

I-603

液状化地盤でのエネルギー蓄積量と過剰間隙水圧に関する一考察

(株)フジタ 技術研究所 正会員 古賀重利 中野浩之 小林範之 斉藤悦郎

1. はじめに

飽和砂の破壊程度を表す指標として、作用する地震力の大きさと繰り返しの効果を考慮するひずみエネルギーに着目した研究に星谷らの解析手法¹⁾や片田らの振動三軸によるワライ実験²⁾がある。本文では模型振動実験結果を利用して液状化時に地盤内に蓄積されるエネルギー量を算出し過剰間隙水圧との関係を調べた。具体的には前報³⁾で求めた地盤の動特性値の時間変化から等価ひずみエネルギーの算出を行い、このエネルギー蓄積量を実験で得られた過剰間隙水圧の発生と比較検討した。

2. 飽和砂地盤の模型実験

模型地盤は、振動台上のせん断土槽(幅120cm,奥行き60cm,高さ60cm)内に浜岡砂($D_{50}=0.29\text{mm}$)を用いて相対密度50%と70%の飽和地盤を水中落下法により作製し、不規則波により加振した。模型寸法、実験ケースなど詳細は前報³⁾を参照されたい。

3. エネルギー蓄積量算出と過剰間隙水圧比の関係

振動中に地盤で消費される力学的エネルギーの中でも破壊現象に重要な指標となるのはひずみエネルギーである。振動系のひずみエネルギーを正確に算出する方法の一つに要素試験を用いたワライ載荷実験²⁾により破壊付近での応力ひずみ関係を求めることが考えられるが、今回のような地盤系全体をシミュレートする土槽振動実験では地盤の復元力の計測が難しい。そこで次式に示す一自由度系のエネルギー平衡式を考え、

$$\int m\ddot{x}(t)\dot{x}(t)dt + \int c\dot{x}(t)\dot{x}(t)dt + \int R(t,x)\dot{x}(t)dt = -\int m\ddot{y}(t)\dot{x}(t)dt$$

この中の復元力 R と減衰 c の項に前述で等価線形系の仮定のもとに軟化する液状化地盤を表す物性値として時間関数で求めた等価固有円振動数 $\omega_{eq}(t)$ と等価減衰定数 $h_{eq}(t)$ を与え、減衰エネルギー E_c (左辺第2項)とひずみエネルギー E_r (左辺第3項)を算出した。これは本来、地盤の非線形復元力特性 $R(t,x)$ から算出されるべきひずみエネルギーを等価線形系に置き換えた $\omega_{eq}(t)$ と $h_{eq}(t)$ を用いることによって E_c と E_r に分散したような形になるため、ここでは (E_c+E_r) を等価ひずみエネルギーと呼ぶことにする。具体的には復元力 R を $m\cdot\omega_{eq}(t)^2\cdot x(t)$ 、減衰 c を $2m\cdot h_{eq}(t)\cdot\omega_{eq}(t)$ とし、次式によって算出する。

$$\text{等価ひずみエネルギー} = \int 2m\cdot h_{eq}(t)\cdot\omega_{eq}(t)\cdot\dot{x}(t)^2dt + \int m\cdot\omega_{eq}(t)^2\cdot x(t)\cdot\dot{x}(t)dt$$

ここで $x(t)$ と $\dot{x}(t)$ は実験によって求められた変位波形とその微分値、または加速度波形の積分値を用いる。図-1はCASE5.4, CASE5.5そしてCASE5.6それぞれの場合について算出した等価ひずみエネルギーの蓄積量の経時変化である。図には地盤のほぼ中心で計測されたU3地点の過剰間隙水圧比の経時変化($U3/\sigma_v'$)を同時に示した。等価ひずみエネルギーの蓄積量は、過剰間隙水圧の発生・上昇の程度と良く対応していることがわかる。ここで等価ひずみエネルギー蓄積量を過剰間隙水圧の上昇を伴う地盤の軟化現象として地盤内で蓄積かつ消費されたエネルギー量と考え、等価ひずみエネルギーの蓄積状況と液状化の進行状況との関係を調べた。図-2は図-1の時刻軸を消去して両者の関係を求めたものである。各ケースを比較すると過剰間隙水圧比の上昇の程度は等価ひずみエネルギー蓄積量に依存しており、この関係は各ケースで共通してほぼ一本の線上にのっていることがわかる。この結果は $D_r=50\%$ の地盤で同じ周波数帯域の入力波を用いたCASE5.1~CASE5.6の場合について同様であった。このことは一定の条件下の地盤では等価ひずみエネルギーの蓄積量を知ることにより過剰間隙水圧比を推定できる可能性を示唆している。実際には地盤内の深さ方向で過剰間隙水圧比の値は異なるが、この地盤系の液状化の程度を示す値を地盤のほぼ中心に位置するU3地点の過剰間隙水圧値で代表させた場合、完全液状化には、単位断面積当たり約 $6.0\text{ gf}\cdot\text{cm}$ ($5.88\times 10^3\text{ erg}$)の等価ひずみエネルギーの蓄積量(単位体積に換算するとその値は約 $1\times 10^2\text{ erg}/\text{cm}^3$)が必要になることがわかる。

次にこの関係をより明確な条件下で調べるために同じ浜岡砂を用いて振動三軸試験を実施し履歴ループの面積から定量的にひずみエネルギーの蓄積量を算出してみた。供試体は有効拘束圧 $1.0\text{ kgf}/\text{cm}^2$ 下の条件下で相対密度

50% ($\rho_t=1.94\text{gf/cm}^3$) と70% ($\rho_t=1.98\text{gf/cm}^3$) のものを作製し、軸荷荷は周期約3秒、最大応力 0.4kgf/cm^2 の不規則荷重とした。破壊付近になるとループが開き面積算定が難しいため今回は間隙水圧比が0.8程度までの値を求めた。Dr=50%の場合の実験結果の一部を図-3から図-5に示す。これらの図から本条件下では単位体積あたりDr=50%の場合約 $5 \times 10^4 \text{ erg/cm}^3$ (5000 J/m^3) のエネルギーを液状化までに要することがわかる。また過剰間隙水圧の上昇も前述の土槽実験の場合と同様にエネルギー量に関係した直線的関係があることがわかる。

5. おわりに

地盤内で蓄積されたエネルギー量の観点から飽和砂地盤の過剰間隙水圧の上昇過程を考察した。その結果、過剰間隙水圧の上昇はエネルギー蓄積量に深く関係しており、一定条件下では両者の関係はほぼ一つの線上にのる傾向が見られた。今後この関係を種々の条件下の要素試験から詳細に検討していく予定である。

- 【参考文献】1) 星谷, 齊藤: 液状化を伴う地盤の等価線形化, 土木学会論文集, 第340号, 1983年12月
 2) 片田他: ひずみ蓄積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, 1987年12月
 3) 小林他: 液状化地盤の動特性の推定, 第47回土木学会年次学術講演会, 1992年

表-1 等価ひずみエネルギー蓄積量 (間隙水圧の最大時刻まで)

実験ケース	ΣE_r	ΣE_c	ΣE_{r+c} (gf·cm)
5.2	0.5	0.3	0.8
5.3	0.7	0.6	1.3
5.4	1.4	1.1	2.5
5.5	1.6	2.1	3.7
5.6	1.9	2.5	4.4

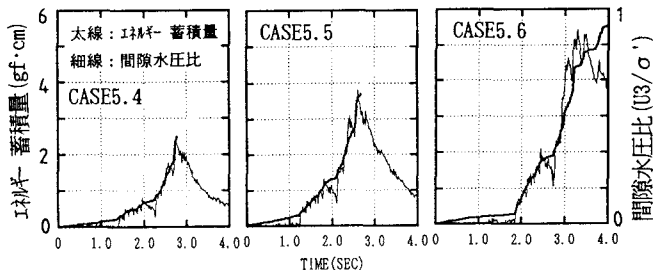


図-1 等価ひずみエネルギーの蓄積状況 (CASE5.4, 5.5, 5.6)

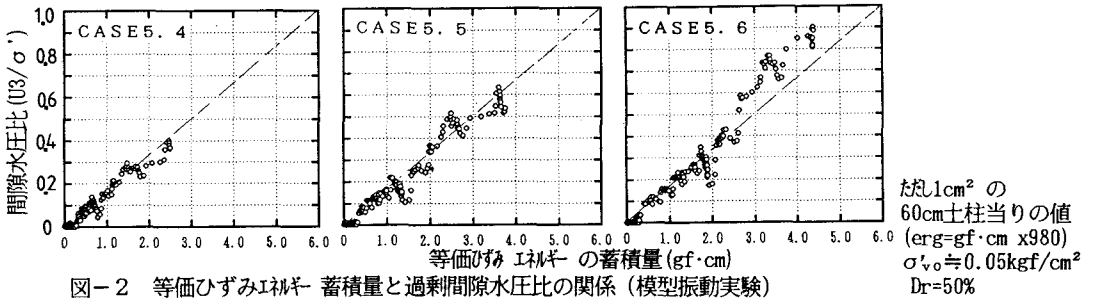


図-2 等価ひずみエネルギー蓄積量と過剰間隙水圧比の関係 (模型振動実験)

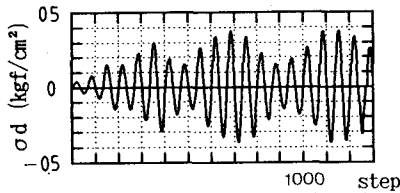


図-3 軸応力波形 (振動三軸試験)

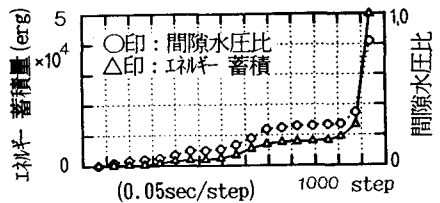


図-6 過剰間隙水圧比と消費エネルギーの関係 (振動三軸試験) Dr=50%, $\sigma'_0=1\text{kgf/cm}^2$

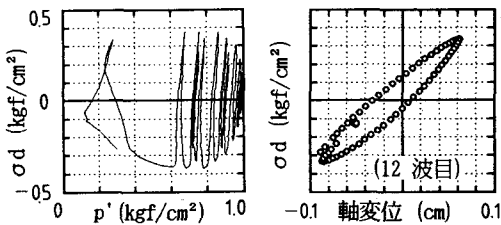


図-4 有効応力経路

図-5 軸応力と軸ひずみ