

# 해양콘크리트의 내구성 설계를 위한 재료 매개변수의 시간단계별 해석

## Time Evolution of Material Parameters in Durability Design of Marin Concrete

윤인석\* 김영근\*\*

Yoon In-Seok Kim Young-Geun

### Abstract

Material parameters such as surface chloride content, water permeability coefficient, chloride diffusivity and critical chloride content are a substantial key parameter for understanding the durability performance of concrete and its micro-structural densification. Over the past few decades, a considerable number of studies on the durability design for marine concrete structures have been carried out. However, the results are different to each other. In order to establish a consistent durability design system of concrete, it is a precondition to define material parameters, which affect deterioration of concrete due to chloride penetration. Such parameters are surface chloride content, chloride diffusivity, and critical chloride content. Usually these parameters are assumed as temporary constant values or obtained from the experimental results for short term. However, it is necessary to define these parameters reasonably, because these significantly influence the calculation of service life of concrete.

In this paper, it is introduced to define material parameters of concrete for chloride diffusion, such as surface chloride content  $[Cl]_s$ , water permeability coefficient  $K$ , chloride diffusivity  $D_{Cl}$ , critical chloride content  $[Cl]_{cr}$ . These are expressed as time function considering hydration evolution of hardened cement paste. The definition of the material parameters is a prerequisite to simulate chloride penetration into concrete as time elapsed.

### 요약

표면염소이온량, 투수계수, 염소이온 확산계수, 임계 염소이온량과 같은 재료 매개변수는 콘크리트의 내구성능을 이해하는데 매우 중요한 재료 매개변수이다. 지난 수십년간, 해양성 콘크리트 구조물의 내구성 설계에 대한 많은 연구가 이루어졌으나 그 결과는 서로 상이하다. 콘크리트의 통합적인 내구성 설계 시스템을 개발하기 위해서 염소이온의 침투에 영향을 미치는 재료매개변수를 정립하는 것은 반드시 필요한 연구이다.

본 고의 목적은 콘크리트의 재료 매개변수를 시간단계별로 추정할 수 있는 기초적 접근방법을 정리하는 것이다. 미세구조 모델 및 시멘트의 경화특성을 기초로 표면 염소이온량  $[Cl]_s$ , 투수계수  $K$ , 염소이온 확산계수  $D_{Cl}$ , 임계 염소이온량  $[Cl]_{cr}$  을 산정할 수 있는 해석적 기법이 소개되었다. 이는 시멘트 경화체의 수화단계별 특성을 고려하여 시간의 함수로 표현하였다. 본 고에서 소개한 재료 매개변수의 정립은 시간경과에 따른 염소이온 침투를 시뮬레이션하기 위한 필수적인 선행연구로서, 향후에는 침투 특성을 묘사할 수 있는 지배방정식 등과 같은 다양한 해석적 기법들이 개발될 예정이다.

\* 정회원, 인덕대학 건설정보과 전임강사

\*\* 정회원, 한국건자재시험연구원 방수보수보강센터 센터장

## 1. 서 론

해양성 콘크리트 구조물의 염해에 대한 내구성 설계는 국내외에서 장기간 동안 연구되어온 분야중의 하나이다. 그런데, 대부분의 연구는 시멘트 경화체의 재료적 특성에 반영하지 않고, 재료매개변수를 임의의 상수로 간주하거나 혹은 짧은 시간 동안의 실험적 결과를 장기 해석결과에 반영하였다. 이는 연구결과마다 해석 결과가 서로 상이함은 물론, 실의 예측치와도 큰 차이를 보이는 공극적 원인이다.

본 고에서는 염해 해석에 영향을 미치는 각종 매개변수 들을 시간단계별로 추정할 수 있는 실용적 해석방법을 살펴보고자 한다. Fig. 1에 의하면 염해 해석에 영향을 미치는 대표적 요소들은 표면 염소이온량, 공극을 통해 콘크리트 내부로 유입되는 염소이온 확산계수 및 투수계수, 염소이온의 고정화, 철근부식을 유발하는 임계 염소이온량 등이 대표적으로서 Fig. 1의 확산식에 의하여 염소이온 프로파일을 예측할 수 있다.

## 2. 재료매개변수의 해석

### (1) 표면염소이온량<sup>1)</sup>

Table 1은 해수성분으로서, 콘크리트 표면내 공극이 해수에 의하여 완전 포화되었다는 가정하에 표면 염소이온량의 이론적 추정이 가능하다. 해수내 전체 염소성분을 35.0%로 가정하면 Fig. 2와 같은 방법에 의하여 표면 염소이온량을 계산할 수 있다.

Table 1 Chemical elements of sea water, e[5]

Chemical Element (e)	Cl	Na	Mg	SO <sub>4</sub>	K	Ca
Volume (mmol/l)	548	470	54	28	10	10

### (2) 염소이온 확산계수<sup>2)</sup>

염소이온 확산계수는 Fig. 3과 같은 (a) 액체에서 이온의 확산계수, (b) 시멘트 경화체의 공극률 및 공극구조, (c) 공극의 연결로 인한 굴곡특성, (d) 확산지연효과 등의 지배를 받으며 이는 간단히 멀티 요소함수로 표현할 수 있다.

① 시멘트 경화체의 공극구조: 시멘트 경화체의 공극분포 특성을 식 (1)과 같이 반영하였으며 이로부터 시멘트 경화체의 총 공극률( $\phi$ )은 식 (2)와 같다. 여기서,  $V_p$ : 공극반경  $r$ 을 변수로 한 공극구조,  $B$ : 공극분포 함수의 매개변수이다. 공극률  $\phi$ 를 이미 알고 있다면, 공극분포 함수의 매개변수  $B$ 는 역산하는 방법으로 계산할 수 있다.

$$dV_p = Br \exp(-Br) d \ln r \quad (1) \quad \phi = \int_0^{\infty} Br \exp(-Br) d \ln r \quad (2)$$

② 공극에 의한 굴곡특성: 단위체적 당 존재하는 시멘트 수화물을 하나의 셀로 간주하고, 시멘트 코어를 정사각형으로 가정한 후, 원형과 정사각형의 형상함수를 고려함으로써 계산한 바 있다. 본 연구에서는 투수에 의한 수분유입의 굴곡특성에 이방법을 이용하였다.

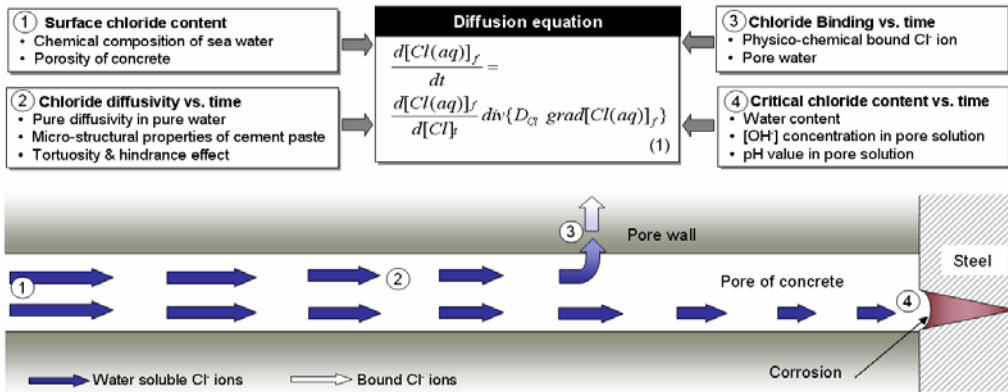


Fig. 1 Main material parameters affecting chloride ions diffusion in concrete  
( $D_{Cl}$ : Cl diffusivity,  $t$ : time,  $[Cl(s)]_b$ : bound Cl content,  $[Cl(aq)]_f$ : free Cl content,  $[Cl(s)]_t$ : total Cl content)

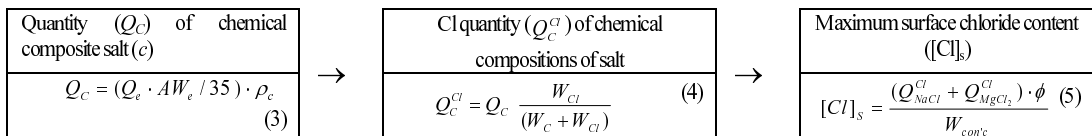


Fig. 2 Calculation of surface chloride content ( $Q_c$ : Quantity of chemical element  $e$ (see table 1),  $AW_e$ : atomic weight of chemical element  $e$ ,  $W_c$ : weight of composite salt  $c$ ( $c$ : NaCl or  $MgCl_2$ ),  $Q_{NaCl}^{Cl}$ : quantity of chloride in NaCl,  $\rho_c$ : density of composite salt  $c$ ,  $\phi$ : porosity of concrete)

③ 시멘트 경화체의 공극수분량 : 시멘트계 재료의 공극구조는 공기가 차지하는 체적량  $\phi_{\text{vap}}^{\text{air}}$ 와 배합수에 의한 내부 포화도  $S_i$ 에 의하여 모세공극 내 수분량  $\phi_{\text{w(cap)}}$ 으로 구성되며 각각이 ④ 염소이온 입자의 충돌 및 좁은 공극벽으로 확산현상의 지연이 초래된다. 이상의 결과를 토대로 골재와 시멘트 각각의 확산계수로부터 콘크리트의 확산계수가 계산되었다.

**(3) 콘크리트의 투수계수<sup>3)</sup>**

① 시멘트 경화체의 투수계수 : Darcy의 법칙에 의하여 유체의 흐름에 대한 골극 특성계수를 고려하면 다공질성 재료의 투수계수는 식 (6)과 같다. 외부의 수분이 차단된 조건에서 액체의 동점성  $\mu$ 와 동점성률  $\nu$  간의 관계로부터 식 (7)과 같이 시멘트 페이스트의 투수계수를 표현할 수 있다.

$$K = \frac{\kappa r_w}{\mu \tau_T} \quad (6) \quad K_{cp} = \frac{\kappa r_w}{\mu \tau_T} = \frac{(d_o^2 + d_{\text{wat}}^2) r_w}{64 \mu \tau_T} = \frac{(d_o^2 + d_{\text{wat}}^2) g}{64 \nu \tau_T} \quad (7)$$

$$K_{\text{con}}(\alpha) = \frac{K_{cp}(\alpha) [\zeta \cdot K_{cp}(\alpha) + (1-\zeta) K_{agg}]}{K_{cp}(\alpha) \lambda + (1-\lambda) [\zeta \cdot K_{cp}(\alpha) + (1-\zeta) K_{agg}]} \quad (8) \quad \lambda = 1 - \zeta = \sqrt{V_{agg}} \quad (9)$$

**(4) 임계 염소이온량<sup>4)</sup>**

Fig. 4와 같이 임계 염소이온량을 [Cl]/[OH]의 수용액 연구결과로부터 시간단계별 수산기 이온의 발현을 고려하여 시간단계별로 예측하였다.

**3. 해석결과**

Fig. 5는 본 고에서 제안된 표면 염소이온량 해석치를 물-시멘트비의 함수로 기존 연구결과와 비교한 것으로, Bazant의 이론치, Takeda의 현장 실측치와 근사한 결과를 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 본 고의 제안방법에 의하여, 물-시멘트비를 변수로 시간경과에 따른 염소이온 확산계수의 변화율을 계산한 결과이다. 콘크리트의 재령 28일까지 염소이온 확산계수가 가파르게 감소하는 추세를 보이는데, 즉 물-시멘트비 50%인 콘크리트의 경우, 초기재령에 비교하여 재령 28일이 되면서는 약 14.7배 이하로 감소하였다. 이후에는 그 감소추세가 현저히 감소하지만, 완만하게 꾸준히 진행되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 콘크리트의 투수계수를 산정한 결과이다. 초기재령에서 투수계수는 매우 낮은 결과를 보이고 있다. 초기단계에서 콘크리트의 투수계수는 물-시멘트비와 무관하게 일정한 추이를 보이지만, 재령이 경과함에 따라 물-시멘트비에 따른 차이는 뚜렷이 보이는 것으로 나타났다. 이는 경화전 단계에서 콘크리트의 투수계수는 시멘트 페이스트의 품질의 영향이 적으나, 시멘트의 수화반응이 진행됨에 따라 물-시멘트비에 따른 공극구조의 발현이 차이로 보이기 때문에 기인된 현상으로 생각된다.

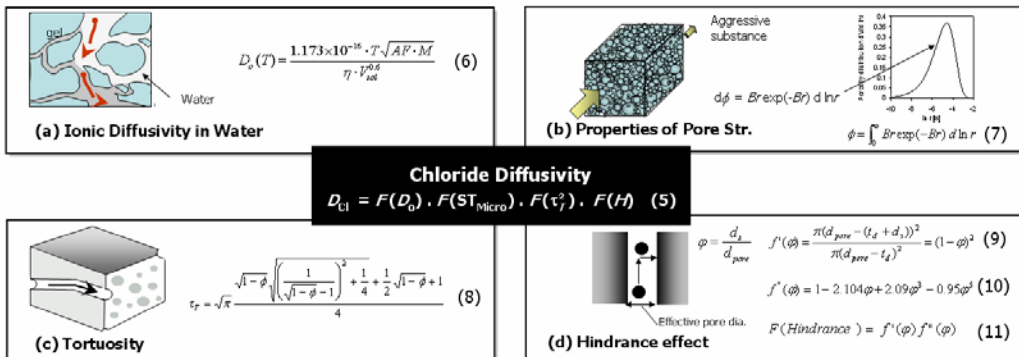


Fig. 3 Formulation of chloride diffusivity to consider various affecting parameters (T: Temp,  $d_{\text{pore}}$ : dia. of pore =  $2r$ ,  $d_s$ : solute molecular dia.,  $B$ : constant for pore size,  $D_0$ : Cl diffusivity in liquid ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $AF$ : 2.26,  $M_s$ : 18.1 g/mol,  $\eta$ : viscosity of water (Pas),  $V_{\text{sol}}$ : molar volume of water at its boiling point ( $\text{m}^3/\text{K mol}$ ),  $t_0$ : thickness of water film at the surface of pore (0 for full saturated condition))

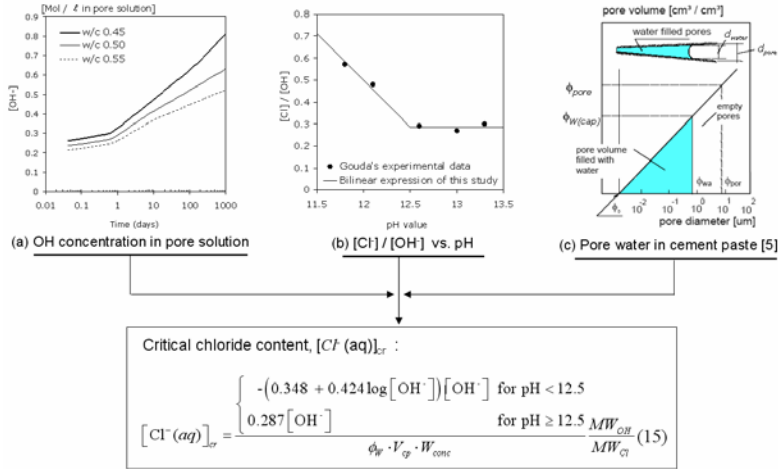


Fig. 4 Theoretical fomulation of critical chloride content of concrete

Fig. 8 은 임계염소이온량을 시간단계별로 해석한 결과이다. 최대 물-시멘트비와 최소 물-시멘트비의 차이가 10 %임에도 불구하고, 시간이 경과함에 따라 임계 염소이온량은 큰폭으로 뚜렷한 차이를 보였다. 콘크리트의 수화가 진행되면서 공극수의 pH 값 및 [OH]<sup>-</sup>농도가 상승하기 때문에 부식에 대한 저항성이 커져서 임계 염소이온량도 상승하는 결과를 초래하였다. 또한, 해사와 같은 내부도입원에 의하여 염소이온이 선혼입될 경우, 초기재령에서는 콘크리트의 공극수 내 [OH]<sup>-</sup> 농도가 매우 적은 양이기 때문에 내재된 염소이온량 적음에도 불구하고, 철근부식이 유발될 수 있다고 생각된다.

#### 4. 향후 계획

본 연구를 기초로 향후 나노단위의 시멘트 수화물부터 메소단위의 콘크리트 재료적 특성이 고려된 멀티스케일 측면에서 시멘트의 과학 및 콘크리트의 공학적 지식이 통합된 내구성 설계 시스템을 개발할 예정이다.

#### 참고문헌

- 1) 윤인석 외 3인, “해수에 노출된 침지대 콘크리트의 표면염소이온량에 대한 이론적 접근방법,” 한국콘크리트학회 봄학술발표논문집, 2006.5.
- 2) 윤인석, 김은겸, 이상수, “탄산화를 고려한 콘크리트의 염소이온 확산계수 해석기법,” 대한토목학회 논문집, 제27권, 4-A호, pp.617-625, 2007.7.
- 3) 윤인석, “탄산화를 고려한 콘크리트의 투수계수 해석기법,” 한국콘크리트학회 논문집, (심사중)
- 4) 윤인석, “시멘트 수화특성 및 탄산화를 고려한 콘크리트의 임계 염소이온량에 대한 해석기법,” 한국 콘크리트학회 논문집, 19권, 3호, pp.367-375, 2007. 6

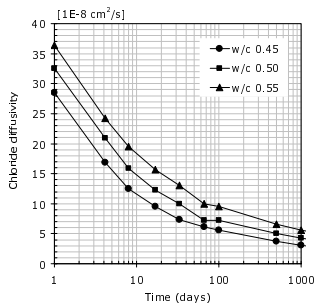


Fig. 6 Chloride diffusivity of concrete

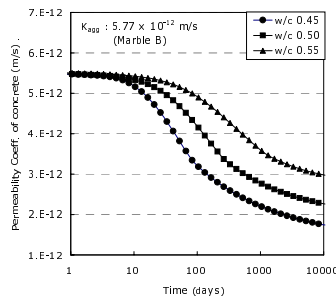


Fig. 7 Permeability coefficient of concrete

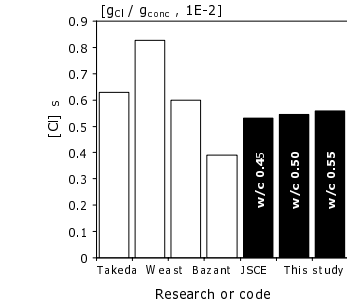


Fig. 5 Comparison of  $[Cl^-]_{cr}$  of this study and other studies

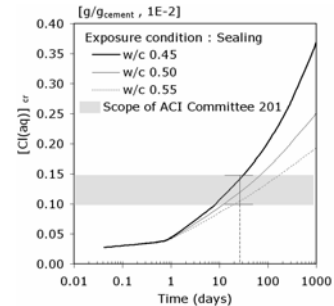


Fig. 8 Critical chloride content in concrete