

SPH-DEM 法に基づく石積み擁壁の模型実験に対する数値シミュレーション

法政大学大学院 学生会員 ○伊吹 竜一, 正会員 酒井 久和
 鳥取大学大学院 正会員 小野 祐輔
 鉄道総合技術研究所 正会員 湯浅 友輝, 高柳 剛, 樺 健典

1.はじめに

石積み擁壁は地震に対して非常に脆弱な構造物であり, 地震による被害を軽減するためには, 崩壊のメカニズムを解明し, 適切な安全性評価と対策を行うことが必要である. そこで筆者らは, 石積み擁壁に対する解析手法の確立を目的として, 2014 年度に実施された傾斜破壊及び振動台実験¹⁾などに対して SPH-DEM 法を用いた解析的検討を進めている²⁾. 本研究では間知石間の力学特性の再現を目的として, 2016 年度に実施された間知石引き抜き崩壊実験³⁾に対する数値シミュレーションを行う. 解析結果と実験結果の不整合に着目して, 解析モデルや解析プログラムの改良を進めるとともに, SPH-DEM 法の有用性を検討する. ただし, 本研究で扱う解析は 2 次元のため, 布積みの実験ケースのみを対象とする.

2.解析条件

2.1.解析パラメータ

間知石引き抜き崩壊実験の解析を行うために必要となる SPH パラメータは各種土質試験³⁾で求められた値を採用する(表 1 参照). また, DEM パラメータのうち, 実験で得られた単位重量と静止摩擦係数以外の解析パラメータは, 相澤の研究⁴⁾で採用された値を用いる(表 2 参照). また, 本解析における積分時間間隔は 2×10^{-6} 秒, 影響半径は 0.026m(粒子間隔の 2.6 倍)である.

表 1 SPH パラメータ

	材料名	単位重量 (kN/m ³)	ヤング率 (kN/m ²)	ポアソン 比	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦 角(°)	ダイレタン シ角(°)
裏栗石	8分川砂利	17.68	16,200	0.3	0	36.2	0
背面地盤	珪砂3号	15.96	5,300	0.3	0	33.7	0

表 2 DEM パラメータ

	ばね係数(N/m)		減衰係数(N・s/m)		摩擦係数
	法線方向	接線方向	法線方向	接線方向	
DEMとDEM	1.0×10^8	1.0×10^7	1.0×10^4	1.0×10^4	0.56
DEMとSPH	1.0×10^8	1.0×10^7	1.0×10^4	1.0×10^4	0.35

2.2.解析モデル

SPH-DEM 法の解析では, 粒子に離散化された解析モデルが必要となる. そこで, 鉄道総合技術研究所の実験報告書³⁾に記載されている模型断面図から座標取得ソフトを用いて要素ごとの閉領域の座標を取得し, その領域内に粒子を配置することで図 1 に示すような解析モデルを構築した. このとき, 境界条件として解析モデルの左端, 右端, 下端の粒子一列を固定した.

2.3.解析プログラムの改良

引き抜き崩壊実験の解析を行うために, 従来の地震応答のみでなく, 間知石に集中荷重を載荷できる機能を解析プログラムに追加した. これにより, 引き抜き対象の間知石(紫色)に対して前面法線方向(各ステップで再計算)に動的集中荷重を引き抜き力(図 2 中赤矢印, 計算上は橙矢印に分解)として作用させる.

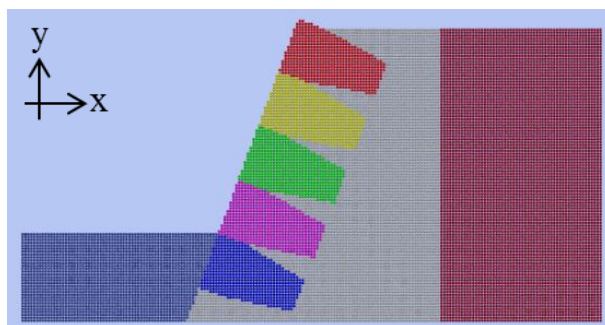


図 1 解析モデル

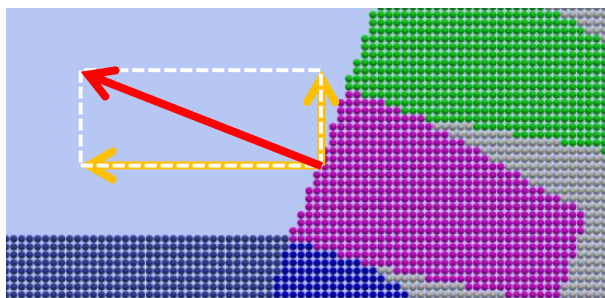


図 2 集中荷重の載荷イメージ

キーワード 石積み擁壁, 数値シミュレーション, 粒子法, SPH 法, 個別要素法

連絡先 〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33 法政大学デザイン工学研究科 TEL03-5228-1347

3.解析結果

実験における引き抜き力の最大値は 2.67kN であることから, 最大 2.50kN に相当する引き抜き力を漸増入力した解析の結果を図 3 に示す. ここでは, 荷重が載荷されると擁壁が一体となって動き, 対象の間知石のみを引き抜くことができなかった. これは DEM 粒子で構成された間知石の表面の凹凸が噛み合い, 間知石間の結合力が大きくなるのが原因であった. また, DEM と DEM の減衰係数が大きいことも原因の 1 つであるとわかった.

間知石間の過大な結合力は DEM 粒子の配列が問題であることから, モデル全体を傾け, 間知石間の接触面における粒子の初期の噛み合わせが除去されたモデルを構築した(図 4 参照). また, 間知石間に作用する力に減衰力が含まれることのないように減衰係数を法線方向, 接線方向ともに 0 として解析を行った. その結果, 引き抜き力が 2.50kN を超えると間知石が大きく変位し始め, 崩壊時には上部 3 つの間知石が実験のように後方へ転倒するなど(図 5 参照), 実験結果(図 6 参照)とほぼ定性的に整合する結果が得られた. ただし, 解析では実験と比較して背面地盤に過大な変形が生じた.

背面地盤の過大な変形は間知石が急激に引き抜かれたためであると考え, 引き抜く間知石の速度に上限値を設けることにより, 速度制御で段階的に載荷を行うようにプログラムを改良して解析を行った. プログラムを改良する前(白色)と後(赤色)の引き抜き後の残留変形状態を重ね合わせたものを図 7 に示す. プログラムの改良前後において背面地盤の変位にあまり差がないことから, 背面地盤の過大な変形は間知石の引き抜き速度とは関係がないと考えられる. さらに, 対象の間知石が引き抜かれると, その直下の間知石が前面に移動してすべり線が実験よりも後方で形成されることから, 過大な変形は間知石間の摩擦力を過大評価したために生じたと考えられる.

4.まとめ

本研究では, 間知石引き抜き崩壊実験³⁾に対して数値シミュレーションを行い, 実験時の間知石の残留変形状態を定性的に再現することができたが, 背面地盤の変形は過大に評価された. 今後, 間知石間の適正な相互作用を再現するには, 間知石の表面を部分的に小さな粒子で構成し, 噛み合わせが無くなるような解析モデルを構築することや, DEM の計算において粒子の噛み合わせによる結合力に上限値を設けるような解析プログラムに改良することが必要である.

参考文献

- 1)中島進他: 崩壊防止ネットと地山補強材による石積み壁の耐震補強工法に関する実験的検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第 18 号, pp.125-132, 2014.
- 2)伊吹竜一他: SPH-DEM 法に基づく石積み擁壁の模型実験に対する数値シミュレーション, 第 2 回擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム, pp20-30, 2017.2.
- 3)湯浅友輝他: 小型模型石積み壁を用いた引き抜き崩壊実験, 土木学会第 72 回年次学術講演会, (2017.9.投稿予定)
- 4)相澤類: SPH 解析による石積み擁壁の対策効果の検討, 法政大学デザイン工学部都市環境デザイン工学科卒業論文, 2016.1.

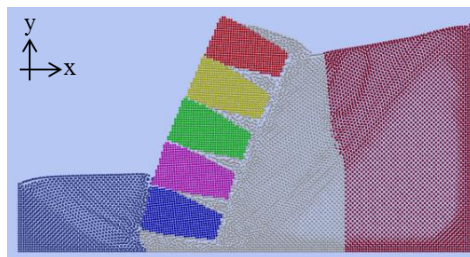


図 3 解析結果(改良前)

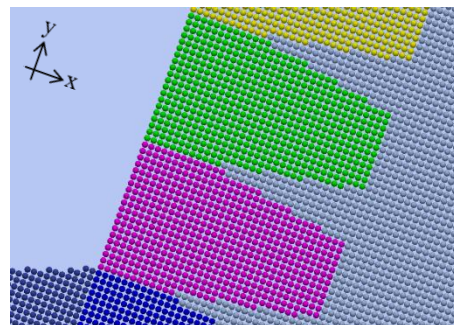


図 4 間知石の粒子配列

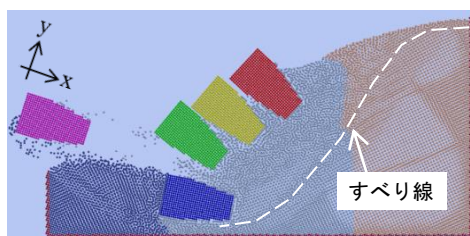


図 5 解析結果(改良後)

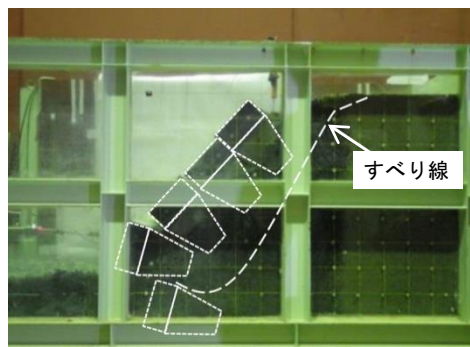


図 6 実験結果³⁾

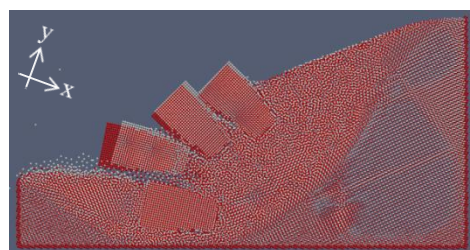


図 7 残留変形状態の比較