

I - B 418

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)

—液状化土の流動に関する相似則の検証—

早稲田大学理工学部 フェロー会員 濱田 政則

早稲田大学大学院 学生会員 ○那須 太郎 河野 暁

1. 研究の目的

模型地盤と実地盤の間に、どのような相似則が成立しているのかは、模型実験結果を用いて実地盤の変位量を予測するために極めて重要な問題である。濱田らは¹⁾流動中の液状化土が擬塑性流体の性質を示すこと、また、模型地盤と実地盤の間にレイノルズの相似則を適用すれば、流動速度が液状化層厚の平方根に比例して増大すること、また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した。

本研究では液状化層厚を変化させた模型実験を行い、提案されている相似則の妥当性を検討した。

2. 実験の方法と条件

模型地盤材料は遠州灘の浜砂で、平均粒径と均等係数はそれぞれ 0.19 (mm)、1.9 である。図 1 に示す流動方向の長さ 3m、幅 1m の土槽に遠州灘の浜砂を入れ、土槽底部からの注水によるボーリングおよび攪拌によって均一な飽和地盤を作成した。これを予備的に加振することにより所定の相対密度 $Dr=40\%$ の模型地盤を作成した。その後、土槽を 6% の角度で傾斜し、流動方向と直角方向に振幅約 $400 (cm/s^2)$ の正弦波で加振し、液状化を生じさせて側方流動を発生させた。模型地盤表面の標的の動きをビデオカメラにより撮影し、地表面変位の時刻歴を求めた。液状化層の厚さは約 15cm、25cm、35cm の 3 種類で総計 12 ケースの実験を行った。

3. 実験結果の整理方法

実験結果の一例を図 2 に示す。ここで、■はビデオカメラによって測定された変位の時刻歴を示す。また図中○は変位の時刻歴を 2 次関数で補間し、これを微分することによって得た速度の時刻歴である。

地表面の速度は、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している。A 点から B 点に向けて流動速度が減少する理由として、模型実験においては液状化後、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。

図 3 は模型実験における加振前と加振後の相対密度の比較をしたものであるが、加振前と加振後では相対密度に大きな

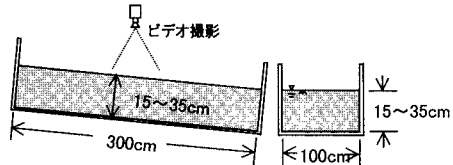


図 1 実験に用いた土槽の概要

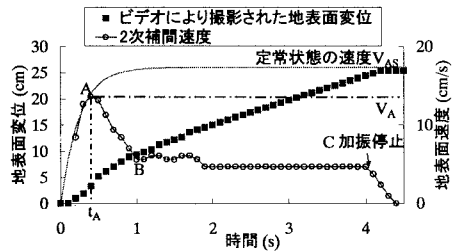


図 2 地表面変位の時刻 T と速度および推定された定常状態の速度

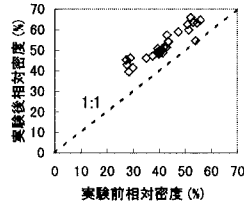


図 3 実験前後の相対密度の変化

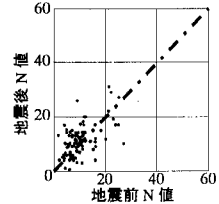


図 4 新潟地震前後における N 値の変化

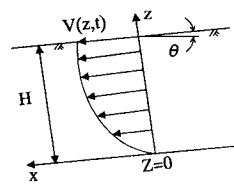


図 5 傾斜地盤における一次元粘性流体の流れのモデル化

差異が見られる。B~C 間で速度が一定であることから模型地盤の締め固めは A から B に向かって過程で生じているものと考えられる。

一方、図 4 では新潟地震において、小泉ら²⁾により液状化前後の N 値の変化が調べられている。これによれば実地盤の N 値の変化は模型地盤ほど顕著ではない。そこで、本実験では流動速度に関して以下のように整理し考察に用いた。

模型地盤の中央点での流れを図 5 に示すように 1 次元の粘性流体の流れとすると、非定常状態の地表面の流動速度 $V_s(t)$ は

キーワード:液状化,側方流動,模型実験 レイノルズの相似則

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 TEL03-3208-0349

式(1)によって表される。A点までは相対密度に変化がなく、粘性係数が一定として、A点での速度 V_A とその観測時刻 t_A より、A点での速度を説明し得る粘性係数 μ_A を求める。

$$V_A(t) = \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} 16 \frac{H^2}{(i\pi)^3} \frac{\rho g \theta}{\mu} \left[1 - \exp\left\{-\left(\frac{i\pi}{2H}\right)^2 \frac{\mu t}{\rho}\right\} \right] \sin \frac{i\pi}{2} \quad (1)$$

この μ_A を用いて定常状態の流動速度 V_{AS} を求めれば下式のようになる。

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

これは相対密度が変化しないとの前提で得られる定常状態の速度と解釈することができる。図2にこのようにして求めた定常速度の一例を示す。

4. 相似則の妥当性の検証

以上のようにして求めた定常状態の速度 V_{AS} と模型地盤の層厚(液状化層厚) H との関係を図6に示す。

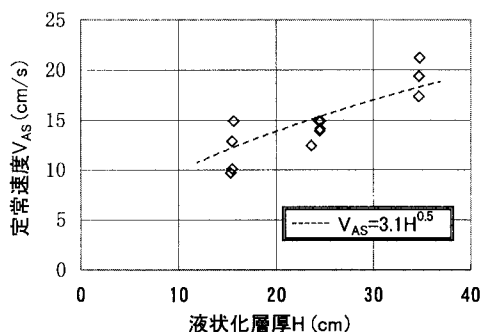


図6 地表面定常速度と液状化層厚の関係

式(2)において粘性係数 μ_A が液状化層厚 H に無関係に一定とすれば定常状態の速度 V_{AS} は液状化層厚の2乗に比例して増大することになる。しかしながら図6の結果はこれと矛盾している。図中の点線は流動速度が逆に液状化層厚の平方根に比例するとして最小2乗法により引かれたものであるが、実験結果はこの線上にのっていると考えることができる。この実験事実については以下のような説明が可能である。

今、図7に示すように層厚の異なる2種類の実験を行い、それぞれの流動が1次元の粘性流体の流れとして表わされるとする。傾斜地盤において重力の傾きによるせん断応力が作用し、定常状態で流動しているとすれば、せん断応力 τ とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係は図8に示すように下式で表される。

$$\tau_1 = \mu_1 \dot{\gamma}_1 \quad (3) \quad \tau_2 = \mu_2 \dot{\gamma}_2 \quad (4)$$

上式において、 μ_1 、 μ_2 はそれぞれの実験における粘性係数を示す。図7において液状化層厚の比 $H_2/H_1 = \lambda$ とすれば、せん断応力の比 τ_2/τ_1 は式(5)に示すように λ となる。従って式(3)、

(4)より式(6)が得られる。

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{H_2}{H_1} = \lambda \quad (5) \quad \frac{\mu_2 \cdot \dot{\gamma}_2}{\mu_1 \cdot \dot{\gamma}_1} = \lambda \quad (6)$$

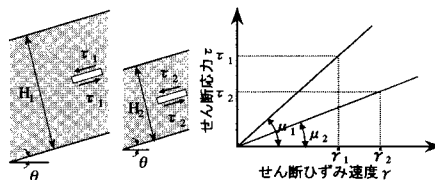


図7 2種類の層厚の実験におけるせん断応力
図8 2種類の層厚の実験におけるせん断応力とせん断ひずみ速度の関係

時間を表す記号を T とすれば式(7)が得られ、無次元量のせん断ひずみ γ_1 、 γ_2 が二つの実験で等しいとすれば式(8)が得られる。

$$\frac{\mu_2 \cdot \gamma_2 \cdot T_1}{\mu_1 \cdot \gamma_1 \cdot T_2} = \lambda \quad (7) \quad \frac{\mu_2 \cdot T_1}{\mu_1 \cdot T_2} = \lambda \quad (8)$$

一方、液状化層厚の異なる2種類の実験においてレイノルズ数が等しいとすれば

$$Re = \rho_1 V_1 L_1 / \mu_1 = \rho_2 V_2 L_2 / \mu_2 \quad (9)$$

上式において ρ 、 V 、 μ はそれぞれ密度、速度、粘性係数を表す。 L は長さを表す記号でこれを液状化層厚 H とし、さらに2つの実験での密度がほぼ等しいため、 $\rho_1 \approx \rho_2$ とすれば

$$\frac{\mu_2}{\mu_1} = \lambda \cdot \frac{V_2}{V_1} \quad (10)$$

が得られる。式(8)および式(10)より、液状化層厚の比 $H_2/H_1 = \lambda$ とすれば

$$\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\lambda} \quad (11) \quad \frac{\mu_2}{\mu_1} = \lambda^{3/2} \quad (12)$$

が得られる。式(11)によれば、流動速度(定常状態)は液状化層厚の平方根に比例して増大することを示している。このことは図6に示す実験結果をよく説明している。

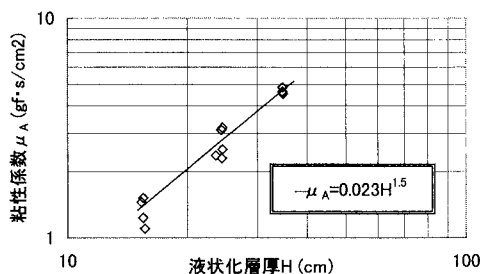


図9 粘性係数 μ_A と液状化層厚の関係

また図9に示すように粘性係数(μ_A : A点での流動速度より算定された粘性係数)は液状化層厚のほぼ3/2乗に比例しており、式(12)が成立していることを示している。

(参考文献) #1 濱田政則, 若松久寿江: 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 小泉友則: 建築研究報告第42号, 1965