

(154) 三次元液状化解析による地盤・構造物系の土槽実験のシミュレーション解析

清水建設(株) 大崎研究室 福武毅芳、大槻 明、藤川 智

**1. はじめに** 従来の有効応力法に基づいた地盤・構造物系の液状化解析では、三次元構造を近似的に二次元モデルに置き換えた解析が行われている。例えば杭の挙動は三次元効果が強いが、数値解析上の種々の制約から杭は壁状の構造物として二次元モデルに置換されるため、本来の三次元挙動を十分に表現できない。

本研究では、既に著者らが開発している有限要素法による三次元液状化解析コード<sup>1),2)</sup>を用いて、杭基礎を有する液状化土槽振動台実験のシミュレーションを実施した。加速度や過剰間隙水圧などについて比較検討し、本解析手法の妥当性を検証するとともに、地盤と杭の三次元挙動を検討した。

**2. 実験概要** 解析の対象としたのは、佐藤・社本<sup>3)</sup>が行なった群杭基礎の液状化模型実験である。模型試験体および計器配置を図1に示す。用いた試料は浅間山砂で、その物性を表1に示す。上部構造物および杭基礎の模型諸元を表2に示す。入力地震波は、1968年十勝沖地震の八戸港で観測されたEW成分を時間軸を1/4に縮尺し、振動台入力最大加速度186Galとしたものである(図4)。実験では10秒間加振しているが、解析ではそのうち主要動の2秒のみに着目して入力している。加振方向は図1のx方向である。せん断土槽の頂部には、土槽のロッキングを抑えるためのローラを設置している。

表1 実験に用いた浅間山砂の物性

単位体積重量	$\gamma$	2.0	tf/m <sup>3</sup>
相対密度	$D_r$	90	%
平均粒径	$D_{50}$	0.31	mm
模型地盤の固有振動数	$f_0$	14.9	Hz

表2 上部構造物および群杭基礎の模型諸元

上部構造物	重量	$W = 36.4$ kgf
	固有振動数	$f = 21.0$ Hz
フーチング	重量	$W = 10.4$ kgf
	鋼製箱	240×240×32 mm
杭基礎	杭本数: 9本 (3×3列)	
	杭間隔: 75 mm	
	材質	アルミニウム
	長さ	900 mm
	外径	30 mm
	厚さ	1 mm
ヤング係数	$7.4 \times 10^5$ kgf/cm <sup>2</sup>	

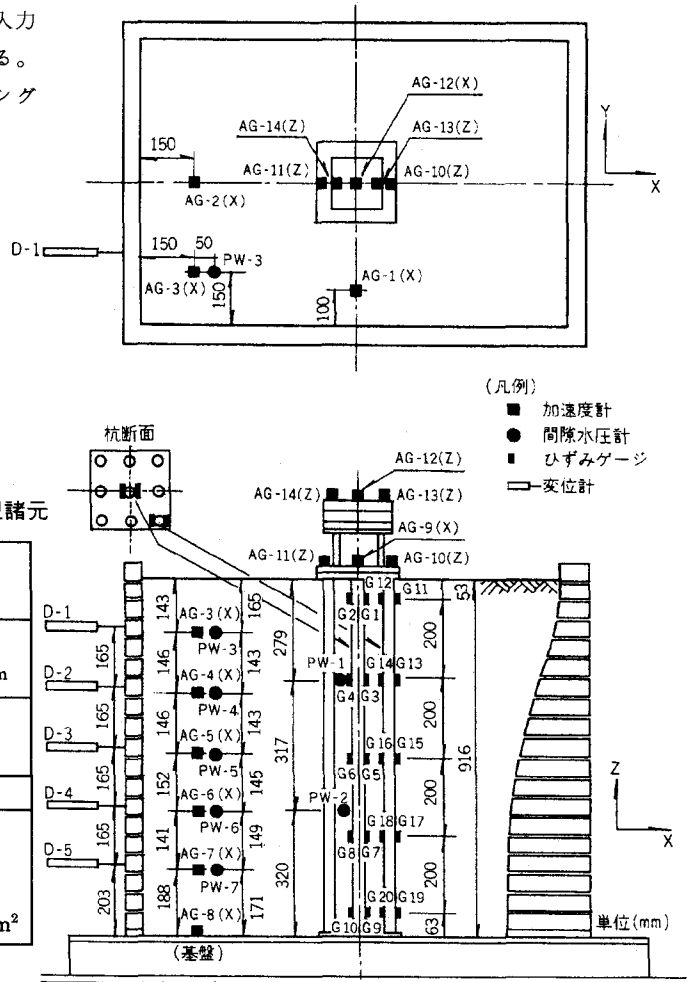


図1 試験体および計器配置

**3. 解析手法の概要** 用いた解析コードは、著者らによって開発されたコードHiPER<sup>1),2)</sup>である。三次元解析では総自由度数が多大となり、また陰解法は陽解法に比べ自由度に対する制限が大きくなる。そこで本コードでは、三次元大自由度の連立方程式を効率よく計算するため、積分は陽解法(中央差分)を用いた1点積分で行なっている。有効応力法に基づいており、非排水条件下で解析している。土の構成式<sup>1),4)</sup>としては、せん断応力-せん断ひずみ関係として近似的に三次元に拡張したRamberg-Osgoodモデルを用い、ダイレタンシーについてはBowllモデルを用いた。

**4. 解析条件** FEMモデルを図2に示す。加振軸(x軸)に対して左右対称であるので、半分のみをモデル化した。地盤は8節点アイソパラメトリック要素でモデル化し、杭および上部構造部の板バネはビーム要素でモデル化した。フーチング部と上部構造部は剛体要素でモデル化した。実験では、ロッキングを抑えたせん断土槽を用いており、せん断変形が卓越すると推察されるので、鉛直方向の変位は全て固定した。

常時微動測定より地盤の1次固有振動数 $f_0$ は14.9Hzであり、解析では $f_0$ が一致するように初期せん断剛性を設定した。その他の非線形性に関するパラメータは、図3に示すように浅間山砂の既往の実験データ<sup>5)</sup>などから設定した。

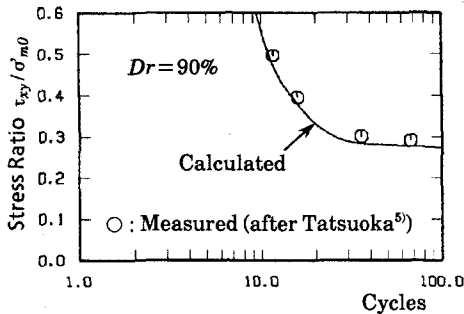


図3 浅間山砂の液化強度曲線

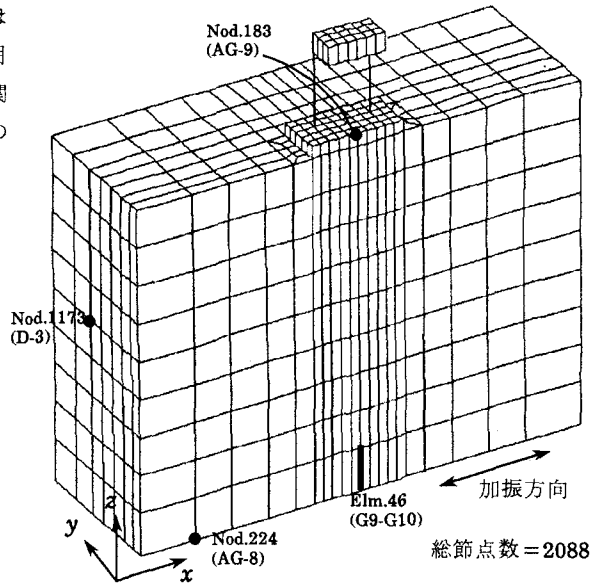


図2 FEMモデルと出力箇所

**5. 実験結果と解析結果の比較検討** 図4には、実験値と解析値の時刻歴の比較を示す。過剰間隙水圧比は、実験値・解析値ともに0.6秒付近から発生し、サイクリックモビリティによる波形の波打ちが見られる。加速度と変位波形の全体的傾向は一致しているが、加速度・変位ともに0.9秒~1.2秒付近で解析値の方が実験値よりやや大きい値を示している。図5,6には、側方地盤における変位と加速度の最大分布を示すが、実験値と解析値の傾向は概ね一致している。両者の最大変位がGL-35cmを挟んで逆転しているのは、後述する過剰間隙水圧の分布の差異によるものと思われる。

図7には、過剰間隙水圧比の分布図を示す。側方地盤における最大分布は、実験ではGL-45, -75cm付近で最大値を示すのに対し、解析ではGL-30~-50cm付近で最大値を示している。また解析による時刻1.0秒における全体の水圧比コンターを見ると、杭基礎近傍地盤ではまわりの地盤に比べて水圧の発生が若干押さえられている。

図8には、中心に位置する杭の下端付近の曲げひずみの時刻歴を示す。両者の波形の定性的形状は一致している。また、図4の変位時刻歴との比較から、杭が周辺地盤と一体となって振動しているのが認められる。図9には中心杭の曲げひずみの最大分布を示す。実験値・解析値ともに下層のGL-85cm付近において大きな値を示している。これは下端固定の杭に対し図5に示すように、地盤下層の相対変位(ひずみ)が大きい

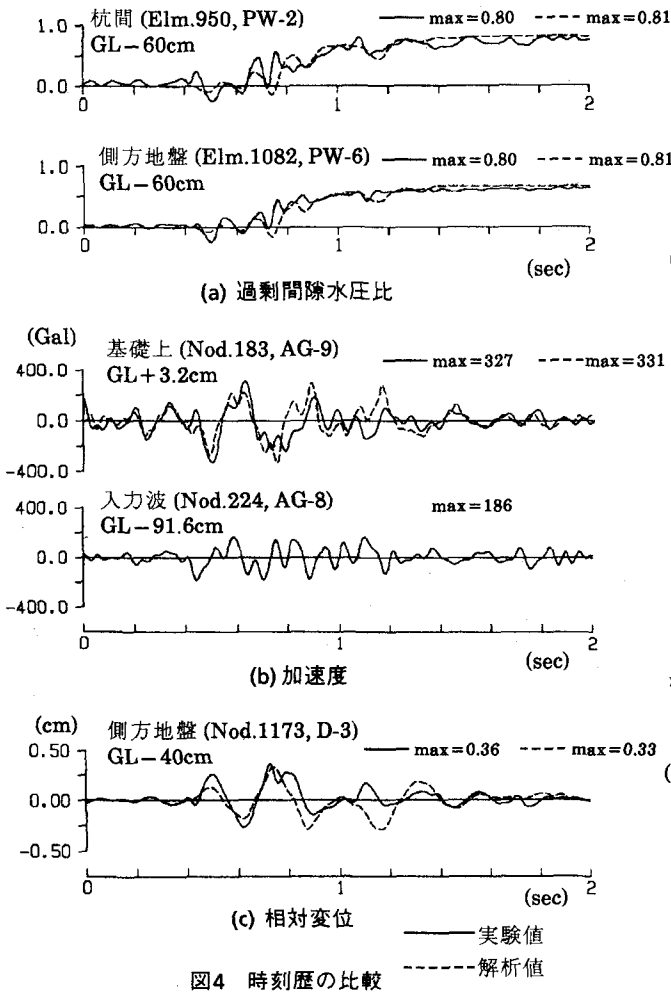


図4 時刻歴の比較

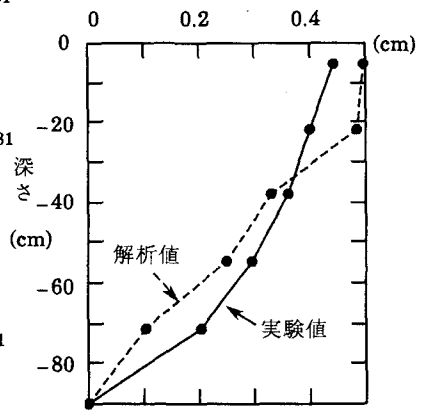


図5 側方変位最大分布図

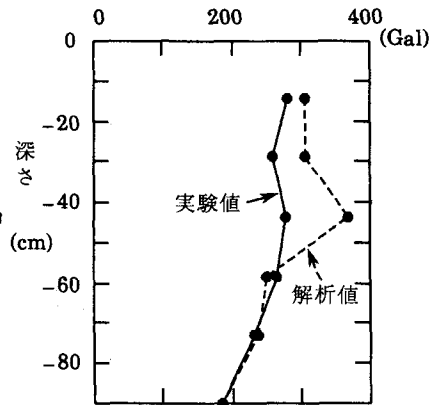
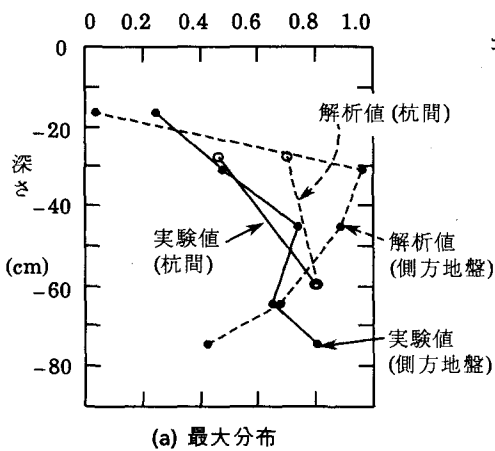


図6 加速度最大分布図



コンターピッチ: 0.1

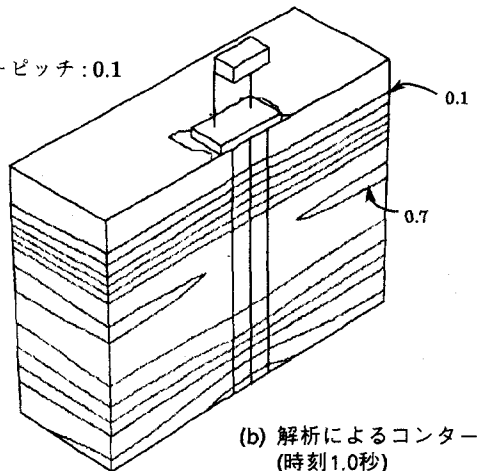


図7 過剰間隙水圧比(過剰間隙水圧/初期拘束圧)の分布

めと考えられる。なお佐藤<sup>3)</sup>は、地盤の変位分布を強制変位として作用させた静的三次元解析により、実験の杭ひずみ分布を精度良く求めている。

このことは、本実験条件下では地盤変位がある程度精度良く予測できれば、杭の挙動が把握できることを意味している。

図10には、基礎端の要素241(GL-10~-20 cm)における水平面上のせん断ひずみオービット( $\gamma_{zx} \sim \gamma_{zy}$ )を示す。加振直行方向(y方向)には加振方向(x方向)に比べて約2割程度のひずみが発生している。特に、地盤が軟化してくる後半部において、y方向成分の割合が増加している。この付随的なy方向成分のせん断ひずみは、その絶対量は小さく、y方向成分のひずみが付加されることによる過剰間隙水圧の新たな発生は構成式の上からはほとんどない。

**6. おわりに** 三次元液状化解析コードを用いて、杭基礎を有する土槽実験のシミュレーション解析を行なった。解析結果は実験結果をほぼ説明できており、本コードの妥当性は検証できたと考えている。本検討は、群杭-地盤系の一次固有振動数が地盤によって定まる実験<sup>2)</sup>に対するシミュレーションであり、さらに上述の条件とは異なったケースについての検討も必要である。今後は合理的な杭の設計や液状化対策などに本コードを適用していくつもりである。

最後に、本研究を行なうに当たり、有益な助言をいただいた当社技術研究所の佐藤正義主任研究員に感謝の意を表します。

**参考文献** 1) 福武毅芳・大槻 明「三次元液状化解析による部分改良地盤の効果の予測」地盤の液状化対策に関するシンポジウム, 土質工学会, pp.205-210 (1991)

2) 大槻 明・福武毅芳「地震時における超々高層建築物・地盤系の有効応力解析, その2 三次元解析による多方向入力

応答の検討」日本建築学会大会学術講演概要集, (1993)

3) 佐藤・社本「群杭基礎の液状化時の挙動に関する模型実験と解析」清水建設研究報告, 第49号, pp.23~30 (1989)

4) 福武毅芳・松岡元「任意方向単純せん断におけるダイレイタンスの統一的解釈」土木学会論文集, No.412/III-12, pp.240-248 (1989)

5) Tatsuoka, F., Ochi, K. and Fujii, S.: Effect of sample preparation method on cyclic undrained strength of sand in triaxial and torsional shear tests. Bull. of ERS, No.17, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo (1984)

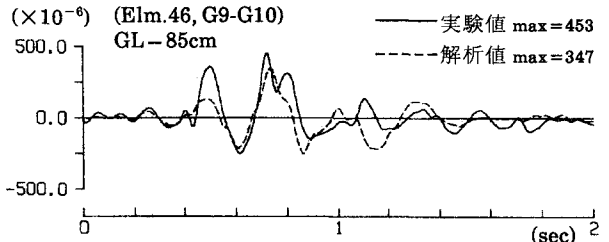


図8 中心杭の下端での曲げひずみの時刻歴

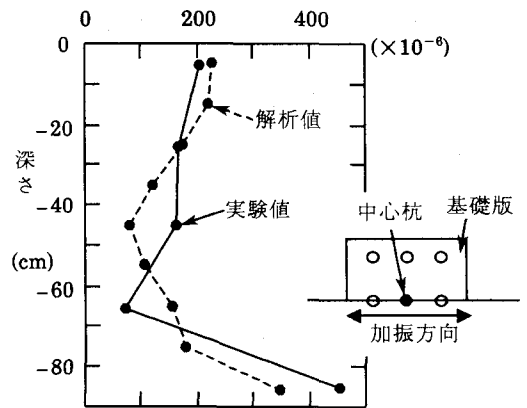


図9 中心杭の最大曲げひずみ分布

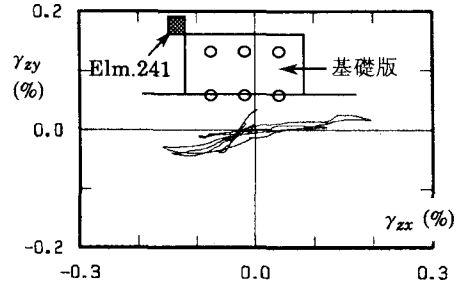


図10 水平面上のせん断ひずみオービット