

3) 加振方向の違いの影響

今年度行った2ケースの実験は、条件の同じ2つの模型を異なる方向に加振したものである。これら模型の応答を比較することにより、加振方向の違いの影響を検討する。

まず、2ケースでの振動台加速度（加振方向）の時刻歴を図25に示す。両ケースで振動台加速度はほとんど一致しており、再現性が確認できる。これに対し、土槽上面に取り付けた加速度の時刻歴は、Case1-2がCase1-1と比較して約30~50%程度大きくなっていることがわかる。本研究で使用した土槽は底板の平面形状が4.4m×1.4mであり、Case1-1ではこの長辺方向に、Case1-2では短辺方向にそれぞれ加振した。そのためCase1-2では土槽が若干ロッキング運動し、土槽上面での加速度が増幅したものと考えられる。

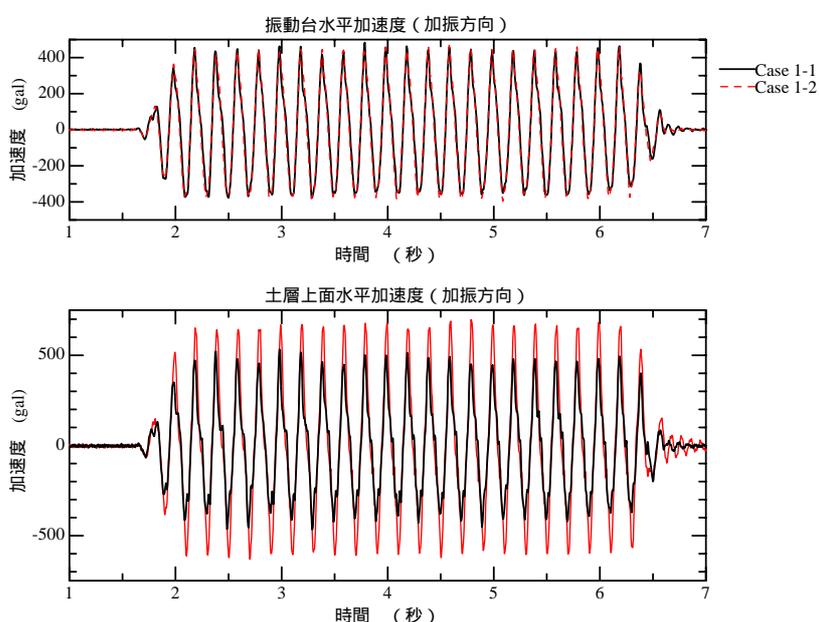


図25 振動台と土槽上面で加振方向加速度

図26は矢板護岸上部とフーチングの流動方向の水平変位である。本研究で使用した矢板は、土層側面摩擦の影響を低減するために模型の奥行き方向（流動方向に直交する方向）に3分割している。写真4はCase1-2後の3枚の矢板を上方から撮影したものである。側面の矢板は、土及び矢板と側面の摩擦の影響を受けるのに対し、中央部の矢板は摩擦の影響がほとんど無いこと、フーチング近傍の土杭とフーチングによって流動変形量が小さいこと、によって、3枚の矢板の変位量はかなり異なったものとなった。以後、原則として中央部の矢板の測定結果を示すこととするが、矢板が大きく変位したCase1-1では加振中に変位計の測定範囲を越えたので、側面側の矢板の測定値も併せて示す。



写真 4 3分割した矢板と地盤表面の変形状況 (Case1-2)

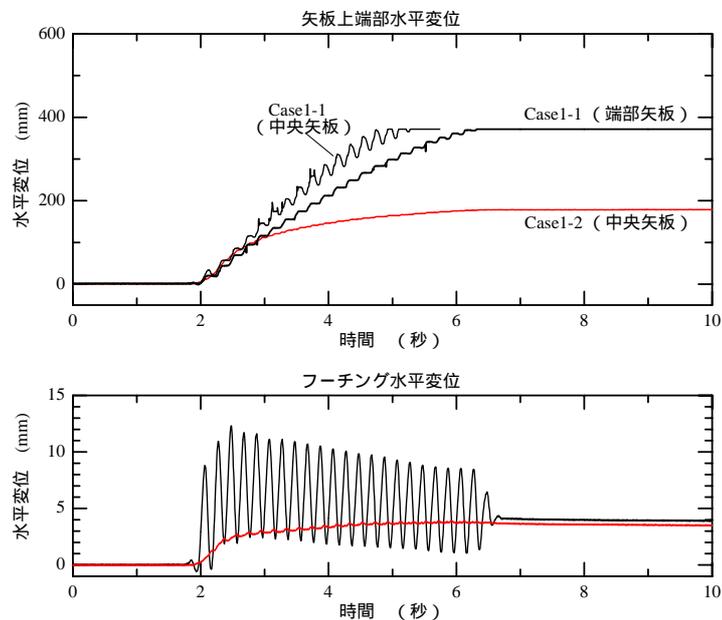


図 26 矢板とフーチングの水平変位 (流動方向)

何れのケースでも、矢板およびフーチングの変位は加振終了 ($t=6.5$ 秒) と同時に止まった。これまでに行われた数多くの護岸や傾斜地盤の振動台実験のほとんどで加振終了と同時に地盤の変形が停止することが報告されており (Okamura et al., 2001)、本実験の結果もこれと整合している。

護岸直交方向 (流動方向) に加振した Case1-1 では、矢板の水平変位は概ね一定の速度で増加している。これに対し、Case1-2 では加振開始直後の変位速度は大きい、およそ $t=3$ 秒以降では変位速度が急減し、最終的な変位量は Case1-1 の $1/2$ 以下となった。

フーチングの変位量については、Case1-2 では変位振幅は小さく、また矢板の変位量と同様の増加傾向を示し、加振後半での変位増分は小さい。Case1-1 では大きな変位振幅が見られ、変位量は $t=2.5$ 秒付近まで増加した後に減少に転じ、加振終了後の変位量は Case1-2 とほぼ同じとなった。

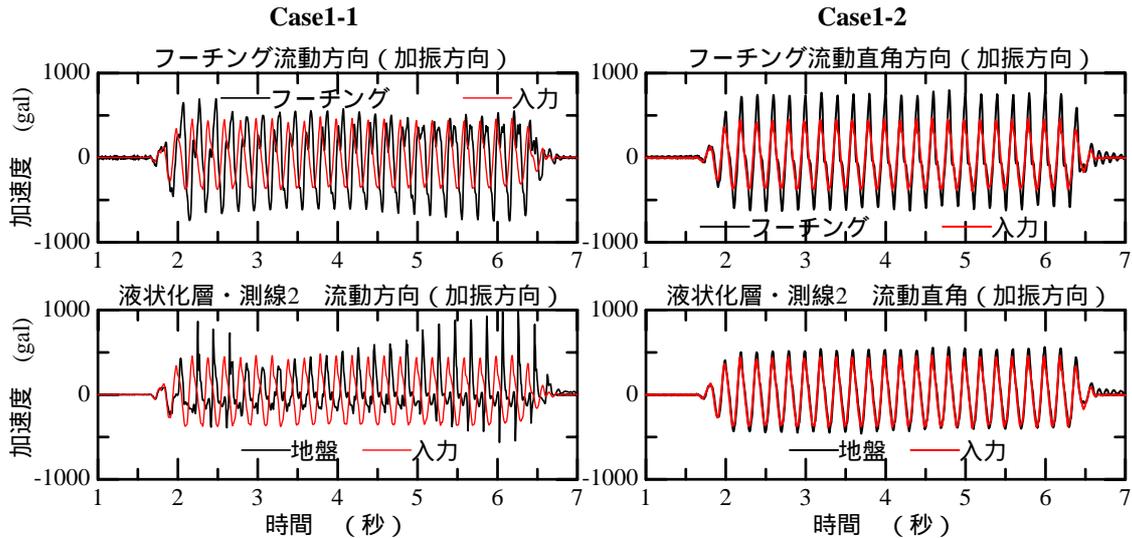


図 27 液状化層中央深度での加速度とフーチング加速度（何れも加振方向）

図 27 は、液状化層とフーチングの加振方向の加速度を入力加速度と比較したものである。液状化層の加速度は、杭の脇（測線 2）において $Dr=35\%$ 豊浦砂層中央深度で計測したものである。Case1-1 の地盤加速度は、最初の 1 波は位相、振幅共に入力加速度とほぼ等しく、2 波目以降では液状化した土に特有のスパイク状の波形が現れている。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。2 波以降では地盤はほぼ逆位相で振動しており、地盤の固有振動数が入力(5Hz)よりも小さくなっていることがわかる。

フーチングの加速度は、地盤と同様に 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 波目以降は若干の位相遅れと増幅が見られる。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周期が長くなる。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周期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 10Hz 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ものと考えられる。平成 15 年度には、適切な上部工模型を杭頭部に取り付けた実験を行い、過渡的な共振状態についても調べる必要があるものと考えられる。

Case1-2 の地盤加速度は若干の増幅が見られることを除いて入力波形とほぼ一致している。これは、過剰間隙水圧がほぼ 100%に達した測線 1 の液状化層での加速度についても言える。Case1-2 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。このような拘束条件下にある砂は、せん断変形が生じなくても少しの衝撃によって液状化するような、極めて緩い状態でなければ液状化しないものと考えられる。Case1-2 ではフーチング加速度にも位相遅れは見られない。

4 深度における杭の曲げひずみ時刻歴を図 28 に示す。ここでは一例として杭 1 と杭 3 について示した。Case1-1 では全ての深度において、 $t=2.3$ 秒付近で曲げひずみの絶対値が最大となり、その後減少しており、この傾向は杭頭変位の時刻歴と一致している。

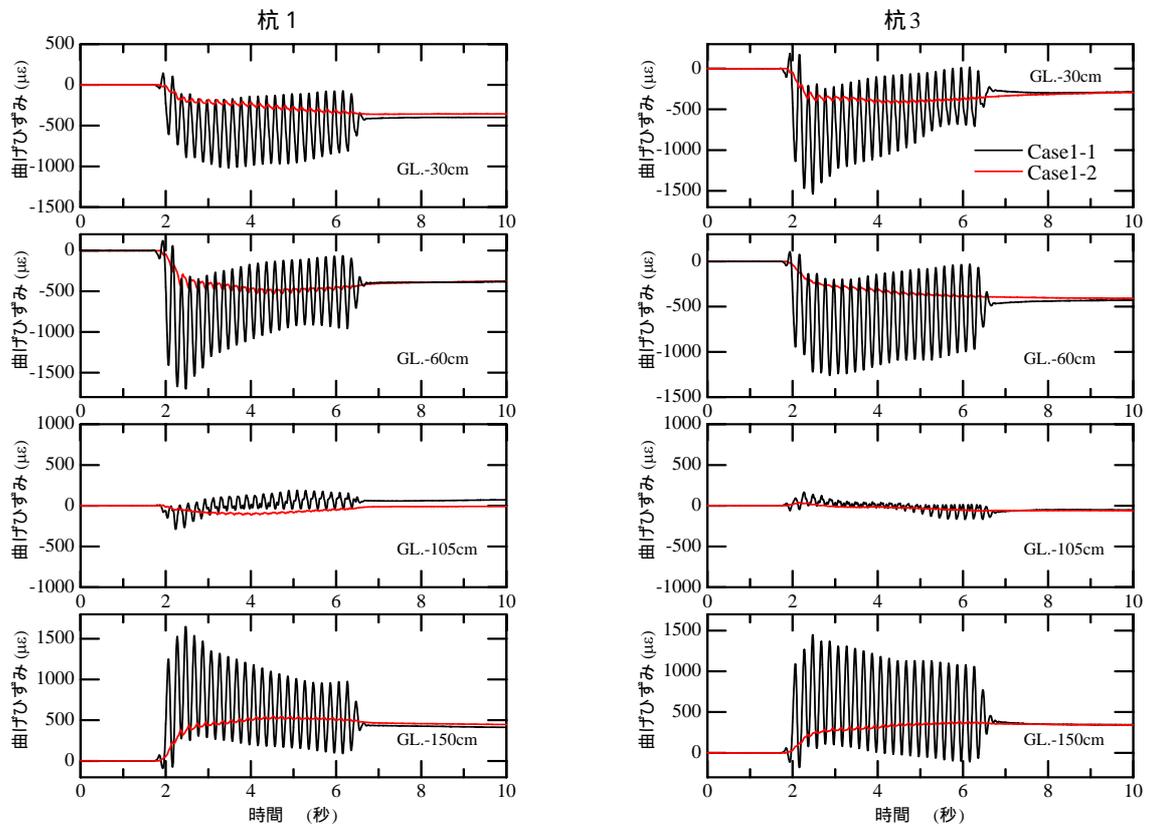


図 28 杭の曲げひずみ

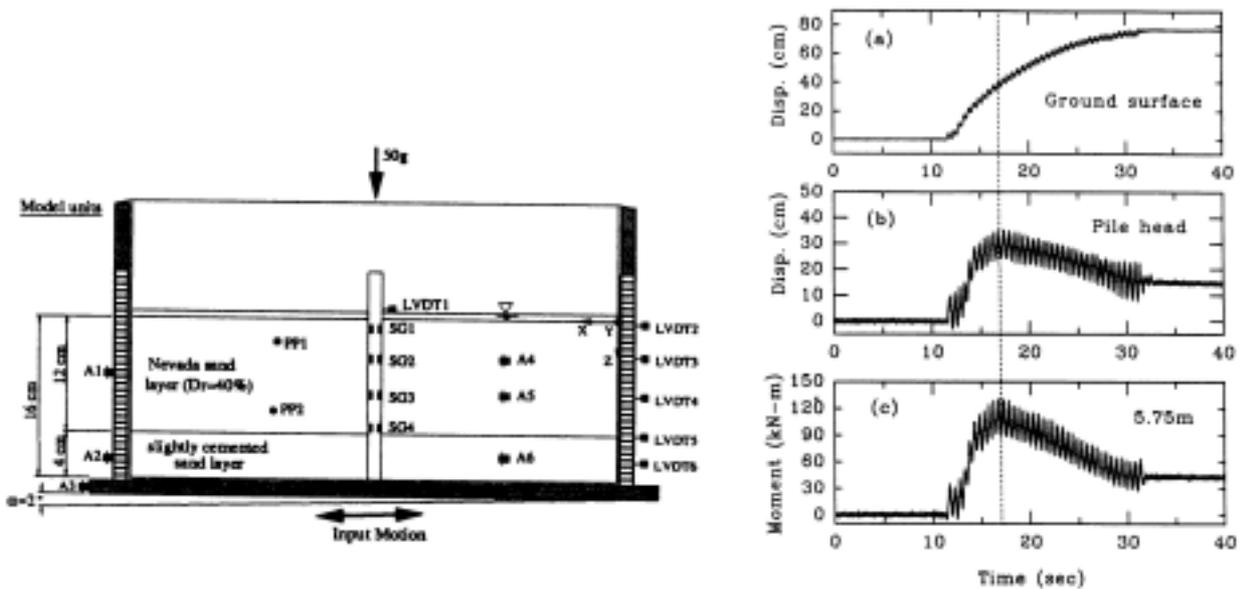


図 29 液状化により流動する地盤中の杭の遠心模型実験(after Tarek and Dobry, 1998)

このような杭頭の変位および杭のひずみの経時変化は傾斜した液状化地盤中の杭の遠心模型実験でも観測されている(Abdoun and Dobry, 1998)。図 29 は Abdoun and Dobry が行った実験模型と結果である。彼らは層厚 2m の支持層とその上に 6m の液状化層を作製し、直径 60cm の単杭を埋め込んだ後に土槽全体を 2° 傾斜させ、50g の遠心力場で流動方向に平行に加振した。実験では t=約 12 秒で液状化層が液状化し、地盤表面が約 40cm (杭径の約 65%) 水平変位したところで杭の変位及び曲げひずみがピークとなり、その後減少した。

Case1-1 では、地盤の過剰間隙水圧比が 1 に達した時点ではなく、その後ある程度変形が進んだ時点で変位及びひずみのピークが現れており、このことについても Abdoun and Dobry の結果と一致している。Case1-1 において、t=2.3 秒での矢板頭部の水平変位は約 70mm であり最終的な変位量の 1/6 である。加振終了後の地盤の変形状況(図 15) より、杭脇位置で液状化層の水平変位量はおよそ 180mm ののであるから、t=2.3 秒の時点では 30mm(=180/6)程度であると推測される。この場合、杭径の約 60%の地盤変位量の時点で杭の変位およびひずみがピークを迎えたことになる。

Case1-1 と Case1-2 ひずみを比較すると、Case1-1 でひずみ振幅が顕著であることがわかる。Case1-1 では、加振方向に土が振動しながら徐々に海側への変位を蓄積させていった。このとき、例えば測線 2 の液状化層での加速度記録の正負両方向にスパイクが見られることから、土の変位振幅はある程度大きいものと考えられる(Dr=40%の豊浦砂の液状化試験でサイクリックモビリティが生じるためには、7~20%以上の両ひずみ振幅が必要である)。したがって、Case1-1 での大きなひずみ振幅は、水平方向に繰り返し変位する土が杭を押し出すことにより発生したものといえる。Abdoun and Dobry の実験では、Case1-1 ほどにはひずみ振幅が顕著ではない。彼らの模型と Case1-1 とでは、地盤表面の非液状化層の有無が異なる。非液状化層から杭に作用する土圧が大きかったために、Case1-1 でひずみ振幅が大きくなったものと推測される。

Case1-1 と Case1-2 のフーチングの水平変位および杭の曲げひずみは、上述したように加振中は大きく異なるが、加振終了後にはほぼ同じ値となった。地盤から杭に作用する土圧や杭の曲げひずみを振動成分と漸増成分に分けて考えると、振動成分は加振方向の影響を強く受けるが、漸増成分については、地盤と杭の相対変位量がある程度以上大きければ(おそらく杭径の数 10%以上)、加振方向の影響が小さい可能性があるものと考えられる。

4) Case1-3 実験結果

a) 矢板ストラット取り外し時

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 30 に示す。矢板頭部での水平変位は 35mm で、矢板近傍で地盤表面付近のみに変位が見られた。

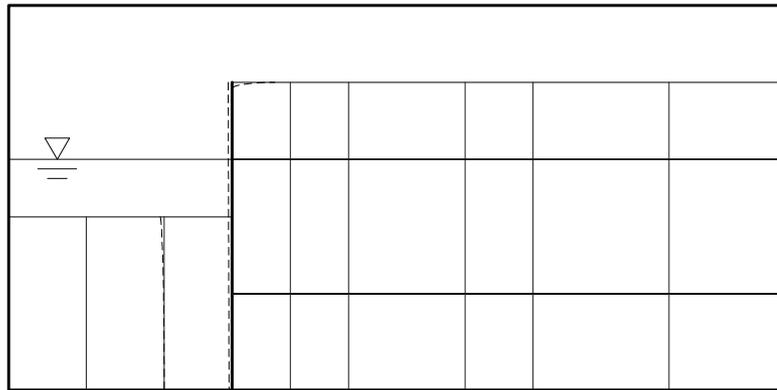


図 30 矢板ストラット取り外しによる地盤変形状況

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り外しにより杭に生じたモーメントとモーメントを 2 階微分して得られた土圧分布を図 31 に示す。全体的にモーメント及び土圧は小さい。海側の杭のモーメントと土圧が大きくなっている。

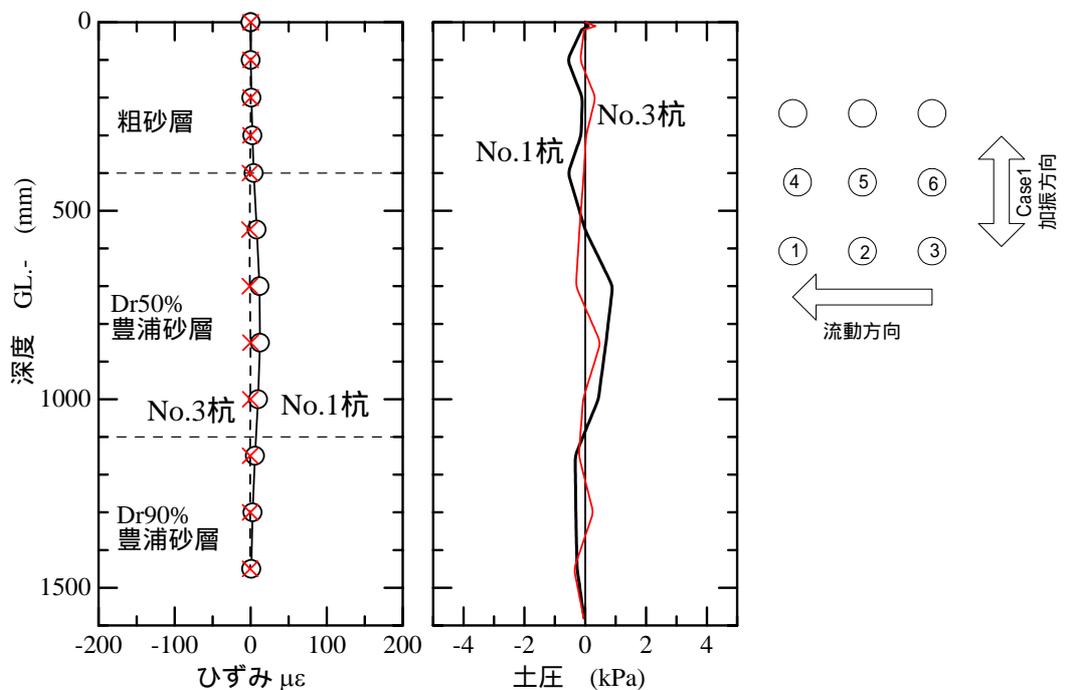


図 31 杭の曲げモーメントと土圧分布

b) 振動実験 (Step1 加振)

間隙水圧及び加速度応答

Step1 加振における振動台及び土槽上面(振動台より高さ 2.1m)の加速度時刻歴を図 32 に示す。加振方向に直行する方向(y 方向及び z 方向)の加速度は、加振方向のおよそ 1/3 程度以下であった。

また、土槽上端で計測した加振方向の加速度(x 方向)は、振動台加速度のおよそ 1.5 倍程度大きくなった。これは、土槽の短辺方向に加振したため、土槽がロッキングしたことによるものである。

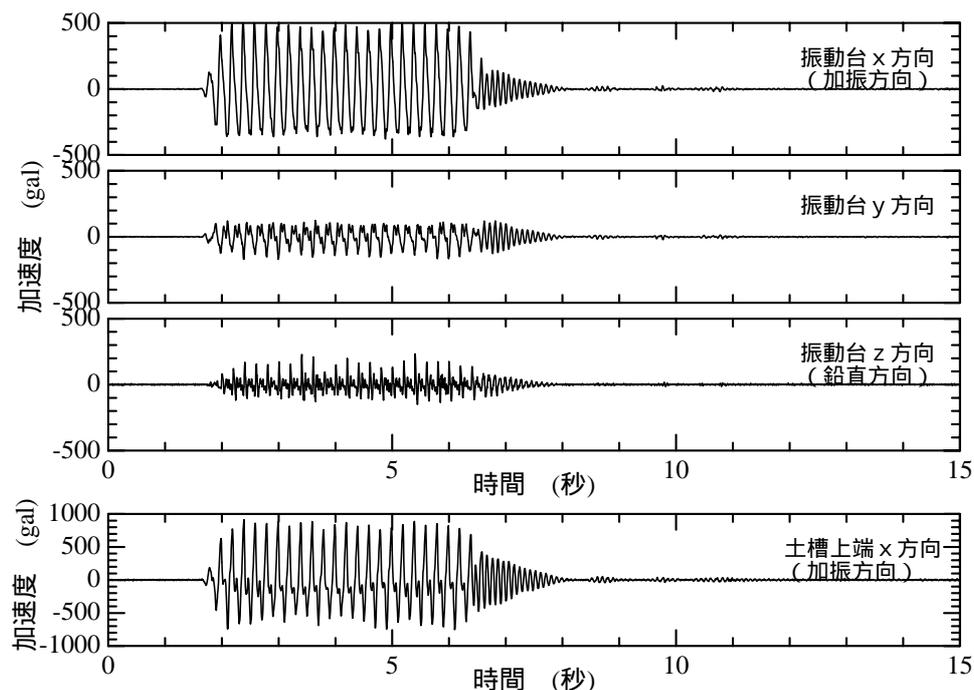


図 32 振動台及び土槽の加速度

図 33、34 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。加速度は、最下層(Dr90%豊浦砂層)では波形及び振幅共に振動台加速度にほぼ近く、また粗砂層では土槽上端での加速度と同様のものとなっている。液状化層(Dr50%豊浦砂層)での加速度はこれらの中間的なものとなっている。

測線-1 および測線-2 での過剰間隙水圧は全体的に極めて小さいものであった。最下層では有効上載圧の 15%程度であり、Dr50%豊浦砂層でも 50%以下であり、加速度計の測定結果と併せてみて、これらの層は液状化しなかったものと言える。後述するように、Dr50%豊浦砂層では Step2 加振時には過剰間隙水圧がほぼ 100%まで上昇したが、最下層(Dr90%豊浦砂層)ではそこでも過剰間隙水圧比は小さいレベルにとどまった。最下層は空中落下と締め固めによって作成したので(Dr50%豊浦砂層は水中落下)、間隙水圧計の飽和に問題があった可能性がある。

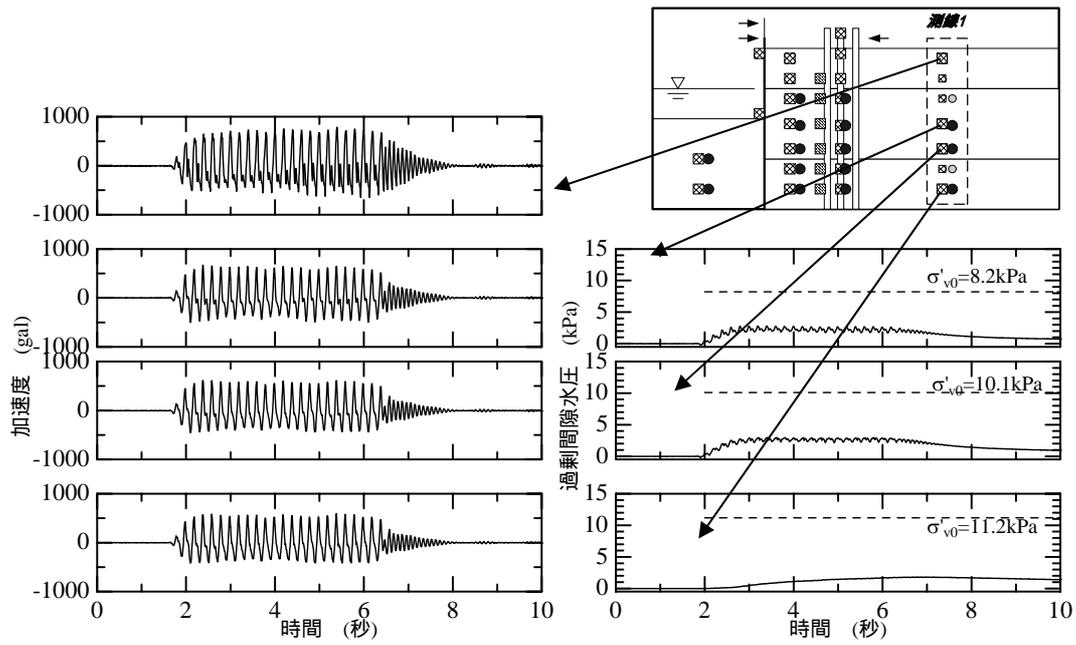


図 33 測線 1 での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

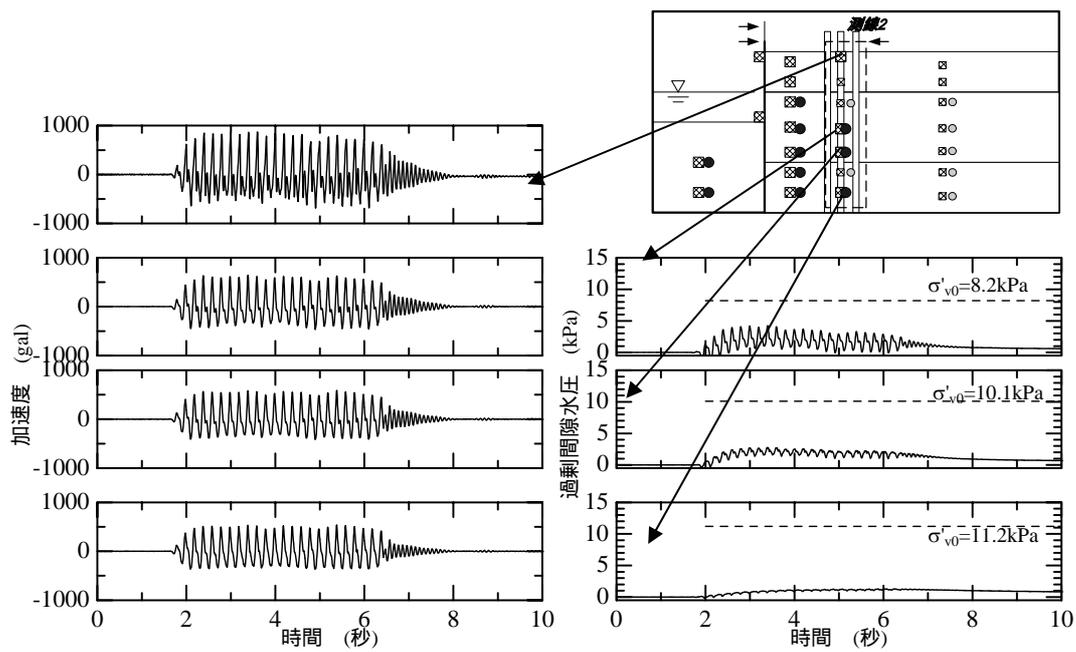


図 34 測線 2 での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

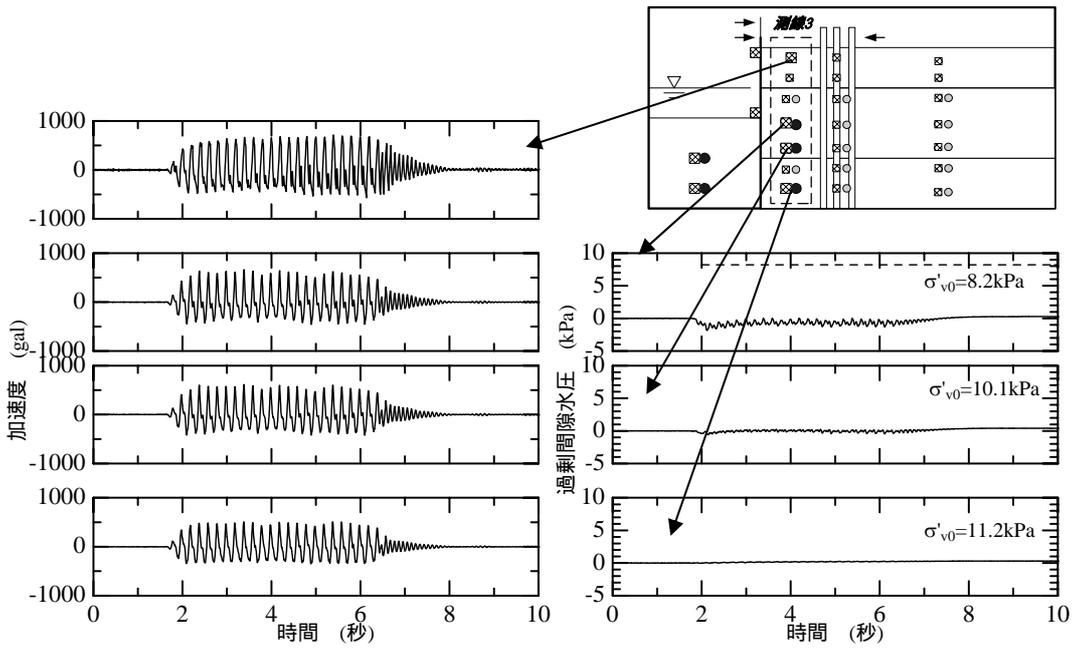


図 35 測線 3 での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

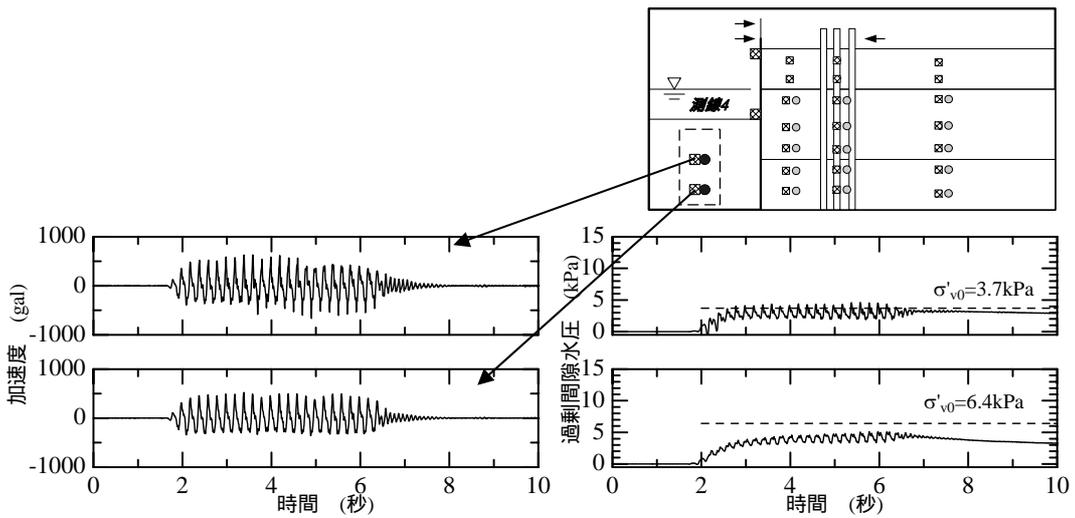


図 36 測線 4 での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

図 35、36 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 での加速度は、測線 1、2 とほぼ同様で何れの深度においても土槽の加速度とほぼ等しいものであった。測線 3 での過剰間隙水圧は、Dr50% 豊浦砂層では矢板の変位の伴う地盤のせん断変形により負圧が生じた

一方、測線 4 の浅部では、過剰間隙水圧が有効上載圧に達すると共に加速度波形にスパイク状の部分が見られ、液状化したことが確認できるが、深部では液状化しなかったものと考えられる。

地盤の変形

Step1 加振後の地盤の変形状況を図 37、写真 5 に示す。加振により矢板頭部が 49mm 海側に変位し、海側の Dr50% 豊浦砂層の浅部～中央深度に変位が見られる。陸側地盤は、地盤表面が沈下したことを除くと、地盤が液状化しなかったために矢板近傍以外に顕著な変位は見られなかった。

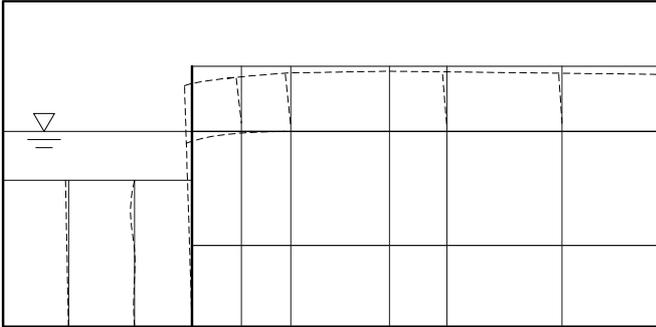


図 37 Step1 加振後の地盤の変形状況

写真 5 Step1 加振後の模型の写真

杭のモーメントと土圧

Step1 加振後の杭の残留曲げひずみ分布を図 38 に示す。杭の曲げモーメントは海側の杭が大きく、陸側が小さくなっている。これは地盤の水平変位が海側杭の位置で大きく、陸側に向かって小さくなっているためである。

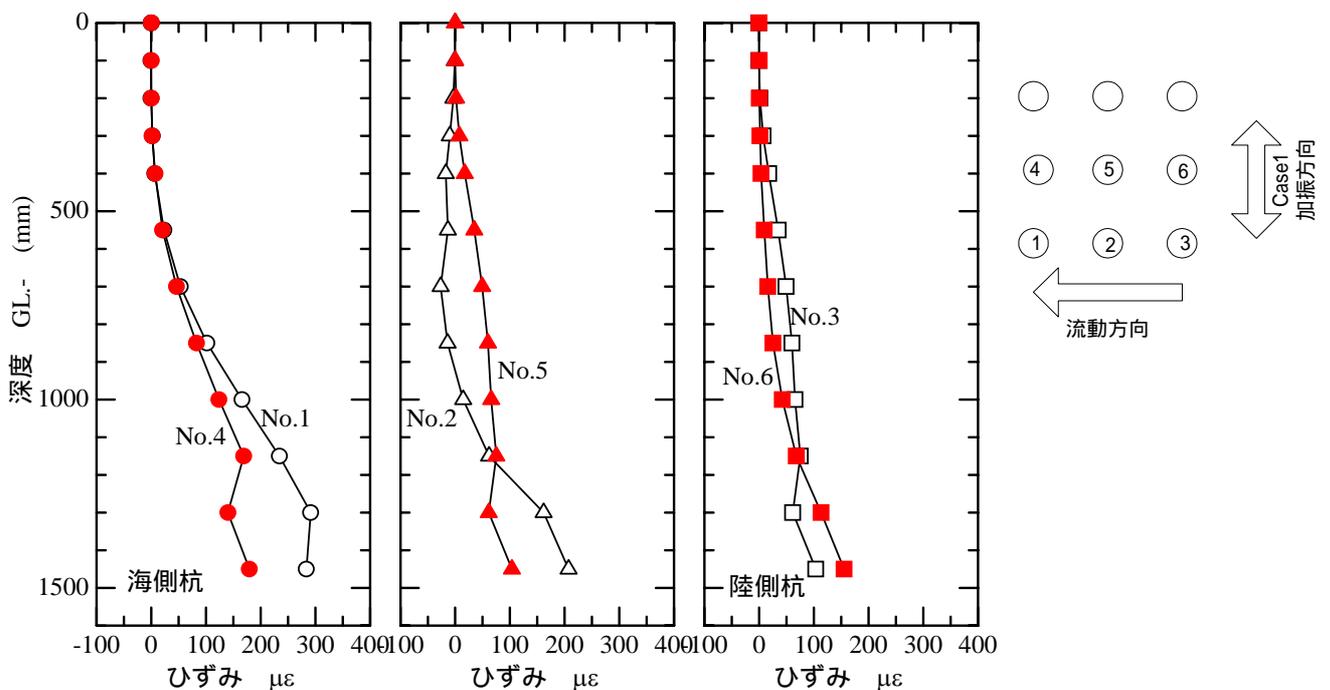


図 38 杭の位置によるモーメント分布の違い

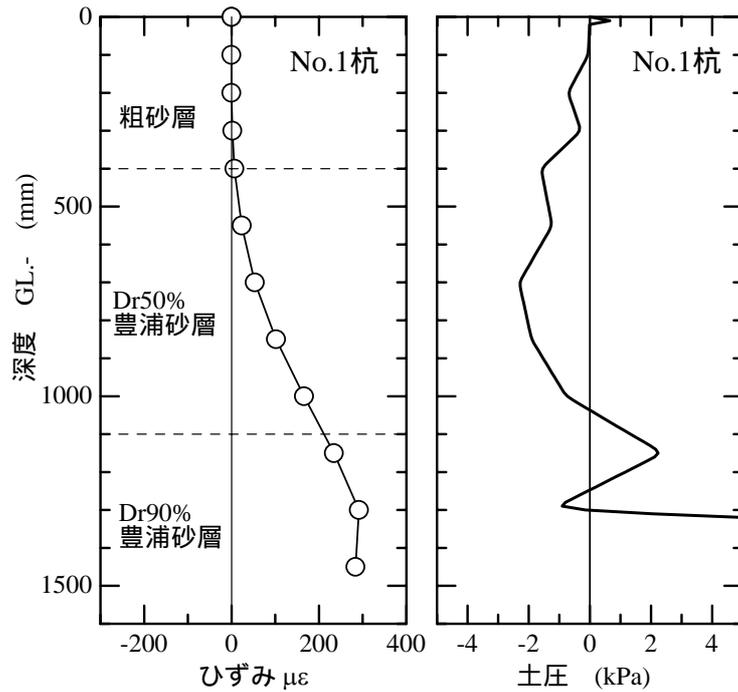


図 39 Step1 加振後の残留ひずみ分布 (No.1 杭)

図 39 は No.1 杭の残留曲げひずみ分布と、ひずみを 2 階微分して求めた土圧分布である。なお、深度 1300mm 以深ではひずみが急変するのに対してひずみゲージの測定点数が十分でないために、この図に示した土圧の精度は低い可能性が高い。

b) Step2 加振

Step2 加振では、振動台加速度振幅を約 700gal、周波数を 3.5Hz、波数を 40 波と何れも step1 加振に比べてより厳しい加振条件とした。

間隙水圧及び加速度応答

図 40～43 に測線-1～4 で測定した加速度と過剰間隙水圧の時刻歴を示す。全体的な地盤中の加速度および過剰間隙水圧は step1 と同様であるが、測線 1 と測線 4 では Dr50% 豊浦砂層が全深度で液状化した。測線 2 では Dr50% 豊浦砂層の過剰間隙水圧は step1 より大きくなったが、液状化には至らなかった。また、測線 3 では step1 と同様に若干負圧が計測された。

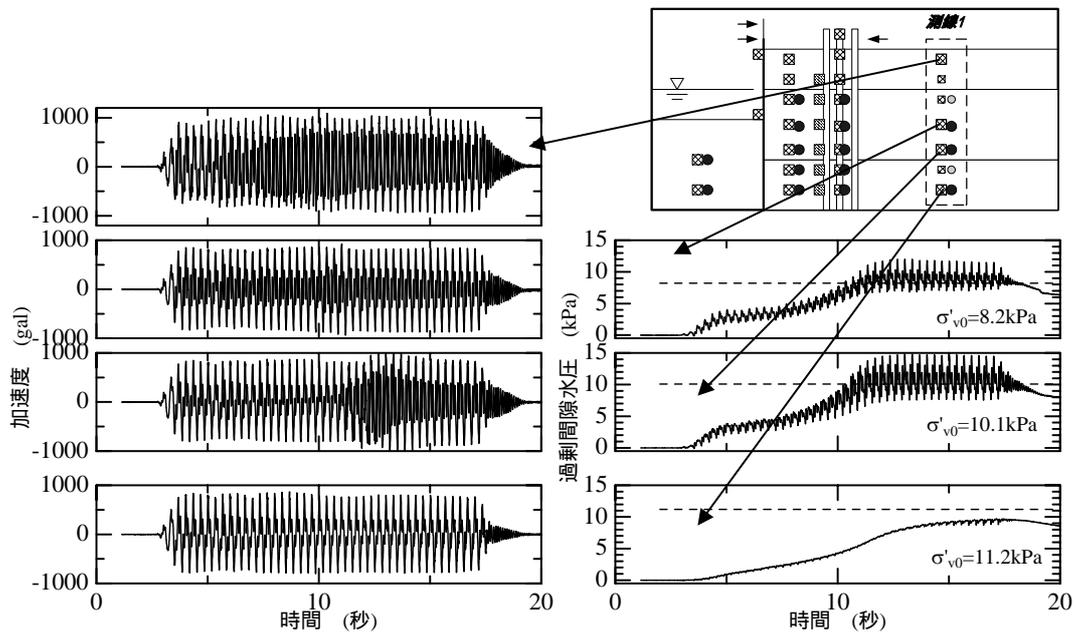


図 40 測線 1 での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

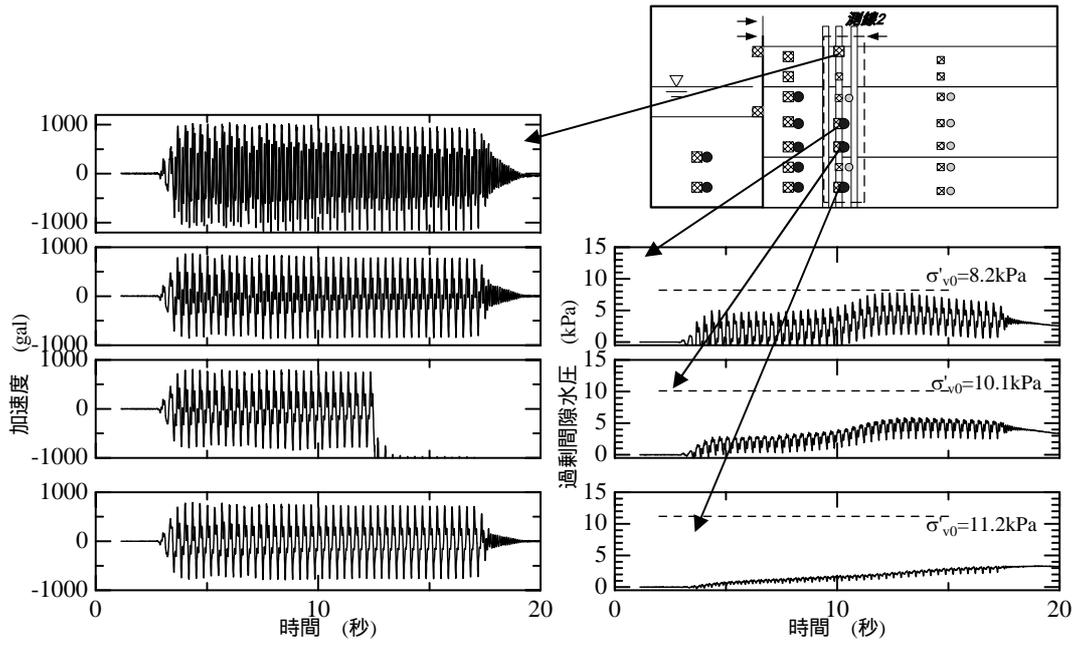


図 41 測線 2 での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

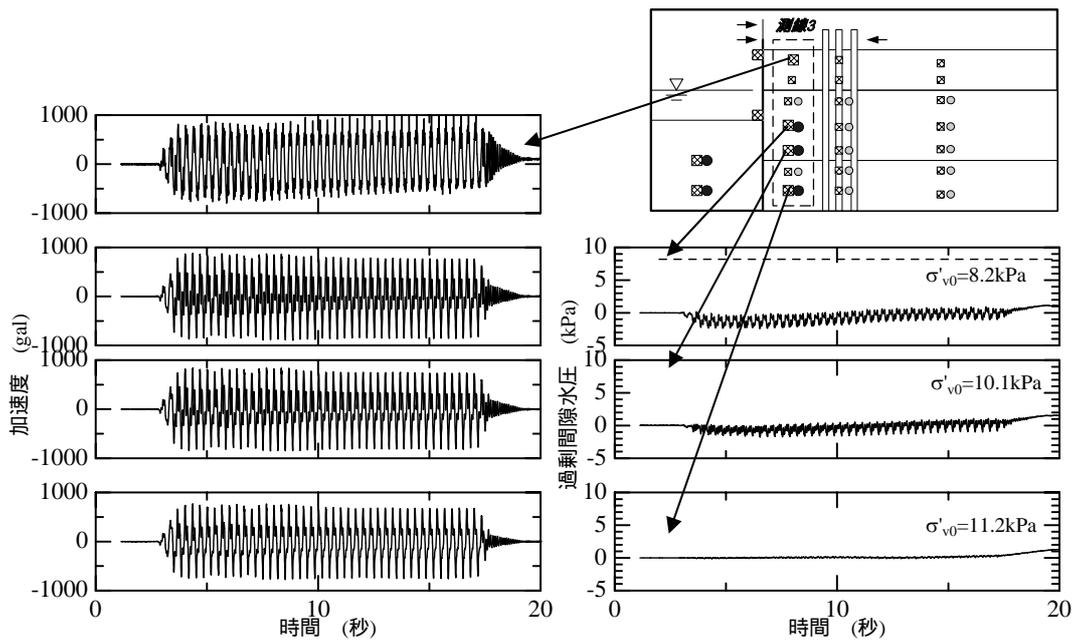


図 42 測線 3 での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

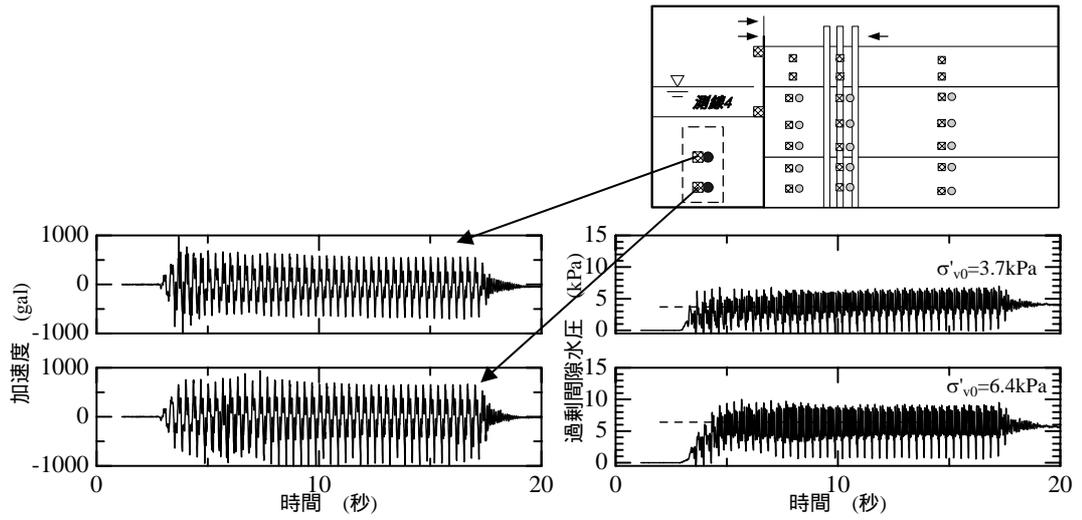


図 43 測線 4 での加速度と過剰間隙水圧の時刻歴

地盤の変形

Step1 加振後の地盤の変形状況を図 44、写真 6 に示す。加振により矢板頭部が 115mm 海側に変位した。陸側地盤は、Dr50%の砂層中に水平変位が見られた。

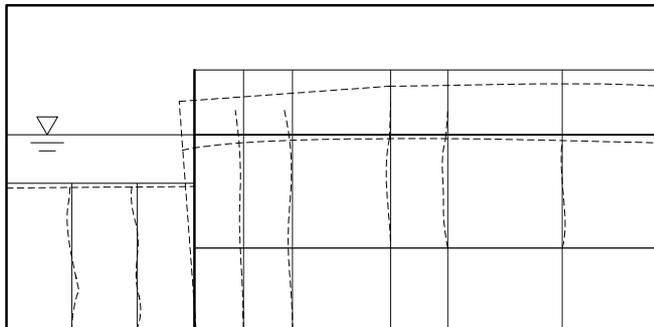


図 44 Step2 加振後の地盤の変形状況



写真 6 Step2 加振後の模型の写真

杭のモーメントと土圧

Step2 加振後の曲げひずみ分布と2階微分により求めた土圧分布を No.1 杭と No.3 杭について図 45 に示す。No.3 杭では、ひずみ分布にやや凸凹があるため、土圧分布が深度方向に大きく変化しているが、概ね流動圧測定杭で測定した土圧と良い対応を示している。

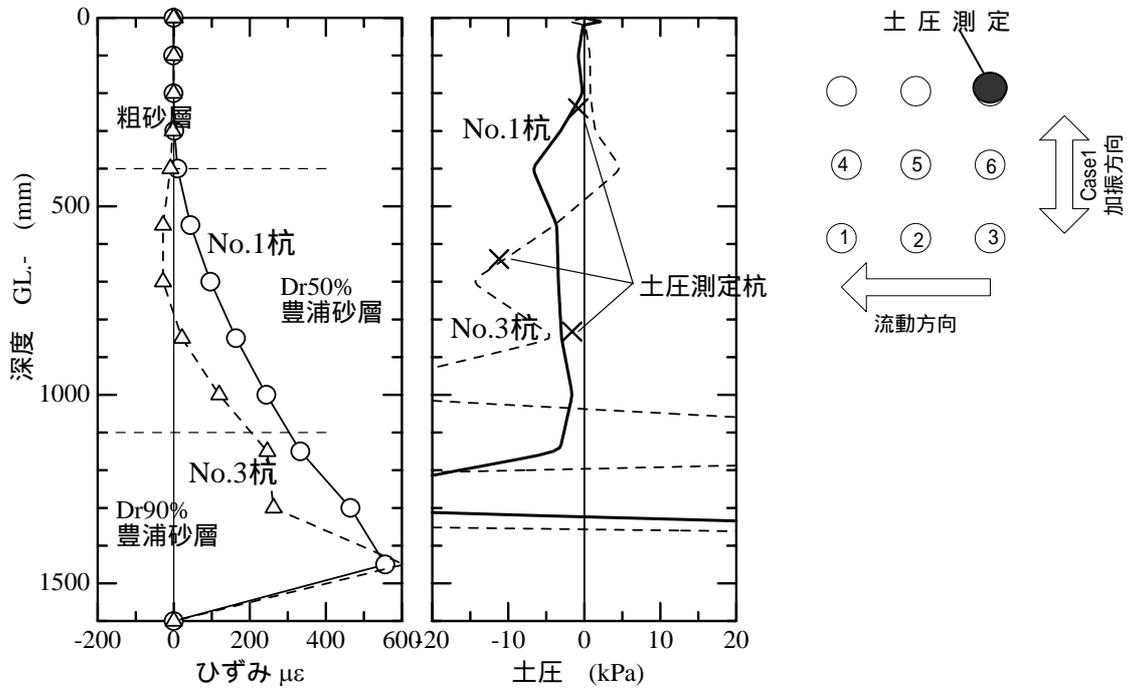


図 45 Step2 加振後の No.1 杭の残留曲げひずみと土圧

(d) 結論ならびに今後の課題

矢板護岸と護岸背後地盤に上部構造物の無い杭基礎模型を設置した試験体を3体作製し、これら3体の試験体を、それぞれ護岸に平行な方向または護岸に直交する方向に加振し、杭基礎及び地盤の応答を計測した。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、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) 杭の曲げモーメントおよびフーチングの水平変位は、加振方向の影響を強く受ける。モーメント及び水平変位量は、護岸直交方向の加振を行うと大きな振幅を伴って振動し、非液状化層がある場合には振幅が大きくなる。また、地盤から杭に作用する土圧や杭の曲げひずみを振動成分と漸増成分に分けて考えると、振動成分は加振方向の影響を強く受けるが、漸増成分については、地盤と杭の相対変位量がある程度以上大きければ、加振方向の影響が小さい可能性があることがわかった。

今後は、水平・鉛直の2方向同時加振時の挙動、および液状化過程において上部構造物の応答が過渡的な共振状態になる場合の挙動について調べる必要がある。

(e) 引用文献

- 1) Okamura, M., Abdoun, T., Dobry, R., Sharp, M. and Taboada, V.: Effects of permeability and weak aftershocks on earthquake-induced lateral spreading, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.6, pp. 63-77
- 2) Abdoun, T. and Dobry, R.: Seismically induced lateral spreading of two-layer sand deposit and its effect on pile foundations, *Proc. Centrifuge '98*, pp. 321-326

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

| 著者 | 題名 | 発表先 | 発表年月日 |
|----|----|-----|-------|
| なし | | | |

2) 口頭発表、その他

| 発表者 | 題名 | 発表先、主催、発表場所 | 発表年月日 |
|-----|----|-------------|-------|
| 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

| 名称 | 機能 |
|----|----|
| なし | |

3)仕様・標準等の策定

なし

(3)平成15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年度と同様の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。