

# 液状化砂の流動特性に関する実験的研究

濱田 政則<sup>1</sup>·佐藤 貴俊<sup>2</sup>

 <sup>1</sup>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
<sup>2</sup>早稲田大学大学院 理工学研究科(〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1) E-mail: takatoshi-sato@ruri.waseda.jp

重力場および遠心載荷場における模型地盤の流動実験により液状化砂の流動特性を実験的に明らかにした.模型地盤の層厚を変えた重力場の流動実験から,液状化砂がせん断ひずみ速度の増大につれて粘性係数が低下するいわゆる擬塑性流体あるいはビンガム流体としての性質を示すこと,また粘性係数が模型地盤層の 1.3~1.6 乗に比例して増大することを示した.さらに,遠心載荷場で遠心加速度を変化させた流動実験から,重力場の模型実験と同様,液状化砂の粘性係数がせん断ひずみ速度の増大により低下すること,および遠心加速度の 1.6~1.7 乗に比例して増大することを示した.

*Key Words:Liquefaction, Liquefaction-induced ground flow, Ground displacement, Non-Newtonian flow, Centrifug test* 

# 1.はじめに

側方流動の発生メカニズムについては, 地盤の大 変位が液状化土の流体的振舞いによって生ずるとの考 え方<sup>1)</sup>, 液状化地盤を固体ととらえ,地盤の剛性が著 しく低下することによって大変位が生ずるとの考え方 <sup>2)</sup>, 液状化地盤中に形成された水膜上を上部の地盤が 滑り,大変位が生ずるとの考え方<sup>3)</sup>,などが提案されて いる.著者らは,既往地震における側方流動事例の分 析および流動中の地盤から基礎杭に作用する外力に関 する模型実験の結果にもとづき,数mもの地盤変位が 液状化土の流体としての挙動によって生じているとの 立場から液状化砂の流動特性に関する研究を行ってき た.

本論文は,重力場と遠心載荷場での模型地盤の流動 実験により液状化砂の流動特性を明らかにして,側方 流動による地盤変位予測のための基本的な知見を得よ うとするものである.

# 2. 重力場における模型地盤の流動実験

#### (1) 実験の方法

重力場の実験に用いた剛土槽および模型地盤の概要 を図-1に示す.模型地盤は,流動方向の長さ530cm, 幅103cm,層厚は84cm~151cmである.地盤材料はケイ 砂5,6号の混合砂で,平均粒径および均等係数はそれ ぞれ0.4mm,2.5である.表-1に示すように模型地盤の 相対密度は33%~35%である.模型地盤作成後,振動台 に8.7%の角度で固定されている台座上に土槽を設置し た.

流動方向と直角の水平方向に,振幅600cm/s<sup>2</sup>,周波数 5.0<sup>1/s</sup>の正弦波加速度で土槽を加振して模型地盤を液状 化させ,地盤下方への流動を生じさせた.加振は地表 面がほぼ平坦になるまで継続した.

図-1に示す土槽中央部地表面に設置された標的の変 位をビデオカメラで標的中心点の変位の時刻歴を測定 し,液状化土の流動特性を検討する.



模型地盤及び計測器の配置

表-1 重力場での流動実験の条件

実験名	模型地盤層厚	相対密度	地表面勾配	加振加速度	周波数
Δ1	84	34	87	(CITI/S) 597	5
A2	100	33	8.7	590	5
A3	119	33	8.7	679	5
A4	151	35	8.7	619	5

(2) 粘性係数の算定

図-2に模型地盤厚100cm(表-1 実験A2)で得られた 地表面変位および地表面速度の時刻歴の一例を示す. 地表面速度は,地表面変位を3次関数で補間し,これを 微分することにより求めた.



模型地盤の上下流方向中央点付近の地盤の流動を図 -3に示すような1次元の粘性流体の流れと考える.



粘性係数が一定, すなわち線型粘性流体とすれば地 表面の流動速度*V(t)*は,

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

と表される.上式は液状化砂の粘性係数がせん断ひず み速度に関係なく一定,すなわち線形粘性流体として の解である.上式においてµおよびHは液状化砂の割 線粘性係数と液状化層厚,,,gはそれぞれ液状化土 の密度,地表面勾配および重力加速度であり,t は時 間である.時刻歴 t=tjにおける地表面速度の測定値Vj を式(1)に代入し,式(1)を満足する粘性係数µjを刻々 算定する.

#### (3) 土槽境界の影響の補正

粘性係数を算定するために用いる式(1)は深さ方向の みに流動速度が変化する1次元の流れの解である.実 験は図-1に示すように流動方向の境界の影響を受けて 流動速度が減少しているものと考えられる.このため 流体解析プログラムPHOENICSを用い土槽中央点の地 表面速度の2次元解析による時刻歴を求め,1次元解析 による流動速度との比を求めた.これを図-4に示す. 図示した速度の比を用いて実験による地表面速度を補 正し,式(1)により粘性係数を算定した.この結果を図 -5に示す.



図-5によれば, せん断ひずみ速度が増加するに従っ て, 粘性係数が減少している.すなわち, 粘性係数が せん断ひずみ速度により変化する非線形的な性質を液 状化砂が有していることが分かる.せん断ひずみ速度 の増加にともない粘性係数が減少する流体は一般に擬 塑性流体あるいはビンガム流体と呼ばれ, せん断応力 とせん断ひずみ速度の関係は図-6のように示される. また図-5によれば模型地盤の層厚が大きいほど粘性係 数が大きく,層厚が大きいほど流れにくい性質を持っていることが分かる.



図-6 液状化砂の非線形粘性係数流体としての性質

(4) 粘性係数に与える層厚の影響

下記のように無次元化されたせん断ひずみ速度を定 義し,層厚の異なる実験において同一の無次元せん断 ひずみ速度における粘性係数を比較する.

無次元せん断ひずみ速度 
$$\bar{\dot{\gamma}} = \dot{\gamma} \sqrt{H}/g$$
 (2)

図-7は無次元せん断ひずみ速度を0.07~0.13とした 場合の粘性係数と模型地盤層厚との関係を示す.それ ぞれのせん断ひずみ速度の実験値に対し両対数軸の傾 きを求めると1.27~1.63となり,液状化砂の粘性係数が 層厚のこれらの係数によるべき乗に比例して増大して いることが分かる.



### 3.遠心載荷場における模型地盤の流動実験

#### (1)実験の方法

重力場の実験により,液状化砂の粘性係数は液状化 層の層厚の1.27~1.63乗に比例して増大することが示 された。このことは鉛直拘束圧の増大にともなって粘 性係数が増加することを示唆している.これを検証す るため遠心載荷場において遠心加速度を変化させ流動 実験を行った.

図-8に示す2種類の模型地盤B,Cを用いた.地盤材料は、平均粒径0.22mm、均等係数1.9の遠州灘の浜砂で

ある.模型地盤Bは流動方向長さ70cm,水平幅 40cm, 模型地盤Cは同じく100cm,40cmである.

模型地盤B,Cとも地盤厚は土槽中央において約20cm で地表面勾配は6%である.間隙液は水を用いている. それぞれの実験における遠心加速度および加振条件を 表-2に示す.流動方向と直角の水平方向に模型地盤を 加振し,液状化を生じさせて流動を発生させる.土槽 中央部の地表面の標的の変位をレーザー変位計によっ て測定し,これを数値微分することにより地表面速度 の時刻を求めた.



図-8 遠心載荷場実験に用いた土槽及び模型地盤

表-2 遠心載荷場での流動実験

実験名	模型地盤	遠心加速度	相対密度	加振加速度	周波数
	層厚(cm)	(g)	(%)	(cm/s <sup>2</sup> )	(Hz)
B1	20	10	35	270 × 10	50
B2	20	20	37	341 × 20	100
B3	20	30	35	373 × 30	150
C1	20	10	36	394 × 10	50
C2	20	10	41	380 × 10	50
C3	20	40	40	270 × 40	200
C4	20	40	39	$350 \times 40$	200

(2) 粘性係数の算定

実験結果の一例として表-2に実験ケースC4の地表面 変位および地表面速度を図-9に示す.



地表面速度は観測された地表面変位を4次関数で補間 しこれを微分することにより求めた.遠心加速度ngが 作用した状態での1次元の粘性流体の流れは式(1)にお いて重力加速度gをngに置き換えることにより表され る.十分に時間間隔の小さいt<sub>i</sub>~t<sub>i</sub>+ t<sub>i</sub>時刻における速 度をそれぞれ $V_j$ ,  $V_{j+}$   $V_j$ とし,式(5)の1次項(i=1)のみを 考慮すれば,式(3)が得られる.ここで $\mu_j$ は $t_j \sim t_{j+}$   $t_j$ 間での粘性係数である.時間間隔  $t_j$ を十分に小さく とれば,図-6に示すせん断応力とせん断ひずみ速度の 関係において接線粘性係数を示すことになる.

$$V_{j} + \Delta V_{j} = V_{j} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{\pi}{2H}\right)^{2} \frac{\mu_{j}}{\rho} \Delta t_{j}\right\} + 16 \frac{H^{2}}{\pi^{3}} \frac{\rho_{ng}\theta}{\mu_{j}} \left[1 - \exp\left\{-\left(\frac{\pi}{2H}\right)^{2} \frac{\mu_{j}}{\rho} \Delta t_{j}\right\}\right]$$
(3)

#### (3) 土槽の境界の影響による速度の補正

遠心載荷場においても図-8に示すように模型地盤の 流動方向の長さは有限であり,実験によって得られた 地表面の流動速度を補正する必要がある.重力場の実 験と同様の手順で速度比を用いて速度を補正し,前述 した方法で求めた粘性係数を図-10に示す.これによれ ば粘性係数はせん断ひずみ速度の増加とともに減少す る非線型性を示し,遠心加速度の増大とともに粘性係 数が増加している.図-10によれば接線粘性係数がせん 断ひずみ速度の増大とともに減少していることから, 液状化砂がビンガム流体よりもむしろ擬塑性流体とし ての性質を示すことが分かる.



## (4) 粘性係数に与える遠心加速度の影響

遠心載荷場での無次元せん断ひずみ速度を以下のように定義する

無次元ひずみ速度 
$$\overline{\dot{\gamma}} = V \sqrt{n} / \sqrt{gH}$$
 (4)

上式でnは重力加速度に対する遠心加速度の比を表す. せん断ひずみ速度を地表面速度Vと層厚Hの比としている.

遠心加速度の異なる実験において同一の無次元せん断ひずみ速度における粘性係数を比較し,遠心加速度が粘性係数に与える影響を検討する.図-11は無次元せん断ひずみ速度を0.10~0.25とした場合の遠心

載荷場と粘性係数の関係を示す.

この図からも遠心加速度の増大により液状化砂の粘 性係数が増加することが分かるが,それぞれの無次元 せん断ひずみ速度の実験値に対し,両対数軸上で傾き を求めると1.56~1.74となる.



## 4.まとめ

()重力場の流動実験により,液状化砂が,せん断ひ ずみ速度の増大とともに粘性係数が減少するビンガム 流体あるいは擬塑性流体としての性質を示すことが示 された.

()重力場の模型実験により,液状化層厚が大きいほど 粘性係数が増大することが示された.無次元化せん断 ひずみ速度が等しい条件下では,液状化砂の粘性係数 は模型地盤層厚の1.27~1.68乗に比例することが示さ れた.

()遠心載荷場での流動実験から,液状化砂がせん断ひ ずみ速度の増大によって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.また,無次元 化せん断ひずみ速度が等しい条件下では粘性係数が遠 心加速度の1.56~1.74乗に比例することが示された.

#### 参考文献

- 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/ -43,189~208,1998
- Yasuda,S.,Nagase,H.,Kiku,H.and Uchida,Y.: The Mechanism and a Simplified Procedure for the Analysis of Permanent Ground Displacement due to Liquefaction,Soils and Foundation, Vol.32,No.1,pp-149~160,1992

 3) 国生剛治:液状化砂層の側方流動に及ぼす水膜の影響と その生成条件,第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1463-1468,1998

(2003.10.9受付)