

# 콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 해석

## A Probability-Based Durability Analysis of Concrete Structures

김 지 상\*, 이 광 명\*\*, 정 상 화\*\*, 배 수 호\*\*\*, 최 규 용\*\*\*\*, 양 종 호\*\*\*\*

Kim, Jee-Sang, Lee, Kwang-Myong, Jung, Sang-Hwa, Bae, Su-Ho, Choi, Kyu-Yong, Yang, Jong-Ho

### ABSTRACT

In recent years, many research works have been carried out in order to obtain a more controlled durability and long-term performance of concrete structures in chloride containing environments. In particular, the development of new procedures for probability-based durability analysis/design has proved to be very valuable. In this paper, the equation used for modelling of the chloride penetration was based on Fick's Second Law of Diffusion in combination with a time dependent diffusion coefficient. The probability analysis of the durability performance was performed by use of a Monte Carlo Simulation. The procedure was applied to an example based on limited data gathered in this country. The influences of each parameter on the durability of concrete structures are studied and some comments for durability design are given. The new procedure may be very useful in designing concrete structures in chloride containing environments.

*Keywords* : durability, probability of failure, Monte Carlo Simulation, chloride penetration, service life

### 1. 서론

#### 1.1 연구 배경

콘크리트 구조물은 강재(鋼製) 구조물과 비교하여 사용 기간 동안 성능 저하 발생 및 유지보수의 필요성이 상대적으로 매우 낮은 것으로 알려져 있었다. 그러나, 최근 들어 해양 및 해안구조물, 환경 처리 시설물 등 콘크리트 구조물의 사용 환경이 열악하여지고, 요구되는 사용 수명이 상대적으로 늘어나고 있어 콘크리트 구조물에 있어서 성능저하 또는 열화로 불리는 내구성 문제에 대한 관심을 불러일으키게 되었다. 국내의 경우 특히 해사 사용, 해수 또는 해양대기에 의한 염분 침투, 결빙제의 사용 등에 따라 염해를 받는 부재의 내구성이 문제가 되고 있다. 따라서 지금까지 구조물의 파괴와 관련하여 안전도를 결정하는 내하 능력에 대하여만 이루어지던 명시적인 설계 절차를 간접적인 방법으로 이루어지고 있는 내구성분야의 문제에도 적용할 필요성이 대두되게 되었다<sup>(1)</sup>.

#### 1.2 연구 내용

본 연구에서는 기존의 내구성 해석 및 설계개념이 갖고 있는 이러한 문제점을 해결할 수 있도록 사용수명과 내구성의 관계를 명시적으로 고려하고, 그 관계식을 구성하는 각 설계변수의 내재적 불확실성을 체계적으로 포함할 수 있게 확률론에 기초한 합리적인 콘크리트 구조물의 내구성 해석 방법을 제시하고자 한다. 즉, 염해환경하에서 사용성 한계상태합수식을 구성하는 각 설계변수(design variable)를 도출하고 그 통계적 성질을 조사하였으며, 이를 바탕으로 MCS(Monte Carlo Simulation)기법을 이용하여 파괴확률, 내구성 기준 초과 확률, 을 계산하는 방법을 정립하였다. 제시된 방법에 따라 실제 국내에 건설된 교량을

\* 정회원, 서경대학교 토목공학과

\*\* 정회원, 성균관대학교 토목공학과

\*\*\* 정회원, 인동대학교 토목공학과

\*\*\*\* 정회원, 삼성물산(주) 건설부문

에 대한 조사 자료를 이용하여 내구성 해석을 수행하고 각 노출조건에 따르는 구조물의 사용수명을 예측하였다. 또한, 한계상태함수식을 구성하는 주요 설계변수의 변화에 따른 파괴확률의 변화를 조사하여 각 변수의 영향을 파악하여 향후 내구성 설계의 기본 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

## 2. 내구성 해석

### 2.1 사용성 한계상태

염해에 의한 콘크리트의 내구성 상실은 염분의 침투에 따라 철근 위치의 염소이온 농도가 한계값을 넘어가면서 콘크리트 내부에 있는 철근 주위의 부동태 피막이 파괴되고 철근의 부식이 진행되어 그 팽창압에 의한 콘크리트의 박리 또는 탈락이 일어나는 것을 의미한다. 따라서 엄밀한 의미의 내구성 상실은 염분 침투 및 염소이온 농축 이후 철근위치에서 염소이온의 농도가 임계값을 넘게 되고, 철근의 부식 개시와 추가적인 진행이 이루어져서 철근의 단면 감소에 이은 단면 내하력의 저하가 일어나는 것을 말한다. 그런데, 철근의 부식 개시 이후 콘크리트의 균열 또는 박리와 같이 육안에 의하여 철근 부식의 징후가 나타나는데는 3-5년 정도의 시간이 걸리고, 구조물 전체의 저항능력을 감소시키는데는 또한 추가적인 기간이 필요하다. 그러나, 철근 부식 개시 시기 자체로서 내구성 상실의 한 단계로 볼 수 있으며 설계자의 입장에서 정의하기 간편하므로 내구성 해석에 있어서 철근의 부식개시 시기, 즉 철근 주위의 염화물 농도가 한계치를 넘는 시점, 를 내구성 해석에서 사용성 한계상태에 도달한 것으로 보는 것이 적절할 것으로 판단된다<sup>(2)</sup>. 따라서, 본 연구에서는 철근의 부식 개시 시기를 염해에 의한 부재의 내구성 파괴로 정의하며, 이 때 그 발생확률을 파괴확률(probability of failure)로 규정하기로 한다.

### 2.2 내구성 해석 모델

콘크리트의 염해를 해석하는 방법으로 가장 간편하고 널리 쓰이는 방법은 콘크리트 내부의 염분 확산문제를 Fick의 확산 제2법칙(Fick's Second Law of Diffusion)을 이용하여 염분침투율을 깊이의 함수로 나타내는 방법으로 기본방정식을 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dC(x, t)}{dt} = D_c \frac{d^2 C(x, t)}{dx^2} \quad (1)$$

여기서,  $C(x, t)$  = 시간  $t$  동안 염분에 노출된 콘크리트의 표면으로부터 거리  $x$ 만큼 떨어진 위치에서의 염소 이온 농도,  $D_c$  = 염소이온확산계수이다. 이 미분 방정식에 경계조건을 대입하여 풀고, 확산계수가 시간 의존함수임을 고려하면, 시간의 존확산계수에 기초한 특정위치에서의 염소이온 농도 수준의 예측이 가능하다.

$$C_x = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( 0.5x / \sqrt{D_0 \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^n} \right) \right] \quad (2)$$

여기서,  $C_s$  = 콘크리트 표면의 염소이온농도, erf = error function,  $D_0$  = 시간  $t_0$  에서의 확산계수, 지수  $n$ 은 시간에 따라 염소침투에 대한 저항이 증가하는 콘크리트의 능력을 나타내는 계수이다.

### 2.3 확률론적 해석

본 연구에서는 MCSM(Monte Carlo Simulation Method)을 적용하여 확률론적인 신뢰성 해석을 수행하였다. MCSM이 유의할 정도의 충분한 반복횟수를 갖는지를 각 설계변수에 대하여 검증하였으며, 한계상태함수는 식(2)를 다시 정리하여 다음과 같이 정의하였다.

$$x(t) = 2 \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{C_{CR}}{C_s} \right) \cdot \sqrt{D_0 \left( \frac{t}{t_0} \right)^n \cdot t} \quad (3)$$

여기서,  $C_{CR}$  = 철근의 부동태 파괴가 시작되는 염소이온농도의 임계값을 나타낸다.

### 3. 확률해석

한계상태함수를 구성하는 각 설계변수(design variable)는 별도의 확률분포를 갖는 확률변수로 모델링하여 입력하여야한다. 국내 측정 자료<sup>9)</sup>를 이용하여 표면 염소이온 농도 및 확산계수를 산정하고 이를 이용하여 본 연구에서 제시된 절차에 따라 확률론에 기초한 콘크리트 구조물의 내구성 해석을 수행하였다.

#### 3.1 설계변수의 통계적 성질

한계상태함수에 포함된 설계변수의 통계적 성질은 기왕의 문헌 결과를 참고하여 모두 정규분포로 가정하였는데, 표1은 그 내용을 정리한 것으로서 여기서 각 염소이온농도는 콘크리트의 중량에 배한 백분율로 나타내었다.

표 1 설계변수의 통계적 성질

설계변수	표면염소이온농도	확산계수 ( $m^2/sec \times 10^{-12}$ )	임계염소이온농도	시간의존성지수	덮개(mm)
평균	0.02	4.12	0.05	0.4	85
표준편차	0.004	1.03	0.01	0.04	8.5

#### 3.2 내구성 확률 해석

해상교량의 교각에 대한 실측자료 중 해상 대기에 대한 결과를 이용하여 시간의존성 지수를 0.4로 고정하였을 때, 대상교량의 내구성 파괴확률, 철근부식확률, 을 도시한 것이 그림 1이다. 그림에서 알 수 있듯이 현재 건설되어 있는 교량의 덮개(85.0mm) 및 콘크리트의 품질을 고려할 때 내구성 피해 확률은 매우 낮았으며 교량의 수명이 100년이 경과한 시점에서 내구성 파괴확률은 63.3%인 것으로 나타났다.

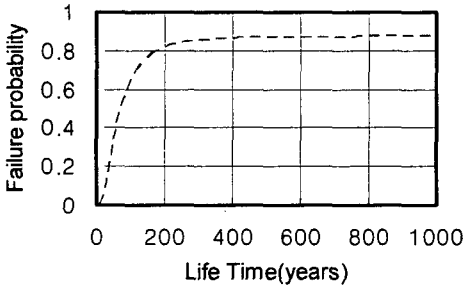


그림1 해상 대기 중의 내구성 파괴확률

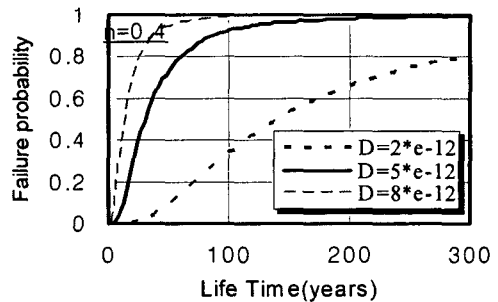


그림 2 확산계수 변화에 따르는 파괴확률

### 4. 설계변수의 영향 평가

#### 4.1 확산계수

본 연구에서는 염소이온 확산계수의 변화에 따른 내구성 파괴확률의 변화 추이를 분석하기 위하여 단계적으로 변화시키면서 파괴확률을 계산하여 그 결과를 그림 2에 정리하였는데, 50년 경과 후에 동일한 조건에서 확산계수의 차이가 2.5배가 되면 파괴확률은 8배 이상 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

#### 4.2 철근 덮개

염분의 확산속도 저하와 함께 염해에 의한 철근 부식을 막는 또 한 가지 효과적인 방법은 염분 침투면으로부터 철근의 위치

를 떨어뜨려 놓는 것이다. 동일한 환경조건 및 재료 상태에 대하여 철근의 덮개를 30mm 부터 90mm 까지 변화시키며 파괴확률을 계산하고 그 결과를 비교하여 놓은 것이 그림 3이다.

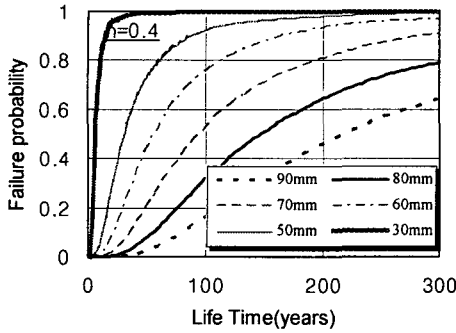


그림 3 콘크리트 덮개에 따른 파괴확률 변화

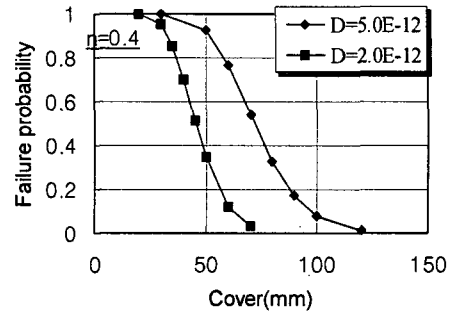


그림 4 확산계수별 소요 덮개

그림 3에서 알 수 있듯이 철근 덮개의 변화에 따라 파괴확률의 변화는 매우 뚜렷하며, 50mm의 경우 50년 사용수명 이후 철근의 부식확률은 74%에 이른다. 한편, 우리나라 콘크리트 구조설계기준에 따라 해양조건 하에 80mm의 덮개를 확보하는 경우 본 세제의 해석 조건하에서는 100년 사용수명 경과 후의 파괴확률이 32%에 이르며, 이는 일반적으로 제시되는 사용성 한계상태에 대한 파괴확률보다 큰 값이 된다. 또한, 동일한 설계 변수값에 대하여 확산계수의 값을 서로 다르게 하여 목표 내구성 파괴 수명 100년에 대한 소요 덮개의 변화 추이를 보인 것이 그림 4이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 해양환경 등의 열악한 조건하에 있는 철근 콘크리트 구조물의 내구성 해석 및 설계를 확률론적 이론에 근거하여 수행하는 합리적인 방법을 제안하였다. Fick의 확산 제2법칙에 근거한 염분 침투이론을 이용하여 한계상태함수식을 세우고, 각 설계변수의 통계적 성질을 산정하여 Monte Carlo Simulation 기법에 의한 내구성해석을 수행하여 각 조건별 파괴확률을 계산하였다. 본 연구에서 제시된 방법은 콘크리트 구조물의 내구성 해석 및 설계에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 구조물의 보수보강 시점의 결정 및 대개체 여부를 결정짓는 합리적인 판단자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부의 지원사업인 교량설계핵심기술연구단의 콘크리트 교량의 내구성 설계기술 개발과제에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. RILEM, "Durability Design of Concrete Structures," Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, RILEM, 1996
2. Miguel Ferreira, Vernund Åskorg, Said Jalali, and Odd E. GjØrv, "Probability-Based Durability Analysis of Concrete Harbor Structures," Concrete under Severe Conditions, 2004, CONSEC'04, Seoul, Korea
3. 정해문, 안태송, 곽현준, 박래선, 지한상, 한복규, "염해를 입은 해상교량의 내염보수대책 적용," 한국구조물진단학회 2004년도 봄학술발표논문집 제8권1호, pp. 449-454