

염소이온의 확산모델에 의한 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 예측연구

A Study on the Prediction of Durability of Concrete Structures Subjected to Chloride Attack by Chloride Diffusion Model

오병환*
Oh, Byung Hwan

장승엽**
Jang, Seung Yup

차수원**
Cha, Soo Won

이명규***
Lee, Myung Gyu

Abstract

Chloride-induced corrosion of reinforcement is one of the main factors which cause the deterioration of concrete structures. Durability and service lives of the concrete structures should be predicted in order to minimize the risk of corrosion of reinforcement. The objective of this study is to suggest the basis of analytical methods of predicting the corrosion threshold time of concrete structures. Based on the chemistry and physics of chloride ion transport and corrosion process, chloride intrusion with various exposure conditions, variability of diffusivity and transport of pore water in concrete are taken into consideration in applying finite element formulation to the prediction of corrosion threshold time. The effects of main factors on the prediction of chloride intrusion and corrosion threshold time are examined. In addition, after chloride diffusivities of several mixture proportions with different parameters are measured by chloride diffusion test, the exemplary analyses of corrosion threshold time of those mixture proportions are carried out.

1. 서 론

일반적으로 콘크리트는 내구성이 매우 우수한 재료로 인식되고 있으나 여러가지 물리적·화학적 환경요인에 노출되면 지속적인 성능저하를 일으키게 되고, 이로 인해 구조물의 내구년한 감소를 가져오

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 전주대학교 토목환경공학과 교수

게 된다. 콘크리트 내부로 침투하는 염소이온에 의해 유발되는 철근의 부식은 이러한 콘크리트 구조물의 성능저하를 유발하는 가장 중요한 요인의 하나로 인식되고 있다. 철근의 부식은 철근 자체의 단면 손실에 의한 구조물의 내하력 감소와 철근 리브의 손상에 의한 부착성능의 감소를 유발할 뿐만 아니라 철근의 부피팽창을 일으킴으로써 콘크리트의 팽창균열 및 피복탈락을 유발하여 전반적으로 구조물의 성능을 심각하게 손상시킨다. 특히 최근 간척시설물이나 해안구조물 건설이 활발해지면서 해수환경에 직접 노출되는 토목구조물의 건설이 많아져서 염해에 의한 철근의 부식이 더욱 심각한 문제로 대두되고 있다. 철근 부식에 대한 위험을 최소화하기 위해서는 구조물의 내구성 및 내구년한을 합리적으로 예측할 수 있어야 하는데 현재까지 구조물의 내구성 예측연구는 강제부식실험에 의한 부식평가방법과 염소이온의 확산모델에 의한 부식발생시점의 예측등을 중심으로 이루어 지고 있다.

본 연구는 부식발생시점을 합리적으로 예측하는 해석적 방법을 제공하는 데 그 목적이 있으며 이를 위하여 염소이온 침투와 철근부식의 물리·화학적 발생기구에 대한 분석 및 고찰을 토대로 다양한 노출환경에서의 염소이온 침투, 확산특성의 변동성과 콘크리트 내에서의 수분의 이동을 고려하는 유한요소 해석모델을 적용하여 부식발생시점을 예측하였다. 염소이온 침투와 부식발생시점의 예측에 영향을 미치는 주요인자들을 분석하였다. 아울러 염소이온 확산실험을 통해 콘크리트 배합특성에 따른 염소이온 확산계수를 측정하여, 각 배합에 대한 부식발생시점의 예측해석을 수행하였다.

2. 유한요소 해석모델의 정식화

염소이온의 침투는 간극수의 침투현상과 모세관 흡수현상을 포함하는 간극수의 이동에 의한 간극수 속에 용해된 염소이온의 이송과 순수한 염소이온의 확산 등의 개별적인 전달기구가 중첩되어 작용하는 복합적인 전달기구에 의해 설명될 수 있다.

2.1 수분 이송향을 고려한 염소이온의 침투

콘크리트 간극수에서의 수분에 의한 염소이온의 전달향을 고려하면, 염소이온의 침투는 연속방정식과 Fick의 확산법칙에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{ce} \frac{\partial C_t}{\partial x} \right) + \frac{\partial (\gamma v C_t)}{\partial x} \quad (1)$$

여기서, D_{ce} : 총 염소이온의 유효확산계수(m^2/sec),

$\frac{\partial (\gamma v C_t)}{\partial x}$: 수분의 전달에 의한 염소이온의 전달항

v : 수분의 이동속도(moisture mass flow rate, (m/sec))

이 때, 물의 밀도를 ρ , 수분의 flux를 J_w 라 하면, $v=J_w/\rho$ 로 정의된다.

C_t : 총 염소이온농도(total chloride concentration, kg/m^3)

x : 확산거리(m), t : 확산시간(sec)

γ : 구속계수(binding ratio)

구속염소이온과 자유염소이온의 존재비율을 α 라 하면,

$\gamma=1/(1+\alpha)$ 로 정의된다(표1).

표 1 자유염소이온과 총 염소이온의 농도

염소이온의 형태	염소이온의 농도, kg/m ³	자유염소이온과 총염소이온의 관계
해수	18.5	Cf = 0.55×Ct
NaCl	20.0	Cf = 0.55×Ct
CaCl ₂	20.0	Cf = 0.35×Ct
MgCl ₂	20.0	Cf = 0.50×Ct

2.2 콘크리트 속에서의 수분의 이송

한편, 콘크리트 간극속에서 수분의 이동은 Darcy 법칙과 연속방정식으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (2)$$

여기서, $h=p/p_{sat}$: 콘크리트 내부의 상대습도

p : 콘크리트 내부의 간극수압(pore pressure, N/m³), p_{sat} : 포화간극수압

w : 콘크리트 간극속의 수분량, w_{sat} : 포화수분량

D_h : 콘크리트의 수분 확산계수(m²/sec)

이 때, $h \approx w/w_{sat}$ 로 근사할 수 있으며 수분의 flux는 다음과 같이 결정된다.

$$J_w = w_{sat} D_h \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3)$$

2.3 콘크리트 확산특성의 변동성

확산계수로 표현되는 염소이온이나 수분의 침투에 대한 콘크리트의 저항성은 콘크리트의 수밀성, 즉 간극의 크기와 구조, 콘크리트 표면의 결합 등을 반영하는 가장 지배적인 변수가 된다. 일반적으로 확산계수는 온도, 시간, 상대습도 등에 큰 영향을 받으므로, 이러한 영향인자를 고려하기 위해 몇몇 연구자들은 다음과 같은 계수를 제안하고 있다.

$$D_{ce} = D_{ci} \cdot f_1(T) \cdot f_2(t_e) \cdot f_3(h) \quad (4)$$

여기서, D_{ci} : 기준조건에서의 확산계수

$f_1(T), f_2(t_e), f_3(h)$: 영향계수(표2)

2.4 유한요소 정식화 및 초기·경계조건

일반적인 Galerkin방법을 적용하여 유한요소 정식화를 수행하였다. 염소이온의 침투방정식은 이송확산방정식(convective diffusion equation)이므로 이송항이 지배적인 경우 일반적인 Galerkin 방법을 적용할 수 없지만 콘크리트 내에서의 수분의 이동속도는 아무리 투수성이 큰 콘크리트라 할지라도 확산속도에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 확산이 지배적인 문제가 되므로 Galerkin 방법으로도 충분한 해의 안정성을 보장할 수 있다고 판단된다.

표 2 확산계수의 영향계수

	관 계 식	비 고
온도의 영향 Arrhenius 법칙	$f_1(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$	T, T_0 : 절대온도(K) R : 기체상수 (gas constant, 8.31473 KJ/(mol · K)) U : 확산 활성화 에너지(Page, C.L.) (activation energy, KJ/mol)
재령의 영향 Saetta 제안식	$f_2(t_e) = \xi + (1 - \xi) \cdot \left(\frac{t_1}{t_e} \right)^{1/2}$	t_e : 재령(day), t_1 : 기준재령(day) ξ : 상관계수($0 \leq \xi \leq 1$)
상대습도의 영향 Bazant 실험식	$f_3(h) = a + \frac{1 - a}{1 + \left(\frac{1 - h}{1 - h_c} \right)^4}$	h_c : 임계 상대습도 상온(25℃)에서 약 0.75 a : 상수 상온(25℃)에서 약 0.05

초기조건은 콘크리트 내부의 수분과 염소이온의 농도가 일정한 것으로 가정하여(C_i, h_i) 다음과 같이 표현하였고, 경계조건은 외부환경으로부터 콘크리트 표면으로 침투하는 수분과 염소이온의 flux가 일정하다고 가정하여 아래와 같이 적용한다. 이 때, 아래첨자 b는 경계를 나타내며, $v < 0$ 이면 수분이 증발하는 상태가 되므로 수분의 이송량은 무시된다.

$$\left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right)_h = -B_h (h_b - h_{en}) \quad (5)$$

$$\left(D_{ce} \frac{\partial C}{\partial x} \right)_h = -B_c (C_b - C_{en}) \quad (6)$$

여기서, B, B_h 는 콘크리트 표면에서의 염소이온과 수분의 전달계수(m/sec, 1/(m²sec))

v : 표면에서의 수분의 평균 침투속도(m/sec)

C_b, h_b : 표면 염소이온농도(kg/m³)와 상대습도

C_m, h_m : 외부환경의 염소이온농도(kg/m³)와 상대습도

3. 콘크리트 배합특성에 따른 부식발생시점의 예측

앞서 기술한 유한요소 해석모델을 철근 콘크리트 벽체요소에 적용하여 수분의 이동에 의한 영향, 노출환경조건에 따른 영향을 분석하기 위한 예제와 함께 배합특성별 부식발생시점 예측예제를 수행하였다. 초기 및 경계조건은 앞서 기술한 바와 같고, 해수의 온도는 1년을 주기로 sinusoidal distribution을 갖는 것으로 설정하였다.

부식발생시점을 예측하기 위해서 반드시 필요한 변수는 확산계수와 부식임계농도이다. 염소이온의 확산계수는 몇가지 실험방법에 의해 근사적으로 결정할 수 있다. 본 연구에서는 현재까지 제안된 여러가지 실험방법 가운데 비교적 소요시간이 짧고 간단한 전위차에 의한 염소이온 투과시험법을 변형한 확산계수 측정법을 적용하였다(Zhang, Gjovrv). 이 방법은 기본적으로 투수성 평가에 사용되는 염소

표 3 확산계수 측정실험의 배합변수

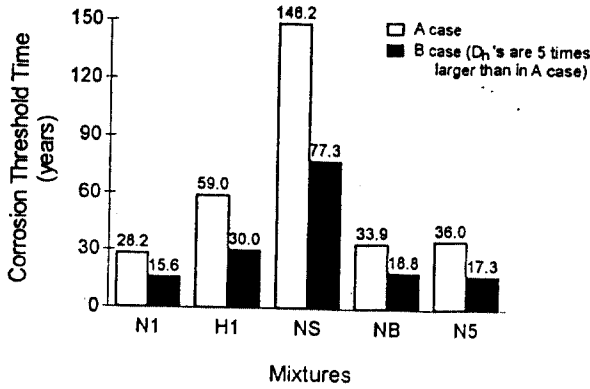
변수명		N1	NS	NB	H1	N5
시멘트 종류		1종				5종
시멘트량 (kg/m ³)		380	342	332.5	550	380
혼화제 (결합제 중량비)		-	실리카 흙 (10%)	고로슬래그 (12.5%)	-	-
물-시멘트비		0.43			0.28	0.43
물		164			154	164
골재 (kg/m ³)	잔골재	850			708	850
	굵은골재	1040			1771	1040

표 4 확산계수 측정결과

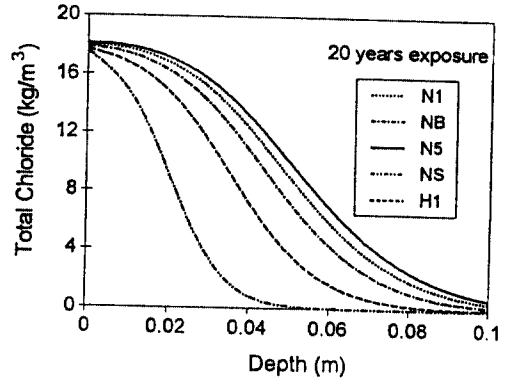
배합명	N1	H1	NS	NB	N5
농도증가율 ($\times 10^{-3}$ mmol/sec)	4.94	2.65	0.92	4.08	5.51
확산계수 (D, m ² /sec)	12.337	6.613	2.287	10.177	13.755
구속계수	0.55				
유효확산계수 (D _{ce} , $\times 10^{-12}$ m ² /sec)	6.78	3.64	1.26	5.60	7.57

이온 투과시험(ASTM 1202-91)과 동일한 실험방법인데, 콘크리트 시편을 통과한 염소이온의 농도증가율을 측정하여 확산계수를 결정한다. 선택된 배합변수는 단위시멘트량과 혼화재료, 시멘트 종류를 달리 하였는데, 단위시멘트량은 380 kg/m³, 550 kg/m³의 두가지를 선택하였으며, 시멘트는 1종과 5종 시멘트를 사용하였고, 혼화제는 실리카흙(10%, 결합제 중량비), 고로슬래그(12.5%, 결합제 중량비)를 사용하였다(표 3). 각 배합변수에 대해 확산계수를 측정한 결과는 표4와 같다. 한편, 부식임계농도(critical chloride concentration)는 시멘트의 C₃A함량이 8%이상인 시멘트의 경우 시멘트 중량의 0.4%, 8%이하인 경우 1%로 선택하였다. 즉, 5종시멘트 배합(N5)의 경우는 시멘트 중량의 1%를, 1종 보통 시멘트 배합의 경우는 0.4%를 적용한다. 이를 배합시 시멘트량에 대한 값으로 근사하여 각각 N5배합의 경우 3.8kg/m³, H1배합의 경우 2.2kg/m³, N1, NS, NB배합의 경우 1.5kg/m³으로 가정한다. 노출환경은 연속적으로 해수에 침지된 경우로 가정하였으며, 수분의 확산계수는 염소이온의 확산계수와 비례할 것으로 생각되므로 N1배합의 수분 확산계수가 1.0×10^{-12} m²/sec인 경우(case A)와 5.0×10^{-12} m²/sec인 경우(case B)의 두가지를 가정하여 염소이온 확산계수의 비에 따라 산정하였다. 기타 다른 해석변수는 해석의 편의를 위해 모든 경우 동일하게 가정하였다.

배합별 부식발생시점의 예측결과는 그림 1에 나타내었다. 예상한 바와 같이 염소이온의 확산계수가 증가하면 부식발생시점은 현저히 감소한다. 염소이온 확산계수가 1.26×10^{-12} m²/sec인 NS배합의 경우 부식발생시점이 148.2년인 반면 염소이온 확산계수가 3.64×10^{-12} m²/sec, 5.60×10^{-12} m²/sec, 6.78×10^{-12} m²/sec인 H1, NB, N1배합은 case A의 경우, 각각 59.0, 33.9, 28.2년으로 예측되었다. 이는 염소이온의 확산계수가 무엇보다도 가장 중요한 인자임을 명확히 보여준다. 또한 case A와 case B를 비교하면 수분의 확산계수가 5배 증가했을 때 부식발생시점이 상당히 감소함을 알 수 있다.



(a) 부식발생시점



(b) 염소이온 침투양상(case A)

그림 1 콘크리트 배합특성에 따른 부식발생시점 예측결과와 침투양상

NS배합의 경우 case B의 경우 77.3년으로 case A의 경우에 비해 50%이상 감소하였다. 이러한 결과는 수분의 확산계수 역시 부식발생시점에 매우 큰 영향을 미친다는 사실을 뒷받침한다. 배합별 염소이온의 침투양상을 살펴보면, N5배합이 가장 높은 염소이온농도를 보이고 있는데 반해 부식발생시점은 오히려 N1배합의 부식발생시점이 N5배합보다 더 짧다. 이는 부식임계농도를 시멘트의 C_3A 함량에 따라 규정하였기 때문이며, 5종시멘트의 경우 염소이온을 더욱 효과적으로 구속하여 1종시멘트에 비해 부식저항성이 더욱 향상되는 경향을 잘 반영하고 있는 것으로 보인다.

5. 결 론

1. 본 연구에서는 부식발생시점의 예측을 토대로 합리적인 콘크리트 구조물의 내구성 예측을 위해 염소이온의 확산방정식을 수분에 의한 염소이온의 전달, 노출환경조건에 따른 영향과 확산계수의 변동성을 고려하여 유한요소 해석모델에 적용하였으며, 이를 통해 염소이온의 침투와 부식발생시점에 대한 각 변수의 영향을 분석하였다.
2. 염소이온의 확산계수는 콘크리트의 확산저항성을 대표하는 변수이다. 본 연구에서는 염소이온 투과 시험을 변형한 전기적 방법을 이용하여 몇가지 배합에 대해 확산계수를 측정하여 이를 통해 부식발생시점의 예측해석을 수행하였다. 해석결과는 염소이온 확산계수가 $1.26 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 인 NS배합의 경우 부식발생시점이 148.2년인 반면 염소이온 확산계수가 $3.64 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$, $5.60 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$, $6.78 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 인 H1, NB, N1배합은 case A의 경우, 각각 59.0, 33.9, 28.2년으로 예측되었다. 결과적으로 염소이온의 확산계수가 염소이온의 침투 및 부식발생시점에 대해 가장 지배적인 영향인자임을 명확히 보였다.
3. 콘크리트 내부의 수분은 염소이온을 콘크리트 내부로 이동시키는 매개체로서 중요한 인자이며 수분의 확산정도는 염소이온의 침투에 매우 큰 영향을 끼친다. 해석 결과 수분의 확산계수를 5배 증가시켰을 때(case B) 부식발생시점이 50%가량 감소하여 이러한 영향을 명확히 나타내고 있다.

참고 문헌

1. Bazant, Z. P., "Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures-Theory," ASCE, ST6, Jun., 1979, pp.1137-1153.
2. Bazant, Z. P., Thonguthai, W., "Pore Pressure and Drying of Concrete at High Temperature," ASCE, EM5, Oct., 1978, pp.1059-1179.
3. Sietta, A. V., Scotta, R. V., Viataliani, R. V., "Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete," ACI Material Journal, Sep.-Oct., 1993, pp.441-451.
4. Zhang, T., Gjølrv, O. E., "An Electrochemical Method For Accelerated Testing of Chloride Diffusivity in Concrete," Cement and Concrete Research, v.24, No.8, 1994, pp.1534-1548.