【 III －13 】

透水係数の異なる厚い砂層の液状化実験

愛媛大学　学生会員　○川神　英彰
愛媛大学院　正会員　　岡村　未対

1. はじめに

現在，液状化判定法として広く用いられている FL 法では排水の影響が考慮されておらず，加振中は非排水状態として考えられている。しかし，透水性の良い地盤に対して液状化判定を行う際に，非排水状態と仮定すると過度に安全側の判定になってしまう。本研究では，加振中の排水が厚い砂層の液状化挙動に及ぼす影響を調べるため，間隙流体の粘性を変えることにより透水係数を広範囲に変えた遠心模型実験を行った。また，過剰間隙水圧の消散を考慮した数値解析を行った。

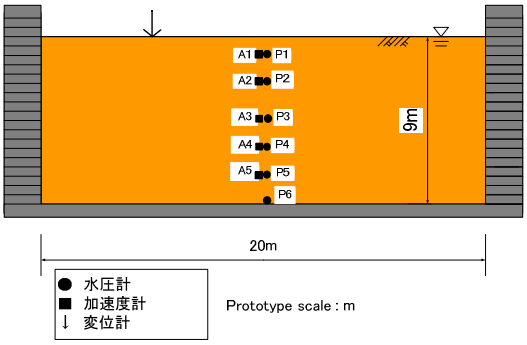

図 1　模型概略

2. 実験概要

本研究では，せん断土槽内に作成した一様な緩い飽和砂質土地盤の動的遠心実験を 50g 場にて行った。地盤は豊浦砂を空中落下法で作製した層厚 9m（模型寸法 18cm），相対密度 45%の砂地盤であり，真空槽内で CO_2 置換した後に-98kPa の負圧下で間隙流体を通水して飽和した。作成した地盤の飽和度 [1)]は 99.2%~99.9%であった。地盤中の図 1 に示す位置に加速度計と間隙水圧計を設置するとともに，地盤表面には地表面の沈下量分布を測定するために変位計を 3~5 箇所に設置した。間隙流体には水または粘性の異なるメチルセルロース水溶液を用い，透水係数の異なる 5 つの地盤を作製して実験を行った。実験条件を表 1 に原型スケールで示す。入力加速度は最大加速度が約 100gal，振動数約 0.5Hz の正弦波 10 波である。

表 1　実験条件

ケース	相対密度 Dr (%)	透水係数k (m/s)	最大加速度 (gal)
1	46.1	8.7×10^{-3}	106.9
2	46.3	2.5×10^{-3}	119.1
3	46.2	8.6×10^{-4}	123.8
4	44.8	1.7×10^{-4}	128.3
5	44.5	4.3×10^{-5}	132.3

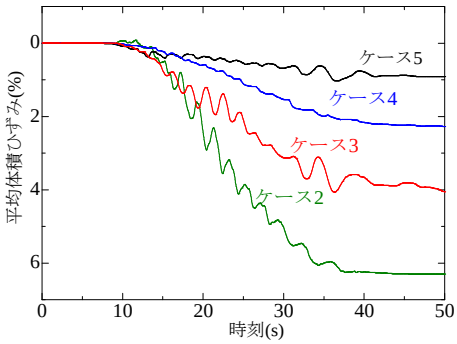

図 2　平均体積ひずみ

3. 数値解析

加振中の過剰間隙水圧は，発生項と消散項の和で表すことができる。発生項は非排水条件で過剰間隙水圧がある有効上載圧までに達する時間で表すことができ，本研究では簡単に次式で表した。

$$\frac{\partial u_g}{\partial t} = \frac{\sigma'_{v0}}{N_1} \cdot \frac{N_{eq}}{t_d}$$

ここで，u_gは過剰間隙水圧（発生），σ'_{v0}は有効上載圧，N_1は非排水状態で過剰間隙水圧比が 1 に達する回数，N_{eq}は地震動による不規則なせん断波と等価な一定振幅のせん断応力波の繰返し回数，t_dは地震動の継続時間である。消散項は Terzaghi の圧密方程式を用いた。

$$\frac{\partial u_d}{\partial t} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u_d}{\partial z^2}$$

ここで，k は透水係数，m_vは体積圧縮係数，γ_wは水の単位体積重量である。本研究で最も透水係数の低い実験であるケース 5 の実験を非排水状態であると仮定し，測定した過剰間隙水圧が発生項の水圧と等しいものとして発生項をこの測定値に合うようにN_{eq}=22，t_d=25，N_1=4 とした。体積圧縮係数は圧密試験の除荷過程よりm_v=4.72×10^{-5}(m²/kN)とした。

4. 実験及び解析結果と考察

加振中の地表面沈下量を複数箇所で測定し，そこから求めた地盤全体の平均体積ひずみを図 2 に示す。なお，ケース 1 に関しては計測器の不具合で計測できていない。透水係数が大きなケース 2 では，加振開始直後から体積圧縮が始まり，加振終了時点では約 6%の体積ひずみが生じた。一方，透水係数の最も低いケース 5 でも僅かではあるが加振直後から体積が減少し始め，加振終了時点での体積ひずみは約 1%となった。

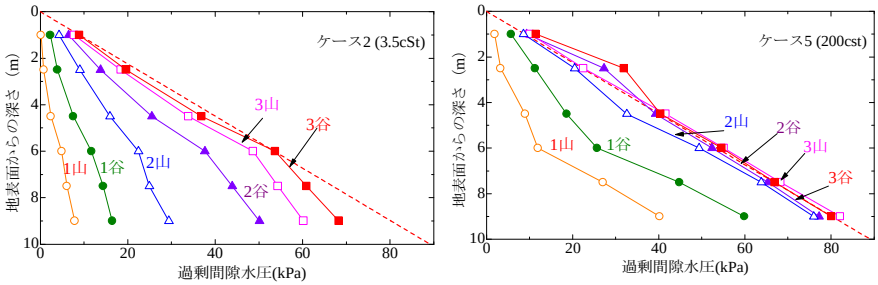

図3　アイソクローン(実験)

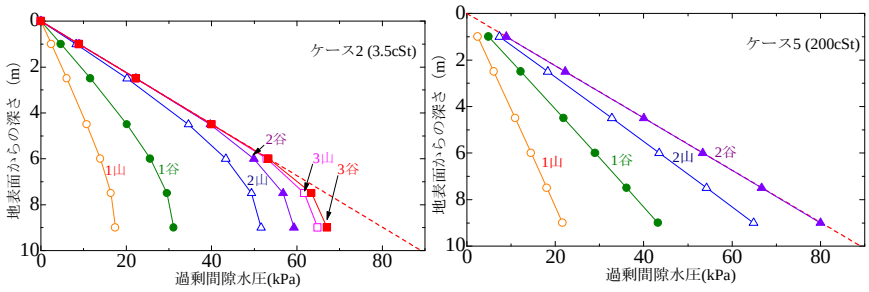

図4　アイソクローン(解析)

加振中の過剰間隙水圧のアイソクローンの一例を図 3 に示す。なお図中の文字は入力加速度の波数を示している。透水係数の低いケース 5 では，入力加速度が 2 波目の山となった時点で最深部までの全層にわたって有効上載圧に達し液状化している。一方，透水係数の高いケース 2 では，過剰間隙水圧の上昇がケース 5 よりも遅く，3 波目の谷の時点で地表から約 6m まで液状化しているが，それ以深では液状化していないことがわかる。加振終了後の各深度における液状化状態の継続時間から Okamura ら [2]に倣って液状化最深部の深度を求めた。図 5 に液状化層厚と透水係数の関係を示す。透水係数が 10^{-3} 程度で液状化層厚が急激に減少し，10^{-2} となるとこの加速度では地盤は液状化しなかった。

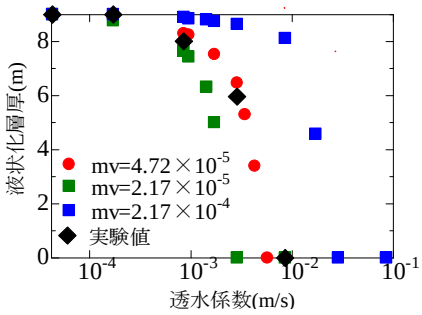

図 5　液状化層厚

数値解析から求めた過剰間隙水圧のアイソクローンを図 4 に示す。解析での水圧上昇過程は実験結果とよく対応したものとなっており，液状化する地盤の深度もほぼ一致している。図 5 に示す解析から求まった液状化層厚と透水係数の関係は，実験結果とよく対応したものとなっている。これより地盤全体が液状化する透水係数領域と地盤が全く液状化しなくなる透水係数領域，およびその中間領域に分けられ，中間領域の透水係数の幅は約 1 オーダーであることがわかる。また，体積圧縮係数が小さくなるほど，図のプロットが左にシフトしていくが，中間領域の幅はいずれもほぼ 1 オーダーであることがわかる。

5.まとめ

1)　透水係数が 10^{-4}m/s 程度の地盤では，加振中の短時間内でも体積は一定でなく，排水が生じていることがわかった。また，均一な地盤においては地表面ほど液状化しやすく，透水係数が増加すると地盤底部で液状化しにくくなり，液状化層厚が減少する。

2)　本研究で行った層厚 9m の豊浦砂の実験では，透水係数が約 10^{-3} から 10^{-2} の約 10 倍の範囲で液状化層厚が急激に減少した。この液状化層厚が急変する透水係数の範囲は，体積圧縮係数が変化しても約 10 倍で変化しない。10^{-2} 以上の透水係数を持つ土は，レキに相当する。現行の液状化判定でレキを液状化土として分類していることの妥当性がある程度裏付けられた。

参考文献

1) 岡村未対・来山博昭(2008)：遠心加速度を利用した飽和模型地盤の作製法と飽和度計測法に関する研究，土木学会論文集，Vol.64, No.3, 662-671.

2) Okamura　M. , Abdoun T.H., Dobry R., Sharp M.K. and Taboada V.M.: Effects of sand permeability and weak aftershocks on earthquake-induced lateral spreading, SOILS AND FOUNDATIONS Vol. 41, No.6, 62-77, 2001.