



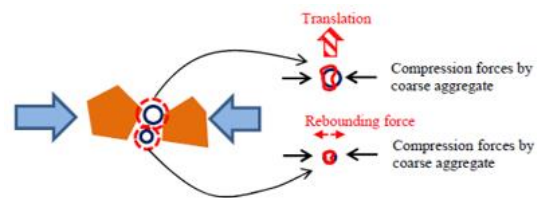
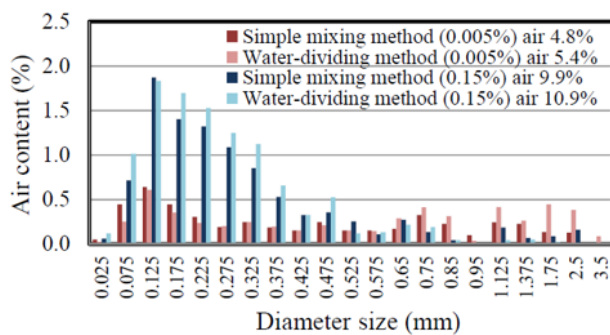
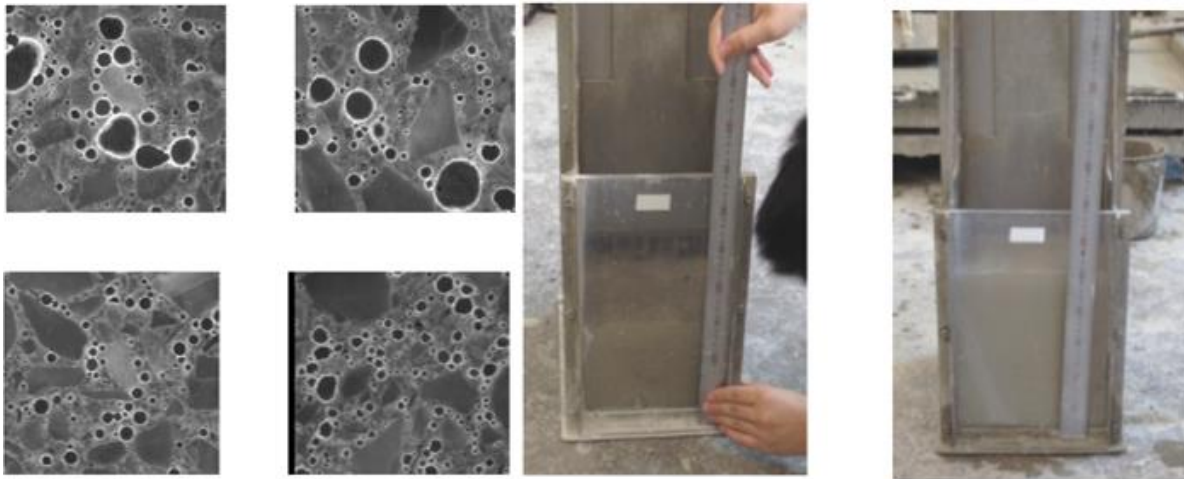
การเพิ่มความสามารถการไหลผ่านสิ่งกีดขวางของคอนกรีตอัดแน่น ด้วยตัวเองโดยฟองอากาศขนาดเล็ก

Self-Compactability Improvement of Self-Compacting Concrete by Fine Air Bubbles

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

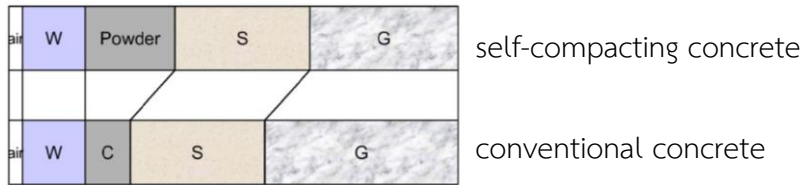
ความเชี่ยวชาญ: วิศวกรรมโครงสร้าง การสำรวจและตรวจสอบโครงสร้าง คอนกรีตวิสดูและ
คอนกรีตพิเศษ



1. บทนำ

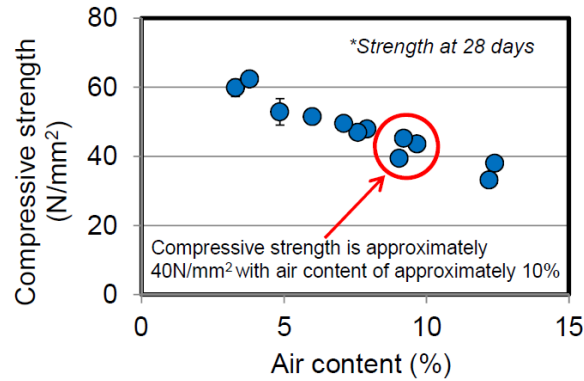
เป็นที่ทราบกันดีว่าคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC) ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาเรื่องความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากการขาดแคลนแรงงานที่มีทักษะในช่วงปี ค.ศ. 1988 [1] แม้ว่าโครงสร้างจะถูกออกแบบอย่างถูกต้องและมีความความแข็งแรง วัสดุที่ใช้ผลิตคอนกรีตได้คุณภาพและมีสัดส่วนผสมที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามหากผู้ปฏิบัติงานไม่มีทักษะการเทคอนกรีตที่ดีก็อาจทำให้โครงสร้างคอนกรีตไม่มีความคงทนตามที่ผู้ออกแบบได้ออกแบบไว้ ดังนั้นคอนกรีตพิเศษนี้จึงถูกคิดค้นโดยศาสตราจารย์โอโอกามูระ และคณะ แห่งมหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่นในปี ค.ศ. 1988 หลักการของคอนกรีตชนิดนี้คือการใช้สารลดน้ำพิเศษในคอนกรีตซึ่งสารลดน้ำพิเศษนี้จะทำปฏิกิริยากับอนุภาคปูนซีเมนต์ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างกัน ส่งผลให้ส่วนผสมคอนกรีตสามารถอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง [2-4] อย่างไรก็ตามการอัดแน่นด้วยตัวเองมีข้อจำกัดคือปริมาณมวลรวมหยาบและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) Japan Society of Civil Engineers (JSCE) [5] แนะนำให้ใช้ปริมาณมวลรวมหยาบร้อยละ 30-33 โดยปริมาตรคอนกรีต เพื่อไม่ให้มีปริมาณมวลรวมมากจนขัดขวางการไหลของคอนกรีต และต้องมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 28-33 โดยน้ำหนักซึ่งหากใช้ W/C มากกว่านี้อาจส่งผลให้ส่วนผสมเกิดการแยกตัวได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันสามารถเพิ่มค่า W/C ในส่วนผสมคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองได้โดยการใช้สารปรับปรุงความหนืด (viscosity modifying agent) ทำให้สามารถผลิตคอนกรีตพิเศษนี้ด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงจากส่วนผสมเมื่อครั้งถูกพัฒนาในช่วงแรกได้ [6]

จากที่กล่าวมานั้นทำให้สามารถแสดงอัตราส่วนผสมของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาได้ดังรูปที่ 1 คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองจำเป็นต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณสองเท่าเพื่อให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์เพียงพอจนคอนกรีตไหลได้ ซึ่งคิดเป็นน้ำหนักปูนซีเมนต์ประมาณ 600 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ขณะที่คอนกรีตธรรมดาดำเนินการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ประมาณ 300 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้จากการจำกัดปริมาณมวลรวมหยาบทำให้สามารถใช้ปริมาณมวลรวมหยาบได้ไม่เกินร้อยละ 33 โดยปริมาตรซึ่งคิดเป็นน้ำหนักประมาณ 890 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ขณะที่คอนกรีตธรรมดาใช้ปริมาณมวลรวมหยาบได้ประมาณ 1,200 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ปริมาณมวลรวมละเอียดที่ใช้สำหรับคอนกรีตสองชนิดนี้มีค่าใกล้เคียงกันโดยใช้น้ำหนักประมาณ มีค่าประมาณ 800 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร



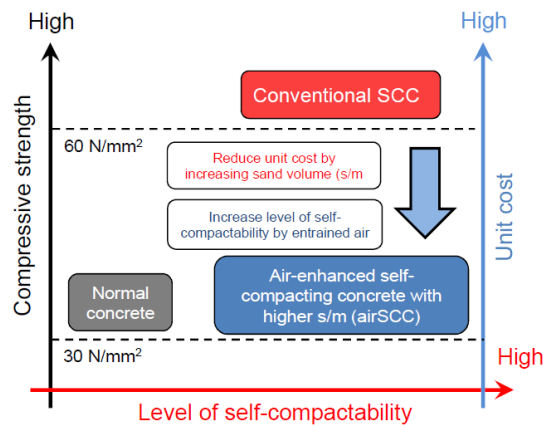
รูปที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตไหลได้และคอนกรีตธรรมดา [1]

คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีราคาสูงจากการใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณมาก แม้ว่าผู้ออกแบบไม่ต้องการกำลังอัดสูงมากแต่หากต้องการมั่นใจว่าคอนกรีตจะอัดแน่นเต็มแบบหล่อโดยการใช้คอนกรีตพิเศษนี้จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณสูงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยคอนกรีตพิเศษนี้อาจมีกำลังรับแรงอัดสูงถึง 1,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผู้วิจัยทั่วโลกทำการศึกษาการใช้วัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อลดราคาต่อหน่วยของคอนกรีตพิเศษนี้และคงไว้ซึ่งความสามารถในการไหลเข้าแบบหล่อและอัดแน่นด้วยตัวเอง วัสดุที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือเถ้าลอย (fly ash) เถ้าลอยนอกจากจะมีราคาถูกแล้วยังเพิ่มความสามารถในการไหลเข้าแบบได้เนื่องจากมีรูปร่างทรงกลม อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาวะแวดล้อมที่มีปริมาณคลอไรด์และซัลเฟตสูงได้ดี [7-14] นอกจากนี้วัสดุทดแทนจำพวกเถ้าต่าง ๆ แล้ว ยังมีผู้วิจัยได้ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการไหลเข้าแบบหล่อ (flow ability) โดยการเพิ่มปริมาณฟองอากาศในส่วนผสมคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง การเพิ่มฟองอากาศในคอนกรีตนั้นไม่ใช่เรื่องใหม่แต่อย่างไร เป็นเรื่องปกติในประเทศที่มีสภาพอากาศหนาวเย็นขนาดอุณหภูมิต่ำ อากาศที่หนาวเย็นจัดทำให้หน้าในช่องว่างคอนกรีตเกิดการแข็งตัวและขยายตัวจนเต็มช่องว่างเกิดเป็นความเค้นภายใน โครงสร้างคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะเช่นนี้เป็นวงจรมักเกิดความเสียหายลักษณะเป็นรอยร้าวต่อเนื่อง การแก้ไขปัญหานี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตซึ่งปริมาณที่แนะนำโดย JSCE ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 3.0-4.5 โดยปริมาตร [5] อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณฟองอากาศส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงโดยลดลงประมาณร้อยละ 5 ต่อการเพิ่มปริมาณฟองอากาศร้อยละ 1 แสดงดังรูปที่ 2 [15]



รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงจากการเพิ่มปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต [15]

อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ และคณะผู้วิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีโคจิ ประเทศญี่ปุ่น (Kochi University of Technology) ได้เริ่มศึกษาขนาดของฟองอากาศที่มีประสิทธิภาพในการไหลของคอนกรีตโดยมีแนวคิดหลักแสดงดังรูปที่ 3 เนื่องจากการเพิ่มความสามารถไหลยอมมาพร้อมกับกำลังรับแรงอัดที่สูงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะคงความสามารถไหลให้เพียงพอต่อคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองโดยฟองอากาศและลดกำลังของคอนกรีตลง (ลดปริมาณปูนซีเมนต์) ซึ่งจะส่งผลให้ราคาต่อหน่วยของคอนกรีตพิเศษนี้ลดลงโดยตรง ดังนั้นหากสามารถเพิ่มความสามารถไหลได้ด้วยการเพิ่มปริมาณฟองอากาศก็จะตอบโจทย์นี้ได้เป็นอย่างดี

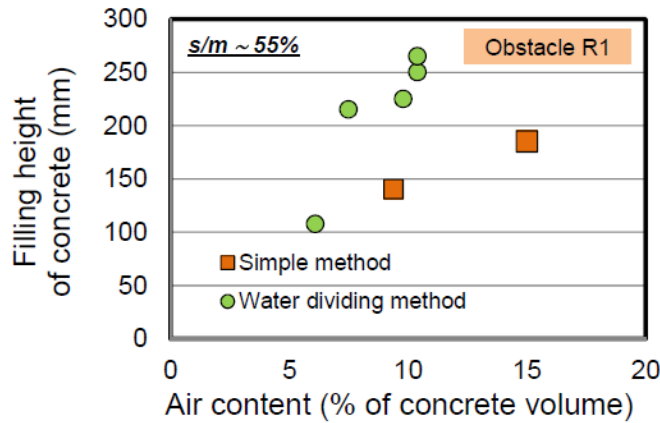


รูปที่ 3 แนวคิดการใช้ฟองอากาศที่มีประสิทธิภาพเพิ่มความสามารถไหลของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง [15]



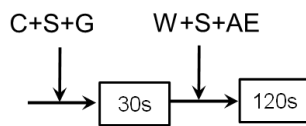
2. การเพิ่มความสามารถการไหลด้วยฟองอากาศ

ความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่ถูกทดสอบด้วย box test เป็นการทดสอบที่สำคัญในการตัดสินว่าคอนกรีตที่ทดสอบนั้นเป็นคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองหรือไม่ โดยคอนกรีตต้องไหลผ่านอุปกรณ์จนมีความสูงไม่น้อยกว่า 250 มม. ระยะเวลาแรกผู้วิจัยพบว่าความสูงที่คอนกรีตไหลผ่านอุปกรณ์ (box height) มีค่า 140 มม. และ 190 มม. เมื่อเพิ่มปริมาณฟองอากาศประมาณร้อยละ 10 และ 15 ตามลำดับ และถูกผสมด้วยวิธีอย่างง่าย แสดงดังรูปที่ 4 การผสมด้วยวิธีอย่างง่ายเริ่มต้นจากใส่วัสดุแห้งทั้งหมดซึ่งประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ ทรายและหิน ผสมเข้าด้วยกันเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นเติมน้ำที่ผสมสารลดน้ำพิเศษและสารกักกระจายฟองอากาศแล้วลงไปทั้งหมดและผสมต่ออีก 120 วินาที ดังรูปที่ 5 แม้ว่า会增加ฟองอากาศถึงร้อยละ 15 ก็ไม่สามารถทำให้คอนกรีตมีค่าการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเพียงพอสำหรับผลิตคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองได้ ผู้วิจัยจึงได้คิดค้นวิธีผสมคอนกรีตใหม่โดยมีสมมติฐานว่าลักษณะของฟองอากาศขึ้นอยู่กับสภาพของส่วนผสมก่อนใส่สารกักกระจายฟองอากาศ ดังนั้นจึงแบ่งน้ำออกเป็นสองส่วนเท่ากัน โดยส่วนที่หนึ่งผสมกับสารลดน้ำพิเศษเทลงส่วนผสมหลังจากผสมวัสดุแห้งและอีกส่วนหนึ่งผสมกับสารกักกระจายฟองอากาศเทลงส่วนผสมเป็นส่วนสุดท้าย ด้วยเหตุจึงทำให้ส่วนผสมก่อนใส่สารกักกระจายฟองอากาศจะมีความชื้นจากน้ำส่วนที่หนึ่งซึ่งทำให้ส่วนผสมเกิดแรงเสียดทานน้อยระหว่างผสมกับสารกักกระจายฟองอากาศ ส่งผลให้ลักษณะของฟองอากาศที่ได้มีความแตกต่างจากการผสมอย่างง่าย วิธีผสมแบบใหม่นี้เรียกว่าวิธีผสมแบบแบ่งน้ำ (water dividing mixing method) โดยขั้นตอนการผสมแสดงดังรูปที่ 6



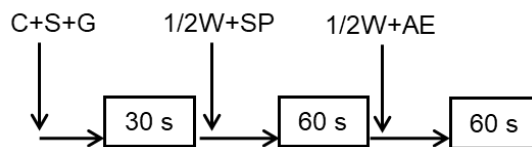
รูปที่ 4 ความสูงที่คอนกรีตไหลผ่านอุปกรณ์ (box height) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้น

[15]



C : cement S : sand W : water G : Gravel
 SP : superplasticizer AE : air entraining agent

รูปที่ 5 วิธีผสมคอนกรีตอัดแน่นด้วยวิธีอย่างง่าย (simple mixing method)



รูปที่ 6 วิธีผสมคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองด้วยวิธีแบ่งน้ำ (water dividing mixing method)

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวิธีการผสมแบบแบ่งน้ำทำให้คอนกรีตมีค่าความสูงที่คอนกรีตไหลผ่านอุปกรณ์ (box height) ถึง 250 มม. ซึ่งมากกว่าคอนกรีตที่ถูกผสมด้วยวิธีอย่างง่ายเมื่อเพิ่มปริมาณฟองอากาศประมาณร้อยละ 10 ดัง**รูปที่ 7** ซึ่งเพียงพอต่อการผลิตคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง วิธีดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการผลิตคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองที่ใช้ฟองอากาศช่วยในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางซึ่งต่อมาคอนกรีตนี้ถูกตั้งชื่อว่า Air-Enhanced Self-Compacting Concrete หรือ AIR-SCC



a) simple method

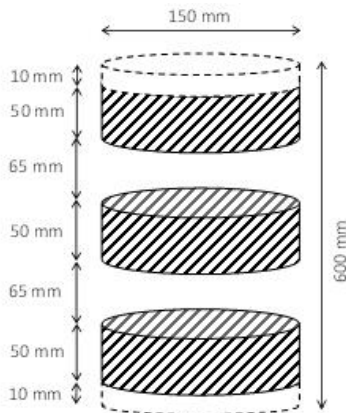


b) water-dividing method

รูปที่ 7 ความสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (box test) ของคอนกรีตที่ผสมด้วยวิธีอย่างง่ายและแบบแบ่ง
น้ำ [15]

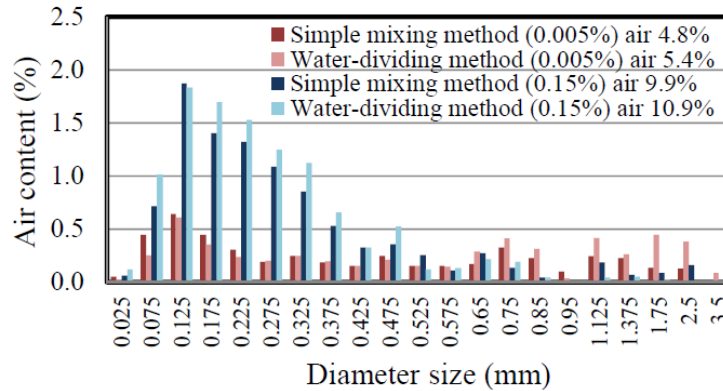
3. ลักษณะการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศที่เพิ่มประสิทธิภาพการไหล

ต่อมาภายหลังผู้วิจัยได้ศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับลักษณะของฟองอากาศที่ได้จากวิธีการผสมทั้งสองวิธีโดยการทดสอบหาระบบช่องว่างอากาศในคอนกรีตแข็งตัวแล้วด้วยกล้องจุลทรรศน์ตามมาตรฐาน ASTM C457, standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete [16] แสดงดังรูปที่ 8



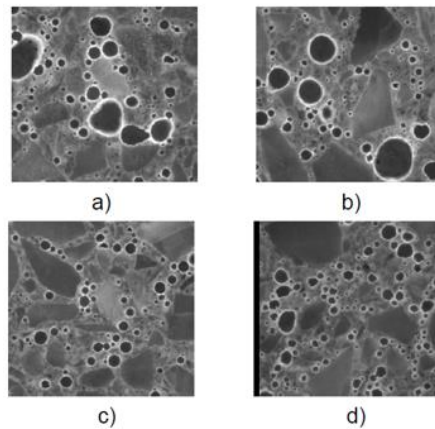
รูปที่ 8 การทดสอบหาระบบช่องว่างอากาศในคอนกรีตแข็งตัวแล้วด้วยกล้องจุลทรรศน์ตามมาตรฐาน ASTM C457 [15]

การทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม. นำมาตัดแบ่งเป็นสามส่วนโดยเว้นส่วนผิวบนและล่างเป็นระยะ 10 มม. และเว้นระยะระหว่างชิ้นส่วนที่ตัดเป็นระยะ 65 มม. แสดงดังรูปที่ 8 เพื่อเฉลี่ยปริมาณฟองอากาศทั้งตัวอย่าง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวิธีการผสมคอนกรีตส่งผลต่อขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างผสมหลังจากใส่สารกักกระจายฟองอากาศ โดยวิธีการผสมแบบแบ่งน้ำสามารถผลิตฟองอากาศขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.025–0.500 มม. ได้ปริมาณมากคิดเป็นประมาณร้อยละ 90 ของปริมาณฟองอากาศทั้งหมด ในขณะที่วิธีผสมอย่างง่ายสามารถผลิตฟองอากาศขนาดเล็กประมาณร้อยละ 40–50 ของปริมาณฟองอากาศทั้งหมด เมื่อพิจารณาขนาดฟองอากาศในคอนกรีตร่วมกับความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางแล้วพบว่ามีความสัมพันธ์ชัดเจน คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากสามารถช่วยให้คอนกรีตไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีฟองอากาศขนาดใหญ่ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.500–3.500 มม.) จำนวนมาก รูปที่ 10 แสดงขนาดฟองอากาศในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเปรียบเทียบขนาดที่ได้จากวิธีผสมทั้งสองวิธี เห็นได้ชัดว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยวิธีแบ่งน้ำ (รูป c และ d) มีฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากแทรกกระหว่างมวลรวม ขณะที่คอนกรีตที่ผสมด้วยวิธีอย่างง่าย (รูป a และ b) มีฟองอากาศขนาดใหญ่ซึ่งมีจำนวนไม่มาก



รูปที่ 9 การกระจายของขนาดฟองอากาศในตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมด้วยวิธีอย่างง่ายและแบบแบ่งน้ำ

[15]

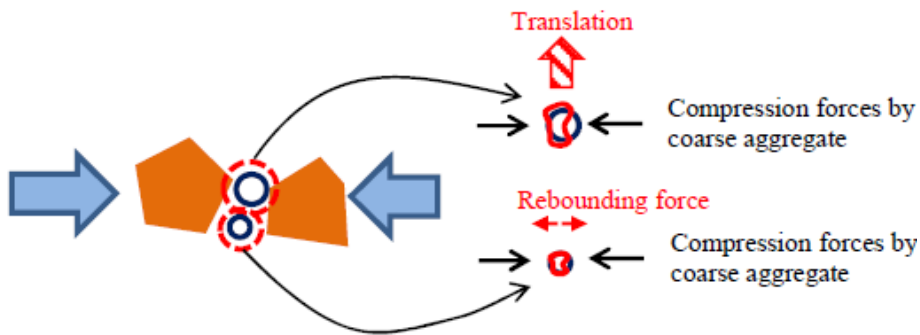


- a) simple mixing method with SP1 and AE 0.006%
- b) simple mixing method with SP2 and AE 0.006%
- c) water-dividing method with SP1 and AE 0.01%
- d) water-dividing method with SP2 and AE 0.15%

รูปที่ 10 การกระจายของขนาดฟองอากาศในตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมด้วยวิธีอย่างง่ายและแบบแบ่งน้ำ

[15]

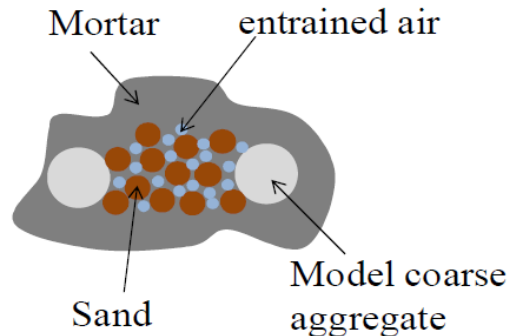
ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่าฟองอากาศขนาดเล็กนอกจากจะมีจำนวนมากกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่แล้ว (เปรียบเทียบปริมาณฟองอากาศทั้งหมดในคอนกรีตเท่ากัน) ฟองอากาศขนาดเล็กเมื่อถูกแรงอัดจากมวลรวมระหว่างที่คอนกรีตเคลื่อนที่จะเกิดแรงผลักลับ (rebounding force) ทำให้มวลรวมเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ในขณะที่ฟองอากาศขนาดใหญ่เมื่อถูกแรงอัดจากมวลรวมแล้วฟองอากาศจะเคลื่อนตัวออกซึ่งไม่ช่วยให้มวลรวมเคลื่อนที่ได้ดี ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การกระจายของขนาดฟองอากาศในตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมด้วยวิธีอย่างง่ายและแบบแบ่งน้ำ

[15]

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังมีสมมติฐานเพิ่มเติมจากฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากที่ล้อมรอบมวลรวมละเอียดภายในคอนกรีตว่าลักษณะพฤติกรรมของฟองอากาศขนาดเล็กมีลักษณะคล้ายกับตลับลูกปืน (ball bearing) ที่ช่วยให้เครื่องจักรต่าง ๆ หมุนหรือเคลื่อนที่ได้ดี แสดงดังรูปที่ 12 ขณะที่คอนกรีตไหลผ่านสิ่งกีดขวางซึ่งมวลรวมจะกระทบกันตลอดเวลา ฟองอากาศขนาดเล็กเหล่านี้จะช่วยให้มวลรวมเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นทั้งจากแรงผลักลับ (rebounding force) และพฤติกรรม ball bearing ส่งผลให้คอนกรีตไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีขึ้นเพียงพอสำหรับคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง อย่างไรก็ตามปริมาณฟองอากาศที่จำเป็นเพื่อให้เพียงพอต่อการผลิตคอนกรีตชนิดนี้มีค่าประมาณร้อยละ 10 ซึ่งจำเป็นต้องออกแบบส่วนผสมให้ดีพิจารณาร่วมกับสมบัติทางกลที่ต้องการเนื่องจากปริมาณฟองอากาศส่งผลลบต่อกำลังรับแรงอัดโดยตรง



รูปที่ 12 *ball bearing effect* โดยฟองอากาศขนาดเล็กในคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง [15]

4. สรุป

การเพิ่มความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางด้วยฟองอากาศขนาดเล็กในคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองถูกพิสูจน์แล้วว่าเป็นไปได้ซึ่งฟองอากาศขนาดเล็กสามารถผลิตได้ด้วยการผสมแบบแบ่งน้ำ (water dividing mixing method) ฟองอากาศขนาดเล็กช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลจากแรงผลักลับ (rebounding force) และพฤติกรรม ball bearing เมื่อถูกแรงอัดจากมวลรวมระหว่างที่คอนกรีตเคลื่อนตัว การใช้ฟองอากาศขนาดเล็กเพิ่มประสิทธิภาพการไหลเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่จำเป็นได้ ราคาคอนกรีตลดลงและเพิ่มความนิยมในการใช้คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองได้ อย่างไรก็ตาม การออกแบบส่วนผสมต้องพิจารณาควบคู่กับสมบัติทางกลที่ผู้ออกแบบต้องการรวมถึงความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อคอนกรีตที่มีฟองอากาศสูง (ร้อยละ 4-10) ร่วมกันเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดสำหรับการใช้คอนกรีตพิเศษนี้

อ้างอิง (references)

- [1] Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(15), 5-15.
- [2] Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. (2011). Chemical admixtures for concrete. *Design and Control of Concrete Mixtures*, 15th ed. Illinois, ch. 7, 117-136.
- [3] Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., Yilmaz, G., Anöz, Ö., & Ramyar, K. (2013). Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1020-1025.
- [4] Liu, M., Lei, J., Bi, Y., Du, X., Zhao, Q., & Zhang, X. (2015). Preparation of polycarboxylate-based superplasticizer and its effects on zeta potential and rheological property of cement paste. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 30(5), 1008-1012, 2015.
- [5] JSCE (1999). Recommendation for Self-Compacting Concrete. Japan Society of Civil Engineers, Japan.
- [6] Attachaiyawuth, A. (2019). Effect of powder type viscosity modifying agent on flowability of self-compacting mortar. *Journal of Thailand Concrete Association*, 7(1), 22-29.
- [7] Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Ngamjarrojana, A., & Chaipanich, A. (2014). Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume. *Materials & Design*, 64, 261-269.
- [8] Gnanaraj, S. C., Chokkalingam, R. B., Thankam, G. L., & Pothinathan, S. K. M. (2021). Durability properties of self-compacting concrete developed with fly ash and ultra fine natural steatite powder. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 431-439.
- [9] Matos, P. R. d., Foiato, M., Ngamjarrojana, A., & Prudêncio, L. R. (2019). Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash highperformance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 203, 282-293.
- [10] Barbhuiya, S. (2019). Effects of fly ash and dolomite powder on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3301-3305.



- [11] Yang, S., Zhang, J., An, X., Qi, B., Shen, D., & Lv, M. (2021). Effects of fly ash and limestone powder on the paste rheological thresholds of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 281.
- [12] Sua-iam, G., & Makul, N. (2017). Incorporation of highvolume fly ash waste and high-volume recycled alumina waste in the production of selfconsolidating concrete. *Journal of Cleaner Production*, 159, 194–206.
- [13] Siddique, R. (2011). Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. *Materials & Design*, 32(3), 1501–1507.
- [14] Promsawat, P., Chatveera, B., Sua-iam, G., & Makul, N. (2022). Properties of self-compacting concrete prepared with ternary Portland cement–high volume fly ash–calcium carbonate blends. *Case Studies in Construction Materials*, 13.
- [15] Attachaiyawuth, A., Rath, S., & Ouchi, M. (2016). Improvement of self-compactability of air-enhanced self-compacting concrete with fine entrained air. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 14, 55–69.
- [16] ASTM C457–06 (2006). *Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, United States.
- [18] Attachaiyawuth, A. (2015). Simple evaluation of flowability of self-compacting concrete by mortar test. *TCA E-Magazine*, Thailand Concrete Association, Thailand.

เกี่ยวกับผู้แต่งบทความ (biography)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนวัณณ์ อรรถไชยวุฒิ ตำแหน่งปัจจุบัน หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา มีความเชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมโครงสร้าง การสำรวจและตรวจสอบโครงสร้าง คอนกรีตอัดแน่นและคอนกรีตพิเศษ สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (พ.ศ.2549) ระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโครงสร้างจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (พ.ศ.2555) และระดับ Doctor of Engineering จาก Kochi University of Technology ประเทศญี่ปุ่น (พ.ศ.2558)

การอ้างอิงบทความ (citation)

อนวัณณ์ อรรถไชยวุฒิ (2563), "การเพิ่มความสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองโดยฟองอากาศขนาดเล็ก (Self-Compactability Improvement of Self-Compacting Concrete by Fine Air Bubbles)," *วารสารคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 2, บทความหมายเลข TCA_M 140202, มิถุนายน-สิงหาคม, 9 หน้า.

Anuwat Attachaiyawuth (2020) "Self-Compactability Improvement of Self-Compacting Concrete by Fine Air Bubbles," *TCA Magazine, Thailand Concrete Association*, Vol. 14, Issue 2, Paper ID TCA_M 140202, May-Aug., 9 pages.