

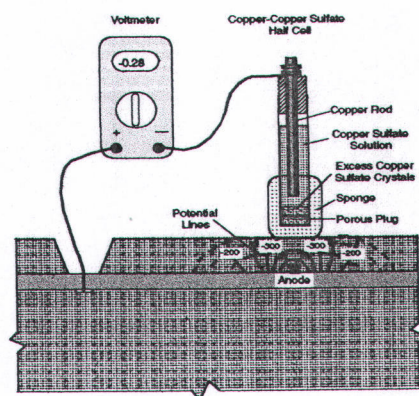
บทที่ 3

การตรวจวัดและแจ้งเตือนสนิมในคอนกรีต

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตไม่สามารถคาดการณ์ได้ชัดเจนต้องรอจนกว่าคอนกรีตจะเกิดการเสียหายซึ่งสิ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเช่น สนิมที่มีรอยด่างเป็นจุดๆ ที่ผิวของเหล็กเสริม รอยร้าวแตกแยกหลุดล่อนออกมาเป็นชั้นๆ สำหรับในการทำนายอายุการใช้งาน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมนั้นควรที่จะต้องกำหนดวิธีการซ่อมแซมหรือการทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กกลับคืนสู่สภาพใช้งานได้ตามปกติ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้เทคนิควิธีทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับใช้ประเมินความสภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็ก

3.1 วิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

หลักการพื้นฐานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถที่จะตรวจสอบเพื่อพิสูจน์ได้ โดยนำเอาวิธีการนี้มาใช้ในการตรวจประเมินสภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีเมื่อเหล็กเสริมถูกกัดกร่อนก็จะเกิดการไหลของกระแส ไฟฟ้าอยู่ทั่วในคอนกรีต (การแพร่กระจายของไอออน) ระหว่างบริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทด โดยมีศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิมเกิดขึ้นโดยรอบๆเหล็กเสริมดังภาพที่ 3-1 แสดงให้เห็นถึงแนวเส้นของศักย์ไฟฟ้าที่ตัดผ่านกันจากผิวคอนกรีตถึงเหล็กเสริมและทุกๆจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสามารถวัดค่าได้ ด้วยวิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ซึ่งมีลักษณะเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูง ทำได้โดยใช้ค่าของศักย์ไฟฟ้าบนผิวคอนกรีตที่วัดค่าได้นำมากำหนดจุดลงบนแผนที่ซึ่งจะแสดงให้เห็นค่าของศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่างๆบนโครงสร้าง ความเป็นไปได้ของการเกิดสนิมให้พิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดค่าได้บนผิวคอนกรีตโครงสร้าง ถ้าหากมีค่าเป็นลบมากกว่าแสดงว่าบริเวณนั้นจะมีโอกาสที่จะเกิดสนิมมากที่สุด (Elsener, B. et al, 1990 and Browne, R.D, et. al, 1983)



ภาพที่ -3-1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตามมาตรฐาน ASTM C 876 โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต ที่มา: (ASTM C 876, 2002)



วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C-876 ดังแสดงในภาพที่ 3-1 เครื่องมือและอุปกรณ์ประกอบด้วย Copper-Copper Sulfate มีการเชื่อมต่อสายไฟกับโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานต่อไฟฟ้าสลับประสิทธิภาพสูงและในส่วนของ half-cell มีแท่งทองแดงแช่อยู่ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวใช้เป็นเซลล์อ้างอิงสำหรับการวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต การวัดค่าของศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของครึ่งเซลล์ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของศักย์ไฟฟ้าที่อ่านค่าได้และสำหรับการเชื่อมต่อของระบบ Half-Cell ทำได้โดยการเชื่อมต่อด้านที่เป็นบวกของโวลต์มิเตอร์ให้ติดกันกับเหล็กเสริมและอีกด้านของโวลต์มิเตอร์ที่เป็นลบให้เชื่อมติดต่อกับ Copper-Copper Sulfate โวลต์มิเตอร์ที่ใช้มีความละเอียดและประสิทธิภาพสูงเพียงพอสำหรับใช้อ่านค่าของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำมากๆ แสดงได้ดังภาพที่ 3-2 การวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีตทำได้โดยใช้ Copper-copper sulfate half-cell เชื่อมต่อที่ผิวคอนกรีตเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจรโดยใช้ Porous Plug และฟองน้ำที่เปียกชื้นด้วยสารละลาย detergent เป็นสื่อตัวนำไฟฟ้า

ถ้าหากเหล็กเสริมเกิดสนิมแสดงว่าอิเล็กตรอนในเหล็กจะเคลื่อนที่จากเหล็กเสริมไปยัง half-cell เพราะว่าด้านปลายของโวลต์มิเตอร์มีการเชื่อมต่อภายในวงจรไฟฟ้างดภาพที่ 3-1 ค่าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์แสดงให้เห็นว่าแรงดันหรือศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบ (ASTM G3) ในการวัดค่า half-cell potential เป็นการวัดศักย์ไฟฟ้าแบบ open circuit potential เพราะเป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีการวัดค่าของกระแสไฟฟ้าในวงจร (ASTM G15) ค่าของแรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ที่ผิวของคอนกรีตจะมีค่าเป็นลบมากขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตยังมีอิเล็กตรอนส่วนเกินอีกมากจึงมีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กเสริมจะยังเป็นสนิมต่อไปได้อีก ในการอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อยู่ในตำแหน่งภายใต้ Copper-copper sulfate reference cell (Van Daveer, J.R., 1975) อย่างไรก็ตามค่าที่ถูกต้องๆเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C876 และวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้านี้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับคอนกรีตและเหล็กเสริมที่มี epoxy เคลือบอยู่ที่พื้นผิว

วิธีเตรียมการทดสอบทำได้โดยกำหนดตำแหน่งของจุดให้มีลักษณะเป็นตารางโดยมีระยะห่างให้เหมาะสมตามลักษณะของโครงสร้างและปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาด เช่นจุดที่กำหนดถ้ามีระยะห่างมากเกินไปหรือการเตรียมข้อมูลไม่เหมาะสมเพียงพอสำหรับการประเมินค่าในขณะที่การกำหนดระยะห่างของเหล็กเสริมเต็มพื้นที่ก็จะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการสำรวจเพิ่มขึ้นเช่นในการสำรวจพื้นผิวคอนกรีตของสะพาน โดยทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 แนะนำให้ใช้ระยะห่าง 1.20 ม. ถ้าความแตกต่างของแรงดันระหว่างจุดที่อยู่ใกล้กันมีค่าเกินกว่า 150 มิลลิโวลต์ ให้ถือว่าระยะห่างนั้นใช้ได้ อย่างไรก็ตามมีคำแนะนำอื่นๆ ที่กำหนดให้ระยะห่างควรจะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของ 1.20 ม. สามารถให้ค่าความน่าเชื่อถือสำหรับการประเมินค่าการเกิดสนิมที่ยังดำเนินการอยู่และขยายออกไป (Clemena, G.G., Jackson, D.R., et al., 1992)

ค่าที่ยอมรับได้จากการทดสอบคือคอนกรีตต้องมีความชื้นอย่างเพียงพอที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรเป็นเหตุผลที่สำคัญในการวัดค่าและถ้าการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ด้วยเวลาต้องทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 ก่อนการทดสอบคอนกรีตต้องมีความเปียกชื้นเพียงพอและในขณะ

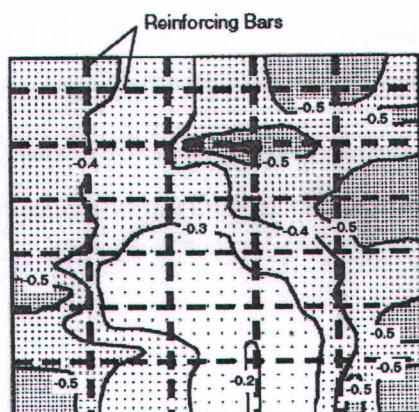


การทดสอบค่าที่วัดได้ไม่ควรเปลี่ยนแปลงมากกว่า ± 20 มิลลิโวลต์ ภายใน 5 วินาที (ASTM C 876) ถ้าหากค่าที่วัดได้มีความเสถียรไม่เพียงพอ อาจเป็นเพราะว่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรเกิดการหันเหทิศทางหรือความต้านทานของกระแสไฟฟ้าภายในวงจรมีมากเกินไป สำหรับในกรณีที่ไม่นำมาใช้กับวิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทำการทดสอบอยู่ภายนอกช่วง 17 ถึง 28° C วิธีการทำให้การทดสอบถูกต้องมีความน่าเชื่อถือให้ทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 สำหรับใช้วัดค่าแรงดันไฟฟ้า

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การวิเคราะห์ข้อมูลตามมาตรฐาน ASTM C-876 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อ่านได้สามารถนำมาใช้ร่วมกับข้อมูลอื่นๆ เช่น ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ความลึกของคาร์บอนชั้นในคอนกรีต สำหรับหาการแตกและหลุดล่อนของชั้นคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมเปิดเผย ซึ่งการรวบรวมสรุปข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดสนิมที่ได้จากการสำรวจอย่างเป็นระบบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สามารถแสดงให้เห็นได้ 2 แนวทางคือ 1. มีลักษณะเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดทั้งเส้น 2. เป็นไดอะแกรมของความถี่สะสมของศักย์ไฟฟ้า ในขณะที่เขียนการรายงานค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการสำรวจต้องระบุให้ชัดเจนในการใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจนำมาสรุปจัดทำเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าซึ่งสามารถทำได้โดยนำเอาค่าที่ได้จากการทดสอบในแต่ละจุดมาสร้างลงบนแปลนตามมาตรฐานของพื้นที่ทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบ สำหรับค่าแรงดันที่อ่านได้จาก half-cell ในแต่ละจุดของการทดสอบให้ทำเครื่องหมายไว้บนแปลนและเขียนเส้นชั้นความสูงซึ่งมีค่าความต่างศักย์เท่ากัน โดยใช้ค่าของแรงดันที่วัดได้ดังแสดงในภาพที่ 3-2 เป็นตัวอย่างของแผนที่เส้นชั้นความสูงที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดความยาวทั้งเส้นตามมาตรฐาน ASTM C-876 แรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดที่วัดค่าได้ในแต่ละช่วงของเส้นชั้นความสูงไม่ควรมีค่าต่างกันเกิน 100 มิลลิโวลต์



ภาพที่ 3-2 ตัวอย่างแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจได้จาก half-cell potential
ที่มา : (ASTM C 876, 2002)

วิธีการของไดอะแกรมความถี่สะสมของศักย์ไฟฟ้าทำได้โดยการนำข้อมูลของศักย์ไฟฟ้ามาเขียนเป็นแผนผังแบบร่างลงบนกระดาษเพื่อหาความน่าจะเป็นสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C-876 โดยนำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจทั้งหมดมาเขียนเป็นกราฟเส้นที่มีการปรับเปลี่ยนให้เข้ามาตรฐานพอดี (best-fit straight line) จากไดอะแกรมความถี่สะสมนำมาใช้โดยกำหนดค่าที่อ่านได้ของศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นร้อยละซึ่งเป็นค่าที่ให้ความแน่นอนเมื่อมีความเป็นลบมากกว่าและสามารถใช้ระบุเป็นค่าของการเกิดสนิมที่ระดับต่างๆ กัน (Elsener, B., et al, 1990) จากทั้งสองวิธีการจะสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM C 876 สามารถที่จะใช้ในการประเมินผลได้ คือเป็นวิธีการเชิงตัวเลขและเป็นเทคนิคที่แสดงความแตกต่างกันของศักย์ไฟฟ้า (potential difference technique) สำหรับวิธีการเชิงตัวเลขจะบ่งชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม

มาตรฐาน ASTM C-876 ให้เป็นแนวทางในการทดสอบดังนี้ ใช้สำหรับกรณีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Copper-copper sulfate reference electrode ดังนี้

- ถ้าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกมากกว่า -200 มิลลิโวลต์ มีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กจะไม่เกิดสนิม
- ถ้าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นลบมากกว่า -350 มิลลิโวลต์ มีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กจะเกิดสนิม
- ความไม่แน่นอนในการเกิดสนิมเมื่อค่าแรงดันอยู่ในช่วง -200 ถึง -350 มิลลิโวลต์

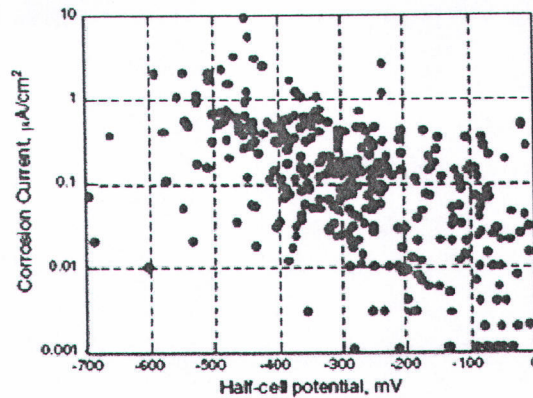
อย่างไรก็ตามข้อแนะนำให้ไปประยุกต์ใช้งานบนหลักการเชิงตัวเลขไม่ควรใช้ในสภาวะเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- การเกิด Carbonation ได้ขยายกว้างออกไปจนถึงระดับของเหล็กเสริมในคอนกรีต
- การประเมินสภาพคอนกรีตที่อยู่ภายในที่จัดเก็บไม่ได้อยู่ในสภาพเปียกชื้น
- เปรียบเทียบการกัดกร่อนของคอนกรีตที่อยู่ภายนอกกับความชื้นที่มีความแปรผันสูงหรือปริมาณ

ออกซิเจนที่มีอยู่ในคอนกรีต

จากข้อความข้างบนเป็นข้อแนะนำการระวังป้องกันในขณะทดสอบเพราะว่าเป็นสิ่งที่สำคัญต่อความต้านทานของคอนกรีตและออกซิเจนที่มีอยู่ทำให้เกิดอัตราการเกิดสนิมและจากภาพที่ 3-3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ไม่ดีระหว่างวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กับวิธีการวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (Feliu, S., Gonzalaz, J.A., and Andrade, C, 1996) สามารถอธิบายได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมมีค่าน้อยกว่า $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมไม่เกิดสนิม แต่ถ้ามีค่ามากกว่า $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมจะมีโอกาสเกิดสนิมสูงมากดังแสดงตามภาพที่ 3-3 การนำไปประยุกต์ใช้งานต้องทำตามข้อแนะนำตามมาตรฐาน ASTM C-876





ภาพที่ 3-3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม(i_{cor})กับศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ที่มา : (Feliu,S.,Gonzalez,J.A.,and Andrade,C.,1996)

วิธีการของศักย์ไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกัน (potential difference technique) สำหรับบริเวณพื้นที่ๆเกิดสนิมพื้นที่บริเวณนั้นจะแสดงให้เห็นถึงความลาดเอียงของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าแตกต่างกันซึ่งเป็นพื้นฐานของแผนภูมิเส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าสำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นเส้นชั้นความสูง (equipotential contour) ระยะห่างของเส้นชั้นความสูงของค่าแรงดันที่เป็นรูปปิดแสดงให้เห็นว่าบริเวณนี้มีความลาดเอียงสูง ซึ่งบางครั้งในทางปฏิบัติค่าของแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าได้เปลี่ยนแปลงมากเกินไป ดังนั้นตัวบ่งชี้ที่แสดงให้เห็นการเกิดสนิมจะเป็นพื้นที่ผิว เช่นแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากกว่า 100 มิลลิโวลต์จะต้องมีพื้นที่มากกว่า 5 ตารางเมตร ดังนั้นวิธีการของ potential difference technique เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในการบ่งชี้ให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดสนิมซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการใช้เทคนิคเชิงตัวเลข (Elsener, B., Dawson, J.L., et. al.,1990)

การอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าในสถานะที่เหล็กเกิดสนิมอย่างมีเหตุผลนั้นสามารถพิจารณาได้จากคอนกรีตจะต้องมีความชื้นอย่างเพียงพอและผู้ใช้ต้องมีความเข้าใจและยอมรับวิธีการใช้งานเมื่อคอนกรีตมีความชื้นไม่เพียงพอสำหรับใช้ในการวัดค่าซึ่งเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากนี้มีหลายองค์ประกอบที่มีผลกระทบต่อขนาดของศักย์ไฟฟ้าที่อ่านค่าได้ ดังนั้นองค์ประกอบดังกล่าวจึงไม่สามารถที่จะให้ค่าที่ถูกต้องแท้จริงตามสภาพการเกิดสนิมได้ (Elsener, B., Dawson, J.L., et. al., 1990)

ปัจจัยหลากหลายที่มีผลกระทบกับวิธีการทดสอบการเกิดสนิมโดยผู้เชี่ยวชาญทางด้านการเกิดสนิมได้ให้คำแนะนำที่เหมาะสมของวิธีการสำรวจด้วยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ (ASTM C-876)

- คอนกรีตต้องอยู่ในสภาพที่อิ่มตัวด้วยน้ำ
- คอนกรีตเกิด Carbonated ที่ระดับความลึกของเหล็กเสริม
- เหล็กเสริมที่เคลือบด้วย (galvanized)



ในการสำรวจค่าศักย์ไฟฟ้าควรมีการทดสอบเพิ่มเติมด้วยการทดสอบ Carbonation และปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบควรสรุปเป็นข้อมูลให้ชัดเจนของค่าศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจวัดค่าได้ที่แสดงให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดสนิมขณะที่ทำการทดสอบเวลานั้นและเงื่อนไขสภาพสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

3.2 ความต้านทานของคอนกรีต

วิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นวิธีการที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ถึงบริเวณที่เหล็กจะเกิดสนิมในช่วงเวลานั้นที่ทำการวัดค่า จากที่ได้มีการอธิบายมาแล้วนั้น สรุปได้ว่าหลังจากที่เหล็กเกิดการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และอัตราการเกิดสนิมจะขึ้นอยู่กับออกซิเจนที่ยังทำปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดและยังขึ้นอยู่กับความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตด้วยทำให้ง่ายต่อการแพร่ของไอออนที่มีอยู่ทั่วไปในคอนกรีตระหว่างบริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทด นอกจากนี้ความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับผิวของโพรงช่องว่างเล็กๆซึ่งเป็นโครงสร้างเล็กๆของเพสต์และปริมาณความชื้นของคอนกรีต ดังนั้นประโยชน์ที่ได้จากการทดสอบและสำรวจด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีต ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นลูกบาศก์ของวัสดุของความต้านทาน (โอห์ม) ต่อความยาว (Millard, S.G., et. al., 1989) โดยที่ ตัวนำทางไฟฟ้าเป็นความต้านทาน R ของพื้นที่ คือ A และความยาวเป็น L ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทาน ρ ดังสมการที่

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3-1)$$

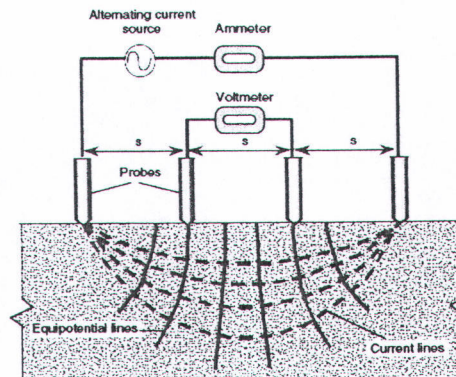
มาตรฐานวิธีการทดสอบการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตยังไม่มีการจัดทำเป็นมาตรฐาน แต่มีเทคนิคที่ใช้แล้วประสบความสำเร็จ ดังแสดงในภาพที่ 3-4 (Millard, S.G. and et al., 1989)

จากพื้นฐานของหลักการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันเป็นระบบของ 4 ขั้วไฟฟ้า (Wenner, F., 1915) ซึ่งได้จัดทำขึ้นเป็นมาตรฐานสำหรับใช้ในการวัดค่าความต้านทานของดิน (ASTM G-57, 2002) โดยที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 มีระยะห่างเท่ากันเป็นระบบการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้ากับผิวของคอนกรีต โดยใช้ (cream) เป็นสื่อตัวนำไฟฟ้า (Millard, S.G., Ghassemi, M.H., and Bungey, J.H., 1990) จากภาพที่ 3-6 มีหลักการทำงานคือ ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกจะเชื่อมต่อกับแหล่งที่ให้กระแสไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายใน 2 ขั้วจะเชื่อมต่อกับเครื่องมืออ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (โวลต์มิเตอร์) ดังนั้นค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 11 (Millard, S.G., Wenner, F., A., et. al., 1990)

$$\rho = \frac{2\pi sV}{I} \quad (3-2)$$



จากสมการที่ 11 ได้มาจาก Wenner ภายใต้สมมุติฐานของวัสดุเป็นแบบ (semi-infinite) และมีคุณสมบัติเหมือนกัน ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ให้มาจะทำให้การวัดค่าความต้านทานได้ค่าที่ถูกต้องเมื่อสมมุติฐานมีข้อมูลเป็นที่เพียงพอและทุกค่าของการเบี่ยงเบนจากข้อสมมุติฐานของ Wenner's จะนำไปสู่ความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณและค่าความต้านทานที่แท้จริงของวัสดุ (Millard, S.G., Ghassemi, M.H., and Bungey, J.H., 1990)



ภาพที่ 3-4 การทดสอบวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตด้วย 4 ขั้วไฟฟ้า

ที่มา : (Bungey, J.H., 1989)

Millard, S.G., et al., 1990. นำเสนอผลที่ได้จากการทดลองศึกษาและวิเคราะห์ให้เป็นที่ยอมรับของอันดับขนาดที่มีความผิดพลาดระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณและค่าความต้านทานที่แท้จริงเมื่อนำสมการที่ 3.2 ไปประยุกต์ใช้กับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตขนาดเล็ก ซึ่งมีหนึ่งตัวแปรที่ต้องพิจารณาคือระยะห่างที่น้อยที่สุดของขั้วไฟฟ้า เพราะว่าส่วนประกอบของเพสต์และมวลรวมจะให้ค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน จึงต้องให้ความสำคัญกับระยะห่างของขั้วไฟฟ้าอย่างเพียงพอ ดังนั้นค่าความต้านทานของคอนกรีตควรจะเป็นค่าเฉลี่ย สำหรับระยะห่างที่น้อยที่สุดของขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดโตสุดของมวลรวม หยาบใช้เป็นค่าต่ำที่สุดของระยะห่าง ในขณะที่ระยะห่างก็ยังเป็นตัวแปรที่กำหนดระดับความลึกซึ่งมีผลกระทบต่อการวัดค่าด้วยเหมือนกัน ในขณะที่ชิ้นส่วนที่มีลักษณะคี่หรือบางก็จะต้องมีความสอดคล้องกับระยะห่างของขั้วไฟฟ้าด้วย

บนพื้นฐานจากการศึกษา Millard, S.G., et al., 1990. ได้แนะนำระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ได้เหมาะสมมีค่าประมาณ 50 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างและความลึกของชิ้นส่วนโครงสร้างควรจะมีอย่างน้อย 4 เท่าของระยะห่างขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้ระยะจากขอบชิ้นส่วนไม่ควรน้อยกว่า 2 เท่าของระยะห่างของขั้วไฟฟ้า เมื่อขนาดต่างๆ เหล่านี้ไม่น้อยไม่เพียงพอ ค่าความต้านทานที่คำนวณได้จากสมการที่ 3-2 ก็จะให้ค่ามากเกินไป ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อการคำนวณค่าความต้านทานแสดงให้เห็นได้ชัดเจน เช่น ชิ้นพื้นผิวที่บางมีผลทำให้ความต้านทานของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าต่ำกว่าค่าที่แท้จริง ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ให้ผลลัพธ์โดยตรงกับค่าความต้านทาน สำหรับปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อเหล็กเสริม เช่น

ความลึกของระยะหุ้มคอนกรีตรวมถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างรับกำลังลดลง

เทคนิคที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่ได้จัดทำขึ้นเป็นวิธีการ Linear polarization (Broomfield,J.,1966) โดยใช้โพรบ(Probe) เป็นอุปกรณ์ที่มีสายเชื่อมต่อกับเครื่องมือโพลาร์ไรซ์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่โดยรอบและวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตด้วยวิธีการ Linear polarization ผลกระทบจากการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตระหว่างเหล็กเสริมและตำแหน่งที่ probe วางบนผิวคอนกรีต ยังไม่ผู้แต่งใดเผยแพร่หรือตีพิมพ์บทความโดยเปรียบเทียบการวัดค่าความต้านทาน โดยใช้ 4 probe และ 1 probe การพัฒนาวิธีการของ single-probe และได้ให้ข้อเสนอแนะดังแสดงในตารางที่ 3-1 แสดงถึงความสัมพันธ์ของความต้านทานคอนกรีตกับความเสียหายของการเกิดสนิม (Feliu,S.,Gonzalez, J.A.,and Andrade, C.,1996)

ตารางที่ 3-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสียหายของการเกิดสนิม

ความต้านทาน ($k\Omega \cdot cm$)	ความเสียหายของการเกิดสนิม
>100 ถึง 200	ไม่เกิดสนิม ; คอนกรีตมีสภาพแห้ง
50 ถึง 100	อัตราการเกิดสนิมต่ำ
10 ถึง 50	ความเหมาะสมในการเกิดสนิมสูงเมื่อเหล็กเริ่มกัดกร่อน
< 50	ความต้านทานไม่สามารถควบคุมอัตราการเกิดสนิมได้

ที่มา : Feliu, S. et al., 1996.

ในอีกกรณีหนึ่ง Bungey ได้ให้แนวทางถึงความแตกต่างกันของข้อมูลระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสียหายของการเกิดสนิม เมื่อเหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม

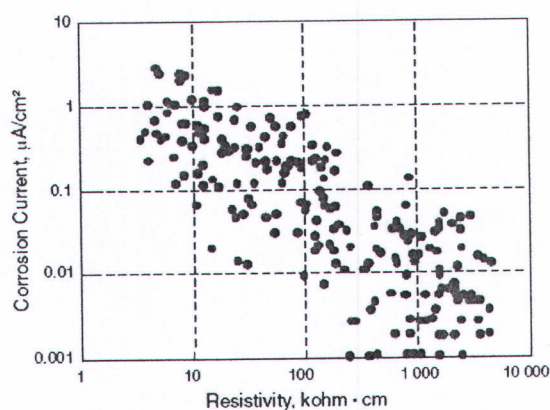
ความต้านทาน ($k\Omega \cdot cm$)	ความเป็นไปได้ของการเกิดสนิม (Nonsaturated Concrete)
> 20	ต่ำ
10 ถึง 20	ต่ำ / เหมาะสม
50 ถึง 10	สูง
< 5	สูงมาก

ที่มา : Bungey, J.H., 1989.

จากภาพที่ 3-5 แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของคอนกรีตและความต้านทานของคอนกรีต (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996) เปรียบเทียบกับรูปที่ 3-3 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม ความต้านทานของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดสนิมได้ดีกว่าการวัดค่าด้วยวิธีการ half-cell potential



สรุปโดยย่อ การวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตเป็นการจัดเตรียมข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ของระดับการเกิดสนิมที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นการนำเอาประโยชน์ที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาใช้ ค่าความต้านทานที่สูงที่ได้จากการสำรวจศักย์ไฟฟ้าแต่อัตราการเกิดสนิมอาจจะมีค่าต่ำ การอ้างอิงถึงความต้านทานของคอนกรีตที่มีความสัมพันธ์กับการแพร่กระจายของไอออนไปโดยทั่วคอนกรีตภายใต้การกระทำของศักย์ไฟฟ้าโดยรอบๆ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด คอนกรีตที่มีความต้านทานเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของโพรงช่องว่างในเฟสตัวมีจำนวนลดลงส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นอายุการใช้งานของคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3-5 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) และค่าความต้านทานของชิ้นส่วนคอนกรีต

ที่มา : (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996)

3.3 ความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้น

เนื่องจากวิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-cell potential) เป็นวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิมที่ให้ค่าโดยประมาณ ซึ่งมีข้อเสียกล่าวคือวิธีการของ (half-cell potential) ไม่สามารถที่จะแสดงค่าของอัตราการเกิดสนิมได้โดยตรง ซึ่งมีหลายวิธีการที่พยายามหาค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมเพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งวิธีการของ Linear polarization resistance (LPR) เป็นอีกวิธีการหนึ่งเป็นที่ยอมรับและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน (Flis, J., Sehgal, A., et al.1992) และได้จัดทำเป็นมาตรฐานวิธีการทดสอบ (Cady and Gannon 1992; Flis et al.1992)

หลักการของเทคนิคความต้านทานโพลาไรซ์เป็นวิธีการที่ดีสำหรับใช้หาค่าอัตราการเกิดสนิม (Corrosion rate) ของเหล็กเสริม สอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM G-59 เป็นเทคนิคพื้นฐานของการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงใน Open Circuit potential (OCP) ของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าแบบ Short-Circuited เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกไหลผ่านเซลล์ จะทำให้ไฟฟ้าครบวงจรซึ่งวิธีการวัดของ LPR ที่นิยมใช้กันมี 2 วิธีการเรียกว่า Potentiostatically ทำได้โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วงทำให้ศักย์ไฟฟ้า (ΔE) เกิดการ

เปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันไปตามค่าของกระแสไฟฟ้า (ΔI) ในขณะเวลานั้นสำหรับวิธีที่ 2 เรียกว่า Galvanostatically ทำได้โดยเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงทำให้กระแสไฟฟ้า (ΔI) เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันไปตามค่าศักย์ไฟฟ้า (ΔE) ในขณะเวลานั้นโดยที่ค่าของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงต้องอยู่ภายในช่วง 10-30 มิลลิโวลต์เท่านั้นค่าที่วัดได้จึงจะมีความถูกต้อง ซึ่งค่าเหล่านี้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔE) และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (ΔI) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่าง $\Delta E/\Delta I$ เรียกว่าความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) ดังสมการที่ 3-3 เพราะว่ากระแสไฟฟ้าจะแสดงในเทอมต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าเป็น Polarized โดยที่ (R_p) มีหน่วยเป็นโอห์มพื้นที่ (ohms.cm^2) ตามมาตรฐาน ASTM G15

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (3-3)$$

Stern and Geary (1957) ได้จัดทำขึ้นภายใต้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดสนิมของขั้วแอโนดและความต้านทานโพลาไรซ์ ซึ่งอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและแคโทด และหาได้จากความลาดชันของกราฟเส้นโพลาไรซ์ของปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด เมื่ออัตราการเกิดสนิมแสดงอยู่ในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมซึ่งแปรผันโดยตรงกับความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) (ASTM G59) แสดงไว้ดังสมการที่ 13

$$I_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad (3-4)$$

โดยที่

$$I_{\text{corr}} = \text{ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม } (\mu\text{A/cm}^2)$$

$$B = \text{ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้า (mV)}$$

$$R_p = \text{ความต้านทานโพลาไรซ์ (Ohms.cm}^2\text{)}$$

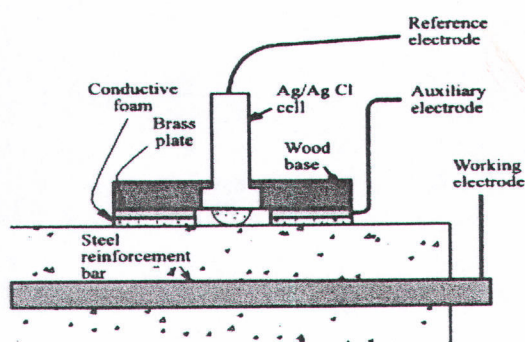
โดยค่า B เป็นค่าคงที่ของ Stern-Geary โดยทั่วไปใช้ค่าเท่ากับ 25 mV เป็นช่วงที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม (Active steel) และใช้ค่าเท่ากับ 50 mV สำหรับเหล็กเสริมในคอนกรีตยังไม่เกิดสนิม (passive steel) (K.R. Gowers, S.G. Millard., et al., 1994) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (i_{corr}) หาได้จากพื้นที่ของเหล็กเสริมตรงบริเวณที่วัดค่าซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ 3-4

$$i_{\text{corr}} = \frac{I_{\text{corr}}}{A} \quad (3-5)$$

สิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงกำลังของโครงสร้างที่เหลือนอยู่ทำได้โดยการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างด้วยวิธีการทดสอบของ LPR ซึ่งเป็นวิธีการที่มีลักษณะเฉพาะโดยการนำเอาขั้วไฟฟ้า (Electrode) ซึ่งเป็น

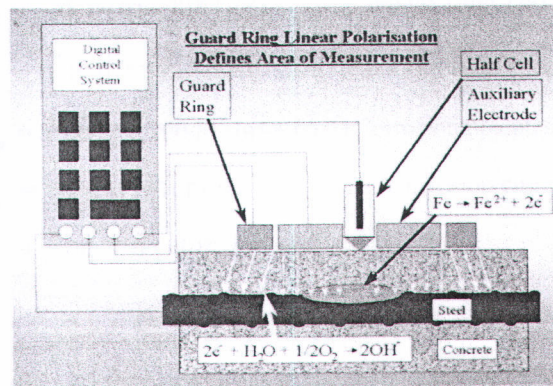
อุปกรณ์เสริมนำมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยในการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตให้ดีขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 16 เป็นการตั้งสมมุติฐานพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตให้อยู่ภายใต้ขั้วไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ชัดเจนว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าไปยังพื้นผิวเหล็กเสริมซึ่งเป็นการส่งสัญญาณในลักษณะที่ไม่มีการจำกัดขอบเขตกระแสไฟฟ้าให้อยู่ภายใต้ขั้วไฟฟ้าส่งผลให้กระแสไฟฟ้าแพร่กระจายเกินออกไปทางด้านข้างซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ทราบโดยเฉพาะเหล็กเสริมที่มีพื้นที่ขนาดกว้างมาก (S. Feliu, J.A. Gonzalez, C. Andrade., et al., 1988) เป็นเหตุให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องเพราะว่าพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมบริเวณที่โพลาไรซ์ (Polarized) ไม่ถูกต้องซึ่งทำให้การคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (i_{cor}) เกิดการผิดพลาดในขณะเดียวกันผลของการประเมินตรวจสอบโครงสร้างจะไม่ถูกต้องด้วย



ภาพที่ 3-6 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยไม่ใช้ guard ring ที่มา : S.G. Milliard, D.W.Law. et al,(2001)

จากปัญหาของการส่งสัญญาณที่ไม่จำกัดขอบเขตสามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มอุปกรณ์เสริมมีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบขั้วไฟฟ้าและ half-cell ซึ่งสามารถช่วยจำกัดขอบเขตการส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตซึ่งได้มีการพัฒนาโดย J.A. Gonzalez, S. Feliu, Jr, C. Andrade. And et al.1990 หลักการทำงานของ Guard ring ที่ล้อมรอบอยู่ภายนอกขั้วไฟฟ้าจะช่วยรักษาการกระจายของกระแสไฟฟ้าในระหว่างการวัดค่า LPR ให้อยู่ในขอบเขตของ Guard ring ซึ่งทำให้ได้ค่าของกระแสไฟฟ้ากระทำต่อพื้นผิวได้ค่าที่ถูกต้อง การจำกัดขอบเขตของกระแสไฟฟ้าให้อยู่ภายใน Guard ring เป็นการป้องกันสัญญาณรบกวนของกระแสไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายใน



ภาพที่ 3-7 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ด้วยการจำกัดขอบเขตการรับและส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าจาก Guard ring ไปยังพื้นผิวของเหล็กเสริม
ที่มา S.G. Milliard, D.W. Law. et al, (2001)

3.4 การประเมินค่าแบบทาเฟล

เทคนิคการประเมินค่าของ Tafel extrapolation technique (TP) เป็นอีกวิธีการหนึ่งของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีใช้สำหรับคำนวณหาอัตราการเกิดสนิมบนหลักการพื้นฐานของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) และความลาดชันทาเฟล (Tafel Slope) ดังนั้นค่าความลาดชันทาเฟลควรนำมาใช้ในการคำนวณหาอัตราการเกิดสนิม (C.Andrade, M.C. Alonso, J.A.Gonzalez, et al., 1990)

วิธีการระหว่าง LPR และ TP เป็นการประยุกต์ใช้จากหลักการพื้นฐานนี้เช่นการกำหนดค่าของกระแสไฟฟ้าให้มีความเสถียรอยู่ในระดับคงที่และอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งเป็นหลักการของกัลวานอสแตติก (Galvanostatic) หรืออีกวิธีการของ LPR จะกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าให้อยู่ในระดับคงที่และอ่านค่ากระแสไฟฟ้า (Current) เป็นหลักการของโพเทนทีโอสแตติก (Potentiostatic) ซึ่งทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันเช่น สำหรับวิธีของ LPR กำหนดให้ค่าของศักย์ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงได้ไม่น้อยกว่า ± 25 มิลลิโวลต์ในขณะที่วิธีการของ TP ให้การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นถึง ± 250 มิลลิโวลต์ ความแตกต่างระหว่างวิธีการ LPR และ TP คือการนำเอาผลที่ได้จากการทดสอบนำมาใช้คำนวณหาอัตราการเกิดสนิม ในกรณีที่ใช้วิธีการของ TP อัตราการเกิดสนิมหาได้จากการนำเอาค่า Tafel Slope (β_a และ β_c) มาแทนค่าลงในสมการที่ 3-6 เพื่อใช้คำนวณหากระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (i_{corr}) และคำนวณหาอัตราการเกิดสนิมได้จากสมการที่ 3-7

$$i = \{ \exp[S_1(E-E_{\text{corr}})] - \exp[-S_2(E-E_{\text{corr}})] \} \quad (3-6)$$

เมื่อ S_1 = ความลาดชันของแอโนดิกบรานช์ (anodic branch) มีค่าเท่ากับ $2.303/\beta_a$
 S_2 = ความลาดชันของแคโทดิกบรานช์ (cathodic branch) มีค่าเท่ากับ $2.303/\beta_c$

β_a = ค่าคงที่ของแอโนดิกทาเฟล (anodic Tafel constant)

β_c = ค่าคงที่ของแคโทดิกทาเฟล (cathodic Tafel constant)

E_{corr} = ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (Corrosion potential)

i_{corr} = กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (Corrosion current) ไมโครแอม

E = ศักย์ไฟฟ้า และ i = กระแสไฟฟ้า

$$\text{Corrosion Rate}(\mu\text{m/yr}) = \frac{0.129 I_{corr} EW}{dA} \quad (3-7)$$

เมื่อ i_{corr} = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
 A = พื้นที่ผิวของเหล็กเสริมภายนอกที่เปิดเผย (ซม²).
 $E.W.$ = น้ำหนักเทียบเท่าของเหล็ก
 d = หน่วยน้ำหนักของเหล็กเสริม, กรัม/ซม³.

การคำนวณหาอัตราการเกิดสนิมของเหล็กโดยวิธี LPR เริ่มแรกต้องคำนวณหาค่า (I_{corr}) จากสมการที่ 16 ซึ่งใช้หลักการพื้นฐานของ Stern-Geary และหลังจากนั้นใช้สมการที่ 3-7 คำนวณหาค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็ก (M.Stern and A.L.Geary, et al,1957)

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 R_p (\beta_a \beta_c)} \quad (3-8)$$

เมื่อ R_p เป็นความต้านทานโพลาไรซ์ ($\text{k}\Omega.\text{cm}^2$) และ β_a และ β_c เป็นค่าคงที่สามารถหาค่าได้จากความชันทาเฟล เพื่อให้การคำนวณทำได้ง่ายซึ่งได้กำหนดให้ค่าคงที่ของ $B = 26 \text{ mV}$ ได้มาจากผลงาน วิจัย (C.Andrade and J.A. Gonzalez., et al., 1978) และเขียนได้ดังสมการที่ 17

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (3-9)$$

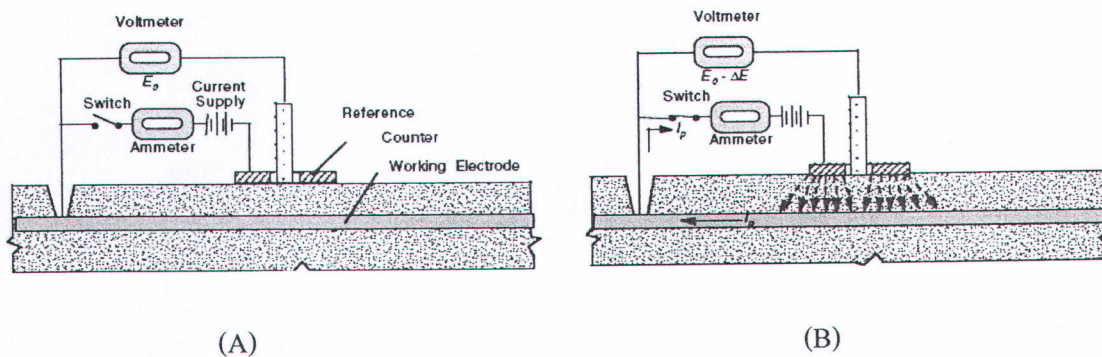
ข้อดีของวิธีการนี้

- แนวความคิดนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของความถูกต้องในการประเมินค่าทาเฟลที่ให้ค่าเท่ากันหรือมากกว่าที่ทำโดยระเบียบวิธีการของ Weight Loss
- ความเป็นไปได้ในการวัดค่าด้วยเทคนิคนี้สามารถวัดค่าในภาวะสุดขีดของอัตราการเกิดสนิมที่มีค่าต่ำมากได้และสามารถใช้เป็นเครื่องบอกให้ทราบถึงการเกิดสนิมได้อย่างเป็นระบบต่อเนื่อง
- Tafel Plot สามารถเตรียมการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมได้โดยตรงซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดสนิม
- ค่าอัตราการเกิดสนิมสามารถหาได้อย่างรวดเร็วด้วยค่าของ Tafel Plot



3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทาน

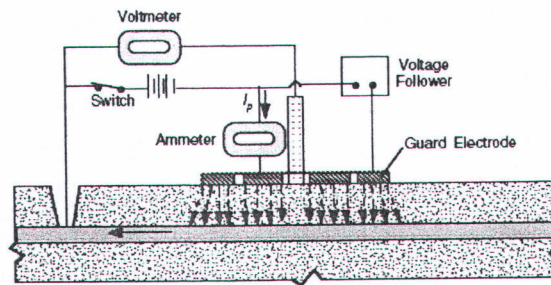
เครื่องมือพื้นฐานสำหรับวัดค่าความต้านทาน Polarization สำหรับเหล็กเสริมในคอนกรีต ประกอบด้วย 3 ขั้วไฟฟ้าตามรูปที่ 3-8 เป็นหลักการพื้นฐานทั่วไปที่นำมาใช้ในการอ้างอิงเป็น '3LP' device เพราะว่ามี 3 ขั้วไฟฟ้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode, RE) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน เป็นเหล็กเสริม เรียกว่า (Working electrode, WE) และขั้วไฟฟ้าตอบสนอง (Counter electrode, CE) ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า Polarization ไปยังที่เหล็กเสริมเป็นเครื่องมือเสริมที่ช่วยวัดค่าแรงดันและความแตกต่างกระแสไฟฟ้าในระหว่างการทดสอบ และเครื่องมือสามารถควบคุมใน Potentiostatic mode ซึ่งมีความแปรผันของกระแสไฟฟ้าก็จะช่วยรักษาความต่างศักย์ของ Working electrode (WE) ให้คงที่หรือจะใช้ galvanostatic mode ในการควบคุมค่าความต่างศักย์ที่แปรผันก็จะช่วยรักษาให้กระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ จาก CE ไปยัง WE



ภาพที่ 3-8 วิธีการวัดค่าโพลาไรซ์เชิงเส้นกับการวัดค่ากระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม

ที่มา : (Escslante, E.,1989.,Clear,K.C.1989)

การคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลของกระแสไฟฟ้าตามที่กล่าวมานั้นยังเป็นค่าที่ไม่ถูกต้องเนื่องจากแนวการไหลของกระแสไฟฟ้าที่อยู่ด้านใต้ของ Counter electrode (CE) ไม่ได้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด (Flis,J.,Sehgal, A.,Li,D.,Kho,Y.T, et al.,1992) การควบคุมที่ดีกว่าจะทำให้แนวการไหลของกระแสไฟฟ้าจาก CE ไปยัง WE ดีกว่า และได้มีการพัฒนาเครื่องมือซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้วไฟฟ้า เรียกว่า guard electrode หรือ auxiliary electrode ซึ่งจะมีตำแหน่งอยู่โดยรอบๆ CE (Feiu,S.,Gonzalez, J.A.,Andrade,C.,and Felio,V.,1989) ดังรูปที่ 3-9 เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการเกิดสนิมโดยใช้ guard electrode ซึ่งจะช่วยรักษาศักย์ไฟฟ้าเป็น CE จากผลลัพธ์ที่ได้นี้ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าจาก CE ไปยัง WE เป็นการไหลของกระแสไฟฟ้าอยู่ในขอบเขตภายใต้ CE สามารถนำเครื่องมือ 3LP ไปใช้ในการประเมินค่า Corrosion Rate ในโครงสร้างได้



ภาพที่ 3-9 เทคนิคโพลาไรซ์เชิงเส้นตรงโดยใช้ guard electrode ในการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า CE ให้อยู่ภายในบริเวณ GE
ที่มา : (Escslante, E.,1989.,Clear,K.C.1989)

ข้อจำกัดของการวัดค่าความต้านทาน

การวัดอัตราการเกิดสนิมโดยใช้ความต้านทานโพลาไรซ์แสดงอยู่ในรูปของเวลาในขณะที่ทดสอบการวัดอัตราการเกิดสนิมจะเป็นจุดพิเศษ โดยเฉพาะในโครงสร้างที่คาดหวังไว้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่หลากหลายเช่น ปริมาณความชื้นและ Oxygen ที่ยังมีอยู่ในคอนกรีตและอุณหภูมิ (Clemen et al.) ได้นำเสนอไว้หลายวิธีที่จะใช้ทำนายอายุการใช้งานของคอนกรีตเสริมเหล็กในอนาคต

- ใช้ค่ามากที่สุดจากการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมในการประมาณอายุการใช้งานที่เหลืออยู่
- ใช้ค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดสนิมในบริเวณตำแหน่งที่เกิดสนิมรุนแรงที่สุดในโครงสร้าง
- ใช้ค่าต่ำสุดและสูงสุดของอัตราการเกิดสนิมในการประเมินค่าช่วงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่

การคำนวณค่าอัตราการเกิดสนิมจากความต้านทานโพลาไรซ์โดยใช้ค่าคงที่ $B = 26 \text{ mV}$ เป็นค่าที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมซึ่งมีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิก (Feliu et al.) ในช่วงเวลานี้ไม่มีการจัดทำมาตรฐานที่อธิบายการวัดค่าอัตราการเกิดสนิม ซึ่งค่าอัตราการเกิดสนิมที่ได้หาได้จากวิธีการที่แตกต่างกันและผลที่ได้ก็มีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นในปัจจุบันมีแนวทางที่เป็นข้อกำหนดของวิธีการทดสอบบนพื้นฐานของประสบการณ์จากห้องทดลองและการทดสอบในสนาม ได้อธิบายการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมโดยใช้อุปกรณ์เสริมคือ guard electrode (GE) (Andrade, C., and Alonso, C., et al.)

3.6 วิธีการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ในการที่จะตรวจสอบและประเมินค่าของ Corrosion Rate เป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการที่จะกำหนด Polarized Area ของเหล็กเสริม และสามารถที่จะทำให้การวัดค่า Corrosion Rate มีประสิทธิภาพได้โดยการใช้ guard electrode (GE) สำหรับใช้กำหนดขอบเขตของกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตที่จำกัด สำหรับตำแหน่งของ GE จะอยู่รอบๆ แกนกลางของ CE และเป็นการรักษาสภาพศักย์ไฟฟ้า เป็นผลให้การกระจายของสัญญาณจาก CE อยู่

ในขอบเขตที่จำกัดมีพื้นที่ไม่มากกว่าจากจุดกึ่งกลางที่มีการแบ่งแยกเป็นสองส่วนระหว่าง CE และ GE เมื่อทั้งคู่เป็น electrode ที่มีความกว้างที่เท่ากันและภายใต้สมมุติฐานว่าคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหมือนกัน

วิธีการของเครื่องมือ GECOR 6 มีอุปกรณ์ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่วัดค่าการกัดกร่อนและ Probe ในส่วนของ Probe จะมี 2 ส่วนที่เป็นขั้ว (Electrode) รับและส่งสัญญาณ และ CE ซึ่งอยู่ภายนอก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 140 มม. ใช้สำหรับ Current Confinement ในการวัดค่า Corrosion Potential จะใช้ Solid Silver/Silver Chloride เป็นขั้วอ้างอิงอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ Probe ซึ่งค่าความต่างศักย์ทุกค่า จะอยู่ระหว่างขั้ว (Electrode) ทั้งสองและมีกระแสไฟฟ้าจาก CE ที่อยู่ตรงกึ่งกลางของ Probe จะเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ระหว่างขั้วรับส่งสัญญาณทั้งสอง เป็นขบวนการที่มีประสิทธิภาพในการจำกัดขอบเขตของกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ที่อยู่ด้านล่างตรงกันกับ CE ค่าที่วัดได้เป็นค่าที่ถูกต้องนำไปใช้ในการคำนวณค่า Polarization Resistance. เครื่องมือนี้ได้พัฒนาในประเทศสเปนผลิตและจำหน่ายใน Illinois โดย GECOR 6

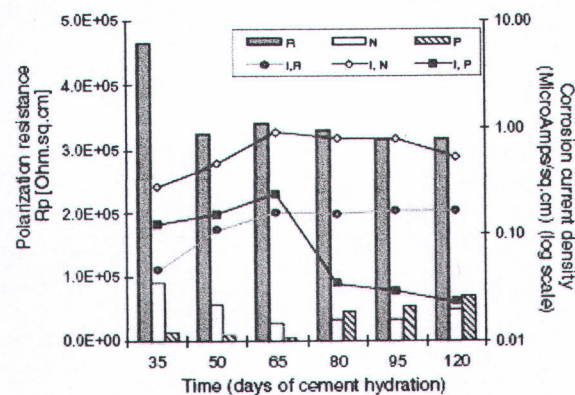
วิธีการของเครื่องมือ 3LP-NBS1 ประกอบไปด้วย Three-Electrode Linear Polarization Technique ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทาน (Clear, K.C.1989) การเคลื่อนที่ขึ้นลงของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบจนกระทั่งเหล็กเป็น Cathodically Polarized ที่ 12 Volte ในระหว่างขบวนการนี้จะใช้การไหลของกระแสไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 4, 8 และ 12 mV เป็นค่าที่บันทึกไว้ และ Probe มีส่วนประกอบของ Pencil Copper/Copper Sulfate เป็น Reference Electrode และมีแท่งทองแดงเป็นแกนกลางอยู่ภายใน Probe มีความยาว 17.1 ซม. และไม่มีอุปกรณ์ guard electrode

วิธีการของเครื่องมือ CORROATCH (NSC) ใช้หลักการควบคุมโดยใช้ galvanostatic double pulse เป็นการให้ 2 ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่มีช่วงจังหวะของการเดินที่แตกต่างกันเป็นส่วนที่ช่วยเสริมการจัดเตรียมความถี่ที่มีค่าสูงมากสำหรับใช้วัดค่าความต้านทานของคอนกรีต (R_s) การวัดค่าโดยใช้ความถี่ที่ต่ำกว่าในการวัดค่าเป็นการรวมความต้านทานของคอนกรีต (R_s) และ Polarization Resistance (R_p) ดังนั้นในความแตกต่างกันระหว่างการจัดเตรียมทั้งสองของ (R_p) ซึ่งสามารถที่จะคำนวณหากระแสของการกัดกร่อนและอัตราของการกัดกร่อนได้ เทคนิคที่ใช้จะแตกต่างจาก AC Impedance Technique ความถี่จะไม่ขึ้นลงอย่างรวดเร็ว แต่จะใช้สองความถี่เท่านั้น ความถี่ที่ใช้ในการควบคุมอาจจัดทำขึ้นมาให้เป็นแบบอัตโนมัติที่ความถี่ 1300 และ 0.02 Hz สำหรับค่าความถี่ที่ต่ำมากสามารถที่จะเลือกเป็น 1 mHz ซึ่งค่าอาจจะต่ำไม่เพียงพอที่จะใช้ในการวัดค่า (R_p) ในสถานะ Passive State และสำหรับ Probe จะประกอบด้วยแกนกลางเป็น Silver/Silver Chloride Reference electrode และแกนกลางเป็น Platinum Counter electrode (CE) และ guard electrode (GE) ซึ่ง (CE) และ (GE) จะช่วยรักษาค่าความเป็นศักย์ไฟฟ้าให้เท่ากันโดยการใช้แรงดันไฟฟ้า

วิธีการของเครื่องมือ PR Monitor เป็นเครื่องมือที่ใช้หาค่า Corrosion Rate ของเหล็กที่พัฒนาหลังจากสามวิธีการแรกโดยมีการตรวจสอบและประเมินจาก SHRP ใช้หลักการพื้นฐานที่เหมือนกันกับวิธีของ GECOR 6 device มีอุปกรณ์ภายนอกเป็น guard electrode (CE) ซึ่งช่วยในการ Confinement Current ให้มีค่าสม่ำเสมอ ผลิตและจำหน่ายโดยบริษัท Cortest Instrument Systems in Texas



D.A.Koleva. et al. ได้ศึกษาและวิจัยการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในมอร์ตาร์รูปทรงระบอกโดยใช้วิธีการของ LPR และ EIS ในการวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (Polarization Resistance, R_p) เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าประกอบด้วย Potentiostat PGSTAT30, combined with FRA2 module, using GPES and FRA software package จากการศึกษาวิจัยนี้ได้แบ่งตัวอย่างทดสอบเป็นสามกลุ่ม โดยกลุ่ม N = Freely Corroding กลุ่ม P = Cathodic Protection และกลุ่ม R = Reference specimen ผลจากการวัดค่าทางไฟฟ้าเคมีโดยวิธี LPR จากภาพที่ 3-10 พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) ของตัวอย่างกลุ่ม N จะเกิดสนิมสูงมากหลังจาก 65 วัน เพราะว่า (i_{corr}) มีค่าเข้าใกล้ $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ และสำหรับตัวอย่างกลุ่ม P ค่า (i_{corr}) ลดลงเรื่อยๆ ในช่วงเวลา 65-80 วันและลดลงต่ำสุดที่ $0.03 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ซึ่งหมายความว่ากลุ่มตัวอย่าง P มีการป้องกันปฏิกิริยาที่ช้าลงจะเกิดสนิมได้ช้ากว่ากลุ่ม N และสำหรับค่าความต้านทาน Polarization (R_p) วัดค่าโดยวิธี EIS จากภาพที่ 3-11 พบว่าตัวอย่างกลุ่ม P แนวโน้มทั่วไปของความต้านทาน (R_p) มีค่าเพิ่มขึ้น และในกลุ่มตัวอย่าง N แนวโน้มทั่วไปของความต้านทาน (R_p) มีค่าลดลง สรุปได้ว่าตัวอย่างทดสอบที่มีการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาที่ช้าลงจะมีอัตราการเกิดสนิมได้น้อยกว่า

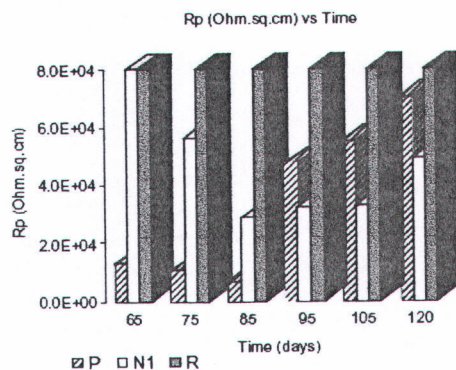


ภาพที่ 3-10 การเปรียบเทียบความต้านทาน Polarization (R_p) โดยวิธี LPR

ที่มา : D.A.Koleva,J.Hu, et al, (2006)

Ha-Won Song and Velu Saraswathy., (2007) ได้ศึกษาและวิจัยพบว่า การหาค่าของพื้นที่โพลาไรซ์รอบเหล็กเสริมหากได้ค่าที่มีความผิดพลาดก็จะทำให้ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) ที่คำนวณได้มีค่าผิดพลาดซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการประเมินค่าอัตราการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผิดพลาดไปด้วย ดังนั้นต้องทำการกำหนดขอบเขตพื้นที่ของกระแสไฟฟ้ารอบเหล็กเสริม โดยใช้อุปกรณ์ช่วยเป็น guard electrode (GE) ให้ทำหน้าที่จำกัดขอบเขตของการไหลกระแสไฟฟ้าและแรงดันให้มีความเสถียรทำให้ได้ค่าอัตราการเกิดสนิมที่ถูกต้องดังรูปที่ 3-10 อย่างไรก็ตามปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีผลกระทบต่อค่า polarization area และ (i_{corr}) คือความหนาของคอนกรีตที่ระย้าหุ้มของเหล็กเสริม (J.Flis et al.,1998) สรุปว่าหาก polarization area มีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้ามีความเสถียร จากวิธีการดังกล่าวได้มีผลงานวิจัยในห้องทดลองให้ข้อมูลไว้เพื่อเป็นบรรทัดฐานในการพิจารณาสภาพการเกิดสนิมตามตารางที่ 3-3





ภาพที่ 3-11 การเปรียบเทียบความต้านทาน Polarization (Rp) โดยวิธี EIS

ที่มา : D.A.Koleva, J.Hu, et al, (2006)

ตารางที่ 3-3 กระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

อัตราการเกิดสนิม (I_{corr})	เงื่อนไขสถานะของเหล็กเสริม
$I_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$	สภาวะยังไม่เกิดสนิม
$I_{corr} 0.1- 0.5 \mu A/cm^2$	อัตราการเกิดสนิมต่ำถึงปานกลาง
$I_{corr} 0.5- 1.0 \mu A/cm^2$	อัตราการเกิดสนิมปานกลางถึงสูง
$I_{corr} > 1.0 \mu A/cm^2$	อัตราการเกิดสนิมสูง
วิธีการของเครื่องมือที่ไม่มี Guard Electrode	
$I_{corr} < 0.2 \mu A/cm^2$	สภาวะที่ไม่เกิดสนิม
$I_{corr} 0.2- 1.0 \mu A/cm^2$	มีโอกาสเกิดสนิมที่ 10-15 ปี
$I_{corr} 1.0- 10 \mu A/cm^2$	มีโอกาสเกิดสนิมที่ 2-10 ปี
$I_{corr} > 10 \mu A/cm^2$	มีโอกาสเกิดสนิมที่ 2 ปีหรือน้อยกว่า

ที่มา : (C.Andrade, M.C.Alonso. et al,1990)

3.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความต้านทานโพลาไรซ์

เทคนิคที่ใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นความสัมพันธ์ของ Stern-Geary ใช้สำหรับการพิจารณาทดสอบแบบไม่ทำลายหาค่าอัตราการเกิดสนิม ดังสมการ (3-10)

$$i_{corr} = B/R \quad (3-10)$$

เมื่อ B = ค่าคงที่

R_p = Polarization Resistance ได้มาจากการทดลอง

ค่าของ R_p ที่ถูกต้องขึ้นอยู่กับพื้นผิวสัมผัสที่ดีเป็นตัวแทนกระแสไฟฟ้าระหว่างพื้นผิวของคอนกรีตกับ Probe สำหรับที่จุดเชื่อมต่อผิวสัมผัสของคอนกรีตไม่มีค่า R_p จะไม่แน่นอนทำให้ค่าของกระแสไฟฟ้าตกต่ำลง



(IR drop) ซึ่งทำให้ผลที่ได้ไม่มีความน่าเชื่อถือ จากการตรวจสอบความถูกต้องถึงผลกระทบบริเวณผิวสัมผัสของคอนกรีตในสภาพที่แห้ง เปียก และ paste ได้รายงานไว้ในตารางที่ 3-4

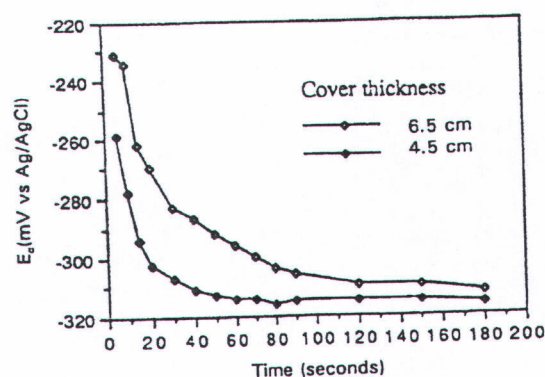
ตารางที่ 3-4 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) ด้วยเครื่องมือ NSC device, ตัวอย่างมอดาร์ขนาดเล็ก

Specimen	R_p ($K\Omega.cm^2$)		
	Dry	Wet	Paste
1	1.55	3.65	3.01
2	1.50	3.64	-
3	1.30	3.10	2.78

ที่มา : (Aquasioic, Parker Laboratories Ins.)

จากตารางที่ 3-4 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสภาพคอนกรีตต่อค่า R_p ที่วัดได้โดยใช้เครื่องมือ NSC device ค่าของ R_p ที่หาได้ โดยการใช้น้ำหรือ Paste เป็นตัวนำจะให้ค่าของ R_p มากกว่าสภาพคอนกรีตที่แห้งและจะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่มีสภาพเป็น Paste และ dry ค่า R_p ที่วัดได้จะต่ำกว่าสภาพที่เปียกและในกรณีพื้นผิวคอนกรีตที่เรียบการกระจายของกระแสไฟฟ้าจะดีกว่าผิวสัมผัสที่ขรุขระ

ค่าของ R_p ที่วัดได้ในสภาพพื้นผิวสัมผัสที่แห้งพบว่าไม่สามารถนำค่า R_p ไปใช้ได้เนื่องจากมีการกระจายของข้อมูลจำนวนมาก แต่ภายหลังจากที่ผิวสัมผัสของตัวอย่างทดสอบมีความเปียกขึ้นค่าของศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม Corrosion Potential (E_c) มีการเปลี่ยนแปลงแสดงได้ดังภาพที่ 3-12



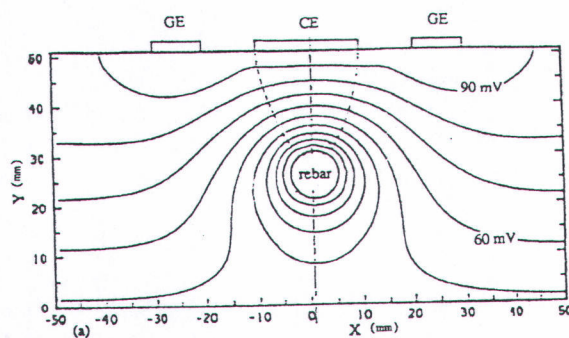
รูปที่ 3-12 การเปลี่ยนแปลงของ Corrosion Potential ภายหลังจากพื้นผิวคอนกรีตมีความเปียกขึ้น.

ที่มา : SHAP-S-324

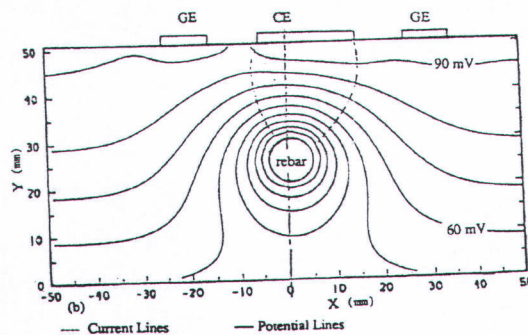
ผิวคอนกรีตที่เปียกขึ้นค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นมากว่าเนื่องจากการซึมผ่านที่ดีของน้ำที่ผิวของคอนกรีต ซึ่งอธิบายได้ว่าความต้องการ Oxygen สำหรับไว้ทำปฏิกิริยาที่ขั้วลบจะเป็นการทำให้เกิดการซึมผ่านของ Oxygen อย่างเป็นระบบในช่องว่างของคอนกรีต ซึ่งค่า Potential ที่มีค่าที่เป็นลบมากกว่าจะทำให้ปริมาณ

Oxygen มีค่าลดลงก็จะส่งผลให้ค่า Potential มีค่าสูงขึ้นไปอีกจนถึง -200 mv (Tamura, M., M.nagayama, and K.Shimosawa.)

และจากรูปที่ 3.12 แสดงให้เห็นถึงช่วงระยะเวลาที่นานค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีความเสถียรมาก โดยที่ระยะหุ้มคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ต่อจากนั้นจะสังเกตได้ว่าช่วงเวลาที่ศักย์ไฟฟ้ามีความเสถียร จะขึ้นอยู่กับสภาพของคอนกรีต ถ้าคอนกรีตแห้งจะมีความต้านทานสูงทำให้ค่า (E_c) จะมีความเสถียร เมื่อมีปริมาณความชื้นในคอนกรีตมากกว่าดังเช่นตัวอย่างคอนกรีตทดสอบที่แช่อยู่ในน้ำคอนกรีตจะมีความต้านทานต่ำ



(A) ตำแหน่งของ Probe มีความสมดุลอยู่บนเหล็กเสริม



(B) ตำแหน่งของ Probe เคลื่อนย้ายจากตำแหน่งตรงกลางของเหล็กเสริม

ภาพที่ 3.13 ตำแหน่งของ Probe ที่มีผลกระทบต่อการกระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในคอนกรีต
ที่มา: SHAP-S-324

จากรูปที่ 3.13 แสดงถึงการจำลองรูปแบบการไหลของกระแสไฟฟ้าและการกระจายของศักย์ไฟฟ้าเป็นตัวอย่างที่กำหนดให้ตำแหน่งของเหล็กเสริมอยู่ตรงกลางภายใต้ Probe ซึ่งจะทำให้ค่า Potential ที่มีความเสถียรมาก และเมื่อมีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของ Probe จากจุดตรงกลางของเหล็กเสริมจะมีผลทำให้ Polarized area รอบๆเหล็กเสริมมีการเบี่ยงเบนกว้างมากขึ้น ดังรูปที่ 23 (A) และ (B) สัดส่วนของ Polarized area

โดยรอบเหล็กเสริมตามรูปที่ 3.13 (A) จะมีขนาดที่มากกว่า รูปที่ 23 (B) และรูปแบบนี้จะเป็นการตรวจสอบที่มีความถูกต้องในการวัดค่าของ R_p ทำให้โดยใช้เครื่องมือ NSC device ในการวัดค่า R_p แสดงผลในตารางที่ 3-4 เมื่อมีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของ Probe จะมีผลทำให้ค่า R_p ลดลงซึ่งจะมีผลทำให้ Polarized area เพิ่มขึ้น โดยที่เหล็กเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าอยู่ในคอนกรีตที่มีความต้านทานสูงและเป็นขนาดที่จำกัดตำแหน่งของ Probe ที่มีความแตกต่างกันจะให้ผลในการกระจายของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3-13(B) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ไม่ดีในการไหลของกระแสไฟฟ้าในส่วนของการที่จะนำค่า R_p ไปใช้ในการคำนวณหาอัตราการเกิดสนิม

ตารางที่ 3.5 ผลกระทบจากการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของ Probe ต่อการวัดค่า R_p โดยใช้เครื่องมือ NSC

Device กับจำนวนคอนกรีตหลายตัวอย่าง

Measurement Site	R_p ($k\Omega \cdot cm^2$)	
	Symmetrical ^b	Displaced ^c
A	48.35	40.27
B	64.33	52.39
C	74.61	49.46
D	41.32	29.38

^a Average of three result report. ^b Probe centered symmetrically over rebar. ^c Probe Displaced 0.5 cm(0.2in.)

from the rebar center.

ที่มา : SHAP-S-324

3.8 พื้นที่สนามไฟฟ้า

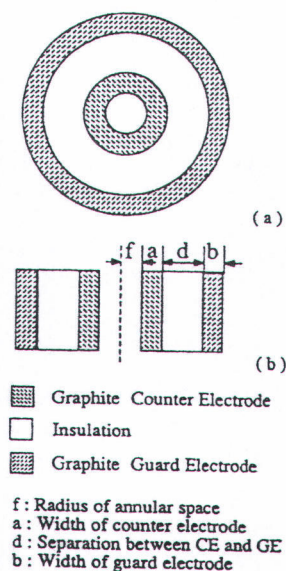
จากความสัมพันธ์ของ Stern-Geary เป็นวิธีการที่ใช้ทดสอบแบบไม่ทำลายซึ่งใช้สำหรับหาค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Andrade,C.and J.A.Gonzalez,1987) อย่างไรก็ตามในโครงสร้างคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมในปริมาณมาก และเป็นไปไม่ได้ที่ CE จะสามารถ Polarized area ของผิวของเหล็กเสริมได้ทั้งหมด เพราะว่า CE จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้าไปยังเหล็กเสริม (WE) ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้ว CE จะมีพื้นที่ในการส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้าได้น้อยกว่า WE มาก ส่งผลให้การกระจายของสัญญาณที่อยู่เหนือเหล็กเสริมเป็นแบบไม่สม่ำเสมอและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ส่งสัญญาณไปก็จะลดลงและหายไป ในที่สุดเมื่อ CE มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง ดังนั้นการกระจายการส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าจะเป็นแบบไม่สม่ำเสมอและขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ เช่นตำแหน่งของเหล็กเสริม (มีกระแสไฟฟ้าไม่มีความเสถียรและจะมีการกระจายอย่างมากสำหรับเหล็กเสริมที่ยังไม่เกิดสนิม) ค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต (สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ส่งไปยังเหล็กเสริมจะ ไม่มีความเสถียรเป็นอย่างมากในคอนกรีตที่มีความต้านทานต่ำ) ขนาดของ CE ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของ R_p ที่วัดได้ขึ้นอยู่กับ การกระจายของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง (Feliu, S., J.A.



Gonzalez.,1990) และการเลือกใช้คลื่นความถี่ เช่นถ้าพื้นที่ของ WE มีมากกว่าพื้นที่ของ CE ค่า Polarized area ขึ้นอยู่กับการรบกวนของความถี่ (Polarized area มีค่าเพิ่มขึ้นการรบกวนของความถี่จะมีค่าลดลง) (Macdonald,D.,1988)

คำจำกัดความของ Polarized area ของเหล็กระหว่างการวัดค่าซึ่งจะมีข้อรับส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้า 2 ขั้ว โดยที่ GE จะอยู่โดยรอบแกนกลางของ CE ซึ่งทำหน้าที่รักษาสภาพศักย์ทางไฟฟ้าไม่ให้กระจายออกไปเกินขอบเขต ผลของการกระจายของสัญญาณไฟฟ้าจาก CE จะอยู่ภายในขอบเขตซึ่งเป็นส่วนที่แยกกันระหว่าง CE และ GE เมื่อทั้งสองขั้วมีขนาดความกว้างที่เท่ากัน จากรูปตัดขวางในแนวดิ่ง ($b=c$ in.) ในภาพที่ 25 และคอนกรีตเป็นตัวนำไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเหมือนกันภายใต้เงื่อนไขของการให้เหล็กเสริมเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอ

ชิ้นส่วนต่างๆที่ประกอบรวมกันของ Guard electrode (GE) และ CE แสดงในรูปที่ 24 ในช่องว่างที่มีวงแหวนล้อมรอบเป็นตำแหน่งของ CE และ RE จะเป็นตัวตอบสนองของการส่งสัญญาณจาก Polarized area ของเหล็ก โดย CEประกอบไปด้วย graphite รูปทรงกระบอกเป็นขั้วไฟฟ้า และพลาสติกสังเคราะห์ (Polyethylene) หรือ แก้ว (glass) เป็นวัสดุทำหน้าที่เป็นฉนวน



ภาพที่ 3.14 ชิ้นส่วนที่ประกอบรวมกันของ CE และ GE: a) Top View : b) Cross Section View

ที่มา : SHAP-S-324

สำหรับในตารางที่ 3-6 เป็นผลจากการวัดค่า R_p ของมอร์ต้าตัวอย่างขนาดเล็กโดยใช้ (NSC device) เป็นเครื่องมือวัด จากทุกตัวอย่างค่าของ R_p จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอันดับขนาดและเมื่อใช้ (GE) แสดงให้เห็นว่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ส่งจาก CE จะช่วยลด Polarized area ตามอันดับขนาด ผลลัพธ์ที่ได้นี้เป็นที่ยอมรับและแสดงให้เห็นว่า GE มีประสิทธิภาพในการจำกัดขอบเขตการกระจายของการส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ดี (Jackson,P.D.,1981 and Matsuoka,K.,1990)



ตารางที่ 3.6 ความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) ได้จากการวัดโดยเครื่องมือ NSC device ด้วยมอร์ตาร์ ตัวอย่างขนาดเล็กโดยใช้ Guard electrode (GE)

Specimen	Polarization Resistance ($k\Omega \cdot cm^2$)		Low Frequency Used (Hz)
	W/O GE	W/GE	
1	1.42	17.12	0.01
1	1.06	11.69	0.04
2	0.94	13.77	0.01
2	0.59	9.95	0.04
3	1.16	18.74	0.01
3	0.90	14.35	0.04

ที่มา : SHAP-S-324

อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้สมมติฐานในการส่งสัญญาณจาก CE ไปยัง Polarized area ที่อยู่ด้านล่างรอบๆเหล็กเสริม โดยสมบุรณ์ โดยที่ค่าจำกัดความของ Polarized area เขียนได้ดังสมการที่ 3-11 (Matsuoka,K.,1990)

$$A = 2\pi rL \quad (3-11)$$

เมื่อ

r = รัศมีของเหล็กเสริม และ

L = ความยาวของของ CE

Matsuoka.ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ Finite element ในการวิเคราะห์หาค่าความยาว L ในขณะที่สมมติฐานว่า Polarized area ทั้งหมดกระทำโดยรอบของเหล็กเสริมระหว่างการวัดค่า R_p และในระหว่างการทดลองได้ใช้คอมพิวเตอร์ในการเลียนแบบจากของจริงพบว่าไม่สามารถที่จะ Polarized area รอบๆเหล็กเสริมได้ทั้งหมดแต่ถ้าต้องการที่จะใช้ CE ส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวเพื่อให้ Polarized area รอบๆของเหล็กเสริมได้โดยสมบุรณ์ Equipotential lines ต้องขนานกับพื้นผิวของเหล็กเสริม ดังนั้น Current Line ต้องตั้งฉากกับเส้น Potential Lines มีทิศทางเป็นเส้นตรงไปยัง Polarized ที่ผิวของเหล็กเสริม และเมื่อใช้ GE และ CE จะสามารถช่วยรักษาศักย์ไฟฟ้าให้มีค่าความเสถียรและดังนั้นพื้นที่ของเหล็กเสริมที่ถูก Polarized ก็จะไม่เกิดการช้อนทับกันค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลจะมีความเสถียร

