

콘크리트중의 鐵筋腐蝕에 대한 非破壞診斷方法에 관한 研究

Non-Destructive Diagnosis on the Corrosion of Reinforcing Bar in Concrete

윤 재 환*
Yoon, Jai Hwan

요 약

염분을 함유한 철근콘크리트중의 철근부식에 관한 2년 촉진시험으로부터 콘크리트표면에서 측정된 자연전위값과 실제의 철근 부식상황과를 비교한 결과 철근의 부식상황을 자연전위법을 이용하여 비파괴적으로 진단하는 방법이 유효함을 알았다. 포화칼로멜전극을 사용했을 경우 -300mV 이하이면 부식이 발생하였으며 -200mV 이상이면 부식이 발생하지 않았다. 또한 부식공시체에 대한 휨강도시험도 행하였으며 중성화에 대한 검토도 행하였다.

Abstract

After two years accelerated corrosion test, the corrosion situation and half cell potential characteristics are compared and it is concluded that half cell potentials can be used to predict corrosion situations of reinforcing bars in concrete. Bending strength of concrete specimens and carbonation of concrete are also investigated.

Keywords : sea-sand, corrosion of reinforcing steel, natural electrode potential

1. 서 론

최근의 신도시 건설등 건설붐에 따라 콘크리트용 재료로서 사용되는 골재중 잔골재의 부족현상이 심화되고 있다. 특히 잔골재의 부족을 충당하기 위하여 구둑이 용이한 해사의 사용이 매년 증가되고 있는 가운데, 해사중의 염분에 대한 세정이 제대로 이루어지고 있지않아 철근부식으로 인한 내구성의 저하가 염려되고 있으며 언론에 보도됨에 따라 크게 사회문제화되고 있는 실정이다. 콘크리트내의 철근은 그 주위에 산화피막의 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 의 부동태피막이 형성되어 부식으로부터 보호되고 있으나 해사에 의한 염분, 중성화등으로 인하여 부식

이 발생하며 부식이 발생하면 철근체적의 팽창으로 인하여 피복콘크리트의 균열, 박리, 탈락, 철근단면적의 감소등 내구성이 현저하게 감소하는 것이 일반적이다.

현재 건설되고 있는 방대한 양의 철근콘크리트 구조물이 수년 이내에 세정하지 않은 해사의 염분으로 인하여 막대한 보수비가 소요되고 내구성이 상실된다고 가정할 때 국가적 재산의 손실은 엄청난 양에 달할 것이다.

이에 저자는 내구성에 관한 연구보고^(1,3)를 계속하여 수행해 왔으며 본고는 콘크리트중의 철근부식을 비파괴적으로 진단검사할 수 있는 방법에 대해서 기존보고³⁾의 후속실험결과이다. 콘크리트중의 철근부식 상황을 비파괴적으로 진단하는 것은 구조물의 내구성 진단을 위하여 중요하며 구조물의 유지, 관리, 보수대책의 선정등 중요하다.

* 정회원, 수원대학교 건축공학과 부교수, 공박

2. 실험의 개요

본 실험은 콘크리트중의 철근부식에 관한 전기화학적 진단방법에 관한 연구로서 2년간 추진한 시험체에 대한 자연전극전위법 측정을 비롯하여 다음과 같은 실험을 수행하였다.

- ① 철근 부식과 자연전위와의 관계.
- ② 부식시험체의 휨강도.
- ③ 콘크리트의 중성화 및 압축강도시험.
- ④ 콘크리트내의 염분함유량 분석.

부식측정을 위한 철근콘크리트 공시체는 15×15×55 cm의 휨실험용 공시체를 이용하여 그림1과 같이 ϕ 13 mm 철근 2대를 삽입한 뒤 철근피복 두께를 2cm로 하여 제작하였다. 철근은 ϕ 13mm의 마봉강(SS 20)을 400번 및 600번의 샌드페이퍼로 표면을 연마한 뒤 아세톤으로 표면을 세정하였다. 또한 철근 양단면에서의 부식을 방지하기 위하여 소정의 구간을 에폭시코팅 처리하였다.

또한, 콘크리트의 배합등 콘크리트의 조성이 부식에 미치는 영향을 파악하기 위하여 콘크리트의 배합은 표1에 나타낸 바와 같이 3종류의 배합으로 하였다.

시험체 조건은 표1의 각각의 배합에 대하여 NaCl 무첨가의 공시체(이하 플레인 공시체라 칭하고 N45, N55, N65 등으로 표기)와 Cl이온이 3kg/m³이 되도록 NaCl을 콘크리트혼합수에 첨가하여 제작한 공시체(이하 염분 함유 공시체라 칭하고 C145, C155, C165 등으로 표기) 및 방청제의 효과를 파악하기 위하여 상기의 염분첨가 공시체에 방청제(NR-1900)를 소정량(3000cc/m³) 첨가한 공시체(이하 방청제첨가 공시체라 칭하고 IN45, IN55, IN65 등으로 표기)를 각각 제작하였다. 동일 조건의 공시체를 3개씩 제작하여 전체 27개를 제작하였다.

사용 골재는 강자갈, 강모래이며, 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고 전배합에 AE감수제(Lignal-AE)를 첨가하였다. 콘크리트 공시체 탈형후 7일간 수증양생을 행한 후 60℃, 100%RH의 항온항습조에서 부식을 촉진하였으며 소정 재령에서 전기화학적 실험을 실시하였다.

콘크리트중에 삽입된 철근 각각에 대하여 그림2와 같이 콘크리트 표면에서 10cm 간격으로 5포인트씩 칼로멜전극을 사용하여 전기화학적 특성치(자연전위(E_c))를 측정하였다.

소정 재령에서 전기화학적인 측정을 행한 공시체는 휨강도시험을 한 후 콘크리트를 파괴하고 내부철근을 꺼내어 부식상태를 관찰하였다.

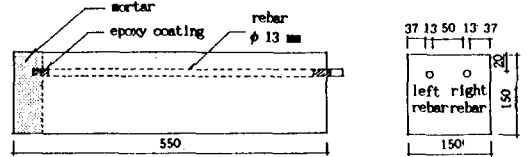


Fig. 1 Details of the test specimens(mm)

2.1 자연전극전위법의 측정 및 원리

콘크리트중의 철근부식에 관한 비파괴적 측정 방법의 종류와 특징에 대해서는 이미 보고⁽³⁾한 바와 같이 자연전위법, 분극저항법, 콘크리트 전기저항법 등이 있으나 본 시험에서는 기기의 간편함, 데이터의 신뢰성등 기존의 실험결과를 고려하여 자연전극전위법을 사용하여 철근의 전위값을 측정하였다. 자연전극전위를 이용한 측정방법은 ASTM C876에 규정되어 있으며 판정기준 및 측정방법은 표2 및 그림2와 같다.

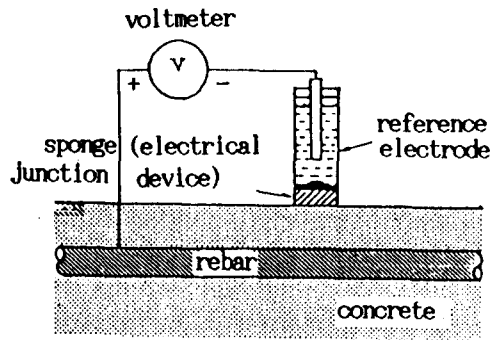


Fig. 2 Saturated calomel half cell circuitry

Table. 1 Concrete mix design

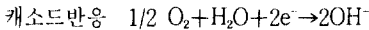
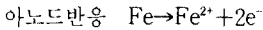
Water-cement ratio(%)	Slump (cm)	Gmax (cm)	Sand-aggregate ratio(%)	Mix proportion by weight(kg/m ³)				AE-WR agent (cx0.15%) (cc)
				Cement	Water	Fine agg.	Coarse agg.	
65	21	20	42.6	269	175	809	1089	403.5
55	21	20	40.2	322	177	744	1106	483.0
45	21	20	37.3	407	183	658	1106	610.5

Table. 2 Guideline according to ASTM 876

Range of corrosion potentials E	Probability of corrosion
$-200\text{mV} < E$	No reinforcing steel corrosion at 90% probability
$-350\text{mV} < E < -200\text{mV}$	Uncertain
$E < -350\text{mV}$	Reinforcing steel corrosion at 90% probability

* Milli voltages listed are referenced to the copper-copper sulfate electrode

콘크리트중의 철근의 부식반응은 그림3과 같이 아노드(anode) 반응과 캐소드(cathode) 반응으로 이루어지며 다음식과 같이 표현된다.



아노드(anode)부의 전위를 E_a , 캐소드(cathode)부의 전위를 E_c 라 하면 그림3과 같이 전기화학적 반응이 진행하기 위해서는 같은 속도(전류)로 반응하지 않으면 안되며 그림4의 양 분극곡선의 교점에서의 전위 및 전류가 자연전위(또는 부식전위) 및 부식전류가 된다. 금속의 부식량은 Farady의 법칙에 의해 부식전류에 비례한다. 그림4와 같은 분극곡선을 고려하면 콘크리트중의 철근의 부식속도는 철근표면으로의 용존산소의 확산도달속도에 지배된다고 생각되므로 산소공급조건에 의한 캐소드분극곡선이 거의 동일하다고 가정하면 Cl⁻의 확산도달에 의해 철근의 부동태피막이 파괴되어 아노드분극곡선이 변화함으로써 생기는 부식속도증가에 대한 영향이 캐소드분극곡선의 변화에 의한 영향보다 훨씬 큰 경우에는 전위만으로써 상당한 부분을 추정할 수 있다. ASTM C 876에 있어서의 평가는 이러한 이유에 기인한다고 생각할 수 있다. 즉 그림4에서 캐소드분극곡선이 일정한 경우 전위가 낮으면 낮을수록 부식전류가 크게 된다.

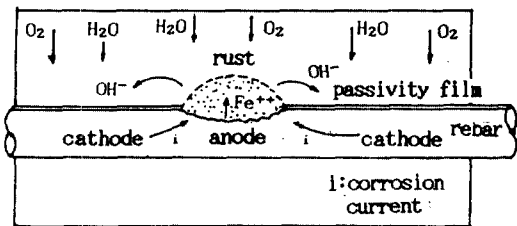


Fig. 3 Corrosion cell of reinforcing bar in concrete

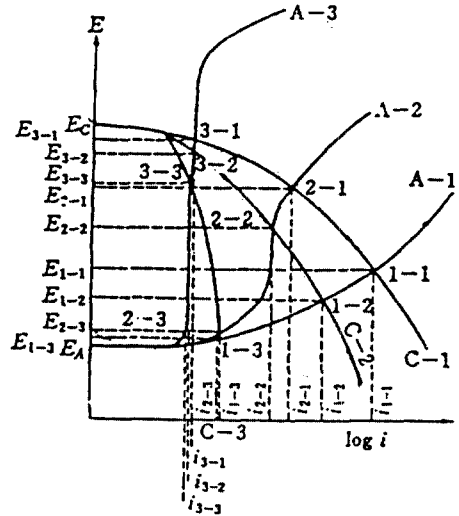


Fig. 4 Relationship between anodic and cathodic polarization curve and corrosion current and potential

2.2 부식시험체의 휨강도 시험

전위측정이 끝난 시험체를 해체하여 철근을 꺼내기 전에 중앙점하중에 의한 휨강도를 시험하였다. 중앙점에서의 처짐량과 철근의 부식과피에 의한 밀림량을 1/100 mm 다이알계이지 2개로 측정하여 그 평균값을 구하였다.

2.3 콘크리트의 중성화 및 압축강도시험

휨강도시험 후 피복두께 부분을 걷어내고 철근을 꺼낸 후 콘크리트 까낸 단면에 대하여 중성화 시험을 하였다. 표면의 먼지, 가루등을 제거한 후 페놀프탈레인 1%의 알코올 용액을 스프레이 한 후 탄산염화한 부분은 전연 변색하지 않으나 알칼리부분(건전부)은 적자색으로 착색함으로써 변색하지 않는 부분의 두께 즉 중성화깊이를 측정하였다.

2.4 콘크리트의 염분함유량분석

경화콘크리트의 염분함유량과 콘크리트 혼연시 투입한 염분량과의 관계를 검토하기 위하여 각 시험체에서 콘크리트 분말을 채취하여 0.15mm 이하 체로 전부 통과시킨 시료에 대하여 ion-chromotography에 의한 가용성염분량

을 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 자연전위의 측정

재령 2년에서 측정된 자연전위값을 철근의 부식도와 같이 그림5, 6, 7에 나타내었다. 그림5, 6, 7은 물시멘트비가 각각 45%, 55%, 65%인 경우의 플레인 공시체, 염분 함유공시체 및 방청제첨가공시체의 동일공시체 1개중 2개의 철근에 대하여 재령2년에서 콘크리트표면에서 측정된 자연전위(E_c : 단위mV VS SCE(Saturated Calomel Electrode))를 mV로 약기와 재령2년에서의 철근의 부식상태를 동시에 표시한 것이다. 철근의 부식상태도는 철근에 발생한 부식을 펼쳐서 그린 전개도로써 검은 부분은 두껍고 치밀한 검은 색깔의 녹이며 백색부분은 건전부분을 나타낸다. 동일공시체상의 2개의 철근은 그림1과 같이 좌측철근, 우측철근으로 구분한다.

3.1.1 플레인콘크리트 공시체

염분을 함유하지 않은 플레인콘크리트에 있어서 전위값과 부식과의 관계를 보면 재령2년에서의 전위값은 N55의 우측철근이 $-200 \sim -250$ mV인 것을 제외하고 전부 -100 mV내외이다. 이것은 또한 철근에 거의 부식이 발생하지 않는 것과 관련되고 있다. 이 결과는 이미 보고⁽³⁾한 바와같이 -200 mV 이상에서는 부식이 거의 발생하지 않는 결과와 일치하고 있다. 이 전위값에서는 철근주위에 부동태피막이 형성되어 부식이 방지되고 있다는 것을 알 수 있다.

그러나 물시멘트비가 증가하여 N65인 경우는 철근하부에 근소한 부식이 있으며 이것은 불리딩현상에 의하여 철근하부에 수막층이 형성된 것과 관련되어 있다. 이처럼 물시멘트비가 증가하면 부식이 증가하는 이유는 물시멘트비가 커질수록 콘크리트의 조직이 치밀하지 못하게 되어 부식에 필요한 산소 및 수분의 확산이 용이하게 되기 때문이다.

3.1.2 염분함유 공시체

부식촉진시험 2년후 결과에 의하면 철근이 대부분 부식하고 있다는 것을 알 수 있다. 재령 2년에서의 전위값을

보면 모든 측정개소에서의 전위값이 -300 mV이하로서 철근부식과 잘 대응하고 있다.

이것은 전위값이 -300 mV를 경계로 부식여부를 판단하는 전보⁽³⁾의 결과와 일치하고 있으며 또한 일본국토개발기술연구센터에서 제안한 자연전위측정에 의한 콘크리트중의 철근부식진단방법(안)의 기준과도 일치하는 결과이다. 물시멘트비에 의한 부식의 차는 현저하지 않다.

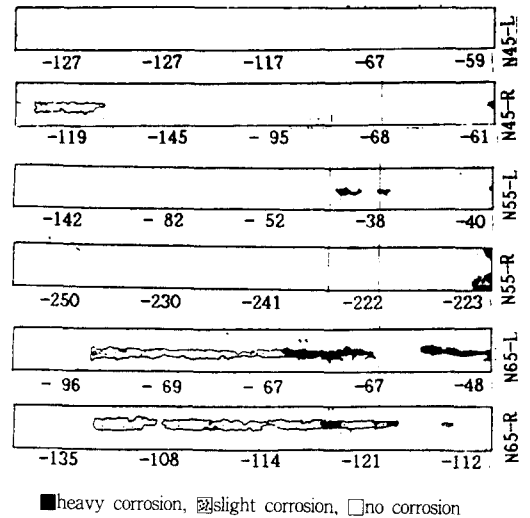


Fig. 5 Measured values of natural electrode potential and corrosion map of reinforcing bars(concrete without NaCl)

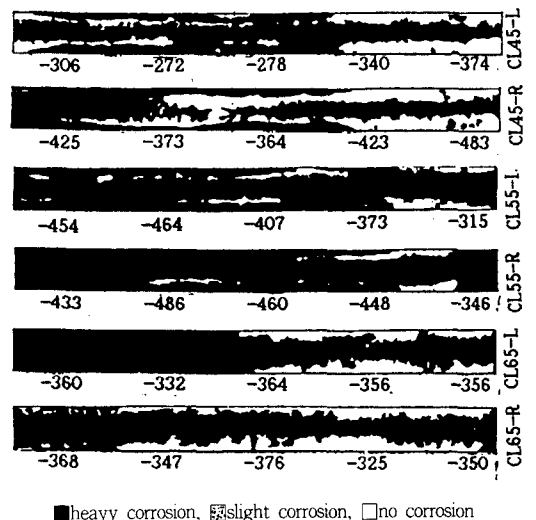


Fig. 6 Measured values of natural electrode potential and corrosion map of reinforcing bars(concrete without NaCl)

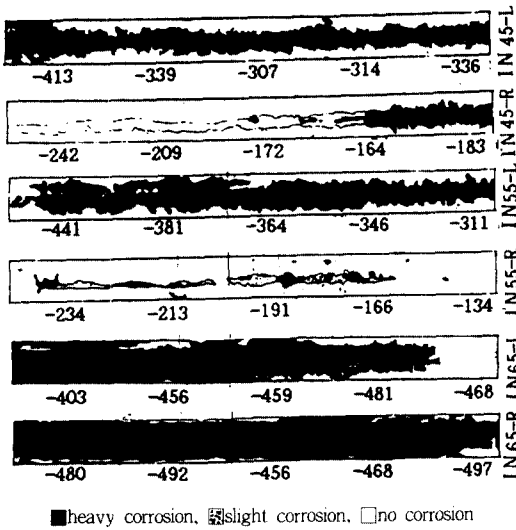


Fig. 7 Measured values of natural electrode potential and corrosion map of reinforcing bars (concrete without NaCl and inhibitor)

3.1.3 방청제 첨가공시체

방청제 첨가공시체의, 전위값은 두가지로 구분되어 -200mV 내외인 경우와 $-300\text{mV} \sim -500\text{mV}$ 인 경우로 나눌 수 있다. 이것은 플레인 콘크리트 및 염분 함유공시체와 동일한 전위값이며 부식상태도 이에 잘 대응하고 있다. 즉 방청제를 첨가시에는 부분적으로 부식을 일으키는 경우와 일으키지 않는 경우가 있어 국부적으로 부식상태가 상이하다. 이것은 방청제의 효과가 균일하지 않다는 것을 나타내며 전보(3)와 동일한 경향이다. 또한 방청제를 첨가한 경우에도 물시멘트비가 증가하면 전면적으로 부식이 증가함을 알 수 있다.

3.1.4 부식면적율과 자연전위와의 관계

그림8에 부식면적율(부식면적/철근 전표면적)과 자연전위값과 관계를 전보(3)의 결과와 같이 나타낸다. 전위값은 한대의 철근에 대해 재령 2년에서 측정된 전위값의 평균값이다.

자연전위가 -200mV 보다 크면 거의 부식을 발생하지 않으나 -300mV 이하가 되면 부식이 발생한다는 것을 알 수 있으며 자연전위를 측정함으로써 비파괴적으로 부식상태를 판단하는 것이 가능하다는 것을 나타낸다.

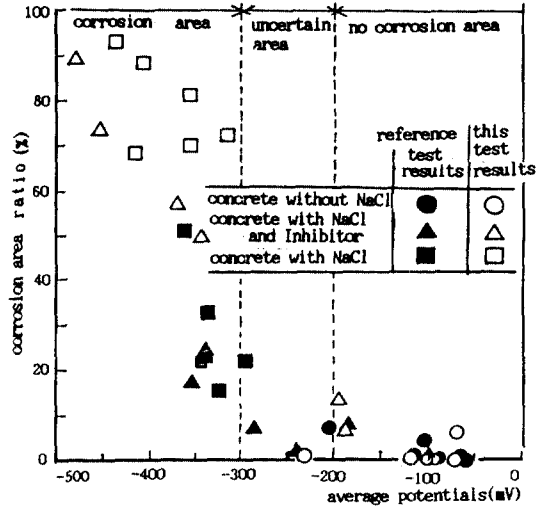


Fig. 8 Relationship between corrosion area ratio and measured values of electrode potential

3.2 부식시체체의 휨강도

철근부식으로 인하여 콘크리트보시체체의 휨내력의 저하가 어느 정도인가를 파악하기 위하여 그림9와 같이 휨시험을 행하였다.

파괴하중 및 보의 하중-처짐곡선은 표3 및 그림9와 같으며 철근부식을 일으킨 시험체의 휨강도가 부식하지 않는 시험체보다 2배정도 강하며 방청제 첨가공시체는 1.5배 정도의 내력을 보였다. 이와 같은 결과는 보시험체에 사용한 철근이 원형철근으로 정착을 위한 후크를 설치하지 않는 결과 부식으로 인하여 콘크리트와의 부착강도가 증가한 때문이라고 생각한다. 이와같이 부식으로 인하여 내력이 상승한 경우는 외국에서도 보고(6)되고 있으나 이것은 일시적인 현상으로 부식으로 인한 철근단면결손이

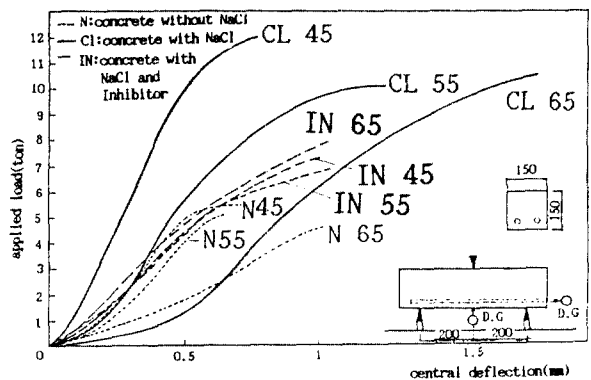


Fig. 9 Load-deflection curves for the specimens

Table. 3 Compressive strength and other properties of concrete specimens

Type of specimens	Compressive strength(kg/cm ²)		Flexural strength (kg/cm ²)	Depth of Carbonation (mm)	Water soluble salt Cl ion(kg/m ³)
	28 days	91 days			
N 45	364.4	363.1	5.57	1	0.043
N 55	-	305.1	5.13	2-3	0.108
N 65	229.7	210.2	4.67	2-3	0.112
CL 45	328.8	340.1	12.0	0-1	3.137
CL 55	251.7	301.9	10.17	1	2.399
CL 65	126.0	205.5	10.62	2-3	2.473
IN 45	172.4	255.7	7.35	2	3.671
IN 55	144.6	181.3	7.0	3-4	2.884
IN 65	103.4	133.8	8.0	3-4	2.926

커지면 내력이 감소할 것은 명백하다.

3.3 압축강도 및 중성화깊이

재령 28일, 91일에서의 압축강도를 표3에 나타내었다. 플레인 공시체와 염분함유공시체는 대개 동일한 값을 보이거나 방청제 첨가공시체는 상당한 강도저하를 보이고 있다.

또 콘크리트의 중성화깊이는 표3에 나타낸 바와 같이 그차가 근소하기는 하나 중성화가 작은 순서대로 열거하면 염분함유공시체<플레인콘크리트공시체<방청제첨가공시체의 순으로 커지고 있다. 또한 동일 종류의 공시체에서는 물시멘트비가 증가함에 따라서 중성화깊이가 커지는 경향을 보였다.

3.4 염분함유량 분석결과

NaCl을 Cl이온이 3kg/m³이 되도록 혼합수에 첨가하였으나 경화콘크리트중의 가용성 Cl이온은 처음 첨가한 양과는 상당히 변동한다는 것이 표3에 나타나 있다. 이것은 시멘트의 C₃A 성분과 염분과의 반응에 의해 Friedel 씨염이 생겨 시멘트중량의 약 0.4%까지 고정된다는 사실과 콘크리트내에서의 염분농도가 수분의 증발과 이동으로 부분적으로 변동하여 콘크리트표면에서의 농도가 높아질 가능성이 있다는 것으로부터 추측할 수 있다.

4. 결 론

본 실험의 범위내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 철근의 자연전위와 부식상황은 잘 대응하고 있으며 철근의 부식상황을 자연전위법을 이용하여 비파괴적

으로 진단하는 방법은 유효하다.

- 2) 칼로멜전극으로 측정된 자연전위값에 의한 부식의 판정기준은 다음과 같다.

자연전위(mV)	콘크리트중 철근부식가능성
-200(E)	부식이 발생하지 않음
-300(E) < -200	불확정
E < -300	부식이 발생하고 있음

- 3) 콘크리트의 중성화 순서는 근소하기는 하나 염분함유공시체<플레인콘크리트공시체<방청제첨가공시체의 순으로 커지는 경향이 있다.
- 4) 콘크리트경화체내의 가용성염분량은 시멘트화합물과의 반응, 콘크리트내부에서의 농축과 이동으로 처음 함유한 염분량과는 상당히 변동한다.

참 고 문 헌

1. 윤재환, "콘크리트중의 조건을 모델화한 수용액중에 있어서 철근의 부식과 전위측정," 대한건축학회 논문집, 5권5호, No.25, 1989, 10. pp.187-192.
2. ASTM C 876, "Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete"
3. 윤재환외, "콘크리트중의 철근부식에 관한 전기화학적 진단방법에 관한 연구," 대한건축학회논문집, 6권3호, 1990, 6. pp.281-289.
4. 社団法人日本コンクリート工學協會, "コンクリート構造物の腐食防食に關する試験方法および規準(案)"
5. 武若耕司, "コンクリートの非破壊檢査方法(原理と手法)-鋼材腐食-, 콘크리트工學, Vol.27, No.3, March, 1989, pp.69-74.
6. 武若耕司, "コンクリート中の鐵筋腐食がRC部材の力學的性狀に及ぼす影響, 第6回コンクリート工學年次講演

會論文集, 1984.

7. 編輯委員會編, “コンクリートの非破壊検査に関する規格. 規準.” コンクリート工學, Vol.27, No.3, March, 1989, pp.94-99.

8. Mars G.Fontana, “CORROSION ENGINEERING,” McGraw-Hill, International Edition.

9. Mitsutaka Hayakawa, “Repair of concrete structures,” CE299 Report, University of California, Berkely

(접수일자 : 1992. 1. 20)