

# 空気注入による安価な液状化対策工法の開発に向けた基礎的研究

竹村次朗<sup>1)</sup>, 五十嵐玲奈<sup>2)</sup>, 井澤 淳<sup>3)</sup>, 細川晃一<sup>4)</sup>, 増田雅士<sup>5)</sup>, 岡村未対<sup>6)</sup>

- 1) 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻, jtakemur@cv.titech.ac.jp
- 2) 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻, reina@cv.titech.ac.jp
- 3) 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻, jizawa@cv.titech.ac.jp
- 4) 愛媛大学 工学部 環境建設工学科, punkspring0402@hotmail.co.jp
- 5) 愛媛大学 理工学研究科 生産環境工学専攻, masuda\_e\_uni@yahoo.co.jp
- 6) 愛媛大学 理工学研究科 生産環境工学専攻, okamura@dpc.ehime-u.ac.jp

## 1. はじめに

これまでの液状化対策は比較的重要な構造物に対して行うものであった。そのため、これまでに数多くの液状化対策工法が開発され実用に供されているが、いずれの工法も工費が高く、莫大な費用を要する。今後は重要構造物以外にでも適用できるように、費用面でも効果面でもバリエーションのある液状化対策工法のラインナップが準備されるべきである。さらに2, 3割というようなコストダウンではなく、1オーダー下げのような技術革新を目指すべきである。本稿では、極めて低コストかつ既設構造物直下へ適用できる可能性のある方法の一つとして、空気注入により地盤を不飽和化する液状化対策工法について述べる。その工法のイメージは図1に示すようなものである。

飽和地盤に地震動が作用した場合、過剰間隙水圧が有効上載圧に達すると、地盤は強度をなくし、液状化に至る。一方、間隙に空気が存在する地盤に地震動が作用した場合は空気の圧縮性により、過剰間隙水圧の上昇が低減され、液状化強度は飛躍的に増加する。土粒子と水を非圧縮とすると、ある間隙圧の増加 $\Delta p$ による土の体積ひずみ $\varepsilon_v$ は、土の飽和度を $S_r$ 、初期間隙圧（絶対圧）を $p_0$ 、有効拘束圧を $\sigma'_c$ とし、ボイルの法則を用いると次式で表される。

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta p}{p_0} (1 - S_r) \frac{e}{1 + e} \quad (1)$$

この体積ひずみは過剰間隙水圧が上昇しきった $\Delta p = \sigma'_c$ のときに最大値 $\varepsilon_v^*$ となる。ただし、ここではサクションを無視し間隙の水圧と空気圧が等しいものとしている。これら3つの量をパラメータとして繰返し三軸試験を行ったところ、飽和度が低いほど、有効拘束圧が高いほど、また初期間隙水圧が低いほど液状化強度が増加することが明かとなった<sup>1)</sup>。図2(a)は液状化強度と飽和状態での液状化強度の比、すなわち液状化強度増加率と $\varepsilon_v^*$ の関係である。液状化強度増加率は $v^*$ とユニークな関係にあること

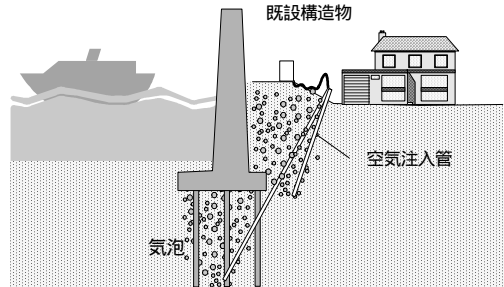


図1 空気注入による地盤の不飽和化のイメージ

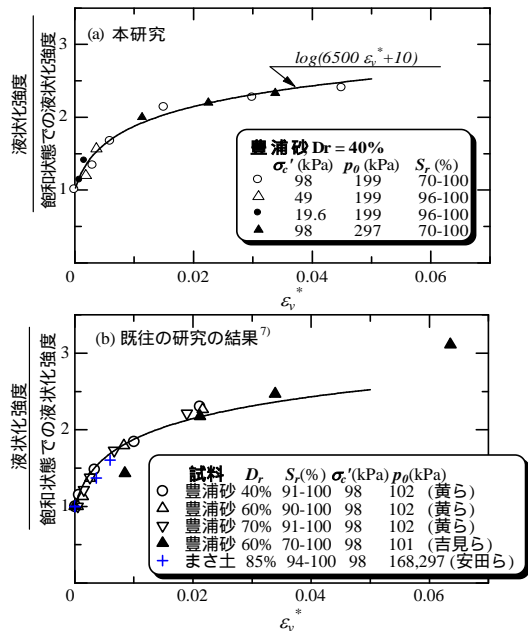


図2 不飽和化による液状化強度比の増加

がわかる。またこの関係は相対密度や砂の種類が異なる既往の試験結果に対してもほぼ成り立っている(図2(b))。

このような土の飽和度の低下による液状化強度の飛躍的な増加は以前からよく知られており、地盤の不飽和化による液状化対策のアイデアは以前からあった。しかし、以下の様な理由から本格的に研究されることはほとんどなかった。

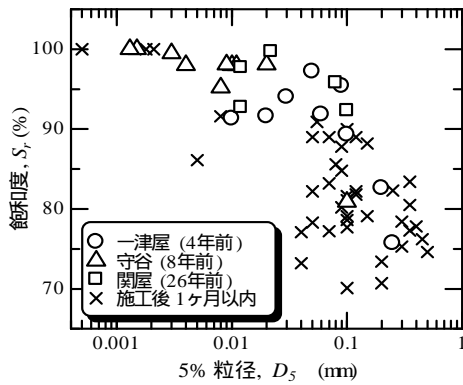


図3 飽和度と5%粒径の関係

地盤の不飽和状態は持続されるのか？

図3にサンドコンパクションパイル(SCP)で改良された地盤の凍結サンプルから得られた5%粒径 $D_5$ と飽和度の関係を示す<sup>2)3)</sup>。SCP工法は地盤に貫入したケーシングパイプ先端から砂と空気を数100kPaの圧力で噴出するため、大量の空気が地盤に注入され、不飽和化している。図3から分かるように飽和度は $D_5$ とよい相関関係を示している。また図中にはSCP打設1ヶ月以内と4~26年後の値を示したが、明確な違いはない。したがって一旦不飽和化した地盤は長期間にわたり不飽和状態が継続することが分かる。

施工法は？

飽和地盤中への空気注入は、汚染された細流土地盤の浄化を目的としたAir Sparging工法<sup>4)</sup>です。すでに実用化されている。しかし、Air Sparging工法は粗粒度地盤に適用されるものであり、液状化地盤のような細粒度地盤への適用には疑問が残る。

空気注入によって地盤が不飽和化されるのか？

不飽和化した地盤の液状化強度の評価法は？

本研究では空気注入による安価な液状化対策工法の開発に向けて、未解明な点である上記およびについて、実験的に調べた。

## 2. 空気注入による地盤の不飽和化実験

### 2.1 実験概要

試料は8号珪砂、および8号珪砂にファインサンド(珪砂を粉砕した非塑性シルト)を重量比2:1で混合し、細粒分含有率をおよそ30%に調節したもの(以下混合砂)を使用した。試料の物理特性を図4に示す。また両試料について行った保水性試験の結果を図5に示す。8号珪砂の空気侵入圧は約8kPa、混合砂は約13kPaであることがわかる。地盤作成の際、体積含水率測定用のTDR水分計、加速度計、間隙水圧計を地盤内の所定の位置に設置した。模型地

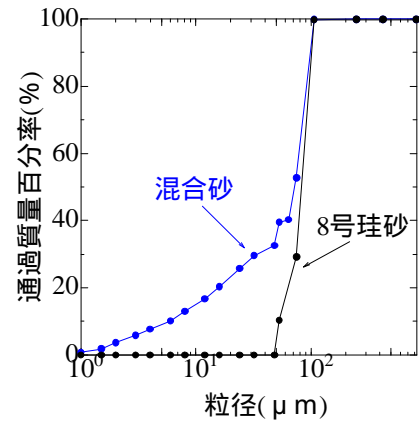


図4 試料の物理特性

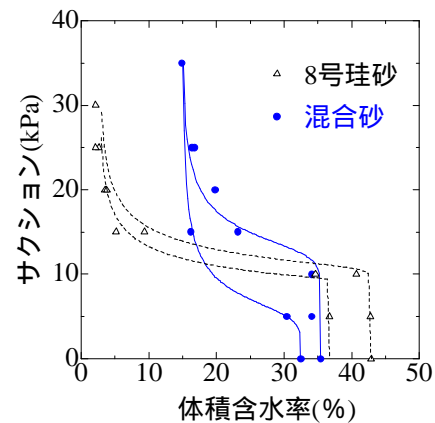


図5 水分特性曲線

表1 不飽和化実験の試験ケース

|          | Case1 | Case2 | Case3 | Case4 |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 試料       | 珪砂8   | 混合砂   | 珪砂8   | 混合砂   |
| 間隙比      | 0.82  | 0.51  | 0.80  | 0.76  |
| 上載圧(kPa) | -     | -     | 69    | 57    |

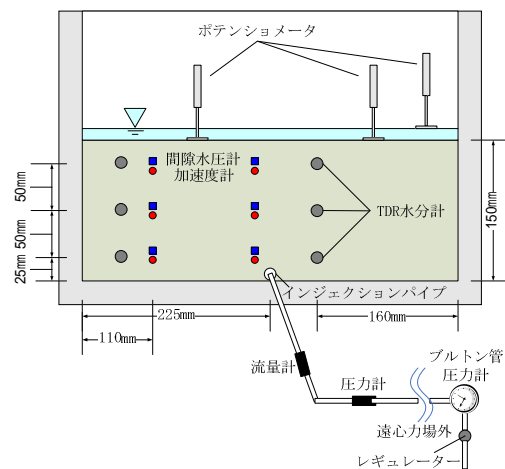
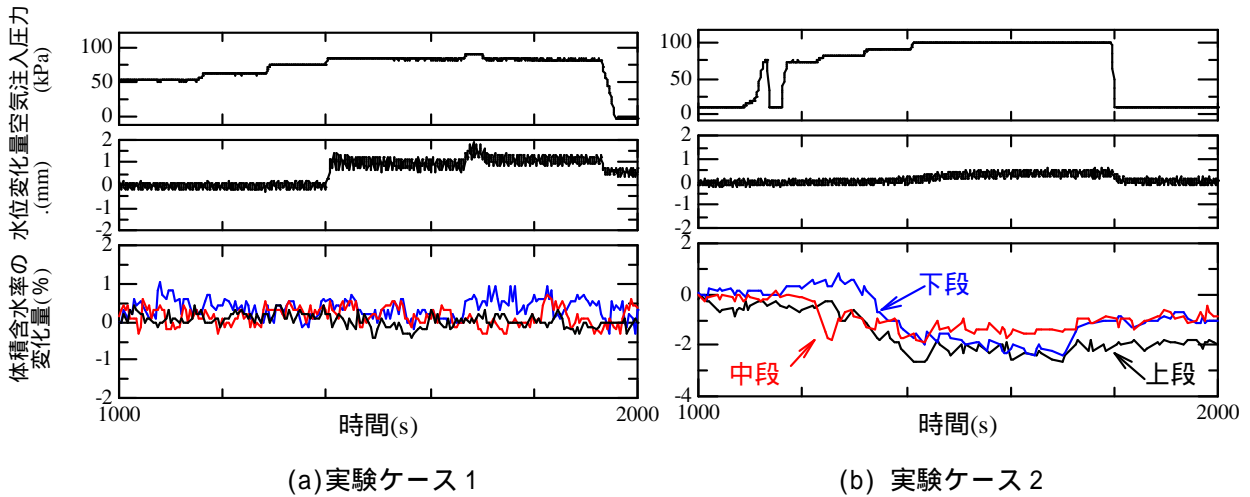


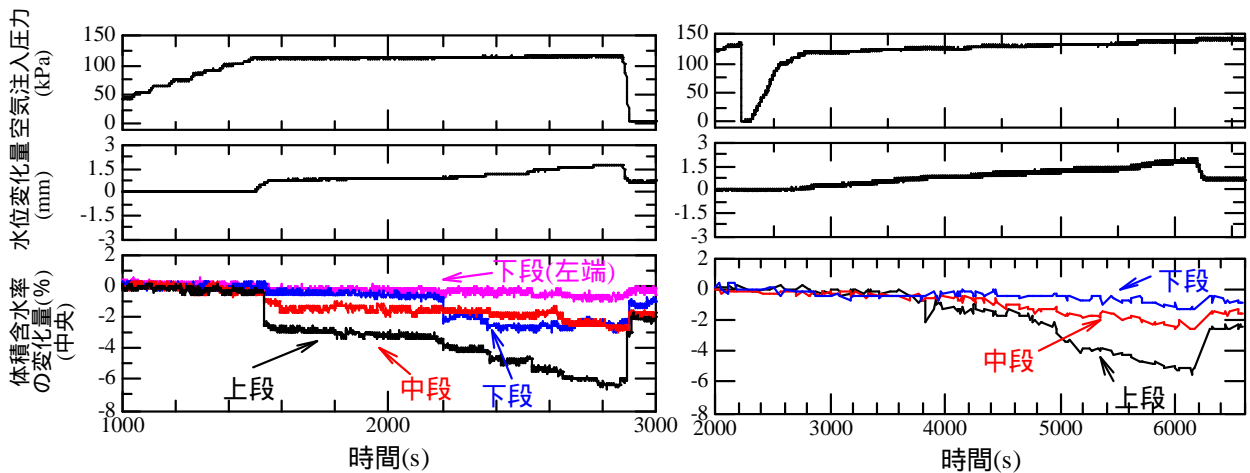
図6 不飽和化実験の地盤概要図

盤の概要を表1に、測定器配置箇所を図6に示す。図中のポテンシオメータは地盤表面及び水位の変化を計測するためのものである。TDR水分計は実験ケ



(a) 実験ケース 1

(b) 実験ケース 2



(a) 実験ケース 1

(b) 実験ケース 2

図 7 空気注入圧力，水面変化量，体積含水率の変化量

ケース 1, 2 では地盤中央に下から順に 3 台設置し，ケース 3, ケース 4 においては地盤端部近くにも 3 台設置した．なお，ケース 3, 4 は空気の注入圧力によって地盤に割裂クラックが発生することを防ぐために地盤表面に層厚約 5.0cm のジルコン砂(土粒子比重 4.7)を敷設して上載圧を付与し実験を行った．

実験は実地盤の応力状態を再現できる遠心模型実験装置を用いて行った．模型地盤を遠心模型実験装置に搭載し，地盤中央位置において 47G の遠心加速度を与えたのち，模型地盤中央底部に設置したインジェクションパイプに圧力制御にて空気圧を供給した．圧力は時間とともに段階的に上昇させた．インジェクションパイプは無数の細孔を有するものである．このとき TDR 水分計とポテンシオメータにより，地中の空気量を測定するとともに，ビデオカメラによって地盤側面の様子を観察した．地盤中に空気を注入するためには，注入地点における空気圧が下記の式(2)を満たす必要がある<sup>3)</sup>．

$$Pa \geq Pw + Pav \quad (2)$$

ここで， $Pa$  は注入口に与える空気圧， $Pav$  は空気侵入圧， $Pw$  は注入口における静水圧である．空気を地盤中に注入するための空気圧の最小値は，式(2)より，実験ケース 1 から順に 85kPa，88kPa，119kPa，120kPa である．

### 2.1 不飽和化実験結果

図 7 は空気注入実験中の供給空気圧，模型地盤の水面高さの変化量，及び TDR 水分計で測定した体積含水率の変化量の時間変化を示したものである．図 7(a) の 8 号珪砂地盤では空気圧が 80 kPa となった時点から水面が上昇し，さらに空気圧が 90 kPa になると水面の上昇量も増加している．約 1900 秒以降は空気注入を停止したが，約 0.5mm の残留水位上昇が認められた．この 0.5mm の上昇量は地盤中に残留した空気の体積に対応するものなので，これより地盤全体の平均飽和度に換算すると約 99.3% となる．しかしながら TDR 水分計の測定値にはほと

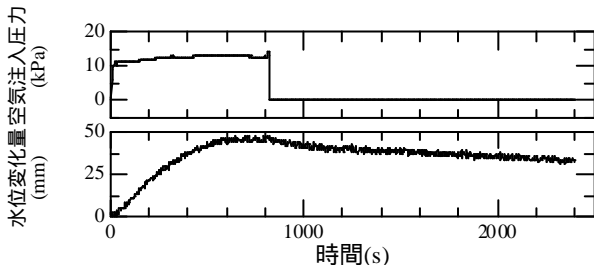


図 8 1G 場での空気注入実験(8 号珪砂地盤)

んど変化がみられない．このケースでは地盤の一部が不飽和化されたが，その領域は比較的狭く TDR 水分計の設置位置では不飽和化されなかったものと考えられる．このことは，地盤表面の監視ビデオカメラによって，地表の狭い領域から空気が噴出したことから確認された．図 7(b)の混合砂地盤では空気注入時点では水位の上昇がみられたが，空気注入を停止した後の残留水位上昇量はわずかである．TDR 水分計の値は空気注入停止後に最大で 2%程度減少していることより，部分的にはあるが地盤が不飽和化されたことが確認できる．ちなみに 2%の飽和度減少により，1.5 倍～2 倍程度の液状化強度増加が期待できることが報告されている<sup>1)</sup>．

上載圧を載荷した図 7(c)の 8 号珪砂地盤の場合は残留水位が増加し，TDR による体積含水率の減少もみられた．またビデオカメラからも地盤全体に空気の層が広がる様子が確認されたことより地盤全体が不飽和化されたものと考えられる．ケース 1 との違いは，上載圧を付与したため地盤内に空気みちが形成されなかったことによるものと考えられる．図 7(d)の混合砂地盤の場合は残留水位が約 0.5mm 上昇し，中央の TDR 水分計の値も最大で 2.5%程度減少した．以上のように今回行った 4 ケースともに水位の上昇量からみた飽和度の低下量は小さいものであった．

最後に，1G 場において 8 号珪砂に対して行った空気注入実験の結果を図 8 に示す．この実験では地盤表面に 40kPa の上載圧を与えて実験を行った．図 8 から水位は最大で約 45mm 上昇していることが確認できる．また空気注入停止後，1 日経過後の残留水位上昇量は約 25mm(地盤の平均飽和度約 68%)であり，遠心場での実験と比べ，飽和度の低下は大きい．遠心場においては地盤中の気泡に作用する浮力が 1G 場と比べ大きくなるため空気が地盤表面に向けて抜けやすくなり，結果的に飽和度の低下が小さいものとなったと考えられる．

### 3. 不飽和地盤の遠心振動台実験

#### 3.1 遠心振動台実験概要

振動台実験では理想的に不飽和化した模型地盤

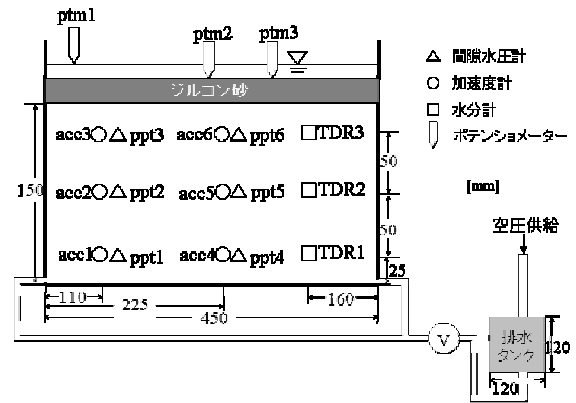


図 9 不飽和振動台実験における各センサーの設置位置及び給排水経路

を作成し，遠心場で振動実験を行うことで，不飽和化による液状化強度の増加を評価した．試料は不飽和化実験で作成した地盤と同じケイ砂 8 号と混合砂を用いている．砂地盤の高さは 150 mm とした，この砂地盤上に 50G で 35 kPa のサーチージ圧となる珪砂を敷いた．地盤作成後，真空タンク内で水を下部から浸透させることにより飽和させた．今回行った実験は以下の 2 ケースであり，いずれも 50G の遠心場において実験を行った．すなわち，

Case1 不飽和履歴無し + 3 加振(5, 20, 30G)

Case2 不飽和履歴有り + 4 加振(10, 15, 25, 30G)

ケース 2 では，50G 場でバルブを開け，一旦地盤底部からタンクに排水し，20 分ほど放置した後，空圧をタンクにかけ地盤内に水を戻し，水位を上昇させた．この間，水分計(TDR センサー)により深さ方向の体積含水率，間隙水圧の変化を計測した．水位上昇後 20 分程放置し，正弦波による加振を入力加速度を徐々に上げて行った．加振中，間隙水圧，加速度，地表面沈下量の計測を行った．各センサーの位置は図 9 に示す通りである．

#### 3.2 遠心振動台実験結果

##### 1) 水位の低下・再上昇による不飽和履歴

図 10 にケース 2 において水位の低下・再上昇を行ったときの間隙水圧，体積含水率の経時変化を遠心加速度，地盤地表面沈下と共に示す．排水を行い水位が低下すると，間隙水圧，体積含水率共に下がっていることが確認できる．下段に設置されている TDR1 は体積含水率の上がり方が他の 2 つに比べて遅く，しかも小さくなっている．また，水位低下による地盤沈下は 0.2 mm 程度でそれほど大きくはない．ppt6 は不飽和化に伴う負圧を間隙水圧計により計測できているが，ppt4, 5 は，セラミックスへの空気侵入により途中で負圧がゼロに戻っている．

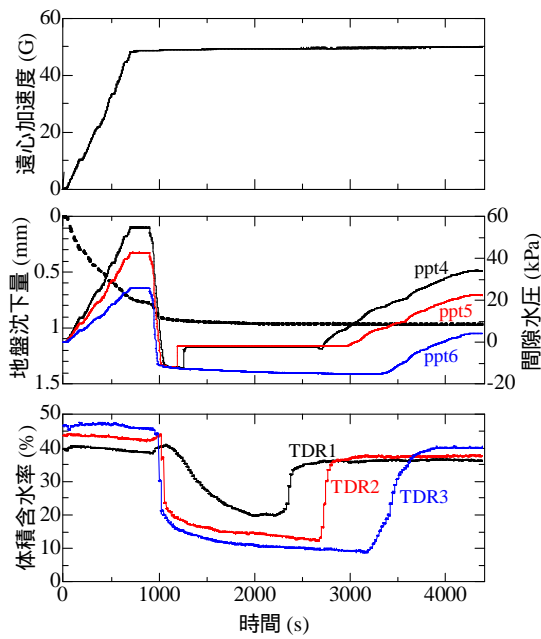


図 10 遠心加速度，地盤沈下量，間隙水圧，体積含水率の経時変化

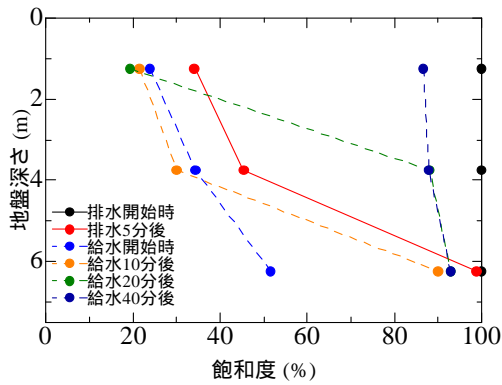


図 11 深さ方向における飽和度の変化

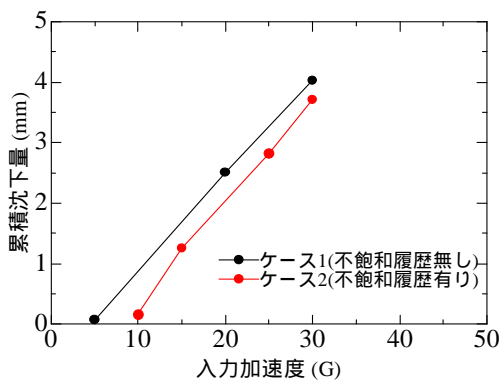


図 12 累積沈下量 - 入力加速度

なお、ppt6 で計測された負圧は 15 kPa 程度であった。給水により水位を上げると、間隙水圧、体積含水率ともに上昇するが、水位低下する前の値には戻らず不飽和履歴が残っていることがわかる。また、水位上昇による地盤沈下量はほとんどないことも確認できる。排水前と給水後ではどの間隙水圧計とも

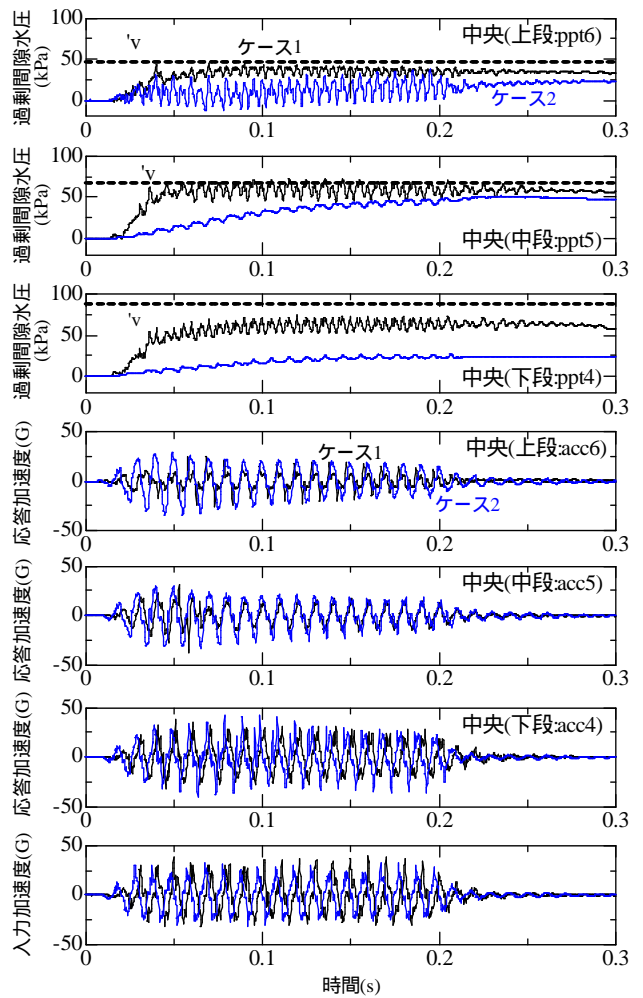


図 13 入力加速度と間隙水圧、加速度の経時変化

後者が 20 kPa 程度小さいが、この差には負圧に加えて静水圧の差も含まれている。

図 10 の地盤沈下量及び体積含水率を用いて、飽和度を計算したものが図 11 である。実線は排水過程を表しており、点線は給水過程を表している。ここでは初期飽和度を 100 %とし、地盤は平均的に沈下しているものと仮定している。この図から、排水により上部で飽和度が 30 %、下部で 50 %まで下がっている。一方、水位を上昇させても完全には飽和せず、上部で 86 %、下部で 92 %程度の飽和度となった。

## 2) 加振実験結果

図 12 は入力加速度と累積沈下量の関係を示したものである。入力加速度の大きさ、回数もケース 1、2 で異なるが、最後の加速度は 30G で同じで、その前までの累積沈下量もほぼ同じである。そこで、入力加速度 30 G でのケース 1 とケース 2 の加振時挙動を比較する。

図 13 は、地盤中央部の 30G 加震時における間隙水圧増分及び、加速度の経時変化を入力加速度と共に

に示したものである．なお間隙水圧増分は加振前のものからであり，ケース2の初期間隙水圧は負圧が残っているためケース1より小さくなっている．また，過剰間隙水圧のグラフには有効上載圧 $\sigma'_v$ を点線で示してある．ケース1のppt5と6は過剰間隙水圧が有効上載圧に達しており，地盤の上半分の深さでは液状化していることが確認できる．間隙水圧増分はどの位置においても不飽和履歴有りのケース2の方が小さくなっており，不飽和地盤の方が液状化は生じにくいことがわかる．図10においてppt4, 5のポーラスストーンに空気が侵入している可能性を述べたが，図13よりppt4と5ではppt6で見られる動的成分が見られないことにより，セラミックスへの空気の侵入が応答を鈍化させていることが推察できる．

加速度応答は上段にいくほど小さくなっているが，ケース1ではケース2に比べ浅部で載荷初期の減衰が顕著になっており，液状化による剛性の低下が生じていることが確認できる．

#### 4. まとめ

遠心場において細粒分を比較的多く含む砂質土地盤に空気を注入した．今回行った4ケースの実験において，空気を注入することにより地盤が不飽和化されたことが確認されたが，飽和度の低下量は小さいものとなった．重力場における実験と比較した結果，残留飽和度は遠心模型実験では小さくなることがわかった．しかしながら，不飽和地盤の液状化強度を模型実験により検討する場合，地盤の応力状態を実地盤と同

等にする必要がある<sup>4)</sup>，遠心模型実験装置を用いる有用性は大きい．

不飽和履歴無し有りの模型に対して遠心振動台実験を行い，残留空気の液状化抵抗に及ぼす影響について調べた．排水・給水を行い飽和度が90%程度残っている地盤の間隙水圧・加速度応答から，不飽和履歴を受けると液状化抵抗は増加することを確認することができた．また実験後，前者ではジルコン砂上に珪砂の噴砂が見られたが，後者では見られず，このことから不飽和履歴を受けた地盤の方が液状化抵抗が増すことを確認できた．

#### 参考文献

- 1) Okamura, M. and Soga, Y., Effect on liquefaction resistance of volumetric strain of pore fluid, *Soils and Foundations*, Vol. 46, No. 5, pp. 695-700, 2006
- 2) Okamura, M., Ishihara, M. and Ohsita, T., Liquefaction resistance of sand deposit improved with sand compaction piles, *Soils and Foundations*, Vol. 43, No. 5, pp. 175-187, 2003.
- 3) Okamura, M., Ishihara, M. and Tamura, K.: Degree of Saturation and Liquefaction Resistances of Sand Improved with SCP, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Proc. ASCE, Vol.132, No.2, pp. 258-264, 2006.
- 4) Gibbs, J., Condit, W., Leeson, A., Wickramanayake, G.m, Fields., K, Air Sparging, *A Project Manager's Guide*, Batterlle Press, 2002