

個別要素法による等体積繰り返しせん断過程における 内部エネルギーの応力経路依存性に関する検討

長岡技術科学大学大学院 非会員 柳 洸聖
長岡技術科学大学 正会員 志賀 正崇
長岡技術科学大学 正会員 池田 隆明

1. 研究背景

地盤の液状化は、地盤の支持力低下や変形、沈下を引き起こし、構造物の倒壊や損壊によって人命や財産に深刻な被害を及ぼす。近年では液状化発生予測の発展により、直接的な被害は減少しているものの、ライフラインの途絶被害は経済社会により深刻な影響を与える。

1964年の新潟地震以降、液状化発生の予測手法に関して多くの研究が行われてきた。予測手法の中でも多く用いられているのが簡易法(応力法)と呼ばれる手法である。簡易法の代表例として、ボーリング調査によって得たN値と粒度、地下水位から液状化に対する抵抗率を求める F_L 法が挙げられるが、主に地震動の特性が考慮できない点が過大であり、2013年の土木研究所の検討結果¹⁾では、液状化すると判定されたものの実際には液状化しなかった、いわゆる空振り評価の地点が多く存在した。

こうした多様な地震動に対して液状化判定を行うための新たな簡易法として、エネルギー法が提案されている²⁾。このエネルギー法は、液状化を引き起こす地震波の速度時刻歴波形から計算される上昇エネルギーと、液状化強度比から回帰式を用いて計算される液状化エネルギー容量との比から計算される。

この液状化エネルギー容量の概念は、液状化中の入力仕事や損失エネルギーが応力経路に依存しないという既往研究を前提としている。例えば Ishihara and Towhata³⁾は、砂質土における過剰間隙水圧の発生を定量的に検討するため中空ねじり試験を行い、試験結果に基づき単位体積あたりの累積せん断仕事量と間隙水圧との相関を調査した。その結果、砂質土の繰り返しせん断時において、せん断仕事量と間隙水圧の間には、せん断応力経路に依存しない固有の関係が存在していることを明らかにした。Jafarian et al.⁴⁾は、2つの校正パラメータを持つ単純な間隙水圧

(PWP)モデルを開発し、中空ねじり試験を行い、ひずみエネルギーの概念を用いて砂の液状化抵抗性と残留間隙水圧を評価した。その結果、液状化を発生させるために必要な累積ひずみエネルギーが応力経路に依存せず、試料の相対密度および初期有効応力のみによって決定されるという関係式を導き出した。

前述した既往研究では、液状化中の入力仕事や損失エネルギーは応力経路に依存しないという関係については明らかにされているものの、なぜ応力経路に依存しないのかについて検討された既往研究は見られない。そこで本研究では、液状化過程における損失エネルギーの応力経路非依存性に着目し、個別要素法を用いた粒状体の内部エネルギーの変化から、その性質について議論する。

2. 解析手法

本研究では、個別要素法のフレームワークとして Yade を用いた。Yade はオープンソースであり、計算部分を C++、それ以外の部分を Python で書かれている。Python において設定した初期パラメータの値を次ページの表-1 に示す。また、内部エネルギーの変化を見るために変化させるせん断応力振幅比と目標間隙比の組み合わせについて、次ページの表-2 に示す。Yade のバージョンは 2022.01a である。

本研究では、Cundall and Strack⁵⁾で提案された接触モデルを適用した。粒子に作用する圧縮力 F_n は引張を正として、以下の式(1)で表される。

$$F_n = \min(k_n u_n, 0) \quad (1)$$

ここで、 k_n は鉛直方向の弾性係数、 u_n は鉛直方向のひずみである。また、せん断力 F_s については次の式(2)で表される。

$$F_s = \begin{cases} k_s u_s & \text{if } |k_s u_s| < |F_n| \tan \phi \\ F_n \tan \phi & \text{if } |k_s u_s| \geq |F_n| \tan \phi \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 k_s はせん断方向の弾性係数、 u_s はせん断方向のひずみ、 ϕ は粒子同士の摩擦角である。また、鉛直方向の弾性係数とせん断方向の弾性係数の比 ν を $\nu \equiv k_s/k_n$ と定義する。

供試体は、幅(x)、奥行き(y)、高さ(z)をそれぞれ7.5 cm × 7.5 cm × 2.5 cmの直方体で模擬し、速度勾配テンソルを設定することで鉛直せん断の9方向にひずみを制御できるようになっている。また、全ての境界を周期境界条件とすることで境界の影響を無視し、シミュレーション時には重力を作用させないようにしている。

供試体の状態については、粒子の生成、拘束圧の増加、間隙比の増加、繰り返しせん断の順で移行し、特に繰り返しせん断時においては、+ z 方向を法線ベクトルに持つ面を $\pm y$ 方向に動かす速度勾配テンソルを与えることで、単純せん断変形下での挙動を確認した。反転条件はせん断応力の大きさで定義し、終了条件は両振幅せん断ひずみが増加しなくなるか、もしくは50%に到達した状態とした。

表-1 設定初期パラメータ

パラメータ名	設定値
粒子密度	2.65 g/cm ³
k_n	3.0×10^8 Pa
ν (k_s/k_n)	0.33
ϕ	35°
D_{50}	1.00 mm
p_0'	100 kPa

表-2 解析条件

試験名	せん断応力振幅比 CSR	目標間隙比 e
Test-01	0.100	0.7500
Test-02	0.125	0.7500
Test-03	0.150	0.7500
Test-04	0.125	0.7375
Test-05	0.150	0.7375
Test-06	0.175	0.7375
Test-07	0.150	0.7250
Test-08	0.175	0.7250
Test-09	0.200	0.7250

3. 結果及び考察

(1) 応力経路

図-1にTest-07とTest-09の応力経路(平均有効主応力とせん断応力の関係)を示す。CSRを変化させることで、ある応力状態から別の応力状態へ移る際の途中の状態経路を変化させている点が見て取れる。

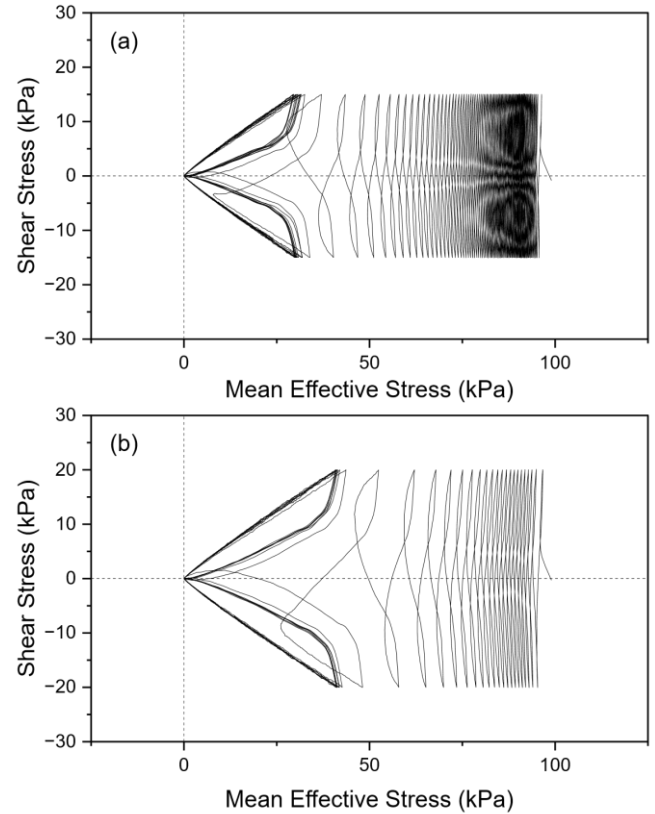


図-1 応力経路の比較(a) Test-07 (b) Test-09

(2) 内部エネルギーと応力経路の関係

粒状体の内部エネルギーとして、ある時間ステップ β における粒子の弾性ひずみエネルギー E_{es}^β 、粒子間接触での摩擦エネルギー増分 $\delta E_{f,ij}^\beta$ を考える。これらの計算式を以下の式(3)、(4)に示す。

$$E_{es}^\beta = \frac{1}{2} \sum_i^{N_p} \sum_j^{N_{c,i}} \frac{\|F_{n,ij}\|^2}{k_n} + \frac{1}{2} \sum_i^{N_p} \sum_j^{N_{c,i}} \frac{\|F_{s,ij}\|^2}{k_s} \quad (3)$$

$$\delta E_{f,ij}^\beta = \begin{cases} 0 & \text{if } \|F_{s,ij}\| < \|F_{n,ij}\| \tan \phi \\ \frac{\|F_{s,ij}\| - \|F_{n,ij}\| \tan \phi}{k_s} \|F_{s,ij}\| & \text{if } \|F_{s,ij}\| \geq \|F_{n,ij}\| \tan \phi \end{cases} \quad (4)$$

ここで、式(3)、(4)の N_p は供試体中の総粒子数、 $F_{n,ij}$ は粒子 i と粒子 j 間の接触による法線方向の圧縮力、

$F_{s,ij}$ は粒子*i*と粒子*j*間の接触による接線方向のせん断力、 $N_{c,i}$ は粒子*i*の総接触点数である。

図-2に、目標間隙比 e を0.725とし異なるせん断応力振幅比CSR (0.150, 0.175, 0.200)を与えた場合における、過剰間隙水圧比と弾性ひずみエネルギーと摩擦エネルギーの関係をプロットした。なお今回の解析では、間隙水はモデル化していないが、初期有効平均主応力と現時間ステップにおける有効平均主応力の差を過剰間隙水圧と定義する。

まず図-2(a)と図-2(b)を比較したとき、摩擦損失エネルギーの方が弾性ひずみエネルギーよりも値が10倍以上大きい点が見て取れる。既往研究¹⁾では応力ひずみ関係が1サイクル中に描くヒステリシスループの面積が、その間の損失エネルギーであると定義している。したがってそれらが粒状体の内部エネルギーの変化として生じたと仮定した場合、この結果は損失エネルギーの大部分は粒子間接触の摩擦によって生じたものであるといえる。

次に、液状化過程におけるせん断応力振幅比とそれぞれの内部エネルギーの関係について、図-2(a)より考察する。まず弾性ひずみエネルギーについて、せん断応力振幅比(CSR)を変化させても弾性ひずみエネルギーの大きさは概ね一致していることが分かる。この結果から、弾性ひずみエネルギーは応力経路に依存しない点が推察される。

摩擦損失エネルギーについては、過剰間隙水圧比が初めて0.8に達するまでの推移に大きな差異はないと言える(図-2(b))。しかし、それ以降の推移に関しては異なる3つのせん断応力振幅比ごとに明確な差異があることが分かる。この結果により、摩擦損失エネルギーは過剰間隙水圧比が初めて0.8に達するまでの範囲においては応力経路に依存しないものの、それ以降の範囲に関しては応力経路に依存していると考えられる。

これらの結果から、弾性ひずみエネルギー及び摩擦損失エネルギーの応力経路非依存性を確認したとともに、摩擦損失エネルギーに関しては応力経路に過剰間隙水圧比の一部範囲において依存しているという関係が確認された。

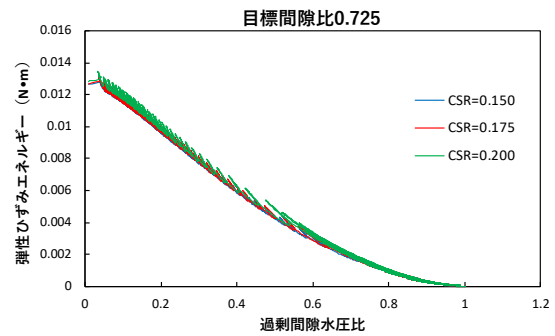
(3) 内部エネルギーと密度の関係

せん断応力振幅比CSRが0.150、目標間隙比 e がそれぞれ0.7500, 0.7375, 0.7250という異なる3つの場合における過剰間隙水圧比と2種類の内部エネルギーの関係を図-3に示す。

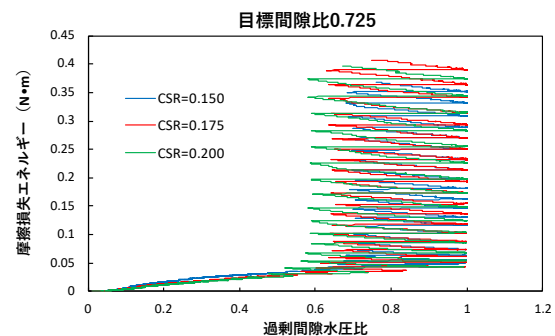
まず弾性ひずみエネルギーについて、目標間隙比の大きい方が初期の弾性ひずみエネルギーの値が大きいことが分かる。その差は間隙比が $e=0.7500$ と $e=0.7250$ とで約 $0.002 \text{ N}\cdot\text{m}$ であった。

また摩擦損失エネルギーについても、過剰間隙水圧比が初めて0.8に達するまでの範囲、それ以降の範囲ともに異なる3つの目標間隙比ごとに明確な差異が見て取れる。特に目標間隙比が0.7250の推移は他の2つの推移と比べて大きく異なった軌跡であり、代表例として過剰間隙水圧比0.6付近の $e=0.7500$ と $e=0.7250$ との差は約 $0.02 \text{ N}\cdot\text{m}$ であった。

したがって、弾性ひずみエネルギー及び摩擦損失エネルギーはどちらも密度に対して依存性を有しているが、その依存性の度合いに関しては摩擦損失エネルギーの方が10倍程度高いという点が確認できた。

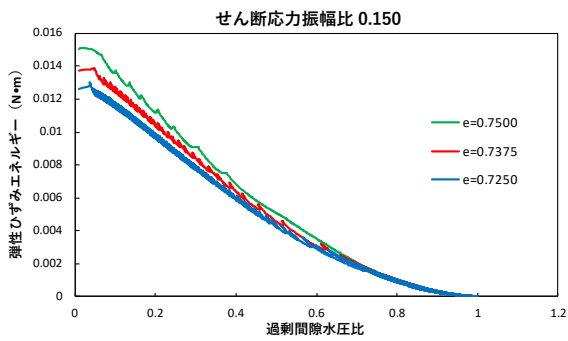


(a) 過剰間隙水圧比と弾性ひずみエネルギーの関係

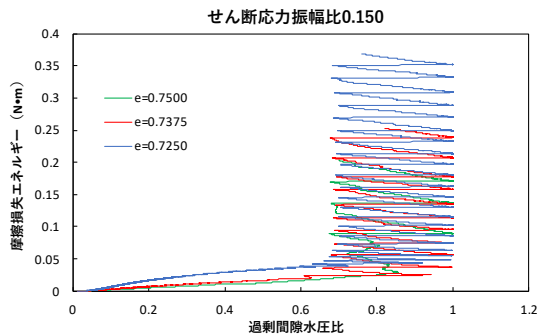


(b) 過剰間隙水圧比と摩擦損失エネルギーの関係

図-2 過剰間隙水圧比と2つの内部エネルギーの比較(Test-07, Test-08, Test-09)



(a) 過剰間隙水圧比と弾性ひずみエネルギーの関係



(b) 過剰間隙水圧比と摩擦損失エネルギーの関係

図-3 過剰間隙水圧比と2つの内部エネルギーの比較(Test-03, Test-05, Test-07の比較)

4. まとめ

個別要素法を用いた解析により、等体積繰り返しせん断過程における弾性ひずみエネルギー及び摩擦損失エネルギーの応力経路と密度依存性について確認することができた。今後はせん断応力振幅比、目標間隙比以外のパラメータも変化させ、内部エネルギーに対する依存性について、さらに細かく調査する。

謝辞

本研究は科学技術研究費課題 23K13401「砂質土の液状化時における微細構造変化と巨視的力学特性の統合的挙動把握」の援助を受けて行われた。

参考文献

1) 佐々木 哲也, 石原 雅規, 谷本 俊輔, 液状化判定法の高精度化に関する研究, 土木研究所重点プロジェクト研究報告書, No.3.9, 2013

- 2) 國生 剛治, エネルギーによる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, 2013, 8巻, 3号, p. 463-475
- 3) Ikuo Towhata and Kenji Ishihara. "Shear Work and Pore Water Pressure in Undrained Shear." Soils and Foundations, vol. 25, no. 3, Elsevier BV, Sept. 1985, pp. 73-84.
- 4) Jafarian, Yaser, et al. "Strain Energy Based Evaluation of Liquefaction and Residual Pore Water Pressure in Sands Using Cyclic Torsional Shear Experiments." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 35, Elsevier BV, Apr. 2012, pp. 13-28.
- 5) Cundall, P. A., and Otto D. L. Strack. "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies." Geotechnique, vol. 29, no. 1, ICE Publishing, Mar. 1979, pp. 47-65.