ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247629

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยใช้หลักการความต้านทานโพลาไลท์เซชั่นเชิงเส้น

Development Linear Polarization Resistance Method for Measurement Corrosions of Steel in Concrete

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
พ.ศ.2554

b00252250

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247629

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยใช้หลักการความต้านทานโพลาไลท์เซชั่นเชิงเส้น

Development Linear Polarization Resistance Method for Measurement Corrosions of Steel in Concrete

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะผู้วิจัย สังกัด

ผศ.จักรพันธ์ แสงสุวรรณ มทร.ราชมงคลพระนคร

นายศุภชัย หอวิมานพร มทร.ราชมงคลพระนคร

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ.2554

บทคัดย่อ

247629

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในงานวัดอัตราการเป็นสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไป มักจะได้รับผลกระทบจากการเกิดสนิมของเหล็กเป็นส่วนมากเป็นผลให้กำลังของโครงสร้างคอนกรีตลดน้อยมีการพบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจากเหล็กเสริมเป็นสนิมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล โดยสาเหตุสำคัญส่วนใหญ่ที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมมักเกิดจากคลอไรด์ซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปถึงเหล็กเสริมและเมื่อคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงระดับของเหล็กเสริมมีปริมาณมากเพียงพอก็จะทำลายฟิล์มที่ป้องกันที่ผิวเหล็กเสริม และทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเกิดสนิมสะสมเพิ่มขึ้นเพียงพอที่จะทำให้เกิดหน่วยแรงและดันให้คอนกรีตเกิดความเสียหายเป็นผลทำให้กำลังของโครงสร้างลดน้อยลงจนไม่สามารถรับกำลังได้อีกและโครงสร้างจะเกิดการวิบัติในภายหลัง

ในการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตในปัจจุบันมีค่าใช้จ่ายสูงมากโดยเฉพาะงบประมาณที่อยู่ในส่วนของระบบสาธารณูปโภค เช่นสะพาน ถนน โครงสร้างอาคารที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นต้น การที่จะทำให้คอนกรีตโครงสร้างที่เสื่อมสภาพกลับคืนมาอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ นั้นต้องมีการวางแผนในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมที่ดี จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างมาก ดังนั้นการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเนื่องจากสนิมจึงกลายเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาและแก้ไขอย่างเร่งด่วนเพราะโครงสร้างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพในลักษณะนี้มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นทุกๆ ปี ในการพิจารณาสถานะภาพเสื่อมสภาพของโครงสร้างเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการตัดสินใจต้องใช้เครื่องมือที่สามารถตรวจหาสภาวะการเสื่อมสภาพได้ใกล้เคียงความจริง ซึ่งในปัจจุบันนี้เครื่องมือที่ใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศแต่สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการนำเข้าเครื่องมือดังกล่าวนี้มาใช้ เนื่องจากราคาแพงมากและผู้ใช้ต้องมีความรู้ทางด้านนี้พอสมควร สำหรับประเทศไทยพบว่าในภาคของการศึกษาและภาคอุตสาหกรรมยังไม่มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังนั้นการสร้างและพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง และเป็นเหตุผลหลัก ที่ควรให้ความสำคัญและส่งเสริมให้นักวิจัยได้ทำการสร้างและพัฒนาเครื่องมือตลอดจนศึกษาวิจัยเพื่อตรวจสอบและพิสูจน์เพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงความจริง และที่สำคัญยิ่ง ยังช่วยลดการขาดดุลทางการค้าที่จะต้องนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศอีกด้วย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สารบัญ

หน้า

สารบัญ
คำขอบคุณ
สารบัญตาราง
สารบัญรูปภาพ
บทที่ 1 บทนำ
1.1 หลักการและเหตุผล 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจาการวิจัย 3
บทที่ 2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต
2.1 การตรวจประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต 4
2.2 หลักการของการเกิดสนิม 4
2.3 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ 7
2.4 หลักการโพลาไลท์เซชั่น 8
2.5 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต 10
2.6 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก 14
2.7 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม 18
บทที่ 3 การตรวจวัดและแจ้งเตือนสนิมในคอนกรีต
3.1 วิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ 19
3.2 ความต้านทานของคอนกรีต 24
3.3 ความต้านทานโพลาไรซ์เซชั่น 27
3.4 การประเมินค่าแบบทาเฟล 30
3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทาน 32
3.6 วิธีการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต 33
3.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความต้านทานโพลาไลท์ 36
3.8 พื้นที่สนามไฟฟ้า 39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วงจรไฟฟ้าและระบบการประมวลผลโปรแกรม	
4.1 วงจรแบ่งแรงดันและกระแสไฟฟ้า	43
4.2 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลและสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก	45
4.3 โปรแกรมคอนโทรลเลอร์	47
4.4 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	48
4.5 หม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค	51
4.6 เลือกขนาดการทนกำลังของอุปกรณ์กำลัง	55
4.7 การประมวลผลโปรแกรม	55
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย	
5.1 การออกแบบจัดสร้างเครื่องมือวัด	61
5.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับใช้ทดสอบเครื่องมือวัดค่าโพลาไลท์เซชั่น	65
5.3 วัสดุและปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต	66
5.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก	67
5.5 วิธีการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า	69
5.6 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์	71
บทที่ 6 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	
6.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	73
6.2 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชั่น (RP)	78
6.3 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	86
6.4 ข้อเสนอแนะ	86
บรรณานุกรม	88
ภาคผนวก ก	92
ภาคผนวก ข	107
ภาคผนวก ค	124

คำขอบคุณ

รายงานฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความอนุเคราะห์จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ในการให้ทุนอุดหนุนวิจัยและสนับสนุนโครงการวิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหิดล เป็นจุดเริ่มต้นที่ได้แนะนำการวัดแบบโพลาไลท์เซชั่น ซึ่งเป็นการจุดประกายแนวความคิดและเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับผู้วิจัย ความสำเร็จอย่างดียิ่งของการวิจัยส่วนหนึ่งเกิดจากความอนุเคราะห์ในการประสานงานของผู้ร่วมวิจัยและที่ปรึกษา ทุกท่านที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและเสนอแนะสิ่งที่มีคุณค่า ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น เพื่อที่จะได้ศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับไม้เนื้ออ่อนที่โตเร็วให้เกิดประโยชน์สูงสุด สำหรับการทดสอบและการจัดเก็บรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานต่างๆ รวมทั้งการคัดข้อมูล การจัดเก็บข้อมูลอย่างมีระบบและมีประสิทธิภาพ โดยผู้ช่วยวิจัยทุกท่าน

คณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเอกสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการด้านวิศวกรรม สถาปัตยกรรม วงการก่อสร้าง และเป็นแนวทางการตรวจสอบการใช้งานของสิ่งปลูกสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก และเครือข่ายประโยชน์ทางเศรษฐกิจแก่ประเทศไทยต่อไป

จักรพันธ์ แสงสุวรรณคณะ

23 กันยายน 2554

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 แผนภาพที่แสดงระบบของเซลล์กัลป์วานิก; การเกิดปฏิกิริยา Oxidation ที่ขั้ว anode และการเกิดปฏิกิริยา Reduction ที่ขั้ว cathode 5

ภาพที่ 2.2 เซลล์ตัวนำไฟฟ้า 8

ภาพที่ 2.3 กราฟเส้นโพลาไรซ์สำหรับ Short-Circuited Electrolytic Cell แสดงถึงความเสถียรของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม 10

ภาพที่ 2.4 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็ก 12

ภาพที่ 2.5 ปริมาตรของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม 13

ภาพที่ 2.6 เซลล์ตัวนำไฟฟ้าที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมในคอนกรีต 14

ภาพที่ 2.7 รูปแบบจำลองกระบวนการเกิดสนิมของเสริมเหล็กในคอนกรีต 15

ภาพที่ 2.8 รูปแบบจำลองระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต 16

ภาพที่ 2.9 แบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพโดยคลอไรด์สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50 มม.) 17

ภาพที่ 2.10 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม 18

ภาพที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตามมาตรฐาน ASTM C 876 โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต 19

ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจได้จาก half-cell potential 21

ภาพที่ 3.3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr})กับศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ 23

ภาพที่ 3.4 การทดสอบวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตด้วย 4 ขั้วไฟฟ้า 25

ภาพที่ 3.5 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) และค่าความต้านทานของชิ้นส่วนคอนกรีต 27

ภาพที่ 3.6 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยไม่มี guard ring 29

ภาพที่ 3.7 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ด้วยการจำกัดขอบเขตการรับและส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าจาก Guard ring ไปยังพื้นผิวของเหล็กเสริม 30

ภาพที่ 3.8 วิธีการวักค่าโพลาไลท์เชิงเส้นกับการวัดค่ากระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม 32

ภาพที่ 3.9 เทคนิคโพลาไลท์เชิงเส้นตรงโดยใช้ guard electrode ในการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า CE ให้อยู่ภายในบริเวณ GE 33

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.10 การเปรียบเทียบความต้านทาน Polarization (Rp) โดยวิธี LPR	35
ภาพที่ 3.11 การเปรียบเทียบความต้านทาน Polarization (Rp) โดยวิธี EIS	36
ภาพที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงของ Corrosion Potential ภายหลังจากพื้นผิวคอนกรีต มีความเปียกชื้น.	37
ภาพที่ 3.13 ตำแหน่งของ Probe ที่มีผลกระทบต่อการกระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในคอนกรีต	38
ภาพที่ 3.14 ชิ้นส่วนที่ประกอบรวมกันของ CE และ GE	40
ภาพที่ 4.1 วงจรการแบ่งแรงดันที่มีโหลด	43
ภาพที่ 4.2 ความต้านทานต่อขนานกันหลายตัว	44
ภาพที่ 4.3 การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก 4 บิต แบบ R/2R แลดเดอร์	46
ภาพที่ 4.4 อนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล	45
ภาพที่ 4.5 โปรแกรมเมเบิ้ลลอจิกคอนโทรลเลอร์	45
ภาพที่ 4.6 ไดอะแกรมภายใน PLC	48
ภาพที่ 4.7 ขั้นตอนการพัฒนาวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จากวงจรแบบบั๊ก-บูสต์	48
ภาพที่ 4.8 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ควบคุมแบบแรงดัน	50
ภาพที่ 4.9 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ควบคุมแบบกระแส	50
ภาพที่ 4.10 การเปิดใช้งานโปรแกรมควบคุมพีแอลซี	56
ภาพที่ 4.11 หน้าจอแรกเมื่อเปิด Software CX-Programmer	56
ภาพที่ 4.12 หน้าจอแรกเมื่อเปิดขยาย Software CX-Programmer	56
ภาพที่ 4.13 Windows ที่ชื่อ Change PLC ขึ้นมาเพื่อให้เลือกรุ่นของ PLC	57
ภาพที่ 4.14 Windows ที่ชื่อ Change PLC ขึ้นมาเพื่อให้เลือกรุ่นของ PLC	57
ภาพที่ 4.15 Click ปุ่ม Setting ที่กรอบของ Network Type แล้ว click tab ที่ชื่อ driver เพื่อเลือก Com Port ที่ต่อจากเครื่อง computer	58
ภาพที่ 4.16 รูปแบบโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนงานวิจัย	58
ภาพที่ 4.17 การใช้ในโปรแกรมออกแบบหน้าจอสั่งการสำหรับงานวิจัย	59
ภาพที่ 4.18 เปิดไฟล์หน้าจอสั่งการสำหรับงานวิจัย	59
ภาพที่ 4.19 ตั้งค่าและกำหนดพารามิเตอร์	59
ภาพที่ 4.20 ตั้งค่าและกำหนดพารามิเตอร์ของระบบสั่งการ	60
ภาพที่ 4.21 ตั้งค่าและกำหนดระหว่างหน่วยความจำที่กำหนด	60

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 5.1	หน้าจอสั่งการและอุปกรณ์ควบคุมที่ใช้สร้างเครื่องมือวัด	61
ภาพที่ 5.2	แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและอุปกรณ์การรับค่าสัญญาณจากการวัด	62
ภาพที่ 5.3	ทดสอบการทำงานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	62
ภาพที่ 5.4	การรับค่าและส่งค่าอนาลอกเข้าสู่โปรแกรม	62
ภาพที่ 5.5	การรับค่าและส่งค่าอนาลอกเข้าสู่โปรแกรมจอ	63
ภาพที่ 5.6	การรับค่าและส่งค่าอนาลอกเข้าสู่โปรแกรมเครื่อง	63
ภาพที่ 5.7	การเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการอุปกรณ์การวัดค่า	64
ภาพที่ 5.8	การเขียนโปรแกรมสั่งงานและแสดงผลการวัดค่าโพลาไลท์	64
ภาพที่ 5.9	ทดสอบการส่งสัญญาณโพลาไลท์เข้าสู่คอนกรีตเสริมเหล็ก	65
ภาพที่ 5.10	แสดงการทดลองการวัดและแก้ไขโปรแกรม	65
ภาพที่ 5.11	รายละเอียดคานคอนกรีตเสริมเหล็กและตำแหน่งการวัดค่าความ ต้านทานทางไฟฟ้า	68
ภาพที่ 5.12	การเตรียมแบบหล่อคานคอนกรีต	68
ภาพที่ 5.13	การเตรียมตัวอย่างคานคอนกรีตและการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า	69
ภาพที่ 5.14	การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือ Half-Cell สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	69
ภาพที่ 5.15	การวัดการเกิดสนิมด้วยวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	70
ภาพที่ 5.16	การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีความต้านทานโพลาไรซ์	71
ภาพที่ 5.17	การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีความต้านทานโพลาไรซ์	72
ภาพที่ 6.1	ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ไม่เร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดมุมของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential	76
ภาพที่ 6.2	ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ไม่เร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งตรงกลางของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential	76
ภาพที่ 6.3	ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดมุมของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential	77
ภาพที่ 6.4	ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดกลางของเหล็กเสริมโดย	

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
	วิธีการของ Half-Cell Potential	77
ภาพที่ 6.5	ความสัมพันธ์ของโพลาไลท์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งมุมของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ LPR	80
ภาพที่ 6.6	ความสัมพันธ์ของโพลาไลท์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดกลางของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ LPR	80
ภาพที่ 6.7	ความสัมพันธ์ของโพลาไลท์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งมุมของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ LPR	81
ภาพที่ 6.8	ความสัมพันธ์ของโพลาไลท์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดกลางของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ LPR	81
ภาพที่ 6.9	ความสัมพันธ์ของโพลาไลท์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งมุมของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ LPR Charge	84
ภาพที่ 6.10	ความสัมพันธ์ของโพลาไลท์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดกลางของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ LPR Charge	85
ภาพที่ 6.11	ความสัมพันธ์ของโพลาไลท์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งมุมของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ LPR Charge	85
ภาพที่ 6.12	ความสัมพันธ์ของโพลาไลท์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดกลางของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ LPR Charge	86
ภาพที่ ข 1	หน้าต่าง Change PLC	108
ภาพที่ ข 2	การเชื่อมต่อ CX-Programmer เข้ากับตัวพีแอลซี	109
ภาพที่ ข 3	การเปลี่ยนโหมดการทำงานของตัวพีแอลซี	109
ภาพที่ ข 4	หน้าต่าง PLC Setting สำหรับพีแอลซีรุ่น CQM1H-CPU21	109

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ข 5 การตั้งค่าโหมดการสื่อสาร และความเร็วในการรับส่งข้อมูลร่วมกับ Touch Screen สำหรับพีแอลซีรุ่น CQM1H 110
ภาพที่ ข 6 Verify เสร็จสมบรูณ์ 111
ภาพที่ ข 7 Verify" ไม่สมบรูณ์ 111
ภาพที่ ข 8 หน้าต่าง "New Project สำหรับหน้าจอ Touch Screen 111
ภาพที่ ข 9 หน้าต่าง "Comm. Setting 112
ภาพที่ ข 10 หน้าต่างเมื่อคลิกเลือก"1: SERIALA 112
ภาพที่ ข 11 การกำหนดค่า Protocol เป็น Host Link และ Comm. Speed เป็น 19200 113
ภาพที่ ข 12 การเดินสายสัญญาณระหว่าง Omron PLC กับ Omron Touch Screen 113
ภาพที่ ข 13 อุปกรณ์ควบคุม 114
ภาพที่ ค 1 เครื่องมือวัดค่าโพลาไลท์เซชั่น 125

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	ความสัมพันธ์ความต้านทานของคอนกรีตและความเสี่ยงของการเกิดสนิม	26
ตารางที่ 3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม	26
ตารางที่ 3.3	กระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	36
ตารางที่ 3.4	ค่าความต้านทานโพราไรด์ (Rp) ด้วยเครื่องมือ NSC device, ตัวอย่างมอตาร์ขนาดเล็ก	37
ตารางที่ 3.5	ผลกระทบจากการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของ Probe ต่อการวัดค่า Rp โดยใช้เครื่องมือ NSC Device กับจำนวนคอนกรีตหลายตัวอย่าง	38
ตารางที่ 3.6	ความต้านท่านโพลาไรซ์ (Rp) ได้จากการวัดโดยเครื่องมือ NSC device ด้วยมอร์ต้าร์ตัวอย่างขนาดเล็กโดยใช้ Guard electrode (GE)	41
ตารางที่ 4.1	พิกัดกระแสไฟฟ้าและพิกัดแรงดันไฟฟ้าของมอสเฟตกำลัง ไดโอดกำลัง และไดโอดบริดจ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ใช้ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	55
ตารางที่ 5.1	ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต ต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร	67
ตารางที่ 5.2	คุณสมบัติของเหล็กเสริมคอนกรีต	67
ตารางที่ 6.1	ค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเกิดการกัดกร่อน ASTM C 876	73
ตารางที่ 6.2	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	73
ตารางที่ 6.3	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	74
ตารางที่ 6.4	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	74
ตารางที่ 6.5	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	74
ตารางที่ 6.6	ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชั่น(R_p) ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 6.7	ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชั่น(R_p) ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	79
ตารางที่ 6.8	กระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	82
ตารางที่ 6.9	ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	83
ตารางที่ 6.10	ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	83
ตารางที่ ก.1	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม	93
ตารางที่ ก.2	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม	94
ตารางที่ ก.3	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม	94
ตารางที่ ก.4	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม	94
ตารางที่ ก.5	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม	95
ตารางที่ ก.6	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม	95
ตารางที่ ก.7	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม	96
ตารางที่ ก.8	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม	96
ตารางที่ ก.9	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม	97
ตารางที่ ก.10	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม	97

ตารางที่ ก.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม 98

ตารางที่ ก.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม 98

ตารางที่ ก.13 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม 99

ตารางที่ ก.14 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม 100

ตารางที่ ก.15 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม 100

ตารางที่ ก.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม 101

ตารางที่ ก.17 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม 101

ตารางที่ ก.18 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม 102

ตารางที่ ก.19 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม 102

ตารางที่ ก.20 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม 103

ตารางที่ ก.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม 103

ตารางที่ ก.22 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม 104

ตารางที่ ก.23 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม 104

ตารางที่ ก.24 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม 105

ตารางที่ ก.25 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม 105

ตารางที่ ก.26 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม 106