

鐵筋콘크리트구조물의 耐久性設計와 殘存壽命豫測

Design for Durability and Prediction of Remaining Lifetime of Reinforced Concrete Structures

윤 재 환*

1. 서 론

철근콘크리트구조물의 내구성을 저해하는 요인으로서 콘크리트의 중성화에 의한 철근의 부식이 가장 중요한 항목이라 할 수 있다. 최근의 건설 붐과 관련된 부실시공 및 불량자재사용, 설계의 잘못등으로 60년 이상의 내구수명을 가진 철근콘크리트구조물이 불과 10~20년만에 콘크리트의 열화로 인하여 재건축을 해야한다는가 사용중 많은 하자보수관리가 들어가시는 안될 것이다. 구조물의 잔존수명을 예측하는 수법은 확립되어 있지않고 아직 연구단계이지만 여기에서는 I, IJUMI(和泉)등에 의해 제안된 手法를 소개하기로 한다.

2. 기본개념

콘크리트의 중성화는 일반환경에서도 틀림없이 진행된다. 이때문에 콘크리트중에 존재하는 철근은 언젠가는 반드시 부식하게 된다. 이 방법은 콘크리트구조물이 특수한 환경에 처해있거나 특수한 방법으로 제조된 경우를 제외한 일반적인 콘크리트구조물에 적용할 수 있다.

본 수법의 기본적인 개념은 실제의 경년열화건축물에 있어서 콘크리트의 중성화깊이, 철근의 부

식상황 및 피복두께의 실제조사결과를 근거로 한 것으로써 신뢰성공학의 개념에 입각하여 철근콘크리트건축물에 있어서 철근부식에 의한 피해를 철근이 부식할 확률로써 정량적으로 정의하려고 한 것이다. 이 방법은 구체적으로 다음 사항을 기본으로 한다.

- ① 콘크리트의 중성화깊이는 시간의 경과에 따라 증대한다.
- ② 콘크리트의 중성화깊이 및 철근의 피복두께에는 편차가 존재한다.
- ③ 콘크리트중의 철근부식상황은 환경조건에 따라 다르나 콘크리트의 중성화깊이와 철근의 피복두께와의 상관관계에 의해 설정된다.

앞에서 철근의 부식확율이란 대상으로 하는 철근콘크리트부재중의 철근중 유해한 부식상태에 있는 철근의 확률로서 정의한다. 철근의 유해한 부식상태란 부식등급Ⅲ(단면결손이 육안관찰에서는 확인되지않으나, 철근의 둘레 또는 전 길이에 걸쳐 들뜬늪이 발생되어있다) 또는 Ⅳ(단면결손을 생기고있다)의 상태를 말한다. 예를들면 실외에 면하고있는 기둥의 띠철근의 전 길이를 L이라고하고 이 중에서 유해한 부식(부식등급 3 또는 4)을 발생한 부분의 길이를 Q 이라고하면 철근의 부식확율 P 는 $P=(Q/L)$ 이다.

* 정회원, 수원대학교 건축공학과 부교수

3. 철근의 부식 확률

어느 편차를 갖는 콘크리트의 중성화의 진행과 철근의 피복두께와의 관계를 개념적으로 그림 1에 나타낸다. 중성화깊이는 재령과 함께 커지며, 그 편차도 재령과 함께 커진다. 한편 철근의 피복두께는 재령과 관계없이 어느 편차를 가지고 존재한다. 그림 1에 나타낸 시간적인 진행에 따른 중성화깊이의 분포와 피복두께의 분포와의 관계를, 더 알기쉽게 하기위하여 1차원적으로 나타내면 그림 2와 같다. 횡축은 중성화깊이 및 철근의 피복두께를 나타내며 종축은 그들의 도수(frequency)를 나타내고 있다.

그림 2에서 중성화깊이는 좌측에서 우측으로 갈수록, 즉 시간이 경과할수록 평균값이 커지며 또한 편차도 증대하며, 어느 시점에서 중성화깊이의 분포와 피복두께의 분포가 일부 겹치게된다. 이것은 중성화깊이가 철근 피복두께에 도달한 철근이 어떤 확률로써 존재한다는 것을 나타내고 있다.

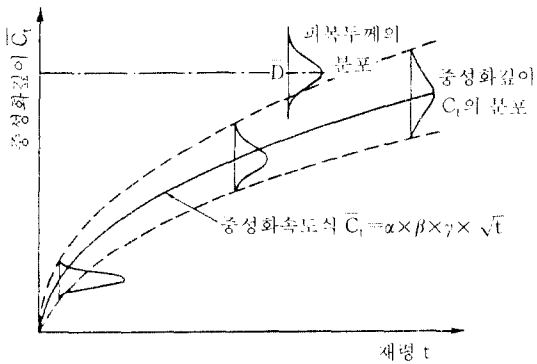


그림 1 중성화의 진행과 철근의 피복두께

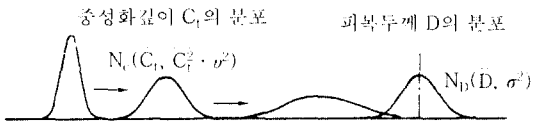


그림 2 중성화깊이의 분포와 철근의 피복두께와의 관계

철근이 부식할 확률을 구하려면 중성화의 진행의 편차의 분포, 철근의 피복두께의 분포 및 철근부식을 정량적으로 구할 필요가 있다. 여기에서는 和泉 등이 실시한 기존건축물에 있어서 중성화깊이 및 철근부식의 실태조사결과를 근거로 하여 다음에 나타내는 항목을 入力 조건으로 한다.

- ① 중성화깊이의 평균치 \bar{C}_t 는 $\bar{C}_t = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \sqrt{t}$ 로써 표현할 수 있다. 여기에서 α : 환경조건에 의한 계수, β : 마감재에 의한 억제계수, γ : 콘크리트의 품질계수
- ② 중성화깊이 값은 정규분포하며, 변동계수 ν 는 재령과 관계없이 일정하다.
- ③ 철근의 피복두께 값은 정규분포한다.
- ④ 비, 바람에 노출되는 실외면의 콘크리트중의 철근은, 중성화영역이 철근표면에 도달하면 동시에 유해한 부식상태가 되며 실내면의 콘크리트중의 철근은 중성화영역이 철근의 피복두께를 20mm 통과한 시점에서 유해한 부식상태가 된다.

여기에서 재령 t에 있어서 중성화깊이의 분포 $f(C_t)$ 를, 평균값이 \bar{C}_t 이고, 표준편차가 $\bar{C}_t \nu$ 인 정규분포 $N_c(\bar{C}_t, \bar{C}_t^2 \nu^2)$ 으로 하고, 철근피복두께의 분포 $f(D)$ 를 평균값이 \bar{D} 이고, 표준편차가 σ 인 정규분포 $N_D(\bar{D}, \sigma^2)$ 로 한다. 철근의 피복두께와 중성화깊이와의 차의 분포 $f(D - C_t)$ 는 $(\bar{D} - \bar{C}_t)$ 를 평균값으로 하고 $\sqrt{\bar{C}_t^2 \nu^2 + \sigma^2}$ 을 표준편차로 하는 정규분포 $N_{D-C}(\bar{D} - \bar{C}_t, \bar{C}_t^2 \nu^2 + \sigma^2)$ 이 되며, 다음과 같이 표시된다(그림 3 참조).

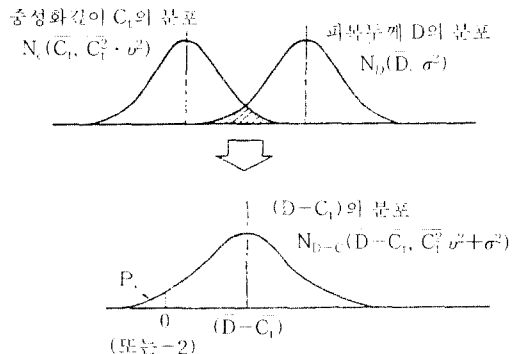


그림 3 철근의 피복두께와 중성화깊이와의 차의 분포

$$f(D-C_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\bar{C}_t^2 v^2 + \sigma^2)}} \exp\left[-\frac{[D-C_t] - (\bar{D} - \bar{C}_t)]^2}{2(\bar{C}_t^2 v^2 + \sigma^2)}\right] \quad (1)$$

따라서 재령 t에 있어서 철근의 부식확률 P는 상기의 입력조건 4에 의해, 그림 3에 나타낸 정규분포 N_{D-C} 의 0mm이하(실외) 또는 -20mm이하(실내)의 면적으로 다음식으로 나타낸다.

$$P_1 = \int_{-\infty}^0 f(D-C_t) d(D-C_t) \quad (2)$$

(실외면으로 비, 바람에 노출되는 경우)

$$P_2 = \int_{-x}^{-2} f(D-C_t) d(D-C_t) \quad (3)$$

(실내면인 경우)

가 되며, 이것에 \bar{C}_t , v , \bar{D} , σ 을 대입함으로써 철근의 부식확률 P를 정량적으로 구할 수 있다.

산정예

실태조사에 근거하여 다음과 같이 入力조건을 설정한다.

- 1) $\alpha=1.0$ (실외면으로 비, 바람에 노출되는 경우), $\alpha=1.7$ (실내면인 경우)
- 2) $\beta=1.0$ (마감재가 없는 경우), $\beta<1.0$ (마감재가 있는 경우, 통기성이 작은 마감재일수록 β 는 작다)
- 3) γ 는 岸谷式에 근거하여 몰시멘트비 χ 의 함수로 한다.

$$\gamma = \frac{R(\chi - 0.25)}{\sqrt{0.3(1.15 + 3\chi)}}$$

$$(\chi \geq 0.6), \gamma = 0.37R(4.6\chi - 1.76) \quad (\chi \leq 0.6)$$

R : 골재나 시멘트의 종류에 따라 정해지는 상수(보통 1)

- 4) 중성화깊이의 변동계수 $v=0.3\sim 0.5(0.4)$
- 5) 철근 피복두께의 표준편차 $\sigma=1.0\sim 2.0\text{cm}$ (1.5)

α , β , χ , v , σ 및 \bar{D} 를 파라미터로 하여 경과년수에 따른 철근의 부식확률 P를 산정할 수 있다.

예를들면 그림 4의 경과년수 t와 철근의 부식확률 P의 관계도로부터 P가 15%일때 어느 내용년수에 필요한 몰시멘트비를 구할 수 있다. 즉, 내용

표 1 철근의 부식확률과 성능저하현상과의 대응

철근의 부식확률 P(%)	성능저하현상의 발생상황
$P < 0.5$	간헐하며, 성능저하증상을 볼 수 없다
$0.5 \leq P < 3$	소수의 미소한 균열(녹물)
$3 \leq P < 15$	여러곳에 균열(녹물), 소수의 박리, 박락
$15 \leq P < 50$	여러곳에 박리, 박락과 철근노출
$50 \leq P$	전반이상의 콘크리트면에 박리, 박락과 철근노출

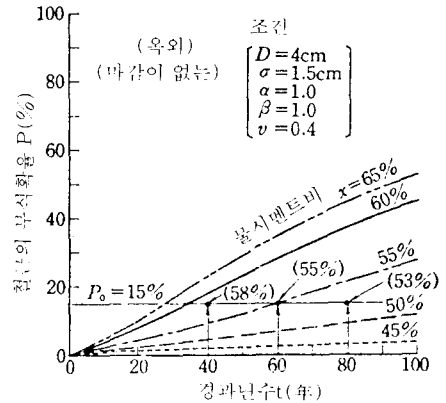


그림 4 내용년수로부터 몰시멘트비를 구하는 예

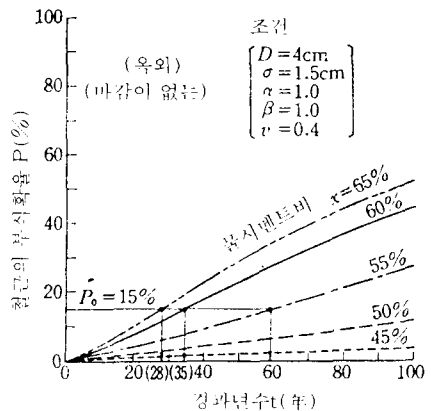


그림 5 몰시멘트비로부터 내용년수를 구하는 예

년수 40년, 60년, 80년을 상정한 경우에 몰시멘트비를 각각 58%이하, 55%이하, 53%이하로 하여야 한다. 또한 몰시멘트비로부터 구조물의 내용년수를 구할 수도 있다(그림 5).

철근의 부식확률과 구조물의 열화현상과의 대응을 다음 표 1에 나타낸다.

3) 설계피복두께의 산정

설계피복두께 D_d 를 구하려 하면 철근의 부식고장(철근부식에 의한 구조물 또는 부재료써의 고장)을 철근의 부식확률로써 정량적으로 정의(P 를 설정)하여, 목표 내용년수 T 를 설정하여, 식(2) 및 (3)에 $\bar{C}_1(t=T$ 로 하고, α, β, γ 를 결정한다), ν 및 σ 를 대입함으로써 \bar{D} 를 산출하며 $D_d = \bar{D}$ 로 하면 된다.

철근의 부식고장의 시점을 철근의 부식확률로써 구체적으로 정량화하기 위해서는

- ① 구조물의 중요성(사회적, 문화적 중요성)
- ② 일상시의 안전성 ③ 철근의 종류를 고려하여야 한다.

$P=5\%$ 는 철근콘크리트구조물이 사용되는 기간중에 부식을 일으키는 철근은 극히 드물며, $P=15\%$ 는 사용기간중 부식하는 철근은 약간 생기나 경미한 보수로써 계속 사용이 가능한 경우이다. 표 2는 건축물을 대상으로 하여 和泉가 제안한 설정치이다.

표 2 철근의 부식고장 이라고 생각되는 철근의 부식확률 P 의 제안값

건축물의 중요성	손상을 줄 위험성*	
	有	無
특히크다	7%이하	15%이하
크다	15%이하	30%이하
보통	30%이하	50%이하

* 철근부식에 의해 피복콘크리트가 낙하했을 때 사람과 기물에 손상을 줄 위험성

철근의 부식확률 P 가 정해지면 목표내용년수를 만족시킬 수 있는 설계피복두께값을 여러 조건하에서 산정할 수 있다.

4) 残余壽命의 예측

여기에서 말하는 잔존수명이란 현재의 조사시점으로 부터 수명에 이르기 까지의 기간을 말한다. 앞에서 기술한 바와 같이 수명을 철근의 부식확률로써 정의하여 철근의 부식확률과 재령과의 관계를 구함으로써 잔여수명의 예측이 가능하다.

본 방법에 의한 잔여수명산정의 순서를 다음에 기술한다(그림 6 참조).

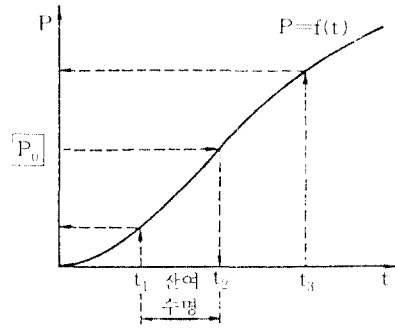


그림 6 잔여수명측정의 설명도

- ① 대상으로 하는 구조물의 조사결과 또는 설계도서를 근거로 다음의 상수를 설정한다.

\bar{D} : 철근의 평균피복두께
 σ : 철근피복두께의 표준편차
 \bar{C}_1 : 콘크리트의 평균중성화깊이
 ν : 콘크리트의 중성화깊이의 변동계수
 t_1 : 조사시의 경과년수
 P_0 : 수명시의 철근의 부식확률

- ② 중성화깊이와 재령과의 관계($\bar{C}_1 = A\sqrt{t}$)를 구한다.

상수 A 는 평균중성화깊이 \bar{C}_{11} 을 $\sqrt{t_1}$ 으로 나누면 얻어진다.

- ③ 철근의 부식확률 P 와 재령 t 의 관계 [$P = f(t)$]를 구한다.

식(1)~(3)에 $\bar{D}, \sigma, \bar{C}_1, \nu$ 를 대입함으로써 얻어진다.

- ④ $P=P_0$ 와 $P=f(t)$ 와의 교점을 구해, 그 시점에서의 경과년수 t_2 를 구한다.

t_2 시점이 수명이 달했을 때의 년수가 된다.

- ⑤ 잔여수명은 $(t_2 - t_1)$ 이 된다.

- ⑥ 대상구조물의 요구수명 t_3 이 $t_2 \geq t_3 > t_1$ 의 경우이면 현재상태로 요구수명을 만족시킬 수 있다고 판단하며 $t_3 > t_2$ 이면 현재상태로서는 요구수명을 만족시킬 수 없다고 판단한다. 요구수명을 만족시킬 수 없는 경우에는 철근의 부식확률 $P=f(t)$ 를 작게 하기위한 처리가 필요하게 된다.

표 3 조사결과

중성화깊이 (mm)	철근의 피복두께 (mm)
32 18 27 31 24	43 32 49 41 29
29 24 26 16 32	36 45 23 45 30
22 27 20 25 14	44 37 53 24 56
19 38 26 34 28	40 26 38 50 52
$\bar{C}_1=26\text{mm}$	$\bar{D}=40\text{mm}$
$v=24\%$	$\sigma=10\text{mm}$

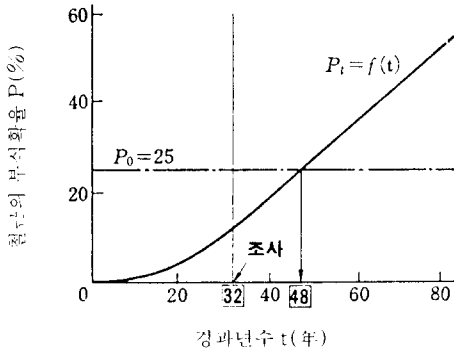


그림 7 $P_i=f(t)$ 와 수명측정

조사에 : 준공후 32년이 경과한 지상3층의 제치장 R,C조 건축물의 외벽을 조사한 예를 다음에 나타낸다.

- ① 외벽면을 random하게 파쇄하여 중성화깊이와 철근의 부식정도를 측정하였다. 측정결과를 표 3에 나타낸다.
- ② 중성화 속도계수 A는 $\bar{C}_1=A\sqrt{t}$ 를 사용하여 구한다.

$$A=26 / \sqrt{32}=4.60$$

따라서 중성화속도식은 다음식으로 표시된다.

$$\bar{C}_1=4.60\sqrt{t}$$

- ③ 철근의 부식화율 P_i 와 경과연수 t 의 관계 $P_i=f(t)$ 를 구하면 그림 7과 같이된다.
- ④ 수명시 철근의 부식화율 P_0 를 25%로 설정한다.
- ⑤ $P_0=25\%$ 일 때 $P_i=f(t)$ 의 교점은 $t_2=48$ 년이 된다.
- ⑥ 잔여수명은 $t_2-t_1=48-32=16$ 년이 된다.
- ⑦ 당건물은 금후 30년을 사용하고 싶다는 건물소유자의 희망이 있었기 때문에 이대로는 요구수명을 만족할 수 없다고 판정되었다. 따라서, 앞으로의 철근부식의 진행을 억제하기 위하여 개수공사를 실시하게 되었다.

참 고 문 헌

1. 和泉意登志, “耐久性診断事例—中性化—”, 콘크리트工學, Vol.26, No.7, July, 1988, pp106~110
2. 岸谷孝一, 西澤紀昭 他編, “中性化”콘크리트構造物의耐久性シリーズ, 技報堂出版, pp47~64
3. 和泉意登志, 構造物의耐久性設計手法例—鐵筋のかぶり厚さの信頼性設計手法—, 콘크리트工學, Vol.26, No.11, Nov. 1988, pp38~42