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

高田　祐希[1]・上田　恭平[2]・三上　武子[3]・井合　進[4]

[1]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）
E-mail: takada.yuki.52u@st.kyoto-u.ac.jp

[2]正会員　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

[3]正会員　前田建設　技術研究所（〒179-8914 東京都練馬区旭町 1-39-16）
E-mail: mikami.take@jcity.maeda.co.jp

[4]正会員　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，地盤液状化の際には地下水位以浅の表層不飽和地盤の影響が無視できないことが指摘されている．そこで本研究では，液状化時の表層不飽和領域への間隙水の移動量を定量的に測るために，遠心模型実験と 2 次元有効応力解析を行った．遠心模型実験では土壌水分計を用いて表層不飽和領域の飽和度を測定した．次に有効応力解析では，不飽和土における間隙空気の影響を考慮できるよう三相系に拡張された解析プログラム FLIP を用いて，実験の再現解析および不飽和層での間隙水圧・飽和度分布の変化について考察を行った．本研究で実施した遠心模型実験と 2 次元有効応力解析より，加振による飽和度上昇を確認した．特に液状化時には不飽和領域の飽和度がかなり高くなり，再液状化の可能性が高くなることの一因であることを示した．

Key Words: *liquefaction, centrifuge model test, the degree of saturation, seepage, effective stress analysis*

1.　はじめに

(1)　研究の背景

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．しかし実際の被災事例を省みると，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で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)2)]．この他にも東日本大震災で液状化地盤上の不飽和盛土が被害を受けた事例が数多く報告されている[3)]．これらの崩壊メカニズムを考えるうえで，地下水位の高さや不飽和領域への浸透に伴う飽和化が重要な鍵となってくる．これに対して既往の研究では Unno et al.[4)]が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・サクションの変化を計測している．また渦岡ら[5)]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[6)]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・空気圧変化を示した．しかしこれまで飽和・不飽和地盤の地震時液状化挙動に着目した研究は十分になされているとは言えず，特に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．また地震によるせん断によってどれだけの間隙水が移動し飽和領域が拡大するかを知ることは余震や将来の地震に対しての備えにもつながる．特に表層付近の地中構造物などは液状化地盤上の不飽和層にあることが多く，これらの耐震性能評価にもつながる．

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を用いた有効応力解析を行った．実験は，地下水位の高さを 2 種類設定し，地震時における不飽和領域での飽和度変化および飽和

地盤の過剰間隙水圧に焦点を当てて行った．また有効応力解析では，実験の再現解析とともに，実験では見ることのできなかった飽和度や間隙(水・空気)圧の全体分布の出力や地下水位を変えた場合の例も行っている．

(2) 研究の目的

本研究では，液状化現象が発生した際の表層不飽和領域への影響を間隙水の移動に着目して定量的に評価する．

1) 液状化現象が起こった際の不飽和領域への間隙水の移動量を，過剰間隙水圧および不飽和領域の飽和度上昇量により定量的に評価する．
2) 不飽和土における間隙空気の影響を考慮できるよう三相系に拡張された有効応力解析プログラム FLIP を用いて数値解析を行う．

2. 遠心模型実験

(1) 遠心力載荷装置

本実験には京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を使用した．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 号を用いた．その諸元を表-1 に示す．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．片方の側面がガラス張りで，地盤の鉛直断面を観察することができる（図-1）．

表-1 硅砂 7 号の物性値

最大間隙比 emax	1.219
最少間隙比 emin	0.675
50%粒径 D50	0.13
均等係数 Uc	1.9
土粒子の比重 Gs	2.641

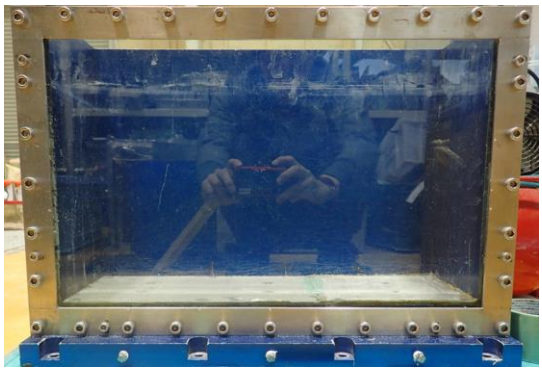

図-1 使用したせん断土槽

(2) 計測機器

本実験において用いる計測機器は，間隙水圧計 6 台（SSK 製：P306A-2），加速度計 6 台（SSK 製：A6H-50），土壌水分計 1 台(Campbell Scientific 製：C-CS650)である．センサーの設置図は図-2 に示す．土壌水分計（図-3）は，土壌の誘電率が体積含水率により変動することを利用して高周波電磁波の反射により土壌の誘電率を測定する [7]．水の誘電率は 81 程度と，空気（誘電率：1）や土粒子（誘電率：3~5）よりも著しく大きい．今回用いた土壌水分計では測定した誘電率を体積含水率 VWC に変換して計測結果として表示する．

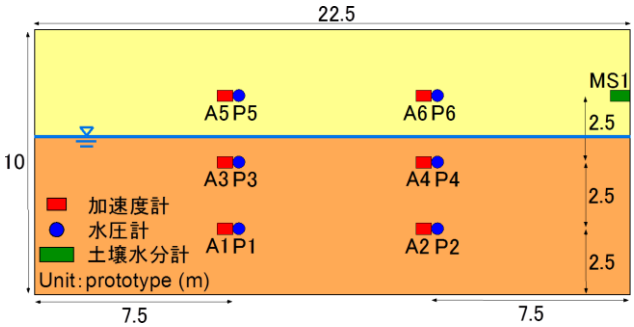

図-2 センサー配置図

図-3 土壌水分計

(3) 実験ケース

地盤内の地下水面の位置，使用する間隙流体の種類，入力波を変えて 4 ケースの実験を行った（表-2）．土壌水分計の設置場所は全ケースを通して地表面から 5cm 下（模型スケール）の位置とし，変えていない．

表-2　実験ケース

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

(4)　模型地盤の作製方法

以下に本研究で作成した地盤の作成方法の詳細を記す.

0)　準備

土壌水分計が加振によって沈下をしないよう支える台を設置し，土槽の壁面に両面テープを用いて水圧計を固定した.

1)　乾燥地盤の作成

相対密度が 50%となるように空中落下法を用いて珪砂 7 号を 20cm の高さまで給砂する.

2)　乾燥地盤の飽和

土槽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た．二酸化炭素充填後，室温での粘度が 50cSt となるように調整し脱気したメトローズを土槽の地表面から注水した．注水の速度調整は水頭差と圧力差で行い，約 10 時間かけて乾燥地盤を完全に飽和させた.

3)　飽和地盤の不飽和化

土槽底面にある排水口とチャンバーをシンフレックスチューブにより接続し，チャンバーに負圧をかけることで排水を行った（図-4）．これら一連の作業は 1G 場で行っている.

4)　排水量の管理

遠心場を上げると排水量に応じて地下水位の位置がはっきりと見えるようになる．そこで 1G 場での排水量と 50G 場での地下水面の位置との関係は事前にキャリブレーションを行った（表-3）．キャリブレーションの際には図-5 に示すように水位観測用の簡易井戸を取り付けた．図-5 は Case 2 と Case 4 で作成する飽和地盤 7m・不飽和地盤 3m（実物スケール)をキャリブレーションしたときのカメラの画像である.

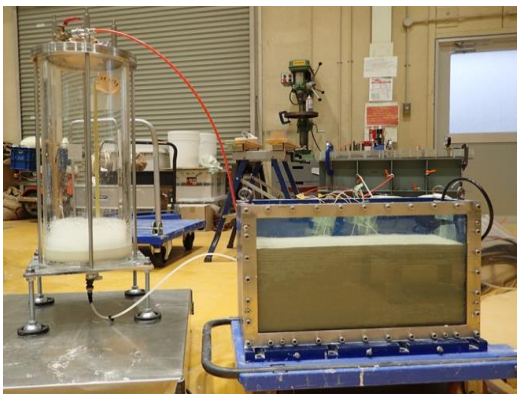

図-4　1G 場での排水の様子

表-3　間隙流体の諸量

排水量		50G 場での水位
水	メトローズ	
959g		8m
1164g		7.7m
1524g	1150g	7m
2142g	2100g	6m

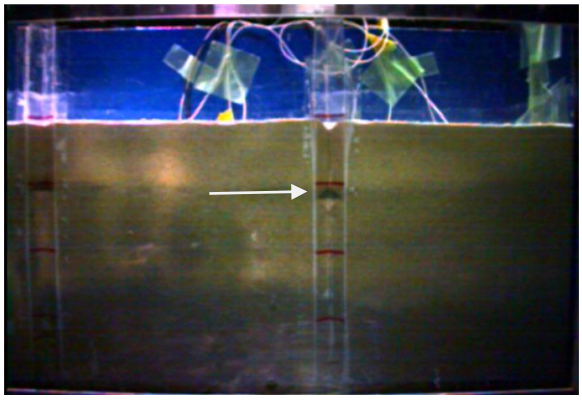

図-5　観測井戸によるキャリブレーションの様子

3.　実験結果

(1)　過剰間隙水圧の応答（図-6）

Case 1, 2 では飽和層を含めほとんど水圧の上昇が確認できなかった．過剰間隙水圧比が 1 よりはるかに小さい値をとっているため，液状化を起こしていないことがわかる．また極めて過剰間隙水圧の消散が早いことも見て取れる．これらは間隙流体に水を使ったことによるものだと思われる．Case 3 では、Case 1, 2 と違って P1 や P3 で過剰間隙水圧比にして 0.5 前後の水圧上昇が見られ，かつその消散に多くの時間を要している．しかし初期有効上載圧には到達しておらず，液状化はしていない．最後に Case 4 について

みてみると，飽和層の計測点（P1, P3）で過剰間隙水圧比が 1 に到達していることから液状化していることがわかる．また不飽和層に設置した計測点 （P5）でも過剰間隙水圧比が 1 に近づいているが，これは実際の水圧計の設置位置が図-2 に示す目標位置よりもやや低かったことによるものであると考えられる．

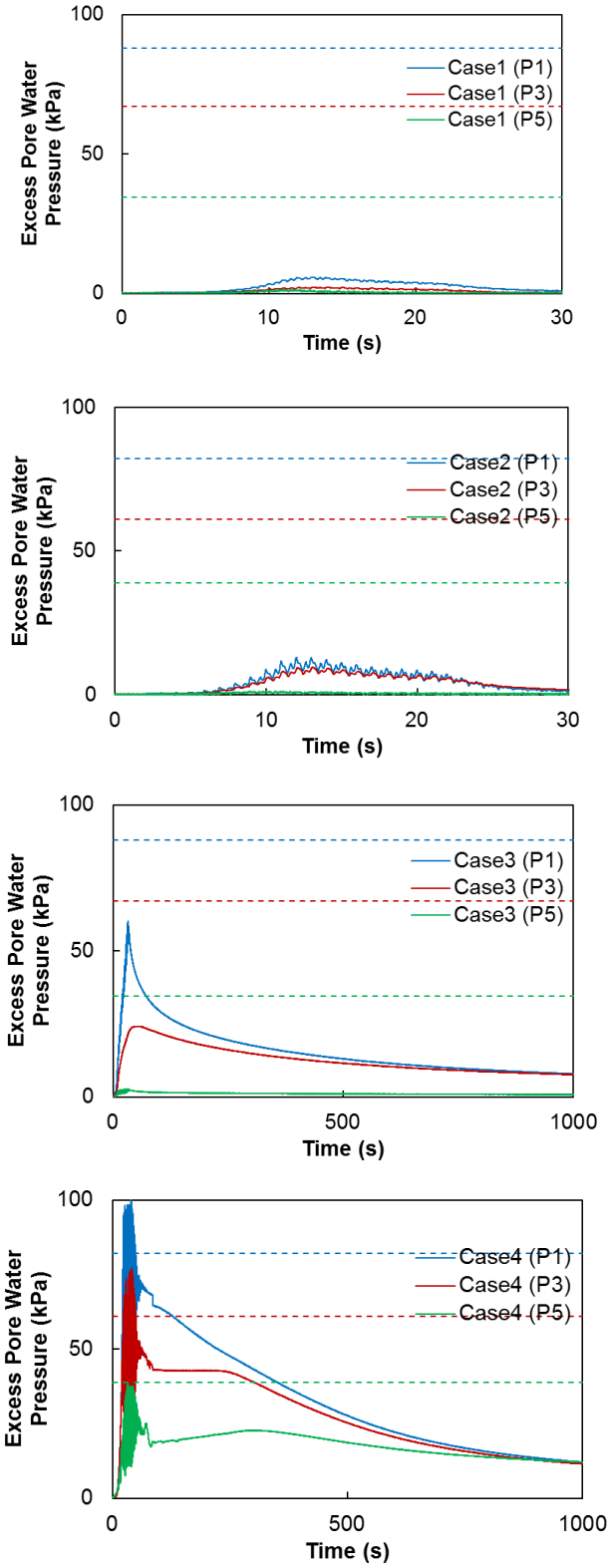

図-6　過剰間隙水圧の応答

(2)　土壌水分計の応答（図-7）

図-7 は加振をしてから過剰間隙水圧が消散するまでの土壌水分計の測定結果である．

Case 1 では加振による飽和度変化は全くみられない．これは間隙流体に水を使い，かつ土壌水分計と地下水面の位置が実物スケールで 1.5m 離れているためだと考えられる．これは間隙流体に水を使っているが，土壌水分計と地下水面の位置が実物スケールで 0.5m しか離れていないためである．また図-6 に示す通り過剰間隙水圧消散は約 30 秒で消散しているため図-7 のようにその後は一定の飽和度を保ち続けた． Case 3 では，土壌水分計と地下水面の位置関係から，加振による飽和度上昇はほとんど見られない．しかし Case1, 2 と違って加振後の飽和度上昇が見られる．これは液状化によって間隙水が時間をかけて不飽和層の方へ排水しようとしている過程を表している．Case 4 では加振による大きな飽和度上昇がみられた．その後過剰間隙水圧消散にあわせてゆっくり飽和度が上昇していくのがわかる．また 400s からは飽和度がゆっくり下がっていくのも見られる．一時的に上昇した飽和度がまた少し下降したのが何の影響なのかは明確にはわからないが，一つの可能性として以下のことが考えられる．土壌水分計に近い間隙水圧計（P5）において、上昇した過剰間隙水圧が消散を始めるタイミングは 350～400 秒である（図-6）。これが図-7 での飽和度の低下開始のタイミングと概ね一致していることから、上昇・下降を伴う飽和度の変化には間隙水圧の挙動が密接に関係しているものと考えられる．

最後にケース毎の比較をしていく．

(1)　Case 1 と Case 2
地下水面の高さの違いが，初期飽和度および加振時の飽和度変化に表れている．

(2)　Case 1 と Case 3
間隙流体の違いによる初期飽和度の違いに加え，過剰間隙水圧の発生量の差による不飽和層への間隙水の流入程度の違いを計測している．

(3)　Case 2 と Case 4
こちらも間隙流体の違いによる初期飽和度の違いがある．それに加え，Case 4 では加振後の過剰間隙水圧消散に伴う飽和度変化がみられる．

(4)　Case 3 と Case 4
加振による飽和度上昇が Case 3 で見られない点が異なっている．これは地下水面と土壌水分計の位置が離れているからだと考えられる．

このようにケースごとに飽和度上昇の違いが明確に表れた．

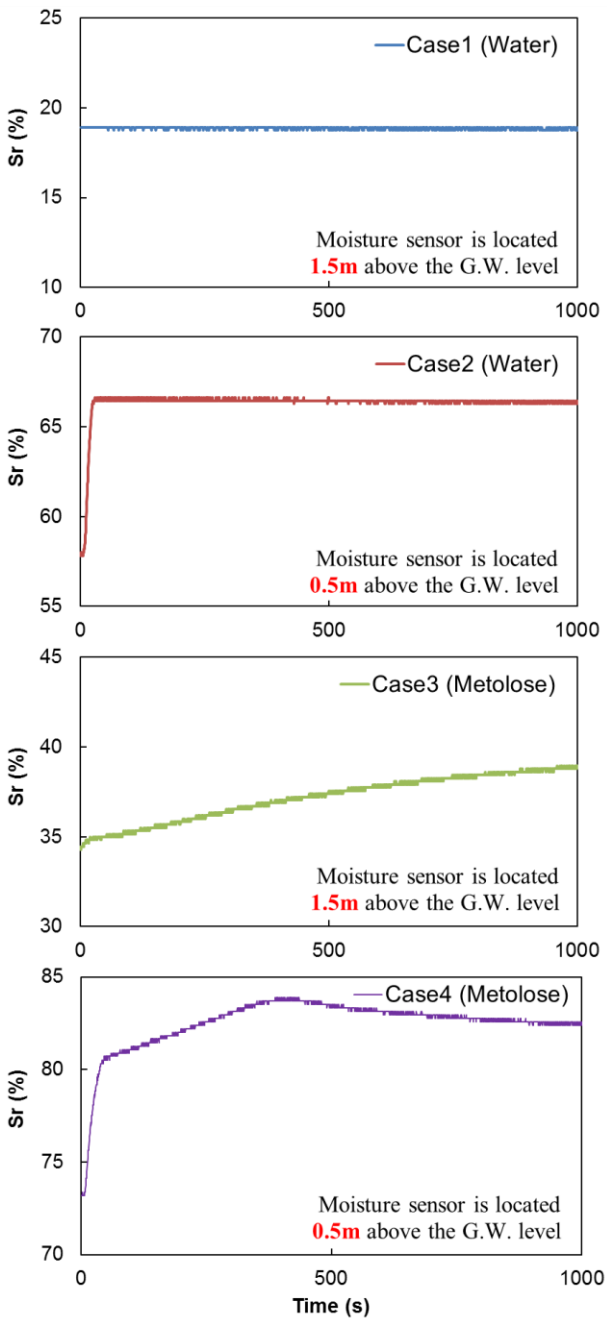

図-7　土壌水分計の応答

4.　2 次元有効応力解析

(1)　不飽和土の支配方程式

本研究では，多重せん断機構を土の構成則とする排水解析機能を組み込んだ 2 次元有限要素有効応力解析プログラム FLIP2D を基礎に，不飽和土の支配方程式および水分特性曲線，不飽和透水・透気係数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う．本解析プログラムで用いられる土の力学モデルは従来の二相系解析プログラムと同様にカクテルグラスモデル [8]と呼ばれるものである．カクテルグラスモデルでは，粒子同士が，どの様に繋がっていて，どの様に力を及ぼし合い，どの様に動くのかという内部構造を数式的に表現し，その体積平均として連続体における巨視的な応力を評価している．以下に不飽和土の支配方程式を示す．

$$\mathrm{div}\boldsymbol{\sigma}+\rho\mathbf{g}=\rho\ddot{\mathbf{u}} \tag{1}$$

$$n\chi\left(\dot{p}_{\mathrm{a}}-\dot{p}_{\mathrm{f}}\right)+nS_{\mathrm{r}}\dot{p}_{\mathrm{f}}/K_{\mathrm{f}}+S_{\mathrm{r}}\mathrm{div}\left(\dot{\mathbf{u}}\right)=-\mathrm{div}\left(\mathbf{k}^{\mathrm{f}}\left[-\mathrm{grad}\left(p_{\mathrm{f}}\right)+\rho_{\mathrm{f}}\mathbf{g}-\rho_{\mathrm{f}}\ddot{\mathbf{u}}\right]\right) \tag{2}$$

$$-n\chi\left(\dot{p}_{\mathrm{a}}-\dot{p}_{\mathrm{f}}\right)+n\left(1-S_{\mathrm{r}}\right)\dot{p}_{\mathrm{a}}/K_{\mathrm{a}}+\left(1-S_{\mathrm{r}}\right)\mathrm{div}\left(\dot{\mathbf{u}}\right)=-\mathrm{div}\left(\mathbf{k}^{\mathrm{a}}\left[-\mathrm{grad}\left(p_{\mathrm{a}}\right)+\rho_{\mathrm{a}}\mathbf{g}-\rho_{\mathrm{a}}\ddot{\mathbf{u}}\right]\right) \tag{3}$$

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，$\boldsymbol{u}$：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，$\mathbf{k}^{\mathrm{f}}$：透水係数，ρ_{f}：間隙水密度，$\mathbf{k}^{\mathrm{a}}$：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．

不飽和土における有効応力は，大野ら (2007)による有効応力の定義を採用し，以下で与える [10]．

$$\boldsymbol{\sigma}=\boldsymbol{\sigma}'-\mathbf{m}p \tag{4}$$

$$p=S_{\mathrm{e}}p_{\mathrm{f}}+\left(1-S_{\mathrm{e}}\right)p_{\mathrm{a}} \tag{5}$$

$$S_{\mathrm{e}}=\frac{S_{\mathrm{r}}-S_{\mathrm{rn}}}{S_{\mathrm{rx}}-S_{\mathrm{rn}}} \tag{6}$$

ここに，S_{e}：有効飽和度，S_{rx}：吸水過程で初めてサクション $s=0$ となる飽和度，S_{rn}：排水過程で初めてサクション $s=\infty$ となる飽和度，$\mathbf{m}$：各成分は δ_{ij} である．

不飽和土の水分特性曲線は，van Genuchten(1980)による実験式を適用する [11]．排水・吸水の水分特性曲線は以下の式で与える．

排水曲線（飽和度低下）

$$S_{\mathrm{r}}=\left(S_{\mathrm{rx}}-S_{\mathrm{rn}}\right)\left[1+\left(s/s_{\mathrm{aU}}\right)^{n_{\mathrm{fU}}}\right]^{-m_{\mathrm{fU}}}+S_{\mathrm{rn}} \tag{7}$$

吸水曲線（飽和度上昇）

$$S_{\mathrm{r}}=\left(S_{\mathrm{rx}}-S_{\mathrm{rn}}\right)\left[1+\left(s/s_{\mathrm{aL}}\right)^{n_{\mathrm{fL}}}\right]^{-m_{\mathrm{fL}}}+S_{\mathrm{rn}} \tag{8}$$

ここに，s_{aU}：排水曲線で $S_{\mathrm{r}}=\frac{S_{\mathrm{rx}}+S_{\mathrm{rn}}}{2}$ に対応するサクション，n_{fU}，m_{fU}：水分特性曲線の排水曲線のパラメータ，s_{aL}：吸水曲線で $S_{\mathrm{r}}=\frac{S_{\mathrm{rx}}+S_{\mathrm{rn}}}{2}$ に対応するサクション，n_{fL}，m_{fL}：水分特性曲線の吸水曲線のパラメータ

である．

不飽和土の透水係数は，van Genuchten(1980)による実験式により，以下で与える[11]．

$$\mathbf{k}^{\mathrm{f}} = r_{k_{\mathrm{f}}} \mathbf{k}^{\mathrm{f}}_{s_{\mathrm{e}}=1} \tag{9}$$

$$\mathbf{k}^{\mathrm{a}} = r_{k_{\mathrm{a}}} \mathbf{k}^{\mathrm{a}}_{s_{\mathrm{e}}=0} \tag{10}$$

ここに，

$$r_{k_{\mathrm{f}}} = \left(S_{\mathrm{e}}\right)^{n_{\mathrm{kf}}} \left[1-\left(1-S_{\mathrm{e}}^{\frac{1}{m_{\mathrm{f}}}}\right)^{m_{\mathrm{f}}}\right]^2 \tag{11}$$

$$r_{k_{\mathrm{a}}} = \left(1-S_{\mathrm{e}}\right)^{n_{\mathrm{ka}}} \left(1-S_{\mathrm{e}}^{\frac{1}{m_{\mathrm{f}}}}\right)^{2m_{\mathrm{f}}} \tag{12}$$

n_{f}，m_{f}：透水(気)係数の飽和度依存パラメータである．

(2)　解析の諸条件と手順

解析に使用したメッシュと境界条件を**図-8** に示す．地盤要素は，前節で説明したカクテルグラスモデルとする．遠心模型実験結果との比較を行うため，解析寸法を実験模型のプロトタイプと同じになるように設定する．また遠心模型実験を再現するためにすべてのケース・フェーズにおいて，底面を固定境界，側面を鉛直ローラーとしている．

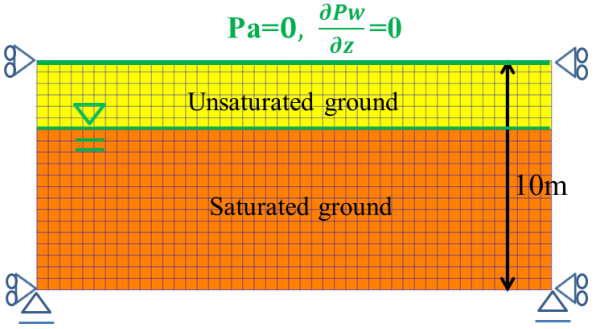

図-8　解析メッシュと境界条件

まず，排水条件で静的解析（自重解析）を行う．この静的解析は，数値解析上は動的解析における初期状態（初期変位，初期応力）を計算するために行うが，物理的には地盤の圧密を行っていることに相当する．その後，排水条件下で動的解析に移行する．なお本解析では遠心模型実験の再現解析を行うが，実験で行ったような 1G 場で排水し，50G 場にもっていくというような複雑な段階は考慮していない．実物スケールで初めから地下水面が所定の位置にある状態で，自重解析を行っている．

地盤の物性値に関するパラメータを**表-4** に示す．間隙流体に水を用いたケースでは，硅砂 7 号の本来の透水係数に 50 倍を乗じた値を使用した．また液状化強度曲線は**図-9** に示すようなものを使用した．

使用した水分特性曲線を**図-10** に示す．なお，水分特性曲線に間隙流体にメトローズを用いたケースにおいても，水と同じものを使用している．これは遠心場で粘性流体を用いた場合に水分特性曲線がそのまま適用できるかわからないことや，1G 場でのメトローズ（50cSt）のサクションが水と比べて 0.8 倍程度と比較的水と近い値であること[12]などが理由である．

表-4　使用したパラメータ

初期せん断剛性 G_0, (kPa)	5.46×10^4
体積弾性係数 K, (kPa)	1.42×10^5
平均有効拘束圧 P_a, (kPa)	73.5
拘束圧依存係数 m	0.5
内部摩擦角 ϕ_f, (deg.)	35.99
変相角 ϕ_p, (deg.)	28
粘着力 c, (kPa)	0
減衰係数 H_{max}	0.24
透水係数 k_f, (m/s)	1.46×10^{-4}
透気係数 k_a, (m/s)	1.0×10^{-2}
質量密度 ρ, (kN/m^3)	2.092
間隙率 n	0.487

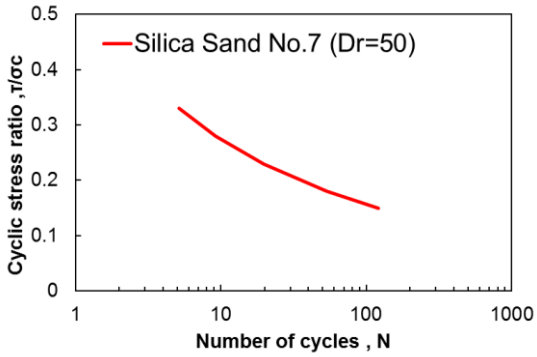

図-9　液状化強度曲線

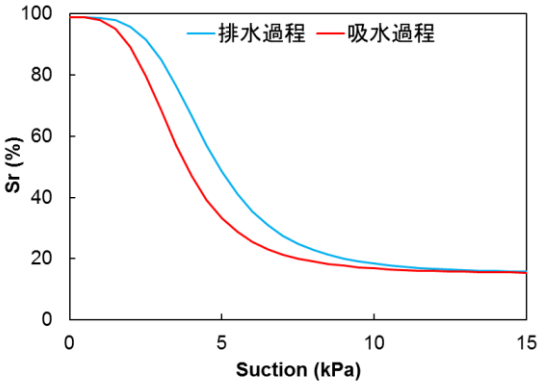

図-10　水分特性曲線

(3)　解析結果

図-11~14 はそれぞれ Case 1~4 における過剰間隙水圧の時刻歴を表したものである．Case1, 2 はそれぞれ間隙流体に水を使ったケースであるが，概ね実験結果を再現できているといえる．一方 Case 3 では飽和層でやや異なった傾向となった．飽和層の P3 では解析の方がやや大きく応答が出ている．また水圧の消散のタイミングもあまり一致しているとは言えない．これらの違いの原因としては地盤の作成方法に原因があるのではないかと考えられる．今回，地盤作成では，一度排水させて 50G 場にもっていくという複雑な過程を経ている．この過程で，一度脱気したメトローズが再度空気を含んで飽和地盤を形成した可能性がある．これが水圧上昇を抑え，かつ水圧消散にも影響を与えたのではないかと考えられる．最後に Case 4 について見てみる．飽和層の計測点 (P1, P3) について見てみると，水圧の立ち上がりや水圧の最大値を含め，実験結果を良好に再現できているといえる．一方，不飽和層の応答 (P5)について見てみると，こちらは実験と解析でやや異なる傾向となった．これは実験の章でも述べた通り，水圧計の設置の際のミスが原因なのではないかと考えられる．

図-15 は Case 4 における飽和度分布を表したものである．加振時の飽和度上昇（飽和度 78%から飽和度 90%へと変化）と加振後の過剰間隙水圧消散に伴う飽和度上昇（飽和度 90%から飽和度 97%へと変化）の 2 点を確認することができる．長い間時間をかけて不飽和層下部の飽和度が変化していることがわかる．これらの結果は実験における土壌水分計の応答をよく再現しているといえる．なお不飽和層最下部の飽和度はコンター図によると赤色になっていて完全飽和になっているように見えるが，実際には飽和度が 97~98%程度と限りなく飽和に近い不飽和状態となっている．間隙空気の圧縮と間隙水の移流の両方が起こる不飽和層下部での飽和度変化の大きさを，コンター図を通して確認することができた．

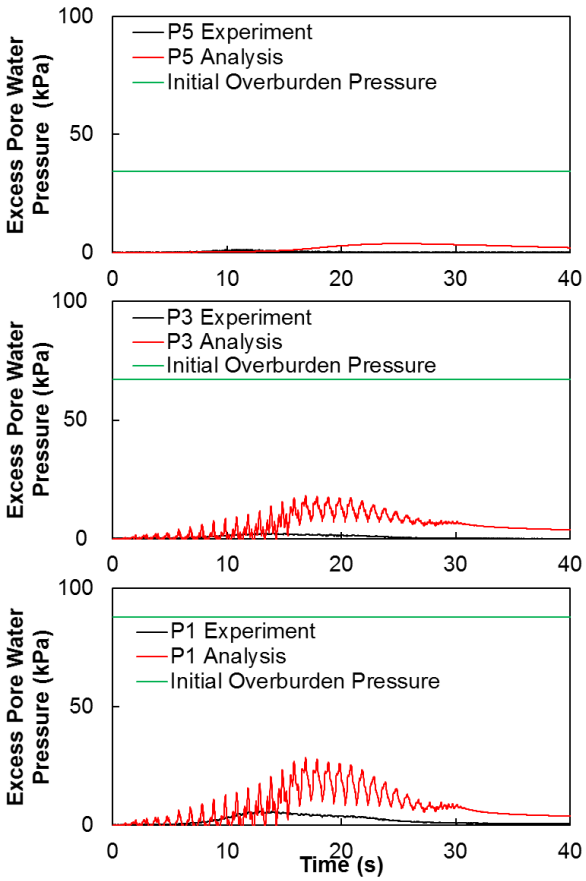

図-11　過剰間隙水圧時刻歴 (Case 1)

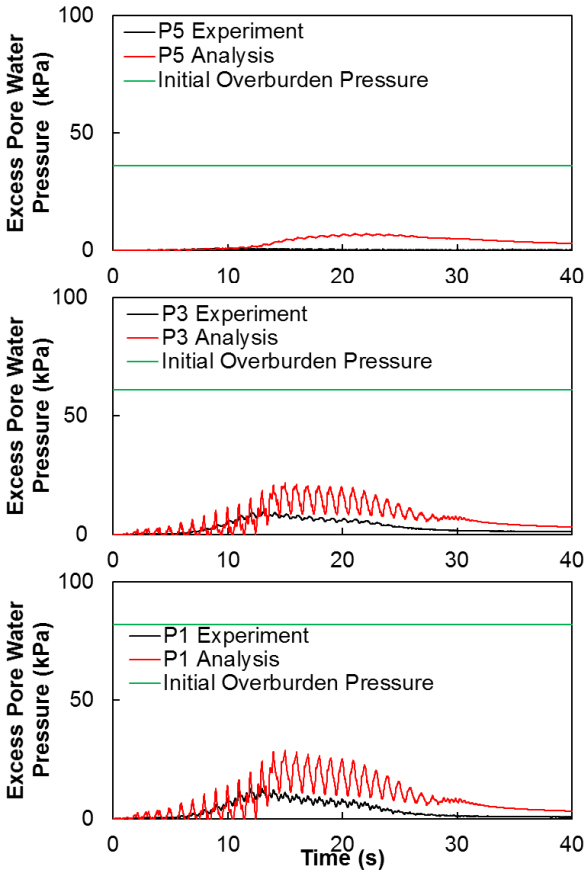

図-12　過剰間隙水圧時刻歴 (Case 2)

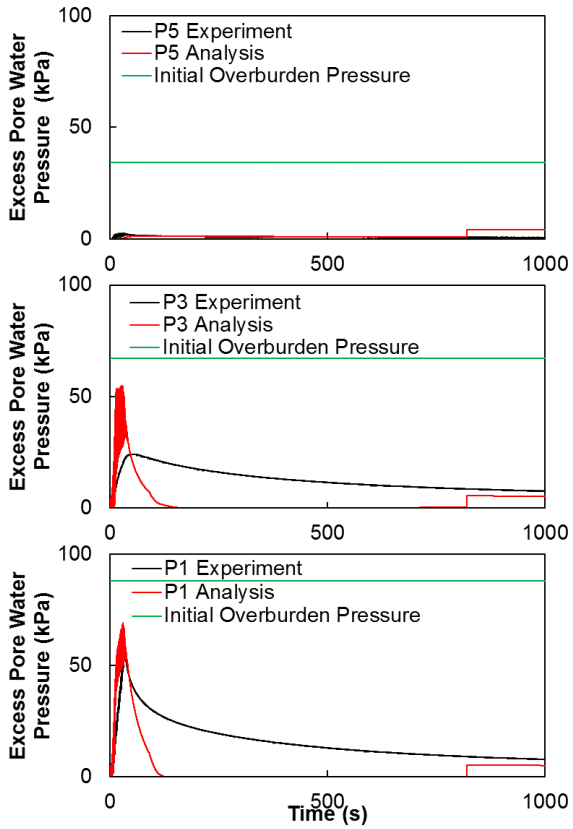

図-13　過剰間隙水圧時刻歴 (Case 3)

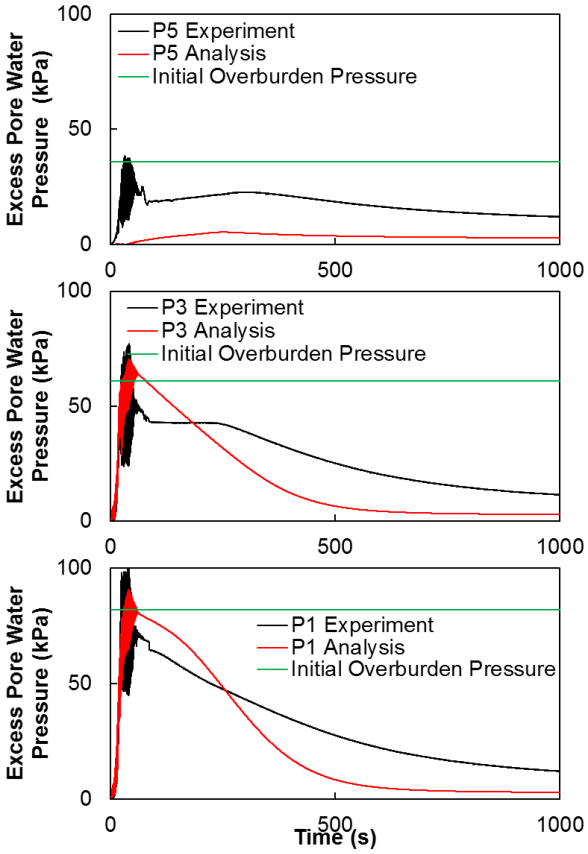

図-14　過剰間隙水圧時刻歴 (Case 4)

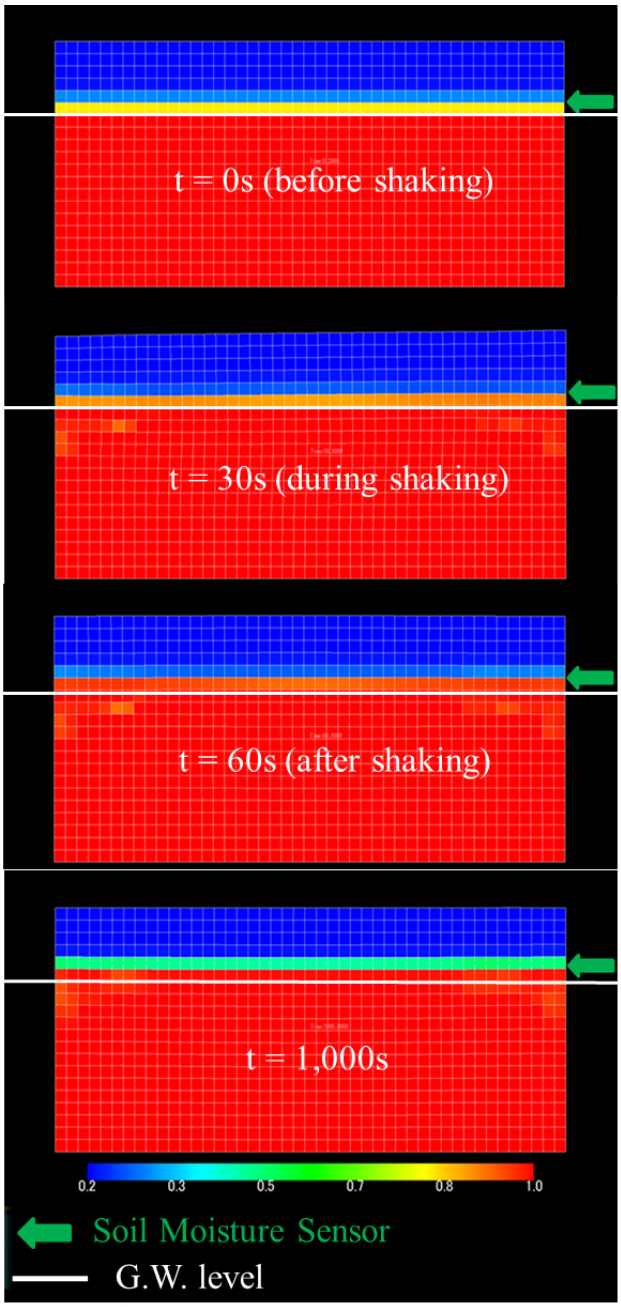

図-15　飽和度分布 (Case 4)

5.　結論

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，様々な条件を変えて遠心模型実験を行い，また不飽和土における間隙空気の影響を考慮できるよう三相系に拡張された有効応力解析プログラム FLIP を用いて実験結果の再現を試みた．以下，得られた結論をまとめる．

1)　遠心模型実験により飽和度の上昇具合の差が明確に表れた．飽和度の上昇具合は加振時と加振後に分け

てまとめると**表-5** に示すようになった．この図より不飽和領域の飽和度上昇には，地下水面の位置および間隙流体（透水係数）が影響していることがわかる．

2) 三相系に拡張された 2 次元有効応力解析では Case 3 を除き実験結果との良い一致が見られた．一致が見られないのは，実験における地盤作成方法に原因があると思われる．また飽和度の分布を出力することにより，加振による地盤全体の飽和度変化を捉えることができ，実験で得られた傾向を，特に間隙流体に水を使ったケースにおいてより良く再現できた．

3) 以上より，加振によって間隙水の分配が全ケースで起こることがわかり，特に液状化をしたケースだけは他と異なる傾向を示していることが明らかになった．地震による飽和地盤の液状化は表層不飽和領域の一部の飽和度をかなり高くするということがいえる．このこと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なっている．したがって今後は表層不飽和領域への浸透も含めて液状化を検討することが必要になってくると考えられる．

今後の課題として以下のことが挙げられる．

1) 精度の高い不飽和地盤の作成方法の確立が必要である．特に粘性流体を用いる場合，筆者が行った方法では空気混入の可能性が大いに考えられる．

2) 粘性流体を使った場合の水分特性曲線についてはほとんど研究されていないのが実情である．今回，解析では水の場合と全く同じパラメータを用いて行ったが，これについても正確な水分特性曲線が必要である．

表-5　遠心模型実験における飽和度上昇のまとめ

		加振後	
		上昇あり	上昇なし
加振時	上昇あり	Case 4	Case 2
	上昇なし	Case 3	Case 1

参考文献

1) 土木学会新潟震災調査委員会：昭和 39 年新潟地震災害被害調査，1966

2) 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.

3) 石川敬祐，安田進：東北地方太平洋沖地震による造成宅地盛土被害の考察，第 67 回土木学会年次学術講演会，Ⅲ，pp.415-416，2012.

4) Unno, T., Kazama, M., Uzuoka, R. and Sento, N.(2006a): Change of moisture and suction properties of volcanic sand induced by shaking disturbance, *Soils and Foundations*, **42**(4), 519-528.

5) 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, 2001.12

6) 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.

7) Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P.: Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I.Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 672-678 (1982)

8) 井合進，飛田哲男，小堤治：砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンシー関係，京都大学防災研究所年報，第 51 号，pp.291-304，2008.

9) Zienkiewicz, O.C., Bettess, P. Soils and other saturated media under transient, dynamic conditions. In: Pande, Zienkiewicz (Eds.), Soil Mechanics - Transient and Cyclic Loads. John Wiley and Sons, 1982. 1-16.

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. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Soc. Am. J., 44: 892-898.

12) Okamura, M., Tamamura, S., Yamamoto, R., 2013. Seismic stability of embankments subjected to pre-deformation due to foundation consolidation. Soils Found. 53 (1), 11-22

（？受付）

LIQUEFACTION BEHAVIOR OF SANDY GROUND FOCUSING ON PORE WATER INFLOW INTO PARTIALLY SATURATED LAYER

Yuki TAKADA, Kyohei UEDA, Takeko MIKAMI and Susumu IAI

It has been pointed out that the effect of partially saturated surface layer (above the groundwater table) cannot be ignored when ground is liquefied. In this research, a series of centrifuge tests was made to clarify the effect of pore water inflow into a partially saturated surface layer during liquefaction. The pore water inflow was measured in terms of the increases in the degree of saturation and excess pore water pressure. The degree of saturation was measured by using an electrical soil moisture sensor. Four tests were carried out by changing groundwater level and pore fluid type (water or viscous fluid). The extent of the expansion of saturated area during and after shaking was different among the cases. Comparison between liquefied and non-liquefied cases indicated that there were obvious differences: a part of the unsaturated layer changed into a saturated one due to the seepage from an originally saturated layer located below. In addition to the tests, three phase numerical analyses which take the effect of pore air pressure into consideration were performed for the centrifuge tests. The simulation well captured the change of the degree of saturation, the response of excess pore water and air pressures.