

# 模型振動台実験による液状化地盤中の杭挙動について BEHAVIOR OF THE PILE IN LIQUEFIED GROUND BY THE MODEL SHAKING TABLE TEST

高橋直樹<sup>1</sup>, 岸下崇裕<sup>2</sup>, 山本陽一<sup>3</sup>, 兵動正幸<sup>4</sup>, 三浦房紀<sup>5</sup>

<sup>1</sup>住友建設技術研究所, 研究員 工修

Naoki Takahashi, Research Institute, Sumitomo Construction Co. Ltd., tnaoki@sumiken.co.jp

<sup>2</sup>フジタ技術センター, 主任研究員 工修

Takahiro Kishishita, Technology Development, Fujita Corporation, kisisita@fujita.co.jp

<sup>3</sup>三井建設技術研究所, 主任研究員 工博

Yoichi Yamamoto, Research Institute, Mitsui Construction Co. Ltd., yoichiyamamoto@mcc.co.jp

<sup>4</sup>山口大学社会建設工学科, 教授 工博

Masayuki Hyodo, Department of Civil Engineering, Yamaguchi University, hyodo@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp

<sup>5</sup>山口大学大学院理工学研究科, 教授 工博

Fusanori Miura, Symbiotic Environmental Engineering, Yamaguchi University, miura@earth.csse.yamaguchi-u.ac.jp

## SUMMARY

In order to determine the behavior of the pile in liquefied ground and its relationship to the input waves, model shaking table tests were conducted while varying the frequency of the input waves and the relative density of the ground. In addition, shaking table tests were simulated using effective stress analysis to evaluate the influence on pile behavior due to ground liquefaction. Comparing the time-history of input waves with footing acceleration a resonance occurs whereby the natural frequency is lowered, amplifying the footing response. Moreover, analyzing the depth distribution of bending moment caused in the pile showed clearly that the pile behavior in the liquefied ground is greatly influenced by the input frequency and the liquefaction.

キーワード: 模型振動台実験, 液状化, 杭基礎, 有効応力解析

Key words: Model Shaking Table Test, Liquefaction, Pile Foundation, Effective Stress Analysis

## 1 はじめに

液状化を考慮した杭基礎構造物の合理的な設計法を構築するためには、液状化地盤中の杭挙動や地盤と杭の動的相互作用を適切に評価することが重要である。最近の研究では、液状化の過程において地盤の剛性が低下することにより、基礎構造物の固有振動数と入力地震動の卓越振動数の関係で過渡的な共振現象が発生することが報告されている<sup>1)</sup>。また、液状化層と非液状化層の2層地盤と杭基礎モデルの振動台実験を実施し、地盤反力特性に及ぼす杭と地盤の相対変位・速度の関係を明らかにする研究<sup>2)</sup>も行われている。

本研究では、せん断土槽を用いた模型振動台実験を実施し、入力周波数や地盤の相対密度を変化させたときの液状化地盤中の杭挙動について検討した。さらに、有効応力

解析による模型振動台実験のシミュレーションを実施し、地盤液状化による杭挙動への影響を考察した。

## 2 実験概要

模型振動台実験は、幅 1.2m×奥行き 0.8m×高さ 1.0m のせん断土槽を用いて重力場で行った。Photo.1 に模型振動台実験装置の全景を示すと共に、Fig.1 に実験模型の概要を示す。模型地盤は、非液状化層である下層部と液状化層の上層部の2層構造とした。前者は、空中落下法で地盤を作成した後、振動台を加振して相対密度が  $D_r=80\%$  となるように締め固めた。一方、後者は乾燥砂を水中落下させて作成した結果、初期の相対密度は  $D_r=30\%$  程度となった。

模型地盤に用いた試料は、Table 1 に物性値を示す浜岡砂である。Fig.2 に非排水繰返し三軸試験を行って求めた

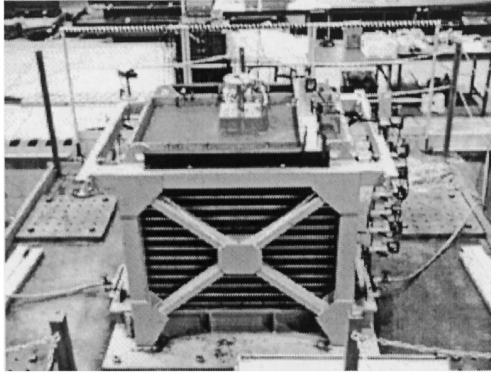


Photo. 1. View of model shaking table test devices

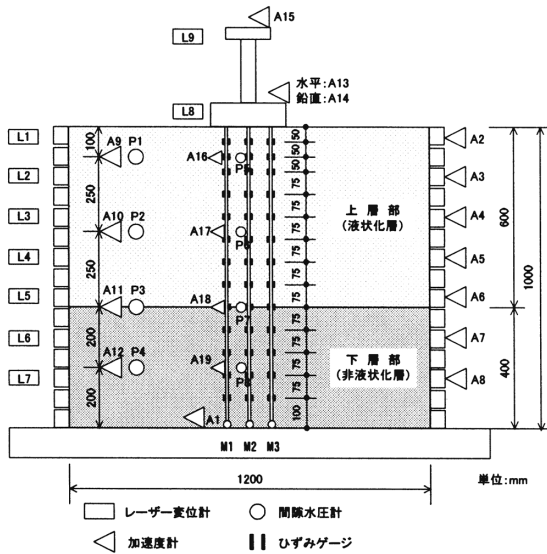


Fig. 1. Outline of experiment

浜岡砂の液状化強度曲線を、豊浦砂  $D_r=50\%$ の結果と比較して示した。浜岡砂の液状化強度は相対密度の増加と共に高くなり、これの  $D_r=40\%$ の液状化強度が豊浦砂の  $D_r=50\%$ のものと同程度である。

杭基礎模型は、 $3 \times 3$ 計9本の群杭として杭頭をフーチングに剛結させ、その先端部はピン結合とした。杭模型は曲げ剛性の選択が任意になり相似則と曲げ剛性の整理が容易になる事から、幅30mm、厚さ5mmのステンレス製の平板を用いた。

計測は地盤の挙動を把握するために地盤中に加速度計と間隙水圧計を、杭の挙動を把握するために杭に加速度計とひずみゲージを設置して行った。なお、杭近傍の間隙水圧を計測するために、杭には間隙水圧計も設置している。さらに、上部構造物とせん断枠の挙動を確認するために、加速度計とレーザー変位計を両者にそれぞれ設置して計測を行った。

実験で用いた入力波は、最大加速度 100gal の正弦波であり、加振はこれを40波として行った。

実験では、加振後沈下した地盤に再度水中落下法で乾燥砂を投入し、所定の地盤高さになるよう模型地盤を成形した後、再度加振を行うこととした。なお、本研究では、こ

Table 1: Physical properties of Hamaoka sand

土粒子の密度	$\rho_s$	2,699 g/cm <sup>3</sup>
粒 度	礫分	0%
	砂分	100.00%
	シルト分	0.00%
	粘土分	0.00%
	均等係数	2.31
	曲率係数	1.03
最大乾燥密度	$\rho_{d \max}$	1,694 g/cm <sup>3</sup>
最小乾燥密度	$\rho_{d \min}$	1,396 g/cm <sup>3</sup>

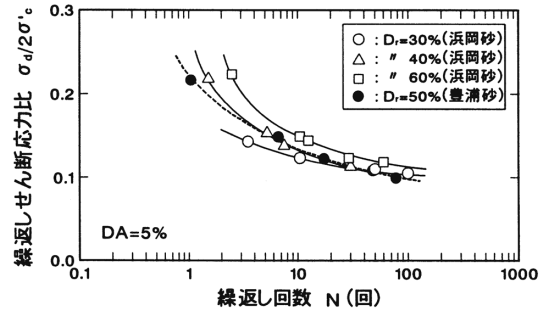


Fig. 2. Comparison of liquefaction resistance curve of Toyoura and Hamaoka sand

Table 2: Testing case

実験ケース	入 力			地 盤	
	周波数 f(Hz)	最大加速度 $\alpha_{max}$ (gal)	想定相対密度 $D_r$ (%)	平均相対密度 $D_r$ (%)	沈下量 (mm)
S1001	10.0	102.7	30	32.6	5.0
S1004	10.0	103.0	60	56.4	2.0
S1005	5.0	102.8	60	59.3	5.0
S1007	10.0	102.9	70	75.6	5.0
S2005	2.0	102.0	60	62.1	20.0

れを最終的に上層部の平均相対密度が70%程度になるまで繰返した。Table 2 に本論文で結果を示す実験ケース及び実験の状況について示す。

### 3 実験結果の考察

#### 3.1 時刻層応答波形

Fig.3~Fig.4 に実験ケース S1004 及び S2005 における過剰間隙水圧比、せん断土槽底面 (A1)・地盤 (A9)・フーチング (A13) の加速度、及び杭頭曲げモーメント (Fig.1 参照 M1 手前列) の経時変化を示す。いずれも上層部の相対密度が  $D_r=60\%$ 程度の場合である。

入力周波数が 10Hz である S1004 の P1, P2 位置における過剰間隙水圧比は、両者とも 1.0 に達しており上層部は液状化している。しかしながら、P3 及び P4 位置におけるそれは 0.5 及び 0.2 程度であり、下層部は液状化に至っていない。一方、入力周波数が 2Hz である S2005 では、P1 位置の過剰間隙水圧比が加振から 0.5 秒で 1.0、P2 位置のそれは 1 秒で 1.0 となり、上層部は加振開始後急激に液状化に至っていることが分かる。さらに、その値は層境界の P3 位置で 1.0、P4 位置で 0.7 程度に達しており、下層部についても液状化もしくはそれに近い状態にあることが分かる。

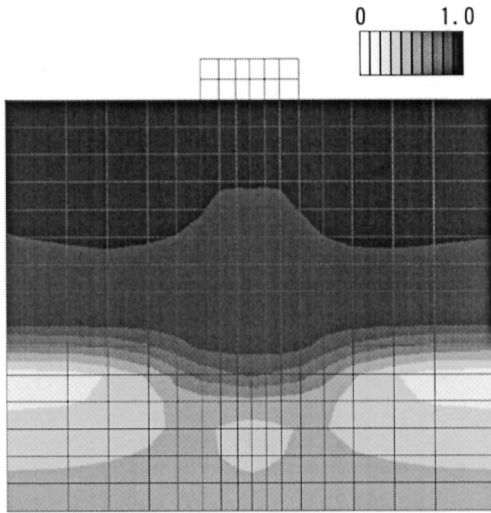


Fig. 7. Contour of the excess pore water ratio

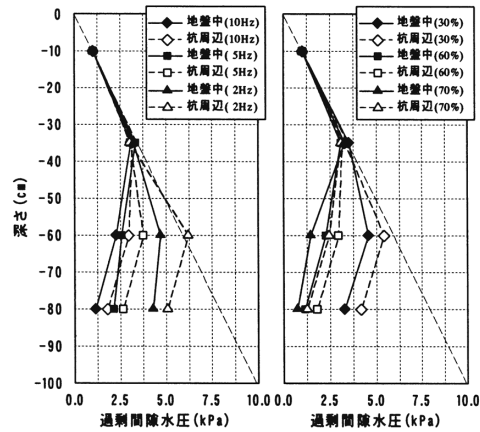


Fig. 8. Depth distribution of pore-water pressure

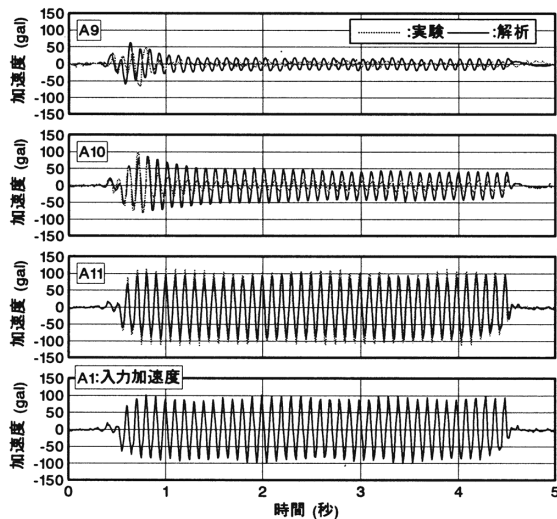


Fig. 9. Comparison between Observed and Calculated time-history of an acceleration of the ground and the input wave

速度が小さすぎるとも考えるが、現時点で明確な原因は不明である。

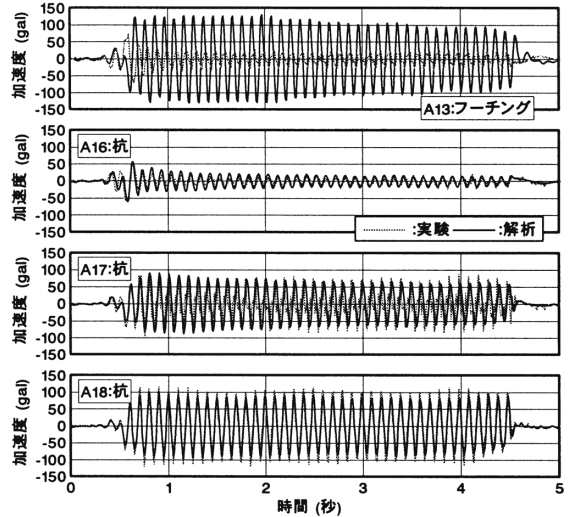


Fig. 10. Comparison between Observed and Calculated time-history of an acceleration of the footing and the pile

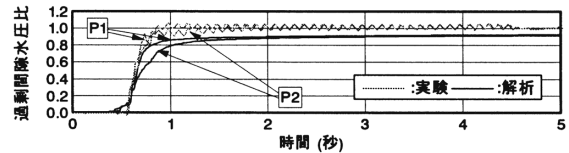


Fig. 11. Comparison between Observed and Calculated time-history of an excess pore water pressure ratio

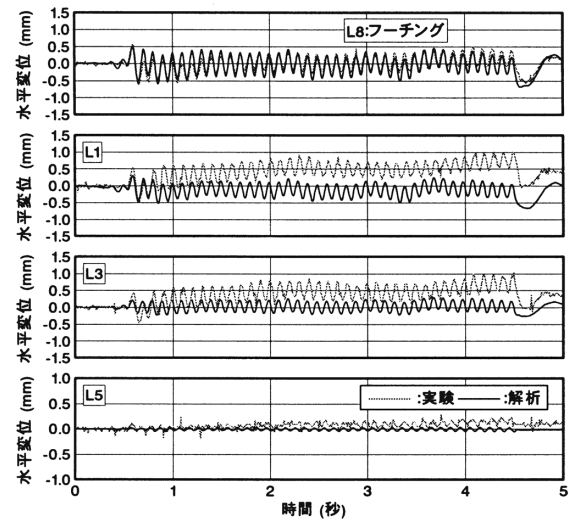


Fig. 12. Comparison between Observed and Calculated time-history of a displacement of the footing and the laminar container

Fig.11 に示す過剰間隙水圧比について、解析結果と実験結果との対応は非常に良いと言える。FLIP では過剰間隙水圧比は採用しているモデルの特性上1.0とはならないが、加振後1秒程度で水圧比0.8を超えて定常状態にあり、この解析コードでは液状化に至っていると判断される。また、解析結果の液状化に至る過程は実験結果と良く対応していることから、液状化パラメータの設定は妥当な範囲にあ

地表部の加速度 (A9) に関して、S1004 のそれは A1 位置と比較して間隙水圧が急激に上昇する 0.7 秒付近より位相のずれが生じ、過剰間隙水圧比が 1.0 となる 0.9 秒以降は大きく減衰している。なお、S2005 において 4 秒付近に観察されるパルス状の波形に、表層地盤の激しい液状化 (流体状) に伴い波打ち状に振動したことによる影響が認められる。

フーチングの加速度 (A13) に関して、S1004 のそれは A1 位置と比較して加振開始時に同位相であったものが、液状化後は 180° ずれている。一方、S2005 における位相は、加振を通じて A1 位置と同様である。ここで、後者の A13 位置は A1 位置の 2 倍程度に増幅している。これは、入力周波数の低下に伴い地盤全体が液状化し、慣性力の増

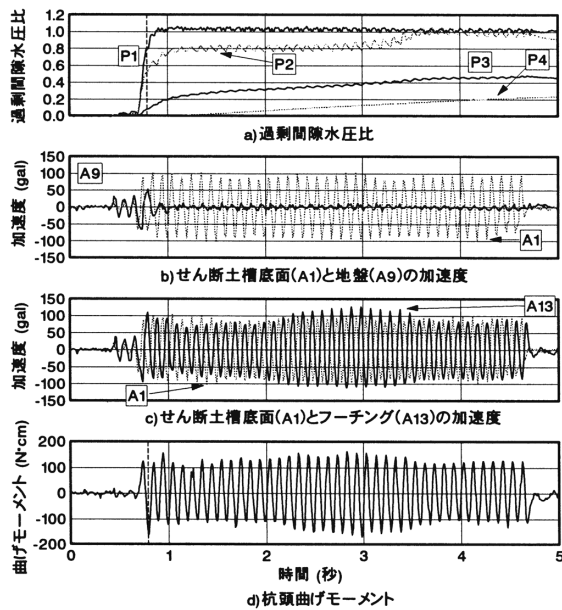


Fig.3. Record of testing case S1004

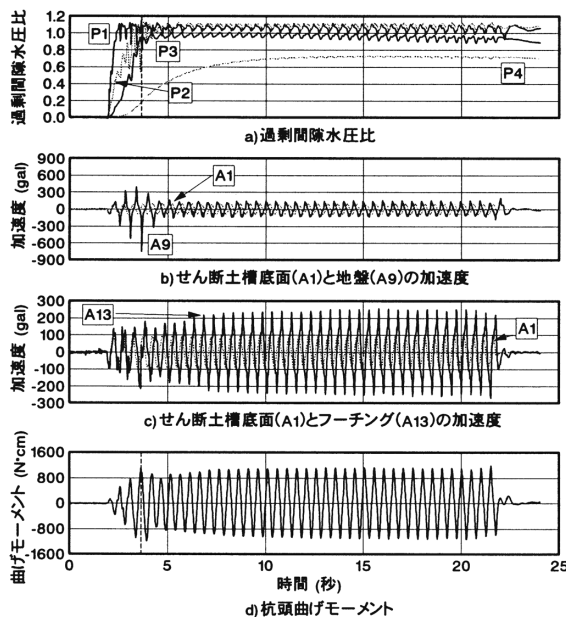


Fig.4. Record of testing case S2005

大によりフーチングの応答が増幅するという共振現象よるものと考えられる。

杭頭部曲げモーメントに関して、図中破線はその値が最大となる時刻を示しているが、この時の P1 位置における過剰間隙水圧比は、S1004 で 0.8、S2005 では 1.0 である。したがって、液状化地盤中の杭に作用する曲げモーメントは、液状化直前あるいは液状化に達した時点で最大値を示すものと推察される。

### 3.2 杭の振動特性の深度分布

ここでは、杭に生じる曲げモーメント及びその変形量の深度分布より、入力周波数の違いが液状化地盤中の杭の振動特性に与える影響を分析する。

Fig.5 に実験ケース S1004、S1005 及び S2005 の杭 (M1 杭) の曲げモーメントと変形量、及び地盤反力の深度分布を示す。いずれも上層部の相対密度が  $D_r=60\%$  程度のケースである。

図中の曲げモーメントは、実験より得られた曲げモーメントを基に 3 次のスプライン関数にて補間した結果を示している。また、杭の変形量は補間された曲げモーメントを 2 階積分することにより求めた。このとき、境界条件として杭先端がピン結合であることから、杭先端の変形量は 0 とした。さらに、地盤反力は補間された曲げモーメントを 2 階微分することにより算出した。なお、図中に示す実線及び破線は以下のように分けて示している。実験ケース S1004 及び S1005 は、実線は加振から Fig.1 中 P1 位置の過剰間隙水圧比が 1.0 になるまでを、破線は P2 位置の過剰間隙水圧比が 1.0 になる近傍の値を示している。一方、S2005 は P1~P3 位置の過剰間隙水圧が急激に上昇しているため、実線は P3 位置の過剰間隙水圧比が 1.0 になるまでを、破線は P4 位置の過剰間隙水圧比が定常状態のときの値を示している。

Fig.5a)~c)に示す曲げモーメントの深度分布より、杭の曲げモーメントの絶対値は入力周波数が低下することにより大きくなるのが分かる。さらに、その分布にはゼロクロスする点が生じ、これが液状化の地盤深部への拡大に従い曲げモーメントの極大値とともに杭先端へ移動している。これらの原因としては、液状化に伴い地盤反力が小さくなり、変形量の深度分布から明らかなように杭の変形の変曲点が杭先端方向に下がる<sup>3)</sup>とともに、上部構造物とフーチングの慣性力が增大すること等が考えられる。

Fig.5a)~c)に示す地盤反力の深度分布は、液状化層における値が非液状化層のそれと比較して小さい傾向にあるものの、本結果からは定量的な評価は難しい。今後さらにデータの分析を進め、相互作用ばね等の評価を行う予定である。

## 4 有効応力解析によるシミュレーション

### 4.1 解析概要

ここでは、振動台実験の検証解析結果について示す。

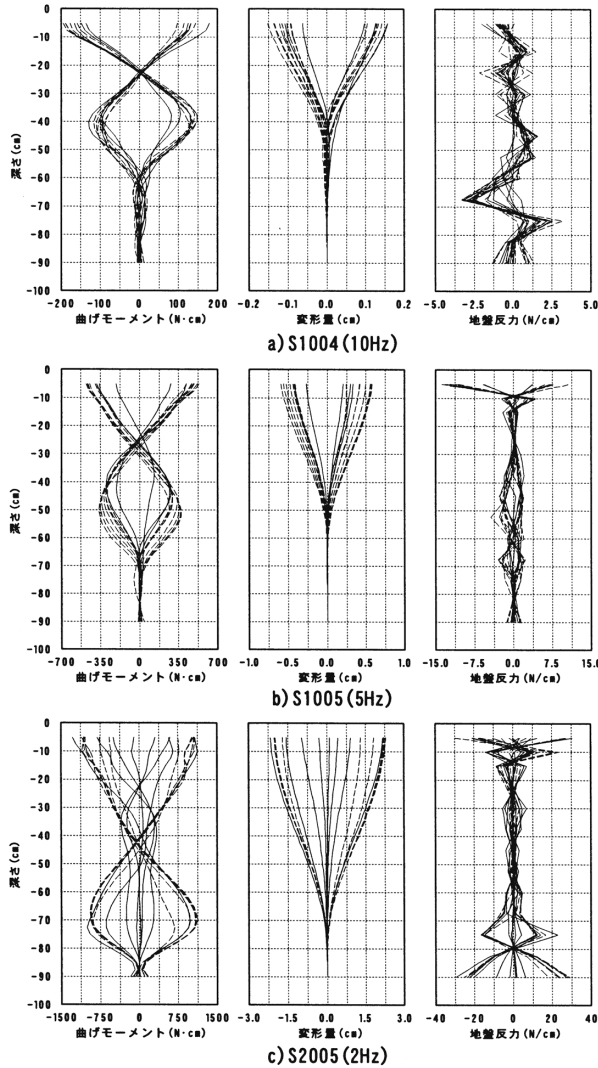


Fig.5. Depth distribution of bending moment and displacement of the pile, and the subgrade reaction

解析の対象とした実験ケースは入力加速度 100gal, 10Hz の正弦波で加振したケース S1001 であり, Fig.1 に概要を示す実験模型の上層部の相対密度は概ね  $D_r=30\%$ , 下層部で  $D_r=80\%$  となっている。また, 地盤液状化による杭挙動への影響を評価するために, 解析コードには FLIP<sup>4)</sup>を用いた。

Table 3 に地盤の解析パラメータを示す。模型地盤の初期剛性  $G_0$  は, 同規模の地盤模型の S 波検層結果<sup>5)</sup>から得られた値を参考に, 砂の相対密度に依存する回帰式を作成して決定した。また, 層中央部で表に示す値になるものとして, 平均有効主応力の 0.5 乗に比例させた。その他表に示す液状化パラメータは, Fig.6 に示す要素試験結果をシミュレーションして決定した。ただし,  $D_r=80\%$  の液状化パラメータは, 豊浦砂  $D_r=70\%$  と  $D_r=90\%$  の繰返し三軸試験結果を参考にしている。

平面要素とビーム要素でそれぞれモデル化されたフーチングと杭の構造物要素と地盤の接触面には 2 重節点を

Table 3: List of the parameters of analysis

土層	$G_0$ (kPa)	PHIF	PHIP	S1	W1	P1	P2	C1
上層部 ( $D_r=30\%$ )	1150	39.0	28.0	0.005	0.6	0.5	1.00	1.5
下層部 ( $D_r=80\%$ )	16300	39.0	28.0	0.005	7.0	0.5	1.00	1.3

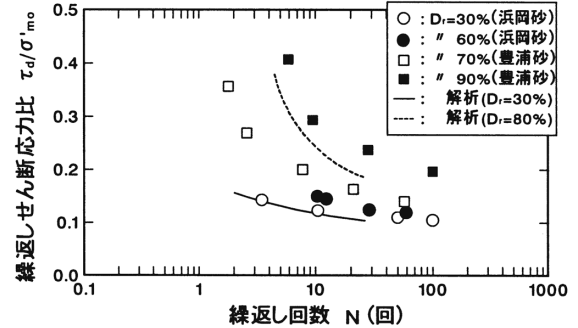


Fig. 6. Results of the simulation of element test

設け, MPC 拘束を行っている。側方境界は繰返し境界とした。

#### 4.2 解析結果と実験結果の比較

Fig.7 に過剰間隙水圧比のコンター図を示す。図に示した時点で上層部の上方で液状化に至っているが, 下層部は液状化していないことが分かる。また, 下層部において杭位置の過剰間隙水圧比の方が周辺地盤に較べて大きい。これは, Fig.8 に示す実験から得られた過剰間隙水圧の深度分布でも確認されるものであり, 解析による過剰間隙水圧の評価は, 実験結果と同様な傾向を示している。

Fig.9 に地盤の加速度, Fig.10 にフーチングと杭の加速度, Fig.11 に過剰間隙水圧比, 及び Fig.12 にフーチングとせん断土槽の変位について解析結果を実験結果と比較して示す。

Fig.9 に示す地盤の加速度については, 液状化に至っていない A11 位置における解析結果は実験結果と良い一致を示している。一方, A9 および A10 位置では実験, 解析結果とも液状化による加速度応答の低下を示している。この液状化による応答の低下は 0.8 秒以降に認められるが, これは過剰間隙水圧比の上昇過程と対応したものである。ただし, A9, A10 位置の解析結果は液状化による加速度応答の低下を良く表現しているが, 実験結果と比較するとやや過大評価となっている。これは, 本解析手法の限界と考えられる。

Fig.10 に示すフーチング及び杭の加速度に関して, 杭の加速度は液状化層である上層部の A16, A17 位置, 非液状化層の A18 位置とも解析結果と実験結果の対応は良好である。さらに, 液状化の程度による杭の加速度応答低下の違いも認められる。一方, フーチングについての解析結果は, 実験結果が液状化以降応答の減衰が著しいのに対して, これを過大に評価している。これに関しては, 杭の加速度応答及び後に示すフーチング水平変位の解析結果と実験結果との対応が良いことを考慮すると実験結果の応答加

ると考えられる。

Fig.12 に示すフーチング及びせん断土槽の水平変位について、フーチング変位の解析結果と実験結果の対応は良い。一方、せん断土槽の水平変位は、実験結果が若干ゼロ線からシフトしているが、解析結果と実験結果の変位量は同程度であり、両者の対応は良いと考える。

以上の解析結果と実験結果との比較により、本解析におけるモデル化は妥当な範囲にあると考えられる。ただし、解析結果が実験結果で認められた液状化による地盤加速度の減衰を過大評価したことは、解析手法の限界であると思われる。また、杭の加速度に関して、解析結果と実験結果との対応が良かった原因として、杭のひずみが弾性範囲内であったことも考えることもできる。しかしながら、地盤が液状化に至った場合でもその程度により杭の加速度応答に違いが認められたことから、液状化後も含めて地盤の剛性変化を適切に評価することが重要であると考えられた。今後、他のケースのシミュレーション結果についても検討を行い、さらに本解析手法の相互作用問題に対する適用性を検討していく予定である。

## 5 結論

液状化地盤中の杭挙動を評価することを目的として、模型振動台実験を実施した。さらに、解析コード FLIP を用いてそのシミュレーションを行い、地盤液状化による杭挙動への影響を考察した。

以下に、本研究で得られた主な知見をまとめる。

①せん断土槽底面とフーチングの加速度、及び過剰間隙水圧比の経時変化より、入力周波数の低下に伴い地盤全体が液状化し、慣性力の増大によりフーチングの応答が増幅す

るといふ共振現象が生じることが確認された。

②杭に生じる曲げモーメントと変形量の深度分布より、液状化地盤中の杭に生じる曲げモーメントと杭の変形量は入力周波数と地盤の液状化に大きく影響を受けることが明らかとなった。

③杭の加速度、フーチング及びせん断土槽の変位に関して、解析結果と実験結果の対応は良く、液状化地盤における杭の地震時挙動を精度良く評価するためには、液状化後も含めて地盤の剛性変化を適切に評価することが重要であると考えられた。

## 参考文献

- 1) 澤田亮, 西村昭彦: 液状化地盤中の基礎構造物の挙動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.597-600, 1997.
- 2) 安達直人, 鈴木康嗣, 津川恒久: 液状化地盤における地盤反力に関する実験的検討(その1)~(その2), 第35回地盤工学研究発表会, 平成12年度発表講演集, pp.1917-1920, 2000.6.
- 3) 佐藤正行, 石川利明, 佐藤博, 嶋田昌義: 地震時における液状化地盤中の杭挙動に関する研究(その1: 実験結果の分析), 土木学会第55回年次学術講演会講演集, I-B, pp884-885, 2000.9.
- 4) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15, 1992.
- 5) 戸早孝幸, 滝本幸夫, 森伸一郎, 武藤正人, 池田孝明: 液状化解析の適用性に関する研究(その4) 地盤-構造物連成系の実験と解析, 第25回土質工学研究発表会講演集, pp. 999-1002, 1990.