

염해 환경 하 보수된 콘크리트 구조물의 사용수명 예측 및 보수 비용 평가

Service Life Prediction and Cost Estimation of Repaired Concrete Structures Under Marine Environment

심 현 보¹⁾*

Shim, Hyun Bo

안 기 용²⁾

Ann, Ki Yong

Abstract

The service life of concrete structures exposed to a marine environment can be extended by controlling the amount of chloride in cover concrete. Patching is one of the appropriate maintenance techniques for chloride contamination. Chloride-contaminated cover concrete is removed and replaced with sound one. It can provide less risk of corrosion of steel, so that the structure can be maintained for required service life.

In this study, a quantitative assessment of the service life subjected to the chloride attack is proposed to determine the effective repair options such as repair depth, repair material and timing of repair. The Crank-Nicolson based finite difference formulation from Fick's second law is proposed to predict the profiles of chloride ion in a repaired concrete structure, considering ingress of chloride from outer and redistribution of residual chloride from the substrate concrete. Therefore, the repair application times and maintenance cost for the target service life can be estimated. Finally, the numerical examples are presented to ensure its applicability

Keywords : Chloride, Corrosion, Maintenance, Cost, Service life, Finite difference

1. 서론

우리나라는 70, 80년대에 고도의 경제성장과 동시에 사회 인프라시설물이 대규모로 건설되었다. 그 중 다수의 구조물들이 다양한 열화환경에 복합적으로 노출되어 점차 수명이 단축되고 있다. 이에 유지관리(maintenance)는 콘크리트 구조물의 보유 기능을 유지시키려는 행위이다. 구체적으로는 일상적인 손상감시, 정비, 점검 등의 행위가 포함되며, 더 나아가 열화 또는 저하된 기능을 준공 시의 수준을 목표로 복귀·향상시키기 위한 보수행위도 포함된다. 이를 위해 체계적이고 지속적인 유지관리가 필요하다(송하원, 2007). 효율적인 유지관리를 위해 유지관리 계획단계에서 보수의 효과, 즉 보수를 통해 연장 가능한 공용기간을 예측하여 합리적인 계획을 세우는 것이 필요하다.

구조물의 내구성에 영향을 미치는 주된 요인으로 염해, 탄산화, 황산염해, 동결융해 등을 들 수 있다. 이와 같은

다양한 열화인자에 의해 구조물은 설계수명 전에 그 기능을 상실할 수 있다. 따라서 이러한 열화인자에 의한 구조물의 열화를 평가하고, 공용기간을 예측하기 위한 많은 연구가 행해져 왔다. 동결융해와 염해의 복합열화로 내구성능이 저하되는 것을 정량적으로 평가하기 위한 연구가 수행되었으며(고경택 등, 2001), 구조물의 내구수명을 실제적으로 예측하기 위해 표면염화물량과 확산계수의 시간의존성을 반영하여 염화물 침투를 예측하는 방법이 제안되었다(송하원 등, 2007). 또한 몬테카를로 시뮬레이션과 Fick의 확산법칙을 통해 염화물의 확산특성 및 내구수명 평가가 시도되었다(권성준 등, 2007). 이와 같이 콘크리트의 내구수명을 평가하기 위해 유해물질의 이동 특성에 대해 다양한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 그러나 새롭게 보수된 부분과 기존의 남아있는 부분으로 두 영역을 갖는 보수된 콘크리트에서의 유해물질의 이동 및 분포를 예측하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 보수된 콘크리트의 염화물 침투를 예측하여 보수된 콘크

1) 정회원, 연세대학교 토목공학과, 박사과정

2) 정회원, 연세대학교 토목공학과, 연구교수

* Corresponding author : mmme151@yonsei.ac.kr 02-2123-7857

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2011년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

리트 구조물의 내구수명과 유지관리비용을 평가하기 위한 연구를 수행하였다.

염해 환경 하에서의 염화물 이온 침투에 대한 콘크리트 유지관리 방법은 크게 표면처리, 패칭 (patching), 전기방식으로 구분할 수 있다(REHABCON, 2004). 본 연구에서는 염화물 이온으로 오염된 콘크리트 피복을 새로운 콘크리트로 치환하는 패칭한 경우를 대상으로 하여 보수된 구조물의 공용기간 및 보수비용 평가를 하는 방법을 제안하였다. 염화물 이온의 침투에 의한 사용수명 평가에 있어 콘크리트와 같은 다공성 물질 내에서 염화물 이온의 이동은 확산, 모세관 흡입, 전위차에 의한 이동 등 다양한 메커니즘에 의해 발생하지만 가장 주된 이동 메커니즘인 확산에 국한하여 연구를 수행하였다. 또한 확산계수에 따른 보수재료 비용의 유추로 목표 공용기간 동안의 유지관리 비용을 평가하여 최적의 보수방법을 결정하기 위한 비용 분석을 하였다.

2. 보수된 콘크리트 구조물의 염화물 침투

2.1 보수된 콘크리트 구조물의 염화물 침투 예측식

보수된 콘크리트에서의 염화물 이동은 보수되지 않은 콘크리트에서와는 다르게 염화물 침투특성이 다른 두 영역이 접하게 된다. 따라서 염화물 분포 예측에 이용되었던 기존의 1차 편미분 방정식(PDE)은 그 해를 구하기가 어렵다 (Song et al., 2009). 보수된 경우에는 초기 조건으로 표면 염화물 이온의 농도와 기존 콘크리트의 잔류 염화물 농도가 주어지고, 외부로부터 염화물 이온이 유입될 뿐만 아니라 기존 콘크리트의 잔류 염화물이 농도차에 의해 재분배가 일어난다. 이를 해결하기 위해 유한차분법을 이용하여 보수된 콘크리트 내의 염화물 이동을 예측하였다.

Fig. 1에서와 같이 특정 깊이에서의 염화물 이온의 농도가 임계치에 도달했을 때의 시간을 t_i , 제거되는 콘크리트의 두께, 즉, 보수되는 두께를 x_p 라고 하면 보수된 직후 $0 \sim x_p$ 구간에서는 염화물 이온의 농도가 0%가 된다. 시간이 경과함에 따라 제거되고 남은 기존의 콘크리트에 함유되어 있는 염화물 이온은 기존 콘크리트와 새로운 콘크리트의 접합부를 통해 확산되어 재분배가 일어날 것이다. 또한 동시에 콘크리트 표면을 통해 외부로부터 염화물 이온이 침투하게 될 것이다. 따라서 보수된 콘크리트

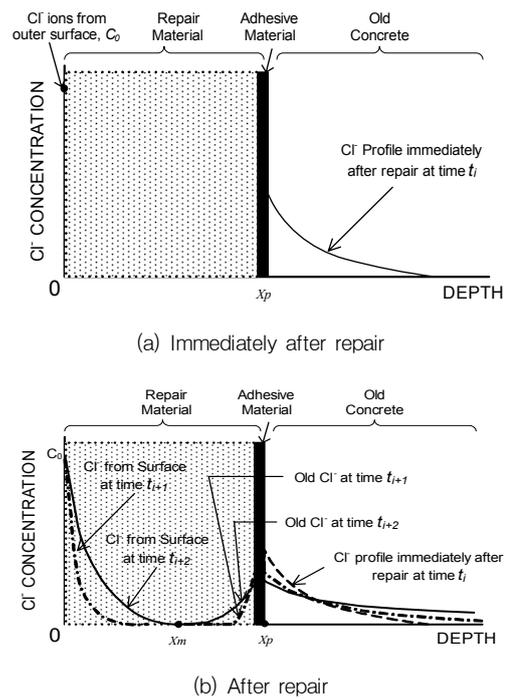


Fig. 1 Chloride Concentration Profile after Concrete Repair

내의 염화물 이온의 재분배와 함께 통합되어 x_m 지점에서의 염화물 농도가 결정되어야 한다. 이를 해석하기 위해서는 각 영역별 확산계수를 적용하여 해석되어야 한다. 본 연구에서는 Fick의 제2법칙에서 개량된 편미분방정식을 제안하여 염화물 분포를 예측하였다.

염화물 이온의 확산 예측은 식(1)에 나타난 것과 같이 Fick의 제2법칙에 의해 1차원적 해석이 주로 이루어져 왔다 (Tang and Nilson, 1996).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D(x, t) \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

여기서, C 는 t 시간에 x 위치에서의 염화물 이온의 농도이고, $D(x, t)$ 는 깊이 x 와 시간 t 의 함수인 확산계수이다.

Crank-Nicolson법을 이용한 수치해석법으로 보수된 콘크리트 구조물에서의 염화물 침투를 예측하였다. 앞서 언급했던 염화물 이온의 외부로부터의 유입과 잔류 염화물을 재분배를 고려하여 염화물 침투를 예측 시 각 영역별로 다른 확산계수가 적용이 가능하도록 영역별로 다른 확산계수를 갖는 방정식의 해를 구하기 다음의 식(2)를 도출하였다.

$$\begin{aligned} & \frac{c_{i,j+1} - c_{i,j}}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{[D_{i+1/2}(c_{i+1} - c_i) - D_{i-1/2}(c_i - c_{i-1})]_{j+1}}{(\Delta x)^2} \right. \\ & \quad \left. + \frac{[D_{i+1/2}(c_{i+1} - c_i) - D_{i-1/2}(c_i - c_{i-1})]_j}{(\Delta x)^2} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

여기서, $D_{i+1/2} = (D_i + D_{i+1})/2$, $D_{i-1/2} = (D_{i-1} + D_i)/2$ 이다. 경계조건은 다음과 같다.

$$c_{0,j} = c_{t_{repair},j} = 0, \quad \frac{c_{i+1,j} - 2c_{i,j} + c_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j}}{\Delta t}$$

콘크리트 피복이 t 시간에 x 깊이만큼 교체되었을 때, 콘크리트 피복의 확산계수는 새롭게 교체된 보수 콘크리트의 확산계수로 갱신된다. 즉, 콘크리트 표면에서 확산계수 $(D_{0,t})_o$ 는 $(D_{0,0})_{rep}$ 가 되며, 보수 두께 x 에서의 확산계수는 $(D_{x,t})_o$ 는 $(D_{x,t})_{rep}$ 가 된다. 여기서 $(D_{x,t})_o$ 와 $(D_{x,t})_{rep}$ 는 각각 기존 콘크리트와 보수 콘크리트의 확산계수로 정의한다.

2.2 시간 의존적 확산계수

콘크리트 내의 철근 부식은 콘크리트의 저항성 또는 확산 특성에 의해 좌우된다. 외부로부터 유입되는 염화물 이온이 철근 깊이까지 침투하여 염화물 임계농도까지 도달해야 철근 부식이 개시하기 때문이다. 따라서 확산계수에 의해 철근 깊이에서의 염화물 농도 변화를 예측하여 콘크리트 구조물의 공용기간을 결정할 수 있다. 확산계수는 주로 일정한 값으로 사용되어 왔으나, 시간 경과에 따라 시멘트 수화반응의 진행으로 콘크리트 내의 공극 크기 및 분포의 변화가 발생하여 확산 특성에 영향을 미치게 된다. 시간 의존성이 반영된 확산계수는 다음의 식(3), (4)와 같이 표현이 가능하다(Thomas and Bentz, 2000).

$$D_{w/c}(t) = D_{w/c} \left(\frac{t_R}{t} \right)^m \quad t \leq 30 \text{년} \quad (3)$$

$$D_{w/c}(t) = D_{w/c} \left(\frac{t_R}{t_{lim}} \right)^m \quad t > 30 \text{년} \quad (4)$$

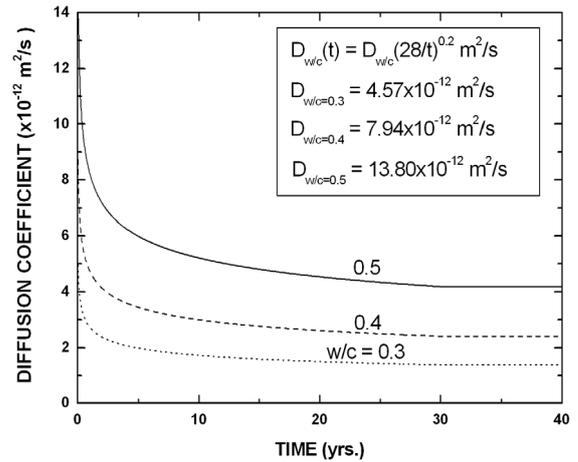


Fig. 2 Time Dependent Diffusion Coefficients

Table 1 Surface Chloride Content(kg/m³)

	Distance from the sea (m)				
	0	100	250	500	1,000
KCI JSCE	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

위의 두 식에서 t 는 시간을 나타내며 t_{lim} 는 경계시간으로 30년이다. 그리고 기준시간 t_R 은 28일이다. $D_{w/c}$ 는 다음의 식(5)로 가정할 수 있다 (Thomas and Bentz, 2000).

$$D_{w/c} = 10^{(-12.06 + 2.4 * w/c)} \quad (5)$$

물-시멘트비가 각각 0.3, 0.4, 0.5인 콘크리트의 시간 의존적 확산계수를 구할 수 있다. Fig. 2와 같이 시간 경과에 따라 확산계수가 초기에는 급격하게 감소하다가 점차 감소폭이 줄어들며 수렴하는 양상을 나타내는 것을 보여준다.

2.3 표면 염화물 이온 농도

표면 염화물 이온의 농도는 구조물의 해수까지의 거리, 구조물의 노출조건(대기 접촉, 조수에 의한 접촉, 해수에 잠김 등), 콘크리트의 성질 등과 같은 인자들에 의해 좌우된다 (Song et al., 2008). 이러한 인자들에 의해 결정된 표면 염화물 이온 농도는 콘크리트 내의 염화물 이온을 예측하기 위한 방정식의 닫힌해(closed form solution)를 구하는데 이용된다 (오병환 등, 2001). 본 연구의 예제에서는 해안으로부터 100m 떨어진 콘크리트 구조물로 가정하여 제안된 방정식의 닫힌 해를 구하는데

이용하였다. 상기의 조건에 대해 Table 1에 따라 표면 염화물 농도의 값은 4.5kg/m^3 을 사용하였다.

2.4 염화물 임계농도

염화물 임계농도, C_{crit} 는 철근 부식이 개시하는 염화물 이온의 농도로 정의할 수 있다. 콘크리트 구조물의 사용수명 평가 시 철근 주변에서 염화물 농도가 이 수준에 도달하면 사용수명의 종료로 간주된다. 염화물 임계농도는 철근 깊이에서 부식의 발생을 억제하는 부동태 피막이 파괴되는 시점의 농도로 정의되며, 이 염화물 임계농도를 시멘트 중량비 0.2~0.4%로 하였다 (Schiesel and Raupach, 1990). 철근 깊이에서 염화물 임계농도에 이르면 철근 부식이 개시되고, 이는 빠른 속도로 전파된다 (Yokota and Iwanami, 2006). 우리나라 및 일본에서는 염화물 임계농도를 1.2 kg/m^3 로 규정하고 있다. 또한 염화물 임계농도는 철근 표면의 거칠기, 콘크리트의 물성, 주변환경에 영향을 받는다 (Alonso et al., 2002, Ann and Song, 2007).

본 연구에서는 철근 깊이에서 염화물의 농도가 임계농도에 이르기 직전을 보수시점으로 하였다. 또한 철근 부식을 위해 필요한 수분과 산소는 충분히 공급되는 것으로 가정하고 해석을 위해 사용된 염화물 임계농도는 1.2 kg/m^3 로 설정하였다.

3. 유지관리비용 평가

3.1 유지관리비용의 산정방법

유지관리에 사용되는 보수재료의 특성에 따른 보수비용을 평가하기 위해 먼저 다음과 같이 콘크리트 피복의 교체 비용은 보수가 되는 시간 t 에 사용되는 보수재료의 비용과 비재료적 비용의 합을 총 유지관리비용으로 정의하였다.

$$C_{REP}(t) = C_M(t) + C_{NM}(t) \quad (6)$$

여기서, $C_{REP}(t)$ 는 t 시간에서의 총 유지관리비용, $C_M(t)$ 는 보수재료 비용, $C_{NM}(t)$ 는 비재료 비용이다. 보수재료 비용은 콘크리트 구조물의 보수에 사용되는 보수재료의 성능과 사용량에 비례한다. 반면에 비재료 비용은

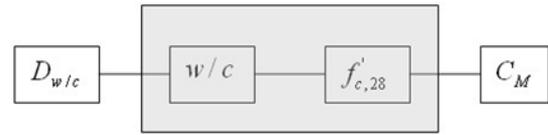


Fig. 3 Relationship between $D_{w/c}$ and C_M

보수에 추가적으로 소요되는 제반비용을 포함한다. 예를 들면, 임금, 사용자비용 등이다. 이는 보수재료 비용의 배수로 가정하여 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} C_{REP}(t) &= C_M(t) + C_{NM}(t) \\ &= C_M(t) + nC_M(t) \\ &= C_M(t) \times (1 + n) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $n = C_{NM}(t)/C_M(t)$ 이다.

보수가 되는 시점에 따라 미래에 소요되는 비용의 가치를 현재의 가치로 환산하여 공용기간 동안에 소요 예상되는 유지관리비용을 더욱 현실적으로 평가할 수 있다. 보수비용의 현재가치(present value, PV)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$PV = \frac{C_{REP}(t)}{(1 + \nu)^t} = \frac{C_M(t) \times (1 + n)}{(1 + \nu)^t} \quad (8)$$

여기서, ν 는 할인율(discount rate)이다.

3.2 확산계수에 따른 보수재료 비용 산출

보수재료 비용을 평가하기 위해서는 본 연구에서 사용되는 확산계수에 따른 콘크리트의 비용 산정이 필요하다. 그러나 현재 콘크리트의 가격은 일반적으로 그 강도에 따라 결정된다. 따라서 콘크리트의 확산계수와 콘크리트의 강도 사이의 관계의 설정이 필요하다. 확산계수와 콘크리트의 압축강도는 물-시멘트 비의 관계로 연결이 가능하다. 따라서 본 연구에서 필요한 확산계수에 따른 재료 비용은 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 간접적으로 유추할 수 있다. 물-시멘트 비에 대한 확산계수는 식(5)에 의해 예측이 가능하고, 물-시멘트 비에 대한 콘크리트의 압축강도는 식(9)와 같이 표현할 수 있다(Oluokun, 1994).

$$f'_{c,28} = \frac{96.55}{8.2^{(w/c)}} \quad (9)$$

Table 2 Cost Estimation of Concrete Repair

w/c	$D_{w/c}$ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) [식 (5)]	$f'_{c,28}$ (MPa) [식 (9)]	비용 (천원/ m^3) [조달청, 2006]
0.3	4.57	51.36	100.53
0.4	7.94	41.61	91.43
0.5	13.8	33.72	57.27

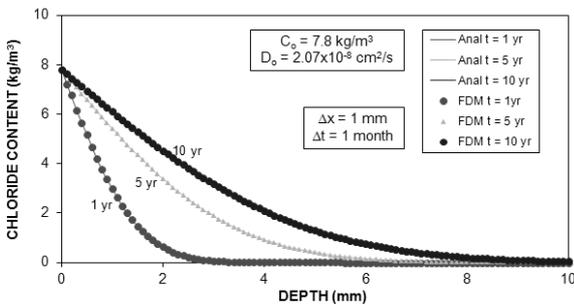


Fig. 4 Chloride Content vs. Depth

여기서, $f'_{c,28}$ 는 28일 압축강도이며, 단위는 MPa이다.

따라서 확산계수와 보수재료 비용과의 관계는 Table 2와 같이 정리할 수 있다. w/c로부터 추정된 압축강도에 따른 비용에 의해 확산계수에 따른 비용을 구할 수 있다.

4. 예 제

각 예제에서 보수 콘크리트는 기존의 콘크리트보다 낮은 확산계수를 갖는 것을 사용하는 것을 기본으로 하였다. 따라서 보수 콘크리트의 물-시멘트 비는 기존 콘크리트보다 낮은 것을 사용하며, 콘크리트 구조물의 위치는 해안으로부터 100m 떨어진 곳으로 표면 염화물 이온 농도(C_s)는 4.5 kg/m^3 로 설정하였다. 콘크리트 피복두께는 80mm로 하였으며, 재료비용과 비재료비용의 비율(n)은 1로 가정하였다. 본 연구에서 기존 콘크리트와 보수 콘크리트 간의 경계면의 영향은 무시하였다. Fig. 4와 5에 나타난 바와 같이 Crank-Nicolson법을 이용한 유한 차분법에 의해 제안된 모델은 합리적이고, 효율적이라 판단되는 메쉬 사이즈를 1mm로 해석 시간간격은 1주로 선택하여 예제를 해석을 수행하였다.

4.1 예제 1

기존 콘크리트와 보수 콘크리트의 물-시멘트 비는 각각 0.3으로 가정하여 기존 콘크리트의 확산계수는

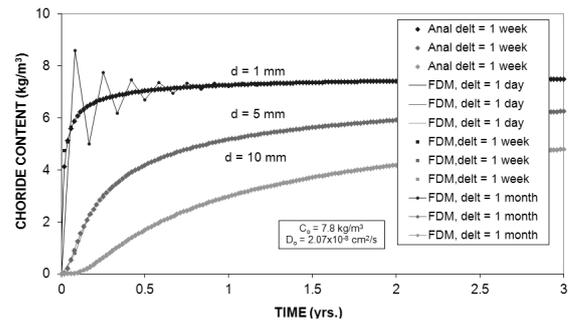
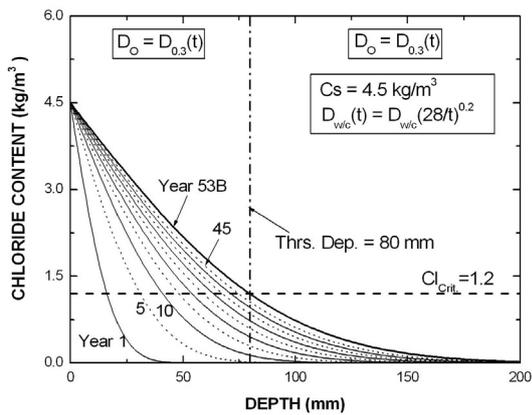


Fig. 5 Chloride Content vs. Time

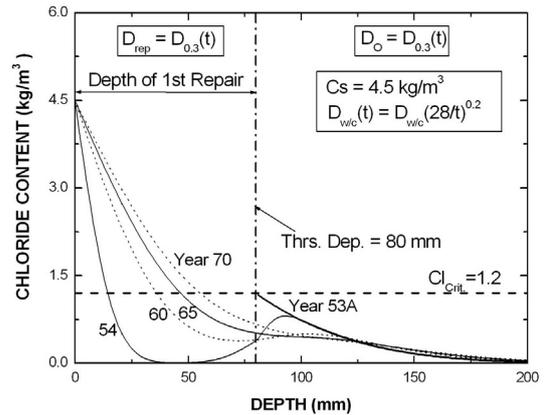
$D_0 = D_{0.3}(t)$ 이고, 보수 콘크리트의 확산계수는 $D_{rep} = D_{0.3}(t)$ 이다. 본 연구에서 제안된 프로그램을 이용하여 염화물 이온의 침투를 예측하면 초기 구조물의 신설 후 염화물은 Fig. 6(a)와 같은 분포를 나타낸다. 여기서 확산계수는 시간 의존성을 반영하여 적용하였다. 염화물 이온이 지속적으로 침투하여 약 53년이 경과된 시점에서 철근 깊이에서 염화물 임계 농도에 도달하게 된다. 따라서 이 시점 직전에 보수를 행하여 염화물로 오염된 콘크리트를 제거하고 건전한 보수 콘크리트로 교체한다. 보수 후의 염화물 분포는 Figs. 6(b)-(d)와 같이 나타난다.

기존 콘크리트에 잔류해 있던 염화물 이온은 확산에 의해 재분배된다. 동시에 외부로부터 염화물 이온이 다시 침투하기 시작한다. 시간이 경과함에 따라 약 91년에 철근 깊이에서 염화물 임계 농도에 다시 도달하게 된다. 따라서 2회의 패치 보수를 통해 공용기간이 약 100년까지 연장될 수 있다.

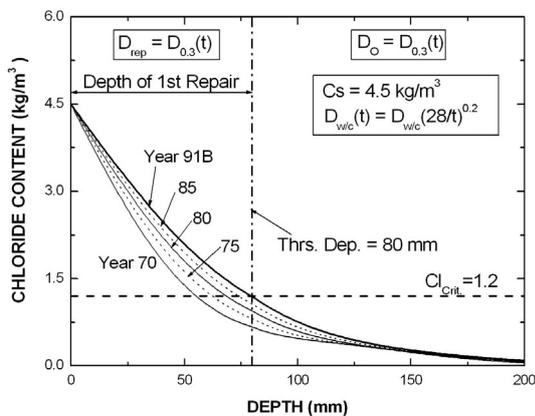
Fig. 7는 보수를 하지 않은 경우와 보수 두께를 각각 80, 100, 120mm로 하였을 때 철근 깊이에서의 염화물 농도 분포를 예측한 것이다. 보수를 하지 않은 경우 철근 깊이에서 염화물 임계 농도에 도달한 이후 계속 증가할 것이다. 만약 철근 깊이에서의 염화물 이온의 농도가 임계 농도에 도달했을 때를 사용수명의 종점이라고 정의한다면 보수를 하지 않은 구조물의 공용기간은 약 53년으로 평가된다. 그러나 53년에 보수 콘크리트로 80mm를 교체한 경우 공용기간은 연장될 것이다. 보수 직후에 염화물 이온으로 오염된 콘크리트는 제거되나, 보수 콘크리트로 교체된 후에는 농도차에 의해 염화물 이온은 재분배된다. 첫 번째 보수에 의해 공용기간이 약 38년 연장되고, 91년째에 철근 깊이에서의 염화물 농도는 다시 임계 농도에 도달한다. 첫 번째 보수와 같은 조건으로 이 시점에 다시 패치 보수를 하여 목표한 100년 이상으로 공용기간을



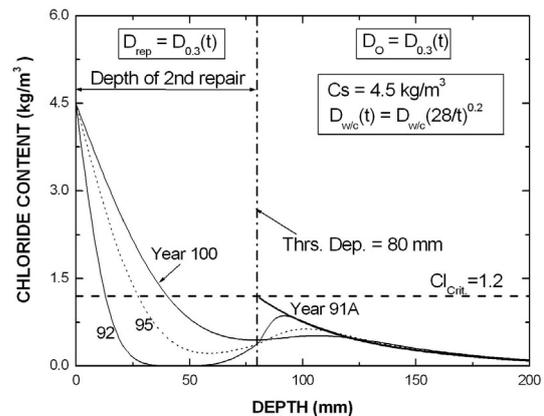
(a) 1-year to 53-year



(b) 53-year to 70-year



(c) 70-year to 91-year



(d) 91-year to 100-year

Fig. 6 Chloride Profile with Concrete Repair

연장할 수 있다. 또한 보수두께를 100mm로 한 경우에는 1회의 보수로 약 99년까지 공용기간의 연장이 가능하며, 120mm로 한 경우에는 1회의 보수로 100년 이상 연장이 가능하다.

Figs. 8과 9은 물-시멘트 비가 0.3인 보수 콘크리트를 이용하여 각각 다른 보수 두께에 대해 연간 누적되는 유지관리비용을 할인율을 0%로 하여 얻은 결과이다. 여기서 총 유지관리비용은 앞서 가정한 바와 같이 비용 비율을 1로 하여 보수재료 비용의 2배한 것으로 하였다. 보수 두께 80, 100, 120mm로 한 경우에 대한 비용 평가 시 목표한 공용기간 100년을 유지하는 동안에 80, 100mm를 덧씌우기 하는 경우 2회의 보수가 필요하다. 그러나 120mm를 덧씌우기 하는 경우에는 1회의 보수로 100년 이상 연장이 가능하다. 따라서 같은 보수 횟수가 적용된 80, 100mm의 경우에 같은 재료를 사용할 경우 보수 두께에 비례하여 보수재료의 사용량이 증가하기 때문에 80mm를 보수한 경우에 총 누적비용이 상대적으로 낮으

나 같은 재료로 120mm를 보수한 경우와 비교하면 120mm를 덧씌우기 한 경우 1회 보수비용은 높지만 목표 공용기간 동안에 1회의 보수만 필요하므로 총 유지관리비용은 낮아진다. 따라서 같은 재료를 사용 시 목표 공용기간 동안의 보수 횟수와 보수 1회당 소요되는 비용을 고려하여 총 유지관리 비용의 산정함으로써 효율적인 보수 두께 및 보수 재료를 결정할 수 있다. 따라서 같은 재료 사용 시 보수 두께에 따라 목표 공용기간 동안의 1회당 보수비용과 보수 횟수가 결정되므로 최적의 보수 두께를 결정할 수 있다.

4.2 예제 2

물-시멘트 비가 0.4인 콘크리트 구조물에 물-시멘트 비가 각각 0.3과 0.4인 보수 콘크리트로 패치 보수한 경우에 대한 보수를 평가하였다.

Fig. 10은 인자를 보수 두께와 보수 재료의 확산특성으

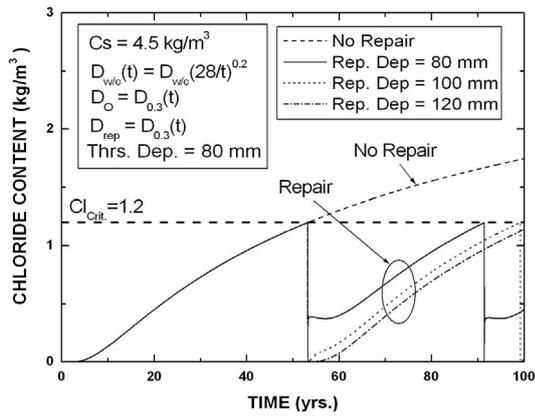


Fig. 7 Chloride Content at Steel Depth with Different Repair Depth

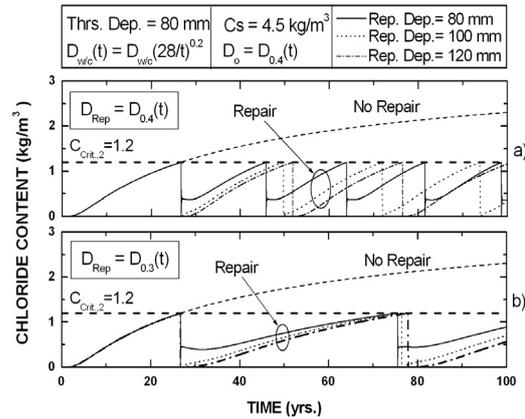


Fig. 10 Chloride Content at Steel Depth with Different Repair Depths and Materials

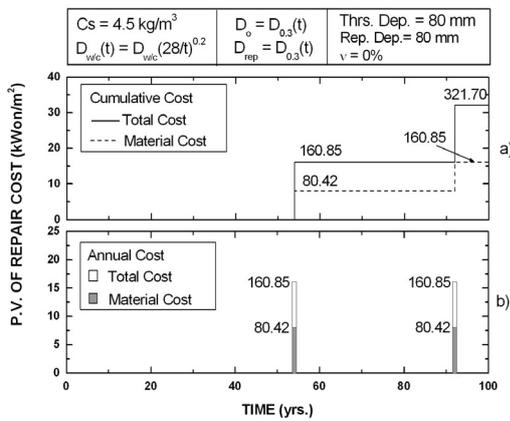


Fig. 8 Present Value of Repair Cost (Repair Depth=80mm)

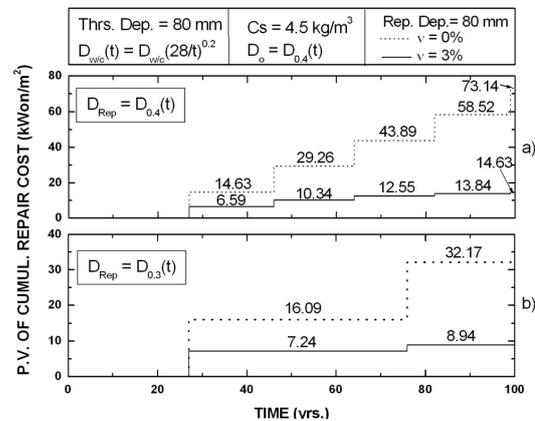


Fig. 11 Present Value of Repair Cost (Repair Depth=80mm)

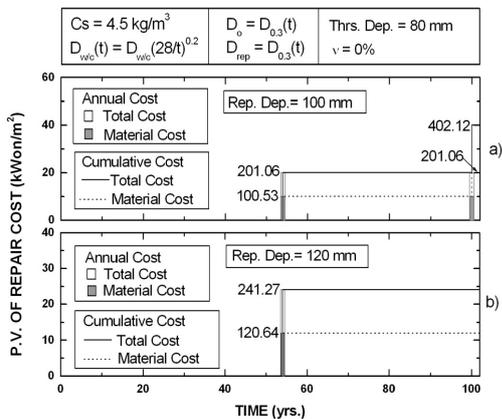


Fig. 9 Present Value of Repair Cost (Repair Depth=100, 120mm)

로 하여 철근 깊이에서의 염화물 농도 변화에 대한 사용 수명 평가를 한 것이다. 보수 콘크리트의 물-시멘트 비가 각각 0.3과 0.4인 경우 80, 100, 120mm를 보수한 경우를 비교하면 물-시멘트 비가 상대적으로 큰 보수 콘크리트를 사용 시 보수 이후에 염화물 침투 속도 또한 빠르기 때문에 목표 공용기간 동안에 더 많은 횟수의 보수가 필

요하게 된다. 따라서 보수 두께 및 보수재료에 따른 보수의 효과, 즉, 보수를 통해 연장 가능한 사용수명 또는 목표 공용기간 동안에 소요 예상되는 보수 횟수가 비교될 수 있다.

Fig. 11에서는 80mm의 보수에 대해 할인율을 각각 0, 3%로 각각 적용하여 공용기간 동안에 소요되는 총 유지관리 비용의 현재가치를 평가하였다. 현재가치로 평가하지 않았을 경우 물-시멘트 비가 0.4인 보수 콘크리트를 사용 시 물-시멘트 비가 0.3인 보수 콘크리트 사용에 비해 총 유지관리 비용이 약 2.3배 높았으나, 현재가치로 평가 시 약 1.6배 높은 것으로 나타났다. 따라서 목표 공용기간 동안에 소요 예상되는 비용을 현재가치로 환산하여 비교하는 것이 합당할 것이다.

Fig. 12에서는 보수 콘크리트의 물-시멘트 비를 0.3과 0.4로 하여 보수두께를 100, 120mm한 경우에 할인율 3%를 적용하여 비교하였다. 목표 공용기간을 100년으로 한 경우 물-시멘트 비가 0.4인 보수 콘크리트를 사용하

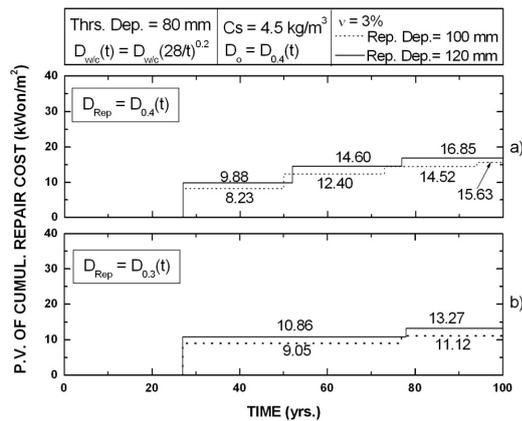


Fig. 12 Present Value of Repair Cost(Repair Depth=100, 120mm)

여 100, 120mm 보수한 경우 보수 횟수가 각각 3, 4회이다. 반면에 물-시멘트 비가 0.3인 보수 콘크리트를 사용 시에는 2회의 보수로 목표 공용기간까지 연장이 가능하다. 목표 공용기간 동안의 총 유지관리 비용을 현재가치로 비교하면 물-시멘트 비가 0.3인 보수 콘크리트로 100mm를 보수하는 것이 가장 효율적인 것으로 평가되었다. 따라서 이 조건에서는 확산계수가 낮은 보수 재료로 최소 두께를 보수하는 것으로 결정내릴 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 Crank-Nicolson법을 이용한 수치해석으로 시간의존적 확산특성과 내부 잔류 염화물의 재분배를 고려하여 보수된 콘크리트 구조물의 사용수명을 예측하였다. 이를 통해 목표 공용기간 동안에 필요한 보수 적용 횟수를 결정하고, 보수재료의 비용을 예측하여 보수 계획을 평가하였다. 제안된 모델을 이용한 예제 분석을 통해 보수재료의 품질이 높을수록, 즉, 보수재료의 확산계수가 낮을수록 침투시간이 연장되어 사용수명은 길어진다. 따라서 목표 공용기간 동안의 보수 횟수도 감소하게 되어 유지관리비용이 감소할 수 있다. 그러나 고품질의 보수재료를 사용 시 재료비용이 증가하게 되기 때문에 최적의 유지관리라 할 수 없다.

염해 환경 하에서 보수된 콘크리트 구조물의 공용기간 예측 및 유지관리비용 평가로 유지관리 계획 단계에서 최적의 보수 두께 및 보수 재료를 결정하여 최저 비용으로 최대 효과를 기대할 수 있다. 따라서 보수 계획 시에 보수된 콘크리트 구조물의 적절한 성능 평가와 동시에 목표 생애주기 동안의 보수비용 산정이 함께 이루어져야 한다.

본 연구에서 기존 콘크리트와 보수 콘크리트 간의 경계면의 영향은 배제되었으나, 추가적인 연구를 통해 경계면의 영향을 반영하여 더욱 실제적인 분석이 가능할 것으로 판단된다. 또한 유지관리 비용 산정에 있어 비재료 비용을 재료 비용의 배수로 가정하였으나, 이에 대한 추가적인 연구를 통해 더욱 실용적인 평가가 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설기반구축사업 보수·보강된 콘크리트 교량의 성능 평가/개선 기술 개발 및 원격관리시스템 구축과제(R&D / 05기반구축 D04-01)의 지원을 받음.

참고문헌

- 강인석, 이한승, 정해문, 안태승, “콘크리트 구조물의 중성화 및 LCC예측을 통한 최적보수공법 선정” 한국콘크리트학회 추계 학술발표회, 제17권 2호, 2005, pp.511-514.
- 고경택, 김도겸, 김성욱, 조명석, 송영철, “동결융해와 염해의 복합작용을 받는 콘크리트의 내구성능 저하 평가” 한국콘크리트학회 논문집, 제13권 4호, 2001, pp.397-405.
- 권성준, 박상순, 나웅진, “확률론적 해석을 통한 염해에 노출된 균열부 콘크리트구조물의 내부수명 평가” 대한토목학회 논문집, 제27권 6A호, 2007, pp.881-890.
- 박경훈, 공정식, 황윤국, 조효남, “생애주기 성능 및 비용에 기초한 교량 유지관리기법 개발” 대한토목학회 논문집, 제26권 6A호, 2006, pp.1023-1032.
- 송하원, “콘크리트 구조물의 선진형 유지관리 개념 및 규격제정의 국제적 동향” 한국콘크리트학회지, 제19권 1호, 2007, pp.16-27.
- 송하원, 백승우, 안기용, “해안 환경 하에 있는 콘크리트 구조물의 시간의존적 염화물침투 평가” 한국콘크리트학회 논문집, 제19권 5호, 2007, pp.585-593.
- 오병환, 안태승, 최영철, “해안에 노출된 콘크리트 구조물의 염화물 침투 확산계수 및 표면염화물량 산정에 관한 연구” 한국구조물진단학회 봄 학술발표논문집, 제5권 1호, 2001, pp.55-58.
- 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서 내구성편, 한국콘크리트학회, 2004, pp.15-18.
- 日本土木學會, 콘크리트標準方書 (構造性能照査編), 2002, pp.1-9.
- Alonso, C., Castellote, M. and Andrade C., “Chloride Threshold Dependence of Pitting Potential of Reinforcements”, Electrochimica Acta, 2002, vol. 47, pp.3469-3481.
- Ann, K.Y. and Song, H.W., “Chloride Threshold Level for Corrosion of Steel in Concrete”, Corrosion Science, 2007, vol. 49, pp.4113-4133.
- Crank, J., The Mathematics of Diffusion, The Clarendon Press, Oxford, 1975.
- Nilsson, L.O. and Tang, L., Transport Mechanisms in Porous Materials - An Introduction to Their Basic Laws and Correlations, Proceeding of the NATIO

- Advanced Research Workshop on The Modeling of Microstructure and Its Potential for Studying Transport Properties and Durability, Kluwer Academic Press, France, 1996.
14. Oluokun, F.A., Fly Ash Concrete Mix Design and the Water-Cement Ratio Law, ACI Materials Journal, vol. 91, pp.362-371, 1994.
 15. REHABCON, Strategy for Maintenance and Rehabilitation in Concrete Structures, Final Report on the Evaluation of Alternative Repair and Upgrading Options, EC Innovation and SME Programme Project No.IPS-2000-0063, Department of Building Materials, Sweden, 2004.
 16. Schiessl, P. and Raupach, M., Influence of Concrete Composition and Microclimate on the Critical Chloride Content in Concrete. Corrosion of Reinforcement in Concrete, Elsevier Applied Science. 1990, pp.49-58.
 17. Song, H. W., Lee, C.H. and Ann, K. Y., "Factors Influencing Chloride Transport in Concrete Structures Exposed to Marine Environments", Cement and Concrete Composites, 2008, vol. 30, pp.113-121
 18. Song, H. W., Shim, H. B., Petcherdchoo, A. and Park, S. K., "Service Life Prediction of Repaired Concrete Structures Under Chloride Environment Using Finite Difference Method", Cement and Concrete Research, 2009, vol. 31, pp.120-127.
 19. Thomas, M. D. A. and Bentz, E. C., Life-365 Manual, Released with Program by Master Builders, 2000.
 20. Yokota, H. and Iwanami W., "Life-Cycle Management of Degraded RC Structures in Ports and Harbors", Proceeding of the International Workshop on Life Cycle Management of Coastal Concrete Structures, Nagaoka, Japan, 2006.

(접수일자 : 2010년 8월 3일)
(심사완료일자 : 2010년 10월 7일)

요 지

해양환경 하에서 염화물의 침투를 억제하여 부식 위험을 최소화함으로써 콘크리트 구조물의 공용기간을 연장할 수 있다. 효과적으로 구조물을 관리하기 위해 적절하게 유지관리하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 효과적인 유지관리 전략을 세우기 위한 보수된 구조물의 유지관리비용 평가와 연계하여 구조물의 사용수명을 정량적으로 평가하는 방법을 제안하였다. Fick의 제2법칙으로부터 Crank-Nicolson법에 기초한 유한 차분법을 제안하여 보수되지 않은 콘크리트 구조물과 보수된 콘크리트 구조물의 염화물 이온 분포를 예측하였다. 이를 이용하여 보수에 의해 연장 가능한 사용수명과 목표한 공용기간 동안에 필요한 보수 횟수를 평가하였다. 게다가 보수 횟수와 콘크리트 교체 비용을 고려하여 총 유지관리 비용을 산출하였다. 마지막으로 제안된 방법의 적용성 검토를 위해 수치해석 예제를 제시하였다.

핵심 용어 : 염화물, 부식, 유지관리, 비용, 사용수명, 유한 차분