

## ファイバー要素を用いた場所打ち杭の変形性能の数値評価

白戸真大<sup>1</sup>・中谷昌一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ基礎チーム 主任研究員（〒305-8516 つくば市南原1-6）

<sup>2</sup>独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ基礎チーム 上席研究員

### 1. はじめに

道路橋示方書には、所定の構造細目を満足する杭を有する群杭基礎に関して塑性率の制限値の目安が示されている<sup>1)</sup>。その値は、主に、橋脚基礎の諸元を模した大型の群杭模型の水平交番載荷実験において観察された各杭体の損傷過程と杭基礎システム(系)としての非線形挙動との関係に基づいている。しかし、実験事例に限られていることから、実験で想定されたものと大きく異なる条件を有する群杭基礎の耐震性に関して許容できる塑性率を個別に評価することも想定される。たとえば、耐震補強を考えると、斜杭を有するもの、設計された年代が古く、現在の構造細目からすると鋼材量や中詰めコンクリート量が少ないものについては道路橋示方書に示される値が危険側になると想定されるので個別に塑性率の制限値を見直さねばならないと考えられる。

場所打ち杭は杭の使用頻度の大半を占める。そこで、以下に示すように、土木研究所基礎チームでは、鉄筋コンクリート(RC)棒部材の数値モデルを提案し、検証してきた。

1. ファイバー要素を用いて、鉄筋、およびコンクリートの損傷過程を忠実に再現する<sup>2),3)</sup>。ファイバー要素とは有限要素法におけるはり要素の一つで、断面がさらに微小断面に分割され、微小断面毎に一軸の応力ひずみ関係が設定され、要素剛性が評価されるものである。
2. はらみ出していないときに比べてはらみ出した軸方向鉄筋は本来鉄筋が負担すべき曲げ引張り応力を負担できないことを考慮するために、Menegotto-Pintoモデル<sup>4)</sup>を拡張してはらみ出した鉄筋の挙動を再現できる履歴則を組み込んだ<sup>2),3)</sup>。
3. コンクリートの応力ひずみ関係として、我が国の道路橋下部構造の断面パラメータ(鉄筋比など)が網羅されている供試体を用いた実験式である星隈ら<sup>1),5)</sup>のモデルを採用した。
4. Manderら<sup>6)</sup>が提案している、横拘束応力を陽に考

慮したコンクリートの応力ひずみ関係を利用して、地盤中の部材に関しては、地盤がかぶりコンクリートを横拘束する効果をかぶりコンクリートの応力ひずみ関係において考慮するようにした<sup>7),8)</sup>。

しかし、コンクリートの応力ひずみ関係の軟化勾配の設定については、未だ課題を有している。星隈らのモデルでは、拘束コンクリートに関して最大圧縮応力に達した後、その0.5倍程度に低下するまでの軟化勾配がモデル化されているものの、それ以後の軟化挙動は与えられていない。また、軟化する応力ひずみ関係を有限要素法で用いると、解が要素長に依存する。そこで、場所打ち杭模型の気中繰返し水平載荷実験に関して鉄筋のはらみ出しが生じていない範囲の荷重変位関係を比較的良く再現できるように、ファイバー要素長を杭径の1/2としたうえで、コンクリートの軟化勾配の設定を変化させた数値解析をいくつか行い、2段階で変化する軟化勾配をかぶりコンクリート、コアコンクリートそれぞれに対して設定した<sup>2)</sup>。しかし、一般的な場所打ち杭の塑性ヒンジ長の代表値として杭径の1/2程度を想定し、ファイバー要素長を杭径の1/2としたものの、得られた軟化勾配は必ずしも汎用性があると言えない。

RC棒部材において鉄筋がはらみ出しているような塑性ヒンジ領域ではかぶりコンクリートや鉄筋周辺のコアコンクリートについても全域で破壊領域になっていると考えられる。一方、一軸圧縮実験結果に基づき軟化域における応力・ひずみ関係を設定する場合には、供試体中で破壊領域が局所化する。したがって、適用する応力ひずみ関係は、そのひずみが一軸圧縮供試体の全体の変形量ではなく、局所化領域の変形量を用いて評価されているものが望ましい。Manderら<sup>6)</sup>は軟化領域まで計算可能な応力ひずみ関係を示している。その応力ひずみ関係は大型の円柱供試体の一軸圧縮試験結果と比較されており、提示した応力ひずみ関係が供試体中に局所化する破壊領域における平均応力・平均ひずみ関係に近い結果を与えることを示している<sup>9)</sup>。Manderらが検証に用いた

実験供試体は鉄筋比などのパラメータが必ずしも我が国の道路橋下部構造における鉄筋コンクリート部材に関して網羅していないという欠点はあるものの、文献<sup>2)</sup>で試行錯誤により同定した軟化域のモデルに替わり得る可能性がある。

そこで、本報告では、試みに、コアコンクリート、かぶりコンクリートの両者に Mander らの応力ひずみ関係を用いて、気中における単杭の交番曲げ荷重実験、緩い砂地盤中の単杭の水平交番荷重実験、気中における群杭の水平交番荷重実験の数値解析を行った結果を示す。

## 2. 模型群杭の気中水平交番荷重実験結果

始めに、群杭の水平交番荷重実験結果のうち、場所打ち杭に関する実験結果<sup>10)</sup>を見て、各杭の損傷と系としての非線形挙動の関係を考察しておく。実験の概要を図-1に示す。各杭の損傷度と群杭としての耐力・変形性能の関係を逐次観察するために実験は気中で行われた。供試体は2種類で、一つは荷重方向に3列、荷重直交方向に2列の群杭供試体(以下、供試体Aと呼ぶ)、もう一つは、荷重方向に2列、荷重直交方向に2列の群杭供試体(以下、供試体Bと呼ぶ)である。各杭の両端はそれぞれフーチングに剛結されている。模型杭の断面は一般的な場所打ち杭の断面を縮小したものである。杭径は300 mmで、杭軸方向鉄筋としてD10 (SD295A)が16本(鉄筋比1.61%)、杭表面から軸方向鉄筋中心位置までの距離50 mmで配置されている。また、帯鉄筋としてD4 (SD295A)が40 mmピッチで配置されている(体積比0.63%)。コンクリートの一軸圧縮試験強度は約30 N/mm<sup>2</sup>であった。杭中心間隔は、実際の道路橋杭基礎と同様に杭径の2.5倍である。

左右に設置された鉛直ジャッキ2基と水平ジャッキ1基を同時に用いて、鉛直荷重は一定に保たれ、かつ(転倒モーメント)/(水平力)の比が2.5に保たれるように制御されながら水平変位が交番荷重された。全杭降伏時の水平変位を $1\delta_y$ として、各荷重ステップにて3回の繰返しを伴う $\pm n\delta_y$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )の水平変位履歴が与えられた。 $1\delta_y$ は供試体Aでは12.5 mm、供試体Bでは14.0 mmであった。試験中に保持される鉛直荷重は、杭1本あたり137 kNであり、コンクリートの一軸圧縮試験強度の6-7%に相当する。

図-2に水平ジャッキの荷重・変位関係を示す。損傷の進展は以下の通りであった。供試体A (3×2列群杭)では、 $2\delta_y$ にてかぶりコンクリートの表面部が剥落した。その後、コンクリートの損傷が進展していくが、 $4\delta_y$ では鉄筋の露出には至っていない。6,  $7\delta_y$ にて両端部列の杭で鉄筋の露出、および軸方向鉄筋のはらみ出しが確認された。その後、鉄筋のはらみ出しが大きくなるとともに、端部列の杭では複数の軸方向鉄筋が破断した。最終

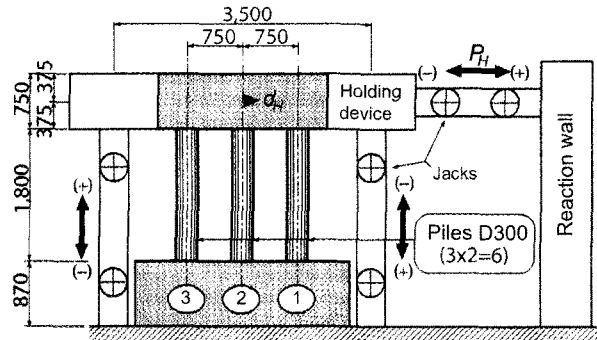


図-1 対象とした組杭荷重実験の概要 (供試体Aの場合)

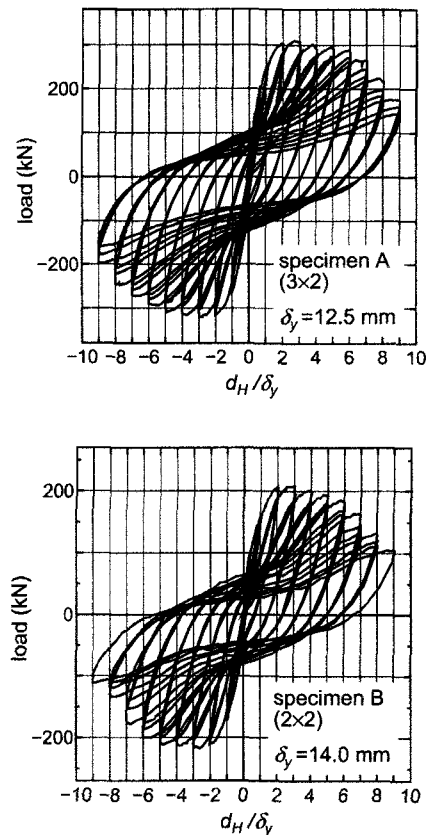


図-2 水平ジャッキの反力-変位関係

荷重ステップでは、中央列杭の下部においても鉄筋が露出し、はらみ出しが生じていることが確認された。供試体B (2×2列群杭)もほぼ同様の損傷の進展であった。

一方、荷重については、両供試体とも、 $3\delta_y$ で最大水平荷重に達し、その後じん性的な挙動を示しながら徐々に荷重が低下し、7から $8\delta_y$ にて降伏荷重程度になる。最大荷重到達後に降伏荷重にまで荷重が低下した状態を終局状態とみなせば、系としての終局塑性率は7程度である。

このように群杭のような不静定構造では、いくつかの塑性ヒンジ部にてかぶりコンクリートが圧壊するような状態に達し、系としての終局状態に達する。したがっ

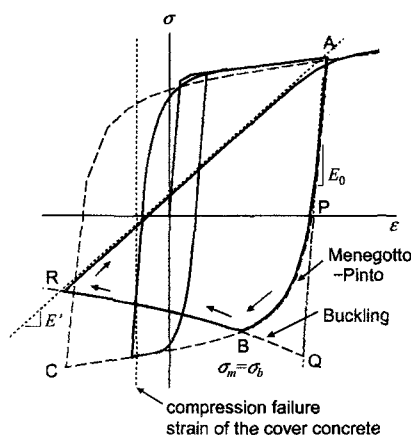


図-3 はらみ出しを考慮した鉄筋の応力-ひずみ関係

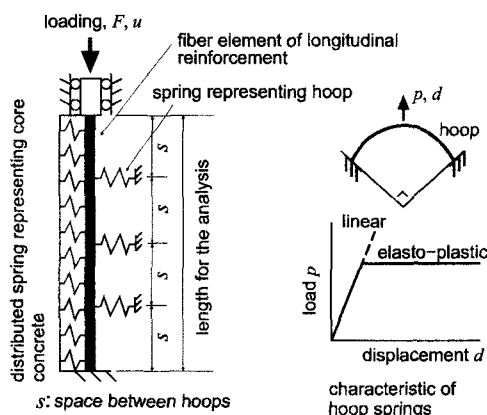


図-4 軸方向鉄筋の塑性座屈解析 ( $L = 4s$  の場合)

て、系としての終局点をファイバーモデルを用いて評価するためには、各杭の降伏点、かぶりコンクリート圧壊点が評価できるだけでなく、かぶりコンクリート圧壊後の耐力低下挙動も考慮できるような鉄筋、コンクリートの応力ひずみ関係の設定法を確立する必要がある。

### 3. ファイバー要素による杭のモデル化

#### (1) 軸方向鉄筋の応力ひずみ関係とファイバー要素長

軸方向鉄筋の一軸の応力ひずみ関係を図-3に示す。ここに、 $\sigma$  は応力、 $\varepsilon$  はひずみ、 $E_0$  は初期剛性である。はらみ出しが生じていないときは、Menegotto-Pinto (MP) モデル<sup>4)</sup> (曲線 ABC) が用いられる。なお、本報告では鉄筋の降伏後剛性は初期剛性の 1/100 とした。

軸方向鉄筋のはらみ出しは、当該軸方向鉄筋位置のかぶりコンクリートが圧壊した後に繰返し荷重を受けて生じる。はらみ出す鉄筋の圧縮応力経路は MP モデルで得られる圧縮応力  $\sigma_m$  と後述する塑性座屈曲線 PQBR より得られる  $\sigma_b$  を比較し、 $\sigma_m = \sigma_b$  となったとき (B 点) から Menegotto-Pinto モデルの BC ではなく塑性座屈曲線上の BR へと移る。点 P は、履歴中の最大引張りひずみ点 (図-3では点 A) から初期勾配  $E_0$  で弾性除荷し

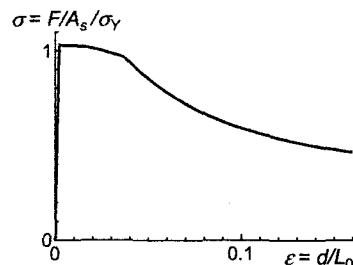


図-5 杭供試体軸方向鉄筋の圧縮平均応力・平均ひずみ関係 ( $\sigma_Y$  は降伏応力)

たときに応力がゼロとなる点である。その後、圧縮経路上から反転し、引張り荷重を受けるときは、履歴中の最大引張りひずみ点 A を目指す。

塑性座屈曲線 PQBR は、図-4に示すように、帯鉄筋とコアコンクリートの拘束を受ける杭中の一本の軸方向鉄筋に着目した二次元面内における塑性座屈解析により求める。そして、塑性座屈する軸方向鉄筋の平均応力・平均ひずみ関係の原点を点 P に移すことにより得られる。塑性座屈解析は、帯鉄筋間隔  $s$  の  $m$  倍 ( $m$  は整数) の長さ  $L = ms$  の  $m$  に関して必要なケース数行う。そして、各  $m$  での挙動を比較し、最も荷重低下が大きな荷重  $F$ ・変位  $u$  関係を取る  $m = m_0$  のときの挙動を持って生じ得るはらみ出し挙動とする。そして、 $m_0$  のケースにおける荷重点での荷重  $F$ ・変位  $u$  関係を、荷重  $F$  を軸方向鉄筋断面積  $A_s$  で、変位  $u$  を特性長さ  $L_0 = m_0 s$  でそれぞれ除すことにより平均応力・平均ひずみ関係に直す。塑性座屈解析において、軸方向鉄筋のはらみ出しに対する帯鉄筋による拘束は帯鉄筋間隔で配置されるバネで、コアコンクリート側への変形に対する拘束は分布バネでモデル化される。群杭実験に用いた杭体の軸方向鉄筋の塑性座屈解析結果を図-5に示す。 $L_0 = 3s = 120 \text{ mm}$  であった。

さらに、はらみ出す軸方向鉄筋の挙動を特性長さ  $L_0$  で平均化しているので、杭のファイバー要素長も応力ひずみ関係を平均化した長さ  $L_0$  に一致させる。

#### (2) コンクリートの応力ひずみ関係

圧縮側の骨格曲線を規定する最大応力点や軟化勾配は Mander ら<sup>6)</sup>の応力ひずみ関係を近似するように設定する。一方、計算における労力を減らすため、使用するソフトウェアに組み込まれている修正六車モデルにより履歴則を与えた。

供試体 A のコンクリートの圧縮応力・圧縮ひずみ関係の骨格曲線を図-6に示す。最大圧縮応力点が点 CC、圧壊点が点 L である。最大圧縮応力点 CC と軟化領域の 2 直線を規定する点 U と L の算出は、以下の 3 通りに場合分けされる。

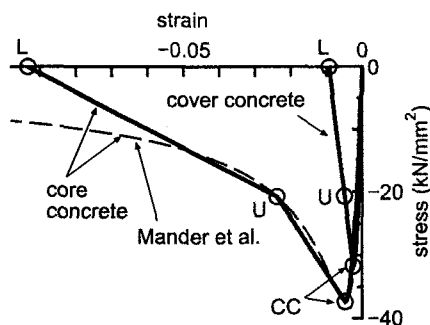


図-6 Mander ら<sup>6)</sup>の応力ひずみ関係と本報告で用いた骨格曲線との比較 (供試体 A)

1. コアコンクリート：Mander らに従い，帯鉄筋による横拘束応力を考慮して設定する
2. 杭が地盤中にあるときのかぶりコンクリート<sup>8)</sup>：周辺地盤による横拘束応力を考慮して Mander らの式を用いて設定する
3. 杭が気中にあるときのかぶりコンクリート：Mander らに従い，横拘束効果を考慮しない場合の応力ひずみ関係を設定する

このうち，2. については，地盤の静止土圧をかぶりコンクリートに対する横拘束応力であるとみなし，Mander らの式中の帯鉄筋による横拘束応力の項を置換え，設定する．杭側面の受ける土圧は[静止土圧]+[杭・地盤相互作用に応じた変動成分]により構成されと考えられるので，かぶりコンクリートが受ける平均的な横拘束応力として静止土圧が考慮されている<sup>7),8)</sup>．

1., 2. で横拘束応力を考慮する場合，軟化勾配を設定するための制御点を最大応力点 CC のひずみ  $\epsilon_{cc}$  の 5 倍，10 倍のひずみに達したときの点とした． $5\epsilon_{cc}$  のときの点を U 点とし，また，U 点と  $10\epsilon_{cc}$  点を結ぶ直線を延長し，L 点を求める．図-6 に示すように，供試体 A のコアコンクリートの圧縮応力・圧縮ひずみ関係については，概ね最大応力の 30% 程度の応力レベルに低下するまで良く近似できる．

横拘束効果が無いかぶりコンクリートの軟化勾配を規定する点 U は，最大応力点 CC におけるひずみ  $\epsilon_{cc}$  の 2 倍のひずみ  $2\epsilon_{cc}$  が生じた点とされ，また，それよりひずみが大きい領域では直線で L 点に向かうものとされている．Mander ら<sup>6)</sup>は応力ひずみ関係の骨格曲線から得られる仕事と，要素試験結果から得られる応力ひずみ関係から得られる仕事とが一致するように L 点を設定することを想定している．しかし，本報告では，簡単のために，U 点よりも大きなひずみ領域における軟化勾配は一定であり，その勾配は計算される  $2\epsilon_{cc}$  点の接線勾配であるとして L 点を求めた．なお，本報告では，最大応力点 CC は一軸圧縮試験結果で得られた値とした．本報告で解析する杭供試体のかぶりコンクリートについてこの

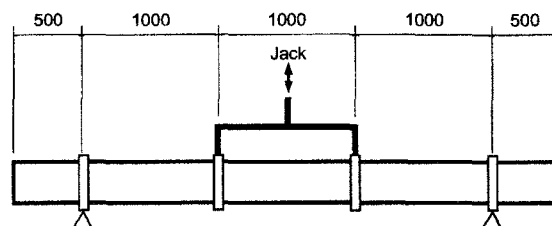


図-7 交番曲げ載荷試験概要

方法で L 点のひずみを設定した場合，Mander らの方法で得られるよりもやや大きくなる傾向があるがオーダーは等しい．

#### 4. 軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しのモデル化

既往の橋脚模型の水平交番載荷実験結果から推測すると，結合鉄筋を介して杭とフーチングが結合されているとき，杭頭での曲げおよび引張り載荷に伴い結合鉄筋がフーチングから伸び出すことが予測される．杭の損傷が小さい状態では，結合鉄筋の伸び出しが杭の挙動に影響を与えている可能性があるため，群杭実験のシミュレーションにおいては杭・フーチング接合部に線形の回転バネを新たに設置する．

回転バネ定数  $K_\theta$  は以下のように設定した．最外縁の鉄筋が降伏に達したときに伸び出している量を  $S_y$ ，杭中心位置から最外縁の鉄筋までの距離を  $x$  とすると，伸び出しに起因する杭断面の回転角は  $\theta_y = S_y/x$  で表される．さらに，初期に作用する鉛直力(死荷重)を考慮したときに杭の最外縁鉄筋が降伏に達する曲げモーメントを  $M_y$  とすると，回転バネ定数  $K_\theta$  が  $K_\theta = M_y/\theta_y$  と求まる． $S_y$  の評価は，橋脚模型に対する正負交番載荷実験結果に基づき石橋らが提案した式<sup>11)</sup>によった．

#### 5. 気中にて交番曲げ載荷を受ける単杭の挙動

最初の計算対象は，杭の交番曲げ載荷実験である<sup>12)</sup>．実験概要を図-7 に示す．供試体断面諸元は群杭載荷実験や次に計算対象とする地盤中の単杭の正負交番載荷実験に用いたものと同じである．杭はフーチングに接合されていないので結合バネを設定する必要がない．さらに実験ではひびわれは見られるものの大きなものではなく，かつかぶりコンクリートの圧壊は観察されていない．したがって，損傷が大きくなる前の杭自体の非線形挙動に関する計算精度の確認が可能であると考えられる．

杭は両載荷点にて同一の強制変位を受ける．最外縁軸方向鉄筋が降伏する変位を  $1\delta_y = 6.5 \text{ mm}$  として， $\pm n\delta_y$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) の漸増繰返し載荷が与えられる．ここに，各変位レベルでの繰返し回数は三回である．

二つの載荷点間距離が 1000 mm であること，鉄筋の

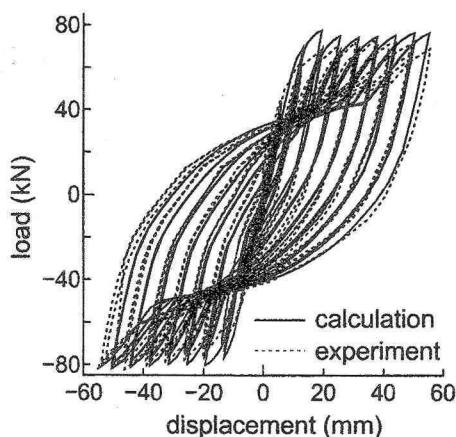


図-8 載荷点における荷重変位曲線

はらみ出しは生じないと想定されることから、この計算ケースのみ要素長を塑性座屈解析結果から求まる 120 mm ではなく 125 mm とした。

図-8に載荷点における荷重変位関係を示す。破線が実験結果、実線が計算結果である。全体的に見ると各サイクルのピーク値および履歴ループ形状の両者に関して、計算結果は実験結果に良く一致した。また、計算においてもかぶりコンクリートの圧壊は生じなかった。しかし、計算は  $1\delta_y$  時のピーク荷重をやや小さめに与えるものの、 $2, 3\delta_y$  におけるピーク荷重を 20-30% 程度大きめに与えた。

## 6. 地盤中にて水平交番載荷を受ける単杭の挙動

次の数値解析対象は、文献<sup>12)</sup>の砂地盤中の模型場所打ち杭の水平交番載荷実験である。これも単杭の載荷実験であるが、杭が地中に埋め込まれている点異なる。地盤は実験土槽に作成されたもので、飽和した緩い砂地盤である。供試体断面諸元は気中での単杭、群杭の実験で用いられたものと同じである。

根入れは 8 m で、地表面から 0.7 m の位置において水平変位が与えられている。 $1\delta = 15$  mm (杭径の 5%) として、各載荷ステップでの繰返し回数を 3 回、 $\pm n\delta$  ( $n$  は整数) で  $17\delta$  まで漸増載荷された。実験終了後の杭の状態を写真-1に示す。左が実験終了後の杭の外観、右がかぶりコンクリートをはつって鉄筋の損傷を調べたものである。地盤面から深度 1.8 m の間に渡ってひび割れが分散しており、深度 1.0 m 付近の損傷が最も大きかった。群杭実験のような気中で行われた実験結果と異なる点は、鉄筋がはらみ出すような大きな損傷を受けていても、かぶりコンクリートの大部分は完全には杭から剥がれ落ちていないことである。

比較のために、地盤によるかぶりコンクリートへの横拘束応力を考慮しない場合とした場合の 2 ケースについて数値解析を行った。後者については、簡単のため、全

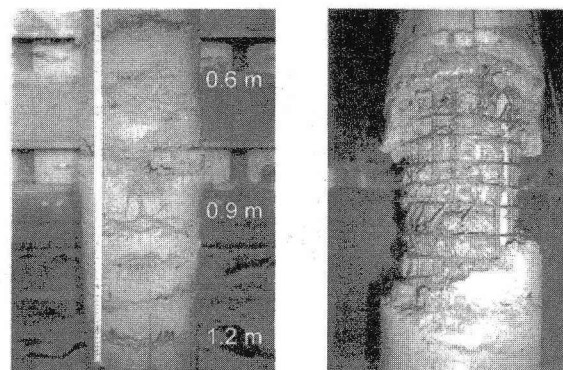


写真-1 杭の損傷状況。左：地盤掘削直後、右：かぶりコンクリートをはつたもの

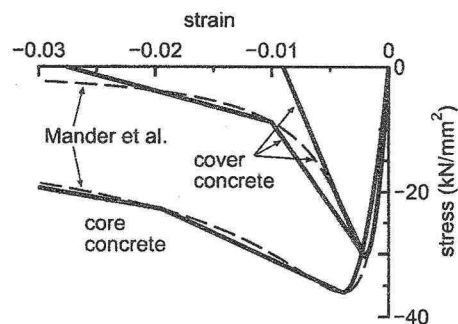


図-9 コンクリートの応力ひずみ関係の比較

深度に渡って深度 -1 m における静止土圧を地盤からの横拘束応力として考慮した。これは、実験における杭の損傷が深度 -1 m 付近で最も大きかったためである。両ケースのかぶりコンクリートの応力ひずみ関係を図-9に示す。最大応力点はほとんど変化しない一方、地盤からの横拘束応力を考慮することで応力がゼロに達するひずみが約 3 倍になる。なお、図-9には参考までにコアコンクリートの応力ひずみ関係も示した。基礎・地盤間の相互作用は  $p$ - $y$  曲線 (Winkler モデル) でモデル化する。ここに  $p$  が地盤反力度、 $y$  が基礎地盤間の相対変位である。 $p$ - $y$  曲線の履歴則は文献<sup>13), 14)</sup>に従い、かつ最大点指向型になるようにパラメータを設定した。

計算結果と実験結果の比較を図-10, 11に示す。図-10は載荷点における荷重変位曲線の比較である。実験では、 $3\delta = 45$  mm からじん性的な挙動が表れ始めており、この変位レベルにて杭は降伏に達したと考えられる。その後、正側では  $6\delta = 90$  mm にて最大荷重に達し、最終載荷レベル  $17\delta = 255$  mm の 1 回目の繰返しで大きな荷重低下が生じ、繰返しを重ねるにつれさらに荷重が低下した。したがって、かなり大きな載荷レベルに達してから、もしくは最終載荷レベルに達してから鉄筋がはらみだし、そして破断に至ったものと推測される。

実験結果に比べて計算結果は耐力を正側では高めに、負側では低めに評価している。実験において正・負で荷

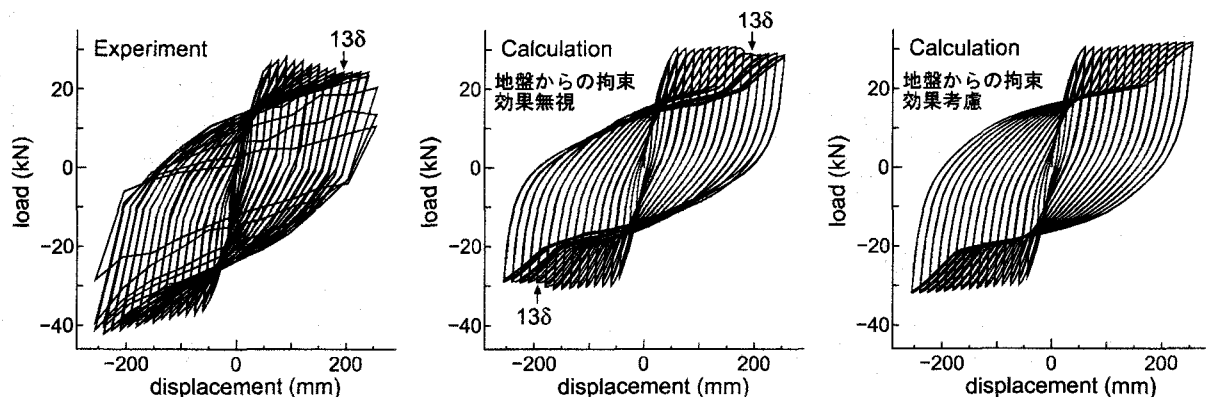


図-10 地盤中の杭の水平交番載荷実験における荷重変位曲線

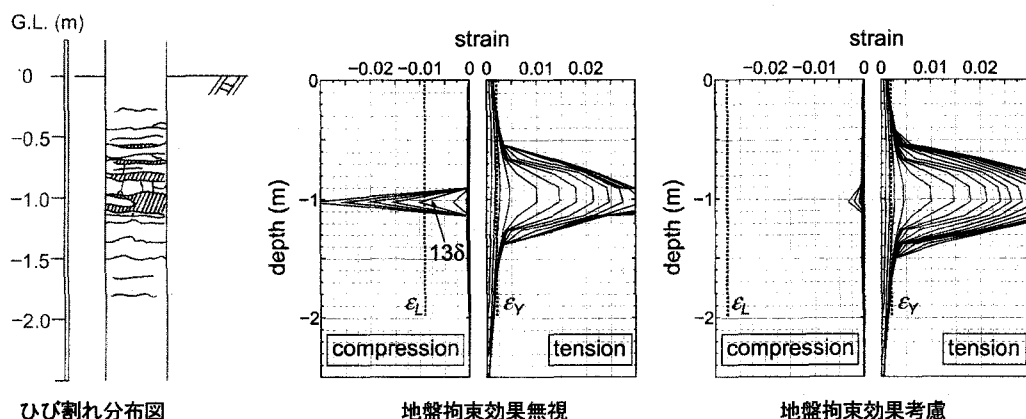


図-11 実験における杭の損傷と数値解析で得られた最外縁鉄筋位置のひずみ分布の比較 ( $\varepsilon_L$  = かぶりコンクリート L 点ひずみ (圧壊ひずみ),  $\varepsilon_Y$  = 軸方向鉄筋降伏ひずみ)

重に差が生じている理由は明らかではない。図-11は実験における杭の損傷状況と数値解析で得られた最外縁鉄筋位置の鉄筋とコンクリートのひずみ分布を比較したものである。計算にて最大ひずみが生じていた深度は-1 m 付近であり、実験において最も損傷が大きかった深度と一致している。また、図-11のひずみ分布は、地盤がかぶりコンクリートを横拘束する効果を考慮しない場合の計算では、138で鉄筋のはらみ出しが生じていることを示している。その結果、図-10に示されるように同変位レベルで顕著に荷重が低下する。実験でも最終載荷ステップ178で顕著な荷重低下が見られたので、計算結果における耐力低下点の予測精度はさほど悪くないと考えられる。しかし、計算でははらみ出しによる耐力低下は再現されるが、鉄筋の破断に伴う耐力低下は再現されないで、耐力低下の度合いが実験結果よりも小さい。

計算結果の最大耐力付近の挙動において、地盤によるかぶりコンクリートへの拘束応力の考慮の有無に起因した違いは見られない。しかし、地盤からの拘束効果を考慮した場合にはかぶりコンクリートに生じる圧縮ひずみはかなり小さくなり、その結果、鉄筋のはらみ出しも生じなかった。文献<sup>8)</sup>にて星隈らのモデルをコアコン

クリートに適用したときには、最終載荷レベルで鉄筋のはらみ出しが生じ、荷重低下が生じるという結果であった。したがって、本報告の計算結果の方が、強度を高く評価している。しかし、実験における負側の載荷で見られるように、載荷ステップが進むにつれ荷重が増加していく現象が計算でも見られるなど、実験結果に近づいた点も見られる。また、星隈らのモデルを用いたときと同様、地盤からの拘束効果を考慮した場合の方が杭に生じる曲げ引張りひずみが集中する領域の幅が広がり、実験で見られたようにひびわれが分散する傾向が見られる。

以上のように、選択したコンクリートの応力ひずみ関係の違いにより若干の計算結果の違いはあるものの、単杭に関しては、ファイバーモデルを用いて気中・地中での損傷の進展を耐力低下域まである程度の精度で予測できることが分かった。

## 7. 気中にて交番載荷を受ける群杭の挙動

解析対象は2.にて述べた群杭模型の交番載荷実験である。解析モデルを図-12に示す。杭体はファイバー要素(要素長 $3s = 120$  mm)で、フーチングは剛なはり要素でモデル化した。さらに上部フーチング中心位置から

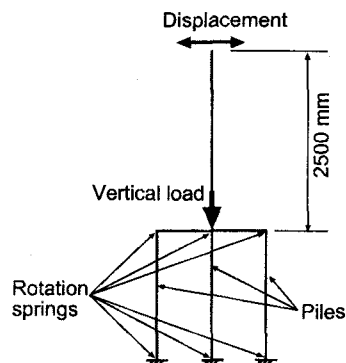


図-12 解析モデル (3×2列杭の場合)

鉛直上方に2.5 mの長さの剛なはり要素を設置した。そして、フーチング中央部に137 kN×(杭本数)の鉛直力を載荷後、鉛直に設置した剛なはり要素の頂部に水平変位履歴を与えた。載荷点の水平変位とフーチング位置の水平変位は一致していないので、可能な限りフーチング位置での水平変位が実験と一致するように試行錯誤し、杭頂部における $1\delta_y$ を供試体Aでは15.3 mm、供試体Bでは20.3 mmとして与えた。計算時間を短縮するため、各 $\delta_y$ の変位ステップにおける載荷繰返し回数を一回とした。図-13に計算で得られた水平荷重・水平変位関係を示す。また、図-13には計算において発生した主なイベント、および鉄筋のはらみ出しを無視し、かつ単調載荷を行った場合の計算結果も併せて示した。計算では $2\delta_y$ で最大荷重に達するが、そのときの耐力は過大評価されている。圧縮杭(正側載荷であれば1列目、負側載荷であればその逆側)の鉄筋のはらみ出しは $2\delta_y$ のレベルから生じている。一方、実験では最大荷重が $3\sim 4\delta_y$ にて発生している。したがって、計算は最大荷重点の変位レベルを小さめに評価している。その後、計算結果は、引抜き側の杭で鉄筋のはらみ出しが生じる $7\delta_y$ までほぼ一致する。鉄筋の破断がモデル化されていないので、それ以後の挙動を計算では評価できない。

計算において最大荷重点から一旦急に荷重低下が生じ、徐々にじん性的な挙動が発揮されるという特徴は、図-6に示されるコンクリートの応力ひずみ関係の骨格曲線形状に類似している。単杭の場合と比べて、群杭の場合には端部の杭の軸力が変動し、大きな軸圧縮力が作用する。図-14に供試体A、Bの端部杭の軸力の変動履歴を示す。縦軸は作用軸力を杭断面積で除すことによって得られる軸圧縮応力 $\sigma_N$ を更にコンクリート軸圧縮試験強度 $\sigma_{c0}$ で無次元化した値である。軸圧縮応力 $\sigma_N$ は最大で一軸圧縮試験強度 $\sigma_{c0}$ の25%以上に達する。通常、橋脚に作用している軸圧縮応力が設計基準強度の数%程度であると考え、かなり高い値である。作用軸力が大きいと曲げに伴いコンクリートに生じる圧縮ひずみが大きいレベルにまで達しやすくなる。その結果、比

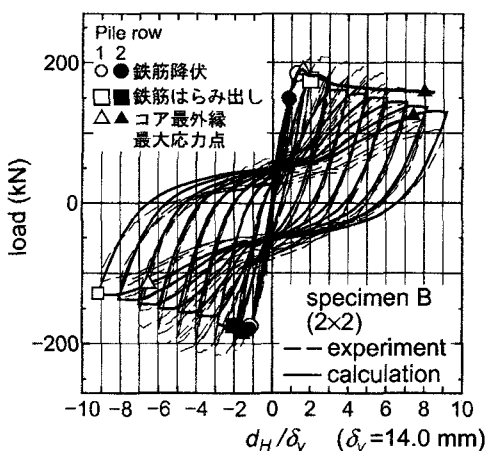
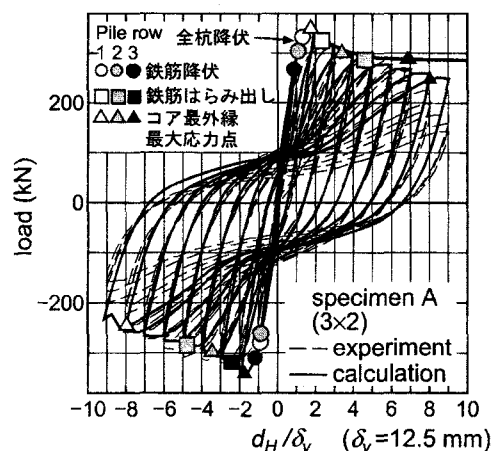


図-13 フーチング位置における水平荷重・水平変位曲線

較的小さい水平載荷レベルからコンクリートに生じる曲げ圧縮ひずみレベルが大きくなるので、計算結果がコンクリートの応力ひずみ関係に敏感になる。

また、供試体Bに関する計算精度が相対的に悪かったことも、同様の原因によるものと考えられる。2×2列杭である供試体Bの杭の方が供試体Aの杭より大きな軸力を受けており、軸力の変動がさほど無い中間列の杭を有していないためである。

## 8. まとめ

構造部材としての場所打ち杭の非線形挙動について、実験結果の数値シミュレーションを行った。本報告では、既報<sup>2),3),7),8)</sup>とは異なり、コンクリートの応力ひずみ関係としてManderら<sup>6)</sup>のモデルを用いた。その結果、杭が地盤中にある場合も含めて、単杭の非線形挙動のシミュレーション結果は曲げ耐力低下域も含めて比較的良好であった。しかし、軸力変動の為に杭に高い圧縮軸力が作用する群杭の場合には計算精度が劣り、コンクリートの応力ひずみ関係の軟化勾配の設定が計算結果に及ぼす影響が顕著に表れた。

したがって、設計実務においてファイバー要素を群杭

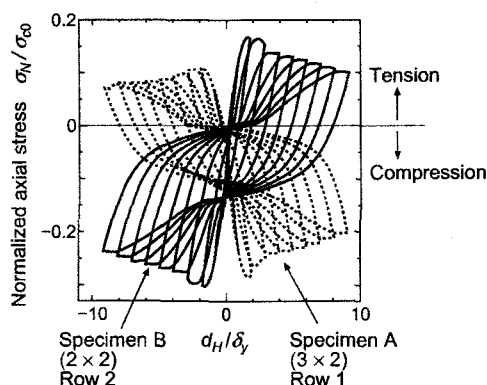


図-14 端部列杭一本あたりの軸力の変動 (供試体 A)

基礎の変形性能評価に用いることができるようにするための重要課題は、コンクリートの応力ひずみ関係における最大応力点以後のモデル化であることは変わらない。拘束コンクリートの応力ひずみ関係にはいくつかの研究結果があり、それらは比較的近い最大応力点を与えるが、最大応力点以後のモデル化については多様である。ファイバー要素を利用して場所打ち杭の挙動を評価するためには、円形断面に適用可能で、かつ静止土圧程度の低横拘束応力から帯鉄筋による高横拘束応力までの幅広い範囲に対応した軟化モデルが必要である。近年、たとえば秋山ら<sup>15)</sup>の研究に見られるように、軟化モデルについては研究が精力的に進められており、今後の更なる研究の進展が期待される。

以上のような現状と併せて考えると、現時点では、設計実務において場所打ち群杭基礎の耐力・変形性能をファイバー要素を用いて評価するときには、少なくとも、ソフトウェアが与えるコンクリートの応力ひずみ関係を無条件に使用することは避ける必要があると考える。ファイバー要素を用いて群杭基礎の変形性能を評価しようとする場合には、本報告や文献<sup>2),3),7),8)</sup>で行ったように、異なる軸力条件、異なる諸元、単杭、群杭などのいくつかの異なった条件の実験結果のシミュレーションを行うなどして、用いるモデルが与える数値解の性質を十分に把握した上で実務に適用する必要がある。

**謝辞：** 本研究の一部は、科学研究費補助金若手研究 (B) (研究代表者：白戸真大、課題番号 15760356) の助成により実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書，1996。
- 2) 白戸真大，木村嘉富，福井次郎，高橋雅裕：杭基礎のポストピーク挙動に関する数値解析，構造工学論文集，Vol. 45A，pp. 1387-1398，1999。
- 3) 白戸真大，木村嘉富，福井次郎：鉄筋のはらみ出しを考慮した場所打ち杭のモデルと地盤振動が杭基礎に与える影響評価への適用，土木学会論文集，No. 689/I-57，pp.

153-172，2001。

- 4) Menegotto, M. and Pinto, P. E.: Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including change in geometry and non-elastic behavior of elements under combines normal force and bending, *IABSE symposium on resistance and ultimate deformability of structures acted on by well-defined repeated Loads, Final Reports*, Vol. 13, pp. 15-22, Lisbon, 1973.
- 5) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A. W.: Stress-strain model for confined reinforced concrete in bridge piers, *J. of Struct. Engrg., ASCE*, Vol. 123, No. 5, pp. 624-633, 1997.
- 6) Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R.: Theoretical stress-strain model for confined concrete, *J. of Struct. Engrg., ASCE*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, 1988.
- 7) Shirato, M.: Computational seismic performance assessment of a pile foundation subjected to a severe earthquake, 東京大学学位論文，2004。
- 8) Fukui, J. and Shirato, M.: A structural model of RC members subjected to severe earthquake loads and its application to assess the seismic performance of pile foundations, 土木研究所資料，第 3916 号，土木研究所，2004。
- 9) Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R.: Observed stress-strain behavior of confined concrete, *J. of Struct. Engrg., ASCE*, Vol. 114, No. 8, pp. 1827-1849, 1988.
- 10) 木村嘉富，大越盛幸，中野正則，福井次郎，横山功一：杭基礎の変形性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 1597-1606，1998。
- 11) 石橋忠良，小林薫，海原卓也：大変形領域の交番載荷を受ける RC 橋脚のフーチングからの鉄筋拔出し量算定法に関する研究，土木学会論文集，No. 648/V-47，pp. 43-54，2000。
- 12) 福井次郎，木村嘉富，大越盛幸，阪野彰：砂地盤中の単杭の復元力特性に関する水平載荷試験，土木研究所資料，第 3552 号，土木研究所，1998。
- 13) Shirato, M., Koseki, J., and Fukui, J.: A new non-linear hysteretic rule for Winkler type soil-pile interaction springs that considers loading pattern dependency, *Soils and Foundations*. (投稿中)
- 14) 白戸真大，野々村佳哲，中谷昌一：Winkler パネを用いた深い基礎の非線形動的解析モデル，第 9 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，2006。
- 15) 秋山充良，洪起男，鈴木将，佐々木敏幸，前田直己，鈴木基行：普通強度から高強度までの構成材料を用いた RC 柱の一軸圧縮実験と圧縮破壊エネルギーを介したコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No. 788/V-67，pp. 81-98，2005。