

염해를 받는 RC구조물의 표면피복재 적용에 따른 LCC평가

The LCC Evaluation of the RC Structure was Deteriorated by chloride ion and Applied by the Surface Coating Method

○ 강 인석* 이 한 승** 정 해 문***
Kang, In-Seok Lee, Han-Seung Cheong, Hai-Moon

Abstract

Recently it is high interested at the LCC(Life Cycle Cost) evaluation in consideration of the initial measure against the deterioration and the maintenance repair administrative expenses in usable years of the concrete structure. The purpose of this study is that it carries out LCC(Life Cycle Cost) calculation of the RC structure which deteriorated by chloride ion. The surface coating method was applied by the initial measure and the repair method of construction.

Repair time of the concrete structure which deteriorated by chloride ion was decided for the time of chloride ion concentration being marginal concentration at location of the reinforcement. It is judged by that selection of the optimal repair method of construction is possible through LCC evaluation.

키워드 : 생애주기비용, 표면코팅법, 염화물이온
Keywords : LCC(Life Cycle Cost), Surface Coating Methode, Chloride Ion

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

교량과 같은 사회기반시설은 가능하기만 하다면 영구적으로 사용할 수 있도록 하고자 하는 노력들이 연구되고 또한 시도되고 있다.

하지만 이러한 요구들은 매우 이상적이며, 현실적으로 철근콘크리트 구조물의 설계·시공조건 및 환경조건에 의해 어느 시기에 도달하게 되면 열화가 가속되어 더 이상 구조물로서의 기능을 발휘하지 못하게 된다.

이러한 열화현상 중에서 대표적 현상은 염화물에 의한 염해, 이산화탄소로 인한 중성화(탄산화)를 꼽을 수 있다.

요즘, 철근콘크리트 구조물의 고내구성 및 장수명화를 목적으로 하여 도장등의 표면보호공법을 시공하는 경우가 많아졌다. 특히 염해를 받기 쉬운 해안구조물의 경우가 그러하다.

표면보호공법(이하 “표면코팅법”이라 칭함)은 콘크리트 표면에 도막이나 피복층을 형성시킴으로써 염해나 중성화 등의 원인이 되는 염화물 이온이나 이산화탄소의 침입을 억제할 수 있기 때문에 콘크리트 구조물의 내구성 향상 공법으로서 유효하다.

또한 공공투자의 효율적인 운용의 관점에서 콘크리트

구조물에 대한 LCC(Life Cycle Cost)를 고려한 설계나 유지관리 계획의 중요성이 제기되고 있다. 국내의 사례들을 통해서 볼 때, 기존 구조물에 대하여 LCC를 사후조사한 보고는 있지만, LCC를 고려한 설계나 계획의 검토는 이제 시작단계이며 아직 본격적으로 실시한 사례는 매우 적다.

따라서 본 연구는 해양환경하에서 철근콘크리트 구조물의 내구성 향상과 보수를 목적으로 하여 표면코팅법을 적용한 경우, 철근콘크리트 구조물의 열화 예측과 LCC평가에 대하여 검토한 결과로서, 향후 LCC평가에 대한 보다 심도있는 연구를 위한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

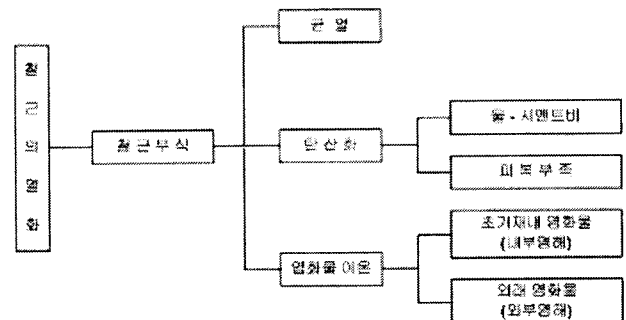


그림 1. 철근부식의 주요 원인

* 정희원, (주)토탈인포메이션서비스, 수치해석과, 과장
** 정희원, 한양대학교 건축공학부, 공학박사
*** 정희원, 한국도로공사 도로교통기술원, 재료환경연구그룹 책임연구원, 공학박사

1.2 표면코팅법의 요구성능

표면코팅에 사용되는 재료를 표면보호재라 부르기로 하지만 표면보호재에는 표면피복재(도장재료, 시트계 재료 등), 표면함침재, 프리캐스트 매설형 거푸집 등 다양한 것들이 있다. 콘크리트 구조물에 이용되는 표면코팅법은 그림 2에 나타난 바와 같이 매우 다양하다.

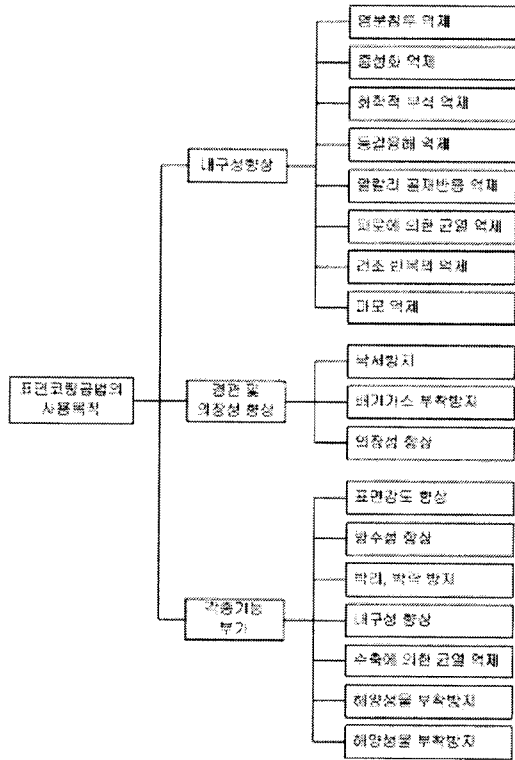


그림 2. 표면코팅법의 사용목적

따라서 표면코팅법으로 얻을 수 있는 성능(요구성능)은 사용 목적에 맞게 결정되어야 할 필요가 있다. 특히 콘크리트 구조물의 내구성향상을 목적으로 한 표면코팅재의 요구성능으로는 이하의 항목들이 요구된다.

- ① 열화를 억제하는 성능
- ② 표면코팅재 자체의 내구성능
- ③ 시공성능
- ④ 유지관리 성능(점검이나 재보수의 용이성 등)

하지만 보수 공법으로서 표면코팅법을 사용하는 경우, 공법 자체의 내용년수 및 콘크리트 구조물의 열화예측 및 내구성 조사 방법이 확립되어야 하나 현 시점에서 관련 연구가 매우 미비한게 현실이다.

2. 보수시기의 판정

2.1 열화진행모델

표면코팅법을 적용한 콘크리트 구조물의 열화예측을 수행함에 있어서 표면코팅재를 포함한 열화진행 모델이 필요하다.

그림 3에 나타난 바와 같이 염화물 침입 모델로부터 콘크리트 구조물의 열화 예측과 내구성 조사 및 LCC평

가가 가능할 것으로 판단된다.

그림 3의 경우, 표면코팅재와 콘크리트의 염화물 이온 확산계수를 별개로 하여 두개의 각기 다른 확산방식을 이용하여 염화물 이온의 침투량을 예측할 수 있도록 한 모델이다.

이러한 모델로부터 염화물 이온의 침투를 예측할 경우 표면코팅재의 확산계수와 표면 피복재의 시간경과에 따른 성능저하를 고려할 필요가 있으나, 본 연구에서는 기존 문헌자료를 근거로 확산계수와 내용년수를 적용하였다¹⁾.

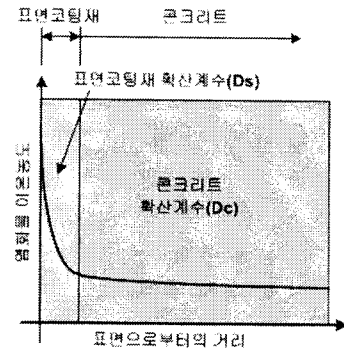


그림 3. 표면코팅법을 적용한 콘크리트 중의 염화물 이온 침입모델

그림 3의 염화물이온의 침입 모델을 적용하여 콘크리트의 염화물이온 침입량을 표면코팅법을 적용하였을 경우와 적용하지 않았을 경우로 구분하여 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 보는 바와 같이 표면코팅법을 적용하였을 경우, 콘크리트 구조물에 침입하는 염화물이온의 침입량을 매우 효과적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

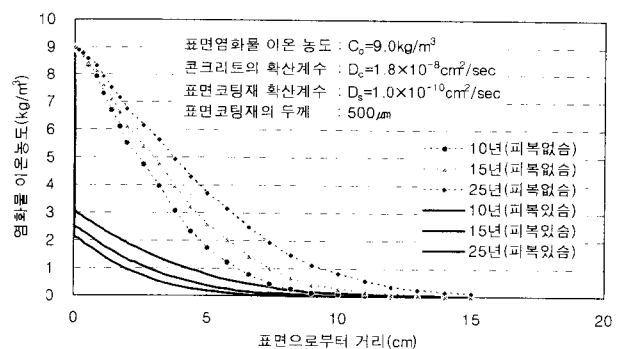


그림 4. 표면코팅법을 적용한 콘크리트의 염화물이온 침투량

2.2 콘크리트 구조물의 보수 시기

콘크리트 구조물에 염화물이온이 침투하여 철근의 부동태 피막이 파괴되기 시작하는 임계농도에 도달하게 되면 철근이 부식하기 시작하고, 부식이 진행됨에 따라 부식물의 부피팽창에 따른 콘크리트 균열이 발생하게 된다.

기존 연구들을 살펴보면 콘크리트에 발생하는 균열이

열화속도를 가속시키는 것에 착안하여 균열폭이 0.3mm일 때 보수하는 것이 경제적으로 가장 합리적이라는 보고가 있다²⁾.

하지만 이러한 방법은 기존 콘크리트 구조물에 대하여 현장에서 균열의 폭을 육안으로 직접 관찰하여 판단할 수 있는 방법으로서 새롭게 건설되는 구조물에 적용하기에는 고려되어야 할 사항이 매우 많다. 따라서 본 연구에서는 철근의 위치에서 염화물이온 농도가 한계농도에 도달한 시점에서 보수를 실시하는 것으로 가정하였다. 또한 보수깊이는 철근의 위치까지 보수하는 것으로 가정하였다.

3. 염해환경에서 콘크리트 구조물의 LCC평가

3.1 표면코팅법을 적용한 LCC평가

콘크리트 구조물이 내용기간동안 내구성이 확보되지 않는 경우에 있어서는 그 기간동안 반복적인 보수계획을 수립해야 한다.

표면코팅법을 적용한 콘크리트 구조물에서는 장기간 사용시 코팅재의 성능저하등으로 인하여 구조물의 내용기간동안 수회에 걸친 재도장 작업을 필요로 한다. 이 때 표면코팅재의 확산계수, 내용년수등 기본적인 물성을 알 수 있다면 콘크리트 및 표면코팅재의 열화예측이 가능하고 언제 어떻게 보수해야 하는지 LCC평가를 통하여 알 수 있다.

표면코팅재를 적용한 콘크리트 구조물의 LCC평가 Flow를 그림 5에 나타내었다.

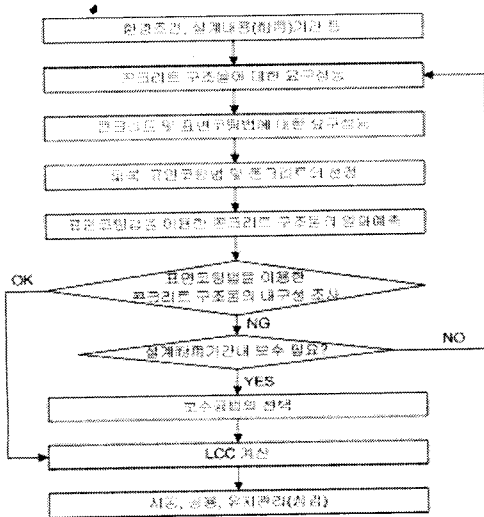


그림 5. 표면코팅재를 적용한 LCC평가 Flow

그림 5와 같은 Flow에 의해 계산되는 LCC는 다음 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, Z_i : 초기건설비용, $\sum_{i=1}^n Z_{M_i}$: 보수비용,

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

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 내용기간동안의 철거 및 재건설비용을 고려한 갱신비용은 고려하지 않고 초기 건설비용 과 보수비용만을 고려하여 LCC를 평가 비교하였다. 또한 보수 규모는 전체 초기 건설 규모의 10%를 보수하는 것으로 가정하였다.

3.2 LCC평가에 적용한 변수

본 연구에서 표면코팅법을 적용한 콘크리트 구조물의 LCC를 평가하기 위하여 표 1에서와 같이 네 가지 경우에 대한 변수를 적용하였다.

표1. LCC평가를 위한 적용변수

구분	초기건설공법		보수공법	표면수복깊이 (코팅두께)
	구조체	표면코팅		
A	철근 콘크리트	×	단면수복	피복두께
B		×	단면수복+표면코팅	피복두께 (500 μ m)
C	철근 콘크리트	○	단면수복+표면코팅	피복두께 (500 μ m)

3.3 확산 해석방정식

콘크리트 구조물의 염해에 대한 조사(열화정도의 평가)는 콘크리트 중의 철근위치에 있어서 염화물 이온 농도(콘크리트 단위 용적당 염화물량)로 평가한다. 철근위치에서의 시간경과에 따른 염화물 이온 농도의 변화 예측은 다음에 표시한 Fick의 확산방정식에 의해 구해질 수 있다.

$$\frac{du}{dt} = D_a \frac{d^2u}{dx^2}, \quad u = u(x, t) \quad (\text{식 2})$$

여기서, t : 시간(년)

x : 콘크리트 표면으로부터의 거리(cm)

(철근위치에서의 염화물 이온 농도를 구하는 경우, 피복두께를 의미)

D_a : 염화물 이온의 설계 확산계수

식 2를 이용하여 1차원 FEM해석을 수행하여 철근위치에서의 염화물 이온 농도를 구하고, 이를 한계농도와 비교하여 보수시기를 판단하였다.

콘크리트의 염화물 이온 확산계수는 $1.8 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로 가정하였으며, 표면의 염화물 이온 농도는 $9.0 \text{kg}/\text{m}^3$ 으로 일정한 농도를 갖도록 경계조건을 설정하였다. 도막두께가 $500 \mu\text{m}$ 인 에폭시수지 계열의 표면코팅재의 확산계수는 $1.2 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로 가정하였다.

3.4 LCC평가 결과

앞서 서술한 바와 같은 변수들을 고려하여 LCC를 계

산하여 평가한 결과, 구조물의 내용기간 중 A의 경우 보수횟수가 15회, B의 경우 6회, C의 경우 6회로 나타났다.

또한 계산된 LCC를 비교하면 A의 경우가 가장 높게 나타났으며, B는 A와 비교하여 약 8.6% 정도 비용이 저감되는 것으로 나타났으며, C의 경우는 A와 비교하여 약 3%정도 저감되는 것으로 나타났다.

그림 6에 각 적용변수별로 내용년수 150년 동안 초기 건설비용 및 유지보수를 고려한 총비용의 변화를 비교하여 나타내었다.

그림 7(a)~(c)에서는 각 적용변수별로 철근의 위치에서 한계농도(1.2kg/m^3)에 도달한 시기에 보수를 실시하였을 때, 염화물 이온농도의 시간이력을 비교하여 나타내었다. 단면수복에 의한 보수효과 및 표면코팅의 유무에 따라 보수시기가 달라지고 있음을 잘 보여주고 있다.

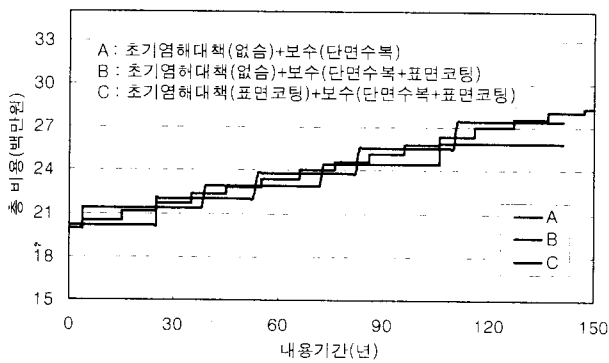
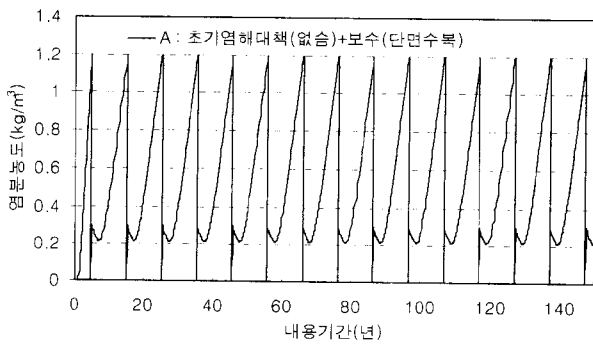
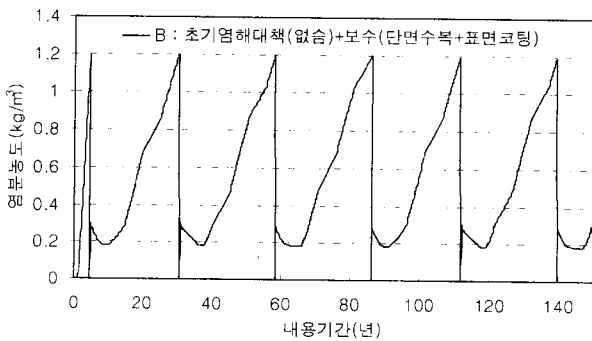


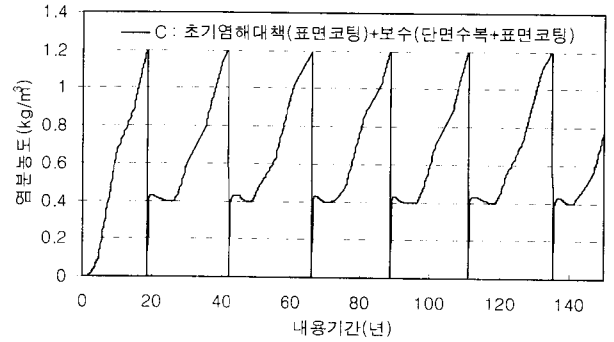
그림 6. 각 적용변수에 대한 LCC비교



(a) 적용변수 A경우의 염화물 이온의 시간이력



(b) 적용변수 B경우의 염화물 이온의 시간이력



(c) 적용변수 C경우의 염화물 이온의 시간이력
그림 7. 각 적용변수별 염화물 이온의 시간이력비교

4. 결론

철근콘크리트 구조물이 염화물 이온에 의해 열화되었을 때, 초기 열화대책 및 보수공법으로써 단면수복 및 표면코팅법을 적용한 LCC평가에 관한 제한적인 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초기 열화 대책 및 내용기간 중에 보수공법으로써 단면수복 및 표면코팅법의 적용 여부에 따라 LCC평가를 통해 초기건설계획 및 유지보수 계획의 수립이 가능할 것으로 판단된다.

(2) 본 연구에서 적용하지 못한 여러 보수공법 및 초기 열화 대책을 적용할 경우, LCC평가를 근거로 한 최적 유지보수공법의 선정이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 竹田 宣典, "表面保護工を適用したコンクリート構造物の劣化予測とLCC評価の計算例", JCI論文集, Vol. 41, No. 9, 2003.9
2. 松島 學, 關 博, 横田 優, "ライフサイクルコストを考慮した最適な補修時期", JCI, 콘크리트 T學年次論文集, Vol. 23, No.1, 2001
3. "Total-LCC Ver 1.0 사용설명서 및 이론설명서", (주)토탈인포메이션서비스, 2004

[감사의 글]

본 연구는 한국도로공사 도로교통기술원과 한양대학교 및 (주)토탈인포메이션서비스한국지점과의 2004년도 "LCC예측수법에 의한 콘크리트구조물 최적보수공법 선정에 관한 연구용역"에 의한 공동연구의 일부 결과이며, 도로교통기술원의 연구비 지원에 감사드립니다.