

杭基礎の液状化挙動に関する大型実験の 遠心実験による再現

田地陽一¹・佐藤正義¹・香川崇章²・箕輪親宏³

¹正会員 清水建設(株) 技術研究所 (〒135 東京都江東区越中島3-4-17)

²正会員 Wayne State University (Detroit 48202, Michigan, U.S.A.)

³ 科学技術庁防災科学技術研究所 (〒305 茨城県つくば市天王台3-1)

遠心力場での杭基礎の挙動が実物を再現できるかについての検証は重要である。そこで、大型せん断土槽を用いた杭基礎の液状化実験を実物とし、遠心振動実験により縮尺を1/15にして再現実験を行った。大型振動実験の杭基礎には、長さ6m、径300mmの実物のPHC杭を用い、地盤は霞ヶ浦産の砂を用い水中落下法により作成した。遠心振動実験は、大型せん断土槽と相似なプローポジションをした土槽を用い、地盤は同一材料を水中落下法によって作成した。実験結果の比較により、過剰間隙水圧の上昇過程や液状化層の分布に関して、遠心振動実験は大型振動実験の液状化挙動を概ね再現でき、杭の曲げモーメント分布においても、液状化初期において定性的に一致する結果が得られた。

Key Words : dynamic centrifuge test, 1 g shaking table test, group pile foundation, bending moment

1. まえがき

遠心振動実験は、通常の模型実験に比べ原理的には土の応力に関する相似則を満足させた実験を行うことができ、実地盤の地震時挙動を再現するための有力な手段と考えられる。しかし、遠心振動実験において模型地盤を作成しようとした場合、必ずしも対象とする実地盤と同一にすることができない部分が存在する。したがって、遠心振動実験が実際の地盤と構造物の地震時挙動をどの程度再現できるかをチェックするとともに、その問題点を解決するための実験技術を向上させる必要がある。これまでこのような実験的検討は非常に少なく、Shibataら¹⁾が乾燥砂地盤の周波数伝達特性、木村ら²⁾がダムの地震時応答、Kazamaら³⁾がケーソンに作用する地震時土圧、Kosekiら⁴⁾が液状化時の埋設構造物の浮上について1g場の大型実験との比較が行われているのみであり、液状化時の杭基礎の挙動に関して比較した研究はみられない。本研究では、過去に例をみない大型せん断土槽を用いた杭基礎の液状化実験⁵⁾を対象とし、相似則を満足する遠心振動実験を行い、両者を比較することによって実物の再現実験を行う場合の問題点を検討する。

2. 振動実験の概要

(1)大型振動実験

大型振動実験は、防災科学技術研究所所有の振動台(サイズ:15x15m、最大搭載質量:500 t)と大型せん断土

槽を用いて行った。せん断土槽の内寸法は長さ11.6m×高さ6m×幅3.1mである⁶⁾。

実験に用いた試料は、霞ヶ浦近くの銚田で採取した川砂を水洗いしたもので、図-1に示す粒度分布を有している。模型地盤は自然乾燥状態の試料を水中落下法により、平均相対密度38%で作成した。間隙流体は水を用い、地下水位は地表面に設定した。構造物は22.2tの鋼板を積み重ねた剛体(2.5m×2.5m×0.45m)で、杭基礎は4本の実物のPHC杭を用いた。PHC杭は杭径300mm、肉厚86mm、長さ6mで、杭頭は構造物に剛結し、杭下端は底盤にピン結合している。群杭効果を小さくするために、杭中心間の距離は杭径の6倍とした。

図-2に大型振動実験の計器配置を示す。加速度計、間隙水圧計は、杭基礎の中心位置の地盤に設置した筒状の柔なプラスチックネットに取付けた。また、杭の曲げひずみを測定するため、杭製造段階でPC鋼線とは別に設置した鉄筋にひずみゲージを貼った。

実験に用いた振動台入力波は、兵庫県南部地震のポートアイランドGL-32mで観測されたNS方向の地震波を、時間縮尺1/2、最大加速度350Galにして用いた。

(2)遠心振動実験

遠心振動実験は、清水建設技術研究所所有の装置を用いて実施した。振動台の仕様は、振動台設置時の有効回転半径3.11m、テーブルサイズは950×650mm、最大遠心加速度50gで最大搭載質量300kgである。

表-1は、遠心実験に適用した相似則を示したもの

である。実験の縮尺は1/15とし、遠心加速度15gである。せん断土槽は、大型せん断土槽と相似な形状をしており、内寸法は長さ80cm×高さ41cm×幅23cmである。

模型地盤の試料は大型振動実験と同一の砂を用い、地盤の作成方法も同一の水中落下法としたが、地盤の平均相対密度は $Dr=65\%$ 、 $\rho_s=1.98\text{t/m}^3$ で大型振動実験と比較して密なものになった。透水性の相似則を満足させるため、間隙流体には水の15倍の粘性(15cs)をもつシリコンオイルを用いた。

杭基礎のモデル化は、大型実験のPHC杭をそのまま縮小したものを作成できなかったため、PHC杭の初期の曲げ剛性に関する相似則を一致させた鉄パイプを用いることとした。模型杭は、径20mm、肉厚0.5mm、長

さ40cmであり、杭本数、配置、杭頭、杭下端の固定条件とも大型振動実験と一致させた。

図-3に遠心振動実験の計器配置を示す。杭間の地盤の中心位置に加速度計、間隙水圧計を設置し、杭の曲げひずみは、4本杭中の杭1本で計測した。

遠心振動実験における振動台入力波は、本来大型振動実験のものを時間縮尺1/15にして用いるべきであるが、遠心実験の振動台では大型実験で用いた低周波数を含んだ大きな入力波で加振することができなかったため、時間縮尺1/20の高周波数の地震波にして用いた。これについては、今後改善する予定である。

表-1 実験に用いた相似則

	Symbol	Scale ratio	Unit	1g	Centrifuge
Sand	Thickness	H_s	$1/\lambda$	m	5.93
	Density	ρ_s	1	g/cm^3	1.83
Stratum	Length of pile	L	$1/\lambda$	m	6.0
	Diameter	D	$1/\lambda$	mm	300
Pile	Thickness	t	$1/\lambda$	mm	86
	Young's modulus	E	1	MN/m^2	44,100
Pile	Geometrical moment of inertia	I	$1/\lambda^4$	cm^4	36,300
	Bending stiffness	$E \cdot I$	$1/\lambda^4$	$\text{MN} \cdot \text{m}^2$	16.0
Pile	Area	A	$1/\lambda^2$	cm^2	471
	Normal stiffness	$E \cdot A$	$1/\lambda^2$	MN	2,080
Footing	Mass	m_f	$1/\lambda^3$	kg	22,200
	Length	L_f	$1/\lambda$	m	2.5
Exciting acceleration				α	λ
				g	0.2
					3.1

$1/\lambda = \text{model} / \text{prototype} = 1/15$

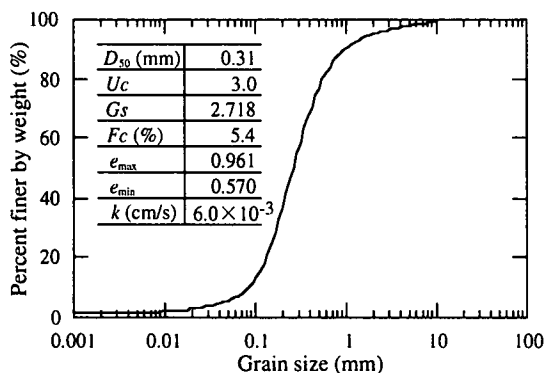


図-1 粒度分布と物理諸量

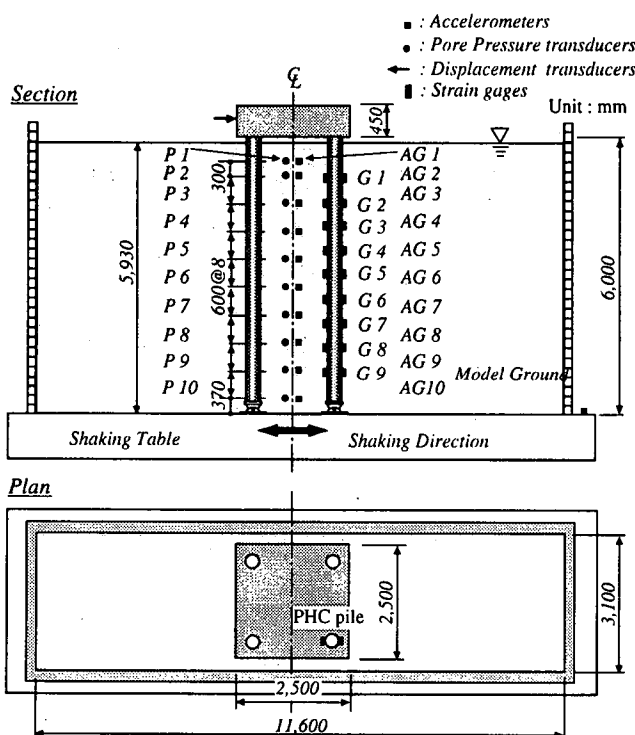


図-2 大型振動実験の計器配置

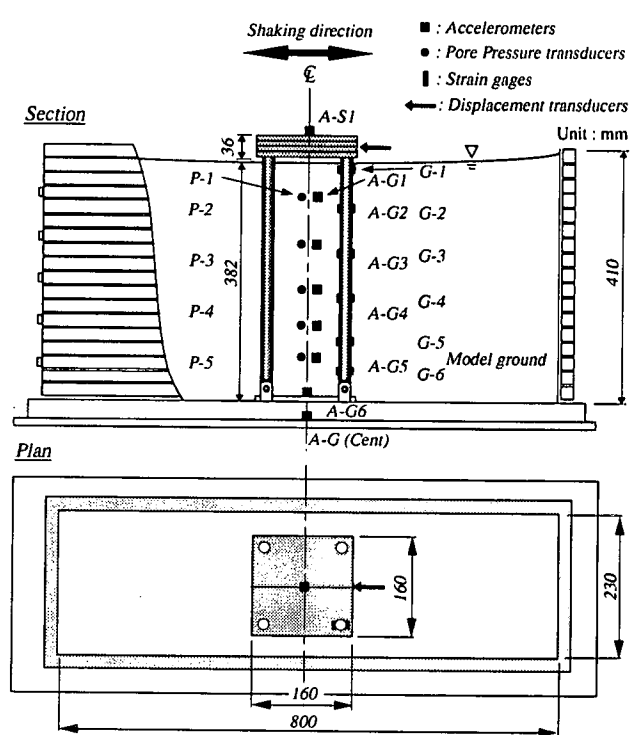


図-3 遠心振動実験の計器配置

模型地盤の特性を把握するため実物換算で微小な加振加速度6Gal、2～10Hzの正弦波スイープ加振を行った。その結果、地盤の固有振動数は3.75Hzであった。

遠心振動実験は、大型振動実験の再現実験を行うために必要な事項として、地盤条件、杭基礎の諸元、振動台入力波のみを事前に入手し、実験終了後に大型振動実験の結果と比較する方法で行った。

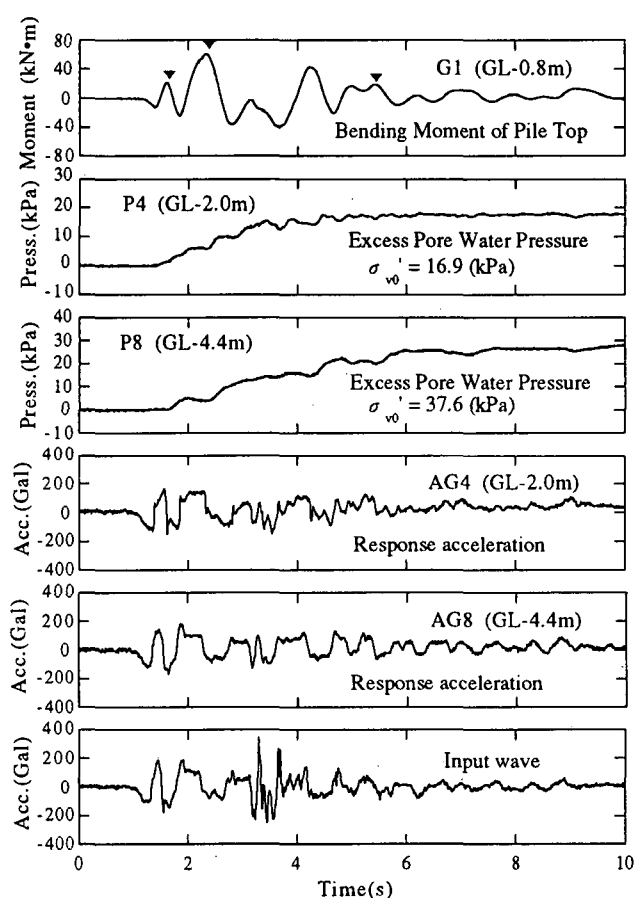
3. 実験結果の比較

図-4 (a)に、大型振動実験における振動台入力波、地盤の加速度応答、過剰間隙水圧および杭頭の曲げモーメントの時刻歴を示す。同様に(b)は、遠心振動実験の時刻歴である。遠心振動実験で用いた加速度入力波形は、大型振動実験で用いた波形の時間縮尺を1/20にして用いているため、波形全体として高周波数成分が多く、振動台入力波としての再現性は良くない。両実験とも地盤の加速度応答は、表層で減少しているが、その傾向は遠心振動実験の方が顕著である。過剰間隙水圧の上昇過程については、大型振動実験は2～5秒にかけて上昇しているのに対し、遠心振動実験は1～3秒であり、大型振動実験の方が水圧の上昇する時刻が遅い。これは、両実験の振動台入力波の違いを考慮すれば、同様の過剰間隙水圧上昇をしているものと

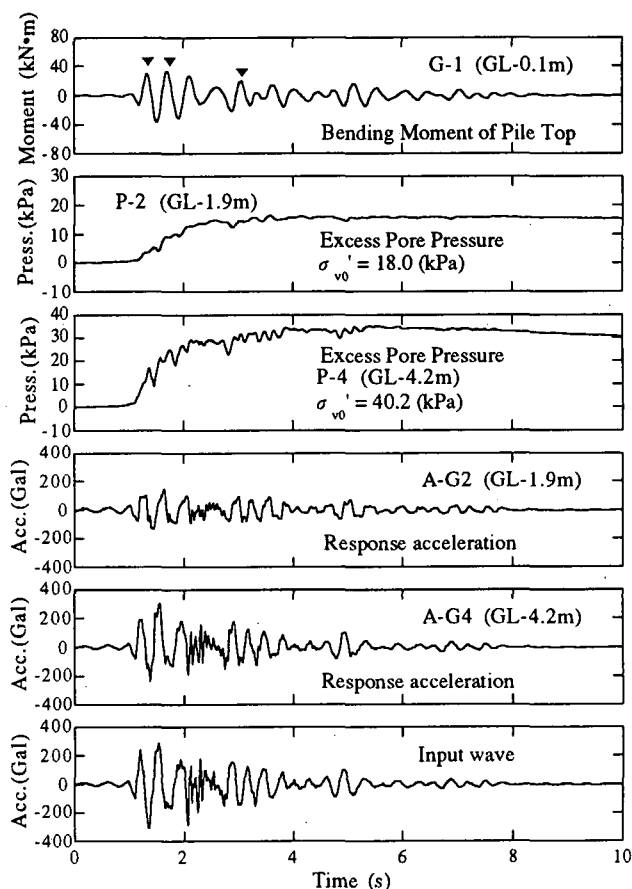
考えられる。

図-5は、図-4において杭の曲げモーメントが大きな値を示す3つの時刻(▼印)と加振終了時刻における過剰間隙水圧の深度分布を比較したものである。加振終了時刻において、大型振動実験ではGL-5.5m付近とGL-3m以浅で液状化が生じており、その中間層では約60%しか水圧が上昇していない。遠心振動実験ではGL-2m以浅で液状化が生じており、その下層では80～90%の水圧上昇であり、過剰間隙水圧比は異なった傾向を示している。しかし、過剰間隙水圧の上昇過程である3つの時刻では、両実験とも中間層のGL-3m付近で小さくなっており、分布形状としては遠心振動実験で大型振動実験の液状化挙動を概ね再現できている。

図-6は杭の曲げモーメントの深度分布の比較である。両実験とも杭頭で大きなモーメントが生じており、液状化初期の曲げモーメント分布は一致している。しかし、過剰間隙水圧がある程度上昇した後のモーメント分布には差が生じている。大型振動実験では、ひび割れモーメント(37.4kN・m)を越える値が計測されているが、遠心実験ではこの部分は表現できていない。これらの違いは、振動台入力波の振動数成分の違いにより杭基礎の応答特性が異なったことが考えられ、構造物の変位や加速度応答の比較により、今後明らかにして行くことが必要である。

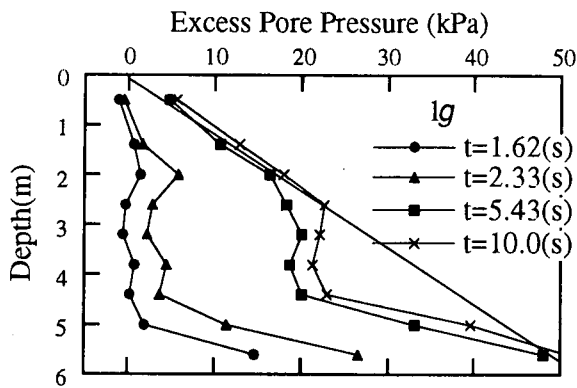


(a) 大型振動実験

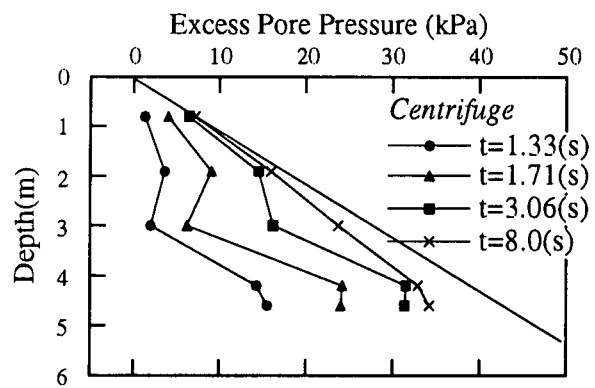


(b) 遠心振動実験

図-4 実験結果の比較

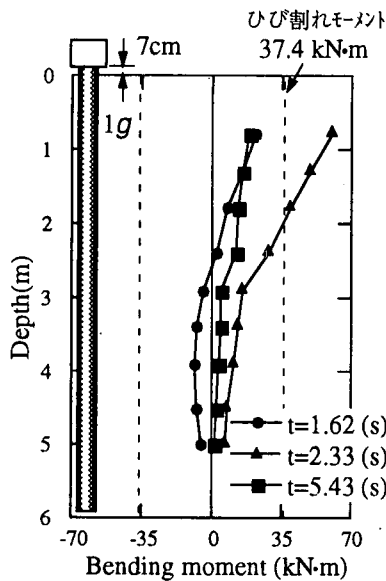


(a) 大型振動実験

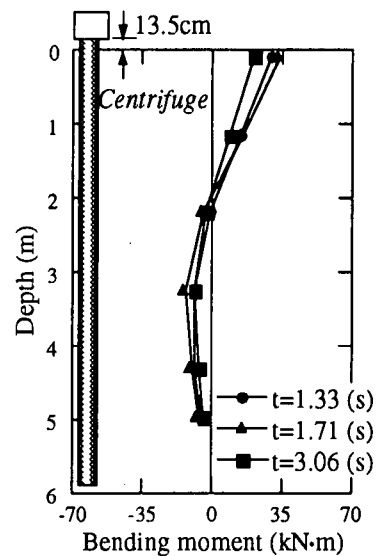


(b) 遠心振動実験

図-5 過剰間隙水圧分布の比較



(a) 大型振動実験



(b) 遠心振動実験

図-6 杭の曲げモーメント分布の比較

4. まとめ

PHC杭を用いた大型振動実験と遠心振動実験での液状化時の杭基礎の挙動を比較した。過剰間隙水圧の上昇過程や深度分布に関して、遠心振動実験は大型振動実験の液状化挙動を概ね再現でき、杭の曲げモーメント分布においても、液状化初期において定性的に一致する結果が得られた。また、今回の実験の比較では、地盤密度や杭基礎のモデル化よりも、入力波形の振動数成分の違いにより杭基礎の応答特性が異なっていたことが考えられる。今後、これらの点を踏まえ、遠心振動実験で実地盤の地震時挙動を再現するための技術の確立にむけて検討を進める予定である。

最後に、本研究は防災科学技術研究所、Wayne State Univ.との共同研究である「地中埋設構造物の大型振動実験に関する研究(EDUS)」プロジェクトで実施しました。この研究の機会を与えていただいた、東京理科大学 石原研而教授、基礎地盤コンサルツ 酒井運雄氏、東京ソイルサーチ 阿部秋男氏をはじめEDUSプロジェクトの関係者の方々に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) Shibata, T., K. Kita, S. Kobayashi and A. Yashima : "Performance of shaking table tests and measurement of shear wave velocities in a centrifuge", Proceedings of The International Conference Centrifuge 91, pp.391~398, Balkema, 1991.
- 2) Kimura, M., F. Katahira, H. Sato and M. Sato: "Centrifuge Modeling of Earthquake Response of Earth Dams", Proceedings of The Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, Paper No.537, 1996. 6.
- 3) Kazama, M., T. Inatomi and E. Iizuka : "Comparison of 1g and centrifuge models of a dynamic earth pressure problem", Proceedings of The International Conference Centrifuge 94, pp.197~202, Balkema, 1994.
- 4) Koseki, J., A. Takahashi, Y. Hayashi and O. Matsuo : "Comparison of centrifuge and shaking table tests on Liquefaction induced damage", Proceedings of The First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, vol. II, pp.729~734, 1995.
- 5) Kagawa, T., Y. Taji, M. Sato and C. Minowa : "Soil-Pile-Structure Interaction in Liquefying Sand from Large-Scale Shaking-Table Tests and Centrifuge Tests", A.S.C.E. Annual Convention, Minneapolis, MN, October 1997. (Submitted)
- 6) 石原研而, 香川崇章, 小川信行, 箕輪親宏, 酒井運雄, 阿部秋男 : 大型液状化再現装置の設計・製作について, 第31回地盤工学研究発表会, pp.1189~1190, 1997.7.