

地盤の不飽和化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

○井澤 淳¹⁾, 五十嵐玲奈²⁾, 増田雅士³⁾, 岡村未対⁴⁾, 竹村次朗⁵⁾, 日下部治⁶⁾

- 1) 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻 jizawa@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) 愛媛大学 理工学研究科 生産環境工学専攻 masuda_e_uni@yahoo.co.jp
- 4) 愛媛大学 理工学研究科 生産環境工学専攻 okamura@dpc.ehime-u.ac.jp
- 5) 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻 jtakemur@cv.titech.ac.jp
- 6) 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻 kusakabe@cv.titech.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ため、これまでに開発され、実用化されている液状化対策工法は、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、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 オーダー下げるような技術革新を目指すべきであると考え、本研究では、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着目した¹⁾²⁾。工法のイメージを図1に示す。本稿では、空気注入による地盤の不飽和化挙動及び不飽和履歴を受けた地盤の地震時挙動について行った実験について報告する。

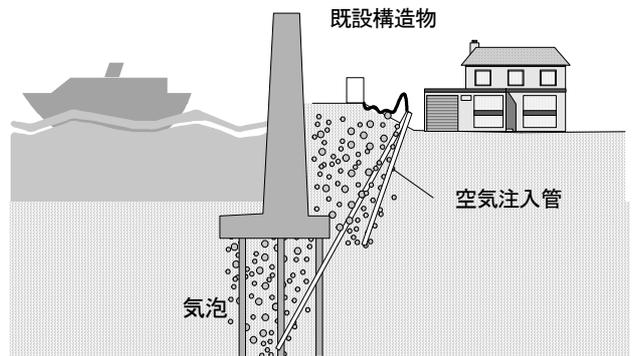


図1 空気注入による地盤の不飽和化のイメージ

表1 不飽和化実験で用いた試料の物性

| | 珪砂8号 | 豊浦砂 |
|-----------------|-------|-------|
| 比重 G_s | 2.65 | 2.645 |
| 平均粒径 D_{50} | 0.10 | 0.19 |
| 有効粒径 D_{10} | 0.041 | 0.135 |
| 均等係数 U_c | 2.93 | 1.56 |
| 最大間隙比 e_{max} | 1.333 | 0.973 |
| 最小間隙比 e_{min} | 0.703 | 0.609 |

2. 空気注入による地盤の不飽和化

2.1. 実験概要

実験で使用した試料は珪砂8号及び豊浦砂の2種類の砂であり、空中落下法により相対密度60%の地盤を作成した。表1は珪砂8号及び豊浦砂の物性値である。実験に用いた土槽は内径150×500×360mmの剛性容器である。砂地盤高さは150mmとし、空気注入圧力による割裂クラックの発生を防ぐため砂地盤上に50gで70kPaとなるようなジルコン砂を敷いた。乾燥地盤作成後、真空タンク内で脱気水を土槽下部から浸透させることにより地盤を飽和させた。

本実験では、50gの遠心加速度の下で模型地盤中央底部に設置したインジェクターにかける空気圧を徐々に増加させることで空気を供給した。図2に示すように時空気供給のラインに取り付けた圧力計及び流量計から、空気注入時の圧力と流量速度を測定するとともに、地盤内に設置したTDR水分計と地盤と水面に設置したポテンシオメータより、局所的な体積含水率(飽和度)、地盤内に入った空気量を

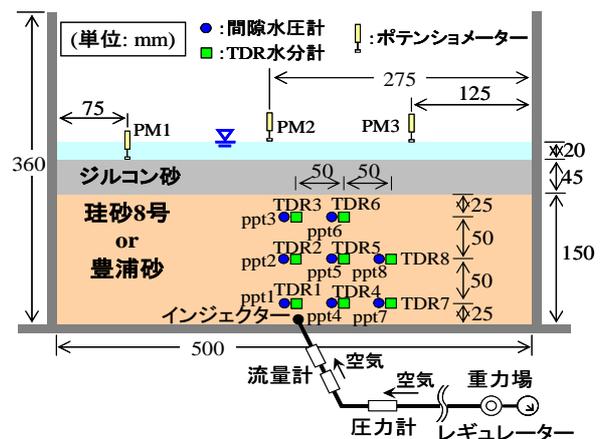


図2 空気注入実験の模型地盤概要

表2 空気注入実験の実験条件

| ケース | S50 | S30 | S10 | T50 | T30 | T10 |
|----------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 試料 | 珪砂8号(Silica) | | | 豊浦砂 | | |
| 遠心加速度(g) | 50 | 30 | 10 | 50 | 30 | 10 |

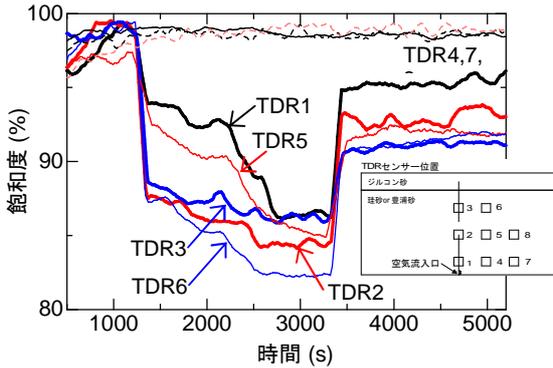
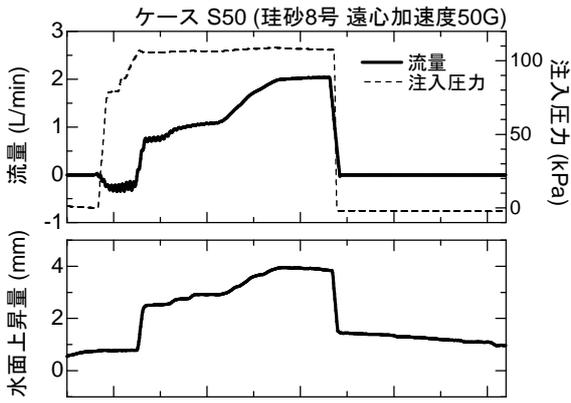


図3 空気注入時の時刻歴 (S50)

測定した。また、ビデオカメラによって地盤内の空気の広がりを観察した。流量速度が 2L/min で定常状態となったことを確認した後、空気注入を停止し、飽和度の変化殆どない状態まで注入後の挙動を観測した。この後、遠心加速度を低下させ、上記と同様の実験を遠心加速度 30g 場、10g 場でも行った。各センサーの設置位置を図2に、実験条件を表2に示す。

2.2. 実験結果及び考察

(1) 空気注入圧力

図3は実験ケース S50 における流量速度、注入圧力、水面上昇量、飽和度の時刻歴である。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 (Pa) は下記の式(1)を満たす必要がある。

$$P_a \geq P_w + P_{av} \quad (1)$$

ここで、 P_{av} は空気侵入圧、 P_w は注入口における静水圧である。空気侵入圧は試料によって異なり、珪砂 8号で約 5kPa、豊浦砂で約 3kPa である。それぞれの実験ケースにおける $(P_a)_{\min} - P_w$ は実験ケース S50 で 7.9kPa、S30 で 4.3kPa、S10 で 3.8kPa、T50 で 4.4kPa、T30 で 2.6kPa、T10 で 0.3kPa となりほぼ空気侵入圧と等しいが、わずかに g レベルの増大と共に増加している。

流量の増加に伴い飽和度が減少し、空気注入を停止すると飽和度は上昇するが、一定値となった飽和度は初期値よりも小さく、空気の残留を確認できる。本研究では、この飽和度を残留飽和度と、流量が

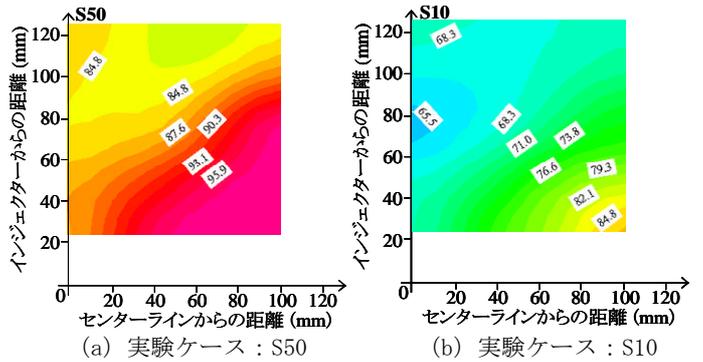


図4 最小飽和度のコンタ

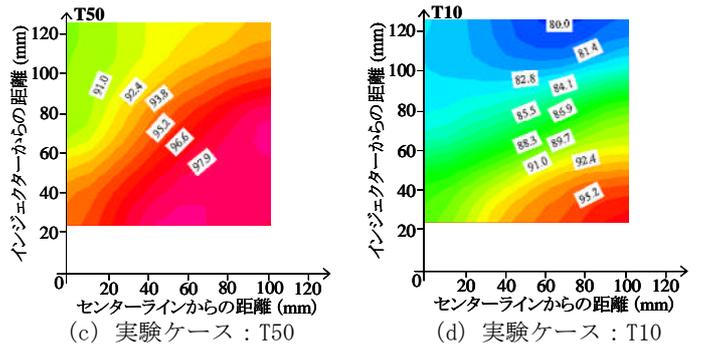
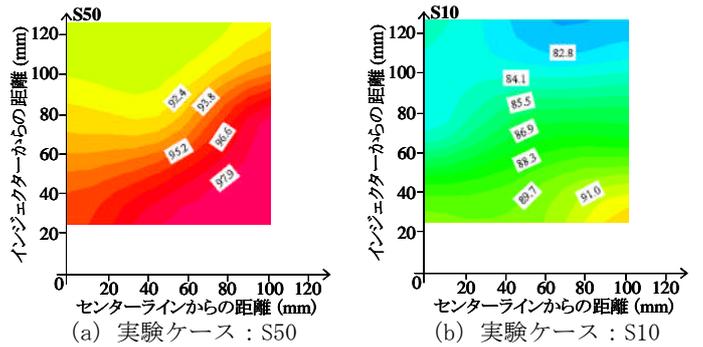


図5 残留飽和度のコンタ

2L/min で最も低い値を示したときの飽和度を最小飽和度と呼ぶ。

(2) 残留飽和度

図4は実験ケース S50 と S10 の最小飽和度のコンタである。遠心加速度が高いほど空気は鉛直方向に広がっており、低い遠心加速度に比べて最小飽和度は大きくなっていることがわかる。

実験ケース S50, S10, T50, T10 それぞれの残留飽和度のコンタを図5に示す。遠心加速度が低いほど残留飽和度は小さくなっている。空気に働く浮力は遠心加速度に依存するが表面張力は依存しないことから、間隙空気に働く浮力と表面張力 (T_f) の比である(マイクロ)ボンド数 B_o は式(2)に示す通り g レベルの増加に伴って大きくなり、地盤内にトラップされる空気は減少する。

$$B_o = (\rho_f N g \ell_{micro}^2) / T_f \quad (2)$$

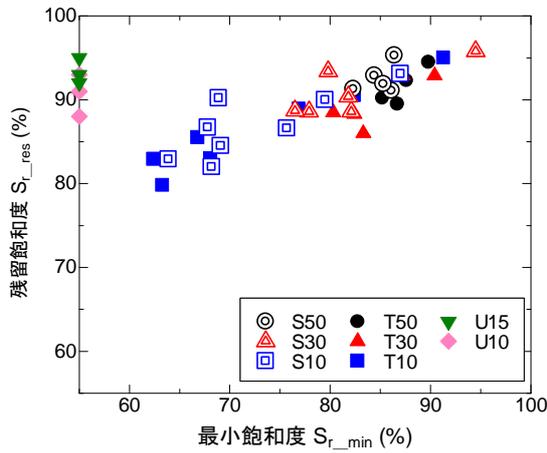


図6 残留飽和度と最小飽和度の関

ここで ℓ_{micro} はマイクロ基準長(例えば間隙のサイズ), ρ_f は間隙流体の密度, N は重力加速度比である。以上のことから, 遠心加速度が大きいくほど残留飽和度も大きくなるが, もし同じ表面張力が得られるのであれば, 粒径を小さくすることで同様の実物と模型のポンド数を合わせることができる。

空気は粒径の細かい珪砂8号地盤の方が粒径の粗い豊浦砂よりもより水平方向に広がっている。豊浦砂のように粒径の粗い砂では透気係数及びポンド数は大きいと考えられ, 結果として空気の移動速度は増大し鉛直方向に広がりやすくなる。逆に珪砂8号のような粒径の細かい砂では, 空気の鉛直方向の移動速度は小さくなり, 空気は水平方向に広がりやすくなると考えられる。

図6はそれぞれの実験ケースにおける最小飽和度と残留飽和度の関係である。残留飽和度は最小飽和度が低下するにつれて低下している。特に10g場でのこの傾向は顕著である。50g場及び30g場では, ある一定の最小飽和度に達すると, 最小飽和度によらず残留飽和度はほぼ等しい値を示している。別報2)の珪砂8号を使用して50gの遠心場で地盤の水位を変化させることで地盤の不飽和化を行った実験(U15, U10)と空気注入実験の実験ケースS50を比較すると, 最小飽和度は大きく異なっているにも関わらず, 残留飽和度はほぼ等しい値を示していることが確認できる。

2.3. まとめ

珪砂8号及び豊浦砂という粒径の異なる2つの試料の飽和地盤に対して空気を注入し, 不飽和化される地盤の範囲及び飽和度の分布, さらに注入停止後の残留飽和度を調べた。遠心加速度が小さいほど残留飽和度は小さくなり, 粒径が細かいほど空気は水平方向に広がることを確認できた。また, 地盤内に設置したTDR水分計の計測結果からある一定の最小飽和度に達すると, 最小飽和度によらず残留飽和

表3 振動台実験で用いた試料の物性

| | 珪砂8号 | 珪砂3号 |
|------------------|----------------------|----------------------|
| 比重 G_s | 2.65 | 2.56 |
| 平均粒径 D_{50} | 0.10 | 1.47 |
| 有効径 D_{10} | 0.041 | 1.21 |
| 均等係数 U_c | 2.93 | 1.26 |
| 最大間隙比 e_{max} | 1.333 | 0.971 |
| 最小間隙比 e_{min} | 0.703 | 0.702 |
| 透水係数 k (m/sec) | 2.0×10^{-5} | 4.6×10^{-3} |

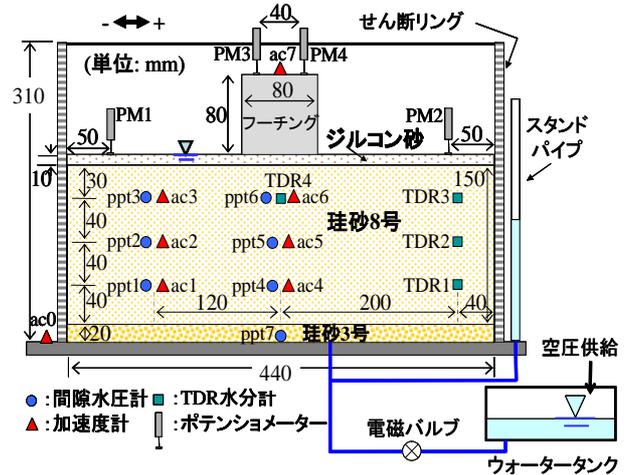


図7 各センサーの設置位置及び給排水経路

度はほぼ等しくなる。

3. 不飽和履歴を受けた砂地盤の地震時挙動

3.1. 実験概要

本章では, 上部構造物を支持する砂地盤を対象とし, 地盤の地下水位を低下・再上昇させることにより均質な不飽和履歴を与えた砂地盤と飽和砂地盤を作製し, これに対して遠心模型振動実験を行い, 不飽和履歴が液状化挙動に与える影響について検討した。

本実験では表3に示す珪砂8号及び珪砂3号を用いて液状化層と下部排水層を作製した。実験では内径 $150 \times 440 \times 300$ mmのせん断土槽を使用し, 土槽底部に珪砂3号を厚さ20mm敷き, その上に空中落下法により厚さ150mm, 相対密度60%の液状化層を作製した。さらに砂地盤上には50gで10kPaとなるようなジルコン砂を敷き, その後真空タンク内で脱気水を土槽下部から浸透させることにより地盤を飽和させた。N gにおける飽和砂の液状化実験では時間に関する相似率の整合を図るためにN倍の粘性を持った流体を用いることがある。しかし粘性流体の不飽和土に関してはその力学特性について殆ど分かっておらず, 本実験では間隙流体としての水と, 粒径の小さな珪砂8号を用いて液状化現象を再現した。このため, 模型砂地盤の透水係数は表1に示す値の50倍となる。

実験では, 重さ2.5kg, 高さ80mm, 幅80mm,

表4 実験条件

| 実験ケース | S10 | U10 | U15 |
|---------------|-----|-----|-----|
| 飽和度 S_r (%) | 100 | 93 | 91 |
| 入力加速度(G) | 10 | 10 | 15 |

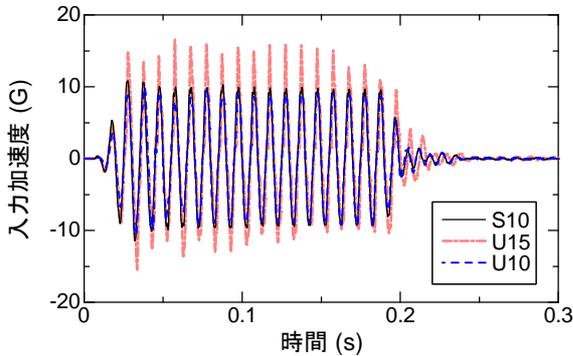


図8 入力加速度の時刻歴

奥行 150mm のアルミ製フーチング (50g 接地圧 100kPa) を地盤中央にセットした飽和地盤模型を 50g 場におき、図 7 に示す電磁バルブを開け土槽下部からタンクに排水することにより地盤の水位を低下させた後に、タンクに空圧を供給することで再び初期の水位まで上昇させることで不飽和履歴を与えた。このとき地盤内水位は排水層の間隙水圧計及びスタンドパイプで確認し、地盤内間隙水圧、体積含水率を間隙水圧計、TDR 水分計で計測した。この不飽和履歴を与えた 2 つの模型地盤と与えない 1 つの模型地盤に対して、100Hz、20 波の正弦波振動を入力し、間隙水圧、加速度、及び地盤と構造物の沈下量を計測した。各センサーの設置位置を図 1 に、実験条件を表 4 に示す。またそれぞれの実験ケースの入力加速度を図 8 に示す。

3.2. 実験結果及び考察

実験結果は図 9 を除いてプロトタイプで示す。

(1) 不飽和化過程

図 9 は実験ケース U15 の不飽和化過程の間隙水圧と体積含水率の経時変化である。水位の低下と共に体積含水率は減少し、体積含水率の値がほぼ一定になった後に再び初期の水位まで上昇させているが、体積含水率は初期値よりも低い値を示しており、不飽和履歴が残っていることがわかる。

排水前の最大の体積含水率を飽和度 100% と仮定して求めた不飽和過程の各時点の飽和度の深さ方向の分布を図 10 に示す。排水により飽和度は 30% 程度まで減少している。給水により飽和度は上昇しているが、地盤底部で 95%、中部で 93%、浅部で 92% となっており、残留飽和度は平均で U15 が 93%、U10 が 91% であった。

図 11 は水位の低下・上昇における ppt4 と 5 位置の飽和度と間隙水圧の関係である。不飽和化による

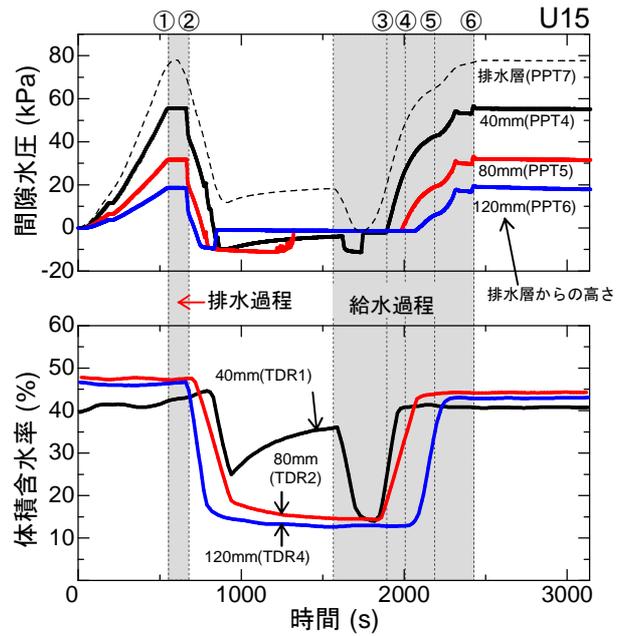


図9 不飽和化過程の時刻歴

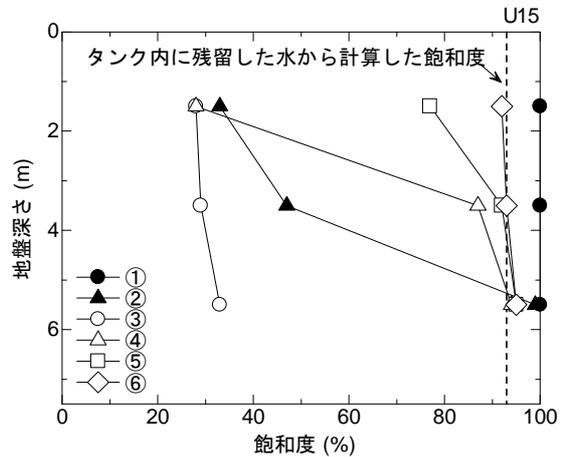


図10 深さ方向における飽和度の変

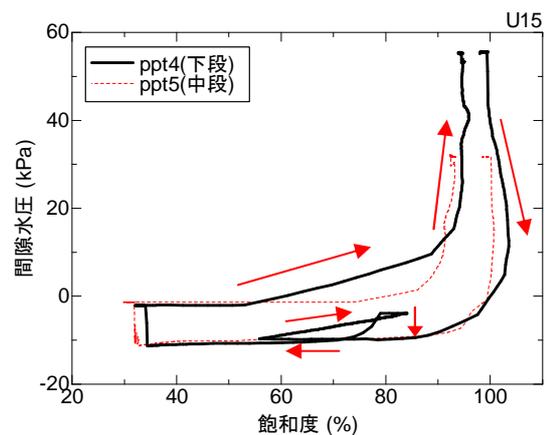


図11 飽和度と間隙水圧の関係

負圧は約 10kPa 程度であることから、毛管上昇高さは 1m となる。これは重力場において本模型地盤と同じサイズで実験を行い地盤の水を排水したとしても毛管上昇の影響で地盤を不飽和化できないことを意味しており、地下水面を有する地盤のモデル化に

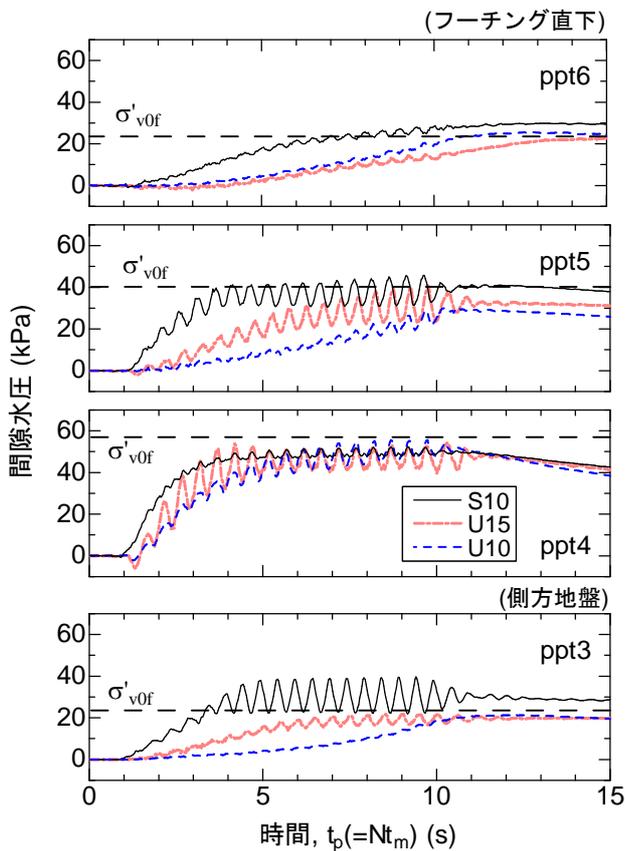


図 12 加振時の過剰間隙水圧の変化

における遠心模型実験のメリットの一つである。

(2) 加振実験

図 12 は各実験ケースにおける加振時の過剰間隙水圧である。図の点線は側方平地盤における有効上載圧 σ'_{v0} を示している。側方では飽和地盤の実験ケース S10 は早い段階で過剰間隙水圧が有効上載圧に達している。一方、不飽和履歴を受けた実験ケース U15 及び U10 は不飽和化によって過剰間隙水圧の上昇は緩やかであり、特にその傾向は地盤浅部で顕著である。

フーチング及び側方地盤の沈下-時間履歴を図 7 に示す。いずれの実験ケースにおいてもフーチングの沈下はほぼ振動中に生じ、不飽和履歴を受けた実験ケース U10 のフーチング沈下量は同じ入力加速度である飽和地盤の実験ケース S10 の約 1/3 になっている。また同様に、不飽和履歴を受けた実験ケース U15 は S10 及び U10 よりも入力加速度が 30% 大きいにも関わらず、フーチングの沈下量は飽和地盤の実験ケース S10 の約 1/2 になっており、不飽和化の改良効果を確認することができる。

側方地盤の沈下量は振動初期において不飽和履歴を受けた U15 及び U10 の方が飽和ケース S10 より大きいですが、これは間隙水圧の上昇に伴う間隙空気の圧縮による土の体積圧縮が生じているためと考えられる。一方長期的に見ると、同様な振動を受けた S10

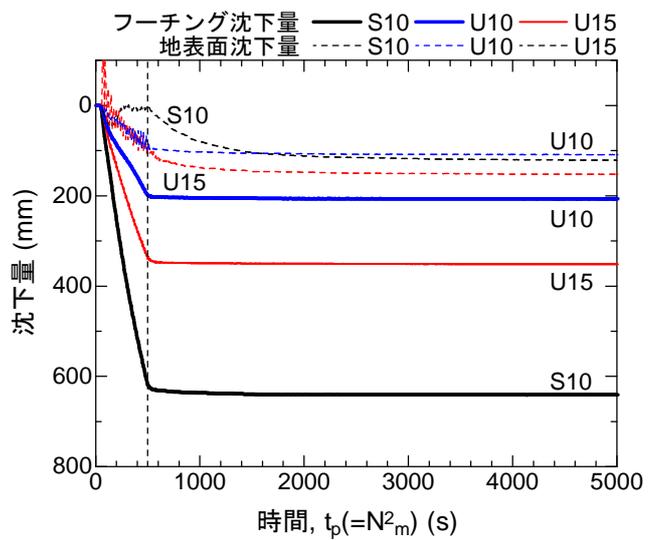


図 13 沈下量の時刻歴

と U10 平地盤の沈下量はほぼ同じとなり、大きな振動を受けた U15 で最も大きな沈下となった。平地盤のような一次元的な沈下が生じる場合、不飽和化することによる沈下抑制効果はそれほど大きくないといえる。

3.3. まとめ

本研究では、遠心模型実験装置において 50 g の遠心場で、飽和地盤と飽和地盤の水位を低下・再上昇させることで不飽和履歴を与えた地盤に正弦波加振を行い、加振時挙動の比較を行った。水位の低下・再上昇という方法で地盤の不飽和化は可能であり、この手法での遠心模型を用いるメリットを確認した。上記手法で不飽和履歴を与えることで、残留飽和度は 91-93% となり、この飽和度で加振による過剰間隙水圧の発生が抑制された。結果として、地盤が支持する上部構造物の沈下は小さくなるが、平地盤における一次元的な沈下の抑制効果は確認されなかった。

4. まとめ

空気注入実験及び不飽和加振実験から、液状化に対する不飽和化の改良効果を確認した。飽和度低下による液状化強度の増加のメカニズムは過剰間隙水圧の発生を抑制することであり、地盤を硬化させるものではない。このため本実験で行ったような緩い地盤においては、液状化による地盤及び構造物の沈下することを防ぐことはできない。本研究で模擬したような方法が、液状化発生を完全に防止するものではないが、液状化による甚大な被害を抑制することは可能である。よって、より改良効果を高めるために空気注入の方法の検討や、低下させる水位を変化させて検討することが重要となってくる。また、

本実験では上部構造物の沈下について検討を行っているが、埋設構造物における浮き上がり防止に対する効果についても検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 岡村未対, 空気注入による安価な液状化対策工法, 土と基礎, Vol. 54, No. 7, pp. 28-30, 2006
- 2) 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