

◆ 報 文 ◆

杭とフーチングの結合部の耐力・変形性能に関する載荷試験

木村嘉富* 大越盛幸** 阪野 彰*** 福井次郎****

1. はじめに

杭とフーチングの結合部については、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、平成2年版¹⁾以降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)を規定しており、許容応力度法による設計法が示されている。この設計法は、一方向の水平載荷試験等に基づき提案されたものである²⁾。

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載荷試験等により明らかとされつつある³⁾。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載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。

このため、結合方法および杭種等の異なる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載荷試験を実施し、結合部における損傷の進行過程を把握するとともに、結合部における耐力・変形性能の評価法について考察した⁴⁾。

2. 試験方法

2.1 試験概要および試験ケース

載荷試験の概要を図-1に、試験状況を写真-1に示す。杭体とフーチングの結合方法は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、杭体はいずれも外径600mmの杭を使用した。杭体内には、道路橋示方書に従い杭径の2.5倍である1,500mm(ケース6では960mm)にわたり設計基準強度 $\sigma_{ck}=20.6\text{N/mm}^2$ 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は $\sigma_{ck}=20.6\text{N/mm}^2$ 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外殻鋼管付きコンクリート杭(以下、「SC杭」という)を用いた。ケース3~6についてはプレテンション方式遠心力高強度プレストレストコンクリート杭(以下、「PHC杭」という)を用いた。ここで、ケース6はJIS A 5337の規格に適合したPHC杭(JIS杭)を用いたのに対し、ケース3~5では平成8年の道路橋示方書IV下部構造編10.11.1の規定にしたがってスパイラル

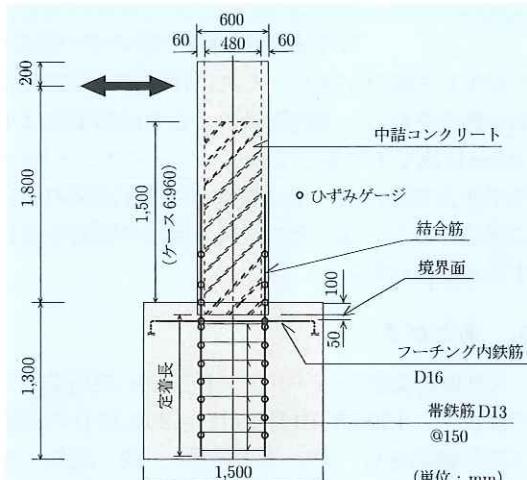


図-1 載荷試験の概要(結合法: 方法B)

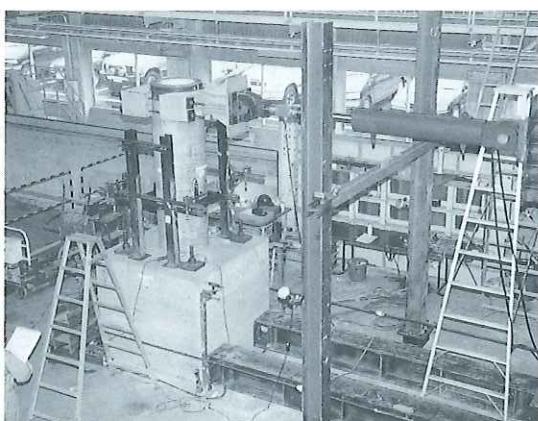


写真-1 載荷試験の状況

表-1 試験ケース

| ケース | 杭種 | 仕様 | 外径 (mm) | 内径 (mm) | 結合法 | 結合筋 | 定着長 (mm) |
|-----|--------------------|--|---------|---------|-----|---|---------------------------|
| 1 | SC 杭 | ・SKK-400 ・t=6mm ・ $\sigma_{ck}=78.4\text{N/mm}^2$ | 600 | 420 | B | D25(SD295A) 13本(杭体内) | 875 (35d(d: 鉄筋径)) |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | PHC 杭 (JIS 強化杭) | ・B種(有効プレストレス 78.4N/mm^2) ・ $\sigma_{ck}=83.3\text{N/mm}^2$ ・PC鋼材φ9 ・スパイラル筋 D10(SD295A)@70mm | 600 | 420 | B | D25(KSW490) 13本(端板溶接) | 1,175 (35d+D/2(D: 杭径)) |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | A | - | - |
| 6 | PHC 杭 (JIS 杭) | ・B種(有効プレストレス 78.4N/mm^2) ・ $\sigma_{ck}=83.3\text{N/mm}^2$ ・PC鋼材φ9 ・スパイラル筋φ4(SWM-B)@50mm | | | B | D16(SD295A) 13本(杭体内) D13(SD295A) 6本(中詰め) | 875 (35d) |

鉄筋量を増加したPHC杭(JIS強化杭)を用いた。

フーチング内への結合筋の定着長としては、ケース1および6は従来の規定である結合筋の直径の35倍とし、ケース2~4はこれに杭径の1/2を加えたものとした。ここで、結合筋は実際の杭の施工と同様、予め杭体内に配置したものとコンクリートを破碎してはつりだす方法としたが、ケース4は直接端板に溶接している。

2.2 載荷方法および計測項目

載荷は反力壁に取り付けた油圧ジャッキを用いて変位制御による正負交番水平載荷とした。フーチング上面から載荷位置までの距離は1,800mmであり、これは杭径の3倍に相当する。載荷は、事前解析において算出した杭体の最外縁における軸方向結合筋あるいは杭体内鋼材が降伏点に達する水平荷重を作成させたときの荷重載荷位置における水平変位 δ_y の整数倍で、変位制御による正負交番繰返し載荷を行った。各水平変位における繰り回数は3回である。

各水平変位ステップにおいて、載荷重および載荷方向最外縁結合筋のひずみを計測した。また、結合部付近の平均曲率および杭体の伸び出しを測定するため、フーチングから杭径に相当する600mm上方の位置に治具を取り付け、杭体周辺の4カ所で鉛直方向の杭体変位を測定した。

3. 試験結果

3.1 水平荷重～水平変位曲線

杭種および結合法による水平荷重～水平変位曲線の相違を明らかにするため、ケース2、3、5の水平荷重～水平変位の履歴曲線を図-2で比較する。方法Bによるケース2とケース3の履歴曲線の形状は酷似しており、比較的初期の水平変位ステップから荷重0における残留変位が発生した紡錘型

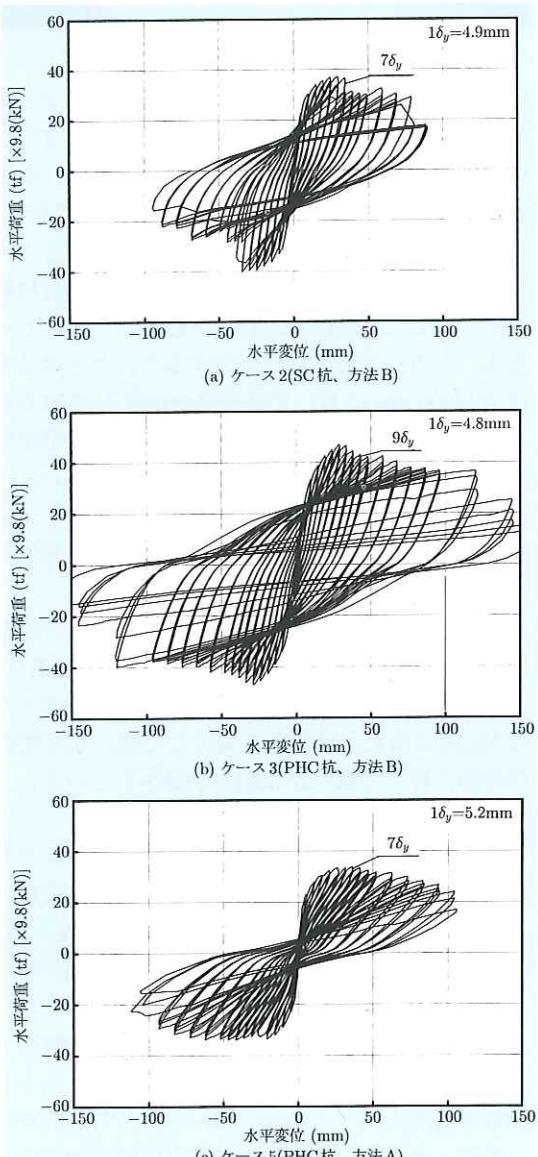


図-2 水平荷重～水平変位履歴曲線

となっている。ケース2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

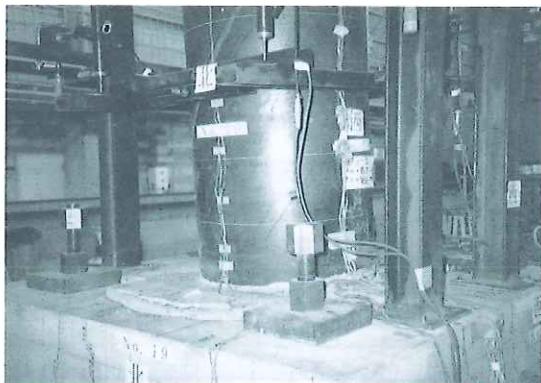


写真-2 結合部の損傷状況(ケース2)

いる。その後結合筋の破断およびフーチングコンクリートの剥離により耐力が低下する。ケース3については、 $6\delta_y$ 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、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といえる。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て耐力が大きく低下したのに対し、ケース3では水平変位100mm以上まで急激な耐力低下はみられない。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の履歴曲線の形状は残留変位が小さい原点指向型であり、方法Bとは履歴特性が異なっている。ケース5では $5\delta_y$ 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。

3.2 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た。方法Bによるケース2、ケース3の損傷状況を写真-2、3に示す。SC杭を用いたケース2では、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。PHC杭を用いたケース3では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、最終的には杭頭部で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。両ケースとも載荷方向に対して杭



写真-3 結合部の損傷状況(ケース3)

の前背面のフーチング表面の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いかった。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。

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. 定着長に関する考察

結合筋のフーチング内への定着長を変化させたケース1、ケース2の試験結果を比較し、必要定着長について考察を行う。ここで、ケース1は平成6年道路橋示方書に従い定着長を $35d$ (d:鉄筋径)としたものであり、ケース2は平成8年道路橋示方書に従い定着長を $35d+1/2D$ (D:杭径)としたものである。

4.1 水平荷重～水平変位の関係

ケース2の載荷試験における水平荷重～水平変位の履歴曲線を図-3に示す。図中には定着長を $35d$ としたケース1の包絡線も破線で示している。両ケースの包絡線を比較すると、結合筋が破断した水平変位35mm以降は異なっているものの最大荷重、初期勾配とも同程度であり、定着長の違いが結合部の剛性および耐力に及ぼす影響は認められない。

4.2 結合筋のひずみ分布

各水平変位ステップにおける結合筋のひずみ分布を図-4に示す。鉄筋のひずみが降伏ひずみに達

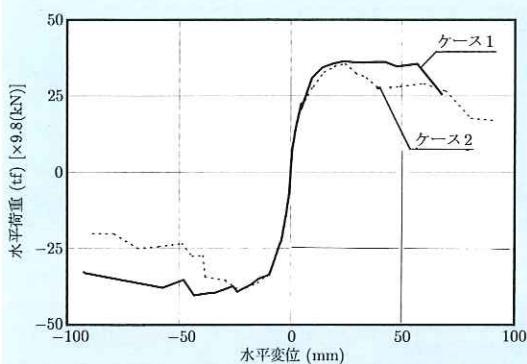


図-3 定着長による水平荷重-水平変位曲線への影響

した区間は、降伏水平変位 $1\delta_y$ においては杭端部の境界面付近のみであるが、水平変位の増加に伴ってその区間がフーチング内に拡大している。鉄筋の破断はケース1では $10\delta_y$ で、ケース2では $7\delta_y$ でそれぞれ生じているが、このときには結合筋が降伏した範囲は、杭とフーチングとの境界面から 30~35cm 程度となっている。

ケース1とケース2の鉄筋のひずみ分布を比較すると同様な形状となっており、定着長が 35d であっても十分結合筋の引張り力をフーチングコンクリートに伝達しているといえる。

4.3 コンクリートの付着強度

結合筋のひずみより鉄筋の引張り力を求め、引張り力の軸方向の変化からコンクリートの平均付着応力度を算定した。鉄筋が降伏していない区間である境界面から 400~550mm の区間における平均付着応力度の最大値は、ケース1で 5.7 N/mm^2 、ケース2で 4.6 N/mm^2 であった。これらの値は、道路橋示方書で規定されている許容付着応力度 1.6 N/mm^2 ($\sigma_{ck}=29.4 \text{ N/mm}^2$) の約 3 倍の大きさである。

コンクリートの付着強度としてケース1で測定された 5.7 N/mm^2 を用いると、結合鉄筋の降伏点 384.3 N/mm^2 を確保するための定着長は 422mm となる。ここで、ケース1の定着長は 875mm であるが、境界面から 350mm の位置まで付着が切れたとしても、それ以深の定着長 525mm により鉄筋の引張り力をフーチングコンクリートに伝達できることとなる。

4.4 杭の伸び出し

載荷試験においては杭頭部の平均曲率を求めるために、杭の両側に鉛直方向の変位計を 4つ取付けている。この鉛直方向の変位計の平均値として求

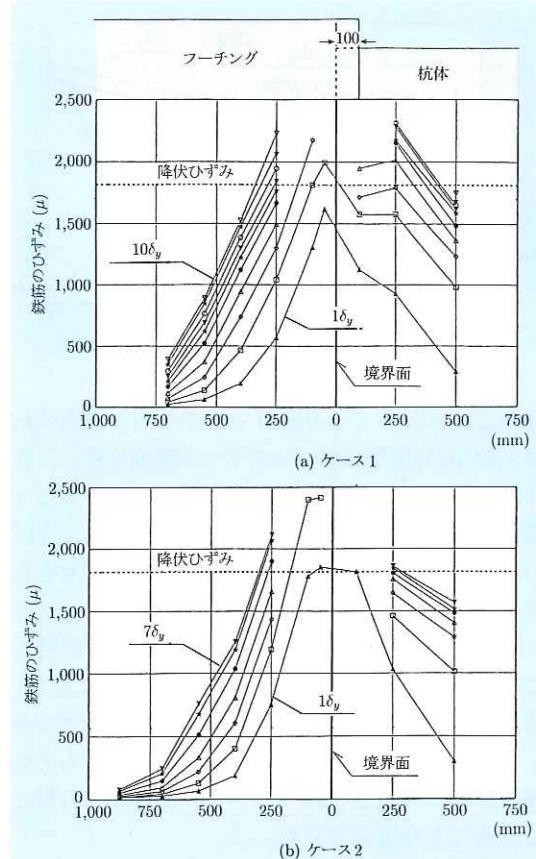


図-4 結合鉄筋のひずみ分布

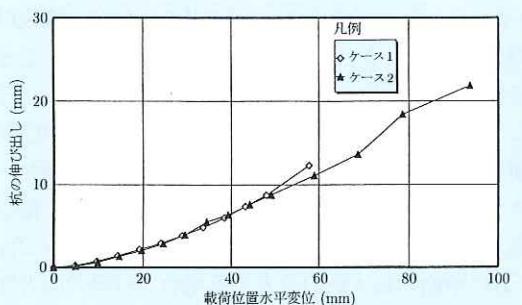


図-5 定着長による杭の伸び出し量の比較

めた杭の伸び出し量と、載荷位置での杭の水平変位との関係を整理すると図-5となる。水平変位の増加に伴い杭全体が上方に伸び出しているが、これは主として境界面付近の結合筋の伸びによるものであり、定着長の相違による差は認められない。

5. 杭頭結合部の耐力・変形性能の評価法

5.1 降伏水平耐力

道路橋示方書では許容応力度法による杭頭結合

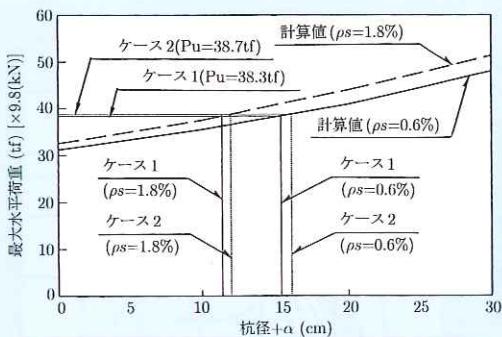


図-6 最大水平荷重時の仮想RC断面径

部の設計において、方法Bではフーチング内に杭径+20cmの仮想鉄筋コンクリート断面を考え、結合筋に生じる応力度が許容応力度以下となるよう鉄筋径、本数等を決定することとしている。今回の試験においてもこの方法により模型の諸元を定めた。また、前述の事前解析もこの方法で行った。

図-4に示したように、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、結合鉄筋の最大ひずみは降伏ひずみ付近にまで達していた。これより、結合部断面の降伏耐力も杭径+20cmの仮想鉄筋コンクリート断面により推定できることが確認された。

5.2 最大水平耐力

降伏水平耐力算定時の仮想RC断面径は杭径+20cmが妥当であることが確認されたが、降伏以後は結合部およびその周辺の損傷が進展することで結合部の挙動が異なってくると考えられる。そこで、試験時の最大水平荷重に対して仮想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筋が破断しているケース1およびケース2とした。

RC断面の最大耐力を考える場合、材料の応力度 $\sigma \sim \epsilon$ 関係を明確にする必要がある。コンクリートについては横拘束効果により $\sigma \sim \epsilon$ 関係が異なることがわかっており、今回の検討では平成8年道路橋示方書V耐震設計編に示された $\sigma \sim \epsilon$ 関係を用いた。実験に用いた試験体のフーチング内の結合筋にはD13(SD295A)の帶鉄筋を150mm間隔で配置しており、この帶鉄筋量を用い体積比 ρ_{hs} を求めるとき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

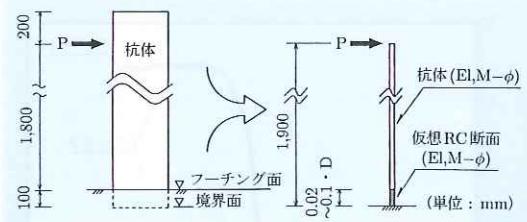


図-7 結合部の解析モデル

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+15cm (75cm) | 杭径の2%(12mm) | 0.5% |
| ② | 杭径+15cm (70cm) | 杭径の10%(60mm) | (実配筋) |
| ③ | 杭径+15cm (70cm) | 杭径の2%(12mm) | 1.8% |
| ④ | 杭径+15cm (70cm) | 杭径の10%(60mm) | (道路橋示方書の最大値) |

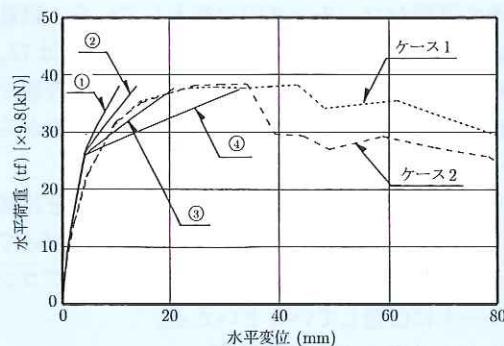


図-8 解析結果

かったことなどから、実際には帶鉄筋量から推定される以上の横拘束を受けているものと予想される。したがって今回の検討では、横拘束筋の体積比 ρ_{hs} を0.6%とした場合の他、道路橋示方書の最大値である1.8%とした場合についても検討した。鉄筋については降伏点を上限値とした完全弾塑性型の $\rho \sim \epsilon$ 関係とした。

検討結果を図-6に示す。この図は仮想RC断面径と最大水平耐力との関係を示したものである。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 $\rho_{hs}=1.8\%$ の場合杭径+11cm程度、 $\rho_{hs}=0.6\%$ の場合杭径+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、杭と一体となって抵抗するフーチングコンクリートの範囲が小さくなつ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、 $\rho \sim \varepsilon$ 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。

5.3 杭頭結合部のモデル化

これまでの検討結果を考慮し、結合方法 B を用いた場合の杭頭結合部の耐力・変形性能評価のためのモデル化を試みた。モデル化にあたっては、結合筋のひずみが境界面において最大値を示していること、フーチング表面の損傷状況としては杭体の埋込み長程度が剥離していること、杭種によらず水平荷重～水平変位の履歴曲線が RC 柱的な形状を示していること等の実験結果を踏まえ、解析モデルとして、図-7 に示すように境界面で支持された片持ち梁とした。固定端である境界面付近には仮想 RC 断面部材を設定することとし、仮想 RC 断面径・断面長および ρ_s を変化させた表-2 に示す 4 ケースについて検討した。部材の曲げモーメント M～曲率 φ の関係については杭本体と同様トリニア型とし、物性値はすべて材料試験値を用いた。

図-8 に解析結果を示す。図中のケース 1 およびケース 2 は試験結果の正負の値を平均したものである。図より、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、降伏以後の挙動としては、 ρ_s として道路橋示方書の最大値を用いた条件③および④が概ね試験の傾向を表していると考えられる。

6. まとめ

杭とフーチングの結合部における地震時の損傷の進行状況を把握し、耐力・変形性能の評価法を検討するために、結合部を模した試験体について正負交番水平載荷試験を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

① 道路橋示方書に示されたフーチングの結合方

法は、十分な変形性能を有している。

- ② 結合方法 B の場合では、載荷方向面のフーチング表面にコンクリートの剥離が生じるが、その深さは杭の埋込み長である 100mm 程度であり、フーチングの鉄筋は露出していない。
- ③ 結合方法 B において結合筋の降伏が杭本体の降伏より先行する場合、杭体の種類が SC 杭、PHC 杭と異なっていても、載荷初期において水平荷重～水平変位の履歴曲線の形状は酷似している。
- ④ 結合方法 B の場合では、載荷変位の増加により杭とフーチングの境界面より 30～40cm 程度の深度まで結合筋が降伏している。しかし結合筋先端付近のひずみの増加割合は少なくフーチング内の鉄筋は十分に定着されており、フーチング深部での付着応力度の最大値は 4.6～5.7N/mm² と道路橋示方書に規定してある許容応力度よりもかなり大きな値であった。
- ⑤ 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、最大水平荷重においては仮想 RC 断面径が減少する傾向にある。
- ⑥ 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。

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、平成 2 年 2 月
- 2) 建設省土木研究所基礎研究室：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、平成 4 年 3 月
- 3) 建設省土木研究所基礎研究室：杭基礎の変形性能に関する載荷試験、土木研究所資料第 3553 号、平成 10 年 3 月
- 4) 建設省土木研究所基礎研究室：杭とフーチングの結合部の耐力・変形性能に関する載荷試験、土木研究所資料第 3551 号、平成 10 年 3 月

木村嘉富*



建設省土木研究所
構造橋梁部基礎研究室
主任研究員
Yoshitomi KIMURA

大越盛幸**



同 基礎研究室研究員
Moriyuki OKOSHI

阪野 彰***



(前 基礎研究室
交流研究員)
Akira BANNO

福井次郎****



同 基礎研究室長
Jiro FUKUI