

群杭基礎の大型振動台実験

野々村佳哲1・白戸真大2・福井次郎3・喜多直之4

¹独立行政法人土木研究所 基礎チーム(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:nonomura@pwri.go.jp
²独立行政法人土木研究所 基礎チーム研究員
E-mail:shirato@pwri.go.jp
³独立行政法人土木研究所 基礎チーム上席研究員
⁴株式会社 大林組(元 独立行政法人土木研究所 基礎チーム交流研究員)

大地震時における基礎の動的挙動に関しては、実験や観測例が少ないことにより未だ十分に解明されて おらず、設計実務で用いるような実用的な基礎の動的解析モデルは未だ十分に整備されていない。そこで、 基礎の地震時における動的挙動を把握するため、乾燥砂地盤中の群杭基礎(杭長3m, 3×3本)の大型振 動台実験を行った。本報告では、基礎の模型杭に設置したロードセルより得られた地盤反力度の結果を用 いて、地盤抵抗における群杭効果のモデル化を検討した結果を報告する。

Key Words : shaking table test, pile-group, horizontal soil resistance, p-multiplier

1. はじめに

近年の大地震の被害経験から、構造物の耐震設計は構 造物の弾塑性挙動を考慮した静的解析によって行われる ようになってきた。さらに、大地震時の橋梁の耐震性能 を詳細に評価するため、動的挙動を考慮できる基礎の動 的解析モデルの開発が求められている。そこで、基礎の 動的解析モデルに用いる地盤抵抗特性を定式化するため の基礎データを得ることを目的に、群杭基礎の大型模型 振動台実験を行った。

本報告では、今回行った実験の概要、および杭基礎が 地震時において受ける水平方向の地盤反力度と基礎と地 盤の相対変位の関係について報告する。また、杭基礎の 水平支持機構に及ぼす群杭効果についても考察を行った ので報告する。

2. 実験の概要

実験は土木研究所で所有している三次元大型振動台 (縦8 m×横8 m)上にせん断土槽(縦4 m×横4 m×高さ 3.5 m)を固定し、その土槽内に基礎模型を設置、砂地 盤を作成後、加振実験を行った。今回行った実験の概略 図を図-1に示す。

実験は同一諸元の杭基礎を用いて、計測器の配置を変 えたCASE 1とCASE 2の2ケースを行った。本報では CASE 1の結果について報告する。実験に用いた杭基礎 模型は3×3本の9本群杭である。杭体には矩形断面の鋼



図-1 群杭基礎の振動台実験



図-2 計測器配置図

管(材質STK400, 杭径D=125 mm, 板厚t=4.5 mm, 杭 長L=3000 mm)を用いた。杭中心間隔は2.5 Dである。 杭頭とフーチングは剛結合されており、杭先端部はヒン ジ条件である。各杭には図-1の平面図において示すよう に杭1~杭9まで番号を振ってある。実験中の杭体の挙動 は弾性挙動であるとみなしてよいものであった。

各計測器の設置位置を図-2に示す。CASE 1では地盤 反力度を直接計測するために、9本の杭全てに対してロ ードセルを2断面ずつ設置している。杭1,2,4,5の4本の杭 に関してはひずみゲージを13断面ずつ取付けた。ロード セルとひずみゲージ設置断面では加振方向の加速度を測 定するため加速度計を併せて設置している。フーチング 部分では、回転挙動の評価ができるよう、加振方向およ び鉛直方向それぞれ3断面ずつ加速度計を設置した。

実験地盤は気乾状態の東北硅砂6号を用いた。実験前の相対密度60~70%であった。地盤内には加振方向の地 盤加速度を測定するため加速度計を設置した。図-1,2に 白丸で示すように、地盤加速度計は基礎模型からみて 東・西・北部の計3ヶ所に基礎模型のひずみゲージ設置 断面と同じ深度となるよう設置した。その他、振動台の 動きを捕捉するための加速度計とレーザー変位計を配置 している。

CASE 1で行った加振の一覧を表-1に示す。入力波の うち、正弦波は2Hz, 30secの波である。また神戸波は兵 庫県南部沖地震(1995)における神戸海洋気象台N-S成分の 観測波である。各入力波は加振中の最大加速度が表-1の 入力加速度になるように時間領域で一定倍率を乗じて調 整されている。

表-1 加振一覧

試験ケ	ース	入力波	入力加速度	重り
Case1	1	正弦波	100gal	300kg
	2		300gal	
	3		400gal	
	4	正弦波	100gal	1500kg
	5		300gal	
	6		400gal	
	7		500gal	
	8		600gal	
	9	正弦波	600gal	300kg
	10	神戸波	818gal	1500kg
Displacement transducer 2-times integlated acceleration 0 0 -10 -20 0 0 10 10 20 30 Time (sec)				
-)				
a) 止场公议(400ga1)				
Displacement transducer				



図-3 振動台変位の算出結果

なお、全てのセンサーは各加振直前にゼロクリアした。 本報告で示すデータはそれについて特に補正を行ってい ない。

3. 実験結果

(1) 変位の評価

本報告に示す変位は、加速度計データを時間方向に 2階積分することにより求めたものである。このとき、 計測ノイズの影響を回避するため2階積分の際には加速 度データをハイパスフィルタに通す処理を行った。

振動台上の加速度計より算出した水平変位とレーザー 変位計により測定された振動台の水平変位との比較を 図-3に示す。図-3のように振動台の変位に関してレーザ 一変位計で得られた変位と一致するようなフィルタを作 成してそのフィルタを他の加速度計データの処理に適用 した。なお、フィルタは各加振ステップごとに設定した。

(2) 地盤反力度と相対変位の関係

図-4にCase 1-6およびCase 1-8における各杭の地盤反力 度pと杭-地盤間の相対変位yの関係を示す。ここで、地 盤反力度pは、杭体に設置した2つのロードセルにより



計測された地盤反力度の差で表した。また、相対変位y はロードセルが設置された断面の深度における各杭の変 位と地盤の変位の差である。図4においては相対変位y は杭径Dで無次元化して表した。

杭が受ける地盤反力度は、加振方向の前列側になった 杭列で大きくなり、そのとき中・後列になっている杭で は小さくなっている。たとえば横軸yDがプラス側のと き、地盤反力度は、最前列である杭3に比べ、後・中列 杭となる杭1,2では非常に小さくなっている。これは図-5に模式図を示すように杭が地盤に対して相対的に押し 込まれた状態であるときに、地盤が抵抗する領域が重な り合うことにより、後列の杭の受ける地盤反力度が減少 しているものと考えられる¹。

前列杭にも後列杭にもなり得る杭1,3の復元力特性は、 p=0に対して非対称な三角形に近い形状になる。これは 杭1または杭3が前列杭になる場合に、他方はその後列と なるためである。一方、常に中間列である杭2のp-y関係



図-6 前列杭に対する群杭効果 η

は、p=0に対してほぼ対称になる。これは杭2は常に後列 杭であるためである。杭5ではp-y関係は楕円状に近い形 状になる。これは杭5のさらに後側の杭が地盤を押し、 それが杭を押す影響が顕著に表れた結果と推測されるが 定かではない。

(3) 杭基礎の群杭効果

Case 1-6~1-8(正弦波400, 500, 600 gal)において得られ たGL -0.35 m, -0.75 mのロードセルの計測データを用いて, それぞれの深度における前列杭に対する中列杭・後列杭 の群杭効果 nを調べてみる。厳密には前列杭も加振直 角方向に並びあう杭の影響を受けるので、単杭である場 合に比べて地盤反力度が減少すると考えられるが、簡単 のため nを前列杭の平均値に対する中間列、後列杭の 比として計算する。本実験結果では他の比較対象がない ため、前列杭を群杭効果を受けていない杭とみなし比較 を行った。

北側の杭列(杭1,4,7)が前列杭となるときの群杭効果 \overline{n} の計算結果を図-6に示す。縦軸の \overline{n} の計算には、 それぞれの杭列における地盤反力度の平均値の時刻歴デ ータから、加振を通しての最大値を用いた。横軸は最大 値となった時刻における杭一地盤間の相対変位を杭幅で 除したものである。 各杭の地盤反力度の大きさは前列>中列(\bigcirc , \bigcirc)> 後列(\blacktriangle , \triangle)となっており、杭位置によって異なった 群杭効果が現れているのがわかる。しかし、おおまかに 見ると、 $\overline{\eta}$ は変位によらず深度別にあるひとつの値で モデル化できると推測される。

(4) 群杭中の一本の杭に関するp-y履歴モデル

CASE 1-6~1-8の測定開始後20~20.5secにおける杭1と 杭3のp-y履歴を重ね合わせたものを図-6に示す。また 図-7には土木研究所基礎チームが行った単柱式基礎の振 動台実験²⁰で得られた基礎の加振方向に対する面に作用 した地盤反力度pと基礎と地盤の相対変位yの関係を示す。

杭基礎の前列杭となる杭におけるp-yの復元力特性と、 単柱式基礎の各面に作用するp-yの復元力特性は相似で ある。よって、群杭中におけるある杭のp-y関係p(y, z)を、 単杭のp-y関係p₀(y, z)を元に、

 $\mathbf{p}(\mathbf{y},\mathbf{z}) = \ \eta \ (\mathbf{z}) \times \mathbf{p}_0(\mathbf{y},\mathbf{z})$

と評価できると考えられる。η(z)は単杭に対する群杭効 率で、群杭効果による地盤反力度の低減率である。

例として図-8に(1)で示すように単杭のp-yの非線形履 歴特性が最大点指向型バイリニアでモデル化できるもの とする。このとき、群杭p-yの履歴モデルは同じ図の(2) に示すように η_1, η_2 を用いてモデル化できる。ここに、 η_1, η_2 はそれぞれp>0,p<0の領域で考慮される群杭効 率であり、杭位置により η_1, η_2 はそれぞれ設定される。

群杭効率η(z)の値は、深度の他に杭中心間隔や地盤の 剛性、強度などにも依存すると予測され、今後検討を進 める必要があるが、変位に対しては一定値でよいものと 考えられる。この考えによって、例えば基礎-地盤間の 相互作用バネにおけるp-y関係のモデル化を容易にする ことができる。

4. まとめ

大地震時における群杭基礎の動的挙動を明らかにする ため群杭基礎模型の振動台実験を行った。本論文ではそ の結果を用いて群杭効率のモデル化を検討した。

- ・ 群杭基礎における最外縁の杭が受ける地盤反力度の 履歴ループ形状と単柱式基礎の地盤反力度の履歴ル ープ形状はよく一致し、群杭基礎をモデル化する際 においては、単柱式基礎により作成したモデルより 類推できると考えられる。
- ・ 群杭基礎中のある杭のp-y関係は単杭のそれに群杭 効率ηを乗じることでモデル化できると考えられる。

現在、実験の数値解析を行うことにより検証を行って いるところであり、別な機会に結果を報告したい。



図-8 群杭効率を考慮したモデル

参考文献

- Brown D. A., Morrison C., and Reese L. C.: Lateral load behavior of pile group in sand, J. of Geotech. Eng., ASCE, Vol. 114, No. 11, pp. 1261–1271, 1988.
- 白戸真大他:「地震時に基礎が受ける地盤抵抗に関する振動台実験(その2)」,土木学会年次学術講演会,第56回, pp.64-65,2001/10

(2003.10.10 受付)