

### 3.3.2 強非線形地盤 - 杭基礎構造物の三次元数値解析に基づいた杭応力の特性

## 目 次

### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 3ヵ年の年次実施計画
- (e) 平成14年度業務目的

### (2) 平成14年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
  - 1) 薄層要素法による地盤・杭の相互作用解析
  - 2) 有効応力解析の地盤モデル作成と地盤の液状化強度
  - 3) 有効応力解析
- (c) 業務の成果
  - 1) 薄層要素法による地盤・杭の相互作用解析
  - 2) 有効応力解析の地盤モデル作成と地盤の液状化強度と数値解析
- (d) 結論ならびに今後の課題
  - 1) 結論
  - 2) 今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

### (3) 平成15年度業務計画案

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目 強非線形地盤 - 杭基礎構造物の三次元数値解析に基づいた杭応力の特性

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名
鹿島建設（株）技術研究所		
地震動・風グループ	主管研究員	八幡 夏恵子
土質基礎構造グループ	主管研究員	鈴木 康嗣
同上	主任研究員	宮田 章
鹿島建設（株）ITソリューション部	主 査	岩本 賢治

(c) 業務の目的

大地震の液状化地盤・杭支持構造物の被害メカニズムを解明するため実大震動台実験が実施される予定である。三次元の実験結果の予測及びシミュレーション解析の技術レベルを向上させ、液状化地盤に対する有効応力解析技術を汎用的な耐震評価技術のツールにすることは重要な課題である。

本業務は、実大振動台実験の基礎的研究として実施される中型振動台実験のシミュレーション解析を行い、実験結果との比較を通して三次元有効応力解析技術の妥当性・適用範囲等の知見を得ること、及びシミュレーション解析コードの改良・高度化を行うことを目的としている。

(d) 5カ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

実験の地盤特性の評価と関連研究の調査

線形解析による実験モデルの地盤・杭支持構造物の相互作用効果解析

2方向・3方向入力による地盤の簡易モデル有効応力解析による時刻歴応答解析

2方向・3方向入力によるせん断土槽の液状化地盤モデルの有効応力解析による時刻歴応答解析

報告書作成

2) 平成15年度：

せん断土槽の液状化地盤の実験結果の有効応力解析によるシミュレーション解析

せん断土槽の液状化地・4本杭モデルの有効応力解析によるシミュレーション解析  
解析結果の考察

せん断土槽の液状化地・多本杭モデルの有効応力解析による時刻歴解析

報告書作成

3) 平成16年度：

実験結果のシミュレーション解析技術の向上

シミュレーション結果のまとめ  
実大三次元震動台解析方針作成  
報告書作成

(e) 平成14年度業務目的

実験の地盤モデルの評価

せん断土槽実験モデルの数値シミュレーションモデルの作成

線形解析による実験の地盤・杭相互作用の把握

地盤の簡易モデルによる三次元有効応力解析に基づく多方向入力の地盤特性の推定

せん断土槽の地盤モデルの三次元有効応力解析に基づく多方向入力の地盤特性

(2)平成14年度の成果

(a) 業務の要約

平成14年度は次の各項目を実施した。

- 1) 実験の豊浦標準砂の液状化強度を相対密度50%と80%の2ケースについて推定した。評価した液状化強度は既往の非排水三軸試験結果と対応する結果である。
- 2) 三次元薄層法による地盤・杭モデルの解析より、微小入力における実験結果を予測した。地盤の剛性は1)のG0を用いた。
- 3) 簡易な地盤の土柱モデルについて三次元FEMによる有効応力解析を行い、実験地盤の時刻歴の応答特性を把握した。1方向入力と2方向入力の水圧波形には明らかな差が生じるので、この性質は実験における着目点になる。
- 4) 円筒形のせん断土槽の地盤モデルを三次元FEMでモデル化し、有効応力解析による時刻歴応答を求めた。
- 5) 簡易の土柱モデルの結果と土槽地盤モデルの結果の比較より、両者の対応関係を把握した。

(b) 業務の実施方法

1) 薄層要素法による地盤・杭の相互作用解析

薄層要素法を用いて150Gal入力における線形時の地盤・杭の相互作用解析を行い、杭応力を把握した。地盤は実験の初期剛性を評価した成層地盤モデルである。

2) 有効応力解析の地盤モデル作成と地盤の液状化強度

有効解析のために実験の模型寸法に一致させた2種類の地盤モデルを作成した。簡易な土柱モデルとせん断土槽モデルの2種類である。

既往の資料により地盤の物性値を推定し模型地盤の液状化強度を評価した。評価した液状化強度は文献の結果と対応を示した。

3) 有効応力解析結果

土柱モデルとせん断土槽モデルについてNS方向入力の場合とNS・EWの2方向入

力の場合の時刻歴応答解析を行い、地盤の応答特性を把握した。  
解析結果をコンターで表示して2種類の地盤モデルの比較より、両者の対応関係を示した。

#### 4) 報告書作成

1)～3)の解析結果を今年度の研究報告にまとめた。

#### (c) 業務の成果

実験の予備解析として、実験モデルを参考に地盤・杭の線形の相互作用解析と地盤の有効応力解析を行い下記のような性質を把握した。

入力は1968年の十勝沖地震の八戸の観測波形とした。

##### 1) 薄層要素法による地盤・杭の相互作用の線形解析の場合

建物のある場合とない場合について次の2)に示す液状化強度を評価した地盤の $G_0$ の剛性で成層地盤と杭の相互作用解析を行った。解析結果は $Dr80\%$ の場合である。杭・基礎・構造物の諸元は実験モデルの条件に一致させた。地盤・杭の薄層要素法は既往法として知られている。サブストラクチャー手法であり、杭のインピーダンスと基礎入力動を求め、建物のバネ・マスモデルに入力して応答を評価する。杭頭は固定条件、杭下端はピンとし、基礎は埋め込みの無い剛基礎とし、建物は実験モデルに対応する1質点のバネ・マスモデルとした。

入力振幅を150Galとし、NS入力とEW入力に対する杭の応答と応力を図1,2に示す。EW入力の方がNS入力より杭の応力が大きくなるが、入力波の周波数特性が異なるためにその影響で杭の特性に相違が生じた。また、線形の場合には一般に建物の応答が大きくなるため、慣性力の影響が顕著である。

##### 2) 有効応力解析の地盤モデルの評価と数値解析

###### a) 地盤モデル

3次元FEMの解析モデルを図3に示した。実験のせん断土槽は円筒型であり、解析モデルも同じ形状とした。別途、簡易な3次元の土柱モデルの解析を行い、せん断土槽の地盤モデル(以下せん断土槽モデルと記述)のプロトタイプに対するスケールの相似則は約1/5である。図3に示したように深度方向は13分割とし、1つの要素は3次元の8面体である。解析コードはDYNFLOW<sup>3)</sup>を用い有効応力解析を行った。実験では杭基礎・建物が設置されるが、本解析は地盤モデルのみであり、モデル概要を下にまとめる。

- $G_0$ から評価した地盤の $V_s$ は図3に示す値である。
- せん断土槽節点数は4494、要素数は4160である。
- せん断土槽モデルの側面境界条件は同じ深度では水平2方向の変位は同じとし、鉛直方向は自由とした。モデル下端は固定とした。
- 土柱モデルは3次元であり、側面は周期境界とし、下端は固定とした。

###### b) 液状化強度

実験では地盤の相対密度 $Dr$ は50%と80%が採用される予定なので、その非排水三軸

試験の解析結果を図4に示した。50%では0.100、0.125、0.150の応力比を、80%では0.150、0.200、0.250の応力比の場合を求め、0.125と0.20の結果を図に示した。得られた結果と既往の液状化強度試験結果の関係を図5に示したが、解析結果は試験結果と対応している。三軸試験の解析的検討と文献4~7)から、地盤の物性値を表1のように評価した。前述したように、表1の値より求まる $V_s$ は図3に併記した。

Dr80%の解析を50%より先行する方が非線形解析上の観点から能率的と考えられるので、以降の時刻歴解析は80%の場合について行った。

### 3) 解析結果

入力振幅はNS方向を150Galとし、EW方向は同じ係数で評価した。図6にX,Y方向の入力波形を示した。寸法の相似則が1/5なので、時間軸は1/5である。解析概要は次のようである。

土柱モデルは、NS(X方向入力)、EW(Y方向入力)、NS・EW(X-Y方向入力)の2方向入力の3ケースである。土柱の周囲は周期境界条件とした。

せん断土槽モデルは、NS・EW(X-Y方向入力)の2方向入力の場合である。せん断土槽の条件<sup>8)</sup>は周囲の水平変位は等しく、鉛直変位は自由とした。土槽質量は地盤の約0.1であり解析では考慮していない。以降ではX,Y方向入力の記述とする。

#### a) 時刻歴波形

~ の場合についてG.L.-0.2m深度の加速度波形を図7に、過剰間隙水圧比(以下水圧比と記述)の時刻歴波形を図8に示した。土槽モデルの応答は中心位置である。図は2-12secの区間を示した。

図7のX方向入力(土柱モデル)、2方向入力(土柱モデル)、2方向入力(土槽モデル)に対するX方向の結果は波形、振幅共に似ている。図8の水圧比がX方向入力では0.3、Y方向入力では0.25、2方向入力の2ケースは0.5である。2方向入力の場合には1方向より水圧比は大きい、液状化程度は弱い。そのため1(X)方向入力と2(X-Y)方向入力の加速度波形には上昇過程の8sec近傍で両者の波形に相違が存在するが、顕著ではない。7.8sec~8.2secの区間の2方向の場合の波形はピーク形状が1方向の場合より鋭くなり、2つの波形(土柱と土槽モデル)の傾向は似ている。7.8sec~8.2secの区間ではY方向の場合にも2方向入力の2つの波形のピーク形状にはこのような傾向が見られる。

図3のせん断土槽の地盤モデルの3次元解析の負荷は大きい、土柱モデルの解析は容易である。2方向入力の両者の加速度応答結果は殆ど同じなので、土柱モデルはせん断土槽の地盤応答を模擬する上で有効であると考えられる。また、図8のせん断土槽の地盤の水圧には上下方向の振動の影響が生じていると考えられるので、土槽モデルのZ方向の加速度波形を図7に示した。Z方向の加速度波形は水平の約3%の振幅であり影響は小さいが、中心から離れると側面境界の影響(側面の鉛直変形は自由としている)が大きくなるが、土柱モデルではこの影響を再現できない。

#### b) 水圧・せん断歪み分布

水圧の振幅が大きい9sec近傍の土槽モデルの水圧分布、せん断歪み $\epsilon_{xz}$ を図9に示す。水圧は土柱モデルの結果も示した。2つのモデルの水圧分布はほぼ対応する。 $\epsilon_{xz}$ は土槽の中間の深度の振幅が大きく約0.2%である。地表の分布から位置による振幅の差が分かるが、差は約1.5倍であり土槽形状の影響は小さいと見做せる。水圧、せん断歪み分布より、土槽の及ぼす影響は小さいと考えられ簡易な土柱モデルで土槽の地盤モデルを評価する事は可能であろう。

#### c) 終わりに

本検討より次の知見を得た。詳細な3次元FEMのせん断土槽モデルと簡易な土柱モデルの解析結果の比較より、土柱モデルの解析により液状化地盤特性を表現できる事を把握した。せん断土槽モデルの鉛直方向の応答は側面境界の鉛直自由の影響と土槽のアスペクト比に依存する地盤のロッキング振動から生じると考えられるが、本解析結果では大きな影響はなかった。

#### 4) 報告書

今年度実施した解析結果の報告書を作成した。

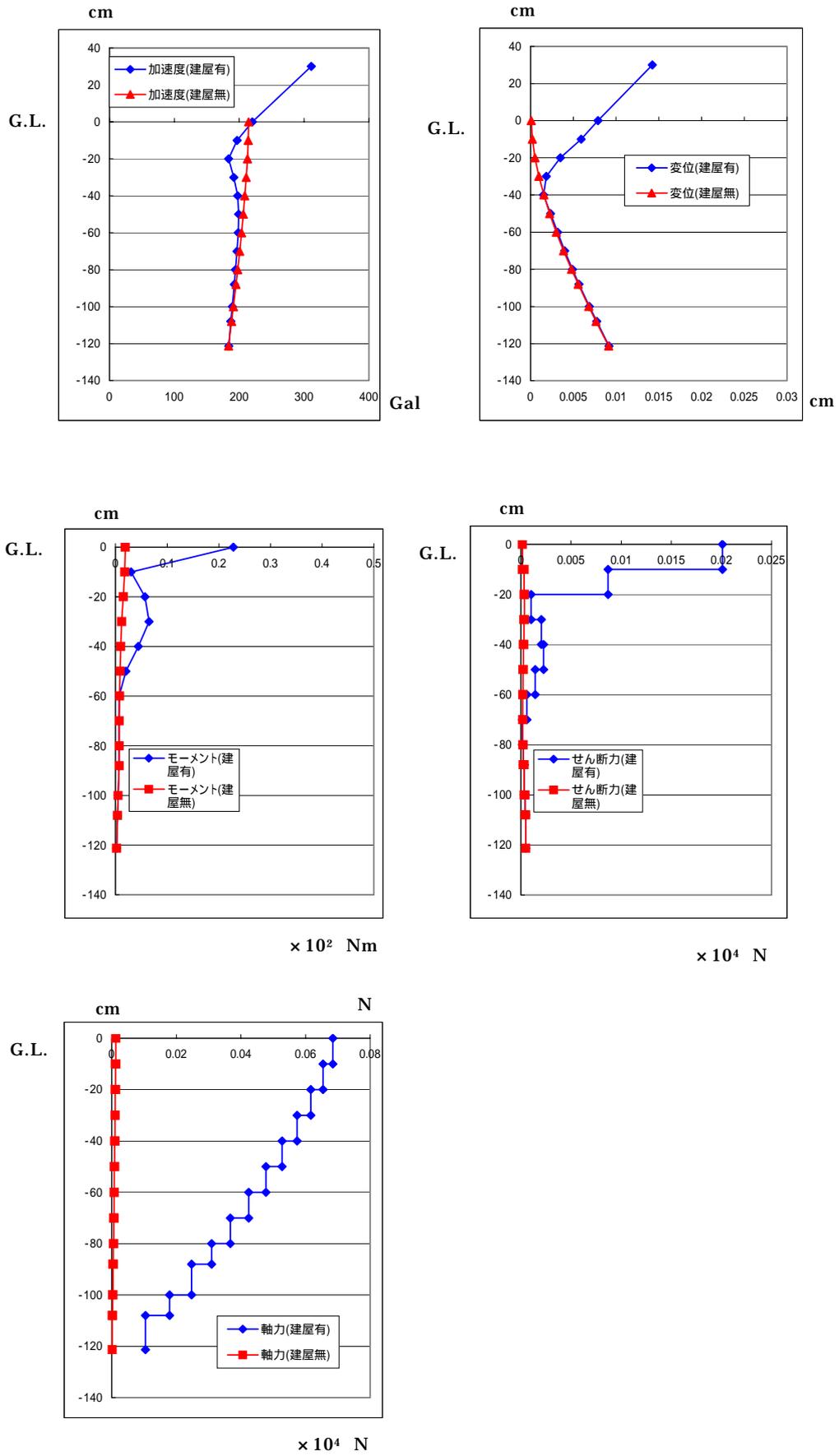


図1 N S 方向入力 of 杭応力

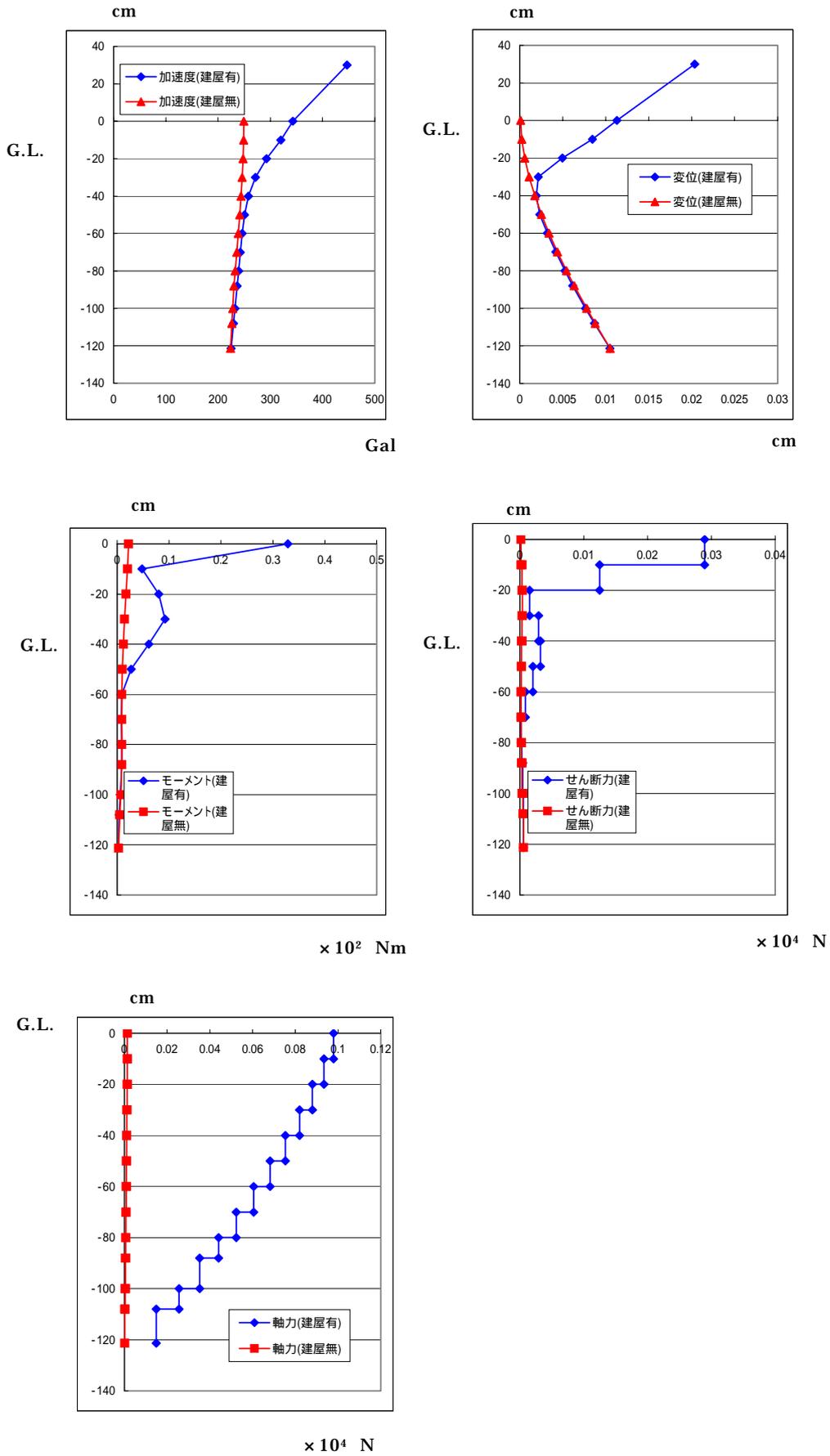


図2 EW方向入力の場合の杭応力

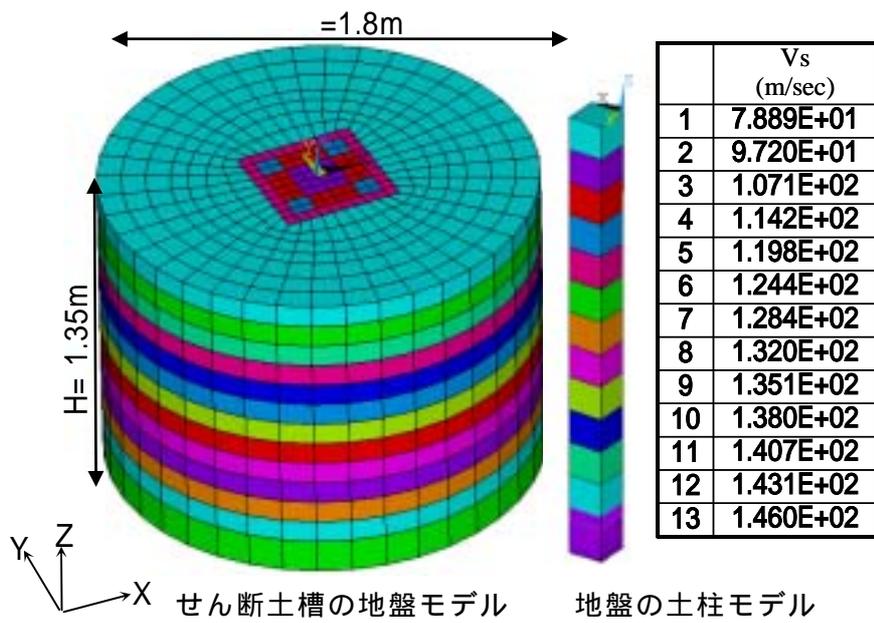


図3 解析モデル

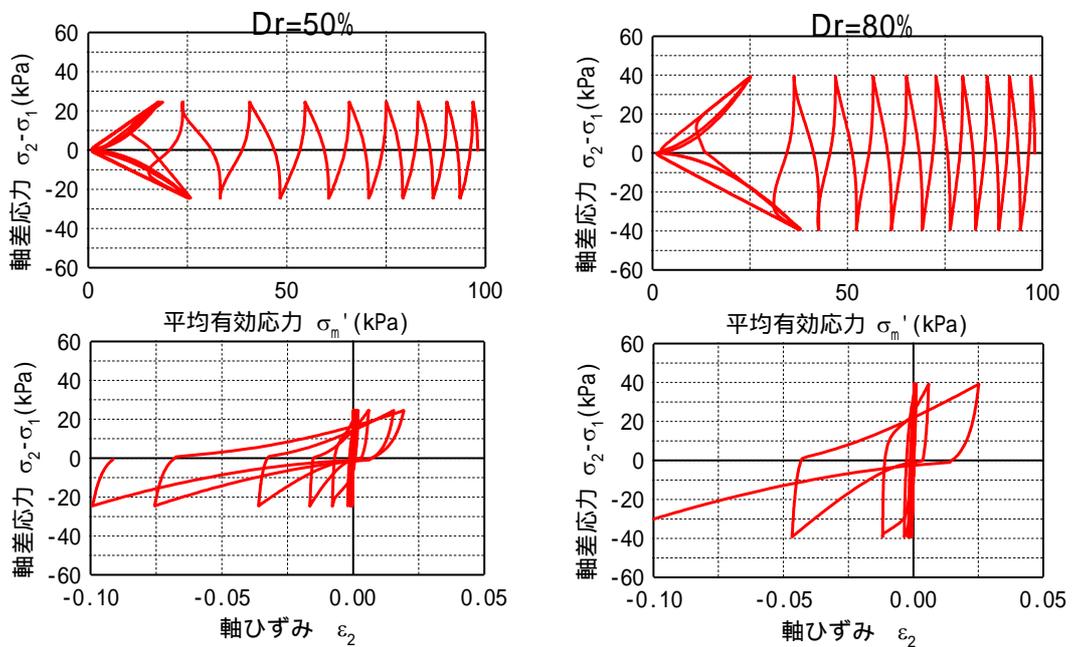


図4 非排水三軸試験の解析

表 1 解析の豊浦標準砂の物性値

項 目	相対密度 Dr	
	50%	80%
土粒子密度 $s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.64	2.64
土骨格せん断弾性係数 $G_0(\text{Mpa})$ *4)	29.04	37.09
土骨格ポアソン比	0.33	0.33
粘着力 $c(\text{kPa})$	0	0
内部摩擦角 (度) *5)	36	40
ダイレタンシ - 角 $d(\text{度})$ *6)	24	28

\* 参考文献番号

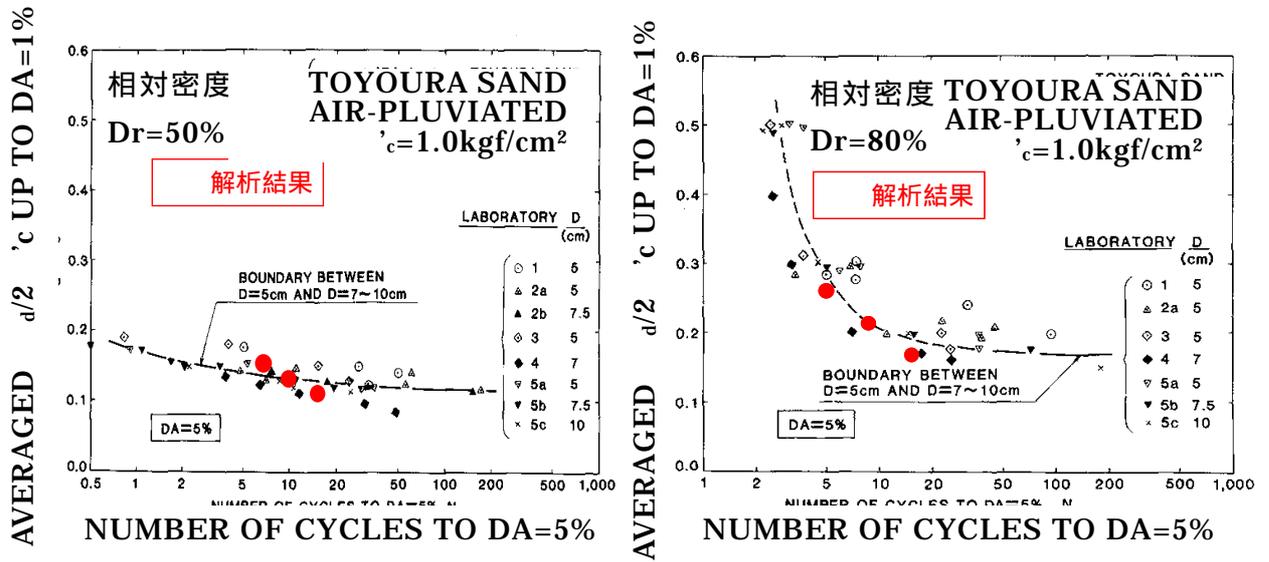


図5 解析の液状化強度と既往の実験結果<sup>7)</sup>

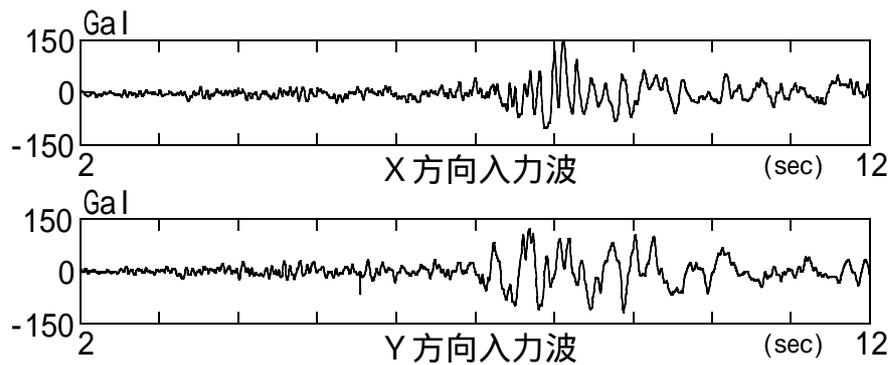


図6 入力波形

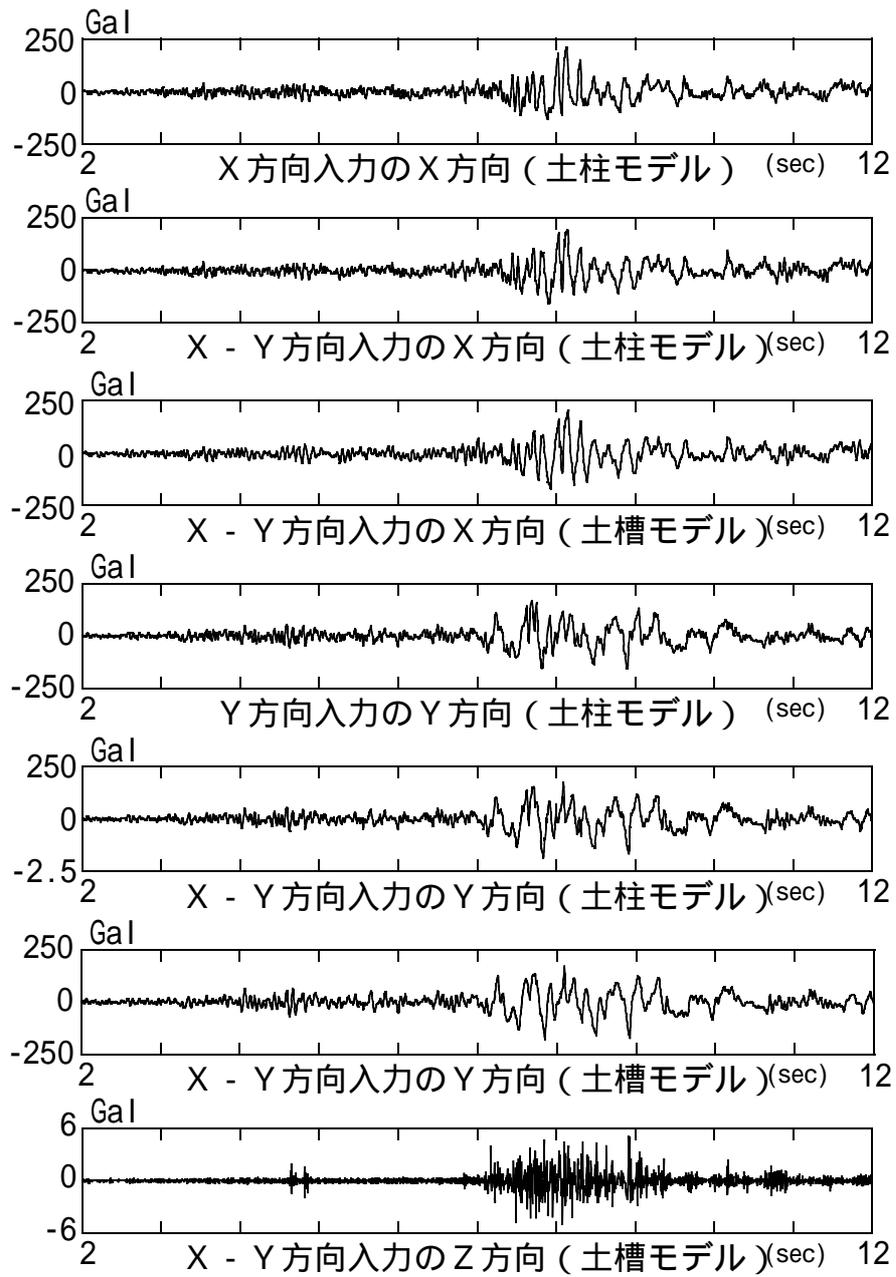


図7 加速度時刻歴波形

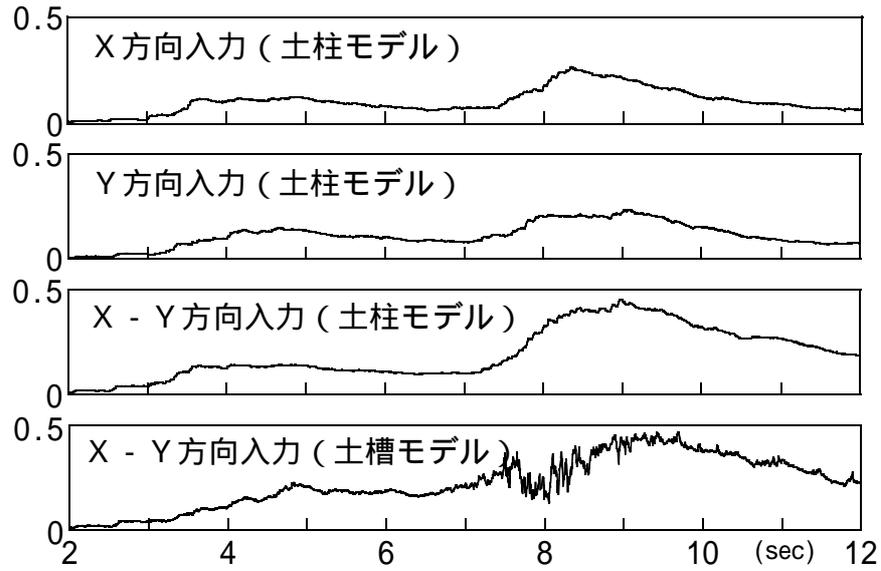


図8 過剰間隙水圧比時刻歴波形

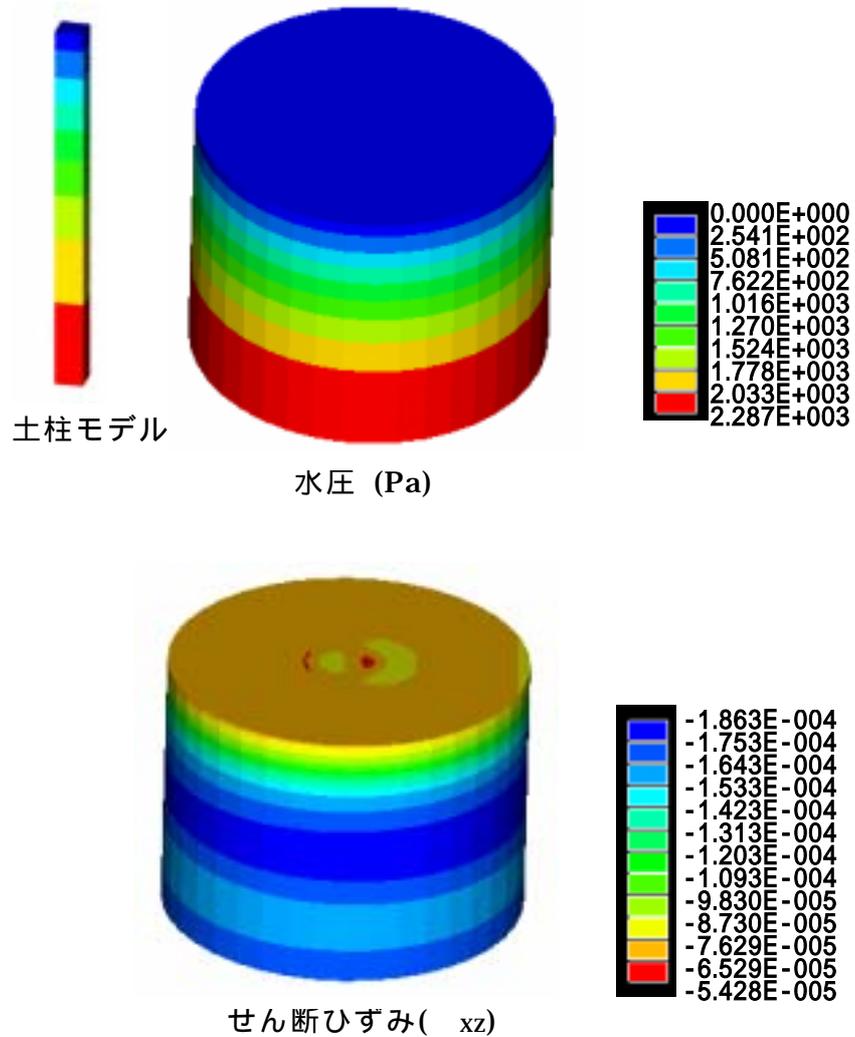


図9 各モデルの水圧及びせん断ひずみ分布

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 結論

- a) 豊浦標準砂の液状化強度が評価できた。
- b) 地盤モデルの有効応力解析より、地盤について有効なモデル化の方法が分かった。

2) 今後の課題

- a) 液状化地盤・杭の解析モデルを作成し、時刻歴応答解析を行う。
- b) シミュレーション 解析のための実験条件を評価し、地盤のシミュレーション解析を行い、次に液状化地盤・杭モデルのシミュレーション解析を行う。入力条件は1方向、2方向、3方向の順で行う。
- c) 多次元有効応力の数値解析遂行上の知見の把握

(e) 引用文献

- 1) 田村,土屋,鈴木,藤井,佐伯,時松：大型せん断土槽を用いた鋼管杭の液状化実験（その1 実験概要）, 第35回地盤工学研究発表会, pp.1907-1908, 2000.6
- 2) 八幡,鈴木,宮田,田村：液状化地盤・杭支持構造物の杭応力に対する慣性力の影響, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp.1213-1216,2002.11
- 3) 宮田,八幡,大保,Prevost：有効応力解析に用いる Multi-yield 弾塑性モデルの高度化, 第35回地盤工学研究発表会, pp.519-520,2001.6
- 4) 加藤,龍岡,プラダン：豊浦標準砂の繰返し非排水三軸試験に及ぼす長期圧密と過圧密の影響, 砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価 - 室内試験法及び試験結果の解釈と適用 - に関するシンポジウム発表論文集,土質工学会, pp.155-162, 1984.12
- 5) 建設省土木研究所：大型せん断試験装置を用いた標準砂とロック材料の動的変形特性試験, 土木研究所資料, 第2132号,1984.6
- 6) 安田：液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, pp131,1988
- 7) 豊浦標準砂の繰返し非排水三軸試験における変形特性に及ぼす諸要因に関する共同研究報告, 砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価 - 室内試験法及び試験結果の解釈と適用 - に関するシンポジウム発表論文集,土質工学会, pp.7-22,昭和59.12
- 8) 堀越,八幡,桜庭：遠心載荷による地盤模型振動実験の解析的考察, 建築学会大会, pp.321-322,1993.9

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
八幡夏恵子 宮田 章 毛利 栄征 鬼丸 貞友	せん断土槽を用いた液状化実験の地盤モデルの3次元解析	2003 年度日本建築学会大会 日本建築学会 東海	2003年9月 (発表予定)

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成15年度業務計画案

(a) 平成 14 年度のせん断土槽を用いた液状化地盤・4 本杭の実験結果について三次元有効応力解析によるシミュレーション解析を次のように行う。

- 1) 相対密度 50%と 80%の地盤モデルの時刻歴のシミュレーション解析を行う。解析は 1 方向入力、2 方向入力、3 方向入力の順で行う。
- 2) 液状化地盤・4 本杭モデルの時刻歴のシミュレーション解析を行う。解析は 1 方向入力、2 方向入力、3 方向入力の順で行う。
- 3) 解析結果の杭応力・地盤反力の特性を考察する。
- 4) 解析と実験結果を全体的に考察し、得られた成果を明らかにする。

(b) 平成 15 年度のせん断土槽の液状化地・多本杭モデルの三次元有効応力解析を次のように行う。

- 1) 解析モデルの作成
- 2) 薄層要素法による線形解析により、各杭の応力把握
- 3) 液状化地盤・多本杭モデルの三次元有効応力解析のデバッグと解析方針の検討
- 4) 液状化地盤・多本杭モデルの実験状況を考慮しつつ三次元有効応力解析のシミュレーション解析を行う。

(c) 平成 15 年度のまとめ