

확률론적 방법을 적용한 콘크리트 구조물의 염해 내구성 설계에 관한 연구

A study on Probability-based Durability Design of Concrete Structures subjected to Chloride Attack

김 원 동* 송 하 원** 변 근 주** 백 승 우***
Kim, Won-Dong Song, Ha-Won Byun, Kun-Joo Pack, Sung-Woo

ABSTRACT

A probability-based durability design which minimizes the uncertainties on durability parameters of concrete is proposed for reinforced concrete structures subjected to chloride attack. The uncertainties of various factors such as water-cement ratio, curing temperature, age of concrete and the variation of these factors which affect chloride ion diffusion are considered. For the durability design, a probability-distribution function for each factor is obtained and a program which combines Fick's 2nd law and Monte Carlo simulation is developed. The durability design method proposed in this study considers probability of durability limit and probability of the concentration of chloride ion, so that the probability-based deterioration prediction is possible.

1. 서론

콘크리트 구조물의 염해는 콘크리트 내부로의 염화물이온 확산으로 인하여 매립철근이 부식되어 구조적 성능을 상실하게 되는 것을 의미한다. 그러나 염화물이온의 확산은 다양한 요인에 의해 영향을 받으므로 정확한 해석이 어려운 실정이다. 따라서, 염해에 대한 내구성 설계를 위해서는 염화물 이온 확산을 합리적으로 고려한 염화물 이온 침투 해석이 요구된다. 현재 염화물이온 농도 변화를 고려한 여러 설계기법들이 제시되고 있으나, 다양한 영향인자의 변동성으로 인하여 해석과 설계에 있어 불확실성이 존재하고 있다. 그러므로 염해에 대한 신뢰성 있는 내구성 설계를 위해서 확률론적 이론에 바탕으로한 영향인자의 변동성을 반영한 설계기법이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 염화물 이온 확산 영향인자의 변동성을 고려하기 위하여, Monte Carlo simulation(MCS)를 적용한 확률론적 내구성 설계기법을 제안하고자 한다.

2. 확률론적 내구성 설계법 이론

확률론적 내구성 설계법은 시간에 따른 열화외력의 변동성을 고려하기 위하여 신뢰성 이론을 기본 개념으로 하고 있다. 구조설계에서의 하중함수(S)와 저항함수(R)와 같이 내구성 설계에서도 시간에 따라 변화하는 환경하중(S(t))과 내구성능(R(t))에 대한 함수를 정의하여야 한다.

* 정희원, (주)동명기술공단중합건축사사무소 부설연구소 연구원

** 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수

*** 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

정의된 두 함수로부터 아래 식 (1)과 같이 한계상태함수 $g(t)$ 를 도출할 수 있으며, $R(t)$ 와 $S(t)$ 가 같아지는 상태를 내구적 한계상태로 정의하였다. 본 한계상태함수를 바탕으로 구조물의 사용기간동안 발생하는 상태변화를 신뢰성 해석을 통하여 확률적으로 결정한다.

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

여기서, t 는 사용기간, $g(t)$ 는 한계상태함수, $R(t)$ 는 시간(t)에 따른 내구성능 $S(t)$ 는 시간(t)에 따른 환경하중을 나타낸다. 위의 한계상태함수를 통해 아래의 식 (2)와 같이 시간 t 에서 구조물이 내구적 한계상태에 도달할 확률을 도출한다.

$$P_{f,t} = P\{g(t) < 0\}_t = P\{R(t) - S(t) < 0\}_t < P_{target} = \Phi(-\beta_{target}) \quad (2)$$

여기서, $P_{f,t}$ 는 시간 t 에서 내구적 한계상태에 도달할 확률을 나타내며, P_{target} 는 최대허용파괴확률, Φ 는 표준정규분포함수, β_{target} 는 목표 신뢰성 지수를 나타낸다.

3. 확률론적 이론에 근거한 염해 내구성 설계 절차

3.1 염화물이온의 침투 예측 모델

일반적으로 콘크리트 깊이에서 염화물이온 침투방정식은 Fick의 제 2법칙을 사용하여 다음의 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$\frac{dC(x,t)}{dt} = D_a \frac{d^2C(x,t)}{dx^2} \quad (3)$$

여기서, $C(x,t)$ 는 위치 x , 시간 t 에서의 염화물이온 농도, D_a 는 염화물 이온 확산계수를 나타낸다. 또한 식 (3)으로부터 유도한 1차원 확산방정식의 일반해는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 본 연구에서 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 설계시 적용할 염화물 이온 침투방정식은 식(4)에 근거하도록 한다.

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{k_e D_a t}}\right) \right) \quad (4)$$

여기서, $C(x,t)$ 는 위치 $x(\text{cm})$, 시간 $t(\text{year})$ 에서의 염화물이온 농도(kg/m^3), C_i 는 초기염화물이온 농도(kg/m^3), C_s 는 콘크리트 표면에서의 염화물이온 농도(kg/m^3), k_e 는 환경계수, D_a 는 염화물이온의 유효확산계수(m^2/year)를 나타낸다.

3.2 재령계수를 적용한 염화물이온 확산계수 모델

콘크리트의 초기 염화물이온 확산계수는 장기적인 수화반응으로 일반적으로 재령에 따라 감소하게 되며, 재령에 따른 콘크리트 내부 구조변화에 의한 염화물이온 확산계수의 변화를 반영하는 재령계수 (α)를 도입한 식 (5)를 사용하였다(Bentz, 2001).

$$D_a = D_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha \quad (5)$$

여기서, D_a 는 시간 t 에서의 확산계수, D_0 는 초기확산계수, t_0 는 초기양생기간(일반적으로 28일), t 는 시간(일), α 는 시간에 따른 확산계수 감소의 영향을 고려하기 위한 재령계수를 나타낸다.

3.3 염해 내구성 설계 결과의 도출

염해에 대한 목표 신뢰성 지수를 내구적 파괴확률 10%에 해당하는 1.3으로 설정하여, 식 (2)의 한계상태함수를 염해에 적용한 내구성 설계식은 다음과 같으며, 이로부터 목표내구수명내에서 콘크리트 구조물의 염해 내구성능을 보장할 수 있는 초기확산계수(D_0)를 도출할 수 있다.

$$P\{R(t) - S(t) < 0\}_t = P\{C_{cr} - C(x, t) < 0\}_t < P_{target} (= 10\%) = \Phi(-\beta_{target} (= 1.3)) \quad (6)$$

여기서, C_{cr} 은 임계염화물량을 나타낸다.

3.4 내구성 설계 결과를 통한 물-시멘트비의 도출

다음으로 식 (6)의 확률론적 내구성 설계기법을 통해 도출된 초기확산계수를 확보할 수 있는 물-시멘트비를 결정하여야 한다. 초기 염화물이온 확산계수는 물-시멘트비, 혼화재 혼입율, 단위시멘트량과 단위수량 등 여러 인자에 의해 변화하지만, 이와 같은 모든 결정 변수를 고려한 확산계수의 예측에 관한 연구는 아직 미진한 실정이다. 한편 초기염화물이온 확산계수는 콘크리트의 배합요인 뿐만 아니라 온도 등과 같은 외부의 환경조건에 따라 영향을 받으므로 이를 고려하여야 한다. 표 1은 OPC를 사용한 콘크리트의 재령 28일에서 각 온도별로 측정된 물-시멘트비에 따른 염화물이온의 확산계수를 나타내고 있다(Christensen, 2002). 본 연구에서는 초기 염화물이온 확산계수의 변수를 물-시멘트비와 온도로 설정하고, 물-시멘트비와 온도의 관계를 회귀분석을 하여 식 (7)과 같은 관계식을 도출하였다.

$$D_0 = -0.71(W/C)^3(T)^2 - 0.97(W/C)^3(T) - 172.24(W/C)^3 + 1.00(W/C)^2(T)^2 + 1.62(W/C)^2(T) + 242.95(W/C)^2 - 0.32(W/C)(T)^2 - 0.49(W/C)(T) - 78.82(W/C) + 0.03(T)^2 + 0.04(T) + 7.70 \quad (7)$$

여기서, W/C 는 물-시멘트비, T 는 양생시 외기온도를 나타낸다.

3.5 염해 내구성 설계 예

염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 설계 절차를 나타내면 그림 1과 같다. 본 절차에 따라 내구성 설계를 수행할 대상 구조물은 해수와 직접 접하지 않는 대기구간(Atmospheric Zone)에 위치한 구조물이며 사용시멘트는 OPC로 정하고, 콘크리트 타설시 평균온도를 4°C로 설정하였으며, 구체적인 설계를 위한 조건은 다음의 표 2와 같다. 표 2의 입력변수에 따라 내구성 설계를 수행한 결과를 표 3에 나타내었으며, 설계결과로부터 대상 구조물의 초기확산계수는 3.5×10^{-12} (m^2/s)으로 결정되었다. 이를 식 (7)에 적용하여, 도출된 초기확산계수를 만족하는 콘크리트(OPC)의 물-시멘트비는 37%로 결정되었다. 그림 2는 염해환경하에 있는 대상구조물의 시간에 따른 신뢰성 지수(β)의 변화를 나타낸 것이다.

표 1 물-시멘트비와 온도의 관계($\times 10^{-12} m^2/s$) (OPC)

물-시멘트비 \ 온도(°C)	온도(°C)		
	4	20	35
0.2	0.31	0.8	1.74
0.3	1.48	3.8	8.47
0.4	4.29	11	24.53
0.5	8.58	22	49
0.6	11.7	30	67
0.7	14	36	80

표 2 대상구조물의 설계조건(대기구간)

변수	단위	평균	표준편차
C_s	표면염화물량 [wt.%/conc wt.]	2.0	0.6
x	피복두께 [mm]	50	8
C_{cr}	임계염화물량 [wt.%/conc wt.]	0.80	0.08
K_e	환경계수	0.92	0.15
t	목표내구수명 year	100	-
C_i	초기염화물량 [wt.%/conc wt.]	0.1	-
D_0	초기확산계수 [$10^{-12} m^2/sec$]	$2 \times 10^{-12} \sim 7 \times 10^{-12}$	-
α	재령계수	0.3 ~ 0.6	-

표 3 대상구조물의 해석 결과

피복두께 (mm)	설계 확산계수 (m ² /s)	재령계수			
		α=0.3	α=0.4	α=0.5	α=0.6
50	2 × 10 ⁻¹²	1.1	2.0	2.5	3.0
	3 × 10 ⁻¹²	-	1.4	2.0	2.5
	4 × 10 ⁻¹²	-	0.9	1.6	2.2
	5 × 10 ⁻¹²	-	-	1.3	2.0
	6 × 10 ⁻¹²	-	-	-	1.7
	7 × 10 ⁻¹²	-	-	-	1.5

도출된 초기 확산계수(D₀) = 3.5 × 10⁻¹² (m²/s)
 물-시멘트비(OPC) = 37% (온도:4℃)

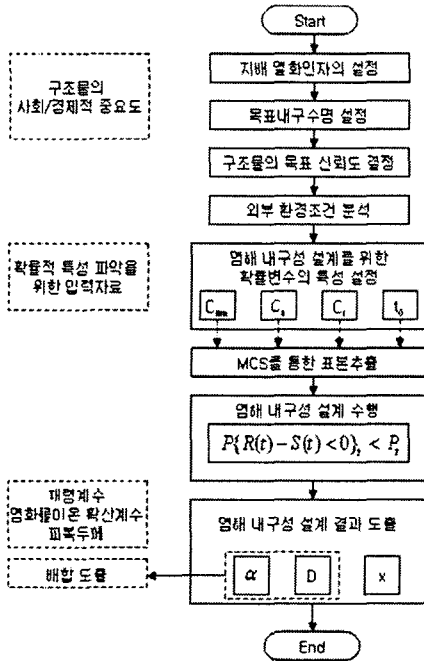


그림 1 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 설계절차

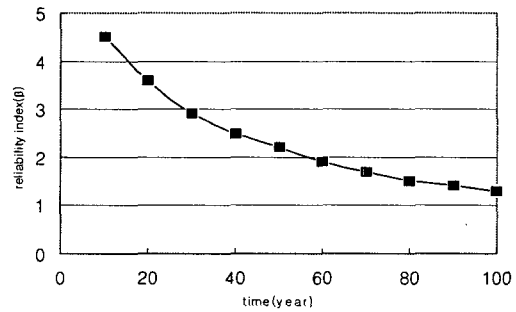


그림 2 대상구조물의 시간에 대한 신뢰성지수의 변화

4. 결론

확률론적 방법을 적용한 콘크리트 구조물의 염해 내구성 설계에 관한 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 염해를 받는 콘크리트 구조물 내의 염화물이온 농도 예측을 위한 염화물이온 확산계수의 영향인자를 양생온도와 물-시멘트비로 설정하여 콘크리트의 초기 양생시 온도의 영향을 고려할 수 있는 확산계수 관계식을 도출하였으며, 재령계수를 도입하여 시간에 따른 확산계수 감소의 영향을 고려하도록 하였다.
- (2) 내구성 설계 절차에서 다양한 확률변수에 대한 표본추출법인 Monte Carlo simulation을 도입하여 이를 적용한 확률론적 염해 내구성 설계절차를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방법으로 염해 환경하에 있는 콘크리트 구조물에 대해 내구성 설계를 수행한 결과, 본 연구의 설계기법이 기존의 확률론적 내구성 설계기법에 비해 구조물의 주변환경(양생온도)에 따른 물-시멘트비를 구체적으로 도출해낼 수 있으므로 보다 효과적인 내구성 설계가 가능하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Bentz, E. C., and Thomas, M. D. A. (2001), "Life-365 Service Prediction Model", *Silica Fume Association*, pp. 34~46.
2. Christensen, P. T. (2002), "Stochastic Modelling of The Diffusion Coefficient for Concrete", *IFIP Working Conference*, Osaka, Japan
3. Edvardsen, C. (2000), "Designing and Rehabilitating Concrete Structures-Probability Approach", *ACI Special Publications*, Vol. 192, No. 2, pp. 1193~1208.