

異なる上載圧と相対密度におけるきれいな不飽和砂の液状化強度

佐藤工業 技術センター 正会員 ○加藤 謙吾
佐藤工業 技術センター 正会員 永尾 浩一

1. 目的

土の不飽和化は、安価で環境負荷の小さい液状化対策工法として用いられている。不飽和化液状化対策工法の対象深度は地表面から約 20m であり、不飽和化の効果が深さ方向に変化することが指摘されている¹⁾。直接単純せん断試験機は、地震動による土の応答の再現性に優れており、繰返し载荷による不飽和土の変形特性の評価などに用いられている。本稿は、きれいな不飽和砂の液状化強度に対する上載圧の影響を検討する。

2. 実験概要

本実験では、直接単純せん断試験機を用いて繰返し非排気・非排水せん断試験を行った。本試験機による繰返しせん断試験方法は基準化されていない。そのため、実験方法は、JGS 0520-009 (土の三軸試験の供試体作製・設置方法)、JGS 0541-2009 (土の繰返し非排水三軸試験方法)、JGS 0151-2009 (土の保水性試験)、JGS 0527-2009 (不飽和土の圧縮試験方法) などに準じた。供試体寸法は、直径 70mm、高さ 30mm である。相対密度 D_r は、40% (37~42%) および 80% (80~83%) に調整した。有効上載圧 σ'_v 、あるいは基底上載圧 $\sigma_{net,V}$ は、25, 50, 100, 300kPa の 4 段階に変化させた。また、飽和度 S_r は、加圧法を用いて 84~100% の間で調整した。実験には、豊浦砂を用いた。なお、繰返し载荷は、周期 1 分の正弦波を与えることにより行った。

3. 結果と考察

図-1 に各 S_r , D_r , σ'_v および $\sigma_{net,V}$ における液状化強度曲線を示す。液状化の判定は、両ひずみ振幅 (DA) 10% を基準とした。 σ'_v または $\sigma_{net,V}$ の影響について、 $D_r=40\%$ において、 $S_r=100\%$ では $\sigma'_v=25\text{kPa}$ に対して 0.11, $\sigma'_v=300\text{kPa}$ に対して 0.15 であった。 $S_r=90\sim 93\%$ では $\sigma_{net,V}=25\text{kPa}$ に対して 0.14 であり、 $\sigma_{net,V}=300\text{kPa}$ に対して 0.23 であった。また、 $S_r=84\sim 87\%$ では $\sigma_{net,V}=25\text{kPa}$ に対して 0.155 であり、 $\sigma_{net,V}=300\text{kPa}$ に対して 0.26 であった。したがって、どの S_r においても σ'_v または $\sigma_{net,V}$ が大きくなると液状化強度は増加した。この傾向は、図-1 に示すとおり、 $D_r=80\%$ においても $\sigma'_v=25\text{kPa}$ を除き同様であった。 $\sigma'_v=25\text{kPa}$ において液状化強度が大きくなる理由として、 σ'_v が低いことにより正のダイレイタンス量が大きくなったことが考えられる。実験結果は、 $D_r=80\%$ かつ $\sigma'_v=25\text{kPa}$ を除き、 $S_r=84\sim 100\%$, $D_r=40, 80\%$ の範囲において、 σ'_v または $\sigma_{net,V}$ が大きくなると液状化強度が増加することを示した。

図-2 に $CSR_{N_{cyc}=20, DA=10\%}$ と σ'_v および $\sigma_{net,V}$ との関係を示す。ここに、 $CSR_{N_{cyc}=20, DA=10\%}$ は、繰返し回数 20 回で $DA=10\%$ に達するときのせん断応力比である。 $D_r=40\%$ および $S_r=91\sim 94\%$ における $CSR_{N_{cyc}=20, DA=10\%}$ は $\sigma_{net,V}=25$,
キーワード 不飽和, 直接単純せん断試験機, 液状化強度, 上載圧

連絡先 〒300-2658 茨城県つくば市諏訪 C30 街区 1 TEL 029-817-5100

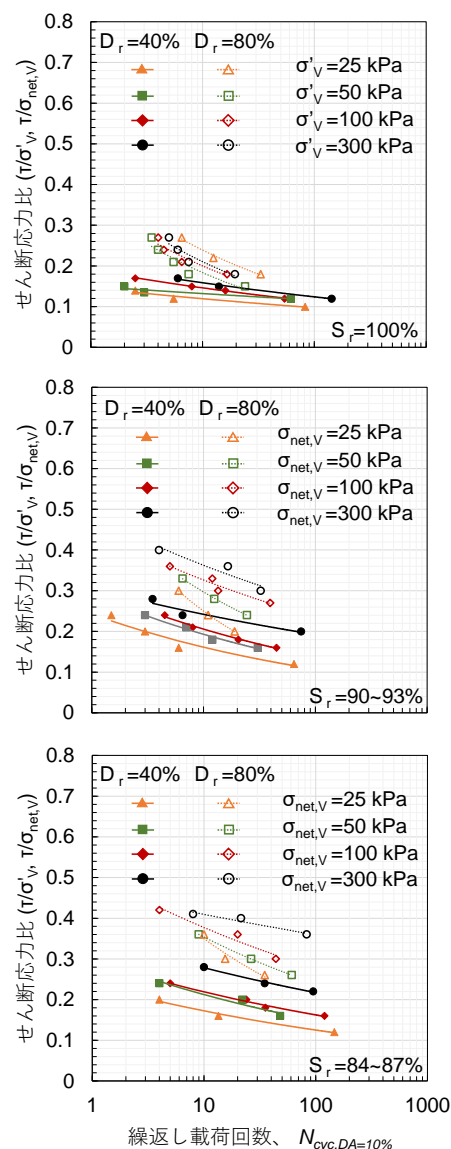


図-1 各 S_r , D_r , σ'_v , $\sigma_{net,V}$ における液状化強度曲線

50, 100, 300kPa に対して 0.14, 0.17, 0.18, 0.23 であった。また, $D_r=80\%$, $S_r=90\sim 92\%$ に対しては, 0.20, 0.25, 0.30, 0.33 であった。各 D_r において, 液状化強度は, σ'_{v} または $\sigma_{net,V}$ が大きくなると増加した。また, この傾向は $S_r=100\%$ または $S_r=84\sim 87\%$ であっても同様であった。実験結果は, $S_r=84\sim 100\%$ の範囲において, σ'_{v} または $\sigma_{net,V}$ が大きくなると $CSR_{Ncyc=20, DA=10\%}$ が増加することを示した。特に, $\sigma_{net,V}=25\text{kPa}$ と低拘束圧下であっても, 不飽和化により, $CSR_{Ncyc=20, DA=10\%}$ は, 1.3~1.4 倍ほど増加した。

図-3 に, 液状化強度倍率 K_σ と大気圧で正規化した有効上載圧 σ'_{v}/P_a および基底上載圧 $\sigma_{net,V}/P_a$ との関係を示す。ここに, P_a は大気圧である。ここでは, 飽和度の影響を考慮するために, Seed²⁾ を参考に, 以下の式により $\sigma_{net,V}$ および S_r の影響を考慮した。

$$K_\sigma = \frac{CSR_{\sigma'_{v=1atm}, S_r}}{CSR_{\sigma'_{v=1atm}, S_r=100\%}} \quad (1)$$

$CSR_{\sigma'_{v=1atm}, S_r=100\%}$ は $\sigma'_{v}=1\text{atm}$ かつ $S_r=100\%$ におけるせん断応力比, $CSR_{\sigma_{net,V}, S_r}$ は $\sigma_{net,V}$ および S_r におけるせん断応力比である。 $D_r=40\%$, $S_r=91\sim 93\%$ における K_σ は, $\sigma_{net,V}=25, 50, 100, 300\text{kPa}$ に対して 1.0, 1.2, 1.3, 1.5 であった。また, $D_r=80\%$, $S_r=90\sim 93\%$ に対して 1.2, 1.5, 1.8, 1.9 であった。実験結果は, 両相対密度において, $\sigma_{net,V}/P_a$ が増加すると K_σ が大きくなることを示した。特に, $D_r=80\%$ における K_σ は, $D_r=40\%$ における値と比べて大きくなった。上記の傾向は, $S_r=100\%$, $84\sim 86\%$ においても同様であった。したがって, 不飽和化による液状化強度の増加率は, D_r が大きいほど, そして, S_r が低下するほど高くなることを示した。実験結果にもとづく経験式を式(2)に提案する。

$$K_\sigma = a \left[1 + b \ln \left(\frac{\sigma'_{v}}{P_a} \right) \right], \text{ または, } K_\sigma = a \left[1 + b \ln \left(\frac{\sigma_{net,V}}{P_a} \right) \right] \quad (2)$$

ここに, a と b はフィッティングパラメータである。豊浦砂に対するパラメータは, 次式より求まる。

$$\ln(a) = 5.94 \cdot \left(\frac{D_r(\%)}{100} \right) \cdot \ln \left(\frac{S_r(\%)}{100} \right) \quad (3)$$

$$b = 0.07 \cdot \left(\frac{D_r(\%)}{100} \right)^{-1} \quad (4)$$

4. 結論

本稿は, 直接単純せん断試験機を用いて不飽和砂の液状化強度を評価した。実験結果は, 不飽和砂の液状化強度が S_r に加えて, D_r および $\sigma_{net,V}$ に影響されることを示した。加えて, K_σ は, 相対密度が大きいほど, また, 飽和度が低下するほど高くなることが示された。実験結果にもとづき, K_σ の経験式を提案した。

参考文献

- 1) Okamura, M. and Soga, Y.: Effects of pore fluid compressibility on liquefaction resistance of partially saturated sand, Soils and Foundations. 46, No. 5, pp.695~700, 2006.
- 2) Seed, H. B.: Earthquake-resistant design of earth dams, Proc., Symp. Seismic Des. of Earth Dams and Caverns, ASCE, New York, pp.1157-1173, 1981.

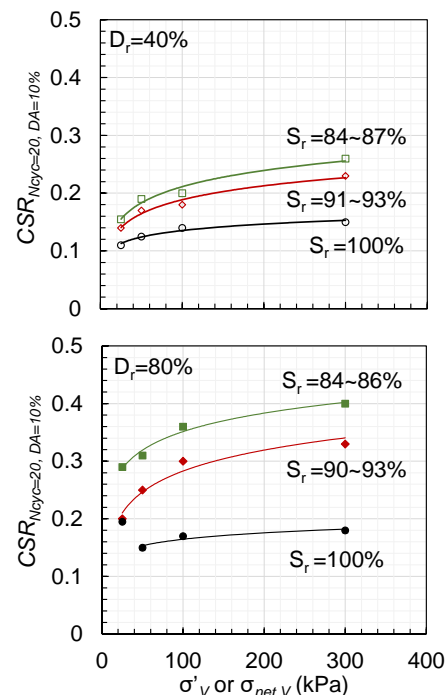


図-2 繰返し回数 20 回におけるせん断応力比と上載圧との関係

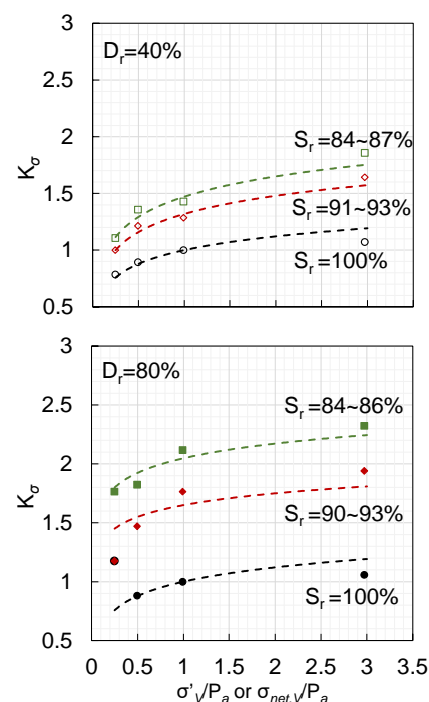


図-3 K_σ と σ'_{v}/P_a または $\sigma_{net,V}/P_a$ との関係