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

新潟大学大学院　学生会員　○西澤元良
新潟大学工学部　正会員　保坂吉則
新潟大学工学部　正会員　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。一方ひずみエネルギーの概念から土の物性を考える研究[2)]が近年多く見られる。エネルギーの観点から液状化現象を扱った研究では、載荷中に発生するひずみエネルギーと過剰間隙水圧発生状況について考察したものや液状化解析の一手段としたものが多く見られるが、液状化後の変形量(沈下量)評価に対する検討がなされていないのが現状である。

そこで今回繰返し三軸試験機を用い液状化試験を行い、それによって得られる応力－ひずみ関係（ヒステリシスループ）から損失ひずみエネルギー求め、これによる沈下量評価を試みた。

２．実験概要

試料として豊浦標準砂のみの試料 S とこれに圧縮性の高い加茂粘土を質量比で 30%の割合で混合した試料 T の二種類を用いた。試料の物性値は表-１の通りである。供試体はϕ　50 ㎜、h　100 ㎜の円柱供試体を空中落下法により作成し、背圧を加え脱気水で飽和させたものを用いる。

表-1　試料の物性値

	試料 S	試料 T
土粒子密度 ρ_s（g／cm³）	2.648	2.631
細粒分含有率 F_c（%）	0.2	23.3
供試体作成時の間隙比 e	0.75～0.8	0.75～0.85

初期応力状態を実験条件とし、49、98、147kPa の３種類の初期拘束圧で等方圧密を行う。それぞれの初期拘束圧条件下で供試体を非排水状態とし、応力比　0.12 で一定振幅の繰返し荷重を加えた。所定の軸ひずみが発生した後載荷を停止し、排水を行なって体積ひずみを求めた。この体積ひずみを液状化後の沈下量と等価なものと考える。また載荷時のヒステリシスループを（１）式で積分してループ内の面積を求める。これを損失ひずみエネルギーΔW（図-1）と定義し、載荷の全過程(図-２)に関して計算を行い、この値と液状化後の体積ひずみの比較を行った。

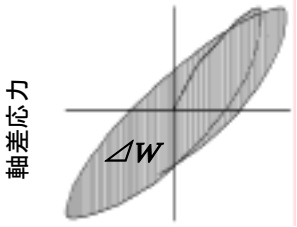

図-1　損失ひずみエネルギー

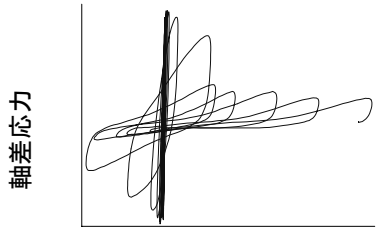

図-2　ヒステリシスループ

$$\Delta W = \int \sigma_d d\varepsilon_a \qquad (1)$$

３．実験結果と考察

3.1 試料による比較

図-３に 98kPa の等方応力条件における液状化時の累積損失ひずみエネルギーと、液状化後の体積ひずみの関係を示す。これを見ると試料の違いによらず損失ひずみエネルギーと体積ひずみはほぼ比例関係であることがわかる。またこの比例関係は試料の違いを問わず成り立っていることも見て取れる。このことは既往の研究[3)]に用いられているパラメータである履歴ひずみと異なる点である。このパラメータ値は増加しても体積ひずみが収束する傾向（図-４）を示し、また試料により異なった関係を示すのに対して、損失ひずみエネルギーではそのような傾向が見られない。また試料 T において試料 S より損失ひずみエネルギーが大きくなっているが、これは試料 T がより圧縮性に富んだ試料であるため、塑性

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　FAX025-262-7021

ひずみが発生しやすい。そのため結果として損失ひずみエネルギー、またそれに比例し体積ひずみとも増加したものと考えられる。

3.2 初期拘束圧による比較

初期拘束圧が異なる場合でも損失ひずみエネルギーと体積ひずみに比例関係が見出せるが、その傾きは図-５のようにそれぞれ異なることがわかる。初期拘束圧が増加すると、同程度の体積ひずみを発生させるために必要な損失ひずみエネルギーも増加する傾向となった。これは初期拘束圧が大きくなる程、液状化を発生させ、同程度のせん断ひずみを生じさせる繰返しせん断力または繰返し回数もそれに比例して大きくなるためであると考えられる。そこで図-６に初期拘束圧の違いによるヒステリシスループの比較を行ってみた。今回の実験では載荷時の応力比と密度をほぼ一定の条件としたため、図-６を見てわかるとおりループはほぼ相似形を示している。そのため初期拘束圧が大きいほど載荷時の軸差応力は大きくなる。その結果、発生したひずみが同じレベルであれば、縦方向にループが大きくなるため損失ひずみエネルギーも大きくなる。

そこで載荷における損失ひずみエネルギーを初期拘束圧で除して正規化したものを横軸にとり比較を行ってみた（図-７）。これを見ると、初期拘束圧の大きさに関わらず、また試料にもよらず一意的な比例関係で近似することができた。このため地震時に地盤内で消費された損失ひずみエネルギーは、液状化後の沈下量を評価するに適したパラメータだと考えることができる。

4.まとめ

本研究を通し以下のことが明らかになった。

- 試料、初期拘束圧の違いを問わず液状化中に損失したひずみエネルギーと液状化後の体積ひずみは比例関係を持つ。
- 細粒分を含む試料程損失ひずみエネルギーが大きく、体積ひずみも大きな値を示す。
- 同程度の沈下量を発生させるには初期拘束圧が高い程、より大きな損失ひずみエネルギーを必要とする。
- 等方条件では、損失ひずみエネルギーを初期拘束圧で除し正規化することで、拘束圧に依らず体積ひずみを評価することができた。

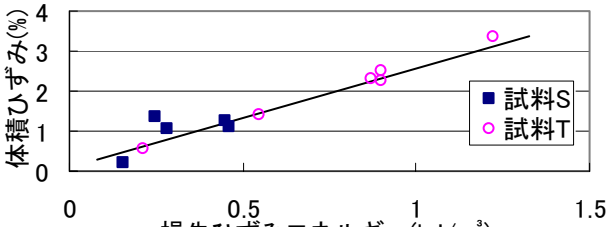

図-3試料での比較（98kPa）

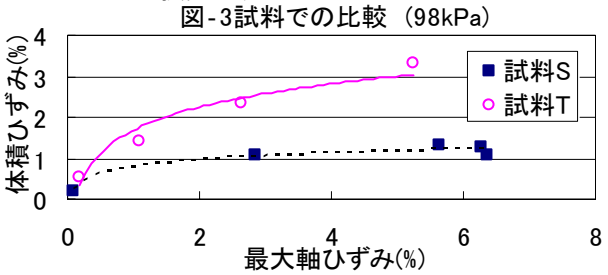

図-4試料での比較（98kPa）

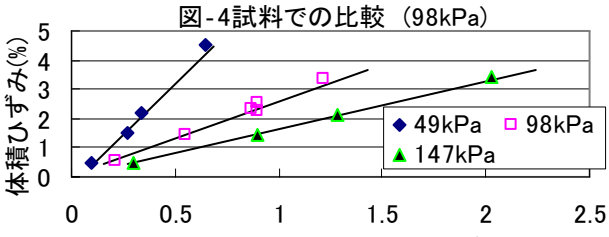

図-5初期拘束圧での比較（試料T）

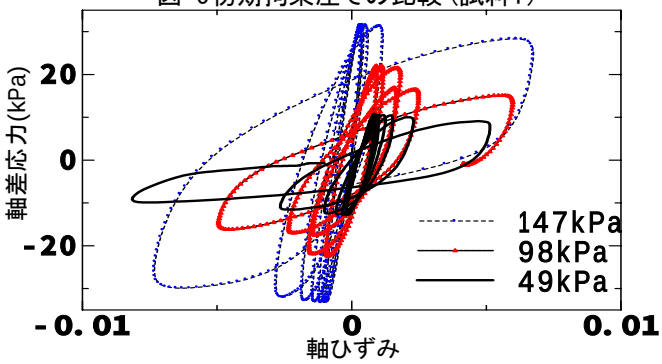

図-6　初期拘束圧の違いによるヒステリシスループ比較

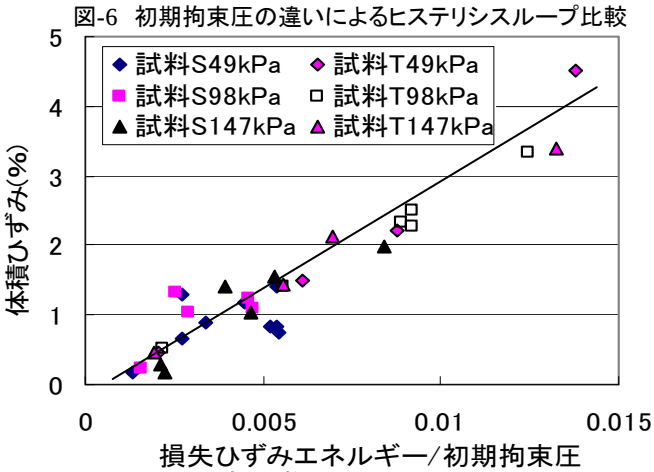

図-7初期拘束圧で正規化した結果

<参考文献>

1) Ishihara, K. ＆Yoshimine, M. （1992）:“ 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(1987)：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/Ⅲ－８

3) 例えば、Nagase, H.＆Ishihara, K.(1988): “ Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes ” Soils and foundations Vol.28,No.1,pp.65-76