

균열 및 철근부식에 의해 열화된 콘크리트 구조물의 성능저하 해석

Degradation Analysis of Deteriorated Reinforced Concrete Structures due to Cracks and Steel Corrosion

김길수* 변근주** 송하원*** 이창홍****
Kim, Kil Soo Byun, Keun Joo Song, Ha Won Lee, Chang Hong

ABSTRACT

In this study, an unified algorithm for the degradation analysis which considers the cracks in concrete and steel corrosion is developed and implemented into finite element analysis program. Using the program, degradation analysis on reinforced concrete structures subjected to chloride attacks was carried out with time by considering the cracks and the steel corrosion and cracking due to expansion of corroded reinforcing bars. The analytical procedure proposal in this study can be used quantitative evaluation of degradation and service life prediction.

1. 서론

1.1 연구목적

콘크리트 구조물은 설계사용수명동안 일정 성능 이상을 유지해야하는 구조물로서 시간의 경과에 따라 열화되며 구조물의 성능은 저하된다. 콘크리트 타설 시점으로부터 건조수축, 수화열에 의한 온도응력, 예기치 않은 하중의 재하와 같은 영향으로 콘크리트 구조물에 균열이 발생하게 되며 균열이 발생한 콘크리트는 염화물 침투에 취약하게 되어 철근부식은 가속화된다. 철근 부식은 철근 단면 결손, 부착강도 저하로 인한 콘크리트 구조물의 전체적인 성능저하를 가져오게 된다.

이 연구에서는 균열이 있는 콘크리트 구조물을 대상으로 하여 염화물 침투에 의한 철근 부식 속도와 함께 철근 부식과 부착강도의 상관관계를 이용하여 콘크리트 구조물의 시간에 따른 성능저하를 체계적으로 구현하는 성능저하 해석 프레임워크를 구축하였다. 구축된 프레임워크의 일련의 과정을 통해 시간에 따른 철근부식을 파악하고 균열의 영향을 고려한 콘크리트 구조물의 구조해석을 수행하였다. 성능저하의 척도로 콘크리트 구조물의 시간에 따른 수명저하 및 내력저하 해석을 시도하였다.

1.2 연구방법

*정회원, 롯데건설(주) 기술연구소 연구원

**정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

***정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

****정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

현재까지 내구성에 대한 연구와 콘크리트 구조의 역학적 연구는 독립적으로 실시된 예가 많다. 따라서 이 연구에서는 콘크리트 구조물의 내구성과 구조해석을 통합하여 시간에 따라 열화되는 콘크리트 구조물의 구조해석을 실시한다. 대상이 되는 구조물은 콘크리트 보이며 콘크리트 보의 내구성 해석을 위하여 균열을 갖고 있는 콘크리트를 대상으로 한다. 내구성 해석을 통하여 시간에 따라 증가하는 부식률을 산출하고 부식률을 통하여 각 시간대별 철근 단면 결손량과 부착 강도 저하를 구조해석에 도입한다. 내구성 해석 결과를 이용한 구조 해석을 통하여 콘크리트 보의 성능저하를 예측하고 사용수명을 결정할 수 있다. 이 때 건전한 콘크리트 보가 가지는 최대내력의 일정 비율을 콘크리트 보의 사용성능의 한계로 규정하고 이때를 사용수명으로 나타낸다.

2 콘크리트 구조물의 성능저하 메카니즘

2.1 콘크리트 구조물의 성능저하

콘크리트 구조물의 성능저하는 콘크리트 구조물이 가지는 고유의 사용수명과 관계가 있다. 그림 1 과 같이 구조물에 환경열화에 따른 내구수명, t_s , 과 열화된 콘크리트 구조물의 성능저하수명, t_{exp} 로부터 구조물의 사용수명, t_s 가 결정되며 콘크리트 구조물의 열화 상태를 고려한 성능평가는 구조물의 사용수명예측에 필수적이다. 특히 염해에 따른 콘크리트 구조물은 염소이온의 침투에 따라 내구한계상태인 부식개시기, 즉 철근 주변 농도가 염화물 이온농도(Cl_{limit})에 도달하고 이에 따라 철근의 부식이 개시되며 철근의 부식에 따른 콘크리트 구조물의 성능저하가 발생한다.

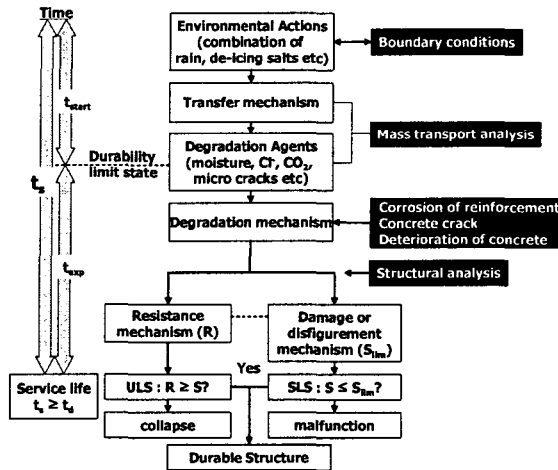


그림 1 콘크리트 구조물의 성능 평가 개념도

2.2 철근 부식 해석 알고리즘

철근부식률을 예측하기 위하여 사용한 내구성 해석 프로그램의 철근 부식 모델은 수화발열, 공극구조 형성, 염화물 침투, 수분이동, 산소 확산이 결합된 연성해석이 요구된다. 이러한 연성 해석을 위해서는 각각의 정보들이 공유되어 상호 연관성에 따라 변화되어야 한다. 따라서 이러한 연성 해석을 위하여 열역학 연성해석 프로그램인 DuCOM을 기본으로 수정된 내구성 유한요소해석 프로그램인 Y-DuCOM을 사용하여 해석을 실시하였다.

Y-DuCOM에서는 식 (1)에 나타낸 질량·에너지 보존 법칙을 만족시키는 온도, 공극수압, 염화물 이온, 산소 농도 등의 해가 시공간 차원에서 결정된다.

$$\alpha_i \frac{\partial \Theta_i}{\partial t} + \text{div} J_i - Q_i = 0 \quad (1)$$

여기서, α_i 는 비용량(Specific capacity), Θ_i 는 자유도 I 의 물리량(T, P, Cl, O_2), Q_i 는 생성·소멸 항(Sink term)이다.

3. 철근콘크리트의 부식열화-인장 모델링

3.1 인장응력 상태의 콘크리트 모델

균열이 발생한 철근 주변의 콘크리트의 하중 저항능력은 콘크리트와 철근의 상호작용에 의하여 영향을 받는다. 철근과 콘크리트의 부착특성으로 인하여 콘크리트에 균열이 발생된 후에도 콘크리트가 철근으로부터 전달되는 인장응력의 일부를 부담하게 된다. 이러한 현상을 인장경화(tension stiffening)라고 하며, 이 효과에 의해 균열이 발생한 콘크리트는 철근만의 강성보다 더 큰 강성을 갖게 된다. 철근주변과 철근에서 멀리 떨어진 부분의 콘크리트의 역학적 특성의 차이는 서로 다른 2개의 영역으로 고려될 수 있다(An, 1996). 하나는 인장경화거동을 나타내는 철근주변의 콘크리트영역인 철근 콘크리트영역(RC zone)이고 다른 하나는 인장연화거동을 나타내는 철근 콘크리트영역 밖의 부분인 무근 콘크리트영역(PL zone)이다.

3.2 철근부식을 고려한 콘크리트 인장경화모델

철근이 부식되면 부식에 의한 덮개 콘크리트의 균열과 부식생성물로 인하여 철근과 콘크리트사이의 부착성능이 저하된다. 이러한 부착성능의 저하는 철근주변에서의 콘크리트의 인장경화거동에 영향을 미치게 된다. 따라서 콘크리트의 인장경화모델을 부식생성물 및 균열의 함수로서 정량적으로 표현하게 되면 부식에 의한 콘크리트 구조물의 내력저하를 반영할 수 있다.

$$\sigma_t = f_t \left(\frac{\epsilon_{tu}}{\epsilon_t} \right)^a \quad (2)$$

$$a = 0.4 \left\{ 2.5 - 1.5 \left(1 - \frac{t_c}{t_u} \right) \left(1 - \frac{w_c}{w_u} \right) \right\} \quad (3)$$

식 (2) 및 식 (3)은 유동우(1998)가 제안한 철근부식의 영향을 고려한 인장경화모델로서 철근과 주변 콘크리트의 부착성능이 철근의 부식생성물의 두께와 인접한 콘크리트의 균열폭에 비례하여 감소되는 것으로 가정하여 Okamura와 Maekawa의 인장경화모델식을 수정한 것이다.

4. 성능저하 해석결과

시간이 경과함에 따라 철근 부식은 점진적으로 진행되어 철근의 단면결손 및 콘크리트와의 부착강도 저하를 초래한다. 이 두 가지 요소를 유한요소해석에 도입하여 100년간의 성능저하 해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다(그림 2~그림 5).

해석결과를 통해 시간에 따라 부식이 진행될수록 콘크리트 보의 성능이 저하하는 것을 알 수 있으며 철근부식이 시작되는 위치에 따라 콘크리트 보의 성능저하 양상이 달라지는 것을 확인할 수 있다(그림 4, 그림5).

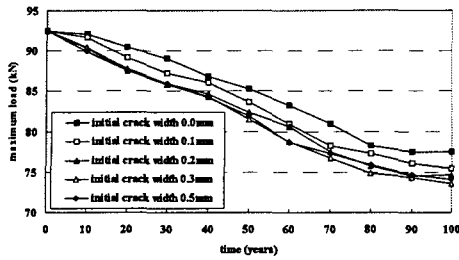


그림 2 전면부식에 따른 성능저하

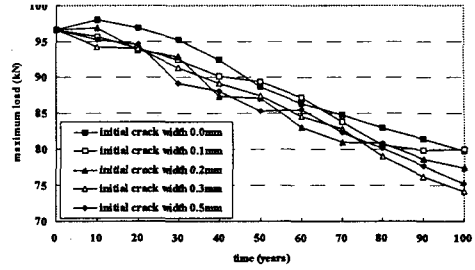


그림 3 균열의 도입에 따른 성능저하

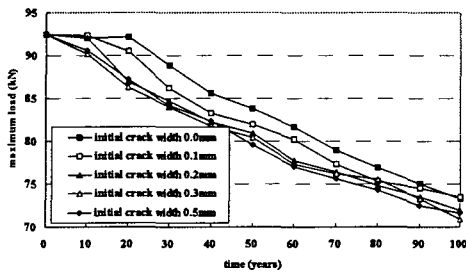


그림 4 보 중앙 부분부식에 따른 성능저하

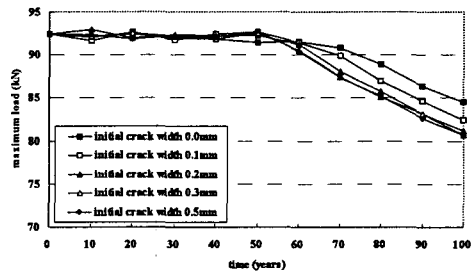


그림 5 보 단부 부분부식에 따른 성능저하

5. 결론

본 연구에서는 실제현상에 가까운 해석을 실시하였으며, 콘크리트 구조물이 시간에 따라 열화되는 과정을 내구적으로 분석한 해석자료를 이용하여 시간에 따른 열화정도가 구조적 안전성능에 미치는 영향을 해석적으로 접근하였다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서는 성능평가형 내구성 설계 개념을 기본으로 철근콘크리트 구조물의 초기재령에서부터 시간에 따른 열화를 고려한 성능저하 통합해석 알고리즘을 구축하였으며, 통합해석법에 따라 콘크리트에 발생하는 균열을 고려한 염해 성능저하 해석을 실시하였다.

2) 통합해석법에 의해 콘크리트 구조물의 염해 내구성 해석을 수행하여 철근의 부식이 전체 구조물의 내력저하에 미치는 정도를 정량적으로 구하였다. 해석으로부터 콘크리트 구조물의 초기 균열폭의 크기가 증가함에 따라 부식률이 증가하고 부식률이 높을수록 콘크리트 구조물의 내력이 감소하는 것을 확인하였다.

3) 성능평가형 수명설계에 가장 중요한, 시간에 따른 콘크리트 구조물의 내력저하를 본 통합해석 알고리즘의 개념을 반영하여 예측할 수 있으며 이는 시공 예정에 있거나 기 시공된 구조물의 수명예측에 본격적으로 적용할 수 있다.

참고 문헌

1. An, X. (1996), "Failure Analysis and Evaluation of Seismic Performance for Reinforced Concrete in Shear", Ph. D. Dissertation, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
2. Ishida, T., Nakarai, K., Toongoenthong, K. and Maekawa, K. (2004), "Multi-Scaled Modeling for Corroded Reinforced Concrete and Soil Foundation", Computational Mechanics, WCCM VI in conjunction with APCOM'04, Beijing, China.
3. 유동우 (1998), "철근콘크리트 T형교의 비선형 파괴해석 모델링기법의 개발", 박사학위논문, 연세대학교, 서울, 대한민국.