

철근콘크리트 구조물의 염해에 의한 사용수명 예측에 관한 연구

김동백[†] · 권기준^{*} · 박병욱

환경대학교 토목공학과 · ^{*}환경대학교 안전공학과
(2005. 3. 23. 접수 / 2005. 6. 8. 채택)

A Study on the Service Life Prediction of Reinforced Concrete Structures with Chloride Penetration

Dong-Baek Kim[†] · Ki-Jun Kwon^{*} · Byung-Wook Park

Department of Civil Engineering, Hankyong National University
^{*}Department of Safety Engineering, Hankyong National University
(Received March 23, 2005 / Accepted June 8, 2005)

Abstract : Recently, the corrosion of reinforced concrete structures has received great attention related with the deterioration of sea-side structures, such as new airport, bridges, and nuclear power plants. In this regards, many studies have been done on the chloride attack in concrete structures. The purpose of the present study is to explore the influences of chloride attack parameters to service life of reinforced concrete structures and to propose the rational program for the guarantee of service life. For this purpose, several codes for durability design have been examined and the diffusion analysis based on Fick's second law has been performed with various parameter value. The present study indicates that durability design code of Japan Society of Civil Engineers is more rational than other codes but the application of durability design code of JSCE to domestic durability design needs more studies to the various parameter values related with chloride penetration.

Key Words : chloride attack, durability design, Fick's second law, diffusion

1. 서 론

현재까지 국내·외 설계기준에서 콘크리트구조물에 대한 내구성 확보방안은 내구성 설계과정을 구조 설계의 일부분으로 보고 콘크리트 품질확보를 위해 콘크리트 품질, 시멘트 종류, 단위 시멘트량, 물-시멘트 비, 양생, 피복두께 등을 제한하는 정성적인 방법을 사용하고 있는 실정이다. 그러나, 목표 사용수명 동안의 내구성을 구조설계와 같은 수준의 신뢰성을 가지고 보장하기 위해서는 콘크리트 구조물의 내구성을 저하시키는 유해물질의 침투, 운반 및 반응과정에 대한 합리적인 연구를 필요로 하게 된다. 이에 따라, 본 연구에서는 콘크리트 구조물에서 발생 가능한 여러 가지 성능저하 과정 중에서 염해와 관련한 내구성을 확보하기 위한

내구성 설계기법이 고려된 여러 나라의 설계기준을 검토하였다. 이들 설계기준 중에서 가장 합리적인 방안을 도출한 후 이를 Fick의 확산법칙에 기초한 시간에 따른 염소이온 확산해석 결과와 비교·검토하였다.

2. 각국의 내구성 설계기준 고찰

2.1. 일본의 내구성 설계기준

일본 토목학회 내구성 설계지침(본안)¹⁾

목표로 하는 내구년한 동안 콘크리트 구조물의 내구성을 보증하기 위하여 설계·시공·유지관리에 이르는 내구지수 T_p 를 정량화된 점수로 환산한 후 구조물에 대해 계산된 내구지수가 목표내구년한 동안 구조물에 작용하는 환경지수 S_p 보다 크도록 설계한다. 우리나라의 경우 서울시 지하철 건설본부에서 1999년 이를 도입하여 콘크리트 구조물의

[†] To whom correspondence should be addressed.
dbkim@hknu.ac.kr

내구성 확보를 위해 사용하고 있으며, 비교적 안전 측의 설계가 가능한 반면에 이론적인 뒷받침보다는 경험적인 결과에 의존하고 있는 단점이 있다.

$$T_p \geq S_p \quad (1)$$

일본 토목학회 내구성 설계지침(부록)¹⁾

콘크리트 구조물에 대한 내구설계를 본 지침과는 별도의 방법으로 구조물의 성능저하과정을 고려하여 염해 및 중성화에 대한 내구성 설계를 할 수 있는 방법으로 기본 및 표준사양을 검토하여 설계조건을 설정한 후 이에 따른 염해 및 중성화에 대한 설계내구년한(T_s)을 계산하여 T_s 가 목표내구년한(T_d) 이상이면 목표하는 내구년한 동안 구조물이 내구성을 유지하는 것으로 간주한다. 유해물질의 확산과정 및 부식과정을 고려한 방법으로 이론적인 원리에 충실하여 추후 연구결과의 반영이 쉽고 비교적 합리적인 결과를 도출할 수 있는 것으로 판단된다.

$$T_s \geq T_d \quad (2)$$

일본 콘크리트공학협회 내구성설계지침(안)²⁾

콘크리트 구조물의 목표내구년한 동안의 내구성 확보 여부를 균열폭, 시공조인트, 거푸집의 종류, 양생기간 등과 같은 기본적인 설계·시공 사항과 함께 중성화 및 염해의 정도를 고려하여 평가할 수 있는 방법으로 일본 토목학회의 부록에서 제시하는 방법과 이론적인 근거가 동일하다. 콘크리트 구조물의 내구성에 대한 검토는 기본 및 표준사양을 검토하여 설계조건을 설정한 후 열화깊이(C_{de})가 등가철근덮개(C)이하인지를 비교하여 수행한다.

$$C_{de} \leq C \quad (3)$$

2.2. 유럽의 내구성 설계방법

CEB-FIP model code 90 및 Euro code³⁾

CEB-FIP Code 90 및 Euro Code는 정량적으로 내구년한을 산출하여 목표내구년한을 보장하는 내구설계기법은 제시하고 있지 않으나, CEB-FIP Code 90의 경우에는 code에서 제시한 제반규정을 준수하여 설계할 경우 50년 이상의 내구년한을 확보할 수 있다고 제시하고 있다. 이들 설계기준에서 내구설계 과정은 구조설계의 일부분으로 다루고 있으며

구조물의 수명이 유지되는 동안 효용성을 크게 잃지 않는 범위에서 사용성, 강도, 안정성 등을 만족하도록 크게 다음과 같은 사항들에 대해 고려하도록 되어있다.

- ① 환경조건
- ② 콘크리트의 품질
- ③ 시멘트의 종류
- ④ 시멘트량
- ⑤ W/C비
- ⑥ 양생방법

영국기준(BS8110)의 내구성 설계 관련규정⁴⁾

내구성을 확보하기 위한 주요과정은 CEB-FIP와 유사하게 구조물의 환경조건에 따른 노출등급을 분류하고 이 노출등급에 따라 최소피복두께, 최대물/시멘트 비, 최소 시멘트량 및 콘크리트의 강도 등을 정하도록 되어있다.

CEB-FIP new approach⁵⁾

1997년 유럽의 CEB-FIP에서는 콘크리트 구조물의 명확하고 일반적인 내구설계 과정을 확립하기 위해 내구한계상태에 대한 정량화 및 확률론적인 접근방법을 통한 내구설계의 새로운 개념을 제시하였다. 일본의 토목학회(부록) 및 콘크리트 공학협회의 지침과 동일하게 유해물질의 확산과정에 근거한 방법이지만 명확한 설계기준을 제시하지 않고 사용수명 예측을 위한 합리적인 연구방향을 제시하고 있다.

3. 염해에 대한 내구수명 예측과정

3.1. 내구한계 기간에 기초한 내구성설계¹⁾

일본 토목학회에서 제시한 콘크리트 구조물의 내구한계 기간에 기초한 내구성 설계방안은 식 (2)에 제시한 바와 같이 염해 및 중성화에 대한 설계내구년한 T_s 가 목표내구년한 T_d 이상이면 목표하는 내구년한 동안 구조물이 내구성을 유지하는 것으로 간주하도록 되어있다. 구조물의 목표내구년한은 발주자가 해당 콘크리트 구조물의 중요도, 규모, 종류, 공용기간, 유지관리 Level, 경제성 등의 각종 요인을 고려하여 결정하도록되어 있다. 한편, 내구한계기간의 경우는 열화 예측 식에 따라 설정하는데 이는 구조물의 건설 후 한계상태에 이를 때까지의 기간이며 목표내구년한 중에 한계상태에 이르지 않도록 검토하여야 한다.

염해나 중성화가 지배적일 때 내구한계기간 T_s

는 구조물의 공용개시부터 강재부식에 따라 구조물에 부식에 따라 구조물에 손상이 발생할 때까지의 기간이라고 생각하는 것이 타당하며, 이 경우 내구기간의 한계는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$T_s = T_{ci} + T_{cc} \quad (4)$$

여기서, T_{ci} : 철근부식 개시까지의 기간
 T_{cc} : 유해균열 발생까지의 기간

철근부식이 발생할 때까지의 기간은 콘크리트의 중성화가 철근위치에 도달하기까지 콘크리트 내부에서 침투, 확산하는 염분이 철근위치에서 부식함 유량을 넘을 때까지의 기간으로 나타낸다.

$$T_{ci} = \frac{(C_c - \alpha_1)^2 \cdot Q_{ci}}{E_{ci}} + T_a \quad (5)$$

여기서, C_c : 등가 덮개(cm)
 Q_{ci} : 부식발생기간에 따른 콘크리트의 품질계수
 E_{ci} : 부식발생기간에 따른 환경계수
 T_a : 표면마감재의 내용기간
 α_1 : 초기 염화물 이온량에 따른 콘크리트 내부 pH 영향계수

강재에 부식이 발생한 후 부식 팽창압에 의한 콘크리트 균열이 발생하기까지의 기간인 T_{cc} 는 내부 강재의 부식속도와 이에 저항하는 인장응력에 대한 콘크리트의 저항성에 의해 결정된다.

$$T_{cc} = \frac{\alpha_{cc} \cdot C_c \cdot Q_{cc}}{E_{cc}} \quad (6)$$

여기서, α_{cc} : 덮개의 균열저항을 나타내는 계수
 Q_{cc} : 균열발생시간에 관련된 콘크리트의 품질계수
 E_{cc} : 균열발생시간에 따른 환경계수

3.2. 염소이온의 침투에 의한 철근부식 평가

일반적으로 외부염소이온의 침투는 다음과 같은 Fick의 1차원 확산법칙을 따르는 것으로 가정한다⁶⁾.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (7)$$

여기서, x 와 t 는 각각 확산거리(m), 확산시간(sec)을 의미하고, C 는 염소이온의 농도(kgf/m³ or %)이며, D 는 염소이온의 확산계수(diffusion coefficient, m²/sec)로 보통의 경우 상수로 가정한다.

Browne을 비롯한 많은 연구자들은 콘크리트 표면에 도입되는 염소이온의 농도와 염소이온의 확산계수가 시간에 대해 일정하다고 가정한 후 염소이온의 확산정도를 예측하였다. 이 경우 초기조건과 경계조건은 각각 다음과 같으며 이에 따른 1차원 확산방정식의 일반해는 식 (8)과 같이 주어진다⁷⁾.

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (8)$$

식 (8)에서 C_s , C_i 및 $C(x, t)$ 는 각각 시간 t 에서 콘크리트 표면의 염소이온 농도, 콘크리트 내부의 초기염소이온농도 및 시간 t , 거리 x 에서의 염소이온농도를 나타내며, erfc 는 $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$ 로 정의되는 “complementary error function”을 나타낸다.

4. 해석결과 및 검토

4.1. 내구한계 기간에 기초한 내구성 설계 예

본 연구에서는 한계기간에 기초한 내구성 설계 방안의 타당성을 검토하기 위해 3.1절에 제시된 방법을 사용하여 실제 교량 구조물의 내구성 해석을 수행하였으며 또한, 3.2절에 제시된 염소이온 침투 해석에 의한 평가를 병행하여 이들 결과와 비교·검토하였다. 본 내구성 해석에 사용된 교량 구조물의 기본 조건은 다음과 같다.

- 설계기준강도 : $f_{ck} = 300\text{kgf/cm}^2$
- 시멘트 종류 : 고로 슬래그 시멘트
- 물-시멘트비 : 0.4
- 단위수량 : 167kgf/m^3
- 초기염소이온량 : 0.3kgf/m^3
- 골재최대치수 : 25mm(보통골재)
- 연평균기온 : 14.7°C, 연평균 상대습도 : 65.2%
- 철근배치 : 단수 2단, 직경 D19, 간격 20cm

교량의 목표내구년한이 100년, 75년, 50년인 경우 각각의 피복두께를 4.2cm, 3.9cm, 3.5cm로 한 경우 내구성 해석 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Design of durability based on the limit of service life

목표내구년한 (T _d ,년)	피복두께 (cm)	내구한계 기간 (T _s ,년)	T _{ci} (년)	T _{cc} (년)	검토결과 (T _d ≤ T _s)
100	4.2	106.2	97.5	8.7	OK
75	3.9	79.8	72.7	7.1	OK
50	3.5	50.5	45.3	5.2	OK

Table 2. Surface chloride contents(kg/m³)

비탈대	해안선으로부터의 거리(km)				
	해안선	0.1	0.25	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

4.2. Fick의 확산방정식에 의한 해석결과

본 절에서는 Fick의 확산방정식의 해 식 (8)을 이용하여 염소이온 침투해석을 수행하였으며 이를 철근부식이 발생하는 임계농도와 비교하여 각각의 목표내구년한을 만족하기 위한 피복두께를 결정하였다. 이 경우 표면염소이온 농도와 염소이온 확산계수에 따라 결과에 많은 차이를 보이므로 일본 콘크리트 공학협회에서 제시한 값과 유럽에서 최근에 조사한 결과를 가지고 다양한 경우에 대한 분석을 실시하였다.

Case I. 일본 콘크리트공학협회에서 제시한 표면염소이온 농도 및 확산계수 사용⁹⁾

Table 2 및 식 (9)는 일본 콘크리트공학협회에서 제시한 해안으로부터의 거리에 따른 표면염소이온 농도 및 고로슬래그 시멘트를 사용한 경우 염소이온 확산계수 추정 식을 나타낸다. 이 경우 표면염소이온 농도는 대상구조물이 해안선으로부터 100~200m에 있으므로 3.0kg/m³을 사용하였으며, 염소이온 확산계수는 식 (9)로부터 계산된 값에 허용균열폭 이내의 균열이 예상되는 경우에 대한 규정을 적용하여 1.5를 곱한 1.09×10⁻¹²m²/s를 사용하였다.

$$\log D_p = [19.5(w/c)^2 - 13.8(w/c) - 5.74] + \log(3.15 \times 10^{-7}) \quad (9)$$

Fig. 1에는 일본 콘크리트공학협회에서 제시한 값을 사용한 경우 해석결과가 나타나있다. 이 경우 철근부식 임계농도를 콘크리트 중량의 0.07%로 하면 100년, 75년, 50년에 대해 철근부식이 발생하는 한계깊이가 각각 5.5cm, 4.8cm, 3.9cm로 나타나고

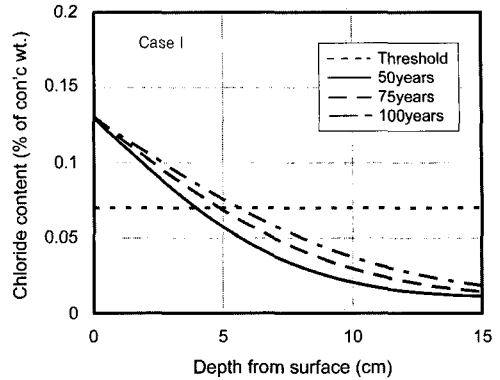


Fig. 1. Analysis results of case I

있으며, 임계농도를 일본 콘크리트공학협회 및 우리나라 콘크리트 표준시방서에서 제시하고 있는 1.2kg/m³(콘크리트 중량의 약 0.05%)로 할 경우에는 철근부식 한계깊이가 각각 8.0cm, 6.9cm, 5.7cm로 나타나고 있다.

Case II. Ferreira et al.의 조사결과 사용⁹⁾

최근 일본이외에 유럽 등지에서는 콘크리트 구조물의 내구성 설계를 위한 다양한 시도를 하고 있으며 이를 위해 기존 구조물의 염소이온 확산계수 및 표면염소이온 농도에 대해 조사도 활발히 수행되고 있다. 이들 중 Ferreira et al.(2004)은 해안으로부터 80~131m 떨어진 노르웨이의 8년 된 항구 구조물을 조사하여 결보기 확산계수 1.23~1.67×10⁻¹² m²/s, 표면염소이온농도 0.28~0.72%(콘크리트 중량 비)의 결과를 얻었다. 이에 따라 Fig. 2에는 염소이온 확산계수 1.23×10⁻¹²m²/s, 표면염소이온농도 0.28%를 사용한 경우의 염소이온 침투해석 결과가 나타나있다.

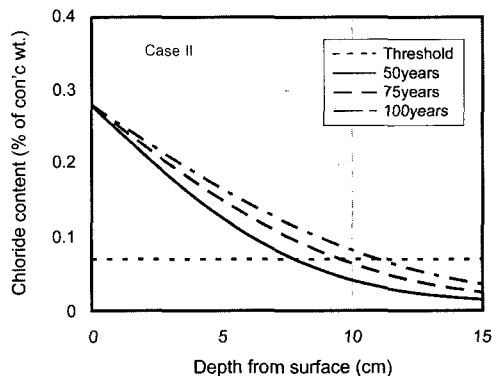


Fig. 2. Analysis results of case II

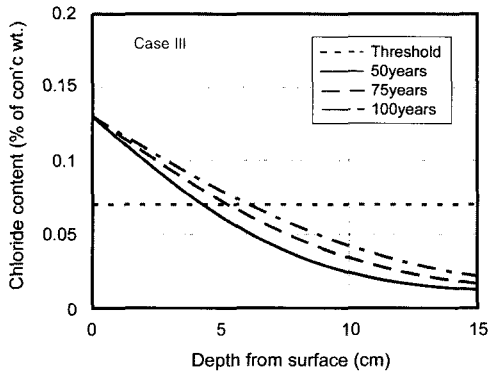


Fig. 3. Analysis results of case III

이 경우 철근부식 임계농도를 콘크리트 중량의 0.07%로 하면 100년, 75년, 50년에 대해 철근부식이 발생하는 한계깊이가 각각 11.0cm, 9.5cm, 7.7cm로 나타나고 있으며, 이것은 목표한 사용수명을 확보하기 위해 Table 1에 제시된 것에 비해 2배 이상의 피복두께가 필요함을 나타낸다.

Case III. 기타의 경우

case II의 경우 표면염소이온 농도를 측정된 구조물의 위치가 본 대상구조물에 비해 현저히 해안에 근접해 있으며, 이에 따라 표면염소이온 농도는 case I에서 사용한 콘크리트 중량비 0.13%(3.0kgf/m³)로 하고 염소이온 확산계수를 1.23×10⁻¹²m²/s로 하여 해석한 결과가 Fig. 3에 나타나있다. 이 경우 100년, 75년, 50년에 대해 철근부식깊이가 각각 6.0cm, 5.2cm, 4.2cm로 나타나 case II에 비해 요구되는 피복두께가 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 염해를 받는 철근콘크리트 구조물의 합리적인 사용수명 예측을 위해 다양한 내구성 설계방안을 비교·검토하였으며, Fick의 확산법칙을 이용하여 서로 다른 표면염소이온 농도 및 염소이온 확산계수 값에 따른 염소이온 프로파일 해석을 수행하였다.

1) 철근콘크리트 구조물의 내구성을 확보하기 위한 기존의 설계기준은 대부분 물/시멘트비 및 피복두께 등의 제한에 의해 정성적으로 수행되고 있으나, 일본 토목학회에서 제시하고 있는 내구한계 기간에 기초한 내구설계(안)는 Fick의 확산방정식

에 기초하여 정량적인 사용수명 확보기준을 제시하고 있다.

2) 일본 콘크리트 공학협회에서 제시하고 있는 표면염소이온 농도 및 염소이온 확산계수를 사용하여 염소이온 확산해석을 수행한 경우 내구한계 기간에 기초한 내구설계(안)에 의해 요구되는 피복두께보다 다소 크게 나타났다.

3) 최근 유럽에서 조사한 표면염소이온 농도 및 염소이온 확산계수를 사용하여 염소이온 확산해석을 수행한 경우 요구되는 피복두께가 더욱 크게 나타나고 있지만, 표면염소이온 농도를 해석대상구조물의 위치를 고려하여 보정할 경우 일본콘크리트 공학협회에서 제시한 값을 사용하는 경우와 유사한 결과를 나타낸다.

4) 검토결과 Fick의 확산방정식을 이용하여 직접적으로 염소이온 침투해석을 수행한 경우, 내구한계 기간에 기초한 내구성 설계(안)에 의해 요구되는 피복두께보다 다소 크게 나타난다. 이 경우 염소이온 확산계수, 표면염소이온 농도 및 염소이온 임계농도에 따라 사용수명을 확보하기 위해 요구되는 철근의 피복두께가 많은 차이를 보인다.

5) 국내 철근콘크리트 구조물의 염해에 대한 합리적인 사용수명 확보를 위해서는 국내에 있는 다양한 콘크리트 구조물에 대한 염소이온 확산계수 및 표면염소이온농도 자료를 축적·분석한 후 일본 토목학회에서 제시한 내구한계기간에 기초하여 합리적으로 수정한 내구성 설계방안을 제시하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

감사의 글 : 이 논문은 2004년도 환경대학교 건설공학연구소 연구장려금에 의해 연구되었음.

참고문헌

- 1) 콘크리트 구조물의 내구성 설계지침(案), 土木學會, 1995.
- 2) 鐵筋콘크리트 구조물의 내구성 설계에關する 考え方, 社團法人 日本콘크리트工學協會, 1991.5.
- 3) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, 1993.
- 4) Structural Use of Concrete, BS 8110, British Standards Institution, 1997.
- 5) New Approach to Durability Design, CEB Bulletin d'Information No238, 1997.

- 6) J. Kdroff, H. K. Hilsdorf, Performance Creteria for Concrete Durability, Rilem report 12, E & FN Spon, London, pp. 4~7, 1995.
- 7) J. R. Clifton, L. I. Knab, "Service life of concrete", NISTIR 89-4086, National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, pp. 29~47, 1989.
- 8) 日本コンクリート工學協會, 콘크리트構造物の構造・耐久設計境界問題研究委員會報告書, 1998.
- 9) M. Ferreira, V. Årskog, S. Jalali and O. E. GjØrv, "Probability-based Durability Analysis of Concrete Harbor Structures", CONSEC'04, 2004.