



เอกสารประกอบการประชุม

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 16th National Convention on Civil Engineering



วิศวกรรมโยธากับการเผชิญวิกฤตปัญหาโลก CIVIL ENGINEERING AND GLOBAL CRISES

18 - 20 พฤษภาคม 2554 | โรงแรมเดอะชาयน์ พัทยา ชลบุรี



จัดโดย
ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถ.พุทธมณฑลสาย 4 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

เว็บไซต์ <http://ncce16.mahidol.uni.net.th> โทรศัพท์ 0-2889-2138 ต่อ 6396 - 7

วันที่ 28 มีนาคม 2554

เรื่อง ผลการพิจารณาบทความเข้าร่วมการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16

เรียน นายเรวัตร ภคพาณิชย์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเพื่อเข้าร่วมการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

รหัสบทความ	MAT0057
ชื่อบทความ	แนวโน้มการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของซีเมนต์เฟสค์ที่ผสมวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิด
ชื่อผู้แต่ง	นายเรวัตร ภคพาณิชย์

บัดนี้ บทความของท่านได้ผ่านการพิจารณาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยมีผลการพิจารณา คือ แก้ไขบทความตามความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ และรับตีพิมพ์ใน Proceedings

ทั้งนี้ ขอให้ท่านได้ดำเนินการแก้ไขบทความตามข้อเสนอแนะที่ได้รับจากผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (หากมี) สำหรับบทความของท่านจะได้รับการตีพิมพ์ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 ส่วนบทความฉบับสมบูรณ์นั้นจะถูกบันทึกลงในแผ่นซีดี-รอมรวมบทความสำหรับงานประชุมนี้ต่อไป

อนึ่งจดหมายการรับรองการตีพิมพ์บทความฉบับนี้จะไม่สมบูรณ์ หากไม่มีใบยืนยันการนำเสนอบทความ ซึ่งจะมอบให้ท่านในงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 ระหว่างวันที่ 18 – 20 พฤษภาคม 2554 ณ โรงแรมเดอะชาयน์ พัทยา จังหวัดชลบุรี

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และทางคณะกรรมการจัดการประชุมขอขอบพระคุณท่านที่ได้เข้าร่วมการประชุมในครั้งนี้ มา ณ โอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชวีร์ ลิละวัฒน์

ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุม

วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 NCCEI 16th National Convention on Civil Engineering

ประกาศนียบัตรรับรองการนำเสนอบทความ

ประกาศนียบัตรฉบับนี้ไม่มีไว้เพื่อแสดงว่า

เรวัตร์ ภคพาณิชย์, วรางคณา แสงสร้อย, ปิตินันต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล

ได้เข้าร่วมและนำเสนอบทความเรื่อง

แนวโน้มการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิด
Shrinkage Cracking Tendency of Cement Paste with Binary and Ternary Binders

ในงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16

ระหว่างวันที่ 18 – 20 พฤษภาคม 2554 ณ โรงแรมเดอะชาयน์ พัทยา



จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชวีร์ ชิละวัฒน์)
ประธานคณะกรรมการดำเนินการจัดการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16

ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16

กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

- | | | |
|----|-----------------|--------------|
| 1. | ผศ.ดร.ภัทราภรณ์ | เมฆพฤษวงค์ |
| 2. | ดร.วศพร | เตชะพีรพานิช |

- | | | |
|----|-----------|---------|
| 3. | ดร.ยัจฉรา | ชุมวงศ์ |
|----|-----------|---------|

กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

- | | | |
|----|-------------|--------|
| 4. | ดร.เอกรัตน์ | อาชีวะ |
|----|-------------|--------|

กรมทางหลวงชนบท

- | | | |
|----|--------------|------------|
| 5. | ดร.แก่นวิทย์ | วงศ์ชูศิริ |
|----|--------------|------------|

การทางพิเศษแห่งประเทศไทย

- | | | |
|----|----------|--------------|
| 6. | ดร.สาโรช | บุญศิริพันธ์ |
|----|----------|--------------|

การประปานครหลวง

- | | | |
|----|------------|---------|
| 7. | นายดลเชษฐ์ | กล้าหาญ |
|----|------------|---------|

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- | | | |
|-----|-----------------|----------------|
| 8. | พ.อ.ดร.กนก | วีรวงศ์ |
| 9. | รศ.ดร.เกษม | ชูจารุกุล |
| 10. | ผศ.ดร.จรรยา | รุ่งอมรรัตน์ |
| 11. | ผศ.ดร.จิตติชัย | รจนกนกนาฏ |
| 12. | ผศ.ดร.ฉัตรพันธ์ | จินตนาภักดี |
| 13. | ศ.ดร.เฉลิมชนม์ | สฤระพจน์ |
| 14. | รศ.ดร.ฐิรวรร | บุญญะฐี |
| 15. | ผศ.ดร.ธเนศ | ศรีศิริโรจนการ |
| 16. | ผศ.ดร.นพดล | จอกแก้ว |
| 17. | อ.ดร.บุญชัย | แสงเพชรงาม |
| 18. | อ.ดร.เบญจพร | บุญขยอนันต์ |
| 19. | ผศ.ดร.พิสุทธิ | เพียรมนกุล |
| 20. | รศ.ดร.เพ็ชรพร | เขาวกิจเจริญ |
| 21. | ผศ.ดร.มานะ | โลหเดปานนท์ |

- | | | |
|-----|--------------------|---------------|
| 22. | ผศ.ดร.วัชร | เพียรสุภาพ |
| 23. | ผศ.ดร.พัฒนชัย | สมิทธาการ |
| 24. | รศ.วิชัย | เยี่ยงวีรชน |
| 25. | ผศ.ดร.วิทิศ | ปานสุข |
| 26. | รศ.ดร.วิศณุ | ทวีย์สมพล |
| 27. | รศ.ดร.วิสุทธิ | ช่อวิเชียร |
| 28. | ผศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์ | เฉลิมพงศ์ |
| 29. | รศ.ดร.สมพงษ์ | ศิริโสภณศิลป์ |
| 30. | ผศ.ดร.สรรเพชญ | ชื่อนิธิไพศาล |
| 31. | รศ.ดร.สุจิต | คุณธนกุลวงศ์ |
| 32. | รศ.ดร.สุธา | ขาวเขียว |
| 33. | ผศ.ดร.เสรี | จันทร์โยธา |
| 34. | อ.ดร.อัศวิน | เล่นวารี |

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

- | | | |
|-----|----------------|-----------------|
| 35. | อ.ดร.จิระกานต์ | ศิริวิชัยไมตรี |
| 36. | อ.ชูพันธุ์ | ชมภูจันทร์ |
| 37. | ดร.นันท์วัฒน์ | ชมหวาน |
| 38. | ผศ.นิมิตร | เจ็ดจันทร์พัฒนา |

- | | | |
|-----|----------------|--------------|
| 41. | รศ.ดร.วราวุธ | วุฒินิชย์ |
| 42. | อ.ดร.วิษณุวงศ์ | แต่สมบัติ |
| 43. | อ.ดร.สมชาย | ประยงค์พันธ์ |
| 44. | รศ.สันติ | ทองพ้านัก |



จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

39.	รศ.ดร.บัญชา	ขวัญยืน	45.	ผศ.ดร.เอกสิทธิ์	โฆสิตสกุลชัย
40.	อ.ดร.ปนัดดา	กลกิจวิวัฒน์			

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

46.	อ.ดร.ธวัชชัย	ตันชัยสวัสดิ์
-----	--------------	---------------

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

47.	รศ.ดร.ก่อโชค	จันทรวงกูร	67.	อ.ดร.วรพงศ์	ศรีโสพล
48.	รศ.ดร.กอบเกียรติ	ผ่องพูน	68.	อ.ดร.วรรณดี	ไทยสยาม
49.	ผศ.ดร.กิจพัฒน์	ภูววรรณ	69.	ผศ.ดร.วราเมศวร์	วิเชียรแสน
50.	อ.ดร.จิระวัฒน์	กณะสุด	70.	รศ.วัชรินทร์	วิทยกุล
51.	รศ.ดร.ชวเลข	วณิชเวทิน	71.	ผศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ
52.	รศ.ชัยวัฒน์	ชัยนการนาวิ	72.	อ.ว่าที่ร้อยตรีธวัช	สุขวิมลศรี
53.	รศ.ดร.ตระกูล	อร่ามรักษ์	73.	รศ.ดร.ศุภกิจ	นนทนันท์
54.	อ.ดร.ทรงพล	จารุวิศิษฐ์	74.	ผศ.ดร.ศุภวุฒิ	มาลัยกฤษณะชลี
55.	ผศ.ดร.ทรงวุฒิ	เฮงพระธานี	75.	ดร.สมปราชญ์	ฤทธิ์พริ้ง
56.	อ.ดร.ทวีศักดิ์	จิรณถาวร	76.	รศ.ดร.สมโพธิ์	วิวิธเกียรติก
57.	อ.ดร.ธีรพงศ์	จันทร์เพ็ญ	77.	อ.สมฤทัย	ทะสวดก
58.	ผศ.ดร.นฤมล	วงศ์ธนาสุนทร	78.	อ.สมศักดิ์	โชติชนาทวีวงศ์
59.	รศ.ดร.นุชนารถ	ศรีวงศ์ตานนท์	79.	รศ.ดร.สันติ	ชินานูวัตวงศ์
60.	อ.ดร.ภารเมศ	วรรณะภูติ	80.	อ.ดร.สีตางค์	พิลัยหล้า
61.	รศ.ดร.เบญจพล	เวทย์วิวัฒน์	81.	อ.ดร.สุชาติ	เหลืองประเสริฐ
62.	รศ.ประทีป	ดวงเดือน	82.	ผศ.ดร.สุนันต์	กุศลาคัย
63.	ผศ.ดร.ปิยะ	โชติโกกร	83.	รศ.ดร.สุวิมล	สัจจวาณิชย์
64.	ผศ.ดร.พงศ์ศักดิ์	หนูพันธ์	84.	อ.ดร.เหมือนมาศ	วิเชียรสินธุ์
65.	รศ.ภัชราภรณ์	สุวรรณวิทยา	85.	ผศ.ดร.อดิษฐ์	พรพรหมินทร์
66.	ผศ.ดร.รุ่งรัตน์	ภิลักขิต	86.	อ.ดร.อภินิติ	โชติลังกา

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

87.	ดร.สิริวงศ์	กลิ่นคำสอน	88.	อ.ดร.อำพน	จรัสรุ่งเกียรติ
-----	-------------	------------	-----	-----------	-----------------

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

89.	อ.ดร.พิชิต	จรัสบำรุงโรจน์	91.	อ.ดร.อดิเทพ	ศรีคงศรี
90.	อ.ดร.สุนิศา	สุภาพ			

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

92.	ผศ.ดร.ธเนศ	เสถียรนาม	97.	อ.ดร.วันชัย	สะตะ
93.	ศ.ดร.ปริญญา	จินดาประเสริฐ	98.	รศ.ดร.วันเพ็ญ	วิโรจน์ภูมิ
94.	ผศ.ดร.พงศ์กร	พรรณรัตนศิลป์	99.	ผศ.ดร.วิเชียร	ปลื้มกมล
95.	ผศ.ดร.พนกฤษณ	คลังบุญครอง	100.	รศ.วีระ	หอสกุลไท

96. รศ.พัชรีย์ หอวิจิตร

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

- | | | |
|------|---------------|----------------|
| 101. | ผศ.ดร.ชยานนท์ | หรรษภิญโญ |
| 102. | รศ.ดร.ชนพร | สุปรียศิลป์ |
| 103. | ผศ.รติ | เชี่ยวชาญวิทย์ |
| 104. | ผศ.ดร.บุญเทพ | นาเนกรังสรรค์ |
| 105. | ผศ.ดร.ประพนธ์ | เขมดำรง |
| 106. | อ.ดร.ปรีดา | พิชยาพันธ์ |
| 107. | ผศ.ดร.ปุ่น | เที่ยงบุรณธรรม |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

- | | | |
|------|----------------|-----------------|
| 115. | ผศ.ดร.จินต์ | อโณทัย |
| 116. | ผศ.ดร.เจริญชัย | โสมพัตราภรณ์ |
| 117. | รศ.ดร.เฉลิมราช | วันทวิน |
| 118. | ศ.ดร.ชัย | จาตุรพิทักษ์กุล |
| 119. | อ.ดร.ชัยณรงค์ | อธิสกุล |
| 120. | อ.ดร.ชัยวัฒน์ | เอกวัฒน์พานิชย์ |
| 121. | ผศ.ดร.ชูชัย | สุจิรกุล |
| 122. | ผศ.ดร.ทวิช | พลูเงิน |
| 123. | อ.ธงชัย | โพธิ์ทอง |
| 124. | ดร.ธรรมบุญ | เฮงษ์ภูกุล |
| 125. | อ.ดร.ธัญลักษณ์ | ราชบุรุษภักดี |
| 126. | ผศ.ดร.นิตยา | หวั่งวงศ์โรจน์ |
| 127. | อ.ดร.ประพัทธ์ | พงษ์เกียรติกุล |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

- | | | |
|------|------------------|----------------|
| 140. | รศ.ดร.กมลวัลย์ | ลือประเสริฐ |
| 141. | อ.ดร.กวิน | ตันติเสวี |
| 142. | รศ.ดร.กิตติชัย | ธนทรัพย์สิน |
| 143. | ผศ.ดร.เทอดศักดิ์ | รองวิริยะพานิช |
| 144. | ผศ.ดร.นรินทร์ | อนันต์ธนกุล |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

- | | | |
|------|------------|---------------|
| 150. | อ.ดร.มาโนช | สรรพกิจทิพากร |
|------|------------|---------------|

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- | | | |
|------|---------------|------------|
| 152. | ผศ.ดร.ฉัตรชัย | โชติษฐาญกร |
| 153. | อ.ดร.ธีรยุทธ | ลิมาพันธ์ |

- | | | |
|------|---------------|--------------|
| 108. | อ.ดร.พุทธิพล | ดำรงชัย |
| 109. | ผศ.ดร.ยงยุทธ | สุขวนาชัยกุล |
| 110. | อ.ดร.รังสรรค์ | อุดมศรี |
| 111. | รศ.ลำดวน | ศรีศักดิ์ |
| 112. | รศ.สมใจ | กาญจนวงศ์ |
| 113. | รศ.ดร.เสนีย์ | กาญจนวงศ์ |
| 114. | อ.อุดม | ฉัตรศิริกุล |

- | | | |
|------|-----------------|-----------------|
| 128. | ผศ.ดร.พรเกษม | จงประดิษฐ์ |
| 129. | อ.ดร.พิชญ์ | สุธีวรรณนา |
| 130. | อ.ดร.วรัช | ก้องกิจกุล |
| 131. | อ.ดร.วีระชาติ | ตั้งจิรภัทร |
| 132. | ผศ.ดร.สนิทา | วงษา |
| 133. | รศ.ดร.สมเกียรติ | รุ่งทองใบสุรีย์ |
| 134. | ศ.ดร.สมชาย | ฐิติพลกุล |
| 135. | ผศ.ดร.สมโพธิ | อยู่ไ |
| 136. | ผศ.ดร.สุทัศน์ | ลีลาทวีวัฒน์ |
| 137. | อ.ดร.อภินิติ | อัฐกุล |
| 138. | อ.ดร.อำพล | การุณสุนทวงษ์ |
| 139. | รศ.เอนก | ศิริพานิชกร |

- | | | |
|------|-----------------|-------------|
| 145. | รศ.ดร.ปิติ | สุคนธสุขกุล |
| 146. | อ.ดร.พรรณพิมพ์ | มะเปี่ยม |
| 147. | อ.ดร.ภาณุวัฒน์ | ปิ่นทอง |
| 148. | ผศ.ดร.วรรณวิทย์ | นัฒมทอง |
| 149. | อ.ดร.สุชัยญา | โปษะนันท์ |

- | | | |
|------|-------------|----------|
| 151. | ผศ.ดร.สัจจา | บุญยฉัตร |
|------|-------------|----------|

- | | | |
|------|-------------|------------|
| 158. | อ.ดร.ศิริตล | ศิริธร |
| 159. | ผศ.สนั่น | ตั้งสถิตย์ |



จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

154.	ผศ.ดร.ปรียาพร	โกษา
155.	ผศ.ดร.พรพจน์	ตันแสง
156.	อ.ดร.รัฐพล	กุ่มบุบผาพันธ์
157.	ผศ.ดร.วชรภูมิ	เบญจโอฬาร

160.	รศ.ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์
161.	รศ.ดร.สุขสันต์	หอพิบูลสุข
162.	ผศ.ดร.สุจิต	ครุจิต
163.	อ.ดร.อภิชน	วัชรินทร์วงศ์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

164.	อ.เกษมชาติ	ศรีวัลย์
165.	รศ.ดร.ชวลิต	ชาลีรักษ์ตระกูล
166.	ผศ.ดร.คณัย	วันทนาก
167.	รศ.ดร.บุรณิตร	ฉัตรวิระ

168.	อ.ดร.ภาวิณี	เอี่ยมตระกูล
169.	ผศ.ดร.ภูษิต	เลิศพัฒน์รักษ์
170.	รศ.ดร.วีรยา	ฉิมอ้อย
171.	อ.ดร.หาญพล	พึงรัมย์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

171.	อ.ดร.กำพล	ทรัพย์สมบูรณ์
172.	อ.ดร.ดุขฎิ	สถิตเศรษฐี
173.	ผศ.ดร.ทวีศักดิ์	แตะกระโทก
174.	ผศ.ดร.ปาริชาติ	ทองสนิท
175.	อ.ดร.รัฐภูมิ	ปรีชาตปรีชา

176.	รศ.วิชัย	ฤกษ์ภูริทัต
177.	อ.ดร.ศิริชัย	ตันรัตนวงศ์
178.	รศ.ดร.สมบัติ	ชื่นชุกกลิ่น
179.	ผศ.ดร.สสิกรณ์	เหลืองวิเศษเจริญ

มหาวิทยาลัยบูรพา

180.	ผศ.ดร.ทวีชัย	สำราญวานิช
181.	อ.ดร.ธรรมบุญ	รัตมีมาสเมือง
182.	อ.ดร.พัชรพงษ์	อาสนจินดา

183.	ผศ.ดร.สยาม	ยัมศิริ
184.	ผศ.ดร.สุเมศวร์	พิริยะวัฒน์

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

185.	อ.ดร.กฤษณ์	ชัยมูล
186.	อ.ชัยชาญ	โชติถนอม
187.	อ.ดร.นิตา	ชัยมูล
188.	ผศ.ดร.เพชร	เพ็งชัย

189.	ผศ.ดร.เรืองรุชดี	ชีระโรจน์
190.	อ.ดร.สทลภา	หอมวุฒิวงศ์
191.	อ.สุตารัตน์	คำปลิว
192.	ผศ.ดร.อนงค์ฤทธิ์	แข็งแรง

มหาวิทยาลัยมหิดล

193.	Asst.Prof.Dr. Ranjna	Jindal
194.	อ.ดร.กฤษณ์	สุรกีตย์
195.	ผศ.ดร.กวี	ไกรระวี
196.	อ.ดร.กาญจนา	นาคะภากร
197.	อ.ดร.จารุวรรณ	วงศ์ทะเนตร
198.	ผศ.ดร.ธวัชวีร์	ลีละวัฒน์
199.	ผศ.ดร.บันลือ	เอมะรุจิ
200.	ผศ.ดร.เบญจภรณ์	ประภักดี
201.	อ.ดร.ประวีณ	ชมปรีดา
202.	ผศ.ปิยะ	รัตนสุวรรณ

203.	อ.พนม	ชัยสิทธิ์
204.	อ.ดร.ยุทธนา	พันธุ์กมลศิลป์
205.	อ.ดร.ระวี	สุวรรณแดงไชโย
206.	ผศ.ดร.วรรณสิริ	พันธุ์อุไร
207.	ผศ.ดร.วเรศรา	วีระวัฒน์
208.	อ.ดร.วัจนันท์	มัตติทานนท์
209.	ผศ.สมพงษ์	ชื่นอ้อม
210.	ผศ.ดร.อัจฉรา	อัครจุฑิกลชัย
211.	ผศ.ดร.อารียา	ฤทธิมา
212.	รศ.อุษณีย์	อุยเสถียร

มหาวิทยาลัยรังสิต

213.	รศ.กิตติ	ลีวัจนกุล
214.	อ.ดร.เกียรติศักดิ์	สหศักดิ์มนตรี
215.	อ.ดร.ธรรมนุญ	สุสำภา
216.	ผศ.ดร.ธรรมศักดิ์	รุจิระยรรยง

มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

220.	ผศ.ดร.ชีวินทร์	ลิ้มศิริ
221.	อ.ดร.ประยงค์	กิริติอุไร

มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

223.	อ.ดร.นคร	กกแก้ว
------	----------	--------

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

225.	ผศ.ดร.ธนาถ	คงสมบูรณ์
226.	ผศ.สุคนธ์รัตน์	เพชรรัตน์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

228.	ผศ.ดร.ชัยศรี	สุสาโรจน์
229.	รศ.ดร.ธนิศ	เฉลิมยานนท์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

231.	อ.ดร.กรรณิกา	รัตนพงษ์เสนา
232.	ผศ.กฤษณ์	ศรีวัฒนา
233.	ผศ.ดร.กิตติศักดิ์	ขันตยวิชัย
234.	ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย
235.	อ.จักรกฤษณ์	อัมพูช
236.	อ.ดร.ณนตกิจ	ชาวีรัตน์
237.	ผศ.ดร.ทวีศักดิ์	วังไพศาล

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

244.	พ.ต.ดร.ณัฐพร	นุทยะสกุล
245.	พ.ท.ณัฐภูมิ	ศรีเพชร
246.	ร.ต.ดร.ต้องการ	แก้วเฉลิมทอง

สถาบันพัฒนาการชลประทาน

250.	อ.ดร.วิชัย	ศรีวงษา
------	------------	---------

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

251.	ผศ.ดร.มณฑุ	เพียรระนองชัย
------	------------	---------------

217.	ผศ.ดร.วินัย	อวยพรประเสริฐ
218.	รศ.วิสูตร	จิระคำเกิง
219.	ผศ.สมศักดิ์	เอื้ออัมมาลัย

222.	ผศ.ดร.อนุชิต	อุทัยชาติ
------	--------------	-----------

224.	อ.ดร.ปกรณ์	ดิษฐกิจ
------	------------	---------

227.	อ.อารีย์	หาญสืบสาย
------	----------	-----------

230.	รศ.สราวุธ	จิระงาม
------	-----------	---------

238.	ผศ.ดร.ธนากร	ทวีวุฒิ
239.	อ.ดร.วัลยา	วิริยเสนกุล
240.	ผศ.ดร.วิภาดา	สนองราษฎร์
241.	ผศ.ดร.วิวัฒน์	พัทธานนท์
242.	รศ.ดร.สถาพร	โกคา
243.	ผศ.ดร.สิทธา	เจนศิริศักดิ์

247.	พ.ท.ดร.ไท	ชาญกุล
248.	พ.ท.ดร.ปรีชา	อภิวัฒน์ตระกูล
249.	พ.อ.ดร.อนันต์	ปัจวิทย์

252.	ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเดิมศิริกุล
------	------------	-----------------



จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- | | | | | | |
|------|-------------------|----------|------|--------------|--------|
| 253. | อ.ดร.ประพัทธ์พงษ์ | อุปลา | 255. | รศ.สิริวัฒน์ | ไชยชนะ |
| 254. | ผศ.สมเกียรติ | ขวัญฤกษ์ | | | |

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

- | | | | | | |
|------|-------------|---------|------|-------------|-------------|
| 256. | รศ.ดร.พานิช | วุฒิพฤษ | 257. | ผศ.ดร.สมิตร | สงพิริยะกิจ |
|------|-------------|---------|------|-------------|-------------|

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

- | | | |
|------|-------------|----------|
| 258. | อ.ดร.ธราวุธ | ทิพย์เดช |
|------|-------------|----------|

สำนักงานโยธา กรุงเทพมหานคร

- | | | |
|------|------------|--------------|
| 259. | นายธวัชชัย | นภาศักดิ์ศรี |
|------|------------|--------------|

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.)

- | | | | | | |
|------|---------------|---------|------|-----------|----------|
| 260. | ผศ.ดร.ปริญญญา | ถนัดทาง | 261. | ดร.ชัชวาล | ลิ้มสกุล |
|------|---------------|---------|------|-----------|----------|

หน่วยงานภาคเอกชน / อื่น ๆ

- | | | | |
|------|---------------|----------------|--|
| 262. | Prof.Dr.CT. | Thomas | NJIT, USA |
| 263. | นายจรง | เจียมอนุกุลกิจ | บริษัท เดคโค เอ็นจิเนียริง แอนด์ คอนซัลแทนท์ จำกัด |
| 264. | ดร.สรวิชัย | องค์ประเสริฐ | บริษัท ทีมคอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียริง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด |
| 265. | ดร.สุจิต | จิตติรัตนกร | บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) |
| 266. | ดร.ธรรมบุญ | มโนสุทธิกิจ | บริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) |
| 267. | ดร.กิตตินันท์ | ศิริจรรยาชัย | |
| 268. | รศ.ดร.พิชัย | นิมิตรยงสกุล | |
| 269. | นายธณัย | ชรินทร์สาร | |
| 270. | ดร.สมเกียรติ | มณีสถิตย์ | |
| 271. | ดร.อิสรทัต | รัศมีทัต | |



จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

MAT0057	แนวโน้มการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิด	190
	Shrinkage Cracking Tendency of Cement Paste with Binary and Ternary Binders เรวัตร ภคพาณิชย์, วรางคณา แสงสร้อย, ปิติศานต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล	
MAT0060	ปริมาณที่เหมาะสมของการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดสำหรับกำลังอัดเทียบเท่าของคอนกรีตทั่วไป ด้วยอัลกอริทึม	191
	Optimum Usage of Ground Bottom Ashes for the Equivalent Compressive Strength of the Normal Concrete by the Hill Climbing Algorithm สถิตย์พงษ์ วงศ์สง่า, อัครนัย ทาภา, เรืองรุชต์ ชีระโรจน์, อลงกรณ์ ละม่อม	
MAT0061	การพัฒนาบล็อกปูพื้นเพื่อลดอุณหภูมิผิวพื้นภายนอกอาคาร	192
	Developing of Pave Blocks to Reduce Exterior Surface Temperature ประชุม คำพูน, กิตติพงษ์ สุวิโร	
MAT0062	ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกมวลเบาผสมเศษพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตท	193
	Product of Light Weight Concrete Block Mixed with Waste of Ethylene Vinyl Acetate Plastics ประชุม คำพูน, กิตติพงษ์ สุวิโร	
MAT0063	การศึกษาแผ่นฝ้าเพดานยิปซัมผสมเกล็ดเปลือกหอยเพื่อลดอุณหภูมิภายในอาคาร	194
	A Study of Gypsum Board Mixed with Rice Husk for Temperature Reducing in Building ประชุม คำพูน, กิตติพงษ์ สุวิโร	
MAT0064	การใช้เกล็ดเปลือกหอยเพื่อพัฒนาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกเสียดินขาวจากจังหวัดระนอง	195
	Using Rice Husk to Develop Unit Weight of White Clay Waste Concrete Blocks from Ranong Province ประชุม คำพูน, สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์, กิตติพงษ์ สุวิโร	
MAT0067	ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารที่พักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล	196
	The Risk of Carbonation Induced Corrosion of Residential RC buildings in Bangkok Metropolitan Area บัญญัติ วารินทร์ไธล, รักติพงษ์ สหมิตรมงคล, ปิติศานต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล	
MAT0069	ผลของเรซินและมวลรวมละเอียดต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต	197
	Influences of Resin and Fine Aggregate on Compression Behavior of Polyester Polymer Concrete นันทพร กาญจนพัฒนานวงศ์, สิทธิชัย แสงอาทิตย์	
MAT0070	การสึกกร่อนของปอซโซลานคอนกรีต	198
	Abrasion of Pozzolan Concrete นาวัน เกษุนทด, สหสภ หอมวุฒิมังค์	
MAT0074	Effects of Water to Binder Ratio and Slag Fineness on Properties of Slag Mortar	199
	Muhammad Ilyas, Prasert Suwanvitaya	
MAT0076	อิทธิพลของส่วนผสม วิธีการบ่มและระยะเวลาบ่ม ต่อความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ	200
	Effects Mixed Design, Curing Methods, and Curing Duration on Carbonation Depth in Cellular Lightweight Concrete under Natural Condition วิวัฒน์ พัทธนันท์, ธนกร ทวีวุฒิ, เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา	
MAT0079	คอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้ากลบเปลือกไม้เป็นวัสดุประสาน	201
	กษิตศ มานะพัฒนานุกุล, ไซยพันธ์ รตนโชตินันท์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล	



จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

แนวโน้มการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิด

Shrinkage Cracking Tendency of Cement Paste with Binary and Ternary Binders

เรวัตร ภคพานิชย์¹, วรางคณา แสงสร้อย², ปิตินันต์ กร้ามาตย์³, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล⁴

¹นักศึกษานิเทศศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (pkpre@hotmail.com)

²นักวิจัย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้ารัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (warangkana@silu.ac.th)

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (pitisan.k@en.rmutt.ac.th)

⁴ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้ารัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (sommuk@silu.ac.th)

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาแนวโน้มการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิด วัสดุประสาน 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์กับเถ้าลอย และ ปูนซีเมนต์กับผงปูนหิน และวัสดุประสาน 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ผสมกับเถ้าลอยและผงปูนหิน ตัวแปรที่ศึกษาประกอบไปด้วย ชนิดของเถ้าลอย (เถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง และ เถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ต่ำ) และชนิดของผงปูนหิน (ผงปูนหินชนิดละเอียด และ ผงปูนหินชนิดหยาบ) ซึ่งทำการทดสอบการหดตัวแบบยึดรั้งแกนเดียว (Uniaxially Restrained Shrinkage) เพื่อหาอายุของการแตกร้าว และความกว้างของรอยแตกร้าว และทำการทดสอบการหดตัวรวมทั้งหมด (Total Shrinkage) แบบไม่ถูกยึดรั้ง เพื่อศึกษาแนวโน้มและเปรียบเทียบผลของชนิดของวัสดุประสานต่อการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสานนั้นๆ จากผลการทดสอบของซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากวัสดุประสาน 2 ชนิด พบว่า เถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด ช่วยเพิ่มอายุของการเกิดรอยแตกร้าว ลดขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว และลดการหดตัวเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนผงปูนหินทั้ง 2 ชนิด ทำให้การหดตัวและขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวลดลง แต่รอยแตกร้าวเกิดเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน และสำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสาน 3 ชนิด ผลการทดสอบที่ได้ พบว่า ช่วยชะลอให้เกิดรอยแตกร้าวช้าลง รวมทั้งความกว้างของรอยแตกร้าว และการหดตัวลดลงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน ซึ่งซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย ช่วยชะลอการเกิดรอยแตกร้าวได้ดีที่สุด ส่วนซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสาน 3 ชนิดช่วยลดการหดตัวได้ดีกว่าชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสาน 3 ชนิดที่ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงกับผงปูนหินชนิดหยาบจะช่วยลดความกว้างของรอยแตกร้าวได้ดีที่สุด ทั้งนี้ผลการทดสอบที่ได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่กำหนด คือ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 ทำการแกะแบบที่อายุซีเมนต์เพสต์ 1 วันนับจากวันหล่อตัวอย่าง และทำการทดสอบภายในห้องควบคุมที่อุณหภูมิ $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $72 \pm 5\%$

ABSTRACT

This study is aimed at investigating cracking tendency due to shrinkage of binary and ternary binder pastes containing fly ash (FA) and limestone powder (LP). Two types of fly ash having low CaO and high CaO contents were used in this study. The effect of particle size of limestone powder on cracking tendency was studied by using two types of limestone powder having fine grain and coarse grain with average particle sizes of 5 and 13 micron, respectively. The control mixture included only Ordinary Portland Cement (OPC) while the binary mixtures were prepared by blending the OPC with FA, and OPC with LP. The ternary mixtures included OPC, FA and LP. Water to binder ratio of 0.35 was used. In this study, uniaxially restrained shrinkage test was performed to check cracking tendency of the pastes. Cracking age and crack width of pastes were measured. Moreover, unrestrained shrinkage test was performed to study effects of type of binders on total shrinkage of pastes. Test results revealed that cracking ages of binary binder OPC-FA pastes with any type of the tested fly ash were extended while crack width and total shrinkage were reduced when compared to that of OPC and OPC-LP pastes. The cracking age of OPC-LP pastes was shorter than that of the OPC and OPC-LP pastes, however crack width and total shrinkage of the OPC-LP pastes were smaller. The ternary binder pastes could extend cracking age and reduce crack width and total shrinkage when compared to that of the OPC paste. Fly ash pastes (OPC-FA) seems to have longest cracking ages while ternary binder pastes give lowest total shrinkage and smallest crack width especially the ternary binder pastes with high CaO fly ash and coarse grain limestone powder.

Keywords: Uniaxially Restrained Shrinkage, Binary Binder, Ternary Binder, Fly Ash, Limestone Powder

* Corresponding author

แนวโน้มการเกิดรอยแตกกว้างเนื่องจากการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุ ประสานสองชนิดและสามชนิด

Shrinkage Cracking Tendency of Cement Paste with Binary and Ternary Binders

เรวัตร กคพาณิชัย¹, วรางคณา แสงสร้อย², ปิติสานต์ กร้ามาตร³, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล⁴

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี pkpre@hotmail.com

² นักวิจัย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ warangkana@siit.tu.ac.th

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี pitisan.k@en.rmutt.ac.th

⁴ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ sommuk@siit.tu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาแนวโน้มการเกิดรอยแตกกว้างเนื่องจากการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิด วัสดุประสาน 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์กับเถ้าลอย และ ปูนซีเมนต์กับผงฝุ่นหิน และวัสดุประสาน 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ผสมกับเถ้าลอยและผงฝุ่นหิน ตัวแปรที่ศึกษาประกอบไปด้วย ชนิดของเถ้าลอย (เถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง และ เถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ต่ำ) และชนิดของผงฝุ่นหิน (ผงฝุ่นหินชนิดละเอียด และ ผงฝุ่นหินชนิดหยาบ) ซึ่งทำการทดสอบการหดตัวแบบยึดรั้งแกนเดียว (Uniaxially Restrained Shrinkage) เพื่อหาอายุของการแตกร้าว และความกว้างของรอยแตกร้าว และทำการทดสอบการหดตัวรวมทั้งหมด (Total Shrinkage) แบบไม่ถูกยึดรั้ง เพื่อศึกษาแนวโน้มและเปรียบเทียบผลของชนิดของวัสดุประสานต่อการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสานนั้นๆ จากผลการทดสอบของซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากวัสดุประสาน 2 ชนิด พบว่า เถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด ช่วยเพิ่มอายุของการเกิดรอยแตกร้าว, ลดขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว และลดการหดตัวเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนผงฝุ่นหินทั้ง 2 ชนิด ทำให้การหดตัวและขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวลดลง แต่รอยแตกร้าวเกิดเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน และสำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสาน 3 ชนิด ผลการทดสอบที่ได้ พบว่า ช่วยชะลอให้เกิดรอยแตกร้าวช้าลง รวมทั้งความกว้างของรอยแตกร้าว และการหดตัวลดลงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน ซึ่งซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย ช่วยชะลอการเกิดรอยแตกร้าวได้ดีที่สุด ส่วนซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสาน 3 ชนิดช่วยลดการหดตัวได้

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดีกว่าชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสาน 3 ชนิดที่ผสมเกลี่ยที่มีปริมาณ CaO สูง กับผงฝุ่นหินชนิดหยาบจะช่วยลดความกว้างของรอยแตกกว้างได้ดีที่สุด ทั้งนี้ผลการทดสอบที่ได้อยู่ ภายใต้เฉพาะเงื่อนไขที่กำหนด คือ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 ทำการแกะแบบที่ อายุซีเมนต์เพสต์ 1 วันนับจากวันหล่อตัวอย่าง และทำการทดสอบภายในห้องควบคุมที่อุณหภูมิ $21\pm 2^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $72\pm 5\%$

ABSTRACT

This study is aimed at investigating cracking tendency due to shrinkage of binary and ternary binder pastes containing fly ash (FA) and limestone powder (LP). Two types of fly ash having low CaO and high CaO contents were used in this study. The effect of particle size of limestone powder on cracking tendency was studied by using two types of limestone powder having fine grain and coarse grain with average particle sizes of 5 and 13 micron, respectively. The control mixture included only Ordinary Portland Cement (OPC) while the binary mixtures were prepared by blending the OPC with FA, and OPC with LP. The ternary mixtures included OPC, FA and LP. Water to binder ratio of 0.35 was used. In this study, uniaxially restrained shrinkage test was performed to check cracking tendency of the pastes. Cracking age and crack width of pastes were measured. Moreover, unrestrained shrinkage test was performed to study effects of type of binders on total shrinkage of pastes. Test results revealed that cracking ages of binary binder OPC-FA pastes with any type of the tested fly ash were extended while crack width and total shrinkage were reduced when compared to that of OPC and OPC-LP pastes. The cracking age of OPC-LP pastes was shorter than that of the OPC and OPC-LP pastes, however crack width and total shrinkage of the OPC-LP pastes were smaller. The ternary binder pastes could extend cracking age and reduce crack width and total shrinkage when compared to that of the OPC paste. Fly ash pastes (OPC-FA) seems to have longest cracking ages while ternary binder pastes give lowest total shrinkage and smallest crack width especially the ternary binder pastes with high CaO fly ash and coarse grain limestone powder.

คำสำคัญ: Uniaxially Restrained Shrinkage; Binary binder; Ternary binder; Fly ash; Limestone powder

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตได้ให้ความสำคัญกับความคงทนของคอนกรีตมากขึ้น เพราะมีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต (Dhir et al, 2007) ซึ่งปัญหาของการเกิดรอยแตกกว้างของโครงสร้างคอนกรีต นับได้ว่าเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญต่อความคงทนของคอนกรีต คือ

ส่งผลให้สารต่างๆ จากสิ่งแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อโครงสร้าง สามารถเข้ามาทำความเสียหายให้กับภายในของโครงสร้างคอนกรีตได้ เช่น การเกิดสนิมในเหล็กเนื่องจากคลอไรด์, การกัดกร่อนจากซัลเฟต, การกัดกร่อนจากกรด, การตกผลึกของเกลือ และการเกิดคาร์บอนเนชั่น เป็นต้น โดยปกติแล้ว การเกิดการหดตัวของคอนกรีตเพียงอย่างเดียว นั้น ไม่สามารถทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งคอนกรีตที่เกิดการหดตัวแบบอิสระจะไม่มีแรงดึงเกิดขึ้น จึงไม่มีการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว แต่ในสภาพการใช้งานจริง โครงสร้างคอนกรีตมักจะถูกยึดรั้ง เช่น กำแพงคอนกรีตที่อยู่ระหว่างเสา หรือ พื้นคอนกรีตที่อยู่ระหว่างคานขนาดใหญ่ เป็นต้น ซึ่งหนึ่งในวิธีการป้องกันหรือลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้ คือ การออกแบบให้คอนกรีตมีการหดตัวต่ำ สามารถทำได้โดยการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยทั้งนี้ในปัจจุบันได้มีการนำเอาวัสดุประสานชนิดต่างๆ เช่น เถ้าลอย และผงฟู่นหิน มาใช้ในงานคอนกรีตมากขึ้น โดยการใส่แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งการนำวัสดุประสานชนิดต่างๆ ดังกล่าวนี้นี้มาใช้มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากวัสดุประสานเหล่านี้จัดได้ว่าเป็นผลพลอยได้หรือของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ การนำมาใช้นอกจากจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตแล้วยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนของวัสดุผสมและช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ได้มีการนำวัสดุประสานชนิดต่างๆ เหล่านี้ไปใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติการแตกร้าวของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ที่ผสมวัสดุประสานเหล่านี้ยังมีเพียงเล็กน้อย ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาลดของวัสดุประสานเพียง 2 ชนิด ที่มีแต่ เถ้าลอย หรือผงฟู่นหิน ผสมกับปูนซีเมนต์ แต่ยังไม่มีการศึกษาผลของวัสดุประสาน 3 ชนิด คือปูนซีเมนต์ผสมร่วมกับเถ้าลอยและผงฟู่นหิน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติของวัสดุประสานที่มีผลต่อการแตกร้าวของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ที่ผสมวัสดุประสาน 2 ชนิด และ 3 ชนิด

2. วัสดุและสัดส่วนผสม

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC), เถ้าลอย 2 ชนิด คือ เถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง (FA(C)) กับ เถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ต่ำ (FA(F)) โดยเถ้าลอย FA(C) จะมีปริมาณ CaO และ SO_3 สูง แต่ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) น้อยกว่าเมื่อเทียบกับเถ้าลอย FA(F) และอนุภาคของเถ้าลอย FA(C) จะมีรูปร่างเป็นทรงกลม แต่ในเถ้าลอย FA(F) อนุภาคจะมีรูปร่างทั้งที่เป็นทรงกลมและไม่กลม และศึกษาขนาดอนุภาคของผงฟู่นหินที่มีต่อการหดตัว, อายุของการเกิดรอยแตกร้าว และความกว้างของรอยแตกร้าว โดยใช้ผงฟู่นหิน 2 ชนิด คือ ผงฟู่นหินชนิดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5 ไมครอน (LP(5)) กับ ผงฟู่นหินชนิดหยาบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 13 ไมครอน (LP(13))

2.2 สัดส่วนผสม

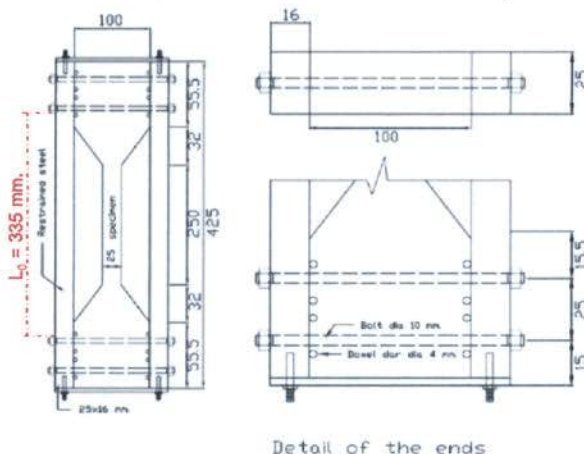
การศึกษานี้ใช้สัดส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ทั้งหมด 13 สัดส่วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 สำหรับการทดสอบการหดตัวรวมทั้งหมด (Total Shrinkage) แบบไม่ถูกยึดรั้ง และการทดสอบ

การหดตัวแบบยึดรั้งแกนเดียว (Uniaxially Restrained Shrinkage) ในส่วนของวัสดุประสานจะใช้ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และสำหรับวัสดุประสานรวม 2 ชนิด ใช้แต่ละอย่างทั้ง 2 ชนิด แทนที่ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 ในขณะที่ผงฝุ่นหินทั้ง 2 ชนิด แทนที่ร้อยละ 10 และ 20 สำหรับวัสดุประสานรวม 3 ชนิด มีการแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยแต่ละอย่างในอัตราส่วนร้อยละ 20 ร่วมกับผงฝุ่นหินร้อยละ 10 โดยใช้สัดส่วนเดียวกันในแต่ละอย่าง และผงฝุ่นหินทั้ง 2 ชนิด

3. การทดสอบ

3.1 การทดสอบการหดตัวแบบยึดรั้งแกนเดียว (Uniaxially Restrained Shrinkage)

การทำการทดสอบการหดตัวแบบยึดรั้งแกนเดียว (Uniaxially Restrained Shrinkage Test) เพื่อศึกษา แนวโน้มของการแตกร้าวจากการหดตัว (Tongaroonsri et al, 2009) ซึ่งปลายทั้งสองด้านของตัวอย่าง ทดสอบซีเมนต์เพสต์จะถูกยึดกับโครงเหล็ก ด้วยนอตและแกนเหล็ก รายละเอียดของแบบที่ใช้ทดสอบ การหดตัวแบบยึดรั้งแกนเดียวจากภายนอก ได้แสดงไว้ตามภาพที่ 1 โดยโครงเหล็กจะมีกรอบเหล็กทำมาจาก เหล็กตัน พื้นที่หน้าตัดรวมของกรอบเหล็กเท่ากับ 400 ตร.มม. หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบซีเมนต์ เพสต์เท่ากับ 25 มม. x 25 มม. กึ่งกลางความยาวเท่ากับ 250 มม. และแคบกว่าปลายทั้งสองด้านเพื่อ บังคับให้เกิดรอยร้าวที่กึ่งกลางคาน หลังจากการหล่อแล้ว ห่อพื้นผิวด้านบนของตัวอย่างทดสอบด้วย แผ่นพลาสติกทันทีเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น และแผ่นโฟมที่ขนาดขึ้นทดสอบทั้งสองข้างจะถูก แกะออกจากแม่พิมพ์หลังการหล่อ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการหดตัวโดย ตัวอย่างทดสอบจะวางอยู่ สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิคงที่ $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $72 \pm 5\%$ ระบบการเก็บข้อมูลสำหรับ ตัวอย่างทดสอบซีเมนต์เพสต์ แสดงตามภาพที่ 2 หลังการแกะแบบ 2 ชั่วโมง นำดินสอคาร์บอน 6B ลากเส้นตามแนวกึ่งกลางเพื่อเชื่อมปลายของแต่ละเส้นกับวงจรแรงดันกระแสไฟฟ้าและเครื่องบันทึก ข้อมูล (Data Logger) ค่าแรงดันของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นคาร์บอนจะถูกตรวจวัดและบันทึกด้วย คอมพิวเตอร์ทุกๆ 10 นาที ระหว่างการเก็บข้อมูลหากค่าแรงดันของกระแสไฟฟ้าตกลง แสดงว่าเกิด



ภาพที่ 1 แบบหล่อสำหรับการทดสอบการหดตัวแบบยึดรั้งแกนเดียว



ภาพที่ 2 ตัวอย่างทดสอบที่ต่อเข้ากับระบบเก็บข้อมูลโดยใช้เส้นดินสอคาร์บอน 6B เป็นตัวเชื่อมวงจรแรงดันกระแสไฟฟ้า

การแตกร้าวขึ้นแล้ว เพราะว่ารอยร้าวจะเป็นตัวตึงตัวจริง โดยช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มการผสมส่วนผสมจนกระทั่งเกิดการแตกร้าวนั้นคืออายุการเกิดรอยแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบหลังจากตัวอย่างทดสอบเกิดรอยแตกร้าวแล้วนั้น จึงเริ่มการวัดและบันทึกค่าความกว้างของรอยแตกร้าวด้วยกล้องไมโครสโคป ซึ่งความกว้างของรอยแตกร้าวสามารถวัดค่าโดยใช้โปรแกรมการวัดสำหรับกล้องไมโครสโคป และทำการวัดความกว้างที่เปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 1 วัน ในช่วงสัปดาห์แรกหลังจากเกิดการแตกร้าว

3.2 การทดสอบการหดตัวรวมทั้งหมด (Total Shrinkage)

การทดสอบการหดตัวแบบไม่ยึดรั้งนั้นปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C157 ซึ่งเป็นมาตรฐานของการทดสอบสำหรับการเปลี่ยนแปลงความยาวของซีเมนต์เพสต์ และแท่งทดสอบมีรูปร่างเป็นปริซึมที่มีขนาด 25 x 25 x 285 มม. ได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบการหดตัวอิสระ (Free Shrinkage) ซีเมนต์เพสต์จะถูกแบ่งเป็น 2 ชั้น และถูกทำให้แน่นด้วยการกระทุ้ง หลังจากนั้นนำพลาสติกมาคลุมชั้นงานทันทีที่หล่อเสร็จเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น วางแท่งทดสอบในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิคงที่ 21 ± 2 °C ตลอดการทดลอง การทดสอบในแต่ละส่วนผสมจะใช้ตัวอย่างทดสอบ 4 แท่งเพื่อหาค่าความเครียดเฉลี่ย ตัวอย่างทดสอบถูกแกะออกจากแบบ 24 ชั่วโมงหลังการหล่อ การวัดความยาวนั้นทำโดยใช้เครื่องวัดความยาว (Length comparator) ทำการวัดความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 1 วัน ในช่วง 2 สัปดาห์แรกหลังจากแกะแบบ หลังจากนั้นความถี่ของการวัดค่าจะลดลงตามลำดับในขณะที่อัตราการหดตัวเริ่มคงที่ การวัดการหดตัวรวมทั้งหมดจะทำการบันทึกค่าความยาวและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับทุกตัวอย่างทดสอบ

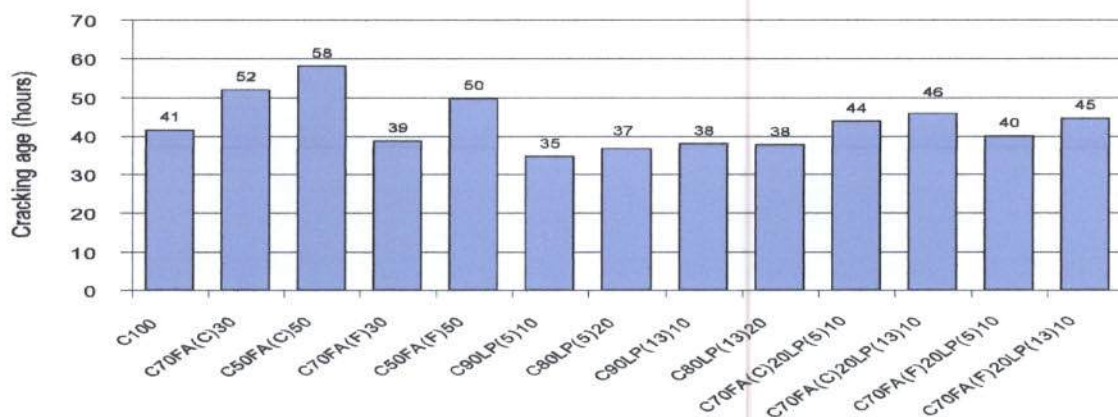
4. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

4.1 การทดสอบการหดตัวแบบยึดรั้งแกนเดียว

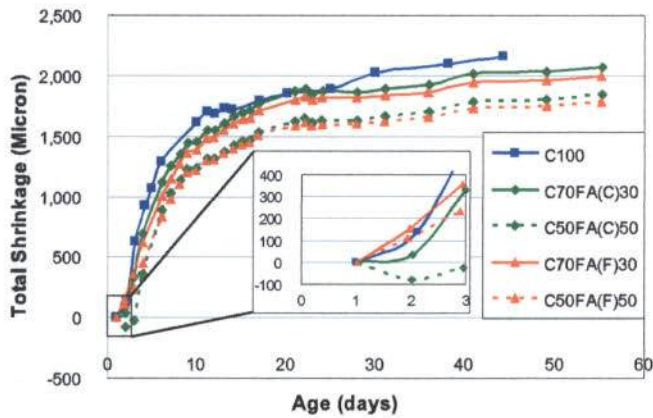
4.1.1 อายุของการเกิดรอยแตกร้าว (Cracking Age)

อายุของการเกิดรอยแตกร้าวของแต่ละสัดส่วนผสม แสดงในภาพที่ 3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้คือ ผลการทดสอบของซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากวัสดุประสาน 2 ชนิด พบว่า เถ้าลอย FA(C) ช่วยเพิ่มอายุของการเกิดรอยแตกร้าวได้ดีกว่าเถ้าลอย FA(F) และเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนของเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มช่วยเพิ่มอายุของการแตกร้าวได้ดียิ่งขึ้น ในส่วนของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมผงปูนหินนั้น พบว่า ผงปูนหินทั้งชนิดละเอียด LP(5) และชนิดหยาบ LP(13) ทำให้เกิดการแตกร้าวเร็วขึ้น เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน และในส่วนของซีเมนต์เพสต์ที่ทำมาจากวัสดุประสาน 3 ชนิดนั้น จะช่วยชะลอการเกิดรอยแตกร้าวได้ดี เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน โดยเฉพาะวัสดุประสาน 3 ชนิดที่มีผงปูนหินชนิดหยาบ LP(13) ผสมอยู่จะมีแนวโน้มในการช่วยชะลอการเกิดรอยแตกร้าวได้ดีกว่าวัสดุประสาน 3 ชนิดที่มีผงปูนหินชนิดละเอียด LP(5) เป็นส่วนประกอบ จากผลการทดสอบพบว่าอายุของการเกิดรอยแตกร้าวจะมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับการหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงอายุเริ่มต้น (Early Age) โดยถ้าซีเมนต์เพสต์ที่มีการหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงอายุเริ่มต้นน้อย การเกิดรอยแตกร้าวก็จะเกิดได้ยากขึ้น ทั้งนี้ในการทดลองได้ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 และเวลาที่เริ่มเกิดการแตกร้าวอยู่ในช่วงก่อน 3 วัน ดังนั้นผลของอายุของการเกิดรอยแตกร้าวจึงมีสาเหตุหลักมาจากการหดตัวแบบ

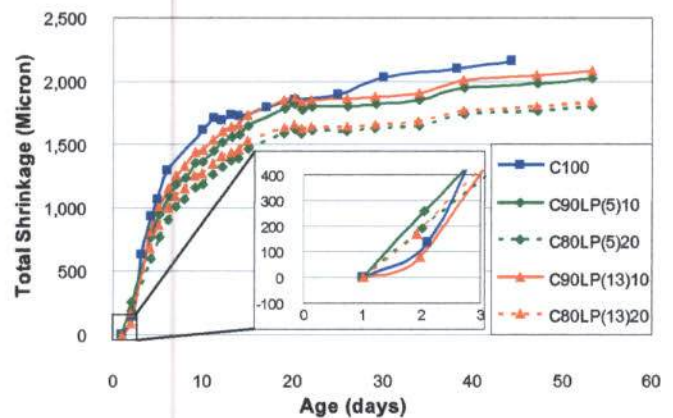
ออโตจีเนียส ซีเมนต์เพสต์ที่มีการหดตัวแบบออโตจีเนียสสูง ก็จะมีแนวโน้มทำให้การหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงดังกล่าวสูงขึ้นตามไปด้วย และส่งผลต่อการเกิดรอยแตกกว้างในช่วงอายุเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ และจากผลการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีเนียสในซีเมนต์เพสต์แต่ละส่วนผสมของ Saengsoy et al. (2010) พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการหดตัวรวมทั้งหมดที่ได้ทดสอบในครั้งนี้ ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าแต่ละส่วนผสม 2 ชนิด มีการหดตัวรวมทั้งหมดน้อยกว่าปูนซีเมนต์ล้วน โดยเฉพาะแต่ละส่วนผสม FA(C) จะมีการหดตัวน้อยกว่าแต่ละส่วนผสม FA(F) ทั้งนี้เนื่องจากแต่ละส่วนผสม FA(C) มีปริมาณ SO_3 ที่สูงกว่า ทำให้เกิดการขยายตัวได้ดีกว่า รวมทั้งรูปร่างอนุภาคทรงกลมของแต่ละส่วนผสม FA(C) ยังช่วยลดการเก็บกักน้ำ ทำให้มีปริมาณน้ำอิสระ (Free water) สูงขึ้น จึงเป็นผลทำให้การหดตัวแบบออโตจีเนียสลดลงและส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมแต่ละส่วนผสม FA(C) มีการหดตัวรวมทั้งหมดน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมแต่ละส่วนผสม FA(F) ดังแสดงในภาพที่ 4 ส่วนในกรณีของผงฝุ่นหินทั้ง 2 ชนิด พบว่าการหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงอายุดังกล่าว จะมากกว่าปูนซีเมนต์ล้วน ดังแสดงในภาพที่ 5 ส่วนในกรณีของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสาน 3 ชนิด จะมีการหดตัวรวมทั้งหมดที่อายุดังกล่าวน้อยกว่าปูนซีเมนต์ล้วน ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยสาเหตุของความแตกต่างของการหดตัวรวมทั้งหมดมาจากการประกอบของส่วนผสม ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และจากประเภทของผงฝุ่นหิน กล่าวคือ เนื่องจากผงฝุ่นหินเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ดังนั้นผงฝุ่นหินชนิดละเอียด LP(5) ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าผงฝุ่นหินชนิดหยาบ LP(13) จึงเข้าไปอุดช่องว่างและกระจายอนุภาคของปูนซีเมนต์ได้ดีกว่า ทำให้เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่งผลให้ไปเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้การหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงอายุดังกล่าวของผงฝุ่นหินชนิดละเอียด LP(5) สูงกว่าผงฝุ่นหินชนิดหยาบ LP(13) ดังนั้นผงฝุ่นหินชนิดหยาบ LP(13) จะช่วยเพิ่มอายุของการเกิดรอยแตกกว้างได้ดีกว่าผงฝุ่นหินชนิดละเอียด LP(5) และเมื่อทำการเปรียบเทียบประเภทวัสดุประสาน 2 ชนิด และ 3 ชนิด ปรากฏว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมกับแต่ละส่วนผสม สามารถเพิ่มอายุของการแตกกว้างได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุประสาน 3 ชนิด และ ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมผงฝุ่นหิน ตามลำดับ เนื่องจากซีเมนต์เพสต์ที่ผสมแต่ละส่วนผสม มีการหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงอายุดังกล่าวน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 7 อย่างไรก็ตามอายุของการเกิดรอยแตกกว้างไม่ใช่เพียงปัจจัยเดียวที่ใช้ในการตัดสินว่าวัสดุนั้นดีหรือไม่ดีต่อการแตกกว้าง จำเป็นต้องพิจารณาความกว้างของรอยแตกกว้างในระยะยาวด้วย



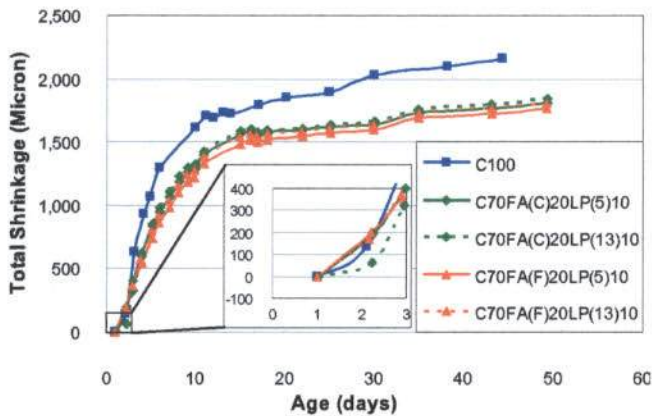
ภาพที่ 3 อายุของการเกิดรอยแตกกว้าง (Cracking Age) ของซีเมนต์เพสต์ในแต่ละสัดส่วนผสม



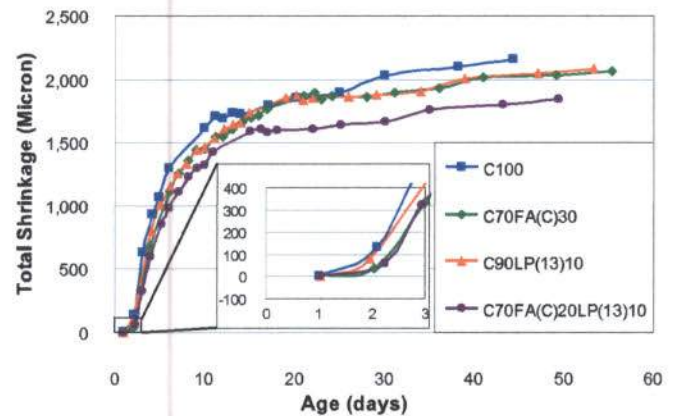
ภาพที่ 4 การหดตัวรวมทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยแต่ละสัดส่วนผสมและแต่ละประเภท



ภาพที่ 5 การหดตัวรวมทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมผงปูนหินแต่ละสัดส่วนผสมและแต่ละประเภท



ภาพที่ 6 การหดตัวรวมทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยและผงปูนหิน แต่ละสัดส่วนผสมและแต่ละประเภท

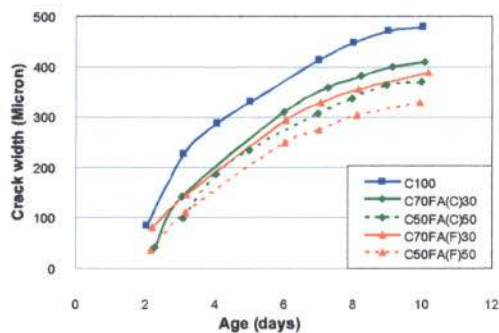


ภาพที่ 7 การหดตัวรวมทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสาน 2 ชนิด และ 3 ชนิด

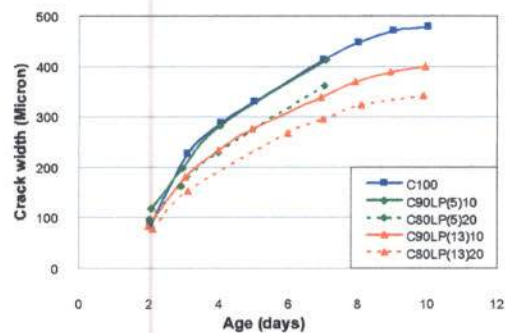
4.1.2 ความกว้างของรอยแตกร้าว (Crack width)

จากผลการวัดความกว้างของรอยแตกร้าวด้วยกล้องไมโครสโคป ในช่วงอายุ 10 วันแรกนับจากวันผสมตัวอย่างทดสอบ พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงระยะยาว (Long-Term) โดยผลการทดสอบของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยมีความกว้างของรอยแตกร้าวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ล้วน แสดงดังภาพที่ 8 โดยเถ้าลอยจะไปหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ช้าลง ทำให้การหดตัวแบบบอโดจีเนียสและการหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงอายุ 10 วันลดลง ส่วนผงปูนหิน ช่วยลดความกว้างของรอยแตกร้าวให้มีขนาดเล็กลง แสดงดังภาพที่ 9 โดยผงปูนหินซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อยสามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างทำให้การหดตัวในช่วงดังกล่าวลดลง และส่วนซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุประสาน 3 ชนิด ก็ช่วยลดความกว้างของรอยแตกรอยให้ลดลง แสดงดังภาพที่ 10 โดยมีสาเหตุดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนภาพที่ 11 เป็นการเปรียบเทียบซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสาน 2 ชนิด และ

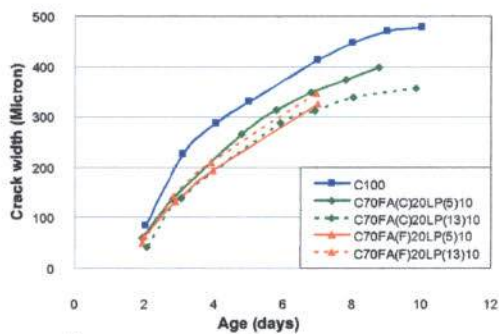
3 ชนิด พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสาน 3 ชนิดช่วยลดความกว้างรอยแตกได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยและซีเมนต์เพสต์ที่ผสมผงฝุ่นหินตามลำดับ เนื่องจากการหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงตั้งตัวของวัสดุประสาน 3 ชนิดมีค่าน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของรอยแตกกับอายุของการเกิดรอยแตก ก็จะพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย กับที่ผสมวัสดุประสาน 3 ชนิดมีความกว้างของรอยแตกในชั่วยุ 10 วันเล็กลง อายุของการเกิดรอยแตกเพิ่มขึ้นและการหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงอายุ 50 วันลดลง ซึ่งในส่วนของผงฝุ่นหินนั้น การเกิดรอยแตกเร็วขึ้น แต่ความกว้างของรอยแตกในชั่วยุ 10 วันและการหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงอายุ 50 วันต่ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วนั้น ความกว้างของรอยแตกของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสาน 2 ชนิด และ 3 ชนิด จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงระยะยาว



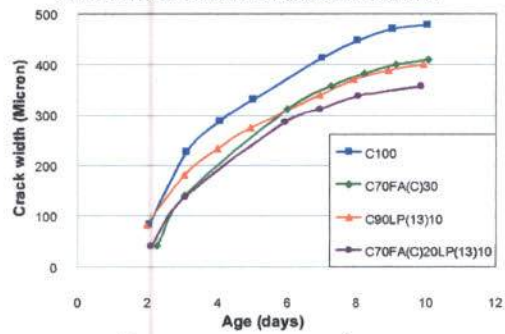
ภาพที่ 8 ความกว้างรอยแตกของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยแต่ละสัดส่วนผสมและแต่ละประเภท



ภาพที่ 9 ความกว้างของรอยแตกของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมผงฝุ่นหินแต่ละสัดส่วนผสมและแต่ละประเภท



ภาพที่ 10 ความกว้างของรอยแตกของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยและผงฝุ่นหินแต่ละสัดส่วนผสมและแต่ละประเภท



ภาพที่ 11 การหดตัวรวมทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสาน 2 ชนิด และ 3 ชนิด

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของรอยแตกกับการหดตัว

จากผลการทดสอบระหว่างการหดตัวแบบยืดหยุ่นเดียวกับการหดตัวแบบอิสระ พบว่าการพัฒนาความกว้างของรอยแตก (Crack Width Development, ΔCW) ที่วัดด้วยกล้องไมโครสโคป มีความสัมพันธ์กับความเครียดที่เปลี่ยนไป (Strain Change, $\Delta \epsilon$) เนื่องจากการหดตัวรวมทั้งหมดหลังจากการเกิดรอยแตก โดยความกว้างของรอยแตกจะเพิ่มมากขึ้นตามอายุของซีเมนต์เพสต์

ทั้งนี้เนื่องจากซีเมนต์เพสต์ที่เกิดรอยแตกแล้วนั้น จะเกิดการหดตัวแบบอิสระโดยไม่มีการถูกยึดรั้งจากแบบโครงสร้างหลัก ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้เป็นแบบเชิงเส้น แสดงดังภาพที่ 12 โดยค่าความเครียดที่เปลี่ยนไป สามารถหาได้จากสมการที่ 1 และจากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาแล้วนั้น ซึ่งถ้าไม่พิจารณาผลของการคืบ(Creep) และความเครียดแบบพลาสติก (Plastic Strain) สามารถทำให้หาความกว้างของรอยแตกที่ ณ เวลาใดๆ ได้จากความเครียดที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการหดตัวรวมทั้งหมด ดังสมการที่ 2 และ 3

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon(t) - \varepsilon_{FC} \quad (1)$$

$$CW(t) = CW_{FC} + \Delta CW \quad (2)$$

$$\Delta CW = \Delta \varepsilon \times L_0 \quad (3)$$

เมื่อ $\Delta \varepsilon$ = ความเครียดที่เปลี่ยนไปจากการหดตัวรวมทั้งหมดหลังจากเกิดรอยแตกแล้ว ณ เวลาใดๆ

$\varepsilon(t)$ = ความเครียดจากการหดตัวรวมทั้งหมดหลังจากเกิดรอยแตกแล้ว ณ เวลาใดๆ

ε_{FC} = ความเครียดจากการหดตัว ณ เวลาที่วัดความกว้างของรอยแตกครั้งแรก

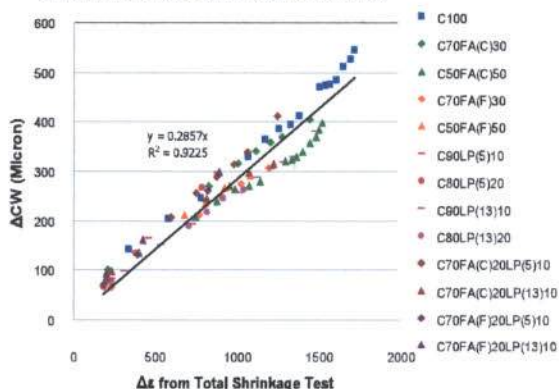
$CW(t)$ = ความกว้างของรอยแตกแล้ว ณ เวลาใดๆ (μm)

CW_{FC} = ความกว้างของรอยแตกแล้วที่วัดได้ครั้งแรก (μm)

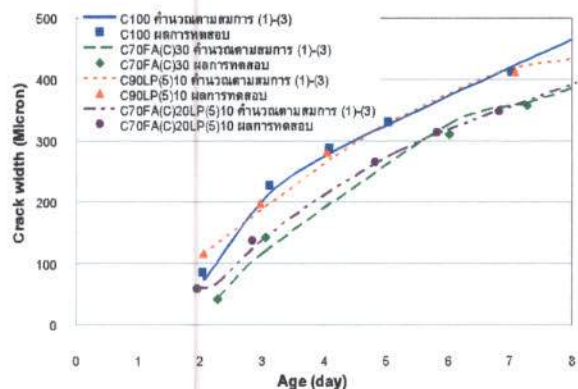
ΔCW = ความกว้างของรอยแตกแล้วที่เปลี่ยนแปลงไป (μm)

L_0 = ความยาวของตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบยึดรั้ง ดังแสดงในภาพที่ 1 (μm)

ภาพที่ 13 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างความกว้างรอยแตกแล้วที่วัดด้วยกล้องไมโครสโคปกับความกว้างของรอยแตกแล้วที่คำนวณตามสมการที่ (1) ถึง (3) โดยจะเห็นได้ว่าความกว้างของรอยแตกแล้วที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับความกว้างของรอยแตกแล้วที่วัดได้จริง ซึ่งค่าความกว้างที่คำนวณได้ในที่นี้ยังไม่ได้พิจารณาผลที่เกิดจากการคืบ และความเครียดแบบพลาสติก จึงมีส่วนทำให้ค่าความกว้างของรอยแตกแล้วที่คำนวณได้คลาดเคลื่อนไปบ้างเล็กน้อย และจากการคำนวณข้างต้นทำให้สามารถประมาณค่าความกว้างของรอยแตกแล้วที่มากที่สุดได้เมื่อการหดตัวรวมทั้งหมดเริ่มคงที่ ซึ่งความกว้างของรอยแตกแล้วที่มากที่สุดใช้เป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการพิจารณาว่าวัสดุใดมีคุณสมบัติในการต้านทานการแตกแล้วได้ดีกว่ากัน



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบความกว้างรอยแตกแล้วกับความเครียดที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการหดตัวรวมทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์แต่ละส่วนผสม



ภาพที่ 13 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการคำนวณของความกว้างรอยแตกแล้ว

5. สรุปผล

จากผลการศึกษาแนวโน้มการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิด ในเงื่อนไขของการทดสอบครั้งนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) แก้วลอยสามารถช่วยเพิ่มอายุของการเกิดรอยแตกร้าว, ลดขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวในช่วงอายุ 10 วัน และลดการหดตัวรวมทั้งหมดเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน รวมทั้งเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนแก้วลอยให้สูงขึ้นแนวโน้มของการเกิดรอยแตกร้าวก็จะเกิดช้าขึ้น ซึ่งแก้วลอย FA(C) ที่มีปริมาณ CaO สูง จะมีประสิทธิภาพดีกว่าแก้วลอย FA(F)
- 2) ผงฝุ่นหินทั้งชนิดละเอียด LP(5) และชนิดหยาบ LP(13) ช่วยลดความกว้างของรอยแตกร้าว และลดการหดตัวรวมทั้งหมดในช่วงอายุ 50 วัน แต่ในช่วงอายุ 3 วันแรกนั้นผงฝุ่นหินทั้ง 2 ชนิด มีการหดตัวรวมทั้งหมดสูงกว่าปูนซีเมนต์ล้วน จึงทำให้อรอยแตกร้าวเกิดเร็วขึ้น
- 3) ส่วนวัสดุประสาน 3 ชนิด ช่วยชะลอการเกิดรอยแตกร้าว, ทำให้การหดตัวรวมทั้งหมดลดลง และลดขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว โดยเฉพาะซีเมนต์เพสต์ที่ผสมแก้วลอย FA(C) ที่มีปริมาณ CaO สูง กับผงฝุ่นหินชนิดหยาบ LP(13) จะช่วยลดความกว้างของรอยแตกร้าวได้ดีที่สุด
- 4) ความกว้างของรอยแตกร้าวของซีเมนต์เพสต์มีความสัมพันธ์กับความเครียดที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการหดตัวรวมทั้งหมดหลังจากที่เกิดการแตกร้าว ซึ่งสามารถคำนวณความกว้างของรอยแตกร้าว ณ เวลาใดๆ เพื่อที่จะเปรียบเทียบแนวโน้มความกว้างรอยแตกร้าวในช่วงระยะยาวของซีเมนต์เพสต์แต่ละส่วนผสมได้จากความเครียดที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการหดตัวรวมทั้งหมด ซึ่งยังไม่ได้พิจารณาถึงผลของการคืบ (creep) และ ความเครียดแบบพลาสติก (Plastic Strain)

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด, ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนงานวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์บางส่วน

7. บรรณานุกรม

- Dhir, R.K., Limbachiya, M.C., and McCarthy, M.J., Chaipanich A., 2007. Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction. Materials and Structures, 40: 459-473.
- Tongaroon Sri, S., Tangtermsirikul, S., 2009. Effect of mineral admixtures and curing periods on shrinkage and cracking age under restrained condition. Construction and Building Materials, 23: 1050-1056
- Saengsoy, W., Tongaroon Sri, S., Hemavibool, S., Tangtermsirikul, S., Plang-ngern, S., 2010. Autogenous Shrinkage and Total Shrinkage of Binary and Ternary systems containing fly ash and limestone power. Annual Concrete Conference 6, MAT-57:297-302.