

I - B 395

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

建設省土木研究所 正員 白戸真大
木村嘉富
福井次郎

1. はじめに

杭基礎の耐震設計において、地震時にどこまでの損傷を許すかは、耐震性能と経済性を両立した設計を行うための重要な項目である。その検討には、杭基礎の局所的な損傷の発生以降の挙動を追跡することが可能なモデルによる数値解析が有効な手段となる。

杭体の曲げ耐力低下には、かぶりコンクリートのはく離や軸方向鉄筋のはらみ出しが関係することが実験的に明らかになってきている。また、著者ら¹⁾は、ファイバー要素を用いた解析においても、軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係にはらみ出し後の挙動を取り込むことで、耐力低下域の杭の挙動を追跡することができる可能性を示した。しかし、軟化型の応力-ひずみ関係を扱う場合には、解析結果の要素長依存性の問題がある。そこで、ここでは軸方向鉄筋のはらみ出し後の挙動を文献¹⁾と同様に塑性座屈現象でモデル化をするが、帯鉄筋による拘束を考慮した軸方向鉄筋単体の塑性座屈解析を行った結果に基づき、要素長の設定および要素長で平均化した軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係の設定を行った。そして、そのモデルを用いて水平力と同時に軸力を変化させた単杭の荷重試験結果²⁾を解析し、その有効性を確認した。

2. 解析例

(1) 解析対象

解析対象は、文献²⁾の場所打ち杭模型の正負交番荷重試験である（図-1）。水平荷重は、変位制御により行われ、部材の変形角が1/1000、1/400の振幅で各1サイクル、1/200、2/200、4/200、6/200、8/200、10/200の振幅で各3サイクルの繰り返し荷重を与えている。ここに、部材の変形角は、載荷点における水平変位量をせん断スパン長で除した値として定義されている。また、この試験では、図-2に示すように、水平力に応じて変動する軸力を荷重している。

(2) 軸方向鉄筋の塑性座屈解析

まず、軸方向鉄筋一本を取り上げ、図-3のようにコアコンクリートと帯鉄筋による拘束を考慮した座屈解

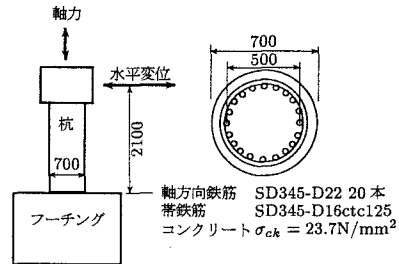


図-1 解析対象試験体の概要（単位:mm）²⁾

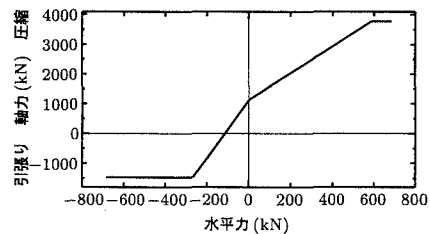


図-2 軸力変動のパターン²⁾

析（両端固定）を行う。軸方向鉄筋はファイバー要素でモデル化し、応力-ひずみ関係は Menegotto-Pinto モデルを用いた。2次勾配は、鉄筋の引張り試験結果を参考に初期剛性の1/100とし、その他の履歴パラメータは文献¹⁾で用いている値を用いた。コアコンクリートの効果は引張りに抵抗しない分布バネでモデル化し、バネに圧縮変形がほとんど生じないように充分大きなバネ定数を設定した。また、帯鉄筋による拘束効果を、ここでは便宜的に、帯鉄筋で作った開角90°の両端固定のアーチ頂部に外向き法線方向の変位を作用させたときの荷重-変位関係を解析し、その結果をバネとして与えることにした。解析は、帯鉄筋間隔 $s = 125(\text{mm})$ の n 倍に対して行う。つまり、各ケースには $(n - 1)$ 個の帯鉄筋バネがある。

まず、帯鉄筋を弾性体として、解析領域長が1s～6sまでの解析をそれぞれ行った。各ケースとも、座屈は軸方向鉄筋の降伏直後に発生したが、その後の荷重低下は解析領域が3s、5sのときに著しかった。このとき、どちらもほぼ同じ形状の一波の座屈が生じており、座屈波

Key Words: cast-in-place pile, postpeak behavior, FEM

〒305-0804 茨城県つくば市旭1

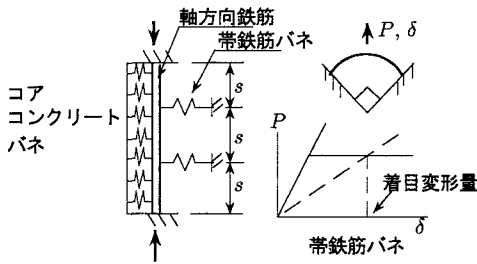


図-3 軸方向鉄筋の塑性座屈解析 (3s の場合)

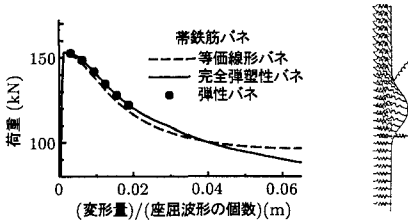


図-4 軸方向鉄筋の塑性座屈解析結果 (3s の場合)

の長さは1sをわずかに越えた程度であった。

後述の杭の載荷試験の解析では、軸方向鉄筋のひずみ履歴に最大で $\pm 5\%$ 程度の振幅が発生する。よって、帯鉄筋が降伏することも考慮するため、座屈後の耐力低下が最も大きかった解析領域長3sに対して、帯鉄筋パネを以下の2ケースに設定し座屈解析を行った。ケース1は、帯鉄筋を完全弾塑性体とした場合、ケース2は、ケース1の解析において軸方向鉄筋の圧縮量が0.3sに達したときの帯鉄筋パネの変形量に着目し、帯鉄筋パネを図-3の破線に示す等価線形パネとした場合である。図-4に、解析結果と帯鉄筋パネに等価線形パネを用いた場合の座屈波形を示す。本解析で対象とする杭体の場合、三者に明確な差は見られなかった。

(3) 杭の水平交番載荷試験の解析

図-1の実験に関し、ファイバー要素を用いた有限要素解析を行う。杭体の要素分割長は、上述の解析より帯鉄筋間隔の3倍(3s)とした。

軸方向鉄筋の履歴則は、Menegotto-Pintoモデルに軸方向鉄筋の座屈後挙動を組み込んだもので、図-5のようなモデルを考えた。軸方向鉄筋の座屈は、かぶりコンクリートの圧壊後初めて起こるものとした。座屈後の圧縮軟化曲線は、帯鉄筋パネを等価線形パネとした場合の(2)の解析結果を基に、荷重を鉄筋の断面積で、変位を3s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して与えた。Menegotto-Pintoの圧縮載荷経路が、この塑性座屈曲線との交点に達したとき塑性座屈

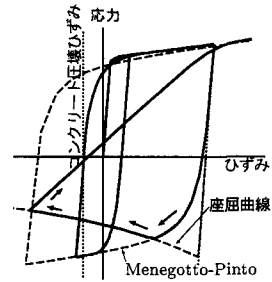


図-5 軸方向鉄筋の履歴則

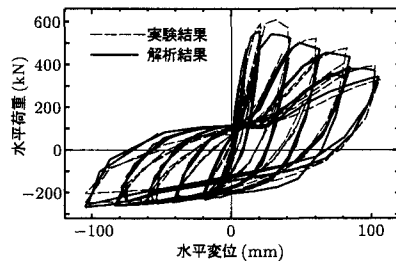


図-6 載荷点における水平変位-水平荷重関係

曲線に移るものとした。座屈後の引張り側への反転経路は、文献¹⁾で提案している履歴則と同様に設定し、最大引張りひずみ点を目指すようにした。

コンクリートの履歴則は、修正六車モデルを用い、コアコンクリートには、帯鉄筋による拘束効果を考慮し、最大圧縮応力点および第一低下勾配を道路橋示方書Vにより与えた¹⁾。

載荷点における水平変位-水平荷重関係を図-6に示す。提案した手法により設定した要素長および軸方向鉄筋の履歴則を用いた解析結果は、実験結果と非常に良く一致しており、変動する軸力の影響も反映された結果となっている。また、解析により得られた杭体の損傷状態や軸方向鉄筋の座屈形状も、実験終了時の状態と定性的に一致していた。ただし、本解析では、フーチングからの鉄筋の抜けだしを考慮していない。

3. おわりに

今後は、実験との比較を多数を行うことで、本手法の一般的な妥当性を検証していく必要がある。

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数値解析, 構造工学論文集, Vol.45A, 1999.
- 2) 棚村史郎, 近藤政弘, 金森真, 菅原篤: 高強度せん断補強鉄筋を用いた模型杭の載荷試験, 鉄道総研報告, Vol.12, No.12, pp.47-52, 1998.