

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
คุณสมบัติของสารผสมเพิ่ม

DAREX AEA

น้ำยาเพื่อเพิ่มอากาศสำหรับคอนกรีต

คุณสมบัติ

DAREX AEA เป็นน้ำยาที่บริสุทธิ์และเปลี่ยนแปลงเกลือของ Suffocated Hydrocarbon มีตัวเร่งที่ช่วยให้ซีเมนต์แห้งสนิทขึ้นและเร็วขึ้น DAREX AEA ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อใช้ในการเพิ่มอากาศ เป็นตัวน้ำยาผสมเพื่อเพิ่มอากาศ เป็นตัวน้ำยาผสมเพิ่มอากาศสำหรับงานคอนกรีต และถูกผลิตด้วยการถูกควบคุมอย่างดีเพื่อให้มีการใช้งานที่คาดการณ์ได้และเสมอต้นเสมอปลาย

ลักษณะ

ลักษณะรูปร่าง	เป็นน้ำยาสีน้ำตาลตามเข็ม
Specific Gravity (20 Deg.C.)	1.015 ± 0.005
สัดส่วนจำนวนของแข็งทั้งหมด	7.0 – 7.5 %
ผลการจับอากาศ	ดีขึ้น 2 – 8 % ขึ้นอยู่กับจำนวนน้ำยาที่ใช้

วิธีปฏิบัติ

การสร้างฟองอากาศเล็กๆแบบ Semi Microscopic จำทำให้การเพิ่มฟองอากาศสำเร็จ วิธีการดังกล่าวทำโดยผสม โดยปั่นและปล่อยทิ้งไว้ในช่วงการผสมของคอนกรีต ฟองอากาศที่ว่าจะทำหน้าที่เหมือนลูกปัด (ลูกหมาก) เล็กๆ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและทำให้คอนกรีตง่ายต่อการใช้งาน ฉาบ ปอก ฯลฯ การแยกตัว การหด หรือ Bleedings ของคอนกรีตจะลดลง DAREX AEA มีตัวเร่งที่ทำให้แห้งเร็วและแห้งสนิทขึ้น ทำให้ซีเมนต์มีแรงดีขึ้นในการผสมที่ค่อนข้างน้อยและสูญเสียความแข็งแรงน้อยที่สุดในการผสมที่เยอะ

การใช้งานโดยทั่วไป

DAREX AEA ใช้ใน Ready – Mix บล็อก งานฉาบปูน และผลิตภัณฑ์คอนกรีตผสมทั่วไป ใช้น้ำงานกับเครื่องผสมหน้างาน และที่ที่มีการผสมคอนกรีตและต้องการการเพิ่มฟองอากาศ เนื่องจากทำให้คอนกรีตผสมนุ่มและหนาขึ้นจะเป็นผลดีมากถ้าใช้กับส่วนผสมที่เบา Slag และค่อนข้างจะทำให้เกิดคอนกรีตที่หยาบและทำให้การผสมคอนกรีตที่มีทรายละเอียดน้อยเกิดขึ้นได้

ประโยชน์

การใช้งานมีประสิทธิภาพมากขึ้น คอนกรีตผสมจะเหนียวขึ้น นุ่มขึ้นเนื่องจากมีฟองอากาศเล็กๆ เป็นล้านๆ ฟอง ช่วยทำหน้าที่หล่อลื่นและเป็นตัวกันชน ทำให้การลดน้ำที่จะใช้ในการผสมเกิดขึ้นได้โดยไม่สูญเสีย Slump การแบ่งแยกของคอนกรีต การหดตัว จะลดลงจนแทบไม่มี

ความทนทานเพิ่มขึ้น

DAREX AEA ถ้าใช้กับคอนกรีตผสมจะทำให้คงทนมาก โดยเฉพาะเวลาที่คอนกรีตต้องเจอกับสภาพหนาวจัดหรือละลายตัว และทำให้คอนกรีตต่อสู้กับเกลือ รวมถึงไอน้ำจากทะเลและน้ำที่ค้างได้ดี

ส่วนผสมของคอนกรีต

เนื่องจากฟองอากาศทำให้คอนกรีตขยายตัว จะทำให้ลดซีเมนต์ที่ใช้ในสัดส่วนของคอนกรีต สภาพนี้จะต้องเปลี่ยนแปลงส่วนผสม โดยสัดส่วนของหินหรือทรายละเอียดจะต้องลดสัดส่วนของน้ำเนื่องจาก DAREX AEA ใช้ได้กับงานคอนกรีตทั่วไป งานฉาบปูนใช้น้ำยาแรงตัวอื่น น้ำยาลดน้ำหรือน้ำยาทำให้น้ำระเหยช้า ความต้องการของน้ำในส่วนผสมจะลดลงและจะมีความแข็งแรงและคงทนที่เพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วน น้ำยาแต่ละประเภทควรจะผสมในคอนกรีตผสมแยกกัน

อัตราส่วนผสม

50 – 100 ml ต่อ 100 กิโลกรัมของซีเมนต์

วิธีการใช้

DAREX AEA เป็นน้ำยาผสมที่ใช้ได้ทันทีไม่ต้องผสมหรือเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ใช้คอนกรีตผสมได้ทันทีที่หน้างานในขณะที่ผสมน้ำลงในคอนกรีต แต่ต้องระวังให้การคลุกเคล้าของน้ำยากับส่วนผสมอื่นเข้ากันได้ดี รถบรรทุกผสม Ready – Mix จะต้องหมุนอย่างน้อย 75 รอบในการผสม DAREX AEA และควรจะตวงน้ำยาใช้อย่างถูกต้อง

ข้อแนะนำทางวิศวกรรม

อย่าให้แข็งตัวแล้วจะต้องปล่อยให้ละลายอย่างช้าๆ เก็บได้นานอย่างน้อย 12 เดือน ถ้ายังไม่ได้เปิดใช้ แต่ถ้าใช้ตามกฎหมายของ BS 5075: Part 2: 1982 จะต้องใช้ตามวันหมดอายุข้างถึงบริษัท ดับบริว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัด

889 ถนนศรีนครินทร์ – เทพารักษ์ อาคารว่องไววิทย์ ชั้น 2 อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10270 โทร.
399-3944, 393-3445, แฟกซ์. 399-3951

MICRO-AIR 303A

MICRO-AIR 303A เป็นสารกักกระจายฟองอากาศ เหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างที่สำคัญ
ทั้งหมดที่ใช้เป็นสารลดน้ำ สารเร่งและสารหน่วง

ความแตกต่างของ MICRO-AIR 303A คือสามารถผสมกับพอสโซไลท์โดยปราศจากการ
ทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่เป็นอันตรายอื่นๆ ในขณะที่ใช้เป็นสารกักกระจายฟองอากาศ สารผสม
ชนิดนี้ไม่ควรที่จะผสมแยกกับสารอื่นก่อนการผสมคอนกรีต หากที่มีผสมก่อนจะละลายระบบการ
ทำงานและทำให้เกิดการตกตะกอน และทำให้ระดับการกักกระจายลดลง

สำหรับประโยชน์อื่นๆ ไม่เพียงแต่การควบคุมคุณภาพการใช้ประโยชน์แต่ยังต้องระวัง
เรื่องการผสม เพียงแค่ผสมหนึ่งถังกับสารผสมเพิ่มอื่นๆ อาจจะทำให้ราคาของอุปกรณ์ลดลง

คำแนะนำทั่วไป

- MICRO-AIR 303A จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C-260
- MICRO-AIR 303A สามารถใช้กับของเหลวหรือของเหลวเจือจางอย่างอื่น
- MICRO-AIR 303A สามารถผสมกับสารผสมเพิ่มพอสโซไลท์ชนิดอื่นโดยไม่ทำ
ปฏิกิริยาเคมี

ข้อดีของการใช้งาน

การกักกระจายฟองอากาศที่ได้ผลดีที่สุดช่วยในการเพิ่มคุณภาพคอนกรีตดังนี้

- ช่วยเพิ่มความเหลวและง่ายต่อการทำงาน
- ลดการแยกออกและลดการ Bleeding
- เพิ่มความทนทานโดยเฉพาะเมื่ออยู่ในสภาวะน้ำแข็งหรือน้ำแข็งละลาย
- สารที่มีน้ำเกลืออยู่

ง่ายต่อการใช้

เพียงใช้มือเทวดาสารเข้าไปในเครื่องผสม

ความเหมาะสมในการใช้

MICRO-AIR 303A เหมาะที่จะใช้กับคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำอื่นๆ เช่น สารเร่ง ใช้ควบคู่ไปกับน้ำ เพื่อเพิ่มการกักกระจายฟองอากาศในคอนกรีต

การประยุกต์ใช้

MICRO-AIR 303A ใช้เป็นสารละลายเจือจางเข้าไปโดยสารนี้ โดยไม่ผสมการสารผสมชนิดอื่น ใส่ MICRO-AIR 303A เข้าไประหว่างผสมคอนกรีตในเครื่องผสมโดยสารกักกระจายฟองอากาศ โดยใส่ไม่เกิน 3 %

ปริมาณสารที่ใส่เข้าไปในคอนกรีต

ไม่มีมาตรฐานของปริมาณที่แน่นอน ปริมาณที่แน่นอนของสารกักกระจายฟองอากาศที่ต้องการไม่สามารถหาค่าได้อย่างแน่นอน เนื่องจากความแตกต่างของวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีต ปัจจัยต่างๆไปที่จะมีอิทธิพลต่อจำนวนของฟองอากาศ คืออุณหภูมิ ซีเมนต์ การให้วัสดุที่ละเอียดเป็นพิเศษเช่น เถ้าลอย

ปริมาณของ MICRO-AIR 303A ที่จะใช้ขึ้นอยู่กับจำนวนของอากาศที่ต้องการภายใต้สภาวะการใช้งานที่แท้จริง ในการปรับค่าการผสมใช้ 0.006 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ควบคุมสารผสมเพิ่ม จำนวนของ MICRO-AIR 303A ที่ต้องการคือน้อยกว่าจำนวนที่ต้องการในคอนกรีต ในการผสมที่ต้องการมากกว่าปริมาณที่ได้รับที่ต้องการอากาศ ปรีกษาหัวหน้างานหรือตัวแทนจำหน่ายก่อนใช้

MICRO-AIR 303A ควรเก็บไว้ในเครื่องที่อุณหภูมิ 35 °F (2°C) หรือสูงกว่า เมื่อแช่แข็งควรจะต้องทำการละลายก่อนเพื่อการประกอบกันใหม่โดยเครื่องปั่นก่อนการใช้งานอย่าใช้เครื่องกวนที่เป็นอากาศอัดความดัน

การบรรจุ

MICRO-AIR 303A เก็บในถังเหล็ก 200 ลิตร

ข้อแนะนำพิเศษ

สารผสมเพิ่มชนิดกักกระจายฟองอากาศสามารถใช้กับสิ่งก่อสร้างที่ซับซ้อน MICRO-AIR 303A ตามมาตรฐาน ASTM C-260 และ CRDC-13 สารควรจะแยกออกจากกัน ในการผสมคอนกรีตจำนวนที่ต้องการจะตามปริมาณอากาศ จะทำให้ปริมาณอากาศสูงขึ้นโดยซีเมนต์ มวลรวม และ ส่วนผสมอื่นๆอาจจะต้องพิจารณา

ภาคผนวก ข.

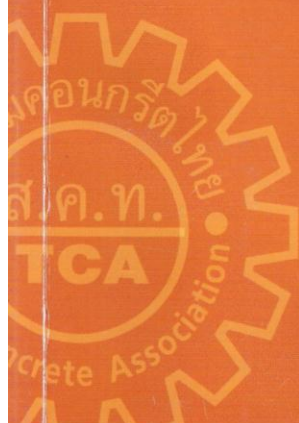
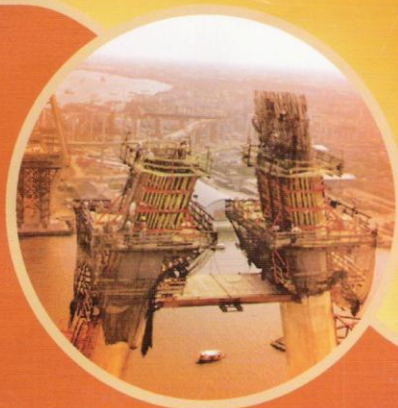
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. ดร.คมสัน มาลีสี และรุ่งโรจน์ หนูรัตน์, อิทธิพลของการบ่มโดยใช้น้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำต่อคุณสมบัติการดูดซึมและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2, หน้า MAT115-MAT119, จ.อุดรธานี, ประเทศไทย, ตุลาคม 25-27, 2549.



การประชุมวิชาการดวนกริตประจำปี ครั้งที่ 2
Annual Concrete Conference

2



25 - 27 ตุลาคม 2549
ณ โรงแรมเจริญธานี แกรนด์ รอยัล
จังหวัดอุดรธานี
จัดโดย... สมาคมดวนกริตไทย (ส.ด.ท.)

อิทธิพลของการบ่มโดยใช้น้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำต่อคุณสมบัติการดูดซึมและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์

Influence of Low Surface Tension Water Curing on Surface Absorption and Degree of Hydration of Cement Paste

กมลสัน มาลีสี¹ และ รุ่งโรจน์ หนูรัตน์²

¹ อาจารย์, ² นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการบ่มโดยใช้สารกักกระจายฟองอากาศผสมลงในน้ำทำให้ น้ำที่ใช้บ่มมีแรงตึงผิวลดลง โดยพิจารณาถึงความสามารถในการซึมผ่านและปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ความลึกต่างๆ โดยทั่วไปชั้นผิวของคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่และมี W/C ต่ำ น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตและน้ำที่ใช้ในการบ่มรวมกันแล้วยังไม่สามารถทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตตัวอย่างให้ดีขึ้นโดยใช้น้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำ ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าน้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำมีคุณสมบัติในการซึมผ่านได้ดีกว่าน้ำธรรมดา โดยเฉพาะที่อายุของซีเมนต์เพสต์ที่มากขึ้น อีกทั้งมีคุณสมบัติในการซึมผ่านจากผิวนอกที่ทำการบ่มได้ดีกว่าน้ำธรรมดา โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ทุกระดับความลึกมีค่ามากกว่าการบ่มด้วยน้ำธรรมดา

ABSTRACT: In this paper, influence of low surface tension water curing (water containing AE-admixture) on surface absorption and degree of hydration were experimentally investigated. In a large-size specimen with a low water-cement ratio, both the mixing water and penetrative water of standard water curing are not sufficient to complete the hydration of the entire specimen. Therefore, low surface tension water curing was studied to improve the properties of the specimens at any distances from the surface during hydration process. From experimental method, cement paste cured with low surface tension water had higher permeability then cured with standard water, especially at older age. Furthermore, this provided better permeable property and higher degree of hydration at all depths than standard water curing.

คำหลัก: การบ่ม; น้ำแรงตึงผิวต่ำ; การแพร่ซึมของน้ำ; ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

1. บทนำ

ในงานก่อสร้างโดยทั่วไป วิธีที่จะควบคุมคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้มีคุณภาพที่ดีวิธีหนึ่งคือ การบ่มคอนกรีต ซึ่งการบ่มคอนกรีตจะช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต และจะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ เป็นผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้การบ่มจึงมีอิทธิพลมากต่องานก่อสร้างทั่วไป

ในระหว่างที่คอนกรีตกำลังแข็งตัวอยู่นั้น คอนกรีตต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาทางเคมีอย่างเพียงพอ หากน้ำมีไม่เพียงพอในระยะใด การปฏิกิริยาเคมีก็จะหยุดในระยะนั้น และถ้าอยู่ในระยะที่มีความแข็งแรงไม่พอที่ต้านทานการหดตัวอันเนื่องจากการระเหย ของน้ำหรือเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงแล้ว อาจทำให้เกิดการเสียหายแตกร้าวขึ้น ในเนื้อคอนกรีตหรือตามผิวที่

แห้งก่อนนั้นได้ทุกเมื่อ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการเก็บน้ำให้ชุ่มตลอดเวลา เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินอย่างต่อเนื่องให้มากที่สุด หรือจนกระทั่งปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

2. ความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากกำลังและความคงทนของคอนกรีตขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการบ่ม ซึ่งการบ่มที่ดีนั้นจะทำให้การซึมผ่านของน้ำที่ใช้บ่มเข้าไปยังชิ้นส่วนโครงสร้างอย่างทั่วถึง อันจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ แต่โครงสร้างคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ น้ำไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างภายในโครงสร้างคอนกรีตได้ จึงเป็นสาเหตุให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผิวภายใน และผิวภายนอก

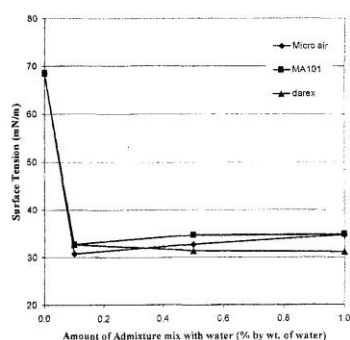
ของคอนกรีตเกิดความแตกต่างกันเป็นผลให้ความสามารถในการรับกำลังลดลง และอาจเกิดปัญหาการแตกร้าวต่างๆ ตามมา

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีที่จะทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปในชั้นส่วนโครงสร้างให้ได้มากที่สุด ซึ่งทำการศึกษาโดยผสมสารกักกระจายฟองอากาศชนิดต่างๆ ลงในน้ำเพื่อลดแรงตึงผิวของน้ำที่ใช้บ่มคอนกรีตเพื่อให้สามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น โดยน้ำที่ใช้บ่มคอนกรีตได้ซึมผ่านเข้าไปภายในซึ่งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มปริมาณน้ำในช่องว่างภายในของคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และน้ำที่ใช้บ่มนี้ยังช่วยปกป้องไม่ให้น้ำภายในคอนกรีตระเหยออกไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอกอีกด้วย ความสามารถในการซึมผ่านเข้าไปของน้ำที่ใช้บ่มสามารถวัดได้จากความสามารถในการดูดซึมและปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้น ณ ระดับความลึกใดๆ ของชั้นส่วนตัวอย่าง

3. การทดลอง

3.1 การทดสอบหาแรงตึงผิว (Surface Tension) ของน้ำผสมกับสารกักกระจายฟองอากาศชนิดต่างๆ

การทดสอบหาแรงตึงผิวของน้ำที่ผสมสารกักกระจายฟองอากาศนั้นเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารกักกระจายฟองอากาศที่ผสมกับน้ำเพื่อให้ได้ค่าแรงตึงผิวที่ต่ำและมีค่าคงตัวเหมาะสมสำหรับการบ่มชั้นตัวอย่างต่อไป โดยใช้ชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงตึงผิว (Du Nouy surface-tension meter) โดยผลการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของสารกักกระจายฟองอากาศต่างๆ

จากรูปที่ 1 พบว่าสารกักกระจายฟองเมื่อผสมกับน้ำจะมีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว เมื่อให้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1% ถึง 1% จะให้ค่าแรงตึงผิวที่ใกล้เคียงกันเท่ากับ 32 mN/m ทั้ง 3 สารกักกระจายฟองอากาศ ในการศึกษาเลือกความเข้มข้นที่ 1% เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

3.2 การทดลองสำหรับการหาความสามารถการดูดซึมของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 1585-04

ใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 และสูง 5 เซนติเมตร ด้านหนึ่งเป็นระบบปิด ผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.30 นำมาเทลงในแบบ ใส่ฟองอากาศปาดผิวหน้าทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เนื่องจากต้องการพิจารณาความสามารถในการดูดซึม ก่อนและหลังจากทำการบ่ม จึงเตรียมตัวอย่างโดยทดสอบก่อนทำการบ่ม (หลังจากถอดแบบ) และทดสอบหลังจากบ่มน้ำมาแล้ว เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 วัน จากนั้นนำเข้าเตาอบ $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างและวัดขนาด ทำการทดสอบโดยวางในภาชนะที่รีบน้ำและภาชนะที่มี AE ความเข้มข้น 1% โดยวางให้ผิวตัวอย่างด้านหนึ่ง จมในน้ำ 2 ± 1 มิลลิเมตร ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นระยะจนครบ 7 วัน โดยคำนวณหาความสามารถการดูดซึม ได้สมการดังนี้

$$I = \frac{(\Delta \text{mass} / A)}{D} \quad \dots (1)$$

โดยที่ I = ระยะทางที่น้ำถูกดูดซึมเข้าไปในตัวอย่าง (มม.)

Δmass = ความแตกต่างของน้ำหนักที่เปลี่ยนไปจากน้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง (มม.²)

D = ความหนาแน่นของน้ำ (กรัม/มม.³)

3.3 การทดลองสำหรับการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ

ใช้แบบพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 และสูง 40 เซนติเมตร ด้านหนึ่งของหลอดพลาสติกเป็นระบบปิด ผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.44 โดยเทชั้นๆ ละ 5 เซนติเมตร และทำการกระทุ้ง จนถึงความสูง 30 เซนติเมตร จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

โดยทำการบ่มด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

- น้ำบริสุทธิ์
- น้ำผสม MA 101 ความเข้มข้น 1%
- น้ำผสม Micro air ความเข้มข้น 1%
- น้ำผสม Darex ความเข้มข้น 1%
- ฝังก๊าซในอากาศ

โดยเทน้ำบ่มที่ผิวบนของตัวอย่างในปริมาณที่เพียงพอตลอดระยะเวลาการบ่ม เป็นเวลา 3, 5, 7, 14, และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดระยะเวลาการบ่ม นำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ออกมาตัดเป็น 6 ส่วน ขนาดเท่าๆ กัน สูงประมาณ 5 เซนติเมตร นำตัวอย่างทั้ง 6 ส่วน ไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก ($M_{105^{\circ}\text{C}}$) และนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก ($M_{950^{\circ}\text{C}}$)

คำนวณหาค่าระดับปฏิกิริยาไฮดรชัน ได้ผลการดังนี้

$$\text{Degree of Hydration} = \frac{M_{105^\circ\text{C}} - M_{950^\circ\text{C}}}{M_{950^\circ\text{C}}} \times \frac{100}{23} \quad \dots (2)$$

โดยที่ Degree of Hydration = ค่าระดับปฏิกิริยาไฮดรชัน (%)

$M_{105^\circ\text{C}}$ = น้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังจากเข้าเตาอบที่ 105°C (กรัม.)

$M_{950^\circ\text{C}}$ = น้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังจากเข้าเตาอบที่ 950°C (กรัม.)

23% = คือน้ำปริมาณ non-evaporable water ต่อน้ำหนักของซีเมนต์ ที่ปฏิกิริยาไฮดรชันเกิดขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์⁽¹⁾

4. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการหาความสามารถการดูดซึมน้ำในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว

การวัดค่าการดูดซึมน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว เป็นการวัดน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากแช่ตัวอย่างได้สัมพัทธ์แล้ว ซึ่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเกิดจากมีน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไป เมื่อทำการบ่มไปเป็นเวลานานๆ น้ำที่ถูกดูดซึมจะมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ไม่สามารถดูดซึมได้อีก น้ำหนักของตัวอย่างก็จะคงที่

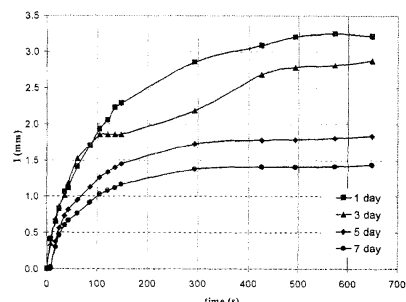
ในการทดสอบจะเป็นการทดสอบให้น้ำบ่มสัมพัทธ์ของตัวอย่างเพียงด้านเดียว เพื่อให้เหมือนกับสภาพการบ่มจริงที่หน้างาน ซึ่งค่าการดูดซึมที่จะได้เป็นการคำนวณหาขณะที่น้ำถูกดูดซึมเข้าไปในตัวอย่าง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1585-04 และน้ำบ่มที่ใช้ทดสอบคือ น้ำกับน้ำผสม AE เข้มข้น 1% เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

สภาพของตัวอย่างจะเลือกใช้ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.3 ซึ่งมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ เพื่อแสดงให้เห็นค่าการดูดซึมได้อย่างชัดเจน และก่อนที่ตัวอย่างจะนำมาทดสอบ จะนำไปบ่มในน้ำปกติ เพื่อหาค่าการดูดซึมเปรียบเทียบระหว่างน้ำและน้ำผสม AE เข้มข้น 1% ว่าสารใดที่สามารถดูดซึมเข้าไปในตัวอย่างได้มากกว่ากัน

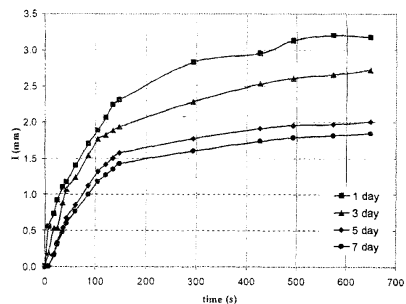
จากรูปที่ 2 และรูปที่ 3 จะพบว่าอัตราการดูดซึมจะเพิ่มสูงในช่วงเวลาแรก และค่อยๆ คงที่เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งในตัวอย่างที่ทำการบ่มมาไม่นานจะมีอัตราการดูดซึมสูงกว่าชิ้นตัวอย่างที่ทำการบ่มมานานกว่า

จากรูปที่ 4 จะพบว่าทดสอบโดยน้ำเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ AE เมื่อตัวอย่างผ่านการบ่มมาแล้ว 7 วัน จะให้อัตราการดูดซึมที่แตกต่างกัน ตัวอย่างที่ทดสอบกับน้ำผสม AE เข้มข้น 1% มีอัตราการดูดซึมที่สูงขึ้นกว่าการทดสอบโดยน้ำอย่างเห็นได้ชัด การที่อัตราการดูดซึมจะมีมากน้อยนั้น มีผลมาจากปริมาณซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา มีปริมาณมากน้อยเพียงใด ซึ่งจากการทดสอบชิ้นตัวอย่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.30 ที่ไม่ได้ทำการบ่มเลย จะมีอัตราการดูดซึมที่มาก เป็น 5 เท่าของอัตราการดูดซึมของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการบ่มมาแล้ว 1 วัน

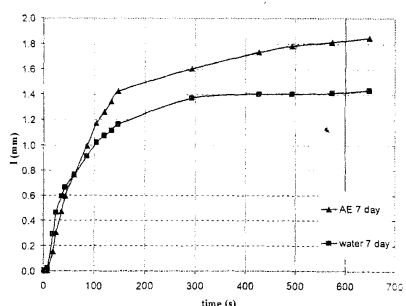
ตัวอย่างที่ทดสอบกับน้ำผสม AE เข้มข้น 1% นั้นมีค่าอัตราการดูดซึมที่สูงกว่าตัวอย่างที่ทดสอบกับน้ำ เมื่อทำการบ่มมาก่อนเป็นเวลา 5-7 วัน เป็นผลมาจาก ช่องว่างเล็กๆ ที่อยู่ในโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ เมื่อทำการบ่มไปเรื่อยๆ ช่องว่างเล็กๆ นั้น จะค่อยๆ เล็กลงจนน้ำไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างเล็กๆ นั้นได้ แต่สารลดแรงตึงผิวซึ่งมีคุณสมบัติซึมผ่านได้ดี จะสามารถที่จะซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างเล็กๆ ในซีเมนต์เพสต์ได้



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับระยะเวลา โดยทดสอบกับน้ำ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับระยะเวลา โดยทดสอบกับ AE เข้มข้น 1%



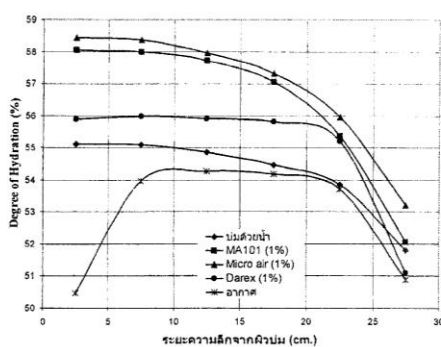
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับระยะเวลาของการทดสอบที่ 7 วัน

4.2 ผลการทดลองปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ความลึกต่างๆ

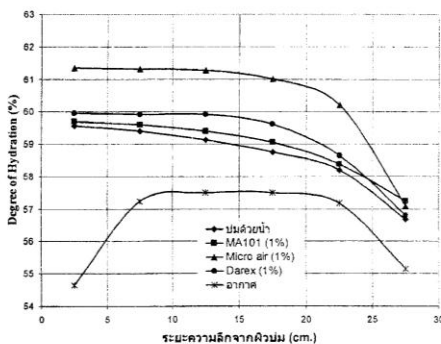
การวัดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ความลึกต่างๆ เป็นการวัดการซึมผ่านของน้ำบ่มลงไปในพื้นที่ความลึกต่างๆ ซึ่งการซึมผ่านของน้ำบ่มนั้นจะมีผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำเน้นต่อไป หากน้ำบ่มมีคุณสมบัติที่สามารถซึมผ่านได้ดีแล้วจะทำให้พื้นที่ตัวอย่างนั้นเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทั่วทั้งตัวอย่าง ในการทดสอบจะเป็นการหาน้ำหนักที่หายไปของตัวอย่างหลังจากผ่านการอบแล้ว ซึ่งค่าน้ำหนักที่หายไปจะนำไปคำนวณหาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในตัวอย่างนั้น โดยมีระยะเวลาในการบ่มที่ 3, 5, 7, 14, และ 28 วัน และวิธีที่ใช้บ่มทดสอบคือ น้ำ, สารลดแรงตึงผิว (น้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศ) และผงในอากาศ เพื่อ

นำมาเปรียบเทียบกับสภาพของตัวอย่างจะเลือกใช้ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ซึ่งมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์

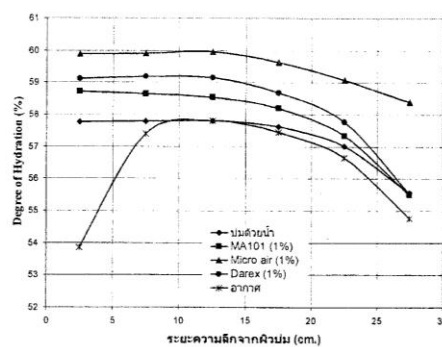
จากรูปที่ 5-6 จะพบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 เมื่อทำการบ่มจะช่วยเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นมาก และการบ่มด้วยน้ำบ่มต่างๆ ในช่วง 3-5 วันปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผิวบนจะมากกว่าที่ผิวล่างของตัวอย่าง ซึ่งสารลดแรงตึงผิวเกือบทั้งหมดจะให้ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากกว่าน้ำ และเมื่อตัวอย่างที่ทำการบ่มนานกว่านั้น การบ่มด้วยสารลดแรงตึงผิวจะมีแนวโน้มที่ให้ ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากกว่าลดทั้งความลึกขึ้นตัวอย่าง ขณะที่การบ่มด้วยน้ำจะให้ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันที่น้อยลงเนื่องจากผิวบนที่ทำการบ่ม ดังรูปที่ 7-9



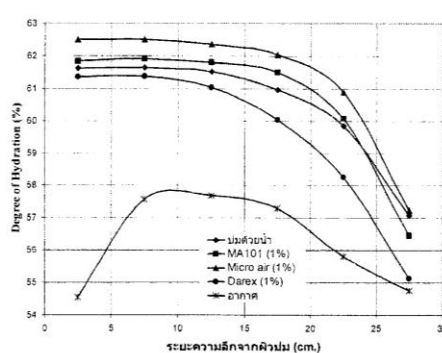
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความลึกตัวอย่าง w/c 0.25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน



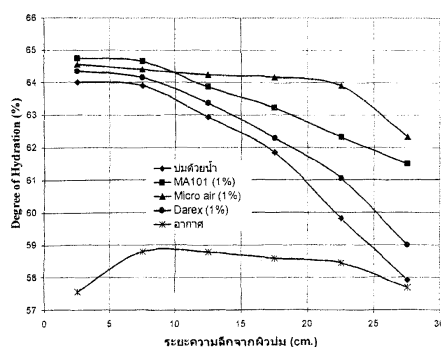
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความลึกตัวอย่าง w/c 0.25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความลึกตัวอย่าง w/c 0.25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 5 วัน



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความลึกตัวอย่าง w/c 0.25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความลึก
ตัวอย่าง w/c 0.25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

การบ่มด้วยน้ำผสม AE เพิ่มขึ้น 1 % จะให้ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ดีกว่าการบ่มด้วยน้ำและการบ่มด้วยอากาศในส่วนใหญ่ ซึ่งสารกักกระจายฟองอากาศที่ให้ผลดีที่สุด คือสาร Micro air เพราะช่วยให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มากที่สุดที่ระยะเวลาการบ่ม 3, 5, 7, 14 และ 28 วัน โดยตัวอย่างที่บ่มด้วยน้ำผสม AE เพิ่มขึ้น 1 % จะให้ค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เท่าๆกัน ที่ระยะความลึกจาก 0 - 12.5 เซนติเมตร วัดจากผิวบ่ม และเมื่อการบ่มด้วยน้ำผสม AE เพิ่มขึ้น 1 % เป็นเวลานานขึ้น ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะใกล้เคียงกันตลอดทั้งตัวอย่าง โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ที่บ่มด้วยน้ำผสม Micro air ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (รูปที่ 9) จะให้ค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันประมาณ 64.5 % ตลอดระยะจาก 0-22.5 เซนติเมตร และจะค่อยๆ ลดลงที่ระยะ 22.5-27.5 เซนติเมตรจากผิวบ่ม

การบ่มด้วยน้ำนั้น ระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีลักษณะลดลงตามระยะความลึกจากผิวบ่มในทุกๆ ระยะเวลาการบ่ม เป็นเพราะน้ำจากการบ่มที่ผิวบ่มจะซึมเข้าไปในช่องว่างโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ไม่มากนัก ซึ่งสันนิษฐานได้ว่า น้ำจากผิวบ่มจะซึมผ่านซีเมนต์เพสต์ได้ยากเพราะน้ำมีแรงดึงดูดที่มากจึงซึมเข้าไปในช่องว่างโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ได้น้อยและใช้เวลานานสำหรับการบ่มด้วยอากาศหรือไม่ได้บ่ม จะมีระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่าการบ่มด้วยวิธีอื่น แต่ถ้าไม่เปรียบเทียบกับวิธีอื่น พบว่าตรงกลางของตัวอย่าง มีแนวโน้มปฏิกิริยาไฮเดรชันค่อนข้างมากเพราะที่ตรงส่วนนี้มีปริมาณน้ำมากกว่าส่วนอื่น เนื่องจากผิวบ่มเป็นระบบเปิด น้ำที่ใช้ผสมซีเมนต์จะสูญเสียไปกับการระเหย ส่วนล่างของซีเมนต์ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะมาก จึงตกลงไปด้านล่าง จึงคั่นน้ำขึ้นมารอบบริเวณตรงกลางของระยะชั้นตัวอย่าง

5. สรุปผลการทดลอง

การที่สารลดแรงดึงผิว AE สามารถดูดซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ได้ดีกว่าน้ำมาก ช่วยให้ระยะเวลาในการบ่มน้อยลงเพื่อให้ถึงค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต้องการได้ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของตัวอย่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ที่ทดสอบด้วยสารลดแรงดึงผิว จะเพิ่มขึ้นเร็วในช่วง 1-7 วันแรก ซึ่งมากกว่าการทดสอบกับน้ำ ถึง 15 % ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้น และจะให้ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ดีกว่าการบ่มด้วยน้ำและการบ่มด้วยอากาศเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสารกักกระจายฟองอากาศที่ให้ผลดีที่สุด คือสารกักกระจายฟองอากาศ Micro air โดยที่การบ่มด้วยสารลดแรงดึงผิวจะสามารถซึมผ่านเข้าไปใต้ผิวจากผิวบ่มที่ทำการบ่ม โดยมีระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่าๆ กันตลอดถึงระยะ 22.5 เซนติเมตร เมื่อทำการบ่มจนครบ 3 วัน และสามารถซึมผ่านเข้าไปใต้ผิวถึง 22.5 เซนติเมตร เมื่อทำการบ่มจนครบ 28 วัน

การบ่มด้วยน้ำ น้ำจะไม่สามารถเข้าไปในชั้นตัวอย่างที่ระยะไกลจากผิวบ่มที่ทำการบ่ม พิจารณาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีค่ามากบริเวณผิวที่ได้รับการบ่มแล้วค่อยๆ ลดลงตามระยะห่างจากผิวบ่ม

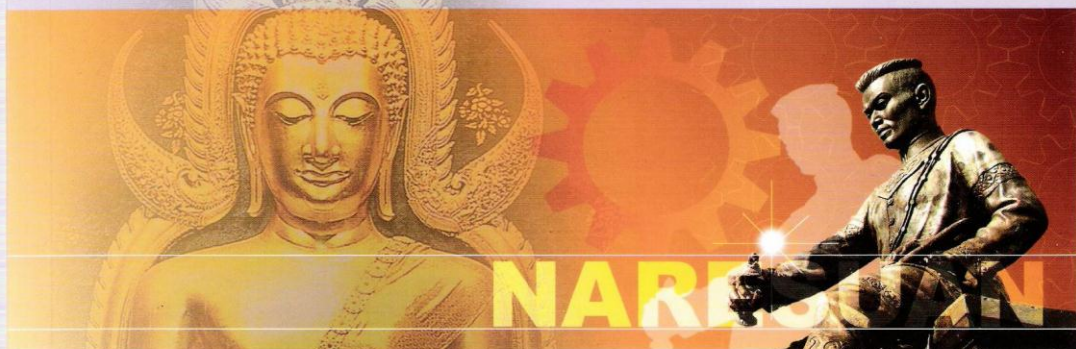
6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tazawa, E.: Autogenous Shrinkage of Concrete, Proceeding of the International Workshop organized by JCI, pp.3-67, 1998.
- [2] Neville, A.M.: Properties of Concrete, pp. 5-53, 1963.
- [3] Taylor, H.F.W.: Cement chemistry 2nd edition, pp. 227-255, 1997.
- [4] Bentz, D.P.: Influence of Curing Conditions on Water Loss and Hydration in Cement Pastes with and without Fly Ash Substitution, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6886, July 2002.
- [5] Powers, T.C.: Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Paste, PCA Bullentin, No. 10, pp. 2-12, 1959.
- [6] Power, T.C.: Absorption of water by Portland cement paste during the hardening process, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 27, pp. 790-794, 1935.
- [7] Maleesee, K., Kasai, T.: Effect of Penetration of Curing Water on Self-desiccation and Strength of Cementitious Materials, Cement Science and Concrete Technology by JCA, Vol.55, pp. 109-115, 2001.
- [8] Maleesee, K., Kasai, T.: Effect of Penetrative Conditions. of Water for Curing on Strength of Concrete, Proceeding of the first fib Congress 2002, Osaka, Japan, pp. 289-296, 2002.
- [9] Maleesee, K., Panitkulpong, A., Kasai, T.: Effect of Penetrative Conditions of Water for Curing on Properties of Hardened Cement Paste, Concrete Research and Technology by JCI, Vol.25, pp. 581-586, 2003.
- [10] Maleesee, K. and Kasai, T.: Influences of Penetrative Curing on Properties of Cementitious Materials, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCCE, No. 767 / V-64, pp. 301-312, 2004

2. รุ่งโรจน์ หนูรัตน์ และดร.คมสัน มาลีสี, การศึกษาอิทธิพลของการป่มโดยใช้สารลดแรงตึงผิว
ต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตในกรณีเงื่อนไขและวิธีการป่มต่างๆ, การประชุมวิชาการ
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, หน้า NCCE12-Volume 5 (MAT)-Page 60 - NCCE12-
Volume 5 (MAT)-Page 65, จ.พิษณุโลก, ประเทศไทย, พฤษภาคม 2-4, 2550.



การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12 The 12th National Convention on Civil Engineering



PROCEEDINGS

"ประเทศไทยก้าวไกลกับวิศวกรรมโยธา"
Thailand Advances with Civil Engineering

2-4 พฤษภาคม 2550

โรงแรมอมรินทร์ ลากูน
อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก

ร่วมจัดโดย

- สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
- ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร วิทยาเขตสารสนเทศพะเยา

โดยความร่วมมือจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องด้านวิศวกรรมโยธาและสถาบันอุดมศึกษาทั่วประเทศ



ปูนซิเมนต์นครหลวง
SIAM CITY CEMENT

การศึกษาอิทธิพลของการบ่มโดยใช้สารลดแรงตึงผิวต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีต ในกรณีเงื่อนไขและวิธีการบ่มต่างๆ

A STUDY ON INFLUENCE OF LOW SURFACE TENSION WATER CURING IN ANY CURING CONDITIONS ON PROPERTIES OF CEMENTITIOUS MATERIALS

รุ่งโรจน์ หนูรัตน์ (Rungrote Noonurat)¹

ดร.กมลสัน มาลีสี (Dr. Komsan Maleesee)²

¹ นักศึกษาปริญญาโท rungrote_bbur@hotmail.com

² อาจารย์ kmkomsan@kmitl.ac.th

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการบ่มในเงื่อนไขและสภาวะการบ่มที่แตกต่างกัน โดยใช้สารกักกระจ่ายฟองอากาศผสมลงในน้ำทำให้มีน้ำที่มีแรงตึงผิวลดลง โดยพิจารณาถึงความสามารถในการซึมผ่าน ปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการหดตัว โดยทั่วไปตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่และมี W/C ต่ำ น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตและน้ำที่ใช้ในการบ่มรวมกันแล้วยังไม่สามารถทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตตัวอย่างให้ดีขึ้นโดยใช้ น้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำ ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าน้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำมีคุณสมบัติในการซึมผ่านได้ดีกว่าน้ำธรรมดา โดยเฉพาะที่อายุของซีเมนต์ เพสท์ที่มากขึ้น อีกทั้งมีคุณสมบัติในการซึมผ่านจากผิวออกที่ทำการบ่มได้ดีกว่าน้ำธรรมดา โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ทุกระดับความลึก มีค่ามากกว่าการบ่มด้วยน้ำธรรมดา

ABSTRACT: In this paper, influence of low surface tension water curing in any curing conditions (water containing AE-admixture) on surface absorption, degree of hydration and autogenous shrinkage were experimentally investigated. In a large-size specimen with a low water-cement ratio, both the mixing water and penetrative water of standard water curing are not sufficient to complete the hydration of the entire specimen. Therefore, low surface tension water curing was studied to improve the properties of the specimen at any distances from the surface during hydration process. From experimental method, cement paste cured with low surface tension water had higher permeability then cured with standard water, especially at older age. Furthermore, this provided better permeable property and higher degree of hydration at all depths than standard water curing.

KEYWORDS: Curing, Low surface tension water, AE-admixture, Autogenous shrinkage, Degree of hydration

1. บทนำ

ในงานก่อสร้างโดยทั่วไป วิธีที่จะควบคุมคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้มีคุณภาพที่ดีวิธีหนึ่งคือ การบ่มคอนกรีต ซึ่งการบ่มคอนกรีตจะช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต และยังทำให้น้ำจากภายนอกแพร่ซึมเข้าไปภายใน ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เป็นผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้การบ่มจึงมีอิทธิพลมากต่อการก่อสร้างทั่วไปเป็นอย่างมาก

ระหว่างที่คอนกรีตกำลังแข็งตัวอยู่นั้น คอนกรีตต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาทางเคมีอย่างเพียงพอ หากน้ำมีไม่เพียงพอในระยะใด การเกิดปฏิกิริยาเคมีก็จะหยุดในระบะนั้น และถ้าอยู่ในระยะที่มีความแข็งแรงต่ำไม่พอที่ต้านทานการหดตัวเนื่องจากการระเหยของน้ำหรือเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงแล้ว อาจทำให้เกิดการเสียหายแตกร้าวขึ้นในเนื้อคอนกรีตหรือตามผิวที่แห้งก่อนนั้นได้ทุกเมื่อ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการเก็บน้ำให้ชุ่มตลอดเวลา เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินอย่างต่อเนื่องให้มากที่สุด หรือจนกระทั่งปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

2. ความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากกำลังและความคงทนของคอนกรีตขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการบ่ม ซึ่งการบ่มที่ดีนั้นจะทำให้การซึมผ่านของน้ำที่ซึมเข้าไปยังชั้นส่วนโครงสร้างอย่างทั่วถึง อันจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ แต่โครงสร้างคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ น้ำไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างภายในโครงสร้างคอนกรีตได้ จึงเป็นสาเหตุให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผิวภายใน และผิวภายนอกของคอนกรีตเกิดความแตกต่างกันเป็นผลให้ความสามารถในการรับกำลังลดลง และอาจเกิดปัญหาการแตกร้าวต่างๆ ตามมา

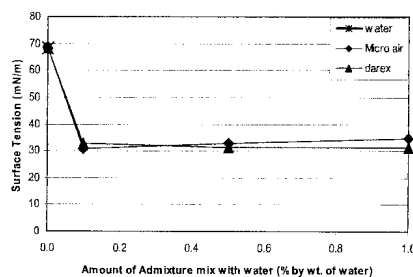
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีที่จะทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปในชั้นส่วนโครงสร้างให้ได้มากที่สุด ซึ่งทำการศึกษาโดยผสมสารกักกระจายฟองอากาศ Air-Entraining Admixtures (AE) ชนิดต่างๆ ลงในน้ำเพื่อลดแรงดึงผิวของน้ำที่ซึมบ่มคอนกรีตเพื่อให้สามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น โดยน้ำที่ซึมบ่มคอนกรีตได้ซึมผ่านเข้าไปภายในซึ่งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มปริมาณน้ำในช่องว่างภายในของคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และน้ำที่ใช้นั้นยังช่วยปกป้องไม่ให้

ภายในคอนกรีตระเหยออกไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอกอีกด้วย ความสามารถในการซึมผ่านเข้าไปของน้ำที่ซึมบ่มสามารถวัดได้จากความสามารถในการดูดซึมและ ปฏิกิริยา ไฮเดรชันที่เกิดขึ้น ณ ระดับความลึกใดๆ ของชั้นส่วนตัวอย่าง

3. การทดลอง

3.1 การทดสอบหาแรงดึงผิว (Surface Tension) ของน้ำผสมกับสารกักกระจายฟองอากาศชนิดต่างๆ

การทดสอบหาแรงดึงผิวของน้ำที่ผสมสารกักกระจายฟองอากาศนั้นเป็นการทดสอบเพื่อหาว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารกักกระจายฟองอากาศที่ผสมกับน้ำเพื่อให้ได้ค่าแรงดึงผิวที่ต่ำและมีค่าคงตัวเหมาะสมสำหรับการบ่มชั้นตัวอย่างต่อไป โดยใช้ชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดึงผิว (Du Nouy surface-tension meter) โดยผลการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงผิวกับความเข้มข้นของสารกักกระจายฟองอากาศในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 1 พบว่าสารกักกระจายฟองเมื่อผสมกับน้ำจะมีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงดึงผิว เมื่อให้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1% ถึง 1% สารกักกระจายชนิด Micro air และ Darex จะให้ค่าแรงดึงผิวที่ใกล้เคียงกันเท่ากับ 32 mN/m ในการศึกษานี้เลือกความเข้มข้นที่ 1% เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

3.2 การทดสอบสำหรับการหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว

ใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 และสูง 5 เซนติเมตร ด้านหนึ่งเป็นระบบปิด ผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อ

ซีเมนต์ 0.25 นำมาทดลองในแบบ ไล่ฟองอากาศปดผิวหน้าทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เตรียมตัวอย่างโดยทดสอบก่อนทำการบ่ม (หลังจากถอดแบบ) และทดสอบหลังจากบ่มมาแล้ว โดยทำการบ่มแบบ Warping บ่มด้วยน้ำ และปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ ทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลาของซีเมนต์พีคส์ครบ 1, 3, 7, และ 14 วันแล้วจึงนำมาทดสอบ นำเข้าเตาอบ 50 ± 2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างและวัดขนาด ทำการทดสอบโดยวางในภาชนะเรียบที่มีน้ำและลาดที่มี AE ความเข้มข้น 1% ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นระยะจนครบ 7 วัน โดยคำนวณหาความสามารถการซึมผ่าน ได้สมการดังนี้

$$\text{Weight of Penetrated water} = \frac{(W_n - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ Weight of Penetrated water = เปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ซึมผ่าน

W_0 = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

W_n = น้ำหนักตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ (กรัม)

3.3 การทดสอบสำหรับการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ

ใช้แบบพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 และสูง 40 เซนติเมตร ด้านหนึ่งของหลอดพลาสติกเป็นระบบปิด ผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.44 โดยพูนๆ ละ 5 เซนติเมตร และทำการกระทุ้ง จนถึงความสูง 30 เซนติเมตร จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยทำการบ่มด้วยวิธีการบ่มด้วยน้ำบริสุทธิ์ ด้วยน้ำผสม AE ความเข้มข้น 1% โดยทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลาจนอายุครบ 28 วัน และทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องคือทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จนได้อายุที่ 3, 7 และ 14 วัน แล้วจึงเทน้ำบ่มที่ผิวบนของตัวอย่าง ในปริมาณที่เพียงพอตลอดระยะเวลาการบ่ม เมื่อครบกำหนด 28 วัน จึงนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ออกมาตัดเป็น 6 ส่วน ขนาดเท่าๆ กัน สูงประมาณ 5 เซนติเมตร นำตัวอย่างทั้ง 6 ส่วน ไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก ($M_{105^\circ\text{C}}$) และนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก ($M_{950^\circ\text{C}}$) คำนวณหาค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้สมการดังนี้

$$\text{Degree of Hydration} = \frac{M_{105^\circ\text{C}} - M_{950^\circ\text{C}}}{M_{950^\circ\text{C}}} \times \frac{100}{23} \quad (2)$$

โดยที่ Degree of Hydration = ค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชัน (%)

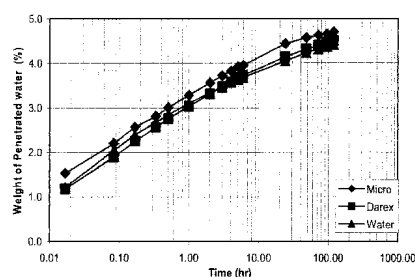
$M_{105^\circ\text{C}}$ = น้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังจากเข้าเตาอบที่ 105°C (กรัม.)

$M_{950^\circ\text{C}}$ = น้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังจากเข้าเตาอบที่ 950°C (กรัม.)

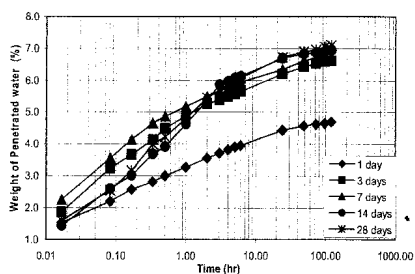
23% - คือค่าปริมาณ non-evaporable water คือน้ำหนักของซีเมนต์ที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้น 100 เปอร์เซนต์^[3]

3.4 การทดลองการยึดหดตัวในซีเมนต์เพสต์ ตามมาตรฐาน JIS A 1129

เตรียมแบบหล่อตัวอย่างขนาดกว้าง 4 สูง 4 ยาว 16 เซนติเมตร ติดตั้งเกจวัดและวัดระยะบันทึกค่า (L_0) ผสมซีเมนต์เพสต์ในอัตราน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 โดยแบ่งการเทซีเมนต์เพสต์เข้าแบบ



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่าน กับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ (หลังถอดแบบ)



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่าน กับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบโดย Micro Air

เป็น 3 ชั้นเท่า ๆ กัน แล้วทำการปาดหน้าซีเมนต์เพสต์ให้เรียบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วถอดแบบ หลังจากถอดแบบวัฏระยะของตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบบันทึกค่า (X_0) จากนั้นนำตัวอย่างมาทำการบ่ม โดยทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลา และทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องคือทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จนได้อายุที่ 1, 3, 7 และ 14 วันแล้วจึงทำการบ่มตัวอย่าง โดยวัฏระยะของตัวอย่างทุกๆ วันจนอายุครบกำหนดบันทึกค่า (X_n) คำนวณค่าการหดตัวได้สมการดังนี้

$$\text{Autogenous Shrinkage} = \frac{(X_0 - X_n)}{L_0} \quad (3)$$

โดยที่ Autogenous Shrinkage = ค่าการหดตัว

X_0 = ระยะเริ่มต้นที่อายุ 1 วันหลังถอดแบบ (มิลลิเมตร)

X_n = ระยะที่อายุ 2 วันถึงอายุ 28 วัน (มิลลิเมตร)

L_0 = ระยะห่างของหัวเกสสิก (มิลลิเมตร)

4. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบการหาความสามารถการซึมผ่านในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว

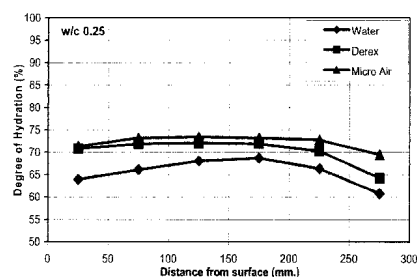
การวัดค่าการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว เป็นการวัดน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากชั้นตัวอย่างได้สัมผัสน้ำแล้ว ซึ่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเกิดจากมีน้ำหนักของน้ำที่ทดสอบซึมผ่านเข้าไป เมื่อทำการทดสอบไปเป็นเวลานานๆ น้ำซึมผ่านจะมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ไม่สามารถซึมผ่านได้อีก น้ำหนักของตัวอย่างก็จะคงที่ สภาพของตัวอย่างจะเลือกใช้ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ซึ่งมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ เพื่อแสดงให้เห็นค่าการซึมผ่านได้อย่างชัดเจน และก่อนที่ตัวอย่างจะนำมาทดสอบ จะนำไปบ่มด้วยวิธีต่างๆ เพื่อหาค่าการซึมผ่านเปรียบเทียบระหว่างน้ำและน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ว่าสารใดที่ยังสามารถซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างได้มากกว่ากัน

จากรูปที่ 2 จะพบว่าการทดสอบตัวอย่างหลังการถอดแบบด้วยน้ำเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ AE ทั้ง 2 ชนิดจะให้อัตราการซึมผ่านที่แตกต่างกัน ตัวอย่างที่ทดสอบกับน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % มีอัตราการซึมผ่านที่สูงขึ้นกว่าการทดสอบด้วยน้ำ มีผลมาจากน้ำที่มีแรงดึงดูดลงทำให้สามารถจะซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างได้ดีกว่า

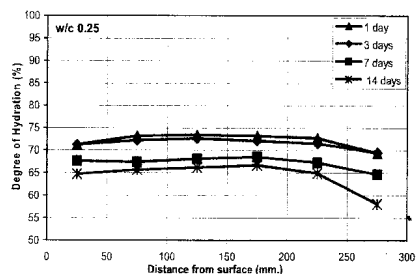
จากรูปที่ 3 จะพบว่าการทดสอบกับน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % มีอัตราการซึมผ่านที่สูงขึ้น เมื่อระยะเวลาในการฝังไว้ในอากาศนานขึ้น เนื่องมาจากน้ำในตัวอย่างระเหยออกไปและทำให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ เป็นผลทำให้ช่องว่างเล็กๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ยังมียูอยู่ในชั้นตัวอย่างทำให้การซึมผ่านมีมากขึ้นตามมา

4.2 ผลการทดสอบปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ความลึกต่างๆ

การวัดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ความลึกต่างๆ เป็นการวัดการซึมผ่านของน้ำบ่มลงไปในพื้นที่ความลึกต่างๆ ซึ่งการซึมผ่านของน้ำบ่มนั้นจะมีผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินทั่วทั้งตัวอย่าง ในการทดสอบจะเป็นการหาน้ำหนักที่หายไปของตัวอย่างหลังจากผ่านกรอบแล้ว ซึ่งค่าน้ำหนักที่หายไปจะนำไปคำนวณหาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน วิธีที่ใช้บ่มทดสอบคือ น้ำและน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่างที่บ่มด้วย น้ำ Durex และ Micro Air ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่างที่บ่มด้วย Micro Air

กัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสภาพของตัวอย่างจะเลือกใช้ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.44 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

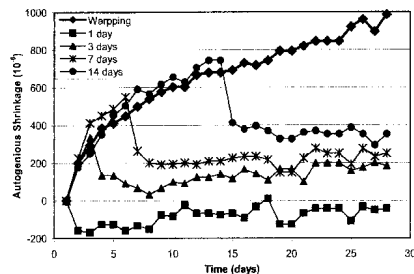
จากรูปที่ 4 จะพบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ที่อายุ 28 วัน เมื่อทำการบ่มด้วยน้ำผสมสารลดแรงตึงผิวทั้ง 2 ชนิดจะช่วยเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นสูงกว่าการบ่มด้วยน้ำ

จากรูปที่ 5 จะพบว่าจากการทดสอบโดยทั้งตัวอย่างไว้ในห้องทดลอง 3, 7 และ 14 วัน แล้วทำการบ่มด้วยสารลดแรงตึงผิวจนอายุซีเมนต์ครบ 28 พบว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีค่าที่ลดลงตามวันของการบ่ม แต่จะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 14 วันมีค่าใกล้เคียงกับการบ่มด้วยน้ำตลอดเวลา เป็นเพราะน้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำสามารถแพร่ซึมเข้าไปในตัวอย่างที่มีความหนาแน่นได้ดีกว่า น้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นอีกทั้งยังมีค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาสังเกตของตัวอย่าง

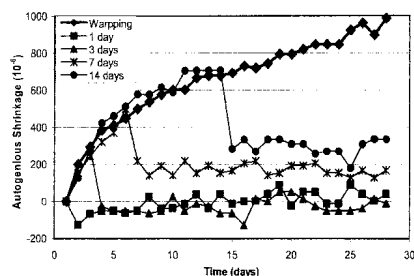
4.3 การทดสอบการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ ตามมาตรฐาน JIS A 1129

การวัดการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ (Autogenous shrinkage) เป็นการวัดการหดตัวของคอนกรีตซีเมนต์เพสต์ อันเนื่องจากการหดของตัวซีเมนต์เพสต์และเพราะปริมาณมวลรวมของของเหลวและของแข็ง เกิดปฏิกิริยามีปริมาณที่ลดลงหลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว โดยทดสอบด้วยการบ่มแบบ Warping บ่มน้ำ และบ่มด้วยน้ำผสมสารลดแรงตึงผิวของอากาศตามเงื่อนไขโดยทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลาและทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องคือทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จนได้อายุที่ 1, 3, 7 และ 14 วัน แล้วจึงทำการบ่ม

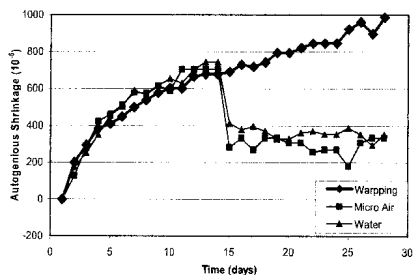
จากรูปที่ 6-7 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ทดสอบโดย Wrapping น้ำ และ AE พบว่าการบ่มแบบ Wrapping มีการหดตัวอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาในการทดสอบ และเมื่อทดสอบโดยการนำมบ่มด้วยน้ำและน้ำผสม AE ตลอดเวลาจะมีการหดตัวเพียงเล็กน้อย ตลอดระยะเวลาในการทดสอบและเมื่อทดสอบโดยการนำมบ่มด้วยน้ำและสารลดแรงตึงผิว AE เพิ่มขึ้น 1% ผสมกับน้ำแบบไม่ต่อเนื่องจะมีการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในช่วงแรกเพราะตัวอย่างสัมผัสอากาศโดยตรง และจะเกิดการขยายตัวเมื่อถึงวันที่ทำการบ่ม และจะมีการหดตัวเพียงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาในการทดสอบ



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ที่ทดสอบด้วยน้ำ ที่ w/c 0.25



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ที่ทดสอบด้วย Micro air ที่ w/c 0.25



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ที่เวลาการบ่ม 14 วัน ที่ w/c 0.25

จากรูปที่ 8 การยึดหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ทดสอบโดยการบ่มแบบ Wrapping ตลอดเวลากับการบ่มด้วยน้ำ และสารลดแรงดึงผิว AE เพิ่มขึ้น 1% ผสมกับน้ำ แบบไม่ต่อเนื่องที่อายุซีเมนต์เพสต์ 14 วัน พบว่าช่วงแรกของการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง มีการยึดหดตัวอย่างต่อเนื่องและมีค่ามากกว่าการทดสอบแบบ Wrapping เนื่องจากตัวอย่างสัมผัสกับอากาศโดยตรงเกิดการระเหยของน้ำหรือเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์แต่เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างไปทำการบ่ม ตัวอย่างจะเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปตัวอย่างจะยึดหดตัวเพียงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาในการทดสอบ

5 สรุปผลการทดลอง

1. น้ำที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตมีค่าแรงดึงผิวประมาณ 69 mN/m เมื่อทำการผสมด้วยสารกักกระจ่ายฟองอากาศความเข้มข้น 1% จะมีค่าแรงดึงผิวลดลงเหลือประมาณ 32 mN/m ทำให้สามารถบ่มในการซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างได้ดีกว่าน้ำ และยังสามารรถซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างที่ทั้งไว้ในอากาศที่เวลาต่างกันหรือไม่ได้รับการบ่มเลยได้คืออีกด้วย
2. จากการทดสอบโดยทั้งตัวอย่างไว้ในห้องทดลอง 3, 7 และ 14 วัน แล้วทำการบ่มด้วยสารลดแรงดึงผิวจนอายุซีเมนต์ครบ 28 วัน พบว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีค่าที่ลดลงตามวันของการบ่มแต่จะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 14 วันมีค่าใกล้เคียงกับการบ่มด้วยน้ำตลอดเวลา
3. จากการทดสอบการยึดหดตัวของซีเมนต์เพสต์ พบว่าการบ่มด้วยน้ำ และ AE เพิ่มขึ้น 1 % การยึดหดตัวเกิดขึ้นค้ำงกันเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อทำการบ่มแบบ Wrapping ตัวอย่างมีการหดตัวอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มมากขึ้นเรื่อยๆ โดยมีค่าสูงกว่าการบ่มด้วยน้ำ และ AE เพิ่มขึ้น 1 % ประมาณ 600 μm ที่ 28 วัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้งานพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนวิจัยเพิ่มเติม นายดำรงเดช สุมาธิธรรม นายธีรวัฒน์ พิทักษา และนายวัชรพล ประทุมวรรณ นักศึกษาปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ร่วมงานวิจัย งานงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tazawa, F., 1998, Autogenous Shrinkage of Concrete, Proceeding of the International Workshop organized by JCI : pp.3-67.
- [2] Neville, A.M., 1963, Properties of Concrete : pp. 5-53
- [3] Taylor, H.F.W., 1997, Cement chemistry 2nd edition : pp. 227-255
- [4] Bentz, D.P., July 2002, Influence of Curing Conditions on Water Loss and Hydration in Cement Pastes with and without Fly Ash Substitution, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6886
- [5] Powers, T.C., 1959, Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Paste, PCA Bulletin, No. 10: pp. 2-12.
- [6] Power, T.C., 1935, Absorption of water by Portland cement paste during the hardening process, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 27: pp. 790-794
- [7] Malesee, K., Kasai, T., 2001, Effect of Penetration of Curing Water on Self-desiccation and Strength of Cementitious Materials, Cement Science and Concrete Technology by JCA, Vol.55: pp. 109-115
- [8] Malesee, K., Kasai, T., 2002, Effect of Penetrative Conditions of Water for Curing on Strength of Concrete, Proceeding of the first fib Congress 2002, Osaka, Japan: pp. 289-296
- [9] Malesee, K., Panikulpong, A., Kasai, T., 2003, Effect of Penetrative Conditions of Water for Curing on Properties of Hardened Cement Paste. Concrete Research and Technology by JCI, Vol.25: pp. 581-586
- [10] Malesee, K. and Kasai, T., 2004, Influences of Penetrative Curing on Properties of Cementitious Materials, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No. 767 / V-64: pp. 301-312

เกี่ยวกับผู้เขียน



นาย จุ้งโรจน์ หนูวรรณ
เกิดเมื่อ วันที่ 5 กรกฎาคม 2522
จบการศึกษาระดับ ว.ศ.บ. (โยธา) จากมหาวิทยาลัยศรีปทุม พ.ศ. 2547
กำลังศึกษาคณะ ว.ศ.ม. (โยธา)
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายรุ่งโรจน์ หนูรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	5 กรกฎาคม 2522 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี
ที่อยู่	86/1 หมู่ 6 ตำบล สระแก้ว อำเภอ เมือง จังหวัด สุพรรณบุรี 72230
ประวัติการศึกษา	2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม 2548 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง