

杭基礎に作用する側方流動の 外力特性に関する研究

張 至鎬¹・濱田 政則²・樋口 俊一³

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

³工修 大林組技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail: higuchis@tri.obayashi.co.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。

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。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、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、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、液状化層上部の非液状化層が杭に及ぼす影響について考察する。

2. 模型実験の方法と考察

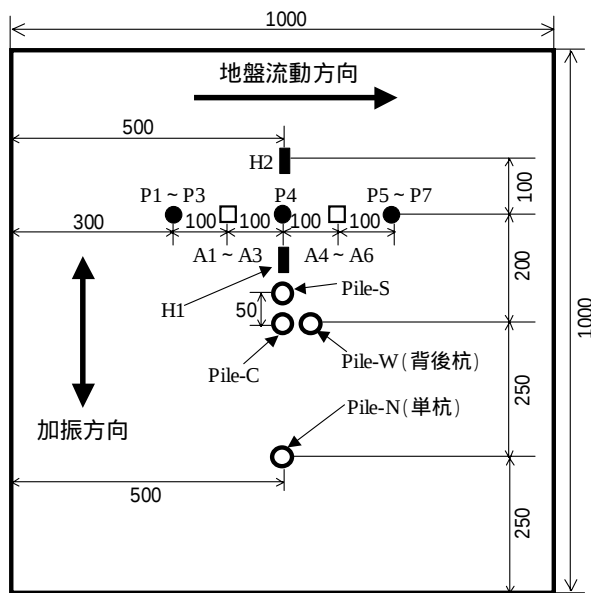
(1) 実験の方法

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。

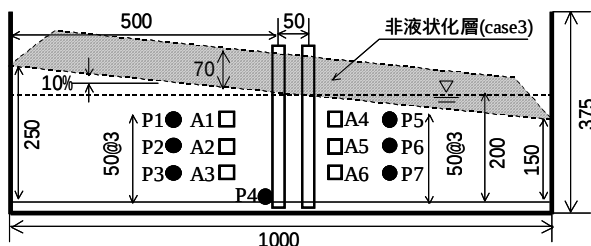
本実験では間隙液として水を用いており、透水性に関する相似性は特に考慮していない。これは、砂と水の混合体が液化し流動する場合の外力特性の解明に重点を置いているからである。

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た。地表面にはレーザー変位計を2箇所に設置し流動変位の時刻歴を測定した。模型杭の配置は、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倍とした。

模型杭は、ステンレス製の中空パイプ(外径 20mm, 肉厚 0.5mm)であり、液化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。杭下端部を土槽底板にボルトで固定し、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 に実験条件をまとめて示す。



(a) 模型杭と計測器の配置 (平面)



(b) 模型杭と計測器の配置 (断面)

- 水圧計(P1 ~ P7) ▮ レーザー変位計(H1, H2)
- 加速度計(A1 ~ A6) ○ 模型杭

図-1 模型地盤の計測項目と計測位置 (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	
			振幅 (m/s ²)	周波数と 波数
case1 (液化化層のみ)	20	40	90	60Hz10波
case2 (液化化層のみ)	20	47	120	60Hz20波
case3 (非液化化層あり)	20 (7)	58 (91)	150	60Hz30波

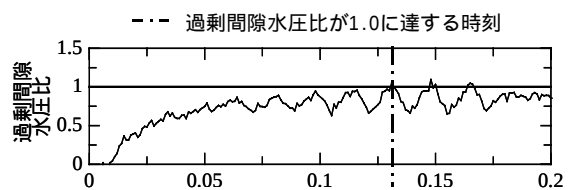
(2) 計測値の時刻歴の比較と考察

図-2, 3 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。図-2, 3 からは以下のことが考察される。

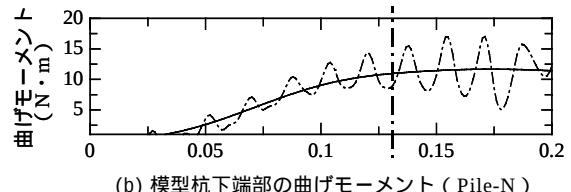
地表面変位は時間の経過とともに一様に増大している。これに対して模型杭下端の曲げモーメントは過剰間隙水圧比がほぼ 1.0 に達するまでは大きく増加し、過剰間隙水圧比が 1.0 に達した後もやや増加するが、その後はほぼ一定値 (case1) あるいは減少する傾向 (case2) を示す。このことは、過剰間隙水圧比がほぼ 1.0 に達するまでは地盤変位に起因した外力が作用した可能性があるものの、過剰間隙水圧比が 1.0 に達した後は地盤変位のみで杭に作用する外力を説明することはできないことを示している。

図-3 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。

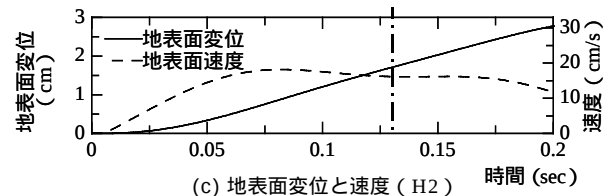
以上の case1, 2 から、過剰間隙水圧比が 1.0 に達する前と後では、流動外力に対する地盤変位と速度の影響の度合いが変化していることが推測される。



(a) 水圧計の記録 (P4)



(b) 模型杭下端部の曲げモーメント (Pile-N)



(c) 地表面変位と速度 (H2)

図-2 液化化層のみの実験 (case1)

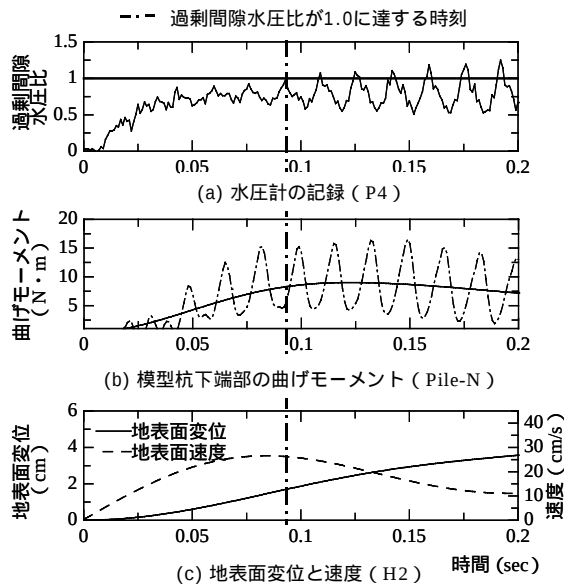


図-3 液状化層のみの実験 (case2)

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-4に示す. 図示した結果より, 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.

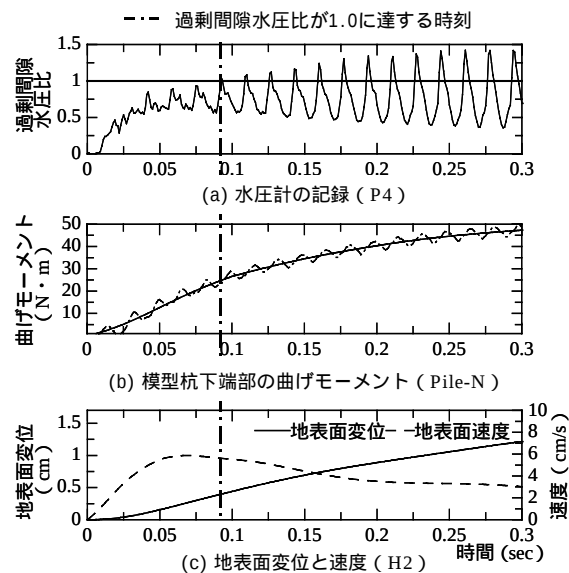


図-4 非液状化層がある場合の実験 (case3)

3. 模型杭に作用する流動外力の評価

(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-5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-5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.

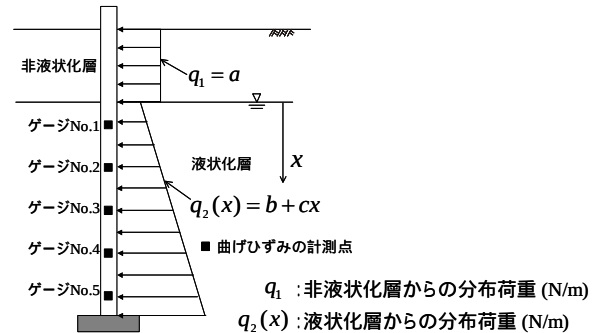


図-5 流動外力の算定モデル

(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-6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.

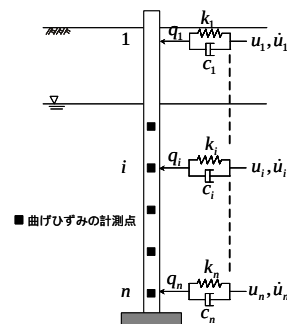


図-6 粘性および弾性力同定モデル

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. 本実験では模型杭の剛性が大きいので, 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 における流動外力 (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. 任意時刻において 0.02 秒の同定区間を設定し, 最小 2 乗法に

より式(1)の右辺の第1項の弾性力と第2項の粘性力を求めた。

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り地中変位と速度を求めた。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、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-7,8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-7,8に示した液状化層のみの実験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-7の地表面からそれぞれ10cm, 14cmおよび図-8の地表面より14cmの位置では、加振開始から0.125秒付近までは弾性力が粘性力を上回っているが、この時刻より後の区間では逆に粘性力が弾性力を上回っている。弾性力と粘性力の大きさが逆転する0.125秒付近は、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。地表面より深さ2cmの最も浅い位置においては常に粘性力が弾性力を上回っている。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。

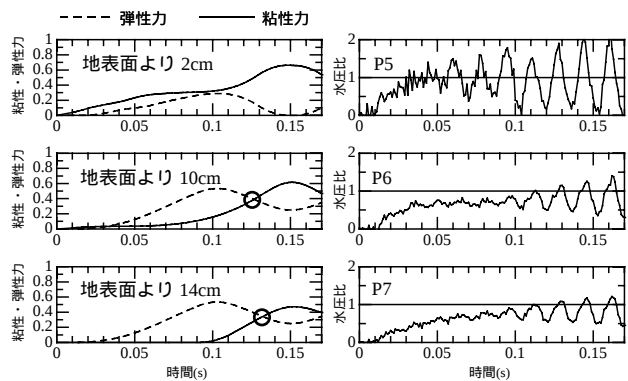


図-7 case1 の同定結果

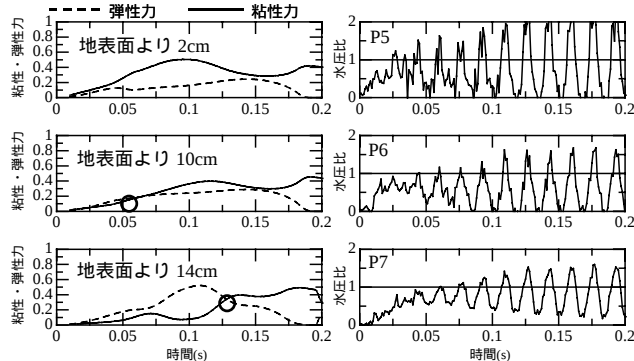


図-8 case2 の同定結果

図-9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-9の地表面より3.5cmの非液状化層では、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秒の段階では弾性力が粘性力を上回っている。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性力を上回っており、図-7,8の液状化層のみの実験と同様な結果が得られている。

以上の非液状化層を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。

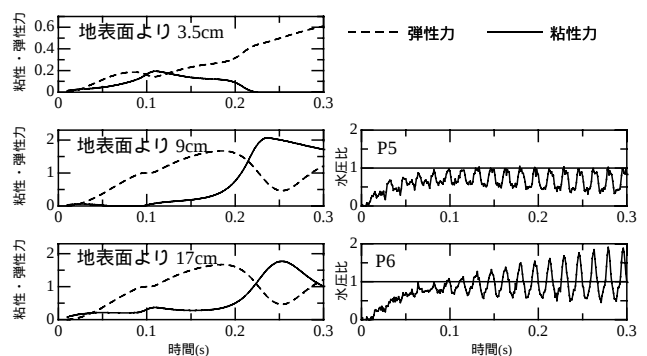


図-9 case3 の同定結果

4. まとめ

- (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を存在する場合には、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。

参考文献

- 1) 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/ -6, pp.221-229, 1986.
- 2) 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.

(2003. 10. 9 受付)