

個別要素法を用いた等体積繰り返しせん断過程における 液状化エネルギー容量に関する検討

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、噴砂や噴水、家屋やインフラ構造物の倒壊及び損壊といった被害が生じる。近年では液状化発生予測の発展により建造物の倒壊といった直接的な被害は減少しているものの、前述したような被害が複合的に発生することで、被災後の生活に長期的かつ多大な影響を及ぼす。

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と呼ばれる手法である。簡易法の代表例として、標準貫入試験等によって得たN値と粒度分布、地下水位等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、地震動に影響を与える諸要因を少ない係数で代表させるため、複雑な地震動特性の表現に限界がある。例えば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。

こうした複雑な地震動に対して統一的に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動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液状化の判定を行う。

この液状化エネルギー容量の概念は、液状化中の砂の密度や外力への依存関係に関するいくつかの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と過剰間隙水圧比を評価した。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。

これら既往研究における砂の密度と外力の大きさに関する事実は主に実験結果のみによって示されているが、密度や外力によって液状化エネルギー容量に差が出るのかどうかについて統一的な見解は出ていない。そこで、液状化過程における液状化エネルギー容量に着目し、個別要素法(DEM, Discrete Element Method)を用いて、液状化エネルギー容量の大部分を占める摩擦損失エネルギー⁵⁾の密度及び外力の大きさに対する依存性を議論する。

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。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、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 Strack⁶⁾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 は法線方向の弾性係数、 u_n は法線方向のひずみである。

また、せん断力 F_s については次式(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、法線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。

解析モデルは、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、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±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。反転条件は表-1で示した初期有効主応力 p_0' と、表-2に示したせん断応力振幅比から計算される最小・最大せん断応力 τ の大きさを定義し、終了条件は両振幅せん断ひずみDA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)	0.25
ϕ	30°
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	0.150	0.7375
Test-05	0.150	0.7250

3. 結果及び考察

(1) 摩擦損失エネルギーと外力の関係

粒状体の内部エネルギーとして、ある時間ステップ β_t における粒子間接触での摩擦損失エネルギーの変化量 $\Delta E_{f,ij}^{\beta_t}$ と載荷開始から時刻 t までの解析モデル全体の摩擦損失エネルギー E_f^t を、計算式を以下の式(3)と(4)に示す。

$$\Delta E_{f,ij}^{\beta_t} = \begin{cases} 0 & \text{if } \|F_{s,ij}\| < \|F_{n,ij}\| \tan \phi \\ \frac{\|F_{s,ij}\| - \|F_{n,ij}\| \tan \phi}{k_s} \|F_{s,ij}\| & \text{if } \|F_{s,ij}\| \geq \|F_{n,ij}\| \tan \phi \end{cases} \quad (3)$$

$$E_f^t = \sum_{\beta_t=0}^t \sum_{i,j} \Delta E_{f,ij}^{\beta_t} \quad (4)$$

ここで、式(3)の $F_{n,ij}$ 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である。

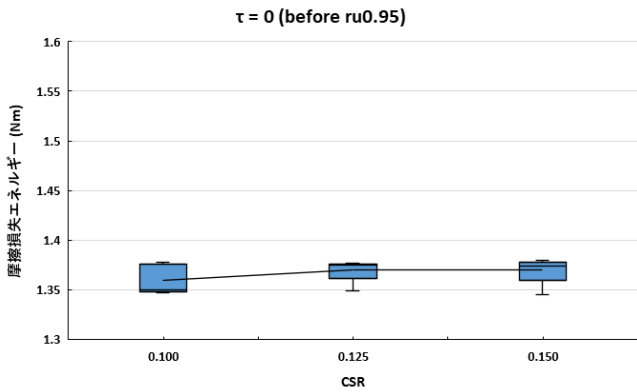
図-1に、目標間隙比 e を0.7500とし異なるせん断応力振幅比CSR (0.100, 0.125, 0.150)を与えた場合における摩擦損失エネルギーについて、同一のパラメータでそれぞれ5回ずつ解析を行い、その結果を基に箱ひげ図を作成した。また、図-1(a)、図-1(b)、図-1(c)はそれぞれ、液状化が発生したと判断する過剰間隙水圧比 $r_u = 0.95$ に至る前の $\tau = 0$ 時点、 $r_u = 0.95$ 時点、 $r_u = 0.95$ に至った後の $\tau = 0$ 時点における摩擦損失エネルギーである。なお今回の解析では、間隙水はモデル化していないが、初期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。また本研究では、せん断応力振幅比CSRの大きさを簡便的に外力の大きさと表現する。

まず $r_u = 0.95$ に至る直前の $\tau = 0$ 時点におけるせん断応力振幅比CSRと摩擦損失エネルギーの関係について、図-1(a)より考察する。CSRを0.100, 0.125, 0.150と変化させても、摩擦損失エネルギーの大きさは概ね一致していることが分かる。したがって、この時点において摩擦損失エネルギーは外力の大きさに依存しないと考えられる。

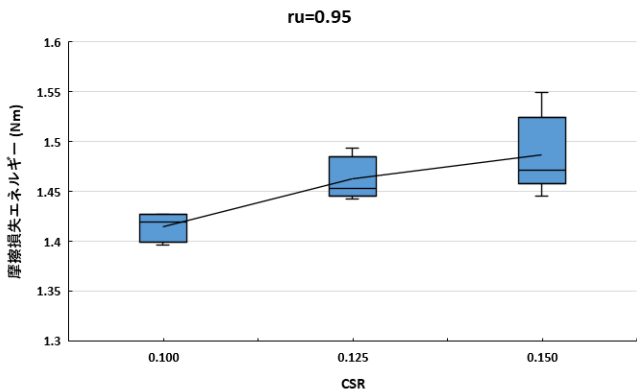
一方、図-1(b)及び図-1(c)では、CSRの増加に伴い摩擦損失エネルギーの値も大きく推移していることが分かる。したがって $r_u = 0.95$ 時点及び $r_u = 0.95$ に至った直後の $\tau = 0$ 時点においては、摩擦損失エネルギー

一は外力の大きさに対して依存すると考えられる。

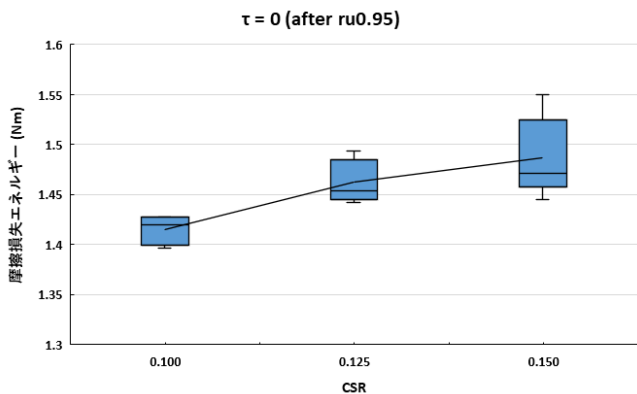
これらの結果から、摩擦損失エネルギーは外力の大きさに対して、液状化が発生する以前においては依存せず、初めて $r_u = 0.95$ に至った後からは依存しているという関係が確認された。しかし、液状化過程においてこの非依存から依存へと切り替わる時点に関しては、より詳細なパラメトリックスタディを行う必要がある。



(a) $\tau = 0$ ($r_u = 0.95$ 前)での摩擦損失エネルギー比較



(b) $r_u = 0.95$ での摩擦損失エネルギー比較



(c) $\tau = 0$ ($r_u = 0.95$ 後)での摩擦損失エネルギー比較

図-1 異なるせん断応力振幅比における

摩擦損失エネルギー (Test-01, Test-02, Test-03)

(2) 摩擦損失エネルギーと密度の関係

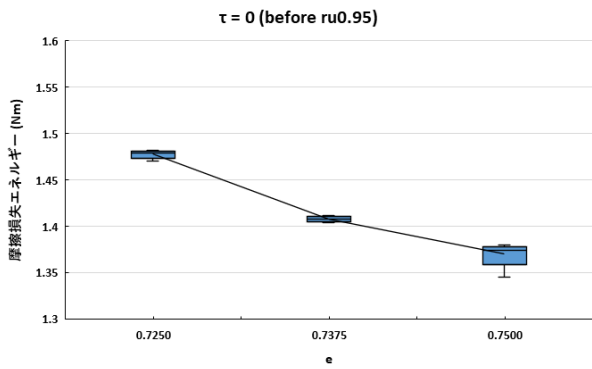
せん断応力振幅比CSRが0.150, 目標間隙比 e がそれぞれ0.7500, 0.7375, 0.7250という異なる3つの場合における摩擦損失エネルギーについて、(1)同様に同一のパラメータでそれぞれ5回ずつ解析を行い、その結果を基に箱ひげ図を作成した。また、図-2(a), 図-2(b), 図-2(c)に関しても、それぞれ $r_u = 0.95$ に至る前の $\tau = 0$ 時点, $r_u = 0.95$ 時点, $r_u = 0.95$ に至った後の $\tau = 0$ 時点における摩擦損失エネルギーについて比較している。

まず $r_u = 0.95$ に至る直前の $\tau = 0$ 時点における間隙比 e と摩擦損失エネルギーの関係について図-2(a)より比較すると、間隙比が小さい場合では摩擦損失エネルギーの値が大きく、間隙比が大きくなるにつれて摩擦損失エネルギーの値は小さくなっていることが読み取れる。このことから高密度ほど摩擦損失エネルギーが大きく、低密度ほど摩擦損失エネルギーが小さくなる関係が確認できたため、摩擦損失エネルギーが密度に対して依存性を有しているということができる。

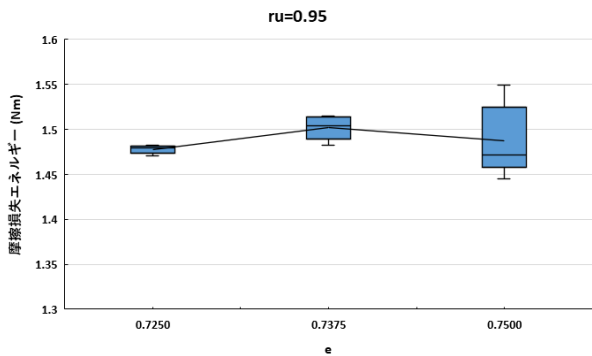
一方、 $r_u = 0.95$ 時点及び $r_u = 0.95$ に至った直後の $\tau = 0$ 時点に関して図-2(b), 図-2(c)より比較すると、異なる3つの間隙比それぞれで、摩擦損失エネルギーの値は概ね一致しており、有意な傾向は確認できなかった。これはつまり、前述の時点において摩擦損失エネルギーは密度に対しての依存性がほぼ無くなっていると言うことができる。

ここで、解析の終了条件である両振幅せん断ひずみが50%に到達した時点における摩擦損失エネルギーの比較を図-3に示す。図-3からは、 $r_u = 0.95$ に至る直前の $\tau = 0$ 時点における比較結果(図-2(a))と同様に高密度ほど摩擦損失エネルギーが大きくなっている点が見て取れる。

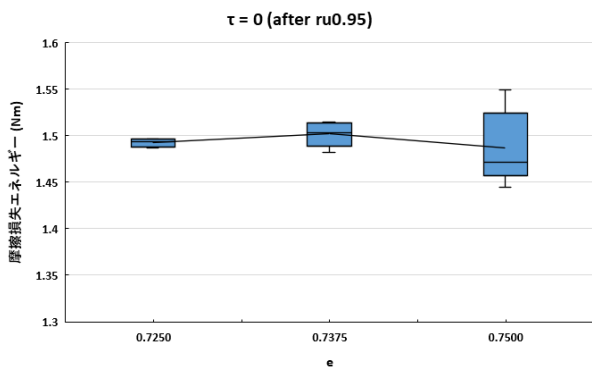
これらの結果より、液状化過程において摩擦損失エネルギーは密度に対して依存性を有しているものの、図-2(b)で示したように、 $r_u = 0.95$ 時点付近ではその依存性が極端に小さくなる範囲が存在することが確認された。



(a) $\tau = 0$ ($r_u = 0.95$ 前)での摩擦損失エネルギー比較



(b) $r_u = 0.95$ での摩擦損失エネルギー比較



(c) $\tau = 0$ ($r_u = 0.95$ 後)での摩擦損失エネルギー比較

図-2 異なる間隙比における

摩擦損失エネルギー(Test-03, Test-04, Test-05)

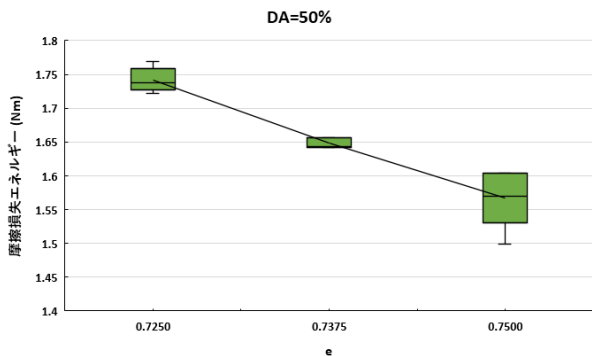


図-3 異なる間隙比における $DA = 50\%$ 時点での摩擦損失エネルギー(Test-03, Test-04, Test-05)

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いて摩擦損失エネルギーは、外力の大きさに対しては初めて $r_u = 0.95$ に至った時点以降のみ依存していることが確認できた。また、密度に対しては基本的には高密度ほど摩擦損失エネルギーは大きくなるが、 $r_u = 0.95$ 時点付近ではその依存性が極端に小さくなる範囲が存在することが確認された。したがって、摩擦損失エネルギーは密度及び外力の大きさに対してそれぞれ液状化過程において依存している時点と依存していない時点が存在しており、依存関係が一意には定まらないことが推察される。今後は解析パターンを増やし、4 点以上の CSR 及び e における摩擦損失エネルギーを比較、検討する。また密度依存性については、液状化過程においてさらに細かい時間軸での摩擦損失エネルギー比較を行い、より詳細な密度依存の推移を検討する。

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) Y.Jafarian, 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) 柳 洸聖, 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, 土木学会新潟会, 2023
- 6) 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.