

場所打ち杭における軸方向鉄筋のはらみ出し特性に関する数値解析

白戸真大*・福井次郎**・木村嘉富***

*建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室 研究員 (305-0821 つくば市旭1)

**建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室 室長

***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)

場所打ち杭の杭体に発生する塑性ヒンジ長、杭体のじん性能、曲げ耐力低下挙動には、軸方向鉄筋のはらみ出しが大きく寄与していることが実験的に明らかになってきている。しかし、はらみ出し挙動は、杭体の配筋により異なるため、その影響を把握しておく必要がある。

そこで、本論文では、軸方向鉄筋のはらみ出しは、かぶりコンクリート剥落後、曲げに伴う圧縮力による鉄筋の塑性座屈によって発生するとモデル化し、帯鉄筋・コアコンクリートによる抵抗を考慮した軸方向鉄筋の塑性座屈解析を行った。解析結果は、杭の繰返し載荷試験におけるはらみ出し長さを良い精度で予測した。また、軸方向鉄筋の硬化特性、帯鉄筋の剛性、帯鉄筋間隔がはらみ出し挙動に与える影響を把握した。

Key Words : Cast in place pile, swelling out, length of plastic hinge, plastic buckling of re-bar, FEM

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。

現在の道路橋基礎の耐震設計は、上部構造からの慣性力の作用に対し基本的には基礎を降伏させない設計を行っており^{1),2)}、そのため、耐力の大きな基礎が造られている。しかし、杭基礎の場合、地中深部において杭体の曲げ耐力が低下しても、周辺地盤の拘束により基礎としての安定にはそれほど問題がないと考えられる。地中部での杭体の損傷をどこまで許容できるかは、杭体の局所的な塑性ヒンジの発生、さらに耐力低下が生じた状態での橋全体の挙動を検証し判断する必要があるが、数値解析により塑性ヒンジの発生やその後の耐力低下挙動まで追跡するためには、塑性ヒンジ長の設定、はらみ出した鉄筋の軸力負担能力の設定などが課題となる³⁾。

一方、杭体の曲げによる損傷領域 (塑性ヒンジ長) や耐力低下には、軸方向鉄筋のはらみ出しが大きく寄与していることが実験的に明らかになってきている²⁾。このはらみ出しは、杭体の配筋により異なるものであるが、この分野に関する研究はまだ十分ではなく、特に杭に関して検討された事例はほとんどない。

そこで、本論文では、軸方向鉄筋のはらみ出しを、かぶりコンクリートの剥落後、曲げによる圧縮力が引き起こす塑性座屈であるとモデル化し、帯鉄筋・コアコンクリートによる抵抗を考慮した軸方向鉄筋の塑性座屈解析を行なう。ここで解析対象としたのは、模型場所打ち杭の水平交番載荷試験に用いられ、曲げによる鉄筋のはらみ出しが起こっている模型杭2体である。杭体軸方向鉄筋の塑性座屈解析より、軸方向鉄筋の硬化特性、帯鉄筋

の剛性、帯鉄筋間隔が塑性ヒンジ長、じん性能、耐力低下挙動に与える影響を把握する。

2. 解析対象

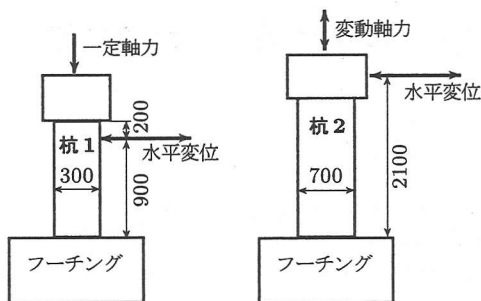
対象杭1は、文献³⁾の一定軸力下での模型場所打ち杭の水平交番載荷試験の試験杭である (図-1)。試験終了後、基部での損傷状況は、写真-1の様に鉄筋が帯鉄筋間隔よりやや長い区間で正弦一波の形状ではらみ出していた。

対象杭2は、文献⁴⁾の模型場所打ち杭の水平交番載荷試験の試験杭である (図-1)。この試験では、実際に地震時に杭が受ける荷重状態をモデル化し、軸力を水平力に伴い変動させている。試験終了後の損傷状態を写真-2に示す。軸方向鉄筋は帯鉄筋間で大きくはらみだしているが、その2本の帯鉄筋も若干はらみだしている。

3. 解析モデル

解析モデルを図-2に示す。杭の軸方向鉄筋一本に着目し、帯鉄筋間隔 s の整数倍の長さの軸方向鉄筋の塑性座屈解析を行う。両端は固定条件とし、帯鉄筋による軸直角方向の抵抗をバネで、コアコンクリートによる抵抗は分布バネでモデル化する。

軸方向鉄筋には、材料非線形性を考慮するためファイバー要素を用いた。ここに、軸方向の要素分割数は各帯鉄筋間を10分割、断面方向には公称断面積を有する円形断面を短冊状に50分割し、各ファイバーの応力-ひずみ関係には、Menegotto-Pintoモデル^{3),5)}を用いた。ヤング率 E と降伏点は材料試験値を用い、硬化率 E_1/E は0, 0.01, 0.02とした。また、バウシinger効果は無視し、履歴パラメータは文献³⁾で用いている値を用



	杭1	杭2
軸方向鉄筋	SD295A D10 16本	SD345 D22 20本
帯鉄筋	SD295A D4ctc40	SD345 D16ctc125
σ_{ck} [N/mm ²]	27.1	23.7

杭体表面から軸方向鉄筋中心までは、杭1：50[mm]，杭2：100[mm]．

図-1 載荷試験概要と杭体諸元^{3),4)}

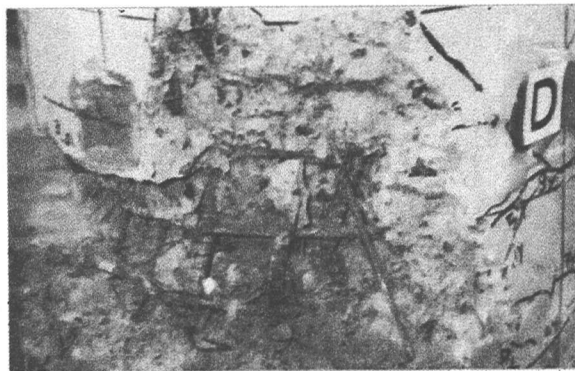


写真-1 杭1 載荷試験終了後の基部の損傷

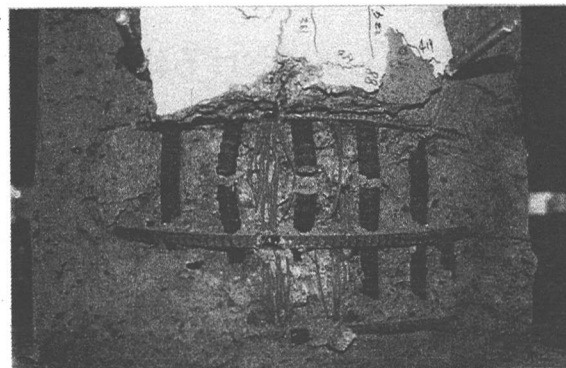


写真-2 杭2 載荷試験終了後の基部の損傷

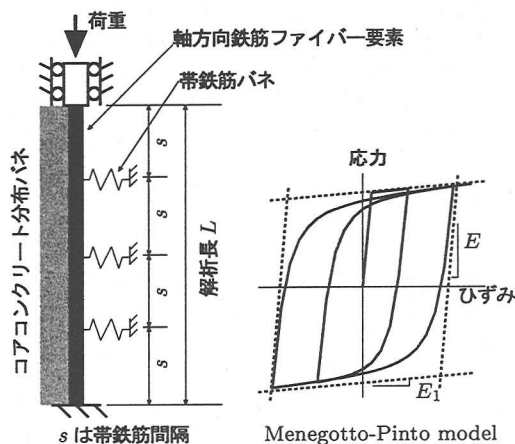


図-2 軸方向鉄筋-コアコンクリート分布バネ-帯鉄筋バネモデル ($L/s = 4$ の場合)

いた。

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ときの荷重-変位関係を別途線形解析し与えた。また、コアコンクリート分布バネのバネ定数は、圧縮側はバネに変形がほとんど生じないように十分大きなバネ定数を設定し、引張り側には抵抗しないものとした。これらのバネは、鉄筋軸直角方向にのみ作用する。また、帯鉄筋バネは実際の帯鉄筋間隔で、コアコンクリート分布バネに関してはファイバー要素の各節点に集約して配置した。

解析は、座屈が発生するように、軸方向鉄筋中央 $L/2$ の位置で $L/10000$ のたわみとなる放物線分布の初期不整を境界以外の各節点に与えて行った。

4. 解析結果

(1) 塑性座屈長と杭体損傷領域の関係

解析により求めた軸方向鉄筋の塑性座屈長と載荷試験における鉄筋のはらみ出し長さの関係を調べる。解析長

L を帯鉄筋間隔 s の n 倍 ($n = 1, \dots, 6$) の6ケースに設定し、塑性座屈解析を行った。つまり、各ケースには $(n-1)$ 個の帯鉄筋バネがある。軸方向鉄筋の硬化率は、杭2の鉄筋の引張り試験結果より降伏点と破断点を参考に杭1、杭2ともに $E_1/E = 0.01$ とした。コアコンクリートバネ定数は、十分大きなバネ定数ということで設定した 9.8 [GN/m²] とした。

杭1において、平均ひずみ(軸方向変位 / 解析長 L) が5%の時の変形状態を図-3に示す。図-3より、座屈波は、 $L/s = 1, 3, 5, 6$ の時は1つ、 $L/s = 2, 4$ は2つとなっている。ここに、変形図のスケールは、それぞれ解析長 L で無次元化されており、軸方向鉄筋は、破線が初期形状、実線が変形形状である。また、バネが二重に見える部分があるが、これも変形前後の形状が描かれているためであり、図中、バネの絵は概念図である。以下の変形図も同様である。

座屈が生じていない部分の軸方向の変形は座屈が生じている部分の軸方向の変形に比べ非常に小さいので、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割ったものと載荷荷重との関

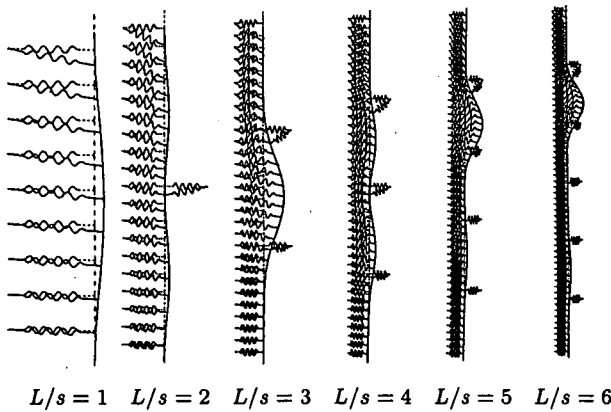


図-3 杭1鉄筋の塑性座屈変形

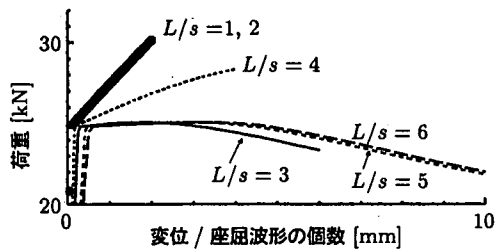


図-4 杭1鉄筋の座屈波が負担する軸力

係について整理したのが図-4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、見かけのオイラー座屈荷重が低下することによって考えられる。また、 $L/s = 3, 5, 6$ の時は最も鉄筋の軸力負担能力が小さく、荷重-変位関係はほぼ同様の挙動を示している。図-3の変形状態と比較して考えると $L/s = 5, 6$ の時は、 $L/s = 3$ の時の座屈モードが生じていることがわかる。2.に示したように、杭1の軸方向鉄筋が載荷試験によりはらみ出した長さはおおむね $L/s = 3$ であり、本解析で最も軸力負担能力が小さかった $L/s = 3$ と一致している。

同様に杭2の軸方向鉄筋に関し塑性座屈解析を行い、発生した座屈波の軸力負担能力を調べたのが図-5である。ここに、 $L/s = 3$ の座屈波形も示す。写真-1と比較すると、 $L/s = 3$ のときの座屈形状は、実験でははらみ出し形状に非常に近い形状で座屈していることがわかる。また、 $L/s = 5$ の時も $L/s = 3$ と同様の座屈波が1つ発生していた。

杭1、杭2で軸方向鉄筋径、帯鉄筋径、間隔が異なっているが、座屈後の軸力の低下が最も著しい座屈モードは、それぞれ唯一に定まっており、実験結果に近い形状となる。よって、鉄筋のはらみ出しは、軸方向鉄筋と帯鉄筋の組み合わせにより、はらみ出した後の鉄筋の軸力負担能力が最も低くなる座屈モードで発生すると考えられる。

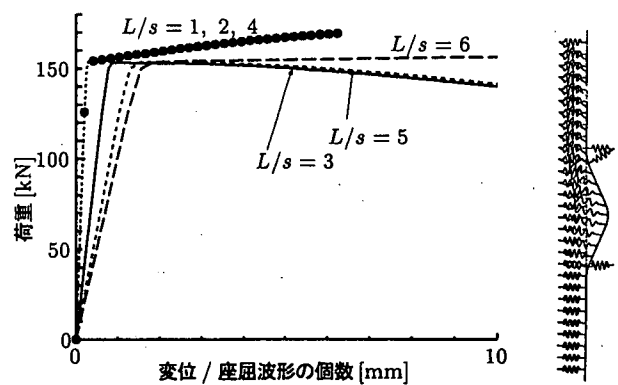


図-5 杭2鉄筋の座屈波が負担する軸力と $L/s = 3$ の塑性座屈変形

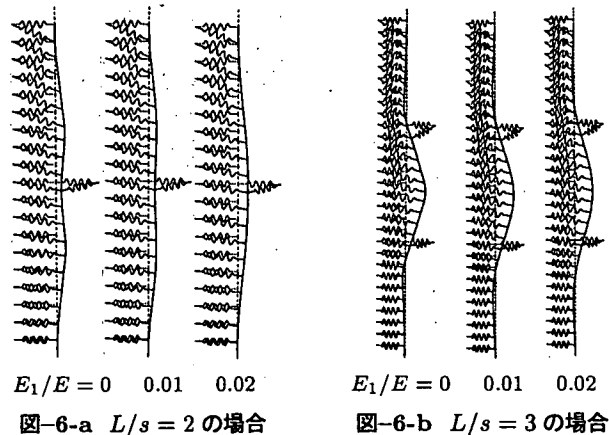


図-6 軸方向鉄筋の硬化率による座屈形状の違い

(2) 軸方向鉄筋の硬化率がはらみ出しに与える影響

まず、解析長 L 、帯鉄筋パネの剛性を一定にし、軸方向鉄筋の硬化率を $E_1/E = 0, 0.01, 0.02$ の3通りに変化させ、ひずみ硬化が塑性座屈形状や軸方向の荷重-変位関係に与える影響を検討する。

ここでは、杭1において、コアコンクリート分布パネのパネ定数を 1.57 [kN/m] としたときの結果を示す。この分布パネ定数は、劣化したコンクリートの反力係数のオーダーを $1 \text{ [kN/m}^3]$ 程度と仮定し、軸方向鉄筋間隔分のコンクリートが抵抗するとして設定したものである。図-6に $L/s = 2, 3$ の時の、平均ひずみ5%の時の座屈形状を示す。 $L/s = 2$ のとき、鉄筋のひずみ硬化率が大きくなると塑性座屈長が2波から1波へと長くなって行く。一方、 $L/s = 3$ のときは座屈モードはほとんど変化しない。 $L/s = 2$ の載荷点での荷重-変位関係を図-7に示す。鉄筋の硬化率が大きいほど耐力低下の割合が小さくなり荷重保持が可能となり、じん性が大きくなっている。これは、 $L/s = 3$ でも同様の結果であった。

このことは、座屈後の挙動が、断面の降伏後接線曲げ剛性により支配されているためと考えられる。この結果に基づき軸方向鉄筋径の影響について考察すると、材質

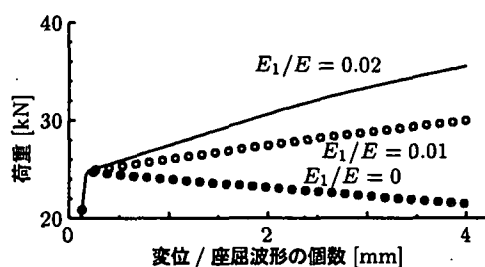


図-7 軸方向鉄筋の硬化率による荷重-変位曲線の違い

が同じでも鉄筋径が大きい方が初期剛性および降伏後剛性が大きくなるため、塑性座屈長が長くなることが予測される。これは、柱での実験結果⁶⁾でも見られる傾向である。

(3) 帯鉄筋の剛性・間隔がはらみ出しに与える影響

つぎに、解析長 L 、軸方向鉄筋の硬化率を一定にし、帯鉄筋パネのパネ定数を k から徐々に低減させて解析を行った。ここに、 k は、上述の方法で求まるパネ定数である。

ここでは、杭1に関する結果を示す。図-8は $L/s = 3$ 、軸方向鉄筋の硬化率を $E_1/E = 0.01$ 、コアコンクリート分布パネ定数を 9.8 [GN/m] とした場合の荷重-変位曲線である。帯鉄筋パネ剛性が小さいほど軸方向鉄筋の耐力低下の割合が増大することがわかる。このとき、帯鉄筋位置でのはらみ出し量は、帯鉄筋の剛性が大きいほど少なく、帯鉄筋による座屈の防止効果が認められた。よって、帯鉄筋の剛性が大きいと杭としてのじん性能も確保されると考えられる。

また、杭1に関し、 $L = 240 \text{ [mm]}$ (6s)、 $E_1/E = 0$ 、コアコンクリートパネ定数を 9.8 [GN/m] とし、帯鉄筋間隔を 80, 40, 20 [mm] と変化させ解析を行った。これまでの結果と同様、解析したケースにおいてははらみ出しは帯鉄筋間より若干長い区間で起こり、帯鉄筋間隔が短いほど荷重低下の割合は小さかった。これは、座屈長が相対的に短くなっていくためと考えられる。

このように軸方向鉄筋の塑性座屈長は、軸方向鉄筋の降伏後の曲げ剛性と帯鉄筋の剛性の比、帯鉄筋間隔により変化する。したがって、鉄筋のはらみ出し長は、軸方向鉄筋の降伏後曲げ剛性と帯鉄筋曲げ剛性・間隔の関係で整理できると考えられる。

5. おわりに

本論文では、帯鉄筋とコアコンクリートによる横抵抗を考慮した軸方向鉄筋の塑性座屈解析を行なった。その結果、塑性座屈長が、軸方向鉄筋の降伏後曲げ剛性と帯鉄筋曲げ剛性・間隔の関係により軸方向鉄筋の軸力負担

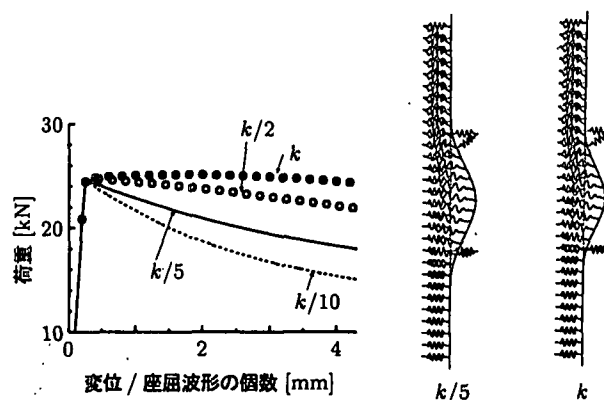


図-8 帯鉄筋パネの剛性による荷重-変位曲線の違い

能力が最も小さくなるモードに唯一に定まると考えられることを、実験結果との比較から示した。

また、ここに示したように、軸方向鉄筋の塑性座屈解析は、杭の曲げ挙動を解析するための塑性ヒンジ長、軸方向鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を合理的に設定するための有望な手法であると考えられる⁷⁾。

今後は、本手法を元に、杭体配筋による塑性ヒンジ長、じん性能の検討、さらに合理的な杭体の配筋形状の検討や杭基礎の地震時挙動の把握を行っていきたい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，V 耐震設計編，1996。
- 2) 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。
- 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数値解析，構造工学論文集，Vol.45A，1999。
- 4) 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。
- 5) 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.
- 6) 星隈順一，運上茂樹，川島一彦，長屋和宏：載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法，構造工学論文集，Vol.44A，pp.877-888，1998。
- 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挙動解析，第54回土木学会年次学術講演会講演概要集，1999。