

중성화와 염소이온의 동시 복합환경에 노출된 콘크리트의 적정 피복두께의 결정

Determination of Required Cover Depth of Concrete Exposed to Simultaneous Attack of Carbonation and Chloride Ion

이 창 수* 윤 인 석** 이 규 동***
Lee, Chang-Soo Yoon, In-Seok Lee, Kyu-Dong

ABSTRACT

The most common deteriorating processes of concrete structures in the world-wide are carbonation and chloride ion. In this paper, chloride profiles of carbonated concrete is predicted to considering two layer composite model, which is based on Fick's 2nd law.

From the experimental result on combined deterioration of chloride and carbonation, it was examined that high chloride concentration was built up to 3~5 mm over depth from carbonation depth. The analytical modeling of chloride diffusion, which was based on the Fick's 2nd law of diffusion, was suggested to depict the relative influence of the carbonation depth.

1. 서 론

국내 환경에서 콘크리트 구조물의 내구성능 저하는 중성화와 염소이온에 의하여 발생되며 이는 전세계적으로 열화를 유발하는 주요한 요인으로 간주되고 있다. 그런데 중성화와 염소이온의 침투에 의한 콘크리트의 성능저하는 실제환경에서 복합적으로 작용하는 것이 일반적인 상황임에도 불구하고 단일조건에서의 열화에 대한 연구로 편중되어 있으며 복합열화에 대한 연구는 매우 드문 상황이다.

한편, 우리나라와 가까운 일본은 콘크리트 표준시방서에 실용적 차원에서 복합열화에 대한 내구성 확보지침을 설정하였으나 국내에서는 이에 대한 연구가 이루어진 바가 없는 실정이다. 그래서 본 연구는 복합열화 현상을 모델화하기 위하여 실험에 의한 콘크리트의 열화속도에 관련된 물리적 특성을 매개 변수화하여 이를 확산법칙과 결합하는 실용적이고 합리적인 예측기법을 제시하고자 하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

사용된 보통포틀랜드시멘트는 비중 3.14, 분말도 3,422 cm³/g 이며, 비중 2.59, F.M 2.78인 천연강사와

* 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 연구원

*** 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

굵은골재 최대치수 25mm, 비중 2.64, F.M 7.58인 세석을 이용하였다. 혼화제는 목표슬럼프와 공기량을 확보하기 위하여 리그닌술포산 표준형 AE제와 감수제를 적정 사용하였다.

2.2 콘크리트의 배합

Table 1의 배합에 따라 KS F 2403에 의해 제작하고 28일 동안 표준 양생하였다.

Table 1 Proportioning of concrete mixtures

Air (%)	Slump (cm)	W/C	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)			
				water	Cement	Sand	Gravel
4.5 ± 1.5	15 ± 1	0.45	42	185	411	709.3	1030.0
4.5 ± 1.5	15 ± 1	0.50	42	185	370	697.3	1012.8
4.5 ± 1.5	15 ± 1	0.55	42	185	336	704.7	1024.2

2.3 실험방법

중성화의 촉진조건은 3%, 5%, 10%의 CO₂ 농도, 상대습도 65%, 온도 20℃의 조건에서 진행되었으며 중성화 깊이는 콘크리트 시험체의 파단면에 1% 페놀프탈레인-알콜 용액을 1분 간격씩 2회 살포하고 버니어캘리퍼스를 이용하여 0.1mm 감도까지 정밀 측정되었다. 염소이온 침투실험은 0.5M NaCl₂ 수용액에 중성화와 염소이온의 영향조건을 일대일 수준으로 하여 1주일 간격으로 반복하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 중성화와 염소이온이 복합작용시의 콘크리트내에 침투한 염소이온 프로파일의 실험결과이다. 콘크리트 내의 염소이온 프로파일은 Fickian 거동을 보이지 않는데 즉, 복합열화 진행시에 고전적인 Fick의 2법칙에 지배되지 않는 것을 알 수 있다. 본 연구는 Fick의 1법칙을 콘크리트에 적용시 매체를 통한 물질의 확산계수가 시간에 일정하다는 조건을 수정하여 시간에 따른 CO₂ 확산계수의 경시변화를 및 미세기후 조건에 따른 물리적 시간계수를 아래와 같이 나타내었다.

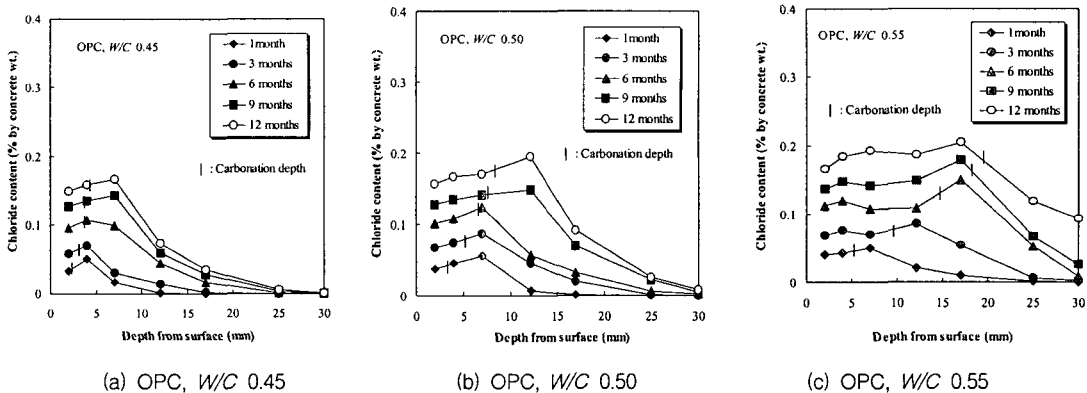


Fig. 1 Total chloride profiles in concrete under combined deterioration

$$D_{CO_2}(t) = D_1 \cdot t^{-n_d} \quad (1)$$

Table 2 Main parameters of carbonation for concrete with W/C ratio

W/C ratio	D_1	n_d	n_m	B
0.45	0.6496	0.2180	0.2773	137.5
0.50	1.2358	0.2348	0.2650	135.4
0.55	2.2248	0.2395	0.2503	134.4

CO₂의 확산이 이루어지는 중성화 경계면을 중성화 깊이(X_c)로, 외부 CO₂ 농도를 대기 중 CO₂ 농도로 가정하면 Fick의 제 1법칙의 중성화에 대한 시간 모델은 식 (2)와 같다.

$$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t, RH)}{a} \cdot C_{CO_2} \cdot t} \left(\frac{t_r}{t}\right)^{n_m} \quad (2)$$

여기서, x_c : 재령 t (s)에서의 중성화 깊이 (cm), D_{CO_2} : CO₂ 확산계수 (cm²/s), C_{ex} : 대기 중 CO₂ 농도 (g/cm³), a : CO₂ 흡착량 ($0.75 \cdot C \cdot CaO \cdot \alpha_H \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}}$, kg/m³), n_m : 미세기후 노출조건에 따른 시간계수, t_r : 기준시기 (1년)이다.

다음으로 표면 염소이온량은 시간경과에 따라 무한대로 증가하지 않으며 일정시기에 도달하게 되면 증가량이 완만해져 최종 표면 염소이온량에 도달하게 되므로 본 연구에서는 아래 식에 의하여 표면 염소이온량이 예측되었다.

$$C_s(t) = C_0^* (1 - e^{-\beta t}) \quad (3)$$

여기서, C_0^* 는 최종 염화물량으로서 본 연구에서는 최종 표면 염소이온량은 일본 청수항 방파제에서 장기 폭로실험을 행하여 얻은 간만대에서 조건인 0.7% (콘크리트 중량 대비)로 간주하였다.

한편, 시간의 경과에 따른 수화도의 향상으로 염소이온 확산계수는 감소되므로 이에 대한 물리적 경시변화 특성을 식 (4)와 같이 표현하였으며 중성화 및 비중성화된 콘크리트의 염소이온 확산계수의 시간계수는 Table 3과 같이 산출되었다.

$$D_{cl}(t) = D_r \left(\frac{t_r}{t}\right)^{-m} \quad (4)$$

Table 3 Parameters of chloride diffusion for concrete

W/C ratio	Carbonated concrete		Uncarbonated concrete	
	D_{Cl}	m	D_{Cl}	m
0.45	11.689	0.2997	2.387	0.2874
0.50	15.191	0.4910	4.114	0.3425
0.55	30.268	0.5650	6.564	0.3436

한편, 콘크리트의 중성화로 인하여 pH가 감소되면 시멘트 내부에 고정된 염소이온 이온은 세공용액 중에 해리되어 염소이온 이온의 농도 상승, 농축과 확산의 반복작용 등이 발생한다. 중성화 깊이에서 3~5mm의 미중성화 영역에서 염소이온의 농축현상이 나타났는데 페놀프탈레인 알칼 용액이 철근부식을 시작하는 pH가 9.5이며 철근의 부식을 유발하는 pH 11은 중성화 깊이에서 6~8mm 선형깊이인 것을 고려해보면 중성화로 인한 pH가 저하의 시작을 보이는 깊이와 비교적 근접한 부위임을 알 수 있다. 염소이온의 농축현상은 순수확산 방정식으로 얻을 수 없으며 실험결과 및 순수확산 방정식에 대한 농축비를 구하여 Fig. 7에 나타내었다. 이를 다시 日本土木學會에서 제안된 염소이온의 농축현상으로 부터 안전한 영역인 중성화 깊이로부터 25mm 깊이까지 염소이온의 농축현상이 발생하는 것으로 가정하고 5mm의 미중성화 영역을 구분하고 각 영역에 대한 회귀분석을 얻은 것이 식 (5)이다.

$$R_{eri} = 0.0482(x-X_c) + 1.3331, \quad x \leq X_c+5\text{mm} \quad (5a)$$

$$R_{eri} = 2.0549(x-X_c)^{-0.226}, \quad X_c+5 < x \leq X_c+25\text{mm} \quad (5b)$$

중성화와 염소이온의 동시 복합적인 열화의 진행을 실용적으로 해석하기 위해서 Fick의 2법칙을 2중 복합 매체에 대하여 적용할 수 있도록 식 (6)과 같이 고려하였다.

$$\text{초기조건: } C_{Cl,cb}(x,0) = 0, \quad 0 < x < X_c, \quad C_{Cl,ucb}(x,0) = 0, \quad x > X_c \quad (6a)$$

$$\text{경계조건: } C_{Cl,cb}(X_c,t) = C_{Cl,ucb}(X_c, t), \quad t \geq 0, \quad C_{Cl,cb}(0,t) = C_s, \quad t \geq 0 \quad (6b)$$

여기서, 시간의존적인 표면 염소이온량 및 염소이온 확산계수와 칼슘 실리케이트 수화물의 분해소실로 미중성화 영역에서 세공용액 중에 염소이온의 농축정도(R_{eri})를 반영한 최종적인 식은 (7)과 같다.

$$C_{Cl,cb}(x,t) = C_s(t) \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left[\text{erfc}\left(\frac{2nX_c+x}{2\sqrt{D_{Cl,cb}(t)}t}\right) - \alpha \cdot \text{erfc}\left(\frac{(2n+2)X_c-x}{2\sqrt{D_{Cl,cb}(t)}t}\right) \right] \quad (7a)$$

$$C_{Cl,ucb}(x,t) = \frac{2kC_s(t)R_{eri}}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \text{erfc}\left\{ \frac{(2n+1)x+k(x-X_c)}{2\sqrt{D_{Cl,cb}(t)}t} \right\} \quad (7b)$$

Fig. 2는 임계 염소이온량을 수용성 염소이온량 0.15%(시멘트 중량비)로 간주하였을 때 경년에 따른 요구피복두께를 결정한 결과이다. 낮은 시멘트의 수화도로 인하여 경년 10년까지 CO₂ 및 염소이온의 확산이 빠르게 진행되어 요구피복두께가 급격히 증가하였다. 또한, 중성화와 염소이온의 시간주기비율이 일대일로 지속적인 반복조건을 갖는 노출환경에서 피복두께 100mm 이하 조건에서 목표 내구수명 100년을 갖기 위해서는 물-시멘트비 0.45이하의 배합조건에서 만족하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

- (1) 염소이온 농축현상은 중성화 깊이에서 3~5mm 깊이에서 표면 염소이온량보다 더욱 높은 농도를 보였다.
- (2) 복합작용에 의한 염소이온의 프로파일의 예측결과, 피복두께 100mm 이하의 조건에서 목표내구수명 100년을 만족시키기 위해서는 물-시멘트비 45% 이하로 배합하는 것이 적절할 것으로 생각된다.

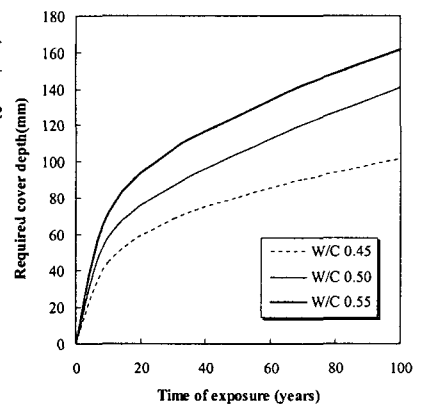


Fig. 2 Required cover depth