

過圧密履歴を受けた浦安砂の累積損失エネルギーの特徴

東京電機大学 正会員 ○石川 敬祐
東京電機大学 名誉会員 安田 進
東京電機大学大学院 学生会員 金井 勇介

1. はじめに

2011 年東日本大震災では、東京湾岸の埋立地において広範囲で液状化が生じた。それを受け震災後には、浦安市等で様々な地盤調査が行われている^{例え 1)}。また、筆者らは浦安市入船地区で深度方向に連続的にサンプリングした試料に対して繰返し三軸試験を実施してきた²⁾。その結果、埋立地の液状化強度の特徴として、地盤物性は不均質であるが地下水位付近から採取された試料の液状化強度が大きい傾向があった。この要因の一つとして、埋立地の地下水位変動による地盤内拘束圧の変化による過圧密履歴の影響が考えられた。そこで、本研究では地下水位変動に伴う過圧密履歴を受けた浦安砂の液状化強度特性を把握することを目的に繰返し三軸試験を実施し、液状化試験時の応力ひずみ関係に着目した累積損失エネルギーに及ぼす供試体密度や過圧密履歴効果について考察を行った。

2. 試験概要

液状化試験には、繰返し非排水三軸試験を用いた。試料は、東日本大震災時に浦安市で採取した噴砂に対して粒度調整を行ったシルト混じり砂（以下、浦安砂）を用いた。浦安砂の物理特性を図 1 に示す。供試体は、直径 5cm、高さ 10cm の円柱形である。供試体の作成方法は、不飽和突き固め法により 5 層に分けて所定の密度になるように作成した。その後、二酸化炭素と脱気水を用いて飽和させ、*B* 値が 0.95 以上であることを確認して所定の圧密履歴を与えている。試験条件の一覧表を表 1 に示す。ここで過圧密比は、千葉市や浦安市で震災後にモニタリングした地下水位観測結果³⁾に基づき設定している。過圧密比は、地下水位が季節変動に伴って 1.2m ほど変化したことを想定して 1.5 と定めた。また、年間の水位変動が複数回起こることから数回の繰返し圧密を行い、さらにその地下水位変動が数十年間起こることも想定して最大で 30 回の繰返し圧密を行うこととした。有効拘束圧 σ'_0 は 50kN/m² とし、背圧は 200kN/m² とした。各拘束圧における圧密時間は一律 30 分間とした。なお、30 回圧密の供試体は、圧密に相当な時間を有するため、拘束圧に対応した錘を用いて実施した。载荷方法は、0.1Hz の正弦波による応力制御である。

3. 試験結果

ここでの正規化累積損失エネルギー ($\Sigma \Delta W / \sigma'_0$)^{例え 4)}は、各供試体の応力ひずみ関係の履歴ループの面積を累積し、有効拘束圧で正規化したものである。図 2 は $\Sigma \Delta W / \sigma'_0$ と過剰間隙水圧比の関係であり、図 3 は $\Sigma \Delta W / \sigma'_0$ と両振幅軸ひずみの関係である。図 2 より、各供試体密度で $\Sigma \Delta W / \sigma'_0$ に応じた過剰間隙水圧比の上昇過程の傾向は繰返し回数が多いものほど下凸となり、それらの形状は類似しており一意性があることがわかる。 $\Delta U / \sigma'_0 = 1.0$ の初期液状化時に着目すると、OCR=1.0 では $\Sigma \Delta W / \sigma'_0 = 0.03 \sim 0.06$ 程度であり、密度が増えることで増加する。過圧密履歴による影響は、 $\Sigma \Delta W / \sigma'_0 = 0.05 \sim 0.12$ 程度と OCR=1.0 に比べて倍増する。また圧密履歴回数の違いによる影響は少ないことがわかった。図 3 の

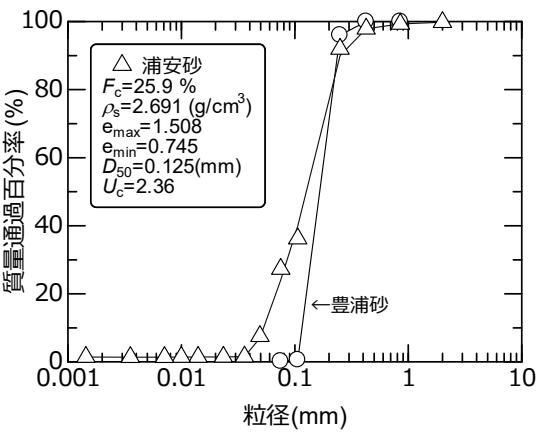


図 1 浦安砂の物理特性

表 1 試験条件

密度	OCR	圧密履歴：拘束圧変化
<i>Dr</i> ≈55% (緩い)	1.0	1回
<i>Dr</i> ≈70% (中密)	1.5	1回：50→75→50
<i>Dr</i> ≈80%		3回：50→(75→50)×3 10回：50→(75→50)×10 30回：50→(75→50)×30

キーワード 過圧密履歴，液状化強度，累積損失エネルギー

連絡先 〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂 東京電機大学理工学部 建築・都市環境学系 TEL049-296-3289

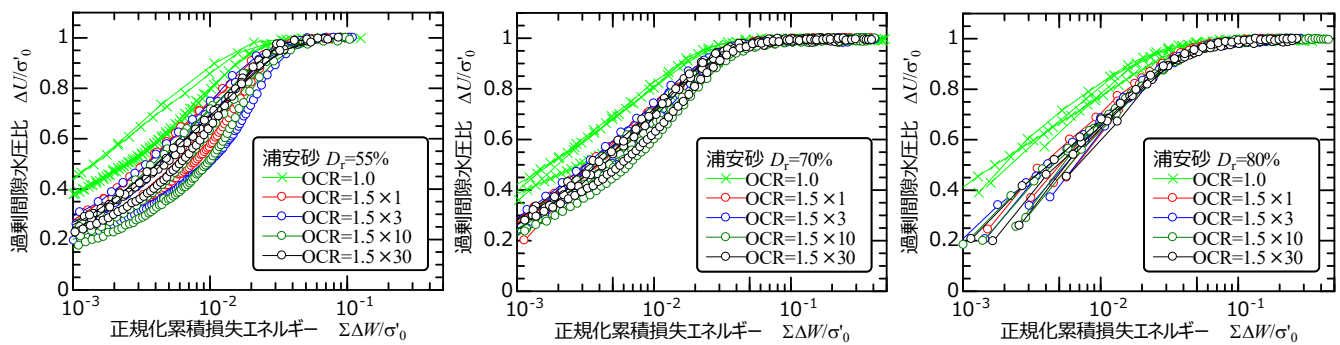


図2 正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の関係

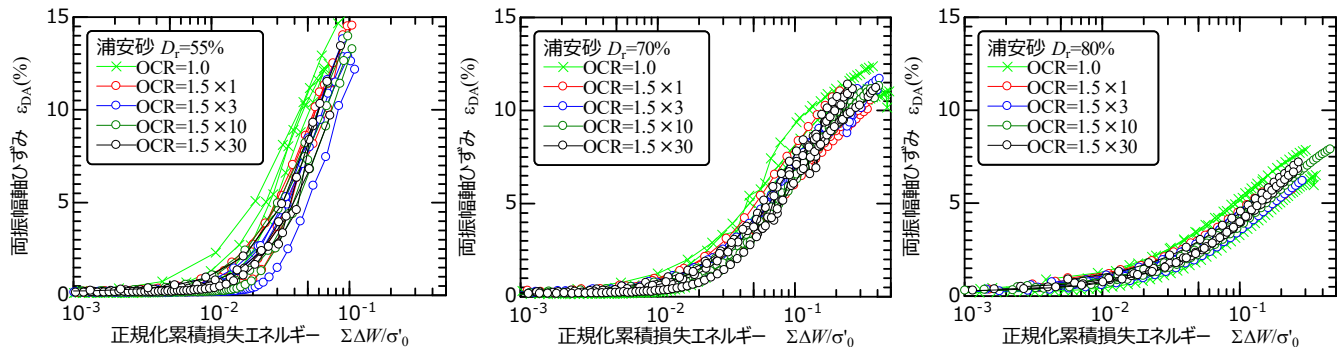
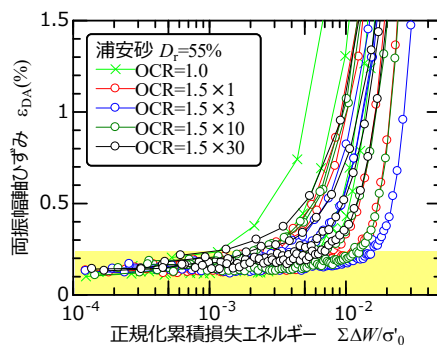
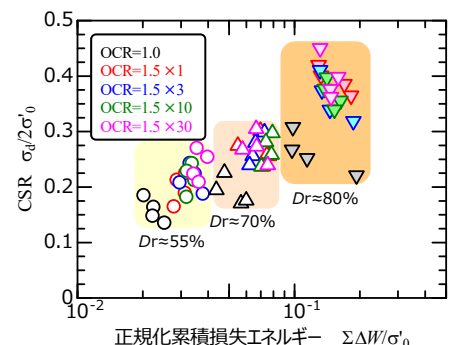


図3 正規化累積損失エネルギーと両振幅軸ひずみの関係

$\Sigma\Delta W/\sigma'_0$ と ε_{DA} の関係より、 $Dr \approx 55\%$ と緩い状態では過圧密履歴の違いによる $\Sigma\Delta W/\sigma'_0$ と軸ひずみの伸展過程に違いがあることが分かる。一方、 $Dr \approx 70\%$ や 80% と供試体が密実化していくとその影響は少なくなる。また、繰返し回数が多い供試体ほど下凸の傾向となる。図4は、図3の $Dr \approx 55\%$ の小ひずみ域の拡大図で

図4 $\Sigma\Delta W/\sigma'_0 - \varepsilon_{DA}$ の関係 (拡大)図5 $\Sigma\Delta W/\sigma'_0 - CSR$ の関係

ある。これより、 ε_{DA} が 0.25% までは大きな軸ひずみの伸展はなく、 $\Sigma\Delta W/\sigma'_0$ の単調増加傾向となっている。このことは、緩い状態の供試体内の間隙が不均一であり、過圧密履歴や小ひずみ域の繰返し载荷による土粒子間の微視的構造の安定に寄与していることが考えられる。図5は、各供試体の $\varepsilon_{DA}=5\%$ 時の $\Sigma\Delta W/\sigma'_0$ と繰返し応力比の関係である。 $\varepsilon_{DA}=5\%$ 時の $\Sigma\Delta W/\sigma'_0$ は、図4の傾向を踏まえて $\varepsilon_{DA}=0.25\%$ までのエネルギー量を差し引いてプロットしている。これより、OCR=1.0 では各密度条件で供試体内の間隙の不均一性によって液状化に至る際の $\Sigma\Delta W/\sigma'_0$ は若干異なり、その傾向は供試体の密度が大きいくほど顕著である。過圧密履歴を受けた供試体は、液状化に対する抵抗力が向上するとともに、繰返し応力比が異なってもほぼ一様の累積損失エネルギー量で液状化に至ることがわかる。

4. まとめ

過圧密履歴を受けることで各密度状態における供試体内の間隙の不均一性が解消されることで液状化に至る際のエネルギー量に一貫性が認められることが分かった。

【謝辞】繰返し三軸試験を実施するにあたり、東京電機大学生の伊藤瞭太氏にご協力いただいた。末筆ながらお礼申し上げます。

【参考文献】1) 石井ら；2011年東北地方太平洋沖地震で液状化被害を受けた浦安市の地盤特性，地盤工学ジャーナル，Vol. 12，No. 1，pp. 91-107，2017.，2) 石川ら；東日本大震災による液状化被害箇所の液状化強度特性の深度分布と種々な液状化判定，エネルギーに基づく液状化予測手法に関するシンポジウム論文集，pp. 324-332，2019.，3) 安田・石川；地下水位低下が戸建て住宅の液状化対策に与える効果，日本地震工学会論文集，第15巻，第7号（特集号），pp. 205-219，2015.，4) 國生；エネルギーによる液状化判定法の適用性検討とFL法との対比，地盤工学ジャーナル，Vol. 8，No. 3，pp. 463-475，2013.