

液状化土槽の流動実験に関する考察

山口大学 工学部 正○羽田野袈裟義・朝位孝二
産業技術総合研究所 正 国松 直・神宮司元治

1. はじめに

地震時には砂地盤に液状化が発生し、多大な被害を出している。液状化した砂の力学的特性を把握することは、災害の軽減法を考える上で不可欠である。このため土槽実験を始め種々の力学試験が行われている。また、模型実験の際には相似則の検討も欠かせない。本研究では、液状化した材料を流体として取り扱う場合の相似則を検討し、既往の実験結果への適用を試みた。

2. 開水路の相似則

模型実験では原型と模型の流れの境界が相似であるだけでなく、原型と模型とでフルード数とレイノルズ数が一致しなければならない。これらの条件が満たされるとき、結果として、圧力やせん断応力の積分として抗力係数が同一となる。

土槽実験は加振により液状化した砂試料を、土槽を傾斜させることにより流動させる実験、あるいは傾斜した土槽を加振して液状化させ流動させる実験が行われている。このような実験は砂試料が流体とみなせるものとするれば、開水路の流れはフルードの相似則がほぼ成立する。

ここで液状化地盤が側方流動している状態を粘性の大きい流体の層流と考え、定常等流を仮定すると、表面流速 U_s は次式で与えられる。

$$U_s = \frac{gH^2}{2\nu} \sin\theta \quad (1)$$

H は流動層厚、 θ は傾斜角、 ν は動粘性係数である。

ここで幾何学的に相似な1g場での実験条件での実験を考える。実験を区別するため、双方の実験に添字1と2を用いると、フルードの相似則から次のような関係が得られる。

$$\frac{H_1^{3/2} \sin\theta_1}{\nu_1} = \frac{H_2^{3/2} \sin\theta_2}{\nu_2} \quad (2)$$

θ が同一で動粘性係数が異なると、次式が成り立つ。

$$\nu_2 / \nu_1 = (H_2 / H_1)^{3/2} \quad (3)$$

すなわち、層平均の動粘性係数は流動層厚の3/2乗に比例する。密度はほぼ一定と考えてよいから、粘性係数 μ も流動層厚の3/2乗に比例する。そして、式(1)と(3)を組み合わせると次式を得る。

$$U_{s2} / U_{s1} = (H_2 / H_1)^{1/2} \quad (4)$$

3. 相似則の検討結果

前節で議論したフルードの相似則の重要な結果は、表面傾斜角が同一の場合、見かけの粘性係数が流動層厚の3/2乗に比例すること、及び表面流速が流動層厚の1/2乗に比例することである。濱田ら¹⁾の実験結果(図-1、図-2)が、フルードの相似則が成立することを示唆している。

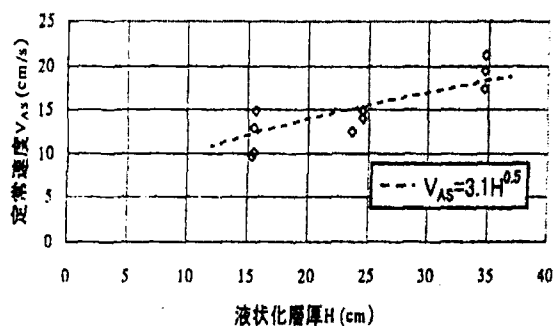


図-1 地表面定常速度と液状化層厚との関係

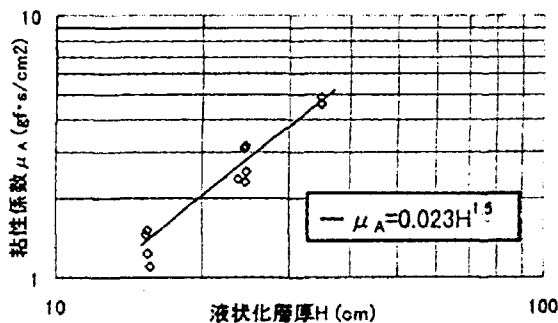


図-2 粘性係数と液状化層厚の関係

ここで、図-1と図-2の結果を用いて粘性係数と速度の深さ方向の分布を考える。まず、図-2より粘性係数 μ は係数 k を用いて次式における。

$$\mu = k H^{1.5} \quad (5)$$

この係数 k の性質を簡単に見ておく。水の動粘性係数を ν_w と置き同一勾配、同一流動厚で水流と液状化試料の流れのフルード数の比を $1 : \alpha$ と仮定する。

$$\frac{H^{3/2} \sin \theta}{\nu} = \alpha \frac{H^{3/2} \sin \theta}{\nu_w} \quad (6)$$

これより、

$$k = \frac{1}{H^{1.5}} \times \frac{\rho}{\rho_w} \times \frac{1}{\alpha} \times \mu_w \quad (7)$$

となり、 ρ 、 ρ_w 、 μ_w 、 H を用いて α を実験的に求めれば k は求まる。

流動層の表面から垂直下方に z をとると、表面から深さ z での粘性係数 $\mu(z)$ は次式で与えられる。

$$\mu(z) = 2.5k z^{1.5} \equiv k_1 z^{1.5} \quad (8)$$

また、表面から z の深さにおけるせん断力 $\tau(z)$ としてこれを $\rho g z \sin \theta$ で評価し、 $z = H$ で速度が 0 の条件で流速分布が次式で求められる。

$$u(z) = \frac{2\rho g \sin \theta H^{0.5} \{1 - (z/H)^{0.5}\}}{k_1} \quad (9)$$

表面での流速 U_s は次式となる。

$$U_s = \frac{2\rho \sin \theta H^{0.5}}{k_1} \quad (10)$$

図-1はこの関係を表している。

4. 粘性係数とせん断ひずみ速度の関係

土質力学の分野では、粘性係数とせん断ひずみ速度の関係を回帰式²⁾で求める試みが行われている。ここで、層平均の粘性係数とせん断ひずみ速度の関係を開水路流れの相似則に基づき検討する。流速分布を用いると、平均のひずみ速度は、

$$\gamma = \frac{2\rho g H^{0.5} \sin \theta}{3k_1} \quad (11)$$

平均の粘性係数は式 (5) である。すなわち

$$\mu = 0.4k_1 H^{1.5} \quad (12)$$

また、流動層下端でのせん断応力 τ_B は、

$$\tau_B = \rho g H \sin \theta \quad (13)$$

従って、せん断応力 τ_B を一定に保った場合、 μ と γ は逆比例の関係になる。図-3はこの関係を濱田らの土槽実験²⁾の文献の表-5を示したものである。図中のプロット傍らの数値は流動層下端におけるせん断応力である。図によると、流動層下端のせん断応力ごとに平均の μ と γ の関係が逆比例に近いことが認められる。また土槽実験における流動層下端のせん断応力 τ_B は中型土槽で、

$$\tau_B = 1048 \sim 2020 \text{ m g f / c m}^2 \quad (14)$$

大型土槽実験では、

$$\tau_B = 648 \sim 833 \text{ m g f / c m}^2 \quad (15)$$

の範囲で行われており、せん断応力の相対範囲が狭いため、全データで μ と γ の関係が逆比例に近い。

せん断応力は液状化層厚と傾斜角に依存するから、結局は実地盤の液状化現象における液状化層厚の見積もりが重要となる。

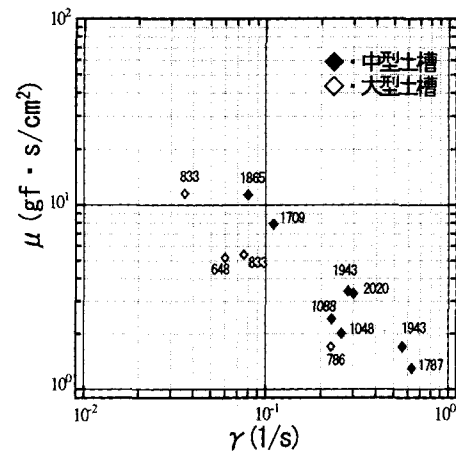


図-3 土槽実験の μ と γ の関係

5. 結語

以上、液状化した試料の流動にフルードの相似則を適用し、表面速度と粘性係数が流動化層厚のそれぞれ0.5乗と1.5乗に比例することを示した。また、土槽実験の粘性係数とひずみ速度の関係を検討した。参考文献

- 1) 濱田・河野・那須：第34回地盤工学研究発表会、2081-2082、1999。 2) 例えば 濱田・若松：土木学会論文集、No.596/β-43、189-208、1998。