

大型土槽実験による液状化土の流動特性の研究

高橋 祐治¹・栗田 誠²・平尾 淳²・藤原 裕司²

¹正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

²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)

The fluid properties of the liquefied soil during its flow is investigated by flow tests of model grounds under 1G condition. It was found that the liquefied soil behaves as a pseudo-plastic flow and that the viscosity of the liquefied soil is in proportion with the square root of the total overburden pressure cubed. This experimental result shows that the Reynolds and Fluid number are constant during the flow of the liquefied soil.

Key Words: Liquefaction, Liquefaction-induced ground displacement, Viscosity

1. はじめに

我々の研究グループでは、液状化地盤の大変位が液状化土の流体的挙動によって生じるとの見地から、これまでに小型土槽および中型土槽（模型地盤層厚35～150cm）を用いた重力場における流動実験を行い、液状化土の流動特性の研究を行ってきた。これらの実験によれば、液状化土は擬塑性流体（せん断ひずみ速度の増加に従って粘性係数が減少する非線型粘性流体）としての性質を示すこと、また、液状化層厚あるいは地盤の拘束圧の3/2乗に比例して粘性係数が増加することが明らかにされた¹⁾。後者の性質は、液状化土の流動においてレイノルズ数とフルード数が一定に保たれていることを示している。

今年度、当研究グループは（独）防災科学技術研究所が所有する大型土槽（模型地盤層厚200, 350cm）を用いた合同実験、および中型土槽（模型地盤層厚100～180cm）を用いたカリフォルニア大学サンディエゴ校との共同実験において、液状化層厚がより実地盤に近い大きさの流動実験を行った。本論文ではそれらの実験の内容及び結果を報告するとともに、同結果を用いて上記の液状化土の流動特性についての検討した結果を報告する。

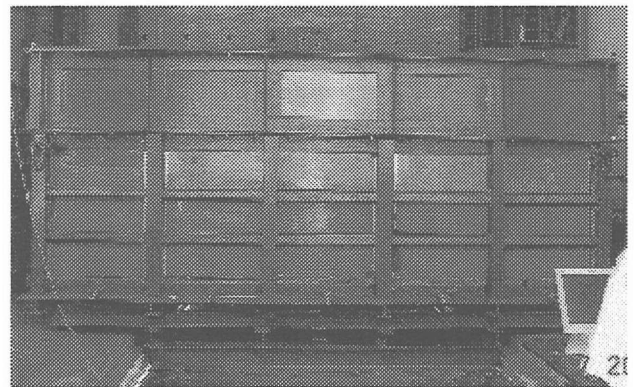


写真-1 中型土槽の流動実験に用いた土槽の外観

実施した実験ケースの一覧を表-1に示す。実験ケースは4ケースであり、地盤作成方法はいずれも水中落下法を用いた。水中落下法は、乾燥砂を砂撒き用ホッパーに入れ、ホッパーから砂材料を水中に落下させる方法である。地盤の飽和度の向上をはかるために、パイプレーターが設置されたスクリーンに砂材料を通し、落下中に砂が巻き込む空気を振動で分離させた。水中落下法による地盤作成の概要を図-1に示す。

表-1 中型土槽の実験ケースの一覧

実験ケース名	土槽中央部における地盤層厚(cm)	地表面勾配 (%)	相対密度 (%)	加速度 (Gal)
UC100-1	106	5.1	32	379
UC140-1	135	6.2	34	390
UC180-1	178	6.8	36	436
UC180-2	176	6.9	35	427

2. 中型土槽を用いた模型地盤による流動実験

(1) 実験の方法

実験に用いた土槽の外観を写真-1に示す。土槽の内寸法は、長さ（流動方向）5.0m、幅（加振方向）1.2m、高さ2.0mである。

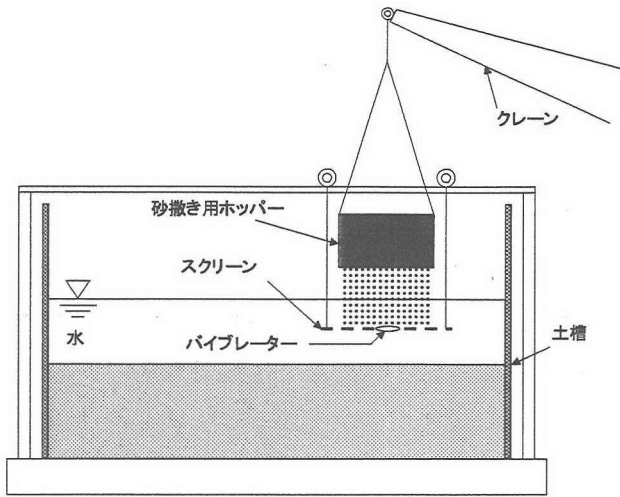


図-1 水中落下法による地盤作成の概要

模型地盤に用いた地盤材料は平均粒径0.32(mm)、均等係数1.7のサウジアラビア産 sand#60であり、粒径加積曲線を図-2に示す。図-2には、後述する大型土槽の流動実験に用いた霞ヶ浦砂、前年度に行った中型土槽の流動実験¹⁾に用いた山形産ケイ砂の粒度分布も示している。図-3に実験に用いた模型地盤の概要、および計測器の配置の例を示す。

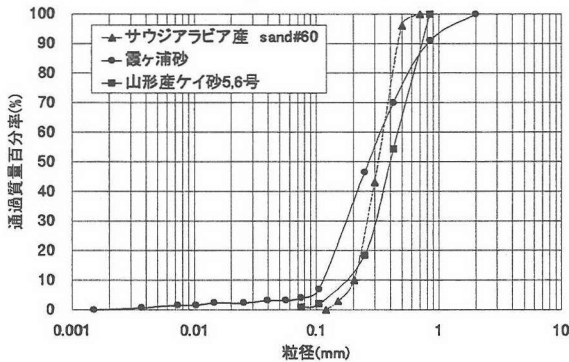


図-2 流動実験に用いた砂の粒径加積曲線

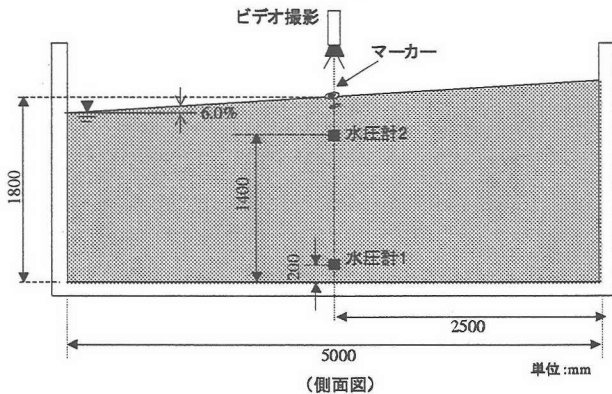


図-3 実験に用いた模型地盤の概要および計測器の配置の例 (UC180-1)

いずれの実験においても目標とする地表面勾配を6.0%、相対密度を40%としたが、相対密度に関しては35%前後とやや緩詰めになった。入力波は3Hzの正弦波で、最大加速度を350Galとしたが、表1に示すようにやや大きめの値となった。

模型地盤を流動方向と直角水平方向に加振して液状化させ、模型地盤下方への流動を生じさせた。その際土槽中央部地表面に設置したマーカーの変位をビデオカメラによって撮影した。

(2) 液状化土の粘性係数の算定

図-4に実験で得られた地表面マーカーの変位と速度の時刻歴の例を示す。ビデオにより撮影された地表面変位のデータは、スロッシングの影響を受け微小なノイズを含んでいるので、ノイズをカットするために1Hzのローパスフィルターを通した。このローパスフィルターを通した地表面変位の補間値の傾きを地表面速度とした。

図-5に実験で得られた水圧計の記録を示す。本論文では、最も深い位置にある水圧計1で計測された過剰間隙水圧が加振前の有効応力に達した時点を完全液状化とみなし、完全液状化してから速度が最大値に達するまでのデータを用いて、液状化土の流動特性について検討する。ここで完全液状化とは、模型地盤全層が完全に液状化した状態を意味している。

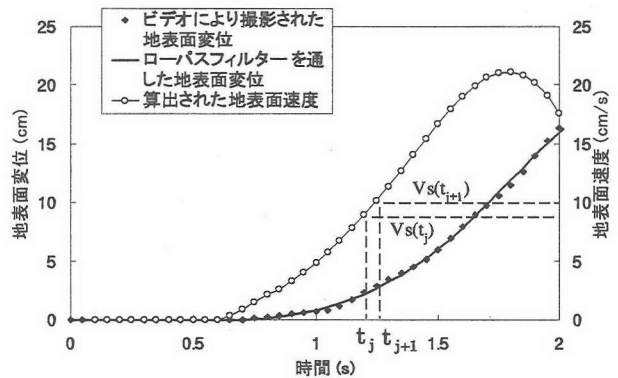


図-4 地表面変位と速度の時刻歴の例 (UC180-1)

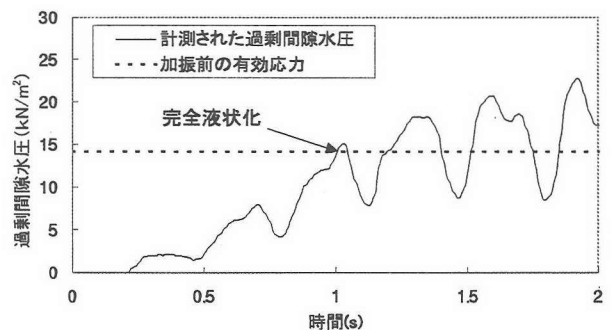


図-5 過剰間隙水圧の時刻歴 (UC180-1 水圧計1: 土槽中央 土槽底部から20cm)

土槽中央部の地盤の動きを図-6に示すような1次元の粘性流体の流れとすれば、地表面(z=H)の時刻tにおける速度 $V_s(t)$ について式(1)が得られる。

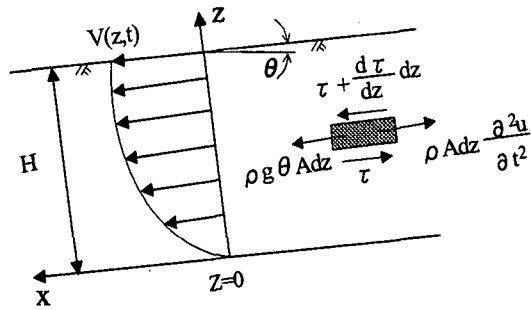


図-6 1次元の粘性流体の流れ

$$V_s(t) = C \exp\left\{-\left(\frac{\pi}{2H}\right)^2 \frac{\mu}{\rho} t\right\} + 16 \frac{H^2}{\pi^3} \frac{\rho g}{\mu} \theta \quad (1)$$

ここにzは深さ、 μ は粘性係数、 ρ, θ, 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、Cは初期条件により定まる定数である。 t_j, t_{j+1} の速度をそれぞれ $V_s(t_j), V_s(t_{j+1})$ とすれば、

$$V_s(t_{j+1}) = V_s(t_j) \cdot \exp\left\{-\left(\frac{\pi}{2H}\right)^2 \frac{\mu}{\rho} (t_{j+1} - t_j)\right\} + 16 \frac{H^2}{\pi^3} \frac{\rho g}{\mu} \theta \cdot \left[1 - \exp\left\{-\left(\frac{\pi}{2H}\right)^2 \frac{\mu}{\rho} (t_{j+1} - t_j)\right\}\right] \quad (2)$$

が得られる。実験によって得られた t_j, t_{j+1} のそれぞれの時刻の地表面速度 $V_s(t_j), V_s(t_{j+1})$ を用い、上式より $t_j \sim t_{j+1}$ 間の粘性係数 μ を算定する。このようにして求めた粘性係数とせん断ひずみ速度との関係を図-7に示す。

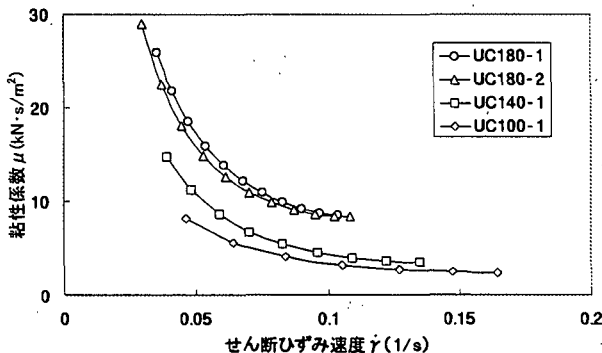


図-7 中型土槽の流動実験によって同定された粘性係数とせん断ひずみ速度の関係

図-7に示すように、液状化土の粘性係数はせん断ひずみ速度の増大に伴い減少しており、液状化土が非線形的な性質を有する粘性流体であることを示している。一般に粘性係数がせん断ひずみ速度の増加とともに減少するような流体は擬塑性流体と呼ばれ、せん断応力 τ とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ との関係は図-8のように示され、この関係の一つの定式化として式(3)が用いられている。

$$\tau = \frac{\mu_0 \dot{\gamma}}{1 + \dot{\gamma}/\dot{\gamma}_r} + \mu_\infty \dot{\gamma} \quad (3)$$

上式において、 μ_0 は初期粘性係数、 μ_∞ はせん断ひずみ速度が無限大での粘性係数である。また $\dot{\gamma}_r$ はせん断ひずみ速度の単位を有し、非線形性の度合いを表すパラメータである。

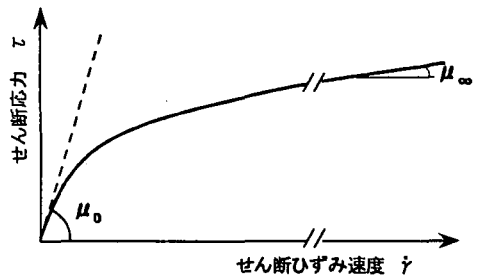


図-8 擬塑性流体におけるせん断応力とせん断ひずみ速度の関係

図-7の結果によれば実験によって得られた粘性係数は模型地盤の層厚の増大によって増加していることが分かる。図-7に示した粘性係数とせん断ひずみ速度を無次元化して示すと図-9となる。

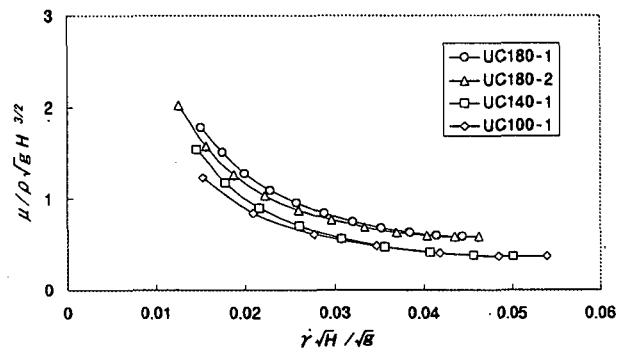


図-9 無次元化された粘性係数とせん断ひずみ速度の関係 (中型土槽)

図-9の縦軸および横軸の ρ, g, H はそれぞれ液状化土の密度、重力加速度および液状化層厚である。図-9によれば、液状化層厚がそれぞれ異なる実験によって得

られた無次元化された粘性係数は、模型地盤層厚が100cm, 140cmに関しては、ほぼ同一の曲線上にプロットされ、横軸に示す無次元化されたせん断ひずみ速度が同じであれば粘性係数が層厚の3/2乗に比例して増大することを示している。模型地盤層厚が180cmの場合に関しては、模型地盤の層厚に対して土槽の幅が十分でないことによる2次元効果の影響が出たものと考えられる。

流体の流動においてフルード数 (Fr) とレイノルズ数 (Re) は以下のように示される。

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (4)$$

$$R_e = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (5)$$

上式においてV, Lは速度および模型実験における代表的な長さであり、 μ, g は粘性係数と重力加速度を表す。代表的長さを液状化層厚Hとし、Vの代わりにせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ ($=V/H$) とすれば、フルード数およびレイノルズ数はそれぞれ下記のように表される。

$$F_r = \frac{\dot{\gamma}\sqrt{H}}{\sqrt{g}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{\mu}{\rho\dot{\gamma}H^2} \quad (7)$$

実験結果より流動のそれぞれの時刻においてフルード数とレイノルズ数を求め、両者の関係を図示すれば図-10となる。

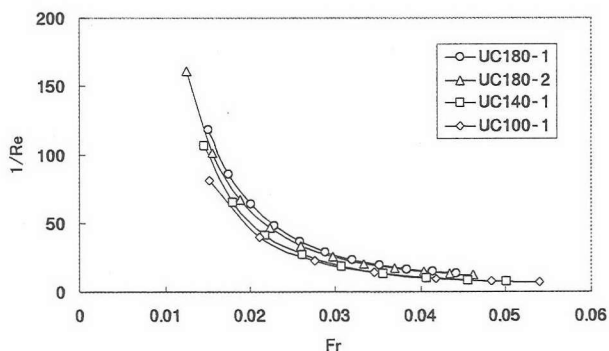


図-10 液状化土の流動におけるレイノルズ数とフルード数の関係 (中型土槽)

図-10によれば、層厚の異なる模型実験の結果はほぼ同一の曲線上にあることが分かる。このことは層厚の異なる

なる非定常状態の流動実験において、横軸に示すフルード数が同一であれば縦軸のレイノルズ数が同一となることを示し、かつ図9の結果は、フルード数が同じであれば粘性係数が層厚の3/2乗に比例して増大していることを示している。

(3) 液状化土の流動の相似則に関する考察

図-11に示すような2つの層厚 H_1, H_2 をもつ地表面勾配が同一の傾斜地盤の、1次元の定常状態の流動を考える。

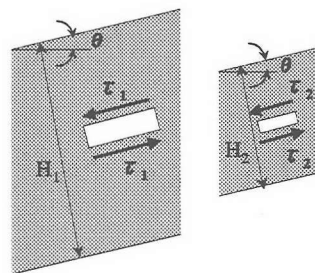


図-11 流動の相似則の考察

この二つの流れにおいてフルード数とレイノルズ数がともに等しいと仮定すれば、次の2つの式が得られる。

$$\frac{V_1}{\sqrt{gH_1}} = \frac{V_2}{\sqrt{gH_2}} \quad (8)$$

$$\frac{\rho_1 V_1 H_1}{\mu_1} = \frac{\rho_1 V_2 H_2}{\mu_2} \quad (9)$$

式(8)より、

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \quad (10)$$

が得られ、二つの実験において $\rho_1 = \rho_2$ とすれば、式(9)、式(10)より、

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

が得られることになる。すなわち、二つの流れにおいてフルード数が等しければ図-10の結果よりレイノルズ数も等しくなり、その結果として二つの流れの粘性係数は層厚の3/2乗に比例して増大することになるが、図-9の結果はこのことを裏づけていると考えることが出来る。液状化土の流動においては粘性係数が液状化層の3/2乗に比例して増大するため、二つの層厚の異なる流れにおいてフルード数とレイノルズ数が同時に一定に保たれていると考えることが出来る。

3. 大型土槽を用いた模型地盤による流動実験

(1) 実験の方法

実験に用いた土槽の外観を写真-2に示す。土槽の内寸法は、長さ（流動方向）11.6m、幅（加振方向）3.5m、高さ4.4mである。

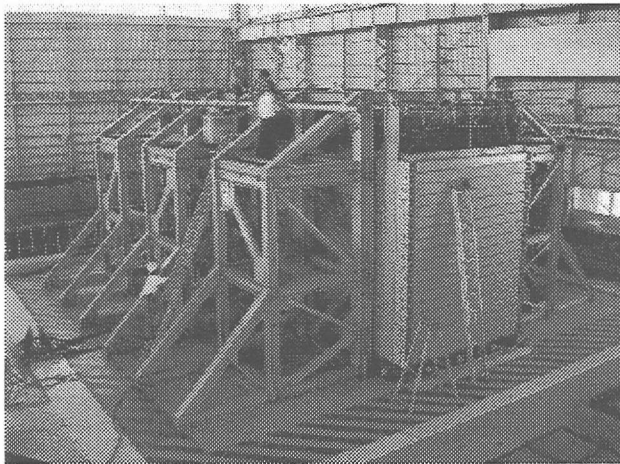


写真-2 大型土槽の流動実験に用いた土槽の外観

実施した実験ケースの一覧を表-2に示す。実験ケースは2ケースであり、地盤作成方法はいずれも、中型土槽の流動実験と同様に水中落下法を用いた。模型地盤に用いた地盤材料は、図-2に示したような平均粒径0.27 (mm)、均等係数2.9の震ヶ浦砂である。図-12に実験に用いた模型地盤の概要および計測器の配置の例を示す。

表-2 大型土槽の実験ケースの一覧

実験ケース名	土槽中央部における地盤層厚(cm)	地表面勾配 (%)	相対密度 (%)	加速度 (Gal)
TB200	191	7.0	44	704
TB350	339	7.8	44	412

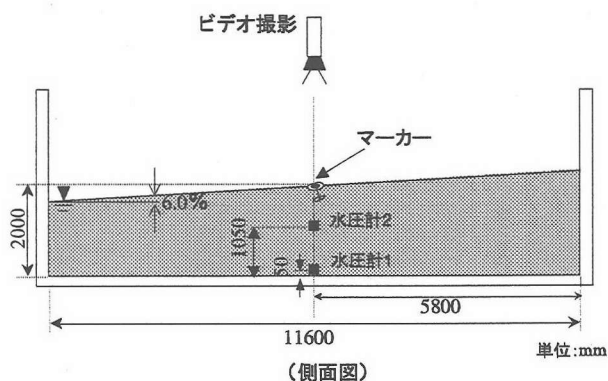


図-12 実験に用いた模型地盤の概要および計測器の配置の例 (TB200)

中型土槽の流動実験と同様に、目標とする地表面勾配および相対密度はそれぞれ6.0%、40%とした。また、

入力波に関しても同様に、3Hzの正弦波で最大加速度350Galを目標としたが、表2に示すように大きめの値となった。

模型地盤を流動方向と直角水平方向に加振して液状化させ、模型地盤下方への流動を生じさせた。その際土槽中央部地表面に設置したマーカーの変位をビデオカメラによって撮影した。

(2) 液状化土の粘性係数の算定

図-13に実験で得られた地表面のマーカーの変位と速度の時刻歴の例を、図-14には水圧計の記録の例を示す。

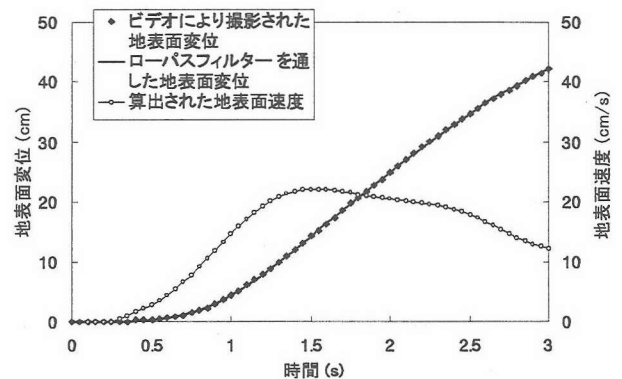
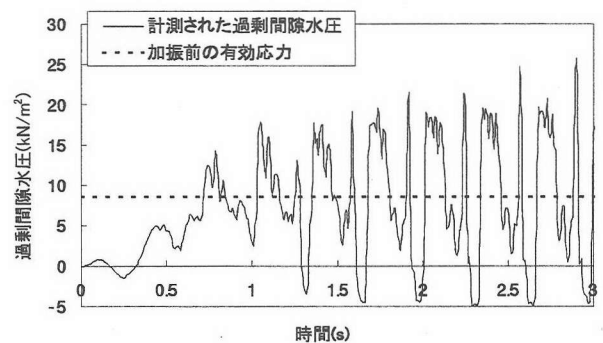
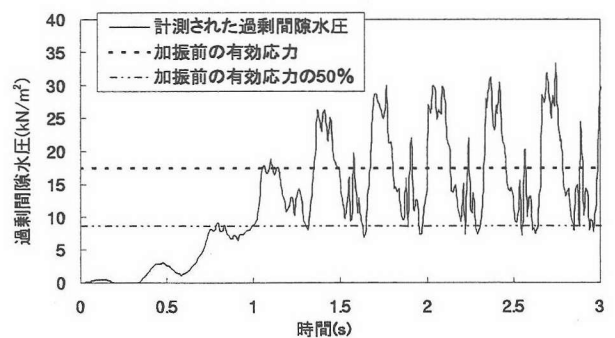


図-13 地表面変位と速度の時刻歴の例 (TB200)



(a) 水圧計2 (土槽中央 土槽底部より105cm)



(b) 水圧計1 (土槽中央 土槽底部より5cm)

図-14 過剰間隙水圧の時刻歴 (TB200)

中型土槽の流動実験と同様に、ビデオにより撮影された地表面変位のデータを1Hzのローパスフィルターに

通した。この地表面変位の補間値の傾きを地表面速度とした。前述したように、本論文では最も深い位置にある水圧計1で計測された過剰間隙水圧が、加振前の有効応力に達した時点から速度が最大値に達するまでのデータを用いて流動特性を検討するが、本実験では前述したように流動特性を検討するための十分な範囲のデータを得ることが出来ない。そこで本実験では水圧計1で計測された過剰間隙水圧が、加振前の有効応力の50%に達した時点から速度が最大値に達するまでのデータを用いて液状化土の流動特性について考察する。本実験においても、中型土槽の流動実験と同様に、式(2)を用いて粘性係数を算出した。算出された粘性係数とせん断ひずみ速度の関係を図-15に示す。

本論文では完全液状化してから速度が最大値に達するまでのデータを用いて流動特性を検討するが、本実験では前述したように流動特性を検討するための十分な範囲のデータを得ることが出来ない。そこで本実験では水圧計1で計測された過剰間隙水圧が、加振前の有効応力の50%に達した時点から速度が最大値に達するまでのデータを用いて液状化土の流動特性について考察する。本実験においても、中型土槽の流動実験と同様に、式(2)を用いて粘性係数を算出した。算出された粘性係数とせん断ひずみ速度の関係を図-15に示す。

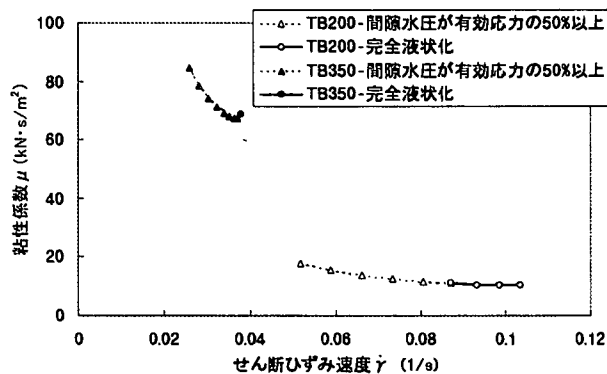


図-15 大型土槽の流動実験によって同定された粘性係数とせん断ひずみ速度の関係

図-15によれば、TB200では完全液状化後において、粘性係数がせん断ひずみ速度の増大に伴い減少する傾向をわずかながら読み取ることが出来る。また、両実験ケースにおいて過剰間隙水圧が加振前の有効応力の50%以上の範囲で算出されたデータにおいても、その傾向を読み取ることが出来る。また、完全液状化後のデータだけではないものの液状化層厚の増大とともに粘性係数が増大している傾向を読み取ることが出来る。

4. まとめ

前年度に行われた中型土槽を用いた流動実験¹⁾(図中のH=80, 100, 120, 150cm)と、本論文の中型土槽および大型土槽を用いた流動実験の結果を合わせて図-16,17に示す。図-16によれば、液状化層厚がそれぞれ異なる実験によ

って得られた無次元化された粘性係数は、ほぼ同一の曲線上にプロットされ、横軸に示す無次元化されたせん断ひずみ速度が同じであれば粘性係数が層厚の3/2乗に比例して増大することを示唆している。

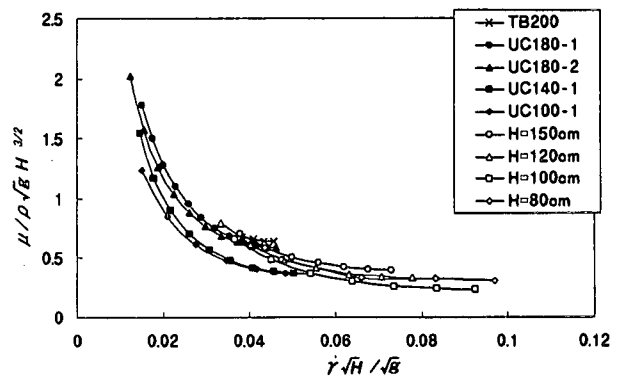


図-16 無次元化された粘性係数とせん断ひずみ速度の関係 (重力場における流動実験)

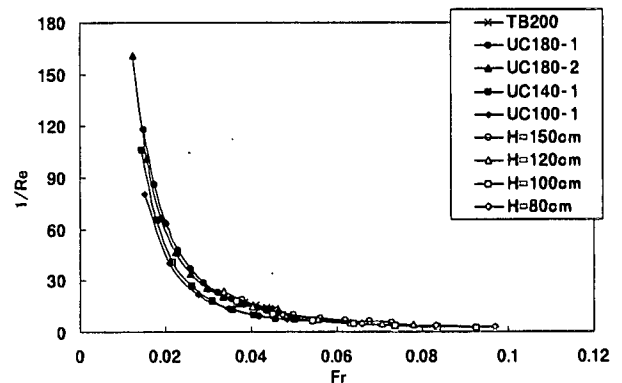


図-17 液状化土の流動におけるレイノルズ数とフルード数の関係 (重力場における流動実験)

また、図-17によれば、層厚の異なる流動実験において横軸に示すフルード数が同じであれば縦軸のレイノルズ数が同じになることを示している。

以上のことは、液状化土の粘性係数が液状化層厚の3/2乗に比例して増大していることを示していると同時に、液状化土の流動においてレイノルズ数とフルード数が一定に保たれていることを示している。

謝辞:本研究は平成13年度科学技術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」の一部である。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 濱田政則、島村一訓：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、p 261-266,2001