

9장 기둥 해석 및 설계

9.1 개요

기둥 : 중력방향으로 작용하는 압축력을 주로 분담하는 압축재

편심 축하중이나 풍하중과 같은 수평하중이 작용시, 기둥의 단면 일부에 인장력을 발생시키기도 하나 주로 압축력이 그 거동을 지배한다.

따라서 기둥의 주철근은 하중 전달방향인 종방향으로 배근된다.

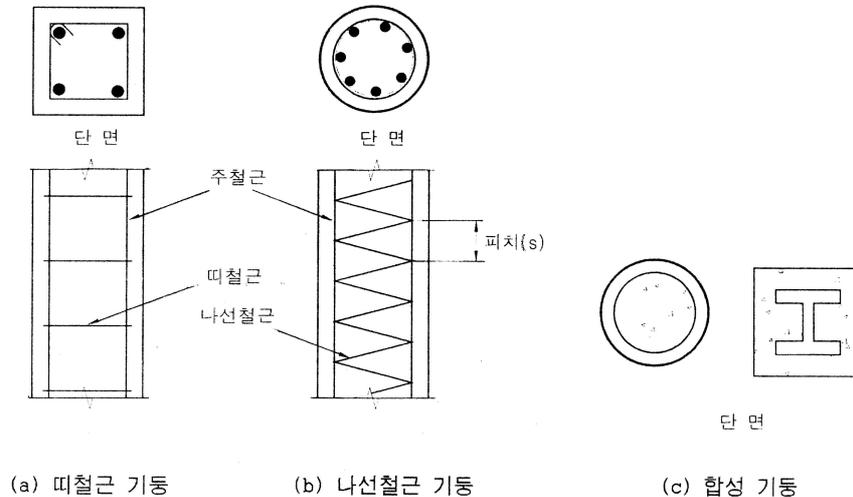
주철근의 위치 고정을 목적으로 **띠철근**이나 **나선철근**이 사용된다. 이들 철근은 기둥의 연성 및 전단내력을 증진시킬 목적으로 사용되어 **횡방향 철근**이라고 한다.

(1) 기둥 분류 ; 주철근 지지방법에 따라

1) 띠기둥 (tied column) : 주철근을 일정간격 (200~500mm)의 띠철근으로 지지
→ 장방형, 정방형, 원형

2) 나선기둥 (spiral column) : 주철근을 25~75 mm 간격의 나선철근으로 지지
→ 원형, 정방형

3) 합성기둥(composite column) : 철골부재 또는 강관과의 합성으로 기둥 형성



9.2 개요

9.2.2 축방향 철근

(1) 철근비 $\left(P_g = \frac{A_{st}}{A_g} \right)$

$\rho_{\min} = 0.01$: 최소한의 휨에대한 저항성 확보

크리프, 건조수축에 대한 저항성 확보

$\rho_{\max} = 0.08$: 경제성과 시공성 고려

단, 시공시 겹침이음이 되는 곳에서는 $P_{\max} = 0.04$

$$0.01 < \rho_g < 0.08$$

(2) 축방향 철근의 순간격은 40 mm , 철근 공칭지름의 1.5배, 및 굵은 골재 공칭 최대 치수의 $4/3$ 배 중 큰 값 이상으로 한다.

(3) 축방향 철근의 최소개수

직사각형·원형 띠철근 기둥 : 4개

나선철근 기둥 : 6개

(4) 기둥 철근은 40 mm 이상 피복되어야 한다. 설계기준 압축강도가 40 MPa 이상인 경우 이 값을 10 mm 줄일 수 있다.

9.2.3 횡방향 보강 철근

(1) 횡방향 보강 철근의 기능

- ① 주철근의 위치를 고정
- ② 주철근의 좌굴 방지
- ③ 축압축에 대한 압축콘크리트 파괴시 횡방향 벌어짐을 구속(confine)시켜줌
⇒ 콘크리트의 연성 증진

나선철근이 띠철근보다 구속효과가 더 크다.

내진구조에 적합하나 시공상 어려움으로 인해 대부분 띠철근 보강

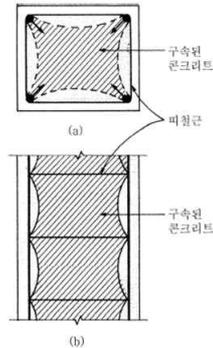


그림 9-2 띠철근에 의한
기둥 콘크리트의 구속

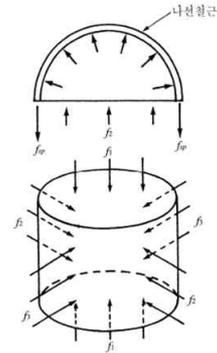


그림 9-3 나선철근에 의한
기둥 콘크리트의 구속

(2) 띠철근

① 직경

주근 직경이 D32 이하 일 때 : D10 이상

주근 직경이 D35이상 또는 다발철근일 때 : D13 이상

② 간격

주근 직경의 16배, 띠근 직경의 48배, 기둥 단면의 최소폭 중 최소값 사용

③ 배근

- 모서리의 주철근과 그에 하나 걸러 있는 주철근은 135°이하로 구부러진 띠철근에 의해 횡방향으로 지지되도록 배근한다.
- 횡방향으로 지지되는 축방향 철근의 순간격은 150 mm이하로 한다.

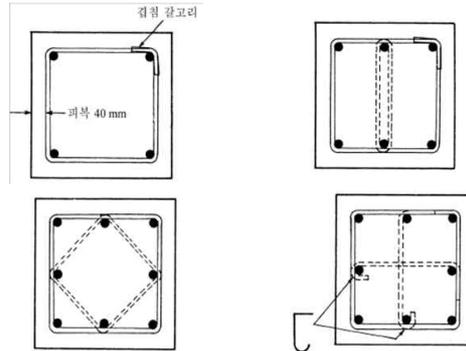


그림 9-5 띠철근의 배근

(3) 나선 철근

→ 기둥의 심부내의 임의의 정방형 입체에는 3축 압축이 작용

→ 콘크리트의 강도 증진 ($f_1 = f_{ck} + 4.1 f_2$)

(5) 띠철근과 나선철근의 구조거동

그림 9.4은 띠철근 기둥과 나선철근 기둥의 축하중과 축변형관계를 나타내는데, 그 후에서 보여지듯이 초기 재하단계에서는 유사한 거동을 보이나, 최대 축하중에 도달한 후에는 피복부분에 균열을 동반한 피복의 박리가 발생하며 이후에는 상이한 거동을 보인다.

9.3 직사각형 기둥의 설계강도

9.3.1 개요

(1) 적용범주

- ① P- Δ 효과 무시, 세장효과 무시 가능한 경우
- ② 적용기준 (세장효과 무시 가능한 경우)

a) 횡구속된 압축재 ; $\frac{k l_u}{\gamma} < 34 - 12 \frac{M_{1b}}{M_{2b}}$

b) 횡구속되지 않은 압축재 ; $\frac{k l_u}{\gamma} < 22$

(M_{1b} 와 M_{2b} 는 기둥의 단부 모멘트로 M_{1b} 는 작은 쪽, M_{2b} 는 큰 쪽의 값이다.)

- (2) 단주 기둥의 설계
- 축압축만을 받는 기둥 (설계 최대 축하중 공식이용)
 - 축압축과 1축 휨을 받는 기둥
 - 축압축과 2축 휨을 받는 기둥

9.3.1 최대 축하중

(1) 기둥의 공칭 축하중 P_0 는 주철근과 콘크리트가 각각 부담하는 하중의 합

$$P_0 = P_s + P_c = A_{st}f_y + 0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) \quad (10.1)$$

여기서 A_g : 기둥의 전단면적 , A_{st} : 주근의 전체 단면적

- f_{ck} 를 0.85배 저감하는 이유는 장기간 작용하는 하중에 대한 콘크리트의 압축강도는 1~2분 정도의 시간에 측정되는 표준압축강도 f_{ck} 의 85%에 해당되기 때문

(2) 최대 설계 축하중

- ① 편심에 대한 영향을 고려한 계수로 나선철근과 띠철근 기둥에 대해 각각 0.85와 0.80을 각각 취한다.
- ② 최대설계축하중, ϕP_n

나선철근 기둥 $\phi P_n = \phi \cdot 0.85P_0 = 0.85\phi [0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y]$, $\phi = 0.70$

띠철근 기둥 $\phi P_n = \phi \cdot 0.80P_0 = 0.80\phi [0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y]$, $\phi = 0.65$

[예제 9-1] 그림 9-11과 같은 정사각형 기둥의 설계축하중을 구하시오.

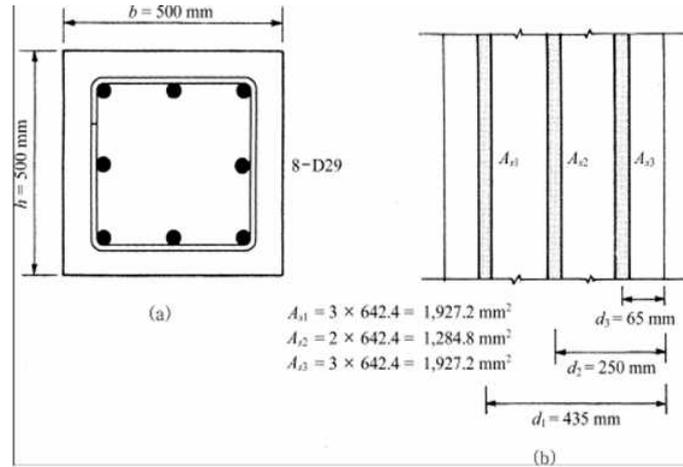


그림 9-11 예제 9-1의 정사각형 기둥

$$P_0 = A_{st}f_y + 0.85f_{ck}(A_g - A_{st})$$

$$P_0 = 0.85 \times 24 \times (250,000 - 5139.2) \times 10^{-3} + 400 \times 5139.2 \times 10^{-3} = 7050.8 \text{ kN}$$

$$P_n = 0.8P_0 = 0.8 \times 7050.8 = 5640.6 \text{ kN}$$

$$\phi P_n = 0.65P_n = 3666.4 \text{ kN}$$

9.3.2 휨을 받는 기둥의 설계강도

(1) 축압축 P_n 과 휨 M_n 동시에 작용시

→ 편심거리 e 를 가지는 편심 축하중으로 대치 가능 $\left(e = \frac{M_n}{P_n} \right)$

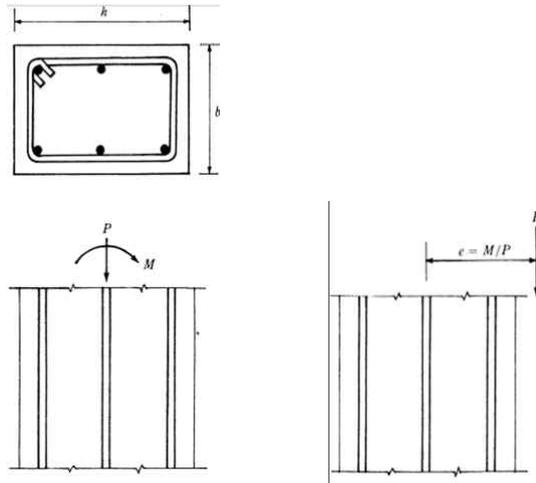


그림 9-6 휨과 축하중을 받는 기둥

(2) P_n 과 M_n 에 의한 강도곡선 : 편심거리 e 에 따른 파괴거동 비교($M_n = P_n \cdot e$)

$$P_n = 0.85f_{ck}ab + \sum_{i=1}^n N_{si} \quad M_n = 0.85f_{ck}ab\left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}\right) + \sum_{i=1}^n N_{si}\left(\frac{h}{2} - d_i\right)$$

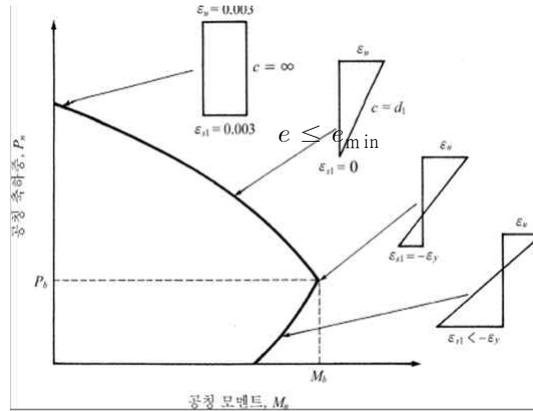


그림 9-9 공칭강도 상관곡선

① 압축파괴 영역 ; ($e < e_b$, $P_n > P_b$)

: 편심거리 e 가 e_b 보다 작아서 기둥 단면내의 대부분에 압축응력이 발생하며, 인장철근이 항복하기 전에 콘크리트의 압축변형도가 $\epsilon_u (= 0.003)$ 에 도달

② 구간 I 의 경우

$$0 \leq e \leq e_{\min} \quad , \quad P_{n(\max)} < P_n < P_0$$

편심에 의한 휨모멘트 영향 무시 가능

→ 축압축으로 P_0 대신 최대 허용 축하중 $P_{n(\max)}$ 이 고려됨

* 최소편심거리 e_{\min}

띠기둥 경우 $\frac{e}{h} = 0.1$ 일 때 $e_{\min} = 0.1h$

나선기둥 경우 $\frac{e}{h} = 0.05$ 일 때 $e_{\min} = 0.05h$

* $0 < e < e_{\min}$ 구간에선 $P_{n(\max)}$ 은 다음 값으로 산정됨

- 띠기둥 경우 $P_{n(\max)} = 0.8 P_0$

- 나선기둥 경우 $P_{n(\max)} = 0.85 P_0$

③ 구간 II 의 경우

$$e_{\min} \leq e < e_b, \quad P_b < P_n < P_{n(\max)}$$

힘의 평형조건 및 변형의 적합조건에 의해 P_n 구하고 $M_n (= P_n \cdot e)$ 을 산정한다.

④ 평형상태 ($e = e_b, P_n = P_b$)

: 콘크리트의 압축변형도가 $\epsilon_u (= 0.003)$ 도달할 때, 동시에 철근의 인장 변형도가 항복변형도 ϵ_y 에 도달

- 콘크리트의 압축파괴와 철근의 인장파괴가 동시 발생
- e_b : 평형상태의 편심거리, P_b : 평형상태의 축하중
 $M_b (= P_b \cdot e_b)$: 평형상태의 휨모멘트

⑤ 인장파괴 영역 ; $e > e_b, P_n < P_b$

편심거리 e 가 e_b 보다 커서 콘크리트의 압축변형도가 $\epsilon_u (= 0.003)$ 에 도달하기 전에 철근의 인장변형도가 먼저 항복변형도 ϵ_y 에 도달

(3) 강도감소계수, ϕ

콘크리트 구조설계 기준 ‘3.3.3 설계강도 (2) 강도감소계수’

- 인장지배 단면 $\phi = 0.85$
- 압축지배 단면
 - 나선철근 부재 $\phi = 0.70$
 - 띠철근 부재 $\phi = 0.65$

즉, $\epsilon_y \leq \epsilon_t \leq 0.005$ 이면, 띠철근 기둥 $\phi = 0.65 - \frac{0.85 - 0.65}{0.005 - \epsilon_y} (\epsilon_t - \epsilon_y)$

나선철근 기둥 $\phi = 0.70 - \frac{0.85 - 0.70}{0.005 - \epsilon_y} (\epsilon_t - \epsilon_y)$

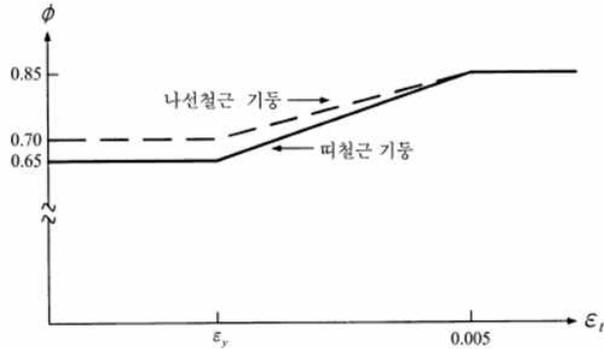


그림 9-10 변화구간 단면의 강도감소계수

9.5 2축 휨을 받는 기둥

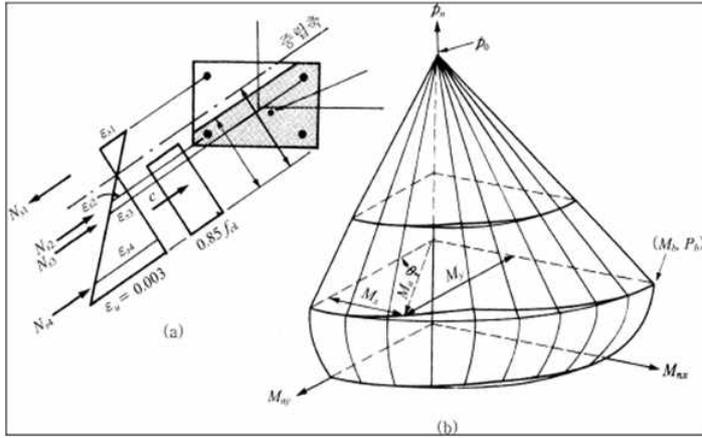


그림 9-18 2축 휨을 받는 기둥의 변형률, 내력 및 상관곡선

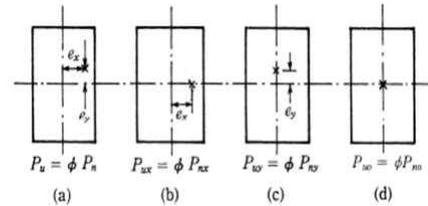


그림 9-19 브레슬러 방정식의 기호

브레슬러(B. Bresler)의 상반하중법(reciprocal load method)

$$\frac{1}{P_u} = \frac{1}{\phi P_{nx}} + \frac{1}{\phi P_{ny}} - \frac{1}{\phi P_{n0}} \quad (9.22)$$

9-6 세장 효과의 해석

9-6-1 개요

기둥의 단면에 비하여 길이가 길면 좌굴과 변형에 의한 $P\Delta$ 효과를 고려하여야 한다.

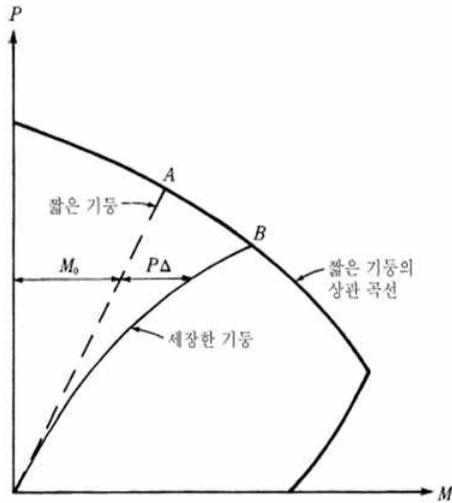


그림 9-20 기둥의 휨-축하중에 대한 거동

9-6-2 기둥의 좌굴

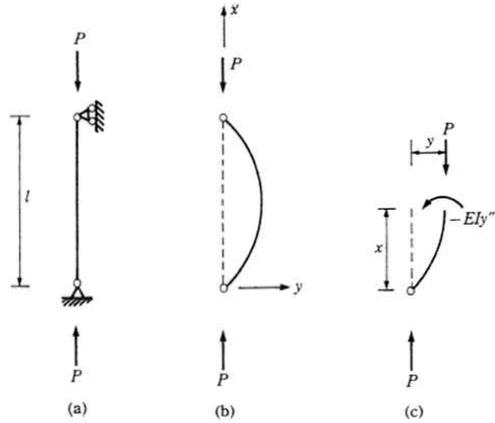


그림 9-21 단순받침 기둥의 좌굴거동

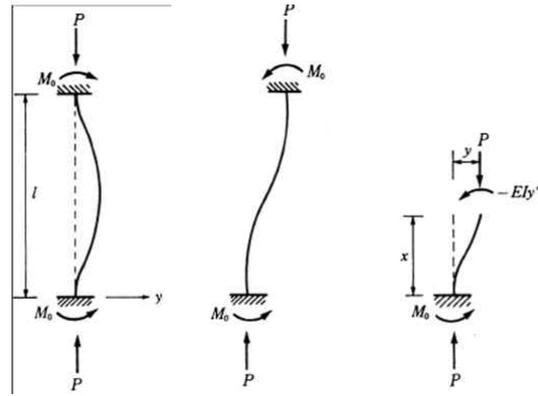


그림 9-22 양단 고정 기둥의 좌굴거동

9-6-2 기둥의 좌굴

(1) 오일러 좌굴하중

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$$

⇒ 기둥의 좌굴하중은 단부의 경계조건과 횡구속에 영향을 받는다.

(2) 좌굴하중

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(kl)^2}, \quad k : \text{유효길이계수}$$

k	0.5	0.7	2.0	1.0	2.0	1.0
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
좌굴 형태						

표 9-2 기둥의 유효길이계수

(3) 기둥의 좌굴응력 : 단위면적에 대한 좌굴하중

$$\sigma_c = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{(kl)^2 \cdot A} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kL}{r}\right)^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

$$\lambda = \frac{kL}{r}, \quad \text{세장비 (slenderness ratio)}$$

9-6-3 골조 기둥의 유효좌굴길이 계수

ㄱ) 직선도표 이용

① 먼저 골조의 버팀지지 상태 판단

② 기둥 양단 (상단, 하단)의 Ψ 산정 $\longrightarrow \Psi_A, \Psi_B$ 산정

$$\Psi = \frac{\sum E_c I_c / \ell_c}{\sum E_b I_b / \ell_b} ; \text{부재 양단의 구속도 계수}$$

fixed ; 0 \longrightarrow 0.5 고려
hinged ; $\infty \longrightarrow$ 1.0고려

참자 b ; 보

참자 c ; 기둥

ℓ_b, ℓ_c : 보와 기둥의 집합부 중심간 거리

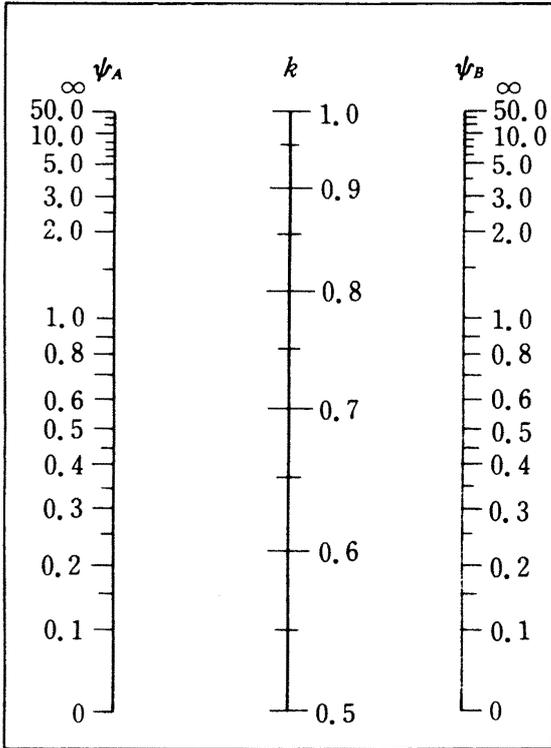
③ Ψ_A, Ψ_B 를 잇는 직선을 그었을 때 중간의 k 축과 만나는 값이 k값.

* 특히 기둥의 상대 강성 계산시 보의 휨강성은 계산된 값보다 낮게 평가 되어야 한다

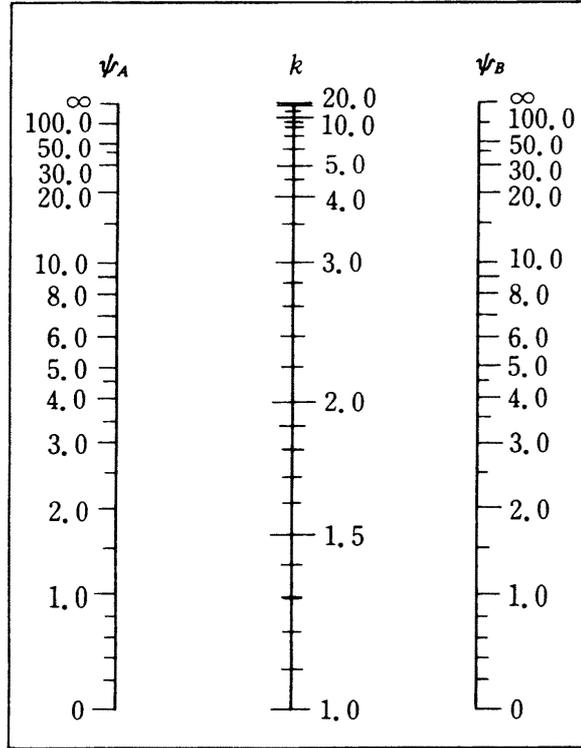
\longrightarrow 기둥 좌굴에 의한 횡변형 발생시 보에 균열이 발생하여 기둥의 회전 변형 구속능력

이 저하되므로규준에선 $\frac{k \ell_u}{r} < 60$ 일 경우, 균열과 상대 강성에 대한 철근 보강의 영

향을 고려하여 Ψ 계산시 보의 I 값을 50% 감소시킴 (=0.5I_g)



(a) 횡구속된 골조



(b) 횡구속되지 않은 골조

ㄴ) 수식 이용

- ① 횡구속된 골조에서 유효길이계수의 상한선은 다음 두식 중 작은값으로 한다 .

$$k = 0.70 + 0.05(\Psi_A + \Psi_B) \leq 1.0$$

$$k = 0.85 + 0.05 \Psi_{\min} \leq 1.0$$

Ψ_A , Ψ_B ; 기둥 양단의 Ψ 값

Ψ_{\min} ; Ψ_A , Ψ_B 중 작은 값

- ② 횡구속되지 않은 골조에서 양단이 구속된 기둥의 유효길이계수

$$\Psi_m \leq 2 \text{ 일 때 } k = \frac{20 - \Psi_m}{20} \sqrt{1 + \Psi_m} > 1.0$$

$$\Psi_m > 2 \text{ 일 때 } k = 0.9 \sqrt{1 + \Psi_m} > 1.0$$

(Ψ_m 은 Ψ_A 와 Ψ_B 의 평균 값)

- ③ 횡구속되지 않은 골조에서 한 단부가 힌지인 경우 기둥의 유효길이계수

$$k = 2.0 + 0.3\Psi > 1.0$$

Ψ ; 회전이 구속된 단부의 값임

9-6-4 모멘트 확대 효과

[1] 횡구속된 골조 기둥

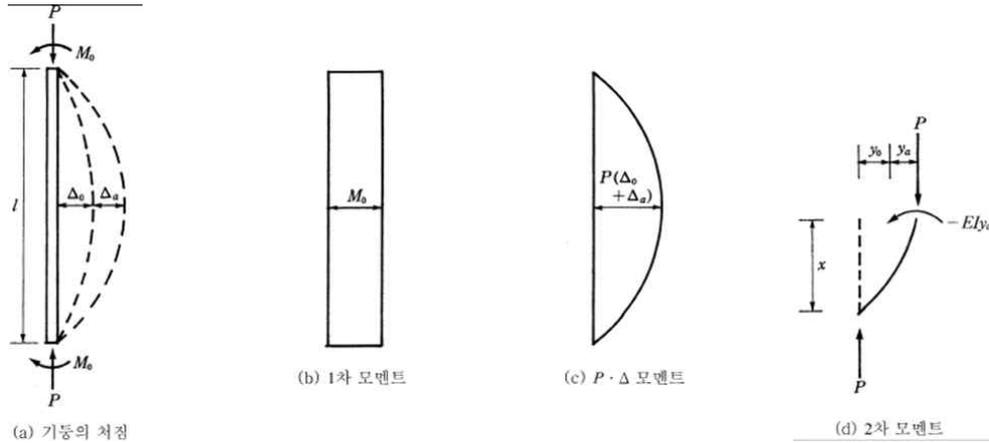


그림 9-25 기둥의 1차 및 2차 모멘트(양쪽 단부모멘트= M_o)

모멘트 확대 계수(moment magnifier) : 압축력 P 에 의해 1차모멘트가 증가하는 것을 나타내는 계수

2차모멘트 $M_c = M_o + P\Delta = \delta_b M_o$

$$\delta_b = \frac{1}{1 - P/P_c}, \quad P_c = \frac{\pi^2 EI}{(kl)^2} \quad (9.49)$$

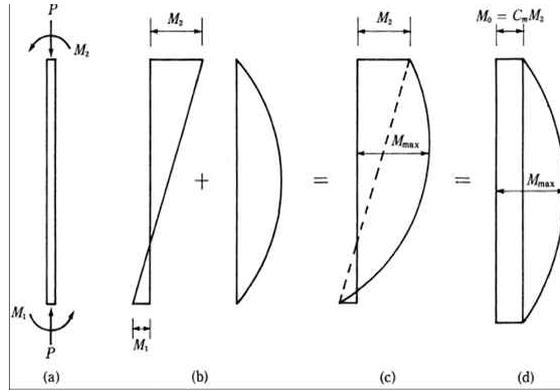


그림 98 서로 다른 단부 모멘트가 작용하는 기둥의 등가모멘트

서로 다른 단부모멘트가 작용하는 기둥의 등가모멘트 M_o

$$M_o = C_m M_2, \quad M_2: \text{큰 쪽의 단부 모멘트}$$

2차모멘트 $M_c = M_o + P\Delta$

$$M_c = \frac{C_m}{1 - P/P_c} M_2 \tag{9.49}$$

$$C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_1}{M_2} \geq 0.4$$

설계기준 6.5.6

횡구속된 골조 기둥에서 계수 축하중 P_u 에 대한 모멘트 확대계수

$$M_c = \delta_{ns} M_2$$

모멘트 확대계수 δ_{ns}

$$\delta_{ns} = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{0.75P_c}} \geq 1.0 \quad (9.49)$$

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(kl)^2}$$

M_2 : 큰 쪽의 단부 모멘트

$$M_{2,\min} = P_u(15 + 0.03h)$$

$$C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_1}{M_2} \geq 0.4$$

[2] 횡구속되지 않은 골조 기둥

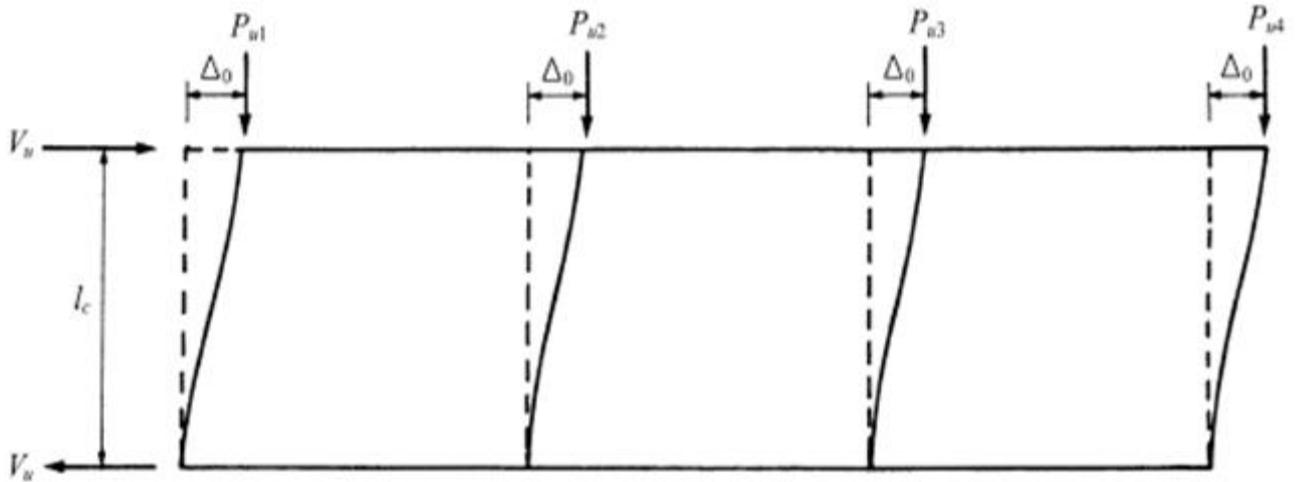
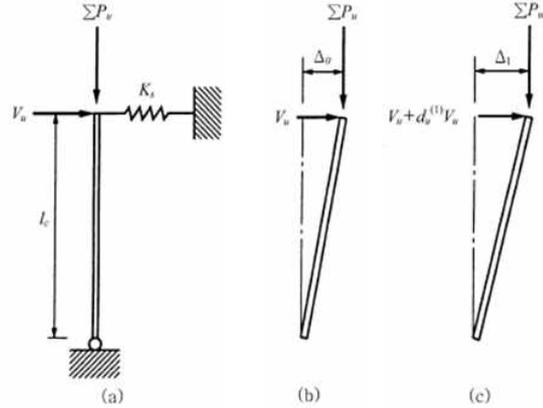


그림 9-28 횡구속되지 않은 골조의 수평하중과 수평변위

[그림 9.29] 횡구속되지 않은 강체 기둥의 처짐



횡구속되지 않은 골조 기둥에서 2차 해석에 의한 처짐 Δ

$$\Delta = \delta_s \Delta_o \tag{9.56}$$

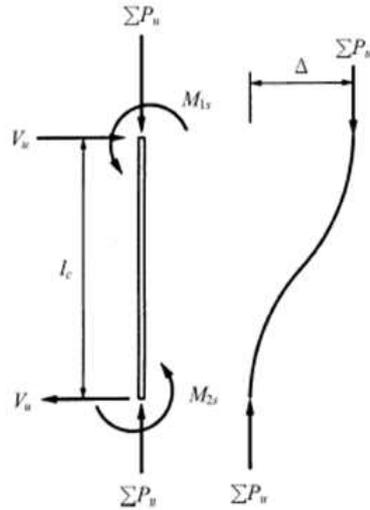
$$\delta_s = \frac{1}{1-Q}, \quad Q = \frac{\sum P_u \Delta_o}{V_u l_c}$$

Δ_o : 1차 해석에 의한 처짐

δ_s : 횡구속되지 않은 골조 기둥의 **모멘트 확대 계수**

Q : 안정성 지수

[그림 9.30] 단부 모멘트가 작용하는 횡구속되지 않는 골조 기둥



최종 처짐 Δ 와 모멘트식

$$\sum P_u \Delta = \delta_s (\sum P_u \Delta_o) = \frac{Q}{1-Q} (M_{1s} + M_{2s})$$

횡변형된 상태에서의 모멘트 평형조건식

$$V_u l_u + \sum P_u \Delta = \delta_s (M_{1s} + M_{2s}) \quad (9.57)$$

설계기준 6.5.7 횡구속되지 않은 골조 기둥의 모멘트 확대

기둥의 양단 모멘트

$$M_1 = M_{1ns} + \delta_s M_{1s}$$

$$M_2 = M_{2ns} + \delta_s M_{2s}$$

M_{1ns}, M_{2ns} : 계수 연직하중 상태에서 횡변형이 구속된 골조해석에서 구한 기둥의 단부 모멘트

M_{1s}, M_{2s} : 연직하중이 없이 계수 횡하중만 작용하는 상태에서 1차 탄성해석으로 구한 기둥의 단부 모멘트

$\delta_s M_s$ 를 구하는 세 가지 방법

① 2차 비선형 해석

② 확대 계수 사용($\delta_s \leq 1.5$ 인 경우 사용 가능) $\delta_s M_s = \frac{M_s}{1-Q} \geq M_s$

③ $\delta_s > 1.5$ 인 경우의 확대 계수 $\delta_s M_s = \frac{M_s}{1 - \frac{\sum P_u}{0.75 \sum P_c}} \geq M_s$

9-6-5 세장 효과에 대한 설계기준

[1] 기둥의 강성

기둥의 좌굴하중을 계산하기 위한 휨강성 EI 는 균열, 크리프, 응력-변형률의 비선형성 등을 고려하여 다음과 같이 계산한다.

$$EI = \frac{0.2E_c I_g + E_s I_{se}}{1 + \beta_d} \quad (9.58a)$$

또는 더 간단한 형태로

$$EI = \frac{0.4E_c I_g}{1 + \beta_d} \quad (9.58b)$$

β_d : 지속하중에 의한 콘크리트의 크리프 영향을 나타내는 계수

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{횡구속된 골조 } \beta_{dns} = \frac{\text{기둥의 최대 계수축 지속하중}}{\text{기둥의 전체 계수축하중}} \quad (9.59a) \\ \text{횡구속되지 않은 골조 } \beta_{ds} = \frac{\text{해당된 층의 지속하중에 의한 최대 계수 전단력}}{\text{해당된 층의 전체 계수 전단력}} \quad (9.59b) \end{array} \right.$$

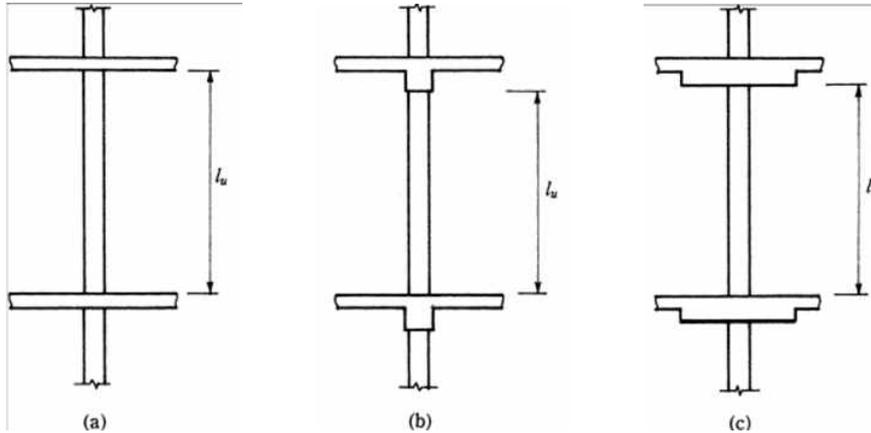
식 (9.58a)는 상대적으로 긴 기둥에 적합하며, 식 (9.58b)는 철근비가 0.01~0.02정도로 작고 길이가 짧은 기둥에 적합.

[2] 세장비

$$\text{단주의 세장비 } \frac{k l_u}{r} \text{ 제한 } \begin{cases} \text{횡구속된 기둥} & : \frac{k l_u}{r} \leq 34 - 12 \frac{M_1}{M_2} \\ \text{횡구속되지 않은 기둥} & : \frac{k l_u}{r} \leq 22 \end{cases}$$

r : 단면2차반경,

l_u : 기둥의 지점간 거리



cf) $\frac{k l_u}{r} \geq 100$ 인 경우엔 2차 골조해석에 의해 단면설계가 요구