

液状化土の流動特性に関する研究 (1)

—重力場での模型実験—

濱田政則¹・島村一訓²・増井仁³・中村正樹⁴

¹フェロー会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-0072 東京都新宿区大久保3-4-1)

²正会員 東京ガス(株) 導管部 (〒105-0022 東京都港区海岸1-5-20)

³正会員 (株)奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大字大砂387)

⁴学生会員 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)

重力場の模型地盤の流動実験により、地盤の相対密度が40%前後と比較的緩詰めの場合には液状化土の流動において粘性力が卓越することを示した。また液状化土の粘性係数がせん断ひずみ速度の増加とともに減少するいわゆる擬塑性流体としての性質を有することを明らかにした。さらに、粘性係数が地盤の全鉛直応力あるいは液状化層厚の3/2乗に比例して増大することを実験的に示し、このことを液状化土の流動に関する相似則を考えることで検証した。

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

1. はじめに

側方流動の発生メカニズムについては、(1)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、(2)地盤の大変位が液状化土の流体的振舞いにより生ずるとの考え方¹⁾、(3)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²⁾、などが提案されている。濱田らは、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³⁾に基づき、数mもの地盤変位が液状化土の流体的挙動によって生じているとの立場から液状化土の流動特性に関する研究を行ってきた。

本論文は、2種類の重力場における模型地盤の流動実験により液状化土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

実験に用いた土槽および模型地盤の概要を図1に示す。図1(a)の模型地盤Aは流動方向の長さ3.0m、幅1.0m、層厚は35cmおよび45cmである。図1(b)の模型地盤Bは流動方向の長さ5.0m、幅1.0m、層厚は80~150cmである。いずれの土槽も剛土槽である。また、土槽は模型地盤Aでは6.0%、模型地盤Bでは8.7%の勾配で振動台に固定されている。模型地盤Aの地盤材料は遠州灘の浜砂、模型地盤Bはケイ砂5,6号であり、それぞれの平均粒径および均等係数を表1に、また粒径加積曲線を図2に示す。両実験とも模型地盤の相対密度の目標値を40%としたが、模型地盤Bの相対密度は35%前後とやや緩詰めである。

傾斜した模型地盤を流動直角の水平方向に表1に示す振幅と振動数をもつ正弦波加速度により加振して液

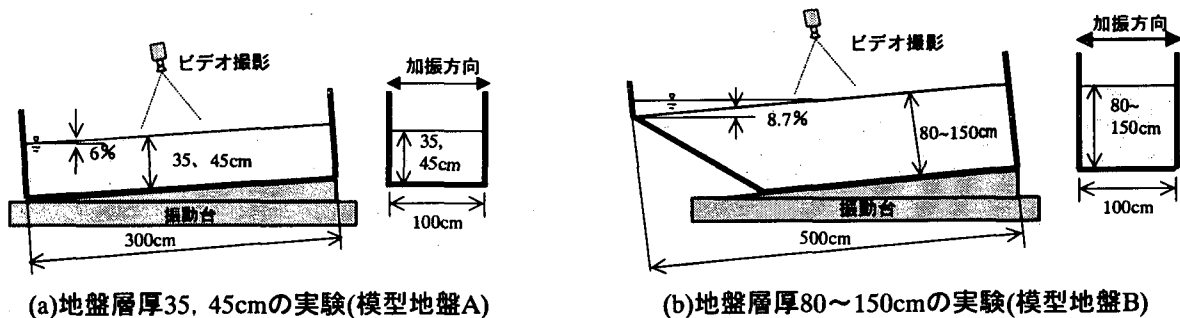


図1 重力場の流動実験に用いた土槽及び模型地盤

表1 重力場での流動実験の条件

実験名	模型地盤層厚 (cm)	実験回数	相対密度 (%)	平均粒径 (mm)	均等係数	地表面勾配 (%)	加振加速度 (cm/s ²)	振動数 (1/s)	加振時間 (s)
A1	34~35	4	39~41	0.19	2.1	6.0	360~400	5	4
A2	45~46	3	39~40	0.19	2.1	6.0	380~400	5	4
B1	84	1	34	0.40	2.4	8.7	600	6	6
B2	100	1	33	0.40	2.4	8.7	590	6	6
B3	119	1	33	0.40	2.4	8.7	650	6	6
B4	151	1	35	0.40	2.4	8.7	620	6	6

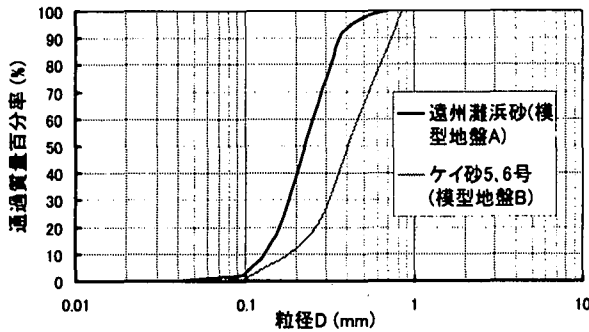


図2 重力場の実験に用いた砂の粒径加積曲線

状化させ、模型地盤下方への流動を生じさせた。加振は流動中継続されている。土槽中央部の地表面に設置したマーカーの変位の時刻歴をビデオカメラによって撮影した。

(2) 粘弾性体としての流動特性の検討

液状化土の流動による大変位を、地盤剛性の著しい減少によって説明するのか、また流体として説明するのかについては現状では研究者の見解が分かれている。ここでは、模型地盤Aによって得られた地表面変位と速度の時刻歴を図3に示すVoigt型の粘弾性モデルを用いて解釈することにより、液状化土の流動中の弾塑性の性質および粘性的性質を検討する。

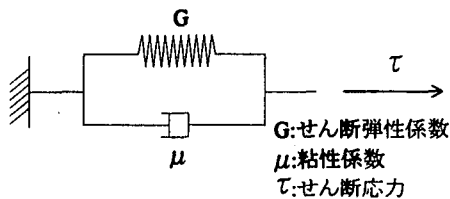
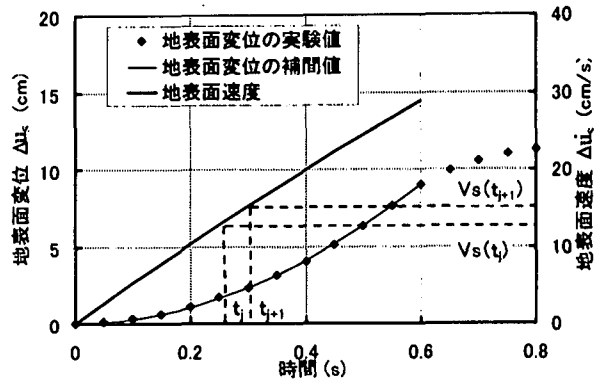


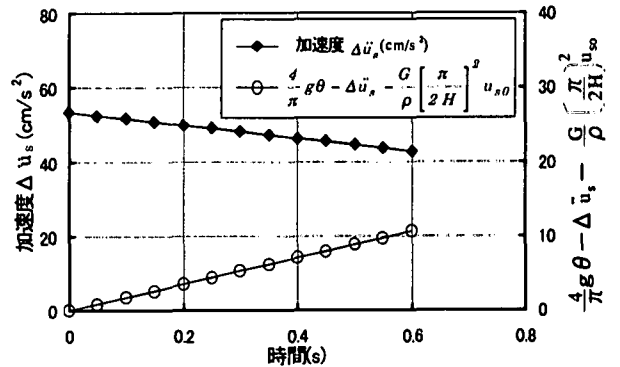
図3 液状化土のVoigt型粘弾性体へのモデル

図4(a)に模型地盤Aを用いた実験による層厚45 cmの場合の地表面マーカーの変位と速度の時刻歴の例を示す。図には流動の初期の部分のみを示している。地表面速度は変位を原点を通る3次関数で補間し、これを微分することにより求めている。

土槽の中央部の地盤の動きを図5に示すような一次元の粘弾性体の流れと仮定する。図5において深さzにおける微小切片の釣合いを考えれば、



(a) 地表面変位と速度の時刻歴



(b) 加速度と式(8)右辺の時刻歴

図4 重力場の流動実験の事例(層厚45cm)

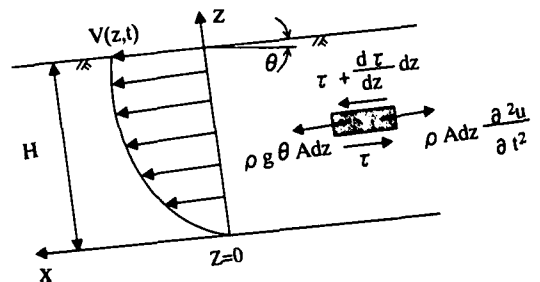


図5 1次元の粘弾性体の流れ

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho g \theta \quad (1)$$

が得られる。上式においてu, τは深さzにおける地盤変位とせん断応力、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、tは時間である。

図3の Voigt モデルにおけるせん断応力τとせん断ひずみγおよびせん断ひずみ速度γ-dotの関係は

$$\tau = G\gamma + \mu\dot{\gamma} \quad (2)$$

式(1)、式(2)より

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} - G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \rho g \theta \quad (3)$$

が得られる。地盤変位 $u(z, t)$ の解を

$$u(z, t) = \sum_{i=1,3}^{\infty} q_i(t) \cdot \sin \frac{i\pi}{2H} z \quad (4)$$

とおけば、

$$\ddot{q}_i(t) + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{i\pi}{2H} \right)^2 \dot{q}_i(t) + \frac{G}{\rho} \left(\frac{i\pi}{2H} \right)^2 q_i(t) = \frac{4}{i\pi} g\theta \quad (5)$$

が得られる。 $z = H$ すなわち地表面の変位 $u_s(t)$ とし、簡略化のため式(4)の一次の変位モードだけを考えれば $u_s(t) = q_1(t)$ となる

$$\ddot{u}_s(t) + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 \dot{u}_s(t) + \frac{G}{\rho} \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 u_s(t) = \frac{4}{\pi} g\theta \quad (6)$$

となる。 $t = 0$ において地表面の傾斜によって初期変位 u_{s0} が生じていると考えれば

$$u_s(t) = u_{s0} + \Delta u_s(t) \quad (7)$$

となる。実験では $\Delta u_s(t)$ を観測していることになる。式(6)を $\Delta u_s(t)$ を用いて整理すれば

$$\begin{aligned} & \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 \Delta \dot{u}_s(t) + \frac{G}{\rho} \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 \Delta u_s(t) \\ & = \frac{4}{\pi} g\theta - \Delta \ddot{u}_s(t) - \frac{G}{\rho} \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 u_{s0} \end{aligned} \quad (8)$$

を得る。左辺の第1項は粘性力を示し、第2項は弾性力を示す。模型地盤の流動実験において、図4(a)に示すように変位の時刻歴 $\Delta u_s(t)$ および速度の時刻歴 $\Delta \dot{u}_s(t)$ は求められている。速度の時刻歴をさらに数値微分することにより加速度の時刻歴 $\Delta \ddot{u}_s(t)$ を図4(b)に示すように求めることができる。

式(8)において、 $t = 0$ で $\Delta u_s = 0$, $\Delta \dot{u}_s = 0$ により右辺が0となるため、初期変位 u_{s0} を含む右辺第3項を図4(b)に示すように決定することができる。これらと変位と速度の時刻歴を用い、最小2乗法により式(8)の左辺の粘性係数 μ とせん断弾性係数 G を同定する。粘性係数とせん断弾性係数は時刻毎に刻々同定するが、それぞれの同定に用いる時間区間はその時刻を中心として0.2秒間としている。

同定結果を図6に示す。これによれば式(8)の左辺の第1項すなわち粘性力に関する項が第2項の弾性力に関する項よりもはるかに大きく、模型実験における液状化土の流れには粘性力が卓越していることを示している。

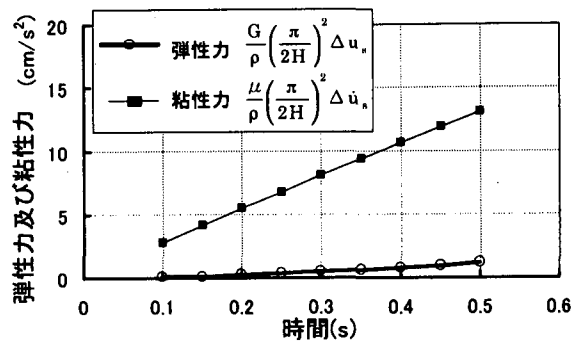


図6 重力場の実験により同定された弾性力と粘性力

(3) 液状化土の粘性係数の算定

式(8)において弾性力に関する項すなわち左辺の第2項と右辺の第3項が他の項に比較して十分に小さいとして、地表面速度 $\Delta \dot{u}_s(t)$ を改めて $V_s(t)$ とし、時刻 $t=t_j, t=t_{j+1}$ の速度 $V_s(t)$ をそれぞれ $V_s(t_j)$, $V_s(t_{j+1})$ とすれば

$$\begin{aligned} V_s(t_{j+1}) &= V_s(t_j) \cdot \exp \left[- \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 \frac{\mu}{\rho} (t_{j+1} - t_j) \right] \\ &+ 16 \frac{H^2}{\pi^3} \frac{\rho g}{\mu} \theta \cdot \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 \frac{\mu}{\rho} (t_{j+1} - t_j) \right] \right] \end{aligned} \quad (9)$$

が得られる。

実験によって得られた時刻 t_j, t_{j+1} 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同一時間内でのせん断ひずみ速度との関係を図7に示す。この場合せん断ひずみ速度は地表面速度を層厚で除すことにより求めている。

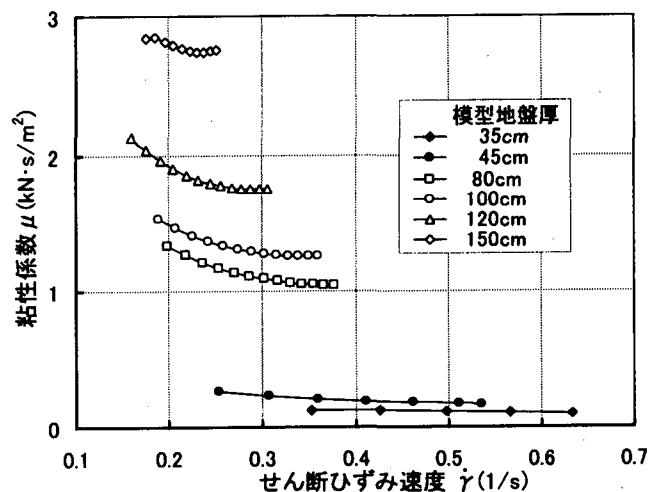


図7 重力場の流動実験によって同定された粘性係数

図7に示すように、模型地盤A,Bの結果とも、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、液状化土が非線型的な性質を有する粘性流体

であることを示している。

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。これは液状化土の流動特性が液状化層の厚さによって変化する非線型性も有していることを示唆している。このことは次に述べる液状化土の流動に関する相似則を考えることで説明が可能となる。

(4) 液状化土の流動の相似則に関する考察とまとめ

図8に示すような2つの地盤層厚 H_1, H_2 をもつ地表面勾配が同一の傾斜地盤の1次元の流動を考える。層厚の比を $\lambda = H_2/H_1$ とすれば幾何学的に相似な位置のせん断応力 τ_1 と τ_2 の比も

$$\tau_2/\tau_1 = (\mu_2 \dot{\gamma}_2)/(\mu_1 \dot{\gamma}_1) = \lambda \quad (11)$$

となる。

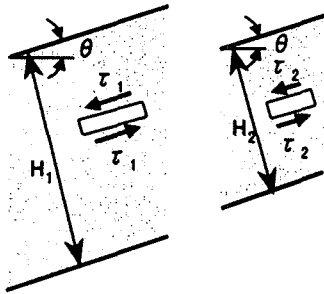


図8 流動の相似則の考察

ここで、 μ_1, μ_2 はそれぞれ地盤層厚 H_1, H_2 の場合の粘性係数、同じく $\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2$ はせん断ひずみ速度である。一方、2つの流動においてレイノルズ数が等しいと仮定すれば

$$\frac{\rho_1 V_1 H_1}{\mu_1} = \frac{\rho_2 V_2 H_2}{\mu_2} \quad (12)$$

上式で ρ_1, ρ_2 は密度、 V_1, V_2 は流動速度である。ここで流動速度の比は

$$V_2/V_1 = \lambda \cdot (\dot{\gamma}_2/\dot{\gamma}_1) \quad (13)$$

と表されるので、相似則を考慮することの結果として

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{1/2}, \frac{\mu_2}{\mu_1} = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{3/2}, \dot{\gamma}_2 = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{-1/2} \dot{\gamma}_1 \quad (14)$$

が得られる。式(14)は層厚の異なる二つの液状化の流れにおいてレイノルズ数が一定に保たれていると仮定すれば流動速度、粘性係数およびせん断ひずみ速度がそれぞれ層厚の1/2乗、3/2乗、-1/2乗に比例することを示している。

層厚の異なる複数の実験において粘性係数を比較するためには、粘性係数を求めるせん断ひずみ速度も相

似則に従った値でなければならない。そこで層厚35cmの実験でのひずみ速度を $0.40^{1/s}$ として、層厚の異なるそれぞれの実験において相似則による等価なひずみ速度を求めれば、層厚45cm, 80cm, 100cm, 120cm, 150cmのそれぞれにおいて $0.35^{1/s}$, $0.26^{1/s}$, $0.24^{1/s}$, $0.22^{1/s}$, $0.19^{1/s}$ となる。図7に示した実験結果からこれらのひずみ速度の値における粘性係数を読み取り、液状化層厚に対してプロットした結果を図9に示す。

図中の破線および一点鎖線は模型地盤A,Bそれぞれの実験結果に対して粘性係数が液状化層厚の3/2乗に比例するとして引いたものである。これによれば、模型地盤A,Bそれぞれについて粘性係数が液状化層厚のほぼ3/2乗に比例していることが分かる。しかし、模型地盤Aによる粘性係数は模型地盤Bによる粘性係数に比較して小さめの値を与えている。このことの原因の一つとして、模型地盤Aは土槽底部からのポイリングと人力による攪拌によって作成したため飽和度が高いと推定されるのに対して、模型地盤Bは砂の水中落下によって作成され、比較的飽和度が低いと推定されることが考えられる。

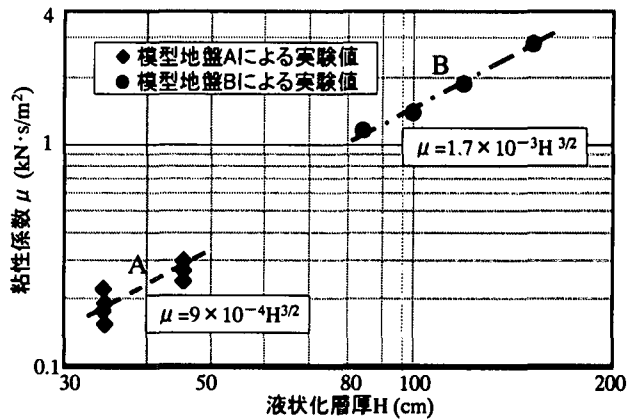


図9 粘性係数と液状化層厚の関係

謝辞:本研究では、経済産業省資源エネルギー庁が(社)日本ガス協会に委託し、平成8年度から12年度に調査研究を実施した「ガス導管液状化対策調査」の成果の一部を引用した。関係各位に謝意を表す。

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) 國生剛治, 藤田勝久: 新潟地震にいける液状化砂層での水膜生成の可能性, 第35回地盤工学研究発表会論文集No1154/E-14, pp. 2249-2250, 2000. 6
- 3) 濱田政則, 濁岡良介, 坂口拓己: 液状化土の流動特性とその外力特性に関する実験的および数値解析的研究, 第34回地盤工学研究発表会論文集No1004/E-14, pp. 2009-2010, 1999. 7