

3.3.5 遠心振動実験による研究（その2）

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
 - 1) 実験装置
 - 2) 基礎根入れ部に作用する土圧と摩擦力の評価法
 - 3) 杭－基礎部－上部構造物模型
 - 4) 実験ケース
- (c) 業務の成果
 - 1) 乾燥砂地盤、液状化地盤における地盤・構造物の応答と土圧および摩擦力
 - 2) 側方流動地盤における地盤・構造物の応答と土圧および摩擦力
 - 3) 液状化の有無が基礎の根入れ効果に及ぼす影響
 - 4) 液状化層の層厚が基礎の根入れ効果に及ぼす影響
 - 5) 側方流動地盤が基礎の根入れ効果に及ぼす影響
 - 6) E-ディフェンスの実験結果との比較
- (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

遠心振動実験による研究（その2）

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名	メールアドレス
京都大学 防災研究所 地震災害研究 部門 構造物震害研究分野	助教授	田村 修次	tamura@sds.dpri.kyoto- u.ac.jp

(c) 業務の目的

「E-ディフェンスによる大型土槽を用いた杭基礎の破壊メカニズム解明」に関連し、E-ディフェンスを用いた実大実験の実験条件の絞込み、実験結果の補足を目的とする。そのため、遠心載荷装置を用いて地盤－杭－構造物系を対象にしたパラメトリックな実験を行い、最重要な実験パラメータを抽出、E-ディフェンスの実験結果の補足を行う。さらに、遠心載荷実験の結果とE-ディフェンスの実験結果と比較することで、遠心載荷実験の信頼性の検討を行う。

(d) 2か年の年次実施計画

- 1) 平成17年度：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に及ぼす要因として、飽和砂層、表層非液状化層、杭の剛性、群杭条件、杭径、上部構造物の固有周期および慣性力などが考えられる。H17年度は、遠心載荷装置を用いたパラメトリックな実験を行い、杭基礎の破壊に最も影響する要因を明らかにし、E-ディフェンスを用いた実大実験における最重要な実験パラメータを抽出する。
- 2) 平成18年度：液状化地盤および側方流動地盤における杭基礎破壊の1つの要因として、基礎部の根入れ効果がある。H18年度は、地盤条件をパラメーターとして杭－基礎部－上部構造物系の遠心載荷実験を行い、基礎部の主働面・受働面の土圧、側面の摩擦力および構造物慣性力を計測し、それらが杭応力に及ぼす影響を検討する。

(e) 平成18年度業務目的

「水平地盤における杭基礎の破壊メカニズム解明」に関連し、E-ディフェンスを用いた実大実験の実験条件の絞込み、実験結果の補足を目的とする。そのため、遠心載荷装置を用いて地盤－杭－構造物系を対象にしたパラメトリックな実験を行い、最重要な実験パラメータを抽出、E-ディフェンスの実験結果の補足を行う。

(2) 平成18年度の成果

(a) 業務の要約

基礎の根入れ部に加わる土圧と側面摩擦力の評価手法を提案するとともに、乾燥砂地盤、液状化地盤および側方流動地盤において杭-基礎部-上部構造物系の遠心実験を行い、土圧と側面摩擦力の評価を行うとともに、それらが杭応力に及ぼす影響を検討した。

(b) 業務の実施方法

1) 実験装置

a) 遠心载荷装置

実験は、京都大学防災研究所の遠心载荷装置で行った。遠心载荷装置（写真1）の概要を表1に示す。遠心装置の半径は2.5mである。実験は全て40g場で行った。

表1 京大防災研遠心载荷装置 概要(京大防災研 WWW から)

Radius	2.5 m
Max. Centrifugal Acceleration	200g for static test 50g for dynamic test
Motor Capacity	37kW
Dimension of model (L x H x W)	50 x 30 x 15 cm for static test 45 x 20 x 15 cm for dynamic test
Max. Weight of model	120kgf
Experimental Capacity	24g-ton
No of Channels	32 ch

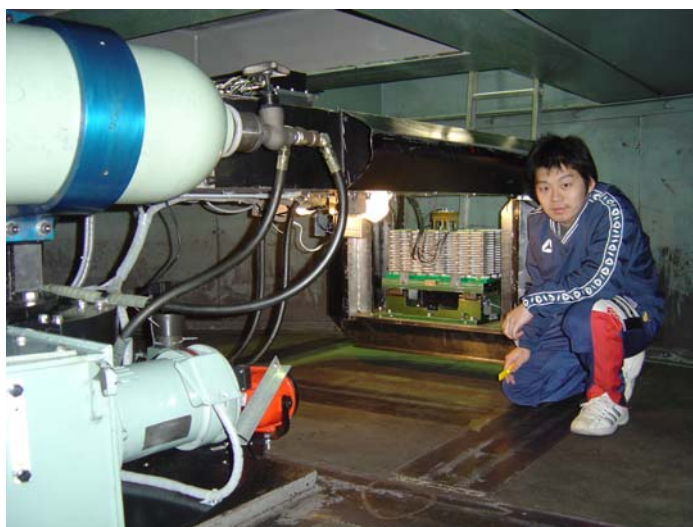


写真1 遠心载荷装置

b) 土槽

実験で用いたせん断土槽は、幅 45cm(加振方向)、奥行 15cm、高さ 20cm(実物スケール：幅 18m、奥行 6m、高さ 8m)である (写真 2)。構造は、ベアリングの付きの層が 17 段積み重ねられたものである。



写真 2 せん断土槽

2) 基礎根入れ部に作用する土圧合力と側面摩擦力の評価法

本研究では、基礎根入れ部に作用する土圧合力と側面摩擦力の評価を行った。その概略を以下に示す。

支持杭を想定し基礎部底面に加わる摩擦を無視できると仮定すると、加振時の杭頭には、図 1 に示すように、上部構造物慣性力 F_1 、基礎部慣性力 F_2 、土圧合力 P_{et} および側面摩擦 P_{sf} が作用する。土圧合力 P_{et} は、主働面土圧 P_{ea} と受働面土圧 P_{ep} の差に相当し、次式で与えられる。

$$P_{et} = P_{ep} - P_{ea} \quad (1)$$

また、杭頭せん断力の和 Q は次式で与えられる。

$$Q = F_1 + F_2 + P_{et} + P_{sf} \quad (2)$$

式(2)より、側面摩擦 P_{sf} は次式で評価できる。

$$P_{sf} = Q - F_1 - F_2 - P_{et} \quad (3)$$

本研究では、 Q は歪ゲージから、 F_1 と F_2 は加速度と質量の積から評価した。 P_{et} は、 P_{ea} と P_{ep} を受圧板に作用する土圧をロードセルで測定することで評価した。以上から式(3)で側面摩擦 P_{sf} を算定できる。

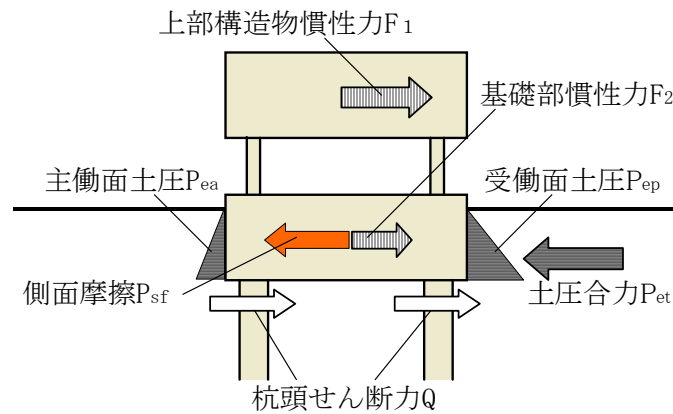


図1 杭頭に作用する力

3) 杭－基礎部－上部構造物模型

図2に、杭－基礎部－上部構造物模型の断面図および平面図、表1に実スケールおよび模型スケールにおける諸元を示す。基礎部内には土圧合力を直接計測するために、超小型ロードセル(東京測器製)を主働面と受働面に取り付け、受圧板を3点で支持した。基礎部周面には、#800の紙やすりを取り付けている。基礎固定時の上部構造物の固有振動数は100Hz程度である

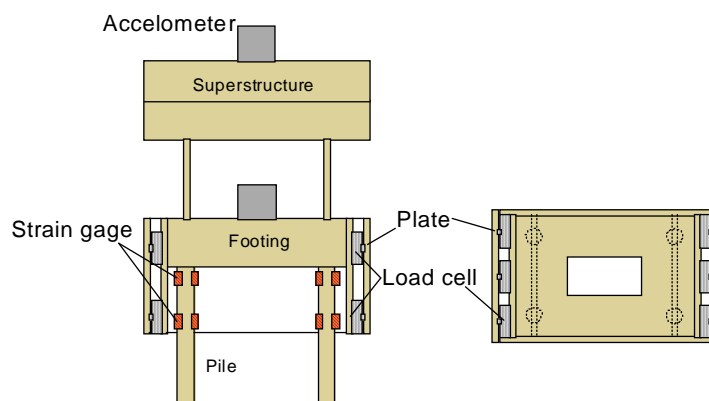


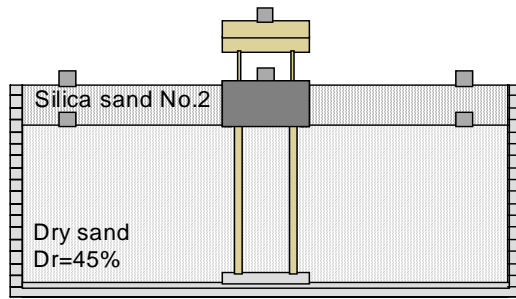
図2 杭－基礎部－上部構造物模型の断面図および平面図

表1 杭－基礎部－上部構造物模型の緒元

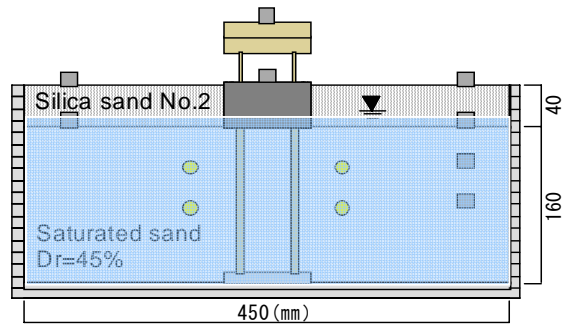
		Unit	Prototype	Model
Pile	Diameter	m	0.24	0.006
	$E \cdot I$	$M N m^2$	30.72	1.20×10^{-5}
Footing	Mass	kg	45,760	0.715
	Length (L × B × H)	m	3.20 × 2.00 × 1.72	0.080 × 0.050 × 0.043
Structure	Mass	kg	66,240	1.035
	Natural frequency	Hz	2.5	100

4) 実験ケース

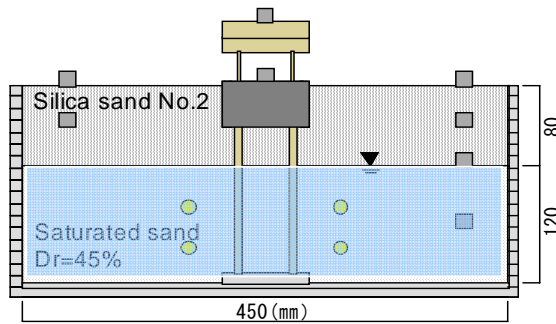
本研究における実験ケースを図3に示す。地盤は、表層乾燥砂はケイ砂2号、下層（飽和砂層）はアルバニー#48珪砂を用いた。入力波は、人工地震の臨海波の振幅を4.2mmに調整したものである。以降、実験結果は、全て実大スケールに換算して示す。



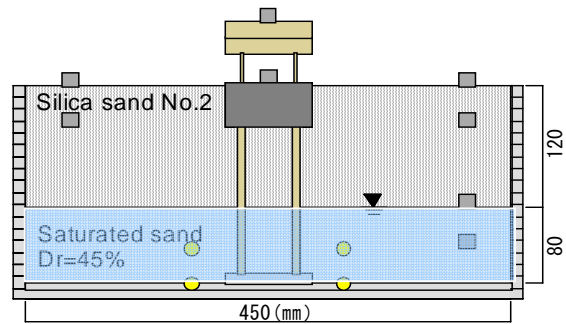
(a) Case 1 乾燥砂地盤
表層乾燥砂層4cm + 乾燥砂層16cm



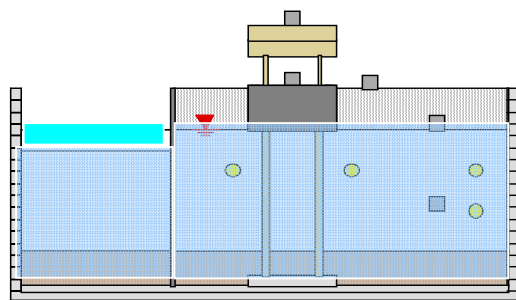
(b) Case 2 液状化地盤
表層乾燥砂層3cm + 飽和砂層17cm



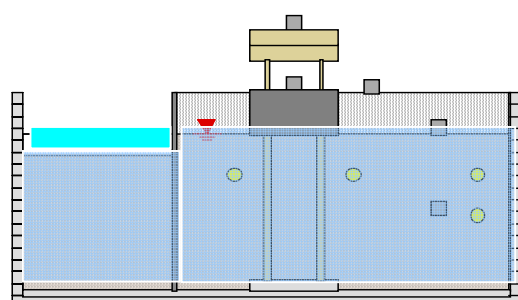
(c) Case 3 液状化地盤
表層乾燥砂層8cm + 飽和砂層12cm



(d) Case 4 液状化地盤
表層乾燥砂層12cm + 飽和砂層8cm



(e) Case 5 側方流動地盤
表層乾燥砂層4cm + 飽和砂層(Dr45%)12cm
+ 飽和砂層(Dr95%)4cm



(f) Case 6 側方流動地盤
表層乾燥砂層4cm + 飽和砂層(Dr75%)16cm
+ 飽和砂層(Dr95%)4cm

図3 実験ケース

(c) 業務の成果

1) 乾燥砂地盤、液状化地盤における地盤・構造物の応答と土圧および摩擦力

Case 1～4における入力加速度、地表面加速度、フーチング加速度、上部構造物加速度、地表面変位、基礎部変位および地表面と基礎部の相対変位の時刻歴、さらに土圧合力と側面摩擦力の時刻歴を図4～11に示す。入力波はケースによらず、概ね200gal程度である。地表面加速度は、Case 1で最も振幅が大きく、液状化したCase 2～4では長周期化し、振幅も比較的小さい。上部構造物および基礎部の加速度応答もCase 1で最も振幅が大きい。また、上部構造物および基礎部の加速度応答は、液状化層厚が最も厚いCase 2では短周期成分が卓越し、液状化層厚が薄いCase 4で長周期成分が卓越している。Case 2では、基礎部と地表面で加速度波形が大きく異なることから、Case 2では土槽底面から杭基礎を介して地震動が基礎部に入力したと考えられる。それに対し、Case 4では、基礎部と地表面で加速度波形が概ね同じである。地表面と基礎部の相対変位は、地盤条件によって大きく異なる。Case 1（乾燥砂地盤）の相対変位が最も小さく、Case 2（液状化層厚：大）の相対変位が最も大きい。液状化層厚が薄くなるにしたがって、相対変位が小さくなり、Case 4（液状化層厚：小）の相対変位は、Case 1と同程度になる。それに対し上部構造物の加速度は、Case 1（乾燥砂地盤）で最も大きく、液状化層厚が大きいほど、小さくなる傾向を示す。

土圧合力は、Case 1（乾燥砂地盤）では、Case 2-4に比べて短周期成分が卓越している。Case 1の土圧合力の波形は、構造物慣性力のそれと似ている。一方、Case 2-4の土圧合力の波形は、構造物慣性力の波形と大きく異なり、地盤変位のそれと比較的似ている。これから、Case 1では、構造物慣性力の反力として土圧が発生しているのに対し、Case 2-4では、地盤変位が主体となって土圧を発生させていると思われる。側面摩擦力の波形は、いずれのケースも土圧合力の波形と類似している。したがって、側面摩擦力の発生メカニズムは、土圧合力のそれと同様と思われる。なお、側面摩擦力の振幅は、土圧合力よりやや小さい。

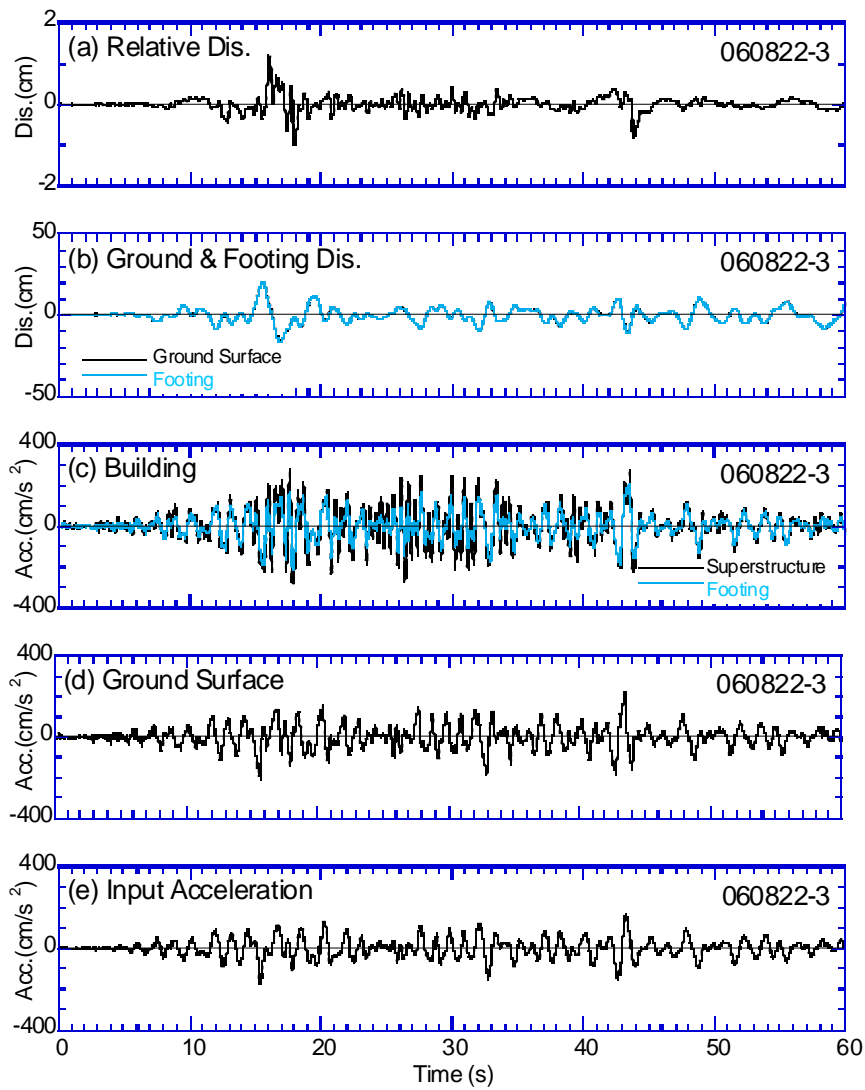


図4 Case 1における加速度および変位の時刻歴

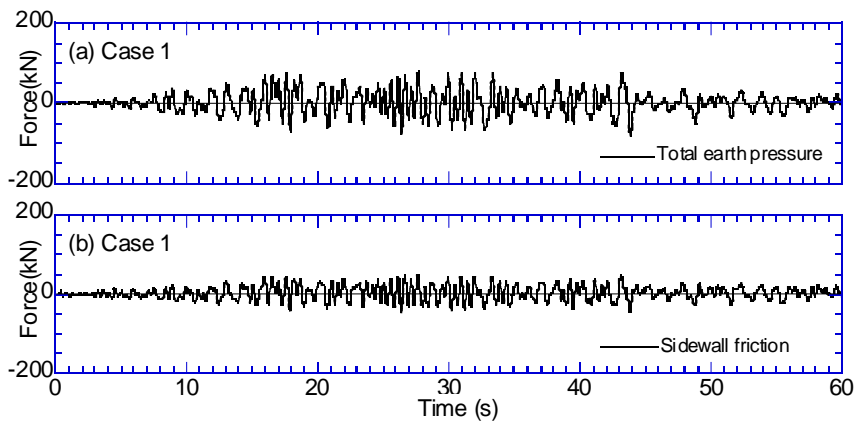


図5 Case 1における土圧合力および側面摩擦力の時刻歴

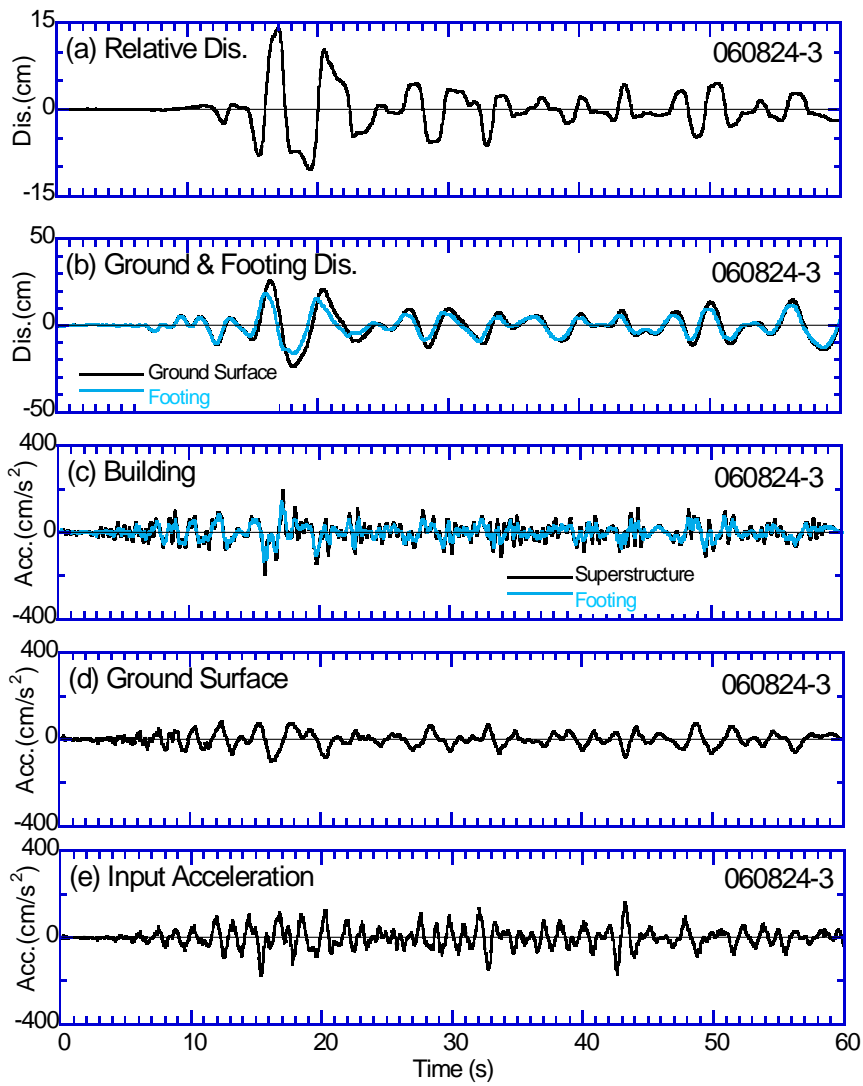


図6 Case 2における加速度および変位の時刻歴

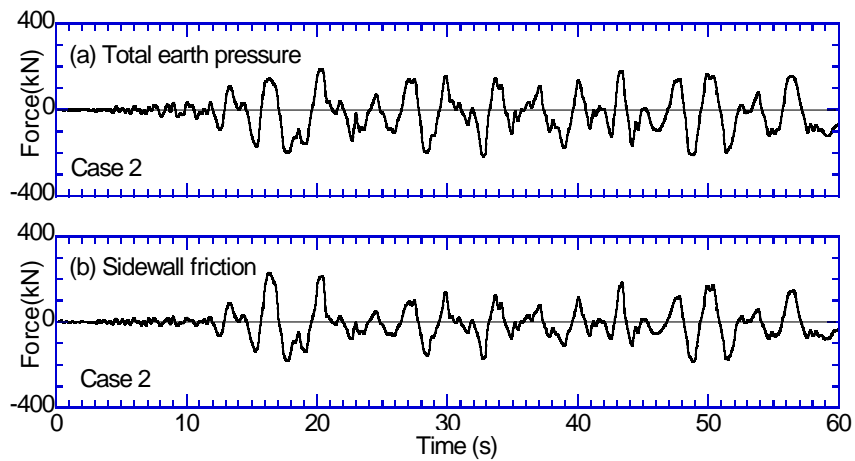


図7 Case 2における土圧合力および側面摩擦力の時刻歴

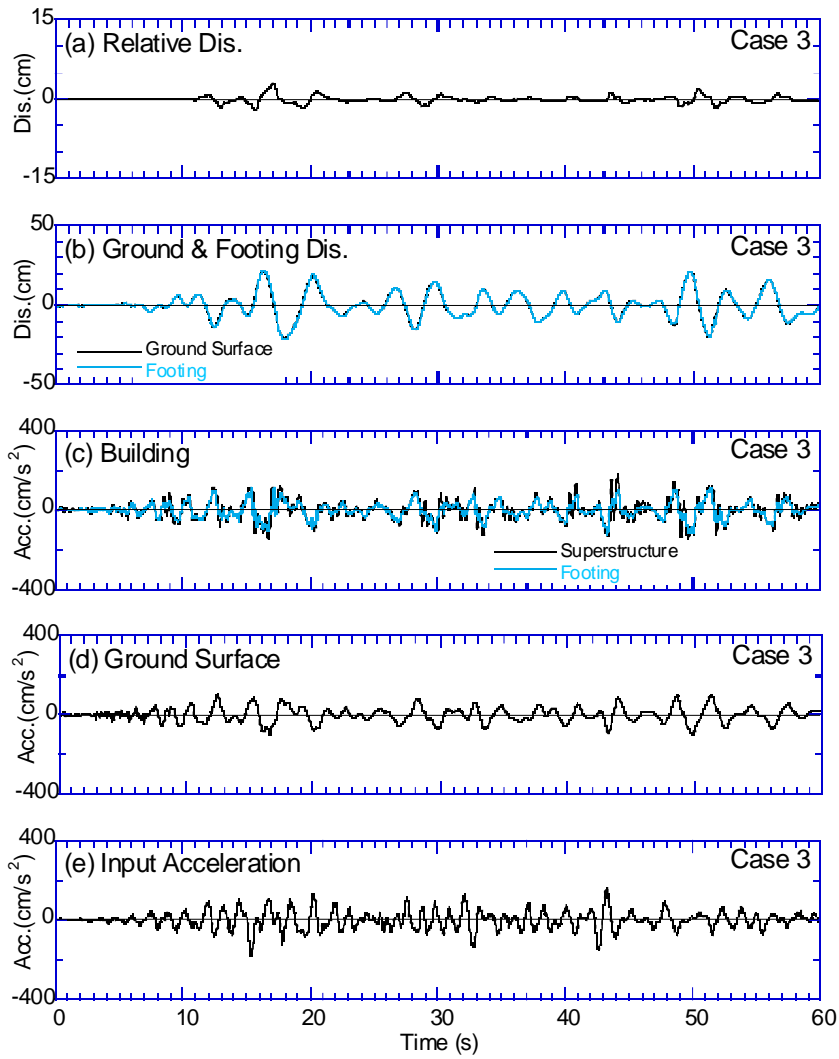


図 8 Case 3 における加速度および変位の時刻歴

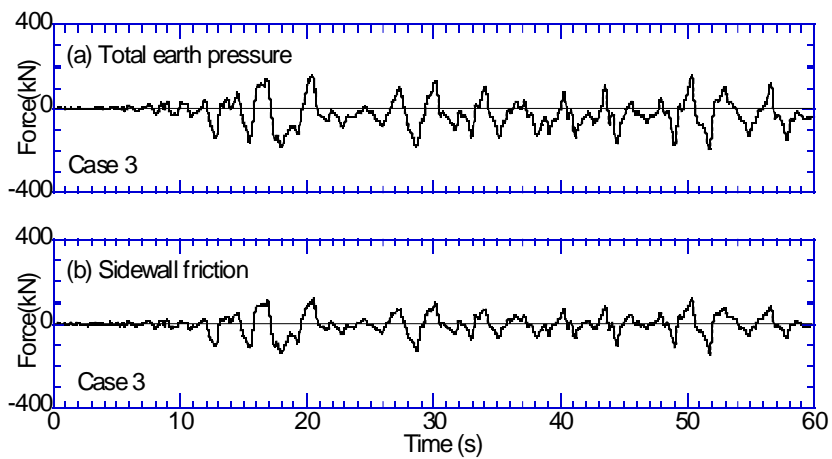


図 9 Case 3 における土圧合力および側面摩擦力の時刻歴

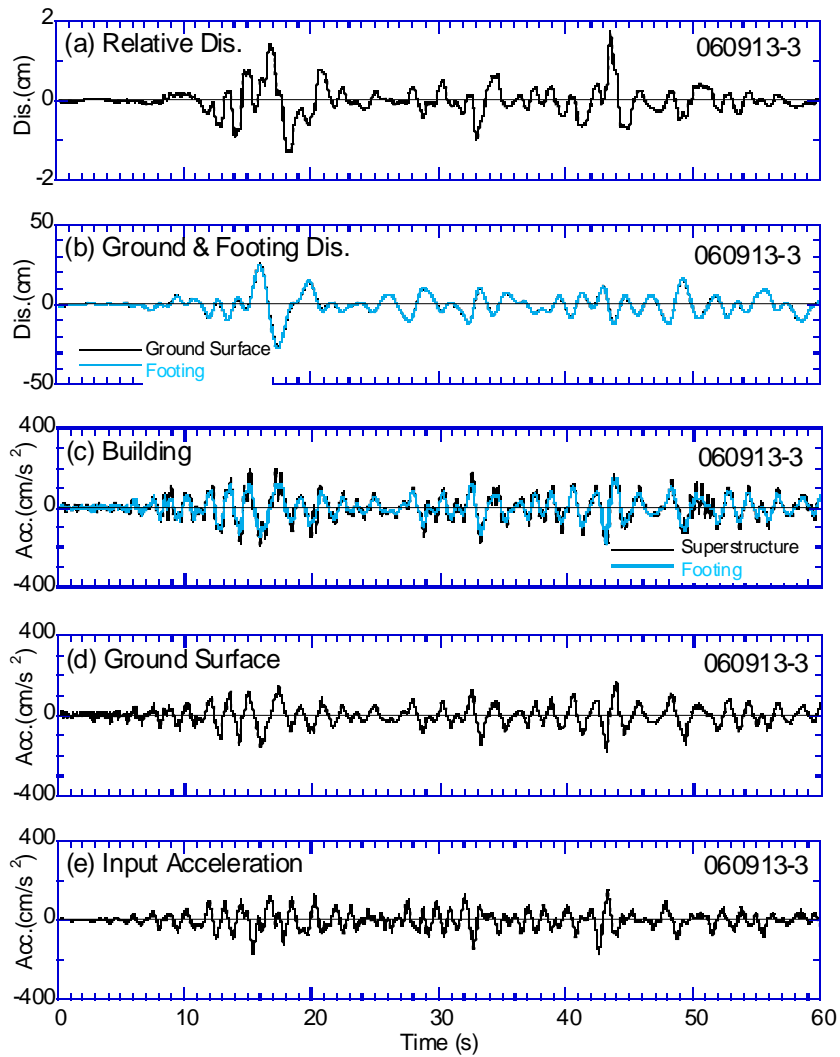


図 1 0 Case 4 における加速度および変位の時刻歴

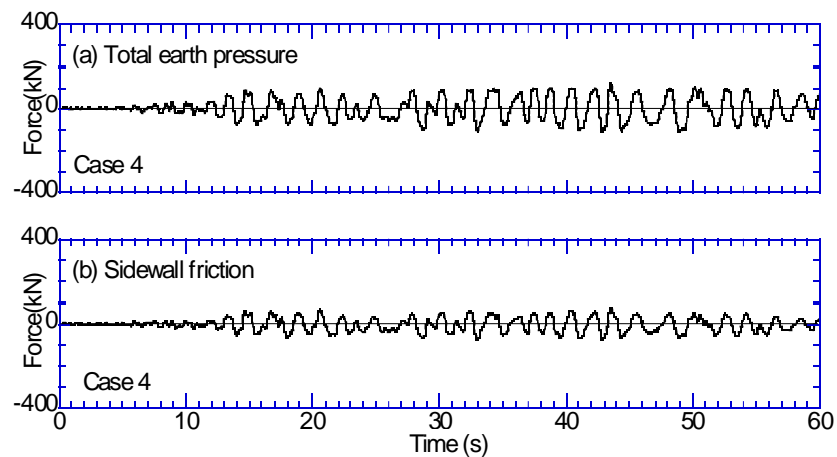


図 1 1 Case 4 における土圧合力および側面摩擦力の時刻歴

2) 側方流動地盤における地盤・構造物の応答と土圧および摩擦力

写真3に、Case 5における加振前、加振後の様子を示す。Case 5～6における入力加速度、地表面加速度、フーチング加速度、上部構造物加速度、地表面変位、基礎部変位、矢板変位および土圧合力と側面摩擦力の時刻歴を図12～15に示す。地表面変位、基礎部変位、矢板変位は、レーザー変位計で計測した。地表面変位は、基礎部山側付近の変位である。矢板は大きく変位し、加振中にレーザー変位計の測定範囲を超えた。地表面変位・基礎部変位は、海側にシフトしていく。

土圧合力は側方流動の進行とともに、シフトしていく。土圧合力の波形は地盤変位のそれと比較的似ている。地盤変位が主体となって土圧を発生させていると思われる。側面摩擦力も同様の傾向を示す。Case 5の土圧合力の振幅は、Case 6のそれより大きい。これは、Case 5の地盤が緩いため、地盤変位が大きくなったためと思われる。

側方流動時の地盤と基礎部の相対変位は、Case 2-4の水平成層液状化地盤のそれに比べて大きいと思われる。一方、側方流動時の土圧合力は、Case 2-4の水平成層液状化地盤のそれに比べて小さい。この原因として、側方流動地盤では基礎部周辺地盤の沈下が大きく、基礎の根入れ深さが減少したことが考えられる。

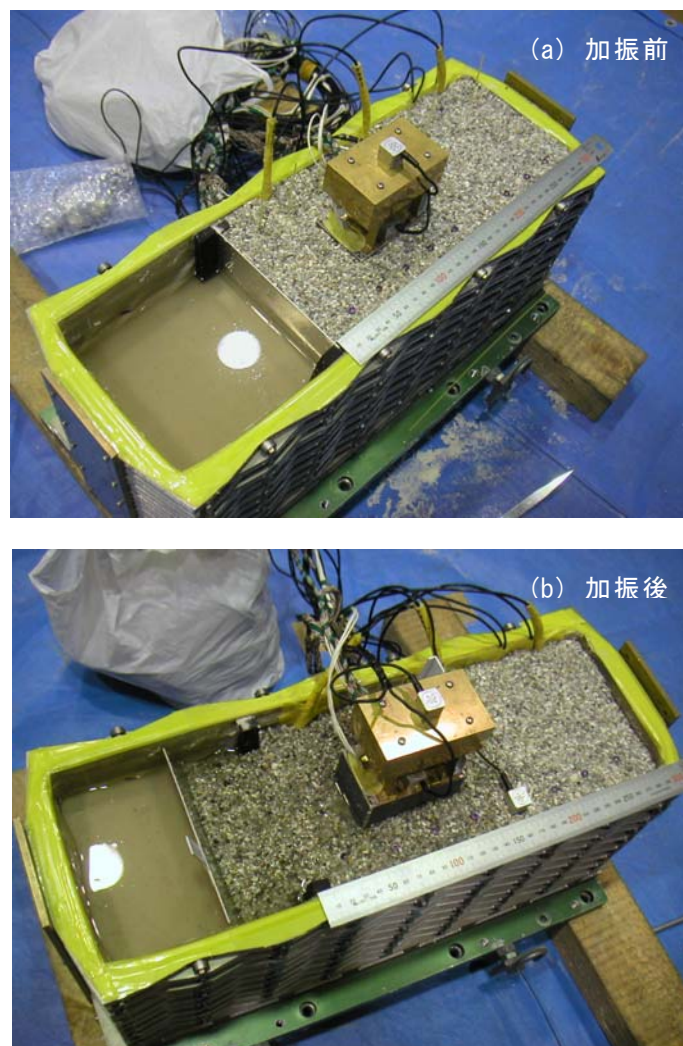


写真3 側方流動実験における加振前および加振後 (Case 5)

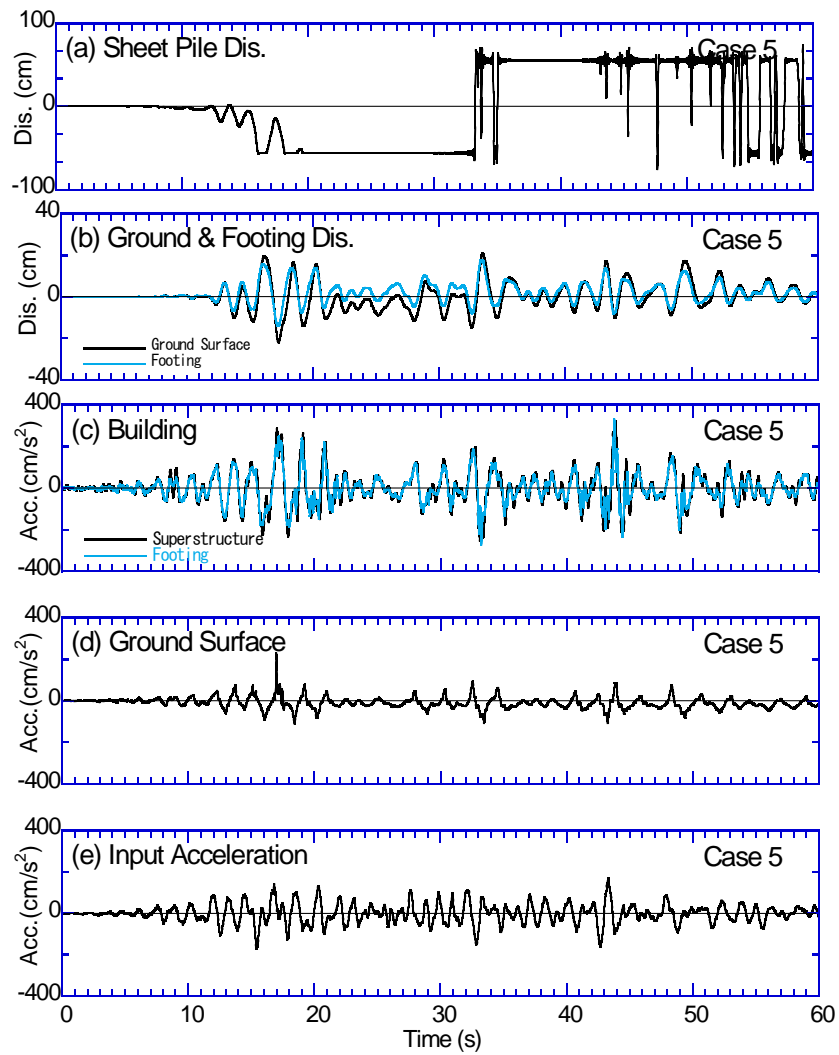


図 1 2 Case 5 における加速度および変位の時刻歴

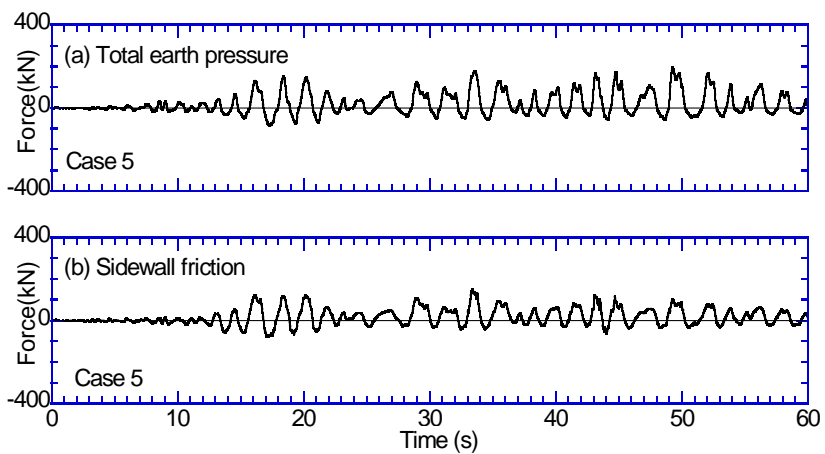


図 1 3 Case 5 における土圧合力および側面摩擦力の時刻歴

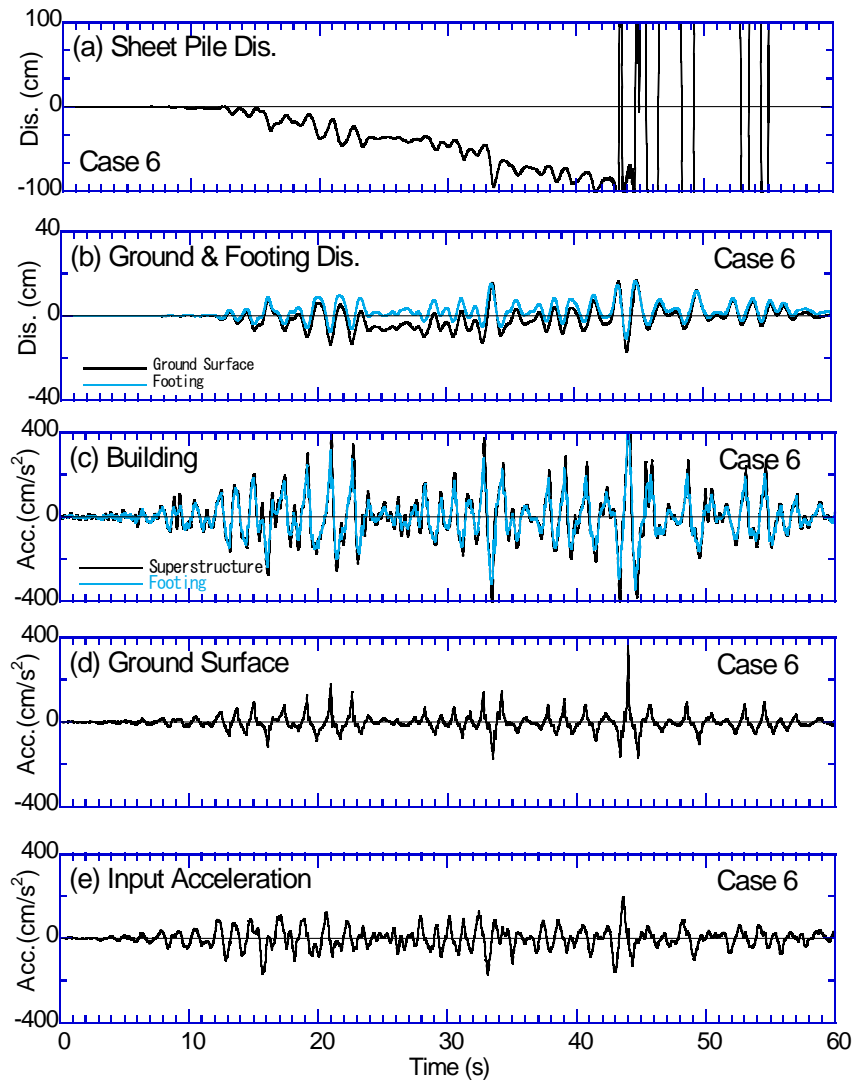


図 1 4 Case 6 における加速度および変位の時刻歴

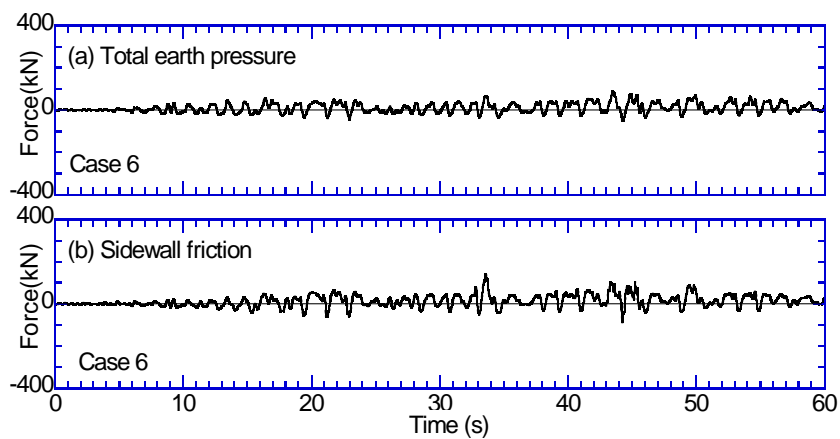


図 1 5 Case 6 における土圧合力および側面摩擦力の時刻歴

3) 液状化の有無が基礎の根入れ効果に及ぼす影響

液状化の有無が基礎の根入れ効果に及ぼす影響を検討するため、Case 1（乾燥砂地盤）とCase 2（液状化地盤）における構造物慣性力（上部構造物慣性力+基礎部慣性力）、土圧・摩擦合力および杭頭せん断力を図16に示す。乾燥砂地盤の場合、土圧摩擦合力は構造物慣性力と逆位相であり、その振幅は構造物慣性力よりもやや小さい。すなわち、土圧摩擦合力は構造物慣性力の反力として発生している。土圧摩擦合力が構造物慣性力のある程度負担するため、杭頭せん断力は構造物慣性力よりも小さい。

液状化地盤の場合、土圧摩擦合力の振幅は構造物慣性力の数倍程度大きい。そのため、杭頭せん断力は土圧摩擦合力に依存する。さらに土圧摩擦合力のピークでは、土圧摩擦合力と構造物慣性力と概ね位相である。このため、杭頭せん断力は土圧摩擦合力より、さらに大きくなる。そのため、液状化地盤における杭頭せん断力は、乾燥砂地盤のそれよりも2倍以上大きくなる。

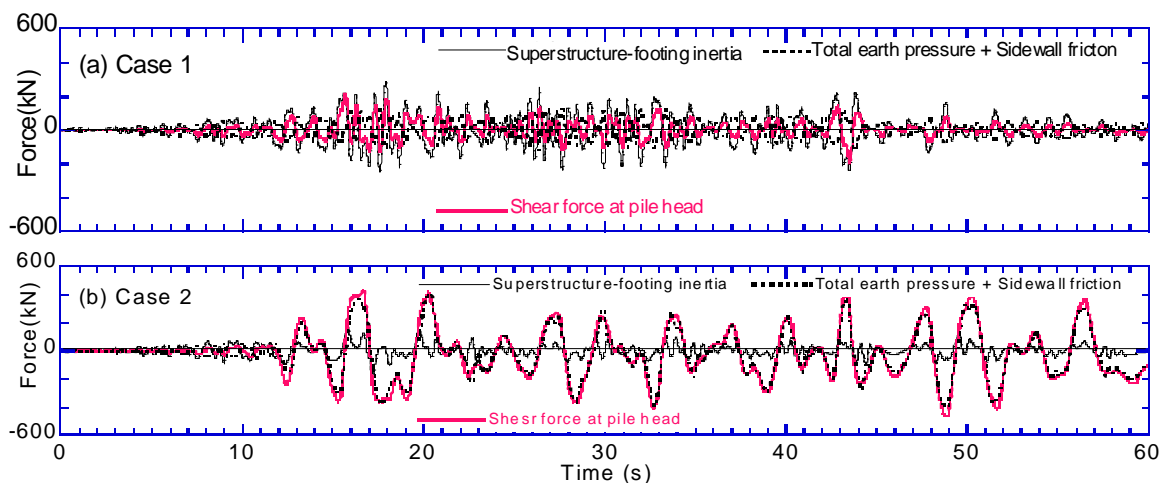


図16 Case 1, 2における構造物慣性力、土圧・摩擦合力および杭頭せん断力時刻歴

4) 液状化層の層厚が基礎の根入れ効果に及ぼす影響

液状化層の層厚が基礎の根入れ効果に及ぼす影響を検討するため、Case 2（液状化層厚：大）と Case 3（液状化層厚：中）と Case 4（液状化層厚：小）における構造物慣性力、土圧・摩擦力合力および杭頭せん断力を図 1 7 に示す。Case 3 では、Case 2 と同様に土圧摩擦合力の振幅は構造物慣性力の 2 倍程度大きい。土圧摩擦合力のピークでは、土圧摩擦合力と構造物慣性力と概ね位相である。このため、杭頭せん断力は土圧摩擦合力よりも大きくなる。土圧摩擦合力の振幅は、Case 2 よりもやや小さい。そのため、杭頭せん断力も Case 2 よりも小さくなっている。

Case 4 では、Case 2 や Case 3 と大きく異なり、土圧摩擦合力は構造物慣性力と概ね逆位相である。土圧摩擦合力が構造物慣性力のある程度負担するため、杭頭せん断力は構造物慣性力よりも小さい。そのため、Case 4 の杭頭せん断力は、Case 2 や Case 3 よりも小さくなっている。以上から、基礎の根入れが杭頭せん断力に及ぼす影響は、液状化層厚に依存することが分かった。液状化層厚が厚い場合、基礎の根入れは杭にとって危険側になるが、液状化層厚が薄い場合、基礎の根入れが杭にとって安全側に作用していることが分かった。

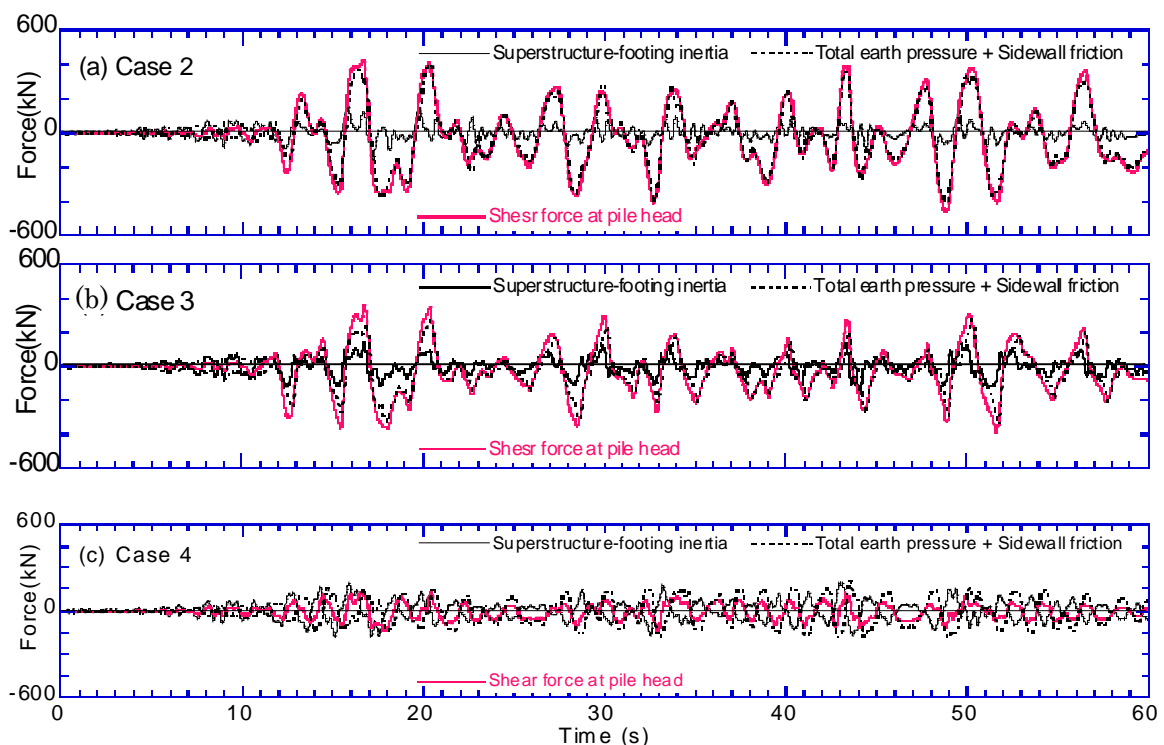


図 1 7 Case 2-4 における構造物慣性力、土圧・摩擦力合力および杭頭せん断力時刻歴

5) 側方流動地盤が基礎の根入れ効果に及ぼす影響

側方流動地盤が基礎の根入れ効果に及ぼす影響を検討するため Case 5（側方流動地盤：Dr45%）と Case 6（側方流動地盤：Dr75%）における構造物慣性力、土圧・摩擦力合力および杭頭せん断力を、Case 2（水平成層地盤、液状化層厚：小）のそれらとともに図 18 に示す。

Case 5、Case 6 とともに、加振開始後 20 秒付近から、土圧摩擦合力がシフトしていく傾向を示す。そのため、杭頭せん断力もシフトしていく。Case 5 の土圧摩擦合力の振幅は Case 6 のそれより大きい。これは、Case 6 の相対密度が高いため、側方流動の変位量小さかったためと考えられる。一方、Case 5 の構造物慣性力の振幅は Case 6 のそれより小さい。

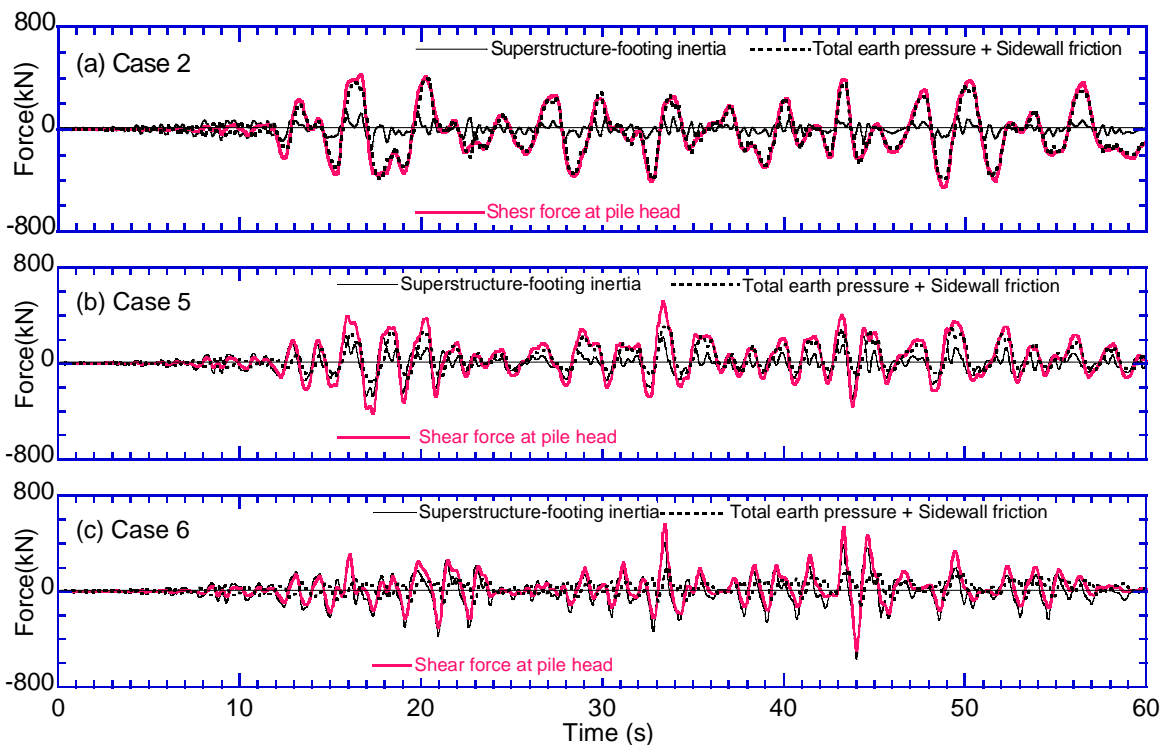


図 18 Case 2, 5, 6 における構造物慣性力、土圧・摩擦力合力および杭頭せん断力時刻歴

6) E-ディフェンスの実験結果との比較

平成 17 年度に E-ディフェンスで行った乾燥砂を用いた短周期建物の実験結果によると、基礎の根入れがあると、杭頭曲げモーメントが減少することが報告されている（平成 17 年度大都市大震災軽減化特別プロジェクト成果報告書）。これは、本研究の Case 1 で基礎の根入れ効果によって、杭頭せん断力が減少していることと対応している。また、同報告書によると、側方流動実験で計測された基礎部の全土圧の時刻歴は、静的な土圧上昇成分と短周期の振動成分の和であり、本研究における土圧合力時刻歴の形状と一致する。これから、遠心載荷実験で実スケールの挙動をある程度再現していると思われる。ただし、E-ディフェンス実験では杭が破壊しているのに対し、遠心実験では杭は破壊していない。こ

これは、遠心載荷装置における振動台が、E-ディフェンスに比べて加振能力が低いことによると思われる。

遠心載荷装置における振動台の加振能力は、アームやプラットフォームにも依存し、高い周波数まで大加速度・大速度で精度良く加振するのは容易ではない。一方、近年の大地震では、極めて大きな加速度、速度が観測されており、また、南海・東南海地震などのプレート型地震では、さらに長周期地震動が予想されている。そのような状況を考えると、大加速度、大速度、長周期地震動が再現できる遠心載荷装置が望まれる。

(d) 結論ならびに今後の課題

H18年度は、乾燥砂地盤、液状化地盤および側方流動地盤において杭—基礎部—上部構造物系の遠心実験を行い、土圧と側面摩擦力の評価を行うとともに、それらが杭応力に及ぼす影響を検討した。その結果、地盤条件によって、土圧や側面摩擦力の発生メカニズム、杭頭せん断力における構造物慣性力、土圧合力、側面摩擦力の寄与が異なることが分かった。今後、基礎の根入れ効果を設計に反映させるためには、さらなる実験データの蓄積とともに、詳細な解析および簡易解析による検討が必要と思われる。また、E-ディフェンスの実験データの分析が進み公表されれば、それと遠心実験結果と比較することで、遠心載荷装置の信頼性が高められると思われる。

(e) 引用文献

文部科学省、防災科学技術研究所：平成17年度大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅡ 震動台活用による構造物の耐震性向上研究成果報告書

(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
今吉毅 田村修次 坂本忠	遠心実験における基礎部の根入れが杭応力に与える影響—乾燥砂実験と飽和砂実験の比較—	第12回日本地震工学シンポジウム論文集	2006年11月
Tamura, S., Imayoshi, T. Sakamoto, T.	Effects of seismic earth pressure and sidewall friction on pile stress during soil liquefaction	4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering	2007年7月 (採用決定)
田村修次 今吉毅 坂本忠	砂の相対密度が基礎根入れ部に作用する土圧と側面摩擦力に及ぼす影響	第42回地盤工学研究発表会	2007年7月 (投稿済み)
違口隆明 坂本忠 田村修次 今吉毅	遠心実験に基づく基礎部の根入れが杭応力に与える影響 —その1 液状化層厚による比較—	第42回地盤工学研究発表会	2007年7月 (投稿済み)

今吉毅 違口隆明 田村修次	遠心実験に基づく基礎部の根入れが杭応力に与える影響 —その2 水平飽和砂モデルと側方流動モデルの比較—	第 42 回地盤工学研究発表会	2007 年 7 月 (投稿済み)
田村修次	遠心実験における杭基礎構造物の根入れが杭応力に与える影響と液状化層厚	日本建築学会大会学術講演会	2007 年 8 月 (投稿済み)

(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

