

論文

[2161] RC 柱の終局曲げ耐力と曲げ靱性設計図表

正会員○高木 秀晃 (大阪大学大学院)  
 正会員 中塚 侑 (大阪大学建築工学科)  
 正会員 岸本 一蔵 (大阪大学建築工学科)  
 正会員 鈴木 計夫 (大阪大学建築工学科)

1. まえがき

コンクリート構造物を合理的に設計するためには、コンクリート構造部材の耐力および変形能力を正確に把握できることが不可欠である。一方、プレーンコンクリートに比べ圧縮強度が増加し、かつ粘り強さが著しく増大するコンファインドコンクリートをRC柱部材に適用すると、その力学的特性、とくに曲げ靱性が改善されることが知られている。しかし現状では、所要の曲げ靱性を確保するための横補強筋量、あるいは横補強筋がある場合の曲げ耐力を容易に知るための設計図表の類は十分に準備されていない。

本研究は、曲げ圧縮部をコンファインドコンクリートとする横補強筋をもつRC柱の曲げ耐力算定式を解析的な考察から誘導すると同時に、筆者等が既報において提示した所要曲げ靱性のための横補強筋量算定式[1]を用いて、所要の曲げ耐力と曲げ靱性に必要な主筋量と横補強筋量を簡単に求めるための設計図表の一試案を示すものである。

2. 曲げ圧縮コンファインドコンクリートが曲げ耐力および曲率変形能力に及ぼす影響

圧縮応力を受けるコンクリートが横補強筋によって拘束されると、すなわちコンファインドコンクリートになると、その応力-ひずみ度特性は図1に示すようにプレーンコンクリートに比べ、

圧縮強度、そのときのひずみ度および応力下降域の勾配が改善される。このようなコンファインドコンクリートをRC柱の曲げ圧縮部に適用すると、図2に模式的に示すように(同図では簡単化のためにかぶりコンクリートは無視している)、

圧縮強度および圧縮ひずみ能力の改善によって、中立軸深さの減少、ストレスブロック係数 $k_2$ の増大が生じて、曲げ圧縮コンクリート合力の作用位置が圧縮縁側に移動するため曲げ耐力が増加し、また圧縮ひずみ能力の増大によって曲率変形も画期的に改善される。図4は、図3に示す解析断面において曲げ圧縮部コンクリートの応力-ひずみ関係が横補強筋比 $p_s$ の増加によって変化するとき、最大耐力 $M_u$

$M_p, M_{cf}$ : プレーンおよびコンファインドコンクリートを有する断面に作用する曲率モーメント  
 $N$ : 断面に作用する軸力  
 $X_n, X_{ncf}$ : プレーンおよびコンファインドコンクリートの場合における中立軸深さ  
 $T, C_s, (T_y, C_y)$ : 引張鉄筋および圧縮鉄筋の合力(ならびにそれらの降伏合力)  
 $C_{cp}, C_{cf}$ : 曲げ圧縮コンクリートの合力  
 $\epsilon_{up}, \epsilon_{ucf}$ : プレーンおよびコンファインドコンクリートの終局ひずみ度

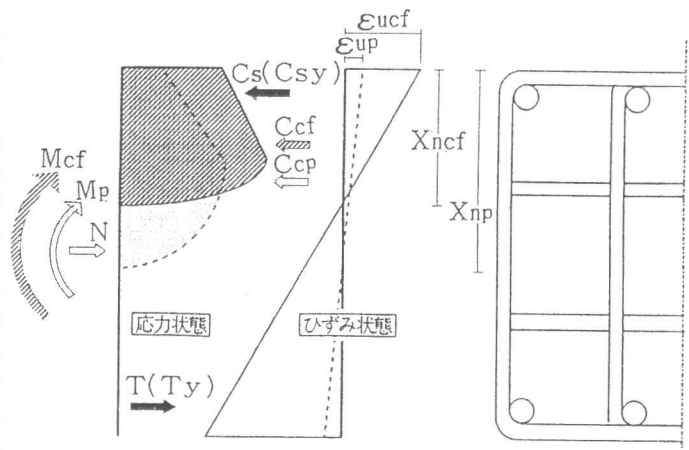


図2:コンファインド補強がMや $\phi$ に及ぼす影響 (N=一定)

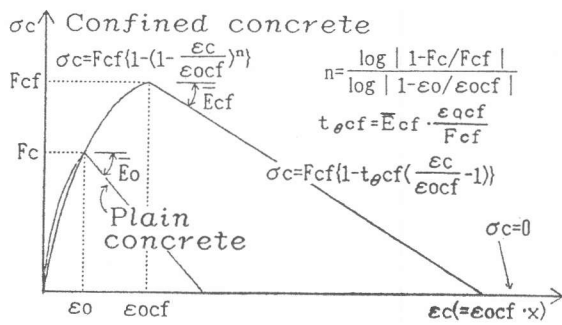


図1: コンクリートの応力度-ひずみ度関係

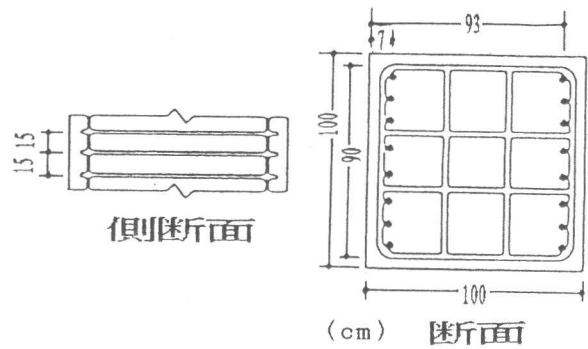


図3: 解析断面 (囲型補強)

点時および終局限界点 $L_c$ 点時[2]での曲げ耐力および曲率変形がどのように変化するかを示した逐次解析例である。ここで、逐次解析とは平面保持仮定下においてひずみ適合条件と力のつりあい条件を満足する曲げモーメントを、漸増する圧縮縁ひずみ度に対して逐次求めていく断面解析のことである。また同解析では図1に示すコンクリートの応力度-ひずみ度関係と完全弾塑性型の主筋の応力度-ひずみ度関係を仮定している。同図によれば、最大耐力 $M_u$ に及ぼす $p_s$ の影響は低軸力比 $\eta$  ( $=N/bDf_c$ )の範囲ではほとんどみられないが、高 $\eta$ の領域では顕著である。また、 $M_u$ 点時の曲率は、絶対値としてはあまり大きくないが $p_s$ の増加にほぼ比例して増大する。曲率には耐力の場合よりも低い軸力比で $p_s$ の影響が認められるが、これは圧縮部コンクリートの合力位置に比べ、ひずみ能力の方がより敏感にコンファインド補強の影響を受ける為と思われる。終局限界点 $L_c$ 点での曲げ耐力は最大耐力の場合より一層小さい $\eta$ から、 $p_s$ の増大によって増加し始める。また同時点での曲率は、 $p_s$ の増大によって圧縮強度時ひずみ及び応力下降域の勾配が改善されるため、画期的に増大する。

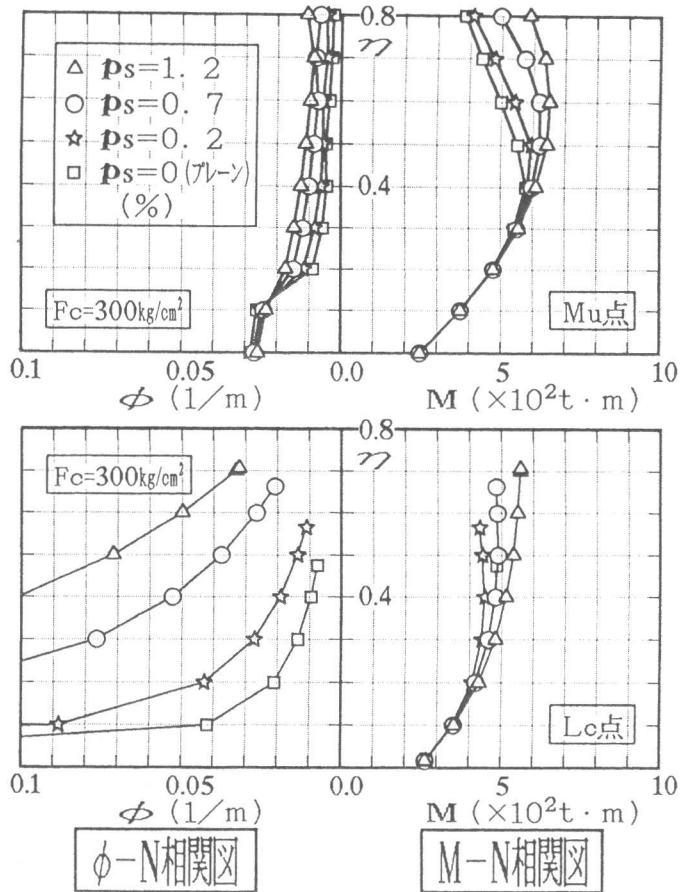


図4: M-Nおよび $\phi$ -N相関関係に及ぼす $p_s$ の影響

### 3. 終局曲げ強度算定式

横補強筋が増加すると高軸力比において曲げ耐力の増加することが前節で示されたが、本節では圧縮側と引張側に等量の軸筋が配置された、図3に示す柱断面を対象として、終局曲げ強度算定式を導く。

まずコンファインドコンクリートの場合の終局曲げ強度算定式を誘導するベースとなるプレーンコンクリートの場合の算定式を考える。図5中の実線は曲げ圧縮部がプレーンコンクリートである

柱断面に対する逐次解析から算出した解析断面についての無次元化曲げ耐力 $m_u (=M_u/bD^2F_c)$ —軸力比 $\eta$ 関係を、各引張鉄筋係数 $q(=p_s \sigma_y/F_c)$ について、コンクリート強度 $F_c$ をパラメータとして示したものである。同図によれば各 $q$ の $m_u$ — $\eta$ 関係に対する $F_c$ の相違による差は小さいので、プレーンコンクリートの場合の $m_u$ — $\eta$ 関係を $F_c$ に関わらず一種の算定式で与えられるとする。低 $\eta$ の範囲( $\eta$ が約0.45以下)では、引張及び圧縮鉄筋が降伏しているときの曲げモーメントつりあい式である(1)式を変形した(2)式において $k_2/k_1k_3=0.55$ とした曲線が、図5中の一点鎖線で示されるように、逐次解析から得られる $m_u$ — $\eta$ 曲線を良好に近似している。

しかし、(2)式は引張鉄筋の降伏が生じなくなる高 $\eta$ 領域( $\eta$ が約0.45以上)では、同図中に示されるように近似度が悪くなる。そのため、本報告では種々の検討から(2)式で $\eta \leq 0.45(=k_1k_3/4k_2)$ の範囲では(2)式と同一式を表し、 $\eta > 0.45(=k_1k_3/4k_2)$ では上述の近似度を改善するため下記のような $q$ の関数である係数 $a_1, a_2$ を用いる(3)式で $m_u$ — $\eta$ 関係を近似することとした。図5中に点線で(3)式による曲線を示すが、各 $q$ に対する $m_u$ — $\eta$ 曲線を良好に近似している。

$$m_u = T_v(d_t - \frac{D}{2}) + C_c(\frac{D}{2} - d_c) + C_c(\frac{D}{2} - k_2 \cdot X_n) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$m_u = -\frac{k_2}{k_1k_3}(\eta - \frac{k_1k_3}{4k_2})^2 + \frac{k_2}{16 \cdot k_1k_3} + (1-2d_t)q \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$m_u = -0.55 \cdot a_1 \cdot (\eta - 0.45)^2 + 0.03 + (1-2d_t)q \quad \dots\dots\dots (3)$$

$\eta \leq 0.45$ のとき  $a_1=1, a_2=2$

$\eta > 0.45$ のとき  $a_1 = \frac{0.7}{100 \cdot q + 1} + \frac{3}{4}q + 0.3, a_2 = \frac{1}{50 \cdot q + 1} + 1$

$D$ : 柱の一辺長さ,  $d_c$ : 圧縮縁から圧縮鉄筋重心までの距離  
 $d_t$ : 圧縮縁から引張鉄筋重心までの距離,  $X_n$ : 中立軸深さ  
 $C_c$ : コンクリート合力

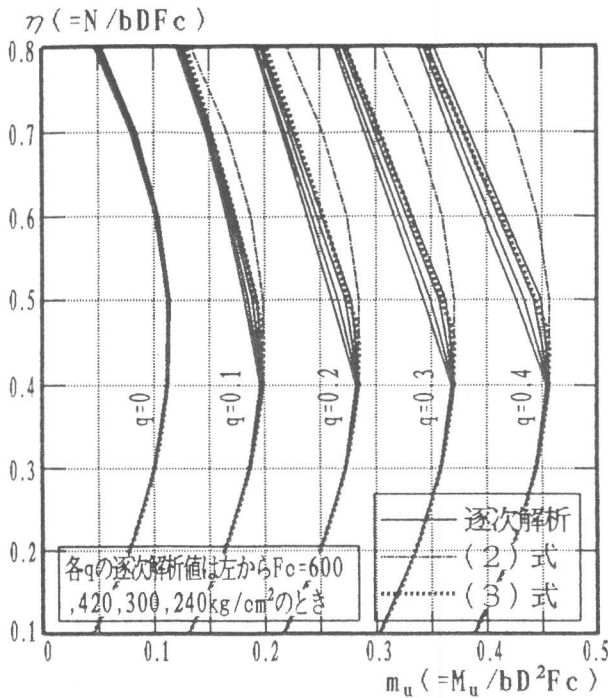


図5:  $m_u$ — $\eta$  相関関係に及ぼす  $F_c$  の影響

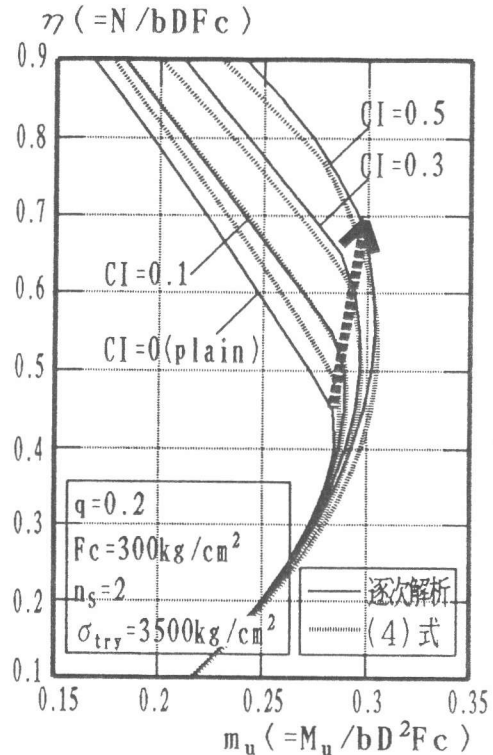


図6:  $m_u$ — $\eta$  相関関係に及ぼす CI の影響

次に、高 $\eta$ 領域において $M_u$ の増大がみられるコンファインドコンクリートの場合の算定式について述べる。図6中の実線は、解析断面の横拘束の程度のみを変化させたとき $m_u-\eta$ 関係がどのように変化するかを、横拘束指標CIをパラメータにとって示したものである。ここで、CIは一律な拘束力をコンクリートに与える拘束筋の形状が円形の場合でのプレーンコンクリートからの増加強度比 $(F_{cf}-F_c)/F_c$ を示すもので、圧縮強度以外の特性値もそれを利用して表示できる、 $CI=4.41 \cdot p_s \cdot \sigma_{tr} \cdot (1-1.24 \cdot S/D_c)/F_c$ で示される指標である[3]。同図によればコンファインドコンクリートの場合の $m_u-\eta$ 曲線はプレーンコンクリートの場合のそれに比べ、釣合軸力点が矢印で示すように $m_u$ と $\eta$ が大なる方向に移動する傾向がある。それ故ここでは、(3)式での釣合軸力点( $\eta=k_1 k_3/4k_2$ )を係数 $a_3$ を使って移動させ、かつ、そのときに生ずる釣合軸力点での $m_u$ に対する修正項を付加した(4)式によってコンファインドコンクリートの場合の $m_u-\eta$ 関係を表すこととした。CIと $F_c$ を変化させた種々の検討によれば、 $a_3$ と $a_4$ をそれぞれ(5)及び(6)式のように与えると、図6中の破線のように逐次解析結果を良好に近似できた。

$$m_u = -a_1 \cdot a_3 \cdot \left(\eta - \frac{1}{4 \cdot a_3}\right)^2 + \frac{1}{16 \cdot a_3} + (1-2d_t)q + (a_3-a_4) \eta^2 \dots \dots \dots (4)$$

$$\eta \leq 1/4 \cdot a_3 \text{ のとき } \quad a_1=1, \quad a_2=2$$

$$\eta > 1/4 \cdot a_3 \text{ のとき } \quad a_1 = \frac{0.7}{100 \cdot q+1} + \frac{3}{4} q+0.3, \quad a_2 = \frac{1}{50 \cdot q+1} + 1$$

$$a_3 = \frac{F_c}{4000} - 0.4 \cdot CI + 0.45 \dots \dots (5), \quad a_4 = \frac{F_c}{18000} - \left(\frac{F_c}{4500} + 0.21\right) \cdot CI + 0.55 \dots \dots (6)$$

次に、既往の実験データ[4~11]を用いて本算定式の適合性を検証する。図7は、曲げ耐力実験値 $eM_u$ を算定値および逐次解析値で除したものを、横軸に軸力比をとってプロットしたものである。なお、柱試験体に関する諸要因の範囲は次のようであった。CI=0.088~1.164,  $F_c=289\sim 1015\text{kg}/\text{cm}^2$ ,  $\eta=0.19\sim 0.72$ ,  $n_s=2\sim 4$ 本,  $D=22\sim 35\text{cm}$ 。同図によれば本算定式は、いずれの軸力の場合でも、逐次解析と同程度の約±25%の精度で実験値を推定している。

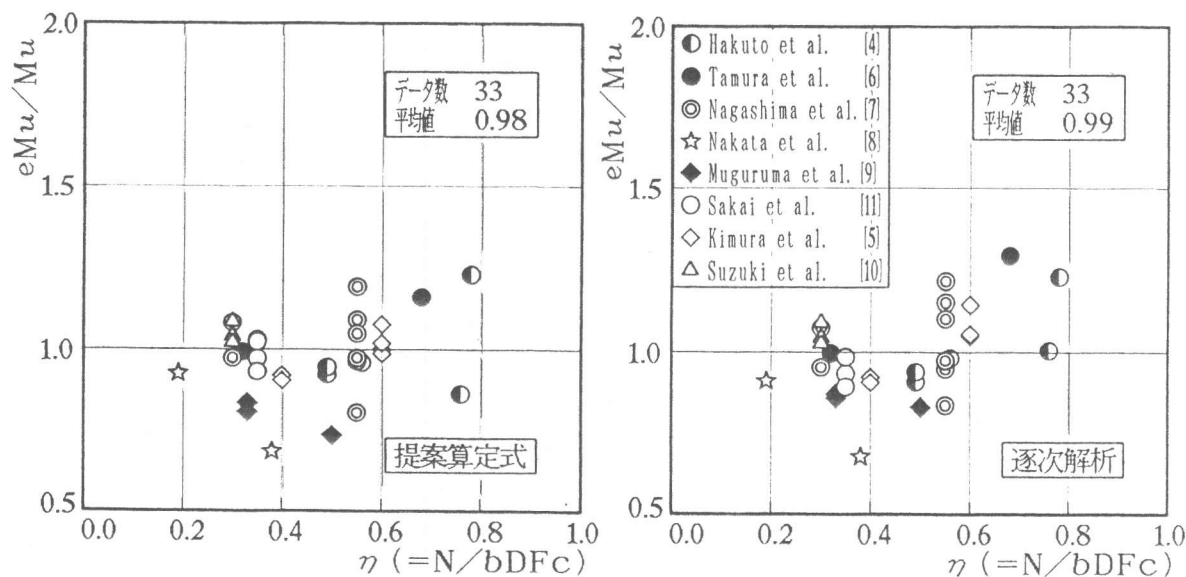


図7: 算定値及び逐次解析値の実験値との比較

#### 4. 設計図表

3節において曲げ圧縮部がコンファインドコンクリートであるRC柱の終局曲げ耐力式を誘導し

た。一方、RC柱の曲げ靱性を確保するための必要横補強筋量の算定式である(7)式が文献[1]で示されている。

$$p_s = W \cdot \left( \frac{F_c}{300} \right)^{(430/F_c + 3/7)} \dots \dots \dots (7)$$

$$W = \frac{D}{D_c} \left\{ \left( \frac{200\theta_u}{9} + \frac{8}{9} \right) \eta + 10 \cdot \theta_u - \frac{5}{12} \right\} \left( \frac{3500}{\sigma_{try}} \right)^{2/3} \left( \frac{3}{5} + \frac{4}{5n_s} \right) \left\{ \left( \frac{A_g}{A_c} \right)^{3/2} - \frac{1}{3} \right\} \left\{ \frac{5}{4} \left( \frac{S}{D} \right) + \frac{7}{8} \right\}$$

$F_c$ : コンクリート圧縮強度(kg/cm<sup>2</sup>) ,  $\theta_u$ : 塑性ヒンジ領域での所要回転角  
 $\sigma_{try}$ : 横拘束筋の降伏強度(kg/cm<sup>2</sup>) ,  $n_s$ : サブタイ本数(本) ,  $A_c/A_g$ : コア面積比  
 $S/D$ : 横拘束筋のピッチ/柱の一辺長さ ,  $D$ : 柱の一辺長さ(cm) ,  $D_c$ : コア一辺長さ(cm)

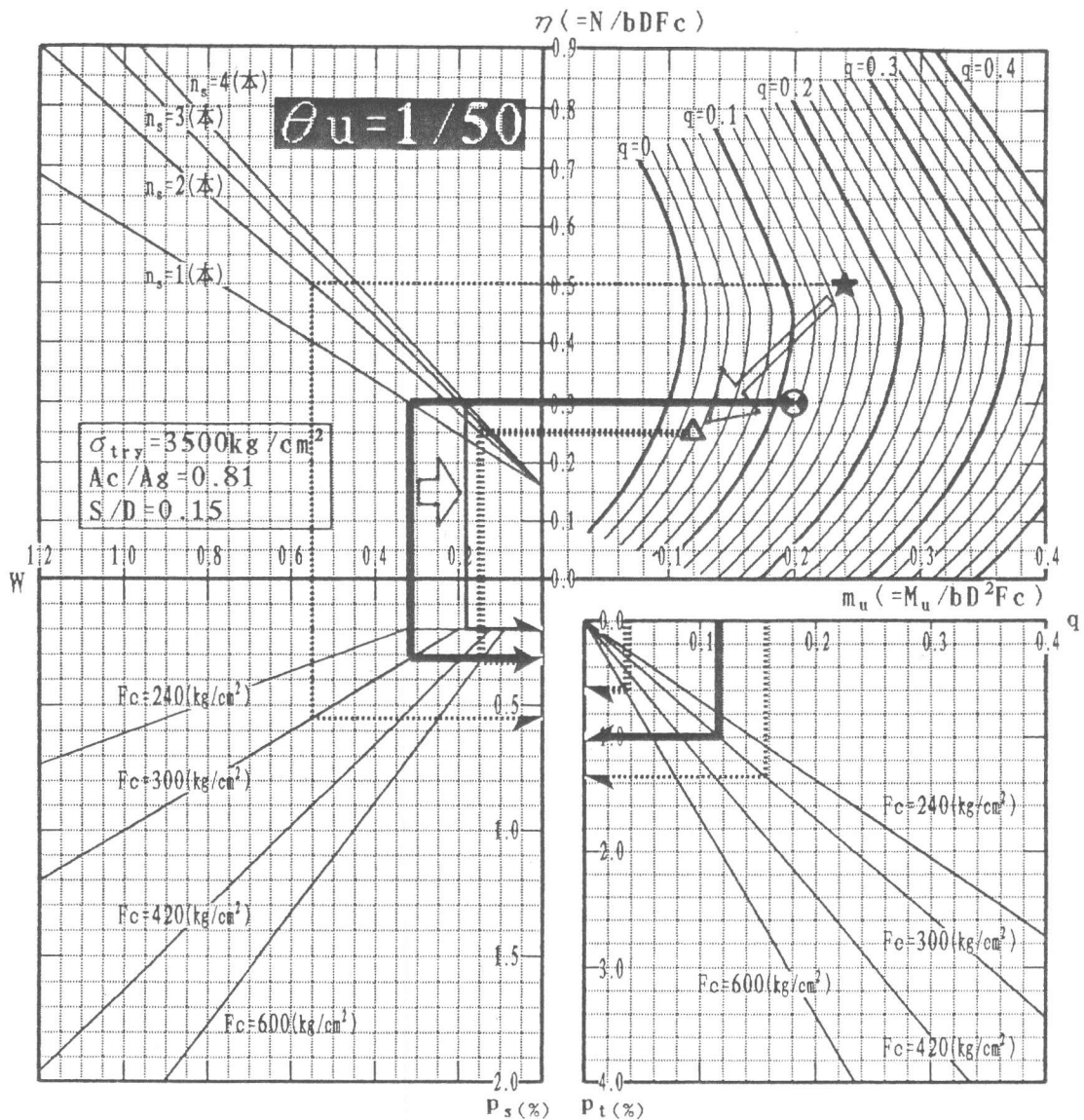


図8: 所要 $p_s$ と所要 $p_t$ を求めるためのRC柱の断面設計図表例

図8は第一象限に(3)式を用いてプレーンコンクリートの場合の $m_u - \eta$ 関係を示している。第2, 3象限には(7)式を用いて、サブタイ本数 $n_s$ やコンクリート強度 $F_c$ によって必要横補強筋比 $p_s$ がどのように変化するかを $\theta_u = 1/50$ の場合について例示している。第4象限には各 $q$ に対して必要な主

筋比 $p_t$ を $F_c$ をパラメータにして示している。

同図において、建物の構造解析から得られる柱の $(M_u, N)$ を無次元化して第一象限の $m_u - \eta$ 平面にプロットすると所要の $q$ が得られるが、いま例として $F_c=300$ で柱の $(\eta, m_u)$ が $(0.3, 0.2)$ である場合(同図中の第一象限の●印)を考えると、この柱に対して必要な横補強筋比 $p_s$ は、横補強筋の形状が田型( $n_s=1$ )の場合、同図中の実線で示すように0.3%となり、横補強筋の形状を罫型( $n_s=4$ )とすると、細い実線で示すように、最小横補強筋量(0.2%)で良いことになり、 $p_s$ が得られると柱断面の終局曲げ強度は(4)式から算出できる。なお引張主筋比 $p_t$ は第4象限の $q - p_t$ 関係から $p_t=1.0\%$ と求まる。次に、 $F_c=300$ で $(\eta, m_u)=(0.5, 0.24)$ のケース(第一象限の★点)において $F_c$ を300から600に増加させた場合を考える。 $F_c=300$ で横補強筋形状を罫型( $n_s=2$ )とすると所要 $p_s$ と $p_t$ は同図中の細い点線で示されるようにそれぞれ0.55%と1.35%になる。 $F_c=600$ とすると $\eta$ と $m_u$ が $F_c=300$ のときの1/2倍となるため $m_u - \eta$ 図でのプロット点は△印へ移動し、そのときに必要となる $p_s$ および $p_t$ は太い点線で示されるようにそれぞれ0.3%、0.6%と求まり、所要鋼材量は減少する。コンクリートの高強度化によって所要 $p_s$ が減少するという結果は、軸力比 $\eta$ の減少が曲げ靱性に大きな影響を与えることに起因する現象と推測される。

## 5. まとめ

1. 曲げ圧縮部がコンファインドコンクリートの場合にも適用できるRC柱断面の終局曲げ強度算定式を誘導し、同式が約±25%の精度で実験結果を推定できるものであることを示した。

2. 曲げ耐力に必要な主筋比 $p_t$ 、曲げ靱性に必要な横補強筋比 $p_s$ が容易に求められるRC柱の断面設計用の図表例を示した。

## <参考文献>

- 1, 鈴木計夫, 中塚侑, 岸本一蔵: RC柱部材の曲げ靱性確保のための横拘束補強筋量算定式について, コンクリート工学年次論文報告集, pp327-332, 1991.6
- 2, 鈴木計夫, 中塚侑, 阿波野昌幸: コンクリートはり部材断面の曲げ終局限界点に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第383号, pp49-57, 1988.1
- 3, 鈴木計夫, 中塚侑, 岸本一蔵, 高木秀晃: 圧縮部が横拘束(コンファインド)補強された鉄筋コンクリート柱の終局曲げ強度算定式, 「材料」第40巻456号, pp72-85, 1991.9
- 4, 白都滋, 本田義博, 山本俊彦, 大滝健: 高強度鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究(その3 曲げせん断実験), 日本建築学会大会梗概集, pp743-744, 1989.10
- 5, 木村秀樹, 山口育雄, 菅野俊介, 東端泰夫, 長嶋俊雄, 原誠: 超高層鉄筋コンクリート造建物の柱および架構に関する実験的研究(その2), 日本建築学会大会梗概集, pp147-148, 1985.10
- 6, 田村彰男, 菅野俊介, 長嶋俊雄, 木村秀樹, 原誠, 沢村牧人: 超高層鉄筋コンクリート造建物の柱および架構に関する実験的研究(その5), 日本建築学会大会梗概集, pp151-152, 1986.8
- 7, 長嶋俊雄, 菅野俊介, 田村彰男, 木村秀樹: 高強度コンクリート及び高強度横補強筋を用いたRC部材の実験的研究(その2), 日本建築学会大会梗概集, pp481-482, 1987.10
- 8, 中田浩之ほか: 超高層鉄筋コンクリート住宅の耐震設計(4)柱部材実験, 日本建築学会大会梗概集, pp382-383, 1987.10
- 9, 六車熙, 俣野善治, 日下部一, 角彰, 瀬川輝夫, 加藤裕造, 久徳敏治: 高強度せん断補強筋により横拘束されたRC柱に関する実験的研究, 日本建築学会大会梗概集, pp383-384, 1986.8
- 10, 鈴木計夫, 中塚侑, 中田浩之, 山中昌一: 高強度コンクリート・高強度横補強筋を用いたRC柱部材の荷重変形特性, コンクリート工学年次論文報告集, pp455-460, 1989
- 11, 境有紀, 日比純一, 小谷俊介, 青山博之: 高強度コンクリートを用いたRC柱の曲げ変形性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, pp445-450, 1990.12