

3.3.5 側方流動に対する基礎の破壊メカニズム解明の実験

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
 - 1) 実験装置
 - 2) 地盤の作成方法 (Case2-1)
 - 3) 地盤の作成方法 (Case2-2、Case2-3)
 - 4) 実験条件
- (c) 業務の成果
 - 1) Case2-1 実験結果
 - 2) Case2-2 実験結果
 - 3) Case2-3 実験結果
 - 4) 実験結果の比較および考察
- (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

(3) 平成 16 年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 側方流動に対する基礎の破壊メカニズム解明の実験

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名
独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ振動チーム	上席研究員 主任研究員	田村 敬一 岡村 未対 谷本 俊輔

(c) 業務の目的

本業務では、護岸背後にある杭基礎の破壊メカニズムを解明するため、比較的小規模の側方流動実験を行う。実験では土槽内に護岸を有する砂質地盤模型を作成し、護岸の背後地盤に杭基礎模型を設置し、これらを水平と鉛直に加振する。これにより、加振方向の違いが上部構造物や地盤の流動変位の応答、杭基礎に作用する地盤流動圧に与える影響等を定量的に把握するとともに、杭基礎と地盤の相互作用を詳細に検討する。

(d) 3 ヶ年の年次実施計画

1)平成14年度：

矢板護岸と護岸背後地盤に上部構造物の無い杭基礎を設置した試験体を3体作製する。これら3体の試験体を、護岸に平行な方向あるいは護岸に直交する方向に加振し、杭基礎及び地盤の応答を計測する。
実験データを解析し、上部構造物が無い場合において加振方向の違いが地盤及び杭の挙動に与える影響を明らかにする。

2)平成15年度：

矢板護岸を有する砂質土地盤と、護岸背後地盤に頭部の回転変位を固定した杭基礎を設置した試験体を2体作製する。これらの模型は杭頭部のフーチング重量が異なるものである。
これら試験体を水平1方向（護岸に平行な方向）あるいは水平・鉛直の2方向に同時加振し、杭基礎及び地盤の応答を計測する。
杭頭を固定しない試験体を作成し、これを水平1方向（護岸に直交する方向）に加振して杭基礎及び地盤の応答を計測する。
実験データを解析し、護岸平行方向に加振するケースにおいて、杭頭の固定条件及び鉛直加振が地盤と杭の応答に及ぼす影響を分析する。また、護岸直交方向加振の場合において、フーチング重量の違いが杭基礎及び地盤の挙動に及ぼす影響を分析する。

3)平成16年度：

平成15年度の模型から地盤表面の非液状化層厚を変えた模型を作製する。

これらの模型を、それぞれ護岸に平行な方向、護岸に直交する方向、及び水平・鉛直2方向に加振し、杭基礎及び地盤の応答を計測する。

実験データを解析し、非液状化層厚と加振方向の違いが地盤と杭の挙動に及ぼす影響を分析する。

全体のとりまとめを行う。

(e) 平成15年度業務目的

護岸背後にある杭基礎の側方流動による破壊メカニズムに及ぼす加振方向の影響を実験的に解明するため、比較的小規模の側方流動実験を行う。

実験では土槽内に護岸を有する砂質地盤と護岸の背後地盤に杭基礎模型を設置した供試体を作成する。作成した模型は、フーチング重量、杭頭の回転変位に関する拘束条件が異なる3種類である。模型を護岸平行な方向、護岸直交する方向、および護岸平行な方向と鉛直方向の2方向に加振することにより、加振方向の違いやフーチング重量、杭頭固定条件の違いが地盤および杭の挙動に与える影響を明らかにする。

(2)平成15年度の成果

(a) 業務の要約

- 1) 矢板護岸と護岸背後地盤に杭基礎を設置した試験体を3体作製し、これらの試験体を、護岸に平行な方向、護岸に直交する方向、または護岸に平行な方向と鉛直の2方向に加振し、杭基礎及び地盤の挙動に関する詳細なデータを得た。
- 2) 実験データを解析し、加振方向の違い、フーチング重量の違い、杭頭の固定条件の違いが地盤及び杭の挙動に与える影響を分析した。また、H14年度に行った実験結果と比較することにより、護岸のセグメント長が地盤の流動変位量に及ぼす影響を調べた。
- 3) その結果、護岸のセグメント長が地盤の流動変位に及ぼす影響は無視し得ないこと、上下動は地盤の変形量の増加に大きく寄与すること、杭頭の固定条件の違いにより杭のモーメント分布や杭の水平変位量には大きな差が生じるが、地盤の変位はほとんど影響を受けないこと、等が明らかとなった。

(b) 業務の実施方法

1) 実験装置

a) 振動台

実験に用いた振動台は、独立行政法人土木研究所の三次元大型振動台である。この振動台はテーブルサイズが8m×8mであり、3次元6自由度の制御が可能である。振動台の概観と主な諸元を写真1、表1に示す。



写真 1 振動台の概観

表 1 大型振動台の主な諸元

項目	仕様
振動台寸法	8m × 8m
最大搭載荷重	300tf
加振方向	水平・鉛直 3軸
最大加振力	X、Y:100tf、Z:500tf
最大変位振幅	X、Y: ± 60cm、 Z: ± 30cm
最大速度	X、Y: ± 200cm/s、 Z: ± 50cm/s
最大加速度	X、Y:2000gal、 Z:1000gal
加振周波数	X、Y:DC ~ 50Hz、 Z:DC ~ 50Hz

b) 土槽

使用した土槽は、内寸で 4.0m(幅) × 1.0m(奥行) × 2.0m(高さ)の剛な土槽である。土槽の 1 面はガラス面となっており、そこから地盤を観察することができる。また、土槽底面のポーラストーンを介して、土槽外から注・排水を行うことができる。

c) 模型杭(図 1)

3 × 3 の群杭基礎を用いた。杭に作用する流動圧に及ぼす杭間隔と加振条件の影響を調べるために、9 本の杭のうち、7 本をひずみゲージを貼付した杭とした。

杭は外径 50.8mm、肉厚 1.5mm のステンレス鋼製であり、ひずみゲージ添付杭には杭の内側の 11 深度にゲージを貼付した。ひずみゲージは同一深度に 2 枚ずつ貼付け、軸ひずみと曲げひずみを測定した。

使用した杭は、実物の曲げ剛性や強度を想定して模型化したものではなく、杭の変位量

が地盤の変位量に比べて小さく、かつ弾性範囲内の変形量となるように設定したものである。また、杭先端と頭部を固定し、地盤がない状態（突出杭）において、加振周波数(5Hz)以下の周波数で共振しないように配慮した。ひずみゲージ付き杭を検定した結果、杭の曲げ剛性 EI は 12.8kN/m^2 で、杭によるばらつきはほとんど無かった。

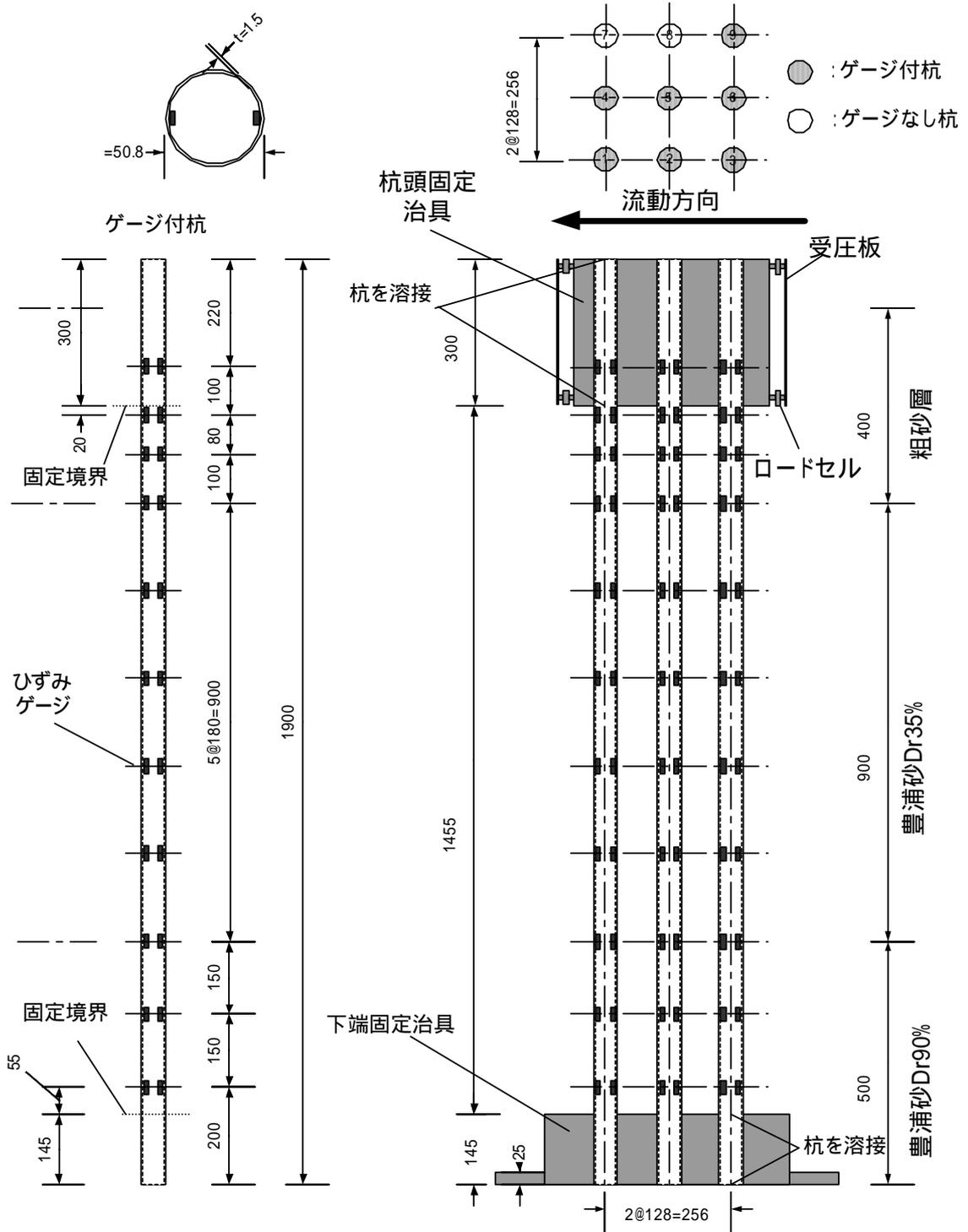


図 1 ひずみゲージ付き杭

d) 地盤内変位計

地盤水平変位を測定するための地盤内変位計を 1 カ所に設置した。この変位計は、加速

度計を取り付けた薄いステンレス板を蝶番で接続し、ステンレス板の傾斜を加速度計によって検出し、地盤水平変位の深度分布を求めるものである。

2) 地盤の作成方法 (Case2-1)

豊浦砂と粗砂を使用し、次の手順で模型地盤を作成した。

矢板護岸と3×3の群杭を土槽内にセットし、矢板背面(陸側に)層厚50cmの密な豊浦砂層(Dr=90%)を空中落下と締固めによって作成した。矢板は肉厚6mmの鉄板である。矢板は土層奥行き方向に3分割し、約2mmの隙間をもって設置した。隙間はグリースを塗布したメンブレンにより塞いだ。矢板先端は土層に固定せず、土層底面上に自立させた。地盤作成中は、矢板の転倒を防ぐために矢板頭部と頭部から850mm下がった位置にストラットを取付け、水平方向に固定した。

分割した矢板の寸法はH14年度の実験と異なる。H14年度の実験は、矢板を奥行き方向に3等分(各33cm)したが、本年度の実験では、土槽壁面に接する矢板の幅を各5cm、中央部の矢板の幅を90cmとした。これは、壁面摩擦の影響を受けやすい土槽壁面近傍とそれ以外の部分とを分けることを意図したものである。杭は、図1に示すように先端を固定治具に溶接し、固定治具を溶接により土層底面に固定した。これにより杭先端の変位が生じないように完全に拘束した。

常時の矢板安定を確保するため、矢板前面(海側)に層厚90cmのゆるい豊浦砂層(Dr=35%)を水中落下法によって作製した。

矢板背面の密な砂層上に、層厚90cmのゆるい豊浦砂層(Dr=35%)を水中落下法により作成した。ガラス面付近には、色砂で20~50cm間隔に鉛直線を描いた。この上に、薄い紙を敷き、その上に層厚40cmの粗砂層をいわき珪砂2号で作成した。

地下水位を粗砂層底面にセットし、模型に設置したセンサーの計測を行いながらストラットを取外した。

加振実験を行い、地盤の挙動を観察した。

作製した模型の概要を図2に示す。

粗砂層は、平均粒径1.7mmのいわき珪砂2号を用いた。これは、サクシオンによる不飽和領域を小さくすること、及び不飽和領域での見かけの粘着力を小さくし、不飽和層の土の物性を明確にすることを意図したものである。

3) 地盤の作成方法 (Case2-2、Case2-3)

Cas2-2 および Case2-3 の模型は、次の点を除き Case2-1 と同じである。

- Case2-2 では、杭頭部に杭の相対変位と回転を拘束する治具とフーチング模型を取り付けた。フーチングの矢板護岸に平行な面にはロードセルと内蔵した受圧板を設置し、フーチングに作用する土圧合力を測定した。治具とフーチングおよび受圧板の質量は、合計21.6kgであった。杭を土槽底面に固定した状態(地盤の無い状態)での杭の固有振動数は14Hzであった。

- Case2-3 では Case2-2 の杭頭部の治具間を鋼材とモルタルで充填し、重量を 170kg とした。杭を土槽底面に固定した状態(地盤の無い状態)での杭の固有振動数は 7Hz であった。

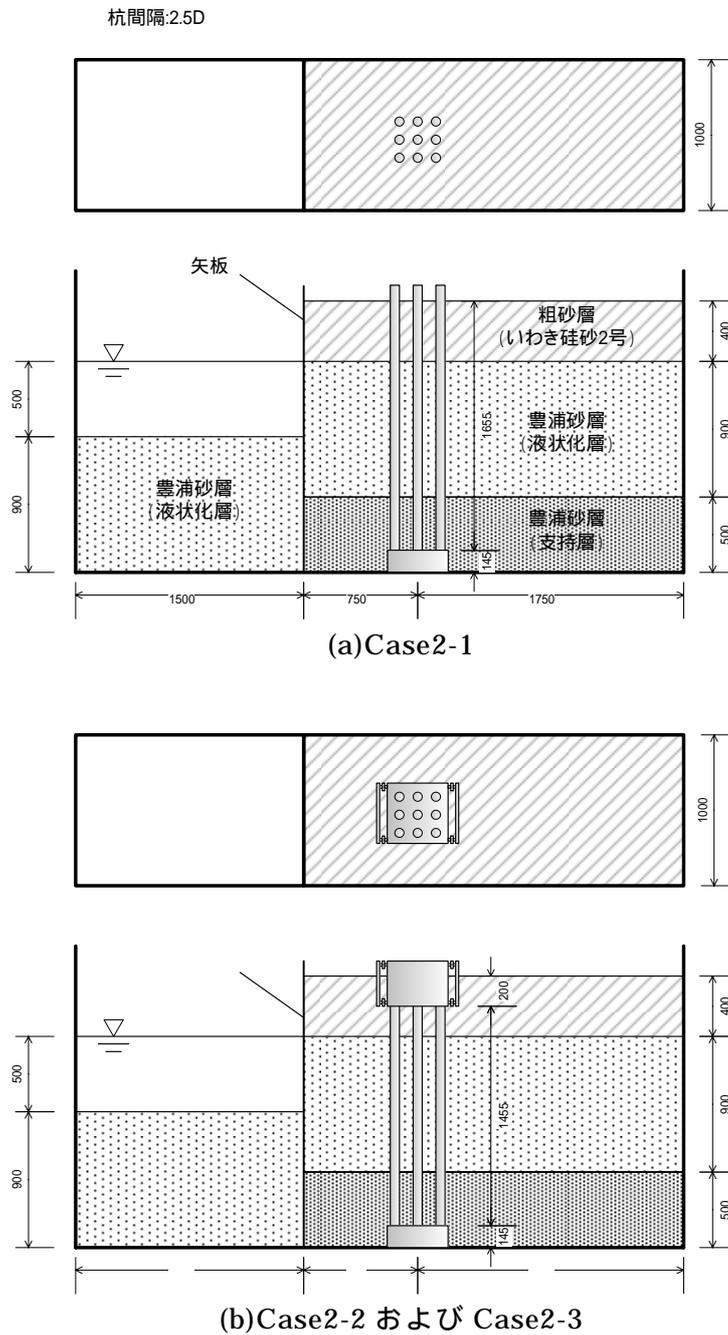


図 2 模型の概要

4) 実験条件

実験条件の一覧を表 2 に示す。杭先端を固定した 3×3 の群杭基礎を有する模型を 3 体作製した。これら 3 模型は、矢板護岸および地盤条件が同じで、杭頭の固定条件および杭頭部の質量が異なるものである。これらの模型を水平 1 方向、あるいは水平上下の 2 方向に加振することにより、加振方向および杭頭条件の違いが地盤及び杭の応答に及ぼす影響を調べた。模型の概要を表-2 に示す。

杭間隔:2.5D

表 2 実験条件一覧

Case	非液化化層厚	杭間隔	液化化層厚、 相対密度	杭頭固定 条件	フーチング	加振方向
2-1	40cm	2.5D	90cm、 35%	回転 自由	無し	護岸平行方向 (水平1方向 加振)
2-2				回転 固定	有り (質量 21.6kg)	護岸平行方向 + 鉛直方向 (2方向同時 加振)
2-3				有り (質量 170kg)	護岸直交方向 (水平1方向 加振)	

a) センサーの配置

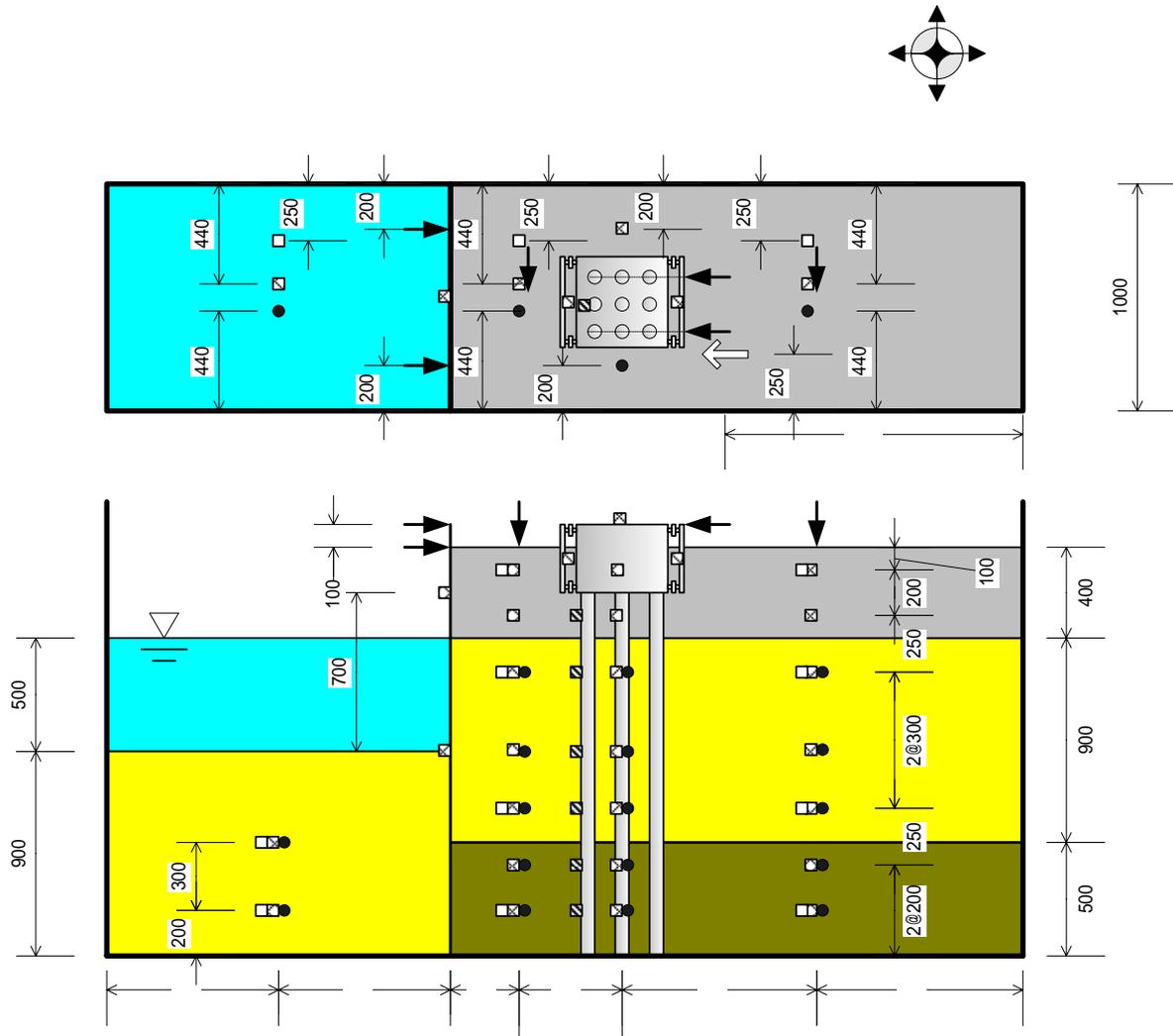
加速度計、間隙水圧計、変位計、ロードセルおよび地盤内変位計を図3に示す位置に設置した。

b) 粗砂の三軸試験

不飽和層の作製に使用したいわき硅砂2号の三軸CD試験(H14年度実施)を図5に示す。

c) 入力波

入力加速度の時刻歴を図6に示す。Case2-1~2-3の水平方向には加速度振幅約350gal、5Hzの正弦波20波で加振した。Case2-2では、水平方向に加えて鉛直方向にも同時に加振した。鉛直方向の加振では、 $t=2.5$ 秒まではほぼゼロであり、以後約1秒ごとに加速度振幅を変化させることにより、鉛直加振の影響が模型の応答に与える影響を調べた。鉛直方向加振の周波数は20Hzである。



- 小型加速度計(杭用)
- ▣ 加速度計(水平)
- 加速度計(鉛直)
- 間隙水圧計
- ⊕ ロードセル
- 変位計
- ← 地盤内変位計
- ↓ 地盤沈下計(レーザー変位計)

図3 センサーの配置 (Case2-1 ではフーチング無し)

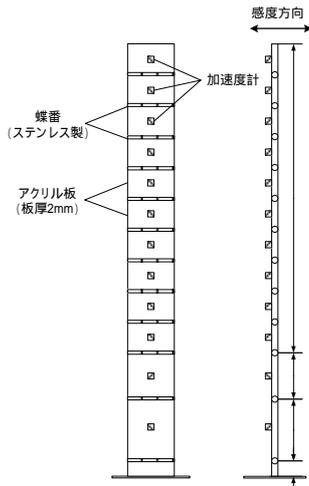


図4 地盤内変位計

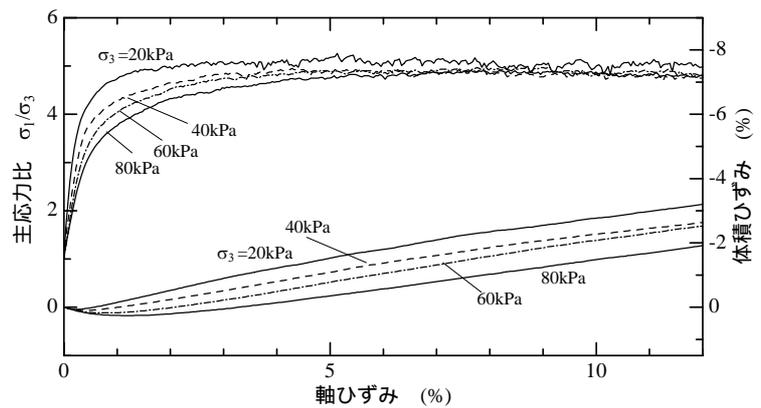


図5 いわき珪砂2号のCD試験結果

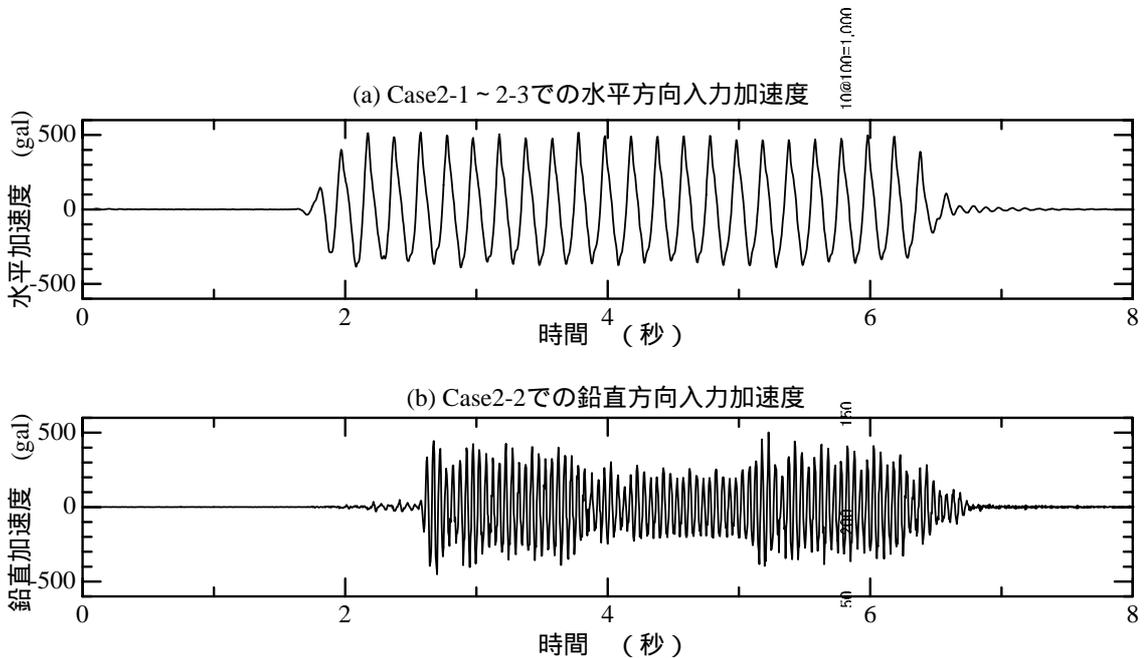


図6 入力加速度の時刻歴（振動台での測定値）

(c) 業務の成果

1) Case2-1 実験結果

i) 矢板ストラット取外し時

地盤の変形

加振直前に地盤作成時に矢板を支持するためのストラットを取外し、振動台を中立位置まで移動した。3分割した矢板の内、中央の矢板頭部に加振までに生じた水平変位は56mmであった。中立位置まで移動した後の地盤の変形状況を図7、写真2に示す。この図は、土槽側面のガラス面を通して観察した色砂および3分割した矢板の内、土槽側面に接するもののスケッチである。

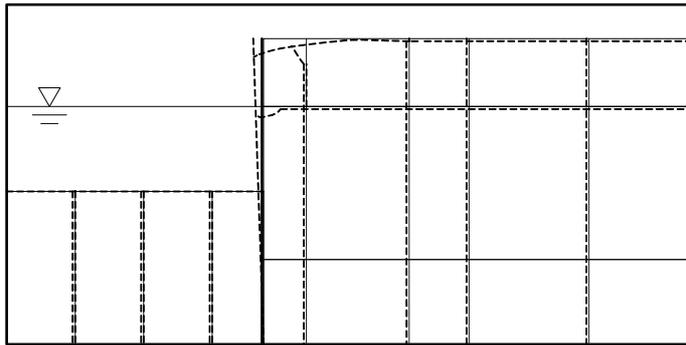


図7 加振直前までの地盤変形状況



写真2 加振直前の模型

杭のモーメントと土圧分布

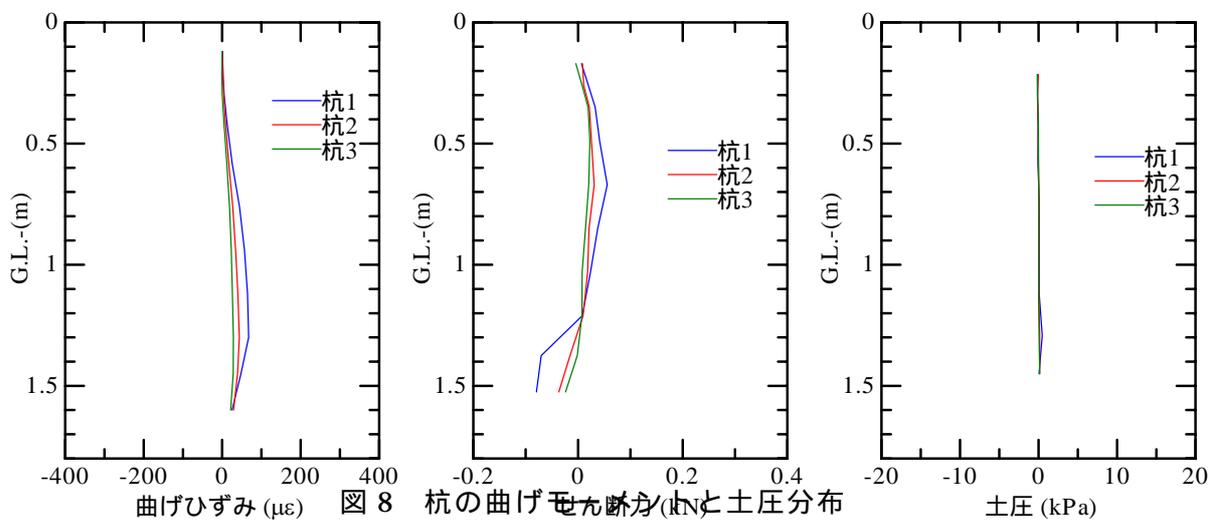


図8 杭の曲げモーメントとせん断力と土圧分布

矢板支持用のストラットの取外しにより杭に生じた杭の曲げひずみ、せん断力、及び土圧の深度方向分布を杭 1、杭 2、杭 3 杭について図 8 に示す。隣り合う深度のひずみ測定値の差からせん断力を、またせん断力の差から土圧を求めた。全体的に杭に発生した曲げひずみは小さく、またせん断力と土圧も小さかったが、杭の曲げモーメント分布や土圧は杭位置によって大きく異なり、護岸に近い杭ほど杭に大きな土圧が作用した。

ii) 振動実験

間隙水圧及び加速度応答

加振時に振動台で測定した加速度時刻歴を図 9 に示す。加振方向に直行する方向（水平方向及び鉛直方向）の加速度は、加振方向に比べて十分に小さく、設定した実験条件通り水平 1 方向のみの加振となっていることがわかる。

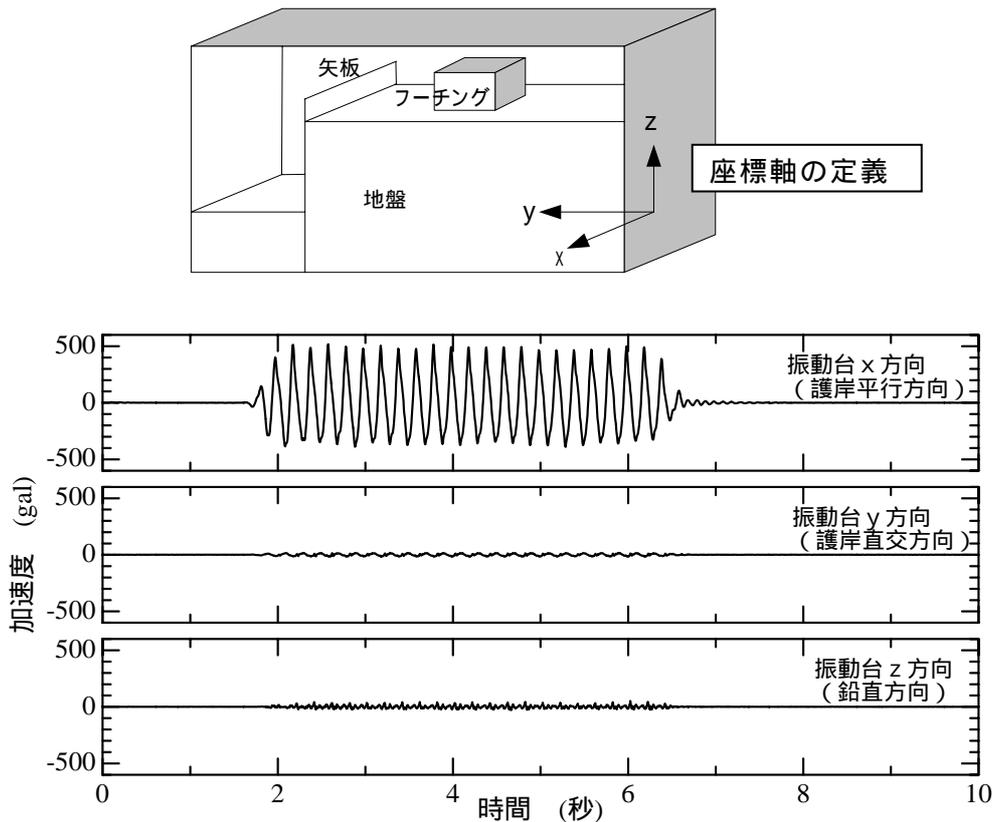


図9 振動台の加速度

図10、11に測線-1および測線-2で測定した加速度と過剰間隙水圧の時刻歴を示す。このケースの地盤中の加速度計は加振方向の加速度を測定するように設置した。測線1、2の何れにおいても最下層(Dr=90%豊浦砂層)の過剰間隙水圧は有効上載圧よりも小さく、また加速度は入力波形とほぼ一致しており、液状化には至っていない。Dr=35%の豊浦砂層は、過剰間隙水圧は有効上載圧に達し液状化したが、加速度波形は入力波形と極めて似たものとなっており、加速度振幅の減衰やスパイク状の加速度といった液状化した土特有の加速度波形は見られない。Case2-1の液状化層は加振方向の両側を剛壁に、また上面と下面を非液状化層に挟まれていることにより、せん断変形が極めて生じにくく、たとえ過剰間隙水圧比が100%まで上昇しても土槽とほぼ一体となって運動したものと考えられる。

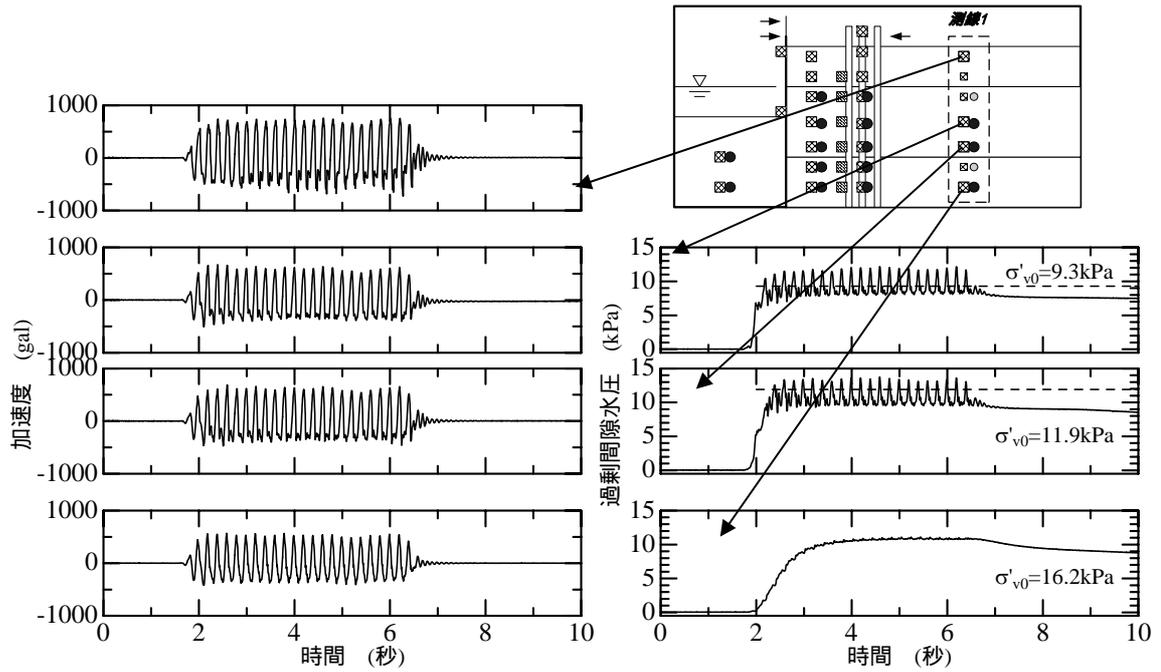


図 10 測線-1 (陸側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

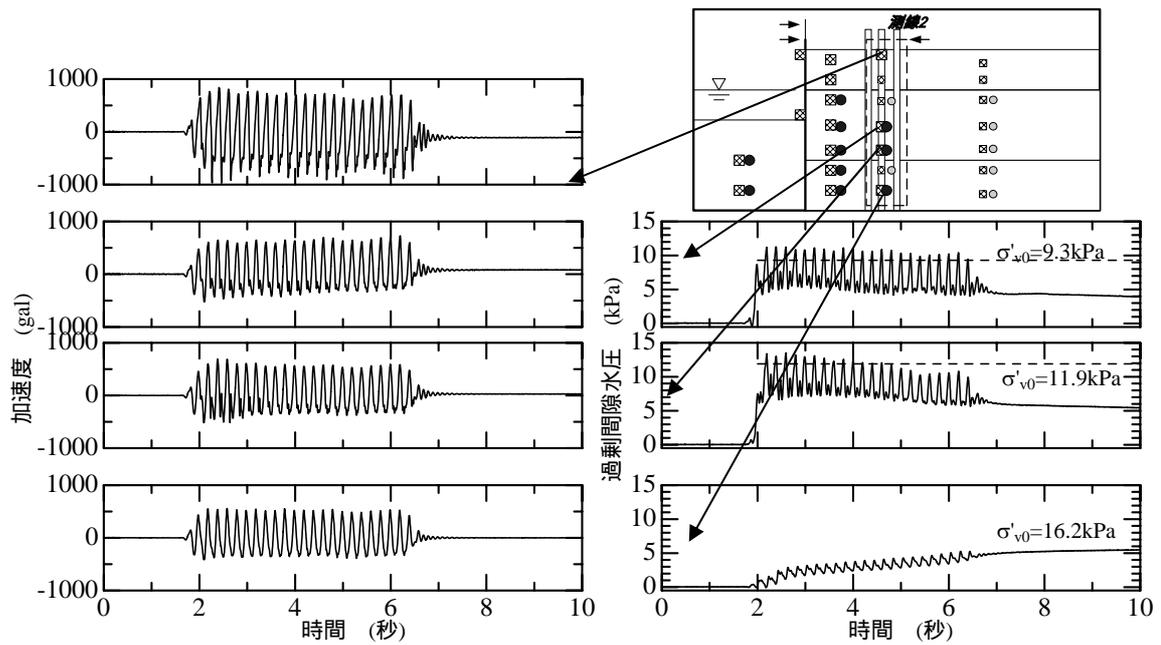


図 11 測線-2 (杭の横) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

図 12、13 は矢板近くの測線 3 と海側の測線 4 における地盤の加速度と過剰間隙水圧の時刻歴である。この層の加速度は、測線 1、2 の $Dr=35\%$ 豊浦砂層と同様に入力加速度とほぼ等しかった。測線 4 では、過剰間隙水圧が有効上載圧に達したが、ここでも加速度波形は入力波形と類似のものであった。

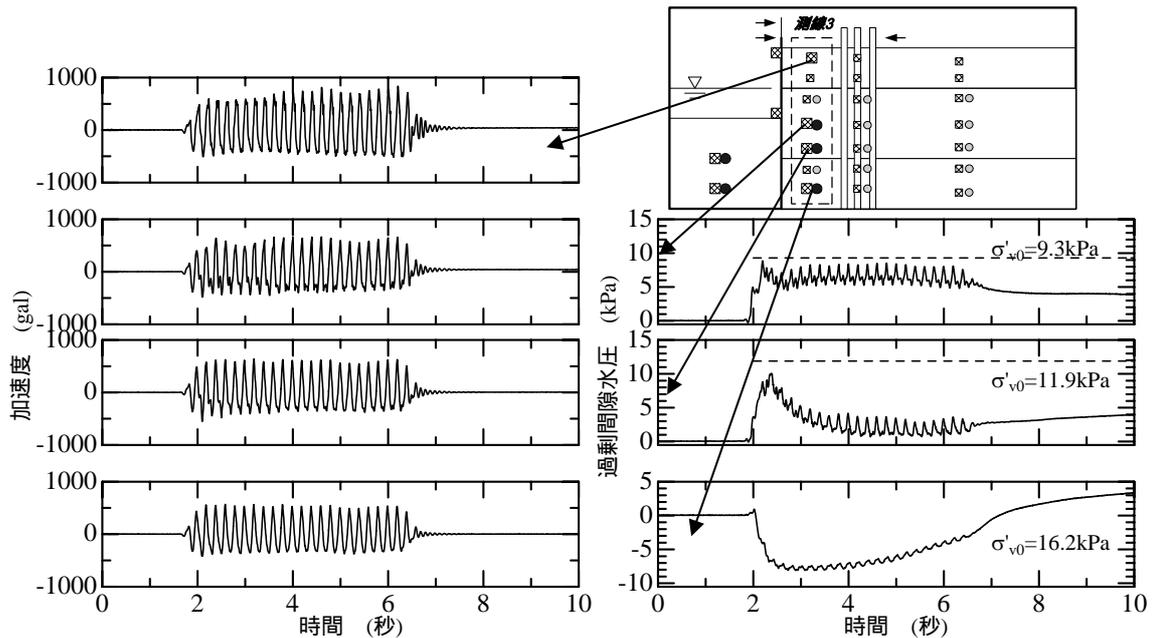


図 12 測線-3 (矢板と杭の間) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

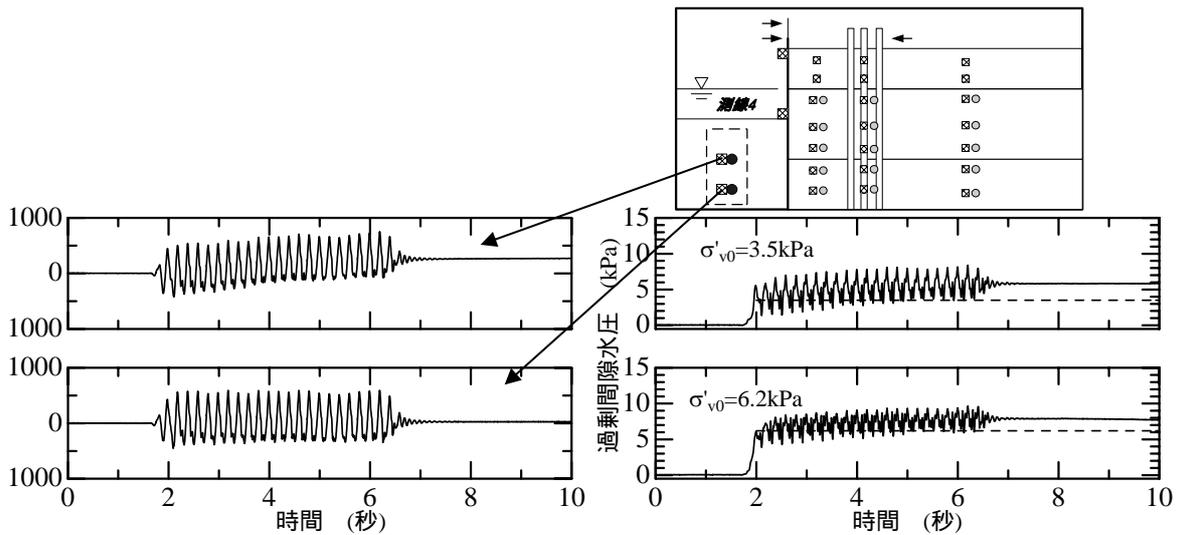


図 13 測線-4 (海側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

地盤の変形

Step1 加振後の地盤の変形状況を図 14、写真 3 に示す。加振により矢板頭部が大きく海側に変位した。3 分割した矢板のうち中央矢板の板頭部変位量は約 37cm であった。

杭のモーメントと土圧

加振終了直後 (t=8 秒) での杭の残留曲げひずみ、せん断力、及び土圧の深度分布を杭 1、杭 2、杭 3 杭について図 15 に示す。杭の曲げモーメント分布は杭位置によって大きく異なっている。杭の曲げモーメント分布を微分することによってせん断力及び土圧を求めた。杭 1~3 のせん断力の分布は、杭 1 (海側) から杭 3 (陸側) に向い増加している。ま

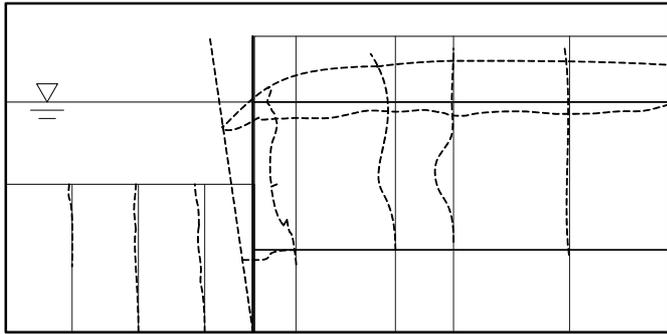


図 14 加振後の地盤変形状況



写真 3 加振後の模型

た、何れの杭もせん断力は地盤中央部から深部に向かって単調に増加していることから、最下層の $Dr=90\%$ 豊浦砂層も水平変位し、その結果最下層での土圧も海側に向かって作用したものと考えられる。

モーメントを二回微分することによって得られた土圧は、全体的に粗砂層下面付近で大きくなり、液状化層中では土圧は小さい。粗砂層では護岸から離れた杭 3 の土圧が大きく、最下層では逆に杭 1 の土圧が大きい。前述した地盤の変形により、加振終了時には杭 3 の位置では粗砂層底面が約 15cm 沈下したので、杭 3 の土圧が最大となっている深度は、この時点での粗砂層下面とほぼ対応している。

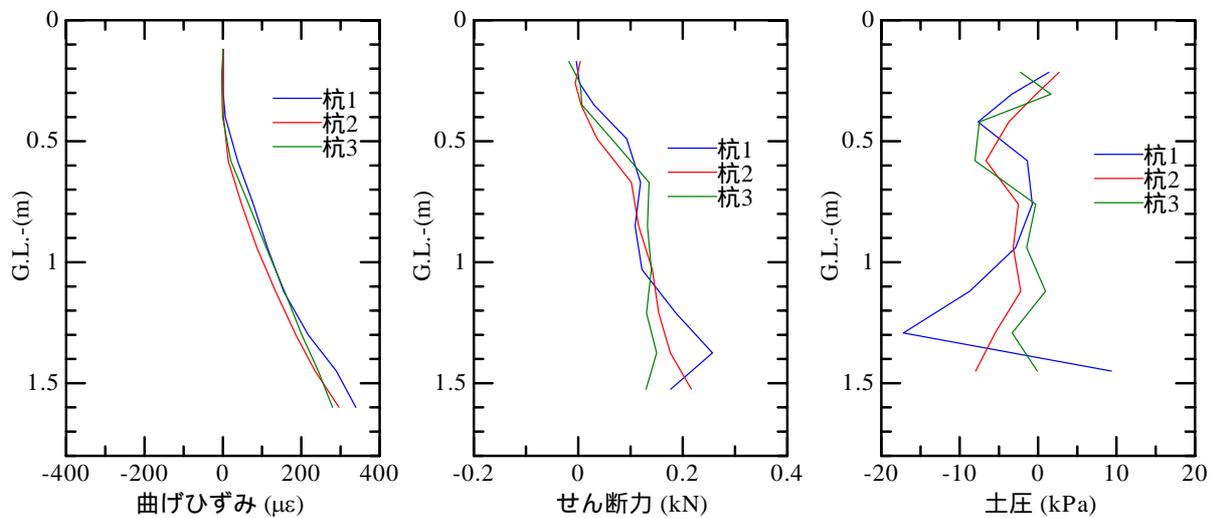


図 15 加振後の残留ひずみ分布と、せん断力・土圧の分布 (杭 1、杭 2、杭 3)

2) Case2-2 実験結果

i) 矢板ストラット取外し時

地盤の変形

加振の直前に、地盤作成時に矢板を支持するためのストラットを取外し、振動台を中立位置まで移動した。これによって生じた地盤変位状況を図 16 に示す。矢板頭部での水平変位は 101mm であった。後述するようにこの値は Case2-1 での値 (54mm) の約 2 倍であったが、振動台の中立位置への移動中の小さな振動による変位が大きく、ストラットの取外しによる変位は Case2-1 と同程度であった。

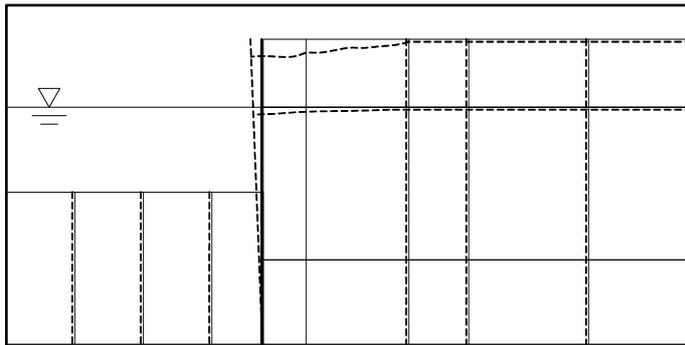


図 16 加振直前までの地盤変形状況



写真 4 加振直前の模型

杭のモーメントと土圧分布

矢板支持用のストラットの取外および中立点への移動により杭に生じた杭の曲げひずみ、せん断力、及び土圧の深度分布を杭 1、杭 2、杭 3 杭について図 17 に示す。このケースでは杭頭の回転を拘束しているために杭に発生したモーメントは小さいが、Case2-1 と比較すると地盤の変位量が大きいため全体的に土圧は大きくなった。

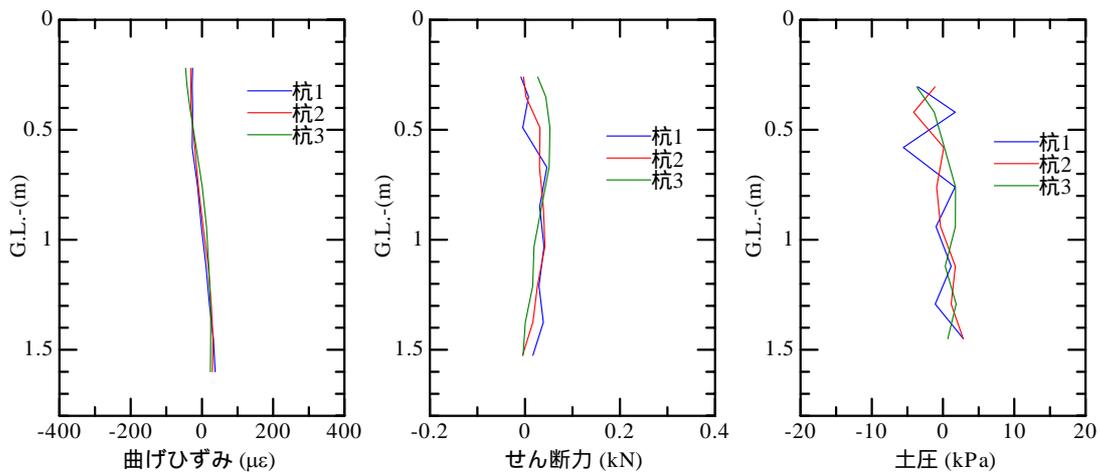


図 17 杭の曲げモーメントと土圧分布

ii) 振動実験

間隙水圧及び加速度応答

振動台で測定した加速度時刻歴を図 18 に示す。振動台の加速度は、水平方向（x、y 方向）は Case2-1 および後述する Case2-3 とほぼ一致し、今年度行った実験での水平方向の入力加速度の再現性は高いものであった。平成 14 年度実験での水平加速度波形と比較すると、波形および加速度の大きさはほぼ一致するが、入力する方向が異なっている。すなわち、図 18 では加速度の正側にややとがった波形となっているのに対し、平成 14 年度の入力波形は負側に尖部がある。

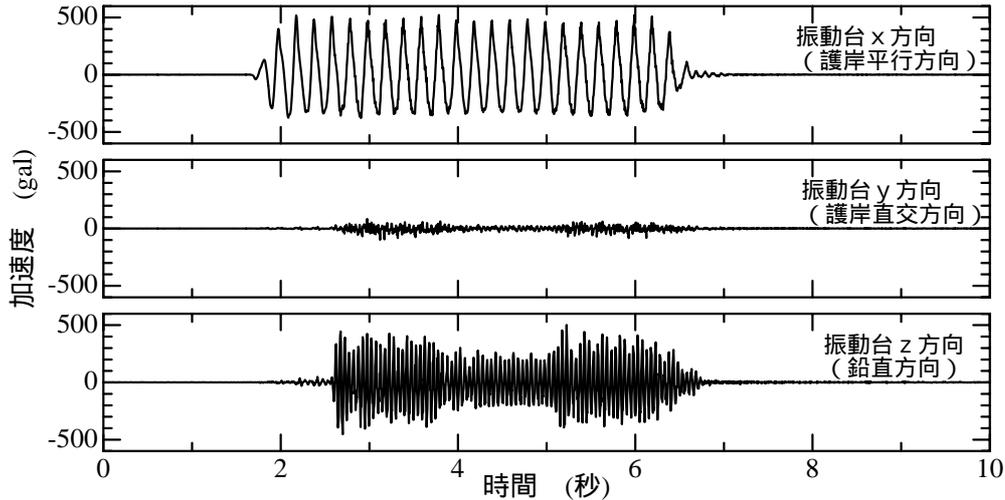


図 18 振動台の加速度

図 19、20 に測線 1 および測線 2 で測定した加速度と過剰間隙水圧の時刻歴を示す。なお、Case2-2 の地盤中加速度計は、加振方向（x 方向）の加速度を測定するように設置した。測線 1、2 の何れにおいても最下層（ $D_r=90\%$ 豊浦砂層）の過剰間隙水圧は有効上載圧以下で、加速度は入力波形とほぼ一致しており、液状化には至っておらず、これらは Case2-1 の結果と極めて類似のものであり鉛直加振の影響がほとんど見られない。 $D_r=35\%$ の豊浦砂層中では、過剰間隙水圧が Case2-1 と同程度まで水圧が上昇し液状化しているが、その波形には鉛直加振に対応した振動数 20Hz の成分が乗っている。これは、鉛直加振により鉛直全応力が加振中に変化することによるものである。加速度波形にも若干 20Hz の成分が乗っているが、Case2-1 とほぼ同様のものとなっている。

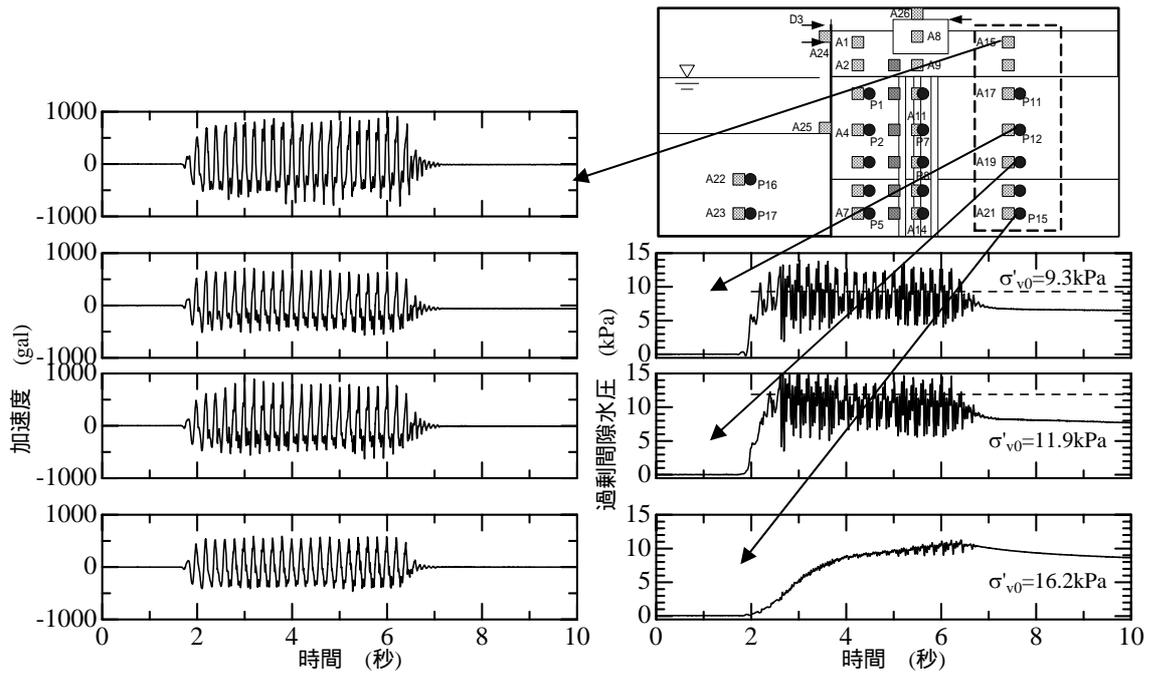


図 19 測線-1 (陸側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

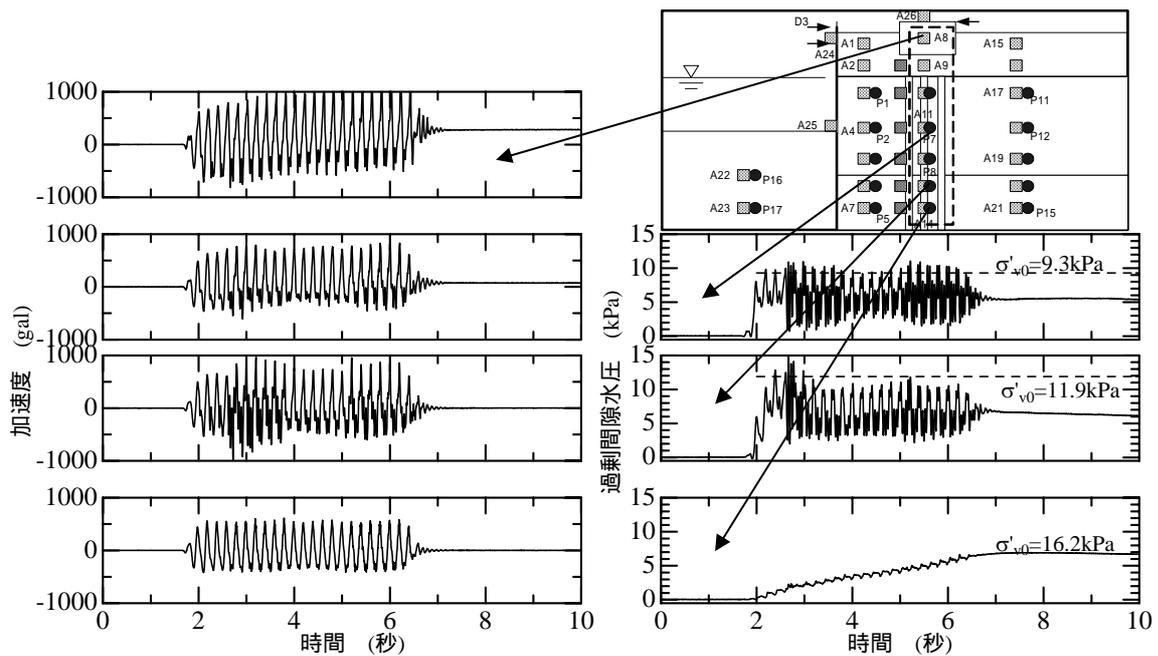


図 20 測線-2 (杭の横) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

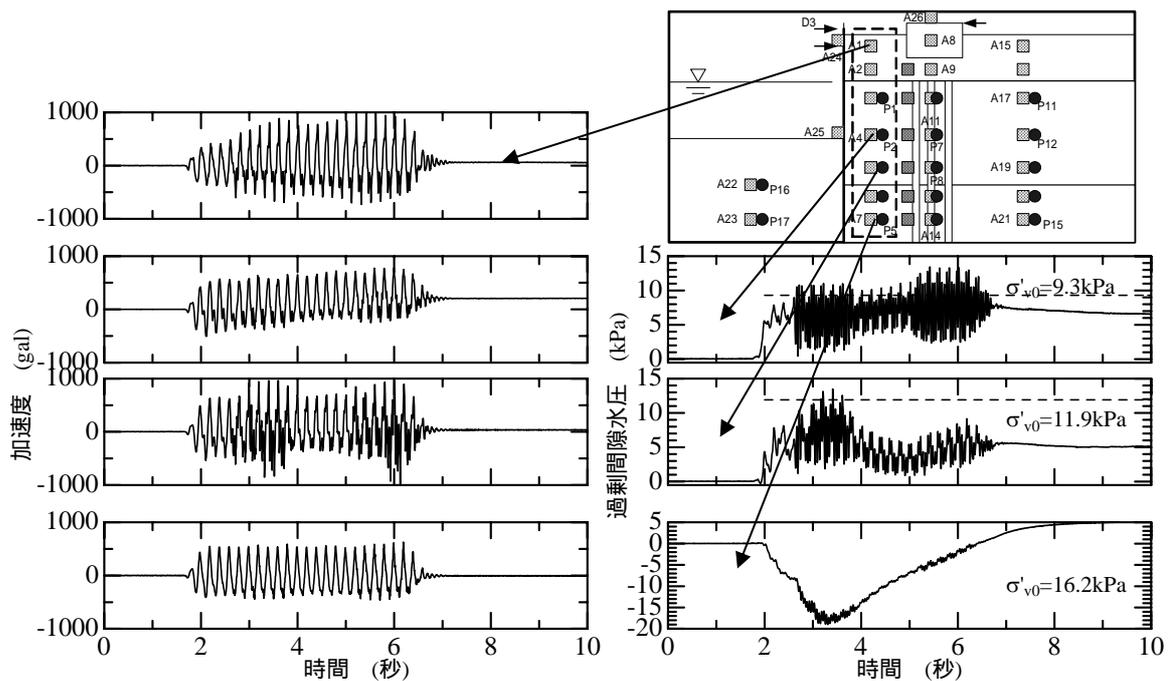


図 21 測線-3 (矢板と杭の間) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

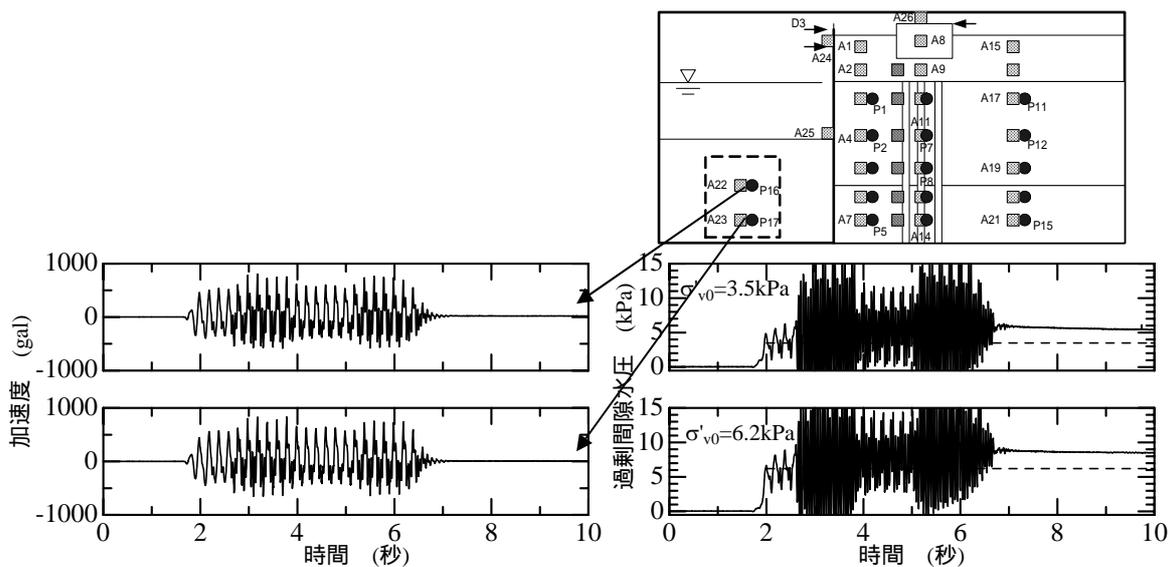


図 22 測線-4 (海側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

図 21、22 は矢板近くの測線 3 と海側の測線 4 における地盤の加速度と過剰間隙水圧の時刻歴である。測線 1、2 と同様に、間隙水圧は鉛直加振の影響を強く受けており測線 4 で特に顕著である。

地盤の変形

加振後の地盤の変形状況を図 23 および写真 5 に示す。加振により中央の矢板頭部が 59cm 海側に変位し、陸側の $Dr = 35\%$ 豊浦砂層とその上の粗砂層が海側に変位した。加振による矢板の変位量は Case1-1 のおよそ 1.5 倍であった。

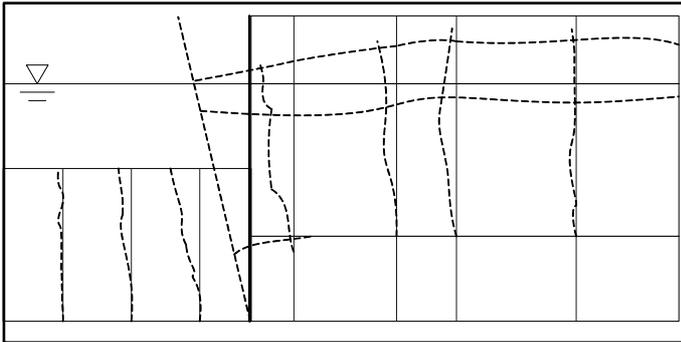


図 23 加振後の地盤変形状況



写真 5 加振後の模型

杭のモーメントと土圧

加振終了直後（ $t=8$ 秒）での杭の残留曲げひずみ、せん断力、及び土圧の深度分布を杭 4、杭 5、杭 6 杭について図 24 に示す。

杭 1～3 のせん断力の分布には次のような特徴が見られる。すなわち、杭頭～地盤浅部のせん断力は、杭 4（海側）から杭 5（陸側）に向い減少し、杭 6 では杭頭でのせん断力がゼロか負値となっている。これは、これらの杭が地盤から受ける土圧に違いがあり、杭頭の変位が等しいように拘束されているためである。杭が地盤から海側に向かって受ける流動圧は、陸側の杭で大きく海側になるほど小さくなることわかる。また、何れの杭も、せん断力は地盤深部に向かって単調に増加していることから、最下層の $Dr=90\%$ 豊浦砂層も水平変位し、その結果この層での土圧も海側に向かって作用したものと考えられる。

曲げひずみを二階微分することによって得られた土圧は、杭 6 では粗砂層下面付近で土圧が大きくなり、液状化層中では土圧は小さくなっている前述した地盤の変形により、加振終了時には杭 6 の位置では粗砂層底面が約 15cm 沈下したので、杭 6 の土圧が最大となっている深度は、この時点での粗砂層下面とほぼ対応している。また、杭 4 は地盤の変形により杭頭部（フーチング下面）から数センチが露出しており、杭 4 位置では粗砂層厚が大きく減少したことにより、杭 4 での粗砂層での土圧が杭 6 ほど大きくなかったものと考えられる。

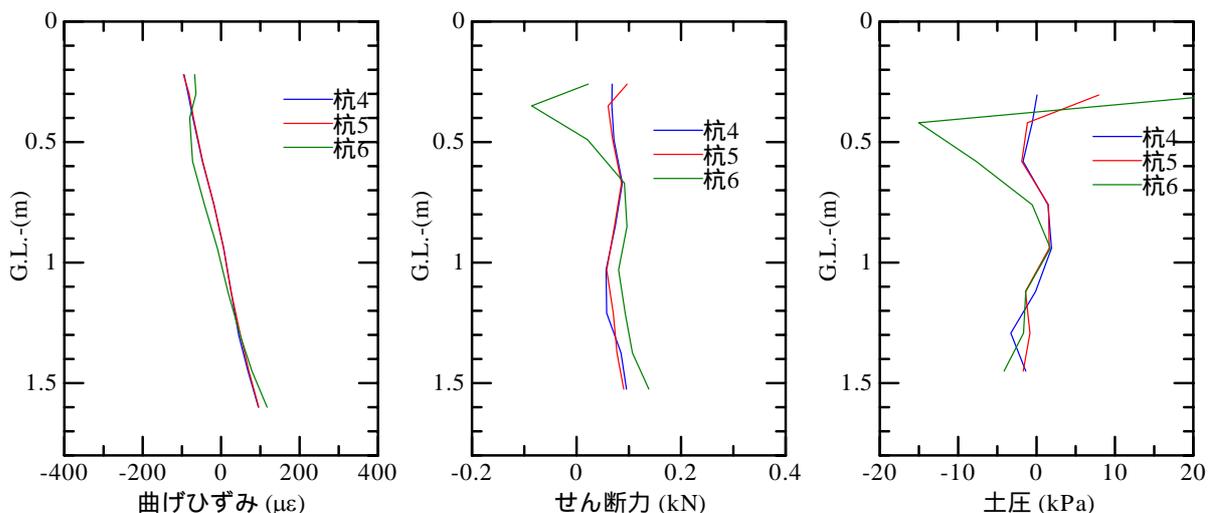


図 24 加振後の残留ひずみ分布とせん断力、土圧の分布（杭 4、杭 5、杭 6）

3) Case2-3 実験結果

i) 矢板ストラット取り外し時

地盤の変形

ストラットの取外しおよび振動台の中立点への移動により生じた地盤変位状況を図 25 に示す。矢板頭部での水平変位は 100mm で、矢板近傍の地盤に変位が見られた。ストラットの取り外し直後（中立点への移動前）の変位は 60mm で、Case2-1、Case2-2 と同程度であった。

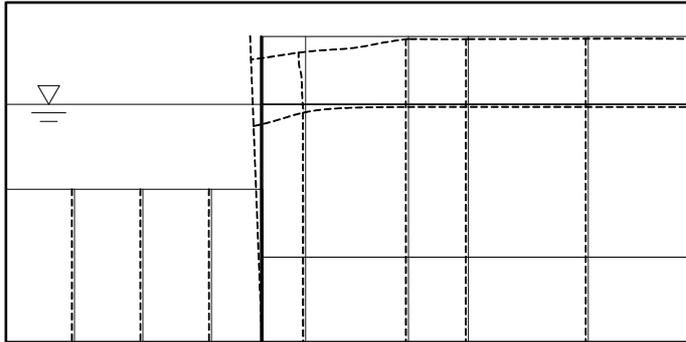


図 25 加振直前までの地盤変形状況



写真 6 加振直前の模型

杭のモーメントと土圧分布

矢板支持用のストラットの取り外しにより杭に生じた曲げひずみとそれを微分して得られたせん断力及び土圧分布を図 26 に示す。全体的にモーメント及び土圧は小さく、Case2-2 と同様の分布となった。

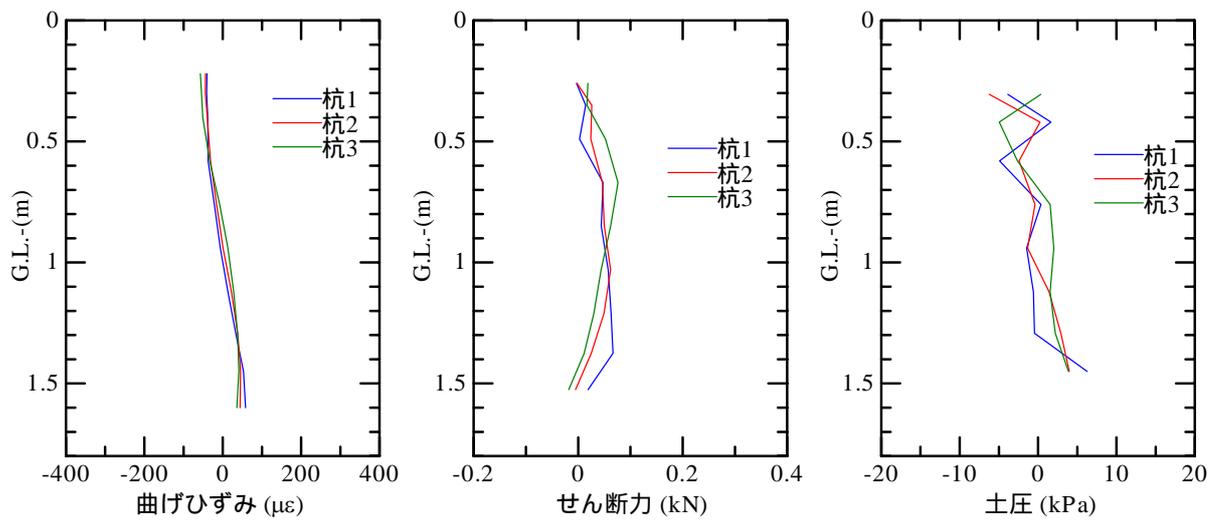


図 26 杭の曲げひずみ、せん断力と土圧分布

ii) 振動実験

間隙水圧及び加速度応答

振動台の加速度時刻歴を図 27 に示す。y 方向の加速度波形は Case2-1、2-2 の x 方向と良く一致しており、また加振方向に直行する方向 (x 方向及び z 方向) の加速度は、加振方向に比べて十分に小さい。

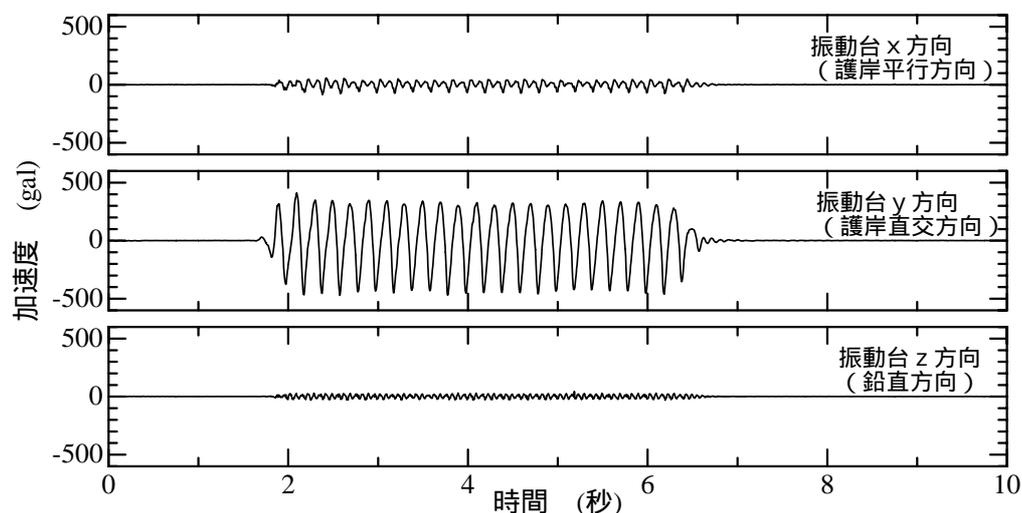


図 27 振動台の加速度

図 28、29 に測線-1 および測線-2 で測定した加速度と過剰間隙水圧の時刻歴を示す。測線 1 における $Dr=35\%$ 豊浦砂層の過剰間隙水圧は、液状化層では加振開始後の 2 波目ではほぼ有効上載圧に達し、液状化したことがわかる。最下層 ($Dr=90\%$ の豊浦砂層) での過剰間隙水圧は有効上載圧までは達しておらず、Case2-1 及び 2-2 と極めて類似のものとなっている。

測線 2 の液状化層の過剰間隙水圧は、2 波目で有効上載圧に達した後、 $t=3$ 秒以降は有効上載圧よりも小さくなっている。後述するスパイク状の加速度応答から判断してもこの位置において $t=3$ 秒以降も液状化しているものと判断されるので、 $t=3$ 秒以降の過剰間隙水圧の低下は矢板の変形に伴う地盤のせん断変形の進行と有効上載圧の減少によるものと考えられる。

応答加速度については、最下層 ($Dr=90\%$ 豊浦砂層) では波形、振幅共に振動台加速度にほぼ近いものとなっている。液状化層 ($Dr=35\%$ 豊浦砂層) での加速度は、加振開始後の 1 波目は入力波形とほぼ一致しているが、2 波目以降は急激に減衰し、部分的に極めて短周期でスパイク状の大きな加速度波形が見られ、過剰間隙水圧の応答に対応したものとなっている。特に測線 2 の液状化層では、加速度の正側で大きなスパイク状の加速度が見られる。ここで、加速度は流動方向の逆 (海側から陸側に向かう方向) を正としている。スパイク状の波形は非対称であり、地盤が海側に変位したときに大きなスパイク状の加速度が生じていることがわかる。

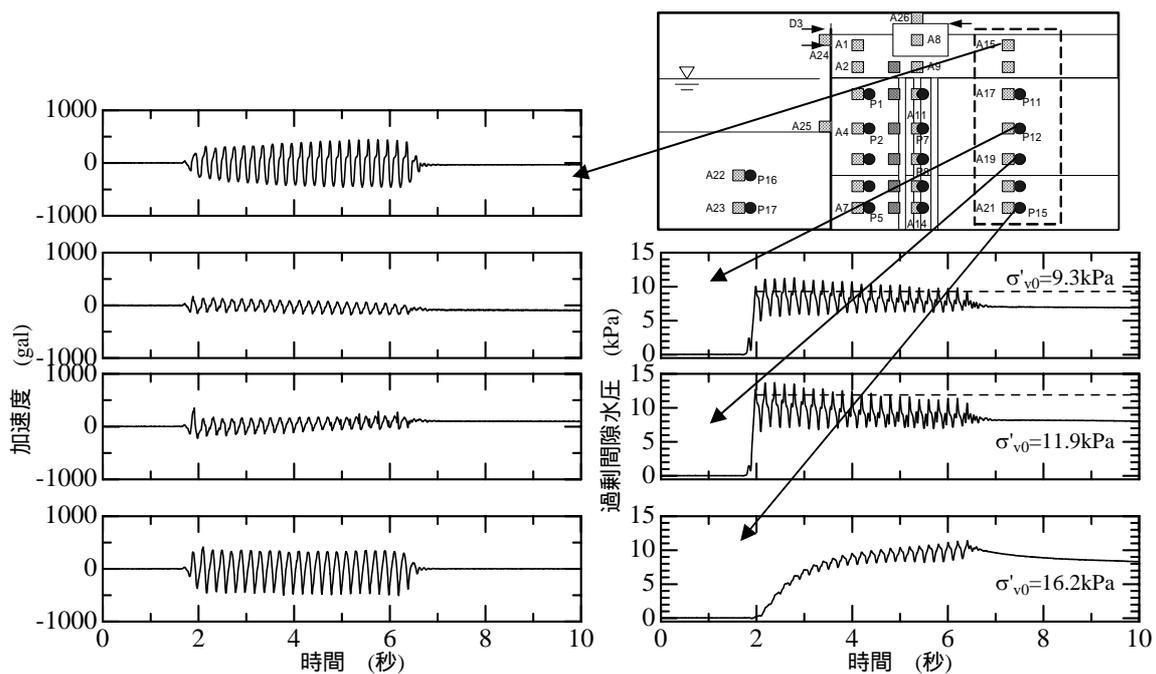


図 28 測線 1 での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

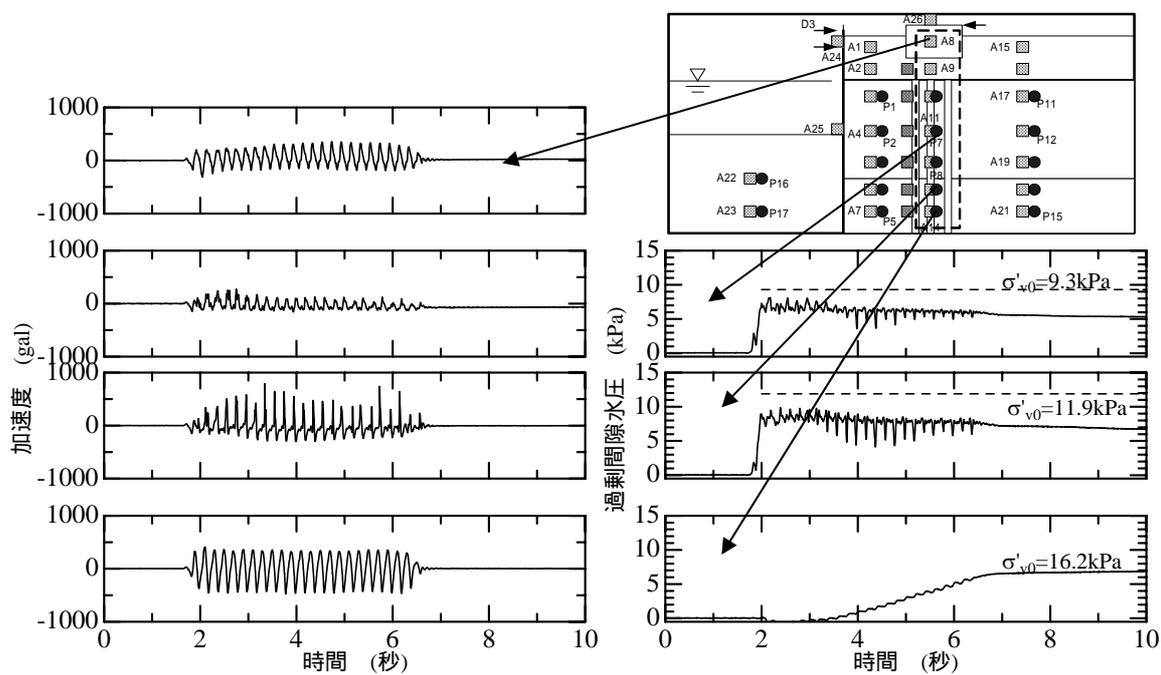


図 29 測線 2 での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

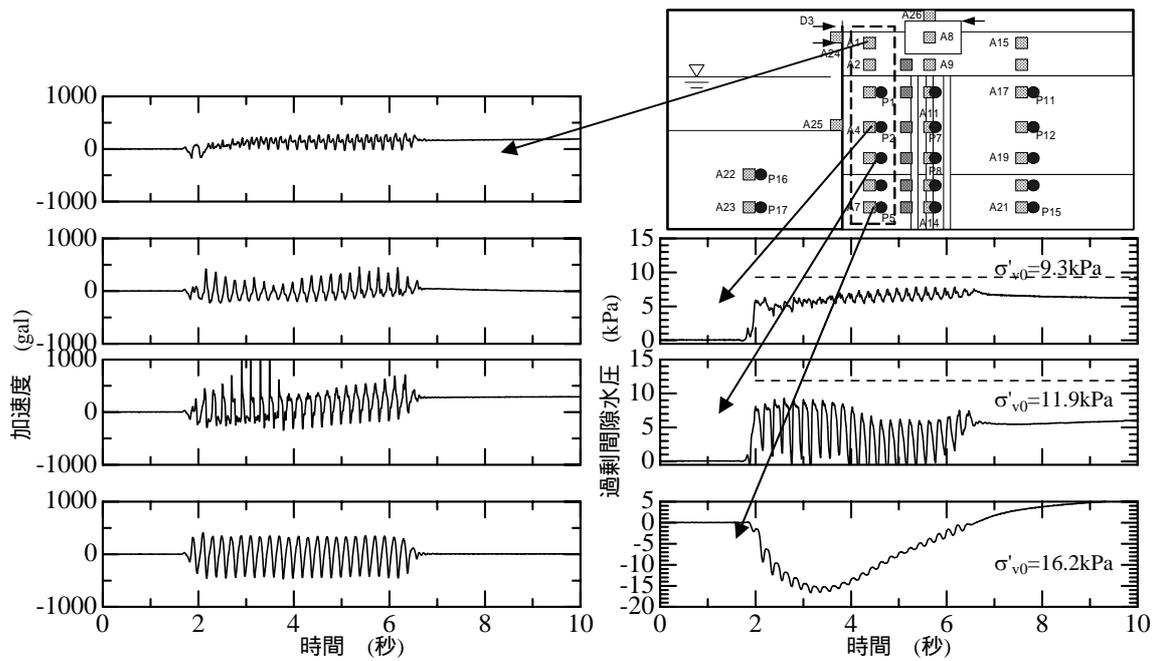


図 30 測線 3 での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

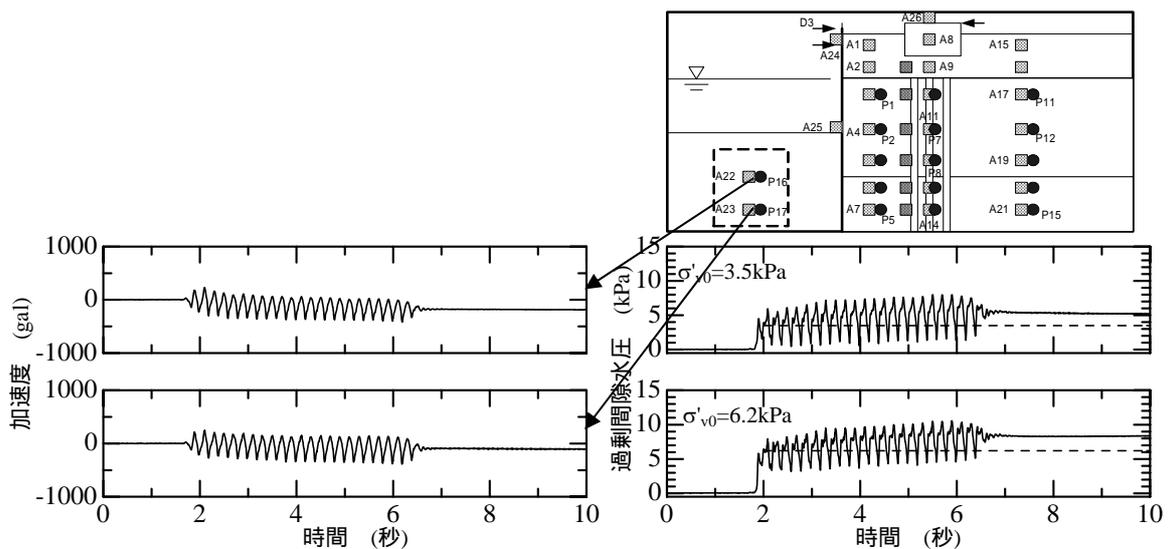


図 31 測線 4 での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

図 30、31 は矢板近くの測線 3 と海側の測線 4 における地盤の加速度と過剰間隙水圧の時刻歴である。測線 3 での過剰間隙水圧は、液状化層では有効上載圧に達しなかったが、加速度波形には波形の乱れやスパイク状の波形が見られ、大きな初期せん断応力が作用していることがわかる。Dr=90%の最下部層での加振中の過剰間隙水圧は負圧となっている。これは矢板の変形によって最下部層の矢板近傍でせん断変形が生じたことによるものであると考える。

測線 4 では、過剰間隙水圧が 2 波目で有効上載圧に達し、液状化したことがわかる。

地盤の変形

加振後の地盤の変形状況を図 32、写真 6 に示す。加振により矢板頭部が 59cm 海側に変位した。

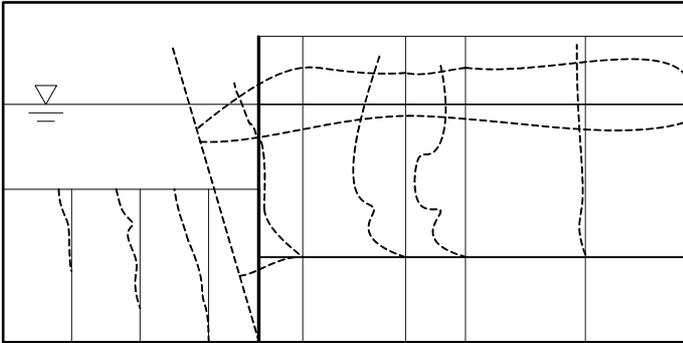


図 32 加振後の地盤変形状況



写真 7 加振後の模型

杭のモーメントと土圧

加振終了直後 (t=8 秒) での杭の残留曲げひずみ、せん断力、及び土圧の深度分布を杭 1、杭 2、杭 3 杭について図 33 に示す。

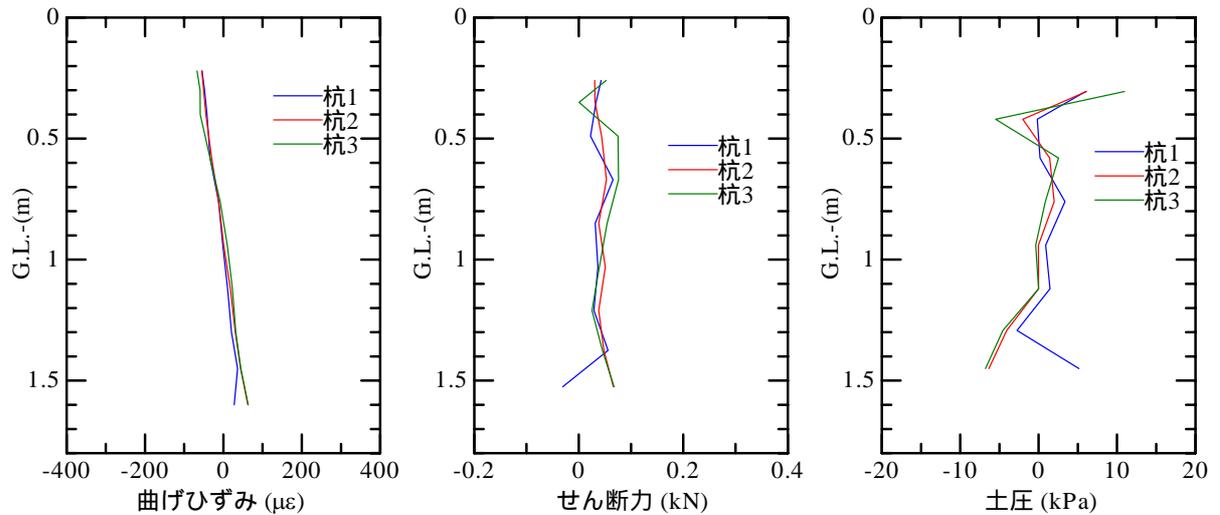


図 33 杭の曲げモーメントと土圧分布

このケースでは、モーメント分布、せん断力分布、土圧分布共に杭による差が他のケースに比べて小さい。また、これらの値も他のケースに比べて小さいものとなっている。

4) 実験結果の比較および考察

i) 矢板奥行き方向の分割の影響

図 34 は今年度および H14 年度の実験での矢板水平変位の時刻歴である。3 分割した矢板のうち中央矢板の頭部変位量である。今年度と H14 年度の矢板は各矢板の幅が異なっており、H14 年度の矢板は各矢板とも幅 33cm であるのに対し、今年度の矢板は中央部が幅 90cm、両側の矢板が幅 5cm である（図中の写真参照）。護岸に直角方向に加振したケースでは、矢板の変位量は矢板の分割を変えることにより 390mm から 510mm に増加し、護岸平行方向に加振したケースでも 140mm（Case1-2）から 400mm（Case2-1）に増加した。矢板の分割は矢板の変位及び矢板近傍地盤の挙動に大きな影響を及ぼすことが分かる。

H14 年度の実験及び Case2-1 では加振終了と同時に変位の増加も停止したが、500mm を超える大きな変位が生じた Case2-2 と Case 2-3 では加振終了後も変位が数秒間に亘り増加し続けた。分割した矢板間には幅 50mm のゴムメンブレンを貼り付け砂及びレキが矢板間から漏出するのを防止した。しかしながら、変位が大きなケースでは中央部と端部の矢板の相対変位が 50mm よりも大きかったために加振後半から加振終了後の数秒間にわたってかなりの量のレキと砂が漏出した（図 34 中の写真参照）。Case2-2 と Case 2-3 で観察された加振終了後の矢板変位は、地盤材料の漏出によるものと考えられる。

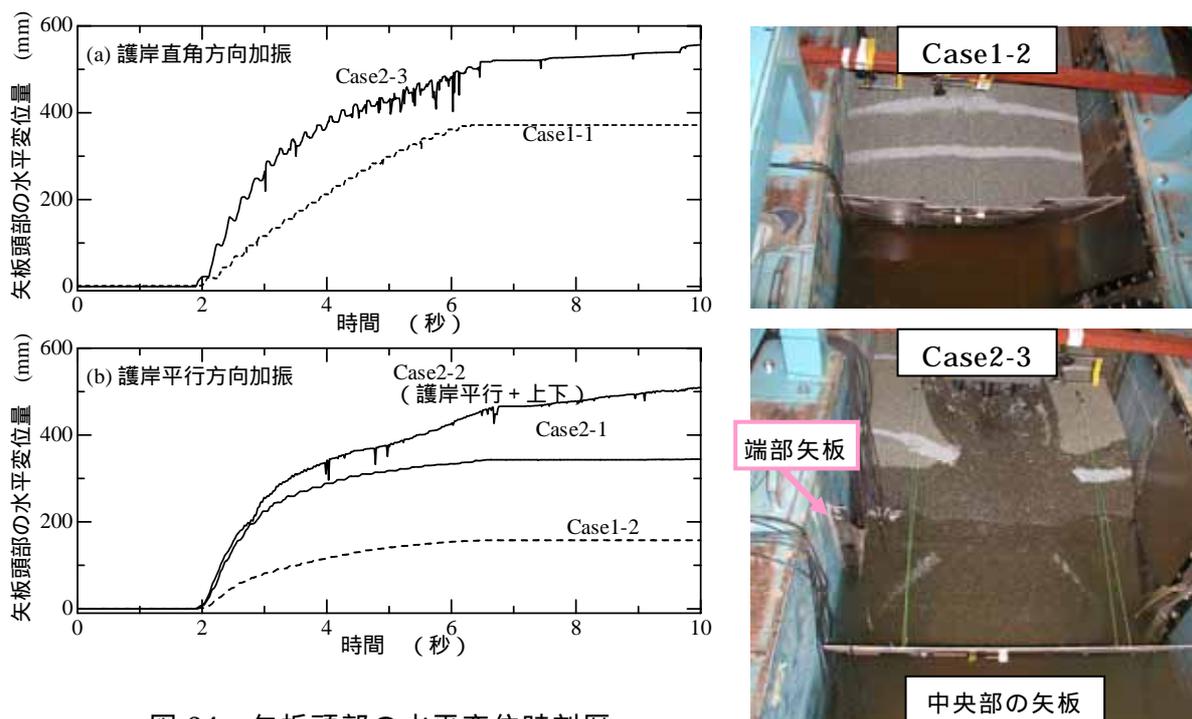


図 34 矢板頭部の水平変位時刻歴

ii) 鉛直加振の影響

Case2-1 と Case 2-2 は水平 1 方向加振（護岸平行方向）と水平（護岸平行方向）・鉛直 2 方向加振の実験であり、加振条件としては鉛直加振の有無のみが相違点である。この他、Case2-1 と Case 2-2 では杭頭の固定条件が自由と回転拘束とで異なるが、加振による杭の

変位量は地盤に比べて十分に小さいため、この杭頭の拘束条件の違いが地盤に及ぼす影響は杭近傍を除き極めて小さいものと考えられる。

図 35 はこれら 2 ケースの矢板水平変位量の時刻歴である。これら 2 ケースでの水平方向の加速度時刻歴はほぼ一致している。Case2-2 では水平加振開始 ($t=1.8$ 秒) から $t=2.6$ 秒までの間 (図中の) の鉛直加速度はほぼゼロであり、この間は Case2-1 と同じ実験条件である。この間の矢板の変位量はほぼ一致しており、実験の高い再現性が確認できる。続く $t=2.6$ 秒から $t=3.9$ 秒の間 () は鉛直加速度が約 400gal と大きな時間帯であり、この間の矢板変位の増加量は Case2-2 の方が約 1.7 倍大きい。図中の の時間帯 ($t=3.9$ 秒 ~ 5.1 秒) は鉛直加速度が 200gal と小さく、その間の変位量増分は Case2-2 の方が約 1.2 倍大きい。鉛直加速度が約 400gal と再び大きな の時間帯では、Case2-2 の方が 2 倍以上大きい。これより、鉛直方向の加振は地盤変形量の増加に寄与しており、鉛直加速度の大きさに応じて矢板の変位量が増加することが分かる。

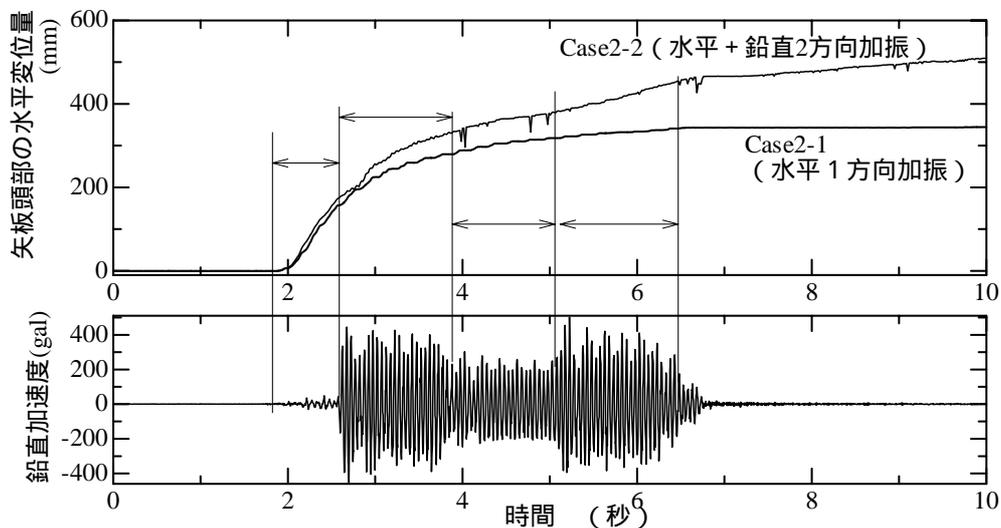


図 35 鉛直加振の有無が矢板の水平変位量に与える影響

iii) フーチング重量の影響

本節では、Case2-3 を Case1-1 と比較することにより、フーチング重量の影響について議論する。Case2-3 はフーチングの質量を 170kg とし、杭 - フーチング系の固有振動数は 7.0Hz であった。一方、Case2-1 でのフーチング質量は 21.6kg であり、固有振動数は 14Hz であった。この他、前述した矢板の分割が異なること以外、これら 2 ケースの実験条件は同一である。

入力加速度とフーチングの応答加速度の関係を図 36 に示す。フーチングの加速度は、1 波目は入力加速度とほぼ一致しているが、地盤が液状化した 2 波目以降は位相が若干遅れ、振幅は増幅した。地盤が液状化し剛性失うと、杭は突出杭のように挙動し固有振動数が小さくなる。加振開始後、過剰間隙水圧の上昇に伴って地盤の剛性が低下してゆき、杭-フーチング系の固有振動数が入力波形のそれと一致する時間帯には過渡的な共振状態となる。今年度の模型杭-フーチング系は、地盤が無い突出状態で固有振動数が約 14Hz (Case1-1) または 7Hz (Case2-3) と入力よりも大きく、そのために共振状態は生じなかったが、

Case2-3 の固有振動数は入力振動数と比較的近づいたため、フーチングの応答加速度が大きくなったものと考えられる。

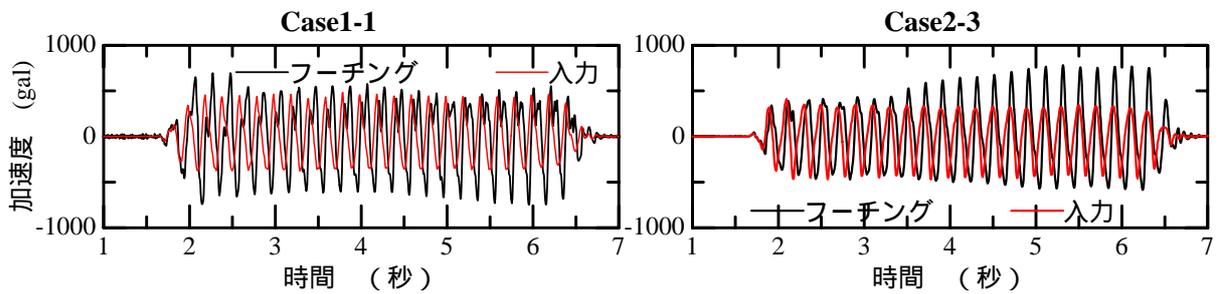


図 36 入力加速度とフーチングの応答加速度

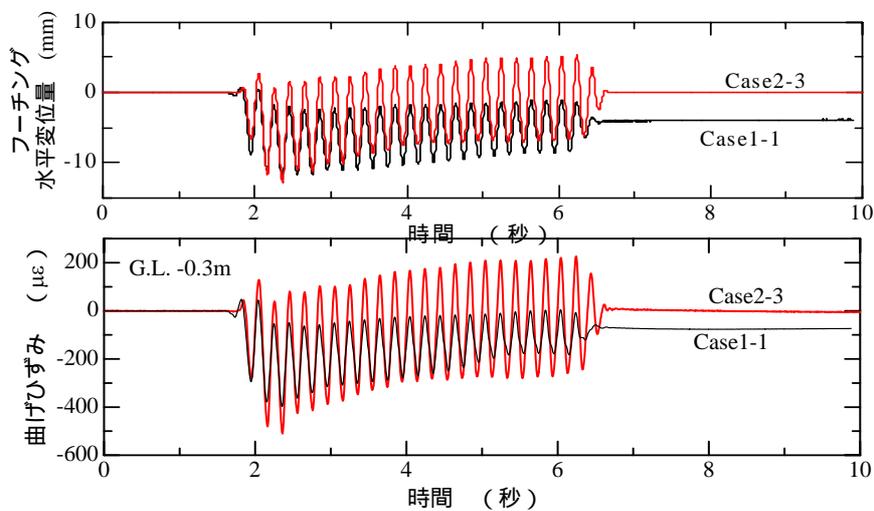


図 37 フーチング変位と杭頭曲げひずみの時刻歴

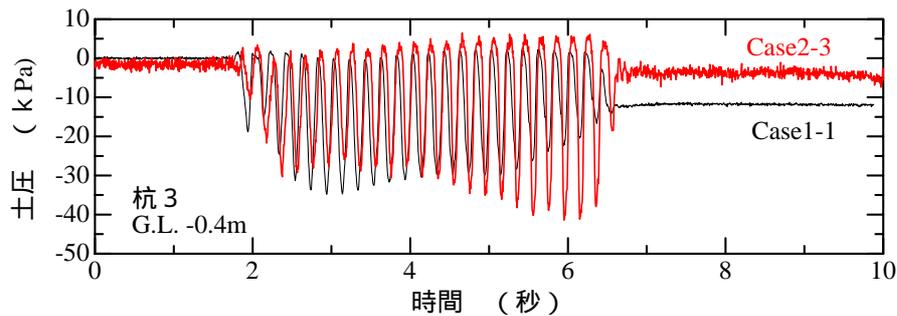


図 38 杭に作用した土圧の時刻歴

フーチングの水平変位と杭頭付近の杭 3 の曲げひずみ時刻歴を図 37 に示す。加振初期にはフーチング重量の差による違いは小さいが、地盤が液状化し特に Case2-3 のフーチング加速度応答が増加するに従って違いが顕著となっている。

図 38 は杭に作用した土圧の一例であり、杭 3 の G.L.-0.4m 付近（粗砂層と液状化層の境界）の土圧時刻歴を示した。土圧振幅は $t=5$ 秒程度まではフーチング重量による違いが小さいが、加振後半では Case2-3 の土圧振幅が大きくなっている。これは Case2-3 の加振後半ではフーチング及び杭の変位が大きく、地盤との相対変位も大きいために土圧振幅も

大きくなったものと考えられる。また、加振終了時の残留土圧は Case2-3 の方が Case1-1 よりも小さくなっている。これに対応してフーチングの残留変位や残留曲げひずみも Case2-3 の方が小さくなっている。これは、杭の大きな変位振幅による杭周辺地盤のゆるみの度合いが Case2-3 の方が大きかったためであると推察される。これに対応してフーチングの残留変位や残留曲げひずみも Case2-3 の方が小さくなっている。

図 39 は Case2-3 のフーチング変位、矢板変位、フーチング慣性力、杭 3 の G.L.-0.4m での土圧を比較したものである。この図で、変位量は陸側から海側へ向かう変位を正とし、また土圧及びフーチング慣性力も海側へ向かう力を正とした。

フーチングと矢板の変位の位相はほぼ 180° ずれている。すなわち、ある 1 加振サイクルの中で矢板が海側に最大変位する時刻には、フーチングは最も陸側に変位している。地盤が液状化した後の杭 - フーチング系の固有周期は 7Hz 程度であり、入力加速度 5Hz で強制振動するとフーチング入力の変位は近いのに対し、液状化した地盤の固有周期は 5Hz 以下であると推察され、地盤は入力と逆位相に近いものとなっている。H14 年度および本年度の杭 - フーチング系の固有周期は入力の周期よりも大きいため、地盤とフーチングがほぼ逆位相になったが、杭 - フーチング系の固有周期が入力よりも小さい場合には地盤とフーチングがほぼ同位相で振動するものと考えられる。

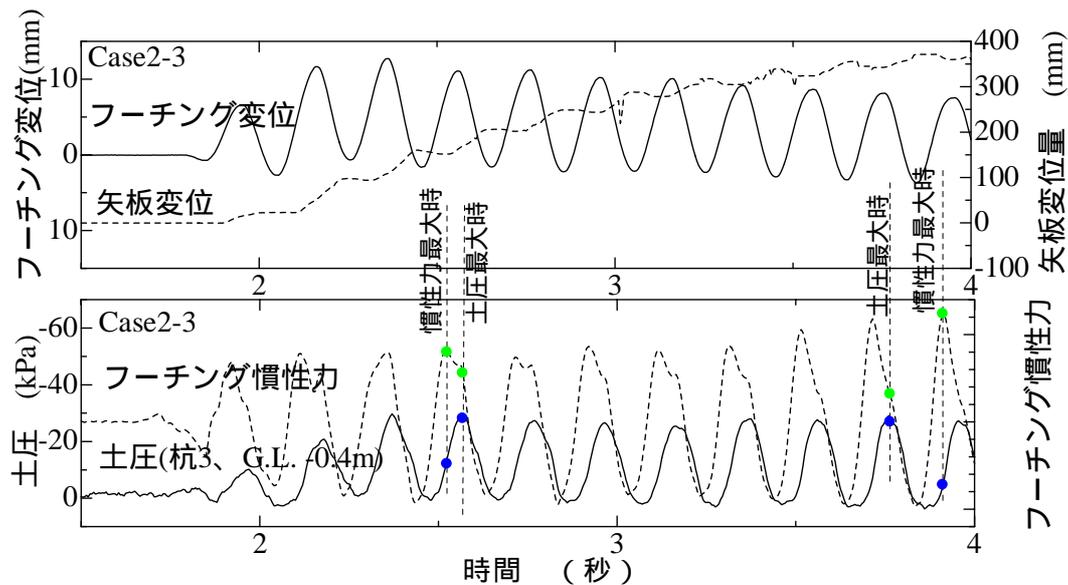


図 39 フーチング及び矢板の変位とフーチング慣性力及び土圧の関係

図 39 の $t=2.5$ 秒付近および $t=3.8$ 秒付近の破線で示した時刻は、慣性力および土圧が最大となる時刻である。図に示した G.L.-0.4m では、有効土被り圧が 6.4kPa、受働土圧が 24kPa ($\delta=35^\circ$ と仮定) であるのに対しピーク時にはおよそ 30kPa と受働土圧以上の大きな土圧が作用した。また、慣性力と土圧が同時にピークとなることは今回の実験の範囲ではなかった (図 40 参照)。

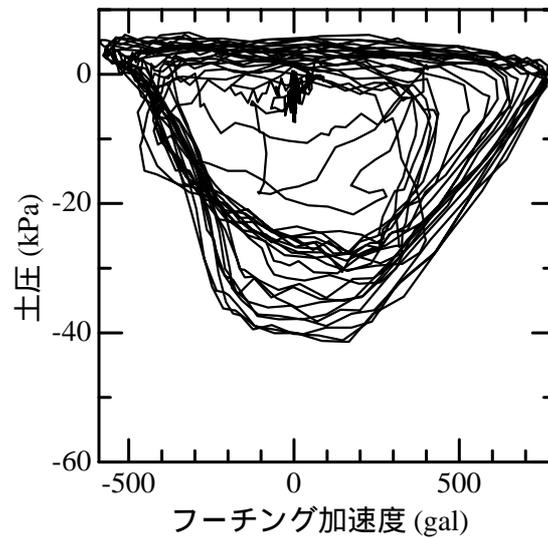


図 40 フーチング加速度と土圧 (杭 3、G.L.-0.4m) の関係 (Case2-3)

(d) 結論ならびに今後の課題

矢板護岸と護岸背後地盤に杭基礎を設置した試験体を3体作製し、これらの試験体を、護岸に平行な方向、護岸に直交する方向、または護岸に平行な方向と鉛直の2方向に加振し、杭基礎及び地盤の応答を計測した。実験データを解析し、その結果、次のことが明らかとなった。

- 1) 土槽奥行き方向が短い場合には、加振方向の違いは地盤の液状化の程度に影響を及ぼし、護岸直交方向の加振が平行方向の加振よりも地盤の液状化の程度が大きくなる。また、平行方向の加振では、地盤の過剰間隙水圧が1に達した後も地盤は土槽と一体となって振動する。
- 2) 護岸の変位量は、護岸のセグメント長の影響を強く受ける。
- 3) 水平方向の振動に加え上下動は地盤の変形量の増加に大きく寄与し、上下方向の加速度が大きいほど地盤の変形量は大きくなる。
- 4) 杭頭の固定条件の違いにより杭のモーメント分布や杭の水平変位量には大きな差が生じるが、地盤の変位はほとんど影響を受けない。
- 5) 杭 - フーチング系の固有振動数が入力加速度の固有振動数よりも高い場合、フーチング質量が大きいほどフーチングの応答加速度および水平変位は大きくなり、杭周辺地盤のゆるみの程度は大きくなり、杭に作用する残留土圧及びフーチングの残留変位は小さくなる。

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
谷本俊輔 田村敬一 岡村未対	護岸背後の液状化により杭基礎に作用する流動圧に関する振動台実験	土木学会地震工学論文集, Vol. 27	2003.12
谷本俊輔 岡村未対 田村敬一	地盤の流動が杭基礎に及ぼす影響に関する実験的研究(速報)	土木学会第58回年次学術講演会、土木学会、徳島市	2003.9

(g) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 16 年度業務計画案

護岸背後にある杭基礎の破壊メカニズムを解明するため、平成 14 年度、15 年度に引き続いて比較的小規模の側方流動実験を行う。実験では土槽内に護岸を有する砂質地盤模型を作成し、護岸の背後地盤に杭基礎模型を設置し、杭頭部には上部構造模型を取り付ける。この模型を水平と鉛直に加振し加振方向の違いが上部構造物や地盤の流動変位の応答、杭基礎に作用する地盤流動圧に与える影響等を定量的に把握するとともに、杭基礎と地盤の相互作用を詳細に検討する。また全体のとりまとめを行う。