

철근의 부식 예측 모델에 관한 연구

Prediction Models for Corrosion of Reinforcing Bars

김도겸* 이종석** 고경택*** 이장화**** 송영철***** 조명석*****

Kim, Do Gyeum · Lee, Jong Suk · Koh, Kyung Taek · Lee, Jang Hwa · Song, Young Chul · Cho, Myung Sug

ABSTRACT

A reinforcement corrosion prediction model was proposed using the results from accelerated testing and mathematical equation from the Fick's 2nd law for chloride-induced corrosion of reinforcement in concrete. The input data included the chloride concentration, mix characteristics of concrete, and environmental conditions. This model can be used to predict the chloride concentration pertaining to corrosion time and loading age for marine concrete structures. This model can also be used to predict the service life.

1. 서론

철근 콘크리트구조물의 사용수명을 예측하는 방법으로는 경험에 의한 방법, 유사한 재료와의 성능 비교에 의한 방법, 촉진시험에 의한 방법, 추계학적인 방법 및 수학적 모델구성에 의한 방법이 있다.

콘크리트구조물의 사용수명을 예측하기 위해서는 위의 다섯가지 방법을 상황에 따라 적절히 조합하여 사용할 수 있으며, 그 중에서도 촉진시험 결과를 결합한 수학적 모델 구성에 의한 사용수명 예측방법이 가장 신뢰성이 있는 방법으로 평가되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 수학적 모델의 구성과 촉진시험결과와의 결합을 통하여 염화물 확산을 고려한 철근 부식 예측 모델을 구성하고자 한다.

2. 기존 예측 모델의 검토

콘크리트 중 염화물의 확산 또는 염화물에 의한 철근의 부식에 관련된 예측모델은 크게 경험적 모델(empirical model)과 수학적 모델(mathematical model)로 나눌 수 있다. 경험적 모델은 결정론적 모델(deterministic model)이라고도 불리는 것으로 실험실 실험결과와 현장에서의 측정 자료에 근거하여 경험적인 관계로부터 구조물의 사용수명을 예측하는 것이다. 또한, 수학적 모델은 열화에 관계된 인자를 수학적으로 표현하여 구조물의 사용수명을 예측하는 방법이다.

2.1 경험적 모델

이 모델은 구조물의 열화 손상을 예측하기 위해 결정론적 모델을 사용하는데 Stratfull, Clear, Cady와 Weyers, Vesikari 및 Liu 등의 연구자들은 콘크리트의 배합 및 사용 환경을 매개변수로 하여 경험

* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원

**** 정회원, 전력연구원 원자력연구실 책임연구원

***** 정회원, 전력연구원 원자력연구실 선임연구원

식을 구성하였다. 이러한 경험식들은 현장실험과 실험실실험의 결과로부터 분석된 계수를 사용하여 하나 또는 몇 개의 조합공식을 구성하는 전형적인 결정론적 모델로서 콘크리트의 품질이 균일하고 사용 환경이 일정하다는 가정 하에 이루어진 것으로 자료를 수집하는 방법과 자료의 요구조건에 대한 명확한 정의가 이루어지지 못하고 있고 제한된 경험을 바탕으로 하고 있기 때문에 정확성 및 신뢰성이 의문시된다. 따라서 경험적 모델의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 다양한 사용환경에 대한 분석과 함께 촉진실험(손상가속실험)을 통한 정량적인 자료의 확보를 통하여 콘크리트의 특성과 사용환경과의 상관관계를 명확히 규명하여야 한다.

2.2 수학적 예측 모델

수학적 모델식은 Fick의 제2법칙(Fick's 2nd law)과 질량보존법칙에 근거한 거시적 관점에서의 확산이론을 적용하여 모델화하는 방법과 Nernst-Plank 방정식 및 Nerst-Einstein 방정식과 같은 전기화학적 기초방정식에 근거하여 모델화하는 방법으로 구분할 수 있는데, 첫 번째의 접근방법은 지배미분방정식(governing differential equation)에 포함되어 있는 모든 매개변수(媒介變數)를 거시적(巨視的) 관점에서 효과적으로 적용하기 위해 각 매개변수의 평균값을 적용하므로 이에 따라 많은 경험적 매개변수들이 직관(直觀)적으로 도입되었기 때문에 도출된 모델은 개개 확산 메카니즘의 과정을 명확하게 설명하지 못하는 단점을 지니고 있다. 두 번째의 접근방법은 반대로 미시적 구조에 기초하여 모델을 구성하였기 때문에 골재의 효과와 시멘트 페이스트의 공극구조를 포함한 콘크리트의 내부구조의 영향을 적절히 반영하지 못하는 단점을 지니고 있다. 어떤 경우에도 어느것이 지배방정식을 공식화 하기 위하여 사용되었다 할 지라도 방정식에서 물질 매개변수를 어떻게 결정하는가가 매우 중요하며, 이것에 대하여 현재에도 연구가 진행중이다.

3. 수명저하 예측 모델 구성

3.1 철근 부식 예측 모델의 구성

계절에 따라 온도가 변화하지만 이러한 변화까지 열화기법에서 모사할 수는 없으므로 시간의 항을 t_y 로 표현하여 일정하다고 보면, $A_d = k_d \cdot t_y^n$, $\log A_d = \log K_d + n \log t_y$ 로 표현할 수 있다. 여기서, A_d 는 시간에 따른 열화량, t_y 는 재령(year), n 은 상수를 나타낸다. n 값은 열화 메카니즘에 따라 달라지며, 염해와 같이 확산이 열화를 지배하는 경우에는 1/2, 동결융해와 같이 반응이 열화를 지배하는 과정일 경우에는 1이 된다. 또한, 황산염 침해와 같이 열화 메카니즘이 반응과 확산에 의해 지배된다면, n 값은 1/2~1의 값이 된다. 따라서, 염화물 확산의 기초 방정식은 $A_d = k_d \cdot \sqrt{t_y}$ 로 정의할 수 있다.

3.2 철근부식 예측 모델의 구성

3.2.1 해양 구조물의 침적 또는 비탈대지역

염화물 확산을 경계조건이 변화하지 않는 평형상태(steady-state condition)로서 가정하면 Fick의 제1법칙(Fick's first law)에 의해 설명할 수 있으며, 확산셀 시험으로부터 염화물 확산계수를 구할 수 있다. 이 방법은 배합특성에 따라 확산계수가 명확히 차이가 나므로 배합특성별 상대비교에 도움을 주며 실험방법이 복잡하지 않아 실험오차가 크게 발생하지 않는 장점을 지니고 있으나, 평형상태 조건을 가정하므로 실제 환경과 차이가 있고 콘크리트에 대한 적용은 불가능한 단점을 지니고 있다.

부분적으로 포화되어있는 구조물의 경우와 같이 콘크리트가 경계조건이 변화하는 불안정상태(non-stationary condition)에 있고 콘크리트표면에 일정량의 염화물이 존재하고 있다고 가정하면, Fick의 제 2법칙으로부터 (식 1)을 유도할 수 있다.

$$C_{(x,t)} = C_o \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) \right] \quad (1)$$

3.2.2 해양 구조물의 비래 염화물 영향 지역

해양 구조물은 취수구를 제외하면 해풍 및 파랑 등에 의한 비래 염화물(飛來鹽化物)에 의한 영향을 받는 구조물로서 식(1)

$$C(x,t) = M \left[\sqrt{\frac{t}{\pi D_e}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4D_e t}\right) \right] \quad (2)$$

을 적용할 수 없으므로 비래 염화물에 따른 염화물 확산방정식으로 변환시켜야 한다. 지속적인 비래염화물에 노출되어 있는 구조물의 경우에는 매년 구조물에 접하는 비래 염분량이 일정하다고 가정하면 (식 2)와 같이 표현할 수 있다.

4. 축진시험

4.1 시험 개요

본 시험에 사용한 재료는 현재 해양 구조물의 건설에 사용중인 재료로 하였으며, 1종 및 5종 시멘트를 사용한 3종류 강도의 공시체를 제작하였다. 시험조건은 염수분무시험, 건습반복시험, 침적시험으로 하였다. 염수분무시험은 대기중의 비래염분이 콘크리트 중으로 침투되는 조건을 가정한 것으로 분무조건은 0.36ml/cm²/day로 하였으며, 2분 분무후 20분 건조 조건으로 하였다.

표 1 배합설계표

No.	w/c	s/a	물 (kg)	시멘트 (kg)	잔골재 (kg)	굵은골재 (kg)	WRA (ml)	AEA (ml)
S13	0.62	0.45	164.9	265.8	806.3	983.1	482	18
S14	0.48	0.46	178.0	370.8	773.1	892.9	505	9
S15	0.42	0.46	169.1	402.3	756.5	892.9	548	9
S53	0.62	0.45	164.9	265.8	806.3	983.1	482	18
S54	0.48	0.46	178.0	370.8	773.1	892.9	505	9
S55	0.42	0.46	169.1	402.3	756.5	892.9	548	9

건습반복시험은 해양환경에서 조석대와 비말대의 조건을 인위적으로 형성하고 콘크리트 구조물이 해수중에 침지 또는 건조되는 것과 같은 조건을 모사한 것으로 12시간 침적후 12시간 건조 조건으로 하였다. 해수중 침적시험은 해양 취수구조물의 하단부와 같은 조건을 모사한 것이다. 측정항목은 압축강도, 콘크리트 공극율 및 깊이별 염화물 함유량으로 하였으며, 시험방법은 KS 및 ASTM 방법을 준용하였고 염화물 함유량의 측정은 이온 전극법을 이용한 일본 K사 제품의 AG-100을 사용하였다.

4.2 시험결과

4.2.1 압축강도, 이론공극율 및 실험공극율

그림 1은 공시체에 대한 28일 평균 압축강도를 나타낸 것으로 표준양생 공시체의 28일강도는 설계강도의 1.17~1.26배로 나타났다. 또한, 그림 2에서 보는 바와 같이 실험공극율과 이론공극율은 직선적인 관계를 가지고 있었으며 실험공극율은 이론 공극율의 85%수준으로 나타났다.

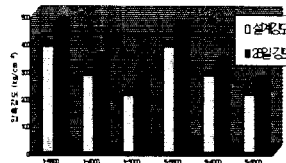


그림 1 압축강도

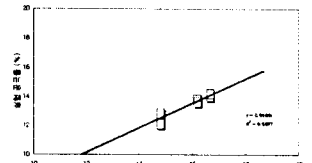


그림 2 공극율

4.2.2 깊이별 염화물 함유량 및 염화물 확산계수

염화물 확산계수는 Fick의 제 2 법칙에 따라 총 염화물량의 이동 비율로부터 계산되어야 하므로 본 연구에서는 Arya와 Newmann의 연구결과 및 Dhir의 연구결과로부터 도출된 식을 사용하여 가용성 염화물량을 총 염화물량으로 변환하여 염화물 확산계수를 도출하였으며, 공시체 종류별 평균 염화물 확산계수는 그림 3과 같다.

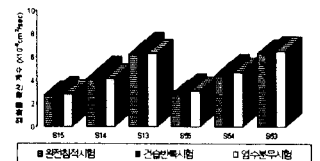


그림 3 염화물 확산계수

이를 분석하여 보면, 1종 시멘트를 사용한 경우가 5종 시멘트를 사용한 경우보다 다소 낮은 염화물 확산계수를 나타내었으며, 견습반복 촉진시험의 경우가 침적 촉진시험에 비하여 다소 높은 확산계수를 나타내었고 분무의 경우는 침적 촉진시험보다 다소 높은 확산계수값을 나타내었으나 견습반복 촉진시험에 비하여는 다소 낮은 확산계수값을 나타내었다.

4.2.3 철근 부식 시기의 예측

철근 부식 시기 예측에 사용된 염화물 확산계수는 4.2.2에서 분석된 촉진조건별 확산계수를 사용하였다. 또한, 해양 구조물의 비래 염화물 영향 지역은 일본에서 조사된 해안으로부터의 거리별 비래 염분량 분석결과를 회기분석한 식 $M = -8.6102 \cdot \ln(d) + 55.241$ 으로부터 해안으로부터의 거리를 20m로 가정한 후 해양구조물의 거리별 비래 염화물량을 추정하여 철근 부식 시기를 예측하였다. 예측된 철근 부식 시기는 침적구역의 경우 1.05~2.55년, 비말대의 경우 0.85~2.14년, 비래 염화물 영향 구역의 경우 25.63~55.52년으로 분석되었다.

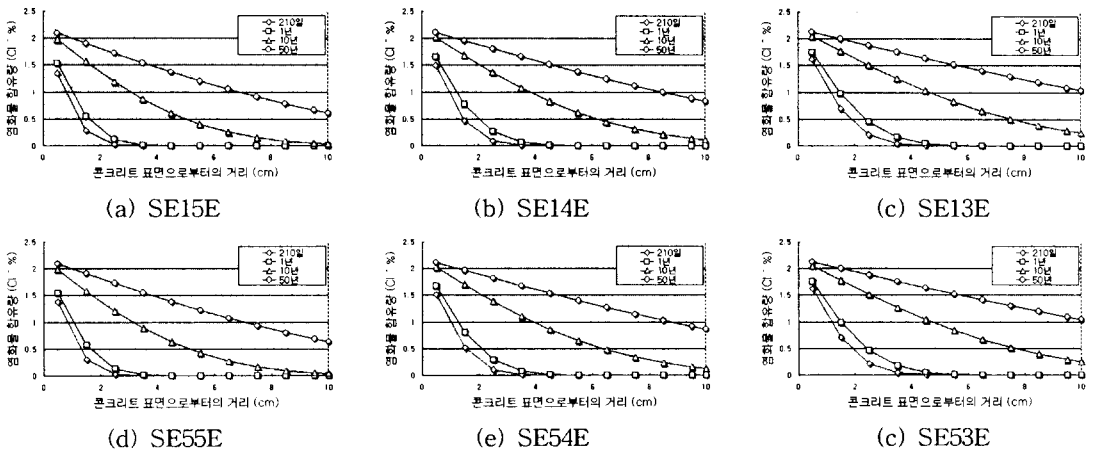


그림 4. 염화물 확산 및 철근 부식시기 예측

5. 결론

본 연구는 Fick의 제2법칙으로부터 유도된 수학적 방정식과 촉진시험결과를 결합하여 해양 구조물의 사용환경에 적합한 철근부식시기예측 모델을 구성하기 위한 연구로서 철근부식시기 예측모델의 주요 변수를 염화물의 농도, 콘크리트의 배합특성, 물리적 특성 및 사용환경으로 하여, Fick의 제2법칙으로부터 유도된 수학적 방정식과 촉진시험결과가 결합된 예측모델을 구성하였으며, 촉진시험을 통하여 얻은 환경조건별 염화물 확산계수로부터 철근의 부식시기를 예측하였다. 본 예측 모델은 해안 구조물의 철근의 부식시기 및 재령에 따른 염화물 응집량을 예측하는데 사용되며, 해안구조물의 사용수명예측에 유용한 자료를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. James R. Clifton, "Methods for predicting remaining life of concrete in structures," James Clifton, James Pommersheim, NISTIR 4954, 1993
2. Anna V. Saetta, Roberto V. Scotta, and Renato V. Vitaliani, "Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete," ACI Materials Journal, pp.441~451, Sep.-Oct. 1993