

論文 ネジフシ鉄筋を用いた露出柱脚の回転バネ剛性値の簡易評価モデル

平出 亨*1・野島 秀雄*2・岡本 達雄*3・金子 洋文*4

要旨: 付着を有する普通鋼材のネジフシ鉄筋をアンカーとし、厚板の柱脚ベース PL を固定する形式の露出柱脚を対象として、その回転バネ剛性値を計算するための簡単なモデルを検討した。柱軸力、ネジ鉄筋径・本数・間隔・ナット締付力を変動させた実験から回転バネ剛性に関する計測結果を抽出した。回転バネ定数値に関する実験計測結果は計算結果と良好に対応した。

キーワード: ネジフシ鉄筋, アンカー, 露出柱脚, 回転バネ, バネ定数

1. はじめに

埋込柱脚よりも工期的にメリットをもたらす露出柱脚には、付着を切ったアンカーボルトに定着板を設け、厚板の柱脚ベースプレート（以下、B.PL）を固定する形式が普及している。一方、切削・転造ボルトを用いず、ネジフシ鉄筋の付着を利用し、定着 PL を設けずに B.PL を固定する形式も簡便かつ安価な形式として期待されるが、設計に必要な柱脚の回転バネ定数値を簡易に計算できないのが現状である。そこで本論では、剛体と仮定した B.PL がフーチングに対して相対回転する場合を対象として、その回転バネ定数の値を計算するための簡単なモデルを検討することにした。次いで、種々の影響因子の中から、柱軸力、鉄筋径・本数・間隔・ナット締付力を実験変数とした実験¹⁾から回転剛性計測値を抽出し、これらを用いて、検討モデルに用いた仮説を検証することにする。

2. 回転バネ剛性を計算する簡単なモデル

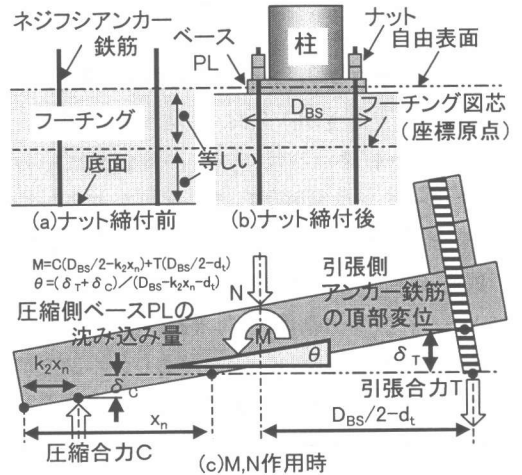
アンカーネジフシ鉄筋（以下、A.鉄筋）のナット締付前のフーチング上面を自由表面、フーチング図芯を図-1のように定義する。ナット締付後、B.PL は柱軸方向圧縮力 N 、柱脚曲げ

モーメント M を受け、剛体 B.PL の回転角 θ は、圧縮側 B.PL の沈み込み量 δ_c と引張側 A.鉄筋の頂部変位 δ_T から定まる。 θ の基準はフーチング図芯であり、その理由は線材置換される建物躯体ラーメンの図芯が未定であることによる。

2. 1 圧縮側 B. P L の沈み込み量 δ_c

(1) フーチング上面の圧縮応力分布の仮定

フーチング上面の圧縮応力の分布を図-2 a のように台形から三角形に仮定する。圧縮合



*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設技術開発部 構造部門 躯体構造第2G 研究主任 工修 (正会員)

*2 (株) 竹中工務店 大阪本店 設計部 構造 第5 設計部門構造グループ

*3 (株) 竹中工務店 大阪本店 設計部 博士 (工学)

*4 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設技術開発部 構造部門 躯体構造第2G リーダー 主任 工博

力 C が作用する位置の応力を σ_c と呼ぶ。

(2) 圧縮応力分布の置換と下方拡散の仮説

B.PL の沈み込み量 δ_c を評価するために、前項にて仮定した応力分布形状を、さらに、一様分布に置換する (図-2 b 右)。その際の一様応力値を C 位置の応力 σ_c に等しくとる。支圧応力に関する知見²⁾を基に、「この一様圧縮応力は鉛直下方に 1:2 の勾配にて均一に拡散」、「コンクリートの応力~歪関係は完全弾性」と仮定すると、内部の鉛直方向歪分布が鉛直座標の 2 次関数の逆数として定まるので、その歪をフーチング図芯~上面まで鉛直方向に積分すれば C 位置の B.PL の沈み込み量 δ_c が得られる。

2. 2 引張側 A. 鉄筋の頂部変位 δ_T

(1) フシに作用する等価支圧応力 $q\sigma$ の導入

フーチング内の A.鉄筋にはフシの谷底面にせん断応力が、フシ山にはさらに圧縮応力が作用する。(図-3 左)。フシ山の高さを変えずに厚みを減少させる置換モデル (図-3 中→右) を想定し、フシ山腹面に等価な軸方向支圧応力 $q\sigma$ のみが作用すると仮定する ($q\sigma \gg \tau_2, \tau_1$)。

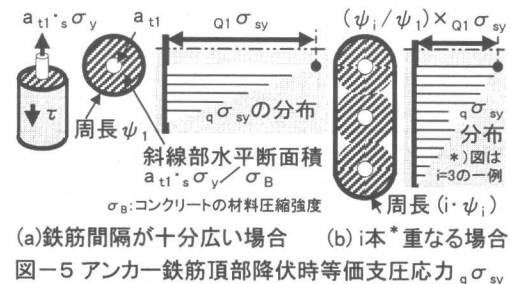
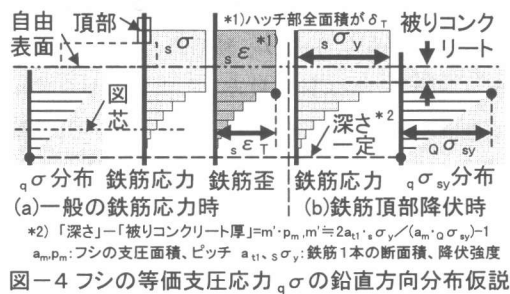
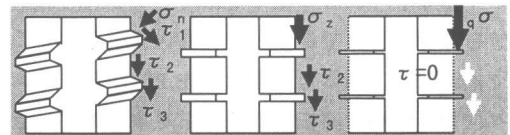
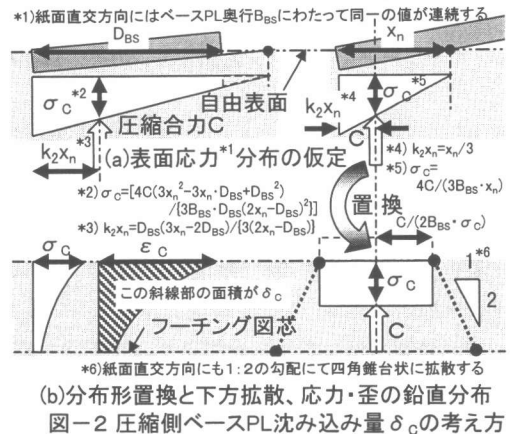
(2) 等価支圧応力 $q\sigma$ の鉛直方向分布仮説

フーチング高さが十分高く、A.鉄筋の埋め込み深さが十分深ければ、フシの等価支圧応力 $q\sigma$ はフーチング下方に行くに従って減少し、やがてゼロになる。強度 σ_B のコンクリート中の鉄筋 (径 d) の必要付着長に関する思想には、ニュージーランド基準³⁾; 付着長 $\omega(d/\sqrt{\sigma_B})$ 、日本⁴⁾; 付着長 $\omega(d^2/\sigma_B)$ 等があり、本論では後者に近い「 $q\sigma$ 分布は逆三角形状に包絡される離散的分布 (図-4) として近似され、分布深さは A.鉄筋頂部応力に関わらず一定」という最も単純な仮説の一つを導入することにした。鉄筋 (材料特性に完全弾性応力~歪関係を仮定) の歪分布は図-4 a に示すような 2 次関数状の階段形分布となり、これを含む全歪分布面積が引張側アンカー鉄筋の頂部変位 δ_T となる。

この分布深さを評価するために、A.鉄筋頂部引張降伏時の $q\sigma$ を $q\sigma_{sy}$ 、その最大値を $q_0\sigma_{sy}$ と呼ぶことにする (図-4 b)。

(3) A. 鉄筋間隔の影響を評価する仮説

鉄筋間隔が十分広い場合の $q_0\sigma_{sy}$ をフシの基本等価支圧強度 $q_1\sigma_{sy}$ と呼ぶ (図-5 a)。鉄



筋間隔が狭くなると付着強度が低下する⁴⁾性状は以下のような仮説にて説明されると仮定する。鉄筋1本の引張降伏張力は図-5 aのような円筒状影響範囲の側面の τ によって主に伝達され、鉄筋間隔が狭くなると図-5 bのように*i*個の影響範囲が重なる。その水平断面囲込外周長値は増大するが、鉄筋1本当りの外周長 ψ_i 値、並びにその側面積は減少し、側面の τ の値には限界があるため、これが円筒高さ($\propto q\sigma_{sy}$ の逆三角形分布深さ)の増加によって補われる。この深さは鉄筋径・降伏強度 $q\sigma_{sy}$ が大きいほど、鉄筋間隔、コンクリート強度が小さいほど深くなり、 $q\sigma_{sy}$ 値は低下する。この $q\sigma_{sy}$ 値を評価するために図-5 a斜線部のような、これらの因子を含むドーナツ状円筒の水平断面が定めるその外周長 ψ_i を導入し、「図-5 bのように鉄筋*i*本の影響範囲が重なる場合には $q\sigma_{sy}$ 値は $(\psi_i/\psi_1)\times q_1\sigma_{sy}$ になる」という最も単純な仮説の一つを導入することにした。

2. 3 収束計算手順の一例

現在では既に汎用表計算ソフト⁵⁾が広く一般にも普及し、その標準機能にて四則演算と同レベルで収束計算も行えるため、それを利用した収束計算手順例の一つを示すことにする。フシの基本等価支圧強度 $q_1\sigma_{sy}$ の値を3章の実験結果から評価すると、図-4 bから $q\sigma_{sy}$ の逆三角形分布深さが決定するため、引張側A鉄筋頂部の歪を任意に指定し、頂部変位 δ_T と引張合力Tの値を確定できる。Tの値が定まると、鉛直方向の力の釣合いからB.PL下面に作用する圧縮合力Cの値が定まる。ついで、図-2 bにてC位置のコンクリート圧縮歪暫定値 ϵ_c^* を与えると、それに対応する暫定応力 σ_c^* 、暫定中立軸位置 x_n^* 、暫定C位置 $k_2x_n^*$ が順次得られる。これらとフーチング自由表面、および剛体B.PLとの幾何学的関係から、図-1によるC位置の暫定変位の一つ δ_c^* が発生する。他方、図-2 b斜線部に示すフーチングコンクリートの鉛直方向圧縮歪分布の面積からも、も

う一つの暫定変位 δ_c^{**} が発生する。両暫定値は ϵ_c^* 値が真で無い限り一致しない。

これを収束させるために、 $(\delta_c^* - \delta_c^{**})$ 項を入力項⁵⁾、0を目標値項、 ϵ_c^* を変化させる項とすると、発散することなく収束解 ϵ_c 、および目標値 $\delta_c = \delta_c^* = \delta_c^{**}$ が得られる。

3. 実験計測値による仮説の検証

以上の仮説を検証するために実験を実施した。B.PLを剛体(400×400×50mm)とした試験体のA鉄筋頂部が引張降伏するまでの、載荷曲げモーメント除荷時を除いた全計測値を抽出した。詳細は参考文献¹⁾を参照されたい。試験体に

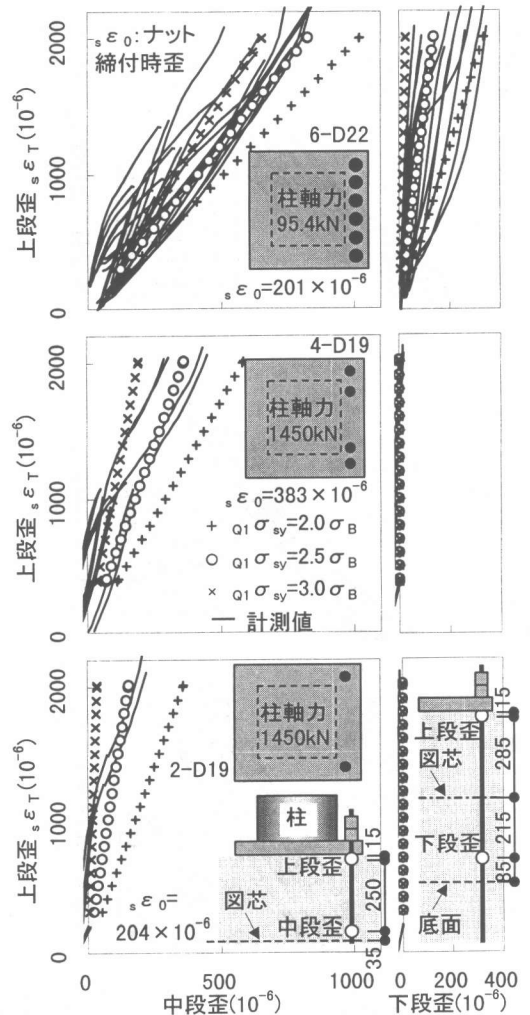


図-6 フーチング内アンカー鉄筋の歪性状

設けられたアンカー一定着 PL を計算モデルでは無視し、フーチング図芯の水平断面を下方に無限連続させた。フシの基本等価支圧強度 $q_1 \sigma_{sy}$ の値を $\sigma_B \times 0.5$ 刻みに設定し、各々に対し引張側 A.鉄筋頂部の歪 $s \varepsilon_T$ を 100×10^{-6} 間隔にて、ナット締付時歪 $s \varepsilon_0$ ~ 降伏歪まで指定し、収束計算を行った。以下そのうちの 3 水準 ($q_1 \sigma_{sy} = 2.0, 2.5, \text{および } 3.0 \times \sigma_B$) の結果を紹介する。

引張側 A.鉄筋の歪計算値は埋め込み深さが深くなるほど減少する (図-6 左→右)。3 水準結果は頂部歪に対して ±1 割程度の広がりを示しており、この範囲のフシの基本等価支圧強度 $q_1 \sigma_{sy}$ 値の変動は鉄筋の軸方向歪分布に大き

な影響を与えていない。実験値は引張側 A.鉄筋全本数の歪を計測したものであり、各々、鉄筋の表裏 2 箇所 の平均値であるが、ばらつきの幅は頂部歪の 3 割近くまで及んでいる。工学的には、 $q_1 \sigma_{sy}$ の値が $2 \sim 3 \sigma_B$ の範囲にあれば 2 章の仮説は、柱軸力、鉄筋径・本数・間隔・ナット締付力が変動しても、実験が示す歪計測値を統一的に説明する仮説であることがわかる。

B.PL の浮上りと沈み込みの変位差計算値はややスリップ形の結果を示しており (図-7)、3 水準間では変位差の中央値に対して ±1 割程度の変動幅を与えている。柱軸力が上がると B.PL の沈み込み量の寄与が高まるため、やや

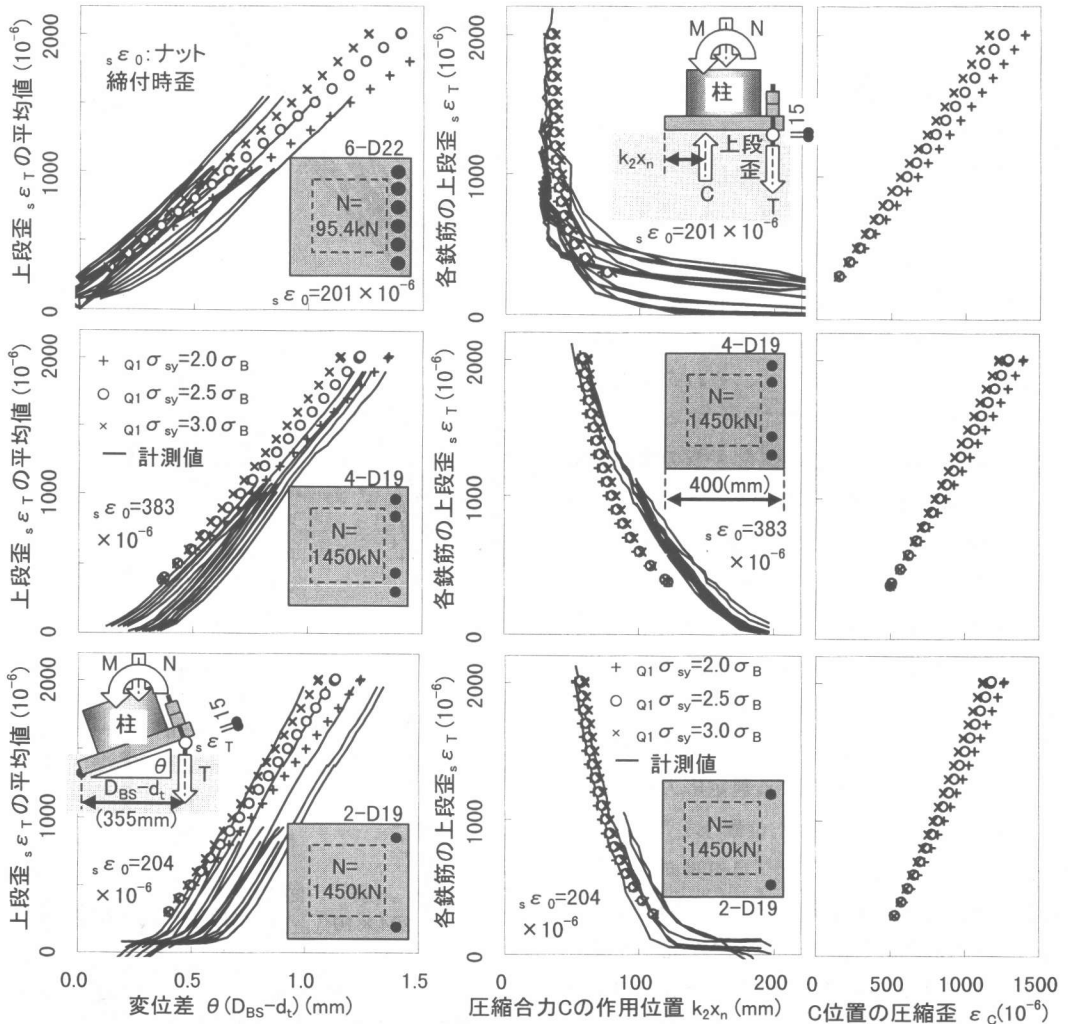


図-7 浮き上がり変位、および沈み込み変位

図-8 圧縮合力Cの作用位置、並びに歪

変動の幅は狭まる。何れにしるフシの基本等価
 支圧強度 $q_1 \sigma_{sy}$ の値は B.PL の回転角に大きな
 影響を与えていない。実験値は圧縮側 A.鉄筋
 間における B.PL 端の計測値 (5 箇所) と、そ
 れらに対応する引張側 A.鉄筋頂部変位線形補
 間値との差である。計測値はそのばらつき幅は
 大きいものの計算値と良好に対応しており、歪
 計測値と同様に、 $q_1 \sigma_{sy}$ の値が $2 \sim 3 \sigma_B$ の範囲
 にあれば、2 章の仮説は、実験が示す B.PL の
 沈み込み量計測値も統一的に説明している。

B.PL 下面に作用する圧縮合力 C の作用位置
 $k_2 x_n$ 計算値は典型的なスリップ形である (図-
 8 左)。ところで、C 位置のコンクリート圧縮

歪 ε_c の 3 水準結果 (図-8 右) は図-7 と同
 様の性状を示すのに対して、 $k_2 x_n$ の 3 水準値は
 ほとんど一致していることから、この $q_1 \sigma_{sy}$
 範囲に対しては、 $q_1 \sigma_{sy}$ の変動は C 作用位置に影
 響を与えないとみてよく、曲げモーメント値の
 評価に問題はない。実験値は、柱軸力、鉄筋径・
 本数・間隔・ナット締付力によらず計算値と良
 好に対応しており、特に A.鉄筋上端部引張降
 伏時には殆ど計算値と一致している。

B.PL 下面に作用する曲げモーメント計算値
 もこの 3 水準範囲に関しては、フシの基本等価
 支圧強度 $q_1 \sigma_{sy}$ の変動の影響を受けず (図-
 9)、また、また引張側 A.鉄筋頂部歪値と概ね

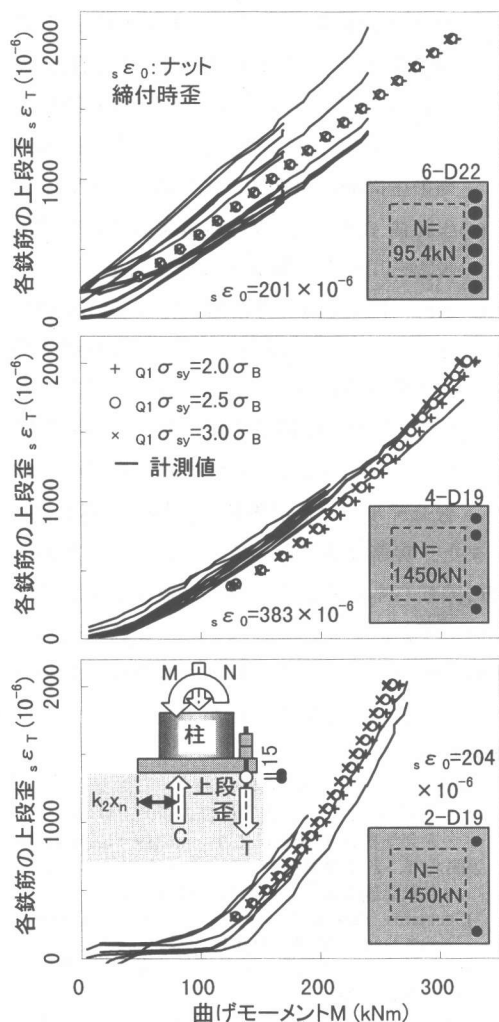


図-9 ベースPL下面に作用する曲げモーメント

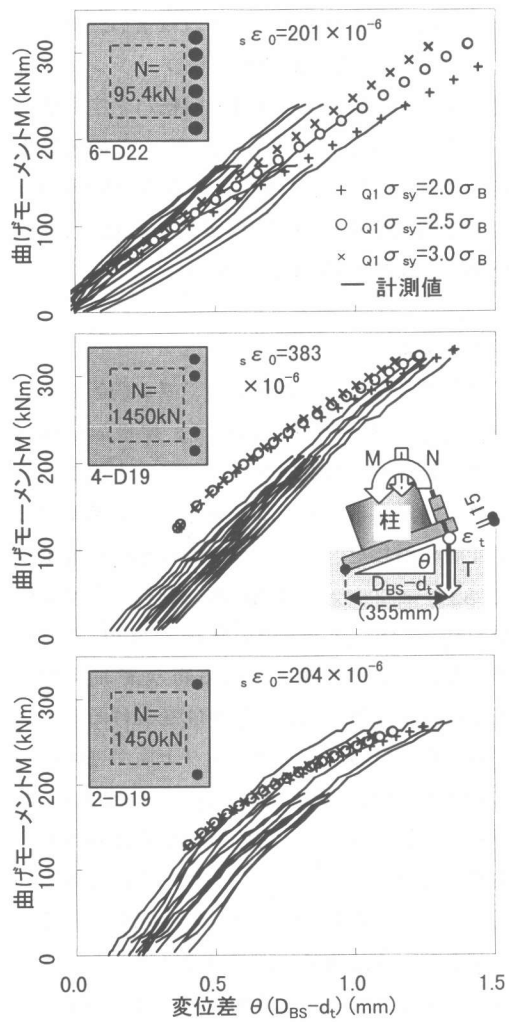


図-10 ベースPLの回転バネ剛性

比例しているが、鉄筋量が少ないとスリップ形の性状が見られる。実験値計測結果もこの計算結果通りの性状を示している。

B.PL の回転バネ剛性計算値は柱軸力が低い時には図-7と同様に3水準変動範囲に対して±1割程度の影響を受けているが、柱軸力が上がると殆ど影響を受けなくなり(図-10)、曲げモーメントの増加につれ回転剛性が徐々に低下する。実験値もこの計算値通りの性状を示す。

図-10の回転角 θ は図-7の横軸と同一であり、ばらつきの幅も大きい。A.鉄筋降伏時の割線剛性にて設計バネ定数を評価するのが現実的であろう。これを安全側(低め)に求めるためには、2章のモデルにて $q_1\sigma_{sy}$ の値を $2\sigma_B$ (図中の+印プロット)とすればよい。また、 $q_1\sigma_{sy}$ に対応する鉄筋歪分布はフーチング底部で 336×10^{-6} 以下ならば設計回転バネ定数値に影響を及ぼさない(図-6上段)。その他適用範囲は、 $s\varepsilon_0\leq 383\times 10^{-6}$ 、 $s\sigma_y\leq 363\text{N/mm}^2$ 、 $d\leq 22\text{mm}$ 、 $2.82d\leq$ 鉄筋間隔、 $\sigma_B\leq 34.5\text{N/mm}^2$ 、(柱圧縮軸力/B.PL底面積) $\leq 0.263\sigma_B$ となる。

4. 結論

付着を有する普通鋼材のネジフシ鉄筋をアンカー(A.鉄筋と略す)として、厚板の柱脚ベースPL(B.PLと略す)をコンクリート製フーチングに固定する露出柱脚を対象とした簡単なモデルを検討した。モデルの目的は剛体と仮定したB.PLとフーチング間の相対回転バネ定数の値を計算することとした。圧縮側B.PLがフーチングに沈み込む量と、引張側A.鉄筋の伸び量とが以下の単純な仮説①~④を設けることにより計算される。①フーチング上面がB.PLから受ける圧縮力は1:2の勾配にて下方コンクリートに拡散する。②引張側A.鉄筋の付着応力を等価なフシの支圧応力 $q\sigma$ に置換できる。③ $q\sigma$ 分布を深さ一定の逆三角形分布として近似できる。④A.鉄筋頂部が引張降伏した場合の $q\sigma$ 最大値を $q\sigma_{sy}$ 、鉄筋間隔が十分広い場合の $q\sigma_{sy}$ をフシの基本等価支圧強度 $q_1\sigma_{sy}$ とし、

鉄筋間隔が $q\sigma_{sy}$ に与える影響を隣合う鉄筋が影響を及ぼす範囲の重複形状から評価できる。以上①~④の仮説に基づいて構築した評価モデルは以下のような特性を示した。

- (1)基本等価支圧強度 $q_1\sigma_{sy}$ は引張側A.鉄筋の軸方向歪分布に大きな影響を与えない。
- (2) $q_1\sigma_{sy}$ 値の変動はB.PL下面に作用する圧縮合力作用位置に殆ど影響を与えず、B.PLの回転剛性を大きく変化させない。

また、柱軸力、鉄筋径・本数・間隔・ナット締付力を実験変数とした実験の計測結果から、A.鉄筋頂部引張降伏開始までのB.PLの回転剛性に関して以下のような知見が得られた。

- (3)引張側A.鉄筋の歪計測結果は仮説②③を用いた計算結果と良好に対応した。仮説④にて用いたフシの基本等価支圧強度に関しては、上記実験変数値が変動しても、一つの $q_1\sigma_{sy}$ 値によって引張側A.鉄筋の歪計測結果が統一的に説明された。
- (4)圧縮側B.PLの沈み込み量実験計測値は仮説①を用いた計算値と良好に対応した。
- (5)B.PL下面圧縮合力作用位置実験計測値は計算値と良好に対応し、特にA.鉄筋頂部引張降伏時には、計算値と殆ど一致した。
- (6)B.PL下面に作用する曲げモーメント実験値、並びにB.PLの回転剛性実験値は、検討モデルによる計算値と良好に対応した。

また、実務設計において、この形式の露出柱脚の回転バネに設定するバネ定数値に関しては、上のモデルにて $q_1\sigma_{sy}=2F_c$ とし、A.鉄筋頂部に引張降伏歪を与え、その時の割線剛性計算値を設計バネ定数値とすることができる。

参考文献

- 1)野島 秀雄,平出 亨,岡本 達雄,金子 洋文,田淵 勝道,小林 道和: CFT 露出柱脚の研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1219~1220, 2000.9
- 2)例えば, 日本建築学会: プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 50条, 1998
- 3)Standards Association of New Zealand: Concrete Design Standards, NZS31101, 1995
- 4)日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 16条, 1999.11
- 5)例えば, マイクロソフト社: Microsoft Excel ユーザーズガイド, 27条, 1994