

液状化土の粘性特性に関する考察

早稲田大学大学院 学生会員 高橋祐幸 東條紀明 藤澤惣
 清水建設技術研究所 正会員 張至鎬 鹿島建設 正会員 宮内良
 早稲田大学 フェロー会員 濱田政則

1. はじめに

既往の地震において、液状化地盤が水平方向に移動する現象、いわゆる側方流動は、杭基礎などの地下構築物に甚大な被害を及ぼした。既往の研究¹⁾において、杭基礎に作用する流動外力は、過剰間隙水圧比が 1.0 に達した完全な液状化状態において、地盤流動速度に起因した外力（粘性力）が卓越することが明らかにされ、その評価は抗力として取り扱うことが提案されている。この知見をさらに発展させて耐震設計法に反映させるためには、液状化土の粘性特性を解明する必要がある。

本研究においては、液状化地盤を粘性流体とみなし、遠心载荷場における模型実験データを用いて粘性係数を算出し、その特性及び予測に関する考察を行った。

2. 対象とする模型実験

粘性係数を算出するにあたって、対象とする模型実験データの概要について表-1 に示す。いずれの実験ケースも拘束圧が実地盤レベルとなる遠心载荷場によって実施している。後述するが、粘性係数の算出するために地表面流動速度を用いているが、いずれの実験ケースも自由地盤表面で計測された値を用いるものとする。図-1 に例として杭を 9 本（杭間隔 5.0D：正正方配列）設置した case13 の地表面変位・速度計測位置の概要を示す。図中のレーザー変位計 H1, H2 で地表面変位を計測し、微分することにより地表面流動速度を算出している。

表-1 対象とする模型実験概要

ケース名	地盤層厚 (cm)	遠心加速度 (G)	相対密度 (%)	地表面勾配 (%)	杭の条件
case1	20.3	10	34.8	6	
case2	20.2	20	36.9	6	
case3	20.2	30	35.3	6	
case4	19.9	10	41.2	6	
case5	20.1	20	37.0	6	
case6	20.0	40	39.6	6	
case7	20.0	40	39.2	6	
case8	25	30	44	10	1本
case9	25	30	41	10	1本
case10	20.0	30	40	10	1本+3本
case11	25.2	30	38.5	10	9本
case12	25.4	30	38.9	10	9本
case13	25.0	30	37.3	10	9本

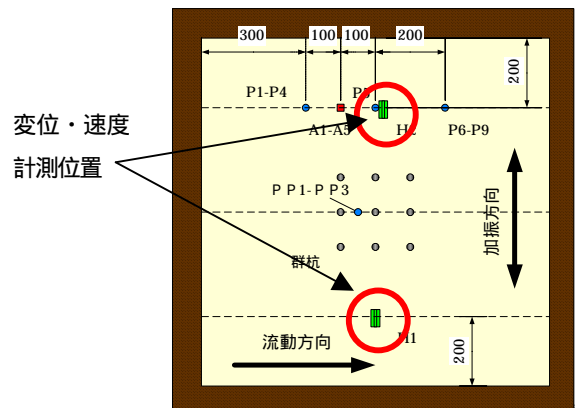


図-1 地表面変位・速度計測位置例 (case15)

3. 模型実験データを用いた粘性係数の算定

模型実験において土槽の流動方向の長さが液状化層厚に比べ、十分に大きく、また模型地盤の水平幅も十分に大きいため、流動に対する側壁の影響が小さいと考えれば、土槽中央部での液状化砂の流れを図-2 のように 1 次元の流れとしてモデル化することができる。既往の研究²⁾において地表面の地盤流動速度の時刻歴 $V_s(t)$ は、(1) のようになるとされている。

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

$V_s(t)$: 地表面の地盤流動速度, H : 模型地盤の層厚, ρ : 地盤密度, g : 重力加速度, μ : 粘性係数, θ : 地表面勾配

(1) で用いているパラメータは粘性係数 μ 以外全て地盤条件となっている為、時刻 t における地表面の地盤流動速度 $V_s(t)$ を (1) に代入し、(1) を満足する粘性係数を算出できる。すなわち、時刻 t における地表面の流動速度時間 $V_s(t)$ を (1) に代入し、(1) を満足する粘性係数 μ を刻々算定する。時間刻み幅は 0.001 秒とする。

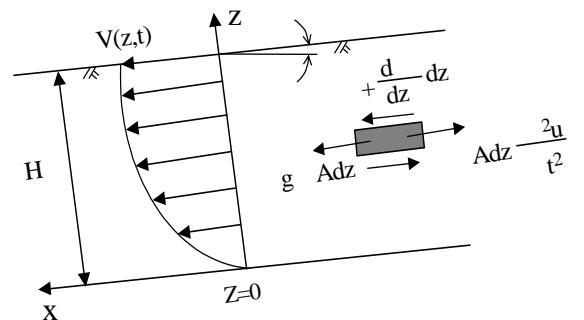


図-2 傾斜地盤における 1 次元粘性流体モデル

キーワード 液状化, 側方流動, 遠心模型実験, 地盤流動速度, 粘性係数

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学 濱田研究室 TEL03-5286-3147 E-mail:hiroyuki-t@fuji.waseda.jp

4. 液状化地盤の粘性係数の特性

図-3に土槽底部に設置している水圧計から求めた過剰間隙水圧比と地表面地盤流動速度および3.で算出した粘性係数の時刻歴比較を示す.これによると,算定された粘性係数は地盤流動速度の増加に伴い減少する傾向にあり,地盤流動速度が最大値を示す時刻に,粘性係数は最小値を示していることがわかる.過剰間隙水圧比がほぼ1.0に達し液状化状態を迎えた時刻以降の減少傾向は小さくなる.次に,(2)に示すようなせん断ひずみ速度と粘性係数の関係を考察する.粘性係数の抽出区間を図-3に示す.既往の研究²⁾によるとせん断ひずみ速度が0.2付近で流体的な性質に遷移し始めるとされているので,その時刻(点線)を開始点とし地盤流動速度がほぼ最大値を示す時刻までの時刻(破線)までを抽出区間とした.せん断ひずみ速度は地表面で0であり,模型地盤の深さ方向に変化している.(2)のせん断ひずみ速度は,模型地盤全体の平均的な値であると解釈できる.

$$\gamma = V/H \quad V: \text{地盤流動速度}, \quad H: \text{模型地盤の層厚} \quad (2)$$

図-4よりせん断ひずみの増加に伴って,粘性係数が減少していることがわかる.すなわち,粘性係数がせん断ひずみ速度によって変化する非線形的な性質(擬塑性流体)を有していることを示している.

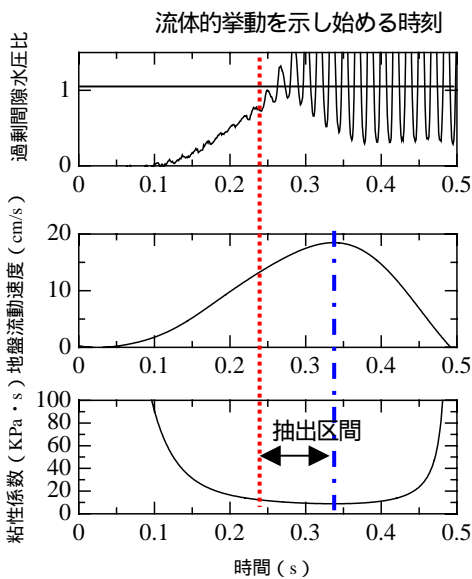


図-3 計測器と粘性係数の時刻歴比較

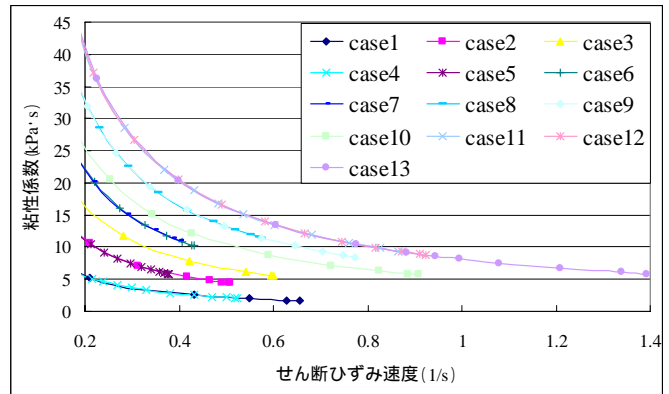


図-4 せん断ひずみ速度と粘性係数の関係

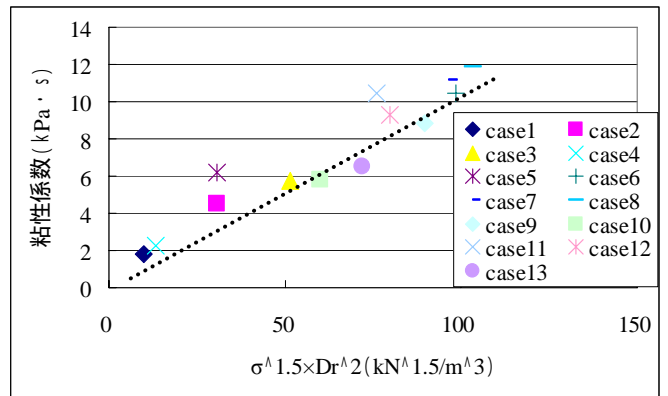


図-5 地盤条件と粘性係数の関係

5. 地盤条件と粘性係数の関係

流動実験および中空ねじり試験結果^{2),3)}を参考に既往の研究では,(3)のように粘性係数は鉛直応力の1.5乗に比例し,相対密度の二乗に比例して増大するものとされている.

$$\mu \propto \sigma^{1.5} Dr^2 \quad (3)$$

実験条件より求まるこれらの値と粘性係数の関係を図-5に示す.比較に用いる粘性係数は,図-4におけるひずみ速度の最大値付近の平均値を各実験の値として用いている.これより,両者は多少の誤差はあるが比例関係にあることがわかる.

6. まとめ

- ・ 地盤が液状化して流動する過程において,液状化土はせん断ひずみ速度の増加に伴い粘性係数が減少する擬塑性流体としての性質を持つことが示された.
- ・ 地盤の条件から算出される値とひずみ速度が最大値付近における液状化地盤の粘性係数は比例関係にあり,地盤の諸条件が得られれば,粘性係数が予測できることが示された.

参考文献

1) 張至鎬・濱田政則: 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,土木学会論文集,第766号/ -68,pp.191-201,2004.7
 2) 濱田政則: 液状化砂の流動特性に関する実験的研究,土木学会論文集,第792号/ -71,pp.13-25,2005.6
 3) 濱田政則・若松加寿江・島村一訓・田島幸治・楡達郎: 液状化地盤の水平変位量の予測法に関する研究,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.267-272,2001.3