

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 柳 洸聖
池田 隆明
志賀 正崇

1. 序論

液状化予測において現在広く用いられている FL 法では表現が難しい複雑な地震動特性に対して、統一的に液状化予測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¹⁾。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判定を行う手法である。

この液状化エネルギー容量の概念は、液状化発生までに地盤内部から消費される累積損失エネルギーが、砂の密度や地震外力に対して非依存関係であることを示す既往研究を前提としている。例えば國生²⁾は、室内で液状化を模擬するため、原地盤に対応した有効拘束圧で圧密した状態で一定振幅の繰り返し応力を非排水条件で載荷する試験を行い、相対密度が大きいほど累積損失エネルギーは多少増加する傾向はあるが、その違いはそれほど目立たず、密度に大きくは依存しないと述べた。Jafarian et al.³⁾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拘束圧のみによって決定されるという関係を明らかにした。Ishihara and Towhata⁴⁾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上昇の間には、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。

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。一方で、エネルギー法が実験的にも解析的にも妥当であることを示すことができれば、本手法の基礎がより強固なものとなり、将来的に実務の場への導入が進む可能性も期待される。そこで既往研究における実験結果に対して、個々の粒子のマクロとマイクロパラメータを考慮可能な個別要素法(DEM)を用いた解析によって、液状化過程におけるエネルギー損失について評価するとともに、液状化エネルギー容量の密度及び外力に対する依存性を検討した。

2. 解析手法及び条件

本研究では、個別要素法のフレームワークとして Yade⁵⁾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表-1 に示す。また、外力及び密度に相当するパラメータをそれぞれ、せん断応力振幅比 CSR、目標間隙比 e_{tar} とし、その組み合わせについて表-2 に示す。ここで、 k_n は粒子の鉛直方向の剛性、 k_s は粒子のせん断方向の剛性、 ϕ は粒子同士の摩擦角であり、鉛直方向の剛性とせん断方向の剛性の比 ν を $\nu \equiv k_s/k_n$ と定義する。また、せん断方向の反転条件は表-1 で示した初期平均有効主応力 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 の大きさで定義し、終了条件は両振幅せん断ひずみ DA が 50% に到達した状態とした。Yade のバージョンは 2022.01a 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、3 方向の境界に作用する鉛直応力の平均値を有効平均主応力 p' 、初期有効平均主応力 p_0' と現時間ステップにおける有効平均主応力 p' の差を過剰間隙水圧 u と定義する。また、過剰間隙水圧比 ($r_u = u/p_0'$) が初めて 0.95 以上となった時点と、両振幅せん断ひずみ DA が 7.5% 以上となった時点とを、それぞれ液状化が発生したと判断する基準の時点とする。

表-1 設定初期パラメータ

パラメータ	設定値
粒子密度	2.65 g/cm ³
粒度分布 (分散値)	2.2×10^{-4} mm
k_n	3.0×10^8 N/m
$\nu(k_s/k_n)$	0.25
ϕ	30°
D_{50}	1.00 mm
p_0'	100 kPa

表-2 解析パラメータ

Case	せん断応力振幅比 CSR	目標間隙比 e_{tar}	解析回数
Test-01	0.100	0.7500	5回
Test-02	0.125	0.7500	5回
Test-03	0.150	0.7500	5回
Test-04	0.125	0.7375	5回
Test-05	0.150	0.7375	5回
Test-06	0.175	0.7375	5回
Test-07	0.150	0.7250	5回
Test-08	0.175	0.7250	5回
Test-09	0.200	0.7250	5回

3. 液状化過程におけるエネルギー損失

エネルギー法においては、三軸液状化試験による軸差応力 σ_d と軸ひずみ ε の関係が1サイクルで描くヒステリシスループの面積A-B-C-Dを、その間の内部損失エネルギーであると定義しており、これはマクロな意味における定義といえる。一方、本研究では個別要素法を用いたミクロな（粒状体の）内部エネルギー変化を検討している。そこで内部損失エネルギーを、運動エネルギー、弾性ひずみエネルギー、摩擦損失エネルギーの3種類の総和と定義し、繰り返しせん断過程におけるそれぞれのエネルギー量変化を観察するとともに、外部からせん断応力によって入力された仕事の主な損失要因について調査する。原点の座標及びエネルギー量のスケールを統一した3種類の内部損失エネルギーの比較図を図-1に示す。なお、解析パラメータに関しては表-2のうち、Test-01の条件で統一している。

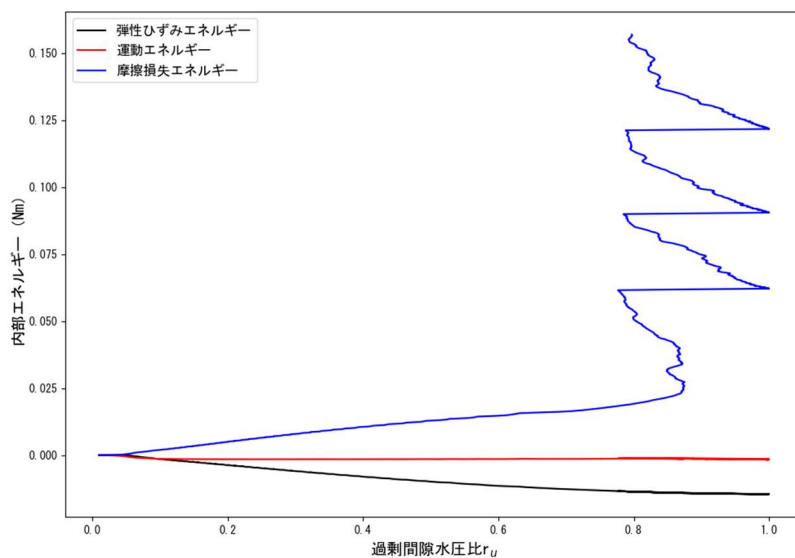


図-1 過剰間隙水圧比 r_u と3種類の内部損失エネルギーの比較(Test-01)

図-1より、3種類の内部損失エネルギーのエネルギー量に注目する。縦軸のスケールを比較すると、摩擦損失エネルギーに比べ、運動エネルギーと弾性ひずみエネルギーは0.000(Nm)から0.015(Nm)のごく狭い範囲内に表示され、 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ オーダー程度小さいことが分かる。この結果は、粒子生成から圧密終了までに入力された外部仕事の多くが、粒子間の塑性変位に寄与したことを示している。また、前述したように応力ひずみ関係が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。そのため、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、この結果により、内部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。

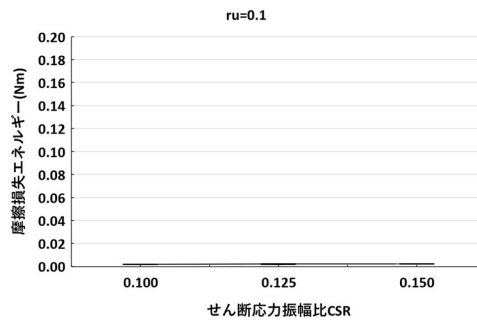
したがって本論文では累積損失エネルギーに基づくエネルギー量である液状化エネルギー容量を実質的に摩擦損失エネルギーと考えるものとし、次章の解析結果以降では、 e_{tar} 及びCSRに対する摩擦損失エネルギーの変化を観察することで、密度や外力が液状化エネルギー容量に与える影響を確認、考察していく。

4. 結果及び考察

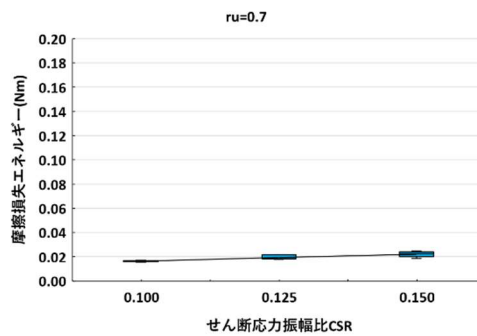
4.1 摩擦損失エネルギーと外力の関係

前述した通り，液状化の発生を示す指標として過剰間隙水圧比 $r_u = 0.95$ あるいは $DA = 7.5\%$ の二つがあるため，液状化進行度の抽出にも同様にこの二つの指標（ r_u 及び DA ）を用いる。

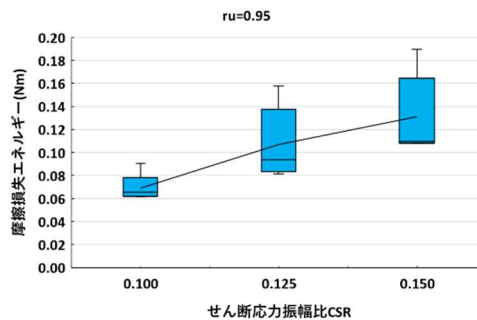
e_{tar} を統一し，異なるCSRを与えた解析を5回ずつ行い，それぞれで算出された摩擦損失エネルギーを r_u 及び DA それぞれの指標を用いて抽出し，各時点における3ケースの箱ひげ図を作成した。例として， $r_u = 0.1, 0.7, 0.95$ 時点のTest-01, Test-02, Test03の箱ひげによる比較図を図-2に示す。また，各箱ひげ図を結ぶ平均線から近似直線を求め，その傾きの値を全 r_u 及び DA 時点ごとにプロットした。図-3に各 r_u 時点における傾きの推移を，図-4には各 DA 時点における傾きの推移を示す。



(a) $r_u = 0.1$ での摩擦損失エネルギー比較



(b) $r_u = 0.7$ での摩擦損失エネルギー比較



(c) $r_u = 0.95$ での摩擦損失エネルギー比較

図-2 異なるせん断応力振幅比 CSR における摩擦損失エネルギー (Test-01,02,03)

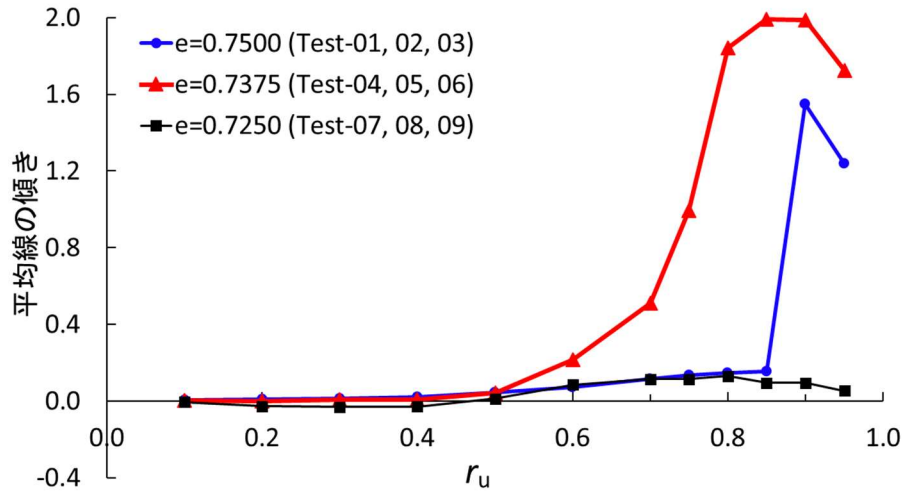


図-3 CSR 依存度の推移 (r_u 指標)

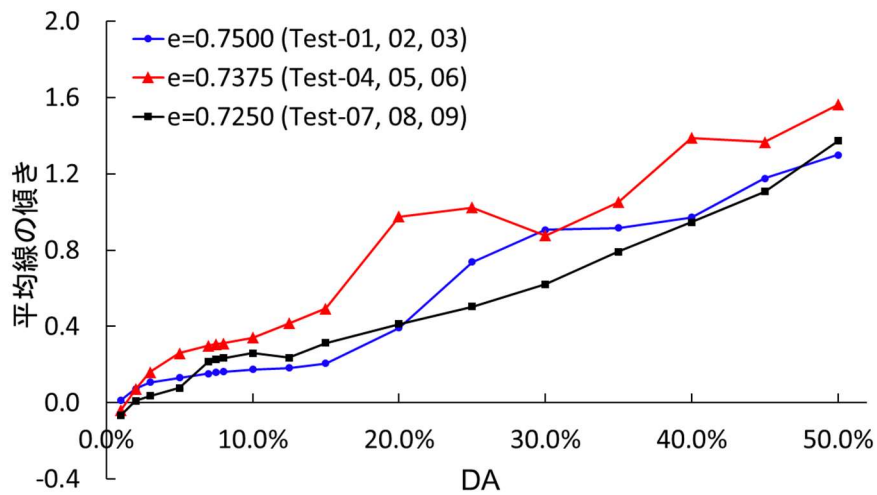


図-4 CSR 依存度の推移 (DA指標)

まず図-3 より, $r_u = 0.5$ までの範囲では3 ケースとも傾き値 0.0 に近い値を維持しており, 大きな変化も現れていないことが分かる. したがって, $r_u = 0.1 \sim 0.5$ の範囲では摩擦損失エネルギーは CSR に依存しておらず, またこの非依存関係は間隙比の大小にもよらないことが考えられる. しかし, $r_u = 0.6 \sim 0.7$ の範囲を境に $e_{tar} = 0.7375$ の傾き値が急激に増加し始め, また $r_u = 0.9$ 時点からは $e_{tar} = 0.7500$ の傾き値も同様に急増している. ここで, 最も顕著な推移を示す $e_{tar} = 0.7375$ の摩擦損失エネルギー変化について図-5 に示す.

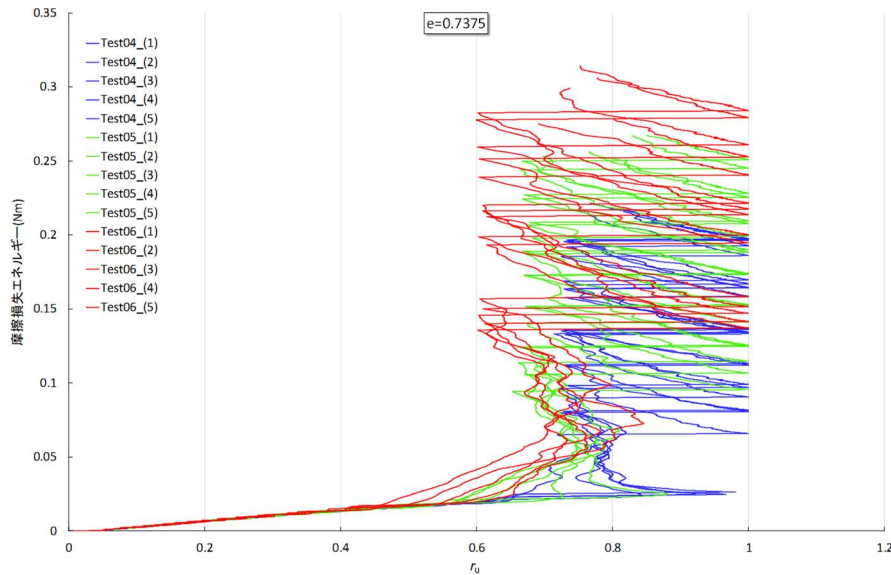


図-5 $e_{tar} = 0.7375$ の摩擦損失エネルギー変化

目標間隙比が同一の条件下では、図-5の赤線に示すようなCSRが大きい試験ほど、 r_u が小さい段階から摩擦損失エネルギー量に変化が発生し始めていることが読み取れる。つまり、この変化が発生し始めるタイミングの差によって、傾き値の急激な増加が生じているのだと分かる。また、このタイミングは概ねサイクリックモビリティの領域前後で発生していることもうかがえる。したがって $e_{tar} = 0.7500$ 及び $e_{tar} = 0.7375$ の推移に関して、サイクリックモビリティの領域においては、摩擦損失エネルギーがCSRに対して依存すると考えられる。

一方、 $e_{tar} = 0.7250$ については、 $r_u = 0.95$ に至るまで多少の変化はあるものの、傾き $-0.2 \sim 0.2$ の範囲内に収まり続けていることが見て取れる。これはつまり $e_{tar} = 0.7250$ 条件下では、 $r_u = 0.1 \sim 0.95$ の範囲において摩擦損失エネルギーはCSRに対して依存しないという事ができる。この理由については、 $e_{tar} = 0.7250$ が本解析中最も高密度であるため粒子間接触も多く、それ故にせん断応力による粒子間の相対的な動きが制限されることで摩擦損失エネルギーが増加しにくくなり、結果としてCSRによるエネルギー量の差が生じなかったのではないかと推察したが、これに関しては他の解析と全く異なる挙動であることから、さらに解析ケースを増やし、より詳しく原因を検討する必要があると考える。

次に図-4より、初期液状化時点である $DA = 7.5\%$ までの範囲とそれ以降の範囲とで、傾き値の推移に大きな変化は見られず、 $DA = 1.0\% \sim 50\%$ の過程全体を通して3ケースとも緩やかな増加傾向であることが分かる。したがって、液状化過程をDAの推移に基づいて捉えた場合、常に摩擦損失エネルギーはCSRに対して依存性を有しているが、例えば $DA = 1.0\%$ のような初期液状化前などは摩擦損失エネルギー自体の絶対値が小さいため、CSRごとの差が見かけ上存在せず、依存性がないと見なすことも可能であると考えられる。ただし、どの程度の傾き値から依存性の有無が分かるのかについては、エネルギー法における液状化エネルギー容量の計算にCSRを組み込み、実際に計算を行い、判定結果に及ぼす影響を検討する必要があるため、本研究では依存性有無の判断基準は定めないものとする。

4.2 摩擦損失エネルギーと密度の関係

密度に対する依存関係についても 4.1 同様に、各 r_u 及びDA時点での異なる e_{tar} による平均線の傾きの推移から考察する。図-6には各 r_u 時点、図-7には各DA時点における傾きの推移を示す。また、間隙比と密度は負の相関であるため、傾きが負の領域であっても正の密度依存があることを考慮し、考察する。

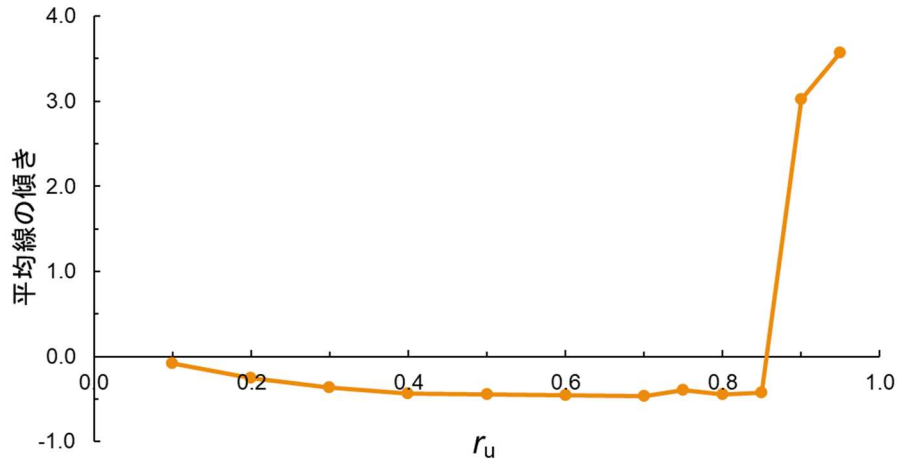


図-6 間隙比依存度の推移 (r_u 指標)

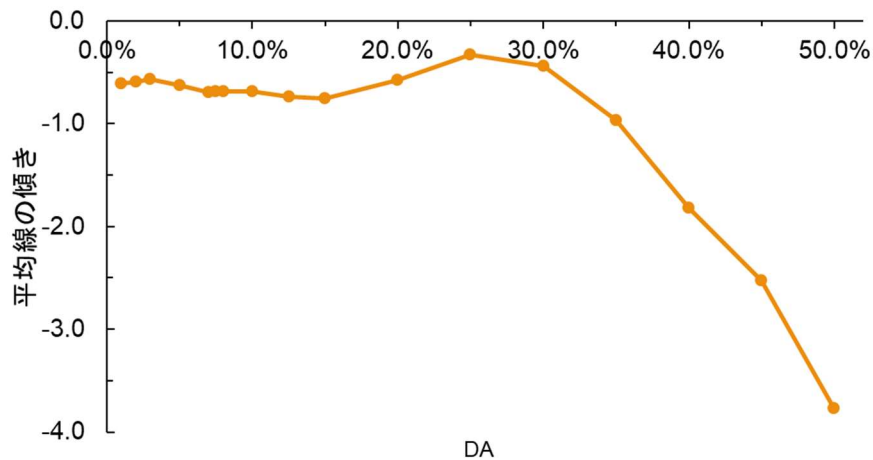


図-7 間隙比依存度の推移 (DA指標)

まず、図-6より $r_u = 0.85$ 時点までは傾きが -0.5 付近を維持しているのに対し、 $r_u = 0.9$ 時点から傾きが急激に増加していることが見て取れる。これにより、液状化過程を r_u で捉えた場合、摩擦損失エネルギーは、初期液状化直前から密度に対して顕著に依存するものと考えられる。

また、図-7より $DA = 30\%$ 付近まで傾きに大きな変動はないものの、それ以降は解析終了時にかけて急激な傾きの減少が見て取れる。したがって、液状化過程を DA で捉えた場合において、初期液状化時点では小さいものの、全体的な傾向として、間隙比が大きいほど、言い換えると密度が小さいほど摩擦損失エネルギーも小さいという依存関係があると考えられる。

5. 結論

5.1 まとめ

本研究では、個別要素法を用いた解析により、液状化発生時のエネルギー損失を解析的に評価し、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の砂の密度や地震外力の大きさに対する依存性について検討した。

まず、内部損失エネルギーを、運動エネルギー、弾性ひずみエネルギー、摩擦損失エネルギーの3種類の総和と定義し、外部からせん断応力によって入力された仕事の主な損失要因について調査し、以下の結果が得られた。

- 1) 摩擦損失エネルギーと比べ、他2種類の内部損失エネルギーは $10^{-1} \sim 10^{-2}$ オーダー程度小さいことが確認できた。そのため、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すると、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、内部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。

また、等体積繰り返しせん断過程における摩擦損失エネルギーの砂の密度や外力の大きさに対する依存性について検討するため、個別要素法により解析を行い、以下の結果が得られた。

- 2) 液状化過程を r_u の変化に基づいて捉えた場合、 $r_u = 0.1 \sim 0.5$ の範囲では摩擦損失エネルギーは外力に依存しておらず、またこの非依存関係は間隙比の大小にもよらないが、それ以降のサイクリックモビリティの領域においては、 $e_{tar} = 0.7500$ 及び $e_{tar} = 0.7375$ のみ、摩擦損失エネルギーは外力に対して依存する。また、 $e_{tar} = 0.7250$ 条件下では、 $r_u = 0.1 \sim 0.95$ の範囲において摩擦損失エネルギーはCSRに対して依存しない。
- 3) 液状化過程をDAの変化に基づいて捉えた場合、常に摩擦損失エネルギーは外力に対して依存性を有している。しかし、例えば $DA = 1.0\%$ のような初期液状化前などは摩擦損失エネルギー自体の絶対値が小さいため、CSRごとの差が見かけ上存在せず、外力に対して依存性がないと見なすことも可能である。
- 4) 液状化過程を r_u の変化に基づいて捉えた場合、 $r_u = 0.1 \sim 0.8$ まで基本的には高密度ほど摩擦損失エネルギーが大きいという関係が成り立つものと考えられる。しかし、 $r_u = 0.9$ 以降の傾き値と相対的に比較して考えると、 $r_u = 0.95$ 直前まで摩擦損失エネルギーは密度に対して大きく依存しておらず、初期液状化時点付近でのみ顕著に依存するということも可能である。
- 5) 液状化過程をDAの変化に基づいて捉えた場合、高密度ほど摩擦損失エネルギーは大きく、低密度ほど摩擦損失エネルギーは小さいという依存関係が常に成り立つことが確認できた。しかし、4)と同様に実現象で起こり得るような $DA (= 1.0 \sim 7.5\%)$ の範囲内においては、摩擦損失エネルギーは密度に大きく依存しないと考えることも可能である。

5.2 今後の課題

本研究で得られた結果を踏まえ、今後検討すべき課題及び展望について以下に整理する。

- 1) 実現現象をより詳細に再現するため、間隙水や非円形粒子を考慮するなど、より高度かつ精密なDEMモデルを作成する必要がある。
- 2) 摩擦損失エネルギーの密度及び外力依存性をより詳細に検討するために、さらに幅広く解析パラメータを設定し、現在の9ケース以上の解析を行う必要がある。
- 3) 摩擦損失エネルギーの密度及び外力依存性の有無について主に定性的な判断、考察を行った。そこで、例えばエネルギー法における液状化エネルギー容量の計算に、CSRや e の依存性を基に作成した数式モデル等を組み込み、実際に計算を行い、判定結果に及ぼす影響を検討することで、依存性について定量的に評価することが可能となり、さらには密度や外力がエネルギー法による液状化予測にどの程度影響するのかという新たな検討にもつながると考える。

参考文献

- 1) 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，Vol.8, No.3, p.463-475, 2013
- 2) 國生剛治：地震地盤動力学の基礎 エネルギー的視点を含めて，鹿島出版会，2014
- 3) 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, Apr. 2012, pp. 13–28.
- 4) 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.
- 5) V. Smilauer et al. Yade Documentation 3rd ed, <https://yade-dem.org/doc/index.html>