

場所打ち杭のポストピーク解析のためのファイバー要素を用いた モデル化手法

白戸真大*・福井次郎**・木村嘉富***

*正会員 工修 建設省土木研究所 構造橋梁部 基礎研究室 研究員(〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1)

**正会員 工修 建設省土木研究所 構造橋梁部 基礎研究室 室長

***正会員 工修 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)

A modeling method is proposed to predict the postpeak behavior of cast-in-place pile foundation. The model includes swelling out as plastic buckling phenomenon in the constitutive relation of re-bar and the plastic buckling length is used as the length of fiber element to avoid mesh dependency of FE results because of a softening constitutive relation. As a result, the proposed model can explain the experimental results of horizontal cyclic loading tests of model piles well.

Key Words : postpeak behavior, cast in place pile, FEM, fiber element, swelling out

1. はじめに

杭基礎は、地震時に、地層の硬軟の境界付近や軟弱地盤中などで、地盤の震動変形により杭頭付近以外でも損傷を受けることが明らかになってきている。しかし、杭基礎は地盤に支持され、かつ複数の杭で構成される高次不静定構造物であるため、地中部における杭の損傷が上部構造の安定に及ぼす影響が明らかになっておらず、耐震設計上この影響をどのように考慮するのかは明確になっていない。その検討には、地中部での杭基礎の局所的な損傷発生以降の挙動を把握する必要があり、数値解析による検討が有効である。

そこで、本研究では、場所打ち杭の弾性挙動領域から耐力低下領域までの挙動を一貫して解析するための、ファイバー要素を用いたモデル化手法を提案する。提案する手法は、軸方向鉄筋のはらみ出しをかぶりコンクリートの圧壊、はく離後に生じる塑性座屈現象としてモデル化して、軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係に考慮する。また、軸方向鉄筋に軟化型の応力-ひずみ関係を用いた場合に生じることがある有限要素解の要素長依存性を回避するため、軸方向鉄筋、帯鉄筋の組み合わせから決まる塑性座屈長をファイバー要素長として設定する。本論文では、まず、水平交番荷重実験が行われた模型杭を対象に、鉄筋の塑性座屈解析を行うことにより鉄筋のはらみ出し長さを算定可能であることを示す。その後、提案したモデルによる荷重実験の解析を行い、提案手法の妥当性を検証する。

2. 鉄筋のはらみ出し現象のモデル化

(1) 塑性座屈解析モデル

本論文では、軸方向鉄筋のはらみ出しを軸方向鉄筋の塑性座屈現象として扱うものとする。鉄筋のはらみ出

しとそれに抵抗するかぶりコンクリートの間には何らかの相互作用があると予想されるが、杭が軸方向鉄筋がはらみ出す程度の曲げ荷重を受ける場合は、かぶりコンクリートは圧壊、はく離すると考えられる。そこで、ここではかぶりコンクリートの存在を無視した図-1のモデルにより、鉄筋の塑性座屈挙動を二次元の有限要素法にて求める。杭中の一本の軸方向鉄筋に着目し、帯鉄筋間隔 s の m 倍 (m は整数) の長さ $L = ms$ に対して、下端固定、上端回転・水平固定境界条件の下で上端に圧縮変位を与えるものである。軸方向鉄筋はファイバー要素で、帯鉄筋による軸直角方向の拘束は帯鉄筋間隔で配置するバネで、コアコンクリートによる拘束は分布バネでモデル化する。

軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係は、繰返し荷重を受ける RC 部材の鉄筋の応力-ひずみ関係として提案された図-1の Menegotto-Pinto モデル^{1),2),3)}を用いる。これは、後述する杭の荷重実験の解析に用いる応力-ひずみ関係と整合を図るためである。ただし、本研究では、4.の杭の荷重実験の解析も含めて、Bauschinger 効果は考慮しない。帯鉄筋バネのバネ定数は、ここでは便宜的に、帯鉄筋で作った開角 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用させた時の荷重-変位関係を別途解析し与える。コアコンクリートの分布バネ定数は、圧縮側はバネに変形がほとんど生じないように十分な値を設定し、引張りには抵抗しないものとする。

(2) 軸方向鉄筋のはらみ出し長さの同定

解析対象は、4.で荷重実験の解析を行う模型場所打ち杭である³⁾。諸元は、図-6に示されている。解析に必要な材料定数は材料試験値を、断面量は公称値を用いた。ただし、軸方向鉄筋の降伏後剛性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初期剛性の $1/100$ とした。また、履歴パラメータは

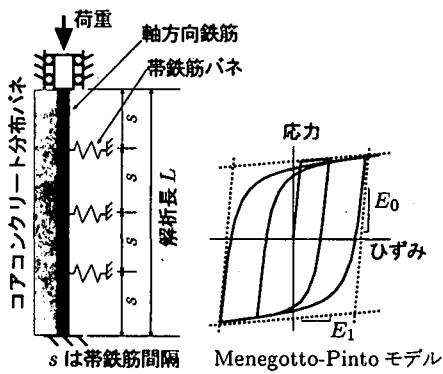


図-1 軸方向鉄筋の塑性座屈解析 ($L = 4s$ の場合)

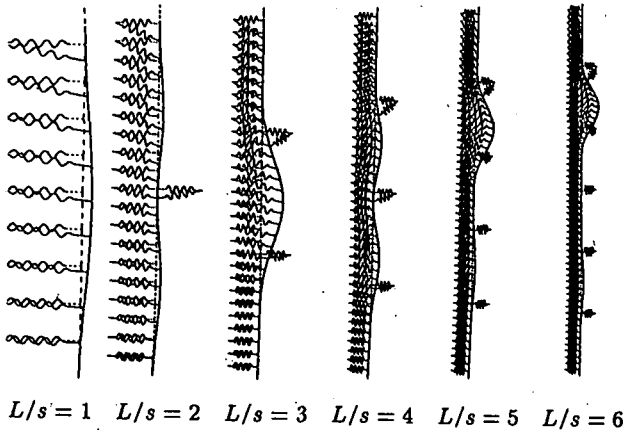


図-2 軸方向鉄筋の塑性座屈モード

文献³⁾と同じ値を用いた。帯鉄筋バネの算定は弾性体として行ない、求めたバネ定数は $k_f = 1.7\text{MN/m}$ である。またコアコンクリート分布バネ定数には 9.8GN/m^2 を与えた。

解析は、 $L = 1 \sim 6s$ の6ケースを行った。なお、解析の際は、軸方向鉄筋に放物線分布の微小な初期不整を入れている。

平均ひずみ (= 軸方向変位 / 解析長 L) が5%の時の変形状態が図-2である。図-2のスケールは、それぞれの解析長 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。変形状態を比較すると $L = 5s, 6s$ の時は、 $L = 3s$ の時と同じ座屈モードが生じているように見える。

そこで、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除したものと載荷荷重との関係について整理したものを図-3に示す。座屈は鉄筋降伏直後に発生し、その後は、図-2で同じ座屈モードであると考えられた $L = 3s, 5s, 6s$ がほぼ同様の挙動を示し、最も荷重低下が大きい。文献³⁾にあるように、ここで解析対象とした杭の載荷実験において軸方向鉄筋がはらみ出した長さは $3s$ 程度であり、本解析で最も不安定なモードを示す $3s$ に一致する。つま

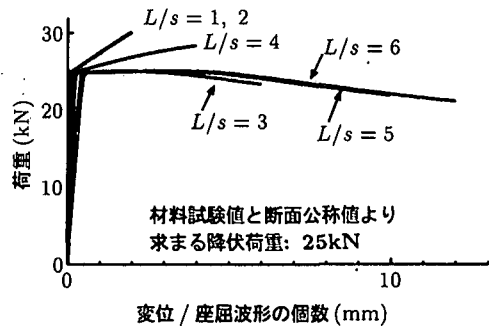


図-3 座屈波1つあたりの荷重-変位関係

り、塑性座屈荷重は断面の塑性化による曲げ剛性の低下により決定されるため解析長 L によらず一定となるが、座屈後の荷重低下経路は異なり、最も不安定なモードが実際の軸方向鉄筋のはらみ出し現象として生じていることが予測される。また、別の模型杭の載荷実験⁴⁾に対しても同様の解析を行ったが、載荷実験での軸方向鉄筋のはらみ出し長さを同定できた。

(3) 帯鉄筋バネの剛性の違いによる挙動の比較

ここまでの塑性座屈解析では帯鉄筋は弾性領域にあると仮定してきたが、杭の変形に伴い鉄筋のはらみ出しが大きくなると帯鉄筋が塑性化することも考えられる。そこで、帯鉄筋バネの剛性が軸方向鉄筋の荷重-変位関係に及ぼす影響を把握するため、解析長を $L = 3s$ と一定にし、以下の三種類の帯鉄筋バネを用いた解析を行った。

- 帯鉄筋バネを弾性バネとした場合 ((2)と同じ)。
- 帯鉄筋アーチの最外縁が降伏応力に達した点を降伏点とした完全弾塑性型バネとした場合。
- 軸方向鉄筋の圧縮量が $0.1L$ に達した時の完全弾塑性型帯鉄筋バネの変形量に対応する割線剛性 k_{fe} を求め、帯鉄筋バネをバネ定数 $k_{fe} = k_f/3$ の等価線形バネとした場合。

解析結果を図-4に示す。ここで対象としている軸方向鉄筋と帯鉄筋の組み合わせでは、帯鉄筋の剛性により塑性座屈後の挙動に差が出る結果となり、バネが柔なほど軸方向鉄筋の受ける拘束が小さくなり不安定な挙動を示す。

一方で、文献⁴⁾の杭の配筋では、軸方向鉄筋の塑性座屈後挙動に帯鉄筋の剛性による違いは明確ではなかった。

3. ファイバー要素を用いた場所打ち杭のモデル化手法

ここでは、繰返し曲げ荷重を受ける杭の挙動を解析するための、ファイバー要素を用いたモデル化手法を提案する。

杭体の要素長は、2.の軸方向鉄筋の塑性座屈解析に

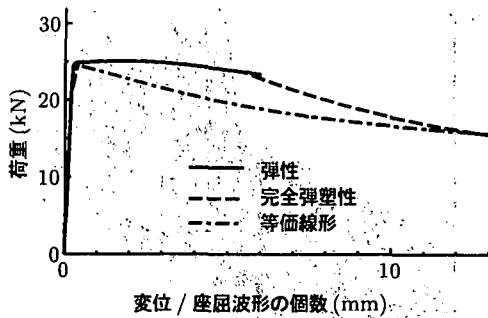


図-4 帯鉄筋バネ剛性の違いによる座屈波1つあたりの荷重-変位関係 ($L = 3s$ の場合)

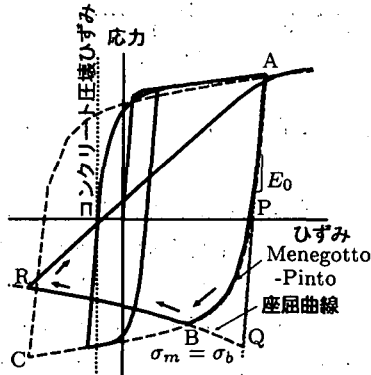


図-5 はらみ出しを考慮した鉄筋の応力-ひずみ関係

より最も不安定な経路をとる解析長 L_0 を求め、その L_0 を要素長とする。これまでの実験から通常の配筋では鉄筋のはらみ出し長さは杭径の半分程度になると考えられ、一般に杭長が杭径の10倍以上となることを考慮すると要素長が梁としての解析精度へ与える影響は少ないと考えられる。

また、軸方向鉄筋のはらみ出し後の平均応力-平均ひずみ関係として、図-5を提案する。圧縮荷重経路は、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。曲線 PQBR は2.で述べた帯鉄筋、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める荷重点での荷重-変位関係を、荷重を断面積で、変位を要素長(塑性座屈長) L_0 でそれぞれ割ることによりみかけの応力-ひずみ関係に直したものの原点を点 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 で弾性除荷したときに応力がゼロとなる点である。変位を要素長で平均化する操作は、軟化する応力-ひずみ関係を平均化することにより有限要素解の要素長依存性を回避することを目的として行うものである。

座屈は、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 が $\sigma_m = \sigma_b$ となったときに発生するものとし、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、座屈発生 の判定は、軸方向鉄筋

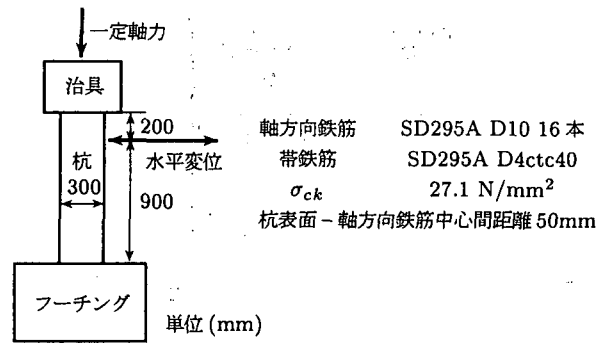


図-6 模型場所打ち杭の水平交番荷重実験

がかぶりコンクリートの圧壊ひずみを経験し、再度引張り荷重を受けた後の圧縮荷重から行うものとする。つまり、履歴中の最初の座屈の発生は、軸方向鉄筋位置のかぶりコンクリート圧壊後に起こるとする。

座屈経路から反転し、引張り荷重を受けるときは、筆者等が文献³⁾で提案しているように、履歴中の最大引張りひずみ点(図-5では点 A)を目指すものとする。

4. 本モデル化手法の妥当性の検証

妥当性検証に用いた解析対象は、筆者等が行った場所打ち杭模型の水平交番荷重実験³⁾である。杭体の諸元と実験概要を図-6に示す。荷重は、鉛直力147kNをまず荷重し、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 $1\delta_y = 3.57\text{mm}$ 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。実験終了後の基部の損傷状況は、鉄筋が帯鉄筋間隔の3倍(120mm)程度の長さで正弦一波の形状ではらみだしていた。詳細は文献³⁾を参照されたい。

解析は、杭体にファイバー要素を用いた二次元の有限要素法により行う。要素長は2.(1)の検討に基づき $3s$ (120mm)とし、軸方向鉄筋の履歴則は2.と同様に設定した Menegotto-Pinto モデルおよび3.で提案したモデルを用いる。ここに、座屈軟化特性は図-4の帯鉄筋バネを等価線形バネとした場合の結果とした。コンクリートの応力-ひずみ関係は、図-7に示すように、骨格曲線には解析対象杭の帯鉄筋比を考慮し星隈ら⁵⁾の提案するモデルを、履歴則には Ristic ら²⁾による修正六車モデルを用いる。かぶりコンクリートとコアコンクリートでは、文献³⁾と同様に最大応力点および軟化勾配の設定を変え、コアコンクリートには帯鉄筋による拘束効果を反映させた。

(1) 解析結果および考察

解析により得られた荷重点での水平荷重-水平変位関係を図-8に示す。全体の包絡曲線は実験の傾向を定性的に良く予測しており、全体として耐力低下までの挙

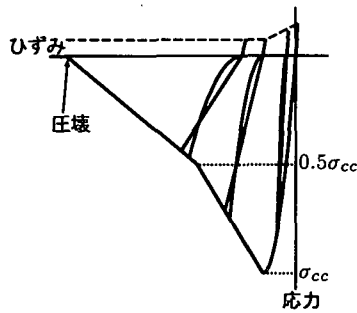


図-7 コンクリートの応力-ひずみ関係

動を比較的良好な精度で追跡している。また、各 δ_y のループ形状も良く一致している。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、耐力低下が早い荷重段階から起きており、荷重を低めに評価している。

解析において荷重終了後に杭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、すなわち基部より帯鉄筋間隔の3倍 ($3s$) の領域のみであり、実験終了後の杭の損傷領域に一致した。これは、本報文中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考慮しているためと考えられる。

以上より、解析が実験に比べ初期に荷重を過大評価し、その後、荷重を低く評価する原因としては各ファイバーの応力-ひずみ関係が考えられる。塑性座屈後の鉄筋の応力-ひずみ関係はもちろんであるが、特にかぶりコンクリートは、その強度が最大耐力や初期の荷重に影響を与え、また、その圧壊を軸方向鉄筋の座屈発生条件としてモデル化しているため、耐力低下挙動にも大きく影響を与えていると考えられる。本解析においても、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 $5\delta_y$ 荷重時、コアコンクリートでは $10\delta_y$ 荷重時に発生しているのに対し、実験では $5\delta_y$ では基部のごく一部が圧壊したにすぎず、かぶりコンクリートの破壊が大きくなるのは $12\delta_y$ 程度からであった。それに応じて、解析では、基部最外縁鉄筋の座屈発生は $6\delta_y$ と、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荷重段階から座屈が発生している。

5. まとめ

本論文では、場所打ち杭に対して、弾性挙動から耐力低下挙動までを解析するための鉄筋のはらみ出しを考慮したファイバー要素によるモデル化手法を提案した。また、提案手法を用いて場所打ち杭モデルの水平交番荷重実験の解析を行った結果、荷重点での荷重-変位履歴、杭体の損傷を比較的良好に予測できた。提案手法は、コンクリートの応力-ひずみ関係やはらみ出し後の鉄筋の荷重分担に検討の余地はあるが、場所打ち杭基礎の地震時挙動の解析に有効な手法であると言える。また、

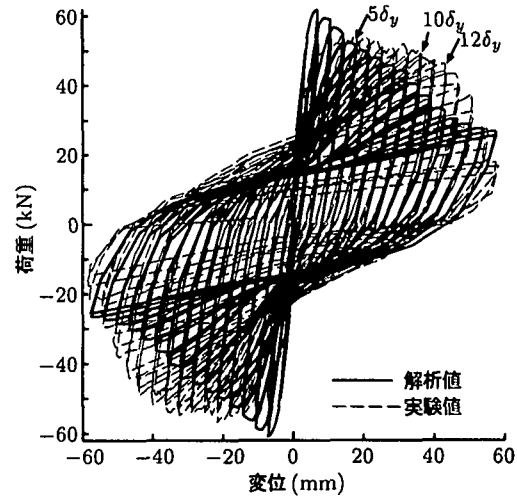


図-8 荷重点での水平荷重-水平変位関係

文献⁴⁾では、提案手法を用いて、別の模型杭を用いた軸力変動を伴う水平交番荷重実験結果の解析を行っているが、非常に良好な精度で解析することができた。

今後は、解析結果に及ぼす設定パラメータの感度を調べるなどモデルの高度化を図るとともに、場所打ち杭基礎の地震時挙動の解析を行うことにより、杭基礎の限界状態について検討したい。

謝辞： (株)長大の矢部正明氏、高橋雅裕氏には、数値計算法や本モデル化手法に関して有益な助言をいただきました。ここに記し、謝辞とします。

参考文献

- 1) 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, *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.*
- 2) 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.*
- 3) 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.*
- 4) 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挙動解析, *土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第1部(B), pp.786-787, 1999.*
- 5) 星隈順一, 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.*