

염해에 노출된 콘크리트 구조물의 내구성 설계

Durability Design for RC Structures Subjected to Chloride Attack

장승엽 Seung-Yup Jang
한국철도기술연구원
고속철도인터페이스연구실
책임연구원

이재훈 Lee, Jae-Hoon
영남대학교
건설시스템공학과
교수

이광명 Kwang-Myoung Lee
성균관대학교
건축토목학부 교수

권성준 Seung-Jun Kwon
한남대학교
건설시스템공학과 교수

1. 머리말

콘크리트는 건설재료 중 가장 경제적이며, 내구성이 우수한 재료로서 건축 및 토목용 철근 콘크리트 구조물에 널리 사용되고 있다. 그러나 사용재료의 품질저하, 시공 결함, 가혹한 환경조건에 따라 미관의 손실, 내구성능 등 사용성능의 저하를 보이며, 최종적으로는 구조물의 안전성에 영향을 준다. 환경조건에 따라 사용성능이 저하하는 것을 열화(Deterioration)로 정의하며, 그 중 염해는 철근부식에 가장 민감하고 빠르게 작용하여 주된 열화원인으로 고려된다.

2000년대에 접어들면서 시방 규정형 설계에서 성능 평가형 설계로 설계 개념이 바뀜에 따라 콘크리트 내구성 설계 역시 정량적인 성능규정 설계방법으로 변화하고 있다. 이는 구조물 목표 수명 동안 성능을 유지하고 허용 열화 상태를 넘지 않도록 콘크리트 배합조정과 구조물 설계를 포함하고 있다. 또한 내구성에 대한 공학적, 사회적 중요성은 높아져 가고 있으며, 해저터널 및 장대교량과 같이 100년 이상의 목표수명을 요구하는 구조물 종류 및 수요가 증가하고 있다. 본 고에서는 염해에 저항하기 위한 콘크리트 구조물의 내구성 설계를 시대 흐름에 맞도록 기술하였으며, 그 발전방향을 모색하고자 한다.

2. 시대에 따른 염해 내구성 설계

2.1 사양설계(Design Based on Specification)

일반적으로 염해가 많이 발생하는 해양 콘크리트 구조물은 해중, 해상 대기 중, 물보라 지역, 간만대 지역 등 몇 가지 분류로 노출환경이 분류되고 구조물의 중요도, 배합특성, 피복두께에 따라 설계내구수명과 염화물 침투 거동이 변하게 된다. 그러나 1990년 이전까지만 하더라도 내구성의 중요성이 크게 인식되지 못하였으며, 주된 설계는 최소 물-결합재비, 피복두께 최소값 등으로 사양(Specification)에 의존한 설계가 지배적이었다. 즉, 적절한 안전성 설계에 국한된 설계방식이며, 정해진 규격만 만족하게 되면 크게 문제가 되지 않는 수준이었다. 그러나 혼화재료의 사용과 구조물의 중요도 등에 대한 차별성이 대두되면서 내구성 설계는 크게 발전하였는데, 이는 1990년대 후반부터 주로 진행되던 결정론적 설계방식이다. <그림 1>에서는 CEB-FIP model 및 EURO code에서 제시하고 있는 내구성 설계 개념을 나타내고 있다. 내구성 설계에서는 주로 개념적인 접근이 주를 이루었던 시기이다.

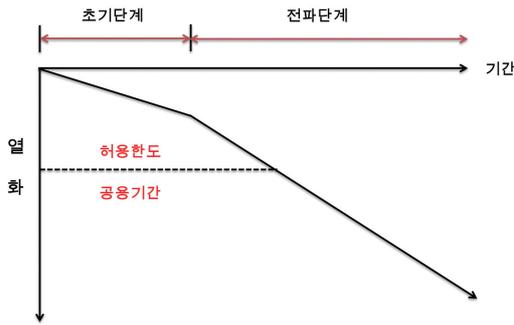


그림 1. CEB-FIP model code의 내구년한 설계개념¹⁾

2.2 결정론적 설계

(Design Based on Deterministic Method)

결정론적 설계는 목표 수명이 정해지고 그 기간 동안 성능을 유지할 수 있는 기법을 해석적으로 제시하는 것으로 목표 수명동안 철근 위치에서 유입된 염화물량이 부식을 야기하는 임계 염화물량보다 낮게 유지하는 방법이 대표적인 결정론적 설계 방법이다. 구조 안전성 설계와 마찬가지로 유입된 염화물량을 외력으로, 부식이 발생하는 임계 농도를 내력으로 정의하여 내력이 외력보다 크게 사용기간 동안 유지하도록 고려하는 설계기법이며, 1990년대 중반이후부터 설계에 도입되어 활용되고 있다.

현재 염화물의 침투속도를 평가하는 방법은 콘크리트 내에서의 염화물의 확산(Diffusion), 이송(Convection), 시멘트 수화물과의 결합(Binding) 등 다양한 메커니즘을 고려하는 엄밀 해석기법과^{2~4)} 실태조사 및 장기침지시험을 통하여 도출된 겉보기 확산계수를 이용하고 Fick's Law에 근거하여 평가하는 방법이 있다^{5,6)}. 엄밀해석기법은 자유 염소이온의 유입을 압력에 의한 침투와 농도차에 의한 확산으로 나타내고, 시스템 내의 자유 염화물 및 고정 염화물의 농도 평형을 고려하는 염소이온 구속관계식(Isotherm)을 이용하여 전 염화물량을 도출한다. 이러한 방법은 온도변화나 비말대 혹은 간만대와 같이 습도가 계속 변화하는 조건을 고려할 수 있고, 표면 염화물량의 변화도 고려할 수 있어 다양한 환경조건에 따른 염화물의 침투 속도를 예측하는 매우 정량적인 방법을 제공하고 있다. 또한 공극률의 변화와 같이 재령에 따른 콘크리트의 특성 변화를 같이 고려할 수 있다. 그러나 실무자들이 이용하기 어려우며, 수치해석의 오차를 많이

발생시키므로 적용 시 주의가 필요하다. 이러한 연구는 건전부 뿐만 아니라 균열부, 타설이음부 등과 같은 콘크리트 취약부에 유입되는 염화물량을 고려하여 다양한 연구로 진행되고 있다.

Fick's 2nd Law에 근거하여 겉보기 확산계수를 이용한 방법은 LIFE 365라는 대표적인 프로그램으로 많이 소개되고 있는데, 식 (1)을 이용하여 염화물 거동을 고려하고 있다.

$$C(x,t) = C_s [1 - \text{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D}t})] , \quad \bar{D} = D_{28} (\frac{t_{28}}{t})^m \quad (1)$$

여기서 C_s 는 표면염화물량, x 및 t 콘크리트 깊이 및 시간, erf 는 오차함수를 나타낸다. \bar{D} 는 시간의존적 확산계수이며, 재령 28일 확산계수(D_{28})과 기준 시간(t_{28})을 포함하고 있다.

현재 국내외의 시방서 수준은 사양설계에서 결정론적 설계방법으로 변화하는 추세이며, 외부환경을 세분화하여 시방서상에서의 최소한의 성능을 규제하는 형식을 사용하고 있다. <표 1>에서는 국내외의 시방서 및 설계기준에서 다루어지고 있는 염해에 대한 내구성 설계 방법을 요약하였다.

2.3 확률론적 설계

(Design Based on Probabilistic Method)

현재의 결정론적 설계방법에 근거한 내구성 설계기법은 물리적, 통계적, 해석모델, 결정론에 따르는 몇 가지 불확실성(Uncertainties)을 가지고 있다. 1990년대 후반부터 몇몇 연구자들을 통해 연구되어 온 확률론적 내구성 설계에서 주로 고려하고 있는 불확실성을 <표 2>와 같이 요약할 수 있다.

최근 이러한 확률론적인 내구성설계기법은 COWI사의 DuraCrete의 프로젝트로 많이 소개되었는데, 국내의 거가대교는 최초로 확률론적 내구성 설계가 도입된 대형구조물이다.

확률론적인 방법은 주로 MCS(Monte Carlo Simulation)를 이용하여 확률변수들에 대한 변동성을 고려한다. <그림 2>에서는 확률론적인 설계방법의 개요도를 나타내었는데, 열화외력(s_t)은 시간에 따라 증가하는 유입된 염화물량으로 하고, 저항내력(R_t)은 부식이 발생하는

표 1. 국내의 현 수준의 사양설계

| 구분 | 노출등급 | 목표 수명 | 최소 피복두께 | 최소 강도 | 최대 W/B | 최소 단위 결합재량 | 결합재 | 기타 | | |
|--------------------------------|---|---|--|----------------|---|--|--|--|---|---------------|
| 국내 | 콘크리트구조기준 (2012) | C0: 건조(무시) C1: 수분노출/염화물x(보통) C2: 염화물에 직접노출(심함) | - | - | 21 MPa 21 MPa 35 MPa | - - 0.4 | - | C2에 대해서만 | | |
| | 도로교설계기준 (2012) | 해수의 염화물에 의한 부식 ES1: 해상대기중 ES2: 해중 ES3: 간만대혹은비말대 염화물에 의한 부식 ED1: 보통습도 ED2: 습윤 ED3: 주기적인습윤/건조 | 50년 | 35 40 45 | 노출등급에 따른 최소 콘크리트 강도 | - | - | - | - | |
| | 항만 및 어항설계기준 (2014) | - | - | - | 철근콘크리트 35 MPa 무근콘크리트 30 MPa | - | - | - | - | |
| | 콘크리트표준 사양서(2009) | 해중 해상대기중 물보라지역, 간만대 지역 | [부록 II] 콘크리트 내구성평가 30 / 65 / 100년 | - | - | 현장시공 / 공장생산 (품질보증) 0.5 / 0.5 0.45 / 0.5 0.4 / 0.45 | 굵은 골재 최대치수 및 노출등급에 따른 단위시멘트량 | - | - | |
| | 도로교표준 사양서 (2013) | 해중 해상대기중 물보라지역, 간만대 지역 | 30 / 65 / 100년 | - | - | 현장시공 / 공장생산 (품질보증) 0.5 / 0.5 0.45 / 0.5 0.4 / 0.45 | 굵은 골재 최대치수 및 노출등급에 따른 단위시멘트량 | - | - | |
| | 항만 및 어항공사 전문사양서 (2014) | 해중 해상대기중 물보라지역, 간만대 지역 | - | - | - | 현장시공/공장생산 (품질보증) 0.5 / 0.5 0.45 / 0.5 0.4 / 0.45 | 굵은 골재 최대치수 및 노출등급에 따른 단위시멘트량 | - | - | |
| 국외 | ACI 318-11 (2011) | C0: 건조/방수상태 C1: 수분노출/염화물x C2: 염화물노출 | - | - | 17 MPa(2,500 psi) 17 MPa(2,500 psi) 35 MPa(5,000 psi) | - - 0.4 | - | - | - | |
| | ACI 301M-10 (2010) | C0: 건조/방수상태 C1: 수분노출/염화물x C2: 염화물노출 | - | - | RC / PSC - - 35 MPa / 35 MPa | RC / PSC - - 0.4 / 0.4 | - | - | - | |
| | BS 6349-1:2013 | XS1: 비래염분에 노출 XS2: 해중 XS3: 간만대/비말대 XD1, 2, 3 | 30년 / 50년 / 100년 | o | o | o | o | 혼화재 조합별 | - | |
| | BS 8500-1:2006 | XD(3) & XS(3) | 50년 / 100년 | o | o | o | o | 혼화재 조합별 | - | |
| | BS 206-1(2013) -Annex F | 해수외의 염분에 의한 XD1: 보통습도 XD2: 습윤(드물게 건조) XD3: 반복적인 건습 해수에 의한 XS1: 비래염분에 노출 XS2: 해중 XS3: 간만대/비말대 | - | - | - | C30 / 37 C30 / 37 C35 / 45 C30 / 37 C35 / 45 C35 / 45 | 0.55 0.55 0.45 0.50 0.45 0.45 | 300 300 320 300 320 340 | - | 기본적인 요구사항만 기술 |
| | 일본콘크리트 표준사양서 (설계편)(2007)-Part 3 Durability design | 비말대 해안으로부터의 거리 (해안가, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0 km) | 20년 / 30년 50년 / 100년 | - | - | - | - | - | - | 확산계수 직접 제시 |
| 일본콘크리트 표준사양서 (재료 및 시공편) (2007) | 해상대기중 물보라지역 수중 | - | - | - | 현장시공 / 공장생산 (품질보증) 0.45 / 0.5 0.45 / 0.45 0.5 / 0.5 | 굵은 골재 최대치수 및 노출등급에 따른 단위 시멘트량 | - | - | | |

표 2. 내구성 설계에 대한 불확실성⁷⁾

| 불확실성 유형 | 한계 |
|----------|---|
| 물리적 불확실성 | 기본 변수들의 본질적인 무작위성 - 콘크리트 피복 두께 - 외부 염화물 농도 - 콘크리트 품질(염화물 이온 확산계수) - 국부적인 조건(균열, 이음) |
| 통계적 불확실성 | 확률 밀도 함수에 대한 가정 - 제한된 표본 크기 |
| 모델의 불확실성 | 염화물 침투에 대한 지배 메커니즘 - Fick의 제2법칙의 단순화된 방정식 - 수화물성의 가정(CSH, Ca(OH) ₂) - 비상관 변수의 가정 |
| 결정의 불확실성 | 내구성 파괴 기준의 정의 - 염화물 침투깊이가 피복두께를 초과하는 기간 |

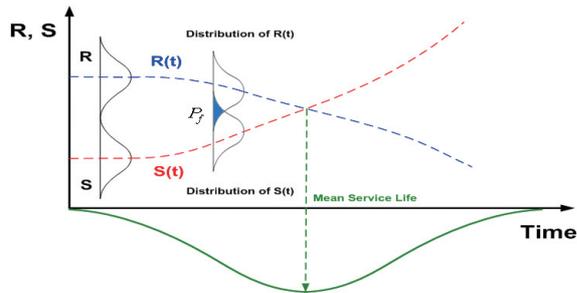


그림 2. Concept of Probabilistic Method for Durability Design⁸⁾

임계염화물량으로 설정한다. 식 (2)는 식 (1)의 지배방정식을 고려한 확률론적 설계의 지배방정식을 나타낸다.

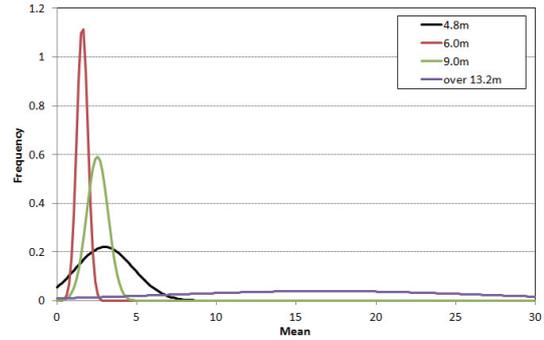
$$P \left\{ C_r(\mu, \sigma) < C_s(\mu, \sigma) \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x(\mu, \sigma)}{D(\mu, \sigma)t} \right) \right] \right\} < P_{\max} \quad (2)$$

여기서, $C_r(\mu, \sigma)$ 는 임계부식량의 확률변수이며, P_{\max} 는 목표 수명동안 내구성을 유지할 확률의 최대값(내구성 파괴확률)이다. 일반적으로 식 (2)와 같은 염화물 거동의 확률변수에서는 확산계수, 피복두께, 표면염화물량에 대한 확률변동성이 고려된다.

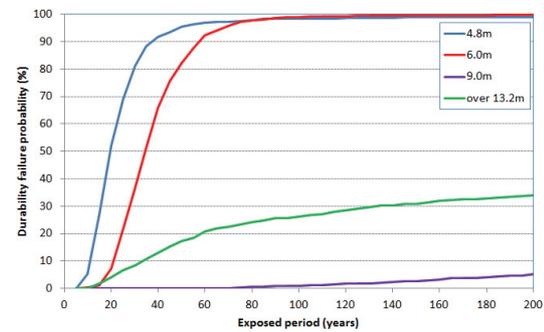
이처럼 실태조사 및 장기침지 실험결과를 통해 도출된 확산계수의 분포와 확률론적인 해석결과를 예로 <그림 3>에 나타내었다.

3. 맺음말

본고에서는 사양설계, 결정론적 설계, 확률론적인 설계의 개요와 흐름을 간략하게 요약하였다. 각각의 방법은 장점과 단점을 명확하게 가지고 있는데, 각 방법의



(a) 확산계수의 변동성



(b) 내구성 파괴확률의 평가

그림 3. 확산계수의 확률분포와 내구성 파괴확률의 변화

개선점은 <표 3>과 같이 정리할 수 있다.

현재 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 내구성에 대한 관심이 다시 재조명받고 있는데, 내구성 설계는 장

표 3. 결정론적 및 확률론적 내구성 설계의 공학적 제한성

| 결정론적 방법의 개선점 |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • 28일 재령에 대한 염화물 확산계수 정립 (보통포틀랜드 시멘트 및 혼화재료) • 보통 시멘트 및 혼화재료 사용에 따른 시간의존성 확산계수의 변화 • 배합특성(물-결합재비)에 따른 확산계수의 시간의존성 • 균열부 및 취약부의 염화물 확산성 변화 • 재령 및 양생조건을 고려한 변수 • 노출환경에 따른 외기 온도 및 습도 보정 계수 • 부식을 야기하는 임계 염화물량의 분석 • 배합특성 및 노출환경을 고려한 표면염화물량의 변화 • 외부의 노출환경(습도 및 온도)을 고려한 영향인자의 정량화 |
| 확률론적 방법의 개선점 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 국내수준을 고려한 피복두께의 확률 변동성(평균 및 표준편차) • 실제 시공된 상태를 고려한 염화물 확산계수의 확률 변동성(평균 및 표준편차) • 배합별 시간의존성을 고려한 변수의 확률 변동성(평균 및 표준편차) • 균열부 및 취약부의 국부적인 염화물 단면의 대규모 조사 • 각 재령에 따른 확산계수의 변동성(재령별 평균 및 표준편차) • 온도 및 습도, 시공성 등을 위한 확률 변동성 • 구조물 중요도를 고려한 목표내구성 확률 설정 |

수명화를 통한 친환경 및 저탄소 공학기술이기 때문이다. 또한 다공질 매체를 통과하는 물질이동특성, 염화물 이온의 물리-화학적 고착, 마이크로/마크로 셀을 통한 철근부식 등 다양한 공학 분야가 맞물려져 있다.

첨단기술, 미래기술 등이 앞으로도 많이 나오겠지만 어떤 기술이든지 내구성 기술을 포함하고 가야만 하는 기초기술이며, 모니터링 기법, 신소재 개발 등의 다른 학문과의 융합을 통하여 더욱 가치를 높일 수 있다. 콘크리트 구조물은 다른 산업과 다르게 모든 공학 분야가 집약되며, 후 세대에 자랑스럽게 물려줄 수 있는 건설문화자원임을 관계하는 모든 이가 인식해야 한다. 본고를 통하여 염해에 대한 내구성 설계에 산·학·연의 공학적 및 사회적 관심이 다시 집중되기를 희망한다. 

담당 편집위원 : 신명수(울산과학기술대학교) msshin@unist.ac.kr

참고문헌

1. CEB-FIP, Model Code for Service Life Design, The International Federation for Structural Concrete(*fib*), Task Group 5.6, 2006, pp. 16 ~ 33.
2. K. Maekawa, T. Ishida, T. Kishi, "Multi-Scale Modeling of Concrete Performance", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 2, 2003, pp. 91~ 126.
3. K. Maekawa, T. Ishida, T. Kishi, "Multi-Scale Modeling of Structural Concrete", Tylor&Francis, London and New York, 1st Edition, 2003, pp. 291 ~ 352.
4. H. W. Song, S. W. Pack, C. H. Lee, S. J. Kwon, Service Life prediction of Concrete Structures under Marine Environment Considering Coupled Deterioration", *Journal Restorat Build Monu*, Vol. 1, No. 2, 2006, pp. 265 ~ 284.
5. Thomas MDA, Bentz EC, life-365™ Service Life Prediction Model™ and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, SFA, 2002.
6. ACI Committee 201, Guide to Durable Concrete, Manual of Concrete Practice Part 1. Detroit USA: American Concrete Institute, 1994.
7. Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., Jung, S. H., "Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-aged Crack: Probabilistic Approach for Chloride Diffusion", *Structural Safety*, Vol. 31, No. 1, 2009, pp. 75 ~ 83.
8. DuraCreteFinalReport, DuraCrete Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, 2000.



장승엽 책임연구원은 2003년 서울대학교 토목공학과에서 콘크리트 내구성명 예측에 관한 연구로 박사학위를 취득하였고, 2003년부터 현재까지 한국철도기술연구원에서 콘크리트 슬래브케도를 비롯한 신형식 케도 관련 연구를 수행해 오고 있다.
syjang@krri.re.kr



이재훈 교수는 University of Wisconsin-Madison에서 철근콘크리트 장주설계를 주제로 박사학위를 취득하였고, 삼성건설 근무를 거쳐 1994년부터 영남대학교 교수로 재직하고 있다. 토목구조기술사, 미국 PE이며, 주 관심 연구 분야는 고강도 철근콘크리트구조, 내진설계, 프리캐스트 RC 및 PSC, FRP 합성구조 및 강-합성구조이다.
jh179@ynu.ac.kr



이광명 교수는 미국 MIT 토목환경 공학과에서 고강도 콘크리트의 파괴거동에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 1994년부터 성균관대학교 건축토목 공학부 교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 고성능 콘크리트, 내구성, 디지털 가상설계이며, 현재 우리 학회 부회장을 맡고 있다.
leekm79@skku.edu



권성준 교수는 연세대학교 토목 공학과에서 박사학위를 받은 후 미국 University of California, Irvine에서 연구원 과정을 마치고, 2011년부터 한남대학교 건설시스템 공학과 조교수로 재직하고 있다. 주된 연구분야는 공극구조 모델을 기반으로 한 염해 및 탄산화 해석, 투수성 해석, 확률론기반 내구성명 설계 등이며, 현재 우리 학회 학회 지면집위원회 간사로 활동하고 있다.
jjuni98@hnu.kr