



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

Creep Effect on Piezoresistive Responses of Cement-Based Sensors

โดย

ผศ.ดร.มานิช สรรพกิจทิพากร

พฤษภาคม 2557

สัญญาเลขที่ MRG5680076

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

Creep Effect on Piezoresistive Responses of Cement-Based Sensors

ผศ.ดร.มานิช สรรพกิจทิพากร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของแรงกระทำแบบคงค้างที่มีผลต่อสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวรับส่งสัญญาณที่ทำจากวัสดุซีเมนต์ (cement-based sensor) ตัวรับส่งสัญญาณซีเมนต์ที่ได้ทำการศึกษานี้ทำมาจากซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 และมีการเติมผงกราไฟต์ในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักซีเมนต์และเส้นใยคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยปริมาตร ซึ่งในการทดสอบจะนำตัวรับส่งสัญญาณซีเมนต์มาทำการอัดด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดแบบคงค้างโดยที่ทำการควบคุมแรงอัดไว้ที่ร้อยละ 30 ของกำลังอัดประลัยของตัวรับส่งสัญญาณซีเมนต์เป็นระยะเวลา 30 วัน จากผลการทดสอบพบว่า การอัดแรงแบบคงค้างทำให้ก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์เกิดสภาวะคืบ (creep) โดยตัวรับส่งสัญญาณซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของกราไฟต์มีอัตราการเกิดสภาวะการคืบที่สูงกว่าตัวรับส่งสัญญาณซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของเส้นใยคาร์บอน และพบว่าสภาวะการคืบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพการต้านทานไฟฟ้าของตัวรับส่งสัญญาณซีเมนต์

คำสำคัญ : ตัวรับส่งสัญญาณซีเมนต์, เพียโซรีซิสติวิตี, การคืบ, เส้นใยคาร์บอน, ผงกราไฟต์

Abstract

This research was to study the influence of a sustained load on the electrical resistivity of a cement-based sensor. The cement-based sensor in this study was made of cement paste having water to cement ratio of 0.4 with the addition of graphite powder at 2% and 4% by cement weight and carbon fibers at 2% and 4% by volume. The sustained load was applied on the cement-based sensor using a sustain machine to control a compressive force continually at 30% of its ultimate compressive strength for a period of 30 days. The test results showed that the sustained load induced a creep strain on the cement-based sensor. The graphite incorporated cement-based sensor showed higher creep strain than the plain cement-based sensor while the carbon fiber cement-based sensor showed lesser. In addition, it was showed that the creep strain affects the electrical resistivity of the cement-based sensors.

Keywords : Cement-Based Sensor, Piezoresistivity, Creep, Carbon Fiber, Graphite Powder

ข้อมูลของโครงการวิจัย

Project Code : MRG5680076

Project Title : Creep Effect on Piezoresistive Responses of Cement-Based Sensors

Investigator : ผศ.ดร.มานิช สรรพกิจทิพากร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail Address : manotes@kmutnb.ac.th

Project Period : 1 ปี (ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2556 ถึงเดือนพฤษภาคม 2557)

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ
 Kraisit Loamrat, **Manote Sappakittipakorn** and Piti Sukontasukkul, (2014)
 “Electrical Resistivity of Cement-Based Sensors under a Sustained Load,”
 Advanced Material Research, vol. 931-932, p. 436-440. (สำเนาบทความในภาคผนวก ก)
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
 - เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)
 โครงการวิจัยนี้เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยในการผลิตบัณฑิตในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร
 มหบัณฑิตจำนวน 1 คน คือ นายนคร เสวกพันธ์ และสนับสนุนการทำวิจัยของนักศึกษา
 ในระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต ในสาขาวิศวกรรมโยธา จำนวน 1 คน คือ นายไกรสิทธิ์ โลมรัตน์

สารบัญ

บทคัดย่อ	ii
Abstract	ii
ข้อมูลของโครงการวิจัย	iii
Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.....	iv
สารบัญ.....	v
สารบัญรูปภาพ	vii
สารบัญตาราง.....	xi
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	3
2.2 งานวิจัยและความรู้ที่เกี่ยวข้องกับตัวรับส่งสัญญาณซีเมนต์เบส.....	7
2.3 ความคืบของคอนกรีต (Creep of Concrete).....	17
2.4 เมททิวเซลลูโลส (Methyl Cellulose).....	31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	33
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	33
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	36
3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลองโดยสังเขป	38
3.4 ขั้นตอนการแปลงค่าทอร์กเป็นค่าแรงอัดกระทำ	41
3.5 ขั้นตอนในการผสม	43
3.6 ขั้นตอนในการหล่อตัวอย่าง	44

3.7	ขั้นตอนในการบ่ม	44
3.8	ขั้นตอนในการทดสอบตัวอย่าง	45
3.9	ขั้นตอนในการสรุปผล	48
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	50
4.1	ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ 56 วัน	50
4.2	ค่าความต้านทานไฟฟ้าภายใต้การรับแรงแบบคงค้างเป็นระยะเวลา 30 วัน	52
4.3	ผลการทดสอบค่าความเครียดภายใต้การรับแรงแบบคงค้างเป็นระยะเวลา 30 วัน	54
4.4	ผลการนำค่าความต้านทานทางไฟฟ้า – ค่าความเครียดมาหาความสัมพันธ์	56
4.5	ผลการนำค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ 56 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกัน	58
4.6	ผลการนำค่าความต้านทานทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้าง ที่ระยะเวลา 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกัน	59
4.7	ผลการนำค่าความเครียดภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้าง ที่ระยะเวลา 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกัน	59
4.8	ผลการนำค่าความต้านทานทางไฟฟ้า – ค่าความเครียด ภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้าง ที่ระยะเวลา 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกัน	60
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	62
5.1	ผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในสภาวะไร้แรงกระทำเป็นเวลา 56 วัน	62
5.2	ผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในสภาวะการรับแรงกระทำแบบคงค้างเป็นเวลา 30 วัน	63
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้า	63
5.4	ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง		65
ภาคผนวก ก		67
ภาคผนวก ข		Error! Bookmark not defined.

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2-1 Percolation phenomena (Xie et al. 1996).....	11
รูปที่ 2-2 Effect of fibre length on conductivity of CFRC at 1 day hydration (Chiarello and Zinno 2005).....	12
รูปที่ 2-3 Resistivity as a function of curing time at different fibre contents (Chacko et al. 2007).....	13
รูปที่ 2-4 Resistivity (ρ) variation with temperature at different frequencies for (a) plain cement mortar ; (b) mortar containing 3 mm carbon fibres (McCarter et al. 2007)	15
รูปที่ 2-5 effect of inter-electrode spacing on the resistivity of CFRC (Banthia et al. 1992).....	16
รูปที่ 2-6 ความเครียดขึ้นกับเวลา ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้น้ำหนักกระทำแบบ คงค้างสำหรับ 90 วันและหลังจากนั้นอีก 30 วันไม่มีน้ำหนักกระทำ.....	18
รูปที่ 2-7 Influence of relative humidity on (a) drying shrinkage and (b) creep of concrete.....	19
รูปที่ 2-8 Maxwell chain model.....	22
รูปที่ 2-9 Realistic modeling of concrete.....	22
รูปที่ 2-10 Geometry and boundary conditions of compressive specimen(all in [mm]).....	25
รูปที่ 2-11 Constitutive law for concrete uniaxial tensile compressive relationship obtained from single solid finite element	25
รูปที่ 2-12 Calculate strain-time relationship for different load levels	26
รูปที่ 2-13 The relation between the relative compressive strength and time at failure.....	27

รูปที่ 2-14 Calculated failure modes (dark zone = maximal principal strains)for	27
รูปที่ 2-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับระยะเวลาของซีเมนต์เฟส (พูนซีเมนต์ คั่นสนะโชติรัศมี).....	29
รูปที่ 2-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับระยะเวลาของซีเมนต์ผสม เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (พูนซีเมนต์ คั่นสนะโชติรัศมี).....	30
รูปที่ 2-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับระยะเวลาของซีเมนต์ผสม ผงกราไฟต์ (พูนซีเมนต์ คั่นสนะโชติรัศมี).....	31
รูปที่ 3-1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	33
รูปที่ 3-2 ผงกราไฟต์ (Graphite Powder)	33
รูปที่ 3-3 เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (Chopped Carbon Fiber)	34
รูปที่ 3-4 สารลดน้ำ (Superplasticizer).....	34
รูปที่ 3-5 ผงซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume).....	35
รูปที่ 3-6 Methyl Cellulose	35
รูปที่ 3-7 เครื่องกดแบบ Sustained Load.....	36
รูปที่ 3-8 เครื่อง LCR Meter : Agilent 4263 B	36
รูปที่ 3-9 ตู้บั่นตัวอย่างแบบควบคุมอุณหภูมิ	37
รูปที่ 3-10 แบบหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 cm	37
รูปที่ 3-11 แผ่นอะคริลิกสำหรับยึดชิ้นขนาด 4.9 x 4.9 x 4.9 cm	38
รูปที่ 3-12 แผ่นขั้วทองแดงขนาดกว้าง 1 cm ยาว 7 cm	38
รูปที่ 3-13 รูปก่อนรับส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบส	39
รูปที่ 3-14 รูปการนำ Load cell ไปวางไว้ในแท่นกดของเครื่อง Sustain load	41

รูปที่ 3-15 รูปการไขเครื่อง Sustain load โดยประแจทอร์คเพื่อเก็บค่าจาก Load cell.....	42
รูปที่ 3-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (kN) – กำลังบิด (lb-m).....	42
รูปที่ 3-17 รูปวัสดุที่นำมาใช้ในการผสมก้อนตัวอย่าง	43
รูปที่ 3-18 ภาพการผสมวัสดุโดยเครื่องมือผสมคอนกรีต	43
รูปที่ 3-19 ภาพการนำถุงพลาสติกมาคลุมก้อนซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์	44
รูปที่ 3-20 ภาพการนำก้อนซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์มาอบด้วยตู้อบ.....	45
รูปที่ 3-21 ภาพโปรแกรมที่ใช้ในการเก็บค่าความต้านทานทางไฟฟ้า	46
รูปที่ 3-22 ภาพแสดงวงจรการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์.....	46
รูปที่ 3-23 ภาพการติดตั้ง strain gauge.....	47
รูปที่ 3-24 ภาพการกดก้อนซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์ด้วยเครื่องทดสอบ Sustained Load	47
รูปที่ 3-25 ภาพการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและค่า strain	48
รูปที่ 3-26 ภาพแสดงวงจรการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์ภายใต้ การรับแรงอัด	48
รูปที่ 4-1 ภาพกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระยะเวลา 56 วัน	51
รูปที่ 4-2 ภาพกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระยะเวลา 56 วัน	52
รูปที่ 4-3 ภาพกราฟความต้านทานไฟฟ้า ΔR ภายใต้การรับแรงแบบคงค้างเป็นระยะเวลา 30 วัน กลุ่มที่1	53
รูปที่ 4-4 ภาพกราฟความต้านทานไฟฟ้า ΔR ภายใต้การรับแรงแบบคงค้างเป็นระยะเวลา 30 วัน กลุ่มที่ 2	54
รูปที่ 4-5 ภาพกราฟความค่าความเครียด $\Delta \epsilon$ ภายใต้การรับแรงแบบคงค้างเป็นระยะเวลา 30 วัน กลุ่มที่ 1	55

รูปที่ 4-6 ภาพกราฟความค่าความเครียด $\Delta\epsilon$ ภายใต้การรับแรงแบบคงค้ำเป็นระยะเวลา 30 วัน	
กลุ่มที่ 2	56
รูปที่ 4-7 ภาพกราฟความสัมพันธ์เชิงกราฟค่าความต้านทานทางไฟฟ้า – ค่าความเครียดภายใต้	
การรับแรงแบบคงค้ำเป็นระยะเวลา 30 วันกลุ่มที่ 1	57
รูปที่ 4-8 ภาพกราฟความสัมพันธ์เชิงกราฟค่าความต้านทานทางไฟฟ้า – ค่าความเครียดภายใต้	
การรับแรงแบบคงค้ำเป็นระยะเวลา 30 วันกลุ่มที่ 2	58
รูปที่ 4-9 ภาพกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในระยะเวลา 56 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลอง.....	58
รูปที่ 4-10 ภาพกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ΔR ภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้ำ	
ในระยะเวลา 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลอง.....	59
รูปที่ 4-11 ภาพกราฟแสดงค่าความเครียด $\Delta\epsilon$ ภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้ำ	
ในระยะเวลา 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลอง.....	60
รูปที่ 4-12 ภาพกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า – ค่าความเครียดภายใต้สภาวะการรับแรง	
แบบคงค้ำในระยะเวลา 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลอง.....	61

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3-1 ตารางแสดงกลุ่มก้อนตัวอย่างและปริมาณจำนวนก้อนทดสอบในกลุ่มที่ 1	40
ตารางที่ 3-2 ตารางแสดงกลุ่มก้อนตัวอย่างและปริมาณจำนวนก้อนทดสอบในกลุ่มที่ 2	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การติดตามความสมบูรณ์ของโครงสร้าง (Structural Health Monitoring, SHM) เป็นรูปแบบของการติดตามสภาพโครงสร้างที่กำลังได้รับความนิยมอยู่ในหลายประเทศ ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยให้การตรวจสอบและการติดตามสภาพโครงสร้างเป็นไปโดยง่าย แม่นยำ และทันต่อเหตุการณ์ ซึ่งเหมาะสำหรับโครงสร้างสาธารณูปโภคขนาดใหญ่ที่จำเป็นจะต้องมีการเฝ้าระวังอยู่ตลอดเวลา

วิธีการเฝ้าระวังทางโครงสร้างนั้นก็มีอยู่ด้วยกันหลายวิธีเช่น การตรวจสอบโครงสร้างด้วยคลื่นความถี่ (Lamb Wave Methods), ระบบเตือนภัยอัจฉริยะ (Smart Load Alarm System, SLAS), ระบบการใช้กล้องทีโอโดไลต์ในการถ่ายภาพโครงสร้าง (Robotic Theodolites, RTS), ระบบตัวส่งสัญญาณไร้สาย (Wireless Sensor Networks, WSNs) เป็นต้น แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ตัวเซ็นเซอร์ในการตรวจสอบ เพราะเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการนำไปใช้อีกทั้งยังมีราคาที่ไม่แพง ซึ่งในงานด้านวิศวกรรม การใช้ประโยชน์จากการตรวจสอบด้วยระบบเซ็นเซอร์นั้น จะนิยมใช้ตัวส่งสัญญาณที่ทำจากโลหะติดตั้งไว้ในจุดที่สนใจในโครงสร้าง ทำให้สามารถได้รับข้อมูลลักษณะการรับแรงของโครงสร้าง ซึ่งออกมาในรูปของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการรับแรงของโครงสร้างนั้นๆ โดยสามารถนำผลของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้านี้มาแปลงเป็นค่าต่างๆ เช่น ค่าความเค้น หรือ ค่าของความเครียด เพื่อใช้ในการนำไปวิเคราะห์และตัดสินใจในการประเมินผลทางโครงสร้างของอาคารนั้นๆ เพื่อที่จะได้ดำเนินการอย่างหนึ่งอย่างใดต่อไป

อย่างไรก็ตาม การใช้งานเซ็นเซอร์โลหะเหล่านี้ก็ยังมีข้อด้อยอยู่ เช่น ความไม่คงทนของตัวส่งสัญญาณซึ่งมีสภาพเป็นโลหะที่อาจเกิดเป็นสนิมขึ้นได้ถ้ามีการซึมผ่านของน้ำและอากาศเข้าไปในเนื้อของคอนกรีต นอกจากนี้ยังมีเรื่องของลักษณะการติดตั้ง โดยเซ็นเซอร์โลหะเหล่านี้มักจะได้รับการติดตั้งที่บริเวณผิวด้านนอกของคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้รับก็อาจจะเป็นค่าที่ตำแหน่งของผิวคอนกรีตไม่ใช่ตำแหน่งของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยตรง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยในครั้งนี้ซึ่งจะเป็นการศึกษาและการทำงานวิจัยตัวเซ็นเซอร์ที่ผลิตจากวัสดุผสมซีเมนต์โดยทำการผสมซีเมนต์กับวัสดุจำพวกคาร์บอนซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำลงและมีพฤติกรรมเป็นเพียโซรีซิสทีฟ (Piezo-Resistive) มากขึ้น ซึ่งตัวเซ็นเซอร์ซีเมนต์เหล่านี้ จะทำให้ปัญหาเกี่ยวกับเซ็นเซอร์โลหะที่กล่าวมาลดน้อยลงเนื่องจากเซ็นเซอร์ซีเมนต์เบสมีความทนทานสูงและสามารถที่จะติดตั้งในเนื้อคอนกรีตได้อีกทั้งยังมีราคาที่ไม่แพง

งานวิจัยนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของโครงการศึกษาและพัฒนาตัวส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสต์เส้นใยคาร์บอนที่มี การผสมเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์และผงกราฟาไฟต์โดยในงานวิจัยนี้จะเน้นในการศึกษาผลกระทบของแรงกระทำ แบบคงค้างที่กระทำบนตัวซีเมนต์เบสเส้นใยคาร์บอนต่อคุณสมบัติด้านไฟฟ้าของซีเมนต์เบสเส้นใยคาร์บอนดังกล่าว ผลลัพธ์ที่ได้เหล่านี้จะนำมาเป็นข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อให้งานวิจัยซีเมนต์เบสเส้นใยคาร์บอนมีข้อมูลที่ครบถ้วนมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- เพื่อเป็นการศึกษาผลกระทบของแรงกระทำแบบคงค้างที่มีผลต่อซีเมนต์เบสเส้นใยคาร์บอนที่ผสม เส้นใยคาร์บอนและที่ผสมผงกราฟาไฟต์
- เพื่อเป็นการพัฒนาและเพิ่มเติมองค์ความรู้ในด้านต่างๆของซีเมนต์เบสเส้นใยคาร์บอนให้มีความ ครบถ้วนมากยิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ขอบเขตของการศึกษาสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อย ดังนี้

- ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซีเมนต์เบสเส้นใยคาร์บอนที่ทำจากวัสดุซีเมนต์ผสมเส้นใยคาร์บอน โดยมีการควบคุมการใช้ที่ร้อยละ 2 และ 4 โดยปริมาตรและที่ผสมผงกราฟาไฟต์ที่ร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักซีเมนต์และมีการใช้ซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 0 และ 15 โดยน้ำหนักซีเมนต์
- ศึกษาโดยการกดน้ำหนักแบบคงค้างโดยใช้แรงกระทำที่ 30% ของ Ultimate Strength และทำการกดเป็นระยะเวลา 1 เดือนแล้วทำการเก็บข้อมูลโดยใช้เครื่อง LCR

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้เห็นถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของความต้านทานไฟฟ้าในกอนทดสอบที่อยู่ในสภาวะแรง กระทำแบบคงค้าง
- เพื่อเป็นการส่งเสริมและให้เห็นถึงความสามารถในการใช้ซีเมนต์เบสเส้นใยคาร์บอนเป็นตัวเฝ้าระวัง ทางโครงสร้าง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ความต้านทานไฟฟ้า คือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของวัตถุ วัตถุที่มีความต้านทานต่ำจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ง่าย เรียกว่า ตัวนำไฟฟ้า ในขณะที่ฉนวนไฟฟ้ามีความต้านทานสูงมาก และกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ยาก

กฎของโอห์ม แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V) กระแสไฟฟ้า (I) และความต้านทาน (R) ได้ดังนี้

$$R = \frac{V}{I}$$

ค่าความต้านทานไฟฟ้าใช้สัญลักษณ์ (R) มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

2.1.1 ความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุ (Resistance)

เมื่อไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านวัตถุหรือสสารที่มีโครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอทั้งชิ้น (เอกพันธ์ หรือ homogeneous) กระแสไฟฟ้าจะกระจายทั่วหน้าตัดของวัตถุหรือสสารเหล่านั้น เราจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมิติทางกายภาพและความต้านทานไฟฟ้า (Resistance, R) ของวัตถุได้เป็น

$$R = l \frac{\rho}{A}$$

โดยที่

l คือ ความยาวของตัวนำมีหน่วยเป็นเมตร (m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำมีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของสสารมีหน่วยเป็นโอห์ม.เมตร ($\Omega.m$)

ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าอาจถูกกำหนดให้เป็นส่วนกลับของค่านำไฟฟ้า (σ) ของวัสดุ

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าเป็นความสามารถของวัสดุในการนำกระแสไฟฟ้า และมีหน่วย SI เป็น ซีเมนต์ต่อเมตร ($S.m^{-1}$)

2.1.2 ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ (Impedance)

ค่าความต้านทานรวมอัตราการไหลของไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่ความถี่ใดๆคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นการรวมของค่าความต้านทานโอห์ม และค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ (Z) โดยทั่วไปจะเป็นเครื่องหมายเชิงซ้อน หรืออยู่ในรูปแบบเชิงขั้ว (Polar Form) มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

$$Z = R + jX$$

โดยที่

Z คือ ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ มีหน่วยโอห์ม (Ω)

R คือ ความต้านทานโอห์มซึ่งรู้ว่าเป็นส่วนจริงของค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

j คือ หน่วยวัดจำนวนจินตภาพ

X คือ ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า ถูกรับรู้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของค่าจำนวนจินตภาพ มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

$$Z = |Z|$$

โดยที่

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right)$$

โดยที่ค่า $|Z|$ และ θ เป็นขนาดและมุมเฟสของอิมพีแดนซ์ ในหน่วย โอห์ม (Ω) และองศา ($^{\circ}$)

2.1.3 ค่าความต้านทานโอห์ม

เมื่อทำงานด้วยสัญญาณแบบกระแสตรง DC ค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรจะถูกต่อต้านจากค่าความต้านทานในวงจร AC เท่านั้น ถึงอย่างไรก็ตาม แนวความคิดในเรื่องของความต้านทานไฟฟ้าที่ถูกนำเสนอก็มีรูปแบบที่ยากจะเข้าใจโดยการกล่าวอ้างถึงค่า อิมพีแดนซ์

ค่าอิมพีแดนซ์ จะประกอบไปด้วยสองส่วน คือ ค่าความต้านทานโอห์ม (R) และค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า (X) และผลอันเนื่องมาจากค่าความต้านทานทางไฟฟ้า จึงทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงส่วนใหญ่จะไม่เหมือนกับค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ

ค่าความต้านทาน (Ohmic Resistance) ถูกรับรู้ว่าเป็นส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ ค่าความต้านทานบางส่วน of ค่าอิมพีแดนซ์ มีคุณสมบัติตามความสัมพันธ์ของมุมเฟสดังสมการต่อไปนี้

$$R = |Z| \cos \theta$$

โดยที่

R คือ ค่าความต้านทาน มีหน่วยโอห์ม (Ω)

$|Z|$ คือ ขนาดของ อิมพีแดนซ์ มีหน่วยโอห์ม (Ω)

θ คือ มุมเฟส (เฟสที่แตกต่างระหว่างแรงดันและกระแส) มีหน่วยองศา ($^{\circ}$)

*ohmic resistance คือ ความต้านทานคงที่ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากอัตราการใช้ของกระแสไฟฟ้า

2.1.4 ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของวงจร AC

ในวงจร AC ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า (X) ถูกกล่าวว่าเป็นส่วนจินตภาพของค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าอิมพีแดนซ์ ซึ่งจะอยู่ในรูปของค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ (X_L) หรือค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของค่าความจุ (X_C) หรือการรวมกันของทั้งสองชนิด การต่อต้านการใช้ของไฟฟ้ากระแสสลับ และความคล้ายกันของค่าความต้านทานโอห์ม (Ω)

สัดส่วนของค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของอิมพีแดนซ์จะมีความสัมพันธ์กับมุมเฟส

$$X = |Z| \sin \theta$$

โดยที่

X คือ ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้ามีหน่วยโอห์ม (Ω)

$|Z|$ คือ ขนาดของอิมพีแดนซ์ มีหน่วยโอห์ม (Ω)

θ คือ มุมเฟส (เฟสที่แตกต่างระหว่างแรงดันและกระแส) มีหน่วยองศา ($^{\circ}$)

เมื่อค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าเป็นบวก ($X > 0$) มันจะเป็นการเหนี่ยวนำที่มากกว่า ถ้าค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าเป็นลบ ($X < 0$) ซึ่งแสดงว่าค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้ามากกว่าค่าการเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าจะเท่ากับศูนย์ ($X = 0$) หมายถึงค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าไม่มีและมีค่าอิมพีแดนซ์เป็นค่าความต้านทานเท่านั้น

ค่าอัตราส่วนของสัดส่วนความต้านทานกระแสไฟฟ้ากับสัดส่วนแรงต้านทานกระแสไฟฟ้าเป็นค่า Q (Quality Factor)

$$Q = \left| \frac{X}{R} \right|$$

โดยที่

Q คือ ค่า Quality Factor

X คือ ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

2.1.5 ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

โดยคำนิยาม ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (X_C) เป็นส่วนหนึ่งของค่าความต้านทานซึ่งเป็นผลมาจากการมีอยู่ของตัวเก็บประจุภายในวงจร

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} = -\frac{1}{2\pi f C}$$

โดยที่

X_C คือ ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมในหน่วยเรเดียนต่อวินาที (rad/s)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็นฟารัด

f คือ ค่าสัญญาณความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

2.1.6 ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ

โดยคำนิยาม ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ (X_L) เป็นส่วนหนึ่งของค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นผลมาจากการมีอยู่ของขดลวดเหนี่ยวนำในวงจรค่า X_L ซึ่งถูกทราบว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความถี่กระแสสลับและตัวเหนี่ยวนำ

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

โดยที่

X_L คือ ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมในหน่วยเรเดียนต่อวินาที (rad/s)

L คือ ค่าการเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำที่หน่วยเป็นเฮนรี (H)

f คือ ค่าสัญญาณความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

2.1.7 มุมเฟส (Phase Angle)

สำหรับวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยค่าความต้านทาน R ตัวนำกระแสไฟฟ้า (L) และตัวเก็บสะสมไฟฟ้า (C) ที่เชื่อมต่อกันในระบบอนุกรมหรือแบบขนานมุมเฟสสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\tan(\theta) = (X_L - X_C) / R$$

โดยที่

θ คือ มุมเฟสมีหน่วยองศา (°)

X_L คือ ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

X_C คือ ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

2.2 งานวิจัยและความรู้ที่เกี่ยวข้องกับตัวรับส่งสัญญาณซีเมนต์เบส

2.2.1 ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต

มีข้อกังวลอย่างมากมาต่อการใช้งานคอนกรีตอันเนื่องมาจากผลของความต้านทานทางไฟฟ้าที่มีต่อลักษณะความต้องการและการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกันกล่าวคือเมื่อมีการใช้พลังงานไฟฟ้าค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการนำไปใช้งาน ตัวอย่างเช่นพื้นของห้องผ่าตัดในโรงพยาบาลที่มีความต้องการค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูง หรือการใช้ระบบป้องกันแคโทดในพื้นที่ซึ่งต้องการค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ(Whiting and Nati 2003) และปัญหาอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต เช่น การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งสามารถลดอัตราการเกิดขึ้นได้โดยการใช้วัสดุคอนกรีตที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงๆนั่นเอง

ในตัวแปรซึ่งมีความแตกต่างกันนั้นจะทำให้มีผลกระทบต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าในคอนกรีต จากการรายงานของ Whiting and Nati (Whiting and Nati 2003) ได้ตีพิมพ์บทวิจารณ์ถึงการนำไฟฟ้าบนซีเมนต์เพสต์ น้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ความชื้น เวลาของการบ่ม สารเคมีของซีเมนต์ การใช้วัสดุเสริมในซีเมนต์ การเกิดปฏิกิริยาของเคมีในส่วนผสมและปัจจัยทางด้านสภาวะแวดล้อม

ผลกระทบต่อชนิดของซีเมนต์และคุณสมบัติทางเคมี ในซีเมนต์ที่มีลูมินาในปริมาณสูงๆ จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ถูกผสมในคอนกรีตที่มีสัดส่วนและวิธีการบ่มที่คล้ายกัน และการที่มี C_3A ปริมาณสูงๆอยู่ในซีเมนต์ก็จะทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในคอนกรีตมีแนวโน้มที่สูงขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในตัวของซีเมนต์เพสต์โดยที่ไม่มีมวลรวมมาเกี่ยวข้องผลที่ได้ก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมที่เพิ่มมากขึ้น

(Whiting and Nagi 2003). ความต้านทานกระแสไฟฟ้าของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณมวลรวมในคอนกรีต (Shi 2004)

ในด้านอิทธิพลที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ Monfore (Monfore 1968) ได้กล่าวว่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลงจะทำให้ค่าความต้านทานของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในความเป็นจริง ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสามารถเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณได้จากการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วง 0.6 ถึง 0.4 ดังนั้นในที่ ที่มีความชื้นต่ำๆโอกาสที่จะมีผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในคอนกรีต จึงมีแนวโน้มที่มากกว่าในสถานะที่มีน้ำอิ่มตัว (Gjorv et al.1977)

ในการใช้วัสดุจำพวก Fly ash , Slag (GGBFS) , Silica fume ได้มีการทดสอบว่าทำให้มีการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานไฟฟ้าในคอนกรีตและในกรณีจากสารเคมีผสมเพิ่ม ซึ่งถูกแสดงในส่วนของเกล็ดคลอไรด์ที่ถูกพิจารณาและถูกยืนยันโดยคุณสมบัติในการสื่อนำพลังงานไฟฟ้าได้สูงของสารละลายคลอไรด์และเกล็ดคลอไรด์อย่างเช่นพวก แคลเซียมคลอไรด์จะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง(Monfore 1968 ; Whiting and Nagi 2003)

ปัจจัยทางด้านสถานะแวดล้อมที่มีความแตกต่างกันนั้นจะมีผลกระทบอย่างมากต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าในคอนกรีต ค่าความต้านทานจะต่ำลงในที่ที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่อัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตหรือในที่ ที่เป็นรูพรุนและในสภาพที่มีความอิ่มตัวก็จะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในคอนกรีตมีค่าที่ต่ำลง เพราะฉะนั้นความชื้นจึงมีแนวโน้มที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าในคอนกรีต

ปัจจัยทางด้านเวลา อิทธิพลของเวลาจะขึ้นอยู่กับการบ่มด้วยความชื้นและการบ่มด้วยอากาศของคอนกรีต ถ้าคอนกรีตถูกบ่มด้วยความชื้นโดยทั่วไปค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีเวลาเพิ่มขึ้นและอาจจะเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณภายใน 90 วันแรกของการบ่ม ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นจากระยะเวลาของการบ่มคอนกรีตในอากาศแห้ง กล่าวคือค่าความต้านทานพวกนี้จะเพิ่มขึ้นจากการสูญเสียค่าความชื้นไปตามระยะเวลาในการบ่ม(Whiting and Nagi 2003) ดังนั้นทั้งการบ่มคอนกรีตด้วยความชื้นและอากาศก็จะให้ผลค่าความต้านทานที่สูงขึ้นตามระยะเวลาซึ่งผลกระทบนี้อาจถูกส่งผ่านจากความแตกต่างของกลไกต่างๆ ที่ถูกเสนอมาอย่างมากมาย สำหรับสิ่งที่สามารถเป็นสื่อนำพลังงานไฟฟ้าได้ของคอนกรีตตัวอย่างเช่น Electrical Grounding , Lightning Protection และไฟฟ้าสถิตที่ปฏิบัติหน้าที่เป็นตัวป้องกัน (Wen 2006)

2.2.2 ไพโซรีซิสติวิตี (Piezoresistivity)

ไพโซรีซิสติวิตี จะอาศัยหลักการของความต้านทานไฟฟ้าต่อค่าความเครียดและจะต้องเป็นวัสดุที่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อค่าความเครียดมีค่าที่เปลี่ยนไปโดยที่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของอะตอมที่อยู่ภายในเมื่อมีการใส่แรงกระทำเข้าไปจะทำให้ค่าความต้านทานของวัสดุเปลี่ยน Senturia (2001)

2.2.3 ตัวรับส่งสัญญาณซีเมนต์ที่ใช้หลักของไพโซรีซิสติวิตี

ซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์ถูกออกแบบอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีไพโซรีซิสติวิตี การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของความเครียดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในตัวเซ็นเซอร์

เป้าหมายวัตถุประสงค์ในการพัฒนาบนพื้นฐานของตัวรับส่งสัญญาณ ก็เพื่อให้ตัวรับส่งสัญญาณมีความทนทานและมีความเข้ากันได้กับตัวของโครงสร้างโดยที่การฝังโครงข่ายของตัวรับส่งสัญญาณนี้ไปในโครงสร้างก็จะสามารถบันทึกค่าความต้านทานและประสิทธิภาพของตัวโครงสร้างได้อย่างแน่นอน

การพัฒนาระบบไวเลสที่ได้รับข้อมูลมาจากซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์ โดยไม่มีข้อสงสัยต่อความสามารถที่เพิ่มขึ้นของตัวเซ็นเซอร์สำหรับงาน SHM , ความเป็นไปได้ที่จะทำการเฝ้าระวังแบบอัตโนมัติในระบบออนไลน์ และการตรวจสอบข้อมูลสำหรับร่องรอยของการถูกทำลายภายในโครงสร้าง ในระยะเวลาสั้นๆตั้งแต่มีความต้องการตัวส่งสัญญาณกันอย่างกว้างขวางระหว่างตัวเซ็นเซอร์และระบบ DAQ , ตัวเซ็นเซอร์แบบไวเลสจะมีราคาที่ย่อมเยากว่าในการติดตั้ง อีกทั้งยังมีกระบวนการและรายละเอียดที่น้อยกว่ารวมถึงข้อได้เปรียบที่ดีกว่าในสถานการณ์ต่างๆและความสามารถในการปรับตัวหรือการออกแบบในระบบ SHM (Lynch 2006 ; Lynch et al. 2004 ; Wang et al. 2007) แต่ถึงอย่างไรก็ตามการพัฒนาเซ็นเซอร์ส่งสัญญาณนั้นยังมีความต้องการรูปแบบในด้านสถาปัตยกรรมใหม่ๆ และวิธีการของการดำเนินงานรวมถึงการทำตัวไวเลสเซ็นเซอร์ให้มีราคาที่ต่ำลง ที่ถูกนำเสนอโดย Hou and Lynch (Tsung – Chin Hou and Lynch 2005 ; Hou and Lynch 2005) ในการสำรวจคุณสมบัติและความแตกต่างกันของไฟโพรซีซิสติวิตีในวัสดุซีเมนต์ผสม (ECC) ECC เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมซีเมนต์ซึ่งประกอบไปด้วยไฟเบอร์สั้นๆ (โพลีเมอร์ , เหล็ก , คาร์บอน) วัสดุผสมไม่ใช่แค่ทำให้ความสามารถของคุณสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ไฟโพรซีซิสติวิตี ยังมีส่วนในการแยกแยะสัญญาณของวัสดุในโครงสร้างได้อย่างชาญฉลาดอีกด้วย

2.2.4 ตัวรับส่งสัญญาณที่ทำจากวัสดุซีเมนต์ผสมเส้นใยคาร์บอน

วัสดุส่วนใหญ่ที่ถูกใช้เพื่อเป็นสื่อไฟฟ้าในซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์ก็คือคาร์บอนไฟเบอร์ และมันเป็นระยะเวลาอันยาวนานมาแล้วที่มีการยอมรับว่าการเติมไฟเบอร์ลงไปคอนกรีตก็เพื่อความสะดวกในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น การทำให้มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น, ความต้านทานความล้า , ความต้านทานแรงอัด , ความต้านทานแรงดึง , การต้านทานแรงดัดงอ , ลดการเสื่อมและการหดตัว และเป็นการปรับปรุงพฤติกรรมของการแตกร้าว (McCarter et al. 2007)

CFRC เซ็นเซอร์โดยทั่วไปจะถูกจัดเตรียมโดยที่ปราศจากแรงอัด ถึงอย่างนั้นในการศึกษาโดย Shifeng et al (Shifeng et al. 2007) เซ็นเซอร์เหล่านี้ถูกสร้างขึ้นภายใต้แรงอัด 2 MPa และ 10 MPa มันถูกพบว่าเซ็นเซอร์ที่ถูกสร้างภายใต้แรงอัด 10 MPa มีความเหมาะสมกว่าสำหรับการนำไปใช้ใน SHM เพราะว่ามีรูปทรงในการรับแรงอัดที่ใหญ่กว่านั่นเอง

2.2.4.1 ผลกระทบของปริมาณเส้นใย

การผสมเส้นใยคาร์บอนเข้าไปในวัสดุซีเมนต์จะก่อให้เกิดการสื่อไฟฟ้าได้หรือในอีกความหมายหนึ่งก็คือเป็นการลดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าลง มันเป็นผลที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนจากการเพิ่มขึ้นของเส้นใยคาร์บอนในวัสดุประกอบ แต่ถึงอย่างไรก็ตามมีการทดสอบแล้วว่าปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมไม่ได้มีผลในระยะ

ยาวต่อการเพิ่มขึ้นของคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าหรือในอีกความหมายหนึ่งก็คือ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและค่าการเชื่อมต่อกันของเส้นใยที่นำไฟฟ้าได้ถูกรู้ว่าเป็นปรากฏการณ์ในการแพร่กระจาย ทฤษฎีนี้เป็นผลกระทบของการสุมค่าการเปลี่ยนแปลงจำนวนและคุณภาพของการเชื่อมต่อของเส้นใยที่มีอยู่ (Xie et al. 1996) อธิบายถึงปรากฏการณ์เหล่านี้เพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นและเป็นหลักเกณฑ์ในการแสดงความคิดว่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นโดยความหลากหลายของขนาดเมื่อปริมาณสัดส่วนของเส้นใยคาร์บอนถึงค่าวิกฤติที่มีความแน่นอนโดยการอ้างอิงถึงจุดเริ่มต้นของการไหลของกระแสไฟฟ้าและการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยที่เกินเกณฑ์นี้จะนำไปสู่ขอบเขตของหลักเกณฑ์ที่จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของขอบเขตการนำไฟฟ้าของวัสดุประกอบเท่านั้น (Xie et al. 1996)

บนพื้นฐานจากสมการ 2-1(Zallen 1983) ได้แสดงทฤษฎีการแพร่กระจายในวัสดุประกอบ Xie et al. (Xie et al. 1996) ได้เสนอสมการ 2-2 สำหรับช่วงของซีเมนต์เฟลสและมอร์ต้ากับความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์

$$\sigma \alpha (\varphi - \varphi_c)_t \quad 2-1$$

โดยที่

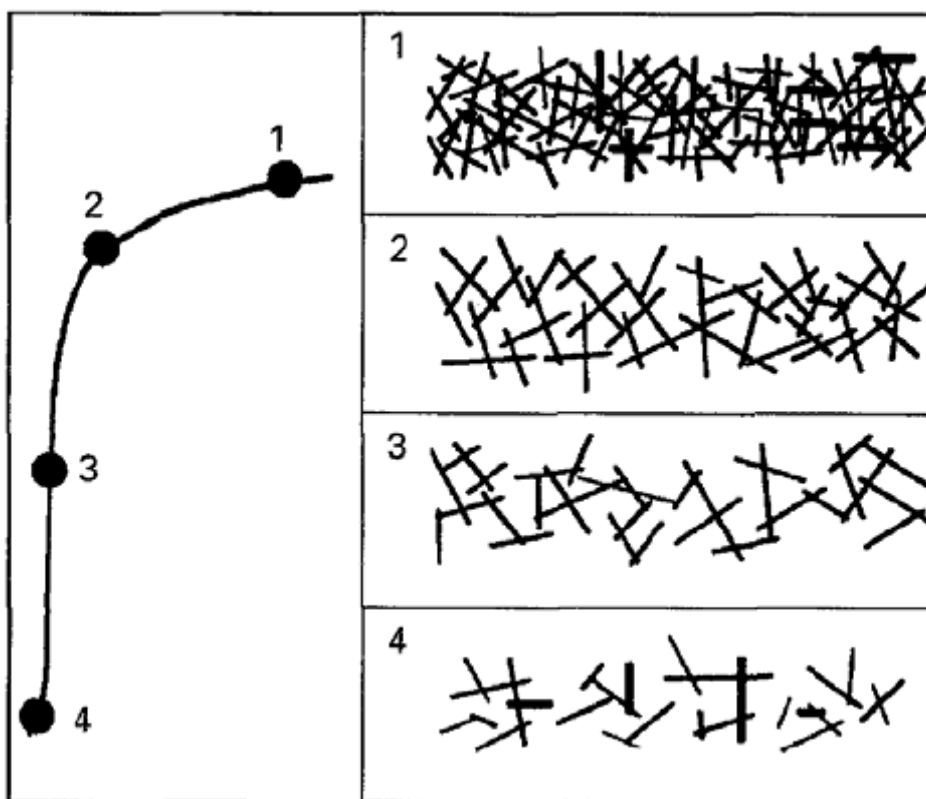
σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุประกอบ

φ คือ ค่าสัดส่วนปริมาตรของเส้นใยนำไฟฟ้า

φ_c คือ ค่าเริ่มต้นของสัดส่วนปริมาตร

t คือ ค่าบวกคงที่ซึ่งเป็นค่าอิสระของวัสดุประกอบระดับจุลภาค

$$\sigma = 4.10(\varphi - 0.01)^{1.65} \quad 2-2$$



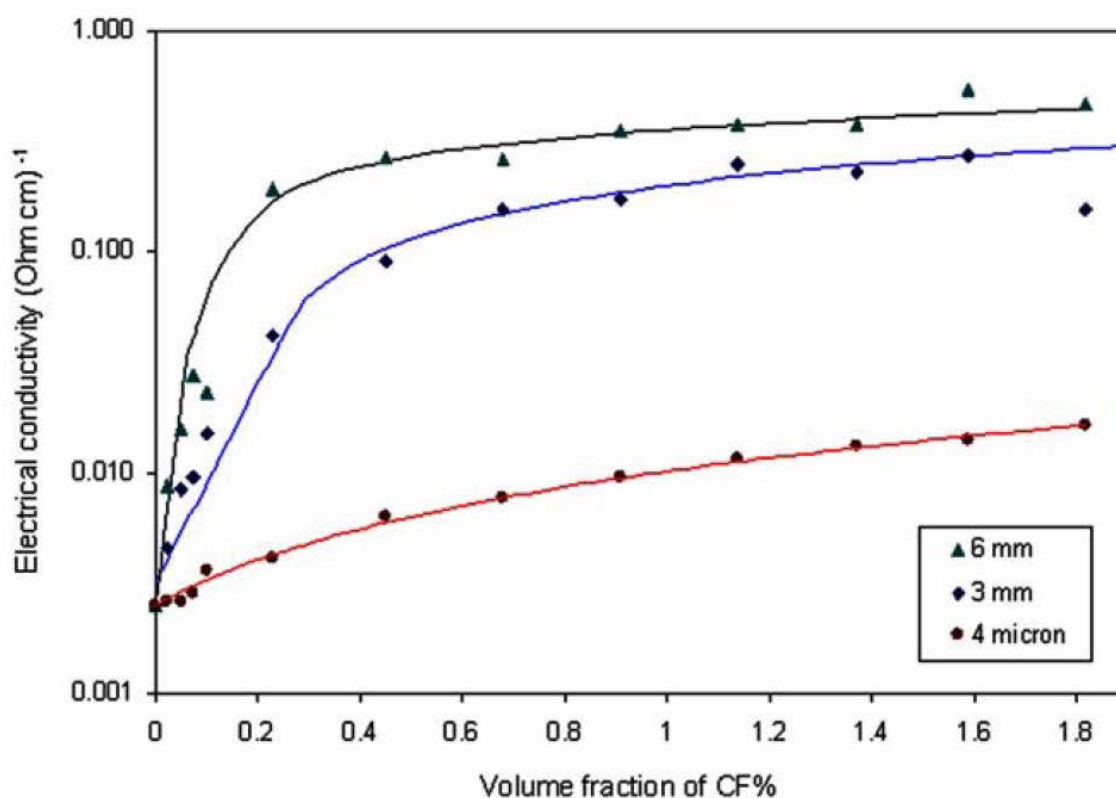
รูปที่ 2-1 Percolation phenomena (Xie et al. 1996)

ควรที่จะจำไว้ว่าขนาดและรูปทรงของเส้นใยเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดจุดเริ่มต้นของการแพร่กระจาย

2.2.4.2 ผลกระทบของความยาวเส้นใย

ความยาวของเส้นใยคาร์บอนที่มีเครือข่ายเส้นใยที่มีความต่อเนื่องที่มากกว่านั้นจะทำให้มีผลกระทบต่อการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าในซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มมากขึ้น ถึงอย่างไรก็ตามเส้นใยที่มีความยาวมาก ๆ ก็มีความยากลำบากต่อการนำมาผสมเช่นกัน ในส่วนของความสามารถในการทำงานได้และการได้รับการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของเส้นใย

ในการศึกษาโดย Chiarello และ Zinno (Chiarello and Zinno 2005) พบว่าความยาวของเส้นใยบนค่าการนำไฟฟ้าของมอร์ต้าเสริมเส้นใยคาร์บอน ที่ถูกตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบสภาพค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ผสมเส้นใยที่มีความยาวที่แตกต่างกันสามแบบ ตามรูปที่ 2-1



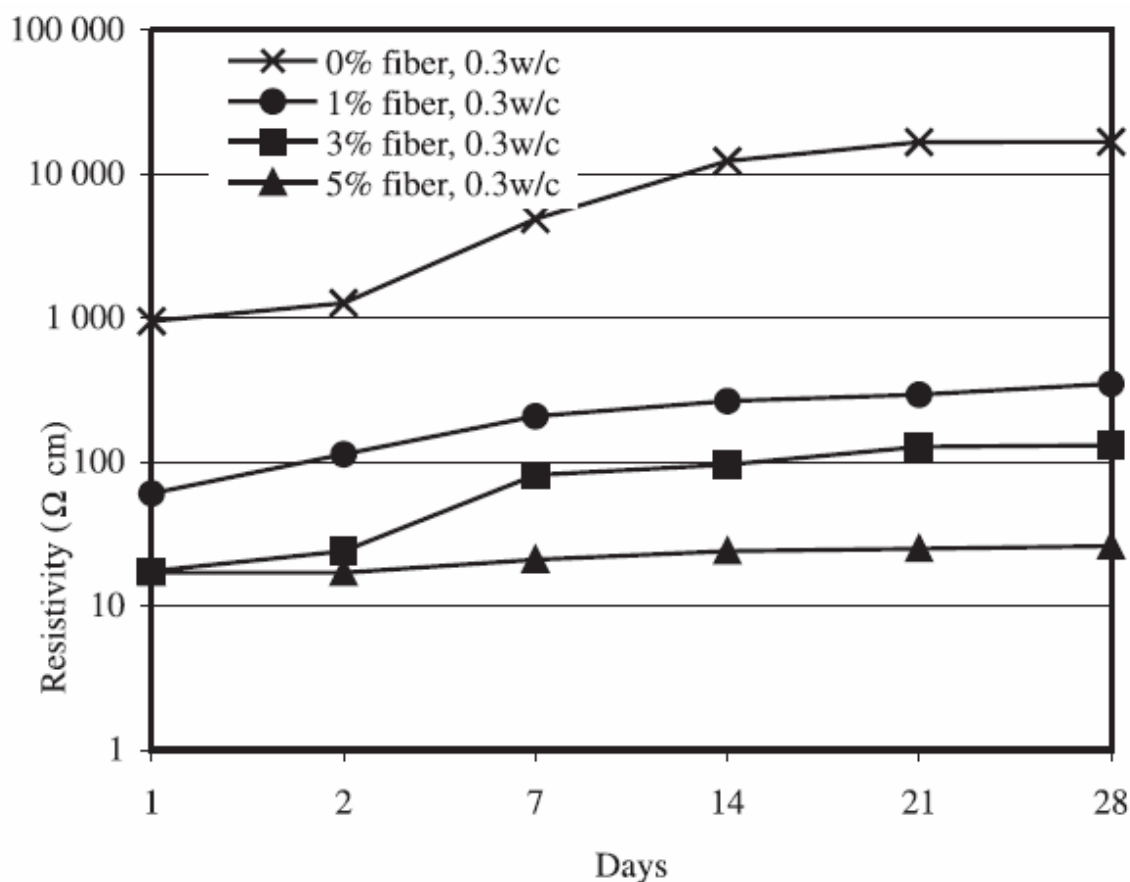
รูปที่ 2-2 Effect of fibre length on conductivity of CFRC at 1 day hydration (Chiarello and Zinno 2005)

ตามรูปที่ 2-2 ยืนยันว่าตัวอย่างที่ใส่เส้นใยที่ยาวกว่าจะให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าในปริมาณเส้นใยที่เท่ากัน ในขณะที่สภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ใส่เส้นใยที่สั้นกว่ามากๆจะค่อยๆมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นด้วยสัดส่วนปริมาณเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น ในอีกความหมายหนึ่งก็คือเส้นใยที่มีขนาดสั้นๆจะมีการใช้ปริมาณในการแพร่กระจายที่สูงกว่าโดยในขณะที่เส้นใยที่มีความยาวจะให้ค่าความสามารถในการทำงานที่แยกลงเพราะฉะนั้นจึงทำให้มีความยากในการผสม จากกราฟนี้จะแสดงถึงความยาวของเส้นใยที่ดีที่สุดและปริมาณเส้นใยที่น้อยที่สุดที่ยังสามารถสร้างเป็นโครงข่ายของเส้นใยที่มีสภาพการนำไฟฟ้าได้โดยปราศจากการลดลงต่อความสามารถในการทำงานได้ของส่วนผสม

2.2.4.3 ผลกระทบของการบ่ม

จากผลลัพธ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน อนุภาคขนาดเล็กๆของซีเมนต์เฟลสที่มีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ยังถูกบ่มและตัวมันก็มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งในความเป็นจริงนี้ครอบคลุมไปถึงแบบตัวอย่างที่เสริมและไม่เสริมเส้นใยถึงแม้ว่าจะใช้ปริมาณเส้นใยที่สูงกว่าในปฏิกิริยาเดิมโดยในที่นี้จะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างช้าๆจากรูปที่ 2-3 เป็นผลการศึกษาโดย Chako และคณะ (Choke et al.

2007) ถึงผลของเวลาในการบ่มที่มีต่อสภาพความต้านทานไฟฟ้าของ CFRC ที่ผสมปริมาณเส้นใยที่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 2-3 Resistivity as a function of curing time at different fibre contents (Chacko et al. 2007)

การเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง CFRC และการสังเกตตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมเส้นใยคาร์บอนเหล่านี้จะสังเกตได้ว่าในทุกๆอายุจะมีการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าในเส้นใยคาร์บอนและค่าการนำไฟฟ้าที่ถูกปรับปรุงขึ้นซึ่งจะปรากฏอย่างเด่นชัดในภายหลัง (Banthia et al. 1992)

Choke et al (Choke et al. 2007) นอกจากนี้ยังตรวจสอบผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และวิธีการบ่มต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของ CFRC ซึ่งสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.3 จะแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่น้อยที่สุดและการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีค่าที่ดีกว่าเมื่อได้ทำการบ่มด้วยความชื้นซึ่งตรงกันข้ามกับคอนกรีตธรรมดา (Whiting and Nagi 2003)

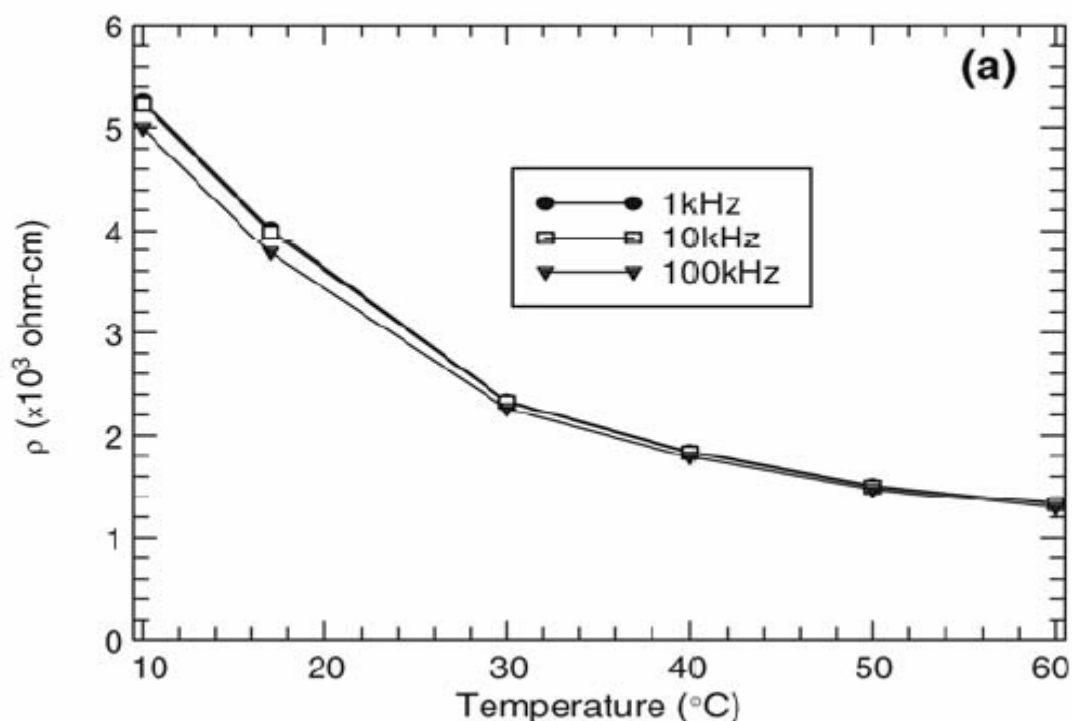
ที่ปริมาณเส้นใยคาร์บอนสูงๆค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของ CFRC จะไม่มีผลกระทบต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเพราะว่าในกรณีนี้เส้นใยคาร์บอนมีเส้นทางการนำไฟฟ้าในรูปแบบของปฏิกิริยาดังนั้นจำนวนของน้ำที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันในวัสดุประกอบจะไม่มีผลกระทบมากนักต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าทั้งหมด (Farhad et al. 2001)

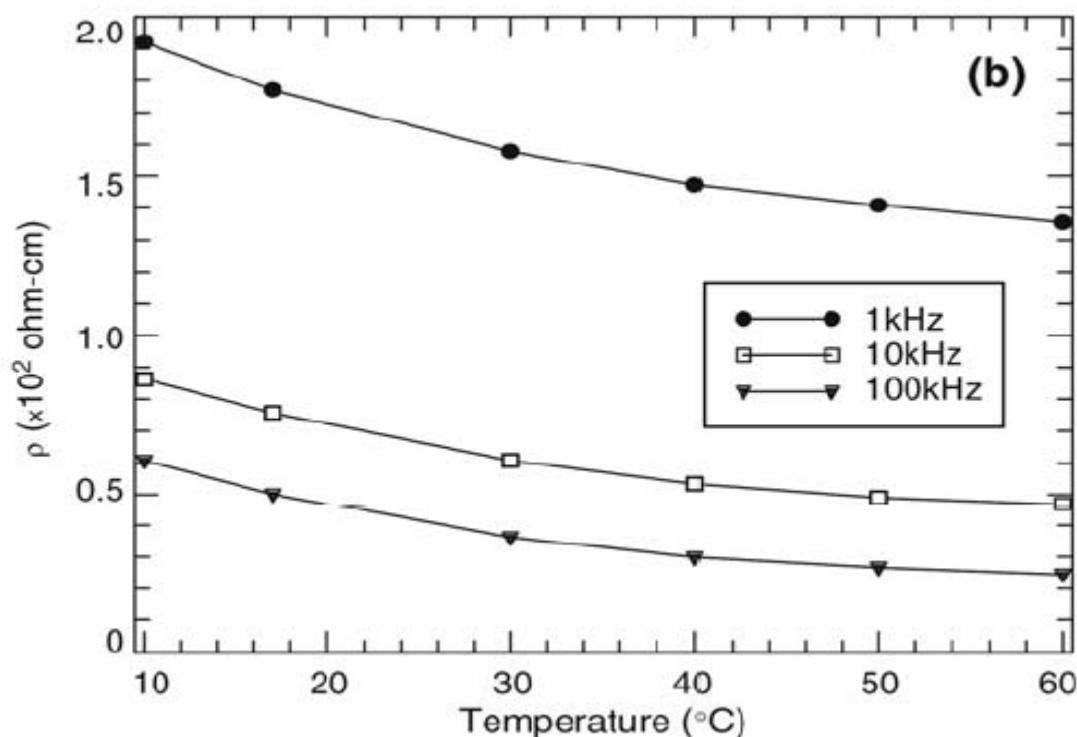
2.2.4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิ

แม้จำนวนงานวิจัยในวัสดุซีเมนต์เบสผสมเส้นใยคาร์บอนจะมีค่อนข้างมากแต่งานวิจัยที่มีความสนใจในเรื่องที่เกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของ CFRC กลับมีน้อย

McCarter et al. (McCarter et al. 2007) มีความสนใจในประเด็นนี้จึงได้ทำการทดลอง การนำไฟฟ้าบนซีเมนต์มอร์ต้าผสมเส้นใยคาร์บอนในช่วงอุณหภูมิที่ 10 – 60 °C และตัวอย่างถูกนำไปแช่เป็นเวลา 12 เดือนจนมั่นใจว่าอิทธิพลเนื่องจากอายุของตัวอย่างไม่มีผลต่อความต้านทานทางไฟฟ้า ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่าความต้านทานมีค่าแปรผกผันกับอุณหภูมิและค่าความต้านทานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงตัดสินใจว่าตัวอย่าง CFRC ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเหมือนกับตัวอย่างของมอร์ต้าธรรมดา (McCarter et al. 2007) ดังที่แสดงในรูป 2-4 ที่อุณหภูมิหนึ่งค่าความต้านทานของตัวอย่าง CFRC จะลดลงเมื่อความถี่เส้นใยเพิ่มขึ้นในขณะที่ตัวอย่างธรรมดาเกือบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยคาร์บอนในวัสดุประกอบมีการกระจายตัวอย่างมีนัยสำคัญในการนำไฟฟ้า (McCarter et al. 2007)

ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่าผลของอุณหภูมิต่อวัสดุซีเมนต์เบสเส้นใยคาร์บอนสามารถกลับไปได้ซึ่งหมายความว่าไม่ได้มีแค่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่านั้นแต่ยังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงด้วย (Choke et al. 2007)





รูปที่ 2-4 Resistivity (ρ) variation with temperature at different frequencies for (a) plain cement mortar ; (b) mortar containing 3 mm carbon fibres (McCarter et al. 2007)

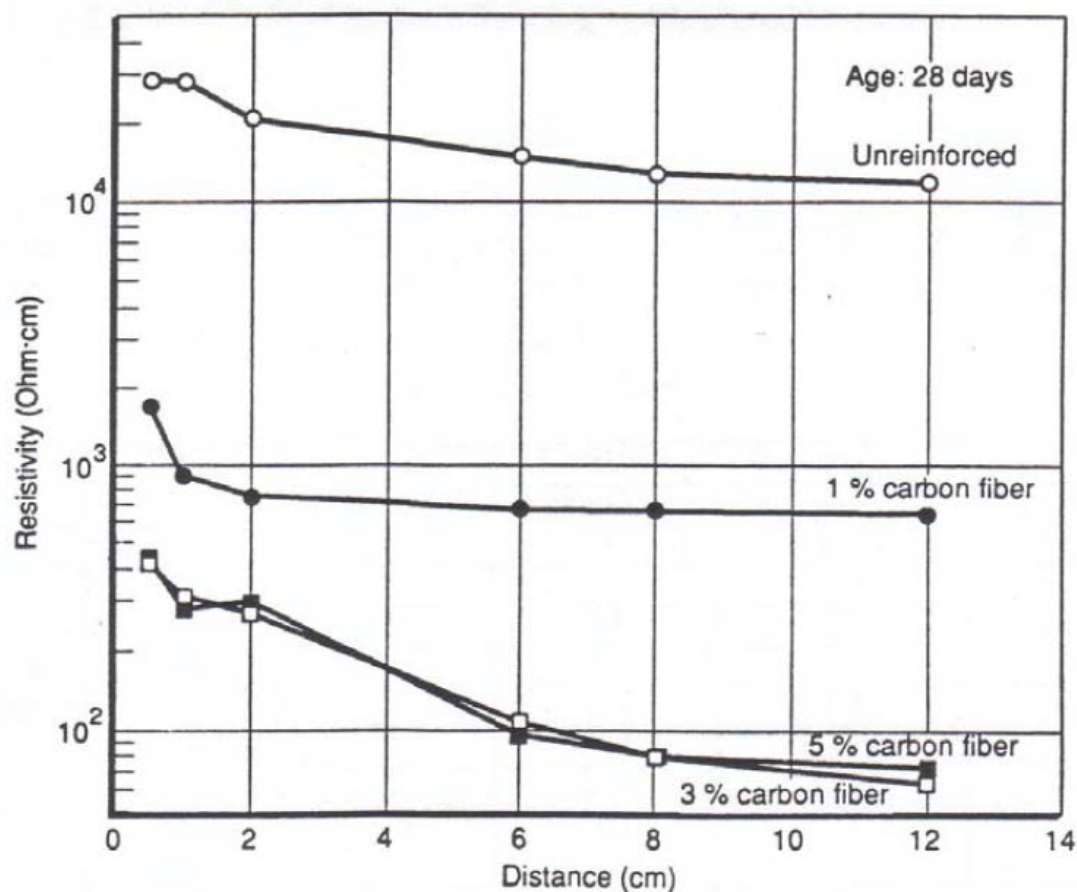
2.2.4.5 ผลกระทบจากชนิดและระยะห่างของขั้วไฟฟ้า

ชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมเป็นเรื่องที่มีความสำคัญมากในการผลิตตัวซีเมนต์เบสเส้นใยโดยมีกฎพื้นฐานที่จะต้องใช้ในการพิจารณาเพื่อใช้ในการเลือกใช้ขั้วไฟฟ้างี้

- มีการนำไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม
- มีช่วงอายุการใช้งานที่ยาวนานและทนต่อการกัดกร่อนและผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม
- มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกลของตัวซีเมนต์น้อย
- มีการฝังตัวที่ง่าย และต้องขึ้นอยู่กับตัวซีเมนต์เบสเส้นใยและการเชื่อมต่อของระบบการตรวจหาข้อมูล (DAQ)

Hen et al. (Han et al. 2007) จากการศึกษาที่มีความสำเร็จอย่างกว้างขวางต่อการออกแบบขั้วไฟฟ้าและวิธีการวัดของเส้นใย CFRC ผลลัพธ์จากการตรวจสอบนี้ถูกแสดงจากการหุ้มขั้วด้วยทองแดงที่เป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมเป็นอย่างมากสำหรับเส้นใย CFRC โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าและการมีสภาพเป็นคลื่นแม่เหล็กของตัวอย่างกับขั้วไฟฟ้าที่ถูกหุ้มไว้ จากการทดสอบความไม่แข็งแรงของขั้วตัวอย่างกับขั้วไฟฟ้าที่ถูกหุ้มอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปก็มีการเปรียบเทียบชนิดของขั้วไฟฟ้าอื่นๆด้วยการหุ้มขั้วด้วยทองแดงแสดงให้เห็นถึงความทนทานที่เพิ่มมากขึ้นและดีกว่าตอนที่อยู่รวมกันกับซีเมนต์ผสมเส้น

ใยคาร์บอน อีกทั้งยังมีสภาพความเป็นแม่เหล็กที่ต่ำลงด้วย , การมีจุดสัมผัสความต้านทานขนาดเล็กและมีความเหมาะสมต่อขั้นตอนในการฝังตัวที่มากกว่า



รูปที่ 2-5 effect of inter-electrode spacing on the resistivity of CFRC (Banthia et al. 1992)

ปัจจัยสำคัญอื่นๆในการออกแบบซีเมนต์เบสเส้นเซอร์จะมีผลกระทบต่อระยะห่างของการฝังขั้ว ผลกระทบนี้ถูกค้นคว้าโดย Banthia et al. (Banthia et al. 1992) กับเครื่องมือของการวัดความต้านทานบน ตัวอย่าง CFRC (ขนาด 19mm x 19mm x 150mm) และสัดส่วนปริมาณของเส้นใยที่มีความแตกต่างกัน ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาถูกนำไปเขียนกราฟได้ดังในรูปที่ 2-5 ซึ่งถูกแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าบนระยะห่าง ระหว่างขั้วไฟฟ้าสำหรับวัสดุประกอบกับปริมาณเส้นใยที่สูงกว่าตัวอย่างซีเมนต์เพลาสธรรมดา ซึ่งผู้คิดค้นได้ แนะนำว่า สาเหตุอาจมาจากความแตกต่างกันของขนาดเส้นใยหรืออาจมีสาเหตุมาจากความยาวของเส้นใย คาร์บอน สรุปจากรูปที่ 2-5 สำหรับตัวอย่าง CFRC ค่าความต้านทานจะลดลงพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสาเหตุของผลลัพธ์นี้ถูกเชื่อมโยงไปถึงข้อเท็จจริงของความสามารถในการประจุ กระแสไฟฟ้าที่มีความเป็นไปได้มากกว่าการมีอิทธิพลจากระยะห่างระหว่างขั้วที่มีขนาดเล็กๆ อย่างไรก็ตาม

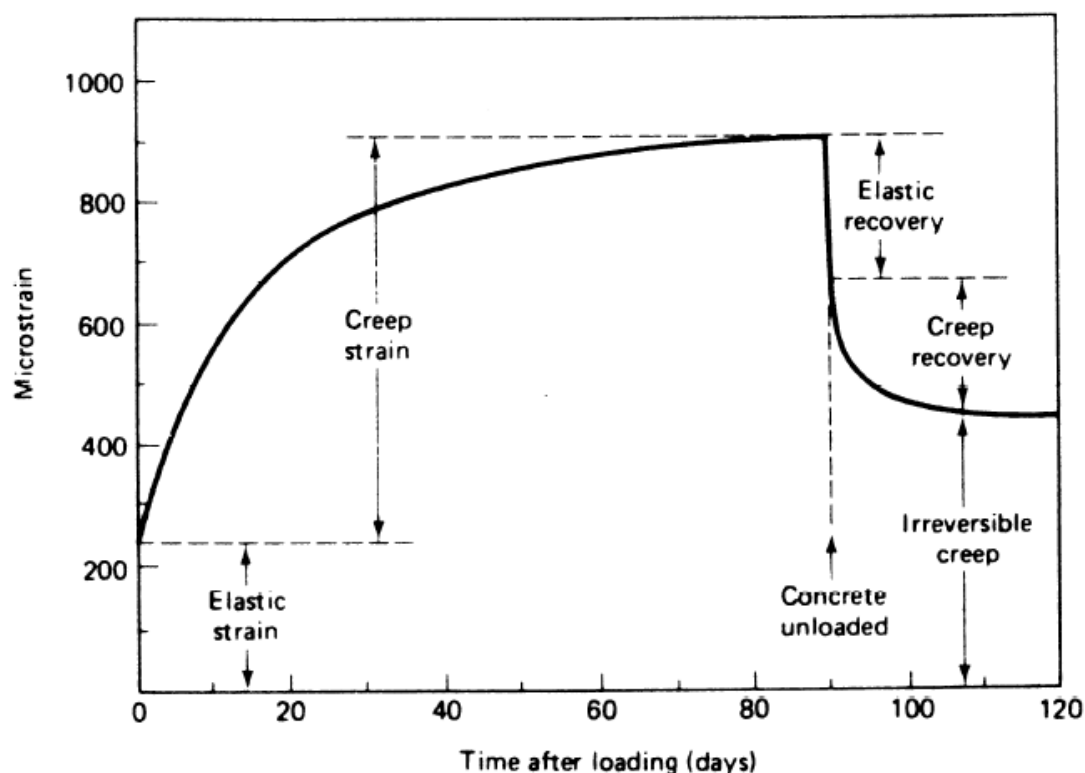
สำหรับตัวอย่างของข้อที่มีระยะห่างเกิน 6cm ค่าความต้านทานไฟฟ้าเกือบจะมีสภาพคงที่ ดังนั้นระยะห่างระหว่างข้อที่ 7cm จึงถูกแนะนำสำหรับตัวอย่างนี้ (Banthia et al. 1992)

Hen et al. (Han et al. 2007) ศึกษาความต้านทานทางไฟฟ้าของเส้นเซอร์ CFRC จะไม่มีผลกระทบบนพื้นที่ของข้อโวลต์เตจและขนาดของข้อไฟฟ้าที่ถูกหุ้มอยู่ ดังนั้นการลดพื้นที่ของข้อโวลต์เตจควบคู่กับการเพิ่มขึ้นของขนาดข้อไฟฟ้าที่ถูกหุ้มและการกำหนดคุณสมบัติทางกลไกของข้อไฟฟ้าของตัวเส้นเซอร์ CFRC ก็จะสามารถทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าลดต่ำลงไปได้ โดยปราศจากการสูญเสียความแม่นยำของการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

2.3 ความคืบของคอนกรีต (Creep of Concrete)

ในการนำน้ำหนักมากระทำบนก้อนคอนกรีต พบว่าก้อนคอนกรีตตัวอย่างจะเกิดผลกระทบขึ้นเมื่อมีระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้น ผลกระทบนั้นเกิดขึ้นมาจากความเครียดที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันซึ่งถูกเรียกว่าการเสียรูปจากความเครียด (Elastic) นี้สามารถกลับไปสู่ในสภาพเดิมได้โดยการเอาน้ำหนักที่กระทำออกจากก้อนตัวอย่าง มันเป็นที่น่าสังเกตว่าในแต่ละวันจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปของความเครียดหลังจากที่มีความเค้นมากระทำบนก้อนคอนกรีตและนี้ถูกเรียกว่าความคืบ (Creep)

ความคืบจึงอาจเป็นตัวกำหนดการเพิ่มขึ้นของความเครียดภายใต้การรับน้ำหนักแบบคงค้าง และความคืบนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นได้เรื่อยๆมากเท่ากับค่าความเครียดที่เกิดจากน้ำหนักที่มากระทำ โดยการคืบนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากในด้านของกลศาสตร์โครงสร้าง



รูปที่ 2-6 ความเครียดขึ้นกับเวลา ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้น้ำหนักกระทำแบบคงค้างสำหรับ 90 วันและหลังจากนั้นอีก 30 วันไม่มีน้ำหนักกระทำ

ภายใต้เงื่อนไขทั่วไปของแรงกระทำ ความเครียดที่ได้ถูกบันทึกไว้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของความสัมพันธ์กับน้ำหนักที่กระทำ มันยากที่จะแยกความแตกต่างได้อย่างถูกต้องระหว่าง ความเครียดแบบคืนรูป (Immediate Elastic Strain) และความคืบในช่วงแรก (Early Creep) แต่นี้ไม่ใช่ความสำคัญที่แท้จริง เนื่องจากความเครียดทั้งหมดถูกเร่งโดยความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่นำมากระทำ

ถ้าเราเอาความเค้นออกหลังจากผ่านไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง ก็จะทำให้มีการคืนสภาพของ (Elastic Strain) และการคืนสภาพอย่างช้าๆในบางส่วนของความคืบแต่ไม่ทั้งหมด ในรูปที่ 2-6จะเป็นการเจาะจงเฉพาะคอนกรีตที่ถูกน้ำหนักกระทำที่อายุคอนกรีต 28 วัน ซึ่งจะทำให้ได้ผลความเครียดในทันที น้ำหนักที่กระทำจะถูกกระทำค้างไว้เป็นเวลา 90 วัน ในระหว่างที่มีความคืบเกิดขึ้นจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปซึ่งเกิดขึ้นเกือบสามเท่าของปริมาตรในทันที ถ้าน้ำหนักยังถูกคงค้างไว้การเปลี่ยนรูปก็เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องต่อไป แต่เมื่อเอาน้ำหนักที่กระทำออก (Elastic-Instantaneous Strain) จะมีการคืนสภาพกลับและจะเห็นการคืนสภาพของความคืบบางส่วนที่เกิดขึ้นด้วย และถ้าคอนกรีตถูกน้ำหนักกระทำอีกครั้งในภายหลังการเสียรูปทรงจากความคืบก็จะเกิดขึ้นมาอีกครั้ง

ความคืบในคอนกรีตหลังปรากฏการณ์ของอีลาสติกในทางปฏิบัติ การหดตัวแห้ง(Drying Shrinkage) และพฤติกรรมวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) มักจะเกิดขึ้นพร้อมกันและหากพิจารณาจากความหลากหลายของน้ำหนักที่กระทำและเงื่อนไขจากความชื้น ข้อกำหนดต่างๆนี้จะถูกกำหนดได้เป็น

1. True or Basic Creep ถูกกำหนดจากความคืบที่เกิดขึ้นภายใต้ปัจจัยเงื่อนไขที่ไม่มีการเกิด (drying shrinkage)

2. Specific Creep ถูกกำหนดโดย (creep strain) ต่อ หน่วยความเค้นที่ปรากฏ

$$[\text{Specific Creep} = \frac{\epsilon_{CT}}{\sigma}]$$

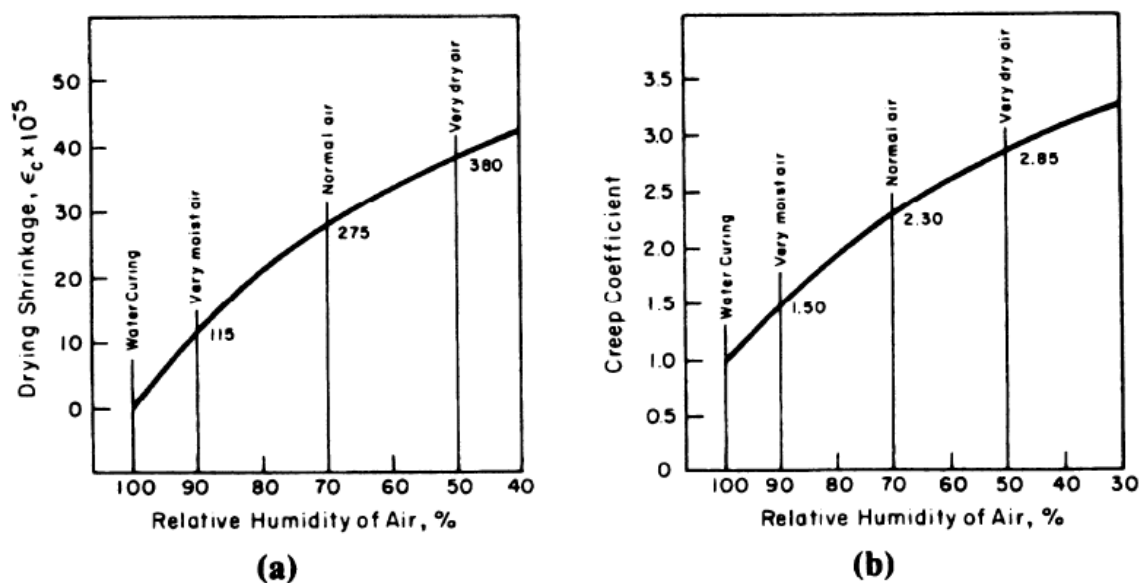
3. Drying Creep เป็นการเพิ่มความคืบที่เกิดขึ้นเมื่อก่อนตัวอย่างอยู่ภายใต้น้ำหนักที่กระทำและมีสภาพที่แห้ง

4. Creep Coefficient ถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของ (creep strain) ถึงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น

$$[\text{Creep Coefficient} = \frac{\epsilon_{CT}}{\epsilon_E}]$$

2.3.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวและความคืบ

ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากที่สุดสำหรับการหดตัวและความคืบ คือความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งอยู่รอบๆ ส่วนกลางของคอนกรีต การกล่าวนี้ได้ถูกกล่าวถึงแล้วสำหรับการหดตัวแต่การหดตัวก็มีส่วนที่คล้ายคลึงกับความคืบอยู่ ดังที่แสดงตามรูปที่ 2-7 สำหรับคอนกรีตที่กำหนดความคืบที่สูงความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ จากรูปที่ 2-7(b) สำหรับตัวอย่างที่บ่มด้วยความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 100 แล้วมีน้ำหนักมากระทำและการสัมผัสความชื้นที่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 2-7 Influence of relative humidity on (a) drying shrinkage and (b) creep of concrete

คอนกรีตซึ่งแสดงการหดตัวที่สูงโดยทั่วไปก็ยังแสดงให้เห็นถึงการเกิดความคืบที่สูงด้วย นี่ไม่ได้หมายความว่าทั้งสองปรากฏการณ์จะมีสาเหตุการเกิดมาจากเรื่องเดียวกันแต่ทั้งคู่อาจมีการเชื่อมโยงที่คล้ายกันในเรื่องของโครงสร้างการไฮเดรตของซีเมนต์เฟส และไม่ควรที่จะลืมว่าการบ่มคอนกรีตและการมีน้ำหนักระง่ำในขณะที่มีความชื้นสัมพัทธ์คงที่จะแสดงให้เห็นความคืบ และความคืบที่เกิดจะไม่มีการสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีตไปยังรอบๆบริเวณ

ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อ การหดตัวแห้ง และ ความคืบ มีดังนี้

มวลรวม

1. อีลาสติซิโมดูลัส (Modulus of Elasticity)
2. ปริมาณความจุของมวลรวม (Aggregate content)

การเพิ่มขึ้นของทั้งสองปัจจัยนี้จะช่วยลดการหดตัวและความคืบ

ซีเมนต์

1. น้ำต่ออัตราส่วนซีเมนต์ สำหรับซีเมนต์ที่มีปริมาณความจุที่การเพิ่มของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะทำให้การ เกิดการหดตัวแห้ง และ ความคืบ มีค่าเพิ่มขึ้น
2. ปริมาณความจุซีเมนต์ (Cement content) สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่คงที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณความจุซีเมนต์จะทำให้ลดการเกิดความคืบ แต่จะไปเพิ่มการเกิดการหดตัวแห้ง และนี่เป็นกรณีเดียวที่มีผลตรงข้ามกัน

ความชื้น

เมื่อความชื้นของอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้นก็จะเป็นการลดการเกิดทั้ง การหดตัวแห้ง และ ความคืบ

อุณหภูมิ

ถ้ามีการบ่มก้อนตัวอย่างที่มีคุณสมบัติที่เหมือนกัน โดยที่ก้อนหนึ่งถูกเก็บอยู่ในอุณหภูมิที่สูงกว่าอีกก้อน ก้อนตัวอย่างที่ถูกบ่มในอุณหภูมิที่สูงกว่านี้จะมีการเกิด การหดตัวแห้ง และ ความคืบที่มากกว่าอีกก้อน

อายุของน้ำหนักรบทุก

เป็นส่วนสำคัญโดยตรงระหว่างขนาดของความเค้นคงค้างและความคืบของคอนกรีต เพราะว่าผลของกำลังบ่มความคืบจะให้ค่าระดับของความเค้น ความคืบที่ต่ำลงจะเกิดจากช่วงระยะเวลาการบ่มที่นานก่อนที่จะมีการรับแรงกระทำ ปัจจัยนี้จะไม่ส่งผลต่อการหดตัวแห้ง

2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดความคืบและรอยแตกร้าวจากคอนกรีตที่ถูกแรงกระทำแบบคงค้าง

ด้านหนึ่งที่สำคัญในเรื่องความทนทานของคอนกรีตและโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรงคือปฏิกิริยาระหว่างรอยร้าวและความคืบของคอนกรีต มันเป็นที่รู้จักกันว่าชิ้นส่วนของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบคงค้างจะมีความต้านทานที่ต่ำที่สุดเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับความต้านทานของชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำเหมือนกันโดยใช้แรงกระทำแบบคงที่ทันทีทันใด ซึ่งสามารถนำมาเป็นส่วนในการพิจารณาเล็กๆได้ หนึ่งในเหตุผลนั้นอาจจะเป็นจากปฏิกิริยาความคืบหรือการแตกร้าวอย่างใดอย่างหนึ่ง ที่แรงกระทำแบบคงที่ที่จะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ที่เกิดความเสียหายและการลดลงของสมรรถนะที่ดีที่สุด ผลกระทบนี้จะมีมากขึ้นถ้าโครงสร้างก่อนหน้านี้อยู่ภายใต้แรงกระทำแบบไซคลิกโหลด (Cyclic Loading)

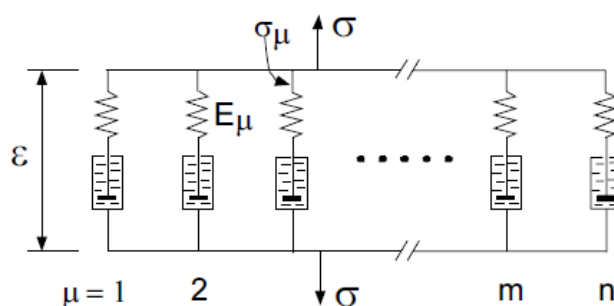
ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาความคืบหน้าในการสร้างแบบจำลองของรอยร้าวและการถูกทำลายของคอนกรีตคล้ายๆกับที่ทำกับวัสดุอื่นๆอย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะอธิบายการแตกร้าวจากความคืบของหลักวิชาทางคอนกรีตที่ยังไม่ได้รับการจัดการโดยกระทั่งเมื่อเร็วๆนี้ ได้มีการนำเสนอการตรวจสอบโดยการผูกมัดของแบบจำลองเหมือนจริงสามมิติสำหรับคอนกรีต กับ รูปแบบความคืบเชิงตรง ก็พอจะมีความเป็นไปได้ที่จะทำนายปฏิสัมพันธ์ของความคืบและรอยแตกร้าวได้อย่างถูกต้อง

2.3.2.1 การเสียรูปของคอนกรีตจากความคืบ (Creep Fracture of Concrete)

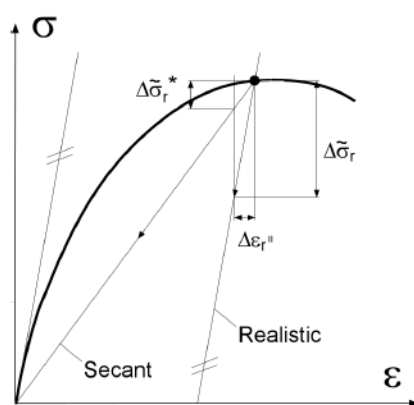
มันเป็นที่รู้จักกันว่า การเสียรูปทรงของคอนกรีตและกำลังภายใต้แรงกระทำแบบคงค้างมีอิทธิพลมาจากวัสดุและข้อบกพร่องทางรูปทรงเรขาคณิต นั่นคือข้อบกพร่องขนาดใหญ่จะนำไปสู่การลดลงของกำลังที่แรงกระทำแบบคงค้าง ตามเหตุผลนี้สมมติฐานหลักในแนวทางปัจจุบันก็คือ ไม่ใช่เป็นผลจากความคืบโดยตรงของคอนกรีตแต่เป็นผลมาจากการแจกจ่ายของความเค้นอันเนื่องมาจากความคืบและเหตุผลที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของความเสียหายนี้คือการแจกจ่ายที่เกิดขึ้นระหว่างในที่ที่แข็งแรง (ที่ที่โดนทำลายน้อย) และมีการปรับตัวลงในพื้นที่ที่โดนทำลายมากของวัสดุ การมีอยู่ของพวกมันจะขึ้นอยู่กับความไม่สม่ำเสมอของคอนกรีตบนรูปทรงทางโครงสร้างตลอดจนแรงกระทำ เมื่อเขตดังกล่าวไม่ได้ดำรงอยู่ในความสม่ำเสมอของความเค้นและความเครียด ก็ยังจะไม่มี การแจกจ่ายความเค้นที่เป็นไปได้ ดังนั้นจึงไม่มีความคืบแบบ (Non-Linear Creep) เมื่อกฎที่ตั้งขึ้นอธิบายถึงการดำรงอยู่ของเขตเหล่านี้จึงมีการผูกกันของส่วนประกอบที่มีความสัมพันธ์กันกับกฎความคืบเชิงตรงซึ่งจะสามารถทำนายผลกระทบของความคืบแบบ (Non-Linear Creep) ได้ เพื่อยืนยันสมมติฐานที่กล่าวข้างต้น ในการรายงานเรื่องรูปแบบไมโครเพลนสำหรับคอนกรีตควบคู่ไปกับรูปแบบของ (Maxwell Chain) ดังที่เห็นในรูปที่ 2-8 ในการเพิ่มขึ้นของขั้นตอนที่เวลา (t_r) ความเค้นที่เพิ่มขึ้น $\Delta\sigma_r$ โดยคำนวณจากความเครียดที่เพิ่มขึ้น $\Delta\epsilon_r$ บนพื้นฐานของรูปแบบไมโครเพลน

$$\Delta\sigma_r = D_r(\Delta\epsilon_r - \Delta\epsilon_r^m) \quad (1)$$

ซึ่งใน $\Delta \varepsilon_r''$ Creep Strain จะมีค่าเพิ่มขึ้น การคำนวณจากกฎความคืบเชิงตรง (Maxwell chain) และ D_r คือเมตริกซ์ความแข็งของวัสดุที่ได้รับจากรูปแบบไมโครเพลน ซึ่งมันถูกสันนิษฐานว่า รูปแบบไมโครเพลนเป็นอิสระจากเวลา



รูปที่ 2-8 Maxwell chain model



รูปที่ 2-9 Realistic modeling of concrete

จุดหนึ่งที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองของ (Non-Linear Creep) คือการใช้กฎมาเป็นส่วนประกอบ (ในกรณีของรูปแบบไมโครเพลน) จะต้องสามารถตอบสนองรูปแบบที่สมจริงของคอนกรีตสำหรับการใช้น้ำหนักกระทำแบบไซคลิกได้ นั่นคือการใช้กฎที่เหมือนจริงของการมีแรงกระทำ การไม่มีแรงกระทำ การมีแรงกระทำซ้ำ โดยการใช้พื้นฐานของกฎอัตราส่วนของด้านตรงข้ามมุมฉาก (Secant) ดังที่เห็นในรูปที่ 2-9 อะไรคือการวิเคราะห์ Non-Linear ของคอนกรีตและโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรง มันเป็นไปได้ที่จะอธิบายถึงผลกระทบของ (Non-Linear Creep) กล่าวคือสำหรับความเค้นที่มีระดับค่อนข้างสูง ความเค้นที่ไม่สมดุลของขั้นตอนการทำซ้ำ i-th การเปรียบเทียบที่ต่ำเกินไปของความเค้นที่ได้รับจากองค์ประกอบที่เหมือนจริงของกฎ ความเค้น-ความเครียด (การเปรียบเทียบ Secant and Realistic Unloading Rule ในรูปที่ 2-9) การแจกจ่ายซ้ำๆ

ของความเค้นในวัสดุ ซึ่งกรณีเช่นนี้มันเป็นไปได้ที่จะเป็นจริง ดังนั้นจึงไม่สามารถคิดถึงผลกระทบของ(Non-Linear Creep) ได้

2.3.2.2 รูปแบบไมโครเพลน (Microplane model)

รูปแบบไมโครเพลน คือ กฎของขอบเขตขนาดใหญ่ที่เป็นภาพสามมิติ ในลักษณะรูปแบบที่แสดงถึงการใช้ความสัมพันธ์เชิงแกนเดียวระหว่างความเค้นและองค์ประกอบของความเครียดบนระนาบต่างๆ ซึ่งการที่จะประยุกต์ในแต่ละจุดของระนาบเหล่านี้อาจจะทำให้ถึงระนาบที่ถูกทำลายหรือระนาบที่มีความอ่อนแอของโครงสร้างขนาดเล็กๆ แนวคิดพื้นฐานที่อยู่เบื้องหลังรูปแบบไมโครเพลน ถูกประยุกต์ใช้ในปี 1938 โดย G.I. Taylor [Taylor 1938] และต่อมาได้ถูกขยายความโดย Bazant และเพื่อนร่วมงานโดยวิธีการสร้างแบบจำลอง quasi-brittle materials และถูกทำให้ง่ายขึ้นโดย [Bazant and Gambarova 1984] , [Bazant and Prat 1988] และในปัจจุบันได้มีการพัฒนารุ่นที่สูงขึ้นของรูปแบบไมโครเพลน สำหรับคอนกรีตซึ่งถูกเสนอใช้โดย [Ozbolt et al.2001] รูปแบบนี้เป็นแนวคิดที่ขึ้นอยู่กับสิ่งที่เรียกว่า“Relaxed Kinematic Constrain” สำหรับรายละเอียดต่างๆได้จาก [Ozbolt et al.2001]

2.3.2.3 อัตราการเกิดความคืบตามกฎของ Maxwell chain

ความคืบของแบบจำลองคอนกรีตโดยวิธีรูปแบบของ Maxwell Chain ดูในรูปที่ 2-8 มันถูกสันนิษฐานจากอัตราส่วนปัวซอง เพราะความคืบจะมีลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่งที่คล้ายคลึงกับสภาพความยืดหยุ่น ที่เวลา t_r ความเครียดทั้งหมดซึ่งจำแนกได้เป็น ความยืดหยุ่น ($\Delta \varepsilon_r^{el}$), แตร้าว ($\Delta \varepsilon_r^{cr}$) และความคืบที่เพิ่มขึ้น ($\Delta \varepsilon_r^m$)

$$\Delta \varepsilon_r = \Delta \varepsilon_r^{el} + \Delta \varepsilon_r^{cr} + \Delta \varepsilon_r^m \dots \dots \dots (2)$$

สภาพความยืดหยุ่นและการโดนทำลายจากความเครียดถูกคำนวณได้จากรูปแบบไมโครเพลน ในขณะที่ Creep Strains ที่รับจากรูปแบบ Maxwell Chain การเสียรูปจากความคืบนั้นถูกคำนวณโดยการใช้ขั้นตอนวิธี step-by-step ซึ่งถูกเสนอใช้โดย [Bazant and Wu 1974] สำหรับขั้นตอนของเวลา Δt_r การเพิ่มขึ้นของ Creep Strain ($\Delta \varepsilon_r^m$) คำนวณโดย

$$\Delta \varepsilon_r^m = \frac{1}{\varepsilon_r^m} [\sum_{\mu=1}^m (1 - e^{-\Delta t_r / \tau_\mu}) \sigma_{\mu r-1}] \quad (3)$$

ด้วย

$$\begin{aligned} E_r^m &= \sum_{\mu=1}^m \lambda_{\mu r} E_{\mu r-1/2} + E_{\infty r-1/2} \quad \text{ที่} \quad E_{\mu r-1/2} = \frac{1}{2} (E_{\mu r-1} + E_{\mu r}) \\ \sigma_{\mu r} &= \sigma_{\mu r-1} e^{-\Delta t_r / \tau_\mu} + \lambda_{\mu r-1} E_{\mu r-1/2} (\Delta \varepsilon_r - \Delta \varepsilon_r^{cr}) \\ \lambda_{\mu r} &= (1 - e^{-\Delta t_r / \tau_\mu}) \tau_\mu / \Delta t_r \end{aligned} \quad (4)$$

โดยที่ μ แสดงถึง μ -th ซึ่งเป็นหน่วยของรูปแบบ Maxwell Chain , $\tau_\mu = \eta_\mu / E_\mu$ เป็นเวลาคลายตัวของหน่วย, η_μ และ E_μ คือความหนืดและโมดูลัสของหน่วย μ -th, ตามลำดับ, σ_μ ถูกเรียกว่าเป็นความเค้นแฝงของหน่วย μ -th และ E_μ^* คือค่ายังโมดูลัสแฝง

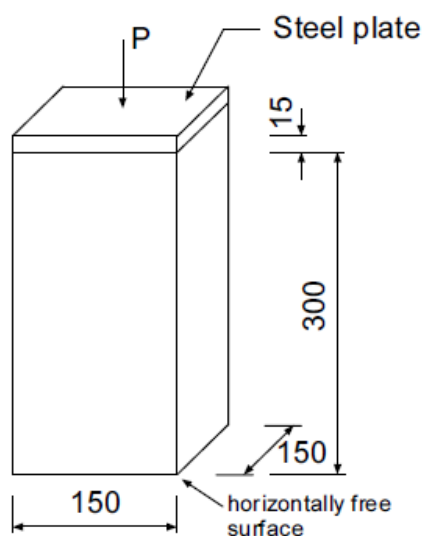
ประโยชน์หลักของการกำหนดรูปแบบของอัตราามีความสำคัญเหนือกว่าการกำหนดที่ Creep Deformations และเป็นการคำนวณจากความเค้นของแรงกระทำในขั้นตอนที่แล้วเท่านั้น ขณะที่ในการกำหนดแรงทั้งหมดจะต้องทำการเก็บประวัติไว้

2.3.2.4 การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของความคืบกับความสัมพันธ์ต่อการแตกร้าว

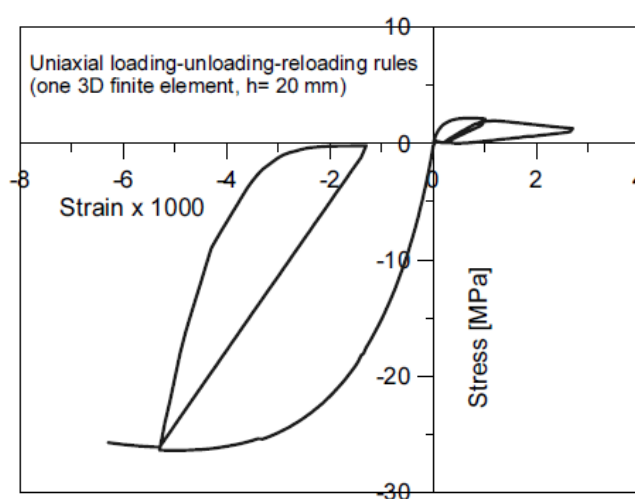
เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าการเข้าสู่ของรูปแบบไมโครเพลนสำหรับคอนกรีตกับรูปแบบของ Maxwell Chain สามารถรายงาน ผลกระทบของ Non-Linear Creep, การวิเคราะห์ Three-Dimensional Finite Element ของคอนกรีต กำลังอัดและกำลังดึงของก้อนตัวอย่างที่ได้ดำเนินการอยู่ สำหรับก้อนตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบทั้งคู่มียุติที่ 28 วัน การเสียรูปเชิงเส้นความคืบที่ $t = \infty$ ยึดเอาเวลาสามครั้งที่มีขนาดที่ใหญ่กว่าระยะเวลาของการเสียรูป (Creep Factor $\phi = 3$) การวิเคราะห์องค์ประกอบของรอยแตกหักได้ถูกดำเนินการโดยใช้ Eight-Node Solid Finite Elements กับ Eight Integration Points รายงานสำหรับวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ด้วยการพิจารณาถึงขนาดของ Finite Elements, วิธีการนี้ถูกนำมาใช้กับกลุ่มรอยแตก (Bazant and Oh 1983)

2.3.2.5 การอัดแรงเชิงเดียว (Uniaxial compression)

ความคืบ ของคอนกรีตภายใต้การวิเคราะห์แรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงเรขาคณิตดังที่แสดงในรูปที่ 2-10 ซึ่งวัสดุมีคุณสมบัติพื้นฐานดังนี้ Young's Modulus $E = 2000$ MPa, Poisson' Ratio $\nu = 0.18$, Uniaxial Tensile Strength $f_t = 2.0$ MPa, Uniaxial Compressive Strength $f_c = 28$ MPa, Fracture Energy $G_F = 0.10$ N/mm และ Concrete Compressive Fracture Energy $G_c = 100G_F$ ตัวอย่างของกำลังอัดและกำลังดึงแกนเดียว เส้นกราฟความเค้นและความเครียด ที่ได้รับจาก Three-Dimensional Finite Element, สมมติกลุ่มรอยแตกกว้าง $h = 20$ mm ดังที่แสดงในรูปที่ 2-11



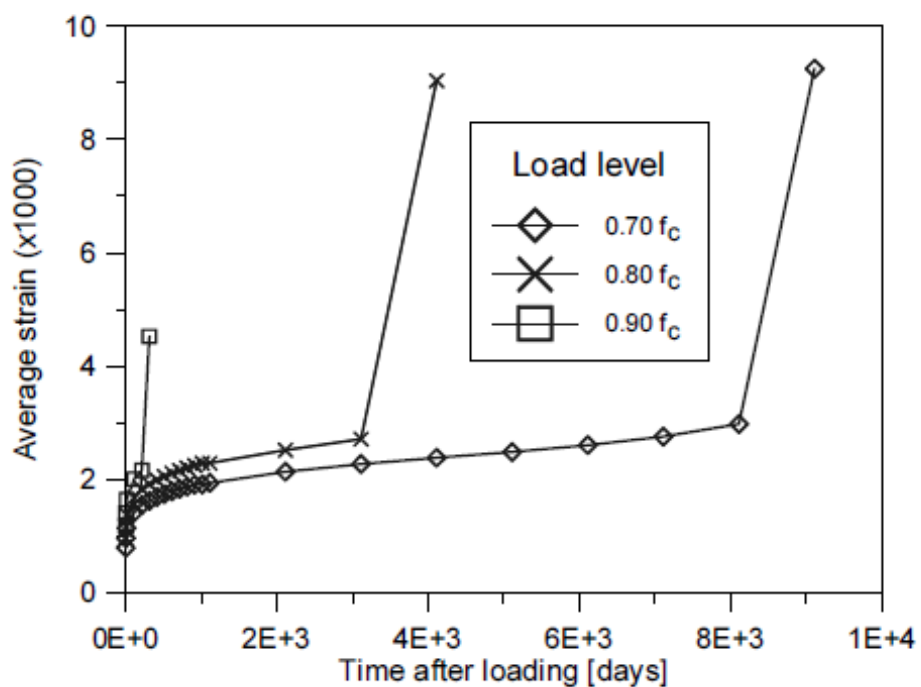
รูปที่ 2-10 Geometry and boundary conditions of compressive specimen(all in [mm])



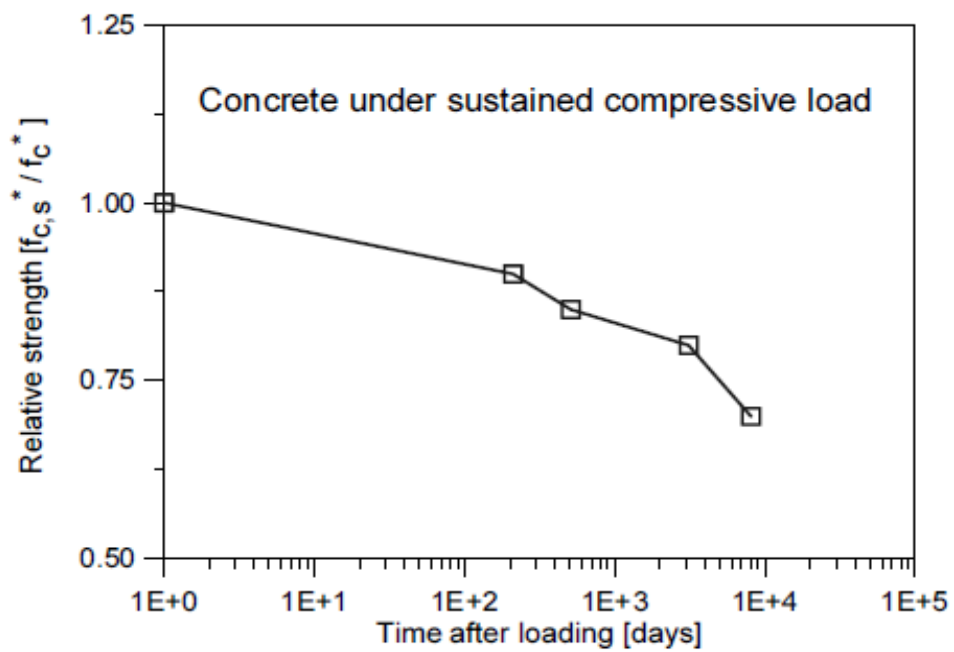
รูปที่ 2-11 Constitutive law for concrete uniaxial tensile compressive relationship obtained from single solid finite element

แรงกระทำถูกปรากฏเหนือแป้นแข็งเกร็งมันถูกใช้เพราะว่าความไม่สม่ำเสมอของสนามความเค้น ความเครียดที่เกิดขึ้นและมันไม่จำเป็นที่จะต้องแนะนำถึง Week Zone หรือการสัสมสร้างคุณสมบัติของวัสดุ สิ่งแรก การคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังของก้อนตัวอย่างภายใต้แรงกระทำอย่างทันทีทันใดเช่น $f_c^* = P_u/A$, โดยที่ P_u = Ultimate Load และ A = พื้นที่หน้าตัด แรงกระทำถูกดำเนินการโดยการควบคุมการเคลื่อนที่ กำลังของคอนกรีตที่ได้รับคือ $f_c^* = 24.40$ MPa (หมายเหตุ กำลังนี้ยังมีผลกระทบต่อโครงสร้างอีกด้วยและมันก็ไม่เหมือนกับ f_c) ต่อมาเป็นการวิเคราะห์ระยะเวลาของแรงกระทำที่ก้อนตัวอย่างโดยการใช้แรงกดที่คงที่แต่มีระดับแรงกดที่แตกต่างกัน (มีการควบคุมน้ำหนักที่กระทำอยู่) แรงกระทำคงค้างที่ใช้แตกต่างกันนั้นนำมาจาก

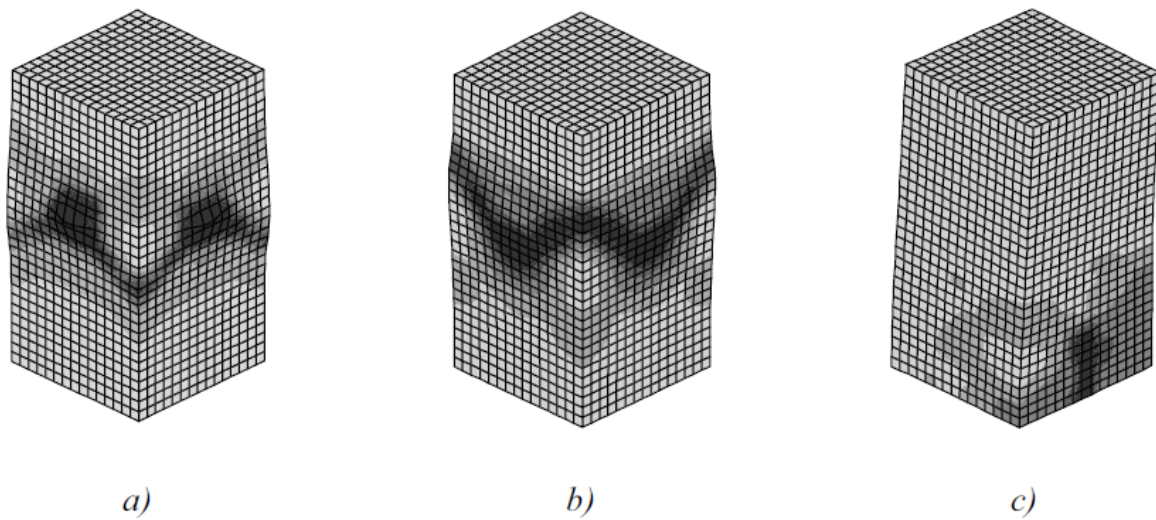
$P = 0.6P_u$ ถึง $P = P_u$ ระยะเวลาสูงสุดที่มีแรงมากกระทำคือ 10000 วัน ระหว่างช่วงระยะเวลานี้ก้อนตัวอย่างจะยังไม่เสียหาย



รูปที่ 2-12 Calculate strain-time relationship for different load levels



រូប 2-13 The relation between the relative compressive strength and time at failure



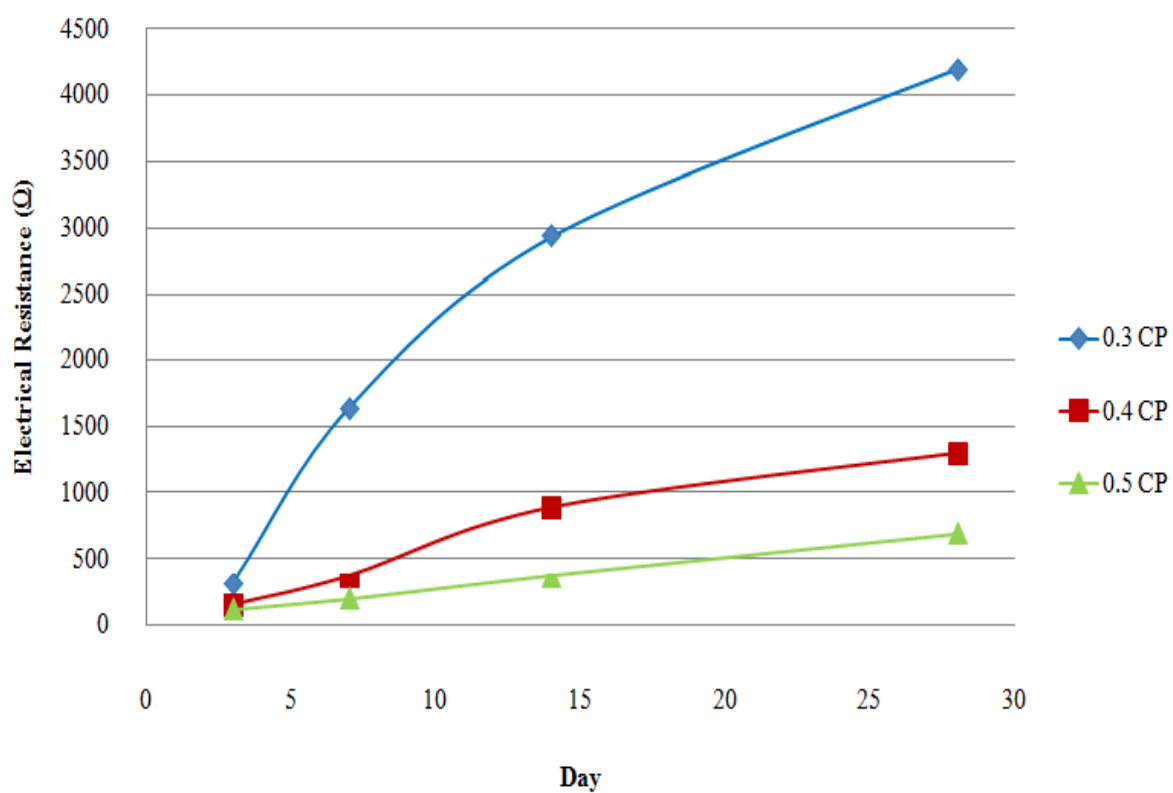
រូប 2-14 Calculated failure modes (dark zone = maximal principal strains) for

a) instantaneous load, b) $P = 0.9 P_u$ and c) $P = 0.7 P_u$

กำลังภายใต้แรงกระทำแบบคงค้างที่ 30% มีขนาดที่เล็กกว่ากำลังอัดแบบทันทีทันใด ($f_{cs}^* = 0.7f_c^*$) เส้นกราฟสามเส้นคือค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนรูปเมื่อเทียบกับเวลาที่ ($P = 0.7P_U$, $0.8P_U$ ถึง $0.9P_U$) ที่แสดงในรูปที่ 2-12 เส้นโค้งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของระดับแรงกระทำที่ ($0.7P_U$ ถึง $0.9P_U$) การเสียรูปความคืบจะเพิ่มขึ้นและระยะเวลาที่เกิดความเสียหายจะลดลง ในรูปที่ 2-13จะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ของกำลังอัดและระยะเวลาของแรงกระทำ ในรูปที่ 2-14a คือตัวอย่างของความเสียหายที่เกิดจากแรงกระทำแบบทันทีทันใด สำหรับการเปรียบเทียบ, ในรูปที่ 2-14b และ รูปที่ 2-14c ซึ่งแสดงถึงความเสียหายของก้อนตัวอย่างที่ถูกแรงกระทำโดย $P = 0.9P_U$ (เกิดความเสียหายหลังจากผ่านไป 211 วัน) และ $0.7P_U$ (เกิดความเสียหายหลังจากผ่านไป 8111 วัน) ตามลำดับ

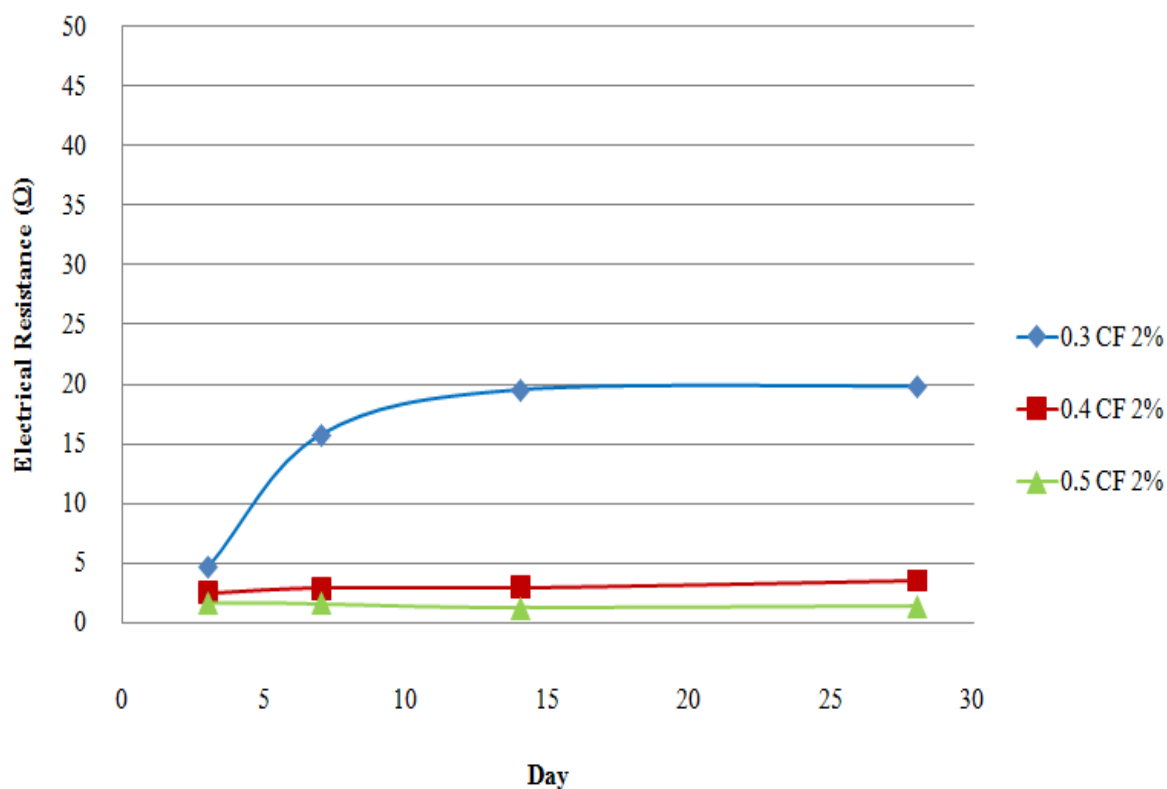
ผลลัพธ์ในเชิงตัวเลขมีความคล้ายคลึงกับข้อมูลการทดลอง ยกเว้นกำลังอัดภายใต้แรงกระทำแบบคงค้างที่มีแรงกระทำประมาณ $0.8P_U$ และ $0.7P_U$ ซึ่งไม่ได้รับการวิเคราะห์ในปัจจุบัน เหตุผลอาจเป็นเพราะความเป็นจริงที่ว่าไม่มีการดำเนินการทดลองที่มีระยะเวลาที่เกินกว่า 25 ปี (ก้อนตัวอย่างที่ถูกแรงกระทำที่ $0.7P_U$ จะเกิดความเสียหายหลังจากระยะเวลาผ่านไปแล้วประมาณ 25 ปี) หรืออาจเกิดจากความเป็นจริงในการวิเคราะห์ผลกระทบจากอายุที่เพิ่มมากขึ้น นั่นคือการเพิ่มขึ้นของกำลังด้วยระยะเวลาจะไม่นำมาคิด มันเป็นที่น่าสนใจที่จะสังเกตว่าความเสียหายของก้อนตัวอย่างที่ถูกแรงกระทำที่ $P = 0.9P_U$ จะมีผลเช่นเดียวกับก้อนตัวอย่างที่ถูกแรงกระทำแบบทันทีทันใด อย่างไรก็ตามก้อนตัวอย่างที่มีแรงกระทำที่ $P = 0.7P_U$ การเสียรูปจะมีหนทางที่แตกต่างออกไป (เปรียบเทียบรูปที่ 2-14b และรูปที่ 2-14c)

2.3.3 ผลของเส้นใยคาร์บอน และ ผงกราฟไฟต์ที่มีต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าในตัวรับส่งสัญญาณซีเมนต์เบสภายใต้สภาวะการรับแรง



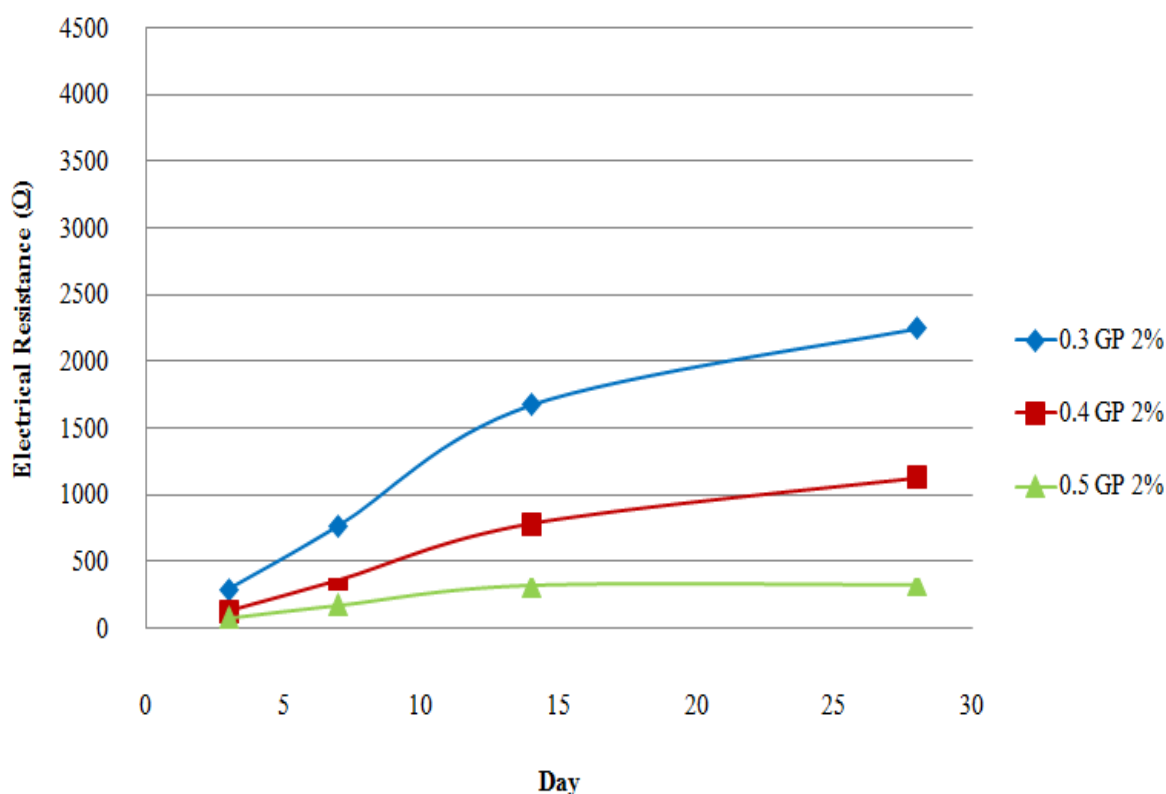
รูปที่ 2-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับระยะเวลาของซีเมนต์เพลส (พุดิฟงค์ คันสนะโชติรัศมี)

จากรูปที่ 2-15 แสดงให้เห็นว่าก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพลสที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.3 , 0.4 และ 0.5 ก้อนตัวอย่างซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 จะให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด



รูปที่ 2-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับระยะเวลาของซีเมนต์ผสมเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (พุฒิพงศ์ คັນสนะโชติรัศมี)

จากรูปที่ 2-16 แสดงให้เห็นว่าก้อนตัวอย่างซีเมนต์ผสมเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์โดยมีเปอร์เซ็นต์ของเส้นใยร้อยละ 2 และมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.3 , 0.4 และ 0.5 จะพบว่าก้อนตัวอย่างซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 จะให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด



รูปที่ 2-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับระยะเวลาของซีเมนต์ผสมผงกราไฟต์ (พุดพิงค์ คั่นสนะโชติรัศมี)

จากรูปที่ 2-17 แสดงให้เห็นว่าก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพลสที่ผสมผงกราไฟต์โดยมีเปอร์เซ็นต์ของผงกราไฟต์ร้อยละ 2 และมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.3 , 0.4 และ 0.5 จะพบว่าก้อนตัวอย่างซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 จะให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด

2.4 เมททิวเซลลูโลส (Methyl Cellulose)

เมททิวเซลลูโลส คือสารประกอบชนิดหนึ่ง ซึ่งได้จากการดัดเซลลูโลสออกจากไม้ หรือสำลี ด้วยด่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วทำปฏิกิริยาต่อด้วยเมททิวคลอไรด์ (methyl chloride) ผลลัพธ์สุดท้ายจะได้สารประกอบที่มีลักษณะเป็นผลึกที่เป็นผงหยาบสีขาว ละลายได้ในน้ำเย็น แต่ไม่ละลายในน้ำร้อน เมื่อละลายน้ำแล้วจะได้สารละลายที่มีความหนืดข้นเมททิวเซลลูโลส ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ใช้เติมในยางธรรมชาติ ใช้เป็นสารป้องกันการตกตะกอนในสารแขวนลอย เช่น CMC (Carboxy Methyl Cellulose) หรือเติมลงในกาบ หรือสารยึดติด เพื่อเพิ่มความแกร่ง ความยืดหยุ่น และแรงยึดเกาะให้กาบ

จากคุณสมบัติในข้างต้นจึงเป็นผลให้มีการนำเมทิวเซลลูโลสมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้เพื่อ อาจจะได้ผลลัพธ์เป็นการทำให้เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยในเรื่องของซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์ที่เป็นวัสดุที่ผลิตมาจากวัสดุจำพวกซีเมนต์ผสมกับวัสดุบางชนิดที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี ตัวอย่างเช่น เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์และผงกราไฟต์ ซึ่งจะมีขั้นตอนในการดำเนินงานและวิธีในการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ซึ่งเป็นซีเมนต์ที่ใช้สำหรับงานโครงสร้าง ดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

- ผงกราไฟต์ (Graphite Powder) มีลักษณะเป็นผงสีดำมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 ผงกราไฟต์ (Graphite Powder)

- เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (Chopped Carbon Fiber) เป็นวัสดุทางวิศวกรรมชนิดหนึ่ง ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยมีคุณสมบัติที่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (Chopped Carbon Fiber)

- สารลดน้ำ (Superplasticizer) เป็นสารที่ช่วยลดการใช้น้ำในคอนกรีต ช่วยเพิ่มความสามารถในการเทของคอนกรีต มีลักษณะดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 สารลดน้ำ (Superplasticizer)

- ผงซิลิกาฟุม (Silica Fume) คือวัสดุที่ใช้ผสมในคอนกรีตสำหรับเพิ่มกำลังคอนกรีตมีลักษณะเป็นผงสีขาวดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 ผงซิลิกาฟุม (Silica Fume)

- เมททิวเซลลูโลส (Methyl Cellulose) คือสารประกอบชนิดหนึ่ง ซึ่งได้จากการดัดแปลงเซลลูโลสออกจากไม้แล้วทำปฏิกิริยาต่อยด้วย methyl chloride ผลลัพธ์สุดท้ายจะได้สารประกอบที่มีลักษณะเป็นผลึกที่เป็นผงหยาบสีขาว ละลายได้ในน้ำเย็น แต่ไม่ละลายในน้ำร้อนดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 Methyl Cellulose

- น้ำ

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องกดแบบ Sustained Load เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการกดแรงกระทำแบบคงค้างซึ่งจะต้องมีการรับแรงกระทำที่สูงจึงต้องมีลักษณะที่แข็งแรงคงทนดังรูปที่ 3-7



รูปที่ 3-7 เครื่องกดแบบ Sustained Load

- เครื่อง LCR Meter : Agilent 4263 B คือเครื่องที่ใช้ในการเก็บค่าทางไฟฟ้า โดยค่าที่เก็บได้จะออกมาในรูปของค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งเครื่องจะมีลักษณะดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 เครื่อง LCR Meter : Agilent 4263 B

- ตู้อบก้อนตัวอย่างแบบที่ควบคุมอุณหภูมิได้ เป็นตู้ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิในการอบได้ และในการทดลองนี้จะทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งมีลักษณะเครื่องดังรูปที่ 3-9



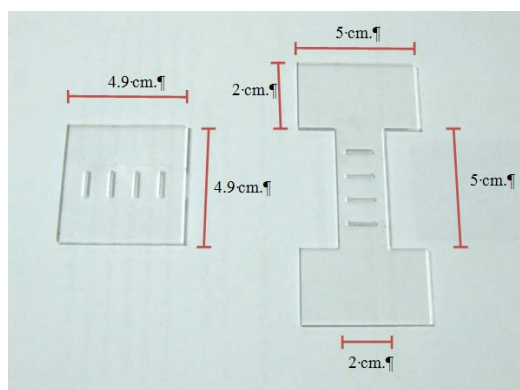
รูปที่ 3-9 ตู้อบก้อนตัวอย่างแบบควบคุมอุณหภูมิ

- แบบหล่อก้อนตัวอย่างขนาด $5 \times 5 \times 5$ cm เป็นแบบหล่อก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่ทำมาจากเหล็กโดยที่หนึ่งบล็อกจะสามารถหล่อก้อนทดสอบได้สามก้อนดังรูปที่ 3-10



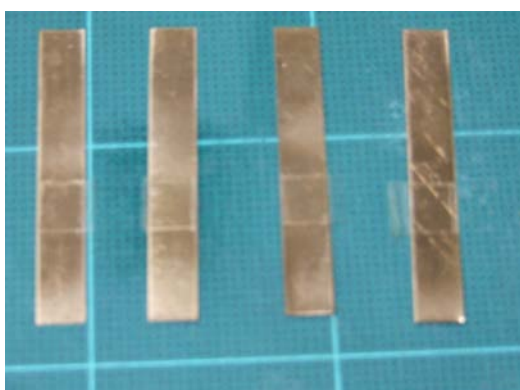
รูปที่ 3-10 แบบหล่อก้อนตัวอย่างขนาด $5 \times 5 \times 5$ cm

- แผ่นอะคริลิกขนาด $4.9 \times 4.9 \times 0.3$ cm มีการเจาะช่องสำหรับใส่ขั้วสั้วดังรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-11 แผ่นอะคริลิกสำหรับยึดขั้วขนาด $4.9 \times 4.9 \times 4.9$ cm

- แผ่นทองแดงขนาดความกว้าง 1 cm และมีขนาดความยาว 7 cm ดังรูปที่ 3-12



รูปที่ 3-12 แผ่นขั้วทองแดงขนาดกว้าง 1 cm ยาว 7 cm

3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลองโดยสังเขป

ในส่วนแรกจะขออธิบายถึงลักษณะของก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสในเบื้องต้น โดยตัวรับส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสจะมีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมทรงลูกบาศก์มีขนาด $5 \times 5 \times 4.7$ cm ที่มีการฝังขั้วทองแดงที่มีความกว้าง 1 cm และยาว 7 cm ไว้ทั้งหมด 4 ขั้วเพื่อใช้ในการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการรับแรงของก้อนส่งสัญญาณ ดังรูปที่ 3-13

3.3.1.1 ปริมาณของคาร์บอนไฟเบอร์ที่ร้อยละ 2 และ 4 โดยปริมาตร

3.3.1.2 ปริมาณของผงกราไฟต์ที่ร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักซีเมนต์

3.3.1.3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ร้อยละ 0.4

3.3.1.4 ปริมาณของซิลิกาฟุ้งที่ร้อยละ 0 และ 15 โดยน้ำหนักซีเมนต์

3.3.1.5 ปริมาณของเมททิวเซลลูโลสที่ร้อยละ 0.2

3.3.2 การแบ่งกลุ่มการทดลอง

ในการทดลองนี้จะแบ่งกลุ่มการทดลองออกเป็น 2 กลุ่มการทดลอง ได้ดังนี้

กลุ่มการทดลองที่ 1 จะเป็นการหล่อก้อนซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์โดยการใช้ซีเมนต์ผสมกับวัสดุผสมเพิ่มชนิดต่างๆโดยมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.4 และไม่มีการใส่ซิลิกาฟุ้งซึ่งจะแบ่งเป็นชื่อกลุ่มต่างๆได้ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ตารางแสดงกลุ่มก้อนตัวอย่างและปริมาณจำนวนก้อนทดสอบในกลุ่มที่ 1

กลุ่มก้อนตัวอย่าง	วัสดุซีเมนต์ผสมกับ	จำนวนก้อนตัวอย่าง
mix 1	ซีเมนต์	12 ก้อน
mix 2	เส้นใยคาร์บอน 2%	12 ก้อน
mix 3	เส้นใยคาร์บอน 4%	12 ก้อน
mix 4	กราไฟต์ 2%	12 ก้อน
mix 5	กราไฟต์ 4%	12 ก้อน
	รวม	60 ก้อน

กลุ่มการทดลองที่ 2 จะเป็นการหล่อก้อนซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์โดยการใช้ซีเมนต์ผสมกับวัสดุผสมเพิ่มชนิดต่างๆโดยมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.4 และมีการใส่ซิลิกาฟุ้งที่ร้อยละ 15 ผสมลงไปด้วยซึ่งจะแบ่งเป็นชื่อกลุ่มต่างๆได้ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ตารางแสดงกลุ่มก้อนตัวอย่างและปริมาณจำนวนก้อนทดสอบในกลุ่มที่ 2

กลุ่มก้อน ตัวอย่าง	วัสดุซีเมนต์ผสมกับ	จำนวนก้อนตัวอย่าง
mix 6	ซีเมนต์	12 ก้อน
mix 7	เส้นใยคาร์บอน 2%	12 ก้อน
mix 8	เส้นใยคาร์บอน 4%	12 ก้อน
mix 9	กราไฟต์ 2%	12 ก้อน
mix 10	กราไฟต์ 4%	12 ก้อน
	รวม	60 ก้อน

3.4 ขั้นตอนการแปลงค่าทอร์คเป็นค่าแรงอัดกระทำ

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้

- 3.4.1.1 ประแจทอร์ค
- 3.4.1.2 Load cell
- 3.4.1.3 Data Logger
- 3.4.1.4 เครื่องกดแบบ Sustain load

3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 3.4.2.1 นำ Load Cell ไปวางไว้ในแท่นกดของเครื่องกดแบบคงค้ำดังรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-14 รูปการนำ Load Cell ไปวางไว้ในแท่นกดของเครื่องกดแบบคงค้ำ

3.4.2.2 นำประแจทอร์คมาไขเครื่องกดแบบคงค้ำ โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าของทอร์คตามลำดับโดยทำการต่อ Load Cell เข้ากับ Data Logger ก่อนทำการไขเครื่องกดแบบคงค้ำ ดังรูปที่ 3-15

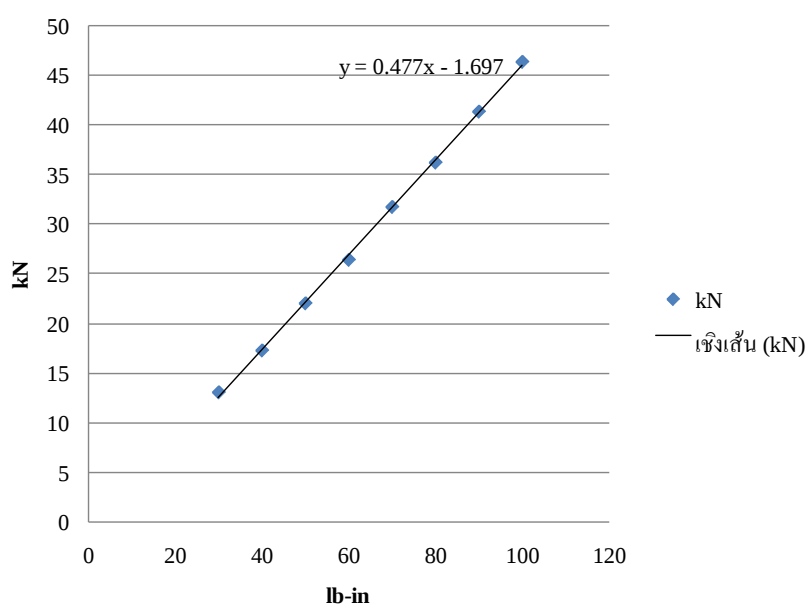


รูปที่ 3-15 รูปการไขเครื่องกดแบบคงค้ำ โดยประแจทอร์คเพื่อเก็บค่าจาก Load Cell

3.4.2.3 บันทึกค่าที่ได้จากเครื่อง Data Logger โดยจะได้ค่าออกมาเป็นหน่วย (mv/v)

3.4.2.4 ทำการแปลงค่าที่ได้จากเครื่อง Data Logger ไปเป็นหน่วยของน้ำหนัก (kN) โดยใช้

สูตร $y(\text{kN}) = 0.477x - 1.697$ โดยที่ค่า x คือค่าที่วัดได้จากเครื่อง Data Logger มีหน่วยเป็น (mv/v) ซึ่งจะได้ค่าแสดงดังรูปที่ 3-16



รูปที่ 3-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (kN) – กำลังบิด (lb-in)

3.5 ขั้นตอนในการผสม

- นำส่วนผสมต่าง ๆ มาทำการชั่งตวงและเตรียมพักไว้ดังรูปที่ 3-17



รูปที่ 3-17 วัสดุที่นำมาใช้ในการผสมก่อนตัวอย่าง

- นำส่วนผสมที่ได้ทำการออกแบบไว้มาผสมโดยใช้เครื่องผสมโดยมีการแยกผสมออกเป็นสองกลุ่มตามที่ได้กำหนดไว้ โดยมีการชั่งตวงอย่างละเอียดด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลดังรูปที่ 3-18



รูปที่ 3-18 ภาพการผสมวัสดุโดยเครื่องมือผสมคอนกรีต

- การผสมในกลุ่ม 1 จะเป็นการผสมผงซีเมนต์ น้ำและซิลิกาฟูมซึ่งจะมีปริมาณสัดส่วนตามที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2 โดยนำส่วนผสมทั้งหมดมาผสมกันด้วยปริมาณที่ได้กำหนดไว้ด้วยเครื่องผสมคอนกรีตและอาจมีการใส่สารลดน้ำลงไปในช่วงขั้นตอนนี้ด้วยหากการผสมเป็นไปได้ด้วยความยากเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่น้อย
- การผสมในกลุ่ม 2 จะเป็นการผสมผงซีเมนต์ น้ำ เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ ผงกราไฟท์ และซิลิกาฟูมตามสัดส่วนและปริมาณที่ได้ทำการออกแบบไว้โดยมีการใส่สารลดน้ำลงไปด้วย เนื่องจากการผสมวัสดุจำพวกเส้นใยลงไปจะเป็นการทำให้การผสมมีความยากลำบากมากขึ้น

การผสมนั้นจะผสมโดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตเช่นเดียวกับการผสมในกลุ่มที่หนึ่งซึ่งมีขั้นตอนที่เหมือนกันแต่แตกต่างกันตรงที่ส่วนผสมเท่านั้น

3.6 ขั้นตอนในการหล่อตัวอย่าง

- นำแบบหล่อตัวอย่างที่ได้มีการทาน้ำมันเตรียมพร้อมไว้แล้วมาวางบนเครื่องสั่น
- นำแผ่นอะคริลิกที่ได้ทำการเจาะรูสำหรับไขควงไว้แล้วมาวางไว้ที่พื้นแบบหล่อหนึ่งแผ่นเพื่อใช้เป็นฐานยึดขั้วทองแดง
- นำขั้วทองแดงมาใส่ขั้วจากนั้นนำมาใส่ตามช่องที่ได้ถูกเจาะไว้ในแผ่นอะคริลิกที่ได้ถูกวางไว้ที่พื้นของแบบหล่อจากนั้นนำแผ่นอะคริลิกอีกแผ่นหนึ่งซึ่งมีลักษณะเหมือนกันมายึดที่ส่วนบนของขั้วทองแดง
- เปิดเครื่องสั่นพร้อมทั้งนำส่วนผสมที่ได้ทำการผสมไว้แล้วมาเทลงแบบ
- เมื่อทำการเทส่วนผสมจนเต็มแบบหล่อแล้วก็ทำการนำแบบหล่อลงจากเครื่องสั่นและนำไปตั้งพักไว้จนก่อนซีเมนต์เซตตัว

3.7 ขั้นตอนในการบ่ม

- หลังจากก้อนตัวอย่างซีเมนต์เซตตัวดีแล้ว ก็ทำการแกะแบบออกนำถุงพลาสติกมาคลุมแล้วทำการมัดให้แน่น จากนั้นนำมาเข้าตู้อบดังรูปที่ 3-19



รูปที่ 3-19 ภาพการนำถุงพลาสติกมาคลุมก้อนซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์

- ทำการอบเป็นระยะเวลา 56 วันโดยเครื่องอบที่อุณหภูมิคงที่ ที่30องศาเซลเซียสดังรูปที่ 3-20



รูปที่ 3-20 ภาพการนำก้อนซีเมนต์เบสเส้นเซอร์มาอบด้วยตู้อบ

3.8 ขั้นตอนในการทดสอบตัวอย่าง

ในขั้นตอนนี้จะแบ่งการเก็บตัวอย่างออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงก่อนรับแรงกระทำและช่วงระหว่างรับแรงกระทำ

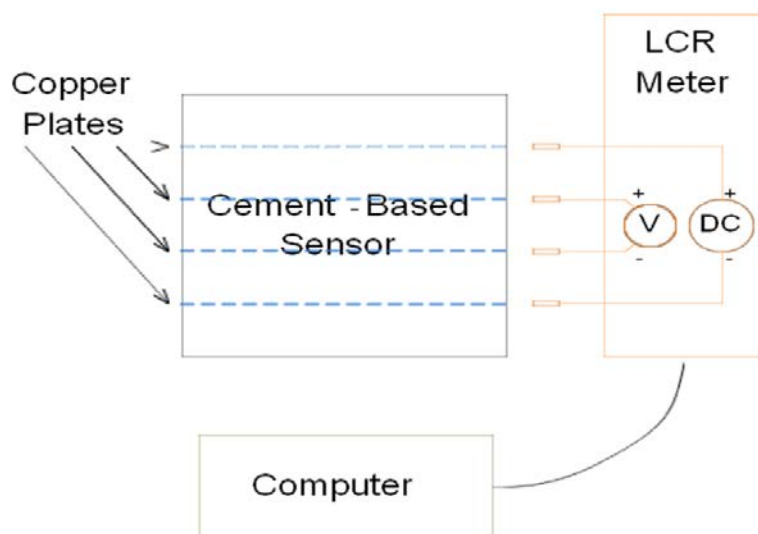
3.8.1 ช่วงก่อนรับแรงกระทำ

- 3.8.1.1 ทำการวัดความต้านทานไฟฟ้าของก้อนตัวอย่างที่ได้ทำการอบไปแล้วเป็นเวลา 3 , 7 , 14 , 21,..., 56 วันด้วยเครื่อง LCR ที่ความถี่ 100 k Hz โดยใช้โปรแกรมที่เขียนบนโปรแกรม Virtual Basic และจะทำการแสดงผลพร้อมทั้งบันทึกผลลงในโปรแกรม Microsoft Excel โดยโปรแกรมที่ใช้จะเป็น โปรแกรมที่แสดงดังรูปที่ 3-21

Figure 3-21 shows a screenshot of an Excel spreadsheet titled "Fscan [Compatibility Mode] - Microsoft Excel". The spreadsheet displays impedance data for various frequencies (500 Hz, 100 Hz, 10 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 100 kHz). The columns are labeled with parameters: Z-Phase, R-X, Y-Phase, G-B, Cp-D, Cp-G, Cp-Q, Cp-Rp, Cs-D, Cs-Rs, Cs-Q, Cs-Rs, Lp-D, Lp-G, Lp-Q, Lp-Rp, La-D, La-Rs, La-Q. The rows show data for each frequency. There are also instructions to enter the GPIB address and click the Start Scan button.

รูปที่ 3-21 ภาพโปรแกรมที่ใช้ในการเก็บค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

3.8.1.2 ทำการบันทึกผลการทดลองที่วัดได้จากเครื่อง LCR อย่างละเอียดไปจนครบ 56 วัน
ซึ่งจะมีลักษณะของการทำงานดังรูปที่ 3-22



รูปที่ 3-22 ภาพแสดงวงจรการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์

3.8.2 ช่วงระหว่างการรับแรงกระทำ

3.8.2.1 นำก้อนตัวอย่างที่ได้ผ่านการบ่มมาเป็นระยะเวลาที่ 56 วันมาทำการติดตั้ง Strain Gauge ดังรูปที่ 3-23



รูปที่ 3-23 ภาพการติดตั้ง Strain Gauge

3.8.2.2 นำก้อนตัวอย่างที่ได้ผ่านการบ่มมาเป็นระยะเวลาที่ 56 วันมาเข้าเครื่องกดแบบคงค้ำ โดยที่หนึ่งเครื่องสามารถกดก้อนตัวอย่างได้สามก้อนโดยใช้กำลังกดที่ร้อยละ 30 ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยเทียบเคียงตามมาตรฐาน ASTM C512/C512M-10 ดังรูปที่ 3-24



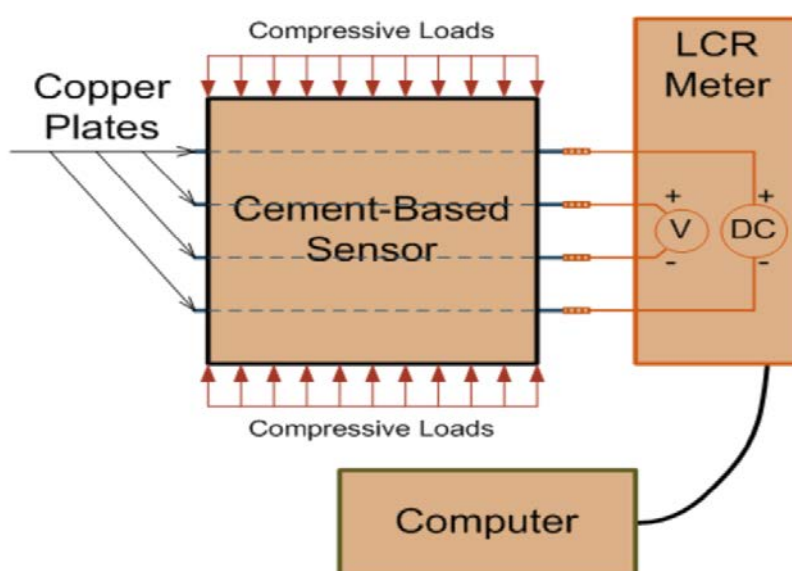
รูปที่ 3-24 ภาพการกดก้อนซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์ด้วยเครื่องกดแบบคงค้ำ

3.8.2.3 ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าความเครียดของก้อนตัวอย่างในระหว่างที่ได้รับแรงกระทำแบบคงค้างในทุกวัน จนครบ 30 วันดังรูปที่ 3-25



รูปที่ 3-25 ภาพการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและค่าความเครียด

3.8.2.4 ทำการบันทึกผลที่วัดได้อย่างละเอียด ซึ่งมีกระบวนการดังรูปที่ 3-26



รูปที่ 3-26 ภาพแสดงวงจรการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวซีเมนต์เบสเซ็นเซอร์ภายใต้การรับแรงอัด

3.9 ขั้นตอนในการสรุปผล

3.9.1 การสรุปผลจากค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าความเครียด

นำค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าความเครียดที่ได้ทำการจดบันทึกทั้งหมดมาทำการหาค่า ΔR และ $\Delta \epsilon$ จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและค่าความเครียดที่วัดได้ กับ พฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์ตัวอย่างที่ถูกแรงกระทำแบบคงค้าง

ΔR คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป – ค่าความต้านทานไฟฟ้าตั้งต้น

$\Delta \epsilon$ คือ ค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไป – ค่าความเครียดตั้งต้น

3.9.2 การนำค่า ΔR และ $\Delta \epsilon$ ของการทดสอบทั้งสองกลุ่มมาทำการเปรียบเทียบกัน

3.9.3 สรุปผลการวิเคราะห์เลือกกลุ่มก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

บทที่ 4

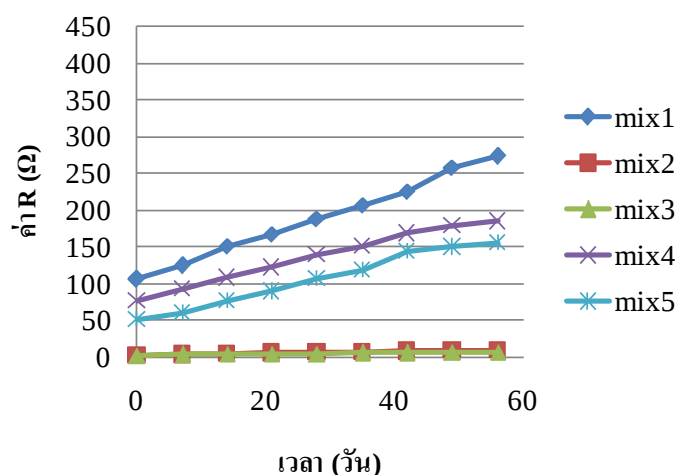
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของงานวิจัยและผลของการวิเคราะห์ โดยในส่วนแรกจะกล่าวถึงผลของการทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออายุของก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบส มีค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามกลุ่มส่วนผสมที่แตกต่างกันไป และผลของวัสดุผสมที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ในส่วนต่อมาจะกล่าวถึงผลกระทบของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อถูกแรงกระทำแบบคงค้างเป็นระยะเวลา 30 วัน ทั้งในกลุ่มส่วนผสมที่ 1 และ ในกลุ่มส่วนผสมที่ 2 แล้วในกลุ่มสุดท้ายจะเป็นการแสดงผลเปรียบเทียบผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของทั้งสองกลุ่มการทดลอง

4.1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ 56 วัน

4.1.1 ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ระยะเวลา 56 วันในกลุ่มทดสอบที่ 1

ผลจากการเก็บค่าความต้านทานไฟฟ้า ของก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบส ในช่วงก่อนรับแรงกระทำเป็นระยะเวลา 56 วัน จากรูปที่ 4-1 จะแสดงให้เห็นว่า ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ทำการวัดได้จากตัวส่งสัญญาณซีเมนต์ทั้ง 5 สัดส่วนผสม จะมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ตามระยะเวลาที่มากขึ้นและจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่น้อยลงและเริ่มจะคงที่หลังจากผ่านไป 56 วัน และอัตราการเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุผสมเพิ่มที่ทำการผสมลงไป ดังในรูปจะเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานที่วัดได้จากตัวส่งสัญญาณที่ทำมาจากซีเมนต์เพียงอย่างเดียว mix1 จะมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงที่สุด ลองลงมาคือตัวส่งสัญญาณที่ทำมาจากซีเมนต์ผสมกรรไฟต์ที่ร้อยละ 2 , mix4 และที่ร้อยละ 4 , mix5 ตามด้วยตัวส่งสัญญาณซีเมนต์ที่ทำมาจากซีเมนต์ผสมเส้นใยคาร์บอนที่ร้อยละ 2 , mix2 และในตัวส่งสัญญาณซีเมนต์ผสมเส้นใยคาร์บอนที่ร้อยละ 4 , mix3 จะให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่น้อยสุด เหตุเพราะทั้งผงกรรไฟต์และเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ต่างมีคุณสมบัติที่ดีในการนำไฟฟ้าและเมื่อนำมาเป็นส่วนผสมในก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์เบสก็จะทำให้ค่าของความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าที่ลดลง



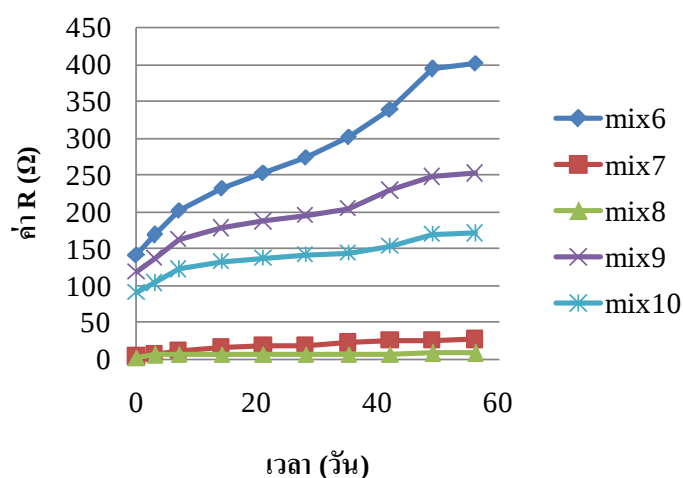
รูปที่ 4-1 ภาพกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระยะเวลา 56 วัน

จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่า วัสดุผสมเพิ่มที่ได้ทำการผสมลงไปจะช่วยทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ของก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์เบสลดลงไปตามแต่ละชนิดของวัสดุผสมเพิ่มโดยจะพบว่า ก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์เบสที่ผสมเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ จะมีค่าของความต้านทานทางไฟฟ้าที่น้อยที่สุดและมีความเสถียรต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานดีที่สุด

4.1.2 ผลการทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ระยะเวลา 56 วันในกลุ่มทดสอบที่ 2

ผลจากการเก็บค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบส ในกลุ่มทดสอบที่ 2 ซึ่งมีส่วนผสมที่แตกต่างจากกลุ่มที่ 1 คือมีการเติมซิลิกาฟุ่มลงไป ในช่วงก่อนรับแรงกระทำเป็นระยะเวลา 56 วัน จากรูปที่ 4-2 จะแสดงให้เห็นว่า ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ทำการวัดได้จากตัวส่งสัญญาณซีเมนต์ทั้ง 5 สัดส่วนผสม จะให้ค่าของความต้านทานทางไฟฟ้าที่เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับกลุ่มทดสอบที่ 1 กล่าวคือ ก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่มีส่วนผสมเป็นซีเมนต์เพียงอย่างเดียว mix6 จะให้ค่าความต้านทานที่สูงที่สุดตามระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นและเมื่อถึงจุดหนึ่ง อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าก็จะมีค่าลดต่ำลงและเริ่มคงที่ รองลงมาจะเป็นก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่มีการผสมผงกราฟาไฟต์ที่ร้อยละ 2 , mix9 และร้อยละ 4 , mix10 ตามด้วยก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่มีการผสมเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ที่ร้อยละ 2, mix7 และร้อยละ 4 , mix8 เป็นก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด เหตุที่ก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่มีการผสมวัสดุผสมเพิ่มทั้งผงกราฟาไฟต์และเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ มีค่าของความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำเพราะ วัสดุผสมเพิ่มพวกนี้มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี จากกราฟจะเห็นได้ว่า ก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่มีการผสมเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ จะมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำกว่าก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่มีการผสมผงกราฟาไฟต์ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์นั้นมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าผงกราฟาไฟต์ กล่าวคือเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์เมื่อนำมาผสมกับซีเมนต์จะมีการ

กระจายตัวและการสัมผัสกันระหว่างเส้นใยที่ดีกว่าการกระจายตัวของผงกราไฟต์ ซึ่งจะทำให้การนำไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ค่าความต้านทานมีค่าที่ต่ำลงนั่นเอง



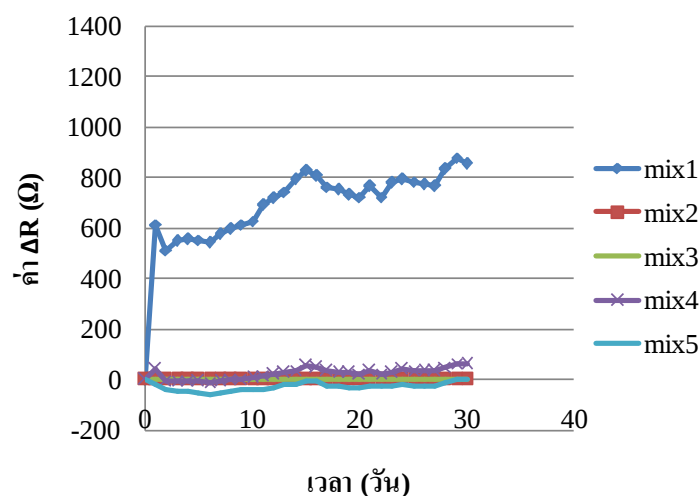
รูปที่ 4-2 ภาพกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในระยะเวลา 56 วัน

4.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าภายใต้การรับแรงแบบคงค้ำเป็นระยะเวลา 30 วัน

4.2.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าภายใต้การรับแรงแบบคงค้ำเป็นระยะเวลา 30 วันในกลุ่มการทดสอบที่ 1

ผลจากการเก็บค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ของก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสภายใต้การรับแรงแบบคงค้ำของกลุ่มการทดสอบที่ 1 จากรูปที่ 4-3 พบว่า ภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้ำค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสมีค่าที่เพิ่มมากขึ้น ตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป โดยค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์ใน mix 1 จะมีการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามากที่สุด เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าวัสดุซีเมนต์นั้น มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูง อีกทั้งยังมีการรับแรงอัดซึ่งแรงอัดนี้จะทำให้ค่าความต้านทานมีค่าที่สูงขึ้น เพราะซีเมนต์มีความหนาแน่นที่เพิ่มมากขึ้นจากการได้รับแรงอัดรอรลงมาก็จะเป็น mix 4 หรือซีเมนต์ผสมกับกราไฟต์ที่ร้อยละ 2 เหตุที่มีค่าความต้านทานที่ต่ำลงเพราะมีอิทธิพลของกราไฟต์เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องเนื่องจากกราไฟต์มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี ลองลงมามากก็จะเป็นในส่วนของซีเมนต์ผสมกับเส้นใยคาร์บอนที่ร้อยละ 2 และร้อยละ 4 ตามลำดับซึ่งปริมาณของคาร์บอนไฟเบอร์ที่ผสมลงไป ก็จะมีส่วนต่อการลดลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ในขณะที่รับแรงกระทำกล่าวคือปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่ร้อยละ 4 (mix3) จะให้ค่าความต้านทานที่ต่ำกว่าปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่ร้อยละ 2 , mix2 และ mix4 หรือซีเมนต์ผสมกราไฟต์ที่ร้อยละ 4 เป็นส่วนผสมที่ให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำสุดเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ปริมาณกราไฟต์ที่ร้อยละ 4 จะทำให้มีการกระจายตัวของกราไฟต์ไปอย่างทั่วถึงจึงทำให้ก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์ใน mix4 เมื่อถูกแรงกระทำแบบคงค้ำก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสซึ่งมีการ

กระจายตัวของกราฟไฟต์ที่ดี จึงทำให้กราฟไฟต์มีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการลดลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

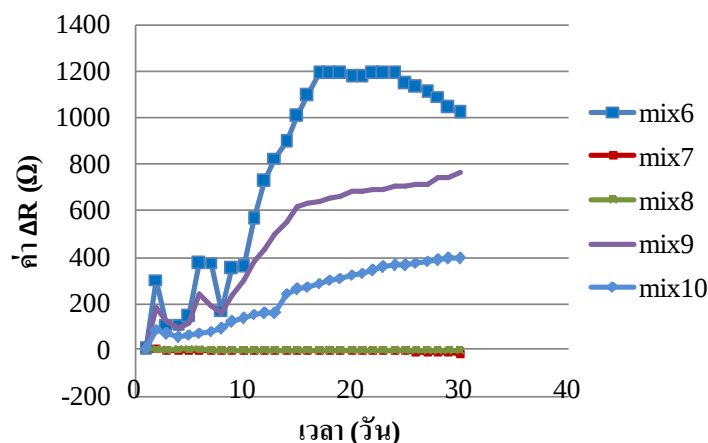


รูปที่ 4-3 ภาพกราฟความต้านทานไฟฟ้า ΔR ภายใต้การรับแรงแบบคงค้ำเป็นระยะเวลา 30 วันกลุ่มที่ 1

4.2.2 ผลการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าภายใต้การรับแรงแบบคงค้ำเป็นระยะเวลา 30 วัน ในกลุ่มการทดสอบที่ 2

ผลจากการเก็บค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสภายใต้การรับแรงแบบคงค้ำของกลุ่มการทดสอบที่ 2 จากรูปที่ 4-4 พบว่าความต้านทานทางไฟฟ้าของก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสในกลุ่มการทดลองที่ 2 จะให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับกลุ่มการทดลองที่ 1 กล่าวคือ เมื่อทำการอัดแรงกระทำแบบคงค้ำลงไป ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสจะมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่มีแรงมากระทำ โดยค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสใน mix6 จะให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงที่สุดเพราะใน mix6 จะมีส่วนผสมของซีเมนต์เพลสเพียงอย่างเดียวและซีเมนต์เพลสนี้ก็มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ไม่ค่อยดีนักจึงทำให้มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูง อีกทั้งยังมีอิทธิพลจากกำลังอัดซึ่งจะทำให้ก้อนทดสอบมีความหนาแน่นที่เพิ่มมากขึ้นและมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า รองลงมาจะเป็นใน mix9 และตามด้วย mix10 ซึ่งทั้งสองส่วนผสมนี้จะมีค่าของความต้านทานทางไฟฟ้าที่น้อยกว่าใน mix6 เพราะมีการใส่ส่วนผสมของผงกราฟไฟต์ลงไปซึ่งคุณสมบัติของผงกราฟไฟต์จะช่วยเข้าไปลดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าลง ต่อมาก็จะเป็นในส่วนของ mix7 และที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดคือ mix8 เหตุที่ทั้งสองส่วนผสมนี้มีค่าความต้านทานที่ต่ำนั้น เพราะทั้งสองส่วนผสมเป็นก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของซีเมนต์เพลสและเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์โดยที่เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์นั้นจะมีคุณสมบัติที่ดีในการนำไฟฟ้าซึ่งจะเป็นการไปลดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าให้ต่ำลงไป จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของทั้งสองส่วนผสมนี้จะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนักจากผลกระทบของแรงกระทำแบบคงค้ำ ซึ่งค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในกลุ่มการทดลอง

ที่ 2 จะมีความแตกต่างจากในกลุ่มการทดลองที่ 1 โดยค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในกลุ่มการทดลองที่ 2 จะมีค่าของความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงกว่าในกลุ่มการทดสอบที่ 1 อันเนื่องมาจากผลของผงซิลิกาฟุ่มที่ทำการผสมลงไปในกลุ่มการทดลองที่ 2 ที่ได้ไปเพิ่มค่าความต้านทานทางไฟฟ้าให้เพิ่มมากขึ้น

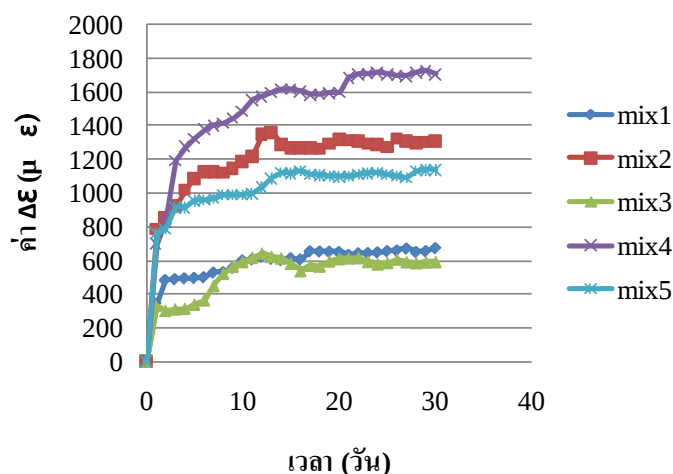


รูปที่ 4-4 ภาพกราฟความต้านทานไฟฟ้า ΔR ภายใต้การรับแรงแบบคงค้ำเป็นระยะเวลา 30 วันกลุ่มที่ 2

4.3 ผลการทดสอบค่าความเครียดภายใต้การรับแรงแบบคงค้ำเป็นระยะเวลา 30 วัน

4.3.1 ผลการทดสอบค่าความเครียดภายใต้การรับแรงแบบคงค้ำเป็นระยะเวลา 30 วันในกลุ่มการทดสอบที่ 1

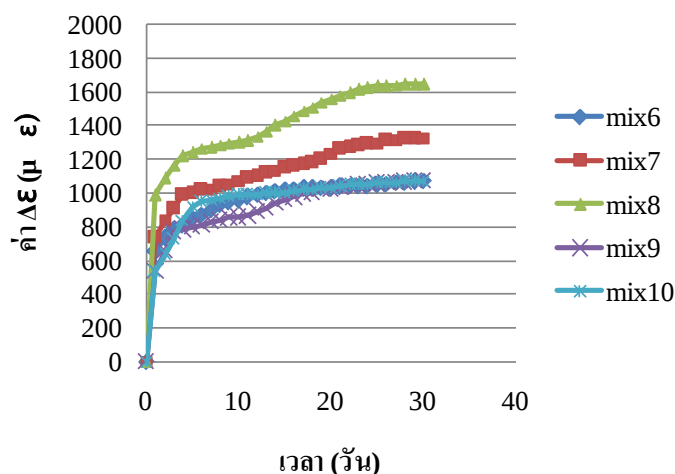
ผลจากการเก็บค่าของความเครียดในกลุ่มก่อนการทดสอบที่ 1 พบว่าภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้ำค่าของความเครียดจะมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งอาจกล่าวได้ว่า เป็นสภาวะของการเกิดการคืบขึ้น ซึ่งจากรูปจะแสดงให้เห็นว่าก่อนส่งสัญญาณซีเมนต์ใน mix 4 หรือซีเมนต์ผสม กราไฟต์ที่ร้อยละ 2 การกดแบบคงค้ำจะมีอิทธิพลต่อการเกิดการคืบมากที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ามีการเกิดความเครียดที่สูงที่สุด ลงลงมาก็คือใน mix 2 หรือซีเมนต์ผสมเส้นใยคาร์บอนที่ร้อยละ 2 และ mix 5 หรือซีเมนต์ผสมกราฟไฟต์ที่ร้อยละ 4 แล้วตามด้วย mix 1 ที่ใช้ซีเมนต์เพสเพียงอย่างเดียว และใน mix 3 หรือซีเมนต์ผสมเส้นใยคาร์บอนที่ร้อยละ 4 คือก่อนส่งสัญญาณซีเมนต์ที่มีผลต่อการเกิดการคืบน้อยที่สุดในสภาวะการรับแรงกระทำแบบคงค้ำ



รูปที่ 4-5 ภาพกราฟความค่าความเครียด $\Delta\epsilon$ ภายใต้การรับแรงแบบคงค้ำเป็นระยะเวลา 30 วันในกลุ่มที่ 1

4.3.2 ผลการทดสอบค่าความเครียดภายใต้การรับแรงแบบคงค้ำเป็นระยะเวลา 30 วันในกลุ่มการทดสอบที่ 2

ผลจากการเก็บค่าความเครียดในกลุ่มก่อนการทดสอบที่ 2 จากรูปที่ 4-6 พบว่าภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้ำ ค่าความเครียดจะมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปโดยจากรูปจะเห็นได้ว่าใน mix8 หรือซีเมนต์ผสมเส้นใยคาร์บอนไฟที่ร้อยละ 4 จะมีค่าการเกิดค่าความเครียดสูงที่สุด รองลงมา ก็จะเป็นส่วนผสมใน mix7 หรือซีเมนต์ผสมเส้นใยคาร์บอนไฟที่ร้อยละ 2 เหตุที่ทั้งสองส่วนผสมมีค่าการเกิดของค่าความเครียดที่สูง เพราะการที่ทั้งสองส่วนผสมมีการผสมเส้นใยคาร์บอนลงไป ซึ่งคุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน จะช่วยในการเกิดความเครียดให้สูงขึ้น ต่อมาก็จะเป็นในส่วนของ mix10 ตามมาด้วย mix6 และในส่วนผสมที่มีการเกิดค่าความเครียดที่น้อยที่สุด คือใน mix9 ซึ่งจากรูปกราฟจะเห็นได้ว่า ในทั้งสามส่วนผสมนี้ จะมีการเกิดของค่าความเครียดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าใน mix9 และ mix10 ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีการเติมผงกราฟไฟต์ลงไป จะไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการเกิดค่าความเครียดเมื่อเทียบกับ mix6 ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีการใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น

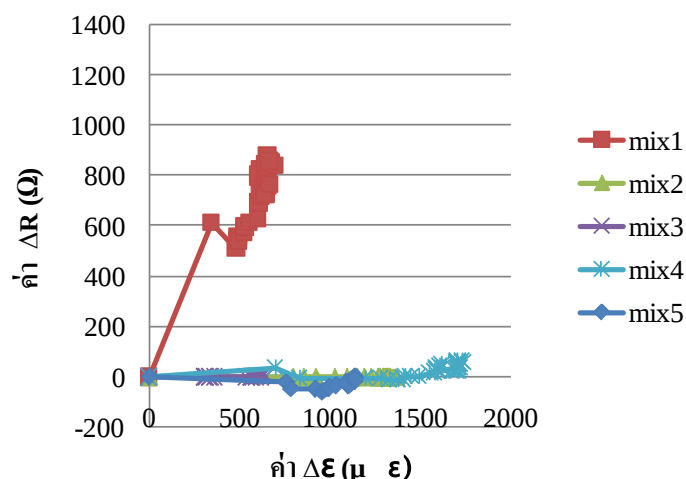


รูปที่ 4-6 ภาพกราฟความค่าความเครียด $\Delta\epsilon$ ภายใต้การรับแรงแบบคงค้างเป็นระยะเวลา 30 วันกลุ่มที่ 2

4.4 ผลการนำค่าความต้านทานทางไฟฟ้า – ค่าความเครียดมาหาความสัมพันธ์

4.4.1 ผลการนำค่าความต้านทานทางไฟฟ้า – ค่าความเครียดมาหาความสัมพันธ์ในกลุ่มการทดสอบที่ 1

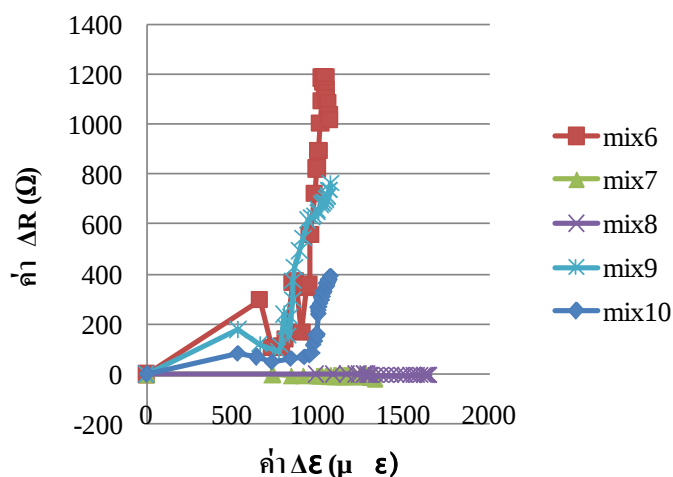
ผลจากการนำกราฟค่าความต้านทานและค่าความเครียดมาพล็อตหาความสัมพันธ์กันจะพบว่า จากรูปที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ของ mix 1 จะเป็นกราฟที่มีความชันของกราฟมากกว่าในสัดส่วนผสมอื่นๆทั้งหมด อันเนื่องมาจากค่าความเครียดของ mix 1 มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเป็นอย่างมากกล่าวคือเมื่อเกิดค่าความเครียดขึ้นค่าความต้านทานทางไฟฟ้าก็จะมี การเปลี่ยนแปลงที่มากขึ้นตามไปด้วย รองลงมาก็จะเป็นในส่วน ของ mix4 และ mix5 ซึ่งเป็นสัดส่วนผสมที่มีการเติมผงกราฟต์ลงไป และในสองสัดส่วนผสมสุดท้ายที่ค่าของการเกิดค่าความเครียดมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยที่สุดคือใน mix2 และ mix3 ซึ่งทั้งสองสัดส่วนผสมนี้มีการเติมเส้นใยคาร์บอนลงไป และจากรูปที่ 4-7 จะพบว่า เมื่อมีการผสมวัสดุจำพวกเส้นใยคาร์บอนหรือผงกราฟต์ลงไปค่าของความเครียดจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่น้อยลง



รูปที่ 4-7 ภาพกราฟความสัมพันธ์เชิงกราฟค่าความต้านทานทางไฟฟ้า – ค่าความเครียด ภายใต้การรับแรงแบบคงค้างเป็นระยะเวลา 30 วันกลุ่มที่ 1

4.4.2 ผลการนำค่าความต้านทานทางไฟฟ้า – ค่าความเครียด มาหาความสัมพันธ์ในกลุ่มการทดสอบที่ 2

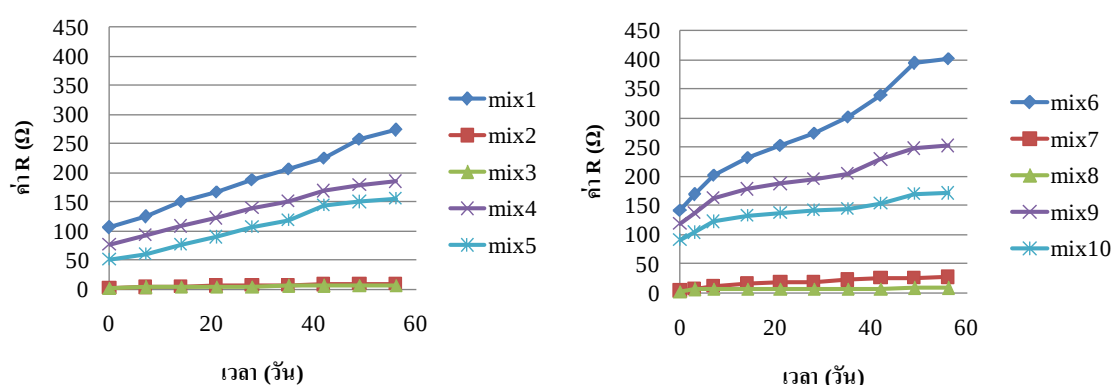
ผลจากการนำกราฟค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและค่าความเครียดมาพล็อตหาความสัมพันธ์กัน จะพบว่า จากรูปที่ 4-8 สัดส่วนผสมที่มีเพียงซีเมนต์เพียงอย่างเดียว mix6 จะให้กราฟที่มีค่าความชันมากที่สุดหรือกล่าวเป็นอีกนัยได้ว่า ค่าการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดใน mix6 มีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูง กล่าวคือเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเครียดหรือการคืบขึ้น ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าของความเครียด รองลงมาก็จะเป็นสัดส่วนผสมใน mix9 และ mix10 ซึ่งเป็นสัดส่วนผสมที่มีการผสมผงกราไฟต์ลงไป โดยทั้งสองสัดส่วนผสมนี้ค่าการเพิ่มขึ้นของความเครียดจะมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่น้อยกว่าใน mix6 ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าการผสมผงกราไฟต์ลงไปเป็นการลดอิทธิพลของค่าความเครียด ที่มีผลต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าลง และในสัดส่วนผสม mix7 และ mix8 จะเป็นสองสัดส่วนผสมที่ค่าของความเครียด จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากที่ทั้งสองสัดส่วนผสมนี้มีการผสมเส้นใยคาร์บอนลงไป และเส้นใยคาร์บอนก็เป็นสาเหตุในการลดอิทธิพลของค่าความเครียดที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า



รูปที่ 4-8 ภาพกราฟความสัมพันธ์เชิงกราฟค่าความต้านทานทางไฟฟ้า – ค่าความเครียดภายใต้การรับแรงแบบคงค้างเป็นระยะเวลา 30 วันกลุ่มที่ 2

4.5 ผลการนำค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ 56 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกัน

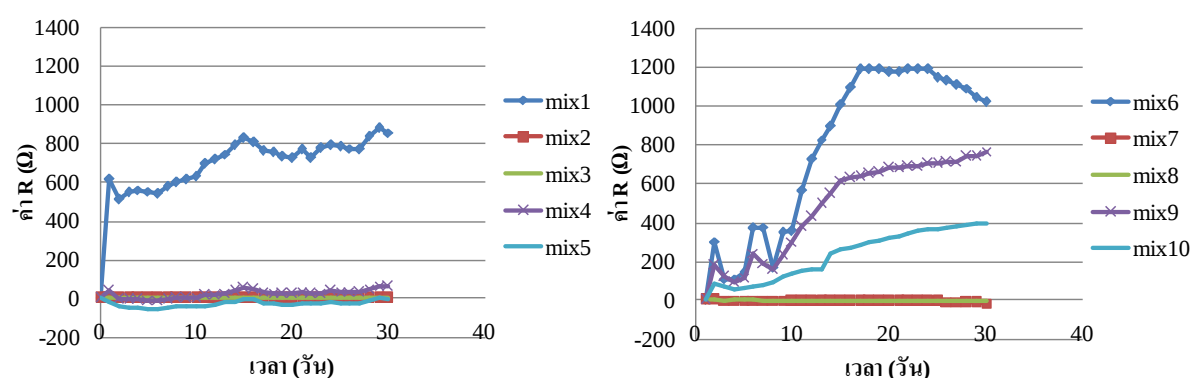
ผลการเปรียบเทียบการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในระยะเวลา 56 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลองพบว่า จากรูปที่ 4-9 ผลจากการนำมาวิเคราะห์พบว่า ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของกลุ่มการทดลองที่สองจะให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงกว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของกลุ่มการทดลองที่หนึ่งในทุกสัดส่วนผสมสาเหตุเกิดจากในกลุ่มการทดลองที่สองมีการผสมซิลิกาฟุ่มลงไป ซึ่งซิลิกาฟุ่มนี้จะไปทำให้ก้อนทดสอบมีความหนาแน่นที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4-9 ภาพกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในระยะเวลา 56 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลอง

4.6 ผลการนำค่าความต้านทานทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้าง ที่ระยะเวลา 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกัน

ผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้าง ที่ระยะเวลา 30 วัน ของทั้งสองกลุ่มการทดลองพบว่า จากรูปที่ 4-10 ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ได้ทำการวัดค่าภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้าง ในกลุ่มการทดลองที่ 2 จะให้ค่าของความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงกว่าในกลุ่มการทดลองที่ 1 แต่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในกลุ่มการทดลองที่ 2 นั้น ในช่วงแรกของการทดสอบกลับพบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะมีการแกว่งของค่าที่มากกว่าในกลุ่มการทดลองที่ 1 และจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในกลุ่มการทดลองที่ 2 จะมีการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงกว่าในกลุ่มการทดลองที่ 1 ในขณะที่ใช้เวลาเท่ากัน แต่จากรูปจะเห็นได้ว่าในทั้งสองกลุ่มการทดลองค่าความต้านทานของสัดส่วนผสมที่มีการผสมเส้นใยคาร์บอนลงไปคือในกลุ่มการทดลองที่ 1 mix2 และ mix3 ในกลุ่มการทดลองที่ 2 mix7 และ mix8 จะให้ค่าของความต้านทานทางไฟฟ้าที่ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

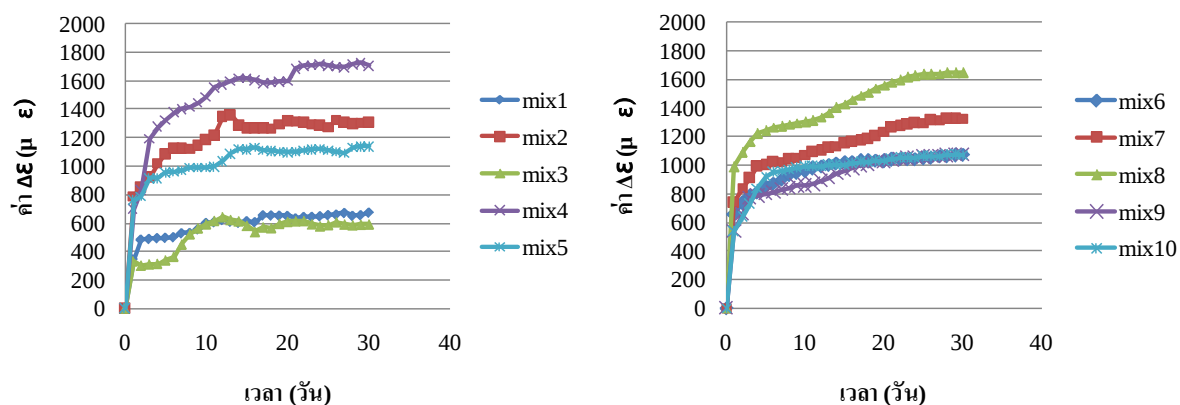


รูปที่ 4-10 ภาพกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ΔR ภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้างในระยะเวลา 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลอง

4.7 ผลการนำค่าความเครียดภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้าง ที่ระยะเวลา 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกัน

ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้าง ที่ระยะเวลา 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลองจากรูปที่ 4-11 พบว่าค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในกลุ่มการทดลองที่ 2 จะมีการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดที่มีความเสถียรมากกว่าในกลุ่มการทดลองที่ 1 โดยพิจารณาได้จากความชันของกราฟที่จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดอย่างต่อเนื่องซึ่งจะแตกต่างจากในกลุ่มการทดลองที่ 1 ซึ่งค่าความเครียดอาจจะมีการแกว่งของค่าเป็นบางช่วงของเวลา และจากทั้งสองกลุ่มการทดลองจะพบว่าสัดส่วนผสมในกลุ่มการทดลองที่ 1 mix2 และ สัดส่วนผสมในกลุ่มการทดลองที่ 2 mix7 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มีการผสมเส้นใยคาร์บอนลงไป

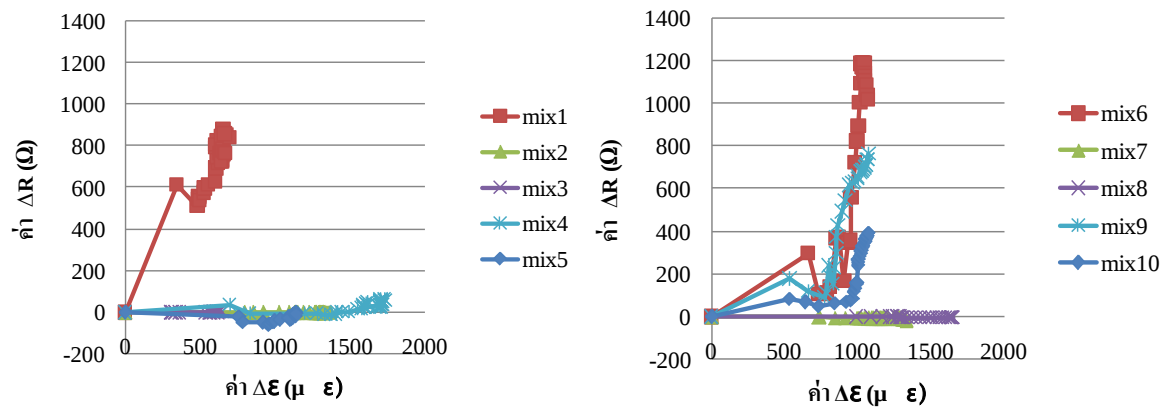
ร้อยละ 2 มีค่าของการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดที่มีความใกล้เคียงกันมาก และจากรูปผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใส่ซิลิกาฟูลลงไปในกลุ่มการทดลองที่ 2 มีส่วนช่วยในการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดให้มีความเสถียรมากขึ้นโดยดูได้จากการที่กราฟในกลุ่มการทดลองที่ 2 ที่จะมีการเกาะกลุ่มกัน ซึ่งมีความแตกต่างจากในกลุ่มการทดลองที่ 1 ซึ่งกราฟมีค่าการเกิดของค่าความเครียดที่กระจายไม่เกาะกลุ่มกัน



รูปที่ 4-11 ภาพกราฟแสดงค่าความเครียด $\Delta\epsilon$ ภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้างในระยะ 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลอง

4.8 ผลการนำค่าความต้านทานทางไฟฟ้า – ค่าความเครียด ภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้าง ที่ระยะเวลา 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกัน

ผลการเปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานทางไฟฟ้ากับค่าความเครียดของทั้งสองกลุ่มการทดลอง จากรูปที่ 4-12 พบว่า ในกลุ่มการทดลองที่สองค่าความชันของกราฟจะมีค่าที่สูงกว่าในกลุ่มการทดลองที่ 1 กล่าวคือในกลุ่มการทดลองที่สอง การเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ที่สูงกว่าในกลุ่มการทดลองที่ 1 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การเติมซิลิกาฟูลลงไปในกลุ่มการทดลองที่ 2 เป็นการช่วยเพิ่มผลกระทบของค่าความเครียด ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าให้สูงขึ้น และจากกราฟจะพบว่าในกลุ่มการทดลองที่ 1 , mix2 และ mix3 และในกลุ่มการทดลองที่ 2 , mix7 และ mix8 จะเป็นสัดส่วนผสมที่มีค่าของความชันที่น้อยมาก กล่าวคือทั้งสี่สัดส่วนผสมนี้ค่าการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่น้อยมาก



รูปที่ 4-12 ภาพกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า – ค่าความเครียดภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้าง
ในระยะ 30 วันของทั้งสองกลุ่มการทดลอง

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลสรุปของการทดสอบที่ได้จากงานวิจัย ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนแรกจะเป็นการกล่าวถึงผลสรุปของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวรับส่งสัญญาณภายใต้สถานะที่ไม่ได้รับแรงกระทำเป็นเวลา 56 วัน ในส่วนที่สองจะเป็นการสรุปผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวรับส่งสัญญาณที่อยู่ภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้างเป็นระยะเวลา 30 วัน และในส่วนสุดท้ายจะเป็นการสรุปผลค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

5.1 ผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในสถานะไร้แรงกระทำเป็นเวลา 56 วัน

5.1.1 อิทธิพลของเส้นใยคาร์บอนและผงกราฟิต์

อิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของเส้นใยคาร์บอนมีผลต่อการลดลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้ากล่าวคือ ปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่ร้อยละ 4 จะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าการผสมเส้นใยคาร์บอนที่ร้อยละ 2 ซึ่งในส่วนของกราฟิต์ก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับเส้นใยคาร์บอน กล่าวคือปริมาณกราฟิต์ที่ร้อยละ 4 จะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าปริมาณกราฟิต์ที่ร้อยละ 2

5.1.2 อิทธิพลของซิลิกาฟูม

เมื่อมีการเติมซิลิกาฟูมลงไปเป็นการเพิ่มความหนาแน่นให้กับก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์ซึ่งมีผลทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มมากขึ้น

5.1.3 อิทธิพลของอายุ

เมื่ออายุของก้อนส่งสัญญาณมีค่าที่เพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าก็จะมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป และค่าของความต้านทานทางไฟฟ้าจะเริ่มคงที่เมื่อก้อนส่งสัญญาณมีอายุประมาณ 56 วัน

5.2 ผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในสถานะการรับแรงกระทำแบบคงค้างเป็นเวลา 30 วัน

ภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้างสามารถสรุปได้ว่า ความคืบหน้ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าความเครียดและค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยจากข้อมูลจะพบว่า ในก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์เบสที่ทำมาจากซีเมนต์ผสมเส้นใยคาร์บอน ความคืบหน้ามีผลต่อค่าความเครียดมากที่สุด โดยจะมีค่ามากกว่าทั้งก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์ที่ทำมาจากซีเมนต์ผสมผงกราไฟต์และแบบที่ใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว เหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดจากการที่เส้นใยคาร์บอนได้เข้าไปทำการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์ ซึ่งจะทำการก้อนส่งสัญญาณมีค่าความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นเหตุให้ผลของค่าความคืบหน้ามีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าความเครียดที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ในทางกลับกันก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์แบบที่มีผงกราไฟต์ผสมอยู่ ซึ่งผงกราไฟต์ไม่ได้เข้าไปช่วยในการการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์มากนักจึงทำให้ผลของค่าความคืบหน้ามีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าความเครียดน้อย ซึ่งจะเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์ที่ทำมาจากวัสดุซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ส่วนในด้านอิทธิพลของค่าความคืบหน้าต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้านั้นกลับพบว่ามีลักษณะที่ผกผันกันกับความเครียด กล่าวคือก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่มีการผสมเส้นใยคาร์บอน การเกิดค่าความคืบหน้ามีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าทั้งก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่มีการผสมผงกราไฟต์และแบบที่ใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยสาเหตุเกิดจากการที่เส้นใยซึ่งมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีได้เข้าไปปรับเปลี่ยนคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าของก้อนส่งสัญญาณให้ดีขึ้น ซึ่งจะเป็นการทำให้ค่าของความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าที่ลดลง โดยจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่มีการผสมผงกราไฟต์ แต่ในแบบที่ผสมผงกราไฟต์ผลของค่าความคืบหน้ามีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าความต้านทานที่มากกว่าในแบบที่ผสมเส้นใยคาร์บอน เพราะถึงแม้ว่า กราไฟต์จะมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าแต่ก็ช่วยในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าของก้อนส่งสัญญาณได้ไม่มากนัก จึงทำให้อิทธิพลของค่าความคืบหน้าต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าแนวโน้มไปในทางที่ใกล้เคียงกับก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่มีการใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวแต่มีค่าอิทธิพลต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่น้อยกว่าไม่มากนัก สำหรับผลของการใส่ผงซิลิกาฟูลลงไปแล้วพบว่ามีผลต่อการผสมผงซิลิกาฟูลลงไปแล้ว ผงซิลิกาฟูลไม่ได้ไปช่วยเพิ่มอิทธิพลของค่าความคืบหน้าต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดมากนักแต่กลับเป็นการช่วยให้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นมีการแกว่งตัวของค่าที่น้อยลง ซึ่งทำให้ค่าที่ได้มีความเสถียรมากขึ้น ส่วนในด้านของความต้านทานทางไฟฟ้าพบว่า การเติมซิลิกาฟูลลงไปแล้วจะเป็นการช่วยเพิ่มอิทธิพลของค่าความคืบหน้าต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานทางไฟฟ้าให้มีค่าเพิ่มมากยิ่งขึ้น

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ก้อนส่งสัญญาณที่ทำมาจากซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ค่าของความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาหรือการคืบ เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะการรับแรงแบบคงค้างจะมีผลต่อ

การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงมาก ซึ่งไม่ดีต่อการนำไปใช้งานเป็นอย่างยิ่ง เพราะอาจทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้มีความผิดพลาดขึ้น ในส่วนของก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่มีการผสมผงกราไฟต์พบว่า เมื่อมีความคืบเกิดขึ้นอิทธิพลของความเครียดจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามากไม่ต่างไปจากผลของก้อนส่งสัญญาณแบบซีเมนต์เบสที่ทำมาจากซีเมนต์เพียงอย่างเดียว กล่าวคือ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียด ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงมาก ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานอีกเช่นกัน และในส่วนของก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์ที่มีการผสมเส้นใยคาร์บอนลงไปนั้น พบว่า ค่าของความเครียดหรือสภาวะการคืบจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่น้อยมาก ซึ่งกล่าวได้ว่าเมื่อมีการเกิดความคืบขึ้น ค่าของความเครียดที่เพิ่มมากขึ้นจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่น้อยมาก จนเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานที่สุด เพราะจะให้ค่าความต้านทานที่แท้จริงเมื่อก่อนทดสอบถูกแรงกระทำแบบคงค้างที่ระยะเวลานาน

5.4 ข้อเสนอแนะ

- ในการผสมก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์ด้วยวัสดุผสมเพิ่มจำพวกเส้นใยคาร์บอนและผงกราไฟต์จะผสมได้ยากเพราะแบบหล่อมีขนาดที่จำกัดหากมีการศึกษาเพิ่มเติมควรออกแบบ แบบหล่อให้มีขนาดที่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน
- ก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์ที่มีการผสมวัสดุผสมเพิ่มเวลาผสมจะเกิดช่องว่างภายในเป็นอย่างมาก ซึ่งควรหาวิธีแก้ไขเมื่อเวลาที่จะต้องเทแบบ
- ศึกษาผลกระทบของการคืบต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเมื่อก้อนส่งสัญญาณซีเมนต์มีการผสมทั้งเส้นใยคาร์บอนและผงกราไฟต์รวมกัน

เอกสารอ้างอิง

1. **Whiting, D. A., and Nagi, M. A. (2003).** "Electrical Resistivity of Concrete – A Literature Review." *Rep. No. Report Serial No. 2457*, Portland Cement Association (PCA).
2. **Shi, C. (2004).** "Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results." *Cem.Concr.Res.*, 34(3), 537-545.
3. **Monfore, G.E.** "The Electrical Resistivity of Concrete," *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, Vol. 10, No. 2, pages 35 to 48, May 1968.
4. **Gjørsv, O.E., Vennesland, Ø , and El-Busiady, A.H.S.,** "Electrical Resistivity of Concrete in the Oceans," *Proceedings – 9th Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, pages 581 to 588, May 2-5, 1977.
5. **Wen, . (2006).** "The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement " *Carbon*,44(11),2130
6. **Senturia, S. D. (2001).** *Microsystem Design*. Kluwer Academic Publishers, Boston
7. **Tsung-Chin Hou, and Lynch, J. P. (2005).** "Conductivity-based strain monitoring and damage characterization of fiber reinforced cementitious structural components." *Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, SPIE-Int. Soc. Opt. Eng, San Diego, CA, USA, 419-29.
8. **McCarter, W. J., Starrs, G., Chrisp, T. M., and Banfill, P. F. G. (2007)** " Activation energy and conduction in carbon fibre reinforced cement matrices"
9. **Shifeng, H., Dongyu, X., Jun, C., Ronghua, X., LIngchao, L., and Xin, C. (2007).** "Smart properties of carbon fiber reinforced cement-based composite." *J.Composite Mater.*, 41(1), 125-31.
10. **Xie, P., Gu, P., and Beaudoin, J. J. (1996).** "Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres." *J.Mater.Sci.*, 31(15), 4093-7.
11. **Zallen, R. (1983),** "Physics of Amorphous Solids", Wiley, New York, 135-204.
12. **Chiarello, M., and Zinno,R.(2005).**"Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. *Cement and Concrete Composite*,27(4),463-469
13. **Chacko, R. M., Banthia, N., and Mufti, A. A.(2007).**"Carbon-fiber-reinforced cement-based sensors." *Canadian Journal of Civil Engineering* ,34(3),284-290

14. **Banthia, N., Djeridanc, S.,and Pigeon, M.(1992).**”Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cement” *Cem.Concr.Res.*,22(5),804-814
15. **Farhad , R., B , B., Gordon , A , Y., Jerry ,and S,L. Jong.(2001)**”Volume electrical resistivity of carbon fiber cement composites “
16. **Han, B., Guan, X., and Ou, J. (2007).** "Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors." *Sens Actuators A Phys*, 135(2), 360-369

ภาคผนวก ก

Electrical Resistivity of Cement-Based Sensors under a Sustained Load

Kraisit Loamrat^{1,a}, Manote Sappakittipakorn^{1,b*} and Piti Sukontasukkul^{1,c}

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, THAILAND

^akraisit2910@gmail.com, ^{b*}manotes@kmutnb.ac.th (corresponding author), ^cpiti@kmutnb.ac.th

Keywords: cement-based sensor, graphite powder, carbon fiber, creep

Abstract. This research was to study the influence of a sustained load on the electrical resistivity of a cement-based sensor. The cement-based sensor in this study was made of cement paste having water to cement ratio of 0.4 with the addition of graphite powder at 2% and 4% by weight of cement and carbon fibers at 2% and 4% by volume. The sustained load was applied on the cement-based-sensor using a sustain machine to control a compressive force continually at 30% of its ultimate compressive strength for a period of 30 days. The test results showed that the sustained load induced a creep strain on the cement-based-sensor. The graphite incorporated cement-based sensor showed higher creep strain than the plain cement-based sensor while the carbon fiber cement-based sensor showed lesser. In addition, it was shown that the creep strains affect the electrical resistivity of the cement-based sensors.

Introduction

Structural health monitoring ensures the reliability of concrete structures by using the data logged from various sensors installed on them. One of the sensors, called cement-based sensors (CBSs), have been developed and can be implemented like strain gages [1]. The sensors are cementitious composites with the addition of conductive materials such as carbon fiber [2], carbon nanotube [3] and graphite powder [4]. Cement-based sensors utilize piezoresistive characteristic to gauge its mechanical strain via a change in its electrical resistivity. In other words, the strain chiefly induces the response of cement-based sensors. Most research studies on these cement-based sensors are emphasized in the elastic range of strain. However, due to their cementitious nature, they may experience creep phenomenon when holding a load for a long time. For that reason, the creep strain taken place in the sensors may affect their performance. The influence of creep on electrical resistivity of CBSs is thus of interest in this research study.

Configuration of Cement-Based Sensors

The cement-based sensor studied here is cubical and its dimension is 50x50x47 mm. as shown in Fig. 1. The sensor was composed of four copper strips embedded in varied cement pastes. As shown in Table 1, five mix proportions were used for the pastes, namely plain cement paste, plain cement paste mixed with carbon fiber at 2% and 4% by volume fraction, and plain cement paste mixed with graphite powder at 2% and 4% by weight of cement. All mixes have a water to cement ratio of 0.4. The properties of the carbon fiber and graphite powder were shown in Table 2 and 3, respectively.

Table 1 Mix proportions of cement-based sensors having a fixed water to cement ratio of 0.4

Mix	Mix Label	Cementitious Matrix	Carbon Fiber (% by vol. fraction)	Graphite Powder (% by wt. of cement)
1	pc	Plain Cement Paste	—	—
2	pc+cf2%		2	—
3	pc+cf4%		4	—
4	pc+gp2%		—	2
5	pc+gp4%		—	4

Table 2 Properties of Carbon Fiber

Item/Type	Chopped carbon fiber
Tensile Strength (MPa)	51.9
Breaking Strength (MPa)	4.9
Splitting Modulus of Elasticity in Compression (GPa)	40.5
Anti-permeability (1.2MP in filter Height) (mm)	39.0
Contractibility Rate ($\times 10^{-4}$)	350
Impact Resistance (times)	58

Table 3 Properties of Graphite Powder

Item/Type	Graphite Powder
Atomic Number	6
Molecular Weight (g/mol.)	12.01
Apparent Density (g/cm ³)	2.0 - 2.25
RTECS Number	FF5250100
Melting Point (°C)	~3650°C
Boiling Point (°C) (Sublimes)	4200°C
Surface Area (m ² /g)	7.2
Thermal Conductivity @230°C (cal/s-cm-°C)	0.38
IMIS Code	1366

The four coppers, each of which is 10 mm wide, 70 mm long and 0.3 mm thick, are 10 mm apart from each other. They are employed for a four-point resistivity measurement technique – a current is applied to the outer pair while a corresponding potential is measured from the inner pair – by using a LCR meter as shown in Fig. 2.

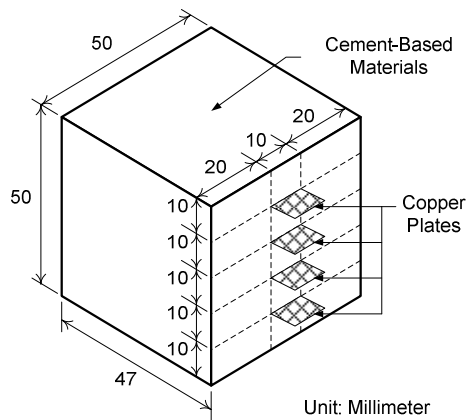


Fig. 1 Shape and dimension of a cement-based sensor

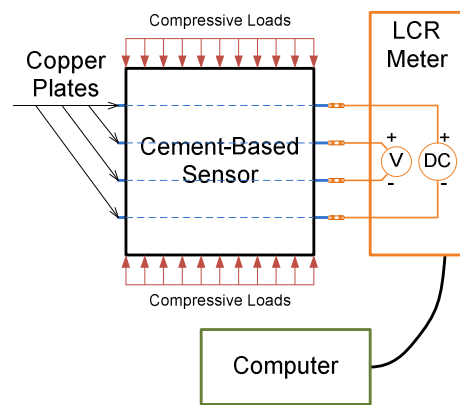


Fig. 2 Schematic outline of the electrical resistivity measurement

Research Methodology

For this experimental study, the cement-based sensors were produced with the five mixes as aforementioned. They were casted in a 50x50x50 mm mold having a top and bottom plate for holding the copper strips in place. These copper strips were coated all around with rubber film except for an area of 10x10 sq.mm. in the center of the sensors. This area was for the path of current flow. At 24 hours after the casting, they were demolded and then were covered with a plastic bag and air-cured in a temperature controlled chamber at 30°C for 30 days. Subsequently, their resistivity was monitored for 56 days by using a LCR meter and the four-point resistivity measurement technique. The measurement was set up as follows; an electrical current was fed from the LCR meter to the outer pair of the copper strips and at the same time a corresponding electrical potential was read from the inner pair of the copper strips. From the data of the applied current and the resulted potential, the LCR meter yielded an electrical resistance of the sensors (R). The resistance was computed further to determine a resistivity (ρ), which is dimensional independent, as follows

$$\rho = R \times \left(\frac{A}{l} \right), \quad (1)$$

where ρ is the electrical resistivity ($\Omega\cdot\text{m}$), R is the electrical resistance (Ω), A is the uncoated area of the copper strip (sq.m.), and l is the spacing between the copper strips (m).

To evaluate the performance of the sensors, the resistivity was converted to the fractional change in resistivity (FCR) using the equation

$$FCR = \frac{\Delta\rho}{\rho(\text{initial})}, \quad (2)$$

where $\Delta\rho$ is the change of the resistivity during the test and $\rho(\text{initial})$ is the initial resistivity (the resistivity of the cement-based sensors at the age of 56 days was employed).

During this testing period, the sensors were always stored in the chamber at 30°C . This measurement was to verify that the effect of cement hydration on the sensors were minimized before the test of creep effect was begun.

To examine the effect of creep on the responses of the cement-based sensors, a sustained compressive loading was introduced to the sensors via a loading rig as shown in Fig. 3. A torque applied to the head of a hex nut at the top by using a torque wrench was converted to a compressive load on the sensors. The correlation between the torque and compressive load was calibrated as shown in Fig. 4. In the test, three replicates of the sensors were pressed at a time. The load was controlled at 30% of the sensors' ultimate strength as per ASTM C512 [5] by adjusting the torque regularly. Once the sensors were pressed, their electrical resistivity was recorded daily for 30 days. Besides two strain gages attached on the sides of the sensors were employed to verify the creep strains, which were also logged at the same time.



Fig. 3 The loading rig for the applying of sustained loading. Three sensors were pressed in the loading rig at a time.

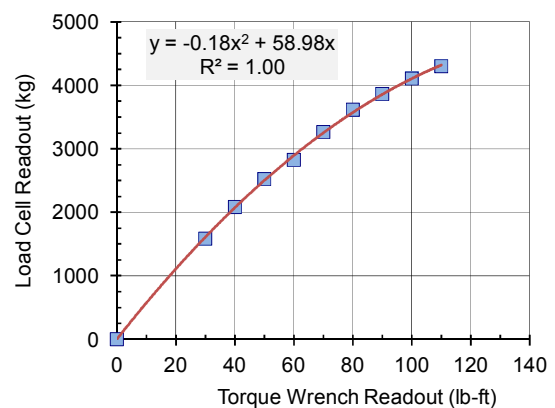


Fig. 4 Calibration chart of the torque wrench used for converting an applied torque to a required compressive force

Experimental Results and Discussion

The electrical resistivity results of the sensors during the period of air curing for 56 days were plotted with time as shown in Fig. 5. With respect to the plain cement paste in the mix 1, the resistivity of the 2% and 4% carbon fiber in the mix 2 and 3 was dropped significantly while the resistivity of the 2% and 4% grahite powder in mix 4 and 5 was reduced at about 25% and 50%, respectively. It was clearly seen that the resistivity of all cement-based sensors was increased with time. The increasing rate was also depended on the mix proportion. The highest to lowest rate was sorted out starting from Mix 1, 4, 5, 2, and 3. After 56 days, the resistivity of the mix 1 was still

increasing but the resistivity of the graphite powder mixes (mix 4 and 5) became rather steady and that of the carbon fiber mixes (mix 2 and 3) was largely stable.

After air-cured for 56 days, the sensors were compressed in the rig. The compressive load was introduced to generate the elastic strain and then sustained for 30 days in which the creep effect on the sensors was evolved. Subsequent to the elastic strain by the loading on the first day, the change of strain (presumably the creep strain) of the sensors was recorded daily as shown in Fig. 6. Simultaneously, their resistivity was measured and then plotted with respect to time as shown in Fig. 7(a). In addition, their calculated FCR was illustrated in Fig. 7(b). It is noticed that, under the sustained load, both resistivity and FCR of all sensors were increased. It is implied that, at the constant stress level, the creep strain causes the change in the resistivity of the cement-based sensors.

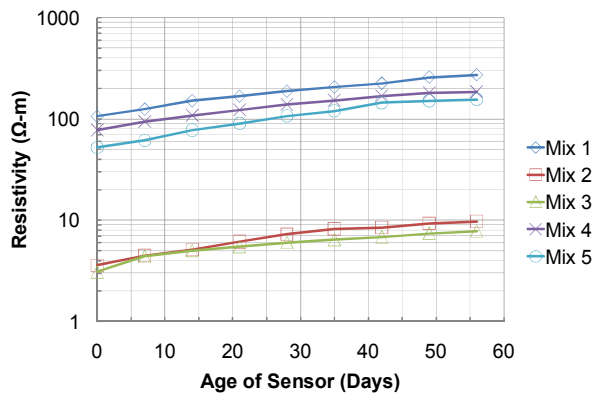


Fig. 5 Average electrical resistivity of the cement-based sensors monitored for 56 days

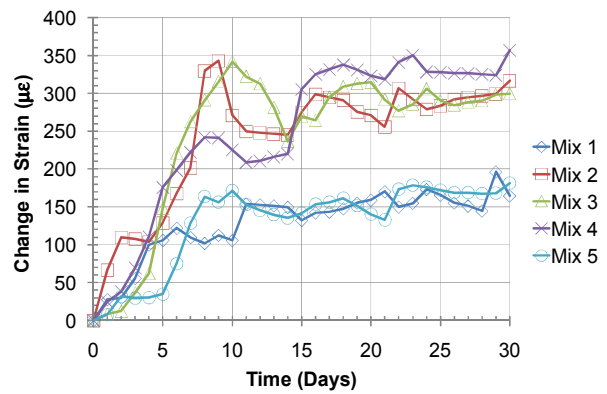
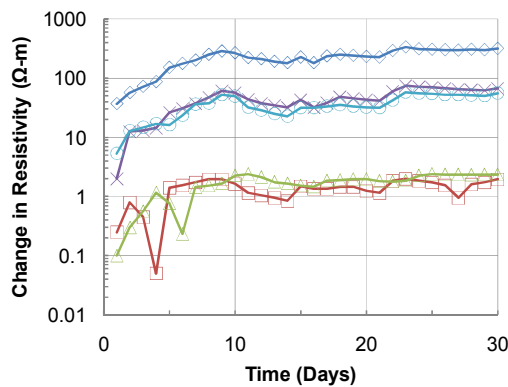
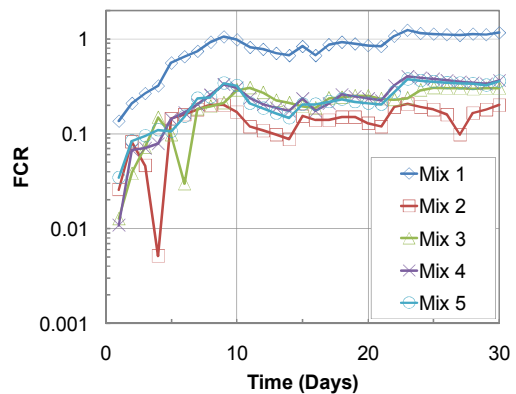


Fig. 6 Average change in strain of the cement-based sensors when subjected to the sustained loading for 30 days



(a)



(b)

Fig. 7 Average change in resistivity and FCR of the cement-based sensors when subjected to the sustained loading for 30 days

Under the sustained loading at 30% of their ultimate strength, the creep strain in the Mix 2, 3, and 4 sensors was higher than that of the Mix 1 sensors. The addition of carbon fiber resulted in the higher strength. In consequence, the Mix 2 and 3 sensors were subjected to larger compression and creep strain. On the other hand, the addition of graphite powder in the Mix 4 and 5 sensors weakened not only their strength but their stiffness as well. For the Mix 4, even though the decrease of strength dropped the load, the decrease of the stiffness induced the greater creep effect. When both strength and stiffness was decreased at the same order in the Mix 5 sensors, their creep strain was similar to that of the plain cement paste sensor.

To illustrate the influence of the creep strain on the piezoresistive behavior of all sensors, their changes in strain were plotted with their fractional changes in resistivity as shown in Fig. 8. The scattered data were fitted statistically with a linear function. The greater the slope of the line, the greater the unfavorable effect of the creep on the sensors' performance. It is clearly noticed that both carbon fiber and graphite powder can lessen the creep effect in the cement-based sensors.

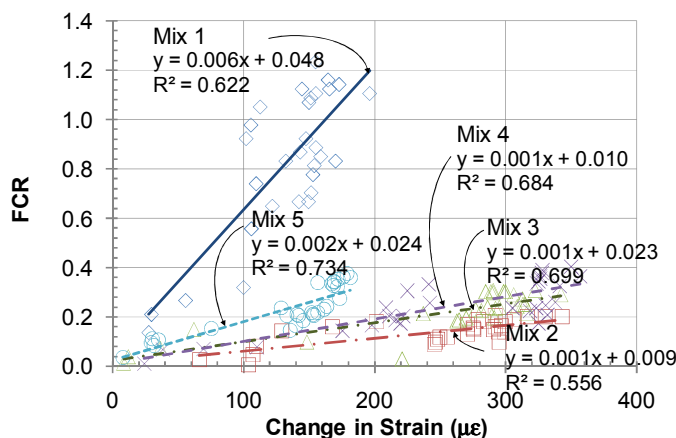


Fig. 8 Relationship between creep strain and electrical resistivity in cement-based sensors

Conclusion

From the experimental results in this study, the effect of creep on the response of the cement-based sensors can be drawn as follows. When subjected to the sustained loading, all sensors have higher strain and electrical resistivity. However, compared with the plain cement paste sensors, the sensors with the addition of carbon fiber and graphite powder were more likely to have higher changes in the strain but lower changes in the resistivity. By relating those two changes, it could be concluded that either the carbon fiber or graphite powder alleviate the effect of creep on the piezoresistive performance of the cement-based sensors.

Acknowledgement

The authors would like to thank The Thailand Research Fund (TRF) for the financial support in this research study (Contract No.: MRG5680076).

References

- [1] Chung, D.D.L., (2002). "Piezoresistive Cement-Based Materials for Strain Sensing," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 13(9), 599-609.
- [2] Chiarello, M. and Zinno, R., (2005). "Electrical conductivity of self-monitoring CFRC," *Cement and Concrete Composite*, 27(4), 463-469.
- [3] Azhari, F. and Banthia, N., (2010). "Structural Health Monitoring using Piezoresistive Cementitious Composites," 2nd Int'l Conf. on Sustainable Construction Materials and Technologies, June 28-30, 2010, Universita Politecnica delle Marche, Ancona, Italy.
- [4] Loamrat, K., Sappakittipakorn, M., Sukontasukkul, P., and Banthia, N. (2014). "Effect of Carbon Fiber and Graphite Powder on Resistivity of Cement-Based Sensor under Compression," *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology*, Vol. 7, issue 1.
- [5] ASTM C512. "Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression," American Standard of Testing and Materials, 2010.