

3.3.3 大型液状化実験の挙動把握および地盤特性の把握

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 2 か年の年次実施計画
- (e) 平成 18 年度業務目的

(2) 平成 18 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) 大型液状化実験における地中変位の計測結果
 - 2) 中型振動台実験における杭と液状化地盤との相互作用
- (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

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

大型液化化実験の挙動把握および地盤特性把握

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学大学院 工学系研究科	教授	東畑郁生	towhata@geot.t.u-tokyo.ac.jp
東京大学大学院 工学系研究科	助手	本多剛	honda@geot.t.u-tokyo.ac.jp
東京大学大学院 工学系研究科	博士課程 3年	Ramin Motamed	motamed@geot.t.u-tokyo.ac.jp
東京大学大学院 工学系研究科	博士課程 3年	Seda Sendir	sendir@geot.t.u-tokyo.ac.jp
東京大学大学院 工学系研究科	修士課程 2年	佐藤純一	junichi@geot.t.u-tokyo.ac.jp
東京大学大学院 工学系研究科	修士課程 1年	川野健一	kawano@geot.t.u-tokyo.ac.jp
東京大学 工学部	学部 4年	Ngo Tuan Anh	ngoanhtuan@geot.t.u-tokyo.ac.jp

(c) 業務の目的

本研究は、液化化時の地盤の物性と変形挙動を把握するために実物大模型実験に適用できる地盤内の変位計測システムを確立し、模型実験時の地盤挙動の計測を実施する。さらに、模型実験から得られる地盤挙動と室内要素試験から得られる土の物性から地盤特性の把握を行う。

(d) 2か年次実施計画

1) 平成17年度：

地盤内変位計測システムの実物大模型実験の適用性の検討

地中変位計の作製と計測の実施

室内要素試験による液化化した土の物性の把握

2) 平成18年度：

大型液化化実験における地中変位の計測結果の検討

中型振動台実験における杭と液化化地盤との相互作用の検討

(e) 平成 18 年度業務目的

平成 17 年度に地盤・基礎の実物大実験のための地中変位計測システムを開発し、平成 18 年 3 月に行われた矢板護岸の側方流動実験に採用した。そこで平成 18 年度には、昨年度に行われた実物大実験の結果から地中変位計測システムの妥当性の検証を行う。さらに、平成 18 年度に実施予定である円形せん断土槽を用いた杭基礎実験とケーソン護岸の側方流動実験においても、地中変位計測システムを用いて強震動時の地盤内変位とその挙動について検討する。また中型振動台実験を併せて実施し、杭と液状化地盤との相互作用について検討する。

(2) 平成 18 度の成果

(a) 業務の要約

地盤・基礎の実物大実験の地盤挙動を調べるため、平成 17 年度に大型実験に適用できる地中変位計測システム¹⁾の改良及び作製を行い、平成 18 年 3 月の矢板護岸の側方流動実験にて地盤内変位の計測を行った。この実物大実験において地表面に設置されたレーザー式変位計と地中変位計から求めた地盤表層部の変位量を比較したところ、この両者には整合性のある結果が得られた。つまり、今回使用した地中変位計は液状化地盤と一体となって変位していたと確認できた。また地中変位計では、一般的な変位計では(測定レンジが狭いために)測定できない 1 m を超える大変位領域までの測定ができた。さらに、平成 18 年度のせん断土槽を使った杭基礎実験とケーソン護岸の側方流動実験にも採用し、強震動時の地盤内変位の測定を行い、加振中の地盤の変形挙動を捉えた。中型振動台では、杭と液状化地盤の相互作用について調べ、杭に作用する力は杭と地盤との相対速度に強く依存することが分かった。

(b) 業務の成果

1) 大型液状化実験における地中変位の計測結果

図 1 に地盤内変位の測定のために設置した地中変位計の模式図と組立て状況を示す。この地中変位計は両端にヒンジを持った 300 mm X 40 mm X 6 mm のプラスチック製のプレートをつなぎ合わせたものであり、それぞれのプレートにはプレートの傾斜量を測定するための加速度計が設置されている。そして、このプレートは液状化地盤と一体となって移動する必要があるため、プレートの材料には飽和した液状化地盤とほぼ等しい単位体積重量 ($\gamma = 19.6 \text{ kN/m}^3$) を持つガラス繊維入りエポキシ樹脂を使用した。図 2 に地中変位測定用のプレートの形状及び寸法を示す。ヒンジ部には $\phi 3.2 \text{ mm}$ の穴に直径 3 mm のステンレス製の丸棒を用い、ヒンジ部への砂粒子の侵入を防いだ。そして、加速度計はプレートの中央部にある孔を使用してねじ止めした。

実物大実験での地中変位計の設置は、図 1 (c)に示すように予め組上げた地中変位計を土槽上部から吊り下げ、また初期状態でのヒンジ部の回転を避けるためにヒンジ部に固定用

のガイドを使用した。そして、地盤作製の進捗状況に応じてこのガイドを取り外す方法で地盤内に設置した。また、地中変位計の下端は土槽底部に固定されている。

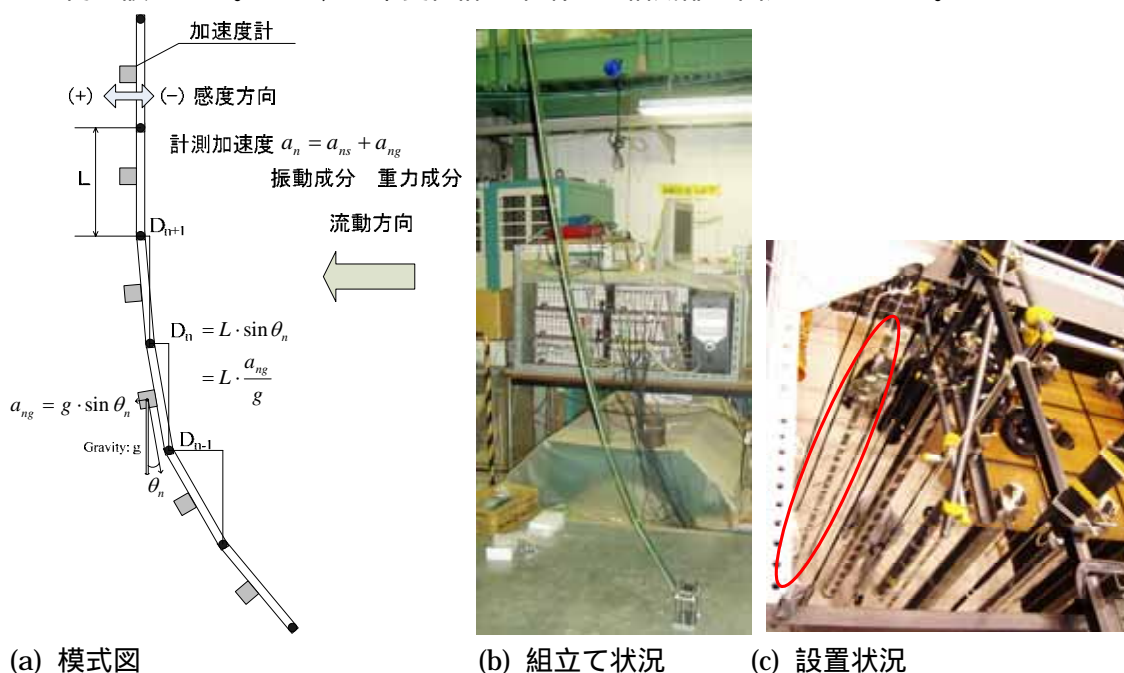


図 1 地中変位計の模式図と組立て状況

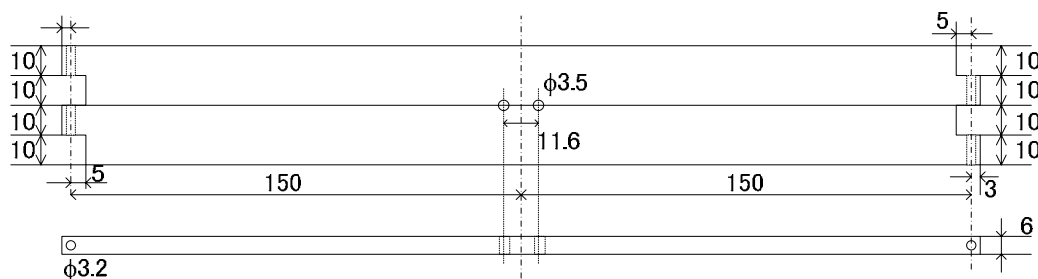


図 2 地中変位計用プレートの形状及び寸法

地中変位計に設置した加速度計から地盤内の水平変位量を求める計算過程は、次の手順によって行われる。地中変位計に設置された加速度の記録結果を高速フーリエ変換し、加振の加速度による高周波数成分を計測記録から取り除く。次に、地盤の変位によって生じた地中変位計の傾斜量を低周波数成分である加速度から求め、各プレートの傾斜量と水平変位量をそれぞれ算定する。地中変位計の下端からの水平変位量を積分することで、各深さにおける水平変位量を算定する。なお、加速度記録の加振による高周波数の加速度成分と傾斜による低周波数の加速度成分の分離には、敷居値である周波数を変えることで最適な周波数を検討した。

次に、平成 17 年度の矢板護岸の側方流動実験と平成 18 年度のせん断土槽の杭基礎実験、ケーソン護岸の側方流動実験での地中変位計の測定結果を示す。

a) H17・矢板護岸の側方流動実験

図3に平成17年度に実施された矢板護岸の側方流動実験の模型平面図を示す。地中変位計は、矢板護岸と基礎フーチングの間地点（地点A）、杭基礎内の群杭（3×2）の内部（地点B）、土槽前面と杭基礎の間地点（地点C）の3箇所に設置した。水平変位量の測定方向は土槽の長手方向である。また図3には、地中変位計の計測結果の妥当性を検討するために使用したレーザー式地表面変位計の設置場所を合わせて示す。

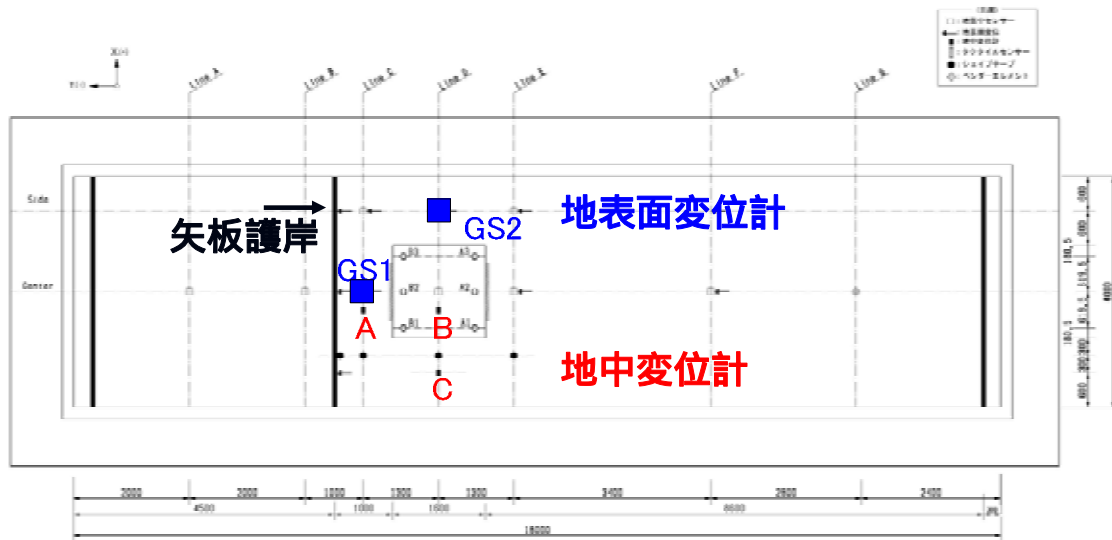


図3 H17・矢板護岸の側方流動実験の地盤概要と地中変位計の位置

模型地盤概要の正面図を図4に示す。地中変位計の下端は土槽底面に接着剤で固定されている。そして、地中変位計の計測深さは土槽底部から700mmある密詰め層（非液状化層）の上端から測定した。それぞれ地点の計測深さは、密詰め層の上端から300mm間隔である（地中変位計に設置した加速度計のそれぞれを地盤下部からA1、A2・・・、A13というようにに地点名と番号で名付けた）。

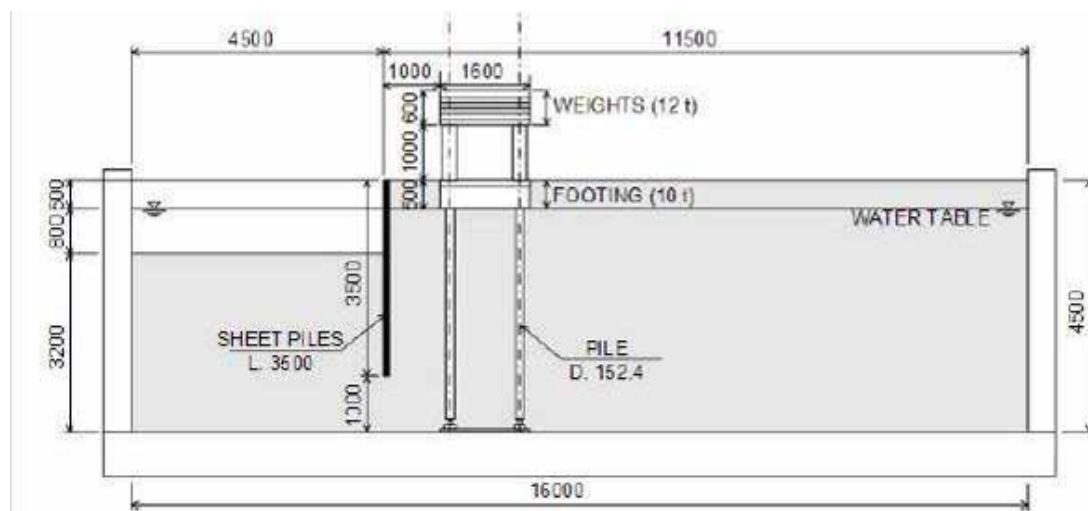
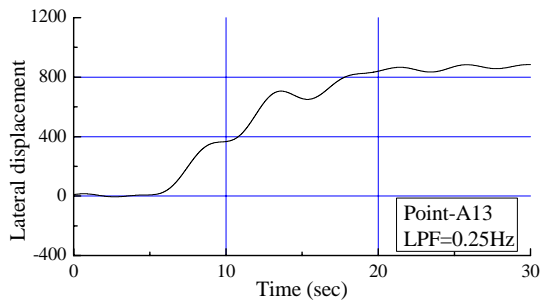


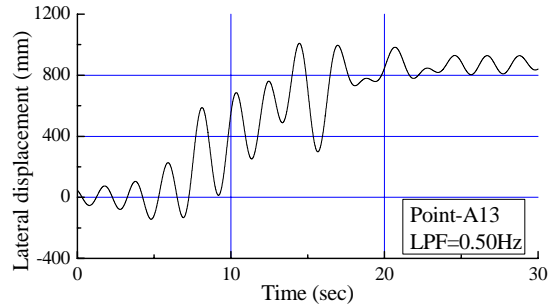
図4 H17・矢板護岸の側方流動実験の地盤概要（正面図）

図5から図7に地点A、B、Cにおける地中変位計から求めた地盤表層付近の水平変位量を示す（海側への変位が正）。これらの図の(a)、(b)は水平変位量算定時に用いた高速フーリエ変換のローパスフィルタ（LPF）の敷居値が異なっており、(a)ではLPF = 0.25 Hzを、(b)ではLPF = 0.50 Hzを用いた結果である。この実物大実験では、計測開始約5秒後から加振が始まり、大きな地震力を受けて地盤が前後（海側と陸側）に激しく揺れながら矢板護岸が海側に大きく変位したために、加速度記録から加振による慣性力の高周波数成分を取り除くことが容易ではなかった。そこで、LPFを様々に変えて水平変位量を算定した結果の一例が図5から図7である。これらの図より、LPF = 0.5 Hzでは慣性力による振動成分を十分に取りきれなかったために地盤変位が大きく振動していることが分かる。一方、LPF = 0.25 Hzでは振動成分が除去されており、側方流動による水平変位の漸増成分を捉えることができている。

図8には模型地盤の地表面に設置された変位計（図3のGS1、GS2）の時刻歴を示す。この変位の時刻歴はレーザー式変位計（測定範囲：-250 mm ~ +250 mm）によって測定されたものであり、計測開始5秒後から変位を始め、約8秒付近で測定限界を超えたためにレンジオーバーの状態に至っている。そして、図5(a)の地点Aの地表面変位と図8(a)のGS1、図7(a)の地点Cの地表面変位と図8(b)のGS2の結果を比較すると、計測開始8秒後に地中変位計の値は約300 mm程度に達しているため、地表面変位計の結果と一致していると判断できる。

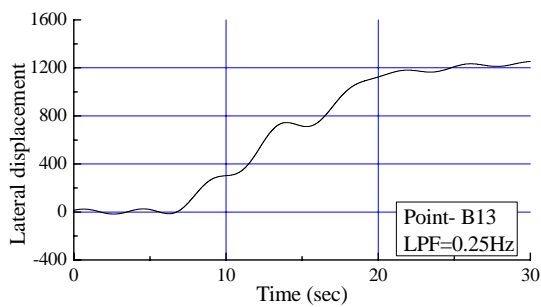


(a) LPF = 0.25 Hz

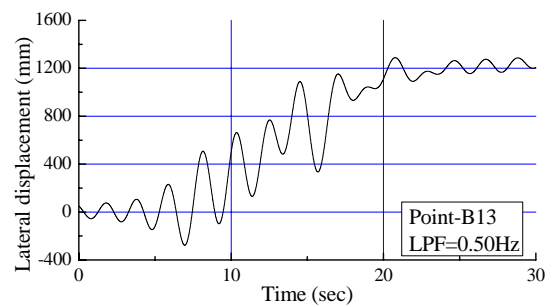


(b) LPF = 0.50 Hz

図5 地点 A : (矢板と杭基礎間) における地表面変位の時刻歴

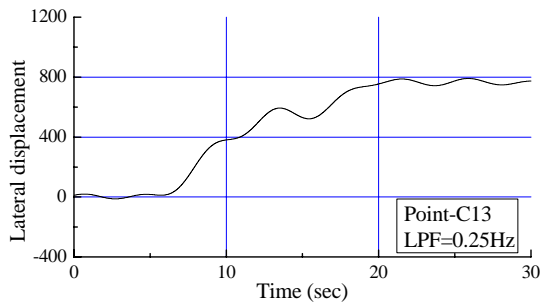


(a) LPF = 0.25 Hz

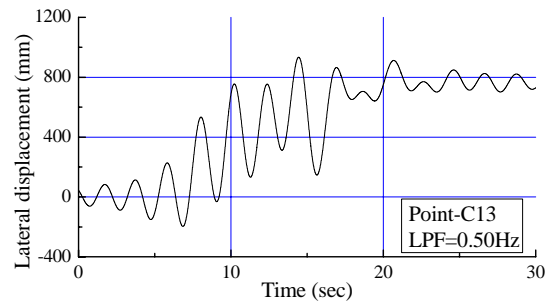


(b) LPF = 0.50 Hz

図6 地点 B : (フーチング直下) における地表面変位の時刻歴

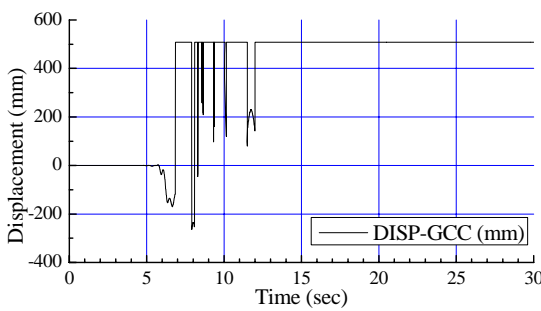


(a) LPF = 0.25 Hz

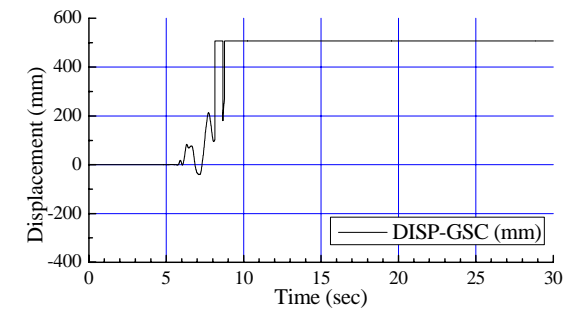


(b) LPF = 0.50 Hz

図7 地点 C : (杭基礎の側方)



(a) GS1



(b) GS2

図8 地表面に設置した地中変位計の時刻歴

地表面に設置した変位計と 0.25 Hz の LPF を用いた地中変位計の地盤表層の比較より、今回設置した地中変位計は液状化地盤と一体となって変位していたことが分かる。

次に、図 9 から図 11 には地中変位計の各深さにおける水平変位の時刻歴を表す。なお、水平変位の算定に用いた LPF は 0.25 Hz である。これらの図から、加振開始と伴に水平変位が発生し、計測開始から 20 秒程度までに地点 A と C では約 800 mm、地点 B では約 1,200 mm の最大変位が発生していることが分かる。

図 12 から図 14 には、計測開始から 10、15、20、25 秒における深さ方向の水平変位分布を表す。図 12 の矢板護岸と杭基礎の中間地点の地点 A では、地盤の表層に近づくほど水平変位量が大きくなっており、最大で約 900 mm の水平変位が発生している。一方、杭基礎の内部に設置した地点 B では水平変位の分布形状は地点 A のものに類似しているが、その水平変位量は地点 A よりも大きく、約 1200 mm の水平変位が生じた。このことから、杭基礎直下では地表面の水平変位よりも大きな水平変位が発生していたことが分かる。また杭基礎の側方（土槽前面と杭基礎の中間）地点に設置した地点 C では、地盤表層付近では不飽和層の影響を受けて変位量が小さくなっており、不飽和層の下側で最大水平変位となっている。

以上の結果より、今回使用した地中変位計は液状化地盤と一体となって変位しており、通常の変位計では測定できない 1 m を超える大変位の範囲まで測定できることを確認した。

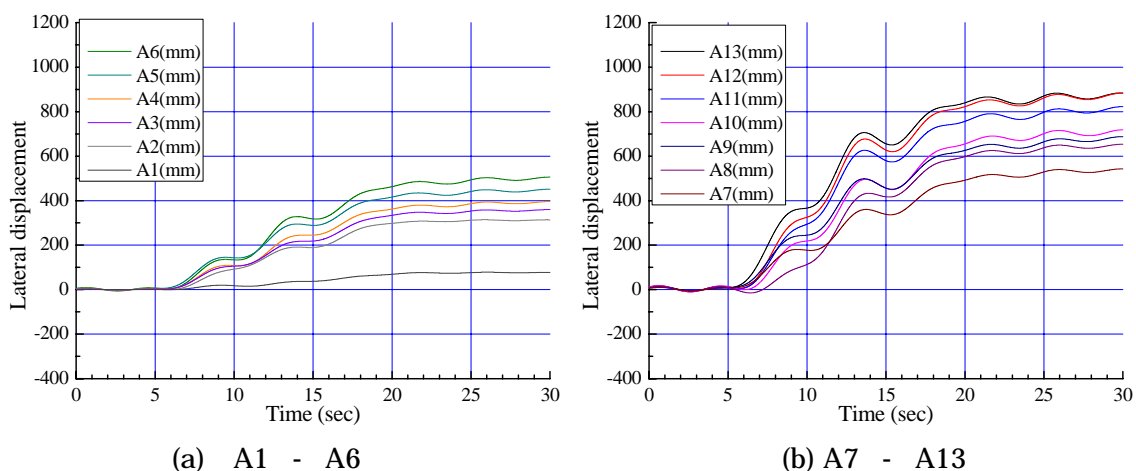
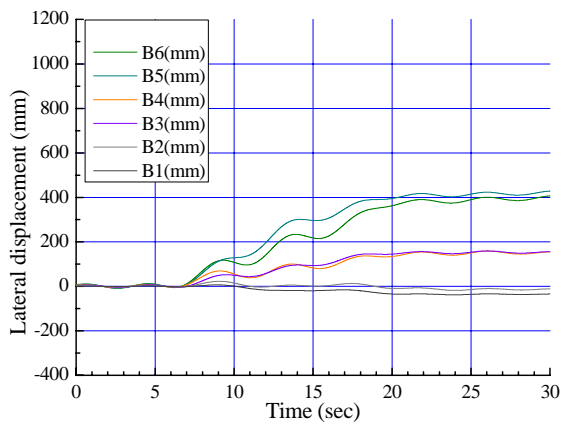
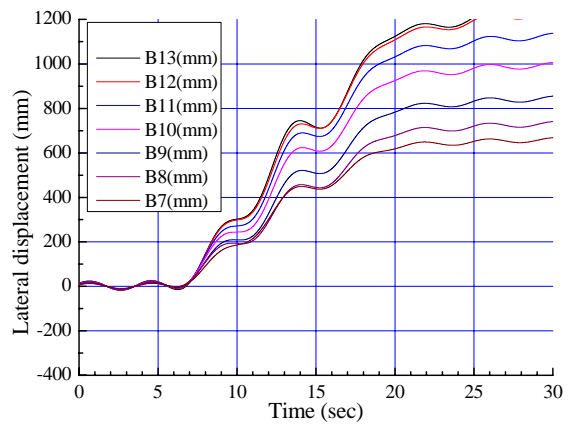


図 9 地点 A における地中変位計から求めた水平変位の時刻歴

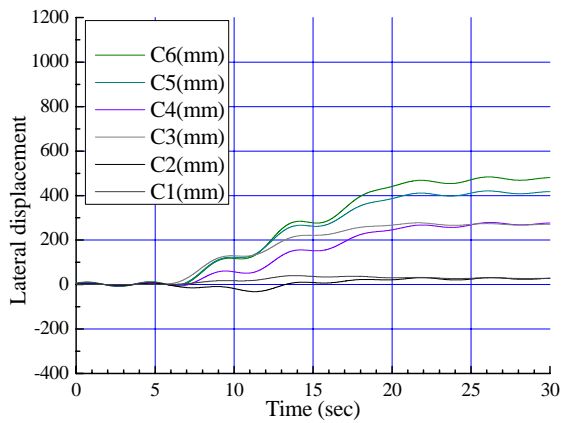


(a) B1 - B6

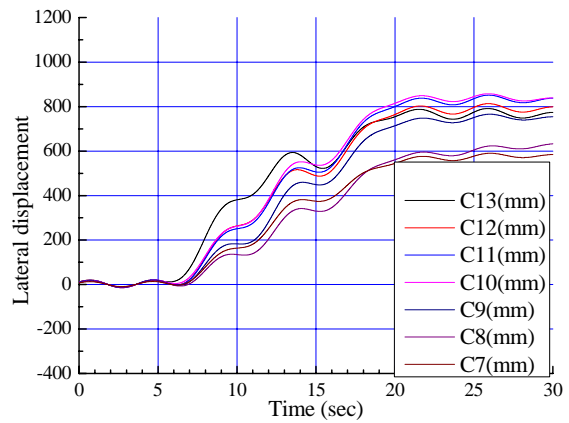


(b) B7 - B13

図 10 地点 B における地中変位計から求めた水平変位の時刻歴



(a) C1 - C6



(b) C7 - C13

図 11 地点 C における地中変位計から求めた水平変位の時刻歴

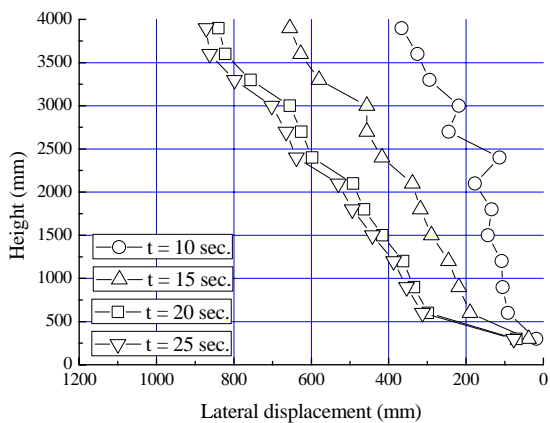


図 12 地点 A の水平変位分布

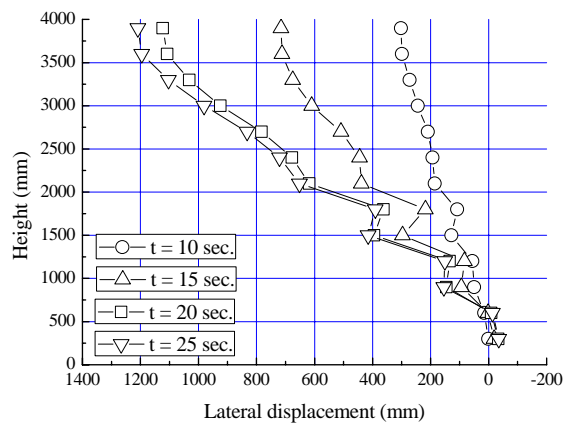


図 13 地点 B の水平変位分布

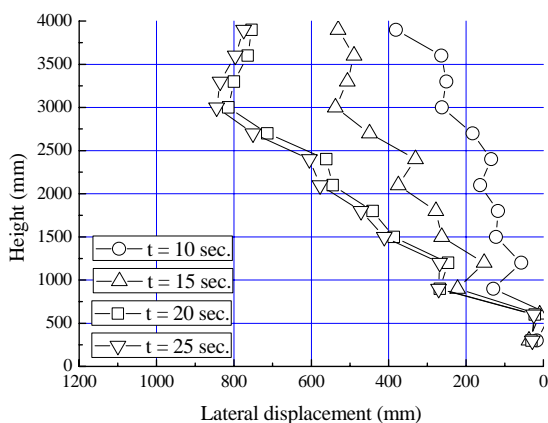


図 14 地点 C の水平変位分布

b) H18・杭基礎の円形せん断土層実験

図 15 に杭基礎の円形せん断土槽実験の地盤概要と地中変位計の設置位置を示す。地中変位計の設置位置は 3 X 3 の杭基礎内部の 2 箇所（地点 A, と地点 B）に設置した。測定方向は、地点 A が紙面の上下方向、地点 B が紙面の左右方向となっている。また深さ方向に設置した地中変位計のプレート数は 16 枚であり、それぞれ土槽の下端から A1、A2、・・・、A16、B1、B2、・・・、B16 である。

地点 A の計測結果として、A4、A8、A12、A16 のプレートに設置した加速度計の時刻歴を図 16 に示す。この図より、土槽下部の A4 と A8 では加速度応答に高周波数成分が見られるが、地盤上部にある A12 と A16 では地盤の液状化によって加速度応答が減衰したために地盤がゆっくりと動いたことが分かる。また、この実験は水平地盤であるために側方流動実験の結果とは異なっており、地盤内変位には残留変形に大きな傾斜は生じていない。むしろ、比較的ゆっくりとした振動による変位が見られた。そこで、このゆっくりと振動する変位成分を求めるためにローパスフィルタ (LPF) を側方流動実験の 0.25 Hz から 0.5 Hz に変更して、各深さにおける水平変位量を求めた。この結果を図 17 に示す。図 17 の計測器は A4、A8、A12、A16 である。これらの図より、フーチング直下では最大で約 200 mm の水平変位が生じていたことになる。図 18 には計測開始から 6、7、8、9、10、12、14、16 秒後の深さ方向の水平変位分布を示す。

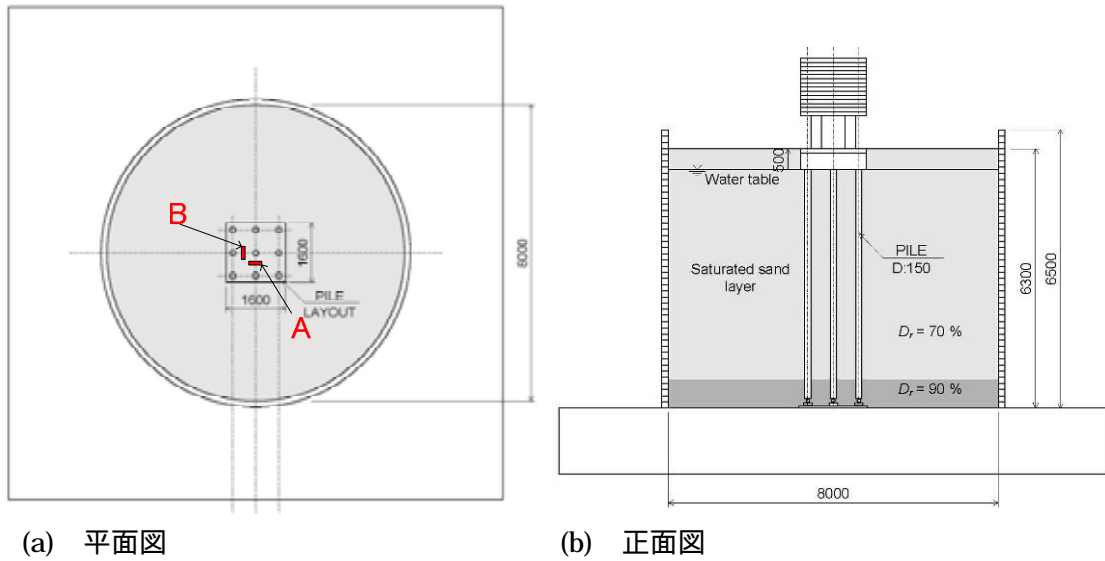


図 15 H18・杭基礎の円筒せん断土層実験の地盤概要と地中変位計の設置場所

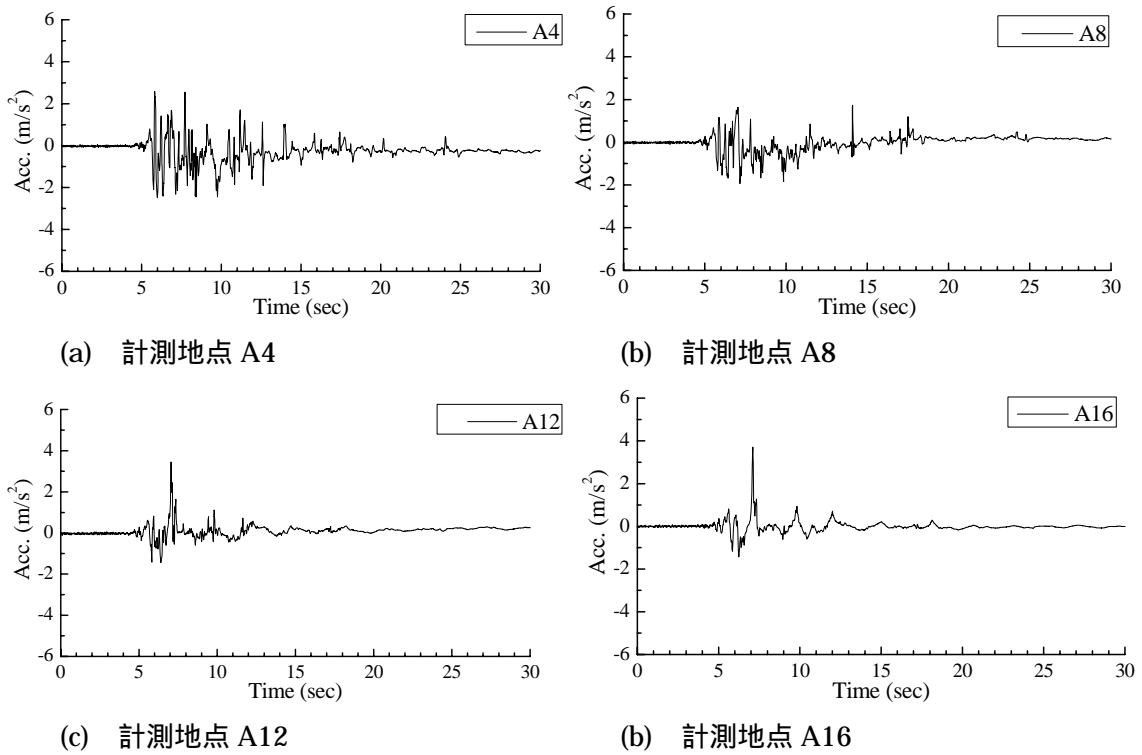


図 16 地点 A における地中変位計の加速度応答

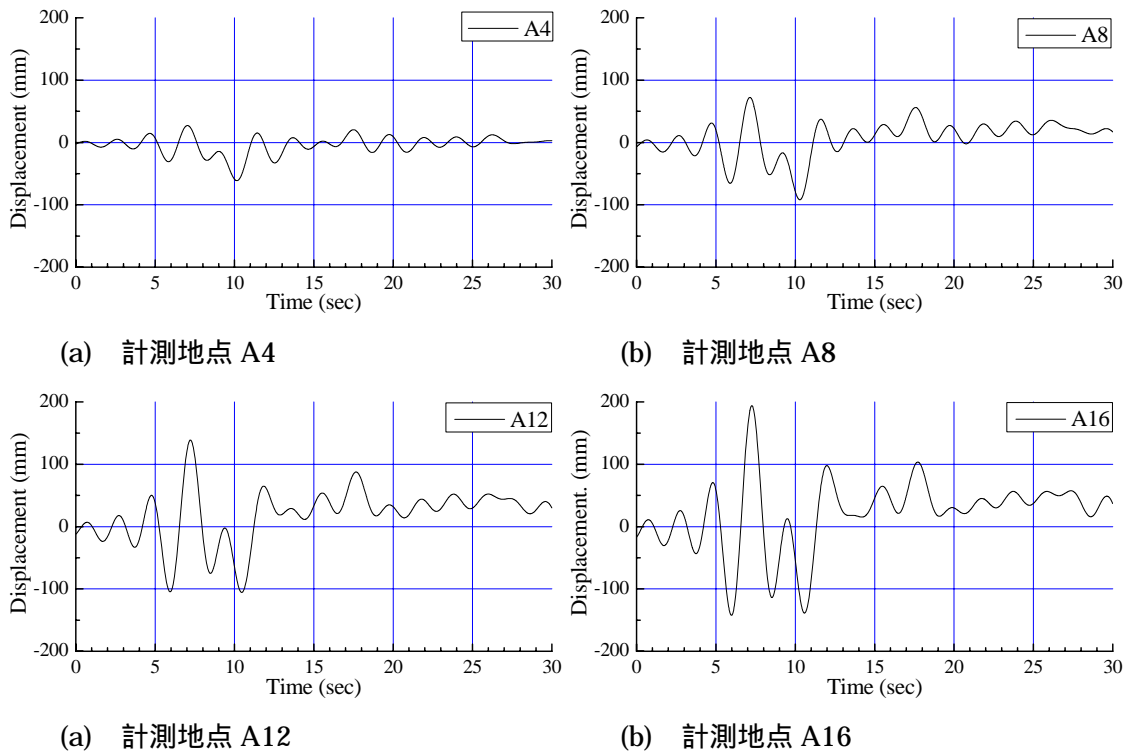


図 17 地点 A における地中変位計から求めた水平変位量の時刻歴 (LPF = 0.5 Hz)

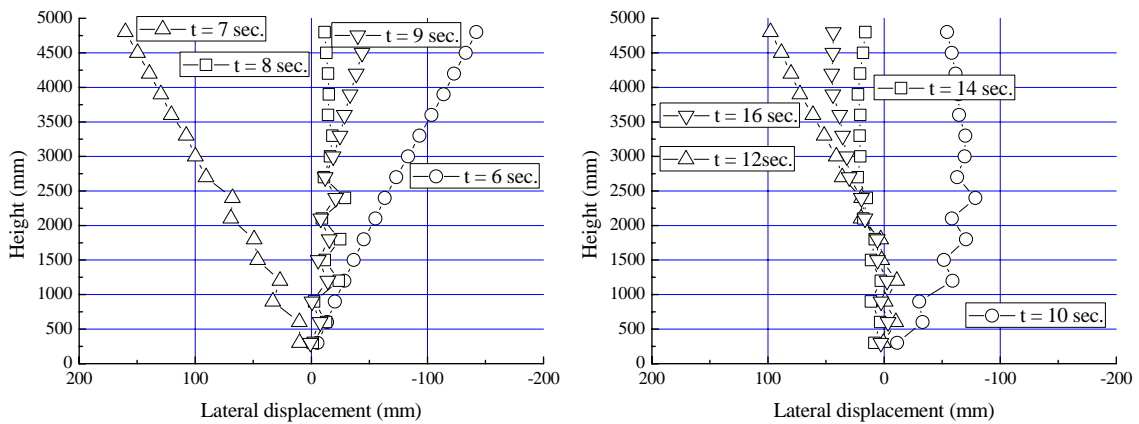


図 18 地点 A における地中変位計から求めた深さ方向の水平変位分布 (LPF = 0.5 Hz)

地点 A と同様に、地点 B の加速度応答の時刻歴と水平変位の時刻歴、深さ方向の水平変位分布を図 19 から図 21 には示す。地点 B においても地盤上部の B12 と B16 では加速度応答が減衰し、ゆるやかに振動する結果となった。

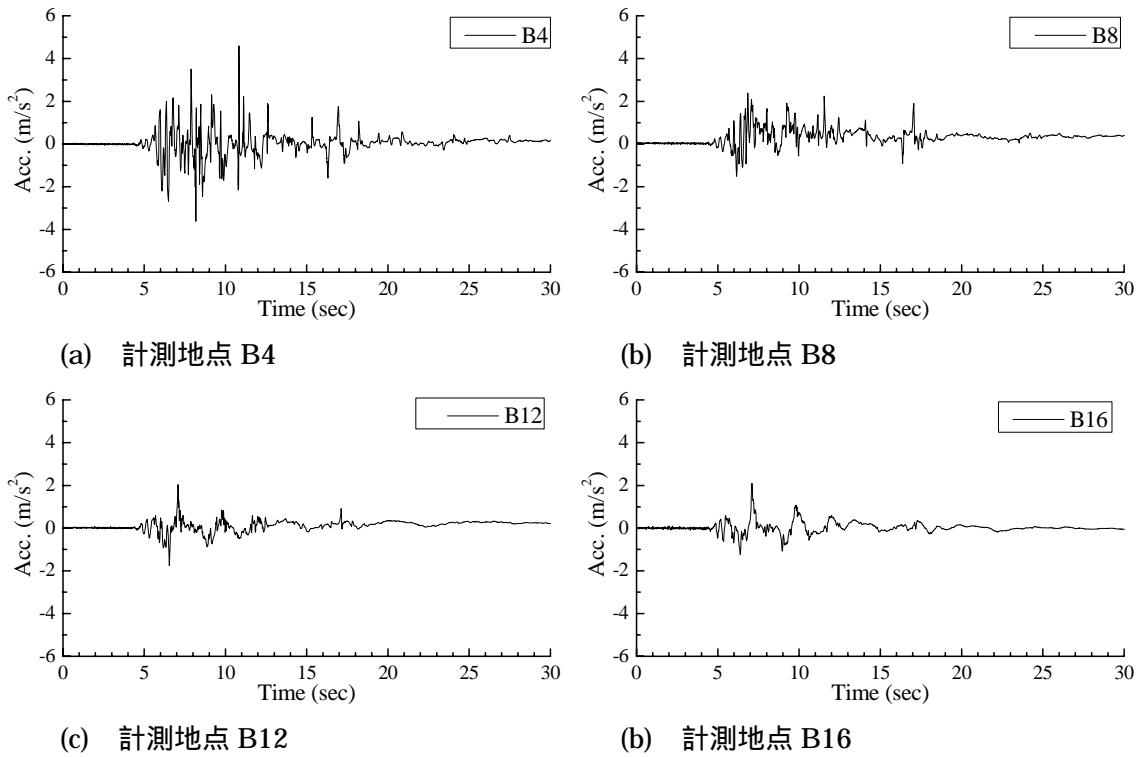


図 19 地点 B における地中変位計の加速度応答

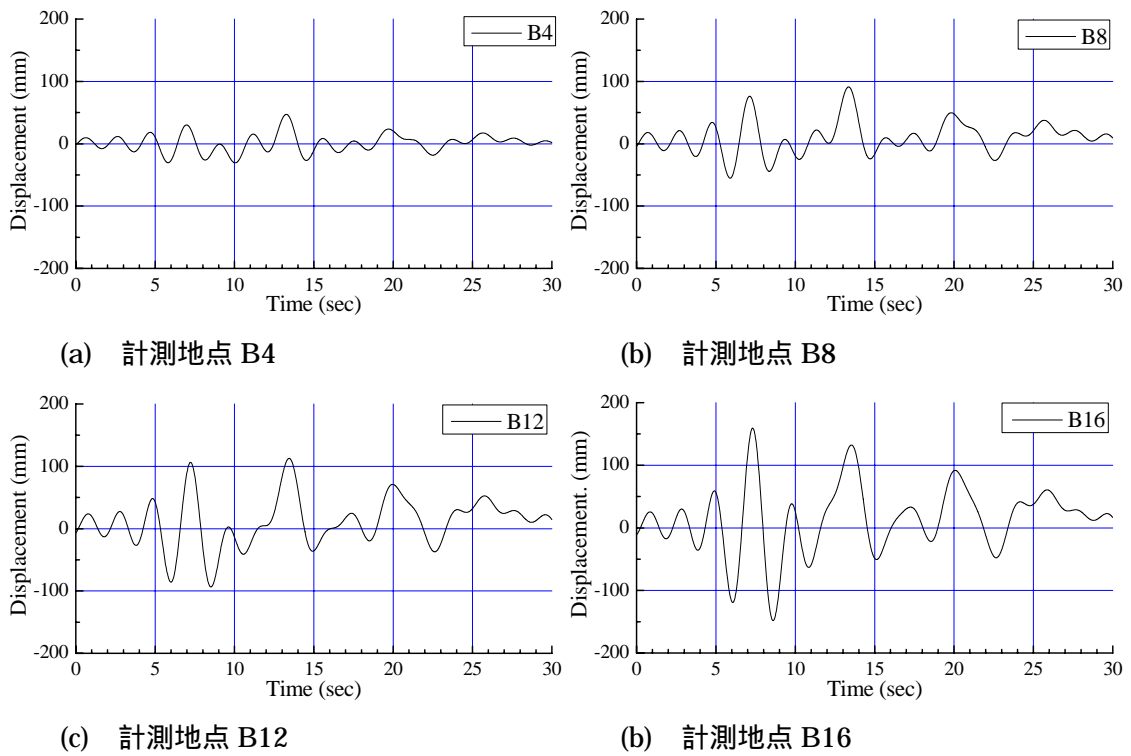


図 20 地点 B における地中変位計から求めた水平変位量の時刻歴 (LPF = 0.5 Hz)

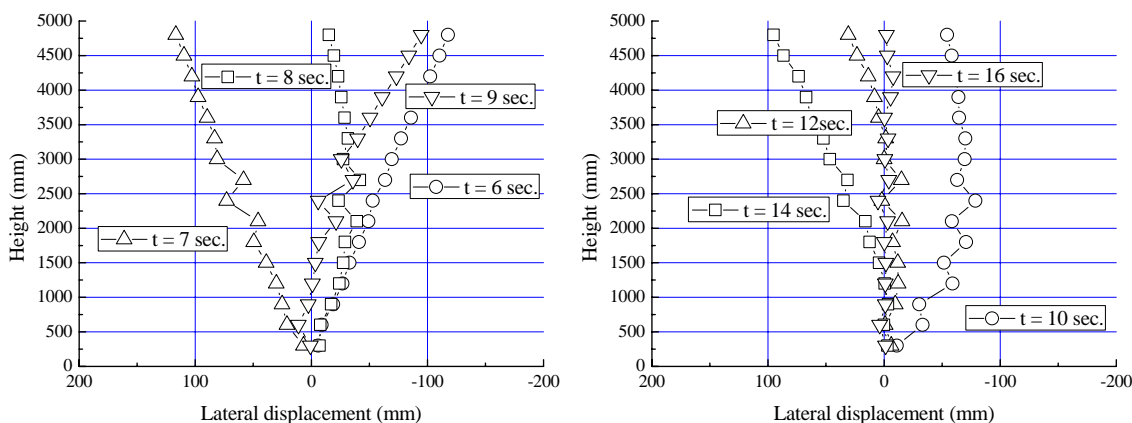


図 21 地点 B における地中変位計から求めた深さ方向の水平変位分布 (LPF = 0.5 Hz)

c) H18・ケーソン護岸の側方流動実験

図 22 にケーソン護岸の側方流動実験の地盤概要と地中変位計の設置位置を示す。地中変位計の設置位置は、平成 17 年度の矢板護岸の側方流動実験と同様に、護岸と杭基礎の間地点の地点 A、3 X 2 の杭基礎内部の地点 B、杭基礎側方（土槽前面と杭基礎の間地点）の地点 C の 3 箇所である。測定方向は土槽の長手方向である。そして、深さ方向に A1、A2、…、A13 の順に 13 枚地中変位計用プレートをつないだ。

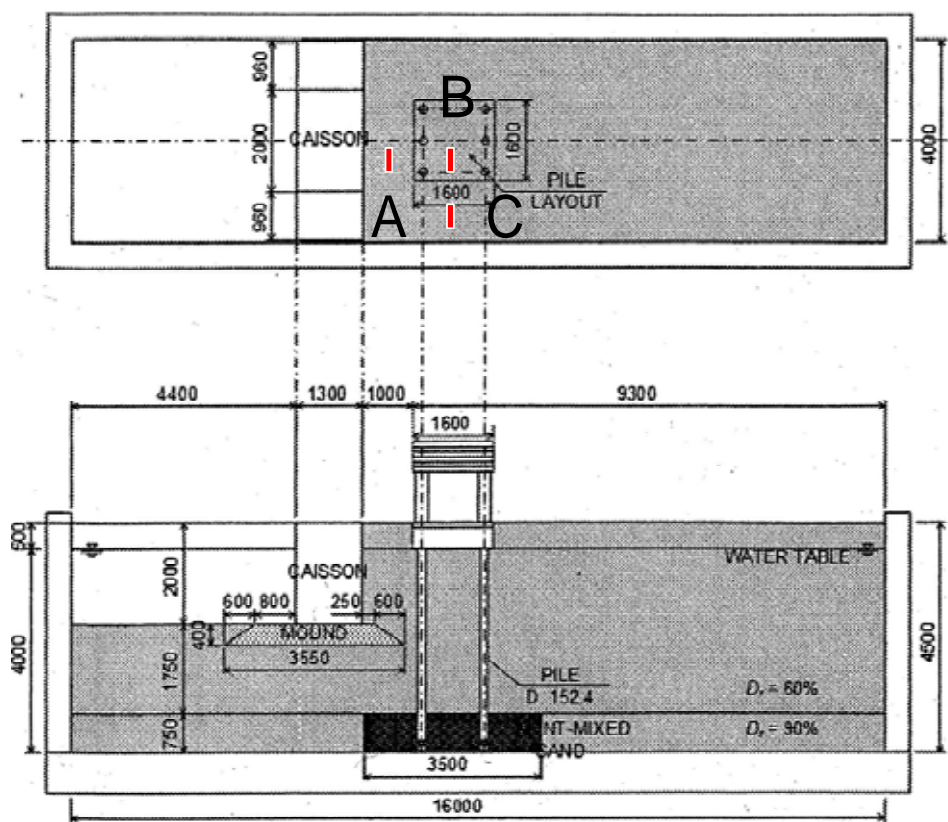


図 22 H18・ケーソン護岸の側方流動実験の地盤概要と計測器の位置

図 23 から図 25 に地点 A、B、C の地中変位計に設置した加速度応答の時刻歴を示す。ケーソン護岸の側方流動実験では加振によって地盤が激しく前後に変動したために、地中変位計に設置した加速度計の値が大きくし変動し、地点 A では大きな水平変位の発生のため計測開始から 15 秒には計測器の断線によって計測が不可能になっている。

次に、図 26 から図 28 には加速度記録に 0.25 Hz の LPF をかけて求めた地盤内の水平変位の時刻歴と深さ方向の水平変位分布を示す。

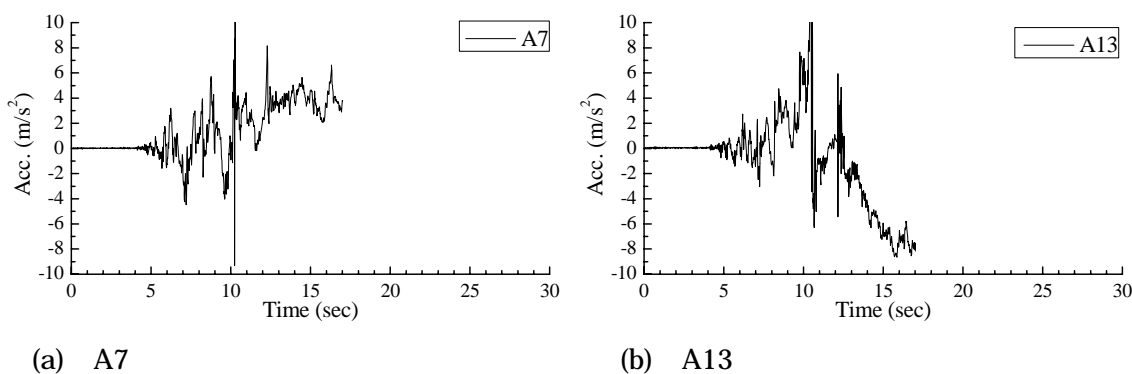


図 23 地点 A の A7、A13 における加速度応答の時刻歴

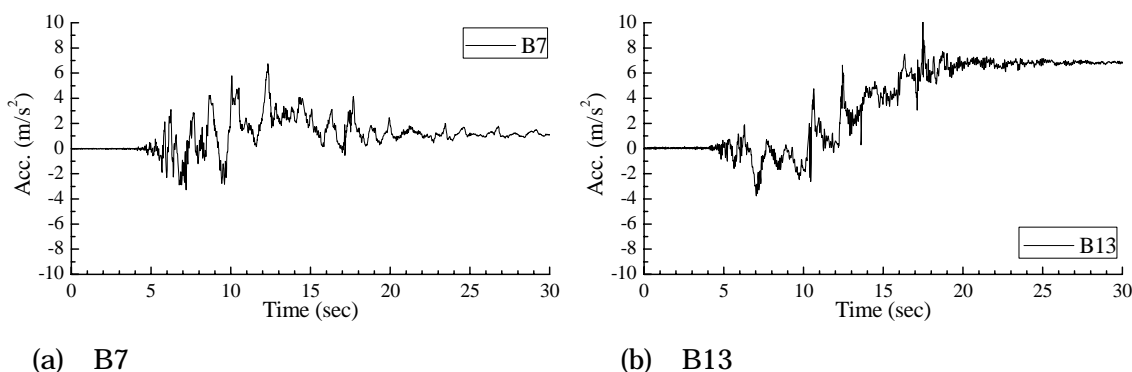


図 24 地点 B の B7、B13 における加速度応答の時刻歴

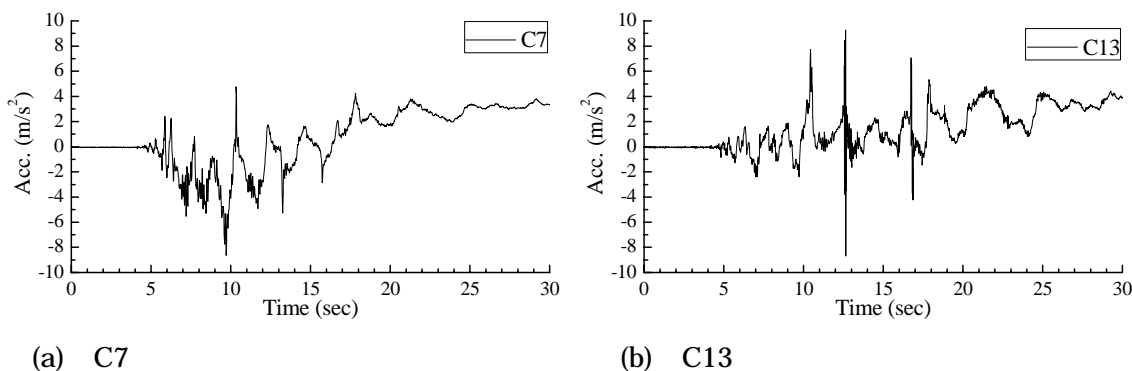


図 25 地点 C の C7、C13 における加速度応答の時刻歴

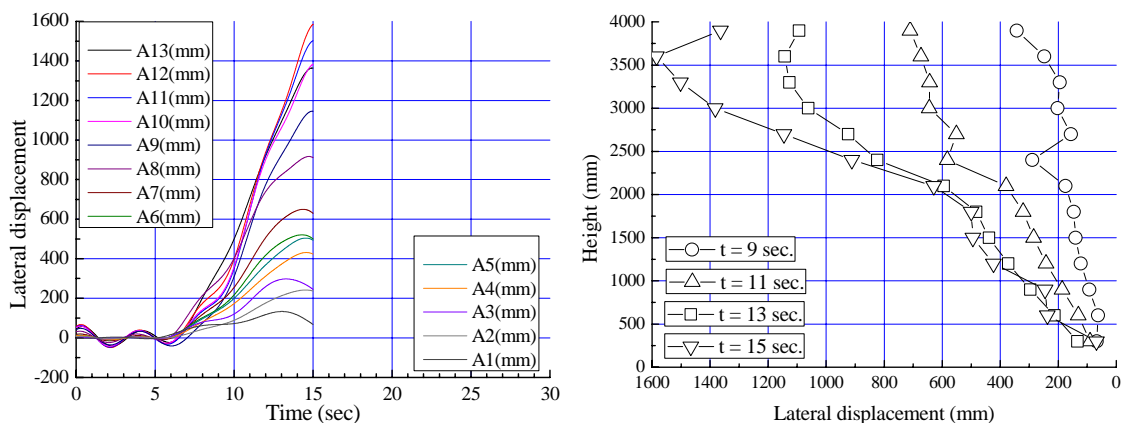


図 26 地点 A における水平変位の時刻歴と水平分布

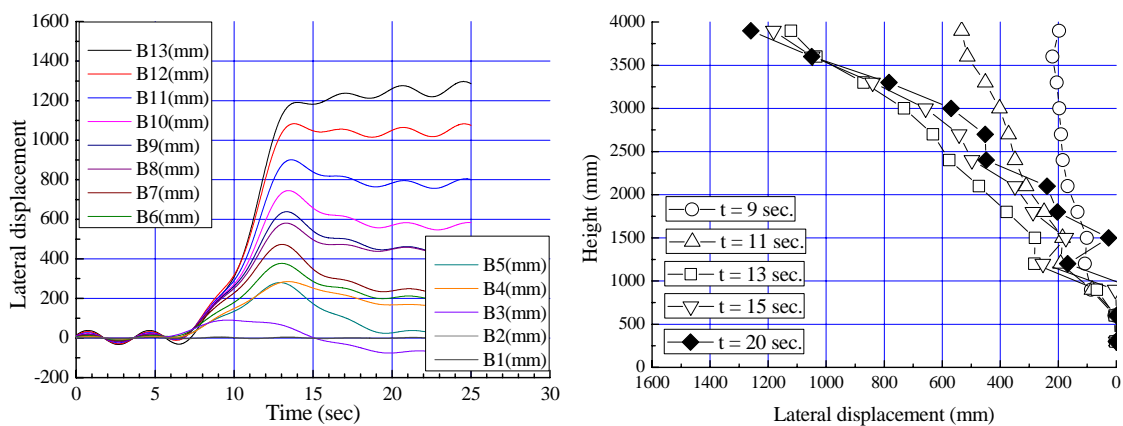


図 27 地点 B における水平変位の時刻歴と水平分布

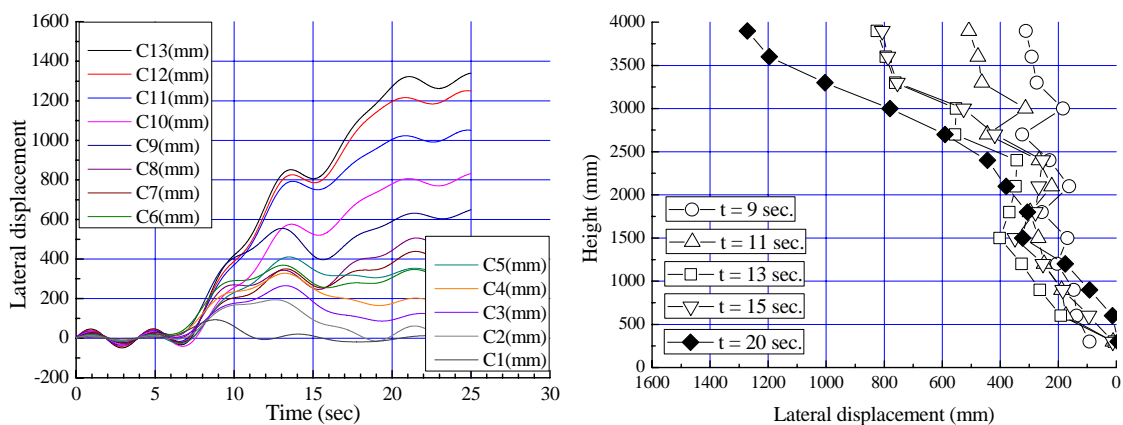


図 28 地点 A における水平変位の時刻歴と水平分布

図 26 から図 28 より、ケーソン護岸と杭基礎の中間地点である地点 A では計測開始から 15 秒までに最大 1.6 m におよぶ大変位が発生した。一方、地点 B と地点 C では最大変位で 1.3 m 程度となっており、地点 A よりも小さい。地点 B と地点 C の計測開始から 13 秒と

15 秒の地盤表層付近の水平変位量を比較すると、杭基礎内部にある地点 B の方が変位量が大きいことが分かる。これは、加振中に杭基礎の基礎が破壊したことによりフーチングから上部が海側に大きく変位したことが原因である。またこれらの図の特徴的な挙動として、地点 B と C の地盤下部において、加振中に水平変位が海側から陸側に戻る挙動が起こった。

2) 中型振動台実験における杭と液状化地盤との相互作用

図 29 に中型振動台実験で行った群杭模型 (Test1 : 6 x 6、Test2 : 11 x 11) の実験状況及び地盤概要を示す。また図 30 には Test2 の正面図を示す。容器には 2 m x 2 m の正方形土槽を用い、地盤材料として相対密度 35 % の豊浦砂で 5 % のゆるやかな斜面勾配を持った地盤を作製した。この地盤内には、ポリカーボネイト製の模型杭 (外径 : 32 mm、内径 : 27 mm、EI : 53.28 Nm²) が 6 x 6 または 11 x 11 の群杭配列されている。そして、加振は斜面の直行方向に行い、側方流動中に杭にかかる力を模型杭に設置したひずみゲージより算出した。



(a) Test1 : 群杭 (6 x 6) (b) Test2 : 群杭 (11 x 11)

図 29 中型模型実験の地盤概要 (平面図)

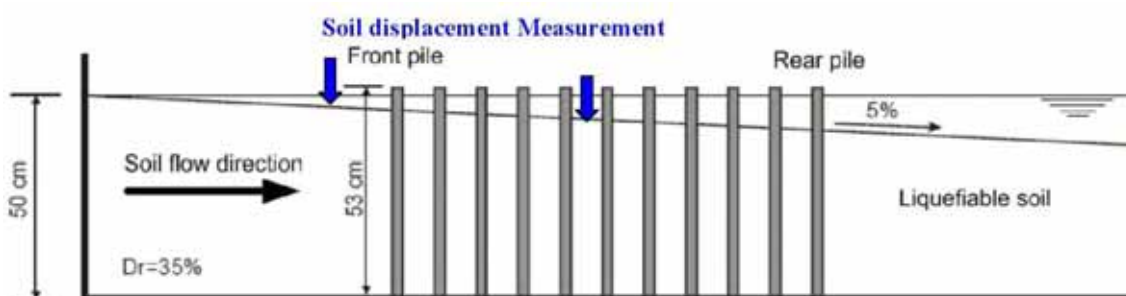


図 30 中型模型実験の地盤概要 (Test2 : 11 x 11、正面図)

図 31 には Test1 (群杭 : 6 x 6) の地中変位計で求めた地盤内変位の時刻歴と深さ方向の変位分布を示す。この図において、(a)と(b)は群杭内部に設置した地中変位計の値であり、また(c)と(d)は群杭の側方に設置した自由地盤内の地中変位計の値である。この図より、群杭内部の方が地盤の変位量が小さいことが分かる。

図 32 には、杭 1 本あたりに働く力と群杭全体に作用する力の算定方法と杭の列ごとの荷重分担率の関係を示す。この図において、杭に作用する荷重 (Q_i) は杭に設置したひずみゲージから求めた曲げモーメントの 2 階微分より求めている。また、それぞれの杭に作用する力をたし合せたものが群杭に作用する合力 (Q_{total}) である。そして、各列の杭に作用する力 (Q_i) を Q_{total} で割ったものが荷重分担率 (図 32(b)) である。

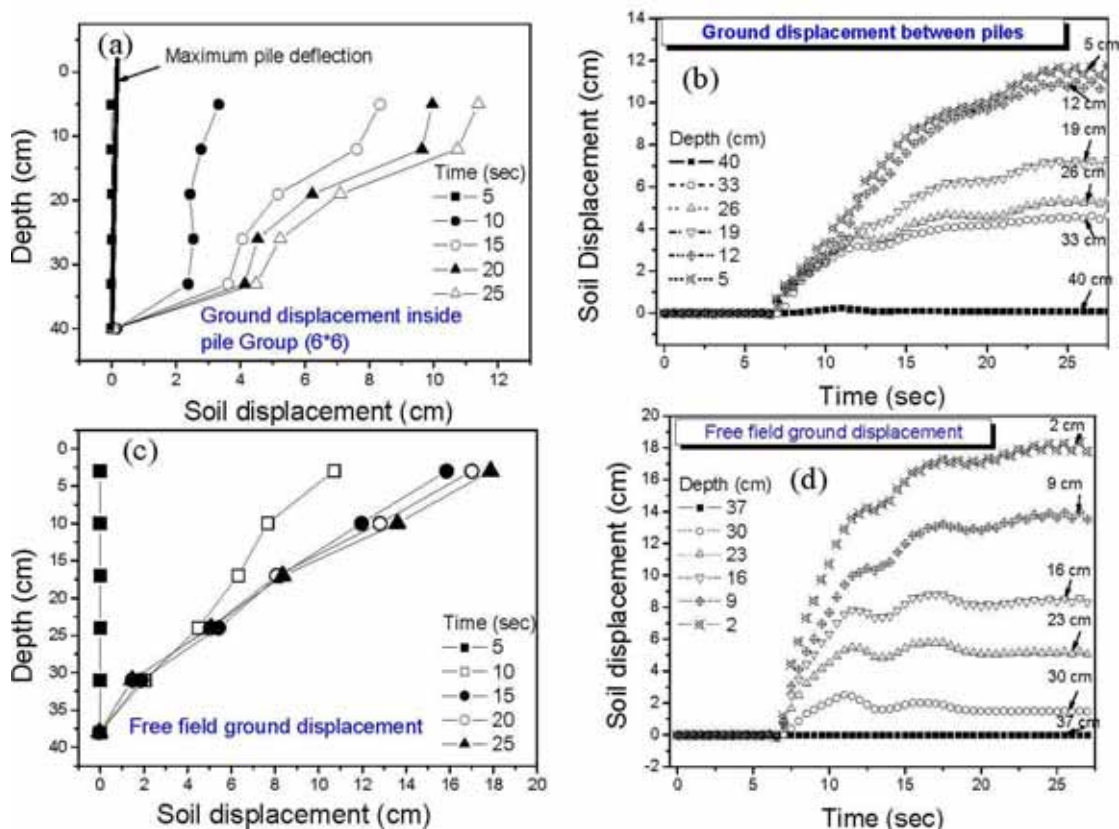


図 31 Test1 (群杭 6 x 6) の地中変位の時刻歴

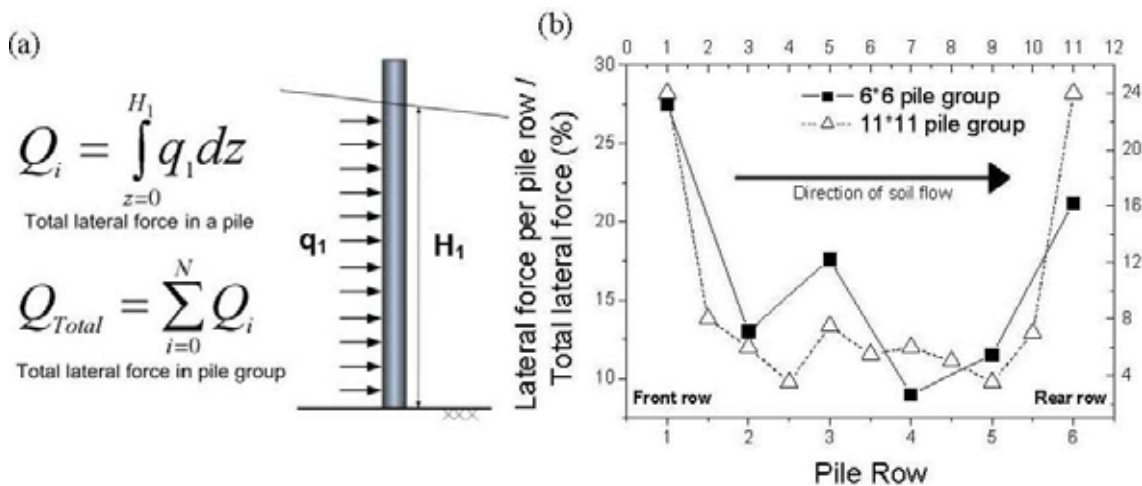


図 32 杭に作用する力と群杭に作用する合力とその分担率

図 32 の杭に作用する荷重の分担率を見ると、流動方向に対して郡杭の最前列及び最後列の杭に大きな荷重が集中し、内部の杭に作用する力は小さいことが分かる。これは、最前列に位置する杭には斜面からの流動圧を受けることと、郡杭内部の地中変位量は周囲に比べて小さいために（図 31）最背後に位置する杭と下流側の地盤には段差が生じ、結果として大きな力が最前列と最後列作用したものと考えられる。そして、この結果より、杭基礎の被害防止の対策として構造物周囲に杭を新たに打つことによって既設構造物の杭基礎被害を抑制することができる。図 33 には、Test1 の最前面に位置する杭に働く力と地盤の流動速度の関係を示す。この図より、地盤の流動速度と杭に働く力にはっきりとした相関を見ることができている。

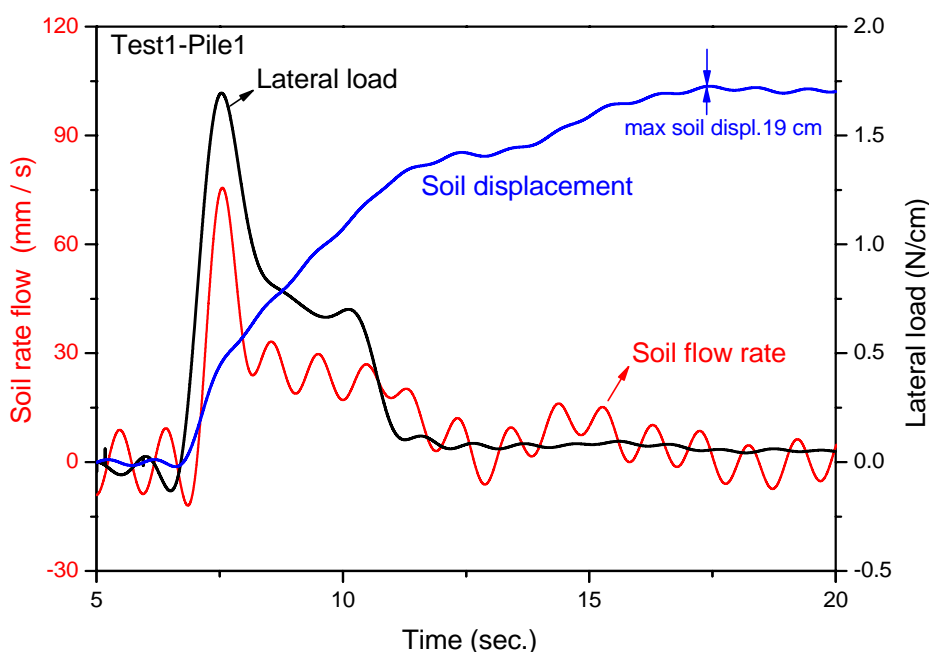


図 33 地盤の流動速度と杭に作用する力の関係

(d) 結論ならびに今後の課題

今回、実物大実験で使用した地中変位計が液状化地盤と一体となって変位することが、地表面に設置した変位計との比較結果より確認できた。また、この地中変位計では、一般的な変位計では（測定レンジが狭いために）測定できない 1 m を超える大变位領域においても地盤の変位に追従し、加振中の地盤内変位の挙動を捉えることができた。ゆるやかな斜面上の郡杭と液状化地盤の相互作用を調べた中型振動台では、流動方向に対して郡杭の最前列と最後列の杭に大きな荷重が作用した。一方、郡杭内部にある杭に作用する水平力は小さいことが分かった。また杭と液状化地盤の相互作用では、杭に作用する力は杭と地盤との相対速度に強く依存していることが確認できた。

(e) 引用文献

- 1) 佐々木康, 常田賢一, 松本秀應, 佐谷洋一, 森利弘: 偏荷重が作用する地盤の液状化による地盤流動特性に関する研究, 土木研究所資料, 3000号, 1991.

(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
Motamed, R., Honda, T., Towhata, I. & Ngo, T.A.	Liquefaction-Induced Large Ground Deformation	Geo-Kanto 2006、第3回地 盤工学会関東支部研究発表 会	平成 18 年 11 月 9 日
本多剛、東畑 郁生	重力場と遠心模型実験の相 似則が地震時の大変形問題 に及ぼす影響	Geo-Kanto 2006、第3回地 盤工学会関東支部研究発表 会	平成 18 年 11 月 9 日
Motamed, R., Towhata, I. & Sesov, V.	Study on P-Y curve for piles subjected to lateral flow of liquefied ground	The 4 th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece	平成 19 年 6 月 25 - 28 日

- (g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定
なし