

3.3.4 遠心振動実験による研究（その1）

目次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5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
 - 1) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響の検討
 - 2) 地盤の側方流動が杭応力に与える影響の検討
- (c) 業務の成果
 - 1) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響の検討
 - 2) 地盤の側方流動が杭応力に与える影響の検討
- (d) 結論ならびに今後の課題
 - 1) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響の検討
 - 2) 地盤の側方流動が杭応力に与える影響の検討
 - 3) これまで実施した地盤-構造物系の振動実験結果のまとめ
- (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

遠心振動実験による研究（その1）

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京工業大学大学院	教授	時松孝次	kohji@o.cc.titech.ac.jp
	助手	鈴木比呂子	hsuzuki@arch.titech.ac.jp

(c) 業務の目的

地震時に建物基礎に生じる被害を想定し対策を行うためには、大地震時の地盤-基礎-構造物の動的相互作用を明らかにする必要がある。そこで、地盤と構造物の大変形挙動と破壊メカニズムを支配する土圧特性、地盤反力特性、地盤変位と上部構造物慣性力の相互作用の把握に焦点をあてた実験を実施し、これらの結果に基づいて杭基礎の設計用簡便法を開発する。提案した設計用簡便法を用いて前述の実験結果の数値解析を行い、その妥当性を検討する。

E - ディフェンスを用いた「側方流動に伴うケーソン護岸とその背後杭基礎の破壊メカニズム解明」および「水平地盤における杭基礎の破壊メカニズム解明」に関わる実験に対して遠心振動実験による予測を行うとともに、大型実験で実施出来ない構造物に重要な影響を与える要因の実験パラメータを抽出して遠心振動実験を実施して、大型実験の補足を行う。また、これまで実施した大型振動台実験、遠心振動台実験の結果に基づき地盤-構造物系振動実験結果の評価を行う。

(d) 5か年の年次実施計画

1) 平成 14 年度：

- 非液状化地盤の基礎-構造物系の大型振動台実験を実施する。
- 地盤変形と上部構造物慣性力が杭応力に与える影響を把握する。
- 構造物固有周期が動的相互作用に与える影響を検討する。
- 大変形時の挙動を予測する設計用簡便法を開発する。

2) 平成 15 年度：

- 液状化地盤の基礎-構造物系の大型振動台実験を実施する。
- 液状化が地盤-杭-構造物系の動的相互作用に与える影響を検討する。
- 前年度に引き続き、大変形時の挙動を予測する設計用簡便法を開発する。

3) 平成 16 年度：

- 群杭基礎を用いた基礎-構造物系の大型振動台実験を実施する。
- 液状化地盤における群杭挙動を把握する。
- 前年度までの成果をもとに設計用簡便法を用いて大型振動台実験における杭応力を算定し、算定手法の妥当性を検討する。

4) 平成 17 年度：

- a) 地盤-杭-構造物系の遠心振動台実験を実施する。
 - b) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭の破壊メカニズムに与える影響を検討する。
 - c) 前年度までに実施している二次元、三次元入力条件での振動台結果をもとに、設計用簡便法の適用範囲を拡張する。
- 5) 平成 18 年度：
- a) 水平地盤-杭-構造物系の遠心振動実験を実施する。
 - b) 側方流動地盤の遠心振動実験を実施する。
 - c) これまで実施した研究のまとめを行う。

(e) 平成 18 年度業務目的

E-ディフェンスを用いた「水平地盤における杭基礎の破壊メカニズム解明」に関わる実験に対して遠心載荷振動台実験による予測および大型実験の補足を行う。前年度は乾燥地盤における杭基礎の破壊メカニズムに影響を及ぼす要因について検討しており、今年度は飽和地盤における杭基礎の破壊メカニズムに影響を及ぼす要因について検討する。実験は基礎根入れの有無、上部構造物の有無、振動台入力波形などをパラメータとして行い、液状化地盤における杭基礎の破壊メカニズム、ならびに各パラメータが杭の破壊・変形モードに与える影響を明らかにする。

E-ディフェンスを用いた「側方流動に伴うケーソン護岸とその背後杭基礎の破壊メカニズム解明」に関わる実験に対して、米国の NEES が所有する大半径の遠心載荷装置を用いて遠心振動実験を実施し、大型実験の予測および補足を行う。実験は杭の本数、基礎の形状、杭の降伏強度などをパラメータとして実施し、各パラメータが側方流動地盤での杭の破壊メカニズムに与える影響を明らかにする。また、米国の研究者と相互に意見交換するとともに、来年度以降の共同研究の可能性を探る。

(2) 平成 18 年度の成果

(a) 業務の要約

地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響を検討するため、アメリカ NEES の施設で遠心振動台実験を実施した。実験は、多くのパラメータを変化させて行い、基礎根入れの有無、上部構造物の有無、入力動卓越周期等が杭の応力に与える影響を評価した。また、同様にアメリカ NEES の施設で側方流動地盤の遠心載荷振動台実験を実施し、基礎の形状、杭の降伏強度が杭応力に与える影響を検討した。

(b) 業務の実施方法

1) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響の検討

飽和地盤の杭応力に影響を与える要因を抽出するため、30G の遠心場においてせん断土槽を用いた地盤-杭-構造物系振動台実験を実施した。写真 1、2 に、実験で用いたせん断土槽、構造物モデル、図 1 および表 1 に実験で用いた地盤-杭-構造物模型を示す。実験は、1/30 縮尺模型を用いており、基礎根入れの有無、上部構造物の有無(A、B)をパラメータとした地盤-杭-構造物模型に対し振動台入力地震動を変化させて行った。

実験は、せん断土槽内に地盤-杭-構造物模型を作成して行った(図 1)。用いたせん断土槽は高さ 0.56m、幅 1.95m、奥行き 0.8m である。図 2 に、実験で用いた地盤材料を示す。最下層 150mm(実大 4.5m)は 4 号硅砂、液状化層 300mm(実大 9m)はアルバニー硅砂、基礎が根入れされる場合の表層 50mm(実大 1.5m)は 2 号硅砂を用いて作成した。杭模型は径 15.9mm 厚 0.3mm(実大 477mm、9mm)のステンレスパイプを用い、頭部は 180mm×180mm×70mm で 2kg(実大 5.4m×5.4m×2.1m、54t)の基礎に剛接合、先端は土槽底面にピン接合とした。上部構造物は 8kg(実大 216t)で、板バネによって支持され、その固有周期は液状化前の地盤より長く、液状化後の地盤より短くなっている。

土槽底面に杭模型を設置したのち、空中落下法により最下層および液状化層を作成した。地盤高さ 450mm まで作成して基礎を設置したのち、土槽を脱気槽に入れ、脱気しながらシリコンオイル(30cst)を注入して地盤を飽和させた。基礎が根入れされる場合は、地盤の脱気および飽和作業完了後に、表層 50mm を作成した。なお、地盤の密度は最下層および表層は $D_r=90\%$ 程度であり、液状化層は $D_r=70\%$ 程度である。

実験では、図 1 に示すように水圧計、土圧計、加速度計、変位計、歪みゲージを配置して計測を行った。また、振動台入力加速度には 2 タイプの地震波の最大加速度を 0.2、2.0、4.0 m/s^2 (実大換算)に調整して用いた。図 3 に両地震波の加速度・速度応答スペクトル($h=5\%$)を示す。鳥取県西部地震波では 0.1 秒以下(図 3(a)(b))、兵庫県南部地震 JR 鷹取波は 0.1~1.0s(図 3(c)(d))で大きくなり、異なる周期特性を持っている。なお、以降の報告では、測定した値を実大スケールに換算して示す。

表 1 地盤-杭-構造物系相互作用実験実施ケース

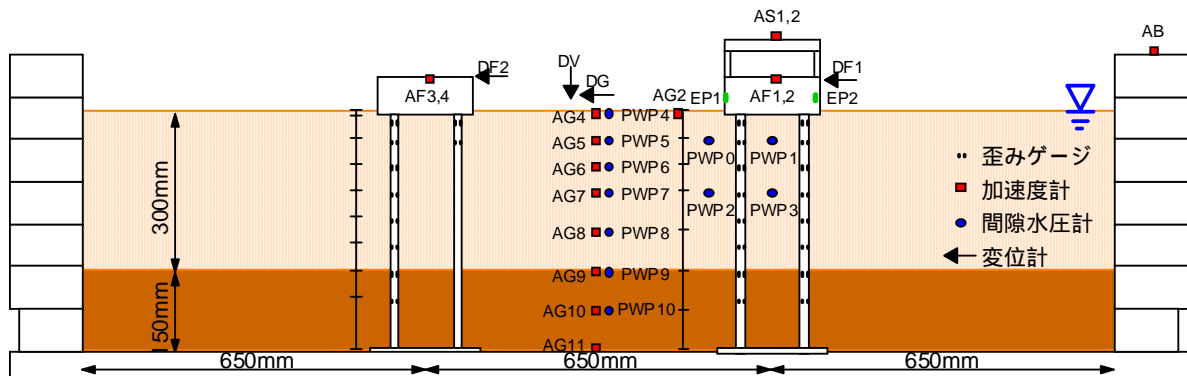
	基礎根入れなし		基礎根入れあり	
	構造物あり (Pile group A)	構造物なし (Pile group B)	構造物あり (Pile group A)	構造物なし (Pile group B)
鳥取県西部地震 赤碕波	0.2、2 m/s^2		0.2、2 m/s^2	
兵庫県南部地震 JR 鷹取波	0.2、2、4 m/s^2		0.2、2、4 m/s^2	



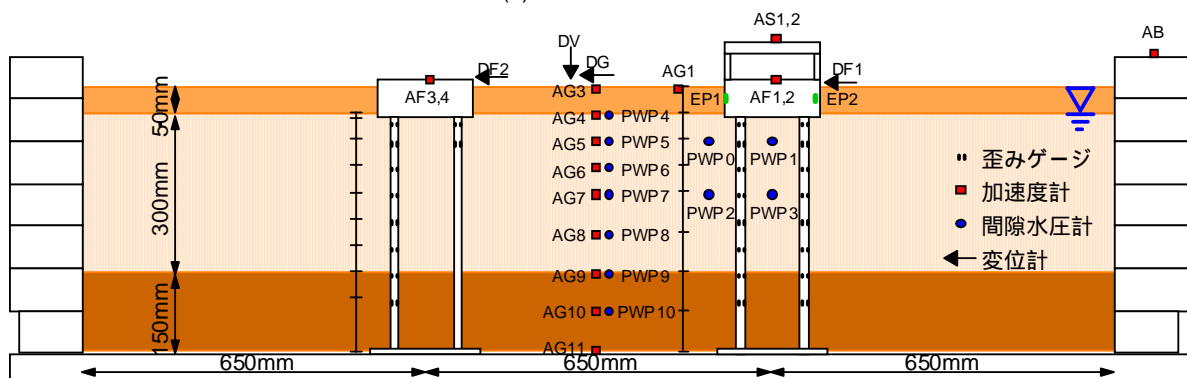
写真 1 遠心载荷装置アームに載った土槽



写真 2 地盤に設置した杭基礎-構造物模型



(a) 基礎根入れなし



(b) 基礎根入れあり

図 1 地盤-杭-構造物模型

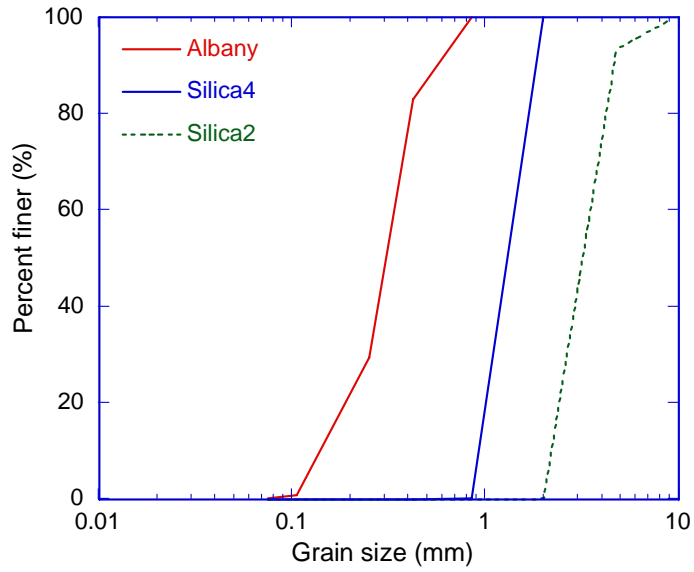


図2 地場材料粒度分布

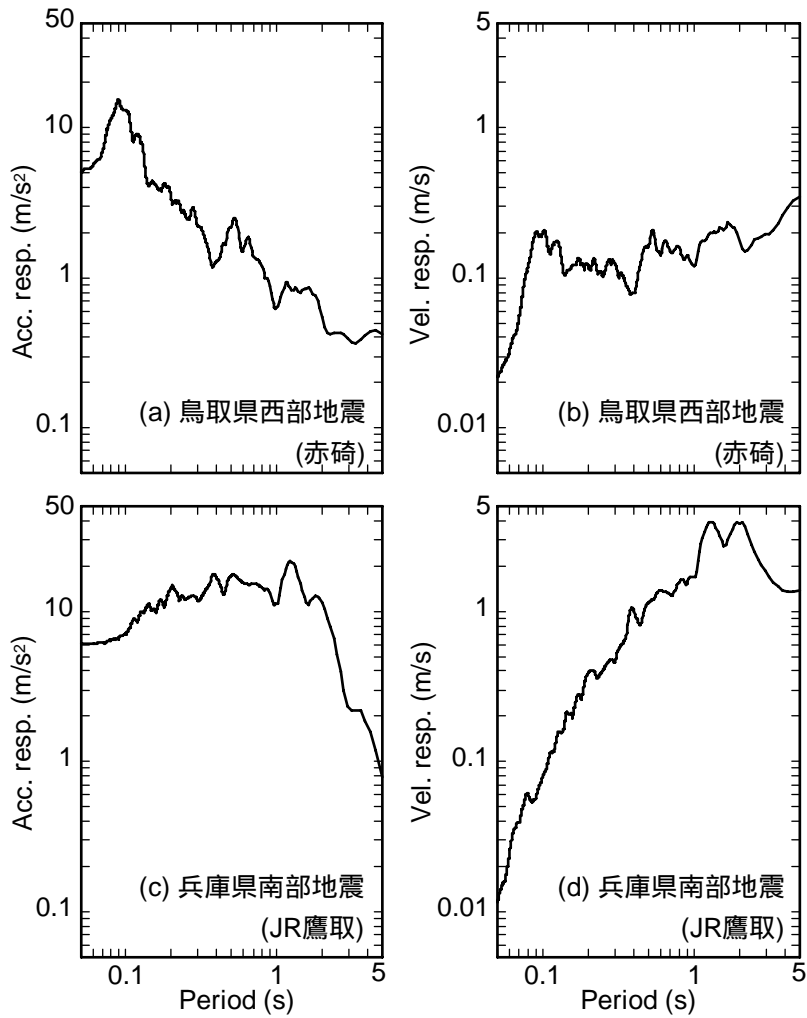


図3 振動台入力波の加速度・速度応答スペクトル(h=5%)

2) 地盤の側方流動が杭応力に与える影響の検討

地盤の側方流動が杭応力に与える影響を検討するため、遠心場において矢板護岸を擁する地盤-杭基礎模型振動台実験を実施した。実験はカリフォルニア大学デービス校の遠心載荷装置を用いて行った。カリフォルニア大学デービス校は米国に15箇所あるNEESの1拠点であり、世界最大規模(半径9m)の遠心載荷装置を有している。この装置を用いて側方流動地盤・液状化地盤における杭基礎構造物の実験を始めとする多くの地盤実験が行われている(たとえば、Boulanger et al.(1999)、Wilson et al. (2000))。写真3、4は遠心載荷装置のある建物、建物内部の遠心載荷装置アーム部分を示している。

表2に実験ケースを示す。実験は、1/30縮尺模型を用いて30G場で行い、基礎の形状、杭の耐力をパラメータとして行った。図4に、実験で用いた地盤-杭基礎模型を示す。表2に示す杭-構造物模型のうち、モデルA~C(図4(a)~(e))、モデルD、E(図4(f)~(i))を同じ地盤内に設置し、加振を行った。

実験では、高さ0.6m×幅1.7m×奥行き0.8mのせん断土槽内に地盤-杭-構造物模型を作成した。写真5に、実験で用いたせん断土槽を示す。地盤は3層構成とし、厚さ150mm(実大4.5m)の最下層は4号珪砂、厚さ300mm(実大9m)の液状化層はアルバニー珪砂、厚さ100mm(実大3m)の表層は2号珪砂で作成した。各地盤材料の粒度分布は図2に示す通りである。矢板はアルミニウム板を用い、高さは500mm(実大15m)である。杭は、径15.9mm厚0.3mm(実大477mm、9mm)のステンレスパイプ、もしくは径16mm厚1mm(実大480mm、30mm)のアルミニウムパイプを用いた2×2または2×1の群杭とした。図5は、実験で用いたステンレスパイプおよびアルミニウムパイプの応力-歪み、曲げモーメント-曲率関係である。両者の剛性EIは同じであるが、降伏強度が異なり、アルミニウムパイプの降伏強度はステンレスパイプの降伏強度の2倍以上になっている。基礎はステンレスで作成し、群杭B、D、Eは156mm×156mm×120mmで質量4kg(実大4.68m×4.68m×3.6m、108t)、群杭Aは156mm×52mm×120mmで質量2kg(実大4.68m×1.56m×3.6m、54t)、群杭Cは156mm×30mm×30mmで0.5kg(実大4.68m×0.9m×0.9m、13.5t)である。

杭先端を土槽底面に剛接合したのち、空中落下により最下層および液状化層を作成した。なお、最下層厚が高さ50mmに達したら、矢板を設置し、矢板と土槽壁面の隙間を砂粒子がすり抜けられない様にゴム膜を設置した。液状化層を空中落下で作成し、表層地盤を敷き詰めて締め固め、基礎を杭に接合した後、せん断土槽を脱気槽に入れ、脱気しながら所定の高さまで飽和した。なお、地下水位の高さは表層面から100mm下(実大3m)で、地盤の相対密度は最下層、表層で $D_r=90\%$ 程度、液状化層で $D_r=70\%$ 程度である。

実験では、図4に示すように水圧計、土圧計、加速度計、変位計、歪みゲージを配置して計測を行った。また、入力波には1995年兵庫県南部地震に観測されたJR鷹取波(図3(c)(d))の最大加速度を実大換算で 4.0m/s^2 、または 6.0m/s^2 に調整したものをを用いる。なお、以降の報告では、測定した値を実大スケールに換算して示す。

表 2 側方流動実験実施ケース

		A	B	C	E	D
基礎	杭 1 本あたりの基礎幅(mm)	52	78	30	78	78
	杭 1 本あたりの荷重(kg)	1.0	1.0	0.2	1.0	1.0
杭	本数	2×1	2×2	2×1	2×2	2×2
	形状	ステンレスパイプ (D=15.9mm、t=0.3mm)				アルミニウムパイプ (D=15.9mm、t=1.0mm)



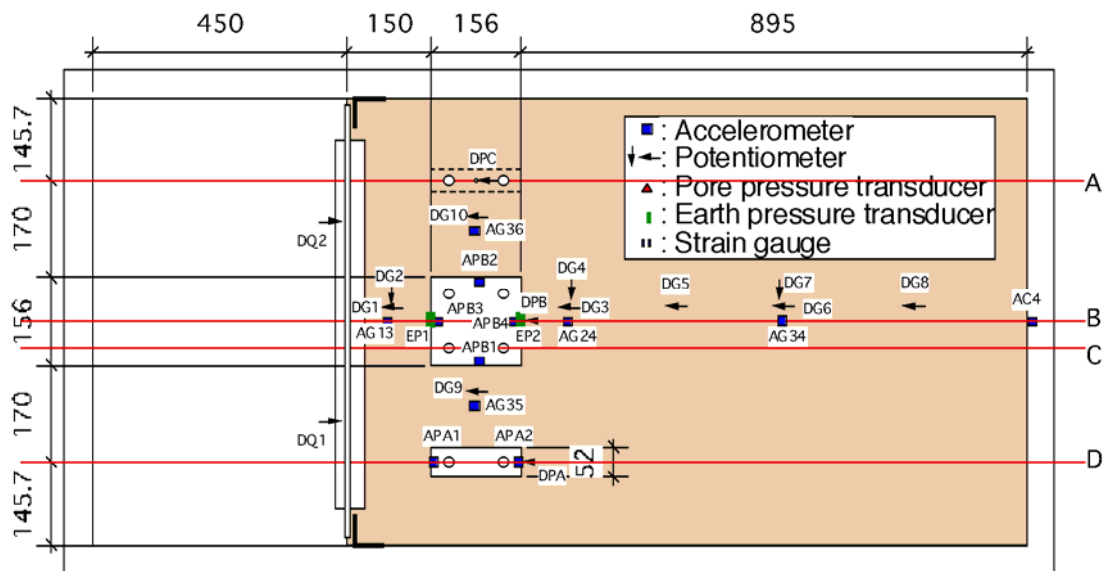
写真 3 遠心載荷装置のある建物



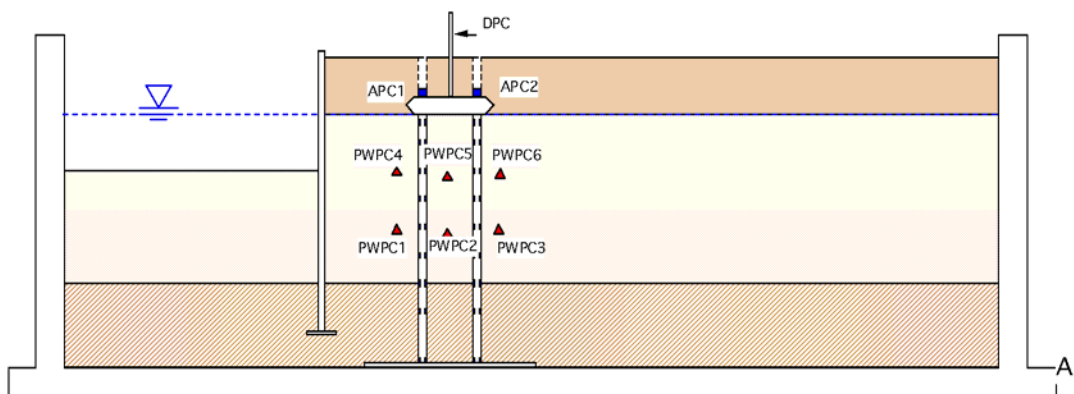
写真 4 遠心載荷装置アーム



写真5 実験で用いたせん断土槽

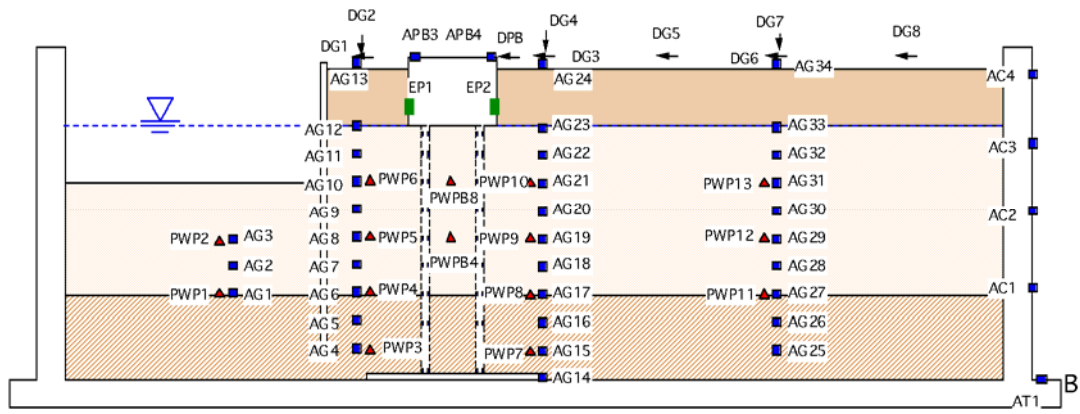


(a) A、B、Cモデル平面図

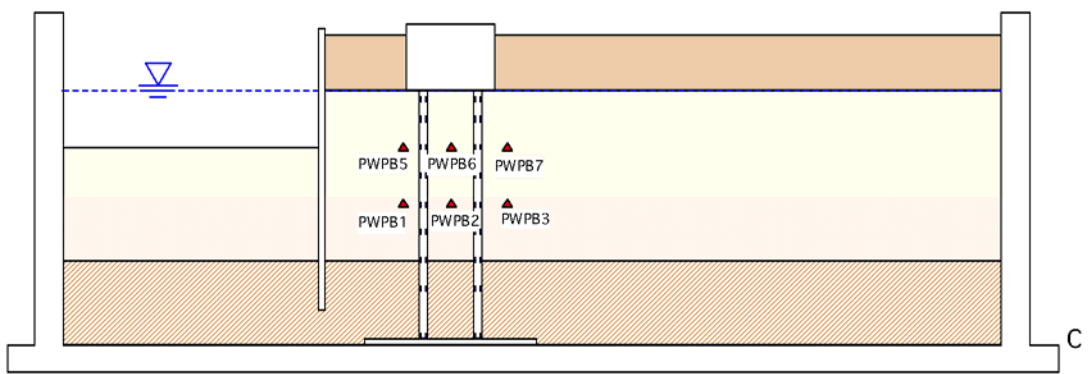


(b) A、B、Cモデル断面図(1)

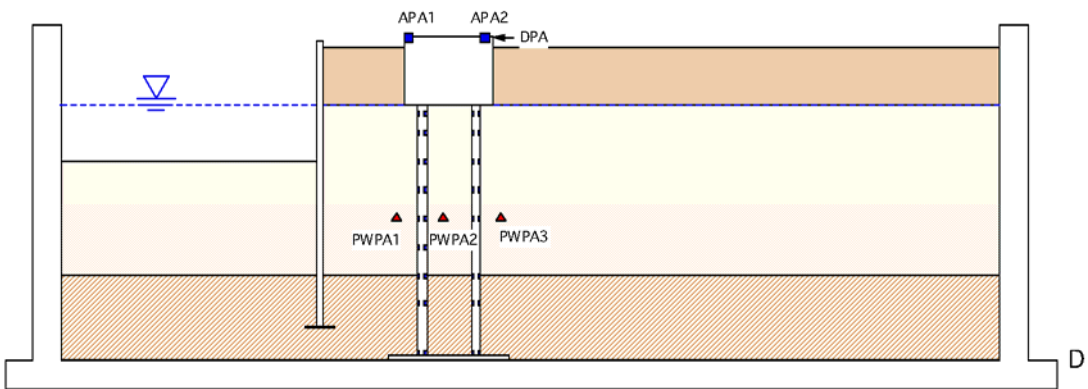
図4 地盤-杭-構造物模型



(c) A、B、C モデル断面図(2)

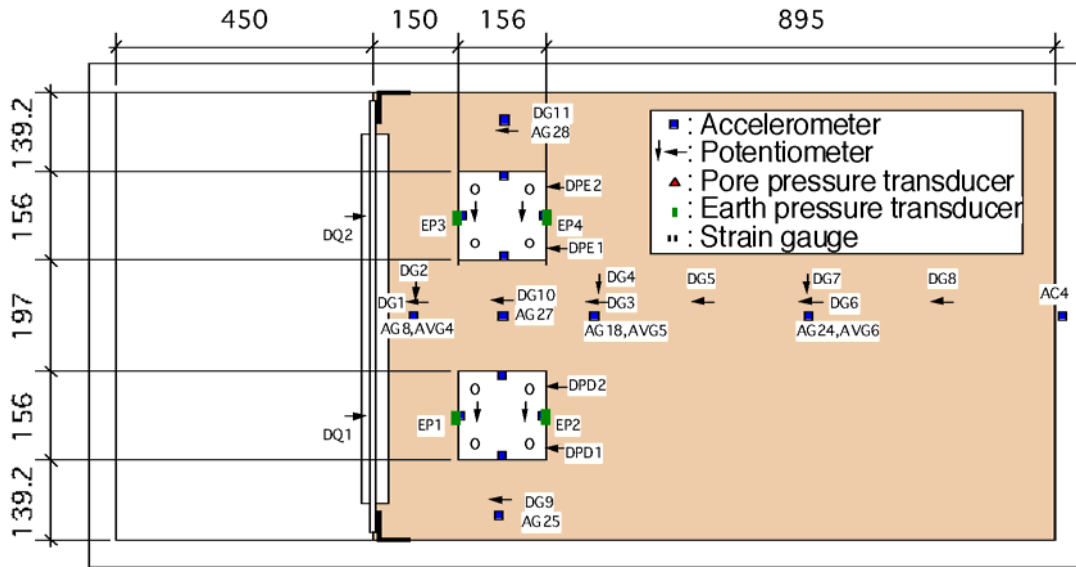


(d) A、B、C モデル断面図(3)

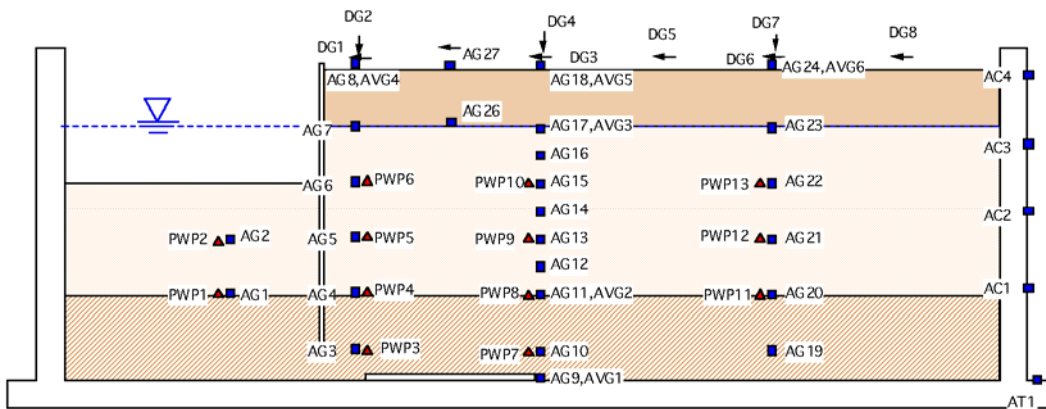


(e) A、B、C モデル断面図(4)

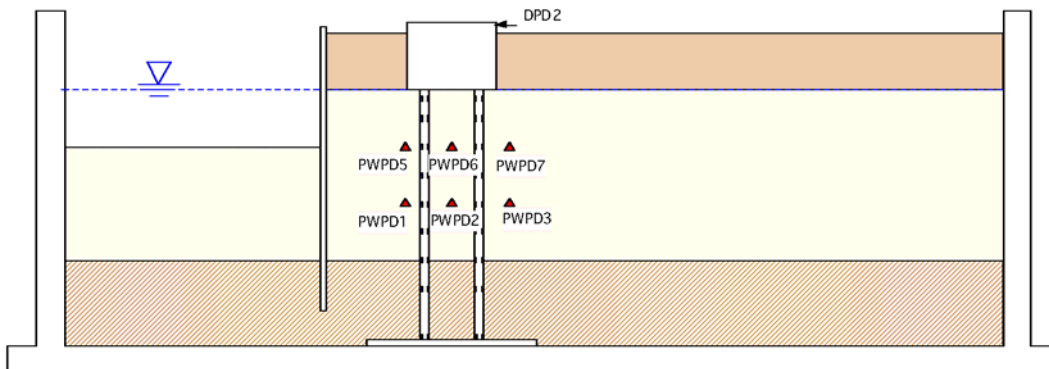
図4 地盤-杭-構造物模型



(f) D、E モデル平面図

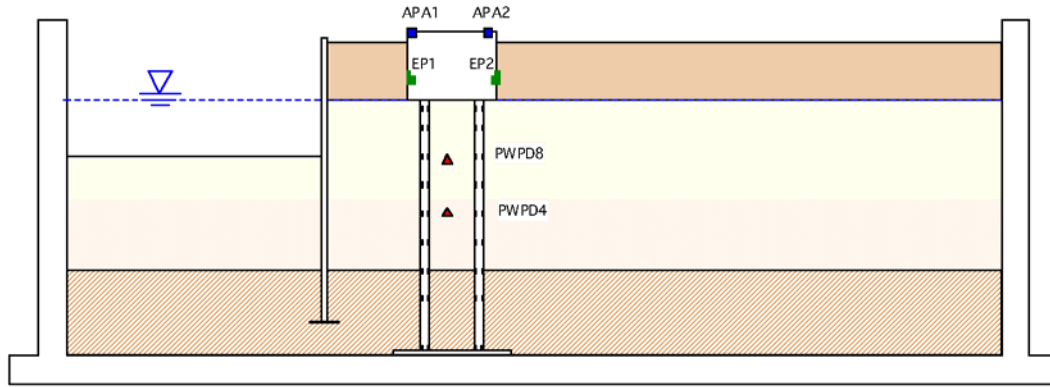


(g) D、E モデル断面図(1)



(h) D、E モデル断面図(2)

図4 地盤-杭-構造物模型



(i) D、E モデル断面図(3)

図 4 地盤-杭-構造物模型

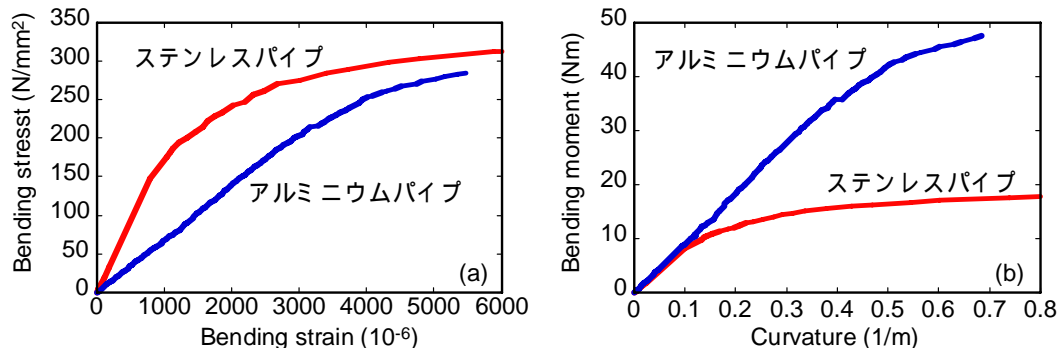


図 5 杭模型材料

(c) 業務の成果

1) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響の検討

本報では、主に、表 1 に示す基礎根入れがあるモデルに対し、鳥取赤碓波、JR 鷹取波の最大加速度を 2.0m/s^2 に調整して入力した実験について、報告する。図 6 に上部構造物、基礎、地表、振動台の加速度記録より算出した速度応答スペクトル(減衰 5%)、図 7、8 に、上部構造物、基礎、地表、振動台の加速度、地表変位、杭の曲げ歪み、過剰間隙水圧の時刻歴を示す。なお、地表変位は地表の加速度記録の積分より算出したものである。なお、表 1 に示す様に基礎 A、群杭 A は構造物ありモデル、基礎 B、群杭 B は構造物なしモデルを表している。

加振開始後、時間の経過とともに過剰間隙水圧は上昇し、地盤は液状化に至る。JR 鷹取波入力時の過剰間隙水圧は初期有効応力に達した後、ほぼ一定であるのに対し(図 8(i))、鳥取赤碓波入力時の過剰間隙水圧は初期有効応力に達した後、次第に低下する(図 7(i))。このことは、JR 鷹取波入力時では液状化した状態が持続するのに対し、鳥取赤碓波入力時では水圧の消散が始まり、入力地震波によって地盤の液状化状態の継続が異なることを示している。

鳥取赤碓波入力時の地表、基礎の応答は入力波と同様に 0.1 秒付近の短周期成分が顕著に見られるが、構造物の応答は著しく小さく、応答特性も入力波とは異なる(図 6(a)、図

7(a)-(e))。一方、JR 鷹取波入力時の地表、基礎、構造物の応答はいずれも入力波と同様に 1.0 秒付近成分が顕著に見られる(図 6(b)、図 8(a)-(e))。これらの入力地震動の違いによる構造物応答の違いは、非液状化地盤と同様に、入力動の卓越周期と構造物の固有周期の大小関係に起因すると考えられる³⁾。また、鳥取赤碓波入力時の地表変位は極めて小さくなるのに対し(図 7(f))、JR 鷹取波入力時の地表変位は 150mm 程度になる(図 8(f))。このことは、過剰間隙水圧が初期有効応力に達しても、地盤の歪みの増大が地震動によって異なることを示唆しており、また、初期有効応力に達した後の間隙水圧の挙動が異なることも対応していると考えられる。

鳥取赤碓波入力時の杭の曲げ歪みは 100 マイクロ程度であるのに対し、JR 鷹取波入力時の杭の曲げ歪みは 1500 マイクロ程度になる(図 7、8(g)(h))。このことは、JR 鷹取波入力時には、構造物の応答が大きくなること、または、地盤変位が大きくなることなどに対応していると考えられる。しかし、構造物のあり・なしモデルでの杭の曲げ歪みを比較すると、鳥取赤碓波入力時では、構造物なし(B)の杭の曲げ歪みは構造物あり(A)の時の値の半分程度であるのに対し(図 7(g)(h))、JR 鷹取波入力時では、構造物なし(B)の杭の曲げ歪みは構造物あり(A)の時の値と同程度である。このことは、入力地震動によって、構造物、地盤からの作用が杭の歪み増加に及ぼす影響が異なる可能性があることを示している。

構造物および地盤からの荷重が杭に及ぼす影響を検討するため、図 9、10 に構造物慣性力と杭頭せん断力または地盤変位の関係を示す。構造物慣性力は基礎と構造物の加速度から、せん断力は測定した曲げ歪みを曲げモーメントに変換したのち深度方向に微分することで算出している。

鳥取赤碓波入力時において、地盤変位は極めて小さく、構造物慣性力との相関は見られない(図 10(a)(b))。杭頭せん断力は上部構造物の有無に関わらず構造物慣性力より小さくなる(図 9(a)(b))。このことは基礎根入れ部に作用する土圧によって杭頭に伝達する荷重が低減されているためと考えられる。また、上部構造物の有無による違いを比較すると、構造物慣性力は上部構造物がない B でわずかに大きくなり、杭頭せん断力は上部構造物がある A でわずかに大きくなる(図 9(a)(b))。これは、上部構造物がある場合、上部構造物は応答が小さく、また基礎と異なる挙動を示すので構造物慣性力を低減する方向に作用するため、また、構造物慣性力が大きくなると地盤との相対変位が増加することで大きい土圧が作用する可能性があるためと考えられる(図 11(a)(b))。

JR 鷹取波入力時において、地盤変位は大きくなり、構造物慣性力と正の相関を示す(図 10(c)(d))。杭頭せん断力は、上部構造物がない B では構造物慣性力より大きくなり、上部構造物がある A では構造物慣性力より小さくなる傾向が見られる(図 9(c)(d))。このことから、地盤変位が大きくなることで、基礎に作用する土圧が杭頭せん断力を増加させる可能性があることが示唆され、その結果、上部構造物がないにも関わらず、杭に生じる曲げ歪みは上部構造物がある場合と同程度まで大きくなると考えられる(図 11(e))。また、上部構造物がある場合においても、地盤変位が増大すると土圧の作用方向が抵抗側から加力側に变化する可能性もある(図 11(c)(d))。

図 12 に、基礎根入れのないモデルも含めた実験ケースの曲げ歪み深度分布を示す。鳥取赤碓波入力の場合は、基礎に作用する土圧は主に構造物慣性力に対して抵抗側に作用するため、杭の曲げ歪みは基礎根入れがある場合より基礎根入れがない場合で大きくなる(図

12(a)(c))。一方、地盤変位が大きくなる JR 鷹取波入力の場合は、基礎に作用する土圧が構造物慣性力に対して加力側に作用する可能性があるため、杭の曲げ歪みは基礎が根入れされない場合より基礎が根入れされる場合で大きくなる(図 12(b)(d))。基礎に作用する土圧による曲げ歪みの増大は上部構造物がない B モデルの場合に特に顕著である。

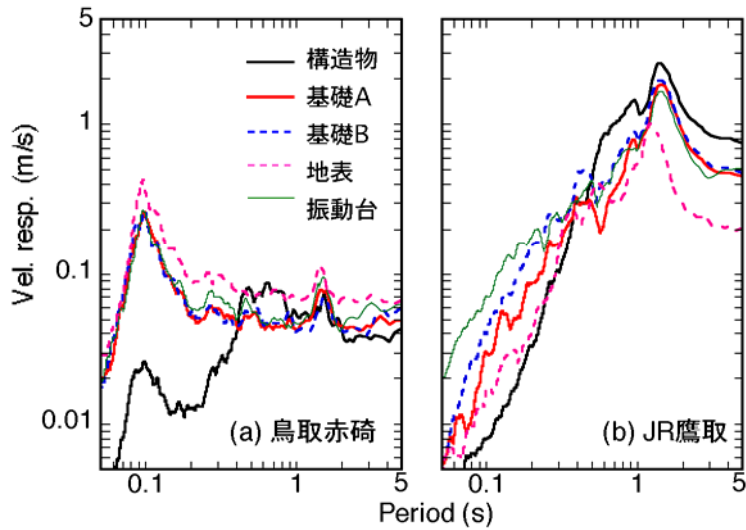


図 6 加速度応答スペクトル(h=5%)

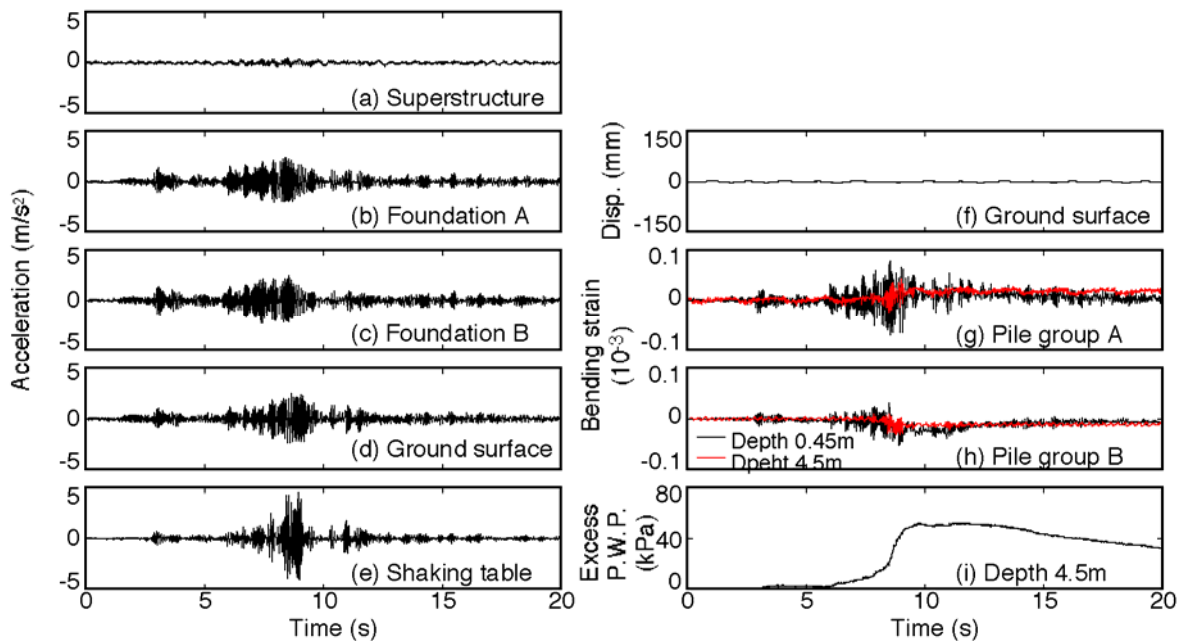


図 7 主要な値の時刻歴波形(鳥取赤碕波入力)

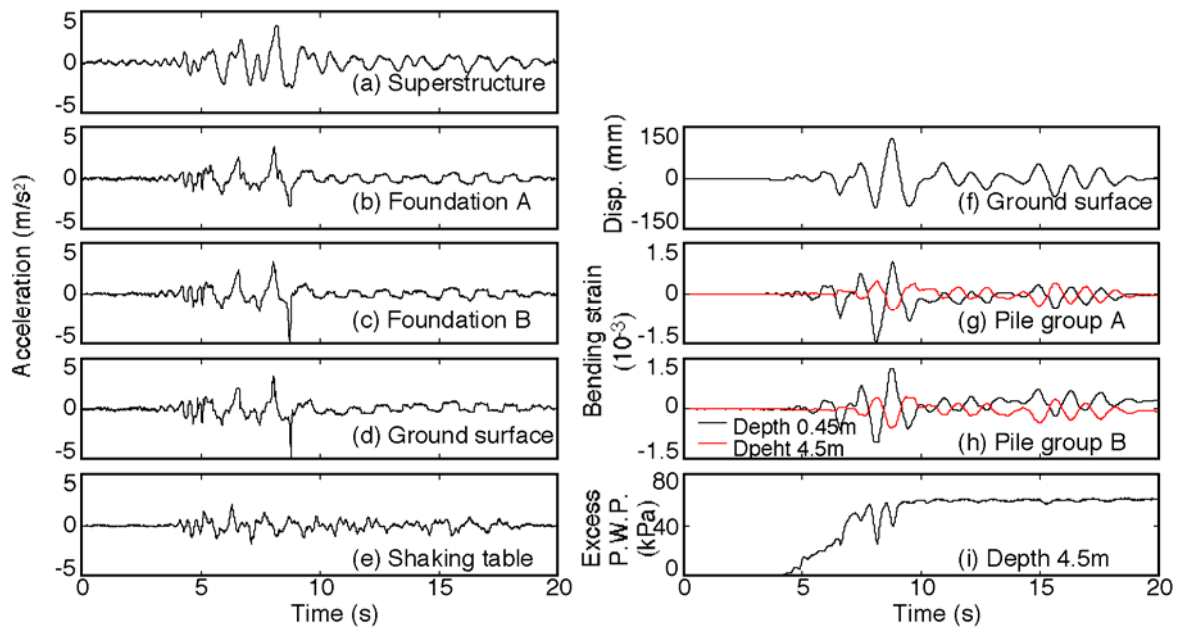


図8 主要な値の時刻歴波形(JR 鷹取波入力)

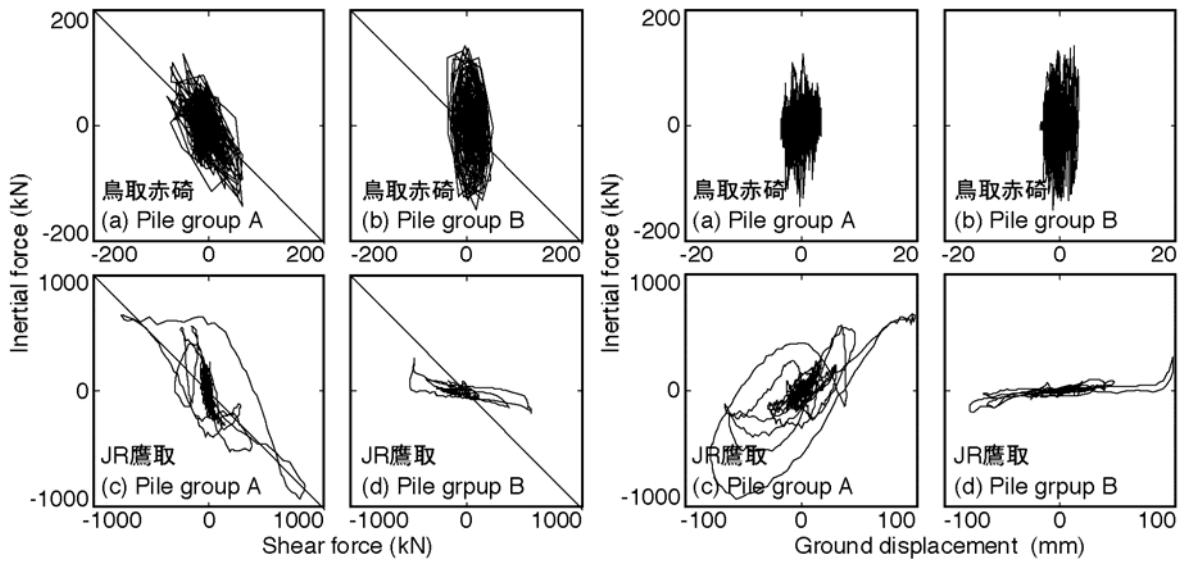


図9 杭頭せん断力と構造物慣性力の関係

図10 地盤変位と構造物慣性力の関係

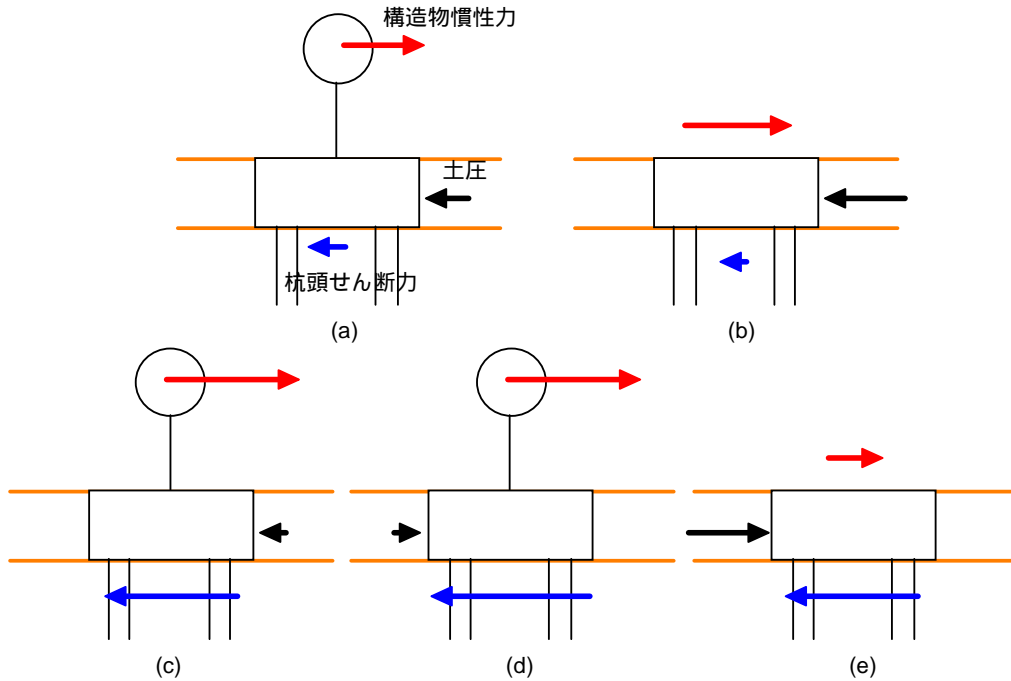


図 11 基礎根入れ部に作用する荷重

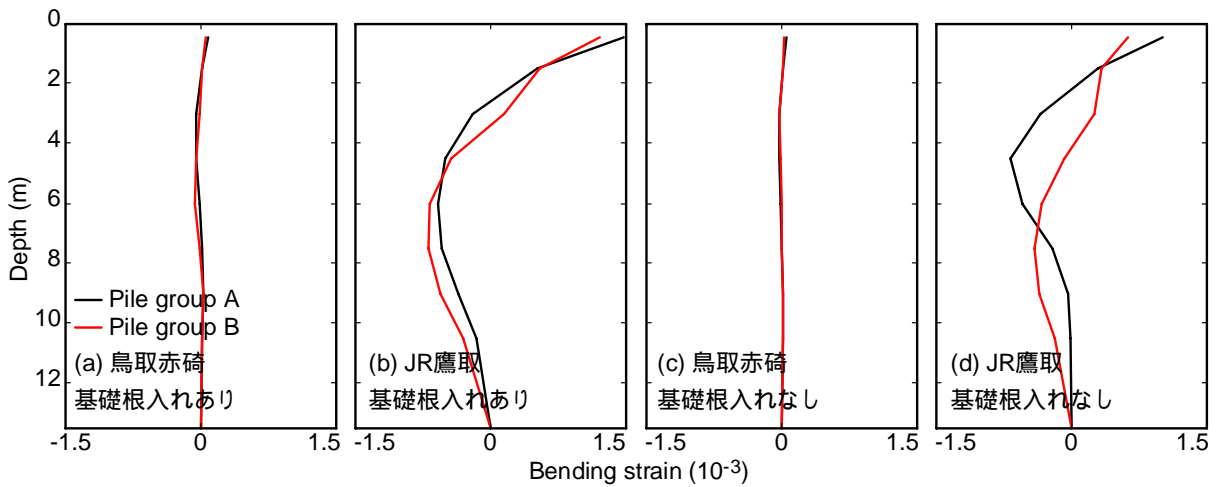


図 12 杭の曲げ歪み深度分布

2) 地盤の側方流動が杭応力に与える影響の検討

本報では、主に、表 2 に示す杭の耐力が異なる 2×2 杭のモデル D、E(図 4(f) ~ (i)) に対して行った実験について報告する。写真 6 は実験前後の基礎、矢板、周辺地盤の状況を示している。矢板が水側に 2m 以上移動し、矢板の移動とともに矢板背後の地表面が大きく沈降した。基礎はいずれも矢板側に変形し、その残留変形の値はアルミニウム杭を用いた(高強度杭)モデル D で 0.8m、ステンレス杭を用いた(低強度杭)モデル E で 1.0m である。基礎の背後の地盤も矢板背後地盤と同様に大きく沈降し、基礎壁面と地盤の間に空間が生じていた。

図 13 に、基礎、地表、矢板の変位、基礎、地表、振動台の加速度、下流側(水側)、上流

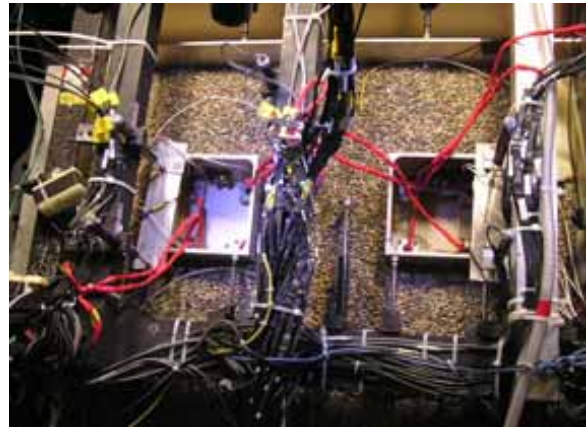
側(陸側)杭の頭部および液状化層下端の曲げ歪み、自由地盤の過剰間隙水圧の時刻歴を示す。地表の変位は図 4(f)に示す DG3、DG10 で計測した値である。加振開始後、振幅の繰り返しにより、間隙水圧比が上昇し、地盤は液状化に至る(図 13(q))。矢板、基礎、地表の変位は著しく増大し、その値は矢板で 2.0m に達する(図 13(a)-(d))。基礎の変位は、低強度ステンレス杭のモデル E で高強度アルミニウム杭のモデル D より大きくなる(図 13(a)(b))。また地表変位と比較すると、いずれの基礎モデルにおいても DG10 より小さく、DG3 と同程度となっている(図 13(a)-(c))。いずれの杭においても、変位の増大にともない曲げ歪みが大きくなる(図 13(i)-(l))。その値は、ステンレス杭のモデル E でアルミニウム杭のモデル D より大きく、杭頭では 10000 マイクロ程度となり弾性限界を大きく超えている(図 5(a)、図 13(i)(j))。また、曲げ歪みは杭頭(深度 0.45m)だけでなく、液状化層下端付近(深度 9.0m)においても大きくなる(図 13(i)-(l))。上流側杭と下流側杭の曲げ歪みを比較すると、モデル D では上流側杭より下流側杭でその値が大きくなるのに対し(図 13(k)(l))、モデル E では、両者の値は同程度である(図 13(i)(j))。軸歪みは、いずれのモデルにおいても上流側杭で引張り側、下流側杭で圧縮側に増加する(図 13(m)-(p))。また、モデル D の軸歪みは杭頭(深度 1.5m)と液状化層下端(深度 9.0m)で同程度であるのに対し(図 13(o)(p))、モデル E の軸歪みは液状化層下端で杭頭より大きくなる(図 13(m)(n))。

杭モデルによる杭の曲げ歪みの違いをさらに比較するために、図 14 にモデル D、E の上流側杭、下流側杭の曲げ歪み深度分布を示す。4.2 秒(図 14(a)(b))時の曲げ歪みは、いずれのモデルにおいても下流側杭が上流側杭より大きくなる。これは、下流側が圧縮側杭、上流側が引張り側杭になっているためと考えられる。モデル D での曲げ歪みの変化は緩やかで、杭頭においても 2000 ~ 3000 マイクロ程度で弾性範囲内(図 5(a))と考えられる。一方、モデル E では杭頭で急激に大きくなり、その値は 4000 マイクロ程度であることから、降伏している(図 5(a))ことが確認できる。7.0 秒(図 14(c)(d))時の曲げ歪みは、モデル D において、曲げ歪みは、下流側杭の頭部で大きくなり、また上流側杭より下流側杭でその値が大きくなる。モデル E においては、杭頭、液状化層下端(深度 9.0m)で急激に大きくなっており、降伏することにより急激に歪み増加が進行することがわかる。また、下流側杭、上流側杭での曲げ歪み分布は同形状となる。これは、下流側と上流側での軸歪みは圧縮と引張り異なるが、その大きさは増大した曲げ歪みに比べて小さいことから、水平方向の変形に大きな影響を及ぼしていないためと考えられる。また、軸歪みが深度方向に増加したのは(図 13(m)(n))、杭頭、液状化層下端が降伏することで鉛直方向の釣り合い系が変化したためと考えられる。

実験後、地盤を掘削し、杭模型を取り出した。アルミニウム杭のモデル D は、杭全体で曲げは生じているものの、その傾斜は小さい。一方、ステンレス杭のモデル E は地中部から大きく変形し、上流側、下流側ともに杭頭で局部座屈が生じていた。



(a)加振前



(b)加振後

写真6 矢板および基礎の周辺地盤

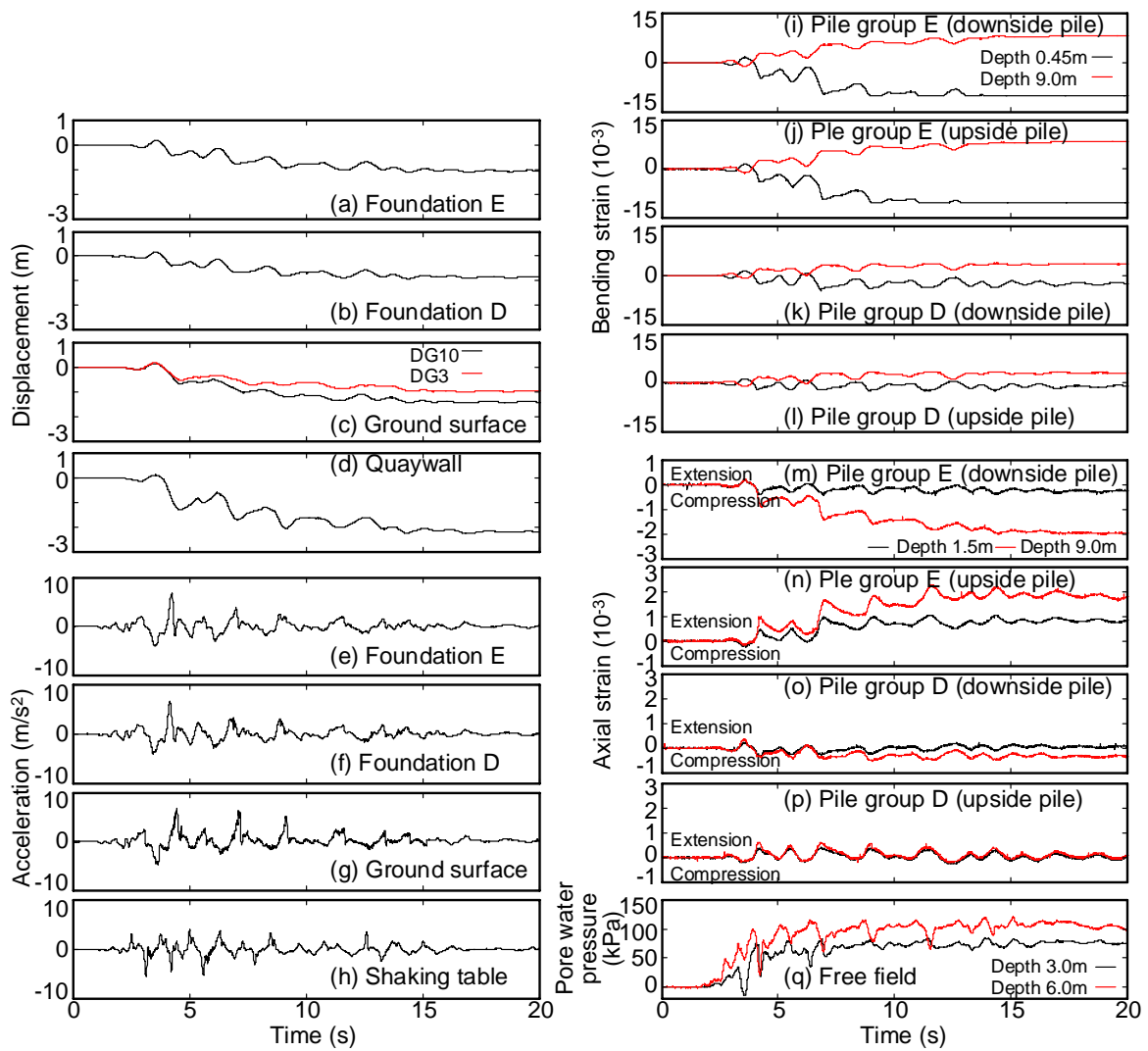


図13 主要な値の時刻歴

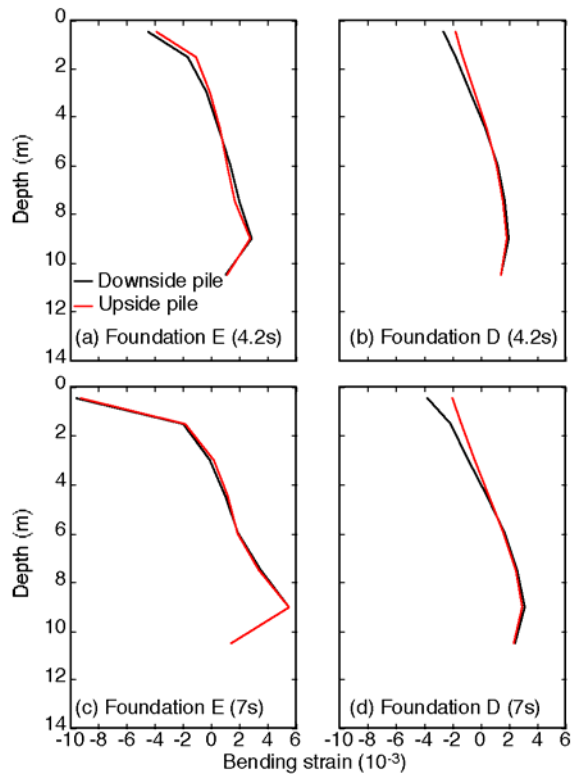


図 14 曲げ歪み深度分布

(e) 結論ならびに今後の課題

1) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響の検討

遠心載荷装置を用いたせん断土槽を用いた振動台実験に基づき、液状化地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響を検討し、以下のことを示した。

- a) 振動台入力地震波の卓越周期が地盤の固有周期より短い場合、間隙水圧は初期有効応力に達した後にすぐ消散し、液状化の状態は長くは続かない。また、地盤変位は小さくなる。一方、振動台入力地震波の卓越周期が地盤の固有周期より長い場合、間隙水圧は上昇後その値を持続させ、地盤の液状化は加振中継続する。地盤変位は、前者の入力地震波の場合に比べて著しく大きくなる。
- b) a)b)より、杭応力には、振動台入力地震波の卓越周期が地盤の固有周期より短い場合は構造物慣性力、振動台入力地震波の卓越周期が地盤の固有周期より長い場合は構造物慣性力と地盤変位が支配的になる。
- c) 基礎が根入れされると、地盤変位が小さい(振動台入力地震波の卓越周期が地盤の固有周期より短い)場合は、基礎に作用する土圧が構造物慣性力に対し抵抗側に作用するのに対し、地盤変位が大きい(振動台入力地震波の卓越周期が地盤の固有周期より長い)場合は、基礎に作用する土圧が構造物慣性力に対し、加力側に作用する可能性がある。

2) 地盤の側方流動が杭応力に与える影響の検討

遠心載荷装置を用いたせん断土槽を用いた振動台実験に基づき、側方流動地盤における杭の降伏強度が杭応力に与える影響を検討し、以下のことを示した。

- a) 地盤変位とともに杭の応力は増加し、下流側杭が圧縮側、上流側杭が引張り側となる。この時、杭の曲げ歪みは上流側杭より下流側杭で大きくなる。
- b) 杭の曲げ歪みの増大が進行して杭が降伏すると、鉛直荷重が水平荷重と比較して小さい場合には、下流側杭と上流側杭の曲げ歪み分布形状は同様になる。
- c) 杭の頭部、液状化層下端などが降伏すると、鉛直のつり合い系が変化し、深度方向に軸応力が変化する可能性がある。

3) これまで実施した振動実験結果のまとめ

E-ディフェンスで行う実験の予備実験、および補足実験として、平成14～18年に1次元大型振動台実験、遠心振動台実験を実施し、地震時の杭応力に影響を及ぼす要因を検討した結果、以下の知見が得られた。

- a) 地盤の応答卓越周期が地盤固有周期より短い場合は、地盤変位が小さくなる結果、杭応力は主に構造物慣性力に支配される。地盤の応答卓越周期と地盤固有周期が同程度の場合は、地盤変位が大きくなる結果、杭応力は構造物慣性力だけでなく地盤変位の影響を大きく受ける。この時、上部構造物固有周期は地盤固有周期より短い場合は、構造物慣性力と地盤変位が同位相で杭に作用する。一方、上部構造物固有周期が地盤固有周期より長い場合は両者の位相がずれる傾向にある。以上の傾向は、非液状化地盤、液状化地盤に関わらず見られる。基礎が根入れされると、基礎に土圧が作用する結果、杭応力が主に地盤変位に支配される可能性がある。この傾向は地盤の変位が大きくなる液状化地盤で顕著に見られる。
- b) 非液状化地盤における杭の軸力は基礎下端をつり合いの中心とした強軸方向の構造物慣性力による転倒モーメントに支配されるのに対し、飽和地盤における杭の軸力は液状化層下端をつり合いの中心とした強軸方向の構造物慣性力および地盤変位による転倒モーメントに支配される。これは、乾燥地盤では構造物慣性力に対して表層地盤が抵抗するのに対し、飽和地盤では液状化による地盤変形の増大と地盤剛性の低下により、外力に対して下部非液状化層が抵抗するためであると考えられる。
- c) 液状化地盤では、杭と地盤に相対変形が生じると、引張り側となる杭の背面側地盤では引張り応力とせん断応力によるダイレイタンスーが増幅し合い間隙水圧が大きく減少するのに対し、圧縮側となる杭前面側地盤では圧縮応力とせん断応力によるダイレイタンスーが打ち消し合い間隙水圧の変動は小さくなる。その結果、杭は間隙水圧が大きく減少する引張り側地盤から引張られる。このような液状化地盤での地盤反力発生メカニズムは、非液状化地盤において圧縮側となる杭前面側地盤で土圧が上昇し地盤反力が発生するメカニズムとは異なるものである。
- d) 非液状化地盤の杭頭せん断力は群杭の前面側杭で大きく背面側杭で小さくなる。一方、液状化地盤の杭頭せん断力は群杭の外周杭で大きく中央杭で小さくなる。非液状化地盤と液状化地盤に見られる群杭における水平荷重分布の違いは、(c)に示す両者の地盤反力発生メカニズムの違いに因ると考えられる。すなわち、非液状化地盤では群杭において杭間隔が狭くなると、前方杭背面の引張り応力と後方杭前面の圧縮応力が重なる

る結果、後方杭の地盤反力が小さくなる。一方、液状化地盤では、杭間隔が狭くなると、群杭の内側に位置する杭では、杭前後面の圧縮/引張り応力が他の杭により生じる引張り/圧縮応力に打ち消されることにより前後面の間隙水圧変動の差が小さくなる結果、内側杭の地盤反力が小さくなる。

- e) 水平 2 方向入力場では、杭の曲げモーメント、軸力は直交 2 方向の外力をそれぞれ単独に加えて求めたモーメントまたは軸力を重ね合わせて算定できるが、2 方向外力の強軸方向が変わると曲げモーメントに比べ軸力の方が大きく影響を受ける。
- f) 応答変位法において、地盤変位または構造物慣性力が単独で作用するときのモーメント深度分布を単純和または二乗和平方根で重ね合わせることで、両者が作用する時のモーメント深度分布の傾向を概ね再現できる。また、地盤の液状化発生の有無、基礎根入れの有無、上部構造物の有無、上部構造物固有周期、杭の剛性または本数などのパラメータによらず大型振動台実験、遠心載荷振動台実験における杭応力を再現でき、簡易的算定手法として有望である可能性を示唆している。

(e) 引用文献

- 1) Boulanger, R. W., Curras, J. C, Kuter, B. L., Wilson, D. W. and Abghari, A.: Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, **125** (9), 750-759, 1999.
- 2) Wilson, D. W., Boulanger, R. W. and Kutter, B. L.: Observed seismic lateral resistance of liquefying sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, **126** (10), 898-906, 2000.
- 3) 杉本良介，中辻友希，鈴木比呂子，時松孝次：遠心振動実験に基づく地盤-杭-構造物系動的相互作用評価，第 41 回地盤工学研究発表会発表講演集，鹿児島，1915-1916，2006.

(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
杉本良介 鈴木比呂子 時松孝次	入力地震動が液状化過程での地盤と杭・構造物の動的相互作用に与える影響	第 42 回地盤工学研究発表会	平成 19 年 7 月 (発表予定)
濱本聖 杉本良介 鈴木比呂子 時松孝次	側方流動地盤遠心載荷実験における杭の耐力がその変形・破壊モードに与える影響	第 42 回地盤工学研究発表会	平成 19 年 7 月 (発表予定)
杉本良介 鈴木比呂子 時松孝次	入力地震動が乾燥及び液状化地盤と杭・構造物の動的相互作用に与える影響	日本建築学会 2007 年度大会	平成 19 年 8 月 (発表予定)

(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