

대기 환경조건을 고려한 콘크리트 교량 바닥판의 염소이온 침투 예측 모델

김 의 성

현대산업개발 토목개발팀

(2008. 4. 14. 접수 / 2008. 7. 28. 채택)

Prediction Model of Chloride Penetration in Concrete Bridge Deck Considering Environmental Effects

Eui-Sung, Kim

Civil Development Team, Hyundai Development Company

(Received April 14, 2008 / Accepted July 28, 2008)

Abstract : Recently, the deterioration of reinforced concrete structures, primarily due to corrosion of steel reinforcement, has become a major concern. Chloride-induced deterioration is the most important deterioration phenomenon in reinforced concrete structures in harsh environments. For the realistic prediction of chloride penetration into concrete, a mathematical model was developed in which the effects of diffusion, chloride binding and convection due to water movement can be taken into account. The aim of this research was to reach a better understanding on the physical mechanisms underlying the deterioration process of reinforced concrete associated with chloride-induced corrosion and to propose a reliable method for estimating these effects. Chloride concentrations coming from de-icing salts are significantly influenced by the exposure conditions such as salt usage, ambient temperature and repeated wet-dry cycles.

Key Words : chloride penetration, bridge deck, deterioration, corrosion, moisture diffusion, convection

1. 서론

콘크리트 구조물은 일반적으로 사용수명 동안 성능 저하 발생이 적어 상대적으로 유지관리 비용이 매우 낮은 것으로 알려져 왔다. 하지만, 최근 사회인식의 변화로 사회기반 시설물에 대한 높은 수명 및 안전도가 요구되어 구조물의 정확한 상태평가를 통한 적절한 유지관리 방법 및 시기 결정에 관한 연구에 관심이 증대되고 있으며, 특히, 환경 조건을 고려한 콘크리트 열화 성능저하에 관한 연구가 많이 수행되고 있다^{1,3,8,11)}.

콘크리트 내부로 침투되는 염소이온은 수분, 산소 등 다른 환경조건과 함께 철근의 부식을 일으키는 가장 중요한 요인으로 인식되고 있다. 철근의 부식은 구조물의 전체적인 강성저하 뿐만 아니라 철근과 콘크리트 사이의 부착력 감소, 이에 따른 균열 발생과 피복탈락을 유발시켜 구조물 외관 및 안전성에 악영향을 미친다. 따라서 콘크리트 구조물의

안전성 확보 및 적절한 유지관리 방안의 마련을 위해서는 콘크리트 내부로 침투하는 염소이온의 침투 특성을 파악하고 정밀하게 예측할 수 있어야 한다.

콘크리트 내부로의 염소이온 침투는 외부 염분 환경, 온도 및 수분환경에 의해 크게 영향을 받기 때문에, 염소이온의 침투상황을 정확히 판단하고 예측하기 위해서는 실제 구조물의 환경조건을 고려한 예측모델이 필수적이다. 이러한 필요성에 의해 Collepardi¹⁷⁾, Nisllon¹⁸⁾, Mejlbro¹⁹⁾ 등 여러 연구자들은 염소이온 확산에 대한 Fick's second law에 기반한 수학적 모델링으로 콘크리트 구조물에 대한 염소이온 침투 예측식을 개발하였다. 또한 Setta⁸⁾ 등은 수분확산을 고려한 염분해석 유한요소 해석 프로그램을 개발하였고, Tang and Nisllon²⁰⁾은 유한차분법을 이용하여 CliCone라는 염소이온 침투 예측 프로그램을 개발하였으며, 각각의 해석 변수에 대한 환경인자를 정량화 하였다. 하지만 기존의 해석 모델들은 콘크리트 구조물 전체의 확산계수가 일정하다고 가정하거나 콘크리트의 특성이 염소이온 침

투에 미치는 영향을 고려하지 못하는 경우도 있다. 또한 바닥판의 경우 태양의 직사광선에 의한 온도 변화가 상당히 크지만 이러한 대기 온도 및 습도의 정확한 해석을 통한 고려가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 내부로의 염소이온 침투에 영향을 미치는 환경인자들의 특성을 정량화하고 이들을 고려한 염소이온 침투 예측 모델을 개발하고자 하였다.

2. 염소이온 침투모델

2.1. 제설염에 의한 침투

도로, 교량 등의 콘크리트 포장에서 제설염으로 사용되는 것은 $CaCl_2$ 나 $NaCl$ 등으로서 녹은 눈이나 얼음과 함께 직접 접하지 않는 구조물 요소에 까지 침투하게 된다. 또 차량에 의해 옮겨진 제설염은 주차장이나 교량의 부속구조물에도 옮겨지게 되어 건습의 반복작용에 의해 높은 농도의 염소이온이 내부로 침투하게 된다. 이런 경우에는 콘크리트가 염소이온과 연속적으로 접하지 않으며 건습의 반복과 함께 외부 염소이온농도가 계속 변하는 상황에 놓이게 된다. 따라서, 이때에는 모세관 흡수현상(capillary absorption)이 염소이온 침투의 주된 메커니즘이 된다. 즉, 콘크리트 표면에서 모세관 흡수현상과 건조현상이 계속 반복되는 것이다. 이러한 현상 때문에 표면근처에서 매우 높은 염소이온 농도를 나타내게 되고 이것이 염소이온의 확산(diffusion)을 통해 내부로 재분배되게 된다.

2.2. 염소이온의 확산

콘크리트 내부에서 염소이온이 확산할 때 콘크리트 내부의 포화상태에 따라 확산 지배방정식이 달라질 수 있다. 특히, 수분의 이동에 따른 염소이온의 이동은 상당한 영향을 받기 때문에 이러한 점을 고려하여야 한다(Fig. 1).

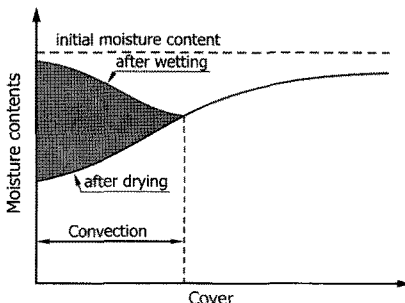


Fig. 1. Moisture variation in the concrete cover.

이러한 수분의 이동에 따른 영향을 고려한 염소이온 확산방정식은 다음과 같다^{7,10}.

$$\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_c w_e}{w_e + \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}} \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w_e C_{fc} J_{mx}}{w_e + \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}} \right) \quad (1)$$

여기서, C_{fc} = 자유염소이온 농도, C_{bc} = 구속염소이온 농도, w_e = 증발가능수량, D_c = 염소이온 확산계수, J_{mx} = 수분 플럭스를 나타낸다.

수분 플럭스, J_{mx} 는 콘크리트 공극의 상대습도의 함수로 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J_{mx} = -D_h \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

여기서, D_h = 수분확산계수, h = 공극의 상대습도를 타낸다.

식 (2)를 식 (1)에 대입하여 수분 이동을 고려한 염소이온 확산방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h^* C_{fc} \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}}, \quad D_h^* = \frac{D_h}{1 + \frac{1}{w_e} \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}} \quad (4)$$

여기서 D_c^* , D_h^* 는 각각 염소이온, 수분의 겉보기 확산계수를 나타낸다.

2.2.1. 염소이온 확산계수

콘크리트 염소이온 확산계수는 콘크리트 미세조직의 특성, 온도, 시간, 상대습도 및 염소이온 농도 등 다양한 인자에 의해 결정된다. 이를 표현하면 다음과 같다^{8,11}.

$$D_c = D_{c,ref} \cdot f_1(T) \cdot f_2(h) \cdot f_3(t) \quad (5)$$

여기서, $D_{c,ref}$ 는 콘크리트 고유 염소이온 확산계수이며, $f_1(T)$, $f_2(h)$, $f_3(t)$ 는 각각 온도, 공극의 상대습도, 재령의 영향을 나타낸 것이다.

콘크리트의 염소이온 확산계수에 미치는 온도의 영향은 Arrhenius's law에 의해 다음 식과 같이 나타낼 수 있다⁸.

$$f_1(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (6)$$

여기서, T 는 절대온도(K), U 는 활성화에너지(kJ/mol), R 은 기체상수(8.314×10^{-3} kJ/K · mol), T_{ref} 는 기준온도(K)를 나타낸다.

상대습도 및 재령의 영향은 다음 식으로 나타낼 수 있다⁸⁾.

$$f_2(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4} \right]^{-1}, f_3(t) = \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (7)$$

여기서, h 는 상대습도, h_c 는 임계상대습도로 0.75, t_{ref} 는 기준 시간, m 은 상수를 나타낸다.

2.2.2. 염소이온 구속효과

콘크리트 내에 침투한 염소이온은 다양한 형태로 존재하는데 이를 크게 분류하면 자유염소이온(free chlorides)과 구속염소이온(bound chlorides)으로 나눌 수 있다. 자유염소이온이란 간극수 내에 녹아있는 염소이온을 일컫는 것으로 콘크리트 내부에서 자유롭게 이동하여 철근의 부식반응을 매개하는 역할을 하게 된다. 반면 구속염소이온이란 여러 가지 메커니즘에 의해 콘크리트 내에 고정되어 구속된 염소이온을 말한다. 일반적으로 이용되는 염소이온 구속등온식은 선형, Langmuir, Freundlich 등이 있으며 이를 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구에서는 Tang¹²⁾에 의해서 제안된 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$C_b = \alpha C_f^\beta \quad (8)$$

여기서, C_b = 구속염소이온 농도, C_f = 자유염소이온 농도, α , β 는 콘크리트 배합에서 결정되는 실험상수를 나타낸다.

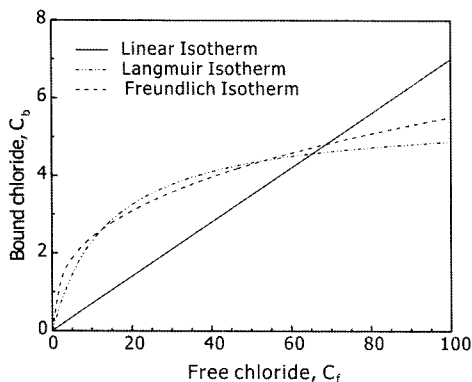


Fig. 2. Chloride binding isotherms.

2.3. 온도분포 수치해석 모델

콘크리트 구조물의 단면 내 온도 분포는 콘크리트 재료 내부의 열전도, 콘크리트 내부 수화열, 구조물 표면의 대류 및 복사 등의 영향을 고려한 열전달 방정식 및 경계조건을 이용하여 구할 수 있다. 구조물 내 시간 t 에서 온도 T 를 나타내는 열전달 방정식은 다음 식과 같다⁸⁾.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v \quad (9)$$

여기서, ρ 는 밀도, c 는 비열, k 는 열전도 계수, q_v 는 단위 부피당 콘크리트 수화발열률이다.

상기 열전달 방정식의 경계조건은 다음과 같다⁸⁾.

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) + q = 0 \quad (10)$$

여기서, q 는 구조물 표면과 주변과의 열에너지 전달률이며, n_x , n_y , n_z 는 경계조건에 접해있는 구조물 표면의 방향코사인이다.

2.3.1. 열에너지 전달률

구조물 표면과 주변과의 열에너지 전달률 q 는 대류, 열복사, 태양열 복사에 의한 에너지전달의 합이며 다음 식과 같이 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$q = q_c + q_r + q_{sun} \quad (11)$$

여기서, q_c , q_r , q_{sun} 은 각각 대류, 열복사, 태양열 복사에 의한 에너지 전달률이다.

구조물 표면과 접해있는 대기의 온도차이로 인한 대류복사 열전달은 다음 식과 같이 표현할 수 있다⁶⁾.

$$q_c = h_{conv}(T - T_a) \quad (12)$$

여기서, h_{conv} 는 대류열전달계수, T 는 구조물의 표면온도, T_a 는 대기온도이다.

대류열전달계수는 풍속, 표면조도, 노출된 구조물의 기하학적 형상 등 여러 가지 변수를 포함하는 함수이며 특히 풍속의 지배적인 영향을 받는다. 풍속과 대류열전달 계수의 관계는 다음과 같다¹⁵⁾.

$$h_{conv} = \begin{cases} 5.6 + 4v_{wind} & \text{for } v_{wind} \leq 5\text{m/s} \\ 7.2v_{wind}^{0.78} & \text{for } v_{wind} > 5\text{m/s} \end{cases} \quad (13)$$

콘크리트 구조물 표면과 주변대기 사이의 장파 복사로 인한 열전달은 Stefan-Boltzman법칙에 의하여 아래 식과 같이 표현된다.

$$q_r = \varepsilon\sigma(T^4 - T_a^4) \quad (14)$$

여기서, $\varepsilon = 0.9$, $\sigma = 5.7 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot C^4$ 이다.

태양복사 에너지는 직접복사, 산란복사, 반사복사로 이루어졌으며 다음과 같은 식에 의해 표현된다.

$$q_{sun} = \gamma_{abs} q_s, q_s = q_b + q_d + q_{refl} \quad (15)$$

여기서, q_b , q_d , q_{refl} 는 각각 직접복사, 산란복사, 반사복사를 나타낸다.

2.4. 습도분포 수치해석 모델

염소이온은 콘크리트 내부로의 확산뿐만 아니라 공극내의 수분이동에 의해서도 침투하게 된다. 또한 염소이온 확산계수는 공극의 상대습도에 크게 영향을 받으므로 콘크리트 내부의 수분분포를 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 콘크리트 공극내의 수분은 상대 습도차에 의한 확산의 형태로 이동하게 되며, 본 연구에서는 자기수축에 의한 수분감소를 고려하여 식 (16)와 같은 지배방정식을 적용하였다⁴⁾.

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial h_s}{\partial t} \quad (16)$$

여기서, w_e 는 증발가능수량, $\partial w_e / \partial h$ 는 수분용량, h_s 는 자기수축에 의한 공극상대습도의 감소량을 나타낸다.

2.4.1. 수분용량

단위 콘크리트 부피당 증발가능 수량은 수분에 대한 구속 등온식, BET^{6,13,14)} 식에 의한 관계식을 이용하여 다음 식 (17)과 같이 산정하였다.

$$w_e = \frac{CkV_m h}{(1-kh)[1+(C-1)kh]} \quad (17)$$

여기서, C는 온도에 의한 상수, k는 온도와 재령에 따른 재료상수, V_m 은 수분의 단분자층 용량을 나타내는 상수이다. Fig. 3, 4는 각각 증발가능 수량과 수분용량을 나타내고 있다.

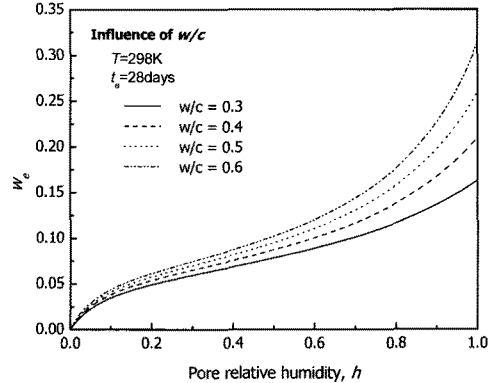


Fig. 3. Water vapour adsorption isotherms.

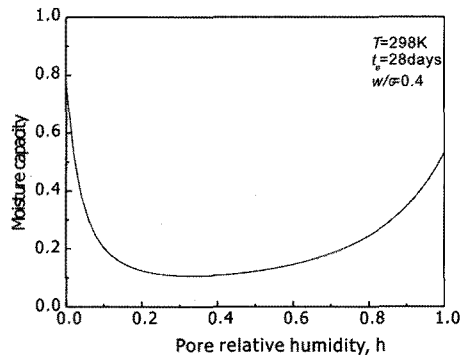


Fig. 4. Moisture capacity vs. pore relative humidity.

2.4.2. 수분확산계수

콘크리트의 수분확산계수도 염소이온 확산계수와 마찬가지로 공극상대습도, 온도, 등가재령에 의한 영향을 받으며 다음과 같은 식으로 표현된다⁸⁾.

$$D_h = D_{h,ref} \cdot F_1(T) \cdot F_2(h) \cdot F_3 F_3(t) \quad (18)$$

여기서, $D_{h,ref}$ 는 콘크리트 고유 수분확산계수이며, $F_1(T)$, $F_2(h)$, $F_3(t)$ 는 각각 온도, 공극의 상대습도, 재령의 영향을 나타낸 것이다.

온도에 의한 영향은 식 (6)과 같은 형태를 취하며, 상대습도에 의한 영향은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다⁴⁾.

$$F_2(h) = \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c} \right)^n} \quad (19)$$

여기서, h는 상대습도, h_c 는 임계상대습도로 0.75, α_0 는 확산계수의 최소값과 최대값의 비율로 0.05의 값을 나타낸다.

콘크리트 수분확산계수는 재령 경과에 따라 콘크리트 내부의 공극이 치밀해져 그 값이 작아진다. 이러한 의존성은 다음 식과 같이 표현된다⁸⁾.

$$F_3(t) = 0.3 + \sqrt{\frac{13}{t_e}} \quad (20)$$

여기서, t_e 는 등가재령을 나타낸다.

3. 해석모델의 검증

3.1. 실험결과와의 비교

침지된 콘크리트 구조물에 대한 Sergi¹⁰⁾의 깊이별 염소이온 실험값과 본 연구의 예측모델에 의한 값과 비교한 결과 Fig. 5에서와 같이 상당히 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 비말대에 위치한 콘크리트 구조물에 대한 Sandberg⁹⁾의 실험결과와 예측모델의 값을 비교한 결과로서, 수분이동을 고려한 염소이온 침투 특성이 잘 예측되고 있는 것으로 나타났다.

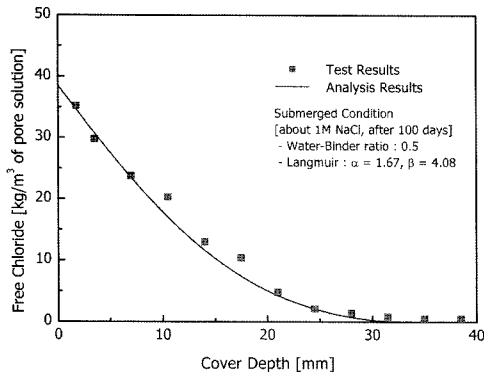


Fig. 5. Chloride ion distribution in submerged zone.

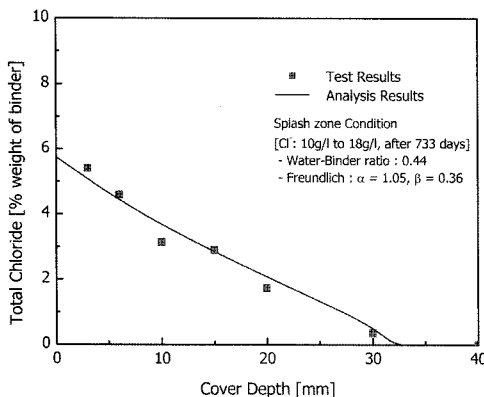


Fig. 6. Chloride ion distribution in splash zone.

3.2. 영향인자 분석

3.2.1. 온도의 영향

콘크리트 내부로의 염소이온 침투에 대기 온도 분포가 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 7에서 실선은 대기온도가 23°C로 일정한 경우에 대한 해석 결과이며, 점선은 콘크리트 구조물의 실제 주변 대기 환경을 고려하여 겨울철 -10°C에서 여름철 30°C까지 주기적으로 변화하는 온도 분포를 고려한 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 대기 온도조건에 따라 깊이별 염소이온 농도가 상당히 다른 분포를 보이는 것으로 나타났다.

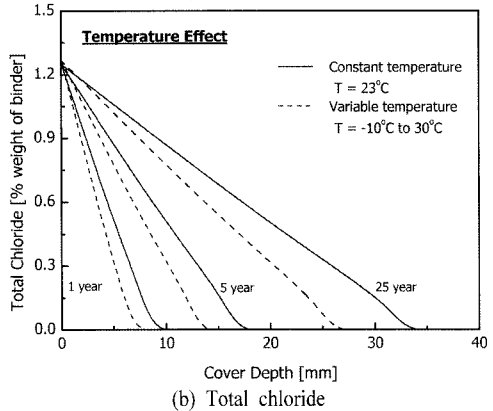
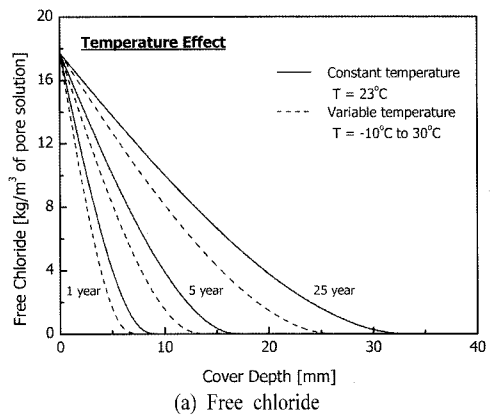


Fig. 7. Effect of temperature on chloride penetration.

3.2.2. 수분이동의 영향

Fig. 8은 수분이동(convection)에 의한 콘크리트 내부의 염소이온 농도 분포를 비교한 것이다. 콘크리트 내부의 상대습도를 70%로 가정하고 주변 대기의 상대습도를 50%, 90%로 하여 비교한 결과 외부 상대습도가 90%인 경우 수분이동에 따른 콘크리트 내부로의 염소이온 침투량이 수분이동을 고려하지 않은 경우보다 큰 것으로 나타났다. 대기 중의

실제 콘크리트 구조물은 주기적으로 건습반복 작용을 받기 때문에 정확한 염소이온 침투 예측을 위해서는 수분이동에 따른 염소이온 침투의 영향을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

3.2.3. 염소이온 구속효과 영향

염소이온의 구속등온식 형태에 따른 염소이온 침투 프로파일 변화는 Fig. 9와 같다.

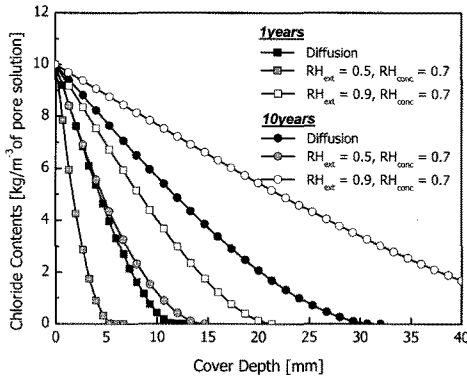
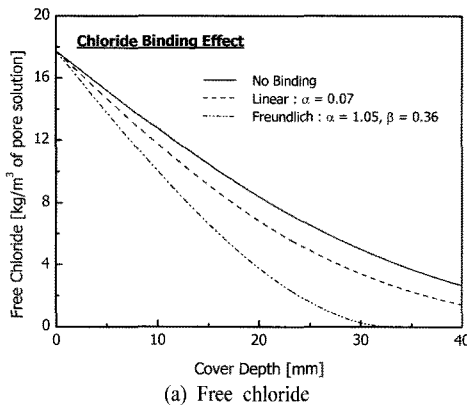
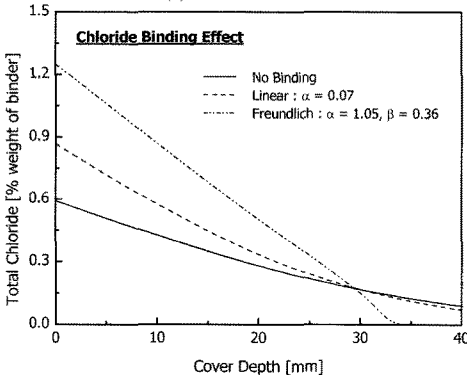


Fig. 8. Effect of convection on chloride penetration.



(a) Free chloride



(b) Total chloride

Fig. 9. Effect of chloride binding on chloride penetration.

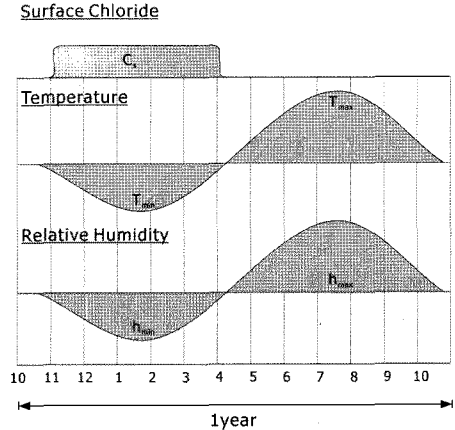


Fig. 10. Conditions of surface chloride, temperature, humidity.

3.3. 교량 바닥판의 염소이온 침투

제설제에 의한 교량 바닥판의 표면 염소이온 농도는 노출환경과 사용된 제설제의 종류에 의해 영향을 받는다. 제설제에 의한 도로교 바닥판의 평균 염소이온 농도는 0~18kg/m³으로 큰 폭의 변동성을 갖는 것으로 보고되고 있다⁵⁾.

본 연구에서는 주변환경의 영향을 고려한 제설제에 의한 교량 바닥판 콘크리트의 염소이온 침투를 예측하기 위해 Fig. 10과 같이 1년 주기의 표면염소이온 농도, 대기 온도, 대기의 상대습도 분포를 가정하여 해석을 수행하였다.

제설제에 의한 표면 염소이온 농도는 보고 자료의 평균값을 적용하여 겨울철에만 C_s = 9kg/m³이 작용하는 것으로 가정하였으며, 대기온도는 여름철 최고온도 30℃, 겨울철 최소온도 -10℃의 사인함수로, 대기의 상대습도 분포는 여름철 최대 상대습도 85%, 겨울철 최소 상대습도 50%의 사인함수로 모델링 하여 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 11, 12에 나타내었다.

겨울철 바닥판의 깊이별 침투양상은 Fig. 11에서 알 수 있듯이 제설염에 의해 표면 근처의 콘크리트 내부 염소이온 농도는 시간에 따라 비슷한 양상을 보이는데 이는 겨울철에 작용하는 표면염소이온의 농도가 크기 때문이다. 일정 깊이에서의 염소이온 농도는 바닥판의 건습 반복작용에 의한 수분이동에 따라 염소이온이 내부로 침투하여 시간이 증가할수록 농도가 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 여름철 바닥판의 깊이별 염소이온 침투양상을 나타내고 있다. 여름철에는 제설제의 사용이 없기 때문에 겨울철에 증가된 표면 근처의 염소이온농도가 반복 건습작용에 의해 콘크리트 내부

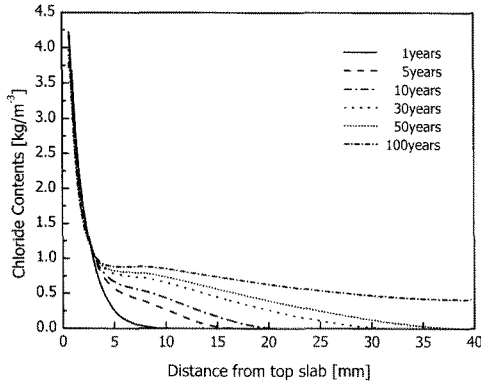


Fig. 11. Chloride profiles in winter season.

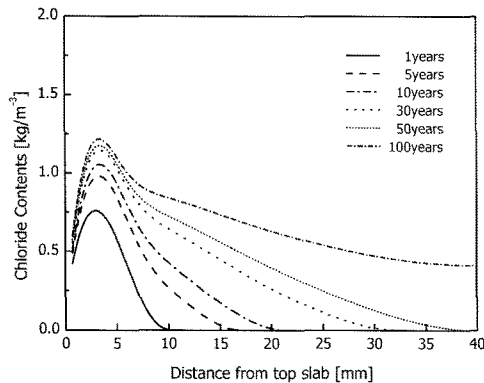


Fig. 12. Chloride profiles in summer season.

로 침투되거나 외부로 용출되어 표면 근처의 염소이온 농도가 낮게 된다. 하지만 Fig. 11과 비교하여 일정 깊이에서의 염소이온 농도는 겨울철에 비해 높은 것으로 나타났다. 이는 건습 반복작용에 의해 표면에서의 염소이온이 내부로 침투한 결과로 판단된다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 실제 주변 환경요인을 고려한 염소이온 침투모델을 개발하였으며, 주변 환경 인자별 영향을 고찰하였다. 또한 제설제에 의한 도로교 바닥판의 염소이온 침투양상을 예측할 수 있는 모델에 대한 연구를 수행하였으며 그 요약 결과는 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 개발된 염소이온 침투모델은 기존 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- 2) 콘크리트의 건습 반복작용에 의한 염소이온의 이동량은 수분이동의 영향을 받으며, 건습 반복을

받는 대부분 구조물의 염소이온 침투를 정확히 예측하기 위해서는 이러한 수분이동 효과를 고려하여야 할 것으로 판단된다.

3) 제설제에 의한 도로교 바닥판의 염화물 침투 해석 결과 계절별로 콘크리트 내부의 염소이온 침투는 상이한 분포를 나타내며, 실제 구조물의 안전 진단을 통한 구조물의 전진도 평가시 이를 반영하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 권성준, 송하원, 변근주, 박찬규, “신경망 이론과 마이크로 모델링을 통한 혼화제를 사용한 콘크리트의 염화물 침투해석”, 대한토목학회 논문집, 제27권, 제1-A호, pp. 117~129, 2007.
- 2) 구현본, 김의태, 이광명, “철근 콘크리트 구조물의 염소이온 침투 모델”, 콘크리트학회 논문집, 제15권, 제1호, pp. 25~34, 2003.
- 3) 한상훈, 김진근, 김동현, 박우선, “콘크리트 구조물의 염소이온 침투 해석에 대한 확산계수의 영향”, 대한토목학회 논문집, 제22권, 제2-A호, pp. 337~345, 2002.
- 4) Bažant, Z. P. and Najjar, L. J., “Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete”, Materials and Structures, Vol. 5, No. 25, pp. 3~20, 1972.
- 5) Berke, N., and Hicks, M., “Predicting chloride profiles in concrete”, Corrosion Engineering, Vol. 50, No. 3, pp. 234~239, 1994.
- 6) Brunauer, S., Skalny, J., and Bodor, E., J. Colloid Interface Science, 30, pp. 546~552, 1969.
- 7) Nilsson, L.-O., Massat, M., and Tang, L., “The effect of non-linear chloride binding on the prediction of chloride penetration into concrete structures”, In V. Malhotra (Ed.), Durability of Concrete, ACI SP-145, pp. 469~486, 1994.
- 8) Saetta, A., Scotta, R., and Vitaliani, R., “Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete”, ACI Materials Journal, Vol. 90, No. 5, pp. 441~451, 1993.
- 9) Sandberg, P., “Chloride initiated reinforcement corrosion in marine concrete”, Lund, Sweden: Lund University, 86, 1998.
- 10) Sergi, G., Yu, S., and Page, C., “Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious materials exposed to a saline environment”, Magazine of Concrete Research, Vol. 44, No. 158, pp. 63~69, 1992.

- 11) Tang, L., and Nilsson, L.-O., "Service life prediction for concrete structures under seawater by a numerical approach", In C. Sjöström (Ed.), *Durability of Building Materials and Components*, Vol. 7, No. 1, pp. 97~106, 1996.
- 12) Tang, L., and Nilsson, L.-O., "Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, No. 2, pp. 247~253, 1993.
- 13) Xi, Y., Bázant, Z., and Jennings, H., "Moisture diffusion in cementitious materials - Adsorption isotherms", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 1, No. 6, pp. 248~57, 1994.
- 14) Xi, Y., Bázant, Z., Molina, L., and Jennings, H., "Moisture diffusion in cementitious materials - moisture capacity and diffusivity", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 1, No. 6, pp. 258~66, 1994.
- 15) CEB, *Thermal effects in concrete structures*. Bulletin d'information No. 167, 122, 1985.
- 16) Bentz, D.P., "A computer model to predict the surface temperature and time of wetness of concrete pavements and bridge decks", NISTIR 6551, August, 2000.
- 17) M. Collepardi, A. Marcialis, R. Turriziani, "The kinetics of chloride ions penetration in concrete", *Il Cemento*, Vol. 6, pp. 157~164, 1970.
- 18) Nilsson, L., "Prediction models for chloride ingress and corrosion initiation in concrete structure", Nordic Mini Semina & fib TG5.5 meeting, Goteborg, 2001.
- 19) Mejlbro, L., "The complete solution of Fick's second law of diffusion with time dependent diffusion coefficient and surface concentration", *Durability of concrete in saline environment*, Cementa AB, Danderyd Sweden, pp. 127~158, 1996.
- 20) Tang, L., "Chloride transport in concrete - Measurement and predictions", Chalmers University of Technology, Publication P-96:6, 1996.