พฤติกรรมการรับน้ำหนักของแผ่นพื้นคอมโพสิต Metal deck ที่มีช่องเปิดภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง และไฟไหม้

Performance study of composite metal decks With openings under combined sustained loading and fire

สมฤทัย คงระกำ[1] เวธนี ฤกษสโมสร[2] วิศรุตา ฤกษสโมสร[3] ภัคจิรา อ่อซ้าย[4*] และ ทนงศักดิ์ อิ่มใจ[5]

[1,2,3,4] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช
**Corresponding author; E-mail address: thanongsak_im@wu.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของแผ่นพื้นคอมโพสิต Metal deck ที่มีช่องเปิดภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้างและไฟไหม้ สำหรับคอนกรีตที่ใช้เททับบนแผ่นพื้น Metal deck จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติทั่วๆ ไป และคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตย่อย ซึ่งมันส่งผลดีในด้านการใช้วัสดุทดแทน ทั้งในด้านคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตผสมจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังของเศษคอนกรีต การให้น้ำหนักบรรทุกคงค้างและไฟไหม้ โดยการตรวจวัดระหว่างเวลากับอุณหภูมิ และ การแอ่นตัวกับการให้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการทนไฟ ประกอบด้วยคุณสมบัติของคอนกรีตประกอบด้วย ประเภท และ คุณสมบัติของพื้นเหล็ก คานเหล็ก การยึดรั้ง และ พฤติกรรมเชิงประกอบ(Composite Action) การเกิดไฟไหม้ในแต่ละครั้งจะมีอุณหภูมิ 600°C - 1000°C โดยเหล็กภายในอาคารสามารถหลอมละลายภายใต้อุณหภูมิ1500°C

คำสำคัญ: □¾ เ มx ม้วนชยึดสำง บ ก้นอาค นคอนนนิดบาละลายภายอ คอนขนิดบาง

RCA หรือ Recycled Concrete Aggregate คือ มวลรวมคอนกรีตจากการนำกลับมาใช้ใหม่(Recycled Concrete Aggregate) ซึ่งได้มาจากคอนกรีตที่แตก หรือ จากคอนกรีตที่ได้มาจากการรื้อ ทำลายสิ่งก่อสร้าง [5] เป็นการลดใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติ และ นำวัสดุเหลือใช้นำกลับมาใช้ใหม่ โดยคุณภาพของคอนกรีตที่ได้ต่างจากคอนกรีตปกติที่ใช้หินจากธรรมชาติหรือไม่อย่างไร เป็นประเด็นที่ศึกษาวิจัยกันมาหลายสิบปีแล้ว โดยเฉพาะประเทศแถบยุโรป และ จีน โดยปกติเศษคอนกรีตเก่าจะมีสิ่งปนเปื้อน หิน และ มอร์ตาร์ เป็นส่วนประกอบ ทำให้มีความแข็งแรง และ ความสะอาดน้อยกว่าหินธรรมชาติ นอกจากนี้เศษคอนกรีตเก่าจะมีความพรุนที่มากกว่าหินธรรมชาติ ทำให้มีอัตราการดูดซึมน้ำมากกว่า เป็นผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนมวลรวมหยาบจะต่ำกว่าคอนกรีตปกติ จากผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของ RCA ในหลายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 10-30 ขึ้นอยู่กับปริมาณสัดส่วนของเศษคอนกรีตเก่าซึ่งมาแทนที่มวลรวม แต่บางงานวิจัยกลับพบว่ากำลังอัดของ RCA ไม่ได้ด้อยกว่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติเลยถ้าออกแบบสัดส่วนผสมโดยคำนึงถึงปริมาณมอร์ตาร์ที่ติดอยู่กับเศษคอนกรีตเก่า ผลการทดลองที่ไม่เป็นในทิศทางเดียวกันนี้ทำให้ภาคอุตสาหกรรมไม่มั่นใจการนำ RCA ไปใช้งานโครงสร้าง เช่น คาน เสา และ จำกัดการใช้ RCA อยู่ในงานถนนเป็นส่วนใหญ่

ถึงแม้จะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสด และคอนกรีตแข็งตัวของ RCA แต่การศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของพื้นทำจาก RCA ยังให้ข้อมูลค่อนข้างจำกัด และผลการทดลองที่ได้ยังค่อนข้างขัดแย้งกัน อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีคอนกรีตละวัสดุก่อสร้างได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ทำให้สมบัติทางกลของคอนกรีตได้รับการปรับปรุงและพัฒนาไปมาก ประกอบกับการทดสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างของพื้นที่ทำจาก RCA ในช่วง 10 ปีหลังได้ให้ผลเป็นไปในทางบวก และ บ่งบอกถึงความเป็นไปได้ในการนำ RCA ไปใช้กับพื้นร่วมกับระบบ Metal deck ในอาคาร

ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของแผ่นพื้น Metal deck ที่มีช่องเปิดภายใต้ไฟไหม้ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่อง ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าระบบพื้น Metal deck สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัด และแรงเฉือนในภาวะขีดสุดได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามข้อมูลวิจัยทางโครงสร้างนี้มีอยู่อย่างจำกัด อย่างไรก็ตามจึงต้องมีการพิจารณาประสิทธิภาพในภาวะการใช้งาน เช่น การรับน้ำหนักแผ่นพื้นคอมโพสิต Metal deck ที่มีช่องเปิดภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง ขณะเกิดไฟไหม้ [6-9] การเสียรูปเนื่องจากอิทธิพลของการวิบัติ [10] เพื่อสร้างความมั่นใจในการใช้เศษคอนกรีตเก่าร่วมกับสมการที่ใช้ออกแบบในปัจจุบัน ซึ่งค่ากำลังเหล่านี้ขององค์อาคาร RCA จะต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีที่กำหนดไว้ในสมการออกแบบของมาตรฐานการออกแบบของสมาคมคอนกรีตแห่งสหรัฐอเมริกา (ACI) [11,12] ซึ่งเป็นแม่แบบมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเริ่มเหล็กในประเทศไทย ผลที่ได้จากการทดสอบนี้จะใช้เป็นแนวทางให้ภาคอุตสาหกรรมหันมาสนใจการผลิตคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนหินและประยุกต์ใช้กับงานโครงสร้างอาคารบ้านเรือนในอนาคตได้อย่างมั่นใจต่อไป จากปัจจัยดังกล่าวข้างต้น ได้มีการศึกษาวิจัยวัสดุและการผลิตคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนหิน ดังแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การผลิตคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนมวลรวม [13]

จากความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย ดังกล่าว จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาประสิทธิภาพการนำเศษคอนกรีตย่อยมาทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติ โดยนำมาผสมกับคอนกรีตสำหรับเทพื้นระบบ Metal deck ให้เป็นระบบพื้นคอมโพสิตชนิดบางสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างอาคารใหม่ โดยใช้วัสดุที่มีประสิทธิภาพ ราคาต้นทุนต่ำ สามารถติดตั้งได้รวดเร็ว และใช้วัสดุที่มีราคาถูกสามารถหาได้ภายในประเทศ

2. วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยเรื่องพฤติกรรมการรับน้ำหนักของแผ่นพื้น Metal Deck พฤติกรรมการรับน้ำหนักของแผ่นพื้นคอมโพสิต Metal deck ที่มีช่องเปิดภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง และไฟไหม้ โดยทำการวิจัยระหว่างมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ และบริษัท เอสพีที ดีไซน์แอนด์ซัพพลาย จำกัด มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

- ได้ผลการทดสอบอิทธิพลของการรับน้ำหนักพื้น Metal deck ที่มีช่องเปิดภายใต้ไฟไหม้และภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง ของพื้นคอมโพสิต
- ได้แนวทางการออกแบบระบบพื้นแผ่นเหล็กพื้นโครงสร้างผสมคอนกรีตจากการย่อยที่พัฒนาขึ้นในโครงการ

3. วิธีการศึกษา

ในการทดสอบลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา จะแบ่งเป็น 10 ตัวอย่าง เป็น NA (Natural Aggregate) 5 ตัวอย่าง ขนาด 15*15 เซนติเมตร ประกอบด้วย NA-1C คือ Natural Aggregate ที่มีช่องเปิดรูปทรงกระบอก 1 รู, NA-2C คือ Natural Aggregate ที่มีช่องเปิดรูปทรงกระบอก 2 รู, NA-1R คือ Natural Aggregate ที่มีช่องเปิดรูปทรงกสี่เหลี่ยมจัตุรัส 1 รู, NA-2R คือ Natural Aggregate ที่มีช่องเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2 รู และ RCA (Recycled Aggregate Concrete)) 5 ตัวอย่าง ขนาด ϕ15 เซนติเมตร ประกอบด้วย RCA-1C คือ Recycled Aggregate Concrete ที่มีช่องเปิดรูปทรงกระบอก 1 รู, RCA-2C คือ Recycled Aggregate Concrete ที่มีช่องเปิดรูปทรงกระบอก 2 รู, RCA-1R คือ Recycled Aggregate Concrete ที่มีช่องเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส 1 รู, RCA-2R คือ Recycled Aggregate Concrete ที่มีช่องเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2 รู

ซึ่งจะแบ่งเป็น 3 ระยะ คือ ระยะที่ 1 ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแผ่นเหล็กบาง (Metal deck) และวัสดุแท่งคอมโพสิตสำหรับใช้ทำเหล็กตะแกรง และทำการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสำหรับเทพื้นคอนกรีตโดยใช้หินจากตามธรรมชาติ (NA 100% คือ Natural Aggregate) และเศษคอนกรีตเก่า (RCA 100% คือ Recycled Aggregate Concrete)

ระยะที่ 2 เป็นการทดสอบการบรรทุกน้ำหนักของแผ่นพื้นตัวอย่างจำนวน 10 ตัวอย่าง แบ่งเป็นหินจากตามธรรมชาติ (NA 100% คือ Natural Aggregate) จำนวน 5 ตัวอย่าง และหินจากเศษคอนกรีตย่อย (RCA 100% คือ Recycled Aggregate Concrete) โดยทำการทดสอบให้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง โดยพิจารณาค่าน้ำหนักบรรทุก กรณี พื้นที่ใช้งานประเภทสำนักงาน [11] (Live load = 250 กก./ตร.ม.) และไฟ โดยให้น้ำหนัก

บรรทุกคงค้างครบ 250 kg/m^2 และทำการวัดการแอ่นตัว หลังจากนั้นปล่อยไฟ เพื่อวัดอุณหภูมิและการแอ่นตัว เป็นเวลา 120 นาที (2 ชั่วโมง)

ระยะที่ 3 ทำการจำลองแบบจำลอง Finite-element แบบ nonlinear Computational Fluid dynamic เพื่อจำลองการถ่ายเทความร้อน ผ่านช่องเปิด

3.1 รายละเอียดแผ่น Metal deck และวัสดุแท่งคอมโพสิตสำหรับเหล็กตะแกรง

แผ่นพื้นผลิตจากแผ่นเหล็กบาง เรียกว่า Metal deck ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ความหนา = 0.8 มม. มีขนาดความกว้างxยาว = 1000x2200 มม. ผลิตโดยบริษัท เอสพีที ดีไซน์แอนด์ซัพพลาย จำกัด มีค่ากำลังดึงคราก Fy= 275 MPa, ค่ากำลังดึงประลัย f_{Fu}= 337 MPa, ค่า Elastic modulus=210 GPa, และ Elongation=2.5% ได้จากค่าเฉลี่ยของทดสอบการดึงของตัวอย่างตัดจากส่วนที่เป็นแผ่นตรง จำนวน 6 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM A370 [14] ลักษณะทางกายภาพของ Metal deck ผลิตจากเหล็กชุบสังกะสี (Galvanized Steel) ที่ได้คุณภาพ มีปุ่มนูน (Embossment) กระจายอยู่ที่สันของแผ่น ปุ่มนูนนี้จะเปรียบเสมือนตัวยึดเกาะไม่ให้แผ่นพื้น Metal Deck กับ คอนกรีตไถลตัวออกจากกัน ทำให้พื้นมีความแข็งแรง รับน้ำหนักได้ตามมาตรฐาน

ในส่วนของเหล็กตะแกรง (wire mesh) ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุคอมโพสิตแบบแท่ง (G_{FRP} rod) มีขนาด 4 มม. และมีค่ากำลังดึงประลัยเฉลี่ย (f_{Fu}) 700 MPa ค่า Elastic modulus (E_{FRP}) = 43 GPa และมี Ultimate strain (e_{Fu}) = 1.5% ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบตัวอย่าง จำนวน 9 ตัวอย่าง ของตามมาตรฐาน ACI 440.3R [15] รูปที่ 3 แสดงการเตรียมแท่งคอมโพสิตเป็นตะแกรงมีระยะห่างระหว่างช่อง = 200 มม. และติดตั้งวัสดุแท่งคอมโพสิตในแบบหล่อ ก่อนเทคอนกรีต

รูปที่ 3 การเตรียมแท่งคอมโพสิตเป็นตะแกรง (ซ้าย) และติดตั้งวัสดุแท่งคอมโพสิตในแบบหล่อ ก่อนเทคอนกรีต (ขวา)

3.2. การผลิตเศษคอนกรีตย่อยทดแทนมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

การผลิตเศษคอนกรีตย่อยทดแทนมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ใช้เครื่องย่อยคอนกรีต WU CRM-01 พัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ให้กำลังโดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถผลิตเศษคอนกรีตย่อย 5-20 มม. มีอัตราการผลิต 1-3 ตัน/ชม. [16] การทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ตามมาตรฐาน ASTM C39 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC Type I) โดยคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้กำหนดให้มีกำลังรับแรงอัดระบุ 28 MPa ส่วนผสมคอนกรีตต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม ของคอนกรีต ตารางที่ 1 แสดงปริมาณของส่วนผสมสำหรับแต่ละตัวอย่างพื้นทดสอบ และตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบและละเอียด และภาพเศษคอนกรีตย่อยแทนมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด โดยมีการทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติ (ทดแทนทรายและหิน) ทั้งหมดด้วยเศษคอนกรีตย่อย 100%

ตารางที่ 1 การออกแบบส่วนผสมต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม สำหรับกำลังอัดระบุ 28 MPa

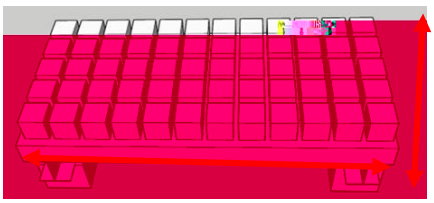
Proportion (kg)	% Replacement for fine (FA) and coarse aggregates (RCA)	
	RCA0%	RCA100%
Cement	100	100
Water	42.6	42.6
Natural fine aggregate,FA (ทราย)	302.3	

ตารางที่ 3 คุณสมบัติส่วนผสมคอนกรีตสำหรับพื้น

Values	RCA0%	RCA100%
$f_{c,cy}$ (Mpa)	31.6	28.3
$f_{c,cu}$ (Mpa)	37.9	32.9
f_t (Mpa)	3.1	3.9
f_b (Mpa)	4.7	4.0

3.3. การตรวจวัดประสิทธิภาพโดยการให้น้ำหนักบรรทุกคงค้างและไฟไหม้

การศึกษาประสิทธิภาพการให้น้ำหนักบรรทุกคงค้างและไฟไหม้ ระยะที่ 2 เป็นการให้น้ำหนักบรรทุกแบบคงค้างและไฟ โดยพิจารณาค่าน้ำหนักบรรทุก กรณี พื้นที่ใช้งานประเภทสำนักงาน (น้ำหนักบรรทุกจร = 250 กิโลกรัม/ตร.ม.) โดยใช้ลูกบาศก์ขนาด 0.15*0.15*0.15 เมตร ในการทดสอบนี้ ใช้ก้อนลูกบาศก์ทั้งหมด 60 ก้อน ดังรูปที่ 4 น้ำหนักแต่ละก้อนประมาณ 8.2-8.4 กิโลกรัม เท่ากับน้ำหนักบรรทุกรวม 502 กิโลกรัม หรือคิดเป็นน้ำหนักแผ่กระจาย = 251 กิโลกรัมต่อตารางเมตร โดยใช้อุปกรณ์วัดการแอ่นตัวแบบดิจิทัล (Digital Dial Gauge) ของบริษัท IGAGING รุ่น IGA-35-128 [17] (อ่านค่าความละเอียดได้ 0.001 มิลลิเมตร) สามชุดถูกติดตั้งที่บริเวณบนกลางแผ่นพื้นทดสอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวของแผ่นพื้น และติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิในการวัดอุณหภูมิ จำนวน 2 ตัวที่ด้านบนและด้านล่างแผ่น และ เครื่องวัดอุณหภูมิ 16 หัว บนแผ่นพื้นในเนื้อคอนกรีตของตัวอย่าง เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิ ระหว่างแผ่น Metal deck และพื้นคอนกรีต การกำหนดขั้นตอนการทดสอบ สำหรับการตรวจวัดประสิทธิภาพการให้น้ำหนักบรรทุกคงค้างและไฟไหม้ กำหนดให้แผ่นพื้นทดสอบวางอยู่บนฐานรับรอง ทำการบันทึกอุณหภูมิและการแอ่นตัวเป็นเวลา 120 นาที



รูปที่ 4 วางน้ำหนักบรรทุกคงค้างจำนวน 60 ก้อน



รูปที่ 5 การทดสอบให้น้ำหนักบรรทุกคงค้างและไฟ [18]



รูปที่ 6 ตัวอย่างการเกิดรอยร้าวหลังจากการทดสอบ



ก.ก่อนการทดสอบให้น้ำหนักบรรทุกคงค้างและไฟ



ข.การหลุดของแผ่น Metal deck

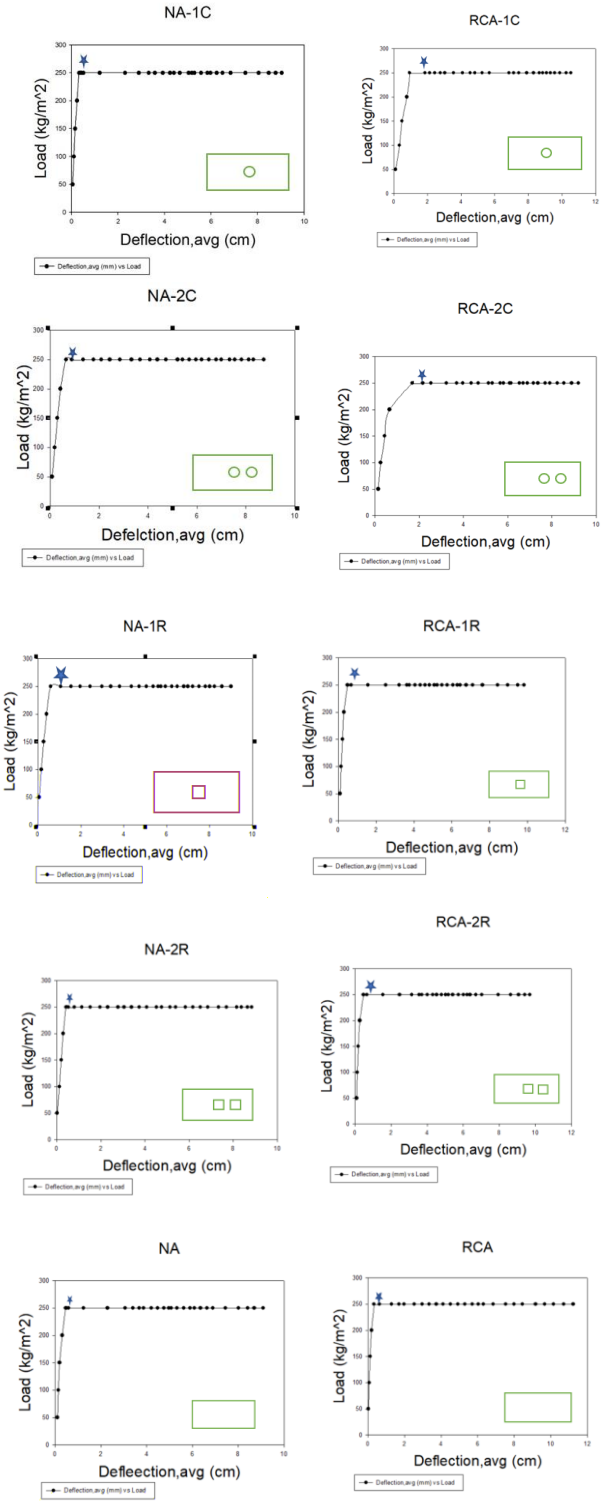
รูปที่ 7 หลังจากการทดสอบการให้น้ำหนักบรรทุกคงค้างและไฟ

4. ผลการศึกษา

4.1 การให้น้ำหนักบรรทุกคงค้างและไฟ

จากการทดสอบแผ่น Metal deck ผสมคอนกรีตจากมวลรวมตามธรรมชาติและจากเศษคอนกรีต พบรอยร้าวของคอนกรีตบริเวณด้านข้างแผ่นพื้นและด้านบนแผ่น ความกว้าง 0.1-0.2 มม. โดยจะเกิดรอยร้าวบริเวณด้านบนและด้านข้างหลายๆจุด ดังแสดงในรูปที่ 6 และทำให้เกิดการหลุดของแผ่น Metal deck ออกจากพื้นคอนกรีต ความกว้างประมาณ 6 เซนติเมตร ดังรูปที่ 7

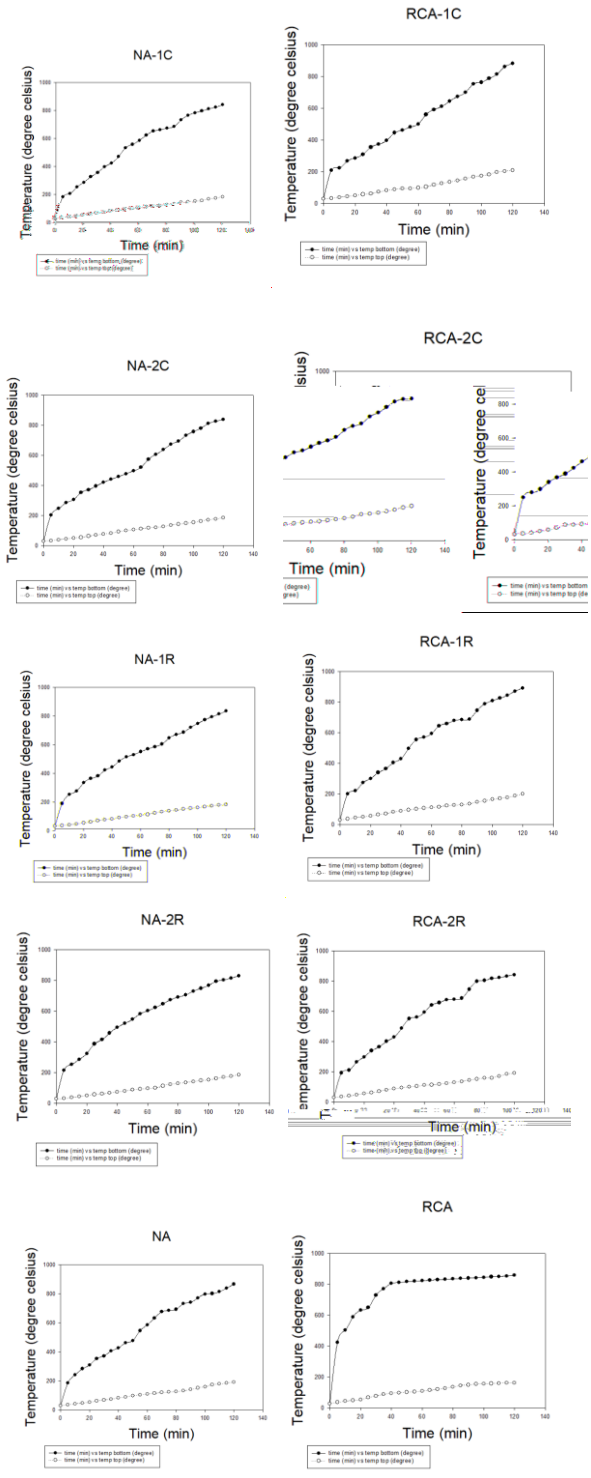
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคงค้าง



*รูปดาว หมายถึง เริ่มวัดการแอ่นตัวพร้อมปล่อยไฟ

รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกคงค้างของ NA และ RCA (100%)

4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิขณะทำการทดสอบของ NA และ RCA



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิขณะทำการทดสอบของ NA และ RCA (100%)

4.4 กราฟแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในเนื้อคอนกรีต จำนวน 4 ตัวอย่าง แบบไม่มีช่องเปิดและมีช่องเปิด

NA RCA

Opening แบบ NA-1R Opening แบบ RCA-1R

รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในเนื้อคอนกรีต

จากการวัดอุณหภูมิในเนื้อคอนกรีตที่บริเวณในเนื้อคอนกรีตและด้านใต้แผ่น Metal deck จะสังเกตได้ว่ากราฟจะมีการลดลง ของอุณหภูมิ ภายในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากอุณหภูมิจากไฟ เข้าถึงเนื้อคอนกรีตด้านในได้ยาก เกิดจากการที่มีแผ่นพื้น Metal deck ภายใต้คอนกรีตมีการบังไฟ จึงทำให้ไฟไม่สามารถเข้าถึงในเนื้อคอนกรีตได้ยากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเปรียบเทียบให้ศึกษาในกรณีคอนกรีตแบบตันและแบบที่มีช่องเปิด ดังรูปที่ 11

0211.3/ว827 คณะวิจัยขอขอบคุณบริษัท เอสพีที ดีไซน์ แอนด์ ซัพพลาย จำกัด ที่อนุเคราะห์แผ่นพื้น Metal deck สำหรับการทดสอบในโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Fisher, J. W. (1970). Design of composite beams with formed metal deck. Engineering J, Am Inst Steel Constr.

[2] Fisher, J. W, "Design of composite beams with formed metal deck," Engineering J, Am Inst Steel Constr, 1970.

[3] Ahmed, G. N., & Hurst, J. P. (1995). Modeling the thermal behavior of concrete slabs subjected to the ASTM E119 standard fire condition. Journal of Fire Protection Engineering, 7(4), 125-132.

[4] Lu, J., Liu, H., & Chen, Z. (2018). Behavior of welded hollow spherical joints after exposure to ISO-834 standard fire. Journal of Constructional Steel Research, 140, 108-124.

[5] Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high- strength concrete. Materials and structures, 33(9), 574-580.

[6] Elsawaf, S. A., & Hassan, M. M. Behaviour of structural sub-assemblies of steel beams with openings in fire conditions. Journal of Constructional Steel Research, vol. 148, pp. 627-638, 2018.

[7] Lamont, S., & Usmani, A. S. Possible 'panel instability' in composite deck floor systems under fire. Journal of Constructional Steel Research, vol. 59, no. 11, pp. 1397-1433, 2003.

[8] Bennetts, I. D., & Thomas, I. R. Design of steel structures under fire conditions. Progress in Structural Engineering and Materials, vol. 4, no. 1, pp. 6-17, 2002.

[9] Elsawaf, S. A., & Hassan, M. M. Behaviour of structural sub-assemblies of steel beams with openings in fire conditions. Journal of Constructional Steel Research, vol. 148, pp. 627-638, 2018.

[10] Self, W. Dr Mukti and other tales of woe. A&C Black, 2013.

[11] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 2011.

[12] ACI Committee 440, ACI 440.2R-08: "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 76, 2008.

[13] Ajdukiewicz, Andrzej, and Alina Kliszczewicz, "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC," Cement and concrete composites, vol. 24, no. 2, pp. 269-279, 2002.

[14] ASTM A370-12. " Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, 2012.

[15] ACI, A. (2004). 440.3 R-04: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.

[16] Setkit, M., Leelatanon, S., Imjai, T., Garcia, R., & Limkatanyu, S. (2021). Prediction of Shear Strength of Reinforced Recycled Aggregate Concrete Beams without Stirrups. Buildings, 11(9), 402.

[17] IGaging. *Digital Dial Indicator*, 2020. Available from: incrementaltools.com/iGaging_Digital_Dial_Indicator_p/iga-35-128.htm [Accessed 10 June 2020].

[18] Mäkeläinen, P., & Ma, Z. Fire resistance of composite slim floor beams. *Journal of constructional steel research*, vol. *54*, no. 3, pp. 345-363, 2000.