

철근콘크리트 구조물의 염해 내구성 평가

Durability Evaluation of RC Structures subjected to Chloride Attack

백 승 우* 남 진 원* 송 하 원** 변 근 주**
Pack, Seung-Woo Nam, Jin-Won Song, Ha-Won Byun, Keun-Joo

ABSTRACT

In this paper, an environmental factor and a durability resistance factor which adapts the concept of the Load Resistance Factor Design for safety design of RC structures is derived and a basic principle of a durability evaluation for RC structures using the factors is proposed.

It is shown that durability of RC structures can be evaluated by comparing predicted value of chloride ion concentration with limit value of concentration for steel corrosion generation in reinforcement steel position and the durability of concrete manufactured for the RC structures can be also evaluated by comparing characteristic diffusion coefficient of concrete with predicted diffusion coefficient during mixture design.

1. 서론

현대 사회에 있어서 콘크리트는 강재와 더불어 가장 많이 쓰이는 사회기반 시설물의 재료 중 하나로 자리잡았다. 구조물이 대형화되고 콘크리트가 도시의 교량 및 고속도로 등 사회기반시설의 건설재료가 되어 콘크리트의 수요가 증가함에 따라 그것이 사용된 구조물의 성능평가 및 설계에도 많은 발전을 가져오게 되었다. 그러나 철근콘크리트 구조물의 안전성에 관한 연구가 많은 발전을 거듭 반면, 내구성을 저해하는 요소인 염화물이온에 의한 철근부식, 이산화탄소 이온의 침투에 의한 중성화, 동결융해, 알칼리 골재반응과 같은 열화인자를 고려한 구조물의 내구성에 관한 연구결과는 부족한 실정이다.

콘크리트 구조물의 내구성에 영향을 미치는 여러 열화 인자 중에서 현재 염해에 대한 관심이 높아지고 있는데, 이는 해양환경하의 항만, 교량, 공항 및 발전소와 같은 콘크리트 구조물 및 건설공사가 증가함으로 인한 하천골재의 부족으로 해사 사용량이 많아짐에 따라 염화물이온이 확산되어 콘크리트 중의 철근을 부식시키게 됨으로써 발생한다. 따라서, 구조물의 시공전 시공계획단계에서 콘크리트 및 콘크리트 구조물에 대해 염화물 확산에 따른 내구성능에 대한 평가를 통한 설계 및 시공이 이루어져야, 염화물에 의한 부식과 이로 인한 콘크리트 균열의 진전으로 인한 보수, 보강 및 재시공에 의한 막대한 예산을 절감할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 내구적인 콘크리트 구조물을 건설하여 목표내구수명까지 사용수명을 확보하기 위하여, 염해에 대하여 콘크리트 및 콘크리트 구조물의 내구성 평가를 시도한다.

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

2. 신뢰성 이론에 의한 염해를 받는 콘크리트 구조물의 환경계수, 내구성감소계수 도출

2.1 콘크리트 구조물의 내구적 한계상태의 발생확률

구조물의 내구성능 및 환경하중은 서로 독립인 확률변수 R과 Q로 나타낼 수 있으며, 내구적으로 안전한 구조물에 대해서는 항상 $Q < R$ 이 성립하며, $Q \geq R$ 이라면 구조물에 내구적 한계상태가 발생하며, 다음의 그림 1에서 빗금 친 면적이 그에 해당된다. 그림 1은 확률변수 R-Q의 확률밀도함수를 나타낸 것이다.

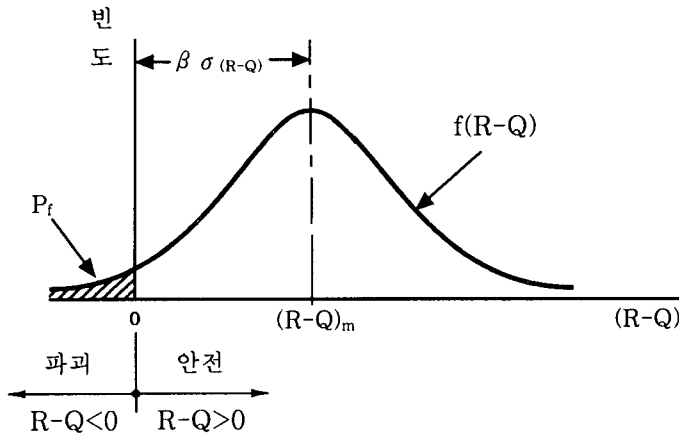


그림 1 (R-Q)의 확률밀도함수

그림에서 빗금 친 면적의 크기는 $R-Q \leq 0$, 곧 구조물의 내구적 한계상태의 발생 확률 P_f 을 의미하며 다음과 같이 나타낸다.

$$P_f = P\{R-Q \leq 0\} \quad (1)$$

여기서, R은 구조물의 내구성능에 관한 확률변수이며 Q는 환경하중에 관한 확률변수가 된다.

R-Q의 평균인 $[R-Q]_m$ 와 R-Q의 표준편차인 $\sigma_{(R-Q)}$ 를 이용하여 표준화시킨 새로운 확률변수 U를 정의하면 식 (2)와 같고 이를 이용하여 내구적 한계상태의 발생확률 P_f 를 다시 나타내면 식 (3)과 같다.

$$U = \frac{[R-Q] - [R-Q]_m}{\sigma_{(R-Q)}} \quad (2)$$

$$P_f = f\left\{U \leq -\frac{[R-Q]_m}{\sigma_{(R-Q)}}\right\} \quad (3)$$

식 (3)에서 팔호안의 항을 신뢰성지수(β)라고 하는데, 이는 확률변수 U 에 대한 확률밀도함수에서 구조물의 내구성에 있어서 내구적 한계상태의 발생확률의 경계점을 나타낸다. 그러므로 β 는 구조물의 내구성에 있어서 안전성 및 신뢰성의 척도가 되고 다음의 식 (4)로 나타낼 수 있으며, 이를 간략화하면 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$\beta = \frac{(R-Q)_m}{\sigma_{(R-Q)}} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{(R_m - Q_m)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (5)$$

여기서, R_m , Q_m 은 각각 R 과 Q 의 평균, σ_R , σ_Q 는 각각 R 과 Q 의 표준편차가 되며, 이로부터, 구조물의 내구적 한계상태의 발생확률에 관한 함수를 나타내면 다음과 같다.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (6)$$

여기서, β 는 신뢰성지수이며, $\phi(x)$ 는 확률변수 x 에 대한 표준정규분포의 함수이다.

2.2 신뢰성지수와 환경계수, 내구성감소계수의 관계

환경계수, 내구성감소계수와 신뢰성지수와의 관계를 살펴보기 위해, 이들의 상관관계를 다음의 표 1에 나타내었으며 식 (6)으로부터 신뢰성지수와 내구적 한계상태의 발생확률을 그림 2와 같이 나타내었다. 환경계수와 내구성감소계수는 3절의 염해에 대한 내구성 평가식에 사용된다.

표 1 신뢰성지수에 따른 γ_D , ϕ_k 의 관계

β	$\phi_k(\beta)$	$\gamma_D(\beta)$	γ_D / ϕ_k
0	1.00	1.00	1.00
0.7	0.95	1.05	1.10
1.3	0.90	1.08	1.20
1.8	0.86	1.11	1.30
2.3	0.81	1.14	1.40
2.8	0.77	1.16	1.50
3.2	0.73	1.17	1.60
3.6	0.69	1.18	1.70
3.9	0.66	1.19	1.80
4.2	0.63	1.20	1.90
4.5	0.60	1.20	2.00

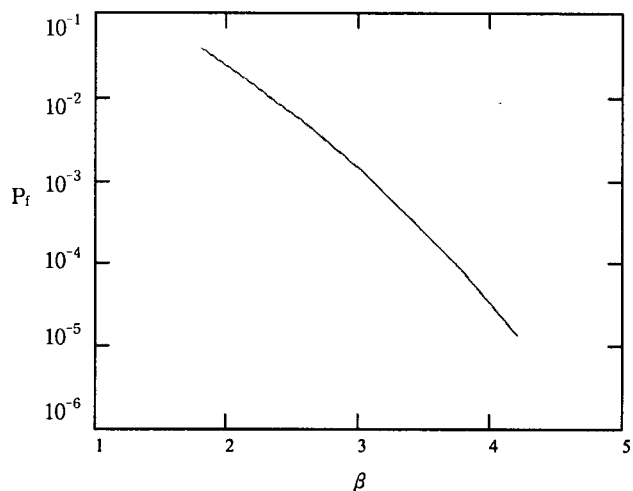


그림 2 신뢰성지수와 내구적 한계상태 발생확률의 관계

염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 평가에 있어서 환경계수와 내구성감소계수는 각각 0.86, 1.11의 값을 갖도록 한다. 표 1로부터 위에서 정한 두 계수의 값은 약 1.8의 신뢰성지수에 해당함을 알 수 있는데, 1.8의 신뢰성지수가 의미하는 바는 식 (6)에 의해 약 1/30의 내구적 한계상태의 발생확률을 의미함을 알 수 있으며, 이는 곧 30개의 구조물중 한 개의 구조물 혹은 구조물내의 30개소 중에서 1개소에서 철근위치에서의 염화물이온 농도가 한계 염화물이온 농도에 도달하는 것을 의미한다.

구조설계에서 신뢰성지수의 범위 중에 전단파괴시의 신뢰성지수가 2.25로서 최소값이다. 이 때의 파괴확률은 대략 1/83으로서 약 83개의 구조물 중에서 1개의 구조물에서 구조적 파괴가 발생할 확률을 나타낸다.

본 연구에서는 염해에 대한 내구성 평가에서 사용하는 목표신뢰도에 의한 내구적 한계상태의 발생확률이 전단파괴에 대한 구조적 신뢰도에 의한 파괴확률에 비해 약 3배 가량 높게 설정하였다.

3. 내구성 평가

3.1 내구성 평가의 기본 원리

시공될 철근콘크리트 구조물이 설계내구수명 동안 만족할 내구성능을 보유하고 있는지 평가하기 위한 시공계획 단계에서 행해지는 콘크리트 및 콘크리트 구조물의 내구성 평가는 다음과 같은 기본원리를 적용한다.

$$\text{환경계수} \cdot \text{내구성능예측치} \leq \text{내구성감소계수} \cdot \text{내구성능특성치}$$

그림 3 내구성 평가의 기본원리

위의 기본원리를 적용한 콘크리트의 내구성 평가에 대한 기본식은 식 (8)과 같다.

$$\gamma_p \cdot A_p \leq \phi_k \cdot A_k \quad (8)$$

여기서, γ_p 는 재료에 관한 환경계수, ϕ_k 는 재료에 관한 내구성감소계수가 되며, A_p 와 A_k 는 각각 콘크리트의 내구성능에 관한 예측치와 특성치이다.

또한, 콘크리트 구조물의 내구성 평가에 대한 기본식은 다음과 같다.

$$\gamma_p \cdot B_p \leq \phi_k \cdot B_k \quad (9)$$

여기서, γ_p 는 구조물에 관한 환경계수, ϕ_k 는 구조물에 관한 내구성감소계수가 되며, B_p 와 B_k 는 각각 콘크리트 구조물의 내구성능에 관한 예측치와 한계치이다.

3.2 염해에 대한 내구성 평가

3.2.1 염해에 대한 콘크리트 구조물의 내구성 평가

염화물이온의 침투에 의한 콘크리트 구조물의 철근부식 평가는 다음과 같이 식 (10)에 의해 이루어질 수 있다.

$$\gamma_p \cdot C_d \leq \phi_k \cdot C_{lim} \quad (10)$$

여기서, γ_p : 염해를 고려한 환경계수

ϕ_k : 염해를 고려한 내구성감소계수

C_d : 철근위치에서 염화물이온 농도의 설계값

C_{lim} : 철근부식이 시작될 때의 염화물이온 임계농도, 일반적으로 1.2kg/m³가 사용되지만, 동결융해작용이 우려되는 환경에서는 1.2kg/m³보다 작은 값을 사용하는 것이 좋다.

γ_p , ϕ_k 를 1.11과 0.86으로 사용하는 경우 γ_p/ϕ_k 의 값은 1.3이 되며 위의 염해에 대한 내구성 평가식에서는 γ_p/ϕ_k 에 대해 1.3의 값을 사용하도록 한다.

또한 본 논문에서의 콘크리트 구조물의 내구성능 평가시에는 Browne(1980)의 염화물이온 농도의 예측식을 사용하도록 한다.

$$C_d(x, t) - C_i = (C_0 - C_i) \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_d t}}\right)\right) \quad (11)$$

여기서, $C_d(x, t)$ 는 위치 x (cm), 시간 t (year)에서의 염화물이온 농도(kg/m³)의 설계값, erf는 오차함수이며, $\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$ C_i 는 초기염화물이온 농도(kg/m³)이며, C_0 는 표면염화물이온 농도(kg/m³)이며, D_d 는 식 (10)에서의 염화물이온의 유효확산계수로서 단위는 [m²/year]로 환산 사용된다.

3.2.2 염해에 대한 콘크리트의 내구성 평가

염해를 고려한 사용예정의 콘크리트 내구성능을 평가하기 위해 식 (12)와 같이 염화물이온의 확산계수를 평가한다.

$$\gamma_p \cdot D_p \leq \phi_k \cdot D_k \quad (12)$$

여기서, γ_p : 염해를 고려한 환경계수

ϕ_k : 염해를 고려한 내구성감소계수

D_p : 콘크리트의 염화물이온 확산계수의 예측값(cm²/year)

D_k : 콘크리트의 염화물이온 확산계수의 특성값(cm²/year)

콘크리트의 내구성 평가시에도 콘크리트 구조물의 내구성 평가와 마찬가지로 γ_p , ϕ_k 를 1.11과 0.86으로 사용하도록 하는데, 이는 염해에 대한 콘크리트 구조물의 환경계수, 내구성감소계수를 콘크리트의 환경계수, 내구성감소계수와 동일하다고 가정하였기 때문이다.

본 연구에서의 내구성능 평가시에는 武若(1988)이 제안한 물-시멘트비에 따른 확산계수의 변화에 대한 확산계수 예측식을 사용하도록 한다.

(a) 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하는 경우

$$\log D_p = [4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47] + \log(3.15 \times 10^7) \quad (13)$$

(b) 고로슬래그 시멘트를 사용하는 경우

$$\log D_p = [19.5(W/C)^2 - 13.8(W/C) - 5.74] + \log(3.15 \times 10^7) \quad (14)$$

여기서, D_p 는 확산계수의 예측값(cm^2/year), W/C 는 물-시멘트비이다.

4. 결론

염해를 고려한 철근콘크리트 구조물의 내구성 평가에 관한 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 하중-강도계수 설계법에서의 하중과 강도의 변동성을 고려한 하중계수 및 강도감소계수의 개념을 내구성 설계에 사용될 내구성 평가 개념에 필요한 환경계수 및 내구성감소계수를 확률론적 접근방식에 의해 도출하였다.
2. 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 설계를 위하여 사용예정인 콘크리트가 설계된 구조물에 적합한가를 확인하기 위한 콘크리트의 재료특성에 기초한 확산계수 평가식과 구조물의 열화깊이를 고려한 침투평가에 대한 기본원리를 하중-강도계수설계법에 근거하여 제안하였다.

참고문헌

1. Browne, R. D. (1980), "Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structures", ACI SP-65., pp. 154-178.
2. Geschwindner, L. F., Disque, R. O., and Bjorhovde, R. (1994), Load and Resistance Factor Design of Steel Structures, Prentice Hall, pp. 24-55.
3. MacGragor, G. (1983), "Load and Resistance Factors for Concrete Design", ACI Journal, V. 80, No. 5, pp. 279-287.
4. 日本土木學會 (2000), 콘크리트標準示方書[施工編]-耐久性照査型, 콘크리트라이브러리-, 第99号, 12.
5. 武若耕司 (1988), 海洋環境下のコンクリートの含有鹽分に關する既往照査結果の整理と分析, 土木學會第43回年次學術講演會概要集.