

有効拘束圧を変化させた砂の中空ねじり液状化試験の内部損失エネルギーの検討

中央大学理工学部 正会員 國生 剛治
中央大学 学生会員 ○松隈 亮介
中央大学大学院 金子 陽輔

1. はじめに

従来、液状化判定法は力の釣り合いに基づいた応力法(FL法)が標準方法として使われてきた。一方で、2011年東北地方太平洋沖地震のように継続時間の長い海溝型地震や1995年兵庫県南部地震のように地殻内で起きる短く激しい揺れの直下地震に対しても統一的に液状化判定を行うためにエネルギー法が提案されているが、実務の場で使われるまでには至っていないのが現状である。本研究では、中空ねじりせん断試験機を用いて非塑性の細粒分を含む砂の非排水繰返しせん断試験を行い、過去に行った三軸試験との試験結果¹⁾と比較し、エネルギー法の根拠となる液状化に伴う損失エネルギーの発生のかたについて検討した。

2. 試験条件

試料は千葉県富津砂を用い、これに混合する細粒分には非塑性な石粉を用いた。表-1は試料の物理特性、図-1は試料の粒径加積曲線を表している。

試験は、相対密度 $D_r \approx 30\%$ 、 50% の条件で細粒分含有率 $F_c = 0 \sim 30\%$ と変化させて行った。試験装置は供試体内径60mm、外径100mm、高さ100mmの空圧制御式中空ねじりせん断試験機である。供試体はウェットタンピング法により所定の相対密度となるように作成し、 B 値が0.95以上であることを確認した後、有効拘束圧49, 98, 196kPa、背圧196kPaで等方圧密する。圧密終了後、応力制御にて载荷周波数0.1Hzの正弦波を加えて非排水繰返し载荷試験を行う。

3. 試験結果とエネルギー的分析

図-2は(a)中空ねじり試験の $D_r \approx 30$ と 50% 、(b)三軸試験の $D_r = 50\%$ において有効拘束圧を変化させた時の液状化強度曲線である。横軸の繰返し载荷回数 N_e は両振幅せん断ひずみ γ_{DA} が7.5%に達した液状化開始時点に対応している。液状化強度曲線を見ると、三軸よりも中空の方が液状化強度比が若干高いことが分かる。また、有効拘束圧が変化してもほぼ同じ強度強度比であり、有効拘束圧の液状化強度比に与える影響が小さい。

ここで試験結果から、損失エネルギー ΔW を算出する。繰返し载荷1サイクル中に供試体で失われる損失エネルギー ΔW は、図-3の斜線部分の履歴面積で表わされ、それらを1サイクル目から各サイクルまで累積することにより任意のサイクルまでの損失エネルギー ΔW を計算することができる。

図-4は横軸に有効拘束圧 σ'_c をとり、縦軸に液状化開始までの累積損失エネルギー ΔW をとった中空ねじりの試験結果を示している。この結果は D_r のずれによる累積損失エネルギーのずれを $D_r = 30, 50\%$ に合わせることに補正を行っている。多少のバラツキはあるものの、液状化開始までの累積損失エネルギー ΔW は有効拘束圧 σ'_c にほぼ比例しており、特に

表-1 試料の物理特性

F_c (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{smax} (g/cm ³)	ρ_{smin} (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}
0	2.741	1.632	1.316	1.083	0.680
5	2.739	1.717	1.323	1.070	0.595
10	2.742	1.777	1.302	1.106	0.543
20	2.739	1.886	1.261	1.172	0.452
30	2.729	1.902	1.171	1.330	0.435

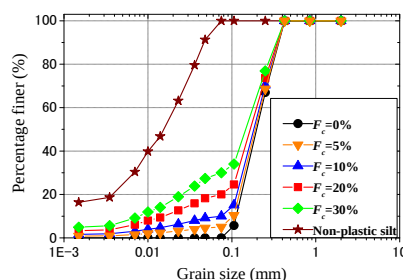


図-1 試料の粒径加積曲線

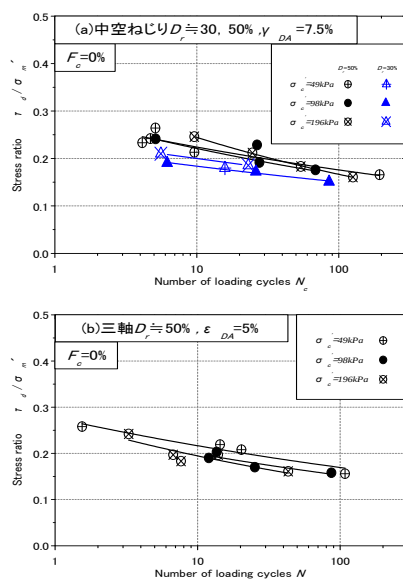


図-2 液状化強度曲線

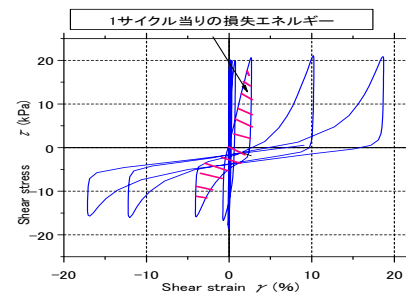


図-3 損失エネルギーの求め方

キーワード 損失エネルギー, 有効拘束圧, せん断ひずみ

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部都市環境学科地盤工学研究室 Tel 03-3817-1799

$D_r=30\%$ ではバラツキも少なく、その関係性が顕著に出ていることが分かる。これにより累積損失エネルギーを有効拘束圧で基準化することの妥当性が示されている。

図-5は、得られた液状化までの累積損失エネルギーを有効拘束圧 σ'_c で除して無次元化した基準化損失エネルギー $\Delta W/\sigma'_c$ を横軸にとり、縦軸には対応する水圧上昇率 $\Delta u/\sigma'_c$ とせん断ひずみ γ_{DA} (三軸の場合には軸ひずみをポアソン比 $\nu=0.5$ として $\gamma_{DA}=(1+\nu)\epsilon_{DA}$ とする)をとった $F_c=0\%$ のクリーンサンドについての有効拘束圧を変化させた実験結果を示している。(a)は三軸試験による $D_r=50\%$, $F_c=0\%$ の条件、(b)は中空ねじりせん断試験の $D_r=30, 50\%$, $F_c=0\%$ の条件の試験結果である。結果には良い整合性があり、特に水圧上昇は D_r や σ'_c によらず $\Delta W/\sigma'_c=0.02$ かそれ以下でほぼ100%上昇する良い相関関係がある。 $\Delta W/\sigma'_c$ とせん断ひずみの関係は D_r の大きさにほぼ同じ経路で単調増加しているものの、(a)三軸と(b)中空ねじりで同じ $\Delta W/\sigma'_c$ に対するひずみを比較した場合(b)中空ねじりの方がせん断ひずみが小さくなっている。以上より、損失エネルギーは液状化発生以降も含めて液状化破壊過程を表す非常に良い指標であると言えると共に、有効拘束圧で基準化できると言える。

図-6は中空ねじり試験によって得られた両振幅せん断ひずみが $\gamma_{DA}=3, 7.5, 15\%$ に達するまでの $\Delta W/\sigma'_c$ と繰返し回数 N_r を縦軸と横軸にとって、両対数グラフ上にプロットしたものである。(a)は $F_c=0\%$ の試料で有効拘束圧を $\sigma'_c=49\sim 196\text{kPa}$ に変化させたもので、(b)は $\sigma'_c=98\text{kPa}$ 一定で、 F_c の量を5~30%に変化させたものである。同じ D_r の条件で繰返し応力比 R_L の異なる試験結果を同一記号のプロットで表し折線で結んでいる。細粒分の混ざっている試料については多少のバラツキはあるものの、 N_r に関わらず縦軸のエネルギー値はほぼ一定であると言える。つまり、 D_r 及び F_c が同じ条件であれば、あるひずみ値に至るまでの損失エネルギーは、継続時間や繰返し回数によらずほぼ一定である。このことから、図-2のような液状化強度曲線は、等損失エネルギー線を表していることが言える。

4. まとめ

- 有効拘束圧と損失エネルギーの間には比例的関係が見られ、損失エネルギーを有効拘束圧で基準化して使用することの根拠が示された。
- 三軸試験と中空ねじりせん断試験から得られた $\Delta W \sim \Delta u$, $\Delta W \sim \gamma_{DA}$ 関係には整合性があり、有効拘束圧が変化しても損失エネルギーや過剰間隙水圧を有効拘束圧で基準化すると同じような関係性を示した。
- 以上より、損失エネルギー ΔW によって、継続時間や繰返し回数によらず水圧上昇とひずみ発生が一意的に評価でき、エネルギーによる液状化判定法の根拠が示された。

参考文献：1) 國生剛治(2012):「内部損失エネルギーと地震波動エネルギーによる液状化判定法の可能性」第47回地盤研究発表会 2) 加藤亮(2011):「砂質土の液状化強度に及ぼす初期せん断応力の影響についての三軸試験」中央大学大学院理工学研究科修士論文 3) 國生剛治(2012):「エネルギー的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, 463-475.

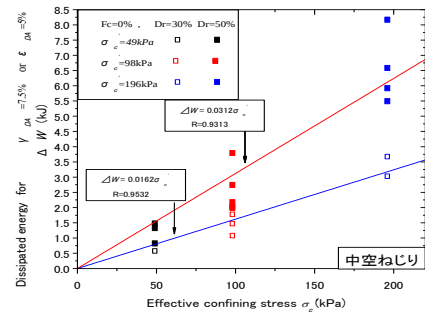


図-4 有効拘束圧と損失エネルギーの関係

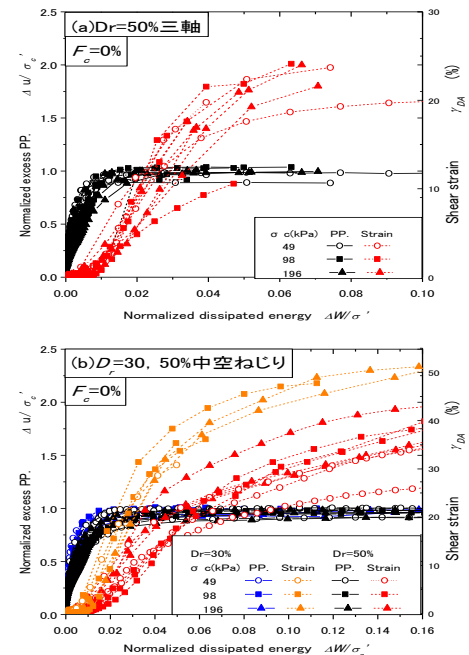


図-5 基準化損失エネルギーに対する水圧上昇率とひずみの関係

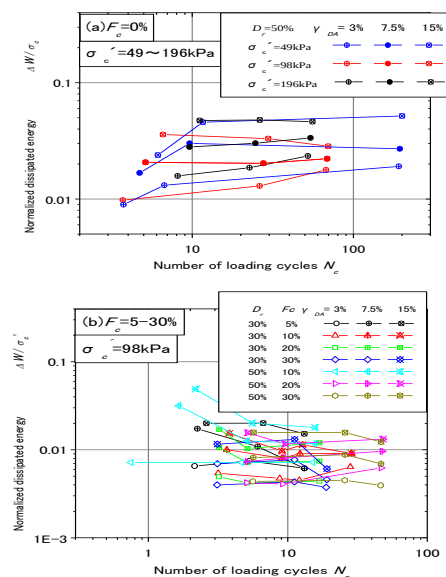


図-6 $\gamma_{DA}=3, 7.5, 15\%$ に達するための繰返し回数と損失エネルギーの関係