



การทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตผสมเศษคอนกรีตเก่ารับแรงเฉือนด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพถ่าย WU-DIC

ภราดร กัณหากรณ์ เวชนี ฤกษ์สมโสสร วิศรุตา ฤกษ์สมโสสร นรสิงห์ อินมณเทียร ทนงศักดิ์ อิมใจ* และ มนเทียร เสรีจกิจ
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

สุพชัย ทิพย์ภักดิ์

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ชิระวัฒน์ วัฒนพานิช

สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7567 2399 อีเมล: thanongsak_im@wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.10.007

รับเมื่อ 18 พฤษภาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 7 กรกฎาคม 2564 ตอรับเมื่อ 20 กรกฎาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 12 ตุลาคม 2565

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การรื้อถอนโครงสร้างอาคารคอนกรีตเก่าและนำเศษคอนกรีตที่ย่อยแล้วมาใช้ทดแทนมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้าง เช่น คาน หรือ พื้น ซึ่งต้องศึกษาพฤติกรรมการรับแรงประเภทต่างๆ เช่น แรงดัด แรงเฉือน แรงอัด หรือ แรงบิด เป็นต้น กรณีการออกแบบโครงสร้างคาน มักป้องกันโครงสร้างมิให้เกิดการวิบัติภายใต้แรงเฉือนหรือแรงบิด ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมของแรงเฉือนของส่วนผสมคอนกรีตดังกล่าว ต้องอาศัยอุปกรณ์ทางเทคนิคที่มีความสามารถตรวจจับการวิบัติของแรงเฉือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเทคนิคประมวลผลภาพถ่ายแบบไม่สัมผัสกับตัวอย่างทดสอบที่ใช้การประมวลผลของภาพของพื้นผิวของวัตถุ เรียกว่า วิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน โดยการกำหนดจุด Pixel จากการพ่นสีที่พื้นผิวของวัตถุ ซึ่งพิกัดของจุดจะใช้อ้างอิงก่อนและหลังการเสียรูป รูปแบบการกระจายตัวของจุดในระนาบสองมิติจะถูกระบุค่าพิกัดเริ่มต้นจากภาพแรก ในการทำนายพฤติกรรมแรงเฉือนของคอนกรีตผสมเศษคอนกรีตเก่า สำหรับตัวอย่างรูปทรง Z โดยนำผลการทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแบบดั้งเดิม มาเปรียบเทียบกับวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการตรวจวัดการเสียรูปจากแรงเฉือน พบว่า ผลการตรวจวัดการเสียรูปนั้น มีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 5 และผลที่ทดสอบนำมาเปรียบเทียบกับสมการที่เป็นมาตรฐานในปัจจุบัน พบว่า ค่าหน่วยแรงเฉือนที่ได้จากการทำนายโดยสมการ Vecchio and Collin ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด จากการศึกษาวิจัยนี้พบว่า การประมวลผลการเสียรูปโดยภาพถ่ายมีความคลาดเคลื่อนน้อย สามารถตรวจวัดการเสียรูปในแนวระนาบของพื้นผิวตัวอย่างแบบสองมิติได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อเทียบกับการตรวจวัดโดยการใช้อุปกรณ์วัดแบบดั้งเดิมภายใต้การวิบัติแบบแรงเฉือน

คำสำคัญ: เศษคอนกรีตเก่า การประมวลผลภาพถ่าย ตัวอย่าง Z-push off พฤติกรรมแรงเฉือน ไฟไนต์เอลิเมนต์

การอ้างอิงบทความ: ภราดร กัณหากรณ์, เวชนี ฤกษ์สมโสสร, วิศรุตา ฤกษ์สมโสสร, นรสิงห์ อินมณเทียร, ทนงศักดิ์ อิมใจ, มนเทียร เสรีจกิจ, สุพชัย ทิพย์ภักดิ์ และ ชิระวัฒน์ วัฒนพานิช, "การทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตผสมเศษคอนกรีตเก่ารับแรงเฉือนด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพถ่าย WU-DIC," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 2, หน้า 355-368, เม.ย.-มิ.ย. 2566.



Estimation of Shear Behaviour for Recycled Aggregate Concrete using Digital Image Correlation (WU-DIC)

Paradorn Kanhakorn, Wataneer Rerksamosorn, Witsaruta Rerksamosorn, Norrasing Inmontien, Thanongsak Imjai* and Monthian Setkit

Civil Engineering Program, School of Engineering and Technology, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand
Suppachai Tippakdee

The Center for Scientific and Technological Equipment, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand

Chirawat Wattanapanich

Computer Engineering and Electronics, School of Engineering and Technology, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 7567 2399, E-mail: thanongsak_im@wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.10.007

Received 18 May 2021; Revised 7 July 2021; Accepted 20 July 2021; Published online: 12 October 2022

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

When using waste demolition such as recycled aggregates, it is important to investigate compressive behavior such as flexural strength, shear strength, and torsional strength, etc. On the design of beam structure, the investigation of structure failure of flexural and shear failure is required. An effective tool to detect failure is necessary. This paper proposed a static stress estimation method using digital image correlation (DIC) for the shear behavior of Z-push off specimens made of 100% recycled aggregate concretes. The DIC method initially requires random black speckles painted on the concrete surface to capture a series of images and, consequently, a displacement field. DIC measures this displacement field by comparing digital images taken before and after the speckles. In forecasting the shear stress behavior of recycled concrete aggregates in Z-push off specimens, the inspection was conducted by comparing the original test results with the DIC. The results of the shear stress revealed approximately 4–6% errors when compared with the present standard equation. Moreover, the shear stress values of test specimens obtained from Vecchio and Collin yielded equation results close to those of the test. In addition, DIC is able to better detect linear deformation when compared with the traditional inspection with less errors.

Keywords: Recycled Concrete Aggregate, Digital Image Correlation, Z-push Off, Shear Behaviour, Finite Element Analysis

Please cite this article as: P. Kanhakorn, W. Rerksamosorn, W. Rerksamosorn, N. Inmontien, T. Imjai, M. Setkit, S. Tippakdee, and C. Wattanapanich, "Estimation of shear behaviour for recycled aggregate concrete using digital image correlation (WU-DIC)," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 2, pp. 355–368, Apr.–Jun. 2023 (in Thai).

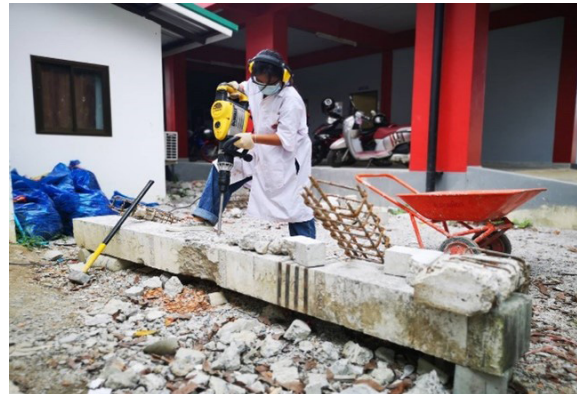
1. บทนำ

ส่วนผสมหลักของคอนกรีตประกอบด้วยซีเมนต์ ทราย หิน และน้ำ มักเรียกทรายและหินว่ามวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ ตามลำดับ โดยปกติมวลรวมหยาบที่นำมาผสมคอนกรีตคือหินธรรมชาติ ในหลายทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาวิจัยที่จะนำเศษวัสดุที่เหลือจากการก่อสร้างเพื่อนำมาย่อยเป็นวัสดุรีไซเคิลและนำมาทดแทนมวลรวมในคอนกรีต [1] เรียกว่าวัสดุจากเศษคอนกรีตเก่าที่ถูกย่อยเพื่อทดแทนมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีตว่า Recycled Concrete Aggregate (RCA) โดยได้จากการนำเศษคอนกรีตเก่ามาย่อยให้มีขนาดเท่ากับหินแล้วนำไปแทนที่หินบางส่วนหรือทั้งหมด ในงานวิจัยต่างๆ ได้ศึกษาคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ RCA เป็นส่วนผสมเพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่ใช้หินจากธรรมชาติ โดยเฉพาะประเทศแถบยุโรป [2], [3] และแถบเอเชีย [4], [5]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เศษคอนกรีตเก่าจะมีสิ่งปนเปื้อน หิน และมอร์ตาร์ เป็นส่วนประกอบทำให้ความแข็งแรง และความสะอาดน้อยกว่าหินธรรมชาติ นอกจากนี้ เศษคอนกรีตเก่าจะมีความพรุนที่มากกว่าหินทำให้อัตราการดูดซึมน้ำมากกว่า เป็นผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนมวลรวมหยาบลดลงร้อยละ 10-30 ขึ้นอยู่กับปริมาณสัดส่วนของเศษคอนกรีตเก่าซึ่งแทนที่หินธรรมชาติ [1] แต่บางงานวิจัยกลับพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสม RCA ไม่ได้ด้อยไปกว่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติ กรณีมีการออกแบบสัดส่วนผสมโดยคำนึงถึงปริมาณมอร์ตาร์ที่ติดอยู่กับเศษคอนกรีตเก่า [3] ในประเทศไทยการใช้คอนกรีตผสม RCA อยู่ในงานถนนเป็นส่วนใหญ่ [6]

อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ทำให้สมบัติทางกลของคอนกรีตได้รับการปรับปรุงและพัฒนาไปมาก ประกอบกับการทดสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างของคานที่ทำจากคอนกรีตผสม RCA ในช่วง 10 ปีหลัง ได้ให้ผลเป็นไปในทางบวก และบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ในการนำ RCA ไปใช้กับองค์อาคารหลัก เช่น พื้น หรือคาน ได้ [7], [8]

ในการออกแบบที่คำนึงถึงประสิทธิภาพของโครงสร้าง



รูปที่ 1 การสกัดเศษคอนกรีตจากโครงสร้างคอนกรีต

คอนกรีตสำหรับพื้น หรือคาน ต้องพิจารณาค่ากำลังอัดในการคำนวณรับแรงดัด และแรงเฉือน ซึ่งในส่วนของการคำนวณรับแรงดัดจะแปรผันตามคุณสมบัติของเหล็กเสริมหลัก ต่างจากพฤติกรรมรับแรงเฉือนซึ่งค่ากำลังอัดคอนกรีตจะเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการออกแบบกำลังรับแรงเฉือน

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา (รูปที่ 1) ได้ศึกษาการรับน้ำหนักของคานและพื้นที่ใช้คอนกรีตผสม RCA โดยได้ทดสอบการรับกำลังเฉือนของพื้นและคาน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแรงเฉือนของคานที่ทำจากคอนกรีตผสม RCA โดยใช้เส้นใยเหล็กในการช่วยต้านแรงเฉือน พบว่าพฤติกรรมการต้านแรงเฉือนของคานที่ทำจาก RCA ผสมเส้นใยเหล็กอาจต่ำกว่าคานของคานคอนกรีตผสมเส้นใยเสริมเหล็กปกติ แต่กำลังเหล่านี้นขององค์อาคาร RCA จะไม่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ในสมการออกแบบของมาตรฐานการออกแบบของสมาคมคอนกรีตแห่งสหรัฐอเมริกา [9] ซึ่งเป็นแม่แบบของมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายในโครงสร้างคอนกรีตภายใต้แรงเฉือน เรียกว่า Digital Image Correlation หรือ DIC ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดแบบไม่สัมผัสสำหรับการประมาณความเครียดตลอดระยะนาบหรือบริเวณที่สนใจอย่างต่อเนื่อง ซึ่งต่างจากการตรวจวัดแบบระบบ Sensor เช่น การใช้ Strain Gage สำหรับความเครียด หรือ Linear Voltage Displacement Transducer (LVDT) สำหรับการแอนตัว พบว่า มีความ



คลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 5-15 เมื่อตัวอย่างทดสอบมีการแตกร้าว หรือที่หลังจากเหล็กเสริมมีการคราก [10], [11]

ในโครงการนี้ คณะวิจัยได้ทำการการศึกษาวิจัยต่อเนื่องเกี่ยวกับพฤติกรรมรับแรงเฉือนของโครงสร้างคอนกรีตผสม RCA โดยใช้ตัวอย่างรูปทรง Z และทำการทดสอบภายใต้แรงเฉือน เรียกว่า Z-push off [3]-[5], [12]-[15] โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่าย ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเปรียบเทียบกับสมการที่ใช้ในการออกแบบในปัจจุบัน ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบนี้จะใช้เป็นแนวทางให้ภาคอุตสาหกรรมหันมาสนใจการผลิตคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนหินและผสมเส้นใยเหล็ก สามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบของค้ำอาคารหลัก ในอนาคตได้อย่างมั่นใจต่อไป

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ ในการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายร่วมกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมรับแรงเฉือนของตัวอย่างคอนกรีตผสม RCA สำหรับตัวอย่างทดสอบ Z-push off จำนวนสามกลุ่ม (ทั้งหมด 9 ตัวอย่าง) จากมวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ (M1) มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตย่อย (M2 มีสัดส่วนละเอียด แสดงในรูปที่ 2) และปรับปรุงคุณสมบัติความเหนียวของส่วนผสมดังกล่าวด้วยเส้นใยเหล็ก (M3)

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมหน่วยแรงเฉือนของตัวอย่างคอนกรีตจากการใช้เศษคอนกรีตย่อยแทนมวลรวมหยาบและปรับปรุงคุณสมบัติด้วยเส้นใยเหล็ก ซึ่งหน่วยแรงเฉือนนี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบโครงสร้างหลัก โดยมีการใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายสำหรับตัวอย่างทดสอบ Z ที่ออกแบบให้วิบัติภายใต้แรงเฉือนซึ่งตัวอย่างและส่วนผสมคอนกรีต มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.1 การออกแบบตัวอย่างทดสอบ

การออกแบบตัวอย่างทดสอบในรูปทรง Z ภายใต้แรงเฉือน เรียกว่า “Z-push off” specimen มีขนาดสูง 500 มม. กว้าง 200 มม. และมีความหนา 100 มม. และมีร่องบากกว้าง 20 มม. ตัวอย่างมีการเสริมเหล็ก ประกอบไปด้วย

เหล็กเสริมหลัก 4-φ12 ($F_y = 395$ เมกะปาสกาล) เพื่อป้องกันการวิบัติจากแรงดัด และใช้เหล็กปลอกขนาด φ6@50 มม. ($F_y = 235$ เมกะปาสกาล) ทุกตัวอย่างทดสอบไม่มีการเสริมเหล็กบริเวณช่วงกลาง Crack Plane (200 × 100 มม.) เพื่อให้การวิบัติจากแรงเฉือนมีต้นตอจากคอนกรีตเพียงอย่างเดียว

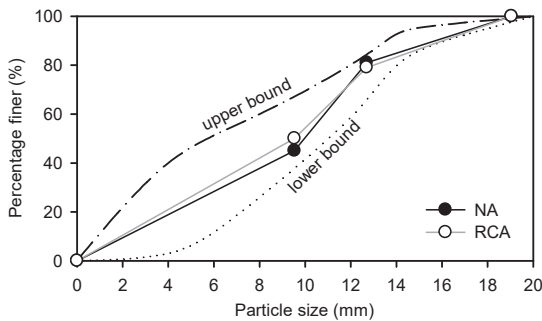
งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ Z-push off จากส่วนผสมคอนกรีตจำนวนสามกลุ่มๆ ละ 3 ตัวอย่าง โดยแยกตามลักษณะมวลรวมหยาบ คือ M1 มวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ (NA) M2 มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตย่อย (RCA) และ M3 มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตย่อยผสมปรับปรุงเส้นใยเหล็กร้อยละ 2.5 จากน้ำหนักคอนกรีต (RCA-SF) แบบชนิด 3D ยาว 65 มม. มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มม. ดังรูปที่ 3 ($F_y = 1200$ เมกะปาสกาล $E = 200$ จิกะปาสกาล) ดังมีรายละเอียดส่วนผสม แสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม

Proportion (kg)	M1	M2	M3
Cement	500	500	500
Water	253	253	253
Fine Aggregate (FA)	765	765	765
Natural Aggregate (NA)	768	-	-
Recycled Aggregate (RCA)	-	768	768
Steel Fiber	-	-	6
Super Plasticizer	-	-	0.25
w/c ratio	0.5	0.5	0.5
Slump (mm)	75	70	65

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบและละเอียด

Physical Properties	NA	RCA	FA
Max. size (mm)	19.1	18.6	4.76
Specific Gravity	2.67	2.53	2.63
Water Absorption (%)	1.1	5.4	1.2
Fineness Modulus	7.48	7.6	3.51
Impact Value (%)	10.15	13.4	-
Crushing Value (%)	21.77	23.12	-
Residual Mortar (%)	-	32.5	-



รูปที่ 2 สัดส่วนคละและขนาดของมวลรวม



(ก) เส้นใยเหล็ก (ข) เศษคอนกรีตย่อย

รูปที่ 3 ตัวอย่างเส้นใยเหล็ก (ก) และเศษคอนกรีตย่อยแทนมวลรวมหยาบ (ข)

2.2 คุณสมบัติคอนกรีตและเหล็กเสริมคอนกรีต

การทดสอบคุณสมบัติส่วนผสมคอนกรีตควบคุม (Mix-1) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ตามมาตรฐาน ASTM C39 [16] เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC Type 1) มีกำลังอัดระบุเท่ากับ 30 เมกะปาสคาล ตามมาตรฐาน ASTM C39 และผลจากการทดสอบหาค่าเฉลี่ยจากประเภทละ 6 ตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ยสำหรับคุณสมบัติคอนกรีต คือค่ากำลังอัดจากตัวอย่างรูปทรงกระบอก ($f_{c,cyl}$) ค่ากำลังอัดจากตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ($f_{c,cu}$) ค่ากำลังดึง (f_t) และ ค่ากำลังแรงดัดจากตัวอย่างคาน (f_b) แสดงในตารางที่ 3

ในส่วนของการทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริม 2 ชนิด ได้แก่ เหล็กปลอก $\phi 6$ มม. และเหล็กเสริมหลัก $\phi 12$ มม. ชนิดละ 6 ตัวอย่าง ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากเฉลี่ยเท่ากับ 242 เมกะปาสคาล และ 412 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และ

กำลังรับแรงดึงประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 510 เมกะปาสคาล และ 655 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

ตารางที่ 3 คุณสมบัติคอนกรีตจากค่าเฉลี่ยจำนวน 6 ตัวอย่าง

Values	Mix-1	Mix-2	Mix-3
$f_{c,cyl}$ (MPa)	34.4	33.4	30.8
$f_{c,cu}$ (MPa)	41.2	40.1	35.8
f_t (MPa)	3.4	3.3	4.2
f_b (MPa)	5.1	4.9	4.4

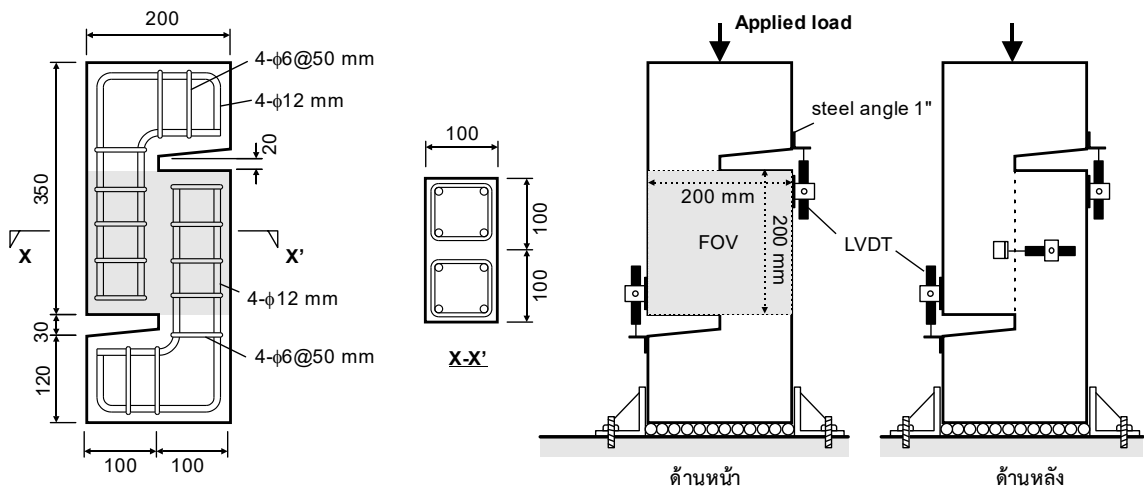
2.3 การให้น้ำหนักบรรทุกและอุปกรณ์ตรวจวัด

การให้น้ำหนักตัวอย่างบรรทุกทดสอบ ติดตั้งโดยเครื่อง UTM ขนาด 50 ตัน ติดตั้งตัวอย่างทดสอบวางไว้แทนทดสอบและนำ Roller Support มาวางไว้บนตัวอย่างทดสอบ ณ ตำแหน่งจุดสมมาตรของตัวอย่างเพื่อถ่ายน้ำหนักไปยังหน้าตัดรับแรงเฉือนโดยตรง และการวัดการแอ่นตัวจะใช้เครื่องมือ Linear Voltage Displacement Transducers (LVDT) ซึ่งสามารถอ่านค่าละเอียดได้ถึง 0.001 มม. จำนวน 2 ชุด บริเวณด้านข้างของตัวอย่างเพื่อหาค่าการเสียรูป โดยการวัดการเสียรูปเป็นการบันทึกค่าการแอ่นตัวจะทำภายหลังการเพิ่มหรือลดชวงน้ำหนักที่กระทำบนตัวอย่าง และทำการวาดตำแหน่ง Shear Plan ณ บริเวณตำแหน่งที่เกิดการวิบัติความยาว 200 มม. (รูปที่ 4) โดยต่อเข้ากับชุดประมวลผล (Data Logger) เพื่ออ่านค่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (Load) กับระยะการแอ่นตัว Deflection) และนำค่าจากกราฟไปวิเคราะห์หาแรงเฉือน และค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นต่อไป

2.4 การประมวลผลภาพเพื่อศึกษาพฤติกรรมแรงเฉือน

2.4.1 ชุดอุปกรณ์ DIC และการประมวลผล

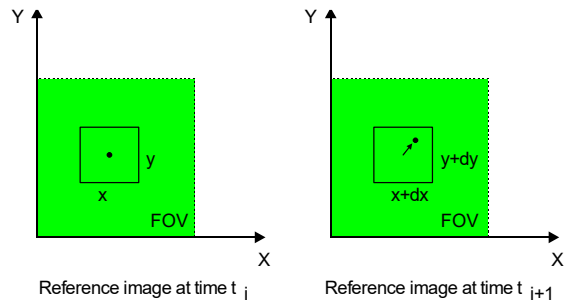
การวัดการเสียรูปและวัดค่าความเครียดของวัสดุและติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทางเทคนิค เช่น Linear Voltage Displacement Transducer (LVDT) สำหรับตรวจวัดการแอ่นตัว และ Strain Sensor สำหรับตรวจวัดค่าความเครียดของตัวอย่างคอนกรีต และใช้ในการตรวจวัดเพียงครั้งเดียว



รูปที่ 4 รายละเอียดเหล็กเสริมคอนกรีตสำหรับตัวอย่างทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทางเทคนิค (หน่วยเป็น มิลลิเมตร)

ต่อการทดสอบ และ Strain Sensor มีราคาสูง (ประมาณ 200 บาทต่อ Sensor) ดังนั้นการประยุกต์ใช้การตรวจวัดการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบ โดยไม่ติดตั้งอุปกรณ์สัมผัสกับตัวอย่างชิ้นงานจึงเป็นการลดวัสดุสิ้นเปลืองในการทดสอบลงได้ เช่น เทคโนโลยีกลุ่มดิจิทัลอิมเมจคอร์เรลชัน เรียกว่า Digital Image Correlation (DIC) จากงานวิจัยที่ผ่านมาระบุว่า DIC มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดการเสียรูปของตัวอย่างคอนกรีตคลาดเคลื่อนร้อยละ 5-15 [11], [17]-[23] โดยมีหลักการประมวลผลการเปลี่ยนรูปที่พื้นผิวของวัตถุ โดยคำนวณค่าดิจิทัลอิมเมจคอร์เรลชันของแต่ละจุดเล็กๆ ที่มีการกำหนดจุดโดยใช้วิธีการพิกัดที่พื้นผิวของวัตถุ (Frame of View; FOV) ซึ่งจุดสี่มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งพิกัดของจุดจะถูกจับก่อนและหลังการเสียรูป รูปแบบการกระจายตัวของจุดในระนาบสองมิติจะถูกระบุค่าพิกัดเริ่มต้นจากภาพแรก จากนั้นตำแหน่งของแต่ละจุดจะถูกระบุในภาพถัดไป ที่ต่อเนื่องกัน เมื่อครบทุกภาพทำให้ทราบถึงการกระจัดสองมิติของจุดทั้งหมดจากภาพอ้างอิงที่มีขนาด Pixel = (x).(y) ที่เวลา t_i และภาพของวัสดุเมื่อมีแรงกระทำ ขนาด Pixel = (x + dx).(y + dy) ที่เวลา t_{i+1} ดังแสดงในรูปที่ 5

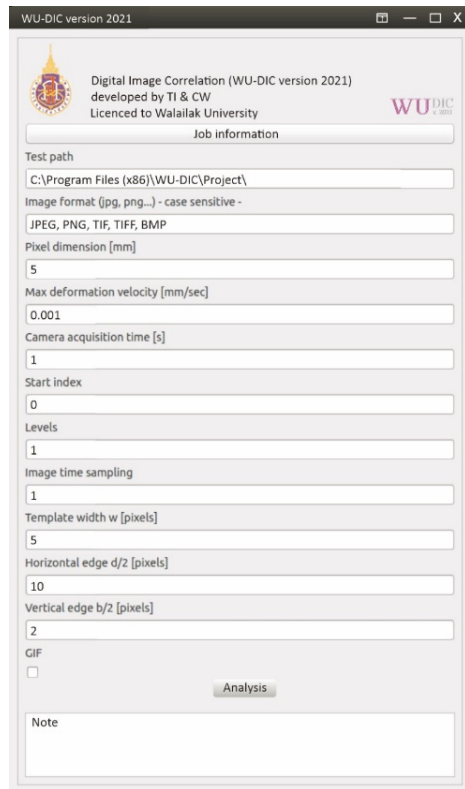
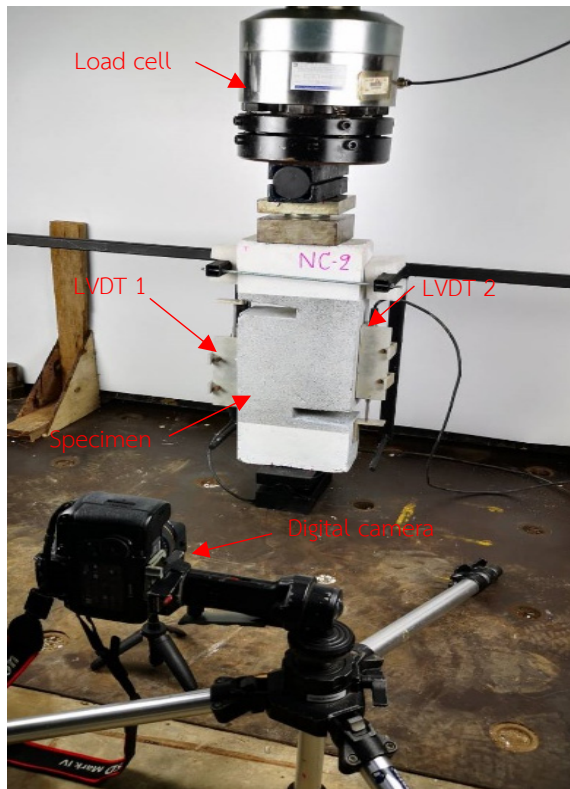
ในการติดตั้งชุดอุปกรณ์ระบบตรวจวัดด้วย DIC สำหรับวิเคราะห์ค่าการเสียรูป และค่าความเครียดของวัสดุ โดย



รูปที่ 5 การประมวลผลเพื่อหาค่าการเสียรูปและค่าความเครียดแบบสองมิติที่พื้นผิวของวัสดุ

เทคนิคการประมวลผลจากภาพถ่ายตัวอย่างรูปทรง Z แสดงในรูปที่ 6 (ก) สำหรับส่งข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม WU-DIC Version 2021 สำหรับพื้นผิว 2 มิติ (2D) พัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ [รูปที่ 6 (ข)] โดยภาษา Python Code Version 3.0 เทียบกับโปรแกรม Open source แบบ 2D และ 3D [23] ในปัจจุบัน ในตารางที่ 4

ในส่วนของการติดตั้งระบบการตรวจวัดการเสียรูปของพื้นผิวตัวอย่างทดสอบ โดยวิธีประมวลผลภาพถ่าย (DIC) คณะวิจัยได้ทำการทดสอบโดยกล้อง Canon EOS 5D Mark IV กำหนดค่าความละเอียดสูงสุด 4480 × 6720 Pixel วางบนขาตั้งแบบ Tripod ห่างจากวัตถุ (FOV) เป็นระยะ 500 มม.



(ก) การติดตั้งอุปกรณ์ระบบตรวจวัดด้วย DIC และการให้น้ำหนักบรรทุก

(ข) โปรแกรม WU-DIC version 2021 ก่อนนำภาพถ่ายเข้าสู่การประมวลผล

รูปที่ 6 (ก) การติดตั้งอุปกรณ์ระบบตรวจวัดด้วย DIC สำหรับตัวอย่าง Z-push off และ (ข) โปรแกรม WU-DIC

ตารางที่ 4 โปรแกรม Open Source สำหรับวิเคราะห์ค่าการเสียรูป ของวัสดุ โดยเทคนิคการประมวลผลจากภาพถ่าย [23]

Softwares	2D/3D	Approach	Language	OS	Code repository
DICe	2D/3D	Local/Global	C++	Cross-platform	https://github.com/dicengine/dice
dolphin_dic	2D/3D	Global	Python	Cross-platform	https://bitbucket.org/mgenet/dolphin_dic/src/master/
Ncorr	2D	Local	Matlab	Linux/Windows	https://github.com/justinblaber/ncorr_2D_matlab
pydic	2D	Local	Python	Cross-platform	https://gitlab.com/damien.andre/pydic
pyxel	2D	Global	Python	Cross-platform	https://github.com/jcpassieux/pyxel
py2DIC	2D	Local	Python	Cross-platform	http://github.com/Geod-Geom/py2DIC/
YaDICs	2D/3D	Local/Global	C++	Linux	http://yadics.univ-lille1.fr/wordpress/
μDIC	2D	Global	Matlab	Cross-platform	https://mudic.readthedocs.io/en/latest/
WU-DIC	2D	Local/Global	Python	Cross-platform	ดำเนินการพัฒนาในโครงการนี้

ภราดร กัณหาภรณ์ และคณะ, “การทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตผสมเศษคอนกรีตเก่ารับแรงเฉือนด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพถ่าย WU-DIC.”

ซึ่งทำการติดตั้งเลนส์ Canon Lens EF 50 มม. ที่มีระยะโฟกัสสูงสุด 0.21x และมีระยะโฟกัสต่ำสุดที่ 0.35 ม. ซึ่งมีการให้ความสว่างโดยโคมไฟ LED จำนวน 8 หลอด ขนาด 300 วัตต์ ให้ความสว่าง 60000 ลักซ์ เพื่อควบคุมระดับความสว่างของระนาบพื้นผิวตัวอย่างให้มีความสม่ำเสมอตลอดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก)

2.4.2 การกำหนด Speckle บนตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 5 แสดงรายละเอียดข้อมูลของรูปภาพตัวอย่างที่ใช้ในการประมวลผล และพารามิเตอร์ของกล้องถ่ายภาพ และ บริเวณตรวจวัด เรียกว่า Frame of View (FOV) ในการบันทึกภาพพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบ จะใช้กล้อง DSLR แบบ Full Frame และใช้โปรแกรม Cannon EOS Utility สำหรับควบคุมการบันทึกภาพทุกๆ 1 วินาที และบันทึกชุดข้อมูลรูปภาพลงในคอมพิวเตอร์ ขณะทำการให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบ เพื่อใช้ประมวลผลการเสียรูปของพื้นผิวตัวอย่างทดสอบต่อไป

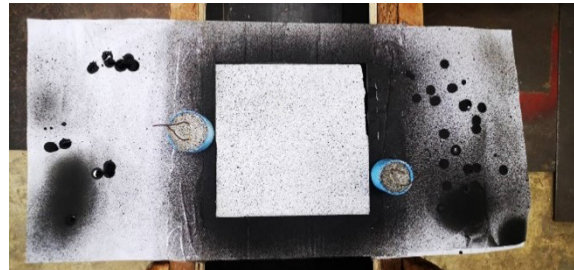
ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบ DIC

DIC Parameters	Value	Unit
Focal Length	50	mm
FOV	200 × 200	mm
Recording Resolution	4480 × 6720	pixel
Objection-camera Distance	500	mm
Speckle Dimension	4.27	pixels
Object Speckle Dimension	0.35	mm
Facet Size	19 × 19	pixels
Recording Trigger	1	sec

ในการเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยเทคนิคการประมวลผลโดยรูปภาพ (DIC) ณ ตำแหน่งที่ทำการการศึกษา (FOV) ที่ขนาด 200 × 200 มม. โดยพื้นที่จุดที่ทำการวิเคราะห์จะถูกขีดด้วย ด้วยกระดาษทราย และ ถูกทำความสะอาดก่อนทำการสร้างจุดอ้างอิง (Speckle Pattern) เพื่อทำการประมวลผลการเคลื่อนไหวในแนวระนาบ คณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างจุดอ้างอิงโดยการพ่น ซึ่งทำการควบคุมแรงกดในแต่ละครั้งโดยใช้ชุดอุปกรณ์ที่ควบคุมแรงกดจาก



(ก) ชุดควบคุมสี Speckle ขาวและดำ

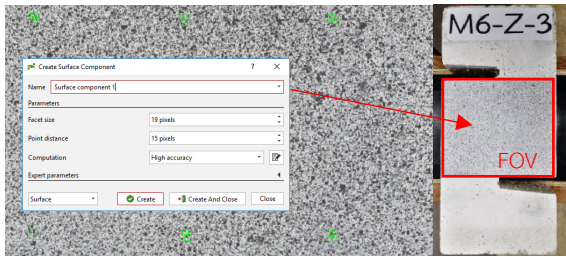


(ข) การพ่น Speckle ในช่อง FOV



(ค) Speckle บน FOV ก่อนทำการทดสอบ รูปที่ 7 ขั้นตอนการเตรียม Speckle บนตัวอย่างทดสอบ

สี่สเปร์รี่ ดังรูปที่ 7 (ก) โดยการสร้างจุดอ้างอิงในลักษณะนี้ จะให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดอ้างอิงเหมาะสมอยู่ที่ 4-5 Pixel อ้างอิงจาก Lecompte และคณะ [19], Zappa และคณะ [20] ซึ่งมีความเหมาะสมในการประมวลผลสำหรับการวิเคราะห์การเสียรูปของตัวอย่างคอนกรีต และทำการพ่นบริเวณ FOV ดังรูปที่ 7 (ข) และพื้นผิวตัวอย่างทดสอบ ที่ทำการพ่นสีจุดอ้างอิง โดยรูปภาพใช้พื้นที่ในการตรวจจับจุดอ้างอิง 19 × 19 Pixel โดยเว้นระยะห่างการตรวจจับที่ 15 Pixel แล้วเสร็จพร้อมทดสอบ แสดงในรูปที่ 7 (ค) และ



รูปที่ 8 การวิเคราะห์ความละเอียดของ Speckle

ผลจากการวิเคราะห์คุณภาพ Gray Speckle โดยโปรแกรม WU-DIC แสดงในรูปที่ 8

3. ผลการทดลอง

3.1 น้ำหนักสูงสุดและรูปแบบการวิบัติ

น้ำหนักวิบัติ และรูปแบบการวิบัติ แสดงในตารางที่ 5 ซึ่งเป็นการวิบัติแบบทันทีทันใด ซึ่งเป็นการวิบัติโดยแรงเฉือน บริเวณหน้าตัดรับแรง (Shear Plane) แรงเฉือนประลัยสูงสุดแปรผันตามกำลังอัดของคอนกรีตในแต่ละตัวอย่างซึ่งมีค่า เท่ากับ 34.4, 33.4 และ 28.3 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และหน้าตัดรับแรงเฉือน ซึ่งยังมีหน้าตัดพื้นที่ ที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังในการต้านทานแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น ผู้วิจัยได้ใช้ความเครียดในการเปรียบเทียบ กำลังของตัวอย่างตามมาตรฐานการทดสอบคอนกรีต โดยตัวอย่างที่สามารถต้านทานกำลังเฉือนได้สูงสุด คือ ตัวอย่างแรก M1 (Nature Aggregate Concrete) มีกำลังเฉือนเท่ากับ 2.7 เมกะปาสคาล M2 (Recycle Aggregate Concrete) มีกำลังเฉือนเท่ากับ 2.4 เมกะปาสคาล และ M3 (Recycle Aggregate Concrete and Steel Fiber) มีกำลังเฉือนเท่ากับ 2.5 เมกะปาสคาล โดยตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 มีความสามารถในการต้านทานน้อยกว่าตัวอย่างแรกอยู่ที่ร้อยละ 9 และร้อยละ 8 ตามลำดับ แต่ตัวอย่างที่ 3 นั้น มีความสามารถในการต้านทานการเสีรูปร่างที่สูงกว่าเนื่องจากการเสริมเส้นใยเหล็ก ที่ช่วยในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงดึงในบริเวณที่เกิดรอยร้าว

จากการทดสอบพบว่า ค่ากำลังอัดประลัยของตัวอย่าง ที่ทำการผสมเส้นใยเหล็กนั้น มีค่าที่น้อยกว่าตัวอย่างแรก และตัวอย่างที่สอง อาจมีผลมาจากการใส่น้ำยา Super

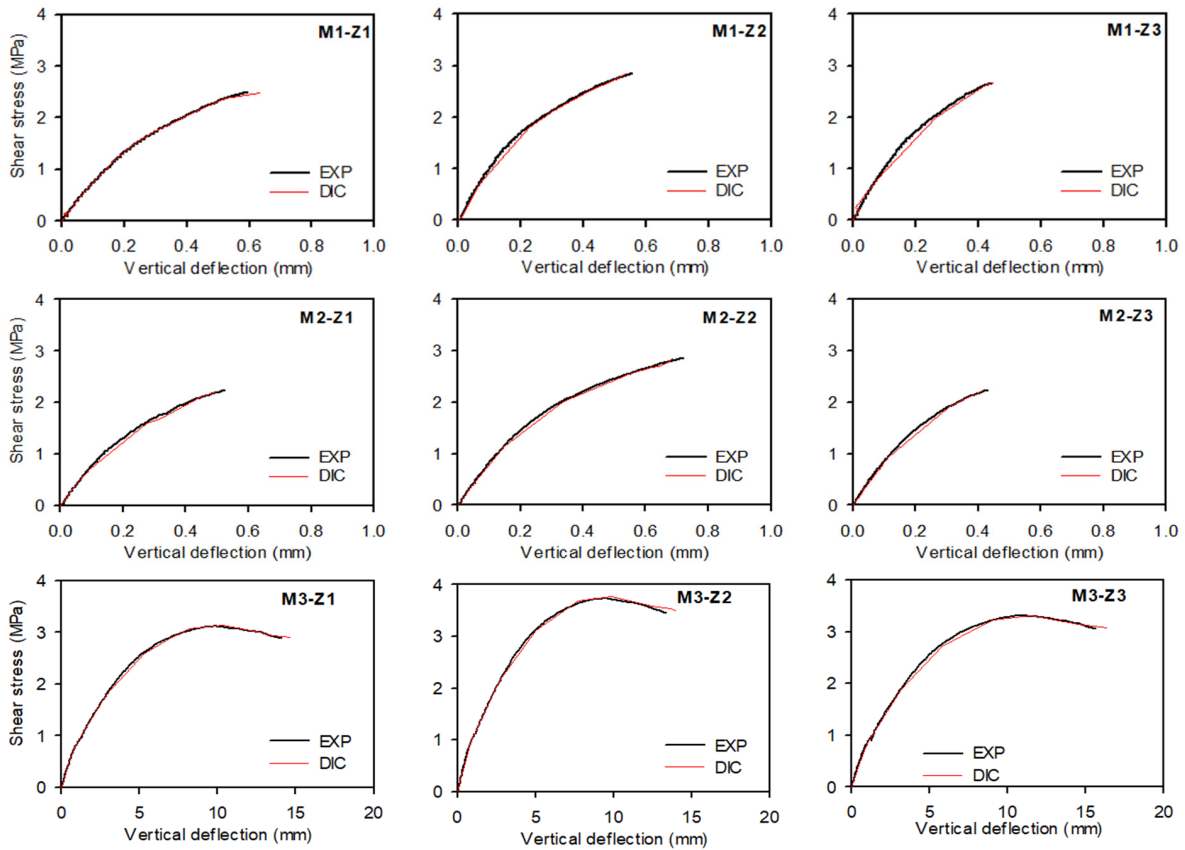
Plasticizer ซึ่งทำหน้าที่ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อ ตัวอย่าง และการกระจายตัวที่เหมาะสมของเส้นใยเหล็ก ทำให้ไม่เกิดการจับตัวกัน แต่ผลที่ตามมาคือ กำลังอัดของ ตัวอย่างนั้นมีค่าน้อยลง [24], [25] แต่ทดแทนด้วยความสามารถในการต้านทานการวิบัติแบบทันทีทันใดได้ดีกว่า ตัวอย่างแรก และตัวอย่างที่สอง

3.2 ผลการตรวจวัดการเสีรูปร่าง

น้ำหนัก และรูปแบบการวิบัติแสดงรูปแบบในรูปที่ 10 ซึ่งบริเวณที่เกิดการวิบัติไม่มีการเสริมเหล็ก ทำให้การวิบัติเกิดแบบทันทีทันใด และไม่เกิดรอยร้าว แต่ในตัวอย่าง M3-RCA-SF ที่มีสัดส่วนของเส้นใยไฟเบอร์ทำให้ตัวอย่างมีการเสริมเหล็ก ส่งผลให้เกิดรอยร้าว ที่ชัดเจนก่อนเกิดการวิบัติ การเสีรูปร่างในตัวอย่าง M1-NA (Nature Aggregate Concrete) มีค่าเท่ากับ 0.52 มม. ตัวอย่าง M2-RCA (Recycle Aggregate Concrete) มีค่าเท่ากับ 0.56 มม. ตัวอย่าง M3-RCA-SF (Recycle Aggregate Concrete and Steel Fiber) มีค่าเท่ากับ 13.45 มม. ซึ่งตัวอย่างแรก และตัวอย่าง M2-RCA มีค่าการเสีรูปร่างที่ใกล้เคียงกัน แต่ในตัวอย่าง M3-RCA-SF ที่มีการเสริมเส้นใยไฟเบอร์นั้นมีความสามารถในการยืดออกที่สูงกว่า ถึง 20-25 เท่า ซึ่งเป็นผลจากการเสริมเส้นใยเหล็ก ที่มีความสามารถในการต้านทานการเสีรูปร่างได้ดีกว่า เนื่องจากมีระยะการเสีรูปร่างที่สูงกว่าคอนกรีต การต้านทานการเสีรูปร่างของตัวอย่างใน รูปแบบของ Energy โดยตัวอย่าง M3-RCA-SF มีความสามารถในการต้านทานการเสีรูปร่างได้สูงกว่าถึง 40 เท่า โดยเฉลี่ย

3.3 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายของเสีรูปร่างแนวตั้ง

ผลการวิเคราะห์การเสีรูปร่างในแนวตั้ง คณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างเครื่องมือในการวัดการเสีรูปร่างในแนวตั้ง โดยผ่านการวิเคราะห์ผลจากรูปภาพ ซึ่งทำการสร้างเครื่องมือในบริเวณเดียวกันกับบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์การวัด LVDT จำนวน 2 ชุด คณะผู้วิจัยได้นำผลจากการวิเคราะห์มาทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าการเสีรูปร่างสูงสุดในแนวตั้งของตัวอย่าง M1-NA, M2-RCA และ M3-RCA-SF มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 5.82,



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและค่าการเสียรูปแนวตั้ง

4.82 และ 4.70 ตามลำดับ แสดงการเปรียบเทียบการเสียรูปในแนวตั้ง ในรูปที่ 9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของเส้นที่ได้จากการวิเคราะห์ผลรูปภาพนั้นมีความคลาดเคลื่อนกันเล็กน้อยในช่วงกลางของกราฟแสดงผลการเปรียบเทียบ ซึ่งอาจมีสาเหตุหลักมาจาก การที่ขนาดจุดอ้างอิงในการตรวจวัดของรูปภาพในการวิเคราะห์ มีขนาดที่แตกต่างกันมากเกินไปทำให้การตรวจจับมีการคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย หรืออาจจะมีส่วนมาจากระยะห่างของกล้องซึ่งมีผลต่อการคลาดเคลื่อน ซึ่งเกิดจากการสร้างจุดอ้างอิง ที่ไม่เหมาะสมกับระยะการบันทึกรูปภาพ [18]

4. การทำนายหน่วยแรงเฉือนจากมาตรฐานการออกแบบ

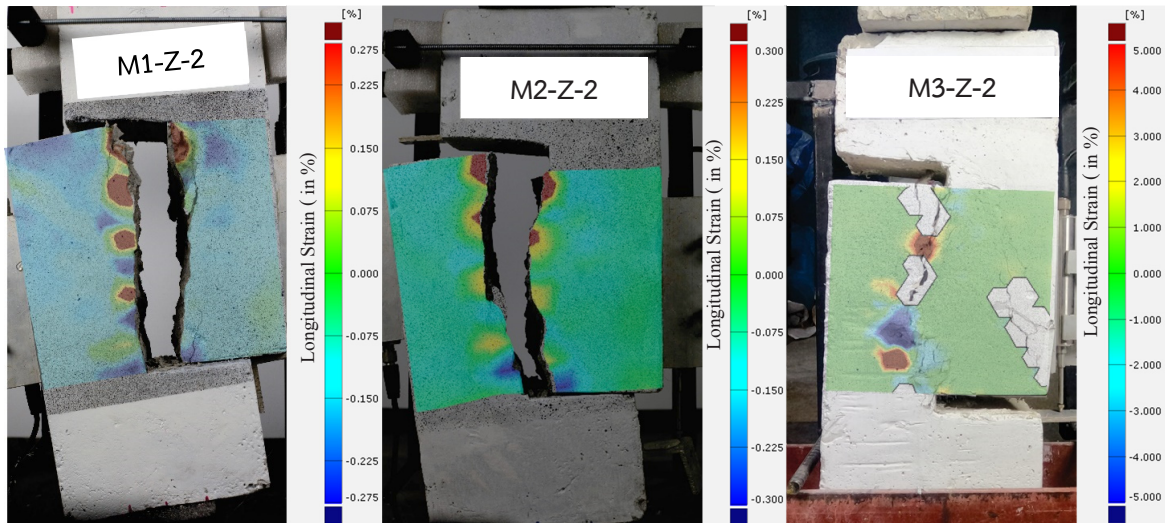
ค่ากำลังเฉือนจากงานวิจัยที่ผ่านมา [14], [17], [21], [22], [26]–[29] และจากมาตรฐานการออกแบบของ ACI 318-14

[9] และ CSA-A23.3-04 [30] ซึ่งได้นำมาอ้างอิงในวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) ในการทำนายค่าหน่วยแรงเฉือนต้านทานจากคอนกรีตเพียงอย่างเดียว ($v_c = V/A_c$) แสดงดังต่อไปนี้

4.1 Vecchio and Collins theory (1986)

จากงานวิจัย Vecchio และ Collins [31] เสนอสมการสำหรับทำนายหน่วยแรงเฉือน (v_c) ในรูปของค่ากำลังอัดคอนกรีต (f'_c) ความกว้างรอยร้าว (w) และขนาดของมวลรวม (d_a) ดังสมการที่ (1)

$$v_c = \frac{0.18 \times \sqrt{f'_c}}{0.3 + \left(\frac{24 \times w_c}{d_a + 16} \right)} \tag{1}$$



(ก) ภาพการวิบัติตัวอย่าง M1-NA (ข) ภาพการวิบัติตัวอย่าง M2-RCA (ค) ภาพการวิบัติตัวอย่าง M3-RCA-SF รูปที่ 10 ลักษณะรอยร้าว และภาพการวิบัติของตัวอย่างทดสอบโดยการประมวลผลภาพถ่ายจากโปรแกรม WU-DIC

4.2 Canada Code CSA (2004)

ในอเมริกาเหนือ มาตรฐานการออกแบบที่ประเทศแคนาดา เสนอสมการอย่างง่ายสำหรับประมาณหน่วยแรงเฉือน (v_c) ในรูปของค่ากำลังอัดคอนกรีต (f'_c) เพียงอย่างเดียว ดังสมการที่ (2)

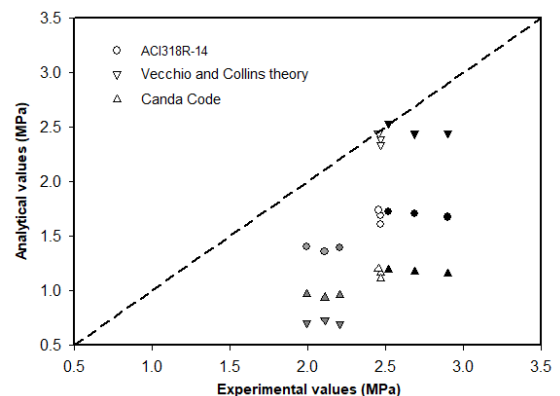
$$v_c = 0.2 \times \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

4.3 ACI-318 (2014) และมาตรฐานของ ว.ส.ท.

สำหรับมาตรฐานการออกแบบที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ตามมาตรฐาน ACI 318-14 ได้นำมาอ้างอิงในวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) ในการทำนายค่าหน่วยแรงเฉือนต้านทานจากคอนกรีตเพียงอย่างเดียว ในรูปของค่ากำลังอัดคอนกรีต (f'_c) ดังสมการที่ (3)

$$v_c = 0.29 \times \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

ผลการเปรียบเทียบการทำนายค่าหน่วยแรงเฉือน โดยสมการทั้งสาม แสดงในรูปที่ 11 แสดงกลุ่มตัวอย่างส่วนผสม M1 คือส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติร้อยละ 100



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบการทำนายหน่วยแรงเฉือนจากมาตรฐานการออกแบบ

(กลุ่มสีดำ) กลุ่ม ตัวอย่างส่วนผสม M2 คือ ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตแทนหินธรรมชาติร้อยละ 100 (กลุ่มสีเทา) และกลุ่มตัวอย่างส่วนผสม M3 คือ ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตแทนหินธรรมชาติร้อยละ 100 ผสมกับเส้นใยเหล็ก (กลุ่มสีเขียว) พบว่าค่าที่ทำนายโดยสมการที่ (2) ให้ค่าที่น้อยกว่าค่าจากการทดสอบมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่าง ค่าทดสอบต่อค่าทำนาย (EXP/ANL) = 2.24 และมี Standard Deviation (SD) = 0.74 ในส่วนของสมการ



จาก ACI318-14 (สมการที่ 3) พบว่า ค่าเฉลี่ย $EXP/ANL = 1.55$ และมี $SD = 0.48$

จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนจากสมการของ Vecchio and Collins ซึ่งใช้หลักทฤษฎี Modified Compression Field Theory (MCFT) ให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดสอบเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมเส้นใยไฟเบอร์ กับสมการอื่นๆ ($EXP/ANL = 1.47$ และมี $SD = 0.70$) ซึ่งจากการศึกษาเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ สมการที่ (3) สามารถใช้ทำนายหน่วยแรงเฉือนสำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษคอนกรีตย่อยแทนมวลรวมหยาบ ได้มีความแม่นยำมากที่สุด แต่ในตัวอย่างที่ทำการผสมเส้นใยเหล็ก ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบนั้นแตกต่างกันอันเนื่องมาจากหลังจากเกิดรอยแตกร้าวบริเวณหน้าตัดรับแรงเฉือนเส้นใยเหล็กจะเป็นกำลังหลักในการรับแรงต่อไป เพราะคอนกรีตไม่สามารถต้านทานกำลังได้อีก โดยผลจากการทำนายยังมีค่าเชิงอนุรักษ์สำหรับการออกแบบเชิงวิศวกรรม

5. สรุป

โครงการวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างรูปทรง Z จากส่วนผสมคอนกรีตโดยใช้เศษคอนกรีตแทนหินธรรมชาติภายใต้แรงเฉือน โดยใช้เทคนิคประมวลผลภาพถ่าย ซึ่งมีผลสรุปดังนี้

- การใช้วัสดุมวลรวมจากเศษวัสดุคอนกรีต สามารถออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังกำลังที่เทียบเท่า กับการใช้มวลรวมจากธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีตตามปกติกว่าเพียงเล็กน้อย
- การทำนายผลกำลังเฉือนจากสมการ Vecchio & Collins สำหรับคอนกรีต ใช้วัสดุมวลรวมจากเศษวัสดุคอนกรีต ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบเมื่อเทียบกับสมการ ACI-318 หรือ CSA
- การทำนายผลกำลังเฉือนจากสมการ Vecchio & Collins สำหรับคอนกรีตใช้วัสดุมวลรวมจากเศษวัสดุคอนกรีตผสมเส้นใยให้ค่าน้อยกว่าผลทดสอบร้อยละ 15-20 เนื่องจากอิทธิพลของเส้นใยในส่วนผสมคอนกรีต
- การตรวจวัดการเสียรูป เช่น การแอ่นตัว รอยร้าว

ความเครียด ของพื้นผิวคอนกรีตใช้วัสดุมวลรวมจากเศษวัสดุคอนกรีต รูปทรง Z ภายใต้แรงเฉือน โดยเทคนิคประมวลผลภาพถ่ายแบบ 2 มิติ โดยโปรแกรม WU-DIC มีความคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 4-6 เมื่อเทียบกับผลการตรวจวัดโดยอุปกรณ์แบบดั้งเดิม

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยจาก IP Audit ประจำปี พ.ศ. 2564 จากอุทยานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในการพัฒนาโปรแกรมการประมวลผลภาพถ่าย WUI-DIC Version 2021 ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ สำหรับการอนุเคราะห์กล้องถ่ายภาพในการวิเคราะห์ประมวลผลภาพถ่ายและทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. U. Mohammed, A. Hasnat, S. M. ASCE, M. A. Awal, and S. Z. Bosunia, "Recycling of Brick Aggregate Concrete as Coarse Aggregate," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 7, pp. 1-9, 2015.
- [2] K. N. Rahal and Y.T. Alrefaei, "Shear strength of recycled aggregate concrete beams containing stirrups," *Construction and Building Materials*, vol. 191, pp. 866-876, 2018.
- [3] N. Shejwadkar, B. Singh, and S. A. Waseem, "Shear friction in recycled aggregate concrete," *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 6, no. 1, pp. 17-36, 2017.
- [4] W. Li, J. Xiao, Z. Sun, and S. P. Shah, "Failure processes of modeled recycled aggregate concrete under uniaxial compression," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 10, pp. 1149-1158, 2012.
- [5] J. Xiao, H. Xie, and Z. Yang, "Shear transfer

- across a crack in recycled aggregate concrete,” *Cement and Concrete Research*, 2012, vol. 42, no. 5, pp. 700–709.
- [6] C. Sombornpanya, P. Bunyarid, W. Simma, and C. Sutamma, “Study properties of concrete manufactured with multi-recycled concrete aggregate,” in *the 25th National Convention on Civil Engineering*, Sattahip, Thailand, July 15–17, 2020 (in Thai).
- [7] J. Sagaseta and R. L. Vollum, “Influence of aggregate fracture on shear transfer through cracks in reinforced concrete,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 63, no. 2, pp. 119–137, 2011.
- [8] K. Jitchaiyapoom, S. Detphan, C. Detphan, T. Phoo-ngernkham, N. Damrongwiriyapap, and S. Hanjitsuwan, “Mechanical properties of high-calcium fly ash geopolymers and normal concretes using recycled concrete aggregate replaced crushed limestone,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, 2022 (in Thai).
- [9] *Building Code Requirements for Structural Concrete and commentary*, ACI 318-14, 2015.
- [10] M. D. Benedetti, S. Cholostiakow, H. Fergani, E. Zappa, A. Cigada, and M. Guadagnini, “3D-DIC for strain measurement in scale GFRP RC specimens,” in *Third Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, Antalya, Turkey, September 7-9, 2015.
- [11] B. Torres, F. B. Varona, F. J. Baeza, D. Bru, and S. Ivorra, “Study on retrofitted masonry elements under shear using digital image correlation,” *Sensors*, vol. 20, no. 7, 2020.
- [12] K. H. Yang, J. I. Sim, J. H. Kang, and A. F. Ashour, “Shear capacity of monolithic concrete joints without transverse reinforcement,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 64, no. 9, pp. 767–779, 2012.
- [13] J. Lee, E. j. Kim, S. Gwon, S. Cho, and S. Sim, “Uniaxial static stress estimation for concrete structures using digital image correlation,” *Sensors*, vol. 19, no. 2, pp. 319, 2019.
- [14] M. A. Mansur, T. Vinayagam, and K. Tan, “Shear transfer across a crack in reinforced high-strength concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 294–302, 2008.
- [15] D. Figueira, C. Sousa, R. Calçada, and A. S. Neves, “Push-Off tests in the study of cyclic behavior of interfaces between concretes cast at different times,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 142, no. 1, 2016.
- [16] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM C39/C39M-18, 2001.
- [17] J. Réthoré, F. Hild, and S. Roux, “Shear-band capturing using a multiscale extended digital image correlation technique,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 196, no. 49–52, pp. 5016–5030, 2007.
- [18] B. Pan, “Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement,” *Optical Society of America*, vol. 48, no. 8, pp. 1534–1542, 2009.
- [19] D. Lecompte, A. Smits, S. Bossuyt, H. Solb, J. Vantommea, D. V. Hemelrijck, and A. M. Habrakenc, “Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 44,



- no. 11, pp. 1132–1145, 2006.
- [20] E. Zappa, P. Mazzoleni, and A. Matinmanesh, “Uncertainty assessment of digital image correlation method in dynamic applications,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 56, pp. 140–151, 2014.
- [21] S. Jung and K. S. Kim, “Knowledge-based prediction of shear strength of concrete beams without shear reinforcement,” *Engineering Structures*, vol. 30, no. 6, pp. 1515–1525, 2008.
- [22] J. Peng, P. Zhao, S. Wang, S. W. Lee, and S. B. Kang, “Interface shear transfer in reinforced engineered cementitious composites under push-off loads,” *Engineering Structures*, vol. 206, 2020, Art. no. 110013.
- [23] V. Belloni, R. Ravanelli, A. Nascetti, M. D. Rita, D. Mattei, and M. Crespi, “py2DIC: A new free and open source software for displacement and strain measurements in the field of experimental mechanics,” *Sensors*, vol. 19, no. 18, pp. 3832, 2019.
- [24] S. Alsadey, “Effect of superplasticizer on fresh and hardened properties of concrete,” *Journal of Agricultural Science and Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 70–74, 2015.
- [25] P. Vinayagam, “Experimental investigation on high performance concrete using silica fume and superplasticizer,” *International Journal of Computer and Communication Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 168–171, 2012.
- [26] J. Jayaprakash, A. A. Samad, and A. A. Abbasvoch, “Experimental investigation on shear capacity of reinforced concrete precracked push-off specimens with externally bonded bi-directional carbon fibre reinforced polymer fabrics,” *Modern Applied Science*, vol. 3, no. 7, pp. 86–98, 2009.
- [27] H. Jiang, Z. Fang, Airon Liu, Y. Li, and J. Feng, “Interface shear behavior between high-strength precast girders and lightweight cast-in-place slabs,” *Construction and Building Materials*, vol. 128, pp. 449–460, 2016.
- [28] H. Shariatmadar, M. Khatamirad, and E. Zamani, “Pre-cracked concrete shear strengthened with external CFRP strips,” *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, pp. 29–38, 2013.
- [29] P. Z. Zhao, S. B. Kang, and B. Yanga, “Shear Strength of Engineered Cementitious Composites under Push-Off Loads,” *Procedia Engineering*, vol. 210, pp. 53–60, 2017.
- [30] *Design of Concrete Structures*, CSA-A23.3-04, 2004.
- [31] F. J. Vecchio and M. P. Collins, “The modified compression-field theory for reinforced concrete element subjected to shear,” *ACI Journal*, vol. 83, no. 2, pp. 219–231, 1986.