

液状化時の飽和砂の振動特性と粘性測定

東海大学大学院 学生会員 ○武田倫直
東海大学工学部 正会員 本間重雄

1. はじめに

地震時の地盤液状化災害には、地盤支持力の喪失による基礎の沈下、護岸や斜面あるいは地盤そのものが変位することによる側方流動、マンホールや共同溝等の埋設構造物の浮き上がり現象などがある。いずれも、地盤が剛性を失って流動化し、変位が許容限度を超えて過大になることが被害の原因である。本研究では、液状化時の飽和砂の振動特性を砂層中に設置した加速度計にて測定し、また液状化飽和砂の粘性係数を飽和砂中の球体落下実験より求め、結果を埋設構造物の浮き上がり現象に対する解析に適用し実験結果と比較した。

2. 実験概要

実験装置は図-1に示す油圧サーボからの制御圧力によって振動台上の土槽を水平および鉛直同時に加振できるものである。この土槽内に豊浦砂(約 200kg)を投入し、土槽下部から水道水を噴き上げながら緩詰め状態の砂層を作成した。この飽和砂中に、図-2に示すように加速度計と鉛散弾を入れた軟式野球ボール(直径 6.65cm, 質量 594.5g)を吊るし、土槽全体に周波数 3Hz, 振幅 3mm の正弦波を水平方向に 10 秒間加え加振した。次に、球体を砂層表面まで持ち上げ、液状化飽和砂中の球体の落下速度を紐一箇所につけたリボンの移動速度より測定した。最後に、同じ緩詰め状態の砂層内部中央に縦横 10cm, 奥行き 34cm のアクリル製埋設構造物模型を設置し、液状化に伴う構造物の浮き上がりや砂層の変形状況を観察した。

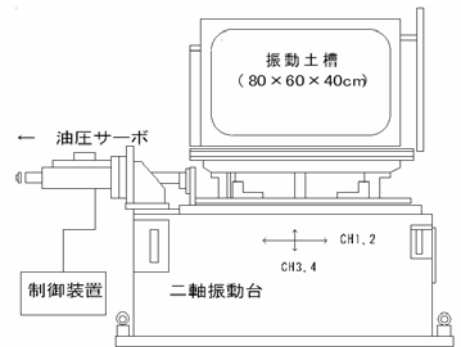


図-1 実験装置

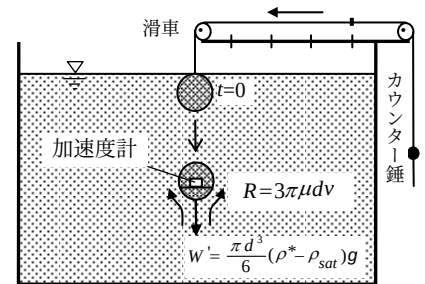


図-2 砂層中への球体設置

3. 実験結果と考察

図-3は土槽下端に設置した加速度計の振動波形と加振中のボールの振動波形を比較したものである。土槽に設置された加速度波形は試験条件の周波数 $f = 3\text{Hz}$, 振幅 $a = 0.3\text{ cm}$ より $\alpha_{\max} = a(2\pi f)^2 = 106.5\text{ cm/s}^2 = 0.104g$ で求まる最大加速度が現れているのに対し、砂層中に設置されたボールの波形では周波数はほぼ同じであるが、最大加速度は約 1/5 に減少している。これは液状化に伴い発生する飽和砂の巨視的な粘性抵抗のため、砂層内部の振動に減衰が生じたためと考えられる。そこで、液状化時の飽和砂全体の粘性係数を Stokes の法則を利用して求めた¹⁾。

Stokes の法則によれば、直径 d , 密度 ρ^* の球体が粘性係数 μ の流体中を沈降する際に受ける抵抗は

$$R = 3\pi\mu dv \quad (1)$$

で与えられ、ここに v は沈降速度である。一方、密度 ρ^* の物体の密度 ρ_{sat} の流体中における重量は次式で求められ

$$W' = (\rho^* - \rho_{\text{sat}}) V g \quad (2)$$

ここに g は重力加速度である。物体が等速沈降する場合には $R = W'$ であるので、式(1)(2)より粘性係数 μ が評価できる。図-4に 6 回の実験結果を示す。ボールが土槽下端に近づくと沈降速度は小さくなるが、時間に対して落下距離が比例する部分全体を直線回帰すると $v = 3.7\text{ cm/s}$ が得られ、これより粘性係数を計算すると $\mu = 1210\text{ g/cm} \cdot \text{s}$ が得られた。10℃ の水の粘性係数は $\mu_w = 0.013\text{ g/cm} \cdot \text{s}$ であるので、液状化時の飽和砂は水の約 10 万倍の粘性をもっていることになる。(ヒマシ油やグリセリンの粘性係数は水の約千倍である。)

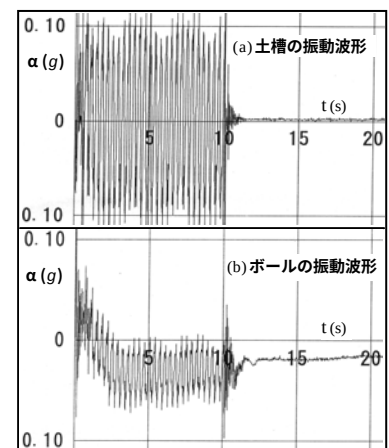


図-3 加速度波形の比較

キーワード：液状化, 飽和砂, 振動特性, 粘性係数

連絡先：〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117 東海大学工学部 Tel 0463-58-1211 FAX 0463-50-2045

4. 埋設構造物の浮き上がり実験と解析

砂質地盤の内部に埋設された構造物は、液状化時には浮力と地盤の粘性抵抗のためゆっくりと上方に変位する。図-5は同一の加振条件(3Hz-3mm, 最大加速度 106gal)で行われた砂層変位および埋設構造物模型の浮き上がり状況を示したものである。砂層の変位を観察するために、布製電気コードの芯を取り除いた袋の内部に砂を詰めた袋紐を加振前水平に配置してある。加振終了時(10 秒後)には構造物は約 10cm 上方に変位し、それに伴い周辺の砂層は構造物を回り込むように変位している。このような地盤の流動現象は、粘性係数をもとにして次の Navier-Stokes の方程式により解析可能である。

$$\rho \dot{v}_i = \rho b_i - p_{,i} + (\lambda + \mu) v_{j,j} + \mu v_{i,jj} \quad (3)$$

ここに v_i は速度ベクトルの成分, λ は膨張粘性係数, b_i は物体力である。流体(液状化飽和砂)を非圧縮性と仮定し, 上式を断面 2 次元流れ場(x 方向速度を u , y 方向を v とする)に展開すると

$$\frac{\partial u}{\partial t} = b_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = b_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4b)$$

となる。(4a)(4b)の連立微分方程式に対し流体各部における物体力の作用を無視し, $\partial(4a)/\partial y - \partial(4b)/\partial x$ なる処理によって圧力項を消去すると, 次の渦度 ζ に関する輸送方程式が得られる²⁾。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -u \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

ここに $\zeta = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}$ (6), $\nu = \mu/\rho$ は動粘性係数である。また, 流速は流れ関数 ψ の関数として $u = \partial\psi/\partial y, v = -\partial\psi/\partial x$ (7a,b) で与えられ, (7a,b) を(6)に適用すると $\zeta = \nabla^2\psi$ (8)なるポアソン方程式となる。式(5)において, 本ケースでは流速の大きさに比べ動粘性係数が非常に大きく ($\nu = 621 \text{ cm}^2/\text{s}$), 渦の拡散が卓越するクリープ流に近い状況である。解析は式(5)を差分化し, ADI法を用いて ζ を計算した後, SOR法により(8)を計算し, (7)により流速成分を求める手順をとった。図-6に差分メッシュ(実験の片側半分)と境界条件を,

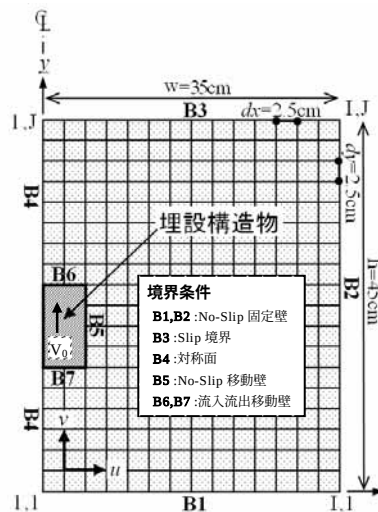


図-6 差分メッシュと境界条件

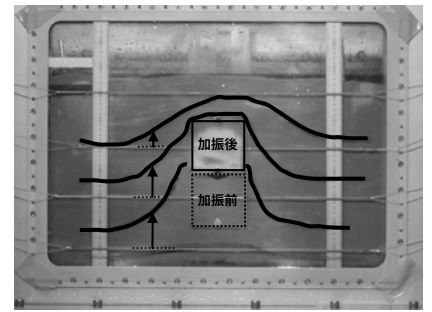


図-5 構造物および砂層の変位状況

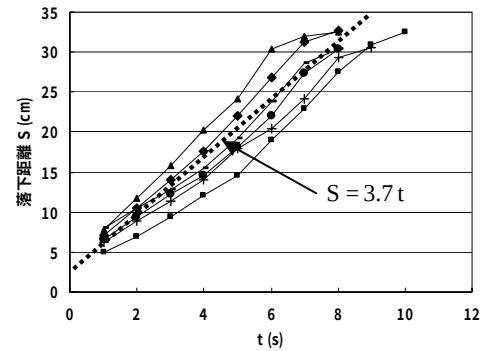


図-4 沈降速度測定結果

図-7に解析結果を示す。埋設構造物の浮き上がりに伴い周辺の飽和砂が引きずられ、土槽内を渦状に流動する状況がうまく再現されている。ここでは液状化発生時の飽和砂(土砂と水の混合体)の粘性係数を一定として取り扱ったが、実際にはボール沈降実験でも見られたとおり砂層下部では液状化中でも砂粒子の再配列化に伴う粘性係数の増加が考えられ、その場合には流体を圧縮性とし膨張(収縮)粘性係数の影響を加味した解析を行う必要があるものと思われる。

5. まとめと課題

本研究では、液状化発生時における飽和砂内の振動減衰から、土砂水混合体の粘性係数を Stokes の法則を利用した球体沈降実験より求め、その値を元に埋設構造物の浮き上がりに伴う周辺地盤の流動化機構を解析的に検討し実験結果と比較したものである。今後は、砂層の相対密度に応じた粘性係数の大きさを定量的に把握するとともに、発生過剰間隙水圧と混合土砂全体の粘性の関係、加振停止後の過剰間隙水圧の消散に伴う粘性係数の変化等を把握することなどが重要と思われる。

【参考文献】1) 原真之・本間重雄; 液状化時の埋設構造物の浮き上がり防止対策に関する室内振動実験, 第 34 回関東支部技術研究発表会, III-17, 2007 2) P.J.Roache, Computational Fluid Dynamics, Hermosa publishers, 1982