

การศึกษาผลของพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบต่อการหดตัวของคอนกรีต

ชำนาญ น้อยพิทักษ์^{1*} สรัณกร เหมะวิบูลย์² และสนธยา ทองอรุณศรี³

¹สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สาทร กรุงเทพฯ 10120;

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร เมือง พิษณุโลก 65000;

³สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญชาก เมือง ตาก 63000

*E-mail: nahn_n@hotmail.com

รับบทความ: 21 มิถุนายน 2565 แก้ไขบทความ: 15 มกราคม 2566 ยอมรับตีพิมพ์: 27 กุมภาพันธ์ 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบต่อพฤติกรรมการหดตัวแบบออตจินัส และแบบโดยรวมของคอนกรีต โดยใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบในการศึกษา ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย พื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบ และร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวม โดยใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดละเอียดต่างกันเป็นส่วนผสมทำให้ได้พื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบมีค่าอยู่ระหว่าง 589–1690 ตร.ซม./กก. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 จากผลทดสอบพบว่า พื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กลง และค่าร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมมีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวโน้มของพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบที่เพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบมีผลกระทบต่อการหดตัวของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ โดยการหดตัวแบบออตจินัสและการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบที่เพิ่มขึ้น และพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบมีผลกระทบต่อการหดตัวแบบโดยรวมมากกว่าการหดตัวแบบออตจินัสของคอนกรีต

คำสำคัญ: การหดตัวแบบออตจินัส การหดตัวแบบโดยรวม ขนาดโตสุดของมวลรวม

ช่องว่างระหว่างมวลรวม

A Study on the Effect of Surface Area of Coarse Aggregates on the Shrinkage of Concrete

Chumnahn Noipitak^{1*}, Saranagon Hemavibool² and Sontaya Tongaroonsri³

¹Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Sathon, Bangkok 10120, Thailand; ²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Muang, Phitsanulok 65000, Thailand; ³Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Muang, Tak 63000, Thailand

*E-mail: nahn_n@hotmail.com

Received: 21 June 2022 Revised: 15 January 2023 Accepted: 27 February 2023

Abstract

This research aimed to study the effect of surface area of coarse aggregates on the autogenous and total shrinkage of concrete. Limestone was used as coarse aggregate in the study. The factors studied consisted of the surface area of the coarse aggregate and the percentage of voids of coarse aggregate. Different particle size distributions of coarse aggregate were used for a mixture, which was cause of the surface area of coarse aggregate ranged from 589–1690 sq.cm./kg. The Ordinary Portland cement type 1 was used in this study as binder phase and using the water-to-cement ratio was 0.55. The test results showed that the surface area of coarse aggregates has increased when using smaller coarse aggregates. In addition, the percentage of voids of coarse aggregate was raised with the trend of increased surface area of coarse aggregates. Moreover, the surface area of the coarse aggregate was significantly affects the shrinkage of the concrete. An increase in coarse aggregate surface area was found to increase both autogenous and total shrinkage of concrete. So that, the surface area of the coarse aggregate has a greater impact on total shrinkage of concrete than the autogenous contraction of concrete.

Keywords: Autogenous shrinkage, Total shrinkage, Size of coarse aggregates, Voids of coarse aggregate

บทนำ

ปัญหาการแตกร้าวในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อความ

สามารถในการรับน้ำหนัก และความคงทน (durability) ของโครงสร้าง ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบจึงให้ความสำคัญกับปัญหาการแตกร้าวของคอน-

กรีตอย่างมาก ปัญหาการแตกร้าวเกิดจากหลายสาเหตุแต่การแตกร้าวที่พบมาก ได้แก่ การแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีต การหดตัวที่เป็นสาเหตุหลักของการแตกร้าว ได้แก่ การหดตัวแบบออโตจีนัส (autogenous shrinkage) และการหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) ของคอนกรีต เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าววิศวกรผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องทราบพฤติกรรมของการหดตัวของคอนกรีต เพื่อออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่ผ่านมามีการพัฒนาสมการสำหรับใช้ในการคำนวณค่าการหดตัวของคอนกรีต เพื่อนำไปใช้ออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการควบคุมการแตกร้าว สมการที่สำคัญและเป็นที่ยอมรับ ได้แก่ ACI 209.2R-08, CEB-FIP 90, Bazant model 3, GL 2000, JSCE 2002 และ Euro 2006 (ACI 209.2R, 2008; JSCE, 2002) อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการคำนวณค่าการหดตัวของคอนกรีตโดยใช้สมการต่าง ๆ เหล่านี้ ได้ค่าที่แตกต่างกันอย่างมาก (ACI 209.2R, 2008) ซึ่งอาจเกิดจากแต่ละสมการใช้หลักการในการพัฒนาสมการรวมถึงตัวแปรในการคำนวณแตกต่างกัน นอกจากนี้เริ่มมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่มีรายงานว่าสมบัติของมวลรวม ได้แก่ ขนาดรูปร่าง ร้อยละการดูดซึ่ม ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ และการหดตัวของมวลรวมหยาบมีผลต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต (Fujiwara, 2007; Grassl *et al.*, 2008; Imamoto and Arai, 2007; Rao, 2001; Tatong and Tangtermsirikul, 2001) แต่ปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของมวลรวมเหล่านี้ยังไม่ได้นำมาพิจารณาในสมการทำนายค่าการหดตัวของคอนกรีต สำหรับประเทศไทยผลการศึกษาพบว่าค่าการหดตัวของคอนกรีตที่คำนวณโดยใช้สมการ

จากต่างประเทศมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับผลการทดสอบในประเทศไทย (Tongaroonsri, 2009) ซึ่งส่วนหนึ่งอาจเกิดจากสมบัติของมวลรวมมีความแตกต่างกันและไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ที่ผ่านมาจึงมีการศึกษาและพัฒนาสมการทำนายค่าการหดตัวของคอนกรีต จากผลการทดสอบในประเทศไทย (Tongaroonsri, 2009) ดังนั้นเพื่อให้สามารถพัฒนาสมการทำนายการหดตัวของคอนกรีตที่มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น จำเป็นต้องพิจารณาผลของมวลรวมร่วมด้วย งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบต่อการหดตัวของคอนกรีต โดยศึกษาทั้งการหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการพัฒนาสมการทำนายการหดตัวของคอนกรีต ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นในอนาคต

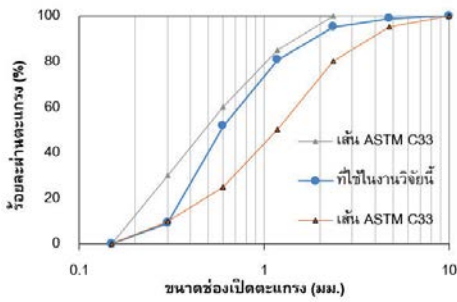
วัตถุประสงค์ และวิธีการวิจัย

วัสดุประสาน

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.16 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188

มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยเป็นทรายแม่น้ำจากลุ่มน้ำปิง จังหวัดกำแพงเพชร มีการกระจายขนาดคละดั่งในภาพที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะแบบอิมมิตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.60 ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.65 และร้อยละการดูดซึ่มของทรายเท่ากับ 0.96 สมบัติของทรายเหล่านี้ได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128, ASTM C136 และ ASTM 128 ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษา

มวลรวมหยาบ

มวลรวมหยาบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหินปูน จากจังหวัดสุโขทัย มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 และมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.22 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127 งานวิจัยนี้ศึกษาผลของพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบ ดังนั้นจึงนำมวลรวมหยาบจากแหล่งผลิตในจังหวัดสุโขทัยที่มีลักษณะของมวลรวมหยาบที่มีขนาดอัตราส่วนของความยาว: ความกว้าง: ความหนาใกล้เคียงกัน (ลักษณะรูปร่างแบบ chunky) แสดงดังในภาพที่ 2 มาเป็นส่วนผสม และเตรียมขนาดคละของมวลรวมหยาบออกเป็น 6 กลุ่ม ได้แก่ แบบไม่คละขนาด (single size) ประกอบด้วย A1, A3 และ A6 และแบบคละขนาด (graded) ประกอบด้วย A2, A4 และ A5 ดังในตาราง 1 การเตรียม

มวลรวมหยาบทั้ง 6 กลุ่ม เพื่อให้มีค่าพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบแตกต่างกัน

ส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 1 ส่วนผสม (ปูนซีเมนต์ 360 kg/m³ น้ำ 196 kg/m³ ททราย 782 kg/m³ และหินปูน 1,068 kg/m³) โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.55 อัตราส่วนทรายต่อมวลรวม เท่ากับ 0.42 โดยปริมาตร เตรียมตัวอย่างคอนกรีตทั้งสิ้น 6 ชุดทดสอบ โดยแต่ละชุดทดสอบใช้ส่วนผสมตามตาราง 2 แต่ใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดคละเปลี่ยนแปลงไปตามตาราง 1 เพื่อให้ได้ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการใช้มวลรวมหยาบที่มีพื้นที่ผิวและร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมแตกต่างกัน



ภาพที่ 2 ลักษณะรูปร่างของมวลรวมหยาบ

ตาราง 1 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ

| รายการ | น้ำหนักของมวลรวมหยาบแต่ละขนาด, Kg/m ³ (ร้อยละ) | | | |
|--------|---|------------|------------|--------|
| | 1" | 3/4" | 3/8" | NO.4 |
| A1 | 1,069 (100) | - | - | - |
| A2 | 534 (50) | 357 (33) | 177 (17) | - |
| A3 | - | 1069 (100) | - | - |
| A4 | 53 (5) | 620 (58) | 342 (32) | 53 (5) |
| A5 | - | 534 (50) | 534 (50) | - |
| A6 | - | - | 1069 (100) | - |

วิธีการวิจัย

สมบัติของมวลรวม

สมบัติของมวลรวมที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ นอกเหนือจากสมบัติพื้นฐานทั่วไป ได้แก่ การทดสอบร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบ การทดสอบร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวม และพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบ โดยการทดสอบร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบ การทดสอบร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวม อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C29/C29M ส่วนการหาค่าพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) – (3)

$$SR = 1.4 S_o \cdot (1 - S/A) \quad \text{--- (1)}$$

$$S_o = 6000 / (D_{av} \cdot \rho) \quad \text{--- (2)}$$

$$D_{av} = \sum D_i M_i / \sum M_i \quad \text{--- (3)}$$

เมื่อ SR คือ พื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบผสมคอนกรีต (cm²/kg)

S/A คือ อัตราส่วนทรายต่อมวลรวมโดยปริมาตร

S_o คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม (cm²/kg)

D_{av} คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของมวลรวมหยาบแต่ละขนาด (cm)

ρ คือ ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม

D_i คือ ความกว้างของช่องเปิดตะแกรง i ที่มวลรวมหยาบค้าง (cm)

M_i คือ ร้อยละมวลรวมหยาบค้างบนตะแกรง i

สมบัติของคอนกรีต

สมบัติของคอนกรีตที่ทดสอบในงานวิจัย ประกอบด้วย การทดสอบค่าการยุบตัว อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C143/C143M ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM

C403/C403M ส่วนการหดตัวแบบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีตมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

(1) การหดตัวแบบบอโตจีนัสของคอนกรีต

การทดสอบการหดตัวแบบบอโต-จีนัส เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C157 โดยวัดค่าการหดตัวของแท่งคอนกรีตขนาด 7.5×7.5×28.5 cm ในแต่ละชุดทดสอบใช้ตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่างเพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย เริ่มวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งตัวอย่างเมื่อคอนกรีตมีอายุ 2 ชั่วโมง หลังจากระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเพื่อให้ก้อนตัวอย่างมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะถอดออกจากแบบโดยไม่เกิดความเสียหาย แล้วหุ้มก้อนตัวอย่างด้วยเทปอลูมิเนียมหนา 5 mm จำนวน 2 ชั้น แล้วตามด้วย พลาสติกใส 5 ชั้น และเทปกาวใส 2 ชั้น เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นออกจากก้อนตัวอย่าง เนื่องจากการหดตัวแบบบอโตจีนัสเป็นการหดตัวที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นออกสู่สิ่งแวดล้อม หลังจากนั้นวัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง โดยการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างจะต้องไม่เกินร้อยละ 0.05 ของน้ำหนักเริ่มต้น เก็บตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ 28±1°C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50±5 ตลอดการทดสอบ วัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่างเมื่อคอนกรีตมีอายุ 0.25, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 14, 18, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63, 70, 77, 84, 91, 98, 113, 129, 144 และ 150 วัน

(2) การหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต

การเตรียมตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบโดยรวม มีลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัส แต่ไม่มีการหุ้มก้อนตัวอย่างเพื่อให้ความ

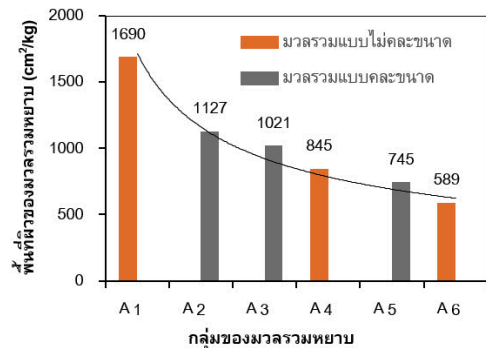
ซึ่งสามารถออกจากก้อนตัวอย่างได้อย่างอิสระ และมีขั้นตอนที่แตกต่างกัน คือ หลังจากนำตัวอย่างคอนกรีตออกจากแบบหล่อแล้ว วัดค่าการหดตัวเริ่มต้นพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างก่อนนำก้อนตัวอย่างบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน ในช่วงที่บ่มจะนำก้อนตัวอย่างขึ้นมาเช็ดให้อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้งแล้ววัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างทุกวัน หลังจากนั้นเมื่ออายุคอนกรีตครบ 7 วัน นำก้อนตัวอย่างขึ้นจากน้ำเช็ดให้อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้งแล้วนำไปเก็บไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ $28 \pm 1^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 5 ตลอดจนการทดสอบวัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่างเมื่อคอนกรีตมีอายุ 7, 8, 10, 12, 14, 18, 21, 28, 35, 49, 63, 77, 91, 105, 119, 133 และ 150 วัน

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดสอบสมบัติของมวลรวม

จากตาราง 2 แสดงสมบัติของมวลรวมหยาบที่มีขนาดคละแตกต่างกัน ประกอบด้วยพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบ ร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบ และร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวม พบว่า พื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบ (ภาพที่

3) แสดงพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีขนาดคละแตกต่างกัน โดยจัดกลุ่มเป็น A1–A6 รวมจำนวน 6 กลุ่ม จากผลการทดสอบพบว่าในกลุ่มของมวลรวมแบบไม่คละขนาด พื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบมีค่าเพิ่มขึ้น ตามขนาดของมวลรวมหยาบที่เล็กลง ส่วนกลุ่มของมวลรวมแบบคละขนาด พบว่าเมื่อแทนที่มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ด้วยมวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ทั้งขนาดของมวลรวมหยาบและขนาดคละของมวลรวมหยาบ มีผลต่อพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 3 พื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบแบบไม่คละขนาด (A1, A3 และ A6) และแบบคละขนาด (A2, A4 และ A5)

ตาราง 2 สมบัติของมวลรวมที่มีขนาดคละของมวลรวมหยาบแตกต่างกัน

| รายการ | พื้นที่ผิวของ | | ร้อยละช่องว่าง | |
|--------|--|--|-----------------------|-------------------|
| | มวลรวมหยาบ (cm^2/kg) | | ระหว่างมวลรวมหยาบ (%) | ระหว่างมวลรวม (%) |
| A1 | 589 | | 40.21 | 25.94 |
| A2 | 745 | | 39.32 | 28.97 |
| A3 | 845 | | 43.10 | 27.54 |
| A4 | 1021 | | 39.72 | 29.20 |
| A5 | 1127 | | 40.22 | 29.69 |
| A6 | 1690 | | 48.81 | 31.95 |

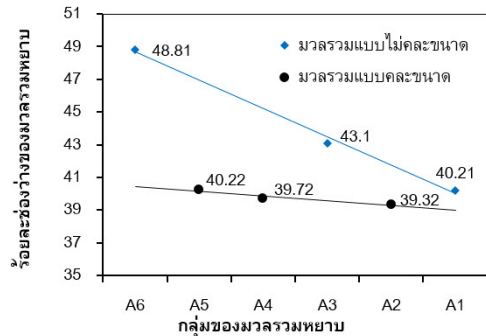
จากร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีขนาดคละแตกต่างกัน (ภาพที่ 4) พบว่าค่าร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบมีแนวโน้มลดลงตามขนาดของมวลรวมหยาบที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งพบทั้งในกลุ่มของมวลรวมหยาบแบบคละขนาดและไม่คละขนาด โดยกลุ่มของมวลรวมหยาบแบบไม่คละขนาดจะมีร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบมากกว่ากลุ่มของมวลรวมหยาบแบบคละขนาด เมื่อพิจารณาค่าร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวม ที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อมวลรวมเท่ากับ 0.42 โดยปริมาตร เท่ากันทุกส่วนผสม

จากความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวม (ภาพที่ 5) เมื่อนำมวลรวมหยาบทั้ง 6 กลุ่มมาผสมกับทรายที่อัตราส่วนระหว่างทรายต่อมวลรวม (S/A) เท่ากับ 0.42 พบว่าค่าร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมทั้งแบบคละขนาดและไม่คละขนาดมีแนวโน้มแบบเดียวกัน คือ ค่าร้อยละช่องว่างลดลงตามขนาดของมวลรวมหยาบที่ใหญ่ขึ้น โดยค่าร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมมีค่าลดลงเนื่องจากทรายเข้าไปแทนที่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบ

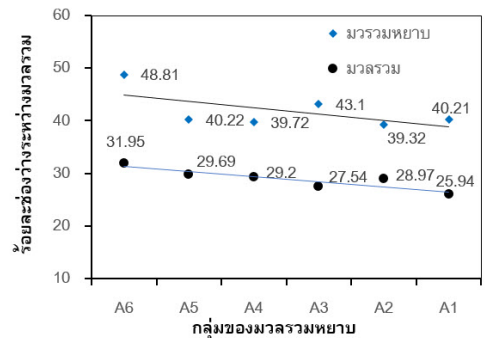
จากความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบกับค่าร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวม (ภาพที่ 6) พบว่าแนวโน้มค่าร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบมีค่าเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบสมบัติของคอนกรีต

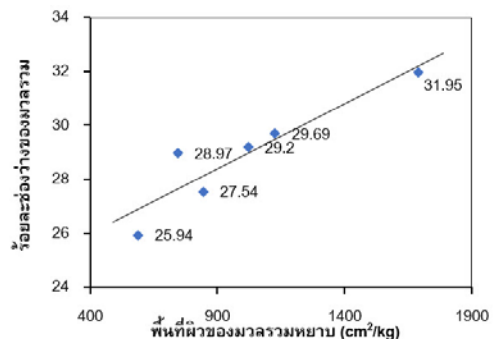
สมบัติของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบที่มีขนาดคละแตกต่างกันในตาราง 3 ประกอบด้วย ค่าการหดตัวแบบบอโตจีนิส ค่าการหดตัวแบบโดยรวม ค่าการยุบตัว และระยะเวลาการก่อ-



ภาพที่ 4 ร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบของมวลรวมหยาบแบบไม่คละขนาด (A1, A3 และ A6) และแบบคละขนาด (A2, A4 และ A5)



ภาพที่ 5 ร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวมกับมวลรวมหยาบไม่คละขนาด (A1, A3 และ A6) และคละขนาด (A2, A4 และ A5)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบกับร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวม

ตัวของคอนกรีต ผลการทดสอบ พบว่าเมื่อมวลรวมหยาบมีขนาดเล็กลงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลง สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา ว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงสุดซึบน้ำหรือซีเมนต์มากกว่า ทำให้ให้อิสรระในคอนกรีตลดลงส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลง (Fujiwara, 1988)

(1) การหดตัวของแบบออตโตจีนัสของคอนกรีต

ผลทดสอบการหดตัวของแบบออตโตจีนัสของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบที่มีพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบแตกต่างกัน (A1–A6) แสดงในตาราง 3 ผลการทดสอบพบว่า การหดตัวของ

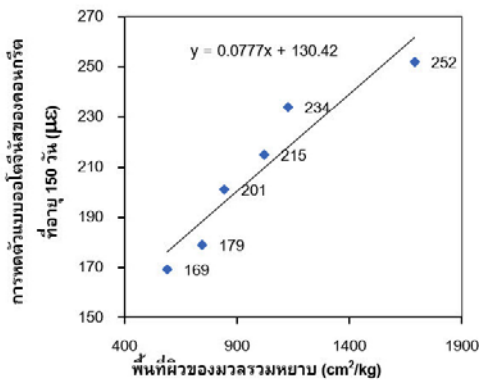
คอนกรีตที่อายุ 150 วัน มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบอย่างมีนัยสำคัญดังภาพที่ 7 ค่าการหดตัวของแบบออตโตจีนัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบที่เพิ่มขึ้น อาจเกิดจากมวลรวมหยาบที่มีพื้นที่ผิวมากกว่า เป็นมวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กกว่าและมีช่องว่างระหว่างมวลรวมมากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพในการยึดรั้งการหดตัวของมวลรวมลดลง เมื่อเทียบกับมวลรวมขนาดใหญ่ที่มีช่องว่างระหว่างมวลรวมน้อยกว่า ซึ่งผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ที่พบว่ามวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นช่วยลดการหดตัวของคอนกรีต (Grassl et al., 2008; Ima-

ตาราง 3 ผลทดสอบสมบัติของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบที่มีพื้นที่ผิวแตกต่างกัน

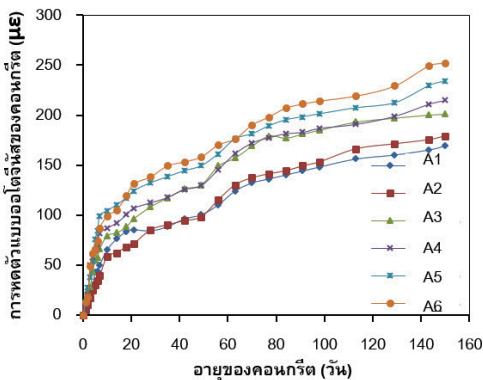
| รายการ | การหดตัวของคอนกรีต (อายุ 150 วัน) | | การยุบตัวของคอนกรีต (cm) |
|--------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | แบบออตโตจีนัส (μE) | แบบโดยรวม (μE) | |
| A1 | 169 | 426 | 10.5 |
| A2 | 179 | 466 | 9.0 |
| A3 | 201 | 511 | 9.0 |
| A4 | 215 | 543 | 7.5 |
| A5 | 234 | 601 | 7.0 |
| A6 | 252 | 646 | 7.0 |

moto and Arai, 2007; Tatong and Tangterm-sirikul, 2001) นอกจากนี้จากการศึกษาที่ผ่านมาเป็นที่ทราบทั่วกันว่า การหดตัวของคอนกรีตจะสัมพันธ์กับปริมาณเพสต์ (paste content) โดยการหดตัวของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเพสต์ที่เพิ่มขึ้น (Fujiwara, 1988) จากการทำงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนทรายต่อมวลรวมเท่ากับ 0.42 ในทุกส่วนผสม รวมถึงใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำคงที่ จึงให้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างของมวลรวมอัดแน่น (γ) ของแต่ละส่วนผสมมีค่าแตกต่างกัน โดยส่วนผสมที่มีปริมาณ

ช่องว่างระหว่างมวลรวมมากขึ้น (มวลรวมหยาบขนาดเล็กลง) จะทำให้ค่า γ ลดลง แต่จากผลการทดสอบการหดตัวของแบบออตโตจีนัสดังภาพที่ 7 และภาพที่ 8 พบว่า แม้ส่วนผสมที่มีค่า γ น้อย (มีพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบมาก) แต่มีค่าการหดตัวมากกว่าส่วนผสมที่มีค่า γ มาก (มีพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบน้อยกว่า) แสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบต่อการหดตัวของแบบออตโตจีนัส มีมากกว่าอิทธิพลของปริมาณเพสต์ เมื่อควบคุมส่วนผสมโดยน้ำหนักให้เท่ากัน



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบกับการหดตัวแบบบอโตจีสของคอนกรีต ที่อายุ 150 วัน

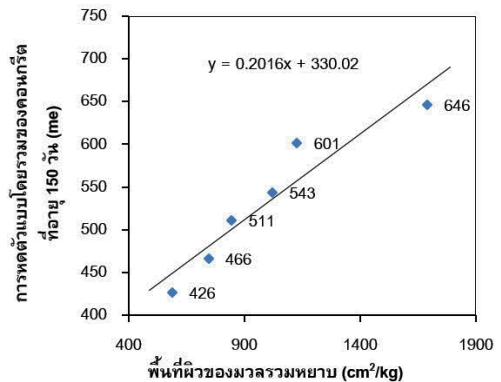


ภาพที่ 8 การหดตัวแบบบอโตจีสของคอนกรีต

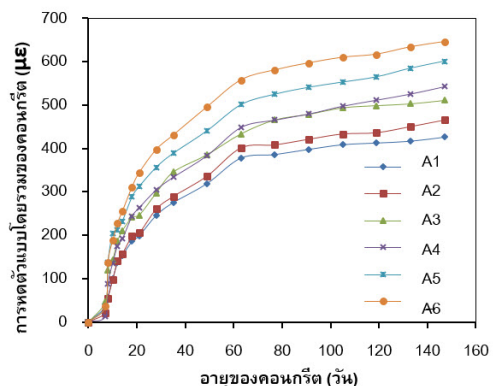
(2) การหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต

จากภาพที่ 9 และภาพที่ 10 พบว่าการหดตัวแบบโดยรวมมีค่าสูงกว่าการหดตัวแบบบอโตจีสของคอนกรีต และค่าการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเกี่ยวกับการหดตัวแบบบอโตจีสของคอนกรีต ดังในภาพที่ 7 นอกจากนี้หากพิจารณาในส่วนของอัตราส่วนปริมาตรเพลสต์ต่อปริมาตรช่องว่างของมวลรวมอัดแน่น (γ) ดังอภิปรายในเรื่องการหดตัวแบบบอโตจีสของคอนกรีต พบว่า ส่วนผสมที่มีค่า γ น้อย (มีพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบมาก)

แต่มีค่าการหดตัวแบบโดยรวมมากกว่าส่วนผสมที่มีค่า γ มาก (มีพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบน้อยกว่า) แสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบต่อการหดตัวแบบโดยรวม มีมากกว่าอิทธิพลของปริมาณเพลสต์ เมื่อควบคุมส่วนผสมโดยน้ำหนักให้เท่ากัน ซึ่งปรากฏการณ์นี้พบเช่นเดียวกับการทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีสของคอนกรีต และเมื่อพิจารณาจากความชันของเส้นแนวโน้มดังในภาพที่ 7 และภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบมีผลกระทบ



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบกับการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต ที่อายุ 150 วัน



ภาพที่ 10 การหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต W/C 0.55 ที่อัตราส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A = 0.42)

ต่อการหดตัวแบบโดยรวมมากกว่าการหดตัวแบบ
ออตโตจีนัสของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้จากงาน
วิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบ
มีผลกระทบต่อการหดตัวของคอนกรีตอย่างมี
นัยสำคัญ ทั้งการหดตัวแบบออตโตจีนัสและการ
หดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต โดยพื้นที่ผิว
ของมวลรวมหยาบมีผลกระทบต่อการหดตัวแบบ
โดยรวมมากกว่าการหดตัวแบบออตโตจีนัสของ
คอนกรีต ดังนั้นพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบจึงเป็น
ปัจจัยสำคัญที่ควรนำไปใช้เป็นตัวแปรในการพัฒนา
สมการทำนายการหดตัวของคอนกรีต เพื่อให้ได้
สมการที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้พื้นที่
ผิวของมวลรวมหยาบยังสัมพันธ์กับขนาดและ
การกระจายตัวของขนาดคละของมวลรวมหยาบ
ดังนั้นการใช้พื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบเป็นตัวแปร
อาจสามารถครอบคลุมถึงผลของขนาดโตสุดของ
มวลรวมและขนาดคละของมวลรวมหยาบได้ อย่างไรก็ตาม
จำเป็นต้องมีการศึกษาประเด็นนี้เพิ่มเติมใน
อนาคต

จากผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้
สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) เมื่อพิจารณามวลรวมหยาบที่มีน้ำ-
หนักเท่ากัน พบว่า มวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็ก
กว่าจะมีปริมาณพื้นที่ผิว ช่องว่างระหว่างมวลรวม
หยาบ และช่องว่างระหว่างมวลรวม มากกว่ามวล
รวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ และค่าร้อยละช่องว่าง
ระหว่างมวลรวมมีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวโน้มของพื้นที่
ผิวของมวลรวมหยาบที่เพิ่มขึ้น

(2) การหดตัวแบบออตโตจีนัสมีค่าน้อย
กว่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต และพื้นที่ผิว
ของมวลรวมหยาบมีผลกระทบต่อการหดตัวของ
คอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ โดยการหดตัวแบบอ-

อตโตจีนัสและการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต
มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณพื้นที่ผิวของมวลรวม
หยาบที่เพิ่มขึ้น

(3) ปริมาณพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบ
มีผลกระทบต่อการหดตัวแบบโดยรวมมากกว่าการ
หดตัวแบบออตโตจีนัสของคอนกรีต

(4) พื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบเป็นปัจจัย
สำคัญที่ควรนำไปใช้เป็นตัวแปรในการพัฒนา
สมการทำนายการหดตัวของคอนกรีต เพื่อให้ได้
สมการที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- ACI 209.2R-08. (2008). Guide for modeling
and calculating shrinkage and creep in
hardened concrete. **American Concrete
Institute**: 1-44.
- Fujiwara, T. (1988). Relation between mix pro-
portion and drying shrinkage of hardened
cement paste, mortar and concrete. **Do-
boku Gakkai Ronbunshu** 390: 209-217.
- Fujiwara, T. (2007). Effect of aggregate on dry-
ing shrinkage in concrete. **Journal of Ad-
vanced Concrete Technology** 6(1): 31-44.
- Grassl, P., Wong, H. S., and Buenfeld, N. R.
(2008). Influence of aggregate size and
volume fraction on shrinkage induced micro-
cracking of concrete and mortar. **Cement
and Concrete Research** 40(1): 85-93.
- Imamoto, K. and Arai, M. (2007). Simplified eva-
luation of shrinking aggregate based on
BET surface area using water vapor. **Jour-
nal of Advanced Concrete Technology**
6(1): 69-75.

- Imamoto, K., and Arai, M. (2007). Specific surface area of aggregate and its relation to concrete drying shrinkage. **Material and Structures** 41: 323–333.
- JSCE 2002 model. (2002). Standard specifications for concrete structures. **Structural Performance Verification**: 34–38.
- Rao, G. A. (2001). Long-term drying shrinkage of mortar influence of silica fume and size of fine aggregate. **Cement and Concrete Research** 31: 171–175.
- Tatong, S., and Tangtermsirikul, S. (2001). Modeling of aggregate stiffness and its effect on shrinkage of concrete. **Science Asia** 27(3): 185–192.
- Tongaroonsri, S. (2009). **Prediction of Autogenous Shrinkage, Drying Shrinkage and Shrinkage Cracking in Concrete**. Doctor of Philosophy in Engineering. Pathum Thani: Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University.