วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ
การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผลของวัสดุประสานต่อพฤติกรรมการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต
Effect of Binders on Shrinkage Cracking Behavior of Concrete

มนตรี คงสุข[1] สรัณกร เหมะวิบูลย์[2] สนธยา ทองอรุณศรี[3*] และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล[4]

[1]นักศึกษา [2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000
[3]อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดตาก 63000
[4]ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิริธร จังหวัดปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวัสดุประสาน ต่อพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตกำลังสูงที่ถูกยึดรั้งการหดตัว พฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตที่ศึกษาได้แก่ อายุการแตกร้าวของคอนกรีตที่ถูกยึดการหดตัวในแนวแกน อัตราการหดตัว การหดตัวแบบอิสระ การขยายตัวของรอยแตกและกำลังของคอนกรีต วัสดุประสานที่ศึกษาได้แก่ เถ้าลอยและผงหินปูน โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 จากผลการทดสอบพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตได้แก่ ชนิดของวัสดุประสาน การหดตัวแบบอิสระ อัตราการหดตัวและการคืบตัวแบบดึงของคอนกรีต การใช้เถ้าลอยและผงหินปูนช่วยลดการหดตัวแบบอิสระและอัตราการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งส่งผลให้อายุการแตกร้าวของคอนกรีตมีค่ามากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนการคืบตัวแบบดึงของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าสูงกว่าคอนกรีตผสมผงหินปูนและคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตามลำดับ

Abstract

This research was aimed to study the effect of binders on cracking behavior of high strength concrete under restrained shrinkage condition. The cracking behaviors of concrete that study were cracking age in uniaxially restrained shrinkage test, shrinkage rate, free shrinkage, crack propagation and strength of concrete. The binders used in this study were fly ash and limestone powder. The weight percentage of replacement of cement by fly ash and limestone powder were 30 and 10%, respectively. The water to binder ratios was 0.35. The results indicated that the influence parameters of shrinkage cracking were type of binder, amount of free shrinkage, shrinkage rate and tensile creep of concrete. The use of fly ash and limestone powder could reduce free shrinkage and shrinkage rate of concrete, and result in the longer cracking age than cement-only concrete. The tensile creep of cement-only concrete was higher than that of limestone powder concrete and fly ash concrete, respectively

คำสำคัญ : การคืบตัวแบบดึง การแตกร้าว การหดตัว เถ้าลอย ผงหินปูน
Keywords : Tensile Creep, Cracking, Shrinkage, Fly ash, Limestone powder

ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ sontaya@rmutl.ac.th โทร. 08 9635 3425

1. บทนำ

การแตกร้าวเนื่องจากการยึดรั้งการหดตัวของคอนกรีต เป็นปัญหาที่ส่งผลต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตที่ถูกยึดรั้ง การแตกร้าวของคอนกรีตทำให้น้ำหรือสสารต่างๆ สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตและเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับเหล็กเสริม ส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิม พื้นที่หน้าตัดเหล็กลดลง ทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงของเหล็กเสริมลดลง เกิดการโก่งตัวเพิ่มขึ้น หากการโก่งตัวเกิดขึ้นมากจะเป็นอันตรายต่อโครงสร้างและส่งผลต่อปัญหาการใช้งานอาคารในระยะยาว การแตกร้าวของคอนกรีตมักเกิดในช่วงอายุต้นของคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตในช่วงอายุต้นมีกำลังต่ำ การแตกร้าวของคอนกรีตเป็นกลไกที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ การหดตัวอิสระ (Free Shrinkage), อัตราการหดตัว (Shrinkage rate), การคืบตัวแบบดึง (Tensile Creep), โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity), เปอร์เซ็นการยึดรั้งการหดตัว (Degree of restraint) และกำลังดึง (Tensile Strength) ของคอนกรีต (Wiegrink, K., Marikunte, S. and Shah, S.P.,1993; Tao, Z. and Weizu, Q., 2006) การหดตัวของคอนกรีตมีหลายชนิด แต่การหดตัวที่มีผลต่อการแตกร้าวมากคือ การหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต เป็นผลมาจากการหดตัวแบบออโตจีนัสและหดตัวแบบแห้งเกิดขึ้นร่วมกัน การหดตัวของคอนกรีตเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ แต่หากมีการยึดรั้งการหดตัวตัวไม่ว่าจะเป็นการยึดรั้งจากเหล็กเสริมภายใน หรือจากโครงสร้างภายนอก ล้วนทำให้เกิดการยึดรั้งภายในคอนกรีตทั้งสิ้น เมื่อคอนกรีตถูกยึดรั้งจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้น เมื่อหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากำลังดึงของคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว (ACI Committee 224R-90, 1994) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการคืบตัวแบบดึงสามารถลดหน่วยแรงดึงที่เกิดจากการยึดรั้งการหดตัวได้ ส่งผลให้อายุการแตกร้าวของคอนกรีตยาวขึ้น ในปัจจุบันมีการนำวัสดุประสานชนิดต่างๆ มาใช้ในงานคอนกรีตไม่ว่าจะเป็น เถ้าลอยหรือผงหินปูน ซึ่งวัสดุประสานเหล่านี้จะส่งผลดีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต แต่ปัจจุบันยังมีองค์ความรู้เกี่ยวกับการแตกร้าวของวัสดุเหล่านี้น้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของเถ้าลอยและผงหินปูนต่อพฤติกรรมการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต โดยในบทความนี้จะเน้นศึกษาในคอนกรีตกำลังสูง พฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตที่ศึกษาได้แก่ อายุการแตกร้าวของคอนกรีตที่ถูกยึดการหดตัวในแนวแกน อัตราการหดตัว การหดตัวแบบอิสระ การขยายตัวของรอยแตกและกำลังของคอนกรีต

2. วิธีการทดลอง

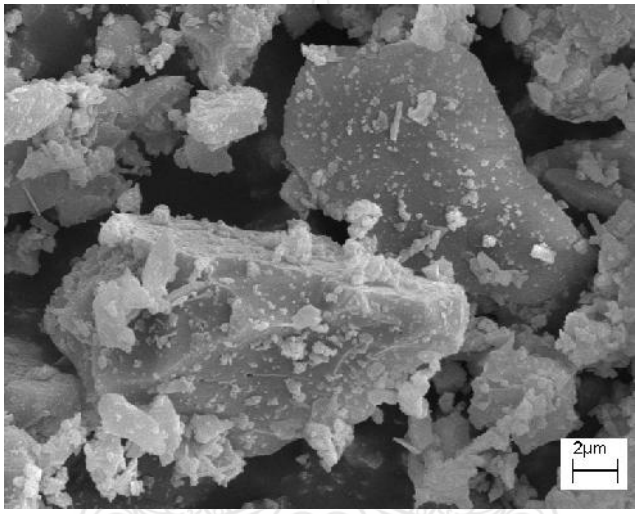
2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย วัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เถ้าลอย (Fly ash, FA) และผงหินปูน (Limestone powder, LP) องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และผงหินปูน แสดงดังตารางที่ 1 เถ้าลอยที่ใช้นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ผงหินปูนที่ใช้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งคือ แคลเซียมคาร์บอเนต นำมาจาก บริษัทสุรินทร์ ออมย่า เคมิคอล (ประเทศไทย) จำกัด มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 5 ไมครอน ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน แสดงดังรูปที่ 1-3 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าปูนซีเมนต์และผงหินปูน มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดนี้ต้องผ่านการบด ในขณะที่เถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม รูปร่างของอนุภาคเหล่านี้มักจะส่งผลต่อสมบัติของคอนกรีต โดยเฉพาะขณะที่เป็นคอนกรีตสด มวลรวมละเอียดที่ใช้ คือ ทรายแม่น้ำ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.95 มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.62 มวลรวมหยาบที่ใช้คือ หินปูนย่อย มีขนาดโตสุดของหินเท่ากับ 19 มิลลิเมตร และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.70

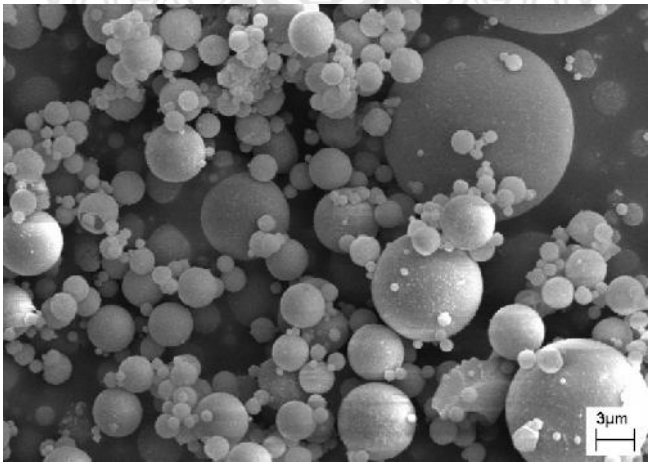
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เถ้าลอย และ ผงหินปูน

Material	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	L.O.I. (%)	Fineness (cm2/g)	Specific gravity
OPC	19.87	4.87	3.55	65.03	2.52	0.73	0.02	0.45	2.26	3350[a]	3.13
FA	39.40	17.93	12.92	19.19	2.99	3.03	1.36	2.50	0.17	2836[a]	2.28
LP	3.25	1.50	1.28	65.40	1.32	-	-	0.26	26.15	-	2.74

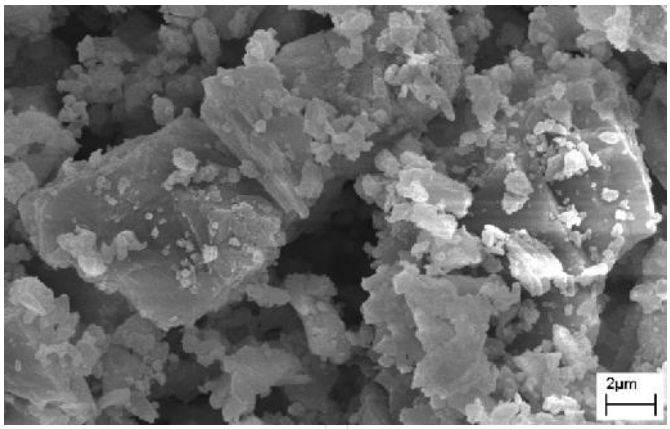
[a] Using Blaine's air permeability method.



รูปที่ 1 ภาพกำลังขยายสูงของปูนซีเมนต์ (2500X)



รูปที่ 2 ภาพกำลังขยายสูงของเถ้าลอย (1500X)



รูปที่ 3 ภาพกำลังขยายสูงของผงหินปูน (3000X)

2.2 ส่วนผสมของคอนกรีต

การศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย อายุการแตกร้าวของคอนกรีตที่ถูกยึดการหดตัวในแนวแกน อัตราการหดตัว การหดตัวแบบอิสระ การขยายตัวของรอยแตกและกำลังของคอนกรีต โดยข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาอธิบายและใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตที่มีวัสดุประสานแตกต่างกัน งานวิจัยนี้เน้นศึกษาในคอนกรีตกำลังสูง จึงกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 0 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 0 และ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ปริมาณของวัสดุประสานแต่ละชนิดที่เลือกใช้ เป็นปริมาณที่เหมาะสมและนิยมใช้สำหรับการผสมคอนกรีต ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วันมากนัก ตัวอย่างทั้งหมดบ่มด้วยความชื้น 7 วัน อัตราส่วนผสมที่ศึกษามี 3 ส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 2 คอนกรีตกำลังสูง (w/c=0.35) มีความสามารถเทได้ต่ำมาก จึงควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตกำลังสูงให้อยู่ในช่วง 10 ± 2.5 เซนติเมตร โดยใช้สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษ ประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 ซึ่งสารลดน้ำพิเศษที่ใช้มีสารประกอบหลักเป็นแนพทาลีนซัลโฟนิก

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมคอนกรีต

Mix no.	Mix designation	w/b	Percentage of replacement		Unit content (kg/m3)						Superplasticizer content (%)
			FA	LP	C	FA	LP	W	S	G	
1	W35r0	0.35	-	-	483	-	-	166	726	1044	0.8
2	W35r30FA	0.35	30	-	320	138	-	157	726	1044	0.5
3	W35r10LP	0.35	-	10	431	-	48	167	726	1044	0.7

หมายเหตุ : C, FA, LP, W, S และ G คือ ซีเมนต์, เถ้าลอย, ผงหินปูน, น้ำ, ทราย และหิน ตามลำดับ

2.3 วิธีการทดสอบ

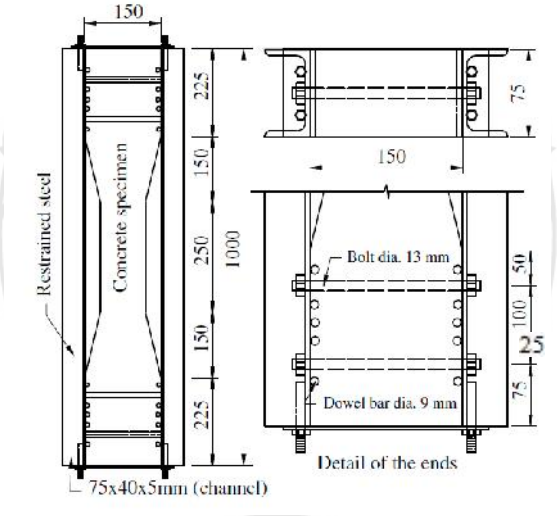
การศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวเนื่องจากการยึดรั้งการหดตัวของคอนกรีต ประกอบด้วยการทดลองย่อยจำนวน 3 การทดลองได้แก่ การทดสอบอายุการแตกร้าวของคอนกรีต การทดสอบค่าการหดตัวแบบอิสระ กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีต ในแต่ละส่วนผสมจะต้องเตรียมตัวอย่างของทุกการทดลองพร้อมกัน เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีสมบัติเหมือนกัน แต่ละการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 การทดสอบอายุการแตกร้าวของคอนกรีต

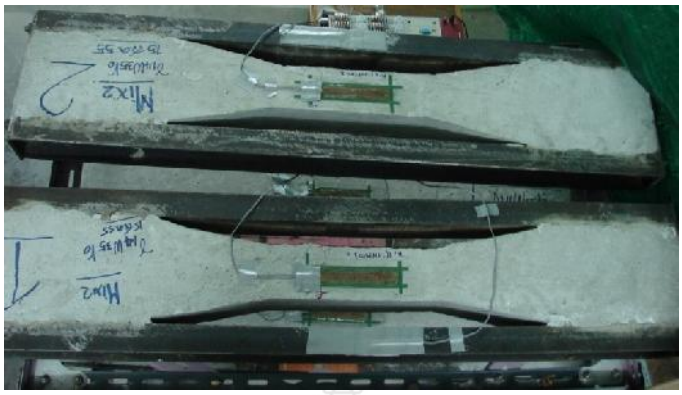
การทดสอบอายุการแตกร้าวของคอนกรีต ใช้ชุดทดสอบการยึดรั้งการหดตัวในแนวแกน ดังรูปที่ 4 เพื่อหาอายุที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าว จากการทดลองนี้ยังได้ค่าการคืบตัวแบบดึงและการขยายตัวของรอยแตกอีกด้วย พื้นที่หน้าตัดของโครงเหล็กที่ทำหน้าที่ยึดรั้งการหดตัวเท่ากับ 17.64 ตารางเซนติเมตร และพื้นที่หน้าตัดบริเวณแคบสุดของคอนกรีต มีขนาด 75 x 75 x 250 มิลลิเมตร ตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกยึดรั้งการหดตัวนี้จะบ่มด้วยความชื้นเป็นเวลา 7 วัน แล้วจึงปล่อยให้สัมผัสกับอากาศ เมื่อเริ่มทดสอบจะบันทึกค่าความเครียดที่คอนกรีตและเหล็กเสริมด้วยแผ่นวัดความเครียด (Strain gauge) ตำแหน่งที่วัดความเครียดแสดงดังรูปที่ 5 บันทึกค่าความเครียดที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มติดแผ่นวัดความเครียดที่อายุ 1 วัน จนกระทั่งคอนกรีตเกิดการแตกร้าว หลังจากนั้นวัดขนาดความกว้างของรอยแตกต่อเนื่องไปเป็นเวลา 14 วัน อายุการแตกร้าวของคอนกรีตจะเริ่มนับตั้งแต่คอนกรีตสัมผัสอากาศ จนกระทั่งถึงเวลาที่คอนกรีตแตก ค่าความเครียดที่วัดได้จากคอนกรีตและเหล็กจะถูกนำมาคำนวณค่าการคืบตัวที่เกิดขึ้นในคอนกรีตโดยใช้สมการที่ (1) ตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกยึดรั้งการหดตัวในแนวแกนใช้ 2 ตัวอย่างต่อ 1 ส่วนผสม เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ตัวอย่างทั้งหมดเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น โดยจะควบคุมอุณหภูมิ 28 ± 1 องศาเซลเซียสและความชื้นร้อยละ 50± 5

$$\varepsilon_{creep} = \varepsilon_{free} - \varepsilon_{rr} - \varepsilon_{net} \quad (1)$$

เมื่อ ε_{creep} คือค่าการคืบตัวของคอนกรีต, ε_{free} คือค่าการหดตัวแบบอิสระของคอนกรีต, ε_{rr} คือ ความเครียดที่เกิดจากการยึดรั้งการหดตัวเนื่องจากเหล็กเสริม และ ε_{net} คือความเครียดจากคอนกรีตที่มีการยึดรั้งการหดตัว



รูปที่ 4 เครื่องมือทดสอบการยึดรั้งการหดตัวของคอนกรีต[12]



รูปที่ 5 ตำแหน่งที่วัดความเครียดในคอนกรีตและโครงเหล็ก

2.3.2 การทดสอบการหดตัวแบบอิสระ อัตราการหดตัว กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีต

การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต มีความสัมพันธ์กับการหดตัวแบบอิสระของคอนกรีต จึงต้องเปรียบเทียบค่าการหดตัวของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม นอกจากนี้การหดตัวแบบอิสระยังใช้ในการคำนวณค่าการคืบตัวแบบดึงของคอนกรีตดังสมการที่ (1) และคำนวณอัตราการหดตัวตามสมการที่ (2) การหดตัวที่ทดสอบเป็นการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต (Total Shrinkage) ซึ่งเป็นรวมผลของการหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้งที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง วัดค่าการหดตัวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C157 โดยใช้ตัวอย่างขนาด 75 x 75 x 285 มิลลิเมตร ใช้จำนวน 4 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในสภาพแวดล้อมเดียวกับตัวอย่างที่ถูกยึดรั้ง การหดตัวแบบอิสระจะเริ่มวัดตั้งแต่หลังระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายและบวกเพิ่มอีก 2 ชั่วโมงและวัดการหดตัวจนกระทั่งมีอายุครบ 28 วัน การหาค่าอัตราการหดตัวของคอนกรีตคือ ค่า α ซึ่งเป็นการนำค่าจากการทดสอบการหดตัวแบบอิสระของคอนกรีตมาคำนวณโดยใช้สมการที่ (2) (ASTM C1581, 2004) เพื่อใช้เปรียบเทียบความเร็วของการเกิดการหดตัวหลังจากเริ่มมีน้ำสูญสียออกจากตัวอย่างของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแต่ละชนิด ดังนั้นอัตราการหดตัวของคอนกรีตจึงคำนวณจากการหดตัวเมื่อคอนกรีตสัมผัสอากาศหรือหลังจากสิ้นสุดการบ่ม

$$\varepsilon_{free} = \sim \sqrt{t} + k \qquad (2)$$

เมื่อ ε_{free} = คือค่าการหดตัวแบบอิสระ มีหน่วยเป็นไมครอน, α คือสัมประสิทธิ์แสดงอัตราการหดตัวแบบอิสระของตัวอย่าง มีหน่วยเป็น ไมครอน/วัน$^{1/2}$, t คือ เวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับอากาศ มีหน่วยเป็น วัน และ k คือ ค่าคงที่

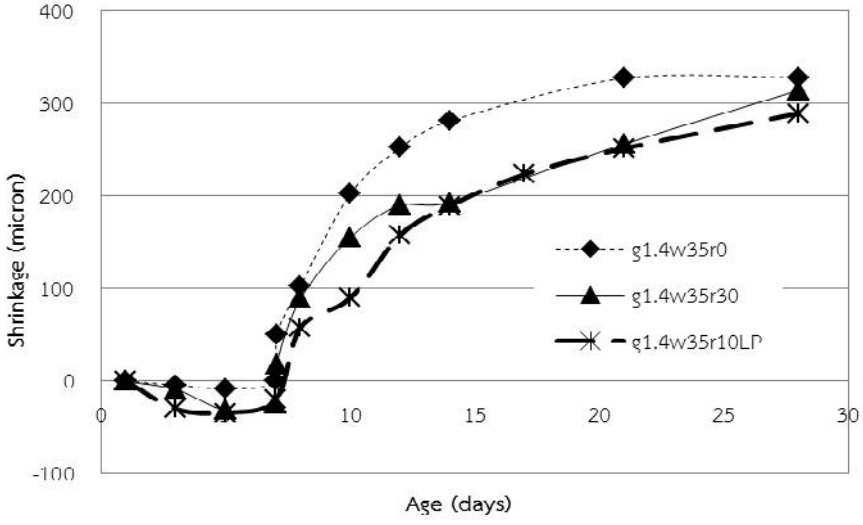
การทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 x 200 มิลลิเมตร และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 และ ASTM C496 ตามลำดับ ทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีต จำนวน 2 ครั้ง คือครั้งที่ 1 ทดสอบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน ส่วนครั้งที่ 2 ทดสอบเมื่อตัวอย่างที่ถูกยึดรั้งเกิดการแตกร้าว เพื่อหาค่ากำลังของคอนกรีต ณ วันที่เกิดการแตกร้าว การทดสอบกำลังในแต่ละอายุใช้จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

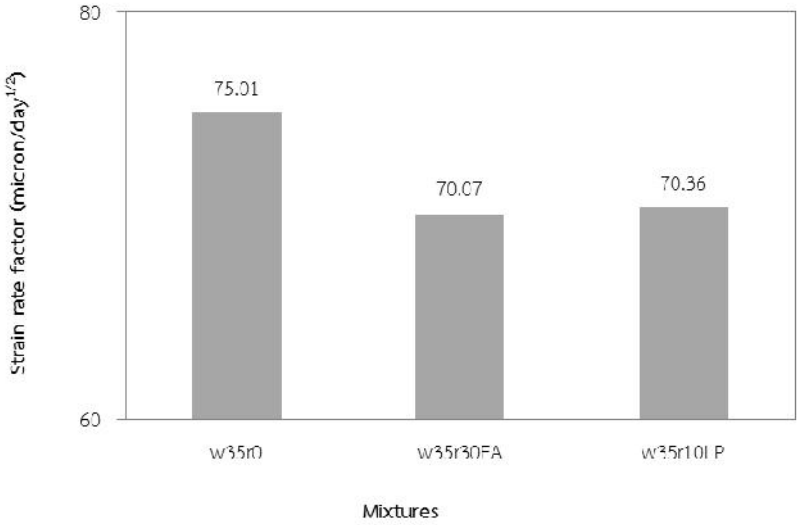
3.1 การหดตัว อัตราการหดตัว และกำลังของคอนกรีต

ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 6 จากผลการทดลองพบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน มีการหดตัวสูงที่สุด รองลงคือคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมผงหินปูน ตามลำดับ ซึ่งการหดตัวของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีความแตกต่างกับการหดตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพียงเล็กน้อย การที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าการหดตัวโดยรวมต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง การหดตัวแบบออโตจีนัสซึ่งมักเกิดขึ้นในช่วงแรกจึงมีค่าลดลง นอกจากนี้การใช้เถ้าลอยยังทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวในช่วงที่บ่ม จึงชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้นในเวลาต่อมาได้บางส่วน ส่วนการใช้ผงหินปูนสามารถลดการหดตัวของคอนกรีตได้เนื่องจาก ผงหินปูนมีขนาดเล็กจึงมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเติม (Filler effect) ในช่องว่างทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และการที่ผงหินปูนเป็นวัสดุเฉื่อยจึงมีความเสถียรและทำหน้าที่คล้ายมวลรวมขนาดเล็กมากที่ช่วยต้านทานการหดตัว เมื่อเปรียบเทียบอัตราการหดตัวของคอนกรีตดังรูปที่ 7 พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีอัตราการหดตัวสูงที่สุด ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 8 จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมผงหินปูนตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังอัดไม่แตกต่างกันมากนักคือมีความแตกต่างกันสูงสุดเพียงร้อยละ 10 ดังนั้นปริมาณวัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 และใช้ผงหินปูนร้อยละ 10 ซึ่งเป็นปริมาณที่นิยมใช้กันทั่วไปสำหรับวัสดุประสานแต่ละชนิดและเป็นปริมาณที่ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตมากนัก



รูปที่ 6 การหดตัวแบบอิสระของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแตกต่างกัน

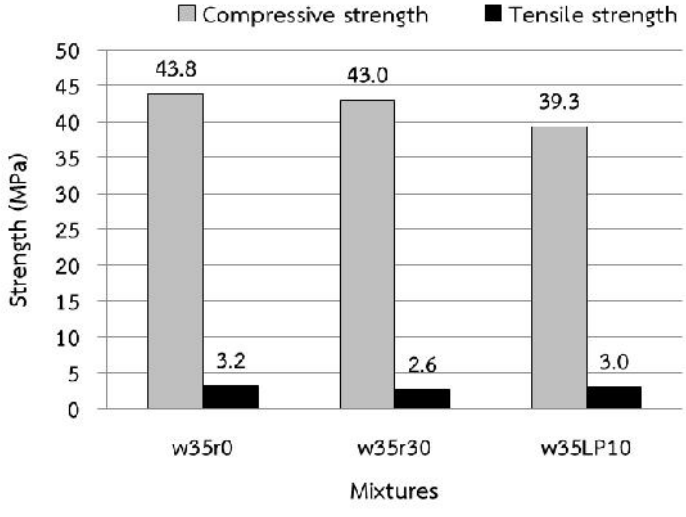


รูปที่ 7 อัตราการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแตกต่างกัน

ตารางที่ 3 อายุการแตกร้าว อัตราการหดตัว และกำลังของคอนกรีต

Mix proportion	Cracking age (hours)	Strain rate factor of free shrinkage (m/m/day$^{1/2}$)	F_c (MPa)	F_t (MPa)	F_{c28} (MPa)	F_{t28} (MPa)
g1.4w35r0	121	75.01	43.9	3.7	43.8	3.2
g1.4w35r30	320	70.07	36.7	2.4	43.0	2.6
g1.4w35LP10	173	70.36	31.2	2.9	39.3	3.0

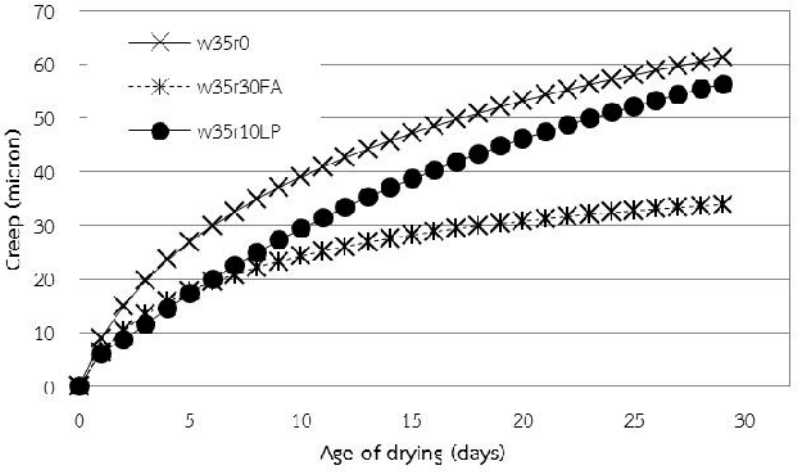
หมายเหตุ: F_c และ F_t การทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีต ณ.วันที่คอนกรีตแตก
F_{c28} และ F_{t28} การทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตอายุ 28 วัน



รูปที่ 8 กำลังของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

3.2 การคืบตัวแบบดึงของคอนกรีตที่ถูกยึดรั้งการหดตัว

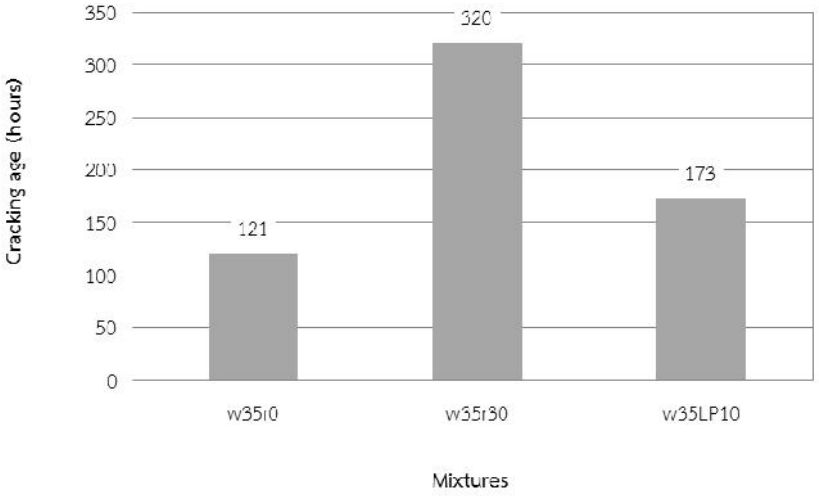
การคืบตัวแบบดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ถูกยึดรั้งช่วยลดหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต การคืบตัวของคอนกรีตที่ถูกยึดรั้งสามารถคำนวณจากสมการที่ (1) โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบการหดตัวแบบอิสระ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม และความเครียดในคอนกรีตที่ถูกยึดรั้ง รวมถึงโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังของคอนกรีต ซึ่งค่าเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอายุของคอนกรีต อย่างไรก็ตามเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณบทความนี้จึงคำนวณการคืบตัวโดยใช้กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นคงที่ที่อายุ 28 วัน จากการคำนวณได้ค่าการคืบตัวแสดงดังรูปที่ 9 จากผลการทดสอบพบว่าการคืบตัวของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือคอนกรีตผสมผงหินปูนและคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยอาจทำให้การคืบตัวของคอนกรีตลดลง อย่างไรก็ตามการทดสอบนี้ใช้ระยะเวลาการทดสอบสั้นและมีปริมาณเหล็กที่ใช้ยึดรั้งตัวอย่างค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาค่าการคืบตัวในระยะยาวและใช้ปริมาณการยึดรั้งที่แตกต่างกันในอนาคต



รูปที่ 9 การคืบตัวแบบดึงของคอนกรีต

3.3 อายุการแตกร้าวของคอนกรีตที่ถูกยึดรั้งการหดตัว

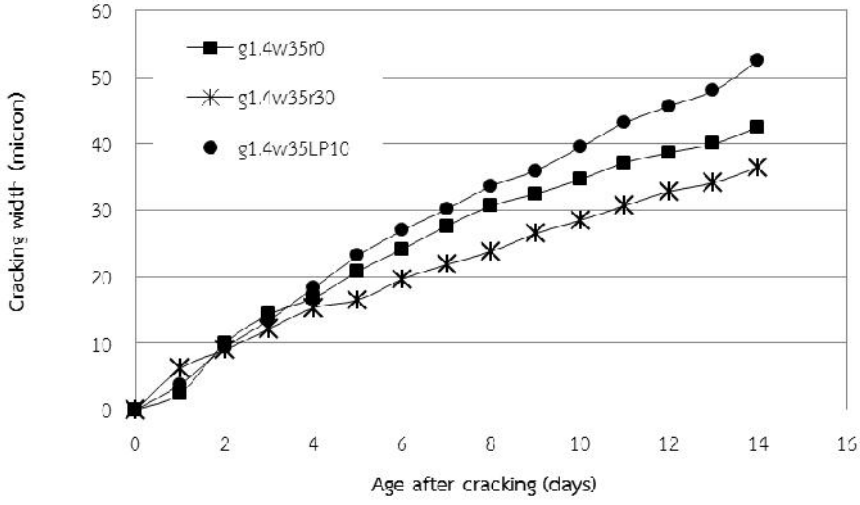
ผลการทดสอบอายุการแตกร้าวของคอนกรีตได้ผลดังตารางที่ 3 และรูปที่ 10 จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีอายุการแตกร้าวน้อยที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีโอกาสเกิดการแตกร้าวได้ง่ายที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตผสมผงหินปูนและคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตขณะเกิดการแตกร้าว พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนแม้จะมีกำลังดึงสูงกว่าส่วนผสมอื่นแต่กลับแตกร้าวได้ง่ายกว่า จึงอาจกล่าวได้ว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงไม่จำเป็นต้องมีความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวสูงตามไปด้วย ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายประการ เมื่อพิจารณาอัตราการหดตัวจากรูปที่ 7 พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าอัตราการหดตัวสูงสุด จึงทำให้เกิดหน่วยแรงดึงสูงกว่าส่วนผสมอื่นๆ แม้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนจะมีค่าการคืบตัวมากกว่าส่วนผสมอื่นแต่ก็ไม่สามารถชดเชยค่าหน่วยแรงดึงที่สูงนี้ได้อย่างเพียงพอ ซึ่งอีกปัจจัยที่มีผลต่อการแตกร้าวคือความสามารถในการยืดตัวก่อนการแตกร้าว (Tensile strain capacity) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Tongaroonsri, S. and Tangtermsirikul, S., 2009) พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราการหดตัวสูงจะมีความสามารถในการยืดตัวก่อนการแตกร้าวลดลง เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองนี้จะพบว่าการใช้เถ้าลอยทำให้ลดโอกาสการเกิดการแตกร้าวได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อจะนำไปใช้งานควรคำนึงถึงสมบัติด้านอื่นๆ ประกอบด้วยเช่น ความคงทนต่อสภาพแวดล้อมเนื่องจากปัจจัยต่างๆ และการพัฒนากำลังของคอนกรีต



รูปที่ 10 อายุการแตกร้าวของคอนกรีตที่ถูกยึดรั้งการหดตัว

3.4 การขยายของรอยแตกร้าวของคอนกรีต

นอกจากการพิจารณาอายุการแตกร้าวของคอนกรีตแล้ว สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือ การขยายตัวของรอยแตกร้าว เนื่องจากคอนกรีตที่แตกเร็ว แต่มีการขยายตัวของรอยแตกน้อย อาจพบปัญหาด้านความคงทนน้อยกว่าส่วนผสมที่แตกร้าวช้า แต่มีการขยายของรอยแตกร้าวมาก ผลการทดสอบการขยายตัวของรอยแตกร้าวของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 11 พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนแม้จะมีอายุการแตกร้าวน้อยกว่าคอนกรีตผสมผงหินปูน แต่ก็มีการขยายตัวของรอยแตกน้อยกว่า ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีอายุการแตกร้าวสูงที่สุดและมีการขยายตัวของรอยแตกร้าวน้อยที่สุด อาจเนื่องมาจากคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีการหดตัวและอัตราการหดตัวต่ำ



รูปที่ 11 ความกว้างของรอยแตกร้าว

4. สรุป

จากผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน มีการหดตัวสูงที่สุด รองลงคือคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมผงหินปูน ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีอัตราการหดตัวสูงที่สุด ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 และใช้ผงหินปูนร้อยละ 10

2. การคืบตัวของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือคอนกรีตผสมผงหินปูนและคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตามลำดับ

3. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีอายุการแตกร้าวน้อยที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตผสมผงหินปูนและคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตขณะเกิดการแตกร้าว พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนแม้จะมีกำลังดึงสูงกว่าส่วนผสมอื่นแต่กลับแตกร้าวได้ง่ายกว่า จึงอาจกล่าวได้ว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดหรือกำลังดึงสูงไม่จำเป็นต้องมีความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวสูงตามไปด้วย

4. คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีอายุการแตกร้าวสูงที่สุดและมีการขยายตัวของรอยแตกร้าวน้อยที่สุด อาจเนื่องมาจากคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีการหดตัวและอัตราการหดตัวต่ำ ส่วนคอนกรีตผสมผงหินปูนมีการขยายตัวของรอยแตกสูงที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา โครงการส่งเสริมการผลิตผลงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสนับสนุนเครื่องมือในการดำเนินงานนี้

6. เอกสารอ้างอิง

Wiegrink, K.; Marikunte, S. and Shah, S.P. 1993. Shrinkage cracking of high-strength concrete. **ACI Materials Journal**. 93(5): 409-415.

Tao, Z.; and Weizu, Q. 2006. Tensile creep due to restraining stresses in high-strength concrete at early ages. **Cement and Concrete Research.** 36: 584-591.

ACI Committee 224R-90. 1994. **Control of cracking in concrete structure**. ACI manual of concrete practice Part 3. Detroit.

ASTM C1581 (2004.) **Standard test method for "Determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage**. ASTM Standards 4.02 ASTM International. West Conshohocken. PA.

Tongaroonsri, S. and 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.