

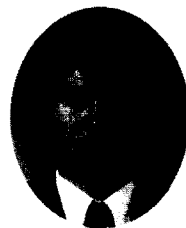
콘크리트 중의 철근 부식 억제를 위한 외부전원법의 효과

Effect of Impressed Current System for Corrosion Protection of Rebars in Concrete



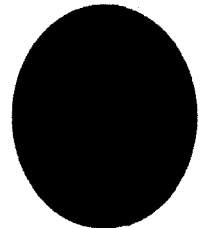
문한영*

Moon, Han-Young



김성수**

Kim, Seong-Soo



김홍삼***

Kim, Hong-Sam

ABSTRACT

Corrosion of rebars can occur if there are cracks, moisture and availability of oxygen or carbonation proceeds, chloride penetrates and diffuses in concrete. Once rebars in concrete corrodes, subsequently accompanied with scaling, spalling in concrete cover. As a result of them, the RC structure is seriously deteriorated.

In this study, theoretical review and experiments for cathodic protection(CP) have been performed to control corrosion of rebars in concrete contained chlorides and pre-crack. For CP the impressed current system was applied, the protection effect was investigated when rebars was directly contacted with salt water due to crack and open to much chlorides in concrete. In order to investigate the effect of protection, when CP was energized for 1 year, half-cell potential, potential-decay with current density, corrosion ratio, etc. were measured. With the cathodic protection by impressed current system, the depolarized values of all specimen were met NACE Standard, the effect of 34~84% of the ratio of corrosion area and 84~86% of cross-section reduction were calculated.

Keywords : corrosion protection, crack, chloride, carbonation, cathodic protection, impressed current system, potential-decay, corrosion current density

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 정회원, 대진대학교 토목공학과 조교수, 공학박사

*** 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

·본 논문에 대한 토의를 1999년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 영종도의 신국제공항을 잇는 영종대교, 부산의 광안대교 및 서해안 고속도로상의 서해대교 등 대규모 콘크리트 구조물이 바다 속이나 바다에 연한 해양환경하에 건설됨으로서 염해 방지대책에 대한 관심이 매우 높아지고 있는 실정이다. 철근콘크리트 구조물이 해양환경하에 건설될 경우, 조수간만의 차에 의한 건습의 반복작용, 파랑, 파도에 의한 마모작용 및 동결융해와 같은 물리작용 이외에도 해수비말이나 바닷물 속에 함유되어 있는 염소이온의 침투확산 등으로 인해 철근의 부식이 상승작용을 일으킨다는 것은 잘 알려진 사실이며 현장조사결과로도 확인되었다.^{1,2)} 뿐만아니라 염화물을 충분히 제거하지 않은 해사를 그대로 사용하거나 겨울철 도로교량상의 눈이나 얼음을 녹일 목적으로 사용되는 염화칼슘과 같은 용빙제의 사용도 콘크리트 중의 철근부식을 유발시키는 주된 요인으로 작용하므로써 콘크리트 구조물의 내구성 저하를 일으키는 문제점으로 지적되고 있다.

그러므로 선진외국에서는 염화물의 영향을 받는 콘크리트 중의 철근부식을 억제하기 위한 많은 연구와 사례보고가 있으며, 일본의 경우에는 염해에 의해 열화된 콘크리트 구조물의 보수방안으로 전기방식법을 활용하여 철근의 부식을 방지하고 있다.^{3,4,5)} 미국에서도 염화칼슘과 같은 용빙제의 대량 살포 등으로 인하여 염해를 입은 콘크리트 구조물의 보수대책으로 전기방식법의 적용 등이 실용화 단계에 있으며, 시공실적과 연구성과들이 많이 발표되고 있다.^{6,7)}

한편 근년에 와서 우리 나라에서도 외부전원법에 대한 기술이 도입되어 철근의 부식이 심한 철근콘크리트 항만구조물의 보수에 적용한 실적은 몇몇 있으나 신설구조물에 적용된 사례나 이와 관련된 연구논문 등은 거의 찾아보기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 철근의 부식을 촉진하고 가혹한 환경조건을 모사하기 위해 콘크리트 내부에 다량의 염화물을 혼입하고 인위적인 균열을 유도하여 염화물이 철근에 직접 닿는 조건하에 놓인 시험체에 대하여 전기방식법 중의 하나인 외부전원법

을 적용하였다. 외부전원법에 의한 전기방식의 효과를 확인하기 위하여 1년간 방식전류를 공급한 경우와 방식을 전연 실시하지 않은 시험체에 대해서 철근의 자연전위, 방식전류밀도에 따른 복극량, 부식면적율, 철근의 단면감소를 측정하여 방식효과에 대하여 검토함으로써 외부전원법의 기초자료를 얻고자 한다.

2. 철근부식 억제를 위한 전기방식의 메커니즘

콘크리트는 강알카리성이므로 밀실한 콘크리트 중의 철근은 부동태 피막이 형성되어 철근은 부식으로부터 보호된다. 그러나 균열이 생겨 물과 산소의 침투가 용이해지거나 또는 외부로부터 염소이온과 같은 염화물이 침투확산되어 콘크리트 중의 철근까지 도달할 경우 및 콘크리트의 중성화가 철근위치까지 진행될 경우 철근의 부동태 피막은 파괴되어 부식이 급격하게 진행된다. 이때 철근의 부식생성물의 체적이 팽창함에 따라 매우 큰 인장응력이 콘크리트의 주위에 작용하게 되어 균열이 발생한다.^{8,9)} 이러한 균열은 콘크리트 내부로부터 점차적으로 콘크리트 표면까지 진행되어 박리 및 탈락현상이 생기며, 이로 인하여 콘크리트 구조물의 내구성이 크게 저하되고, 심할 경우 구조물이 붕괴하게 된다. 이러한 경우 철근의 부식억제 방법으로서서는 Pourbaix Diagram^{10,11)}에서 철이 놓인 환경을 알카리측으로 변화시키거나 철의 전위를 강제적으로 낮은(卑)방향으로 변화시켜 부동태 영역 혹은 불활성 영역으로 이동시키는 방법이 있다. 철의 전위를 강제적으로 부식이 일어나지 않는 영역으로 이동시키는 방법이 소위 전기방식이라 불리는 캐소드방식법 또는 음극방식법이다.

전기방식의 원리는 부식하는 금속에 충분한 전류를 공급하여 금속의 용해 속도가 전해질로 들어가는 애노드 전류를 멈추게 하거나 만족할 만한 수준으로 줄이는 것이다. 그러므로 금속표면을 훨씬 낮은 전위(negative)로 만들면 캐소드의 반응속도를 촉진시키는 전자들의 농도는 증가하고 애노드 반응속도는 감소하게 된다. 즉 방식전류를 공급하게 되면 철의 용해속도는 방식전류에 의해

공급된 철근표면의 전자에 의해 점차 줄어든다. 전류의 공급을 늘려 충분한 방식전류가 공급되어 완전히 부식반응이 억제된 경우 철이 용해되는 반응($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$)은 가역반응($Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$)과 같게 되는데 이는 철근표면의 전자가 증가하기 때문이다.¹²⁾

외부로부터 전류를 받지 않는 자연부식의 경우에는 전위가 낮아지면 낮아질수록 부식하는 경향이 있지만, 전기방식과 같이 외부에서 전류를 공급하는 경우에는 전위가 낮게 되는 방향으로 전류를 공급해줄 필요가 있다. 따라서 전기방식하에서 콘크리트 중의 철근의 전위가 낮으면 낮을수록 방식(防蝕)상태에 있다고 할 수 있다.

이를 분극도로 나타낸 것이 Fig. 1이다. 전기방식을 실시하지 않은 콘크리트 중의 철근의 경우 Fig. 1에서와 같이 철의 산화($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$)반응과 이때 발생된 전자를 소모하는 환원반응($2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$)이 평형을 이루는 점이 철근의 부식전류밀도(I_{corr}) 및 부식전위(E_{corr})가 된다. 한편 철근의 부식을 억제할 목적으로 방식전류를 철근에 공급하면, 철근의 부식전류밀도는 I_{corr} 에서 $I_{1,corr}$ 를 거쳐 $I_{2,corr}$ 로 분극폭션을 따라서 감소하며, 전위 또한 낮아지게 된다.

충분한 방식전류가 공급되면 이론적으로는 애노드(철)의 용해속도가 교환전류밀도 $I_{o,a}$ 에서 침전($Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$) 속도에 의해 정확히 균형이 이루어질 때, 또는 캐소드의 분극이 $E_{o,c}$ 의 개회로(open-circuit) 전위에 도달할 때, 순수 부식전류는 "0"이 되어 부식은 일어나지 않는다.¹³⁾ 이러한 전기방식은 크게 두가지로 나뉘는데 방식

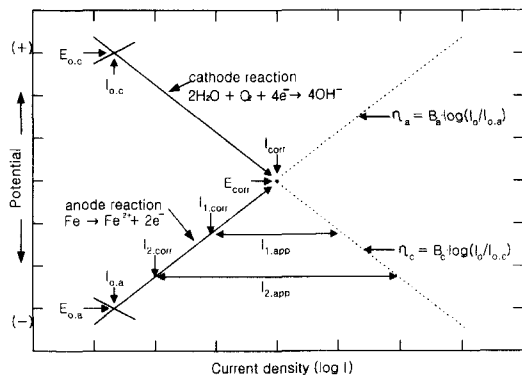


Fig. 1 Principles of cathodic protection in polarization diagram

목적물을 음분극(陰分極)시키는 전원(電源)이 외부로부터의 직류전원이면 외부전원법(또는 통전법)이라고하고 방식목적물보다 훨씬 저전위(低電位)이고 방식에 필요한 만큼 분극시킬 수 있는 금속을 희생양극으로 사용하는 방법을 희생양극법(또는 유전양극법)이라 한다.

3. 실험 개요

3.1 사용재료

(1) 시멘트

보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition and physical properties of cement

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Ig. loss (%)	Specific gravity	Specific surface area (cm ² /g)
20.3	6.2	3.2	62.4	3.0	2.0	1.9	3.18	3,265

(2) 골재

잔골재는 인천 앞바다에서 채취한 해사를 세척하여 사용하였으며, 굵은골재는 영종도에서 석산을 개발하여 얻은 부순돌이며, 잔, 굵은골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2 Physical properties of aggregate

Type	Items	G _{max} (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	F.M.	Organic impurities	Unit weight (kg/m ³)
Fine agg.	-	-	2.61	0.86	3.21	good	1,605
Coarse agg.	13	2.83	0.5	6.89	-	-	1,949

(3) 철근

직경 13mm 원형철근(SR30)의 표면을 No. 800 샌드페이퍼로 연마한 후 아세톤으로 깨끗이 닦아 양 단면을 에폭시로 코팅하였으며, 한쪽 끝은 통전용 전선을 연결하였다. 철근의 화학조성은 Table 3과 같다.

Table 3 Chemical composition of rebars (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn
0.24	0.26	0.95	0.016	0.008	0.03	0.04	0.01	0.02	0.0005

(4) 혼화제

목표 공기량을 확보하기 위하여 M회사의 리그닌 슬폰산 칼슘이 주성분인 표준형 AE감수제를 사용하였다.

(5) 양극재료

방식전류를 공급할 양극재료는 ASTM B 265의 Titanium Gr.1에 규정된 고순도 티타늄에 르테니움(Ru) 등의 백금계 금속산화물을 경화코팅한 메쉬를 사용하였으며, 메쉬의 특성은 Table 4와 같다.

3.2 실험조건 및 콘크리트 배합

콘크리트 속에 염화물을 함유할 경우 및 균열이 존재하는 경우의 전기방식의 효과를 알아보기 위하여 Table 5와 같이 콘크리트 배합시 NaCl을 0 및 10.5kg/m³ 혼입하였으며, 재령 28일까지 수중양생을 실시한 후 시험체 중앙부에 하중을 3점 재하하여 인위적인 균열을 주었으며 시험체 표면에서 측정된 균열폭은 0.2~0.25mm으로 나타났다. 또한 철근의 부식을 촉진시키기 위하여 시험체 뒷면에 염화물 용액을 채울 틀을 만들어 그 속에 3% NaCl 용액을 3일간 공급하고 용액을 제거한 다음 4일간 대기에 노출시켜 건조시키는 과정을 1사이클로 하는 salt-ponding을 실시하였다. 실험에 사용된 콘크리트의 배합은 Table 6과 같으며, 굵은골재의 최대치수는 시험체의 크기 및 형상을 고려하여 13mm로 정하였으며, 외부전원에 의한 방식은 salt-ponding 실시 2개월 후부터 실시하였다.

Table 5 Test conditions

혼입 염화물량 (NaCl, kg/m ³)	균열	방식	철근의 표면적(cm ²)**
0	무	무	816.8
	유	무	816.8
	무	유	816.8
	유	유	816.8
10.5*	무	무	408.4***
	유	무	816.8
	무	유	816.8
	유	유	816.8

* 부식을 촉진하기 위해 시멘트 중량의 3%를 혼입함.
 ** 사용된 4개 철근의 전체표면적.
 *** 2개의 철근만 사용됨.

Table 6 Mix proportion of concrete

G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
13	10±1	4.5	55	45	193	350	752	933	0.67

3.3 시험체의 제작 및 실험방법

(1) 시험체의 제작

Fig. 2와 같이 150×250×500mm 크기의 콘크리트 시험체에 표면에서부터 30mm 깊이에 직경 13mm의 원형철근을 묻었다. 철근 위 20mm 위치에 전류를 공급해 줄 티타늄메쉬를 고정한 후, 그 위에 다시 10mm두께로 콘크리트를 덮어 타설하였다.

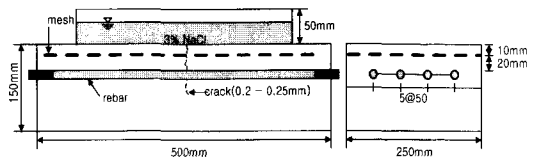


Fig. 2 Shape and size of concrete specimen

Table 4 Properties of anode mesh

Size (mm)	Catalyst	Thickness (mm)	Electric resistance (Ω/m)	Max current density in rebar(mA/m ²)	Max current density in concrete (mA/m ²)
25×51	Ru	1.0	0.027	107.6	32.3

(2) 방식전류의 공급 및 조절

외부에서 철근의 방식에 필요한 직류전류를 공급하기 위하여 정전압 직류전원 공급장치(LMS-3000)를 사용하였으며, 회로를 구성할 때 외부 전원의 (-)극에 철근을 (+)극에 메쉬전극을 연결하여 전류가 메쉬전극쪽에서 철근으로 흐르게 하였다. 방식대상 시험체에 1V미만의 미소 직류 전압을 가하고 각각의 시험체에 1k Ω (5W)의 가변저항기를 연결하여 방식전류를 조절 하였으며, 이때 철근의 방식을 위해 공급되는 전류량을 확인하기 위하여 전압계를 병렬로 연결한 전기방식의 회로도도 Fig. 3과 같다.

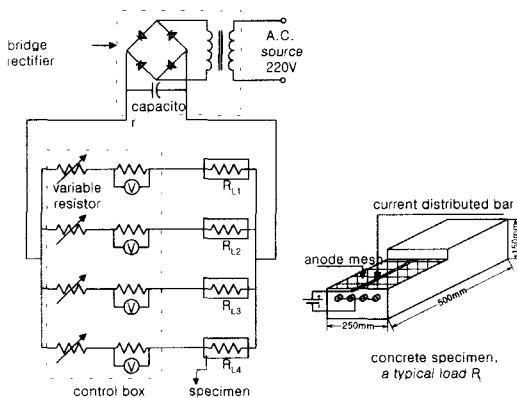


Fig. 3 Electrical schematic for supplying current to rebars in concrete specimen

(3) 철근의 자연전위 측정

ASTM¹⁴⁾에 근거하여 포화황산동전극과 입력저항이 큰 전압계(10M Ω 이상)를 사용하여 측정하였다.

(4) 방식전류밀도의 설정 및 복극량시험

방식전류밀도의 설정값은 철근의 부식상태나 조건에 따라 다른 값을 갖기 때문에 갈바노스태트를 이용하여 전위대 전류밀도곡선을 작성하고 이를 토대로 초기의 방식전류밀도를 결정하게 된다. 한편, 방식전류의 공급 후 경과시간에 따라 통전전위 또는 복극량이 변하게 되므로 일정시간 경과 후 복극량을 확인하기 위해 각각의 실험조건별로 전류공급을 차단한 직후의 전위와 차단 후 1, 2, 3, 4, 24시간에서 각각 철근의 전위를 측정하였다. 복극량은 전원차단 직후의 전위

(instant-off)와 4시간 후의 전위차로 구하였다.

(5) 철근부식 면적율과 부식부위의 단면감소량의 측정

실험이 끝난 후 콘크리트 중의 철근을 꺼내어 부식면적율은 녹발생부위를 트레이싱지로 스케치한 다음 이를 방안지를 이용하여 부식된 면적에 포함된 교점수 n 을 구하고, 철근의 전개도에 포함된 전체 교점수를 N 으로 하여 전체교점수에 대한 부식면적의 교점수의 비로 나타내었다. 또한 철근의 단면 감소량은 전체철근의 단면감소량이 아닌 철근표면에 발생된 부식부위 중 3곳에서 절단하여 부식이 발생하지 않은 영역의 단면으로부터 구한 평균단면 감소량으로 나타내었다.

4. 실험결과에 대한 고찰

4.1 염화물 혼입량 및 균열 유무에 따른 철근의 부식

염화물 혼입량과 균열의 유무에 따른 철근의 부식정도를 알아보기 위하여 콘크리트에 염화물량을 혼입하지 않고 균열이 없는 시험체와 균열을 발생시킨 시험체, 그리고 콘크리트 믹싱시 염화물을 10.5kg/m³ 혼입하고 균열이 없는 시험체와 균열을 발생시킨 시험체 4종류에 대해 외부전원에 의해 방식을 실시하지 않고 3% NaCl 용액으로 salt-ponding만을 실시하여 철근부식을 촉진시키는 동안 시험체 중의 철근의 자연전위를 14개월까지 측정하여 정리한 결과가 Fig. 4이다.

염화물을 혼입하지 않고 균열이 없는 시험체에 salt-ponding만을 실시한 경우의 철근의 자연전위는 12개월까지는 대체로 -234~-300mV로 나타나 철근의 전위가 부식이 불확실한 영역에 존재하는 반면에 12개월 이후부터는 철근의 자연전위가 -350mV이하로 낮아져 부식이 활발한 영역에 있음을 알 수 있다. 이는 콘크리트 시험체 제작시에 염화물을 혼입하지 않았으므로 salt-ponding에 의해 염화물이 콘크리트속에 침투확산되어 철근위치까지 도달하므로써 철근의 부동태피막이 파괴되어 부식이 활성화된 영향으로 추정된다. 또한 콘크리트 제조시 염화물을 혼입하지

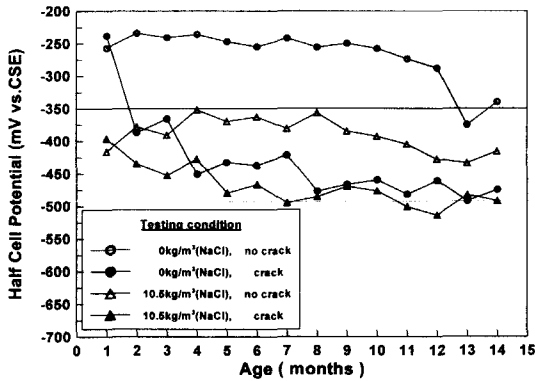


Fig. 4 Half-Cell potential of rebars according to ages

않고 균열을 발생시킨 후 salt-ponding에 의해 콘크리트 중의 철근이 염화물에 노출된 시험체를 살펴보면 철근의 자연전위는 초기에 -238mV로 부식이 불확실한 영역에 놓여 있었으나 salt-ponding에 의해 -336~-492mV 정도의 보다 낮은 전위를 나타내어 철근의 부식이 활발한 것으로 나타났다. 한편, 콘크리트 믹싱시 NaCl 10.5kg/m³을 혼입한 경우를 살펴보면 균열이 없는 시험체 중의 철근의 자연전위가 초기부터 -416mV로 나타나 염화물에 의한 부식이 진행되고 있고 것으로 나타났으며, 경과시간에 따라 다소의 전위변동은 있지만 전반적으로 -378~-434mV정도의 범위에 존재하였다. 또한 가장 가혹한 조건으로 콘크리트 믹싱시 염화물을 혼입하고 인위적으로 균열을 발생시킨 시험체 중의 철근의 자연전위는 혼입 염화물 뿐만아니라 salt-ponding의 반복에 의해 발생된 균열을 통해 침투한 염화물에 철근이 직접 노출됨에 따라 가장 낮은 전위를 나타내었다.

실험종료 후 콘크리트 속의 철근을 꺼내어 측정된 부식면적율과 평균단면감소량을 측정하여 정리한 결과를 Table 7에 나타내었다. 콘크리트 중의 철근에 발생된 부식정도를 조사한 결과 부식면적의 경우는 자연전위에 의해 평균된 부식상황과 거의 일치함을 알 수 있었으며, 균열이 없고 콘크리트에 염화물을 혼입한 시험체중의 철근의 부식면적은 염화물을 혼입하지 않은 시험체중의 철근에 비해 약 3배정도로 증가하였다.

특히 균열이 존재하여 직접 염화물에 철근이

Table 7 Corrosion area ratio and cross-section reduction of rebars

염화물량 (kg/m ³)	균열	부식면적율 (%)	평균단면감소깊이 (μm)*
0	무	5.0	9.9
	유	46.1	474.6
10.5	무	14.7	57.2
	유	61.0	623.4

* 평균단면감소깊이는 13mm를 기준으로 한 값임.

노출되는 시험체의 경우 약 9 ~ 12배 정도로 부식면적이 증가하였으며 콘크리트 내부에 혼입된 염화물량보다는 발생된 균열을 통해 염화물이 침투한 경우가 부식이 훨씬 큰 결과임을 알 수 있었다. 또한 염화물에 의해 발생된 부식부위의 단면으로부터 구한 평균 단면 감소깊이를 살펴보면 콘크리트 믹싱시 염화물을 혼입하지 않고 균열이 없는 시험체의 경우 평균 단면감소깊이는 약 9.9 μm였으나 콘크리트 믹싱시 염화물을 혼입하고 균열이 없는 경우는 57.2μm로 조사되었으며, 균열이 존재하여 직접 철근이 염화물에 노출되어 있는 경우 약 474.6μm이고 염화물이 혼입되고 균열이 존재하는 경우는 약 623.4μm로 나타났다.

일반적으로 콘크리트의 중성화에 의한 철근의 부식은 중성화 부위가 전체적으로 부식되는 균일 부식(uniform corrosion)의 특징을 보이는 반면, 염소이온에 의한 철근의 부식은 주로 공식(금속 표면의 작은 영역에서 비교적 빠른 속도의 국부적인 부식)의 형태를 띄게 된다. 철근부식에 있어 염소이온의 역할은 첫째, 철근의 부동태피막을 파괴하고, 둘째, 부동태피막의 파괴부위에서 용출된 철(Fe→Fe²⁺ + 2e⁻)이온이 물분자 중의 산소와 반응시 생성되는 수소이온과 염소이온이 결합하여 국부적으로 pH가 3~4인 강산성(強酸性)의 HCl을 형성하게 되며, 셋째, 철의 부식반응에 소모되지 않고 단지 부식반응의 촉매로써 작용하므로 위와 같은 반복작용에 의해 국부적으로 단면결손이 크게 된다. 따라서 상기의 실험 결과로 미루어 볼때 주로 인장을 받는 철근의 경우, 특히 균열이 존재하여 철근이 염화물에 직접 노출되는 경우 철근의 단면감소로 인한 인장강도의 저하가 클 것으로 판단되며, 프리스트레스트 콘크리트 구

조물의 경우는 급작스런 파괴의 원인이 될 수 있다.

4.2 방식전류밀도에 따른 철근의 복극량

미국 NACE(National Association of Corrosion Engineering)는 대기 중 콘크리트 구조물 중의 철근에 대한 방식기준으로써 전원 차단 직후부터 4시간까지의 복극량이 100~150mV 정도이면 만족할 만한 방식효과를 얻을 수 있다고 추천하고 있다^{15,16}. 따라서 외부전원에 의해 공급된 방식전류에 의한 복극량을 알아보기 위해 전위대 전류밀도 곡선으로부터 구한 최초 통전전류밀도를 포함하여 실험기간 동안 모두 3차례의 전류밀도를 조정하였으며, 각각의 전류밀도로 약 3개월간 통전을 실시한 후, 복극시험(depolarization test)을 행하였다. 콘크리트에 묻힌 철근의 부식계에서는 콘크리트의 세공용액이 전해질로써 작용하기 때문에 콘크리트의 저항에 의하여 방식전류의 공급시에 전압강하(IR drop)가 발생¹⁷하므로 방식전류의 공급시 측정된 철근의 전위는 방식전위(protection potential)가 아닌 통전전위(on potential)이다. 따라서 정확한 복극량을 산정하기 위해서는 Fig. 5와 같이 전압강하량(IR drop)을 제외한 전원차단 직후의 전위(instant-off potential)를 기준으로 전원차단 후 4시간에서 측정된 전위의 차를 복극량으로 계산하였다.

이와 같은 방법으로 각각의 실험조건별로 공급된 방식전류밀도에 따른 복극량과의 관계를 정리한 것이 Fig. 6~Fig. 9이다. 콘크리트 믹싱시 염화물을 혼입하지 않고 균열도 없는 시험체중의 철근에 대해 방식전류를 10.0, 8.5 및 5.8 mA/m²로 3차례 조정하여 실시한 복극시험 결과 복극량(Fig. 6)은 각각 358, 338 및 303mV이었으며, 염화물을 혼입하지 않고 균열이 존재하는 시험체중의 철근의 경우는 15.0, 12.0 및 8.4 mA/m²의 전류밀도로 방식전류를 공급하였을때의 복극량(Fig. 7)은 각각 255, 135 및 151mV로 측정되었다.

한편, 콘크리트 믹싱시 10.5 kg/m³의 NaCl을 혼입한 시험체중에서 균열이 없는 시험체의 철근에 전류밀도를 15.0, 9.3 및 9.1mA/m²로

변화시켜 측정된 결과 복극량(Fig. 8)은 각각 336, 262 및 243mV이었으며, 균열이 존재하는 경우(Fig. 9)는 20.0, 15.0 및 13.1mA/m²의 전류밀도로 각각 282, 267, 187mV의 복극량을 얻었다.

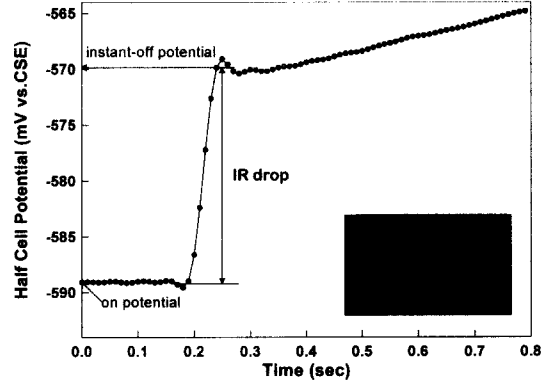


Fig. 5 An example of instant-off potential

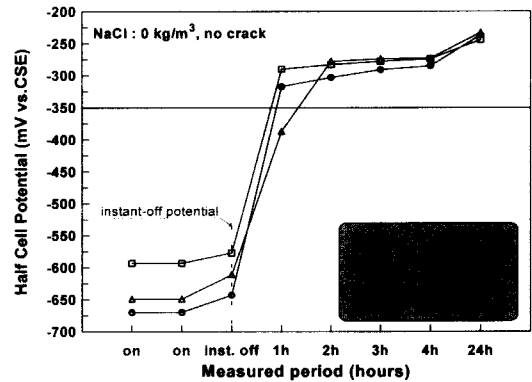


Fig. 6 Depolarization values with current density

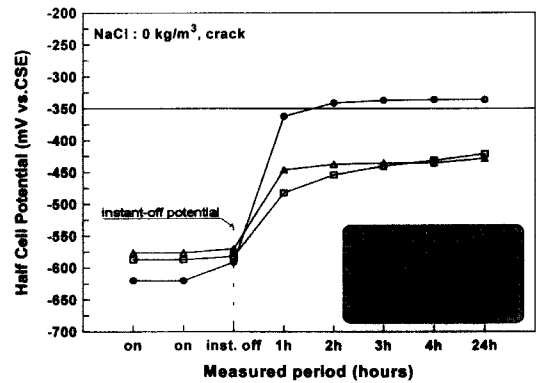


Fig. 7 Depolarization values with current density

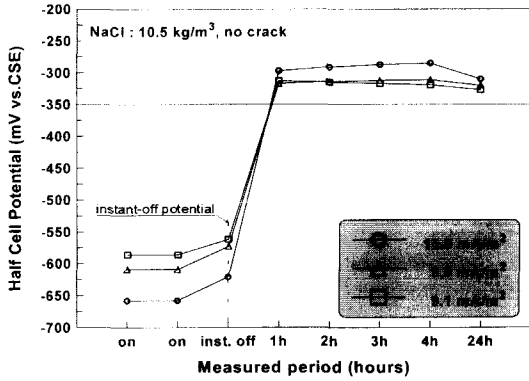


Fig. 8 Depolarization values with current density

이와 같이 각각의 실험조건에서 전류밀도를 달리하여 실시한 복극시험의 결과는 NACE에서 추천하고 있는 방식기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

4.3 외부전원법에 의한 철근의 방식효과

실험 종료후 공시체 중의 철근을 꺼내어 각각의 조건에 놓인 철근의 단면을 촬영하여 Photo 1~3에 나타내었으며, 외부전원법에 의한 전기방식을 적용한 시험체의 방식효과를 알아보기 위해 측정된 철근의 부식면적율과 부식부위의 평균단면 감소정도를 측정된 결과를 정리하여 Fig. 10 및 11에 나타내었다.

Photo 1은 균열이 없고 염화물을 혼입하고 있지 않은 철근의 종단면의 모습으로 부식축진에 의해서도 별다른 단면손실이 없음을 알 수 있으나 균열이 존재하여 철근이 직접 염화물에 노출

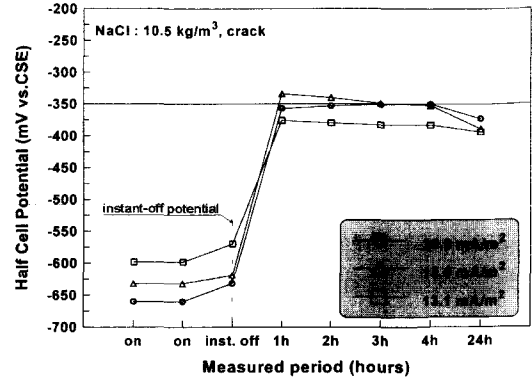


Fig. 9 Depolarization values with current density

되는 경우는 Photo 2와 같이 단면의 상부에 공식이 발생하여 단면감소를 확인 할 수 있었다. Photo 3은 콘크리트 믹싱시 염화물을 혼입하지 않고 균열이 있는 경우의 공시체에 1년간 외부전원법에 의한 전기방식을 적용한 경우의 철근 단면의 모습으로 거의 단면손실이 없음을 알 수 있다.

한편, 부식면적율의 경우 Fig. 10에서 알 수 있듯이 콘크리트 중에 염화물과 균열이 없고 salt-ponding만을 실시한 시험체에 대해 외부전원에 의한 전기방식을 실시함으로써 방식하지 않은 경우의 부식면적에 대해 약 34%의 부식면적을 줄일 수 있었으며, 균열이 존재하여 salt-ponding에 의해 염화물이 직접 철근에 접한 시험체의 경우는 부식면적이 약 63% 감소됨을 확인할 수 있었다. 또한 콘크리트 믹싱시에 10.5kg의 염화물을 함유한 시험체에서는 균열이 없는 경우는 55%, 균열이 있는 경우는 84%의 부식면적율의

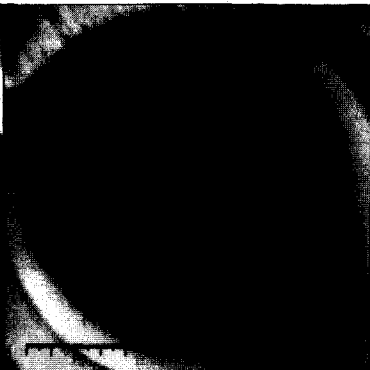
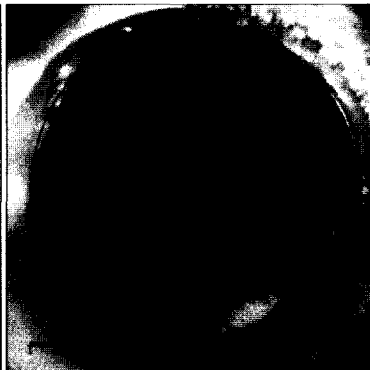


Photo 1 Cross-section of rebar(no crack)

Photo 2 Cross-section of rebar (crack)

Photo 3 Cross-section of rebar (crack, CP)

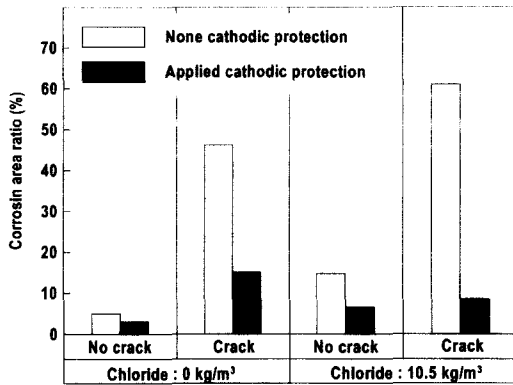


Fig. 10 Corrosion area ratio of rebars

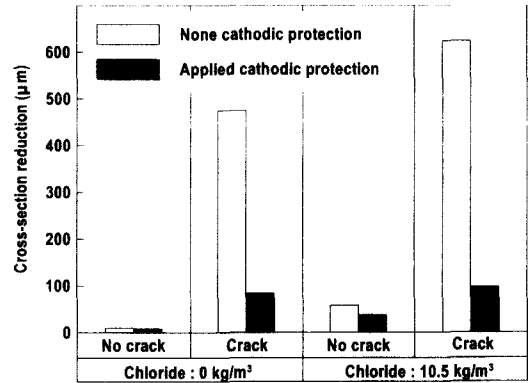


Fig. 11 Cross-section reduction of rebars

감소를 확인하였다.

한편, 부식부위의 3곳에서 측정된 평균 단면감소깊이의 경우는 Fig. 11에서와 같이 균열이 존재하여 salt-ponding에 의해 염화물이 직접 철근에 접한 시험체의 경우는 방식하지 않은 시험체에 비해 약 84~86%의 단면감소를 줄일 수 있었다. 그러나 균열이 없는 시험체의 경우 부식면적율과 마찬가지로 단면감소에 의한 방식효과가 크지 않은 것으로 나타났는데 이는 균열이 없는 조건이므로 보다 더 장기간의 촉진 실험 후의 결과를 비교한다면 뚜렷한 방식 효과를 확인할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

1. 콘크리트 중의 철근의 부식정도는 균열이 없으며 염화물을 혼입한 시험체중의 철근 부식면적은 염화물을 혼입하지 않은 시험체중의 철근에 비해 약 3배, 균열이 존재하여 직접 염화물에 철근이 노출되는 경우 약 9~12배 정도 증가하였으며, 평균 단면감소량은 균열이 있는 경우 약 475 μm정도이며, 염화물이 혼입되고 균열이 존재하는 경우 약 523 μm정도였다.

2. 염화물을 혼입하지 않고 균열이 없는 시험체의 방식전류가 5.8~10.0 mA/m²에서 복극량은 303~358 mV, 균열이 있는 경우 8.4~15.0 mA/m²의 방식전류로 151~255 mV의 복극량을 얻었다. 한편, 염화물을 혼입하고 균열이 없는 경우 9.1~15.0 mA/m²의 방식전류에서 복극량

243~336 mV, 균열이 있는 시험체에서 13.1~20.0 mA/m²의 방식전류로 187~282 mV의 복극량을 나타내었다.

3. 염화물과 균열이 없고 salt-ponding만을 실시한 시험체중의 철근을 외부전원에 의한 전기방식을 실시함으로써 방식하지 않은 경우와 비교해 부식면적율을 약 34% 정도 줄였으나, 균열로 인해 염화물이 철근에 침투한 시험체의 경우 약 63%, 염화물을 함유하였으나 균열이 없는 시험체의 경우 55% 및 균열이 있는 시험체는 약 84%의 부식면적율을 감소시키는 효과를 얻었다.

4. 철근의 단면 감소는 콘크리트 중의 혼입 염화물량과는 상관없이 균열이 없는 경우는 외부전원법에 의한 전기방식을 실시하여 뚜렷한 방식효과를 확인할 수 없었지만 균열이 존재하여 염화물이 직접 철근에 접한 시험체의 경우는 방식하지 않은 시험체에 비해 약 84~86%의 단면감소를 줄일 수 있었다.

이상의 연구결과 염화물 환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 부식억제를 위한 외부전원법의 방식효과는 확인 할 수 있었으나, 실제 해양환경하에 놓인 콘크리트 구조물 중의 철근방식에 적용하기 위해서는 복극량에 따른 철근의 방식 및 전류밀도에 따른 철근과 콘크리트의 부착응력 등에 대한 검토가 필수 불가결하므로 계속 실험연구가 진행중임을 밝혀 둔다.

감사의 글

본 연구수행을 위하여 실험용 재료를 제공해 주신 한국 엘가드(株)와 결과 정리에 도움을 주신 Miki Funahashi씨께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 文翰英, 金成秀, 柳在頌, 金洪三, "용병제 사용으로 인해 열화된 콘크리트 구조물의 내구성 조사", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, Vol.8 No.1, 1996. 5
2. 文翰英, 金成秀, 柳在頌, 金成燮, "해양환경하에 있는 콘크리트 구조물의 염해에 대한 고찰", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, Vol.8 No.1, 1996. 5
3. 天侯, 峰松, 川田, 高橋, "電氣防食法による港灣コンクリート構造物中の鋼材の防食", 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, 1990.
4. 堺, 大越, 石川, 武田, "積雪寒冷地における導電性塗料方式による鐵筋の電氣防食", 土木學會第46回年次學術講演會講演概要集, 第5部, 1991.
5. 大越, 堺, "콘크리트 구조물의 電氣防食", 開發土木研究所月報, No. 467, 1992
6. 武若耕司, "콘크리트 구조물における電氣防食法の現狀", 콘크리트工學, Vol. 30, No.8, p.16-27, 1992.
7. B. L. Martin and J. E. Bennett, "An Activated Titanium Mesh Anode for the Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Concrete.", Corrosion Paper No. 147, 1987.
8. Jan P. Skalny, "Materials Science of Concrete.", The American Ceramic Society. Inc, 1989.
9. ACI Committee 222, "Corrosion of Metals in Concrete.", ACI Journal, Jan.-Feb., 1985
10. "電氣防食の原理と技術", 住友セメント(株)技術資料
11. Mars G. Fontana, "Corrosion Engineering.", 3th, McGraw-Hill, p.453-454, 1986.
12. Denny A. Jones, "Principle and Prevention of Corrosion.", 2th, Prentice Hall, p.440-441, 1997.
13. H. H. Uhlig, "The Corrosion Handbook", Pennington, NJ:Electrochemical Society Inc., 1948.
14. ASTM C 876 "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.", V04.32, S4, p440-445, 1993.
15. NACE, "Standard Recommended Practice Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures.", NACE Standard PR 0290-90, 1990.
16. M. Funahashi, "Technical Review of 100mV Polarization Shift Criterion for Reinforcing Steel in Concrete", Corrosion p376-386, 1991
17. John P. Broomfield, "Corrosion of Steel in Concrete.", E&FN SPON, p143-147, 1997.

요 약

콘크리트 구조물에 균열이 생겨 물과 산소의 침투확산이 용이해 지거나 또는 외부로부터 염소이온과 같은 염화물이 침투확산되어 콘크리트 중의 철근까지 도달할 경우 및 콘크리트의 중성화가 철근위치까지 진행될 경우 철근의 부동태 피막은 파괴되어 부식이 급진전 되며 콘크리트의 박리 및 탈락현상이 수반될 뿐만 아니라 구조물의 내구성이 크게 저하된다.

본 연구에서는 콘크리트 중의 철근부식을 억제하기 위한 한 방안으로 적용되는 전기방식의 이론적인 고찰과 콘크리트 내부에 다량의 염화물을 함유시키거나 또는 균열을 발생시킨 시험체에 대하여 외부전원법을 활용한 실내실험을 실시하여 철근의 방식효과에 대해 고찰하였다. 외부전원법에 의한 전기방식을 실시하여 복극량을 측정된 결과 대상 시험체 모두 NACE의 방식기준을 만족하였으며, 부식면적율의 측정결과 34 ~ 84%, 단면감소의 경우 84 ~ 86%의 방식효과를 확인하였다.

(접수일자 1998.12. 8.)