

กำลังยึดหน่วงระหว่างเหล็กเสริมที่เคลือบอีพ็อกซีกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อย ปิยนุช ใจแก้ว¹, ภัคที คบกลาง^{2*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

²คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Email: pakdee.k@ku.th

Received: Jan 20, 2022

Revised: Apr 25, 2022

Accepted: Jun 13, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อย โดยทดลองหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด $150 \times 150 \times 150$ มม. มีเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. เสริมอยู่ที่จุดกึ่งกลางของหน้าตัดมีระยะฝังเท่ากับ 50 มม. คอนกรีตที่ใช้มีเถ้าขานอ้อยผสมทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก จำลองตัวอย่างให้มีลักษณะการยึดหน่วง 2 แบบ คือ ฝังเหล็กเสริมพร้อมหล่อคอนกรีตกับเจาะคอนกรีตในภายหลัง แล้วเสริมเหล็กโดยใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำการทดสอบตัวอย่างเมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้อีพ็อกซีมีผลให้กำลังยึดหน่วงในช่วง 7 วันแรก มีค่ามากกว่ากรณีฝังเหล็กเสริมพร้อมหล่อคอนกรีตถึงประมาณร้อยละ 12 โดยต้องผสมเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 สำหรับในระยะยาว ตัวอย่างที่ทดสอบทั้ง 2 กรณี ให้กำลังยึดหน่วงไม่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: กำลังยึดหน่วง, กำลังอัด, อีพ็อกซี, เถ้าขานอ้อย, เหล็กเสริม

Bonding Strength of Rebars Coating Epoxy Resin in Concrete mixed with Bagasse Ash

Piyanuch Jaikaew¹, Pakdee Khobklang^{2*}

¹ Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

² Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University, Chalermphrakiat Sakonnakhon Province Campus

Email:pakdee.k@ku.th

Received: Jan 20, 2022

Revised: Apr 25, 2022

Accepted: Jun 13, 2022

Abstract

This article aims to study the effect of epoxy resin on bonding strength between rebars and concrete mixed with bagasse ash. The cube specimen, 150 × 150 × 150 mm, and 12 mm in diameter of deformed bar were adopted in the pull-out tests to determine bonding between concrete and rebars. Two types of rebar installation, 50 mm deep at the center of cross-sectional area, were investigated i.e., installation during specimen were casting and installation after setting time of concrete by drilling a hole at center of cross-sectional area of specimen then pushed rebar with coated epoxy resin into the hole. In this study, ordinary Portland cement type I was replaced by bagasse ash at 0%, 10%, 20%, 30% and 40% by weight and samples were tested at the age of concrete was 3, 7, 28, 60 and 90 days. The experimental results reveal that at the early age of concrete that mixed with bagasse ash less than 20%, namely 3 and 7 days, the samples using epoxy-coated rebars exhibit higher bonding strength, up to 12%, than the samples without epoxy. However, in the long-term, it is found that bonding strength of the samples using epoxy-coated rebars were gradually increased and the differences in bonding strength are not significance when comparing to the samples without epoxy.

Keywords: Bonding strength, Compressive strength, Epoxy resin, Bagasse ash, Rebar

บทนำ

องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Member) เป็นโครงสร้างชนิดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก แต่เนื่องจากปูนซีเมนต์และมวลรวมที่ใช้ผลิตคอนกรีตมีราคาสูงขึ้นเรื่อย ๆ วงการวิศวกรรมโยธาทั่วโลกจึงมีแนวคิดที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ มาผสมในคอนกรีต เพื่อช่วยให้คอนกรีตมีราคาถูกและเป็น การช่วยกำจัดวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอีกด้วย เถ้าขานอ้อย (Bagasse Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งชนิดหนึ่งซึ่งได้รับความสนใจจากวิศวกรที่จะนำมาผสมในคอนกรีต [1-8] เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาธรรมชาติ Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [9] โดยในประเทศไทย มีปริมาณเถ้าขานอ้อยเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลไม่น้อยกว่า 10 ล้านเมตริกตันต่อปี มีปริมาณเถ้าขานอ้อยเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลไม่น้อยกว่า 10 ล้านเมตริกตันต่อปี [10, 11] ดังนั้น เถ้าขานอ้อยจึงน่าจะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตได้ เช่นเดียวกับกับเถ้าลอย (Fly Ash) การนำเถ้าขานอ้อยมาผสมในคอนกรีตนั้น มีจุดประสงค์เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง แต่ยังคงอัตราส่วน W/B ไว้เท่าเดิม โดยผสมเถ้าขานอ้อยเข้าไปในส่วนผสมคอนกรีตให้เท่ากับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษผลกระทบของการผสมเถ้าขานอ้อยที่มีต่อคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของคอนกรีตอย่างจริงจัง

ในการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น สมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบถูกวิศวกรสร้างขึ้นมาจากสมมติฐานที่ว่า เหล็กเสริมและคอนกรีตยึดแน่นติดกันตลอดเวลา [12-14] ซึ่งต้องอาศัยพื้นที่สัมผัสระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่เพียงพอต่อการสร้างแรงยึดเหนี่ยวเพื่อทำให้เหล็กเสริมกับคอนกรีตไม่เกิดการเลื่อนหลุดออกจากกัน (slip) หรือที่ในทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเรียกว่า ระยะฝัง (development length) อย่างไรก็ตาม การฝังเหล็กเสริมในคอนกรีตอาจไม่สามารถดำเนินการได้ในระหว่างการหล่อ

คอนกรีต เช่น การต่อเติมโครงสร้างในภายหลัง หรือ การซ่อมแซมโครงสร้าง เป็นต้น ในกรณีเช่นนี้ วิศวกรต้องใช้วิธีเจาะคอนกรีตซึ่งแข็งตัวแล้วให้มีขนาดช่องเปิดที่สามารถติดตั้งเหล็กเสริมเข้าไปได้ โดยจำเป็นต้องใช้กาวหรืออีพ็อกซี่ (Epoxy Resin) เป็นวัสดุยึดประสานเหล็กเสริมเข้ากับคอนกรีตไม่ให้เกิดรอยหลุดออกจากกันเมื่ออยู่ในสภาวะใช้งาน ซึ่งกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้ย่อมแตกต่างจากกรณีที่ฝังเหล็กเสริมในขณะที่หล่อคอนกรีต

นอกจากนี้ การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อยยังมีน้อย [15-24] งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมที่เคลือบอีพ็อกซี่กับคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อย ซึ่งเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะเป็นประโยชน์สำหรับวิศวกรเพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อยให้ปลอดภัย มีประสิทธิภาพสูงสุด และประหยัดราคาค่าก่อสร้าง

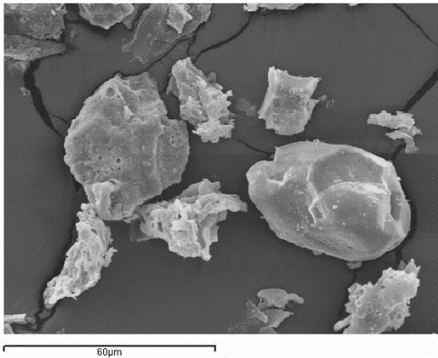
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อย โดยเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากการฝังเหล็กเสริมในขณะที่หล่อคอนกรีต กับกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากการใช้อีพ็อกซี่เป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้มีตัวแปรต้นคือ วิธีการติดตั้งเหล็กเสริมและปริมาณเถ้าขานอ้อยที่ผสมในคอนกรีต ตัวแปรคงที่คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B ratio), ปริมาณมวลรวมหยาบ, ปริมาณมวลรวมละเอียด ชนิดของอีพ็อกซี่ ขนาดของแท่งตัวอย่างทดสอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม และระยะฝังเหล็กเสริม ตัวแปรตามคือ กำลังอัดของคอนกรีตและกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับ

คอนกรีต โดยส่วนผสมคอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายแม่น้ำกรวด น้ำ และเถ้าขานอ้อยที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิดขนาด 40 ไมโครเมตร) ซึ่งลักษณะอนุภาคของเถ้าขานอ้อยที่ได้มีรูปร่างไม่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 1 แตกต่างจากเถ้าลอยที่อนุภาคมีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลม



รูปที่ 1 อนุภาคเถ้าขานอ้อยที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ซึ่งถ่ายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM)

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยนั้น จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) technique พบว่า ในเถ้าขานอ้อยที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) เกินกว่าร้อยละ 80 ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งซิลิกอนไดออกไซด์นี้เป็นองค์ประกอบสำคัญในปฏิกิริยาปอซโซลานที่ช่วยเพิ่มกำลังอัดให้กับคอนกรีต

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย

ออกไซด์	ปริมาณโดยน้ำหนัก (ร้อยละ)
MgO	2.23
Al ₂ O ₃	2.70
SiO ₂	84.70
P ₂ O ₅	2.32
SO ₃	0.17
Cl	<0.01

ออกไซด์	ปริมาณโดยน้ำหนัก (ร้อยละ)
K ₂ O	2.66
CaO	3.02
TiO ₂	0.36
MnO	0.37
Fe ₂ O ₃	1.43
CuO	<0.01
Rb ₂ O	<0.01
ZrO ₂	0.06

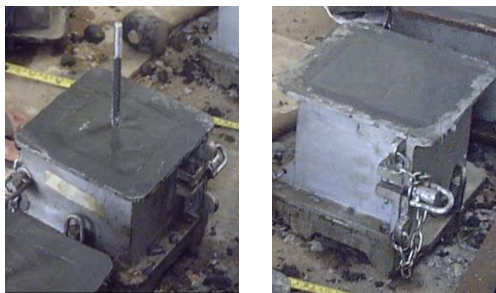
การทดสอบสมบัติเชิงกลในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตและการทดสอบกำลังยึดหน่วงระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต โดยทดลองผสมเถ้าขานอ้อยทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ การทดสอบกำลังอัด ใช้แท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม. ใช้สัดส่วนผสมเดียวกันกับแท่งตัวอย่างที่ทดสอบกำลังอัดหน่วง ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 [25] เมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ชุดละ 5 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แท่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

สำหรับการทดสอบกำลังยึดหน่วงนั้น แบ่งตัวอย่างเป็น 2 ชุด คือ ชุดตัวอย่างที่เสริมเหล็กในขณะที่หล่อคอนกรีต กับชุดตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมเหล็กในขณะที่หล่อคอนกรีต แต่ทำการเจาะช่องเปิด

เพื่อติดตั้งเหล็กเสริมในภายหลัง ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยทั้ง 2 ชุดจะใช้ตัวอย่างแท่งคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มม. มีเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ฝังลึก 50 มม. ที่จุดกึ่งกลางของหน้าตัด คอนกรีตที่หล่อมีเถ้าขานอ้อยผสมทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์เช่นเดียวกัน ทำการทดสอบออกแรงดึงจนเหล็กเสริมหลุดออกจากแท่งตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C900 [26] เมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ชุดละ 5 ตัวอย่าง

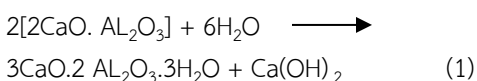


รูปที่ 3 แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดหน่วง (ก) แท่งตัวอย่างฝังเหล็กเสริมในขณะที่หล่อคอนกรีต และ (ข) แท่งตัวอย่างที่เตรียมไว้สำหรับเจาะช่องเปิดเพื่อติดตั้งเหล็กเสริมในภายหลัง

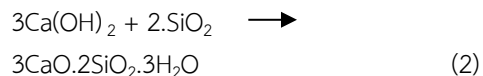
ผลการวิจัย

- กำลังอัด

การก่อตัวของคอนกรีตโดยทั่วไปนั้นเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ซึ่งเกิดขึ้นทันทีเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ โดยมีสารตั้งต้นคือ CaO , SiO_2 และ H_2O เมื่อทำปฏิกิริยากันแล้วจะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) หรือเรียกว่า CSH ซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมประสาน สามารถเขียนในรูปสมการเคมีได้ดังแสดงในสมการ (1)



การผสมเถ้าขานอ้อยในคอนกรีตส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน กระบวนการก่อตัวของคอนกรีตจึงช้าลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าขานอ้อย แต่ก็มีข้อดีคือทำให้คอนกรีตสามารถระบายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีขึ้น สำหรับปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) นั้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยากับซิลิกา (Silica) และอลูมินา (Alumina) ที่มีอยู่ในเถ้าขานอ้อย จึงทำให้เกิดเป็นสารประกอบ CSH เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างภายในเนื้อคอนกรีตที่บีบแน่นมากขึ้น ช่วยให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่บีบแน่นมากขึ้น กำลังสูงขึ้น และเพิ่มความทนทานให้กับคอนกรีตด้วยปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น สามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังแสดงในสมการ (2)



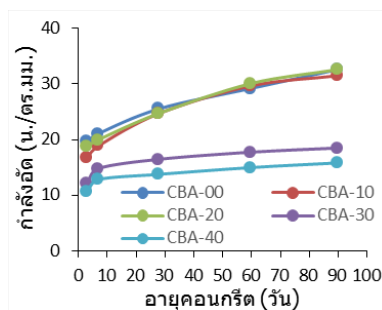
อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกหน่วงให้ดำเนินไปอย่างช้า ๆ จากการผสมเถ้าขานอ้อย แต่ก็ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานดำเนินต่อเนื่องไปในระยะยาว ทำให้กำลังของคอนกรีตค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต

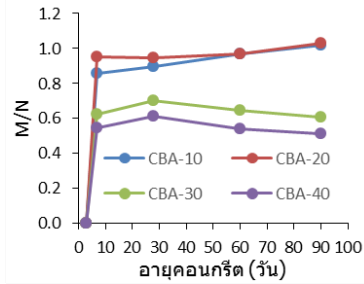
อายุ	กำลังอัด (น./ตร.มม.)				
	CBA-00	CBA-10	CBA-20	CBA-30	CBA-40
3	20.0	17.2	19.1	12.4	10.8
7	21.5	18.7	20.4	16.8	14.5
28	26.0	26.5	25.2	16.8	13.4
60	29.8	30.3	30.7	19.0	14.5
90	33.3	32.1	33.2	18.9	16.1

CBA-xx คือ คอนกรีตที่ผสมเถ้าซันอ้อยทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ xx โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าซันอ้อยพัฒนากำลังอัดได้ช้ากว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าซันอ้อย โดยหากคอนกรีตมีอายุไม่เกิน 28 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าซันอ้อยทุกสัดส่วนผสมมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าซันอ้อย แต่เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่มีอายุมากกว่า 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าซันอ้อยไม่เกินร้อยละ 20 มีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าซันอ้อย โดยเมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 90 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าซันอ้อยไม่เกินร้อยละ 20 มีแนวโน้มไม่แตกต่างจากกำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าซันอ้อย สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าซันอ้อยในอัตราส่วนไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 ค่ากำลังอัดที่ได้มีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าซันอ้อยค่อนข้างมาก ถึงประมาณร้อยละ 50 ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงลดลง ส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณลดลง การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจึงลดลงตามไปด้วย จึงทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าซันอ้อยไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 มีกำลังอัดต่ำมาก ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 5 อัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าซันอ้อยกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าซันอ้อย M คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าซันอ้อย N คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าซันอ้อย

- กำลังยึดหน่วง

สำหรับการทดสอบกำลังยึดหน่วงระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตนั้น ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 สำหรับกรณีฝังเหล็กเสริมในขณะหล่อคอนกรีตกับกรณีเจาะฝังเหล็กเสริมโดยเคลือบอีพ็อกซีตามลำดับ

ตารางที่ 3 กำลังยึดหน่วงเฉลี่ยของตัวอย่างที่ฝังเหล็กในขณะหล่อคอนกรีต

อายุ	กำลังยึดหน่วง (น./ตร.มม.)				
	CBA-00	CBA-10	CBA-20	CBA-30	CBA-40
3	9.9	9.7	11.1	7.1	6.2
7	11.1	10.4	11.3	7.9	7.3
28	12.9	12.5	13.3	8.3	7.5
60	13.2	13.3	13.6	8.4	7.9
90	13.3	13.6	13.6	8.5	7.9

ตารางที่ 4 กำลังยึดหน่วงเฉลี่ยของตัวอย่างที่เจาะฝังเหล็กเสริมโดยเคลือบอีพ็อกซี

อายุ	กำลังยึดหน่วง (น./ตร.มม.)				
	CBA-00	CBA-10	CBA-20	CBA-30	CBA-40
3	11.1	10.0	10.9	6.7	5.9
7	11.8	10.6	11.5	7.5	6.9
28	12.2	12.0	12.1	8.6	8.0
60	12.3	12.7	12.5	8.8	8.3
90	12.5	13.1	13.1	8.8	8.5

เมื่อพิจารณาตารางที่ 3 และ 4 พบว่า กำลังยึด
หน้ามีแนวโน้มแปรผันตามกำลังอัดของคอนกรีตทั้ง
กรณีที่เหมาะสมและกรณีที่ไม่เหมาะสม
อ้อย กล่าวคือ เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น
กำลังยึดหน้าระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมมี
แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งกรณีที่ฝังเหล็กเสริม
พร้อมหล่อคอนกรีตและฝังเหล็กเสริมในภายหลัง
โดยใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน นอกจากนี้ยัง
พบว่า ในแง่ตัวอย่างที่คอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยไม่
เกินร้อยละ 20 และคอนกรีตมีอายุไม่เกิน 7 วัน
การใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสานช่วยให้กำลังยึด
หน้าระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมมีค่ามากกว่า
กรณีฝังเหล็กเสริมพร้อมกับหล่อคอนกรีตถึง
ประมาณร้อยละ 12 อายุบ่มของคอนกรีตมีผลต่อ
กำลังยึดหน้าสูงสุดเฉลี่ยของตัวอย่างเหล็กที่ฝัง
เหล็กพร้อมหล่อคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบในระยะยาว
กล่าวคือ เมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 28 วันขึ้นไป
และผสมเถ้าขานอ้อยไม่เกินร้อยละ 20 การฝังเหล็ก
เสริมพร้อมกับหล่อคอนกรีตมีแนวโน้มให้กำลังยึด
หน้าที่สูงกว่าการใช้อีพ็อกซีเล็กน้อย ประมาณไม่
เกินร้อยละ 5 ซึ่งถือว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

- ลักษณะการวิบัติ

กรณีฝังเหล็กเสริมพร้อมหล่อคอนกรีต พบว่า
ลักษณะการวิบัติของแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้า
ขานอ้อยเป็นไปตามรูปที่ 6(ก) และกรณีไม่ผสมเถ้า
ขานอ้อยเป็นไปตามรูปที่ 6(ข)

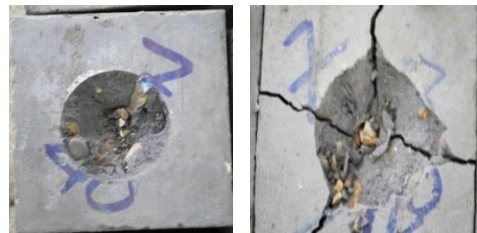


(ก)

(ข)

รูปที่ 6 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่ฝังเหล็กเสริม
ในขณะหล่อคอนกรีต (ก) กรณีผสมเถ้าขานอ้อย
และ (ข) กรณีไม่ผสมเถ้าขานอ้อย

กรณีเจาะฝังเหล็กเสริมโดยใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุ
เชื่อมประสาน พบว่า ลักษณะการวิบัติของแท่ง
ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อยเป็นไปตามรูปที่
7(ก) และกรณีไม่ผสมเถ้าขานอ้อยเป็นไปตามรูปที่ 7(ข)



(ก)

(ข)

รูปที่ 7 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่เจาะฝังเหล็ก
เสริมโดยใช้อีพ็อกซี (ก) กรณีผสมเถ้าขานอ้อย และ
(ข) กรณีไม่ผสมเถ้าขานอ้อย

เมื่อพิจารณารูปที่ 6 และ 7 สังเกตได้ว่าลักษณะ
การวิบัติของแท่งตัวอย่างที่ฝังเหล็กเสริมพร้อม
การหล่อคอนกรีต และการวิบัติของแท่งตัวอย่างที่
เจาะฝังเหล็กเสริมโดยใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อม
ประสาน ทั้งกรณีคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยกับกรณี
คอนกรีตไม่ผสมเถ้าขานอ้อย มีลักษณะที่ต่างกัน
กล่าวคือ แท่งตัวอย่างที่ฝังเหล็กพร้อมกับการหล่อ
คอนกรีตมีลักษณะการวิบัติที่แสดงให้เห็นการ
กระจายแรงไปสู่คอนกรีตโดยรอบ ทำให้คอนกรีตมี
การหลุดร่อนเป็นวงกว้างรอบเหล็กเสริม ในขณะที่
แท่งตัวอย่างที่ใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสานมี
ลักษณะการวิบัติที่แสดงให้เห็นว่าอีพ็อกซีช่วยยึด

เกาะเหล็กเสริมกับคอนกรีตโดยรอบได้เป็นอย่างดี แต่สามารถกระจายแรงไปสู่คอนกรีตที่อยู่โดยรอบเหล็กเสริมเท่านั้น การวิบัติจึงเป็นลักษณะกรวย ส่วนอิทธิพลของเถ้าขานอ้อยนั้น พบว่า คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าขานอ้อยมีแนวโน้มหลุดร่อนได้ยากกว่ากรณีผสมเถ้าขานอ้อย สังเกตได้ชัดเจนจากรูปที่ 7(ข) ซึ่งเห็นได้ว่า คอนกรีตช่วยกันทำงานอย่างเต็มที่ จนแท่งคอนกรีตแตกออกในขณะที่เหล็กเสริมหลุดออกจากแท่งตัวอย่าง ซึ่งผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Ahmed KS, et al. [27] และ Shang H, Shao S and Wang W [28] ทั้งลักษณะการวิบัติและกำลังยึดหน่วงที่ได้ โดยได้ดำเนินการทดลองในลักษณะที่คล้ายกัน

สรุปและอภิปรายผล

กำลังยึดหน่วงระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตแปรผันตามกำลังอัดของคอนกรีตเป็นหลัก ทั้งกรณีฝั้เหล็กเสริมในขณะหล่อคอนกรีต และกรณีเจาะฝั้เหล็กเสริมในภายหลังโดยใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 กำลังยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมมีค่าไม่แตกต่างจากคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าขานอ้อย แต่หากผสมเถ้าขานอ้อยเกินร้อยละ 20 จะส่งผลให้กำลังยึดหน่วงมีค่าลดลงเป็นอย่างมากถึงร้อยละ 50 กำลังยึดหน่วงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อผสมเถ้าขานอ้อยในอัตราร้อยละ 10-20 ทั้งกรณีฝั้เหล็กเสริมพร้อมกับหล่อคอนกรีต และกรณีเจาะฝั้เหล็กเสริมในภายหลังโดยใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน

2. การเจาะฝั้เหล็กเสริมในภายหลังโดยใช้อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน มีผลให้กำลังยึดหน่วงในช่วง 7 วันแรก มีค่ามากกว่ากรณีฝั้เหล็กเสริมพร้อมหล่อคอนกรีตถึงร้อยละ 12 โดยคอนกรีตต้องผสมเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 10 แต่หากผสมเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนตั้งแต่ร้อยละ 20 ขึ้นไป กำลังยึดหน่วงจะน้อยกว่าการฝั้เหล็กเสริมพร้อมหล่อคอนกรีต และการใช้อีพ็อกซีเป็น

วัสดุเชื่อมประสาน ให้กำลังยึดหน่วงในระยะยาวไม่แตกต่างจากการฝั้เหล็กเสริมพร้อมหล่อคอนกรีต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการสำหรับทดสอบตัวอย่าง และขอขอบพระคุณ บริษัท ฮิลติ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนโครงการ โดยมอบอีพ็อกซีรุ่น HIT-HY 150 #338973 ให้เป็นวัสดุในการทดลองในครั้งนี้

References

- [1] Batool F, Masood A and Ali M. Characterization of Sugarcane Bagasse Ash as Pozzolan and Influence on Concrete Properties. *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media B.V.)*. 2020; 45(5): 3891-3900.
- [2] Chindaprasirt P, et al. Mechanical properties, chloride resistance and microstructure of Portland fly ash cement concrete containing high volume bagasse ash. *Journal of Building Engineering*. 2020; 31: 101415.
- [3] Ganesan K, Rajagopal K and Thangavel K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*. 2007; 29: 515-524.
- [4] Jha P, Sachan AK and Singh RP. Agro-waste sugarcane bagasse ash (ScBA) as partial replacement of binder material in concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 44(Part 1): 419-427.

- [5] Khobklang P, Nokkaew K and Greepala V. *Effect of Bagasse Ash on Water Absorbtion and Compressive Strength of Lateritic Soil Interlocking Block*, in Excellence in Concrete Construction-through Innovation, Limbachiya MC, Editor. 2008, Kingston University: London, UK.
- [6] Loganayagan S, Chandra Mohan N and Dhivyabharathi S. *Sugarcane bagasse ash as alternate supplementary cementitious material in concrete*. Materials Today: Proceedings. 2021; 45(Part 2): 1004-1007.
- [7] Pritish Gupta Q, Eric W and Chandradeo B. *Sustainable concrete: Potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. Case Studies in Construction Materials*. 2021; 14(e00545-).
- [8] Sujjavanich S, et al. *Effect of Bagasse Ash as Cementitious Material*. In. Proceeding in NOCMAT/3-Vietnam International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies; March 12-14; Hanoi, Vietnam 2002
- [9] American Society for Testing and Materials. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, in Concrete and Aggregates*. 2004, ASTM International: West Conshohocken, United States.
- [10] Dumrongsil S and Thep Wong R. *Strength and Microstructure of Cement Blended Bagasse Ash and Fly Ash*. 2007, Rajamangala University Of Technology Rattanakosin: Bangkok, Thailand. p. 19.
- [11] Tancharoen S and Suwansaard A. *The Study of Proportion of Bagasse Ash Affecting to Compressive Strength of Concrete*. *The Journal of Industrial Technology*. 2022; 18(1): 12.
- [12] Barbosa AF and Ribeiro GO. *Analysis of Reinforced Concrete Structures using ANSYS Nonlinear Concrete Model*. *Computational Mechanics*. 1998; 19(3): 50.
- [13] Ferguson PM, Breen JE and Jirsa JO. *Reinforced Concrete Fundamentals*. 5th ed. 1991, United States of America: John Wiley and Sons, Inc. 768; 1991
- [14] Nilson AH, Darwin D and Dolan CW. *Design of Concrete Structures*. 15th ed. ed. Darwin D and Dolan CW. 2015, Boston: McGraw-Hill Higher Education; 2015
- [15] Abrishami HH and Mitchell D. *Analysis of Bond Stress Distributions in Pullout Specimens*. *Journal of Structural Engineering*. 1996; 122(3): 255.
- [16] Arezoumandi M, Looney TJ and Volz JS. *Effect of fly ash replacement level on the bond strength of reinforcing steel in concrete beams*. *Journal of Cleaner Production*. 2015; 87(1): 745-751.
- [17] Arezoumandi M, Wolfe MH and Volz JS. *A comparative study of the bond strength of reinforcing steel in high-volume fly ash concrete and conventional concrete*. *Construction and Building Materials*. 2013; 40: 919-924.

- [18] Chang EH. *Shear and Bond Behaviour of Reinforced Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Beams, in Civil Engineering*. 2009, Curtin University of Technology: Perth. p. 410.
- [19] Gomaa E, et al. Bond strength of eco-friendly class C fly ash-based thermally cured alkali-activated concrete to portland cement concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 235: 404-416.
- [20] Jiong-Feng L, et al. Bond behavior between high volume fly ash concrete and steel rebars. *Computers & Concrete*. 2017; 19(6): 625-630.
- [21] Li Q, et al. Bond characteristics between early aged fly ash concrete and reinforcing steel bar after fire. *Construction and Building Materials*. 2017; 147: 701-712.
- [22] Liang JF, et al. Bond behavior between high volume fly ash concrete and steel rebars. *Computers and Concrete*. 2017; 19(6): 625-630.
- [23] Manjunath R, Narasimhan MC and Suryanarayana LR. Bond strength characteristics of fly ash admixed self-compacting alkali activated concrete mixes. 2020, *INDIAN CONCRETE JOURNAL: India*. p. 50-58.
- [24] Zhou Q, et al. *Effect of fly ash and corrosion on bond behavior in reinforced concrete*. In: 2020/01/01/: Thomas Telford; 2020. p. 1839-1852.
- [25] American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. 2017, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [26] American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete*. 2001, ASTM International: West Conshohocken, PA, United State of America.
- [27] Ahmed KS, et al. *Bond strength of post-installed high strength deformed rebar in concrete. Case Studies in Construction Materials*. 2021; 15: e00581.
- [28] Shang H, Shao S and Wang W. Bond behavior between graphene modified epoxy coated steel bars and concrete. *Journal of Building Engineering*. 2021; 42: 102481.