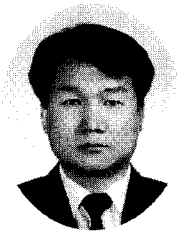


특집

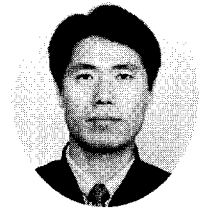
|| 국내 콘크리트 구조물의 내구성 설계 ||

내염해 설계 방법 및 방식 대책

- Durability Design and Countermeasures against Chloride-Induced Corrosion of Concrete Structures -



정영수*



배수호**

1. 머리말

콘크리트 속의 내재염분이 허용값을 초과하면 매입된 철근은 부식을 일으키고, 이로 인해 철근에 의한 피복콘크리트에 축 방향 균열의 발생으로 구조물의 내구성이 저하되며, 심한 경우에는 철근의 공식(孔蝕)에 의한 단면 감소로 구조물의 내하력 저하 등이 발생하는데 이것을 염해라 부른다.

정부가 추진하고 있는 수도권 신도시, 고속철도 및 서해안 고속도로 건설 등의 대규모 공사로 골재의 수요가 급증하고 있으며, 특히 천연산 잔골재인 하천사의 부족 현상은 심각한 실정이다. 이로 인해 대체 잔골재로서 해사의 사용이 매년 급증하고 있으며, 이에 따라 규정에 맞지 않은 미세척 해사가 출하되고 있는 실정이다. 미세척 해사를 철근 콘크리트 구조물에 사용할 경우 철근의 부식 촉진으로 콘크리트의 균열 발생 등 조기 노후화 현상이 나타나 콘크리트 내구성을 크게 저하시킨다. 한편, 동절기에 제설이나 동해 방지를 목적으로 교량 슬래브 혹은 도로상에 살포되는 제빙제는 주성분이 염화칼슘으로 그것이 콘크리트 속에 허용값 이상으로 침투될 경우 철근 부식 촉진으로 콘크리트의 내구성에 나쁜 영향을 미친다. 또한, 해양 환경, 즉 해수중, 비말대, 또는 해상 대기 중에 위치한 콘크리트 구조물은 시공시 양질의 하천골재나 제염된 해사를 사용해도 구조물 주변의 비례염분

이 직·간접으로 콘크리트 속으로 침투되어 그것이 허용값을 초과하면 철근 부식 및 콘크리트 균열을 유발하는 염해를 일으킬 수 있다.

따라서, 철근 콘크리트 구조물의 내구성 저하로 사회간접자본 시설의 내용년수가 단축되면 국가 경제의 막대한 손실은 물론이고, 내구성 저하로 인한 기존 구조물 철거시 발생하는 건설 폐기물로 인한 환경 훼손도 극심하므로, 본고에서는 최근 사회적으로 문제시되고 있는 염해 환경하에 있는 철근 콘크리트 구조물의 내염해 설계 방법 및 방식 대책을 제시하고자 한다.

2. 철근 부식 메커니즘

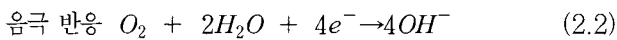
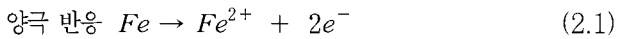
부식의 전기화학적 정의(electrochemical definition)는 금속이 전기화학 반응에 의하여 전자를 잃고 양이온으로 되는 현상으로서 이러한 반응은 애노드 반응(anodic reaction)과 캐소드 반응(cathodic reaction)으로 구성된다. 금속의 산화 반응은 전자를 생산하며, 환원 반응은 전자를 소비하는 일을 한다. 즉, 양극에서는 산화 반응이 일어나면서 금속이온이 분해되어 용액 속으로 녹아나며, 음극에서는 전자를 소비하면서 양극의 산화 반응을 돕게 되며, 산화와 환원 반응은 항상 동시에 일어나게 된다. 콘크리트 중의 철근 부식 역시 전기화학적 반응에 의하여 일어나며, 콘크리트에 묻힌 철근의 부식계는 전기화학적 산화(oxidation)가 일어나는 양극(anode)과 전기화학적 환원(reduction)이 일어나는 음극(cathode), 전기전도체, 그리고 전해질로써 콘크리트 중의

* 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

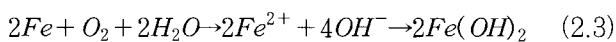
** 정회원, 안동대학교 토목환경공학과 조교수

세공용액으로 구성된다. 콘크리트 세공(細孔)용액은 포화 수산화칼슘용액과 그 속에 약간의 수산화나트륨과 수산화칼륨을 함유하고 있어 용액의 pH가 약 12.5 이상이기 때문에 보통 콘크리트 중의 철근은 부식하지 않는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 콘크리트는 강한 알칼리성 환경을 가지고 있기 때문에 철근은 그 표면에 부동태 피막이라는 20~60 Å 두께의 얇은 산화 피막(γ -Fe₂O₃·nH₂O)이 형성되어 부식 작용으로부터 보호되고 있다. 그러나, 알칼리 성분의 용출과 탄산화에 의해서 콘크리트 중의 알칼리성이 저하되거나 콘크리트 중에 각종 유해 성분이 혼입되면 철근은 활성태로 되어 쉽게 부식하게 된다. 철근의 부동태 피막을 파괴하는 유해 성분으로는 Cl⁻, Br⁻, I⁻, SO₄²⁻ 등이 있다. 이들 중에서 염소이온의 작용이 가장 활발하며, 염소이온은 콘크리트 중에 혼입되는 기회가 많기 때문에 콘크리트 중의 철근 부식에 가장 유해한 이온이다.

콘크리트 중의 철근에 생성된 부동태 피막의 파괴는 염화물이나 탄산화에 의한 알칼리성의 저하에 의하여 발생하며 <그림 2.1>과 같이 철근 중에 부식전지가 형성된다. 이때 철이 이온화하여 산화된 양극(anode) 반응과 산소가 환원하는 음극(cathode) 반응이 식 (2.1) 및 (2.2)와 같이 진행된다.



철근의 부식 반응은 식 (2.1) 및 (2.2)의 양 반응을 조합한 반응으로 다음 식 (2.3)과 같이 Fe(OH)₂이 철 표면에 분출된다.



이 화합물은 용존산소에 의해 산화되어 Fe(OH)₃이 된다. 더욱이 이 화합물은 물을 잃어 FeOOH 또는 Fe₂O₃의 붉은 녹이 되며, 또한 일부는 산화 불충분 상태로 Fe₃O₄가 되어 철근 표면에 녹 층을 형성한다.

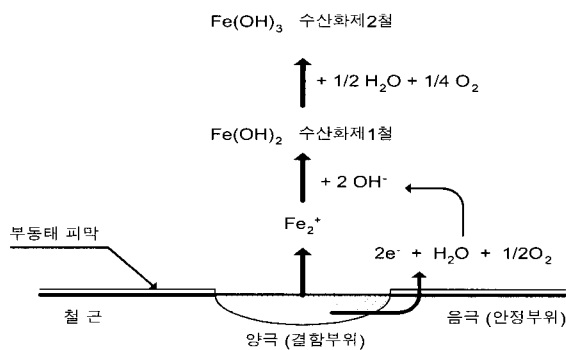


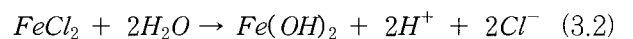
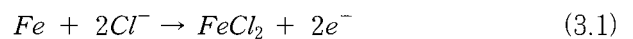
그림 2.1 철근의 부식 반응 메커니즘

콘크리트 중의 철근이 부식하여 생성된 녹은 원래 체적의 2~6배 정도로 팽창하고, 그 팽창압에 의해 피복 콘크리트에 균열이 발생한다. 균열이 발생하면 산소와 수분의 공급이 용이하게 되어 철근의 부식은 더욱 촉진되고 균열은 가속화된다. 또한 콘크리트와 철근의 부착성이 저하되고 콘크리트의 강도가 저하되는 문제점도 발생하며 최악의 경우에는 피복 콘크리트가 박리되고 구조물의 성능이 현저하게 떨어지게 된다.

3. 염해에 의한 철근 부식

염화물이 콘크리트 중으로 유입되는 경우는 해사나 배합수 등에 의하여 직접 콘크리트 중에 유입되는 것과 해양 환경하의 비래염분이나 해수의 직접적인 접촉 또는 동절기 용빙제의 살포 등으로 인하여 염화물이 콘크리트 중으로 침투, 확산되는 것으로 나눌 수 있다.

염화물에 의한 부동태 피막의 국부적인 파괴에 의하여 야기된 애노드와 캐소드 면적의 분리는 부식 형태에 상당한 영향을 미친다. 애노드 지역에 인접한 콘크리트의 철이온 농도가 증가하여 pH는 떨어지고, 음극 반응의 산물인 수산화이온의 생성은 철의 캐소드 지역 부근에서 일어난다. <그림 3.1>에서와 같이 애노드에서 국부적인 pH의 강하 때문에 FeCl₂의 가용성 화합물이 형성될 수 있으며, 이 화합물은 애노드로부터 퍼져나가서 부식이 계속될 수 있다. 또한 양극에서 발생된 수소이온은 철근 표면의 pH를 낮춤으로써 부식에 영향을 미치게 된다. 활발한 부식 반응이 일어나고 있는 철근 부위에서의 pH는 언제나 4.8~6.0 사이의 범위라고 한다. 이들의 부식 반응은 다음과 같다.



위 식에서 볼 수 있듯이 염소이온은 반응에 참가하지 않고 촉매 역할을 수행함으로써 끊임없이 부식 반응이 진행된다.

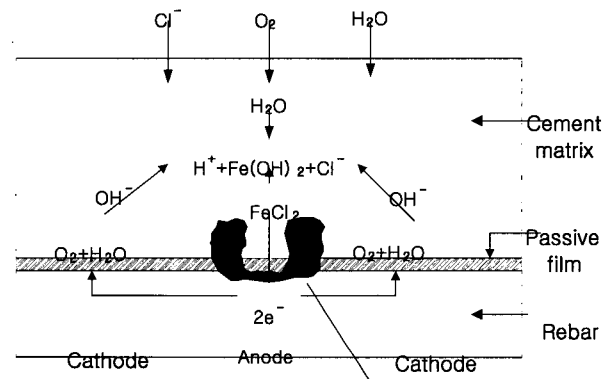


그림 3.1 염소이온에 의한 콘크리트 중의 철근 부식 메커니즘

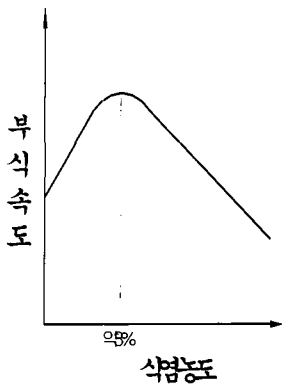


그림 32 식염(NaCl)수용액
중에서의 철의 부식 속도

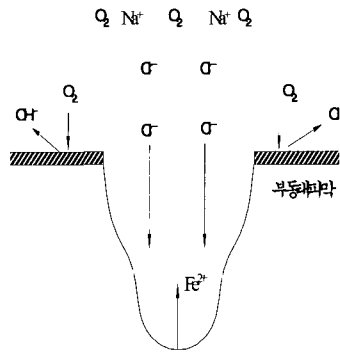


그림 33 공식 기구

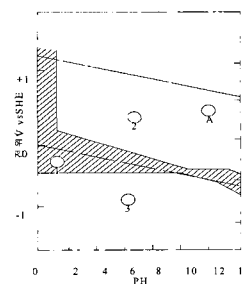
식염수 중에서의 강제부식의 경우에는 <그림 3.2>에 나타내는 바와 같이 비교적 식염농도가 작은 경우에는 부식농도의 증가에 따라 부식 속도는 증대한다. 그러나, 해수 중에서의 염소이온량과 거의 같아지는 3% 정도에서 부식 속도는 최대로 되고, 그 이상이 되면 감소한다. 3% 이상에서의 부식 속도 감소에 대해서는 Cl⁻량이 증가함에 따라 캐소드 반응에 필요한 수용액 중의 용존산소량이 감소됨에 따른 것으로 여겨지고 있다. 애노드 반응, 캐소드 반응의 식을 보면 알 수 있는 바와 같이 Cl⁻는 반응식에 포함되어 있지는 않아 부식 그 자체에 필요한 것은 아니므로 반응에 필요한 산소가 감소되면 부식 속도가 감소되는 것은 명백하다. 그러나, 이 용존산소량의 감소는 Cl⁻량이 3% 이하인 경우라도 생기게 된다. 3% 이하에서의 부식 속도의 증대에 대해서는 ① 부식 초기에서의 수산화제1철의 생성 방식과 표면을 피복한 상태가 농도에 따라 변화하는 것에 따른다. ② Cl⁻가 초기 피막을 국부적으로 재용해하는 작용이 크기 때문이다. 즉 Cl⁻은 부식 반응을 진행시키는 촉매적인 작용과 수용액의 전기저항을 감소시킴에 따른 전기화학반응속도의 상승 효과를 해수농도 정도까지에서는 현저하게 일으키고 있기 때문이다. 염분이 있는 경우, 일반적으로 강재의 부식 속도는 상승되지만, 또 하나의 특징은 공식(孔蝕)을 일으키는 경우가 있는 점이다. 공식 그 자체의 정의에 아직 명확한 것은 없고 일반적으로 공식(孔蝕)을 생성하고 그 공(孔)은 원형에 가까운 것으로 여겨지고 있다. 공식(pitting corrosion)은 예를 들면 <그림 3.3>과 같은 기구로 생성되는 것으로 설명된다.

공식의 바닥에서는 철이 용해되는 애노드 반응을 일으키고, 캐소드 반응으로서는 산소 환원 반응이 비교적 건전한 표면의 부동태 피막상에 생긴다. 더욱이 애노드 반응에 의해 생긴 철이온의 일부는 외부로 확산되고 용존산소로 산화되면 용해도가 극히 작은 제2철수산화물을 공식 입구에 침전시켜 다른 Fe²⁺의 외부로의 확산을 방해하거나 한다. 이 때문에 공식내의 양이온과 음이온의 밸런스를 유지하기 위해 수용액으로부터 Cl⁻가 공식 내로 침입해, Cl⁻량이 점점 증대됨과 더불어 Fe²⁺의 가수분해에 의한

pH의 저하 등에 의해 공식은 진전되게 된다.

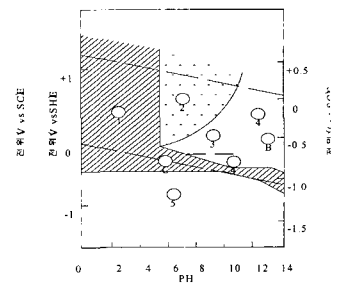
부동태 피막이 파괴된 경우, 공식으로까지 발전할 것인가의 여부는 환경 조건에 크게 좌우된다. 용존산소와 OH⁻와 같은 부동태 피막의 생성을 도와주는 성분이 많은 경우에는 파괴는 곧 복구될 가능성이 높은 데 반해, Cl⁻와 같은 파괴 성분이 존재하면 부동태 피막은 재생하기 어렵게 된다.

위와 같이 철근 부식 반응은 전기화학적 반응으로서 그 특징을 이용해 부식 경향을 pH와의 관계로 분석하는 것으로서 전위-pH도가 있다. Cl⁻를 포함하지 않는 경우와 포함하는 경우의 전위-pH도의 예를 <그림 3.4>, <그림 3.5>에 나타내었다. Cl⁻를 포함하지 않는 액 중에서는 넓은 부동태 영역이 존재함에 반해 Cl⁻를 0.01 mol(355 ppm) 포함하는 수용액 중에서는 pH(6에서는 부동태 영역은 없어지고, pH>6에서는 공식 및 불완전 부동태 영역이 나타나는 것을 볼 수 있다. Cl⁻량이 0.01 mol보다 큰 경우에는 더욱이 공식 영역은 오른쪽 아래 방향으로 확대된다. 따라서, 전위-pH도에 의해 부식 가능성을 검토할 수 있으며, 콘크리트 내에서도 측정된 pH와 전위에 의해 경향을 판정할 수 있다. 또한, 공식이 일단 발생한 후에는 공식 주위의 전위는 저하된다.



①전면부식 ②부동태
③불활성(=전기방식)

그림 34 철의 전위-pH도
(Cl⁻를 포함하지 않는 경우)



①전면부식 ②공식 ③불완전
④완전부동태 ⑤불활성(=전기방식)

그림 35 철의 전위-pH도
(Cl⁻=355 ppm을 포함하는 경우)

4. 염해에 의한 성능 저하 과정

<그림 4.1>은 철근 콘크리트 구조물의 염해에 의한 성능 저하 과정을 나눈 것으로, 잠복기, 진전기, 가속기 및 성능 저하기의 4단계는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 제I기 (잠복기) : Cl⁻가 피복 콘크리트 중으로 침투하여 강제부근에 축적되는 과정으로, 그 기간은 주로 콘크리트 중에서 Cl⁻의 확산 속도에 의해 지배된다. 따라서 콘크리트 재료에 함유된 Cl⁻, 예를 들면 해사 중 Cl⁻량이 많은 경우는 잠복기는 존재하지 않고 바로 진전기로 들어간다.
- 제II기 (진전기) : 강재가 Cl⁻에 의해 부식되기 시작, 부식 생성물(녹)이 축적되어 그 팽창압력(약 42 MPa)에 의하여 피복 콘크리트에 균열이 발생하는 과정으로, 부식 속도

및 이에 의하여 정해진 진전기의 기간은 주로 용존산소량에 지배되고, 부수적으로 수분의 공급량 및 콘크리트의 전기 저항 영향도 받는다.

- 제Ⅲ기(가속기) : 강재에 의한 균열(축 방향 균열)의 발생에 의하여 부식 속도가 촉진되어 피복 콘크리트의 박리, 박락이 발생하는 과정으로, 지배 요인은 제Ⅱ기(진전기)와 거의 같으나, 하중 작용 등의 영향도 받는다. 축 방향 균열이 발생하여도 그 직후는 정적 내하력은 저하되지 않으나, 공식 등에 의해 높은 응력의 반복 하중이 작용하는 경우는 내하력 및 인성의 저하가 발생하기 시작한다.
- 제Ⅳ기(성능 저하기) : 강재부식이 진전, 단면적의 감소가 현저하게 되고, 내하력의 저하가 현저하게 되는 과정으로, 지배 요인은 제Ⅲ기(가속기)와 거의 같다.

이들의 구분을 지배하는 주된 요인으로서 Cl^- 및 산소의 확산이 있는데, 전자는 부식의 발생, 후자는 부식의 속도를 크게 지배하는 요인으로 되고, 염해에 의한 철근 콘크리트 구조물의 내용년수 또는 잔존 내용년수를 검토하는 데 극히 중요한 항목이다. Cl^- 및 산소의 확산 문제는 종래 여러 가지 방법에 의하여 취급되어 왔고, 여러 가지 보고가 있는데, 콘크리트 중의 겉보기 확산계수는 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 정도로, 지금까지 알려진 것보다 매우 빠르게 확산·침투되어 축적되는 것이 밝혀졌다. Cl^- 의 축적에 의하여 일단 부식이 발생되고 그것이 계속적으로 진행되는 환경하에서는 부식에 의한 축 방향 균열이 발생하는데 소요되는 기간이 산소의 확산 등으로부터 추정할 경우, 피복두께가 50mm로 되어도 불과 2개월 정도밖에 안되는 경우가 있는 등 Cl^- 의 축적 기간에 비하여 짧게 될 가능성이 높다

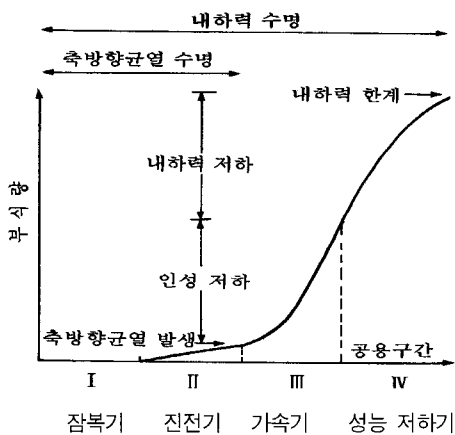


그림 4.1 염해에 의한 성능 저하 과정

콘크리트 구조물의 내용년수에 대해서는 여러 가지 정의가 가능한데, 비교적 안전측이긴 하나 합리적인 내용년수 설정 방법은 부식에 의한 축 방향 균열의 발생까지, 즉 잠복기와 진전기의 합으로써 하는 것이다. 그러나 산소의 확산에 의해 지배되는 진

전기가 Cl^- 의 확산에 의해 지배되는 잠복기에 비하여 짧게 되는 수가 많다. 이 경우 잠복기, 즉 Cl^- 가 부식발생 임계량(예를 들면 1.2 kgf/m^2)에 달할 때를 내용년수로 하는 방법도 있다.

5. 내염해 설계 방법

철근 콘크리트 구조물의 내구성 설계는 설계 성능 저하 인자에 하여 계획 내용년수 기간 내에는 허용 성능 저하 상태를 넘지 않도록 하는 것을 목표로 한다. 따라서 철근 콘크리트 구조물의 내구성을 향상시키기 위해서는 설계·시공·유지관리 계획을 종합적으로 검토하는 것이 중요하며, 내구성 설계시에는 콘크리트 강도, 피복 두께, 등을 검토해야 한다. 철근 콘크리트 구조물의 계획 내용년수를 보증하기 위한 내구성 설계는 콘크리트의 품질뿐만 아니라 유지관리를 고려한 내구성 확보 계획을 작성하여 이것에 기초하여 내구설계를 실시하여야 한다. 내구설계는 성능 저하 인자에 대하여 계획내용년수 기간 내는 허용할 수 있는 성능 저하 상태를 넘지 않도록 하는 것을 목표로 구조물 형상, 균열 제어 방법, 부재 단면, 배근·피복 두께, 마감재, 콘크리트 재료 및 배합, 시공 사양, 품질관리·유지관리의 방법을 정하는 것이라고 할 수 있다.

현재 일반적인 철근 콘크리트 설계·시공규준에는 체계적인 내구설계는 실시되어 있지 않고 내구성 목표에 대해서도 명확히 되어 있지 않다. 내구설계를 실시하려면 구조물의 내용년수 기간이나 성능 저하 모드에 대하여 일정한 목표를 설정할 필요가 있다. 또한, 성능 저하 인자가 다르면 성능 저하 모드 및 속도가 다르기 때문에 일정 목표를 만족하기 위해서는 성능 저하 인자에 의해 설계 및 시공의 사양을 변화시킬 필요가 있다. <그림 5.1>은 내구설계의 순서와 내구성 평가 개념을 나타낸 것이다.

5.1 염화물 이온 침투량에 의한 방법

염해에 대한 철근 콘크리트 구조물은 내구성상의 약점이 발생하지 않도록 계획하며 필요한 유지관리·보수가 용이하도록 계획한다. 염해에 대한 철근 콘크리트 구조물의 내구성 향상 대책은 설계 내용년수 이내에는 허용 성능 저하 상태를 넘지 않은 것을 확인하여야 하며, 필요시 마감재 등을 시공하여 내구성 향상을 도모한다. 또한, 사용 기간 중에는 유지관리 및 보수가 용이하도록 재료·시공 측면을 면밀히 검토한다.

염해에 대한 내구성 설계시 내구설계 허용 균열 폭, 물-시멘트 비 제한, 콘크리트 압축강도 제한, 단위 시멘트량 제한, 피복 두께 제한값을 기본으로 하여 일차적인 설계를 실시한다. 염해에 대한 내구성 설계시 적용하는 규정은 각종 규준에 입각하여 정하며, 그 예는 다음과 같다.

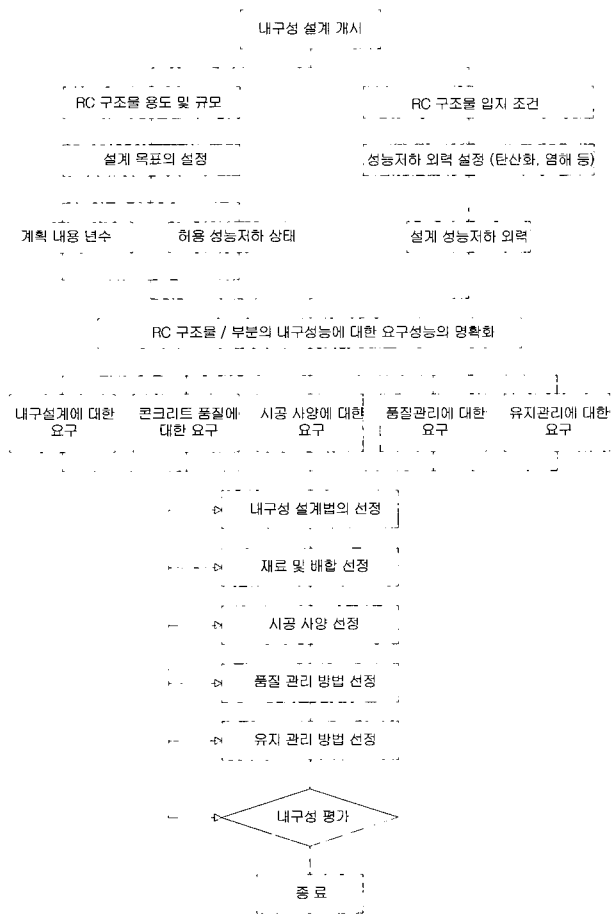


그림 5.1 내구설계 순서 개념

- 1) 건물 옥외면은 해수나 해염입자가 부착하기 어렵고 또한 체류하기 어려운 형상으로 한다
- 2) 염해 지역에서의 내구성 확보를 위한 설계 허용 균열 폭은 0.15 mm를 표준으로 한다.

염해에 대한 내구설계시 피복 두께에 대한 검증은 일반(30년), 표준(65년), 고내구성(100년)을 목표로 한 설계 내용년수 기간에 허용 성능 저하 상태를 넘지 않도록 하는 것을 기본으로 할 수 있다. 이의 검증은 일반적으로 염해에 대한 내구성 설계 수법으로 사용되고 있는 Fick의 확산 법칙을 이용하며, 확산계수 D, 콘크리트 표면 염소이온량 C_0 는 구조물 위치 실태 조사 또는 신뢰할 수 자료를 근거로 해야 한다.

염소 이온의 침투를 받는 콘크리트 중에 있어서 철근 부식이 발생하지 않는 것을 구조물의 내구성 한계 상태라고 한 경우, 그 내구성 설계는 콘크리트 중에 침투하여 강제 위치에 축적한 염소 이온 농도를 산출하고 그 값이 강제 부식 발생 한계농도 이하인 것을 검토하여야 한다. 철근 위치에서 염소이온 농도 산정은 확산이론에 기초하여 사용하는 것이 일반적이다. 이온 확산은 물질 내에서 이온의 농도차가 구동력으로 되어 일어나는 현상이며 콘크리트 내의 액상 중의 이온 농도차에 의한 확산 현상으로서 취

급하는 것이 가능하다.

단, 염소 이온은 그 일부가 시멘트 수화 생성물이나 시멘트 성분 에 고정 혹은 흡착되며 이 현상은 탄산화 등 액상의 pH 변화 에도 영향을 받는다. 이 때문에 본래는 이러한 현상을 고려한 상태에서 콘크리트 중의 염소이온의 확산 현상을 파악하는 것이 바람직하다. 그러나, 실제로 있어서는 액상의 염소이온 존재 상황 과 그 이동을 적절히 평가하고 그 농도와 강제 부식과의 관계에 대하여 정량적인 검토를 실시한 예는 그다지 많지 않다.

염소이온의 침투 상황의 추정에 관하여 지금까지 비교적 많이 실시된 수법은 콘크리트 단위용적 중의 전염화 물량을 겉보기 염소이온 농도로 하여 콘크리트 중의 분포를 단순화한 확산 방정식의 해로서 구하는 방법이 있다. 콘크리트 중의 염소이온 침투 해석에서는 매크로(macro)적인 1차원 침투 해석이 많고 일반적으로는 식 (5.1)과 같은 확산 방정식(Fick의 제2식)을 사용하는 경우가 많다. 대표적인 염소이온 침투 확산 모델로는 Tuutti(1982), Saetta et al.(1993), Nagesh et al.(1998)가 제안한 모델이 있다.

$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = D_{ab} \frac{\partial^2 C_c}{\partial x^2} \quad (5.1)$$

여기서,

D_{ab} : 콘크리트의 겉보기 염소 이온 확산계수 (cm^2/s)

C_c : 콘크리트중의 염분량 (kgf/m^3)

x : 콘크리트 표면에서의 거리 (cm)

t : 시간 (s)

식 (5.1)의 엄밀해는 어느 일정 조건하에서는 식 (5.2)와 같다.

$$C(x, t) = C_0(1 - \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \quad (5.2)$$

여기서,

$C(x, t)$: 철근위치 x 의 시각 t 에 있어서 염화물 이온 농도
혹은 염화물량

C_0 : 콘크리트 표면에 있어서 염소 이온농도 혹은 염화물량
(kgf/m^3)

D : 콘크리트중의 염소 이온 혹은 염화물의 겉보기 확산계수

따라서, 콘크리트 표면 염분량 및 확산계수가 부여되면 해(어느 시각, 어느 위치에 있어서 염분량)가 얻어진다. 단, 식 (5.2)에서 얻어진 엄밀해는 확산계수가 위치적으로 일정하고 사용 개시시에 콘크리트 중의 혼입 염분량은 0인 경우에 한정된다. 또한, 이 식은 콘크리트 표면의 염소이온 농도가 항상 일정하다는 가정 하에 계산한 일차원의 Fick 확산 방정식의 값이다. 이 해석

법은 실 구조물의 염해 성능 저하 평가에 자주 사용되고 있으며 해석 결과와 철근 부식 상황과의 비교 데이터도 다수 축적되어 있다. 따라서 철근 위치에 있어서 염소이온 농도의 설계치를 윗식을 이용하여 산정한 다음 이것을 철근 부식 발생 한계농도와 비교하는 것에 의해 사용 기간 중 철근 부식 발생이 생기지 않도록 하는 것이 염해에 대한 내구성 설계의 기본이다.

콘크리트의 염소 이온의 침입에 대한 저항성을 평가하기 위한 지표는 확산계수의 설정이다. 배합설계에 있어서 사용되는 확산계수의 예측값에 대하여 폭로실험이나 실 구조물의 조사 결과에 의해 미리 콘크리트 중의 염화물량 분포가 얻어진 경우에는 식 (5.2)의 콘크리트 표면의 염소이온 농도와 확산계수를 변수로 하여 근사 해석을 실시하여 콘크리트 표면 염소이온 농도와 확산계수를 각각 결보기값으로 산정하여 이 결보기 확산계수를 예측값으로서 사용해도 좋다. 또한, 기존의 실적이나 연구 성과를 참고로 하여 예측치를 결정하는 경우는 그 예측의 정도나 콘크리트의 품질 차이 등을 고려하여 적당한 값을 사용하는 것이 가능하다. <그림 5.2>는 기설 콘크리트 구조물 중의 염화물량 분포 조사 결과에서 구한 결보기의 확산계수와 물-시멘트비의 관계를 나타낸 것이다. 또한, 이들 결과를 기초로 작성한 콘크리트의 결보기 확산계수와 물-시멘트비의 상관 회귀식은 식 (5.3) 및 (5.4)와 같다.

① 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우

$$\log D = 4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47 \quad (5.3)$$

② 고로 시멘트를 사용한 경우

$$\log D = 19.5(W/C)^2 + 13.8(W/C) - 5.74 \quad (5.4)$$

여기서,

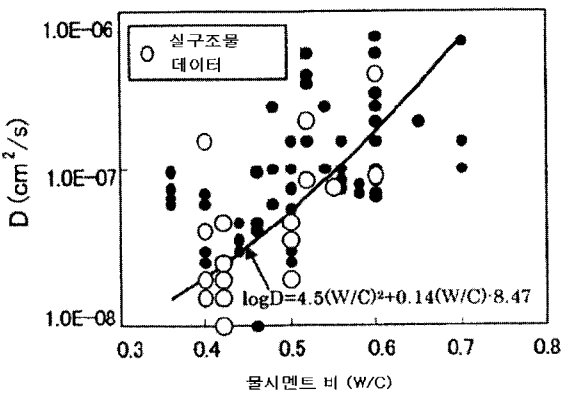
D : 콘크리트의 결보기 확산계수 (cm^2/sec)

W/C : 물-시멘트비

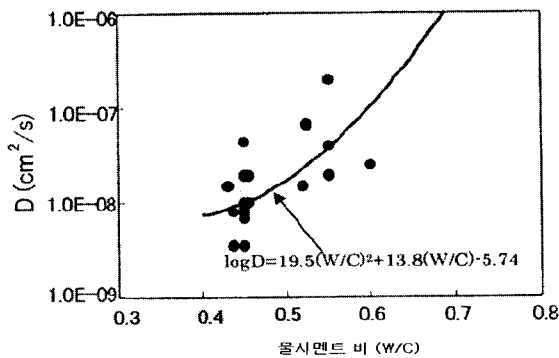
따라서, 콘크리트 확산계수는 실측 데이터를 기초로 하여 사용하는 것이 바람직하다. 이 외에 확산셀을 이용하여 직접 콘크리트의 확산계수를 예측하는 방법도 있으나 본질적으로 실측치와는 상당한 차가 발생하고 있어 이의 적용에는 한계가 있으므로 확산계수의 선정에 있어서는 안전계수와 실측치를 고려하여 설계자가 합리적으로 선정할 필요가 있다. 콘크리트 중의 염소이온의 침투량을 예측하는 경우에는 콘크리트 표면의 염소이온 농도 C_0 를 구조물의 환경 조건마다 설정할 필요가 있다. 해안가나 비래 염분 입자의 부착에 의해 콘크리트 중에 염화물이 공급되는 경우에는 콘크리트 표면의 염화물량이 항상 일정하다고 해석하는 것은 적절하지 않다. 그러나 콘크리트 표면 염화물량을 변화시킨 해석이나 표면에의 염화물의 부착을 고려한 해석을 시행하기 위해서는 여러 가지 파라메타를 설정할 필요가 있고 실제에 있어서는 데이터가 충분하지는 않다.

특히, 해안가에서 바닷물이 접촉하고 건습 반복되는 경우 및 제빙제를 살포하는 경우는 콘크리트 표면 염화물 농도가 매우 클 가능성이 있으므로 별도로 적절한 값을 설정할 필요가 있다.

염화물 침투 예측식을 이용하여 내구성 설계를 실시할 경우 철근 표면에 있어서 철근 부식 발생 한계염소이온 농도의 설정이 필요하다. 일반적으로 콘크리트 중의 강제 부식 한계염소이온 농도에 관하여 기존의 연구를 정리하면 전체적으로 $0.3 \sim 1.2 \text{ kgf/m}^3$ 정도의 농도를 한계값으로 하는 경우가 많다. 그러나 구체적으로 살펴보면 ① 배합시 염화물이 혼입된 공시체에 의한 촉진 실험 결과에서는 $0.3 \sim 0.6 \text{ kgf/m}^3$ 에서 부식한다는 연구가 많으며, ② 실제 환경의 폭로 실험 데이터에 의하면 $1.2 \sim 2.4 \text{ kgf/m}^3$ 로 평가되는 경우가 많다. 또한, 동결융해를 받는 콘크리트 구조물에 있어 콘크리트 중의 염소이온이 농축되는 것을 고려하여 보정계수가 필요하다. 또한, 상시 해수 중에 있는 콘크리트 구조물에 있어서는 콘크리트에 산소 공급이 억제되기 때문에 강제 부식 속도가 지연되는 것이 알려져 있다. 따라서, 이 점을 고려하여 상황에 따라서는 총염소이온량의 한계값을 2.4 kgf/m^3 정도까지 증가시킬 수 있다. 한편, 실구조물의 조사 혹은 폭로 실험등에 의해 구조물을 설치하는 환경에 있어서 강제 부식 발생 한계농도를 미리 명확하게 알게된 경우는 그 값을 사용하는 것이 가능하나, 이 경우 염소이온 농도는 콘크리트 중의 전염소이온량으로 표시한다.



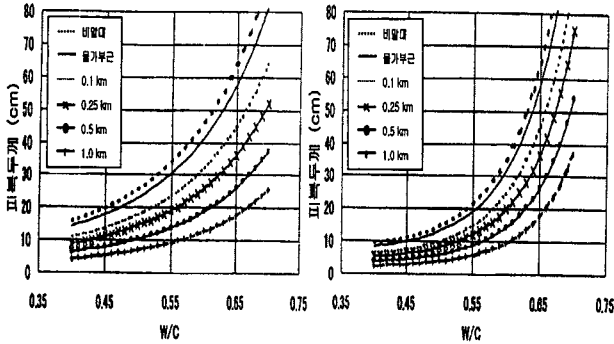
(a) 보통 포틀랜드 시멘트



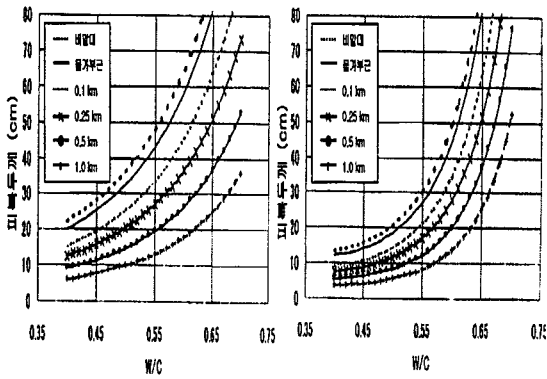
(b) 고로시멘트 B종

그림 5.2 물-시멘트비와 염소이온 확산계수와의 관계

이상을 참고로 하여 실제 설계 내용년수에 따라 물-시멘트비 별로 철근이 부식하지 않는 피복두께를 계산한 예는 <그림 5.3>과 같다.



(a) 실제 내용년수 50년의 경우



(b) 실제 내용년수 100년의 경우

그림 5.3 염소이온 침투에 따른 강재 부식 발생 (최소 피복 두께와 최대 물-시멘트비와의 관계)

5.2 콘크리트의 밀실성과 피복 두께를 기초로 한 방법

콘크리트의 밀실성과 피복 두께는 본래 동시에 취급할 필요가 있는데, 그것은 콘크리트가 밀실화되어도 피복 두께가 작으면 강재 표면의 Cl⁻량은 빠르게 증대할 것이고, 콘크리트가 밀실화되지 않아도 피복 두께가 크면 Cl⁻량이 증대되는 시기는 지연될 것이기 때문이다. 일반적으로 외관상으로는 Cl⁻가 피복 콘크리트 중에 침투·축적되는 것을 확산과정으로 해석할 수 있고, Cl⁻의 콘크리트 중으로의 침투성상을 확산계수에 의해서 검토할 수 있다(<그림 5.4>). 예를 들면 콘크리트의 Cl⁻ 확산계수 및 콘크리트 표면의 Cl⁻량을 요인으로 하고, 한계 Cl⁻량을 시멘트의 0.4%로 하여 구조물의 수명 추정을 한 모노그래프가 제안되고 있다(<그림 5.5>). 여기서 임계 Cl⁻량을 기초로 한 정량적 표현을 시도한 기본적인 확산 과정은 식 (5.5)와 같다.

$$C(x, t) = C(o) + [C(s) - C(o)] \cdot \left\{ 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \quad (5.5)$$

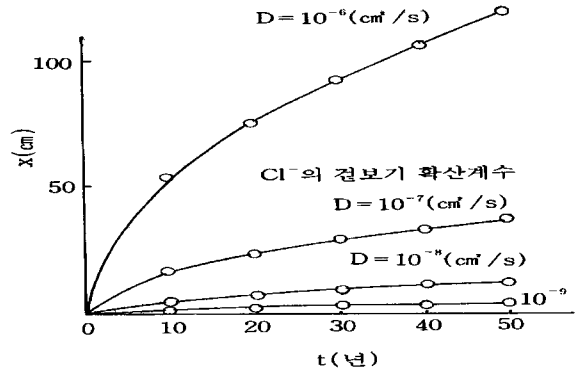


그림 5.4 콘크리트 중의 Cl⁻의 걸보기 확산계수(D)가 Cl⁻의 침투깊이에 미치는 영향

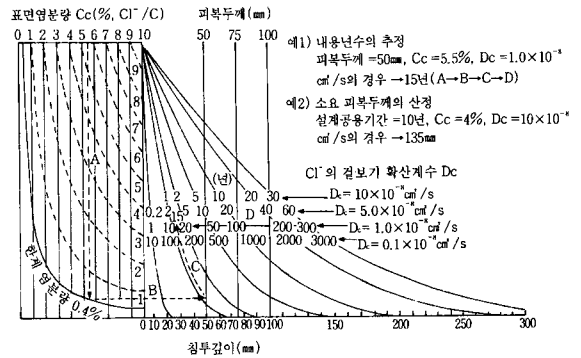


그림 5.5 콘크리트 구조물의 수명 추정 모노그래프의 예

여기서,

$C(x, t)$: 콘크리트 표면으로부터의 거리 x , 시간 t 후의 Cl⁻ 농도

$C(o)$: 콘크리트 중의 초기 Cl⁻ 농도

$C(s)$: 피복 콘크리트 표면의 Cl⁻ 농도

erf : 오차함수

D : 걸보기 확산계수

t : 시간 (s)

$C(s)$ 는 무한정 증가되는 것이 아니고, 어느 정도 짧은 기간이 경과하면 일정값에 머무르는 것으로 하며, 23 kgf/m²로 가정한다. 안전측으로 표면 농도는 초기부터 23 kgf/m²로 가정할 수 있다. 안전측으로 재료에 따라서 함유된 Cl⁻량과 외부로부터 침투하여 강재 표면에 도달한 Cl⁻량의 합계가 전술한 1.2 kgf/m²로 되었을 때를 축 방향 균열의 발생을 표준으로 한 수명으로 생각할 수 있다. 여기서 $C(o)$ 는 0으로 하고, 걸보기 확산계수 D 가 물-시멘트비 (W/C), 단위 시멘트량(C), 설계 요인(f_d), 사공 요인(f_c) 및 유지관리 요인(f_m) 등의 함수 $f(W/C, C, f_d, f_c, f_m)$ 로 표현하면 피복 두께를 X 로 한 경우 구조물의 수명 T 는 식 (5.6)과 같다.

$$T = \frac{X^2}{(9.00 \cdot f(W/C, C, f_d, f_c, f_m))} \quad (5.6)$$

겉보기 확산계수에 대해서 보통 포틀랜드 시멘트가 사용되는 것으로 하고, 간략히 물-시멘트비만의 지수함수를 식 (5.7)과 같이 표현하면 식 (5.6)은 식 (5.8)과 같이 된다.

$$f = \exp(11.5(W/C) - 21.85) \quad (5.7)$$

$$T = \frac{X^2}{[9.00 \cdot \exp\{11.5(W/C) - 21.85\}]^2} \quad (5.8)$$

이상의 산정 방법은 매우 안전측으로 한 것으로, 실제에 비하여 극히 작은 물-시멘트비와 매우 큰 피복 두께를 요구하는 경우도 있다. 더욱이 염해에 대해서는 철근 콘크리트 구조물의 수명을 보증하기 위해서 현실적으로 설계, 시공 및 유지관리의 과정을 일관성 있게 하여야 할 것이다.

6. 방식 대책

염해 환경하에 있는 철근 콘크리트 구조물의 방식 대책의 기본은 사용 재료 중의 염화물 이온(Cl⁻로 표시)량을 가능한 한 적게 하는 것과 함께 환경 조건에 따라서 물-시멘트비가 작고 적절한 단위시멘트량의 밀실한 콘크리트를 사용하며, 충분한 피복 두께와 균열 폭을 적게 함으로써 Cl⁻ 등 부식을 촉진시키는 물질이 콘크리트 중의 강재 표면까지 도달하는 것을 억제하는 것이다. 방식 대책의 개요는 크게 두 가지가 있으며, 제 1 방식법에서는 염화물의 제거 및 고정화, 콘크리트의 밀실성, 균열 폭 제어 및 피복 두께의 대해서 기술하였고, 제 1 방식법이 불충분한 경우에 추가로 제 2 방식법인 내염성 철근, 전기 방식 등을 기술하였다.

6.1 제 1 방식법

콘크리트 재료로부터 혼입되는 Cl⁻량은 가능한 한 적게 하는 것이 좋고, 원칙적으로는 0.3 kgf/m³ 이하로 하여야 한다. Cl⁻는 해사 등의 바다에서 채취된 해사골재 이외에 혼화재료, 물 등에 함유되어 있는 경우가 있으므로, 각각의 재료에 함유되어 있는 Cl⁻량으로부터 콘크리트 1m³ 중에 존재하는 Cl⁻량을 적절히 추정할 필요가 있다. 혼화제는 함유된 Cl⁻량에 따라서 3종류로 구분되는데, 사용할 때는 어느 종류인가를 파악해 둘 필요가 있다. 한편, 방청제는 Cl⁻량이 소량인 경우는 효과가 기대되나, 재료 중에 Cl⁻가 다량 함유되어 있는 경우 또는 해양 환경 등으로부터 Cl⁻가 다량 공급되는 경우는 효과를 기대할 수 없으며, 그 경우 오히려 부식이 촉진되는 경우가 있으므로, 그 효과에 대해서는 확인해 두는 것이 바람직하다.

(1) 염화물의 제거

콘크리트 중에 함유된 염화물은 가능한 한 제거하는 것이 방식

대책의 기본이다. 염화물에는 콘크리트에 처음부터 함유되는 내재 염화물과 해양 환경의 구조물과 같이 나중에 침입하는 외래 염화물이 있다. 전자에 대해서는 허용값 이하로 제거하면 거의 문제가 발생하지 않는다. 따라서 이 한도를 지키는 것이 매우 중요한 사항이나, 실제 현장에서는 제염되지 않은 해사가 출하되는 경우가 많으므로, 염화물량이나 구조물의 내용년수에 따른 대책이 필요하다. 염화물량이 해사로부터 도입된 정도의 양이라면, 물-시멘트비의 저감이나 피복 두께의 확보 및 방청제의 사용 등 일반적인 범위에서는 매우 유효한 대책을 마련할 수 있다.

그러나, 외래 염화물이 현저한 경우에는 위와 같은 일반적인 대책으로는 불충분하다. 이 경우에는 콘크리트 표면에 마감재를 처리하여 침투 염분을 억제하거나 내염성 철근을 사용하는 등의 특별한 대책이 필요하다. 부식 환경 요인을 콘크리트 제조 단계에서 제거하는 것이 가장 이상적이다.

(2) 염화물의 고정화(固定化)

시멘트가 수화하여 경화될 때 거기에 존재하는 염화물은 시멘트의 알루미늄이트 화합물과 반응하여 물에 불용성의 푸리델염(3CaO · Al₂O₃ · CaCl₂ · 10H₂O)을 생성하여 부식의 원인이 되는 수용성 염화물의 양을 감소시킨다. 이와 같이 포틀랜드 시멘트는 푸리델염과 같은 형태로 염화물을 불용성의 염으로 시멘트 중량의 최대 0.4%까지 고정화시켜 부식에 대해서 어느 정도의 보호 작용을 가지고 있다. 염화물의 고정화는 그것과 화학적으로 결합하여 용해도가 대단히 작은 안정된 화합물을 만들어 콘크리트 중의 액상으로부터 염화물을 제거하는 것을 목적으로 하나, 현실적으로 무기화합물로서는 질산이나 질산수는 외에는 없고, 유기화합물에서도 적당한 것은 출현되고 있지 않으며 현재까지도 아이디어 범주를 벗어나지 못하고 있다. 또한 갈슘 알루미늄이트 함유량이 많은 시멘트가 푸리델염을 많이 만들므로 염화물에는 유리하지만, 이같은 시멘트는 화학적 침식에 약하다는 것도 충분히 고려하여야 한다.

(3) 콘크리트의 밀실성

콘크리트가 철근 방식에 대해서 담당하는 주된 역할은 다음의 3가지가 있는데, 즉 높은 pH에 의하여 철근 표면에 견고한 부동태 피막을 만들고, Cl⁻, 수분 및 산소 등의 침입을 억제시키며, 높은 전기저항성에 의하여 부식 전류를 흐르기 어렵게 한다. 여기서 콘크리트의 밀실성은 주로 2번째의 여러 가지 물질의 침입 방지를 의미하고, 더욱이 3번째의 전기저항성에 대해서도 매우 양호한 것을 기대할 수 있다. 따라서 콘크리트의 밀실성은 철근의 방식상 가장 중요한 요인이라 할 수 있다.

콘크리트를 밀실하게 하기 위하여 일반적으로 사용되는 방법은 콘크리트의 단위 시멘트량을 적절히 증가시켜서 물-시멘트비를 감소시키는 것이다. 예를 들면 압력하에 있는 시멘트폴의 투수계수는 물

-시멘트비가 50 %를 넘으면 급격히 증대하는 것으로 알려져 있다. 그러나 일반적으로 부식 작용이 대단히 심한 환경 조건인 해양을 고려하면 해수 중이 아니라 비말대 지역으로서 압력수의 작용 하에서가 아니다. 따라서 모세관 등으로 전달되는 물의 흡수·침투 및 Cl⁻의 확산·침투가 가장 중요한 문제이다. 木内芳夫(1983)¹⁾가 시행한 흡수 시험 결과에 의하면 흡수 중량, 흡수 높이는 물-시멘트비가 커짐에 따라서 증가하고, 물-시멘트비가 큰 경우는 건습 반복 작용 하에서 상당한 수분의 출입이 이루어지며, 물뿐만 아니라 산소의 침입도 허용할 가능성이 높다는 것이다. 산소량이 많으면 음극 반응을 가속시키게 되어 부식은 더욱 촉진된다.

(4) 균열 폭 제어 및 피복 두께의 증대

피복 콘크리트의 균열은 수분, 염분 등을 강제 위치까지 용이하게 침입시키는 통로가 된다. 여기서 균열에 기인한 부식은 균열에 의한 부식 발생 유무와 부식이 발생한 경우 그 속도로 나누어서 생각하여야 한다. 예를 들면 赤塚雄三(1966)²⁾은 미리 균열을 준 철근 콘크리트 보를 해중에 1년간 방치한 후 그 관찰 결과로부터 철근이 부식하는 비율이 50% 정도로 되는 것을 허용한도로 하면, 그 균열 폭은 0.1 mm 정도로 보고하고 있으나, 이것은 명확하게 부식 발생 유무의 문제에 대한 답으로서 부식 속도에 관한 것은 아니다. 또한 岡田 清(1979)³⁾은 피복두께 20 mm의 공시체에 균열을 발생시켜 인공해수를 살수한 후 자연전위를 측정된 결과 부식 발생 유무의 관점으로부터 한계 균열 폭은 0.1~0.2 mm 사이에 있다는 것을 보고하였다.

그러나 물-시멘트비가 커짐에 따라 전위차와 균열 폭의 상관관계는 작아지고, 물-시멘트비가 70%에서는 상관 관계가 나타나지 않는데, 이것은 물-시멘트비가 큰 경우 균열이 없는 부위에서도 피복 콘크리트의 밀실성이 작기 때문에 수분, Cl⁻가 침투하여 균열부 이외의 부위에서도 부식을 일으키기 쉽기 때문인 것으로 해석된다. 따라서 한계 균열 폭 제어가 의미를 갖는 한계 물-시멘트비는 60% 정도이다.

콘크리트 중의 강재의 부식 속도는 산소가 강재 표면에 확산도달하는 속도로 결정하는 경우가 많다. 이 산소는 음극 반응에서 필요하게 되는데, 균열부가 양극으로 되어 강재가 용해되기 시작하고, 균열이 없는 부분이 음극으로 되면 균열 폭과 부식 속도와의 직접적인 관계가 없다. 산소를 받는 면적, 즉 음극부가 크면 양극부에 대한 산소량의 비율이 증대하여 부식 속도는 증대된다.

또한 양극과 음극 사이의 전기저항이 큰 경우는 부식을 일으키는 기전력의 대부분이 양극과 음극 사이의 전기저항에 따른 전위강하에 소비되어 버리기 때문에 부식 속도는 감소하나, 역시 균열 폭과는 직접 관계가 없다. 산소의 확산이나 피복 콘크리트의 전기저항은 주로 콘크리트의 밀실성이나 환경 조건에 관계되는 요소이다. 또한 균열 제어가 의미를 가지는 한계 물-시멘트비 이

하로 되면 미수화 시멘트 등에 의해서 균열선단에서 자연 치유가 일어날 가능성도 높아진다.

허용 균열 폭은 피복 두께의 함수로서 표시하는 경우가 많은데, 이것은 피복 콘크리트의 표면에서 동일 균열 폭이라도 피복 두께가 큰 쪽이 강제 표면에서는 노출 면적이 작은 것을 고려하였기 때문이다. 또한 피복 두께가 큰 경우는 부식 생성물의 침적 또는 미수화 시멘트의 수화 등에 의한 자연 치유가 발생할 확률도 높아진다. 더욱이 피복 두께를 크게 함에 따라 Cl⁻가 강재에 도달할 때까지의 기간을 길게 하는 것이 가능하다. 「콘크리트구조설계기준」에서는 강재의 부식에 대한 환경조건을 건조 환경, 습윤 환경, 부식성 환경 및 고부식성 환경의 4경우로 구분하고 허용 균열 폭과 콘크리트의 최소 피복 두께를 규정하고 있다.

(5) 방청제의 이용

방청제란 소량을 콘크리트 속에 첨가함으로써 강재의 부식 속도를 효과적으로 감소시키는 화학물질을 말한다. 방청제는 콘크리트 뿐만 아니라 각종 화학 장치, 수조, 보일러, 및 각종 파이프 라인 등의 방식에 사용되며 그 종류도 다양하다. 방청제의 분류는 여러 가지가 있으나, 부식 억제 작용으로부터 분류하면 양극 반응 억제형과 음극 반응 억제형으로 대별하는 것이 편리하며, 전자는 콘크리트 중의 철근의 부식 문제에 한해서 부동태화와 동일한 의미를 갖는 것으로부터 부동태화제라고도 부른다.

염화물에 의한 강재의 부식은 강제 표면의 부동태 피막의 생성 억제 및 파괴로부터 시작되므로, 부동태 피막의 생성 촉진과 파괴된 부동태 피막을 곧바로 보수할 목적으로 부동태화제가 먼저 검토 대상으로 되고 있다. 콘크리트용 방청제로는 효과가 큰 것은 당연하나 콘크리트의 물성에 나쁜 영향을 미치지 않아야 한다. 또한 공해의 원인이 되는 독성이 없어야 하는데, 크롬산염은 독성을 가지므로 환경친화적인 면에서 문제가 있다. 즉, 방청제 사용시에는 방청 효과와 동시에 콘크리트 물성에 대한 영향을 충분히 확인하며, 또한 공해의 원인이 되는 중금속 등을 함유하고 있지 않다는 것을 확인하여야 한다. 양질의 방청제의 사용은 염해 대책으로서 효과적인 방법이라 할 수 있다.

6.2 제 2 방식법

제 1 방식법으로는 피복 두께가 크게될 뿐 바람직하지 않은 경우에는 제 2 방식법을 사용하며 주요 방법은 다음과 같다.

(1) 콘크리트 표면 처리

종래에 자주 사용되는 보수 공법의 경우에는 노후화 부분을 치평함으로써 주로 시멘트계 재료에 대한 단면 복구를 시행하여 그 위에 도장 등을 실시한다. 콘크리트 표면 처리(함침, 도장, 코팅, 라이닝 등)는 일반적으로 유지보수가 가능한 장소에 사용된다.

수지로서 에폭시, 우레탄, 폴리에스텔, 아크릴, 불소, 충전제 등이나, 폴리머 시멘트 모르타르로서 아크릴, SBR(Styrene Butadiene Rubber), EVA(Ethylene Vinyl Acetate) 계 등이 사용되고, 유리섬유, 유리조각 또는 유리매트 등에 의한 보강이 이루어지는 경우도 있다. 충전제는 발수성을 가지며, MMA(Methyl Methacrylate Monomer)와 함께 함침재로서 사용된다. 도막을 갖는 것은 일반적으로 프라이머, 접합제(putty), 중간바름, 마무리바름으로 이루어진다. 합성수지재료는 그 조성에 따라서 성질이 크게 다르고, 현재 개발 중에 있는 것도 많기 때문에, 사용시에는 프라이머에 대해서는 내알칼리성, 중간바름에 대해서는 차수, 투습, 산소 차단 및 차열성, 마무리바름에 대해서는 내후성 등에 대하여 검토할 필요성이 있다. 그 외에도 콘크리트와의 일체성, 균열추종성 등에 대해서도 고려하여야 한다.

(2) 에폭시수지 도장 철근

에폭시수지 도장 철근은 최근 염해 환경하에서 자주 사용되며, 이것은 분체형 에폭시수지 도료를 사용하여 정전도장한 것으로서, 도막 두께가 200±50 μm 가 표준이다. 비교적 심한 부식 환경하에서도 사용할 수가 있으며, 에폭시수지의 전기적 절연성으로 매크로셀(macro cell) 부식에 대해서도 효과적이다. 그러나 시공시에는 도막이 파손되지 않도록 주의가 필요하고, 도막이 파손된 부분에서 부식이 촉진된다는 보고도 있다.

(3) 내염성 철근

내염성 철근에 대해서는 여러 가지 종류들이 개발되고 있으므로, 그 성능에 대해서도 균일하지 않고 체계적인 보고도 없는 실정이다. 따라서 사용시에는 그것의 조성·성능을 확인하여야 한다.

(4) 전기 방식

전기 방식은 콘크리트 중의 강재의 전위를 인위적으로 불활성 영역(그림 3.4)에 두는 음극 방식과 부동태 영역에 두는 양극 방식이 있는데, 일반적으로 전자가 사용된다. 전기 방식은 콘크리트 중에 다량의 Cl⁻가 존재하는 경우에도 방식 효과를 기대할 수 있으므로, 보수 공법으로도 사용할 수 있다. 이것은 강 구조물의 방식법으로 이미 확립된 방법이고, 콘크리트 구조물에 대해서도 적용 사례가 증가하고 있다. 전류는 구조물 전체에 균일하게 흐르는 것이 바람직하고, 방식 전류로서는 10 mA/m² 정도가 많다.

7. 맺음말

본고에서는 철근 콘크리트 구조물에 있어서 내구성 저하의 주된 요인 중의 하나인 염해에 대한 발생 메커니즘, 내구성 설계 방법 및 방식 대책을 요점 정리하였다. 최근 선진 외국에서는 내구성 설계를 체계화시킴으로써 철근 콘크리트 구조물의 설계에 반영하고자 하는 노력이 진행되고 있으나, 아직까지 국내에서는 내구성 설계에 대한 기준조차도 미확립된 실정이다. 따라서, 신설 구조물의 경우는 내구성을 고려한 설계, 기설 구조물의 경우는 내구성 향상을 위한 체계적인 유지관리 등을 수행할 수 있는 국내 실정에 맞는 내구성 관련 기준을 확립하는 노력이 필요하다. 최근 한국콘크리트학회(2001)에서 최초로 관련 연구를 수행한 바 있으나 계속적인 연구가 요구되며, 필자는 마지막으로 본고의 내용이 국내의 철근 콘크리트 구조물의 내구성 향상 기준에 다소나마 기여를 할 수 있기를 바란다. □

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, "콘크리트 염해 및 탄산화로 인한 내구성저하 방지대책 연구", 2001.
2. Nagesh, M. and Bishwajit, B., "Modelling of Chloride Diffusion in concrete in Concrete and Determination of Diffusion Coefficients," ACI Material Journal, Vol. 95, No. 2, 1998, pp. 113~120.
3. Seatta, A. V., Scotta, R. V., and Vitaliani, R. V., "Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturate Concrete," ACI Material Journal, Vol. 90, No. 5, 1993, pp. 441~451.
4. Tuutti K., Corrosion of steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research institute, Stockolm, 1982.
5. 木内芳夫, 官川豊章, 岡田 清, "コンクリートの電気抵抗および酸素浸透について", 土木學會第38回 年次學術講演會 講演概要集 第5部, 1983, pp. 265~266.
6. 赤塚雄三, 關 博ほか, "海水の作備を受ける鐵筋コンクリートのひびわれと鐵筋の腐蝕について", セメント・コンクリート, No. 266, 1966, pp. 38~43.
7. 岡田 清, 官川豊章, "コンクリートの水セメント比およびひびわれが鐵筋腐蝕に與える影響について", セメント技術年報, Vol. 33, 1970, pp. 494~497.