

シルト質砂の異方応力状態における損失エネルギーと液状化強度の関係

東京電機大学 正 石川 敬祐、名誉 安田 進
株式会社不動産テトラ 正 原田 健二、正 出野 智之
東京電機大学大学院 学生 ○坪井 稜太

1. 目的

1995年の兵庫県南部地震や2011年の東北地方太平洋沖地震では若齢な埋立地盤の広範囲で液状化が生じた。しかし、締固めによる地盤改良が行われていた場所では液状化被害が少なく、液状化の対策として有効であることが報告されている¹⁾。締固め工法による対策効果には、地盤の密度を増加させるとともに静止土圧係数の増加も含まれていることが考えられている。そこで本研究では中密詰め供試体に対して平均有効主応力一定条件と鉛直有効応力一定条件の等方・異方応力状態における液状化試験を行い、累積損失エネルギーや液状化強度比の比較を行った。

2. 液状化試験概要

試料には、細粒分質砂（土粒子の密度 $\rho_s=2.667\text{Mg/m}^3$ 、最大間隙比 $e_{\max}=1.399$ 、最小間隙比 $e_{\min}=0.827$ 、 $e_{\min}^*=0.623$ 、細粒分含有率 $F_c=30.8\%$ ）を用い、中空ねじりせん断試験による液状化試験を実施した。供試体形状は外径100mm、内径60mm、高さ100mmの中空円筒形である。供試体は不飽和振動法にて試料を5層に分け、各層を所定の高さとなるようにモールドの外側をハンマーで叩いた。相対密度は e_{\min}^* を用いた修正相対密度 Dr^* で定義²⁾し供試体作成時が $Dr^*=70\%$ とした。供試体作成後 CO_2 で供試体空隙部を置換し、供試体体積の2~3倍の脱気水を通水した。次に背圧を 200kN/m^2 かけ、B値が0.95以上に達したことを確認した。静止土圧係数は平均有効主応力 $\sigma'_m=130\text{kN/m}^2$ を基準としたものと鉛直有効応力 $\sigma'_v=100\text{kN/m}^2$ を基準にしたものより $K_0=0.5, 1.0, 1.5$ の各拘束圧で30分間の圧密を行った。各拘束圧条件を表1と表2に示す。圧密終了後、異方応力状態の試験では龍岡ら³⁾の試験法に倣い、軸変位を拘束した繰返し非排水せん断試験を実施した。载荷条件は、0.1Hzの正弦波による応力制御である。

3. 試験結果の考察

図1に両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DA}=7.5\%$ に至るまでの繰返し回数と鉛直有効応力 σ'_v で正規化した繰返しせん断応力

表1 平均有効主応力一定条件での各拘束圧

K_0	$\sigma'_v(\text{kN/m}^2)$	$\sigma'_h(\text{kN/m}^2)$	$\sigma'_m(\text{kN/m}^2)$
0.5	200	100	130
1.0	130	130	130
1.5	100	150	130

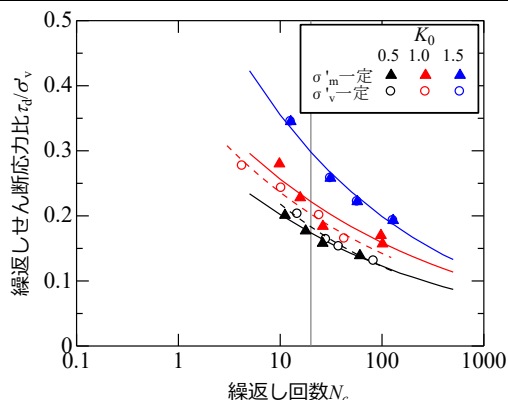
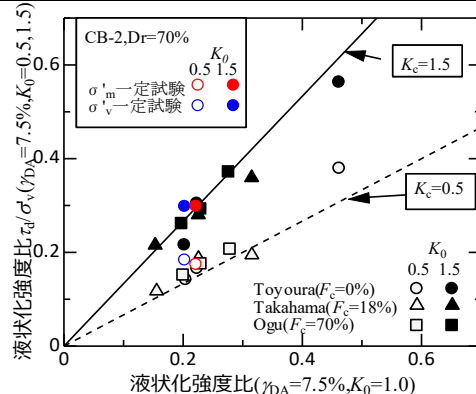


図1 液状化強度曲線

表2 鉛直有効応力一定条件での各拘束圧

K_0	$\sigma'_v(\text{kN/m}^2)$	$\sigma'_h(\text{kN/m}^2)$	$\sigma'_m(\text{kN/m}^2)$
0.5	100	50	67
1.0	100	100	100
1.5	100	150	130

図2 K_0 の影響に関する実験結果⁴⁾

キーワード 損失エネルギー、液状化強度比、異方応力状態

連絡先 〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂 東京電機大学 TEL 049-296-5819

比の関係を示す。図中の縦線は繰返し回数が 20 回を示し、液状化強度比 R_{L20} は液状化強度曲線の繰返し回数が 20 回の時の繰返しせん断応力比と定義している。図 1 より、平均有効主応力一定の試験と鉛直有効応力一定の試験の両方で静止土圧係数の増加により液状化強度は増加している。図 2 は図 1 の試験結果より等方・異方状態の液状化強度比を比較したものである。これより $K_0=1.5$ は既往の研究⁴⁾と重なり異方性を再現できているが $K_0=0.5$ は若干大きな傾向があり、この傾向は既往の研究と類似している。図 3 に各供試体の $\gamma_{DA}=7.5\%$ に至るときの正規化累積損失エネルギーと繰返し回数の関係を示す。累積損失エネルギー ($\Sigma \Delta W = \int \tau d\gamma$) は、各供試体の応力ひずみ関係より履歴ループの面積を累積して求め、鉛直有効応力 σ_v で除しものを正規化累積損失エネルギーと定義した⁵⁾。図中の縦線は繰返し回数 20 回を示している。 σ_m 一定条件の $K_0=0.5$ が他に比べて若干小さくなるが繰返し回数が 30 回以下では損失エネルギーに大きな違いは見られない。図 4 に図 1 より得られた液状化強度比 R_{L20} と静止土圧係数の関係を示す。 σ_m 一定条件と σ_v 一定条件で液状化強度比に大きな差はなく、ほぼ同じと見做せる。これより σ_v 一定条件と σ_m 一定条件で応力条件が異なっても液状化強度比は同一な結果が得られると考えられる。また、静止土圧係数が増加すると液状化強度比も増加した。図 5 に図 3 より得られた正規化累積損失エネルギーと静止土圧係数の関係を示す。 σ_v 一定条件では静止土圧係数が増加しても正規化累積損失エネルギーはほぼ同じと見做せる。 σ_m 一定条件では $K_0=0.5$ が若干小さい。これは $K_0=0.5$ では σ_v 一定条件と σ_m 一定条件の拘束圧に 2 倍の差があり、この影響を受けていると推測される。 σ_v 一定条件と σ_m 一定条件で正規化累積損失エネルギーはほぼ同じ大きさとなった。図 6 に正規化累積損失エネルギーと液状化強度比 R_{L20} の関係を示す。 $K_0=0.5$ の時に σ_m 一定条件と σ_v 一定条件で正規化累積損失エネルギーにばらつきがあるが、 $K_0=1.0, 1.5$ では損失エネルギーがほぼ同じ大きさとなった。これより、一定にする応力条件や静止土圧係数に関わらず正規化累積損失エネルギーと液状化強度比 R_{L20} の間には一意的な関係があることがわかった。

4.まとめ

本研究では細粒分質砂を用いて平均有効主応力一定条件と鉛直有効応力一定条件の液状化試験を行い、等方・異方応力状態での累積損失エネルギーや液状化強度比を比較した。静止土圧係数の増加により両条件で液状化強度比は増加する一方で累積損失エネルギーはほぼ一定となることがわかった。

【参考文献】1) 原田健二:沿岸地区の液状化対策 SAVE コンポーザー-東北地方太平洋沖地震における改良効果-, 土木施工 2011 Dec VOL.52 No.12, pp54-552 Kenji Ishihara, Kenji Harada, W.F.Lee, A.M.M.Safiullah : Post-liquefaction settlement analyses based on the volume change characteristics of undisturbed and reconstituted samples, *Soils and Foundations*, Vol156, No3, pp533-546, 2016 3) 龍岡ら:砂の平面ひずみ繰返しねじり単純せん断非排水試験, 第 16 回土質工学研究発表会, pp585-588 1981 4) 原田健二, 石原研而, 矢部浩史:細粒分を含む砂の N 値と液状化強度に及ぼす水平応力比の影響, 第 14 回地盤改良シンポジウム, pp1-6, 2020 5) 國生剛治:エネルギーによる液状化判定の適用性検討と FL 法との対比, 地盤工学ジャーナル Vol.8, No.3, pp463-475, 2012

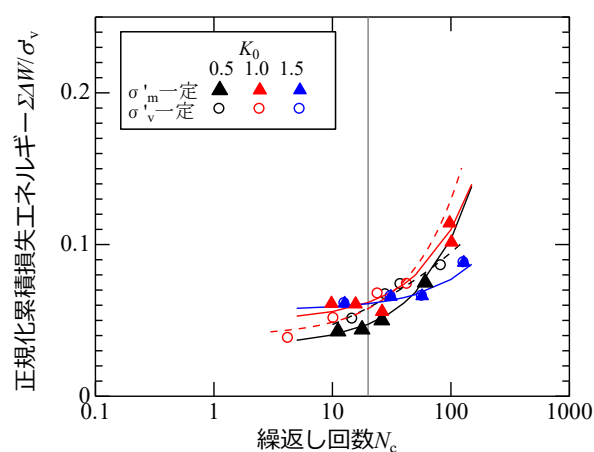


図 3 繰返し回数と正規化累積損失エネルギーの関係

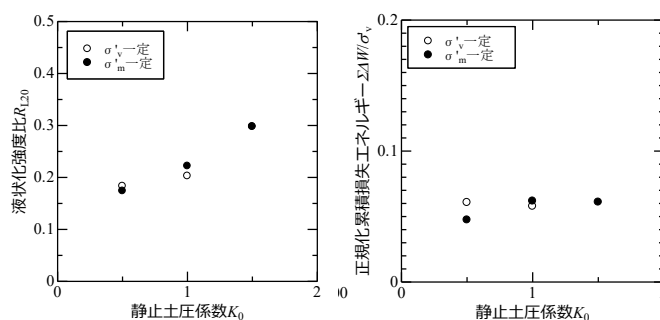


図 4 液状化強度比 R_{L20} — 静止土圧係数関係

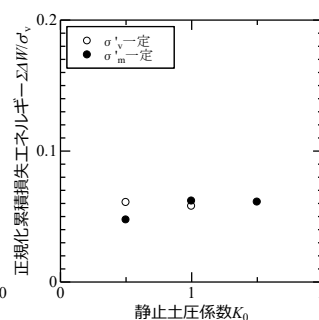


図 5 正規化累積損失エネルギー — 静止土圧係数関係

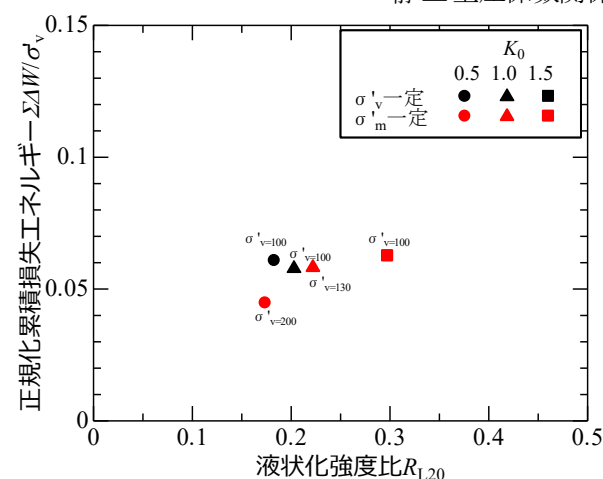


図 6 正規化累積損失エネルギー — 液状化強度比 R_{L20}