

# รายงานการศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมของคอนกรีต ที่มีกำลังสูงถึง 1,000 กก/ซม<sup>2</sup> ที่ใช้งานก่อสร้างจริงในประเทศไทย

เรียบเรียงจากบทความเรื่อง Performance Confirmation Tests on C100 Concrete in Dubai, UAE

โดย Shusuke Kuroiwa, Yoshitaka Inoue, Kensuke Fujioka and Adel William

ผู้เรียบเรียง รศ. ดร. สุวิมล ธีจฉายา

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีก้าวหน้าไปอย่างไม่หยุดยั้งในศาสตร์ต่างๆ ด้านงานทางด้านวิศวกรรมโยชาก็เช่นกัน การพัฒนาสิ่งใหม่ๆ ทั้งทางด้านวัสดุและเทคโนโลยีทุกแขนง ทั้งการออกแบบ การก่อสร้าง การบริหารจัดการ เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับความต้องการของมนุษย์

นับตั้งแต่ Elisha Otis นักประดิษฐ์ชาวอเมริกัน ได้ประดิษฐ์ลิฟต์ที่ใช้ขนส่งในทางสูงในปี คศ .1853 (1) งานก่อสร้างก็ขยายขอบเขตออกไปในทางสูงอย่างน่ามหัศจรรย์ เมื่อสองร้อยปีที่แล้ว อาคารที่มีความสูงถึง 200 เมตร เป็นเรื่องที่ไกลเกินกว่าจินตนาการ ทว่าอาคารที่สูงที่สุดในปัจจุบันสูงถึง 448 เมตร (2) และมนุษย์ก้าวข้ามขีดจำกัดทางความสูงขั้นแล้วขั้นเล่า โดยอาศัยเทคโนโลยีในการก่อสร้างและวัสดุก่อสร้างใหม่ๆ ที่พัฒนาอย่างต่อเนื่อง

ในช่วงปี 1940 คอนกรีตที่มีกำลังสูง 40 N/mm<sup>2</sup> จัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงมาก แต่ในปี 1990 คอนกรีตกำลังสูงถึง 220 N/mm<sup>2</sup> เป็นสิ่งที่เป็นไปได้ในห้องปฏิบัติการและในช่วงเวลา 20 ปีที่ผ่านมา การใช้คอนกรีตกำลังสูง 600 – 800 N/mm<sup>2</sup> จัดเป็นเรื่องปกติในงานก่อสร้างจริง

การใช้คอนกรีตกำลังสูงมากๆ เหล่านี้เป็นประโยชน์ในการก่อสร้างอาคารสูงด้วยเหตุผลหลายประการ ที่สำคัญคือการลดขนาดขององค์อาคารที่มีผลกระทบต่อพื้นที่ใช้สอย ความสูง และน้ำหนักของอาคาร นอกจากนี้ยังเป็นการใช้วัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นอย่างมีประสิทธิภาพ และสมคุณค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะเพื่อรองรับการก่อสร้างตึกสูง รวมถึงตึกกระจกที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติและพฤติกรรมที่แตกต่างจากคอนกรีตทั่วๆ ไปทั้งในระยะสั้นและระยะยาวของคอนกรีตพิเศษเหล่านี้เป็นเรื่องสำคัญที่ผู้ใช้งานต้องมีความรู้ความเข้าใจอย่างดี โดยเฉพาะพฤติกรรมในด้านการแตกร่อนอย่างรุนแรงเมื่อเกิดไฟไหม้ การหดตัวออโตจีเนียส หรือค่าคุณสมบัติทางกลที่ถูกต้อง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบและคาดการณ์ถึงพฤติกรรมของโครงสร้างในอนาคต เช่น ค่า E (Modulus of Elasticity) ค่าสัมประสิทธิ์การล้าที่จะเกี่ยวข้องกับการเสีรูปจากการใช้ค่า E ต่ำ เมื่อเทียบกับค่ากำลังที่สูงมากของคอนกรีต

บทความฉบับนี้เรียบเรียงจากรายงานการศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีกำลังสูงถึง 1,000 กก/ซม<sup>2</sup> ที่ใช้วัสดุท้องถิ่นที่ใช้ในงานก่อสร้างจริงในประเทศไทย(3) ซึ่งมีโครงการก่อสร้างอาคารระฟ้าจำนวนมาก และมีสภาพแวดล้อมรุนแรงทั้งสภาพอากาศ เกลือคลอไรด์ และซัลเฟต

คณะนักวิจัยได้ศึกษาคอนกรีตกำลังสูง 100 N/mm<sup>2</sup> ซึ่งผลิตจากวัสดุท้องถิ่นทั้งคุณสมบัติและพฤติกรรม โดยรวมถึงพฤติกรรมของคอนกรีตสดที่เกี่ยวกับความสามารถทำงานได้ ระยะเวลาก่อตัวในช่วงต้นและปลาย ค่ากำลังอัด ค่า E การหดตัวแบบอโตจีนีซิส พฤติกรรมการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและการล้า การทนไฟ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาพฤติกรรมในด้านความทนทานเพื่อรองรับการใช้งานในภูมิภาคประเทศที่รุนแรงของประเทศคูโบทั้งด้านอุณหภูมิ การทำลายจากคลอไรด์และซัลเฟต โดยพิจารณาจากการซึมผ่านของน้ำและคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ร่วมกับเส้นใยโพลีโพรพิลีน และสารลดน้ำอย่างมาก ซึ่งเป็นกระบวนการปฏิบัติที่ใช้ทั่วไปในประเทศนี้

ในรายงานประกอบด้วยรายละเอียดสองส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาคุณสมบัติของตัวอย่างคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยได้เติมเส้นใย PolyPropylene ร้อยละ 0, 0.1 และ 0.15 โดยปริมาตรเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการแตกหลุดร้อนเมื่อได้รับความร้อนสูงซึ่งเป็นพฤติกรรมที่เป็นปัญหาของคอนกรีตกำลังสูงที่มีเนื้อที่แน่นและได้เลือกสัดส่วนผสมที่มีเส้นใยผสมร้อยละ 0.1 หรือ 0.91 กก/ม<sup>3</sup>

ในการศึกษาส่วนที่สองซึ่งเป็นการศึกษาเสาจำลองคู่แฝดที่หล่อขึ้นโดยใช้วิธีก่อสร้างและวัสดุเช่นเดียวกับเสาจริงในโครงสร้าง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดความร้อนภายในผลกระทบจากการบ่มและกำลังอัดของคอนกรีต โครงสร้างจากการเจาะตัวอย่างศึกษา

รายละเอียดของการศึกษาสรุปแสดงในตารางที่ 1, 2 และ 3

### ตารางที่ 1 รายละเอียดชุดการทดสอบ

Series of experiments	#1 Tests to confirm basic properties	#2 Experiment using mock-up columns
Objective	Basic properties of fresh and hardened concrete with a compressive strength of 100 N/mm <sup>2</sup>	Placing performance tests while producing a mock-up reinforced columns with a cross sectional area of the actual size and test to confirm the strength properties after hardening
Concrete	1) C100 without fiber 2) C100 with 0.91 kg/m <sup>3</sup> polypropylene fibers 3) C100 with 1.37 kg/m <sup>3</sup> polypropylene fibers	1) C100 with 0.91 kg/m <sup>3</sup> polypropylene fibers

ตารางที่ 2 รายละเอียดวัสดุทดสอบ

Material	Details		
Cement	Ordinary portland cement	d=3.15 g/cm <sup>3</sup>	S=320m <sup>2</sup> /kg
Mineral admixture	Fly ash	d=2.17 g/cm <sup>3</sup>	S=320m <sup>2</sup> /kg
	Silica fume	d=2.20 g/cm <sup>3</sup>	S=21m <sup>2</sup> /g
Fine aggregate	Washed crushed sand (limestone)	d=2.7 g/cm <sup>3</sup>	A=1.0%
	Natural dune sand	d=2.65 g/cm <sup>3</sup>	A=0.9%
Coarse aggregate	Crushed stone (limestone)	d=2.70g/cm <sup>3</sup>	A=0.6%
		Maximum size:10mm.	
Chemical admixture	superplasticizer	Polycarboxylic ether polymers	
Fiber	Polypropylene fibers (PPF)	Length :12mm. Thickness: 18 microns	

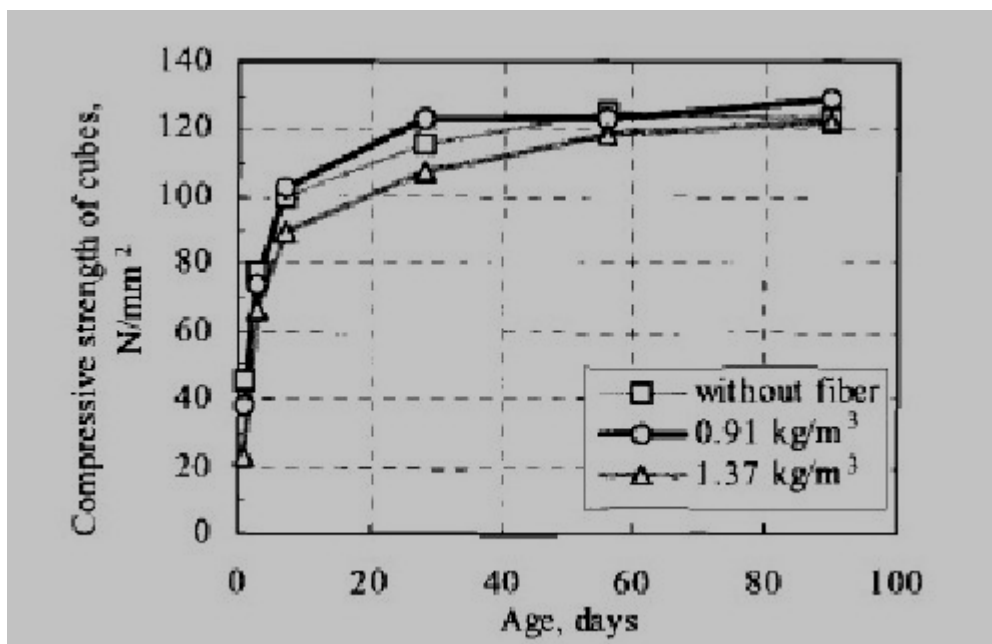
d: specific gravity S: Blaine fineness A: Absorption

ตารางที่ 3 รายละเอียดส่วนผสม

รายละเอียด	C100 without fibers	C100 with 0.91 kg/m <sup>3</sup> PPF	C100 with 1.37kg/m <sup>3</sup> PPF
Air content,%	1.5	1.5	1.5
Water,kg/m <sup>3</sup>	1.33	1.33	1.33
OPC, kg/m <sup>3</sup>	500	500	500
Fly ash, kg/m <sup>3</sup>	90	90	90
Silica fume, kg/m <sup>3</sup>	45	45	45
Fine ag.(Washed crushed sand) kg/m <sup>3</sup>	600	650	650
Fine ag.(Natural dune sand) kg/m <sup>3</sup>	310	260	260
Coarse ag.( crushed stone) kg/m <sup>3</sup>	790	800	800
Polypropylene fibers, kg/m <sup>3</sup>	0	0.91	1.37
Superplasticizer,mL	11000	14000	15250
		15500	
Series of experiment	#1	#1	#2
			#1

ในการศึกษานี้ นักวิจัยได้พยายามลดข้อจำกัดในการทดสอบที่อาจมีผลกระทบต่อผลลัพธ์เท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ได้ข้อมูลใกล้เคียงความเป็นจริง เช่น การลดการยึดรั้งเนื่องจากแบบในการศึกษา การหัดตัวแบบ ออโตจีเนียส ดังรายละเอียดที่ระบุไว้ในเอกสารฉบับเต็ม(3) และได้พบพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูงดังสรุปรายละเอียดต่อไปนี้

1. คอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตจากวัสดุในท้องถิ่นร่วมกับซิลิกาฟูม เถ้าลอย และสารลดน้ำปริมาณมาก โดยมีคุณสมบัติตามต้องการนั้น สามารถเป็นไปได้เมื่อใช้วิธีการปฏิบัติจริง
2. พฤติกรรมในด้านความสามารถทำงานได้นั้น เมื่อทดสอบตามวิธีการ T50 – BS 1881 part 102 คอนกรีตมีค่าการไหลลดลง และเวลาที่วัดได้เมื่อมีการไหล 50 ซม. เพิ่มขึ้น หากใส่เส้นใยปริมาณมากขึ้น โดยคอนกรีตที่มีเส้นใย 0.91 กก/ม<sup>3</sup> (0.10%) คงค่าการไหลได้ไม่น้อยกว่า 60 ซม. เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยยังคงมีกำลังอัดที่ 56 วัน 120 N/mm<sup>2</sup> ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน
3. อย่างไรก็ดี คอนกรีตเติมเส้นใยที่ใช้ในการศึกษานี้ ซึ่งเติมสารลดน้ำปริมาณมาก มากขึ้นกว่าปกติ เพื่อคงค่าการไหลตามต้องการนั้น มีระยะเวลาก่อตัวนานกว่า 10 ชั่วโมง และปัจจัยนี้ส่งผลกระทบต่อการพัฒนากำลังในช่วง 7 วันแรก อย่างไรก็ดี ในการทำงานจริงอาจแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยปรับเปลี่ยนชนิดสารลดน้ำปริมาณมากและให้ความระมัดระวังในการใช้แบบหล่อทั้งแบบ Jumping Form และแบบเลื่อน (Slip Form)
4. การเติมเส้นใยและปริมาณที่ใช้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง โดยลดลงมากขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น อย่างไรก็ดี กำลังที่อายุ 56 วัน แม้จะลดลงแต่ยังอยู่ที่ระดับ 120 N/mm<sup>2</sup> ซึ่งยังคงเป็นไปตามข้อกำหนด (สูงกว่า 100 N/mm<sup>2</sup>) การพัฒนากำลังของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การพัฒนากำลังของคอนกรีตกำลังสูงที่ใส่และไม่ใส่เส้นใย

5. การใช้หินปูนบดเป็นทั้งมวลรวมหยาบและละเอียด สำหรับคอนกรีตกำลังสูงมีแนวโน้มที่จะให้คอนกรีตที่มีเสถียรภาพสูง เช่น ค่า E ที่อายุ 56 วัน เกิน  $50 \text{ kN/mm}^2$  (ASTM 469) ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบคอนกรีตทั้งชนิดไม่มีและมีส่วนใย (ร้อยละ 0, 0.1, 0.15) มีค่า 52,100 53,300 และ  $52,400 \text{ N/mm}^2$  ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการประมาณด้วยสมการของ JASS 5(4) ซึ่งคำนวณได้  $55 \text{ kN/mm}^2$  แม้จะมีความแตกต่างอยู่บ้างเนื่องจากการศึกษาใช้มวลรวมทั้งหยาบและละเอียดจากหินปูนบดล้วน แต่ผลชี้ว่าค่าจากสมการสามารถใช้ประมาณค่า E สำหรับคอนกรีตกำลังสูงได้ใกล้เคียง

6. ค่าการหดตัวออโตจีเนียสมีค่าค่าประมาณ 500 – 600 ไมครอน (อายุ 91 วัน) แม้เมื่อใช้ซีเมนต์ปกติร่วมกับซิลิกาฟุ่ม และใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำเพียง 0.209 นอกจากนั้นค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนก็มีค่าต่ำ เพียงประมาณ  $7.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  เมื่อเทียบกับค่าโดยประมาณ  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  ซึ่งทั้งสองกรณี นักวิจัยคาดว่าเป็นผลจากการใช้มวลรวมหินปูน ซึ่งจัดเป็นข้อดีเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากหน่วยแรง และหน่วยการยึดตัวที่อาจจะเกิดจากความร้อนจากปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้น

7. ในด้านพฤติกรรมการคืบ ตัวอย่างคอนกรีตที่ทิ้งไว้ในอากาศมีค่าความเครียด เมื่อได้รับแรงกระทำนาน 240 วัน สูงกว่าตัวอย่างที่มีการผิวกว ในสภาพเดียวกัน (500 ไมครอน เทียบกับ 400 ไมครอน) ซึ่งชี้ชัดว่าลักษณะการแห้งตัวมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูงมากกว่าคอนกรีตปกติ และสำหรับโครงสร้างค้ำฟ้าซึ่งมักมีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่กว่าปกติมาก และมีการแห้งตัวช้ากว่าปกติย่อมต้องการความเอาใจใส่ในการบ่มมากกว่าปกติ

8. ผลการศึกษาพฤติกรรมด้านความคงทนทั้งการซึมผ่านของน้ำและคลอไรด์ จากการศึกษาชี้แสดงว่าคอนกรีตกำลังสูงมีความคงทนสูงเพียงพอสำหรับการใช้งานแม้จะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ปริมาณเส้นใยมากขึ้น

9. ผลการศึกษาพฤติกรรมของเสาจำลองขนาดพื้นที่หน้าตัด  $1.0 \times 1.0 \text{ m}$ . ใช้ร่วมกับแบบที่มีฉนวน Polystyrene หนา 5 ซม. หุ้ม แสดงว่าอุณหภูมิภายในมิได้เพิ่มสูงผิดปกติภายใน 24 ชั่วโมงแรก แต่จะพัฒนาจนมีอุณหภูมิซึ่งวัด ณ บริเวณกลางเสาเพิ่มสูงถึง  $70^{\circ}\text{C}$  หลังจากเทคอนกรีตได้ 2 วัน โดยมีความแตกต่างจากอุณหภูมิที่วัด ณ ระยะจากมุมเสา 5 ซม. เพียง  $6^{\circ}\text{C}$

10. ค่ากำลังอัดของแท่งคอนกรีตที่เจาะจากเสาจำลองบริเวณใกล้ศูนย์กลางของเสาที่อายุ 28 และ 56 วัน มีค่าผันแปรระหว่าง  $91.4 - 98.4 \text{ N/mm}^2$  และ  $95.6 - 107 \text{ N/mm}^2$  ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากำลังของแท่งตัวอย่างรูปลูกบาศก์ที่เก็บตามปกติที่อายุเดียวกัน (56 วัน) เล็กน้อย ( $115 \text{ N/mm}^2$ ) อย่างไรก็ตาม กำลังของแท่งตัวอย่างที่เจาะเก็บจากเสาจำลอง ณ ตำแหน่งต่างกันไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งแสดงว่าอาจเป็นผลจากการติดตั้งฉนวนที่แบบซึ่งป้องกันผลกระทบจากอุณหภูมิที่แตกต่าง ณ ตำแหน่งต่างๆ กัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงตำแหน่งของคอนกรีตในเสาคอนกรีตจากแท่งตัวอย่างเจาะตามยาวบริเวณด้านบนของเสามีค่าต่ำกว่าระดับอื่นประมาณร้อยละ 4

11. เมื่อพิจารณาคูณสมบัติด้านการทนไฟซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งของคอนกรีตกำลังสูง การวิจัยนี้แสดงว่าการเติมเส้นใยมีประสิทธิภาพมากในการลดคอนกรีตหลุดร่อนรุนแรงเมื่อได้รับความร้อน

เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้เติมเส้นใยซึ่งเกิดการหลุดร่อนในช่วงเวลา 7 – 20 นาทีหลังได้รับความร้อน และหน้าตัดเสียหายรุนแรงหลังจาก 55 นาที ขณะที่คอนกรีตตัวอย่างที่ใส่เส้นใยทั้งร้อยละ 0.1 และ 0.15 ไม่แสดงการหลุดร่อน และคงสภาพหน้าตัดได้เกินร้อยละ 94 ที่ระยะเวลา 55 นาที เช่นกัน

รายงานฉบับนี้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติและพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูง รวมถึงแนวทางที่จะนำไปปรับใช้ในการทำงานจริงเพื่อให้ได้คอนกรีตกำลังสูงมากที่มีคุณสมบัติที่ควบคุมได้ตามต้องการ และมีประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเหล่านี้ยังมีความจำกัด โดยเฉพาะในกรณีคุณสมบัติของคอนกรีตในอุณหภูมิสูงซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไปในอนาคต

#### เอกสารอ้างอิง

1. <http://inventors.about.com/library/inventors/blelevator.htm> retrieved on 16 /03/08
2. <http://architecture.about.com/gi/dynamic/offsite.htm/skyscraperpage.com/> retrieved on 16 /03/08
3. Shusuke Kuroiwa, Yoshitaka Inoue, Kensuke Fujioka and Adel William, Performance Confirmation Tests on C100 Concrete in Dubai, UAE, Journal of Advanced Concrete Technology , Vol. 5 (2007) , No. 2 pp.171-180.
4. Architectural Institute of Japan, Japanese Architectural Standard Specification for Reinforced Concrete Work.