



สมรรถนะการรับแรงเฉือนทะเลลู่ของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมมวลรวมจากเศษคอนกรีตย่อยเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กบางซิกแซก

ประภัสสร ฤทธิกรรม อลงกรณ์ ประชุมรัตน์ ทยากร บุญแก้ว อาดัม เจ๊ะหะ ภักจิรา อ่อซ่าย และ ทนงศักดิ์ อิ่มใจ*
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7567 2399 อีเมล: thanongsak_im@wvu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.11.006
รับเมื่อ 14 พฤศจิกายน 2566 แก้ไขเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2567 ตอรับเมื่อ 23 พฤษภาคม 2567 เผยแพร่ออนไลน์ 19 พฤศจิกายน 2567
© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

เนื่องด้วยปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นจากการก่อสร้างและการรื้อถอนของเสีย การวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA) และคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล (RAC) ได้รับการศึกษามานานหลายทศวรรษ ซึ่งผลที่ออกมาค่อนข้างมีความแปรปรวน เนื่องจากคุณภาพของ RCA ที่ใช้แตกต่างกัน แต่ผลทดสอบส่วนใหญ่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้และศักยภาพของ RCA ที่สามารถใช้แทนหินธรรมชาติได้ทำให้กำลังที่ได้เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบของ ACI 318 บทความนี้นำเสนอการศึกษาทดลองของแผ่นพื้นที่รวม RCA 100% แผ่นพื้น RAC มีการควบคุมขนาด $1,200 \times 1,200 \times 12$ มิลลิเมตร ได้รับการทดสอบแบบการให้น้ำหนักบริเวณที่กึ่งกลางของแผ่นพื้นคอนกรีตโดยมีฐานรองรับ 8 จุด ผลการทดสอบพบว่า แรงเฉือนทะเลลู่ของแผ่นพื้น RAC ตัวควบคุมรับน้ำหนักได้น้อยกว่าตัวที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กบางแบบซิกแซก แผ่นที่ทดสอบภายใต้แรงเฉือนทะเลลู่ระแตก และการทำนายโดย Eurocode ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำยิ่งขึ้นและเป็นการเปลี่ยนคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลทุกระดับและการเสริมแรงตัดต่ำ

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล ความสามารถในการรับน้ำหนัก แรงเฉือนทะเลลู่ แผ่นเหล็กบาง

การอ้างอิงบทความ: ประภัสสร ฤทธิกรรม, อลงกรณ์ ประชุมรัตน์, ทยากร บุญแก้ว, อาดัม เจ๊ะหะ, ภักจิรา อ่อซ่าย และ ทนงศักดิ์ อิ่มใจ, “สมรรถนะการรับแรงเฉือนทะเลลู่ของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมมวลรวมจากเศษคอนกรีตย่อยเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กบางซิกแซก,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 35, ฉบับที่ 4, หน้า 1–10, เลขที่บทความ 254-7459, ต.ค.-ธ.ค. 2568.



Punching Shear Performance of Recycled Aggregate Concrete Slabs Reinforced with Thin Zigzag Steel Plates

Prapatsorn Rittigun, Alongkorn Prachumrat, Thayakorn Bunkaew, Adam Cheha, Pakjira Aosai and Thanongsak Imjai*

Civil Engineering Program, 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.2024.11.006

Received 14 November 2023; Revised 1 February 2024; Accepted 23 May 2024; Published online: 19 November 2024

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

With the growing environmental concerns associated with construction and demolition waste, research on Recycled Concrete Aggregate (RCA) and Recycled Aggregate Concrete (RAC) has gained momentum over the past few decades. The results, however, have been variable due to differences in the quality of RCA used. Nonetheless, most studies demonstrate the feasibility and potential of RCA as a substitute for natural aggregate, providing strength that meets the design standards of ACI 318. This article presents an experimental investigation of slabs composed of 100 percent RCA. Controlled RAC slabs measuring 1,200 × 1,200 × 12 mm were tested under monolithic simple at the middle column over eight simply supports. The test results revealed that the punching shear strength of the controlled RAC slab is lower compared to the one reinforced with thin zigzag steel plates. The plates, tested under impact shear stress, provided more accurate results according to Eurocode predictions and are suitable for all grades of recycled aggregate concrete with low flexural reinforcement.

Keywords: Recycled Aggregate Concrete, Serviceability, Punching Shear, Slim Steel Plate

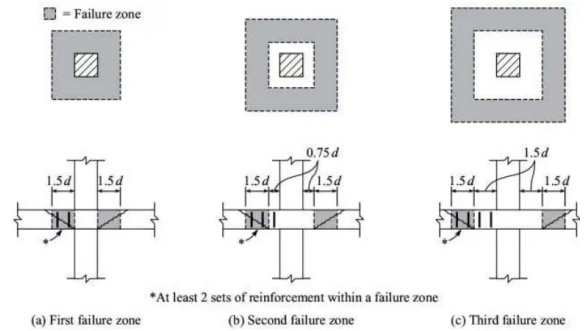
Please cite this article as: P. Rittigun, A. Prachumrat, T. Bunkaew, A. Cheha, P. Aosai, and T. Imjai, "Punching shear performance of recycled aggregate concrete slabs reinforced with thin zigzag steel plates," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 4, pp. 1–10, ID. 254-7459, Oct.–Dec. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

แรงเฉือนเจาะทะลุในคาน การวิบัติประเภทนี้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด การวิบัตินี้ไม่สามารถยับยั้งได้ด้วยเสริมแรงหลัก ดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของโครงสร้างจึงลดลง ซึ่งต่ำกว่าความสามารถในการรับแรงตัดโดยการกระทำของแรงเฉือน [1], [2] แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแรงเฉือนของคานพบว่า แรงเฉือนเจาะทะลุจะมีความสำคัญน้อยกว่าในแผ่นคอนกรีต แรงเฉือนเจาะทะลุจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงอัดที่มีค่าสูง [3], [4] ซึ่งพื้นที่หน้าตัดวิกฤติต่าง ๆ ของแผ่นพื้นแสดงในรูปที่ 1 ตามพื้นที่ที่จะต้องมีการเสริมแรงโดยปกติการวิบัติในแนวตั้งและแนวขวางจะเป็นไปได้โดยที่ไม่สามารถรู้ได้ว่าการวิบัติสามารถเกิดขึ้นได้ที่ใด ดังนั้นจะต้องเสริมแรง [5], [6]

มีการพยายามส่งเสริมคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล (RAC) ในการใช้งานเชิงโครงสร้างอย่างมีประสิทธิภาพในการทำแผ่นพื้นและในการใช้งานอื่นๆที่คล้ายคลึงกัน พฤติกรรมของ RAC ภายใต้แรงเฉือนเจาะทะลุ เศษคอนกรีตย่อยหรือเรียกว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA) ได้จากการนำเศษคอนกรีตเก่ามาย่อยให้มีขนาดเท่ากับหินแล้วนำไปแทนที่หินบางส่วนหรือทั้งหมด คุณภาพของคอนกรีตที่ได้ต่างจากคอนกรีตปกติที่ใช้หินจากธรรมชาติ จากผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของ RCA ในหลายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า กำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 10-30 ขึ้นอยู่กับปริมาณสัดส่วนของ RCA ที่นำมาแทนที่หินธรรมชาติ แต่การศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของพื้นทำจาก RCA ยังให้ข้อมูลค่อนข้างจำกัด [7], [8]

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ คณะวิจัยจึงทำการศึกษากฎการเสริมพื้นที่คอนกรีตผสม RCA รับแรงเฉือนเจาะทะลุเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กบางแบบซิกแซก โครงการวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักสำหรับแผ่นพื้นรับแรงเฉือนเจาะทะลุ ศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการใช้แผ่นเหล็กบางและเหล็กแผ่นบางแบบซิกแซก (Zigzag Shear Band) และทำการเปรียบเทียบกับผลการทำนายจากการทดลองและมาตรฐานการออกแบบงานพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยผลจากการทดสอบนี้จะใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาแนวทางการออกแบบ และใช้



รูปที่ 1 พื้นที่หน้าตัดวิกฤติที่ต้องการมีการเสริมแรง[5]

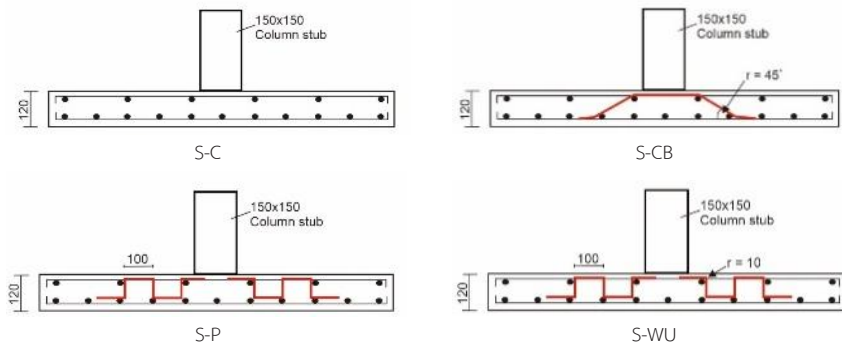
เป็นฐานข้อมูลในการศึกษาพัฒนาแผ่นพื้นคอนกรีตรับแรงเฉือนเจาะทะลุเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กบางซิกแซกต่อเนื่องในอนาคตสำหรับอุตสาหกรรมไทยต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 3 ระยะ ซึ่งระยะที่ 1 คณะวิจัยทำการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ออกแบบระบบพื้นเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กบางซิกแซกร่วมกับการใช้ RCA ในระยะที่ 2 ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักสำหรับแผ่นพื้นรับแรงเฉือนทะลุ ศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการใช้แผ่นเหล็กบาง และแผ่นเหล็กบางแบบซิกแซก (Zigzag Shear Band) และในระยะที่ 3 คณะวิจัยได้ทำการศึกษาพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ในการวิเคราะห์ระบบพื้นเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กบางซิกแซกและศึกษาความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อพิจารณาความคุ้มค่ากับการเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กบางและแผ่นเหล็กบางแบบซิกแซก

2.1 คุณสมบัติวัสดุ

คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC Type 1) มีส่วนผสมดังแสดงดังตารางที่ 1 กำหนดกำลังอัดเท่ากับ 28 เมกะปาสคาล และมีคุณสมบัติของเหล็กเสริม โดย PTMS มีค่า $F_u = 950$ เมกะปาสคาล และแผ่นเหล็กบางมีค่า $F_u = 510$ เมกะปาสคาล และ $F_y = 245$ เมกะปาสคาล โดยที่ F_y คือ ค่ากำลังแรงดึงที่



รูปที่ 2 รูปแบบแผ่นพื้นตัวอย่างทดสอบ

จุดคราก และ F_u คือ ค่ากำลังแรงดึง คณะวิจัยทำการเก็บตัวอย่างการทดสอบประเภทละ 6 ตัวอย่าง ที่คอนกรีตมีอายุ 28 วัน และคุณสมบัติของ RCA แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ 1 ลบ.ม.

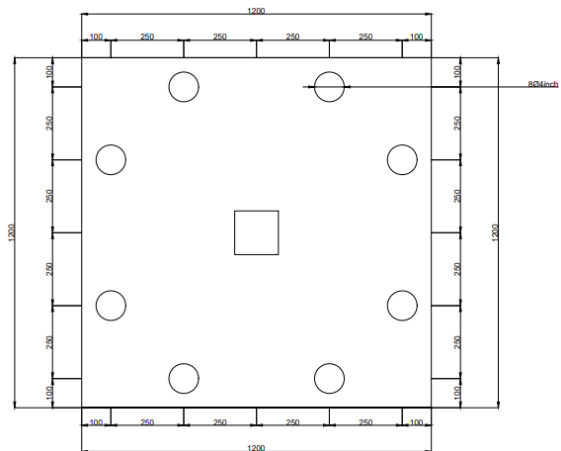
ส่วนผสม	อัตราส่วน
ปูนซีเมนต์ (กก./ลบ.ม.)	303
มวลรวมหยาบ (กก./ลบ.ม.)	1,028
มวลรวมละเอียด (กก./ลบ.ม.)	916
น้ำ (กก./ลบ.ม.)	129
สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์	0.43
การยุบตัว (มิลลิเมตร)	80

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเศษคอนกรีตย่อย

คุณสมบัติ	หินธรรมชาติ	มวลรวมหยาบรีไซเคิล
ความถ่วงจำเพาะ (SSD)	2.7	2.43
หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	1,730	1,397
อัตราการดูดซึมน้ำ (%)	0.28	4.59
ความชื้น (%)	0.61	2.24
ขนาด (มิลลิเมตร)	19.1	18.6

2.2 การออกแบบพื้นที่ทดสอบ

โครงการวิจัยนี้มีการเตรียมพื้นตัวอย่างจำนวน 12 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยมีขนาดหน้าตัด



รูปที่ 3 การให้น้ำหนักบรรทุก อุปกรณ์ตรวจวัดทางเทคนิค และรายละเอียดพื้นที่ทดสอบ

1,200 × 1,200 มิลลิเมตร หน้า 120 มิลลิเมตร เหล็กเส้นข้ออ้อยด้านบน 6 เส้น ระยะห่าง 200 มิลลิเมตร ด้านล่าง 11 เส้น ระยะห่าง 100 มิลลิเมตร ขนาด Ø12 มิลลิเมตร ($F_y = 392$ เมกะปาสคาล) แสดงในรูปที่ 2

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพการรับน้ำหนักและอุปกรณ์ตรวจวัดทางเทคนิค

การให้น้ำหนักบรรทุกจะเป็นแบบ Displacement Control ติดตั้งโดยเครื่อง UTM ขนาด 100 ตัน ติดตั้งพื้นที่ทดสอบวางไว้บน Roller Support และนำแผ่นพื้นที่ทดสอบขนาดความยาว 1,200 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3 แผ่น

ตารางที่ 3 สรุปผลการทดสอบและผลการเปรียบเทียบดัชนีประสิทธิภาพ

ชุดทดสอบ	ชื่อตัวอย่าง	P_{cr} (กิโลนิวตัน)	Δ_{cr} (มิลลิเมตร)	P_y (กิโลนิวตัน)	P_u (กิโลนิวตัน)	Δ_{max} (มิลลิเมตร)	Δ_y (มิลลิเมตร)	Δ_f (มิลลิเมตร)	การวิบัติ	S_e (กิโลนิวตันต่อมิลลิเมตร)	ζ (กิโลนิวตันมิลลิเมตร)
I	S-C-NA	35	0.9	144.2	145.5	7.00	7.40	15.4	Punching Shear	38.89	1562.5
	S-CB-NA	45	1.7	158.3	159.2	6.87	6.97	8.3	Punching Shear	26.47	717.50
	S-P-NA	83	2.7	158.5	160.8	6.36	6.61	9.0	Punching Shear	30.74	914.32
	S-WU-NA	21	1.2	168.0	170.3	8.44	8.90	12.2	Punching Shear	17.50	1166.35
II	S-C-RCA50	32	1.6	104.4	105.3	8.27	8.73	15.6	Punching Shear	20.34	1296.83
	S-CB-RCA50	42	2.4	117.3	118.6	6.87	8.76	8.5	Punching Shear	17.53	609.88
	S-P-RCA50	80	3.4	119.7	121.9	7.62	7.94	9.2	Punching Shear	23.53	777.17
	S-WU-RCA50	18	1.9	129.4	130.5	9.71	10.12	12.4	Punching Shear	9.47	1014.72
	S-C-RCA100	29	1.8	99.8	100.1	10.43	10.64	15.8	Punching Shear	16.11	1125.03
	S-CB-RCA100	39	2.6	112.7	114.3	8.41	10.93	8.8	Punching Shear	15.34	530.95
	S-P-RCA100	77	3.6	115.3	116.4	9.75	10.03	9.3	Punching Shear	21.39	694.88
	S-WU-RCA100	15	2.1	122.5	124.8	10.92	11.13	12.5	Punching Shear	7.14	898.09

*หมายเหตุ: S คือ แผ่นพื้น C คือ แผ่นพื้นคอนกรีตที่ไม่มีเสริมแรง CB คือ Conventional Shear Bent Bar P คือ PTMS (Post-Tensioned Metal Strapping) WU คือ แผ่นเหล็กบางแบบซิกแซก NA คือ หินธรรมชาติ RCA คือ มวลรวมหยาบรีไซเคิล RCA50 คือ มีส่วนผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล 50% แทนหินธรรมชาติ RCA100 คือ มีส่วนผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล 100% แทนหินธรรมชาติ P_{cr} คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักที่จุดวิกฤต Δ_{cr} คือ ระยะการโก่งตัวที่จุดวิกฤต P_y คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักที่จุดคราก P_u คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด Δ_{max} คือ ระยะการโก่งตัวสูงสุด Δ_y คือ ระยะการโก่งตัวที่จุดคราก Δ_f คือ ระยะการโก่งตัวที่จุดเสียหาย S_e คือ ดัชนีประสิทธิภาพ ζ คือ ดัชนีการดูดซับพลังงาน

พื้นวางพาดบนฐานที่รองรับเพื่อถ่ายน้ำหนักไปยังพื้นเพื่อให้เกิดโมเมนต์ดัดที่กึ่งกลางคาน และวัดการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น โดยอุปกรณ์ใช้ในการตรวจวัดประเภท Linear Voltage Displacement Transducers (LVDT) ติดตั้งที่ปลายพื้น

ทั้งสองฝั่งและกลางพื้น โดยต่อเข้ากับชุดประมวลผล (Data Logger) เพื่ออ่านค่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (Load) กับระยะการแอ่นตัว (Deflection) และนำค่าจากกราฟไปวิเคราะห์หาโมเมนต์หน้าดัดที่เกิดขึ้นต่อไป

ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดการแอ่นตัวแนวตั้ง LVDT ซึ่งสามารถอ่านค่าละเอียดได้ถึง 0.001 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชุด ที่บริเวณขอบพื้นสำหรับใช้คำนวณการแอ่นตัวเฉลี่ย โดยการวัดการแอ่นตัวของพื้น การบันทึกค่าการแอ่นตัวจะทำภายหลังการเพิ่มหรือลดช่วงน้ำหนักที่กระทำบนพื้นทดสอบ และจะทำการหยุดการทดสอบเมื่อแรงกระทำลดลง ไม่สามารถเพิ่มน้ำหนักบรรทุกได้ เนื่องจากแผ่นพื้นทดสอบอาจเกิดจากวิบัติแล้ว โดยจะทำการทาสีขาวบาง ๆ เพื่อสะดวกต่อการสังเกตลักษณะรอยร้าว ตลอดความยาวพื้นทดสอบเพื่อเป็นเส้นอ้างอิงตรวจสอบการทำมุมของรอยร้าวที่ขณะทดสอบ คณะวิจัยทำการวาดรูปแบบรอยร้าวขณะทดสอบ และภาพหลังวิบัติ พร้อมวัดความกว้างรอยร้าวด้วย Crack Microscope ขณะทดสอบ

3. ผลการทดลอง

3.1 น้ำหนักสูงสุดและรูปแบบการวิบัติ

น้ำหนักวิบัติและรูปแบบการวิบัติ แสดงดังตารางที่ 3 และแสดงในรูปที่ 4 เห็นได้ว่าในสัดส่วนผสมที่เป็นหินธรรมชาติ (NA) S-WU มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดเฉลี่ย 170.3 กิโลนิวตัน S-P = 160.8 กิโลนิวตัน S-CB = 159.2 กิโลนิวตัน S-C = 145.5 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ในสัดส่วนผสมที่เป็นหินรีไซเคิล (RCA) 50% S-WU มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดเฉลี่ย 130.5 กิโลนิวตัน S-P = 121.9 กิโลนิวตัน S-CB = 118.6 กิโลนิวตัน S-C = 105.3 กิโลนิวตัน ตามลำดับ และในสัดส่วนผสมที่เป็นหินรีไซเคิล (RCA) 100% S-WU มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดเฉลี่ย 124.8 กิโลนิวตัน S-P = 116.4 กิโลนิวตัน S-CB = 114.3 กิโลนิวตัน S-C = 100.1 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ซึ่งการวิบัติทั้งหมดจะเป็นการวิบัติแบบแรงเฉือนเจาะทะลุ (Punching Shear) รอยแตกร้าวมีความกว้างประมาณ 1.62 มิลลิเมตร การทดสอบในระยะนี้จะทดสอบตัวอย่าง S-C ทดสอบจนวิบัติเนื่องจากเป็นตัวควบคุมซึ่งมีรอยร้าวแรกเท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร ในส่วนของแผ่นพื้นทดสอบที่มีการเสริมกำลังจะทดสอบจนวิบัติโดยมีรอยร้าวแรก (First

Crack) ซึ่งมีค่าพิกโตรอยร้าวแรกใกล้เคียงกันโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.87 มิลลิเมตร

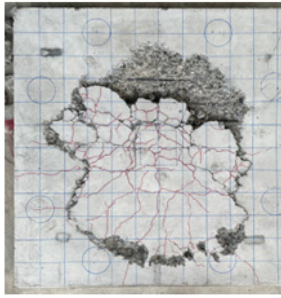
คณะวิจัยใช้สมการคำนวณโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ACI318-19 และ Eurocode2 ดังสมการที่ (1) และ (2) โดยการนำสมการที่ (1) มาคำนวณ 3 สมการย่อยให้เลือกใช้ค่าต่ำสุดสำหรับการคำนวณหาแรงเฉือนในการเปรียบเทียบกำลังของตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ โดยตัวอย่างที่สามารถต้านทานกำลังได้ดีที่สุดคือ ตัวอย่าง S-WU

3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีประสิทธิภาพ

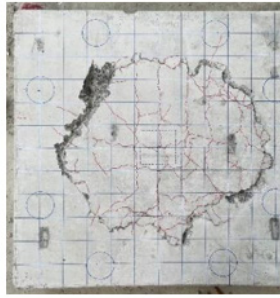
การเปรียบเทียบระหว่างดัชนีประสิทธิภาพและดัชนีการดูดซับพลังงาน ซึ่งดัชนีการดูดซับพลังงานคำนวณมาจากพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุภายในแผ่นที่จะดูดซับพลังงาน สรุปผลการทดสอบและผลการเปรียบเทียบดัชนีประสิทธิภาพ แสดงดังตารางที่ 3

โดยค่าเฉลี่ย S_e (Effective Pre-yield Stiffness) ของแผ่นทดสอบ S-C, S-CB, S-P และ S-WU ในสัดส่วนผสมที่เป็นหินธรรมชาติ (NA) มีค่าเท่ากับ 38.89, 26.47, 30.74 และ 17.53 กิโลนิวตันต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ

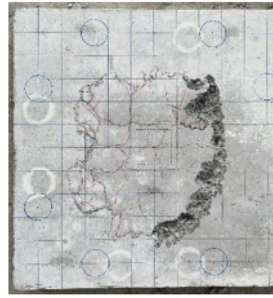
ในส่วนของเปรียบเทียบดัชนีการดูดซับพลังงาน ζ (kN.mm) ของแผ่นทดสอบ S-C, S-CB, S-P และ S-WU มีค่าเท่ากับ 1,562.5, 717.5, 914.32 และ 1,166.35 กิโลนิวตันมิลลิเมตร ตามลำดับ ในสัดส่วนผสมหินรีไซเคิล (RCA) 50% มีค่าเท่ากับ 20.34, 17.53, 23.53 และ 9.47 กิโลนิวตันต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ ในส่วนของเปรียบเทียบดัชนีการดูดซับพลังงาน ζ (กิโลนิวตันมิลลิเมตร) ของแผ่นทดสอบ S-C, S-CB, S-P และ S-WU มีค่าเท่ากับ 1,296.83, 609.88, 777.17 และ 1,014.72 กิโลนิวตันมิลลิเมตร ตามลำดับ และในสัดส่วนผสมหินรีไซเคิล (RCA) 100% มีค่าเท่ากับ 16.11, 15.34, 21.39 และ 7.14 กิโลนิวตันต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ ในส่วนของเปรียบเทียบดัชนีการดูดซับพลังงาน ζ (กิโลนิวตันมิลลิเมตร) ของแผ่นทดสอบ S-C, S-CB, S-P และ S-WU มีค่าเท่ากับ 1,125.03, 530.95, 694.88 และ 898.09 กิโลนิวตันมิลลิเมตร ตามลำดับ หามาจากพื้นที่



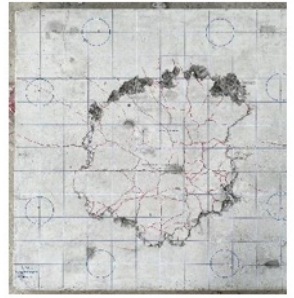
(ก) S-C-NA



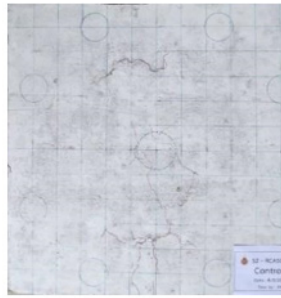
(ข) S-CB-NA



(ค) S-P-NA



(ง) S-WU-NA



(จ) S-C-RCA50



(ฉ) S-CB-RCA50



(ช) S-P-RCA50



(ฌ) S-WU-RCA50



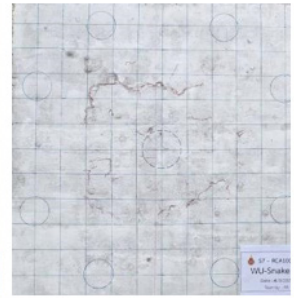
(ฉ) S-C-RCA100



(ค) S-CB-RCA100



(ค) S-P-RCA100



(ค) S-WU-RCA100

รูปที่ 4 รูปแบบการวิบัติของแผ่นทดสอบ

ได้กราฟพบว่า ค่าตัวอย่าง S-P และ S-WU เหมาะที่จะนำมาใช้งานจริงเนื่องจากสามารถรับน้ำหนักได้สูง

3.3 ผลการเปรียบเทียบกับมาตรฐานการออกแบบ

การคำนวณประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนของแผ่นพื้นคอนกรีต ตามมาตรฐานของ ACI318-19 [10] และ Eurocode2 ซึ่งสะท้อนถึงรูปแบบการตั้งสมการที่ (1) และ (2)

$$V_{ACI} = \left\{ \begin{array}{l} 0.33\lambda_s\lambda\sqrt{f_c}b_0d \\ \left(0.17 + \frac{0.33}{\beta}\right)0.33\lambda_s\lambda\sqrt{f_c}b_0d \\ \left(0.17 + \frac{0.83\alpha_s d}{b_0}\right)\lambda_s\lambda\sqrt{f_c}b_0d \end{array} \right\} \quad (1)$$

เมื่อ $\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1+0.004d}} \leq 1$ คือ ค่าปรับเปลี่ยนซึ่งจะลดแรงเฉือน โดยใช้กับแผ่นพื้นที่เกิดแรงเฉือนเจาะทะลุ $d > 250$ มิลลิเมตร β คือ อัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นของเสา $\alpha_s = 40$ สำหรับเสาภายใน $\lambda = 1$ สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ และ 0.75 สำหรับคอนกรีตมวลเบา f_c คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีต d คือ ความลึกประสิทธิผล และ b_0 คือ เส้นรอบรูปพื้นที่วิกฤติ อยู่ที่ $d/2$ จากระยะขอบเสา

$$V_{EC2} = C_{Rd,k} k (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} b_0 d \geq 0.035 k^{3/2} f_c^{1/2} b_0 d \quad (2)$$

เมื่อ $C_{Rd,k} = 0.18/\gamma_c$, γ_c คือ ค่าปรับเปลี่ยนสำหรับวัสดุคอนกรีต d คือ ความลึกประสิทธิผล k คือ ค่าปรับเปลี่ยนผลจากขนาด มีค่าเท่ากับ $1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$ f_c คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีต ρ คือ อัตราส่วนกำลังรับแรงดัด มีค่าเท่ากับ 0.002 และ b_0 คือ เส้นรอบรูปพื้นที่วิกฤติ อยู่ที่ $2d$ จากระยะขอบเสา

3.4 ผลจากแบบจำลอง Concrete Damage Plasticity Model

ในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบ Concrete Damaged Plasticity [9] เนื่องจากแบบจำลองชนิดนี้สามารถจำลองพฤติกรรมที่ละเอียดที่สุดคล้ายพฤติกรรมจริง แบบจำลองคอนกรีตได้กำหนดคุณสมบัติเป็นคอนกรีต [11] ที่สามารถแสดงพฤติกรรมตอบสนองได้ทั้งในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (Concrete Damage Plasticity; CDP) จึงถูกนำมาใช้กำหนดพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง

เพื่อกำหนดพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง พฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นกำหนดให้มีความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด เป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's Law) ซึ่งความสัมพันธ์มีลักษณะเชิงเส้นที่มีค่าความเค้นยืดหยุ่นสูงสุดในช่วงนี้เป็นไปตามคำแนะนำของ ACI 318-19 [10] หรือ $0.45 \cdot f_c'$

ส่วนในช่วงไม่ยืดหยุ่นเลือกใช้แบบจำลอง CDP ใน Abaqus Library [9] กำหนดความสัมพันธ์ในช่วงที่ไม่เชิงเส้นทั้งก่อน และหลังจุดที่ความเค้นมีค่าสูงสุด ซึ่งตามวิธีของความเสียหายเชิงพลาสติกที่เลือกใช้จะสามารถแสดงผลในส่วนของความเสียหายหรือการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์คอนกรีตได้ในรูปของการเสื่อมสภาพความแกร่ง (Stiffness Degradation) ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งผลจากการกระทำ

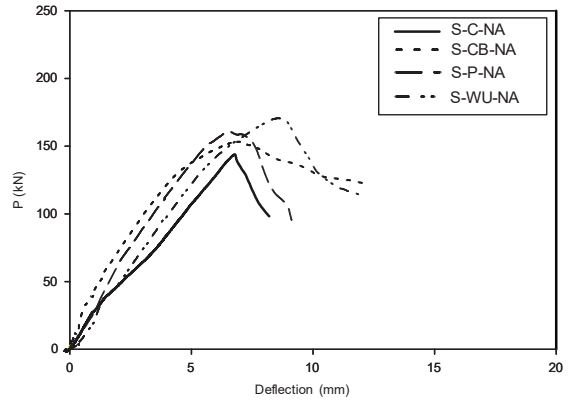
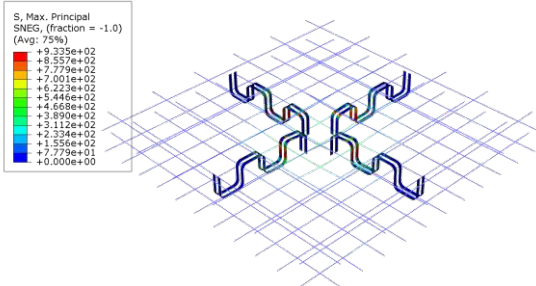
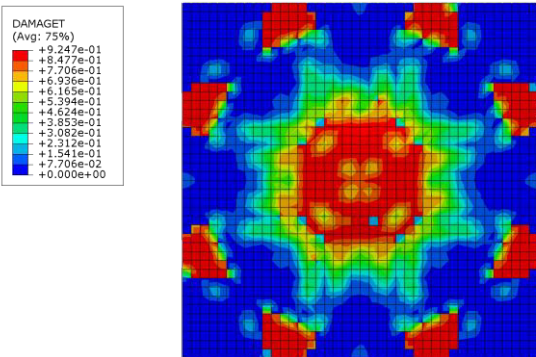
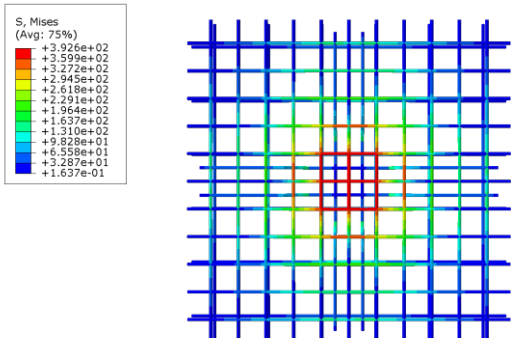
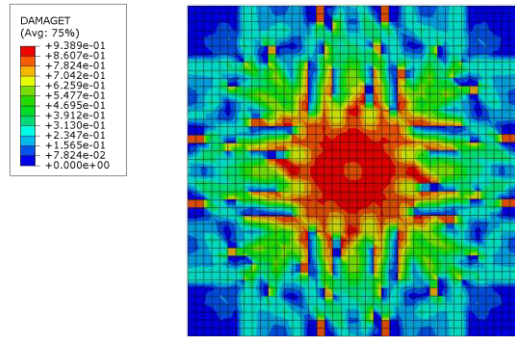
จากผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของตัวอย่าง S-WU แสดงในรูปที่ 5 พบว่า รูปแบบและขนาดของรอยร้าวมีความใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีค่าความกว้างของรอยร้าวเท่ากับ 1.60 มิลลิเมตร ค่า Stress ในแนวราบมีค่าเท่ากับ 392 เมกะปาสคาล ในส่วนของผลการเปรียบเทียบ Load Deflection จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์แสดงในรูปที่ 6 พบว่า ตัวอย่าง S-WU สูงสุดมีค่าประมาณ 175 กิโลนิวตัน และตัวอย่าง S-C มี Load ต่ำสุดประมาณ 148 กิโลนิวตัน เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 18 ซึ่งผลที่ได้คณะวิจัยได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แล้วนำค่าที่ได้มาใส่ในโปรแกรม เพื่อให้ผลการวิเคราะห์รอยร้าวและความเครียดมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติจริง

4. อภิปรายผลและสรุป

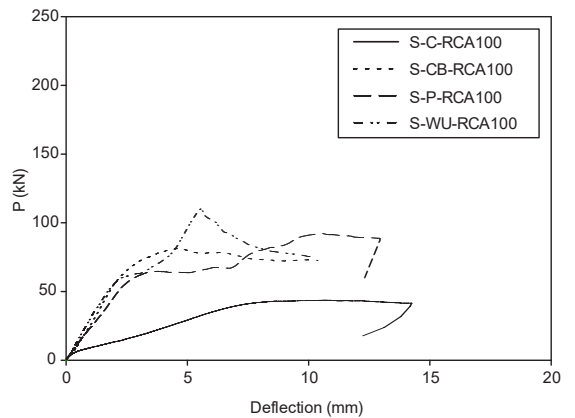
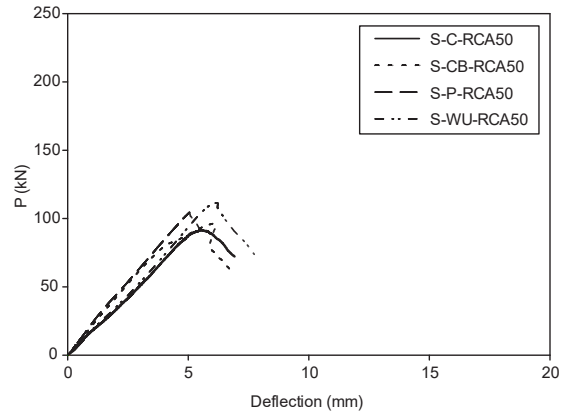
โครงการวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการเกิดแรงเฉือนทะลุของแผ่นพื้นคอนกรีตจากเศษคอนกรีตย่อยเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กบางแบบซิกแซกซึ่งมีผลสรุปดังนี้

- การใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลสามารถออกแบบแผ่นพื้นรับแรงเฉือนทะลุโดยที่การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กบางแบบซิกแซกสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด และเพิ่มขึ้นจากแผ่นพื้นตัวควบคุมร้อยละ 18 และป้องกันการเกิดแรงเฉือนทะลุได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการเสริมกำลังด้วย Post-Tensioned Metal Strapping และแบบ Conventional Shear Bent Bar

- การทำนายค่าแรงเฉือนจากสมการ ACI318-19 สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กบางแบบซิกแซก ให้ค่าที่ต่ำกว่ากับผลการทดสอบ ร้อยละ 10



(ก) Test Series I



(ข) Test Series II

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์การเกิดรอยร้าวและความเครียดจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์

รูปที่ 6 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบ Load-deflection จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์

• การทำนายค่าวิบัติจากแบบจำลองที่ใช้การจำลองการวิบัติของคอนกรีตแบบ Concrete Damage Plasticity Model สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กบางแบบซิกแซก ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการประกวด Structural Steel Improvement for Young Engineers (SSI4YE2022) บริษัทสหวิริยาสตีลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) และผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. S. Poon, Z. H. Shui, L. Lam, H. Fok, and S.C. Kou, "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 1, pp. 31–36, 2004.
- [2] S. Yehia, K. Helal, A. Abusharkh, A. Zaher and H. Istaitiyeh, "Strength and durability evaluation of recycled aggregate concrete," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol.9, no. 2, pp. 219–239, 2015.
- [3] R. Nassar and P. Soroushian, "Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement," *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 368–377, 2012.
- [4] N. Almeida, F. Branco, and J. R. Santos, "Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures," *Building and Environment*, vol. 42, no. 2, pp. 810–819, 2007.
- [5] T. Mohammed, A. Hasnat, A. M. Awal, and S. Z. Bosunia, "Recycling of brick aggregate concrete as coarse aggregate," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol 27, no.7, pp. 1–10, 2014.
- [6] G. Dimitriou, P. Savva, and M. F. Petrou, "Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 158, no. 15, pp. 228–235, 2018.
- [7] J. de Brito, J. Ferreira, J. Pacheco, D. Soares, and M. Guerreiro, "Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 6, pp. 1–16, 2016.
- [8] T. C. Hansen and H. Narud, "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate," *Concrete International*, vol. 5, no. 1, pp. 79–83, 1983.
- [9] ABAQUS. (2004) [Online]. Available: <http://www.abaqus.com>.
- [10] *Building code requirements for reinforced concrete and commentary*, ACI Committee 318-19, 2019.
- [11] A. Kasor, K. Srisuwan, N. Madden, and T. Imjai, "Service and ultimate performance of simply-support precast composite beam," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 1, 2024.