

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

～その1 重力場における実験による液状化土の流動特性の研究～

早稲田大学 学生会員 中村 正樹 フェロー会員 濱田 政則 学生会員 柳瀬 和俊

1. 研究の目的

濱田ら¹⁾は流動中の液状化土が擬塑性流体の性質を示すこと、及び模型地盤と実地盤の間にレイノルズの相似則が成立することを示した。これによれば、流動速度が液状化層厚の平方根に比例して増大し、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になる。本文では液状化層厚を変化させた重力場における液状化土の流動実験を行い、相似側の妥当性について検討した。

2. 重力場における液状化土の流動実験

2.1 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/s²)で加振して液状化させることにより流動を発生させた。土槽中央部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た。

地盤材料は遠州灘の浜砂で平均粒径0.19(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ボイ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、これを予備加振することによって相対密度約40%の模型地盤を作成した。

2.2 実験結果の整理方法

実験結果の一例を図2に示す。図中印はビデオカメラにより撮影された地表面変位の時刻歴で、○印はこれを数値微分することにより得た地表面速度の時刻歴である。地表面速度は、図中A点で最大値を記録し、その後B点に向かって減少する。B～C間ではほぼ一定速度で流動し、C点で加振が停止すると流動が停止する。A点からB点に向けて流動速度が減少する理由として、模型実験では液状化後、排水が急激に生じ、地盤の締め固めが起きていることが考えられる。B～C間で流動速度がほぼ一定のことから地盤の締め固めはA～B間で生じているものと推定される。そこで、流動開始よりA点に至るまでの流動速度の時刻歴に着目して液状化土の粘性係数を検討する。

2.3 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3に示すようにひずみ速度の増加に伴って粘性係数が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。せん断応力 τ とひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係を双曲線で近似すれば次式となる。

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

上式において μ_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。図4のように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地表面における非常の流速 $V_s(t)$ は次式によって表される。

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

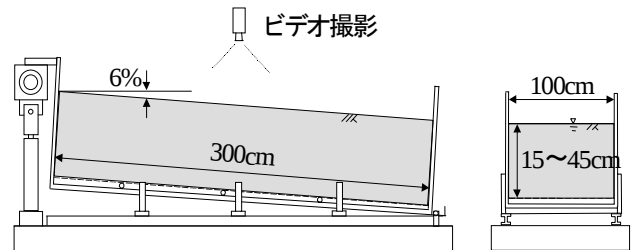


図1 重力場における実験の実験装置

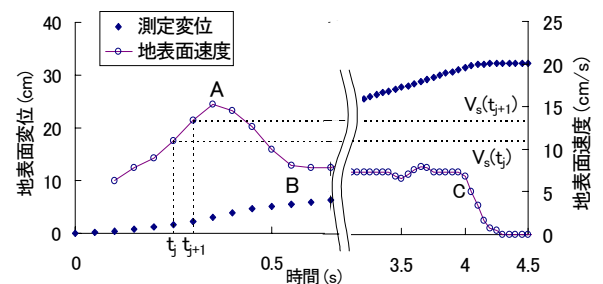


図2 標的の変位及び速度の時刻歴

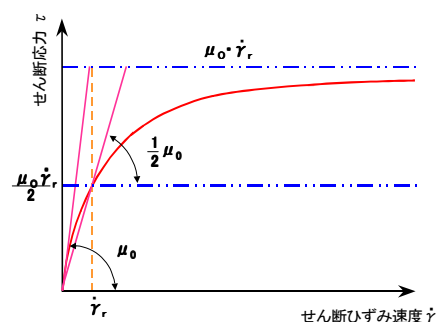


図3 擬塑性流体のせん断応力とひずみ速度の関係

キーワード：側方流動、相似則、擬塑性流体、模型地盤

連絡先：〒169-0072 新宿区大久保3-4-1 早稲田大学理工学部濱田研究室

03(3208)0349

式(2)において、 H は液状化層厚、 ρ は液状化土の密度、 μ は粘性係数、 θ は地表面勾配、 i は深さ方向の流速モードを表す次数である。

図2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 $V_s(t_{j+1}) - V_s(t_j)$ は次式のように求まる。

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

$$q_i(t_j) = \frac{\rho}{\mu_j} \frac{8H}{(i\pi)^2} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{i\pi}{2H} \right)^2 \cdot \frac{\mu_j}{\rho} t_j \right\} \right] \quad (4)$$

上式において μ_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(3),(4)より推定することが可能である。

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5である。これによれば、A点付近までは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。また、ひずみ速度がそれより大きくなると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の排水による圧密が原因と考えられる。

図示した結果より、せん断応力とせん断ひずみ速度との関係を双曲線近似した場合の初期粘性係数 μ_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。

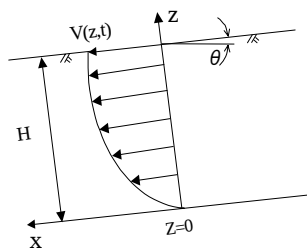


図4 傾斜地盤における一次元粘性流体の流れ

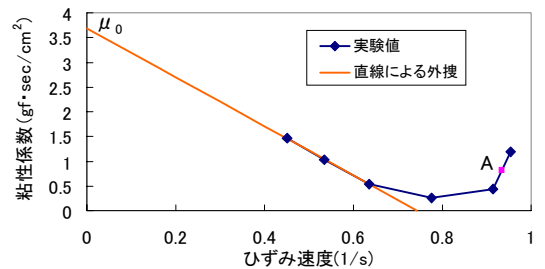


図5 粘性係数とせん断ひずみ速度の関係

$$\mu = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = \frac{\mu_0}{(1 + \dot{\gamma}/\dot{\gamma}_r)^2} \quad (5)$$

図5の結果を式(5)にあてはめ外推によって μ_0 を推定することになるが、重力場の模型実験ではビデオカメラの測定精度が不十分のため実験値が3点程度しか得られず、推定値が不安定となる。そこで、近似的に図5の実線で示すように実験による粘性係数の値を直線補間して外推することにより初期粘性係数として推定した。このようにして求めた初期粘性係数と液状化層厚の関係を図6に示す。

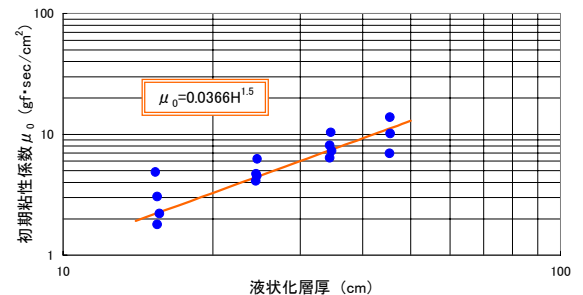


図6 初期粘性係数 μ_0 と液状化層厚の関係

3. 相似則の考察

図7に示すように層厚の異なる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。二つの流れにおいてレイノルズ数が等しいと考えると、流動速度(V_1, V_2)、粘性係数(μ_1, μ_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)}

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{1/2}, \quad \frac{\mu_2}{\mu_1} = \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{3/2} \quad (6)$$

式(6)によれば粘性係数の比は液状化層厚の $3/2$ 乗に比例する。図6によれば重力場における実験により得られた初期粘性係数 μ_0 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に関する考察が合理的であることを示している。

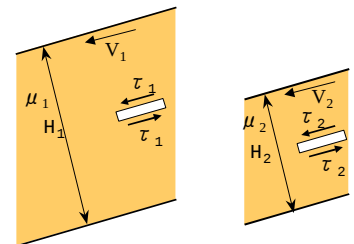


図7 2種類の層厚の実験におけるせん断応力

(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 / -43, pp.189-208, 1998.6
- 2) 濱田政則, 榎野地盤における側方流動量の予測法に関する実験的研究, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集第1部(B)/ -B418, pp.832-833, 1999.9
- 3) 濱田政則, 榎達郎: 液状化土の流動に関する相似則の研究, 第24回地震工学・応用地学に関するシンポジウム/1, pp1-2, 2000.3