

個別要素法による砂質土を対象とした繰返し単純載荷時の履歴特性の分析

群馬工業高等専門学校 学生会員 ○内山 康太郎
群馬工業高等専門学校 正会員 井上 和真

群馬工業高等専門学校 学生会員 浅見 健斗
鳥取大学 正会員 小野 祐輔

1. 研究の背景と目的

個別要素法(DEM: Discrete Element Method)は離散体の解析手法の1つであり、粒状体の挙動として各粒子の運動を取り扱うことができるため、地盤の土粒子の微視的な挙動分析に適した解析手法であると言える。近年、コンピュータの性能の向上とともに地盤を対象としたDEMによる地盤挙動分析が多くなされている。例えば、福元ら¹⁾は、地盤特性を適切に表現できるシンプルなDEMモデルを提案し、砂質土を対象に一面せん断の単調載荷によって提案モデルの妥当性を検証している。一方で、地震時には、地盤は繰返しせん断載荷を受けことから、正負交番載荷時の履歴特性の挙動を把握することは重要な課題の一つであるものの、先行事例は見当たらない。そこで、本研究ではDEMによる砂質土を対象とした繰返し単純載荷時の履歴特性の挙動の把握と、現行の地盤地震応答解析に用いられる砂質土の履歴特性との比較を行う。

2. 砂質土を対象としたDEMによる単純せん断試験

2.1 DEMによる単純せん断試験の解析条件

本研究では、まず、砂質土を対象としたDEMの妥当性確認を行うため、粒径が異なる3種の砂質土を対象に、DEMによる単純せん断試験を実施した。本研究で用いるDEMの解析ソフトはオープンソースであるYade²⁾とした。単純せん断試験のDEMの解析条件を表1に、DEMモデルの図の一例を図1に示す。DEMのモデルとして、せん断箱は6.0×6.0×2.0cmの直方体で設定した。砂質土の粒径は、0.5・1.0・1.5mmと粒径の異なる3種とし、実際の砂質土には粒径にばらつきがあることを考慮して、粒径に対して標準偏差0.2のばらつきを与えた。DEMの載荷条件として、50・100・200kN/m²と3段階の異なる垂直応力となるような垂直力を与えたのち、直交する2つの座標軸に対する垂直応力(σ_y および σ_z)を保つ。その後、最大せん断ひずみ0.35³⁾となるまで単純載荷を与えた。境界条件として、モデルの底面は固定、モデルの側

面は周期境界とすることにより単純せん断変形を与えた。なお、定圧条件での単純せん断試験で得られる強度定数は排水試験であることから、通常、内部摩擦角と粘着力はそれぞれ ϕ_d, c_d と表記されるが、本解析では土粒子間隙水や間隙空気を考慮していないため、内部摩擦角と粘着力はそれぞれ ϕ, c と表記する。

2.2 DEMによる単純せん断試験の解析結果

DEMによる単純せん断試験の解析結果として、図2にせん断応力-せん断ひずみ関係を、図3に最大せん断

表1 DEMによる単純せん断試験の解析条件

	モデル1(中砂)			モデル2(中-粗砂)			モデル3(粗砂)		
粒径(mm)	0.5			1.0			1.5		
垂直応力 σ (kN/m ²)	50	100	200	50	100	200	50	100	200
せん断箱の辺長(cm)	6.0×6.0×2.0								
粒径の標準偏差	0.2								

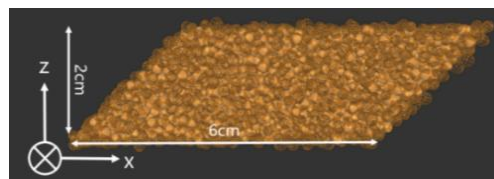


図1 砂質土を対象としたDEMによる単純せん断試験の例

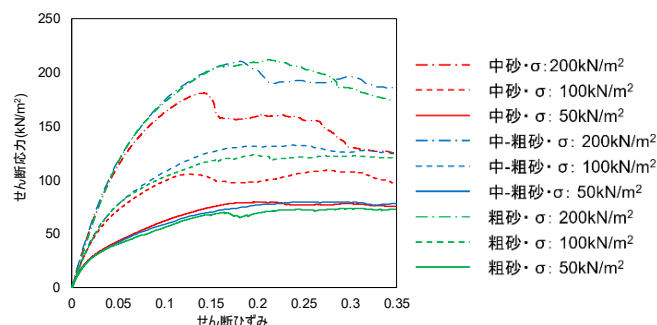


図2 DEM単純せん断試験によるせん断応力-せん断ひずみ

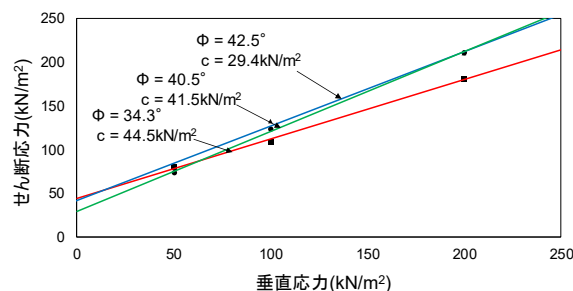


図3 DEM単純せん断試験によるせん断応力-垂直応力

断応力 - 垂直応力の関係を示す。DEM の結果として、粒径が小さくなるに従い、内部摩擦角は小さく、粘着力は大きくなったため、一般的な土粒子と同様の挙動を示すことが確認された。

3. 砂質土を対象とした繰返し単純載荷解析

3.1 繰返し単純載荷解析の条件

前述の表 1 におけるモデル 2 (中-粗砂: 粒径 1.0mm) の垂直応力 50kN/m^2 のケースを対象に、繰返し単純せん断試験によって、砂質土の履歴特性の分析を実施する。繰返し単純載荷は、せん断ひずみ振幅を $+0.05, -0.05, +0.10, -0.10$ のように $+0.35, -0.35$ まで、計 7 サイクルの繰返し単純載荷を行う。DEM との比較解析として、平面ひずみ要素を対象とした FEM 解析を実施する。FEM の解析ソフトは TDAPIII⁴⁾ とし、1 要素の平面ひずみ要素に、地盤の材料非線形モデルとして修正 GHE モデルを採用し、DEM と同様のせん断ひずみ振幅を与えた。1 要素 FEM 解析のイメージ図を図 4 に示す。境界条件として、モデル底面を固定とし、モデル上面の節点に水平の強制変位を与えることにより、平面ひずみ要素に単純せん断ひずみを与えた。修正 GHE モデルの各パラメータは鉄道標準⁵⁾の標準値を使用した。表 4 に修正 GHE モデルのパラメータを示す。この 1 要素の FEM 解析では、せん断応力 - せん断ひずみ関係における砂質土の骨格曲線と砂質土の履歴曲線を関数 (修正 GHE モデル) で定められているため、せん断ひずみに応じて決められたせん断応力が算出される。DEM では、FEM のようにせん断応力 - せん断ひずみ関係を関数で定義できない。そこで、せん断応力 - せん断ひずみ関係の骨格曲線に相当する単純せん断挙動について、DEM と近い値となるように、FEM における修正 GHE モデルの基準ひずみ γ_r とせん断弾性係数 G を設定した上で、両者の履歴特性を比較することとした。

3.2 繰返し単純載荷解析の結果

DEM と FEM による繰返し単純載荷の解析結果として、せん断応力 - せん断ひずみ関係を図 5 に示す。DEM による砂質土の履歴特性は履歴曲線を定義していないにも関わらず、FEM (修正 GHE モデル) と類似した砂質土の履歴特性を示すことが確認された。砂質土の履歴特性を定量的に評価するために、DEM と FEM のせん断応力 - せん断ひずみ関係から算出した等価剛性と等価減衰定数を図 6 に示す。等価剛性・等価減衰定数と

もに修正 GHE モデルと近い値となることや、ひずみ増加に伴う剛性低下および減衰増加が表現できている。

4. 本研究のまとめと今後の課題

DEM により砂質土を対象とした繰返し単純載荷時の履歴特性を算出した結果、せん断応力 - せん断ひずみ関係は安定した履歴曲線を描いた。今後は、砂質土のみではなく、シルトや粘土といった粒径の細かい土粒子に対しての履歴特性の分析を行う必要がある。

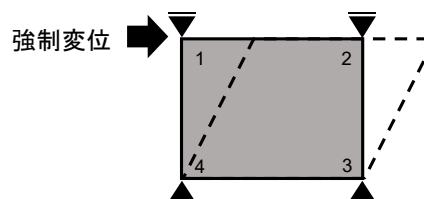


図 4 1 要素 FEM 解析のイメージ図

表 4 修正 GHE モデルのパラメータ⁵⁾

$C_1(0)$	$C_2(0)$	$C_1(\infty)$	$C_2(\infty)$	α
1.000	0.830	0.170	2.500	2.860
β	h_{\max}	β_1	$G(\text{kN/m}^2)$	γ_r
3.229	0.240	0.000	1.755×10^4	0.048

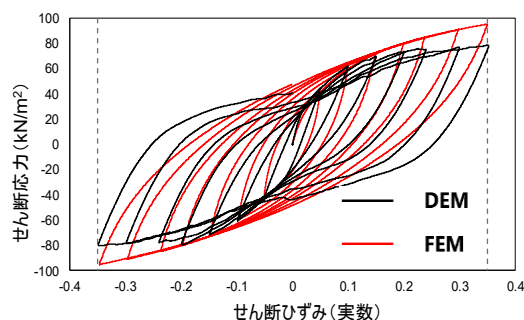


図 5 DEM・FEM によるせん断応力 - せん断ひずみ関係

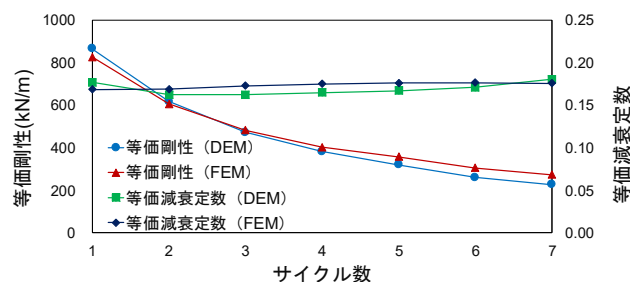


図 6 DEM・FEM による等価剛性・等価減衰定数の比較

参考文献

- 1) 福元ら：地盤材料の破壊基準を表現するためのシンプルな個別要素モデル，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol67，NO.1,105-112,2011.
- 2) Yade : <https://yade-dem.org/doc/> (閲覧日 2022 年 10 月 31 日).
- 3) 公益社団法人 地盤工学会：地盤調査基本と手引き，丸善，2013.
- 4) アーク情報システム：TDAPIIIマニュアルバージョン 3.10，2018.
- 5) 公益財団法人 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，2012.