4. 柱の耐荷力（その1）　－短柱の耐荷力－

4.1　はじめに

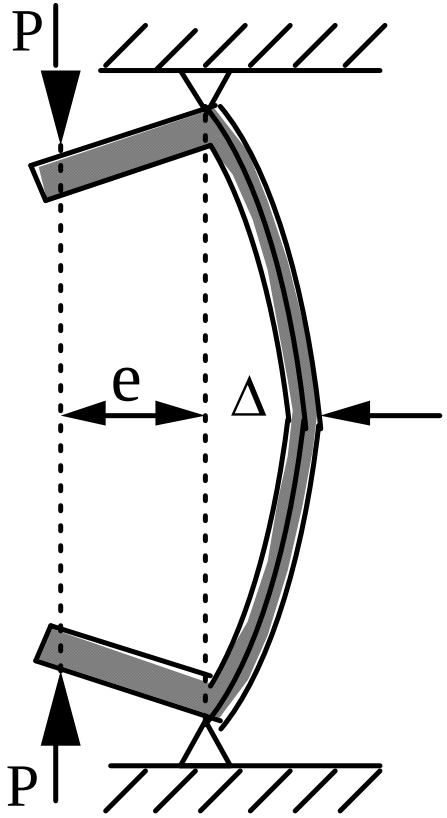
○「柱」部材→　構造物中の垂直部材。
主として圧縮力を受け持つ。ただし、曲げを伴う場合が多い。
○→「曲げ＋軸圧縮力」を受ける部材
○耐荷力の点から見たRC柱の種類
　　(a) 短柱（たんちゅう）
　　(b) 長柱（ちょうちゅう）

○短柱
断面の横寸法に比較して、高さが短い柱。
耐荷力は、断面寸法と材料特性のみから決まる。

○長柱
断面の寸法に比較して、高さの高い柱。
耐荷力は付加モーメントの影響により、断面自体の耐荷力よりも低下する。

◎付加モーメント

初期たわみ、あるいは偏心載荷による横方向変位と、作用する軸力（圧縮力）により付加されるモーメント。2次モーメントともいう。P−Δ効果等ともいう。



偏心載荷によるモーメント
$= P\,e$

変形に伴う2次モーメント
$= P\,\Delta$

作用モーメント
$= P\,(e + \Delta)$

付加モーメントの影響で耐荷力が低下する柱を「長柱」と称する。

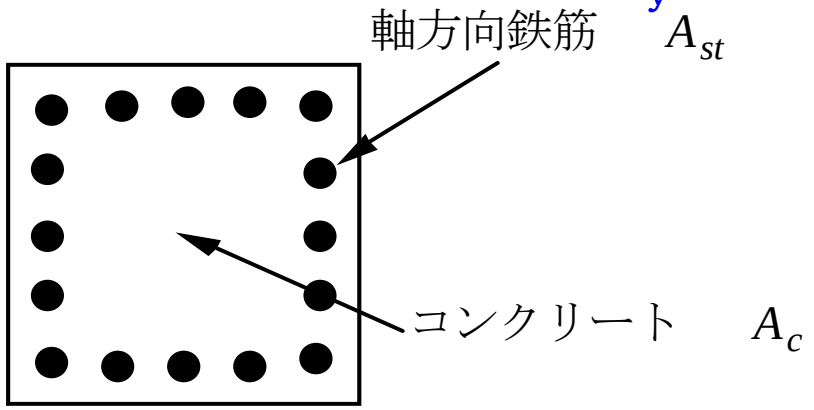
4.2　一様圧縮を受ける短柱の耐荷力

○短柱の断面図心に圧縮力が加わると一様な圧縮力が生じる。鉄筋とコンクリートが完全に付着していて、すべりがないとすると、コンクリートひずみおよび鉄筋ひずみは、部材全体の軸方向ひずみに一致する。

○鉄筋が座屈しないとき、鉄筋の圧縮降伏ひずみはおおよそ $f_y/E_s \fallingdotseq 0.002$程度。一軸圧縮下でのコンクリートの圧縮破壊ひずみは0.0035程度。したがって、コンクリートが圧縮破壊するとき、鉄筋は既に降伏していると考えられる。したがって、耐荷力N_u'は、

$$N_u' = 0.85\, f_c' \cdot A_c + f_y' \cdot A_{st} \qquad (1)$$

ただし、f_c'：コンクリートの圧縮強度、f_y'：鉄筋の圧縮降伏強度（$= f_y$）



○(1)式中の右辺の0.85の意味

→ f_c’ は円柱供試体を用いた圧縮試験より得られる。しかし、柱の中のコンクリートと円柱供試体のコンクリートではいくつかの相違点がある。

(a)締固め・養生の程度が異なる（実大の柱では供試体ほど十分ではない）。

(b)縦横の寸法比が異なる。細長いものほど弱くなる（端部拘束の影響小）。

Hognestad（米国イリノイ大学）が多数の実験を行い、0.85という値を示した。

○超高強度鉄筋を用いた場合

$\varepsilon_y' > \varepsilon_{cu}'$ のとき（コンクリートの圧壊時に鉄筋が降伏しないとき）

$$N_u' = 0.85 f_c' \cdot A_c + E_s \cdot \varepsilon_{cu}' \cdot A_{st} \quad (2)$$

ただし、E_sは鉄筋のヤング係数、ε_{cu}' はコンクリートの終局ひずみ（0.0035程度）

○短柱の破壊形態

以上の説明では、鉄筋とコンクリートが共同して、圧縮に抵抗すると仮定していた。しかし現実には、「圧縮力の作用　→　コンクリートが縮むと同時に横に膨れ出す　→　縦ひび割れの発生　→　かぶりコンクリートの剥落　→　軸方向鉄筋の座屈　→　耐荷力の低下」となって、鉄筋の降伏以前に耐荷力を失う場合がある。

○したがって、かぶりコンクリートが剥落しても、柱の軸方向鉄筋が座屈しないような配慮が必要。

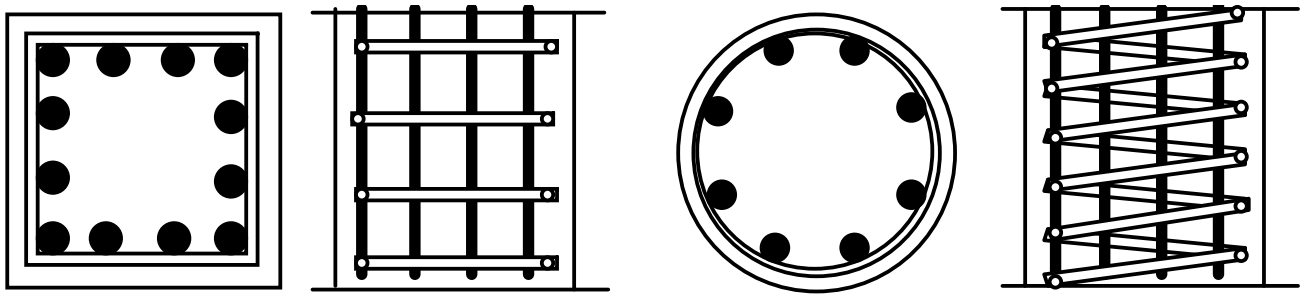
○柱の鉄筋に関する施工上の注意事項（構造細目, Detailing）

柱には、軸方向鉄筋の座屈防止のため、必ず横方向鉄筋を配置して、軸方向鉄筋を取り囲んで拘束し、座屈を防止しなければならない。

○横方向鉄筋の種類

(a)帯鉄筋（一般に矩形断面柱）　(b)らせん鉄筋（一般に円形断面柱）

必ず軸方向鉄筋を取り囲むように配置する。



(a)帯鉄筋　　(b)らせん鉄筋

また横方向鉄筋の端部は、内部のコアコンクリートにしっかりと定着しておく。最近では、大型断面に対して、中間帯鉄筋の配置が規定されている。

4.3　らせん鉄筋柱の耐荷力

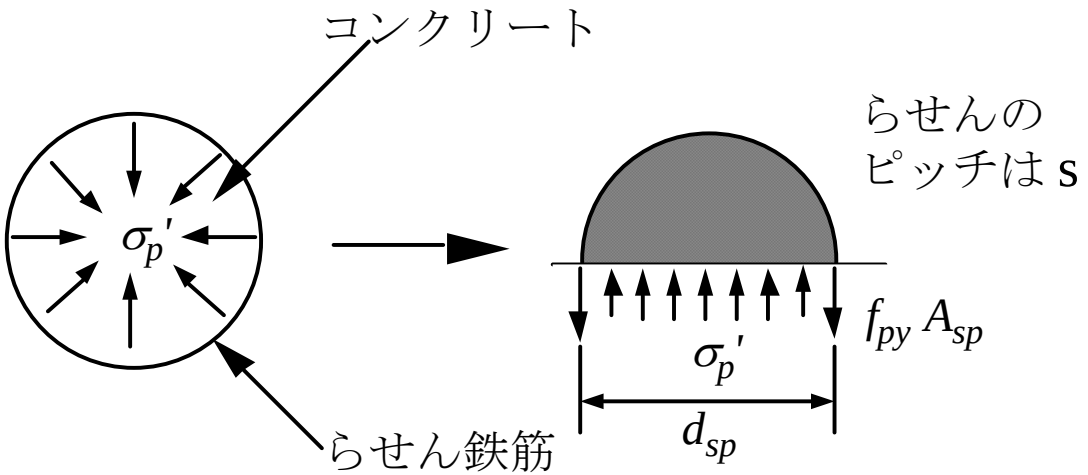
○ピッチが細かく、連続して配置されている「らせん鉄筋」は、軸方向鉄筋の座屈防止の他、耐荷力自体をさらに高める働きがある。

○軸圧縮力の作用　→コンクリートの横方向への膨張　→らせん鉄筋がこれを拘束　→コンクリートに半径方向の圧縮力が作用することになる（側圧）　→　3軸圧縮状態

3軸圧縮されるとコンクリートの軸方向強度は飛躍的に増加する。

ただし、かぶりコンクリートは拘束されないので、最終的には、かぶりコンクリートは剥落する。

◎らせん鉄筋柱の耐荷力を求める。



まず、らせん鉄筋が降伏した後に、コンクリートに作用する側圧は、

$$\sigma_p' = \frac{2 f_{py} \cdot A_{sp}}{d_{sp} \cdot s} \qquad (3)$$

ただし、f_{py}：らせん鉄筋の降伏強度
A_{sp}：らせん鉄筋の断面積
d_{sp}：らせん鉄筋が取り囲む円の直径
s　：らせん鉄筋の軸方向ピッチ

○コンクリートの3軸圧縮強度 f_{c3}' は、例えばモール・クーロンの破壊規準にしたがうとすると、側圧 σ_p' のとき、以下のように書ける。

$$f_{c3}' = f_c' + m \cdot \sigma_p' \qquad (4)$$

ただし、 $m = f_c'/f_t$ で f_t はコンクリートの引張強度

(4)式の f_{c3}' を(1)式に代入する。

$$N_u' = 0.85\ (f_c' + m\ \sigma_p')\cdot A_n + f_y' \cdot A_{st} \qquad (5)$$

ただし、A_nはらせん鉄筋が取り囲む面積(＝$\pi d_{sp}^2/4$)。
つまりかぶりコンクリートは剥離して機能しないと仮定している。
(5)式に(3)式の σ_p' を代入すると、

$$N_u' = 0.85\, f_c'\, A_n + f_y'\, A_{st} + 0.85\, \frac{2\, m\, f_{py}\, A_{sp}}{d_{sp}\, s}\, \frac{\pi\, d_{sp}^{\,2}}{4}$$

$$= 0.85\, f_c'\, A_n + f_y'\, A_{st} + \frac{0.85\, \pi\, m\, d_{sp}\, f_{py}\, A_{sp}}{2\, s} \quad (6)$$

式を簡単にするため、らせん鉄筋柱の軸方向（高さ方向）の単位長さに含まれる、らせん鉄筋の体積に等しい仮想の軸方向鉄筋を想定し、この断面積をA_{spe}とする。

$$volume = A_{spe} \cdot s = A_{sp} \cdot \pi \cdot d_{sp}$$

$$A_{spe} = \frac{A_{sp} \cdot \pi \cdot d_{sp}}{s} \quad (7)$$

これを(6)式に代入すると、

$$N_u' = 0.85\, f_c'\, A_n + f_y'\, A_{st} + k\, f_{py}\, A_{spe} \quad (8)$$

ただし、**k = 0.85m/2**

◎$m = f_c'/f_t$ は通常は 10 程度であり、したがって k は 4 程度となるが、側圧が必ずしも均一には作用しないことを考慮し、土木学会のコンクリート標準示方書では十分安全側に **k = 2.5** とした設計式が規定されている。