

### 3.3.9 地盤の三次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ヶ年の年次実施計画
- (e) 平成15年度業務目的

##### (2) 平成15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杭の水平地盤反力発生メカニズムの評価
  - 2) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響
- (c) 業務の成果
  - 1) 液状化地盤における杭の水平地盤反力発生メカニズムの評価
  - 2) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響
- (d) 結論ならびに今後の課題
  - 1) 液状化地盤における杭の水平地盤反力発生メカニズムの評価
  - 2) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響
- (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、使用・標準等の策定

##### (3) 平成16年度業務計画案

- (a) 業務計画
- (b) 実施方法
- (c) 目標とする成果

## (1) 業務の内容

### (a) 業務題目

地盤の3次元挙動評価技術

### (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>
理工学研究科 建築学専攻	大学院生	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年度に完成する実大三次元震動破壊実験施設（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ヶ年の年次実施計画

#### 1) 平成14年度：

- a) 非液状化地盤の基礎-構造物系の大型振動実験を実施する。
- 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) 液状化地盤の基礎-構造物系の大型振動実験を実施する。
- b) 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。
- 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実験を実施する。
- b) 群杭が動的相互作用に与える影響を検討する。
- c) 3.3.1「地盤-基礎-構造物の三次元非線形動的相互作用の実験」の結果をもとに、二次元入力が杭の変形・破壊モードに与える影響を検討する。
- d) 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。

#### 4) 平成17年度：

- a) 地盤-杭-構造物系の遠心振動実験を実施する。
- b) 群杭間隔が動的相互作用に与える影響を検討する。
- c) 3.3.1「地盤-基礎-構造物の三次元非線形動的相互作用の実験」の結果をもとに、

三次元入力が杭の変形・破壊モードに与える影響を検討する。

- d) 前年度に引き続き、大変形の挙動を予測する設計用簡便法を開発する。
- e) 実験結果の数値シミュレーションにより、設計用簡便法の妥当性を検討する。

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 15 年度業務の目的

E-ディフェンスでの地盤-構造物系実験結果の革新的評価に向けて振動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、液状化地盤の杭-構造物模型振動実験を実施する。杭の周辺に多数の間隙水圧計、土圧計等のセンサーを配置して実験を行うことで、液状化地盤における地盤反力発生メカニズムを明らかにする。また、過去に実施した地盤-杭-構造物系実験と比較することで、地盤-杭-構造物系の動的相互作用が杭応力に与える影響を検討する。本年度および前年度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 15 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地盤-杭-構造物系振動実験を実施した。実験では、杭周辺地盤に多数のセンサーを配置し、また過去の実験と比較できるように 1999 年(産官学共同研究により実施)、2002 年(本プロジェクトにより実施)に用いた杭の 2 倍径の高剛性杭を用いた。

実験結果をもとに、杭の周辺地盤の間隙水圧変動が杭の水平地盤反力変位関係に与える影響を検討することで、液状化地盤の地盤反力発生メカニズムを示した。また、過去の実験結果と比較し、杭の剛性および杭の変形の違いが上部構造物応答、杭-基礎に作用する土圧に与える影響を明らかにした。さらに、応答変位法を用いた杭応力の推定を行い、応答変位法が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杭の水平地盤反力発生メカニズムの評価

液状化地盤における地盤と杭の動的相互作用を検討するため、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。実験は、表 1 に示す上部構造物の有無、上部構造物固有周期をパラメータとした 3 ケースである。実験に用いたせん断土槽は、幅 11.6m 奥行き 3.1m 高さ 5.0m である。地盤は、砂礫層 1.5m、飽和砂層 3.0m、乾燥砂層 0.5m より構成される。杭は径 31.85cm 肉厚 0.60cm の鋼管杭 4 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、14.2t である。

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
SD1	なし	低密	0.3m/s <sup>2</sup> 、 1.5m/s <sup>2</sup> 、 0.3 m/s <sup>2</sup>
SDL	あり (T=0.7s)	中密	0.3m/s <sup>2</sup> 、 2.0m/s <sup>2</sup> 、 0.3 m/s <sup>2</sup>
SDS	あり (T=0.2s)	高密	0.3m/s <sup>2</sup> 、 2.0m/s <sup>2</sup> 、 3.5m/s <sup>2</sup> 、 0.3 m/s <sup>2</sup>

表 2 計測センサー

		杭				基礎	上部 構造物	地盤	土槽	振動台	計
		A	B	C	D						
加速度計	水平	8			8	2	2	23		1	44
	水平直交					1	1			1	3
	鉛直					2	2			1	5
変位計	水平					2	2		6		10
	鉛直					2	2				4
間隙水圧計		7			13			26			46
歪みゲージ	曲げ	17			17						34
	曲げ・軸力	6	3	3	6						36
土圧計		1			7	2					10
計											192

実験中、地盤、杭、構造物の加速度、変位、間隙水圧、土圧ひずみ、曲げひずみなどの計 192 点のセンサーを配置し計測を行っている(図 1、表 2)。特に、図 2 に示す深度 2.5m では、地盤反力発生メカニズムを明らかにするために、杭周辺に多数の間隙水圧計、土圧計を配置している。また、地盤密度を推定するため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 SD1、SDL、SDS の順に高くなっている。なお、実験では、表 1 に示すように人工地震波 RINKAI92 の最大加速度を調整して入力している。

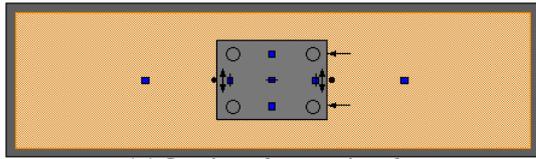
図 3 に示すように、実験結果をもとに、液状化地盤における杭周辺地盤の間隙水圧変動が杭の地盤反力変位関係に与える影響を検討し、地盤反力発生メカニズムを明らかにする。なお、杭の水平地盤反力は、実験で測定した杭の曲げ歪みを曲げモーメントに変換した後、深度方向に微分することで、地盤と杭の相対変位は両者の実測加速度記録を時間で 2 回積分し差分をとることで算出する。

## 2) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響

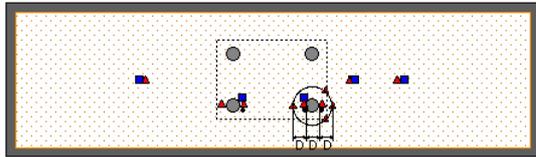
三次元大変形挙動の設計用簡便法開発のため、地盤変位と構造物慣性力が杭応力に与える影響を検討した。検討対象は、図 4 に示すように、先に述べた本年度に実施した実験と、1999 年(産官学共同実験)<sup>1)</sup>、2002 年(本プロジェクト)<sup>2)</sup>に実施した液状化地盤および非液状化地盤における杭-構造物系の大型振動実験である。

1999 年、2002 年に実施した実験では、幅 11.6m 奥行き 3.1m 高さ 4.5-6m のせん断土槽に、乾燥地盤の場合は日光珪砂を、飽和地盤の場合は下層に砂礫、上層に霞ヶ浦砂を用い

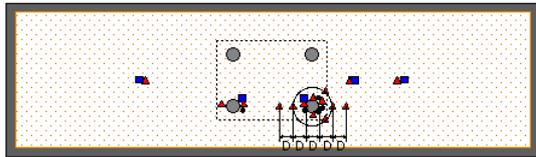
- ▲ Pore pressure transducer
- Horizontal accelerometer
- Vertical accelerometer
- ↕ Displacement pot
- Soil pressure transducer
- × Strain gauges



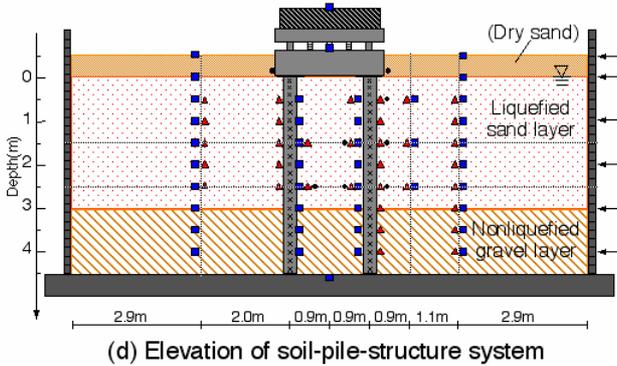
(a) Section of ground surface



(b) Section of 1.5 m depth



(c) Section of 2.5 m depth



(d) Elevation of soil-pile-structure system

図1 地盤-杭-構造物模型

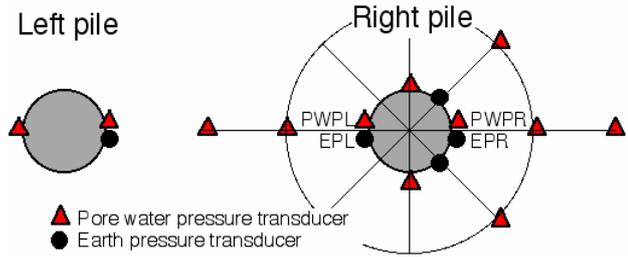


図2 杭周辺のセンサー配置

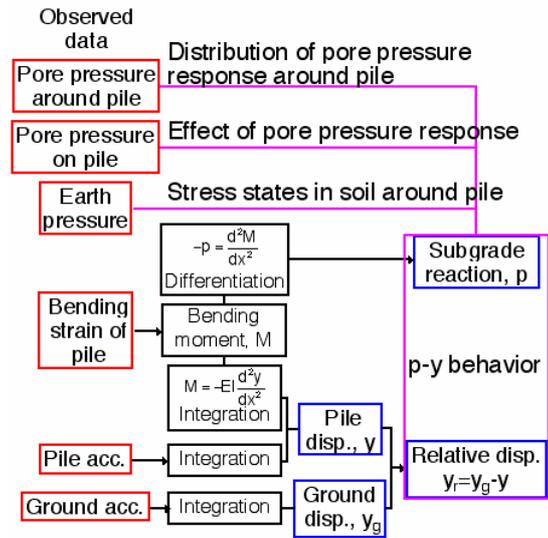


図3 地盤反力変位関係の算出

て作製している。杭は径 16.52cm 肉厚 0.37cm 鋼管杭 4 本とし、本年度実施した実験と比較するとその剛性が低くなっている。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。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、構造物の有無、構造物固有周期をパラメータとし、RINKAI92 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、間隙水圧、曲げひずみなどを測定している。

なお、実験シリーズは 3 文字で表し、最初は地盤条件(乾燥砂が D、飽和砂が S)、2 番目は杭剛性(低剛性 B、高剛性 D)、3 番目は上部構造物固有周期 ( $S(T_b=0.06-0.2s)$ 、 $L(T_b=0.7s)$ )で、 $S(T_b=0.06-0.2s)$ は、乾燥地盤、飽和地盤の固有周期 ( $T_g=0.3s$ )及び飽和地盤が液状化した後の固有周期 ( $T_g=1.2s$ )よりも短く、 $L(T_b=0.7s)$ は、乾燥地盤、飽和地盤の固有周期よりも長く、飽和地盤が液状化した後の固有周期よりも短くなっている。

Soil	Pile	Superstructure		
		No	Yes, (0.06-0.2 s)	Yes, (0.7-0.8 s)
Dry sand	D=16.52cm t=0.37cm	DB1 4.5m	DBS 4.5m	DBL 4.5m
		SB1 6.0m	SBS 6.0m	SBL 6.0m
Saturated sand	D=31.85cm t=0.60cm	SD1 5.0m	SDS 5.0m	SDL 5.0m

図4 検討対象となる地盤-杭-構造物系振動実験

(c) 業務の成果

1) 液状化地盤における杭の水平地盤反力発生メカニズムの評価

a) 間隙水圧変動が杭の水平地盤反力変位関係に与える影響

液状化地盤における地盤と杭との相互作用を明らかにするため、杭の水平地盤反力発生メ

カニズムを検討する。検討対象は低密地盤 SD1、中密地盤 SDL、高密地盤 SDS に入力加速度最大値を  $1.5\text{m/s}^2$  または  $2.0\text{m/s}^2$  として行った実験である。図 5~7 に、各実験の深度 2.5m における地盤、杭の変位および両者の相対変位、地盤反力、間隙水圧比の時刻歴を入力加速度と合わせて示す。間隙水圧比は、図 2 に示す杭の表面(PWPR、PWPL)で計測した値である。加振から、10-20 秒程度で間隙水圧比は 1 に達し、地盤は液状化に至る。地盤の液状化にともなう杭と地盤の相対変位の増大は、地盤密度が低くなるほど顕著になる。一方、杭と地盤の相対変形によって生じる杭の水平地盤反力は、地盤密度が高くなるほど大きくなり、高密地盤 SDS の地盤反力は液状化後においても大きな値を保持している。また、地盤反力が大きくなる高密地盤 SDS の間隙水圧は大きく変動する傾向があるのに対し、地

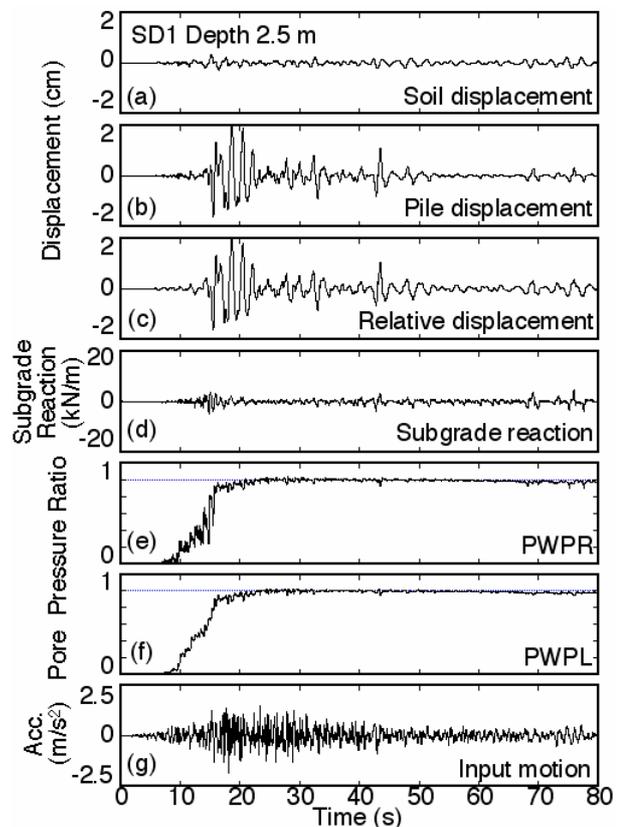


図5 SD1 深度 2.5m の時刻歴

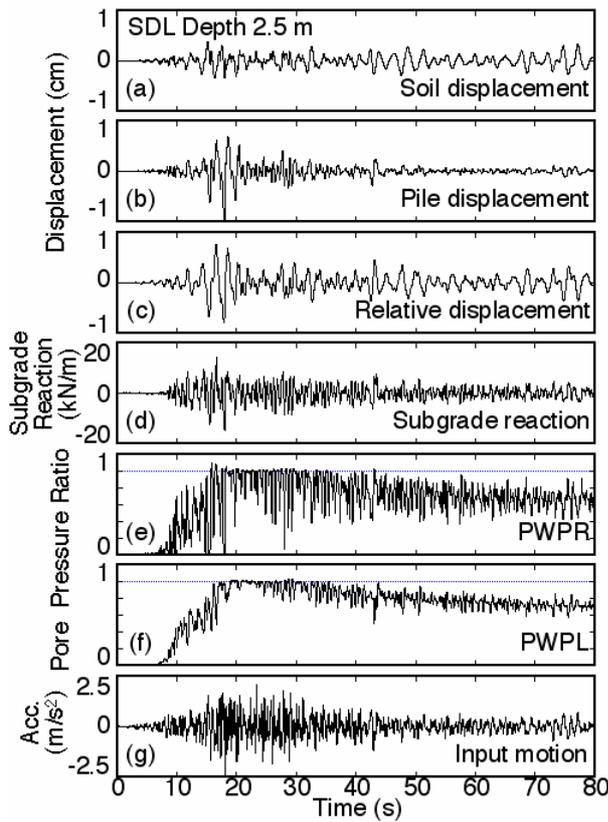


図6 SDL 深度 2.5m の時刻歴

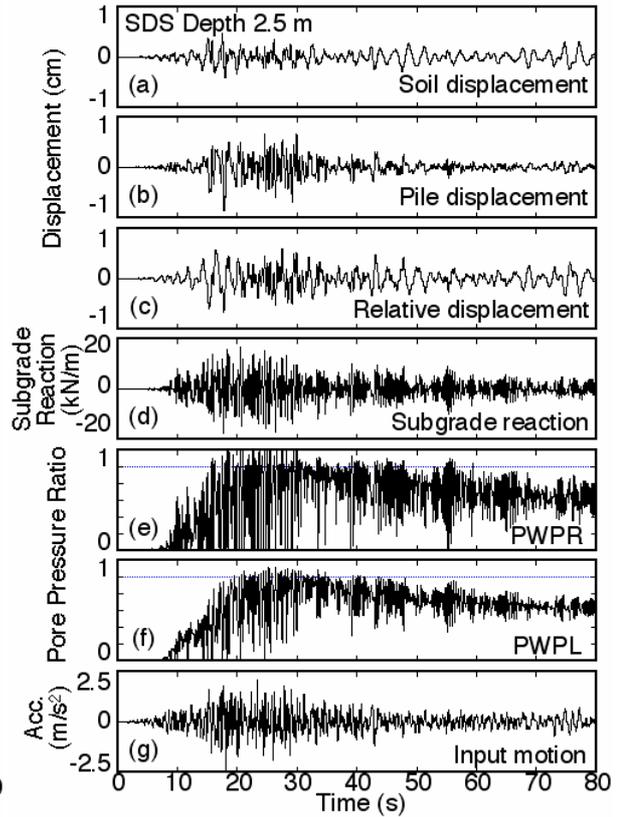


図7 SDS 深度 2.5m の時刻歴

盤反力が小さくなる低密地盤 SD1 ではこの傾向は見られなくなる。

液状化地盤における間隙水圧の変動が杭の水平地盤反力変位関係に与える影響を検討するため、図8に、低密地盤 SD1、中密地盤 SDL、高密地盤 SDS の深度 2.5m における液状化後(20-50s)の相対変位と地盤反力および平均間隙水圧比の関係を示す。平均間隙水圧比は、杭表面で計測した値の平均値である。図より、相対変位の増大により密な地盤ほど大きな地盤反力が生じ、地盤反力変位関係が逆S字型になることがわかる。この地盤反力の増加は、間隙水圧の減少とよく対応している。すなわち、密度の低い砂では間隙水圧減少はほとんどなく地盤反力も小さいが、密度の高い砂では間隙水圧減少が大きく地盤反力も大きい。これは、地盤密度の違いによって生じる杭周辺地盤のダイレイタンス特性の違いに起因するものと考えられる。

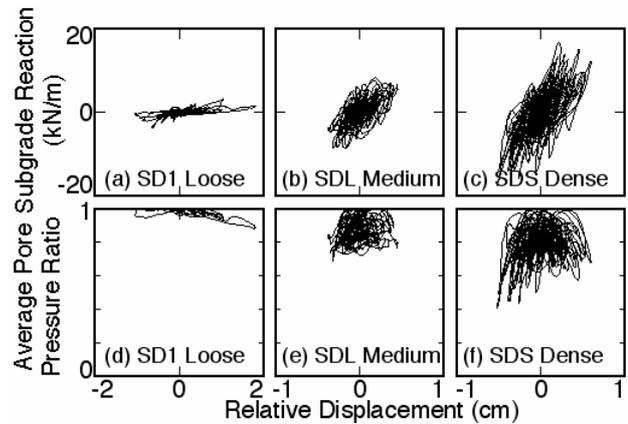


図8 相対変位と地盤反力  
および平均間隙水圧比の関係

#### b) 杭周辺地盤の応力状態変化

地盤反力の発生メカニズムを詳細に検討するために、図9に高密地盤 SDS 深度 2.5m における液状化後の相対変位と杭両面で計測した土圧増分と間隙水圧比の関係を示す。杭が

地盤に対して右側に変形するとき(正の変位)、杭の前面の土圧は一定であるのに対し(b)、杭の背面の土圧は大きく減少する(a)傾向が見られる。同様に、左側に変形するとき(負の変位)、前面の土圧は一定で(b)、背面の土圧は大きく減少する(a)。この土圧の変動傾向は間隙水圧の変動(図 9(c) (d))と対応する。すなわち、間隙水圧は、杭の前面ではほぼ一定であるのに対し、杭の背面では大きく減少する。

以上に見られた杭の前面と背面の土圧および間隙水圧の変動の違いは、図 10 に示すように、相対変形の増大によって杭前面側地盤は圧縮領域、杭背面側地盤は引張り領域になることによって生じていると考えられる。すなわち、引張り側地盤(杭の背面)では引張り応力がせん断変形によるダイレイタンスを増幅させる結果、間隙水圧が大きく減少する。一方、圧縮側地盤(杭の前面)では圧縮応力はダイレイタンスを減少させる結果、間隙水圧の変動が抑えられる。

また、杭に作用する全土圧(図 9(e))は土圧増分の差から推定でき、その値は地盤反力(図 8(c))と同様の傾向を示す。このことから、地盤反力は相対変形の増大にともなう杭周辺地盤の間隙水圧変動の差によって発生していると考えられる。また、間隙水圧および土圧の変動は杭の背面で大きくなることから、図 10 に示すように杭は背後の引張り側に押し返す力を受ける。以上のことは、液状化地盤における地盤反力が、前面土圧の増大により大きくなる乾燥地盤や非液状化地盤における地盤反力とは全く異なるメカニズムで大きくなることを示唆している。

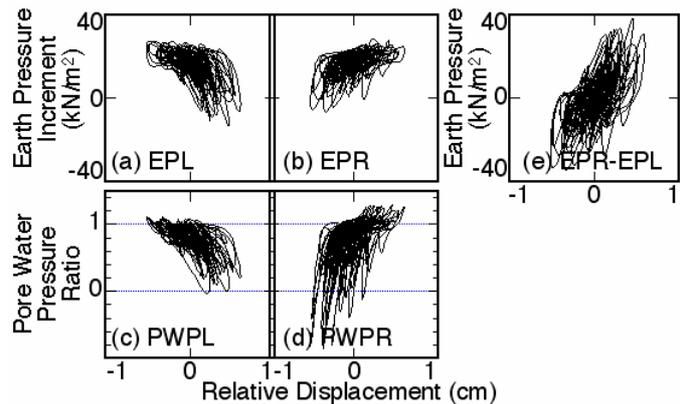


図 9 SDS 深度 2.5m の土圧、間隙水圧応答

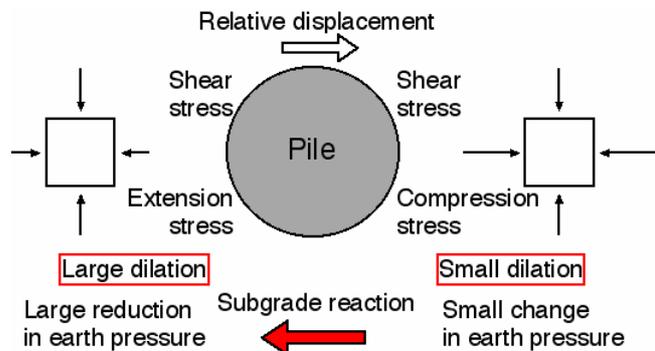


図 10 地盤反力発生メカニズム

## 2) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響

### a) 乾燥地盤における慣性力と地盤変位の影響

図 11 に、DB1、DBS、DBL $2.4m/s^2$  入力の場合の地盤、基礎、上部構造物の加速度と杭頭モーメントの時刻歴を示す。DB1、DBS、DBL の地盤、基礎、上部構造物加速度の最大値は同程度であり、実験ケースによる大きな違いは見られない。一方、上部構造物のある DBS の杭頭モーメントの最大値は、基礎のみの DB1 の値の 2 倍程度であるのに対し、DBL の杭頭モーメント最大値は DB1 と同程度であり、杭頭モーメントには構造物の慣性力以外の要因が影響していることがわかる。

そこで、杭頭モーメントを微分して杭頭せん断力を、さらに、図 12 にしたがって、基礎根入れ部に働く土圧合力( $P=P_{Ep}-P_{Ea}=F_1+F_2-Q$ )を求め、慣性力とこれらの関係をまとめて図 13 に示す。DBS では、慣性力とせん断力がほぼ 1 対 1 に対応しており、構造物の慣性

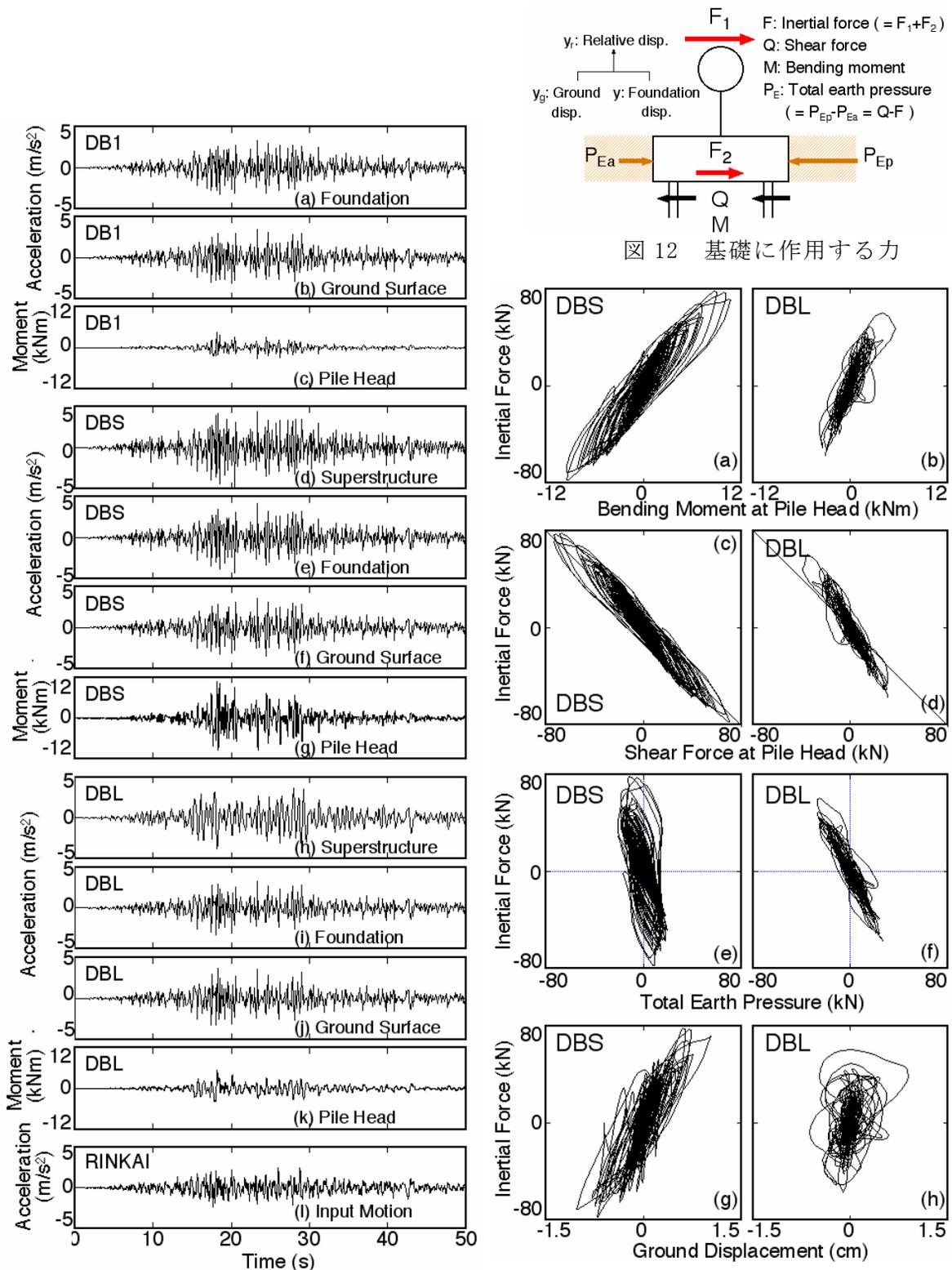


図 11 乾燥地盤の時刻歴

図 13 乾燥地盤の慣性力とモーメント、せん断力、土圧、地盤変位の関係

力がすべて杭頭に伝達されている。一方、DBL では杭頭せん断力が慣性力より小さくなっている。これは、DBS では、構造物慣性力と地盤変位が同位相であるため、慣性力最大時に土圧の寄与が少なく、慣性力の大部分が杭頭に伝達されているのに対し、DBL では、慣性力と土圧の最大発生時刻が一致し、両者が逆向きに作用するため、慣性力に比べ杭頭せん断力が小さくなっている。このため DBS は DBL より、杭頭モーメントが大きくなっていると考えられる。

モーメントが大きくなる時の地盤変位および構造物慣性力の影響を確認するために、図 14、15 に DBS、DBL の杭頭モーメント、地表変位、構造物加速度が最大になる時の杭モーメント、地盤および杭変位の深度分布を示す。図 14 より、DBS の杭および地盤変位の深度分布、構造物慣性力(図中の矢印)は(b)(c)(d)で同程度である。すなわち、いずれの場合も、杭は地盤変位と慣性力による杭頭水平力の作用を同時に受け、この条件でモーメント最大が発生する可能性が示唆される。一方、図 15 より、DBL の杭および地盤変位深度分布、構造物慣性力は(b)(c)(d)で異なることが分かる。すなわち、地盤変位が大きい場合では慣性力は小さく、慣性力が大きい場合では地盤変位は小さく、両者が同時に最大になることはない。またモーメントの最大値も、DBS と異なり、両者の最大値を同時に受けて発生する可能性が低いことが示唆される。

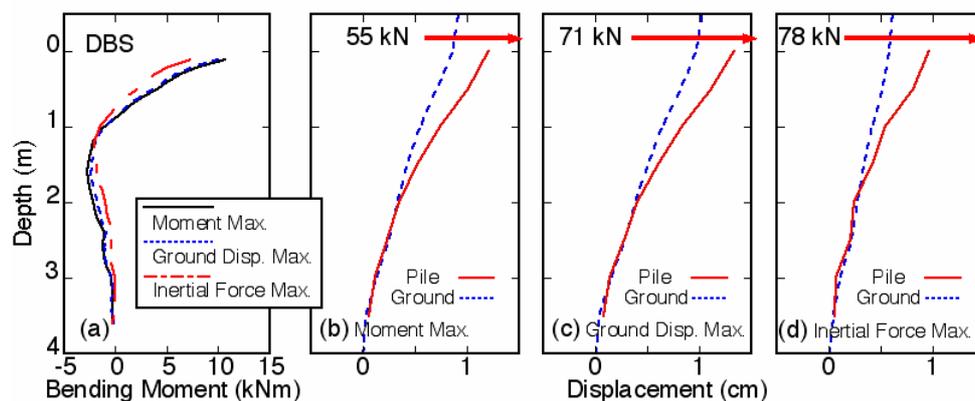


図 14 DBS のモーメントおよび変位深度分布

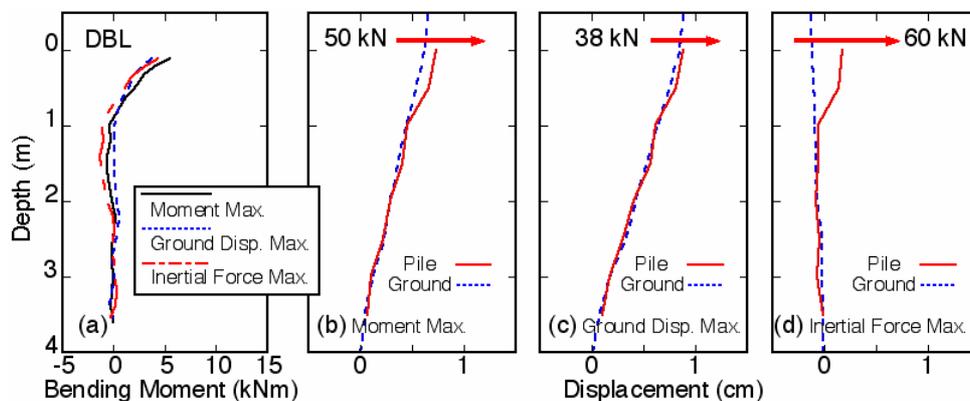


図 15 DBL のモーメントおよび変位深度分布

b) 液状化地盤における慣性力と地盤変位の影響

図 16 に、杭剛性の異なる SBL $2.4\text{m/s}^2$  入力、SDL $2.0\text{m/s}^2$  入力の地盤と基礎の変位、構造物慣性力、杭頭モーメント、間隙水圧の時刻歴を示す。いずれの実験においても、加振から 10~20 秒程度で間隙水圧比が 1 に達し、地盤変位が増大する。高剛性杭の SDL は、低剛性杭の SBL と比較して基礎の変形が抑えられるが、構造物慣性力、杭頭モーメントは大きくなる。

構造物慣性力の杭頭へ伝わり方を検討するため、図 17 に SBL、SDL の構造物慣性力と杭頭せん断力の関係を示す。杭剛性の低い SBL では、液状化前の 0-10 秒では、杭頭せん断力は慣性力より小さくなっているが、液状化後では、杭頭せん断力は慣性力と同程度かそれ以上となっている。これは液状化にともなって地盤変形が大きくなる結果、抵抗側に働いていた基礎根入れ部の土圧が減少するかまたは逆に加力側に働くためと考えられる。杭剛性の高い SDL では、杭頭せん断力は終始、慣性力と同程度かそれ以上となっている。これは剛な基礎の変位に対し、周辺地盤の変位が大きいため、基礎根入れ部の土圧が常に加力側に働くためと考えられる。

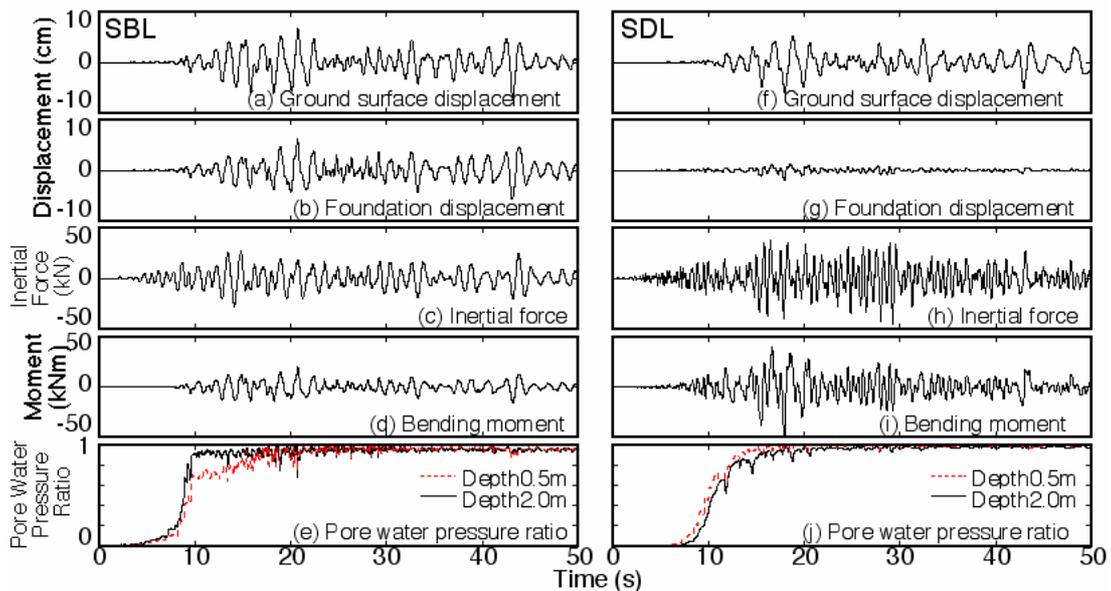


図 16 液状化地盤の時刻歴

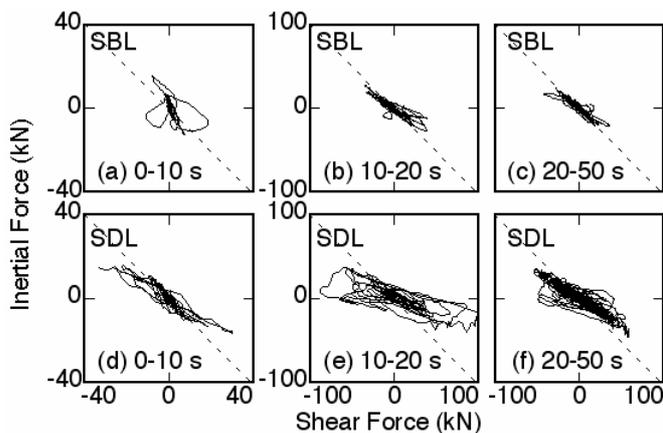


図 17 液状化地盤の慣性力とせん断力の関係

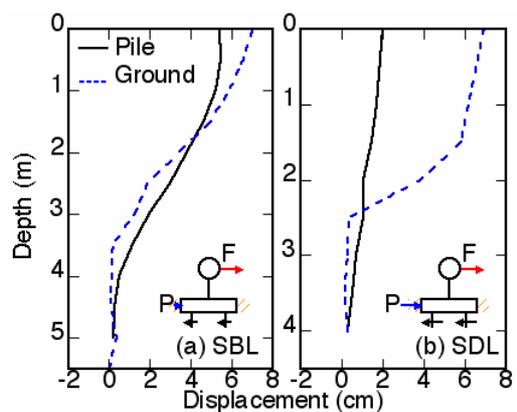


図 18 変位深度分布

確認のため、図 18 に最大杭頭モーメントが発生した時点での地盤変位と杭変位の深度分布を比較して示す。SBL では、地盤変位は杭変位と同程度かやや大きくなる程度で、基礎根入れ部への土圧の影響が相対的に小さくなっている。一方 SDL では、地盤変位が杭変位よりかなり大きくなり、根入れ部土圧が加力側に作用していることが確認できる。以上のことは、基礎に作用する土圧には、地盤と杭の相対変位の大きさが影響を及ぼすことを示唆している。

c) 応答変位法

i) 構造物慣性力と地盤変位の作用の組み合わせ

図 19 は液状化過程の構造物慣性力と地盤変位が杭応力に与える影響を模式的に示したものである。非液状化地盤や液状化前の地盤では、構造物慣性力(杭頭水平力)が主で、地盤変位の影響は小さい(Case I)と考えられる。液状化過程および液状化後の地盤では、構造物慣性力の影響に加え、液状化による地盤変位の増加と p-y 関係への影響(Case 2)を考慮する必要があり、さらに側方流動地盤では、大きな地盤変位を考慮する必要がある。既往の研究によれば、液状化地盤での杭頭モーメントの最大値は、Case II、側方流動地盤での杭頭モーメントの最大値は Case II または Case III の状態で生じている。

以上のような杭応力の算定を簡便に行う方法として、応答変位法がある。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<sup>3)-5)</sup>は次式となる。

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

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、 $k_b$  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、振動実験結果に基づいて、図 20 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。

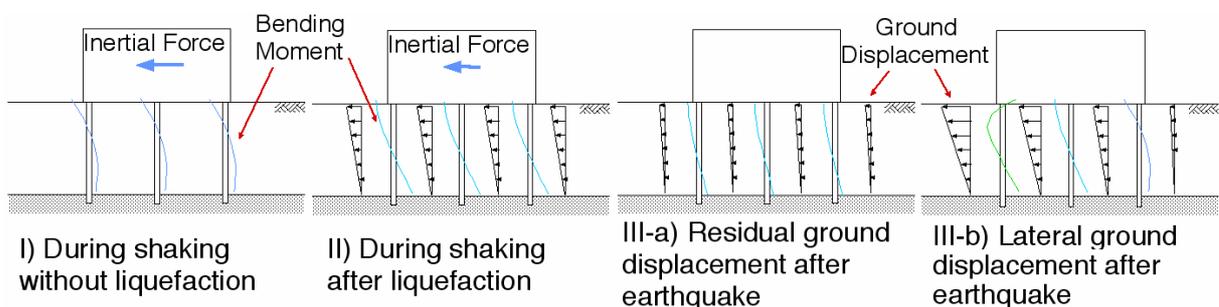


図 19 地震時における地盤と構造物の作用

ii) 基礎根入れ部に働く土圧

地盤と基礎の相対変位によって変化する土圧を推定するため、基礎根入れ部に作用する

土圧を図 12 にしたがって、次式で定義する<sup>6)-8)</sup>。

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

ここで、 $\gamma$  は砂の単位体積重量、 $H$  は基礎壁面高さ、 $B$  は基礎幅、 $K_{Ea}$  主働土圧係数、 $K_{Ep}$  は受働土圧係数を表す。この時の土圧の作用の向きは、地盤変位が基礎変位より小さい時は抵抗側になり、地盤変形が基礎変形より大きい時は加力側となる。土圧係数  $K_{Ea}$ 、 $K_{Ep}$  は張らによる土圧理論<sup>9)-12)</sup>を用いて次式によって定義する。

$$K_{Ea} = \frac{2 \cos^2(\phi - i)}{\cos^2(\phi - i)(1 + R) + \cos i \cos(\delta_{mob} + i)(1 - R) I_{E.1}} \quad (-1 \leq R \leq 1) \quad (3)$$

$$K_{Ep} = 1 + \frac{1}{2} (R - 1) \left[ \frac{\cos^2(\phi - i)}{\cos i \cos(\delta_{mob} + i) I_{E.2}} - 1 \right] \quad (1 \leq R \leq 3) \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} I_{E.1} \\ I_{E.2} \end{pmatrix} = \left[ 1 \pm \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta_{mob}) \sin(\phi - i)}{\cos(\delta_{mob} + i)}} \right]^2 \quad (5)$$

$$R = \max \left[ -1, -1 \left( \frac{|\Delta_r|}{\Delta_a} \right)^{0.5} \right] \quad (6)$$

$$R = \min \left[ 3, 3 \left( \frac{|\Delta_r|}{\Delta_p} \right)^{0.5} \right] \quad (7)$$

$$\delta_{mob} = \frac{1}{2} (1 - R) \delta_a \quad (-1 \leq R \leq 1) \quad (8)$$

$$\delta_{mob} = \frac{1}{2} (R - 1) \delta_p \quad (1 \leq R \leq 3) \quad (9)$$

ここで、 $\phi$  は砂の内部摩擦角を表す。 $i$  は地震合成角で地震加速度と重力加速度の比より算出する。(6)、(7)式の  $R$  はひずみ拘束係数で地盤と基礎の相対変位  $\Delta_r$ 、主働状態、受働状態となる相対変位  $\Delta_a$ 、 $\Delta_p$  の関数、(8)、(9)式の  $\delta_{mob}$  は基礎壁面の摩擦角で、主働状態、受働状態における基礎壁面の摩擦角  $\delta_a$ 、 $\delta_p$  の関数である。

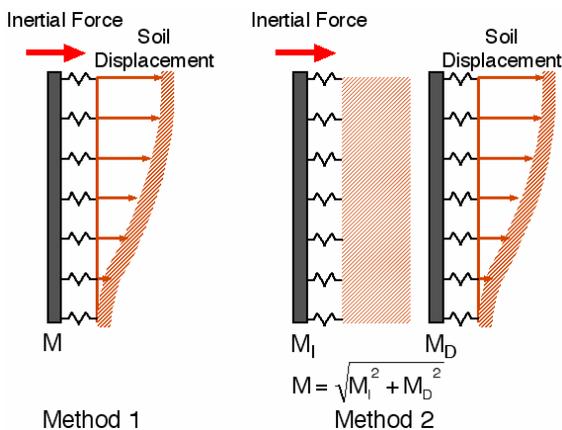


図 20 地盤変位と構造物慣性力の作用の組み合わせ

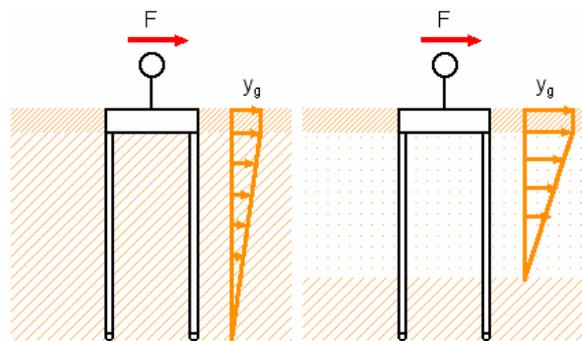


図 21 解析における地盤-杭-構造物モデル

iii) 地盤反力変位関係のモデル化

建築基礎構造設計指針<sup>5)</sup>では、杭の水平地盤反力( $p$ )と杭と地盤の相対変位( $y$ )の関係は、次式で与えられる。

$$p = k_h B_p y_r \quad (10)$$

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<sup>13)14)</sup>。

$$k_h = k_{h1} \frac{2\alpha}{1 + |y_r/y_1|} \quad (11)$$

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

d) 応答変位法による杭応力の推定

図4に示すモデルのうち、DBS、DBL、SBL、SDLの4ケースを検討対象とする。非液状化地盤DBSは $T_b < T_g$ 、DBLは $T_b > T_g$ 、液状化地盤SBL、SDLは液状化後のCase2(図19)に対し、 $T_b < T_g$ である。地盤-杭-構造物系のモデル化にあたっては、図21のようなフレームモデルを考える。表層地盤変位および構造物慣性力は、実験で測定された最大値を用い、地盤変形は非液状化地盤では土槽下端でゼロ、液状化地盤では液状化層下端でゼロとなる三角形分布とする。なお、杭の水平地盤反力はN値を介してコーン貫入抵抗値から推定し<sup>15)</sup>、液状化地盤 $k_{h1}$ の低減率 $\alpha$ は0.1、 $\phi$ は $30^\circ$ 、 $\delta_a$ 、 $\delta_p$ は $15^\circ$ 、 $\Delta_a$ 、 $\Delta_p$ は $H$ の0.5%、5%とする。

図22に、推定杭モーメント深度分布(実線)を実測杭モーメント最大値(○印)と比較して示す。液状化の有無に関わらず推定モーメントは実験結果とよく対応しており、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が示唆される。

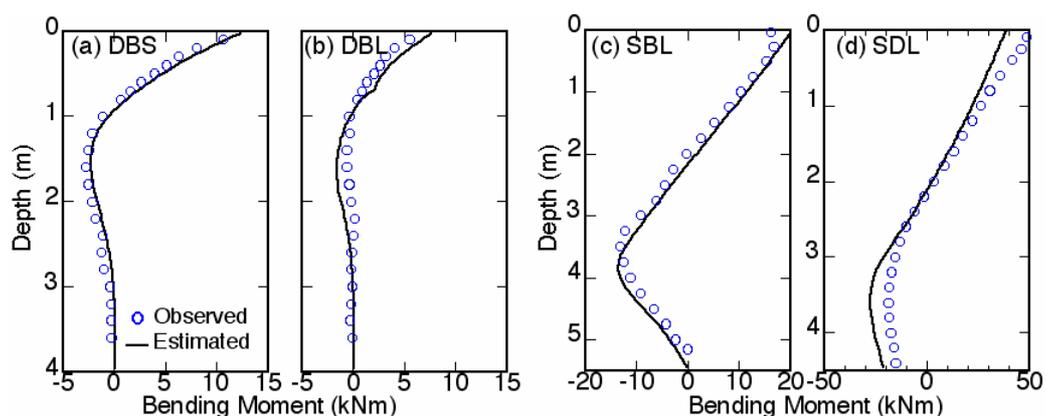


図22 推定および実測杭モーメントの比較

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 液状化地盤における杭の水平地盤反力発生メカニズムの評価

- a) 杭と地盤に相対変形により、杭の両面の地盤に引張り領域と圧縮領域が交互に生じる。相対変位の増大により間隙水圧と土圧は引張り領域の地盤では大きく減少するのに対し、圧縮領域の地盤ではほぼ一定である。これは、引張り領域ではせん断応力による地盤のダイレイタンスーと引張り応力による間隙水圧減少が重なるのに対し、圧縮領域では地盤のダイレイタンスーによる間隙水圧減少が圧縮応力に打ち消されるためである。
- b) 液状化地盤における水平地盤反力は、引張り領域となった側の地盤で間隙水圧が減少し、土圧が低下することによって生じている。この傾向は、地盤密度が高いほど顕著に見られ、地盤反力変位関係が逆S字型になる歪み硬化を示す。
- c) 以上の液状化地盤における地盤反力発生メカニズムは、非液状化地盤で、圧縮領域となった側の地盤で土圧が上昇し地盤反力が発生するメカニズムと異なる。

2) 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響

- a) 杭応力を支配する慣性力と地盤変位は、構造物の固有周期と地盤の固有周期、液状化の有無、基礎剛性などの影響を受けて、その寄与度が異なる。
- b) 構造物固有周期が地盤の固有周期より短い場合は地盤変位と慣性力が同位相のため、両者が同時に大きくなるときに、杭頭モーメントの最大値が発生しやすいのに対し、構造物固有周期が地盤の固有周期より長い場合は、両者が同位相でないため、地盤変位と慣性力の両方が同時に大きくない条件で、杭頭モーメントの最大値が発生する傾向がある。
- c) 基礎根入れ部に作用する土圧は、非液状化地盤では構造物慣性力に対して抵抗側に作用する傾向があるのに対し、液状化地盤では地盤が大きく変形することによって構造物慣性力に対して加力側に作用する。この加力側に作用する土圧の増大は、地盤に対する抵抗が大きい高剛性杭ほど顕著である。
- d) 基礎根入れ部に働く地震時土圧、液状化地盤における杭の水平地盤反力変位関係を考慮した応答変位法による杭応力算定において、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実験における杭応力を再現できる。
- e) 上記の応答変位法は、土圧が構造物慣性力に対し抵抗側だけでなく加力側に作用する場合においても実験の傾向を再現できる。
- f) 今後は、異なる条件を持つ振動実験を実施し、評価方法の妥当性を検討するとともに、適応範囲を拡張する。また、被害パターンの異なる被害事例調査の解析を行い、評価方法がいずれの事例においても現象を説明できるか検証し、その有効性を確認する。

(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、Vol. 2、pp. 1907-1908、2000.6.
- 2) 文部科学省：大都市大震災軽減化特別プロジェクトII振動台活用による建造物の耐震性向上研究、平成14年度成果報告書、pp. 372-397、2003.5.
- 3) 西村昭彦：地盤変位を考慮した建造物の設計、基礎工、Vol. 6、No. 7、pp. 48-56、1978.
- 4) 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.
- 5) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、pp. 262-296、2001.10.
- 6) 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建造物慣性力の関係、日本建築学会構造系論文報告集、No.559、pp. 129-134、2002. 9.
- 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. 4.
- 8) 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、2003.8.
- 9) 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、10(5)、pp. 1063-1094、1924.
- 10) Okabe. S.: General Theory on Earth Pressure and Seismic Stability of Retaining Wall and Dam、土木学会誌、10(6)、pp. 1277-1323、1924.
- 11) 張建民、社本康広、時松孝次：建造物の地下壁に加わる地震時土圧の評価法、第5回建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.
- 12) 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、1998.6.
- 13) 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、2002.3.
- 14) 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、2002.9.
- 15) 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、1992.8.

## (f) 成果の論文発表・口頭発表等

発表者	題名	発表先	発表年月日
Kohji Tokimatsu	Behavior and design of pile foundations subjected to earthquakes	12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering、Keynote lecture、	2003年 8月
時松孝次 鈴木比呂子 佐藤正義	地盤-杭-構造物系振動実験における基礎根入れ部作用土圧が杭応力に与える影響	日本地震工学会 2003 年度大会、 日吉	2003年 11月
鈴木比呂子 時松孝次	杭周辺地盤の間隙水圧変動が杭の水平地盤反力に与える影響	日本地震工学会 2003 年度大会、 日吉	2003年 11月
時松孝次	地盤-杭-構造物系の大型振動実験に基づく動的相互作用評価	第7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	2003年 12月
Kohji Tokimatsu Hiroko Suzuki Masayoshi Sato	Effects of pre water pressure response around pile on p-y relation during liquefaction	11th ICSDEE & 3rd ICEGE、 Berkeley	2004年 1月
Hiroko Suzuki Kohji Tokimatsu	Influence of inertial and kinematic components on pile response during earthquake	11th ICSDEE & 3rd ICEGE、 Berkeley	2004年 1月
時松孝次 鈴木比呂子 高澤昌義 佐藤正義	大型振動台実験から推定した地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭の軸力変動に与える影響	第39回地盤工学研究発表会、 新潟	2004年 7月 (発表予定)
鈴木比呂子 時松孝次	応答変位法に基づく大型振動実験における杭の軸力および曲げ応力の評価	第39回地盤工学研究発表会、 新潟	2004年 7月 (発表予定)
鈴木比呂子 中辻友希 時松孝次 阿部秋男	液状化・側方流動実験における杭周辺の間隙水圧変動と杭に作用する土圧の関係	第39回地盤工学研究発表会、 新潟	2004年 7月 (発表予定)
Kohji Tokimatsu Hiroko Suzuki Masayoshi Sato	Effects of inertial and kinematic forces on pile stresses in large shaking table tests	13th WCEE、 Vancouver	2004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

### (3) 平成 16 年度業務計画案

(a) 業務計画

E-ディフェンスでの地盤-構造物系実験結果の革新的評価に向けて、振動実験と数値シミュレーションの成果を踏まえつつ、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。

地盤-杭-構造物系の動的相互作用を明らかにすることを目的とし、群杭を用いた液状化地盤の振動実験を実施する。大変形時の群杭基礎の挙動を評価するとともに、過去 1999 年 2003 年に実施した実験と比較し、杭基礎の違いが杭-構造物系の応答に与える影響を検討する。

(b) 実施方法

大型せん断土槽(長さ 12.0mX 幅 3.5mX 高さ 6m)に、杭-構造物系モデルを設置して実験を行う。地盤モデルは、れき層(非液状化地盤)、飽和砂層(液状化地盤)、乾燥砂層の 3 層とする。杭基礎-上部構造物モデルは、鋼材で作製し、杭は群杭とする。実験は、根入れの有無、構造物の有無、入力加速度をパラメータとする。

(c) 目標とする成果

振動実験結果の検討、および過去に実施した実験との比較、及び解析より、以下の項目を明らかにする。

- 杭基礎の違いが杭-構造物系応答に与える影響
- 群杭の杭位置によるモーメント・せん断力深度分布の違い
- 大変形時の群杭基礎の挙動
- 群杭の地盤反力変位関係

さらに、振動実験に基づいて群杭基礎にも有効な簡易手法を開発するとともに、その有効性を確認することで、地盤-杭の大変形挙動時の設計用簡便法確立の可能性を探る。