



นวัตกรรมเสาเข็มไมโครไพล์จากเศษคอนกรีตเก่าเสริมแรงด้วยวัสดุแห่งคอมโพสิต

คงเดช บัวน้อย มุชิลฮีย์ สามแม ทิพพาภรณ์ ทองเดช วันวิไลदान แวยูโซะ ประภัสสร ฤทธิกรรมณ์ ภักจิรา อ่อซ่าย และ
ทงศักดิ์ อิ่มใจ*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7567 2399 อีเมล: thanongsak_im@wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.10.014

รับเมื่อ 14 พฤศจิกายน 2566 แก้ไขเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2567 ตอรับเมื่อ 19 มีนาคม 2567 เผยแพร่ออนไลน์ 7 ตุลาคม 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการออกแบบนวัตกรรมเสาเข็มไมโครไพล์จากเศษคอนกรีตเก่าเสริมแรงด้วยวัสดุแห่งคอมโพสิต โดยทำการศึกษารูปแบบข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับเสาเข็มคอนกรีตและพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของส่วนผสมเศษคอนกรีตเก่าและเสริมแรงด้วยวัสดุคอมโพสิตสำหรับเสาเข็มพร้อมทั้งศึกษาพฤติกรรมเชิงกลในการรับแรงของเสาเข็ม ศึกษาและทดสอบการรับแรงตามแนวแกน การรับแรงแผ่นดินไหว การรับแรงเฉือนจากคอนกรีตที่ทำจากเศษคอนกรีตเก่าและวัสดุคอมโพสิต และศึกษาการรับแรงเฉือนที่จุดเชื่อมต่อตามแนวยาวระหว่างเสาเข็ม 2 ต้น ซึ่งผลการทดสอบพบว่า มีความสามารถในการรับน้ำหนักได้ดีเมื่อเทียบกับค่าโมเมนต์ที่สูงสุดเฉลี่ย 6.50 กิโลนิวตันต่อเมตร เมื่อเทียบกับเสาเข็มไมโครไพล์ที่จำหน่ายในท้องตลาด การศึกษาการวิบัติการเกิดรอยร้าวของโครงสร้าง เพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืนมีประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักได้ตามมาตรฐานการออกแบบสามารถติดตั้งได้รวดเร็วมีความทนทานตลอดอายุการใช้งานและใช้วัสดุที่มีราคาถูกลดต้นทุนได้ภายในประเทศ

คำสำคัญ: เสาเข็มไมโครไพล์ มวลรวมหยาบรีไซเคิล วัสดุแห่งคอมโพสิต

การอ้างอิงบทความ: คงเดช บัวน้อย, มุชิลฮีย์ สามแม, ทิพพาภรณ์ ทองเดช, วันวิไลदान แวยูโซะ, ประภัสสร ฤทธิกรรมณ์, ภักจิรา อ่อซ่าย และ ทงศักดิ์ อิ่มใจ, “นวัตกรรมเสาเข็มไมโครไพล์จากเศษคอนกรีตเก่าเสริมแรงด้วยวัสดุแห่งคอมโพสิต,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 35, ฉบับที่ 3, หน้า 1-11, เลขที่บทความ 253-107453, ก.ค.-ก.ย. 2568.



Innovative Recycled Aggregate Concrete Micropiles Reinforced with FRP Reinforcement

Kongdach Buanoi, Musilhee Samae, Tippaporn Thongdet, Wanwildan Waeyusoh, Prapatsorn Rittigun, Pakjira Aosai and Thanongsak Imjai*

Civil Engineering, 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.2024.10.014

Received 14 November 2023 ; Revised 1 February 2024 ; Accepted 19 March 2024; Published online: 7 October 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research introduces an innovative design approach for concrete micropiles constructed from recycled concrete aggregate, reinforced with Fiber-reinforced Polymer (FRP) composites. The study begins by examining standard specifications for concrete piles and then develops the mechanical properties of a mix combining recycled concrete scraps with composite materials for pile fabrication. The investigation extends to the mechanical behavior of the piles under loads, with a focus on axial force and shear strength during earthquake exposure. Special attention is given to the shear force at the longitudinal connection point between two piles. Test results demonstrate a satisfactory load-bearing capacity, with an average maximum moment value of 6.50 kN/m, which is competitive with conventional concrete micropiles available in the market. Additionally, the study explores structural crack failure to promote sustainable infrastructure development. The proposed design method proves to be efficient in supporting weight according to design standards, enables rapid installation, ensures durability over its lifespan, and utilizes cost-effective materials available in the local construction industry.

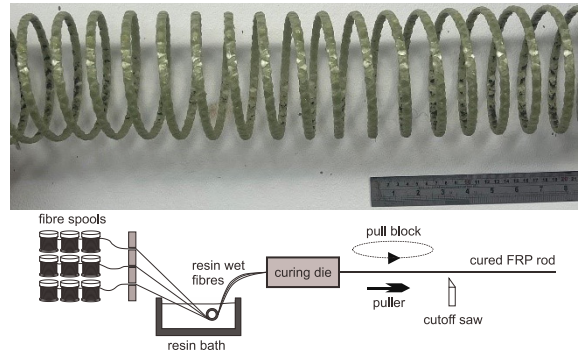
Keywords: Micropiles, Recycled Aggregate Concrete, Composite Materials

Please cite this article as: K. Buanoi, M. Samae, T. Thongdet, W. Waeyusoh, P. Rittigun, P. Aosai, and T. Imjai, "Innovative recycled aggregate concrete micropiles reinforced with FRP reinforcement," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 3, pp. 1–11, ID. 253-107453, Jul.–Sep. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยนิยมใช้เสาเข็มคอนกรีตที่ทำจากคอนกรีตอัดแรง เนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทาน และวัสดุที่หาได้ง่ายกว่า จากการศึกษางานวิจัยและการดำเนินงานวิจัยที่ผ่านมาของทีมนักวิจัยของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์พบว่า คอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มีคุณภาพสูง สามารถนำมาใช้แทนคอนกรีตปกติได้ แต่ยังไม่ได้มีการศึกษาการประยุกต์ใช้คอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลกับคอนกรีต [1]–[5] สำหรับเสาเข็ม ดังนั้นโครงการวิจัยนี้พัฒนาเสาเข็มคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลเสริมแรงด้วยวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ วัสดุแท่งคอมโพสิต ที่เรียกว่า FRP Rod สามารถออกแบบและผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการเฉพาะด้านต่าง ๆ ของการใช้งานในแต่ละประเภท รวมถึงประเภทของเส้นใยและเมทริกซ์โพลิเมอร์ รูปแบบและปริมาณการใช้ของงานแต่ละแบบ รวมถึงรูปแบบการผลิตของการวางแนวเส้นใยและความหนาของชั้นเส้น [6]–[9] อย่างไรก็ตาม แท่งคอมโพสิตโดยทั่วไปผลิตโดยกระบวนการ Pultrusion โดยใช้เครื่องเทอร์โมเรซินโพลิเมอร์ แสดงในรูปที่ 1 เพื่อใช้ในงานโครงสร้างอาคารทั่วไปโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเสาเข็มคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูง ลดการใช้วัสดุมวลรวมจากธรรมชาติในการก่อสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปในงานก่อสร้าง เพื่อให้เป็นรูปแบบโครงสร้างอาคารเขียว (Green Buildings) และลดการก่อเกิดคาร์บอนสำหรับโครงสร้างสาธารณูปโภคพื้นฐานระบบรางในประเทศไทย [10]–[13]

ในอดีตวัสดุแท่งคอมโพสิต (Fiber Reinforced Polymer; FRP) จะมีราคาสูงกว่าเหล็กเสริมคอนกรีตแบบดั้งเดิม เนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งจะมีราคาสูงกว่าเหล็กประมาณ 1–3 เท่า เทียบจากน้ำหนักที่เท่ากัน ในปัจจุบัน การผลิตวัสดุแท่งคอมโพสิตสามารถผลิตได้ในประเทศไทย และใช้วัสดุในประเทศไทยในกระบวนการผลิต ทำให้ราคาต้นทุนวัสดุแท่งคอมโพสิตใกล้เคียงกับเหล็กเสริมคอนกรีตแบบดั้งเดิม และยังสามารถผลิตได้แบบไม่จำกัดความยาว มีน้ำหนักเบา ง่ายต่อการขนส่ง ซึ่งในปัจจุบันได้นำวัสดุแท่งคอมโพสิตแทนเหล็กเสริม มาทดแทนเหล็กเสริมคอนกรีตแบบดั้งเดิม เป็นที่นิยมมากขึ้นในอุตสาหกรรม



รูปที่ 1 ตัวอย่าง FRP Rod และการผลิต FRP Rod ด้วยกระบวนการ Pultrusion

การก่อสร้างประเทศไทย เนื่องจากทำก่อสร้างได้รวดเร็ว เมื่อเทียบกับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กแบบดั้งเดิม และนอกจากนั้นยังยืดอายุการใช้งาน โครงสร้างได้ดินที่มีการกัดกร่อนสูงในช่วงอายุการใช้งานแสดงในรูปที่ 2

การนำมวลรวมหยาบรีไซเคิลได้มาจากการย่อยเศษคอนกรีตจากการก่อสร้างหรือถอนอาคาร แสดงในรูปที่ 3 นำมาผ่านเครื่องย่อย และร่อนให้มีขนาดเทียบเท่ากับหินธรรมชาติแสดงการประยุกต์ใช้คอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate; RCA) สำหรับงานโครงสร้างยังมีอยู่ค่อนข้างจำกัด เนื่องจากขาดข้อมูลงานวิจัยสนับสนุนที่มากเพียงพอ ยังไม่มีแนวทางการออกแบบที่ชัดเจน ประกอบกับสมบัติของมวลรวมหยาบรีไซเคิลไม่แน่นอน มีความพรุนและการดูดซึมน้ำที่มาก ทำให้กำลังของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลไม่แน่นอน

งานวิจัยด้านการประยุกต์ใช้คอนกรีตผสมมวลรวมหยาบสำหรับงานโครงสร้างในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาเน้นในเรื่องพฤติกรรมและกำลังของคาน เช่น การทดสอบกำลังเฉือนของคานที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลเพื่อทดแทนหินธรรมชาติที่ร้อยละต่าง ๆ อย่างไรก็ตามถึงผลทดสอบที่รายงานในงานวิจัยต่าง ๆ จะออกมาค่อนข้างแตกต่างกัน แต่ผลทดสอบส่วนใหญ่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้และศักยภาพของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่สามารถใช้แทนหินธรรมชาติได้ ทำให้กำลังที่ได้เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบของ ACI 318 [15]



(ก) งานเสาเข็ม

(ข) งานเสาเข็มสั้นสำหรับพื้นที่จำกัด

รูปที่ 2 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้วัสดุแห่งคอมโพสิตในงานคอนกรีตสำหรับงานเสาเข็ม

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 3 ระยะ ซึ่งระยะที่ 1 คณะผู้วิจัยทำการศึกษารรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ทำการศึกษาพฤติกรรม การรับน้ำหนักของเสาเข็มประกอบจากคอนกรีต RCA และการเสียรูปในภาวะขีดสุด (Ultimate Limit State) สำหรับการรับน้ำหนักบรรทุกทุกระยะสั้นในระยะเวลาที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของตัวอย่าง เสาเข็มประกอบจากคอนกรีต RCA ศึกษาพฤติกรรมแรงเฉือน การรับแรงตามแนวแกน การรับแรงแผ่นดินไหว สภาวะความคงทนที่จุดเชื่อมต่อระหว่างเสาเข็มสองต้นที่ต่อกันด้วยการเชื่อม และในระยะเวลาที่ 3 ศึกษาพัฒนาจัดสร้างแบบจำลองเพื่อเสริมแรงด้วยวัสดุแห่งคอมโพสิต และงานเผยแพร่ผลงานวิจัย ระดับชาติ ระดับนานาชาติ

2.1 คุณสมบัติวัสดุ

คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ตามมาตรฐาน ASTM C39 [16] เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC Type 1) มีส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 1 มีกำลังอัดระบุเท่ากับ 45 เมกะปาสคาล คณะผู้วิจัยทำการเก็บตัวอย่างการทดสอบประเภทละ 6 ตัวอย่าง และคุณสมบัติคอนกรีตจากค่าเฉลี่ยจำนวน 6 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 3 ตัวอย่างเศษคอนกรีต

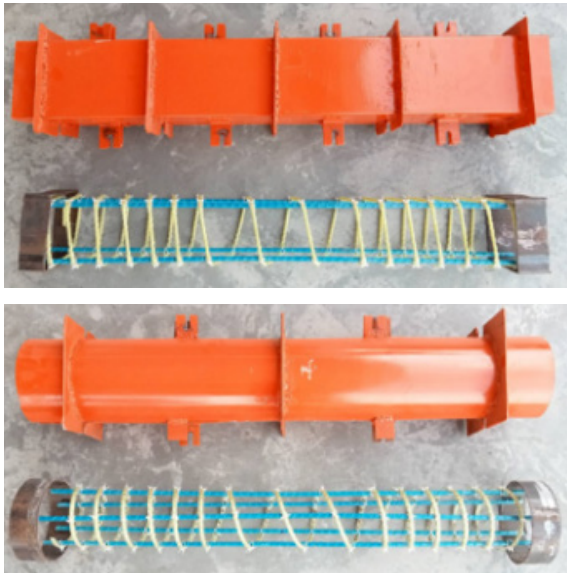
ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ 1 ลบ.ม.

	ส่วนผสม (กก.)
ปูนซีเมนต์	500
น้ำ	150
มวลรวมละเอียด (ทราย)	1,017
มวลรวมรีไซเคิล (หิน)	767
สารลดน้ำ	0.25
อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	0.30
การยุบตัว (มม.)	75

ตารางที่ 2 คุณสมบัติมวลรวมหยาบรีไซเคิล

คุณสมบัติทางกายภาพ	RCA	FA
ขนาดใหญ่สุด (มม)	18.7	4.75
ความถ่วงจำเพาะ	2.53	2.63
การดูดซึมน้ำ (%)	5.4	1.2
โมดูลัสความละเอียด	7.6	3.51
Impact value (%)	13.3	-
Crushing value (%)	23.13	-
Residual mortar (%)	32.5	-

วัสดุคอมโพสิต FRP มีพฤติกรรมที่เปราะเมื่อเทียบกับพฤติกรรมความเหนียวของเหล็ก ซึ่งการเพิ่มกำลังและคุณสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นของ FRPs นั้นมีผลต่อโครงสร้าง เนื่องจากความเปราะของ FRP จะส่งผลกระทบต่อความสามารถที่จำกัดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ เมื่อเพิ่ม



รูปที่ 4 ตัวอย่างการติดตั้งวัสดุแท่งคอมโพสิตในแบบหล่อก่อนเทคอนกรีต

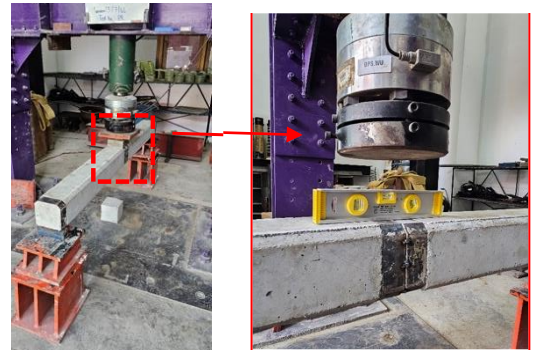
ความสามารถในการรับแรงดัดหรือเสริมแรงให้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคุณสมบัติมาตรฐานของการต้านแรงดึงของวัสดุ

2.2 การออกแบบเสาเข็มไมโครไพลท์ทดสอบ

เสาเข็มมีขนาด 15×15 ซม. ความยาว 100 ซม. และเสากลมมีขนาด $\varnothing 15$ ซม. ความยาว 100 ซม. มีการเสริมแรงด้วยเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ ตาม มอก. SR24 คือ $\varnothing 6$, $\varnothing 12$ มม. วัสดุคอมโพสิตแบบเกลียว (Spiral) มีขนาด $\varnothing 6$ มม. และวัสดุคอมโพสิตแบบแท่ง (GFRP Rod) มีขนาด $\varnothing 12$ มม. แสดงในรูปที่ 4

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพการรับน้ำหนักและอุปกรณ์ตรวจวัดทางเทคนิค

การให้น้ำหนักเสาบรรทุกทดสอบ ติดตั้งโดยเครื่อง UTM ขนาด 100 ตัน ติดตั้งเสาทดสอบวางไว้บน Roller and Pined Support และนำเสาเข็มทดสอบขนาดความยาว 1,000 มม. แสดงในรูปที่ 5 เสาวางพาดบนฐานที่รองรับเพื่อถ่วงน้ำหนักไปยังหัวเสาทั้งสองฝั่งเพื่อให้เกิดโมเมนต์ดัดที่กึ่งกลางเสา



รูปที่ 5 การให้น้ำหนักบรรทุกทุก อุปกรณ์ตรวจวัดทางเทคนิคและรายละเอียดทดสอบ (หน่วยเป็น มิลลิเมตร)

และวัดการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นโดยอุปกรณ์การตรวจวัดประเภท Linear Voltage Displacement Transducers (LVDT) ติดตั้งที่กลางเสา โดยต่อเข้ากับชุดประมวลผล (Data Logger) เพื่ออ่านค่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (Load) กับระยะการแอ่นตัว (Deflection) และนำค่าจากกราฟไปวิเคราะห์หาโมเมนต์หน้าตัดที่เกิดขึ้นต่อไป

ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดการแอ่นตัวแนวตั้ง LVDT ซึ่งสามารถอ่านค่าละเอียดได้ถึง 0.001 มม. จำนวน 1 ชุดที่บริเวณกลางเสาสำหรับใช้คำนวณการแอ่นตัวเฉลี่ยโดยการวัดการแอ่นตัวของเสาการบันทึกค่าการแอ่นตัวทำภายหลังการเพิ่มหรือลดช่วงน้ำหนักที่กระทำบนเสาทดสอบทำการทาสีขาวบาง ๆ เพื่อสะดวกต่อการสังเกตลักษณะรอยร้าวตลอดความยาวเสาทดสอบเพื่อเป็นเส้นอ้างอิงตรวจสอบการทำมุมของรอยร้าวที่ขณะทดสอบ คณะวิจัยทำการวาดรูปแบบรอยร้าวขณะทดสอบ และภาพหลังวิบัติ พร้อมวัดความกว้างรอยร้าว ด้วย Crack Microscope ขณะทดสอบ

3. ผลการทดลอง

3.1 น้ำหนักสูงสุดและรูปแบบการวิบัติ

จากผลการทดสอบน้ำหนักวิบัติและรูปแบบการวิบัติแสดงดังตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า S-NA-C15 มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดเมื่อเทียบกับค่าโมเมนต์ที่สูงสุดเฉลี่ย 6.50 กิโลนิวตันต่อเมตร S-NA-C15-N 13.95 กิโลนิวตันต่อเมตร S-NA-C15-D 16.20 กิโลนิวตันต่อเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบดัชนีประสิทธิภาพ

Test Series	Specimen ID	P_{cr}	D_{cr}	P_y	P_u	D_{max}	D_y	D_f	m_u	m_f	S_e	z	M
		(กิโลนิวตัน)	(มม.)	(กิโลนิวตัน)	(กิโลนิวตัน)	(มม.)	(มม.)	(มม.)			(กิโลนิวตันต่อมิลลิเมตร)	(กิโลนิวตันมิลลิเมตร)	(กิโลนิวตันเมตร)
I	S-NA-C15	15.00	0.60	50.00	65.00	2.20	2.50	3.40	0.88	0.74	25.00	820	6.50
	S-NA-R15	30.00	0.50	56.50	63.00	2.10	3.00	3.80	0.70	0.79	60.00	970	6.30
	S-RCA-C15	15.50	0.50	42.00	59.00	2.30	2.70	3.00	0.85	0.90	31.00	630	5.90
	S-RCA-R15	16.00	0.40	42.50	57.50	1.90	2.00	3.60	0.95	0.56	40.00	800	5.75
	FRP-NA-C15	22.00	0.70	60.50	63.00	2.15	3.00	4.00	0.72	0.75	31.43	1160	6.30
	FRP-NA-R15	21.50	0.65	58.00	60.00	2.20	3.10	3.50	0.71	0.89	33.08	860	6.00
	FRP-RCA-C15	18.00	0.70	51.50	59.50	2.90	3.80	3.80	0.76	1.00	25.71	720	5.95
	FRP-RCA-R15	15.00	0.80	50.00	58.00	2.30	3.70	4.10	0.62	0.90	18.75	1150	5.80
II	S-NA-C15-N	20.00	0.80	60.00	62.00	3.90	3.50	5.00	1.11	0.70	25.00	1100	13.95
	S-NA-R15-N	21.00	0.70	55.00	59.50	3.60	3.00	4.95	1.20	0.61	30.00	1000	13.39
	S-RCA-C15-N	20.00	0.85	51.00	59.00	3.90	3.10	4.20	1.26	0.74	23.53	750	13.28
	S-RCA-R15-N	19.00	0.70	50.00	58.00	3.50	2.70	4.80	1.30	0.56	27.14	770	13.05
	FRP-NA-C15-N	20.00	1.40	58.00	61.50	7.80	5.90	9.90	1.32	0.60	14.29	2150	13.84
	FRP-NA-R15-N	20.00	1.50	57.00	60.00	7.50	6.00	8.10	1.25	0.74	13.33	2100	13.50
	FRP-RCA-C15-N	19.00	1.60	53.00	58.00	7.30	5.90	8.50	1.24	0.69	11.88	1900	13.05
	FRP-RCA-R15-N	18.00	1.20	54.00	57.00	7.00	5.80	7.90	1.21	0.73	15.00	1850	12.83
III	S-NA-C15-D	18.00	0.50	70.00	72.00	3.40	3.00	4.50	1.13	0.67	36.00	920	16.20
	S-NA-R15-D	18.00	0.50	64.00	69.50	3.10	2.70	4.90	1.15	0.55	36.00	980	15.64
	S-RCA-C15-D	15.00	0.40	60.00	65.00	3.20	2.70	4.00	1.19	0.68	37.50	880	14.63
	S-RCA-R15-D	16.00	0.45	62.00	66.00	3.00	2.75	4.10	1.09	0.67	35.56	850	14.85
	FRP-NA-C15-D	10.00	0.65	65.00	69.50	6.50	5.50	8.50	1.18	0.65	15.38	2000	15.64
	FRP-NA-R15-D	11.00	0.70	60.00	68.00	6.50	5.20	7.10	1.25	0.73	15.71	1940	15.30
	FRP-RCA-C15-D	9.00	0.60	59.00	62.00	6.40	5.10	7.50	1.25	0.68	15.00	1890	13.95
	FRP-RCA-R15-D	10.00	0.65	52.00	60.00	5.50	4.00	6.60	1.38	0.61	15.38	1780	13.50

หมายเหตุ: *S* คือ Steel, *FRP* คือ Fiber Reinforce Polymer, *NA* คือ หินธรรมชาติ, *RCA* คือ หินรีไซเคิล, *R* คือ Rectangular, *C* คือ Circular, *N* คือ Normal Joint Cyclic Load, *D* คือ Dowel Joint Cyclic Load, P_u คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด, S_e คือ ดัชนีประสิทธิภาพ และ z คือ ดัชนีการดูดซับพลังงาน

ซึ่งจะเป็นการวิบัติแบบ Concrete Crushing รอยแตกกว้าง มีความกว้างประมาณ 4.17 มม.

3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีประสิทธิภาพ

คณะวิจัยใช้สมการคำนวณโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ACI 440.1R ดังสมการที่ (1) สำหรับคำนวณและใช้ค่าความเครียดในการเปรียบเทียบกำลังของตัวอย่างตามมาตรฐานการทดสอบ

คอนกรีต แสดงในรูปที่ 6 โดยตัวอย่างที่สามารถต้านทานกำลังได้ดีที่สุด คือ ตัวอย่าง FRP-NA-C15-N, FRP-NA-R15-N และ FRP-NA-C15-D แต่เนื่องจากการทดสอบพบว่า วัสดุคอมโพสิตสามารถรับน้ำหนักได้ใกล้เคียงกับเหล็กคณะวิจัยจึงเลือกวัสดุคอมโพสิตมาใช้ในการวิเคราะห์และนำไปใช้ในการพัฒนาเสาเข็มไมโครไพล์ โดยใช้วัสดุแห่งคอมโพสิตทดแทนเหล็กเสริมสำหรับเสาเข็มคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

**Civil Engineering**

Project	-	Beam No.
Location	-	Engineering
Owner	-	Date

FRP BEAM DESIGN**ACI440.1R****1. Material**

FRP Type		GFRP
Tensile strength	f_{fu}^*	= 620.6 MPa
Rupture strain	ϵ_{fu}^*	= 0.014
Modulus of elasticity	E_f	= 44800 MPa
Conc	f_c	= 42 MPa
Conc modulus	E_c	= 30783.52 MPa
Ultimate comp. strain	ϵ_{cu}	= 0.003

2. Beam Section

Member type		Simple Beam
Span Length	L	= 1 m
Width	b	= 150 mm
Depth	h	= 150 mm

3. Reinforcement design

Main rebar		FRP12
Number		4 เส้น
Stirrups rebar		FRP6
Covering	d'	= 15 mm
Effective depth	d	= 123.00 mm
Area of FRP	A_f	= 452.39 mm ²

4. Design for ultimate load

Beam dead load	w_{sw}	= 0.54 kN/m
Dead load	w_{DL}	= 5 kN/m
Live load	w_{LL}	= 8.8 kN/m
Distributed load $W_u=1.2DL+1.6LL$	w_u	= 20.73 kN/m
Factor ultimate moment	M_u	= 2.59 kN.m

5. Design rupture stress of the FRP

Exposure condition		Not Exposed
Environmental reduction factor	C_E	= 0.8
Design rupter stress	f_{fu}	= 496.48 MPa
Factor for nenutral axis depth	β_1	= 0.7492
Reinforcement ratio for balanced	ρ_{fb}	= 0.011
Reinforcement ratio	ρ_f	= 0.025 Concrete crushing
Tensile stress in FRP	f_f	= 321.54 MPa
Moment of Resistance	M_n	= 15.91 kN.m
Strength reduction factor	ϕ	= 0.65
Check : $\phi M_n > M_u$	ϕM_n	= 10.34 kN.m OK
Unity Check		= 3.99 OK

6. Check the crack with

Exposure condition (Crack)		Intreior exposur
Maximum allowable crack with	W_{max}	= 0.7 mm
$M_{DL} = W_{DL}L^2/8$	M_{DL}	= 0.69 kN.m
$M_{LL} = W_{LL}L^2/8$	M_{LL}	= 1.10 kN.m
$M_{DL+LL} = M_{DL} + M_{LL}$	M_{DL+LL}	= 1.79 kN.m
$n_f = E_f/4750\sqrt{f_c}$	n_f	= 1.46
$k = (\sqrt{(\rho_f n_f)^2 + 2\rho_f n_f})$	k	= 0.23
$f_f = M_{DL+LL} / A_f d(1-k/3)$	f_f	= 34.94 MPa
$\beta = (h-kd)/d(1-k)$	β	= 1.29
$d_c = h-d$	d_c	= 27.00 mm
$s = b-2d_c$	s	= 96 mm ²
$w = 2f_f E_f \beta k_s d_c^2 + (s/2)^2$	w	= 0.15 mm OK

7. Long term deflection

Allowable defactions	L/240	= 4.17 mm
PSL%	PSL	= 0.2 %
Moment of inertia	I_g	= 4.22E+07 mm ⁴
Cracking moment	M_{cr}	= 2.26 kN.m
Cracked section	I_{cr}	= 7.04E+06 mm ⁴
Coefficient bond and modulus	βd	= 0.43
Effective moment of inertia	$(I_e)_{DL+LL}$	= 2.91E+07 mm ⁴

Short term deflection

$(\Delta)_{DL+LL}$	$(\Delta)_{DL+LL}$	= 0.21 mm
$(\Delta)_{DL}$	$(\Delta)_{DL}$	= 0.08 mm
$(\Delta)_{LL}$	$(\Delta)_{LL}$	= 0.13 mm

Long term deflection

Duration of the building	ξ	>5 years
Multiplier $\lambda = 0.6\xi$	λ	= 1.2
Δ_{LT}	Δ_{LT}	= 0.26 mm OK

8. Creep rupture stress limit

Creep rupture $f_{rs(max)}$	$f_{rs(max)}$	= 99.30 MPa
Moment sustained load	M_s	= 0.91 kN.m
Sustained stress level in FRP	f_{rs}	= 17.8 MPa OK

รูปที่ 6 รายการคำนวณการออกแบบเสาเสริม

$$f_{s,sus} = M_{s,sus} \frac{n_f d(1-k)}{I_{cr}} \quad (1)$$

เมื่อ

I_{cr} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของการแตกร้าว

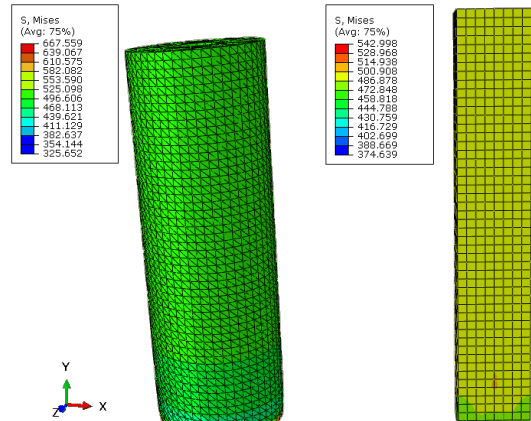
d คือ ความลึกประสิทธิผล

k คือ สัมประสิทธิ์ระดับความเครียดในการเสริมแรงด้วย FRP

3.4 แบบจำลอง Concrete Damage Plasticity Model

การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต้นแบบโดยโปรแกรม ABAQUS [14] ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย ระหว่างมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ร่วมกับ University of Warwick (พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาเข็มไมโครไฟลต์ต้นแบบ) โดยแบบจำลองรูปแบบชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโครงสร้างคอนกรีต คือ ชนิด 8-node Quadratic Tetrahedron (C3D8R) ใน Library ของโปรแกรม ABAQUS Version 6.14 ซึ่งเป็นการสร้างรูปแบบเอลิเมนต์ภายในขอบเขตตามที่ผู้ใช้กำหนด (User Define) การวิเคราะห์เริ่มต้นนี้ใช้สำหรับออกแบบเสาเข็มไมโครไฟลต์ต้นแบบ (การวิเคราะห์ระยะแรกนี้จะพิจารณาเฉพาะคอนกรีตเพียงอย่างเดียว ไม่รวมผลของวัสดุเสริมแรง) และกำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานจริง กำหนดคุณสมบัติวัสดุคอนกรีต [17]

เพื่อกำหนดพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีต ภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง พฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่น กำหนดให้มีความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's Law) ซึ่งความสัมพันธ์มีลักษณะเชิงเส้น ที่มีค่าความเค้นยืดหยุ่นสูงสุดในช่วงนี้เป็นไปตามคำแนะนำของ ACI 318-19 [15] หรือ 0.45- f_c' ส่วนในช่วงไม่ยืดหยุ่นเลือกใช้แบบจำลอง CDP ใน ABAQUS Library [14] กำหนดความสัมพันธ์ในช่วงที่ไม่เชิงเส้นทั้งก่อนและหลังจุดที่ความเค้นมีค่าสูงสุด ซึ่งตามวิธีของความเสียหายเชิงพลาสติกที่เลือกใช้จะสามารถแสดงผลในส่วนของความเสียหายหรือการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์คอนกรีต



รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของตัวอย่าง

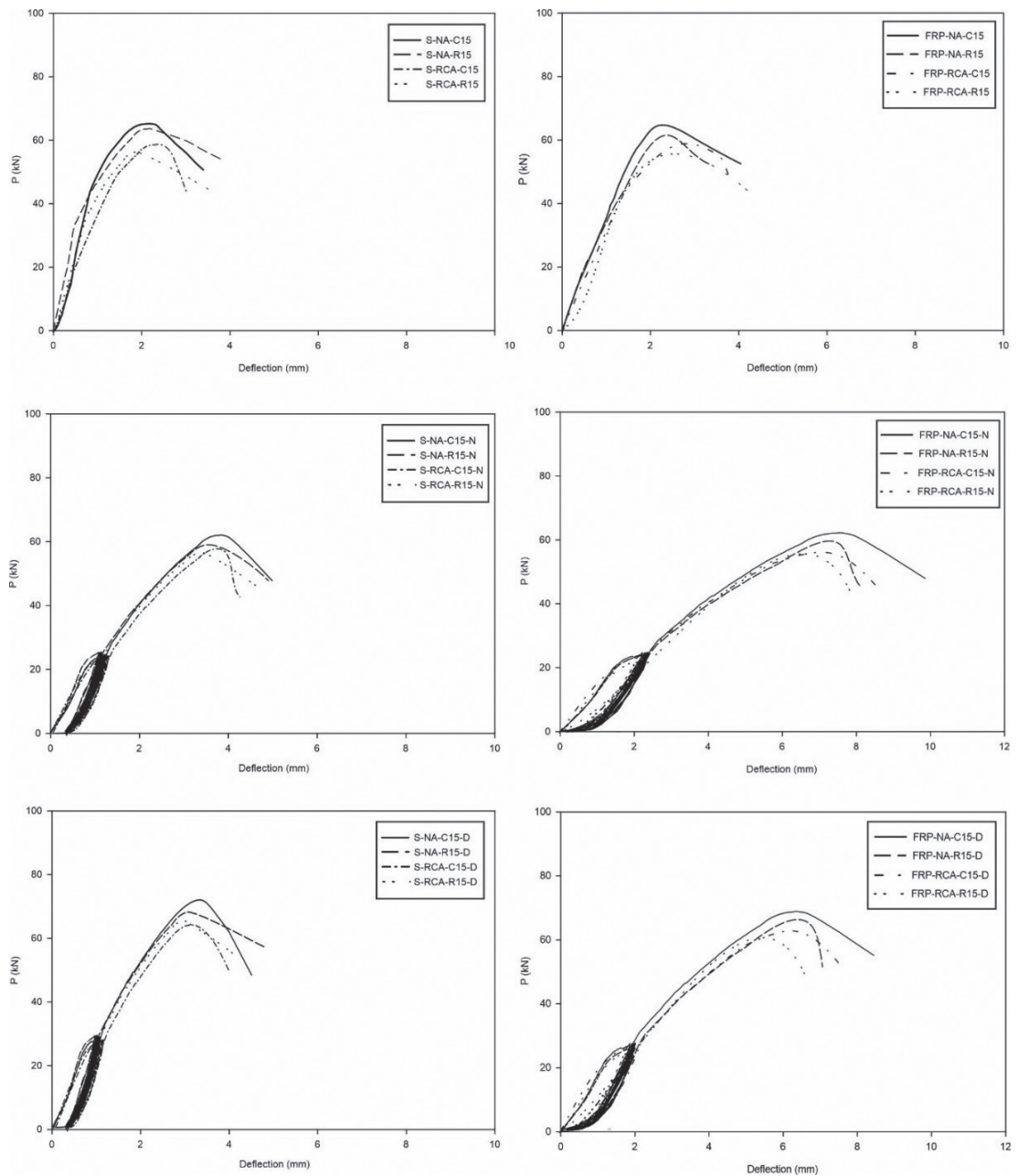
ได้ในรูปของการเสื่อมสภาพความแกร่ง (Stiffness Degradation) ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งผลจากการกระทำของแรงอัดและแรงดึง [17]

จากผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของตัวอย่างแสดงในรูปที่ 7 พบว่ารูปแบบและขนาดของรอยร้าวมีความใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการคอนกรีต โดยในส่วนของผลการเปรียบเทียบ Load Deflection จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ แสดงในรูปที่ 8 ตัวอย่างที่สามารถต้านทานกำลังได้ดีที่สุด คือ ตัวอย่าง FRP-NA-C15-N, FRP-NA-R15-N และ FRP-NA-C15-D

4. อภิปรายผลและสรุป

จากผลการทดสอบน้ำหนักวิกฤติและรูปแบบการวิบัติ เห็นได้ว่าในระยะที่ 1 ที่คณะวิจัยทำการทดสอบหาน้ำหนักด้วยวิธี Bending และระยะที่ 2 ทำการทดสอบการหาน้ำหนักด้วยวิธี Bending โดยทำการศึกษาบริเวณจุดต่อของเสาเข็ม และในระยะที่ 3 ทำการศึกษาเดี่ยวและรอยต่อของรอยเชื่อม มีผลการทดสอบดังนี้

- ตัวอย่าง S-NA-C15 มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดเมื่อเทียบกับค่าโมเมนต์ที่สูงสุดเฉลี่ย 6.50 กิโลนิวตันต่อเมตร S-NA-C15-N 13.95 กิโลนิวตันต่อเมตร S-NA-C15-D 16.20 กิโลนิวตันต่อเมตร ตามลำดับซึ่งจะเป็นการวิบัติแบบ



รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบ Load-deflection จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์

Concrete Crushing รอยแตกกว้างมีความกว้างประมาณ 4.17 มม.

• สมการคำนวณโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ACI 440.1R สำหรับคำนวณและการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียด

จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ การเปรียบเทียบกำลังของตัวอย่างตามมาตรฐานการทดสอบคอนกรีต โดยตัวอย่างที่สามารถต้านทานกำลังได้ดีที่สุด คือ ตัวอย่าง FRP-NA-C15-N, FRP-NA-R15-N และ FRP-NA-C15-D

• วัสดุคอมโพสิตสามารถรับน้ำหนักได้ใกล้เคียงกับเหล็กคณะวิจัยจึงเลือกวัสดุคอมโพสิตมาใช้ในการวิเคราะห์และนำไปใช้ในการพัฒนาเสาเข็มไมโครไพล์ โดยใช้วัสดุแห่งคอมโพสิตทดแทนเหล็กเสริม

• ควรมีการนำวัสดุคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้จากแหล่งเดียวกัน รู้คุณภาพกำลังอัดที่ชัดเจนเพื่อควบคุมคุณภาพของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการประกวด Structural Steel Improvement for Young Engineers (SSI4YE2022) บริษัทสหวิริยาสตีล อินดัสตรี 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] M. Etxeberria and I. Vegas, "Effect of fine ceramic recycled aggregate (RA) and mixed fine RA on hardened properties of concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 67, no. 12, pp. 645–655, 2015.
 - [6] M. C. Limbachiya, T. Leelawat, and R. K. Dhir, "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete," *Materials and Structures*, vol. 33, pp. 574–580, 2000.
 - [7] M. L. Berndt, "Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 2606–2613, 2009.
 - [8] J. Xiao, W. Li, Y. Fan, and X. Huang, "An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011)," *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 364–383, 2012.
 - [9] B. González-Fonteboa and F. Martínez-Abella, "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties," *Building and Environment*, vol. 43, no. 4, pp. 429–437, 2008.
 - [10] 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.
 - [11] X. Li, "Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53, no. 1–2, pp. 36–44, 2008.
 - [12] X. Li, "Recycling and reuse of waste concrete



- in China: Part II. Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53, no. 3, pp. 107–112, 2009.
- [13] 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.
- [14] ABAQUS. (2020). [Online]. Available: <http://www.abaqus.com>.
- [15] *Building code requirements for reinforced concrete and commentary*, ACI Committee 318–19, 2019.
- [16] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM C39/C39M–18, 2001.
- [17] 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, pp. 1–10, 2024 (in Thai).