

鐵筋콘크리트 構造物の 耐久性 設計手法에 관한 文獻的 研究

Literature Study on the Durability Design Method of Reinforced Concrete Structure

신 성 우* 이 한 승**
Shin, Sung Woo Lee, Han Seung

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the durability design method of reinforced concrete structure in order to establish a rationally combined design system of structural and durability design, that is to say performance-based design. In literature study, the integrated design of concrete structure studied JCI committee is very intensive durability design method for reinforced concrete structure. Specially, B root durability design method for selection of verification level is very effective method in the view of modeling of materials and structural properties to analyze safety and serviceability of RC structures.

1. 서 론

최근, 철근콘크리트조(이하 RC라 함) 구조물의 내구성 저하에 따른 보수·보강이 주요한 사회적 문제로 대두되고 있어, RC 구조물의 내구성을 확보하기 위한 체계적인 시스템의 개발이 요구되고 있다. 이러한 추세에 따라 RC 구조물의 설계에 있어서는 안전성능과 사용성능을 확보하기 위한 「구조설계」와 콘크리트 및 철근의 장기 품질확보를 위한 「내구설계」를 합리적으로 통합하여 설계하려는 시도가 이루어지고 있다¹⁾. 이 중, 구조설계는 구조재료가 소정의 성능을 가지고 있다는 전제하에 거의 체계적으로 확립되어 있으나 내구설계는 재료의 내구성능에 관한 수많은 데이터가 있음에도 불구하고 설계 전체에서의 위치가 명확하지 않고 연구성과가 설계레벨까지 일반화되어 있지 않은 실정이다. 특히, 국내에서는 내구설계에 관한 개념이 일반화되어 있지 못한 실정으로 귀중한 RC 구조물의 내구성에 관한 연구들이 사장되고 있어 이를 체계적으로 분류하고 시스템화하여 내구설계에 반영하는 기법의 개발이 요구되고 있다. 또한, 최근의 건축물 설계기법이 시방규준에서 성능규정으로 전환하는 세계적인 추세에 비추어 건축물의 요구성능에 대응한 내구설계 수법의 확립이 절실히 요청되고 있다.

본 연구에서는 구조설계 및 내구설계의 통합 및 성능규정에 대응한 RC 구조물의 내구설계 수법 확립을 목적으로, 현재까지 발표되어 있는 내구설계 기법을 문헌적으로 조사하고 각각의 특징을 고찰하여 국내실정에 적합한 내구설계기법의 개발 및 실용화를 위한 기초자료 수집하고자 한다.

2. RC 구조물의 내구성 설계와 허용 열화한도

RC 구조물의 내구성 설계, 잔존수명 예측 및 예방보전 등의 기술을 개발하기 위해서는 먼

* 성희원 한양대학교 공학대학 건축공학과 교수

** 성희원, 한양대학교 초대형 구조물 시스템 연구 센터 연구 조교수

저, 허용 열화한도를 설정 할 필요가 있다. RC 구조물은 여러 가지 원인에 의해 열화되며 열화가 허용할 수 없는 정도에 도달한 시점이 허용 열화한도 또는 수명이 된다. 수명은 그림 1과 같이 열화원인에 따른 열화곡선과 열화한도의 교점에서 정해지며 수명의 예측 혹은 수명설계를 실시할 때에는 대상구조물의 열화속도와 허용할 수 있는 열화한도의 양자를 정량적으로 설정하는 것이 가장 중요하다. 열화속도는, 콘크리트 강도, 탄성계수, 철근부식량 등의 특성치의 경시적 변화를 명확히 하는 연구로서 비교적 많은 검토가 되어 왔으나, 열화의 한도에 관한 연구는 극히 적고 이것이 수명예측 또는 수명설계의 발달을 저해하고 있다. 일반적으로 철근 콘크리트의 수명 또는 허용 열화한도는 철근부식 발생의 관점에서 허용열화한도를 중성화가 철근까지 도달한 시점으로 하는 중성화 수명설, 부식발생 염분량이 철근위치까지 도달한 시점으로 하는 염분 도달 수명설, 철근 부식에 의해 콘크리트 표면에 균열이 발생한 시점으로 하는 균열발생 수명설, 철근부식정도에 의한 구조내력 저하를 고려한 물리적 수명설이 있다. 이중 중성화 수명설 및 염분도달 수명설은 철근의 부식발생조건 성립을 근거로한 수명설로서 구조내력이 주요한 요구성능인 구조물에서 이시점을 수명으로 하는 것은 수명을 과소평가 하는 것이다. 한편, 균열 발생 수명설은 철근부식속도의 급격한 증가 및 녹의 유출로 인하여 미관의 손상, 콘크리트의 박리·박락으로 인한 인적사고의 위험성에서 합리적인 수명이라고 판단된다. 그러나, 균열이 발생되어도 구조물의 내력은 저하하지 않는다는 연구도 발표되어 있고, 구조설계 및 내구성 설계를 통합하려는 통합설계기법을 도입하기 위해서는 구조내력에 대한 철근 부식정도의 열화한도에 관한 연구가 선행되어야 하므로 앞으로는 구조내력에 대한 열화한도의 규명이 중요하다. 그림2와 같이 森永는 철근의 부식정도를 고려한 구조부재의 수명 예측 모델을 제안하고 있으며, 구조성능의 열화한도가 정해지면 교점 ③에서 철근성능의 허용열화도를 알 수 있고 교점 ②로부터 철근부식의 허용한도가 결정되어 교점 ①로부터 수명 L이 산정된다. 이와같이, 내구성 설계 혹은 수명산정을 위해서는 허용 열화한도의 산정, 각종 열화원인에 의한 열화속도 곡선의 모델화가 중요한 과제라 하겠다.

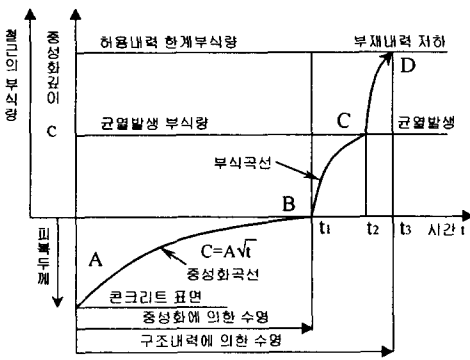


그림 1 열화요인에 따른 열화곡선

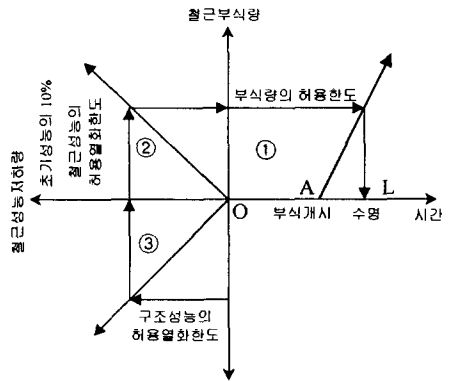


그림 2 철근 콘크리트 부재의 수명 예측 모델²⁾

3. 철근콘크리트조 건축물의 내구성 설계수법

RC 구조물의 규정은 크게 성능규정과 시방규정으로 나눌 수가 있다. 현재까지 여러 가지 재료규정은 시방규정이 주류를 이루었지만 기술의 진보를 구속하는 점, 설계·시공자와 시공주사이의 인식에 차이가 발생하기 쉽고 건축규제의 조화가 이루어지지 않는 등의 문제점에서, 재료분야의 건축기준의 성능규정화가 요구되고 있다. 구조물의 내구성은 최종적으로는 “몇년의 공용기간이 보증된다.”, “몇년 후에 어느 정도의 품질을 유지할 수 있다.” 라는 요구성능은 명확히 되어 있지만, 사용목적이

나 외적환경에 깊이 관련되어 있어 시방규정은 곤란하며 시방 규정화 한 경우 세분화되어 필요 없는 것이 많이 발생되리라고 생각된다. 따라서, 내구성 면에서도 규제의 성능규정화가 필요하며, 이러한 관점에서 기존의 내구성 설계수법을 정리하면 다음과 같다.

3.1 건축물의 내구성 향상기술 개발

본 지침에서의 내구성 설계란 설계열화내력에 대하여 계획내용년수의 기간내에는 허용열화상태를 넘지 않도록 하는 것을 목표로 하며, 가능한 열화현상이 발생하지 않도록 설계·시공하나, 어느 정도의 열화현상은 허용하고, 계획적인 지식관리에 의하여 내용년수의 저하가 없도록 설계하는 방법을 취하고 있다. 또한, 표 1과 같이 구조물의 종류(통상, 고내구성), 환경조건, 내용년수구분, 계획내용년수, 설계열화외력, 지역구분의 조합의 4단계로 시방표준의 적용을 설정하는 시방규정형의 설계법이다.

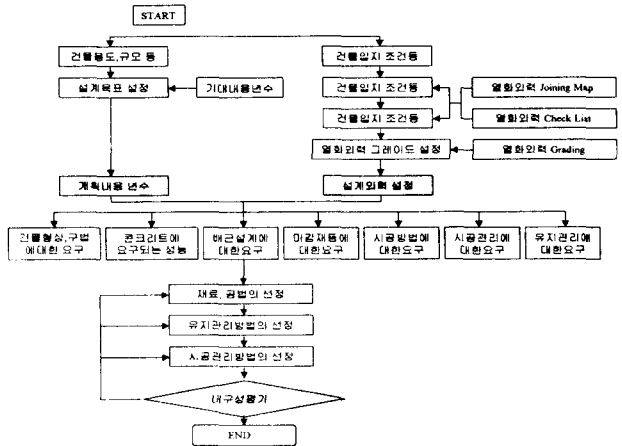


그림 3 내구성 설계의 개념³⁾

표 1 계획내용년수 및 설계열화외력·지역구분에 대응한 시방의 적용

설계·시공사양표준	내용년수	계획내용년수	설계열화외력·지역구분		
			중성화	동해지역 구분	염해지역구분
일반환경하 통상의 RC조	II 급	65년	일반대기중	동해위험도 0 ~ 2	일반환경
일반환경하 고내구 RC조	I 급	100년	일반대기중	동해위험도 0 ~ 2	일반환경
동해위험지역의 RC조	II 급	65년	일반대기중	동해위험도	일반환경
	I 급	100년		3 ~ 5	
염해위험지역의 RC조 건	III 급	30년	일반대기중	동해위험도 0 ~ 2	중염해지역
	II 급	65년			염해지역
	I 급	100년			중염해지역

3.2 콘크리트의 강도를 중심으로한 내구성 설계수법⁴⁾

본 내구성 설계수법은 1997년에 개정된 JASS 5에 나타나 있으며 내구성상 요구되는 콘크리트의 강도를 높여 내구 설계기준강도로 지정한 것으로 내용은 다음과 같다.

① 종래의 방법

구조설계 → 설계기준강도(F_c) → 조합강도(F) → 발주(호칭강도 F_n)
 내구성 → 물시멘트비(W/C) → 발주(W/C 또는 F_n)

② 개정된 방법

구조설계 → 설계기준강도(F_c)
 ----- 조합강도(F) → 발주 (호칭강도 F_n)
 내구설계 → 내구설계기준강도(F_d) -----

③ 콘크리트의 내구설계기준강도는 구조물 또는 부재의 계획공용기간의 급에 대응하여 특기에 의한 다. 특기가 없는 경우는 표 2에 의한다.

④ 콘크리트의 품질기준강도는, 식 (1) 및 식 (2)의해 산정된 값중, 큰 값으로 한다.

$$F_c = F_c + \Delta F \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad \text{----- (1)}$$

$$F_q = F_d + \Delta F \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad \text{----- (2)}$$

여기서, F_q :콘크리트의 품질기준강도, F_c :설계기준강도, F_d :내구설계기준강도
 ΔF :구조체 콘크리트의 강도와 공시체의 강도차를 고려한 할증으로 3N/mm^2

표 2 콘크리트의 내구설계 기준강도

계획 공용기간의 등급	내구 설계기준강도 (N/mm ²)
일반 (대규모 보수불요기간 30년, 공용한계기간 65년)	18
표준 (대규모 보수불요기간 65년, 공용한계기간 100년)	24
장기 (대규모 보수불요기간 100년)	36

3.3. 피복두께 제어 중심 내구성 설계수법

신규 RC조 건축물이 그 계획내용기간 동안 내구성을 확보하는 것을 검토하는 방법으로 열화 현상중 중성화 및 염해로부터 철근부식이 발생하기 까지를 고려한 것이다. 내구설계의 골격은 피복두께의 결정방법으로서 등가피복두께($C = C_o - C_e + C_a$, C_o :설계피복두께, C_e :시공오차 수정치, C_a :표면가마재 가산치)와 열화깊이($C_{de} = (AE/Q\sqrt{t}, A$:계수중성화0.4, 염해1.3, E:환경계수로 열화축진, Q:품질계수로 열화를 늦추는 피복콘크리트의 품질계수, t:설계내용기간)를 산정하여 C_{de} 가 C이하 인 것을 확인하는 방법으로 설계를 실시하는 것이다.

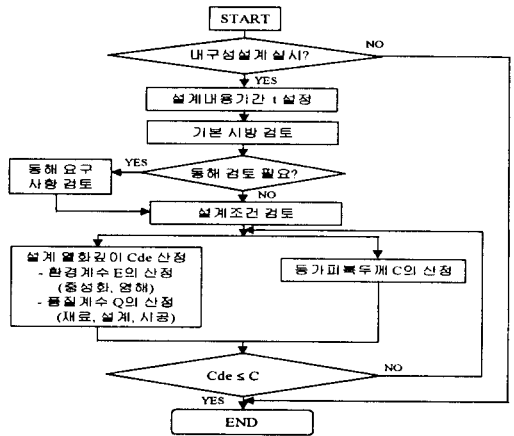


그림 4 내구설계의 흐름도⁵⁾

3.4 포인트를 사용한 내구성 설계수법⁶⁾

시공, 설계, 재료 등, 건축물이 실제로 준공되기까지 생각할 수 있는 모든 Factor를 통일적으로 포인트로 산정하며, 기본 설계내용년수를 50년으로 하고 있다. 또한, 환경조건을 일반환경, 한냉지환경, 해양환경으로 나누고 있으며, 주요 내용은 다음과 같다.

① 내구성 판정방침 : 부재각부의 내구성은 내구지수 T_p 와 환경지수 S_p 를 정의하여 ($T_p \geq S_p$) 식으로 판정하며 모든 부재가 다음식을 만족하면 구조물은 내구적이라고 판단한다.

② 환경지수 S_p : 구조물이 놓여있는 환경조건 및 요구되는 Maintenance Free 기간을 고려하여 정해지는 지수, $S_p = S_o + \sum(\Delta S_p)$, S_o 는 표준적인 환경에서 50년간 Maintenance Free인 경우 100임, 100년 경우 $S_o=150$, ΔS_p 는 염분, 동해작용 심한 환경조건 염해 심각(10~70), 동해심각(10~50)

③ 내구지수 T_p : 설계작업, 부재의 형상, 보강재의 종류, 보강재의 상세, 설계도, 설계균열, 특수한 형래, 포면보호공사, 콘크리트 재료품질, 콘크리트품질, 콘크리트공사원, 철근공, 거푸집공, 지보공 등을 고려하여 산정하고, $T_p \cdot (I, J)$ 는 구조물의 내구성에 관한 요인의 영향을 정량적으로 평가한 내구성 포

인트로서, $T_p = 30 + \sum T_p \cdot (I, J)$ 로 나타낸다 (예: 콘크리트공사(주입기술자:20~-5, 반입:5~-5, 운반 타설:20~-45, 표면마감양생:5~-40).

3.5 Australian Standard의 내구설계 방법

구조물의 공용기간은 40~60년으로 하고 설계자는 공용기간을 설정할 수 없으며, 정해진 환경조건 등급에 따라 목표공용기간을 유지하기 위한 시방규정이다. 시방규정으로서, 콘크리트 품질, 양생조건, 피복두께를 규정하고, 특수 열화 외력으로는 마모를 받는 부재, 동결융해를 고려하는 부재를 설정하고 있으며, 그림 5에 내구설계 흐름도를 나타낸다.

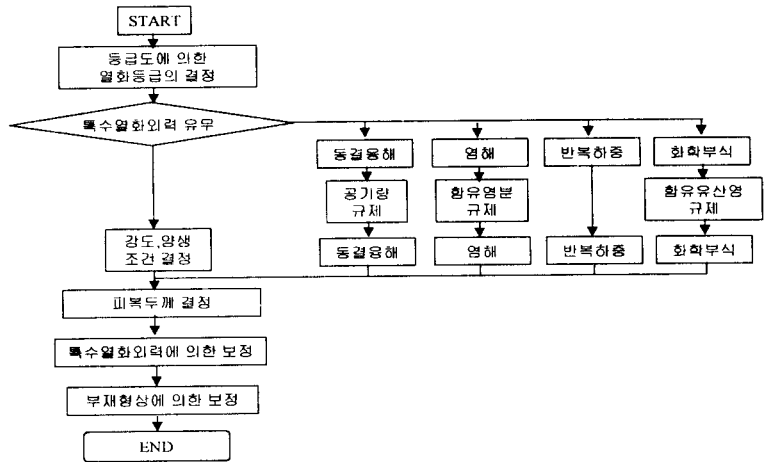


그림 5 Australian Standard 내구설계의 흐름도⁷⁾

3.6 Rilem Report 14의 내구설계 방법⁸⁾

부재의 수명예측 및 건축물의 수명예측을 확률론적으로 취급한 것으로 열화고장을 표현하는 기본 수확모델은 {열화고장}=(R < S)으로 나타내고 콘크리트 구조물의 외적 열화요인인 부하변수 S와 열화에 대응하는 저항성을 나타내는 저항변수 R의 대소관계를 비교하여, 부하변수 S가 저항변수 R보다 크게되면 열화고장이 발생하는 것으로 표현하고 열화고장의 확률을 Pf도 하여 식(3)과 같이 표현한다.

$$Pf = P(R < S), Pf: \text{열화고장이 일어날 확률}, R: \text{저항변수}, S: \text{부하변수} \quad (3)$$

4. 철근 콘크리트 구조물의 구조설계와 내구설계의 통합설계 방법¹⁾

1996년 일본 콘크리트 공학협회의 연구위원회 [콘크리트 구조물의 구조·내구설계 경계문제 연구위원회]의 연구성과물로서 구조·내구성을 통합한 평가기술을 3수준으로 나누어 각각 설정 가능한 내구성의 규정방법에 대하여 검토를 하였다.

- ① 내구성능 1, 2 : 공용기간중 안전성, 사용성, 미관이 열화하지 않는 것이 요구되는 레벨
(예: 철근부식이 전혀 일어나지 않는 상태) - 평가기술 A루트로도 가능
- ② 내구성능 3 : 설계단계에서 보수보강이 불가피한 레벨 - 평가기술 B루트가 바람직 함.

평가기술 중 B루트는 정교한 해석모델(예를 들면 유한요소 해석의 적용)을 사용하여 micro적으로 판정하는 수법으로서 가장 이상적이며 미래지향적인 방법이다. 즉, 임의의 환경작용과 역학적인 하중작용 아래에서, 구조물의 변위, 변형, 내력, 구성재료의 거시적인 기계적 손상(균열, 항복 등), 구성재료의

조직구조(수화반응, 부식정도, 탄산화 정도, 공극률 등), 각종 물질의 이동(염분, 산소, 수분 등) 등을 산정하는 것이 가능하다면 실험실실험을 실시한 것과 같은 정보를 얻는 것이 가능할 것으로 판단된다. 평가기술 A루트는 B루트와 같은 정교한 해석모델을 사용하지 않고 macro적으로 판정하는 수법으로 위에서 살펴본 내구성 설계 및 평가방법에 의하여 가능하며, 이 중에서 A1루트는 기존의 구조설계방법만을 이용한 수법이고, A2루트는 내구성설계를 고려한 방법이다.

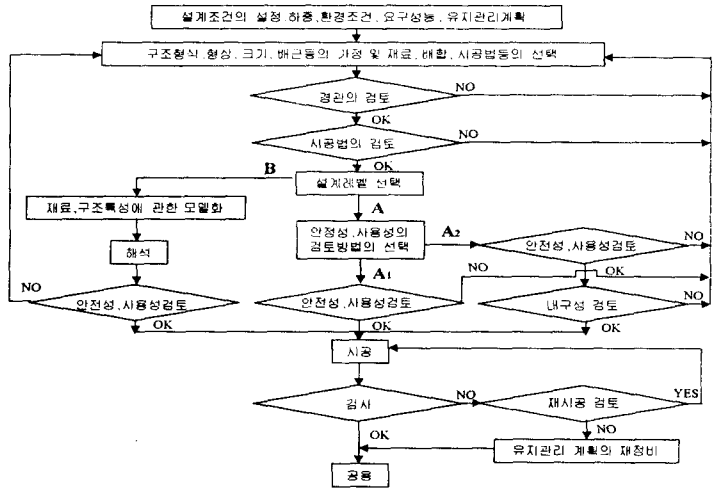


그림 6 구조·내구성설계 통합 설계법의 전체 흐름도⁹⁾

표 3 각종 내구성 설계수법의 비교 (△ : 보통, ○ : 적합, ◎ : 최 적합)

항목	명칭	주요내용	판정수법	적용가능성
3.1절	일본 건설성 Project	열화 grading에 의함	계획내용년수 > 설계열화외력	△
3.2절	일본 개정 JASS 5	콘크리트 강도 증가로 내구성 향상	$F_q = F_d + \Delta F (N/mm^2)$	○
3.3절	일본 JCI 91	等價 피복두께를 중심으로 제어	$C > C_{de}$	○
3.4절	일본 토목학회	조합,시공,환경조건을 Point제로산정	$T_p \geq S_p$	△
3.5절	Australian Standard	환경조건 grading과 압축강도 상관	환경조건→강도→피복두께산정	△
3.6절	RILEM	확률개념으로 신뢰성 설계수법 도입	$P_f = P\{R < S\}$	△
4장	일본 JCI 98	구조설계와 내구성설계의 통합시도	구조설계 ↔ 내구성 설계	◎

5. 결 론

최근, 철근콘크리트 구조물에 있어서 구조설계 및 내구성설계의 통합 및 성능규정에 대응한 RC 구조물의 내구성설계 수법의 확립이 내구성에 관련한 주요한 연구과제로 대두되고 있으며, 문헌조사 결과 기존의 내구성설계수법은 개념적인 것으로 실용화에는 이르고 있지 못하나, 최근의 일본 콘크리트 공학협회의 구조설계와 내구성설계의 통합시도는 국내에서도 연구에 박차를 가해야 할 부분이며, 특히, 방대한 내구성자료를 시스템적으로 정리하고, 열화원인에 대응한 재료 및 부재의 열화모델을 도입하여 해석하는 B 루트법이 신뢰성과 함께 실제 적용성이 많은 유효한 내구성설계기법이라고 생각된다.

참고문헌

- 1.日本コンクリート工學協會, “콘크리트 構造物의 構造·耐久設計境界問題研究委員會報告書”, 1998.7
- 2.森永 外2人, “鐵筋콘크리트 構造物의 劣化限度와 壽命豫測에 關する 研究”, 清水建設技術研究所, 1993.5
- 3.建設省, “建築物의 耐久性向上技術의 開發”, 建設省綜合技術開發 프로젝트, 1985.3
- 4.日本建築學會, “建築工事標準仕様書·同解説 JASS 5”, 1997.1
- 5.日本コンクリート工學協會, “콘크리트 構造物의 壽命豫測의 耐久性設計에 關する 技術의 現狀”, 1988.4
- 6.日本土木學會, “콘크리트 構造物의 耐久設計指針(案)”, 콘크리트 라이브러리-82, 1995.11
- 7.Australian Standard, “鐵筋콘크리트 造建築物의 耐久設計·施工基準에 關する 研究”, 東京大學, 1998.3
- 8.Durability Design of Concrete Structures, RILEM REPORT 14, 1996
- 9.Japan Concrete Institute, Integrated Design of Concrete Structures, 1998.7