

液状化地盤の流動により杭基礎に作用する外力の評価法について

早稲田大学 学生会員 ○張至鎬，花田賢師，コンケツ，内田壘
早稲田大学 フェロー会員 濱田政則

1. はじめに

液状化地盤の流動により杭に作用する流動外力としては，一般に地盤変位に起因した外力と地盤の速度に起因した外力が考えられる．両者の外力は地盤の液状化の割合によって変化するものと推定される．著者らの研究グループでは，遠心載荷場における地盤と杭の模型実験を行い，完全な液状化状態では地盤の速度に起因した外力が卓越することを示した¹⁾．本研究では，液状化地盤の流動外力を粘性流体の抗力として評価する方法について考察する．

2. 実験の方法と考察

実験は，図-1に示す長さ300cm，高さ60cm，奥行き100cmの剛土槽を用い，重力場で実施した．模型地盤は相対密度約30～40%の地盤と70～80%の飽和状態とした2種類の地盤で作成されている．土槽は振動台に一定の傾斜（6%）をもって固定されており，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．模型地盤の厚さは全実験ケースとも30cmとし，模型地盤は，平均粒径0.157mm，均等係数1.545の珪砂7号を用い，ボーリング方法で作成した．

図-1に示すように水圧計（W1～W9）を土槽の側壁に設置するとともに，土槽の流動方向（AF）と加振方向（AS）に加速度計を設置した．地表面には円形標的を設置し，標的の変位を高速カメラで撮影して標的中心点の変位の時刻歴を測定した．模型杭は，図-1に示すようにステンレス製（ $E=206\text{kN/mm}^2$ ）とアルミニウム製（ $E=70\text{kN/mm}^2$ ）の中空パイプ（外径20mm，肉厚0.5mm）であり，液状化地盤の流動による曲げひずみを測定した．表-1の実験条件に示すように模型実験は，相対密度の小さい地盤（case1～3）と相対密度の大きい地盤（case4～6）の計6ケースを実施した．加振入力は正弦波加速度を用いており，加振周波数3Hzで最大振幅は全ての実験において400Galを目標としたがややばらつきがある．杭の配置は表-1に示すとおりである．

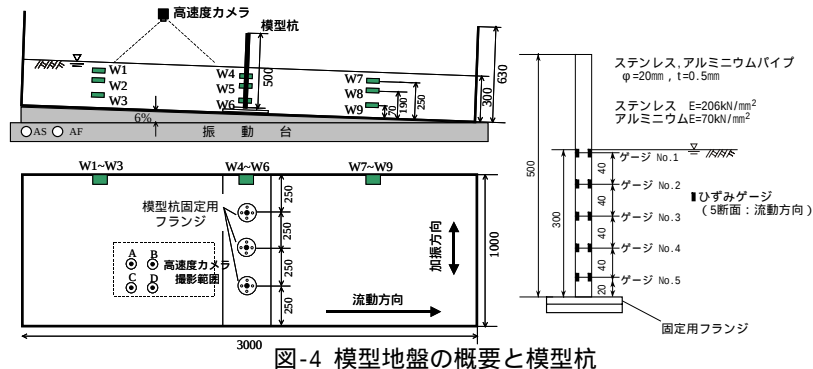


図-4 模型地盤の概要と模型杭

表-1 実験条件

実験名	相対密度 (%)	模型杭の材料	杭の配置 流動方向 → 模型杭	加振加速度 (Gal)
case1	37	ステンレス	●	385
case2	42	アルミニウム	●	392
case3	31	ステンレス アルミニウム	●	388
case4	71	ステンレス	●	402
case5	71	アルミニウム	●	394
case6	77	ステンレス アルミニウム	●	407

図-2,3に実験の1例として相対密度の小さい実験（case1）と相対密度の大きい実験（case4）で得られた各計測値の時刻歴を示す．同図には，水圧計（W6），高速カメラの画像処理より得られた地表面標的（A，図-1）の流動変位と速度，模型杭の曲げモーメントを示した．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．

図-2のcase1の実験結果によれば，地表面速度は加振開始から約1.0秒で最大を示しており，その後は減少している．模型杭の曲げモーメントは地盤の流動速度が増加する実験の前半部においては大きく増加するがその後は急激に減少し，加振開始から5秒付近で杭の曲げモーメントはほぼ0となっている．一方，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とが分かる．図-3の相対密度が大きいcase4では，地表面速度が最大を示す時刻は加振開始から3.0秒と遅くなっており，その後は緩やかに減少する傾向にある．曲げモーメントは地表面変位の増加とともに大きくなっており，加振開始から5秒の時刻においても杭には残留変形が生じている．これらのことは，相対密度が小さい条件の実験では，杭には地盤の流動速度に依存した外力が卓越して作用した可能性を示している．

キーワード 液状化，地盤流動，粘性流体，抗力係数，レイノルズ数

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学 T E L 03-3208-0349, jangjiho@fuji.waseda.jp

一方、相対密度が大きい場合は、地盤の速度のみでは杭への外力を評価することは難しく、地盤の変位による外力も作用した可能性があることを示している。

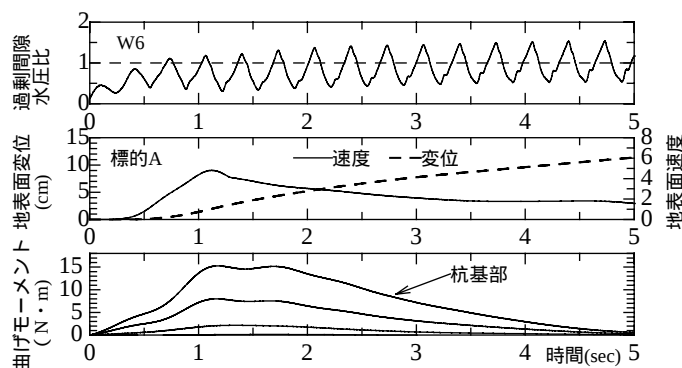


図-2 case1 (Dr=37%) の実験結果

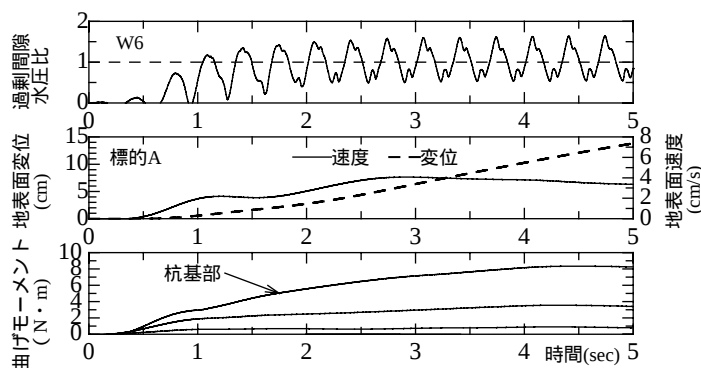


図-3 case4 (Dr=71%) の実験結果

3. 流動外力の抗力としての評価法

一様な流れの中に置かれた物体に働く力 f (物体軸方向単位長さ当たりの力)は、式(1)のように表される。

$$f = 0.5\rho V^2 C_D D \quad (1) \quad \text{ここに、} f: \text{抗力、} \rho: \text{密度、} V: \text{地盤の流動速度、} C_D: \text{抗力係数、} D: \text{杭径である。}$$

上記の抗力係数(C_D)はレイノルズ数(Re)との関数であり、Lamb は円柱に対する抗力係数は、レイノルズ数が 0.5 以下の小さい範囲において式(2)の関係を示している。

$$C_D = 8\pi / Re \{0.5 - 0.5772 - \log(Re/8)\} \quad (2)$$

本研究では速度に起因した外力が支配的に作用したと考えられる相対密度の小さい実験(case1～case3)を対象に液状化地盤から作用する流動外力に対する式(2)の適合性を検討する。杭基礎を式(3)に示す Voigt モデルを用いてモデル化し、図-2 に示したように模型杭には速度に起因した力が作用すると仮定すれば、式(3)の第1項は無視することができる。式(3)の第1項を削除した式(3)と抗力の式(1)を等しいとすれば、抗力係数(C_D)は式(4)のように書ける。 c_i は実験から得られた曲げモーメントおよび地盤速度を用いて最小2乗法で算定した¹⁾。

$$f_i = k_i u_i + c_i \dot{u}_i \quad (3) \quad C_D = 2c_i / \rho V D \quad (4)$$

ここに、 f_i : 深さ*i*における杭軸方向単位長さあたりの力(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。

レイノルズ数は式(5)のように表される。

$$Re = \rho V D / \mu \quad (5)$$

ここに、 μ は液状化土の粘性係数、 D :杭径である。粘性係数を算定すればレイノルズ数は求まることとなり、本研究では模型地盤の流れを1次元粘性流体の流れとし、式(6)を満足する粘性係数を算定した²⁾。

$$V_t = \sum_{i=1,3,\dots}^9 16 \frac{H^2}{(i\pi)^3} \cdot \frac{\rho g \sin \theta}{\mu} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{i\pi}{2H} \right)^2 \frac{\mu}{\rho} t \right\} \right] \sin \frac{i\pi}{2} \quad (6)$$

図-4 に上記の方法により求めたレイノルズ数と抗力係数の関係を示すとともに、図-5 には抗力係数と相対密度の関係を示す。図-4 によれば、本実験により求められたレイノルズ数は 10^{-2} 以下の小さい領域であり、抗力係数はレイノルズ数の 10^{-3} を境に急激に減少する傾向にありことが分かる。また、図中に実線で示した Lamb の関係式と比較すると概ね良い対応を示すことが分かる。図-5 によれば、同一実験において求まる抗力係数は大きくばらついていて、相対密度の増加とともに抗力係数も大きくなるような傾向にあることが分かる。

4. まとめ

本研究により相対密度が小さい地盤条件においては、杭基礎に地盤の流動速度に起因した外力が卓越して作用すること、およびその外力は粘性流体の抗力として評価可能であることが示された。

5. 参考文献

- 1) 張至鎬, 濱田政則, 樋口俊一: 杭基礎に作用する側方流動の外力特性に関する研究, 第27回地震工学研究発表会, 報告76
- 2) 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304

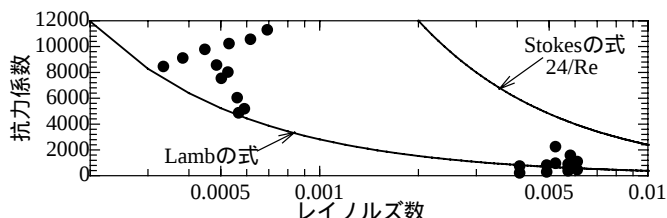


図-4 レイノルズ数と抗力係数の関係

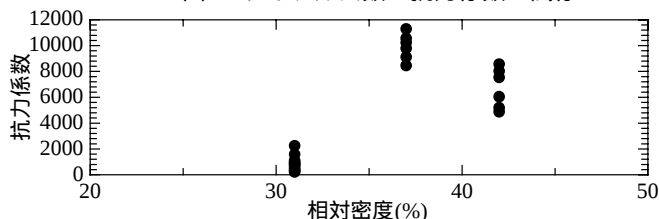


図-5 相対密度と抗力係数の関係