

## SPH - DEM 連成解析法を用いた石積み壁載荷試験の再現解析

(公財) 鉄道総合技術研究所 正〇 高柳剛 正 伊吹竜一

## 1. はじめに

鉄道沿線の石積み壁の維持管理には、壁体の変状程度に応じた適切な健全性判定、および変状石積み壁に適用する経済的な簡易補強工法などが求められる。補強が必要な場合の簡易補強工の例として、アンカーと腹起し材で石積み壁の変形部を拘束するなどの措置を挙げる。しかし石積み壁の健全性判定基準や簡易対策工の変形抑制効果の評価手法はこれまで確立されていない。そこで筆者らは実物大の石積み壁模型を用いた載荷実験<sup>1)</sup>(図1)を実施し、変形過程の観察や補強工の効果確認等を試みているものの、一般化の為に石積み壁の変形解析手法の整備が求められる。本稿では、近年、土木分野の大変形解析問題に適用される事例が増えつつある Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用いた上記載荷実験の再現解析に関する検討結果を報告する。

## 2. 解析条件

本検討においては、小野ら<sup>2)</sup>によって提案された二次元 SPH - DEM 連成解析法のプログラムコードを適用して静的載荷実験<sup>1)</sup>の再現を試みる。同解析法は石積み壁の地震応答解析を目的に開発され、ブロック要素を個別要素法 (DEM)、礫・土要素を SPH でモデル化して両者を連成解析する。載荷実験の条件に基づき作成した石積み壁のモデルを図2に、石積み壁の岩ブロック要素の概要を図3に示す。さらに模型実験の情報を参考に設定した各解析パラメータを表1に示す。岩ブロック要素は六角形の各頂点に設定した接触判定点と各辺に設定した接触判定線から構成され、単位体積重量には  $24.0\text{kN/m}^3$  を設定する。なお本解析の SPH 粒子総数は 25,037、粒子径は  $0.01\text{m}$ 、解析積分時間は  $2.0 \times 10^{-6}\text{sec}$ 、平滑化距離は  $0.026\text{m}$  である。過去の載荷実験では、石積み壁の法肩に面積  $A=1.0\text{m} \times 0.5\text{m}$  の載荷板を介して載荷重を最大  $200\text{kN}$  作用させているため、本検討

では法肩に同載荷板を模擬したブロック要素 (質量  $200\text{kg}$ , 載荷幅  $0.5\text{m}$ ) を設定し、同要素に Z 方向 (下方向) の加速度を作用させること

で載荷重を再現する。次に本検討の解析ケースを表2に整理して示す。今回は土要素の残留粘着力  $C_{res}$  の有無、載荷増加速度、補強の有無を条件として、これらの影響を検討する。特に載荷増加速度については、実際の静的載荷

キーワード 石積み壁, 粒子法, 個別要素法

連絡先 〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 地盤防災 TEL 042-573-7263

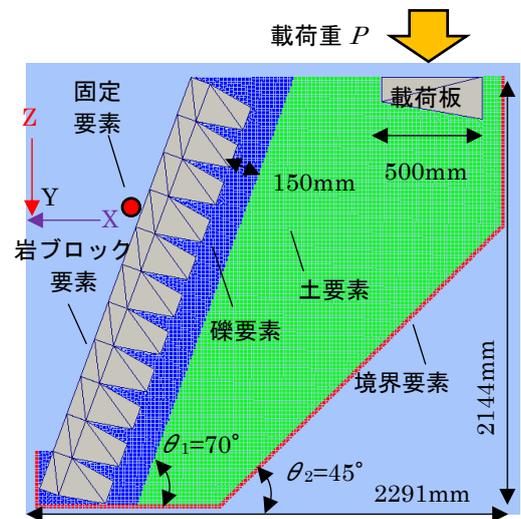
図1 石積み壁載荷試験の様子<sup>1)</sup>

図2 石積み壁の二次元解析モデル概要

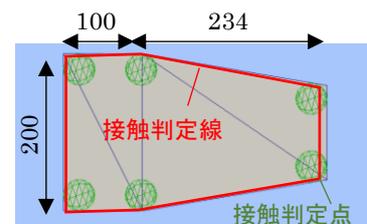


図3 ブロック要素の概要

表1 解析パラメータまとめ

要素	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	ヤング率 $E$ (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	初期粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (°)
土要素	17.9	17,100	0.33	49	33
礫要素	15.7	36,400	0.29	0.1	36.9
境界	法線方向 バネ係数 (N/m)	接線方向 バネ係数 (N/m)	法線方向 減衰係数 (N・S/m)	接線方向 減衰係数 (N・S/m)	摩擦係数 $\mu$
DEM-DEM	1.00E+08	4.17E+07	8.40E+02	5.42E+02	0.6
DEM-SPH	1.00E+07	4.17E+06	2.66E+02	1.71E+02	0.26

実験の荷重速度を解析で再現することは解析荷重の観点から困難である。そこで図4に示す複数の荷重条件を適用し、荷重増加速度が石積み壁の変形挙動に与える影響を把握する。また補強条件として、腹起し材により石積み壁の横一段が拘束される簡易補強を模擬し、石積み壁の下から8段目の岩ブロックに固定要素を配置する(図2)。

### 3. 解析結果

解析ひずみ分布図の一例を図5に示す。さらに各解析ケースの比較を目的に、石積み壁の下から5段目の岩ブロックの変位量(x軸方向)ー荷重重関係を図6に整理して示す。図5は実験結果で観察された石積み壁の変形モード(図1)と概ね一致する結果となった。一方でCASE:A-1とCASE:A-2を比較すると、土要素のパラメータの違いによって、壁面の変形モードが影響を受けることが分かった。CASE:A-1ではすべり面が比較的明瞭に表れ、石積み壁下部が最も変形するモードとなった。一方、CASE:A-2では石積み壁中腹から下部にかけて累積塑性ひずみが広く分布し、石積み壁中腹が最も変形した。変形モードの観点では、CASE:A-2の方が実験結果と一致するものの、変位量ー荷重重関係の最大荷重  $P_{max}$  の観点からはCASE:A-1の方が実験結果と一致する。変形量および最大降伏荷重に関する解析精度の向上には、今後、DEMおよびSPHの適切なパラメータ設定に関して更なる検討を進める必要がある。

次に荷重速度の影響検討を目的に、CASE:A-2, CASE:B-1, CASE:B-2の変位量ー荷重重関係を比較した結果、荷重増加速度によらず最終的な最大荷重  $P_{max}$  は概ね同等となるものの、石積み壁の変形過程において差異を生じるケースが確認され、荷重速度が最も遅いCASE:B-2でその傾向が顕著であった。一方、本解析においては荷重速度を実際の荷重速度まで遅くしたとしても、解析精度の向上には大きく寄与しないと判断される。最後に石積み壁への補強を再現したCASE:C-1の解析結果(図6)を確認すると、5段目岩ブロックの変位量(x軸方向)は9mm程度で、一段分の石積み壁を腹起し材で固定した場合でも、壁面全体の変位を大きく低減できる解析結果が得られた。これは過去の荷重実験における同変位量8mmと一致しており、良好な再現解析結果が得られている。

### 4. まとめ

本検討では二次元SPH-DEM連成解析法を利用して、実物大石積み壁模型の静的荷重実験結果の再現解析を試みた。各要素に設定するパラメータに関して更なる検討が必要であるものの、良好な再現解析結果を得ることができた。今後は石積み高さや背面地盤強度等を条件としたパラメータスタディ等を進める予定である。

謝辞：本研究の実施には法政大学の酒井教授に多大なご協力を頂いた。深くお礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 高柳剛 他：はらみ出し指数に着目した石積み擁壁の安定度評価，第49回地盤工学研究発表会，2014
- 2) 小野 祐輔 他：石積み擁壁の耐震補強効果の検討のためのSPH-DEM連成解析法の開発，土木学会論文集A1,73巻4号,p.357-365,2017

表2 解析ケースまとめ

解析ケース	残留粘着力 $C_{res}$ (kN)	荷重増加速度 $v_p$ (kN/sec)	補強条件
CASE A	1	49	補強材なし
	2	0	補強材なし
CASE B	1	0	補強材なし
	2	0	補強材なし
CASE C	1	0	補強材あり

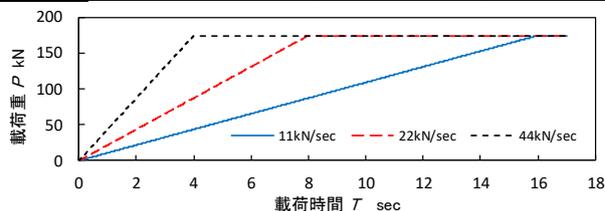


図4 荷重条件(荷重重ー荷重時間)

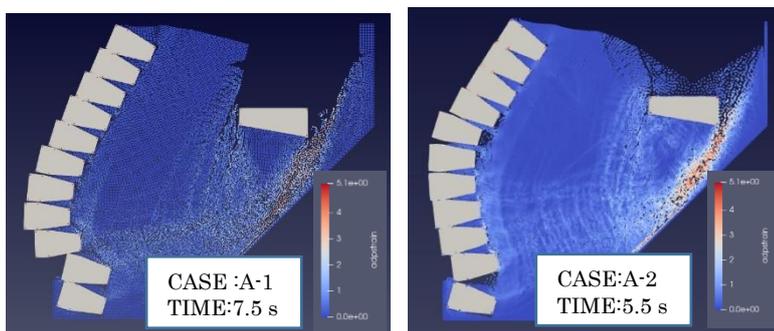


図5 解析ひずみ分布図の例(CASE:A-1, CASE:A-2)

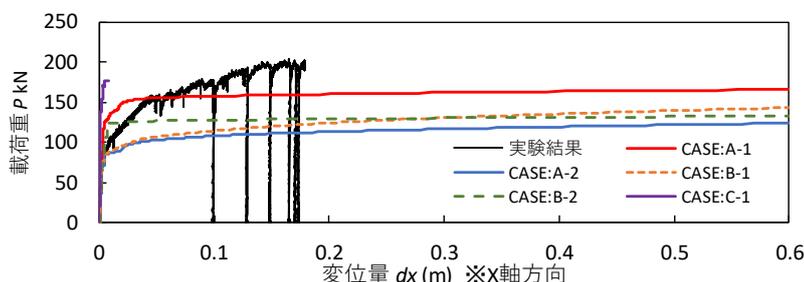


図6 変位量ー荷重重関係まとめ