第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

個別要素法による砂質土を対象とした水平2方向載荷時の挙動分析に関する研究

内山　康太郎[1]・井上　和真[2]・小野　祐輔[3]・上田　恭平[4]

[1]学生会員　群馬工業高等専門学校　専攻科環境工学専攻（〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町580）
[2]正会員　博士（工学）　群馬工業高等専門学校准教授　環境都市工学科
（〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町580）
[3]正会員　博士（工学）　鳥取大学教授　工学部社会システム土木系学科
（〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4丁目101番地）
[4]正会員　博士（工学）　京都大学准教授　防災研究所（〒611-0011京都府宇治市五ケ庄）

1. はじめに

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．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試験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変形を生じることから，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．

更に，水平 2 方向入力に対する地盤の地震時挙動の分析・把握も重要な課題の一つである．例えば，井上ら [2)]は，地盤の非線形性を考慮した 3 次元土柱モデルを対象に，等価線形解析，逐次非線形解析を用いて水平 2 方向入力の非線形地震応答に与える軌跡特性の影響の評価を行った．酒句ら [3)]は，仮動的実験法を用いて，異なる実測波を 2 方向入力および最大応答加速度方向の 1 方向入力による飽和砂地盤の液状化特性について実験的に検討を行った．藤川ら [4)]は，液状化試験のシミュレーション解析を行うことで，加速度や過剰間隙水圧，地表面沈下量に着目し，実験結果との比較や 1 方向および 2 方向入力の比較を行った．このように地盤を対象に水平 2 方向入力作用時の地盤の非線形応答に着目した研究が行われてきた．これらの研究は，地盤のマクロな挙動に着目したものであり，水平 2 方向入力作用が地盤の非線形応答に及ぼす影響の主要因については，土粒子に着目した分析が必要であると考えられる．数多くの室内土質試験が存在するが，水平 2 方向に単純せん断変形を載荷できる土質試験機は存在しないことが現状である．

そこで，DEM により水平 2 方向に載荷可能な単純せん断試験機の創出を行い，水平 2 方向載荷時の砂質土の非線形応答特性の分析を実施した．

まず，砂質土の繰返し載荷に対する履歴特性を確認するために，繰返し単純せん断試験を DEM によって表現し，せん断応力-せん断ひずみ関係や動的変形特性について分析を実施した．また，最大せん断ひずみを基準として，せん断ひずみの経路が異なる単純せん断試験を DEM で実施し，水平 2 方向載荷時のせん断応力 - せん断ひずみの関係を評価した．なお，本研究で用いる DEM の解析ソフトは Yade[5)] のバージョン 2023.02a を使用した．

2. DEMによる砂質土の履歴特性の評価

(1) DEMによる繰返し単純せん断試験の解析条件

DEMによる砂質土の履歴特性を確認するために，漸増振幅による繰返し単純せん断試験を実施した．DEMによる単純せん断試験のモデル概要図を**図-1**に，単純せん断試験のDEMの解析パラメータを**表-1**に示す．DEMによる砂質土を対象とした単純せん断試験のモデルとして，地盤調査基本と手引き[6)]を参考にせん断箱を横6.0cm，奥行き6.0cm，高さ2.0cmの直方体とし，砂質土の粒径は直径0.80mm（中砂）として，砂地盤を均一な径を持つ球体粒子の集合体とした．このとき，粒子を納めるせん断箱と粒子間には摩擦は生じないこととした．境界条件は，モデルの底面を固定，側面を周期境界とすることにより，砂質土の単純せん断変形を表現した．

載荷手順として，等方性圧縮過程は100kN/m^{2}となる垂直応力となるような垂直力を与えたのち，単純せん断変形をひずみ制御にて与える．DEMによる繰返し単純せん断試験結果と地盤の非線形モデルとのせん断応力 - せん断ひずみ関係の比較を行うことを目的として，修正GHEモデル[7)]との比較を行う．任意の載荷履歴に対する修正GHEモデルのせん断ひずみ - せん断応力関係を取得するために，汎用解析

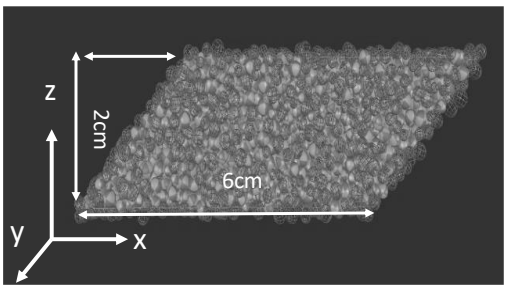


図-1 DEMによる単純せん断試験のモデル図

表-1 砂質土のDEM解析パラメータ

密度(kg/m^3)	2400
ヤング係数(Pa)	3.00E+07
粒子間摩擦角(°)	45
ポアソン比	0.15

表-2 修正 GHE モデルのパラメータ [9)]

修正GHEモデル固有のパラメータ	$C_1(0)$	1.000
	$C_2(0)$	0.830
	$C_1(\infty)$	0.170
	$C_2(\infty)$	2.500
	α	2.860
	β	3.229
	hmax	0.240
	β_1	0.000
初期せん断弾性係数	G_0(kN/m^2)	4.00×10^6
基準ひずみ	γ_r	0.0227

プログラムのTDAPIII[8)]を援用し，1要素の平面ひずみによるFEM解析を実施した．1要素の平面ひずみ要素には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．境界条件として，FEM解析の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．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，修正GHEモデルのように骨格曲線と履歴曲線を定義することができない．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と近しい値となるように，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．修正GHEモデルの各パラメータは鉄道標準[9)]の標準値を使用した．**表-2**に修正GHEモデルのパラメータを，**図-2**に1要素のFEM解析のモデル図を示す．繰返し単純せん断試験におけるひずみ振幅は**表-3**に示すように微小ひずみレベルから徐々にせん断ひずみ振幅を増加させ，最大せん断ひずみ10%まで増加させることにより，漸増繰返し単純せん断試験の振幅とした．

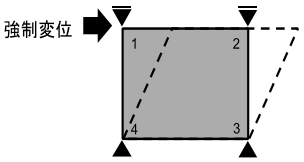


図-2 1要素のFEM解析のモデル図

表-3 繰返し単純せん断試験におけるせん断ひずみ振幅

サイクル数	せん断ひずみ振幅（%）
1	±1.0×10^{-4}
2	±3.2×10^{-4}
3	±1.0×10^{-3}
4	±3.2×10^{-3}
5	±1.0×10^{-2}
6	±3.2×10^{-2}
7	±1.0×10^{-1}
8	±3.2×10^{-1}
9	±6.3×10^{-1}
10	±1.0
11	±3.2
12	±6.3
13	±10

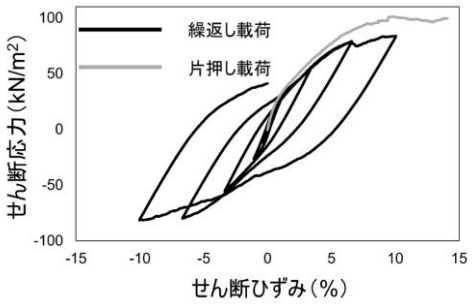


図-3 DEM による片押しと繰返し単純せん断試験時のせん断応力 - せん断ひずみ関係の比較

(2) DEMよる繰返し単純せん断試験の解析結果

図-3に，DEMによる片押しと漸増振幅の繰返し単純せん断試験のせん断応力 - せん断ひずみ関係を示す．繰返し単純せん断試験のせん断応力は，片押し時せん断応力を下回っており，繰返し作用によって，せん断応力が低下しているものと推察される．

図-4にDEMにより求められたせん断応力 - せん断ひずみ関係と，修正GHEモデルのせん断応力-せん断ひずみ関係の比較を示す．両者を比較すると，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，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剛性低下曲線G/G_0-γと減衰低下曲線h-γを**図-5**に示す．DEMは履歴曲線が定義されていないものの，修正GHEモデルと類似した履歴特性となることや，せん断ひずみ増加に伴う剛性低下や減衰増加が表現できていることが確認された．以上により，繰返し単純せん断を受ける砂質土の履歴特性の分析において，DEMの適用性が確認された．

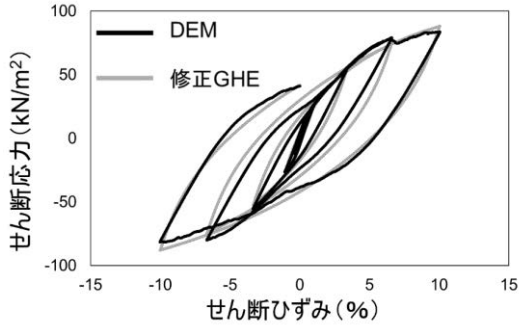


図-4 DEMと修正GHEモデルのせん断応力-せん断ひずみ関係の比較

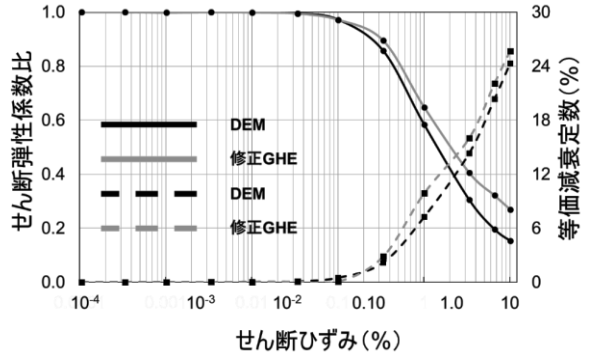


図-5 DEM と修正 GHE モデルの動的変形特性の比較

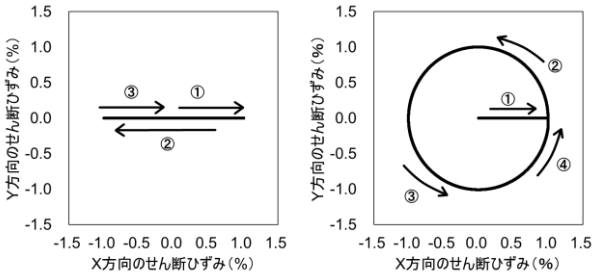
3. DEMによる水平2方向単純せん断試験

(1) DEMによる水平2方向単純せん断試験の解析条件

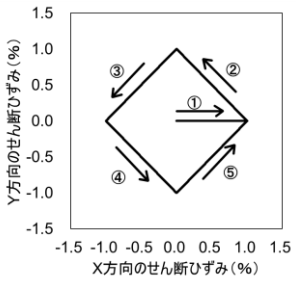
砂質土の水平2方向の地震応答特性を確認するために，水平2方向載荷の単純せん断試験を実施した．水平2方向載荷の単純せん断試験では，水平1方向の載荷経路の直線経路，水平2方向の載荷経路の円形経路，ひし形経路による単純せん断ひずみ経路による載荷を実施した．各載荷経路は最大合成せん断ひずみが，1.0%（あるいは10%）で等しい点に特徴がある．**図-6**に最大せん断ひずみ1.0%とした場合の載荷経路を示す．最大せん断ひずみ10%の場合の図示は省略するが，**図-6**のせん断ひずみを10倍したものに相当する．また，**図-6**における○数字は，載荷経路の順序を示している．水平2方向載荷による非線形特性の影響は，水平1方向経路載荷時と水平2方向経路載荷時の砂質土の応答を比較することで評価する．なお，円形経路やひし形経路については，鋼製橋脚[10]・RC橋脚[11]，免震ゴム支承[12]の水平2方向静的載荷実験における載荷経路を参考に採用した．

(2) DEMによる水平2方向単純せん断試験の結果

DEMによる水平2方向単純せん断試験の結果として，**図-7**，**図-8**に各載荷経路ごとのせん断応力-せん断ひずみ関係を示す．円形経路，ひし形経路のY方向のせん断応力-せん断ひずみ関係に着目すると，Y方向はX方向と同一のせん断ひずみにおけるせん断応力が低下していることが確認できる．**図-9**に方向別のせん断応力-せん断ひずみ関係を示す．

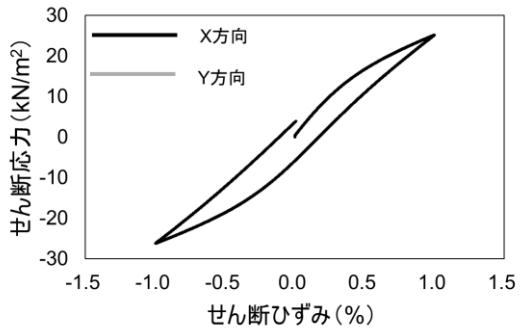


(a) 直線経路　　(b) 円形経路

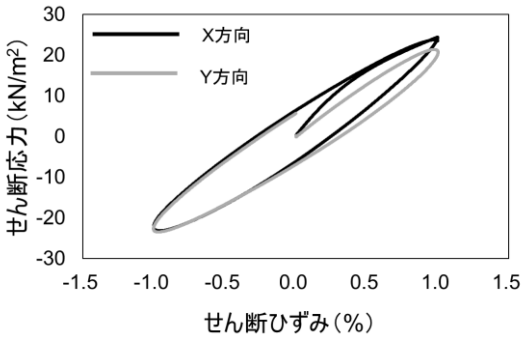


(c) ひし形経路

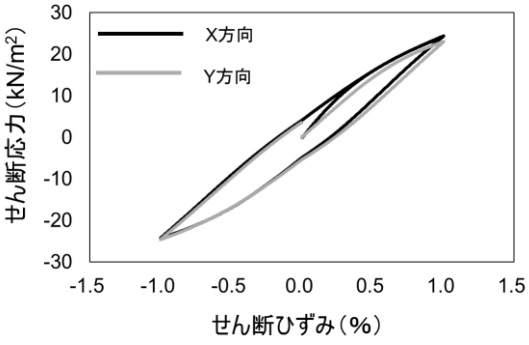
図-6　単純せん断試験の載荷経路（γ_{max} = 1.0%の例）



(a) 水平1方向経路（直線経路）

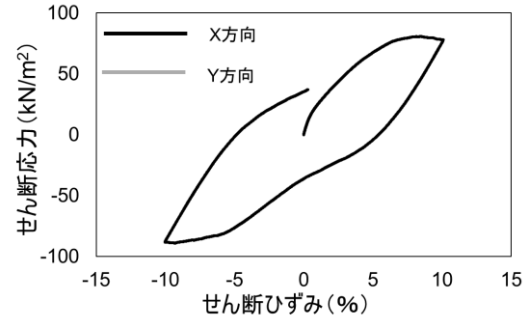


(b) 円形経路

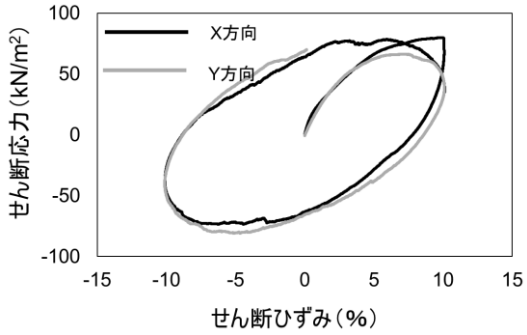


(c) ひし形経路

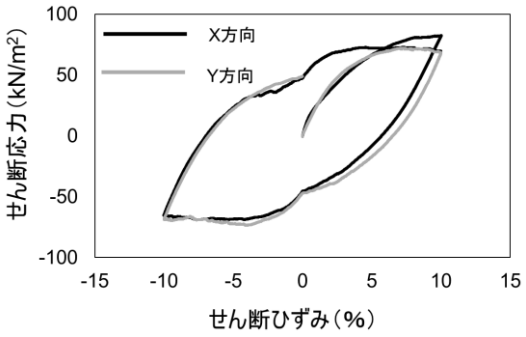
図-7　せん断応力-せん断ひずみ関係（γ_{max} = 1.0%）



(a) 水平1方向経路（直線経路）

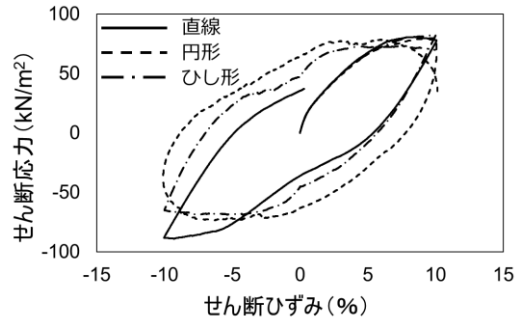


(b) 円形経路

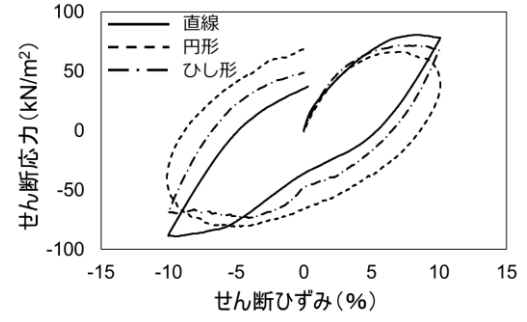


(c)ひし形経路

図-8 せん断応力-せん断ひずみ関係（γ_{max} = 10%）



(a) X方向のせん断応力－せん断ひずみ関係



(b) Y方向のせん断応力－せん断ひずみ関係

図-9 方向別せん断応力-せん断ひずみ関係（γ_{max} = 10%）

この応力低下は，円形経路・ひし形経路において，Y方向に至る前に，事前にX方向の載荷を受けたことに起因すると考えられ，特に載荷経路の長い円形経路で応力低下の大きいことが確認できる．

4. 結論

DEM による繰返し単純せん断試験結果として，履歴特性を評価した結果，せん断応力 - せん断ひずみ関係は安定した履歴曲線を描き，修正 GHE モデルと類似した履歴特性，動的変形特性を示した．更に，載荷経路の異なる水平 2 方向単純せん断試験により，円形経路の場合，応力低下が顕著となる結果が得られた．今後の課題として，水平 2 方向の載荷経路ごとの砂質土の体積変化（液状化）に着目した検討を行う予定である．

謝辞：本研究は科研費 20K14816，23K04013 および令和 5 年度京都大学防災研究所共同研究の助成のもと実施しました．また，港湾空港技術研究所の佐藤樹博士，毛利惇士博士に助言をいただきました．

参考文献

1) 福元豊，阪口秀，村上章：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，土木学会論集A2（応用力学），vol67．No.1，pp.105-112，2011.
2) 井上和真，渡辺和明，立石章，五十嵐晃：2方向応答スペクトル適合波による土中モデルの非線形応答に関する解析的検討，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.74，No.2，pp.I_603-I_614，2018.
3) 酒句教明，安達俊夫：液状化特性に及ぼす二方向入力の影響，地盤工学研究会発表講演集，第38回地震工学研究発表会（秋田），pp469-470，2003.
4) 藤川智，福武毅芳，大槻明：二方向同時入力による液状化のシミュレーション解析，地震工学研究発表会講演概要22巻，pp.35-38，1993.
5) Yade：https://yade-dem.org/doc/（閲覧日2023年5月2日）
6) 公益社団法人 地盤工学会：地盤調査基本と手引き，丸善，2018.
7) 西村昭彦，室野剛隆：GHEモデルと簡易な履歴則を用いた土 の非線形モデルの提案と実験的検証，第25回地震工学研究発 表会，pp.309-312，1999.
8) アーク情報システム：TDAPⅢマニュアルバージョン3.10，2018.
9) 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.
10) 後藤芳顯，江坤生，小畑誠：2方向繰返し荷重と受ける矩形断面鋼製橋脚柱の履歴特性，土木学会論文集A，Vol.63，No.1，pp.122-141，2007.
11) 早川涼二，川島一彦，渡邊学歩：水平2方向地震力を受けるRC橋脚の耐震性，土木学会論文集，No.759，pp.I-67，pp.79-98，2004.
12) 五十嵐晃，党紀，村越雄太，伊東俊彦：免震ゴム支承の水平2方向復元力特性に関する載荷実験及び復元力モデルの比較検討，土木学会論文集A1，Vol.69，No.4，pp.I_311-I_325，2013.