

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 16 年度業務目的

(2) 平成 16 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 (Case16-1)
 - 3) 地盤の作成方法 (Case 16-2, Case 16-3)
 - 4) 実験条件
- (c) 業務の成果
 - 1) Case16-1 実験結果
 - 2) Case16-2 実験結果
 - 3) Case16-3 実験結果
 - 4) 実験結果の比較および考察
- (d) 結論
- (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 14～16 年業務のまとめ

(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	杉田 秀樹
	主任研究員	高橋 章浩
		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、これらを水平に加振する。加振方向、杭基礎模型の固有周期、杭本数を変化させることにより、これら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ヵ年の年次実施計画

1)平成14年度：

- a) 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。
- b) 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。
- c) 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：

- a) 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。
- b) 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。
- c) 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。
- d) 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：

- a) Case15-3と同じ模型を作成し、加振方向の異なる実験を行うことにより、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。
- b) Case15-3とフーチング重量のみが異なる実験を行い、フーチング重量（構造物の固有周期）の違いが地盤と杭の挙動に及ぼす影響を分析する。
- c) 杭本数を9本から4本に減らした模型を大きく加振することにより、杭に塑性変形を生じさせ、流動化時における杭基礎の破壊メカニズムについて分析する。

d) 全体のとりまとめを行う。

(e) 平成16年度業務目的

- 1) 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。
- 2) 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モデルを設置した供試体を作成する。実験モデルとして、フーチング重量、杭本数が異なる3種類のものを作成し、モデルを護岸平行な方向、護岸直交する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（構造物の固有周期）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。また、杭本数を9本から4本に減らしたモデルを大きく加振することにより、杭に塑性変形を生じさせ、流動化時における杭基礎の破壊メカニズムについても検討する。

(2) 平成16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、加振方向の違い、フーチング重量（構造物の固有周期）の違い、杭本数が地盤及び杭の挙動に与える影響を分析した。
- 3) 基礎の固有振動数と入力時振動の卓越周波数が近いほどフーチングは大きく振動し、今回用いたような比較的硬い基礎の場合は永久変形量が小さくなること、加振方向が振動後の基礎の残留変位に与える影響は小さいこと等が明らかとなった。
- 4) 杭基礎を強地盤振動下に置くことによって、杭に塑性変形を生じさせることができた。その結果、側方流動に対する基礎の破壊メカニズムを解明するための基礎的なデータを得ることができた。

(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図1、表1に示す。



図 1 振動台の概観

表 1 三次元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

Case16-1 およびCase16-2 では、図 2に示す3×3の群杭基礎を用いた。杭の曲げモーメントや流動圧を調べるために、9本の杭のうち、7本にひずみゲージを貼り付けた。

Case16-3 では、図に示す2×2の群杭基礎を用いた。この模型には、全ての杭にひずみゲージを貼り付けた。

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10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、杭先端と杭頭部を固定した。杭の検定を行った結果、杭の曲げ剛性EIは12.8kN・m²で、杭によるばらつきはほとんど無かった。

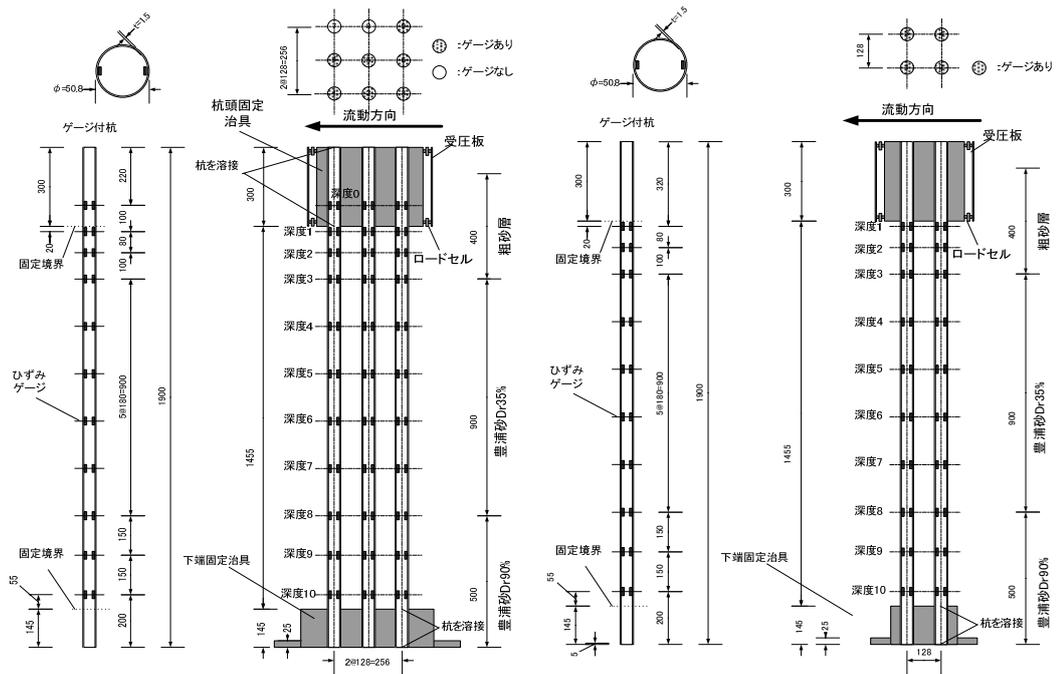


図 2 ひずみゲージ付き杭 (左 : Case16-1 および Case16-2、右 : Case16-3)

d) 地盤内変位計

地盤の水平変位を測定するため、図 3 に示すような地盤内変位計を設置した。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。

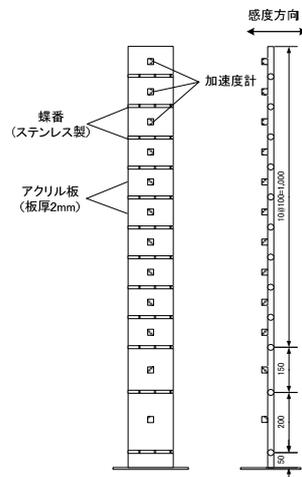


図 3 地盤内変位計

2) 地盤の作成方法 (Case16-1)

豊浦砂と粗砂を使用し、次の手順で模型地盤を作成した。

- a) 矢板護岸と群杭模型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 ($D_r=90\%$) 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ビニールシートにより塞いだ。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ストラットを取付け、水平方向に固定した。

- b) 杭は、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および回転が生じないよう完全に拘束した。
- c) 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=30%) を水中落下法によって作製した。
- d) 矢板背面の密な砂層上に、層厚 90cm のゆるい豊浦砂層 (Dr=30%) 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 間隔に観察用測線を描いた。
- e) ゆるい豊浦砂層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。
- f) 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。
- g) 加振実験を行い、地盤と杭の挙動を観察した。

作製した模型の概要を図 4 に示す。粗砂層の材料には平均粒径 1.7mm のいわき珪砂 2 号を用いたが、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。

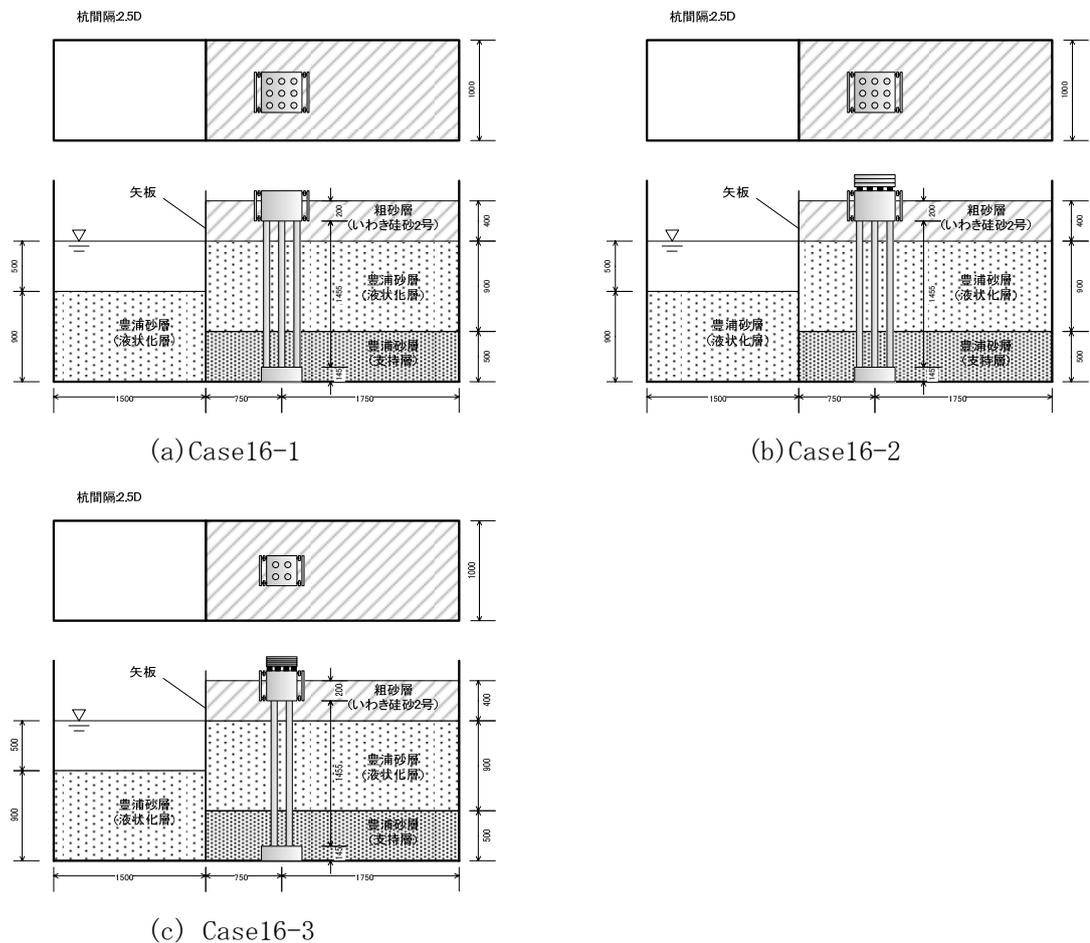


図 4 模型の概要

3) 地盤の作成方法 (Case 16-2、Case 16-3)

Case 16-2 および Case 16-3 の模型は、地盤構成は Case 16-1 と同じであるが、設置した杭基礎構造物が異なっている。Case 16-1 で用いた構造物は気中での固有周波数は 7Hz であり、入力地震動(5Hz)と比べて大きくなっているが、Cases 16-2、16-3 では後に示すようにフーチングの質量を変えることによって、構造物の固有振動数を入力地震動の周波数に近づけた(4.8Hz)。

4) 実験条件

3 ヶ年の実験条件の一覧を模型の概要と合わせて表 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 4 体、2×2 の群杭基礎を 1 体、合計 5 体作製した。これらの模型は、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、杭本数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固定条件、上部工の質量（構造物の固有振動数）の違いが地盤及び杭の応答に及ぼす影響を調べた。

表 2 実験条件一覧（今年度実施分は網掛けで示す）

Case	杭本数	矢板分割	液状化層厚、 相対密度	フーチング	加振方向
14-1	9 本	なし	70cm、 50%	なし	護岸平行方向
14-2		33cm	90cm、 30%	あり (21.6kg)	護岸直交方向
14-3		×3 枚		あり (21.6kg)	護岸平行方向
15-1		89cm ×1 枚、 5cm ×2 枚		なし	護岸平行方向
15-2				あり (21.6kg)	護岸平行方向 +鉛直方向
15-3				あり (170kg)	護岸直交方向
16-1				あり (170kg)	護岸平行方向
16-2				あり (320kg)	護岸直交方向
16-3				4 本	あり (140kg)

a) 入力波

入力加速度の時刻歴を図 5に示す。Case16-1 およびCase16-2 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。また、Case16-3 では、同図に示す波形の振幅を 2.5 倍したものを用了。

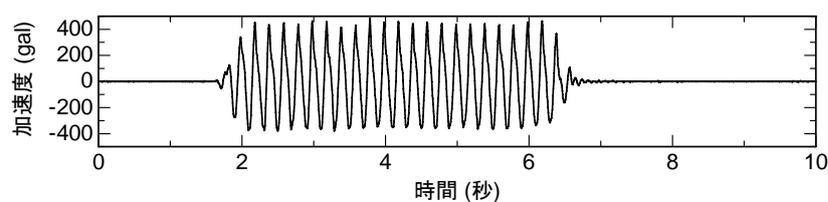


図 5 入力加速度の時刻歴（振動台への指令値）

b) センサーの配置

加速度計、間隙水圧計、変位計、ロードセル、圧力計および地盤内変位計を図 6 に示す位置に設置した。加速度計、変位計は、EW 方向(流動方向)は西方向を、NS 方向(流動直角方向)は南方向を、上下方向は上方向を正とした。

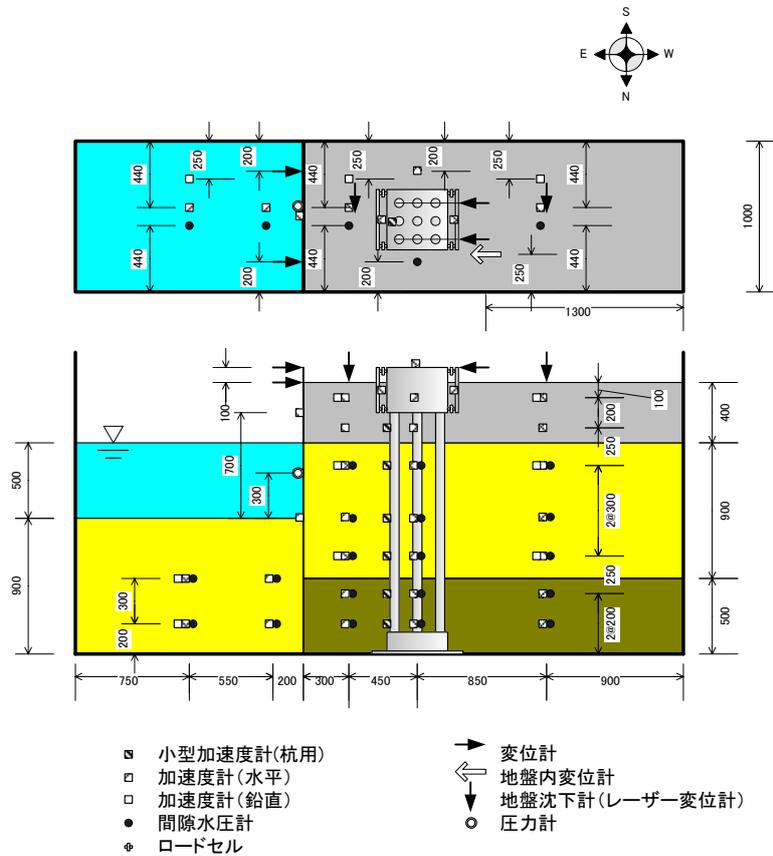


図 6 センサーの配置 (ただし、Case16-3 の杭配列は 2×2)

c) 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 7 に示す。

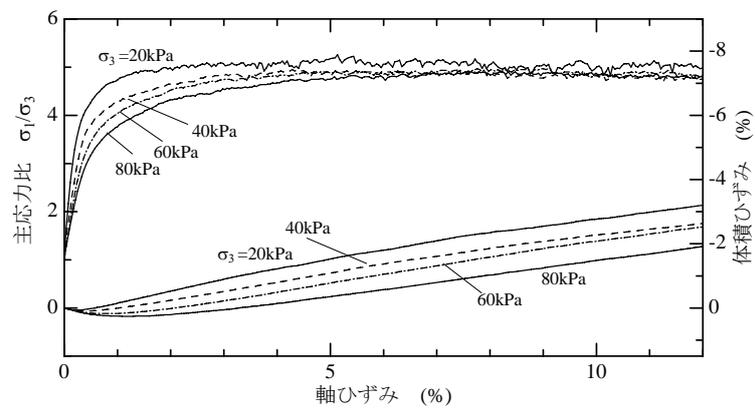


図 7 いわき硅砂 2 号の CD 試験結果

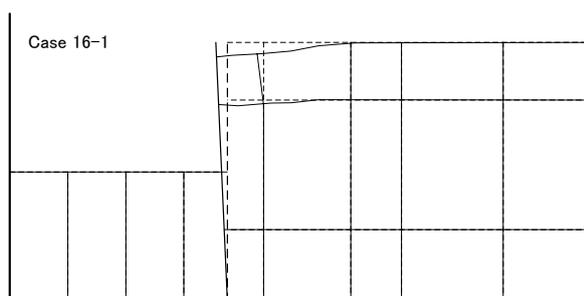
(c) 業務の成果

1) Case16-1 実験結果

a) 矢板ストラット取外し時

i) 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104mm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8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。



地盤変形状況



外観写真

図 8 加振直前の模型の状況 (Case 16-1)

ii) 杭のモーメント分布

矢板支持用のストラットの取外しにより杭に生じた奥行き方向中央列杭の曲げモーメント分布を図9に示す。ここで杭4は矢板側、杭6は陸側杭に対応する。杭の曲げモーメント分布を5次の多項式で近似し、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。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る。護岸に近い杭(杭4)と陸側杭(杭6)を比較すると、地盤の主働化により、護岸側で大きな土圧変化が発生したことがわかる。中央杭(杭5)の応答を他の杭と比較すると、中央杭では土圧の増加方向が他のものと異なっており、陸側に作用する土圧が発生していることがわかる。これは中央杭では地盤の変形により杭に作用する土圧の変化が発生したのではなく、土圧が直接作用する外側の杭の変形に従ってフーチングが矢板側に変位した結果、中央杭が主働杭となり、地盤反力が増加した結果であると解釈できる。

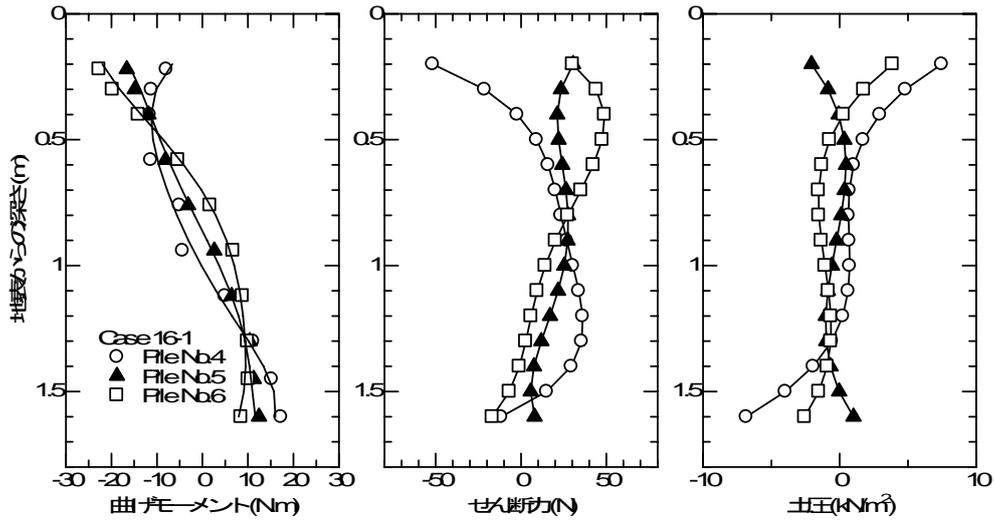


図 9 加振直前の杭の曲げモーメント、せん断力、土圧分布 (Case 16-1)

b) 振動実験

i) 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 10 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。しかしながら、このケースでは実際に模型地盤に入力された地震動は、指令値より 35%程大きくなってしまっている。

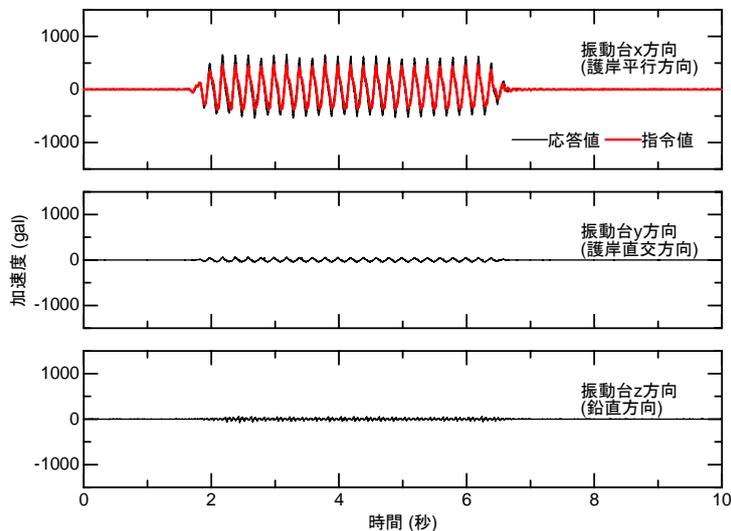


図 10 振動台の加速度 (Case 16-1)

図 11、図 12 に測線-2 および測線-3 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 2、3 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。加速度波形は入力波形と極めて似たものとなっており、明確な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。Case16-1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。

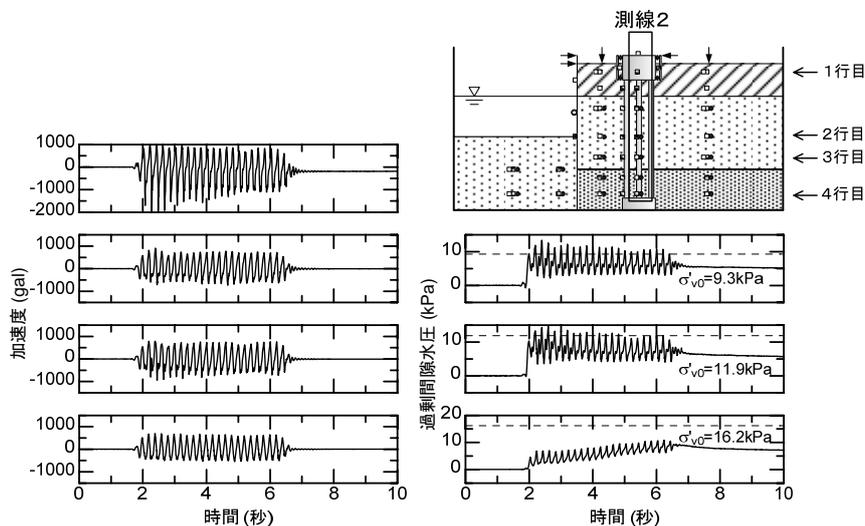


図 11 測線-2（杭の横）での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴（Case 16-1）

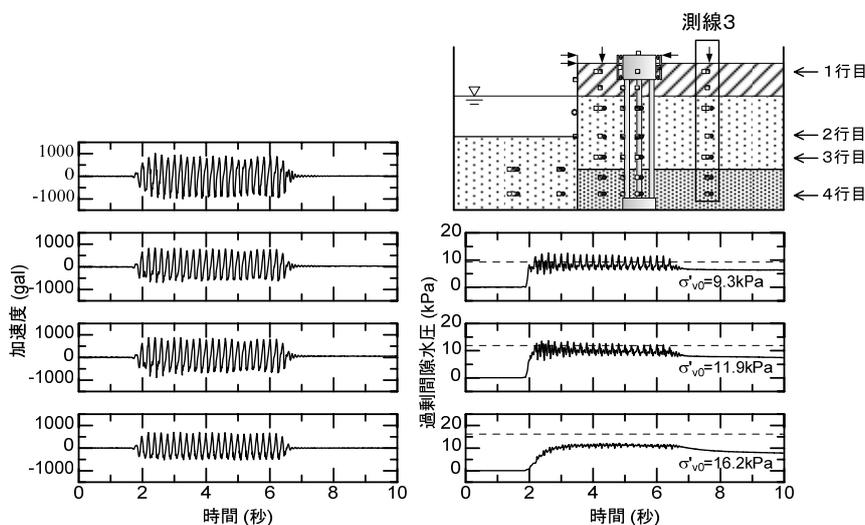


図 12 測線-3（陸側）での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴（Case 16-1）

図 13、図 14 は矢板近くの測線 1 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 では大きな矢板変位により、下方において振動中に過剰間隙水圧の低下が見られる。この測線での加速度記録は上層で漸増傾向が見受けられるものの、測線 2、3 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相似であった。

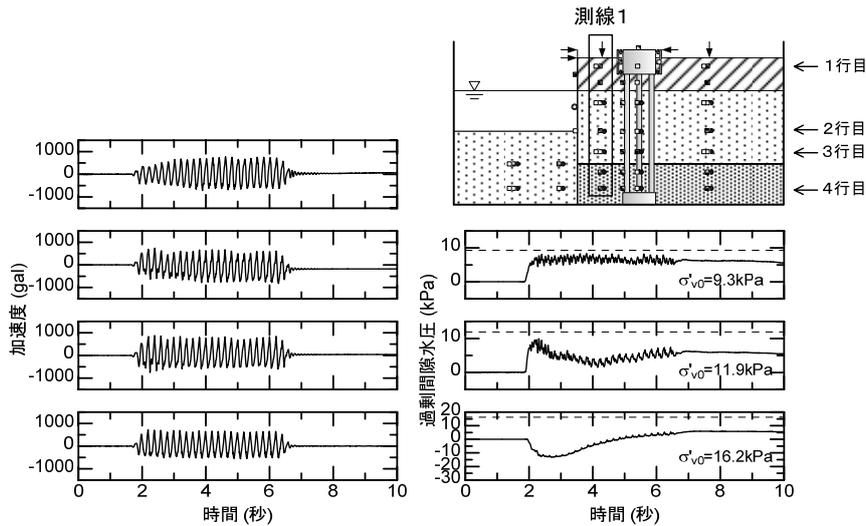


図 13 測線-1 (矢板と杭の間) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴 (Case 16-1)

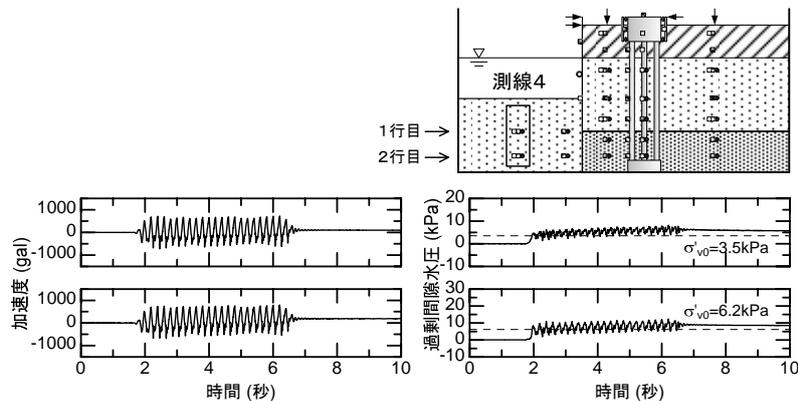


図 14 測線-4 (海側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴 (Case 16-1)

ii) 構造物の応答

図 15 に構造物の応答並びに杭の曲げひずみの時刻歴を示す。ここで示すフーチング加速度は護岸平行方向のものであり、曲げひずみは奥行き方向中央の列のもので、杭 4 は矢板側、杭 6 は陸側に対応する。フーチング変位の時刻歴を示した図中、細線は実際に観測されたものを、太線は振動成分を取り除いたものを示している。矢板背後地盤が液状化するまでの間は ($t=2\sim 3$ 秒)、フーチング、矢板共に急激に変位が増加している。 $t=2.39$ 秒でフーチングの累積水平変位は最大 (2.78mm) となった。その後、矢板変位は徐々に増加するものの、フーチング変位は減少に転じ、振動終了時には、ほぼ元の位置に戻ってきている。この傾向は、本年度実施の Cases 16-2 および 16-3 のようにフーチングに作用する慣性力が大きなものほど顕著であり、これらのケースでは完全にもとの位置に戻る。これは、本実験シリーズで用いた杭が、塑性変形を生じさせないように比較的硬く設計されたためであり、柔な基礎を用いた場合にはこのような現象は起こらず、永久変形が生じると考えられる。曲げひずみの時刻歴はフーチング変位の変化と対応している。曲げひずみの大きさは杭の位置によらずほぼ同じであった。

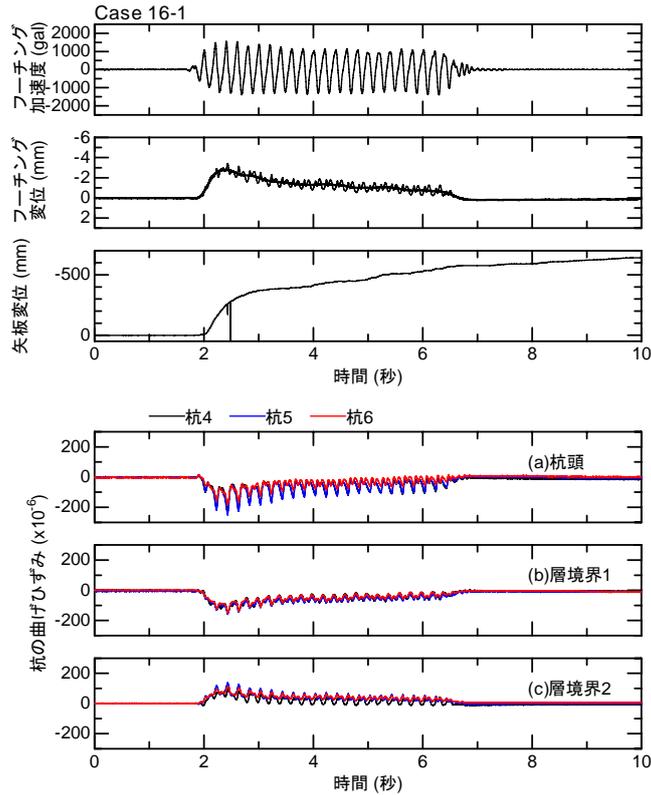


図 15 構造物の応答と杭の曲げひずみの時刻歴 (Case 16-1)

iii) 地盤の変形

加振後の地盤の変形状況を図 16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64cmであった。この時矢板背後地盤地表面は20cm以上沈下しており、フーチングは完全に露出していた。一方で海側地盤は矢板の大きな傾斜と土槽による側方変形抑制により、地表面が12cmほど隆起していた。

深さ方向の地盤の水平変位分布を見ると、表層地盤の水平変位は液状化層のそれと比べて小さくなっていた。特にその傾向は杭周辺で顕著であった。このような現象は、液状化砂層は杭をすり抜けて容易に海側へ水平変位できたが、表層地盤の海側への水平変位は杭の存在により抑制されてしまったために起きたものと思われる。

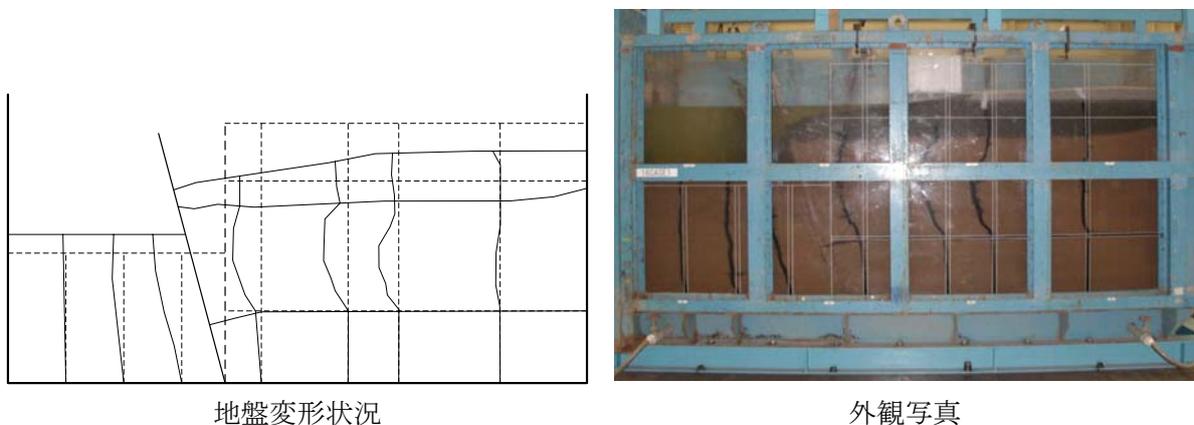


図 16 加振後の模型の状況 (Case 16-1)

iv) 杭の曲げモーメントと土圧

フーチングの累積水平変位が最大となる時点 ($t=2.39$ 秒) での杭の曲げモーメント、せん断力、及び土圧の深度分布を図 17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5次の多項式で近似し、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。表層付近(深さ 0.2~0.4m)において、比較的大きな右方向(海側へ向かう方向)への土圧増加が見られる。これは、矢板変形により地表面が大きく沈下していることを考えると、液状化しない表層地盤の海側への変位によって発生したものと考えられる。液状化層での杭に作用するせん断力、土圧分布を見ると、これらは杭位置によらず、ほぼ同じであるが、下部の支持層(1.3m以深)では、杭 4(矢板側杭)において、大きな右向きの土圧増加が見られる。この傾向は、Cases 16-2、16-3 でもほぼ同様であり、図 13に見られる支持層での負の過剰間隙水圧の発生により発生したものと推測される。

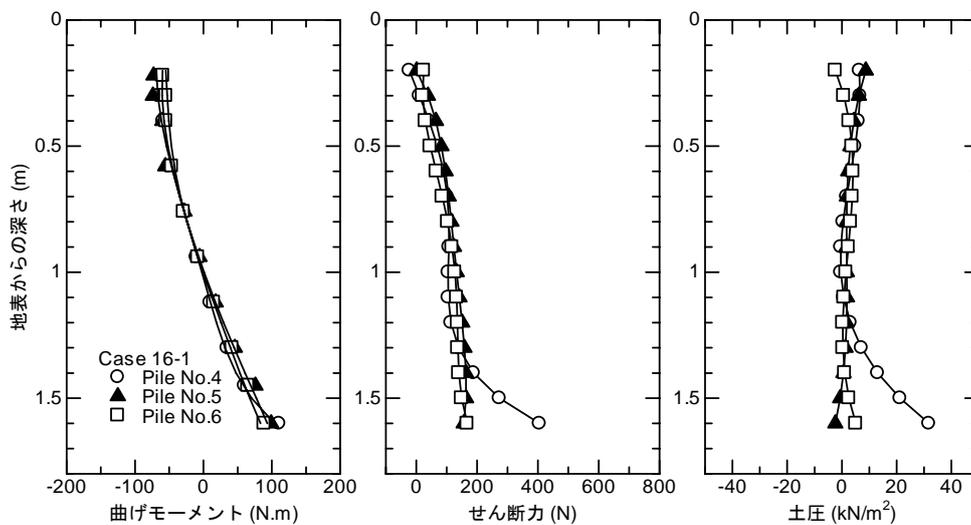


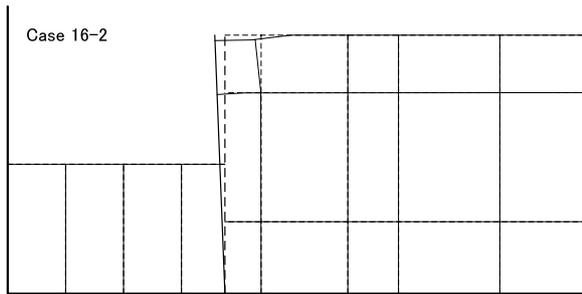
図 17 累積フーチング変位最大時の杭の曲げモーメント、せん断力、土圧分布 (Case 16-1)

2) Case16-2 実験結果

a) 矢板ストラット取外し時

i) 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 18 に示す。矢板頭部での水平変位は 47mm であった。



地盤変形状況

外観写真

図 18 加振直前の模型の状況 (Case 16-2)

ii) 杭のモーメント分布

矢板支持用のストラットの取外しにより杭に生じた奥行き方向中央列杭の曲げモーメント分布を図 19 に示す。合わせて示したせん断力、土圧分布は、Case 16-1 と同様の方法で求めた。矢板の変形量が小さかったためか、杭の曲げモーメントの変化量は小さいものの、ほぼ Case 16-1 と同様の変化が見られた。

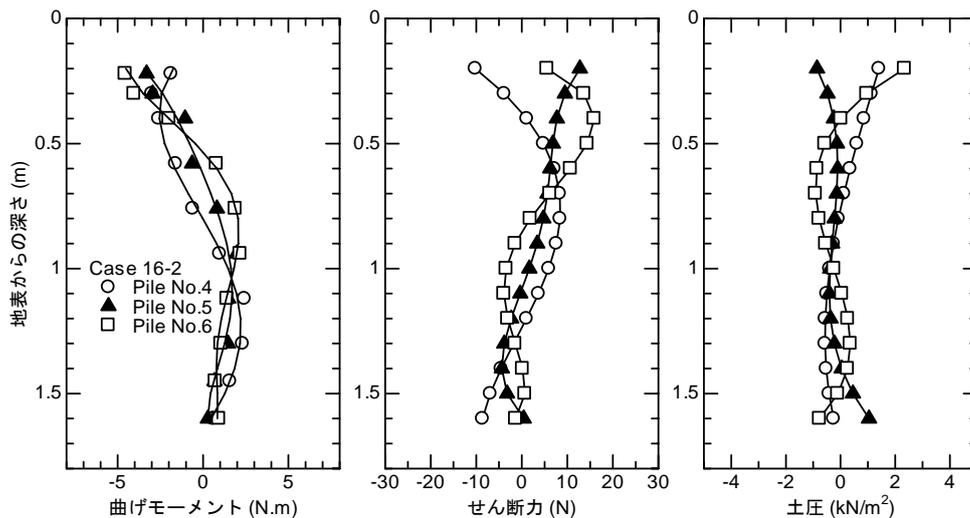


図 19 加振直前の杭の曲げモーメント、せん断力、土圧分布 (Case 16-2)

b) 振動実験

i) 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 20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。

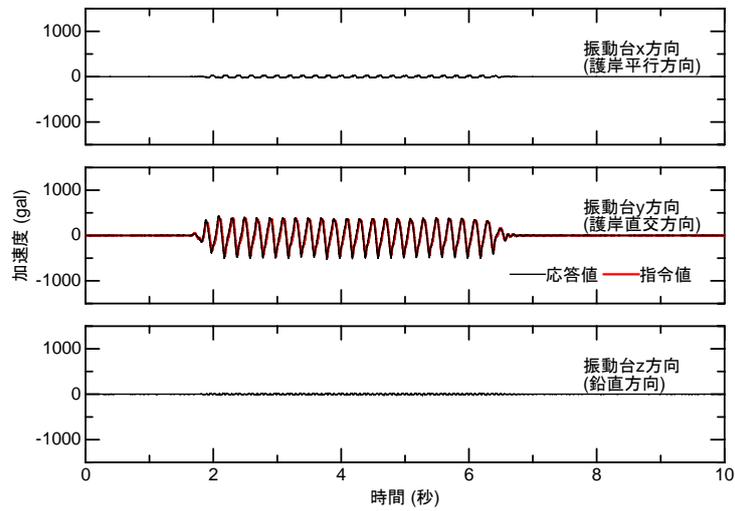


図 20 振動台の加速度 (Case 16-2)

図 21、図 22 に測線-2 および測線-3 で測定した加速度と過剰間隙水圧の時刻歴を示す。測線 2、3 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、加速度振幅の大きさは入力波のそれと比べて非常に小さくなっていること、スパイク状のピークが生じていることなど、液状化した土特有の加速度波形が見られた。

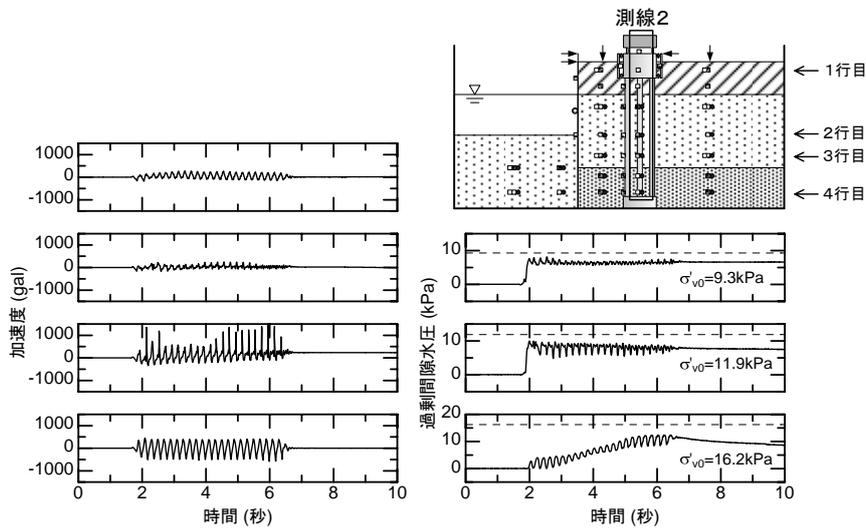


図 21 測線-2 (杭の横) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴 (Case 16-2)

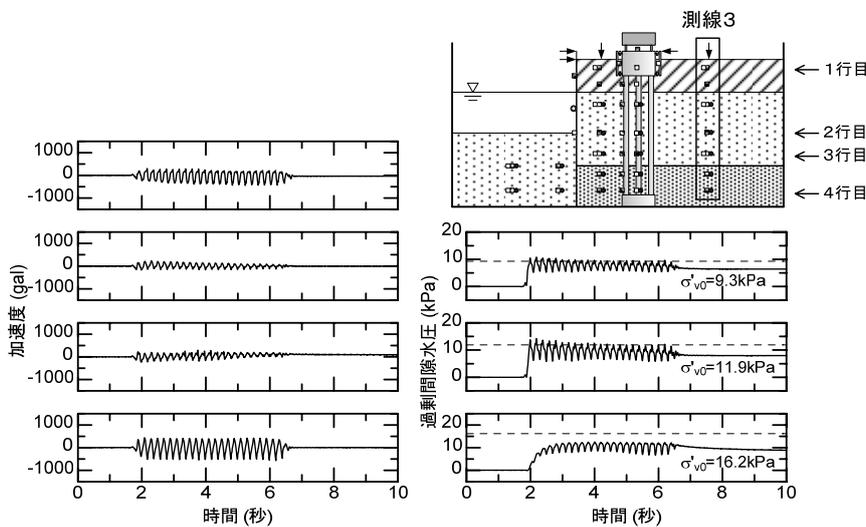


図 22 測線-3 (陸側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴 (Case 16-2)

図 23、図 24 は矢板近くの測線 1 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 では大きな矢板変位により、下方において振動中に過剰間隙水圧の低下が見られる。この測線での加速度記録も測線 2、3 と同様に振幅が入力地震動と比べて小さくなっているが、測線 4 でのその程度は小さい。

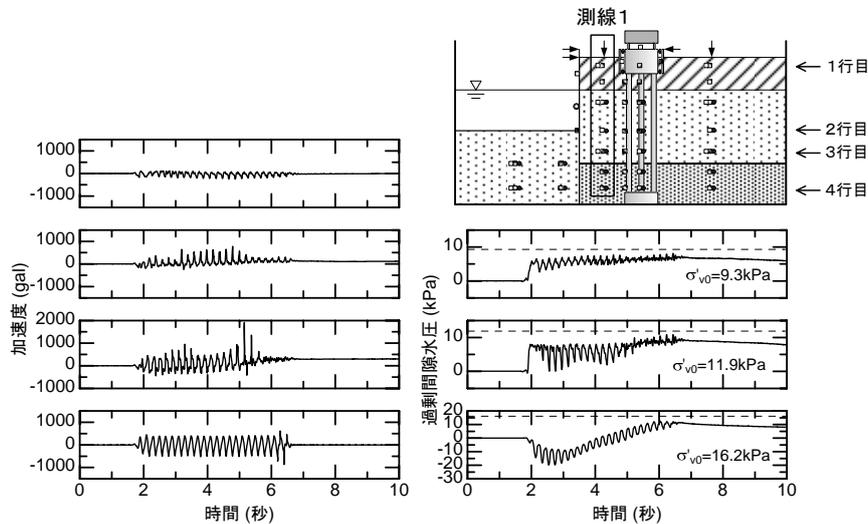


図 23 測線-1 (矢板と杭の間) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴 (Case 16-2)

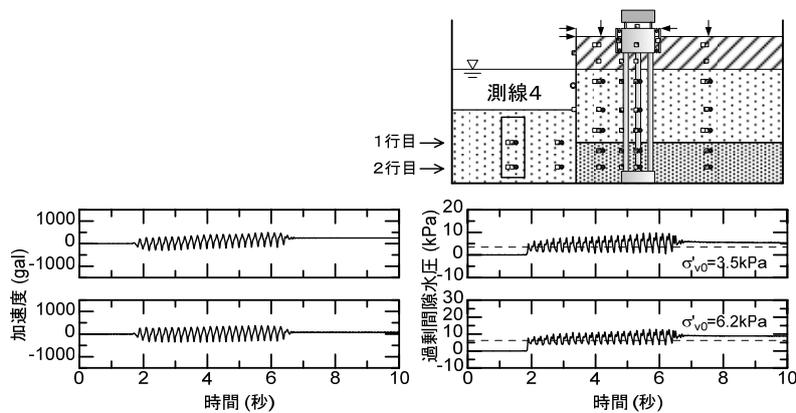


図 24 測線-4 (海側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴 (Case 16-2)

ii) 構造物の応答

図 25 に構造物の応答並びに杭の曲げひずみの時刻歴を示す。ここで示す曲げひずみは奥行き方向中央の列のもので、杭 4 は矢板側、杭 6 は陸側に対応する。フーチング変位の時刻歴を示した図中、細線は実際に観測されたものを、太線は振動成分を取り除いたものを示している。いずれのデータも Case 16-1 と比べると、加振方向が護岸直交方向であることから、明らかに振動成分が大きくなっている。変位に着目すると、矢板背後地盤が液状化するまでの間は ($t=2\sim3$ 秒)、Case 16-1 と同様、フーチング、矢板共に急激に変位が増加している。 $t=2.26$ 秒でフーチングの累積水平変位は最大 (5.35mm) となった。その後、矢板変位は徐々に増加するものの、フーチング変位は減少に転じ、振動終了時には、ほぼ元の位置に戻ってきている。曲げひずみの時刻歴はフ

グ変位の変化と対応している。曲げひずみの大きさは杭の位置によらずほぼ同じであった。

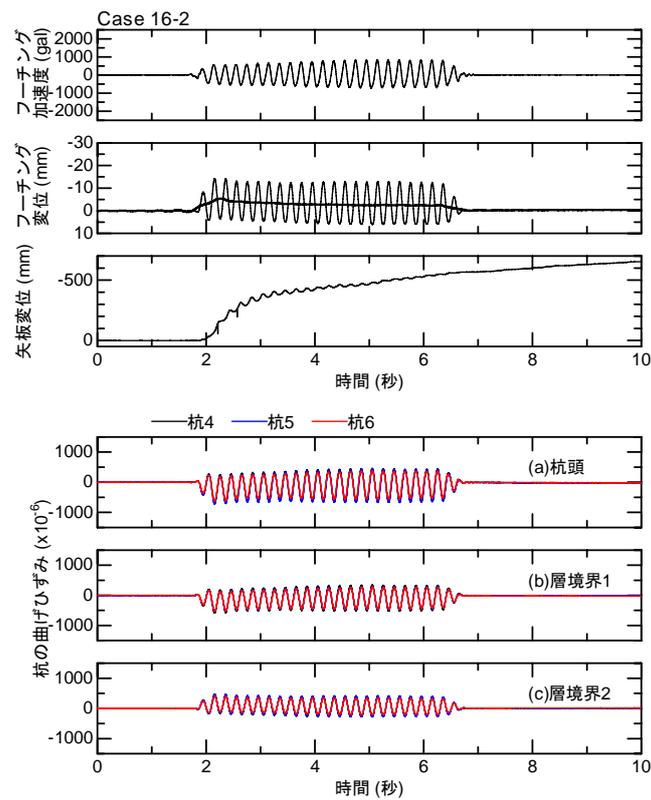
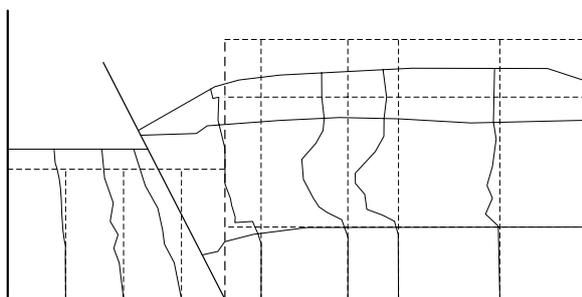


図 25 構造物の応答と杭の曲げひずみの時刻歴 (Case 16-2)

iii) 地盤の変形

加振後の地盤の変形状況を図 26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 65cmであった。地盤変形のモードは基本的にCase 16-1と同様である。



地盤変形状況

外観写真

図 26 加振後の模型の状況 (Case 16-2)

iv) 杭のモーメントと土圧

フーチングの累積水平変位が最大となる時点 ($t=2.26$ 秒) での杭の曲げモーメント、せん断力、及び土圧の深度分布を図 27に示す。杭の曲げモーメント分布を 5 次の多項式で近似し、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。表層付近(深さ 0.2~0.4m)において、比較的大きな右方向への土圧増加が見られる。これは、矢板変形により地表面が大きく沈下していることを考えると、液状化しない表層地盤の海側への変位によって発生したものと考えられる。液状化層での杭に作用するせん断力、土圧分布を見ると、中央杭のそれらは、両端の杭と比べると異なっている。これは、Case 16-1 の矢板のストラット取外し時と同様、中央杭では地盤の変形により杭に作用する土圧の変化が発生したのではなく、土圧が直接作用する外側の杭の変形に従ってフーチングが矢板側に変位した結果、中央杭が主働杭となり、地盤反力が増加した結果であると解釈できる。下部の支持層(1.3m以深)では、Case 16-1 と同様、杭 4(矢板側杭)において、大きな左向きの土圧増加が見られた。

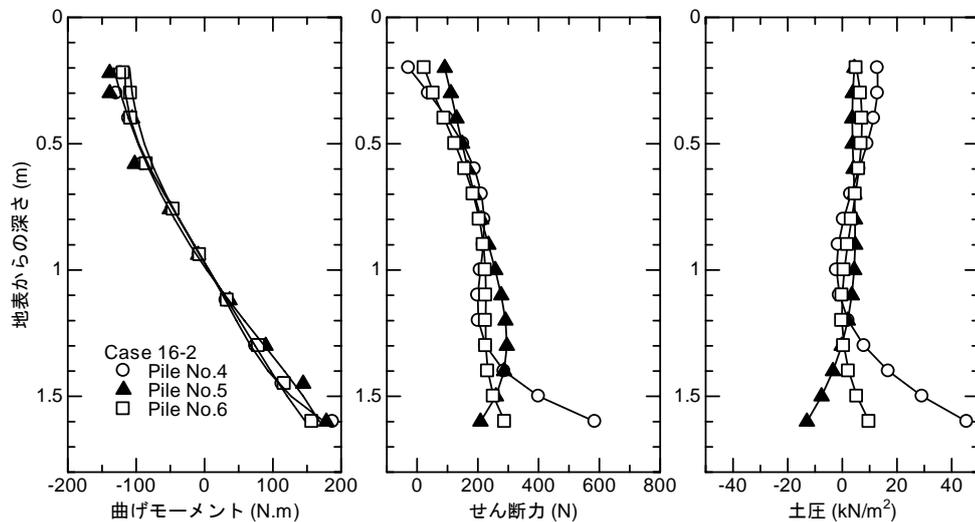


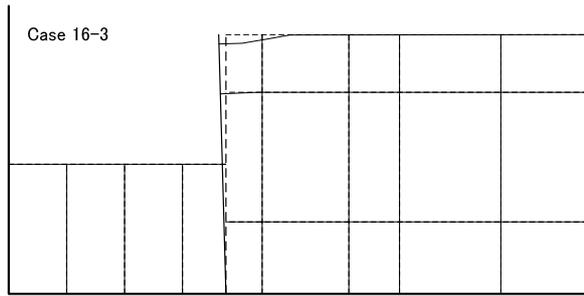
図 27 累積フーチング変位最大時の杭の曲げモーメント、せん断力、土圧分布 (Case 16-1)

3) Case16-3 実験結果

a) 矢板ストラット取外し時

i) 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43mm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28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。



地盤変形状況

外観写真

図 28 加振直前の模型の状況 (Case 16-3)

ii) 杭のモーメント分布

矢板支持用のストラットの取外しにより杭に生じた曲げモーメント分布を全ての杭について図29に示す。杭の曲げモーメント分布や土圧は杭位置によって異なり、地盤の主働化により、護岸側で大きな土圧変化が発生したことがわかる。

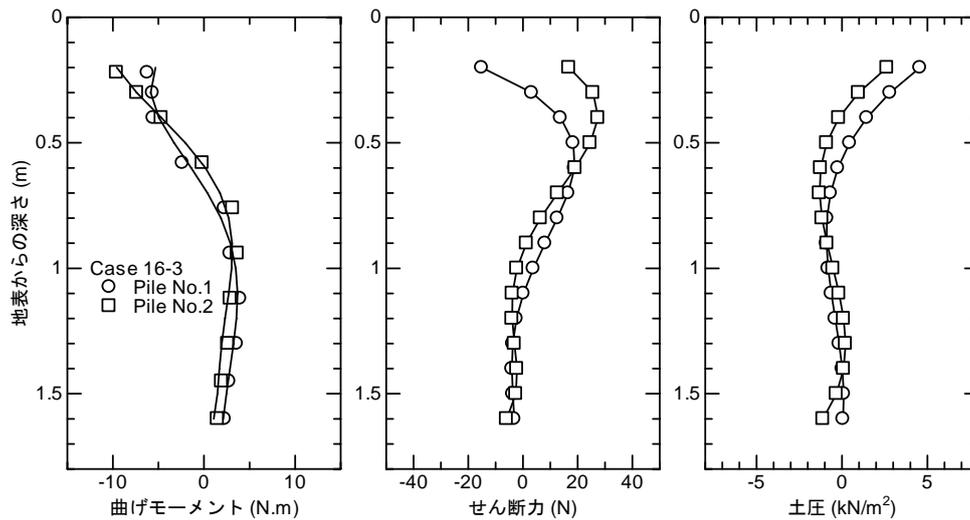


図 29 加振直前の杭の曲げモーメント、せん断力、土圧分布 (Case 16-3)

b) 振動実験

i) 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 30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。

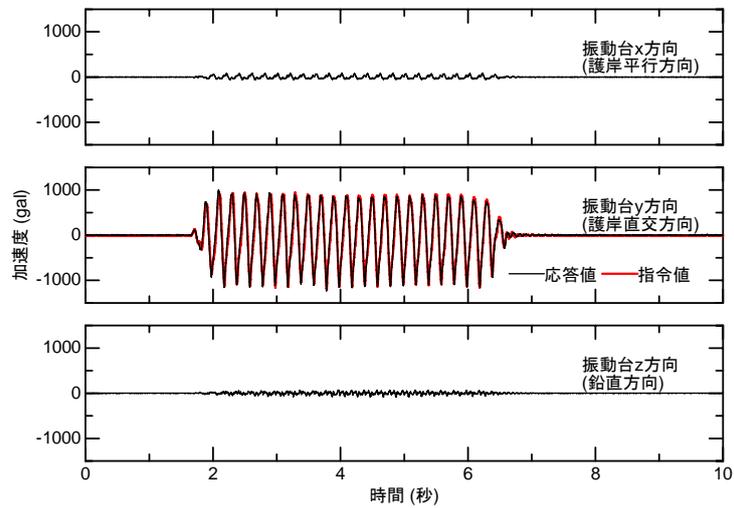


図 30 振動台の加速度 (Case 16-3)

図 31、図 32 に測線-2 および測線-3 で測定した加速度と過剰間隙水圧の時刻歴を示す。測線 2、3 の何れにおいても加振半ばまでに最下層 (Dr=90%豊浦砂層) まで過剰間隙水圧はほぼ有効上載圧に達している。いずれの計測点においても、液状化に達した時点で明確な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が見られた。

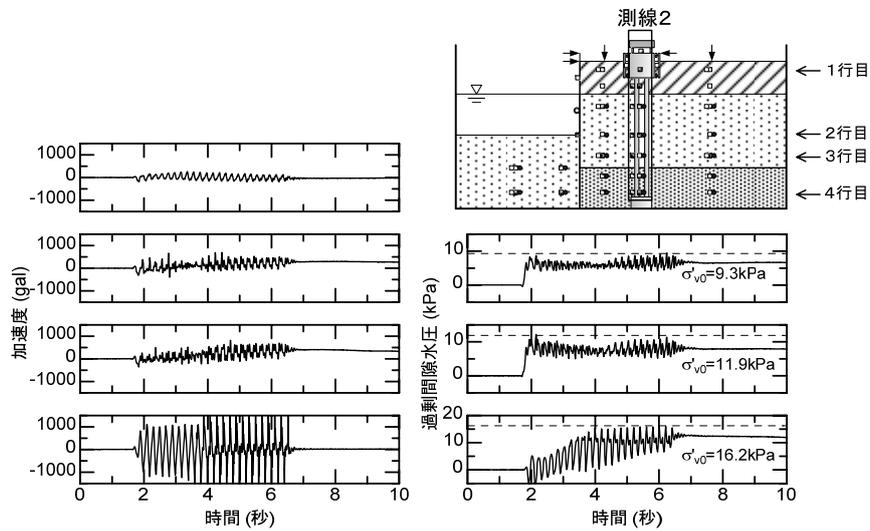


図 31 測線-2 (杭の横) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴 (Case 16-3)

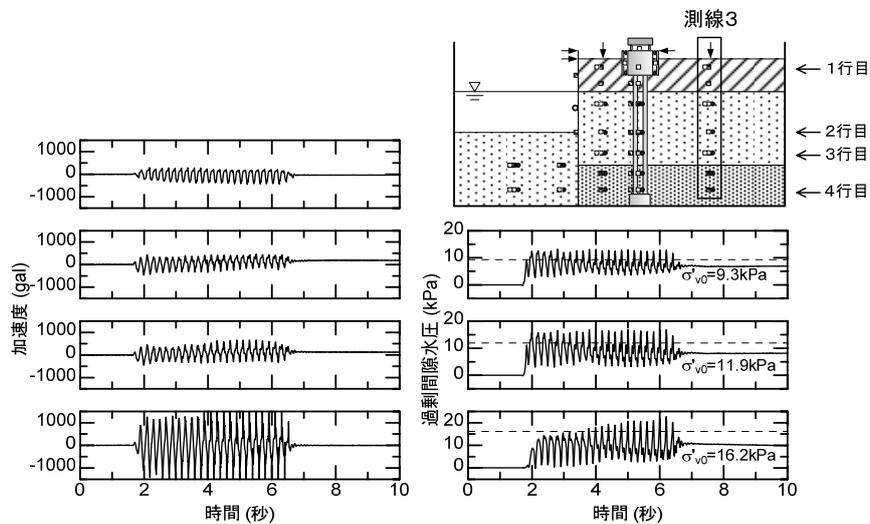


図 32 測線-3 (陸側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴 (Case 16-3)

図 33、図 34 は矢板近くの測線 1 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 では大きな矢板変位により、下方において振動中に過剰間隙水圧の低下が見られるが、加振半ばにはほぼ初期有効上載圧に達し、液状化を呈している。この測線での加速度記録も測線 2、3 と同様に振幅が入力地震動と比べて小さくなっているが、測線 4 でのその程度は小さい。また測線 4 での過剰間隙水圧の時刻歴を見ると、他のケースと比べて非常に大きな振動成分があることが分かる。

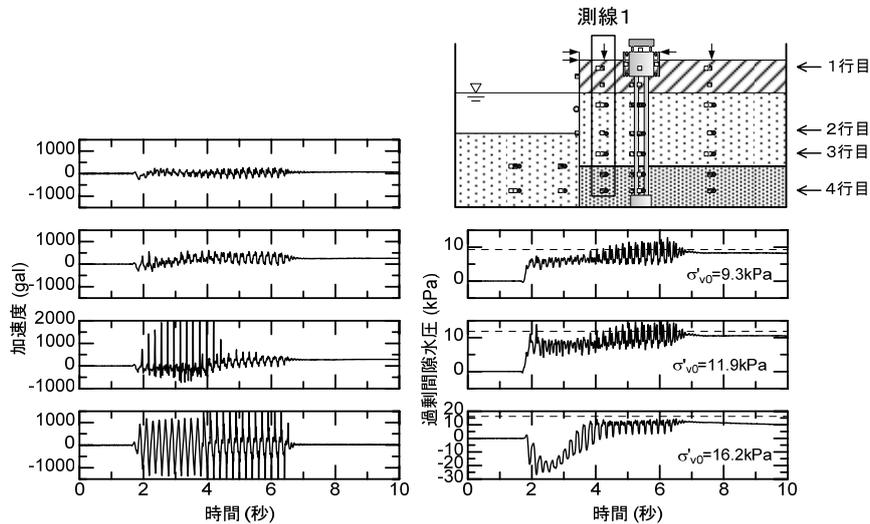


図 33 測線-1 (矢板と杭の間) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴 (Case 16-3)

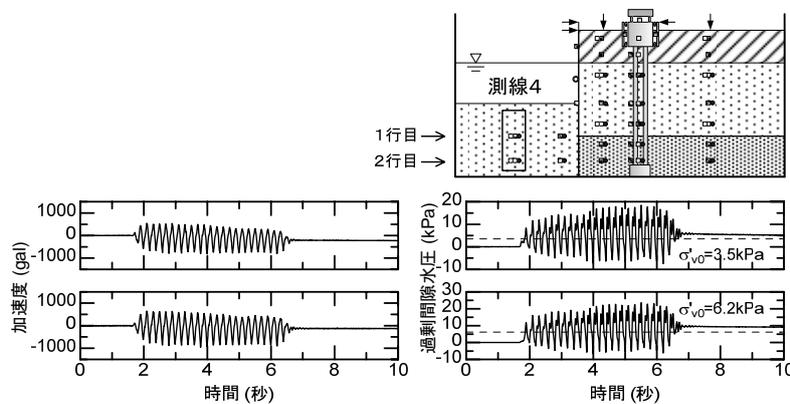


図 34 測線-4 (海側) での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴 (Case 16-3)

ii) 構造物の応答

図 35 に構造物の応答並びに杭の曲げひずみの時刻歴を示す。ここで示す曲げひずみは奥行き方向中央の列のもので、杭 4 は矢板側、杭 6 は陸側に対応する。フーチング変位の時刻歴を示した図中、細線は実際に観測されたものを、太線は振動成分を取り除いたものを示している。フーチングの加速度記録を見ると、液状化の進行と共に振幅が大きくなっていることが分かる。変位に着目すると、矢板背後地盤が液状化するまでの間は(t=2~3秒)、Case 16-2 と同様、フーチング、矢板共に急激に変位が増加している。t=2.34秒でフーチングの累積水平変位は最大(15.0mm)となった。杭本数が少ない本ケースでのフーチング変位の最大値は、他のケースと比べて非常に

くなっている。その後、矢板変位は徐々に増加するものの、フーチング変位は減少に転じ、振動終了時には、ほぼ元の位置に戻ってきている。曲げひずみの大きさは杭の位置によらずほぼ同じであり、曲げひずみの時刻歴はフーチング変位の変化と対応しているが、このケースでは、杭頭付近での最大曲げひずみは降伏値(1,000 μ 程度)を超えており、他のケースや深部にはない、加振終了後のひずみの残留が見られた。

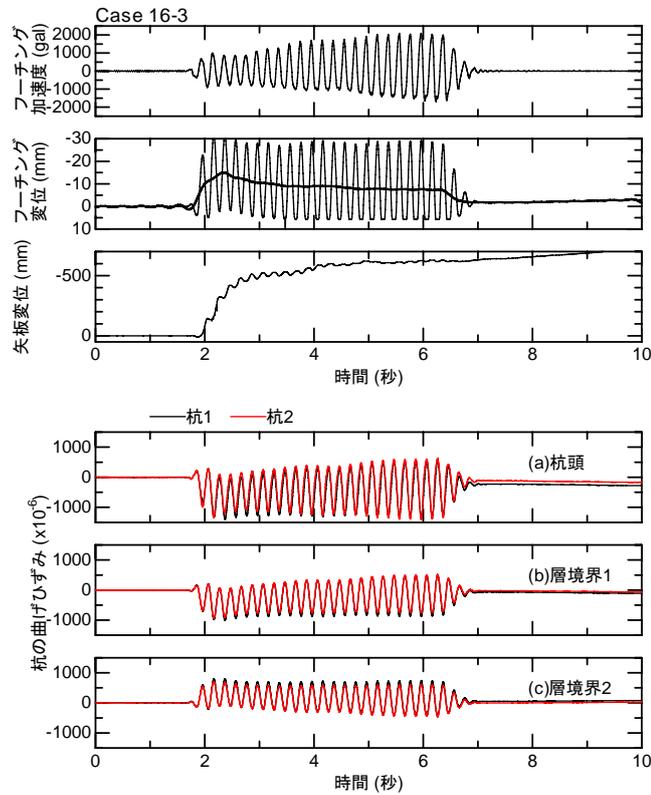
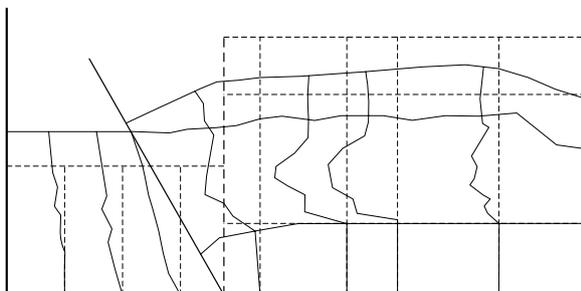


図 35 構造物の応答と杭の曲げひずみの時刻歴 (Case 16-3)

iii) 地盤の変形

加振後の地盤の変形状況を図 36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70cmであった。地盤の変形モードは他のケースとほぼ同様である。



地盤変形状況



外観写真

図 36 加振後の模型の状況 (Case 16-3)

iv) 杭のモーメントと土圧

フーチングの累積水平変位が最大となる時点 ($t=2.34$ 秒)での杭の曲げモーメント、せん断力、及び土圧の深度分布を図 37に示す。曲げひずみの時刻歴のところでも説明したように、杭頭部で非常に大きな曲げひずみが観察された。この図の曲げモーメントは杭が弾性範囲内にとどまっていると仮定して求めているが、杭頭部での曲げひずみの大きさは明らかに降伏値を超えていることから、ここでの曲げモーメントは実際の値よりも大きなものとなっている。そのため特に矢板側の杭の上部で陸側方向の土圧増加が見られるが、実際にこのような土圧変化は発生しなかったと考えられる。

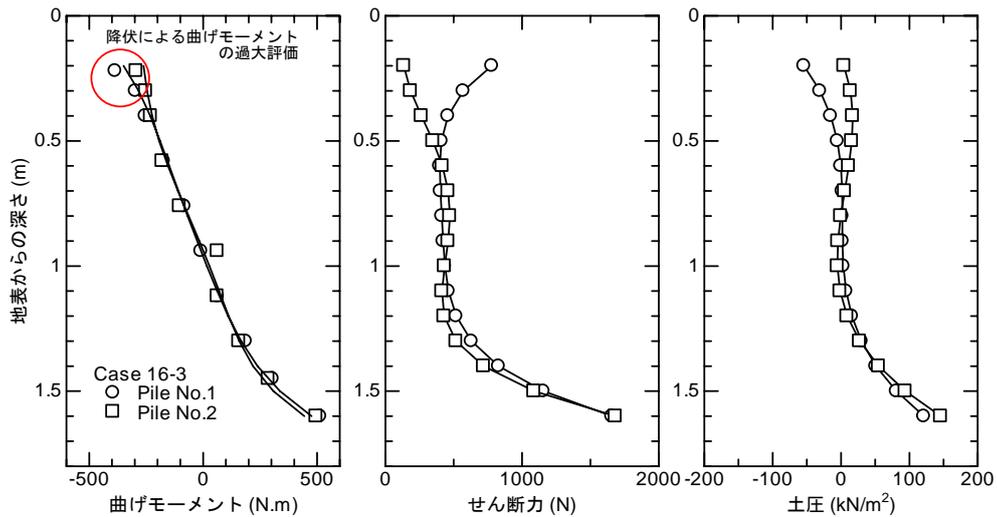


図 37 累積フーチング変位最大時の杭の曲げモーメント、せん断力、土圧分布 (Case 16-1)

4) 実験結果の比較および考察

a) フーチング質量の影響

本年度行ったCase 16-2 と昨年までに行ったフーチング質量の異なるケース (Cases 14-2 & 15-3) を比較することにより、フーチング質量の杭基礎応答に与える影響を検討する。これらのケースでは同じ杭を用い、フーチングの質量だけが異なる (Case 14-2 は 21.6kg で固有振動数 $f_s=14\text{Hz}$ 、Case 15-3 は 170kg で固有振動数 $f_s=7\text{Hz}$ 、Case 16-2 は 320kg で固有振動数 $f_s=4.8\text{Hz}$)。図 38 にフーチングと陸側 (測線 3) 地表面の加速度の時刻歴を示す。ここで、Case 14-2 では入力地震動の正負が他のケースと異なることを明記しておく。フーチングの加速度応答を見ると、どのケースも位相は周辺地盤とほぼ一緒であるが、振幅は杭基礎の固有周期によって異なっている。固有振動数が入力地震動の周波数 (5Hz) に比べて大きなCase 14-2 では、若干複雑な波形になっているものの、振幅自体はそれほど大きく変化していないが、基礎の気中での固有振動数が入力地震動の振動数に近づくほど、振動と共に振幅が大きくなっていることが分かる。これは既往の研究でも指摘されている^{1), 2)} ように、地盤の液状化により地盤の固有振動数が低下し、その結果基礎-地盤系の固有振動数が入力地震動の振動数に近づいたためと考えられる。周辺地盤の加速度応答を見ると、Case 14-3 ではフーチングのそれとほぼ同じであるのに対し、基礎の固有振動数が入力地震動の振動数に近いものでは、振動と共に正側の振幅が負側のそれと比べて小さくなっていることが分かる。加速度計の値は陸側に向かう方向を正としていること、地盤の加速度が正のピークとなるときに地盤は海側最大変位を示していると考えられるが、この時の加速度が小さいということは地盤の陸側への復元力が小さいことを意味している。これには地盤の海側への流動が寄与していると考えられるが、それに加えて基礎の振動による基礎周辺地盤の乱れの影響もあると考えられる。

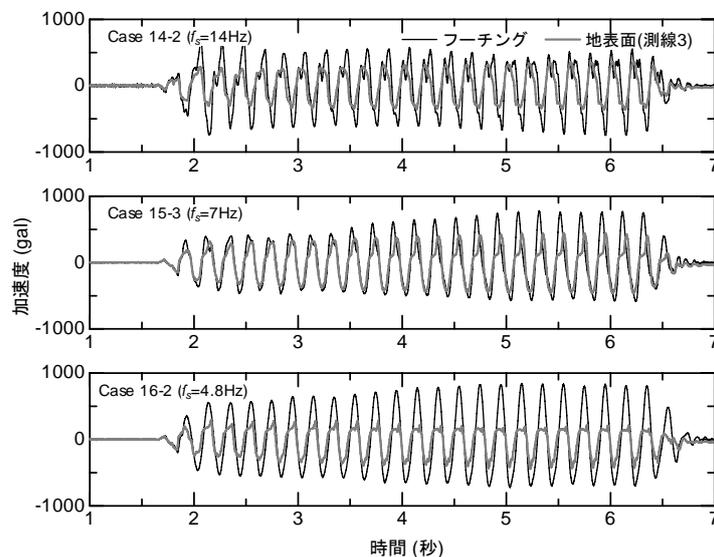


図 38 フーチングと表層地盤 (測線 3) の加速度の時刻歴 (フーチング質量の影響)

図 39 にフーチングすぐ脇の表層地盤 (測線 2) のフーチングに対するの相対水平変位の時刻歴を示す。この相対変位はフーチング近傍の地盤の水平面内でのせん断ひずみと直接関係していると考えられ、この値が大きいほど、フーチング周辺地盤に大きなせん断ひずみが発生していると判断される。各ケースを比較すると、基礎の固有振動数が入力地震動の振動数に近いものほど振幅が大きく、振動と共にその値は大きくなっていることが分かる。これらより、基礎の固有振動

数が入力地震動の振動数に近いものほどフーチング近傍地盤に大きなせん断ひずみが発生していると考えられ、その結果、この付近での地盤の剛性・強度は低下し、図 38で見られたような、陸側地盤での陸側の復元力の低下を招いたと推察される。

図 40 にフーチングの水平変位と、地表面より 0.4m の深さの地点で、観測窓側の陸側杭 (杭 3) に作用する土圧の時刻歴を示す。フーチング加速度の時刻歴でも見られたように、基礎の固有振動数が入力地震動の振動数に近いものほど変位振幅が大きくなっている。その結果生じた、上述したような基礎周辺地盤の剛性・強度低下により、振幅が小さなものでは、振動終了時に若干永久変位が残っているものの、その大きさは基礎の固有振動数が入力地震動の振動数に近いものでは非常に小さく、Case 16-2 では完全に元の位置に戻ってきている。この時杭に作用する土圧はフーチングの応答変位の大きさに従って、大きくなっていることも分かる。

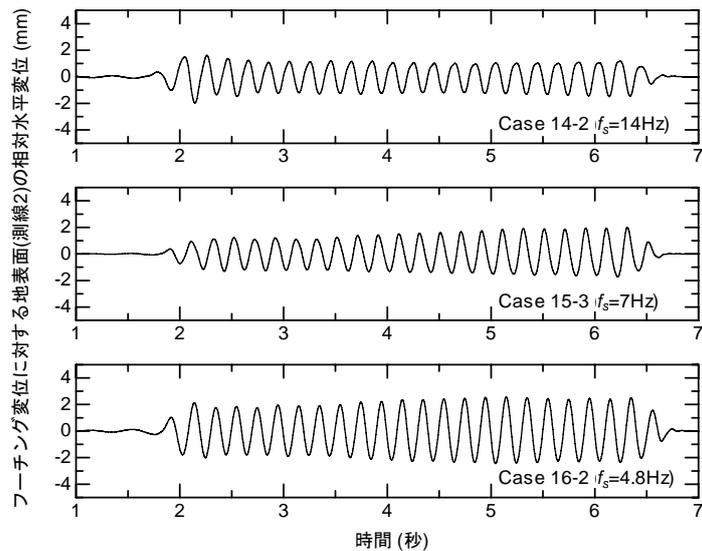


図 39 表層地盤(測線 2)のフーチングに対する相対水平変位の時刻歴(フーチング質量の影響)

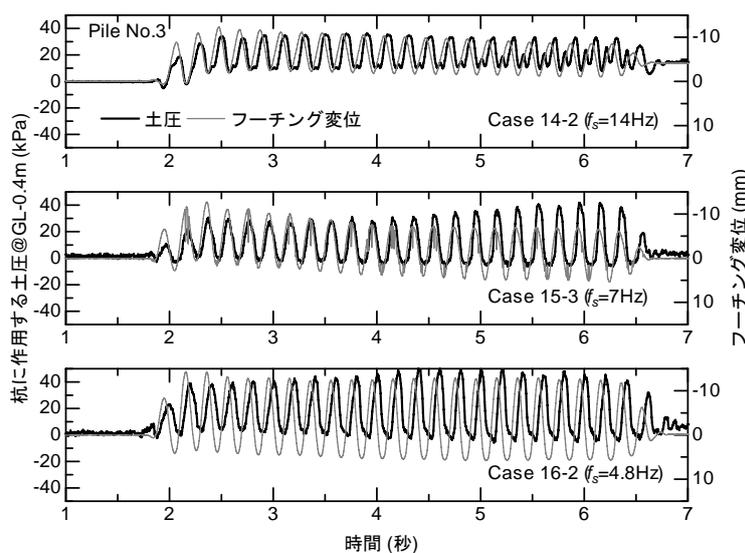


図 40 フーチングの水平変位と GL-0.4m 位置で杭に作用する土圧の時刻歴(フーチング質量の影響)

b) 加振方向の影響

本年度行った流動直交方向に地震動を入力したCase 16-1 と昨年度行った流動方向に地震動を入力したCase 15-3 を比較することにより、加振方向の杭基礎応答に与える影響を検討する。これらのケースでは地震動入力方向を除き、条件は同じである。ただし、Case 16-1 の入力地震動の大きさは、最大加速度で35%ほどCase 15-3 と比べて大きかったことを明記しておく。図 41にフーチングの水平変位と、地表面より 0.4mの深さの地点で、観測窓側の陸側杭(杭 3)に作用する土圧の時刻歴を示す。合わせて累積成分のみを取り出した線も図中に示している。予想されたとおり、流動直交方向加振のCase 16-1 では、フーチング変位、土圧共に振動成分が小さくなっている。(1)このケースでの入力地震動は流動方向加振のCase 15-3 と比べて大きいこと、(2) 矢板の変位量は両ケースとも同程度であったことを考えると、流動直交方向加振のケースでの基礎の変位は、流動方向加振のものと同等若しくはそれ以上となっても良さそうであるが、累積成分を比較しても流動方向加振のケースと比べて小さくなっている。加振終了直後を比較すると、どちらもフーチングの永久変位はほとんどないが、作用している土圧は同程度であることから、基礎の応答のうち、振動成分は加振方向の影響を強く受けているようであるが、残留値に関しては、その影響を受けないのかもしれない。

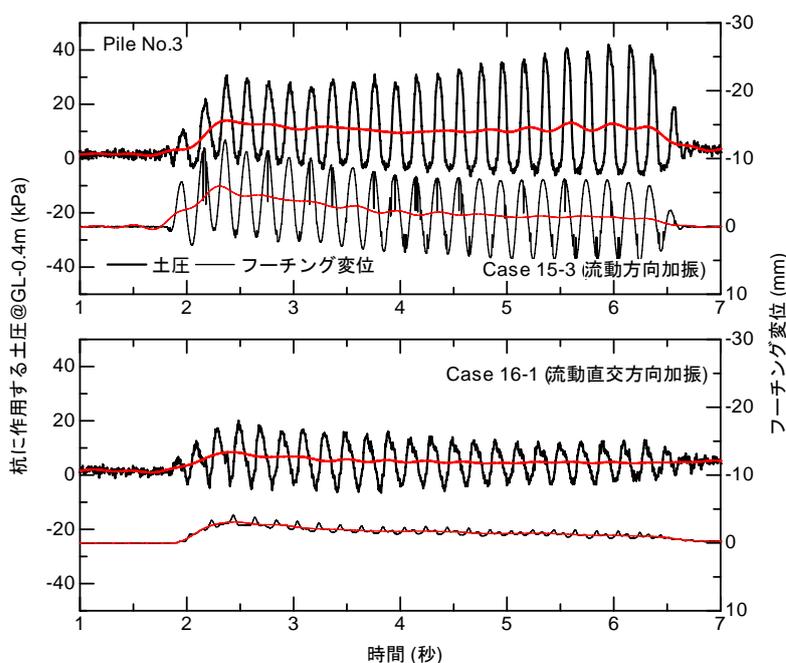


図 41 フーチングの水平変位と GL-0.4m 位置で杭に作用する土圧の時刻歴 (加振方向の影響)

c) 塑性変形を生じる杭基礎の応答について

本実験シリーズでは、杭諸元は杭の応答が弾性範囲内にとどまるように決定したが、最後に実施したCase 16-3 では、(1) 杭の本数を 9 本から 4 本に減らし(但し気中での固有振動数はCase 16-2 と同じ 4.8Hzに合わせた)、(2) 大きな地震動を流動方向に入力することによって、杭に塑性変形が生じるように、基礎の条件を設定した。入力地震動を最大加速度で他のケースの 2.5 倍となるように設定したため、液状化層下の支持層においても、図 31～図 33に示されるように液状化が発生し、大きな地盤流動を発生させることができた。このときのフーチングの応答は図 35に示されているように、振動とともにその加速度振幅は増大しており、地盤の液状化により地盤の

固有振動数が低下し、その結果基礎—地盤系の固有振動数が入力地震動の振動数に近づいた様子が見て取れる。同図に示されているように、杭の曲げひずみは杭頭付近において降伏値を超え、振動終了後に残留ひずみが発生していたことから、杭に塑性変形を生じさせることに成功したといえる。

当初の本ケースの目的は、杭の破壊メカニズムを調べることであったが、実験で発生した杭頭部での塑性変形が地盤流動によって発生したものなのか、大きなフーチングの動的応答によって発生したのかは、今回の実験結果からは判断することができなかった。したがって、今後このような杭の破壊メカニズム解明の試みがなされるのであれば、フーチングや上部工の慣性力の影響が少ないケースも実施することによって、上部工慣性力の杭破壊への寄与度を調べたほうがよいと考えられる。

(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、振動実験を実施した。実験では、加振方向、杭基礎模型の固有周期、杭本数を変化させることにより、これら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調べることを目的として、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、護岸直交方向加振のケースの方が平行方向加振のものよりも地盤の液状化の程度が大きくなる。また、平行方向加振のケースでは、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) 基礎の固有振動数が入力地震動の卓越周波数に近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る。
- 3) 矢板背後地盤が液状化するまでの間は、フーチングの累積変位は急激に増加するもののその後減少に転じ、振動終了時にはほぼ元の位置に戻ってきた。この傾向は、フーチングに作用する慣性力が大きなものほど顕著であった。これは、本実験シリーズで用いた杭が、塑性変形を生じさせないように比較的硬く設計されたためであり、柔な基礎を用いた場合にはこのような現象は起こらず、永久変形が生じると考えられる。
- 4) 本実験条件下では、加振方向の基礎応答に与える影響は、振動成分に対しては大きいものの、残留値に対しては小さかった。
- 5) 杭基礎を強地盤振動下に置くことによって、杭に塑性変形を生じさせることができた。その結果、側方流動に対する基礎の破壊メカニズムを解明するための基礎的なデータを得ることができた。

(e) 引用文献

- 1) 足立紀尚、龍岡文夫：新体系土木工学 18 土の力学（Ⅲ）-圧密・せん断・動的解析-、土木学会編、pp. 312-322、技報堂出版、1981
- 2) 佐藤直毅、田村敬一、東拓生、小林寛：「液状化の進行過程における杭基礎の振動挙動に関する実験的研究」、第26回地震工学研究発表会、pp. 849~852、2001. 8

(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
田村敬一 岡村未対 谷本俊輔	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
谷本俊輔 杉田秀樹 高橋章浩 田村敬一 岡村未対	加振方向に着目した流動化時の杭基礎に関する振動台実験	日本地震工学会・大会-2004、東京	2005. 1

(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

(3) 平成14～16年度業務のまとめ

本業務では、矢板式護岸と護岸背後に杭基礎を有する地盤模型を作成し、加振方向、杭頭の固定条件、上部構造物の重量等を種々変更させた振動台実験を行うことにより、側方流動が生じる地盤の挙動および側方流動が生じる地盤と杭基礎の相互作用に関する詳細なデータを得た。また、得られたデータを解析し、以下に示す様々な知見を得た。

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体作製するとともに、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した。得られたデータの解析を行い、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について調べた。
- ・ 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。
- ・ 上部構造物が無い場合でも、非液状化層と杭基礎の相互作用の違いにより、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ることが明らかとなった。

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3体作製するとともに、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した。得られたデータを解析し、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した。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した。
- ・ 14年度の模型から矢板模型の分割長を変更した結果、地盤の流動変位が大きくなり、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を明らかにした。
- ・ 振動台に入力する鉛直動は、地盤の流動変位量の増加に大きく寄与することを明らかにした。
- ・ 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を明らかにした。

3) 平成16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3体作製するとともに、これら試験体を、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した。得られたデータを解析し、加振方向の違い、フーチング重量（構造物の固有周期）の違いおよび杭の塑性化が地盤と杭の応答に及ぼす影響を分析した。
- ・ 基礎の固有振動数と入力地震動の卓越周波数が近いほどフーチングは大きく振動し、基礎周辺地盤のゆるみが大きくなる結果、基礎の残留変位が小さくなることを明らかにした。
- ・ 加振方向が振動後の基礎の残留変位に与える影響は小さいこと等が明らかとなった。
- ・ 強振動を受ける地盤中に杭基礎を置くことにより、杭に塑性変形を与えることができ、側方流動に対する基礎の破壊メカニズムを解明に資する基礎的なデータを得ることができた。