

# 大型せん断土槽を用いた杭基礎と地盤の動的相互作用に関する実験的検討

王 海波<sup>1</sup>・室野 剛隆<sup>2</sup>・西村 昭彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士 (工学) (財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都分寺市光町 2-8-38)

(現在: 中国水利水電科学研究院耐震研究センター (中国北京市車公庄西路 20 号))

<sup>2</sup>正会員 博士 (工学) (財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都分寺市光町 2-8-38)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都分寺市光町 2-8-38)

杭基礎の耐震設計には、杭体と地盤の動的相互作用の評価は不可欠である。本研究では、大型せん断土槽を用いて実物大鋼管杭の振動台実験の実施により、大地震の際の軟弱地盤中の杭基礎の挙動と杭基礎—地盤の動的相互作用について検討した。強い動的荷重を受けた地盤と杭基礎の  $p\sim y$  関係の考察から、地震動の振動数範囲においては地盤反力の弾性係数は振動数の依存性が小さいこと、地盤反力の減衰力は振動数に依存しない非粘性減衰の特徴を持っていること、これらの係数は地盤振動レベルまたは杭の深さ方向によって変化することなどが明らかになった。さらに、上部構造物の慣性力が大きな場合、地表近傍において前杭と後杭の地盤反力係数および極限地盤反力に差が生じることも分かった。さらに、自立性のある緩い地盤では地盤と杭の間に隙間が生じることが確認された。

*Key Words: pile foundation, dynamic interaction, Winkler medium, shaking table test, laminar box*

## 1. はじめに

基礎の地震時挙動を把握するためには、杭基礎構造物と地盤間の動的相互作用の解明が不可欠である。近年の詳細な地盤調査法と数値解析技術の急速な進展に伴って、三次元弾塑性有限要素法で杭基礎を解析することが可能になって来<sup>1)2)</sup>が、一般的な耐震設計に用いられる方法は、杭を梁要素で、地盤をばね要素でそれぞれ評価した骨組みモデルによる方法<sup>3)4)</sup>である。これは、地盤を Winkler ばねに置き換えたものであり、地盤反力  $p$  は地盤と杭間との相対変位、静的な場合は杭のたわみ  $y$  の関数となる。この  $p\sim y$  関係を用いて杭基礎構造物と地盤間の動的相互作用を評価する。地盤は非線形性の強い材料であるため、 $p\sim y$  関係はその非線形性を忠実に反映できるものでなければならない。一般には、地震時慣性力に対して杭基礎の耐震設計を行うことが多いので、その  $p\sim y$  関係は杭頭水平載荷試験等に基づき推定される。また、多くの経験式が提案されている<sup>5)</sup>。

一方、地震観測や杭基礎の地震被害調査から杭基礎

の耐震設計には上部構造物の水平慣性力のほかに地盤の変形が杭体の地震応答に大きな影響を与えることが指摘されている<sup>6)7)</sup>。また、数値解析や模型振動実験からも同様のことが明らかにされている<sup>7)8)9)</sup>。その挙動を究明するためにせん断土槽を用いて地盤変位と杭頭荷重を同時に作用させる水平載荷実験も行われている<sup>10)11)</sup>。さらに、地盤変位を考慮した杭基礎の耐震設計の開発も行われている<sup>9)12)</sup>。

しかし、強い地震動を受けた地盤中の杭基礎と地盤の動的相互作用の問題を扱った実物大の動的実験または地震観測の研究はきわめて少ない。

そこで、著者らは高さ 6m の大型せん断土槽を用いて外径 320mm の鋼管杭の大変位振動台実験を実施し、軟弱地盤中の杭基礎の大地震時挙動に関する検討を行ってきた。本論文は動的振動台実験によって得られた杭基礎の地震時挙動を分析し、杭と地盤の動的相互作用特性ならびにそれを支配する要因の検討などについて論じ、杭基礎の合理的な耐震設計法確立のための基礎資料を提供しようとしたものである。

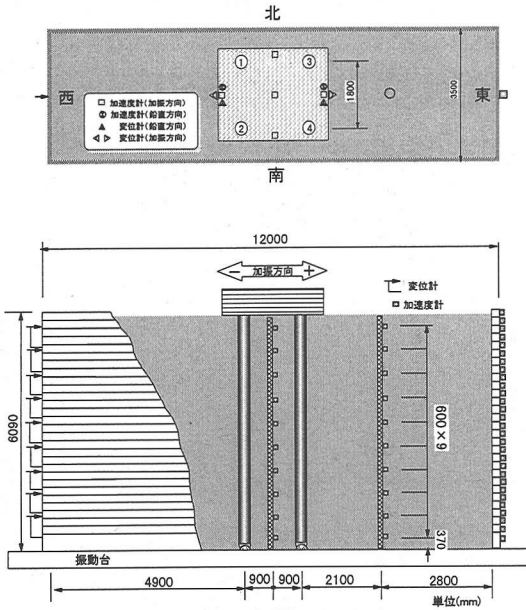


図-1 実験概要図

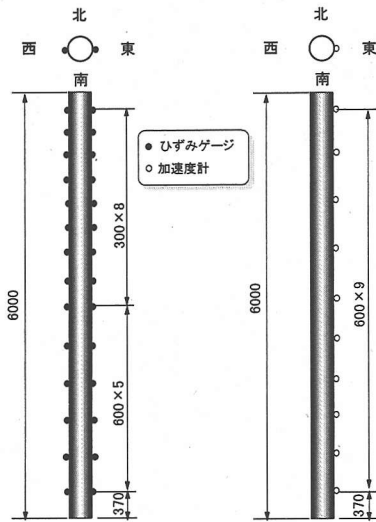


図-2 杭体のひずみゲージと加速度計の配置

## 2. 実験の概要

本実験は科学技術庁防災科学技術研究所の 15m×14.5m, 最大搭載質量 500,000kg の大型振動台で行った。振動台の上に長さ 12m, 幅 3.5m, 高さ 6m で 29 段のフレームから構成されたせん断土槽を設置した<sup>13)</sup>。高さ約 6m の水平地盤は、せん断土槽内に自然乾燥状態の霞ヶ浦産の砂を空中落下法で投入することにより作成した(図-1 を参照)。その試料の物理的・化学的性質を表-1 に示す。せん断土槽内には、外径  $D=320\text{mm}$ 、長さ 6m の鋼管杭を 4 本設置し、杭間隔は 1.8m の約  $6D$  と

表-1 物性試験結果

土粒子の密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2714
自然含水比 (%)	21.59
れき分 (%)	0
砂分 (%)	97
シルト分, 粘土分 (%)	3
$D_{50}$ (mm)	0.267
均等係数	2.39
曲率係数	0.86
最大乾燥密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1744
最小乾燥密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1393

表-2 鋼管杭の諸元

外径 $D$ (mm)	319.8
内径 $d$ (mm)	305.7
肉厚 (mm)	7.0
長さ (m)	6.0
ヤング率 $E$ (N/m <sup>2</sup> )	$2.1 \times 10^{11}$
曲げ剛性 $EI$ (N・m <sup>2</sup> )	$1.78 \times 10^7$
鋼材の種類	STK 400

表-3 加振ケース一覧

	加振ケース	加振後相対密度 (%)	上載重量 (kg)
一日目	White noise 100gal	42.03	15,600
	White noise 200gal	43.51	
	White noise 400gal	49.31	
	3.0Hz sine wave 400gal	57.86	
二日目	White noise 100gal	58.55	44,300
	White noise 200gal	59.19	
	White noise 400gal	61.84	
	3.0Hz sine wave 600gal	66.01	
	Seismic wave G0C	72.82	

した。フーチングは鋼板により作成し、モルタルにより杭頭を剛結した。積み重ねる鋼板の枚数を変化させることによりフーチング重量を 2 段階に変化させた (15.6tof と 44.3tonf)。杭先端はピン構造になっている。鋼管杭の諸元を表-2 に示す。

地盤の挙動を計測するために、4 本杭の中央位置および土層枠と杭の中間位置の地盤中に加速度計を設置した。また、せん断土槽のフレームに加速度計と変位計を設置した(図-1)。地盤内の加速度計は、接着剤でプラスチック製のグリッドに 0.6m の間隔で取り付けて地盤に埋めている<sup>13)</sup>。このプラスチックグリッドは、加振時には上端、下端とも拘束はなく地盤と一体化して挙動すると考えられる。さらに、加振に伴い地盤が沈下するが、地盤内計測用グリッドは座屈して地盤と均等に沈下すると考えられる。杭基礎の挙動を計測するために、杭①と杭④にはひずみゲージと加速度計を、フーチングには変位計と加速度計を設置した(図-1 と図-2)。

振動を与えることにより緩い砂地盤には沈下が発生

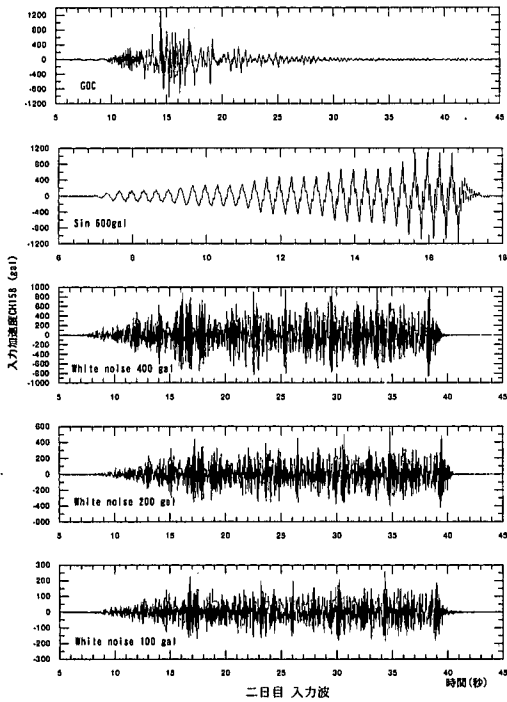


図-3 実験に用いた加振入力波形

することが予測されたので、地盤の密度が安定するまで予備加振を行った。具体的にはランダム波 200gal を 3 回と 300gal を 1 回実施した。加振は二日間に分けて行なった。実験ケースを表-3 に示す。また入力波形を図-3 に示している。加振ケース名の加速度値は、入力波の最大値であり、G0C 波は鉄道構造物の耐震設計において兵庫県南部地震クラスの検討に用いる暫定基盤入力波である<sup>12)</sup>。

### 3. 地盤-杭間の相対変位と地盤反力の算出法

計測された地盤の加速度時刻歴波形から地盤の増幅特性や加振中の地盤のせん断波速度の変化などが考察できるが、その詳細は文献<sup>15)</sup>を参照されたい。

地盤と杭体との間の相互作用力を求めるために、杭体のひずみから曲げモーメントを算出し、曲げモーメントの 2 回微分を計算した。杭体が梁部材と考えると、その運動方程式は以下のように与えられる。

$$\frac{d^2 M}{dx^2} + k(w - u) + \rho \ddot{w} = 0 \quad (1)$$

ここに、 $M$ ：杭の曲げモーメント、 $x$ ：杭軸線方向の座標、 $w$ ：杭軸線に垂直な加振方向の水平変位、 $u$ ：地盤の加振方向の水平変位、 $\rho$ ：杭の単位長さの質量、 $k$ ：地盤反力係数、 $\ddot{w}$ ：杭体の加速度である。式(1)には杭

軸の上向きを  $x$  軸の正、東向きを加振の正とした右手座標系を用いた(図-1 参照)。

実験には鋼管杭を使用したため、杭体の質量が小さく、その影響は無視できると仮定すると、式(1)は以下のように書き換えられる。

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = k(u - w) = p(x) \quad (2)$$

杭体の変形が弾性範囲であるという前提で杭体のひずみから曲げモーメントを容易に算出することができる。

$$M = EI\chi = \frac{EI(\varepsilon_w - \varepsilon_e)}{D} \quad (3)$$

ここに、 $EI$ ：杭の曲げ剛性、 $\chi$ ：杭軸線の曲率、 $D$ ：杭の直径、 $\varepsilon_w$  と  $\varepsilon_e$ ：杭体の西側と東側でのひずみ(図-2 参照)である。曲げモーメントの 2 回微分を算出する際、スプライン関数を用い、境界条件として杭の両端部の地盤反力  $p$  を零とした。これは杭の下端がピン構造であり、上端は地表面に位置することから定めた。

計測したデータのノイズなどを除去するために、2 回微分を計算する前に、曲げモーメントのデータについて 7 点 Savitzky-Golay 方法でスムージング処理を行なった。微分した結果の精度が問題となるが、後で示すように地盤反力と地盤-杭間の相対変位のコヒーレンスが高かったこと(図-14 と図-15) から、ここに述べた方法で計算した地盤反力の精度は十分高いと考えられる。ただし、曲げモーメントが小さい場合には、計測機器の分解能の限界によって計測データのノイズが大きくなり、計算した地盤反力の精度は大きく落ちている。

せん断土槽のフレームで変位を計測しており、この計測値を地盤変位として用いることも可能であるが、この値にはフレームの自重の影響などが含まれている可能性がある。地盤変位自体に着目するときは、その影響は無視できるが、杭と地盤との相対変位を求める際には無視できないと言える。したがって、地盤の変位  $u$  は地盤の加速度記録波形を積分することで算出した。杭体の変位も杭軸線の曲率から計算できるが、地盤変位を求める方法と統一するために、杭体の水平変位  $w$  も加速度波形から算出した。

加速度波形から変位を計算する際、0.55Hz のハイパスフィルタを用いた。フーチングと地表面との相対変位はレーザー変位計により実測されており、上記の方法により算出した地盤-杭間の相対変位と比較することにより、計算値の精度を確認した。図-4 にこの比較を示した。0.5mm 以下の小さい変位でもよく一致することが分かった。

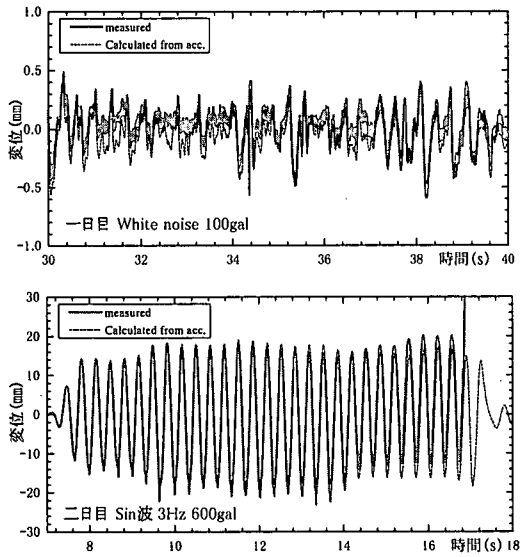


図-4 フーチング-地表面間の計測相対変位と  
地盤-杭①間の算出した相対変位 (5.77m) の比較

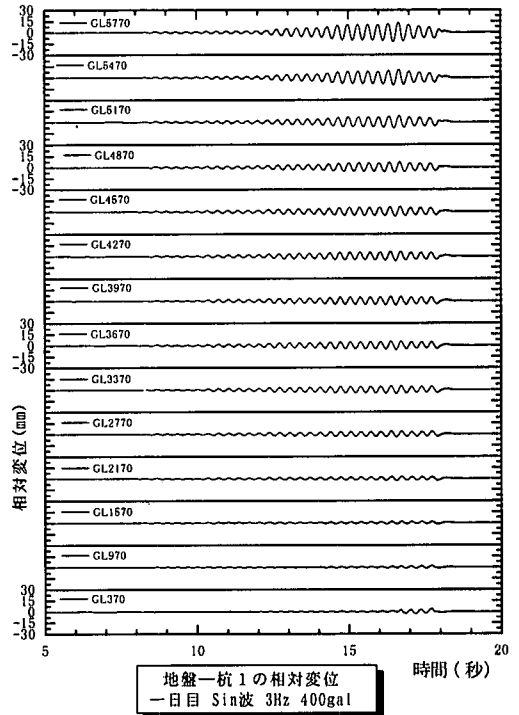


図-6 地盤と杭①の相対変位

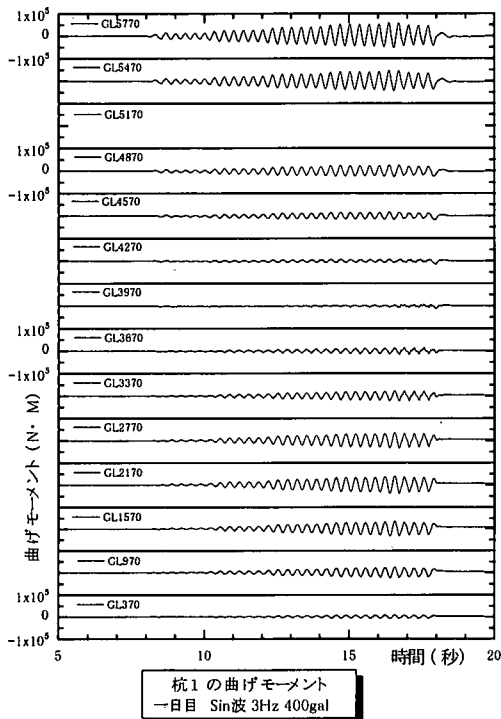


図-5 曲げモーメントの時刻歴

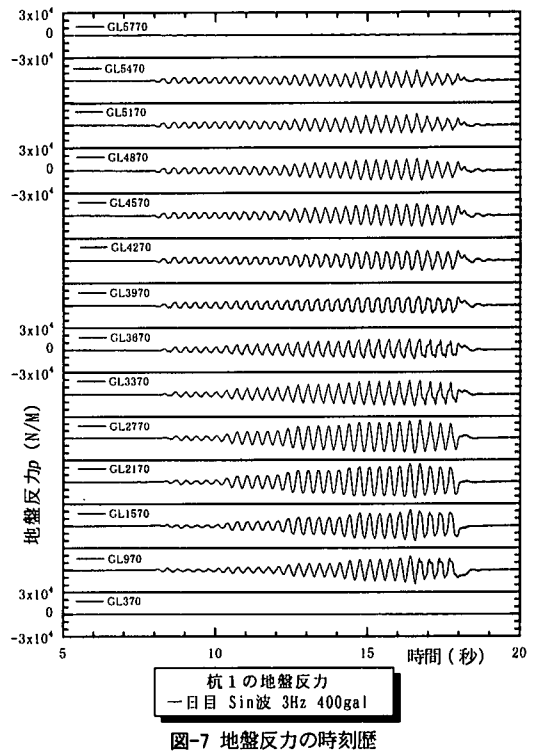


図-7 地盤反力の時刻歴

#### 4. 実験結果の考察

上載重量（フーチング）の違いが構造物の応答および地盤反力に影響を及ぼすため、以下ではフーチング

重量が軽いタイプと重いタイプの結果を分けて述べる。

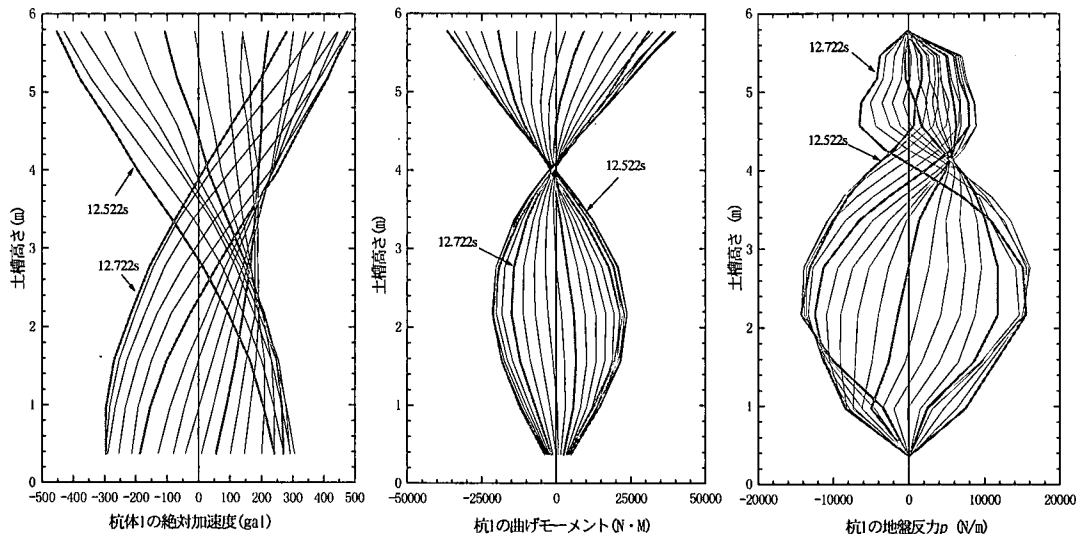


図-8 杭①の絶対加速度，曲げモーメント，地盤反力の深さ方向の分布

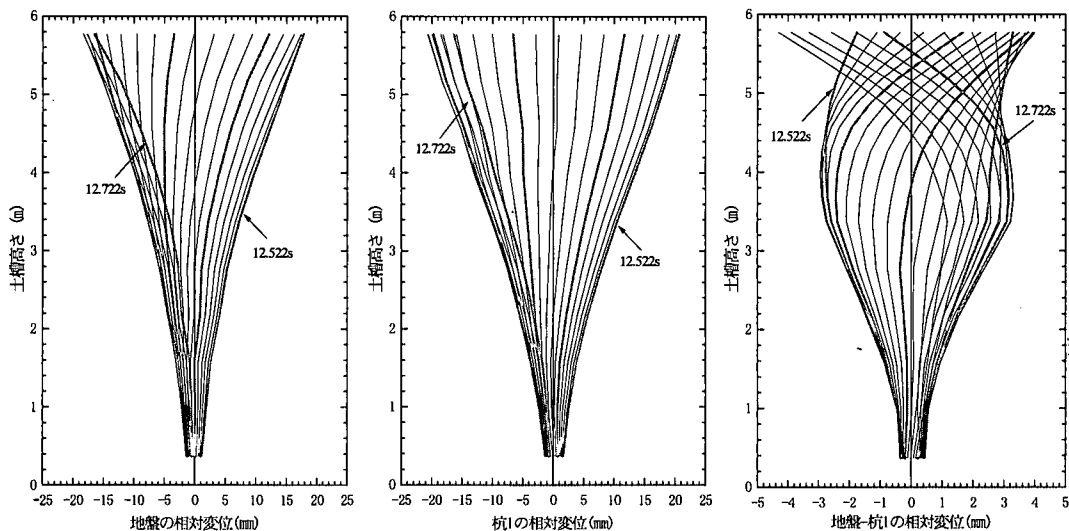


図-9 地盤の相対変位，杭①の相対変位，地盤—杭①の相対変位の深さ方向の分布

(1) 軽い錘りの場合（軽量タイプ）

一例として，図-5，図-6 および図-7 に軽量タイプを周期 3Hz の正弦波で加振したときの杭①の曲げモーメント，地盤-杭①間の相対変位および地盤反力の時刻歴を全計測位置でそれぞれ示している。図中の凡例はせん断土槽底面からひずみゲージの位置までの高さであるが，等間隔ではないことに注意されたい（例えば，GL370 は土層底面から高さ 370mm の位置を示す）。より詳しく考察するために，図-8 には，杭①の絶対加速度，曲げモーメントおよび地盤反力の鉛直方向での分布を，図-9 には，地盤，杭①および地盤-杭①間の相対変位の鉛直方向分布をそれぞれ示している。12.522 秒から 12.722 秒までの区間を 0.01 秒刻みで描いており，

0.05 秒の間隔を灰色太線で示している。また，図-10 には入力に対する地表面および杭頭部の加速度の伝達関数を示す。

絶対加速度の分布（図-8）から杭体の上下端は逆位相で振動していることが分かる。図-10 に示した伝達関数からも分かるように，これは地盤の共振によるものである。

a) 曲げモーメントの変化

図-5 より杭頭部の曲げモーメントは加振レベルとともに増加するが，約 16.7 秒以後では入力が増大するにもかかわらず頭打ちする傾向が見られる。また，高さ約 4m の位置では曲げモーメントがほぼゼロとなり，

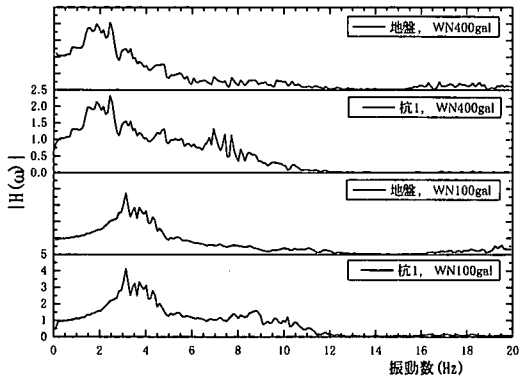


図-10 地表面および杭頭部の伝達特性 (一日目)

ここを境にして位相が反転する。図-8を見るとこのことがより明確に分かる。さらに、モーメント分布が正負対象であることは注目すべき特性である。

### b) 地盤-杭の相対変位と地盤反力変化

フーチングの慣性力によって杭体は地盤より10%程度大きく変形していることが図-9から分かる。地盤の変形は曲線状になっている。地盤の物性が一律であれば地盤変位分布は $\cos$ 分布となるが、実験では拘束圧に応じて地盤のせん断剛性が変化しているために、反るような分布形状となっている。それに対して、杭体はその剛性が大きく、曲げ変形が少ないので直線的な変形をしている。その結果、地盤-杭の相対変位の分布形状(図-9右)はより複雑になる。静的載荷試験などのように荷重を杭頭に載荷した場合には、杭のたわみ分布には第一不動点が存在し、その符号が反転するが、本振動実験ではこの第一不動点の位置が常に変動しており、浅くなったり深くなったりする。これは、慣性力以外に地盤変位の影響が大きいことが原因と考えられる。地盤変位の影響が無視できないことを示唆している。

地盤反力については、地中部においては地盤-杭①間の相対変位とほぼ同じ位相であることが図-9から確認できるが、浅い位置の地盤反力は、地盤-杭①間の相対変位が最大の時に小さく、地盤-杭①の相対変位が零になる前後で最大になり、約 $90^\circ$ の位相遅れが見られる。これは、図-11で示した地盤反力と地盤-杭間の相対変位( $p \sim y$ 関係)の履歴曲線からも分かる。このことは、浅い位置での地盤反力における減衰力が支配的になっていることを表している。なお、参考にWhite noise 100gal加振時の $p \sim y$ の履歴曲線を図-12に示す。入力レベルが小さい場合には減衰力が相対的に小さいことが分かる。

以上のことから、杭基礎構造物の応答を把握するためには、地盤の剛性のみではなく減衰特性も正しく評価しなければならないこと、慣性力のみならず地盤変

位の影響も無視できないことが分かった。

### c) $p \sim y$ 関係の振動数の依存性

$p \sim y$ 関係の振動数依存性を考察するために、White noise 100gal入力ときの地盤反力 $p$ と地盤-杭間の相対変位( $u-w$ )の伝達関数を図-13に、コヒーレンスを図-14に求めた。2Hzから10Hzまでの振動数範囲においては、深さ約3mまでの測定位置のコヒーレンスは高い値を示しており、計算した地盤反力と伝達関数の信頼性は高いことが分かる。

しかし、深い位置での地盤反力と地盤-杭の相対変位とのコヒーレンスが低下している。その原因は、単純に計測機器の分解能の限界と考えられる。杭体に発生した曲げひずみはひずみ計測装置の最小分解能の数倍にしすぎないので、大きなノイズが生じたためと考えられる。信号の二次微分計算によってその誤差がさらに拡大され、算出した伝達関数の信頼性が低下したものと推定できる。入力レベルが大きなWhite noise 400gal加振では、信号ノイズ比(SN比)が大きくなるので深い位置のコヒーレンスの改善傾向が見られる(図-15)。また、図-8に示した正弦波加振の場合も深い位置まで杭体が大きく変形しているのでSN比は十分高い。

一方、低い振動数でコヒーレンスが低下するのは、加速度の積分から変位を算出する際にハイパスフィルタを用いたのが原因と考えられる。また12Hz以上では加振入力信号が小さくなったためコヒーレンスが低下したと思われる。

図-13に示すWhite noise 100gal加振の場合の伝達特性によると、振動数の増加に伴ない地盤反力係数の絶対値はやや大きくなるが、浅くなるほど明確なピークが見られなくなり、地盤反力と地盤-杭間の相対変位の伝達関数の振動数依存性は小さいと言える。

伝達関数の実数部分は剛性 $k$ に、その虚数部分が減衰係数 $c$ に対応すると考えられる。例としてWhite noise 400gal加振の場合の $k$ および $c$ を図-16と図-17に示している。剛性 $k$ は振動数とともに増加するが、振動数が約5Hz以下では、その変化が少ない。特に、浅い位置では解析対象とした全周期範囲で剛性 $k$ は概ね一定値となっている。地震動の振動成分を考えると剛性 $k$ は一定値にしても差し支えないと考えられる。減衰係数 $c$ もほとんど振動数に依存しないことが分かる。地盤反力に含まれた減衰力には速度に比例する粘性減衰が少なく非粘性減衰が支配的であると考えられる。この非粘性減衰は基本的に土の履歴変形特性によるものと考えられる<sup>10)</sup>。

表-4には $p \sim y$ 関係の履歴曲線から目視で求めた剛性と伝達関数の虚数部分から算出した平均的な減衰係数を示している。地盤反力の剛性 $k$ は深さとともに大き

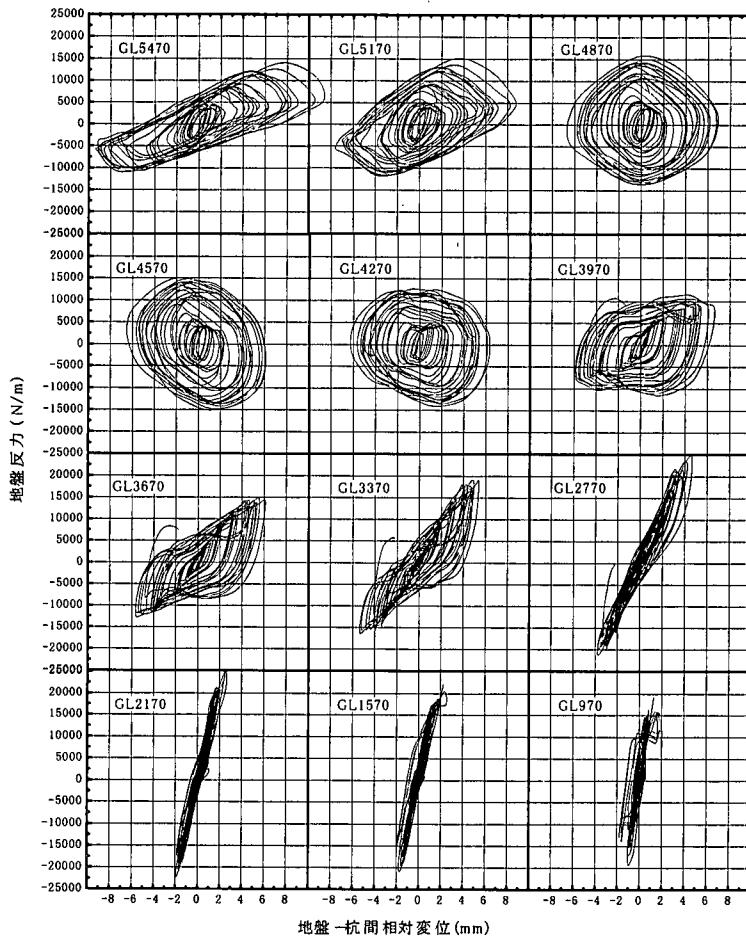


図-11  $p \sim y$  関係の履歴曲線(一日目正弦波加振)

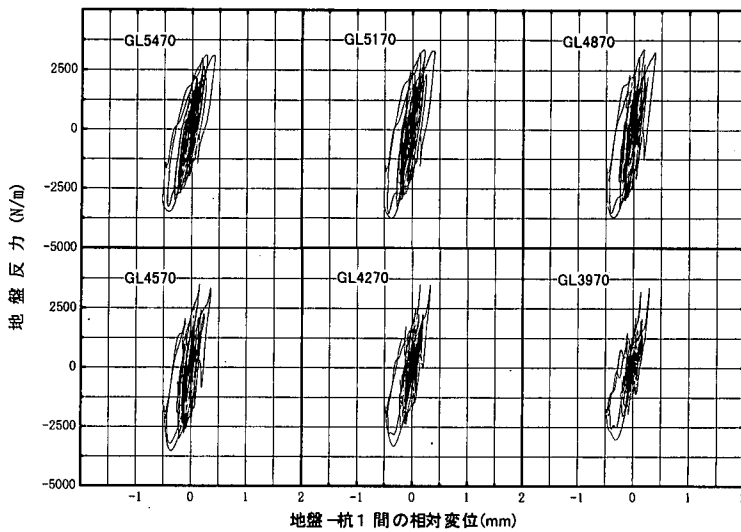
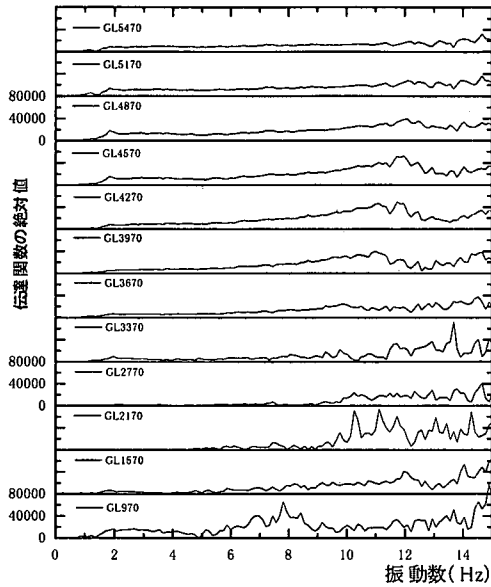


図-12  $p \sim y$  関係の履歴曲線(一日目 White noise 100gal 加振)

くなる。また、剛性  $k$  は入力レベルの増加につれて大きく低下する。

一方、その減衰係数  $c$  の入力レベルに対する低下は小さい。その結果、減衰比は振動レベルとともに大き



地盤反力と地盤一杭の相対変位の伝達特性  
一日目 White noise 100gal加振

図-13 地盤反力と地盤一杭の相対変位の伝達関数

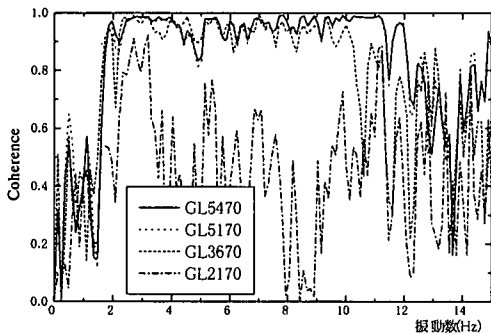


図-14 地盤反力と地盤一杭の相対変位のコヒーレンス  
(一日目 White noise 100gal 加振)

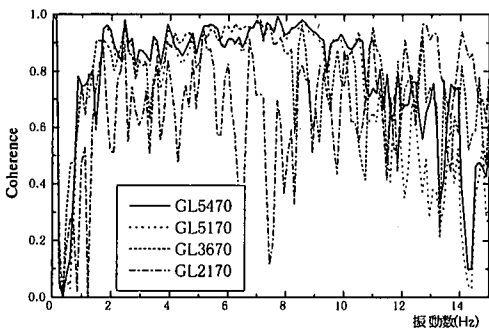
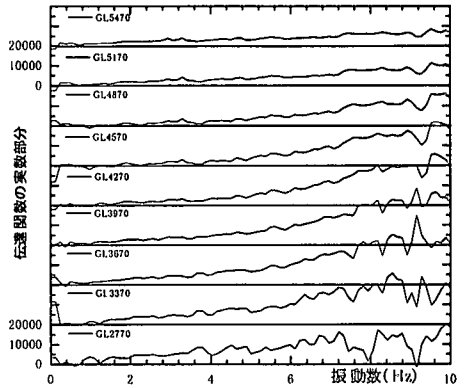


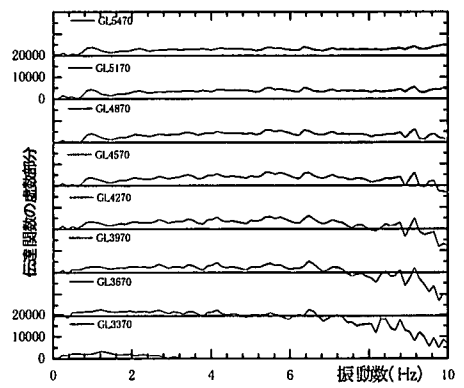
図-15 地盤反力と地盤一杭の相対変位のコヒーレンス  
(一日目 White noise 400gal 加振)

くなっている。ただし、その変化は地表近傍に集中している。深い位置では減衰係数および減衰比の変化は



地盤反力と地盤一杭の相対変位の伝達特性  
一日目 White noise 400gal加振

図-16 地盤反力と地盤一杭の相対変位の伝達関数



地盤反力と地盤一杭の相対変位の伝達特性  
一日目 White noise 400gal加振

図-17 地盤反力と地盤一杭の相対変位の伝達関数

小さくなる。

## (2) 重い錘りの場合 (重量タイプ)

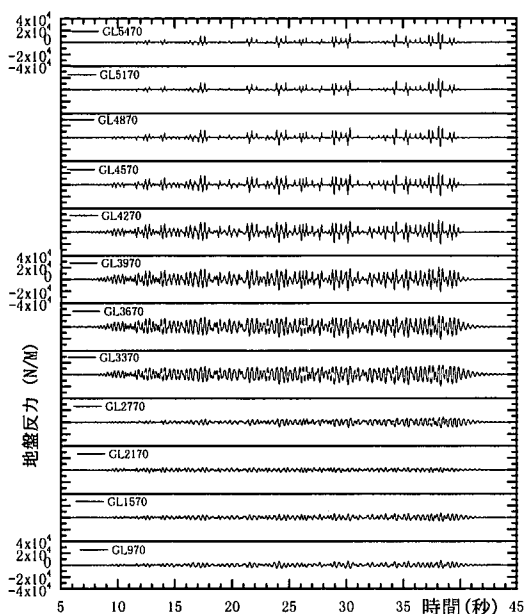
### a) 地盤一杭間の隙間

二日目の加振は、フーチングの全体質量が 44,300kg で、一日目の約 3 倍となっている (表-3)。図-18 および図-19 に White noise 100gal 加振および正弦波 600gal 加振の時の杭①の地盤反力の時刻歴波形を示す。地盤反力の波形にはパルス状の反力が見られる。これは、①土槽内の地盤が自然乾燥状態 (含水比 21.6%) であったため、一定な自立性を持っていること、②地表近傍では慣性力による相互作用効果が大きくなったこと等により、杭と地盤との間に隙間ができたことを表している。この隙間は、加振レベルとともに広がっている。ただし、入力が大きき場合は図-19 に示すようにパルスのな地盤反力波形の形状が徐々にスムーズな形状に移行しており、振動レベルが大きくなると隙間に砂が埋め戻される (自立していた土が崩壊) 傾向も観



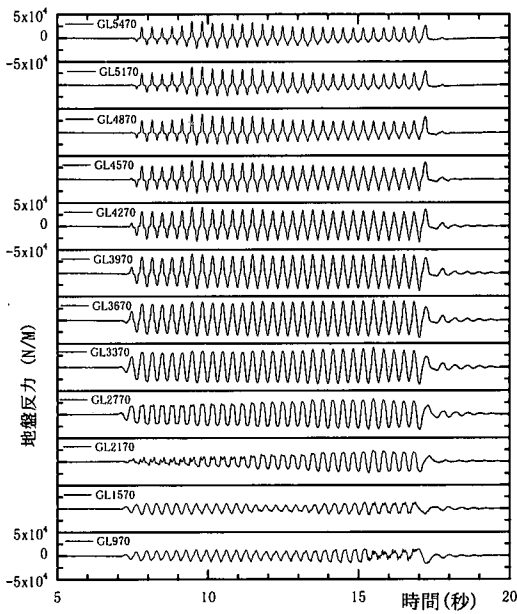
表-4 算出した地盤反力係数（一日目）

計測位置	White noise 100gal			White noise 200gal			White noise 400gal		
	k (MN/m/m)	c' (MN/m/m)	減衰比 c'/2k	k (MN/m/m)	c' (MN/m/m)	減衰比 c'/2k	k (MN/m/m)	c' (MN/m/m)	減衰比 c'/2k
GL5470	8.40	3.97	0.236	5.88	3.49	0.297	3.50	2.64	0.377
GL5170	10.90	5.03	0.230	7.69	4.20	0.273	4.57	3.16	0.345
GL4870	15.38	5.52	0.179	9.23	4.44	0.240	7.27	3.56	0.245
GL4570	15.38	4.97	0.161	10.90	4.09	0.188	8.90	3.59	0.202
GL4270	15.38	3.54	0.115	12.63	3.32	0.131	10.00	3.23	0.161
GL3970	15.38	2.31	0.075	12.63	2.53	0.100	10.00	2.56	0.128
GL3670	8.69	1.53	0.088	10.90	1.76	0.081	11.10	1.61	0.072
GL3370				15.00			12.12		



杭1の地盤反力  
二日目 White noise 100gal

図-18 地盤反力の時刻歴



杭1の地盤反力  
二日目 Sin波 3Hz 600gal

図-19 地盤反力の時刻歴

察できる。

杭と地盤との間に隙間があるため、地盤反力と地盤一杭間の相対変位の関係は強い非線形的な挙動を示して、一日目のように伝達関数から地盤反力係数を考察するのは難しくなる。そのために、地盤反力の弾性係数のみを  $p \sim \gamma$  関係の履歴曲線から求めることにした。履歴曲線からみると減衰比は一日目と同じ程度であると考えられる。

図-20には White noise 100gal 加振時の  $p \sim \gamma$  関係の履歴曲線を示している。隙間により  $p \sim \gamma$  関係が逆S字型のループを描いている。また、浅い位置では、正負で地盤の剛性に差が生じている。つまり、前杭（杭①）に

対しては正の相対変位となる場合）と後杭（負の相対変位となる場合）では、荷重の分担が異なることを示している。この差は軽い重りの場合（図-11と図-12参照）には見られなかった。また、深い位置ではこの差が小さくなっている。これらのことから、このような現象は、慣性力が卓越する場合に見られる現象と言える。

b) 応答値の深さ方向の分布

図-21には正弦波加振のときの、曲げモーメント、地盤一杭間の相対変位および地盤反力の深さ方向の分布を示す。モーメント分布は正負非対称の分布になっているのが、一日目（軽いタイプ）との大きな違いで

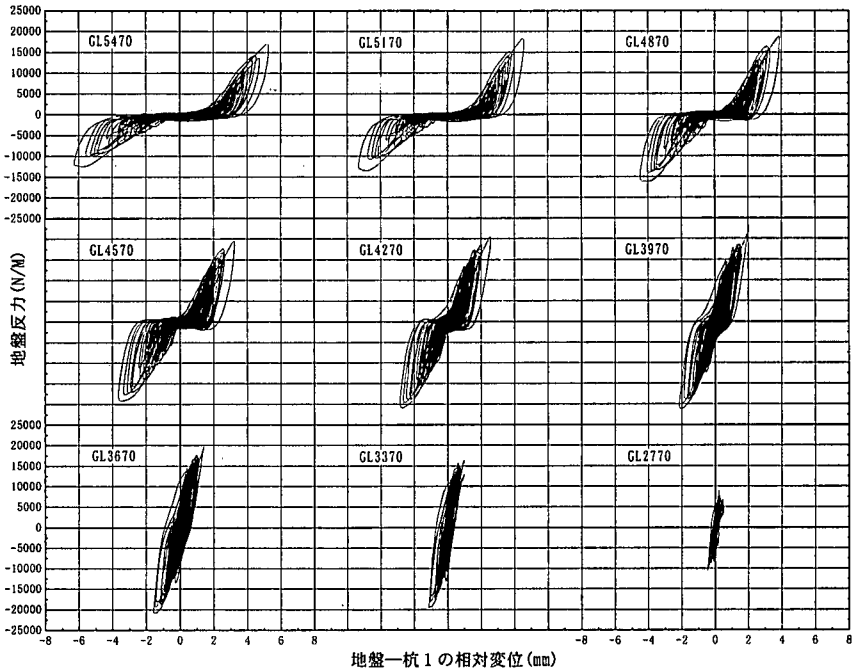


図-20  $p \sim y$  関係の履歴曲線(二日目 White noise 100gal 加振)

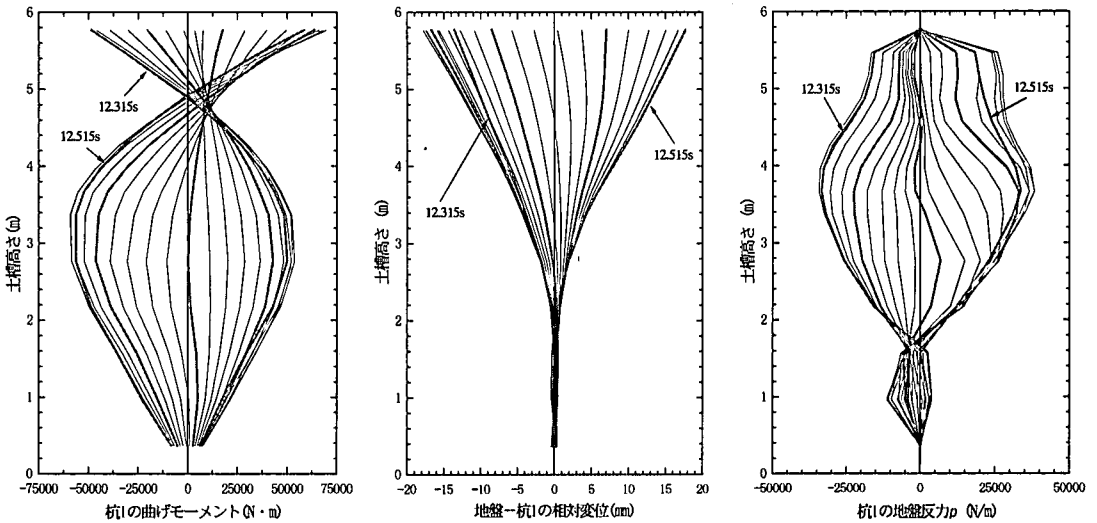


図-21 杭①の曲げモーメント, 地盤-杭①の相対変位, 地盤反力の深さ方向の分布 (二日目正弦波加振)

ある。これは、前杭と後杭で荷重分担が異なることを示している。また、一日目と比べると土槽および杭基礎の振動台に対する相対変位が少ししか増えていないが、地盤-杭の相対変位が大きく増加した。地表面では地盤-杭の相対変位は杭体変位の75%も達している。

c) 地盤反力の剛性

地盤反力の剛性は  $p \sim y$  履歴曲線の荷重時の勾配から算出した。表-5 での  $k$  と  $k'$  は前杭と後杭の剛性を表す。前後杭で反力に差が生じる領域は振動レベルの

増大によって深い位置まで達する。

剛性は、一日目の加振と同様に深さ方向に増加する傾向がある。浅い位置での剛性は振動レベルの増加に伴ない低下するが、その低下率は一日目より小さくなっている。これは加振により砂が締め固まったためと考えられる。

d) 最大地盤反力

図-22 と図-23 にはそれぞれ White noise 400gal と正弦波加振ときの地表近傍の  $p \sim y$  履歴曲線を示してい

表-5 算出した地盤反力係数 (二日目)

計測位置	White noise 100gal		White noise 200gal		White noise 400gal		正弦波 3Hz 600gal	
	k (MN/m/m)	k' (MN/m/m)	k (MN/m/m)	k' (MN/m/m)	k (MN/m/m)	k' (MN/m/m)	k (MN/m/m)	k' (MN/m/m)
GL5470	5.50	3.52	4.67	3.50	4.50	3.64	2.00	0.375
GL5170	8.00	5.00	7.30	4.50	6.25	4.37	2.00	0.375
GL4870	8.00	6.77	7.60	6.27	7.27	4.88	2.40	1.20
GL4570	10.00	9.75	9.41	7.27	8.75	6.97	2.96	2.08
GL4270	12.20	12.20	10.80	8.70	9.52	7.35	3.57	3.03
GL3970	13.71	13.71	12.00	11.36	10.00	9.47	4.76	3.46
GL3670	16.84	16.84	13.90	13.90	10.20	10.20	6.25	4.30
GL3370	20.00	20.00	14.50	14.50	12.50	12.50	6.50	5.26
GL2770	28.57	28.57	22.20	22.20	15.40	15.40	10.13	10.13
GL2170								

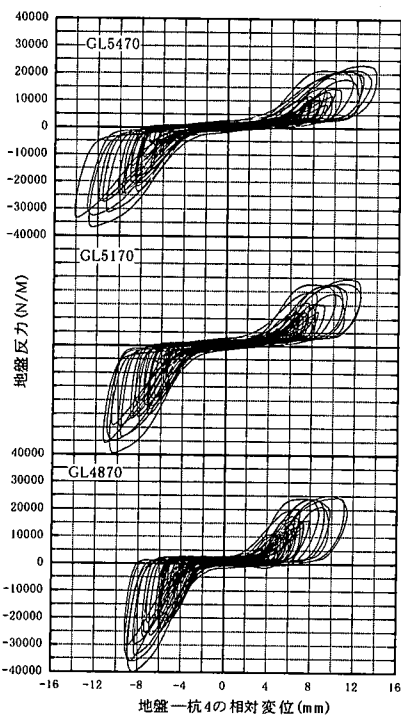


図-22  $p \sim y$  関係の履歴曲線  
(二日目 White noise 400gal 加振)

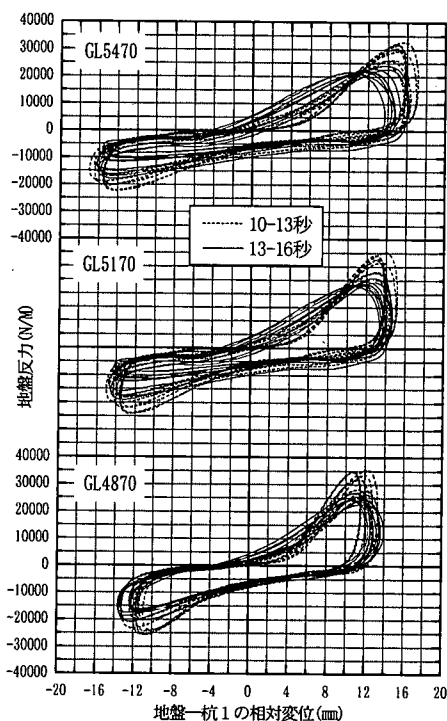


図-23  $p \sim y$  関係の履歴曲線  
(二日目 正弦波 3Hz 600gal 加振)

る。前杭と後杭とのもうひとつ違いは最大地盤反力である。一日目ではほとんど差が見られなかった(図-11と図-12)のに対して、二日目では明らかな差が現われている。ただし、最大地盤反力の差は基本的には地表近傍に限られている。(White noise 400gal 加振の場合、杭①のひずみデータが連続2箇所まで不良であったため、杭④の結果を図示した。この場合、負の相対変位が生じる場合が前杭の状況に相当)

G0C 加振する場合は、地盤反力が極限反力に達す位置がさらに深くなると考えられるが、残念ながら 14.5 秒近傍で杭体は降伏したため、ひずみから曲げモー

メントの計算が出来なくなり、地盤反力の考察は不可能になった。

### (3) 地盤反力係数とせん断波速度

図-24 にはすべての加振ケースでの地盤反力係数(剛性)の深さ方向の分布を示している。多少の例外はあるが、地盤反力係数はほぼ深さに比例して大きくなるのが分かった。これは一様な砂地盤に対する Reese-Matlock<sup>17)</sup> の仮定と一致する。

加振レベルによって地盤反力弾性係数に変化して、振動中の地盤剛性に依存することが明らかである。そ

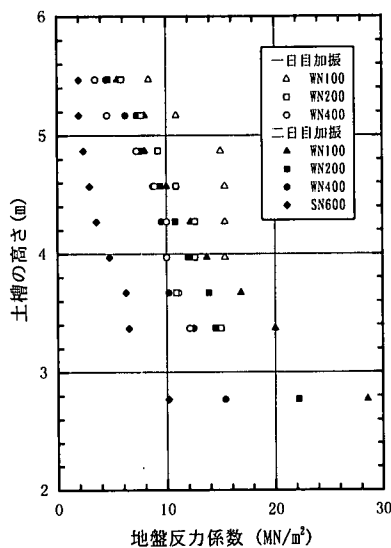


図-24 地盤反力係数の鉛直分布

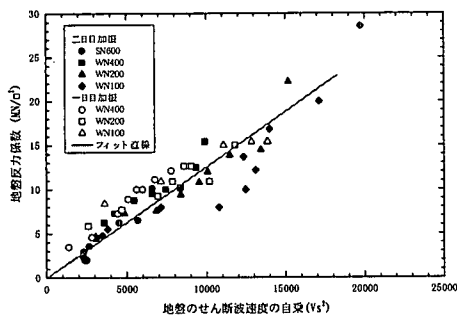


図-25 地盤反力係数とせん断波速度の関係

ここで、加振中の地盤のせん断波速度を地盤中の加速度記録間の相互相関から求めた。ただし、この速度は加速度計の鉛直間隔が 0.6m であるので、その間の平均的な速度である。一般には地盤剛性が地盤のせん断波速度の自乗に比例する。図-25 には地盤反力係数と加振中の地盤せん断波速度の自乗との関係を示した。二日目での White noise100gal 加振ケースの地表近傍の数点を除くと、ほぼ線形関係にあることが確認できる。

## 5. おわりに

本論文では大型せん断土槽振動台実験によって得られた一様砂地盤中の実物大杭基礎の動的挙動を分析し、杭と地盤との動的相互作用特性を検討した。得られた結果は次のとおりである。

(1) 動的地盤反力は剛性と減衰係数の二つで構成されると考えられる。剛性は振動数の増加に伴ないやや大きくなるが、地盤の振動特性によらず、明確なピー

クが見られない。また、地震動の振動数範囲では、振動数の依存性を考慮しなくても差し支えないと考えられる。減衰係数は振動数の依存性が小さく、非粘性減衰の特徴を持っている。

(2) 地盤反力の剛性は加振中の地盤せん断速度の自乗に比例して、一様な砂地盤では深さに比例することが確認された。

(3) 地盤反力の減衰係数は土の履歴変形によると考えられ、減衰比として地盤の振動レベルとともに増加する傾向が見られる。とくに、地表近傍では大きな減衰比が期待できる。

(4) 上部構造物の慣性力によって、自立性のある地盤では、杭と地盤との間に隙間が生じることが確認された。この隙間は振動レベルの増加によって拡大し、深い方向に進行する。ただし、強い振動で地盤の崩壊によってこの隙間が埋められる場合がある。

(5) 地表近傍では、前後杭に対する地盤反力係数の差が現われる。この差は上部の慣性力に大きく影響される。さらに、地盤の極限反力においても、前後杭の差が観察できる。したがって、前後杭の分担力には差が生じ、前杭には大きな曲げモーメントが見られる。

(6) 地盤変位の影響によって、杭変形の第一不動点の位置は常に変動する。杭基礎の挙動を考える場合に、慣性力のみならず地盤変形の影響も考慮する必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、ご指導とご協力を頂きました科学技術庁防災科学科学研究所の箕輪親宏氏および東京ソイルリサーチの阿部秋男氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 張 銘, 八嶋 厚, 木村 亮, 渦岡良介: 軸力変動による影響を考慮した場所打ち群杭基礎の繰り返し水平載荷試験の3次元弾塑性有限要素シミュレーション, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集, pp.141-144, 2000.3.
- 2) 大槻明, 福武毅芳, 藤川智, 佐藤正義: 液状化時群杭挙動の三次元有効応力解析, 土木学会論文集, 第495号/1-28, pp.101-111, 1994.7.
- 3) 杭基礎の設計法とその解説, 社団法人地盤工学会, 1985.
- 4) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 基礎構造物・抗土圧構造物, 1997.3.
- 5) 大平 彰, 田蔵 隆, 中松 新, 清水 勝美: 軟弱地盤中の杭基礎の地震時挙動特性に関する研究, 土木学会論文集, 第362号/1-4, pp.417-426, 1985.10.

- 6) 地盤工学会阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書，1996.10.
- 7) 室野剛隆，西村昭彦：杭基礎構造物の地震時応力に与える地盤・構造物の非線形性の影響とその評価手法，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1717-1722，1998.
- 8) 室野剛隆，永妻真治，西村昭彦：杭の動的挙動に与える慣性力と地盤変位の影響に関する実験的研究，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.625-628，1997.
- 9) 室野剛隆，王海波，西村昭彦，長谷川淳史：杭の地震時挙動に与える地盤震動と慣性力の影響に関する実験的考察，第25回地震工学研究発表会講演論文集，pp.517-520，1999.
- 10) 福田秀樹，土屋富男，山下清，加倉井正昭：大型せん断土槽を用いたRC杭の水平載荷試験（その1）～（その2），第33回地盤工学研究発表会，pp.1485-1488，1998.
- 11) 富井隆，野田静男，久保賀也，土屋富男，福田秀樹，杉本三千雄：大型せん断土槽を用いたRC杭の水平載荷試験と解析的検討，日本建築学会学術講演梗概集，1998.9.
- 12) 室野剛隆，西村昭彦：杭基礎の耐震設計における地盤変位と慣性力の組合せ，第3回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.1-8，1999.12.
- 13) 石原研而，香川崇章，小川信行，箕輪親宏，酒井運雄，阿部秋男：大型液化化再現装置の設計・製作について，第31回地盤工学研究発表会，pp.1189-1190，1996.
- 14) 鉄道総合技術研究所：新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料，1996.3.
- 15) 王海波，室野剛隆，西村昭彦：大型せん断土槽振動実験における地盤応答特性，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1629-1634，1998.12.
- 16) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，1976.
- 17) Reese, L. C. and Matlock, H. : Non-dimensional Solution for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth, Proc. 8th Texas Conf. S.M.F.E., The Univ. of Texas, Austin, 1965.

(1999.8.2 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC INTERACTION OF PILE FOUNDATION AND SOIL USING MOCKUP MODEL

Haibo WANG, Yoshitaka MURONO and Akihiko NISHIMURA

Large scale shaking table experiments of pile foundation have been carried out to investigate dynamic interactions between pile and soil. The deposit of K asumigaura sand, naturally dried, is prepared in a laminar box of 12m, 6m and 3.5m in length, height and width, in which 4 steel piles of 6m and 0.32m in length and diameter are installed. The force of interaction between soil and pile is calculated from the 2nd derivative of moment on the pile, the relative displacements between the deposit and piles are obtained from the accelerations measured. It has been found that the coefficients of dynamic interaction increase with depth proportionally, decrease with shaking level but vary slightly with the frequency. Most of damping is attributed to the nonlinearity of soil so that damping ratio increases with shaking level.