

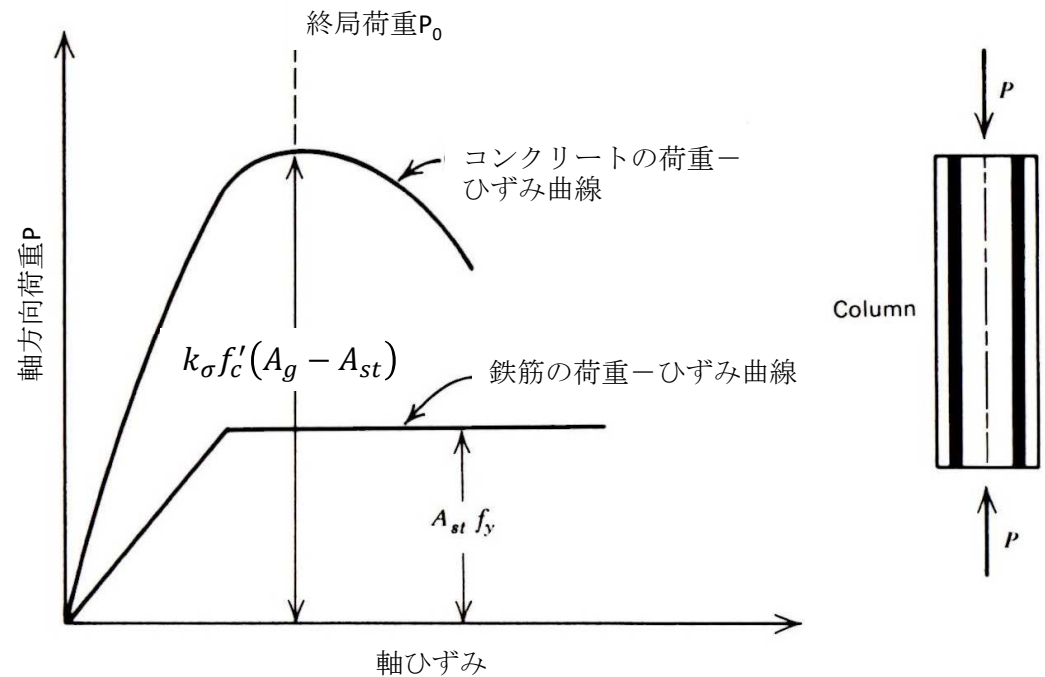
6. 曲げと軸力を受ける 部材の強度

軸力を受ける柱

柱の軸方向挙動

■ 軸方向荷重が増加すると

- 鉄筋が先に降伏強度に達する
- コンクリートが全強に達するまで変形は増大し、更なる荷重に持ちこたえる



柱の軸方向強度

■鉄筋降伏強度とコンクリート圧縮強度の和として表わされる

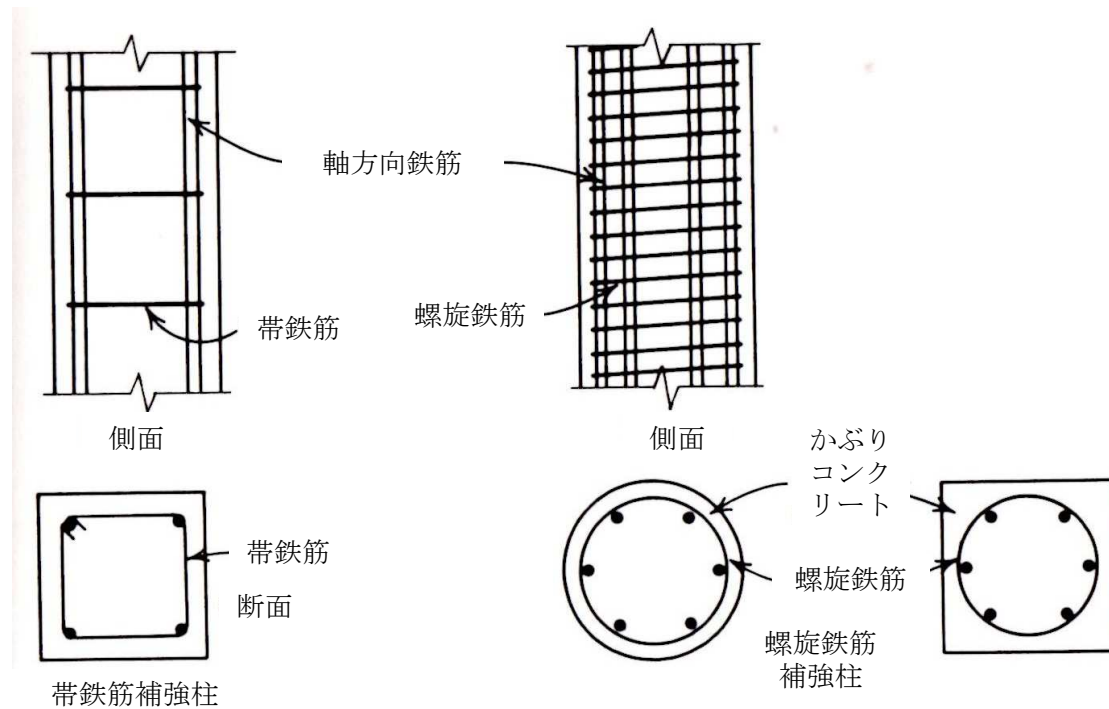
$$P_0 = k_{\sigma} f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$$

A_g : コンクリート全断面積、

A_{st} : 軸方向鉄筋の全断面積

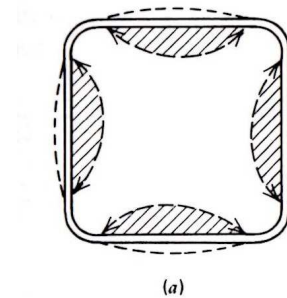
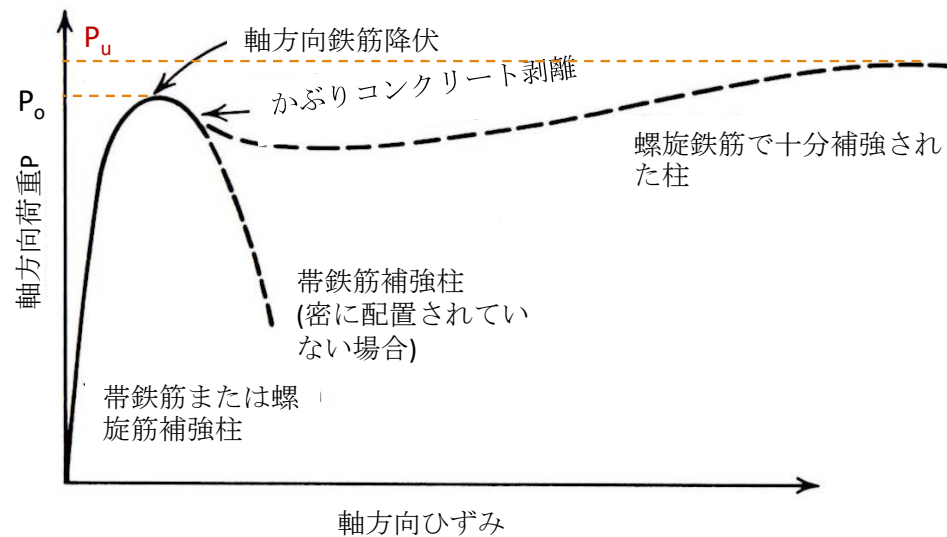
f_y : 鉄筋の降伏強度

横方向鉄筋による補強

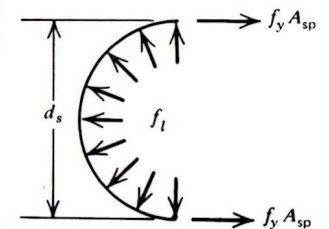
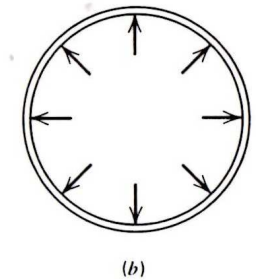


螺旋鉄筋で補強された柱

- 螺旋鉄筋はコアコンクリート部(徐々に破壊が進行するため体積膨張する)を拘束
- 半径方向の圧縮応力がコアコンクリートの軸方向強度を増大させる



/// 拘束されない部分



拘束圧による軸圧縮強度

■ 軸圧縮強度

$$P_u = (k_\sigma f'_c + \alpha f_{conf}) A_{cc} + f_y A_{st}$$

α : 拘束圧による軸圧縮強度増加分に関わる係数

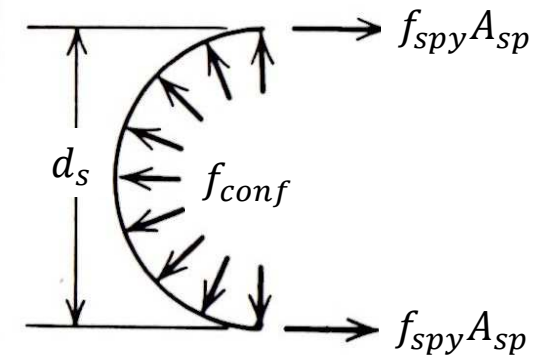
■ 螺旋筋に作用する力の釣合い

$$2f_{spy}A_{sp} = f_{conf}d_s s \quad \therefore f_{conf} = 2 \frac{f_{spy}A_{sp}}{d_s s}$$

■ 軸圧縮強度式に代入して

$$P_u = \left(k_\sigma f'_c + 2\alpha \frac{f_{spy}A_{sp}}{d_s s} \right) A_{cc} + f_y A_{st}$$

A_{cc} : 螺旋筋で囲まれた部分の面積 A_{st} : 軸方向鉄筋の面積



拘束圧による軸圧縮強度式: *Brandtzaeg*と*Brown*

■ $k_\sigma = 0.85, \alpha = 4.1$

$$P_u = P_u = \left(k_\sigma f'_c + 2\alpha \frac{f_{spy} A_{sp}}{d_s s} \right) A_{cc} + f_y A_{st}$$

$$= \left(0.85 f'_c + 8.2 \frac{f_{spy} A_{sp}}{d_s s} \right) A_{cc} + f_y A_{st}$$

$$= \left(0.85 f'_c + 2.05 f_{spy} \frac{4A_{sp}}{d_s s} \right) A_{cc} + f_y A_{st}$$

$$= \left(0.85 f'_c + 2.05 f_{spy} \rho_{sp} \right) A_{cc} + f_y A_{st}$$

ρ_{sp} : 螺旋筋の体積比

$$\rho_{sp} = \frac{\text{螺旋筋1本の体積}}{\text{1本の螺旋筋に対応するコンクリート部分の体積}} = \frac{A_{sp} \times \pi d_s}{\left(\frac{\pi d_s^2}{4} \right) s} = \frac{4A_{sp}}{d_s s}$$

拘束圧による軸圧縮強度式：土木学会

$$\blacksquare k_{\sigma} = 1 - 0.003f'_{ck} = 0.85 (f'_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2)$$

$$P_u = 0.85f'_c A_{cc} + f_y A_{st} + 2.5f_{spx} A_{spe}$$

$$= 0.85f'_c A_{cc} + f_y A_{st} + 2.5f_{spx} \pi d_{sp} A_{sp} / s$$

A_{spe} : 螺旋鉄筋の換算断面積 ($\pi d_{sp} A_{sp} / s$)

$$= 0.85f'_c A_{cc} + f_y A_{st} + 10f_{spx} \left(\frac{\pi d_{sp}^2}{4} \right) A_{sp} / d_{sp} s$$

$$= 0.85f'_c A_{cc} + f_y A_{st} + 10f_{spx} A_{cc} A_{sp} / d_{sp} s$$

$$= \left(0.85f'_c + 2.5f_{spx} \frac{4A_{sp}}{d_{sp}s} \right) A_{cc} + f_y A_{st}$$

$$= (0.85f'_c + 2.5f_{spx} \rho_{sp}) A_{cc} + f_y A_{st} \quad \longrightarrow \quad \alpha = 5.0 \text{ に相当}$$

$$\rho_{sp} = \frac{A_{sp} \times \pi d_s}{\left(\frac{\pi d_s^2}{4} \right) s} = \frac{4A_{sp}}{d_s s}$$

拘束圧による軸圧縮強度式：道示とACI

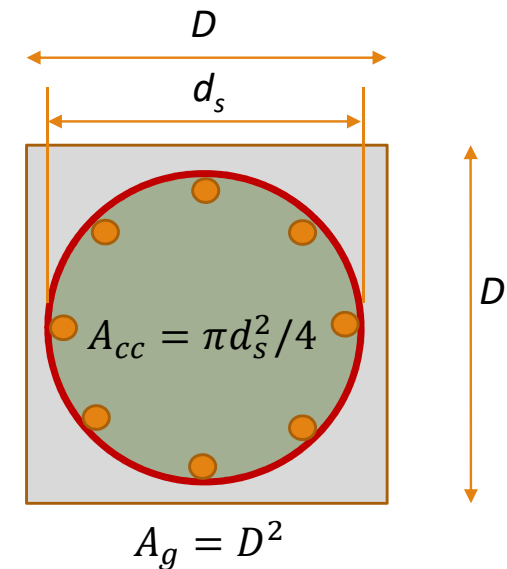
■道示(RC橋脚の地震時保有耐力照査)：円形断面の場合

$$P_u = (f'_c + 3.8f_{spx}\rho_{sp})A_{cc} + f_y A_{st} \quad \longrightarrow \quad \alpha = 7.6 \text{に相当}$$

■ACI

$$P_u = 0.85[0.85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]:$$

P_0 に対応する式である



軸圧縮荷重を受ける円形断面柱を例に

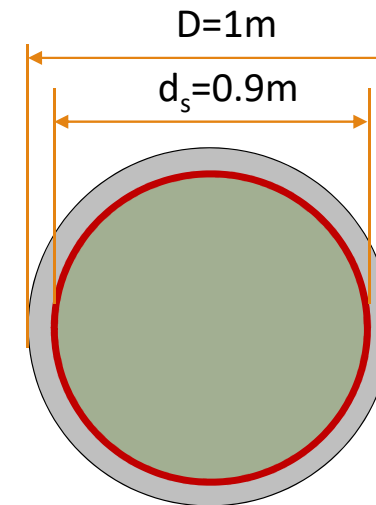
■対象とする円形断面柱

外径 $\Phi 1\text{m}$

コア部径 $\Phi 0.9\text{m}$ （かぶり 5cm ）

軸方向鉄筋比 $\rho_{st} = 0\%$

$f'_c = 30\text{N/mm}^2$ 、 $f_{spy} = 300\text{N/mm}^2$



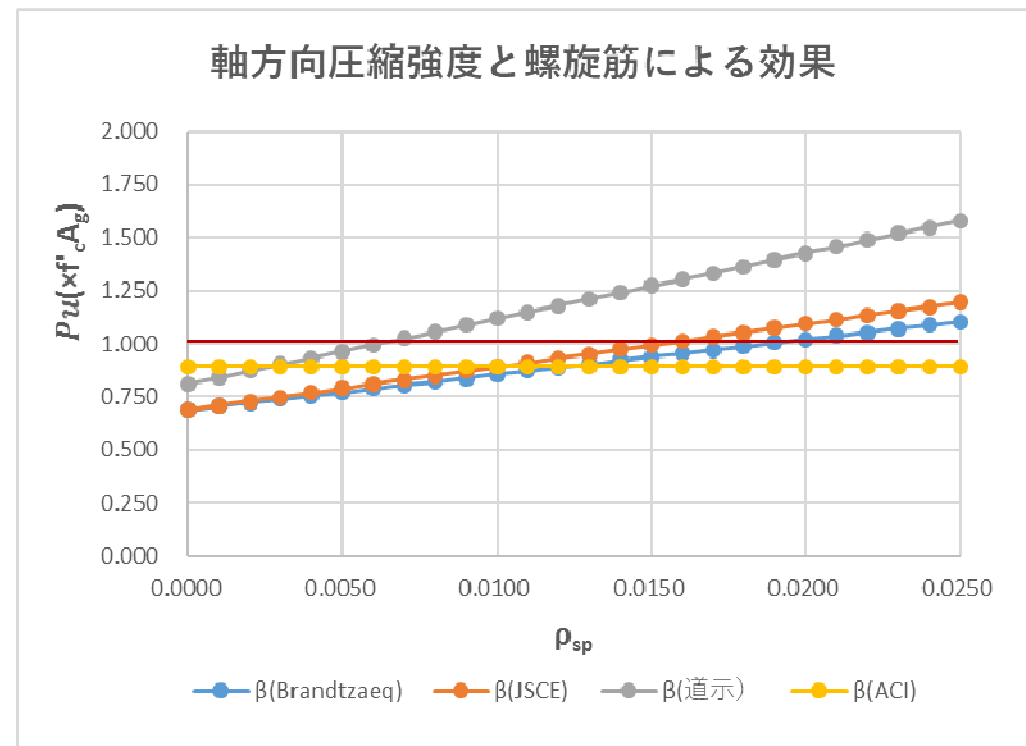
$$A_{cc} = 0.9^2 A_g = 0.81 A_g$$

拘束圧による軸圧縮強度式の比較

■ Brandtzaeg式と土木学会式は類似

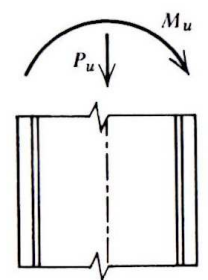
■ ACI式は拘束鉄筋比の影響を含まないため、拘束鉄筋比の大きい場合に安全側

■ 道示式は拘束鉄筋比の影響を積極的に考慮



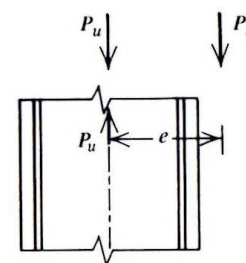
偏心軸力を受ける柱

軸力 P_u と曲げモーメント M_u の
組合せ載荷は、偏心距離
 $e = M_u/P_u$ を有する軸力 P_u
の載荷と等価



曲げと軸力作用

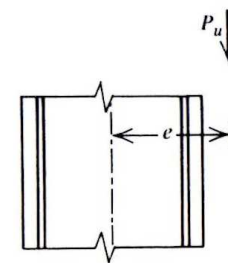
=



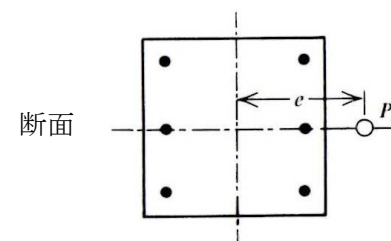
$$M_u = P_u e$$

側面

=



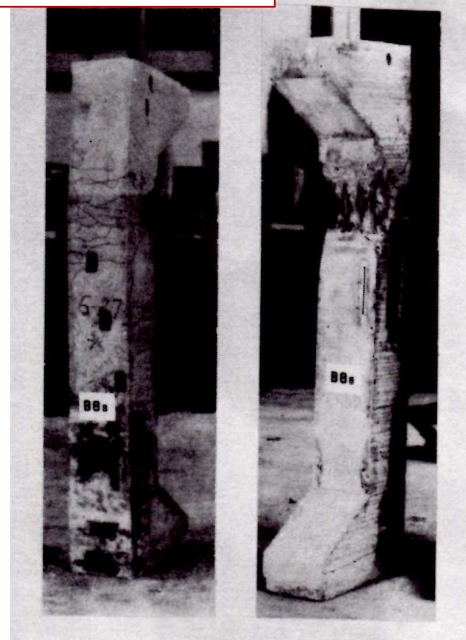
偏心軸力載荷に置換した等価な柱



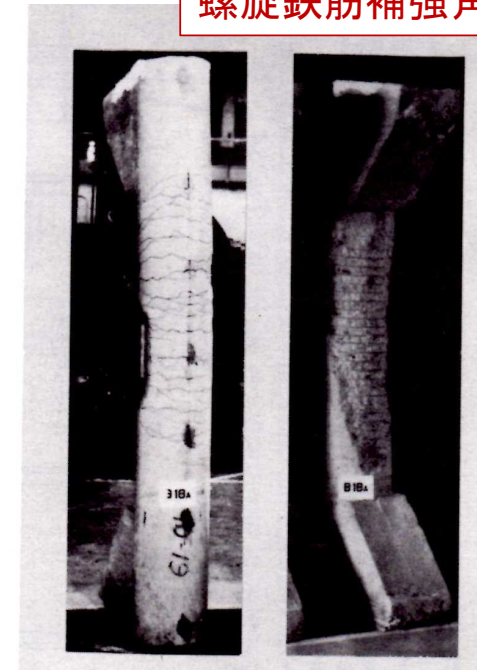
帯鉄筋補強角柱と螺旋鉄筋補強円柱

螺旋鉄筋補強柱は高い靱性

帯鉄筋補強角柱



螺旋鉄筋補強角柱



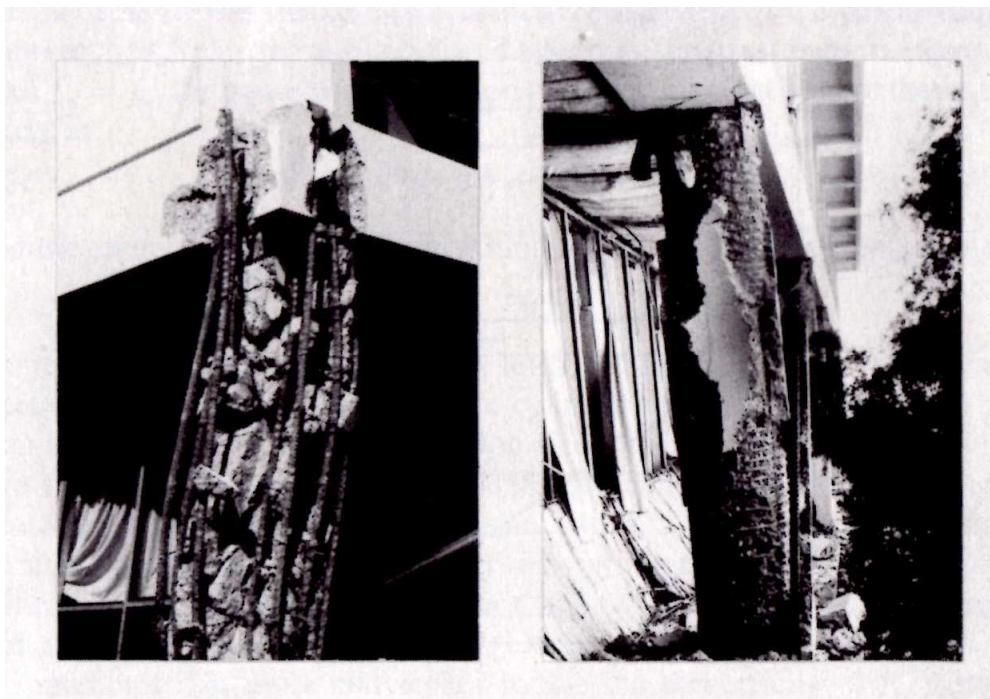
E.Hognestad, A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members, University of Illinois Engineering Experimental Station, Bulletin No.399, June 1951, pp.128

帯鉄筋補強角柱と螺旋鉄筋補強円柱― 地震被害例

■ 1971年San Fernando 地震でのOlive View
病院低層階柱の被害

・帯鉄筋補強角柱のコンクリートは押しつぶ
され瓦礫状態

・螺旋鉄筋補強円柱はかぶり部分が剥がれ
落ちているもののコア部は健全な状態



単鉄筋または複鉄筋 長方形断面の計算

偏心軸力を受ける柱

■ 圧縮鉄筋は $f'_s = f_y$ と仮定 (引張鉄筋は弾性)

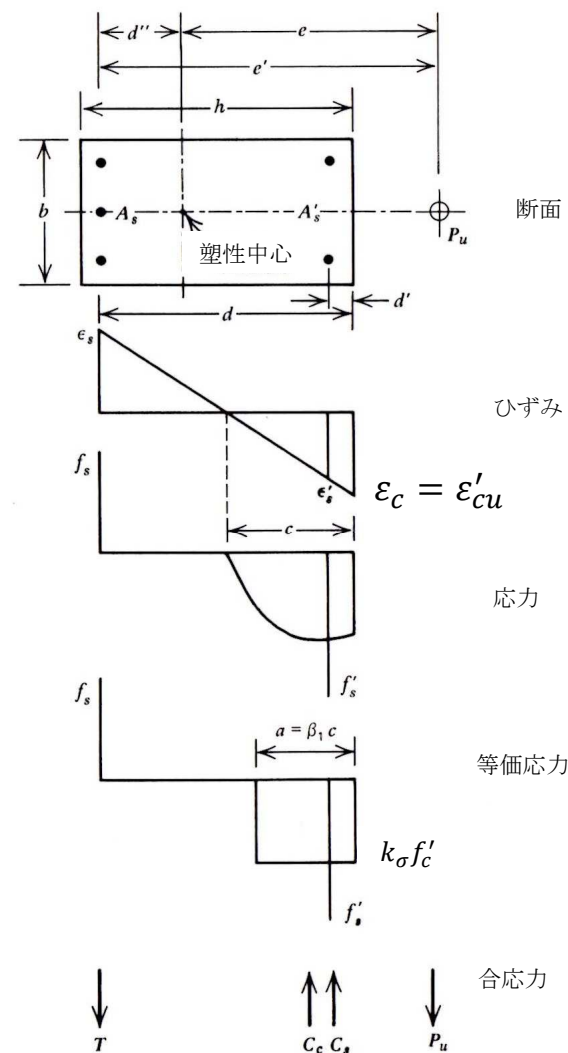
■ 合力の釣合い:

$$P_u = k_\sigma f'_c ab + A'_s f_y - A_s f_s$$

■ 引張鉄筋周りのモーメント

$$P_u e' = k_\sigma f'_c ab (d - 0.5a) + A'_s f_y (d - d')$$

e' : 引張鉄筋中心位置から偏心荷重 P_u の作用点までの距離



モーメント中心をどこにとるか？

■ 圧縮縁よりx位置にある軸周りのモーメント:

$$M = C(x - a/2) + T(d - x)$$

$$= (C - T)x - Ca/2 + Td$$

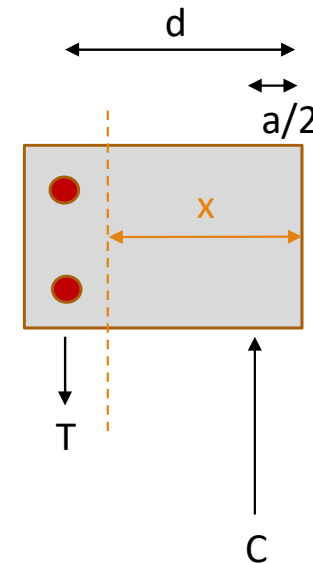
■ 軸力がない梁の場合 ($C = T$)、

$$M = -Ca/2 + Td = C(d - a/2)$$

xに関わらずモーメントは一定

■ 軸力が作用する柱の場合 ($C \neq T$)

xによってモーメントは変化

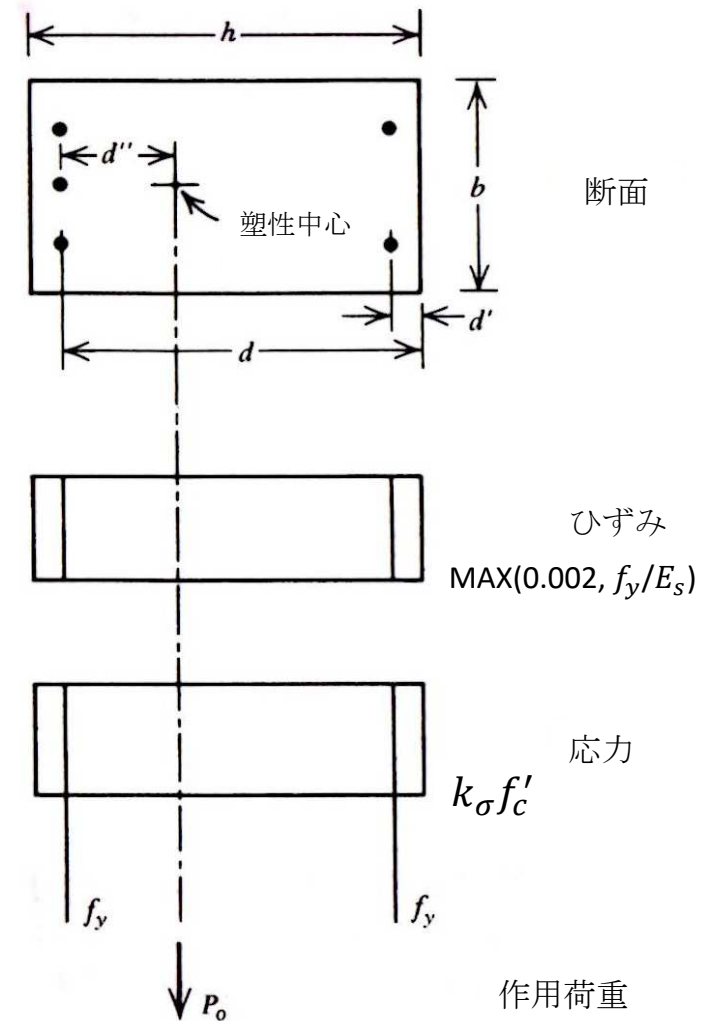


塑性中心

■ 断面内一様ひずみ状態にあり、全てコンクリートが最大
圧縮強度 $k_{\sigma}f'_c$ に、全ての鉄筋が圧縮降伏応力 f_y に達する
時の合力作用中心



終局時に一様軸応力状態をもたらす外荷重 P_0 の作用点



塑性中心位置 d''

■左側鉄筋中心周りの内力モーメントを考え、これを圧縮合力によるモーメントと等しいと置く

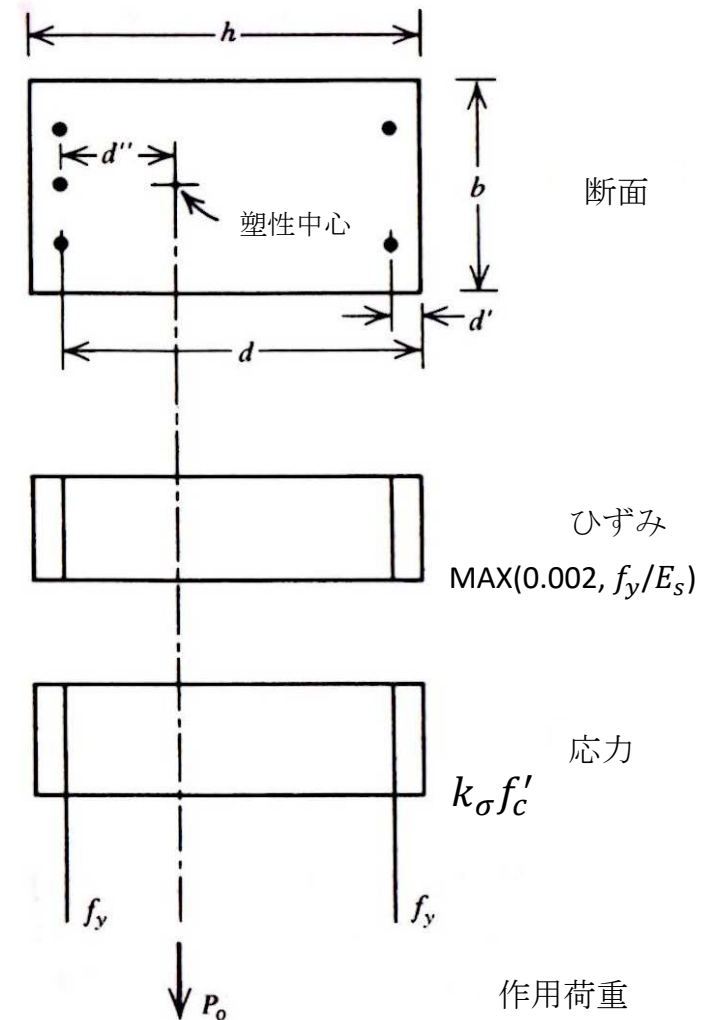


$$k_{\sigma} f'_c b h (d - 0.5h) + A'_s f_y (d - d')$$

$$= P_0 d'' = [k_{\sigma} f'_c b h + (A_s + A'_s) f_y] d''$$

$$\therefore d'' = \frac{k_{\sigma} f'_c b h (d - 0.5h) + A'_s f_y (d - d')}{k_{\sigma} f'_c b h + (A_s + A'_s) f_y}$$

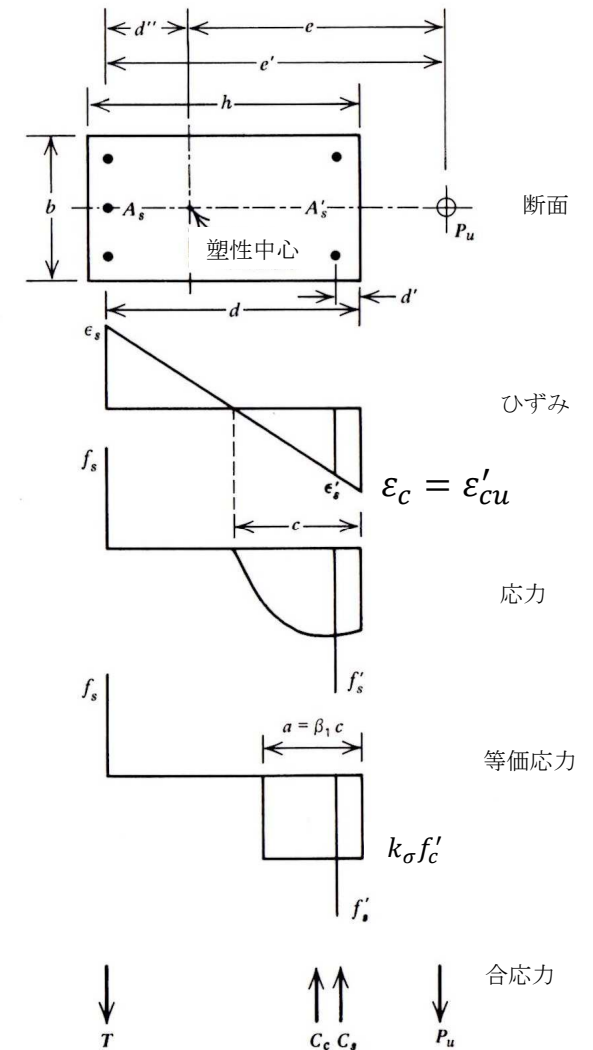
■ d'' : 偏心載荷を受ける柱の塑性中心から引張鉄筋中心までの距離
(鉄筋が対称に配置されている場合には、塑性中心は断面中心に一致)。



偏心軸力を受ける柱— 塑性中心周りのモーメント

■ 偏心軸力を受ける柱の塑性中心周りのモーメント

$$P_u e = k_{\sigma} f'_c a b (d - d'' - 0.5a) + A'_s f_y (d - d' - d'') + A_s f_s d''$$



釣合い破壊

■ひずみ分布の相似性より

$$\frac{\varepsilon'_{cu}}{c_b} = \frac{f_y/E_s}{d - c_b}$$

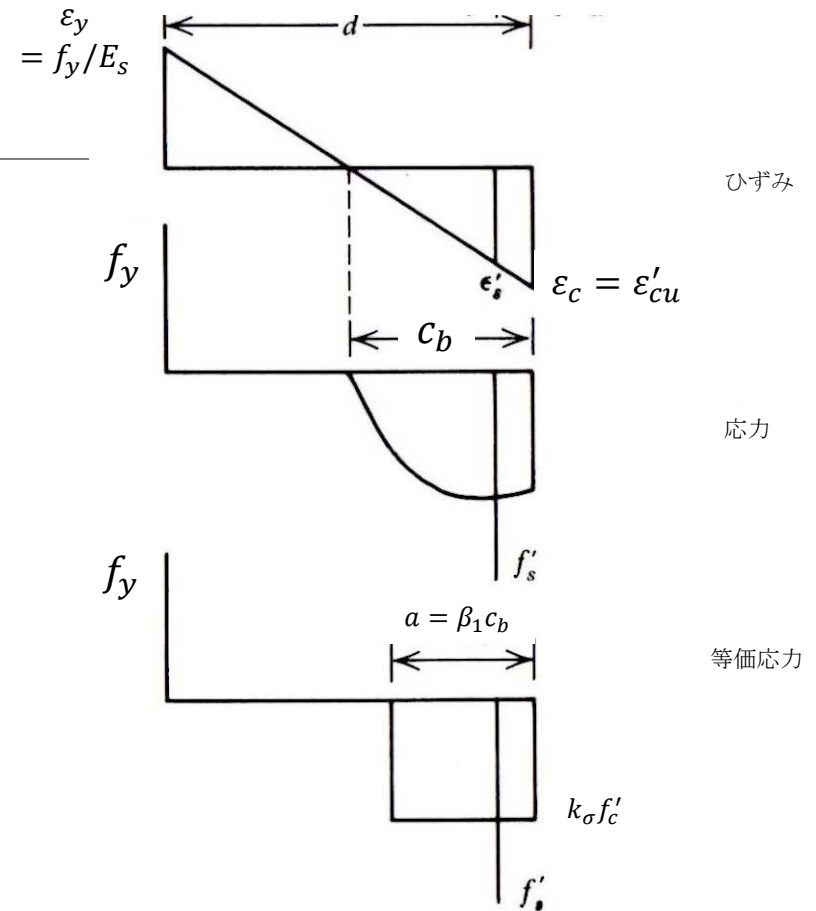
$$c_b f_y / E_s = \varepsilon'_{cu} (d - c_b)$$

$$(f_y / E_s + \varepsilon'_{cu}) c_b = \varepsilon'_{cu} d$$

$$\therefore c_b = \frac{\varepsilon'_{cu} E_s}{f_y + \varepsilon'_{cu} E_s} d$$

且つ、

$$a_b = \beta_1 c_b = \frac{\varepsilon'_{cu} E_s}{f_y + \varepsilon'_{cu} E_s} \beta_1 d$$



柱断面の終局時ひずみ分布と破壊タイプ

■釣合い破壊荷重

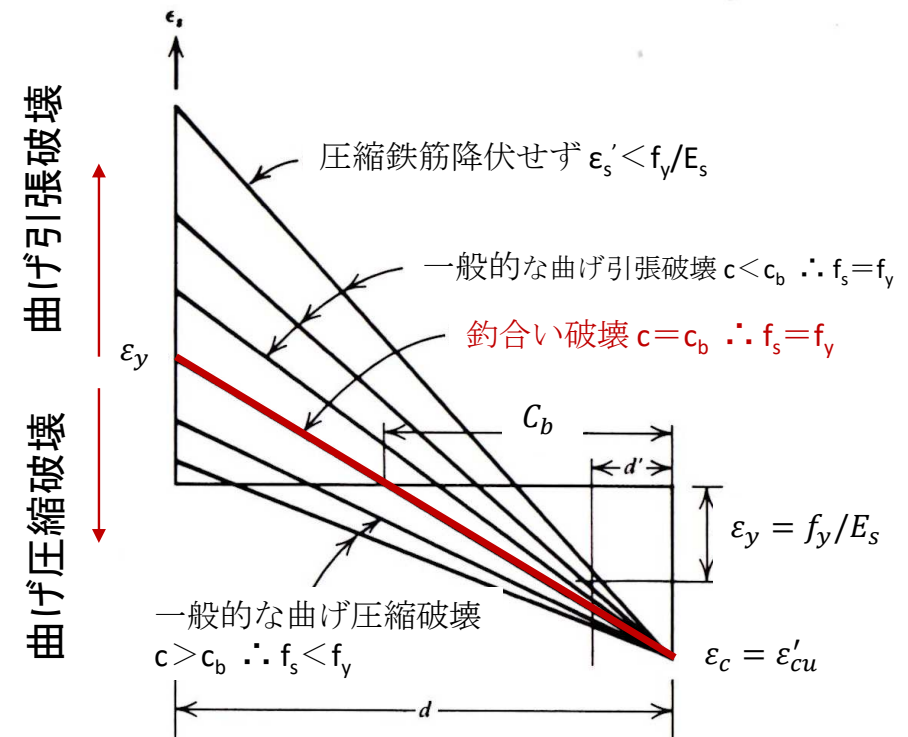
$$P_b = k_{\sigma} f'_c a_b b + A'_s f_y - A_s f_y$$

■ $P_u < P_b$: 曲げ引張破壊

P_b より小さい荷重なら $c < c_b$ 、 $\epsilon_s > f_y/E_s$

■ $P_u > P_b$: 曲げ圧縮破壊

P_b より大きい荷重なら $c > c_b$ 、 $\epsilon_s < f_y/E_s$



柱断面の終局荷重 P_u 一曲げ引張破壊1

■ 圧縮鉄筋が降伏する場合

$$\text{軸力の釣り合い: } P_u = k_\sigma f'_c ab + A'_s f_y - A_s f_y \quad \therefore a = \frac{P_u + (A_s - A'_s) f_y}{k_\sigma f'_c b} \quad (a)$$

$$\text{曲げモーメント: } P_u e = k_\sigma f'_c ab(d - d'' - 0.5a) + A'_s f_y(d - d' - d'') + A_s f_y d'' \quad (b)$$

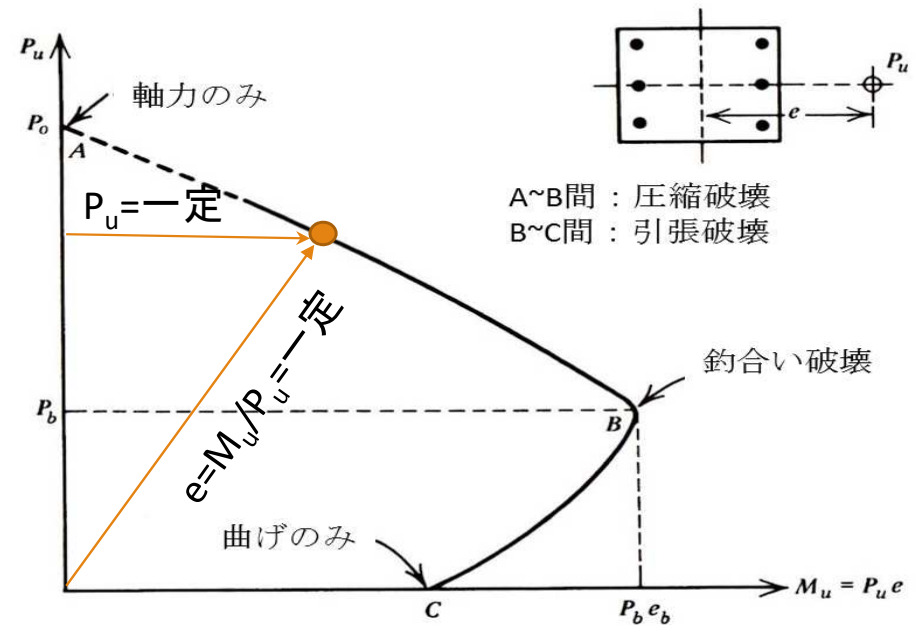
式(a)を式(b)に代入し、 P_u に関する2次方程式を解く。

$$P_u e = k_\sigma f'_c \frac{P_u + (A_s - A'_s) f_y}{k_\sigma f'_c b} b(d - d'' - 0.5 \frac{P_u + (A_s - A'_s) f_y}{k_\sigma f'_c b}) + A'_s f_y(d - d' - d'') + A_s f_y d''$$

終局荷重の算定方針

■ P_u =一定とする方法と $e=M_u/P_u$ =一定とする方法がある。

■ ここでは $e=M_u/P_u$ =一定とする方法を紹介



柱断面の終局荷重 P_u — 曲げ引張破壊2

■ 圧縮鉄筋が降伏しない場合

ひずみ分布の相似性より

$$\frac{\varepsilon'_{cu}}{c} = \frac{\varepsilon'_s}{c-d'} \quad \therefore f'_s = E_s \varepsilon'_s = E_s \frac{c-d'}{c} \varepsilon'_{cu} = E_s \frac{a-\beta_1 d'}{a} \varepsilon'_{cu}$$

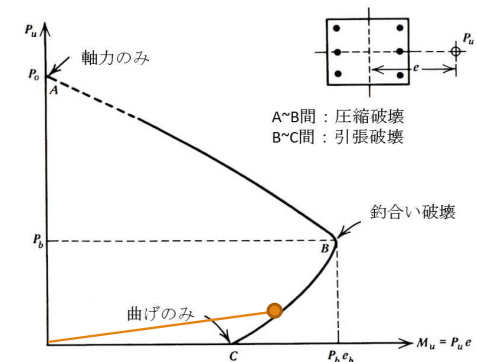
$$\text{軸力の釣合い: } P_u = k_\sigma f'_c ab + A'_s f'_s - A_s f_y = k_\sigma f'_c ab + A'_s E_s \frac{a-\beta_1 d'}{a} \varepsilon'_{cu} - A_s f_y \quad (c)$$

$$\text{曲げモーメント: } P_u e = k_\sigma f'_c ab (d - d'' - 0.5a) + A'_s f'_s (d - d' - d'') + A_s f_y d'' \quad (d)$$

式(c)を式(d)に代入して、

$$\begin{aligned} & \left[k_\sigma f'_c ab + A'_s E_s \frac{a-\beta_1 d'}{a} \varepsilon'_{cu} - A_s f_y \right] e \\ &= k_\sigma f'_c ab (d - d'' - 0.5a) + A'_s E_s \frac{a-\beta_1 d'}{a} \varepsilon'_{cu} (d - d' - d'') + A_s f_y d'' \end{aligned}$$

a に関する3次方程式を解き、式(c)に代入して終局荷重 P_u を求める。



柱断面の終局荷重 P_u 一曲げ圧縮破壊1

■ 圧縮鉄筋が降伏する場合(引張鉄筋は降伏しない)

ひずみ分布の相似性より

$$\frac{\varepsilon'_{cu}}{c} = \frac{\varepsilon_s}{d-c} \quad \therefore f_s = E_s \varepsilon_s = E_s \frac{d-c}{c} \varepsilon'_{cu} = E_s \frac{\beta_1 d - a}{a} \varepsilon'_{cu}$$

$$\text{軸力の釣合い: } P_u = k_\sigma f'_c ab + A'_s f_y - A_s f_s = k_\sigma f'_c ab + A'_s f_y - A_s E_s \frac{\beta_1 d - a}{a} \varepsilon'_{cu} \quad (e)$$

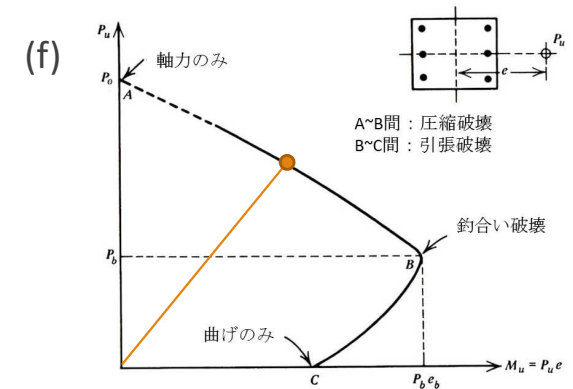
$$\begin{aligned} \text{曲げモーメント: } P_u e &= k_\sigma f'_c ab(d - d'' - 0.5a) + A'_s f_y(d - d' - d'') + A_s f_s d'' \\ &= k_\sigma f'_c ab(d - d'' - 0.5a) + A'_s f_y(d - d' - d'') + A_s E_s \frac{\beta_1 d - a}{a} \varepsilon'_{cu} d'' \end{aligned}$$

式(e)を式(f)に代入して、

$$\left[k_\sigma f'_c ab + A'_s f_y - A_s E_s \frac{\beta_1 d - a}{a} \varepsilon'_{cu} \right] e$$

$$= k_\sigma f'_c ab(d - d'' - 0.5a) + A'_s f_y(d - d' - d'') + A_s E_s \frac{\beta_1 d - a}{a} \varepsilon'_{cu} d''$$

a に関する3次方程式を解き、式(e)に代入して終局荷重 P_u を求める。



柱断面の終局荷重 P_u 一曲げ圧縮破壊2

■ 圧縮鉄筋が降伏しない場合

ひずみ分布の相似性より

$$\text{引張鉄筋: } \frac{\varepsilon'_{cu}}{c} = \frac{\varepsilon_s}{d-c} \quad \therefore f_s = E_s \varepsilon_s = E_s \frac{d-c}{c} \varepsilon'_{cu} = E_s \frac{\beta_1 d - a}{a} \varepsilon'_{cu}$$

$$\text{圧縮鉄筋: } \frac{\varepsilon'_{cu}}{c} = \frac{\varepsilon'_s}{c-d'} \quad \therefore f'_s = E_s \varepsilon'_s = E_s \frac{c-d'}{c} \varepsilon'_{cu} = E_s \frac{a - \beta_1 d'}{a} \varepsilon'_{cu}$$

$$\text{軸力の釣合い: } P_u = k_\sigma f'_c ab + A'_s f'_s - A_s f_s = k_\sigma f'_c ab + A'_s E_s \frac{a - \beta_1 d'}{a} \varepsilon'_{cu} - A_s E_s \frac{\beta_1 d - a}{a} \varepsilon'_{cu} \quad (\text{g})$$

$$\begin{aligned} \text{曲げモーメント: } P_u e &= k_\sigma f'_c ab (d - d'' - 0.5a) + A'_s f'_s (d - d' - d'') + A_s f_s d'' \\ &= k_\sigma f'_c ab (d - d'' - 0.5a) + A'_s E_s \frac{a - \beta_1 d'}{a} \varepsilon'_{cu} (d - d' - d'') + A_s E_s \frac{\beta_1 d - a}{a} \varepsilon'_{cu} d'' \end{aligned} \quad (\text{h})$$



次スライドへ

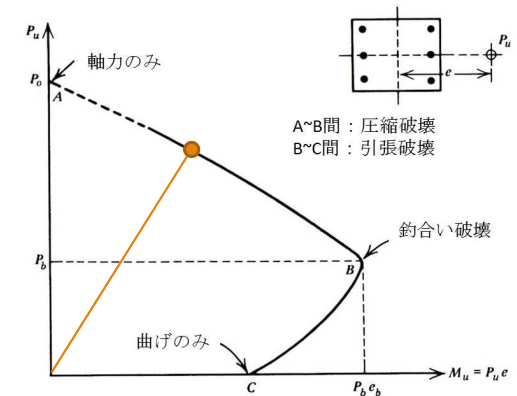
柱断面の終局荷重 P_u 一曲げ圧縮破壊2

■ 続き（圧縮鉄筋、引張鉄筋とも降伏しない場合）

式(g)を式(h)に代入して、

$$\left[k_{\sigma} f'_c ab + A'_s E_s \frac{a - \beta_1 d'}{a} \varepsilon'_{cu} - A_s E_s \frac{\beta_1 d - a}{a} \varepsilon'_{cu} \right] e$$
$$= k_{\sigma} f'_c ab (d - d'' - 0.5a) + A'_s E_s \frac{a - \beta_1 d'}{a} \varepsilon'_{cu} (d - d' - d'') + A_s E_s \frac{\beta_1 d - a}{a} \varepsilon'_{cu} d''$$

a に関する3次方程式を解き、式(g)に代入して終局荷重 P_u を求める。



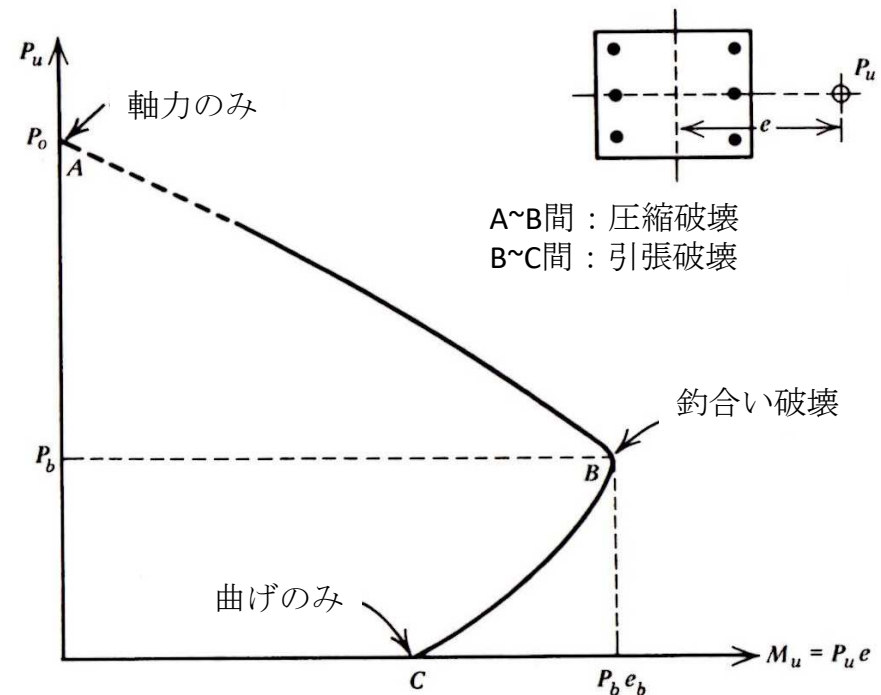
偏心軸力载荷を受ける鉄筋コンクリート柱断面の強度相関曲線

■ 曲げ圧縮破壊域：

- ・ 曲線ABを与える軸力と偏心量の組合せ
- ・ 軸力の増加にともないモーメント強度が減少

■ 曲げ引張破壊域：

- ・ 曲線BCを与える軸力と偏心量の組合せ
- ・ 引張鉄筋の降伏が圧縮コンクリートの圧壊に先行
- ・ 軸力の増加にともないモーメント強度が増加



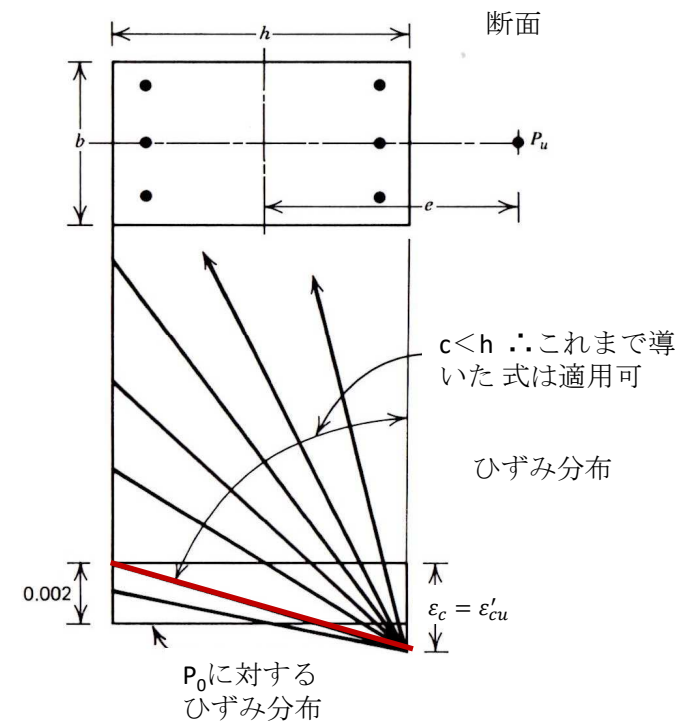
強度相関曲線の適用限界

■ $c > h$ のとき、

これまで導いた式はそのままでは使用不可 ∵ 中立軸位置が断面の外側となり応力ブロックの形状が異なる

■ $c \rightarrow \infty$ のとき、

偏心距離が0、終局荷重が P_0 となる。この際、 P_0 に対応するひずみは $\varepsilon_c = \varepsilon'_{cu}$ の断面内一様分布となる。



練習問題

軸力－偏心モーメントの強度相関曲線を計算する

■単鉄筋長方形断面

1辺20in(508mm)正方形断面、かぶり厚さ2.5in(63.5mm)
 $A_s = A'_s = 4\text{in}^2$ の対象補強

■材料

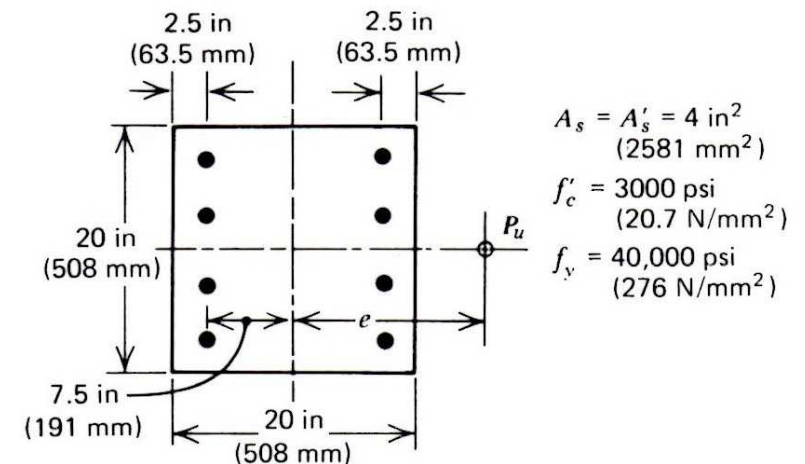
$$f'_c = 3000\text{psi} (20.7\text{N/mm}^2)$$

$$f_y = 40,000\text{psi} (275.8\text{N/mm}^2)$$

$$E_s = 29 \times 10^6\text{psi} (0.20 \times 10^6\text{N/mm}^2)$$

■ $A_s = (1) 4\text{in}^2 (2581\text{mm}^2)$ 、 $(2) 8\text{in}^2 (5161\text{mm}^2)$ 、

(3) 釣合い鉄筋比のときのモーメント強度をそれぞれ計算せよ。



釣合い破壊(1)

■ 引張鉄筋は降伏: $f_s = f_y$

■ 圧縮鉄筋は降伏を仮定: $f'_s = f_y$

■ 圧縮応力ブロック深さ: a_b

$\varepsilon'_{cu} = 0.003$ 、 $\beta_1 = 0.85$ を仮定。 $k_\sigma = 0.85$ 。

$$\begin{aligned} a_b &= \beta_1 c_b = \frac{\varepsilon'_{cu} E_s}{f_y + \varepsilon'_{cu} E_s} \beta_1 d \\ &= \frac{0.003 \times 29 \times 10^6}{40000 + 0.003 \times 29 \times 10^6} \times 0.85 \times (20 - 2.5) = 10.19 in \end{aligned}$$

釣合い破壊(2)

■軸力

$$\begin{aligned}P_b &= k_\sigma f'_c ab + A'_s f_y - A_s f_y = k_\sigma f'_c ab \\ &= 0.85 \times 3000 \times 10.19 \times 20 = 519,700lb \text{ (2310kN)}\end{aligned}$$

■モーメント

鉄筋が対称配置されており、塑性中心が断面中心に一致していることを考慮して(従って $d'' = 7.5in$)、

$$\begin{aligned}P_b e_b &= k_\sigma f'_c ab(d - d'' - 0.5a) + A'_s f_y(d - d' - d'') + A_s f_s d'' \\ &= 519700 \times (17.5 - 7.5 - 0.5 \times 10.19) + 4 \times 40000 \times (17.5 - 2.5 - 7.5) + 4 \times 40000 \times 7.5 \\ &= 4.95 \times 10^6 lb \cdot in \text{ (559kN} \cdot m\text{)}\end{aligned}$$

釣合い破壊(3)

■ 圧縮鉄筋応力のチェック

■ 中立軸位置

$$c_b = a_b / \beta_1 = 10.19 / 0.85 = 11.99 \text{ in (305 mm)}$$

■ 鉄筋降伏ひずみ

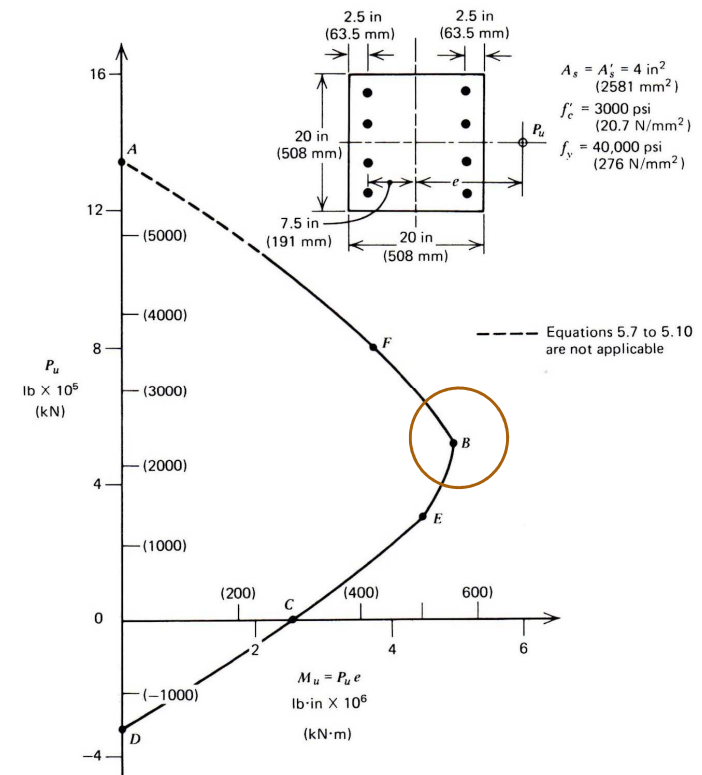
$$\frac{f_y}{E_s} = \frac{40,000}{29 \times 10^6} = 0.00138$$

■ 鉄筋ひずみ

$$\varepsilon'_s = 0.003 \frac{11.99 - 2.5}{11.99} = 0.00237 > 0.00138$$

圧縮鉄筋は仮定した通り降伏している。

■ P_b および $P_b e_b$ の計算値は図中の点B



曲げ引張破壊(1)

■ $P_u < P_b$ に対しては、 $f_s = f_y$

■ $P_u = 300,000\text{lb}$ (1330kN) $< P_b$ を考える

■ 圧縮鉄筋もまた降伏すると仮定

■ 軸力の釣合い:

$$P_u = k_\sigma f'_c ab + A'_s f_y - A_s f_y = 0.85 f'_c ab$$

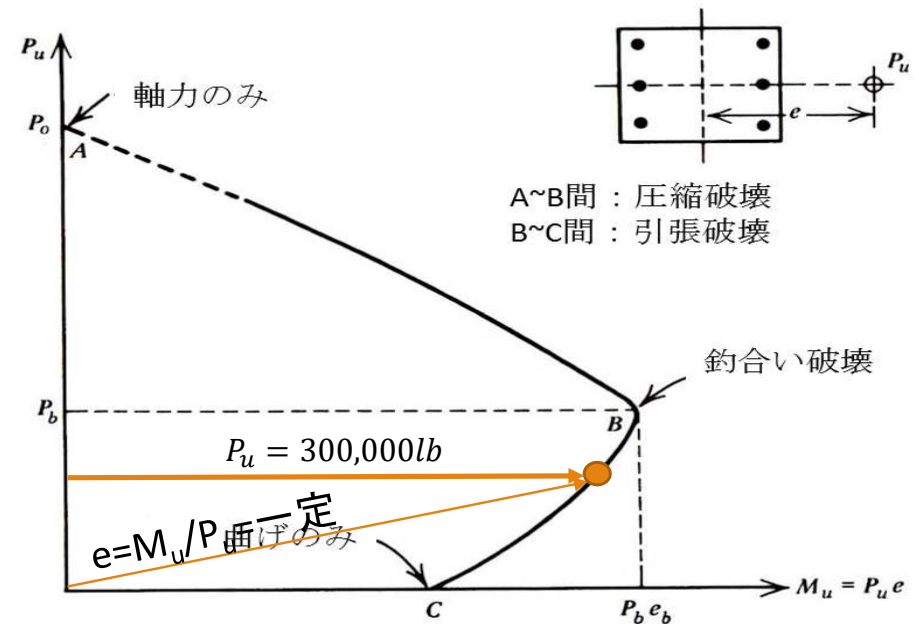
$$300000 = 0.85 \times 3000 \times a \times 20$$

$$\therefore a = 5.88\text{in} \text{ また、 } c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{5.88}{0.85} = 6.92\text{in}$$

■ 圧縮鉄筋ひずみ

$$\epsilon'_s = \frac{c-d'}{c} \epsilon'_{cu} = \frac{a-\beta_1 d'}{a} \epsilon'_{cu} = \frac{6.92-2.5}{6.92} 0.003$$

$$= 0.00192 > 0.00138 \quad \text{仮定した通り降伏}$$



曲げ引張破壊(2)

■モーメント

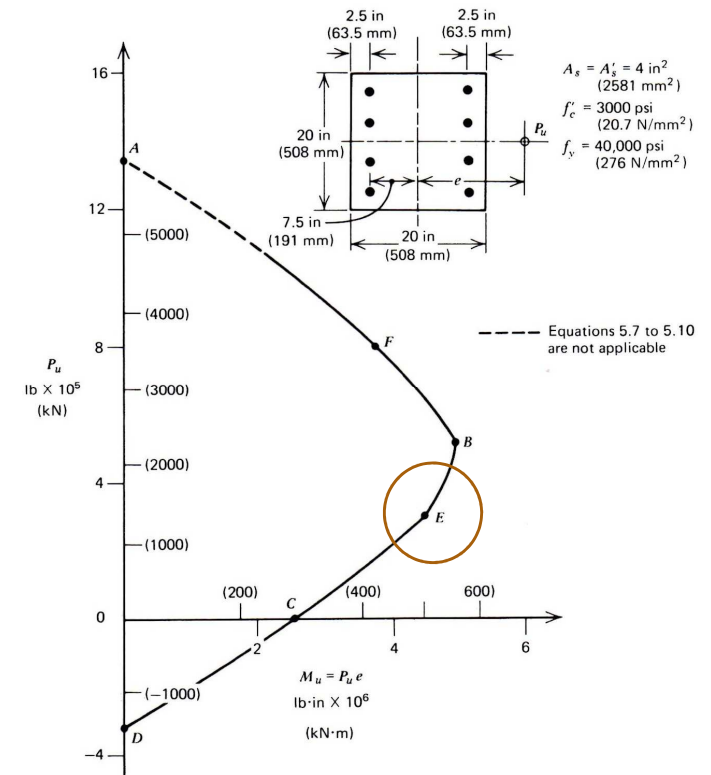
$$P_u e = k_\sigma f'_c ab(d - d'' - 0.5a) + A'_s f_y (d - d' - d'') + A_s f_y d''$$

$$= k_\sigma f'_c ab(d - d'' - 0.5a) + A'_s f_y (d - d' - d'') + A_s f_y d''$$

$$300,000(17.5 - 7.5 - 0.5 \times 5.88)$$

$$+ 2 \times 4 \times 40,000 \times 7.5 = 4.52 \times 10^6 \text{ lb} \cdot \text{in} \text{ (510 kN} \cdot \text{m)}$$

これを点Eとして図中に示す。



曲げ引張破壊—純曲げ(1)

■ $P_u \rightarrow 0$ 、 $e=0$ の状態

■ $A'_s=A_s$ であり $f'_s < f_y$ は自明

■ 圧縮鉄筋応力

$$\begin{aligned} f'_s &= \varepsilon'_{cu} \frac{c-d'}{c} E_s = 0.003 \frac{a-\beta_1 d'}{a} E_s \\ &= 0.003 \frac{a-0.85 \times 2.5}{a} \times 2.9 \times 10^6 = 87,000 \frac{a-2.215}{a} \text{ psi} \end{aligned}$$

■ 軸力の釣合式

$$P_u = k_\sigma f'_c ab + A'_s f'_s - A_s f_y = 0$$

$$\therefore 0.85 \times 3000 \times 20a + 4 \times 87,000 \frac{a-2.215}{a} - 4 \times 40,000 = 0$$

$$a^2 + 3.69a - 14.51 = 0$$

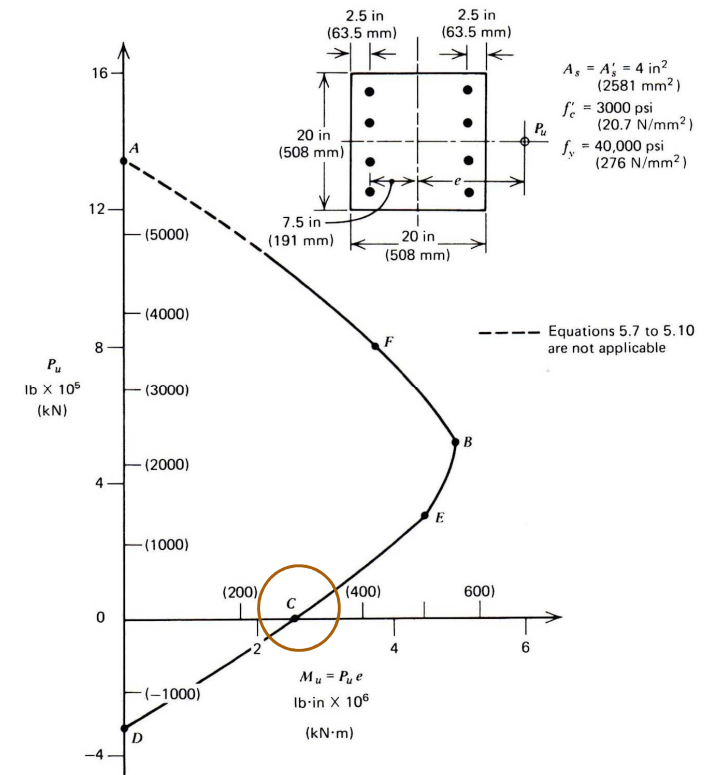
$$\text{2次方程式を解くと、} a = 2.39 \text{ in (60.7 mm)} \quad \text{圧縮鉄筋応力: } f'_s = 87,000 \frac{2.39-2.215}{2.39} = 9650 \text{ psi}$$

曲げ引張破壊—純曲げ(2)

■モーメント:

$$\begin{aligned}
 M_u &= P_u e \\
 &= k_\sigma f'_c ab(d - d'' - 0.5a) + A'_s f_s(d - d' - d'') + A_s f_y d'' \\
 &= 0.85 \times 3000 \times 2.39 \times 20(17.5 - 7.5 - 0.5 \times 2.39) \\
 &\quad + 4 \times 9650 \times (17.5 - 2.5 - 7.5) + 4 \times 40,000 \times 7.5 \\
 &= 2.56 \times 10^6 \text{ lb} \cdot \text{in} \text{ (} 289 \text{ kN} \cdot \text{m)}
 \end{aligned}$$

$M_u = P_u e$ の計算値は図中のC点



曲げ圧縮破壊(1)

■ $P_u = 800000lb > P_b$ の場合を考える

■ $P_u > P_b$ のときは、 $f_s < f_y$ (引張鉄筋は降伏しない)

■ $P_u = P_b$ のとき圧縮鉄筋は降伏した。 $\therefore$ これより大きな軸力に対しては降伏する $\Rightarrow f'_s = f_y$

■ 引張鉄筋応力:

$$f_s = E_s \frac{\beta_1 d - a}{a} \epsilon'_{cu} = 29 \times 10^6 \times 0.003 \times \frac{0.85 \times 17.5 - a}{a} = 87,000 \frac{14.88 - a}{a}$$

■ 軸力の釣合い:

$$P_u = k_\sigma f'_c ab + A'_s f_y - A_s f_s = k_\sigma f'_c ab + A'_s f_y - A_s E_s \frac{\beta_1 d - a}{a} \epsilon'_{cu}$$

$$80,000 = 0.85 \times 3000 \times 20a + 4 \times 40,000 - 4 \times 87,000 \frac{14.88 - a}{a}$$

$$\therefore 0 = a^2 - 5.725a - 101.5$$

2次方程式の解は $a = 13.34in(334mm)$

曲げ圧縮破壊(2)

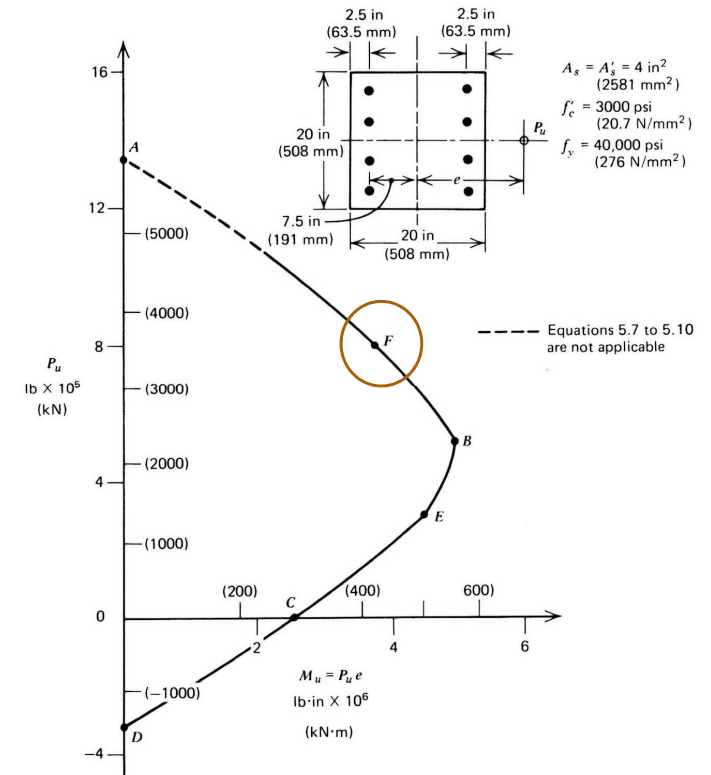
■引張鉄筋応力:

$$f_s = 87,000 \frac{14.88 - 13.34}{13.34} = 10,040 \text{ psi} (69.3 \text{ N/mm}^2)$$

■モーメント:

$$\begin{aligned} P_u e &= k_\sigma f'_c ab(d - d'' - 0.5a) + A'_s f_y (d - d' - d'') + A_s f_s d'' \\ &= 0.85 \times 3000 \times 13.34 \times 20 \times (17.5 - 7.5 - 0.5 \times 13.34) \\ &\quad + 4 \times 40,000 \times (17.5 - 2.5 - 7.5) + 4 \times 10,040 \times 7.5 \\ &= 3.77 \times 10^6 \text{ lb} \cdot \text{in} (426 \text{ kN} \cdot \text{m}) \end{aligned}$$

この点を図中のFに示す。



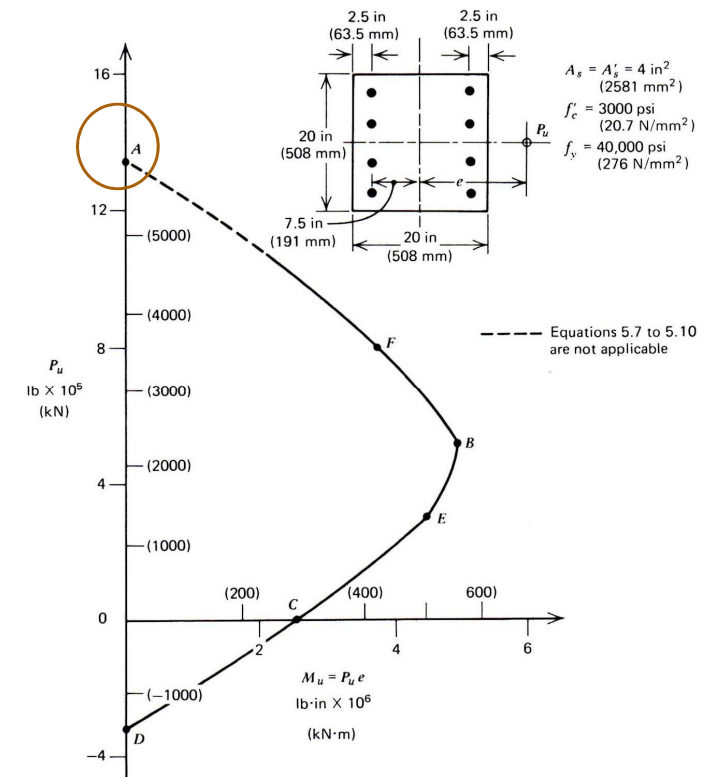
曲げ圧縮破壊(3): 軸圧縮強度

■ 曲げ圧縮破壊の極値 ($e = 0$)

P_u は最大値をとる

$$\begin{aligned} P_u &= P_0 = k_\sigma f'_c ab + A'_s f_y + A_s f_y \\ &= 0.85 \times 3000 \times 20 \times 20 + 2 \times 40,000 \times 4 = 1,340,000 \text{ lb} \end{aligned}$$

図中のA点



軸引張強度

■コンクリートの引張強度は無視

$$P_u = -A'_s f_y - A_s f_y$$

$$= -2 \times 40,000 \times 4 = -320,000 lb \ (-1420 kN)$$

図中のD点

■ $P_u = 0 \sim -320,000 lb$ 間(C~D間)の曲げ強度については、曲げ引張破壊の場合の式から求めることができる。

