

(e-4)

# 側方流動が杭基礎に及ぼす流動外力特性に 関する実験的研究

○張 至鎬<sup>1</sup>, 樋口 俊一<sup>2</sup>, 栗田 誠<sup>3</sup>, 平尾 淳<sup>3</sup>, 松田 隆<sup>4</sup>, 濱田 政則<sup>5</sup>

<sup>1</sup>工修 早稲田大学大学院 理工学研究科 (〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1)

<sup>2</sup>工修 (株)大林組技術研究所土木耐震構造研究室 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸 4-640)

<sup>3</sup>大学院生 早稲田大学大学院 理工学研究科 (〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1)

<sup>4</sup>工博 (株)大林組技術研究所土木耐震構造研究室 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸 4-640)

<sup>5</sup>工博 早稲田大学大学院 理工学研究科 (〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1)

The present paper describes the characteristics of the external forces from flowing liquefied soil on piles. The authors conducted model tests under centrifuge condition. It was obtained that the viscous force on the piles from the flowing ground was dominant while the model ground was perfectly liquefied and was flowing. On the contrary, the force resulting from ground displacement was dominant while the model ground was not liquefied or partially liquefied.

*Key Words: Shaking table test, Liquefaction, Liquefaction-induced ground displacement, Pile Foundation, Viscous force, Voigt model*

## 1. はじめに

液状化地盤の側方流動は、杭基礎など地下構築物に大きな被害を及ぼして来た。側方流動の影響を考慮した地下構造の耐震設計法を確立するためには、側方流動が基礎構造に及ぼす外力の特性を明らかにすることが重要である。

側方流動地盤が杭基礎に作用する流動外力としては一般的に、地盤変位に依存した外力と流動速度に依存した外力が考えられる。前者の例としては、液状化した地盤を剛性が著しく低下した固体（地盤定数の低減）として捉えた被害事例の数値解析例がある<sup>1)</sup>。また、後者の例としては、液状化した地盤を粘性流体として捉え、地中構築物に作用する外力を抗力として評価した研究例がある<sup>2)</sup>。

本研究では、側方流動地盤から杭基礎に加わる流動外力特性を遠心載荷場における模型実験により明らかにした。流動外力を粘弾性体モデルより評価し、地盤変位と地盤速度が外力に与える影響を明らかにした。また、複数杭を用いた実験により流動方向に対する杭の配置が外力に与える影響を明らかにするとともに、複数の杭が側方流動量に及ぼす影響について検討した。さらに、液状化層上部の非液状化層が杭に及ぼす影響について検討した。これらの一連の実験結果および考察について報告する。

## 2. 遠心場における模型実験

### (1) 実験条件

実験は 30G の遠心載荷場で実施し、長さ 100cm、高さ 37.5cm、奥行き 100cm の剛土槽を用いた。

図-1 に模型地盤、模型杭および各計測器の配置を示す。本実験では、地表面が傾斜した模型地盤を流動方向と直角方向に加振することにより液状化を生じさせ、側方流動を発生させた。地盤の厚さは、模型地盤中心において液状化層で 20cm、非液状化層で 7cm である。地表面勾配は 10% で、地下水位は土槽中央の底面から 20cm である。

模型地盤のうち、相対密度約 40% の緩い地盤の液状化層は珪砂 8 号（比重 2.65、最大間隙比 1.40、最小間隙比 0.71、平均粒径 0.062mm）を用い、相対密度約 80% の非液状化層では珪砂 6 号（比重 2.65、最大間隙比 1.13、最小間隙比 0.74、平均粒径 0.3mm）を用いた。地盤作成はいずれの場合でも空中落下法により作成した後、地表面傾斜は、掃除機より地表面の余分な砂を吸い取ることで作成した。

地盤中には、図-1(a)、(b) に示す位置に加速度計と水圧計を設置し、地表面変位の時刻歴を測定するためにレーザー変位計を 2 箇所を設置した。さらに、高速度カメラにより地表面に設置した標的の画像撮影を行った。

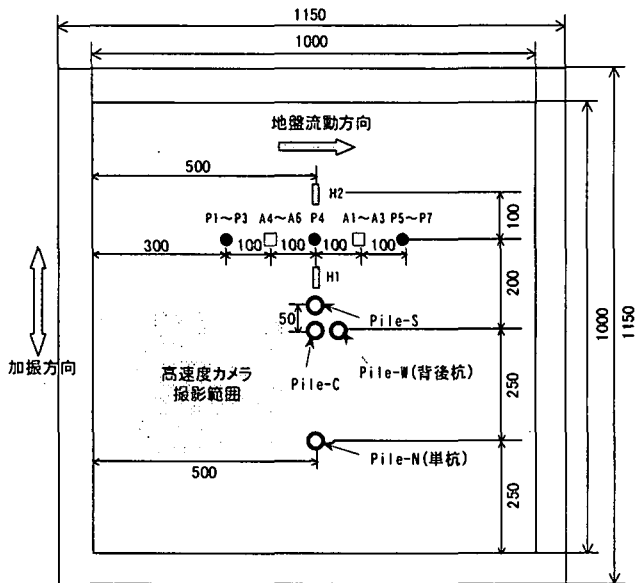
模型杭は、図-1(c) に示すようにステンレス製の中空パイプ（外径 20mm、肉厚 0.5mm）であり、側方流動による

曲げひずみをパイプ内側に設置したひずみゲージより測定した。本実験の目的は、流動地盤中にある杭に作用する外力特性を明らかにすることを目的としており、実物の杭との相似性は特に考慮していない。模型杭は流動外力に対して十分な強度を有しており、弾性範囲で挙動する。流動方向に対する杭の幾何学的な配置が外力に及ぼす影響を明らかにするため、図-1(a)に示すように単杭(Pile-N) および複数杭(Pile-C, S, W)を設置した。複数杭の配置間隔は、 $2.5D$  ( $D$ :杭径)とした。

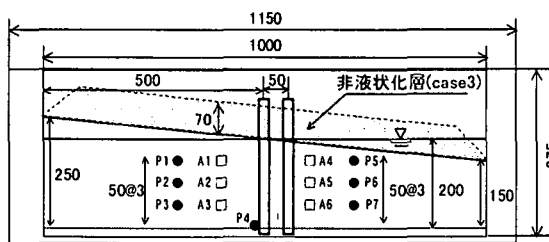
表-1 実験ケースの一覧

	H (cm)	H' (cm)	$D_r$ (%)	入力波形	最大振幅 ( $m/s^2$ )
case1	20	—	約40	60Hz10波	90
case2	20	—	約40	60Hz20波	120
case3	20	7	約40(80)	60Hz30波	150

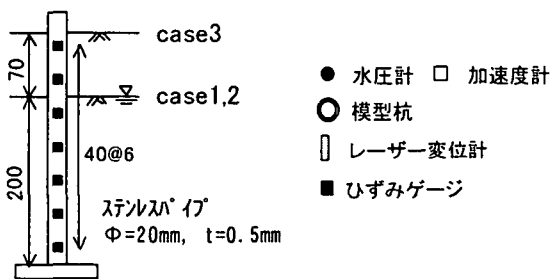
注1) H: 液状化層厚, H': 非液状化層厚,  $D_r$ : 相対密度  
注2) ()の中は非液状化層の相対密度である。



(a) 模型地盤の平面図



(b) 模型地盤の側面図



(c) 模型杭

図-1 模型地盤の計測項目, 計測点, 模型杭

## (2) 実験ケースおよび入力波形

表-1 に示すように、液状化層のみの実験 (case1, case2) および非液状化層がある場合の実験 (case3) の計3ケースを実施した。入力波形は、正弦波で遠心場での振動数、波数および振幅を表-1に示す。

## 3. 実験結果および考察

### (1) 計測値の時刻歴

図-3の(a), (b)に液状化地盤のみの実験 case1, 2での時刻歴応答値を示す。同図には上から、地表面より最も深い位置に設置した水圧計 (P4, 図-1(b)), 単杭 (Pile-N) の基部での曲げモーメント (中の実線は振動成分を Hamming の手法より除去した値を示す), レーザー変位計より計測された地表面流動変位 (H2, 図-1(a)) および H2 の地表面流動変位を微分して求めた流動速度を示している。なお、これらの図では加振開始を0としており、30G場の値である。図-3によれば、いずれの実験ケースにおいても模型地盤は加振開始から0.1秒付近で液状化状態に達している。H2の地表面流動変位は、case1で約3cm, case2では約6cmとなっているが、これらを微分して求めた流動速度の最大値は case1, 2ともに約20cm/sの値を示していることから、概ね同程度の速度で地盤が側方流動したと推測できる。

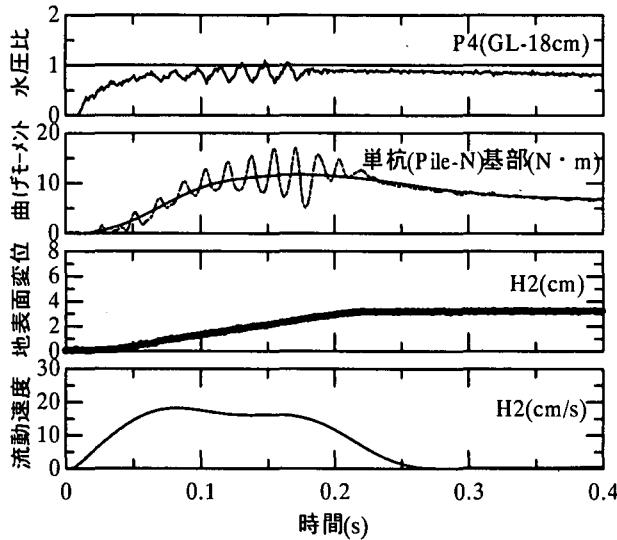
単杭 (Pile-N) 基部の曲げモーメントが最大となる時刻は、加振開始から case1では約0.15秒, case2では約0.1秒付近である。ただし、地表面変位はこの時間帯では最大値に達せず、増大している。

一方、曲げモーメントと流動速度の比較によると、最大値を示す時間および減衰する時間が概ね一致しており、杭に流体的な外力が作用したことを示唆している。

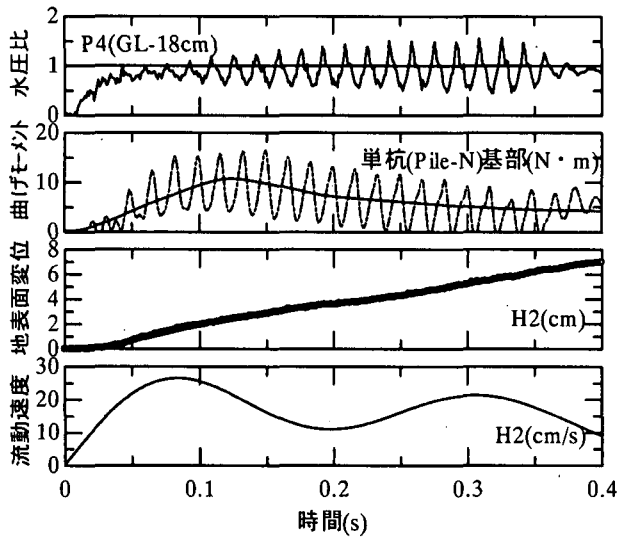
図-4に示した非液状化層の実験 case3の時刻歴応答値は、図-3に示した液状化層のみの実験とは違う傾向を表している。単杭 (Pile-N) 基部での曲げモーメントは、地表面変位の増大とともに大きくなっており、ほぼ相似形になっている。地表面変位を微分して求めた流動速度は、加振開始から0.05~0.1秒付近から減衰し始めているのに対し、この時間帯での曲げモーメントは最大値に達していない。

上記のことを考慮すると、液状化層上部の非液状化層が杭を拘束したまま、地盤が液状化することにより発生した強制変位が杭の変形を生じさせたと考えられる。また、曲げモーメントの最大値を液状化層のみの実験

(case1, 2) と非液状化層の実験 (case3) を比較すると、前者が約  $10\text{N}\cdot\text{m}$  に対して後者が  $50\text{N}\cdot\text{m}$  の値を示していることから、非液状化層から大きい流動外力が杭に作用したと考えられる。



(a) case1



(b) case2

図-3 液状化層のみの実験の時刻歴

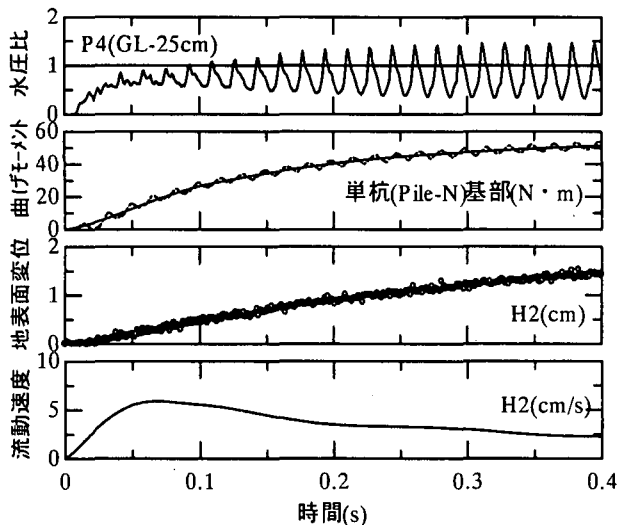


図-4 非液状化層の実験の時刻歴

## (2) 杭の配置が流動外力に及ぼす影響

各実験ケースでの単杭 (Pile-N) および複数杭 (Pile-C, S, W) の最大曲げモーメントの分布を図-5 に示す。

液状化層のみの実験 case1, 2 では、流動方向の下流側に設置された Pile-W の応答値が最も小さく、単杭 (Pile-N) が最も大きい値を示している。また、複数杭で上流側に設置された Pile-C, S はほぼ等しい。これは、液状化状態での杭に及ぼす側方流動外力を流体力と見なせば、単杭と複数杭の配置条件の影響を受けて、杭周辺での地盤流動の度合いは異なることが予想される。すなわち、液状化地盤が杭をすり抜けるとき、杭に作用する流動外力が単杭と複数杭では異なることを示唆している。

一方、図-5 の case3 の非液状化層がある場合の実験結果によれば、流動方向に対する上流側の杭は、概ね同様な曲げモーメントを示しており、液状化層のみの実験とは異なる結果を示している。

非液状化層の変位が杭の変形を生じさせた場合、杭の変形を求める方法としては、地盤変位を地盤ばねを介して入力する方法、すなわち応答変位法が一般的に用いられている。このような観点から、本実験結果での流動方向の上流側に設置された杭に同程度のモーメントが発生したことは、単杭および複数杭に入力された地盤変位が同程度であり、かつ地盤が受動崩壊に達しないまま地盤ばねを介した杭幅分の外力が杭に作用したことによると考えられる。

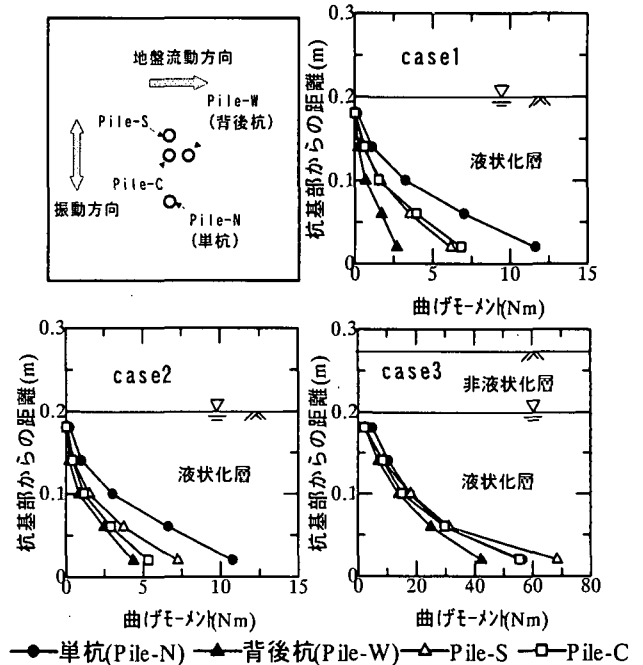


図-5 各実験での曲げモーメント分布

## 4. 杭基礎に作用する側方流動外力の評価

### (1) 側方流動外力の算定

模型実験結果を用いて側方流動が杭基礎に及ぼす流動外力を推定する。流動外力の推定には液状化層のみの実

験 (case1, 2) と非液状化層の実験 (case3) では、性質の異なる材料からの側方流動外力の違いを明確に評価するために異なる分布を用いている。

a) 液状化層の側方流動外力の算定 (case1, 2)

case1, 2 での流動外力の算定方法は図-6 に示すように、流動外力の鉛直分布を1次関数とし、モーメントの計測値 ( $M_2 \sim M_6$ ) から式(1)より、最小二乗法を用いて1次関数の係数を同定する方法を用いた。ここで、流動外力を1次関数としたのは、深さ方向に対する外力分布の大小関係を明確に判断するためである。

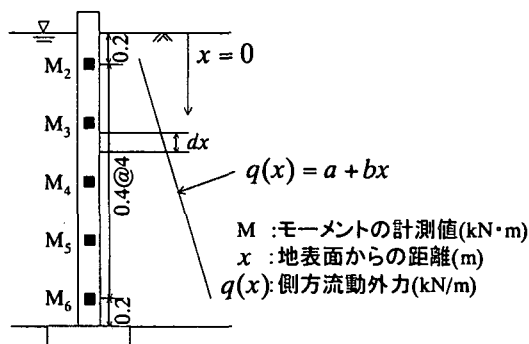
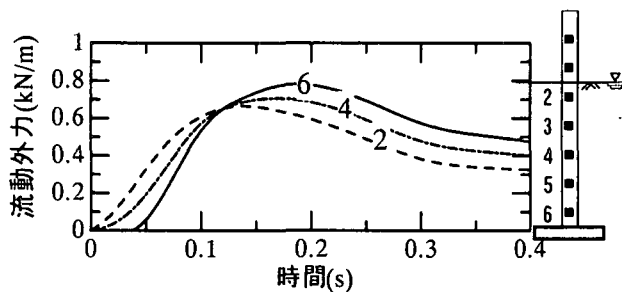


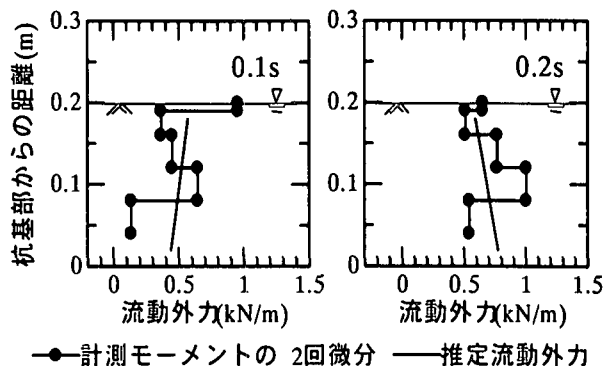
図-6 case1, 2 における側方流動外力の算定モデル

$$\sum_{i=2}^6 \left\{ M_i - \int_0^{x_i} x_i (a + bx) dx \right\}^2 = E, \frac{\partial E}{\partial a} = 0, \frac{\partial E}{\partial b} = 0 \quad (1)$$

図-6 の方法を用いて推定した case1 での流動外力の時刻歴を図-7(a) に示す。また、特定時刻での推定した流動外力の鉛直分布と計測モーメントを距離で2回微分して求めた流動外力の鉛直分布を図-7(b) に示す。加振開始から0.1秒付近までの流動外力は、地表面で大きく、深くなると小さくなっているのに対して、それ以降の時間では、深い位置で大きくなっている。0.1秒付近までの時間では、液状化地盤の流動外力を流体力と見なせば、地表面に近いほど流動速度が大きいので杭に作用する流動外力は大きくなると考えられる。一方0.1秒以降の時間では、杭下部の周辺地盤の剛性が回復し、地盤変位に起因する外力が卓越したと推定される。図-8(a), (b) に示した case2 も同様な結果を示している。

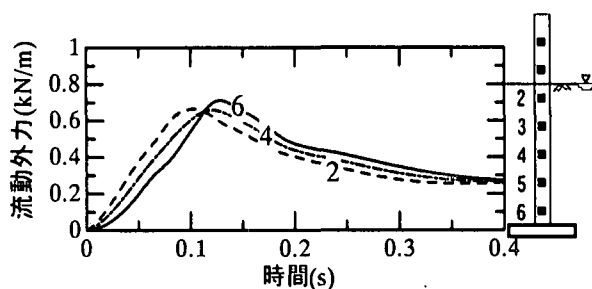


(a) 流動外力の時刻歴

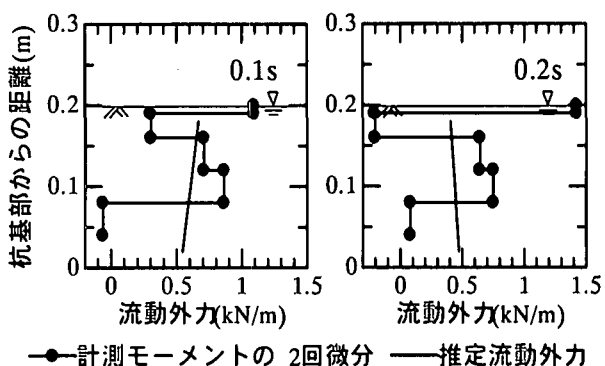


(b) 特定時刻での流動外力の鉛直分布

図-7 case1 の流動外力の時刻歴と鉛直分布



(a) 流動外力の時刻歴



(b) 特定時刻での流動外力の鉛直分布

図-8 case2 の流動外力の時刻歴と鉛直分布

b) case3 の流動外力の算定 (非液状化層)

液状化層の上部に非液状化層がある場合は、非液状化層からの外力と液状化層からの外力は異なった特性をもつと考えられる。このため、図-9 に示す方法で流動外力の算定を行った。非液状化層の外力を等分布と仮定し、式(2) に示すように最小二乗法を用いて係数を同定する。

本実験では、非液状化層中の杭のひずみを計測していない。このため、非液状化層中の杭の曲げモーメント分布は、液状化層中で計測された曲げモーメント分布を3次関数で補間し、これを外挿することにより求めた。つぎに、液状化層から杭に及ぼす流動外力の算定では、非液状化層からの外力による曲げモーメントを考慮し、図-6 に示した方法を用いて係数 b, c を同定した。

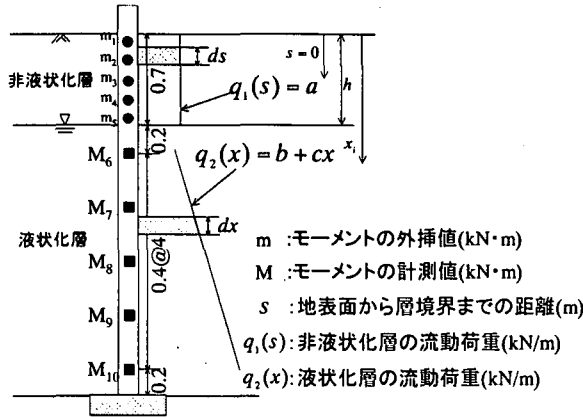


図-9 case3における側方流動外力の算定モデル

$$\sum_{i=1}^5 \left\{ m_i - \int_0^{s_i} s(a) ds \right\}^2 = E, \quad \frac{\partial E}{\partial a} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $m_i$  は外挿した非液化化層のモーメントである。

上記の方法より求めた非液化化層の流動外力と単杭基部でのモーメントの時刻歴を図-10に示す。図-10によれば、非液化化層からの流動外力は、加振開始から増加し続けており、単杭基部での曲げモーメントの時刻歴と相似形となっている。

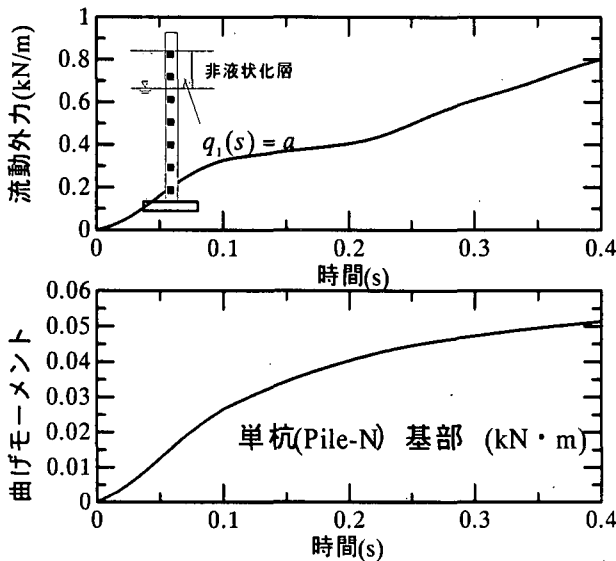


図-10 case3の流動外力の時刻歴

### (2) Voigt モデルを用いた考察

流動地盤より杭に作用する外力としては、地盤変位に起因する外力（以下弾性力という）と地盤速度に起因する外力（以下粘性力という）の双方が考えられる。

弾性力の場合は杭と地盤の相対変位に、粘性力の場合は相対速度に比例する。前述した実験では地盤の変位と速度に比較し、杭の変位と速度が著しく小さいため図-11に示すように杭には地盤変位と速度に比例した外力が作用するものとした。

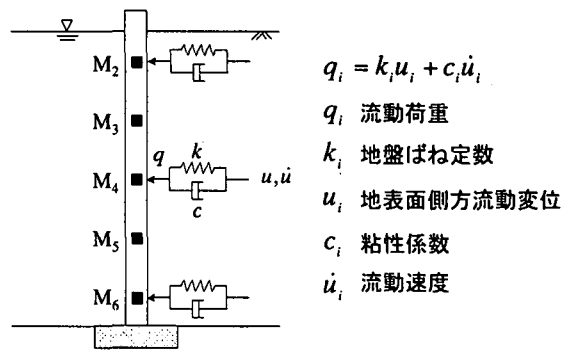


図-11 流動外力の同定モデル

### a) 流動外力の同定方法と位置

流動外力の同定は、式(3)に示すような最小二乗法より求めた。同定する区間を0.02秒間隔とするデータから中心における弾性係数、粘性係数を算定し、それぞれの係数に地盤変位、速度を乗じることで粘性・弾性力を同定する。それ以降の時間では、データを0.001秒ステップずつ移動させながら同定する方法を用いた。

$$\sum \left\{ q_{(t)} - (k_{(t)}u_{(t)} + c_{(t)}\dot{u}_{(t)}) \right\}^2 = E, \quad \frac{\partial E}{\partial k_{(t)}} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial c_{(t)}} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $q$ :流動外力、 $u$ :地盤変位、 $\dot{u}$ :流動速度、 $k$ :ばね定数、 $c$ :粘性係数である。

流動外力を同定する位置としては、図-12に示すように、case1, 2では $M_2, M_4, M_6$ とし、case3では $m_3, m_6, m_8$ としている。このとき、地中部での同定には、地中部での変位および速度のデータが必要となるが、本実験では、既往の研究成果<sup>5)</sup>などを参考に地中の変位、速度の分布は1/4正弦波分布としている。

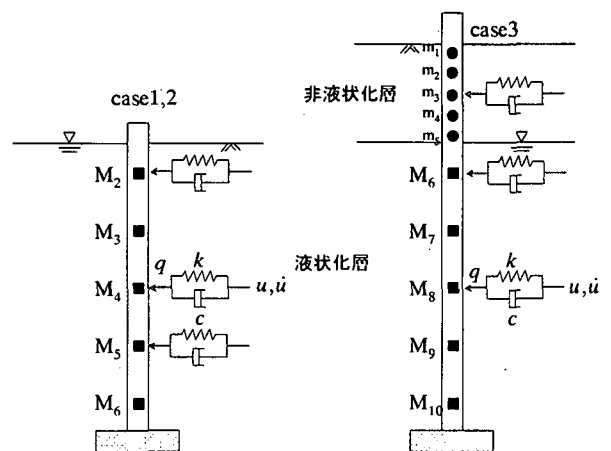


図-12 粘弾性力の同定位置

### b) 流動外力の同定結果

上記の方法より同定した液化化層の実験 (case1, case2) の結果を図-13, 14に示す。図中には、同定を行った位置と同位置で計測された水圧比の時刻歴を併せて

示している。図-13, 14 によれば、液状化に達しない状態では、弾性力が粘性力を上回っており、水圧が有効上載圧に達する液状化状態では、粘性力が弾性力を上回っている。ただし、地表面付近では拘束圧が小さいことから、液状化しやすい影響を受けて、常に粘性力が卓越している。また、同図によれば、粘性力が弾性力を上回る時刻と水圧が有効上載圧に達する時刻は概ね一致しており、地表面の近いほど早くなる結果となった。すなわち、地盤が液状化した状態から杭に作用する流動外力は、地盤変位に比例する弾性力の影響は非常に小さくなり、地盤速度に比例する流体力が支配的であると考えられる。

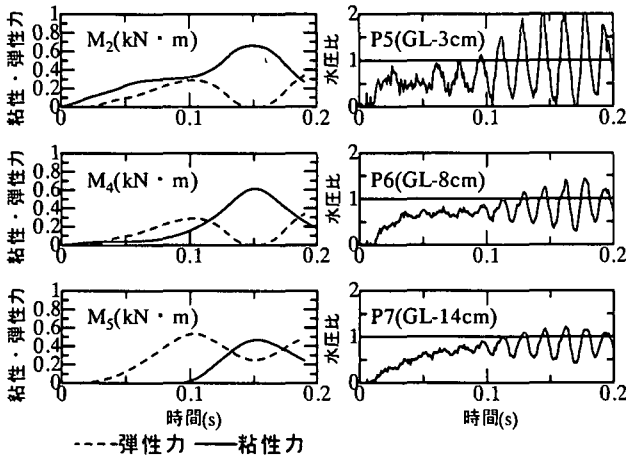


図-13 case1 の同定結果

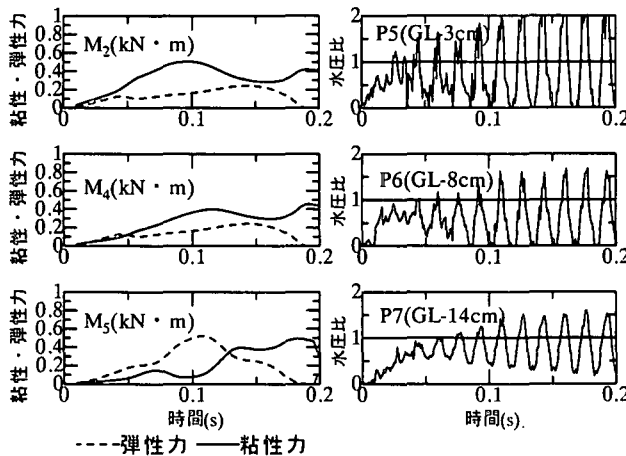


図-14 case2 の同定結果

図-15 に非液状化層の実験 (case3) の同定結果を示す。同図からは、非液状化層中では ( $m_3$ ) 弾性力が卓越しており、液状化層では ( $M_6, M_8$ ) 水圧が有効上載圧に達する時刻からは粘性力が弾性力を上回る結果となっている。これは、液状化層では図-13, 14 に示した液状化層のみの同定結果と同様な傾向を示している。すなわち、杭に変形を及ぼした外力は、非液状化層からは地盤変位に依存した弾性力が作用し、有効上載圧に達してからの液状化層では地盤速度に依存した流体力が作用したと考えられる。

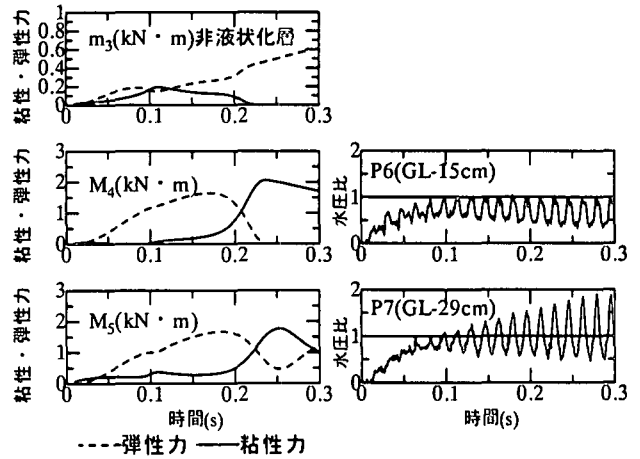


図-15 case3 の同定結果

## 5. まとめ

遠心载荷場における液状化地盤の流動実験による杭に作用する外力を評価した。この結果、液状化層のみの実験では、液状化状態では速度に依存した粘性力が、液状化に達しない状態では変位に依存した弾性力が卓越することが示された。また、液状化層上部に非液状化層がある場合には、非液状化層より変位に依存した弾性力が作用することが示された。

## 謝辞

本研究は、平成 14 年度科学技術振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一部である。ここで、関係者各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 吉田望, 濱田政則: 地盤の液状化による基礎杭の被害の解析, 第 8 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp55-60, 1990
- 2) 濱田政則, 吉田誠, 三野栄作: 液状化土が杭に及ぼす流動外力の実験と解析, 第 33 回地震工学研究発表会,
- 3) 大友敬三: 地中構造物に及ぼす地盤側方流動の外力特性評価, 土木学会論文集, No. 519/ I -43, pp283-297, 1998
- 4) 濱田政則, 松本浩一郎, 森厚憲, 樋口俊一: 液状化土の粘弾性的特性に関する考察, 第 2 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp287-292, 2001
- 5) 樋口俊一, 松田隆, 三浦房紀: 側方流動地盤中の杭に作用する外力特性, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp661-664, 2001