

杭基礎の変形性能に関する実験的研究

An Experimental Study on the Ductility of Pile Foundations

木村嘉富¹、大越盛幸²、中野正則³、福井次郎⁴、横山功一⁵

Yoshitomi KIMURA, Moriyuki OKOSHI, Masanori NAKANO, Jiro FUKUI and Koichi YOKOYAMA

- | | | | | | | |
|-------|----|----------|-------|-------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1 正会員 | 工修 | 建設省土木研究所 | 構造橋梁部 | 基礎研究室 | 主任研究員 | (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地) |
| 2 正会員 | | 同 | 上 | | 研究員 | (同 上) |
| 3 正会員 | 工修 | 同 | 上 | | 前室長 (現 建設省建設経済局 情報管理室建設専門官) | |
| 4 正会員 | 工修 | 同 | 上 | | 室長 | (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地) |
| 5 正会員 | 工博 | 同 | 上 | 耐震技術研究センター長 | | (同 上) |

The check of ductility and dynamic strength for pile foundations has been proposed based on the results of research into the behavior of pile foundations during severe deformation. For this pile foundation analysis method, a rigid frame pile model was made accounting for the non-linear properties of the vertical resistance of piles, horizontal ground resistance, and the bending stiffness of the pile body. In order to observe the extent of damage to a pile body as deformation increase, horizontal loading tests for a model of group piles were performed. Reinforced concrete pile, PHC pile (pretensioned spun high-strength concrete pile) were tested. These tests confirmed that at less than 4times the yield displacement, the pile bodies are spared serious damage.

key Words : pile foundation, seismic design, ductility, cyclic loading test

1. まえがき

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震においては、橋脚の倒壊や落橋など道路橋にも多くの被害が生じた。一方、基礎は地中部にあるために地震直後にはその被災状況を調査することはできなかったが、復旧に伴って基礎についても損傷調査が行われた。その結果、道路橋の基礎については地震時の安定性に影響のある沈下や鉄筋の破断、コンクリートの剥離などの構造的な被害は生じておらず、概して基礎の損傷は軽微であることが確認された¹⁾。しかしながら今後の課題として橋全体としての耐震性を向上させるため、鉄筋コンクリート橋脚以外の構造部材に対しても地震時の変形性能および動的耐力の評価法を開発する必要があることが示されている¹⁾。また、同年2月27日に建設省より通知された「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」²⁾ (以下、「復旧仕様」という。)では、橋脚基礎においても地震時の耐力および変形性能の照査を行うこととされている。

一方、筆者らは以前から大変形時の杭基礎の挙動を解析できる計算モデルについて研究を進めてきた³⁾。そこ

では、現地載荷試験や室内模型実験などに基づき、杭基礎の挙動の非線形性として

- ①杭の軸方向の抵抗特性⁴⁾
- ②杭軸直角方向の地盤抵抗特性^{5) 6)}
- ③杭体の曲げ剛性⁷⁾

の評価法を検討している。

復旧仕様に従って設計を行うにあたり、これらの非線形挙動を考慮した解析手法が必要となった。このため、それまでの研究成果を基に、杭基礎全体系の荷重～変位量の関係を算定する手法として荷重漸増法による解析モデルを提案し⁸⁾、計算例とともに示している⁹⁾。そこでは、杭基礎は橋脚躯体と比較して十分大きい耐力を有することを基本としているので、基礎周辺地盤に液状化が生じる場合や橋脚躯体が設計水平震度に対して十分に大きな終局耐力を有している場合などにこの方法をそのまま適用することは困難であった。

本研究では、道路橋示方書の改訂にあたり、大地震時における杭基礎の設計法を提案するとともに、杭基礎のうち場所打ち杭基礎およびPHC杭基礎の耐力および変形性能に関する模型実験を行った。実験は、杭基礎における杭本体の損傷の進行状況を目視により観察することを目的として気中で行うこととし、地震時において比較

表－１ 杭基礎の耐震設計の基本方針

設計で考慮する地震動	目標とする杭基礎の耐震性能		照査項目	解析モデル
橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動	健全性を損なわない		杭頭の軸方向反力、水平変位、杭体の応力度が許容値以下。	線形解析（変位法）
橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動	基礎の変位により橋の安全性が損なわれない		橋への影響を判断	地盤抵抗および杭体の非線形性を考慮した解析
	杭体に復旧に支障となるような過大な損傷が生じない	橋脚基部に主たる塑性ヒンジを形成させる	橋脚躯体の終局水平耐力相当の水平震度に対し、杭基礎が降伏しない。	
		杭体に過大な損傷を生じさせない	基礎の応答塑性率が、その制限値以下となる。	

的損傷が集中していた杭とフーチングの結合部付近をモデル化した組杭模型を作成し、正負交番水平載荷試験を行った。ここで、PHC杭においては従来使用しているJISの規定に基づく杭の他、せん断耐力および変形性能を向上させるために杭体のスパイラル鉄筋を増加させた杭についても試験している。これらの試験の結果、適切な構造細目を設定した杭基礎は、十分に大きな変形性能を有していることを確認している。

2. 杭基礎の耐震設計の基本方針

兵庫県南部地震における道路橋の杭基礎の被災は比較的軽微なものであった。その理由としては、橋脚躯体と比較して基礎の耐力が大きいのが多かったことや、液状化により基礎の耐力が低下したものでも十分な変形性能のある基礎が用いられていたことなどが考えられる。これらの被災状況から判断すると、杭基礎の設計法としては従来の道路橋示方書で規定する震度法や変位法で概ね十分と考えられる。

しかしながら、兵庫県南部地震においては従来の設計地震力を超える大きな荷重が作用しており、これを考慮して設計される橋脚躯体は従来より耐力、変形性能が大きくなるなど、橋梁を構成する各部材と基礎との耐力のバランスが異なってくる。また、地中にある杭基礎においては損傷調査およびその後の補強は困難なため、基礎本体に大きな損傷が生じないよう設計する必要がある。このことから復旧仕様においては、杭基礎は橋脚躯体の耐力と同等以上の耐力を有することを照査するものとしていた。しかしながら、液状化が生じる場合などでこの方法により杭基礎を設計しようとすると、従来と比較して基礎の規模を著しく大きくする必要が生じるなどの問題点がある。そのため、地震時に橋梁基礎に要求される性能を整理し、杭基礎の耐震設計法として次の方法を提案する。

耐震設計で考慮する地震動としては、従来から震度法として用いられていた橋の供用期間中に発生する確率が

高い地震動と、橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動の２段階が想定されている。これらの地震動に対し、杭基礎は表－１に示す基本方針で設計する。

橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動については、基礎としての機能を損なわないように設計することを目標とする。設計においては、地震時荷重に対して杭頭の軸方向反力や水平変位、杭体の応力度が、それぞれの降伏点に対して余裕を持たせた許容値以下となることを照査する。この範囲では杭基礎の挙動は線形挙動として近似できるため、杭基礎の変位や断面力等の解析法としては従来の道路橋示方書¹⁾で規定されている変位法を用いればよい。

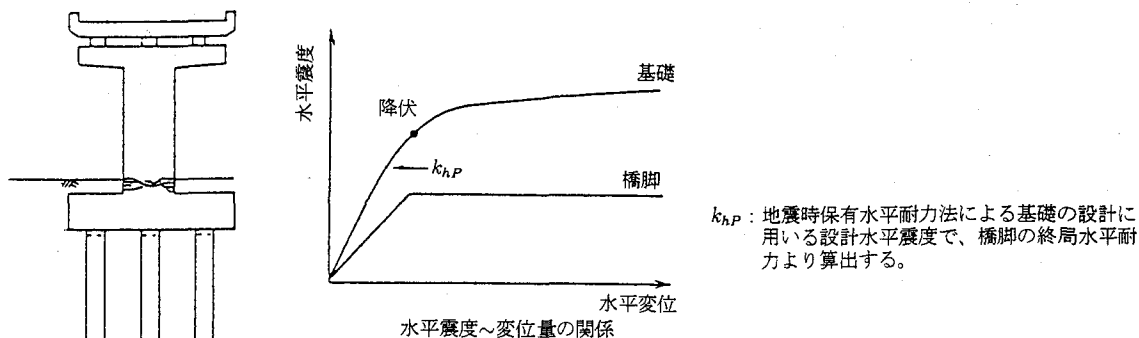
一方、橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動については、杭基礎が次の二つの事項を満たすことを設計の目標とする。

- ① 基礎の変位により、橋の安全性が損なわれないように設計する。
- ② 基礎本体に、復旧に支障となるような過大な損傷が生じないように設計する。

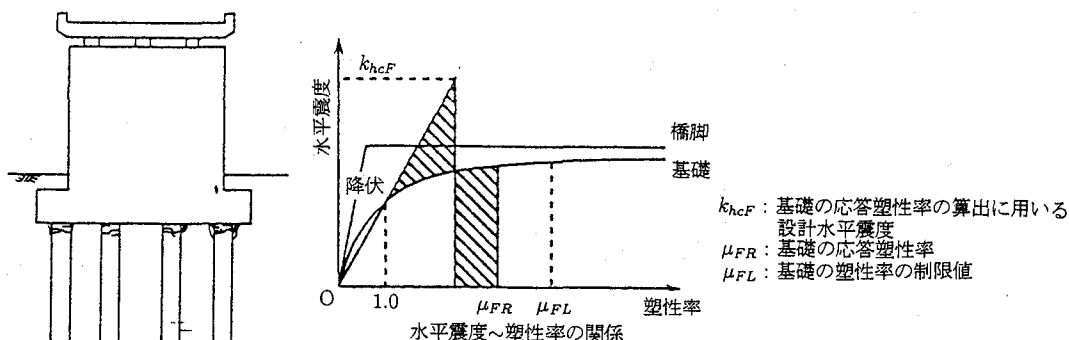
①に対しては、地震時における基礎の変位を算定し、それによる橋全体への影響が許容できる範囲であるかどうかを判断することとなる。

②に対しては次のとおりとする。基礎本体は地中部にあるため、橋脚躯体に比較して損傷の発見が困難でありまた、その補修も大規模とならざるを得ない。したがって、橋脚躯体基部に塑性ヒンジを形成させて地震エネルギーを吸収させ、杭基礎の挙動は降伏範囲内にとどめることを基本とする。ここで、杭基礎の挙動の降伏とは、杭体の降伏あるいは、杭頭反力が支持力の上限值に達したことにより、基礎の水平変位あるいは回転変位が急増し始めるときとする。設計においては、図－１（a）に示すように、橋脚躯体基部の終局水平耐力相当の水平震度を作用させ、このときに杭基礎の挙動が降伏に達していないことを照査する。

橋軸直角方向において、壁式橋脚のように地震時保有



(a) 橋脚基部に主たる塑性ヒンジが生じる場合



(b) 基礎～地盤系に主たる非線形性が生じる場合

図-1 地震時保有水平耐力法による基礎の設計の基本方針

水平耐力法に用いる設計水平震度に対して橋脚躯体が十分大きな終局水平耐力を有している場合には、基礎の耐力を橋脚の終局水平耐力以上となるように設計することは必ずしも合理的ではない。また、液状化が生じる場合には、基礎周辺の地盤の強度や支持力が低下することにより基礎全体としての耐力が低下するが、この場合においても基礎の耐力を橋脚躯体の終局水平耐力よりも大きくしようとすると、構造断面が過度に増大し橋全体の設計として不合理な場合があると考えられる。したがって、このような場合の基礎の設計においては、杭基礎の耐力は橋脚躯体の終局水平耐力を下回るものの杭体に過度な損傷が生じない範囲において降伏以降の塑性化を許容し、基礎でエネルギー吸収を期待して設計を行う方が合理的である。これらの場合には、図-1 (b)に示すように地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度 k_{hcF} に相当する水平力に対して杭体における損傷の程度を推定し、それが復旧の支障とならないことを照査すればよい。ここで、杭体の損傷を直接的に推定することは困難であるため、損傷の程度を表す目安として便宜的に基礎の応答塑性率 μ_{FR} を用いることとし、それが杭基礎の応答塑性率の制限値 μ_{FL} 以下であることを照査することとする。ここで、基礎の応答塑性率 μ_{FR} とは、基礎の降伏水平変位に対する応答水平変位の比として定義され、動的解析などにより推定することとなる。

なお、これらの設計において、基礎へ作用する地震荷重としては、橋脚から伝達される上部構造および橋脚躯体の慣性力およびフーチング慣性力とする。杭基礎に及ぼす地震の影響としては、この他に地震時の地盤の変形による幾何学的拘束効果があげられる。しかしながら、杭体の断面力が終局耐力付近となる領域における幾何学的拘束効果の評価法、および慣性力効果との組合せ方法についてはいまだ十分には解明されていない。また、地盤変形による幾何学的拘束効果により躯体に損傷が生じるが、幾何学的拘束効果のみでは地盤変形を大きくこえて変形が進行するとは考えられなく、杭体の破断などの大きな損傷を生じさせる原因としては上部構造の慣性力が支配的と考えられる。これらのことから、ここでは慣性力に対して杭基礎の応答挙動を算定し、杭体には十分な変形性能を有するよう、別途構造細目を規定することとする。

3. 載荷試験の概要

3.1 試験目的

杭基礎の耐震設計において基礎でのエネルギー吸収を期待して設計を行う場合には、基礎本体に過大な損傷が生じるのを防ぐため、基礎の応答塑性率がある値以内となるように設計する必要がある。このような塑性率の制

表-2 試験ケース

ケース	杭 種	杭配置	杭長 (mm)	杭径 (mm)	軸方向鉄筋 (鉄筋比)	帯鉄筋 (鉄筋比)	杭体中詰め 鉄筋
1	場所打ち杭	2列×3本	9,000	300	SD295A D10 16本 (1.61%)	SD295A D4 840 (0.58%)	-
2		2列×2本					
3	PHC杭 (JIS杭)	2列×3本			PC鋼線 φ7 12本	SW-B φ3 850	あり
4	PHC杭 (JIS強化杭)					SD295A D6 850 スパイラル	なし

表-3 杭コンクリート強度試験結果

ケース	材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)
1	22	323	2.04	28.6
2	79	288	2.49	26.9
3	65	796	3.15	51.7
4	35	818	3.36	48.7

表-4 使用鋼材の引張試験結果

ケース	種類	規格	降伏応力度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
1	軸方向鉄筋	D10(SD295A)	3,757	5,229
	帯鉄筋	D4(SD295A)	3,529	5,006
2	軸方向鉄筋	D10(SD295A)	3,396	5,626
	帯鉄筋	D4(SD295A)	3,529	5,052
3	軸方向鋼材	φ7(SWPD1)	13,130	17,336
	帯鉄筋	φ3(SMW-B)	-	6,623
	中詰め 軸方向鉄筋	D10(SD295A)	3,715	4,925
	中詰め 帯鉄筋	D6(SD295A)	-	5,378
4	軸方向鋼材	φ7(SWPD1)	13,130	17,336
	帯鉄筋	D6(SD295A)	-	5,378

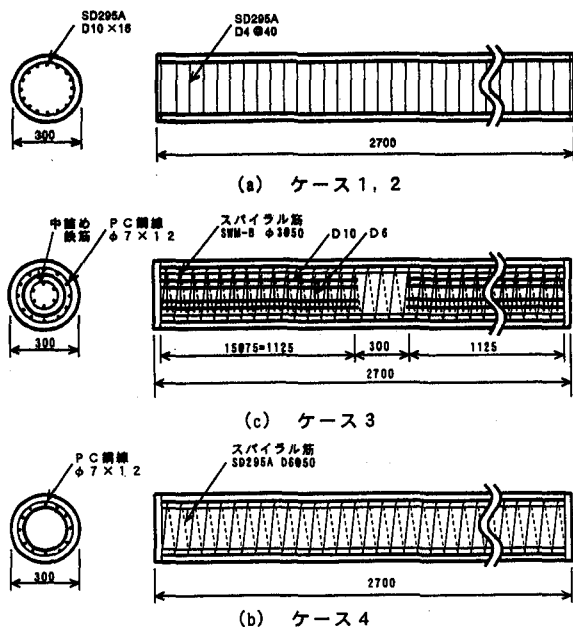


図-2 杭体の配筋

限值として、鉄筋コンクリート橋脚では終局状態を定義し、これに対して安全係数を用いて許容塑性率を定めている。杭基礎においては、杭体の一部が部材としての終局状態に達しても直ちには基礎全体系としての著しい耐力低下にはつながらないため、杭基礎全体系としての終局状態を定義することが困難である。その一方、基礎は地中にあるため、地震後の基礎の損傷の調査およびその復旧は橋脚に比して困難となる。このため、杭基礎モデルの載荷実験により基礎の塑性率と杭体の損傷状況を把握し、塑性率の制限値を定める際の参考とする。ここで、杭基礎の水平抵抗としては杭本体の抵抗の他、地盤抵抗もあるため、地震時の杭の損傷状況を再現するためには地盤中での実験が望ましいが、地盤中での実験では杭体の損傷の進行状況を観察することができないため、杭頭部付近を模した組杭供試体について気中で載荷試験を行う。

3.2 試験方法

(1) 供試体製作

試験ケースを表-2に示す。杭基礎モデルは直径30cm、長さ180cmの鉄筋コンクリート杭を用いた。ケース1お

よびケース2は場所打ち杭基礎を模したもので、ケース3およびケース4はPHC杭基礎を模したものである。杭の配置は載荷直角方向に2本、載荷方向に3列を基本とし、杭列による影響を調べるためケース2のみ2列とした。ここで、中心間隔は一般的な杭基礎の配置である、杭径の2.5倍の75cmである。

杭体の配筋図を図-2に示す。

ケース1およびケース2に用いた杭体は、場所打ち杭を模した直径30cmの鉄筋コンクリート杭である。軸方向主鉄筋はSD295A D10を16本とし、帯鉄筋はSD295A D4を4cm間隔で設置した。杭体外面から軸方向鉄筋中心までの距離は5cmである。完成した鉄筋かごを鋼製型枠にセットし、コンクリート打設、蒸気養生し、試験体とした。

ケース3に用いたPHC杭(JIS杭)は、肉厚6cmのB種(有効プレストレス80kgf/cm²)のプレテンション方式高強度プレストレスコンクリート杭である。軸方向のPC鋼材はφ7mmを12本とし、スパイラル筋としてφ3mm(SMW-B)を50mm間隔で配置した。完成した鉄筋かごを鋼製型枠にセットし、コンクリートを打設、PC鋼材緊張、遠心成形の後、蒸気養生し試験体を作成する。その後、杭体内部にフーチング端部から杭の上下部それぞれ75cmづつの範囲に中詰め鉄筋(軸方向鉄筋D10×6本、帯鉄筋D6 ctc75mm)を配置した後

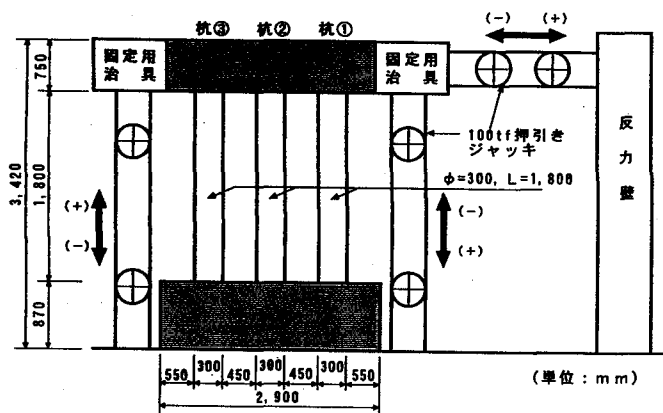


図-3 載荷試験方法

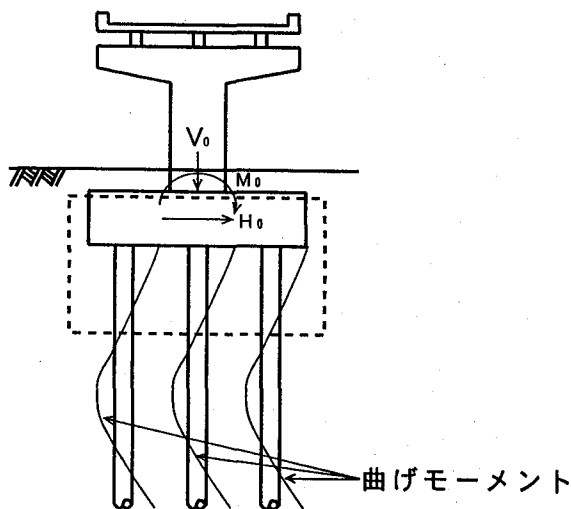


図-4 杭基礎における地震時荷重状態

コンクリートを充填して試験杭とした。

ケース4に用いたPHC杭(JIS強化杭)は、ケース3で用いたJIS規格品に対し、杭体のせん断耐力と変形性能を増加させるようスパイラル筋を増加させたものである。スパイラル筋としては、D6(SD295A)を50mm間隔で配置した。なお、中詰めコンクリートはケース3と同様であるが、中詰め鉄筋は配置していない。

試験時に行った杭体コンクリートの強度試験結果を表-3に示す。コンクリートの圧縮強度は、場所打ち杭を模したケース1およびケース2では300kgf/cm²程度、PHC杭を模したケース3およびケース4では800kgf/cm²程度であった。使用鋼材の引張試験結果を表-4に示す。

(2) 載荷方法

載荷試験方法の概要を図-3に示す。この試験は図-4に示すようにフーチングに剛結された組杭基礎に橋脚躯体から伝達される荷重が作用したときの杭体の損傷状態を把握することを目的としており、水平力と同時にモーメントも作用させる必要がある。載荷は、上部フーチ

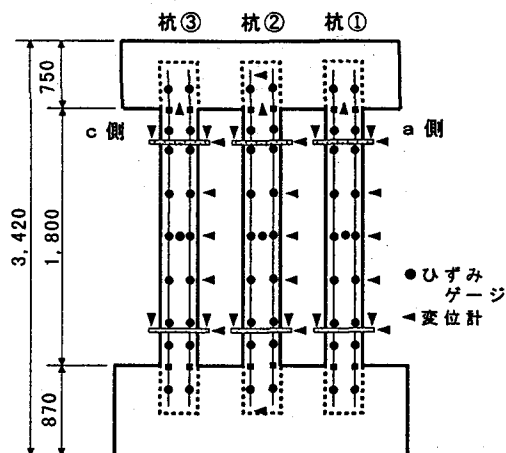


図-5 ひずみゲージ、変位計測位置

ング横の水平ジャッキおよび供試体左右の2基の鉛直ジャッキの計3基ジャッキを同時に制御して鉛直荷重を一定に保ち、水平力HとモーメントMの比率 $M/H=2.5$ を一定に保ちながら水平力を正負交番載荷させて行った。

載荷は、事前解析において全杭の杭体の最外縁の軸方向鉄筋が降伏する水平荷重が作用したときの荷重載荷位置の変位を1δとし、1δずつ変位を増加させて正負交番載荷を行った。また、1δ当り3サイクルの載荷とした。鉛直荷重は杭①本あたりの軸力が14tfとなるようにした。ここで、 M/H および杭①本あたりの軸力は、一般的な橋脚杭基礎の設計例を参考に定めた。

(3) 計測・観察項目

図-5にひずみゲージおよび変位計の計測位置を示す。ひずみゲージは各杭体の載荷方向の軸方向鋼材に30cm間隔で貼り付けた。変位としてはフーチングの水平変位、鉛直変位、杭体各位置に30cm間隔で変位計を取付け水平変位を測定している。また、フーチングから30cm離れた位置の杭体に鉛直変位計を取付け、杭頭部付近の平均曲率を測定した。

載荷試験中は上記事項について計測するとともに、各水平変位の3サイクル目に杭体の損傷状況を観察した。

4. 試験結果と考察

4.1 場所打ち杭における杭体の損傷の進行状況

ケース1の載荷試験により得られた水平荷重と水平変位の履歴曲線を図-6に示す。また、各水平変位で3回繰り返した後の杭体の損傷状況の展開図を図-7に示す。杭体の損傷は次のとおり進行した。

水平荷重が7tfおよび10tfに達したときに、各列杭の上下部にひび割れが発生した。事前解析により求めた全

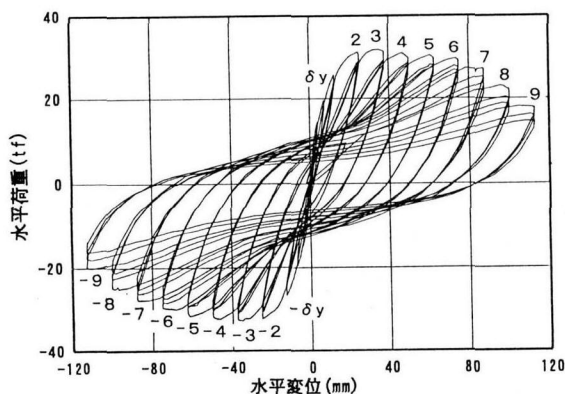


図-6 水平荷重～水平変位履歴曲線（ケース1）

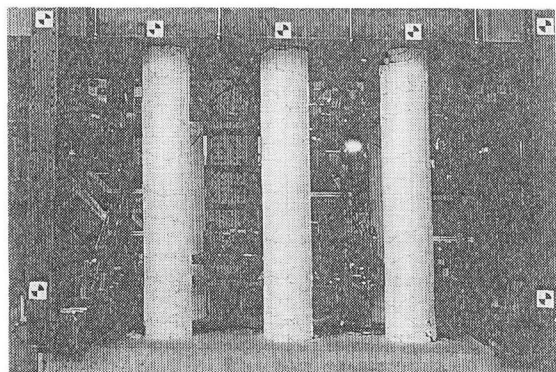


写真-1 杭体の損傷状況（ケース1, $\pm 4 \delta_y$ ）

杭縁端での軸方向鉄筋が降伏する水平荷重に達したとき、フーチングでの荷重載荷位置で計測された水平変位は12.5mmであった。この水平変位を降伏変位 δ_y とし、以降、この整数倍で载荷した。

$2 \delta_y$ で杭①、杭③の上下部および杭②の下部でかぶりコンクリートに圧壊の兆候が現れ、 $3 \delta_y$ で最大荷重に達した。このとき杭①下部のかぶりコンクリートが若干剥離していた。 $4 \delta_y$ における杭体の損傷状況を写真-1に示す。 $4 \delta_y$ になると杭①上部、杭③上下部、杭②下部のかぶりコンクリートが剥離したが、鉄筋露出には至っていない。 $6 \delta_y$ になると杭①下部、杭③上下部で鉄筋が露出・座屈し、 $7 \delta_y$ で杭①上部でも鉄筋が露出・座屈した。繰り返し载荷を行うに従い、帯鉄筋や軸方向鉄筋の破断が生じ、水平力が低下した。

杭体の損傷状況は図-7にも示すように、中央か端部かといった杭の位置、および杭体の载荷側か反対側かにより大きく異なっている。たとえば、 $+4 \delta_y$ における杭①では上端のc側（図面左側）および下端のa側（図面右側）でかぶりコンクリートが剥離しているが、その他の杭では損傷は軽微である。以下、杭体の損傷状況について考察する。

各杭列の杭体の水平変位分布を図-8に示す。ここで、杭体の水平変位は杭位置によらず同じ値であったため、杭①について示したものである。計測した区間においては杭体はほぼ直線のまま変形しており、杭体の損傷は杭

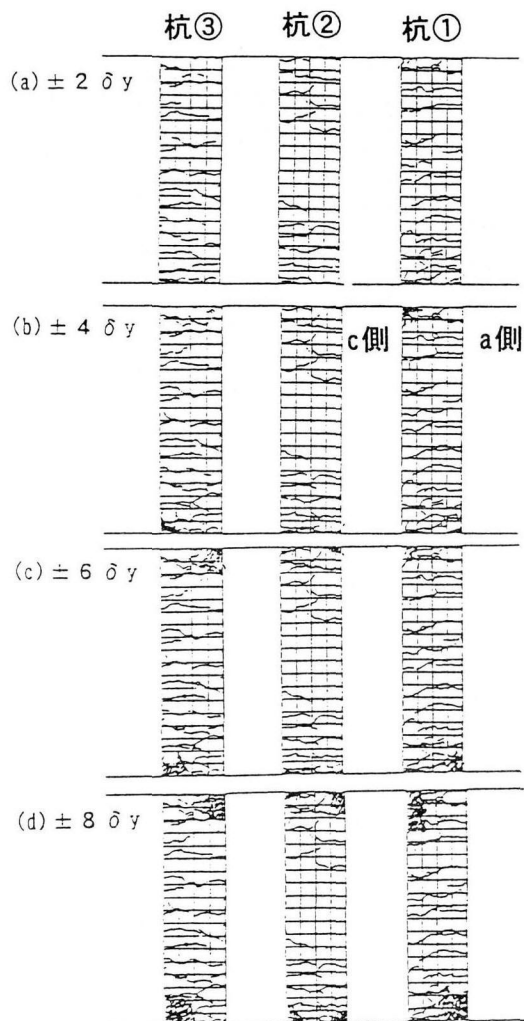


図-7 杭体の損傷状況展開図（ケース1）

頭部付近に集中していることがこの図からも確認される。したがって、杭頭部付近に着目し、各列杭において測定された曲率とフーチング水平変位の関係を整理すると図-9となる。各列杭とも水平変位に比例して曲率は増加している。杭により若干の差は認められるものの、杭位置との関係に特に有意な傾向は認められず、各列杭ともほぼ同程度の曲率となっているといえる。

鉄筋コンクリート部材の損傷を支配する項目としては上記の曲率の他、部材の軸力があげられる。このため、モーメントMによる各列杭における軸力変化とフーチング水平変位との関係を求めると、図-10が得られる。杭の軸力は、杭体の中央の断面に設置したひずみゲージより算定した。ここで、杭の平均ひずみが負となる、つまり、圧縮となる場合には全断面を有効として材料試験により得られた弾性係数を用いて軸力を算定し、平均ひずみが負となる場合にはコンクリート負担分を無視し、鉄筋のみで負担するとして算定している。この方法は厳密さには欠けるが、ここでは各列杭の軸力変化の傾向を確認することを主目的としていること、鉄筋コンクリー

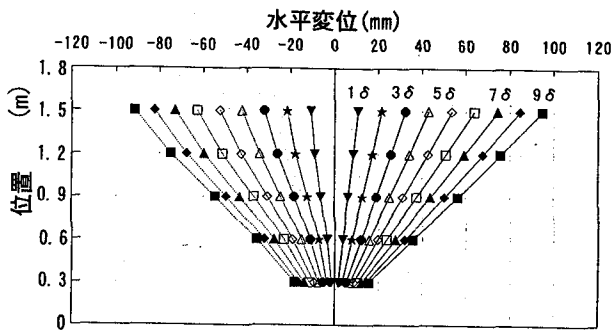


図-8 杭体の水平変位分布 (ケース1)

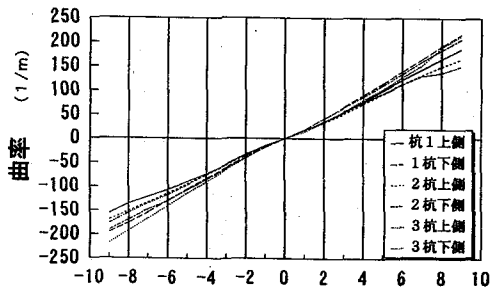


図-9 杭体の曲率と水平変位との関係 (ケース1)

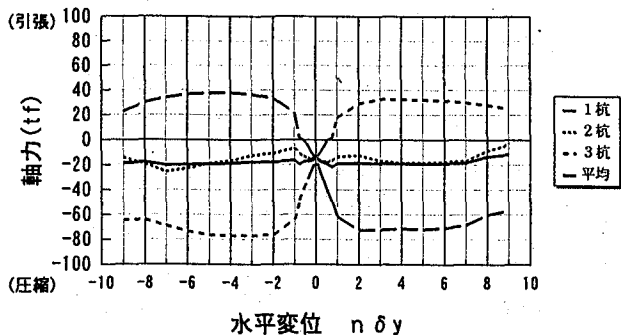


図-10 杭体の軸力と水平変位との関係 (ケース1)

ト部材において測定された曲げひずみの信頼性等を考慮し、この方法とした。したがって、図中の平均軸力が当初の14tf から20tf へ増加しており、本手法では引張力を小さめに評価しているといえる。図より、基礎全体の水平力が増加する 2δ までは圧縮杭で70tf 程度の圧縮力、引張杭で30tf 程度の引張り力に向けて変動しており、その後はほぼ一定の軸力となっている。

以上のことより、正側に載荷した場合の杭体の損傷メカニズムを図示すると図-11となる。フーチングに水平変位が生じると杭とフーチングの結合部付近において亀裂が生じ曲率が大きくなる。このため、各杭の上部ではc側に圧縮ひずみが生じ、a側に引張りひずみが生じる。杭の下側では逆となる。一方、杭の軸力としては杭①では大きな圧縮力が作用し、杭③では引抜き力が作用する。このため、各杭とも曲率は同程度であるが、鋼材の降伏は杭③上部のa側および下部のc側で最初に生じ、コンクリートのはくりはそれとは逆に杭①上部のc側および下部のa側で最初に生じる。なお、実験では正負交番載荷としており、損傷は左右対称に生じている。

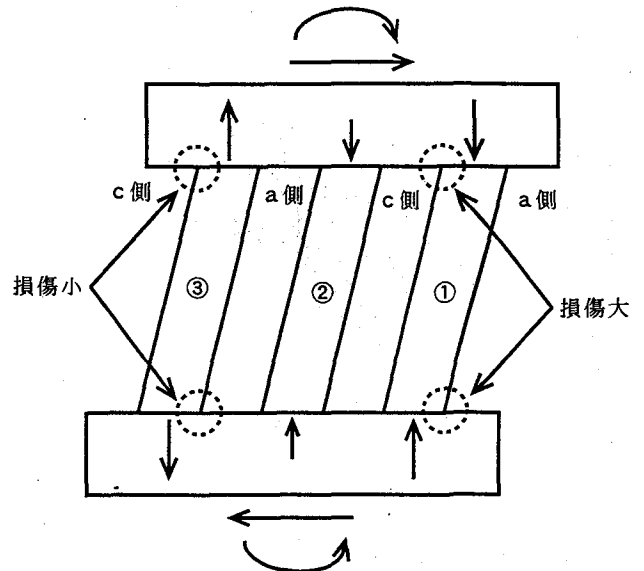


図-11 杭体の損傷メカニズム (正載荷時)

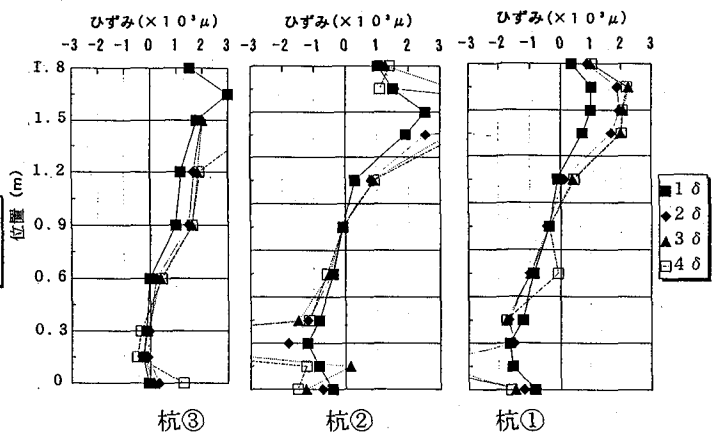


図-12 杭体のひずみ分布 (ケース1、a側)

以上の現象を確認するため、正載荷における杭体のa側面のひずみ分布を整理すると図-12が得られる。杭下端のひずみに着目すると、杭①では2,000 μ 程度の圧縮ひずみが生じているのに対し、杭③では圧縮ひずみは最大でも500 μ 程度であり、上記メカニズムを裏付けているといえる。

4.2 杭列数による影響

ケース1の実験の結果、載荷方向に3列配置した場所打ち杭では十分に変形性能があることが確認された。杭基礎、特に場所打ち杭の場合では載荷方向に2列となることも十分に考えられるため、ケース2について同様に正負交番水平載荷試験を行った。

水平荷重と水平変位の履歴曲線を図-13に示す。3列からなるケース1と同様、エネルギー吸収に優れた安定したループを描いており、2列杭においても十分な変形性能を有しているといえる。なお、記述は省略するが、損傷の進行状況は、4本杭も同様であった。

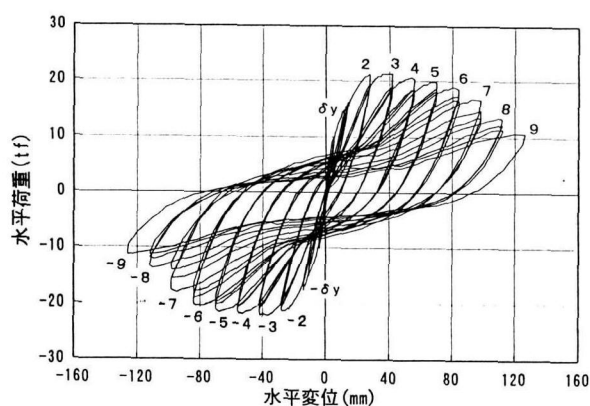


図-13 水平荷重～水平変位履歴曲線（ケース 2）

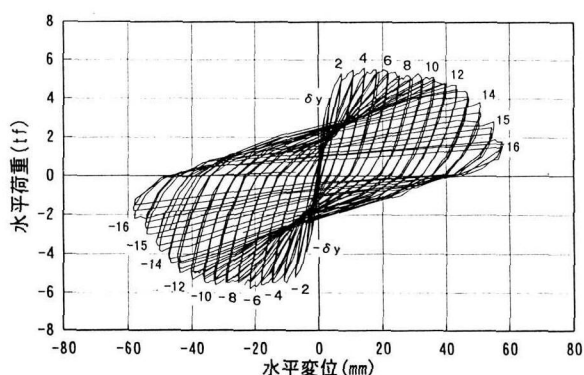


図-14 水平荷重～水平変位履歴曲線（単杭）

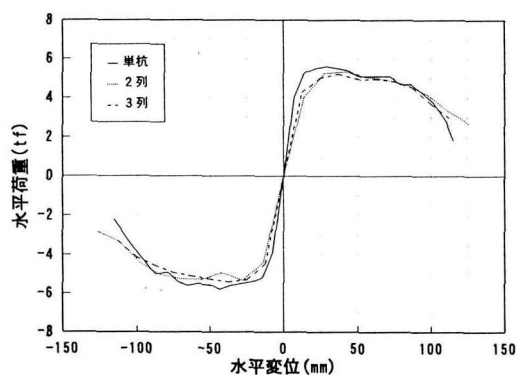


図-15 水平荷重～水平変位包絡線の比較

筆者らは、別途ケース 1, 2 と同じ諸元の杭を用いた単杭の正負交番水平荷重試験を行っており、その結果得られた水平荷重と水平変位の履歴曲線を図-14に示す。ここで、杭体の直径は組杭試験と同様30cm であり、使用材料および配筋諸元も組杭試験と同じである。また、杭の軸力も14tf と同じ値である。ただし、フーチングから荷点までの距離は90cm であり、杭上端は自由としている。図より単杭においても十分変形性能があるが、水平変位が50mm 付近を越えると急激に水平荷重が低下している。

各荷重試験により得られた水平荷重～水平変位履歴曲線の包絡線を比較すると、図-15となる。ここで、比較のため水平荷重は杭①本あたりに換算しており、また、

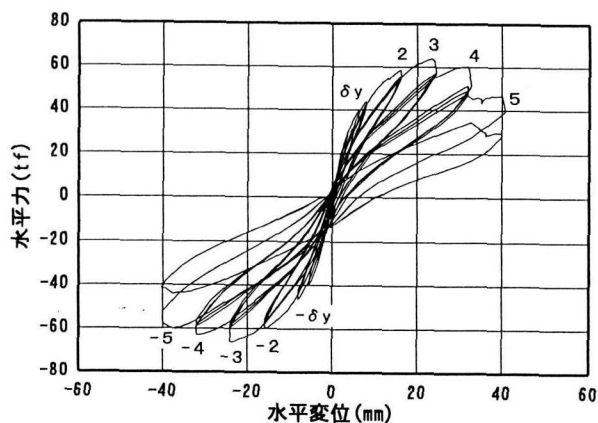


図-16 水平荷重～水平変位履歴曲線（ケース 3）

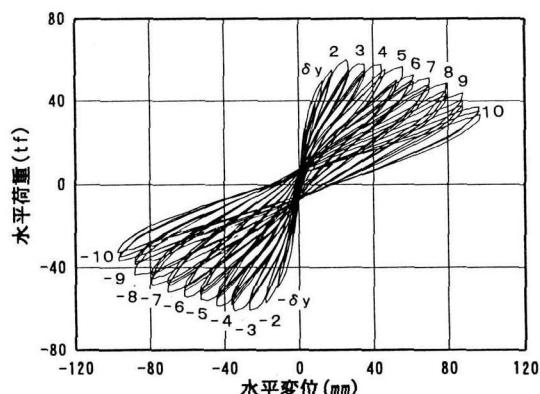


図-17 水平荷重～水平変位履歴曲線（ケース 4）

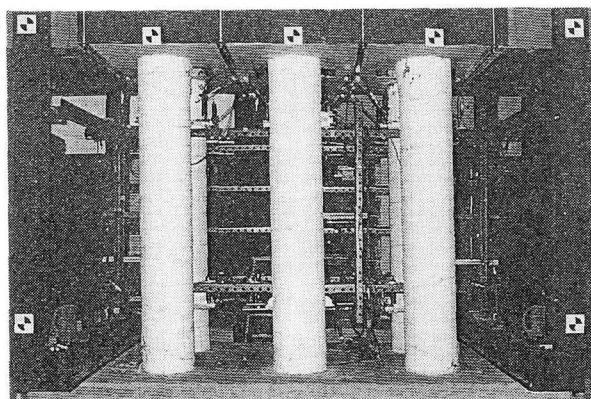


写真-2 杭体の損傷状況（ケース 4, $\pm 4 \delta_y$ ）

単杭ではフーチングから荷点までの距離が組杭の場合の1/2であったことから、水平変位を2倍して比較している。図より、気中実験においては杭列数による変形性能の差は特に認められなかった。

4.3 PHC杭の変形性能

(1) PHC JIS杭

PHC JIS 杭を用いたケース 3 における水平荷重と水平変位の履歴曲線を図-16に示す。杭体の損傷状況は次のとおりである。

事前解析により求めた降伏荷重44tf を荷重したときの水平変位 δ_y は8.0mm であった。3 δ_y で両端部の杭の

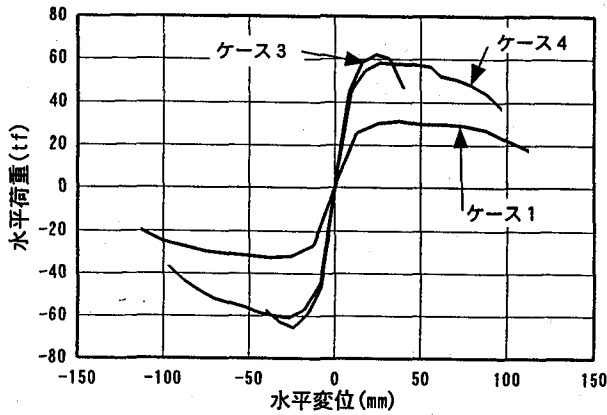


図-18 水平荷重～水平変位包絡線の比較

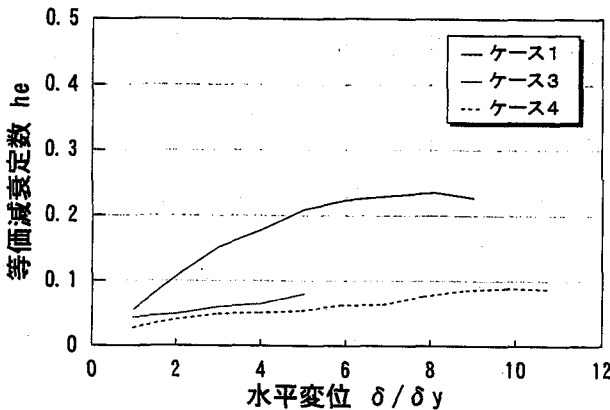


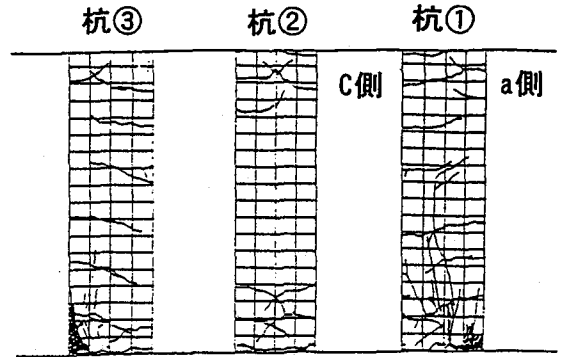
図-19 等価減衰定数の比較

下部でかぶりコンクリートに圧壊の兆候が現れ、繰返し載荷を行っているうちに両端部の杭下部のかぶりコンクリートが若干剥離した。3 δ_y が最大荷重である。-3 δ_y で杭③において縦方向にひび割れが発生した。4 δ_y で杭①にせん断ひび割れが発生し、繰返しによって徐々に進行していった。また、両端部の杭の上部および中央杭の下部のコンクリートが圧壊した。5 δ_y で杭①のせん断ひび割れが貫通し、耐力が急激に低下した。このとき、せん断ひび割れを横切る帯鉄筋は破断していることが確認された。繰返し載荷を行っているうちに、中央杭においてもせん断ひび割れが発生し帯鉄筋が破断した。

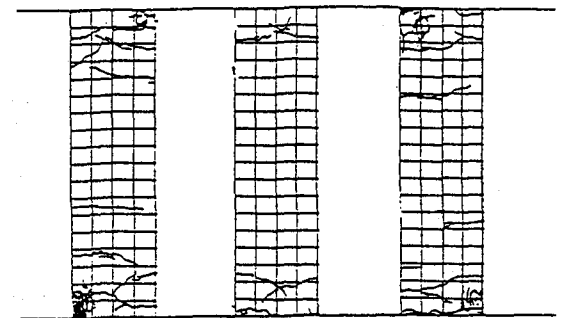
(2) PHC JIS強化杭

PHC JIS 強化杭を用いたケース4における水平荷重と水平変位の履歴曲線を図-17に示す。杭体の損傷状況は次のとおりである。

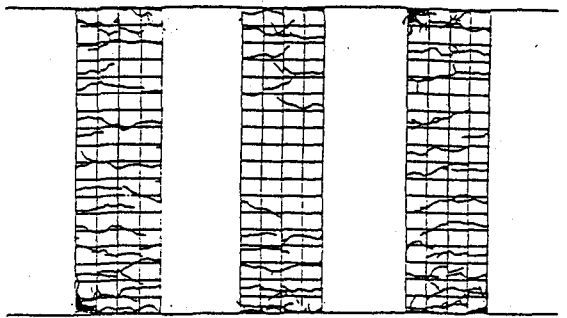
水平荷重が22tfに達したときに各杭の上下部にひび割れ発生が観察された。事前解析により求めた全杭の縁端の軸方向鋼材が降伏する水平荷重43.9tfに達したときの荷重載荷位置における水平変位8.8mmを降伏変位 δ_y とし、その後は δ_y の整数倍の変位でそれぞれ3回繰返し載荷を行った。3 δ_y で両端部の杭の下部でかぶりコンクリートに圧壊の兆候が現れ、繰返し載荷を行っているうちに両端部の杭の下部のかぶりコンクリートが若干



(a) ケース3 (PHC JIS 杭)



(b) ケース4 (PHC JIS 強化杭)



(c) ケース1 (場所打ち杭)

図-20 杭体の損傷状況展開図 ($\pm 4 \delta_y$)

剥離した。3 δ_y が最大荷重である。4 δ_y における杭体の損傷状況を写真-2に示す。4 δ_y になるとかぶりコンクリートの剥離が進展し、中央杭においても下部で圧壊がみられた。その後、変位の増加と共に剥離が進展し、7 δ_y で両端の杭の下部で軸方向鋼材が座屈した。さらに載荷を継続すると7 δ_y で両端の杭の下部で軸方向鋼材の破断に至るが、基礎全体の水平耐力の低下はそれほど急激ではない。

(3) 場所打ち杭との比較

各試験ケースにおける水平荷重～水平変位包絡線の比較を図-18に示す。ケース3のPHC JIS杭においては変形性能が小さいが、ケース4のようにスパイラル鉄筋を増加させることにより、場所打ち杭と同等の変形性を有することができることが確認された。

各試験ケースにおける等価減衰定数 h_e の比較を図-19に示す。ここで、等価減衰定数は、水平荷重～水平変

位履歴曲線の1サイクル当たりに失われる履歴吸収エネルギー ΔW と弾性エネルギー W より次式で計算した。

$$h_s = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (1)$$

ケース1の場所打ち杭では水平変位の増加にしたがって等価減衰定数は増加し、軸方向鉄筋の座屈が生じた $6\delta_y$ 以降はほぼ一定の値となっている。ケース3、ケース4のPHC杭でも水平変位の増加にともない等価減衰定数が増加するが、その値はケース1と比較して小さい値である。

水平変位 $4\delta_y$ における各ケースの杭体の損傷状況を図-20に示す。ケース3、ケース4のPHC杭では場所打ち杭に比して亀裂の本数が小さく、また、荷重除荷時の亀裂幅も小さくなっており、プレストレスト部材の特徴が現れている。

5. 結論

杭基礎の耐震設計法の確立のために、大地震時における杭基礎の設計法を提案するとともに、場所打ち杭基礎およびPHC杭基礎の変形性能に関する正負交番水平載荷試験を行った。その結果確認された事項は次のとおりである。

- ① 橋脚から伝達される荷重が支配的な条件下では、引抜側の杭で最初に杭体の鉄筋の応力度が降伏点に達するが、その後、その部分での損傷は大きくは進展しない。
- ② 各杭のフーチングとの結合部付近の曲率は同程度であるが、杭位置により杭体の軸力が異なるため、損傷の状況も大きく異なる。
- ③ かぶりコンクリートの圧壊および剥離は、圧縮ひずみが卓越する圧縮側の杭で発生し、変形の進行により軸方向鉄筋が座屈し、水平荷重が低下する。ただし、組杭基礎においてはその低下は急激なものではない。
- ④ 気中での場所打ち杭を模した組杭モデルの載荷試験では、杭列数による変形性能への影響は確認されず、いずれも十分に大きな変形性能を有していることが確認された。
- ⑤ PHC組杭の載荷試験の結果、従来用いていたJIS杭ではせん断破壊により急激に水平荷重が低下したが、杭体にスパイラル鉄筋を補強して配置することにより場所打ち杭と同程度の変形性能を確保することができた。
- ⑥ 場所打ち杭およびスパイラル筋を配置したJIS強化

杭では、一部の杭においてかぶりコンクリートが剥離しても直ちに基礎全体の耐力が低下するわけではなく、その後もある程度水平耐力を保持し、全ての杭で損傷が進展した後耐力が低下する。また、全ての杭で杭体の一部の鉄筋の応力度が降伏点に達する変位を降伏変位 δ_y とすると、 $4\delta_y$ では局所的なかぶりコンクリートの剥離は生じるものの基礎全体としての損傷はきわめて軽微である。

なお、本研究は道路橋示方書改訂作業の一貫として行ったものであり、試験計画やその評価においては日本道路協会下部構造小委員会ならびに震災対策特別分科会のご指導をいただいた。また、試験の実施に際しては鹿島建設技術研究所の方々にご助言をいただいたことを記して謝辞と致します。

参考文献

- 1) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書，1995. 12.
- 2) 建設省：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に関する仕様，1995. 2.
- 3) 例えば、藤原稔、岡原美知夫、中谷昌一、木村嘉富、高木繁：水平載荷試験による杭基礎の保有水平耐力、UJNR 耐風・耐震構造専門部会第24回合同部会、土木研究所資料第3162号、1993. 3.
- 4) 岡原美知夫、高木章二、中谷昌一、木村嘉富：単杭の支持力と柱状体基礎の設計法に関する研究、土木研究所資料第2919号，1991.
- 5) 木村嘉富、龍田昌毅、春日正巳：大変形時における杭の水平抵抗の非線形性の評価、基礎構造物の限界状態設計法に関するシンポジウム発表論文集，1995. 5.
- 6) 岡原美知夫、木村嘉富、高木繁、大堀裕康：群杭の水平載荷試験およびシミュレーション解析、構造工学論文集 Vol. 39A，1993. 3.
- 7) 例えば、阪神高速道路公団：岸和田旧港実杭水平載荷試験 実験報告書，1994.
- 8) 中野正則、木村嘉富、松井謙二、友永則雄：杭基礎の耐震設計法の検討、橋梁と基礎 Vol. 30, No. 8，1996. 8.
- 9) 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に関する仕様」の準用に関する参考資料（案），1995. 6.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，1994. 2.

(1997年9月26日受付)