콘크리트 구조물의 중성화 및 LCC예측을 통한 최적보수공법 선정

Optimal Repair Method Selection through Neutralization Prediction and LCC Evaluation of a Concrete Structure

강인석* 이한승** 정해문*** 안태송****
Kang, In Seok Lee, Han Seung Jeong, Hae Moon An, Tae Song

ABSTRACT

In this study, LCC(Life Cycle Cost) evaluation technique is used for the purpose of accumulation of basic data required for such integrative system construction. We predicted the degradation time of concrete and repair material by neutralization through FEM analysis, and utilized the result for LCC evaluation

It turned out that the repair method of construction in the most economical initial measure against degradation and a durable period can be chosen through the LCC evaluation in consideration of the degradation prediction using FEM analysis and the initial construction expense in a durable period and repair expense, and the number of repair times.

1. 서론

1.1 연구배경

기존 신축 지상주의 개념으로 대량으로 축조된 RC 구조물은 구조 안전성 및 초기건설비용의 경제성을 최우선 목표로 한 반면, 내구성 및 유지관리에 관한 지침, 매뉴얼 및 시스템이 없는 상태에서 주변 환경 조건 따른 재료의 경년변화를 고려하지 않은 결과, 균열 발생 및 철근 부식으로 인한 내구성 저하 및 유지관리에 막대한 비용이 들어가는 사회적인 문제로 제기되고 있다.

따라서 구조물의 초기건설 비용 및 내용기간동안에 이루어지는 유지/보수 관리비용을 고려한 LCC 평가를 통하여 건설초기의 열화대책을 비롯한 보수공법의 선택이 가능한 효율적이고 종합적인 시스템이 개발이 필요한 실정이다.

그림 2는 RC구조물의 수명을 50년으로 계산한 경우, LCC비용을 나타낸 것으로, 건설비용 보다는 운영 및 유지관리 비용이 LCC 중 총 4/5를 차지하는 것을 알 수 있다.

특히, 구조체의 보수/보강은 막대한 비용이 들어가므로 유지관리에 따른 LCC를 줄이기 위해서는 구조물 설계단계에서부터 내구성 설계 및 적절한 보수설계를 통하여 유지관리 비용을 최소화 할 필요가 있다.

*정회원, (주)토탈인포메이션서비스한국지점, 수치해석과 과장
**정회원, 한양대학교 건축학부, 조교수
***정회원, 한국도로공사 도로교통기술원, 재료환경연구그룹, 책임연구원
****정회원, 한국도로공사 도로교통기술원, 재료환경연구그룹, 수석연구원

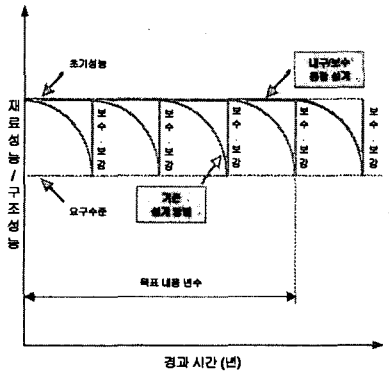

그림 1 초기성능 지속 유지 관점에서
내구성 및 보수 통합 설계

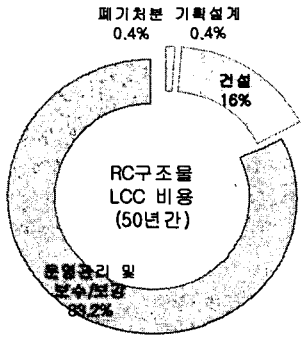

그림 2 RC구조물의 수명을
50년으로 계산한 경우, LCC

1.2 연구 범위 및 목적

본 연구는 철근콘크리트 구조물을 대상으로, 열화요인 중 가장 중요한 영향을 미치는 인자중의 하나인 중성화에 한정하였다.

FEM해석을 이용하여 중성화에 따른 구조물 열화상태 및 내구수명을 예측하고, 이를 기초로 여러 다양한 보수공법을 변수로 적용하고 각 공법의 공사비를 산출하는 LCC기법을 이용하였다.

이러한 일련의 연구과정을 통하여 도출된 결과를 바탕으로 구조물의 내용기간 중 LCC를 최소화 할 수 있는 최적 보수공법을 선정 있는 시스템 구축을 위한 기초자료의 축적을 목적으로 연구를 수행하였다.

2. 중성화 예측을 위한 FEM 해석

2.1 해석방정식

콘크리트의 중성화는 대기중의 CO_2가 콘크리트 표면으로부터 내부로 침투, 확산하여 콘크리트 중의 $Ca(OH)_2$과 반응하여 $CaCO_3$가 되고 콘크리트가 알칼리성에서 중성이 되어 철근의 방청성이 상실되는 것을 이해되고 있다. 일반적으로 다음과 같은 화학 방정식으로 표현된다.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (1)$$

$Ca(OH)_2$와 CO_2와의 1차반응을 나타내는 CO_2의 확산방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k \cdot C \cdot Ca \quad (3)$$

2.2 보수시기의 판정

지금까지 보고 된 연구들을 보면 중성화가 침입하는 CO_2와 콘크리트 중의 $Ca(OH)_2$와의 1차원 반응으로 가정하고, 아래 식과 같이 반응의 진행에 의한 $Ca(OH)_2$의 소비를 조합한 확산 지배방정식을 이용하여 중성화 예측 모델을 제안하고 있다. 이 모델에서는 완전하게 중성화한 영역, $CaCO_3$와 $Ca(OH)_2$가 공존하

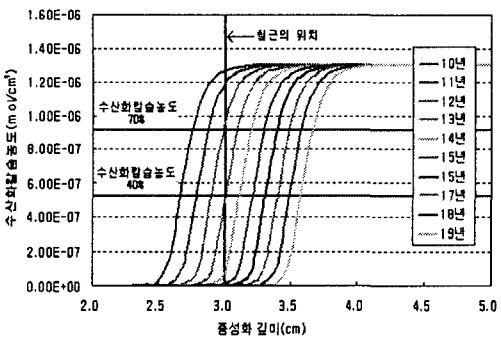

그림 3 중성화에 의한 보수시기의 판정

는 영역, 미중성화의 영역이 존재하는 것으로 하고 있고, 중성화의 깊이는 $Ca(OH)_2$의 농도가 초기치의 40~70%까지 감소한 위치로 하고 있다.

따라서 본 연구에서는 중성화에 의해 철근의 부식이 시작되어 보수가 필요하다고 판단되는 시기를 철근의 위치에서 $Ca(OH)_2$의 농도가 초기치의 40~70%까지 감소한 때로 가정하였다(그림 3 참조).

3. LCC 평가

3.1 LCC 평가 개요

3.1.1 중성화에 의한 경년 열화 피해에 LCC

본 연구에서는 중성화에 의한 경년 열화 피해는 중성화 침투해석을 수행하는 것으로부터 검토하고 평가하였다. 중성화에 의한 경년 열화 피해에 대한 LCC는 초기 건설비용(Z_I)과 내용기간중의 보수비용($\sum z_{M_i}$)을 합하여 산출하였다. 여기서 초기 건설비용은 구조물의 건설비용과 초기 열화대책 고려한 경우 그 소요비용을 포함하는 비용이며, 보수비용은 내용기간중 열화한 콘크리트를 회복시키기 위하여 실시하는 보수에 소요되는 비용이다.

$$LCC = Z_I + \sum_{i=1}^{n} Z_{Mi} \tag{4}$$

중성화 한계 깊이 즉, 철근의 위치에서 초기 수산화칼슘의 농도가 40~70%에 도달한 시기를 초과한 경우에 보수를 실시하는 것으로 하였다.

3.1.2 대상 구조물 및 적용 변수

LCC 평가를 위한 대상구조물로서 폭 4m, 깊이 3m, 높이 15m의 철근 콘크리트 장방형교각을 대상으로 하였다. 중성화 피해를 입은 콘크리트 구조물의 LCC평가를 위한 적용변수 일람을 표 1에 나타내었다. 중성화에 대한 유한요소 해석을 위한 각 재료들의 기본물성은 표 2에 나타낸 바와 같다.

표 1 해석변수 일람

모델명	중성화 대책		
	초기대책	보수대책	
	시멘트 몰탈(1cm)	단면수복	시멘트 몰탈(1cm)
A-1	×	○	×
A-2	×	○	○
B-1	○	○	×
B-2	○	○	○
C	에폭시도막철근(30년)	○	×
D	전기방식	×	×

표 2 재료물성

콘크리트	
물시멘트비(W/C)	60%
CO_2확산계수	0.05cm^2/day
표면 CO_2 초기농도	0.3× 10^{-6}mol/cm^3
$Ca(OH)_2$ 농도	1.3× 10^{-6}mol/cm^3
반응정수	500,000
시멘트 몰탈	
$Ca(OH)_2$ 농도	1.7× 10^{-6}mol/cm^3
CO_2확산계수	0.01cm^2/day

3.1.3 각 변수별 중성화 진행 예측

각 적용 변수에 대한 대표적인 경우에 대하여 그림 4, 5, 6에 각각 나타내었다. A-1의 경우 15년, B-1의 경우 55년, 단면수복의 경우 15년을 보수주기로 결정하였다.

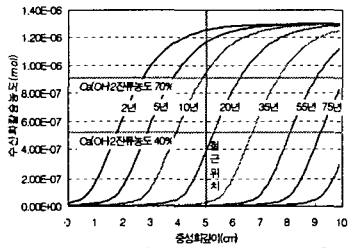

그림 4 A-1의 중성화 진행 예측

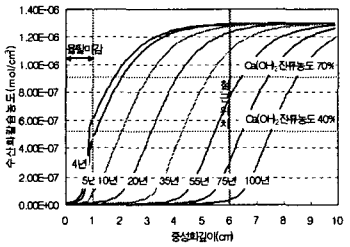

그림 5 B-1의 중성화 진행 예측

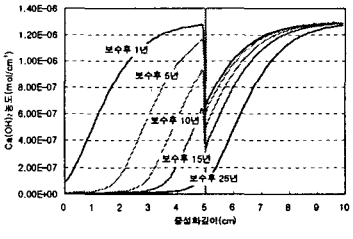

그림 6 단면수복의 중성화 진행 예측

4. LCC 평가

FEM 해석을 수행하여 콘크리트 구조물의 중성화 및 보수시기를 예측하였고, 이를 근거로 중성화 피해를 입은 콘크리트의 최적 보수공법 선택을 위한 LCC 평가를 수행하였다. 앞서 중성화 진행 예측 및 보수시기 판정을 위한 FEM해석을 통하여 산출된 각 보수공법 적용시 콘크리트 구조물의 보수시기 및 내용기간 동안의 보수회수와 조사된 각 보수공법의 비용을 고려한 LCC 평가를 수행하였다.

LCC 평가 결과를 그림 7 에 나타내었다. 여러 공법에 대한 중성화수복 비용을 고려한 LCC 평가 결과, 초기대책으로 표면몰탈을 적용하고, 보수 공법으로서 단면수복과 표면몰탈을 적용한 B-2모델의 경우가 최소 LCC를 산정하는 것으로 나타났다.

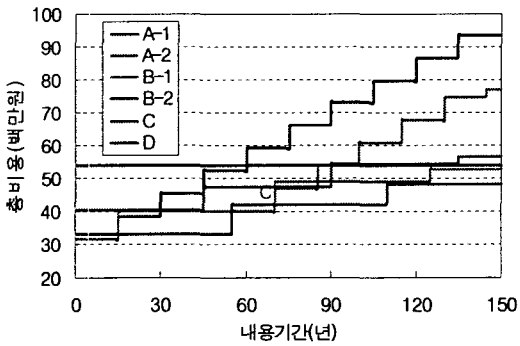

그림 7 각 적용변수별 내용기간중 LCC 비교

5. 결 론

각 보수공법에 적용한 보수재료의 내구수명을 가정하여, 내용기간동안의 구조물의 열화 및 보수재료의 열화에 의한 보수회수를 산정하고 LCC를 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) FEM 해석 기법을 이용하여, 보수공법의 적용여부에 따라, 혹은 보수방법에 따른 콘크리트 구조물의 열화 예측 및 변화를 표현할 수 있었다.

(2) 초기건설비용, 보수회수, 보수비용, 내용기간등의 종합 평가를 통하여 LCC 평가를 수행한 결과를 근거로 중성화 피해를 입은 콘크리트 구조물의 최적 보수 공법을 산정할 수 있었다.

참고문헌

1. 相原 康平 外３人, "塩害環境下におけるンクリート道路橋のＬＣＣ評価に關する研究", 工學年次論文集、Vol. 26, Ｎｏ.2, 2004
2. 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", 工學年次論文集、Vol. 26, Ｎｏ.９. 2004