

組杭試験体による杭頭結合構造の 正負交番水平載荷実験

道路・鉄道技術委員会

1. はじめに

道路橋における杭基礎およびその周辺技術の高機能化をはかるため、鋼管杭・鋼矢板技術協会では、土木研究所とともに共同研究を進めており、その中の重要課題として、鋼管ソイルセメント杭¹⁾や回転杭¹⁾等の大支持力鋼管杭実用化に伴う杭頭反力増大に対応するための新しい杭頭接合構造の開発が急務となっている。

従来の道路橋基礎における鋼管杭とフーチングの結合方法としては、実施工においてはフーチング内配筋の施工性確保などの理由から、フーチング内の杭の埋込みは最小限度(100mm)に留め、主として中詰め補強鉄筋で補強することにより杭頭反力に抵抗する方法(方法B)が採用される傾向にある²⁾。

その一方で、前述の大支持力鋼管杭に対しては、結合方法Bの中詰め補強鉄筋だけでは十分な杭頭部耐力が確保できないことから、現状では補強鉄筋を鋼管杭外周にも現場溶接(フーチングへの埋込み部10cm範囲のフレア溶接)して杭頭部耐力を高める方法(図1)が広く用い

られている。しかし、本杭頭結合構造では、現場溶接における施工条件管理や品質確認を確実に行うことは困難であり、必ずしも十分な品質保証がなされていないのが実情である。

この問題への対処として、①杭頭結合部に用いる中詰め補強鉄筋の材質(強度)を現状最大のSD345(降伏点345N/mm²以上)からSD490(降伏点490N/mm²以上)へ高強度化、②杭頭結合部の耐力評価方法(フーチング内に鉄筋コンクリート断面を仮定した仮想RC断面による評価)の合理化(拡大)、により、構造性能とコスト性を維持しつつ、現場溶接レス化する方法(図2)を提案している。筆者らは、まずは単杭実験による杭頭結合部水平耐力の実験³⁾を実施し、SD490鉄筋を用いた場合の杭頭結合部の水平耐力および変形性能を明らかにした。

一方、単杭実験では杭体に作用する変動軸力を再現できないことから、結合部が軸圧縮力および軸引張り力を繰り返し受けた場合の杭頭結合部の性能については未確認であった。このため、2本組杭の供試体による正負交番の水平載荷実験を行い(写真1)、杭頭結合部の

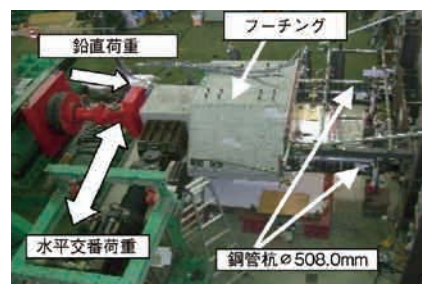


写真1 組杭試験状況

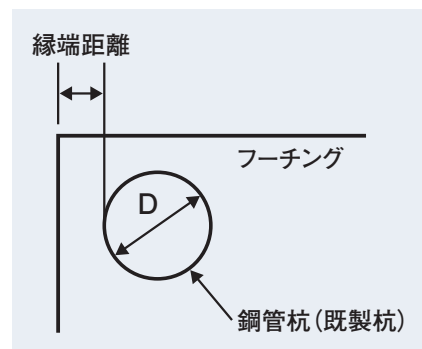


図3 フーチング縁端距離

構造性能を確認した。なお本実験では、フーチング端部の杭表面からフーチング縁端までの距離(以下、縁端距離)の異なる供試体での載荷を実施しており、杭頭結合部の耐力評価とあわせてフーチング縁端部の損傷過程にも着目し、現行設計法の規定(鋼管杭径の0.75倍以上)を短縮することが可能であるかを検討した。

2. 実験条件

本実験は、図4に示すように、橋脚基部からフーチング、杭体までを模擬したもので、実スケールの1/2程度を想定しており、軸力、曲げモーメント、せん断力が同時に杭頭結合部に作用する構造とした。また、杭頭水平力による杭縁端部で

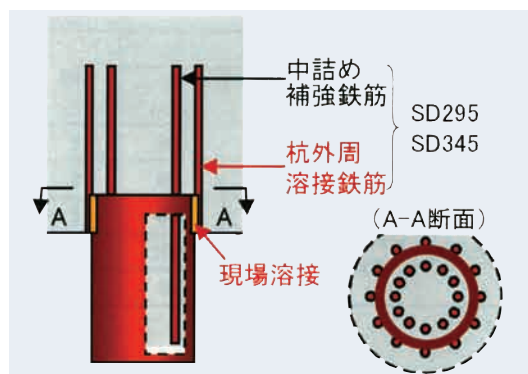


図1 現状の鋼管杭頭結合構造(中詰め+杭外周溶接鉄筋)

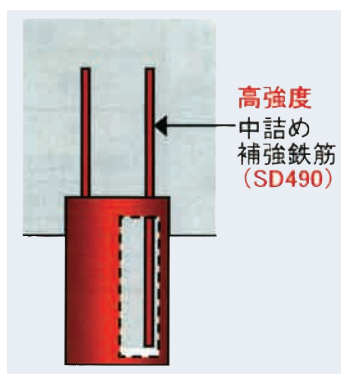
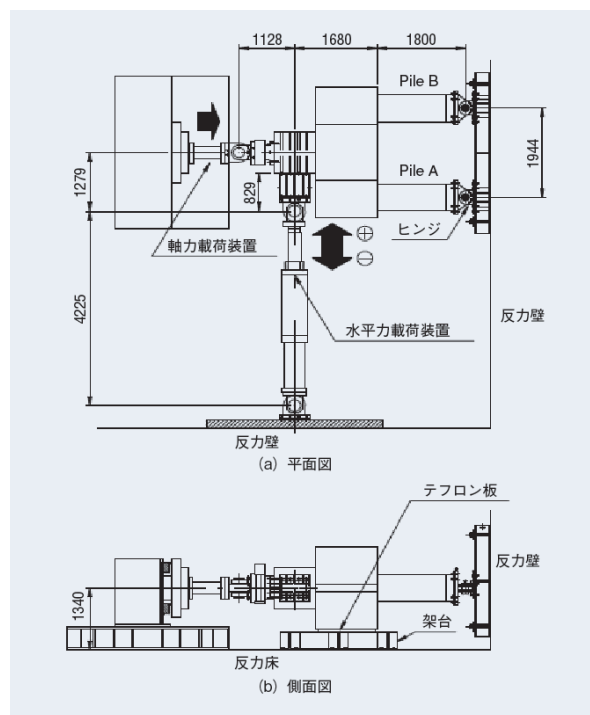


図2 高強度鉄筋を用いた杭頭構造(溶接レス)

		Case 1	Case 2
杭 種		鋼管杭	
杭 径		508mm	
スケール		1/2	
載荷高さ		1500mm (約3D)	
鋼管肉厚		7.8mm	
鋼管杭材質		STK400	
軸 力		1200kN	
コンクリート設計 基準強度	杭 体	30N/mm ²	
	フーチング	30N/mm ²	
鉄筋種類	軸方向	SD490	
	その他	SD345	
杭の軸方向鉄筋 (鉄筋比)		D29-12本 (0.0393)	
フーチング下面の主鉄筋		D22@125mm	D22@125mm
杭の縁端距離		168mm (0.33D)	375mm (0.75D)
側面鉄筋		無 し	
フーチング側の 鉄筋定着方式		機械式定着	PileA: 一般的定着 PileB: 機械式定着

図4 鋼管杭 組杭実験概要



コンクリートが負担する押抜きせん断抵抗面積が最も小さくなる45°方向に載荷した。

供試体は、Case1では縁端距離を現行規定よりも縮小した0.33D (D: 杭径) とした。一方、Case2では、現行の道路橋示方書で規定されている最小距離0.75Dとした。また、杭頭補強鉄筋としてはいずれも高強度鉄筋 (SD490) を使用しており、フーチングコンクリートの圧縮強度は、鉄筋との付着性能を向上させる目的で $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ を用いた。

杭頭補強鉄筋の定着に関して、杭側の定着長については単杭実験結果³⁾をもとに、 $Lo+10\phi$ (ϕ : 鉄筋径、 Lo : 現行設計法における定着長) として設定した。フーチング側について、Case1では両杭ともに機械式定着体 (写真2) を用いて定着長を $2/3 \times Lo+10\phi$ とした。Case2では片方の杭を機械式定着体 (定着長: $2/3 \times Lo+10\phi$)、もう片方は機械式定着体なし (定着長: $Lo+10\phi$) とした。

実験に用いた鉄筋およびコンクリートの



写真2 杭頭補強鉄筋の機械式定着体

表1 杭頭結合部 鉄筋の材料強度 (Case 1, Case 2共通)

	降伏応力 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	最大応力 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
杭軸方向鉄筋 SD490, D29	526.2	2698	708.8	195.0
フーチング主鉄筋 SD345, D22	364.9	1890	569.5	193.1

表2 杭頭結合部 コンクリート強度

		圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	割裂強度 (N/mm ²)	材齢 (日)
Case 1 (0.33D)	フーチング	33.72	26.89	0.191	3.294	31
	杭体 (中詰め)	27.94	25.07	0.194	2.473	38
Case 2 (0.75D)	フーチング	29.74	25.45	0.175	2.900	30
	杭体 (中詰め)	31.99	26.97	0.204	3.001	37

表3 フーチングの配筋情報

	Case 2 (縁端距離0.33D)	Case 2 (縁端距離0.75D)
フーチング厚	1400mm	1620mm
下面鉄筋 (SD345)	D22@125mm (pt=0.23%)	D22@125mm (pt=0.23%)

材料強度を表1および表2に示す。また、フーチングの配筋情報を表3に示す。

杭体の降伏荷重 P_y の設定については、実験供試体に用いた材料の規格下限強度を用いて、押込み側で死荷重相当の軸力を引抜き側では軸力ゼロとし中詰めコンクリートを考慮した杭体モデルによる非線形フレーム計算により算定した。また、実験において降伏荷重 P_y に到達した時点の載荷点変位を $(1\delta_y)$ とした。

なお、本載荷に先立ち、杭頭補強鉄筋の高強度鉄筋がレベル1 地震動に対してその性能を発揮するのか、有害なひ

び割れが発生しないかを確認するため、レベル1 地震動相当荷重として $0.75P_y$ を10回繰り返すこととした。

3. 実験結果

図5、6に各ケースの載荷点における荷重-変位関係を示す。

(1) 水平荷重と変位の関係

いずれの試験体も載荷ステップ $2\delta_y$ 付近において、引張り側最外縁に位置する杭頭補強鉄筋が降伏した後、 $8\delta_y$ 載荷

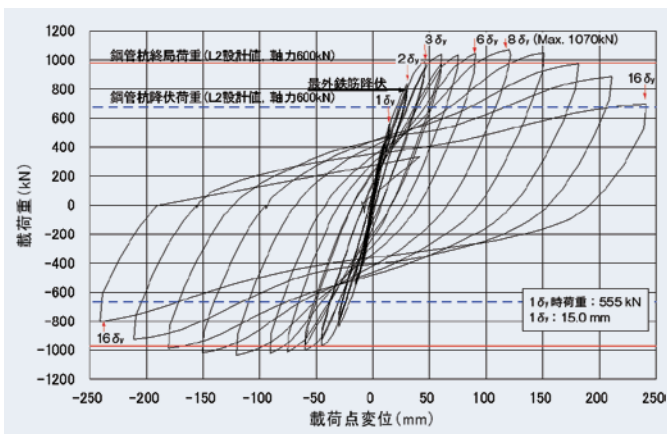


図5 載荷荷重位置での荷重-変位関係 (Case 1) (縁端距離0.33D)

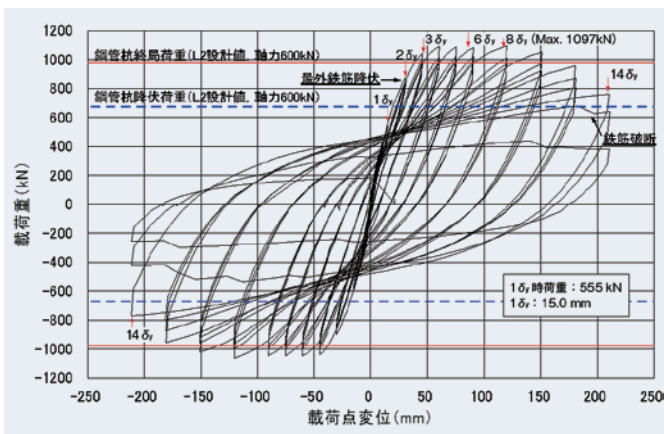


図6 載荷荷重位置での荷重-変位関係 (Case 2) (縁端距離0.75D)

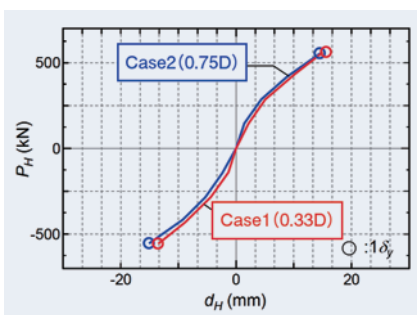


図7 全杭降伏までの剛性比較



写真3 フーチング被りコンクリート脱落



写真4 鉄筋の破断

時に最大荷重に到達し、14~16 δ_y において破壊に至った。杭頭結合部における軸方向鉄筋の降伏荷重およびその時の変位、並びに最大荷重および変形性能については、縁端距離の違いによる明確な差は無いことが確認できた。さらに、図7に示すように基礎の降伏までの剛性比較から杭頭剛結度は変わらないことが分かった。

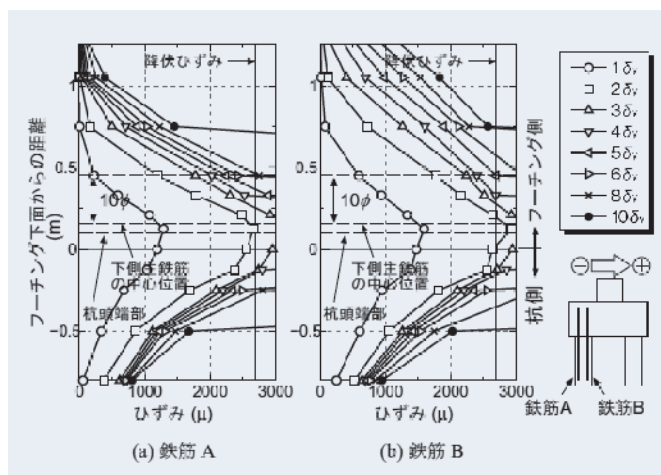


図8 各載荷ステップごとの引張側最外縁鉄筋(引張杭)の歪み分布 (Case 2)

(2) 変形性能

いずれのケースでも8 δ_y 程度に至るまで荷重が増加し、軸力変動を考慮した組杭実験においても杭頭結合構造の変形性能に問題ないことが確認できた。いずれのケースも最大荷重到達後の荷重低下要因は、押込み杭内側コンクリートの圧壊が進行し、フーチング被りコンクリートが脱落したことによる(写真3)。

なお、被りコンクリート脱落により剥き出した杭頭補強鉄筋は、その後の載荷サイクルにおいて、繰り返し塑性変形を受け、最終的に14~16 δ_y に至って破断が生じた(写真4)が、これはフーチング被りコンクリート圧壊後の現象であることから、フーチングの健全性が保たれていれば、杭頭補強鉄筋に致命的な損傷が生じることは無いと考えられる。

(3) 杭頭補強鉄筋の定着性

本実験より、SD490 高強度鉄筋を用いた場合、鉄筋定着長が $L_o + 10\phi$ であれ

ば、鉄筋抜け出しによる破壊は生じないことが確認できた。また機械式定着体を有する場合、定着長を $2/3 \times L_o + 10\phi$ としても有効に機能していることが確認できた。

図8に各載荷ステップごとの引張側最外縁鉄

筋(引張杭)の歪み分布を示す。なお同図より基礎の塑性率が4程度(4 δ_y)の場合、杭頭結合面からフーチング側、杭体内側ともに10 ϕ 程度で杭頭補強鉄筋が塑性化していることから、この区間では付着切れが生じていると考えられる。したがって、フーチング内、杭体内ともに現行設計法における定着長 L_o に加え、10 ϕ の余裕分を見込むのが妥当であると考えられる。

(4) 仮想RC断面径の評価

実験における杭頭降伏荷重(杭頭鉄筋が降伏応力度に達するときの水平荷重)に対して、計算による仮想RC断面の降伏耐力値と一致するように逆算した(仮想RC径-杭径)の値について、杭径との対比として整理したものを図9に示す。同図中には、既往の実験結果^{3)~6)}を同様に整理したデータも記載した。

組杭試験の仮想RC柱径評価については、非線形フレーム計算結果(押込み

側で死荷重相当の軸力を引抜き側では軸力ゼロとし中詰めコンクリートを考慮した杭体モデルによる)をもとに各杭の水平分担力を決定し、引抜き側の杭頭結合部で評価を行った。今回の組杭実験における結果は、杭基礎設計便覧¹⁾で設定されている200mmを上回っており、既往の単杭実験結果によるフィッティング線 ($0.25D + 100\text{mm}$)と概ね一致することが確認できた。

(5) フーチングの損傷発生について

表4にCase1 (縁端距離0.33D) およびCase2 (縁端距離0.75D) におけるフーチングの損傷発生時点について、比較して示す。フーチングのひび割れについて、縁端距離の短いCase1において、フーチング下面ひび割れと側面までの進展がより早い段階で発生するとともに、フーチング下面鉄筋の一部が降伏したことが確認された。一方、前述のとおり、降伏および最大荷重、変形性能については、縁端距離の違いによる明確な差は無く、押込み杭内側のコンクリートの圧壊、およびフーチング被りコンクリート脱落の発生時点は同じであったことから、フーチングのひび割れ発生等が杭頭結合部の構造性能に及ぼす影響は小さいことがわかった。したがって、縁端距離を現行規定 (0.75D) よりも縮小することは可能であると考えられる。

4. まとめ

組杭による正負交番載荷試験により以下のことが確認できた。

- (1) 道路橋示方書における杭頭結合方法Bにおいて、中詰め補強鉄筋の強度をSD490に高めることにより結合部強度が確実に向上するとともに、軸力変動を伴う繰り返し載荷に対しても十分な変形性能を保持していることが確認できた。
- (2) SD490高強度鉄筋を用いた場合、杭側の鉄筋定着長が $L_o + 10\phi$ (ϕ : 鉄筋径、 L_o : 現行設計法における定着長) であれば、鉄筋抜け出しによる破

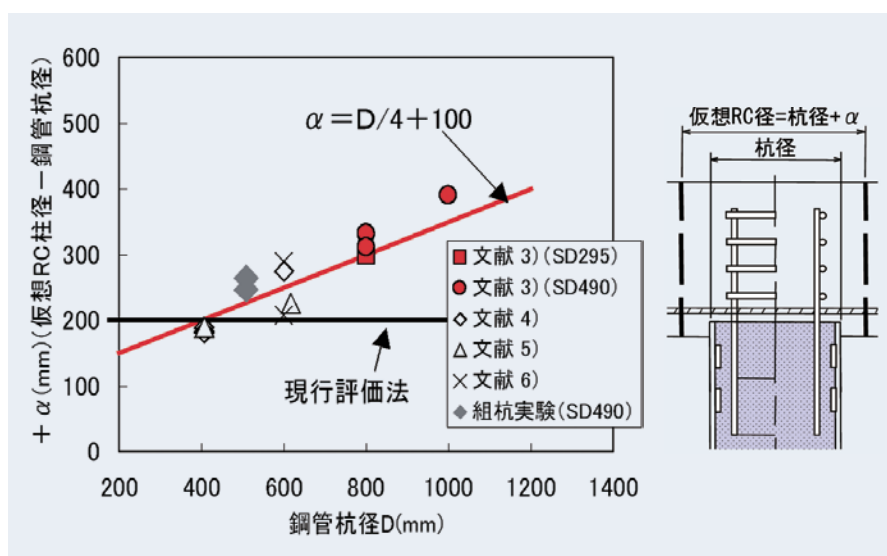


図9 杭径と仮想RC柱径との関係(降伏荷重時)

表4 フーチングの損傷発生比較

Case 1 (縁端距離 0.33D)		Case 2 (縁端距離 0.75D)	
0.25 δ_y 時	③-0 フーチング下面にひび割れが発生(押込み側)	0.75 δ_y 時	③-0 フーチング下面にひび割れが発生(押込み側)
2 δ_y 時	③-1 フーチング側面に破壊ひび割れ(せん断ひび割れ)が発生	4~14 δ_y 時	※フーチング側面のせん断ひび割れが進展するものの破壊までには至らず
5~6 δ_y 時	フーチング下面鉄筋の一部が降伏(引抜き側)		※フーチング下面鉄筋は降伏せず
10 δ_y 時	⑤フーチング被りコンクリートが脱落(引抜き側)	10 δ_y 時	⑤フーチング被りコンクリートが脱落(引抜き側)
14 δ_y 時	③-2 鉛直押抜きせん断によりフーチング上面のかぶりコンクリート剥落	14 δ_y 時	実験供試体破壊時(杭の軸方向鉄筋破断)

壊は生じないことが確認できた。また機械式定着体を有する場合、定着長を $2/3 \times L_o + 10\phi$ に縮小しても有効に機能することが確認できた。

- (3) 杭頭結合部の耐力評価について、現行の規定値を上回るとともに、組杭実験において既往単杭実験と同等の仮想RC断面径評価であったことが確認できた。
- (4) 縁端距離を現行規定 (0.75D) よりも小さくした場合 (0.33D)、フーチングのひび割れ発生等は早まるものの、杭頭結合部の剛性、耐力、変形性能は変わらないことが確認できた。したがって縁端距離を現行規定 (0.75D) よりも縮小することは可能であると考えられる。

<参考文献>

- 1) (社)日本道路協会: 杭基礎設計便覧、平成19年1月
- 2) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IV下部構造編、2002
- 3) 恩田、中谷、白戸ら: 高強度鉄筋を用いた杭頭結合構造の正負交番水平載荷実験、土木学会第64回年次学術講演会、2009
- 4) 建設省土木研究所: 杭頭部とフーチングの結合部の設計法に関する検討、土木研究所資料、第3077号、1992
- 5) 建設省建築研究所: 杭頭接合部の力学的挙動に関する研究、建築研究報告、No.129、1990
- 6) 小林ら: 杭頭結合部の耐荷特性に及ぼす埋込み型補強筋のかご径の影響、土木学会第42回年次学術講演会、1987.9