

不飽和地盤の動的挙動に対する FLIP プログラムの適用性検討

上田 恭平*

1. 研究の目的

これまで地盤の液状化は地下水位以深の飽和砂質土層が非排水条件下で繰返しせん断を受けることで生じるとされてきた。しかし 2011 年東日本大震災では浦安市の戸建住宅地で、地下水位以浅の不飽和領域が直下の液状化層の影響を受け飽和化し、余震時に液状化が発生した例がある¹⁾。しかし、飽和層の液状化挙動に及ぼす不飽和層への間隙水の移流の影響を遠心模型実験により検討した例はない。そこで本研究では、地震時・地震後の、表層不飽和領域の存在が水平成層地盤の液状化挙動に及ぼす影響を解明するために遠心模型実験、さらにはひずみ空間多重せん断モデル²⁾を用いた有効応力解析 (FLIP) を行った。

2. 研究の方法

(1) 遠心模型実験

京都大学防災研究所の遠心力载荷装置を使用した。実験模型の概略を図-1 に示す。地盤作成方法は以下の通りである。1) 珪砂 7 号を用いて乾燥地盤を作製、2) 地盤を完全に飽和、3) 地盤内の水を所定量排水させた。実験は全部で 4 ケース (表 1) 行い、2 ケースは水分特性曲線を合わせるため間隙流体に水を使い、残りは相似則を合わせるためメトロゾを使った。また、不飽和層の飽和度変化を測定する目的で土壤水分計を設置し、その位置は全ケースを通して固定とした。

(2) 有効応力解析

ひずみ空間多重せん断モデル²⁾を土の構成則とする 2 次元有限要素有効応力解析プログラム (FLIP) を基礎に、不飽和土の支配方程式 (式(1)~(3)) や水分特性曲線等のモデル化を考慮した三相系プログラムを用いて解析を行った。

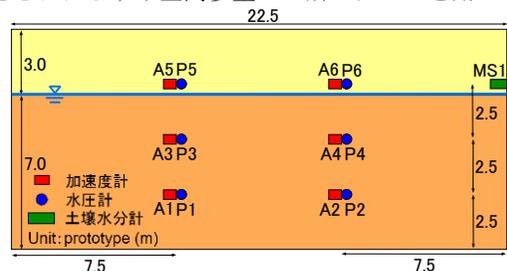


図-1 実験模型の概略

表 1 実験ケース

Case	地盤状態	間隙流体	入力波
1	飽和 6m+不飽和 4m	水	300gal 30s
2	飽和 7m+不飽和 3m		
3	飽和 6m+不飽和 4m	メトロゾ	300gal 40s
4	飽和 7m+不飽和 3m		400gal 60s

$$\text{div}\boldsymbol{\sigma} + \rho\mathbf{g} = \rho\ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

$$n\chi(\beta_a - \beta_f) + nS_r\beta_f / K_f + S_r\text{div}\dot{\mathbf{u}} = -\text{div}\left[\mathbf{k}^f(-\text{grad}p_f + \rho_f\mathbf{g} - \rho_f\dot{\mathbf{u}})\right] \quad (2)$$

$$-n\chi(\beta_a - \beta_f) + n(1 - S_r)\beta_a / K_a + (1 - S_r)\text{div}\dot{\mathbf{u}} = -\text{div}\left[\mathbf{k}^a(-\text{grad}p_a + \rho_a\mathbf{g} - \rho_a\dot{\mathbf{u}})\right] \quad (3)$$

ここに、 $\boldsymbol{\sigma}$: 全応力、 ρ : 密度(土と水の複合物)、 \mathbf{g} : 重力加速度、 \mathbf{u} : 土骨格の変位、 n : 間隙率、 χ : 比水分容量、 p_f : 間隙流体圧、 p_a : 間隙空気圧、 S_r : 飽和度、 K_f : 間隙水の体積弾性係数、 \mathbf{k}^f : 透水係数、 ρ_f : 間隙水密度、 \mathbf{k}^a : 透気係数、 K_a : 間隙空気の体積弾性係数、 ρ_a : 間隙空気の密度である。

3. 得られた成果

図-2 に Case 2 と Case 4 の過剰間隙水圧の時刻歴を示す。これらは地下水面と土壤水分計の位置関係が同じケースである。これによると、Case 2 では過剰間隙水圧が加振中に抜けていて、液状化

*京都大学防災研究所・助教

はしていない。一方、Case 4 は飽和層の過剰間隙水圧が初期有効上載圧に到達していることから、液状化をしたということがわかる。実験と解析を比較すると、過剰間隙水圧の時刻歴について概ね良い一致が見られている。

次に、図-3 に土壤水分計により得られた飽和度変化の時刻歴を示す。液状化の有無による不飽和層の飽和度上昇の違いがよくわかる。液状化をした場合、加振終了後も飽和度が上昇するということがいえる。これは液状化により、より多くの過剰間隙水圧が発生したことに伴うものだと考えられる。

図-4 は Case 4

における飽和度分布を表したものである。加振時だけでなく、加振終了後 (t= 60s) 以降も不飽和層下部の飽和度が上昇していることが確認できる。これらの傾向は実験で得られた土壤水分計の測定結果と定性的には一致しているといえる。やがて t=1000s になると不飽和層最下部が飽和領域 (Sr=97~98%) へ変わったことが確認できる。

飽和地盤の液状化は、加振時のみだけでなく、比較的長い時間にわたり不飽和層の飽和度上昇に寄与し、表層不飽和領域の一部飽和化をもたらす。これは余震による再液状化の可能性が高いことを示す一例と考えられる。今後液状化を検討する際は、表層不飽和領域への浸透も含めて検討することが必要になってくると思われる。

発表論文

高田祐希, 上田恭平, 三上武子, 井合進: 表層不飽和領域への間隙水流入に着目した砂地盤の液状化に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 2017. (登載決定)

参考文献

- 1) 福島宏文, 佐藤厚子, 林宏親, 橋本聖, 梶取真一: 盛土の被害, 寒地土木研究所月報 東北地方太平洋沖地震被害調査報告特集号, 2011. 2) Iai,S., Tobita,T., Ozutsumi,O., Ueda,K.: Dilatancy of Granular Materials in a Strain Space Multiple Mechanism Model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 35(3), 360-392, 2011.

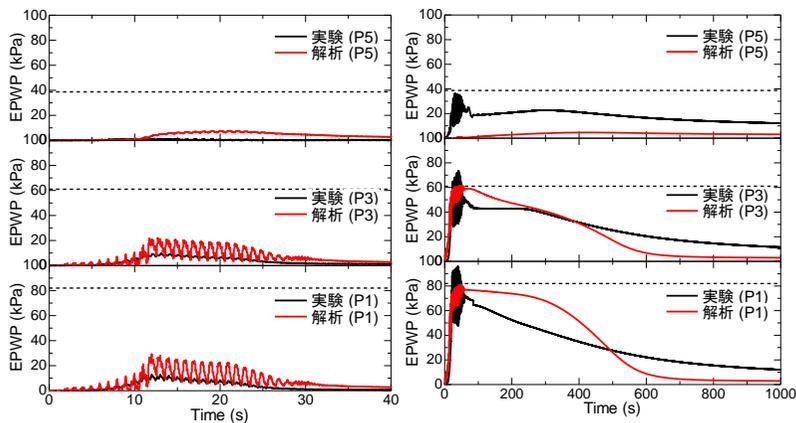


図-2 過剰間隙水圧の時刻歴 (左: Case 2, 右: Case 4)

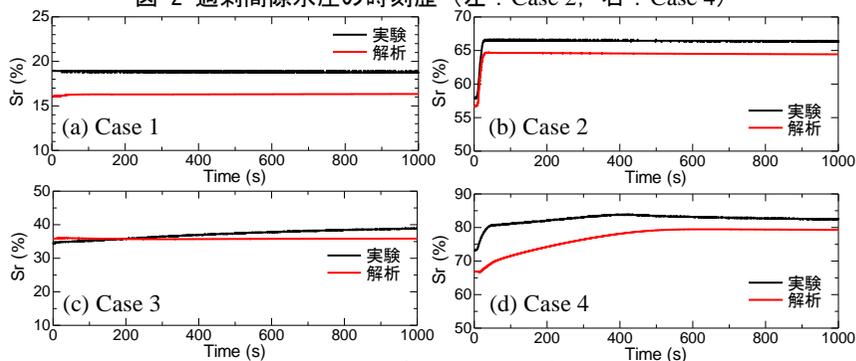


図-3 土壤水分計の応答

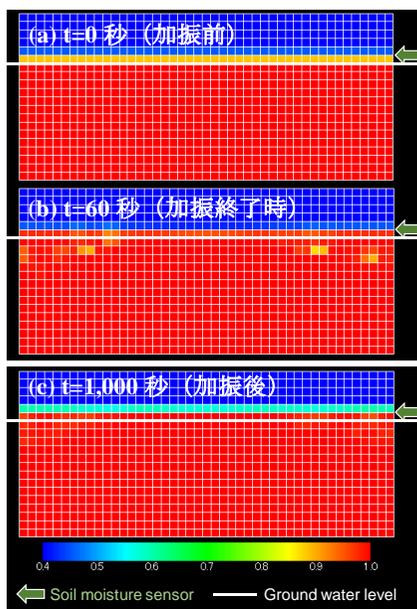


図-4 飽和度分布 (Case 4)