

細粒分混り砂の異方応力状態における損失エネルギーと体積ひずみの関係

東京電機大学 正 石川 敬祐、名誉 安田 進
 株式会社不動テトラ 正 原田 健二、正 出野 智之
 東京電機大学大学院 学生 ○町田 亘

1.目的

砂の繰返しせん断試験後の排水による体積ひずみとせん断中にあらわれる最大せん断ひずみとの間に良い相関があることが報告¹⁾され、この関係が実務的な液状化に伴う砂地盤の沈下量予測に用いられてきている。一方、近年精力的に液状化挙動を土中で損失するエネルギーを用いた実験的な適用性が述べられている²⁾。本研究では異方応力状態における繰返し中空ねじり試験を行い、損失エネルギーを指標とした液状化特性および繰返し载荷後の体積ひずみの関係について考察を行った。

2.液状化試験概要

試料には、細粒分混り砂（土粒子の密度 $\rho_s=2.678\text{g/cm}^3$ 、最大間隙比 $e_{\max}=1.177$ 、最小間隙比 $e_{\min}=0.617$ 、 $e_{\min}^*=0.459$ 、細粒分含有率 $F_c=8.4\%$ ）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。供試体寸法は高さ 10cm、直径 10cm、内径 6cm である。供試体作成は不飽和振動法を用い、相対密度 40%、70%を目標とした。なお相対密度は $e_{\min}^*$ を用いた値で定義した³⁾。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、静止土圧係数は平均有効主応力が 130kN/m^2 を基準に $K_0=0.5$ 、1.0、1.5 の各拘束圧で 30 分間の圧密を行った。圧密終了後、異方応力状態の試験では龍岡ら⁴⁾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比の関係を示す。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、供試体密度の増加に伴い液状化強度比も増加する。また静止土圧係数の増加に伴い液状化強度比も増加した。累積損失エネルギー ($\Sigma \Delta W = \int \tau_d \dot{\gamma}$) 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、初期鉛直拘束圧で除して正規化累積損失エネルギーと定義した。図 2 は各供試体の $\gamma_{DA}=7.5\%$ に至るときの正規

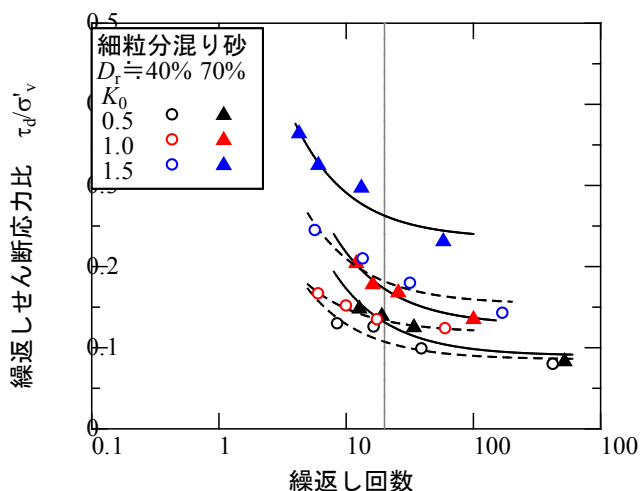


図 1 液状化強度曲線

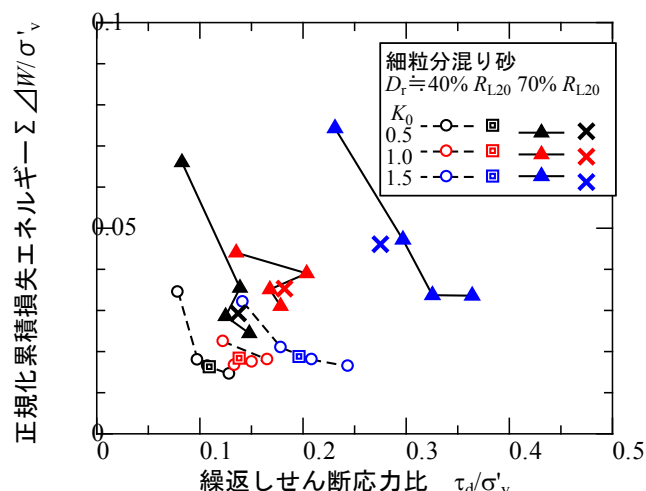


図 2 正規化累積損失エネルギーとせん断応力比の関係

キーワード 損失エネルギー，せん断応力比，体積ひずみ

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

化累積損失エネルギーと繰返しせん断応力比の関係を示す。供試体密度が緩詰状態の場合、液状化に至る際の累積損失エネルギーは繰返し回数が 100 回未満では各拘束圧で大きな違いは認められない。一方、供試体密度が中密になると同関係の傾きが認められ、各拘束圧で繰返しせん断応力比の違いにより累積損失エネルギーも異なることがわかる。同図中の×記号は中密供試体の各拘束圧の液状化強度比を示し、このデータに着目すると締固め改良により原地盤の密度増加と側方拘束圧増加の両効果を累積損失エネルギーで評価できることが期待される。

図 3 に体積ひずみと最大せん断ひずみの関係を示す。繰返し载荷中にあらわれる片振幅せん断ひずみの最大値を最大せん断ひずみ γ_{ma} と定義した。各供試体条件の違いによらず両者の関係は、既往の研究³⁾と同様に相関があることが確認された。完全液状化状態に達すると、緩詰状態での体積ひずみは約 4.0%~6.0%となり、中密状態での体積ひずみは約 1.5%~4.0%となる。これらの体積ひずみは、石原吉嶺によるきれいな砂の体積ひずみに対して若干大きい。この要因として本試験では細粒分を多少含んでいることが影響していると考えられる。図 4 に最大正規化累積損失エネルギーと最大両振幅せん断ひずみの関係を示す。緩詰状態では最大せん断ひずみが 20%~30%で正規化累積損失エネルギーは 0.1 付近に分布し、中密状態では最大せん断ひずみが 10%~20%付近で同エネルギーは 0.15~0.2 付近に分布し、密度の違いによる特徴をよく表している。図 5 に正規化累積損失エネルギーと体積ひずみの関係を示す。正規化累積損失エネルギーと体積ひずみの関係は、図 3 や図 4 から分かるように最大せん断ひずみと同様な傾向が認められ、完全液状化状態となる累積損失エネルギーを消費すると、緩詰状態の体積ひずみは 4.0%~6.0%となり、中密状態では体積ひずみが 1.5%~4.0%程生じることがわかった。これらより、累積損失エネルギーは液状化特性だけでなくその後の体積ひずみを推定する際のパラメータとなることが期待できる。

4.まとめ

本報告では累積損失エネルギーを指標に異方応力状態の液状化特性と体積ひずみについて検討を行った。細粒分混り砂の液状化特性に及ぼす密度や拘束条件の影響を累積損失エネルギーによって定量的に評価できることを確かめた。損失エネルギーと体積ひずみには相関があり、損失エネルギーが同程度であっても供試体密度が緩いと体積ひずみが大きくなる。また正規化累積損失エネルギーが 0.1 付近から体積ひずみは頭打ちとなる。なお、拘束条件の違いによる体積ひずみの明瞭な差異は認められない。

【参考文献】1)Kenji Ishihara, Mitsunori Yoshimine :Evaluation of Settlement in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.1, pp173-188, 1992, 2)JGS 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, 委員会活動報告書及びシンポジウム, pp1-2, 2019. 3)Kenji Ishihara, Kenji Harada, W.F.Lee, A.M.M.Safullah :Post-liquefaction settlement analyses based on the volume change characteristics of undisturbed and reconstituted samples, *Soils and Foundations*, Vol.56, No.3, pp533-546, 2016; 4)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

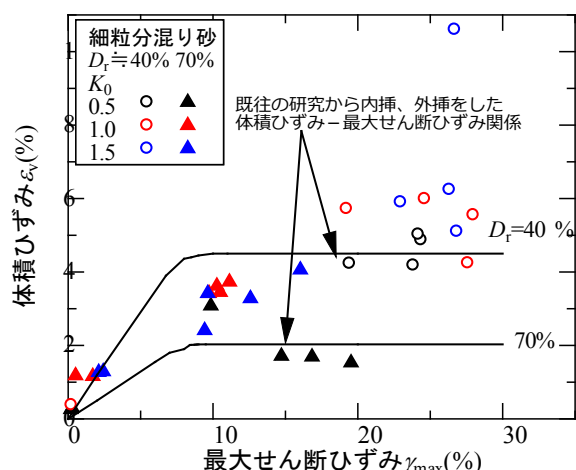


図 3 体積ひずみー最大せん断ひずみ関係

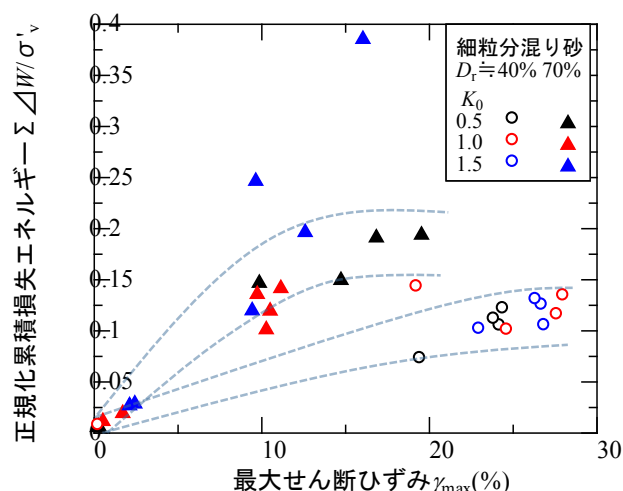


図 4 正規化累積損失エネルギーー最大せん断ひずみ関係

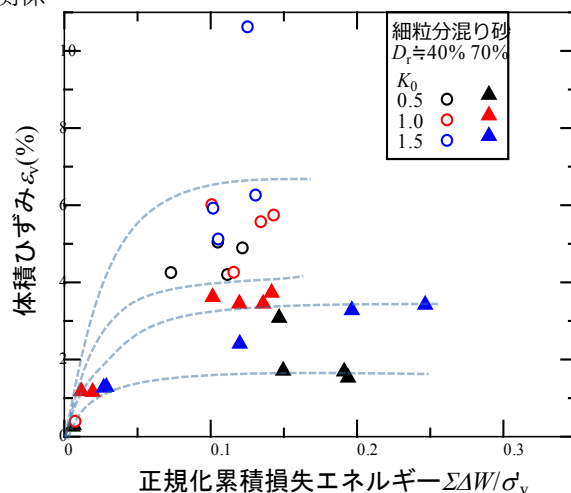


図 5 正規化累積損失エネルギーー体積ひずみ関係