

水平成層地盤の地震時挙動に及ぼす 地盤飽和度の影響

上田 恭平¹・白 可²・井合 進³

¹正会員 博士（工学） 京都大学助教 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

E-mail: ueda.kyohei.2v@kyoto-u.ac.jp

²京都大学大学院 工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

E-mail: iai.susumu.6x@kyoto-u.ac.jp

近年、降雨・浸透流に伴う盛土の崩壊メカニズムを究明するため、不飽和土に関する研究が盛んに行われている。しかし、その多くは不飽和土の力学特性や保水性（水分特性曲線）に関する室内試験、またそのモデル化といった点に主眼が置かれており、飽和度の変化が地震時の液状化を含めた地盤の動的挙動にどのような影響を及ぼすかについては未解明な部分が多い。そこで本研究では、水平成層地盤の地震時挙動に対する不飽和化の影響を明らかにするため、遠心模型実験と有効応力解析を行った。遠心模型実験では、飽和時において土槽の下からの注水スピードを制御することにより、飽和度が90%の不飽和地盤を作成した。飽和地盤と不飽和地盤の結果の比較より、過剰間隙水圧の応答に顕著な差異が認められ、不飽和地盤では水圧が上昇しにくい結果であった。有効応力解析では、間隙空気圧を厳密に考慮した土・水・空気の三相系解析に加え、サクションをゼロと仮定し、液体と気体の混合体の等価な体積弾性係数を用いる簡易三相系解析も併せて実施した。その結果、飽和度が高い場合には、不飽和土の地震時の動的挙動に対して簡易三相系解析の適用性が確認された。

Key Words : *partially saturated ground, centrifuge model test, effective stress analysis*

1. はじめに

近年、降雨・浸透流や地震に伴う盛土の崩壊メカニズムを究明するため、不飽和土に関する研究が盛んに行われている。例えば、Unno et al.¹⁾は豊浦砂を用いて不飽和土の繰返し三軸試験を行い、飽和度およびサクションの変化を計測している。また、渦岡ら²⁾は、地震時の不飽和地盤への浸透特性を数値解析的に示し、吉川ら³⁾は、弾塑性モデルを用いた有限要素解析により、地震時・地震後の不飽和シルト盛土の飽和度・過剰間隙水圧・空気圧変化を示している。しかし、これまでの不飽和土に関する研究の多くは、不飽和土の（静的な）力学特性や保水性（水分特性曲線）に着目したものが多く、飽和度の変化が地震時の液状化を含めた地盤の動的挙動にどのような影響を及ぼすかについては未解明な部分が多い。

そこで本研究では、水平成層地盤の地震時挙動に対する不飽和化の影響を明らかにするため、遠心場における模型振動実験と、地盤の構成モデルとしてひずみ空間多重せん断モデルによる間隙空気の影響を考慮した有効応

力解析を行った。

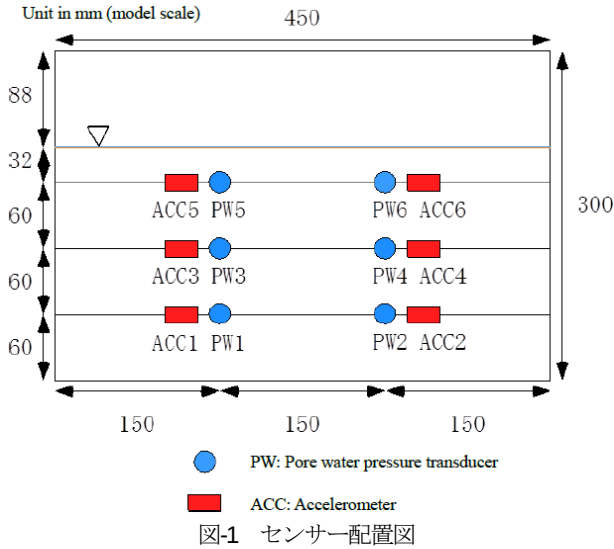
2. 遠心模型実験の概要

本実験には京都大学防災研究所の遠心力载荷装置を使用した。アームの回転軸からプラットフォームに設置した土槽の中心までの長さである有効回転半径は 2.5m である。最大遠心加速度は振動台を用いない静的な実験で 200g、振動台を用いる動的な実験では振動台の性能による制限から 50g である。

地盤の作成にはすべての実験ケースで珪砂 7 号を用いており、相対密度は 60%に設定した。土槽は内寸が 45cm×30cm×15cm（長さ×高さ×奥行き）の剛土槽を使用した。本実験において用いる計測機器は、図-1に示すとおり、間隙水圧計（SSK 製：P306A-2）と加速度計（SSK 製：A6H-50）が 6 台ずつである。

実験ケースは 4 ケースであり、Case 1（ $S=100\%$ ）と Case 2（ $S=90\%$ ）では、乾燥砂を空中落下法により堆積

させた上で、土槽の下からの注水スピードを制御することにより所定の飽和度を実現した。一方、Case 3 ($S_r=100\%$) と Case 4 ($S_r=90\%$) では、あらかじめ所定の飽和度に調整した再構成試料を用い、不飽和地盤の作成を行った。模型振動台実験の結果、Case 1 と Case 3、また Case 2 と Case 4 の間には大きな差異は生じなかったため、本稿では Case 1 および Case 2 についてのみ示すものとする。なお、土槽の下から注水を行う際には、乾燥地盤を脱気槽に移動させて、十分脱気を行った後に、二酸化炭素を注入し充填させている。また、通常の遠心模型実験では相似則を考慮して遠心加速度に応じた粘性流体（例えば、メトロース）を使用するが、不飽和土の水分特性曲線が粘性流体（の表面張力）に依存するため⁴⁾、本研究では間隙流体として水を使用した。



3. 数値解析の概要

(1) 不飽和土の支配方程式

飽和度が S_r 、間隙率が n である不飽和土の運動方程式および液体・気体の収支バランス式は、土粒子骨格に対する液体・気体の相対加速度が無視できる場合には、以下のとおり $u-p$ 形式⁵⁾で近似することができる⁶⁾。

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

$$\rho_f n \dot{S}_r + \rho_f n S_r \dot{p}_f / K_f + \rho_f S_r \text{div} \dot{\mathbf{u}} = -\text{div} \mathbf{w}^f \quad (2)$$

$$-\rho_a n \dot{S}_r + \rho_a n (1 - S_r) \dot{p}_a / K_a + \rho_a (1 - S_r) \text{div} \dot{\mathbf{u}} = -\text{div} \mathbf{w}^a \quad (3)$$

ここに、 $\boldsymbol{\sigma}$: 全応力、 $\mathbf{g}$: 重力加速度、 $\mathbf{u}$: 土骨格の変

位、 p_f : 間隙水圧、 p_a : 間隙空気圧、 K_f : 間隙水の体積弾性係数、 K_a : 間隙空気の体積弾性係数である。不飽和土の密度 ρ は、固相（土粒子）、液相（水）、気相（空気）の密度をそれぞれ ρ_s 、 ρ_f 、 ρ_a とすると、

$$\rho = (1 - n) \rho_s + n S_r \rho_f + n (1 - S_r) \rho_a \quad (4)$$

により与えられる。また、飽和土の定式化^{例えば、5)}に従い、式(2)(3)の右辺における固相（土粒子骨格）に対する液相と気相の相対速度ベクトル（多孔質体の全断面における見かけの面積あたりの流量）は、

$$\mathbf{w}^f = \rho_f \mathbf{k}^f (-\text{grad} p_f + \rho_f \mathbf{g} - \rho_f \ddot{\mathbf{u}}) \quad (5)$$

$$\mathbf{w}^a = \rho_a \mathbf{k}^a (-\text{grad} p_a + \rho_a \mathbf{g} - \rho_a \ddot{\mathbf{u}}) \quad (6)$$

のように、透水および透気係数テンソル $\mathbf{k}^f$ 、 $\mathbf{k}^a$ と間隙水圧・空気圧勾配に対して与えるものとする。

ここで、間隙空気圧と間隙水圧の差から、

$$s = p_a - p_f \quad (7)$$

のようにサクションが与えられる。飽和度 S_r とサクション s の関係は水分特性曲線と呼ばれるヒステリシス型の経験式で与えられ、この勾配を χ とおくと、

$$\dot{S}_r = \frac{\partial S_r}{\partial s} \dot{s} = \chi (\dot{p}_a - \dot{p}_f) \quad (8)$$

が成立するので、式(2)(3)は以下のように書くことができる。

$$n \chi (\dot{p}_a - \dot{p}_f) + n S_r \dot{p}_f / K_f + S_r \text{div} \dot{\mathbf{u}} = -\text{div} [\mathbf{k}^f (-\text{grad} p_f + \rho_f \mathbf{g} - \rho_f \ddot{\mathbf{u}})] \quad (9)$$

$$-n \chi (\dot{p}_a - \dot{p}_f) + n (1 - S_r) \dot{p}_a / K_a + (1 - S_r) \text{div} \dot{\mathbf{u}} = -\text{div} [\mathbf{k}^a (-\text{grad} p_a + \rho_a \mathbf{g} - \rho_a \ddot{\mathbf{u}})] \quad (10)$$

なお、式(9)(10)の導出の際、密度は一定であると仮定した。不飽和土の解析では式(1)(9)(10)を連成させて解けばよく、有限要素法のための離散化方法に関しては、基本的には間隙空気の分だけ自由度が増えるのみで、あとは飽和土解析^{例えば、7) 8)}に準じて離散化された支配方程式の定式化が可能である。

(2) 不飽和土の構成式および水分特性曲線

不飽和状態の砂質土に対しては、飽和砂質土に対して提案されているひずみ空間多重せん断モデル（カクテルグラスモデル）⁹⁾をそのまま適用する。ただし、構成式に用いる有効応力 $\boldsymbol{\sigma}'$ としては、大野¹⁰⁾による以下の定義を採用する。

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - p\mathbf{I} \quad (11)$$

$$p = S_e p_f + (1 - S_e) p_a \quad (12)$$

$$S_e = \frac{S_r - S_m}{S_{rx} - S_m} \quad (13)$$

ここに、 S_e ：有効飽和度、 S_{rx} ：水分特性曲線において吸水過程で初めてサクションがゼロとなる飽和度、 S_m ：水分特性曲線において排水過程で初めてサクションが無限大となる飽和度、 $\mathbf{I}$ ：2 階の単位テンソルである。

水分特性曲線としては、van Genuchten¹¹⁾による経験式を適用する。排水過程（飽和度低下）の水分特性曲線は、

$$S_r = (S_{rx} - S_m) \left[1 + (s / s_{aU})^{n_U} \right]^{-m_U} + S_m \quad (14)$$

により、吸水過程（飽和度上昇）に関しては、

$$S_r = (S_{rx} - S_m) \left[1 + (s / s_{aL})^{n_L} \right]^{-m_L} + S_m \quad (15)$$

により与えるものとする。ここに、 s_{aU} , s_{aL} ：排水および吸水曲線で $S_r = (S_{rx} + S_m) / 2$ に対応するサクション、 n_U , m_U ：排水曲線のパラメータ、 n_L , m_L ：吸水曲線不飽和土の透水および透気係数は、van Genuchten¹¹⁾による経験式により、以下で与えるものとする。

$$\mathbf{k}^f = r_{k_f} \mathbf{k}_{s_e=1}^f \quad (16)$$

$$\mathbf{k}^a = r_{k_a} \mathbf{k}_{s_e=0}^a \quad (17)$$

ここに、

$$r_{k_f} = (S_e)^{n_{kf}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m_f}} \right)^{m_f} \right]^2 \quad (18)$$

$$r_{k_a} = (1 - S_e)^{n_{ka}} \left(1 - S_e^{\frac{1}{m_a}} \right)^{2m_a} \quad (19)$$

であり、 n_{kf} , n_{ka} , m_f は透水・透気係数の飽和度依存パラメータである。

(3) 液体と気体の混合体の等価体積弾性係数を用いた簡易三相系解析

飽和度が1.0（完全飽和）に近く、式(9)と式(10)が同一の解（ $p_f = p_a$ ）を与える場合には、連立方程式としては特異点に相当する ill-condition の状態となり、数値解析上の問題が発生する可能性がある。この場合には、液体と気体の混合体における等価な体積弾性係数を導入し、

飽和土解析（二相系）にて三相系の挙動を解析する方法（ここでは、簡易三相系と呼ぶ）が考えられる。

まず、

$$p_f = p_a = p \Leftrightarrow s = p_a - p_f = 0 \quad (20)$$

$$\mathbf{k}^f = S_r \mathbf{k} \quad (21)$$

$$\mathbf{k}^a = (1 - S_r) \mathbf{k} \quad (22)$$

と仮定し、式(9)(10)の第1項を消去すると、

$$\frac{n}{K_p} \dot{p} + \text{div} \mathbf{u} = -\text{div} \left[\mathbf{k} (-\text{grad} p + \rho_p \mathbf{g} - \rho_p \ddot{\mathbf{u}}) \right] \quad (23)$$

ここに、

$$\rho_p = S_r \rho_f + (1 - S_r) \rho_a \quad (24)$$

$$\frac{1}{K_p} = \frac{S_r}{K_f} + \frac{(1 - S_r)}{K_a} \quad (25)$$

したがって、飽和度が高い場合には、式(25)の等価体積弾性係数を用いることで、飽和土解析により簡易的に不飽和土の挙動が評価できるものと考えられる。

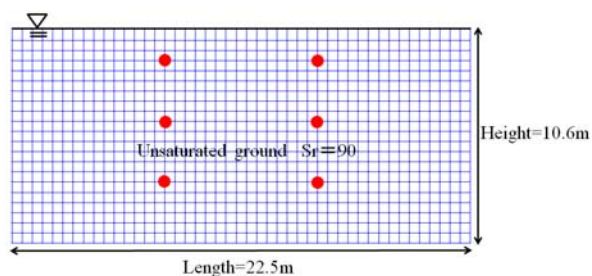
(4) 解析条件および解析手順

解析に使用した有限要素メッシュを図-2に示す。解析寸法は遠心模型実験のプロトタイプスケールと同一とし、実験における境界条件を模擬するため、底面を固定境界、側面を鉛直ローラーとした。また、地表面を排水（間隙水圧がゼロ）および排気（間隙空気圧がゼロ）境界とした（簡易二相系解析では排水境界のみ）。

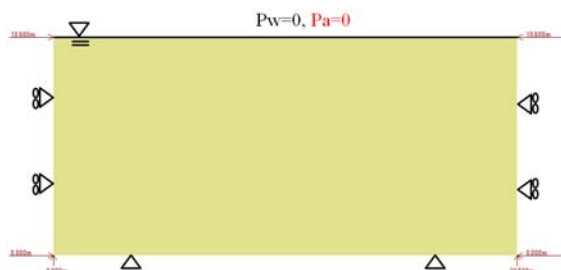
三相系解析では、まず、初期飽和度分布を求めるため、定常浸透流解析を実施した。模型実験における初期飽和度（完全飽和および $S_r=90\%$ ）の違いは、入力パラメータ S_{rx} を調整することで考慮した。続いて、地盤の圧密過程に相当する重量作用下での自重解析を行った後、模型実験で計測された入力波を用いて動的解析を実施した。なお、簡易二相系解析では、定常浸透流解析は不要であり、模型実験における初期飽和度に応じて透水係数および質量密度、体積弾性係数を式(21)(24)(25)により算定し、それらを用いて自重解析およびそれに続く動的解析を行った。

解析に用いた地盤材料（珪砂7号）のモデルパラメータのうち、強度や動的変形特性に関するものを表-1に示す。ひずみ空間多重せん断モデル（カクテルグラスモデル）におけるダイレイタンシーパラメータに関しては、相対密度60%の珪砂7号の液状化強度（ $R_L=0.15$ 程度）を

満足するよう、図-3 ($S=100\%$) のように設定した。なお、簡易三相系解析で式(25)において $S=90\%$ とした場合 ($K_p=1,100\text{kPa}$) には、同図の三角印のような液状化強度曲線が得られており、これはYoshimi et al.¹²⁾の結果とも同調的である。三相系解析における水分特性曲線に関するパラメータは、既往の文献¹³⁾を参考に、図-4のように設定した。なお、パラメータ S_{rx} は、Case 1 (飽和地盤: $S=100\%$) のシミュレーションでは0.99とし、Case 2 (不飽和地盤: $S=90\%$) の場合には、実験における初期の飽和度を模擬するため0.90に設定した。



(a) 有限要素メッシュ



(b) 境界条件

図-2 解析メッシュと境界条件

表-1 解析パラメータ

初期せん断剛性 G_0 , (kPa)	5.57×10^4
体積弾性係数 K , (kPa)	1.45×10^5
平均有効拘束圧 P_a , (kPa)	98.0
拘束圧依存係数 m	0.5
内部摩擦角 ϕ_r , (deg.)	38.5
変相角 ϕ_p , (deg.)	28.0
粘着力 c , (kPa)	0.0
減衰係数 H_{max}	0.24
透水係数 k_t , (m/s)	7.3×10^{-3}
透気係数 k_a , (m/s)	1.0×10^{-2}
質量密度 ρ , (kN/m ³)	1.85
間隙率 n	0.45

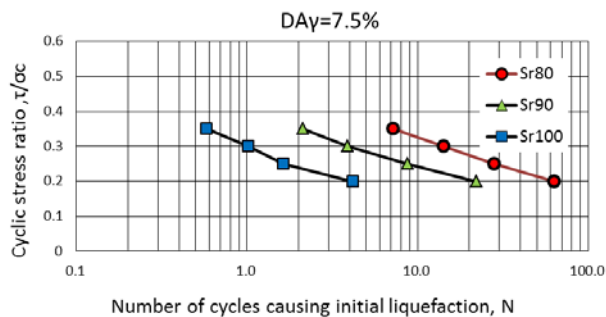


図-3 液状化強度曲線

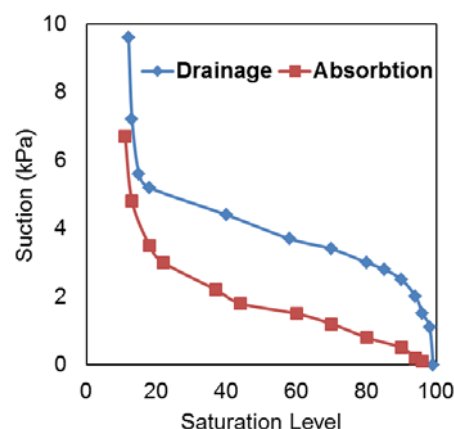
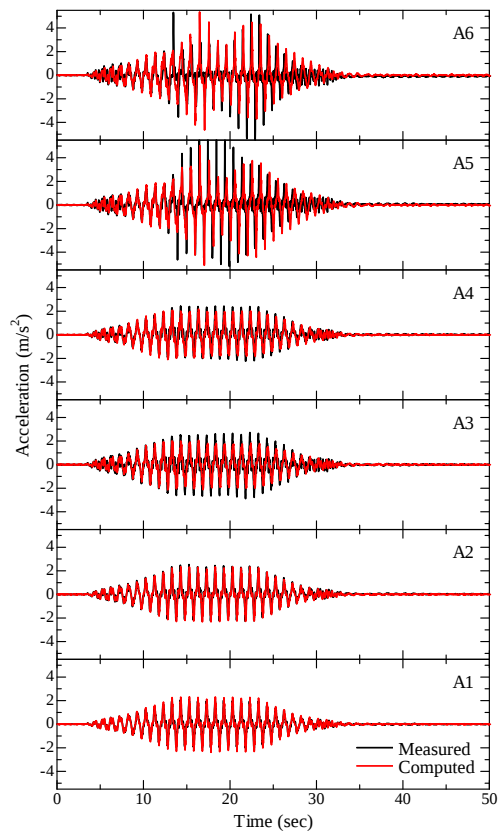


図-4 水分特性曲線

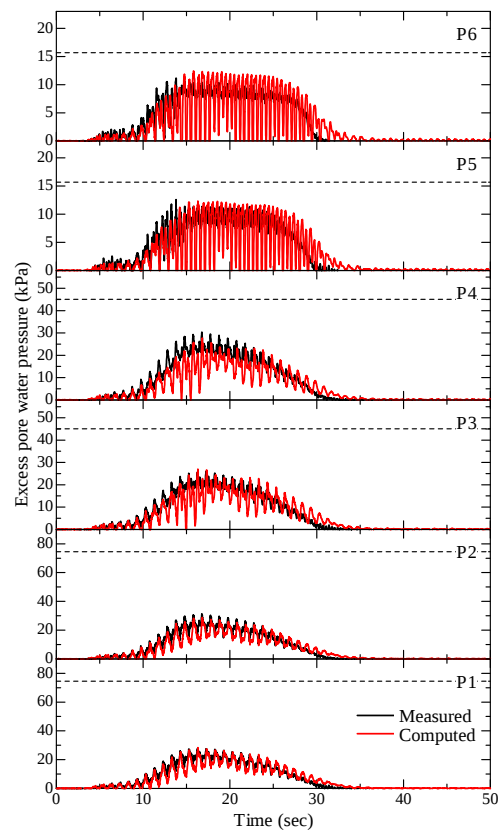
4. 遠心模型実験と数値解析の比較

遠心模型実験の結果を解析結果と併せて図-5～図-8に示す。まず、実験結果についてのみ比較すると、地表面付近における応答加速度がCase 1 (飽和 $S=100\%$) ではCase 2 (不飽和 $S=90\%$) よりも大きくなっているものの、両者にそれほど大きな差異は見られない。これは、いずれのケースでも、過剰間隙水圧が初期有効上載圧 (図中の破線) に達しておらず、完全な液状化には至っていないためだと考えられる。また、Case 1における地表面付近での加速度増幅は、正のダイレイタンス挙動を反映しているものと思われる。一方、過剰間隙水圧の応答は両ケースで大きく異なっており、Case 2の不飽和地盤の方が水圧上昇が抑制されているのがわかる。

次に、簡易三相系解析の結果に着目すると、細部にこそ実験結果との違いはあるものの、Case 1とCase 2の両者において非常に精度良く加速度および水圧応答を再現できていると言える。つまり、Case 2のように不飽和地盤ではあるが飽和度が比較的高い場合には、簡易三相系解析が十分に適用できることが明らかとなった。なお、この結果は、地盤の保水性にも大きく影響され则认为ら

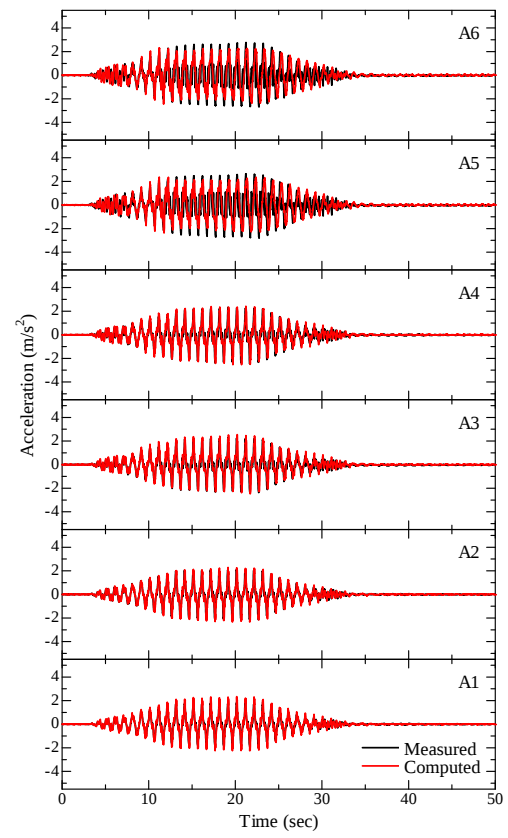


(a) 加速度

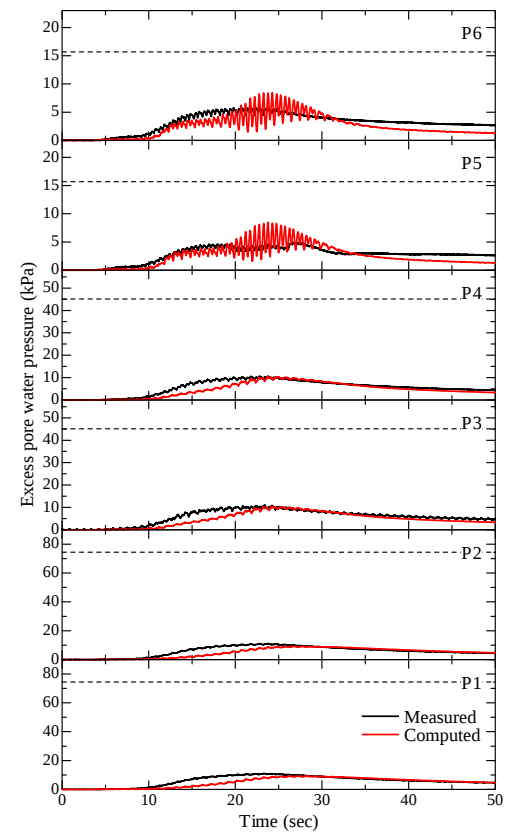


(b) 過剰間隙水圧

図-5 Case 1 (飽和 $S_r=100\%$) と簡易三相系解析の結果

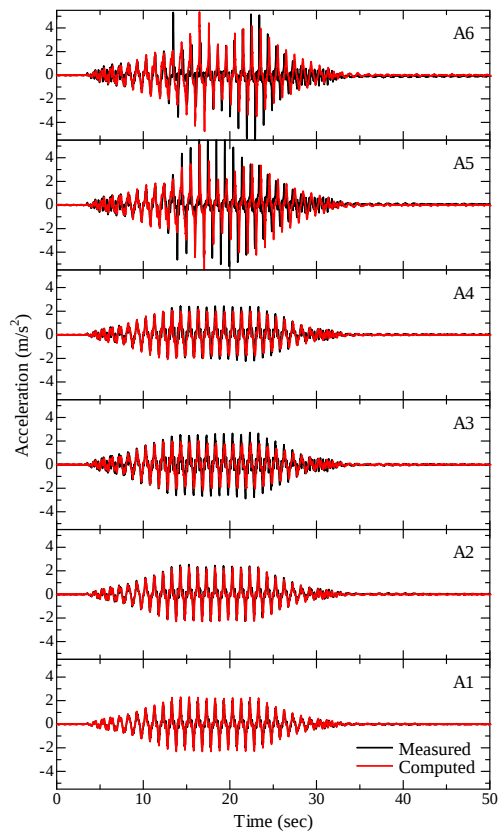


(a) 加速度

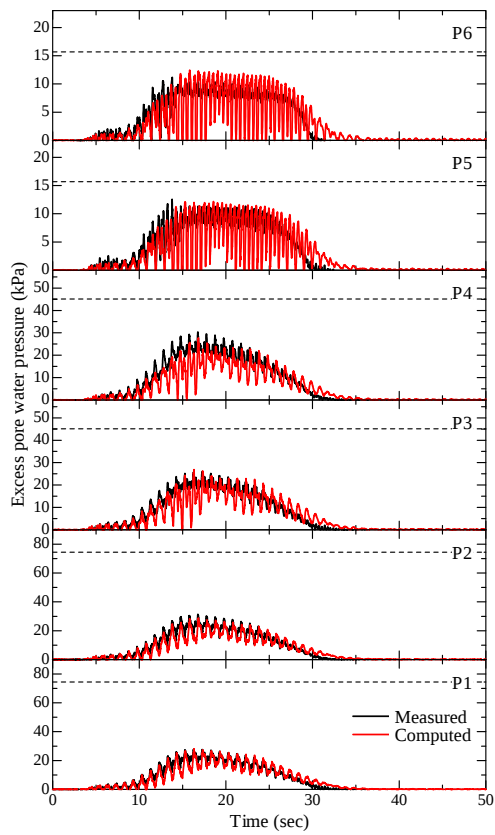


(b) 過剰間隙水圧

図-6 Case 2 (不飽和 $S_r=90\%$) と簡易三相系解析の結果

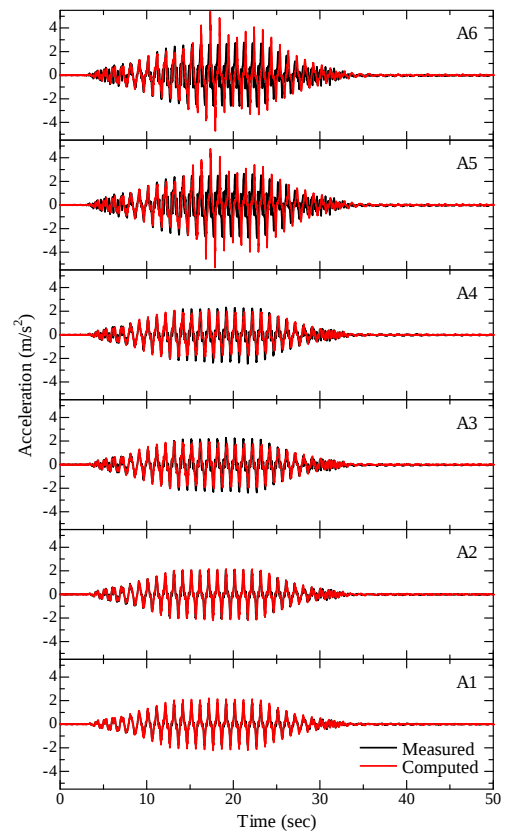


(a) 加速度

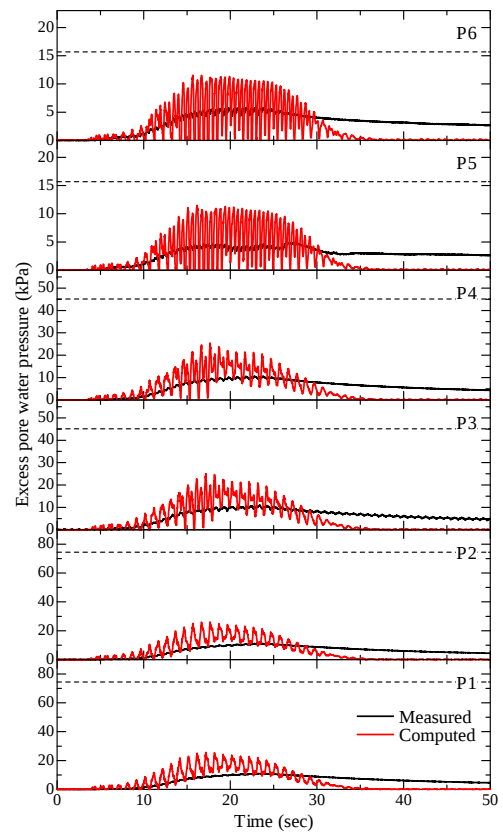


(b) 過剰間隙水圧

図-7 Case 1 (飽和 $S_r=100\%$) と三相系解析の結果



(a) 加速度



(b) 過剰間隙水圧

図-8 Case 2 (不飽和 $S_r=90\%$) と三相系解析の結果

れ、水分特性曲線が図-4と大きく異なる、すなわち飽和度 $S=90\%$ に対応するサクションの値が今回のケースよりも非常に大きく無視できない場合（例えば、粘性土）には、簡易三相系解析の適用には注意が必要であると思われる。

最後に、三相系解析の結果を見ると、Case 1では簡易三相系解析の場合と同様に実験結果を良く再現できているが、Case 2では簡易三相系解析に比べて実験結果との乖離が大きい。この原因は現状では不明であるが、水分特性曲線のモデル化や透気係数の設定等に改良の余地が残されている可能性もあり、今後さらに検討を進める予定である。

5. まとめ

本研究では、水平成層地盤の地震時挙動に対する不飽和化の影響を明らかにするため、遠心模型実験と有効応力解析を行った。遠心模型実験では、飽和時において土槽の下からの注水スピードを制御することにより、飽和度が90%の不飽和地盤を作成した。飽和地盤と不飽和地盤の結果の比較より、過剰間隙水圧の応答に顕著な差異が認められ、不飽和地盤では水圧が上昇しにくい結果であった。有効応力解析では、間隙空気圧を厳密に考慮した土・水・空気の三相系解析に加え、サクションをゼロと仮定し、液体と気体の混合体の等価な体積弾性係数を用いる簡易三相系解析も併せて実施した。その結果、飽和度が高い砂質系地盤の場合には、不飽和土の地震時の動的挙動に対して簡易三相系解析の適用性が確認された。

参考文献

- 1) Unno, T., Kazama, M., Uzuoka, R. and Sento, N.: Change of moisture and suction properties of volcanic sand induced by shaking disturbance, *Soils and Foundations*, 42(4), 519-528, 2006.
- 2) 渦岡良介, 久保哲夫, 八嶋厚, 張鋒: 不飽和層への浸透現象を考慮した液状化解析, 土木学会論文集 No.694/III-25, pp153-163, 2001.
- 3) 吉川高広, 野田利弘: 不飽和土構造物の施工時・地震時・地震後の空気～水～土骨格連成有限変形シミュレーション, 第 25 回中部地盤工学シンポジウム, pp.23-28, 2013.
- 4) Okamura, M., Tamamura, S., Yamamoto, R.: Seismic stability of embankments subjected to pre-deformation due to foundation consolidation. *Soils Found.* 53 (1), 11-22, 2013.
- 5) Zienkiewicz, O. C., and Bettess, P.: Soil and Other Saturated Media under Transient, Dynamic Conditions; General Formulation and the Validity Various Simplifying Assumptions, *Soil Mechanics - Transient and Cyclic Loads*, John Wiley & Sons, 1-16, 1982.
- 6) Borja, R.I.: Cam-Clay plasticity. Part V: A mathematical framework for three-phase deformation and strain localization analyses of partially saturated porous media, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193 5301-5338, 2004.
- 7) 小堤治: 液状化地盤上の地盤・構造物系の地震被害推定に関する数値解析法の研究, 京都大学博士学位論文, 2003.
- 8) 上田恭平: 砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究, 京都大学博士学位論文, 2009.
- 9) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and 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.
- 10) 大野進太郎, 河井克之, 橘伸也: 有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル, 土木学会論文集, Vol.63, No.4, pp.1132-1141, 2007.
- 11) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Soc. Am. J.*, 44: 892-898, 1980.
- 12) Yoshimi, Y., Tanaka, K. and Tokimatsu, K.: Liquefaction resistance of a partially saturated sand, *Soils and Foundations*, 29(3), 157-162, 1989.
- 13) 神谷浩二, Rully Bakrie, 本城勇介: 保水性を制御した不飽和土の透気係数の測定, 土木学会論文集 C, Vol. 62, No. 3, 679-688, 2006.

(2017.???.? 受付)

EFFECT OF THE DEGREE OF SATURATION ON SEISMIC BEHAVIOR OF HORIZONTALLY LAYERED GROUND

Kyohei UEDA, Ke BAI and Susumu IAI

In this research, centrifuge test and effective stress analysis are made to clarify the effects of partial saturation on the seismic behaviors of flat ground and embankment. In centrifuge test, S_r 90% flat ground is made by controlling the velocity of water that injected from the bottom of the box. Two phase numeri-

cal analysis based on the equivalent bulk modulus of pore water was conducted for centrifuge test. The result of three phase numerical analysis for embankment showed the elevation of saturation during shaking, and confirmed the change of pore air pressure and suction at the same time.