

염해를 받는 콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 해석

김지상¹⁾·정상화^{2)*}·김주형²⁾·이광명²⁾·배수호³⁾

¹⁾서경대학교 ²⁾성균관대학교 ³⁾안동대학교

(2005년 8월 4일 원고접수, 2005년 12월 30일 심사완료)

Probability-Based Durability Analysis of Concrete Structures under Chloride Attack Environments

Jee-Sang Kim¹⁾, Sang-Hwa Jung^{2)*}, Joo-Hyung Kim²⁾, Kwang-Myong Lee²⁾, and Su-Ho Bae³⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Seokyeong Univ, Seoul 136-704, Korea

²⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan Univ, Suwon 440-746, Korea

³⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Andong National Univ, Andong 760-749, Korea

(Received August 4, 2005, Accepted December 30, 2005)

ABSTRACT

Recently, a variety of researches has been carried out to obtain a more controlled durability and long-term performance of concrete structures under chloride attack environments. In particular, new procedures for probability-based durability analysis/design have been noticed to be very valuable for the enhancement of service life of concrete structures. Although there is still a lack of relevant data, this approach has been successfully applied to some new concrete structures. In this paper, the diffusion equation based on Fick's second law has been solved with a time dependent diffusion coefficient and the probabilistic analysis of the durability performance has been carried out by using a Monte Carlo Simulation. From the results, the influence of each parameter on the durability of concrete structures was investigated and the new procedure for durability analysis was demonstrated in terms of chloride penetration data from various concrete structures. The new procedure might be very useful in designing important concrete structures and help to predict the remaining service life of existing concrete structures under chloride attack environments.

Keywords : durability, corrosion probability, chloride penetration, service life, corrosion

1. 서 론

콘크리트 구조물은 강구조물과 비교하여 사용 기간 동안 성능 저하 발생 및 유지보수의 필요성이 상대적으로 매우 낮은 것으로 알려져 있다. 그러나 최근 들어 해양 구조물, 환경 처리 시설물 등의 콘크리트 구조물의 사용 환경이 열악해지는 반면에 요구되는 사용 수명이 상대적으로 증가하고 있어 콘크리트 구조물에 있어서 성능저하 또는 열화로 불리는 내구성 문제에 대한 관심이 고조되고 있다¹⁻⁴⁾. 국내의 경우 특히 해사 사용, 해수 또는 해양대기에 의한 염분 침투, 제빙화해제의 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 이루어

어졌을 내구성 분야의 문제에도 적용할 필요성이 대두되게 되었다. 그런데, 현재의 콘크리트 구조물의 내구성설계는 사용 재료의 선정, 재료의 구성, 작업 조건, 단면치수에 대한 정성적인 제한을 통해 수행하고 있는 실정이다. 즉, 명시적인 사용수명의 정의 없이 일반적인 콘크리트의 건전성 확보를 목적으로 하여 설계 및 시공을 하고 이를 통하여 간접적으로 내구성을 보증하고 있어, 그 적용에는 다음과 같은 문제점이 있다.

첫째, 현재 선진외국의 새로운 설계 기준들이 채택하고 있는 성능기반 설계기법(performance based design)을 적용하는 경우 해당 성능과 구조물의 사용수명간에 명시적인 관계가 정의 또는 설정되어야 하는데 종래의 방법은 이를 충족시키지 못한다. 둘째, 1990년대에 들어서 총비용의 개념을 이용한 투자결정 방법 정립에 따라 구조물 사용 수명에 대한 명시적인 규정 설정의 필요성이 대두되게 되면서 구조적 안전도의 상실이라는 극한 파괴 상태에 의한 수명 평가 외에 사용성능의 미달성이라는 사용성 한계상태에

* Corresponding author

E-mail : jsh2593@dreamwiz.com

©2006 by Korea Concrete Institute

대한 수명 평가가 이루어지게 되었다. 이 때 내구성 상실의 관점에서 사용 수명에 대한 정의 또는 내구성능과 사용 수명의 명시적 관계에 대한 수학적 모델이 필요한데 기존의 내구성 해석 방법으로 이를 표현할 수 없는 한계가 있다. 마지막으로 최근 들어 콘크리트 구조물의 성능저하 과정에 대한 연구 성과가 축적됨에 따라 내구성에 대한 다양한 수학적 모델이 콘크리트 구조물의 설계 또는 해석에 직접 적용될 수 있도록 개발되었다. 그렇지만, 기존의 방법들은 이를 적절하게 활용하지 못하는 문제점을 나타내고 있다^{5,6)}.

본 연구에서는 이러한 기존의 내구성 해석 및 설계개념이 갖고 있는 문제점을 해결할 수 있도록 사용수명과 내구성의 관계를 명시적으로 고려하고, 그 관계식을 구성하는 각 설계변수의 내재적 불확실성을 체계적으로 포함할 수 있도록 확률론에 기초한 합리적인 콘크리트 구조물의 내구성 해석 방법을 제시하였다. 즉, 염해환경 하에서 사용성 한계상태함수식을 구성하는 각 설계변수를 도출하고 그 통계적 성질을 조사하였으며, 이를 바탕으로 MCS(Monte Carlo Simulation)기법을 이용하여 파괴확률 혹은 내구성에 관한 한계상태 기준을 초과하는 확률을 계산하는 방법을 정립하였다. 또한, 한계상태함수식을 구성하는 주요 설계변수의 변동에 따른 파괴확률의 변동성을 조사하여 각 변수의 영향을 파악하여 향후 내구성 설계의 기본 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

2. 내구성 해석 방법

2.1 사용성 한계상태

콘크리트 구조물의 설계법으로서 적용되고 있는 한계상태 설계법은 구조물의 파괴 또는 기능의 상실을 각각 내하력이 한계에 도달하여 파괴가 일어나는 극한 한계상태와 구조물이 소요의 기능 및 목적의 달성에 실패하는 사용성 한계상태로 구분하여 구조물을 설계하는 방법이다. 종래의 강도설계법에서는 먼저 극한 한계상태에 대하여 검토하여 이에 따라 구조물을 설계하고, 내구성은 2차적인 문제로 간주하여 사용재료선정, 재료의 배합, 피복두께 및 배근 상세의 제한값 설정 등의 간접적인 방법으로 고려하여 왔다. 그러나, 실제 구조물의 내구저항 능력 상실에 따른 문제가 발생하게 되면서 내구성 문제를 별도의 사용성 한계상태의 하나로 고려하고자 하는 시도가 이루어지고 있다^{6,7)}.

염해에 의한 콘크리트의 내구성 상실은 염분의 침투에 따라 철근 위치의 염소이온 농도가 한계값을 초과하면 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 염소이온농축 이후 철

근위치에서 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 나타날 때까지는 3~5년 정도의 시간이 소요되고, 구조물 전체의 저항능력을 감소시킬 때까지는 또한 추가적인 기간이 필요하다. 그러나, 철근 부식 개시 시기 자체를 내구성 상실의 한 단계로 볼 수 있으며 설계자의 입장에서 정의하기 간편하므로 내구성 해석에 있어서 철근의 부식개시 시기, 즉 철근 주위의 염소이온 농도가 임계값을 넘는 시점을 내구성 해석에서 사용성 한계상태에 도달한 것으로 보는 것이 적절할 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 철근의 부식개시시기를 염해에 의한 부재의 내구성 파괴로 정의하며, 이때 그 발생확률을 파괴확률(probability of failure)로 규정하였다.

이 경우 앞에서 규정한 한계상태에 대한 파괴확률 혹은 부식발생 확률을 구하기 위한 한계상태함수(limit state function), $g(X, t)$ 는 전통적인 구조신뢰성 이론에 따라 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$g(X, t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

여기서, X 는 한계상태를 규정하기 위한 설계변수벡터를 나타내며, $R(t)$ 및 $S(t)$ 는 각각 시간에 따라 변화하는 저항 및 하중을 의미한다. 염해의 경우 저항 $R(t)$ 는 철근의 피복두께로 정의되며, 하중 $S(t)$ 는 시간에 따라 변화하는 염소이온 침투깊이로 정의된다.

2.2 내구성 해석 모델

콘크리트의 염해를 해석하는 방법으로 가장 간편하고 널리 쓰이는 방법은 콘크리트 내부의 염분 확산 문제를 Fick의 확산 제2법칙(Fick's Second Law of Diffusion)을 이용하여 염소이온 침투율을 깊이의 함수로 나타내는 방법으로 기본 방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다⁸⁾.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(t) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

여기서, C 는 시간 t 동안 염분에 노출된 콘크리트의 표면으로부터 거리 x 만큼 떨어진 위치에서의 염소이온 농도이며, $D(t)$ 는 시간에 따른 콘크리트 특성 변화를 반영한 염소이온 확산계수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad (3)$$

여기서, D_0 는 시간 t_0 에서의 확산계수, 지수 n 은 시간에 따른 염소이온 확산계수의 변화를 나타내는 계수이다.

한편, 식 (4)와 같이 매개변수 T 를 정의하면 식 (2)를 식 (5)와 같이 표현할 수 있으며, 표면염소이온 농도 (C_s)가 일정하고 초기염소이온 농도가 0인 경우 특정위치에서의 염소이온 농도는 식 (6)과 같이 에러함수(erf)를 사용하여 나타낼 수 있다.

$$T = \int_0^t D(\tau) d\tau \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

$$C_x = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_m t}} \right) \right] \quad (6)$$

여기서 D_m 은 식 (7)과 같이 표현되는 시간 t 까지의 평균 염소이온 확산계수이다.

$$D_m = \frac{D_0}{1-n} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad (t < t_c) \quad (7a)$$

$$D_m = D_0 \left[1 + \frac{t_c}{t} \frac{n}{1-n} \right] \left(\frac{t_0}{t_c} \right)^n \quad (t \geq t_c) \quad (7b)$$

여기서 t_c 는 염소이온 확산계수의 변화가 일어나지 않는 시점을 나타내며 본 연구에서는 30년으로 가정하였다.

2.3 확률론적 해석

2.3.1 사용수명의 확률론적 해석

콘크리트 구조물의 염소이온에 의한 파괴 즉, 콘크리트 내의 철근 부식 개시시기를 확률론적으로 추정하는 방법은 암묵적인 방법(implicit method)과 명시적인 방법(explicit method)으로 구분할 수 있다⁸⁾.

암묵적인 방법은 염소이온 확산방정식을 구성하는 각 설계변수를 확률변수로 보고 각 변수의 확률밀도함수를 대입하여 이를 직접 적분하는 방법을 말한다. 이 방법은 주어진 시간에서의 파괴확률, 즉 철근의 부식개시확률을 직접 나타내는 방정식 형태의 결과를 주는데, 직접적으로 확률을 계산할 수 있고 확률함수의 형태를 명시적으로 파악할 수 있는 장점이 있으나, 복잡한 구성방정식 때문에 이를 푸는데 수학적인 어려움이 있다.

명시적인 방법은 식 (2)와 같은 지배방정식의 직접적인

변형이 필요하지 않은데, 1계 신뢰성방법(first order reliability method, FORM), 2계 신뢰성방법(second order reliability method, SORM) 등이 그 대표적인 방법이다. 이 방법은 요구조건 또는 하중(demand)과 저항능력 또는 내하력(capacity)의 차이를 정의하는 한계상태함수를 사용하는 것으로서, 철근콘크리트 구조물의 염해 문제에 있어서 요구조건은 주어진 시점에서 콘크리트 내부 철근 위치에서의 염소이온농도가 되고, 저항능력은 철근 주위의 부동태 피막이 파괴되고 부식이 시작되는 임계 염소이온 농도가 된다. 또, 하나의 대표적인 명시적 방법으로는 전통적인 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS)을 들 수 있다. MCS는 확률변수들의 결합 확률밀도 함수를 이용하여 각 확률변수의 분포 특성이 반영된 난수(random number)를 추출하여 충분한 수의 확률변수 표본 집단을 생성한 다음, 생성된 각 확률변수의 값을 차례로 한계상태식에 대입하여 그 값이 0보다 큰지 작은지, 즉 구조물이 안전한지 파괴되는지를 판단하는 방법이다.

2.3.2 몬테카를로 시뮬레이션의 적용

본 연구에서는 전술한 방법 중 MCS를 적용하여 확률론적인 신뢰성 해석을 수행하였다. MCS가 유의할 정도의 충분한 반복횟수를 갖는지를 각 설계변수에 대하여 검증하였으며, 한계상태함수를 정의하기 위해 식 (6)을 정리하여 다음과 같이 시간에 따른 임계농도 깊이를 정의하였다. 이 경우 식 (6)은 식 (1)로 정의된 한계상태함수 중에서 하중 $S(t)$ 에 해당한다.

$$x(t) = 2 \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{cr}}{C_s} \right) \cdot \sqrt{D_m t} \quad (8)$$

여기서 C_{cr} 은 철근의 부동태파괴가 시작되는 염소이온 농도의 임계값을 나타낸다.

각 시뮬레이션마다 입력변수는 가해진 확률밀도함수로부터 임의로 추출되며, 그 변수조합에 대하여 한계상태함수의 값이 결정된다. 즉, 한계상태함수 값이 음으로 되는 경우를 내구성 파괴가 일어나는 경우로 하여 그 횟수를 측정 한 후 이 값을 전체 시뮬레이션 횟수 N 으로 나누어 파괴 확률을 결정한다. 따라서 파괴확률은 다음 식으로 결정할 수 있다.

$$p_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n I [g(r_j, s_j)] \quad (9)$$

여기서 $g(r_j, s_j)$ 는 한계상태함수, $I []$ 는 내구성 파괴가 발생한 횟수를 나타낸다.

2.3.3 확률해석 절차

본 연구에서는 전술한 절차에 따라 확률론적 내구성 해석을 수행할 수 있는 프로그램을 작성하였으며, 그 절차는 다음과 같다.

- 1) 각 설계 변수에 대하여 가정된 확률분포함수를 이용하여 무작위 샘플링을 수행하고 이를 각 설계변수의 입력값으로 한다.
- 2) 하나의 설계변수 조합에 대하여 식 (8)을 이용하여 한계상태함수 값을 계산한다.
- 3) 한계상태함수 값이 음으로 나온 경우의 수를 내구성 파괴가 일어난 경우로 고려하고 이를 누적하고 계산이 끝난 후 전체 시뮬레이션 횟수로 나누어 파괴확률을 계산한다.
- 4) 이 과정을 반복하여 식 (9)를 이용하여 전체 사용수명 동안 특정 시점에서의 파괴확률, 즉 철근 부식 개시 확률을 구한다.

3. 설계확률변수의 민감도 해석

본 연구에서 제시된 확률론적 내구성 해석 방법을 이용하여 한계상태함수를 구성하는 각 설계변수가 파괴확률에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 민감도 해석을 수행하였다. 이 경우 한계상태함수에 포함된 설계변수는 실측 자료 또는 실험 결과에 바탕을 두고 별도의 확률분포를 갖는 확률변수로 모델링하여 입력하여야 한다. 그러나 국내의 경우 축적된 연구 자료를 찾기가 어려운 실정이므로 본 연구에서는 외국의 참고문헌을 참조하여 설계변수를 모두 정규분포로 가정하였으며, 각 변수의 평균과 표준편차는 적절한 가정을 하여 합리적인 범위 내에서 변화시켜 그 영향을 고찰하였다. Table 1에는 본 연구에서 민감도 해석을 위해 사용한 확률변수의 기준값이 제시되어 있다. 이 경우 설계확률변수로는 초기염소이온 확산계수 D_0 , 확산계수 시간의존성 지수 n , 피복두께 c , 임계농도 C_{cr} 및 표면 염소이온농도 C_s 를 채택하였으며, 각각의 설계변수에 대한 평균 및 표준편차는 Table 1의 2열에 나타나 있다. 이때 초기염소이온 확산계수 D_0 는 일반적으로 타설 후 28일 시점에서의 값이다.

3.1 염소이온 확산계수

Table 1 Parameter values for sensitivity analysis

Parameters	Base case (average, standard deviation)	Variation of values
$D_0 (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	N(6, 1.2)	3, 6, 9
n	N(0.4, 0.08)	0.3, 0.4, 0.5
c (cover, mm)	N(70, 7)	30, 50, 70, 90
$C_{cr} (\text{kg}/\text{m}^3)$	N(1.2, 0.24)	0.6, 1.2, 2.4
$C_s (\text{kg}/\text{m}^3)$	N(9, 1.8)	4.5, 9, 13

콘크리트의 염소이온 확산계수는 시멘트량, 시멘트 종류, 실험 방법 등 많은 변수의 영향을 받는데, 우리나라 지방서⁹⁾에서는 실제 실험 또는 실측에 의하여 구하는 것을 원칙으로 하되 신뢰할 만한 자료를 확보하지 못한 경우 사용할 수 있도록 보통포틀랜드 시멘트 및 고로슬래그분말 시멘트의 두 종류에 대하여 기존 자료에 대한 회귀분석 식을 규정하고 있다.

본 절에서는 확산계수의 변화에 따른 파괴확률의 변화 추이를 분석하기 위하여 Table 1에 제시되어 있는 것처럼 초기 확산계수(D_0)만을 3×10^{-12} , 6×10^{-12} 및 $9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 변화시키면서 부식개시확률을 계산하였으며 그 결과를 Figs. 1 및 2에 나타내었다.

Fig. 1을 보면 다른 설계변수 값이 동일한 경우 콘크리트 내부 철근의 부식확률이 50%에 이르는 기간은 염소이온 확산계수가 6×10^{-12} 에서 $9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 1.5배 증가한

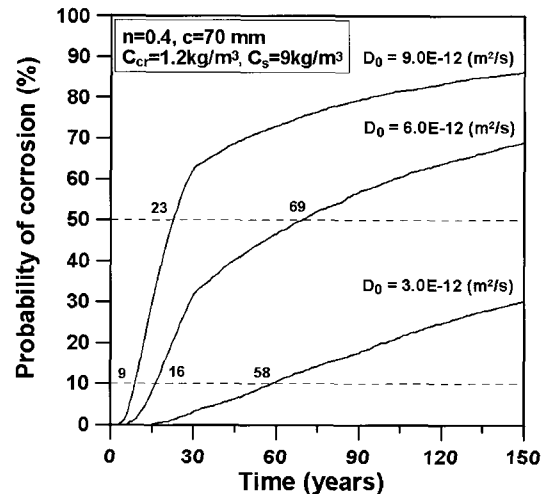


Fig. 1 Probability of corrosion vs. time with various diffusion coefficients

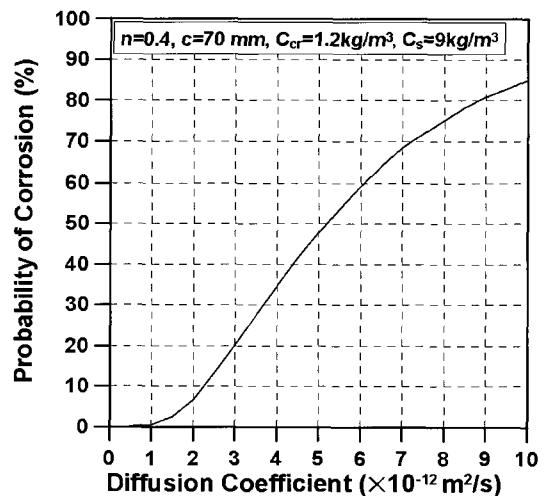


Fig. 2 Probability of corrosion vs. diffusion coefficient at 100 years

경우 69년에서 23년으로 1/3로 감소하고 있으며, 10%의 부식확률에 대해서는 3×10^{-12} , 6×10^{-12} 및 $9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 에 대해서 각각 58년, 16년 및 9년의 기간이 필요하다. 이 경우 부식확률 50%의 경우는 종래의 결정론적인 방법(deterministic model)에 의한 부식기간에 해당하며 이로부터 염해환경 콘크리트 구조물의 내구성을 정량적으로 확보하기 위해서는 확률론적인 방법을 도입할 필요가 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 2는 사용수명 100년 경과 후에 동일한 조건에서 확산계수의 차이에 따른 철근의 부식확률을 나타내고 있다.

Bentz⁸⁾의 연구에 따르면, 동일한 실험실의 연구 결과에서는 염소이온 확산계수의 분산계수가 17% 정도인데 반하여 여러 실험실의 연구 결과를 종합한 경우 37%에 이르는 분산계수를 보인다. 따라서 이에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단되며, 본 연구에서는 동일한 조건하에서 염소이온 확산계수의 편차를 10% 및 20%로 한 경우 철근의 부식확률 변화를 검토하였다.

Fig. 3은 동일한 조건하에서 사용수명 100년인 경우 요구되는 부식확률을 만족하기 위해 필요한 피복두께를 나타내고 있으며, 2가지 확산계수 초기값과 COV(coefficient of variation)를 10% 및 20%로 한 경우에 대해서 각각 검토하였다. 이 경우 염소이온 확산계수의 편차에 따른 영향은 부식확률이 50%인 경우에는 나타나지 않고 있으며 부식확률이 10%인 경우에는 COV가 20%일 때 요구되는 피복두께가 1mm 증가하는 것을 알 수 있다. 이로부터 염소이온 확산계수의 경우 평균값의 크기가 철근의 부식확률에 미치는 영향에 비해 편차의 영향은 매우 작은 것을 알 수 있다.

3.2 확산계수의 시간의존성 지수

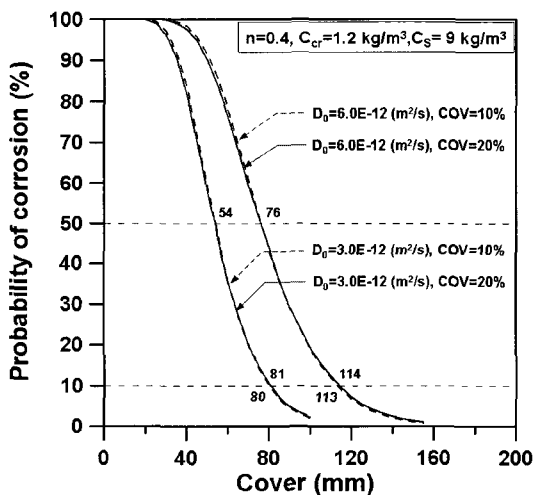


Fig. 3 Calculated concrete cover for different mean values and COV of diffusion coefficient at 100 years

콘크리트의 염소이온 확산계수는 시간에 따라 변화하는데, 이는 시간의 경과에 따라 염소이온 침투에 저항하는 콘크리트의 능력이 증가하는 경향을 반영하는 것으로서 일반적으로 지수 함수의 형태로 모델링되며, 이를 반영하는 설계변수가 시간의존성 지수 n이다. 이 값은 0.20에서 0.60 또는 0.37에서 0.60 등 연구자에 따라 많은 차이를 보이고 있으며, 실험 방법에 대한 명확한 규정이 없는 실정이다^{9,11)}. 이에 따라 본 연구에서는 Table 1과 같이 시간의존성 지수를 0.3, 0.4, 0.5로 변화시키고 COV를 10% 및 20%로 한 경우에 대한 철근의 부식확률 변화를 검토하여 Figs. 4~6에 나타내었다.

Fig. 4를 보면 동일한 조건에서 철근의 부식확률이 10%에 도달하는 기간은 시간의존성 지수 n이 0.3, 0.4, 0.5인 경우에 각각 10년, 16년, 27년으로 증가하고 있으며, 이로

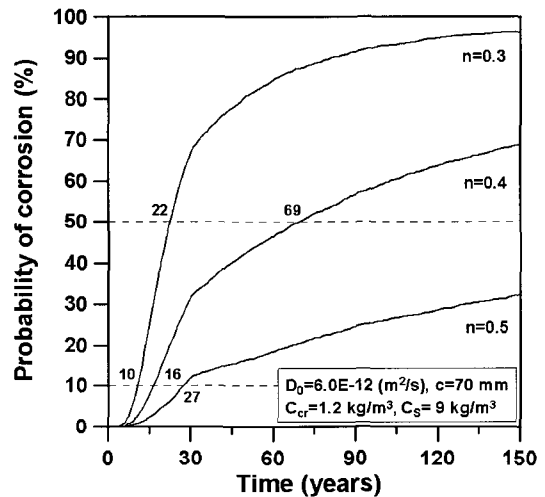


Fig. 4 Probability of corrosion vs. time with various time dependent parameter n

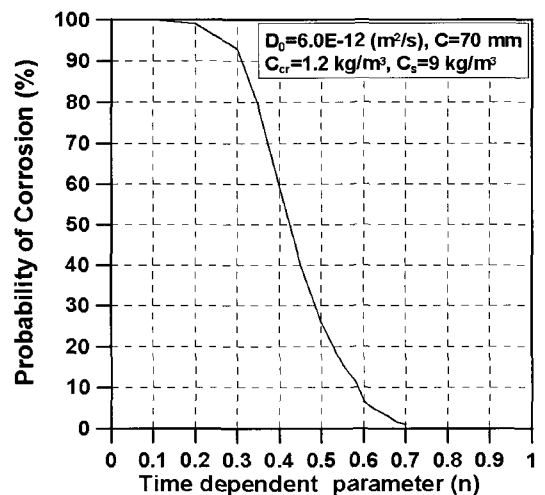


Fig. 5 Probability of corrosion vs. time dependent parameter at 100 years

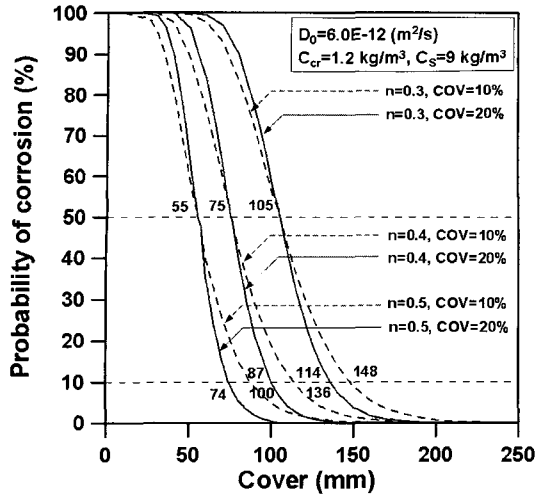


Fig. 6 Calculated concrete cover for different mean values and COV of time dependent parameter n at 100 years

부터 시간의존성 지수가 커질수록 시간에 따른 확산계수 값이 감소하여 철근의 부식확률에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 5를 보면 100년 시점에서 시간의존성 지수의 증가에 따라 철근의 부식확률이 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며, 이를 Fig. 2와 비교하면 시간의존성 지수 n 이 염소이온 확산계수 D_0 보다 부식확률에 미치는 영향이 더욱 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 사용수명이 100년인 경우 요구되는 부식확률을 만족하기 위해 필요한 피복두께를 나타내고 있으며, 세 가지의 시간의존성 지수에 대하여 지수의 COV가 10% 및 20%인 경우에 대해 검토하였다. 이 경우 Fig. 3과 마찬가지로 시간의존성 지수 n 의 편차에 따른 영향은 부식확률이 50%인 경우에는 나타나지 않고 있으며 부식확률이 10%인 경우에는 COV가 20%일 때 요구되는 피복두께가 COV가 10%인 경우에 비해 12~14mm 증가하는 것을 알 수 있다. 이로부터 시간의존성 지수 n 의 경우 편차가 철근의 부식확률에 미치는 영향이 비교적 큰 것을 알 수 있다.

3.3 철근의 피복두께

염소이온의 확산속도 저하와 함께 염해에 의한 철근 부식을 막는 또 한 가지 효과적인 방법은 철근의 피복두께를 증가시키는 것이다. 즉, 염소이온의 침투면으로부터 철근까지 염소이온의 침투경로를 증가시키면 동일한 노출시간에 임계염소이온농도에 도달하는 깊이가 철근으로부터 멀어지게 된다. 동일한 환경조건 및 재료 상태에 대하여 철근의 덮개를 30mm부터 90mm까지 변화시켜 시간 경과에 따른 철근의 부식확률을 계산하고 그 결과를 비교한 것이 Fig. 7이며 Fig. 8에는 100년 시점에서의 피복두께 및 피복두께의 편차에 따른 부식확률이 제시되어 있다.

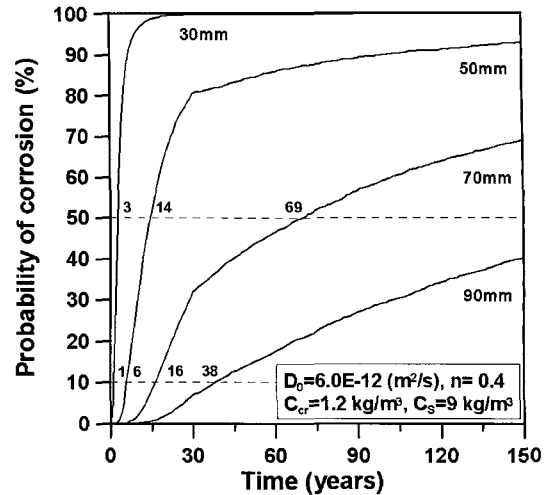


Fig. 7 Probability of corrosion vs. time with various cover

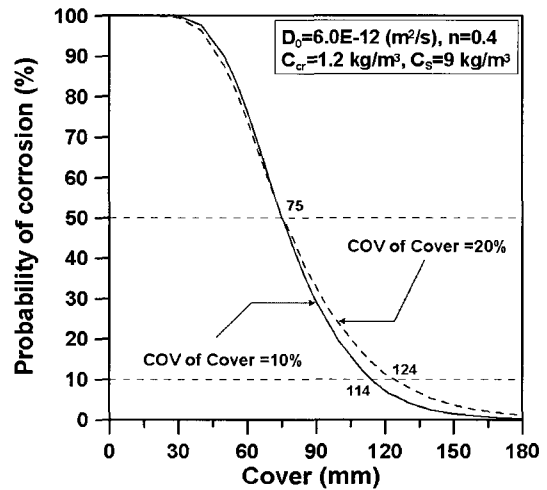


Fig. 8 Calculated concrete cover for different COV of cover at 100 years

Figs. 7 및 8에서 알 수 있듯이 피복두께의 변화에 따라 파괴확률의 변화는 매우 뚜렷하며, 피복두께가 50mm 이하의 경우 100년 사용수명 이후 철근의 부식확률은 90%에 이른다. Fig. 8에서 피복두께의 편차를 달리했을 경우 사용수명 100년에 대한 소요 피복두께의 변화 추이를 살펴보면 부식확률 10%가 되는 피복두께는 COV 10% 및 20%에 대해 각각 114mm 및 124mm로 나타나고 있다. 이러한 결과를 Fig. 6과 비교해보면 피복두께의 편차는 염소이온 확산계수의 시간의존성 지수와 유사하게 철근의 부식확률에 상당한 영향을 주는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 동일한 조건하에서 피복두께의 COV를 달리했을 경우 시간에 따른 부식확률의 차이를 보여주고 있다. 이 경우 피복두께의 편차가 증가하는 경우 일반적인 예상과는 달리 초기에는 파괴확률이 증가하지만 약 100년 이후에는 오히려 파괴확률이 감소하는 것을 알 수 있다.

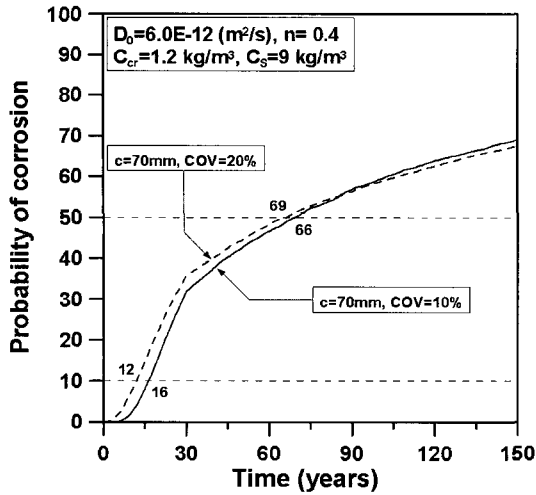


Fig. 9 Probability of corrosion vs. time with different COV of cover

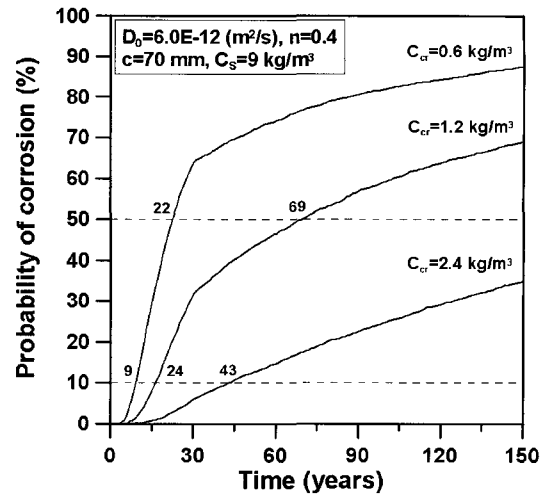


Fig. 11 Probability of corrosion vs. time with various surface chloride contents

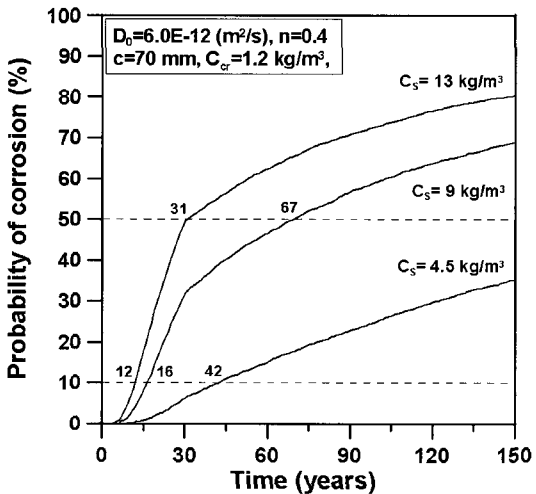


Fig. 10 Probability of corrosion vs. time with various surface chloride contents

3.4 표면 염소이온농도 및 임계 염소이온농도

설계변수 중 지역적인 변동이 가장 심하고, 동일한 구조물 내에서도 위치에 따라 가장 큰 분산을 보이는 것이 표면 염소이온농도라 할 수 있는데, 특히 해상 교량 등 해안에 위치하고 있는 구조물의 경우 동일 부재에 대하여도 해중, 물보라지역, 해상대기 등의 위치 변화에 따른 영향이 가장 큰 설계변수이다. 이에 따라 본 연구에서는 콘크리트 표준시방서 내구성편에서 제시하고 있는 표면 염소이온농도를 참고하여 표면 염소이온농도를 13.0, 9.0, 4.5 kg/m³으로 변화시켜 영향 정도를 분석하였다.

Fig. 10을 보면 표면 염소이온농도의 경우 철근의 부식확률에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있으며, 구체적으로 동일한 조건하에서 부식확률이 10%가 되는 경과시간은 표면 염소이온농도가 13.0, 9.0, 4.5 kg/m³로 감소되는 경우 각

각 12, 16, 42년으로 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

철근부식과 관련된 임계 염소이온농도의 경우 Life-365 프로그램¹⁰⁾에서는 콘크리트 중량비 0.05%를 기준으로 하며, 우리나라 시방서에는 임계 염소이온농도 값을 1.2 kg/m³으로 제시하고 있다. 본 연구에서는 임계 염소이온농도가 실내실험의 경우 0.6~1.2 kg/m³의 범위이고 염해환경에 있는 실구조물의 경우에는 1.2~2.4 kg/m³의 범위에 있다는 연구 결과를 참조하여 임계 염소이온농도를 0.6, 1.2, 2.4 kg/m³으로 변화시켜 영향을 분석하였다.

Fig. 11을 보면 임계염소이온농도가 0.6, 1.2, 2.4 kg/m³일 때 부식확률이 10%가 되는 경과시간은 각각 9, 24, 43년으로 증가되는 것을 알 수 있으며, 이로부터 염해에 대한 정량적인 내구성해석을 수행하고자 하는 경우 임계염소이온농도를 적절히 예측하는 것이 필수적인 요소인 것으로 판단된다.

4. 염해환경 콘크리트 구조물의 내구성 해석

본 장에서는 국내·외 측정 자료를^{7,11)} 이용하여 측정시점에서의 표면염소이온농도 및 확산계수를 산정한 후 식 (3)을 이용하여 초기 확산계수 D_0 를 추정하였다. 이후 본 연구에서 제시된 절차에 따라 확률론에 기초한 콘크리트 구조물의 내구성 해석을 각각의 경우에 대해 수행하였다. 사용된 통계자료는 국내의 경우 시공 후 12년이 경과한 서해안 교량의 하부구조로부터 시료를 채취하여 분석한 것이며, 외국의 경우는 노르웨이 해안에 위치한 시공 후 8년이 경과한 항만구조물로부터 얻어진 자료이다.

Table 2에는 이들 측정자료 및 28일 시점에서 추정된 확산계수 D_0 값이 주어져 있다. 한편, 확률론적 내구성 해석을 수행하기 위해서 필요한 설계변수 값 중에서 Table 2에 제시되지 않은 변수들은 철근의 피복두께 100mm, 임

Table 2 Parameters of durability analysis

Name	D_c ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	C_s (kg/m^3)	$D_b(\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$		Time (years)
			n=0.2	n=0.3	
Pier 1 ¹⁾	2.20	7.80	6.04	10.0	12
Pier 2 ¹⁾	1.28	13.34	3.52	5.83	12
Harbor 1 ²⁾	1.67	14.64	-	6.73	8
Harbor 2 ²⁾	1.29	15.12	-	5.2	8
Harbor 3 ²⁾	1.29	6.72	-	5.2	8

계염소이온농도 $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 으로 각각 가정하여 해석을 수행하였다. 또한, 각 설계변수의 변동계수는 20%로 가정하였으며, 다만 피복두께의 경우만 10%로 가정하였다.

4.1 서해안 교량 하부구조

Fig. 12는 Table 2의 2행 및 3행에 제시된 서해안 교량 하부구조 조사 자료에 의한 시간에 따른 부식확률 변화 추이를 보여주고 있다. 이 경우 조사시점(재령 12년)에서의 염소이온 확산계수는 pier 1 및 pier 2 각각의 경우 $2.20 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 및 $1.28 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나타났으며, 식 (3)을 이용하여 28일 시점에서의 초기염소이온농도를 추정 한 값은 n=0.2인 경우에 각각 6.04 및 $3.52 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, n=0.3인 경우에 각각 10.0 및 $5.83 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나타나는 조사된 자료가 비교적 합리적인 결과를 보이고 있다.

Fig. 12 에서 부식개시확률 50% 도달시간은 종래의 결정론적인 내구성 해석을 통한 부식개시 시간과 동일하며 확률론적 내구성 해석을 수행하지 않을 경우 기존 교각의 염해에 대한 사용수명이 38~57년 사이에 있음을 나타낸다. 그러나 부식개시 확률 50%는 구조적인 안전성과 비교하여 비안전측의 결과를 나타내며 구조물의 부식개시확률을 10% 이내로 하고자 하는 경우에는 염해에 대한 내구 수명이 각각의 교각에 대해서 16~19년 및 21~25년 정도에 불과한 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 50년 재령에서 피복두께에 따른 부식개시 확률의 변화를 나타내고 있다. 이 경우 사용수명 50년을 확보하기 위해 요구되는 피복두께는 부식확률 50% 기준으로 97~110mm이지만, 부식확률 10%를 목표로 하는 경우에는 pier 1이 145~147mm, pier 2가 130~132mm의 피복두께가 필요한 것을 알 수 있다.

4.2 노르웨이 항만구조물

Figs. 14 및 15는 Table 2의 4~6행에 제시된 시공 후 8년이 경과된 노르웨이 해안의 항만구조물의 조사 자료를 이용한 염해에 대한 확률론적 내구성 해석 결과를 나타내고 있다.

Fig. 14에서 harbor 1 및 harbor 2 구조물은 4.1절에

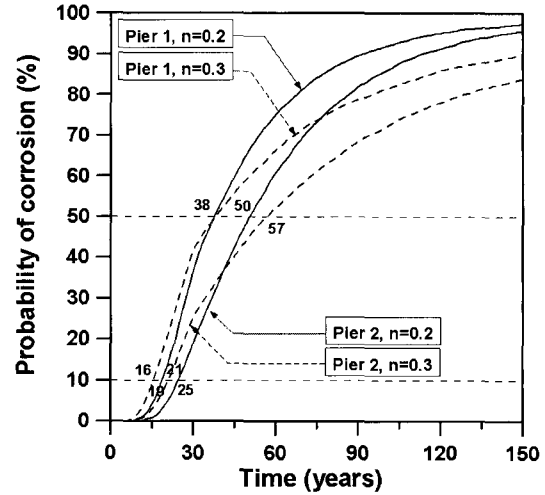


Fig. 12 Probability of corrosion vs. time with domestic field data

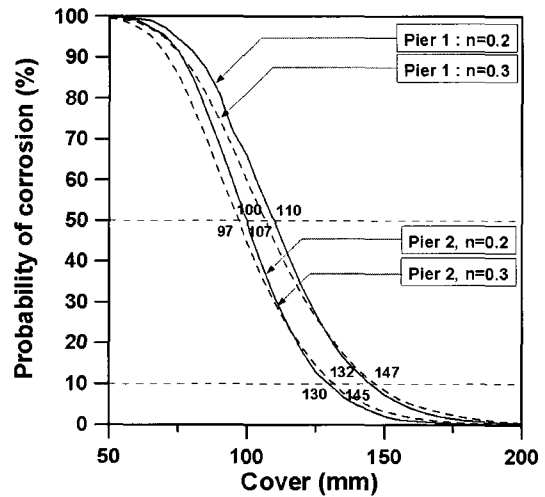


Fig. 13 Calculated concrete cover for domestic field data at 50 years

제시된 국내의 pier 1 및 pier 2와 거의 동일한 시점에서 동일한 부식개시 확률을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 harbor 1의 경우 pier 1과 비교하여 확산계수가 작은 반면에 표면염소이온 농도가 크기 때문에 이들 인자의 영향이 복합되어 나타난 현상으로 판단된다. 또한, harbor 2의 경우는 pier 2와 확산계수 및 표면염소이온 농도가 유사하게 나타났기 때문에 동일한 결과를 나타내는 것이 당연하다고 볼 수 있다. 다만, harbor 3 구조물의 경우 harbor 2와 동일한 염소이온 확산계수를 나타내고 있지만 표면염소이온 농도의 차이로 인해 동일한 부식개시 확률에 이르는 기간이 매우 크게 나타난다. 그러므로 실제 구조물에 대한 사용수명을 예측하고자 하는 경우 염소이온 확산계수 및 철근의 피복두께와 같은 설계인자 이외에 표면염소이온 농도와 같은 환경요인을 정확히 예측하는 것이 매우 중요한 사항임을 알 수 있다.

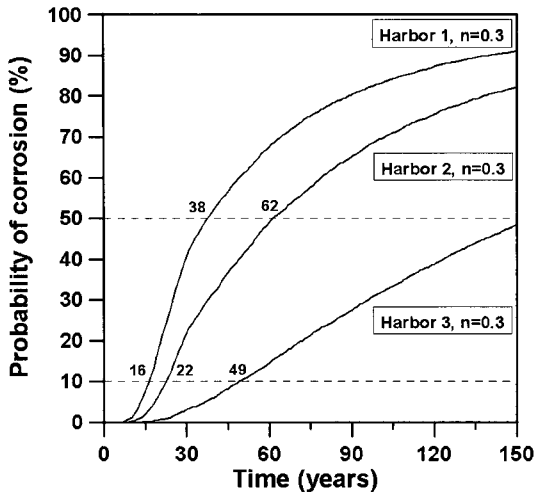


Fig. 14 Probability of corrosion vs. time with foreign field data

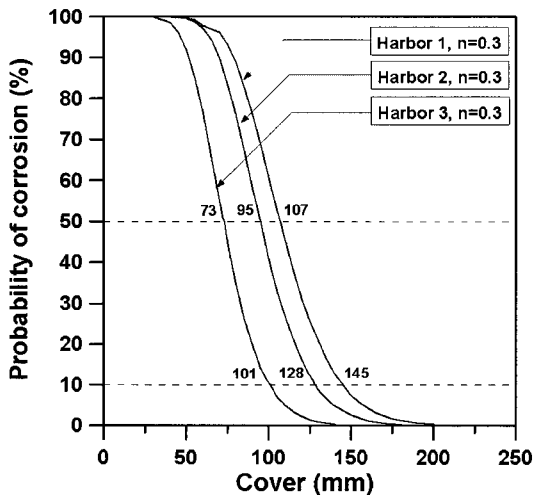


Fig. 15 Calculated concrete cover for foreign field data at 50 years

Fig. 15의 경우는 재령 50년 시점에서 철근의 부식이 발생하는 피복두께를 나타내고 있다. 여기서 10% 이내의 부식확률을 목표로 하는 경우에 필요한 철근의 피복두께는 101, 128 및 145mm로 나타나고 있으며, 이러한 확률론적 해석 결과를 통해 기존의 설계기준에 의해 시공된 콘크리트 구조물의 경우 염해에 대한 사용수명을 충분히 확보하기 위해서는 지속적인 모니터링을 통한 보수·보강이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 해양환경 등의 열악한 조건하에 있는 철근 콘크리트 구조물의 내구성 해석 및 설계를 확률론적 이론에 근거하여 수행하는 합리적인 방법을 제안하였다. 본 연구로부터 도출된 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 몬테카를로 시뮬레이션 기법에 의한 내구성해석을 수행하여 초기 염소이온 확산계수 D_0 , 확산계수의 시간의존성 지수 n , 철근의 피복두께 c 등의 각 내구성 설계인자들이 콘크리트 구조물 내부에 위치한 철근의 부식확률에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.
- 2) 각 설계변수의 편차는 부식확률 50%인 경우에는 사용수명에 영향을 주지 않지만 부식확률 10%를 목표로 하는 경우에는 상당한 영향을 주는 것으로 나타났다. 이 경우 시간의존성 지수의 경우에는 변동계수가 10%에서 20%로 증가함에 따라 100년 시점에서의 부식가능 깊이가 101 mm에서 114 mm(Fig. 6; $n=0.4$ 인 경우)로 증가하며, 피복두께의 경우에는 114 mm에서 124 mm로(Fig. 8) 증가한다. 다만, 염소이온 확산계수의 경우 변동계수의 증가에 따른 동일시점에서 부식가능 깊이의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.
- 3) 해양구조물에 대한 국·내외 조사 자료를 기반으로 확률론적 내구성 해석을 수행한 결과 피복두께 100 mm를 기준으로 부식확률 50%에 도달하는 기간은 38~57년(국내 교량 하부구조, 38~150년(노르웨이 항만구조물)으로 나타났다. 그러나 부식확률 10%를 목표로 하는 경우에는 16~25년 및 16~49년으로 나타나 염해에 대한 사용수명의 신뢰성을 충분히 확보하기 위해서는 본 논문에서 제시한 확률론적인 내구성 해석 방법의 도입이 필수적인 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김은겸, 신치범, 이운환, "콘크리트 구조물의 염화물 이온 침투 거동 해석", 콘크리트학회 논문집, 9권 6호, 1997. 12, pp.233~241.
2. 문한영, 김홍삼, 이승태, "해수 침식을 받은 콘크리트의 성능저하 원인 규명", 대한토목학회 논문집, 22권 1A호, 2002. 1, pp.171~179.
3. 오병환, 정상화, 강의영, 김지상, "고농도 황산염 이온이 함께 존재하는 경우의 염소이온 침투특성에 관한 실험 연구", 콘크리트학회 논문집, 15권 2호, 2003. 4, pp.173~182.
4. 송하원, 권성준, 이석원, 변근주, "고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물 침투 저항성에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, 15권 3호, 2003. 6, pp.400~408.
5. RILEM, *Durability Design of Concrete Structures*, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, RILEM, 1996.

6. Duracrete Final Report, *DuraCrete Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures*, May 2000.
7. Ferreira, M., Askorg, V., Jalali, S., and Gjφrv, O. E., "Probability-Based Durability Analysis of Concrete Harbor Structures", *Concrete under Severe Conditions*, 2004, CONSEC'04, Seoul, Korea.
8. Bentz, E. C., "Probabilistic Modeling of Service Life for Structures Subjected to Chlorides", *ACI Material Journal*, Sep.-Oct. Vol.100, No.5, 2003, pp.391~397.
9. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서 내구성편, 2005, pp.56~57.
10. Thomas, M. D. A. and Bentz, E. C., *Life-365 Manual*, released with program by Master Builders at www.Masterbuilders.com, 55pp.
11. 한국콘크리트학회, 콘크리트 염해 및 탄산화로 인한 내구성 저하 방지대책 연구(부록 II: 국내 콘크리트 염해·탄산화 성능저하 실태 조사보고서), 2001, pp.52~56.

요 약

최근 들어 염해환경하의 콘크리트 구조물에 대한 정량적인 사용수명 및 장기적인 성능의 확보를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 확률론에 기초한 새로운 내구성 해석 및 설계개념이 콘크리트 구조물의 사용수명을 증진하기 위해 매우 효과적인 것으로 나타났다. 이와 관련하여 아직까지는 설계변수와 관련한 신뢰성 있는 자료가 부족한 실정이지만, 새로운 콘크리트 구조물의 경우에는 확률론적 내구성 설계 개념을 부분적으로 적용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 시간에 따라 변화하는 염소이온 확산계수를 고려하여 Fick의 확산방정식에 대한 해를 구하였으며, 이를 이용하여 Monte Carlo Simulation에 기초한 확률론적 내구성 해석을 수행하였다. 또한, 이를 통해 콘크리트 구조물의 내구성과 관련된 각 설계변수들의 영향을 명확히 하였으며, 제시된 확률론적 내구성 해석절차를 다양한 콘크리트 구조물로부터 얻어진 염소이온 침투자료에 적용하여 유용성을 검토하였다. 그 결과 본 연구에서 제시한 확률론적 내구성 해석절차는 향후 염해 환경에 처한 중요 콘크리트 구조물의 내구성 확보 및 기존 구조물의 염해에 기초한 잔존수명 예측에 매우 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 내구성, 부식확률, 염소이온침투, 사용수명, 부식