

# 傾斜地盤における側方流動のメカニズムと 変位量の予測

濱田 政則<sup>1</sup>・河野 暁<sup>2</sup>・那須 太郎<sup>2</sup>・柳瀬 和俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>工博 早稲田大学 理工学部 土木工学科 教授

<sup>2</sup>早稲田大学 理工学研究科

During past earthquakes liquefaction-induced large ground displacements caused severe damage to foundations of buildings, bridges and industrial facilities as well as to buried pipelines of lifeline systems. The authors investigated into the fluid properties of liquefied soil by 1 G shaking table test, centrifuge test and hollow-cylindrical shear test, and found a similitude law which governed the flow of the liquefied soil. By referring this similitude law they are going to propose a method for prediction of the ground surface displacement based on the 1 G gravity shaking table test and the case studies of the ground displacements during past earthquakes.

## 1. はじめに

液状化した地盤が地表面の傾斜や護岸の崩壊により水平方向に数 m のオーダーで変位する現象は、1964 年新潟地震などの既往地震において観測され、建物や橋りょうの基礎構造およびライフラインの地中構造物に極めて甚大な被害を与えてきた。1983 年の日本海中部地震を契機に側方流動に関する研究が始められ、事例分析や模型実験などが行われてきたが、側方流動のメカニズムや側方流動が構造物に及ぼす外力の特性について研究者間のコンセンサスが得られるには至っていない。

このため、平成 11 年度より開始された科学技術庁振興調整費による総合研究「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」においても、液状化地盤の側方流動は重要課題として位置づけられ、研究課題「液状化地盤の側方流動のメカニズムの解明と地盤変位量の予測手法の開発」が推進されているところである。

著者らは、ここ数年にわたって流動する液状化土を流体と見なすことにより、側方流動のメカニズムを合理的に説明し、変位予測手法の開発に結びつける一連の研究を行ってきている。上記の科学技術振興調整費によって重力場および遠心載荷場での液状化土の流動実験と液状化土の中空ねじり試験が行わ

れている。本文はこれらの実験試験結果をもとに、合理的な流動変位量の予測法の開発に向けて側方流動量のメカニズムについて考察する。

## 2. 重力場における液状化土の流動実験

### (1) 実験の方法

図 1 に示す長手方向(流動方向) 3.0m、幅 1.0m、厚さ 15、25、35、45cm の飽和地盤を地表面勾配 6% に傾斜させ、これを流動方向と直角な水平方向に正弦波(5Hz、400cm/s<sup>2</sup>) で加振、液状化させることにより流動を発生させた。

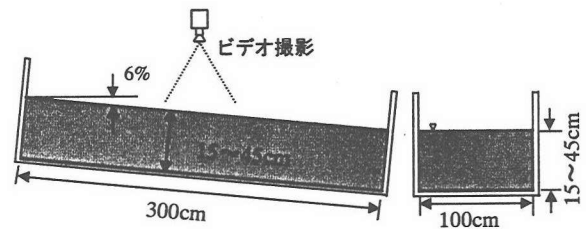


図-1 実験で用いた土槽

地表面に設置された標的の移動をデジタル・ビデオカメラで撮影し、得られた変位の時刻歴を微分することにより地表面の流動速度の時刻歴を求めた。地盤材料は遠州灘の浜砂で平均粒径 0.194 (mm)、均等係数 1.88 である。土槽底部の水槽からの注水による

ポリングと人力による攪拌によって均一な飽和地盤を作成し、これを予備加振によって所定の相対密度約 40%の模型地盤を作成した。

## (2) 実験結果の分析方法

本実験における模型地盤の流動方向長さは 3.0m で地盤層厚に対して十分に大きいと考え、土槽中央部における流動を一次元の粘性流体の流れとすれば、非定常の流れは式(1)により示される。

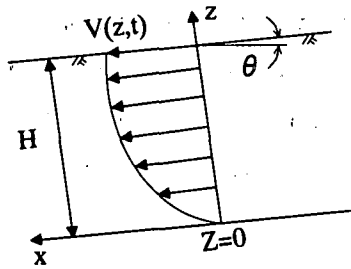


図-2 傾斜地盤における一次元粘性流体の流れ

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

上式において  $v$ : 流動速度,  $z$ : 深さ方向,  $t$ : 時間,  $\mu$ : 粘性係数,  $\rho$ : 液状化土の密度,  $i$ : 深さ方向に沿った流れのモードである。

地表面 ( $z=H$ ) における非定常速度は下式のように表される。

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

定常状態の地表面速度  $V_{AS}$  ( $t \rightarrow \infty$ ) は下式のように求まる。

$$V_{AS} = \frac{1}{2} \frac{H^2}{\mu} \rho g \theta \quad (3)$$

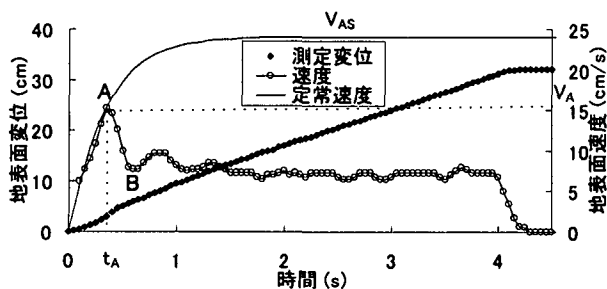


図-3 標的の変位及び速度の時刻歴と定常状態の速度

図3の●印はビデオカメラにより撮影された土槽中央部における地表面変位の時刻歴とこれを微分することにより得た地表面速度の時刻歴である。これによれば流動開始より流動速度が増加し、図中A点において最大速度に達し、その後B点に向かって速度が減少する。B~C間において速度はほぼ一定値を保ち、C点で加振を停止すると流動が急速に停止する。A点からB点に向けて流動速度が減少するのは、液状化発生に伴う間隙水の排水による模型地盤の圧密が原因と考えられる。

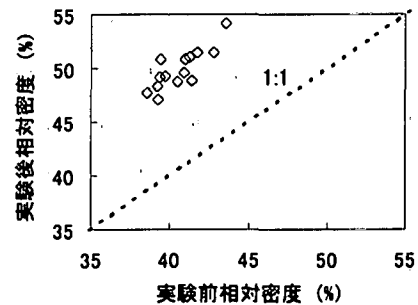


図-4 実験前後の相対密度の変化

図4は実験前後の模型地盤の相対密度の変化を示したもので、実験後、模型地盤の相対密度が増大していることを示している。本実験では、間隙水として水を用いていることおよび模型地盤の層厚が小さいため、液状化後急速に排水が生じたものと考えられる。

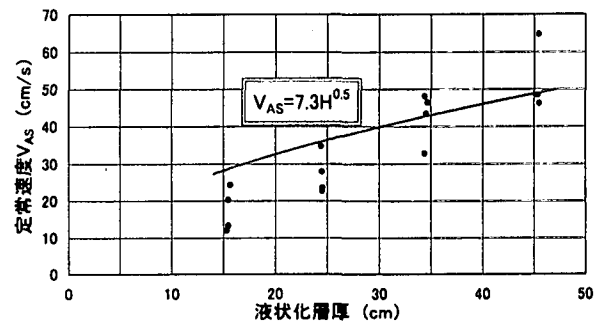


図-5 定常状態の速度  $V_{AS}$  と液状化層厚の関係

このため実験結果の解釈にあたって次のように考察した。B~C間で流動速度がほぼ一定ということから、液状化土の圧密はA~B間で生じているものとして、式(2)を用い、A点での時刻( $t_A$ )と流動速度( $V_A$ )を満足するような粘性係数 $\mu_A$ を求める。これを式(3)に代入し、定常状態の地表面流動速度  $V_{AS}$  を求める。

このようにして求められた速度  $V_{AS}$  は、模型地盤の相対密度が変化しないと仮定した場合の定常速度と解釈することが出来る。図5に定常速度  $V_{AS}$  と模型地盤の層厚すなわち液状化層厚との関係を示す。

式(3)によれば、液状化土の粘性係数が液状化層厚の影響を受けず一定と仮定すれば、地表面の定常速度は液状化層厚の2乗に比例して増大することになるが、図示した結果はこれと明らかに矛盾している。

この矛盾は以下のような液状化土の流動に関する相似則を考えることで解決される。図6に示すように層厚  $H_1, H_2$  の2種類の液状化土の各深さにおいて地表面の傾きによるせん断応力を受けて定常状態で流動している場合を考える。

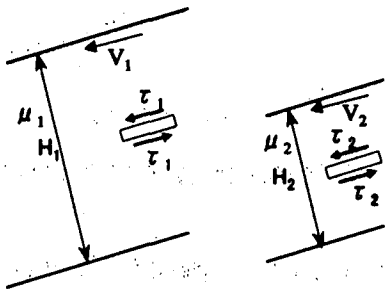


図-6 2種類の液状化層厚の実験におけるせん断応力

二つの流れにおいてレイノルズ数が等しいと考え、流動速度 ( $V_1, V_2$ ), 粘性係数 ( $\mu_1, \mu_2$ ) およびひずみ速度 ( $\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2$ ) に関して以下の相似則が成立する。(1), (2)

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{1/2}, \frac{\mu_2}{\mu_1} = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{3/2}, \frac{\dot{\gamma}_2}{\dot{\gamma}_1} = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{-1/2} \quad (4)$$

一方、慣性力と重力が卓越する開水路の流れについては一般に次式に示すフルードの相似則が適用されることが多い。

$$\frac{V_1}{\sqrt{g_1 H_1}} = \frac{V_2}{\sqrt{g_2 H_2}} \quad (5)$$

上式において  $g_1, g_2$  は共に重力加速度で等しいので、式(5)は流動速度の比が液状化層厚の比の平方根に比例することを意味している。すなわち、上述の結果は、液状化土の流動においては液状化の粘性係数が液状化層厚の  $3/2$  乗に比例しており、このためレイノルズおよびフルードの相似則が同時に満たされていることを示している。

図7は重力場の模型実験によって得られた粘性係数  $\mu_A$  と液状化層厚の関係を示唆しており、実験結果にはばつきはあるものの概ね粘性係数が液状化層厚の  $3/2$  乗に比例して増大することを示唆しており、上述の相似則に関する考察が妥当であることを示している。また、図5に示した定常状態の速度  $V_{AS}$  も液状化層厚の平方根に比例して増大していると考えることが出来る、この結果も上述の相似則を支持している。

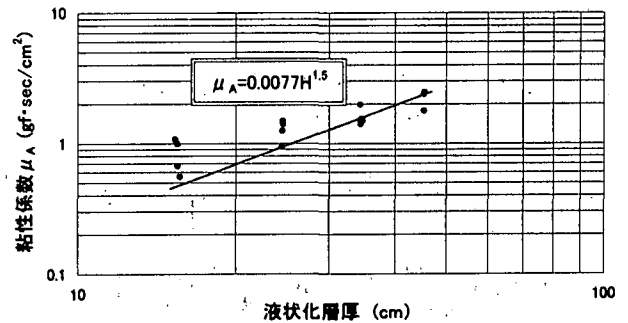


図-7 粘性係数  $\mu_A$  と液状化層厚の関係

### (3) 液状化土の粘性の非線型性に関する考察

著者らは既に液状化土の粘性係数が図8に示すようにひずみ速度の増加に伴って減少するいわゆる擬塑性流体の性質を示すことを明らかにしている。(1)

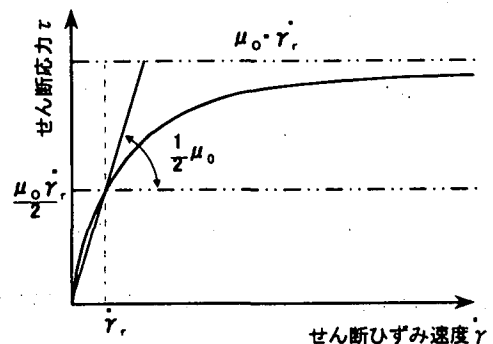


図-8 擬塑性流体のせん断応力とひずみ速度の関係

せん断応力  $\tau$  とひずみ速度の関係を双曲線で近似すれば次式となる。

$$\tau = \frac{\mu_0 \dot{\gamma}}{1 + \dot{\gamma} / \dot{\gamma}_r} \quad (6)$$

上式において  $\mu_0$  は初期粘性係数、 $\dot{\gamma}_r$  は基準せん断ひずみ速度でひずみ速度が基準せん断ひずみ速度に等しい場合、割線粘性係数が初期粘性係数の  $1/2$  となる。

重力場の流動実験をもとに上述の液状化土の粘性特性の非線型性を検討する。模型地盤の流動方向の長さは3mで、地盤の厚さよりも十分に大きいため、模型地盤の中央部の流れを一次元の粘性流体と見なせば、非定常状態の地表面での流動は式(2)で示されることは既に述べた。

図9に示すように、模型実験における時間区間 $t_j \sim t_{j+1}$ 間の地表面の流動速度の増分 $V_s(t_{j+1}) - V_s(t_j)$ は下式のように求まる。

$$V_s(t_{j+1}) - V_s(t_j) = \sum_{i=1,3,\dots}^{\infty} \left[ 16 \frac{H^2}{(i\pi)^3} \frac{\rho g}{\mu_j} \theta - q_i(t_j) \right] \times \left[ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{i\pi}{2H} \right)^2 \frac{\mu_j}{\rho} (t_{j+1} - t_j) \right] \right] \cdot \sin \frac{i\pi}{2} \quad (7)$$

$$q_i(t_j) = \frac{\rho}{\mu_j} \frac{8H}{(i\pi)^2} \left[ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{i\pi}{2H} \right)^2 \frac{\mu_j}{\rho} t_j \right] \right] \quad (8)$$

上式において $\mu_j$ は時間区間 $t_j \sim t_{j+1}$ における粘性係数であり、実験により測定された各区間の流動速度の差を用いることにより式(7),(8)より推定することが可能である。

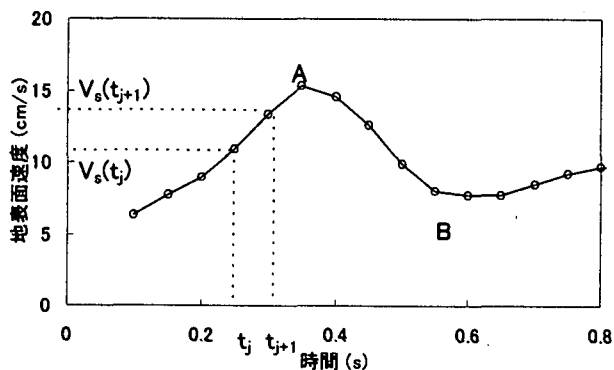


図-9 流動速度の変位による粘性係数の推定

区間の地表面の平均流動速度 $V_s(t_{j+1}) + V_s(t_j)/2$ を層厚 $H$ で除した値を模型地盤の深さ方向の平均的なせん断ひずみ速度と考え、これと粘性係数の関係を示したものが図10である。

この図10によれば明らかにひずみ速度の増大により粘性係数が減少する傾向を示しており、液状化土が前述の擬塑性流体の特性を有していることが分かる。しかしながら、図3に示した速度が最大となる点、A点付近より逆に粘性係数が増大している。これは前述したように、模型地盤に排水による圧密が生じて

いることが原因である。

図示した結果より、せん断応力 $\tau$ とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ との関係を双曲線近似した場合の初期粘性係数 $\mu_0$ と基準せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_r$ の推定を試みる。実験によって得られる各時間区間の粘性係数は接線粘性係数に相当する。接線粘性係数は次式によって表される。

$$\mu = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = \frac{\mu_0}{(1 + \dot{\gamma}/\dot{\gamma}_r)^2} \quad (9)$$

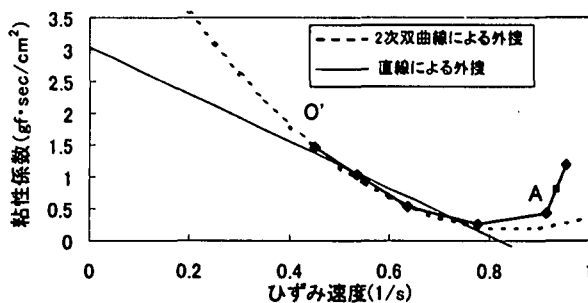


図-10 粘性係数とせん断ひずみ速度の関係

上式に図10に示した実験値を当てはめ、最小2乗法によって初期粘性係数 $\mu_0$ および基準せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_r$ を求めることを試みた。この結果の一例が図10中の点線である。2次双曲線による外捜によって $\mu_0$ を推定することになるが、重力場の模型地盤では外捜するための実験値がビデオカメラの測定精度のため3点程度しか得られず、推定精度の低くなることが分かる。

そこで、ここでは近似的に図10の実線で示すように直線補間して外捜することにより縦軸との切片を初期粘性係数とした。

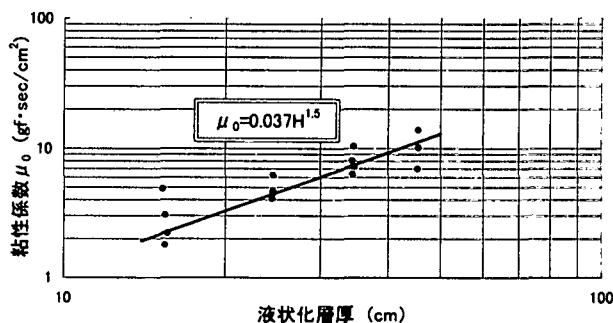


図-11 液状化層厚と粘性係数の関係

以上のように求めた初期粘性係数 $\mu_0$ と模型の液状

化層厚との関係を図 11 に示す。これによれば初期粘性係数は液状化層厚のほぼ 3/2 乗に比例して増大しており前述の相似則が満足されていることを示している。

相似則によれば式(4)に示したようにひずみ速度は液状化層厚の縮尺比の平方根に反比例することになる。従って基準せん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}_r$  も縮尺比の平方根に反比例する。実験より、基準せん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}_r$  を接線粘性係数が初期粘性係数  $\mu_0$  の 1/4 となる時のひずみ速度として求めた。

図 12 に液状化層厚と基準せん断ひずみ速度の関係を示す。これによれば実験値にばらつきがみられるものの、液状化層厚の増大に伴って基準せん断ひずみ速度は減少しており、相似則の妥当性を検証している。

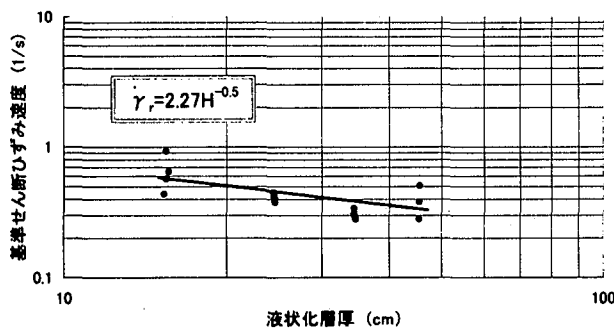


図-12 液状化層厚と基準せん断ひずみ速度の関係

### 3. 遠心載荷場における液状化土の流動実験

重力場の実験により液状化土の粘性係数が液状化層厚の 3/2 乗に比例して増大することが示された。このことは粘性係数が有効鉛直応力の 3/2 乗に比例して増加することを意味している。有効鉛直応力が液状化土の流動性、すなわち粘性係数に与える影響を検討するため、図 13 に示す模型地盤を用いて遠心載荷場における流動実験を行った。模型地盤の材料は遠州灘の浜砂で重力場の実験の値と同一であり、相対密度も約 40%で重力場の実験と同じである。

遠心加速度は 10, 20, 30 g である。地表面変位の時刻歴は非接触式変位計で測定し、これを微分することにより地表面の流動速度の時刻歴を求めた。

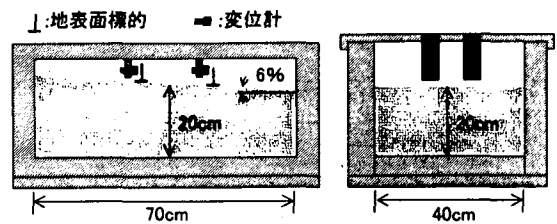


図-13 遠心載荷場における流動実験の地盤模型

遠心載荷場における地表面速度および任意の時間間隔  $t_j \sim t_{j+1}$  間における速度差はそれぞれ式(7)、(8)において重力加速度  $g$  を 10~30g として置き換えることにより求めることができる。

図 14 に実験により測定された流動速度の時刻歴の一例を示す。この結果を用い粘性係数と、ひずみ速度との関係を求めた。これを図 15 に示す。

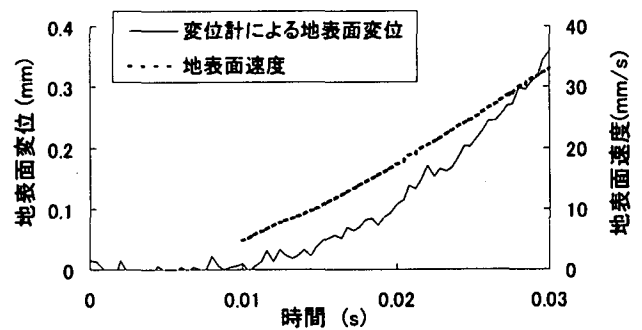


図-14 遠心載荷場における流動実験による流動速度の時刻歴

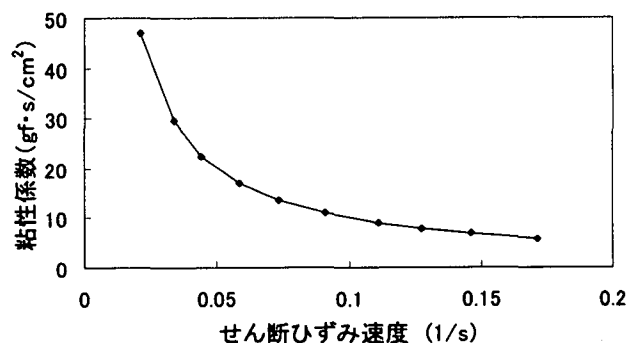


図-15 粘性係数とひずみ速度の関係

図 15 の結果を用いて式(9)の初期粘性係数  $\mu_0$  および基準せん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}_r$  を最小 2 乗法によって算定する。模型地盤の重力場での水中単位体積重量を 1.8gf/cm<sup>3</sup> とし、10~30g 場における模型地盤中央深さにおける有効鉛直応力を求め、これと初期粘性係数  $\mu_0$  および基準せん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}_r$  との関係を示

した結果が図 16, 17 である。

初期粘性係数はほぼ模型地盤の中央深さにおける有効鉛直応力の 3/2 乗に比例して増大しており、著者らが提案している液状化土の流動に関する相似則が遠心場の実験においても保たれていることが分かる。また、ばらつきはあるものの基準せん断ひずみ速度は有効鉛直応力のほぼ平方根に比例して減少しており、この結果も相似則の妥当性を支持している。

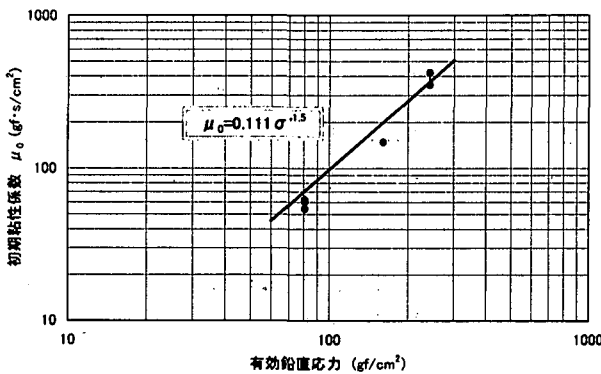


図-16 有効鉛直応力と初期粘性係数の関係

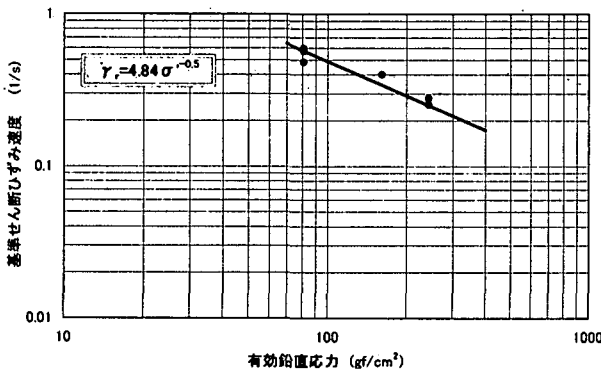


図-17 有効鉛直応力と基準せん断ひずみ速度の関係

#### 4. まとめ

重力場および遠心載荷場での実験をまとめ、模型地盤の有効鉛直応力と初期粘性係数との関係を示した結果を図 18 に示す。

重力場および遠心載荷場での実験はともに遠州灘の浜砂の同一材料で行われており、相対密度も 40% と同じである。図 18 の結果はいずれも著者らが式 (3) から提案している液状化土の流動に関する相似

則を支持している。

現在著者らの研究グループにより中空ねじり試験による液状化土の粘性係数が測定されており、この結果と併せて相似則の検証を進める予定である。

液状化土の側方流動に関する相似則が検証されれば、模型実験および液状化土の試験結果もとに実地盤の流動量の予測の道が拓けるものと考えている。

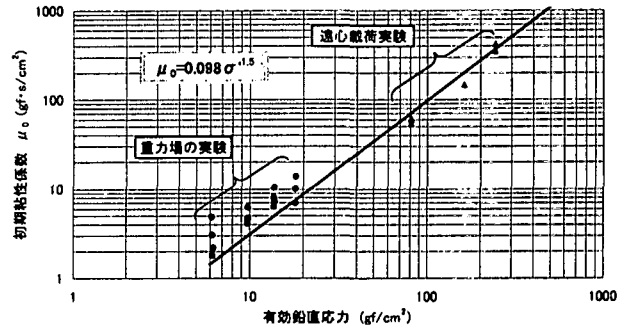


図-18 有効鉛直応力と初期粘性係数の関係

本研究は「1.はじめに」に述べたように平成 11 年度科学技術振興調整費による総合研究の一環として行われたもので、関係者に謝意を表する次第である。

(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, 1998.6
- 2) 濱田政則 那須太郎: 傾斜地盤における側方流動量の予測法に関する実験的研究(1), 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 1 部(B) I-B418, pp.832-833, 1999.9
- 3) 濱田政則 河野暁: 傾斜地盤における側方流動量の予測法に関する実験的研究(2), 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 1 部(B) I-B419, pp.834-835, 1999.9