

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

道路・鉄道技術委員会

1. 緒言

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、鋼管杭協会では、土木研究所ら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工法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、フーチングの中に杭を一定長さ L ($L \geq D$, D : 杭径)だけ埋込み、杭頭反力(鉛直力、水平力、曲げモーメント)に抵抗する方法(方法A)、および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)の2つの方法が道路橋示方書²⁾に規定されている。ただし、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、ほぼ全てのケースで(方法B)が採用される傾向にある³⁾。

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することは困難であり、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、杭頭結合

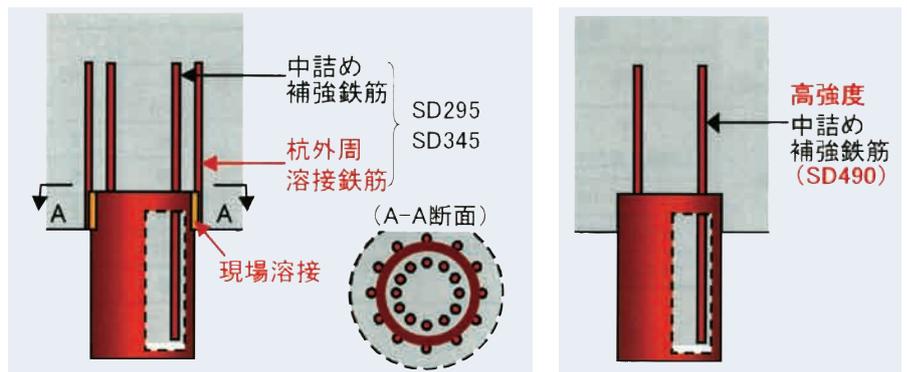


図1 現状の鋼管杭頭結合構造(中詰め+杭外周溶接鉄筋)

図2 高強度鉄筋を用いた杭頭構造(溶接レス)

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/mm^2 以上)からSD490(降伏点 490N/mm^2 以上)に高強度化することにより、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。本稿では、提案構造の構造性能を確認し、設計法確立に資することを目的として実施した実験結果を報告する。

2. 正負交番水平載荷実験

2.1 実験の目的

本実験では、(1)「主鉄筋(中詰め補強鉄筋)の高強度化した場合の杭頭結合部の構造性能評価」に加えて、(2)「杭頭部結合部耐力設計で用いる仮想RC径の合理的な評価手法の確立」に資することを目的とした。具体的な確認項目は以下のとおりである。

- (1)「中詰め補強鉄筋の高強度化」による杭頭結合部の構造性能評価項目
 - ①「中詰め補強鉄筋の高強度化」による杭頭結合部の水平耐力確認
 - ②「中詰め補強鉄筋の高強度化」による杭頭結合部の変形性能確認
 - ③高強度鉄筋を用いた場合のコンクリート付

- 着切れによる鉄筋の抜出し有無の確認
- ④高強度化補強鉄筋の必要定着長の確認

(2)杭頭部結合部耐力設計で用いる仮想RC径の合理的な評価手法の確立
杭頭結合を方法Bとする場合は、杭頭結合部が杭頭部より先行して損傷しないよう、フーチング内に鉄筋コンクリート断面を仮定した断面(図3参照、以下、仮想RC断面という)におけるコンクリートおよび鉄筋の応力度の照査が必要であり、杭基礎設計便覧¹⁾では仮想RC断面の直径は、杭径(鋼管ソイルセメント杭では、鋼管径)に200mmを加えた径として評価することとなっている。

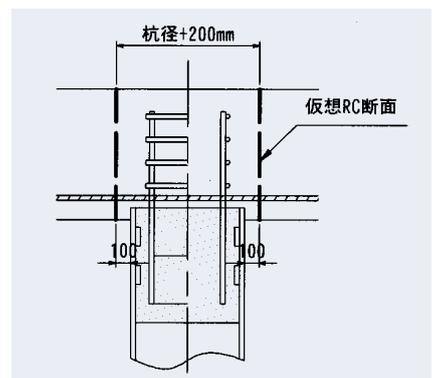


図3 仮想RC断面(杭頭結合方法B)

表1 正負交番水平載荷実験供試体・各供試体の鉄筋定着長

No.	鋼管杭			中詰め補強鉄筋		フーチング Fc (N/mm ²)	備考	定着長 算定式Lo (N/mm ²)	鉄筋定着長(mm ²)		
	径 (mm)	板厚 (mm)	フーチング への埋込長	種類	径 (mm)				本数 (主筋量)	フーチング側	杭側
1	800	24	100mm	SD295	16	24 (0.95%)	30	400	(従来鉄筋強度)	831(52d相当)	560(35d相当)
2	800			SD490					29	30(4.4%)	1170**
3	800			28(2.5%)	ずれ止め t12×2段	1460(=Lo+10d,50d相当)	同左(50d相当)				
4	1000	28(2.5%)			ずれ止め t12×2段	1460(=Lo+10d,50d相当)	同左(50d相当)				
5	800	30(4.4%)		ずれ止め t16×2段	1460(=Lo+10d,50d相当)	同左(50d相当)					

※定着長算定のための鉄筋許容応力度を245N/mm²として算出¹⁾ 算定式より算出 ※定着長算定のための鉄筋許容応力度を295N/mm²として算出¹⁾ 算定式より算出



写真1 載荷状況 (No.3供試体)

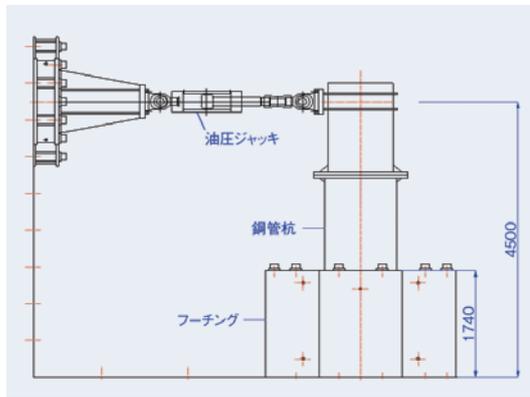


図4 正負交番水平載荷実験装置 (No.4試験体)

ただし、これは実物においては小径域となる杭径600mm以下の供試体による載荷試験結果^{4),5),6)}に基づいて設定されたものであることから、今回の実験では、仮想RC断面径の評価法をより合理的なものとする目的から杭径800~1000mmの供試体を用いることとした。

2.2 実験条件

表1に実験ケースならびに結合部に用いる鉄筋サイズ、材質、本数、鉄筋定着長などの条件を示す。供試体は外径800~1000mmの鋼管杭の杭頭結合部(いずれも方法B)を模したもので、中詰め補強鉄筋の材質はNo.1のみSD295でその他のケースはSD490となっている。No.1とNo.2の鉄筋径および本数は同一とした。また、No.1,2に比べてNo.3~5では杭側の定着長を長めの設定とした。ズレ止め厚さについては、No.1~4では道路橋示方書の構造細目に従って設定(ズレ止め厚さ12mm)する一方、No.5供試体ではワンサイズ厚いズレ止め厚さ(16mm)とした。

載荷は写真1および図4に示す装置により繰り返し水平荷重を静的に正負交番載荷する方法で行った。

載荷基準変位 $1\delta_y$ の設定については、鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を用いた仮想RC柱において、杭が降伏す

る時の水平荷重 P_y を計算で求め、その P_y を載荷させた時の変位を $1\delta_y$ とした。

2.3 実験結果

水平荷重と変位の関係を図5~図9に示す。

(1) 水平荷重と変位の関係

杭体内への鉄筋定着長がやや短いNo.1, No.2では、いずれも $3\delta_y$ 載荷後に一旦荷重が低下しているのに対し、杭体内への鉄筋定着長を長く(L_0+10d)したNo.3~No.5では、 $8\delta_y$ 載荷に至るまで荷重が増加し続けた。

なお、SD490鉄筋を用いたNo.2供試体とSD295鉄筋を用いたNo.1供試体とを比較すると、降伏強度の比は1.52(=414kN / 273kN)であり、SD490鉄筋を用いたNo.2供試体が大きく上回った。

また、No.3とNo.5はずれ止めのサイズを変更した供試体であるが、水平荷重と変位の関係において相違はなかった。

(2) 変形性能

いずれのケースでも $10\delta_y$ (実験降伏荷重時の変位で補正)程度に至るまで降伏荷重を上回る荷重を保ち続けており、SD490鉄筋を用いた場合で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。

(3) 鉄筋の定着状況

No.2供試体およびNo.4供試体の載荷

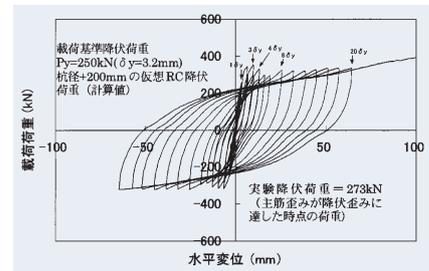


図5 水平荷重と変位の関係 (No.1, SD295)

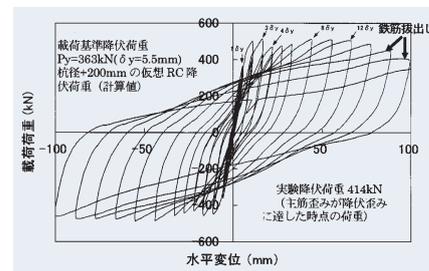


図6 水平荷重と変位の関係 (No.2, SD490)

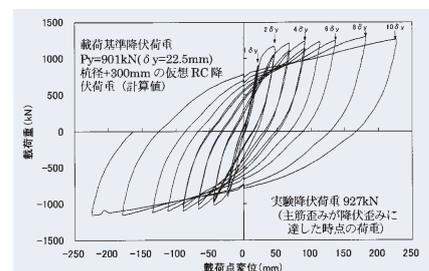


図7 荷重と水平変位の関係 (No.3, SD490)

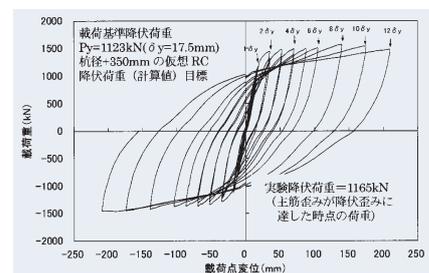


図8 荷重と水平変位の関係 (No.4, SD490)

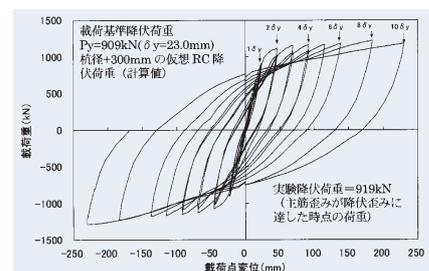


図9 荷重と水平変位の関係 (No.5, SD490)

実験後の鉄筋の状況を写真2、写真3に示す。杭側の鉄筋定着長が比較的短いNo.2供試体（杭側定着長35d相当、d：鉄筋径）では、鋼管内の鉄筋端部で30～60mmの大きな抜け出しが発生していた。なお、フーチング内（定着長52d相当）では鉄筋抜け出しは認められなかった。

一方、杭側の鉄筋定着長が長いNo.4供試体（定着長 $Lo+10d=50d$ 相当、d：鉄筋径）では、杭側、フーチング側ともに鉄筋抜け出しは認められなかった。

(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10に示す。同図中には、既往の実験結果^{4), 5), 6)}を同様に整理したデータも記載した。

降伏荷重時では杭径に比例して（仮想RC径-杭径）の値も大きく評価できることが実験により確認できた。杭径φ800mm時において（仮想RC径-杭径）の値は300～340mm程度、杭径φ1000mm時において（仮想RC径-杭径）の値は390mm程度であり、杭基礎設計便覧¹⁾で設定されている200mmを上回る結果となった。

実験における最大荷重に対して、計算による仮想RC断面の終局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11に示す。

最大荷重時においても、杭径に応じて（仮想RC径-杭径）の値も大きくなる傾向にあるが、バラツキが大きく、降伏荷重時の（仮想RC径-杭径）の値に比べてやや下回る傾向である。No.1は $a=263\text{mm}$ 、No.2は $a=166\text{mm}$ 、No.3=No.5では $a=270\sim 325\text{mm}$ となった。No.2の供試体においては前述したように鋼管杭側の鉄筋定着長不足により鉄筋が抜け出したことにより、他のケースに比べて大きく低下したものと考えられる。

3. まとめ

高強度鉄筋の適用性について正負交

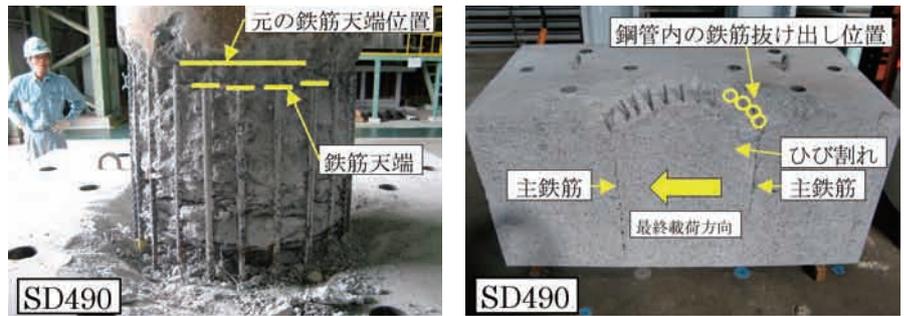


写真2 実験後の鉄筋の状況 (No.2供試体、杭側定着長35d=L0)

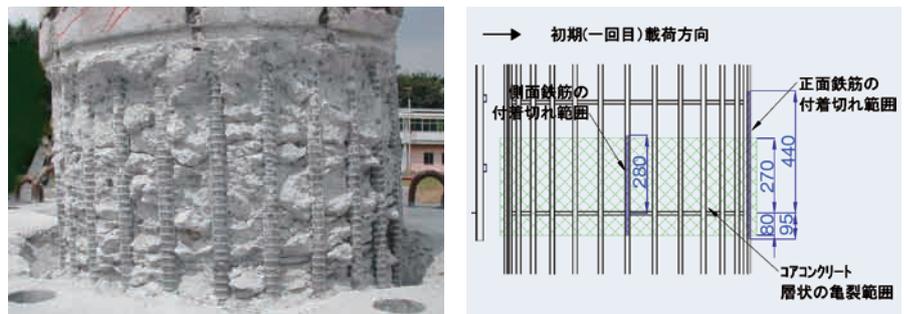


写真3 実験後の鉄筋の状況 (No.3供試体、杭側定着長50d=L0+10d)

番載荷試験により以下のこと確認できた。

- (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、繰り返し載荷に対し十分な変形性能も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 $Lo+10d$ （d：鉄筋径、 Lo ：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壊は生じないことが確認できた。
- (3) 杭頭結合部の仮想RC断面径の評価について、杭径の拡大とともに「仮想RC径-杭径」の値も大きくなる傾向にあり、杭径φ800mm以上の場合、現行の設定値200mmを上回ることが確認できた。

なお、今回の実験に引続き、軸力変動の影響を考慮できる2本の杭による組杭載荷試験を実施しており、現在評価中である。

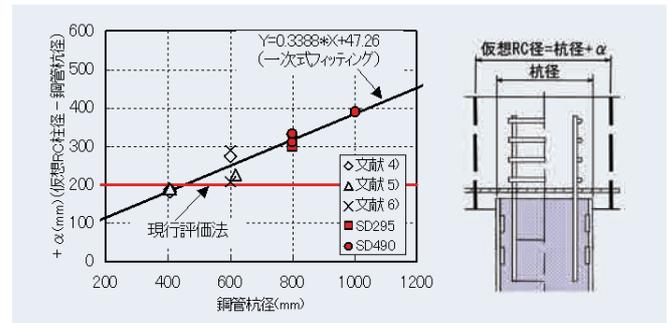


図10 杭径と仮想RC柱径との関係 (降伏荷重時)

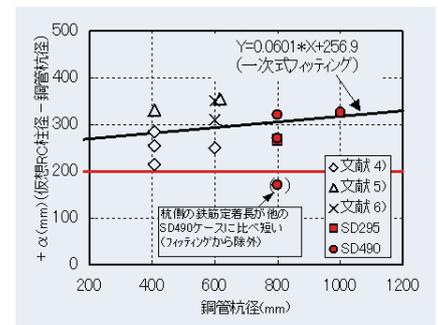


図11 杭径と仮想RC柱径との関係 (最大荷重時)

<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) (独)土木研究所：橋梁基礎形式の選定手法調査、土木研究所資料、第4037号、2007
- 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：くい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