

염해환경에서의 염화물이온 침투 예측에 관한 연구

A Study on Prediction Model of Chloride ion Permeation of Cement Mortar by Steel Powder

김 정 진* 박 순 전** 고 주 환*** 한 천 구****
Kim, Jeong Jin Park, Soon Jeon Ko, Joo Hwan Han, Cheon Goo

ABSTRACT

In this study the prediction model of Chloride Ion progress rate of concrete using steel powder as an addition is developed, in which the reduction of not only the diffusion rate of Cl^- but also the corrosion rate by replenishment of pore by corrosion products. The model is based on the diffusions of Cl^- and its reaction with Fe^{2+} in chloride attack progression region. The model can also explain the characteristics of chloride ion permeation resistance of concrete that the matrix is densified due to corrosion products. The prediction by the model agreed well the experimental data in which the concrete using steel powder, and it showed the lower rate in long-term age to Chloride Ion progress rate than the concrete without steel powder. Consequently the model can predict Chloride Ion progress rate of concrete exposed in the atmosphere regardless of the water-to-cement ratio, the amount of the content of steel powder, etc.

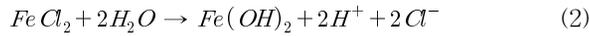
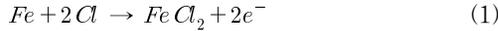
요 약

본 연구는 부식생성물의 공극충전에 의한, 부식 반응량 및 이산화탄소의 확산속도 변화를 고려한 철분혼입 콘크리트의 염화물이온침투 예측모델에 관한 연구이다. 본 모델은 염화물이온 침투영역에서 염화물이온과 철이온의 반응 및 염화물이온의 확산에 기초한다. 또한 본 모델은 콘크리트 조직이 부식 생성물로 인해 치밀해져, 콘크리트의 염화물이온 침투저항성이 억제되는 것에 대해서도 해석이 가능하다. 모델에 의한 예측치와 철분을 혼입한 콘크리트에 있어서의 실측값은 잘 일치하였고, 재령이 경과함에 따라 철분무혼입 콘크리트에 비해 염화물이온 침투속도가 상당히 늦어지는 것으로 나타났다. 결론적으로 본 모델은 대기중에 노출된 콘크리트의 물시멘트비 및 철분 혼입 유무와 혼입율에 따른 염화물이온 침투 예측이 가능하였다.

* 정회원, 롯데건설(주) 기술연구소 책임연구원, 공학박사
** 정회원, 롯데건설(주) 기술연구소 수석연구원
*** 정회원, 롯데건설(주) 건축사업본부, 부사장
**** 정회원, 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사

1. 서 론

염화물이온에 의한 철근부식은, 콘크리트 속에 염화물이온이 침투해 철근위치에서의 염화물이온농도가 일정치를 초과하면 발생하게 된다. 따라서 염해에 의한 철근부식 개시 시기는 철근위치에서의 염화물이온농도가 철근부식한계에 도달할 때까지의 시간으로 정의 되는 경우가 많다¹⁾.



식 (1), (2)는 철과 염화물의 부식반응을 나타내는데, 위식에서 알 수 있듯이 콘크리트 속에 침투한 염화물은 어떠한 형태로든 소모되지 않고 철근과 부식 반응하여 중간생성물(FeCl₂)을 형성하였다가 방출하는 것을 반복하며 철근을 부식시키게 된다.

따라서 본 연구에서는 염화물 침투를 사전에 방지 또는 감소시키는 방안의 하나로써 콘크리트 속에 철분을 혼입하여 철분과 콘크리트에 침투하는 염화물, 수분 및 산소와의 부식반응을 유도함으로써 철근부식에 영향을 미치는 외적 열화요인을 소비시키고, 부식반응 결과 생성된 부식생성물이 콘크리트 내부의 모세관공극을 충전하여 콘크리트의 조직을 치밀하게 함으로써 염화물의 확산침투가 억제되는 현상을 포함한 모델구축에 대하여 검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

표 1은 사용재료, 조합, 실험요인 및 수준을 나타낸 것이다. 철미분말은 성분 및 입도범위가 다른 3종류를 사용하였으며, 혼입율은 모르타 체적의 0%, 2%, 4%를 혼입하는 7수준을 계획했다.

표 1. 실험계획

실험 개요	수준	실험사항	실험 항목	
배합	배합비	1	1 : 3	염분침투깊이 염화물이온 농도 EPMA
	W/C	1	65%	
	잔골재	1	오오이가와산 강모래	
	철근	1	SD345 Ø10mm	
	철분 종류	3	DR-A, MS, DR-B	
	피복 두께	2	20mm, 40mm	
	철분 혼입율	3	0%, 2%, 4%	

2.2 염수침적시험

콘크리트의 겉보기 염화물이온 확산계수를 예측하기 위하여 염수침적시험을 실시했다. 실험체는 재령 14일까지 봉함양생을 실시한 후 탈형하여, 항온 항습실(온도 20±3℃, 습도60±5%)에서 4주간 기중양생을 실시하였다. 염수침적시험(온도 20℃, Cl⁻농도 3%) 2일 침적, 1일 건조(온도 20℃, 습도 60%)를 1사이클로 하여 3, 6, 9, 12개월간 침적시킨 후, 각 재령별 시점에서 공시체를 슬라이스하여 각 깊이별 염화물이온량을 측정하여, 그 농도분포로부터 확산계수를 산출하였다.

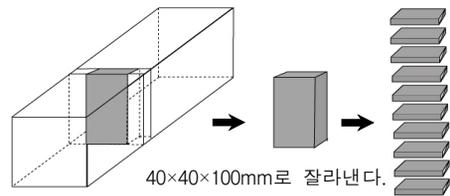


그림 1. 염화물이온 분석용 시료채취 방법

2.3 측정항목

소정기간, 염수침적한 콘크리트 공시체는 그림 1과 같이 염화물이온의 침투방향으로 40×40×100mm로 잘라낸 후, 표면으로부터 5mm 간격으로 슬라이스한 후 콘크리트 시편속의 가용성 염화물이온 농도 측정은 JIS A 1154에 의거 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 콘크리트의 확산계수 경시변화

표 2는 1년간의 염수침지 결과로부터 구한 W/C 65% 철분무혼입 콘크리트(이하, OPC)의 겔보기확산계수의 경시변화를 나타낸 것이다. 표에 의하면 OPC의 겔보기 확산계수는 $2.27e^{-12}m^2/sec$ 로, W/C 65%의 OPC 기준확산계수 D_{ref} 로서 취급하는 것이 가능할 것으로 생각된다²⁾. 또한, 염해환경에서의 전공극량 감소비 ζ_i 을 기준확산계수에 곱하는 것에 의해 철분 혼입에 의한 확산계수변화를 예측하는 것이 가능하다.

표 2. W/C 65% OPC의 확산계수 (1년간 침지)

침지 기간	확산계수
3개월	$2.29e^{-12}m^2/sec$
6개월	$2.00e^{-12}m^2/sec$
9개월	$2.11e^{-12}m^2/sec$
12개월	$2.68e^{-12}m^2/sec$
평균	$2.27e^{-12}m^2/sec$

3.2 염수침적시험 측정결과 및 계산값의 비교

염화물이온 확산계수의 타당성을 검증하기 위하여, 비선형유한요소해석을 통해서 구한 침지시간에 대한 침투 염화물이온 농도분포곡선과 실측치의 비교를 실시했다.

그림 2는 유한요소해석을 실시하기 위한 모델이며, 해석구간 400mm를 200등분으로 하였다. 한편, 염화물이온의 확산방정식을 매트릭스 형식으로 나타내면 식(3)과 같다.

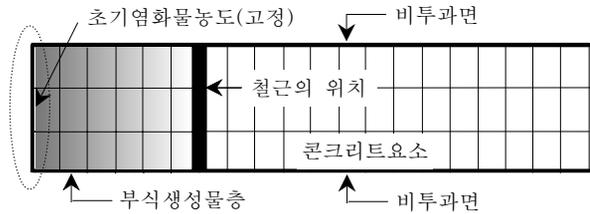


그림2. 유한요소해석을 위한 2차원 요소분할

$$[D]\{\theta\} + [L]\left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\} = \{F\} \quad (3)$$

여기에서, $[D]$ 는 염화물이온 확산매트릭스, $[L]$ 은 염화물이온 용량매트릭스, $\{F\}$ 는 외부염화물이온 유속벡터, $\{\theta\}$ 는 전체의 절점염화물이온량 벡터이다.

시험체의 초기조건은 염화물이온량이 $0kg/m^3$ 이고, 경계조건은 $30kg/m^3$ 이다. 염화물이온 확산계수 $[D]$ 는 공극율(ϵ)에 대해서 비선형함수이므로, 뉴턴랩슨법(Newton Raphson Method)을 이용해서 해석을 수행했다. 또한, 염화물이온 확산방정식의 매트릭스를 시간에 관한 이산화수법으로서는 크랭크니콜슨(Crank-Nicolson)차분법을 이용하였다.

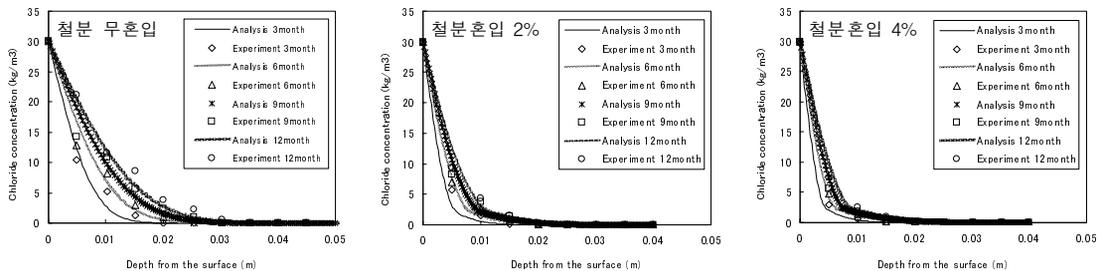


그림 3. 염화물이온농도의 실측값과 계산값의 비교

그림 3은 식(3)의 기초 확산방정식을 이용해서 해석을 실시한 결과를 나타낸 것으로 실험값과 계산값이 거의 일치하고 있음을 잘 표현하고 있다. 계산 결과에 따르면, 철분혼입 콘크리트의 염화물이온 침투속도는 재령이 경과함에 따라 철분무혼입 콘크리트에 비해 크게 감소하는 것으로 나타났다.

3.3 자연환경에서의 철분혼입 콘크리트의 염분침투예측

염분의 침투현상은 콘크리트속 공극에서의 수분의 침투에 따른 염분의 이동, 세공용액속에서의 농도 확산에 의한 염분의 이동 및 염분의 화학적 고정 또는 흡착 등이 복합적으로 작용하는 현상이다. 콘크리트속에서의 염화물이온의 확산을 나타내는 기초방정식은 식(4)의 Fick의 제2법칙을 이용하였으며, 표면 염화물량은 표 3의 간만대 및 비말대의 13kg/m³을 적용하여 해석을 수행하였다.

표 3. 표면 염화물 이온 농도(kg/m³)²⁾

간만대 및 비말대	해안으로부터의 거리(km)				
	해안선부근	0.1	0.25	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (4)$$

자연환경하에서의 철분혼입 콘크리트의 염화물이온침투에 관한 장기예측을 시행한 결과를 그림 4에 나타내었다. 철분 혼입율별 콘크리트의 염화물이온 침투속도는 철분 무혼입 콘크리트에 비해 철분혼입 콘크리트의 경우가 재령증가에 따라 50~70%정도 늦어지는 것으로 예측되었다.

한편, 염화물이온이 콘크리트에 침투할 경우, 기존연구 결과에서도 보았듯이 철분과 계속적으로 활발히 반응을 함으로써, 철분이 계속해서 존재할 경우에는 염화물이온의 침투를 억제하는 것이 가능함으로 부식반응량 및 반응속도 등을 고려하면 좀 더 정확한 해석이 가능할 것으로 사료된다.

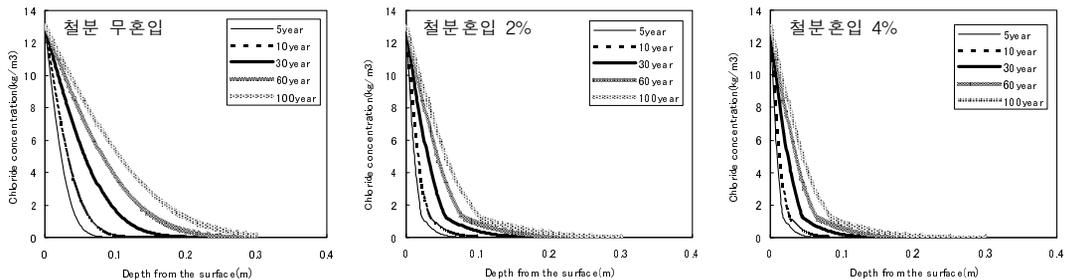


그림 4. 염화물이온농도의 실측값과 계산값의 비교

4. 결론

1) 염화물이온 침투량 변화를 측정된 결과, 철분의 혼입 유무, 철분의 종류 및 혼입율에 따라 큰 차이를 보였으며, 철분 무혼입 콘크리트의 1년간의 염분농도분포 값을 이용해 기준확산계수를 구한 결과 2.27e⁻¹²m²/sec 정도였으며, 철분을 혼입함으로써 40~60%정도 감소하는 것으로 나타났다.

2) 염화물이온 침투에 관한 기초 확산방정식에 공극감소에 의한 확산계수의 경시변화를 적용하여, 염해환경에서의 철분 혼입 콘크리트의 염화물이온 침투 예측모델을 구축하여 해석을 실시한 결과, 실측값과 예측값이 상당히 유사하게 나타나는 것이 확인되었다. 한편, 100년까지의 장기해석을 실시한 결과에서도 철분을 혼입함으로써 구조물의 수명이 2~3배정도 길어지는 것으로 나타났으며, 철분 혼입율별로는 철분혼입2%에 비해 철분혼입4%의 경우 염화물이온 침투저항성이 더 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 小林豊治, 米澤敏男 : 콘크리트 구조물의 내구성 진단 시리즈, 森北出版, 1993.
2. 鐵筋콘크리트 造建築物의 내구設計施工指針(案)同解説, 日本建築學會, 2004