

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 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) 実験装置
 - 2) 地盤の作成方法
 - 3) 実験条件
- (c) 業務の成果
 - 1) Case1-1 実験結果
 - 2) Case1-2 実験結果
 - 3) 加振方向の違いの影響
 - 4) Case1-3 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 15 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

本業務は、比較的小規模の側方流動実験を行い、護岸背後にある杭基礎の破壊メカニズムに及ぼす種々の要因の影響を実験的に解明することを目的とする。実験では、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する。試験体としては、地盤表面の非液状化層厚の異なるもの、及び杭基礎に上部工模型を取り付けたものと取り付けないものを作製し、これら試験体に水平1方向、あるいは水平鉛直の2方向の地震波を加え、地盤条件および加振条件の違いが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明らかにする。

(d) 3カ年の年次実施計画

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：

矢板護岸と護岸背後地盤に上部構造物の無い杭基礎および上部構造物を有する杭基礎を設置した試験体を1体ずつ作製する。
上部構造物の無い試験体を水平・鉛直の2方向に同時加振する。また、上部構造物を有する試験体を護岸直交方向に加振し、上部構造物、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、上部構造の有無が杭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14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上部構造物の無い杭基礎模型を設置した供試体を3体作製しこれらを護岸に平行な方向、または直交する方向に加振することにより、上部構造物のない場合における加振方向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14年度の成果

(a) 業務の要約

- 1) 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体作製し、これらの試験体を、護岸に平行な方向または護岸に直交する方向に加振し、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、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分析した。その結果、土槽の奥行きが比較的短い場合には、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ことが明らかとなった。また、上部構造物が無い場合でも、加振方向によって杭の曲げモーメントの最大値に大きな差が生じ、この違いは非液状化層の影響が大きいことがわかった。

(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)土木研究所の大型振動台である。この振動台は、テーブルサイズが8m×6mの水平・鉛直の2軸振動台で、最大100tの模型を水平方向に最大700gal、鉛直方向に350galで加振することができるものである。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 × 6m |
| 最大搭載荷重 | 100tf |
| 加振方向 | 水平・鉛直 2 軸 |
| 最大加振力 | X:120tf、 Z:200tf |
| 最大変位振幅 | X: ± 75mm、 Z: ± 30mm |
| 最大速度 | X: ± 80cm/s、 Z: ± 30cm/s |
| 最大加速度 | X:700gal、 Z:350gal |
| 加振周波数 | X:DC ~ 75Hz、 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 2）

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、4 本をひずみゲージを貼付した杭、1 本を流動力計測杭とした。

杭は外径 50mm、肉厚 1mm の鋼製であり、ひずみゲージ添付杭には杭の内側の 12 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、軸力をキャンセルし杭の曲げ成分のみを検出するようにブリッジを組んだ。

流動圧測定杭は、支柱と支柱にロードセルを介して取り付けられた外径 50mm のパイプからなり、非液状化層（粗砂層）の 1 深度と液状化層の 2 深度において杭に作用する土圧を直接測定した。

使用する杭は、実物の曲げ剛性や強度を想定してモデル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 12.6MN/m^2 で、杭によるばらつきはほとんど無かった。

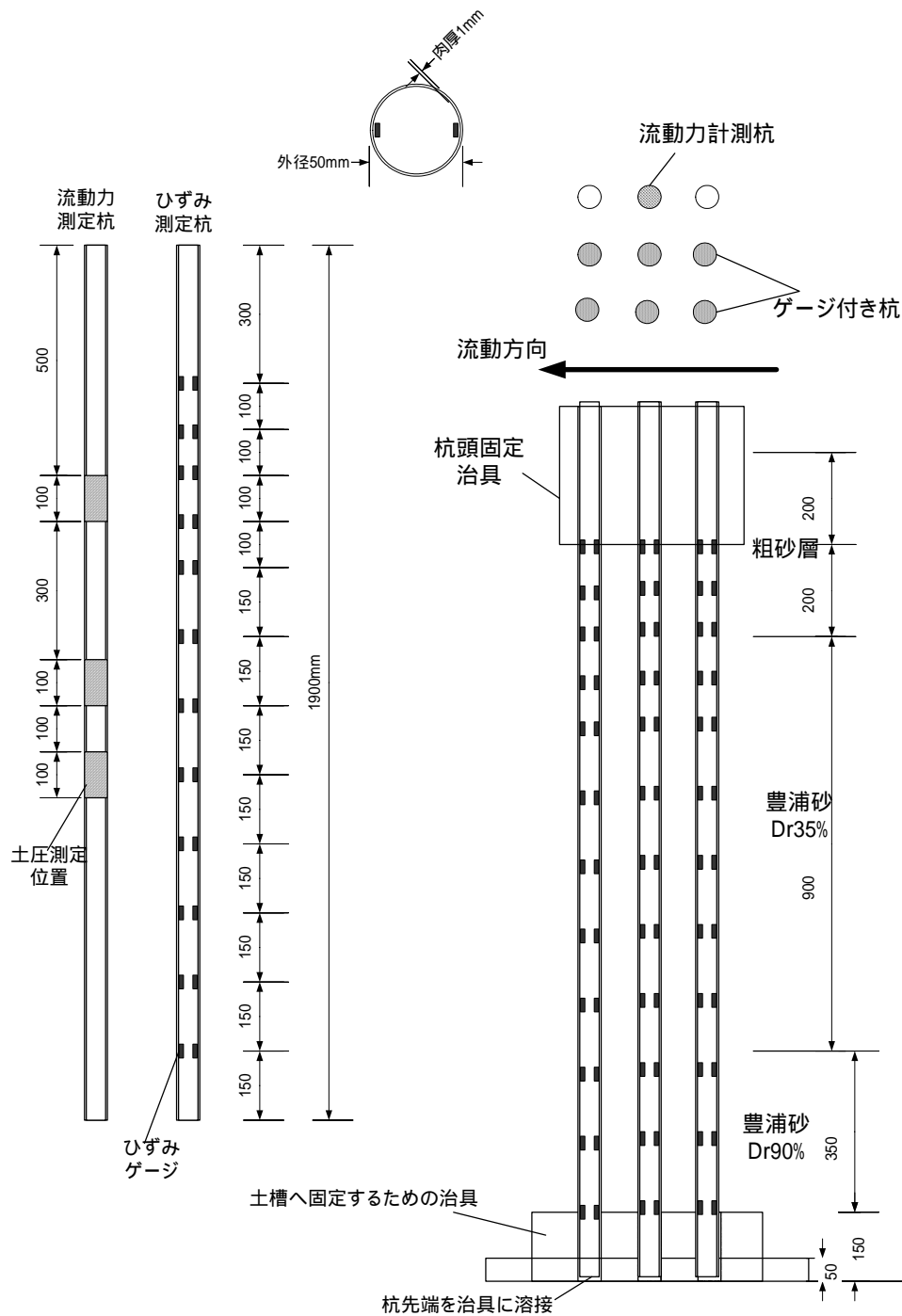


図2 ひずみゲージ付き杭及び流動圧測定杭

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2カ所に設置する。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

a) Case1-1、Case1-2 の作成方法

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。

杭は、図2に示すように先端を治具に溶接し、ボルトと溶接によって治具を土層に固定した。また杭頭は、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。治具とフーチングの質量は、合計21.6kgであった。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号を用いて作成した。

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。

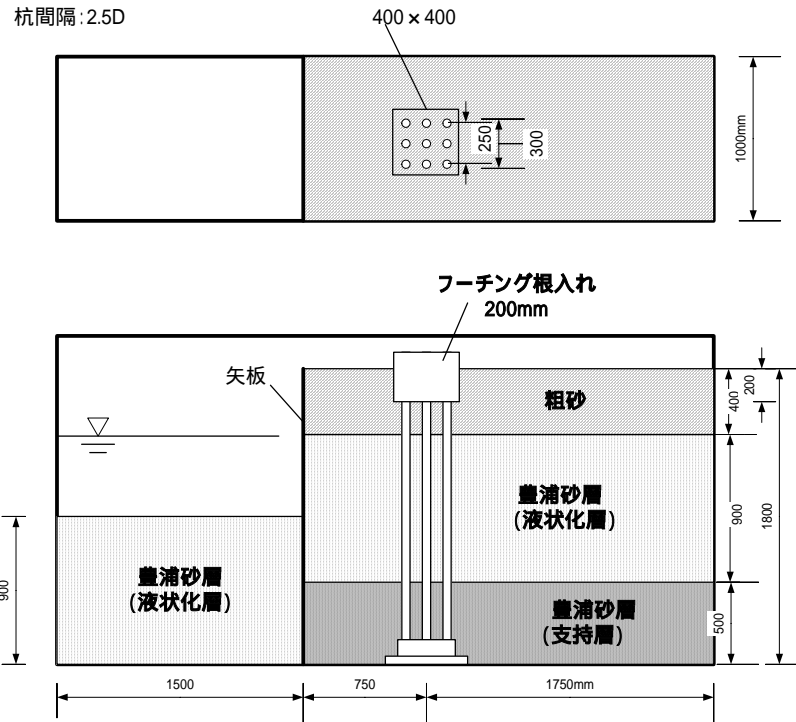
作製した模型を図3に示す。

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。

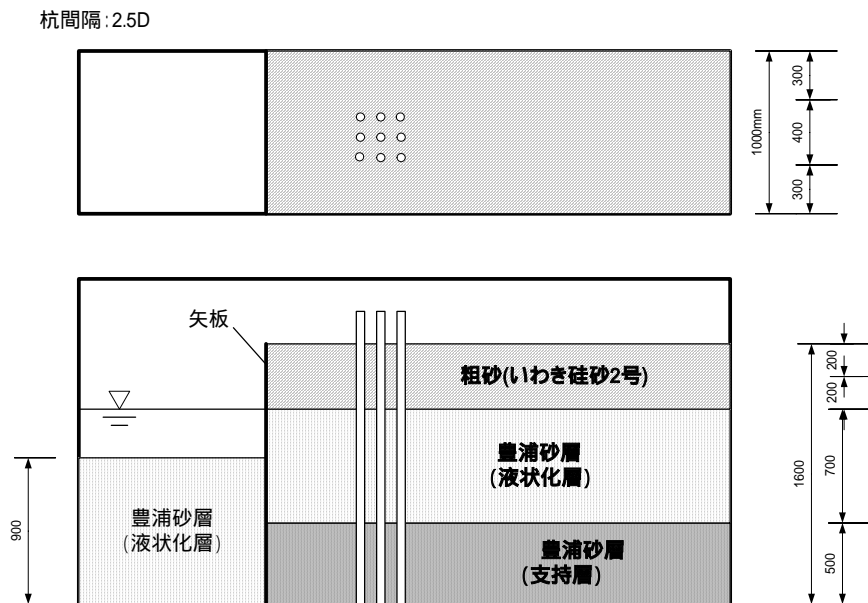
b) Case1-3 の作成方法

Case1-3の模型は、次の点を除きCase1-1およびCase1-2と同じである。

- ・ 海側及び陸側の緩い豊浦砂層の相対密度が50%。
- ・ 陸側の緩い豊浦砂層厚が70cm。
- ・ 杭頭部は拘束しない。



(a)Case1-1、1-2



(b)Case1-3

図3 模型の概要

3) 実験条件

実験条件の一覧を表2に示す。杭頭と杭先端を共に固定した3×3の群杭基礎を有する模型を2体作製した。これら2模型は、矢板護岸および杭基礎に関する条件、地盤条件など全て同じ条件で作製し、2つの模型を異なる方向に加振することにより、加振方向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。

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 | 上部工 | 加振方向 |
|------|--------|------|----------------|------------|-------------------------------|--------|
| 1-1 | 40cm | 2.5D | 90cm、 35% | 回転 固定 | 無し (杭頭は固 定、フーチ ング有り) | 護岸直交方向 |
| 1-2 | | | | | | 護岸平行方向 |
| 1-3 | | | 70cm、 35% | 回転 自由 | 無し (フーチン グ無し) | 護岸平行方向 |

a) センサーの配置

加速度計、間隙水圧計、変位計は図 4 に示す位置に設置した。また、図 5 に示す地盤内変位計を 1 カ所に設置した。

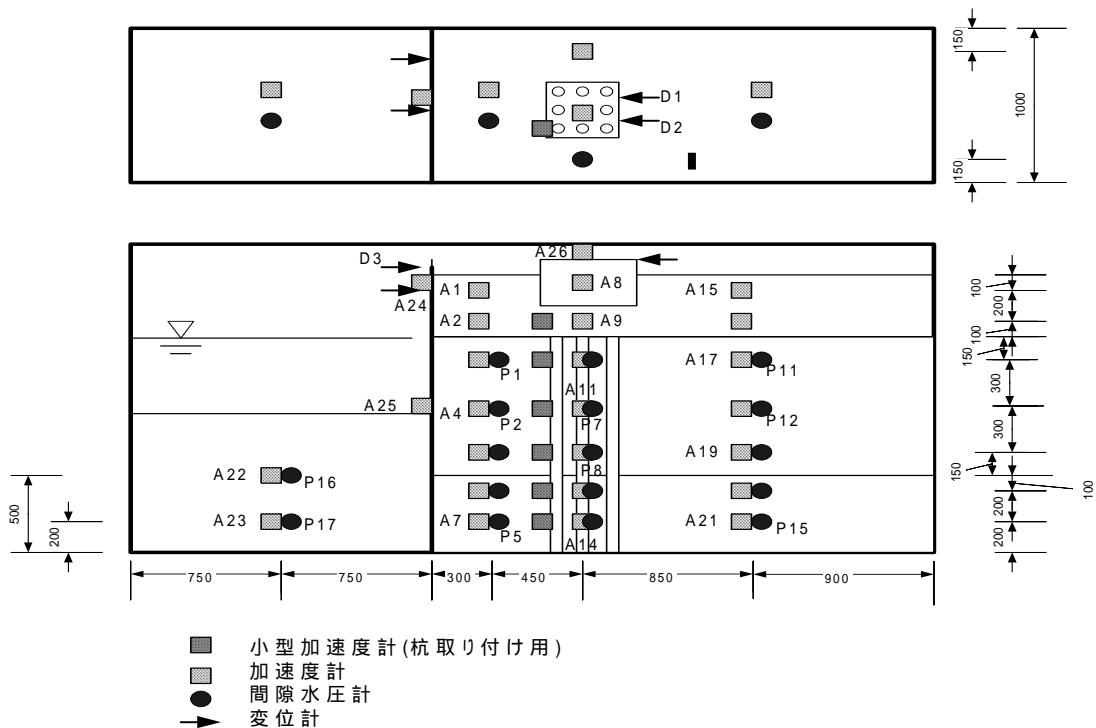


図 4(a) センサーの配置 (Case1-1、1-2)

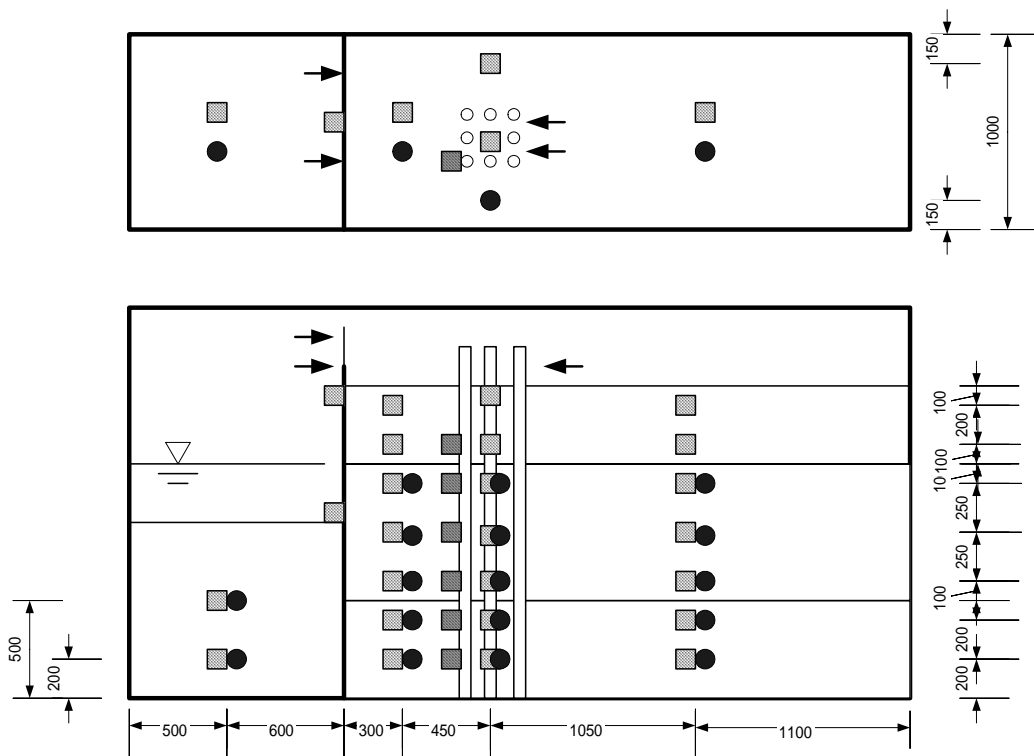


図 4(b) センサーの配置 (Case1-1、1-2)

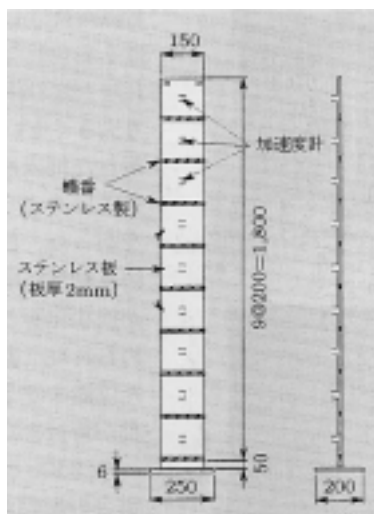


図 5 地盤内変位計

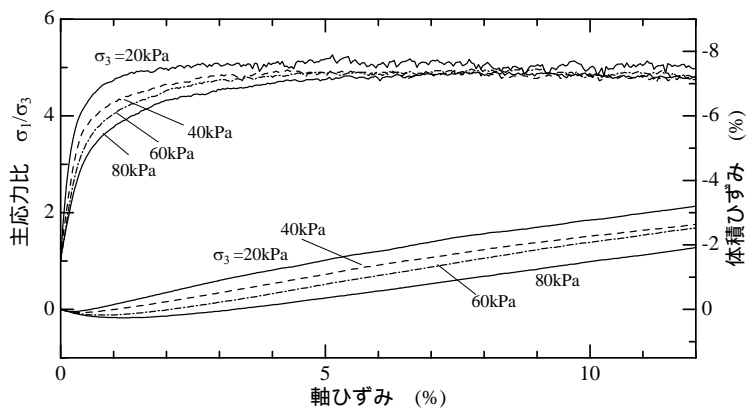


図 6 いわき珪砂 2 号の CD 試験結果

b) 入力波

加速度振幅約 350gal、5Hz の正弦波 20 波で水平方向に加振した。ただし、Case1-3 ではこの入力波による加振で地盤が十分に液状化しなかったため、700gal、3.5Hz の正弦波 40 波で 2 回目の加振を行った。

c) 粗砂の三軸試験

不飽和層の作製に使用したいわき珪砂 2 号の三軸 CD 試験を実施した。試験は拘束圧

を変化させて行った。試験結果を図 6 に示す。

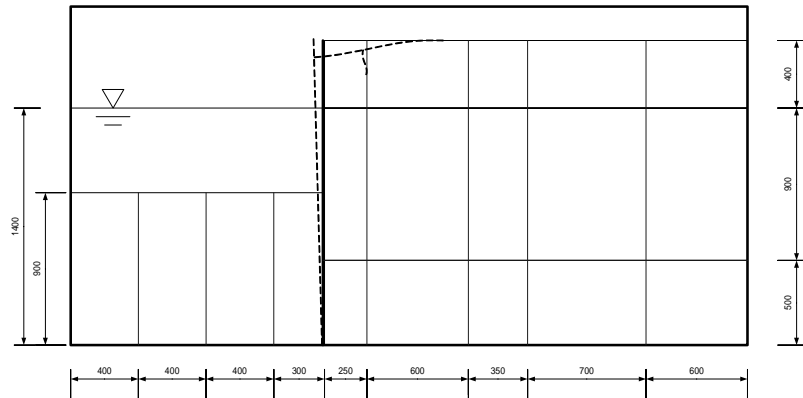
(c) 業務の成果

1) Case1-1 実験結果

a) 矢板ストラット取外し時

地盤の変形

地盤作成時に矢板を支持するためのストラットを加振前に取り外した。そのときに生じた地盤変位状況を図 7 に示す。矢板頭部での水平変位は 54mm で、地盤は矢板近傍で



地盤表面付近のみに変位が見られた。

図 7 ストラット取外し後（加振前）の地盤状況

杭のモーメントと土圧分布

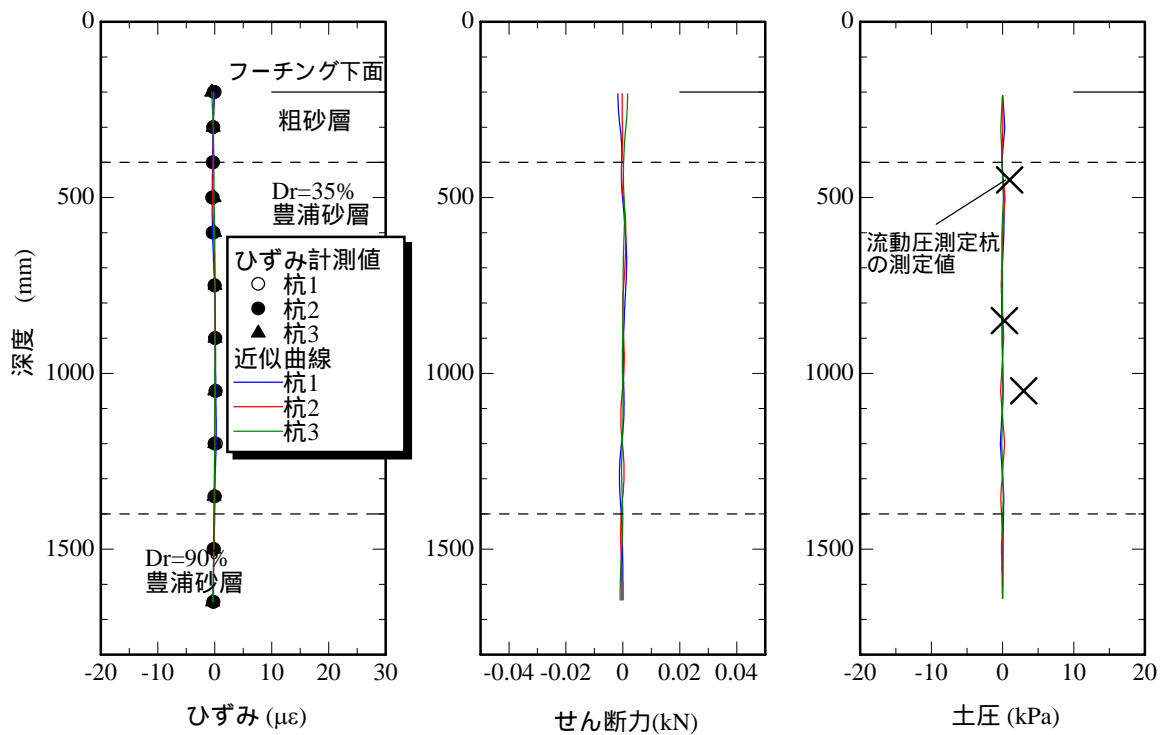


図 8 杭の曲げモーメントと土圧分布

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。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 3 次スプラインによって近似し、それを微分することによってせん断力及び土圧を求めた。

全体的に杭に発生したモーメントは極めて小さく、最大でも $1\mu\epsilon$ 以下であった。また、杭のせん断力と土圧も小さかった。

杭 2 と対象な位置に取り付けた流動圧測定杭で得られた加振終了時の土圧を図中に併せて示す。流動圧測定杭で計測した土圧も小さく、曲げモーメントから求めた土圧に対応したものとなった。

b) 振動実験

間隙水圧及び加速度応答

加振時に振動台及び土槽上面（振動台より高さ 2.1m）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、加振方向のおよそ 1/4 程度以下と小さいものであった。

また、土槽上端で計測した加振方向の加速度（x 方向）は、振動台加速度と振幅および位相がほとんど同じ（加速度は若干増幅した）であり、振動台及び土層のロッキング運動はほとんど生じなかったことがわかる。

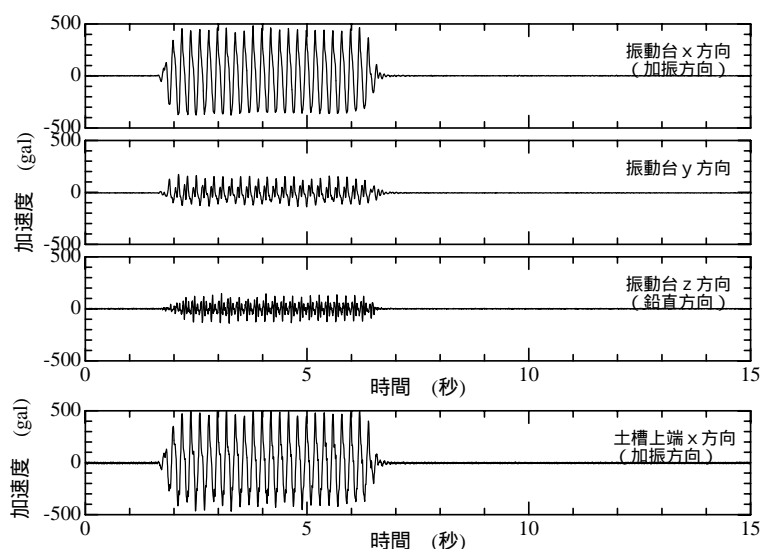


図 9 振動台及び土槽の加速度

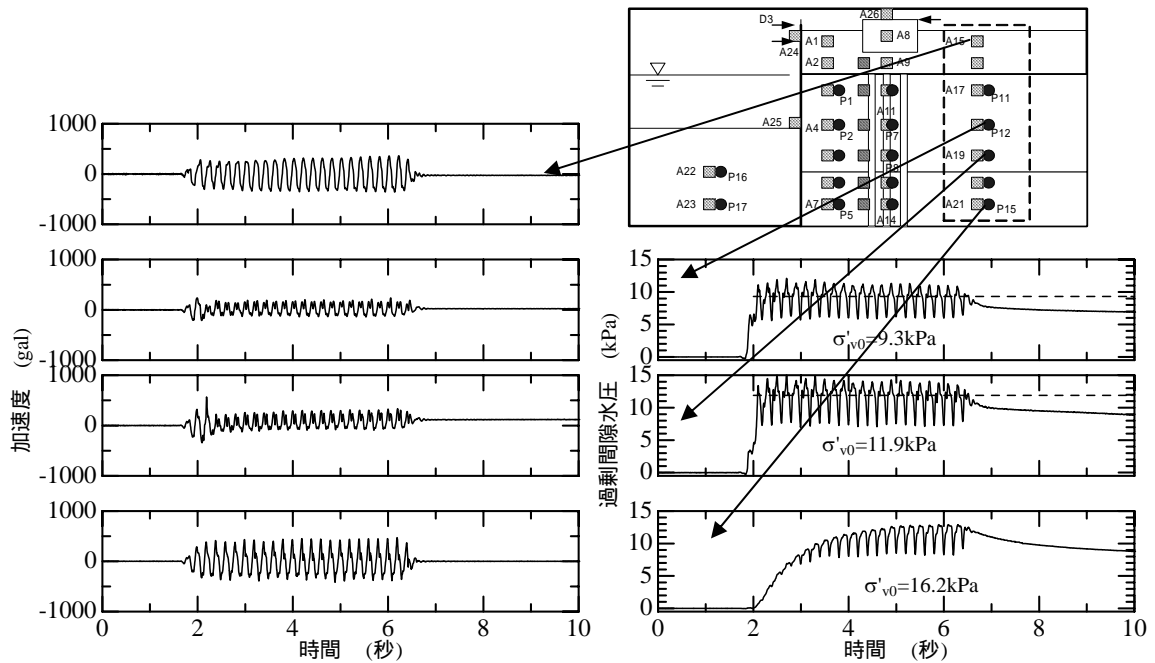


図 10 測線-1 (陸側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

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。測線 1 での過剰間隙水圧は、液状化層では加振開始後の 2 波目でほぼ有効上載圧に達し、液状化したことがわかる。液状化後は急激に間隙水圧が減少し有効応力が回復する瞬間が加振周波数に対応し毎秒 5 回の割合で生じた。最下層 ($D_r=90\%$ 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いないが、過剰間隙水圧比は約 80%に達した。また、液状化層と同様の急激な間隙水圧の減少が見られた。

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 ($D_r=90\%$ 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。ただし各サイクルで加速度が最大及び最小となる時刻において、波形がやや尖ったものとなっており、間隙水圧応答に急激な水圧減少が見られたことと対応している。液状化層 ($D_r=35\%$ 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。

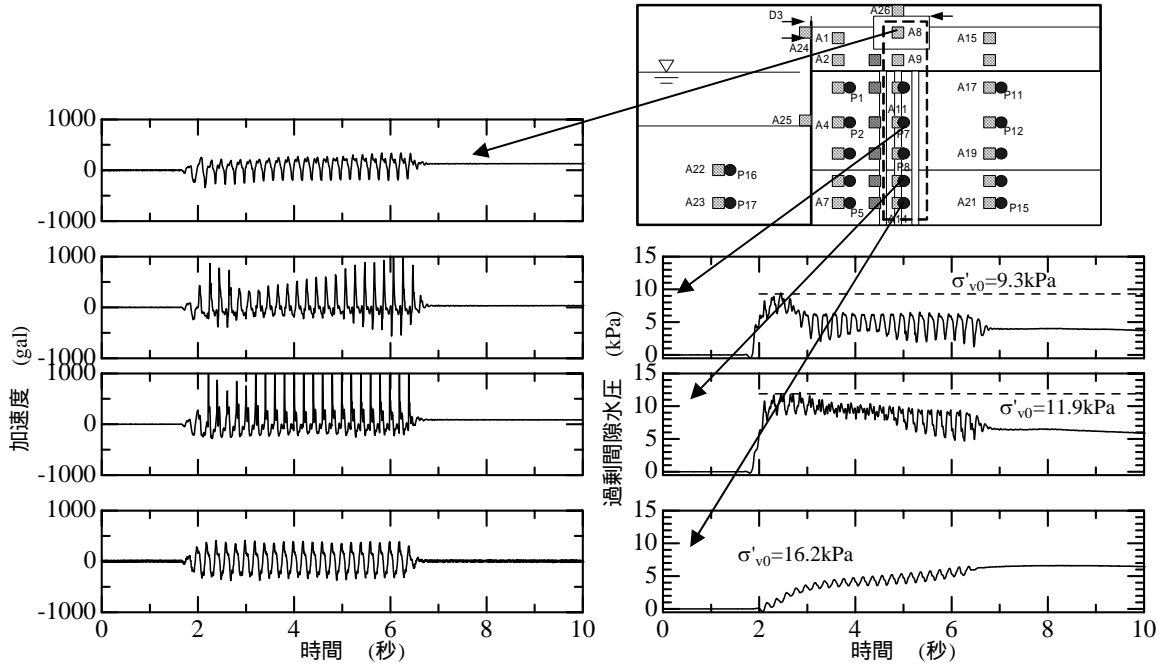


図 11 測線-2 (杭の横) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

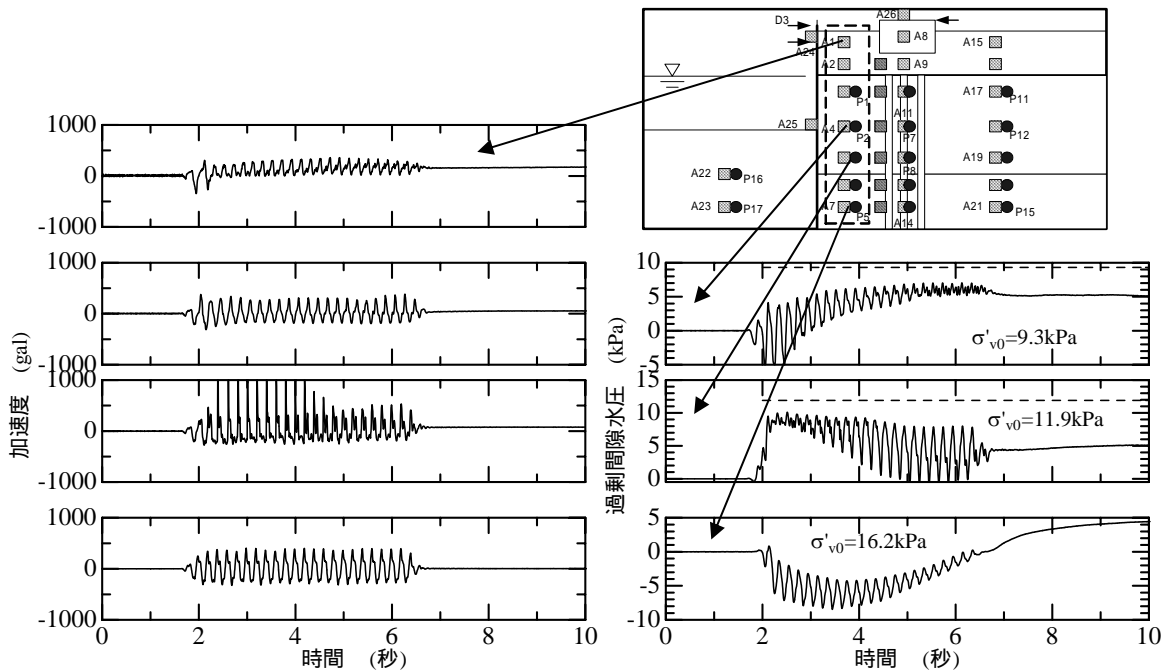


図 12 測線-3 (矢板と杭の間) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

図 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。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。特に液状化層上部での過剰間隙水圧は低く、加速度波形も入力波形に近い形状であることから、液状化層上部では液状化しなかったものと考えられる。また、液状化層の深部では、過剰間隙水圧は有効上載圧までは達していないが、測線 2 と同様に過剰間隙水圧の波形及び加速度波形から判断して液状化したものと考えられる。Dr=90%の最下部層

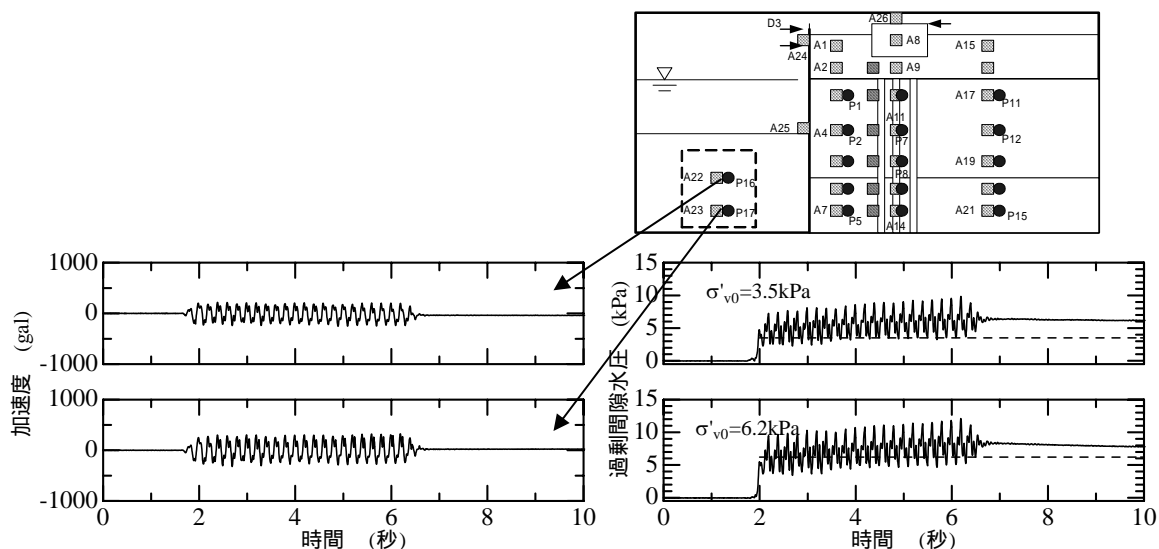


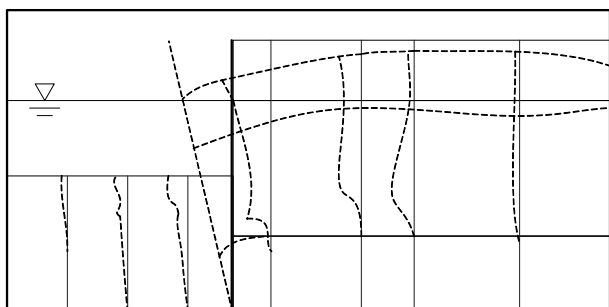
図 13 測線-4 (海側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

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と考えられる。

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

Step1 加振後の地盤の変形状況を図 14、写真 2 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の矢板に取り付けたセンサ - が振り切れたため加振後の正確な板頭部変位量は不明だが、実験後の測定によると約 42cm であった。ガラス面内側の色砂の移動量の観察から、杭脇の液状化層では色砂は約 18cm 水平変位した。また、 $Dr=90\%$ の最下層でも、杭脇の色砂は最深部で 0~2mm、上面で 5mm 程度の水平変位が見られた。



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 3 次スプラインによって近似し、それを微分することによってせん断力及び土圧を求めた。ひずみゲージの計測値には若干の誤差があるため、一階微分して求めたせん断力は完全には滑らかなものとはなっていない。しかしながら、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 1（海側）から杭 3（陸側）に向かい減少し、杭 3 では杭頭でのせん断力が負となっている。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がわかる。また、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。

モーメントを二階微分することによって得られた土圧は、せん断力の深度分布に見られる若干の凹凸の影響を強く受けるので、図に見られる局所的な増減は意味を持たないが、全体的に見ると杭 3 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、最下層では杭 1 と比べて土圧が小さい。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 10cm 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。

杭 2 と対象な位置に取り付けた流動圧測定杭で得られた加振終了時の土圧を図中に併せて示す。流動圧測定杭は、3 深度において土圧を測定したが、このうち 2 深度に設置したロードセルが不調であったため、1 深度の結果のみ示してある。この深度は、加振前は $Dr=35\%$ 豊浦砂層の上面に位置していたが、加振終了後は粗砂層下面であった。ここでの土圧は 9kPa であり、この杭の位置における加振後の有効上載圧(2.5kPa)の約 3.5 倍の土圧が作用していたことになる。この土圧は、杭 2 のモーメント分布から得られた土圧に概ね対応したものとされている。

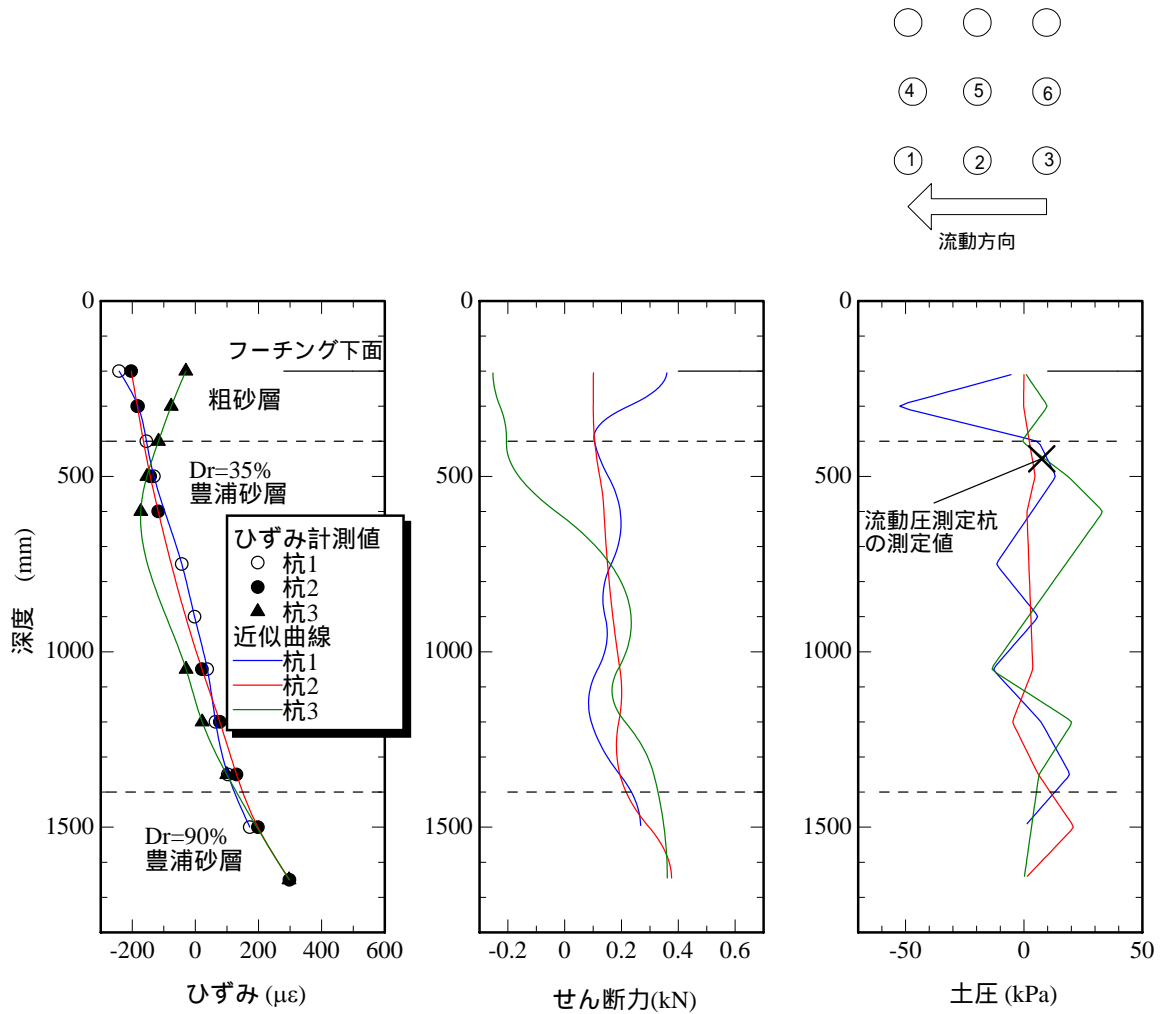


図 15 加振後の残留ひずみ分布とスプライン近似することにより求めたせん断力と土圧の分布 (杭 1、杭 2、杭 3)

2) Case1-2 実験結果

a) 矢板ストラット取外し時

地盤の変形

地盤作成時に矢板を支持するためのストラットを加振前に取り外した。そのときに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 51mm で、この値は Case1-1 での値 (54mm) とほぼ一致した。Case1-2 でも矢板近傍で地盤表面付近のみに変位が見られた。

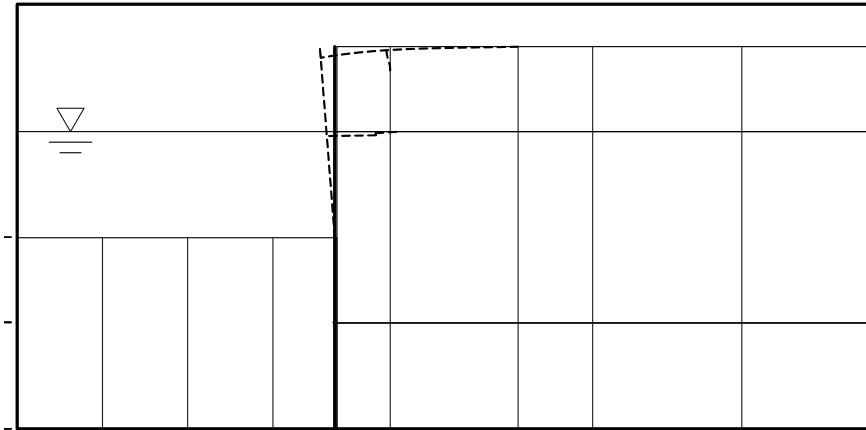


図 16 ストラット取外し後（加振前）の地盤状況

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、及び土圧の深度分布を杭 1、杭 2、杭 3 杭について図 17 に示す。杭に発生したモーメントは極めて小さく、Case1-1 のストラット取外し時とほぼ同様の結果となった。

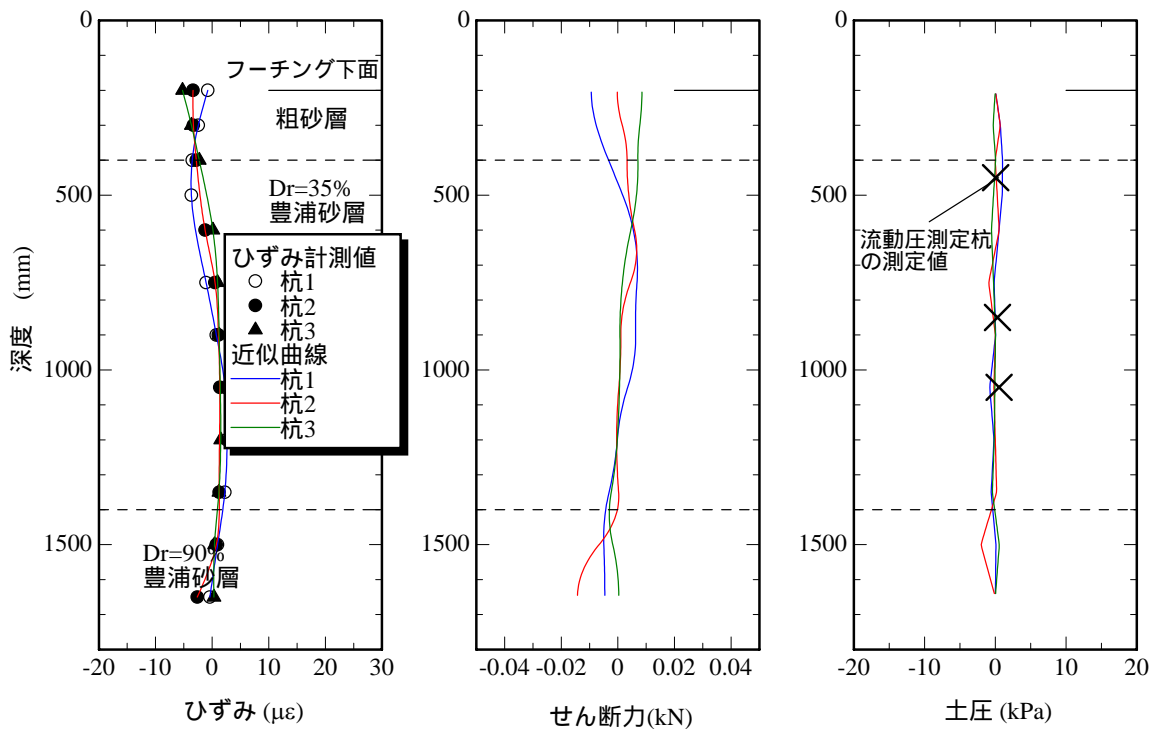


図 17 杭の曲げモーメントと土圧分布

b) 振動実験

間隙水圧及び加速度応答

加振時に振動台及び土槽上面（振動台からの高さ 2.1m）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、何れの方法（x、y、z 方向）についても case1-1 とほとんど一致しており、今年度行った 2 ケースの実験での入力加速度がほぼ同じであったことがわかる。

また、土槽上端で計測した加振方向の加速度（x 方向）は、振動台加速度と比較して若干の増幅（30～50%）がみられた。これは土層の短辺方向に加振したために土層全体が若干のロッキング運動をしたためである。

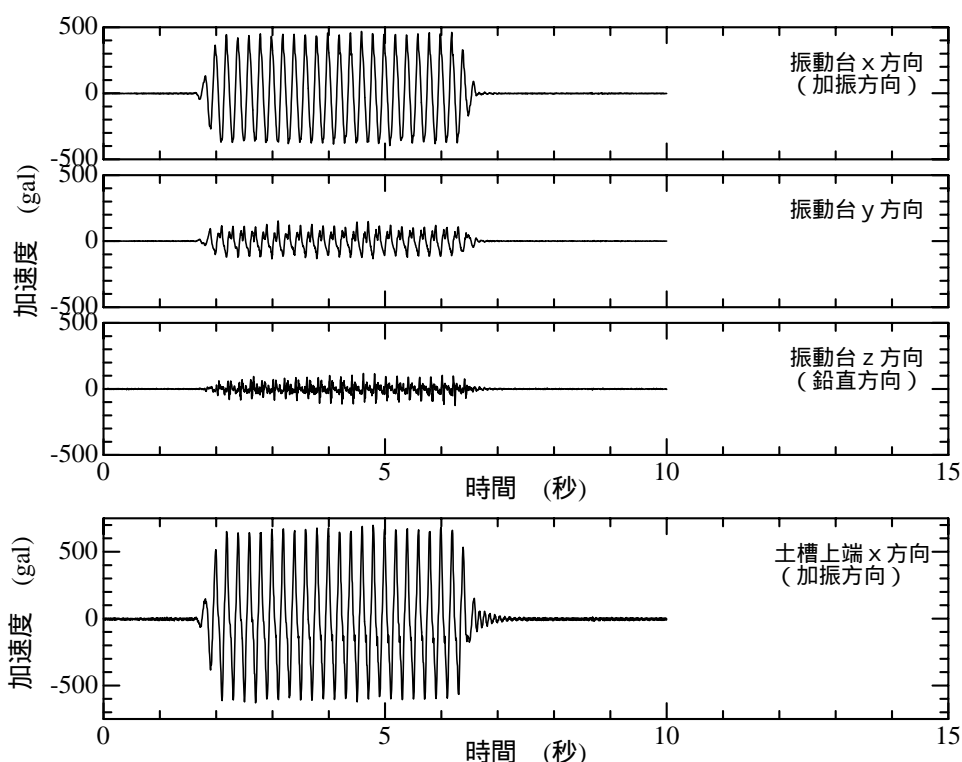


図 18 振動台及び土槽の加速度

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、Case1-2 の地盤中加速度計は、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（ $D_r=90\%$ 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、液状化には至っていない。Case1-1 では測線 1 の最下層の過剰間隙水圧波形に急激な減少がサイクリックに生じたことと比較すると、Case1-2 での最下層の液状化の程度は小さいものと言える。

$D_r=35\%$ の豊浦砂層中では、Case1-1 と同程度まで水圧が上昇した。しかしながら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。

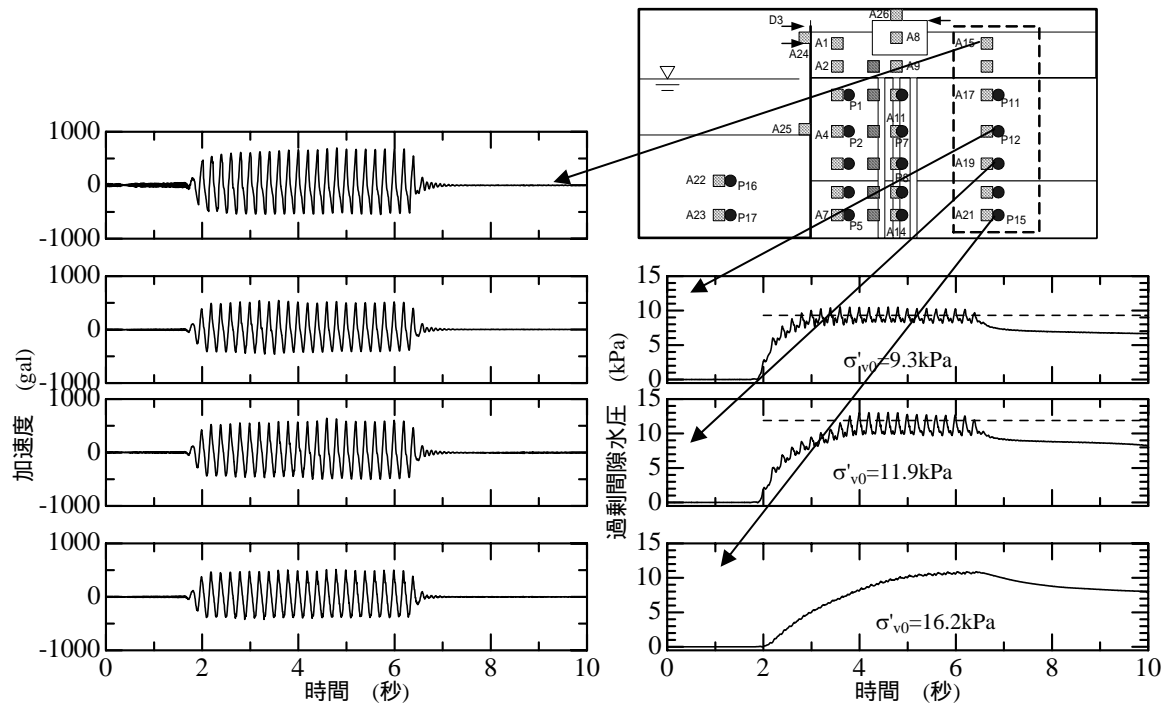


図 19 測線-1 (陸側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

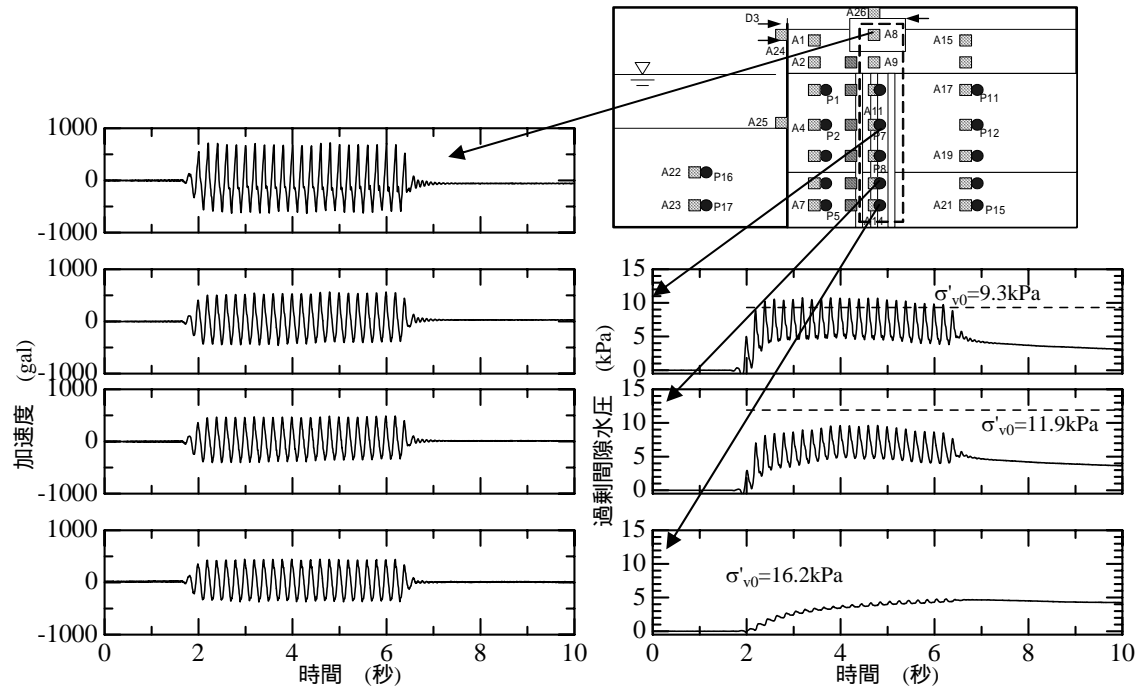


図 20 測線-2 (矢板の脇) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

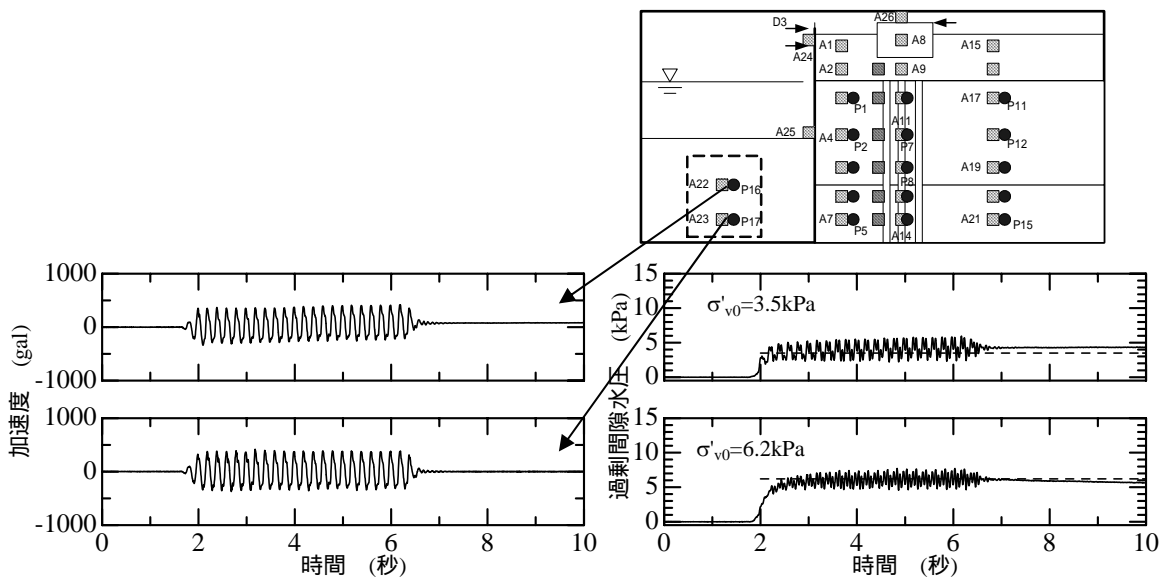
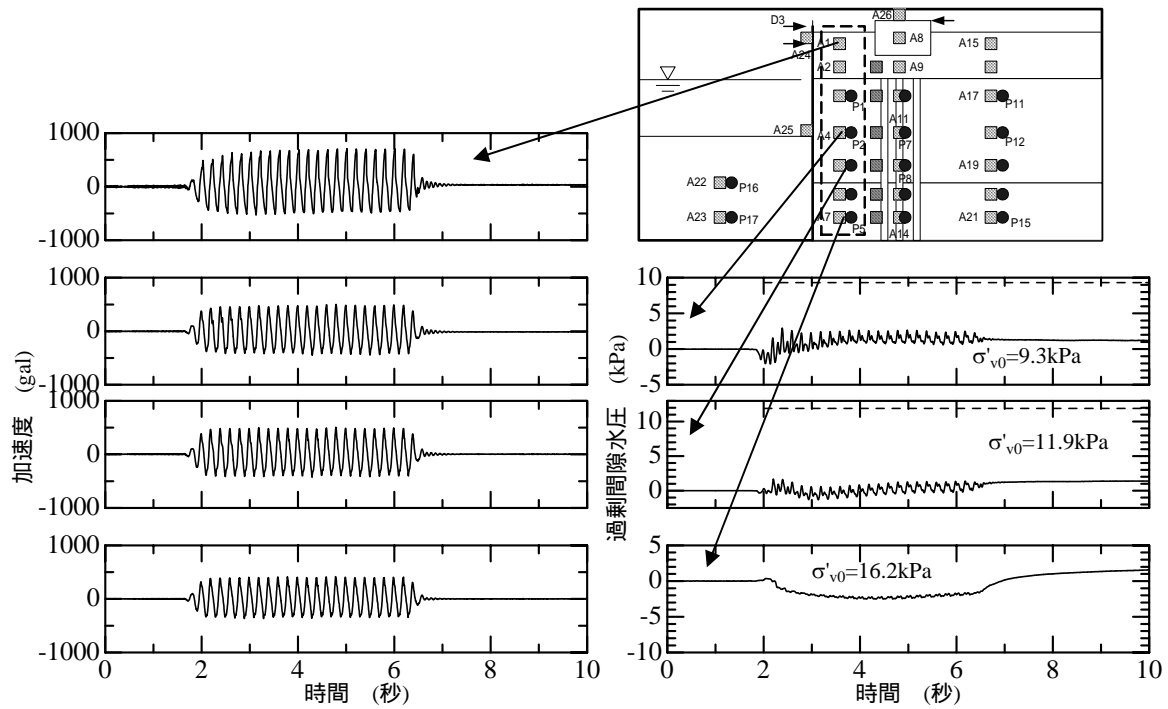


図 22 測線-4 (海側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

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 3 では、 $Dr=35\%$ 豊浦砂層の過剰間隙水圧は Case1-1 よりも低かった。またこの層の加速度は、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、加速度波形は入力波形に似たものであった。

地盤の変形

加振後の地盤の変形状況を図 23 および写真 3 に示す。加振により矢板頭部が 190mm 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 1/2 弱であった。

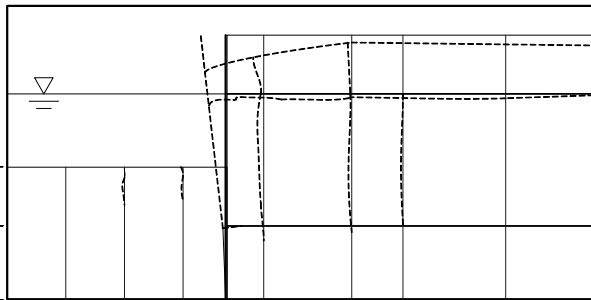


図 23 加振後の地盤変形状況



写真 3 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 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 1 (海側) から杭 3 (陸側) に向かい減少し、杭 3 では杭頭でのせん断力が負となっている。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のがわかる。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。ここで、最深部のひずみゲージの測定値は、下端の境界条件が完全に回転固定とはなっていない可能性があり (特に杭 2)、そのために得られたせん断力は最深部で減少するものとなった可能性がある。

モーメントを二階微分することによって得られた土圧は、せん断力の深度分布に見られる若干の凹凸の影響を強く受けるので、図に見られる局所的な増減は意味を持たない。全体的には杭 1 では地盤浅部分で土圧が小さく、 $Dr=90\%$ 豊浦砂層 (最下層) で大きくなっている。また、杭 3 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、最下層では杭 1 と比べて土圧が小さい。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 10cm 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対応している。また、杭 1 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 1 位置では粗砂層厚が大きく減少したことにより、杭 1 での粗砂層での土圧が杭 3 ほど大きくなかったものと考えられる。

最下層の水平変位は、護岸位置で数 mm であり、杭 3 位置では非常に小さかった。そのため、最深部での土圧は杭 1 で比較的大きく杭 3 では小さかったものと考えられる。

杭 2 と対象な位置に取り付けた流動圧測定杭で得られた加振終了時の土圧を図中に併せて示す。流動圧測定杭は、3 深度において土圧を測定したが、このうち 2 深度に設置したロードセルが不調であったため、1 深度の結果のみ示してある。この深度は、加振前は $D_r=35\%$ 豊浦砂層の上面に位置していたが、加振終了後は粗砂層下面であった。ここでの土圧は 9kPa であり、この杭の位置における加振後の有効上載圧 (2.5kPa) の約 3.5 倍の土圧が作用していたことになる。この土圧は、杭 2 のモーメント分布から得られた土圧に概ね対応したものとなっている。

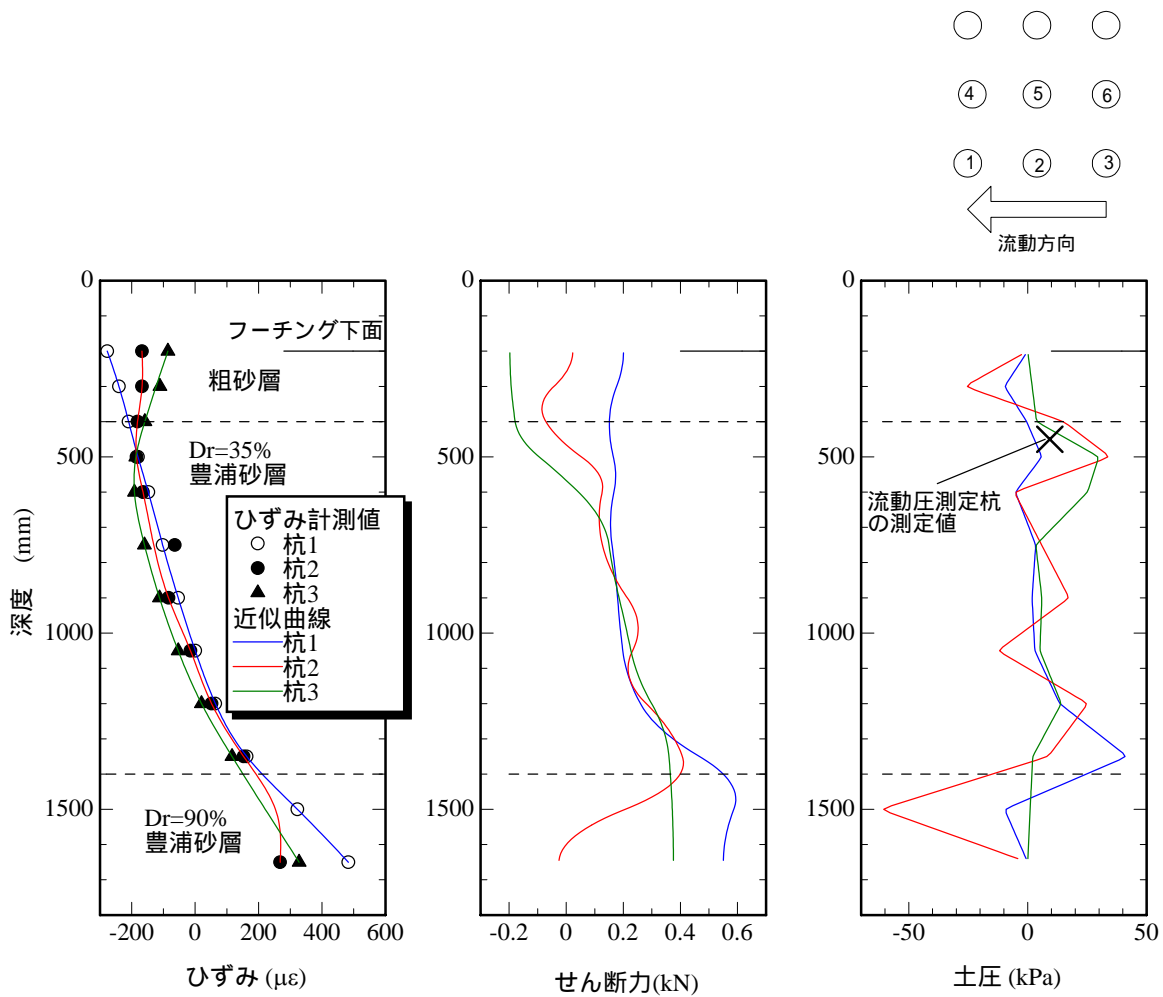


図 24 加振後の残留ひずみ分布とスプライン近似することにより求めたせん断力と土圧の分布 (杭 1、杭 2、杭 3)