วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา
Engineering Journal of Research and Development
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage
ปีที่ 33 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2565
Volume 33 Issue 4 October-December 2022
Received 25 October 2021
Revised 9 February 2022
Accepted 25 March 2022

ประสิทธิภาพภาวะใช้งานของระบบพื้นคอมโพสิตจากแผ่นเหล็กบางและคอนกรีตจากเศษคอนกรีตเก่า

SERVICEABILITY PERFORMANCE OF COMPOSITE METAL DECK WITH SLAB FROM RECYCLED CONCRETE COMPOSITION

วิศรุตา ฤกษสโมสร[1], เวธนี ฤกษสโมสร[1], สมฤทัย คงระกำ[1], ภัคจิรา อ่อซ้าย[1],
นรสิงห์ อินมณเฑียร[1], อัฟฟาน กาซอ[1] และ ทนงศักดิ์ อิ่มใจ[2*]
[1]นักศึกษา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
[2]รองศาสตราจารย์, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
[*]Corresponding author, E-mail: thanongsak.im@wu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมความคืบและการสั่นเนื่องจากผู้ใช้อาคาร ในภาวะใช้งานของระบบแผ่นเหล็กพื้น โครงสร้างผสมเศษคอนกรีตจากการย่อย การศึกษาวิจัยในโครงการนี้ประกอบไปด้วยการทดสอบตัวอย่างแผ่นพื้นเมทัลเดค ประกอบจากแผ่นเมทัลเดค จำนวน 5 ตัวอย่าง คือ Metal deck slab-RAC0%, Metal deck slab-RCA25%, Metal deck slab-RCA50%, Metal deck slab-RCA75%, Metal deck slab-RCA100% การใช้วัสดุมวลรวมจากเศษคอนกรีต (RCA) มีผลด้านกำลังที่เทียบเท่าหรือน้อยกว่าแค่เพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบจากหินธรรมชาติ ในแบบระยะสั้น ซึ่งมันส่งผลดีในด้านการใช้วัสดุทดแทน ทั้งในคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตผสมมวลรวมจากเศษคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังของเศษคอนกรีต การตรวจวัดค่าการสั่นของตัวอย่างทดสอบ RCA 0% และ RCA 100% พบว่าค่าการสั่นสูงสุดของแผ่นพื้นทดสอบ ทั้งสองตัวอย่างไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน กรณี เดินปกติ เดินเร็ว แต่เมื่อพิจารณา กรณีกระโดดพบว่า ค่าการสั่นสูงสุดเกินกว่า 0.15g ซึ่งเป็นระดับที่รบกวนมาก นอกจากนั้นพบว่าทุกตัวอย่างทดสอบมีผลการสั่น กรณีกระโดด เกินกว่า 0.15 g ซึ่งเป็นระดับที่ระกวนมาก และผลจากการการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ พบว่ารูปแบบการวิบัติของตัวอย่างพื้นทดสอบ เกิดการคราก ของแผ่นเมทัลเดค

คำสำคัญ: แผ่นเหล็กพื้นโครงสร้าง; ระบบพื้นคอมโพสิต; แผ่นเหล็กม้วนชนิดบาง; ความคืบ; การสั่นสะเทือน; คอนกรีตผสมวัสดุย่อย; ภาวะใช้งาน

ABSTRACT

This paper studies the serviceability performance of composite metal deck (2200x1000 mm) with slab from the recycled concrete aggregate. The composite metal decks with concrete made from recycled concrete aggregate (0-100% replacements) are metal deck slab-RCA0%, Metal deck slab-RCA25%, Metal deck slab-RCA50%, Metal deck slab-RCA75%, Metal deck slab-RCA100%. The specimens were tested in three testing series. In series 1, material proprieties of metal deck, FRP rods, as well as mechanical properties of RCA are investigated. In series 2, 15 test specimens were tested in short, 90 days long-term loadings and subjected

Witsaruta Rerksamosorn[1], Watanee Rerksamosorn[1], Somruthai Kongrakam[1], Pakjira Aosai[1], Norrasing Inmontien[1], Affan Kasor[1] and Thanongsak Imjai[2*]
[1]Student, School of Engineering and Technology, Walailak University, Thailand.
[2]Associate Professor, School of Engineering and Technology, Walailak University, Thailand.

to vibration due to human induction. In series 3, non-linear finite element analysis was used to study the ultimate capacity of test specimens with 100% reparent aggregate. Based on the result, it is found that the vibration levels recorded in the case of human walking lies within the acceptance level (<0.15g), except in the case of human jumping, which exceeds the very annoying level. Numerical results show that the failure mode for the tested slab with 100% RCA occurred due to metal deck yielding.

KEYWORDS: Steel metal deck; Composite floor; Hot-rolled coil steel; Creep; Human induced vibration; Recycled aggregate; Serviceability

1. บทนำ

ในปัจจุบันการแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการขยายตัวอย่างมาก เนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นและการขยายตัวของเขตเมือง ในการก่อสร้างโครงสร้างอาคารคอนกรีตประกอบด้วย องค์อาคารหลักสำคัญ คือ พื้น คาน เสา ซึ่งเป็นโครงสร้างที่อยู่ด้านบนและโครงสร้างที่อยู่ด้านล่าง คือ ฐานราก และระบบเสาเข็ม โครงสร้างหนึ่งที่สำคัญมีหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกจร เป็นอันดับแรกคือโครงสร้างพื้น ในปัจจุบันการก่อสร้างพื้นมีหลายรูปแบบ เช่น วิธีแบบดั้งเดิมการใช้วัสดุไม้ การใช้คอนกรีตเทในที่ และในปัจจุบันมีการพัฒนาระบบพื้นแบบบางในรูปแบบต่างๆ เช่น พื้นคอนกรีตสำเร็จรูป เพื่อให้การก่อสร้างและการควบคุมคุณภาพเป็นไปได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ และระบบพื้นอีกประเภทหนึ่งที่ใช้คุณสมบัติเด่นของแผ่นเหล็กบางซึ่งสามารถรับแรงดึงได้เป็นอย่างดีและใช้คุณสมบัติของคอนกรีตรับแรงอัด เรียกว่า Metal deck slab [1, 2] ซึ่งระบบนี้จะประกอบไปด้วยแผ่นเหล็กบางรีดเป็นลอนลักษณะคล้ายกับแผ่นเหล็กหลังคาเมทัลชีท และใช้เหล็กตะแกรงกันร้าว (Wire mesh) วางด้านบนก่อนทำการเทคอนกรีตทับ ซึ่งระบบพื้นคอมโพสิตนี้มีคุณสมบัติรับแรงได้สูงกว่าระบบพื้นทั่วไปที่ความหนาเท่ากัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระบบพื้นประเภทนี้ซึ่งค่อนข้างมีขนาดบาง ปัจจัยที่วิศวกรต้องพิจารณาคือภาวะขีดสุด เช่น กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงเฉือน และในภาวะใช้งาน คือการแอ่นตัว และการสั่นสะเทือนของโครงสร้างพื้น เนื่องจากผู้ใช้งานของอาคาร [3-6] เหล่านี้ต้องมีการพิจารณาให้อยู่ในค่าที่กำหนด ซึ่งควรต้องมีการศึกษาผลของการเสียรูปตามกาลเวลา เช่น การหดตัว (Shrinkage) ความคืบ (Creep) เป็นต้น

เศษคอนกรีตย่อย หรือเรียกว่า Recycled Concrete Aggregate (RCA) โดยปกติเศษคอนกรีตเก่าจะมีสิ่งปนเปื้อน หิน และมอร์ตาร์เป็นส่วนประกอบ ทำให้ความแข็งแรงและความสะอาดน้อยกว่าหินธรรมชาติ นอกจากนี้เศษคอนกรีตเก่าจะมีความพรุนที่มากกว่าหิน ทำให้อัตราการดูดซึมน้ำมากกว่า เป็นผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนมวลรวมหยาบจะต่ำกว่าคอนกรีตปกติ จากผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของ RCA ในหลายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 10-30 ขึ้นอยู่กับปริมาณสัดส่วนของเศษคอนกรีตเก่าซึ่งแทนที่หินธรรมชาติ แต่การศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของพื้นทำจาก RCA ยังให้ข้อมูลค่อนข้างจำกัด และผลการทดลองที่ได้ยังค่อนข้างขัดแย้งกัน อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ทำให้สมบัติทางกลของคอนกรีตได้รับการปรับปรุงและพัฒนาไปมากประกอบกับการทดสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างของพื้นที่ทำจาก RCA [7-10] และในประเทศไทย [11, 12] ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมายังไม่มีงานวิจัย ระบุในการนำ RCA ไปใช้กับพื้นร่วมกับระบบ Metal deck ในอาคาร [12]

วัสดุแท่งคอมโพสิต (Fiber reinforced Polymer, FRP) จะมีราคาสูงกว่าเหล็กเสริมคอนกรีตแบบดั้งเดิม เนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งจะมีราคาสูงกว่าเหล็กประมาณ 1-3 เท่า เทียบจากน้ำหนักที่เท่ากัน ในปัจจุบันการผลิตวัสดุแท่งคอมโพสิตสามารถผลิตได้ในประเทศไทย และใช้วัสดุในประเทศไทยในกระบวนการผลิต ทำให้ราคาต้นทุนวัสดุแท่งคอมโพสิต ใกล้เคียงกับเหล็กเสริม เช่น ระบุจากงานวิจัยที่ผ่านมา [13]

บทความวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ RCA ไปใช้กับพื้นร่วมกับระบบ Metal deck และใช้วัสดุแท่งคอมโพสิตที่ผลิตภายในประเทศไทยเป็นเหล็กตะแกรง มาใช้การก่อสร้างและพัฒนาแผ่นพื้นสำเร็จรูปในงานก่อสร้างพื้น โดยศึกษาประสิทธิภาพภาวะใช้งานของระบบพื้นคอมโพสิตจากแผ่นเหล็กบางและคอนกรีตจากเศษคอนกรีตเก่า เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการใช้เศษคอนกรีตเก่าร่วมกับระบบพื้น Metal deck ผสมเศษคอนกรีตเก่าในการใช้งานอาคารต่อไป

2. วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพภาวะใช้งานของระบบพื้นคอมโพสิตจากแผ่นเหล็กบางและคอนกรีตจากเศษคอนกรีตเก่า ใช้ทดแทนมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด โดยทำการเปรียบเทียบกับโครงสร้างพื้นคอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมธรรมชาติแบบดั้งเดิม และทำการศึกษาประสิทธิภาพในภาวะใช้งาน คือ การเสียรูปในการให้น้ำหนักบรรทุกระยะยาวประมาณ 90 วัน และการสั่นจากการจำลองการใช้งานของผู้ใช้อาคาร และทำการพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของตัวอย่างพื้นทดสอบโดยการแทนที่มวลรวมจากธรรรมชาติด้วยเศษคอนกรีตย่อย

3. วิธีการศึกษาวิจัย

คณะผู้วิจัยจะแบ่งขอบเขตการดำเนินการศึกษาวิจัยโครงการนี้ ออกเป็น 3 ระยะ คือ ระยะที่ 1 ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ แผ่นเหล็กบาง (Metal deck) และวัสดุแท่งคอมโพสิตสำหรับใช้ทำเหล็กตะแกรง และทำการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสำหรับเทพื้นคอนกรีตโดยใช้เศษคอนกรีตเก่าจากการรื้อถอนอาคารหรือก้อนคอนกรีตที่ทำการทดสอบแล้วมาย่อยขนาดต่างๆ ทดแทนมวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) และมวลรวมละเอียด (Fine aggregate) ซึ่งการศึกษาในส่วนนี้จะศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนที่ทดแทนมวลรวมธรรมชาติเป็นร้อยละ คือ RCA0%,RCA25%, RCA50%, RCA75%, RCA100%

ระยะที่ 2 เป็นการทดสอบการบรรทุกน้ำหนักของแผ่นพื้นตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง แบ่งตามปริมาณการทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติโดยเศษคอนกรีตย่อย แบ่งเป็นสามกลุ่ม กลุ่มที่ 1 ทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจนวิบัติทดสอบที่อายุคอนกรีตเท่ากับ 28 วัน กลุ่มที่ 2 จะทดสอบน้ำหนักบรรทุกแบบคงค้าง โดยพิจารณาค่าน้ำหนักบรรทุก กรณีพื้นที่ใช้งานประเภทสำนักงาน [14] (Live load = 250 กก./ตร.ม.) เป็นระยะเวลา 90 วัน และกลุ่มที่ 3 ทำการทดสอบการสั่นจากการจำลองการใช้งานของผู้ใช้อาคาร โดยใช้ลู่วิ่งไฟฟ้าแบบควบคุมความเร็ว อัตโนมัติ ทำการทดสอบ แยกเป็นชาย หญิง วิ่งบนลู่วิ่งไฟฟ้าที่ความเร็ว 2 กม./ชม. จำลองการเดินของผู้ใช้งานในอาคาร ที่ความเร็ว 5 กม./ชม.จำลองการวิ่งของผู้ใช้งานในอาคารที่ความเร็ว 10 กม./ชม. และมีการกระโดดของผู้ใช้งาน โดยทำการตรวจวัดการสั่นของโครงสร้างพื้นทดสอบต่อเนื่อง เป็นเวลา 6 นาที

ระยะที่ 3 เป็นการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองคอนกรีต Damage Concrete Plasticity model โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการศึกษาที่ผ่านมาของคณะวิจัย เพื่อเปรียบเทียบผลการทำนายของแผ่นพื้นคอมโพสิตรับน้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งวิบัติ

3.1 รายละเอียดแผ่น Metal deck และวัสดุแท่งคอมโพสิตสำหรับเหล็กตะแกรง

แผ่นพื้นผลิตจากแผ่นเหล็กบาง เรียกว่า Metal deck ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ความหนา 0.8 มม. มีขนาดความกว้าง x ยาว 1000x2000 มม. ผลิตโดยบริษัท เอสพีที ดีไซน์แอนด์ซัพพลาย จำกัด มีค่ากำลังดึงคราก F_y=275 MPa, ค่ากำลังดึงประลัย F_u=337 MPa, ค่า Elastic modulus=210 GPa, และค่า Elongation=2.5% ได้จากค่าเฉลี่ยของทดสอบการดึงของตัวอย่างตัดจากส่วนที่เป็นแผ่นตรง จำนวน 6 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM A370 [15] ลักษณะทางกายภาพของ Metal deck ผลิตจากเหล็กชุบสังกะสี

(Galvanized Steel) ที่ได้คุณภาพ มีปุ่มนูน (Embossment) กระจายอยู่ที่สันของแผ่น ปุ่มนูนนี้จะเปรียบเสมือนตัวยึดเกาะไม่ให้แผ่นพื้น Metal Deck กับ คอนกรีตไถลตัวออกจากกัน ทำให้พื้นมีความแข็งแรง รับน้ำหนักได้ตามมาตรฐาน ในการทดสอบนี้จะใช้น้ำหนักบรรทุกจร 250 กิโลกรัม/ตร.ม. ตามที่ระบุในมาตรฐานการออกแบบทั่วไปในประเทศไทย

ในโครงการนี้คือ มวลรวมที่ผลิตจากเศษคอนกรีตย่อย โดยแบ่ง ปริมาณสัดส่วนที่ทดแทนมวลรวมธรรมชาติเป็นร้อยละ คือ RCA0%, RCA25%, RCA50%, RCA75%, RCA100% ตัวอย่าง เช่น RCA0% หมายถึง ส่วนผสม พื้นคอนกรีตเป็นการใช้คอนกรีตในงานก่อสร้างทั่วไป (กำหนดกำลังอัดระบุ = 28 MPa) โดยใช้หินและทรายจากธรรมชาติ 100% (ไม่มีการใช้เศษคอนกรีตย่อยทดแทน) RCA50% หมายถึง การใช้เศษคอนกรีตย่อยทดแทน 50% ร่วมกับหินและทรายจากธรรมชาติ 50%

ในส่วนของเหล็กตะแกรง (Wire mesh) ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุคอมโพสิตแบบแท่ง (GFRP rod) มีขนาด ϕ4 มม. และมีค่ากำลังดึงประลัยเฉลี่ย (f_{fu}) 700 MPa ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{FRP}) 43 GPa และมี Ultimate strain (ε_{fu}) = 1.5% ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบตัวอย่าง จำนวน 9 ตัวอย่างของตามมาตรฐาน ACI 440.3R [16] รูปที่ 1 แสดงการเตรียมแท่งคอมโพสิตเป็นตะแกรงมีระยะห่างระหว่างช่อง 200 มม. และติดตั้งวัสดุแท่งคอมโพสิตในแบบหล่อ ก่อนเทคอนกรีต

รูปที่ 1 การเตรียมแท่งคอมโพสิตเป็นตะแกรง (ซ้าย) และติดตั้งวัสดุแท่งคอมโพสิตในแบบหล่อ ก่อนเทคอนกรีต (ขวา)

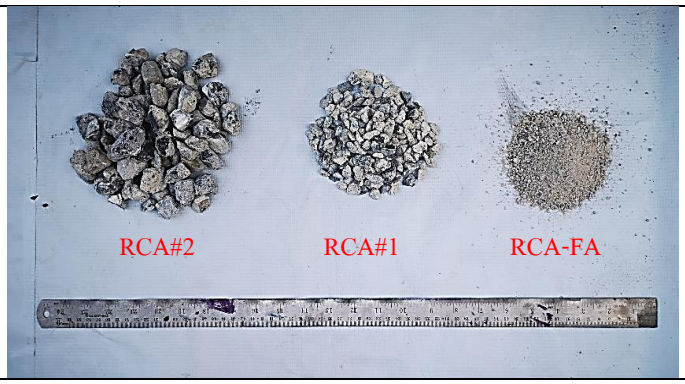
3.2 การผลิตเศษคอนกรีตย่อยทดแทนมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

การผลิตเศษคอนกรีตย่อยทดแทนมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ใช้เครื่องย่อยคอนกรีต *WU CRM-01* พัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ให้กำลังโดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถผลิตเศษคอนกรีตย่อย 5-20 มม. มีอัตราการผลิต 1-3 ตัน/ชม. [12] การทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ตามมาตรฐาน ASTM C39 [17] เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC Type I) มีกำลังอัดระบุเท่ากับ 28 MPa ส่วนผสมคอนกรีตต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม ของคอนกรีต ตารางที่ 1 แสดงปริมาณของส่วนผสมสำหรับแต่ละตัวอย่างพื้นทดสอบ และตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบและละเอียด และภาพเศษคอนกรีตย่อยแทนมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด โดยมีการทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติ (ทดแทนทรายและหิน) ทั้งหมดด้วยเศษคอนกรีตย่อย ร้อยละ 0, 25, 50, 75, 100

ตารางที่ 1 การออกแบบส่วนผสมต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม สำหรับกำลังอัดระบุ 28 MPa

Proportion (kg)	% Replacement for fine (FA) and coarse aggregates (RCA)				
	RCA0%	RCA25%	RCA50%	RCA75%	RCA100%
Cement	303	303	303	303	303
Water	129	129	129	129	129
Natural fine aggregate (FA)	916	687	458	229	-
RCA for fine aggregate (RCA-FA)	-	229	458	687	916
Natural aggregate (NA)	1028	771	514	257	-
Recycled aggregate (RCA)	-	257	514	771	1028
Super plasticizer	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
w/c ratio	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
Slump (mm)	75	78	82	86	91

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบและละเอียด และภาพเศษคอนกรีตย่อยแทนมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

Physical properties	RCA #2	RCA #1	RCA-FA	ภาพเศษคอนกรีตย่อยแทนมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด
Max. size (mm)	20.9	18.6	0.075	
Specific gravity	2.78	2.70	2.63	
Water absorption (%)	1.1	1.05	1.2	
Fineness modulus	7.6	7.4	3.51	
Impact value (%)	13.4	13.6	-	
Crushing value (%)	22.6	23.12	-	
Residual mortar (%)	32.4	31.2	-	

การทดสอบคุณสมบัติส่วนผสมคอนกรีตควบคุมโดยใช้มวลรวมจากธรรมชาติ 100% (ระบุเป็น RCA0%) ตามมาตรฐาน ASTM C39 [17] RCA#2 คือขนาดที่ค้างตะแกรงเบอร์1/2 RCA#1 คือขนาดที่ค้างตะแกรงเบอร์3/8 และ RCA-FA คือขนาดที่ผ่านตะแกรงเบอร์3/8 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC type I) มีกำลังอัดระบุเท่ากับ 28 MPa และผลจากการทดสอบหาค่าเฉลี่ยจากประเภทละ 6 ตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ยสำหรับคุณสมบัติคอนกรีต คือค่ากำลังอัดจากตัวอย่างรูปทรงกระบอก ($f_{c,cyl}$) ค่ากำลังอัดจากตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ($f_{c,cu}$) ค่ากำลังดึง (f_t) และ ค่ากำลังแรงดัดจากตัวอย่างคาน (f_b) แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติส่วนผสมคอนกรีตสำหรับพื้นทดสอบจากค่าเฉลี่ยจำนวน 6 ตัวอย่าง

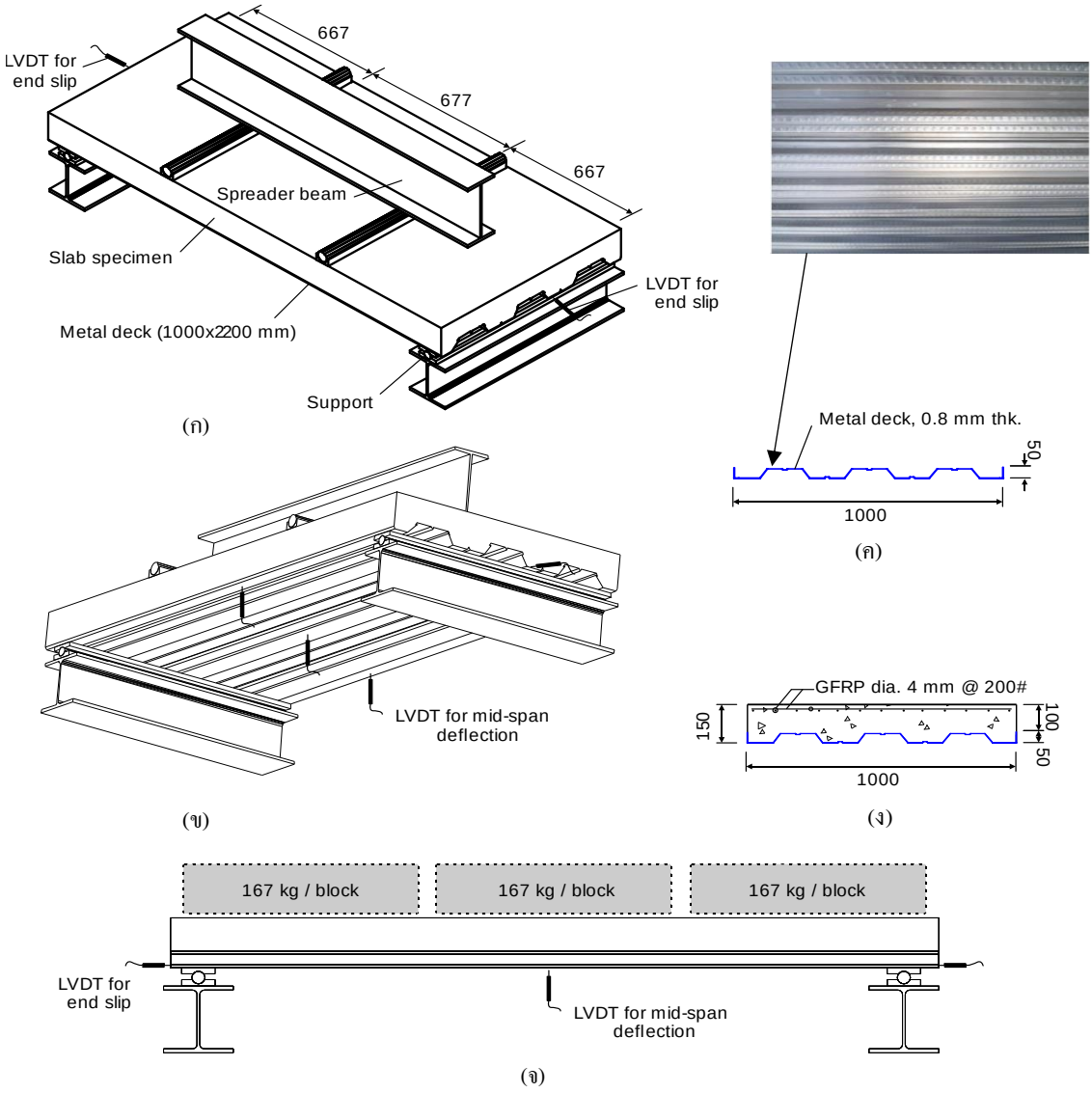
Values	RCA0%	RCA25%	RCA50%	RCA75%	RCA100%
$f_{c,cyl}$ (MPa)	31.6	30.7	32.3	31.1	28.3
$f_{c,cu}$ (MPa)	37.9	36.9	36.2	33.9	32.9
f_t (MPa)	3.1	3.0	3.3	3.6	3.9
f_b (MPa)	4.7	4.5	4.3	4.1	4.0

3.3 ประสิทธิภาพการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย

การศึกษาประสิทธิภาพการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ระยะที่ 2 กลุ่มที่ 1 นี้เป็นการทดสอบการบรรทุกน้ำหนักของแผ่นพื้นตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่างแบ่งตามปริมาณการทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติโดยเศษคอนกรีตย่อย โดยกำหนดการทดสอบแบ่งเป็นสามกลุ่ม จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ กำหนดการให้น้ำหนักบรรทุกนั้นผ่านคานขวาง (Spreader beam) บนแผ่นพื้นทดสอบวางอยู่บนฐานที่รองรับขนาด 100 มม. ประเภท Pinned และ Roller supports ด้านซ้ายและขวาของตัวอย่างทดสอบ ในส่วนของการให้น้ำหนักบรรทุก ทำการให้น้ำหนักโดยเครื่องทดสอบ UTM ขนาด 100 ตัน ดังรูปที่ 2-ก และมีการให้น้ำหนักแบบ Displacement control ที่ 1 mm/min ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานจะทำการบันทึกโดยติดตั้ง LVDT จำนวน สามชุดใต้แผ่นพื้นทดสอบไว้ และติดตั้ง LVDT จำนวน 2 ตัวที่ด้านหัว-ท้าย ของตัวอย่างดังรูปที่ 2-ข เพื่อตรวจวัดการ End slip ระหว่างแผ่น Metal deck และพื้นคอนกรีต ระหว่างทดสอบทำการบันทึกพฤติกรรมรอยร้าว โดยผลการตรวจวัดจะมีการบันทึกผ่าน Data Logger ยี่ห้อ KYOWA model EDX-10B แสดงผลแบบ Real-time ผ่านคอมพิวเตอร์ เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมขณะทดสอบได้ทันที ทำการให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบจนกระทั่งค่าน้ำหนักบรรทุกไม่เพิ่มขึ้น และระยะยืดของกระบอก Hydraulic ที่ติดตั้งบนเครื่องทดสอบ UTM ถึงขีดจำกัด (ไม่เกิน 150 มม.)

3.4 การตรวจวัดประสิทธิภาพในภาวะใช้งานโดยการให้น้ำหนักบรรทุกระยะยาว

การศึกษาประสิทธิภาพการในภาวะใช้งาน ระยะที่ 2 กลุ่มที่ 2 เป็นการให้น้ำหนักบรรทุกแบบคงค้าง โดยพิจารณาค่าน้ำหนักบรรทุก กรณีพื้นที่ใช้งานประเภทสำนักงาน (น้ำหนักบรรทุกจร 250 กิโลกรัม/ตร.ม.) โดยบล็อกคอนกรีตขนาด 0.7 x 0.5 เมตร หนา 0.2 เมตร ในการทดสอบนี้ใช้ก้อนบล็อกคอนกรีตทั้งหมด 3 ตัวอย่าง เท่ากับน้ำหนักบรรทุกรวม 501 กิโลกรัม หรือคิดเป็นน้ำหนักแผ่กระจาย 250.5 กิโลกรัมต่อเมตร เป็นระยะเวลา 90 วัน โดยใช้อุปกรณ์วัดการแอ่นตัวแบบดิจิทัล (Digital Dial Gauge) ของบริษัท IGAGING รุ่น IGA-35-128 [18] (อ่านค่าความละเอียดได้ 0.001 มิลลิเมตร) สามชุดถูกติดตั้งที่บริเวณใต้แผ่นพื้นทดสอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวของแผ่นพื้น และติดตั้ง LVDT จำนวน 2 ตัวที่ด้านหัว-ท้าย ของตัวอย่างดังรูปที่ 2-จ เพื่อตรวจวัดการ End slip ระหว่างแผ่น Metal deck และพื้นคอนกรีต การกำหนดขั้นตอนการทดสอบ สำหรับการตรวจวัดประสิทธิภาพในภาวะใช้งานโดยการให้น้ำหนักบรรทุกระยะยาว กำหนดให้แผ่นพื้นทดสอบวางอยู่บนแบบหล่อคอนกรีต และติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการแอ่นตัว เมื่อทำการหล่อคอนกรีต ค่าการแอ่นตัวจากน้ำหนักคอนกรีตสดจะถูกบันทึก เป็นเวลา 28 วัน และจะทำการใส่น้ำหนักบรรทุกจากบล็อกคอนกรีตตามที่กำหนดไว้ และทำการบันทึกการแอ่นตัวต่อเนื่องอีกประมาณ 60 วัน ก่อนที่จะเอาน้ำหนักบรรทุกออก และตรวจวัดต่อไปอีก 3 วัน รวมระยะเวลาการตรวจวัดทั้งสิ้น 90 วัน

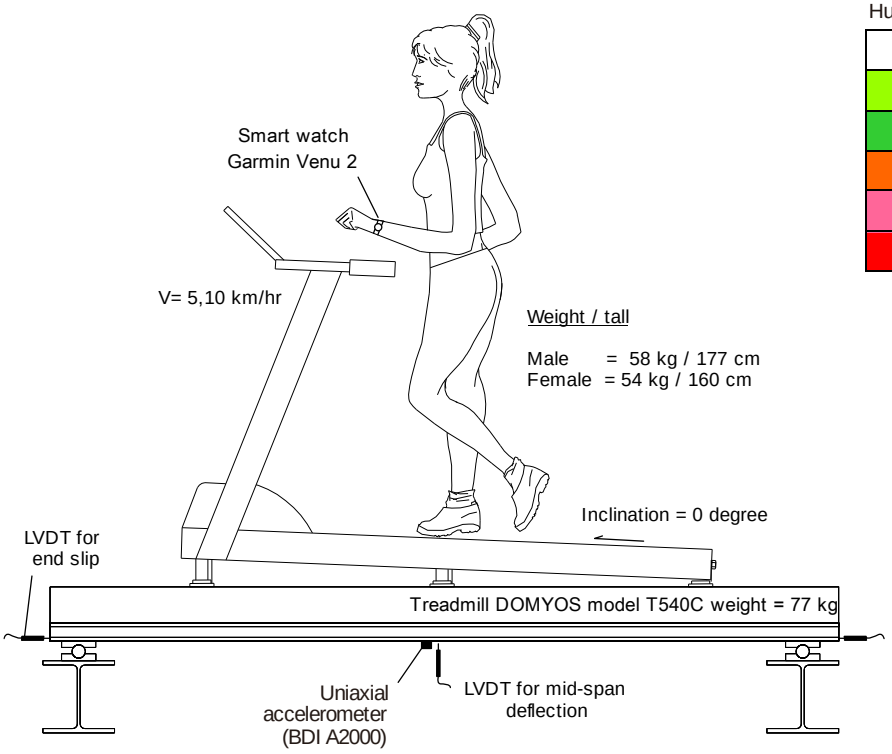


รูปที่ 2 รายละเอียดพื้น Metal deck ผสมเศษคอนกรีตย่อย ทดสอบในโครงการวิจัย

3.5 การตรวจวัดการสั่นสะเทือน

การทดสอบการสั่นจากการจำลองการใช้งานของผู้ใช้อาคาร เป็นการตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากผู้ทดสอบ ชาย-หญิง อายุ 20 ปี (กำหนดเป็นช่วงวัยทำงาน) ซึ่งประกอบไปด้วย การเดินปกติ และการเดินเร็ว (รูปที่ 3) ผู้ทดสอบเป็นเพศชาย สูง 177 เซนติเมตร น้ำหนัก 58 กิโลกรัม และเพศหญิง สูง 160 เซนติเมตร น้ำหนัก 54 กิโลกรัม ที่ได้เตรียมทำการทดสอบ มีทำการวัดการสั่นสะเทือน พร้อมเครื่องตรวจจับการสั่นสะเทือน ยี่ห้อ BDI A2000 Accelerometer สามารถตรวจวัดความเร่งได้ ±5g แบบแกนเดียว ทำการติดตั้ง ไว้ใต้แผ่น Metal deck หลังจากนั้นทำการทดสอบ โดยได้นำเครื่องลู่วิ่งรุ่น Treadmill DOMYOS model T540C ดังรูปที่ 3-ก วางไว้บนแผ่น Metal deck ทดสอบ ซึ่งจะทำการให้ผู้ทดสอบขึ้นไปทำการทดสอบบนลู่วิ่ง ที่ได้ทำการตั้งไว้บนแผ่นพื้นทดสอบ และได้เริ่มทำการทดสอบจับการตรวจวัดการสั่นสะเทือน ในรูปแบบที่กำหนดไว้คือ การเดินปกติ (กำหนดความเร็วเฉลี่ยของคนเดิน 5 กม./ชม.) การเดินเร็ว (กำหนดความเร็วเฉลี่ยของคนเดิน 10 กม./ชม.) และการกระโดด (กำหนดความถี่ 50 ครั้ง/นาที)

การกำหนดความเร็วของผู้ทดสอบ ทำการกำหนดความเร็วของเครื่องลู่วิ่ง เทียบกับนาฬิกาแบบ Smart Watch รุ่น Garmin Venue 2 เพื่อดูความแตกต่างของการเดินปกติ และการวิ่ง เช่น กรณี เกิดอุบัติภัย และการกระโดด เพื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนและการแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบ และนำค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดไปตรวจสอบกับเกณฑ์มาตรฐานในรูปของค่าความเร่งโน้มถ่วง (g=9.81 m/s^2) โดยมาตรฐาน BS 6472-1 [19] กำหนดค่าที่ยอมให้ในรูปที่ 3-ข จะเป็นค่าที่ผู้ใช้งานอาคาร มีการรับรู้ได้ (Human perception)



(ก)

Human perception to vibration

Effect	Acceleration Range
Imperceptible	A<0.005g
Perceptible	0.005<a<0.015g
Annoying	0.015g<a<0.05g
Very annoying	0.05g<a<0.15g
Intolerable	0.15g<a

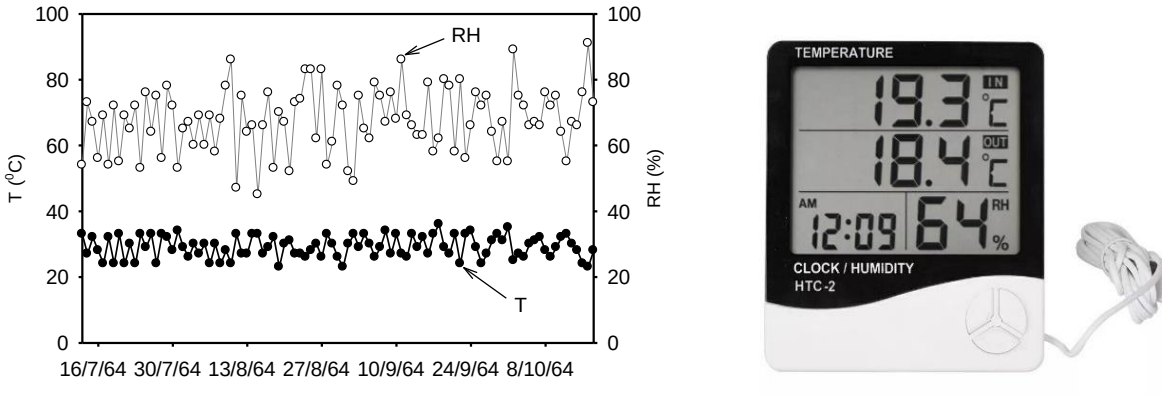
(ข)

(ค)

รูปที่ 3 การทดสอบการสั่นโดยจำลองการสัญจรของผู้ใช้อาคารผ่านลู่วิ่ง (ก), เทียบกับผลกระทบต่อผู้ใช้อาคาร (ข) จากอุปกรณ์ตรวจความเร่ง (ค)

3.6 การตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

ในการให้น้ำหนักจากภาคสนาม คณะวิจัยได้ทำการตรวจวัดอุณหภูมิ (Ambient Temperature) และทำการตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) เป็นค่าอัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศต่อปริมาณไอน้ำที่จะทำให้เกิดอากาศอิ่มตัว ณ อุณหภูมิเดียวกัน แสดงในรูปร้อยละ (%) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลจากผลของอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่อการโก่งตัวของแผ่น Metal deck ทดสอบในการทดสอบในระยะยาว เช่น การคืบ และในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้อุปกรณ์ไฮโกรมิเตอร์แบบดิจิทัลรุ่น HTC-2 ซึ่งสามารถบันทึกค่าอุณหภูมิ (ช่วงการวัด -50 ถึง 70 องศาเซลเซียส) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ (ช่วงการวัดร้อยละ 10 ถึง 99) รูปที่ 4 เป็นกราฟที่แสดงผลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เริ่มตรวจวัดวันที่ 13 กรกฎาคม 2564 ถึง วันที่ 17 ตุลาคม 2564 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงขณะทำการวางน้ำหนักบรรทุก และอุณหภูมิลดลงเล็กน้อย เนื่องจากมีฝนตกขณะวางน้ำหนักบรรทุก และจากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 29.1 องศาเซลเซียส และค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 67.7



(ก) กราฟอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (ข) ไฮโกรมิเตอร์ รุ่น HTC-2

รูปที่ 4 ผลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จากการบันทึกโดยไฮโกรมิเตอร์ รุ่น HTC-2

4. ผลการทดสอบ

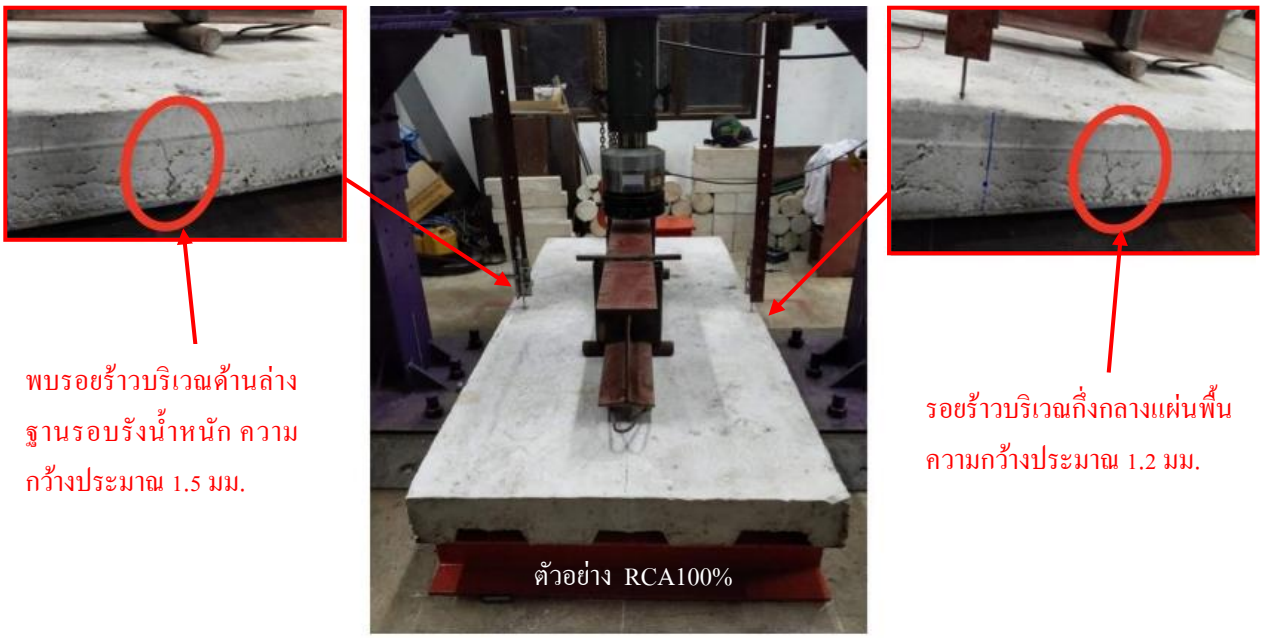
4.1 ประสิทธิภาพการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย

จากการทดสอบแผ่น Metal deck ผสมคอนกรีตจากการย่อยแบบระยะสั้น พบรอยร้าวของคอนกรีตพบรอยร้าวบริเวณด้านล่างฐานรองรับน้ำหนัก ความกว้างประมาณ 1.5 มม. และรอยร้าวบริเวณกึ่งกลางแผ่นพื้น ความกว้างประมาณ 1.2 มม. โดยจะเกิดรอยร้าวบริเวณด้านข้างเกือบกลางคาน 2 จุด ดังแสดงในรูปที่ 5 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัวกลางคาน และ End slip แสดงในรูปที่ 6 พบว่าน้ำหนักที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มครากประมาณ 25 kN และมีค่าการแอ่นตัวระหว่าง 3.5 ถึง 4.2 มม. ในส่วนของ End slip พบว่า ก่อนจุดครากจะไม่พบการเลื่อนไถล เมื่อเกินค่าน้ำหนักคราก พบว่ามี End slip ประมาณ 0.5- 0.9 มม. ตารางที่ 4 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพของพื้นทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกทดสอบแบบระยะสั้นจนวิบัติ จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบค่าของ RCA 0% จะมีกำลัง (P_{max}) เท่ากับ 27.0 kN และแอ่นตัวเท่ากับ 3.5 มม. ที่ เทียบกับ RCA 100 % (P_{max}) เท่ากับ 25.2 kN และแอ่นตัวเท่ากับ 4.20 มม.

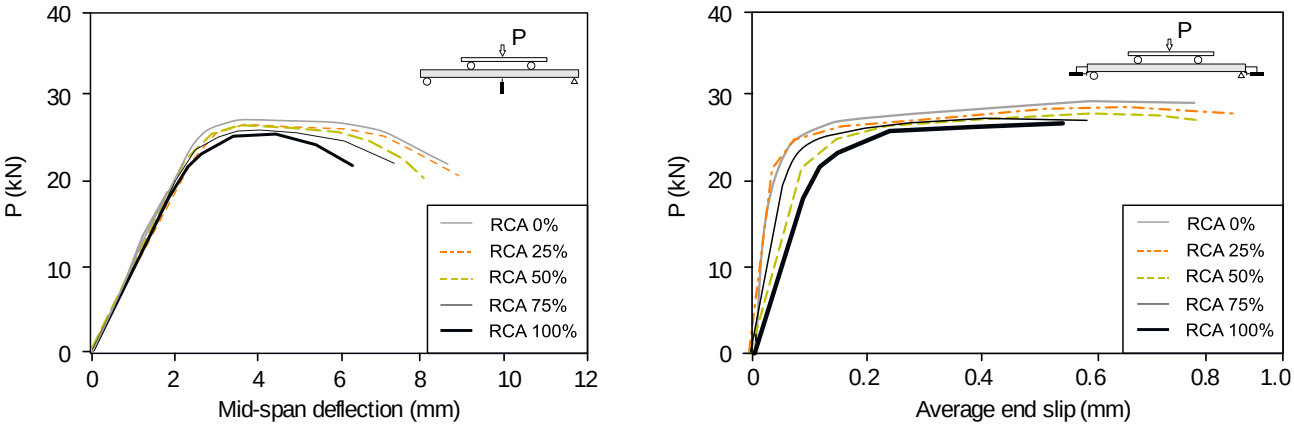
ตารางที่ 4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของพื้นทดสอบภายน้ำหนักบรรทุกทดสอบระยะสั้นจนวิบัติ

Slab Ref.	P_{max} (kN)	P_f (kN)	M_{max} (kN-m)	Δ_{max} (mm)	M_y (kN-m)	Δ_y (mm)	μ_u	μ_f	K_e (kN/m)	E (kN.mm)
RCA0%	27.0	21.9	45.0	3.5	39.8	2.3	1.52	3.78	10.3	198
RCA25%	26.5	20.5	44.1	3.62	38.1	2.5	1.45	3.58	9.3	185
RCA50%	26.4	20.2	44.1	3.6	38.3	2.3	1.55	3.52	9.7	172
RCA75%	26.1	22.1	43.3	3.64	38.7	2.4	1.52	3.04	9.8	151
RCA100%	25.2	21.5	42.1	4.20	37.5	2.4	1.70	2.56	9.9	127

Note: P_f is load failure, SF is shear failure, μ_u is ductility at ultimate, μ_f is ductility at failure, K_e is are the stiffness of load-deflection curve before yielding and after yielding, E is the anergy absorption.



รูปที่ 5 ภาพแสดงรูปแบบการวิบัติและพฤติกรรมการเกิดรอยร้าว ของตัวอย่างทดสอบ RCA100%



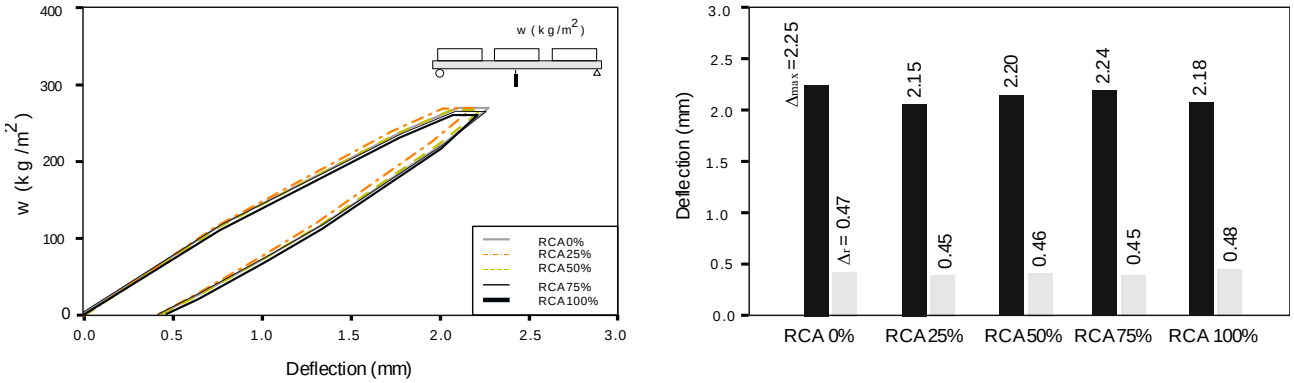
รูปที่ 6 ผลการตรวจวัด Average mid-span deflection และ Average end slip

4.2 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกระยะยาว

ในส่วนของการให้น้ำหนักคงค้างแบบระยะยาว (Long-term loading) นั้น จะเป็นระยะเวลา 90 วัน รูปที่ 7 เมื่อให้น้ำหนักจากก้อนบล็อกคอนกรีตแล้วเสร็จ 3 ก้อน รวมน้ำหนักทั้งหมด 501 กิโลกรัม กำหนดวางน้ำหนักค้างไว้เป็นเวลา 90 วัน และอ่านค่าการแอ่นตัวคงค้างภายหลังการทดสอบ 90 วัน โดยจะได้ค่าการโก่งตัวช่วงกลาง (Δ_{max}= 2.25) ของ RCA 0% สูงสุด และค่าการเลื่อนไถล (Δ_r = 0.48) ของ RCA100% สูงสุด แสดงดัง รูปที่ 8-ก, ข

วิศรุตา ฤกษสโมสร[1], เวธนี ฤกษสโมสร[1], สมฤทัย คงระกำ[1], ภัคจิรา อ่อช้าย[1], นรสิงห์ อินมณเฑียร[1], อัฟฟาน กาซอ[1] และทนงศักดิ์ อิ่มใจ[2*]

รูปที่ 7 การให้น้ำหนักแบบคงค้างโดยการทดสอบแบบระยะยาว



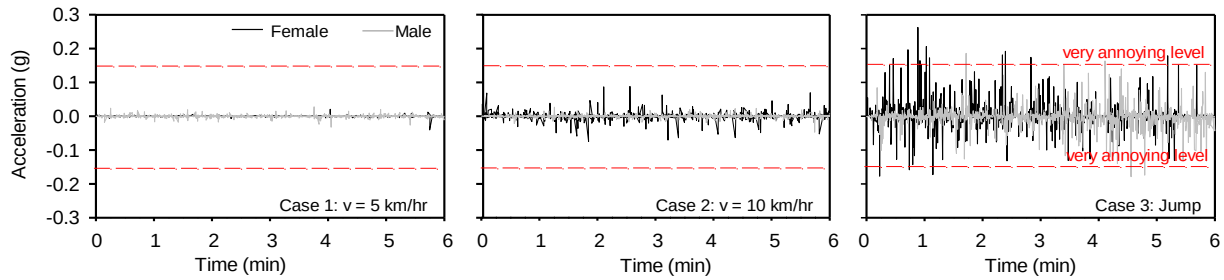
(ก) (ข)

รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด และการแอ่นตัวคงค้างภายหลังการทดสอบ 90 วัน

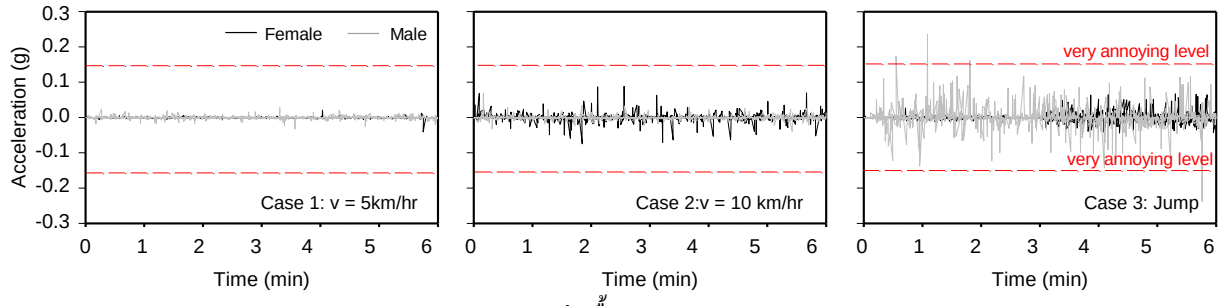
4.3 การตรวจวัดการสั่นสะเทือนและเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของผู้ใช้งานอาคาร

การตรวจวัดการสั่นสะเทือน คณะวิจัยจะใช้เครื่องตรวจจับการสั่นสะเทือน ยี่ห้อ BDI A2000 Accelerometer (รูปที่ 3-ค) สามารถตรวจวัดความเร่งได้ ±5g แบบแกนเดียว ทำการติดตั้ง ไว้ใต้แผ่น Metal deck ซึ่งมาตรฐานที่เกี่ยวข้องของการสั่นสะเทือนสำหรับในการตรวจวัดการสั่นสะเทือนและเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของผู้ใช้อาคาร [19] จากรูปที่ 9 แสดงผลการตรวจวัดค่าการสั่นของตัวอย่างทดสอบ RCA 0% และ RCA 100% พบว่าค่าการสั่นสูงสุดของแผ่นพื้นทดสอบ ทั้งสองตัวอย่างไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน กรณี เดินปกติ เดินเร็ว แต่เมื่อพิจารณา กรณีกระโดดพบว่า ค่าการสั่นสูงสุดเกินกว่า 0.15g ซึ่งเป็นระดับ very annoying นอกจากนั้นพบว่าทุกตัวอย่างทดสอบ มีผลการสั่นกรณีกระโดด เกินกว่า 0.15g ซึ่งเป็นระดับ very annoying ดังรูปที่ 9-ค

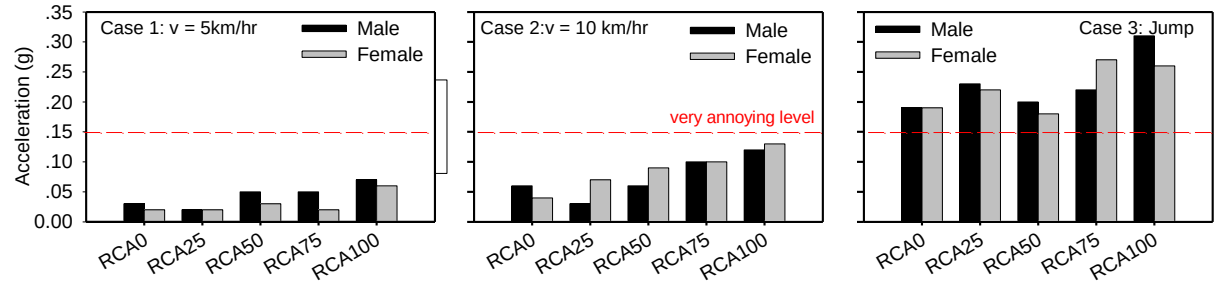
จากผลการทดสอบดังกล่าว พบว่าการใช้ระบบพื้นคอมโพสิตจากแผ่นเหล็กบางและคอนกรีตจากเศษคอนกรีตเก่า ทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติ มีระดับค่าการสั่นอยู่ในช่วงที่ผู้ใช้งานอาคาร มีการรับรู้ได้ (Human perception) รู้สึกในภาวะสบาย กรณี เดินปกติ และเดินเร็ว ยกเว้นกรณีกระโดด ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่อาจจะเกิดในกรณีสุดวิสัย



(ก) แผ่นพื้นทดสอบ RCA 0%



(ข) แผ่นพื้นทดสอบ RCA 100%



(ค) ค่าการสั่นสูงสุด

รูปที่ 9 ผลการตรวจวัดค่าการสั่นของตัวอย่างทดสอบ (ก) RCA0% (ข) RCA100% และ (ค) ค่าการสั่นสูงสุดของแผ่นพื้นทดสอบ

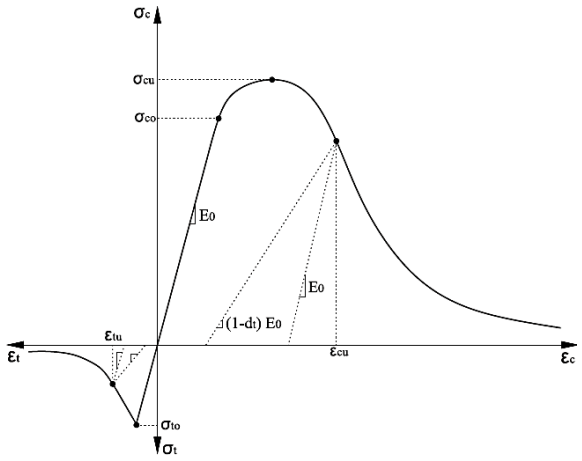
5. การวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์

5.1. รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ การให้น้ำหนัก รายละเอียดจุดที่รองรับ และการปรับแก้แบบจำลอง

การวิเคราะห์การแอ่นตัวของแผ่น Metal deck ทดสอบโดยแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์โดยโปรแกรม ABAQUS version 6.14 [20] สำหรับโครงสร้างแผ่นพื้นทดสอบ 1 ตัวอย่าง (RCA100%) รับน้ำหนักบรรทุกแบบ Monotonic loading จนกระทั่งวิบัติ เพื่อใช้เปรียบเทียบพฤติกรรมการเสียรูปของตัวอย่างคอนกรีตที่ทดแทนด้วยมวลรวมจากเศษคอนกรีตย่อยทั้งหมด ดังมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยต่อเนื่อง ภายใต้โครงการเสริมสร้างศักยภาพและขับเคลื่อนความร่วมมือเชิงยุทธศาสตร์ระหว่างประเทศระดับทวิภาคี ปี 2564 ระหว่างมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ (ดำเนินการทดสอบภาคสนาม 90 วัน) ร่วมกับ University of Warwick (พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของโครงสร้างคอนกรีตจากการทดแทนมวลรวมทั้งหมดโดยเศษคอนกรีตย่อย [12] ในงานวิจัยนี้แบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์สำหรับโครงสร้างคอนกรีต คือ ชนิด 8-node linear brick (C3D8R) และสำหรับโครงสร้างคานเหล็กประกอบ คือ ชนิด 10-node quadratic tetrahedron (C3D10) ใน Library ของโปรแกรม ABAQUS ซึ่งเป็นการสร้างรูปแบบอิลิเมนต์ภายในขอบเขตตามที่ผู้ใช้กำหนด (User define) มีการกำหนด

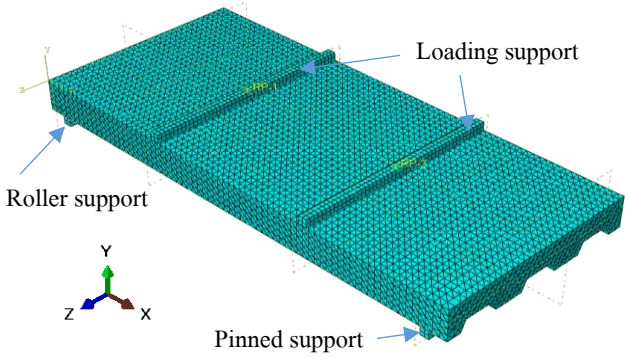
ขนาดชิ้นส่วนย่อยตามขนาดที่เหมาะสมที่สุด ที่กำหนดอัตโนมัติโดยโปรแกรม และกำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ทดสอบจริง (ค่าน้ำหนักแผ่กระจาย w = 250 กิโลกรัม/ตร.ม.) เพื่อประหยัดทรัพยากรในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์

การจำลองสภาพการยึดรั้งของแบบจำลองจะใช้ฐานรองรับแบบหมุนได้ (Pinned support) ซึ่งใช้ในการทดสอบภาคสนาม และกำหนดคุณสมบัติวัสดุคอนกรีต แบบ Concrete Damage Plasticity model (CDP) ถูกนำมาใช้กำหนดพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีต ภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง พฤติกรรมในช่วง ยืดหยุ่นกำหนดให้มีความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's law) ซึ่งความสัมพันธ์จะมี ลักษณะเชิงเส้น ที่มีค่าความเค้นยืดหยุ่นสูงสุดในช่วงนี้เป็นไป ตามคำแนะนำของ ACI318-19 [14] หรือ 0.45xfc' ส่วนในช่วง ไม่ยืดหยุ่นเลือกใช้แบบจำลองของ Carreira D.J. และ Chu K.H. [21] กำหนดความสัมพันธ์ในช่วงที่ไม่เชิงเส้นทั้งก่อน และหลังจุดที่ความเค้นมีค่าสูงสุด ซึ่งตามวิธีของความเสียหาย เชิงพลาสติกที่เลือกใช้จะสามารถแสดงผลในส่วนของความ เสียหายหรือการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์คอนกรีตได้ในรูป ของการเสื่อมสภาพความแกร่ง (Stiffness degradation) ซึ่ง เกิดขึ้นได้ทั้งผลจากการกระทำของแรงอัดและแรงดึง ดังแสดงใน (รูปที่ 10)



รูปที่ 10 รูปแสดงพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง [14]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะวิจัย ทำการศึกษากับพฤติกรรมรับแรงเฉือนของโครงสร้างคอนกรีตผสม RCA โดยใช้ตัวอย่างรูปทรง Z และทำการทดสอบภายใต้แรงเฉือน [22] โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ และได้ใช้รูปแบบ Concrete Damaged Plasticity ในการจำลองพฤติกรรมดังกล่าว ดังนั้นการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับ CDP ในการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Abaqus กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ต่างๆ อ้างอิงจากการศึกษาที่ผ่านมา สำหรับความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียด (Constitutive concrete model) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตจากเศษคอนกรีตย่อย ค่า Elastic modulus ของคอนกรีตคำนวณตามสมการกำหนดโดย Model Code 2010 [23] เท่ากับ 28 MPa และ Poisson's ratio = 0.25 ในส่วนของเหล็กแผ่น Metal deck ทำการกำหนดจุดคราก F_y=275 MPa และจุดประลัย F_u= 337 MPa ค่า Elastic modulus (E_s) เท่ากับ 210 GPa และ Poisson's ratio = 0.35 ดังนั้นข้อกำหนดของการวิบัติ (Failure criteria) ในแบบจำลองในการวิเคราะห์นี้คือ เมื่อโครงสร้างเหล็กแผ่นบางถึงจุดคราก ($S11=F_y$) หรือ ค่าความเครียดคอนกรีต ($E11$) ถึงค่า ε_{cu} = 0.003



(ก) แบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์

(ข) การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 11 (ก) แบบจำลองคอมพิวเตอร์ 3 มิติ และ (ข) การทดสอบแผ่นพื้นตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

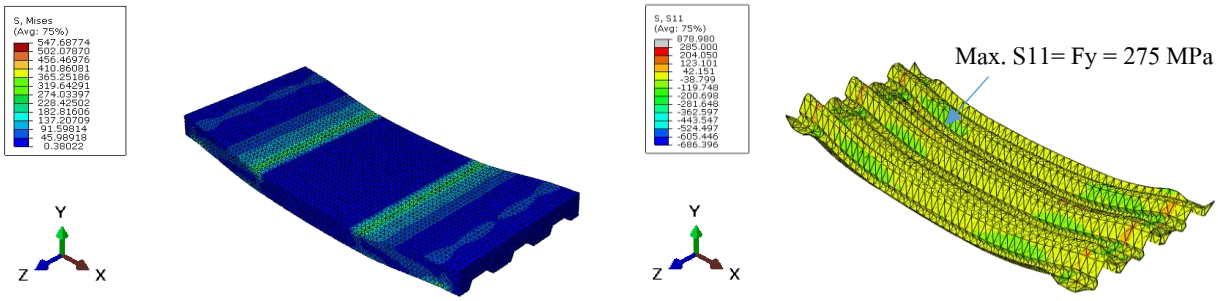
5.2. การจำลอง Contact ระหว่าง Metal deck และพื้นคอนกรีต

ในส่วนของการจำลองรูปแบบการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่น Metal deck ซึ่งจะสอดคล้องกับผลจากการตรวจวัดโดย LVDT ที่ติดตั้งหัวท้ายของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งไม่พบการเลื่อนไถล (Slip) ระหว่างคอนกรีตและแผ่น Metal deck ก่อนตัวอย่างถึงจุดครากของแผ่นพื้น ดังนั้นถือว่า Metal deck slab เป็นคอมโพสิตโดยสมบูรณ์ และใช้แบบจำลองการยึดเหนี่ยวประเภท Hard Contact จึงมีความเหมาะสมในการศึกษาพฤติกรรมในช่วงก่อนค่าน้ำหนักที่จุดครากของแผ่น Metal deck

5.3. ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์

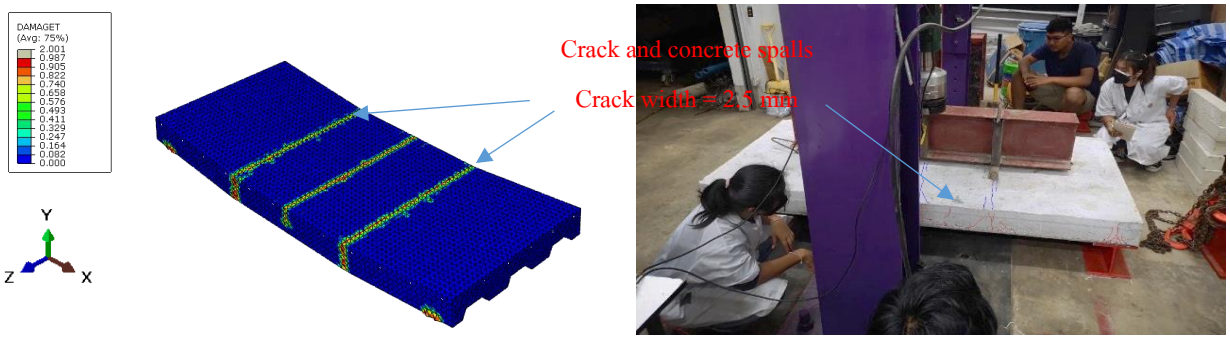
รูปที่ 12 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นแบบ von Mises และ สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีต (รูปที่ 12-ก) และ S11 สำหรับ Metal deck (รูปที่ 12-ข) ซึ่งผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์สำหรับตัวอย่างพื้นคอมโพสิต ที่ใช้เศษคอนกรีตย่อยทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติ 100% พบว่าค่าความเค้น von Mises สูงสุดเท่ากับ 320 MPa ที่บริเวณช่วงกลางด้านบนแผ่นพื้น และบริเวณด้านบนบริเวณจุดให้น้ำหนัก ($S11$= 319 MPa) ซึ่งมากกว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีต และผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นของแผ่น metal deck พบว่าค่าความเค้น $S11$= 275 MPa เท่ากับค่า F_y ซึ่งกำหนดเป็น Failure criteria แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตวิบัติก่อนที่แผ่น Metal deck จะคราก ซึ่งเป็นการวิบัติแบบลักษณะ Ductile ตามที่ได้ออกแบบไว้สำหรับการใช้งานสำหรับสำนักงาน

ในการวิเคราะห์ดัชนีความเสียหาย ซึ่งในโปรแกรม Abaqus จะสามารถตรวจและจำลองความเสียหาย เช่น ตำแหน่งรอยร้าวของตัวอย่างทดสอบ เป็นความเสียแบบการอัด (DAMGEC) และความเสียหายโดยการดึง (DAMGET) โดยรอยร้าวจะเกิดขึ้นบนโครงสร้างคอนกรีตเมื่อค่า DAMGET > 1.0 ซึ่งความเสียหายโดยการดึงนี้จะแสดงรูปแบบและตำแหน่งรอยร้าวได้ ดังแสดงใน (รูปที่ 13-ก) และเปรียบเทียบกับตำแหน่งรอยร้าวบนตัวอย่างทดสอบที่น้ำหนักสูงสุด (รูปที่ 13-ข) พบความกว้างรอยร้าว 1.5-2.5 มม.



(ก) (ข)

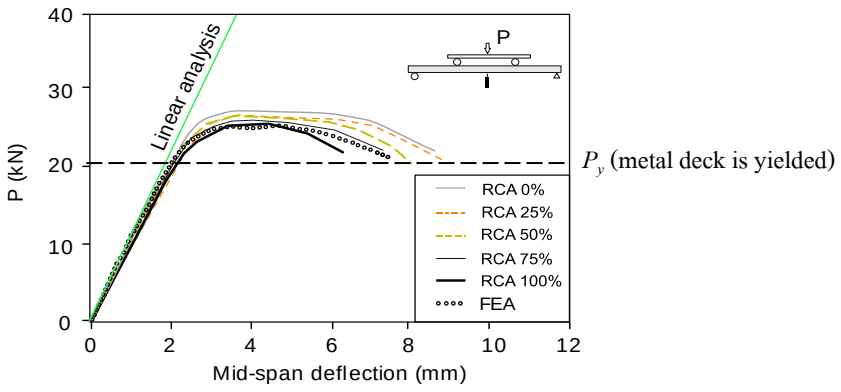
รูปที่ 12 (ก) ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นแบบ von Mises และ สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีต และ (ข) S11 สำหรับ Metal deck



(ก) (ข)

รูปที่ 13 (ก) ผลการวิเคราะห์รอยร้าวจากผล DAMGET และ (ข) ความเสียหายบนตัวอย่างทดสอบที่น้ำหนักสูงสุด

ค่าการแอ่นตัวในแนวราบของ RCA 0% , RCA 25% , RCA 50% , RCA 75% และ RCA 100% มีค่าเท่ากับ 8.7 , 9 , 8.2 , 7.5 และ 6.3 มีหน่วยเป็น มม. ตามลำดับ ค่าน้ำหนักสูงสุดในแนวดิ่ง มีค่าเท่ากับ 27, 26 , 26 , 25.5 และ 24.8 มีหน่วยเป็น kN ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งจะพบว่าผลจากการทำนายโดยการวิเคราะห์หน้าตัดคอมโพสิตแบบอีลาสติก (Linear analysis) ตามมาตรฐาน BS5950 [24] และการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ พบว่าเมื่อตัวอย่างถึงค่าน้ำหนักที่ทำให้แผ่น Metal deck คราก (P_y) ค่าที่ได้จากจากวิเคราะห์จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์เป็นในทิศทางเดียวกันกับตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบจริงภาคสนาม กรณี ตัวอย่างพื้นทดสอบ RCA100% ผลจากการวิเคราะห์สามารถทำนาย ค่าน้ำหนักที่จุดคราก ค่าน้ำหนักที่วิบัติ โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5% (รูปที่ 14)



รูปที่ 14 ผลการเปรียบเทียบการแอ่นตัวของพื้นทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์

6. สรุปผลการศึกษา

จากศึกษาประสิทธิภาพภาวะใช้งานของระบบพื้นคอมโพสิตจากแผ่นเหล็กบางและคอนกรีตจากเศษคอนกรีตเก่า ใช้ทดแทนมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด โดยทำการเปรียบเทียบกับโครงสร้างพื้นคอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมธรรมชาติแบบดั้งเดิม และทำการศึกษาประสิทธิภาพในภาวะใช้งาน คือ การเสียรูปในการให้น้ำหนักบรรทุกระยะยาว ประมาณ 90 วัน และการสั่นจากการจำลองการใช้งานของผู้ใช้อาคาร สามารถสรุปผลการทดสอบดังนี้

- การทดสอบครั้งนี้จะมีการระบุกำลังอัดเท่ากับ 28 MPa ส่วนผสมคอนกรีตต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. ของคอนกรีต โดยมีการทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติด้วยคอนกรีตย่อย (RCA)
- การใช้วัสดุมวลรวมจากเศษคอนกรีต (RCA) มีผลด้านกำลังที่เทียบเท่าหรือน้อยกว่าแค่เพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบจากหินธรรมชาติ ในแบบระยะสั้น ซึ่งมันส่งผลดีในด้านการใช้วัสดุทดแทน ทั้งในคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตผสมมวลรวมจากเศษคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังของเศษคอนกรีต
- จากการทดสอบแผ่นพื้น Metal deck ทดสอบจะเห็นได้ว่า สามารถนำวัสดุมวลรวมจากเศษคอนกรีต (RCA) มาใช้ในงานพื้นประเภทสำนักงานได้ (Live load = 250 กิโลกรัม/ตร.ม.)
- ผลการตรวจวัดค่าการสั่นของตัวอย่างทดสอบ RCA 0% และ RCA 100% พบว่าค่าการสั่นสูงสุดของแผ่นพื้นทดสอบ ทั้งสองตัวอย่างไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน กรณี เดินปกติ เดินเร็ว แต่เมื่อพิจารณา กรณีกระโดดพบว่า ค่าการสั่นสูงสุดเกินกว่า 0.15g ซึ่งเป็นระดับ very annoying นอกจากนั้นพบว่าทุกตัวอย่างทดสอบ มีผลการสั่น กรณีกระโดด เกินกว่า 0.15g ซึ่งเป็นระดับ very annoying
- การใช้ระบบพื้นคอมโพสิตจากแผ่นเหล็กบางและคอนกรีตจากเศษคอนกรีตเก่า ทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติ มีระดับค่าการสั่นอยู่ในช่วงที่ผู้ใช้งานอาคาร มีการรับรู้ได้ (Human perception) รู้สึกในภาวะสบาย กรณีเดินปกติและเดินเร็ว ยกเว้นกรณีกระโดด ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่อาจจะเกิดในกรณีสุดวิสัย
- จากผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ สำหรับตัวอย่างพื้นคอมโพสิต ที่ใช้เศษคอนกรีตย่อยแทนมวลรวมธรรมชาติ 100% พบว่าความเค้น von Mises สูงสุดเท่ากับ 320 MPa ที่บริเวณช่วงกลางด้านบนแผ่นพื้นและบริเวณด้านบนบริเวณจุดให้น้ำหนัก ($S11$ = 319 MPa) ซึ่งมากกว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีต
- ผลการวิเคราะห์รูปแบบการวิบัติพบว่า คอนกรีตจะเกิดการวิบัติ ในรูปแบบ Concrete crushing ที่ด้านบนแผ่นพื้น ตามด้วยเกิดการคราก ของแผ่น Metal deck ดังนั้นการเสริมแรงด้วยเหล็กเสริมหลักที่ด้านบนแผ่นพื้นหรือ การใช้คอนกรีตกำลังสูงอาจจะสามารถเพิ่มกำลังการรับน้ำหนักของแผ่นพื้นได้

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการประกวด Structural Steel Improvement for Young Engineers (SSI 4YE 2021) บริษัทสหวิริยาสตีล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) และทุนอุดหนุนการวิจัย โครงการเสริมสร้างศักยภาพและขับเคลื่อนความร่วมมือเชิงยุทธศาสตร์ ระหว่างประเทศระดับทวิภาคีและพหุภาคี กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 ตามสัญญาเลขที่ อว 0211.3/ว827 คณะวิจัยขอขอบคุณบริษัท เอสพีที ดีไซน์แอนด์ซัพพลาย จำกัด

ที่อนุเคราะห์แผ่นพื้น Metal Deck สำหรับทดสอบในโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ Dr. Reyes Garcia จาก University of Warwick, UK สำหรับการอนุเคราะห์ผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Idrus, A. B. and Newman, J. B. Construction related factors influencing the choice of concrete floor systems. *Construction Management & Economics*, 2002, 20(1), pp. 13-19.

[2] Mahmood, A. I. and Tsavdaridis, K. D. The evolution of composite flooring systems: applications, testing, modelling and eurocode design approaches. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 155, pp. 286-300.

[3] OHLSSON, S. Springiness and human-load floor vibrations. A design guide. *Document-Swedish Council for Building Research*, 1988.

[4] Polensek, A. Structural damping and its effect on human response to floor vibrations. *Forest Research Laboratory, Oregon State University*, Corvallis, 1985.

[5] Hu, J. L., Chui, Y. H., and Onysko, D. M. Vibration serviceability of timber floors in residential construction. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2001, 3(3), pp. 228-237.

[6] Murray, T. M., Allen, D. E. and Ungar, E. E. Floor vibrations due to human activity Steel Des. *Guid. Ser*, 2003, 11, D811.

[7] Mohammed, T. U., Hasnat, A., Awal, M. A. and Bosunia, S. Z. Recycling of brick aggregate concrete as coarse aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(7), B4014005.

[8] Dimitriou, G., Savva, P. and Petrou, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 2018, 158, pp. 228-235.

[9] De Brito, J., Ferreira, J., Pacheco, J., Soares, D. and Guerreiro, M. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. *Journal of Building Engineering*, 2016, 6, pp. 1-16.

[10] De Brito, J., et al. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. *Journal of Building Engineering*, 2016, 6, pp. 1-16.

[11] K. Jitchaiyapoom, S. Detphan, C. Detphan, T. Phoo-ngernkham, N. Damrongwiriyanupap and S. Hanjitsuwan. Mechanical Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer and Normal Concretes using Recycled Concrete Aggregate Replaced Crushed Limestone. *The Journal of KMUTNB,* 2022, 32(3), (Accepted).

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

[13] Imjai, T., Garcia, R., Guadagnini, M and Pilakoutas, K. Strength degradation in curved Fiber-reinforced Polymer (FRP) bars used as concrete reinforcement. *Polymers*, 2020, 12(8), pp. 1653.

[14] ACI Committee 318-19. *Building code requirements for reinforced concrete and commentary.* American concrete institude: Detroit, 2019, pp. 417-463.

[15] ASTM A370-12. *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. 2012.

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

[17] ASTM C39/C39M-18. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Philadelphia: USA, 2001.

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

[19] BS 6472-1. *Guide to Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings*. Part 1: Vibration Sources Other Than Blasting, 2008.

[20] ABAQUS. 2016. *FEA software and User's Manual version 6.14.* Hibbitt, karlsson Sorensen Inc, Rhode Island: USA. http://www.abaqus.com., [1 March 2020]

[21] Carreira, D. J. and Chu KH. Stress strain relationship for plaine concrete in tension. *ACI Journal*, 1985, pp. 82-72 : 797-804.

[22] Kanhakorn, P., Rerksamosorn, W., Rerksamosorn, W., Inmontien, N., Imjai, T. and Setkit, M. Estimation of Shear behaviour for Recycled Aggregate Concrete using Digital Image Correlation (WU-DIC). *The Journal of KMUTNB*, 2021, 28(4).

[23] Bulletin No. 56. *Model Code 2010 - First complete draft, Volume 2*, 2010. Available from: https://www.fib-international.org, 2020.

[24] Bradford, M. A., Nethercot, D. and Trahair, N. Behaviour and design of steel structures to BS 5950. *CRC Press*. 2002.