

확산과 이송을 고려한 해양 콘크리트 교각의 염소이온 침투해석

Chloride penetration in the marine concrete pier considering diffusion and convection

김 기 현* 차 수 원** 장 승 업***
Kim, Ki Hyun Cha, Soo Won Jang, Sung Yup

ABSTRACT

Reinforcement corrosion is generally prohibited under normal condition by the alkalinity of the pore water in the concrete. However, concrete structures in marine environment are subjected to chloride attack due to the high salinity of the sea water. Thus the probability of steel corrosion becomes higher when the chloride ions are introduced into the concrete. Steel corrosion is a decisive factor for the determination of service life of the marine concrete structure because chloride ions are abundant in the sea, and piers are the typical construction elements in concrete structures in marine environment. Hence, it is of great importance to evaluate the service life of the piers. In this paper, chloride penetration analysis for the rectangular pier in the marine environment is performed considering the diffusion and convection movement of chlorides. Result reveals that the service life of the reinforcement with drying-wetting cycles is much shorter than that of the reinforcement with saturated condition. This may be due to the fact that moisture movement is much faster than chloride diffusion.

요 약

콘크리트 내 공극수의 알칼리성으로 인해 일반적인 상황에서는 철근의 부식이 억제된다. 그러나 해양환경에 있는 콘크리트 구조물은 해수에 존재하는 염분에 의해 극심한 염해 환경에 놓이게 되고, 이에 의해 철근은 부식하기 쉬운 상태가 된다. 해수의 풍부한 염소이온으로 인한 철근부식 가능성이 콘크리트 구조물의 내구수명 결정에 큰 영향요소이며, 특히 교각은 해양환경 콘크리트 구조물의 대표적인 부재이므로 교각의 내구수명 예측은 매우 중요하다고 할 수 있다. 이 논문에서는 염소이온의 확산에 의한 이동과 이송에 의한 이동을 고려하여, 해양 콘크리트 교각에 대한 염소이온 침투해석을 수행하였다. 콘크리트가 항상 수중부에 위치하는 경우보다 건습반복을 받는 경우에 염소이온이 더 빨리 침투함을 확인하였다. 이는 염소이온의 확산속도 보다 수분의 이동속도가 더 빠르기 때문인 것으로 판단된다.

* 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정

** 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 교수

*** 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

1. 서론

콘크리트 내의 철근 표면에 부동태피막이 존재하므로 일반적인 상황에서는 철근부식이 억제된다. 그러나 콘크리트 내의 공극수에 염소이온이 일정량 이상 존재하면 철의 부동태피막이 파괴되거나 부동태화가 방해된다. 염소이온은 부동태 피막을 파괴하는 작용이 강력하며 콘크리트 중에 혼입될 수 있는 기회가 많으므로 철근부식에 대하여 가장 유해한 이온이라 할 수 있다. 따라서 콘크리트 구조물의 내구수명을 예측하고 적절한 시기에 보수 및 보강을 수행하기 위해서는 염소이온의 침투를 정확히 평가해야 한다.

본 논문에서는 해양환경에 존재하는 사각형 콘크리트 교각에 대한 염소이온 침투해석을 실시하여, 철근 위치에서의 염소이온 농도가 임계농도에 도달하는 데 걸리는 시간을 계산하였다. 사각형 교각이 수중부와 건습반복 환경에 존재하는 경우에 대한 이차원 염소이온 침투해석 결과로부터 건습반복 환경에서 염소이온이 더 빨리 침투함을 확인하였다.

2. 염소이온 침투해석

콘크리트에 존재하는 염소이온의 총량은 구속 염소이온과 자유 염소이온의 양으로 나타낼 수 있다.

$$C_t = C_b + WC_f$$

여기서, C_t , C_b 는 콘크리트 단위부피에 존재하는 총 염소이온량(kg/m^3_{conc})과 구속 염소이온량(kg/m^3_{conc})이며, C_f 는 공극수에 존재하는 자유 염소이온농도(kg/m^3_{water}), W 는 콘크리트 단위부피에 존재하는 물의 부피이다(m^3_{water}/m^3_{conc}).

염소이온의 확산과 이송을 고려한 염소이온 전달의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\left(W + \frac{\partial C_b}{\partial C_f}\right) \frac{\partial C_f}{\partial t} + C_f \frac{\partial W}{\partial t} = \nabla \cdot (D_c \nabla C_f) - \nabla \cdot (C_f J_m)$$

여기서, $\partial C_b / \partial C_f$ 는 콘크리트의 구속능으로 염소이온 구속등온식으로부터 얻어지며, J_m 은 수분 유동율로서 수분이동해석으로부터 얻어진다. 이 논문에서는 아래와 같은 선형 구속등온식을 적용하였다.

$$C_b = 0.55 C_f$$

이는 해수의 염소이온 농도가 $20kg/m^3_{water}$ 이고 콘크리트의 공극률이 10%인 경우 표면 염소이온 농도를 $13kg/m^3_{conc}$ 로 하는 가장 간단한 형태라 할 수 있다.

3. 해양환경에 존재하는 콘크리트 교각의 염소이온 침투해석

3.1 대상구조물 및 재료물성

사각형 교각의 코너 부위는 측면 부위와 달리 양면으로부터 염소이온이 유입되므로 이차원 해석이 요구된다. 또 수중부 및 건습반복부는 염소이온 노출환경이 다르며 이러한 노출환경의 차이를 고려한 해석이 필요하다. 해석대상 교각은 그림 1과 같은 사각형 형태를 띠고 있으며, 철근중심에서 피복까지의 거리는 100mm이고 주철근 중심 사이의 간격이 100mm인 경우에 대하여 해석을 실시하였다.

사각형 교각의 이차원 효과 및 노출환경의 영향을 분석하기 위하여 온도는 섭씨 23도로, 해양의 염소이온농도는 $20kg/m^3$ 로 유지하였다. 건습반복을 받는 콘크리트 교각의 초기상대습도는 0.90이며 건조기와 습윤기가 각각 10일씩 유지되는 것으로 하였다. 건조기와 습윤기의 상대습도는 각각 0.80과 1.00

으로 유지하였으며, 수분확산계수는 Hedenblad (1993)¹⁾의 모델을 사용하였다. 염소이온 노출개시시기는 재령 28일이며 콘크리트의 물성은 표 1에 나타나 있다.

표 1. 콘크리트 물성

항목	값
물시멘트비	0.38
단위시멘트량	450kg/m ³
단위수량	171kg/m ³
공극률	10%
재령계수	0.55
기준염소이온확산계수	5.79×10 ⁻¹² m ² /s

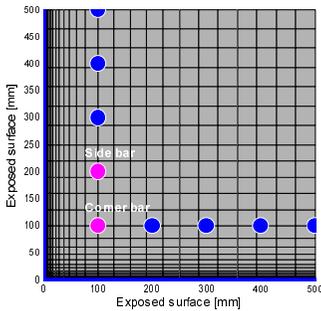


그림 1. 사각형 교각

3.2 내구수명 기준

부식임계농도는 콘크리트표준시방서내구성편²⁾에 따라 총 염소이온량이 1.2kg/m³_{conc}일 때로 하였다.

3.3 해석결과

철근 위치 및 노출환경에 따른 염소이온 침투해석 결과를 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

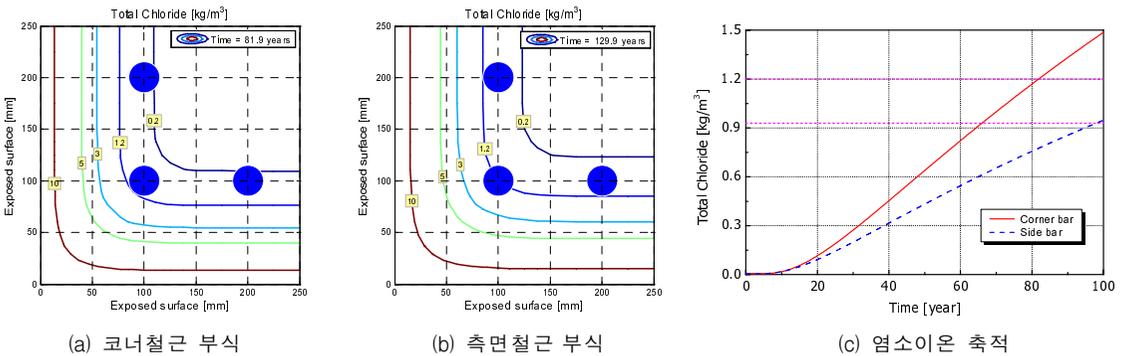


그림 2. 수중부 교각의 염소이온 침투해석 결과

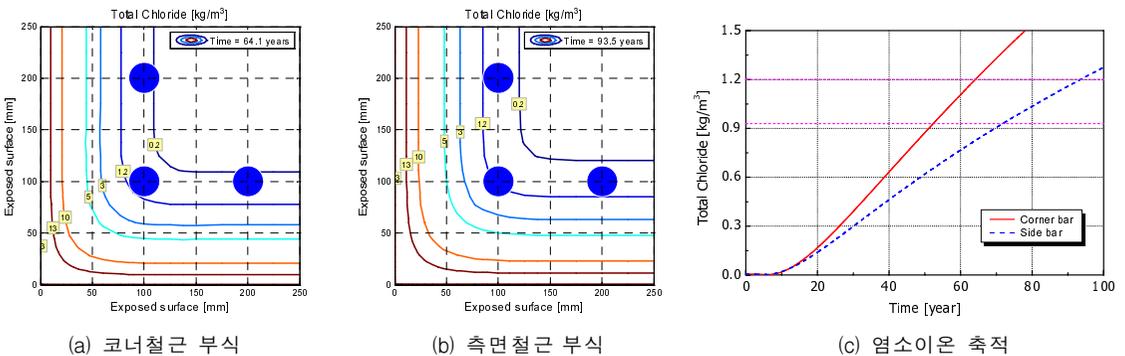


그림 3. 건설반복을 받는 교각의 염소이온 침투해석 결과

내구수명 예측 결과를 표 2에 나타내었다. 측면철근 보다 코너철근에 대한 내구수명이 훨씬 짧은 것으로 나타났으며, 이는 코너철근의 경우 양면으로부터 염소이온이 유입되기 때문으로 판단된다. 또 수중환경에 비하여 건습반복환경에 대한 내구수명이 더 작게 계산되었는데, 이는 건습반복으로 인한 수분이동이 포화상태에서의 염소이온 확산속도 보다 훨씬 더 크기 때문에, 결국 염소이온이 더 빨리 콘크리트 내부로 침투되었기 때문으로 생각된다. 실제로 염해환경에서의 철근부식 사례가 수중부 보다 간만대에서 많이 보고되고 있는데, 여러 문헌에서는 이 원인으로 부식반응에 필요한 산소의 공급이 간만대에서 활발하기 때문인 것으로 정성적으로 설명하고 있다. 본 논문의 해석결과에 의하면 산소 공급의 용이함을 언급하기 이전에 염소이온 자체의 침투속도가 건습반복환경에서 더 빠른 것으로 계산되었음을 주목할 만하다.

표 2. 내구수명

노출환경	내구수명 (year)		
	코너철근 부식 (a)	측면철근 부식 (b)	a/b
수중환경	81.9	129.9	0.63
건습반복환경	64.1	93.5	0.69

4. 결론

해양에 건설되는 사각형 교각의 염소이온 침투에 대한 내구수명의 예측을 위해서는 교각 내 철근의 위치와 노출환경이 큰 영향을 미친다. 연구결과 수중부에서 보다 건습반복을 받는 간만부의 콘크리트에 염소이온 침투가 더 빨리 발생함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 건설교통부의 지원사업인 콘크리트코리아연구단의 “고성능다기능 콘크리트의 개발 및 활용기술” 과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Hedenblad, G. (1993). Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste. PhD. Dissertation, Report TVBM-1014, Lund Institute of Technology, Sweden.
- 콘크리트 표준시방서 내구성편 해설, 한국콘크리트학회