

3.3.8 地盤・基礎実験における三次元数値シミュレーションによる実験の予測解析
(水平地盤中の杭基礎解析、その1)

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 2か年の年次実施計画
- (e) 平成18年度業務目的

(2) 平成18年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
 - 1) 解析対象の三次元有限要素法(FEM)によるモデル化
 - 2) 解析ケース
 - 3) 地盤のモデル化
 - 4) 固有値解析結果
 - 5) 地震応答解析と入力波
 - 6) 地震応答解析結果
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (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

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

地盤・基礎実験における三次元数値シミュレーションによる実験の予備解析（水平地盤中の杭基礎解析、その1）

(b) 担当者

| 所属機関 | 役職 | 氏名 | メールアドレス |
|--------------|-------|------|------------------------------|
| 清水建設（株）技術研究所 | 主任研究員 | 福武毅芳 | kiyoshi.fukutake@shimz.co.jp |

(c) 業務の目的

最新の解析手法により実物大の杭基礎構造物が破壊するまでの過程を三次元条件下の解析で予測し、構造物の耐震性の向上に役立てることを主目的とする。また、E-ディフェンスによる実験条件として、適切な加振波の選択と最適な液状化実験の条件や、群杭基礎の加振方向の影響および三次元効果を検討し、防災科研殿が目標としている「数値震動台」の一部となる地盤の三次元数値シミュレーション手法（有効応力解析を含む）の開発・高度化に資するデータとする。

(d) 2か年の年次実施計画

- 1) 平成17年度：乾燥砂地盤における群杭模型を対象として、大加振時の挙動を事前に解析し、杭の損傷を評価する。また入力地波は水平1方向加振に加え、水平2方向加振、さらに上下動も考慮した3方向を考慮し、その影響が応答性状や杭の損傷に及ぼす効果を検討する。
- 2) 平成18年度：飽和砂地盤における群杭模型を対象として、中加振と大加振時の挙動を事前に解析し、杭の損傷を評価する。入力地波は水平2方向の加振とする。中加振では杭は線形挙動する振幅とし、大加振では杭が非線形になる（損傷する）程度の振幅とする。それぞれの加振の影響が液状化の程度や杭の応力（群杭効果）に及ぼす効果を検討する。

(e) 平成18年度業務目的

本業務の目的は、事前の解析によって実験に適切な入力レベルについて事前検討する。その結果に基づき、模型実験において杭が損傷する入力レベルと液状化強度の関係や、地盤剛性（密度）などを想定する。

業務の実施にあたっては、有効応力法に基づく三次元 FEM により飽和地盤－杭基礎－構造物系の実験模型をモデル化し、地震応答解析を種々の条件で実施する。液状化地盤における群杭挙動や損傷メカニズムを主眼に検討し、実験結果の事前予測と、三次元数値シミュレーション手法の高度化を行う。

(2) 平成 18 年度の成果

(a) 業務の要約

本業務の目的は、事前の解析によって実験に適切な入力レベルや過剰間隙水圧の関係などについて事前検討し考察することにある。その結果、模型実験において杭が損傷する入力レベルや地盤剛性(密度)などを想定し、その条件下における地盤—杭基礎—建屋の応答を詳細に検討する。

実施にあたっては、有効応力法に基づいた三次元非線形FEMにより、実験模型をモデル化し、固有値解析ならびに地震応答解析を種々の条件で実施する。地盤のモデルは、三次元に拡張した Ramberg-Osgood モデルとダイレイタンシーモデル(おわんモデル)を併用して用いている。過剰間隙水圧の影響や液状化地盤における基礎—建屋の応答を詳細に評価できる。

着眼点は、①入力レベル(大加振と中加振)や地盤密度に応じた、液状化の程度(ひずみや過剰間隙水圧)、②液状化の程度と杭体の非線形の影響 (M - ϕ 関係や構造物の応答特性)、③群杭効果、④群杭周辺のローカルノンリニアリティー(過剰間隙水圧やせん断ひずみの挙動)やサイクリックモビリティ、などである。また平成 17 年度に実施した乾燥砂地盤のケースとの比較も行う。解析結果より以下の成果を得た。

○75Gal 入力の場合

- ・ 過剰間隙水圧は群杭の近傍から上昇し始め、水圧比は 92%まで上昇する。
- ・ 地盤の最大せん断ひずみは 0.14%であり、特に杭近傍と外周で大きな値となる。
- ・ 杭は線形状態にある。
- ・ 各杭頭の応力分担や曲率は、隅杭で若干大きくなる傾向がみられる。ただし乾燥砂の場合ほど顕著な差異は無い。

○180Gal 入力(原波×0.3 倍)の場合

- ・ 過剰間隙水圧は群杭の近傍から上昇し始める。
- ・ 過剰間隙水圧比は約 4 秒で 100%まで上昇し、完全な液状化に至り、サイクリックモビリティを示す。
- ・ 地盤の最大せん断ひずみは 10.8%であり、ローカルノンリニアリティーのため杭近傍で特に大きな値となる。
- ・ 杭は杭頭と液状化と支持層である非液状化層境界部において降伏する。杭頭では 6~7 秒(液状化に達して 2 秒後)で降伏状態となり、局部座屈状態に至る。
- ・ 各杭頭の応力分担や曲率は比較的一様であり、隅杭で大きくなる傾向はあまり見られない。これは乾燥砂の場合と異なる。

上記の解析結果は実験結果とほぼ整合する。

(b) 業務の実施方法

解析は以下の手順で実施した。

1) 解析対象の三次元有限要素法(FEM)によるモデル化

模型全体をせん断土槽リングも含めて三次元 FEM でモデル化した。地盤は六面体ソリッド要素を用いた。構成式としては応力・ひずみ関係として Ramberg-Osgood モデルを用い、ひずみ・ダイレイタンシー(過剰間隙水圧)関係としておわんモデルを用いた。土質パラメータは、応力・ひずみ関係(Ramberg-Osgood モデル)に関しては動的変形試験

結果による $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係より設定した。ダイレイタンシーに関するパラメータ(おわんモデル)は非排水繰返しせん断試験より求められる液状化強度と繰返し回数の関係より設定した。

杭体ははり要素と杭自体の体積を考慮してモデル化した。杭体の非線形特性($M-\phi$ 関係)はファイバーモデルを用いてノーマルトリリニアールモデルとした。初期応力は自由地盤(一次元地盤)の自重解析で K_0 値を 0.5 として求めた。

2) 固有値解析

固有値解析により解析モデルの基本特性を把握した。清水建設株式会社保有の三次元非線形有限要素プログラム HiPER^{1), 2)}を用いて行った。このときせん断土槽リングの影響についても検討した。

3) 地震応答解析

清水建設株式会社保有の有効応力法による三次元非線形有限要素プログラム HiPER^{1), 2)}を用いて行った。①入力レベル(大加振と中加振)に応じた、液状化の程度(ひずみや過剰間隙水圧)、杭体の非線形の影響 ($M-\phi$ 関係)、②群杭効果、③群杭周辺のローカルノンリニアリティやサイクリックモビリティ、に着目して検討し考察した。

(c) 業務の成果

1) 解析対象の三次元有限要素法 (FEM) によるモデル化

三次元 EFM の概要を図 1 に示す。メッシュ分割は 3.3.9 節とほぼ同じである。以下に解析条件を示す。

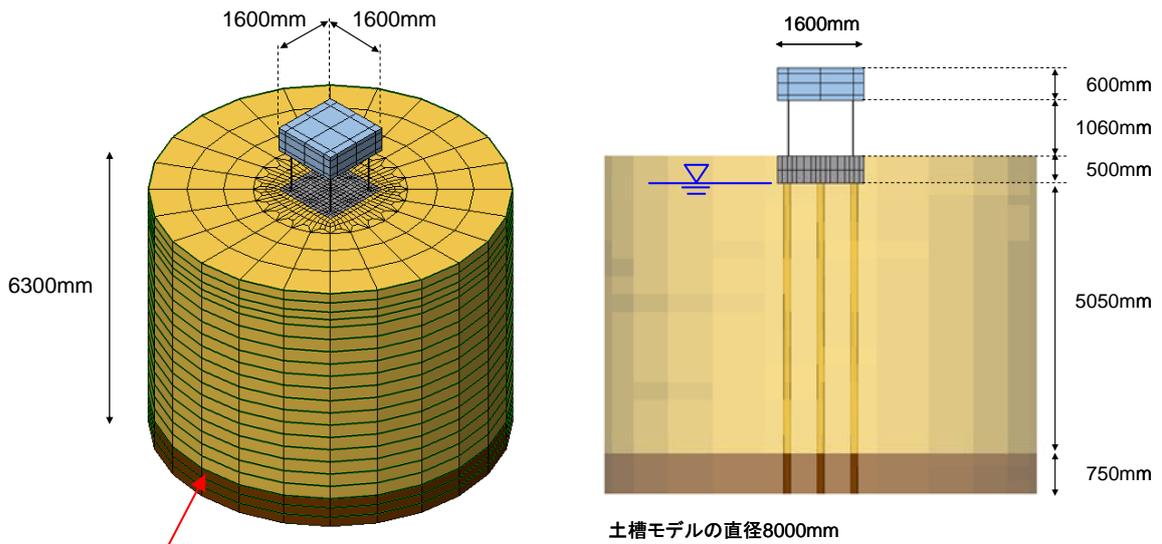
a) 側方境界と土槽せん断リング

側方境界は、周面水平変位(x, y 変位)が同変位条件になるように、剛な梁要素を設定した。表面に付いている緑の線部材が剛な梁要素である。せん断土層の重量は、側面の全節点に振り分けて設定した。

b) 構造物のモデル化

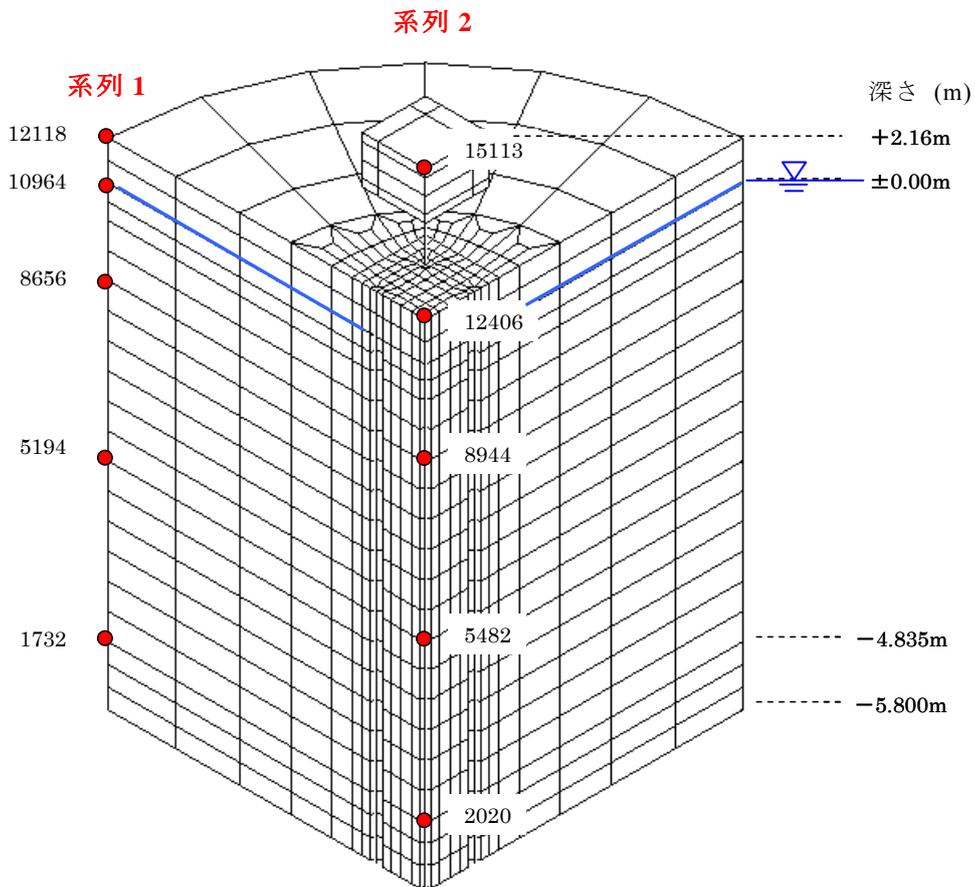
i) 杭のモデル化

杭は、梁要素でモデル化した。長さは 5.516m で杭下端はピンとした。杭体積を考慮するため、地盤中に直径 152mm の円筒に外接する八角柱の空洞(杭による排除体積に相当)を作る。そして図 2 に示すように、杭をはり要素でモデル化し、同一深度にある地盤の角柱内のり節点とはり要素の節点とを同変位条件で結ぶ。このとき、断面内で平面保持を満足するように、MPC 機能を用いて周りの地盤要素と線形結合関係する³⁾。線形結合は同図の「方法 2」を採用した。「方法 1」では曲げモーメント分布が不連続となるが、「方法 2」では連続になるためである。表 1 には杭に用いたはり要素の断面定数を示す。



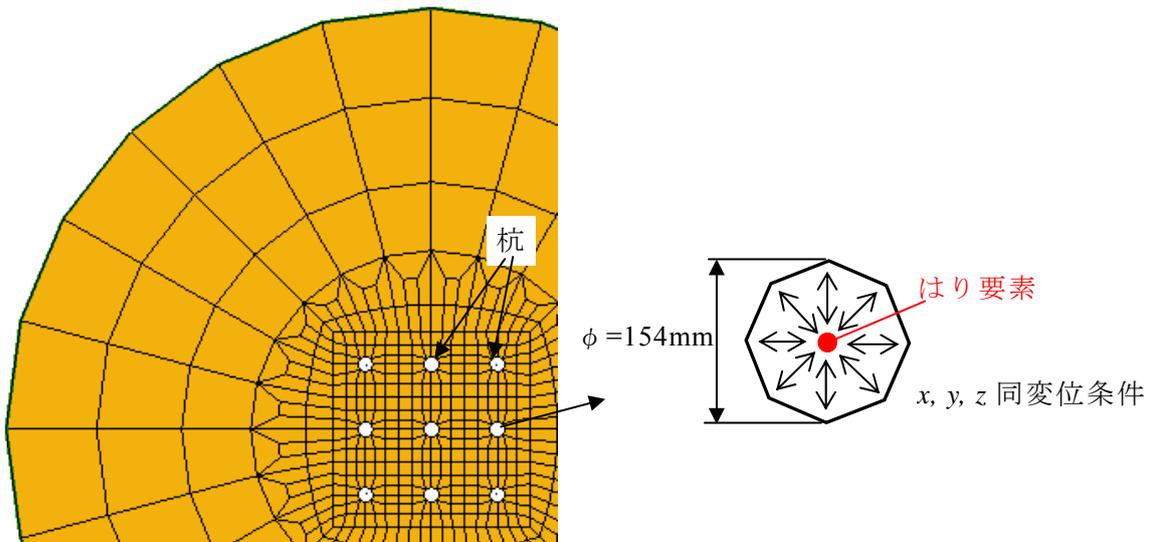
側面：周面変位が同変位条件になるように、剛な梁要素を設定。表面に付いている緑の線部材が剛な梁要素。

(a) FEM 全体モデルと側方境界

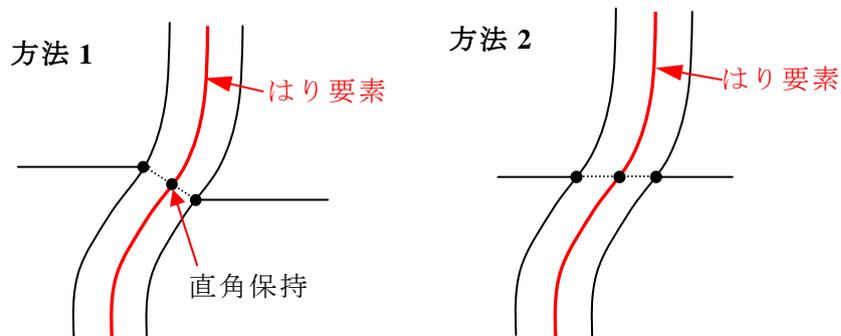


(b) 1/4 切断面と時刻歴出力箇所 (●印)

図 1 三次元 FEM による解析モデル



(a) ソリッド要素に八角形の円筒状の穴を作りその中心にはり要素を設置



(b) はり要素とソリッド要素の結合方法 (方法2を採用)

図2 杭の体積を考慮したモデル化

表1 杭に用いたはり要素の断面定数

| | 記号 | 値 | 単位 | 備考 |
|-----------|----------|------------|-------------------|----|
| ポアソン比 | ν | 0.25 | | |
| ヤング率 | E | 2.10E+08 | kN/m ² | |
| せん断弾性係数 | G | 84000000 | kN/m ² | |
| 単位体積重量 | γ | 77.0 | kN/m ³ | |
| 杭径 | ϕ | 152.4 | mm | ※1 |
| 肉厚 | t | 2.0 | mm | ※1 |
| 断面積 | A | 9.4499E-04 | m ² | ※2 |
| 断面2次モーメント | I | 2.6725E-06 | m ⁴ | ※2 |
| ねじりモーメント | J | 5.3449E-06 | m ⁴ | ※2 |
| 断面2次モーメント | I' | 2.4830E-06 | m ⁴ | ※3 |

※1 鋼管杭 メッシュモデルでは $\phi=150\text{mm}$ となっているが、そのままとした。

※2 断面諸元は、実際の寸法 ($\phi=152.4\text{mm}$) で算出。

※3 $M-\phi$ 関係から算出。

表 2 軸力 42.0kN 下での $M-\phi$ 関係

| | 記号 | 値 | 単位 | 備考 |
|------------------|--------------|------------|-------------------|----|
| 第一折れ点 | M1 | 7.300 | kN・m | ※1 |
| | $\phi 1$ | 0.014 | 1/m | |
| 第二折れ点 | M2 | 9.540 | kN・m | ※2 |
| | $\phi 2$ | 0.022 | 1/m | |
| 第三折れ点 | M3 | 10.750 | kN・m | ※3 |
| | $\phi 3$ | 0.064 | 1/m | |
| 初期剛性 | M1/ $\phi 1$ | 521.43 | kN・m ² | |
| | E・I | 561.22 | kN・m ² | |
| M- ϕ 換算断面2次 | I | 2.4830E-06 | m ⁴ | |
| 降伏後の勾配率 | $\alpha 1$ | 0.53699 | | |
| | $\alpha 2$ | 0.05525 | | |

- ※1 鋼管圧縮縁降伏時の曲げモーメント：圧縮側の縁応力が 259 N/mm²。
 ※2 鋼管引張縁降伏時の曲げモーメント：引張側の縁応力が 259 N/mm²。
 ※3 鋼管圧縮縁におけるひずみが式(1)の ϵ_s' に達した時の曲げモーメント(局部座屈) SKK400 降伏 (バイリニャーでの折れ点)：235N/mm² 短期許容応力の場合は「ばらつき」を考慮して 1.1 倍となるので、 $\sigma_a=235 \times 1.1=259$ N/mm² となる。

杭の非線形特性は、平面保持を仮定しファイバーモデルにより断面解析を実施して $M-\phi$ 関係を図 3 のように設定した。(さびしろ 1mm を考慮) 変動軸力の影響は無視し、常時の断面力として、軸力 42.0kN を与えた。履歴則はノーマルトリリニャーとした。終局状態を超える領域はそのままの勾配で延長して解析した。

$$\epsilon_s' = 0.44t/D \tag{1}$$

ここで、 ϵ_s' は鋼管の局部座屈の限界ひずみに対応する^{4),5)}。

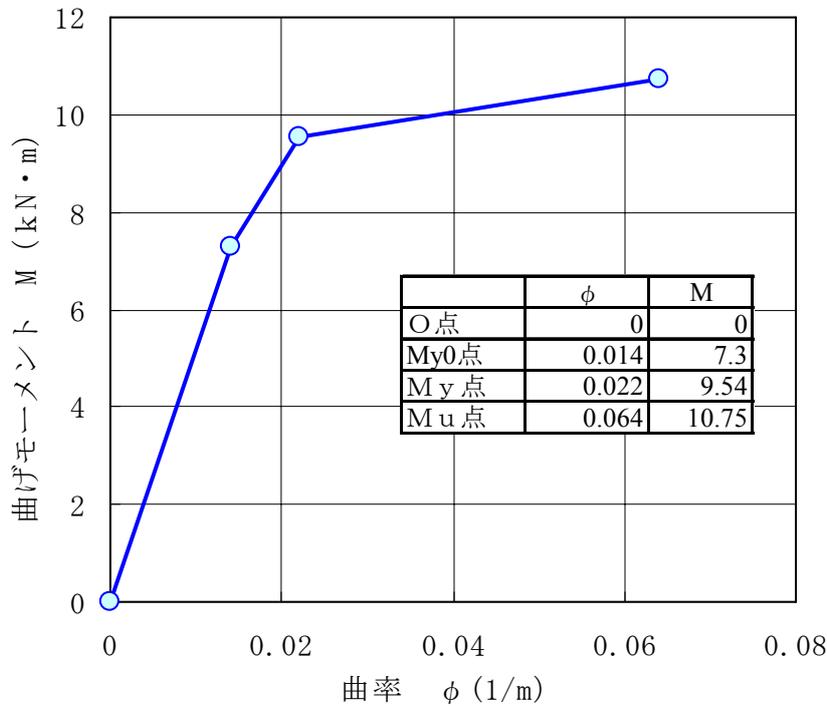


図 3 鋼管杭の $M-\phi$ 関係 (ノーマルトリリニャー)

ii) 上部構造物、柱、フーチングのモデル化

上部構造物、柱、フーチング(1600mm×1600mm、高さ 600mm)の諸元を表 3～5 に示す。上部構造物は柱下端固定条件で固有周期は 21.6Hz である。

杭～上部工柱の結合条件は、杭・上部工の柱がフーチングで剛結にするために、フーチングに 1 要素埋め込んでモデル化する。但し、上記の節点は、柱と杭が結合されているため、ピンの条件とする。(図 4(a)の緑の点)

表 3 上部構造物ウエイト(1600mm×1600mm、高さ 600mm)の諸元

| | 記号 | 値 | 単位 |
|---------|----------|----------|-------------------|
| ポアソン比 | ν | 0.25 | |
| ヤング率 | E | 2.10E+08 | kN/m ² |
| せん断弾性係数 | G | 84000000 | kN/m ² |
| 単位体積重量 | γ | 77.0 | kN/m ³ |

表 4 上部構造物(高さ 1060mm(フランジ 30mm+柱 1000mm+フランジ 30mm))の諸元

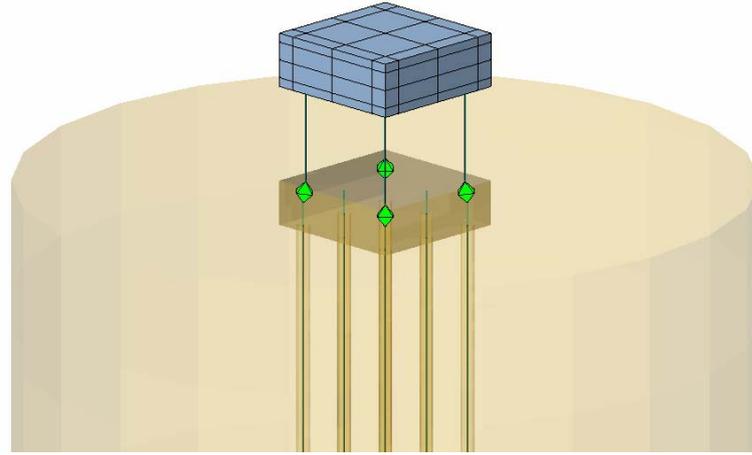
| | 記号 | 値 | 単位 |
|-----------|----------|------------|-------------------|
| ポアソン比 | ν | 0.25 | |
| ヤング率 | E | 2.10E+08 | kN/m ² |
| せん断弾性係数 | G | 84000000 | kN/m ² |
| 単位体積重量 | γ | 77.0 | kN/m ³ |
| 外径 | ϕ | 267.4 | mm |
| 肉厚 | t | 5.8 | mm |
| 断面積 | A | 4.7667E-03 | m ² |
| 断面2次モーメント | I | 4.0796E-05 | m ⁴ |
| ねじりモーメント | J | 8.1591E-05 | m ⁴ |

表 5 フーチング(1600mm×1600mm、高さ 500mm)の諸元

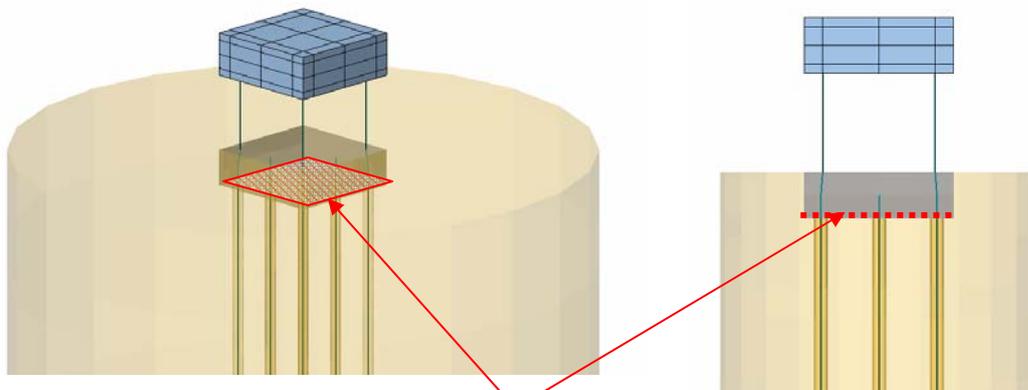
| | 記号 | 値 | 単位 |
|---------|----------|----------|-------------------|
| ポアソン比 | ν | 0.25 | |
| ヤング率 | E | 2.10E+08 | kN/m ² |
| せん断弾性係数 | G | 84000000 | kN/m ² |
| 単位体積重量 | γ | 77.0 | kN/m ³ |

iii) 減衰

減衰は、剛性比例減衰で評価し、地盤と構造物は別々の係数を使用した。構造物は、構造物だけの固有値解析より、1 次振動数で 1%になるように設定した。地盤は、1 次元の地盤の固有値解析より、1 次振動数 (10Hz) で 0.2%になるように設定した。これは加速度波形にひげ上の高振動成分を取除くためである。



(a) 柱と杭の結合：ピン(緑の点)



フーチング底面と地盤は独立：不連続スライド条件
杭頭節点とフーチング節点は連続

(b) フーチング底面と地盤の境界条件

図4 フーチングに関するモデル化

2) 解析ケース

実施した解析ケースを以下に示す。

- ・ 地盤のみの解析：180Gal～300Gal 入力（パラメータと応答のチェック）
- ・ 75Gal 入力（杭：線形）
- ・ 180Gal 入力（杭：非線形）
- ・ 240Gal 入力（参考）

3) 地盤のモデル化

地盤(アルバニー珪砂)の基本物性を表 6 に示す。参考までに、 $T_s=4H/V_s$ で算出した固有振動数も示した。表層のせん断弾性係数(V_s)については、昨年度の乾燥砂の値を参考にした。目標相対密度 D_r は 60%~70%である。初期応力は自由地盤(一次元地盤)の自重解析で K_0 値を 0.5 として求め、三次元モデルの同じ深度の要素に用いた。すなわち初期せん断応力は作用していない。

表 6 地盤構成とアルバニー珪砂の基本物性

| No | 深さ (m) | 層厚 H (m) | 物性区分 | ポアソン比 ν | せん断弾性 係数 G (kN/m ²) | 単位 体積重量 γ (kN/m ³) | せん断波 速度 V_s (m/s) | 鉛直応力 σ_v (kN/m ²) | |
|----------------------------|-----------|----------------|------|----------------|--|--|------------------------------|--|-------|
| 1 | -0.500 | 0.50 | 乾燥砂 | 0.33 | 61163.27 | 18.5 | 180.0 | 4.63 | |
| 2 | -5.550 | 5.05 | 飽和砂 | 0.33 | 61163.27 | 18.5 | 180.0 | 26.59 | |
| 3 | -6.300 | 0.75 | 支持層 | 0.33 | 75510.20 | 18.5 | 200.0 | 56.45 | |
| 等価せん断波速度 | | | | | | | V_s | 182.38 | (m/s) |
| 固有周期($T_g=4\cdot H/V_s$) | | | | | | | T_g | 0.14 | (sec) |
| 固有振動数 | | | | | | | F | 7.24 | (Hz) |

地盤の非線形特性は、三次元に拡張した Ramberg-Osgood(R-O)モデル^{2),6)} とおわんモデル^{2),7)}により表現した。その土質パラメータを表 7 に示す。

基準ひずみ $\gamma_{0.5}$ と最大減衰定数 h_{max} は、砂試料の動的変形試験結果である $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係へのフィッティングより求めた。試験結果とフィッティング状況を図 5 に示す。初期せん断剛性 G_0 と基準ひずみ $\gamma_{0.5}$ は有効拘束応力 σ'_m の 0.5 乗に比例する。よって表中の G_0 と $\gamma_{0.5}$ は、1.0kN/m² の値 (G_{0i} 、 $\gamma_{0.5i}$) を示している。また G_0 は V_s より算出した値を土層モデルの層中心の平均有効応力での値として算出した。よって V_s は層の中央では 180m/s であるが、180m/s で一様ではなく、拘束応力の 0.25 乗に比例して深くなるほど大きくなる。

おわんモデルのパラメータは、非排水繰返しせん断試験結果から得られる液状化強度と繰返し回数の関係にあうように設定した。

表 7 地盤の構成式のパラメータ

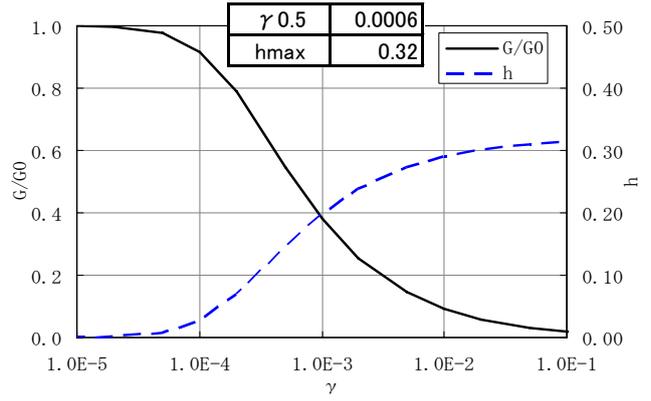
| No | 物性区分 | R-Oモデルのパラメータ | | | $Cs/$ ($1+e_0$) | $Cc/$ ($1+e_0$) | X_l |
|----|------|-------------------------|--------------------------|--|----------------------|----------------------|-------|
| | | 最大減衰定 数 h_{max} | 基準ひずみ $\gamma_{0.5i}$ | 基準せん断 弾性係数 G_{0i} (kN/m ²) | | | |
| 1 | 乾燥砂 | 0.32 | 0.00006 | 34832 | - | - | |
| 2 | 飽和砂 | 0.32 | 0.00006 | 14526 | - | - | |
| 3 | 支持層 | 0.32 | 0.00006 | 12309 | - | - | |

| No | 物性区分 | おわんモデルのパラメータ | | | | | | |
|----|------|--------------|-----|-----|----|----------------------|----------------------|-------|
| | | A | B | C | D | $Cs/$ ($1+e_0$) | $Cc/$ ($1+e_0$) | X_l |
| 1 | 乾燥砂 | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 飽和砂 | -0.4 | 1.4 | 4.0 | 50 | 0.006 | 0.01 | 0.18 |
| 3 | 支持層 | - | - | - | - | - | - | - |

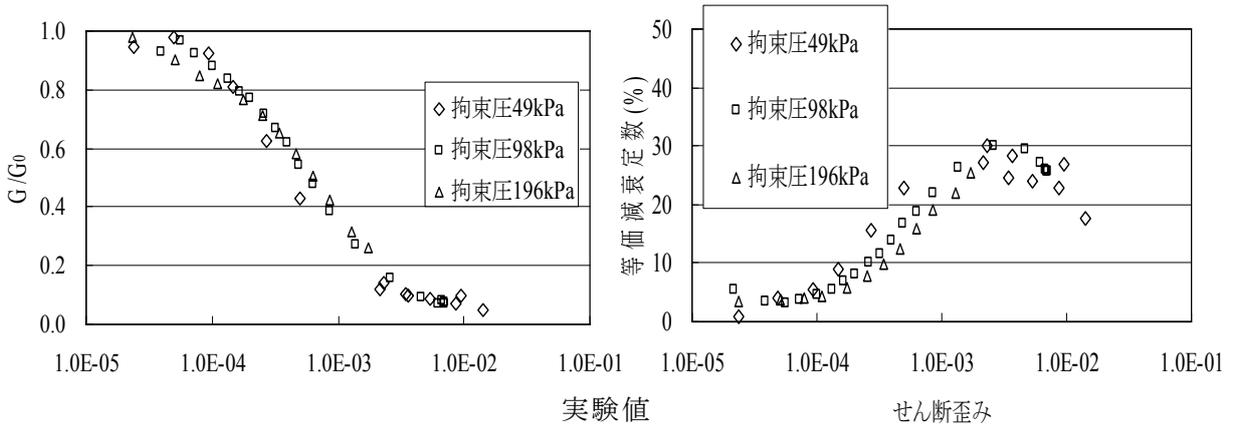
注) A, B : 正のダイレイタンスを規定。C, D : 負のダイレイタンスを規定。

Cs, Cc : 膨潤指数と圧縮指数

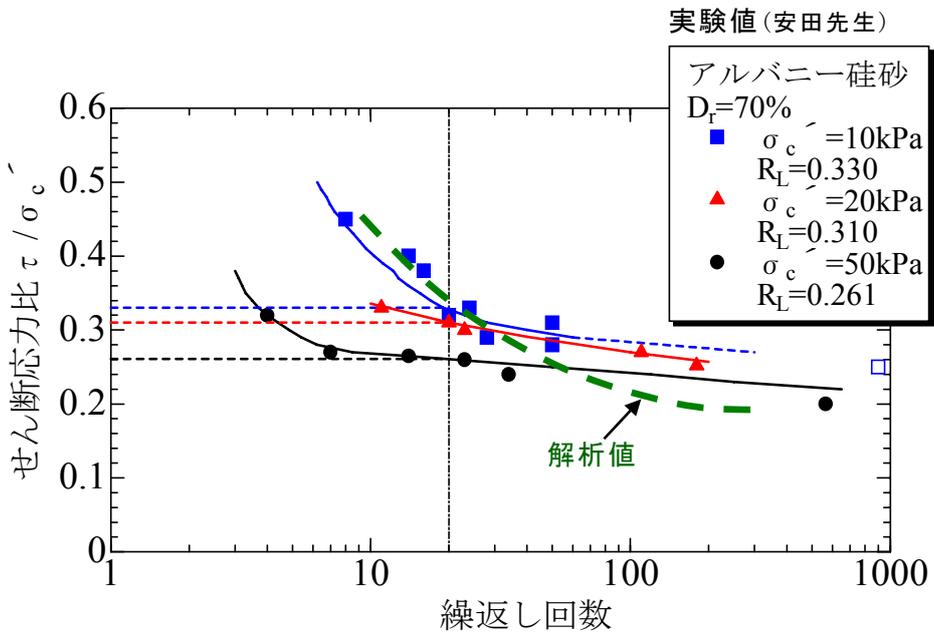
X_l : 液状化強度の下限值



R-O モデルによる曲線



(a) $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係



(b) 液状化強度曲線

図5 アルバニー珪砂の要素試験結果と構成式による計算値

4) 固有値解析結果

全体モデルの固有値解析結果を図 6 に示す(モード減衰 0.02)。1 次モードは地盤の 1 次周期が卓越するモードである。またせん断土層リングの重量の影響は小さいことがわかる。これは既往の論文⁸⁾で述べられている「地盤とせん断土層リングの重量の比が 7:1 以上離れていれば応答に影響が無い」ことと整合している。

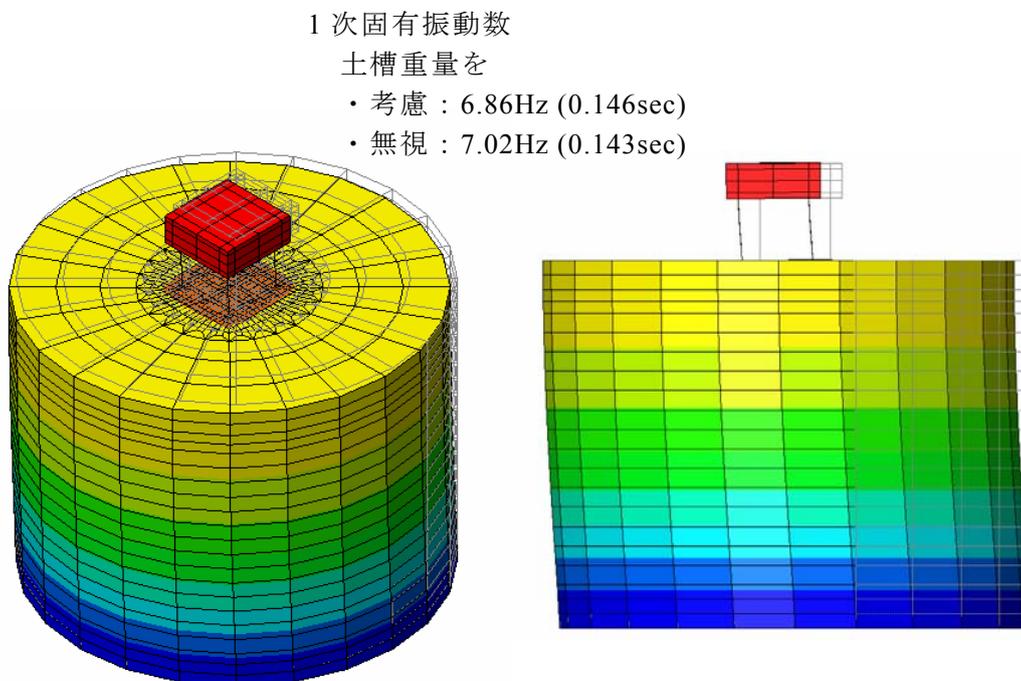


図 6 せん断土層リングの重量を考慮したモード図 (1 次モード)

5) 地震応答解析と入力波

地震応答解析は三次元非線形有限要素プログラム HiPER^{1), 2)}を用いて行った。解析の積分時間間隔は 0.002 秒であり、時間積分は Newmark の β 法を用いた。非線形の収斂方法は初期剛性法である。

入力地震波は、図 7 に示す兵庫県南部地震の JR 鷹取で観測された加速度(原波)である。解析では振幅を 75Gal, 180Gal, 240Gal に調整して入力した。

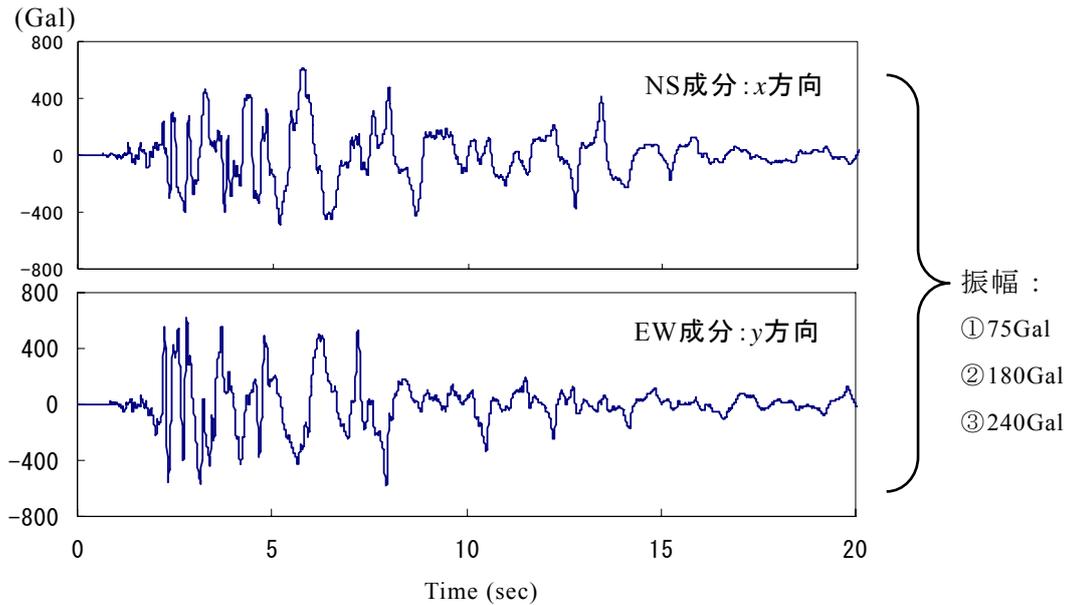


図7 入力地震波（JR鷹取の観測記録）

6) 地震応答解析結果

深度分布を示してある図はフーチング底面を GL0m としている（昨年度の乾燥砂とあわせるため）。地表は GL+0.5m であることに注意されたい。

図8には最大水平加速度の深度分布を示す。フーチングから上の上部構造物の増幅はあまり大きくなく、入力方向の影響も小さい。180Gal 入力で値が変動しているのは、サイクリックモビリティにより加速度波形がスパイク状となり、液状化しても大きな加速度を示したためである。

図9には最大水平変位の深度分布を示す。Y方向(EW成分)の方が大きな変位を示している(30cmを超えている)。側方地盤と模型中心における変位形は各成分で類似している。液状化層中の変形分布は直線的である。側方地盤では表層で変位の増加量が小さくなっている。

図11には隅杭の曲げモーメント M の最大深度分布を、図12には隅杭の局率 ϕ の最大深度分布を示す。加振方向と M_y 、 M_z 、 ϕ_y 、 ϕ_z の関係や杭位置は、図10を参照されたい。また M 、 ϕ の両者ともに、杭位置による違いはほとんど無いので、隅杭の分布図のみを示している。これは乾燥砂とは異なる傾向である。

75Gal 入力の場合は杭体は線形であり、杭頭で最も大きな値を示し、次に支持層上面でやや大きな値となっている。これは地盤の kinematic な効果に比べ建屋慣性力の方が卓越していることを示している。y方向加振(EW方向加振)で生じる M_y 、 ϕ_y の方が大きな値を示している。この傾向は乾燥砂の場合と同じであるが、乾燥砂の場合は建屋重量が飽和砂の場合より2.3倍重いので、その影響もある。

180Gal 入力の場合は、杭頭と支持層境界部で非線形となっている。特に杭頭では第二折れ点を大きく越えており局部座屈となっている。また支持層上面でも y方向加振(EW方向

加振)では第二折れ点を越えている。これは建屋慣性力の効果に加え、地盤の kinematic な効果もかなり大きいことを示している。

軸力分布は、75Gal 入力の場合は杭位置や深度によらず値はあまり変化がない(42~45kN)。75Gal 入力の場合は、中心杭では一定値であるが(42kN)、隅杭では杭頭で 60kN、下端で 45kN 程度である。

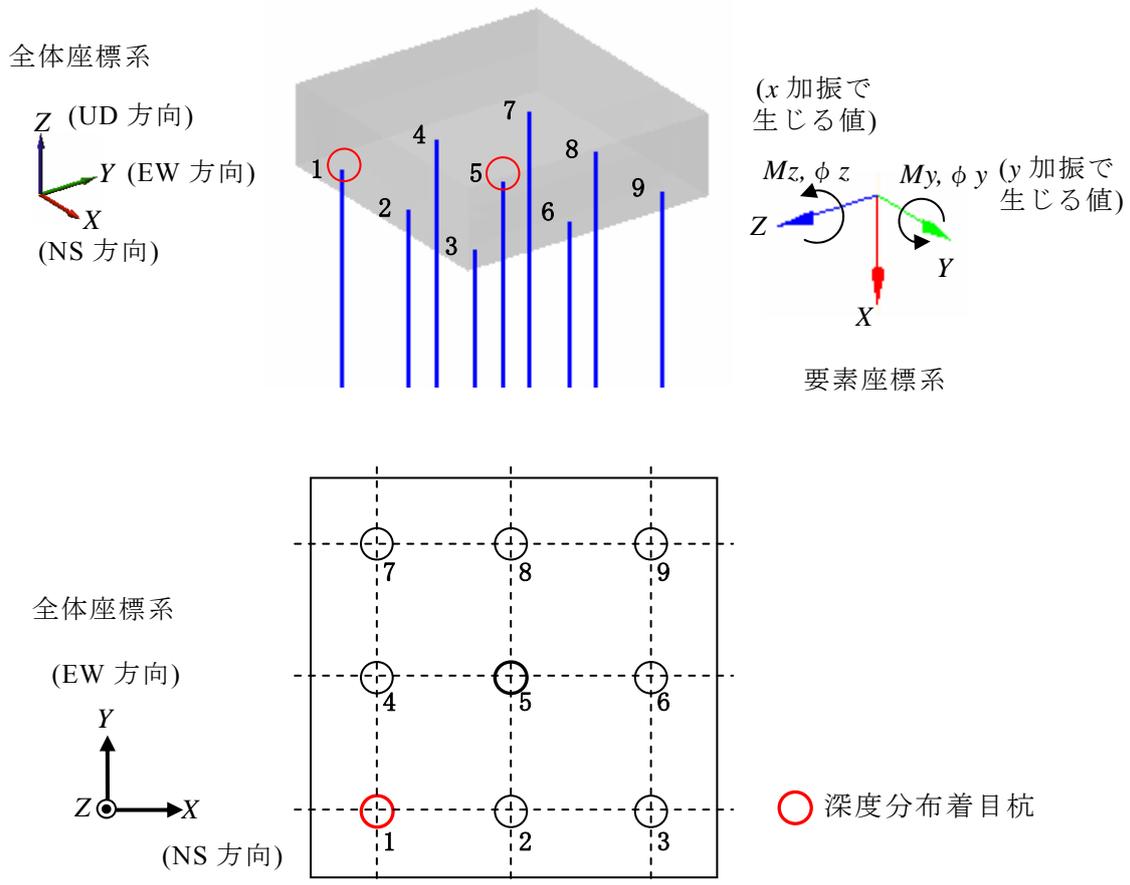


図 10 杭位置と要素座標系における曲げモーメントの定義

X方向：NS成分、Y方向：EW成分

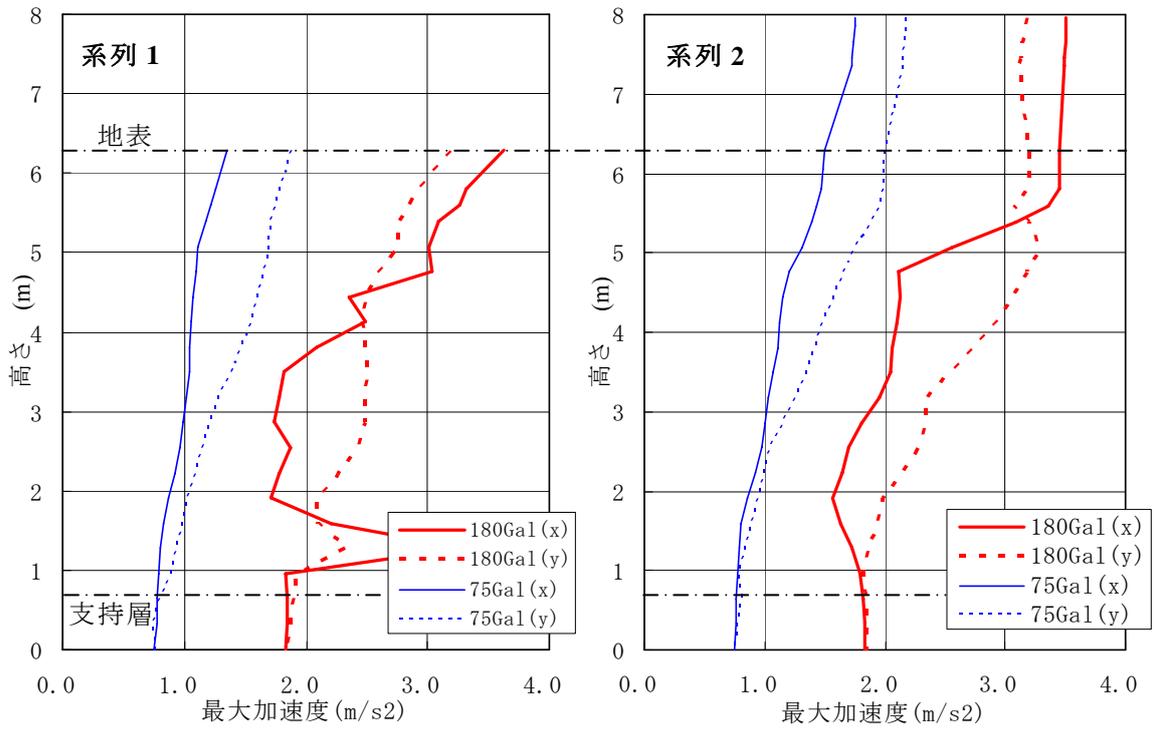


図 8 最大水平加速度の深度分布

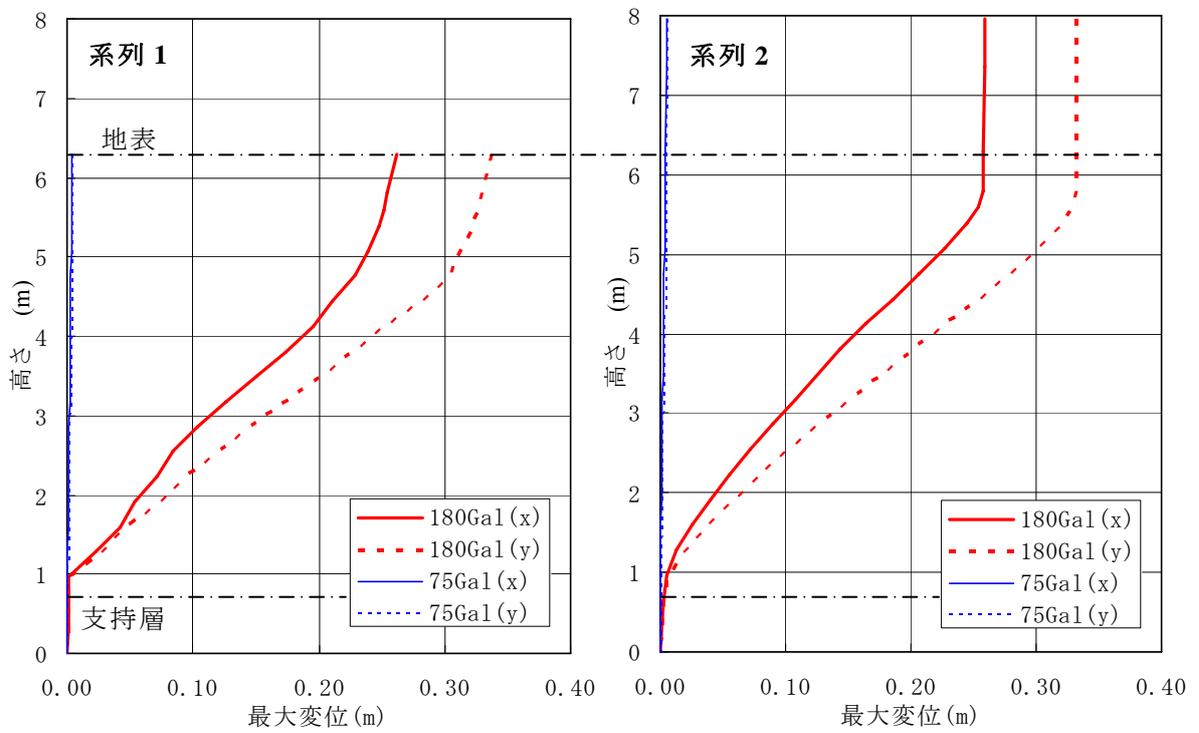


図 9 最大水平変位の深度分布

(縦軸：フーチング底面(-0.5m)からの深度)

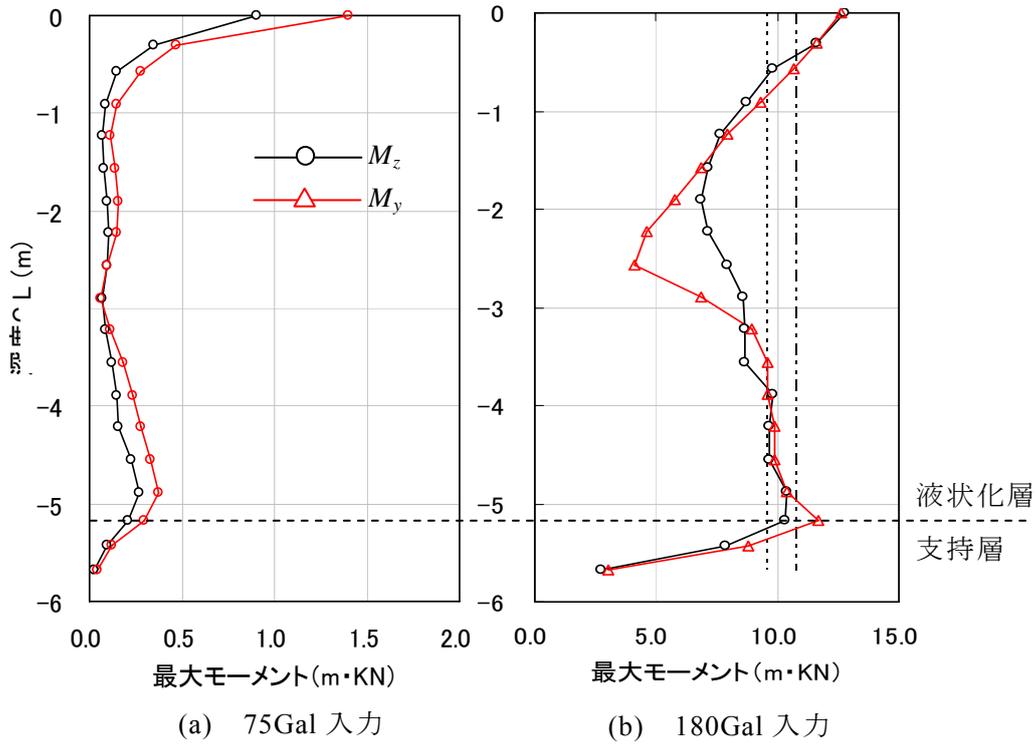


図 11 杭の曲げモーメントの最大深度分布 杭① (隅杭)

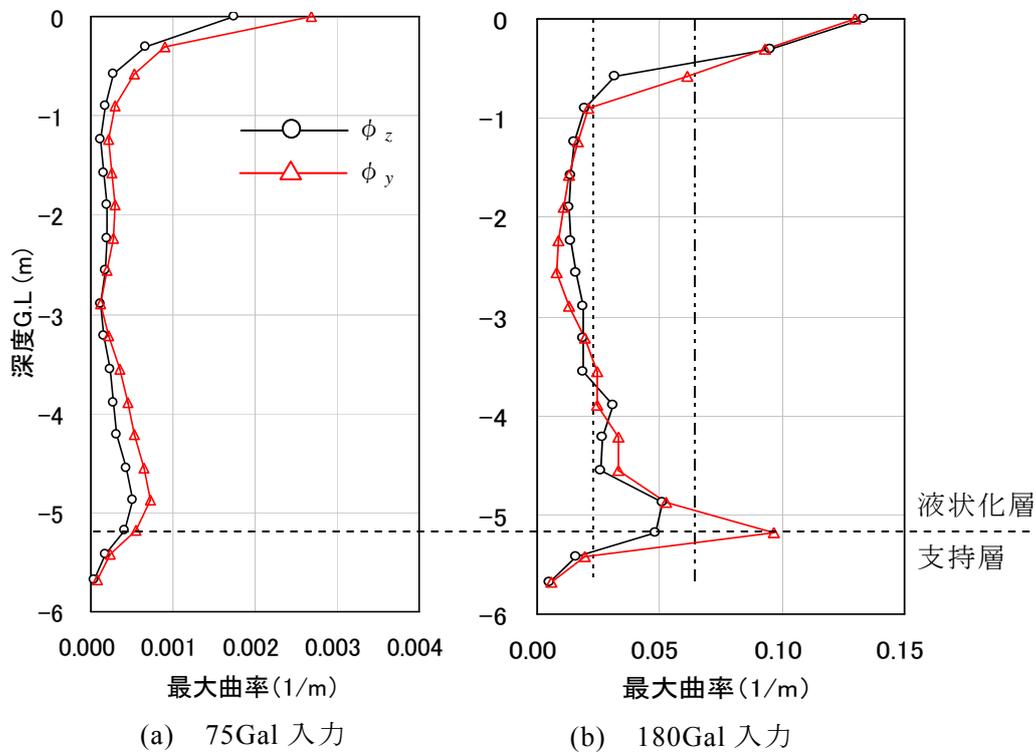


図 12 杭の曲率 ϕ の最大深度分布 杭① (隅杭)

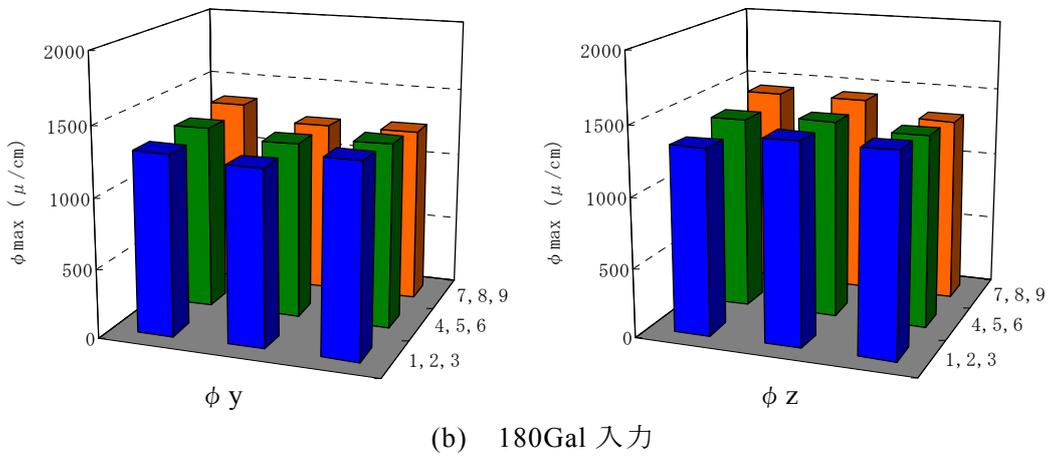
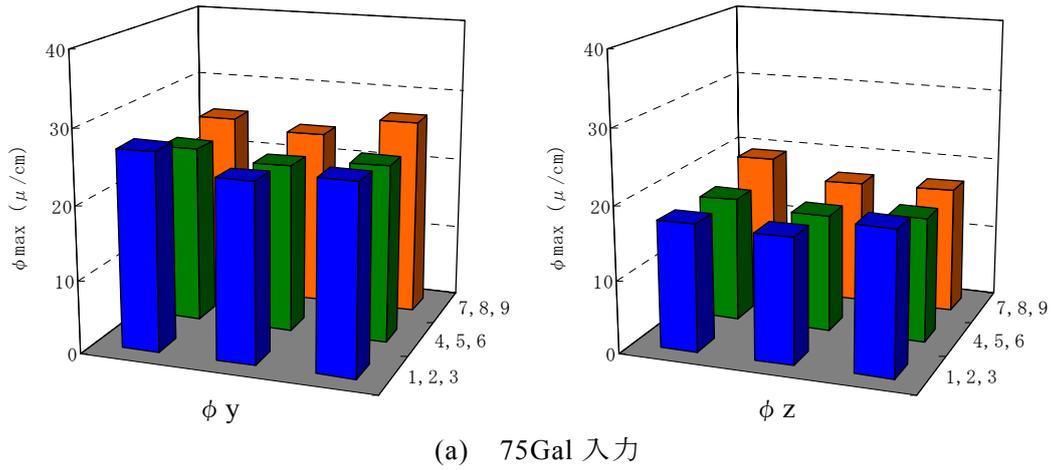


図 13 各杭頭における最大曲率

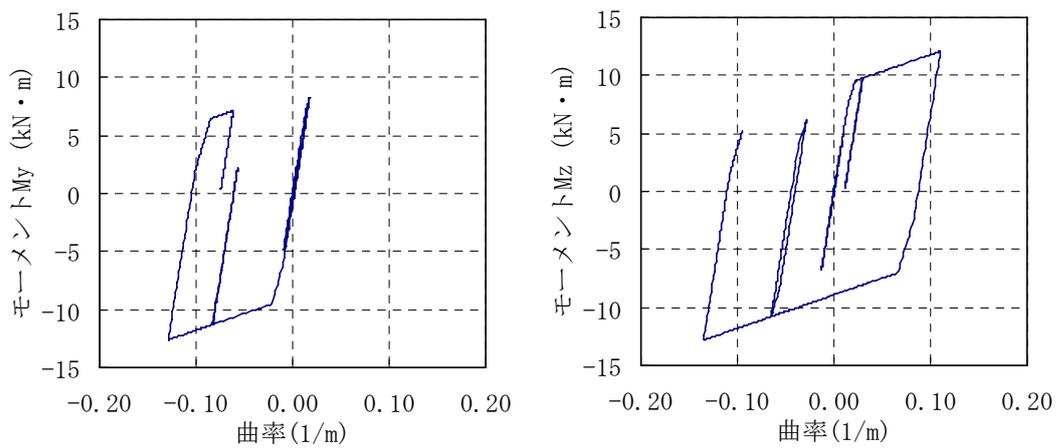


図 13 には各杭頭における最大曲率 ϕ を示す。各杭における曲率の違いは、75Gal 入力では隅杭が若干大きくなる傾向が見られるが、180Gal 入力では違いはあまり無く各杭頭でほぼ一様である。

図 14 には隅杭の杭頭における M - ϕ 関係を示す。履歴ループは対称ではなく、 ϕ が負の方向へシフトしている。

図 15, 16 には隅杭の杭頭における M と ϕ の時刻歴最を示す。図中の○は M - ϕ 関係が第二折れ点を超えた時点を示す。6 秒を超えた付近であり、これは液状化に至った約 2 秒後である。 ϕ_y は負の側へシフトしている。

図 17 には過剰間隙水圧比の最大値コンターを基礎対角線断面で切断したパネルダイヤグラム形式で示す。75Gal 入力では水圧は基礎近傍で 92%まで上昇しており液状化に近い状態になっているが、側方地盤では 60%程度である。180Gal 入力では飽和砂層のほぼ全領域で 99%まで上昇しており、液状化に至っている。

図 18 には合せん断ひずみ Γ の最大値コンターをパネルダイヤグラム形式で示す。ここで Γ は次式で表される。

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{zx}^2 + \gamma_{zy}^2 + \gamma_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2} \quad (2)$$

75Gal 入力の場合、 Γ は基礎近傍の砂層中央で大きく 0.14%となっている。180Gal 入力の場合、 Γ は飽和砂層で全体的に大きく平均で 7%程度である。基礎近傍では 10%を超えている。

図 19 にはフーチンク底面深度における合せん断ひずみ Γ の最大値分布を示す。75Gal 入力の場合、全ての杭の近傍でひずみが大きくなっており、特に外周に位置する 8 本の杭の外側でひずみが大きくなっている。さらに隅杭の外側で最も値が大きく 0.12%になっている。杭間地盤ではひずみは小さく 0.05%程度である。これはローカルノンリニアリティーにより、杭近傍では杭と地盤の相対変形が局所的に大きくなっていることによる。180Gal 入力の場合 75Gal 入力の場合に比べやや複雑な分布となる。南東と北西の隅杭の外側で 4%程度の大きなひずみが生じている。各杭近傍で大きなひずみが生じる傾向と、杭間地盤ではひずみが小さく(1%程度)なる傾向は似ている。ひずみ成分で見ると、 x 方向や y 方向の単純せん断ひずみ(γ_{zx} 、 γ_{zy})よりも、面内のせん断ひずみ γ_{xy} がやや卓越している。

図 20,21 には加速度と変位の時刻歴を示す。加速度は 4 秒以降で長周期化している。この時間は過剰間隙水圧比が 100%に達する時間と対応する。変位は、建屋で y +方向(東側)に残留変位が約 30cm 生じている。これは実験よりも大きめの値である。

図 22 には過剰間隙水圧比の時刻歴と変位時刻歴を示す。4 秒で液状化に至り、6~7 秒付近で大きな波打ち(サイクリックモビリティ)が見られる。参考までに実験結果を示す。解析値の方が水圧上昇の速度が速く、サイクリックモビリティも顕著である。これは実験では本加振の前に 2 回の加振を行っており、2 回とも基礎近傍で噴砂が見られた。そのため密度がやや高くなっているか、粒子構造が変化したためと思われる。また変形は実験の方が小さいが、上記がその一因とも考えられる。

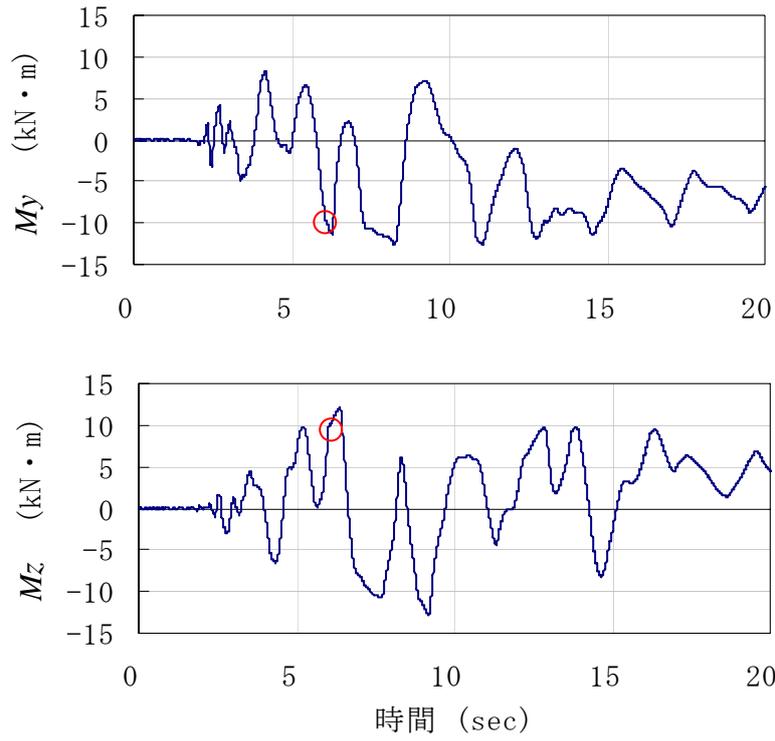


図 15 杭頭の M の時刻歴 杭① (隅杭)

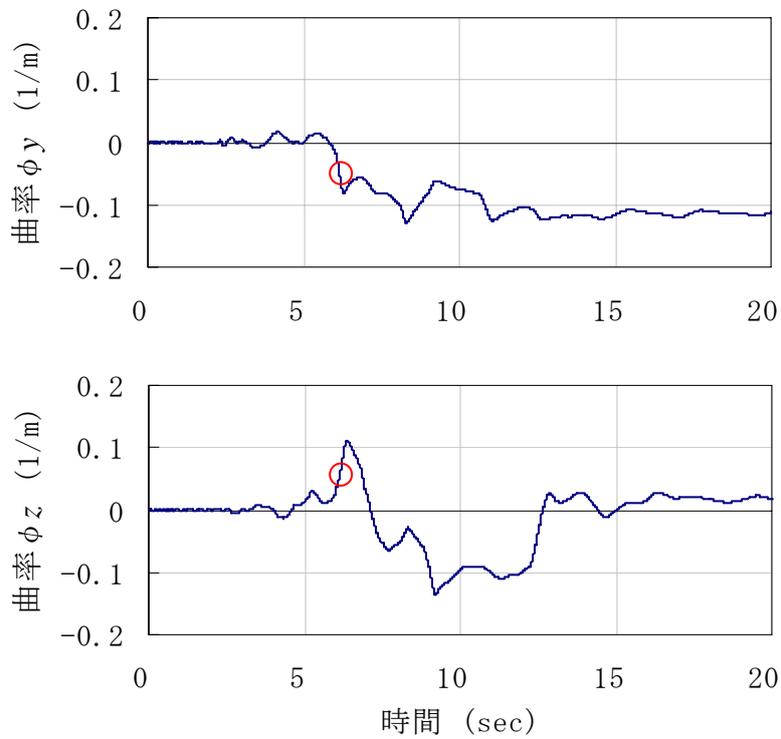
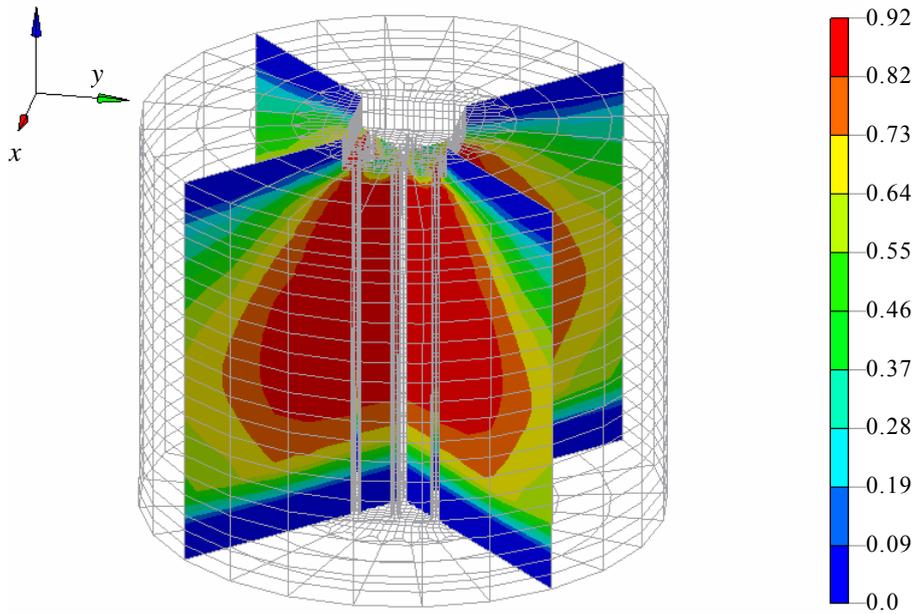
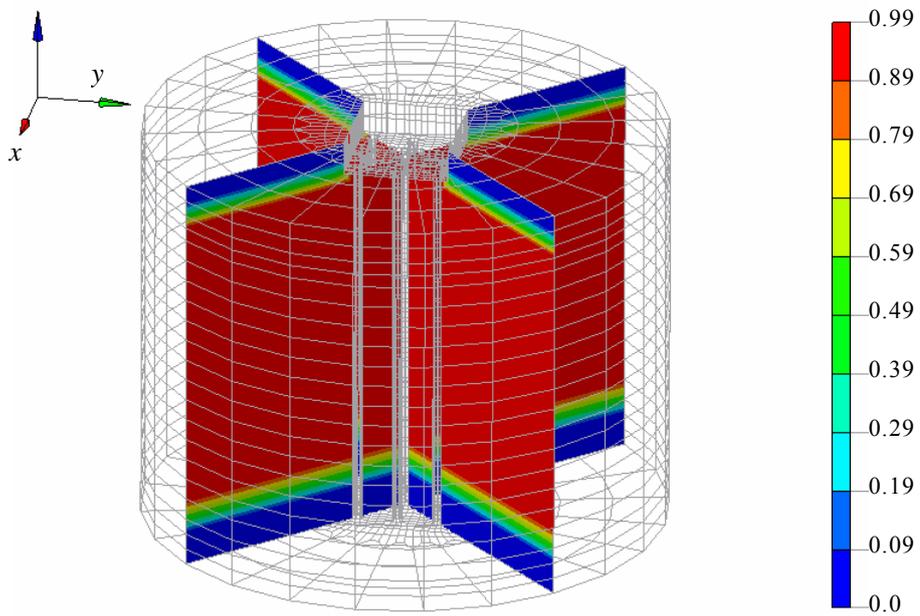


図 16 杭頭の曲率 ϕ の時刻歴 杭① (隅杭)



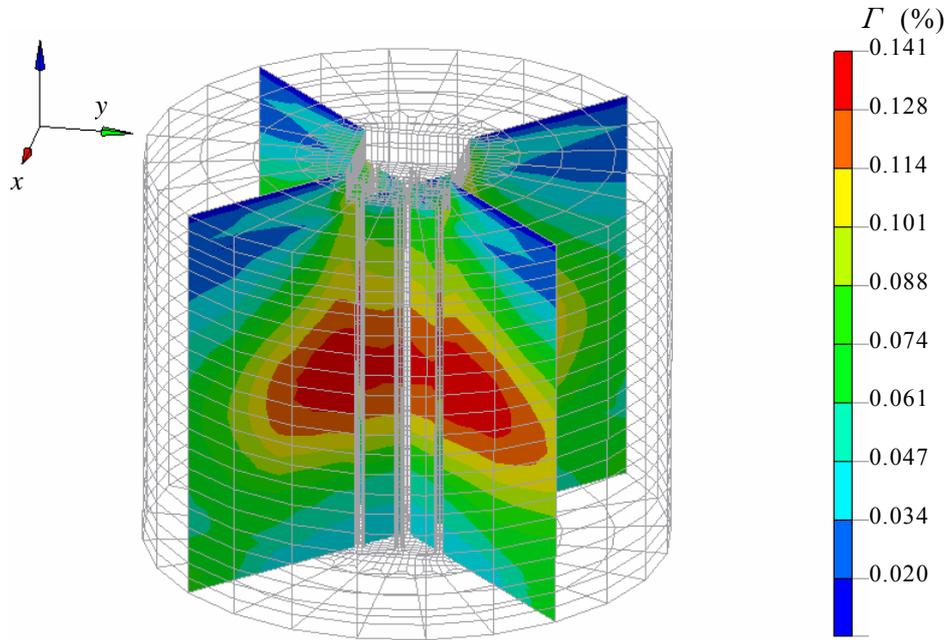
(a) 75Gal 入力



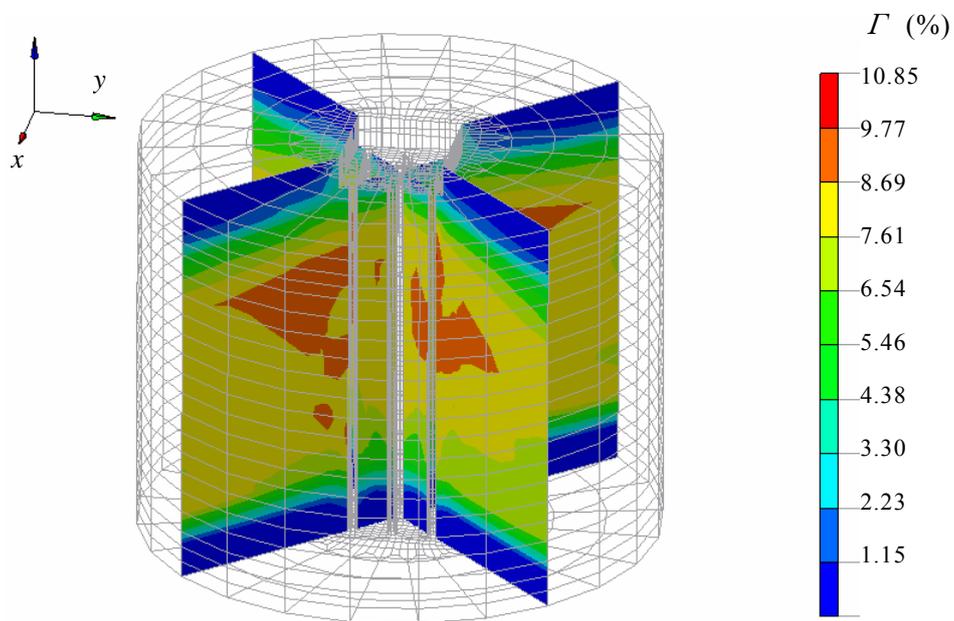
(b) 180Gal 入力

図 17 最大過剰間隙水圧比のコンター
(パネルダイヤグラム表示)

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{zx}^2 + \gamma_{zy}^2 + \gamma_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2}$$

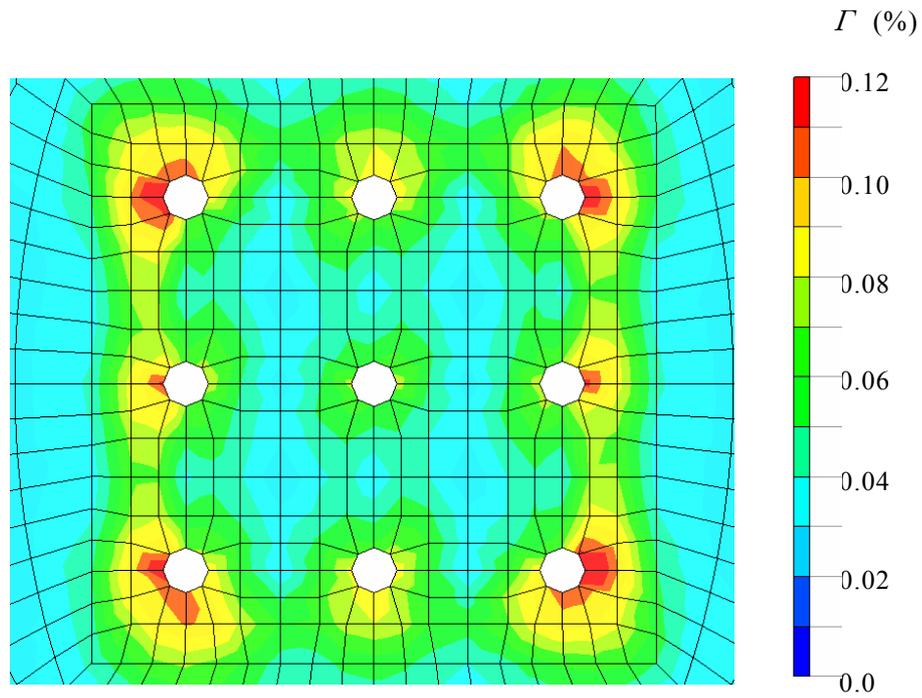


(a) 75Gal 入力

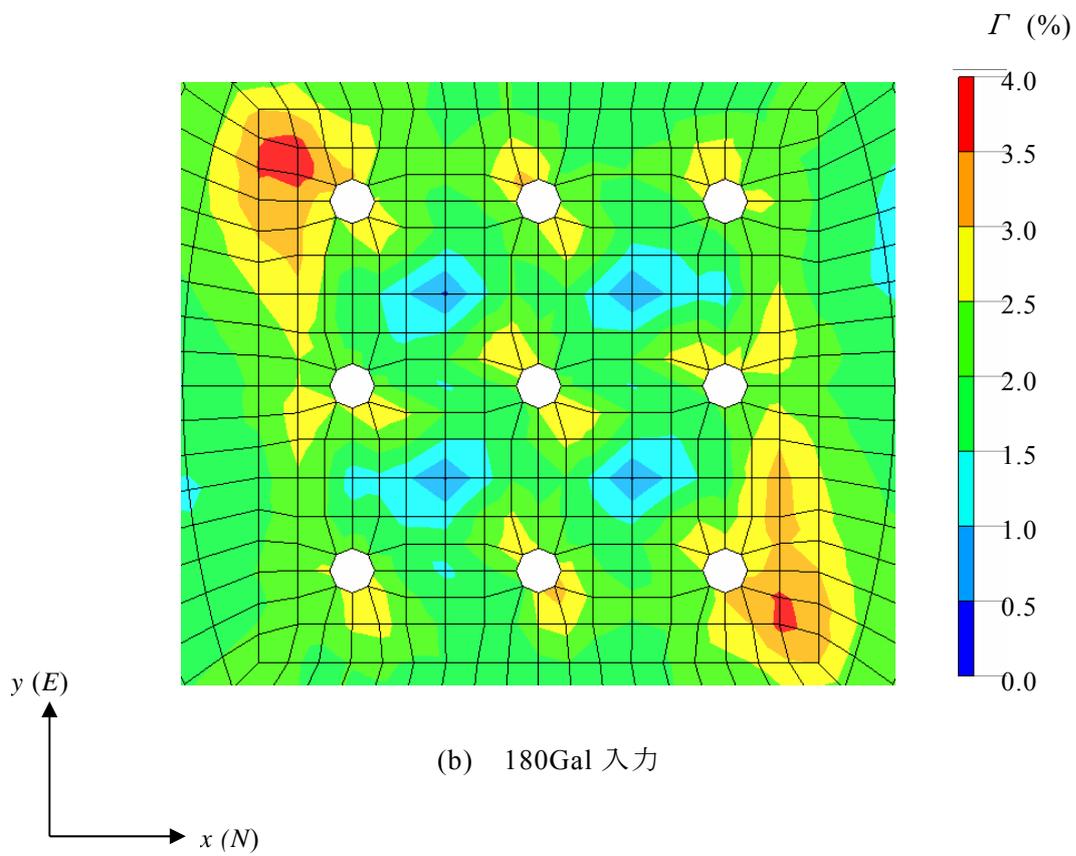


(b) 180Gal 入力

図 18 最大合せん断ひずみ Γ のコンター
(パネルダイヤグラム表示)



(a) 75Gal 入力



(b) 180Gal 入力

図 19 フーチンク底面深度の合せん断ひずみ Γ の最大値分布

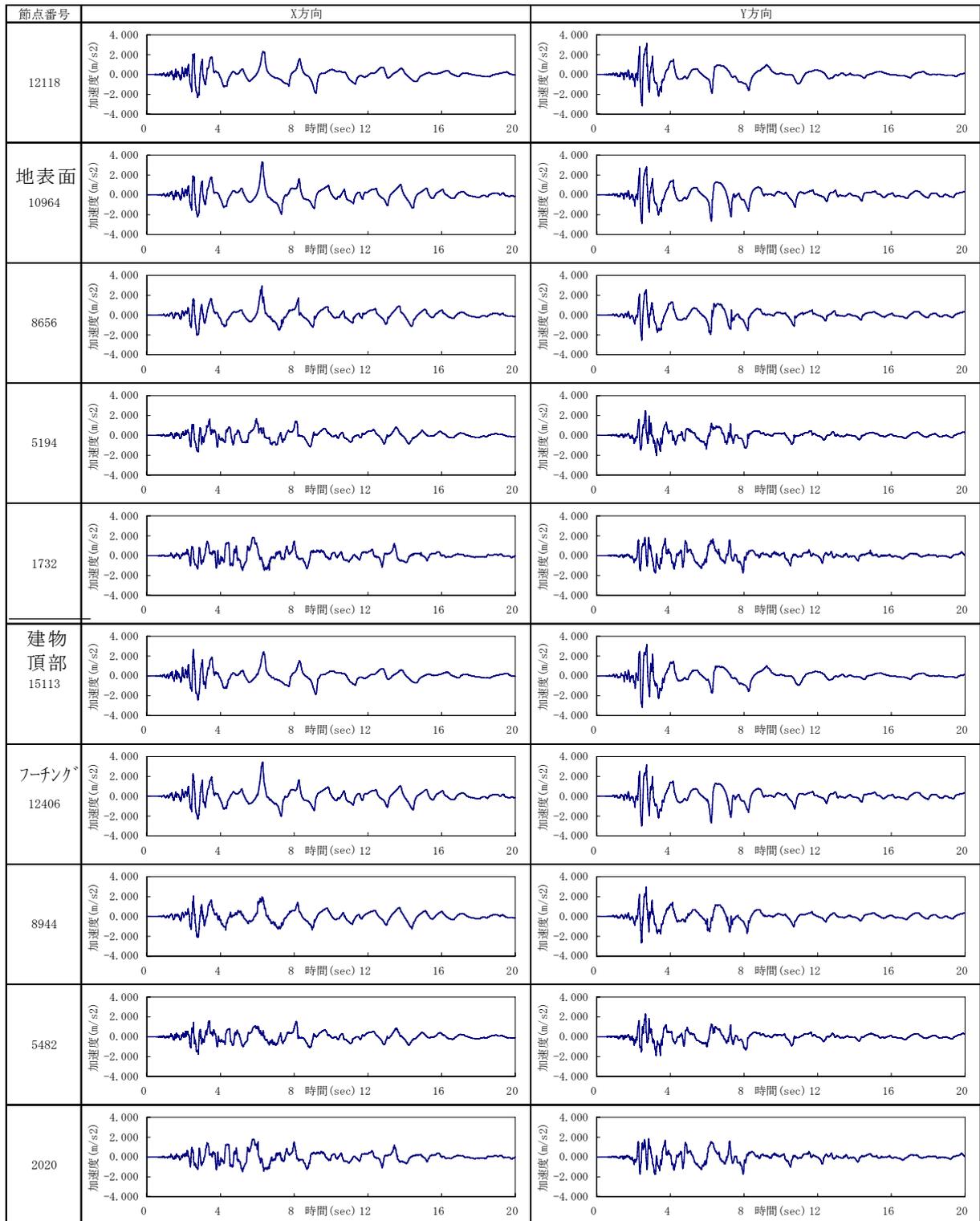


図 20 加速度の時刻歴

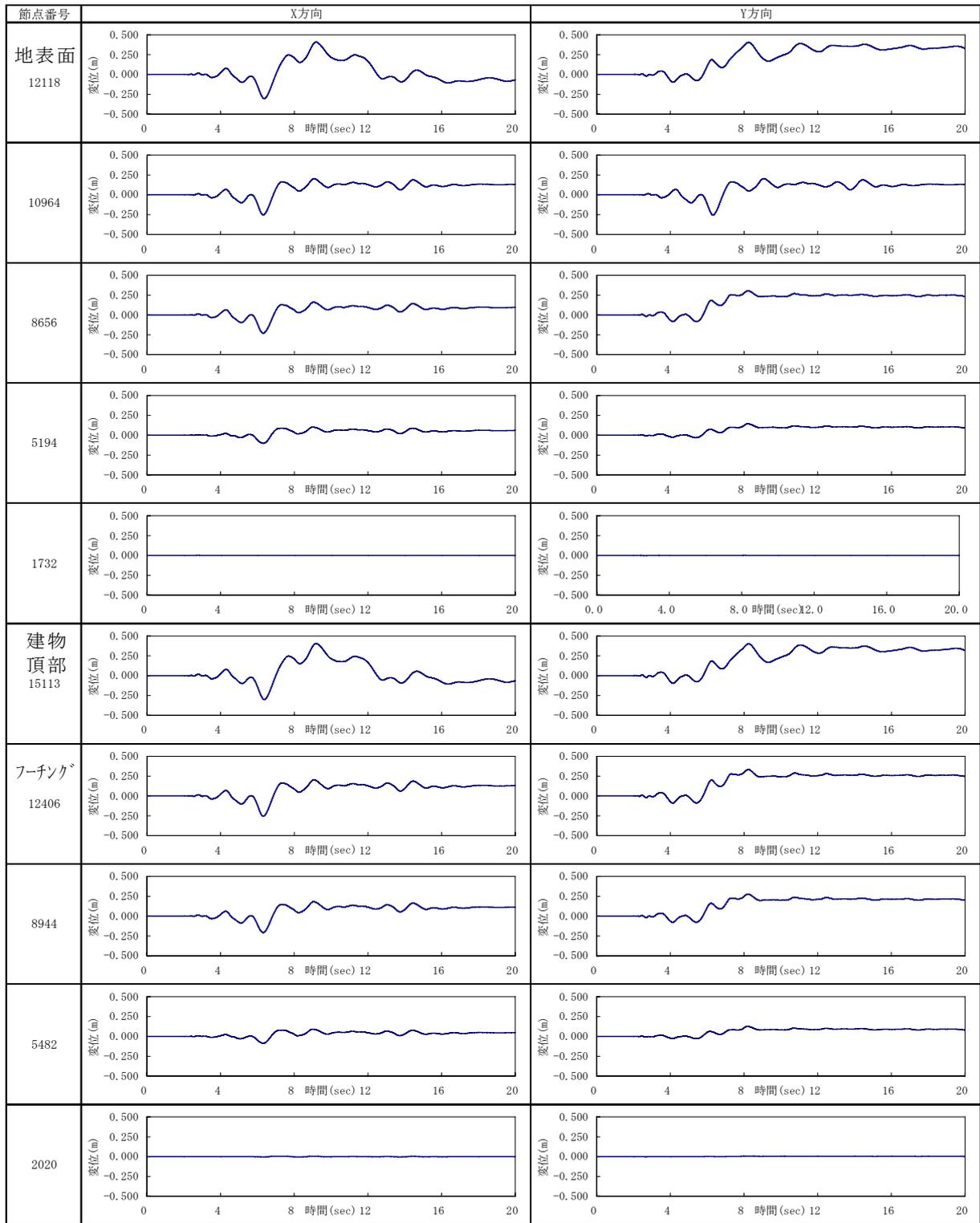


図 21 変位の時刻歴

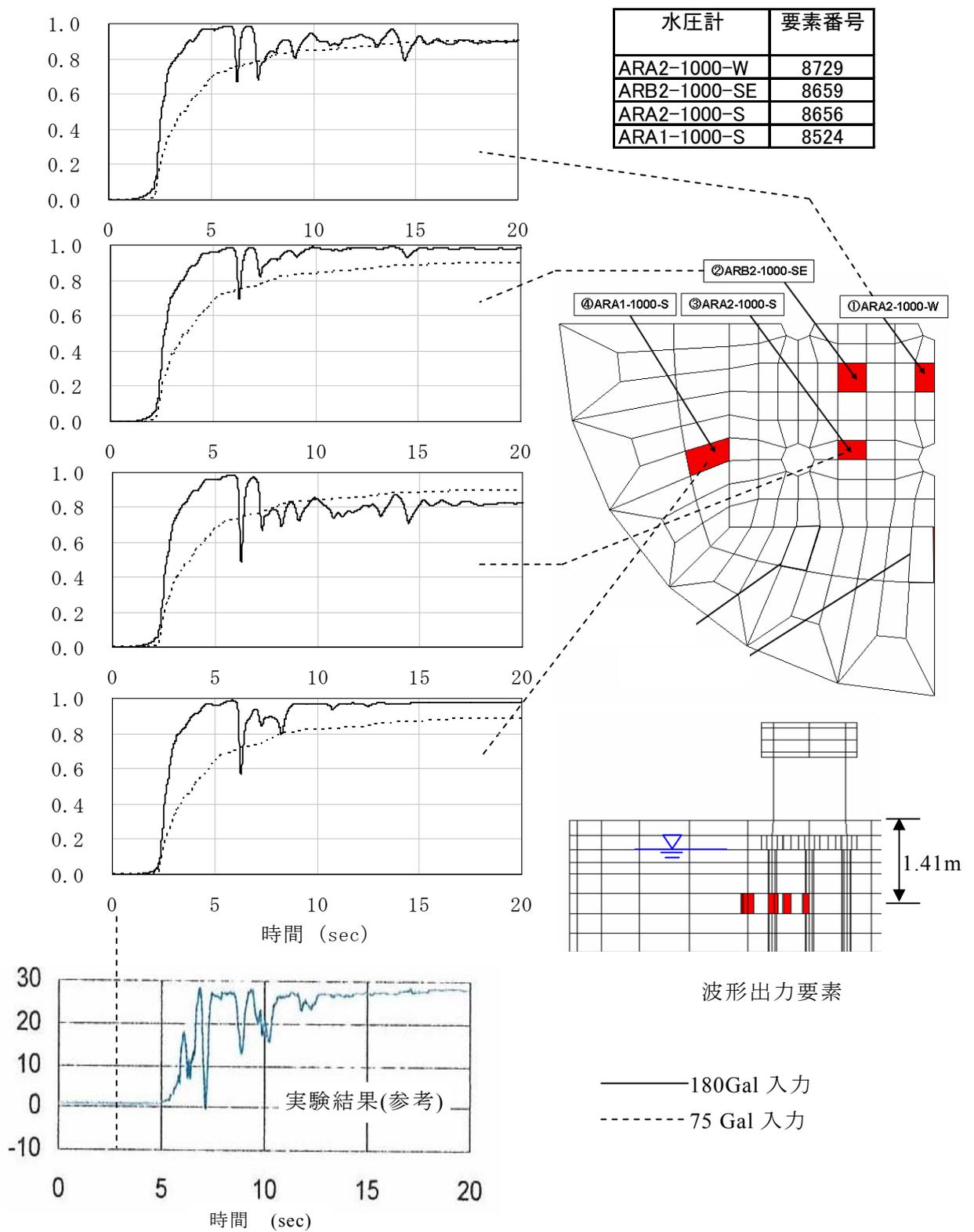


図 22 過剰間隙水圧比の時刻歴

(d) 結論ならびに今後の課題

解析結果より得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 180Gal 入力の場合は飽和砂層が全て液状化に至り大きなひずみが生じたが、75Gal 入力の場合では、杭近傍で液状化に近い状態に至ったがひずみは小さかった。
- 2) 75Gal 入力の場合、kinematic interaction に比べ inertia interaction の効果(建屋慣性力の効果)が大きいため、杭頭で大きなモーメントが生じたが、線形範囲内であった。
- 3) 180Gal 入力の場合、杭頭で最大のモーメントを示し局部座屈が生じるが、液状化層と支持層の境界でも大きな値を生じ降伏する。これは 75Gal 入力に比べ 180Gal 入力では、地盤の大きな変形が生じ、kinematic な効果が卓越するためである。この現象は乾燥砂の場合と大きく異なる。
- 4) 液状化した地盤では、各杭の曲げモーメント分担率はほぼ同じである。
- 5) 杭の降伏は、過剰間隙水圧比が 100%に達して 2 秒後である。
- 6) 過剰間隙水圧やひずみは、側方地盤よりも杭近傍の方が大きな値を示す。特にひずみは杭周辺と外周の杭の外側で大きい。これはローカルノンリニアリティーのためである。杭の間の地盤ではやや小さな値である。
- 7) 180Gal 入力の場合、過剰間隙水圧の上昇過程を見ると、実験の方がやや遅く、サイクリックモビリティも顕著である。また変形量や杭の損傷程度も解析の方が顕著である。これは、加振前の 2 回の液状化が原因として考えられる。

今後の検討すべき課題を以下に示す。

- 1) 地盤密度が異なる場合の挙動。
- 2) 地層構成が傾斜した地盤や、支持地盤が傾斜した地盤の検討。
- 3) 杭剛性や杭種を変えた場合の検討。例えばコンクリート杭など。
- 4) 群杭の形式の違いによる影響。すなわち、杭本数、杭間隔や杭径や間隔率(D/ϕ)。
- 5) 杭の配置(正方配置以外)など。
- 6) 杭長さが異なる基礎や異種基礎(直接基礎と杭基礎の併用など)。
- 7) 上部構造物の違いによる影響。例えば偏心構造物や長周期構造物など。
- 8) 一旦損傷を受けた杭基礎が続く地震でどのような挙動をするかといった検討。
- 9) 杭損傷を軽減する種々の対策工の効果の検討。

(e) 引用文献

- 1) 大槻 明・福武毅芳・藤川 智・佐藤正義：液状化時群杭挙動の三次元有効応力解析,土木学会論文集,No.495/I-28,pp.101-110,1994
- 2) 福武毅芳：土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究,名古屋工業大学博士論文,1997
- 3) 福武毅芳・太田泰博・中村紀吉・勝沢勝栄・鈴木康夫：建屋－杭－地盤系の有効応力解析のモデル化の研究その 5, 3次元解析と 2次元解析の比較・杭体積考慮の影響,日本建築学会大会学術講演概要集,B-2 構造 II ,pp.465-466,1996
- 4) 加藤勉、秋山宏他：軸圧縮力を受ける鋼管の塑性局部座屈耐力、日本建築学会論文報告集、第 204 号、pp.9-17、1973.
- 5) 建設省総合技術開発プロジェクト「新構造体系の開発」性能評価分科会基礎 WG 最終

報告書、2000.3

- 6) 龍岡 文夫・福島 伸二：砂のランダム繰返入力に対する応力～ひずみ関係のモデル化について(1)、生産研究, 第 30 卷 9 号, pp.26-29, 1978
- 7) 吉見吉昭・福武毅芳：地盤液状化の物理と評価・対策技術(5 章), 技報堂出版, 2005.10
- 8) 福武毅芳・大槻 明・佐藤正義・社本康広・亀岡裕行：遠心載荷振動台実験のシミュレーションとせん断土槽フレームの影響,第 28 回土質工学研究発表会,pp.1151-1154,1993

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(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

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

