

地盤－杭－構造物系の大型実験を対象とした遠心振動実験による再現

佐藤正義*

Reproduction of Large-scale Tests of Dynamic Behavior on Sand Deposits and Soil-Pile-Structure Systems by Dynamic Centrifuge Modeling

Masayoshi SATO

*Disaster Prevention System Research Center,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
m.sato@bosai.go.jp*

Abstract

This paper documents three case studies that involve dynamic centrifuge tests that simulated large-scale shaking Table tests on soil-pile structure systems. The large-scale shaking table tests were performed using the one of the world's largest laminar shear box with depth of 6 m and plan dimensions of 11.6 m and 3.1 m. Life-size steel and pre-stressed concrete piles were used in these test. The dynamic centrifuge tests treated the large-scale models as the prototype. Only essential information about the large-scale models and the testing conditions were available to design and perform the dynamic centrifuge tests. The three case studies showed that carefully designed performed centrifuge tests could reproduce the key features of the responses of the large-scale models. The large-scale tests involved intense shaking that produced strong nonlinear stress-strain effects and degradation of soil stiffness due to liquefaction in the foundation soil models. However, some differences were also found in the results from these types of tests.

Key words : Large-scale shaking table test, Large-scale laminar box, Soil-pile-structure system, Dynamic centrifuge test, Soil liquefaction, Similarity rule, Reproduction

1. はじめに

遠心振動実験は、通常の重力場（重力加速度 9.8 m/s^2 が発生している状況を遠心振動実験にて発生する遠心力場と対比して重力場と称する）の地盤の模型実験に比べ原理的には、土の自重による拘束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る。そのため、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、今後研究を進展させることにより、重要構造物の実設計への適用が期待される。しかし、遠心振動実験の結果がどの程度まで実際の地盤と構造物の挙動を再現できているかを確認する、すなわち相似則をチェックする必要がある。実際問題として、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や実構造物と同一条件にすることができない部分が存在する。したがって、その問題点を解決するための実験技術を向上させることは、今後の遠心振動実験による地盤の

耐震性評価手法を確立するために重要である。

基礎の支持力問題や斜面の安定などの静的問題に対しては、現場実験が行われた場合、それを対象として再現性のチェック実験が可能であるが、地盤と構造物の地震時挙動に関して相似則のチェックを行おうとした場合、その対象となるデータを得るのが困難という状況がある。相似則のチェックとして、まず遠心振動実験では Modeling of models¹⁾ がよく用いられる手法である。これは例えば実物に対して 1/10, 1/20, 1/40 の縮尺比の遠心振動実験を行い、それらの結果が相似則を満足していれば、実物にも適用できるというものであるが、明らかかな外挿であるため、本質的に相似則チェックとしては大きな問題点を抱えている。次に、実構造物の地震観測結果に基づく実験が考えられるが、この場合地震波の入力が 3 方向になるのに対し、遠心振動実験では 2 方向加振の実験²⁾ もわずかに見られるが、現状ではほとんどが 1 方

* 独立行政法人 防災科学技術研究所 防災システム研究センター

向加振の実験となるので、3 方向加振と 2 方向および 1 方向加振では実験結果の比較が難しい。そこで大型の振動実験を行い、それを対象とし、実験条件を合わせて再現性の実験を行うのが、現状では最も精密な相似則チェックの方法と考えられる。ただし、実物となる実験があまり大きくない場合には、遠心振動実験の模型が小さくなり、実験精度が悪くなることに注意する必要がある。

これまで、遠心振動実験による実物の挙動の再現性において、動的問題に関する検討は少ないが、Shibata *et al.*³⁾ は乾燥砂地盤の周波数伝達特性を 10 : 1 の縮尺で実施しており、その結果は、共振周波数で重力場の実験よりも応答倍率が小さくなっている。その原因として、遠心振動実験ではせん断土槽フレーム間の摩擦のためと報告されている。Kimura *et al.*⁴⁾ は、ダム地震時応答特性を 16 : 1 の縮尺で実施し、重力場の実験にできるだけ同様の作成方法で行った事により、遠心振動実験で重力場の実験を比較的良好に再現できることを報告している。Kazama *et al.*⁵⁾ は、ケーソンに作用する地震時土圧を模型縮尺 4 : 1、遠心加速度 40g (g : 重力加速度 9.8 m/s²) で実験しているが、このままでは相似則が成り立たないので、重力場の実験に香川の相似則⁶⁾を導入しその結果を比較検討し、両者が概ね一致していると報告している。しかし、このような 2 つの相似則を適用してそれを比較するには、それぞれの相似則の成立性を検証する必要がある。また、Koseki *et al.*⁷⁾ は、液状化時の埋設構造物の浮上について模型縮尺 20 : 1 で実験を行い、重力場の大型実験との比較し、液状化にいたるまでの過剰間隙水圧上昇が遠心振動実験の方が早いことを報告している。これについては、遠心模型地盤の透水性が何処まで再現できているかの問題があるのと、実物となっているものが小さいため、遠心振動実験の模型が小さすぎると考える。このように、遠心振動実験の実物に対する再現性を検討したものは幾つか見られるが、決して十分とは言えない。さらに、遠心振動実験における今後の適用分野として、杭基礎の液状化時を含むその動的挙動に関して再現性を検討することは非常に重要と考えられるが、この問題に関しては Kagawa *et al.*⁸⁾ の研究のみである。

本研究は、これまでに実施した大型実験を対象にした遠心振動実験による再現実験を総括的にまとめたものである。本研究では、大型せん断土槽を用いた乾燥砂地盤の動的挙動の再現実験(CASE-1)⁹⁾、乾燥砂地盤における杭基礎の動的挙動の再現実験(CASE-2)¹⁰⁾、さらに杭基礎の液状化時挙動に関する再現実験(CASE-3)¹¹⁾を対象として、相似則を満足する 3 ケースの遠心振動実験を行い、両者を比較することによって、大型実験の再現性を検討したものである。なお、ここで実施した遠心振動実験は、大型実験の再現実験を行うために必要な条件として、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、実験終了後に大型実験の結果と比較する方法で行っており、完全なブラインドテストである。

2. 実験装置と地盤材料

2.1 大型実験装置および遠心振動実験装置

重力場のせん断土槽の大型実験に用いた振動実験装置は、箕輪ら¹²⁾によりその詳細が述べられている防災科学技術研究所の振動台であり、テーブルサイズは 15 m × 14.5 m である。最大搭載質量 500 t を搭載した場合の加振能力は、最大加速度 500 Gal、最大速度 75 cm/s である。

遠心振動実験に用いた実験装置は、Sato¹³⁾によりその詳細が述べられている。主な装置仕様は、振動台設置時の有効回転半径 3,110 mm、テーブルサイズ 950 × 650 mm、遠心加速度 50g において最大搭載質量 300 kg、加振能力は最大加振加速度 10g である。振動加振方式は電磁式を採用しており、高周波数領域でも安定した制御波形の加振ができるという特徴がある。

2.2 大型実験および遠心振動実験のせん断土槽

重力場の大型実験に用いたせん断土槽¹⁴⁾の写真を、図 1 に示す。土槽は高さ 6 m で、平面の内寸法は、長さ 11.6 m、幅 3.1 m である。土槽は、H 型鋼 200 mm × 200 mm を長方形のフレームに加工したものを 29 段積み重ね、土槽内側には止水用に厚さ 3 mm のゴムメンブレンを取り付けている。また、各々の土槽フレーム間には外径 200 mm の鋼製パイプをローラーとして設置し、H 型鋼との間にはテフロンシートを敷いて、土槽自体のせん断剛性を小

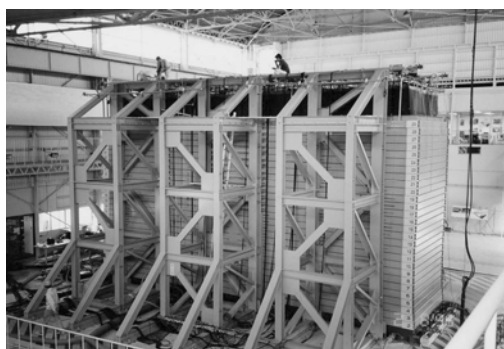


図 1 大型せん断土槽の外観
Fig. 1 Laminar container of large-scale shaking table test at the NIED.

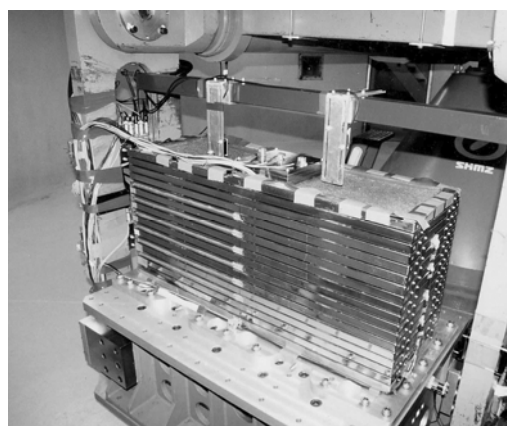


図 2 遠心振動実験用のせん断土槽の外観
Fig. 2 Laminar container of centrifuge shaking table test.

さくしている。

遠心振動実験に用いたせん断土槽の写真を、**図 2** に示す。土槽の内寸法は、長さ 800 mm，高さ 410 mm，幅 230 mm であり、大型実験のせん断土槽と概ね相似の形状をしている。土槽は、角パイプを長方形のフレームに加工したものを 18 段積み重ねたもので、土槽内側には止水用に厚さ 0.5 mm のゴムメンブレンを取り付けている。土槽フレームは、高さ 20 mm，幅 40 mm，厚さ 1.2 mm の長方形中空スチール製の角パイプを用いて軽量化を図っている。また、各々の角パイプ間にはベアリング厚さ 2 mm，ベース厚さ 1 mm の平型ベアリングを設置している。

2.3 地盤材料

実験に使用した大型実験および遠心振動実験ともに同じ地盤材料である。茨城県霞ヶ浦で採取した川砂 ($\rho_{max}=1.73t/m^3$, $\rho_{min}=1.39t/m^3$, $D_{50}=0.31mm$, $G_s=2.718$, $U_c=3.0$, $F_c=5.4\%$) であり、**図 3** に示す粒度分布を有している。

2.4 実験ケースと相似則

表 1 に示すように、大型実験は、不飽和の地盤のみの実験、不飽和地盤中の杭基礎の実験、液状化地盤中の杭基礎の実験に関する 3 ケースの実験を行い、遠心振動実験は大型実験に対応する 3 ケースの実験を実施した。これらの実験に適用した相似則の一覧を**表 2** に示す。大型

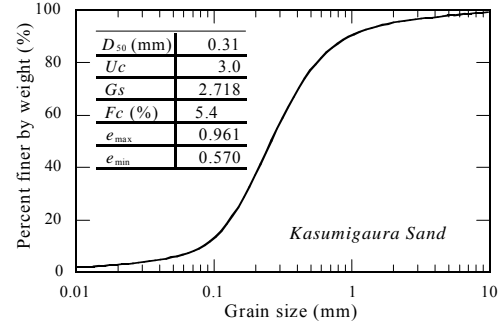


図 3 実験に用いた地盤材料の粒径加積曲線と物理定数
Fig. 3 Grain-size distribution curve and physical properties.

表 1 実験ケースと条件

Table 1 Test conditions for large-scale and centrifuge tests.

	Sand Deposit	Pile Foundation	Input wave		
			Wave shape	Frequency	Acceleration
CASE-1	unsaturated (w=4%)	without	Sine Sweep	1~7Hz	50 Gal
			Sine	3Hz	100 Gal
			Sine	3Hz	200 Gal
			Sine	5Hz	100 Gal
CASE-2	unsaturated (w=11%)	PHC pile (4=2x2)	Sine	3Hz	0~600 Gal
CASE-3	saturated (w=99%)	Steel pile (4=2x2)	Port Island (NS-direction) (Hyougoken Nanbu Earthquake)		430 Gal

表 2 遠心振動実験に適用した相似則

Table 2 Similitude requirements used in the centrifuge tests.

	Symbol	Scale ratio	Unit	CASE-1		CASE-2		CASE-3		
				Prototype	Centrifuge	Prototype	Centrifuge	Prototype	Centrifuge	
Sand deposit	Thickness	H	1/N	m	5,000	333	5,994	400	5,930	395
	Density	ρ_t	1	kg/cm ³	1.59	1.59	1.69	1.69	1.99	2.00
Structure	Mass	m	1/N ³	kg	—	—	15,600	4.6	22,200	6.6
Pile	Length of pile	L	1/N	mm	—	—	6,000	400	6,000	400
	Diameter	D	1/N	mm	—	—	318.5	21.23	300	20
	Thickness	t	1/N	mm	—	—	6.9	0.46	86	5.73
	Young's modulus	E	1	MN/m ²	—	—	2.06E+05	2.06E+05	4.41E+04	4.41E+04
	Area	A	1/N ²	m ²	—	—	6.75E-03	3.00E-05	5.78E-02	2.57E-04
	Geometrical moment of inertia	I	1/N ⁴	m ⁴	—	—	8.20E-05	1.62E-09	3.84E-04	7.59E-09
	Normal stiffness	E · A	1/N ²	MN	—	—	1.39E+03	6.18E+00	2.55E+03	1.13E+01
	Bending stiffness	E · I	1/N ⁴	MN/m ²	—	—	1.69E+01	3.34E-04	1.70E+01	3.35E-04
Input wave	Shaking acceleration	a	N	Gal	50~200	750~3,000	600	9,000	430	6,450
	Time	t	1/N	sec	15	1	15	1	15	1
	Frequency	f	N	Hz	1~7	15~105	1	15	1	15

*) Scale ratio=1/15=centrifuge/prototype

実験に対する遠心振動実験の縮尺は3ケースとも1/15とし、遠心加速度は15gである。これ以降の遠心振動実験結果の時刻歴および分布図は、相似則により大型実験に対応する物理量に換算して示す。

3. 不飽和砂地盤のみの実験

3.1 大型実験の実験方法

実大地盤の動的挙動を把握するための基本実験として、砂地盤のみの振動実験を実施した。CASE-1の大型せん断土槽の実験モデルを図4に示す。地盤は自然乾燥状態の少し湿った状態の砂を用い、砂をホッパーに入れ落下させて水平にならしたあと、30 cmの層厚毎にプレートコンパクターで締め固め、地盤深さ5 mで製作した。実験前における地盤の平均密度は $\rho_d=1.59\text{t/m}^3$ 、相対密度 $D_r=64\%$ 、含水比 $w=5.4\%$ であった。計器配置は図4に示すように、加速度計を地盤内に鉛直に設置したプラスチックネットに取り付けた。このネットは筒状の柔いものであるため、地盤の挙動に追従する。

加振ケースとして、モデル地盤の特性を把握するため (a)周波数範囲1~7 Hz、加振加速度50 Galの正弦波スイープ加振、次に定常状態の応答になるよう波数100波で (b)正弦波加振3 Hz、100 Gal、(c)正弦波加振3 Hz、200 Gal、(d)正弦波加振5 Hz、100 Galの計4つの加振実験を実施した。

3.2 遠心振動実験の実験方法

遠心振動実験の地盤モデルは、図11に示したものの杭基礎がない場合であるが、地盤深さ333 mmである。大型実験の地盤の含水比 $w=5.4\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.59\text{ g/cm}^3$ であるが、遠心振動実験の地盤の平均密度が、大型実験の再現にどう影響するか把握するため、 $w=0\%$ 、 $\rho_d=1.59\text{g/cm}^3$ と $w=5\%$ 、 $\rho_d=1.54\text{g/cm}^3$ の2つの模型地盤を作成して実験を行った。実験開始時は緩い地盤を作成し、最

終的には振動加振により沈下を発生させて密度を増加させることにより、所定の密度になるようにした。

計測は、大型実験と比較できるように地盤中心の深度方向に加速度計6台を設置した。加振は、大型実験に対応する計4つの加振実験を実施し、両者の実験結果を比較できるようにした。

3.3 大型実験と遠心振動実験の比較

正弦波スイープ加振について、基盤(土槽底面)に対する地表の周波数伝達関数を図5に示す。遠心振動実験の $w=5\%$ 、 $\rho_d=1.54\text{g/cm}^3$ の場合は、大型実験と加速度応答倍率、固有振動数とも一致しているとは言い難い。一方、 $w=0\%$ 、 $\rho_d=1.59\text{g/cm}^3$ の場合は大型実験と加速度応答倍率、固有振動数とも概ね一致しているが、周波数伝達関数の形状は異なっている。大型実験と遠心振動実験の結果が異なる要因として、地盤密度、含水比、地盤の非線形特性としての剛性低下および減衰、土槽の振動特性に違いによることが考えられる。地盤密度と含水比の影響については、図5の結果から、含水比の一致している $w=5\%$ 、 $\rho_d=1.54\text{g/cm}^3$ の場合よりも、地盤密度の一致している $w=0\%$ 、 $\rho_d=1.59\text{g/cm}^3$ の場合のほうが大型実験に良い一致をみせていることから、含水比よりも地盤密度の影響のほうが支配的であると考えられる。また、土槽の振動特性については、土槽フレームの加速度も測定しているが、大型実験および遠心振動実験の結果とも地盤の加速度とほぼ一致しており、土槽の影響は小さいと言える。地盤の非線形特性に関しては、この加振実験の場合における地盤のせん断ひずみは $\gamma\approx 4\times 10^{-4}$ 、せん断剛性の低下率は $G/G_0=0.5$ 程度に達しており、地盤はかなり非線形性を示している。今後、剛性低下および減衰特性の違いがどのように影響しているかを詳細に検討する必要があると考える。

地盤加速度の深度方向分布の比較を、図6~図8に示す。図6は正弦波3 Hz、100 Gal、図7は正弦波3 Hz、200 Gal、図8は正弦波5 Hz、100 Galの場合についての比較である。図6~図8を通して、全般的には遠心振動実験の $w=0\%$ の場合は、 $w=5\%$ の場合より大型実験に一致度が高い。これは、図5の周波数伝達関数において、 $w=0\%$

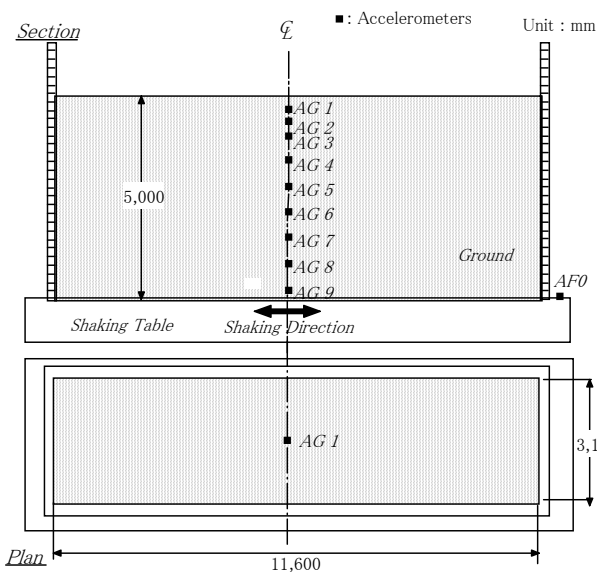


図4 地盤のみの大型実験モデルと計器配置 (CASE-1)
Fig. 4 A large-scale shaking table test model and location of transducers (CASE-1).

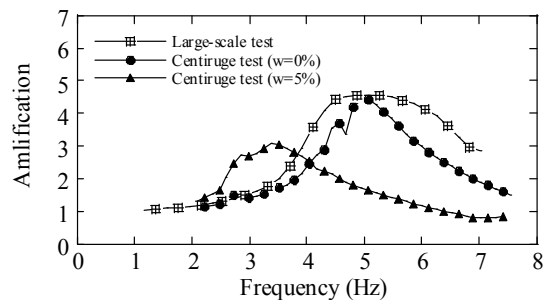


図5 正弦波掃引加振における地盤の周波数伝達関数の比較 (CASE-1)
Fig. 5 The comparisons of the frequency transfer function at the ground for the sweep shaking tests (CASE-1).

の場合は $w=5\%$ の場合より大型実験の応答特性を再現できていることから分かる。ただし、正弦波 3 Hz, 100 Gal 加震の場合は、 $w=5\%$ のほうが $w=0\%$ より大型実験の実験結果に近いが、正弦波 3 Hz, 200 Gal と正弦波 5 Hz, 100 Gal 加震の場合は、 $w=0\%$ のほうが $w=5\%$ より大型実験の実験結果に近い。この理由については、図 5 に関して周波数伝達関数が比較的一致している場合でもその形状が異なっていることなど、地盤の非線形特性の影響と

して、せん断剛性、減衰特性に関して、不明な部分があることが考えられ、今後更に詳細な検討が望まれる。

CASE-1 の実験結果の比較により、遠心振動実験では地盤密度を一致させることにより、概ね大型実験の再現が可能であるといえる。

4. 不飽和砂地盤中の杭基礎の動的挙動に関する実験

4.1 大型実験の実験方法

実大の杭基礎の動的挙動を把握するため、CASE-2 の実験として、液状化しない不飽和砂地盤中に杭基礎がある振動実験を実施した。地盤－杭－構造物系における乾燥砂の大型せん断土槽モデルと計器配置を図 9 に示す。地盤は自然乾燥状態の少し湿った状態の砂を用い、砂をホッパーに入れ、空中落下法により作成した。実験開始時における地盤の平均密度は $\rho_r=1.69 \text{ t/m}^3$, $\rho_d=1.52 \text{ t/m}^3$, 相対密度 $D_r=44\%$, 含水比は $w=11\%$ である。

構造物は、長方形の鋼板を積み重ねた長さ 3,000 mm × 幅 2,500 mm × 高さ 260 mm の剛体で、質量は 15.6 t, 杭基礎は 4 本で実物の鋼管杭（外径 318.5 mm, 肉厚 6.9 mm, 長さ 6,000 mm）である。杭頭は構造物に剛結し、杭下端は底板にピン結合した。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。土槽内に杭基礎を設置した状況の写真を図 10 に示す。計器配置は図 9 に示すように、加速度計を地盤内に設置し、杭の曲げひずみを測定するため鋼管の表面にひずみゲージを貼った。

実験に用いた振動台入力波は、正弦波の加速度漸増波で加振周波数 3 Hz, 最大加速度約 600 Gal である。

4.2 遠心振動実験の実験方法

遠心振動実験の地盤－杭－構造物系の乾燥砂の大型せん断土槽モデルと計器配置を図 11 に示す。模型地盤の作製方法は大型実験と同一である。遠心振動実験では、大型実験の再現を行うための目標とする模型地盤として、地盤の固有振動数を一致させることとした。CASE-1 で大型実験と遠心振動実験の地盤の平均密度を一致させることで乾燥砂地盤の挙動を概ね再現できたことを報告したが、平均密度を一致させるだけでは地盤の不均一性が応答特性に及ぼす影響が懸念されるため、ここでは地盤の弾性時における応答特性を一致させることが、地盤全体の挙動を検討するのに適切と考えた。したがって、模型地盤は大型実験よりもやや緩い密度で作製し、微小な加振加速度 0.1 g , 加振周波数範囲 30~150 Hz（実物換算：6.5 Gal, 2~10 Hz）の正弦波スイープ加振を行い、地盤の固有振動数を把握して、振動締め固めにより目標とする固有振動数 75 Hz（実物換算：5 Hz）の模型地盤を作製した。

杭基礎のモデル化は、大型実験で用いた鋼管杭の曲げ剛性に関する相似則を満足する鉄製パイプを用いることとした。模型杭は、外径 20 mm, 肉厚 0.5 mm, 長さ 40 cm であり、杭本数、配置、杭頭、杭下端の固定条件とも大型実験と一致させた。遠心振動実験に用いた杭基礎の写真を、図 12 に示す。

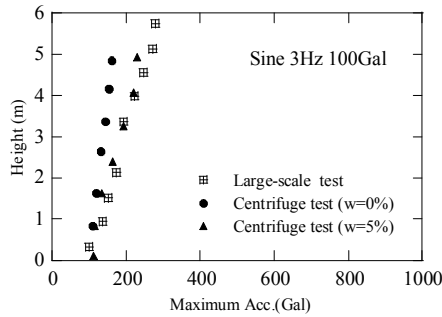


図 6 正弦波加振における地盤応答加速度の深度分布 (CASE-1: 正弦波, 振動数=3 Hz, 加速度=100 Gal)

Fig. 6 The distributions of the soil response accelerations (CASE-1: Sine wave, $f=3 \text{ Hz}$, $a=100 \text{ Gal}$).

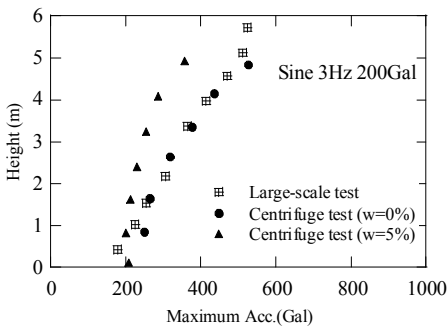


図 7 正弦波加振における地盤応答加速度の深度分布 (CASE-1: 正弦波, 振動数=3 Hz, 加速度=200 Gal)

Fig. 7 The distributions of the soil response accelerations (CASE-1: Sine wave, $f=3 \text{ Hz}$, $a=200 \text{ Gal}$).

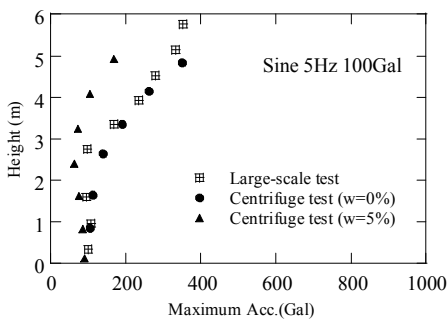


図 8 正弦波加振における地盤応答加速度の深度分布 (CASE-1: 正弦波, 振動数=5 Hz, 加速度=100 Gal)

Fig. 8 The distributions of the soil response accelerations (CASE-1: Sine wave, $f=5 \text{ Hz}$, $a=100 \text{ Gal}$).

計器配置は大型実験と比較できるように、地盤内に加速度計を設置し、杭の曲げひずみを測定するため鋼管の表面にひずみゲージを貼った。

振動台入力波は、大型実験の土槽底板上で測定されたものを時間縮尺 1/15 にして用いた。実験結果は、両者の波形形状はほぼ一致していたが、最大加速度は 400 Gal であり遠心振動実験のほうが小さめであった。

4.3 大型実験と遠心振動実験の比較

大型実験において、実験開始前に地盤の特性を把握するため、常時微動測定と板たたき法によるせん断波速度 V_s の測定を実施した。常時微動測定の結果による地盤の固有振動数は図 13 に示すように 5 Hz であった。地盤全体のせん断波測定結果は、 $V_s=118$ m/s であり、これから地盤の弾性時の固有振動数を計算すると $f=4.9$ Hz であり

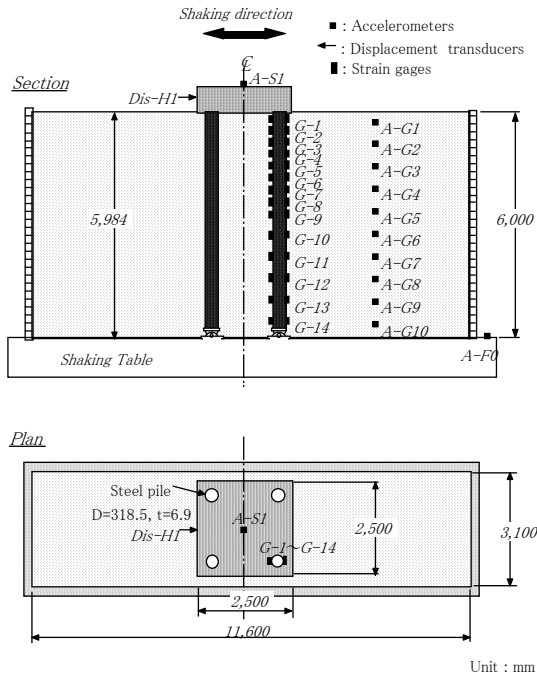


図 9 地盤-杭-構造物系の乾燥砂の大型せん断土槽モデルと計器配置 (CASE-2)

Fig. 9 Soil-pile-structure system of large-scale shaking table test model and location of transducers (CASE-2).

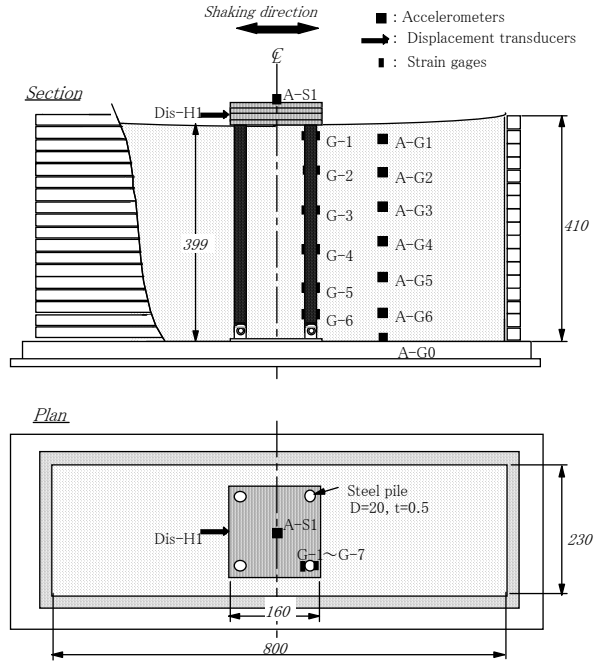


図 11 地盤-杭-構造物系の乾燥砂の遠心振動実験モデルと計器配置 (CASE-2)

Fig. 11 Soil-pile-structure system of centrifuge shaking table test model and location of transducers (CASE-2).



図 10 大型実験の杭モデル (CASE-2)

Fig. 10 The pile foundation model of the large-scale shaking table test (CASE-2).



図 12 遠心振動実験の杭モデル (CASE-2)

Fig. 12 The pile foundation model of the centrifuge shaking table test (CASE-2).

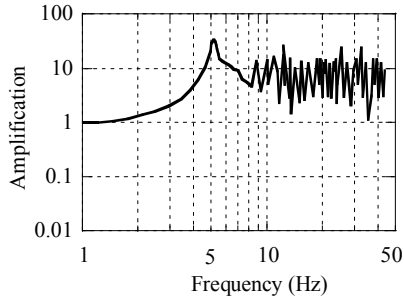


図 13 大型実験の常時微動測定の結果による地盤の固有振動数 (CASE-2)

Fig. 13 The frequency transfer function of the ground surface in the large-scale shaking table test (CASE-2).

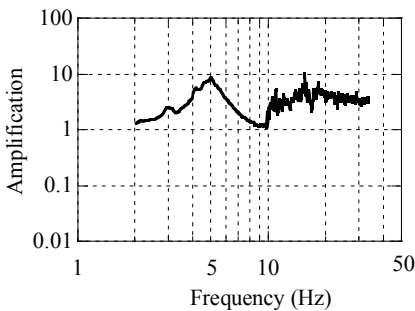


図 14 遠心振動実験の微小加振の結果による地盤の固有振動数 (CASE-2)

Fig. 14 The frequency transfer function of the ground surface in the centrifuge shaking table test (CASE-2).

常時微動測定結果と概ね一致している。遠心振動実験では常時微動測定ができないので、加振レベルが約 3 Gal の正弦波スイープ加振を行った。その結果を図 14 に示しているが、大型実験と遠心振動実験における地盤の固有振動数は、ほぼ一致させることができている。

大型実験における振動台入力および地盤と構造物の加速度応答の時刻歴を図 15 に示す。同様に、図 16 は遠心振動実験のものである。振動台入力加速度は、遠心振動実験のほうがかなり小さく、これに伴って、構造物 (A-S1) の応答加速度も遠心振動実験のほうがかなり小さい。地盤の地表付近の加速度応答 (A-G1) は、入力波の大きさが異なっている割には両者の結果は概ね一致しており、高さ $H=4.5$ m 付近の中間位置で小さくなっている傾向もとらえている。大型実験と遠心振動実験の地盤の加速度応答が同程度であることは、大型実験のほうが地盤の非線形性の程度が大きくなってしまったことが原因のひとつとして考えられる。

図 17 は、加速度の小さい加振初期の時刻 $t=3.7$ s と加速度がほぼ最大となった時刻 $t=10.6$ s における大きく地盤の加速度応答の深度分布を比較したものである。加振初期の時刻 $t=3.7$ s では、遠心振動実験と大型実験は土槽底面から $H=4$ m 付近までは一致しているが、 $H=4$ m 以上になると大型実験のほうが大きく増幅している。

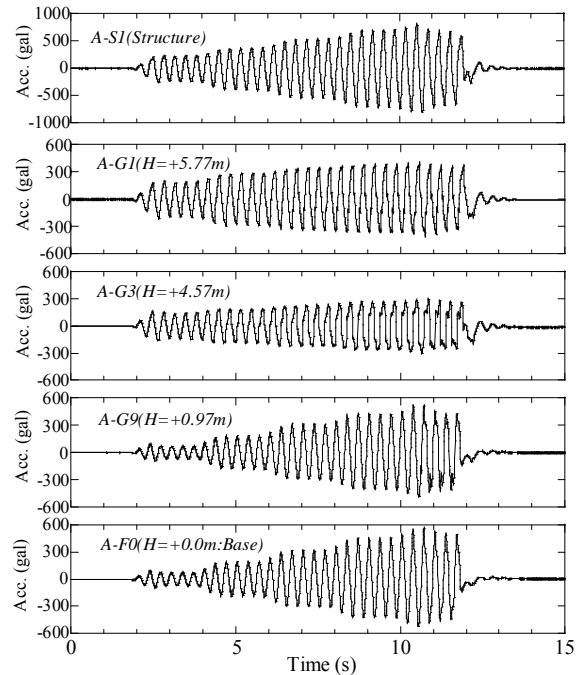


図 15 大型実験の構造物と地盤の加速度応答の時刻歴 (CASE-2)

Fig. 15 The time history of the structure and soil responses in the large-scale shaking table test (CASE-2).

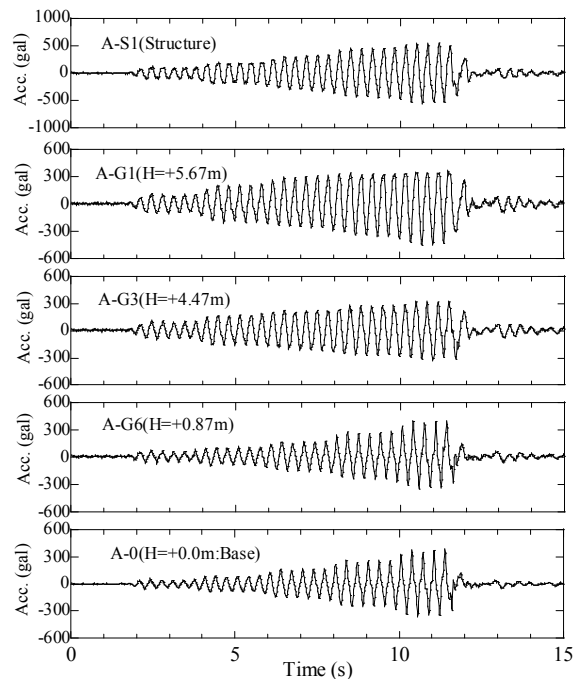


図 16 遠心振動実験の構造物と地盤の加速度応答の時刻歴 (CASE-2)

Fig. 16 The time history of the structure and soil responses in the centrifuge shaking table test (CASE-2).

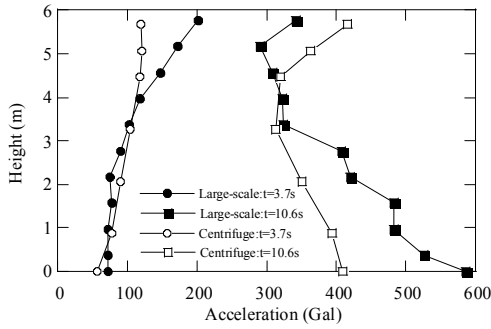


図 17 地盤の加速度応答の深度分布 (CASE-2)
 Fig. 17 The distributions of the soil response accelerations (CASE-2).

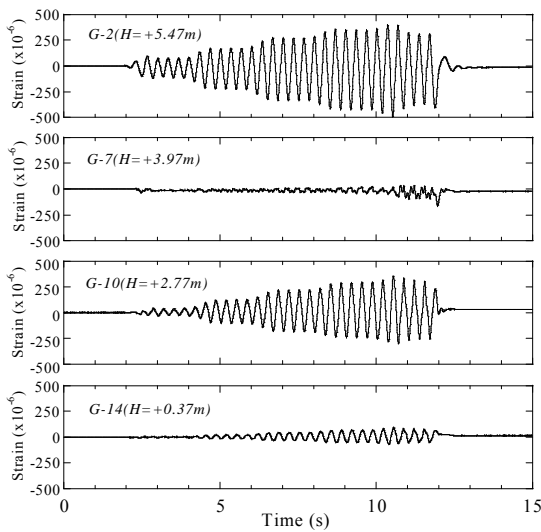


図 18 大型実験の杭の曲げひずみの時刻歴 (CASE-2)
 Fig. 18 The time history of the bending strains of pile in the large-scale shaking table test (CASE-2).

が大きくなっているが、曲げひずみの分布形状は概ね一致していると言える。高さ $H=3.5\text{ m}$ 付近の中間位置で杭の曲げひずみが小さくなっているのは、曲げひずみの正負が逆転する位置であり、杭下端はヒンジ構造のため小さくなっている。なお、曲げひずみと曲げモーメントの関係は、次式で表される。

$$\varepsilon = M y / E I \quad (1)$$

ここに、 ε : 曲げひずみ, M : 曲げモーメント, y : 杭の半径, E : 杭のヤング係数, I : 断面二次モーメント

CASE-2 では地盤と杭基礎の挙動に関して、大型実験と遠心振動実験の比較を行った、両者の弾性時における地盤の固有振動数を一致させることにより、遠心振動実験により地盤および構造物の応答加速度や深度分布に関して概ね再現できる結果が得られた。また杭の曲げひずみにおいても杭頭ではほぼ一致する結果が得られた。

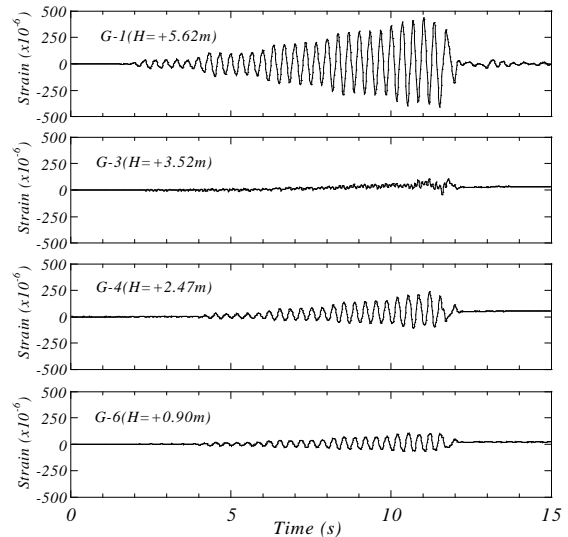


図 19 遠心振動実験の杭の曲げひずみの時刻歴 (CASE-2)
 Fig. 19 The time history of the bending strains of pile in the centrifuge shaking table test (CASE-2).

これは、遠心振動実験のほうが、減衰が大きいためではないかと考えられる。加速度がほぼ最大となった時刻 $t=10.6\text{ s}$ では、地盤下部では入力加速度が大型実験のほうが大きいため、その影響で差が出ているが、地盤上部では、遠心振動実験のほうが大きい。これは、大型実験のほうが地表付近地盤の剛性低下が大きいと考えられる。

大型実験における杭の曲げひずみの時刻歴を図 18 に示す。図 19 は、遠心振動実験のものである。両者の比較より、全般的に入力加速度の大きさのためか大型実験のほうがやや大きくなっているが、曲げひずみの応答は概ね一致していると言える。特に、高さ $H=3.5\text{ m}$ 付近の中間位置で杭の曲げひずみが小さくなるという傾向を、遠心振動実験は比較的良く再現できている。

図 20 は、杭の曲げひずみが大きな値を示した時刻の深度分布を比較したものである。全般的に大型実験のほう

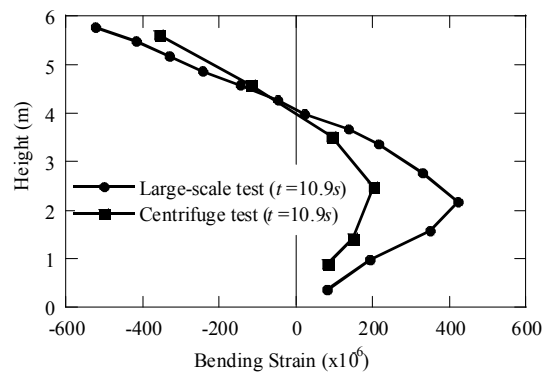


図 20 杭の曲げひずみの深度分布の比較 (CASE-2)
 Fig. 20 The distributions of the bending strain of the pile (CASE-2).

5. 液状化地盤中の杭基礎の動的挙動に関する実験

5.1 大型実験の実験方法

実大の杭基礎の液状化時挙動を把握するための実験として、飽和砂地盤中に杭基礎がある振動実験、CASE-3を実施した。その土槽モデルと計器配置を図21に示す。地盤材料は自然乾燥状態の砂を用い、ポッパーに入れて土槽の水面から1mの高さから落下させる水中落下法により作成した。地盤の平均密度は $\rho_f=1.99 \text{ t/m}^3$, $\rho_d=1.57 \text{ t/m}^3$, 平均相対密度は D_r =約60%である。間隙流体には水を用い、地下水位は地表面に設定した。

構造物は、鋼板を積み重ねた長さ2,500mm×幅2,500mm×高さ450mmの剛体で、質量は22.2t、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6,000mmで、杭頭と杭下端の境界条件はCASE2と同じである。計器配置は図21に示すように、地盤中の加速度計の横に間隙水圧計を杭基礎の中心位置の地盤に設置、杭の断面力を測定するため、杭製造段階で鉄筋にひずみゲージを貼ったものを杭のPC鋼線とは別に設置した。

実験に用いた振動台入力波は、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で観測された地震波を用いた。遠心振動実験が低周波を含んだ地震波の加振ができないため、入力波を1Hzのローカットフィルターを通したものとした。実験結果として地震波の最大加速度は約430Galであった。

5.2 遠心振動実験の実験方法

遠心振動実験の試験体概観は、図11に示したものとほぼ同じである。模型地盤の試料は大型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、地盤の平均密度は $\rho_f=2.0 \text{ t/m}^3$, $\rho_d=1.59 \text{ t/m}^3$, 平均相対密度は D_r =約65%で大型実験と比較してやや密なものになった。透水性の相似則¹⁵⁾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、実物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た。模型杭は、径20mm、肉厚0.5mm、長さ400mmであり、杭本数、配置、杭頭、杭下端の固定条件とも大型実験と一致させた。

計器配置は大型実験と比較できるように、加速度計を地盤内に設置し、杭の曲げひずみを測定するため鋼管の表面にひずみゲージを貼った。

遠心振動実験における振動台入力波は、大型実験のものを時間縮尺1/15にして用いた。遠心振動実験の土槽底板での測定結果では、両者の波形形状はほぼ一致していた。

5.3 大型実験と遠心振動実験の比較

大型実験では、実験開始前に地盤の特性を把握するため、板たたき法によるせん断波速度 V_s の測定を実施した。地盤全体の平均の V_s 測定結果は、 $V_s=108 \text{ m/s}$ であり、これから地盤の弾性時の固有振動数を計算すると4.5Hzであった。遠心振動実験では常時微動測定ができないので、加振レベルが極めて小さいスイープ加振を行った。その結果、地盤の固有振動数は4.2Hzであり、大型実験と遠心振動実験の地盤の固有振動数が概ね両者一致した地盤

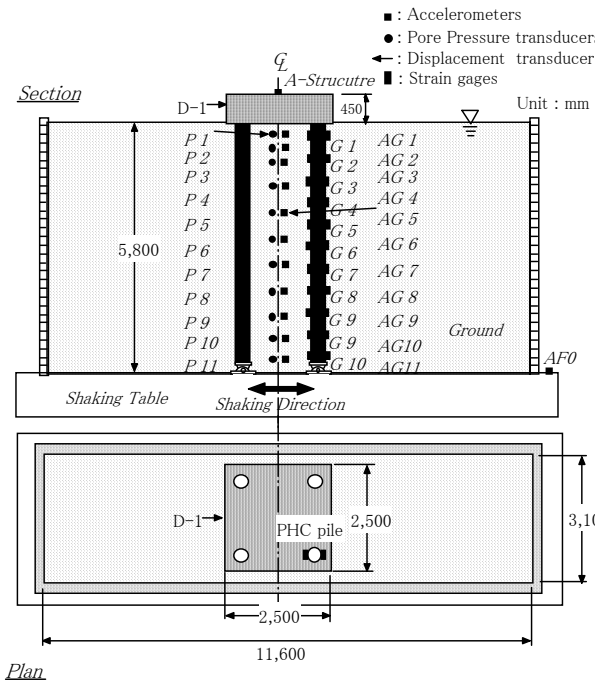


図21 地盤－杭－構造物系の液状化実験の大型せん断土槽モデルと計器配置 (CASE-3)

Fig. 21 A large-scale shaking table test model and location of transducers (CASE-3).

を作成することができた。

大型実験における振動台入力および地盤と構造物の加速度応答の時刻歴を図22に示す。同様に図23は、遠心振動実験の時刻歴である。遠心振動実験の加速度入力波形は、大型実験のものを概ね再現できている。両実験ともほぼ地盤が全層にわたって液状化したため、構造物の加速度応答が減少しているが、その傾向は大型実験の方がやや顕著である。

大型実験における過剰間隙水圧の時刻歴を図24に示す。同様に図25は、遠心振動実験の時刻歴である。過剰間隙水圧の上昇過程に関して、上昇過程で発生している振動成分の周期が異なるものの、遠心振動実験の結果は大型実験の傾向をとらえている。

加振終了時刻の約15秒後における過剰間隙水圧の深度分布の比較を図26に示す。GL-6m ($\sigma'_{v0}=56 \text{ kPa}$)で過剰間隙水圧は約58kPaとなっており、両実験ともほぼ地盤が全層にわたって液状化したことが分かる。

大型実験における曲げひずみの時刻歴を図27に示す。同様に図28は、遠心振動実験の時刻歴である。杭頭の曲げひずみについては、遠心振動実験の結果は大型実験の波形形状および振幅ともによく再現できている。

杭の曲げひずみが最大値を示した時刻における深度分布の比較を図29に示す。両実験とも杭頭で大きなモーメントが生じているが、大型実験は杭頭のみが大きいのに対し、遠心振動実験は直線的に小さくなる傾向を示している。この違いについては、杭基礎の液状化時の応答特性が異なったことが考えられ、今後数値解析等によりさらに検討して行くことが必要である。

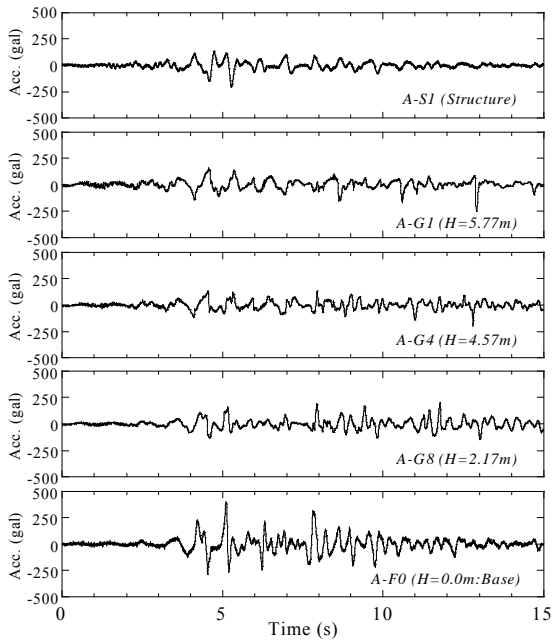


図 22 大型実験の構造物と地盤の加速度応答の時刻歴 (CASE-3)

Fig. 22 The time history of the structure and soil responses in the large-scale shaking table test (CASE-3).

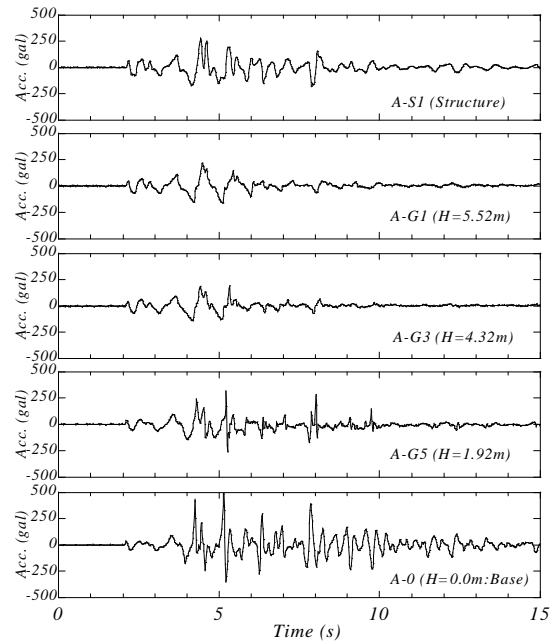


図 23 遠心振動実験の構造物と地盤の加速度応答の時刻歴 (CASE-3)

Fig. 23 The time history of the structure and soil responses in the centrifuge shaking table test (CASE-3).

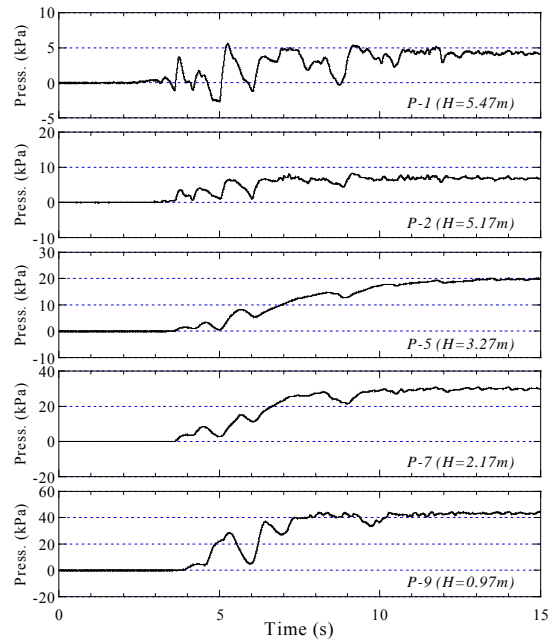


図 24 大型実験の地盤における過剰間隙水圧の時刻歴 (CASE-3)

Fig. 24 The time history of the excess pore water pressures in the large-scale shaking table test (CASE-3).

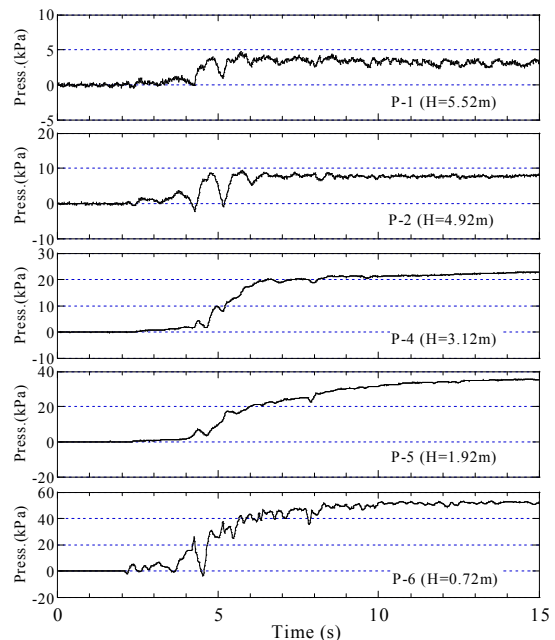


図 25 遠心振動実験の地盤における過剰間隙水圧の時刻歴 (CASE-3)

Fig. 25 The time history of the excess pore water pressures in the centrifuge shaking table test (CASE-3).

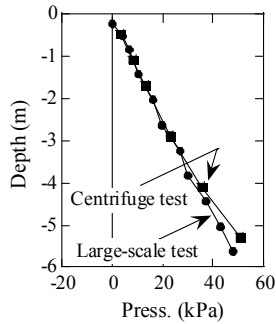


図 26 地盤の過剰間隙水圧の深度分布の比較 (CASE-3)
Fig. 26 The distributions of the excess pore water pressures in the large-scale and centrifuge shaking table tests (CASE-3).

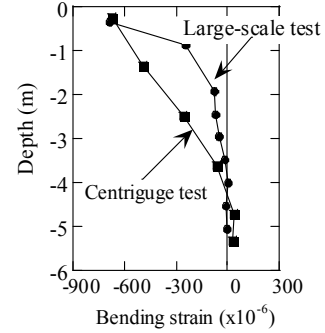


図 29 杭の曲げひずみの深度分布の比較 (CASE-3)
Fig. 29 The distributions of the bending strains in the large-scale and centrifuge shaking table tests (CASE-3).

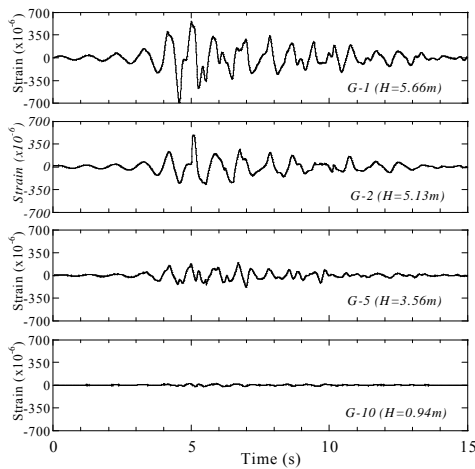


図 27 大型実験の構造物と地盤の加速度応答の時刻歴 (CASE-3)
Fig. 27 The time history of the structure and soil responses in the large-scale shaking table test (CASE-3).

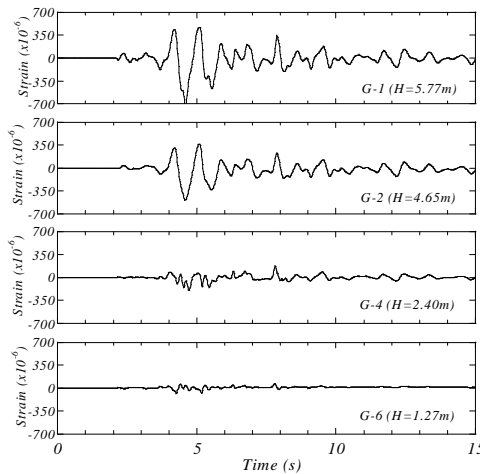


図 28 遠心振動実験の構造物と地盤の加速度応答の時刻歴 (CASE-3)
Fig. 28 The time history of the structure and soil responses in the centrifuge shaking table test (CASE-3).

CASE-3では、大型実験と遠心振動実験での液状化時の地盤と杭基礎の挙動を比較した。その結果、地盤の液状化時の加速度応答および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は定性的に一致する結果が得られた。

6. まとめ

大型実験の地盤密度、地盤の固有振動数、杭基礎の諸元、振動台入力波など、大型実験の再現実験を行うために必要なデータのみを事前に入手し、大型実験の再現実験として相似則を満足する3ケースの遠心振動実験を実施した。

- (1) 不飽和砂のみの大型実験と相似則をあわせた遠心振動実験の比較を行った。遠心振動実験においては、地盤密度を一致させることにより大型実験の再現が概ねできていることが分かった。しかし、地盤の非線形特性の影響などについて不明な部分がある。
- (2) 不飽和砂を用いた地盤と杭基礎の挙動に関して、大型実験と遠心振動実験の比較をした。両者の弾性時における地盤の固有振動数を一致させることにより、遠心振動実験により地盤および構造物の応答加速度や深度分布に関してほぼ再現できる結果が得られた。また杭の曲げひずみにおいても杭頭ではほぼ一致する結果が得られた。
- (3) 飽和砂を用いた地盤と杭基礎の液状化挙動に関して大型実験と遠心振動実験の比較をした。地盤の液状化時の加速度応答および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。
- (4) これまで行われた実物と対象にした遠心振動実験の再現は、モデルの大きさなどの問題があった。ここでは、できるだけ、相似則に沿って大型実験のモデルを忠実に再現するようにした。今後、ここで実施したように相似則をチェックする実験的研究を繰り返す。

返し実施し、データを蓄積する必要がある。そのためには、大型実験の再現だけでなく、実構造物の地震観測結果を対象とした研究に取り組むため、実構造物の地震時応答を再現できる 3 次元加振が可能な遠心振動実験装置の開発が必要とされる。このように、種々の再現実験に取り組むことによって、遠心振動実験の信頼性を高め、実構造物の耐震設計へ適用を目指した研究が望まれる。

参考文献

- 1) 寺師昌明・藤井斉昭 (1988) : 講座 遠心模型実験 4. 遠心模型実験装置の基本システムと計測システム. 土と基礎, No.36-1(360), 79-86.
- 2) Ng, C. W. W., Li, X. S., Van Laak, P. A., and Hou, Y. J. (2004) : Centrifuge Modeling of Loose Fill Embankment Subjected to Uni-axial and Bi-axial Earthquakes. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, No. 24, 305-318.
- 3) Shibata, T., Kita, K., Kobayashi, S., and Yashima, A. (1991) : Performance of Shaking Table Tests and Measurement of Shear Wave Velocities in a Centrifuge. Proceedings of The International Conference Centrifuge 91, 391-398.
- 4) Kimura, M., Katahira, F., Sato H., and Sato, M. (1996) : Centrifuge Modeling of Earthquake Response of Earth Dams, Proceedings of The Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, Mexico, Paper No. 537.
- 5) Kazama, M., Inatomi, T., and Iizuka E. (1994) : Comparison of 1g and Centrifuge Models of a Dynamic Earth Pressure Problem. Proceedings of International Conference Centrifuge 94, 197-202.
- 6) 香川崇章 (1978) : 土構造物の模型振動実験における相似則. 土木学会論文集, 第 275 号, 69-77.
- 7) Koseki, J., Takahashi, A., Hayashi Y., and Matsuo, O. (1995) : Comparison of Centrifuge and Shaking Table Tests on Liquefaction Induced Damage. Proceedings of The First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, 729-734.
- 8) Kagawa, T., Taji, Y., Sato, M., and Minowa, C. (1997) : Soil-Pile-Structure Interaction in Liquefying Sand from Large-Scale Shaking-Table Tests and Centrifuge Tests. A.S.C.E., Geotechnical Special Publication No.70, 69-84.
- 9) 佐藤正義・田地陽一・石原研而・香川崇章・箕輪親宏 (1997) : 基礎と地中埋設構造物の大型振動実験 その 6 遠心実験による乾燥砂地盤の動的挙動の再現. 第 32 回地盤工学研究発表会講演集, 1131-1132.
- 10) Sato, M., Minowa, C., and Saito, Y. (2002) : Reproduction of Large-scale 1g Test on Dry Sand Deposit and Pile Foundation using Centrifuge Modeling. Proceedings of the International Conference on Physical Modeling in Geotechnics, ICPGM '02, 723-728.
- 11) Sato, M., Kagawa, K., and Minowa, C. (2000) : Reproduction of Large-scale Test on Unsaturated Sand Deposit and Pile Foundation using Centrifuge Modeling. Proceedings of The 12th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Paper No.2093, 1-6.
- 12) 箕輪親宏・小川信行・大谷圭一 (1989) : 大型耐震実験装置更新報告, 防災科学技術研究所資料. 第 140 号, 科学技術庁国立防災科学技術センター, 1-29.
- 13) Sato, M. (1994) : A new dynamic geotechnical centrifuge and performance of shaking Table tests. Proceedings of The International Conference Centrifuge 94, Singapore, 157-162.
- 14) 酒井運雄・石原研司・香川崇章・小川信行・箕輪親宏・阿部秋男 (1996) : 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講演集, 1189-1190.
- 15) 高田直俊・日下部治 (1987) : 講座 遠心模型実験 3. 原理. 土質工学会, 土と基礎, 89-94.

(原稿受理 : 2010年3月26日)

要 旨

本論文は、地盤-杭-構造物系のせん断土槽の大型実験を対象として遠心振動実験による再現を 3 ケースについて実施したものである。大型振動台実験は、高さ 6 m、平面の内寸が長さ 11.6 m、幅 3.1 m の世界最大級のせん断土槽を用いて実施された。杭基礎の杭材として、実大の鋼管杭とコンクリート杭が用いられた。遠心振動実験は、大型実験を実物と想定して実施され、遠心振動実験を実施するために必要な大型実験のモデルと実験条件だけが使用された。大型実験のモデルをできるだけ精密に遠心振動実験用に作成した結果、大型実験の振動応答の重要な部分を再現することができた。大型実験の一つのケースでは、大きな加速度の振動加振が行われ、液状化により地盤の強非線形性と剛性低下がみられた発生した。しかしながら、実施した遠心振動実験の中には、大型実験の再現が十分でないものもあった。

キーワード : 大型振動台実験, 大型せん断土槽, 地盤-杭-構造物系, 遠心振動実験, 液状化, 相似則, 再現