

杭とフーチングの結合部の耐力・変形性能に関する载荷試験

阪野彰¹⁾・大越盛幸²⁾・木村嘉富³⁾・福井次郎⁴⁾

¹⁾正会員 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室（〒305 茨城県つくば市旭1）

²⁾正会員 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室（〒305 茨城県つくば市旭1）

³⁾正会員 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室（〒305 茨城県つくば市旭1）

⁴⁾正会員 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室（〒305 茨城県つくば市旭1）

1. はじめに

杭とフーチングの結合部分については、これまでに各種の結合方法が提案されている。道路橋示方書IV下部構造編においては、フーチング内に杭を杭径以上埋め込む方法（方法A）と、フーチング内に10cmだけ埋め込み鉄筋で杭とフーチングを結合させる方法（方法B）が規定されている。これらの結合方法は、一方向の水平载荷試験等に基づき許容応力度法による設計法として提案されたものである¹⁾。

しかし、平成8年の道路橋示方書の改訂に伴い、橋脚基礎においても地震時保有水平耐力法による設計を行うこととなり、杭基礎の耐力および変形性能を照査する必要が生じた。そこでは部材の非線形領域における挙動の適切な評価が必要であり、これまでに杭体自身の耐力・変形性能については载荷試験等により明らかとされつつある。しかし、杭とフーチングの結合部については、地震時のような繰返し载荷を受ける場合の損傷の進行過程や、その耐力・変形性能の評価法等は十分把握されていないのが現状である。

本論文では、結合方法および杭種等の異なった杭とフーチングの結合部を模した試験体について正負交番水平载荷試験を実施し、結合部における損傷の進行過程を把握した。また試験結果を解析し、結合部分における耐力および変形性能の評価法について考察した。

2. 試験方法

(1) 試験概要および試験ケース

試験概要を図-1に示す。今回の試験では、杭体はいずれも外径600mmの各種杭を用い、フーチングから载荷位置までの距離は杭径の3倍である1,800mmとした。杭体とフーチングの結合方法は、

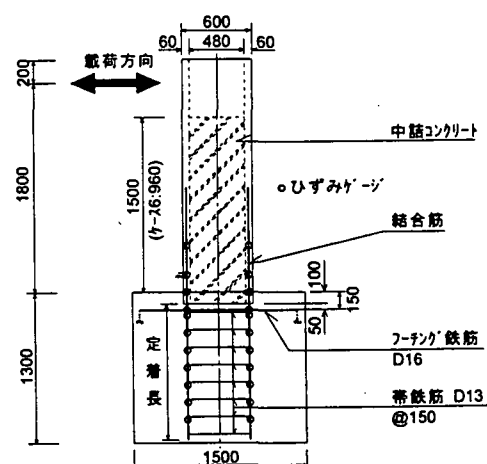


図-1 試験概要

道路橋示方書で規定している方法Aおよび方法Bによるものとした。杭体内には道路橋示方書に従い杭径の2.5倍（ケース6では960mm）にわたり設計基準強度 $\sigma_{ck} = 210 \text{ kgf/cm}^2$ のコンクリートを中詰めしている。フーチング部分のコンクリート強度としては $\sigma_{ck} = 210 \text{ kgf/cm}^2$ とした。

試験ケースを表-1に示す。ケース1およびケース2は、杭体には極力損傷を生じさせず結合部のみで主たる非線形性が生じるよう、杭体としてSC杭を用いた。ケース3～5は平成8年の道路橋示方書の規定に従ったPHC杭、ケース6は平成6年の道路橋示方書に従ったPHC杭である。また、ケース4は杭頭部をカットオフせずに、端板に結合筋を溶接したものである。

(2) 载荷方法および計測項目

载荷は反力壁に取り付けたセンターホール型の油圧ジャッキを用いて行った。事前解析により杭体の最外縁における結合筋が降伏する水平荷重を作用させたときの荷重载荷位置における杭体の水平変位を δ_y とし、 δ_y の整数倍で正負交番繰返し水平载荷を

表-1 試験ケース

ケース	杭 種	仕 様	外径	内径	結合法	結合筋	定着長
1	SC 杭	・SKK400 ・ $t = 6 \text{ mm}$ ・ $\sigma_{ck} = 800 \text{ kgf/cm}^2$	600 mm	420 mm	B	D25(SD295A) 13本(杭体内)	35d (d:鉄筋径)
2							35d + D/2 (D:杭径)
3	PHC杭 (強化杭)	・B種(有効プレスト 80 kgf/cm^2) ・ $\sigma_{ck} = 850 \text{ kgf/cm}^2$ ・PC鋼材 $\phi 9$ ・スパイラル筋 D10(SD295A)@70 mm				D25(KSW490) 13本(端板溶接)	
4							
5					A	—	—
6	PHC杭 (従来杭)	・B種(有効プレスト 80 kgf/cm^2) ・ $\sigma_{ck} = 850 \text{ kgf/cm}^2$ ・PC鋼材 $\phi 9$ ・スパイラル筋 $\phi 4$ (SWM-B)@50 mm			B	D16(SD295A) 13本(杭体内) D13(SD295A) 6本(中詰め)	35d

行った。各水平変位における繰返し回数は3回である。

各荷重ステップにおいて、荷重載荷位置における杭体の水平変位を、またケース1～4およびケース6については載荷方向最外縁結合筋のひずみを計測した。ひずみゲージの貼付位置は、結合筋に対し杭先端を中心に50～250mm間隔とした。

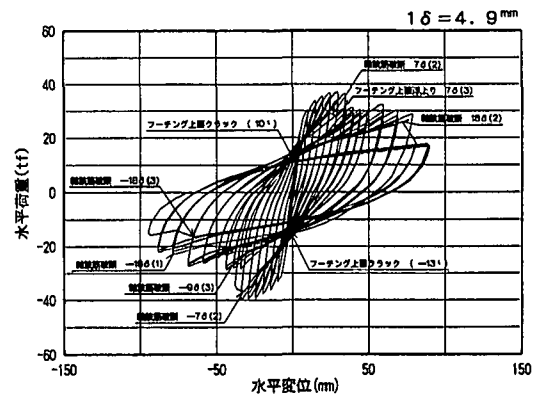
3. 試験結果

(1) 水平荷重～水平変位曲線

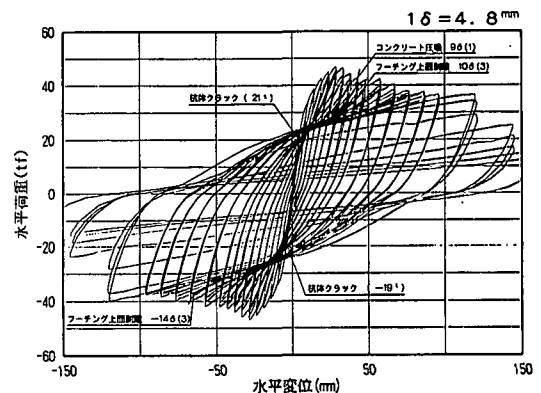
図-2(a)～(c)にケース2、3、5の荷重載荷位置における水平荷重～水平変位の履歴曲線を示す。ケース2の履歴曲線の形状は、比較的初期の段階から残留変位が発生した紡錘型となっている。正荷重側では最大水平荷重は $5\delta_y$ で発生しており、 $7\delta_y$ まではほぼ最大荷重を保持している。その後結合筋の破断により耐力が低下する。ケース3については、 $5\delta_y$ 時に最大水平荷重を発生した後、水平変位の増加に伴って緩やかに耐力が減少している。

ケース2とケース3を比較すると、杭体の種類はSC杭、PHC杭と異なっているものの、履歴曲線の形状は酷似している。これは、ケース2、ケース3とも結合筋の降伏は杭とフーチングとの境界面で最初に生じており、載荷初期においてはこの断面の特性が支配的であることによるものと考えられる。一方、変形性能に着目すると、ケース2では $7\delta_y$ (34mm)において結合筋が破断したのに対し、ケース3では水平変位100mm以上まで一定の水平耐力を保持している。これはケース2ではSC杭本体の亀裂が少なく、結合筋のひずみが境界面付近にのみ集中して発生したためと考えられる。

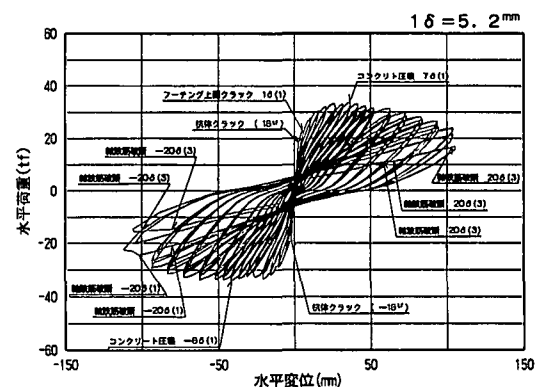
結合方法として方法Aを用いたケース5の履歴曲線形状はプレストレストコンクリート部材特有の原



(a) ケース2 (SC杭, 方法B)



(b) ケース3 (PHC杭, 方法B)



(c) ケース5 (PHC杭, 方法A)

図-2 水平荷重～水平変位履歴曲線図

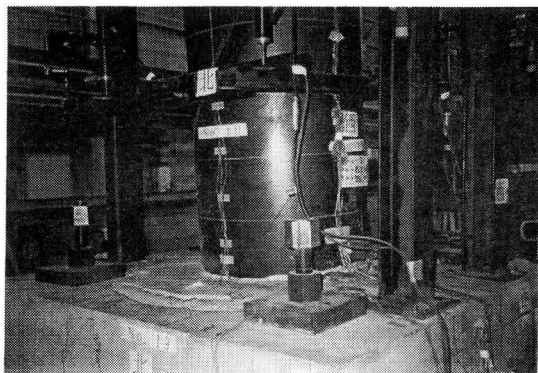


写真-1 ケース2 損傷状況

点志向型である。5 δ_y 時に最大水平荷重を発生した後、水平変位の増加に伴って緩やかに耐力が減少している。

(2) 杭体およびフーチングの損傷状況

杭体の損傷は杭種によって、またフーチングの損傷は結合方法によって異なっている。ケース2の損傷状況を写真-1に示す。ケース1、ケース2のSC杭については、境界面において結合筋が破断した。杭体表面の鋼管についてはほぼ健全な状態であり、試験後に鋼管を切断して調査したところ内部のコンクリートにはクラックが数本発生していた程度であった。フーチング表面は載荷方向に対してコンクリートが剥離した。試験後の観察では、剥離した範囲は杭体を埋め込んでいる100mm以浅であり、フーチングの鉄筋は露出していなかった。これらの状況は、結合方法として方法Bを用いたケース1～4およびケース6で同様であった。

ケース3の損傷状況を写真-2に示す。結合筋のひずみは載荷初期には境界面が最も大きかったが、最終的には杭頭部における結合筋の座屈により杭体のかぶりコンクリートが剥落し、結合筋が座屈・破断した。

結合方法として方法Aを用いたケース5については、フーチング表面のコンクリート剥離は生じていないが、載荷の進行に伴い杭体を中心に放射状のクラックがフーチング側面まで進展した。杭体自体の損傷については杭頭部においてコンクリートが剥落しPC鋼材が座屈・破断した。

4. 杭頭結合部の耐力・変形性能の評価法

(1) 降伏水平荷重

許容応力度法による杭頭結合部の設計においては、フーチング内に杭径+20cmの仮想円形断面を考え、結合筋に生じる応力度を求めている。今回も

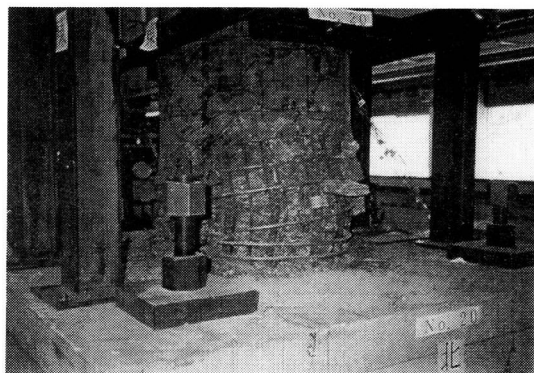


写真-2 ケース3 損傷状況

この方法により結合部の降伏水平荷重を事前に解析して載荷試験を行った。

試験の結果、各ケースとも事前解析により得られた降伏水平荷重を載荷したときに、結合筋の最大ひずみは降伏ひずみ付近にまで達していることが確認されている。これより、結合部断面の降伏は従来通り杭径+20cmの仮想RC断面により推定してよいといえる。

(2) 最大水平荷重

降伏荷重の算定においては仮想RC断面径として杭径+20cmを想定したが、降伏以降の結合部の状態は結合部の損傷の進展等により挙動が異なってくると考えられる。よって、試験時の最大水平荷重を用いて仮想RC断面径の検討を行った。検討対象は、今回の試験ケースのうち杭体自体の損傷が少なく境界面にて結合鉄筋が破断しているケース1およびケース2(SC杭)とした。

杭体の最大耐力を考える場合、対象部材の応力～ひずみ関係($\sigma \sim \epsilon$ 関係)を明確にする必要がある。コンクリートについてはコンクリートの拘束効果により $\sigma \sim \epsilon$ 関係が異なることがわかっており、平成8年道路橋示方書V耐震設計編に示された $\sigma \sim \epsilon$ 関係を用いて仮想RC断面におけるM- ϕ 関係を算出する。フーチング内の結合筋にはD13(SD295A)の帯鉄筋を150mm間隔で配置してある。この帯鉄筋量を用いて体積比 ρ_s を求めると0.6%となる。ただし、フーチング自体にもフーチング部材として必要な量の鉄筋を別途配置していること、試験においてフーチング内部のコンクリートに著しい損傷が認められなかったことなどから、実際にはかなり大きな横拘束を受けているものと予想される。よって今回の検討では、横拘束筋の体積比 ρ_s を0.6%とした場合と、道路橋示方書に規定している上限値 $\rho_s=1.8\%$ とした場合の2ケースについて検討した。鉄筋については降伏点を上限値とした完全弾塑性型とした。

図-3に仮想RC断面径～最大水平荷重の関係を示す。図より、ケース1、2の試験結果は、最大水平荷重時の仮想RC断面径として杭径+11～16cm程度を示している。これは、降伏水平荷重で考察した杭径+20cmより小さな値となっている。この理由として、かぶりコンクリートおよび境界面付近のコンクリートの損傷等によって仮想RC断面径が小さくなったものと考えられる。ただし、この検討では鉄筋を完全弾塑性型として評価しているため、 $\sigma \sim \varepsilon$ 関係において降伏点以降の2次勾配を考慮すれば、仮想RC断面径は更に小さくなる。

(3) 杭頭結合部のモデル化

上記の検討を考慮し、表-2に示す仮想RC断面の条件に基づいて解析を行った。解析モデルは、図-4に示すように境界面で支持された片持ち梁とし、部材のM- ϕ については非線形性を考慮してある。物性値はすべて材料試験値を用いた。図-5に解析結果を示す。図中において、ケース1、2は試験結果の正負の値を平均したものである。今回の解析では、フーチング内における結合筋の伸び出しの影響を考慮していないため初期勾配を若干大きく評価しているが、条件③および④は、概ね試験の傾向を表していると考えられる。ただし、結合筋が同じであるにもかかわらずPHC杭の最大水平荷重はSC杭と比較してかなり大きな値を示しており、PHC杭に見られたような損傷部位の移行現象について説明できていない。

5. まとめ

以上の結果をまとめると以下のとおりである。

- ①道路橋示方書の規定に従った杭とフーチングの結合部の載荷試験の結果、各ケースとも十分大きな変形性能を有していることが確認された。
- ②結合方法が方法Bの場合では杭前面のフーチングにコンクリートの剥離が生じるが、その深さは杭の埋め込み長である100mm程度であり、フーチング鉄筋は露出していない。
- ③降伏水平荷重を算出する仮想RC断面径は概ね杭径+20cmで妥当であるが、最大水平荷重時には仮想RC断面径が減少する傾向にある。
- ④結合部の仮想RC断面の径、長さおよび横拘束筋体積比を適切に評価した片持ち梁モデルを用いることで、杭頭結合部の耐力および変形性能を評価できる見通しを得た。

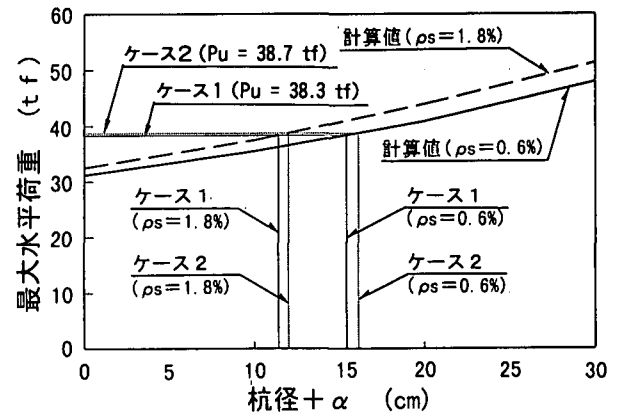


図-3 最大荷重時の仮想RC断面径

表-2 解析条件

条件	最大荷重時の 仮想RC断面径	仮想RC断面長	横拘束筋体積比 ρ_s
①	杭径 + 15 cm (75 cm)	杭径の2%(12 mm)	0.6 % (実配筋)
②		杭径の10%(60 mm)	
③	杭径 + 10 cm (70 cm)	杭径の2%(12 mm)	1.8 % (道路橋示方書の 最大値)
④		杭径の10%(60 mm)	

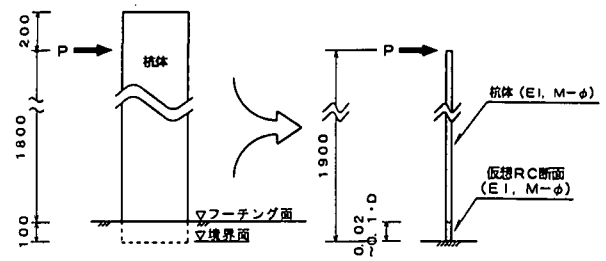


図-4 解析モデル

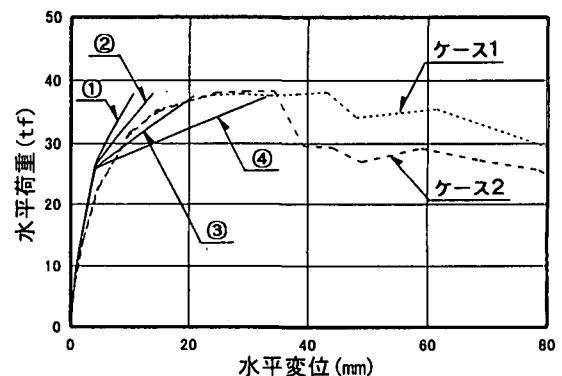


図-5 解析結果

参考文献

- 1) 岡原, 福井, 中谷, 田口, 藤村: 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, 建設省土木研究所, 1992年3月

地震時保有耐力法に基づく耐震設計法の開発に関する研究小委員会

1. 活動目的

兵庫県南部地震による激甚な被害から明らかなように、構造物の耐震設計に際して弾性挙動を考えた震度法による耐震設計だけでは不十分であり、大地震時に生じる現実的な地震力を設計地震力として見込み、構造物の非線形応答を考慮し、構造部材のじん性と動的耐力に基づいて構造物の耐震設計を行う地震時保有耐力法に基づく耐震設計体系を構築していく必要がある。すでに、橋梁の耐震設計では平成8年11月に道路橋示方書が改訂され、従来の震度法と並ぶ基本的な耐震設計法として地震時保有耐力法が取り入れられた。しかし、地震時保有耐力法の歴史は浅く、今後研究すべき多数の項目が残されている。

本小委員会では、地震時保有耐力法に基づく耐震設計の構築に必要とされる学術的な研究項目に関し、いろいろな専門領域を超えて研究、技術交流を行い、今後の耐震設計技術の向上に資することを目的とする。

2. 主要な検討項目

地震時保有耐力法に基づく耐震設計法の構築に向けて今後検討が必要とされる下記事項を中心に活動を行っていく。

- 1) マルチヒンジ構造系の非線形応答の推定と終局状態の設定
- 2) 基礎の非線形性が上部構造系のダクティリティーデマンドに及ぼす影響
- 3) 弾性応答から非線形応答への精度の良い変換方式の開発
- 4) 地震時に生じる残留変位の推定法
- 5) 斜張橋やアーチ橋のように全体構造系の安定性に直接係わる構造部材に塑性ヒンジが生じる場合の耐震設計法
- 6) 諸外国（米国、ニュージーランド、ヨーロッパ）における耐震設計の動向

3. 委員会構成

委員長 川島一彦

幹事長 小長井一男

委員 阿部雅人、有賀義明、家村宏和、伊津野和行、運上茂樹、大塚久哲、岡本裕昭
小川篤生、北沢正彦、工藤浩史、黒田修一、小坂寛己、中島章典、西村昭彦
藤野陽三、星隈順一、前原康夫、睦好 宏、目黒公郎、森 敦、矢部正明
横田 弘

注) 下線部はシンポジウム実行委員会メンバー

4. その他

本小委員会の活動にご関心があり、小委員会メンバーとして参加されたい方は、土木学会事務局（担当；飯野）までご連絡下さい。