

液状化地盤の流動が基礎杭に及ぼす 外力特性に関する研究

張 至鎬¹・濱田 政則²

¹工修 早稲田大学 理工学研究科 建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail:jangjiho@fuji.waseda.jp

²フェロー会員 工博 早稲田大学 理工学部 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail:hamada@waseda.jp

遠心載荷場における液状化地盤の流動実験により模型杭に作用する流動外力の基本的な特性を明らかにした。過剰間隙水圧比が 1.0 に達した液状化状態では地盤の流動速度に起因した外力が卓越すること、また過剰間隙水圧比が 1.0 に達していない液状化に至る過程では地盤変位に起因した外力が卓越することが示された。さらに、液状化層上部に非液状化層がある場合には、非液状化層からの外力が杭の変形に支配的な影響を持つこと、および非液状化層からの外力は地盤変位に起因していることを明らかにした。これらの実験結果は、液状化地盤の流動の影響を考慮した基礎杭の耐震設計法の確立に有用な知見を与えるものである。

Key Words : centrifuge test, liquefaction, liquefaction-induced ground displacement, pile foundation viscous flow, voigt model

1. はじめに

液状化地盤の流動に関する研究は、1983 年日本海中部地震を契機として開始された。その後の濱田らの航空写真測量による事例調査により、1964 年新潟地震など既往地震における液状化地盤の流動とそれによる構造物基礎等の被害が報告されている^{1),2),3),4)}。さらに、1995 年兵庫県南部地震では、神戸市などの埋立地を中心に広い範囲で地盤の液状化が発生し大規模な流動が観測された⁵⁾。

液状化地盤の流動による地盤の大変位は、橋脚や建物の基礎およびライフライン埋設管路に多くの被害を与えて来た。兵庫県南部地震後、道路橋や鉄道施設などの土木構造物の耐震基準が改訂された。この中で、基礎構造の耐震設計で液状化地盤の流動の影響が考慮されるようになったが、必ずしも、液状化地盤の流動が基礎に及ぼす外力の特性が十分に明らかにされ、この結果が反映されたものではない。液状化地盤の流動の影響を考慮した基礎構造の耐震設計法を確立するためには、液状化地盤の流動が基礎構造に及ぼす外力の基本的な特性を明らかにすることが重要である。

液状化地盤の流動が基礎杭に及ぼす流動外力とし

ては、一般的に地盤変位に起因した外力と地盤の流動速度に起因した外力が考えられる。前者による外力は地盤のばね定数を著しく低下させたモデルによって表現される。このモデルを用いた被害事例の数値解析結果が報告されている^{6),7),8),13)}。また、後者の外力は、液状化地盤の流体的な挙動により生じるとの考え方であり、基礎杭に作用する外力を抗力として評価した研究が報告されている^{9),10),14)}。

液状化地盤より基礎杭に作用する外力は、地盤の液状化の度合いによって変化するものと考えられる。すなわち、過剰間隙水圧比がほぼ 1.0 に達した完全な液状化状態では流体としての外力が、液状化に至る過程および間隙水圧の逸散過程など不完全な液状化状態では地盤変位による外力が、また、液状化の状態によっては両者の外力が同時に作用していることも考えられる。

本研究では、流動地盤から基礎杭に加わる外力特性を遠心載荷場での模型実験により明らかにする。流動外力を粘弾性モデルを用いて評価し¹²⁾、地盤変位と地盤の流動速度が外力に与える影響について検討する。また、単杭と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検討するとともに、液状化層上部の非液状化層が杭に及

ばす影響について考察する。さらに、3次元流体モデルを用いた数値解析により模型杭周辺の流動速度分布を求め、実験結果と併せて流動外力の特性について考察する。

2. 模型実験の方法と考察

(1) 実験の方法

実験は、図-1に示す長さ100cm、高さ37.5cm、奥行き100cmの剛土槽を用い、30gの遠心載荷場で実施した。模型地盤は相対密度約40~60%で飽和状態とした液状化層と、相対密度90%の不飽和状態の土層(以下非液状化層と呼ぶ)で作成されている。地表面が10%で傾斜した模型地盤を流動方向と直角な水平方向に加振することにより液状化を生じさせ、地盤の流動を発生させた。模型地盤の厚さは、流動方向の中央点において液状化層が20cm、非液状化層が7cmである。水位は土槽底面より20cmとしている。

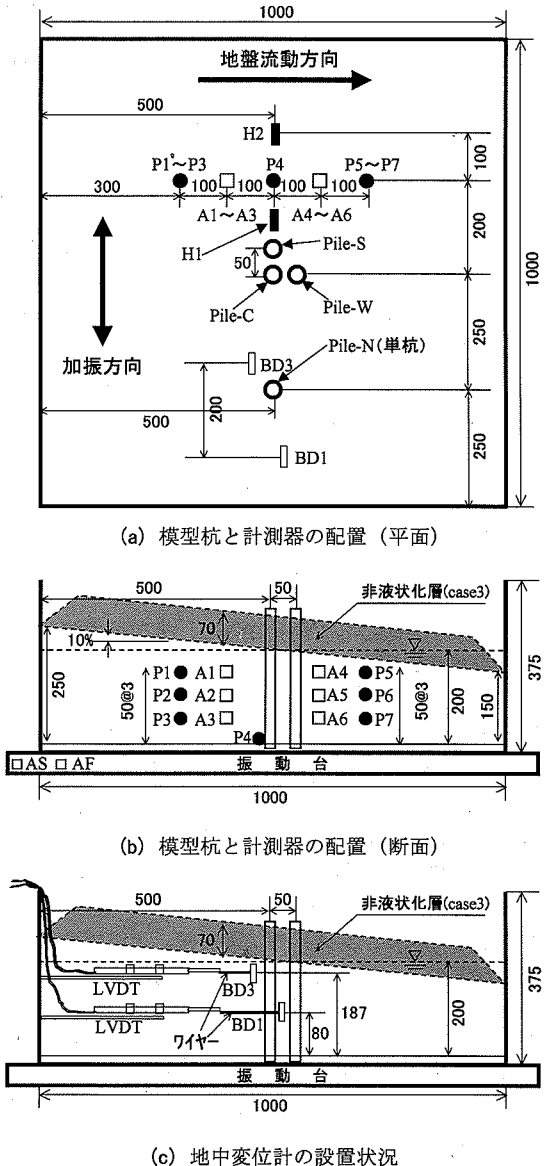
液状化層は平均粒径0.062mm、均等係数4.27の珪砂8号で、非液状化層は平均粒径0.3mm、均等係数1.48の珪砂6号で作成した。模型地盤の作成は以下の手順によった。乾燥砂を空中落下させ砂層を作成した後、地表面が10%の傾斜になるように整形した。非液状化層を含む模型実験では図-1(b)に示すように流動方向の上下両端部を斜めにカットした。その後、土槽底部より水を注入して模型地盤を飽和状態とした。本実験では間隙液として水を用いており、透水に関する相似性は考慮されていない。これは、本研究が砂と水の混合体が液状化状態で流動している場合の外力特性の解明に重点を置いているためである。

図-1(a), (b)に示すように模型地盤中に加速度計と水圧計を設置し、振動台には加振方向(AS)と流動方向(AF)に加速度計を設置した。地表面にはレーザー変位計を2箇所を設置し流動変位の時刻歴を測定した。さらに、地中変位を測定するために図-1(c)に示すように耐圧型地中変位計(LVDT)を設置した。流動方向に対する杭の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杭径の2.5倍¹⁵⁾とした。

模型杭は、図-2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、 $E=206\text{kN/mm}^2$)であり、液状化地盤の流動による曲げひずみをパイプ内側表面に設置したひずみゲージより測定した。杭下端部を土槽底版にボルトで固定し、片持ち梁として挙動するように設置されている。本実験は流動

地盤より作用する外力の定性的特性を明らかにすることを主眼としているため、実構造物の杭と模型杭との変形等に関する相似性は考慮されていない。

表-1の実験条件に示すように模型実験は、液状化層のみの実験(case1, case2)と液状化層上部に非液状化層が存在する場合の実験(case3)の計3ケースを実施した。加振入力には正弦波加速度を用いており、遠心載荷場30gでの振幅と周波数、および波数は表-1に示すとおりである。



- 水圧計(P1~P7) ○ 模型杭 ■ レーザー変位計(H1, H2)
- 加速度計(AS, AF, A1~A6) ▭ LVDT型地中変位計(BD1, BD3)

図-1 模型地盤の計測項目と計測位置 (単位: mm)

ステンレスパイプ $\phi=20\text{mm}$, $t=0.5\text{mm}$ $E=206\text{ (kN/mm}^2\text{)}$

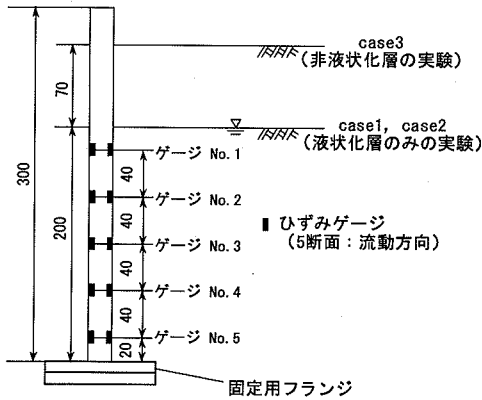


図-2 模型杭とひずみの計測点 (単位: mm)

表-1 実験条件

実験名	土槽中央部 模型地盤層厚 (cm)	相対密度 (%)	加振加速度の最大値	
			振幅 (m/s^2)	周波数と 波数
case1 (液化化層のみ)	20	40	94 (38)**	60Hz10波
case2 (液化化層のみ)	20	47	138 (48)**	60Hz20波
case3 (非液化化層あり)	20 (7)*	58 (91)*	179 (66)**	60Hz30波

*()は非液化化層の値である。

***()は流動方向加速度である。

(2) 計測値の時刻歴の比較と考察

図-3, 4に液化化層のみの実験(表-1の case1, 2)で得られた各計測値の時刻歴を示す。同図には、上から振動台の加振方向加速度(AS, 図-1(b)), 最深部に設置した水圧計(P4, 図-1(b)), 単杭(Pile-N 図-1(a))の下端部の曲げモーメント, LVDT型地中変位計より計測された地中変位と流動速度(BD3, BD1 図-1(c))およびレーザー変位計より計測された地表面変位と流動速度(H2, 図-1(a))を示した。case1の実験では地表面より12cmに設置した地中変位計BD1が正常に作動しなかったため、ほぼ地表面付近のBD3から得られた計測値を示した。流動速度は変位の時刻歴を数値微分することにより求めた。これらの図の横軸は加振開始時刻を0とした時間であり、曲げモーメントおよび地表面と地中における流動変位と速度とともに30g場の値で表示している。また、曲げモーメントは一点破線で示した計測記録をHammingのスムージング手法を用いて振動成分を除去した値(図中の実線)を併せて示す。

図-3, 4(c)によれば、過剰間隙水圧が1.0に達した

液化化状態では曲げモーメントに加振振動数と同じ振動数を持つ振動成分が卓越している。本実験では流動方向とほぼ直角方向に加振したが、表-1によれば、流動方向の加速度は加振方向の加速度の3~4割程度となっており、この流動方向の加速度が杭の曲げモーメントに振動成分を生じさせたものと推測される。地盤の剛性が著しく低下する液化化状態では加速度の影響をより受け易いため、水圧比の上昇とともに振動成分が大きくなったと考えられる。

一方、図-5(c)に示した非液化化層が存在する実験結果では杭の曲げモーメントの振動成分はほとんど生じていない。これは、非液化化層の剛性により杭の流動方向の振動が拘束されたためと考えられる。以下では前述したスムージングより曲げモーメントの振動成分を除去して検討する。

なお、本実験での模型杭は、杭頭自由および先端固定の片持ち梁となっており、杭の境界条件は実構造物と異なるため、この振動成分の大きさが実構造物の挙動には直接的に関係しないと考えられる。

図-3, 4からは以下のことが考察される。

- ①地表面変位および地中変位は時間の経過とともに一樣に増大している。これに対して模型杭下端の曲げモーメントは過剰間隙水圧比がほぼ1.0に達するまでは大きく増加する。過剰間隙水圧比が1.0に達した後もやや増加するが、その後はほぼ一定値(case1)あるいは減少する傾向(case2)を示す。これらのことは、過剰間隙水圧比がほぼ1.0に達するまでは地盤変位に起因した外力が作用した可能性があるものの、過剰間隙水圧比が1.0に達した後は地盤変位のみで杭に作用する外力を説明することはできないことを示している。
- ②図-3に示すcase1の実験では、地表面速度および地中速度は過剰間隙水圧比がほぼ1.0に達する前に最大速度を記録している。これに対して最大速度を記録した後も杭下端部の曲げモーメントは増加している。このことから過剰間隙水圧比が1.0に達する前の時間領域では地盤速度のみで杭に作用する外力を説明することは難しいと考えられる。
- ③図-4に示すcase2の場合、過剰間隙水圧比がほぼ1.0に達した後速度が減少しており、かつ曲げモーメントもやや時間の遅れはあるものの減少する傾向にある。このことから過剰間隙水圧比が1.0に達した後では速度に起因した外力が模型杭に作用した可能性があると考えられる。しかしながら、曲げモーメントが最大値を記録する時刻と速度が最大値を記録する時刻には時間差があることから、地盤速度のみで杭に作用する外力を説明することはできない。

以上の液化化層のみの模型実験(case1,2)から、

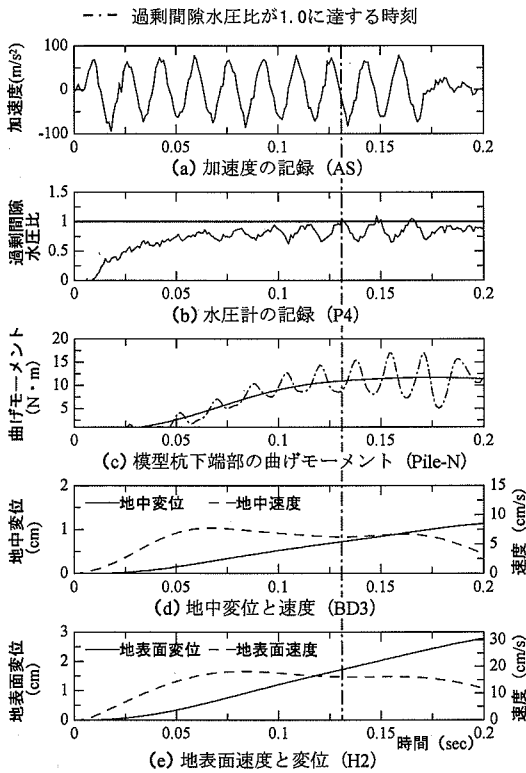


図-3 液状化層のみの実験 (case1)

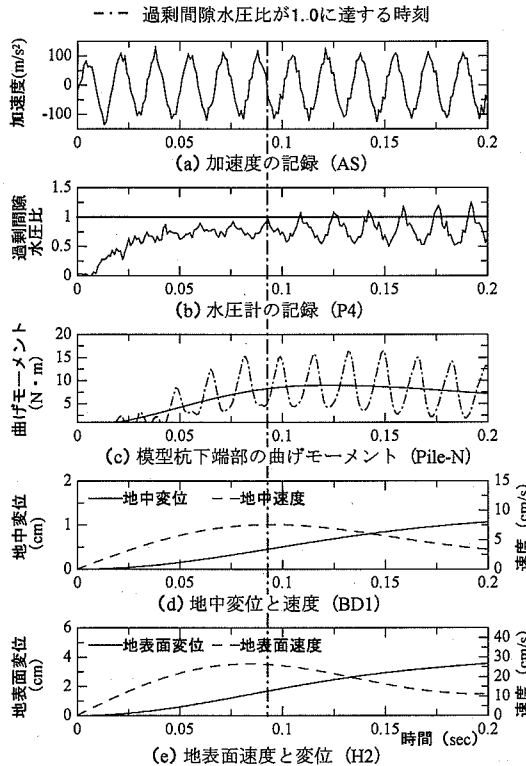


図-4 液状化層のみの実験 (case2)

過剰間隙水圧比が1.0に達する前と後では、流動外力に対する地盤変位と速度の影響の度合いが変化していることが推測される。

液状化層の上部に非液状化層が存在する場合 (表-1のcase3) の実験結果を図-5に示す。図示した結果より以下のことが考察される。

①模型杭 (Pile-N) 下端部の曲げモーメントは、加振開始より地表面変位の増加とともに増大している。これに対して、地表面および地中における流動速度は過剰間隙水圧比がほぼ1.0に達する前に最大値を記録し、その後減少している。このことにより、地盤変位に依存した流動外力が杭に作用したものと考えられる。

②液状化層のみの実験 (case1,2) による杭の最大曲げモーメントが約10N・mであるのに対し、非液状化層が存在する場合の模型実験では最大で約50N・mに達しており、非液状化層の存在により大きな外力が模型杭に作用したことが分かる。

(3) 杭の配置が外力に与える影響と考察

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深さ方向分布を図-6に示すが、最大値の発生時刻は必ずしも同一ではない。曲げモーメントが最大になる時刻は液状化層のみの実験

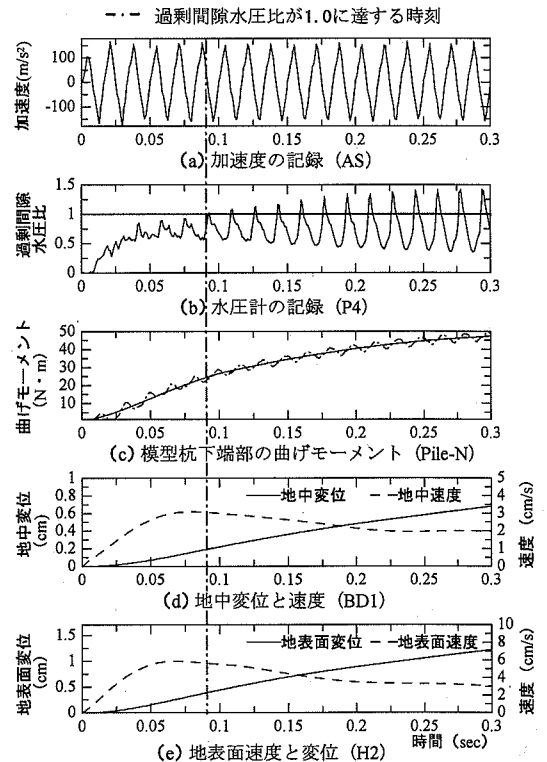


図-5 非液状化層がある場合の実験 (case3)

case1,2において、最深部に設置したP4水圧計(図-1(b))で、過剰間隙水圧比がほぼ1.0に達した後の時刻であり、前述の考察から地盤速度に起因した外力が作用した可能性があると考えられる時間領域である。図-6(b),(c)によれば、単杭(Pile-N)が最も大きい値を示しており、流動方向に対して下流側に設置された杭(Pile-W)の曲げモーメントが最も小さくなっている。また、複数杭の上流側に設置されたPile-C,Sの曲げモーメントはほぼ等しいが、単杭(Pile-N)の曲げモーメントより小さくなっている。

この実験結果は以下のように解釈することができる。図-7(a)に示すように液状化層のみの実験における複数杭の周辺の地盤流動速度は、杭が複数存在することにより、単杭周辺よりも減少していると考えられる。また流動の下流側に位置する杭の周辺の地盤速度はさらに減少していると考えられる。このことが図-6(b),(c)に示した曲げモーメントの差になったと考えられる。上記の単杭と複数杭周辺の流動速度分布は、後述する数値解析で定量的に検討する。

一方、図-6(d)のcase3の非液状化層が存在する実験結果によれば、流動方向に対して上流側の同じ位置に配置された単杭(Pile-N)および複数杭の上流側の杭(Pile-C,S)には、ほぼ等しい曲げモーメントが発生している。このことは、図-7(b)に示すように非液状化層が存在することにより地表面がほぼ一様に変位し、かつ変位による外力が卓越したためと推定される。

3. 模型杭に作用する流動外力の評価

流動する液状化地盤から模型杭に作用する外力として、前述したように地盤変位に起因した外力と地盤の流動速度に起因した外力およびそれらの合成による外力が考えられる。計測された模型杭の曲げモーメントより地盤の各深さでの流動外力を算定し、これをもとに地盤の流動変位と速度が流動外力に与える影響を定量的に検討する。

(1) 地盤流動の外力の算定および考察

地盤の流動による外力の深さ方向分布を図-8に示すように液状化層では直線分布、非液状化層では一定と仮定する。各計測点の曲げモーメントから最小2乗法より図-8に示す非液状化層からの分布荷重 a 、および直線分布と仮定した液状化層からの分布荷重の係数 b, c を決定する。

液状化層からの流動外力の深さ分布を直線分布としたのは、図-6に示した曲げモーメントの深さ方向分布は3次曲線によっても十分に近似できると判断したためである。非液状化層からの荷重の分布を一定と仮定したのは、非液状化層が液状化層の上に乗って固体的に移動し、深さ方向の変位分布がほぼ一定であると推測したことによる。

上記の方法より算定した液状化層のみの模型実験case1, 2での流動外力の時刻歴を図-9に示す。図-9によれば、いずれの実験においても実験の前半部約0.1秒以前と実験の後半部約0.15秒付近以降では分布荷重の大きさが深さによって逆転していることが分かる。図-3, 4によれば実験の前半区間は過剰間隙水圧比が1.0に達しておらず液状化途中の段階である。これに対して実験の後半部では過剰間隙水圧比が1.0に達しており完全な液状化状態と考えられる。図

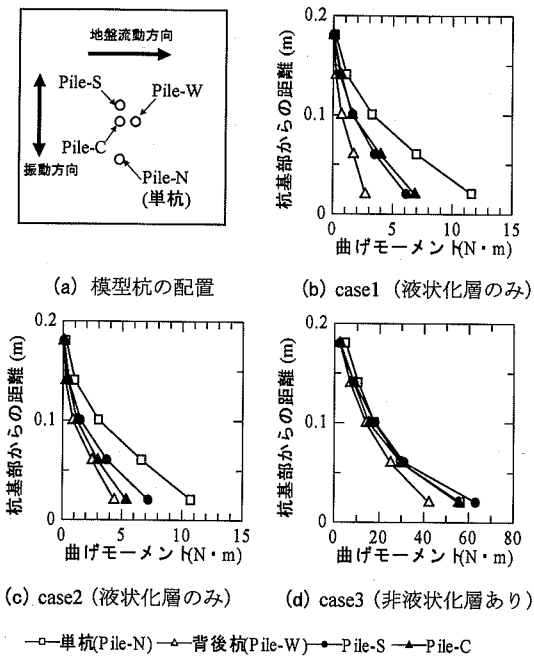


図-6 最大曲げモーメントの深さ方向分布

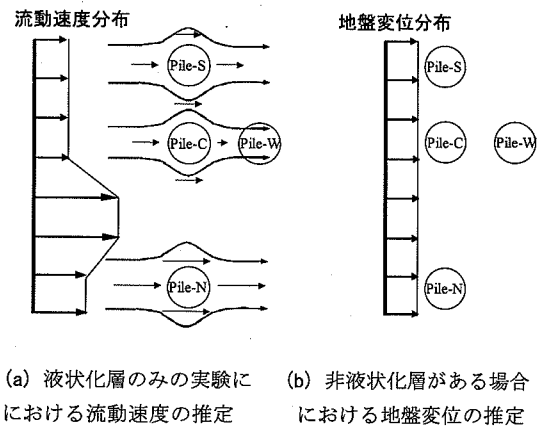


図-7 模型杭周辺の地盤の流れ

-9の結果は液状化に至る過程と過剰間隙水圧比が1.0に達した液状化状態では荷重の特性が変化していることを示唆している。

(2) 粘弾性モデルによる流動外力の評価

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）が考えられる。ここでは杭～地盤間の相互作用を図-10に示すVoigtモデルでモデル化し、地盤変位と地盤速度が流動外力に与える影響を検討する。

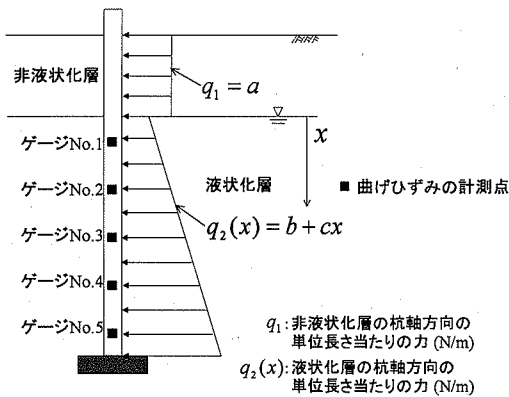
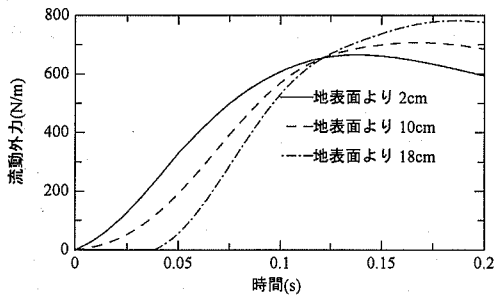
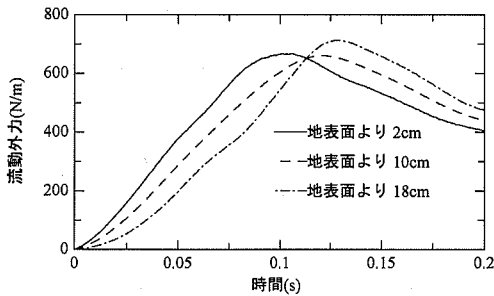


図-8 流動外力の算定モデル



(a) 液状化層の実験 (case1)



(b) 液状化層の実験 (case2)

図-9 流動外力の時刻歴

弾性力は杭と地盤の相対変位に、粘性力は相対速度に比例する。本実験の case1 における地表面の最大変位と最大速度は、図-3 に示したように約 3cm と約 20cm/s である。一方、杭の曲げモーメント分布より求めた杭頭の最大変位と最大速度はそれぞれ約 6mm と 8mm/s であり、地盤の変位と速度に比較し、模型杭の変位と速度は十分小さい。このため式(1)に示すように杭には地盤変位と地盤速度に比例した外力が作用するものとした。

$$q_i = k_i u_i + c_i \dot{u}_i \quad (1)$$

ここに、 q_i : 深さ i における杭軸方向の単位長さ当たりの力(N/m), k_i : 深さ i における地盤ばね定数(N/m²), u_i : 深さ i における地盤変位(m), c_i : 深さ i における粘性定数(N・s/m²), \dot{u}_i : 深さ i における地盤速度(m/s)である。

杭の各位置で推定された流動外力および同じ深さにおける変位と速度を用いて式(1)の右辺の地盤ばね定数および粘性定数を各時刻で同定する。同定の方法は以下の通りである。任意時刻において図-11に示すように 0.02 秒の同定区間を設定する。この区間内の流動外力と流動変位および流動速度のデータ (0.001 秒間隔) を用い、最小 2 乗法により式(1)の右辺のばね定数 k_i と粘性定数 c_i を求め、同定区間の中央時刻での値とする。これらの定数に流動変位と流動速度を乗じることで式(1)の第 1 項の弾性力と第 2 項の粘性力を求める。同定区間を順次移動させて行き、弾性力と粘性力の時刻歴を求める。

同定に必要な流動変位と速度は、地表面では H2 のレーザー変位計 (図-12(a)) より得られたデータを、地中部においては LVDT 型地中変位計より得られたデータ (case2 では BD1, case3 では BD1, BD3) を入力値として用いた。ただし、case1 の実験に関し

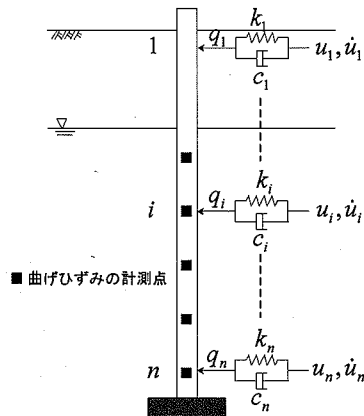


図-10 粘性および弾性力同定モデル

ては、前述したように地中変位計の作動が正常に起動しなかったため、地盤変位と速度の深さ方向の分布を1/4正弦波分布と仮定し、地表面変位と速度よ

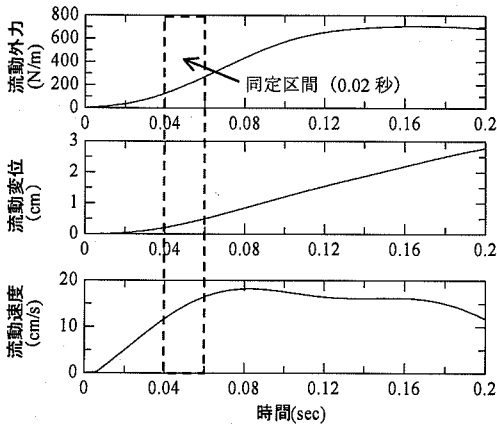


図-11 粘性および弾性力の同定方法 (case1)

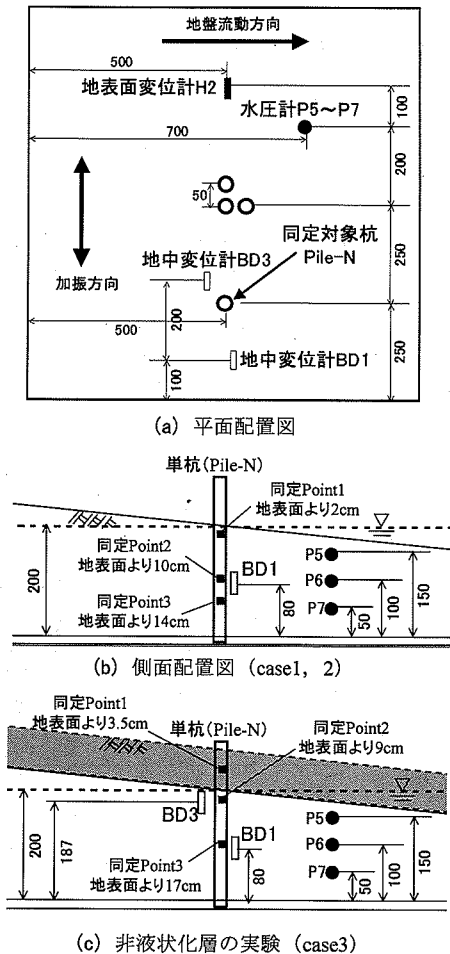


図-12 同定位置と水圧計，地中変位計の配置図

り地中変位と速度を求めた。各実験での流動変位と流動速度の時刻歴は図-3~5に示した通りである。

流動外力を同定する深さと水圧計および地中変位計の配置を図-12(b), (c)に示す。同図に示すように粘性力および弾性力の同定位置は、液状化層のみの実験 case1,2では地表面より2cm, 10cm, 14cmとし、液状化層上部に非液状化層が存在する場合の実験 case3では地表面より3.5cm, 9cm, 17cmとした。

図-13, 14に液状化層の実験 (case1, 2)の粘性力と弾性力の同定結果を示す。同図には同定を行った位置とほぼ同位置で計測された過剰間隙水圧比の記録を併せて示す。図-13示した case1の粘性力と弾性力の同定結果により次のことが考察できる。

図-13(b), (c)に示した地表面からそれぞれ10cm, 14cmの位置では、加振開始から0.125秒付近までは点線で示した弾性力が実線で示した粘性力を上回る

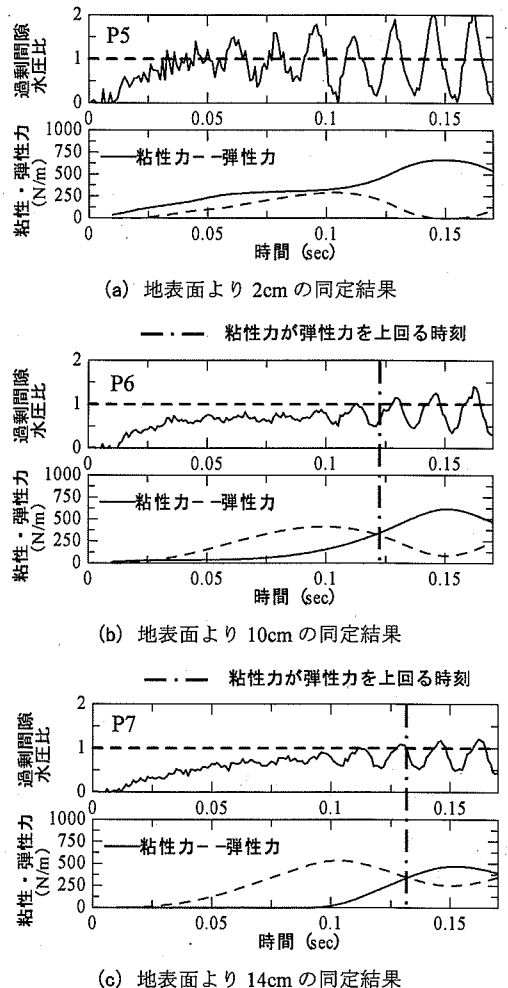
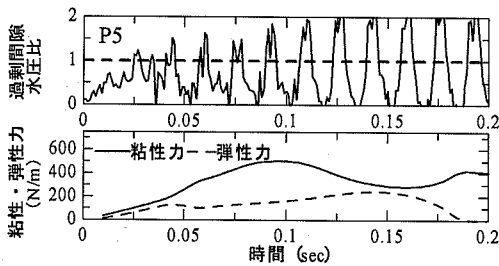


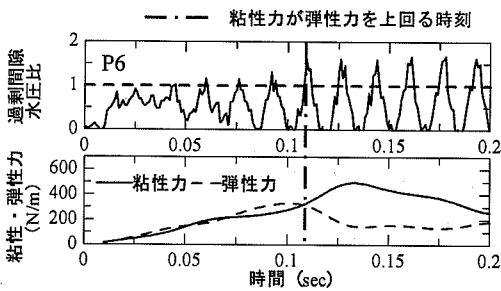
図-13 case1の同定結果 (液状化層のみの実験)

ているが、この時刻より後の区間では逆に粘性力が弾性を上回っている。弾性力と粘性力の大きさが逆転する0.125秒付近は図-13(b), (c)に示すように、これらの深さにおいて過剰間隙水圧比がほぼ1.0に達する時刻である。このことから水圧比が1.0に達していない液状化途中では変位に起因した外力が、水圧比が1.0に達した液状化状態では速度に起因した外力が生じていることが分かる。粘性力が弾性を上回る時刻は地表面より近いほど先行する結果となった。また、地表面より深さ2cmの最も浅い位置(図-13(a))においては常に粘性力が弾性を上回っている。この位置では加振初期から過剰間隙水圧比が1.0に達し、液状化状態になっている。

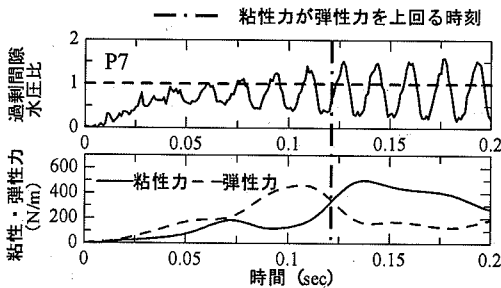
図-14に示した case2 の同定結果でもほぼ同様な結果が得られる。すなわち、地表面より深さ10cm, 14cm(図-14(b), (c))において前半の区間では弾性



(a) 地表面より2cmの同定結果



(b) 地表面より10cmの同定結果

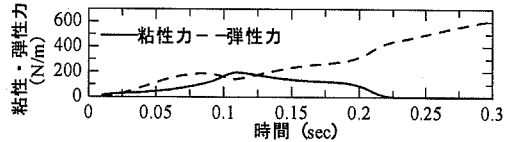


(c) 地表面より14cmの同定結果

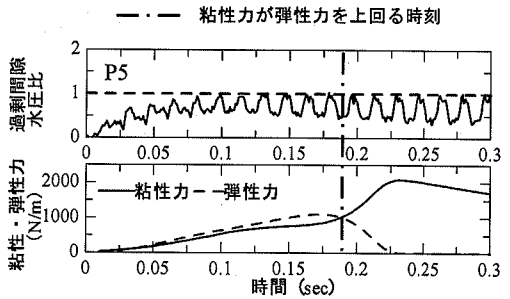
図-14 case2 の同定結果 (液状化層のみの実験)

力が粘性力を上回っているか(図-14(c)),あるいはほぼ同等(図-14(b))であるのに対し、過剰間隙水圧が上昇し液状化に達した状態では粘性力が卓越することが分かる。また、地表面より深さ2cmの位置(図-14(a))においては粘性力が弾性を上回っている。

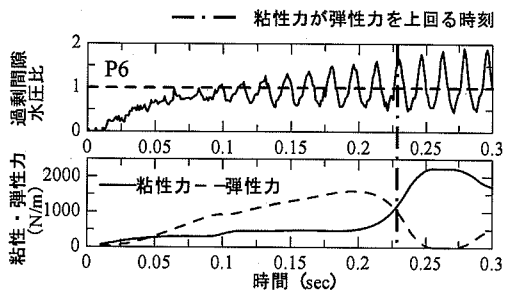
図-15に非液状化層が液状化層上部に存在する場合の実験(case3)の同定結果を示す。図-15(a)の地表面より3.5cmの非液状化層では、加振開始から0.15秒の実験の前半部では弾性力が粘性力よりやや大きくなっているか、あるいは同等であるのに対し、実験の後半部では地盤変位による弾性力が粘性力を大きく上回っている。これに対して図-15(b), (c)に示した地表面より9cm, 17cmの液状化層での同定結果によれば、実験開始より約0.2秒の段階では粘性力と弾性力がほぼ等しいか(図-15(b)), 弾性力が粘性力を上回っている(図-15(c))。しかしながら、約0.2~0.25秒以降の実験の後半部では粘性力が弾



(a) 地表面より3.5cmの同定結果



(b) 地表面より9cmの同定結果



(c) 地表面より17cmの同定結果

図-15 case3 の同定結果 (非液状化層がある場合の実験)

性を大きく上回っており、図-13, 14 の液状化層のみの実験と同様な結果が得られている。

以上の非液状化層が存在する模型実験から、非液状化層からは変位に起因する外力が、また過剰間隙水圧比が 1.0 に達した場合、液状化層からは速度に起因した外力が卓越していることが示された。

4. 数値解析による流動速度の考察

以上述べた模型実験から、過剰間隙水圧比が 1.0 に達した液状化状態では液状化砂が流体として挙動し、模型杭に地盤の流動速度に起因した外力が作用することが示された。ここでは液状化砂を粘性流体と見なし、模型杭の周辺における流動速度を数値解析より求め、実験結果と併せて考察する。

(1) 解析方法および条件

図-16 に 3 次元粘性流体の解析モデルを示す。解析には流体汎用プログラム「PHOENICS」を用い、液状化層のみの実験 case1 を対象とした。地盤モデルに 10%の初期の地表面勾配を与え、遠心加速度 30g の重力による流動速度を算定する。解析では流動による地表面勾配の変化を考慮している。側面と底面の境界では速度を 0 とし、地表面は自由表面とした。

濱田は、遠心載荷場における液状化砂の流動実験から、粘性係数の推定を行っている。この結果によれば、相対密度約 40%、平均粒径 0.22mm、均等係数 1.9 の砂を用いた実験から 30g 場での粘性係数は、約 $2.9 \sim 10.0 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ の範囲にあるとされている¹¹⁾。本解析ではその平均値である $6.45 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ を粘性係数として用いた。

(2) 解析結果および考察

液状化層のみの実験 case1 の地表面速度 (図-1(a) の H1, H2) の実験結果と数値解析結果の比較を図-17 に示す。これによれば、約 0.05 秒以前の前半部においては解析値と実験値に差が生じているものの、それ以降はほぼ一致している。前半部の差異は以下のように解釈できる。図-3 に示した実験結果によれば過剰間隙水圧比が 1.0 に達するのは加振開始より 0.125 秒付近である。特に 0.05 秒以前では過剰間隙水圧比が 1.0 を大きく下回っており、流体的な性質よりも固体的な性質が卓越していると推定される。一方、数値解析では時刻 0 より模型地盤が流体として挙動することを仮定している。このことが加振開始直後の解析による流動速度が実験結果と異なった

原因と考えられる。

ほぼ一定速度に達していると見なされる流動開始から 0.1 秒における解析による地表面の流動速度の平面分布を図-18(a) に、複数杭と単杭周辺での流動速度ベクトルを図-18(b), (c) に示す。図-18(a) によれば、流動速度は杭が存在しない領域 (図中 A 領域) が最も大きくなっている。流動速度は A 領域と比較し複数杭の周辺で急激に減少し、複数杭と単杭の間 (図中 B 領域) では増加するものの、単杭周辺で再び減少していることがわかる。図-18(b), (c) によれば、複数杭周辺の地盤の流動速度は、単杭周辺地盤の流動速度に比較し小さいことが分かる。このことは、図-7(a) に示した流動速度の分布の推論が妥当であることを示している。

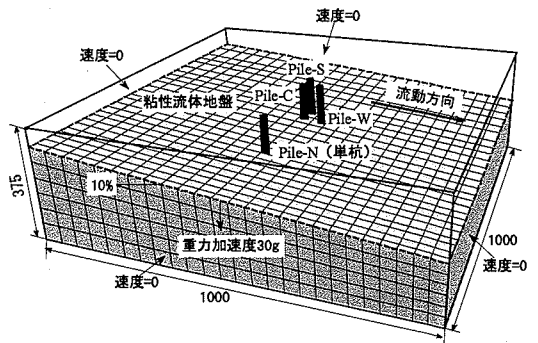
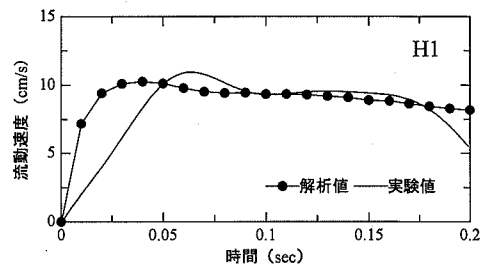
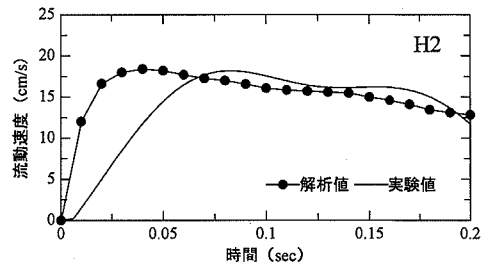


図-16 流体 3 次元解析モデル (単位: mm)

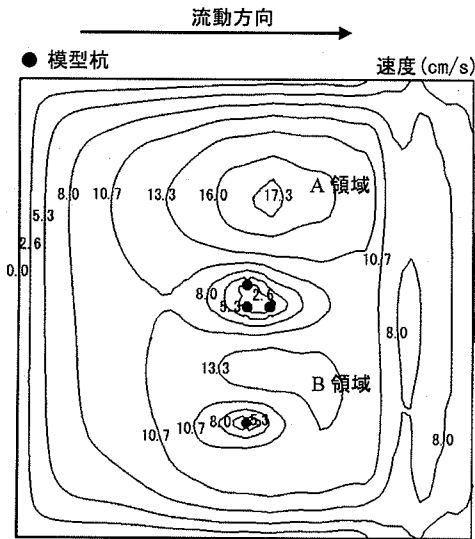


(a) H1 の流動速度

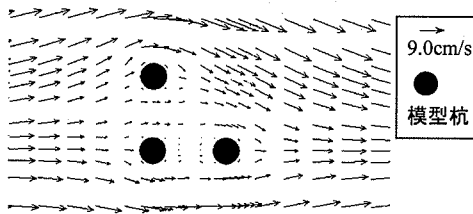


(b) H2 の流動速度

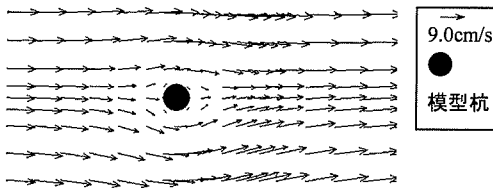
図-17 地表面の流動速度比較



(a) 地表面の流動速度分布



(b) 複数杭周辺の速度ベクトル



(c) 単杭周辺の速度ベクトル

図-18 地表面流動速度の平面分布

5. まとめ

本研究は、遠心載荷場における模型実験により流動中の液状化地盤から基礎杭に作用する外力の特性を明らかにしたものである。本研究の結論として以下のことが得られた。

(1) 液状化層のみの実験により、過剰間隙水圧比が1.0に達していない不完全な液状化状態では地盤変位に起因した外力が卓越すること、および過剰間隙水圧比が1.0に達した後の完全な液状化状態では地盤の流動速度に起因した外力が卓越することを示し

た。

(2) 液状化層上部に非液状化層が存在する場合には、非液状化層からは地盤変位に起因した外力が卓越すること、および非液状化層の存在による外力が杭の曲げ変形に支配的な影響を及ぼしていることが示された。

(3) 過剰間隙水圧比が1.0に達した液状化状態では、単独に設置された杭（単杭）に作用する外力は、複数設置された杭に作用する外力よりも大きいことが示された。これは、複数杭の周辺の流動速度が単杭の周辺の流動速度よりも減少するためであることが数値解析から示された。また、流動方向に対して下流側に設置された杭へ作用する外力も流動速度の低下により減少することが実験により示された。

(4) 液状化層上部に非液状化層が存在する場合、単杭および複数杭のうち流動方向に対して上流側に設置された杭には、ほぼ同等の大きさの外力が作用することが示された。これは非液状化層の変位による外力が卓越し、かつ非液状化層の変位がほぼ同等であることによると考えられる。

本研究により、液状化状態および液状化に至る過程での基礎杭に作用する外力の特性が明らかにされた。液状化地盤の流動を考慮した耐震設計法の構築のための基礎的な知見を提供することができたと考えられる。

謝辞：本論文で記述した遠心載荷場の模型実験は、(株)大林組技術研究所の協力により行われ得られたものである。また、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。以上の関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 濱田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利: 液状化による地盤の永久変位の測定と考察, 土木学会論文集, 第376号/III-6, pp.211-220, 1986.
- 濱田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利: 液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究, 土木学会論文集, 第376号/III-6, pp.221-229, 1986.
- Hamada, M. and O'Rourke, T.D. (Eds): *Case study of Liquefaction and lifeline performance during past earthquake, Vol.1 Japanese case studies*, Technical Report NCEER-92-001, 1992.
- O'Rourke, T.D. and Hamada, M. (Eds): *Case study of Liquefaction and lifeline performance during past earthquake, Vol.2 United States case studies*, Technical Report NCEER-92-002, 1992.

- 5) Hamada, M., Ioyama, R. and Wakamatsu, K.: *The 1995 Hyogoken-nanbu (Kobe) earthquake liquefaction ground displacement and soil condition in Hanshin Area*, 地震予知総合研究振興会, 1995.
- 6) 森伸一郎, 清水勝美, 鈴木信久, 高木政美, 中村晋: 液状化による地盤の永久変位に起因する杭基礎の被害と解析, 第20回地震工学研究発表会講演概要, pp.25-28, 1989.
- 7) 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, pp.55-60, 1990.
- 8) 堀田洋之, 難波伸介: 地盤の側方流動で被災した杭基礎の簡易法による評価, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.37-42, 1998.
- 9) 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, pp.283-297, 1998.
- 10) Hamada, M., Sato, H. and Nakamura, T.: *An Experimental and Numerical Study on Liquefaction-Induced Ground Displacement*, Proceedings of the 5th U.S National Conference on Earthquake Engineering, Vol.IV, pp.169-178, 1994.
- 11) 濱田政則, 佐藤貴俊: 液状化砂の流動特性に関する実験的研究, 第27回地震工学研究発表会, 報告番号304, 2003.
- 12) 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, pp.287-292, 2001.
- 13) 斉藤一郎, 張至鎬, 田近孝治, 濱田政則: 側方流動による基礎杭の被害のシミュレーション, 第3回都市直下地震災害総合シンポジウム, pp.209-212, 1998.
- 14) 濱田政則, 若松加寿江: 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, No.596/III-43, pp.189-208, 1998.
- 15) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 1996.

(2003. 9. 1受付)

A STUDY ON LOADS ON FOUNDATION PILES FROM FLOWING LIQUEFIED SOIL

Jiho JANG and Masanori HAMADA

The authors investigated into the fundamental characteristics of the external loads on foundation piles from flowing liquefied soil based on the experimental results under a centrifuge condition. The followings were obtained as conclusions; The viscous load depending on the ground flow velocity of liquefied soil was dominant on the piles when model ground was completely liquefied. On the contrary, the external load resulting from ground displacements was governing the pile deformation when the model ground was not liquefied or partially liquefied. Furthermore, when a non-liquefied soil was overlaying on the liquefied soil, an external load due to ground displacements of the non-liquefied soil was dominant.