

### 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カ年の年次実施計画
- (e) 平成17年度業務目的

### (2) 平成17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) 地盤-構造物系動的相互作用が群杭挙動に与える影響
  - 2) 地盤-構造物系動的相互作用に影響を及ぼす要因の検討
  - 3) 水平2方向入力場での地盤-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響
  - 4) 2次元遠心振動実験実施の可能性の検討
- (d) 結論ならびに今後の課題
  - 1) 地盤-構造物系動的相互作用が群杭挙動に与える影響
  - 2) 地盤-構造物系動的相互作用に影響を及ぼす要因の検討
  - 3) 水平2方向入力場での地盤-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響
  - 4) 2次元遠心振動実験実施の可能性の検討
- (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18年度業務計画案

## (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	<a href="mailto:kohji@o.cc.titech.ac.jp">kohji@o.cc.titech.ac.jp</a>
	助手	鈴木比呂子	<a href="mailto:hsuzuki@arch.titech.ac.jp">hsuzuki@arch.titech.ac.jp</a>

### (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、3次元挙動時の地盤-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、3次元入力場での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遠心振動実験、大型振動実験を実施し、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シミュレーションを行い、その妥当性を検討する。また、平成17年に完成する3次元大型振動台E-ディフェンスでの地盤-構造物系振動実験結果の評価技術を構築する。

### (d) 5カ年の年次実施計画

#### 1) 平成14年度：

- a) 非液化地盤の基礎-構造物系の大型振動台実験を実施する。
- b) 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。
- c) 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。
- d) 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：

- a) 液化地盤の基礎-構造物系の大型振動台実験を実施する。
- b) 液化が地盤-杭-構造物系の動的相互作用に与える影響を検討する。
- c) 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：

- a) 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。
- b) 液化地盤における群杭挙動を把握する。
- c) 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。

d) 米国 NEES の施設を使用した 2 次元遠心振動実験の可能性を検討する。

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) 米国 NEES の施設で側方流動地盤遠心振動実験を実施する。

c) 設計用簡便法の E-ディフェンスでの大型振動台実験に対する適用性を検証する。

d) 研究の総括をする。

(e) 平成 17 年度業務目的

平成 17 年に完成した E-ディフェンスを用いて、地盤-杭-構造物系動的相互作用および側方流動が杭基礎の破壊メカニズムに与える影響を検討するための実験が行われる。杭基礎の破壊メカニズムには多くの要因が影響を与えると考えられるが、時間的制約などから E-ディフェンスでは実施できる実験は限られている。そこで、大型実験で実施出来ない、いくつかのパラメータを変化させた振動台実験を遠心载荷装置で実施し、大型振動台実験の予測を行うとともに、重要な影響要因の抽出を行い大型実験の補足を行う。

## (2) 平成 17 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、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、杭の本数・杭間隔、基礎根入れの有無、上部構造物固有周期、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、前年度以前に実施している多次元入力場における地盤-杭-構造物系振動台実験より、水平 2 方向入力が杭応力に与える影響を検討した。

さらに、次年度にアメリカ NEES の施設で実施する遠心実験について、施設を見学するとともに、担当研究者と実験計画に関する打ち合わせを行った。

(b) 業務の実施方法

1) 地盤-構造物系動的相互作用が群杭挙動に与える影響

非液状化地盤または液状化地盤における群杭の挙動を評価するために、30G の遠心場において振動台実験を実施した。図 1 に地盤-杭-構造物模型を示す。実験模型の縮尺率は 1/30 である。図 1 に示すように、乾燥地盤、飽和地盤に対して杭を 2×2 本(D4、S4)、3×3 本(D9、S9)、4×4 本(D16、S16)と変化させた計 6 ケース行った。

地盤模型はいずれも豊浦砂を用い、空中落下法により作製した。乾燥地盤の場合は  $Dr=70\%$  の 1 層(層厚 450mm)、飽和地盤の場合は上層  $Dr=70\%$ (層厚 300mm)、下層  $Dr=90\%$ (層厚 150mm)の 2 層の構成とした。なお、飽和地盤の場合は地盤作製後に脱気し、土槽底面から間隙流体として 30cst のシリコンオイルを注入した。杭模型は径 15.9mm 厚 0.3mm のステンレスパイプを用い、杭の間隔を 7.5D、3.75D、2.5D とした。杭の先端は土槽底面にピン接合し、頭部は基礎に剛接合した。なお、基礎は固有周期 0.01s(実大換算 0.3s)の上部構造物を支持している。

実験では、入力波形には人工地震波 RINKAI の最大加速度を  $2.0\text{m/s}^2$ (実大換算)に調整したものを、図 1 に示すように加速度計、変位計、間隙水圧計(飽和砂の場合)、歪みゲージを配置して計測を行った。なお、以降の報告では、測定された値を実大に換算して示す。

## 2) 地盤-構造物系動的相互作用に影響を及ぼす要因の検討

乾燥地盤の杭応力に影響を与える要因を抽出するため、30G の遠心場において地盤-杭-構造物系振動台実験を実施した。図 2 に、実験で用いた模型を示す。実験は基礎根入れの有無、上部構造物の固有周期をパラメータとした地盤-杭-構造物模型 S1、L1、S2、L2 に対し振動台入力波形を変化させて行った。

地盤模型はアルバニー-珪砂を用いて空中落下法により作製した。なお、地盤の密度は  $D_r=70\%$ 程度と、基礎が根入れされない場合は  $450\text{mm}$ (図 2(a))、基礎が根入れされる場合は  $500\text{mm}$ とした(図 2(b))。杭模型は径  $15.9\text{mm}$  厚  $0.3\text{mm}$  のステンレスパイプを用い、杭頭は基礎に剛接合、杭先端は土槽底面にピン接合した。基礎は上部構造物を支持し、その固有周期は質点を支える板バネの剛性を変えることで変化させた。なお、上部構造物固有周期は S モデル(S1、S2)では地盤の固有周期より短く、L モデル(L1、L2)では地盤の固有周期より長くなっている。

実験では、図 2 に示すように加速度計、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図 3 に示す 4 タイプの波を実大換算で最大加速度を  $2.0\text{m/s}^2$ (実大換算)に調整して用いた。なお、加速度応答は鳥取県西部では  $0.1$  秒以下(図 3(a))、神戸気象台波は  $0.3$  秒(図 3(b))、鷹取波は  $1.0\text{s}$ (図 3(c))で大きく、RINKAI 波では  $0.1\sim 1.0$  秒の間で同程度の大きさになる(図 3(d))。なお、以降の報告では、測定した値を実大に換算して示す。

## 3) 水平 2 方向入力場での地盤-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響

過去に実施した多次元入力振動台実験より、水平 2 方向入力場における地盤-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。実験は本プロジェクトにおいて農業工学研究所で実施されたものであり、その詳細は文献 1)2)に詳しい。

図 4 に検討対象となる実験模型を示す。せん断土槽は円柱形で、直径  $1.8\text{m}$  高さ  $1.35\text{m}$  である。地盤模型は、乾燥砂層  $1.35\text{m}$  または飽和砂層  $1.0\text{m}$  礫層  $0.35\text{m}$  より構成される。杭は径  $32\text{mm}$  板厚  $1\text{mm}$  の鋼管杭で、基礎と上部構造物を支持している。入力波は時間軸を  $1/\sqrt{5}$  に縮尺し最大加速度を  $2.0\sim 2.5\text{m/s}^2$  に調整した八戸波である。実験の間、間隙水圧および 2 方向の加速度、歪み、変位を測定している。なお、検討対象となる実験シリーズは、乾燥地盤に八戸波 NS 成分を入力した D1 と乾燥および飽和地盤に八戸波水平 2 成分(NS、EW 成分)を同時入力した D2、S2 である。

## 4) 2 次元遠心振動実験実施の可能性の検討

米国の NEES プロジェクトで開発した 2 方向加振できる遠心振動装置を使用して実施する可能性について検討した。遠心载荷装置を所有する UC Davis 校を訪問し、装置の性能等を確認するとともに<sup>3)</sup>、実験計画に関して担当研究者と打ち合わせを行った。

## (c) 業務の成果

### 1) 地盤-構造物系動的相互作用が群杭挙動に与える影響

図5にD16(乾燥地盤：4×4本杭)における上部構造物、基礎、地表、振動台の加速度、図1(c)に示す杭A~Dの杭頭せん断力の時刻歴を示す。構造物加速度の変動にともなって杭頭せん断力は大きく変動しており、構造物慣性力が杭頭に伝わることによってせん断力が生じていることが確認できる。また、杭頭せん断力は杭Aでは正側、杭Dでは負側に大きくなる傾向を示す。

杭位置による水平荷重分担の違いを検討するために、構造物加速度から構造物慣性力を算出し、杭頭せん断力との関係を図6に示す。せん断力は杭位置によって異なる傾向を示す。すなわち、杭頭せん断力は構造物慣性力が正側に大きくなる時は杭Aで小さく、杭Dで大きく、慣性力が負側に大きくなる時の杭Aで大きく、杭Dで小さくなるのに対し(図6(a)(d))、他の杭ではこの傾向は見られない(図6(b)(c))。このことから、群杭の杭位置によって応力に違いが生じることが確認できる。

乾燥地盤における杭の本数・間隔が杭頭水平荷重の分担に与える影響を検討するために、構造物慣性力が最大となる時の各杭の杭頭せん断力の分担率を図7に示す。図中の縦軸は構造物慣性力が各杭に均等に分担した時の場合を1とし、それに対する値を示している。なお、杭頭せん断力の値は相対変位が左側に生じた時の値と相対変位が右側に生じた時の値を反転させたものを平均している。2×2杭では、杭位置による荷重分担の違いは見られない(図7(a))。杭の本数が多くなると、せん断力が前方の杭で大きく、後方の杭で小さくなり、この傾向は4×4杭で顕著になる(図7(b)(c))。これは、杭間隔が狭くなると杭の変形により地盤に生じる応力範囲が重なり合うことによって後方杭の荷重分担が小さくなるが、杭の間隔が広がるとその影響は小さくなることを示している。以上のことは、非液状化地盤での杭の水平載荷試験において杭間隔が狭くなると、前方となる杭の荷重分担が大きく、後方となる杭の荷重分担が小さくなることと対応している<sup>4)5)</sup>。

地盤の液状化が杭の水平荷重分担に与える影響を検討するために、図8に液状化後の飽和地盤における杭頭せん断力の分担率を示す。2×2杭におけるせん断力の分担率は杭位置による違いは見られない(図8(a))。このことは、非液状化地盤で見られた傾向と対応している。しかし、杭の本数が多くなり杭間隔が狭くなると、せん断力分担率は隅杭で大きく中央杭で小さくなる(図8(b)(c))。この傾向は非液状化地盤で見られたようにせん断力分担率が群杭の前方で大きく後方で小さくなることと異なる。

以上の群杭におけるせん断力分担率の傾向の違いは非液状化地盤と液状化地盤での地盤反力発生メカニズムの違いによって生じると考えられる。すなわち、地盤と杭に相対変位が生じると杭の前面に圧縮応力、背面に引張応力が生じる。このため、非液状化地盤では、圧縮側地盤が抵抗することによって地盤反力が発生する。群杭において杭間隔が狭くなると、前方の杭背面の引張応力と後方の杭前面の圧縮応力が重なることで、背面側の杭ほど地盤反力が小さくなる(図9(a))。その結果、背面側の杭ほどせん断力分担が小さくなる。一方、液状化地盤では、相対変位の増大にともなう圧縮側地盤と引張側地盤の間隙水圧変動の差によって地盤反力が発生する<sup>6)</sup>。杭間隔が狭くなると、内側に位置する杭の圧縮応力は前方の杭により生じる引張応力に、引張応力は後方の杭により生じる圧縮応力に

打ち消されることで、杭両側地盤の間隙水圧変動の差が減少し、地盤反力が小さくなる(図 9(b))。その結果、群杭内側の杭でせん断力分担が小さくなると考えられる。これらのことは、非液状化地盤だけでなく液状化地盤においても群杭で杭間隔が狭くなると、杭位置によって水平荷重分担が異なる可能性があることを示唆している。

## 2) 地盤-構造物系動的相互作用に影響を及ぼす要因の検討

本報告では、図 2 の S1、L1、S2、L2 の 4 シリーズに対し鳥取県西部地震波、RINKAI 波(以降 TT 波、RK 波)を入力した 8 ケースについて検討した結果を示す(表 1)。図 10 に各実験ケースにおける地表、基礎、上部構造物の加速度応答スペクトルを示す。上部構造物の応答は、TT 波入力では極端に小さくなるが(図 10(a)~(d))、RK 波入力では大きくなる(図 10(e)~(h))。TT 波入力での上部構造物の応答スペクトルは、基礎、地盤と同じ周期にピークをとる(図 10(a)~(d))。一方、RK 波入力での上部構造物の応答スペクトルは、上部構造物固有周期( $T_b$ )が地盤固有周期( $T_g$ )より短い S モデルでは基礎、地盤と同じ周期にピークをとるのに対し(図 10(e)(f))、 $T_b$  が  $T_g$  より長い L モデルでは異なる周期にピークをとる(図 10(g)(h))。また、TT 波入力では地盤応答の卓越周期( $T_p$ )が  $T_g$  より短いのに対し、RK 波入力では両者はほぼ一致している。

図 11 に構造物慣性力と杭頭モーメントの関係を示す。根入れがない全てのケースにおいて、構造物慣性力と杭頭モーメントの関係は正の相関を示す(図 11(a)(b)(e)(f))。一方、根入れがあるケースでの構造物慣性力と杭頭モーメントの関係は、TT 波入力では正の相関を示すが(図 11(c)(d))、RK 波入力では正の相関は見られず、特に L モデルでは負の相関を示す(図 11(g)(h))。根入れがないケースでの杭頭モーメントは、入力によらず S モデルで L モデルより大きくなる(図 11(a)(b)及び(e)(f))。一方、根入れがあるケースでの杭頭モーメントは、TT 波入力では S、L モデルで同程度であるが(図 11(c)(d))、RK 波入力では S モデルで L モデルより小さくなる(図 11(g)(h))。また、根入れがあるケースでの杭頭モーメントは、構造物モデル、入力地震波によらず根入れがないケースよりも小さくなる。以上のことから、杭頭モーメントには上部構造物および地盤の固有周期と地盤の応答卓越周期の関係、基礎根入れの有無等が影響を与えていることが確認できる。

構造物慣性力と地盤変位の作用の組み合わせが杭頭モーメントに与える影響を検討するため、図 12 に構造物慣性力と表層地盤変位の関係を示す。地盤変位は、RK 波入力の場合の方が TT 波入力の場合より顕著に大きくなる。なお、図中の白丸は杭頭モーメントがピークとなる点を示す。TT 波入力における構造物慣性力と地盤変位の関係は、根入れがないケースでは相関が見られないが(図 12(a)(b))、根入れがあるケースでは正の相関を示す(図 12(c)(d))。一方、RK 波入力での構造物慣性力と地盤変位の関係は、S モデルでは正の相関を示すが(図 12(e)(g))、L モデルでは相関が見られない(図 12(f)(h))。また、L2R では地盤変位が大きくなるときに杭頭モーメントがピークとなる傾向が見られる(図 12(h))。

図 13 に地盤変位が大きくなる RK 波入力の場合の表層地盤変位と杭頭モーメントの関係を示す。構造物慣性力と地盤変位が正の相関を示す S モデルでは、地盤変位と杭頭モーメントの関係は構造物慣性力と杭頭モーメントの関係と同様の傾向を示す(図 13(a)(c))。構造物慣性力と地盤変位に相関が見られない L モデルでの地盤変位と杭頭モーメントは、根入れがあるケース(L2R)では正の相関を示すが(図 13(d))、根入れがないケース(L1R)では

相関が見られない(図 13(b))。

基礎根入れの有無が杭頭モーメントに与える影響を検討するため<sup>7)8)</sup>、図 14 に基礎根入れがある 4 ケースでの構造物慣性力と杭頭せん断力の関係を示す。図中の白丸は杭頭モーメントがピークとなる点を示す。いずれのケースにおいても杭頭せん断力は構造物慣性力より小さくなる。このことから、図 15(b)に示すように基礎根入れ部に作用する土圧が杭頭に伝わる構造物慣性力を低減していることが確認できる。この傾向は地盤変位の大きい RK 波入力の場合に顕著に見られる。また、構造物慣性力と地盤変位の位相がずれる L2R では、杭頭モーメントが大きくなる時に構造物慣性力と杭頭せん断力が同じ向きになる傾向がある(図 14(d))。これは、図 15(c)に示すように基礎に作用する土圧が構造物慣性力に対し抵抗するだけでなく、さらに逆向きに加力することで杭頭モーメントが大きくなることを示しており、L2R の杭頭モーメントが地盤変位が大きくなる時に構造物慣性力の向きと逆向きに大きくなることと対応している(図 11、12(h))。このことは、構造物固有周期が地盤固有周期より長く、地盤変位が大きくなると、杭応力に対して地盤変位が支配的になる可能性があることを示唆している。

表 1 検討対象となる実験ケース

入力波形	鳥取県西部地震波		RINKAI 波	
	S モデル	L モデル	S モデル	L モデル
上部構造物	S1T	L1T	S1R	L1R
基礎根入れなし	S1T	L1T	S1R	L1R
基礎根入れあり	S2T	L2T	S2R	L2R

### 3) 水平 2 方向入力場での地盤-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響

図 16 に D2、S2 の杭頭モーメント、構造物慣性力、地盤変位の水平 2 次元面内の軌跡を示す。構造物慣性力は乾燥地盤 D2 では指向性は見られないが、飽和地盤 S2 では EW 方向に大きくなる傾向が見られる(図 16(b)(e))。地盤変位は、D2、S2 で NS または NS から 45 度ずれた方向で大きくなる(図 16(c)(f))。杭頭曲げモーメントは D2 では構造物慣性力と似た軌跡を示し、S2 では構造物慣性力だけでなく地盤変位と似た軌跡を示している(図 16(a)(d))。

図 17 に、D1、D2、S2 の杭頭モーメントが最大になる方向の構造物慣性力または地盤変位と変動軸力または杭頭曲げモーメントの関係を示す。乾燥地盤 D1、D2 を比較すると、曲げモーメントは作用する構造物慣性力が 2 方向成分の重ね合わせとなる D2 で 1 方向入力の D1 より大きくなるものの、構造物慣性力に対する傾きは同程度である(図 17(b)(e))。一方、変動軸力の構造物慣性力に対する傾きは D2 では変化するのに対し、D1 では一定である(図 17(a)(d))。以上のことから、杭頭曲げモーメントは構造物慣性力の大きさにより定まるのに対し、変動軸力は構造物慣性力の大きさだけでは定まらず、両者の関係に 2 方向入力を与える影響が無視できないことが示唆される。

飽和地盤 S2 の構造物慣性力に対する杭頭曲げモーメントの傾きは D2 と比較して大きくなる(図 17(e)(h))。S2 では D2 より地盤変位が大きく、また地盤変位と杭頭曲げモーメントが似た軌跡を示すことから(図 16(d)(f))、構造物慣性力だけでなく地盤変形の増大がモ

ーメントに大きく影響を与えていると考えられる(図 17(i))。また、S2 では小さい構造物慣性力にも関わらず大きな変動軸力が生じている。以上より、液状化による地盤変形の増大が杭の曲げモーメントだけでなく変動軸力に影響を与えていると考えられる。

2 方向入力が杭の変動軸力に与える影響を検討するため、図 17(d)の乾燥地盤 2 方向入力 D2 の構造物慣性力と変動軸力の関係を各時刻の構造物慣性力の強軸方向(矢印)ごとに図 18 の 8 方向に分類して、測定杭位置( )とともに示す。強軸方向が NS、EW 方向の時(図 18(a)(e))の変動軸力の傾きは 1 方向入力(図 17(a))と同程度であるのに対し、NS、EW 方向から 45 度ずれる時は小さく(図 18(c))、または大きくなる(図 18(g))。これは、構造物慣性力が NS または EW 方向に卓越するときは転倒モーメントによる変動軸力を 4 本の杭で支持するのに対し、対角方向に卓越する時は対角の 2 本の杭で支持するためと考えられる。このことは、変動軸力が外力の強軸方向の向きに顕著に影響を受けることを示唆し、曲げモーメントが外力の大きさに主として影響を受けることと異なる。

液状化地盤では、構造物慣性力が変動軸力を 4 本で支持する EW 方向に卓越する(図 16(e))にもかかわらず、大きな軸力が生じている。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し、変動軸力は基礎に作用する転倒モーメントに支配されるのに対し(図 19(a))、飽和地盤では、液状化による地盤剛性の低下と地盤変形の増大により、表層地盤ではなく下部の非液状化層が構造物慣性力に抵抗し、変動軸力は液状化層下部まで含めた釣り合い系に支配されるためと考えられる(図 19(b))<sup>9)</sup>。

#### 4) 2次元遠心振動実験実施の可能性の検討

E-ディフェンスでは、2×3 杭で支持された構造物模型を用いて側方流動実験が平成 17、18 年度の 2 年間に渡って実施される。そこで、図 20 に示すように、遠心载荷装置を用いた側方流動実験を計画した。実験は、US Davis 校の遠心载荷装置を用いて実施する。実験は、護岸背後の杭基礎構造物をターゲットとし、杭頭条件が杭応力に与える影響を検討するため、杭頭が基礎に固定された 2×3 の群杭だけでなく杭頭自由の単杭模型を設置する。また、表層非液状化層の有無をパラメータとして 2 ケース行う。

実験では、歪みゲージ、加速度計、変位計、間隙水圧計などの多数のセンサーを設置して計測行う。また、振動台入力波形には E-ディフェンスで実施する実験と同様に 1995 年兵庫県南部地震で観測された JR 鷹取波を用いる。



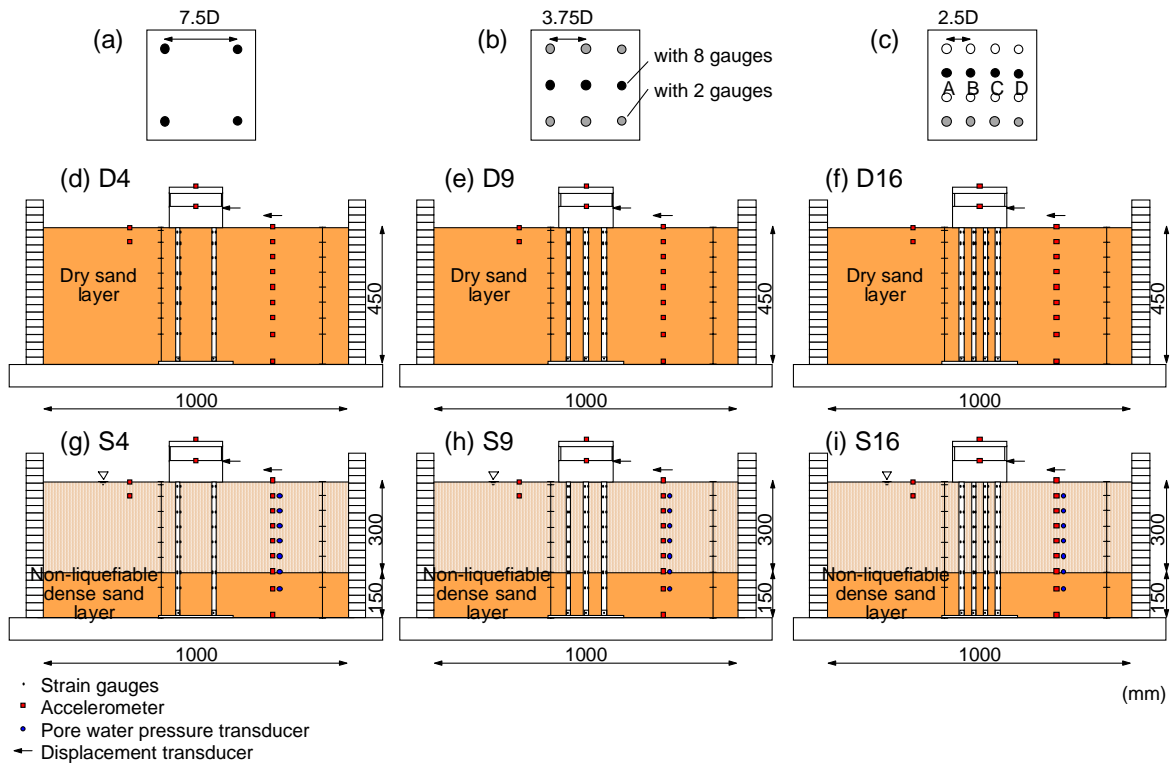


図1 杭条件をパラメータとした実験の地盤-杭-構造物模型

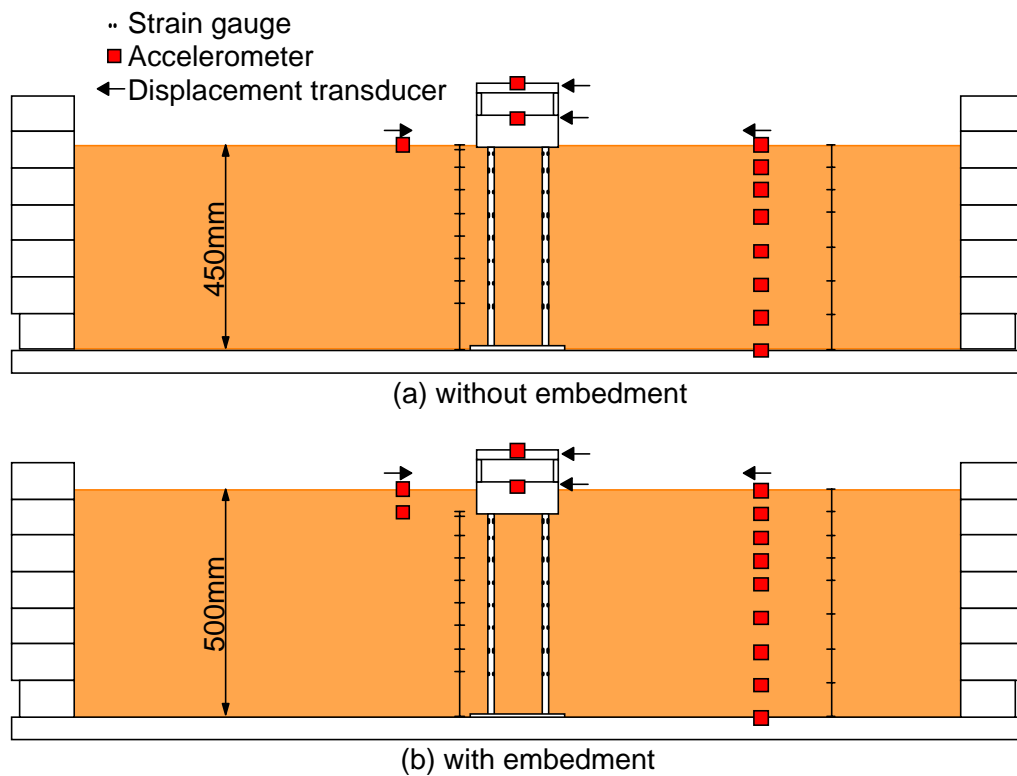


図2 構造物条件をパラメータとした実験の地盤-杭-構造物模型

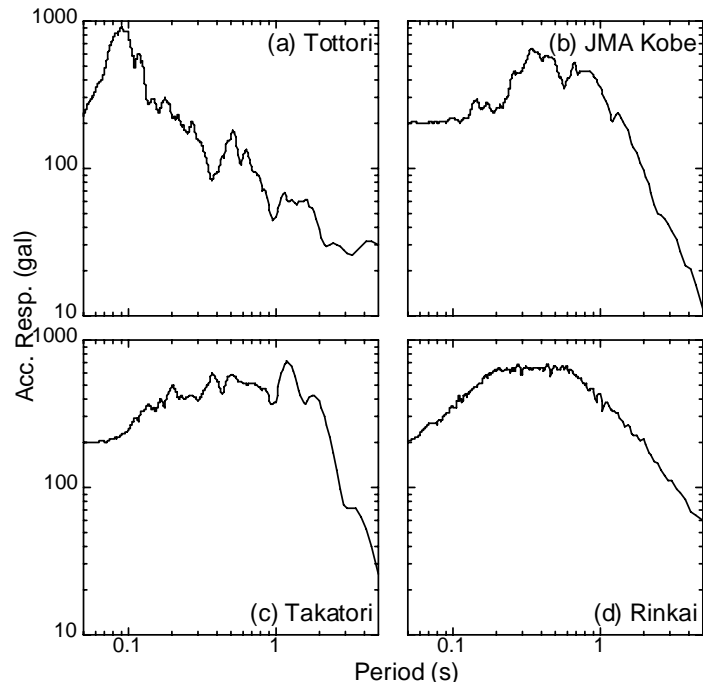


図3 卓越周期の異なる地震動

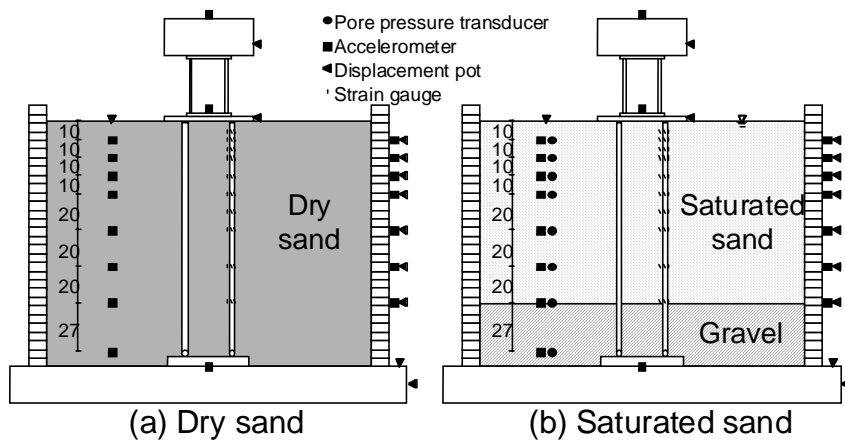


図4 2方向入力実験の地盤-杭-構造物模型

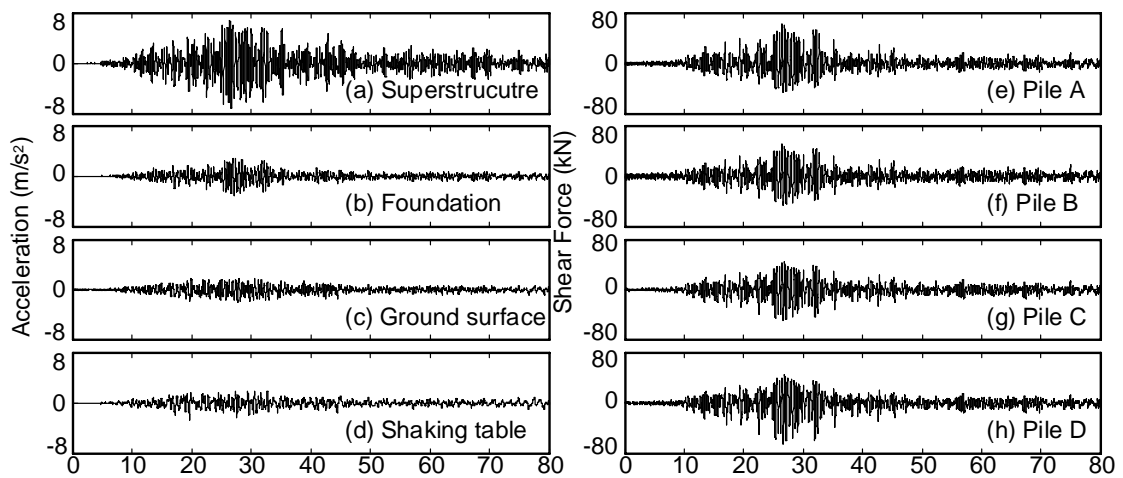


図5 乾燥地盤で4×4杭を用いた実験の加速度波形および杭頭せん断力

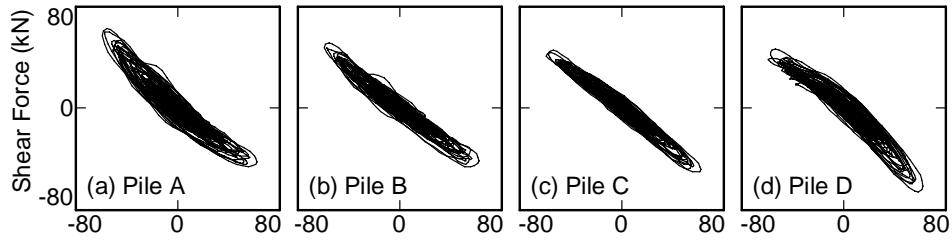


図 6 非液化化地盤で 4 × 4 杭を用いた実験の構造物慣性力と杭頭せん断力の関係

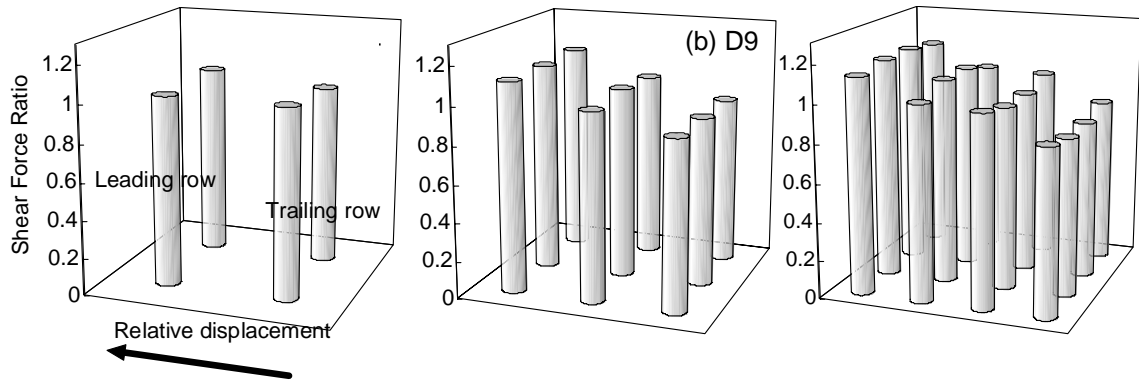


図 7 非液化化地盤における群杭の杭頭の水平荷重分布

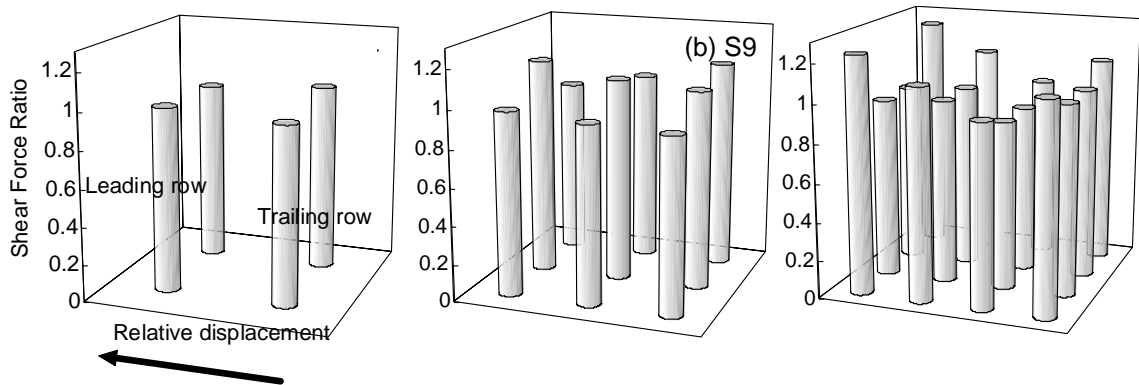


図 8 液化化地盤における群杭の杭頭の水平荷重分布

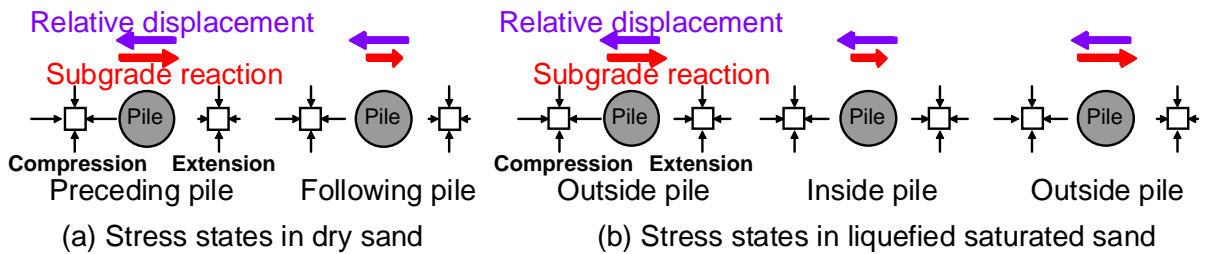


図 9 非液化化地盤および液化化地盤における群杭の地盤反力発生メカニズム

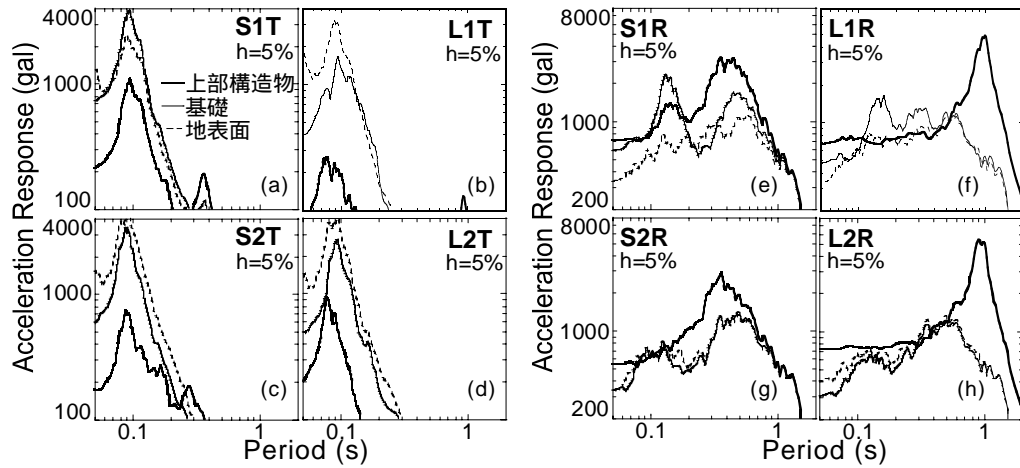


図 10 各実験における上部構造物、基礎、地表の加速度応答

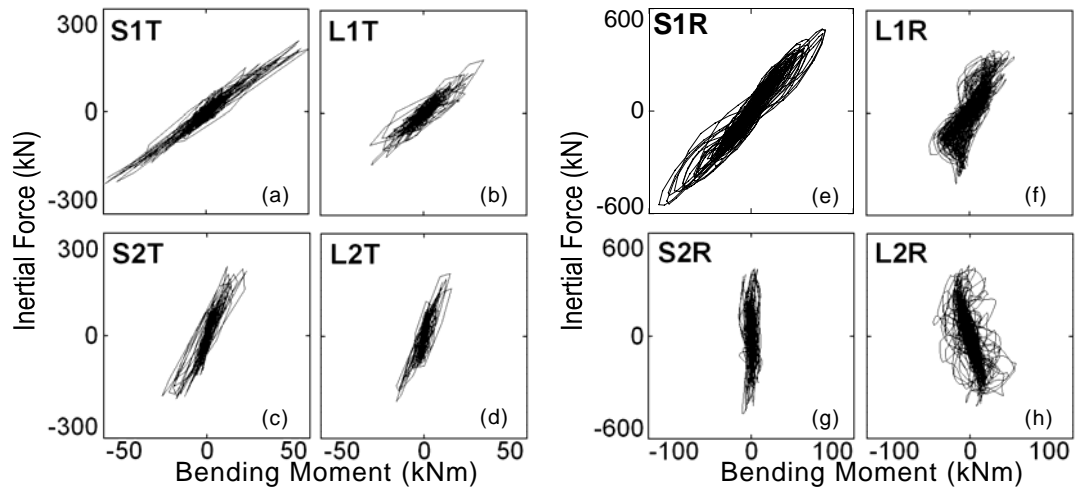


図 11 杭頭曲げモーメントと構造物慣性力の関係

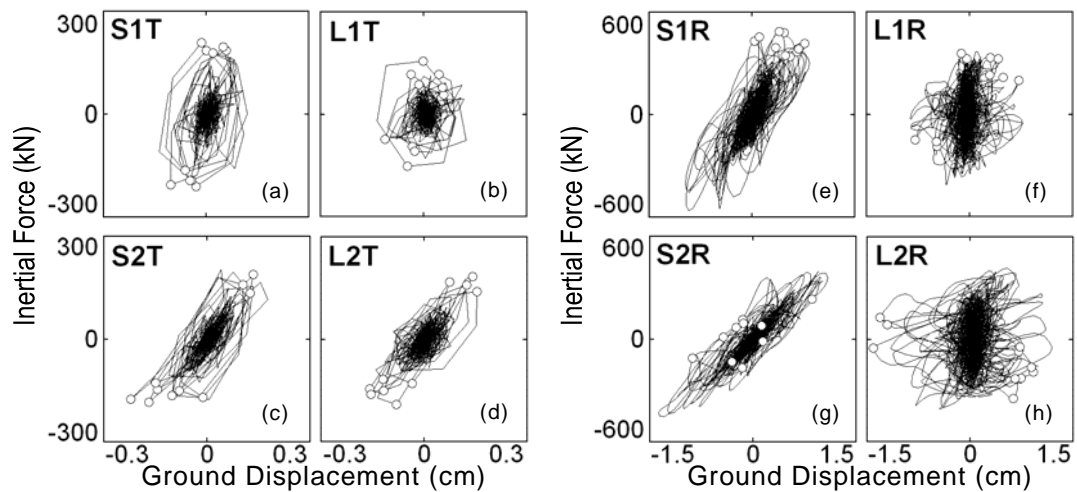


図 12 表層地盤変位と構造物慣性力の関係

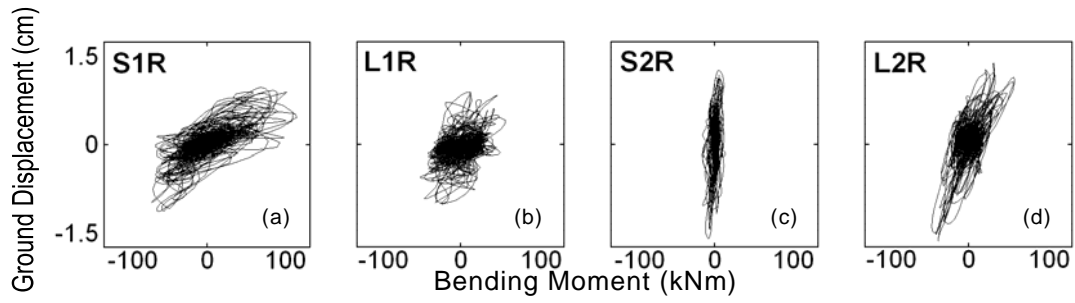


図 13 臨海波入力の場合の杭頭曲げモーメントと表層地盤変位の関係

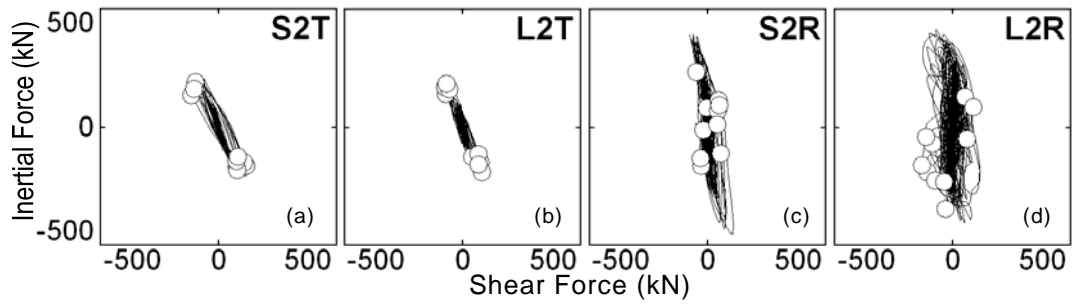


図 14 基礎根入れがある場合の杭頭せん断力と構造物慣性力の関係

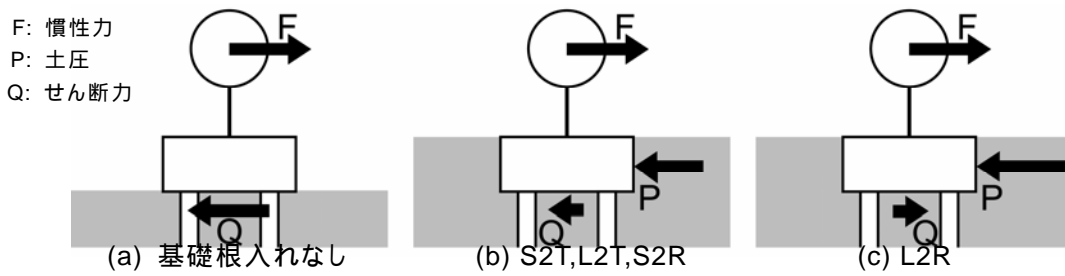


図 15 基礎根入れ部に作用する土圧

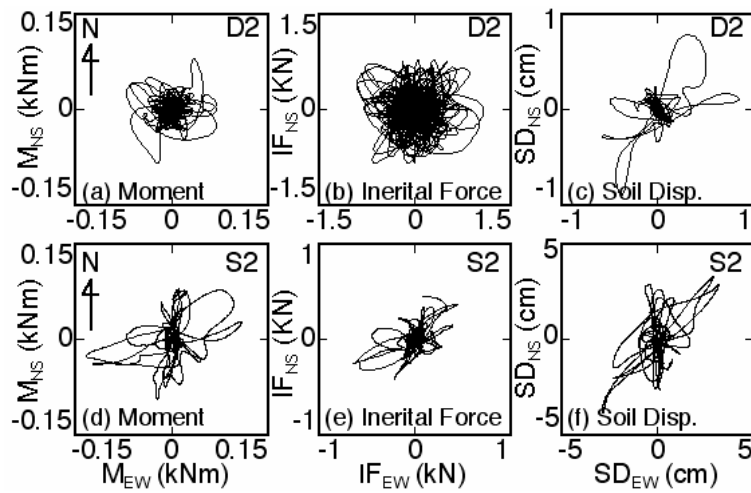


図 16 杭頭曲げモーメント、構造物慣性力、表層地盤変位の水平面内の軌跡

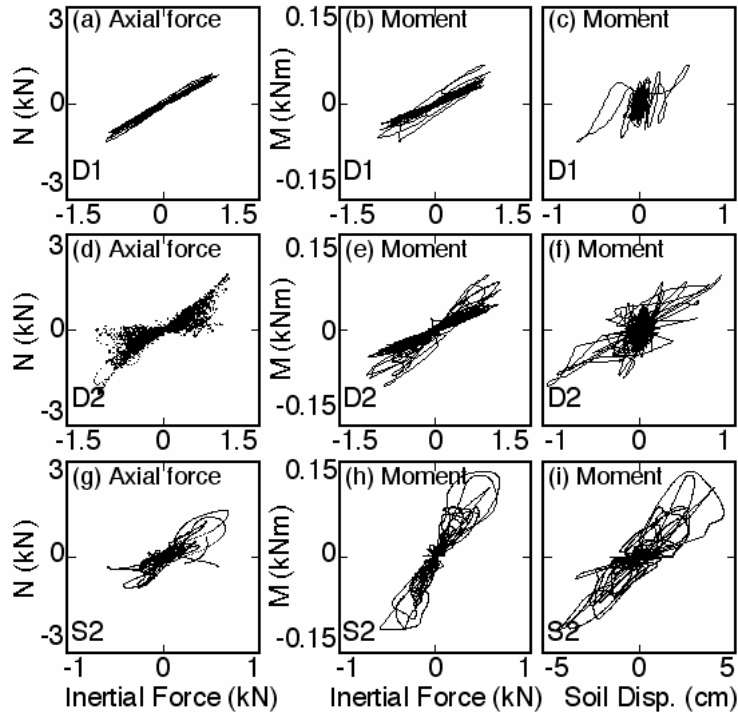


図 17 杭頭軸力および杭頭曲げモーメントと構造物慣性力および地表変位の関係

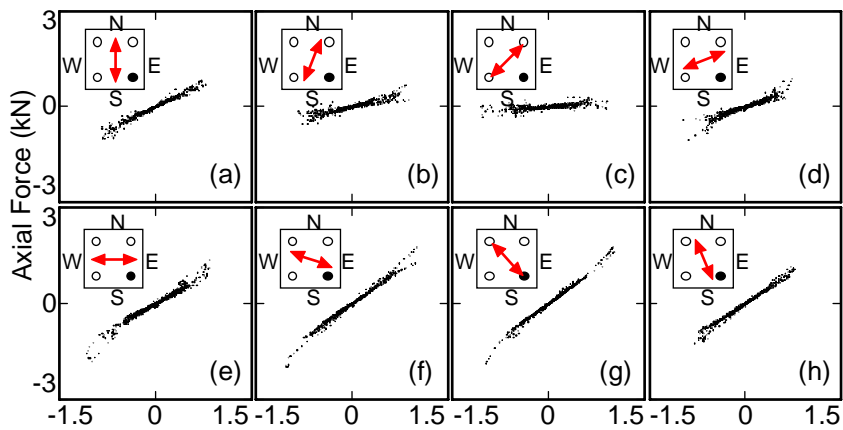


図 18 D2 における強軸方向ごとの杭頭軸力と構造物慣性力の関係

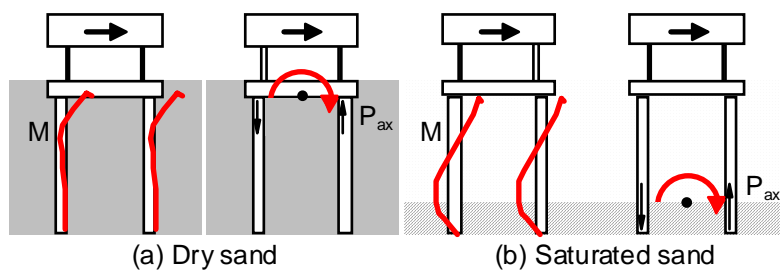


図 19 杭に作用する荷重

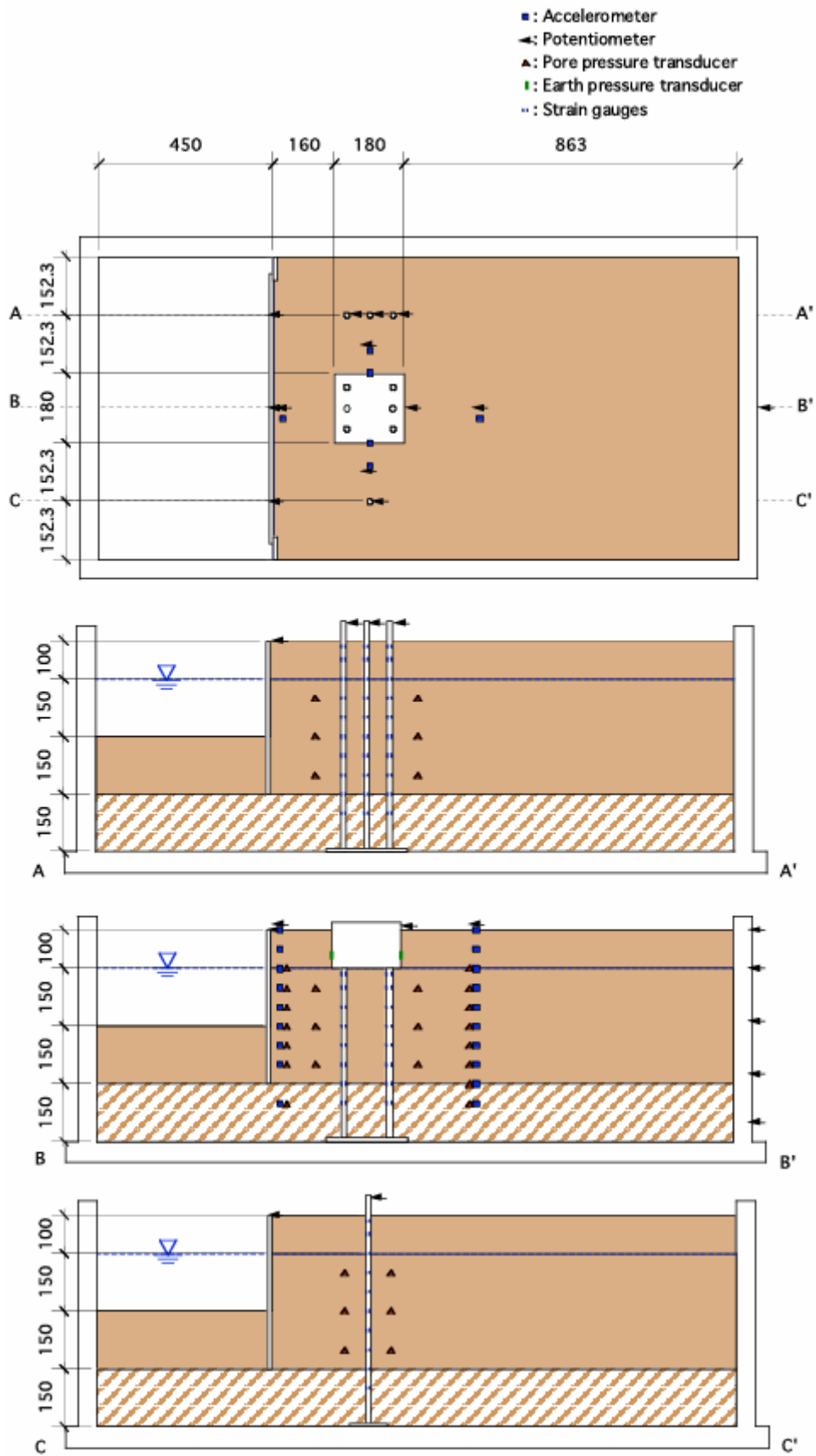


図 20 側方流動実験の模型

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 地盤-構造物系動的相互作用が群杭挙動に与える影響

- a) 液状化前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。
- b) 液状化直後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。
- c) 液状化後の繰返し変形にともなって地盤剛性が低下すると、せん断力は群杭の杭位置によらず同程度となる。
- d) a)b)の傾向の違いは、液状化前と液状化後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、液状化前では杭前面の圧縮側地盤が抵抗して地盤反力が生じ、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結果、後方杭の地盤反力が小さくなる。一方、液状化後では杭の前後面の間隙水圧変動の差により地盤反力が生じ、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。

2) 地盤-構造物系動的相互作用に影響を及ぼす要因の検討

- 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。
- b) 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り、基礎が根入れされると基礎に土圧が作用する結果、杭応力が地盤変位に支配される可能性もある。

3) 水平 2 方向入力場での地盤-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響

- a) 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。
- b) 乾燥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。

4) 2次元遠心振動実験実施の可能性の検討

- a) UC Davis 校の遠心載荷装置を用いて 2 ケースの側方流動実験を実施することを計画した。



(e) 引用文献

- 1) 毛利栄征：文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト II 振動台活用による構造物の耐震性向上研究，平成 15 年度成果報告書，pp.419-436，2004.
- 2) 毛利栄征：文部科学省地盤-杭基礎-構造物の三次元非線形動的相互作用の実験，大都市大震災軽減化プロジェクト II 震動台活用による構造物の耐震性向上研究-平成 16 年度報告書，pp. 295-329，2005.
- 3) R. W. Boulanger, B. L. Kutter, S. J. Brandenberg, P. Singh and D. Chang: Pile foundations in liquefied and laterally spreading ground during earthquakes: Centrifuge experiments & analyses, UCD/CGM-03/01, 2003.
- 4) 鈴木康嗣，安達直人：模型水平載荷試験による群杭の地盤反力～変位関係，日本建築学会構造系論文集，No.570，pp.115-122，2003.
- 5) K. M. Rollins, T. P. Kris, and J. W. Thomas: Lateral load behavior of full-scale pile group in clay, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 16, pp. 468-478, 1998.
- 6) K. Tokimatsu and H. Suzuki: Pore water pressure response around pile and its effects on p-y behavior during soil liquefaction, Soils and Foundation, Vol. 44, No. 6, pp. 101-110, 2004.
- 7) 田村修次，時松孝次，宮崎政信，八幡夏恵子，土屋富男：大型せん断土槽を用いた液状化実験における基礎根入れ部に加わる土圧，日本建築学会構造系論文報告集，No.554，pp.95-100，2002.
- 8) 田村修次，時松孝次，内田明彦，船原英樹，阿部秋男：大型せん断土槽を用いた液状化実験における基礎根入れ部に加わる土圧合力と構造物慣性力の関係，日本建築学会構造系論文報告集，No.559，pp.129-134，2002.
- 9) K. Tokimatsu and H. Suzuki: Estimation of combined effects of inertial force and kinematic forces on pile stresses based on large shaking table tests, Pros. of Second International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp. 321-326, 2005.

(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
Kohji Tokimatsu, Hiroko Suzuki Masayoshi Sato	Effects of inertial and kinematic interaction on seismic behavior of pile with embedded foundation	International Journal of Soil Dynamics and Earthquakes Engineering, Vol. 25	2005. 8-10
Hiroko Suzuki Kohji Tokimatsu Masayoshi Sato	Factor affecting horizontal subgrade reaction of piles during soil liquefaction and lateral spreading	Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 145	2005

Akio Abe			
Kohji Tokimatsu Hiroko Suzuki	Influential factors affecting pile stress in liquefiable soils	Satellite Conference on Recent Developments in Earthquake Geotechnical Engineering	2005.9
鈴木比呂子 時松孝次 毛利栄征	水平 2 方向入力地盤-杭-構造物系振動台実験に基づく杭応力の評価	日本地震工学会 2005 年度大会	2005.11
Hiroko Suzuki Kohji Tokimatsu Gakushi Ozawa	Estimation of group pile effects in non-liquefied and liquefied ground based on centrifuge model tests	Eighth National Conference on Earthquake Engineering	2006.4 (発表予定)
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	2006.7 (発表予定)
鈴木比呂子 時松孝次 毛利栄征	水平 2 方向入力振動台実験に基づく地盤-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	2006.7 (発表予定)
鈴木比呂子 小澤楽周 中辻友希 時松孝次	大型振動台実験に基づく液状化過程における群杭の水平荷重分担の経時変化	第 41 回地盤工学研究発表会	2006.7 (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

### (3) 平成 18 年度業務計画案

#### (a) 業務計画

E-ディフェンスを用いた「側方流動に伴う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、重要な影響要因の抽出に関する実験検討を遠心実験で実施し、大型実験の補足を行う。

#### (b) 水平地盤-杭-構造物系の遠心振動実験の実施

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振動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。実験は地盤密度、基礎根入れの有無、上部構造物の固有周期などをパラメータとして行い、以下の項目を明らかにするとともに、液状化地盤における杭基礎の破壊メカニズムを明らかにする。

基礎に作用する土圧が杭の変形・破壊モードに与える影響

軸力変動が杭の変形・破壊モードに与える影響

上部構造物固有周期および入力動の卓越周期が杭の変形・破壊モードに与える影響

#### (c) 米国 NEES の施設での側方流動地盤遠心振動実験の実施

E-ディフェンスを用いた「側方流動に伴う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、杭頭固定条件などをパラメータとして実施し、以下の項目を明らかにするとともに側方流動地盤での杭の破壊メカニズムを明らかにする。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。

杭位置による杭の変形・破壊モード

杭頭固定条件が杭の変形・破壊モードに与える影響

地盤の残留変形が杭の変形・破壊モードに与える影響

側方流動地盤での土圧の発生メカニズム

