

항만 콘크리트 구조물의 내구성 파괴확률 예측을 위한 신뢰성 모델

Reliability-based Model of Durability Failure for Harbor Concrete Structure

한상훈* 박우선**
Han, Sang Hun Park, Woo Sun

ABSTRACT

Reliability-based durability model was developed to consider the uncertainty of analysis variables in durability model for harbor concrete structures. The durability analysis program based on Finite Element Method (FEM) was modified adopting the reliability concept to estimate the probability of durability failure. Water-cement ratio in the durability analysis is the most important factor influencing chloride diffusion coefficient, evaporable water, etc. The probability distribution of water-cement ratio was calculated converting standard deviations of compressive strength in Concrete Standard Code to those of water-cement ratio. Based on the Monte Carlo Simulation, the probabilities of penetration depth and durability failure were calculated.

1. 서론

콘크리트 구조물의 내구성 해석을 위해서는 여러 재료 모델링과 침투 메카니즘을 고려하는 것이 필요하다. 재료 모델링에는 물-시멘트비, 단위시멘트량, 양생온도, 상대습도 등의 자료가 필요하고 침투 메카니즘에서 염소이온확산과 수분확산 등이 고려되어야 한다. 이러한 모델링과 메카니즘에는 많은 입력변수들이 있는데 그 변수들의 값은 큰 불확정성을 내포하고 있다. 예를 들어, 물-시멘트비도 계량오차, 품질오차 등에 따라 그 값이 변화하며 이것은 다른 변수들도 마찬가지이다. 변수들의 이러한 불확정성을 고려하는 한 가지 방법이 신뢰성 이론을 내구성 해석에 도입하는 것이다. 신뢰성 이론에 의한 내구성 해석 결과는 결정론적인 해석과는 달리 해석 변수들의 확률분포를 고려할 뿐만 아니라 내구성 파괴확률 등의 제시로 내구성 해석의 적용성을 넓혀 준다.

본 연구에서는 유한요소법으로 모델링된 염소이온 침투 모델링에 신뢰성 이론을 도입하여 입력변수들에 대한 확률분포를 고려해 염소이온 침투 깊이의 확률분포를 예측한다. 또한, 이러한 침투깊이의 확률분포를 바탕으로 내구성 파괴확률을 제시하고자 하였다.

2. 염소이온 침투 해석모델

2.1 수분확산의 유한요소법에 의한 정식화

미소체적 내부에서 확산과정이 등방성이고 확산계수가 일정하다면 수분의 시간에 따른 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

*정회원, 한국해양연구원 연안개발연구본부, 선임연구원

**정회원, 한국해양연구원 연안개발연구본부, 책임연구원

$$\frac{\partial h}{\partial t} = D_h \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] = D_h (\nabla^2 h) \quad (1)$$

일반적인 요소 평형방정식 유도과정을 거치면 다음과 같은 요소내의 평형방정식을 구할 수 있다.

$$[C]_h \left\{ \frac{dh(t)}{dt} \right\} + [K]_h \{h(t)\} - \{Q\}_h = 0 \quad (2)$$

여기서, $[C]_h = \int_V [M]^T [M] dV$

$$[K]_h = \int_V D_h \left\{ \frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right\} dV + \int_S f_h [M]^T [M] dS$$

$$\{Q\}_h = \int_S f_h [M]^T h_{en} dS \quad f_h : \text{수분확산의 표면계수} \quad h_{en} : \text{외기의 상대습도}$$

2.2 염소이온침투의 유한요소법에 의한 정식화

염소이온침투는 염소이온확산과 수분확산에 의한 염소이온 이동이 동시에 일어나므로 수분확산보다는 정식화과정이 조금 복잡하다. 확산과정이 등방성이고 미소체적내부에서 자유염소이온에 대한 고정염소이온의 변화율과 확산계수 및 증발가능수량이 일정하다면 자유염소이온의 시간에 따른 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial C_f}{\partial t}_{diff} + \frac{\partial C_f}{\partial t}_{sorp} \quad (3)$$

여러 유한요소 정식화 과정을 거치면 다음과 같은 요소 매트릭스 방정식을 유도할 수 있다.

$$[C] \left\{ \frac{dC_f(t)}{dt} \right\} + ([K_1] - [K_2] - [K_3] + [K_4]) \{C_f(t)\} - \{Q\} = 0 \quad (4)$$

여기서, $[C] = \int_V [M]^T [M] dV$

$$[K_1] = \int_V D_c \left\{ \frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right\} dV$$

$$[K_2] = \int_V k_h [M]^T \left[\frac{\partial [M]}{\partial x} \{h(t)\} \frac{\partial [M]^T}{\partial x} + \frac{\partial [M]}{\partial y} \{h(t)\} \frac{\partial [M]^T}{\partial y} + \frac{\partial [M]}{\partial z} \{h(t)\} \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \right] dV$$

$$[K_3] = \int_V \frac{\partial H}{\partial h} [M]^T [M] \left\{ \frac{\partial h(t)}{\partial t} \right\} [M] dV \quad [K_4] = \int_S f_c [M]^T [M] dS$$

$$\{Q\} = \int_S f_c [M]^T C_{f, en} dS$$

3. 염소이온 침투에 대한 신뢰성 분석

3.1 해석변수의 확률분포

내구성해석 변수들은 물-시멘트비, 단위시멘트량, 시멘트 종류 등의 함수이다. 이러한 배합설계 자료 등에 대한 확률분포를 구할 수 있다면 내구성해석 변수들에 대한 확률분포도 함께 구할 수 있다. 배합설계 자료의 오차는 계량오차, 품질오차 등 여러 가지가 있을 수 있는데 이러한 것들을 모두 고려하여 확률분포를 구하는 것은 현실적으로 매우 어렵고 실험자료들을 구한다고 하더라도 각 실험자료는 각각의 특정한 경우에 해당되는 것으로 일반적인 범용성을 확보했다고 할 수는 없다.

일반적으로 콘크리트의 성질을 대표하는 것은 압축강도이다. 「콘크리트 표준 시방서」에서는 이러한 압축강도가 골재와 시멘트의 품질변동, 계량오차, 비비기 작업 등에 대한 변동성을 고려하여 배합강도를 설계기준강도보다 조금 크게 산정한다. 따라서, 콘크리트 표준시방서의 콘크리트 강도의 표준편차를 이용하여 물-시멘트비와 표준편차를 계산할 수 있다. 압축강도 21 MPa 미만이면 0.107, 21 MPa 이상 35 MPa 이하이면 0.094 그리고, 35 MPa 초과하면 0.095 이다. 이러한 압축강도의 표준편차를 압축강도와 물-시멘트비의 표준편차 사이의 상관관계식에 대입하면 물-시멘트비의 표준편차를 계산할 수 있다. 물-시멘트비의 확률분포가 정규분포라고 가정하고 콘크리트 시방서의 물-시멘트비와 압축강도에 대한 상관관계식을 사용한다면 물-시멘트비의 강도 수준에 따른 표준편차는 다음과 같다.

표 1 콘크리트 표준 시방서의 배합강도를 이용한 물-시멘트비 표준편차

	압축강도 수준별 표준편차		
	물-시멘트비 0.70 이상 (21 MPa 미만)	물-시멘트비 43 이상 0.70 이하 (21 MPa 이상 35 MPa 이하)	물-시멘트비 0.43 이하 (35 MPa 초과)
물-시멘트비 표준편차	0.107	0.094	0.095

염소이온 침투해석에서 가장 중요한 해석변수는 염소이온확산계수이다. 이러한 염소이온 확산계수를 모델링하는 식 중 ACI Life-365 모델에서 제시하는 표준염소이온확산계수는 다음과 같다.

$$D_{c, ref} = 10^{-12.06 + 2.40(w/c)} \quad (5)$$

물-시멘트비에 대한 확률분포가 제시되어 있으므로 식 (5)를 이용하면 표준염소이온 확산계수의 확률분포를 구할 수 있다. 물-시멘트비에 대한 표준편차를 이용하여 10만번의 Monte Carlo Simulation을 통한 표준염소이온확산계수를 구하고 각 확산계수값을 구간별로 나누어 그 구간에 속한 simulation 횟수를 합산하면 그림 1과 같은 분포를 구할 수 있다. 표준염소이온확산계수가 지수 함수의 형태로 제시되어 있으므로 그 분포가 물-시멘트비의 확률분포와는 달리 정규분포가 아님을 알 수 있다.

염해에 직접적인 영향을 미치는 자유자유염소이온의 양을 결정하는 증발가능수량도 물-시멘트비에 직접적인 영향을 받으며 이에 대한 확률분포도 해석에서 고려되었다.

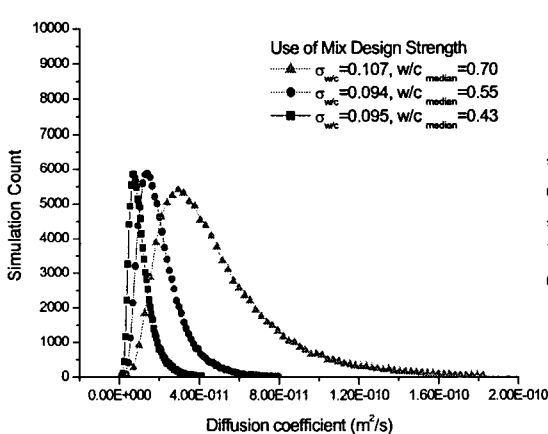


그림 1 염소이온확산계수의 확률분포

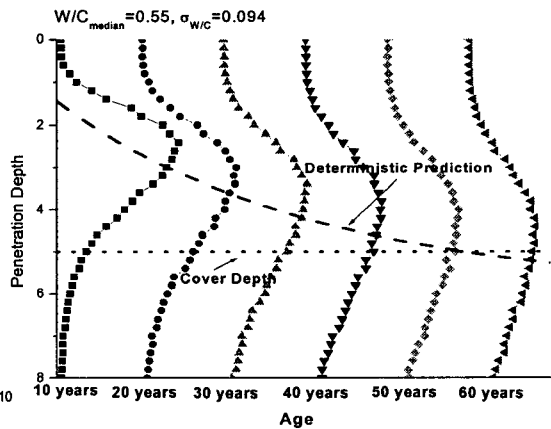


그림 2 침투깊이의 확률분포

3.2 입계의 염소이온 농도에 대한 신뢰성 해석

앞에서 구한 염소이온확산계수와 증발가능수량 등의 확률분포를 이용하여 염소이온 침투 해석을 수행하면 그림 2와 같다. 표면

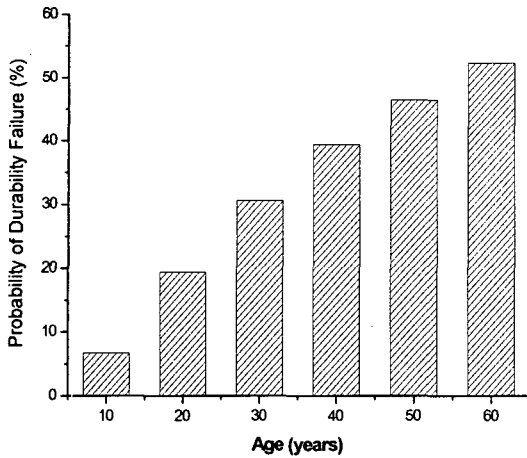


그림 3 내구성 파괴확률

L_{st} 보다 큰 경우로 다음과 같은 형태로 정의될 수 있다.

$$P(L_{st} < L_{cl}) = F_c(L_{st}) = \frac{\text{Number of Simulation } L_{st} < L_{cl}}{\text{Total Simulation Number}} \quad (6)$$

즉, 내구성 파괴확률은 Monte Carlo Simulation을 통해, 임계의 염소이온 농도 침투깊이가 피복두께를 초과한 경우를 전체 Simulation 횟수로 나눈 것이다. 이 때, 침투깊이와 피복두께 모두의 확률분포로 나타낼 수 있지만, 본 논문에서는 편의상 침투깊이만을 확률분포로 하고 피복두께는 일정한 값으로 가정하였다. 그림 2의 확산깊이의 확률분포에서 피복두께를 5 cm로 가정하면 그림 3과 같은 내구성 파괴확률을 구할 수 있다. 재령 10년에서는 6.7% 정도인 내구성 파괴확률이 재령이 경과하면 점차로 증가하여 재령 60년이 되면 파괴확률이 52.2%가 됨을 알 수 있다. 재령 30년에서 60년까지 보다 재령 30년이하에서 파괴확률의 증가가 큼을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 내구성 해석변수들의 불확정성을 고려하기 위해서 신뢰성 이론을 도입하여 염소이온 침투깊이의 재령에 따른 확률분포를 구하고 그 결과를 이용하여 내구성 파괴확률을 구하였다. 물-시멘트비에 대한 합리적인 확률분포를 제시하기 위해서 시방서의 압축강도 표준편차를 이용하여 물-시멘트비의 표준편차를 제시하였으며, 이러한 물-시멘트비의 표준편차를 이용하여 내구성 해석변수 중 염소이온확산계수와 증발가능수량 등에 대한 확률분포를 구할 수 있다. 이러한, 확률분포를 바탕으로 침투깊이의 확률분포와 내구성 파괴확률을 제시하였다. 내구성 파괴확률은 항만 구조물에 대한 최적의 보수·보강 시점 판단의 근거자료로 사용될 수 있으며, 구조물의 경제적인 공존수명을 계산하는데 이용될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

염소이온의 농도는 2.0 kg/m^3 , 단위시멘트량 330 kg/m^3 , 시멘트의 C_3A 성분 8.0% 등을 사용하였다. 본 해석에서는 이러한 값들을 일정한 상수로 고려하였지만, 이 변수들에 대해서 합리적인 확률분포가 제시되어있다면 그것을 해석에 그대로 이용할 수 있다. 그림 2에 나타나 바와 같이 재령이 경과할수록 확산깊이의 확률분포가 분산됨을 알 수 있다. 또한, 확정론적인 확산깊이와 비교해서 확률분포의 peak값(mode값)에 해당하는 확산깊이가 조금 작다. 즉, 확정론적인 확산깊이는 확률분포의 중앙값을 나타내는 것으로 확산깊이가 정규분포가 아니므로 mode값과는 다른 값을 나타낸다.

3.3 내구성 파괴확률의 계산

염소이온에 의한 내구성 저하의 판단은 철근부식을 일으키는 임계의 염소이온 농도의 침투깊이(L_{ch})와 피복두께(L_{st})를 비교함으로써 이루어진다. 구조물의 내구성 파괴확률은 L_{ch} 가