

3.3.9 地盤の3次元挙動評価技術の開発（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ヵ年の年次実施計画
- (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) 液状化地盤における群杭構造物の挙動の把握
 - 2) 杭応力算定手法の妥当性の検討
- (c) 業務の成果
 - 1) 液状化地盤における群杭構造物の挙動の把握
 - 2) 杭応力算定手法の妥当性の検討
- (d) 結論ならびに今後の課題
 - 1) 液状化地盤における群杭構造物の挙動の把握
 - 2) 杭応力算定手法の妥当性の検討
- (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17年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

地盤の3次元挙動評価技術の開発（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	教授	時松孝次	kohji@o.cc.titech.ac.jp
大学院理工学研究科建築学専攻	大学院生	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、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：

- 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：

- 地盤-杭-構造物系の遠心振動台実験を実施する。
- 水平地盤における杭の破壊メカニズムを明らかにする。
- 側方流動地盤における杭の破壊メカニズムを明らかにする。
- 遠心振動台実験の成果および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) 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。
- b) 設計用簡便法の実際の建物に対する適用性を検証する。
- c) 研究の総括をする。

(e) 平成16年度業務目的

E-ディフェンスでの地盤-構造物系実験結果の評価に向けて振動台実験と数値シミュレーションを実施し、地盤-構造物系の三次元大変形挙動の設計用簡便法の開発を行う。

本年度は、液状化地盤の群杭構造物模型振動台実験を実施する。杭の周辺に多数の間隙水圧計を配置して実験を行うことで、液状化地盤における群杭の水平地盤反力発生メカニズムを明らかにし、さらに、液状化地盤での群杭の応力について検討する。また、本年度、前年度までの検討結果をもとに、杭応力算定のための簡便法を用いて振動台実験結果をシミュレーションし、算定手法の妥当性を検討する。

(2) 平成16年度の成果

(a) 業務の要約

地盤-構造物系の大変形挙動の設計用簡便法の開発に向けて、大型せん断土槽を用いた液状化地盤-群杭構造物系振動台実験を実施した。実験では、杭周辺地盤に多数のセンサーを配置し、杭の歪み、杭周辺地盤の間隙水圧を計測した。

実験結果をもとに、周辺地盤の間隙水圧変動と群杭の水平地盤反力の関係、群杭の曲げモーメント、せん断力を比較することで、群杭の杭位置による応力の違いについて検討した。また、今年度までに実施したすべての大型振動台実験における杭応力最大値の算定を行い、提案した算定手法が液状化発生の有無、基礎根入れ部の有無、上部構造物の有無、上部構造物固有周期、杭の剛性や本数によらず実験結果を再現できることを示した。

(b) 業務の実施方法

1) 液状化地盤における群杭構造物の挙動の把握

液状化地盤における群杭構造物の挙動を明らかにするため、防災科学技術研究所の大型せん断土槽に、図1に示すような地盤-杭-構造物模型を設置して振動実験を行った。実験模型は、表1に示す上部構造物の有無、基礎根入れの有無をパラメータとした4シリーズである。実験に用いたせん断土槽は、幅11.6m奥行き3.1m高さ5.6mである。地盤は霞ヶ浦砂を用い、密に締め固めた非液状化層1.5m、水中落下によって作成した液状化飽和砂層3.5m、非液状化層0.5m(基礎が根入れされる場合)より構成される。杭は径16.52cm肉厚0.37cmの鋼管杭9本とし、頭部および先端は基礎、土槽底面に剛接されている。基礎および上部構造物は鋼材で作製し、その重量は2.1t(基礎)、14.2tまたは17.6t(上部構造物)である。なお、基礎固定とした時の上部構造物固有周期(T_b)は0.01s程度である。

実験では、図1に示すように多数のセンサーを配置し、地盤、杭、基礎、上部構造物の加速度、地盤、基礎、上部構造物、土槽の変位、地盤の間隙水圧、杭の曲げおよび軸ひず

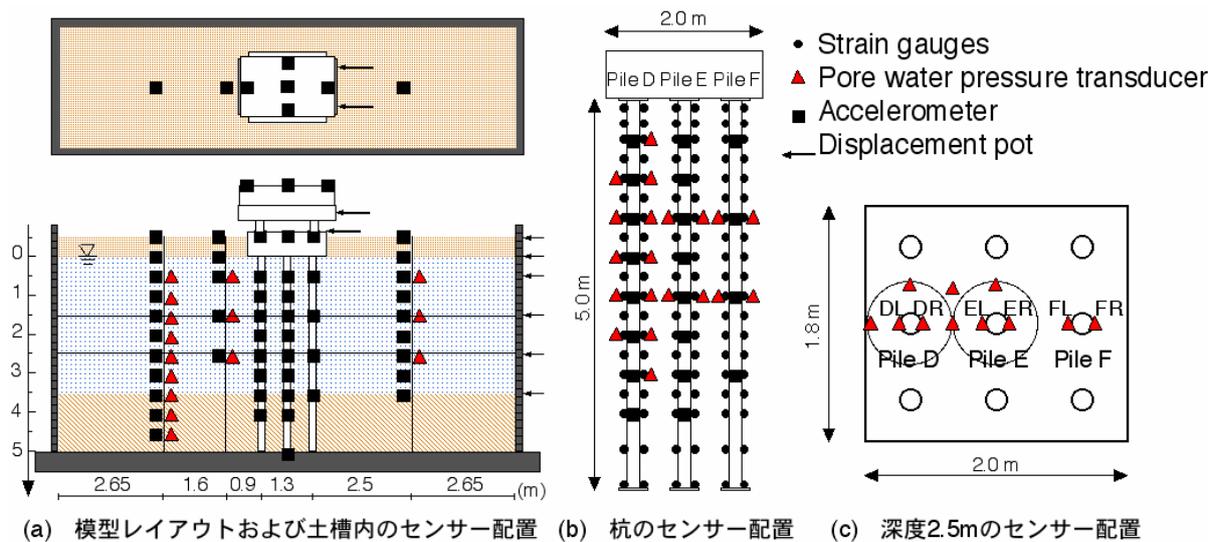


図1 地盤-杭-構造物模型

表1 実施した実験シリーズ

実験シリーズ	上部構造物	地盤密度	入力加速度
SANG	なし	低密	0.2m/s ² , 2.0m/s ²
SASG	あり(14.2t)	中密	0.2m/s ² , 2.0m/s ²
SBNG	なし	中密	0.2m/s ² , 2.0m/s ²
SBSG	あり(17.6t)	高密	0.2m/s ² , 2.0m/s ² , 4.0m/s ²

みの計測を行っている。D、E、F杭には深度方向に密にゲージを貼り、D、E、F以外の杭では杭頭だけにゲージを貼り計測を行っている。液状化地盤における群杭の水平地盤反力発生メカニズムを明らかにするために、深度1.5mおよび2.5mのD、E、F杭の周辺地盤に多数の間隙水圧計を配置している。また、地盤の密度を推定するために実験シリーズごとにコーン貫入試験を実施している。コーン貫入試験値から推定した地盤密度はSANG、SASG、SBNG、SBSGの順に高くなっている。なお、実験では、表1に示すように最大加速度を調整した人工地震波RINKAI92を入力波として用いている。

実験結果をもとに、液状化地盤における群杭の杭応力、地盤反力変位関係を検討する。実験で測定した杭の曲げ歪みを曲げモーメントに変換した後、深度方向に微分することで、杭のせん断力、杭の水平地盤反力を、地盤と杭の加速度記録を時間で2階積分することで両者の変位および相対変位を、基礎と上部構造物の加速度記録とその質量より構造物慣性力を算出する。

2) 杭応力算定手法の妥当性の検討

三次元大変形挙動の設計用簡便法開発のため、今年度と前年度までの成果にもとづき応答変位法を用いた杭応力最大値の算定を行った。検討対象は、先に述べた本年度に実施した実験と、図2および表2に示す1999年(産官学共同実験)¹⁾、2002年(本プロジェクト)²⁾、

2003年(本プロジェクト)³⁾に防災科学技術研究所の大型振動台および大型せん断土槽を用いて実施した液状化地盤および非液状化地盤における杭-構造物系の振動台実験である。

1999年、2003年に実施した実験の地盤モデルは、震ヶ浦砂および礫を用い、下層の非液状化層(1.5m)と上層の液状化飽和層(3.0-4.0m)より構成される(SAN、SAS、SAL、SBN、SBS、SBL、SBNR、SBSR、SBLR)。2002年に実施した実験の地盤モデルは、日光珪砂を用い、乾燥地盤1層(4.5m)より構成される(DAN、DAS、DAL、DBN、DBS、DBL)。いずれの実験シリーズでも2×2の鋼管杭を用いる。1999年、2002年に実施した実験では、杭は径16.52cm肉厚0.37cmで、杭の頭部は基礎に剛接、先端は土槽底面にピン接合されている。2003年に実施した実験では、杭は径31.85cm肉厚0.6cmで、杭の頭部、先端は基礎および土槽底面に剛接合されている。基礎および上部構造物は鋼材で作製し、その重量は2.1t、14.2tである。実験は、基礎根入れの有無、上部構造物の有無、構造物固有周期をパラメータとし、RINKAI92またはE1 Centro波の入力加速度を変えて行なっている。実験中、地盤、杭、構造物の加速度、変位、地盤の間隙水圧、杭の曲げおよび軸ひずみなどを測定している。

なお、実験シリーズは3または4文字で表し、最初は地盤条件(乾燥砂がD、飽和砂がS)、2番目は基礎根入れの有無(無しA、有りB)、3番目は上部構造物固有周期($S(T_b=0.06-0.2s)$ 、 $L(T_b=0.7-0.8s)$)で、 $S(T_b=0.06-0.2s)$ は非液状化地盤、液状化地盤の固有周期(T_g 、 T_{gL})より短く、 $L(T_b=0.7s)$ は非液状化地盤の固有周期(T_g)より長く、液状化地盤の固有周期(T_{gL})より短くなっている。なお、シリーズ名が3文字の場合は低剛性(径16.52cm肉厚0.37cm)の2×2杭、シリーズ名が4文字の場合はRが高剛性(径31.85cm肉厚0.6cm)の2×2杭、Gが低剛性の低剛性(径16.52cm肉厚0.37cm)の3×3杭を表している。

		without embedment		with embedment		
		without superstructure	with superstructure	without superstructure	with superstructure	
Dry sand	Model layout					Flexible pile: D=16.52cm, t=0.37cm
	Test ID & T_b	DAN	DAS (0.06s) DAL (0.7s)	DBN	DBS (0.06s) DBL (0.7s)	
Saturated sand	Model layout					Flexible pile: D=16.52cm, t=0.37cm
	Test ID & T_b	SAN	SAS (0.2s) SAL (0.8s)	SBN	SBS (0.2s) SBL (0.8s)	
	Model layout					Stiff pile: D=31.85cm, t=0.60cm
	Test ID & T_b			SBNR	SBSR (0.2s) SBLR (0.7s)	

T_b : Natural period of superstructure

図2 検討対象となる実験シリーズ

表 2 検討対象となる振動台実験の主要な値の最大値

実験 シリー ーズ	入力波 /加速度 (m/s ²)		加速度 (m/s ²)			慣性力 (kN)	地表 変位 (cm)	曲げ モーメント (kNm)	せん断力 (kN)	軸力 (kN)
			地表	基礎	上部構造物					
DAN	RINKAI	1. 5	2.2	2.2	-	4.6	0.2	0.8	6.9	5.8
		3. 1	3.9	4.1	-	8.6	0.7	2.9	15.2	10.3
	El Centro	2. 4	3.5	3.5	-	7.3	0.4	2.0	13.6	7.0
DAS	RINKAI	1. 3	1.9	3.9	4.3	69.9	0.2	9.4	77.6	31.8
		3. 0	3.6	7.1	7.8	124.8	0.7	17.7	135.7	66.0
	El Centro	2. 4	3.5	6.8	7.3	118.6	0.6	16.8	111.9	51.6
DAL	RINKAI	1. 5	2.1	2.5	1.6	24.1	0.2	2.4	25.4	13.6
		3. 1	3.7	4.0	4.2	54.6	0.7	6.6	57.6	30.5
	El Centro	2. 4	3.4	3.6	3.5	51.0	0.5	6.3	59.2	29.0
DBN	RINKAI	1. 5	2.2	2.1	-	4.4	0.2	1.2	5.8	1.9
		3. 0	3.9	3.8	-	7.9	1.0	4.8	25.2	10.0
	El Centro	2. 4	3.6	3.4	-	7.2	0.7	3.5	17.7	8.5
DBS	RINKAI	1. 4	2.2	2.5	2.6	42.3	0.3	3.0	23.3	16.5
		2. 8	3.9	4.5	4.9	78.7	1.0	10.6	73.7	39.3
	El Centro	2. 4	3.5	4.2	4.7	75.8	0.8	8.3	48.4	31.2
DBL	RINKAI	1. 5	2.2	2.2	1.7	25.0	0.2	1.6	14.3	9.5
		3. 0	3.7	3.6	4.4	60.3	0.9	5.5	39.2	22.8
	El Centro	2. 4	3.6	3.4	3.8	55.2	0.6	4.6	33.5	24.7
SAN	RINKAI	1. 3	0.7	1.8	-	3.1	4.8	4.5	3.2	9.8
SAS	RINKAI	1. 3	0.3	0.9	1.0	16.6	3.5	6.9	16.1	23.2
		2. 8	0.8	1.1	1.3	20.1	7.2	11.6	18.2	32.7
SAL	RINKAI	1. 3	0.4	1.1	0.7	11.4	2.6	5.3	13.4	18.4
SBN	RINKAI	1. 2	2.4	2.8	-	4.8	3.3	8.5	18.2	15.4
		2. 8	5.4	7.0	-	14.8	10.8	11.0	25.9	22.8
SBS	RINKAI	1. 3	1.0	0.9	1.0	15.9	3.0	9.0	16.4	23.6
		2. 7	1.0	1.3	1.5	24.2	7.3	15.5	30.0	37.8
SBL	RINKAI	1. 2	1.3	1.0	1.4	21.1	2.8	10.9	25.7	24.6
		2. 7	1.4	4.0	1.9	27.8	6.8	19.6	42.0	36.7
SBNR	RINKAI	1. 9	1.6	2.9	-	6.1	4.8	53.6	70.4	55.6
SBSR	RINKAI	2. 4	1.5	3.8	5.12	78.9	6.1	43.2	113.4	89.2
SBLR	RINKAI	2. 4	1.6	4.1	3.4	51.3	6.3	48.7	93.6	65.2

(c) 業務の成果

1) 液状化地盤における群杭構造物の挙動の把握

a) 液状化地盤における群杭の杭応力

液状化地盤における群杭挙動を把握するために、曲げモーメント、せん断力の杭位置による違いを検討する。検討対象は表 1 の地盤-杭-構造物模型SANG、SASG、SBNG、SBSGに対してRINKAI92 の最大加速度を 2.0m/s^2 に調整して行った実験である。なお、SANG、SASG、SBNG、SBSGの順に地盤密度が高く、また、いずれの実験ケースも地盤は深度方向に密度が高くなっている。図 3 に、SBSGの構造物慣性力、杭D、E、Fの杭頭曲げモーメントおよびせん断力、自由地盤での過剰間隙水圧、振動台入力加速度の時刻歴を示す。加振後 10～20 秒で過剰間隙水圧が初期有効応力に達し、地盤は液状化に至る。液状化後D、E、F杭の杭頭曲げモーメントおよびせん断力は構造物慣性力の増加とともに大きくなり、互いに同程度の値を示す。杭位置による杭応力をさらに検討するために、図 4 に構造物慣性力が最大になる時のD、E、F杭の曲げモーメントおよびせん断力深度分布を示す。D、E、F杭の応力深度分布は互いに同じ形状を示し、杭頭だけでなく深度方向においても群杭の杭位置による応力の違いが生じていないことが確認できる。杭応力の分担率を検討するため、図 5(a)に、構造物慣性力が大きくなる時の各杭の杭頭せん断力を 3×3 杭の平均杭頭せん断力で除した値を示す。乾燥地盤における傾向と比較するため、図 5(b)に、遠心場で行った乾燥地盤-群杭構造物系振動台実験⁴⁾の杭頭せん断力分布を示す。図 5(a)より、液状化地盤の杭頭せん断力には杭位置による大きな違いは見られない。このことは乾燥地盤の杭頭せん断力が群杭の前面で大きく、背面で小さくなる傾向と大きく異なっている。

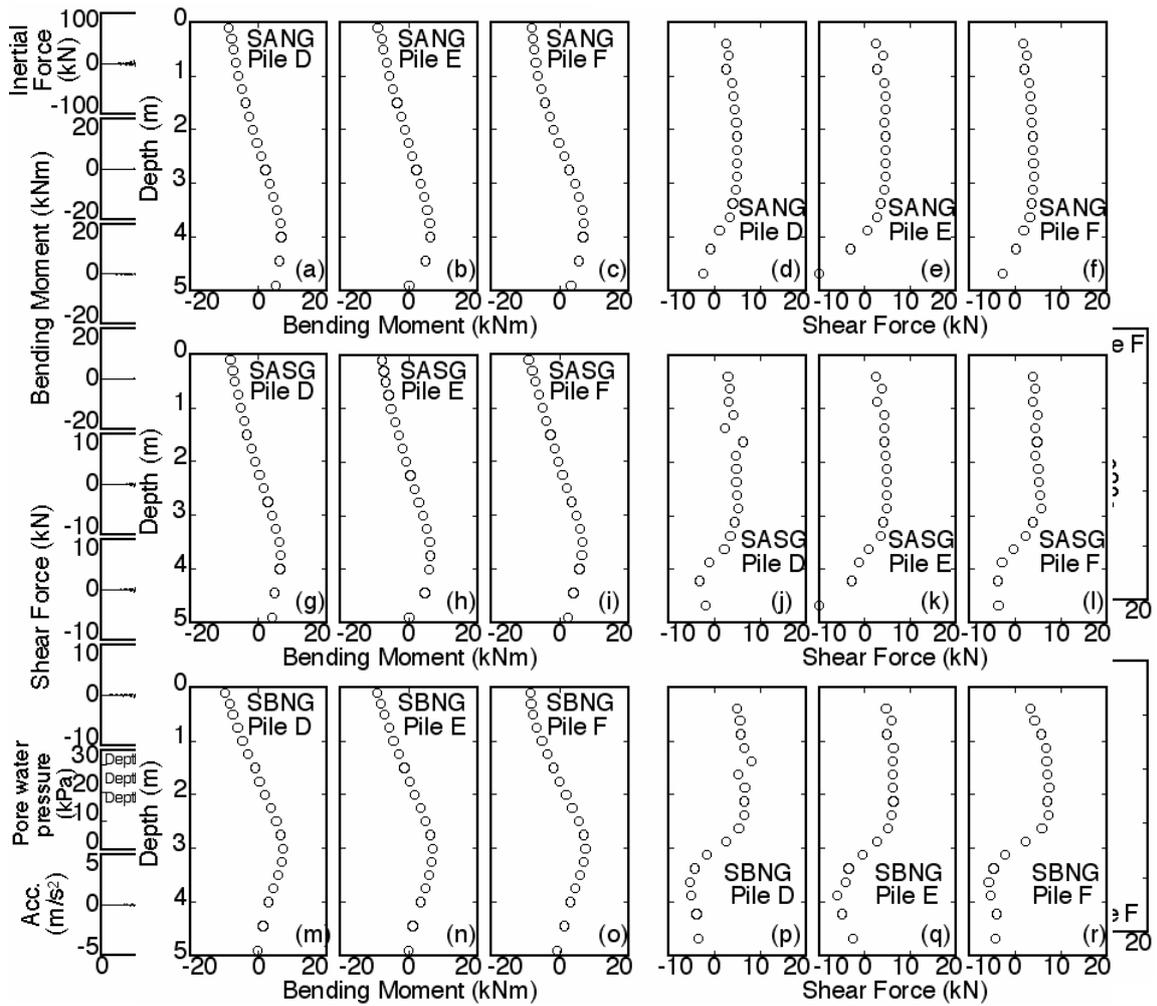
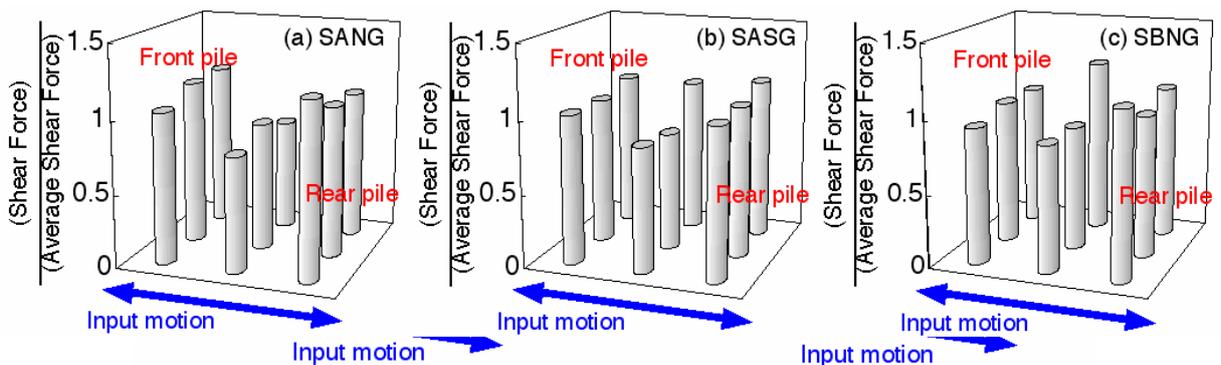


図6 SANG、SASG、SBNGの杭応力深度分布



(a) 液状化地盤 (b) 非液状化地盤

図7 SANG、SASG、SBNGの杭頭せん断力

他の3ケースでの杭応力の傾向を確認するため、SANG、SASG、SBNGの構造物慣性力が最大になるときの杭D、E、Fの曲げモーメントおよびせん断力深度分布を図6に、杭頭せん断力分布を図7に示す。上部構造物の有無、基礎根入れの有無によらず、いずれの実験においても杭に生じる曲げモーメント、せん断力に杭位置による違いが見られないことが確認できる。

b) 液状化地盤の杭の水平地盤反力と杭周辺地盤の間隙水圧変動

液状化地盤から群杭に作用する力を検討するため、図 8 に、SBSGにおける深度 2.5m ($D_r=70\%$) の地盤変位 y_g 、杭変位 y 、地盤と杭の相対変位 y_r 、D、E、F 杭の水平地盤反力 p 、各杭の左右両面で測定した過剰間隙水圧を振動台入力加速度とともに示す。なお、変位は D、E、F 杭でほぼ同じであることから E 杭の値のみを示している (図 8 (b) (c))。

杭表面で測定した過剰間隙水圧は変動を繰り返しながら上昇し、その値が初期有効応力に達した後も大きく変動する。その変動する傾向は D 杭左側 DL (図 8 (e)) F 杭右側 FR (図 8 (l))、すなわち群杭の外側で顕著である。また、液状化後の地盤反力に大きな低下は見られない (図 8 (f) (i) (m))。その値はいずれの杭においても同程度であり、杭位置により違いが認められる間隙水圧の傾向とは異なっている。

杭位置による間隙水圧変動の違いを詳細に検討するため、図 9 に深度 2.5m における液状化後の杭と地盤の相対変位と杭両面で計測した過剰間隙水圧の関係を示す。相対変位が正になるときは杭が右側で地盤を押し、相対変位が負になるときは杭が左側で地盤を押ししていることを示している (図 12、図 13 も同様)。

相対変形の増大にともなって間隙水圧は大きく変動しており、その傾向は杭位置によって異なっている。すなわち、群杭内側の E 杭 (図 9 (c) (d)) が右側で地盤を押しとき (正の相対変位)、杭の右側 (前面) の間隙水圧はほぼ一定であるのに対し、杭の左側 (背面) の間隙水圧が大きく減少する。また、杭が左側で地盤を押しとき (負の相対変位)、杭の左側 (前面) の間隙水圧はほぼ一定であるのに対し、杭の右側 (背面) の間隙水圧が大きく減少する。これは、図 10 に示すように地盤と杭に相対変形が生じると杭の前面が圧縮側、背面が引張り側になり、両側地盤の応力変形状態が異なるためである。すな

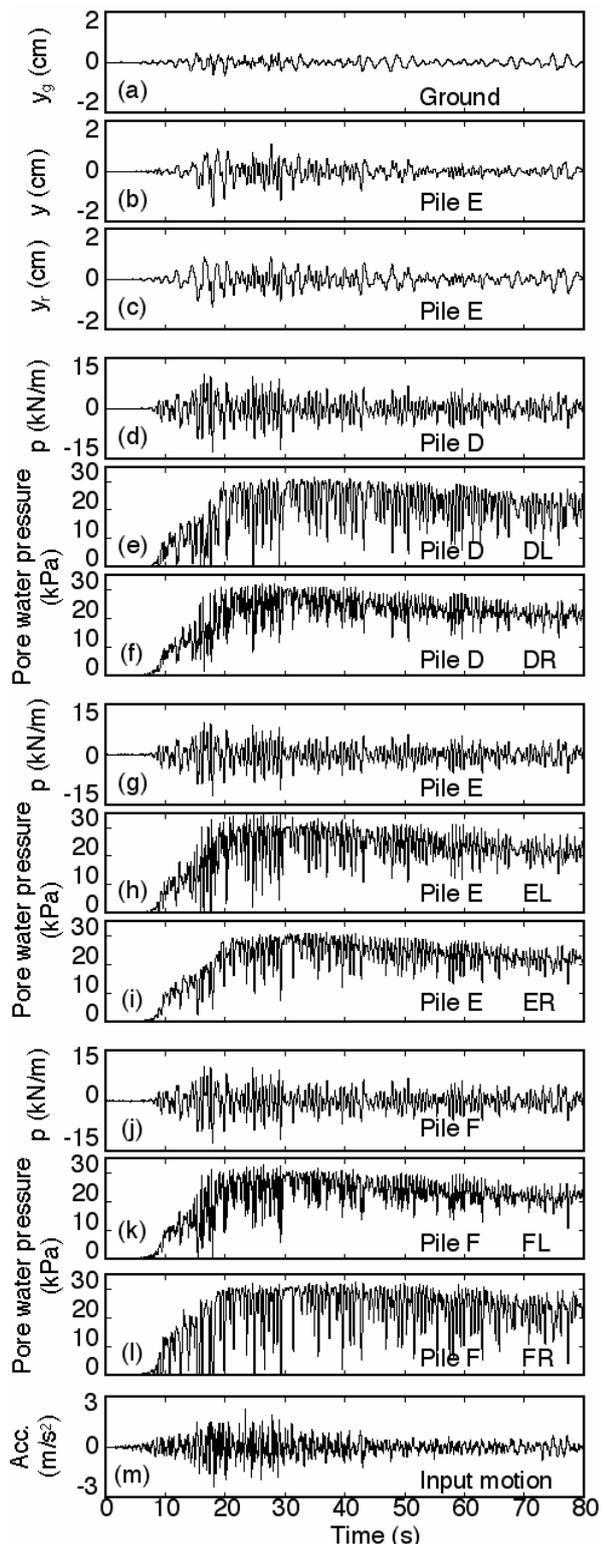


図 8 SBSG 深度 2.5m の変位、地盤反力、間隙水圧の時刻歴

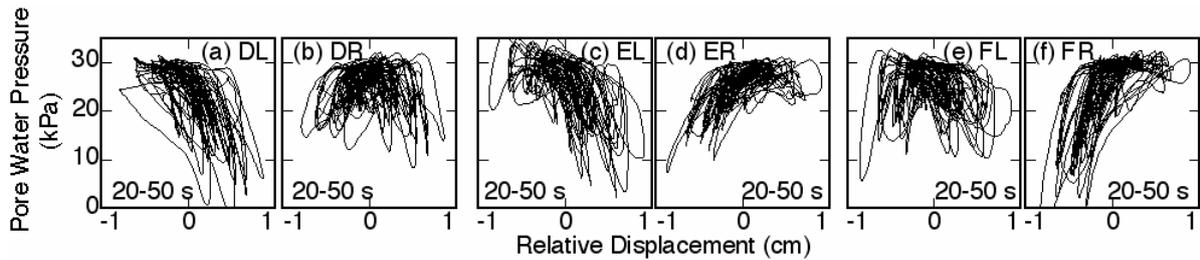


図9 SBSG 深度 2.5m の相対変位と杭周辺地盤の間隙水圧の関係

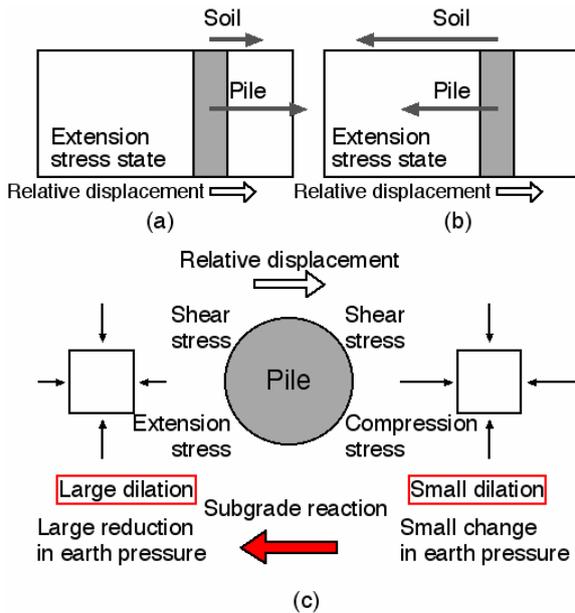
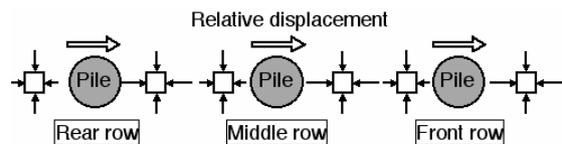
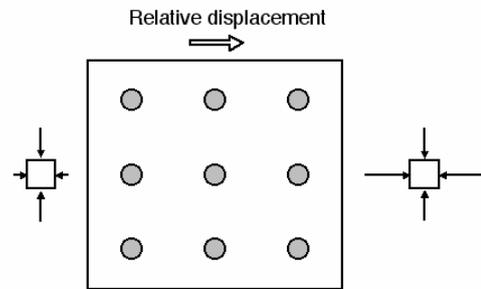


図10 杭周辺地盤の応力



(a) 各杭の相対変形によって生じる周辺地盤の応力



(b) 群杭の相対変形によって生じる周辺地盤の応力

図11 群杭周辺地盤の応力

わち、引張り側地盤ではせん断変形によるダイレイタンスーと引張り応力が増幅し、間隙水圧が大きく減少するのに対し、圧縮側地盤ではせん断変形によるダイレイタンスーと圧縮応力が打ち消し合い、間隙水圧の変動が小さくなる。その結果、杭の前面と背面の応力状態に違いが生じ、杭は間隙水圧が大きく減少している背面から引張られる。以上のような液状化地盤の杭の水平地盤反力発生メカニズムは乾燥地盤において圧縮側地盤が抵抗することによって地盤反力が生じるメカニズムとは全く異なるものである。

群杭外側の D 杭(図 9(a) (b))が左側で地盤を押すとき(負の相対変位)、および F 杭(図 9(e) (f))が右側で地盤を押すとき(正の相対変位)は、地盤の間隙水圧が杭の前面でほぼ一定となり背面で減少する。この傾向は群杭内側の E 杭の傾向と対応している。一方、D 杭(図 9(a) (b))が右側で地盤を押すとき(正の相対変位)、および F 杭(図 9(e) (f))が左側で地盤を押すとき(負の相対変位)は、地盤の間隙水圧が杭の背面だけでなく前面でも減少する。また、この時、杭背面の間隙水圧減少は他の杭での値と比較して大きくなる。この傾向は群杭内側の E 杭の傾向と異なっている。以上のことは、相対変形に対し後方に位置する杭(正の変形の時の D 杭、負の変形の時の F 杭)ほど周辺地盤の間隙水圧減少が大きくなり、群杭における杭位置によって杭周辺地盤の応力状態に違いが生じていることを示唆している。これは、図 11 に示すように杭の地盤に対する相対変形により各杭の前面と背面側地盤に圧縮および引張り応力が生じるだけでなく(図 11(a))、群杭が周辺地盤と一体となって

変形することで群杭全体の前面と背面側地盤により大きな圧縮応力および引張り応力が生じた結果によるものである(図 11(b))と考えられる。

杭の水平地盤反力は杭周辺の間隙水圧変動に大きく影響を受けることから、図 12 に杭の水平地盤反力変位関係と杭両面の過剰間隙水圧変動の差を比較して示す。杭位置により間隙水圧変動に違いが生じるものの(図 12)、杭の水平地盤反力に大きな違いは見られない(図 12(d)-(f))。これは、杭の水平地盤反力は杭両側の間隙水圧変動の差によって生じており、その値は杭位置によらずほぼ同程度であるためと考えられる(図 12(a)-(c))。

地盤密度が杭の水平地盤反力に与える影響を検討するため、図 13 に SBSG の地盤密度の低い深度 1.5m(Dr=35%)における杭の水平地盤反力変位関係と杭両面で計測した過剰間隙水圧の差を比較して示す。相対変形の増大にともなう間隙水圧変動の差は小さくなる。その結果、杭の水平地盤反力は小さく、各杭による違いは見られない。

以上の液状化地盤の杭の水平地盤反力の傾向は非液状化地盤で群杭の水平地盤反力が群杭の前方に位置する杭で大きく、後方に位置する杭で小さくなることと⁵⁾異なる。群杭の水平地盤反力に杭位置による違いが生じない結果、図 3-7 に示すように杭に生じる曲げモーメント、せん断力に杭位置による違いが生じていないと考えられる。

2) 杭応力算定手法の妥当性の検討

杭応力を算定する簡易的手法として応答変位法があげられる。応答変位法は弾性支承梁と仮定した杭に杭頭慣性力とともにバネを介して地盤変位を与える解法で、基本式⁶⁾⁻⁸⁾は次式となる。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_h B_p (y - y_g) = 0 \quad (1)$$

ここで、 EI は杭の曲げ剛性、 x は深度、 y 、 y_g は杭、地盤の水平変位、 k_h は地盤反力係数、 B_p は杭径を表す。ここでは、構造物慣性力(杭頭水平力)と地盤変位を与える際、振動実験

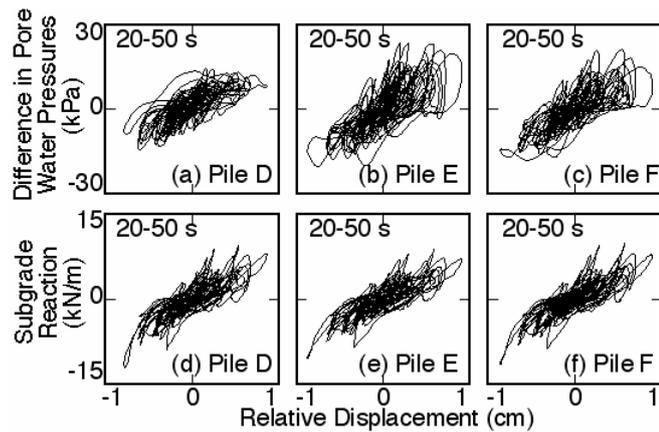


図 12 SBSG 深度 2.5m の地盤反力変位関係と杭両面の間隙水圧変動の差の比較

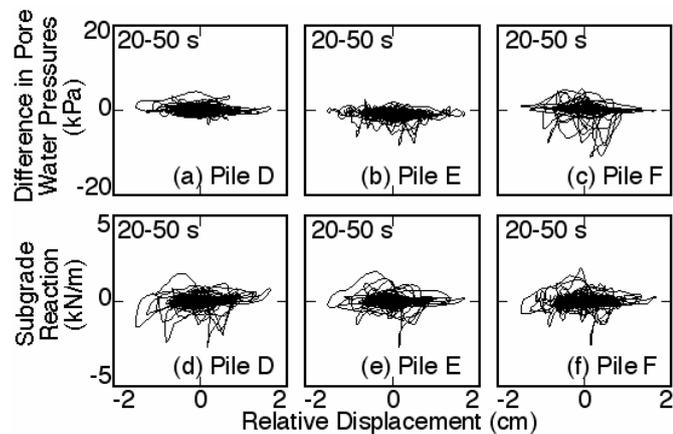


図 13 SBSG 深度 1.5m の地盤反力変位関係と杭両面の間隙水圧変動の差の比較

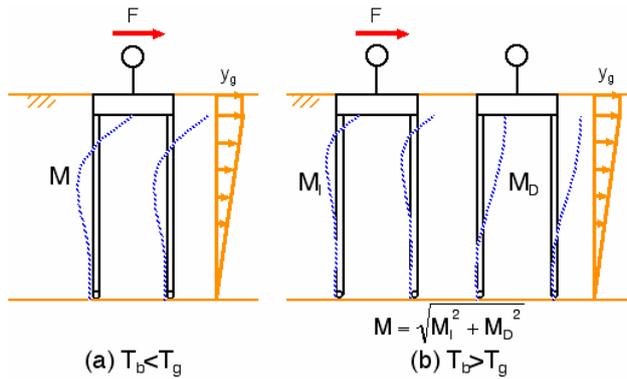


図 14 構造物慣性力と地盤変位の作用の組み合わせ

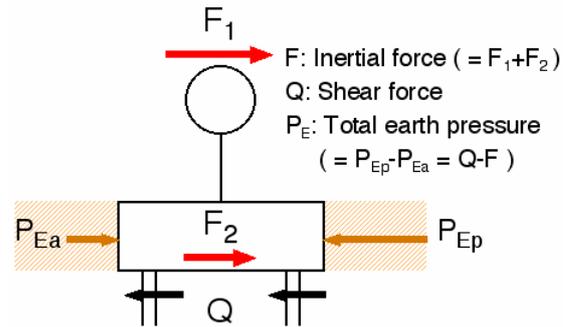


図 15 基礎に作用する力

結果に基づいて、図 14 のように、構造物固有周期が地盤固有周期より短い ($T_b < T_g$) 場合は地盤変位と構造物慣性力を同時に作用させ、長い ($T_b > T_g$) 場合は一方ずつ作用させて求めた応力を二乗和平方根で重ね合わせることで杭応力を求める。

構造物慣性力と地盤変位の作用の組み合わせに加えて、根入れされた基礎に作用する土圧、および杭の水平地盤反力は定義する必要がある。基礎根入れ部に作用する土圧は図 15 にしたがって、次式で定義する⁹⁾⁻¹¹⁾。

$$P_E = P_{Ep} - P_{Ea} = \frac{1}{2} \gamma H^2 B (K_{Ep} - K_{Ea}) \quad (2)$$

ここで、 γ は砂の単位体積重量、 H は基礎壁面高さ、 B は基礎幅、 K_{Ea} は主働土圧係数、 K_{Ep} は受働土圧係数を表す。土圧係数 K_{Ea} 、 K_{Ep} は張らによる土圧理論¹²⁾⁻¹⁵⁾を用いて、基礎と地盤の相対変形によって定義し、主働状態から受働状態から変化する土圧を連続的に定義する。

杭の水平地盤反力 (p) は杭と地盤の相対変位 (y_r) の関係は、次式で与えられる。

$$p = k_h B_p y_r \quad (3)$$

ここに、 B_p は杭径、 k_h は地盤反力係数を表し、次式で与える¹⁶⁾¹⁷⁾。

$$k_h = k_{h1} \frac{2\beta}{1 + |y_r / y_1|} \quad (4)$$

ここで、 k_{h1} は基準地盤反力係数、 y_1 は基準相対変位、 β は液状化による地盤反力低減率を示している。

上記の応答変位法を用いて大型振動台実験の杭応力最大値を算定するために、杭に作用させる構造物慣性力および表層地盤変位は実験で測定された最大値を用いる。なお、地盤は三角形分布とし、乾燥地盤の場合は杭先端でゼロ、液状化飽地盤の場合は液状下層下端でゼロとする。また、(4)式における基準地盤反力係数は実験で測定したコーン貫入試験値から建築基礎設計指針に基づきN値を介して推定し⁸⁾¹⁸⁾、基準相対変位は杭径の1%¹⁷⁾、液状化による地盤反力低減率は0.1とする。

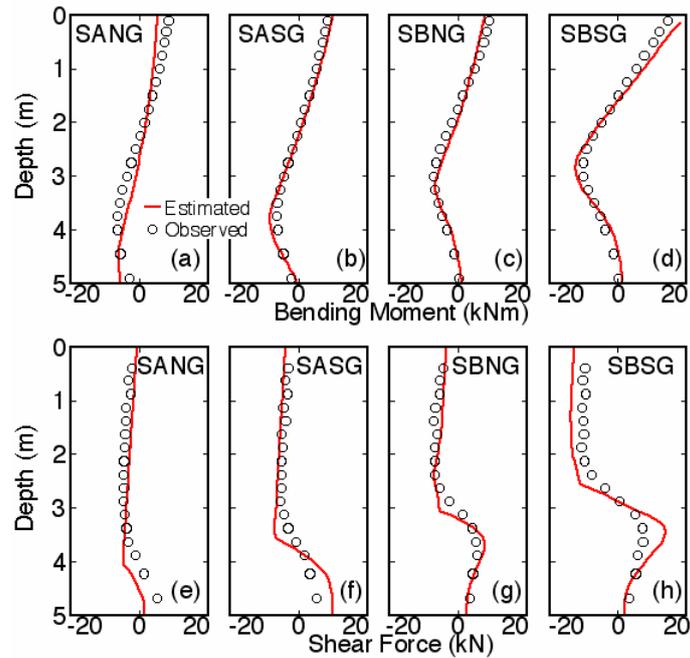


図 16 SANG、SASG、SBNG、SBSG の推定杭応力と実測杭応力の比較

図 16 に、SANG、SASG、SBNG、SBSGに臨海波の最大加速度を 2.0m/s^2 に調整して入力した実験の杭の最大曲げモーメント、せん断力深度分布の推定値を実測値と比較して示す。なお、杭応力は杭位置によらず同程度であることから、D、E、F杭で測定した値の平均値を実測値としている。いずれの実験においても推定杭応力は実測値と良く対応している。

杭応力算定手法の妥当性を検討するために、図 17 に図 16 の 4 ケースと表 2 に示す 31 ケースの杭頭曲げモーメント、せん断力、軸力の最大値の値を算定し、実測値と比較して示す。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推定杭応力は実測値とよく対応しており、このことは簡便な応答変位法によりある程度の精度で杭応力の推定が可能であることを示唆している。

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 液状化地盤における群杭構造物の挙動の把握

a) 杭と地盤の相対変形により杭の両側地盤に引張りと圧縮応力が生じると、引張り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。

b) 群杭が周辺地盤と一体となって動くことで、各杭の前面と背面側地盤だけでなく群杭全体の前面と背面側地盤に圧縮および引張り応力が生じる。その結果、群杭全体の引張り側にある杭の周辺地盤では間隙水圧の減少が大きくなり、群杭全体の圧縮側にある杭の周辺地盤では間隙水圧の減少が小さくなる。

c) 杭の水平地盤反力は群杭の位置による違いは見られなかった。これは、杭の水平地盤反力は杭両側地盤の間隙水圧変動の差によって生じており、その値は杭位置によらずほ

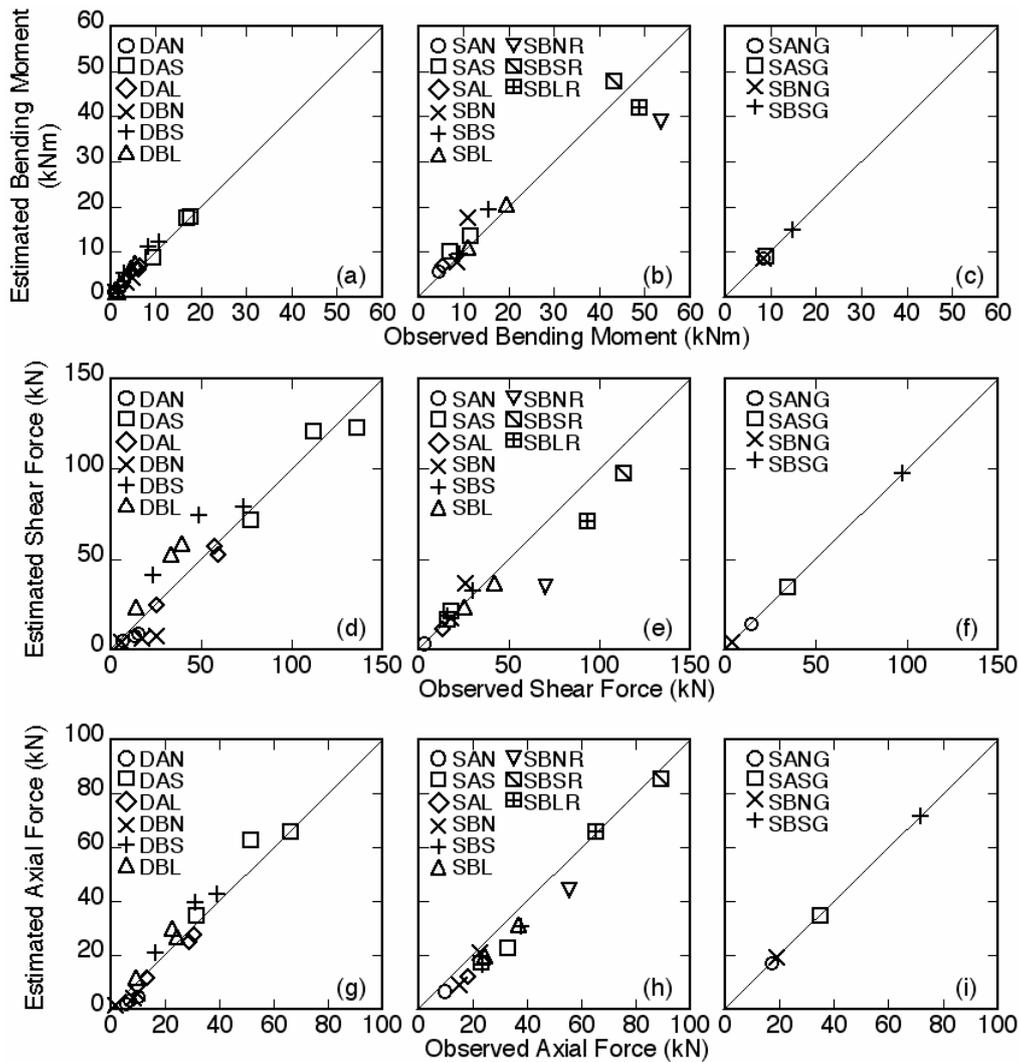


図 17 推定杭応力最大値と実測杭応力最大値の比較

ば同程度であるためと考えられる。

d) c)の結果、液状化地盤の群杭の応力は杭位置によらず同程度であった。このことは、乾燥地盤の杭応力が群杭の前方に位置する杭で大きく、群杭の後方に位置する杭で小さくなる傾向とは大きく異なるものである。

2) 杭応力算定手法の妥当性の検討

a) 応答変位法において、地盤固有周期が上部構造物固有周期より長い場合は地盤変位と構造物慣性力を同時に作用させることで、短い場合は一方ずつ作用させて求めた応力を二乗和平方根で重ね合わせることで杭応力を算定することができる。

b) 構造物慣性力と地盤変位の作用の組み合わせ、杭の水平地盤反力、基礎に作用する土圧を考慮した応答変位法は、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。

c) 今後は、E-ディフェンスの実験に向けて、多次元入力条件での振動台実験の検討をもとに、算定手法の適応範囲を拡張する。また、被害事例などの杭応力の算定を行い評価

方法の有効性を検証する。

(e) 引用文献

- 1) 田村修次, 土屋富男, 鈴木康嗣, 藤井俊二, 佐伯英一郎, 時松孝次: 大型せん断土槽を用いた鋼管杭の液状化実験(その 1 概要), 第 35 回地盤工学研究発表会発表講演集, Vol.2, pp.1907-1908, 2000.
- 2) 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 14 年度成果報告書, pp.372-397, 2003.
- 3) 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.
- 4) 小澤楽周, 鈴木比呂子, 時松孝次, 内田明彦: 遠心模型実験に基づく群杭の地震時挙動の評価, 第 40 回地盤工学研究発表会発表講演集, 2005(発表予定).
- 5) 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.
- 6) 西村昭彦: 地盤変位を考慮した構造物の設計, 基礎工, Vol.6, No.7, pp.48-56, 1978.
- 7) 時松孝次, 能村商栄: 液状化過程における地盤変位が杭の応力に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, No.426, pp.107-113, 1991.
- 8) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, pp.262-296, 2001.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 時松孝次, 田村修次, 宮崎政信, 吉澤睦博: 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の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, No.570, pp.101-106, 2003.
- 12) 物部長穂: 地震上下動に関する考察ならびに振動雑論, 土木学会誌, Vol.10, No.5, pp.1063-1094, 1924.
- 13) Okabe. S.: General Theory on Earth Pressure and Seismic Stability of Retaining Wall and Dam, 土木学会誌, Vol.10, No.6, pp.1277-1323, 1924.
- 14) 張建民, 社本康広, 時松孝次: 構造物の地下壁に加わる地震時土圧の評価法, 第 5 回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム, 日本建築学会, pp.231-236, 1998. 5.
- 15) Zhang, Jian-Min, Shamoto, Y. and Tokimatu, K.: Seismic Earth Pressure Theory for Retaining Walls under any Lateral Displacement, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.38, No.2, pp.143-163, 1998.
- 16) 時松孝次, 鈴木比呂子, 鈴木康嗣, 藤井俊二: 大型振動台実験に基づく液状化過程における杭の水平地盤反力の評価, No.553, pp.57-64, 2002.
- 17) 時松孝次, 鈴木比呂子, 佐伯英一郎: 大型振動台実験に基づく液状化過程での杭の水平地盤反力変位関係のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, No.559, pp.135-141, 2002.

18)山田清臣, 鎌尾彰司, 吉野広司, 増田幸政: 標準貫入試験の N 値とコーン貫入試験の qc との相関性, 土と基礎, Vol.40, No.8, pp.5-10, 1992.

(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	Pore water pressure response around pile and its effects on p-y behavior during soil liquefaction	Soils & Foundations, Vol.44, No.6	2004.12
時松孝次 鈴木比呂子 佐藤正義	地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響	日本建築学会構造系論文集, No.587	2005.1
鈴木比呂子 時松孝次	液状化地盤における群杭周辺地盤の間隙水圧変動と水平地盤反力の関係	液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム	2004.12
Hiroko Suzuki Kohji Tokimatsu	Effects of pore water pressure response on horizontal subgrade reaction of pile group during liquefaction	Abstract Volume of International Symposium on Earthquake Engineering Commemorating Tenth Anniversary of the 1995 Kobe Earthquake	2005.1
鈴木比呂子 時松孝次	応答変位法に基づく大型せん断土槽実験における杭応力の算定	阪神・淡路大地震10周年地震工学シンポジウム	2005.1
鈴木比呂子 時松孝次 佐藤正義	大型液状化振動台実験に基づく群杭挙動の評価	第40回地盤工学研究発表会	2005.7 (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17年度業務計画案

(a) 業務計画

「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」のためには、パラメータを変化させて多くの実験を行い、それらパラメータが杭基礎の破壊メカニズムに与える影響を適切に評価することが重要である。しかし、E-ディフェンスを使用した実験は、時間的制約等から各テーマにつき年間それぞれ1ケース程度しかできない。そこで、E-ディフェンスによる実験をより有益なものとし目標とする成果を得るために、小規模の遠心振動装置による実験を多く実施し、E-ディフェンスによる実験は最重要なケースのみを選択して実施する。

(b) 水平地盤における杭基礎の破壊メカニズム解明

遠心载荷装置を用いて地盤-杭-構造物系振動台実験を実施する。実験は乾燥地盤、飽和地盤に対し、杭の本数、杭間隔、入力波形等のパラメータを変化させて行う。実験結果および過去に実施した大型振動台実験との比較より以下の項目を検討するとともに、水平地盤における杭基礎の破壊メカニズムを明らかにし、杭応力算定手法確立の可能性を探る。

- 乾燥地盤および液状化飽和地盤における群杭効果
- 軸力変動が杭の変形・破壊モードに与える影響
- 多次元効果が杭の変形・破壊モードに与える影響

(c) 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

遠心载荷装置を用いて地盤-杭基礎の振動台実験を実施する。実験は、護岸を持つ地盤に対し、地盤密度、杭の本数や間隔等をパラメータとして行う。実験結果より以下の項目を検討し、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を明らかにする。さらに、側方流動地盤での杭の変形・破壊モードを水平地盤での場合と比較し、大変形が生じるような側方流動地盤においても有効な杭応力算定手法確立の可能性を探る。

- 杭位置による杭の変形・破壊モード
- 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

