 497.25 | 490.00 | 497.25 | 527.77 | N/A | N/A | N/A |
| 160 | N/A | N/A | 606.32 | 555.97 | 539.18 | 522.40 | 539.18 | 555.97 | 606.32 | N/A | N/A |
| 176 | 710.00 | 682.22 | 676.43 | 659.65 | 642.86 | 626.08 | 642.86 | 659.65 | 676.43 | 682.22 | 710.00 |
| 188 | 721.99 | 707.99 | 693.99 | 679.97 | 665.98 | 651.99 | 665.98 | 679.97 | 693.99 | 707.99 | 721.99 |
| 200 | 781.99 | 781.99 | 781.99 | 781.99 | 781.99 | 781.99 | 781.99 | 781.99 | 781.99 | 781.99 | 781.99 |

รูปที่ 9 ตัวอย่างผลการกระจายอุณหภูมิจากการประมาณค่าช่วงภายในแบบจำลอง

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าความโค้ง K และค่า \bar{y}_f เพื่อนำไปคำนวณการกระจายความเครียด

หลังจากการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดของแบบจำลองแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการกระจายความเครียดในหน้าตัดของแบบจำลอง โดยการกำหนดค่าความโค้ง K และค่า \bar{y}_f เพื่อนำไปคำนวณหาการ

กระจายตัวของความเครียดภายในหน้าตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางจากสมการที่ (1)

$$\epsilon_{c-s,y} = K(\bar{y}_f - y) \quad (1)$$

โดยที่

- $\epsilon_{c-s,y}$ แทน ความเครียดของคอนกรีตและลวดอัดแรงรับแรงดึง
- K แทน ค่าความโค้งที่กำหนด
- \bar{y}_f แทน ตำแหน่งของแกนสะเทิน
- y แทน ระยะความลึก ณ ตำแหน่งที่สนใจ

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณความเค้น ($\sigma_{c,xy}$, σ_s) และแรง ($F_{c,xy}$, F_s) ภายในคอนกรีตและลวดอัดแรง

ในการคำนวณความเค้นและแรงภายในคอนกรีตจะมีการกำหนดข้อสมมติเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณดังนี้

1. ระนาบของหน้าตัดก่อนเกิดการดัดและหลังเกิดการดัดยังคงเป็นระนาบดั้งเดิม (Plain section before binding remain plain after bending)
2. คอนกรีตและลวดมีพันธะยึดเหนี่ยวกันโดยสมบูรณ์ กล่าวคือความเครียดของคอนกรีตและลวดอัดแรงมีค่าเท่ากัน (Bonding slip between steel tendons and concrete is fully bonded)
3. ได้แกนสะเทินคอนกรีตไม่รับแรงดึง (The tensile strength of concrete below the natural axis is ignored)

การคำนวณความเค้นในคอนกรีตนั้นจะใช้การลดทอนกำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากผลของอุณหภูมิของเพลิงไหม้และทำการคำนวณเพื่อให้ได้ค่าความเค้นในแต่ละพื้นที่ย่อยๆ ของหน้าตัดจากนั้นจะทำการนำความเค้นในแต่ละบริเวณพื้นที่ย่อยๆ คำนวณกับพื้นที่ย่อยๆ นั้นเพื่อให้ได้แรงภายในหน้าตัดของคอนกรีตและลวดอัดแรงและทำการรวมแรงภายในที่ระดับเดียวกันเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณในขั้นตอนถัดไป

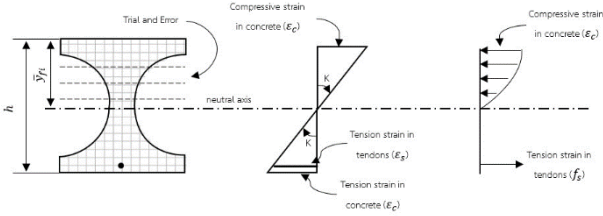
ขั้นตอนที่ 4 หาค่า \bar{y}_f ที่ค่าความโค้ง K เพื่อหาสมมูลของแรงอัดในคอนกรีตและแรงดึงในลวดอัดแรง

เมื่อได้แรงภายในจากการคำนวณในขั้นตอนที่ 3 แล้วจะทำการหาค่าตำแหน่งของแกนสะเทินด้วยวิธีลองผิดลองถูก (trial and error) ดังรูปที่ 10 และหาสมมูลของแรงอัดภายในคอนกรีตและแรงดึงในลวดอัดแรงด้วยสมการที่ (2)

$$\sum_{y=0}^{y=\bar{y}_f} (\sum_{x=0}^{x=B} F_c) = \sum F_s \quad (2)$$

โดยที่

| | | |
|----------------|-----|-----------------------------------|
| F_c | แทน | แรงอัดภายในคอนกรีตในพื้นที่ย่อย |
| F_s | แทน | แรงดึงภายในลวดอัดแรง |
| \bar{y}_{fi} | แทน | ระยะของแกนสะเทินในหน้าตัดแบบจำลอง |
| B | แทน | ความกว้างของหน้าตัดแบบจำลอง |



รูปที่ 10 ตัวอย่างการหาตำแหน่งแกนสะเทินด้วยวิธีลองผิดลองถูก

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าโมเมนต์ดัดภายในหน้าตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง ($M_{fi,t,Rd}^k$)

การคำนวณค่าโมเมนต์ดัดภายในหน้าตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง ($M_{fi,t,Rd}^k$) จะคำนวณค่าโมเมนต์เนื่องจากแรงภายในคอนกรีต (M_c) และค่าโมเมนต์เนื่องจากแรงภายในลวดอัดแรง (M_s) จากสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ และจะทำการรวมค่าโมเมนต์ดังกล่าวทั้งสองค่าเป็นค่าความต้านทานโมเมนต์ดัดของแผ่นพื้นที่ค่าความโค้ง κ ที่กำหนดตามสมการที่ (5)

$$M_c = \sum_{y=0}^{y=\bar{y}_{fi}} (\sum_{x=0}^B F_{c,xy} |y-y_n|) \quad (3)$$

| | | |
|--------|-----|------------------------------------|
| โดยที่ | | |
| M_c | แทน | โมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงภายในคอนกรีต |
| y | แทน | ตำแหน่งของแรงภายในคอนกรีต |
| y_n | แทน | ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของแบบจำลอง |

$$M_s = \sum F_s (d-y_n) \quad (4)$$

| | | |
|--------|-----|--------------------------------------|
| โดยที่ | | |
| M_s | แทน | โมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงภายในลวดอัดแรง |
| d | แทน | ตำแหน่งของแรงภายในลวดอัดแรง |

$$M_{total} = M_c + M_s \quad (5)$$

โดยที่ M_{total} แทนความต้านทานโมเมนต์ดัดรวมที่ค่าความโค้ง κ ที่กำหนด

3.2 การโค้งตัวของแผ่นพื้นแกนกลางเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก

การโค้งตัวของแผ่นพื้นแกนกลางในสภาวะอุณหภูมิสูงเกิดเนื่องจากสองปัจจัย คือ ความแข็งแรง (Stiffness, E_{eff}) กับ ความยาวช่วง (span, L) ซึ่งจากแบบจำลองพฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้นแกนกลางในสภาวะเพลิงไหม้

ใหม่ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดภายในหน้าตัดกับความโค้ง ($M_{fi,t,Rd}^k - \kappa$) ที่แต่ละช่วงเวลาในแผ่นพื้นแกนกลาง จะสามารถหาค่าความแข็งแรงเชิงดัดประสิทธิผลได้จาก secant slope ของไดอะแกรมโมเมนต์ดัดภายในหน้าตัด ($M_{fi,t,Rd}^k$) กับความโค้ง (κ) แทนความแข็งแรงของหน้าตัดที่โมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก (M_{app}) และ M_n คือ ความต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่อุณหภูมิปกติ เมื่อพิจารณาผลกระทบของความเครียดจากความร้อนต่อความสัมพันธ์ $M_{fi,t,Rd}^k - \kappa$ โดยไม่คำนึงถึงผลของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อแผ่นพื้นที่ไม่ได้รับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งส่งผลให้เกิดแผนภาพไดอะแกรม $M_{fi,t,Rd}^k - \kappa$ ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งจะหาค่าความแข็งแรงประสิทธิผลได้จากสมการที่ (6) สำหรับการประมาณค่าระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางของแผ่นพื้นแกนกลางเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอ และน้ำหนักบรรทุกกระทำที่จุดใดจุดบนแผ่นพื้นแกนกลาง ในสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

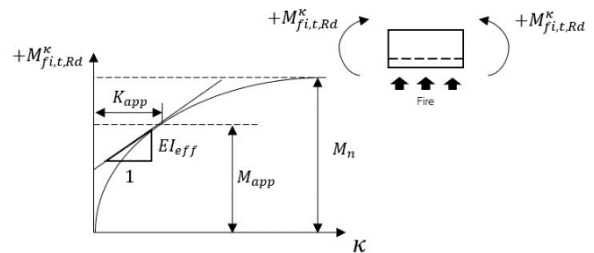
$$E_{eff} = \frac{M_{app}}{\kappa_{app}} \quad (6)$$

$$\Delta_w = \frac{5wL^4}{384E_{eff}} \quad (7)$$

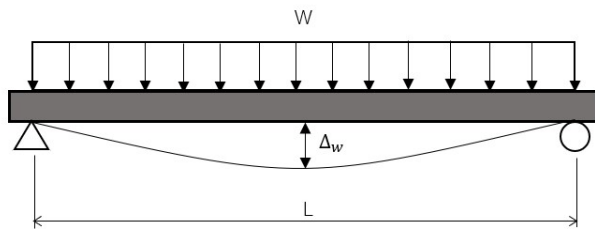
$$\Delta_P = \sum \frac{Pb(3L^2-4b^2)}{48E_{eff}} \quad (8)$$

โดยที่

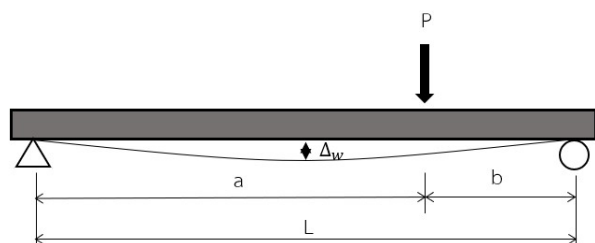
P คือ น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนแผ่นพื้นแกนกลาง ดังแสดงในรูปที่ 13
 L คือ ความยาวช่วงของแผ่นพื้น
 b คือ ระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนแผ่นพื้นที่จุดรองรับ



รูปที่ 11 แผนภาพไดอะแกรมโมเมนต์ดัดภายในหน้าตัดกับความโค้งภายใต้สภาวะเพลิงไหม้



รูปที่ 12 แบบจำลองคานช่วงเดียวที่มีน้ำหนักบรรทุกคงที่กระทำตลอดความยาว



รูปที่ 13 แบบจำลองคานช่วงเดียวที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุด

3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ทำได้โดยการเปรียบเทียบความต้านทานโมเมนต์ดัด ระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางช่วงของแผ่นพื้น และอัตราการทรนไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางในแต่ละช่วงเวลา ในแบบจำลองพฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง กับ ผลการทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางในภาวะเพลิงไหม้

4. ผลการวิจัย

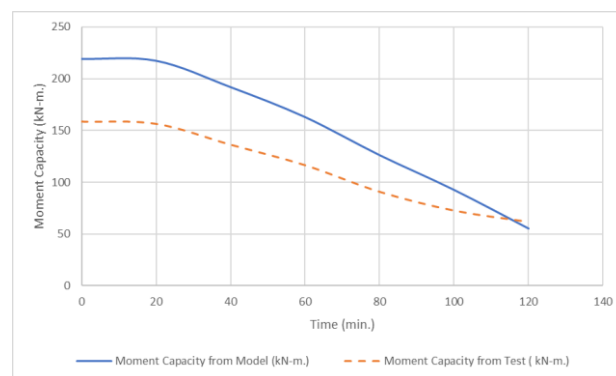
จากการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายที่มีความสามารถทำนายพฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางในสภาวะเพลิงไหม้โดยการป้อนข้อมูลดังนี้ ขนาดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง (ความกว้าง, ความยาว, ความหนา), อุณหภูมิแต่ละจุดบนหน้าตัดของแบบจำลอง, ค่ากำลังอัดของคอนกรีต, ชนิดของมวลรวมในคอนกรีต, เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลาง, จำนวนเส้นลวดอัดแรง, กำลังรับแรงดัดประลัยของลวดเกลียวอัดแรง, เส้นผ่านศูนย์กลางขึงเส้นลวด, ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเส้นลวด และนำข้อมูลข้างต้นมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง

หลังจากการนำข้อมูลที่กล่าวไปข้างต้นมาทำนายพฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางผ่านการกระจายอุณหภูมิด้วยวิธีการประมาณค่า ช่วง จากนั้นทำการกระจายความเค้นและความเครียดที่แปรผันตามอุณหภูมิเพลิงไหม้ภายในหน้าตัดของแบบจำลองและทำการหาแรงภายในหน้าตัดของแบบจำลองและนำแรงที่ได้ไปหาค่าความต้านทานโมเมนต์ดัด และสามารถประมาณค่าการโก่งตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางได้โดยการหาค่าความแข็งแรงประลัยผลของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางจากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าการโก่งตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางได้ตามลำดับ

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการการทำนายผ่านแบบจำลองพฤติกรรมเชิงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางแล้วจะทำให้สามารถทราบค่าที่มีความเกี่ยวข้องกับการวิบัติของแผ่นพื้นในสภาวะเพลิงไหม้ได้ 2 ค่า คือ ความต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าการโก่งตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง โดยจากการนำข้อมูลผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015) [9] ที่ศึกษาผลการตอบสนองของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางภายใต้สภาวะเพลิงไหม้ มาใช้อ้างอิงในการสร้างแบบจำลอง ดังนั้นจึงนำผลการทำนายจากแบบจำลองอย่างง่ายที่สร้างขึ้นและผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015) มาเปรียบเทียบกันได้ผลความต้านทานโมเมนต์ดัดดังตารางที่ 1 และผลค่าการโก่งตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางดังตารางที่ 2 จากผลที่ได้จึงสามารถทำนายอัตราการทรนไฟของตัวแบบจำลองได้และนำมาเปรียบเทียบอัตราการทรนไฟจากผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015) ดังรูปที่ 16

ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบความต้านทานโมเมนต์ดัดจากแบบจำลองอย่างง่ายและผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015)

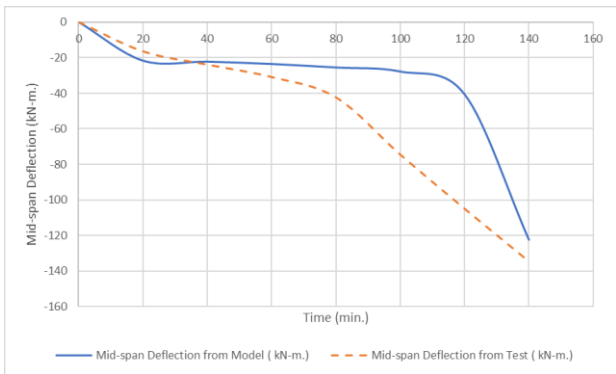
| Time (min.) | Moment Capacity from Model (kN-m.) | Moment Capacity from Test (kN-m.) |
|-------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 219.49 | 158.88 |
| 20 | 217.67 | 156.68 |
| 40 | 192.12 | 136.45 |
| 60 | 163.08 | 116.53 |
| 80 | 126.19 | 90.75 |
| 100 | 92.48 | 72.47 |
| 120 | 55.03 | 61.51 |



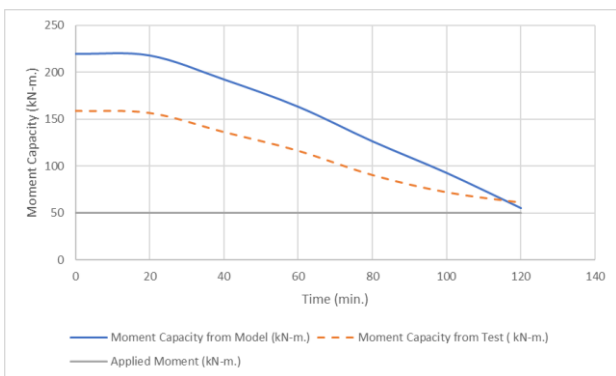
รูปที่ 14 กราฟการเปรียบเทียบความต้านทานโมเมนต์ดัดจากแบบจำลองอย่างง่ายและผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015)

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าความการโก่งตัวจากแบบจำลองอย่างง่ายและผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015)

| Time (min.) | Mid-span Deflection from Model (kN-m.) | Mid-span Deflection from Test (kN-m.) |
|-------------|--|---------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 20 | -21.72 | -16.51 |
| 40 | -22.3 | -23.96 |
| 60 | -23.6 | -30.96 |
| 80 | -25.55 | -42.38 |
| 100 | -27.82 | -74.55 |
| 120 | -40.64 | -105.00 |
| 140 | -122.35 | -134.62 |



รูปที่ 15 กราฟการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวจากแบบจำลองอย่างง่ายและผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015)



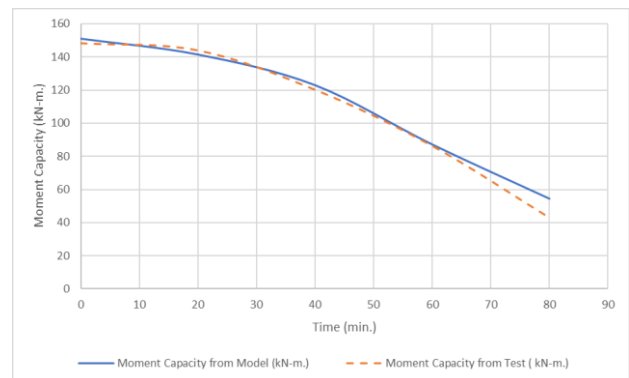
รูปที่ 16 กราฟการเปรียบเทียบอัตราภาระทนไฟจากแบบจำลองอย่างง่ายและผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015)

จากผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานโมเมนต์ดัด ค่าการโก่งตัวและอัตราการทนไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางที่ได้จากแบบจำลองอย่างง่ายที่จัดทำขึ้นและจากผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015) พบว่าค่าที่ได้มีความเป็นไปในทิศทางเดียวกันและแบบจำลองอย่างง่ายสามารถทำนายผลของอัตราการทนไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางได้เท่ากับ 128 นาที เมื่อเทียบกับผลการทดสอบจากงานวิจัยที่ได้อัตราการทนไฟเท่ากับ 140 นาที พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 12 นาที หรือเท่ากับร้อยละ 8.57

เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอย่างง่ายที่จัดทำขึ้นว่ามีความถูกต้องและยอมรับได้จึงมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางตามงานวิจัยของ V. Kodur and A. Shakya (2017) [7] และ T. Pothisiri and C. Kositsornwanee (2015) [6] เพื่อทำนายค่าความต้านทานโมเมนต์ดัด ได้ผลดังตารางที่ 3 ค่าการโก่งตัวได้ผลดังตารางที่ 4 และ 5 และอัตราการทนไฟดังรูปที่ 19 ตามลำดับ เนื่องจากงานวิจัยของ T. Pothisiri and C. Kositsornwanee (2015) มีผลทดสอบเพียงค่าการโก่งตัวของแผ่นพื้น ณ จุดเวลาต่างๆ เท่านั้น จึงแสดงผลการเปรียบเทียบได้

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบความต้านทานโมเมนต์ดัดจากแบบจำลองอย่างง่ายและผลการทดสอบจากงานวิจัยของ V. Kodur and A. Shakya (2017)

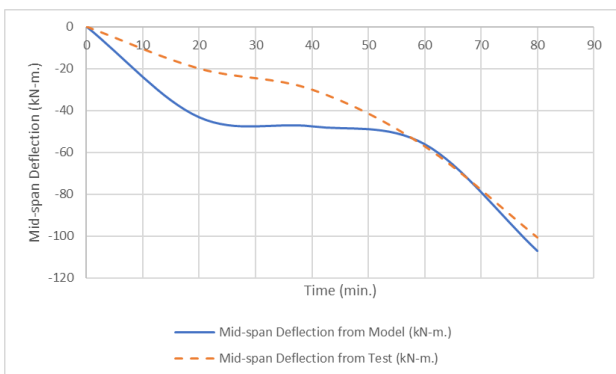
| Time (min.) | Moment Capacity from Model (kN-m.) | Moment Capacity from Test (kN-m.) |
|-------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 150.86 | 148.13 |
| 20 | 141.3 | 143.82 |
| 40 | 122.8 | 120.1 |
| 60 | 87.01 | 86.3 |
| 80 | 54.28 | 43.02 |



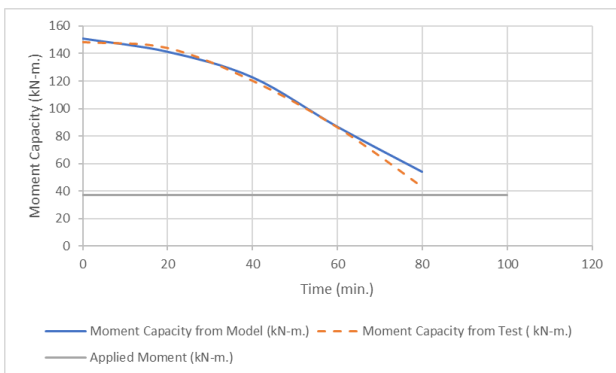
รูปที่ 17 กราฟการเปรียบเทียบความต้านทานโมเมนต์ดัดจากแบบจำลองอย่างง่ายและผลการทดสอบจากงานวิจัยของ V. Kodur and A. Shakya (2017)

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวจากแบบจำลองอย่างง่าย และผลการทดสอบจากงานวิจัยของ V. Kodur and A. Shakya (2017)

| Time (min.) | Mid-span Deflection from Model (kN-m.) | Mid-span Deflection from Test (kN-m.) |
|-------------|--|---------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 20 | -43.22 | -20 |
| 40 | -47.55 | -30 |
| 60 | -56.03 | -57 |
| 80 | -106.96 | -100.5 |



รูปที่ 18 กราฟการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวจากแบบจำลองอย่างง่ายและผลการทดสอบจากงานวิจัยของ V. Kodur and A. Shakya (2017)



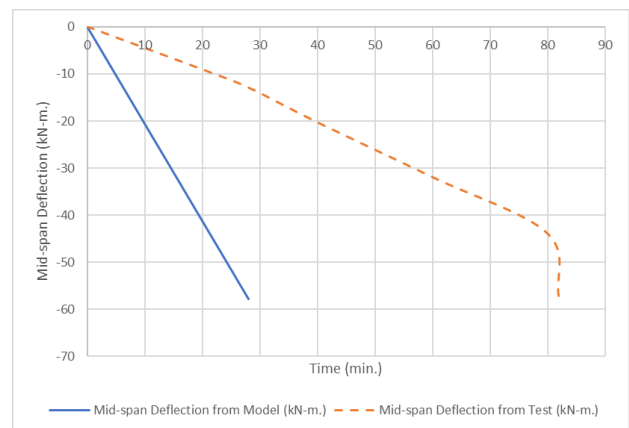
รูปที่ 19 กราฟการเปรียบเทียบอัตราภาระทนไฟจากแบบจำลองอย่างง่าย และผลการทดสอบจากงานวิจัยของ V. Kodur and A. Shakya (2017)

จากผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานโมเมนต์ดัด ค่าการโก่งตัวและอัตราภาระทนไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางที่ได้จากแบบจำลองอย่างง่ายที่จัดทำขึ้นและจากผลการทดสอบจากงานวิจัยของ V. Kodur and A. Shakya (2017) พบว่าค่าที่ได้มีความเป็นไปในทิศทางเดียวกันและแบบจำลองอย่างง่ายสามารถทำนายผลของอัตราภาระทนไฟของแผ่นพื้น

คอนกรีตแกนกลางได้เท่ากับ 97 นาที เมื่อเทียบกับผลการทดสอบจากงานวิจัยที่ได้อัตราภาระทนไฟเท่ากับ 90 นาที พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 7 นาที หรือเท่ากับร้อยละ 7.78

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวจากแบบจำลองอย่างง่าย และผลการทดสอบจากงานวิจัยของ T. Pothisiri and C. Kositsornwanee (2015)

| Time (min.) | Mid-span Deflection from Model (kN-m.) | Mid-span Deflection from Test (kN-m.) |
|-------------|--|---------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 20 | -41.3 | -9.06 |
| 28 | -57.82 | -12.9 |
| 40 | - | -20.28 |
| 60 | - | -31.91 |
| 80 | - | -43.84 |
| 82 | - | -57.5 |



รูปที่ 20 กราฟการเปรียบเทียบค่าความโก่งตัวจากแบบจำลองอย่างง่าย และผลการทดสอบจากงานวิจัยของ T. Pothisiri and C. Kositsornwanee (2015)

จากผลการเปรียบเทียบระยะเวลาการโก่งตัวสูงสุดของแผ่นพื้น เนื่องด้วยผลการทำนายของแบบจำลองมีอัตราภาระทนไฟที่ 28 นาที ในขณะที่ผลการทดสอบจากงานวิจัย T. Pothisiri and C. Kositsornwanee (2015) มีอัตราภาระทนไฟอยู่ที่ 82 นาที พบว่า แบบจำลองสามารถทำนายเวลาวิบัติได้เบื้องต้น ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการกระจายอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งลวดเหล็กไม่มีการบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิระหว่างการทดสอบ ทำให้การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งลวดเหล็กอาจสูงเกินไป ซึ่งส่งผลต่อความ

ด้านทานโมเมนต์ดัดในหน้าตัด อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับระยะการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติ พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน

5. สรุปผลการวิจัย

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การศึกษาพฤติกรรมเชิงคดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางในสภาวะเพลิงไหม้ผ่านแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อใช้ในการประเมินอัตราทรานไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง โดยข้อมูลที่ใช้ในการจัดทำแบบจำลองอย่างง่ายนี้ขี้นมาจากการวิจัยของ Kodur, V. and A.M. Shakya (2015) [9] และใช้ข้อมูลดังกล่าวในการตรวจสอบแบบจำลองอย่างง่ายที่สร้างขึ้นว่ามีความถูกต้องน่าเชื่อถือโดยการนำค่าความต้านทานโมเมนต์ดัด ค่าการโก่งตัวและอัตราทรานไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางจากแบบจำลองอย่างง่ายมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากงานวิจัย

ในการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนที่หนึ่งจะอธิบายถึงการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมเชิงคดของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางโดยใช้ข้อมูลอ้างอิงจากงานวิจัยข้างต้น ต่อมาในส่วนที่สองจะนำแบบจำลองพฤติกรรมเชิงคดที่ได้จากส่วนที่หนึ่งมาทำนายค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำเป็นจุดบนแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง และในส่วนที่สามเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบค่าความต้านทานโมเมนต์ดัด ค่าการโก่งตัวและอัตราทรานไฟแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางจากแบบจำลองอย่างง่ายกับผลการทดสอบจากงานวิจัย

เมื่อตรวจสอบแบบจำลองแล้วพบว่าแบบจำลองอย่างง่ายที่จัดทำขึ้นมีความถูกต้องน่าเชื่อถือ จึงมีการเปลี่ยนคุณสมบัติของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลางเพื่อทำนายค่าความต้านทานโมเมนต์ดัด ค่าการโก่งตัวและอัตราทรานไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตแกนกลาง ณ คุณสมบัติต่างๆ ตามงานวิจัย [6, 7] พบว่าผลการทำนายและผลการทดสอบจากงานวิจัยดังกล่าว [6, 7] มีผลไปในทิศทางเดียวกันแต่ด้วยผลจากงานวิจัยของ T. Pothisiri and C. Kositsornwanee (2015) ไม่มีการบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิแวดล้อมที่กระทำระหว่างการทดสอบ ทำให้การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งลวดเหล็กอาจสูงเกินไป ซึ่งส่งผลต่อความต้านทานโมเมนต์ดัดในหน้าตัด อย่างไรก็ตาม ผลการทำนายมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดสอบและมีระยะการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติใกล้เคียงกัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงที่ให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งจาก ศ.ดร.ธัญวัฒน์ โพธิศิริ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง รวมถึงขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว และ ศ.ดร. อาณัติ เรืองรัศมี ที่ให้ความคิดเห็น และให้คำแนะนำ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งข้าพเจ้าอาจไม่ได้กล่าวถึง และไม่สามรถเอ่ยนามทั้งหมดได้ในนี้ ขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Kankeri and S. S. Prakash, "Experimental evaluation of bonded overlay and NSM GFRP bar strengthening on flexural behavior of precast prestressed hollow core slabs," *Engineering structures*, vol. 120, pp. 49-57, 2016.
- [2] V. K. Kodur and A. M. Shakya, "Modeling the response of precast, prestressed concrete hollow-core slabs exposed to fire," *PCI Journal*, vol. 59, no. 3, pp. 78-94, 2014.
- [3] U. Schneider, "Concrete at high temperatures—a general review," *Fire safety journal*, vol. 13, no. 1, pp. 55-68, 1988.
- [4] J. Atienza and M. Elices, "Behavior of prestressing steels after a simulated fire: Fire-induced damages," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 8, pp. 2932-2940, 2009.
- [5] M. Rahman, M. Baluch, M. Said, and M. Shazali, "Flexural and shear strength of prestressed precast hollow-core slabs," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 37, pp. 443-455, 2012.
- [6] T. Pothisiri and C. Kositsornwanee, "Experimental investigation of the fire resistance of thin hollow-core concrete slabs with simple supports," *Engineering Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 139-155, 2015.
- [7] V. Kodur and A. Shakya, "Factors governing the shear response of prestressed concrete hollowcore slabs under fire conditions," *Fire Safety Journal*, vol. 88, pp. 67-88, 2017.
- [8] P. Steels, "Elevated-temperature tensile and creep properties of some structural and prestressing steels," *Fire test performance*, p. 186, 1970.
- [9] A. Shakya and V. Kodur, "Response of precast prestressed concrete hollowcore slabs under fire conditions," *Engineering Structures*, vol. 87, pp. 126-138, 2015.
- [10] V. Alberro, A. Espinós, E. Serra, M. L. Romero, and A. Hospitaler, "Numerical study on the flexural behaviour of slim-floor beams with hollow core slabs at elevated

temperature," *Engineering Structures*, vol. 180, pp. 561-573, 2019.

- [11] J. Chang, A. H. Buchanan, R. P. Dhakal, and P. J. Moss, "Hollow-core concrete slabs exposed to fire," *Fire and Materials: An International Journal*, vol. 32, no. 6, pp. 321-331, 2008.
- [12] J. Fellingner, J. Stark, and J. Walraven, "Shear and anchorage behaviour of fire exposed hollow core slabs," *Heron*, 50 (4), 2005.