

累積損失エネルギーによる液状化後の体積ひずみ評価

五洋建設(株) 正会員 西澤元良
 新潟大学工学部 正会員 保坂吉則 大川秀雄

1. はじめに

これまで液状化後の沈下量の評価指標として履歴ひずみに注目した研究¹⁾がなされてきた。しかし履歴ひずみでは試料条件の違いによって一元的に体積変化を評価できないという問題が存在する。一方、繰返し載荷時の応力-ひずみ曲線より得られる累積損失エネルギーを用いて液状化の評価を行った研究事例²⁾が近年多く見られる。累積損失エネルギーとは繰返し載荷時の応力-ひずみ曲線のループ内の面積の累積値であり、三軸非排水条件では以下の式で表わされる。

$$\sum \Delta W_i = \int \sigma_d d\varepsilon_a \quad (1)$$

筆者らは振動三軸試験機を用いた液状化試験を実施し、累積損失エネルギーとその後再圧密により発生する体積ひずみに比例関係が成り立つことを明らかにし、更にこれを初期拘束圧で除した正規化累積損失エネルギーを用いることで、初期拘束圧によらず体積ひずみを評価できることを示した³⁾。

前報では試料や試験条件が限られていたので、今回より広い範囲に条件を拡大して三軸液状化試験を行い、更なるデータの蓄積を得たのでその結果を報告する。

2. 試験概要

2.1 試験条件

液状化後の体積変化は液状化強度と同様に、初期拘束圧、相対密度、試料の種類、細粒分含有率、過圧密、供試体作成法等の影響が考えられ、これらを検討項目として実験を計画した。

用いた試料は阿賀野川砂および豊浦砂の2種類のきれいな砂と、豊浦砂に新潟県加茂産の粘土を質量比で85:15, 70:30(それぞれ砂:粘土)で混合した細粒分を含む試料2種類(それぞれTK15, TK30と呼ぶ)の計4種類である。各試料の物性値を表-1に、また粒径加積曲線を図-1に示す。試料ごとの詳細な条件は表-2に示した。

表-1 試料の物性値

試料名	阿賀野川砂	豊浦砂	TK15	TK30
土粒子密度(g/cm ³)	2.671	2.648	2.643	2.631
細粒分含有率(%)	0.3	0.2	10.7	23.3
平均粒径(mm)	0.54	0.18	0.17	0.16

表-2 試料ごとの試験条件

試料	Dr(%)	作製法	OCR	F.C.(%)
阿賀野川砂	45	空中落下法	1	0.3
	55	空中落下法	1	0.3
	65	空中落下法	1	0.3
	80	空中落下法	1	0.3
豊浦砂	45	空中落下法	1	0.2
	55	空中落下法	1	0.2
	90	水中振動法	1	0.2
	e=0.78	空中落下法	1	10.7
TK15	e=0.75	空中落下法	2	10.7
	e=0.73	空中落下法	4	10.7
TK30	e=0.70	空中落下法	1	23.3

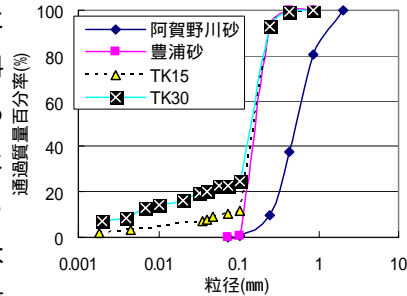


図-1 試料の粒径

2.2 試験方法

三軸供試体は 50 mm、h 100 mmである。阿賀野川砂、TK15、TK30は空中落下法により供試体を作製した。豊浦砂では空中落下法、不飽和突固め法、水中振動法の3パターンで供試体を作製し、空中落下法と不飽和突固め法により同一の相対密度の供試体を作製して比較を行った。非常に高密な供試体は水中振動法により作製した。不飽和突固め法は含水比20%に調整した試料を、地盤工学会基準の締固め試験のA法と同等の単位体積あたりエネルギーをランマーで与え、供試体を作製する方法である。水中振動法はモールドに入れた飽和試料を、側方から木槌で打撃を加えることによって所定の密度に調整する方法である。

完全飽和させた供試体を98kPaで等方圧密をした後、非排水状態で応力振幅一定の繰返し載荷を加え、所定の軸ひずみを発生させた後に載荷を停止する。その後排水を行い、その排水量より体積ひずみを算定した。

3. 試験結果

試験結果は(1)式の累積損失エネルギーを初期拘束圧 σ_0' で除した正規化累積損失エネルギーによって体積ひずみ評価を行っている。図-2に相対密度をパラメータに用いた試験結果を示す。これを見ると相対密度の増加に伴い正規化累積損失エネルギー-体積ひずみ関係の傾きが小さくなっていることがわかる。ここで、この比例定数を今回新たにエネルギー圧縮係数(E_v)と定義すると、体積ひずみとの関係は以下の式

キーワード：体積ひずみ、液状化、ひずみエネルギー

連絡先：新潟県新潟市五十嵐2の町8050 新潟大学工学部建設学科 TEL025-262-7032 FAX025-262-7032

で示することができる。

$$\varepsilon_v = E_c \times \frac{\sum \Delta W_i}{\sigma'_0} \quad (2)$$

このエネルギー-圧縮係数と相対密度の関係を示したものが図-3である。これを見るとエネルギー-圧縮係数は相対密度の増加に伴って指数的に減少していることがわかる。

図-4には豊浦砂の試験結果を示す。いずれの場合も正規化累積損失エネルギーと体積ひずみには比例関係が成り立っている。しかし、同じ密度でも作製法によって傾きが異なることがわかる。また、作製法は統一されていないものの、高密度な程エネルギー-圧縮係数が小さい傾向は阿賀野川砂と同様であった。

図-5に過圧密比毎の正規化累積損失エネルギー-体積ひずみ関係を示す。密度条件と同様に、過圧密比の増加に伴ってエネルギー-圧縮係数が小さくなる傾向が見て取れる。

4. 液状化後の体積ひずみ評価

さて、相対密度や過圧密比の増加は液状化強度の増加に寄与することが知られている。このことを考慮し、上記の結果から総合的に推測するに、エネルギー-圧縮係数は液状化強度と関連があることが想像される。そこで、全ての試験結果のエネルギー-圧縮係数と液状化強度 R との関係の一つにまとめたものが図-6である。これを見るとエネルギー-圧縮係数-液状化強度は供試体条件に依らず高い相関のあることがわかり、これを定式化して(2)式に代入することにより、液状化後の体積ひずみは、

$$\varepsilon_v = \left(e^{\frac{0.181-R}{0.052}} \right) \times \left(\frac{\sum \Delta W_i}{\sigma'_0} \right) \quad (3)$$

のように、地震時の累積損失エネルギーと液状化強度から評価することができた。この式は液状化強度の増強が液状化発生を抑制するだけでなく、その後の変形挙動をも抑制することを示している。

5. まとめ

液状化過程で生ずる累積損失エネルギーと体積ひずみには比例関係が成り立つことがわかった。ただし、試料の種類、相対密度、供試体の作製法、初期拘束圧、過圧密比などの各条件によりその比例定数は異なる。今回新たにエネルギー-圧縮係数と定義したこの比例定数は、試料、試験条件に依らず、液状化強度と高い相関があることがわかった。またこの関係は液状化強度の上昇と伴にエネルギー-圧縮係数が指数的に減少する傾向を示し、これを定式化して液状化後の体積変化量の評価式を提案することができた。

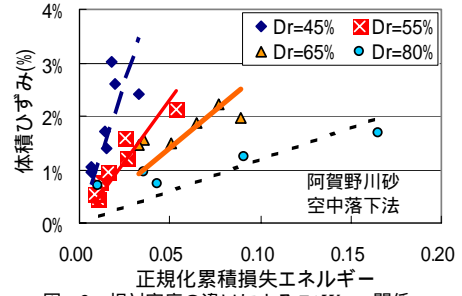


図-2 相対密度の違いによる $\sum \Delta W - \varepsilon_v$ 関係

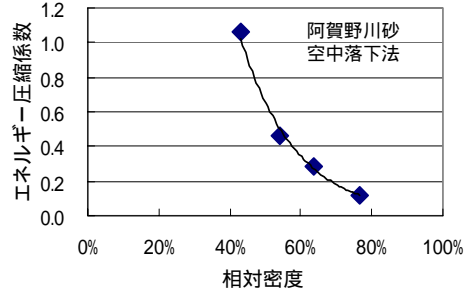


図-3 エネルギー-圧縮係数-相対密度関係

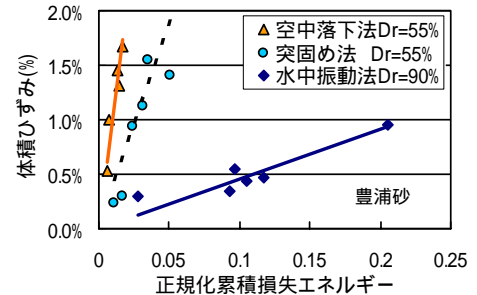


図-4 供試体作製法の違いによる結果

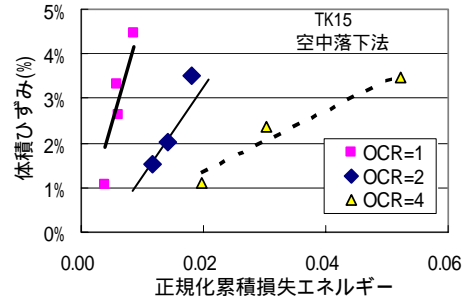


図-5 過圧密比の違いによる $\sum \Delta W - \varepsilon_v$ 関係

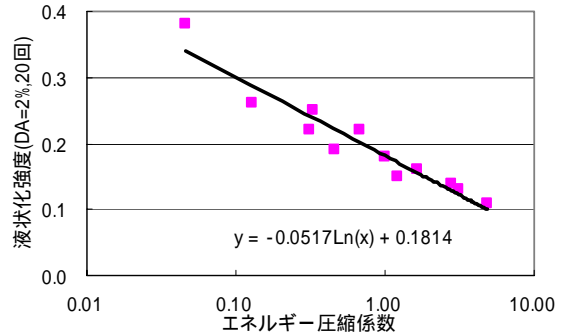


図-6 エネルギー-圧縮係数-液状化強度関係

<参考文献>

- 1) Ishihara, K. & Yoshimine, M. : " Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes " Soils and foundations Vol.32, No.1, pp.173-188
- 2) 例えば、片田敏行他：ひずみエネルギー-蓄積効果を用いた飽和砂地盤の液状化過程の考察、土木学会論文集、第388号/ 8 (1987)
- 3) 西澤元良他：“損失ひずみエネルギーを用いた液状化後の沈下挙動評価” 第61回土木学会年次学術講演会，pp553～pp554 (2001)