

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¹⁾, 小松本奈緒美²⁾, 井澤 淳³⁾, 関 栄⁴⁾

- 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) 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻, jizawa@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。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と考え。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(図1(a)により地盤を不飽和化が考えられる。この他、図1(b)に示すように地下水低下工法で一端地下水を下げた後、地下水が上昇してもある程度の空気が残留する。

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 Δp による土の体積ひずみ ε_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 σ'_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 ε_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。Okamura and Soga¹⁾はこれら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し、不飽和土と飽和土の液状化強度の比(R_u/R_s)、すなわち液状化強度増加率と ε_v^* の間にはユニークな関

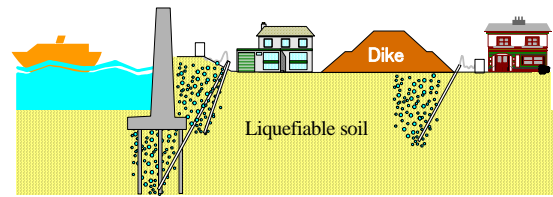


図1(a) 空気注入による地盤の不飽和化のイメージ

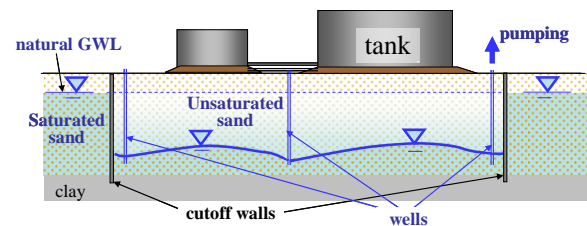


図1(b) 地下水低下による地盤の不飽和化

係にあることを示した。

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²⁾、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が、地下水位以深で残留空気を有する不飽和地盤上の構造物の地震時挙動についての研究はあまり行われていない。筆者らは、石油タンク等の直接基礎について、遠心模型振動実験を行い、不飽和化の効果について検討した³⁾。本稿では、同様に動的遠心模振動実験により、重力式護岸の液浄化対策としての地盤不飽和化の効果について検討した。

2. 遠心模型実験

2.1 地盤材料

本実験では表1に示す硅砂8号及び硅砂3号を用いて、液状化層と下部排水層作成した。硅砂8号は細粒分を多く含み透水係数が小さいため、本研究で用いた50gの遠心加速度場でも原型の透水係数はかなり小さくなり、粘性流体を用いなくても液状化現象を再現できる。

表 1 硅砂の特性

	No.8	No.3
Specific gravity: G_s	2.65	2.56
Mean particle size: D_{50} (mm)	0.100	1.47
Particle size: D_{10} (mm)	0.041	1.21
Coefficient of uniformity: U_c	2.93	1.26
Max. void ratio: e_{max}	1.333	0.971
Min. void ratio: e_{min}	0.703	0.702
Permeability coef.: k (m/sec)	2.0×10^{-5}	4.6×10^{-3}
(k in prototype scale with 50g)	(1.0×10^{-3})	(2.3×10^{-1})

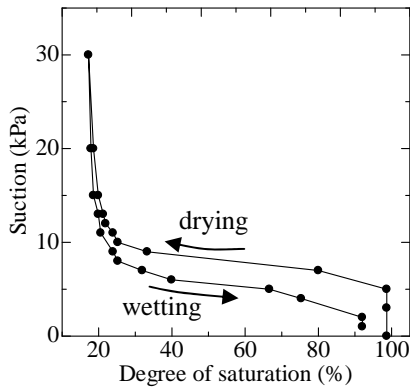


図2 8号硅砂の水分特性曲線

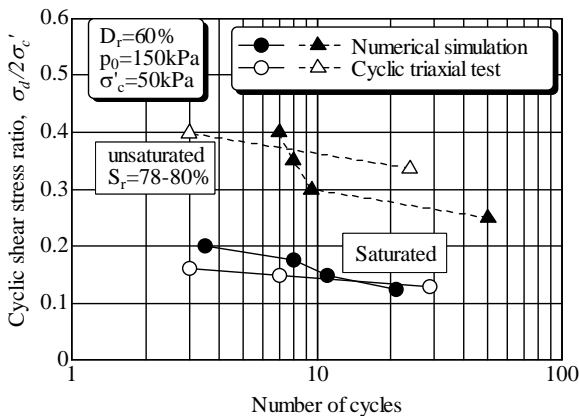


図3 飽和、不飽和硅砂8号の液状化曲線

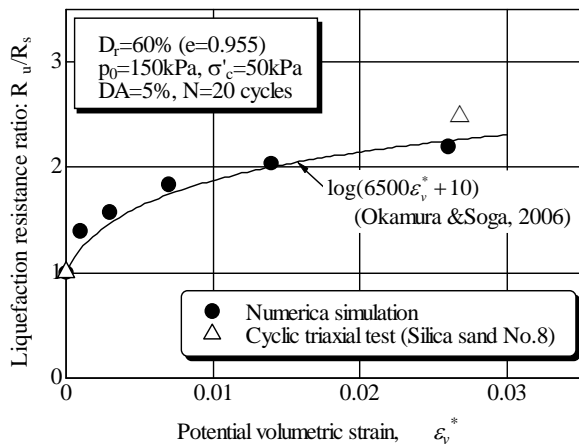


図4 不飽和化による液状化強度の増加: 硅砂8号

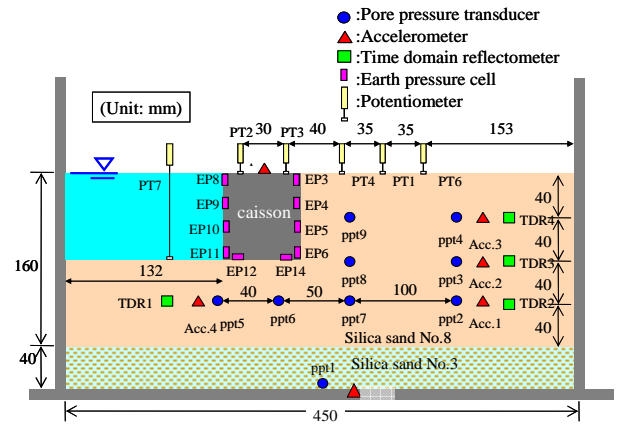


図5 模型概要, センサー位置

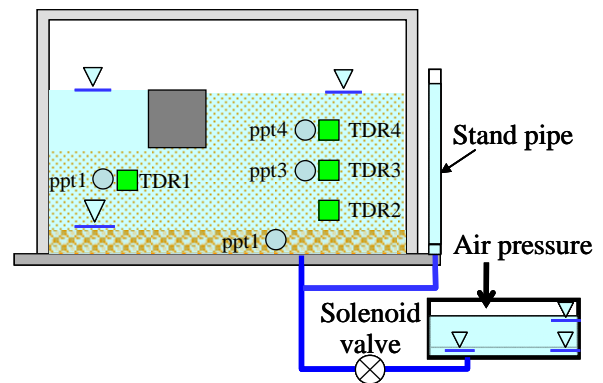


図6 地盤水位低下, 上昇用給排水システム

図 2 は、硅砂 8 号の水分特性曲線であり、この図よると、1G 場では、水位の下降、上昇による過程で、約 90% 程度の不飽和土となる。また、図 3 に示した硅砂 8 号の液状化曲線、更には図 4 の ϵ_v^* と液状化強度比の関係より、不飽和化により三軸試験における液状化強度は大きく増加することが確認できる。

2. 2 実験方法

岸壁構造に対する実際の不飽和化としては空気注入工法が現実的な工法であるが、できるだけ均質な不飽和化地盤を作成するために、本実験では地盤水位の低下、上昇により不飽和地盤を作成した。

図 5 は模型概要と各種センサーの位置を示したものである。実験では、内径 $150 \times 450 \times 270$ mm の剛性容器を使用し、土槽底部に硅砂 3 号を厚さ 40 mm 敷き、その上に空中落下法により厚さ 160 mm、相対密度 60% の液状化層を作成した。この液状化地盤上に重さ 1.6 kg、高さ 80 mm、幅 60 mm、奥行 150 mm のケーソン (50g: 設置圧 72 kPa) を設置し、背面砂層を作詞した後、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。

飽和地盤模型を遠心装置に搭載し、遠心加速度を 50g まで上昇させ後、図 6 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。水分含水量計（TDR）の値がある程度一定値になるのを確認した後、排水タンクに空圧を供給することで、地盤下部から給水し、再び初期の位置まで水位を上昇させた。この時、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、地盤内間隙水圧計、体積含水率を間隙水圧計、TDR 水分計で計測した。また、この不飽和履歴を与えた模型地盤と与えない模型地盤に対して 45Hz の正弦波を機械式振動台を用いて与えた。実験条件を表 2 に示す。

表 2 実験条件

Test code	CASE1	CASE2
Relative density D_r (%)	60	60
Degree of saturation* (%)	88	100
Input acceleration amplitude(g)	9.5	9.5

*: average value evaluated from TDR sensors

3. 実験結果および考察

3.1 水位の低下・再上昇による不飽和履歴

図 7 に CASE1 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 TDR2, 4 は体積含水率の下がり方が他の 3 つに比べて遅く、しかも小さくなっている。水位上昇後の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。図 8 は、原型寸法で地表面から 2m(TDR4)の地点を基準とした飽和度と水位の関係である。水位が基準点より 1m 下がったところで、飽和度が減少していることから毛管上昇高さは約 1m (図 9) であることがわかる。これは重力場において本模型地盤と同じサイズで実験したのでは、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おける遠心模型実験の利点の一つを示している。

排水前の最大の体積含水率を飽和度 100%とし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 20%程度まで減少している。最終的な残留飽和度は、地盤底部で 89%、中部で 81%、浅部で 88%となり、平均残留飽和度は 88%となった。

3.2 加振実験

図 11 は二つの模型に与えた入力加速度を示したものである。機械式の振動台を用いて約 0.2 秒の短い波を与えており、必ずしもきれいな正弦波とはなっていないが、二つの実験ではほぼ同じ波を入力できたことがわかる。

図 12 は各実験ケースにおける加振時の過剰間隙水圧の経時変化である。図中の点線は、有効上載圧

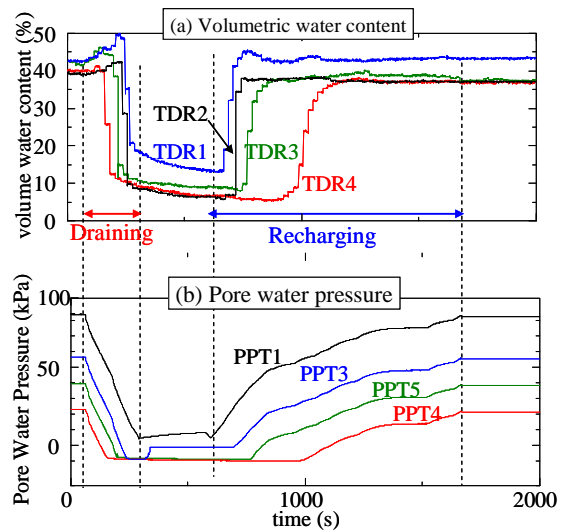


図7 水位低下上昇による体積含水率，間隙水圧の変化

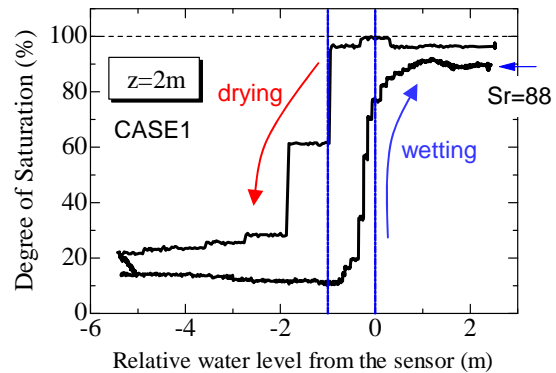


図8 地盤内水位と飽和度の関係：TDR4

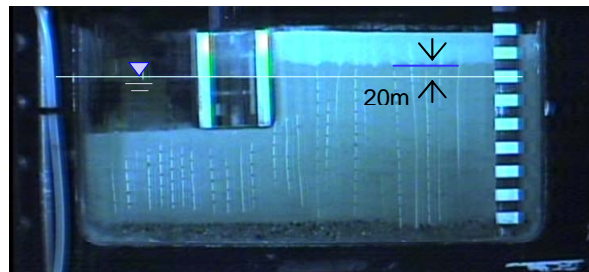


図9 50g場における毛管上昇高さ (CASE1)

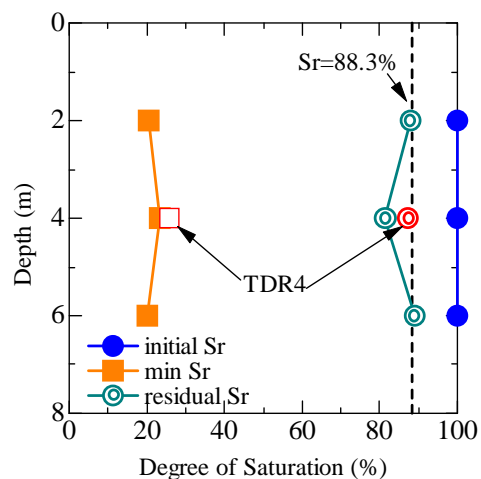


図10 地盤内の飽和度の変化

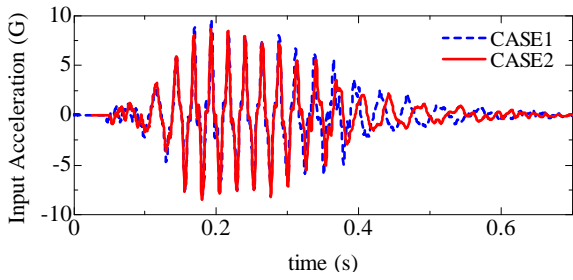


図11 (CASE1)入力加速度 (Acc.0)

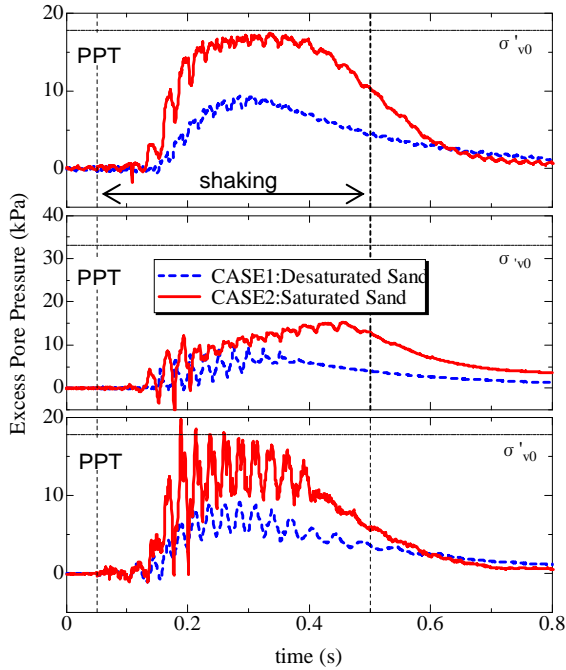


図12 振動中の過剰間隙水圧の変化

σ'_{v0} を示している。飽和地盤のケースである CASE2 の PPT5 で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、不飽和地盤のケースである CASE1 は CASE2 と比べ、過剰間隙水圧の上昇は緩やかで小さく、振動後期の段階で過剰間隙水圧は減少している。振動中の地盤とケーソン上部の応答加速度の変化を図13と14にそれぞれ示す。不飽和地盤である CASE1 の Acc1~3 を見てみると、振幅はどの位置においてもほぼ等しく減衰も見られない。一方、飽和地盤である CASE2 の加速度応答は、CASE1 と比べかなり減衰しており、入力加速度に対しても位相のずれが大きいことから、液状化の影響をうけていることが伺える。これは地盤浅部の Acc3 において顕著である。

ケーソンの挙動の経時変化を図15に示す。不飽和地盤の CASE1 は、飽和地盤である CASE2 のケーソンの水平変位の約 1/5、鉛直変位の約 1/2、回転角の約 1/3 程度まで抑えられており、不飽和化の効果を確認することができる。

図16は振動時のケーソン底部の土圧の時間履歴を示したものである。飽和地盤の CASE2 は、不飽和地盤の CASE1 と比べケーソンの海側先端部土圧 (EP12)

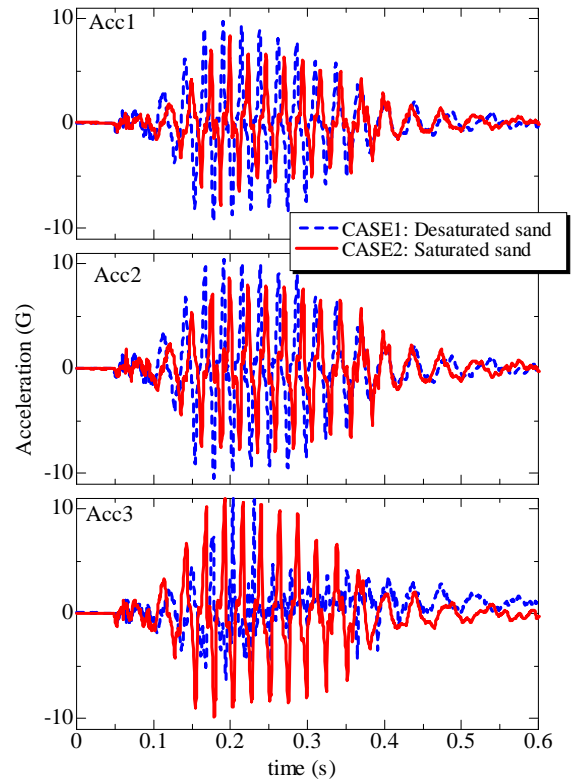


図13 地盤の加速度応答

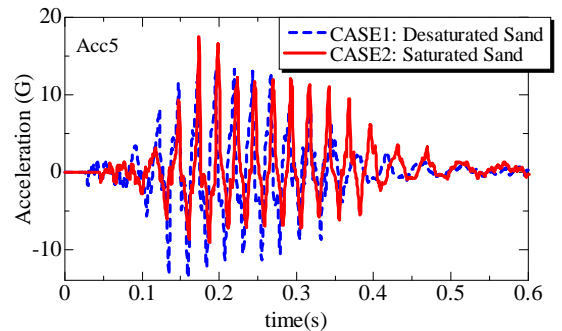


図14 ケーソンの加速度応答

の振幅がかなり大きくなっているのに対して背面側の先端の土圧計 (EP14) の振幅は両 CASE ともほとんど変わらない。このことから CASE2 は背面の先端部分を中心にして構造物がロッキングしていると考えられる。この大きな振幅の影響は図12に示すケーソン下の間隙水圧 (PPT5) の大きな振幅にも現れている。EP12 大きな振幅は、動的な地盤反力が発揮されていることを意味し、CASE2 のケーソンの鉛直変位や回転が水平変位と比べて、ある程度抑えられていることと対応する。

図17は振動中のケーソン背面土圧の変化を示したものである。背面上部では、土圧挙動に飽和、不飽和の差は見られないが、下部では、液状化による間隙水圧上昇の影響が現れ、振動後半部で不飽和ケースに比べ、飽和ケースで背面土圧が大きくなっている。さらに、振動成分も前者が後者より大きく、ケ

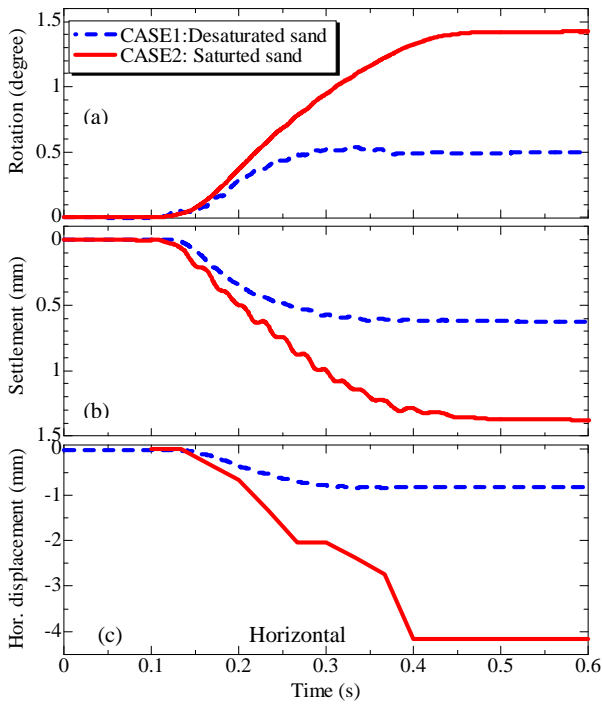


図15 振動中のケーソンの変位

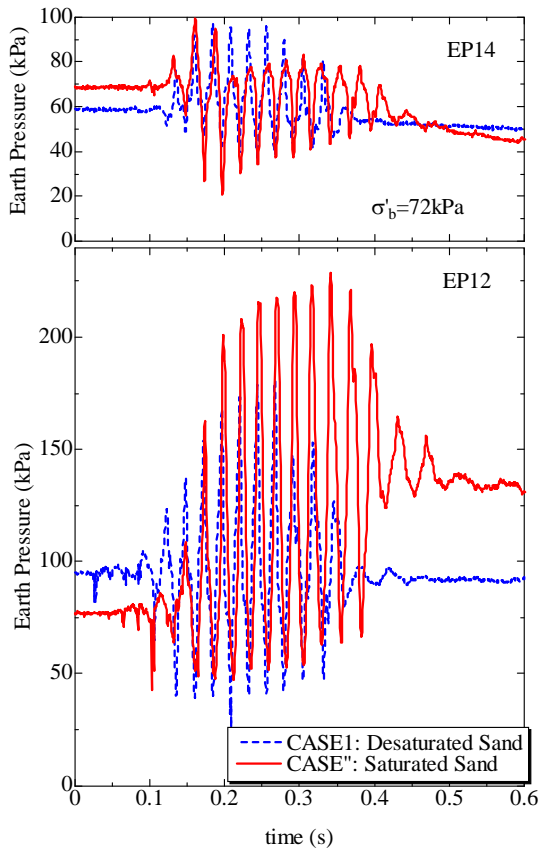


図16 振動中のケーソン底面土圧

ケーソン底面の土圧の動的挙動と同様の傾向が見られる。

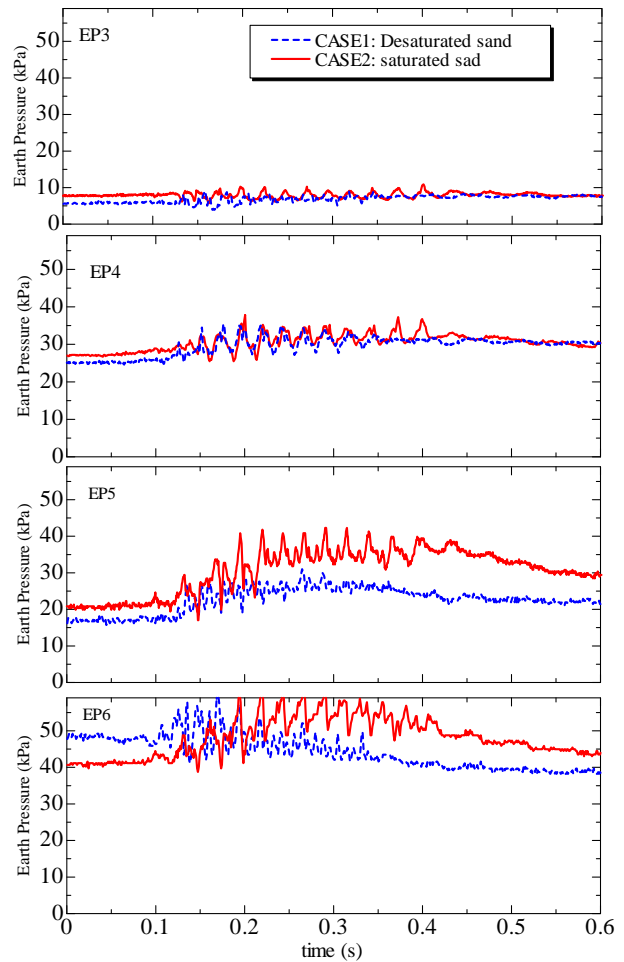


図17 振動中のケーソン背面の土圧

4. まとめ

本研究では、遠心模型実験装置において 50g の遠心場で飽和地盤と不飽和地盤の水位を低下・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。上記手法で不飽和履歴を与えることで、残留飽和度は約 88% になり、この飽和度で加振による過剰間隙水圧の発生が、初期の段階で大きく抑制された。飽和地盤の浅部での加速度応答が入力加速度と比べ減衰していることから飽和地盤の強度が低下していることがわかる。結果として、不飽和地盤のケーソンの鉛直変位、水平変位、そして回転角は飽和地盤に比べ小さくなった。また、ケーソン前面海底部の液状化を防ぐ布設部ことにより、ケーソンの回転を効果的に抑制することがわかった。

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) Yoshimi, Y., Tanaka, K. and Tokimatsu, K., Liquefaction resistance of a partially saturated sand, *Soils and Foundations*, 29(3), 157-162, 1989
- 3) 井澤淳,五十嵐玲奈,増田雅士,岡村未対,竹村次朗,日下部治, 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,平成 19 年度首都圏プロジェクト成果報告シンポジウム