

불확실성을 고려한 RC구조물의 부식개시시기에 대한 확률 기반 예측

Probability-Based Prediction of Time to Corrosion Initiation of RC Structure Exposed to Salt Attack Environment Considering Uncertainties

김진수* 도정윤** 송훈*** 소승영**** 소양섭****
Kim, Jin Su Do, Jeong Yun Song, Hun So, Seung Young Soh, Yang Seob

ABSTRACT

Chloride ingress is a common cause of deterioration of reinforced concrete structures. Modeling the chloride ingress is an important basis for designing reinforced concrete structures and for assessing the reliability of an existing structure. The modelling is also needed for predicting the deterioration of a reinforced structure.

This paper presents an approach for the probabilistic modeling of the chloride-induced corrosion of reinforcement steel in concrete structures that takes into account the uncertainties in the physical models. The parameters of the models are modeled as random variables and the distribution of the corrosion time and probability of corrosion are determined by using Monte Carlo simulation. The predictions of the proposed model is very effective to do the decision-making about initiation time and deterioration degree.

1. 서 론

초기 철근콘크리트 구조물이 건설되어졌을 때는 반영구적인 구조물로 인식되어져 열화현상에 대한 유지관리가 필요하지 않다고 여겨졌지만 최근의 연구결과나 현장조사 결과를 통하여 보면 콘크리트는 다양한 환경적 요인에 의하여 콘크리트 자체뿐만 아니라 콘크리트 내에 매립되어 보호되고 있는 보강 철근마저도 성능이 저하하여 제기능을 발휘하지 못한다는 것이 밝혀졌다. 철근 콘크리트 구조물에서 철근의 부식은 철근 단면적의 감소로 인한 하중한계용량(load carrying capacity)과 부식생성물로 인한 부착강도의 저하로 인하여 내구적인 문제가 구조적 안정성을 해치는 문제로 확대되게 된다.²⁾

철근콘크리트 구조물의 열화현상 중에서도 염해환경에 있는 구조물의 보강철근의 부식은 그 속도와 영향력 면에서 매우 심각한 현상이다. 특히 동한제를 많이 살포하는 지역이나 해안가의 교량, 건축물은 염해의 영향권 안에 있으며 도심지 내에서도 주차장과 같이 제설을 위해 염분의 살포가 많은 구조물은 염해에 대한 고려가 필요하다. 따라서 염화물 이온에 의한 부식 환경에 노출된 콘크리트 구조물

* 정회원, 전북대학교 건축공학과 대학원, 석사과정
** 정회원, 전북대학교 건축·도시 공학부, 강사, 박사수료
*** 정회원, 한국건설기술연구원, 건축연구부, Post doc., 공학박사
**** 정회원, 전북대학교 건축·도시 공학부, 교수, 공학박사

의 경우 부식이 언제 일어나는 지를 예측하는 것은 철근 콘크리트 구조물을 설계하는 시점부터 고려되어야 할 설계요소이다. 또한 철근의 부식을 예측하는 것은 건설 후 구조물의 적절한 유지보수시기를 결정하는 데에도 매우 유효하다.

지금까지의 철근부식개시시기를 예측하는 방법은 이른바 결정론적인 계산법으로, 이는 입력변수의 평균값을 예측식에 대입함으로써 단 하나의 예측값을 계산해 내는 것이다.³⁾ 이러한 방법은 입력변수들이 가지는 불확실성을 전혀 반영하지 못하므로 최종적인 의사결정을 하는 경우 매우 어려운 문제에 부딪히게 된다. 따라서 본 연구는 철근부식개시시기에 영향을 미치는 여러 변수들의 불확실성을 고려하고 보다 유연한 의사결정이 가능하도록 하는 것을 그 목적으로 한다. 이를 위하여 확률기반의 예측식을 이용하여 입력변수들을 평균값에 대하여 임의의 변동계수를 가지는 확률변수로 처리하여 확률기반의 연산을 실시하였다. 그 연산 방법으로는 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation;MCS)의 기법을 활용하였다.

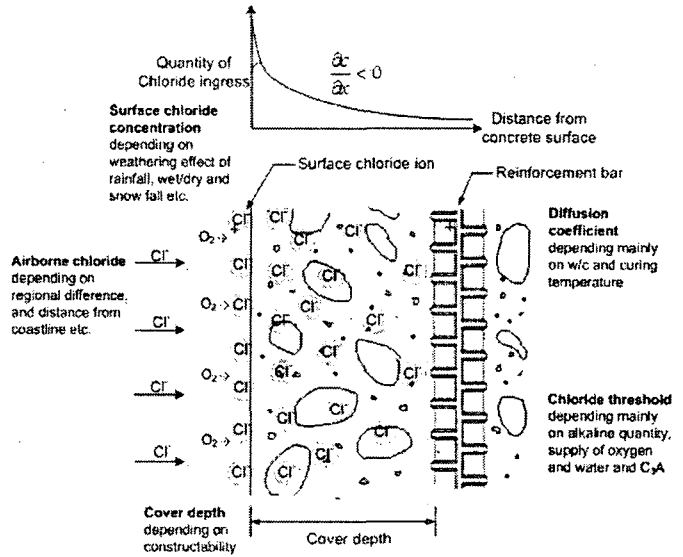


Figure 1 Schematic modeling of chloride ingress into concrete¹⁾

2. 부식개시시기 예측 모델식과 불확실성

2.1 예측 모델식⁵⁾

부식개시시기를 예측하기 위해서는 예측식이 필요한 데 본 연구에서는 확산에 대한 Fick's 2nd law을 기반으로 한 다음과 같은 예측식을 이용하였다.

$$C(x,t) = C_o \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right] \right\}$$

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad = C_o \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right] \right\}, \quad \operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-t^2) dt, \quad \operatorname{erfc} = 1 - \operatorname{erf}$$

여기서, $C(x,t)$ 는 콘크리트 표면으로부터 임의의 거리 x 에서의 시간에 따른 염화물 이온량(kg/m^3), C_o 는 표면 염화물 이온량(kg/m^3), x 는 피복두께(cm)이고 erf 는 다음과 같은 형태의 에러함수를 가리킨다. 따라서 x cm의 피복두께를 가지는 구조물의 부식이 진행되는 시간은

$$T_{\text{corr}} = \frac{x^2}{4D \cdot \gamma^2} \quad \text{with} \quad \gamma = \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{cr}}{C_o} \right)$$

2.2 예측식에 존재하는 불확실성

부식개시 시기를 예측하는 위의 식은 소위 결정론적인 접근법이다. 즉 입력자료들은 측정된 혹은 수집된 자료의 평균값을 이용하여 예측값으로 하나의 값을 출력하게 된다. 하지만 입력자료들은 모두

불확실성을 가지는 변수들이므로 이를 고려한 연산이 필요하다. 따라서 불확실성을 고려한 예측을 함으로써 신뢰도를 높이며 보다 유연한 의사결정을 할 수 있게 된다. 본 연구에서는 각 입력변수들을 확률변수로 처리하여 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용하여 각각 1000개의 랜덤한 입력변수가 발생하도록 설정하여 연산을 하였다.

3. 입력변수

본 연구에서 조사한 구조물의 표면염화물 농도 값은 약 5cm의 깊이에서 시료를 채취하여 염화물 이온을 측정하였으며 이 측정량을 염화물이온 확산식에 대하여 extrapolation을 통해 추측하였다. 확산계수는 유효확산계수로서 현장에서 수집한 깊이 5cm 정도에서의 시료에 대하여 확산계수를 측정하였다. 염화물이온이 콘크리트를 경유하여 철근의 표면에 도달한 후 부식이 시작되기 위해서는 임의의 농도 이상이 되어야 한다. 바로 이 농도가 임계농도(critical concentration 또는 chloride threshold)이다. ACI에서는 단위 시멘트(kg/m^3)에 대하여 약 0.2%정도를 그 수치로 제시하고 있으며 CEB에서는 약 0.4%를 제시하고 있다. 또한 각국의 규준에 따라 다소 다른 값들을 제시하고 있다. 국내에서는 콘크리트의 단위중량에 대하여 약 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 을 임계농도로 제시하고 있다. 하지만 염화물 이온의 시멘트 성분 중 C_3A 에 의한 고정화를 생각하여 본다면 시멘트 중량비로 제시하는 것이 바람직하여 보인다. 따라서 본 연구에서는 각 규준 중에서도 다소 보수적인 임계값을 제시하고 있는 ACI의 규준값을 사용하였다. 구조물의 피복두께는 비파괴시험방법에 의하여 조사되었다.

Table 1 Summary of data from field investigation

Input variable		Probability density function	Mean value	Coefficient of Variation
Surface chloride concentration	C_0 (kg/m^3)	Lognormal distribution	1.9	14%
Diffusion coefficient	D (cm^2/year)	Lognormal distribution	0.89	29%
Critical chloride concentration	C_{cr} (kg/m^3)	Normal distribution	0.6	18%
Cover thickness	x (cm)	Normal distribution	6.5	35%

4. 시뮬레이션 결과

Figure 1은 확률변수로 간주된 각 입력변수들을 1000회의 시뮬레이션을 실시한 부식개시시기의 결과를 나타내는 것이다. 부식개시시기는 lognormal한 확률밀도함수(PDF)를 나타내고 있다. Figure 2는 부식개시시기의 확률분포함수를 나타내는 것으로 주어진 환경에서 준공 후 약 24년 정도 후에는 약 50%정도의 확률로 대상 구조물의 철근이 부식할 것이라는 판단을 내릴 수 있으며 대상 구조물에 대하여 ASTM C 876의 방법으로 측정된 자연전위값은 약 $-180 \sim -50\text{mV}$ 정도로 분포하고 있으므로 부식확률을 알 수 없지만 본 연구에서

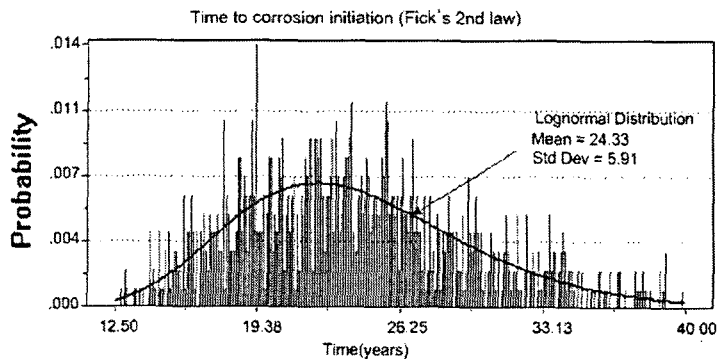


Figure 1 Histogram and PDF of the time to corrosion initiation from stochastic modeling.

실시한 확률연산을 통하여 보면 준공 후 27년이 지난 현 시점에서의 부식 확률은 약 75% 정도로 나타났다. 따라서 유지관리를 위하여 준공 후 주어진 환경 하에서 구조물의 부식개시를 예측하는 경우 매우 유연한 의사결정이 가능할 것으로 본다.

Figure 4는 몬테카를로 시뮬레이션기법을 이용하여 예측된 부식개시 시기에 대하여 각 입력변수들의 민감도를 계산한 것으로써 초기 콘크리트 구조물의 염화물에 의한 철근부식의 내구설계를 실시하거나 보수를 하는 경우 고려하여야 할 인자를 파악할 수 있도록 도움을 줄 수 있는 그래프이다.

철근의 부식시기의 경우 임계농도는 고정된 값으로 간주하면 피복두께가 두꺼울수록 부식개시시기를 연장하는 데 가장 유리함을 알 수 있으며 확산계수가 높을수록 부식개시기가 빨라지므로 콘크리트의 확산계수를 결정하는 콘크리트 배합인자를 설계시 혹은 콘크리트 배합시 주의해서 계획할 필요가 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 염해 환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 부식개시기에 영향을 미치는 변수의 불확실성을 고려하기 위해 MCS기법을 활용한 확률론적 연산을 실시하여 부식개시시기를 예측하는 데 그 신뢰성을 높이기 위해 이루어 졌다. 본 연구를 통하여 볼 때 철근 콘크리트조의 보강 철근의 부식개시시기를 예측하는 데 있어 MCS법을 이용한 확률론적 연산법은 적용성이 매우 좋으며 최종적인 의사결정을 하는 데 있어서도 유연하게 결정을 내릴 수 있는 장점이 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Jeongyun Do, "Nominal Cover Thickness Design of RC Quantitatively Considering Environment Condition by means of Fuzzy Inference System", Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol.3 No.2, Nov. 2004, pp.225-232.
2. Somerville, G., "The Design Life of Structures," Thomson Litho Ltd., East Kilbride, Scotland, 1992.
3. Lounis, Z. et al., "Reliability-based prediction of chloride ingress and reinforcement corrosion of aging concrete bridge decks", Life Cycle Performance of Deteriorating Structures, ASCE, 2004, pp.113-122.
4. ACI 318-02/318R-02, Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, 2004.
5. 日本建築學會, 鐵筋콘크리트造建築物의耐久設計施工指針(案)・同解説, 2004.

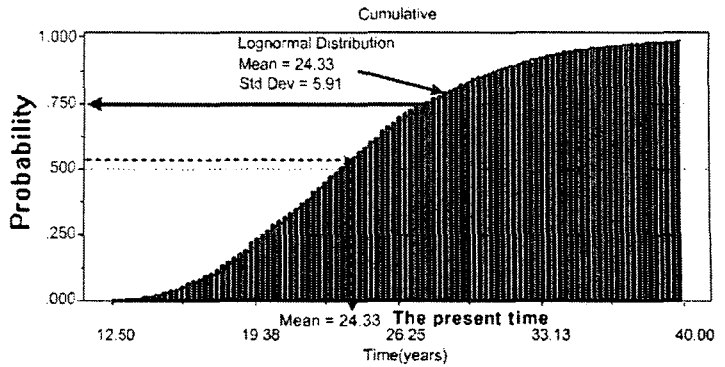


Figure 3 Cumulative PDF of the time to corrosion initiation

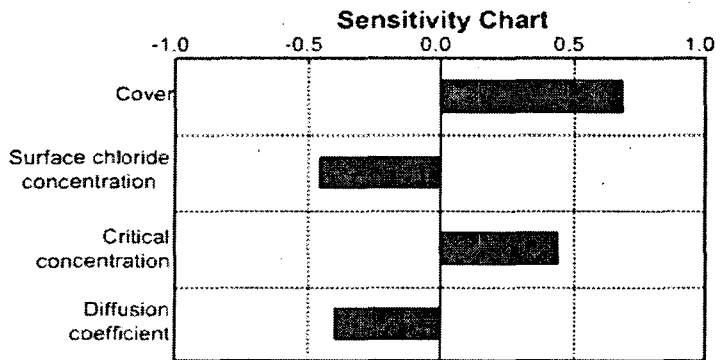


Figure 4 Sensitivity analysis of each variable on output variable