#### 旧設計指針に基づく鋼管杭基礎の杭頭結合部に対する実験的研究 論文

長谷川 悠\*1・塚原 元英\*2・島端 嗣浩\*1・村上 祐治\*3

要旨:旧設計指針に基づき設計された鋼管杭基礎について、杭頭結合部の試験体に対して繰返し交番載荷試 験を行い、破壊形態、耐荷性能、履歴特性及び変形性能について確認した。その結果、試験体は杭頭結合部で 補強鉄筋が引抜ける挙動が確認され、耐荷性能、履歴特性、変形性能については現行の設計指針で要求され る性能を満たすことを確認した。また、三次元の非線形有限要素法によるシミュレートでは、杭体とフーチ ングの界面にジョイント要素を配置することで、水平荷重-水平変位関係が実験結果と概ね一致し、補強鉄 筋が抜出す挙動も概ね再現出来ることを確認した。

キーワード:杭頭結合部,旧設計指針,繰返し交番載荷,水平荷重-水平変位関係,非線形有限要素解析

#### 1. はじめに

土木構造物の評価において、設計指針の改定で要求さ れる構造細目が変更された場合、この細目を満足しない 既設構造物に対して新指針の照査方法を適用できず、新 たに設定された地震外力に対して構造性能を正しく評価 できない可能性があることが課題として挙げられる。

鋼管杭基礎の場合,道路橋示方書・下部構造編 1)2)では, フーチング内の杭の埋込み長さを最小限度(100mm)に 留め、補強鉄筋により杭頭曲げモーメントに抵抗する結 合方法において、一例として、表-1 に示すとおり、旧 版 1)に対して現行版 2)では補強鉄筋の必要定着長やずれ 止めに関する構造細目が変更されており、照査方法も許 容応力度法から限界耐力設計法へ更新されている。

本研究では、鋼管杭基礎の杭頭結合部の曲げ挙動に着 目し,旧版1)の設計に基づく杭頭結合部の試験体に対し, 水平力に対する破壊挙動、形態の把握を目的とした、杭 体に対する軸力を考慮しない case1 と、鋼管杭基礎の地 震応答解析による杭頭軸力の試算結果に基づき、軸力 1000kN を載荷する case2 の2 ケースについて交番載荷試 験を実施した。また,載荷試験により確認した耐荷性能, 履歴特性及び変形性能については現行の設計指針で要求

表-1	杭頭結合部に要求される構造細目

道路橋示方書・下部構造編 の初版年度	補強鉄筋の 必要定着長	杭体内のずれ止め
昭和 55 年(旧版)	一般には 35d としてよい	要求無し
平成 29 年(現行版)	$L_{0f}$ +10 $\phi$	2 段取り付ける ことを標準とする

d, φ:補強鉄筋の直径

Lof: フーチングコンクリートの付着応力度を用いて算定される定着長  $L_{0f}: \int_{L_{0f}} \frac{\sigma_{sa}}{4\tau_{0a}} \cdot \phi$ 

σsa:鉄筋の引張応力度の基本値

τ<sub>0a</sub>: コンクリートの付着応力度の基本値

\*1 東電設計(株) 土木本部耐震技術部 (正会員)

\*2 東京電力ホールディングス(株) 原子力設備管理部原子力耐震技術センター

\*3 (株)安藤・間 建設本部技術研究所土木研究部 (正会員)

される性能と比較を行った。

また,三次元の非線形有限要素法を用いた実験のシミ ュレーションを行い, 杭頭結合部のモデル化手法につい て検討した。

#### 2. 実規模載荷実験

## 2.1 実験概要

#### (1) 試験体及び計測器

図-1 に試験体の概要図を示す。試験体は実スケー ルとし、フーチングの形状は高さ1.4m,幅及び奥行きは 2.3m とした。補強鉄筋の定着長は旧版<sup>1)</sup>による必要定着 長 1113mm を満たすよう設定し、鋼管杭については、実 験の目的が杭頭結合部の破壊挙動、形態の確認であるこ とから,外径 800mm,肉厚 16mm とすることで,鋼管杭 の全塑性モーメントが仮想鉄筋コンクリート断面の終局 耐力を上回るよう設定した。また、試験体上端には、補 強鉄筋の位置に合わせて穴開加工を施した鋼板を溶接し, 載荷時には鋼板をピン支承に接続している。なお、本試 験体を現行版 2)の指針に適合させる場合は、必要定着長 1312mm を満たすために補強鉄筋を折曲げ鉄筋とする他, 杭体内にずれ止めを2段取り付ける必要がある。

表-2~表-4に材料の物性値を示す。コンクリートの 圧縮強度、ヤング率は一軸圧縮試験、引張強度は割裂試 験から算定した。鋼材の降伏強度、ヤング率は引張試験 から算定した。

また、主要な変位計やひずみゲージは図-2のとおり 配置する。鋼板の変位計は水平変位の測定用、杭基部の 変位計について、鉛直方向に設置したものは補強鉄筋の 引抜け量,水平方向に設置したものは杭の回転角の測定 用である。補強鉄筋のひずみゲージは損傷が集中すると 想定される杭体とフーチングの界面付近に集中的に配置



図-1 試験体の概略図

した。なお、同図に示す他にも、鉄筋の降伏状況を確認 する目的で必要最小限のゲージを配置している。

## (2) 載荷方法

図-3に載荷装置の概要図を示す。PC 鋼棒により試験 床に固定された試験体に対し,試験体上端に接続された 水平荷重載荷用の油圧ジャッキを用いて交番載荷を行っ た。載荷は補強鉄筋の初降伏 1δy まで荷重制御とし,以 降は変位制御とした。載荷サイクルは既往の載荷実験<sup>3)</sup> を参考とし,図-4に示すとおり,1δy及び 2δyは三回, 3δy及び 4δyは二回,以降は一回とし,載荷装置の限界ま で荷重を漸増させるものとした。

## 2.2 実験結果

## (1) 破壊過程の概要

caselの試験体の破壊過程として,水平変位 1δyの 2 ル ープ目でフーチング表面に割裂ひび割れが生じ,水平変 位の増加に伴い,徐々に範囲が拡大した。その後,水平 変位 6δyで表層のコンクリートの剥離が確認され,徐々 にその範囲が拡大した。また,補強鉄筋の引抜きに伴う 杭体の浮き上がりも確認され,水平変位 14δyでは杭体の 先端が露出する程度まで浮き上がった。**写真-1** に杭頭 結合部の損傷状況の例を示す。case2 の破壊過程も case1 と概ね同様であるが,ひび割れや剥離の進行が遅い等の 図-2 計測器配置図

違いが見られた。例えば、図-5 は正側に同程度の水平 変位が生じた時のひび割れ位置、剥離の範囲を両ケース で比較したものであるが、case2 は case1 と異なり、載荷 方向に直交方向のひび割れがフーチング端部まで達して いない、剥離の範囲が case1 よりも小さいことが分かる。



写真-1 杭頭結合部の損傷状況の例







## (2) 水平荷重一水平変位関係

図-6に水平荷重-水平変位関係を示す。case1の初降 伏は水平変位 6.75mm,水平荷重 935kN となり,最大荷 重について,正側は14δ<sub>ν</sub>載荷時に1368kN,負側は14δ<sub>ν</sub> 載荷時に 1322kN となった。case2 の初降伏は水平変位 8.93mm, 水平荷重 1114kN となり, 最大荷重について, 正側は88v載荷時に1573kN, 負側は88v載荷時に1435kN となり, 圧縮軸力による耐荷力の向上を確認した。case1 は $16\delta_y$ , case2は $14\delta_y$ まで交番載荷を行った後,以降は 正側にプッシュオーバーによる載荷を行い, casel では水 平荷重が 1158kN, case2 では 1142kN まで低下したが, 初降伏時の荷重は維持しており、靭性のある挙動を示し た。また、両ケースにおいて、図-2に示す杭体とフー チングの界面にある全てのゲージが、水平変位 2δy 載荷 時に降伏ひずみ以上の計測値を示した。以降、載荷方向 である南北の補強鉄筋における降伏範囲の拡大を確認し, 補強鉄筋の抜出しの要因となったと考えられる。

## (3) 補強鉄筋の抜出し

図-7 に補強鉄筋の抜出し量-水平変位関係を示す。 載荷初期から水平変位 50mm 程度までは, case2 の抜出 し量の増加率は case1 と比較して小さく, 圧縮軸力が要 因と考えられる。以降は, case1 は水平変位 10δy (68mm) 程度, case2 は水平変位 10δy (89mm) 程度で表層コンク



リート剥離後の浮き上がりが顕著になり,変位計の位置 がずれた影響で,抜出し量が急激に増減している。

## (4) 試験体解体後の観察

a) 中詰めコンクリートのひび割れ

実験終了後に鋼管杭を切断及び撤去し、中詰めコンク リート表面のひび割れを確認した。図-8 に中詰めコン クリート表面のひび割れ図を示す。載荷方向である南北 では水平方向の曲げひび割れが、載荷方向に直交方向と なる東西では斜め方向のせん断ひび割れが主に確認され た。また casel では杭上端から下端まで、ほぼ同等の密 度でひび割れが分布することに対し, case2 では杭基部~ 0.5d の範囲におけるひび割れの密度は case1 と概ね同等 であるが、上部になるにつれて、密度が小さくなった。 この要因として、杭基部~0.5dの範囲と比較して曲げモ ーメントが小さい杭上部においては, 圧縮軸力が作用す ることにより、水平力によって生じるコンクリート断面 内の引張応力の発生が抑制されたことが考えられる。ま た、今回の試験体にはずれ止めが無いことから、支圧破 壊により生じたと思われるひび割れが無いことが特徴の 一つとして挙げられる。

b) 補強鉄筋

鋼管杭の撤去後,結合部のコンクリートをはつり,補 強鉄筋の結合部付近における損傷状況を確認した。写真 -2 に補強鉄筋の状況を示す。補強鉄筋の破断は確認で きず,節の間隔から引張りひずみを算定した結果,破断 時のひずみ 0.246 に対し,最大 0.15 程度まで生じていた ことを確認した。





(a) case1



<sup>|</sup> (b) case2 写真-2 補強鉄筋の状況

## 3. 実験結果と現行の設計指針との比較

#### (1) 耐荷性能

実験で得られた水平荷重の最大値から、杭頭結合部に 生じる曲げモーメントを算定し、現行の道路橋示方書・ 下部構造編<sup>2)</sup>に規定される仮想鉄筋コンクリート断面の 限界状態3に要求される耐荷性能と比較する。比較の結 果,**表-5**に示すとおり、両ケースにおいて、実験によ る算定値が道路橋示方書による耐力を1~2割程度上回 り、試験体の杭頭結合部には所定の耐荷性能があること を確認した。また、道路橋示方書による耐力と同様に、 実験でも、軸力を考慮することで耐荷性能が向上したこ とを確認した。

#### (2) 履歴特性による減衰定数

実験で得られた水平荷重-水平変位関係から式(1)に 基づき履歴特性による減衰定数を算定した結果,図-9 のとおり0.1~0.3 程度となった。一方,現行の道路橋示 方書・耐震設計編<sup>4</sup>において,各構造要素の減衰定数の 標準値として,基礎は0.1~0.2 と規定されている。この 値は,部材の粘性減衰や履歴減衰,地下逸散減衰等を考 慮し,実験や観測,これまでの知見等を踏まえた値とな るが,実験結果で得られた減衰定数は標準値を上回るこ とを確認した。

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \tag{1}$$

h:履歴特性による減衰定数 ΔW:1サイクル中の損失エネルギー W:ひずみエネルギー

#### (3) 変形性能

参考として,建築基礎構造設計指針 5 で提案される杭

表-5 道路橋示方書による耐力との比較

検討 ケース	載荷 方向	①実験による 算定値 (kNm)	②道路橋示方書 による耐力 (kNm)	比率 (①/②)
case1	正	2285	1012	1.20
	負	2208	1912	1.15
case2	正	2627	2204	1.19
	負	2396		1.09



図-9 実験結果より算定した履歴特性による減衰定数

頭結合部の回転ばねを用いたモデル化例における非線形 特性と、実験で得られた特性を比較した。なお、実験に よる曲げモーメントは、水平荷重と杭頭からピン支点ま での距離の乗算、回転角は杭基部の変位計で得られた水 平変位を測定点から杭頭までの距離で除すことで算定し た。比較の結果、図-10に示すとおり、両ケースにおい て、回転ばねの特性は実験で得られた非線形特性を概ね 再現していること、実験における最終的な塑性率は30以 上に達したことから、試験体の杭頭結合部には所定の変 形性能があること確認した。





図-11 モデル概要図

## 4.3 解析結果

## (1) 水平荷重一水平変位関係

図-12 に実験と解析の水平荷重-水平変位関係の比 較結果を示す。参考として,界面にジョイント要素を配 置せず,杭体とフーチングを剛結としたモデル(図-12 中の剛結モデル)は実験結果と大きく乖離した。一方, ジョイント要素を配置したモデル(図-12中のジョイン トモデル)は実験の履歴特性と概ね一致した。以上より, 水平荷重-水平変位関係に対し,補強鉄筋が抜け出す挙







図-12 水平荷重-水平変位関係の比較

図-10 建築基礎構造設計指針のM-θばねとの比較

# 4. 三次元解析におけるモデル化手法の検討

## 4.1 概要

本検討は、実験による水平荷重-水平変位関係を精度 良く再現する杭頭結合部のモデル化手法の検討を目的と した。解析コードには、前川らが開発した非線形有限要 素解析プログラム COM3D<sup>0,7)</sup>を用いて検討することとし、 補強鉄筋が抜出す挙動を考慮するため、鉄筋降伏後の付 着特性<sup>の</sup>を考慮したジョイント要素を用いた。

#### 4.2 モデル化方法

図-11 にモデル概要図を示す。無筋コンクリート部及 び鉄筋コンクリート部を分散ひび割れ及び分散鉄筋モデ ルに基づくソリッド要素で,鋼管杭をプレート要素でモ デル化し, 杭体とフーチングの界面にジョイント要素を 配置した。フーチングについて、上面のかぶり部で剥離 が観察されたことから、上筋のかぶり15 cmのうち10cm の範囲を無筋コンクリートとすることで、フーチング表 層の局部的な軟化を再現する方針とした。ピン支承は剛 なソリッド要素でモデル化し,載荷位置を実験と一致さ せた。コンクリート及び鉄筋の構成則には前川モデルを 適用し,鉄筋コンクリート部は鉄筋の構成則とコンクリ ートの構成則を重ね合わせて表現されている。ひび割れ 後のコンクリートは、付着の影響を考慮した引張軟化特 性と,ひび割れ面での噛み合い効果を考慮したせん断伝 達及びひび割れ幅に応じて圧縮剛性を低減させて評価さ れる。鋼管杭の材料特性には弾塑性を考慮した非線形特 性を付与した。載荷は変位制御とし、実験時の変位と同 様の変位とした。

動による影響は大きく,杭体とフーチングにジョイント 要素を配置することが効果的であると考えられる。ただ し,今後の課題として,解析でも水平荷重のピーク及び その後の荷重低下を再現すること,再載荷時の剛性を実 験に漸近させること等が挙げられる。

## (2) 鉄筋の抜出し

確認として、補強鉄筋の抜出し量について、実験とジョイント要素を用いた解析の結果を比較した。図-13に 補強鉄筋の抜出し量-水平変位関係の比較を示す。前述 した表層のコンクリートの浮き上がりから、実験の抜出 し量は水平変位 50mm 程度まで信頼できると考えられる が、この範囲であれば、case1、2の両ケースで実験と解 析が概ね一致していることを確認した。





図-13 補強鉄筋の抜出し量-水平変位関係の比較

#### 5. まとめ

本研究では,昭和 55 年の道路橋示方書の設計指針に 基づく鋼管杭基礎の杭頭結合部の実規模試験体に対し交 番載荷試験を実施することで破壊形態を確認し,耐荷性 能,履歴特性,変形性能,については現行の設計指針で 要求される性能と比較した。加えて,三次元非線形有限 要素解析による実験のシミュレーションも行った。本研 究で得られた主な成果は以下のとおりである。

- 交番載荷試験より、試験体は靭性のある挙動を示した。
- case2は case1と比較し、フーチング上面のひび割れ や剥離の進行が遅い、耐荷性能が大きくなる、中詰 めコンクリートのひび割れの密度が上側になるに つれて減少する等の違いが確認された。
- 3) 実験で得られた杭頭結合部の耐荷力が,現行の道路 橋示方書・下部構造編に規定される仮想鉄筋コンク リート断面の終局耐力を上回った。
- 4) 実験で得られた履歴特性による減衰定数は、現行の 道路橋示方書・耐震設計編に規定される減衰定数の 標準値を上回った。
- 5) 実験で得られた非線形特性を建築基礎構造設計指 針で提案されている回転ばねモデルと比較した結 果,所定の変形性能を有した。
- 6) 三次元非線形有限要素解析による実験のシミュレ ーションでは、補強鉄筋が引抜ける挙動が想定され る場合、杭体とフーチングの界面に鉄筋降伏後の付 着特性を考慮したジョイント要素を配置すること で、履歴特性が実験と概ね一致することを確認した。

## 参考文献

- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説IV下部構造編, pp.308-315, 1980.5
- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説IV下部構造編, pp.284-288, 2017.11
- 3) 土木研究所,鋼管杭・鋼矢板技術協会、コンクリートパイル建設技術協会:杭基礎の大変形挙動後における支持力特性に関する共同研究報告書(杭頭結合部に関する研究), pp.61-62, 2012.3
- 日本道路協会:道路橋示方書・同解V耐震設計編, pp.125-231, 2017.11
- 5) 日本建築学会:建築基礎構造設計指針, pp.441-443, 2019.11
- 6) 岡村甫,前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形解析 と構成則,技報堂出版,1991.5
- Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London, 2003.4