

# 構造物基礎の被害を考える

京都大学大学院工学研究科 土木システム工学専攻

助教授 木村 亮

『群杭基礎の水平耐力とその破壊メカニズムの解明』を目的として、筆者は平成4年度に資料-1に示すような現場水平載荷試験を実施した。実験結果をまな板の上に乗せて、地盤の杭の相互作用をいかに評価し、簡便な非線形の解析法を作るかを議論していた。2000年（平成12年）ごろに改訂する道路橋示方書の基礎的データを与えるためである。震災前は現状の許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行すべく、各種期間で精力的に研究が行われたと言っても過言ではない。

そこに兵庫県南部地震が発生した。基礎構造物の被害は、上部構造物と比較して直接目に見えないため、場所を特定した具体的な被害状況は現在でもベールに包まれている。本報告では、著者の私見（土木学会誌3月号、震災フォーラムNo.6『基礎構造』に投稿）と震災後の研究の対応について簡単に示す。

## 被災した杭基礎を見て考えたこと

朝日新聞の夕刊第一面に「阪神高速地中杭にも亀裂」とショッキングに伝えられたのは、昨年3月10日である。地震後各機関で、掘削による目視、非破壊試験、ボアホールテレビによる観察等々の手法を用い、杭の損傷は確認されている。もちろん無被害の杭も多い。杭基礎に対して、私見を述べてみたい。

杭は杭種や施工法によって、支持力特性が大きく変わる構造物である。場所打ちコンクリート杭の場合、杭頭に静的な水平力が作用すれば、杭径の1%程度の杭頭変位量で、RC構造物の特性として引張り側にクラックが生じる。クラックの幅、本数、方向を考慮して、被災後の杭基礎の水平耐力を推定する方法は難しいが、鉄筋が降伏点を越えていると、不安な杭基礎といえよう。鉄筋の腐食を防ぐために注入を行うだけですむ場合、地盤改良や増し杭が必要な場合の境界はどこにあり、根拠は何なのか、解決しなければならない問題である。被災の確認はボアホールテレビによる観察が有効といわれているが、いっそのこと重要構造物のフーチングと杭には、施工時に何本かの中心にあらかじめ穴を開けておくほうがよい。

静的な群杭の水平終局耐力をいかに算定するか、破壊メカニズムはどのようになるか

等は、地震前の重要研究課題であった。杭基礎にも限界状態設計法を導入しようという動きから発生したものである。一般に、単杭と群杭の変形・支持力特性は根本的に別物であり、使用限界・終局限界等の定義をも含めて再考する必要がある。ただ、杭径に対する変位量で杭の損傷度は決まり、杭径の小さい杭ほど終局耐力に至る絶対変位量は小さい。小径杭が「折れ」ても、大径杭は同じ状態ではない。また、鋼管杭はどのくらいの変形量で座屈するのか、全くしないのか、興味深い問題である。

動かないと思ったものが動く大変なことになる。護岸近傍の基礎は、護岸の動きによって側方流動を受け被害が拡大した。設計上動いては困る構造物近傍に、新たに構造物を作る場合、なんらかの対処を既存の構造物にできなかったのであろうか。事業者が別なら「縦割り・・・」で困難なのか。今後は、同時に計画が決まっても、後に計画されたものであっても、何らかの方策ができる体制を作るべきである。

「他のところではどのように復旧するのかよくわからないし、知りたい」という言葉をよく耳にした。各事業者はそれぞれの考えで、ベストの復旧手法を模索された。ベストと考えた方法もいろいろ集めてみると、見劣りや不経済性が顔をだす。税金を使うかぎり後で比較される。確立した手法が皆無の状況で、混乱の中大変な努力が注がれた。後で比べるのは簡単だが、それなりの配慮があってしかるべきだろう。

不運にも落橋した部分を通り中のトラックが、橋脚に付けたタイヤの痕を見た。動的な問題として水平力を受ける群杭の挙動をどこまで解明できるか。黒いタイヤ痕を常に思い出しながら、問題を整理し、解決のため私は邁進しようと思う。

## 基礎構造物の解明すべき問題点

今回の震災で以下のようなテーマが構造物基礎に対して提示されているように思う。各テーマそう簡単に解決できるものではない。

1. 上部構造物と基礎構造物の組み合わせと耐震性能の差異
2. 地盤の液状化および側方流動と構造物基礎の被害とそのメカニズム
3. 被災しなかった構造物に関する要因の分析
4. 地震時に側方流動圧を受ける構造物基礎の設計法
5. 地盤と構造物の相対変位の発生メカニズムおよび相対変位吸収方法
6. 構造物基礎の損傷状況の診断方法と評価方法
7. 構造物基礎の損傷の復旧方法ならびに今後の対策工法
8. 上部構造物と基礎構造物が一体となった設計思想
9. 既設構造物基礎の耐震診断手法

## 震災後の研究

震災後、どのような研究を行っているかを、2例ほど簡単に紹介したい。

### 1) 繰返し水平荷重を受けた場所打ち杭の終局挙動

場所打ち杭にクラックが入った場合には、クラックの幅、本数、位置、方向を考慮して、被災後の杭基礎の水平耐力を推定する必要がある。一般に、鉄筋の降伏点を越えた杭は、支持力に対し信頼性が低くなるが、鉄筋の腐食を防ぐために注入を行うだけですむ場合、地盤改良や増し杭が必要な場合の境界はどこにあり、根拠は何なのか、早急に解決しなければならない問題である。

そこで、場所打ちコンクリート杭を想定したピアノ線モルタル模型杭に、遠心力場で静的な繰返し水平荷重を与え、直列2本群杭の水平耐力を求めた。損傷度合いを変化させるために、繰返し載荷幅をパラメータとし、載荷幅と水平耐力および終局状態の関係を調べた。

Fig.1に実験装置を示す。モーターを順回転・逆回転することと、モノキャリアで繰返し載荷を行う。杭頭はフーチングによる固定とし、杭中心間隔は杭径の2.5倍である。

模型杭は、ピアノ線10本(主鉄筋)と真鍮製のリング10個(帯鉄筋)で組立てた鉄筋かごに、モルタルを充填して作成した長さ46 cm、杭直径  $d = 2.4$  cmのミニチュアコンクリート杭である(文献：第30回土質工学研究発表会, pp.1495-1498, 1995)。杭の諸元をTable 1に示す。

地盤材料には乾燥した豊浦標準砂を用い、ホッパーによる気中落下法で相対密度が約90%の密な地盤を作成した。載荷方法は変位制御で行い、載荷速度は5.8 mm/minである。繰返し数は3回で繰返した後に杭径の100%まで変位させた。

以下の遠心載荷実験結果はプロトタイプ換算して示す。また、水平変位は杭径  $d$  で規準化して示す。まず始めに、一方向載荷実験の荷重～変位関係(直列2本群杭)と以前に実施した直列3本群杭の破壊メカニズムを、それぞれFig.2, Fig.3に示す。

図は省略するが、Fig.2を両対数表示すると折れ点が22%で見られ、引張り側の鉄筋が降伏状態になる。そこで、本実験では簡単のため繰返し幅を10%、20%、30%、40%と決定した。

20%、40%で繰返し時の荷重～変位関係をFig.4に示す。20%では各サイクルで荷重に変化は少なく、40%では1サイクル目から2サイクル目にかけて大きく荷重は低下することがわかる。

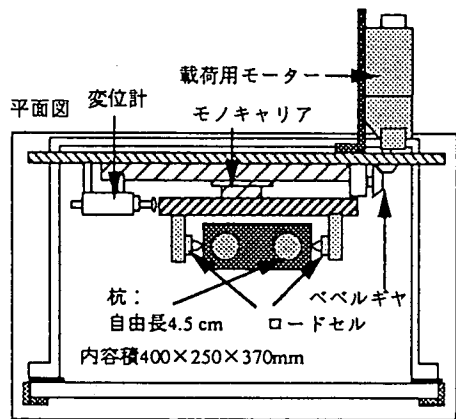


Fig.1 実験装置

Table 1 杭の諸元

	直径	長さ	EI (kgfcm <sup>2</sup> )	遠心
想定コンクリート杭	1.2m	29m	$3.17 \times 10^{12}$	
プロトタイプ換算	1.2m	22.5m	$9.04 \times 10^{11}$	50g
モルタル製模型杭	2.4cm	46cm	$14.46 \times 10^4$	

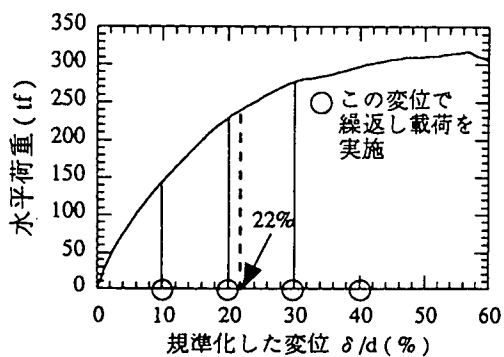


Fig.2 一方方向載荷の荷重～変位関係と繰返し幅

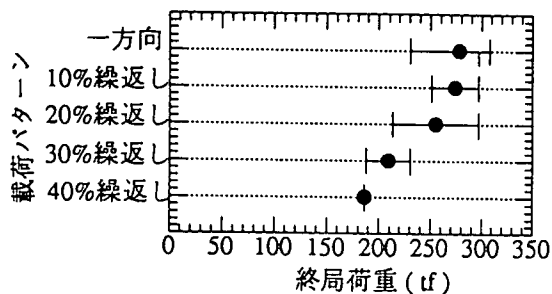


Fig.7 繰返し幅と水平耐力の関係 ( $\delta/d = 40\%$ )

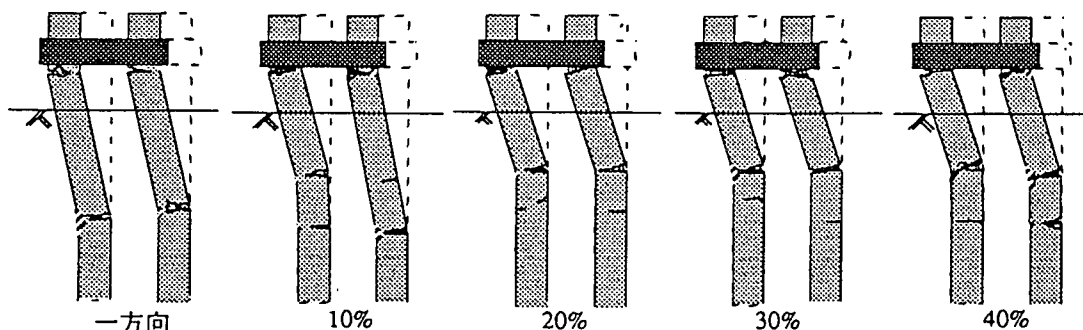


Fig.6 模型杭のスケッチ ( $\delta/d = 100\%$ )

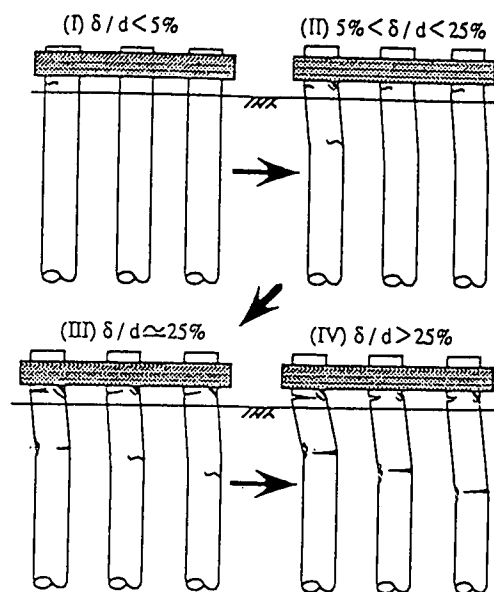


Fig.3 杭体の破壊メカニズム (直列3本杭)

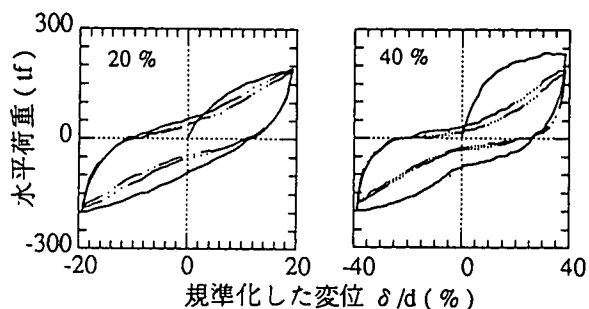


Fig.4 繰返し時の荷重～変位関係

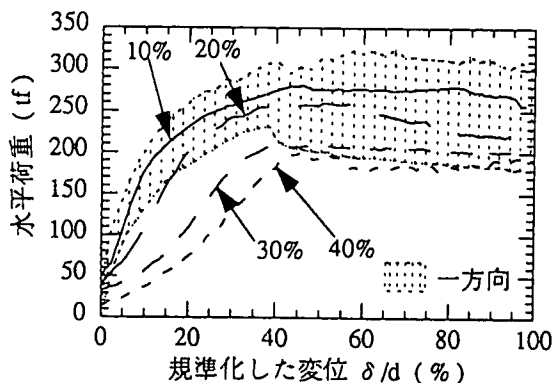


Fig.5 繰返し後の荷重～変位関係

Fig.5は繰返し後の荷重～変位関係である。数回実施した一方向載荷実験結果にはばらつきが見られたので、ここでは幅をもって示す。10%、20%では一方向載荷時の平均的な挙動を示すが、30%、40%ではその下限値をとる。また、載荷実験終了後の模型杭のスケッチをFig.6に示すが、繰返し幅が大きくなるにつれ、杭の終局限界状態での損傷度が大きくなる傾向が観察できる。

Fig.7は各繰返し幅での水平耐力の値を比較したもので、横のラインは数回実施した実験値の分布、黒丸は平均値を示す。水平耐力の定義は種々考えられるが、ここでは変位が40%での荷重を水平耐力としている。一方向、10%、20%ではほぼ同じ、30%、40%ではそれより低下する傾向が見られる。

本実験より、場所打ち杭に鉄筋が降伏する程度の損傷が与えられると、水平耐力がある程度低下することがわかった。今後はこの傾向を定量的に評価するため、さらなる実験結果を蓄積する必要がある。さらに、繰返し載荷終了後の損傷状態を把握し、最終的には実杭の終局耐力を診断できるよう、研究を進めていく予定である。

## 2) 鋼管群杭基礎の終局水平耐力に関する模型実験

阪神大震災を契機に、橋梁基礎の耐震設計の見直しが行われている。この見直しではこれまでの震度法による設計に加え、橋梁基礎が橋梁躯体の地震時水平耐力と同等もしくはそれ以上の耐力と十分な変形性能を有することを照査することが必要となる見込みである。しかしながら、橋梁基礎のような群杭状態の基礎の軸力作用化における水平載荷時の挙動と終局状態に関しての実験は少ない。このため、鋼管杭群杭の終局状態に至るまでの水平載荷時挙動と、中詰コンクリートによる靱性向上効果を把握する目的で模型実験を実施した。

鋼管杭は $\phi$  216.3mm, t 4.5mm, STK400構造用鋼管によりモデル化した。試験体はFig.8に示すように上下コンクリートのフーチングを有し4本の鋼管杭モデルで支える鋼管群杭構造である。試験体はTable 2に示す4種類であり、鋼管杭モデル両端部への中詰コンクリートの長さ(全長, 1D, 3D, 中詰無: Dは鋼管径)をパラメータとした。

試験体、試験装置のセットアップをFig.9に示す。センターホール型ジャッキとSEEEケーブルにより一定軸力60 tを保持し、両動ジャッキにより水平力を加えた。

載荷に先立ち鋼管の縁応力が降伏を始める変位量 $\delta y$ (=約5mm)を算定し、この変位量 $\delta y$ を基準に、 $\pm 1\delta y$ ,  $\pm 2\delta y$ ,  $\pm 3\delta y$ ,  $\pm 5\delta y$ ,  $\pm 8\delta y$ ,  $\pm 10\delta y$ ,  $\pm 15\delta y$ を最大変位量とするサイクルで各サイクル3回の変位制御の正負繰返し載荷を行った。 $\pm 15\delta y$

の終了後、正方向に一方向終局載荷を試みた。

水平荷重と上フーチングの水平変位の関係をFig.10に示す。中詰無試験体は、水平変位量 $8\delta y$  (= 約40 mm) で最大荷重を迎え、以降は次第に耐力が低下していく。1D中詰試験体も水平変位量 $8\delta y$  (= 約40 mm) で最大荷重を迎え、以降若干の負勾配となるものの、杭径以上の変位 (= 約250 mm) でもわずかな耐力の低下で追従している。3D中詰試験体は水平変位量 $8\delta y$  (= 約40 mm) 以降も耐力の低下はわずかである。全長中詰試験体は、載荷が片振りとなった影響もあるものの、水平変位量 $15\delta y$  (= 約75 mm) でも耐力の漸増が見られ、杭径以上の変位 (= 約250 mm) でも水平耐力の低下は見られない。

以上の結果より、杭頭1Dの中詰コンクリートを施工すれば大変形時においても水平耐力の低下は少なく、鋼管杭基礎全体の靱性を向上させる効果があることが判明した。また、軸力下の鋼管杭の群杭基礎においては全ての鋼管杭の端部が圧縮座屈を始めるまで最大水平耐力は低下せず、さらに全ての鋼管杭の端部が圧縮座屈した後も急激な水平耐力の低下はないことがわかった。

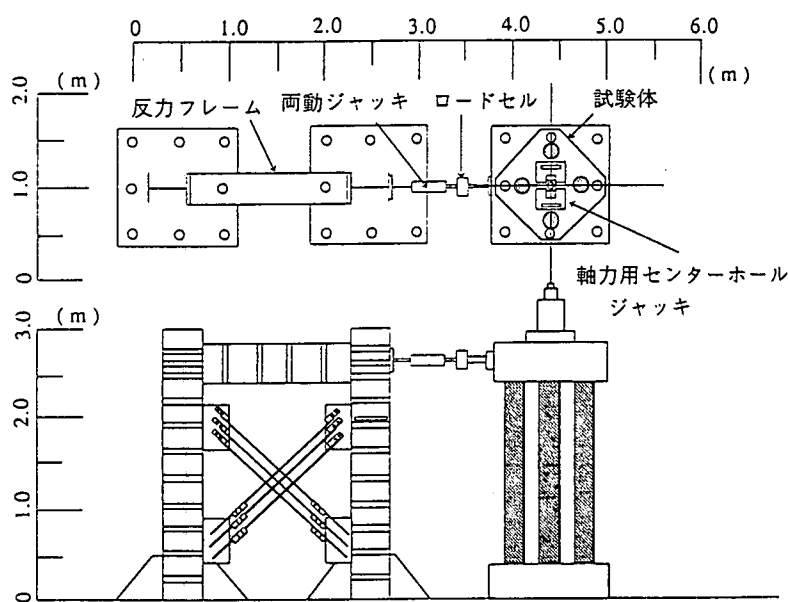


Fig.8 試験装置のセットアップ

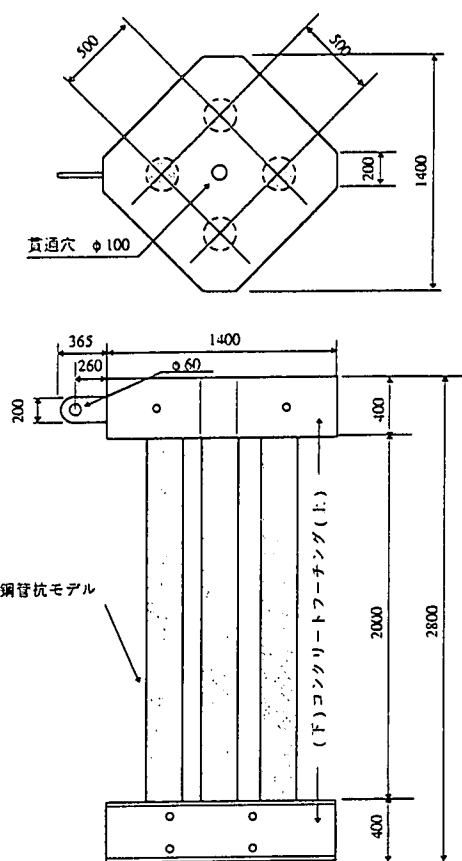
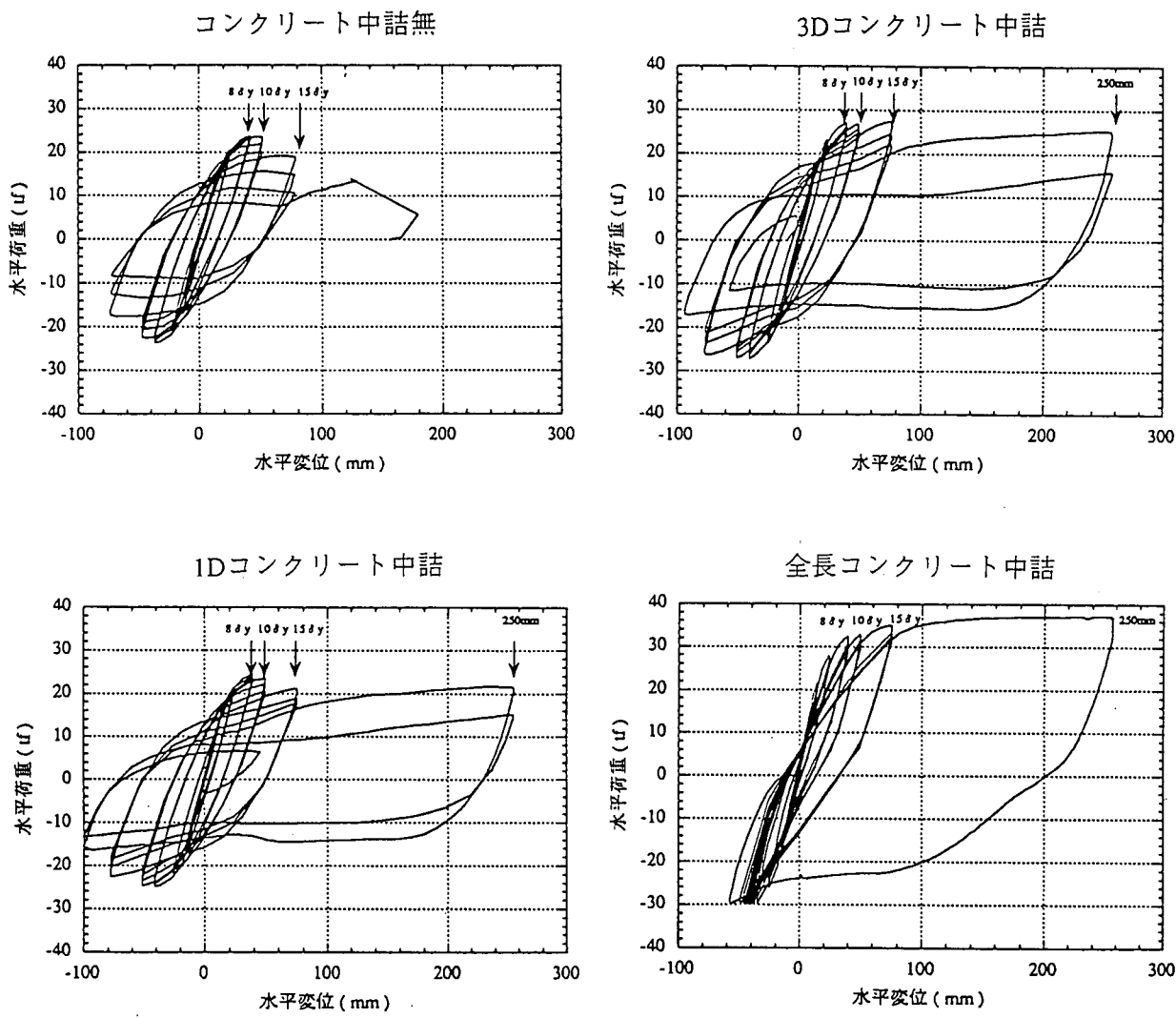


Fig.7 試験体の概要

Table 2 試験体の種類と特徴

NO	試験体種類	試験体の特徴	数量
1	中詰無試験体	コンクリート中詰無	1体
2	全長中詰試験体	全長コンクリート中詰	1体
3	杭頭中詰試験体 a	杭頭・先端部1Dコンクリート中詰	1体
4	杭頭中詰試験体 b	杭頭・先端部3Dコンクリート中詰	1体



全実験の包絡線

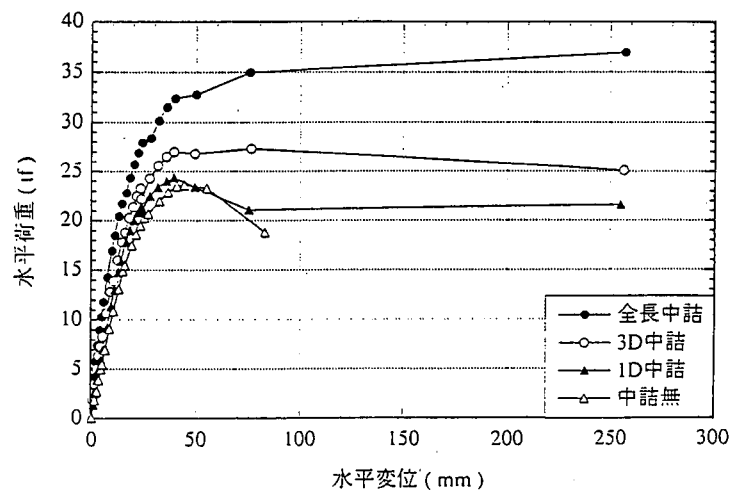


Fig.9 水平荷重と水平変位

# 場所打ち杭を用いた群杭の大変形水平載荷試験

## Large Lateral Displacement Experimental Studies of Grouped Cast-in place Piles

幸左賢二 (こうさ けんじ)

阪神高速道路公団 公務部設計課

森田悠紀雄 (もりた ゆきお)

基礎地盤コンサルタンツ関西支社 支社長

木村亮 (きむら まこと)

京都大学工学部交通土木工学科

伊藤恭平 (いとう きょうへい)

㈱建設技術研究所 大阪支社

### 1. はじめに

構造物の設計に「限界状態設計法」を導入するに当たって、実構造物に大変形を生じさせたときに杭などがどのような挙動を示すかを知ることが必要である。

筆者らは、ベント工法で打設された9本の場所打ち杭(φ1200mm)基礎フーチングを、杭径の35%に相当する大変位を生じさせる水平載荷試験を実施したので、測定結果の概要を報告する。

### 2. 実験の概要<sup>1)</sup>

実験場所はおよそ3年前に埋立てられた大阪府岸和田港の若齢埋立地である。図-1は実験場所の地盤調査データである。表層を構成する埋立地は約13mの層厚を有し、最大礫径が30cm程度の巨礫を含む砂礫埋立層である。それ以深は砂質土と粘性土の互層である洪積地盤(測定N値は5~30程度)が35m以深まで堆積しており、基礎杭は深度31.4m付近に打ち止めされている。

杭の水平抵抗力に大きく影響を及ぼす表層埋立層での測定N値は3~20(4箇所で調査)の範囲にあり、礫打ちによる過大影響を考えると、極めてルーズな砂礫層である。メナールプレシオメーターを用いて測定した変形係数は $E_s \approx 10 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

大変形水平載荷試験は単杭ならびに9本群杭について

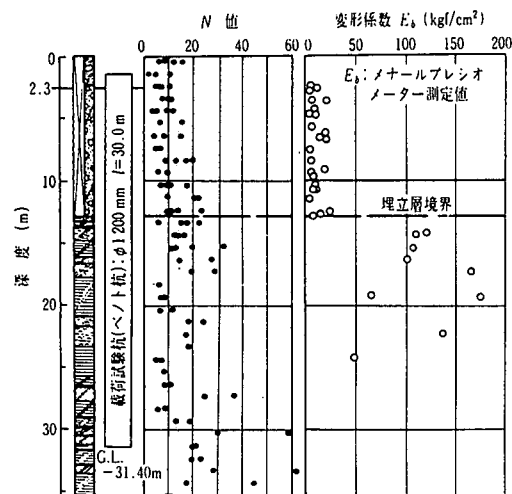


図-1 地盤調査データ

表-1 試験杭の諸元

コンクリート	設計基準強度 呼び強度	$\sigma_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_{tk} = 300 \text{ kgf/cm}^2$
鉄筋	規格 規格降伏点	DS345 $\sigma_{sv} = 3500 \text{ kgf/cm}^2$
軸方向鉄筋 配置	杭頭部	D29-24本
	鉄筋変化部以深	D22-12本

実施しており、その杭配置は図-2、杭体の諸元は表-1である。群杭試験体フーチングの大きさは $9.0 \times 9.0 \times 2.3$ (厚さ)mである。群杭試験を実施するに当たっては、フーチング前面土の抵抗を除くために、試験体の前方約10m、両側5mの範囲はフーチング底面深度(2.3m)まで排土して、試験地盤面がフーチング底面と一致するようにした。

実施した計測項目は表-2である。

### 3. 群杭の水平載荷試験測定結果<sup>2)</sup>

#### 3.1 試験体の変位測定結果

水平力は隣接するフーチングを反力に、6台の油圧ジャッキを用いて、片方向多サイクル方式でフーチング底面から90cm上方の位置にて載荷した。

一定荷重の保持時間は原則として15分間とし、載荷可能な限界荷重まで載荷することを試み、9サイクル目で2050tfまでの計測データを得ることができた。

試験体前面中央部(底面から20cmの位置)での水平変位測定結果と載荷重との関係は図-3である。また、多段傾斜計を用いて測定した中央列の杭体ならびに前方地盤(前列杭から2D, 5D地点)の水平変位深度分布は図-4である。変位の深度分布を見ると、埋立層下深限

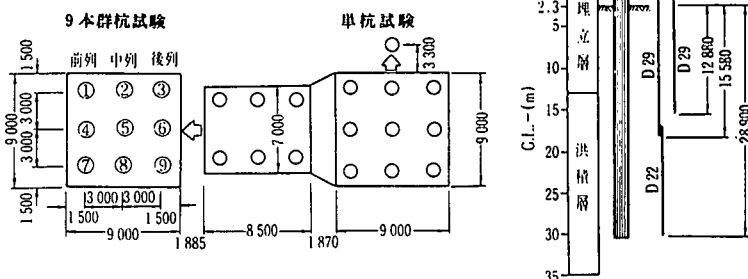


図-2 試験杭(群杭)の配置



表-2 計測項目

計測項目	使用計器類
① 載荷重の大きさ	ジャッキ油圧 (油圧圧力計)
	デジタルひずみ測定器
② 杭頭水平変位	接触型変位計
③ 試験杭フーチング変位 (H, V)	接触型変位計
	ワイヤー式変位計
④ 反力杭フーチング変位 (H, V)	接触型変位計
⑤ 試験杭周辺地表面地盤変位	接触型変位計
	写真撮影による測定
⑥ 背後地盤地中変位	固定式多段傾斜計
	パイプひずみ計
⑦ 試験杭地中部変位	固定式多段傾斜計
⑧ 杭頭作用せん断力	コンクリートひずみ計
⑨ 杭体曲げ応力	杭主鉄筋 鉄筋計
⑩ 組杭荷重分担率	フーチング鉄筋計
⑪ 温度測定 (外気)	温度計
⑫ 温度測定 (基準梁)	温度計

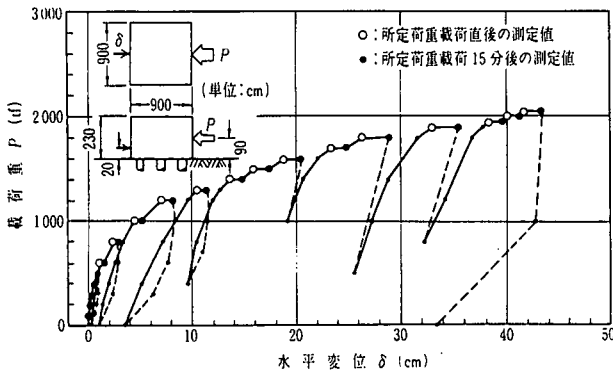


図-3 載荷重と水平変位関係

付近から水平変位の生じていることが分かる。

図-5~6は接触型変位計で測定したフーチングの回転変位測定結果である。水平力を受けたフーチングは浮き上がりつつ回転を生じたことを示している。

3.2 杭体の軸方向鉄筋ひずみ測定結果

図-7は杭体の軸方向鉄筋ひずみ測定結果のうち、載荷重が500tf~2000tfの15分間載荷後測定値(500tfピッチ)深度分布である。同図から、以下の指摘ができる。

- ① 地中部での最大ひずみ発生深度は載荷重の大きさによって変化せずに深度8m付近で発生し、 $\epsilon_{MAX} \approx 2200\mu$ に達した。一方、杭頭部付近では杭

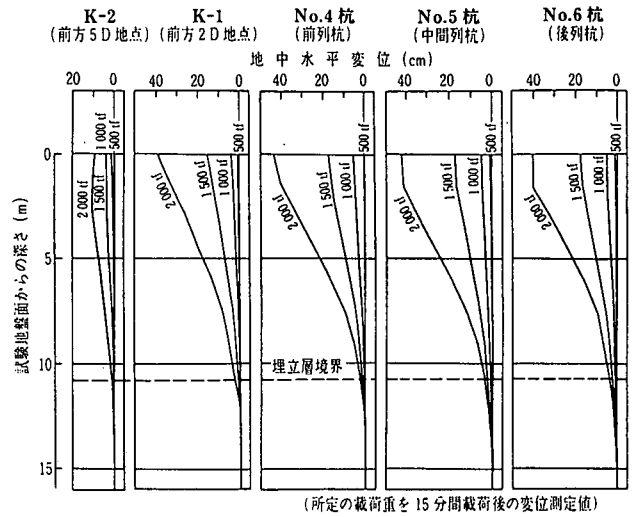


図-4 地中内変位分布

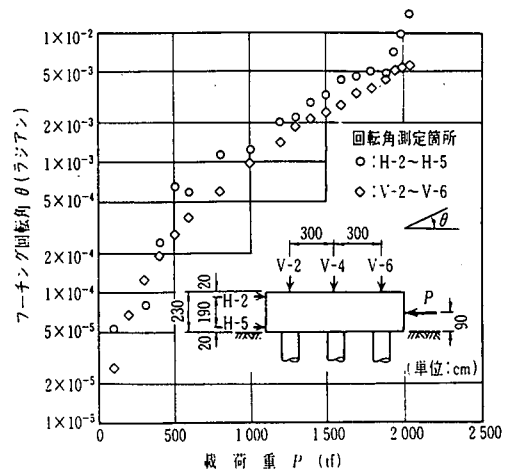


図-5 載荷重~フーチング回転角の関係

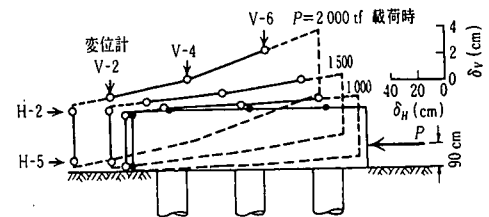
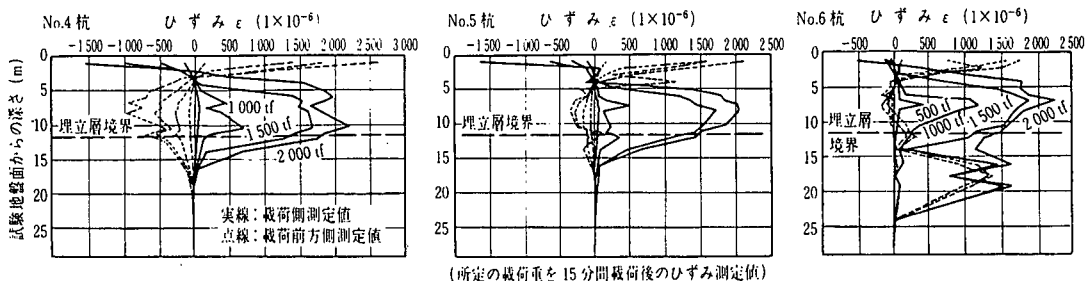


図-6 フーチングの変位挙動

- 頭拘束の影響を受けて大きな曲げひずみが生じ、 $\epsilon_{MAX} \approx 2600\mu$ に達した。
- ② 測定ひずみの増加は、引張り側 (+側) では不連続となっている。これは杭体コンクリートが部分的にひび割れを生じたためであると考えられる。



(所定の載荷重を15分間載荷後のひずみ測定値)

図-7 杭体の軸方向鉄筋ひずみ分布

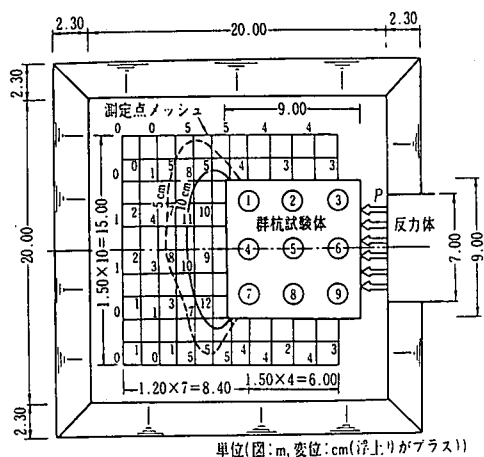


図-8 除荷後測定地表面鉛直変位分布

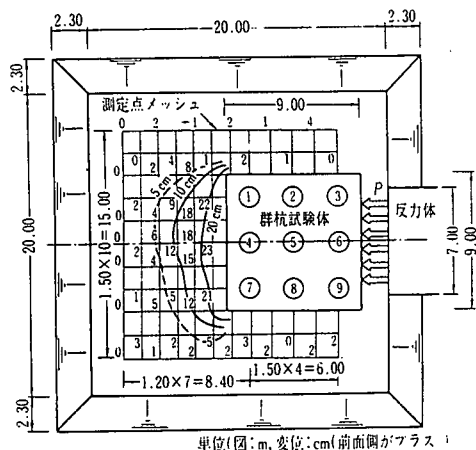


図-9 除荷後測定地表面水平変位分布

③ 前列杭と後列杭ではひずみの分布形状が大きく異なっている。前列杭では1000tfから引張り軸力が顕著に作用していることを示しており、それは深度24mまで及んでいる。

3.3 地盤地表面の変位分布と杭頭部の観察結果

図-8～9は載荷試験終了直後に測定した試験体周辺地盤地表面の鉛直ならびに水平変位測定値である。除荷したことによって多少は発生変位が戻っていることはあるが、一部の地点で載荷中に接触型変位計を用いて測定した測定値と大差はなく、最大荷重(2050tf)載荷時の地表面変位分布と考えると良い。測定結果が示すように、地表面変位は前列杭から前方6D(約7m)の範囲まで生じているが、明りょうな滑り面は確認できず、試験体の前面では約10cmの隆起を測定した。

載荷終了後に杭頭部付近を側面から掘削して観察したところ、杭頭部には曲げ応力に起因する水平クラックの発生が確認できた(図-10)。

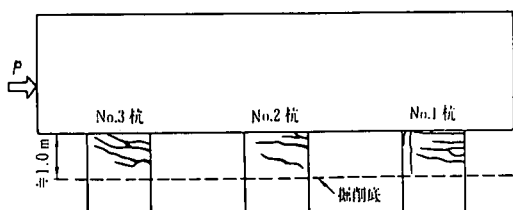


図-10 杭頭部のひび割れ状況

4. 群杭の荷重分担<sup>3)</sup>

杭の各深度で実測した一対の鉄筋ひずみ(図-7)から各深度の曲げモーメントを算定した。この算定に当たっては、コンクリートならびに鉄筋の非線形応力～ひずみ関係を考慮した。

つぎに、曲げモーメントの深度分布を三次スプライン関数で補間した後、微分操作によって杭頭近傍での作用せん断力を算定した。算定結果は図-11である。

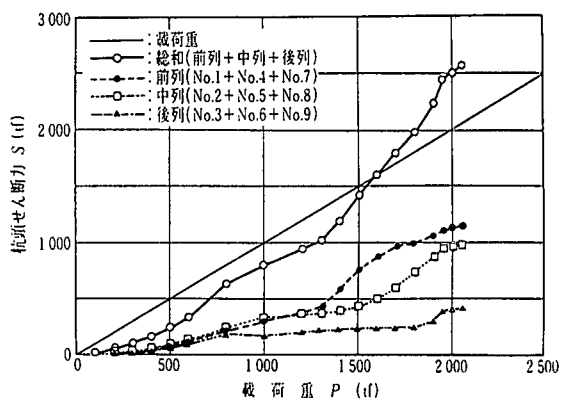


図-11 各杭列の水平荷重分担

算定した杭頭せん断力の総和は載荷重と一致していない。考えられる原因は、測定精度のほかに、フーチング底面での地盤との摩擦抵抗があげられる。

さらに検証すべき問題点を残してはいるが、図-11から読み取れる各杭の水平載荷重分担は、800tf付近までは各杭が一致した荷重分担をしており、その後は、徐々に前列杭の分担が大きくなっていることが分かる。およその分担比を読取ると、前列:中列:後列の比は1200tfでは1.2:1.2:0.6、2000tfでは1.3:1.2:0.5である。

5. おわりに

ここに報告した載荷試験では、フーチングの主鉄筋ひずみ、杭頭コンクリートひずみなども測定しており、現在、これらの計測データを総合的に分析して、「限界状態設計法」を実施に供する解析・評価を進めている。詳細な分析結果は改めて報告したい。

この載荷試験の実施に当たっては、阪神高速道路管理技術センターが主催する「杭の水平抵抗に関する調査研究会(主査:木村 亮)」の委員から指導を受けた。

参考文献

- 1) 石井・前川・村田・米村・溝口:実杭を用いた単杭の大変形水平載荷試験, 第29回土質工学研究発表会, pp.1591~1594, 1994.
- 2) 坂本・林・森田・笹尾・友永:実杭を用いた9本群杭の大変形水平載荷試験, 第29回土質工学研究発表会, pp.1603~1606, 1994.
- 3) 幸左・木村・木村・伊藤:実杭を用いた大変形水平載荷試験の考察, 第29回土質工学研究発表会, pp.1595~1598, 1994.

(原稿受理 1994.11.28)