

側方流動地盤中の杭に作用する 外力の特性

○樋口俊一¹, 松田 隆², 三浦房紀³

¹正会員 工修 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)

²正会員 工博 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)

³正会員 工博 山口大学大学院理工学研究科 環境共生工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

杭基礎の破壊に至るまでの挙動を解明し、合理的耐震設計を実現するには、杭の破壊に至るまでの物性を明らかにすると共に、地盤から杭に作用する外力を明らかにすることが必要である。このような観点から、本研究は液状化地盤から杭に作用する外力を評価するために、遠心载荷実験により液状化発生から側方流動に至る一連の過程における杭の挙動を調べた。また、完全液状化時の地盤を粘性流体と見なし、側方流動地盤から杭に作用する流体力の特性を評価するとともに、杭基礎に作用する外力を推定できることを示した。

Key words: Pile, Centrifuge, Shaking table test, Liquefaction, Lateral spreading

1. はじめに

杭基礎の破壊に至るまでの挙動を解明し、合理的耐震設計を実現するには、杭の破壊に至るまでの物性を明らかにすると共に、地盤から杭に作用する外力を明らかにすることが必要である。特に杭基礎が液状化地盤内にある場合には地盤の物性が時々刻々変化するために、杭基礎に作用する外力は非常に複雑となる。これまで液状化地盤中の杭の挙動に関する研究は多く行われているが、統一的に外力の評価を試みた例は少ない。このような観点から、本研究は液状化地盤から杭に作用する外力を評価するために、遠心载荷実験により液状化発生から側方流動に至る一連の過程における杭の挙動を調べ、側方流動力の外力特性の評価を試みたものである。

2. 遠心模型実験の概要

(1) 実験ケース

本実験では遠心重力 $30g$ ($294m/s^2$) 場において模型地盤を加振し、側方流動現象を発生させた。表-1 に実験ケースを示す。実験パラメータとして地盤の液状化の程度に影響を及ぼすと考えられる地盤の密度と入力加振波の最大振幅・波形形状を設定した。また、杭の挙動に大きな影響を及ぼす非液状化層の有無についても検討した。

(2) 模型地盤

図-1 に模型地盤・計測項目および計測点を示す。地盤は 8 号珪砂で作製し、長さ、幅ともに 1000mm、層厚はスロープ上部で 300mm、下部で 200mm の傾斜地盤である。地表面勾配は 10% で、地下水位は 250mm である。液状化により杭に作用する側方流動力に着目することから、模型地盤の地表面傾斜方向と加振方向は直交方向とした。間隙流体には水を使用した。

地盤内部および地表面には液状化時の地盤の応答性状と応答変位を把握するため、加速度センサーと間隙水圧計、レーザー変位計を設置した。液状化時の地中の変位分布については実際に計測された例が少ないことから、この実験では図-1(c)のように耐圧型 LVDT を用いた地中変位の時刻歴の計測を試みた。

表-1 実験ケース

ケース	1	2	3	4	5
地盤構成*	A	A	A	A	B
相対密度 D_r (%)	40	40	80	40	40
入力波形**	1	1	1	2	2
最大入力加速度 (gal)	400	150	400	400	400

*地盤構成 A : 全層液状化層, 地盤構成 B : 下部液状化層+上部非液状化層

**入力波形 1 : 60HzSin 波振幅漸増, 入力波形 2 : 60HzSin 波一定振幅

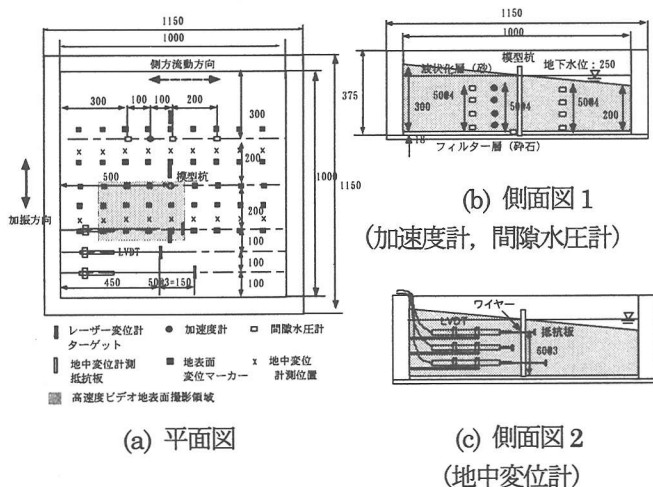


図-1 模型地盤と計測点

(3) 模型杭

図-2 に模型杭を示す。模型杭はステンレス製中空パイプで、外径 20mm、肉厚 0.5mm である。境界条件を明確にするため杭先端部にフランジを溶接し、土槽底板にボルトで固定した。杭には側方流動方向に対し、上下流 6 断面のひずみを計測した。また、杭の表面に大きな凹凸が出来ないように、これらのひずみゲージは杭の内面に取り付けた。

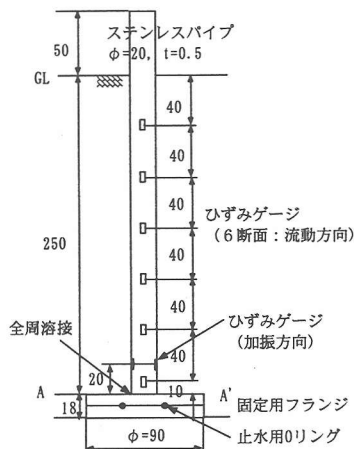


図-2 模型杭とひずみ計測点

3. 実験結果

図-3 に代表的な実験結果の 1 例として、地盤が完全に液状化したケース 1 の入力加速度、過剰間隙水圧比、杭の曲げモーメント、地盤地表面変位の時刻歴を示す。これより約 0.4 秒付近から間隙水圧が上昇し始め、0.57 秒ころに完全液状化していることが分かる。曲げモーメントはほぼ完全液状化する時間に最大値となっている。地表面の変位は間隙水圧が上昇し始める時刻から増大し、完全液状化するとその増加割合は小さくなっている。このように、過剰間隙水圧比（液状化の程度）と地盤の側方流動変位及び杭に作用する外力の間には密接な関係がある。

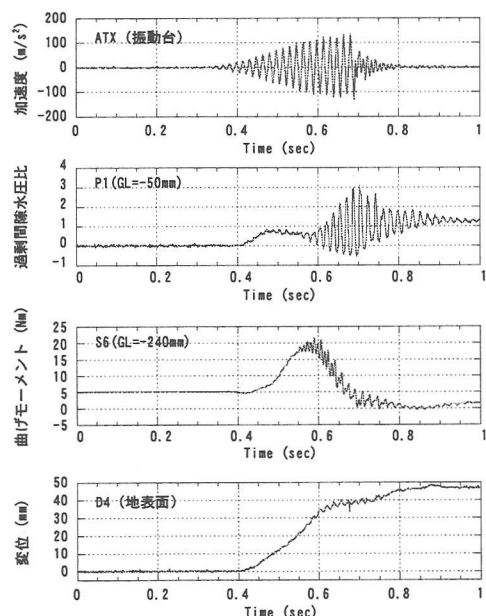


図-3 加振加速度、過剰間隙水圧比、杭の曲げモーメント、地表面変位の時刻歴（ケース 1）

表-2 に、それぞれの実験ケースにおける最大過剰間隙水圧比 PPR_{max} 、最大地盤変位 $DG_{max}(mm)$ 、杭頭最大変位 $DP_{max}(mm)$ 、杭基部の最大曲げモーメント $M_{max}(Nm)$ 及び最大曲げモーメント発生時刻における地盤変位 $DG_{Mmax}(mm)$ 、杭頭残留変位 $DP_{Rm}(mm)$ を示した。

表-2 各実験ケースでの計測値

ケース	1	2	3	4	5
PPR_{max}	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0
DG_{max}	47.1	13.6	24.1	51.1	17.0
DP_{max}	1.8	0.6	1.3	1.8	7.0
M_{max}	19.2	8.3	18.3	20.5	42.0*
DG_{Mmax}	27.6	13.0	20.5	24.9	3.5*
DP_{Rm}	0.0	0.3	0.9	0.0	4.0

*杭の応答が塑性域に入ったため、弾性限界での値

表-2 より以下のようなことが読み取れる。

- ① 側方流動変位は緩い地盤（ケース 1）と比較して締め固めた地盤（ケース 3）では半分程度となる。過剰間隙水圧比が 1.0 に達しない場合（ケース 2）でも側方流動が発生したが、流動変位は小さい。
- ② 緩い地盤では側方流動地盤が杭をすり抜けるが、締め固めた地盤では地盤が杭を完全にはすり抜かず、杭に残留変位が生じる。過剰間隙水圧比が 1.0 に達しない場合も杭に残留変位が生じる。
- ③ 地盤が杭をすり抜ける場合（ケース 1）でも、杭が拘束される場合でも（ケース 3）、杭基部には同じ程度の最大曲げモーメントが生じる。
- ④ 間隙水圧が徐々に上昇する場合（ケース 1）と即座に上昇する場合（ケース 4）でも、杭基部最大曲げモーメント

トはほぼ等しく、地盤の流動変位もほぼ等しい。

⑤ 液状化層上の非液状化層は杭を拘束し、側方流動時に杭に大きな強制変位を生じさせる。

4. 杭に作用する流体力の評価

(1) 側方流動地盤の粘性係数の評価

濱田らは、流動中の液状化土は流体としての性質を有すると指摘している¹⁾。ここでは完全液状化した地盤が流体であるとの立場で液状化地盤から杭に作用する力の特性を分析する。なお、ここからは地盤が完全に液状化したと見なせるケース1及びケース4の実験結果に基づいて分析を実施する。

a) 側方流動地盤の流速分布

図-1(c)に示した地中変位計と地表面のレーザー変位計より側方流動地盤の地中流速分布を求めた。図-4にケース1の流速時刻歴を示す。図-5は各流速時刻歴より、地盤が完全に液状化したと考えられる数点の時刻断面(過剰間隙水圧比が1を超え、かつ杭の最大曲げモーメント発生時刻前後)における地盤の流動速度分布を、地表面速度で正規化して示したものである。これより流速分布は深さ方向にsin分布していることを見なせることから、土槽内部の側方流動地盤は1次元の粘性流体の流れとしてモデル化する。ここで時刻tの地盤内流速 $V_t(z)$ を次式で定義する。

$$V_t(z) = V_{st} \cdot \sin(\pi z / 2H) \quad (1)$$

z: 基盤層からの高さ, V_{st} : 地表面流速, H: 液状化層厚

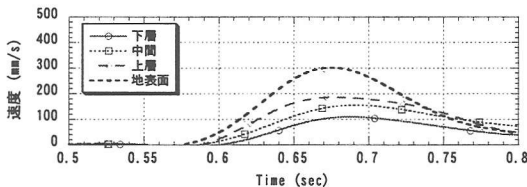


図-4 側方流動地盤の流速時刻歴 (ケース1)

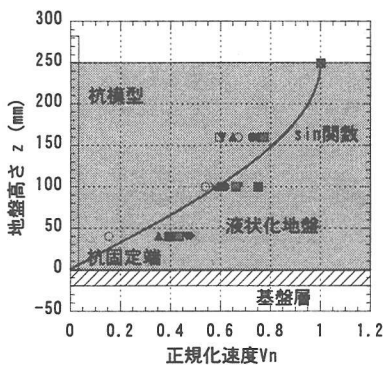


図-5 正規化した地盤内流速分布

b) 杭に作用する流動外力の分布

図-6は、ひずみゲージより計測した杭の曲げモーメントの深度分布の1例である。ここで、時刻tの曲げモーメントの分布形状を次式で近似する。

$$M_t(z) = M_{tb}(1 + \sin(\pi z / 2H)) \quad (2)$$

z: 基盤層からの高さ, M_{tb} : 時刻tでの基部曲げモーメント, H: 液状化層厚

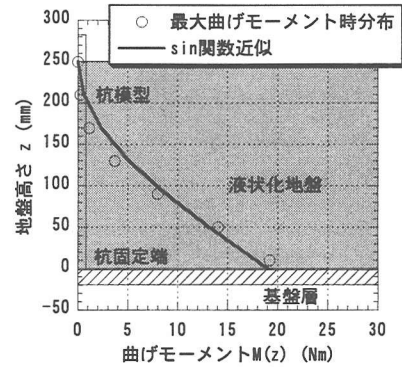


図-6 杭の曲げモーメント分布 (ケース1)

杭に作用する分布外力を求めるには、曲げモーメントをzで2回微分すれば良い。式(2)の2回微分は次式となる。

$$q_t(z) = M_{tb} \pi^2 / 4H^2 \cdot \sin(\pi z / 2H) \quad (3)$$

c) 粘性係数の算定と非線形性

杭に作用する外力が流動力のみであると考え、流動地盤から杭表面に作用するせん断応力 τ として、

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (4)$$

μ : 粘性係数, $\dot{\gamma}$: ひずみ速度

を仮定する。ここで、ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ として地表面速度 V_{st} を層厚Hで除した液状化層の平均的なせん断ひずみ速度を用いて、各ケースから選定した複数の時間断面における側方流動地盤の平均的な粘性係数 μ を算定する。すなわち、杭基部のせん断力 Q_{tb} と杭全表面に作用するせん断力に、 $Q_{tb} = \mu_t \dot{\gamma}_t \pi D H (= M_{tb} \pi / 2H)$ (5) μ_t : 時刻tでの粘性係数, $\dot{\gamma}_t$: 時刻tでのひずみ速度 (V_{st}/H), D: 杭径

なる関係を仮定する。実験より得られた杭基部のせん断力 Q_{tb} と(5)式より粘性係数を算定し、粘性係数 μ とひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係を整理したところ、図-7のように粘性係数はひずみ速度の増大に伴って小さくなることが明らかとなった。これは濱田らにより指摘されている、側方流動地盤の疑似塑性流体的性質¹⁾によるものである。

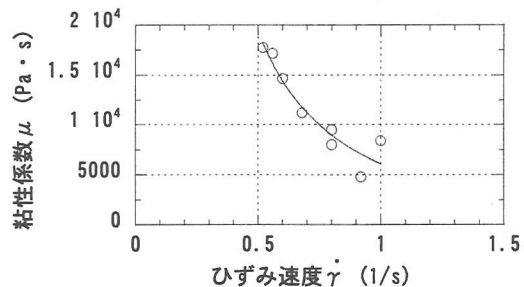


図-7 実験より算定した粘性係数 μ とひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係

このように、杭に作用する外力より推定した側方流動地盤の粘性係数の範囲は $4,500\text{Pa} \cdot \text{s} \sim 18,000\text{Pa} \cdot \text{s}$ となった。これは、濱田らが遠心載荷実験において側方流動地盤の流動速度から推定した粘性係数 ($1,000\text{Pa} \cdot \text{s} \sim 40,000\text{Pa} \cdot \text{s}$)²⁾ の範囲にある。図中に示した曲線は、粘性係数 μ とひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係を2次双曲線で最小二乗近似したもので、

$$\mu = \mu_0 (1 + \dot{\gamma} / \dot{\gamma}_r)^2 \quad (6)$$

μ_0 : 初期粘性係数, $\dot{\gamma}_r$: 基準ひずみ速度

である。ここで、 $\mu_0 = 398,400(\text{Pa} \cdot \text{s})$, $\dot{\gamma}_r = 0.1411(1/\text{s})$ である。

(2) 数値シミュレーション

4.(1)で算定した側方流動地盤の粘性係数を用いて、側方流動地盤中の杭基礎の応答をシミュレーションした。解析対象としたのは、図-8に示す矢板護岸背後の単杭基礎の遠心模型振動実験である。

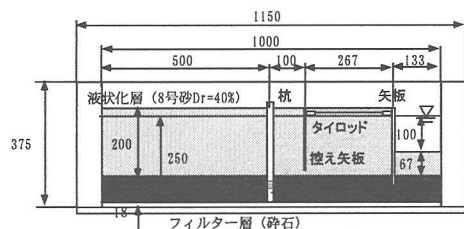


図-8 矢板護岸遠心実験模型

図-9に解析モデルを示す。解析モデルは杭を梁要素で、下部基盤層を地盤ばねでモデル化したフレームモデルとした。解析は最大曲げモーメントの発生時刻を対象に実施した。実験結果より得た解析時刻での地表面速度 $V_s = 104\text{mm/s}$ から、ひずみ速度は $\dot{\gamma} = 104/167$ (液状化層厚: mm) $= 0.632(1/\text{s})$ となり、(6)式の関係より粘性係数 $\mu = 13,300(\text{Pa} \cdot \text{s})$ が求まる。杭に作用する外力はこの粘性係数を(5)式に代入して M_b を求め、(3)式の外力分布を用いて算定した。解析では上部非液状化層には解析時刻の地表面流動変位が 12mm と大きいことから道示の降伏地盤反力を、液状化層には流体力を節点力として流動方向に入力した。また、基盤層の水平地盤ばねは道示の方法で設定した。

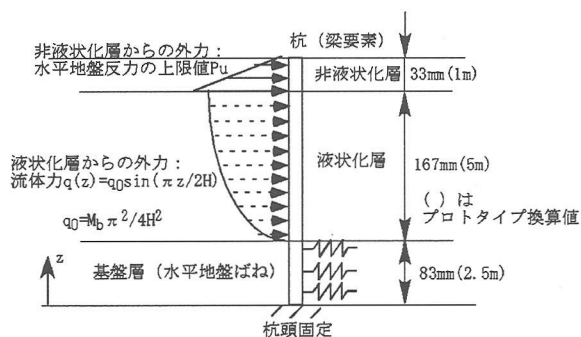


図-9 側方流動力シミュレーションモデル

図-10に解析結果を示す。粘性流体力による方法とともに、道示の側方流動力を用いた計算結果も示している。なお道示の方法では流動力の作用幅 B を群杭最外縁の杭間幅としているため、ここでは単杭周辺地盤の影響を比較するため杭径 D の1倍と3倍について計算した。

解析の結果、粘性流体力による方法で求めた側方流動時の杭の曲げモーメント分布は大きさにおいて実験値を多少上回るが、おおむね一致することが示された。固定端付近で解析値と実験値の曲率が異なるのは、実験では加振による基盤層自体のせん断変形が生じたためと考えられる。一方、道示の方法では $B=D$ とした場合は実験値とよく合ったが、 $B=3D$ の場合は側方流動力が過大に評価された。

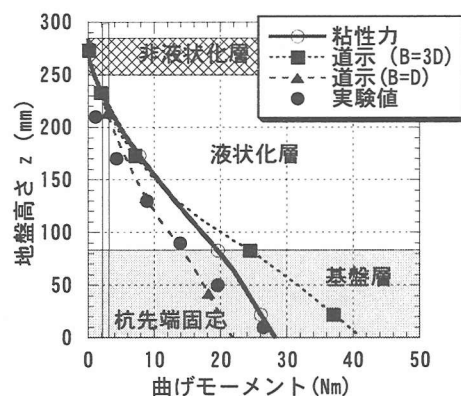


図-10 フレーム解析による杭の曲げモーメント分布

5. まとめ

遠心載荷装置を用いた実験より、側方流動する地盤中の杭の応答と地盤から杭に作用する外力について検討した。完全液状化した地盤が流体であると仮定して液状化地盤から杭に作用する力の特性を分析し、粘性係数 μ と地盤のひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係を見出した。推定した粘性係数を用いて流体力を算定し、側方流動地盤の杭基礎の応答をシミュレーションしたところ杭の曲げモーメント分布は実験値とおおむね一致し、応答を推定できることがわかった。今後、粘性係数 μ と地盤のひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係について詳細に検討するとともに、地盤が杭をすり抜けないような場合についても定式化を進めたいと考えている。

なお本研究は、「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」の一環として実施されたことをここに記し、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 濱田政則, 島村一訓, 柳瀬和俊, 中村正樹, 田中淳寛: 液状化土の流動特性に関する研究, 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.261-266, 2001.