

# 液状化過程における杭基礎の挙動

## — 起振機実験による動特性把握 —

水野二十一<sup>1</sup>・平出 務<sup>2</sup>・飯場正紀<sup>3</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人 建築研究所 建築研究プロジェクト統括官 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

<sup>2</sup>独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

<sup>3</sup>独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ 上席研究員 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

The paper presents shaking table tests using large scale shear box to investigate behavior of pile foundation during liquefaction and oscillator tests to investigate behavior of pile foundation in decrease of water pressure process. Oscillator tests with decrease of water pressure, resonate frequency becomes high and amplitude of response becomes low and a height of point of contra flexure is large. It means gradual recovery of horizontal subgrade reaction to piles.

**Key Word:** Large-scale shear box, Oscillator test, Liquefaction, Dissipation of Excess Pore Water Pressure

### 1. はじめに

これまでの建物・地盤の地震観測，模型振動台実験及びその解析などにより杭基礎の設計においては建物の慣性力と共に，杭基礎に作用する地盤の変位・変形の影響が無視し得ないことが明らかとなってきた。また，砂質地盤が液状化した場合に杭基礎に作用する力・変位については，現象的にも不明な部分が多く，早急な解明が望まれている。

縮小模型を用いた重力場での液状化実験や遠心力場における模型液状化実験が行われてきているが，模型を用いることによる制約から模型の相似則を完全に満足することは難しい。液状化地盤における杭基礎の地震時挙動の再現性を考慮すると大型のせん土槽を用い，ある程度の実地盤を再現した液状化実験が有効であると考えられる。

大型せん土槽を用いた液状化実験を実施する上では，地盤作製技術，作製した地盤の評価技術，実験時の地盤応答計測技術の開発等が課題となっている。これらの課題に対して各研究機関で研究開発<sup>1)2)3)</sup>が取り組み，研究成果の確認，問題点の抽出を目的として独立行政法人防災研究所の大型せん断土槽を用いた合同での液状化実験が計画実施された。ここでは，合同での液状化実験の中で実施した，液状化時の杭基礎挙動の把握を目的とした杭基礎-液状

化地盤系の振動台実験と過剰間隙水圧消散過程での起振機実験結果の概要について報告する。

なお，合同実験で作製した地盤の評価技術，地盤応答計測技術の一部については，各研究機関より本シンポジウムの論文として発表されているので参照されたい。

### 2. 実験概要と実験ケース

実験には，独立行政法人防災研究所の大型せん断土槽を用いた。内法寸法で，長さ(振動方向)11.6m，奥行3.1m，高さ4mである。杭模型には，幅40cm，厚さ10cmの鋼材を使用し，杭頭を固定，杭先端を

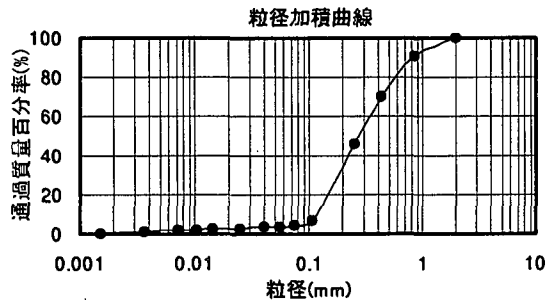
表-1 実験シリーズ一覧

実験シリーズ	入力	水位(m)
実験シリーズ1 地盤-杭基礎 モデル	-1 ポートアイランド波 20gal	G.L.-0.5m
	-2 ポートアイランド波 50gal 消散過程の計測	
	-3 ポートアイランド波 100gal	G.L.
	-4 ポートアイランド波 150gal 消散過程での起振機実験	
実験シリーズ2 地盤-杭基礎 モデル	-1 ポートアイランド波 20gal	G.L.
	-2 SIN波3Hz 40gal 消散過程での起振機実験	
	-3 SIN波3Hz 100gal 消散過程での起振機実験	
実験シリーズ3 地盤-杭基礎-建物 モデル	-1 ポートアイランド波 20gal	G.L.
	-2 ポートアイランド波 300gal 消散過程での起振機実験	
	-3 ポートアイランド波 800gal 消散過程での起振機実験	

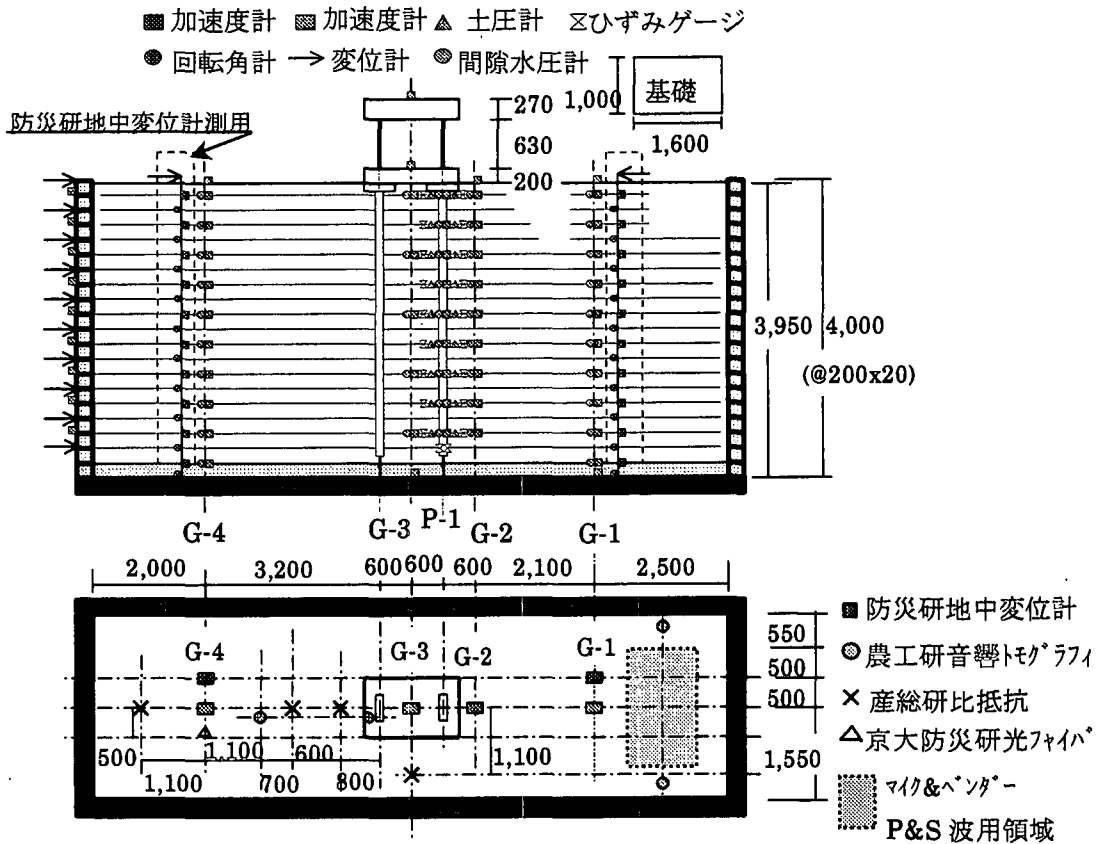
表一 実験シリーズの地盤条件

実験シリーズ	地盤面高さ (m)	乾燥密度 $\rho_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	相対密度 Dr (%)
実験シリーズ1	-1	3.952	14.9
	-2		
	-3	3.947	14.9
	-4	3.875	15.2
実験シリーズ2	-1	3.827	15.3
	-2		
	-3	3.801	15.4
実験シリーズ3	-1	3.762	15.6
	-2		
	-3	3.689	15.9

\*加振終了後の値



図一 粒径加積曲線



図一 実験計測概要図

ピンとする境界条件とした。基礎模型は、1m x 1.6m 厚さ 20cm の鋼板とした。建物模型は、質量 (1m x 1.6m 厚さ 27cm の鋼板) と板バネで構成される固有振動数約 5Hz の一質点系モデルとした。表一に各実験シリーズ一覧を示した。実験シリーズ1では、液状化時の地盤変位測定と杭基礎の挙動把握を、実験シリーズ2では、入力波の違いによる影響把握を、実験シリーズ3では、建物 (上部構造物) の影響把握を主な目的としている。

実験に使用した砂は、霞ヶ浦砂である。図一に粒径加積曲線を示す。

地盤作製方法として水中落下法による地盤作製の際に水中振動スクリーンを用いる方法を使用した。

バケットから砂材料を水中に落下させる際に、水中に設置した振動スクリーンを通すことで、落下中に砂が巻き込む空気を振動で分離させ、飽和度の向上をはかる方法である。なお、実験では、実験シリーズ1で作製した地盤を水位レベルのみを調整して以後の実験に用いている。

実験シリーズ1の初期水位レベルは、G.L.-50cm。実験シリーズ2、3の水位レベルは、G.L.とした。

表一に各実験シリーズでの地盤高さや地盤の相対密度等の地盤条件を示した。

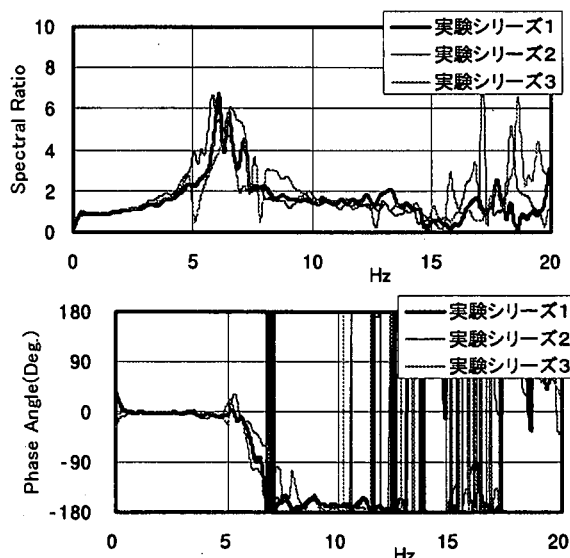
図一に実験計測概要を示す。作製地盤の評価、地盤応答変位計測用の計測配置も併せて図示している。図中の地盤の計測線(G-1~G-4)には、加速度計

と過剰間隙水圧計を、杭(P-1)には、加速度計、過剰間隙水圧計及び土圧計(振動方向の前後面)を設置している。また、杭(P-1)表面にひずみゲージを貼付している。その他、基礎、建物及びせん断土槽に加速度計と変位計を設置している。

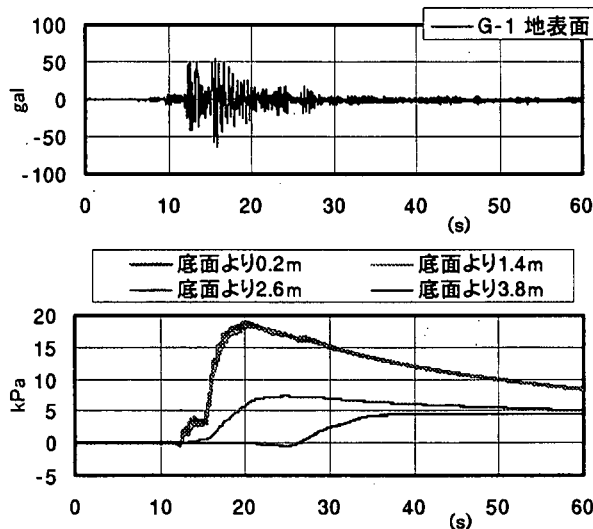
振動台への入力には、1995年兵庫県南部地震のポートアイランド記録(GL-32m, NS 成分)の最大加速度を振幅調整した地震動と SIN 波 (3Hz, 60 波, 開始と終了5波の振幅を調整) を用いている。

各実験シリーズでは地震動及び SIN 波 (3Hz) による加振の他に地盤状況の把握を目的とした地震動加振(20gal)と加振により発生した過剰間隙水圧の消散過程での杭基礎の挙動把握を目的とした起振機実験をそれぞれ実施している。

### 3. 実験結果の概要



図一三 地盤の伝達特性



実験シリーズ1-2 50gal 入力

### (1) 地盤の振動特性

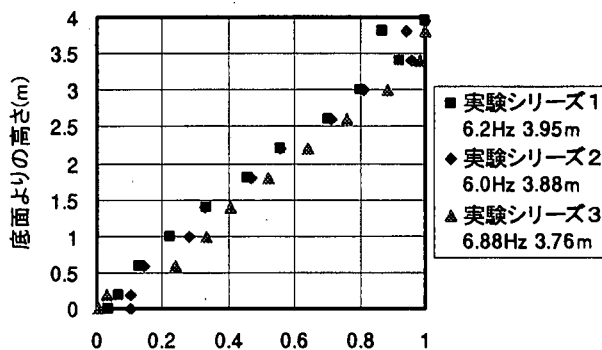
図一三に地盤特性を把握する目的で実施したポートアイランド波 20gal 加振時の地盤の振動特性を示す。地盤の固有振動数は、実験シリーズ1~2では、6.0~6.2Hz, 実験シリーズ3では、6.9Hzであった。

図一四にポートアイランド波 20gal ランダム加振時の地盤の固有振動数時における各実験シリーズの振動モードを示す。地表面近傍でのばらつきは、初期水位の影響と考えられる。多少ばらつきがみられるものの全体の形状は、各実験シリーズとも類似している。

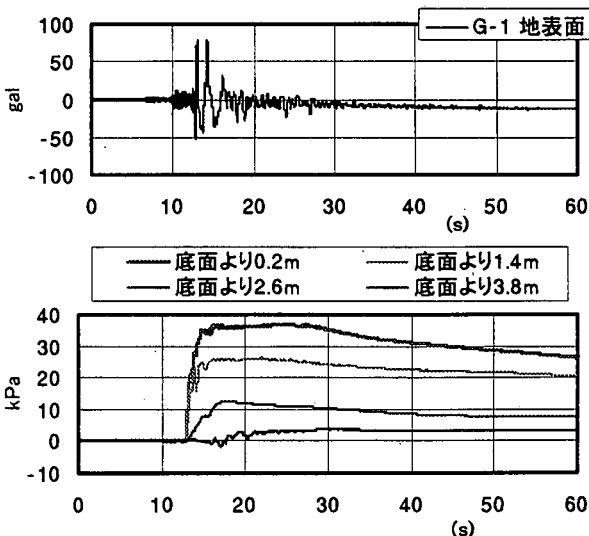
### (2) 振動台加振結果の概要

#### a) 実験シリーズ1

ポートアイランド波 50gal 加振時と 100gal 加振時の G-1 計測線における地表面加速度と過剰間隙水圧の時刻歴波形を図一五に示す。

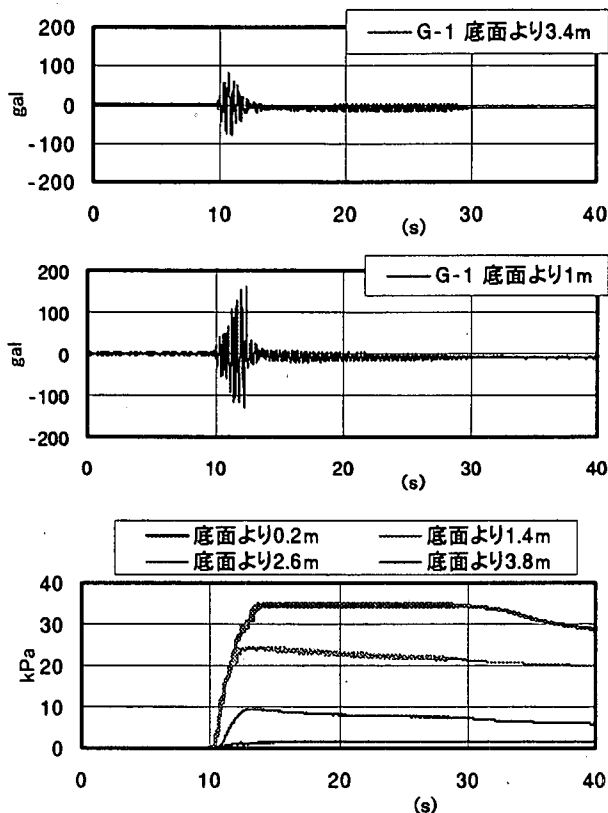


図一四 地盤の振動モード



実験シリーズ1-3 100gal 入力

図一五 実験シリーズ1の結果概要



実験シリーズ2-3 SIN波 3Hz Max.100gal 入力

図一六 実験シリーズ2の結果概要

50gal 加振では地表面での液状化は確認されず、100gal 加振で地表面まで完全に液状化した。50gal 加振で振動台底面より 3.8m 位置の過剰間隙水圧の上昇に時間遅れが見られた。これは、実験シリーズ1の初期水位位置が地表面より 50cm 下にあり、間隙水圧計設置位置までの約 35cm 間を過剰間隙水が上昇するための時間差と考えられる。

b) 実験シリーズ2

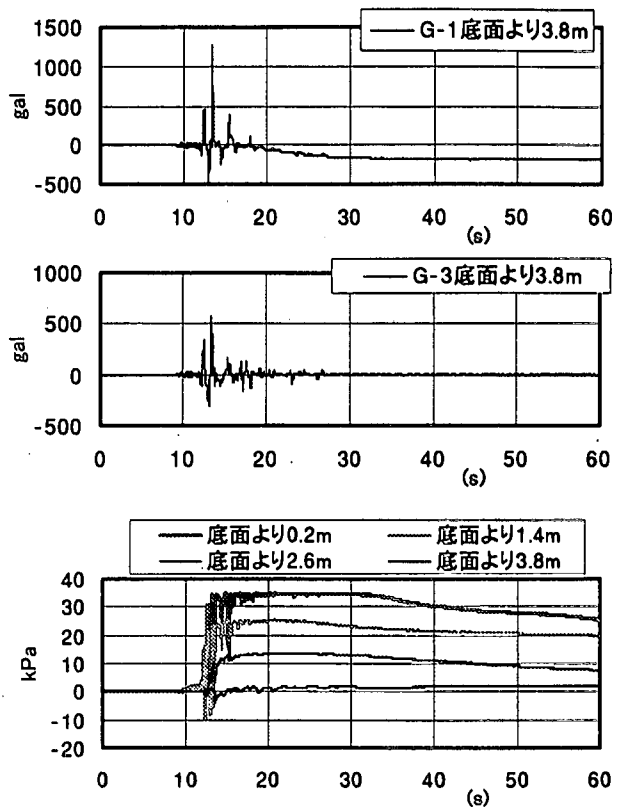
SIN波 3Hz100gal 加振における G-1 計測線の加速度と過剰間隙水圧の時刻歴波形を図一六に示す。液状化により地表面の加速度応答が小さくなっていることが良くわかる。

c) 実験シリーズ3

ポートアイランド波 800gal 加振における地盤の加速度と G-1 計測線の過剰間隙水圧の時刻歴波形を図一七に示す。加振加速度が大きいことによる影響で、過剰間隙水圧上昇時の変動が非常に大きいことがわかる。また、地盤の加速度応答波形には、パルス的な波形が見られるが、杭間地盤の加速度応答はやや小さく、杭間地盤が拘束されている影響と考えられる。

(3) 過剰間隙水圧消散過程における起振機実験

起振機実験は、振動台加振により発生した過剰間



実験シリーズ3-3 800gal 入力

図一七 実験シリーズ3の結果概要

隙水圧の消散過程で基礎に設置した起振機を 30 秒間に振動数を 1.8~11Hz の範囲でスイープアップ及びスイープダウンさせる方法を基本に、実験シリーズ1-4では5回行った。なお、偏心モーメントは 100kgcm である。

a) 起振機実験結果の概要

実験シリーズ1-4ポートアイランド波 150gal 加振終了後の G-4 計測線の過剰間隙水圧消散状況を図一八に示した。なお、間隙水圧値は地震動加振前をゼロ点としている。図中記号 T1~T5 は、過剰間隙水圧消散過程で実施した起振機実験 No.を、起振機実験 No.の時間区間は、スイープアップの時間帯を示している。過剰間隙水圧の消散が短時間に進んでいることがわかる。

図一九は、図一八で示した起振機実験(T1~T5)のスイープアップの時間帯における過剰間隙水圧値の平均値を分布(G-4)として示したものである。図中には地表面高さから求めた有効上載圧値も併せて示した。過剰間隙水圧の消散が、下層部から上層部に向かって進んでいることがわかる。

図一〇に起振機実験(T1~T5)における基礎の加速度応答値から求めた基礎変位の伝達特性を示した。なお、インデックスにおけるカッコ内の数値は、杭(P-1)に設置した過剰間隙水圧計の平均値から求

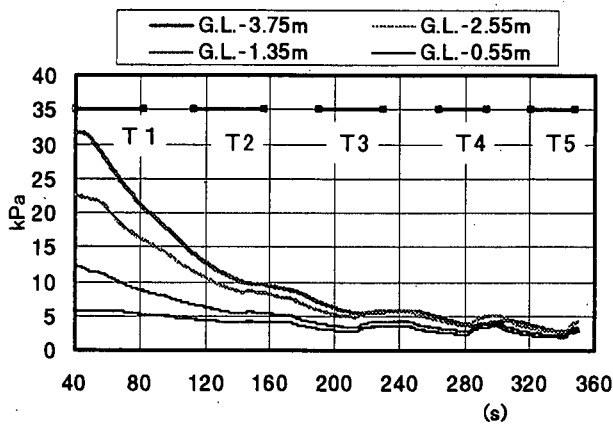


図-8 過剰間隙水圧の消散状況

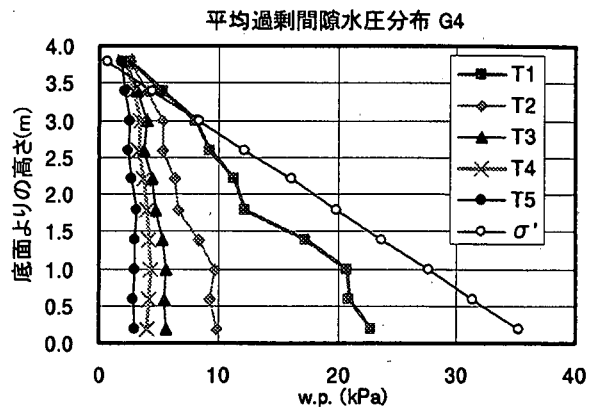


図-9 過剰間隙水圧分布

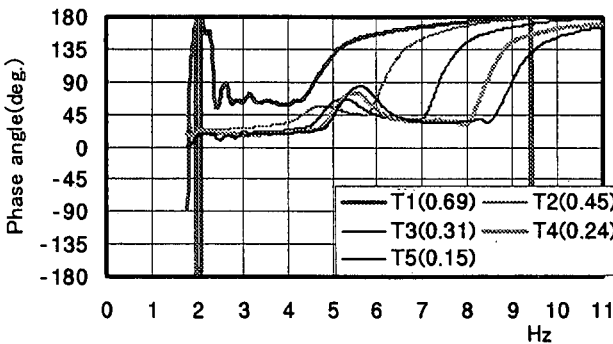
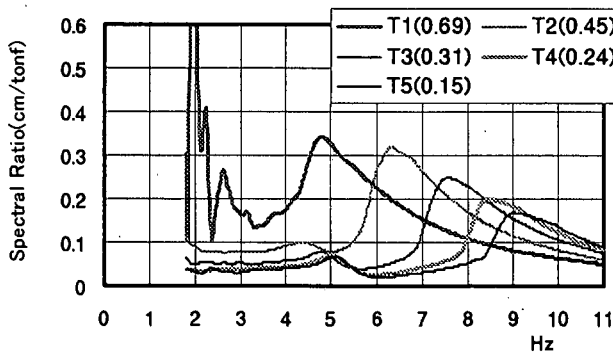


図-10 基礎変位の伝達特性

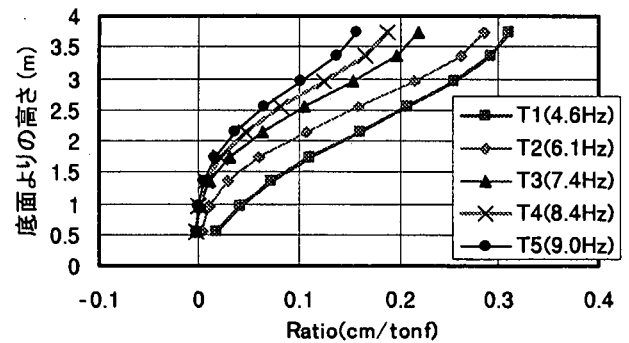


図-11 杭の変位モード

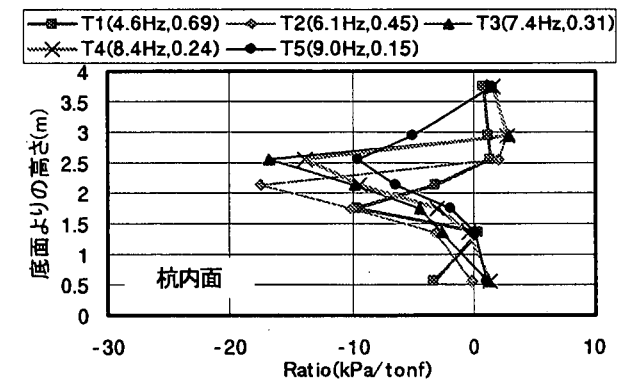
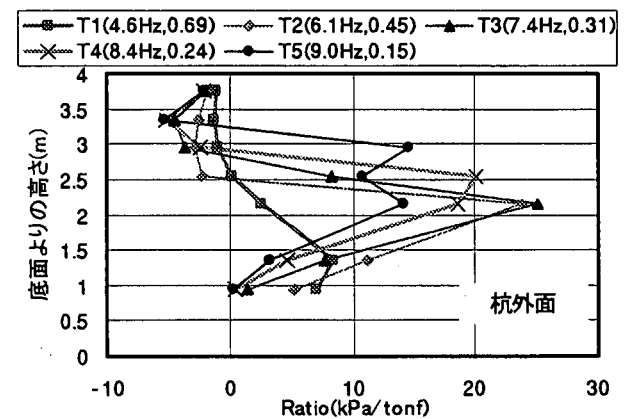


図-12 土圧計のモード

めた間隙水圧比であり、約 0.7~0.1 の範囲にある。ピーク振動数は、T1~T5 の順にピーク値が低下すると共にピーク振動数が移動しており、地盤状態が変化している様子が判る。位相特性から求めたピーク振動数は、消散が進むと共に、4.6Hz, 6.1Hz, 7.4Hz, 8.4Hz, 9.0Hz の順に高振動数へ変化している。なお、起振機実験 T3~T5 における 5Hz 付近に見られるピークは、地盤の 1 次固有振動数による影響と考えられる。

起振機実験 T1~T5 のピーク振動数時の杭(P-1)に設置した加速度計から求めた杭の変位モードを図-11 に示した。1 次モードで変形していることが確認できる。図-12 に、杭(P-1)に設置した杭外面土圧計と杭内面土圧計のピーク振動数時のモードを示した。なお、計測値は、振動台加振前をゼロ点とした変動分である。分布形状は、対称形ではない

が、実験 T1~T5 の順に最大値部分が杭上部に移動する傾向が見られる。

### b) 過剰間隙水圧消散開始直後の特性

過剰間隙水圧消散開始直後の特性を把握するため、実験シリーズ2-3以降の起振機実験では、振動台加振時から起振機の振動数を1.8Hzに設定し、スタートさせる事とした。

図-1 3に実験シリーズ2-3における過剰間隙水圧消散開始直後の基礎の加速度応答値から求めた基礎変位の伝達特性を示す。なお、この時の杭(P-1)に設置した過剰間隙水圧平均値から求めた間隙水圧比は、0.81であった。2.7Hz付近に90度の位相ずれが見られるが、応答は小さく平坦である。

図-1 4は、実験シリーズ1-4の土圧分布モードに実験シリーズ2-3の過剰間隙水圧消散開始直後の土圧分布モード(T1(2.7Hz,0.81))を追加し、過剰間隙水圧比0.8~0.1の間の土圧分布モードとして表したものである。なお、ここでの土圧値は、杭の外面と内面の土圧計測値の差として求めている。

土圧分布モードの最大値部分が、起振機実験中における過剰間隙水圧比の減少とともに順に上部に移動するとともに、値が増加する傾向が見られる。最大値部分の移動は、時間の経過に伴って過剰間隙水圧の消散が進み、杭周辺地盤の剛性が下層部より回復している結果と考えられる。

### 4. まとめ

大型せん断土槽を用いた振動台実験において実施した過剰間隙水圧消散過程における起振機実験結果より以下のような知見が得られた。

- (1) 過剰間隙水圧の消散と共に、地盤の卓越振動数が明確となる事が確認された。
- (2) 過剰間隙水圧の消散と共に、杭周囲の地盤剛性が回復していく現象が確認された。また、地盤下層部でより早く回復していく現象が確認された。

なお、以下の項目が今後の課題である。

- (1) 液状化過程における地盤剛性・減衰の評価

### 参考文献

- 1) 毛利栄征, 榎原淳一, 吉村公孝, 山本督男: せん断土槽地盤の作成方法と均一性, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.83-88, 2001年3月
- 2) 佐藤正義, 阿部秋男, 水野二十一, 田村修次: 液状化土槽実験における飽和度評価のためのP波測定と液状化時の地盤変位測定, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.89-94, 2001年3月

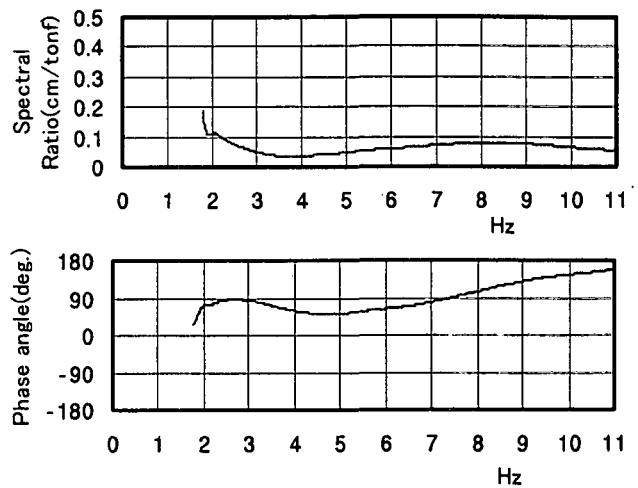


図-1 3 過剰間隙水圧消散直後の基礎変位の伝達特性 (実験シリーズ2-3)

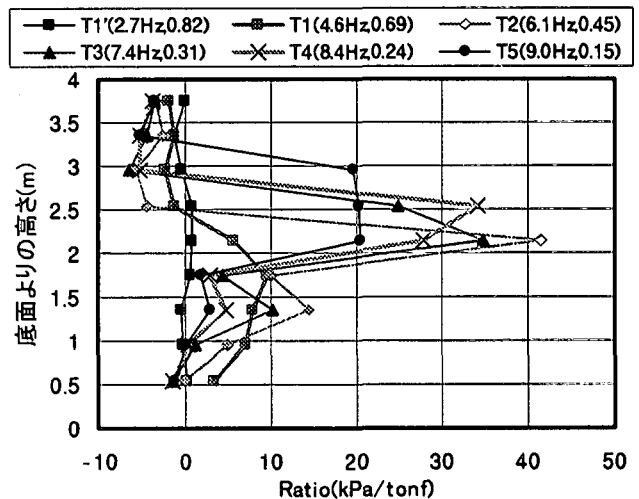


図-1 4 土圧分布モード

- 3) 神宮司元治, 国松 直, 泉 博允: 非抵抗を用いた液状化地盤のモニタリング手法と大型土槽への適用方法, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.94-98, 2001年3月