

3.3.1 地盤 - 杭基礎 - 構造物の三次元非線形動的相互作用の実験

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 ヶ年の年次実施計画
- (e) 平成 15 年度業務目的

(2) 平成 15 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) 地盤条件と作成状況
 - 2) 実験結果
- (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

(3) 平成 16 年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 地盤 - 杭基礎 - 構造物の三次元非線形動的相互作用の実験

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
独立行政法人 農業工学研究所	室長 特別研究員	毛利栄征 ARANGELOVSKI Goran	accord1@nkk.affrc.go.jp

(c) 業務の目的

地盤および構造物の地震時の安全性を解明するためには、地盤そのものの三次元的な挙動解明が不可欠であるとともに、地盤と構造物の動的な相互作用を実験的に明らかにすることは極めて重要である。

本業務は、二方向せん断土槽を用いた杭および地盤の三次元振動実験を実施して、多方向入力（水平面内での2方向振動、水平及び鉛直振動）が地盤及び杭の挙動に及ぼす影響を明らかにすること、地盤の剛性や杭の剛性が動的破壊挙動に及ぼす影響を解明するための詳細なデータを蓄積すること、及びEディフェンスでの実験計画に資する基礎資料を得ることを目的とする。

(d) 3カ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

- a) 地盤に設置する杭を試作し、均一地盤での振動実験を実施する。
- b) 乾燥地盤と飽和地盤を対象として、水平1方向振動時における地盤と杭の挙動を明らかにする。
- c) 水平面内での二方向振動実験によって地盤の挙動を明らかにして、入力地震動の多方向性の影響を検証する。

2) 平成15年度：

- a) 杭を支持するために比較的剛性の高い地盤（非液状化層）を土槽の底部に作成し、この上部に均一な緩い地盤が積層する2層系の地盤モデルを作成した。水平1方向振動時における地盤の液状化が杭の挙動に与える影響を明らかにする。
- b) 水平面内2方向振動が同時に作用する場合について、地盤の液状化の発生と杭の振動性状を明らかにする。
- c) 鉛直振動と水平2方向振動が同時に作用する場合について、地盤の液状化の発生と杭の振動性状を明らかにする。

3) 平成16年度：

- a) 地盤内部に非液状化層や剛性の異なる層を設けた振動実験を実施し、地盤と杭の動的相互作用を明らかにする。すなわち、地盤内部に水平な液状化抵抗力の異なる層

がある場合を対象として、この複合地盤と杭の動的相互作用を求める。

- b) 液状化抵抗力の異なる層が積層している場合の振動実験を実施することにより、間隙水圧の消散、すなわち、有効応力の低下と回復過程での杭の挙動を明らかにし、地盤と杭の三次元動的相互作用のメカニズムを解明する。

(e) 平成 15 年度業務目的

- 1) 杭端部が底部の非液状化層で支持されている 2 層系の地盤モデルを用いた振動実験を実施し、入力振動の多方向性（水平 1 方向振動、水平面内 2 方向の同時加振、鉛直振動と水平 2 方向振動）が地盤の液状化に与える影響を明らかにし、杭と地盤の相互作用を明らかにするための振動実験を行う。
- 2) 実験では、平成 14 年度と同様の 4 本杭を作成し、杭端部が比較的剛性の高い地盤に設置されている状態で上部地盤が液状化する場合の杭に発生するモーメントを計測する。平成 14 年度の実験結果との比較では、杭の支持条件や地盤の条件が異なることによる杭及び地盤の挙動に与える影響を明らかにする。
- 3) 数値解析グループの結果と比較検証するための地盤と杭の基本的な挙動データを提供する。

(2) 平成 15 年度の成果

(a) 業務の要約

平成 15 年度は次の各項目を実施した。

- 1) 杭の支持地盤として碎石を用いた非液状化層を土槽底部に設置し、この上部には豊浦砂を用いた飽和地盤によって構成される地盤モデルをせん断土槽に作成した。
- 2) この 2 層系の地盤に杭（外径 32mm のステンレス製として、杭間隔が直径の約 10 倍の 2 × 2 の 4 本杭モデル）を設置した地盤杭系モデルの三次元振動実験を実施し、杭基礎及び地盤の動的挙動に関する詳細データを得た。
- 3) 実験データの分析により、杭に発生する振動方向の曲げモーメントは杭頭部で最大となる非線形な分布を示すが、杭端部が支持地盤に埋設された状態になっているため 2 次のモードが卓越している。
- 4) 杭周辺の地盤の過剰間隙水圧は、水平 1 方向振動の場合よりも多方向振動の場合の方が継続時間は長くなる。鉛直振動が作用した場合には過剰間隙水圧の消散は短時間に終了する。すなわち、地盤の挙動は入力地震動の多方向性の影響を強く受けることが明らかとなった。
- 5) 杭周辺地盤の応力 ひずみ関係は、地盤深部ほど剛性が高く維持されており液状化発生時にはサイクリックモビリティに似た挙動を示すことが確認できた。

(b) 業務の実施方法

1) 実験装置

a) 振動台

振動台の外観を写真1に仕様を表1に示す。3次元6自由度の制御が可能で、入力波については振動台に所定の重量の疑似模型を設置しておき、予備加振によって波形補正を行い実際の駆動入力波を作成した。



写真1 振動台の外観

表1 振動台の仕様

項目	仕様
テーブルサイズ	4 m x 6 m
駆動方式	電気油圧サーボ方式
加振方向	水平2軸(X, Y)、垂直1軸(Z)
最大搭載質量	50トン
最大加速度	±500Gal
最大速度	X & Y : ±75 cm/s、Z : ±50 cm/s
最大変位	X & Y : ±15 cm、Z : ±5 cm
回転角度	±2度
加振周波数	DC ~ 40 Hz
測定システム	190ch

b) せん断土槽

せん断土槽は、写真2、図1に示すように内径1.8m、高さ1.5mの円筒形のせん断土槽(30段のプレートによって構成)である。土槽内面には防水用のゴムシートが設置され底面部には注水装置がある。これを利用して地盤のボイリングなどが可能である。プレートはアルミハニカム構造を採用して剛性を確保するとともに、軽量化を進めている。1枚の重量は約17kgfで、内部に設置される地盤重量に対して1/15になっている。



写真2 せん断土槽の外観

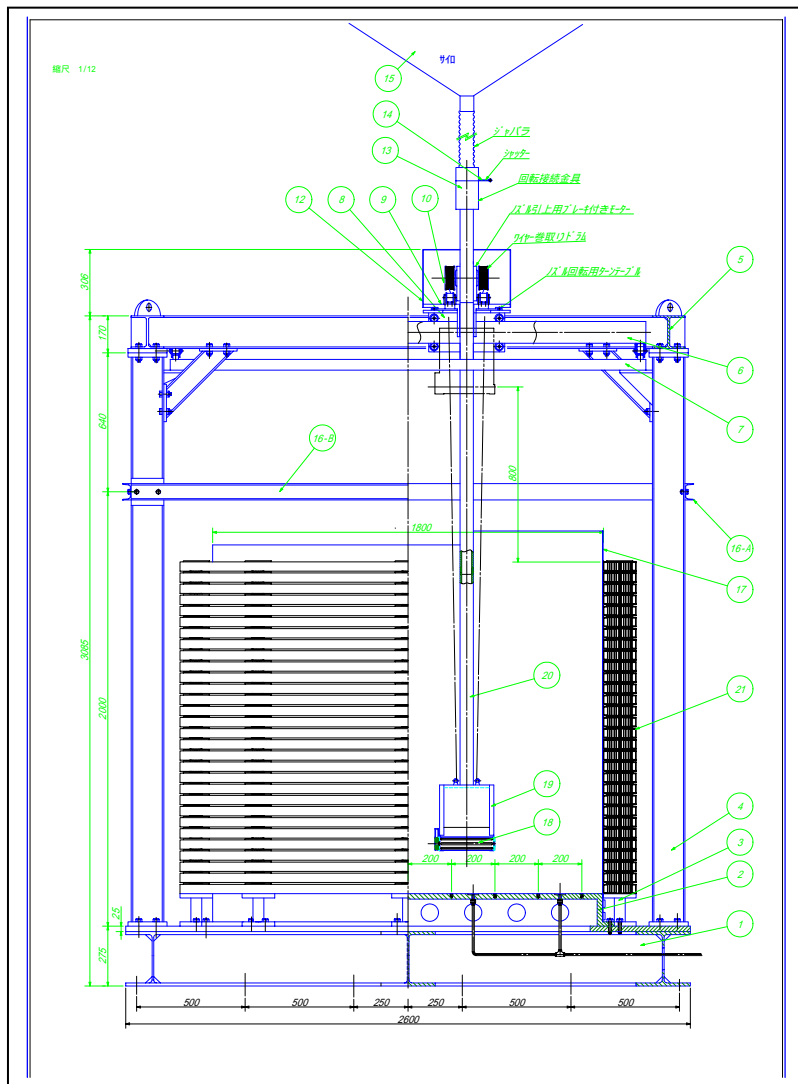


図1 せん断土槽断面

2) 実験条件

入力振動については、地震波を使用することとする。

水平1方向の場合を検討し、水平面内2方向振動の影響や鉛直振動が加わった時の影響についても検討することとする。

地震波は3成分が揃っている十勝地震(1968年)を用いた。

a) 地盤作成

地盤モデルは杭を支持する下部の非液状化層と上部の液状化層からなる。

底部の地盤は碎石(最大粒子径10mm)を乾燥密度 d (g/cm³) 1.896に締固めて作成した。層厚は35cmである。

上部の飽和地盤の作成方法は、初期地盤を土槽内の水中に砂を落下堆積させて作成し、土槽下部からの注水と上部からの圧力水の注水によって地盤全体をボイリング状態にする。

-) 土槽の底板に設けた注水装置によって地盤に上昇流を発生させる。
-) 同時に地盤地表面からも圧力水を地盤内部まで注入し、地盤の流動化を促進する。
-) 地表面上部に貯まった水は、水中ポンプによって土槽底板からの注水装置に送られ循環する。
-) 土槽内の地盤が完全に流動化することを確認して、注水を完了する。
-) 地盤表面に排水機能を持った載荷板をセットして、振動を加えて地盤表層部分の圧縮を促進する。

2回目以降の地盤作成は、同様にボイリングによって地盤の再生を行うこととする。碎石層と上部液状化層との間には遮水シートを設置し、その上部にボイリング用のパイプを設置している。このパイプを用いて上部飽和地盤の再生を行い、地盤全体が水中に浮遊した状態を確認して、自然堆積した地盤を初期地盤とした。地盤の密度は以下のように振動台の予備加振を繰り返して調整した。

-) 初期地盤の地表面に排水機能を持った載荷板を設置する。
-) 水平1方向の加振を行う。5Hz~20Hzまでの振動を均一に含むランダムな振動を与える。地盤の高さを計測し地盤密度を確認する。(1回目)
-) 水平1方向の加振を行う。5Hz~20Hzまでの振動を均一に含むランダムな振動を与える。地盤の高さを計測し地盤密度を確認する。(2回目)
-) 鉛直方向の加振を行う。5Hz~20Hzまでの振動を均一に含むランダムな振動を与える。地盤の高さを計測し地盤密度を確認する。

b) 杭基礎モデル

2本×2本の杭基礎とする(図2参照)。それぞれの杭頭部は梁で固定して一体化する。杭は表2に示す直径32mm、肉厚1.0mmのステンレス管で、杭間隔は直径の約10倍とする。No.1とNo.4杭の内面には軸方向にひずみゲージを接着した。ひずみゲージの間隔は図2に示すように杭頭に近い部分は5cm間隔として1断面に4点で計測してX, Y方向の曲げひずみを算出できるようにした。杭の端部はボールジョイントを設けて土槽底板に固定している。

上部構造のモデルを図3, 4、写真3に示す。杭の上端部を連結している部分は4

7.1kg (37.4+9.7kg) で、上部の構造物は247.6kgである (支柱を含まない) 。支柱は直径16mmの丸鋼として重量は1.92kgである。

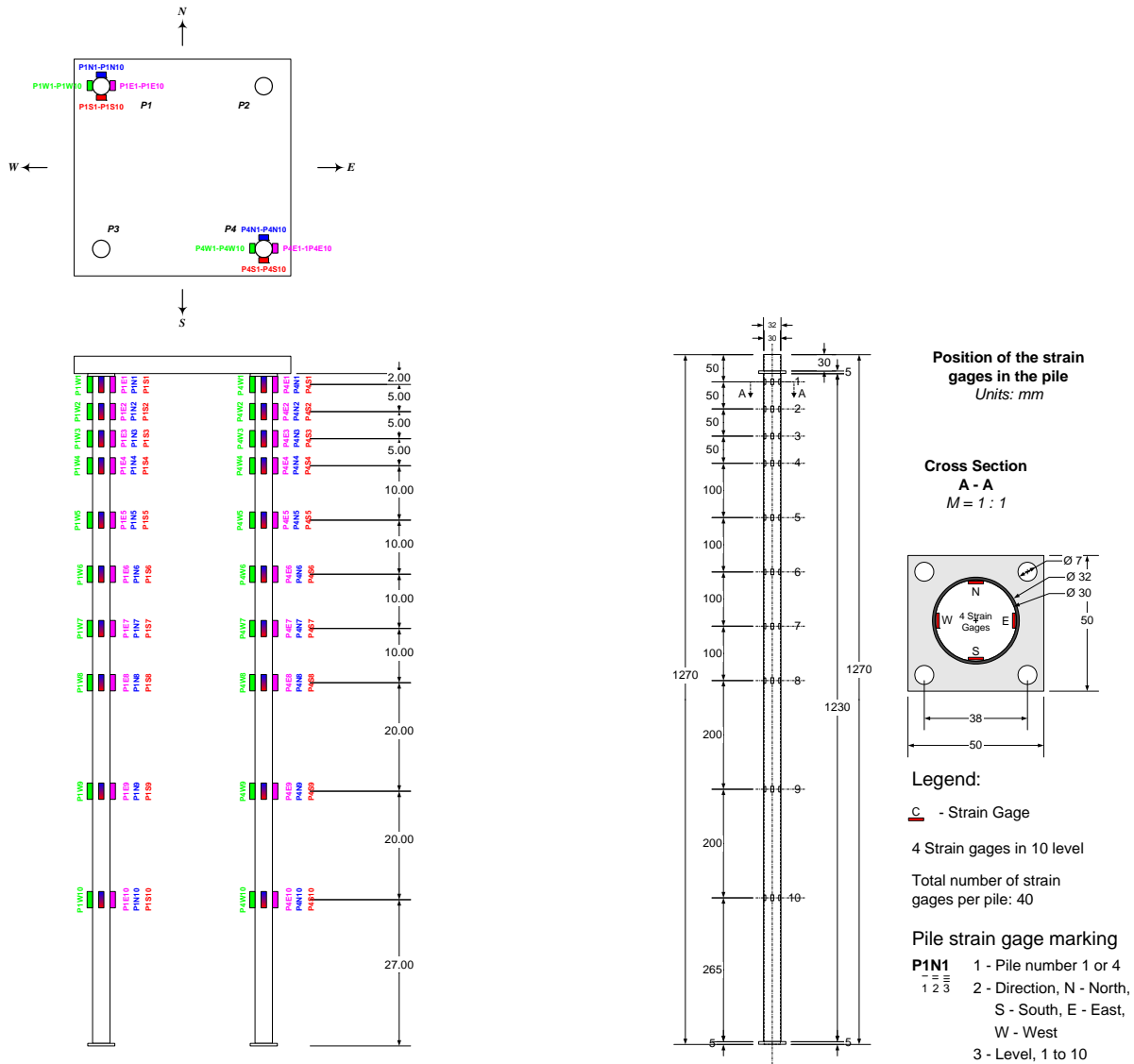


図2 杭モデルとひずみゲージの位置

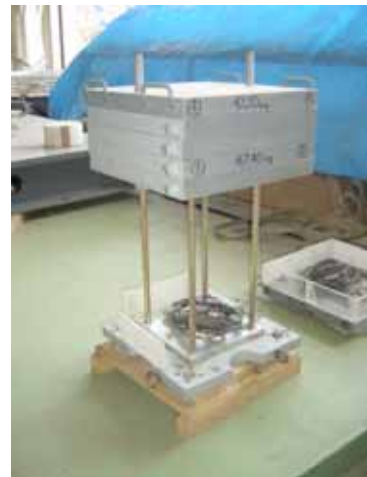
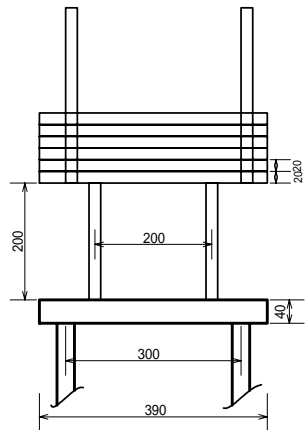
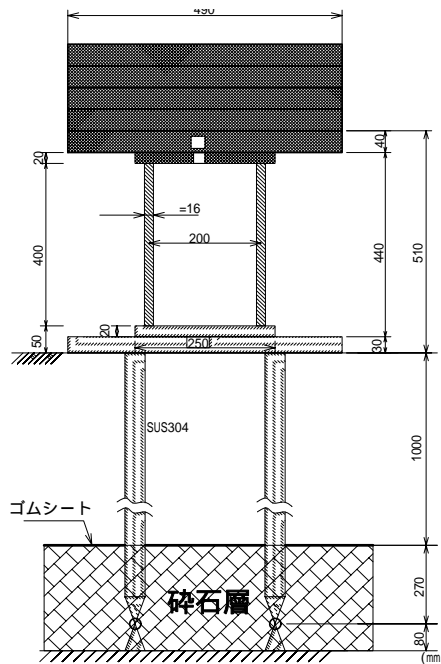


図3 上部構造物の基本形状(a)

写真 3 上部構造物

(上部構造物の支柱は実験ケースによって変更) Mタイプ(支柱径16mm)



上部質量：237.9kg (49+47.3+47.4+46.9+47.3kg)
 上部連結板：9.7kg
 支柱：1.92kg (直径16mm、高さ400mm)
 下部連結板：9.7kg
 連結梁：37.4kg

図4 杭と構造物、地盤の構成

表2 杭モデル

	杭本数	杭肉厚	杭材料	その他
杭モデル1	2 × 2本	1.0mm	SUS304	外形32mm

c) 計測器と計測位置

表 3 に示す計測器を図 5 に示すように配置した。

表 3 計測器

計器名称	測定位置	測定 ch 数
加速度計	構造物	6
	杭	6
	地盤内	3 0
	土槽フレーム	2 0
	振動台	3
変位計	構造物	2
	土槽フレーム	2 0
	地表面	3
間隙水圧計	地盤内	2 0
ヒズミゲージ	杭	4 0
ロードセル	杭底部	4

) 地盤内加速度計と間隙水圧計の設置方法

地盤内のセンサーは、杭と平行に地盤内部に挿入したジオグリッドの帯に固定した。このジオグリッドの帯は土槽底板に一端を固定しており、地表面上部から一定のテンションを与えることによって、方向性を維持できるようにしている。ただし、加速度計については、あらかじめ幅 3 cm のアルミ板をジオグリッドに取り付けておきこれをベースとしてセンサーを固定した。

d) 入力波

入力波として、地震動のデジタル記録が3成分そろっている地震動の中から、代表的な十勝地震(1968年)の八戸での記録波形を用いることとし、時間軸を模型に応じて $1/5$ (1/2.236) に圧縮する。相似則については、模型とプロトタイプについて物理現象に関連する主要値が等しいとして求めている。ここで、プロトタイプは防災科学技術研究所が実施している杭地盤系の大型振動実験のモデルで、長さに関するスケールファクターは $\lambda_L=1/5$ である。すなわち、同一の重力場の実験であるので、対象とするプロトタイプと模型については、せん断剛性や減衰定数のひずみ依存性、せん断波速度、密度などはほぼ同一の値として、入力加速度の相似率を $\lambda_a=1$ としている。また、 $\lambda_t = \lambda_L / \lambda_a^2$ であるから時間に関するスケールファクター λ_t は λ_L となる。時間軸を圧縮した十勝沖地震の3成分は図6に示すとおりである。

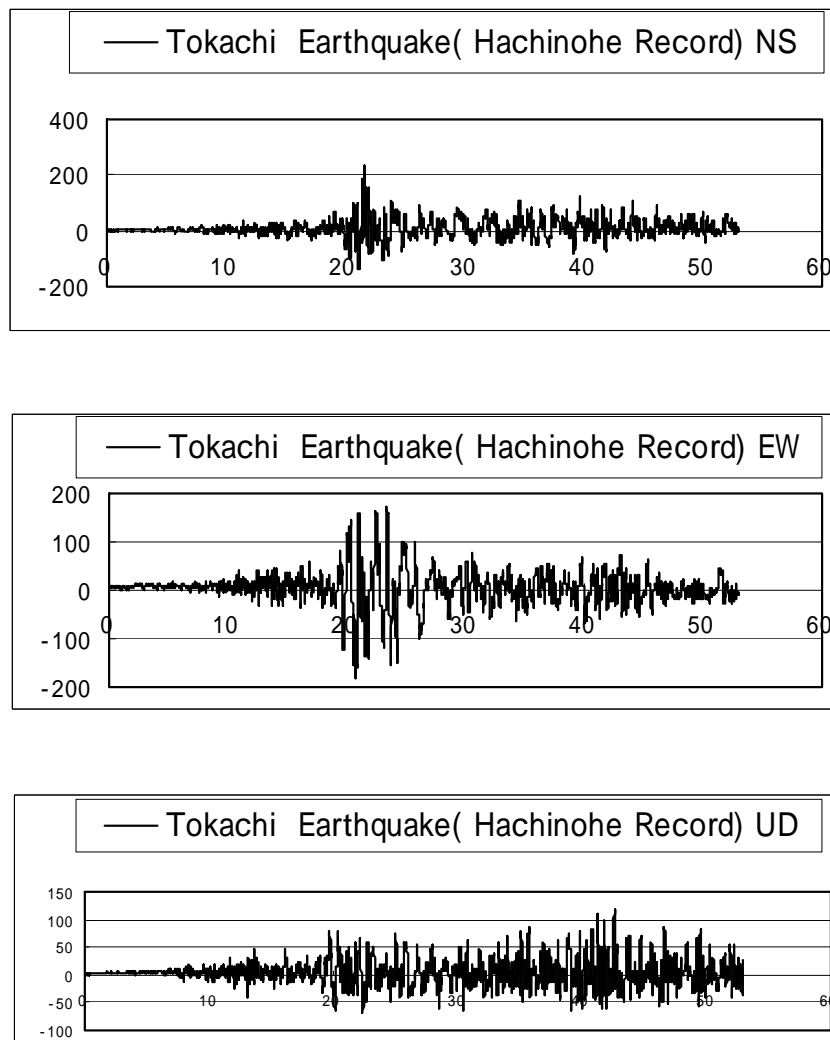


図6 十勝地震波(1968)

e) 実験ケース

表4に平成15年度に実施した実験条件を示す。なお、以下の実験結果では、データファイル名を用いて表現している。相対密度はそれぞれの実験の地盤の全体重量と体積から計算した平均的な値を表記している。

表4 実験ケースと条件 (平成15年度、S5)

Test No.	Density (%)	Input Direction	Top Structure	データファイル名
CASE31	Dr=75	X & Y方向(1/√5)	M=247.6kg M-Type	HCXYW31c1
CASE32	Dr=68,70	X方向,NS方向(1/√5)	M=247.6kg M-Type	HCNSW32c1 HCNSW32c5
CASE33	Dr=73	X&Y方向,(1/√5)	M=247.6kg M-Type	HCXYW33c1
CASE34	Dr=70	XYZ方向, 3方向(1/√5)	M=247.6kg M-Type	HC3DW34c1
CASE35	Dr=77	Y方向, EW方向(1/√5)	M=247.6kg M-Type	HCEWW35c1

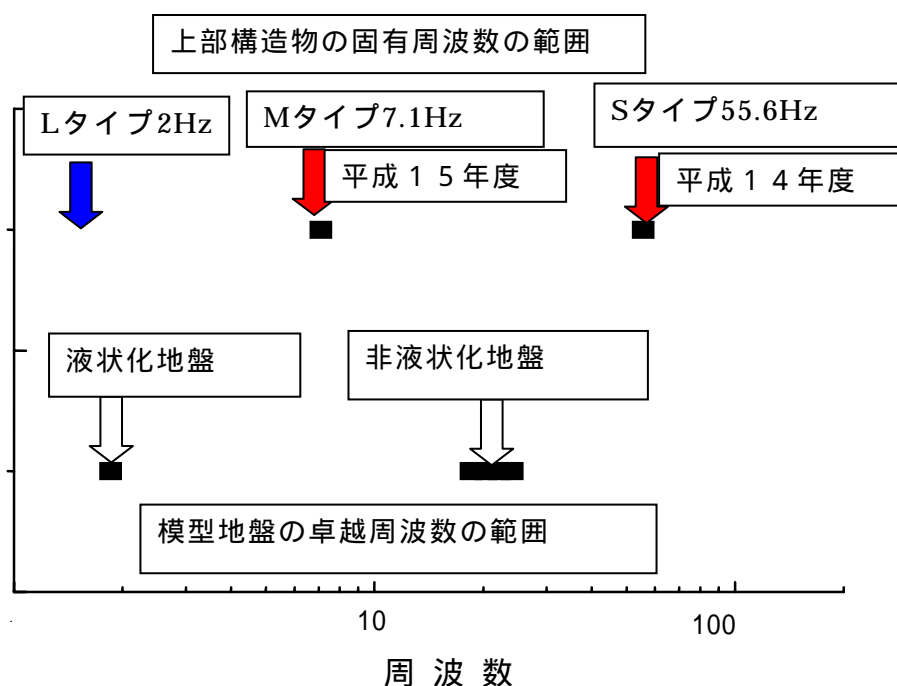


図7 上部構造と地盤の固有周波数の関係

(c) 業務の成果

1) 地盤条件と作成状況

図8に振動実験直前と実験直後に計測した模型地盤のコーン貫入試験結果を示す。コーンの貫入速度はモータによって制御しており、全試験で一定としている。地盤の全体重量と体積から算出される相対密度は70%前後であるが、コーン貫入抵抗は深さ方向に増加する傾向を示している。また、地表面から深さ20cmまでの地盤はかなり緩い状態で、低い加速度レベルでも液状化しやすく、地盤の内部とは異なった状態にあることが分かる。また、深部の貫入抵抗にもバラツキが見られる。

振動によって緩い地盤は密度を増加し、比較的密度の高い地盤は緩む傾向を確認することができる。

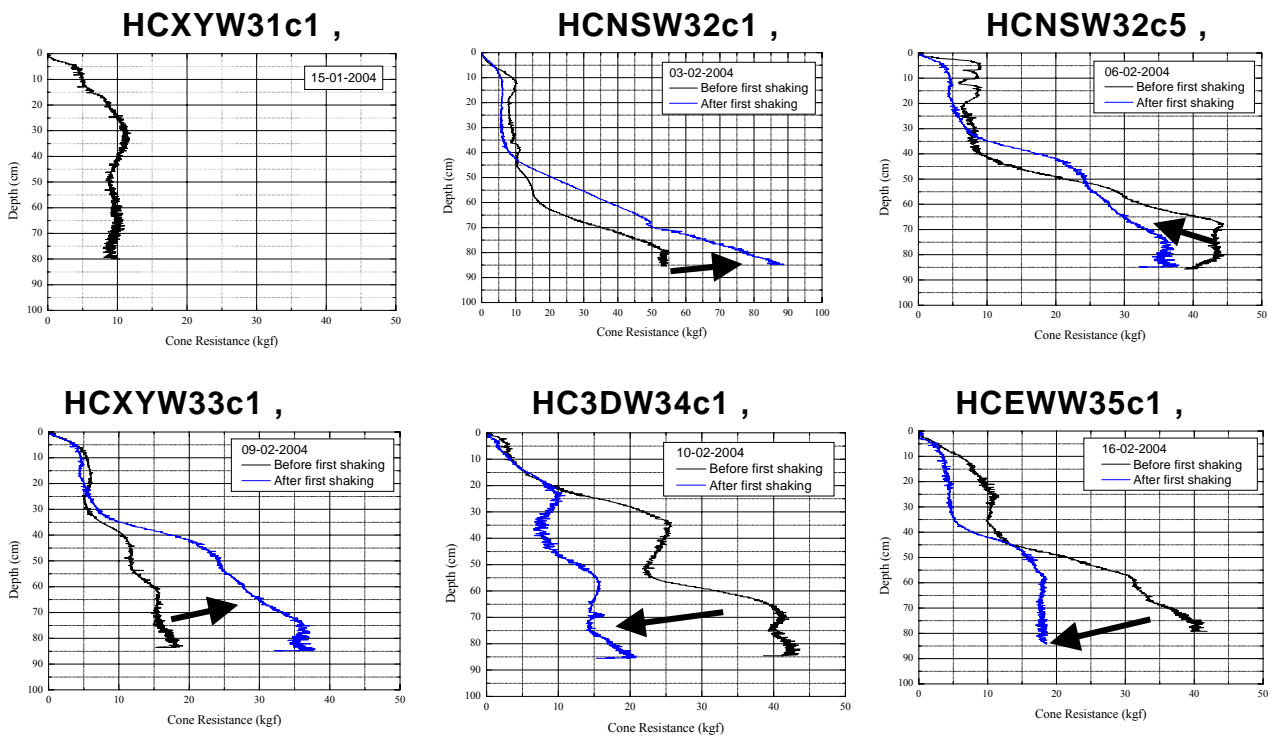


図8 地盤のコーン貫入抵抗

2) 実験結果

a) 杭の剛性

杭単体の曲げ試験によって、杭の曲げ剛性を確認するとともに杭内部に接着しているひずみゲージの出力値と解析値を比較して、ひずみと杭の変形（曲げ撓み量）に整合性のとれていることを確認した。杭の弾性係数と曲げ剛性は平成14年度と同じく以下のとおりである。

$$E=1.93E+08 \text{ (kN/m}^2\text{)}、EI=2.09E+10 \text{ (kNm}^2\text{)}$$

b) 杭基礎と構造物の加速度応答

地盤及び構造物の加速度記録を図9に示す。水平1方向振動実験の結果を2つ並べて示しているが、液状化が顕著になる以前の11.5秒までの応答は、ほぼ同等と考えられる。入力加速度に対する構造物の応答倍率は1.75と1.62で若干の違いが見られるが、液状化直前のスパイク的な応答によるものであること、また、地盤深部から上部方向に加速度増幅する傾向など全体としては整合性のとれた結果である。地盤についても相対密度がそれぞれ68,70%で、地盤深部ほど大きな貫入抵抗を示していることなどほぼ同一の仕上がりとなっており、得られた地盤の挙動は整合性のある精度の高いデータと考えられる。水平面内2方向振動の結果も示しているが、液状化の発生しない加速度レベルでは入力振動と同じ挙動を各X、Y方向成分が示すものの、液状化の発生後には成分方向の入力波形から大き

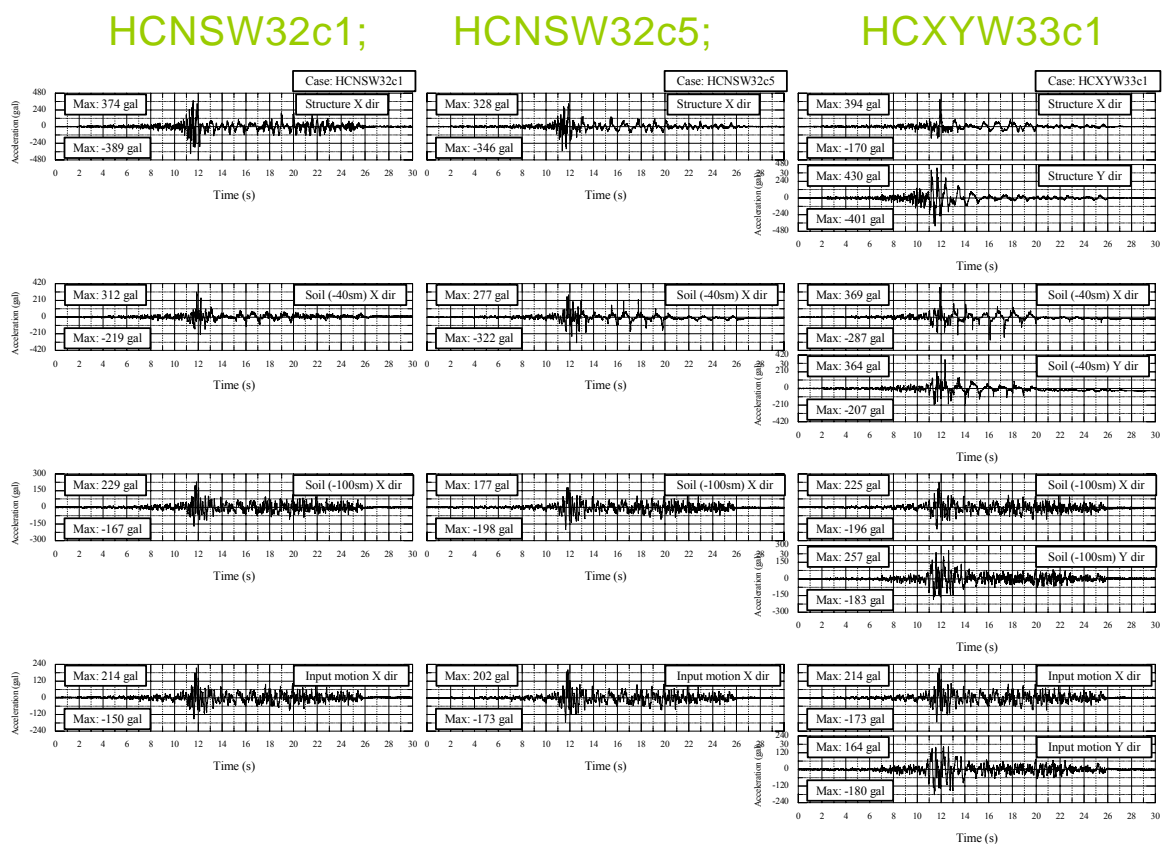


図9 同一条件の振動実験における加速度応答の比較

く乱れる結果となっている。

図10には水平1方向振動（X（NS）単独加振、Y（EW）単独加振）と2方向同時振動（XY方向）の結果を示す。地盤深部（100cm）の波形で見ると、成分毎の特徴がXYの2方向振動でも残っており、液状化前の地盤や液状化レベルの低い場合には成分毎の応答を重ねることである程度の挙動を予測できる可能性がある。ただし、地表面近くの波形に見られるように、完全に液状化が発生した場合には加速度波形に特徴的なスパイク状の応答が繰り返し現れる影響を受けて各成分の加速度応答波形は入力のものとは大きく異なったものとなっている。

図11は、水平1方向入力と多方向入力時（XY2方向とXYZ3方向）の杭と構造物の加速度応答である。いずれの場合にも入力加速度が50gal以下の初期の振動時には入力波形に対応した加速度応答を示している。いずれの入力波の条件でも液状化の発生直後からスパイク的な加速度応答が見られ、この傾向は2方向振動の方が1方向振動より大きく、さらに、鉛直方向の入力を考慮したXYZの3方向振動では入力加速度に対して4倍以上の大きな応答が発生している。

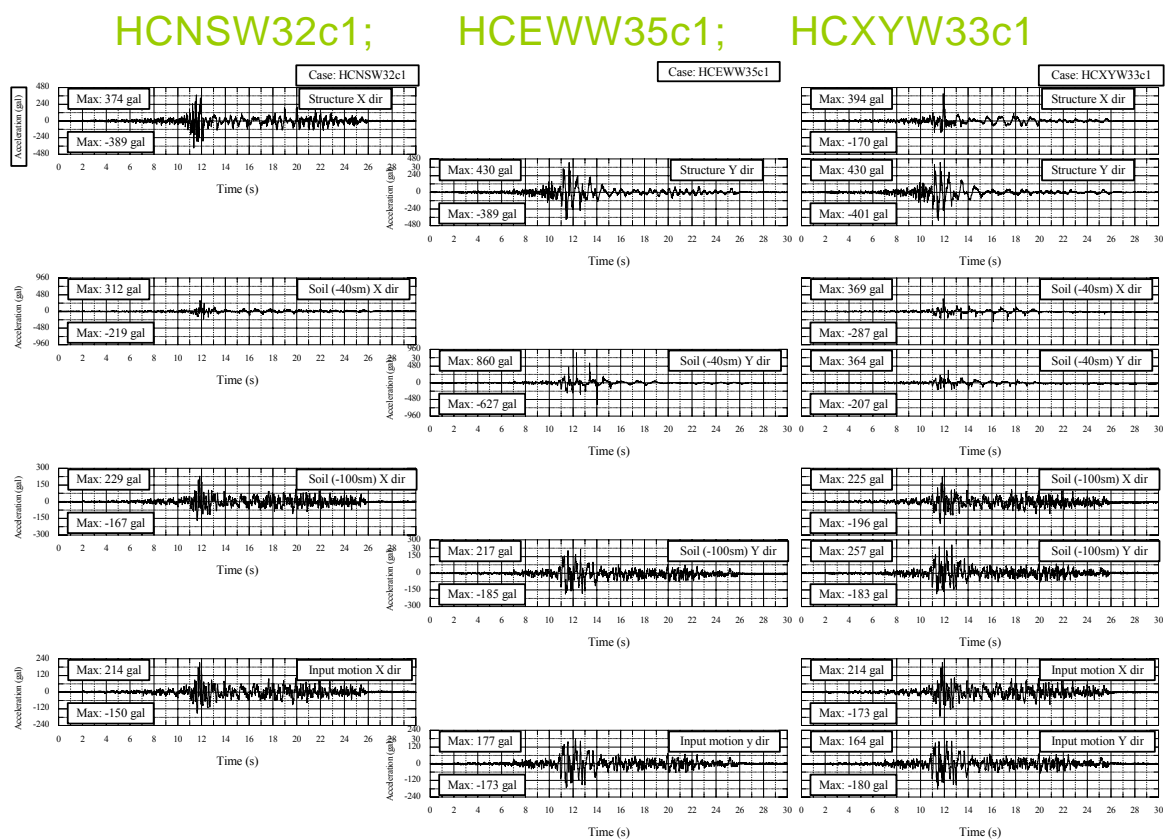


図10 水平面内の振動による加速度応答

HCNSW32c1;

HCXYW33c1 ;

HC3DW34c1

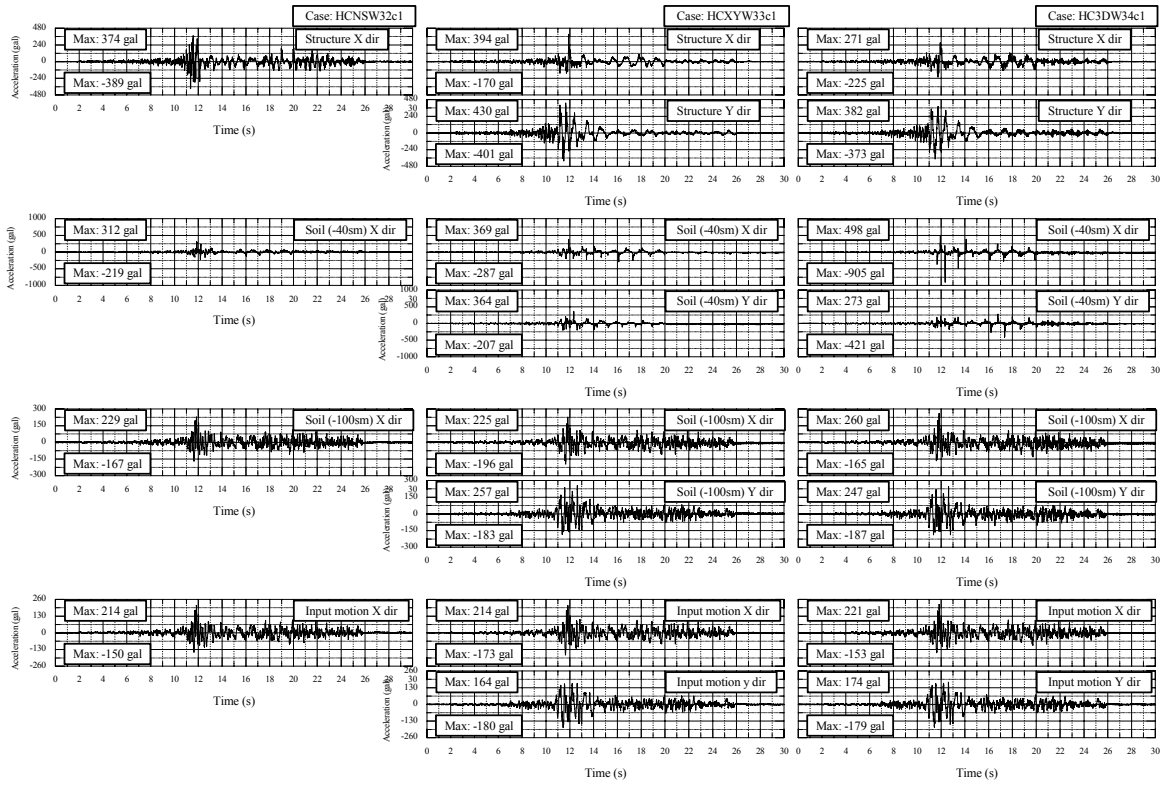


図 1 1 加速度応答と入力振動の多方向性の影響