제3장 보의 강도설계법에 의한 해석 핵심요약

1 개 요

(1) **기본개념**

1) 철근 콘크리트보를 소성체로 보고 소성이론에 의해 그 부재의 계수강도를 알아내어 안정성을 확보하는 설계법

즉, $\phi M_n \geq M_u = 1.4 M_D + 1.7 M_L$

(M_D : 고정하중에의한 모멘트, M_L : 활하중에의한 모멘트,
M_n : 공칭휨강도, ϕM_n 설계휨강도, M_u : 계수강도)

2) 강도설계법의 장·단점

① 파괴에 대한 안전도의 확보가 확실하다.

② 하중계수에 의하여 하중의 특성을 설계에 반영할 수 있다.

③ 사용성의 확보를 위해 별도의 검토(균열·처짐)를 필요(사용성)

※ 안정성은 계수하중으로 검토 ⇒ 강도설계법의 설계하중은 계수하중
사용성은 사용하중으로 검토 ⇒ 허용응력설계법의 설계하중은 사용하중

(2) **기본가정**

1) 변형률은 중립축으로부터 거리에 비례 (허용응력 설계법과 동일)

2) 압축측 연단의 콘크리트 최대변형률은 0.003으로 가정

3) 항복강도 f_y 이하에서 철근의 응력은 그 변형률의 E_s배이고, 변형률에 관계없이 최대응력을 f_y 와 같다고 가정

4) 콘크리트 인장강도는 휨응력 계산시 무시한다. (허용응력설계법과 동일)

5) 응력은 변형률에 비례하지 않는다. (허용응력설계법과 차이점)

6) 콘크리트의 압축응력이 $0.85 f_{ck}$로 균등하고, 이 응력이 $a = \beta_1 \cdot c$ 까지 등분포한다고 가정한다.

7) β_1 값의 규정

① $f_{ck} \le 280\ \mathrm{kgf/cm^2} \Rightarrow \beta_1 = 0.85$

$f_{ck} > 280\ \mathrm{kgf/cm^2} \Rightarrow f_{ck}$ 값이 10씩 증가할 때마다 0.85에서 0.007씩 감소시킨 값을 사용

② 단, β_1 값은 0.65보다 작아서는 되지 않는다.

(3) **강도 감소계수와 하중계수**

1) 강도 감소계수 (ϕ)

구조물에 발생할 수 있는 강도의 결함, 치수오차등을 보완하기 위한 계수

강도감소계수 (ϕ)

휨부재, 축방향 인장부재, 휨과 축방향을 겸해 받는 부재		0.85
전단과 비틀림		0.80
축방향 압축부재, 축방향 압축과 휨을 겸해 받는 부재	나선철근 부재	0.75
	기타 부재(띠철근)	0.70
콘크리트의 지압		0.70
무단 콘크리트의 휨부재		0.65

2) 하중계수 (Load factor)

초과하중의 영향과 하중의 조합 영향을 고려하는 계수

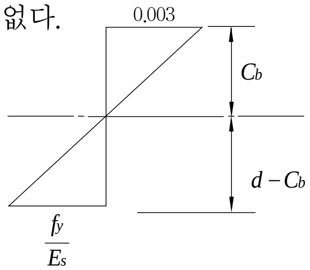
고정하중(D)와 활하중(L)이 작용하는 경우 : 계수하중 (U) = 1.4D + 1.7L

2 단철근 직사각형보

(1) **균형보**

인장철근이 항복강도, f_y에 도달함과 동시에 콘크리트도 극한 변형률 0.003에 도달하는 보를 균형보라 하고, 이러한 보의 파괴형태를 균형파괴(=평형파괴)라 한다.

그러나, 이러한 파괴는 이론상의 파괴이지 실제 파괴에서는 생길 수 없다.



1) 균형보의 중립축 위치 (C_b)

$$C_b : 0.003 = d : 0.003 + \frac{f_y}{E_s}$$

$$C_b = \frac{0.003E_s}{0.003E_s + f_y} \times d \xrightarrow{E_s\ =\ 2.0\ \times\ 10^6\ \mathrm{kgf/cm^2}} C_b = \frac{6{,}000}{6{,}000 + f_y} \cdot d$$

2) 균형철근비 (ρ_b)

$C_b = T_b$이므로

$0.85 f_{ck} \cdot a_b \cdot b = A_{s(b)} \cdot f_y$ 여기서 $a_b = \beta_1 \cdot C_b$, $A_{s(b)} = \rho_b \cdot b \cdot d$

$$\therefore \rho_b = 0.85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f_{ck}}{f_y} \cdot \frac{6{,}000}{6{,}000 + f_y}$$

(2) **보의 휨파괴 거동**

1) 균형파괴 (균형보: $\rho = \rho_b$)

이론상의 파괴형태로서 실제파괴에서는 생길 수 없다.

인장철근이 항복점(f_y)에 도달할 때, 콘크리트도 극한변형률 0.003에 동시에 도달하여 철근의 연성을 활용하지 못한 일종의 취성파괴

2) 과다철근에 의한 취성파괴 ($\rho > \rho_b$)

철근을 과다하게 사용하여 콘크리트는 최대변형률인 0.003에 도달되었지만, 인장철근의 응력은 아직 항복강도(f_y)에 도달하지 못한 비경제적인 보. 파괴시 변형이 크게 생기지 않고, 압축부 콘크리트 파쇄로 붕괴되므로 위험을 예측할 수 없는 취성파괴를 일으킨다.

3) 과소철근에 의한 연성파괴 ($\frac{14}{f_y}$ 또는 $\frac{0.80\sqrt{f_{ck}}}{f_y} < \rho < \rho_b$))

철근비를 균형철근비보다 작게 사용하여 인장철근의 응력이 항복강도(f_y)에 도달되었지만,

콘크리트는 최대변형률인 0.003에 도달하지 못한 보.

1차적으로 파괴시 변형이 크게 생겨 파괴를 예측할 수 있으며, 2차적으로

중립축의 위치가 압축측 콘크리트쪽으로 상승하여 콘크리트의 파괴를 일으킨다.

이러한 파괴형태를 연성파괴라 한다.

4) 철근비(량)의 제한

① 최대철근비 : $\rho_{(use)} \leq \rho_{(max)} = 0.75\rho_{(b)}$

사용철근비($\rho_{(use)}$)가 균형철근비($\rho_{(b)}$)보다 작으면 과소철근으로서 연성파괴를 유도할 수 있으나, 시방서에서는 확실한 연성파괴로 유도하기 위하여 최대철근비($\rho_{(max)}$)를 균형철근비($\rho_{(b)}$)의 75%로 상한을 두어 규제하고 있다.

② 최소철근량

㉠ 철근을 적게 넣으면, 콘크리트에 균열이 생기는 순간 철근도 동시에 끊어져서 갑자기 파괴가 일어난다. 이러한 취성파괴를 방지하기 위하여 하한을 두어 규제하고 있다. 다음의

두 값 중 큰 값 이상

$$A_{s(use)} \geq A_{s(min)} = \frac{14}{f_y} b_w \cdot d \text{ 또는 } \frac{0.80\sqrt{f_{ck}}}{f_y} b_w \cdot d$$

㉡ 단, 주철근이 설치되는 휨부재에서는 정·부 철근량을 해석상 소요되는 양보다 1/3을 더 많이 배근하면 최소철근비 규정을 따르지 않아도 좋다.

(3) **과소철근보** ($\rho_{min} = \frac{14}{f_y}$ 또는 $\frac{0.80\sqrt{f_{ck}}}{f_y} \leq \rho \leq \rho_{max} = 0.75\rho_{(b)}$)

1) 해석

① 등가응력 사각형의 깊이 (a)

$$C = T \Rightarrow 0.85 f_{ck} \cdot a \cdot b = A_s \cdot f_y \Rightarrow a = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b}$$

② 공칭휨강도 (M_n)

$$\begin{cases} M_n = C \cdot Z = 0.85 f_{ck} \cdot a \cdot b \cdot (d - \frac{a}{2}) \\ M_n = T \cdot Z = A_s \cdot f_y \cdot (d - \frac{a}{2}) \end{cases}$$

③ 설계휨강도 (ϕM_n)

공칭휨강도에 ϕ (휨=0.85)를 곱한 값

즉, $$\phi M_n = \phi [0.85 \cdot f_{ck} \cdot a \cdot b \cdot (d - \frac{a}{2})]$$
$$= \phi [A_s \cdot f_y \cdot (d - \frac{a}{2})]$$

2) 설계

소요휨강도(M_u)와 설계휨강도(ϕM_n)을 같다고 하여, 콘크리트 단면의 b폭를 가정하면 유효깊이 d와 철근량 A_s를 구할 수 있다.

$$\phi M_n = \phi [A_s \cdot f_y \cdot (d - \frac{a}{2})] \xrightarrow[A_s = \rho \cdot b \cdot d]{a = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b}} \phi [f_y \cdot \rho \cdot b \cdot d^2 (1 - 0.59\rho \cdot \frac{f_y}{f_{ck}})]$$

$$= \phi \cdot f_{ck} \cdot q \cdot (1 - 0.59q) \cdot b \cdot d^2 = R_u \cdot b \cdot d^2$$

여기서, $q = \rho \cdot \frac{f_y}{f_{ck}}$, $R_u = \phi \cdot f_{ck} \cdot q \cdot (1 - 0.59q)$

① 유효깊이 (d)결정

설계방정식은 $1.4M_D + 1.7M_L = M_u \le \phi M_n = R_u \cdot b \cdot d^2$

$$\therefore\ d = \sqrt{\frac{M_u}{R_u \cdot b}}$$

② 철근량 (A_s) 결정

$$M_u \le \phi M_n = \phi\left[A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)\right]$$

$$\therefore\ A_s = \frac{\phi M_n}{f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)} = \frac{M_u}{f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)}$$

단, $A_s \le \rho_{max} \cdot b \cdot d$ (최대철근비 규정)

③ 복철근 직사각형보

복철근 보에서도 인장철근은 물론 압축철근도 항복응력 f_y에 도달하여야 한다.
인장철근비가 $\rho \le 0.75\rho_b$이면, 보의 강도는 압축철근을 무시하고 계산해도 좋으나, $0.75\rho_b$보다 크면 압축철근의 항복에 대한 정밀계산이 필요하다.

(1) **해석**

복철근 보의 해석은 압축철근과 동일한 인장철근량과 압축철근에 의해 생기는 우력모멘트 (M_n1), 나머지 인장철근과 콘크리트에 의한 우력모멘트(M_n2)로 나누어 해석한다.

1) 설계휨강도 (ϕM_n)

$$M_n1 = C \cdot Z = T_1 \cdot Z \cdot = A_s' \cdot f_y \cdot (d - d')$$

$$M_n2 = C_c \cdot Z = 0.85 \cdot f_{ck} \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$= T_2 \cdot Z = (A_s - A_s') \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$\therefore\ \phi M_n = \phi[M_n1 + M_n2]$$

$$= \phi\left[A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') + (A_s - A_s') \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)\right]$$

2) 등가응력 사각형의 깊이(a)

$$C_c = T_2 \Rightarrow 0.85 f_{ck} \cdot a \cdot b = (A_s - A_s') \cdot f_y$$

$$\therefore\ a = \frac{(A_s - A_s') \cdot f_y}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b}$$

3) 압축철근이 항복하기 위한 조건

압축철근의 변형률 ε_s 이 항복변형률보다 크려면

$$0.003\left(\frac{c-d}{c}\right) \geq \frac{f_y}{E_s} \quad \Rightarrow \quad c \geq \frac{6{,}000}{6{,}000-f_y} \cdot d' \text{ -------------- ①}$$

힘의 평형조건에서 $T - C_s = C_c \Rightarrow A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y = 0.85 f_{ck} \cdot a \cdot b$

$$= b \cdot d \cdot (\rho - \rho') \cdot f_y = 0.85 \cdot f_{ck} \cdot (\beta_1 \cdot c) \cdot b$$

$$\therefore c = \frac{(\rho-\rho') \cdot f_y \cdot d}{0.85 \cdot \beta_1 \cdot f_{ck}} \text{ --------------- ②}$$

②식을 ①식에 대입하면, 압축철근이 항복하기 위한 조건은

$$\rho - \rho' \geq 0.85\beta_1 \cdot \frac{f_{ck}}{f_y} \cdot \frac{d'}{d} \cdot \frac{6{,}000}{6{,}000-f_y}$$

4 단철근 T형보

(1) T형보의 판정

폭 b인 직사각형보로 보고 등가응력깊이 a를 구한다. $a = \dfrac{A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b}$

a와 두께 t를 비교하여 판정한다.

즉, a≤t : 폭 b인 직사각형보 ⇒ 단철근 직사각형 해석

a>t : T 형보 ⇒ T 형보로 해석

(2) 해석

T형보의 해석은 압축측 콘크리트에서 복부를 제외한 플랜지 부분과 가상철근량 A_{sf}에 의한 우력모멘트(M_n1), 복부의 콘크리트와 A_{sf}를 제외한 나머지 인장철근에 의한 우력모멘트(M_n2)로 나누어 해석한다.

1) 가상압축철근량 (A_{sf})

$C_f = T_f$ 이므로 $0.85 f_{ck} \cdot t \cdot (b - b_w) = A_{sf} \cdot f_y \quad \therefore A_{sf} = \dfrac{0.85 f_{ck} \cdot t \cdot (b-b_w)}{f_y}$

2) 등가응력 사각형의 깊이 (a)

$C_w = T_w$ 이므로 $0.85 f_{ck} \cdot a \cdot b_w = (A_s - A_{sf}) \cdot f_y \quad \therefore a = \dfrac{(A_s - A_{sf}) \cdot f_y}{0.85 f_{ck} \cdot b_w}$

3) 설계휨강도 (ϕM_n)

$$M_{n1} = C_f \cdot Z = 0.85 f_{ck} \cdot t \cdot (b - b_w) \times (d - \frac{t}{2})$$

$$= T_f \cdot Z = A_{sf} \cdot f_y \cdot (d - \frac{t}{2})$$

$$M_{n2} = C_w \cdot Z = 0.85 f_{ck} \cdot a \cdot b_w \times (d - \frac{a}{2})$$

$$= T_w \cdot Z = (A_s - A_{sf}) \cdot f_y \times (d - \frac{a}{2})$$

$$\therefore \ \phi M_n = \phi [M_{n1} + M_{n2}]$$

$$= \phi [A_{sf} \cdot f_y \cdot (d - \frac{t}{2}) + (A_s - A_{sf}) \cdot f_y \cdot (d - \frac{a}{2})]$$

5 처짐과 균열

처짐과 균열은 사용하중 하에서 보의 사용성을 검토하기 위한 규정이다.

(1) **처짐**

1) 탄성처짐

하중이 재하되는 순간 발생되는 처짐으로 즉시처짐 또는 순간처짐이라고도 한다. 응용역학에서 등분포하중 재하시 처짐계산식 $\delta = \frac{5wl^4}{384EI}$ 으로 표현

2) 장기처짐

지속하중재하시 콘크리트의 건조수축과 크리프에 의한 추가적인 처짐

장기처짐 = (지속하중에 의한 탄성처짐) × λ

여기서, $\lambda = \frac{\xi}{1+50\rho'}$, ρ'(압축철근비) = $\frac{A_s'}{b \cdot d}$

ξ : 지속하중의 재하기간에 따른 계수

재하기간(개월)	3개월	6개월	12개월	5년 이상
ξ	1.0	1.2	1.4	2.0

3) 최종처짐

최종처짐 = 탄성처짐 + 장기처짐 = 탄성처짐 + (탄성처짐 × λ)

= 탄성처짐 × (1 + λ)

(2) **균열**

1) 균열(crack)

$f_y \geq$ 3,000 kgf/㎠ 의 철근을 사용시 균열에 대한 신중한 고려가 필요하다.

균열은 외관상 좋지않을 뿐만 아니라, 철근의 부식 및 내구성저하로 이어지므로 몇 개의 큰 균열보다는 미세한 균열이 바람직하다.

① 이형철근 사용시 균열폭을 최소화 할 수 있다.

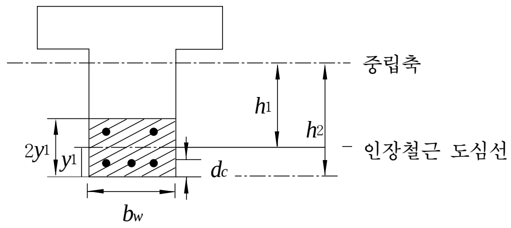
② 인장측에 철근을 잘 분배하면 균열폭을 최소화 할 수 있다.

③ 동일 철근량을 사용할 경우 굵은철근보다 가는철근을 여러개 사용하는 것이 균열의 폭을 최소화 할 수 있다.

2) 균열에 대한 제한

인장철근의 항복강도 $f_y \geq$ 3,000 kgf/㎠ 를 초과하는 경우 다음 식에서 구한 휨균열 폭(W)이 허용균열폭 (W_a) 을 초과하지 않도록 해야 한다.

$W = 1.08 \cdot \beta_c \cdot f_s \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A} \times 10^{-5}$ (㎜)



콘크리트 유효 인장 단면적

f_s: 사용하중에 의한 철근의 인장응력
(계산에 의하지 않을 경우, $0.6f_y$)

d_c: 인장측 연단에서 가장 가까운 철근의 도심까지의 거리

A : 유효인장 단면적($2y_1 \times b_w$)을 배근된 철근의 갯수로 나눈 값

y_1 : 인장철근의 도심에서 인장측 연단까지의 거리

β_c : $\dfrac{\text{인장부 연단에서 중립축까지의 거리}}{\text{주철근의 도심에서 중립축까지의 거리}} = \dfrac{h_2}{h_1}$

(β_c은 보에서 1.2, 슬래브에서는 1.35)