

◆ 構造物模型実験特集 ◆

鉄筋のはらみ出しを考慮した場所打ち杭の耐力低下に関する数値解析

白戸真大* 福井次郎** 木村嘉富***

1. はじめに

比較的細長くフレキシブルな部材からなる杭基礎では、軟弱地盤中や剛性が大きく異なる地層境界面付近などでは地盤のせん断変形が大きくなるため、地震時保有水平耐力法による設計で曲げ降伏すると予測される杭頭付近以外でも杭体が降伏する恐れがある。しかし、地中部での杭体の損傷程度や杭体に許容される損傷程度は未だ明確ではなく、今後の要求性能照査型基準への移行のためには、地中部で杭体に必要とされる变形性能を明確にしておく必要がある。

地中に存在する杭基礎の挙動を実験や観測により把握するのは困難であるため、数値解析が有効な手段である。筆者等は、杭体をファイバー要素でモデル化し、軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係に鉄筋のはらみ出し後の挙動を取り込むことで杭基礎の耐力低下挙動まで追跡できることを示している¹⁾。しかし、そこでは、実際の鉄筋のはらみだし長さや塑性ヒンジ領域を予測するには至っていない。また、軟化型の応力-ひずみ関係を用いて有限要素解析する場合、一旦ある要素で軟化が起こったあと、その要素にのみ変形が集中することにより、解析結果が要素寸法に依存してしまうという問題が認識されている²⁾。つまり、軟化型の応力-ひずみ関係と適用する有限要素長を適切に関係づける必要がある。

そこで、本報文では、軸方向鉄筋のはらみ出しを塑性座屈現象としてモデル化することで、軸方向鉄筋のはらみ出し長さと軟化する荷重-変位関係を求める。そして、杭体をモデル化するファイバー要素の要素長として鉄筋のはらみ出し長さを用いて、はらみだした鉄筋の荷重-変位関係を軸方向鉄筋の軟化則として直接取り込んだ見かけの応力-ひずみモデルを提案する。最後に、このモデルを用いて単杭の水平交番載荷実験結果を解析することにより、モデルの検証を行う。

A Method for Numerical Analysis of Cast in Place Pile Considering the Swelling Out of Reinforcement Bar

2. 場所打ち杭模型の水平交番載荷実験

解析対象は、筆者等が行った場所打ち杭模型の水平交番載荷実験^{1),3)}である。杭体の諸元と実験概要を図-1に示す。載荷は、鉛直力147kNをまず載荷し、その後鉛直力を一定に保ちながら水平変位を与える。水平変位は、杭体最外縁鉄筋が降伏するときの変位を $18_y = 3.57\text{mm}$ とし、 $\pm n\delta_y (n = 1, 2, 3, \dots, 16)$ 、各 n での繰り返し回数3回の強制変位である。

載荷点での水平荷重-水平変位関係を図-2に示す。水平荷重が24.5kNに達したとき杭体表面にひび割れが発生し、 $4\delta_y (14.5\text{mm})$ で最大水平荷重55kNに達する。 $5\delta_y$ 載荷時に杭体とフーチングの境界部分でかぶりコンクリート表面が圧壊し、 $7\delta_y (25.0\text{mm})$ で荷重が若干低下、その後、 $7\sim 10\delta_y$ で荷重が保持されるが、 $10\delta_y (35.7\text{mm})$ より再び荷重が低下、 $12\delta_y (42.7\text{mm})$ で杭体の損傷が大きくなり、 $13\delta_y$ でかぶりコンクリートはく離、 $14\delta_y$ で軸方向鉄筋の1本が破断し、その後 $16\delta_y (57.1\text{mm})$ で実験を終了した。

実験終了後、基部の損傷状況を観察したのが写真-1である。鉄筋が帶鉄筋間隔の3倍(120mm)程度の長さで正弦一波の形状ではらみだしている。しかし、実験中はかぶりコンクリートが存在するため、鉄筋のはらみ出しがどの程度の変位から発生しているのかは観察できなかった。

3. 軸方向鉄筋の見かけの応力-ひずみ関係

3.1 軸方向鉄筋の塑性座屈解析

3.1.1 解析モデル

軸方向鉄筋のはらみ出し長さとはらみ出し後の軟化挙動を調べるため、はらみ出しを塑性座屈現象としてモデル化し塑性座屈解析を行う。

解析モデルを図-3に示す。杭中の一本の軸方向鉄筋に着目し、帶鉄筋間隔 s の m 倍(m は整数)の解析長 $L = ms$ に対して二次元の有限要素法にて片端固定、他点回転・水平固定条件で塑性

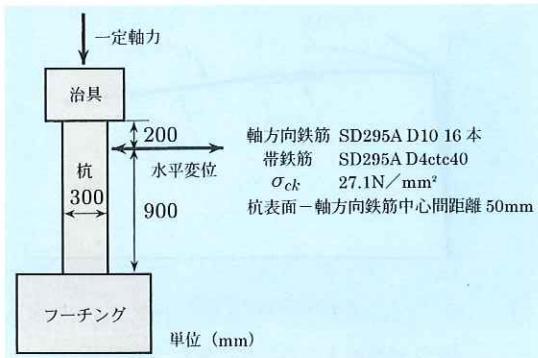
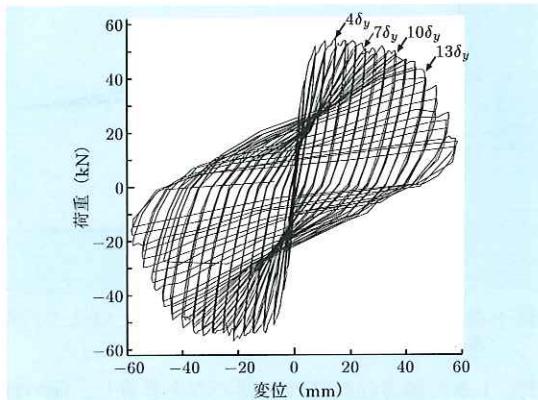


図-1 模型場所打ち杭の水平交番載荷実験

図-2 載荷点での水平荷重-水平変位関係
座屈解析を行う。

軸方向鉄筋の要素にはファイバー要素を用いて、要素分割を行った。応力-ひずみ関係は、繰り返し載荷を受けるRC部材中の鉄筋の応力-ひずみ関係として考案されたMenegotto-Pintoモデル^{1),4),5)}を用いた。このモデルは、図-3に示すように、初期剛性(ヤング率) E_0 、降伏後剛性 E_1 のバイリニア型の包絡線に漸近するものである。

帶鉄筋による軸直角方向の拘束はバネで、コアコンクリートによる拘束は分布バネでモデル化した。簡単のため、軸方向鉄筋のはらみ出しありコンクリートはく離後に起こるものとし、かぶりコンクリートによる拘束は考慮しない。帶鉄筋バネは実際の帶鉄筋間隔で、コアコンクリート分布バネはファイバー要素の各節点に集約して配置した。

帶鉄筋バネのバネ定数は、ここでは便宜的に、帶鉄筋で作った開角90°の両端固定アーチの頂部に外向き法線方向の荷重を作成させたときの荷重-変位関係を別途解析し与えた。コアコンクリートバネの分布バネ定数は、圧縮側はバネに変形が

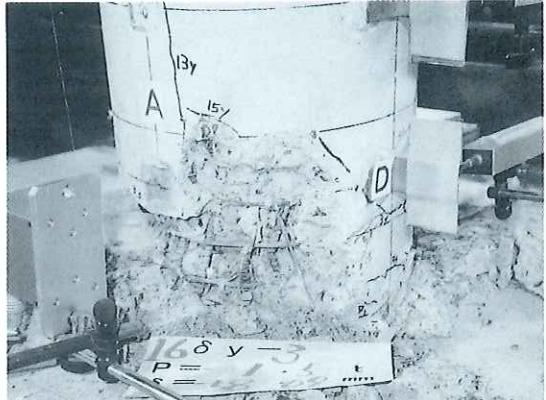
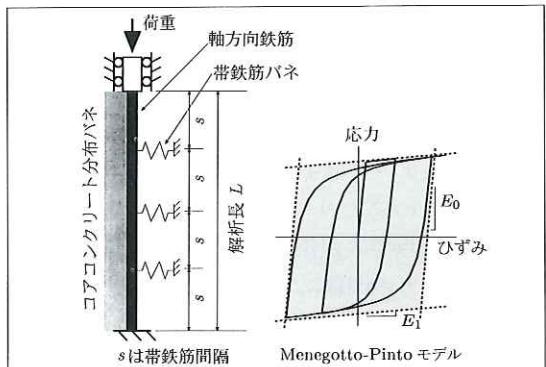


写真-1 基部での損傷状況

図-3 軸方向鉄筋の塑性屈折解析($L/s=4$ の場合)
ほとんど生じないように十分大きな値を設定し、引張り側には抵抗しないものとした。

3.1.2 解析結果

$L/s = 1 \sim 6$ の6ケースとし塑性座屈解析を行った結果を示す。ここに、ファイバー要素の断面量は規格値を、軸方向鉄筋の材料定数は、初期剛性 E_0 、降伏ひずみ ϵ_y には材料試験値を用いた。降伏後剛性 E_1 は材料試験結果がなかったので、別の鉄筋(SD345)の引張り試験結果を参考に $E_1=0.01E_0$ とし、等方硬化則を採用した。また、履歴パラメーターは文献⁵⁾を参考に同じ値を用いた。帶鉄筋バネの算定は、帶鉄筋アーチには線形の梁要素を用い、断面量は規格値を、ヤング率は材料試験値を用いた。求まったバネ定数は $k_f = 1.7 \text{ MN/m}$ である。コアコンクリート分布バネ定数は、 9.8 GN/m^2 とした。

平均ひずみ(=軸方向変位/解析長 L)が5%の時の変形形状が図-4である。図-4のスケールは、各ケースそれぞれ解析長 L で無次元化されており、破線が初期形状、実線が変形後の形状である。図中、バネの絵は概念図で、バネが二重に見える

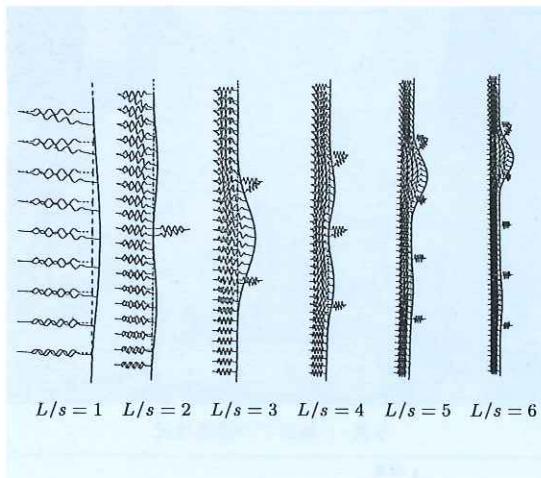


図-4 軸方向鉄筋の塑性座屈モード

部分は、これも変形前後の形状が描かれているためである。図-4より、座屈波は、 $L/s = 2, 4$ で2つ、他4ケースは1つとなっている。

座屈波1つあたりの荷重-変位関係を評価するため、載荷点での変位を座屈波の数で割ったものと載荷荷重との関係について整理したのが図-5である。座屈は鉄筋降伏直後に発生する。これは、降伏により接線剛性が極端に落ちることで、見かけのオイラー座屈荷重が低下するためと考えられる。その後は、 $L/s = 3, 5, 6$ がほぼ同様の挙動を示し、最も荷重低下が大きい。図-4の変形状態と比較して考えると $L/s = 5, 6$ の時は、 $L/s = 3$ の時と同じ座屈モードが生じていることがわかる。写真-1に示したように、載荷実験で軸方向鉄筋がはらみだした長さは3s程度であり、本解析で最も軟化する3sに一致する。

このように帶鉄筋の拘束効果を考慮した軸方向鉄筋の塑性座屈解析により、実験で観察されたはらみだし長さが予測できた。

次に、 $L/s = 3$ において、帶鉄筋の降伏を考慮し帶鉄筋バネを完全弾塑性型とした解析を行った。ここに、帶鉄筋バネの降伏荷重 P_{fy} は、前述の帶鉄筋アーチの解析において要素中心のひずみが材料試験から得られた降伏ひずみに達した時の荷重とした。結果を図-6に示す。図-6には、帶鉄筋バネが弾性の場合の結果も示す。帶鉄筋の降伏により軸方向鉄筋が受ける拘束は弾性時より小さくなるため、軸力の低下が大きくなる。

本報文で提案している軸方向鉄筋の塑性座屈解析モデルでは、帶鉄筋バネ定数 k_f の算定を行う

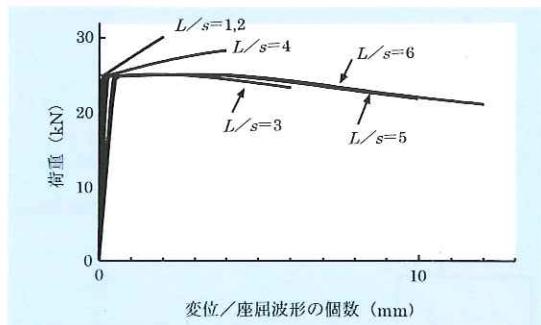
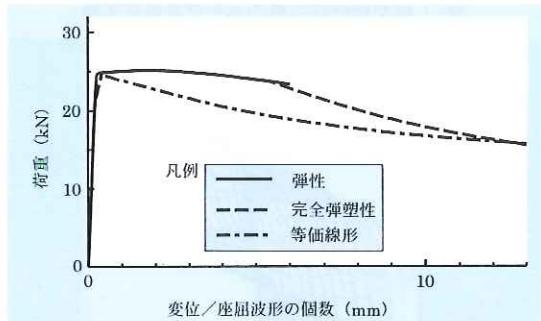


図-5 座屈波1つあたりの荷重-変位関係

図-6 帯鉄筋バネ剛性の違いによる座屈波1つあたりの荷重-変位関係($L/s = 3$ の場合)

際、1本の軸方向鉄筋の影響のみを考慮し、他の軸方向鉄筋の影響を無視している。このため、実際のバネ定数は k_f より小さくなることが考えられる。そこで、完全弾塑性バネを用いた塑性座屈解析結果において、軸方向鉄筋の平均ひずみが10%（変位量0.3s）の時に帶鉄筋バネに生じていた変形量に着目した等価線形バネ定数 $k_{fe} = k_f/3$ を用いて塑性座屈解析を行ってみた。結果を図-6に併せて示す。これは、解析対象の水平交番載荷実験を鉄筋に座屈が生じないものとして解析すると¹⁾、基部要素の軸方向鉄筋のひずみが引張りから圧縮へ反転したあと最大で10%程度変動することより設定したものである。完全弾塑性バネを用いた場合に対し、座屈直後から急激な耐力低下が生じることがわかる。

3.2 はらみ出しを考慮した鉄筋のみかけの応力-ひずみ関係の提案

ここでは、軸方向鉄筋に座屈が生じないときの応力-ひずみ関係である図-3のMenegotto-Pintoモデルと3.1の結果を組み合わせ、はらみ出しを考慮した軸方向鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係として図-7を提案する。

座屈が発生する場合の圧縮載荷経路は、座屈を

考慮しない Menegotto-Pinto モデル(曲線 ABC)と座屈軟化曲線(曲線 PQBR)で構成される。ここで、曲線 PQBR は、3.1 で述べた帶鉄筋、コアコンクリートの拘束を考慮した軸方向鉄筋の塑性座屈解析より求まる載荷点での荷重-変位関係を、荷重を断面積で、変位を塑性座屈解析長 L でそれぞれ割ることによりみかけの応力-ひずみ関係に直し、原点を点 P に平行移動したものである。ここに、点 P は、引張りから圧縮へ反転する点 A から初期勾配 E_0 で弾性除荷した場合に応力がゼロとなる点である。

座屈発生の判定は、軸方向鉄筋がかぶりコンクリートの圧壊ひずみを経験し、再度引張り載荷を受けた後の圧縮載荷から行うものとした。同一ひずみに対し、Menegotto-Pinto モデルで得られる圧縮応力 σ_m と座屈軟化曲線 PQBR より得られる σ_b を比較することにより行い、 $\sigma_m = \sigma_b$ となつたときに Menegotto-Pinto モデルから座屈軟化曲線上の BR へ経路を変える。ただし、かぶりコンクリートの存在による拘束があるうちは軸方向鉄筋の座屈は生じないものとする。

座屈経路から反転し、引張り側への載荷を受けるときは、筆者等が文献¹⁾で提案しているように、履歴中の最大引張りひずみ点 A を目指す。

また、本提案モデルは、塑性座屈解析長 L でひずみを平均化しているため、杭の解析に用いるファイバー要素長も塑性座屈解析長 L を用いる。

4. 場所打ち杭模型の水平交番載荷実験の解析

4.1 解析モデル

2. で述べた場所打ち杭模型の水平交番載荷実験に対し、解析を二次元の有限要素法で行う。基部は完全固定とし、杭体はファイバー要素でモデル化した。かぶりコンクリート、コアコンクリート、鉄筋のそれぞれのファイバーに材料非線形性を考慮した一軸の応力-ひずみ関係を与える。軸方向鉄筋ファイバーは、それぞれの鉄筋の中心位置に設定した。

杭体の要素長は、3.において軸方向鉄筋がはらみだした後最も軟化し、かつ、塑性座屈解析長が最短であった $3s$ (120mm) と設定した。軸方向鉄筋はらみ出し後の軟化特性にも塑性座屈解析長が $3s$ の結果を適用し、杭体の耐力低下が大きい領域の挙動に主眼を置き、図-6 で等価線形バネを用い

た場合の荷重-変位関係を用いた。

また、本解析では、耐力低下域の挙動に着目しているため、軸方向鉄筋のフーチングからの抜けだしを考慮していない。

4.1.1 コンクリートの応力-ひずみ関係

繰り返し載荷を受ける杭の耐力低下に関して解析を行うので、繰り返し載荷を考慮し、かつ軟化域における履歴則もモデル化されている Ristic 等⁵⁾による修正六車モデル(図-8)を採用した。

最大応力点ならびに第一低下勾配は、横拘束筋の拘束効果が考慮され、本供試体程度の帶鉄筋体積比の柱部材に対して提案されている星隈等⁶⁾のモデルで与えた。このモデルの低下勾配は、最大応力 σ_{cc} とその 50% の $0.5\sigma_{cc}$ の区間で同定されたものであるため、本解析でも σ_{cc} から $0.5\sigma_{cc}$ の間において適用するものとし、 $0.5\sigma_{cc}$ 以下では、

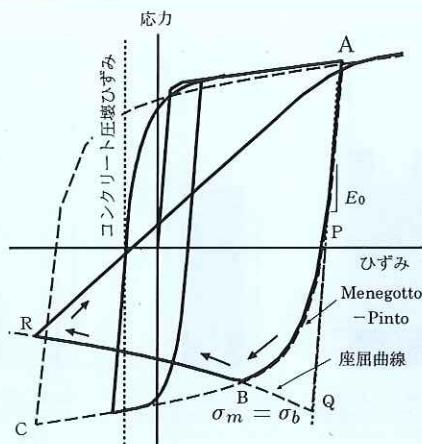


図-7 はらみ出しを考慮した鉄筋の応力-ひずみ関係

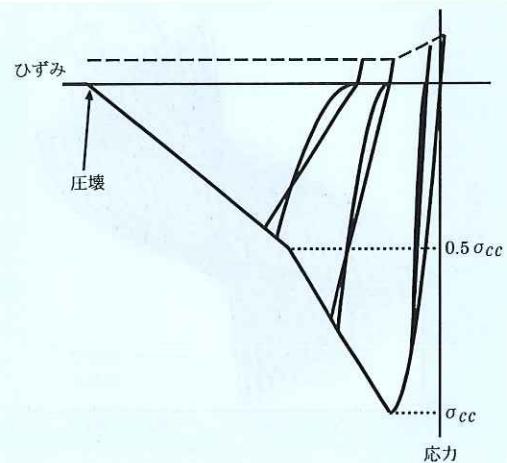


図-8 修正六車モデル

便宜的に低下勾配を1/2とした。また、帶鉄筋の拘束効果は、文献¹⁾での検討に基づきコアコンクリートにのみ考慮し、かぶりコンクリートには考慮しなかった。

ここで具体的に設定したパラメーターは、文献¹⁾で本解析対象杭を解析するために同定した値である。文献¹⁾と本報文では要素長が異なるが、その差はわずかであり、本報文でも採用した。

4.2 解析結果と考察

図-9に、解析による $13\delta_y$ 終了後の損傷状態を示す。軸方向のコンクリートの圧壊領域および鉄筋の座屈が生じている領域は、基部の一要素、すなわち基部より帶鉄筋間隔の3倍の領域(120mm)のみであり、写真-1に示す実験終了後の杭の損傷領域に一致する。このことは、本報文で提案した要素長の設定方法が杭の破壊メカニズムを適切に

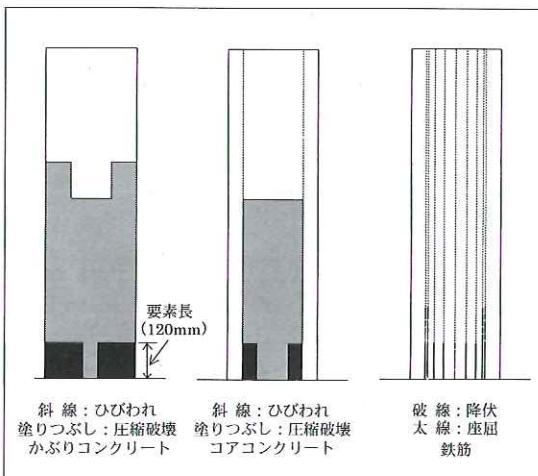


図-9 解析による $13\delta_y$ 終了後の損傷状態

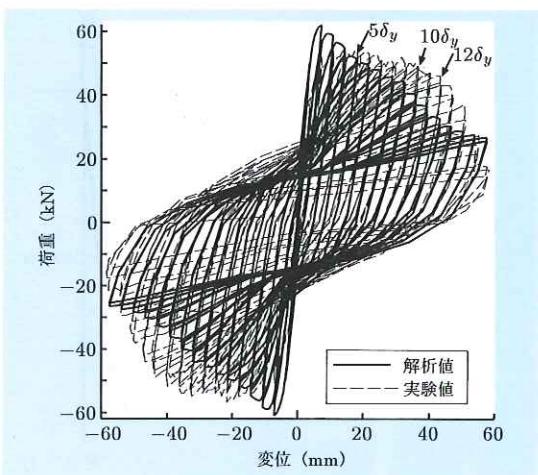


図-10 載荷点での水平荷重-水平変位関係

考慮しているためと考えられる。

図-10が載荷点での水平荷重-水平変位関係である。全体の包絡曲線は、実験での傾向を定性的に良く予測している。また、各 δ_y でのループ形状は良く一致しており、全体として耐力低下までの挙動を比較的良い精度で追跡している。しかし、解析は、 $3\delta_y$ までは実験値よりかなり大きな荷重を算出し、その後は、耐力低下が早い載荷段階から起きており、荷重を低めに評価している。特に、負側では正側より差が大きい。

解析が初期に荷重を大きめに評価するのは、軸方向鉄筋の抜け出しを考慮していないこと、また、ひび割れコンクリート中で引張りを受ける軸方向鉄筋のヤング率が、鉄筋単体での材料試験による値とは見かけ上異なっていることなどが考えられる。

次に、解析の方が耐力低下を大きく評価するのは、以下の3つの要因が考えられる。

第一に、基部要素における断面方向の損傷の進展の差が考えられる。解析では、基部最外縁軸方向鉄筋位置でのコンクリートの圧壊は、かぶりコンクリートでは $5\delta_y$ 載荷時、コアコンクリートでは $10\delta_y$ 載荷時に発生しているのに対し、実験では、2.で示したように $5\delta_y$ では基部のごく一部が圧壊したにすぎず、杭体の破壊が大きくなるのは $12\delta_y$ 程度からであり、最終状態でも軸方向鉄筋位置程度までしか損傷が進展していない。

第二に、座屈の発生が実験に比べ早かったことが考えられる。本解析では、座屈の発生を軸方向鉄筋位置のかぶりコンクリート圧壊後としているため基部最外縁鉄筋での座屈発生は $6\delta_y$ であったが、実験ではまだかぶりコンクリートによる拘束が存在していたため座屈は発生していなかったと考えられる。

この理由としては、コンクリートの応力-ひずみ関係の骨格曲線の設定が考えられる。本解析では図-8に示すように最大応力点に達した後すぐに軟化するように設定したため、耐力保持域が再現できなかったと考えられる。

第三に、軸方向鉄筋の軟化特性の影響もあると考えられる。ここでは、軸方向鉄筋の軟化特性として、耐力低下が大きくなったときの状態を想定して、図-6で等価線形帶鉄筋バネとした場合の結果を用いているが、同じ図-6の完全弾塑性バネの

場合の曲線と比較すると、完全弾塑性バネの方は座屈直後に荷重を保持する領域がある。実際は、同じ要素でも鉄筋ファイバーの位置によっては完全弾塑性バネの場合に近い挙動をするものもあると考えられる。

以上をまとめると、ループ形状や損傷領域を非常に良い精度で予測できること、損傷の進展を概ねとらえていることから、提案した履歴則は概ね妥当な結果を与えるものであると言える。また、筆者等は本解析モデルを用いて異なる諸元の模型杭を用いた軸力変動を伴う水平交番載荷実験の結果も解析したが、非常に精度良く解析できた⁷⁾。

今後、解析の方が耐力低下が大きくなることに対して、コンクリートの応力-ひずみ関係や、帶鉄筋バネの評価方法に関して改善の余地があるとともに、地震動のような複雑な荷重履歴を受ける場合の検証が別途必要である。

5. まとめ

本報文では、場所打ち杭の水平交番載荷実験で観察される鉄筋のはらみだし長さを、帶鉄筋、コアコンクリートによる横拘束効果を考慮した軸方向鉄筋の塑性座屈現象で予測できることを示した。また、塑性座屈解析結果に基づく軸方向鉄筋の履歴モデルを提案し、その履歴モデルを用いて単杭の水平交番載荷実験の解析を行い、杭体の耐力低下域までの挙動を精度良く解析できることを示した。ここで検討した杭体のモデル化は、コンクリートの応力-ひずみ関係や、はらみ出しに対する帶鉄筋による抵抗のモデル化などに課題が残るが、耐力低下域まである程度の精度で追跡できるモデルが提案できたと考えている。

今後は、種々の杭体や荷重履歴に対する検証を進めるとともに、地盤-基礎-上部構造系の解析を通して杭基礎の限界状態の検討を行いたい。

参考文献

- 1) 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一数值解析、構造工学論文集, vol.45A, pp.1387-1398, 1999.
- 2) たとえば、中村光：材料特性としてのコンクリートの応力-ひずみ関係、コンクリート構造物の耐震技術-現状と将来展望-concrete engineering series 20, pp.92-95, 土木学会, 1997.
- 3) 福井次郎、中野正則、木村嘉富、石田雅博、大越盛幸、阪野彰：杭基礎の变形性能に関する載荷試験、土木研究所資料, 第 3553 号, 1998.
- 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 combined normal force and bending, I-ABSE 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) Ristic, D., Yamada, Y., Iemura, H., and Petrovski, J. : Nonlinear behavior and stress-strain based modeling of reinforced concrete structures under earthquake induced bending and varying axial loads, Research Report No.88-ST01, School of Civil Engineering, Kyoto University, 1988.
- 6) 星置順一、川島一彦、長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係、土木学会論文集, No.520/V-28, pp.1-11, 1995.
- 7) 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杭のポストピーク解析、第 54 回土木学会年次学術講演会概要集第 1 部 (A), pp.786-787, 1999.

白戸真大*



建設省土木研究所
構造橋梁部基礎研究室
研究員
Masahiro SHIRATO

福井次郎**



建設省土木研究所
構造橋梁部基礎研究室長
Jiro FUKUI

木村嘉富***



国土庁
(前 建設省土木研究所
構造橋梁部
基礎研究室主任研究員)
Yoshitomi KIMURA