염해환경하의 철근콘크리트 교량 사용수명 예측에 관한 연구

김동백 · 권기준* · 정상화**
한경대학교 토목공학과 · *한경대학교 안전공학과 · **전주대학교 토목환경공학과

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 시멘트 량, 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 설계기법에 대한 검토를 통해 가장 합리적인 방안을 도출한 후 이를 국내 콘크리트 교량에 적용하여 도출된 내구성 설계기법을 검증하였다.

2. 각국의 내구성 설계기준 고찰

2.1 일본의 내구성 설계기준

2.1.1 일본 토목학회 내구성 설계지침(본안)[1]

목표로 하는 내구년한 동안 콘크리트 구조물의 내구성을 보증하기 위하여 설계·시공·유지관리에 이르는 내구지수 T_p를 정량화된 점수로 환산한 후 구조물에 대해 계산된 내구지수가 목표내구년한 동안 구조물에 작용하는 환경지수 S_p보다 크도록 설계한다. 우리나라의 경우 서울시 지하철 건설본부에서 1999년 이를 도입하여 콘크리트 구조물의 내구성 확보를 위해 사용하고 있으며, 비교적 안전 측의 설계가 가능한 반면에 이론적인 뒷받침보다는 경험적인 결과에 의존하고 있는 단점이 있다.

$$T_p \geq S_p \tag{1}$$

2.2.2 토목학회 내구성 설계지침(부록)[1]

콘크리트 구조물에 대한 내구설계를 본 지침과는 별도의 방법으로 구조물의 성능저

하과정을 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_s가 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.

$$T_s \geqq T_d \tag{2}$$

2.2.3 콘크리트공학협회 내구성설계지침(안)[2]

콘크리트 구조물의 목표내구년한 동안의 내구성확보 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.

$$C_{de} \leqq C \tag{3}$$

2.3 유럽의 내구성 설계방법

2.3.1 CEB-FIP model code 90 및 Euro code[3]

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

2.3.2 영국기준(BS8110)의 내구성 설계 관련규정[4]

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

2.3.3 CEB-FIP New Approach97[5]

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 내구성 설계방법[1]

일본 토목학회에서 제시한 콘크리트 구조물의 내구한계 기간에 기초한 내구성 설계방안은 식(2)에 제시한 바와 같이 염해 및 중성화에 대한 설계내구년한 T_s가 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_s는 구조물의 공용개시부터 강재부식에 따라 구조물에 부식에 따라 구조물에 손상이 발생할 때까지의 기간이라고 생각하는 것이 타당하며, 이 경우 내구기간의 한계는 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$T_s = T_{ci} + T_{cc} \tag{4}$$

여기서, T_{ci} : 공용개시부터 철근이 부식되기까지의 기간

T_{cc} : 철근부식에서 콘크리트에 유해한 균열이 발생하기까지의 기간

철근부식이 발생할 때까지의 기간은 콘크리트의 중성화가 철근위치에 도달하기까지 콘크리트 내부에서 침수, 확산하는 염분이 철근위치에서 부식함유량을 넘을 때까지의 기간으로 나타낸다.

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

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 내부강재의 부식속도와 이에 저항하는 인장응력에 대한 콘크리트의 저항성에 의해 결정된다.

$$T_{cc} = \frac{\alpha_{cc} \cdot C_c \cdot Q_{cc}}{E_{cc}} \tag{6}$$

여기서 α_{cc} : 덮개의 균열에 대한 저항을 나타내는 계수

Q_{cc} : 균열발생시간에 관련된 콘크리트의 품질계수

E_{cc} : 균열발생시간에 관련된 콘크리트의 환경계수

3.2 염소이온의 침투에 의한 철근 부식의 평가

일반적으로 외부염소이온의 침투는 다음과 같은 Fick의 1차원 확산법칙을 따르는 것으로 가정한다.[6]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{7}$$

여기서, x와 t는 각각 확산거리(m), 확산시간(sec)을 의미하고, C는 염소이온의 농도(kg/m^3 or %)이며, D는 염소이온의 확산계수(diffusion coefficient, m^2/sec)로 보통의 경우 상수로 가정한다.

한편 식(7)에 의해 외부 염소이온이 침투하는 경우 시간의 경과에 따라 철근위치에서의 염소이온 농도가 임계농도에 다다를 경우 철근 부식이 일어나게 된다. 그러므로, 본 논문에서는 염소이온에 의한 철근부식이 일어나는 임계농도를 $1.2kg/m^3$로 가정한 후 유한요소 해석방법에 의해 Fick의 확산방정식을 계산하여 철근의 부식과정을 평가하였다.

4. 해석결과

본 연구에서는 한계기간에 기초한 내구성 설계방안의 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} = 300kgf/cm^2

시멘트 종류 : 고로 슬래그 시멘트

물-시멘트비 : 0.4

단위수량 : 167kg/m^3

초기염소이온량 : 0.3kg/m^3

골재종류 및 최대치수 : 보통골재 사용, G_{max} = 25mm

연평균기온 : 14.7℃, 연평균 상대습도 : 65.2%

철근배치 상세 : 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 표 1과 같다.

표 1. 내구한계 기간에 기초한 내구성 설계 결과

목표내구년한 (T_d,년)	피복두께 (cm)	내구한계기간 (T_s년)	T_{ci} (년)	T_{cc} (년)	검토결과 ($T_d \leq T_s$)
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

한편, 그림 1은 3.2절에 제시한 방법에 의한 철근부식 개시시점 분석결과이며 이로부터 100년, 75년, 50년인 경우 각각 4.7cm, 4.0cm, 3.3cm 깊이에서 철근이 부식되기 시작하는 것으로 나타났다.

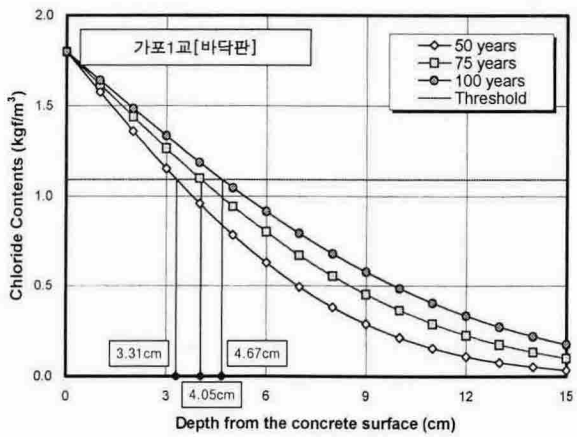

그림 1 염소이온의 침투에 의한 철근부식의 평가

5. 결 론

본 연구에서는 일본 토목학회에서 제시한 내구한계기간에 기초한 철근콘크리트 구조물의 내구성 설계방안을 국내 콘크리트 교량에 적용한 후 Fick의 확산법칙에 근거한 염소이온 확산해석 결과와 비교하여 내구성 설계기법의 합리성을 검토하였다. 주어진 환경조건에 따라 목표내구년한을 100년, 75년, 50년으로 한 경우 내구성 설계방안에 따라 필요한 콘크리트 피복두께는 각각 4.2cm, 3.9cm, 3.5cm로 나타났으며, 염소이온 임계농도를 1.2kgf/m^3로 가정한 후 염소이온 확산해석을 통해 임계농도를 구한 결과는 각각 4.7cm, 4.0cm, 3.3cm로 나타났다. 그 결과 내구한계기간에 기초한 철근콘크리트 구조물의 내구성 설계방안을 통해 염해를 받는 철근콘크리트 구조물의 내구수명을 합리적으로 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. コンクリート構造物の耐久設計指針(案), 土木學會, 1995.
2. 鐵筋コンクリート構造物の耐久性設計に關する考え方, 社團法人 日本コンクリート工學協會, 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 Bullitin d'Information No238, 1997.
6. J. Kdroff, H. K. Hilsdorf, Performance Creteria for Concrete Durability,Rilem report 12, E & FN Spon, London, 1995, pp.4~7