

ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อโมดูลัสการแตกร้าวและความสามารถในการยืดตัว
ก่อนการแตกร้าวจากแรงดึงของคอนกรีต

Effect of Water-cement Ratio on Modulus of Rupture and Tensile Strain
Capacity of Concrete

วันดี พูนพจน์มาศ¹ ธนชิต อินตาไช้² เทียนชัย ธนะสิทธิ์² มณศิตา บัวเชื้อม² สนธยา ทองอรุณศรี²
สรินทร์ เหมะวิบูลย์³ และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล⁴

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 นางล้นจี พุ่มหาเมฆ สาทร กรุงเทพมหานคร 10120

โทร: 02-2879600 E-mail : wandee.po@rmutk.ac.th

² สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

41 พหลโยธิน ฝั่งงาม เมือง ดาก 63000

โทร: 055-515900

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

99 หมู่ 9 ท่าโพธิ์ เมืองพิษณุโลก พิษณุโลก 65000

โทร: 055-961000

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

99 หมู่ 18 คลองหนึ่ง คลองหลวง ปทุมธานี 12121

โทร. 02-9869009

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาโมดูลัสการแตกร้าวและความสามารถในการยืดตัวก่อนการแตกร้าวจากแรงดึงของคอนกรีต ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้เท่ากับ 0.35, 0.55, 0.65 และ 0.75 การทดสอบการยืดตัวก่อนการแตกร้าวใช้วิธีการทดสอบด้วยแรงดึง จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 63.40 – 497.45 กก./ตร.ซม. และมีค่าการยืดตัวก่อนการแตกร้าวอยู่ระหว่าง 155 – 216 ไมครอน คอนกรีตที่ทดสอบมีกำลังอัดประมาณร้อยละ 11 – 39 ของกำลังอัด จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วงที่ศึกษามีผลต่อโมดูลัสการแตกร้าวและการยืดตัวก่อนการแตกร้าวอย่างมีนัยสำคัญ โดยโมดูลัสการแตกร้าวและการยืดตัวก่อนการแตกร้าวมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : การแตกร้าว โมดูลัสการแตกร้าว การยืดตัวก่อนการแตกร้าว กำลังดึง กำลังดัด

ABSTRACT

This research was aimed to study the modulus of elasticity and tensile strain capacity of concrete. The parameter considered was water-cement ratio. The water-cement ratios were 0.35, 0.55, 0.65 and 0.75. Tensile strain capacity was investigated using flexural test method. The test results showed that the compressive strength of concrete is between 63.40 - 497.45 ksc. The modulus of rupture of concrete is between 23.52 – 55.47 ksc and the tensile strain capacity is between 155 – 216 micron. The flexural strength is about 11 – 39 % of compressive strength. The investigation showed that the effect of water-cement ratio in the tested ranges was significant. The tensile strain capacity and modulus of rupture decreased with the increase of water-cement ratio.

Keywords : rupture, modulus of rupture, tensile strain, tensile strength, bending strength

1. บทนำ

การแตกร้าวของคอนกรีตเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งการแตกร้าวที่เกิดขึ้นส่งผลให้ความคงทนและประสิทธิภาพการใช้งานของอาคารลดลง ดังนั้นเพื่อป้องกันการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงควรวิเคราะห์โอกาสเกิดการแตกร้าวของคอนกรีต ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบและการเลือกส่วนผสมคอนกรีต ปัจจัยที่จำเป็นต้องใช้ประเมินโอกาสเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตมีหลายปัจจัย ได้แก่ การหดตัวแบบอิสระ เปอร์เซ็นต์การยึดรั้ง โมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture, MOR) และความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีต หรืออีกอย่างหนึ่งเรียกว่า ความสามารถในการยืดตัวก่อนการแตกร้าว (Tensile Strain Capacity, TSC) [1-3] ซึ่งค่าเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากทั้งในและต่างประเทศ ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าวเหล่านี้ [1-7] แต่มี

งานวิจัยน้อยมากที่ศึกษาเกี่ยวกับ TSC [8] ค่า TSC ถูกใช้เป็นตัวชี้วัดการเกิดการแตกร้าวของคอนกรีต เช่นเดียวกับ MOR ของคอนกรีต แต่จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าการใช้ TSC ประเมินการแตกร้าวมีความแม่นยำกว่าการใช้ MOR ของคอนกรีต [9] เมื่อคอนกรีตถูกแรงกระทำไม่ว่าแรงนั้นจะเกิดขึ้นจากแรงภายนอกหรือเกิดจากแรงภายในเช่น หน่วยแรงดึงจากการหดตัวของคอนกรีต จะส่งผลให้เกิดความเครียดยึดรั้ง (Restrained Strain) เมื่อความเครียดยึดรั้งมากกว่า TSC คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าว [10] TSC ของคอนกรีตมีค่าแตกต่างกันตามส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงไปของคอนกรีต [7] ดังนั้นเพื่อศึกษาตัวชี้วัดที่ถูกใช้ในการประเมินการแตกร้าวของคอนกรีต งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อ MOR และ TSC ของคอนกรีต เพื่อเป็นข้อมูลในการประเมินโอกาสเกิดการแตกร้าวของคอนกรีต

2. วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุและส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุประสานที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 1 มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำ จากอำเภอเมือง จังหวัดตาก มีสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 2 มวลรวมหยาบที่ใช้เป็นหินปูน ขนาดโตสุดของมวลรวมเท่ากับ 3/4 นิ้ว จากอำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร มีสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 2 มวลรวมที่ใช้มีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C33-97 ส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวต่ำกว่า 7.5 ซม. จะมีการเติมสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 เพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้มีค่าอยู่ในช่วง 7.5 -12.5 ซม. สารลดน้ำพิเศษที่ใช้มีสารประกอบหลักเป็นเนฟทาไลน์ซัลโฟนิค (Naphthalene sulfonic Acid) ปริมาณสารลดน้ำพิเศษและค่าการยุบตัวของคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3

ส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยมีจำนวนทั้งสิ้น 4 ส่วนผสมดังตารางที่ 3 โดยออกแบบส่วนผสมให้มีอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35, 0.55, 0.65 และ 0.75 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Chemical and Physical Properties		Cement Type I
Chemical Compositions (%)	SiO ₂	19.87
	Al ₂ O ₃	4.87
	Fe ₂ O ₃	3.55
	CaO	65.03
	MgO	2.52
	SO ₃	0.73
	Na ₂ O	0.02
	K ₂ O	0.45
Physical Properties	L.O.I.	2.26
	Blaine Fineness (cm ² /g)	3350
	Specific gravity	3.13

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม

Physical Properties	Sand	Limestone
Specific Gravity	2.58	2.63
Absorption (%)	0.78	0.53
fineness Modulus (F.M.)	2.89	8.34
Unit Weight (kg/m ³)	1639	1593

ตารางที่ 3 ส่วนผสมและค่าการยุบตัวของคอนกรีต

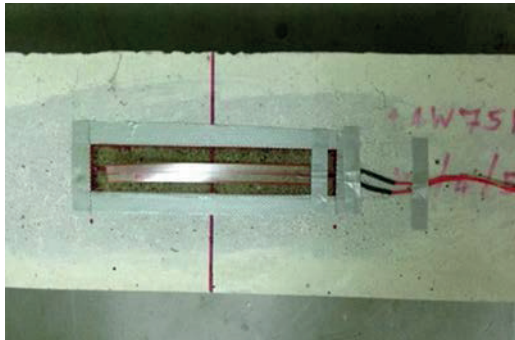
Mix Designation	w/c	Unit content (kg/m ³)				SP (%)	Slump (cm)
		C	W	S	G		
w35	0.35	483	169	722	1017	0.70	12.15
w55	0.55	372	205	722	1017	-	14.75
w65	0.65	334	217	722	1017	-	18.75
w75	0.75	302	227	722	1017	-	18.60

หมายเหตุ : C,W,S,G และ SP คือ ปูนซีเมนต์ น้ำ หทราย หินปูนและสารลดน้ำพิเศษ ตามลำดับ

3. วิธีการทดลอง

การทดสอบหลักที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แก่ การทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 และการทดสอบความสามารถในการยึดตัวก่อนการแตกร้าวจากแรงดึงของคอนกรีต (TSC) การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. และสูง 20 ซม. ส่วนการทดสอบหาค่า MOR และ TSC ในงานวิจัยนี้เป็น การทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C78 เพื่อมาหาค่าการยึดตัวที่ผิวล่างของคาน ตั้งแต่เริ่มให้แรง จนกระทั่งคานเกิดการแตกร้าวและเกิดการวิบัติ ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นนอกจากจะได้ค่าการยึดตัวแล้ว ยังได้กำลังดัดของคอนกรีต หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โมดูลัสการแตกร้าว (MOR) ตัวอย่างคานที่ใช้มีขนาด 10x10x40 ซม. ระยะระหว่างจุดรองรับของคานเท่ากับ 30 ซม. หลักการของการทดสอบคือ เมื่อเพิ่มแรงกดคานจะเกิดการโก่งตัว ที่ผิวด้านล่างของคานจะเกิดการยึดตัวเนื่องจากหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น การยึดตัวนี้จะเพิ่มมากขึ้นตามแรงกดที่เพิ่มขึ้น จนการยึดตัวมีค่าสูงสุดเมื่อคานเริ่มเกิดการ

วิบัติ งานวิจัยนี้จะใช้แผ่นวัดความเครียด (Strain Gauge) สำหรับติดคอนกรีตและมีความยาว 9 ซม. ติดที่ผิวด้านล่างของคาน เพื่ออ่านค่าความเครียดจากการยึดตัวที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 1 และใช้ Load cell อ่านค่าแรงกระทำกับคาน โดยข้อมูลทั้งสองจะถูกอ่านและบันทึกไปพร้อมกันด้วย Data Logger ดังภาพที่ 2 จนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 3 แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หา MOR และค่าความเครียดของคอนกรีตต่อไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าในการทดสอบตัวอย่างคานจะได้ค่าทั้ง MOR และ TSC มาพร้อมกัน ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดและ TSC หลังจากผสมคอนกรีตและเทคอนกรีตเข้าแบบแล้ว ตัวอย่างจะถูกแกะออกจากแบบที่อายุ 23 ชั่วโมง หลังจากแกะออกจากแบบตัวอย่างคอนกรีตจะถูกบ่มในน้ำจนกระทั่งอายุครบการทดสอบ โดยจะทดสอบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 1, 3 และ 28 วัน ในแต่ละอายุการทดสอบใช้จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าการเฉลี่ย



ภาพที่ 1 ตัวอย่างคานที่ติดแผ่นวัดความเครียดแล้ว พร้อมนำไปทดสอบ



ภาพที่ 2 Data Logger ที่ใช้บันทึกแรงและความเครียด



ภาพที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบ MOR และ TSC ของคอนกรีต

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสการแตกร้าวของคอนกรีต

Mix	Compressive Strength, f'_c (ksc)				Modulus of Rupture, MOR (ksc)				(MOR/ f'_c)x100 (%)			
	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days
w35	217.46	403.38	492.28	497.45	44.38	48.51	51.13	55.47	20.41	12.03	10.39	11.15
w55	149.09	213.25	265.27	338.86	31.18	35.41	40.83	50.67	20.91	16.60	15.39	14.95
w65	79.78	129.85	147.60	221.04	24.68	31.90	35.46	46.68	30.94	24.57	24.02	21.12
w75	63.40	79.40	121.85	162.58	23.52	30.91	33.07	38.83	37.10	38.93	27.14	23.88

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

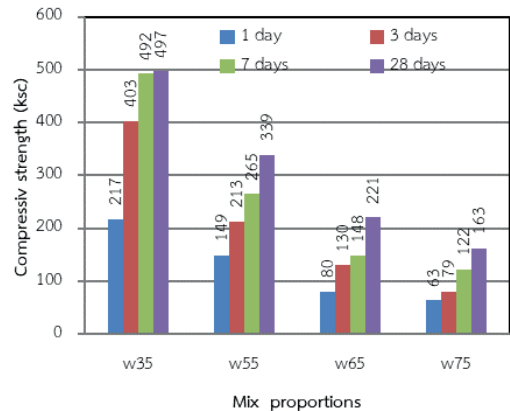
4.1 กำลังอัดและโมดูลัสการแตกร้าวของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดและ โมดูลัสการแตกร้าวของคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 4 จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 63.40 - 497.45 กก./ตร.ซม. มี MOR อยู่ในช่วง 23.52 - 55.47 ตร.ซม. จากภาพที่ 4 และ 5 พบว่ากำลังอัดและ MOR มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีตและมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความพรุนของคอนกรีตแปรผันตรงกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นส่วนผสมที่มีน้ำมากจะมีความพรุนสูงกำลังของคอนกรีตจึงมีค่าลดลงทั้งกำลังอัดและ MOR นอกจากนี้จากตารางที่ 4 พบว่าโมดูลัสการแตกร้าวมีค่าประมาณร้อยละ 11 - 39 ของกำลังอัด และอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสการแตกร้าวกับกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาหรือกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนความแข็งแรงของเฟสดีกับความแข็งแรงของมวลรวมที่มีค่าเปลี่ยนไปตามเวลา [7]

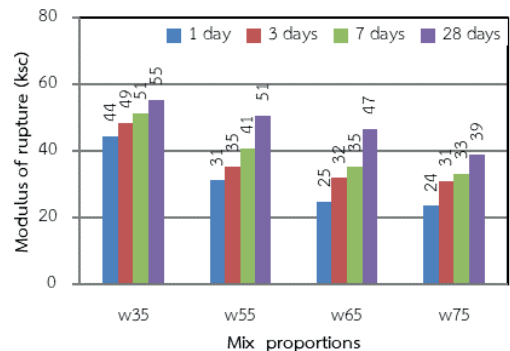
4.2 ความสามารถในการยึดตัวก่อนการแตกร้าวของคอนกรีต

ผลการทดสอบความสามารถในการยึดตัวก่อนการแตกร้าวของคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 5 และภาพที่ 6 จากผลการทดสอบพบว่า TSC มีค่าอยู่ในช่วง 155 - 216 ไมครอน จากผลการทดสอบพบว่า TSC จะมีอัตราเพิ่มขึ้นสูงใน 7 วันแรก แต่ในระยะยาวมีแนวโน้มคงที่ และ TSC มีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 7 พบว่า TSC มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ [ข้อมูลค่า TSC ของอัตราส่วนน้ำต่อ

ซีเมนต์ 0.30 มาจากงานวิจัยของ Tongaroosri and Tangtermsirikul (2008)] ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ กำลังอัดมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีต



ภาพที่ 5 โมดูลัสการแตกร้าวของคอนกรีต

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดโมดูลัสการแตกร้าวและการยึดตัวก่อนการแตกร้าว

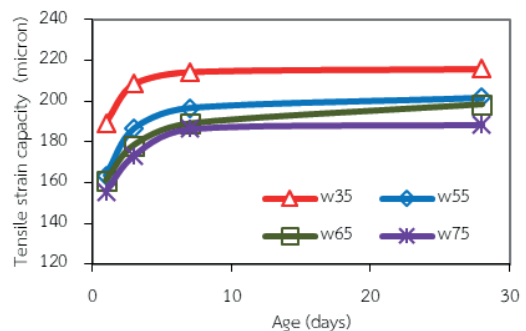
เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการแตกร้าวกับกำลังอัด ดังภาพที่ 8 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดตัวก่อนการแตกร้าวกับกำลังอัด ดังภาพที่ 9 พบว่าค่าต่างๆ เหล่านี้มีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเส้นตรง

(Nonlinear) ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการแตกร้าวกับกำลังอัดของคอนกรีต มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย และมีสมการความสัมพันธ์นี้ในมาตรฐานการออกแบบ ทั้งใน ACI 318 [11] ACI 330 (หรือ Raphael,1984 [12]) และ ACI 363 [13] เนื่องจากพฤติกรรมการแตกร้าวและการโค้งตัวของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับโมดูลัสการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรูปแบบสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและใช้ในมาตรฐานต่างๆ คือ สมการกำลัง (Power Equation) จากภาพที่ 8 พบว่าเมื่อใช้รูปแบบสมการกำลังในการสร้างความสัมพันธ์จะได้สมการที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.923

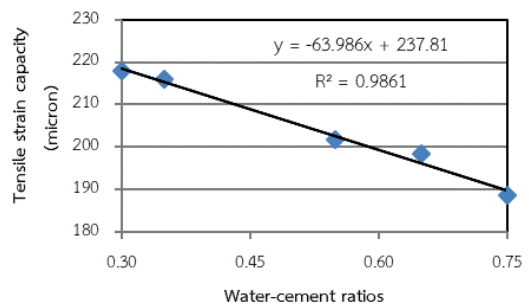
ที่ผ่านมายังไม่มีการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยืดตัวก่อนการแตกร้าวกับกำลังอัดของคอนกรีต เนื่องจากส่วนใหญ่จะใช้โมดูลัสการแตกร้าวในการคำนวณการโค้งตัวและการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีต แต่จากการศึกษาในปัจจุบันพบว่า การใช้ค่าการยืดตัวก่อนการแตกร้าวในการทำนายการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวมีความเหมาะสมและถูกต้องมากกว่า [7] จากกราฟระหว่างการยืดตัวก่อนการแตกร้าวและกำลังอัดของคอนกรีต ดังภาพที่ 9 พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน และเมื่อใช้รูปแบบสมการกำลังในการสร้างความสัมพันธ์จะได้สมการที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.853 แสดงให้เห็นว่าโมดูลัสการแตกร้าวและการยืดตัวก่อนการแตกร้าว มีความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบในการยืดตัวก่อนการแตกร้าวของคอนกรีต

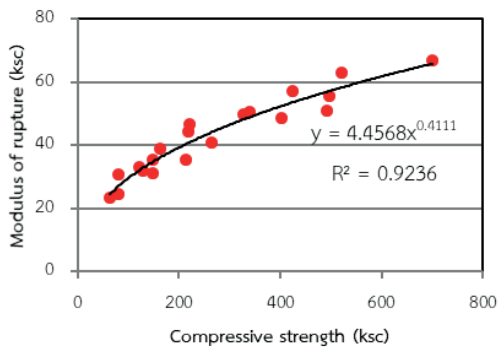
Mix	Tensile Strain Capacity (micron)			
	1 day	3 days	7 days	28 days
w35	189.33	208.50	214.50	216.00
w55	163.50	186.50	196.67	201.67
w65	161.00	178.33	189.00	198.50
w75	155.50	173.00	186.33	188.50



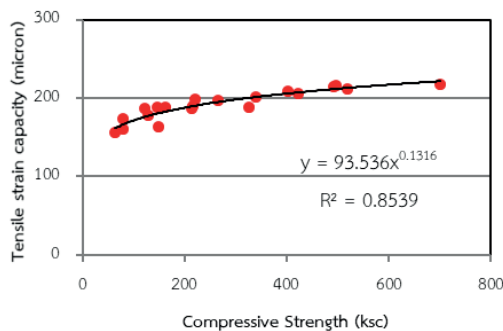
ภาพที่ 6 ความสามารถในการยืดตัวก่อนการแตกร้าวของคอนกรีต



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับ TSC ที่อายุ 28 วัน



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการแตกร้าวกับกำลังอัด



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยืดตัวก่อนการแตกร้าวกับกำลังอัด

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า กำลังอัด โมดูลัสการแตกร้าวและการยืดตัวก่อนการแตกร้าวของคอนกรีตมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมดูลัสการแตกร้าวและการยืดตัวก่อนการแตกร้าวมีความสัมพันธ์กับกำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการกำลัง การยืดตัวก่อนการแตกร้าวมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก แต่ในระยะยาวมีแนวโน้มคงที่

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่สนับสนุนทุนวิจัยในการดำเนินงานนี้ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก และมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่สนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Suzuki, K., Ohno, Y. and Nakagawa, T. (1993). Test method for cracking of concrete due to drying shrinkage. In: Zdenek P, Bazant, editor, *Creep and shrinkage of concrete*. London: E and FN Spon, 63-70.
- [2] Wiegrink, K., Marikunte, S. and Shah, S.P.(1993). Shrinkage cracking of high-strength concrete, *ACI Material Journal*, 93, 5, 409-415.
- [3] Tongaroonsri, S. and Tangtermsirikul, S., (2010) "Prediction of Cracking Age of Concrete due to Restrained Shrinkage", *Proceedings of the 15th National Convention on Civil Engineering*, Engineering Institute of Thailand, UbonRatchathani, 12 - 14 May 2010, MAT.029, pp.202
- [4] Yuan, Y., and Wan, Z.L. Prediction of cracking within early-age concrete due to thermal, drying and creep behavior. *Cement and Concrete Research*, 32, (2002), 1053-1059.

- [5] Lu, H.R., Swaddiwudhipong, S., and Wee, T.H. Evaluation of thermal crack by a probabilistic model using the tensile strain capacity. *Magazine of Concrete Research*, 53, 1 (2001), 28-30.
- [6] Holt, E., and Leivo, M. Cracking Risks Associated with Early Age Shrinkage, *Cement and Concrete Composites*, 26, (2004), 521-530.
- [7] Tongaroonsri, S. and Tangtermsirikul, S. Influence of Mixture Condition and Moisture on Tensile Strain Capacity of Concrete, *Science Asia*, 34, 1 (2008), 059-068.
- [8] Swaddiwudhipong, S., Lu, H.R., and Wee, T.H. Tensile strain capacity of concrete under various states of stress. *Cement and Concrete Research* 33, (2003), 2077-2084.
- [9] Tongaroonsri S. (2009). *Prediction of Autogenous Shrinkage, Drying Shrinkage and Shrinkage Cracking in Concrete*, PhD thesis, Sirindhorn International Institute of Technology and Faculty of Engineering, Thammasat University, PathumThani, Thailand.
- [10] ACI Committee 224R-90 (1994) *Control of cracking in concrete structure*. ACI manual of concrete practice Part 3, Detroit.
- [11] ACI. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary (ACI 318RM-14)*. ACI Standards. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2002.
- [12] Raphael, J.M. Tensile Strength of Concrete. *ACI Journal*, Proceedings Vol. 81, pp. 158-165, March-April 1984.
- [13] ACI. *Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-92)*. ACI Standards. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1992.