

側方流動地盤が杭に及ぼす外力に関する 模型実験と数値解析

濱田 政則¹・飯田 康史²・志摩 美裕貴²・山田 隆一²

¹フェロー会員 工博 早稲田大学理工学部 (〒169-0072 東京都新宿区大久保三丁目 4-1)

²学生会員 早稲田大学大学院 (〒169-0072 東京都新宿区大久保三丁目 4-1)

模型実験と数値解析により側方流動地盤が杭に及ぼす外力特性を検討した。この結果、模型地盤の全層が液状化する場合には杭に流体力が作用するが、杭周辺の液状化土の流体としての物性が大きく変化し、実験結果もばらつくことが示された。上部に非液状化層がある場合には、杭に作用する外力に上限値があること、非液状化層から受ける外力が層厚に比例することが示された。また、著者らの提案している数値解析モデルにより、実験結果を概ね説明することができた。

Key Words : liquefaction, ground displacement, lateral flow, foundation pile, model test, numerical analysis

1. 模型地盤の全層が液状化する場合の実験と解析

(1) 実験方法および結果の考察

実験に用いた杭―地盤模型を図-1に示す。土槽底板中央には模型杭（ポリカーボネート製、直径 26mm、EI=約 30N・m²）を設置している。地盤材料は遠州灘の浜砂で、これを水中で攪拌し、予備加振によって再堆積させて所定の相対密度を有する飽和砂層を作成した。この土槽を所定の角度に傾斜後、流動直角方向に加振（5Hz、8 波、約 8m/s²）し側方流動を発生させた。流動中は地表面に設置した標的の動きをビデオカメラで撮影し、地表面変位の時刻歴を求めた。標的の位置を図-2に示す。液状化層厚は約 240mm で、地表面勾配は 2、4、6%と変化させた。相対速度は概ね 20~40%の範囲にある。

表-1に示した実験ケースのうち 62b(相対密度 24%)及び 64a(相対密度 43%)の杭下端の曲げひずみ、地表面変位及び地表面速度の時刻歴を図-3に示す。曲げひずみはフィルターにより、加振と杭の自己振動に起因する振動成分を除去している。また地表面速度は、変位の時刻歴を2次関数で補間し、これを微分することにより得られたものである。図-3より、2ケースともに曲げひずみの時刻歴は地表面速度の時刻歴とほぼ相似形で

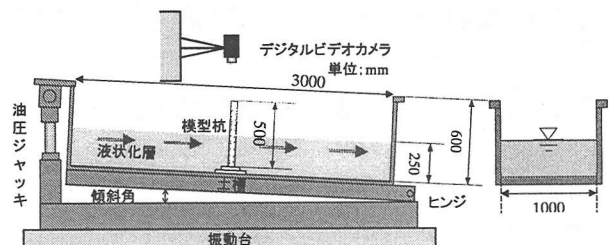


図-1 杭―地盤模型

表-1 実験ケース

Case No.	液状化層厚 (mm)	相対密度 (%)	地表面勾配 (%)
23a	239	31.6	2
23b	241	31.4	2
43a	243	31.9	4
43b	245	31.9	4
63a	241	33.9	6
63b	243	32.4	6
62a	233	22.9	6
62b	233	23.8	6
64a	222	42.7	6
64b	216	39.9	6

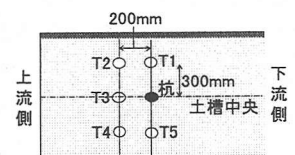


図-2 標的の位置

あり、杭に流体力が作用したことがわかる。ただし相対密度が比較的大きい 64a では加振停止後も残留ひずみが生じており、地盤の流動速度だけでは杭の曲げひずみを説明することができない。

相対密度約 30% (表-1 の 6 ケース) について地表面勾配と最大速度及び最大曲げモーメントの関係を図-4に示す。両者とも地表面速度の増加に応じて増大するが、最大速度は地表面速度が同じであれば一定

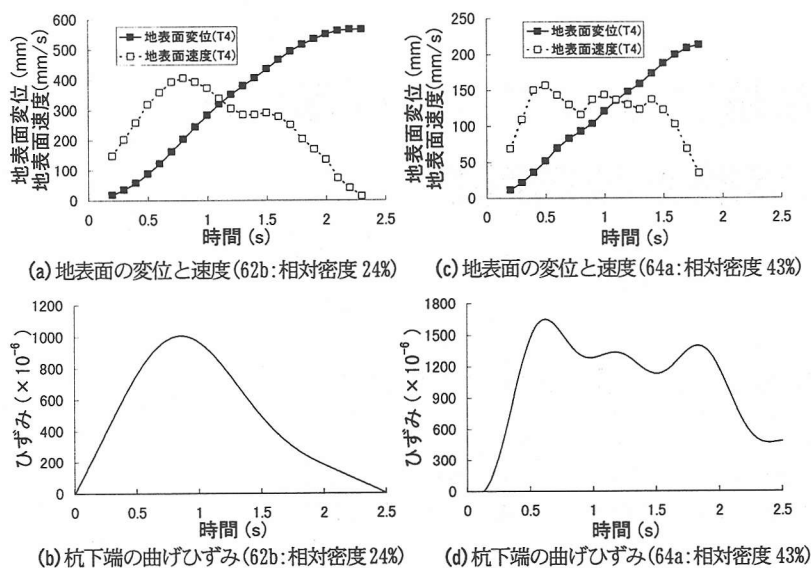


図-3 地表面変位、速度及び杭の曲げひずみの時刻歴

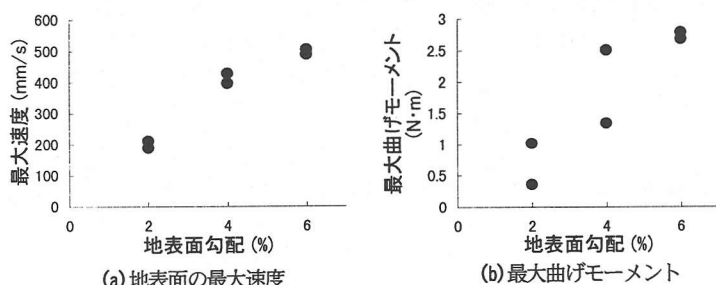


図-4 地表面勾配と最大速度及び最大曲げモーメントの関係

なのに対し、最大曲げモーメントは実験ケースにより差が見られる。これは杭の存在によって杭周辺の液状化土の流動が乱され、この影響で液状化土の粘性係数などの物性が不規則に変化したためと考えられる。

(2) 数値解析結果と考察

自由表面の変化を考慮し、重力のみを外力とした三次元粘性流体解析を行った。解析の対象としたのは実験 62a である。液状化土全体の粘性係数を一様に $60\text{Pa}\cdot\text{s}$ とした場合の (a) 地表面速度及び (b) 最大曲げモーメントの実験値および解析結果を図-5 に示す。図-5 より、解析による速度の時刻歴は実験値に概ね一致しているのに対し、最大曲げモーメントは実験値が解析値を大幅に上回っていることがわかる。これは杭周辺の流動が杭の存在により乱され、杭周辺の液状化土の粘性係数が増加したためと考えられる。そこで図-7 に示すように、杭周辺の液状化土の粘性係数を増加させた解析を行った。粘性係数が増加する領域は、地表面で杭より半径 10cm の範囲とし、深さ方向に $1/4$ 正弦波分布で変化させ、地表面で $2000\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、模型地盤底部で $60\text{Pa}\cdot\text{s}$ とした。その他の領域での粘性係数は図-5 の解析と同様

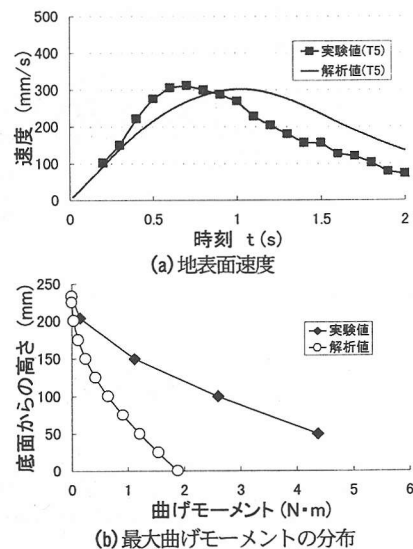


図-5 実験値と解析値の比較 (粘性係数一定)

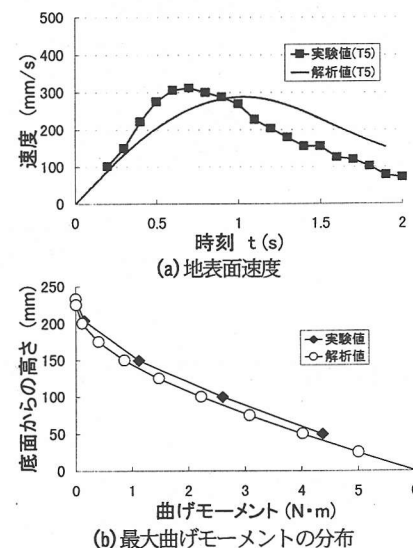


図-6 実験値と解析値の比較 (粘性係数変化)

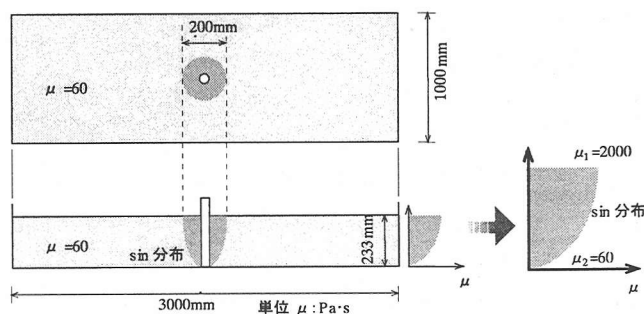


図-7 粘性係数増加を見込んだ解析モデル

$60\text{Pa}\cdot\text{s}$ としている。このモデルによる (a) 地表面速度及び (b) 最大曲げモーメントの解析結果を図-6 に示すが、速度、最大曲げモーメントともに実験値と解析値がよく一致している。

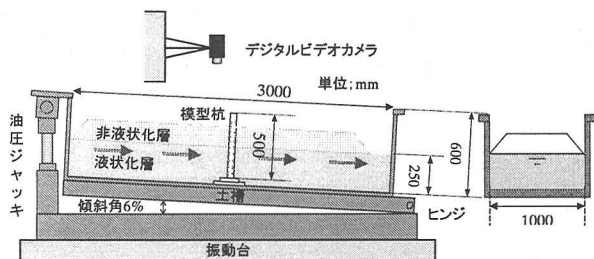


図-8 杭一地盤模型

表-2 実験ケース

Case No.	非液化化層厚 (mm)	液化化層厚 (mm)	相対密度 (%)
5a	52	221	30.2
5b	53	225	25.8
5c	51	233	28.1
15a	157	219	29.6
15b	161	227	27.1

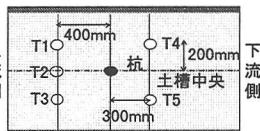
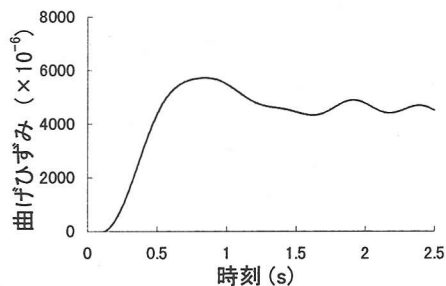
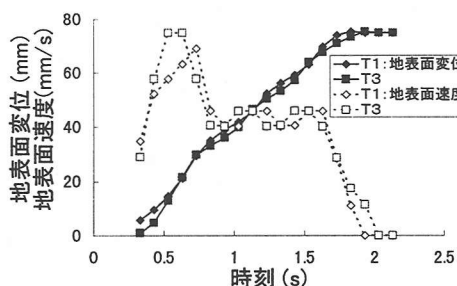


図-9 標的の位置



(a) 杭下端曲げひずみ



(b) 地表面の変位と速度

図-10 杭の曲げひずみ及び地表面変位、速度の時刻歴

2. 模型地盤の上部に非液化化層がある場合の実験と解析

(1) 実験方法および結果の考察

実験に用いた杭一地盤模型と実験ケースを図-8、表-2 にそれぞれ示す。土質材料、模型杭、飽和地盤作成法については前述の通りである。飽和砂層の上に乾燥砂を巻き、非液化化層を作成した。非液化化層は、土槽による拘束の影響を軽減するため断面が台形状になるように作成した。土槽を 6% に傾斜後、流動直角方向に加振(5Hz, 8 波, 約 7.5m/s²)し、側方流動を発生させた。地表面の変位をビデオカメラで撮影し、地表面変位の時刻歴を撮影した。本実験における地表面の標的の位置を図-9 に示す。

表-2 に示した実験ケースのうち 15a における杭下端の曲げひずみ、地表面変位及び地表面速度の時刻歴

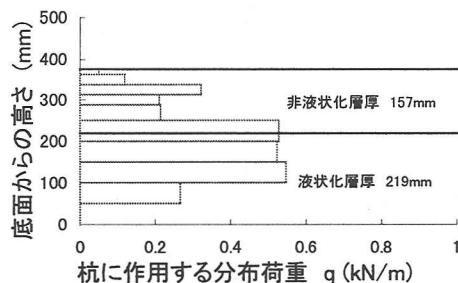


図-11 分布荷重

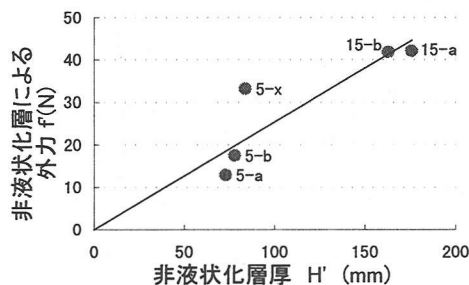


図-12 非液化化層による外力

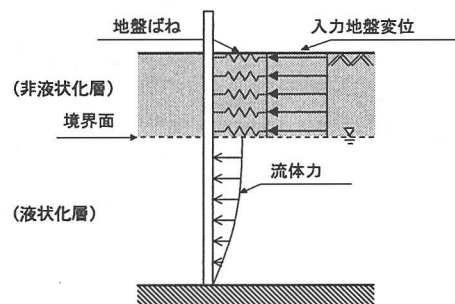


図-13 解析モデル

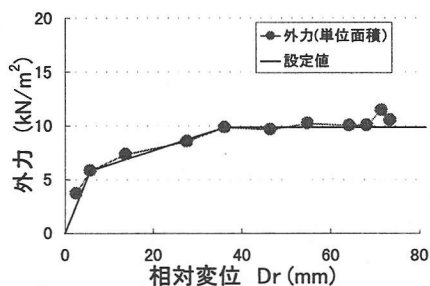
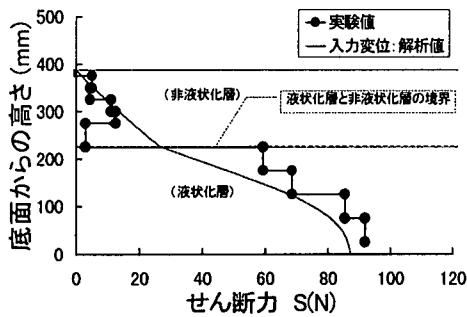
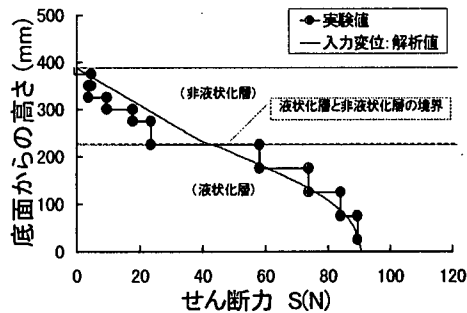


図-14 相対変位と外力 (単位面積) の関係

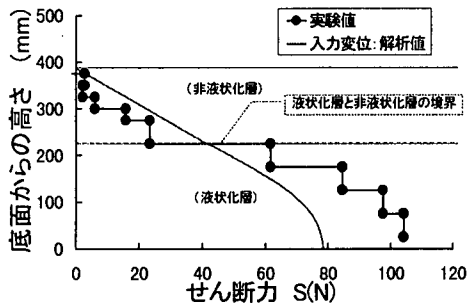
を図-10 に示す。曲げひずみはフィルターにより振動成分を除去している。また、地表面速度の算出方法は前述の通りである。図-10 より、杭の曲げひずみは流動変位の増大に伴って増加し、その後一定値に収束する。この結果は、杭に作用する外力に上限が存在することを示している。また、曲げひずみが最大となる時刻での杭に作用する分布荷重を図-11 に示す。荷重は実験によって得られた曲げモーメントを 2 回微分することにより算定した。本実験の全ケースについて、非液化化層厚と加振開始 1 秒後の非液化化層からの合力の関係を図-12 に示す。合力は非液化化層における分布荷重の総



(a) せん断力分布 ($t=0.4$)



(b) せん断力分布 ($t=1.0$)



(c) せん断力分布 ($t=1.6$)

図-15 せん断力分布の時刻歴

計として算定した。図-12 より非液化化層からの外力は、層厚にほぼ比例して増大することが分かる。

(2) 数値解析の概要・結果及び考察

解析モデルを図-13 に示す。本モデルでは非液化化層の変位を地盤バネを介して入力させ、液化化層からは流体力を杭に作用させている。地盤バネ係数は非液化化層全体で一様と仮定した。実験によって得られた、杭への合力と杭～地盤間の相対変位の関係を図-14 に示す。相対変位は、杭頭変位と杭より 40cm 上流の地表面変位(標的 T2)の差とした。これを図示するようにトリリニア型モデル化し、地盤バネの復元力特性を定めた。加振開始後 0.4 秒、1.0 秒、1.6 秒におけるせん断力分布の解析値を図-15 に実験値と対比して示す。液化化層から受ける流体力の算定は、液化化層のみの場合と同様に杭周辺の粘性係数の増大を考慮して、図-7 のモデルを用いて行っている。図-15 より、 $t=0.4$ (sec)、 $t=1.0$ (sec) の場合については良好な結果

が得られたが、 $t=1.6$ (sec) では液化化層におけるせん断力に大きな差が見られる。これは、この時刻では加振がほぼ停止しており、液化化層に固体的性質が戻って、流体と見なした解析と差が生じたものと考えられる。

3. 結論

全層が液化化する場合については、以下の結果が得られた。

- 1) 杭の曲げひずみと地表面速度の時刻歴が相似形であることから、杭に流体力が作用したと考えられる。
- 2) 地表面勾配、相対密度が同一条件下の実験では、液化化土の流動速度はほぼ一定なのに対し、杭の曲げモーメントにはケースによる差が見られる。
- 3) 同一条件下の実験において、杭の曲げモーメントがばらつく原因として、杭の存在により液化化の流動が乱され、流体としての特性、すなわち粘性係数が大きく変化していることが考えられる。このことは粘性係数増加を見込んだ数値解析により確認された。

上部に非液化化層がある場合については、以下の結果が得られた。

- 1) 杭に作用する外力は地盤変位とともに増大し、その後、一定値に収束する。
- 2) 非液化化層による外力は、非液化化層厚にほぼ比例する。
- 3) 非液化化層の変位を地盤バネを介して入力し、かつ流体力を考慮した解析結果は、実験結果と概ね一致した。

参考文献

- 1) 液化化による地盤の水平変位の研究 土木学会論文集 濱田政則, 若松加寿江 1998. 6
- 2) 液化化土が杭に及ぼす流動外力の実験と解析 第 33 回 地盤工学研究発表会 濱田政則, 三野栄作, 吉田誠