

다층구조확산을 고려한 제설제에 노출된 콘크리트의 염화물 해석

Analysis for Chloride Penetration in Concrete under Deicing Agent using Multi Layer Diffusion

서지석*, 권성준**

한국건설생활환경시험연구원*, 한남대학교 건설시스템 공학과**

Ji-Seok Seo(jscivil86@kcl.re.kr)*, Seung-Jun Kwon(jjuni98@hnu.kr)**

요약

콘크리트는 경제적이며 고내구성 건설재료이지만, 염해에 노출된 경우 매립된 철근의 부식으로 인해 내구성에 대한 문제가 발생한다. 최근 들어 동절기에 제설제가 많이 사용되고 있는데, 제설제의 사용은 콘크리트 표면에 미세균열과 박리를 증가시키고 용해된 제설제는 매립된 철근의 부식을 야기한다. 기존의 염화물 지배방정식인 Fick's 2nd Law의 해석기법은 표면이 열화된 콘크리트의 염해특성을 평가하지 못하므로 이에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 콘크리트 다층구조 확산 모델과 시간의존성 염화물 확산을 이용하여 제설제에 노출된 콘크리트의 염화물 해석기법을 제안하였다. 이를 위해 18년 경과된 콘크리트 도로 교의 염해실태를 분석하였으며, 역해석을 통하여 표면열화깊이 및 열화된 콘크리트 층의 증가된 염화물 확산성을 평가하였다. 제안된 기법은 30MPa 콘크리트에서 12.5~15.0mm 열화깊이와 2배 증가된 열화층의 염화물 확산성을 나타내었다. 본 해석기법은 표면열화 및 표면 강화 등 2개의 다른 확산성을 가진 콘크리트의 염화물 거동을 평가하는데 효과적으로 적용될 수 있다.

■ 중심어 : | 제설제 | 다층구조 콘크리트 | 염해 | 동결융해 | 시간의존성 확산 |

Abstract

Concrete is cost-benefit and high-durable construction material, however durability problem can be caused due to steel corrosion under chloride attack. Recently deicing salt has been widely spread in snowing season, which accelerates micro-cracks and scaling in surface concrete and the melted deicing salt causes corrosion in embedded steel. The previous governing equation of Fick's 2nd Law cannot evaluate the deteriorated surface concrete so that another technique is needed for the surface effect. This paper presents chloride penetration analysis technique for concrete subjected to deicing salt utilizing multi-layer diffusion model and time-dependent diffusion behavior. For the work, field investigation results of concrete pavement exposed deicing salt for 18 years are adopted. Through reverse analysis, deteriorated depth and increased diffusion coefficient in the depth are evaluated, which shows 12.5~15.0mm of deteriorated depth and increased diffusion coefficient by 2.0 times. The proposed technique can be effectively applied to concrete with two different diffusion coefficients considering enhanced or deteriorated surface conditions.

■ keyword : | Deicing Salt | Multi-layered Concrete | Chloride Attack | Freezing and Thawing | Time-dependent Diffusion |

* 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2015R1A5A1037548)

접수일자 : 2015년 10월 23일

수정일자 : 2015년 12월 22일

심사완료일 : 2015년 12월 29일

교신저자 : 권성준, e-mail : jjuni98@hnu.kr

1. 개요

철근 콘크리트(RC: Reinforced Concrete)는 현대 산업에서 가장 많이 쓰이는 건설재료로서 철근과 콘크리트를 사용한 복합 건설재료이다. 콘크리트는 압축력에 강하지만, 인장력에 취약하기 때문에 철근을 사용하여 인장력에 저항하도록 설계하고 있다. 강한 알칼리를 가지고 있는 콘크리트는 내부에 매립된 철근 표면에 부동태 피막을 형성시키며, 부식으로부터 철근을 보호 한다[1][2]. 콘크리트는 일반적인 환경에서라면 양생이 진행됨에 따라 수화 반응에 의해 장기적으로 강도가 증가하지만 염해, 탄산화와 같은 열화환경에서는 매립된 철근의 부식이 발생하고 이에 따라 구조적인 성능 저하가 발생하는 것이 일반적이다[2][3]. 특히 염해에 의한 염화물 이온은 다공성 재료인 콘크리트 내부로 전달속도가 빠르고 철근의 부동태 피막 파괴에 의한 열화에 직접적으로 관여하므로 인장부 철근의 부식 평가는 필수적이다[4][5].

일반적으로 염화물 유입이 증가하는 환경인 해안가 또는 해수중의 콘크리트는 내구성에 대한 대책이 고려되지만, 상대적으로 염해 대책이 미비한 도심지에서는 해사의 사용 또는 염화물 이온을 함유한 화학 혼화제 등에 의한 염해가 지속적으로 증가하고 있다[6][7]. 도심지의 도로 등에 사용되는 제설제는 염화나트륨(NaCl) 또는 염화칼슘(CaCl₂) 등을 포함하고 있는데, 순간적으로 콘크리트 표면의 온도를 증가시켜서 표면에 쌓은 눈을 녹게 만든다. 녹은 눈은 다량의 염화물 이온을 함유하게 되는데, 이로 인해 다른 염해에 대한 피해가 발생하게 된다[8]. 제설제가 살포되는 겨울에는 주기적으로 콘크리트의 동결융해가 발생하는데, 이는 내부 공극의 자유수가 결빙과 융해가 반복되는 현상이다. 동결융해가 발생할 때, 4.0% 이상 공기량과 충분한 강도를 갖지 못한 콘크리트는 표면으로부터 균열 및 박리가 진행되어 열화가 가속된다[9][10]. 표면에 발생한 미세 균열과 박리된 콘크리트는 용해된 염화물 이온의 확산을 가속화시키며 이로 인해 내부 철근부식을 촉진하게 된다.

염해의 정량적 평가를 위한 모델링은 기존의 Fick's

2nd Law를 기본으로 한 겹보기 확산계수에 의한 평가에서 출발하고 있으나, Nernst-Einstein식을 이용하여 염화물 이온의 확산, 침투, 흡착을 이용한 모델링으로 진보하고 있다[11][12]. 또한 이러한 해석기법은 공극률과 수화도의 변화를 고려한 초기재령 거동 모델링과 연계하여 내구성 해석분야로 많은 연구가 진행 중이다[13][14]. 그러나 이러한 연구들 역시, 표면으로부터 침투되어 온 염화물 거동을 모사할 뿐이지 복합열화와 같이 콘크리트 내부에서 불연속적으로 증가 또는 감소하는 염화물 거동을 명확하게 보여주지는 못한다. 표면 변화에 따른 염화물 거동을 모사하는 기법은 다층구조를 이용한 수치해석(FE) 방법이 유일하며, 방법론적으로 표면 콘크리트 제거 이후 염화물 거동을 예측하는 기법으로 제안된 연구가 있다[15].

본 연구에서는 콘크리트의 열화깊이를 고려한 다층구조에서를 가진 콘크리트의 염화물 침투모델링을 평가하였으며, 실태조사 결과에 대한 역해석을 통하여 제설제에 노출된 콘크리트의 염화물 해석기법을 제안하도록 한다. 사진 1에서는 제설제에 노출되어 표면이 박리된 콘크리트를 나타내고 있다.



사진 1. 제설제에 노출된 콘크리트 표면 열화

2. 다층구조에서 염화물 확산 및 시간의존성

2.1 다층구조에서의 염화물 확산

콘크리트를 통과하는 염화물 침투는 식 (1)과 같이 겹보기 확산계수(D)와 Fick's 2nd law에 의해 구현할 수 있다. 또한 경계조건을 이용하면, 식(2)와 같이 오차

함수를 이용한 형태로 고려할 수 있다[3][16].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$C(x, t) = C_s \left\{ 1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \quad (2)$$

여기서, C_s 는 표면염화물량(kg/m^3), erfc 는 오차함수, D 는 염화물 확산계수(m^2/sec)를 나타낸다.

표면이 열화되어 있는 경우 콘크리트는 열화된 표면과 내부 구체의 확산계수가 다른 이중구조를 가지게 되는데, 이를 고려한 콘크리트의 염해 모식도를 [그림 1]에 나타내었다.

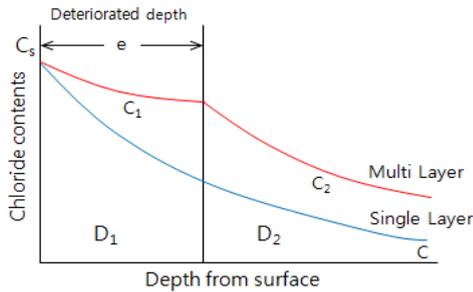


그림 1. 표면이 열화된 콘크리트의 염화물 침투

기존의 연구에서는 초기조건 및 경계조건을 고려하여 표면층의 염화물(C_1) 및 내부의 염화물(C_2)을 이룬 식식(3)과 식(4)와 같이 제안하였다[17].

$$C_1(x, t) = C_s \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left[\operatorname{erfc} \left\{ \frac{2ne+x}{2\sqrt{D_1t}} \right\} - \alpha \operatorname{erfc} \left\{ \frac{(2n+2)e-x}{2\sqrt{D_1t}} \right\} \right] \quad (3)$$

$$C_2(x, t) = \frac{2kC_s}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)e+k(x-e)}{2\sqrt{D_1t}} \right] \quad (4)$$

여기서, C_1, C_2 는 콘크리트 표면과 구체의 염화물 농도(kg/m^3), D_1, D_2 는 콘크리트 표면과 구체의 확산계수(m^2/sec), e 는 침투깊이를 나타내며, k 는 $(D_1/D_2)^{0.5}$, α 는 $(1-k)/(1+k)$ 와 같다[17].

2.2 확산계수의 시간의존성

식(2)에서의 확산계수(D)는 전염화물량의 이동을 확산으로 가정한 겉보기 확산계수를 나타내는데, 콘크리트의 공극률 감소 및 이온농도구배의 감소에 따라서 감소하게 되며, 일반적으로 시간에 따라 감소하는 모델링으로 간단하게 구현할 수 있다[17-19].

식(2)와 같은 오차함수를 사용한 지배방정식에서는 확산계수의 시간의존성을 고려하고 있지 않으므로 일정한 표면염화물 조건에서 식(5) 및 식(6)과 같은 시간의존성 지수식을 사용하는 것이 일반적이다[20][21].

$$D(m) = \frac{D_{ref}}{1-m} \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (t < t_c) \quad (5)$$

$$D(m) = \frac{D_{ref}}{1-m} \left(\frac{t_0}{t_c} \right)^m \left[1 - m + m \left(\frac{t_c}{t} \right) \right] \quad (t \geq t_c) \quad (6)$$

여기서, $D(t)$ 는 시간 t 에서의 확산계수, D_{ref} 는 기준시간($t_{ref}=28$ 일)에서의 확산계수, m 은 시간에(재령)에 따른 시간계수로서 혼화재를 사용하지 않는 보통 콘크리트의 경우 0.2를 가정하며, t_c 는 확산계수가 더 이상 감소하지 않는 시간으로 30년을 가정하고 있다[18][19].

3. 역해석을 통한 다층구조 콘크리트 염화물 해석

3.1 제설제에 의한 콘크리트 실태조사 결과 분석

본 절에서는 18년 경과한 지방 국도를 대상으로 염화물 프로파일을 분석한 기존의 연구결과를 이용하였다[22]. 질산은 지시약에 의한 염화물 침투깊이는 20~25mm 수준으로, 동결융해를 받은 열화깊이는 10~15mm 수준으로 평가되었다. 표면 염화물량은 $4.0kg/m^3$ 수준으로 보고되었는데, 일반적인 해수에 노출된 콘크리트의 표면염화물량 수준인 $18.0\sim 23.0kg/m^3$ 에 비하면 상당히 낮은 값을 보인다. 이는 동절기에만 제설제가 살포되고 이후에는 우수 등에 의하여 표면염화물이 제거되기 때문이다.

[그림 2]에서는 실태조사 결과를 나타내고 있는데, 코어채취 결과 압축강도는 $32.5MPa$ 로 평가되었다[22].

[그림 2]의 염화물 프로파일을 경과시간인 18년과 Fick's 2nd Law를 기준으로 회귀분석을 수행한 결과는 [표 1]과 같이 나타내었으며, 대상 구조물인 강원도 도로교의 노출환경은 [그림 3]에 나타내었다.

표 1. 경과시간에 따른 표면염화물 및 확산계수

Type	A	B	C	D	Average
Surface chloride content(kg/m ³)	3.65	3.63	3.78	3.97	3.76
Diffusion coefficient (×10 ⁻¹² m ² /sec)	1.14	0.90	1.31	0.92	1.07

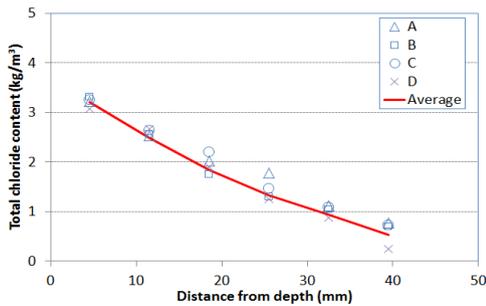
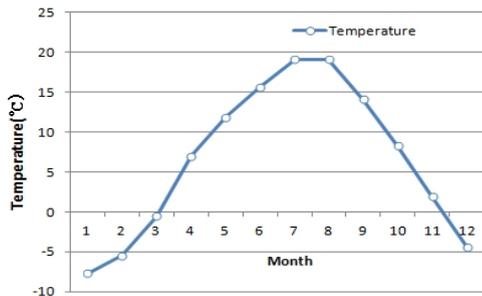
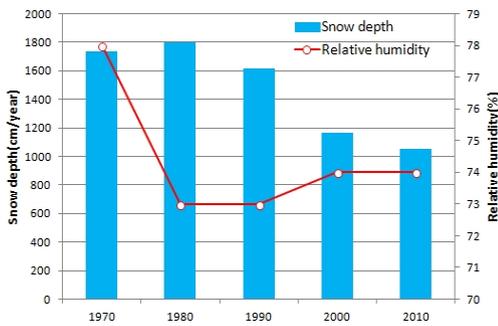


그림 2. 실태조사를 통한 염화물 프로파일



(a) 강원도 온도



(b) 적설량 및 습도

그림 3. 대상구조물의 노출환경

3.2 표면 열화된 콘크리트의 염해 거동

역해석을 통한 다층구조의 염해 거동을 평가하기 위해서는 해석조건을 명확하게 설정해야 한다. [그림 4]에서는 본 연구를 위한 해석절차를 나타내고 있다. 유한 요소해석 등을 통하여 표면부에 다른 메쉬를 구성하고 각각의 요소에 확산계수와 시간의존성을 도입하면 해결할 수 있으나 본 연구에서는 간략한 이론식을 통하여 다층구조의 염화물 거동을 모사하고자 한다. 실제로 각 요소의 물성치가 다른 경우 해의 수렴성 및 해석시간이 길어지는 단점을 가지게 된다.

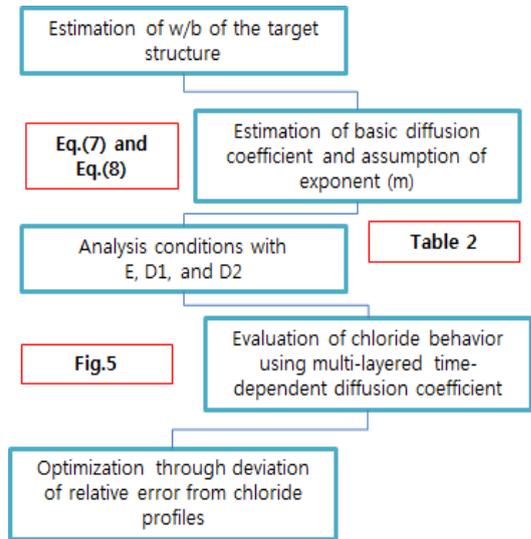


그림 4. 본 연구를 위한 플로우 차트

대상구조물에 대한 배합을 입수할 수 없었으므로 현재 시공수준과 시방서 제한조건을 고려하여 w/b(물-결합재비)는 0.4로, 플라이애쉬 사용량은 25%로 가정하였다[16]. w/b에 따른 콘크리트의 28일 확산계수는 식(7)와 같이, 혼화재 사용에 따른 시간지수 m 의 변화는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다[18][19].

$$D_{28} = 1 \times 10^{-12.06 + 2.40 \frac{w}{c}} \quad (7)$$

$$m = 0.2 + 0.4(FA/50 + SG/70) \leq 0.6 \quad (8)$$

여기서, FA 및 SG 는 플라이애쉬 및 슬래그의 치환률

을 나타낸다. 그러나 식(7)은 기존의 연구에서 과다하게 산정된다고 보고되고 있으며, 특히 w/b가 0.5 이하인 경우, 감소된 값을 사용해야 한다고 보고되고 있다 [21][23][24]. 본 연구에서는 식(7)의 값의 50% 수준을 사용하였는데, 식(8)을 통한 m 값은 0.4로 평가되었다.

이상의 정보를 시간의존성을 고려한 식(5)에 대입하면 18년 경과시의 확산계수는 $0.364 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 수준으로 평가된다. 이 값을 이용한 이론식과 실태조사 결과와 비교하면 [그림 5]와 같이 나타낼 수 있다.

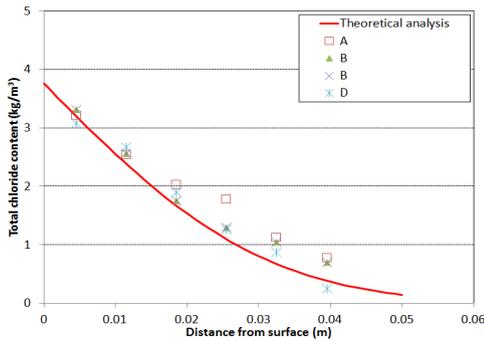


그림 5. 실태조사결과와 이론값

[그림 5]에서 나타난 바와 같이 표면염화물량 농도가 크지 않음에도 불구하고 콘크리트 표면에서 내부로 갈수록 이론값과 실태조사결과의 차이가 증가하는데, 이는 기존의 단일구조 염해에 대한 해석식의 제한성을 보여주고 있다. 또한 동결융해로 인해 표면이 열화된 경우 염화물 침투가 일반 콘크리트보다 크게 발생하여 내부로 염화물 확산이 크게 증가되고 있음을 알 수 있다.

다음 절에서는 동결융해로 인한 콘크리트 표면열화를 고려하여 시간의존성 다층구조 확산 모델링을 수행하도록 한다.

3.3 시간의존성과 다층구조를 고려한 염화물 침투 해석 모델링

식(3)과 식(4)에서 제안된 식은 다층구조의 염화물 거동을 모사할 수 있으나 확산계수의 시간의존성을 고려하지 못한다. 본 연구에서는 콘크리트의 다층구조와 시간의존성 확산계수를 고려하여 식(3), 식(4)와 식(5),

식(6)을 통합하였다. 그 결과는 식(9) 및 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left\{ \begin{aligned} C_1(x, t) &= C_s \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left[\operatorname{erfc} \left\{ \frac{2ne + x}{2\sqrt{\frac{D}{1-m} \left(\frac{t_0}{t}\right)^m t}} \right\} \right. \\ &\quad \left. - \alpha \operatorname{erfc} \frac{(2n+2)e - x}{2\sqrt{\frac{D}{1-m} \left(\frac{t_0}{t}\right)^m t}} \right] \\ C_2 &= \frac{2kC_s}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)e + k(x-e)}{2\sqrt{\frac{D}{1-m} \left(\frac{t_0}{t}\right)^m t}} \right] \end{aligned} \right. \quad (t < t_c) \tag{9}$$

$$\left\{ \begin{aligned} C_1(x, t) &= C_s \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left[\operatorname{erfc} \left\{ \frac{2ne + x}{2\sqrt{\frac{D}{1-m} \left(\frac{t_0}{t_c}\right)^m \left[1 - m + m\left(\frac{t_c}{t}\right)\right] t}} \right\} \right. \\ &\quad \left. - \alpha \operatorname{erfc} \frac{(2n+2)e - x}{2\sqrt{\frac{D}{1-m} \left(\frac{t_0}{t_c}\right)^m \left[1 - m + m\left(\frac{t_c}{t}\right)\right] t}} \right] \\ C_2 &= \frac{2kC_s}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)e + k(x-e)}{2\sqrt{\frac{D}{1-m} \left(\frac{t_0}{t_c}\right)^m \left[1 - m + m\left(\frac{t_c}{t}\right)\right] t}} \right] \end{aligned} \right. \quad (t \geq t_c) \tag{10}$$

여기서 e는 동결융해에 따른 열화깊이이고 표면의 확산계수 D_1 은 열화된 콘크리트 표면의 확산계수를 모사하기 위해 내부의 확산계수 D_2 보다 크게 가정하도록 한다.

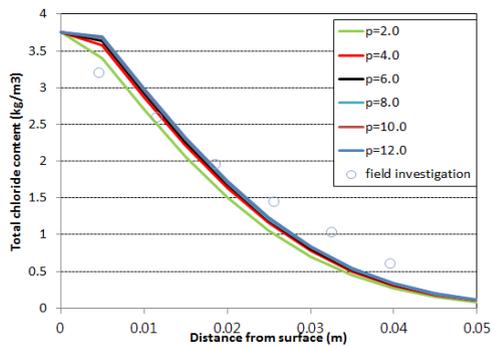
3.4 역해석을 통한 다층구조 해석 simulation

실태조사결과에 합당한 역해석을 수행하기 위해 e와 D_1 을 가정하여 염화물 확산을 평가하였다. 열화깊이는 실태조사결과 5~15mm 정도로 나타났으므로, [표 2]와 같은 해석조건을 설정하여 염화물 침투 해석을 수행하였다.

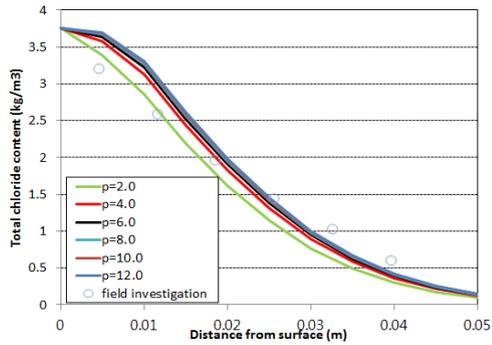
표 2. 역해석을 위한 해석조건

e (m)	0.005, 0.0075, 0.010, 0.0125, 0.015
p(= D_1/D_2)	2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0

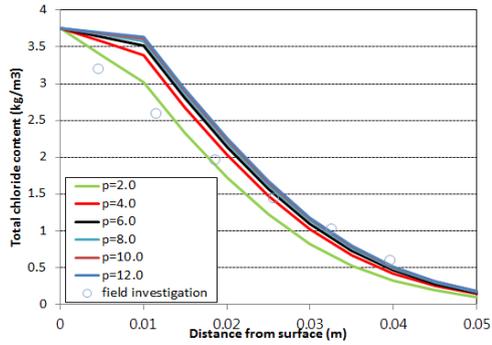
열화깊이는 실태조사 결과를 기반으로 5~15mm 까지 고려하였으며 표면 열화된 콘크리트의 확산에 대해서는 명확한 자료가 없으므로 확산계수비는 2.0~12.0 배로 증가시키면서 염화물 침투 해석을 수행하였다. 각 해석 결과에 따른 해석값과 평균 실태조사값과의 상대 오차를 산정함으로 역해석을 통하여 최적의 값을 도출하였다. [그림 6]에서는 e 및 $p(=D_1/D_2)$ 의 변화에 따른 염화물 변화와 실태조사 결과의 비교를 나타내고 있다.



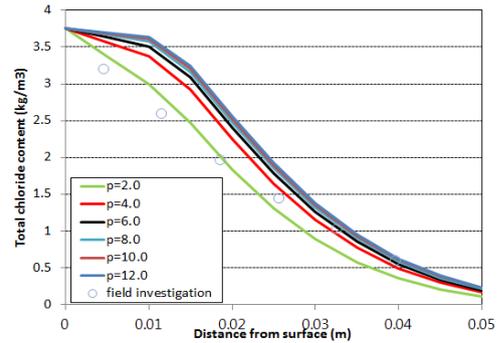
(a) $e=5.0\text{mm}$



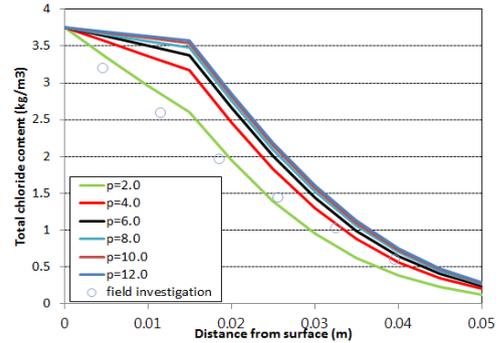
(b) $e=7.5\text{mm}$



(c) $e=10.0\text{mm}$



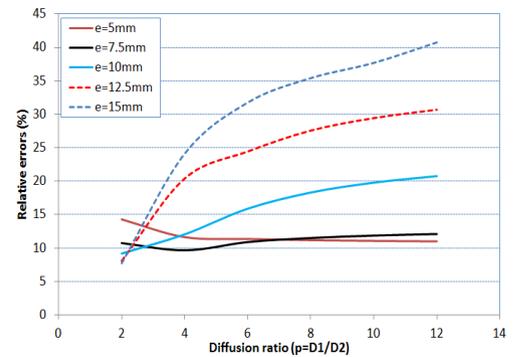
(d) $e=12.5\text{mm}$



(e) $e=15.0\text{mm}$

그림 6. 염화물 열화깊이(e)와 확산계수비의 변화에 따른 염화물 거동

정량적인 역해석 결과를 비교하기 위해 실험값 위치에서 해석값과의 상대오차를 비교하였다. [그림 7]에서는 해석조건에 따른 상대오차의 변화 및 조건에 따른 오차 contour를 나타내고 있다.



(a) 열화깊이 및 확산계수비에 따른 상대오차

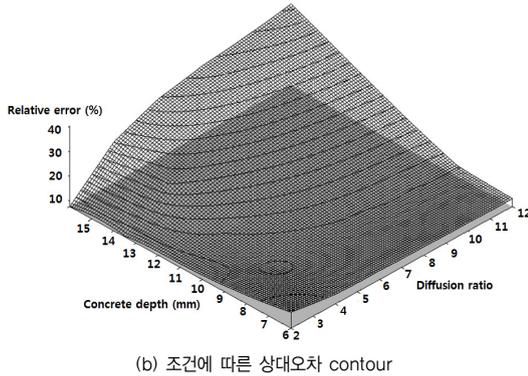


그림 7. 열화깊이(e)와 확산계수비(p)의 변화에 따른 상대 오차

[그림 7]에서 알 수 있듯이 콘크리트 열화깊이를 12.5~15.0mm로, 열화층의 확산계수를 내부 확산계수보다 2배 크게 가정할 경우 실험조사결과와 가장 근접한 결과를 나타내고 있다. 이는 동결융해에 의해 콘크리트 표면이 열화되고 제설제에 의한 염화물 확산이 발생할 경우, 표면 12.5~15.0mm 정도를 열악한 조건으로 고려하는 것이 합리적으로 판단된다.

본 연구결과는 강도 30 MPa이상의 콘크리트에 대해서는 우수한 적용성을 보이고 있다. 그러나 일반강도 콘크리트와의 비교는 수행되지 못하였으므로, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 21~24MPa 수준의 콘크리트에서는 콘크리트 열화깊이가 더욱 진전될 것이고 확산계수의 증가가 더욱 뚜렷해질 것으로 예상되므로 2.0배 이상의 표면열화층의 확산계수와 깊은 침투깊이(e)의 변화가 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 18년 노출된 콘크리트 포장에 대하여 다층구조 염화물 확산과 시간의존성 염화물 확산을 고려하여 실험조사에 근거한 역해석을 수행하였다. 본 연구의 범위 내에서 다층구조확산을 고려한 제설제에 노출된 콘크리트 염화물 해석기법에 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 기존의 연구를 이용하여 시간의존성을 고려한 다층구조 염화물 확산식을 제안하였다. 이후 18년 경과한 콘크리트 포장의 실험조사결과를 분석하여 전염화물 거동을 평가하였다. 일반적인 Fick's 2nd Law에서 제안한 방법은 표면의 염화물 거동을 모사하지 못하였지만, 제안된 기법은 표면에서 염화물 증가와 이로 인해 증가된 염화물 확산성을 모사할 수 있었다.
- 2) 역해석을 통하여 표면 열화층의 두께는 12.5~15.0mm 수준으로, 열화된 콘크리트의 확산성은 내부의 양호한 콘크리트 확산계수의 2배 정도로 평가되었다.
- 3) 본 연구에서는 30MPa 이상의 도로교를 대상으로 제설제에 노출된 콘크리트의 염화물 거동을 예측하였다. 이보다 낮은 강도의 콘크리트를 대상으로 할 경우, 열화깊이 및 확산계수비는 증가될 것으로 예상되며 다양한 염화물 실험조사결과를 이용한 추가 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] J. P. Broomfield, *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, pp.1-15, 1997.
- [2] S. J. Kwon, U. J. Na, S. S. Park, and S. H. Jung, "Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-Aged Crack: Probabilistic Approach for Chloride Diffusion," *Structural Safety*, Vol.31, No.1, pp.75-83, 2009.
- [3] RILEM, *Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL*, E&FN, pp.28-52, 1994.
- [4] 이윤, 박기태, 권성준, "폴리프로필렌 섬유 보강 RHA 콘크리트의 공학적 특성," *한국콘크리트학회 논문지*, 제15권, 제3호, pp.427-437, 2015.
- [5] 김윤용, 오광진, 박기태, 권성준, "공극구조 및 하중조건에 따른 콘크리트의 초음파 속도 모델링,"

- 한국콘텐트 학회 논문집, 제15권, 제3호, pp.415-426, 2015.
- [6] 김홍삼, 김진철, 이재영, “제설제에 의한 콘크리트 도로구조물의 열화조사,” 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제26권, 제2호, pp.489-490, 2014.
- [7] 고경택, 김도겸, 김성욱, 조명석, 송영철, “동결융해와 염해의 복합작용을 받는 콘크리트의 내구성능 저하 평가,” 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제13권, 제4호, pp.397-405, 2001.
- [8] P. K. Metha and P. J. M. Monteiro, *Concrete-Structure, Properties, and Materials*, Prentice Hall, 2nd Edition, 1993
- [9] 양은익, 이성태, 박해균, 김명유, 박진호, “제설제 살포에 따른 콘크리트포장의 염화물 침투특성,” 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제17권, 제2호, pp.475-478, 2005.
- [10] 박상준, “연행 공기량이 해양콘크리트의 동결융해 및 염화물 확산특성에 미치는 영향,” 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 제12권, 제3호, pp.161-168, 2008.
- [11] K. Maekawa, T. Ishida, and T. Kishi, “Multi-scale Modeling of Concrete Performance,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.2, pp.91-126, 2003.
- [12] T. Ishida, K. Maekawa, and T. Kishi, “Enhanced Modeling of Moisture Equilibrium and Transport in Cementitious Materials under Arbitrary Temperature and Relative Humidity History,” *Cement and Concrete Research*, Vol.37, pp.565-578, 2007.
- [13] S. J. Kwon and H. W. Song, “Analysis of Carbonation Behavior in Concrete using Neural Network Algorithm and Carbonation Modeling,” *Cement and Concrete Research*, Vol.40, No.1, pp.119-127, 2010.
- [14] S. S. Park, S. J. Kwon, S. H. Jung, and S. W. Lee, “Modeling of Water Permeability in Early aged Concrete with Cracks based on Micro Pore Structure,” *Construction and Building Materials*, Vol.27, No.1, pp.597-604, 2012.
- [15] H. W. Song, H. B. Shim, A. Petcherdchoo, and S. K. Park, “Service Life Prediction of Repaired Concrete Structures under Chloride Environment Using Finite Difference Method,” *Cement and Concrete Composites*, Vol.31, No.2, pp.120-127, 2009.
- [16] L. Tang and G. Joost, “On the Mathematics of Time-Dependent Apparent Chloride Diffusion Coefficient in Concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol.37, No.4, pp.589-595, 2007.
- [17] C. Andrade, J. M. Diez, and C. Alonso, “Mathematical Modeling of a Concrete Surface “Skin Effect” on Diffusion in Chloride Contaminated Media,” *Advanced Cement Based Materials*, Vol.6, No.2, pp.39-44, 1997.
- [18] M. D. A. Thomas and P. B. Bamforth, “Modeling Chloride Diffusion in Concrete: Effect of Fly Ash and Slag,” *Cement and Concrete Research*, Vol.29, No.4, pp.487-495, 1999.
- [19] M. D. A. Thomas and E. C. Bentz, *Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides*, Life365 Manual, SFA, pp.12-56, 2000.
- [20] E. Poulsen, “On a Model of Chloride Ingress into Concrete, Nordic Mini Seminar-Chloride Transport, Department of Building Materials,” Gothenburg, 1993.
- [21] 문진만, 김진영, 김영준, 오경석, 권성준, “콘크리트내의 이중구조와 시간의존성을 고려한 염화물 해석기법의 개발,” 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 제19권, 제5호, pp.83-91, 2015.
- [22] 강릉대학교 산학협력단, *친환경성 액상유기산 제설제 개발 및 실용화 연구 보고서*, R&D 산학연 04 A02-07, 2007.

[23] 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서-내구성 편, 2006.

[24] 이승훈, 권성준, “시간의존성 염화물 확산계수와 압축강도 상관성에 대한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 논문집, 제24권, 제6호, pp.715-726, 2012.

저 자 소 개

서 지 석(Ji-Seok Seo)

정회원



- 2014년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : KCL 위촉 연구원

<관심분야> : 내구성, 구조해석, 균열, 염해

권 성 준(Seung-Jun Kwon)

정회원



- 2006년 9월 : 연세대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 한남대학교 건설시스템 공학과 교수

<관심분야> : 염해, 탄산화, 마이크로 모델링, 투수