

# 염소이온 침투 FEM 해석을 통한 RC구조물의 보수 LCC 평가

Repair LCC Evaluation of RC Structures through the FEM Analysis of Chloride Ion Penetration

이 한 승\*

Lee, Han-Seung

## Abstract

In this paper, the method for repair LCC evaluation of reinforced concrete structures deteriorated by chloride attack was constructed. Also, the FEM analysis for chloride ion penetration into concrete was conducted to evaluate the repair LCC which was decided by the number of repair times including early stages of construction and repair construction during the service life of structures. As a result, the number of repair times is obtained from the comparing the concentration of the chloride ion in a rebar position, and the critical chloride ion concentration of rebar corrosion through the FEM analysis considering the kind of repair materials and methods. Also, the repair LCC could be calculated by the number of repair times during the service life of structures.

## 요 지

본 논문에서는 염해에 의하여 열화된 철근콘크리트 구조물의 보수 LCC평가 방법에 대하여 연구를 수행하였다. 또한, 철근콘크리트 구조물의 목표내용년수 동안에 건설초기 공법과 염해보수 공법을 포함한 보수 LCC를 평가하기 위하여 콘크리트내로의 염소이온 침투를 FEM 해석으로 실시함으로써 보수횟수를 결정하였다. 그 결과, 염해 보수 횟수는 보수재의 종류 및 보수방법을 고려한 FEM 해석을 통하여 철근위치에서의 염소이온 농도와 철근부식 임계염소이온 농도를 비교함으로써 산정할 수 있었으며, 염해 보수 횟수를 이용하여 목표내용년수 동안의 보수 LCC를 산정하는 것이 가능하였다.

**Keywords** : RC structures, LCC, chloride attack, repair, FEM analysis

**핵심 용어** : RC 구조물, LCC, 염해, 보수, FEM 해석

\* 한양대학교 공학대학 건축학부 조교수

E-mail : ercleehs@hanyang.ac.kr 031-400-5181

•본 논문에 대한 토의를 2006년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2006년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

철근콘크리트(RC)구조물은 내구성이 우수하기 때문에 종래에는 유지관리가 거의 필요 없다고 생각되어 왔지만, 최근에는 콘크리트 구조물의 열화, 특히 조기열화 현상이 지적되고 있기 때문에 콘크리트구조물의 유지관리 업무의 중요성이 재인식되고 있다. 특히, 과혹한 해양환경에 놓인 교량 및 해안 구조물에 있어서 이러한 조기 열화현상은 열화원인이 염해인 경우에는 심각한 상황을 초래할 수 있으므로, 구조물의 내용년수 동안에는 대단위의 보수시공이 이루어지지 않기 위한 설계단계에서의 내구성설계 및 보수시기와 보수횟수를 고려한 유지관리 LCC 설계 등이 필요하다.<sup>(1),(5)</sup>

일반적으로 콘크리트구조물의 관리는 육안에 의한 간단한 조사에 의한 보수점검에 기초하여 열화정도를 판정하고 열화정도가 보수를 필요로 하는 경우에는 상세한 보수점검을 실시하여 보수시공을 하고 있다. 그러나, 장기 내용년수를 갖는 철근콘크리트 구조물의 경우, 유지관리 측면에서의 보수시기는 구조물 수명, 구조물의 중요도, 열화 환경, 보수비용 등을 고려한 정량적인 보수전략이 수립되어야 하나 이에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 특히, 염해를 받는 콘크리트 구조물의 보수시기를 평가하기 위해서는 정량적인 열화정도의 평가가 필요하며 이를 위해서는 Fig. 1과 같이 염해에 의한 철근콘크리트구조물의 내구성능 저하를 열화도별에 따른 시기로 구분하여야 하며, 경년변화에 따른 이들 열화진행 모델을 구축하는 것이 매우 중요하다.<sup>(6)</sup>

일반적으로 염해의 경우, 철근콘크리트 구조물의 물리적수명은 철근위치에서의 임계염소이온농도로 판정하게 되며, 경년변화에 따른 콘크리트 내부로의 염소이온 침투는 염소이온 확산계수를 사용한 유한요소해석(FEM analysis)으로 진행되고 있다.<sup>(2)</sup> 그러나, 철근콘크리트 구조물의 표면이 노출되어 있는 토목구조물과는 달리 건축구조물의 경우에는 대부분 마감재가 시공되어 있고 특히, 보수공법이나 보수시기에 따라 새로운 재료가 콘크리트 표면에 시공되기 때문에 이러한 구조물의 염소이온침투를 정량적으로 평가하는 것이 필요하다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 철근콘크리트구조물의 목표내용년수 동안에 염소이온침투 현상을 FEM해

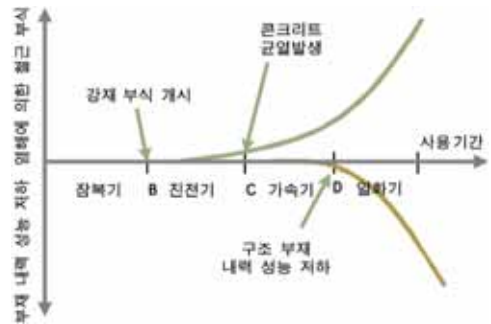


Fig. 1 염해에 의한 내구성능 저하 모식도

석으로 평가 하고 철근위치에서의 임계염소이온농도를 기초로 하여 보수재를 시공한 경우의 보수횟수 및 이를 통한 보수비용 발생을 LCC측면에서 평가하는 기법에 대하여 해석적인 검토를 실시하였다.

## 2. 염해 환경 RC구조물 LCC평가 방법

### 2.1 보수 LCC평가 Flow

보수시공을 실시하는 콘크리트 구조물에서는 장기간의 내용기간에 대해서 표면피복, 단면수복, 재도장 등의 보수시공을 필요로 하는 경우가 많기 때문에 목표내구 수명동안에 보수 LCC를 고려한 유지관리 계획을 수립하는 것이 중요하다. 보수시공을 적용하는 경우의 콘크리트 구조물의 LCC산정 Flow는 Fig. 2와 같다. 보수 LCC산정시에는 우선, 콘크리트 구조물에 대한 요구성능에 대응하여 콘크리트 및 보수시공에 대한 요구성능을 결정하고, 설계내용기간에 있어서 열화예측을 수행하고, 이것을 근거로 하여 내구성 조사를 수행한다. 설계내용기간내에 내구성이 확보되지 않는 경우에는 보수 공법에 따른 보수 계획을 세워 언제, 어떻게 보수를 실시할 것인가를 결정한다. 또, 보수 후의 열화예측도 수행하여 재보수시기 및 재보수 횟수의 계획을 세운다. 이러한 보수계획을 기초로 설계내용기간에 있어서 LCC를 산정한다. 따라서, 구조물 목표내용년수 동안에 최적 보수 LCC를 평가하는 것에 의하여 LCC관점 및 보수관점에서의 최적 유지관리 전략을 수립하는 것이 가능하다. Fig. 2와 같은 Flow에 의해 계산되는 보수 LCC는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

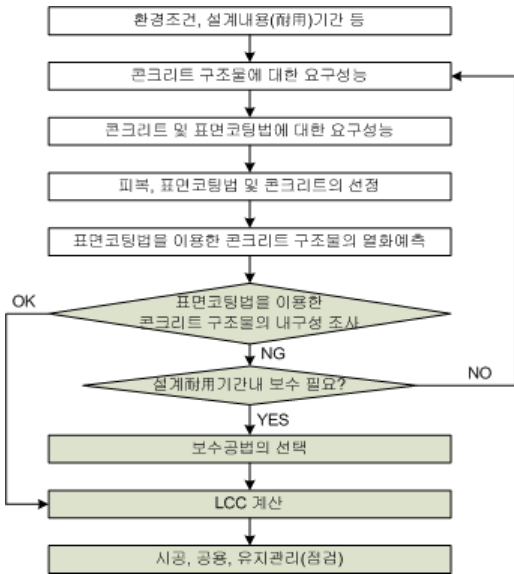


Fig. 2 보수시공을 고려한 LCC평가 Flow

$$LCC = Z_i + \sum_{i=1}^n Z_{M_i} + \sum_{i=1}^m Z_{R_i} \quad (\text{식 1})$$

여기서,  $Z_i$  : 초기건설비용

$$\sum_{i=1}^n Z_{M_i} : \text{보수비용}$$

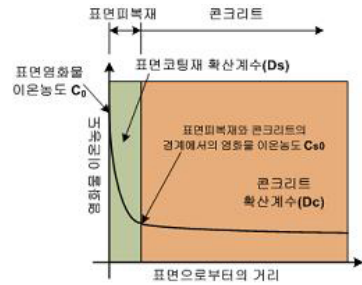
$$\sum_{i=1}^m Z_{R_i} : \text{갱신비용(철거 및 재건설비용)}$$

정밀하게는 초기건설비용, 보수비용, 갱신비용을 고려하여 LCC를 평가하여야 하나, 일반적으로 갱신비용은 철거 및 재건설비용이 포함되므로 보수 LCC산정에서는 목표내구수명동안에 발생하는 초기건설비용과 보수비용만을 고려하여 평가하고 있으며, 본 연구에서도 이를 적용하기로 하였다.

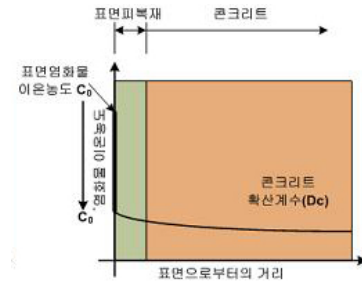
## 2.2 보수시기 판정 방법

보수시공을 적용한 콘크리트 구조물의 열화예측을 수행하기 위해서는 보수재를 포함한 염소이온 침투 모델을 설정할 필요가 있다. 염해를 받는 콘크리트 구조물에 표면 피복재를 적용한 경우, Fig. 3에 나타난 바와

같이 모델 A 및 모델 B로 나누어 표면피복재에 의한 염소이온 침투 억제효과를 고려함으로써 염소이온의 침투를 평가할 수 가 있다.



(a) 모델 A



(b) 모델 B

Fig. 3 보수재 시공 콘크리트의 염소이온 침투 모델

모델 A : 보수재와 콘크리트 염소이온 확산계수( $D_s$ ,  $D_c$ )를 개별로 설정하고 2층 재료로써 확산방정식을 이용하여 염소이온 침투 예측 모델

모델 B : 보수재 시공에 의해 콘크리트 표면 경계조건이 변화하는 것을 고려하여, 표면 염소이온농도가  $C_0$ 에서  $C_0'$ 까지 저하하는 것을 가정하여 확산방정식을 이용해서 염소이온 침투 예측 모델

모델 A에 의한 염소 이온의 침투를 예측하는 경우에는 표면피복재의 성능 (예를 들어 도장재료의 염소이온 확산계수)과 표면피복재의 시간 경과에 따른 성능저하를 정량적으로 파악할 필요가 있다. 도장재료 등의 표면피복재의 열화에 의한 성능저하는 현시점에서 분명하지 않고 이를 고려한 경우에는 축적된 데이터가 거의 없어 정확한 예측이 어려운 것이 현실이다.

또한, 모델 B를 사용하는 경우에 표면피복재에 의한

효과로 표면피복재의 표면 염소이온농도를 저하시켜 해석하는 방법이 있지만 이에 관한 저감계수 등의 데이터가 없기 때문에 주로 요소를 자유롭게 나눌 수 있는 유한요소해석의 경우에는 요소의 확산계수, 즉  $D_s$ 와  $D_c$ 를 구별하여 염소이온침투를 해석하는 것이 바람직하다고 판단된다.

모델 A에 의해 표면피복재를 시공한 경우, 유한요소 해석에 의한 콘크리트 염소이온 침투 해석 결과를 Fig. 4에 나타낸다. 본 해석에서는 콘크리트 염소이온 확산계수( $D_c$ )는  $1.8 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 하였으며, 표면 염소이온 농도는  $9.0 \text{ kg/m}^3$ 으로 일정한 농도를 갖도록 경계조건을 설정하였다. 또한, 표면피복재로써는 도막두께가  $500\mu\text{m}$ 인 에폭시수지 표면 도장재료를 사용한 경우로 설정하였으며, 기존 연구결과를 참조로, 에폭시수지 표면피복재 확산계수( $D_s$ )는  $1.2 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 설정하여 계산을 수행하였다.<sup>(2)</sup>

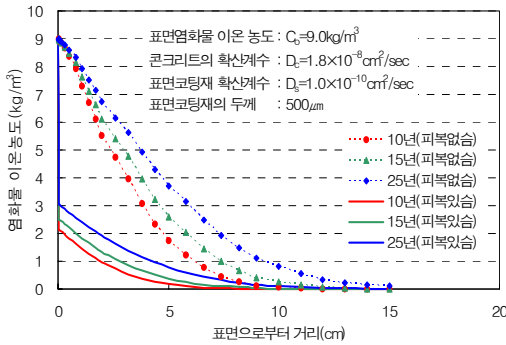


Fig. 4 표면피복재 유무에 따른 염소이온 침투변화

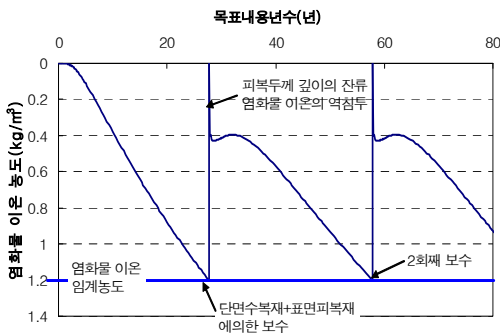


Fig. 5 보수시공 경우의 철근위치 염소이온 침투량

Fig. 4에서 알 수 있듯이 에폭시 수지를 콘크리트 표면에 피복하는 것에 의하여 콘크리트내로의 염소이온의 침입을 매우 효과적으로 억제할 수 있는 것을 알 수 있다. 경과년수 25년의 경우, 철근위치 5cm에서의 염소이온 농도를 비교하면 표면피복이 없는 경우는 약  $4.0 \text{ kg/m}^3$ 로써 일반적인 임계염소이온 농도인  $1.2 \text{ kg/m}^3$ 를 초과하여 철근부식이 발생될 것으로 판단된다. 그러나, 에폭시수지 도장을 실시한 경우에는 약  $1.0 \text{ kg/m}^3$ 으로써 임계염소이온 농도를 밑돌기 때문에 철근의 부식은 발생되지 않을 것으로 판단되어 표면피복재에 의한 염소이온 침투를 효과적으로 억제할 것을 알 수 있다. 특히, 표면피복재를 시공한 경우에 있어서는 콘크리트 표면부에 있어서 염소이온의 차단효과가 매우 큼을 알 수 있다.

한편, Fig. 5는 콘크리트 표면으로부터 염소이온이 침투하여 철근위치의 임계염소이온 농도가  $1.2 \text{ kg/m}^3$ 를 초과한 시점에서 단면수복재 및 표면피복재를 실시한 경우의 염소이온 침투량을 FEM해석에 의해 산정한 것이다. 27년이 경과한 시점에서 철근위치의 염소이온량은  $1.2 \text{ kg/m}^3$ 에 도달하였으므로 철근위치까지 콘크리트를 제거하고 단면수복재와 표면피복재를 시공한 경우, 재차 염소이온의 침투가 발생하고 다시 임계염소이온농도에 도달하는 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 해석기법을 이용한다면 목표내구수명동안에 몇회의 보수를 필요로 하는 지를 예측할 수 있다.

### 3. 보수 LCC 평가를 위한 FEM해석

#### 3.1 LCC 평가 적용 보수 공법 종류

목표내구수명 동안 철근콘크리트 구조물의 보수

Table 1 LCC평가를 위한 공법 종류

| 적용 공법 | 건설초기 염해대책 | 보수 공법     | 보수 깊이 (표면피복두께)            |
|-------|-----------|-----------|---------------------------|
| A     | ×         | 단면수복      | 피복두께                      |
| B     | ×         | 단면수복+표면피복 | 피복두께 (500 $\mu\text{m}$ ) |
| C     | ○ (표면피복)  | 단면수복      | 피복두께 (500 $\mu\text{m}$ ) |
| D     | ○ (표면피복)  | 단면수복+표면피복 | 피복두께 (500 $\mu\text{m}$ ) |

LCC평가를 위하여 설정한 건설 초기 공법 및 보수공법은 Table 1과 같다.

### 3.2 FEM 해석 개요

보수 LCC 평가를 위한 구조물은 가혹한 염해환경에 놓여지는 장방형의 교각을 대상으로 하였으며 폭 4m, 깊이 3m, 높이 15m의 철근 콘크리트 교각을 대상으로 하였다.

FEM해석에서 콘크리트내로의 염소이온 침투는식 (2)와 같이 푸리에 법칙을 적용하였다.<sup>(3)</sup> 물체내의 단위면적을 단위시간 t안에 이동하는 염소이온 침투유속 q는 염소이온이 침투하는 방향의 구배  $dC/d_x$  (C: 염소이온량, x: 염소이온의 침투방향에서 취한 좌표) 에 비례한다.

$$q = -D_x \frac{dC}{dx} \quad (2)$$

식 (2)의 비례정수  $D_x$ 를 확산계수라 하며, 물질에 있어서 염소이온이 침투하기 쉬운의 정도를 나타내는 것이다.

한편, Fig. 7과 같이 물체 내 임의의 위치 (x,y,z)에서 직육면체를 생각하면, 위치 (x,y,z), 시간 t에 있어서 염소이온 농도를  $C(x,y,z,t)$ 로 두고, 식 (2)의 푸리에 법칙을 이용하여 시간 dt 사이에 A면에서 유입하는 염분유속  $(dq_x)_{in}$ 을 산정하면,

$$(dq_x)_{in} = - [D_x \frac{\partial C}{\partial x}] dydzdt \quad (3)$$

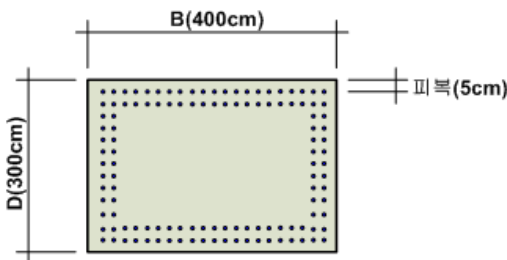


Fig. 6 FEM 해석 대상 구조물

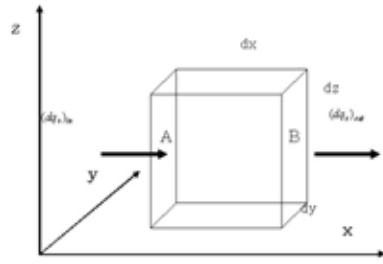


Fig. 7 FEM 해석에서 염소이온 이동

으로 된다. 또한, B면에서 유출되는 염소이온 유속  $(dq_x)_{out}$ 는

$$(dq_x)_{out} = - [(D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) dx] dydzdt \quad (4)$$

으로 되고, 식 (3), (4)에 의해 x방향 염소이온 출입에 따라 직육면체에 축적되는 염소이온은 식 (5)로 표시된다.

$$(dq_x)_{in} - (dq_x)_{out} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) dx dy dz dt \quad (5)$$

본 연구에서 적용한 콘크리트내로의 염소이온 침투해석을 위한 FEM 해석모델은 Fig. 8과 같이 콘크리트 표면의 염소이온 농도를 고정시키고, 단면수복재, 표면피복재, 도장재료 등의 보수 마감재를 통하여 콘크리트내로의 수평방향 염소이온 확산만을 고려하였다.

콘크리트 구조물의 염해 열화정도 평가는 콘크리트 중의 철근위치에 있어서 염소이온농도로 평가하였다. 유한요소해석 결과, 철근위치에서의 염소이온농도와 철근부식 임계염소이온 농도(1.2 kg/m<sup>3</sup>)를 비교하여 보수시기를 산정하였으며, 150년 목표내구수명 동안의

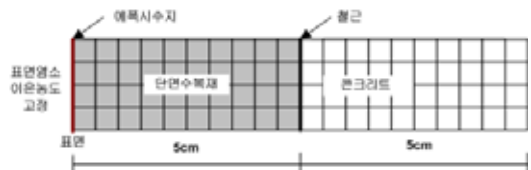


Fig. 8 철근콘크리트 내에서의 FEM 해석 모델 개요

보수횟수를 산정하여 염해 보수 LCC를 평가하였다. 또한, 초기 건설비용 및 염해 보수비용은 유지관리업체에서 제공한 자료를 준용하였다.

물시멘트비 50%인 콘크리트의 염소이온 확산계수는  $1.8 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ , 단면수복재의 염소이온 확산계수는  $0.8 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ , 도막두께가  $500 \mu\text{m}$ 인 에폭시수지 계열의 표면피복재 염소이온 확산계수는  $1.2 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로 하였다. 한편, 보수재 표면의 염소이온 농도는  $9.0 \text{kg}/\text{m}^3$ 으로 일정한 농도를 갖도록 경계조건을 설정하였다.

### 3.3 보수 LCC 평가 결과

Table 2에 유한요소해석 결과에 기초한 보수 LCC 평가 결과를 나타낸다. 초기 염해대책 및 염해 보수공법 종류에 따라 150년 목표내구수명 동안 보수횟수는 각기 다르게 나타났다. Fig. 9~Fig. 12에 각 적용공법별로 철근 위치에서 임계염소이온 농도( $1.2 \text{kg}/\text{m}^3$ )에 도달한 시기에 보수를 실시하였을 때, 염소이온의 시간 이력을 나타낸다. 각 적용 건설 공법 종류별로는 A공법의 경우 보수횟수가 15회, B의 경우 4회, C의 경우 14회, D의 경우 5회로 나타났다. 전체적으로 단면수복에 비하여 표면피복이 염소이온 침투 억제효과가 우수하며 염해보수공법으로 표면피복을 적용한 경우의 보수횟수가 작게 나타나 염소이온 침투 억제를 위해서는 표면피복이 유효한 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 13은 각 적용 건설 공법 종류별로 목표내구수명 150년 동안의 LCC 변화를 나타낸 것이다.

전체적으로 보수횟수가 많은 A공법 및 C공법의 LCC가 높게 나타나고 있다. 본 해석의 범위에서는 C공법의 경우 보수 LCC가 가장 높게 나타났으며, C공법의 LCC를 1로 무차원화 한 경우, A공법은 1%, B공법은 25%, D공법은 10%의 LCC 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서, 본 해석의 범위에서는 초기염해대책을 세우지 않고 노출콘크리트 상태로 시공한 구조물을 단면수복과 표면피복을 병용하여 염해보수하는 것이 가장 최적의 공법으로 나타났다. 그러나, 이것은 단순히 초기 염해대책 비용과 염해보수비용을 합산한 것이므로 실제로는 LCC 평가에 있어 사회적 손실, 비용의 시간적 가치 환산, 폐기물의 발생 등 종합적인 변수해석을 통한 LCC평가가 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

철근콘크리트구조물을 대상으로 건설초기의 염해대책 및 목표내용년수 동안의 염해보수 대책을 고려한 LCC를 평가하였다. 보수재를 통하여 콘크리트내로의 염소이온 침투 현상은 FEM해석으로 평가하였으며 철근위치에서의 염소이온 농도와 철근 부식 임계 염소이온 농도를 비교하여 보수시기 및 보수횟수 산정을 수행하고 이것을 기초로 염해대책 보수 LCC를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 염해를 받는 철근콘크리트 구조물의 염해 보수 LCC는 환경조건에 따른 초기 염해대책, 목표내구수명 동안의 염해보수 횟수를 설정함으로써 평가할 수 있다.

Table 2 유한요소해석 결과에 기초한 보수 LCC 평가 결과

| 적용 공법 | 초기 염해 대책 | 내용기간 중 염해 보수대책 | 초기 건설비용 (백만원) | 염해 보수비용 (백만원) |         |      | 총비용 (LCC, 백만원)<br>초기 건설비용 + 염해 보수비용 |
|-------|----------|----------------|---------------|---------------|---------|------|-------------------------------------|
|       |          |                |               | 보수 횟수         | 1회 보수비용 | 소계   |                                     |
| A     | ×        | 단면수복           | 19.9          | 15            | 5.89    | 83.8 | 103.7<br>(0.99)                     |
| B     | ×        | 단면수복+<br>표면피복  | 19.9          | 4             | 14.88   | 59.5 | 79.4<br>((0.75))                    |
| C     | 표면피복     | 단면수복           | 22.9          | 14            | 5.86    | 82.1 | 105.0<br>(1.00)                     |
| D     | 표면피복     | 단면수복+<br>표면피복  | 22.9          | 5             | 14.50   | 72.5 | 95.4<br>(0.90)                      |

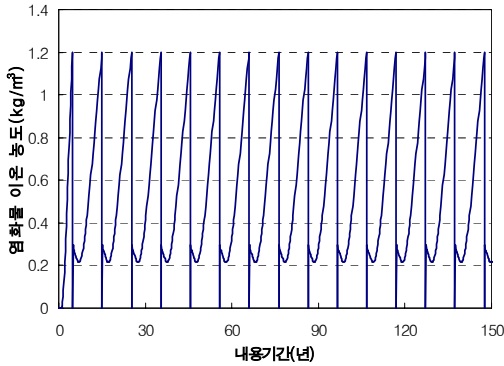


Fig. 9 보수횟수 (염해 보수 A 공법)

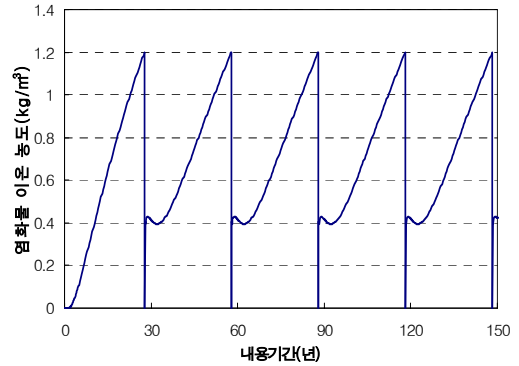


Fig. 12 보수횟수 (염해 보수 D 공법)

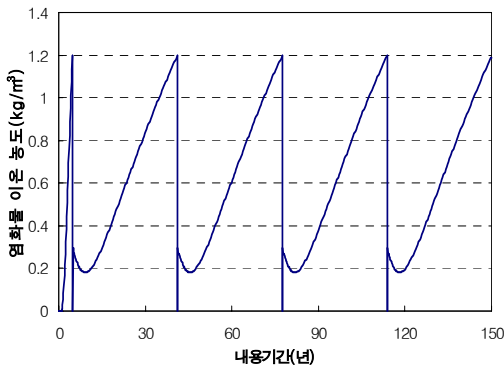


Fig. 10 보수횟수 (염해 보수 B 공법)

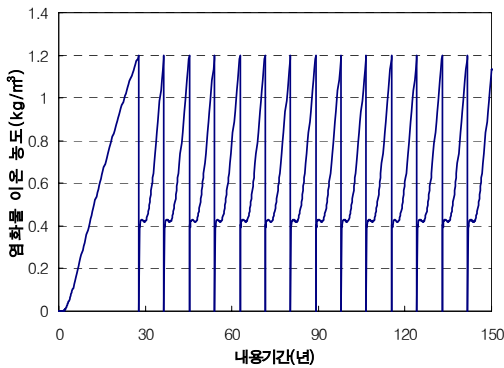


Fig. 11 보수횟수 (염해 보수 C 공법)

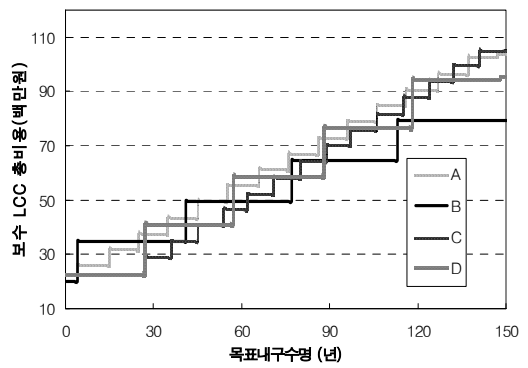


Fig. 13 각 보수공법 적용에 따른 염해 보수 LCC

2) 염해 보수 LCC 평가시, 염해 보수 횟수는 보수 마감재를 포함한 콘크리트내로의 염소이온 침투를 FEM에 의하여 해석함으로써 산정할 수 있다.

- 3) 염해 보수 시기는 FEM 해석을 통한 철근위치에서의 염소이온 농도와 철근부식 임계염소이온 농도를 비교함으로써 산정할 수 있다.
- 4) 본 연구 범위에서는 전체적으로 단면수복에 비하여 표면피복이 염소이온 침투 억제효과가 우수하며 염해보수공법으로 표면피복을 적용한 경우의 보수횟수가 작게 나타나 염소이온 침투 억제를 위해서는 표면피복이 유효한 것을 알 수 있었다.
- 5) 본 해석적 연구 범위에서는 초기염해대책을 세우지 않고 노출콘크리트 상태로 시공한 구조물을 단면수복과 표면피복을 병용하여 염해 보수하는 것이 LCC 측면에서 가장 최적의 공법으로 나타났다.
- 6) 금후, 보다 정확한 염해보수 LCC 평가를 위해서는 보수재료의 염소이온 확산계수 및 자체의 내구성능 저하 등 실험검증 및 데이터의 확보 등 요소적 기술

의 개발과 함께, LCC 평가에 있어 사회적 손실, 비용의 시간적 가치 환산, 폐기물의 발생 등 종합적인 변수해석을 통한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 우수연구센터육성사업 (# R11-2005-056-04003) 및 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 (05핵심기술C01-02)의 지원으로 수행되었음.

### 참고문헌

1. 이한승, “철근콘크리트 구조물의 내구설계 수법에 관한 연구”, 한국 콘크리트학회 춘계 학술발표 논문집, 1999. 5.
2. 이우진, 김동석, 이한승, “각종 표면마감재가 염소이온 확산 저항성에 미치는 영향에 관한 연구”, 대한건축학회 창립 60주년 기념 학술발표대회 논문집, 제 25권 제 1호, 2005. 10.
3. 이우진, 이한승, “기존 자료를 통한 염소이온 확산계수 분석 및 철근 콘크리트 구조물의 염해 수명예측”, 한국 콘크리트학회 춘계 학술발표대회 발표 논문집, 2004. 5.
4. 문환영, 이승태, 김홍삼, “시멘트 경화체의 해수침식에 의한 성능저하 및 저항성 평가”, 콘크리트학회 논문집, 제13권, 2호, 2001, pp.175~183.
5. 콘크리트 구조물의 수명 예측과 내구성 설계에 관한 기술의 현황, 일본 콘크리트 공학 협회, 1988. 4.
6. 平成11年版 : 콘크리트 표준시방서[施工編] - 내구성 조사형 改訂資料, 콘크리트 라이브러리 第99호, 日本土木學會, 2000.1.
7. 武若, “海洋環境下のコンクリートの含有塩分量調査分析”, 土木學會43回學術講演會概要集, p p36-37, 1988.
8. 李翰承, “腐蝕劣化した 鐵筋콘크리트 構造부재의 耐力性能 評價 및 補強에 관한 研究 (腐蝕劣化した鐵筋 콘크리트 構造部材의 耐力性能 評價 및 補強에 關する 研究)”, 東京大學 博士學位 論文, 1997. 3.
9. 日本土木學會, “콘크리트 標準시방서, 維持管理編”, 2002年制定.
10. Japan Concrete Institute, The boundary system problem in the structure and durable design of concrete structures, Research committee Report. 1998.
11. Andrade, C.,(1993) “Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements,” Cement and Concrete Research, Vol.23, pp.724~742.
12. Tang, L., Nilsson, L. O.,(1992) “Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field,” ACI Materials Journal, Vol.89, No.1, pp.49~53.
13. Lee, H. S., “FEM Analysis for Structural Performance of Deteriorated RC Structures Due to Rebar Corrosion”, 2nd International Conference, CONSEC 98, Tromso, Norway, 1998. 7.
14. Okamura, H. and Maekawa, K. (1990) Nonlinear analysis and constitutive models of reinforced concrete, Gihodo, Tokyo.

(접수일자 : 2005년 11월 22일)