

三軸砂供試体の密度と飽和度の違いが繰返しせん断挙動に与える影響
(Effect of density and saturation degree of triaxial sand specimen
on cyclic shear behavior)

岸川貴洋¹, 吉川高広², 野田利弘¹

1 名古屋大学大学院・工学研究科土木工学専攻

2 名古屋大学大学院・工学研究科土木工学専攻・yoshikawa.takahiro.d3@f.mail.nagoya-u.ac.jp

概 要

液状化対策工法の一つとして知られるサンドコンパクションパイル工法は、地盤の密度を増大させる工法であるが、施工時に噴射する空気が地盤内に取り込まれるため、地盤の飽和度を低下させる副次的な効果も期待されている。一方で、液状化は緩い飽和砂地盤で生じるため、不飽和状態であっても緩い砂の繰返しせん断挙動に注目した研究が多く、密な不飽和砂の繰返しせん断挙動に注目した研究はあまり行われていない。本研究では、相対密度 64%程度で中密な場合と相対密度 84%程度で密な場合の豊浦砂供試体に対して、飽和度を 70~100%の範囲で系統的に変化させて、軸ひずみ振幅 1%の側圧一定・非排気非排水繰返し三軸試験を行った。その結果、密な場合は飽和度が 94%程度に低下しただけで、飽和状態と比べて繰返しせん断に伴う剛性低下が著しく抑制され、また飽和度が 79%と 69%の場合はほぼ同じ力学挙動を呈するなど、密な場合は中密な場合に比べて少しの飽和度低下で大きな改良効果が得られた。

キーワード：繰返し三軸試験，飽和度，相対密度

1. はじめに

液状化対策工法の一つとして知られるサンドコンパクションパイル工法は、地盤の密度を増大させる工法であるが、施工時に噴射する空気が地盤内に取り込まれるため、地盤の飽和度を低下させる副次的な効果も期待されている¹⁾。一方で、液状化は緩い飽和砂地盤で生じるため、不飽和状態であっても緩い砂の繰返しせん断挙動に注目した研究が多く、密な不飽和砂の繰返しせん断挙動に注目した研究はあまり行われていない。

本研究では豊浦砂を用いて、相対密度 64%程度の中程度に密（以後、中密と称する）な供試体と、相対密度 84%程度の密な供試体に対して、飽和度を 70~100%の範囲で系統的に変化させて繰返し三軸試験を実施し、豊浦砂供試体の密度と飽和度の違いが繰返しせん断挙動に与える影響を調べた。

2. 実験条件

実験に用いた三軸試験機について、供試体下端では微細多孔質膜²⁾を用いて水圧を、上端では撥水性のポリフロンフィルターを用いて空気圧を、それぞれ独立して制御した。体積変化は、二重セルシステムを用いて、内セルの水位変化から算出した。実験手順は次の通りである。

- (1) 乾燥状態の豊浦砂をモールド内に投入後、木槌で打撃することで密度を調整する。
- (2) 通水後に基底応力 20kPa で供試体を自立させて、背圧上昇により飽和化させる。
- (3) 基底応力 100kPa で等方圧密を行う。
- (4) 基底応力を一定に保ったまま、空気圧の上昇によりサクションを作用させ、所定の飽和度まで低下させる。
- (5) 軸ひずみ速度 0.06%/min, 軸ひずみ振幅 1%の変位制御で、側圧一定・非排気非排水繰返しせん断を 20 回行う。

本研究では構成モデルの改良/開発を見据え、供試体の均質性を保つことを目的に、変位制御の繰返し三軸試験を行った。表 1 は実験ケース一覧であり、実験手順(4)の終了時（繰返しせん断直前）の状態量を示す。ケース「1-」は相対密度 D_r が 64%程度の中密な場合、ケース「2-」は D_r が 84%程度の密な場合であり、ケース番号が大きくなる

表 1 実験ケース一覧（繰返しせん断直前の状態量）

ケース名	相対密度 D_r (%)	飽和度 S_r (%)
1-1	56.3	100
1-2	64.5	93.0
1-3	64.2	89.5
1-4	67.1	75.1
2-1	85.8	100
2-2	84.7	94.1
2-3	83.5	86.8
2-4	86.4	78.8
2-5	84.4	68.8

ほど飽和度 S_r が低い条件となっている。飽和条件のケース 1-1 と 2-1 では B 値が 0.95 以上であることを確認している。

3. 実験結果

図 1 は中密な場合の繰返し三軸試験結果を示す。飽和条件のケース 1-1 および S_r が 93.0% と 89.5% のケース 1-2 と 1-3 では、平均骨格応力 p' がゼロになっている一方で、 S_r が 75.1% のケース 1-4 では p' はゼロにならず、液状化に至っていない。ケース 1-1~1-3 では剛性がゼロ近くまで低下しているが、ケース 1-4 では剛性の低下が抑えられている。体積圧縮量はケース 1-4 で最も大きく、圧縮性が高い空気が多いほど、繰返しせん断時に体積変化（圧縮）を許容するため、 p' の低下と剛性の低下を抑制できたことがわかる。

図 2 は密な場合の繰返し三軸試験結果を示す。飽和条件のケース 2-1 では液状化に至っているものの、中密な場合とは異なり、 S_r が 94.1% のケース 2-2 においても p' はゼロにならず、飽和条件のケース 2-1 と比べて繰返しせん断に伴う剛性低下が著しく抑制されている。体積ひずみの結果より、2.12% の圧縮ひずみが生じており、空気の高い圧縮性の影響が大きいと考えられる。 S_r がさらに低いケース 2-3~2-5 の結果より、 S_r の低下に伴って p' の低下と剛性の低下は抑制されているものの、中密な場合に比べてその割合は小さく、 S_r が 78.8% と 68.8% のケース 2-4 と 2-5 の場合ではほぼ同じ力学挙動を呈している。体積ひずみについても、中密の場合に比べて、 S_r の低下に伴う体積圧縮量の増加割合が低い。図 3 と図 4 はそれぞれ中密な場合と密な場合の繰返しせん断に伴う割線剛性の変化を示す。この図からも、密な場合は中密な場合に比べて、 S_r が 94% 程度に低下するだけで繰返しせん断に伴う剛性低下が著しく抑制されることがわかり、密な場合は少しの飽和度低下で大きな改良効果が得られることが示唆される。

4. おわりに

本研究では、相対密度 64% 程度で中密な場合と相対密度 84% 程度で密な場合の豊浦砂供試体に対して、飽和度を 70~100% の範囲で系統的に変化させて、軸ひずみ振幅 1% の側圧一定・非排気非排水繰返し三軸試験を行った。その結果、密な場合は飽和度が 94% 程度に低下しただけで、飽和状態と比べて繰返しせん断に伴う剛性低下が著しく抑制され、また飽和度が 79% と 69% の場合はほぼ同じ力学挙動を呈するなど、密な場合は中密な場合に比べて少しの飽和度低下で大きな改良効果が得られた。ただし、密な砂で塑性体積膨張が生じると、体積変化を許容しやすい条件、すなわち飽和度が低い方がせん断強度・剛性が低くなり得ると考えられる。今後は変位振幅を大きくした場合の実験を試みるとともに、実験結果の数値シミュレーションを通じた構成モデルの改良／開発を行ってきたい。

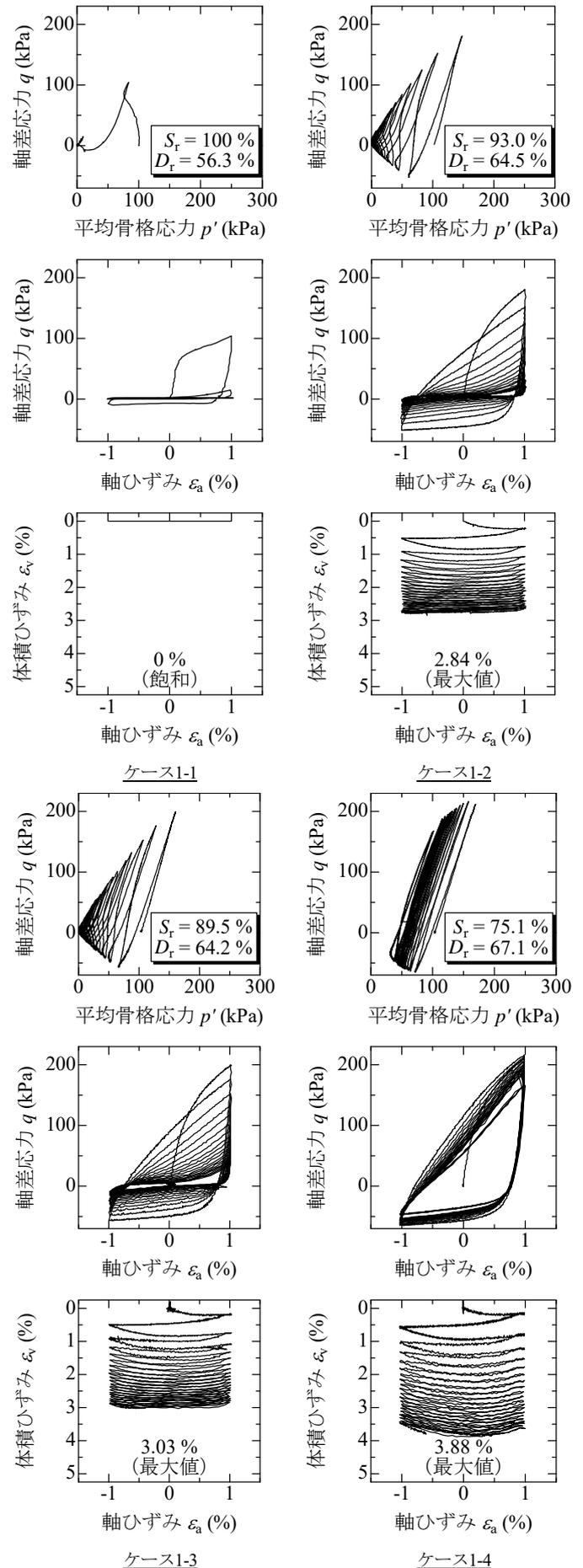


図 1 中密な場合の繰返し三軸試験結果

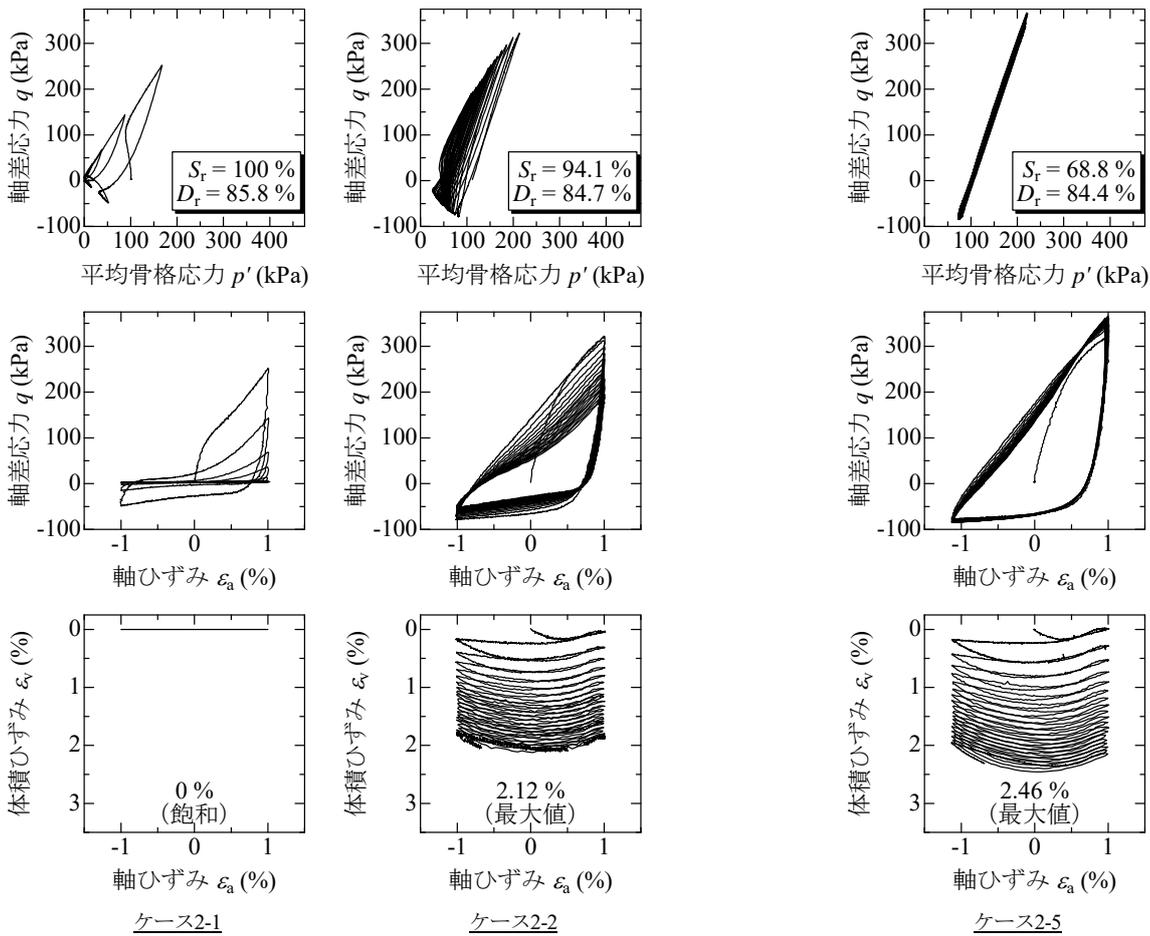


図2 密な場合の繰返し三軸試験結果

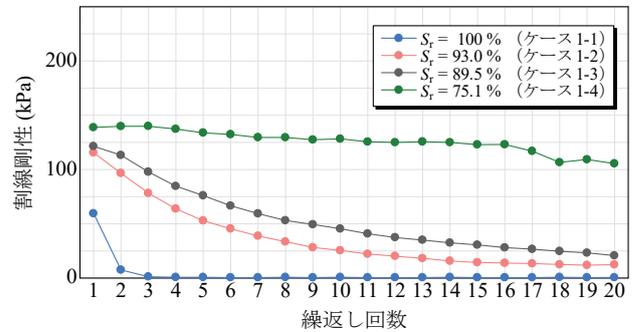
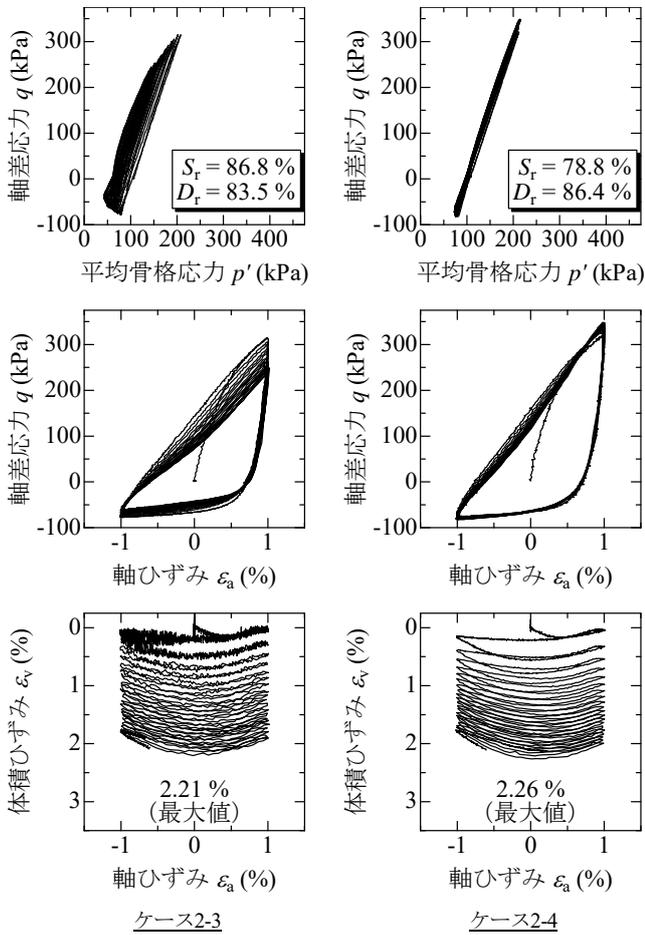


図3 中密な場合の繰返しせん断に伴う割線剛性の変化

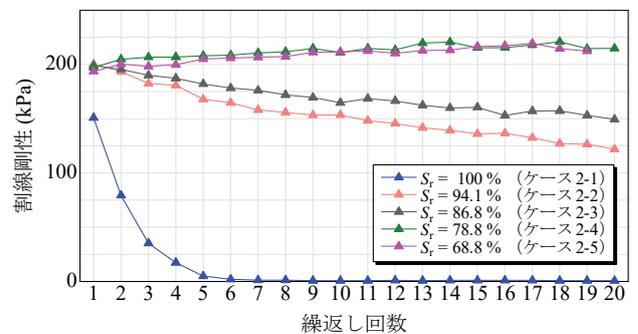


図4 密な場合の繰返しせん断に伴う割線剛性の変化

謝辞

JSPS 科研費 17H01289 の助成を受けた。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) Okamura, M., Ishihara, M. and Oshita, T.: Liquefaction resistance of sand deposit improved with sand compaction piles, *Soils and Foundations*, Vol. 43, No. 5, pp. 175-187, 2003.
- 2) Nishimura, T., Koseki, J., Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.: Microporous membrane technology for measurement of soil-water characteristic curve, *Geotechnical Testing Journal*, the American Society for Testing and Materials, Vol. 35, Issue 1, pp. 201-208, 2012.