

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

伊吹 竜一¹・小野 祐輔²・酒井 久和³・
高柳 剛⁴・湯浅 友輝⁵・池田 勇司⁶

¹ 学生会員 法政大学 デザイン工学研究科 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)
E-mail: ryuichi.ibuki.6s@stu.hosei.ac.jp

² 正会員 鳥取大学大学院准教授 工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101)
E-mail: ysk@cv.tottori-u.ac.jp

³ 正会員 法政大学教授 デザイン工学部 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)
E-mail: hisakai@hosei.ac.jp

⁴ 正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺光町 2-8-38)
E-mail: takayanagi.tsuyoshi.42@rtri.or.jp

⁵ 正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺光町 2-8-38)
E-mail: yuasa.tomoki.49@rtri.or.jp

⁶ 非会員 法政大学 デザイン工学部 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)
E-mail: yuji.ikeda.66@adm.hosei.ac.jp

石積み擁壁は地震に対して非常に脆弱な構造物であり、これまでに多くの被害が報告されている。そのため、石積み擁壁の崩壊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求められている。本研究では、石積み擁壁に対する地震時安定性評価手法の確立を目的とし、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法と個別要素法 (Distinct Element Method) を組み合わせた SPH-DEM 法の適用性を検討した。

鉄道総合技術研究所で行われた引き抜き崩壊実験を対象とした再現解析を試みた結果、解析の三次元化や摩擦力の過大評価といった課題が残されたが、引き抜き荷重の最大値や石積み擁壁の最終残留変形形状をほぼ再現することができた。

Key Words: *Masonry retaining wall, Smoothed particle method, Distinct element method, Two dimensional analysis*

1. 研究の背景と目的

石積み擁壁は、材料の入手が容易であること、コンクリート壁体と比べると環境に対する負荷が小さく、景観的にも優れていることより、古くから多くの国や地域で用いられてきた¹⁾。しかし、石積み擁壁は地震に対して非常に脆弱であり、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震²⁾や2016年4月11日の熊本地震⁴⁾において、石積み擁壁の崩壊や、はらみ出しによる上部の地盤の陥没、致命的な損傷による機能の停止などの被害事例が多数報告されている。また、石積み擁壁が崩壊すると、人的被害のみではなく、崩れた積み石や背面地盤が道路や線路を遮断し、救助活動や復旧工事に大きな影響を与えることがある。今後発生すると予想されている南海トラフ地震や主都直下型地震においても、これらのような石積み擁壁の崩壊による人的・経済的被害

害が考えられる。

石積み擁壁の地震による被害を軽減するためには、石積み擁壁の崩壊メカニズムを解明し、適切な安全性評価、対策を行うことが必要であるが、未だに十分なメカニズムの解明はなされていないのが現状である。メカニズムを解明する方法として、模型振動台実験などが行われているが、実物大の実験は困難な上、多様なケースの実験を実施すると多大な費用と時間がかかる。そのため、近年では数値シミュレーションによって、効率的に石積み擁壁の崩壊メカニズムを解明しようとする試みがなされている。

これまでは主に有限要素法(FEM: Finite Element Method)、不連続変形法(DDA: Discontinuous Deformation Analysis)といった数値シミュレーションに基づく研究が行われている。しかし、これらの手法では、崩壊などの大変形を伴う表現が不得意であったり、土質試験結果に基づかないパラ

メータの設定等が困難なうえ、それらのパラメータが結果に大きく影響するなど、問題点を有するのが現状である。一方、粒子法に属するSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法では対象とする連続体を粒子の集合で表現する。その際、運動量保存則、エネルギー保存則などを表す偏微分方程式に対してカーネル近似を行うことで個々の粒子の運動を計算し、連続体の挙動を確認する⁵⁾。SPH法では、物質の分裂・合体等の激しい動きにも対応でき、大変形を伴う現象や自由表面の複雑な運動を再現することが可能であるため、地盤構造物の大変形問題⁶⁾をはじめとした他の様々な分野への適用が試みられている。

本研究では、鉄道総合技術研究所によって実施された引き抜き崩壊実験⁸⁾について、SPH法と個別要素法(DEM:Distinct Element Method)を組み合わせたSPH-DEM法を用いて数値シミュレーションを行う。そして、解析結果と実験結果の不整合に着目して、プログラムの改良、パラメータの見直しを行い、石積み擁壁に対する数値シミュレーション手法を確立することを目的とする。

2. 解析手法

(1) SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法

SPH理論は1970年代後半にLucy⁹⁾、Monaghan¹⁰⁾によって提案された解析手法であり、当初は宇宙物理学における星間物質のダイナミクスや惑星衝突問題に対して用いられた。粒子表現による圧縮性流体解析手法として出発したが、弾性粒子の運動を表現することで、構造問題を扱うことも可能であるため、1990年代には宇宙工学の分野にも適用された。SPH法は図-1のように連続体を多数の粒子の集合とみなし、近似式から各物理量を計算する。離散化された粒子は、近似を行うための評価位置を示す仮想的な存在である。

SPH法では、連続体を多数の粒子へと離散化し、近似的に計算を行う。その際、関数 $f(x)$ の微分形 $\nabla \cdot f(x)$ に対して次に示すカーネル近似と呼ばれる近似手法を用いる⁹⁾。

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = - \int f(x') \cdot \nabla W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

ここで、 $\langle \nabla \cdot f(x) \rangle$ は関数 $f(x)$ の微分形 $\nabla \cdot f(x)$ を重み関数によって平均化したカーネル近似、 $W(x-x', h)$ はカーネル関数と呼ばれる重み関数、 x は評価する粒子の評価中心及び座標値、 x' は x の周辺の粒子の評価中心及び座標値、 h は影響半径である。

重み関数は原点に頂点があり、原点から離れるにつれて減少し、影響半径以上離れた時ときに0となる性質を持つ。粒子間の距離によって重み関数の値を変化させ、影響半径内にある粒子の物理量に重み付けを行い、それ

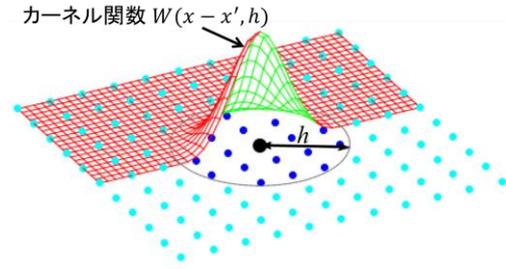


図-1 連続体の離散化と影響半径¹¹⁾

らの平均により、評価する粒子の物理量を求める。

関数 $f(x)$ は密度 ρ を持つ媒質上で定義されていると考え、式(1)を粒子によって離散化することで

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = - \sum_{j=1}^N \frac{m^j}{\rho^j} f(x^j) \cdot \nabla W(x-x^j, h) \quad (2)$$

を得る。ここで、 ρ^j 、 m^j 、 x^j は粒子 j の密度、質量、座標、 N は影響半径内にある粒子の総数である。

(2) 運動方程式の離散化

密度 ρ を持つ弾性体の運動方程式は次式で表される⁹⁾。

$$a^i = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{ij}}{\partial x^j} \quad (3)$$

ここで、 a^i は i 方向の加速度、 σ^{ij} は応力テンソルである。さらに、式(3)に式(2)を適用することで、次式を得る。

$$a_i^i = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{ij}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{ij}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \delta^{ij} \right) \frac{\partial W}{\partial x^j} \quad (4)$$

ここで、 I は評価を行う粒子、 J は影響半径内に含まれる粒子のことを指す。また Π_{ij} は人工粘性と呼ばれ、解の振動を防ぐために導入されており、それぞれ次のように定義される。

$$\Pi_{ij} = \frac{\mu_{ij} (\alpha C_{ij} + \beta |u_{ij}|)}{\rho_{ij}} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{h \left(\sum_{k=1}^2 (v_i^k - v_j^k) (u_i^k - u_j^k) \right)}{d_{ij}^2 + \epsilon h^2} \quad (6)$$

$$C_{ij} = \frac{1}{2} (C_i + C_j) \quad (7)$$

$$\rho_{ij} = \frac{1}{2} (\rho_i + \rho_j) \quad (8)$$

ここで、 C はP波速度、 v は粒子速度、 u は粒子位置、 d は粒子間距離である。また、 α 、 β は減衰の大きさ

を表す定数であり、 ε は過度な減衰が発生し、解析が不安定になることを防ぐパラメータである。

(3) 個別要素法 (DEM: Distinct Element Method)

DEMの粒子は変形をしない剛体粒子で、個々の粒子が大きな変位や回転することができるため、剥離、滑り、接触といった連続体の解析手法では再現できない現象を計算することができる¹²⁾。そこで、本研究では、間知石をDEM粒子を剛に結合させた剛体として表現する。

DEMでは粒子同士の接触により生じる力から各粒子の運動を計算するため、粒子の接触点に生じる力の評価が非常に重要となる。図-2に示すように、粒子*i*と粒子*j*の粒子間距離 L が2粒子の半径の合計である $(r+r')$ 以下するとき、二つの粒子は接触していると判断される。

また、粒子の持つ弾性的及び非弾性的性質は、接触点間に挿入したバネ(K_n, K_s)とダッシュポット(C_n, C_s)、スライダー(slider)で表現される(図-3参照)。つまり、粒子を完全な剛体とする代わりに、接触点に弾性特性、減衰特性、摩擦特性を表現するメカニズムを導入することで、粒子間の接触や運動の計算を行う¹³⁾。

本研究では、大きく変形する土粒子をSPH法で、剛体である間知石をDEMで計算するSPH-DEM法に基づいて、石積み擁壁の解析を行う。この手法では、SPH要素と剛体要素の接触によって発生する力はDEMのアルゴリズムに従って計算する。また、粒子の接触の判定はSPH粒子もDEM粒子と同様に円型であると仮定することで行う。全ての粒子の速度、位置を更新した後、剛体の挙動を考慮して、剛体を構成するDEMの粒子の速度及び位置を修正する。

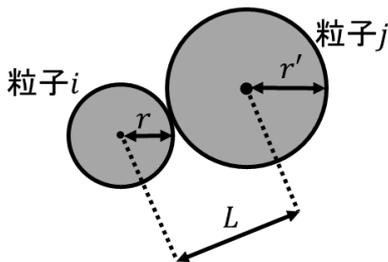


図-2 粒子の接触判定

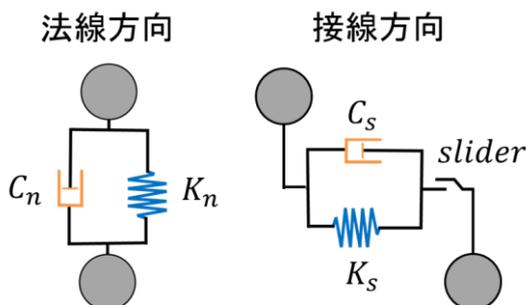


図-3 DEMにおける接触モデル

3. 対象実験の概要

本研究では、鉄道総合技術研究所において2016年9月から10月の間に実施された引き抜き崩壊実験⁹⁾を対象とする。この実験は、石積み擁壁の変形解析を行うために必要となる物性値の取得や再現解析の妥当性を検討するためのデータ取得を目的としており、解析パラメータ取得実験と引き抜き崩壊実験が実施された。解析パラメータ取得実験としては、摩擦係数の取得を目的とした実験(Case-A)、弾性係数の取得を目的とした平板載荷実験(Case-B)及び内部摩擦角の取得を目的とした実験(Case-C)が行われた。また、引き抜き崩壊実験では石積み方式として布積み(Case-1)と谷積み(Case-2)の2ケースが行われたが、解析が二次元であるため、本研究ではCase-1を対象とする。

(1) Case-A (摩擦係数の取得実験)

Case-Aでは、間知石と間知石の間と間知石と裏グリ石の間の静摩擦係数と動摩擦係数を取得することを目的として実験が行われた。間知石は質量が24kg、底面が200mm×200mm、上面が120mm×120mm、高さが334mmの四角錐台状であり、裏グリ石は8分砂利が用いられた。間知石と間知石の間の摩擦係数の取得実験では、固定した間知石の上に引き抜き棒付きの間知石を置き、その棒を油圧ジャッキでゆっくりと引っ張り、引き抜き荷重とジャッキの変位量の関係から各摩擦係数が求められた。また、間知石と裏グリ石の間の摩擦係数の取得実験では、アルミ板の上に裏グリ石を接着剤で固定し、その上に引き抜き棒付きの間知石を設置して同様に実験が行われた。なお、両ケースともに引き抜く間知石の上に上乗荷重として間知石が一つ置かれている。また、静止摩擦係数は引き抜き荷重の最大値から算出され、動摩擦係数は最大静止摩擦力を無視し、接触面間の相対的な変位の発生後、一定時間の間の荷重の平均値から算出された。

その結果、間知石と間知石の静摩擦係数は0.56、動摩擦係数は0.46、間知石と裏グリ石の静摩擦係数は0.35、動摩擦係数は0.25であった。

(2) Case-B (弾性係数の取得実験)

Case-Bでは、地盤工学会の平板載荷試験方法¹⁴⁾を参考に実験が行われた。土槽に8分砂利と珪砂3号をそれぞれ高さ約0.5m、幅約1m、奥行き約1mの範囲に実験条件と同様に構築し、地盤表面の中央に150mmの平板を置き、平板に対して上からジャッキで単調繰返し荷重が与えられた(図-4参照)。そして、そのときの荷重と平板の変位量の関係から式(9)を用いて弾性係数 E (MN/m²)が求められた。ただし、平板の変位量は平板に設置された四つの変位計の値の平均値である。

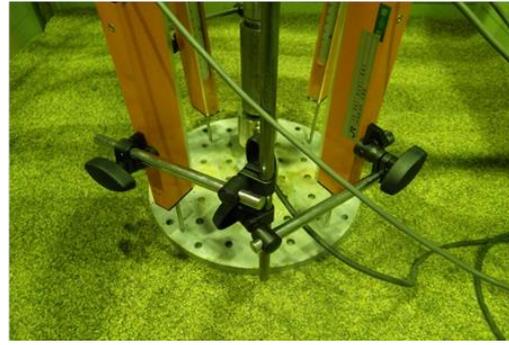


図-4 Case-B (左：8分砂利, 右：珪砂3号)⁸⁾



図-5 Case-C (左：8分砂利, 右：珪砂3号)⁸⁾

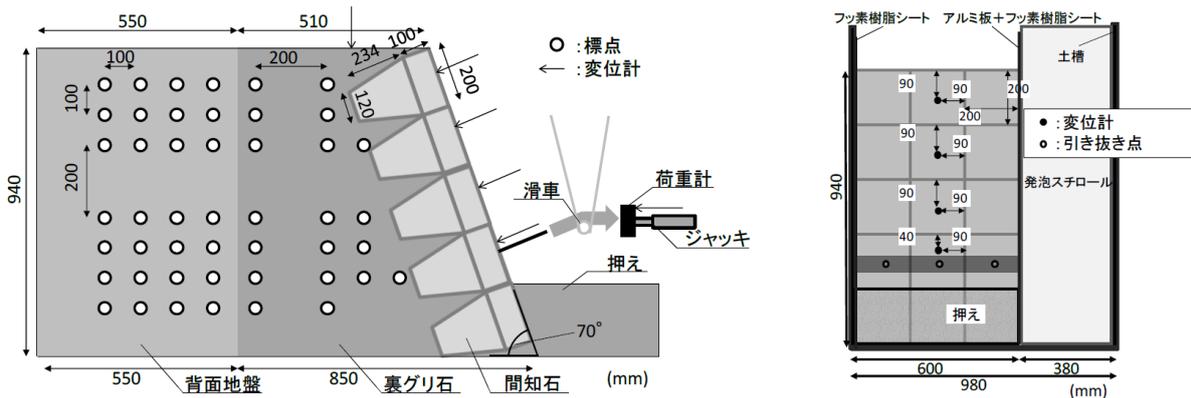


図-6 Case-1に用いられた模型 (左：側面, 右：正面)⁸⁾

$$E = \frac{\pi r(1-\nu^2)}{2} \frac{\Delta p}{\Delta \delta} \quad (9)$$

ここで、 Δp は荷重圧力の増分(MN/m²)、 $\Delta \delta$ は変位の増分(mm)、 ν はポアソン比、 r は荷重板の半径(mm)である。なお、計算に用いるポアソン比は珪砂3号については駒延ら¹⁵⁾を参考に0.3が採用され、8分砂利については0.3と仮定された。

その結果、裏グリ石の弾性係数 E は約 16.2×10^6 Pa、背面地盤の弾性係数 E は約 5.3×10^6 Pa であった。

(3) Case-C (内部摩擦角の取得実験)

Case-C では、二つの土試料 (8分砂利, 珪砂3号) は飽和度の低い粘着力がない土質材料と仮定し、内部摩擦角を安息角として求められた。図-5 に示すように、高

さ約 0.5m、横約 0.5m、縦約 0.5m のアクリル容器の端に土試料を一定の高さから少しずつ落とし、土試料を一定量落とした時点で、土試料が崩れることなく安定したときのアクリル容器底面と土試料の斜辺の角度が安息角として計測された。

その結果、裏グリ石 (8分砂利) の内部摩擦角は約 36.2°、背面地盤 (3号珪砂) の内部摩擦角は約 33.7° であった。

(4) Case-1 (布積み崩壊実験)

Case-1 では太田の研究¹⁶⁾をもとに図-6 に示すような模型が作成された。間知石の後ろには裏グリ石を詰め、その背面には地山を模擬した地盤が構築された。裏グリ石と背面地盤は巻き出し厚さ 10cm 毎に一定の締め固めエネルギーで締め固めが行われた。そして、下から2段目に横一列で設置された引き抜き棒付きの間知石を鋼製 L

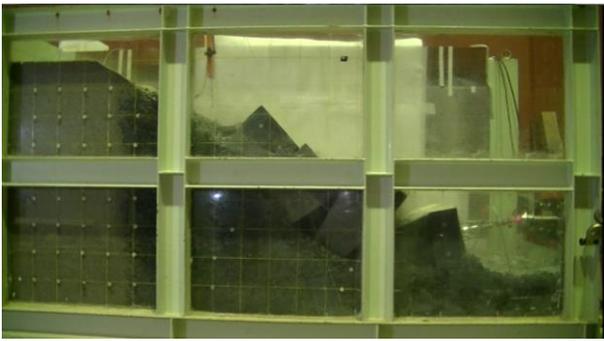


図-7 最終残留変形形状 (Case-1)

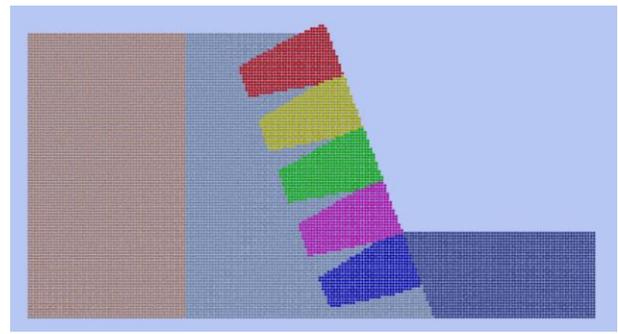


図-9 解析モデル (基本解析)

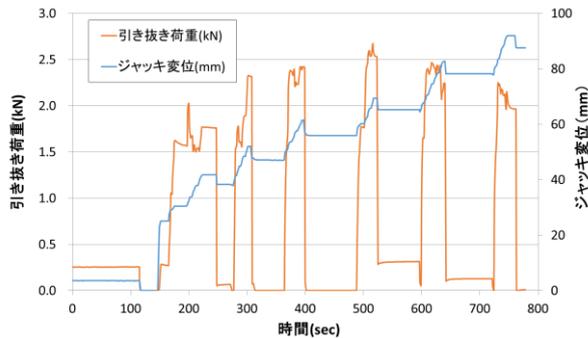


図-8 引き抜き荷重とジャッキ変位の経時変化 (Case-1)

字アングルで固定し、油圧ジャッキによって石積み擁壁前方へと同時に引き抜かれた。なお、間知石を引き抜く際に最下部の間知石が前方に滑り出さないように、石積み擁壁前方の基礎部に引き抜き間知石の下部の高さまで8分砂利を用いて押えとなる地盤が構築された。

2段目の間知石を引き抜くと、背面地盤の一部と裏グリ石の一部及び間知石に大きな変形が見られ、横方向に一樣なすべりが確認された(図-7参照)。下部の間知石は前方に裏グリ石とともに滑るように変位するのに対して、最上段の間知石は実験開始後、一度後方に変位した後に前方へ滑るように変位していることがわかった。Case-1での引き抜き荷重の最大値は2.67kNであった。図-8に引き抜き荷重とジャッキ変位の経時変化を示す。

4. 解析条件

(1) 解析モデル

図-6に基づき、粒子によって離散化した解析モデルを作成した(図-9参照)。このモデルの総粒子数は14,736個、粒子間隔は0.01m(影響半径0.026m)であり、モデルの左右端、下端の粒子一列を固定している。

(2) 解析パラメータ

a) 地盤材料のパラメータ

本研究で用いたSPH解析では、地盤パラメータとし

て、密度、ヤング率、ポアソン比、粘着力、内部摩擦角、ダイレイタンスー角を必要とする。これらはCase-BとCase-Cで求められた値を採用した。また、せん断による体積変化を考慮しておらず、ダイレイタンスー角は0とした。使用した地盤パラメータを表-1に示す。

b) 間知石のパラメータ

DEMの解析に用いる密度、バネ係数、減衰係数、摩擦係数は、Case-Aと小野らの研究¹⁷⁾を参考に設定した。

密度は、Case-Aより、 $2400(\text{kg}/\text{m}^3)$ とした。

バネ係数は、値が小さいと粒子が互いに貫入してしまい、大きすぎると解析が不安定となる。そこで、粒子の貫入が起こらない値として、法線方向に $1.0 \times 10^8(\text{N}/\text{m})$ 、接線方向に $1.0 \times 10^7(\text{N}/\text{m})$ を採用した。

減衰係数は、中瀬らの研究¹⁸⁾を参考に、法線方向を $1.0 \times 10^5(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m})$ 、接線方向を $1.0 \times 10^5(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m})$ とした。

摩擦係数は、DEM粒子とDEM粒子、DEM粒子とSPH粒子の接触の2ケースについて設定した。Case-Aより、DEM粒子とDEM粒子間の摩擦係数は0.56、DEM粒子とSPH粒子間の摩擦係数は0.35とした。

(3) 引き抜き荷重の設定

a) プログラムの改良

間知石引き抜き崩壊実験の解析を行うにあたり、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ようにプログラムを改良した。

剛体とみなしたブロック中の一粒子に加速度を与えれば、ブロック全体の動きに影響を与えることができるため、モデル化した間知石中の一粒子に加速度を与えて油圧ジャッキによる引き抜き荷重を再現した。ここで、作用させた加速度は、引き抜き対象の間知石(紫色)の前面部の角度を各タイムステップで計算して引き抜き荷重を2方向(橙色)に分解することで前面部法線方向(赤色)に作用させた(図-10参照)。

b) 入力加速度

本研究で使用するプログラムは計算時間が非常に長く、実際に実験に要した時間(約1時間50分)全体に対して数値シミュレーションを行うことが難しいので、

表-1 地盤パラメータ

	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 ンシー角 (°)
裏グリ石	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

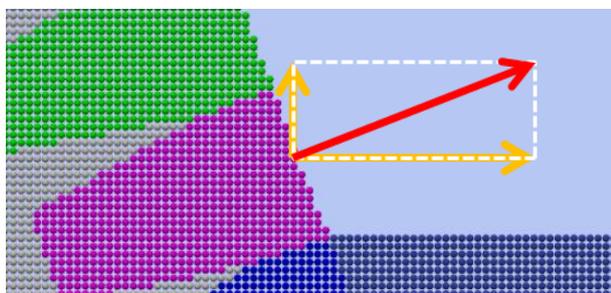


図-10 集中荷重の荷重イメージ

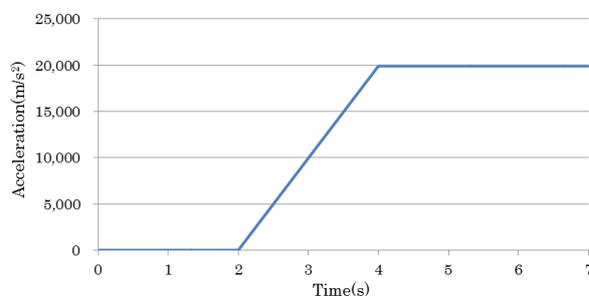


図-11 入力加速度（基本解析）

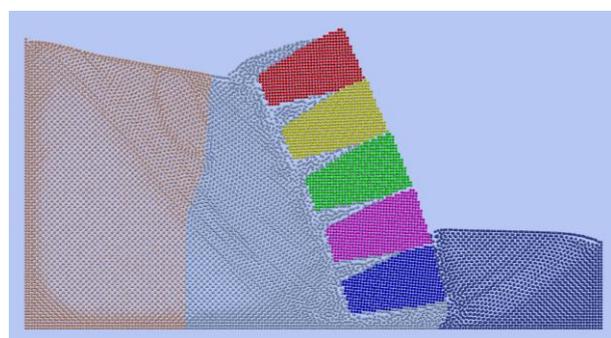


図-12 解析結果（基本解析）

図-11 に示す加速度を引き抜き荷重として入力した。この加速度の最大値は実験における 2.5kN の引き抜き荷重に相当し、下から 2 段目にある間知石（紫色）の前面部の中心にある粒子のみに与えられる。また、解析の積分時間間隔は 2.0×10^{-6} 秒である。

5. 解析結果

本研究では、解析結果をもとにモデルやプログラムの改良を行う。以後、改良を行う前の解析を基本解析、改良を行った後の解析を改良解析と呼ぶ。また、実験結果と解析結果を比較するために、引き抜き荷重は解析上（奥行き 1m）の数値を実験の条件（奥行き 0.6m）に対応するよう変換した数値を示す。

(1) 基本解析

Case-1 の解析結果を図-12 に示す。引き抜き荷重を作用させると、対象の間知石が前方に変位していることが

わかる。しかし、間知石同士が一体となり動き、擁壁全体が引き抜かれる間知石とともに変位しており、それに伴って前面地盤と背面地盤に大きな崩壊が生じた。

摩擦係数や減衰係数の変更等のいくつかの検討を行った結果、間知石同士が一体となる挙動は減衰係数と関係があり、最も影響を与えているのは間知石を構成している粒子の凹凸による噛み合わせであると考えられる。

(2) 改良解析その 1

本節では、基本解析からモデルの改良と減衰係数の算定を行うことで、解析の精度を高めることを目的とする。

a) モデルの改良

実験模型の擁壁は前面部の角度が 70 度となるように間知石が設置されている。そこで、モデル全体を 20 度傾け、間知石同士の接触面における粒子の階段状の噛み合わせを除去した（図-13 参照）。構築したモデルを図-14 に示す。このモデルの総粒子数は 15,213 個、粒子間隔は 0.01m（影響半径 0.026m）である。また、モデルの周りに SPH 粒子で枠（赤色）を作成し、それらの粒子を固定した。

b) 減衰係数

対象の実験は準静的であるため、粒子間の相対速度に依存する減衰は解析上適切でないことから、減衰係数は法線方向、接線方向ともに 0 とした。

c) 自重解析

引き抜き崩壊実験の解析を行うにあたり、引き抜き荷重作用前に各要素がほぼ安定域に入るまで自重のみによる解析を行った。解析モデルが 20 度傾いているため、重力加速度を水平方向と鉛直方向に分解して与えた。入力した加速度を図-15 に示す。

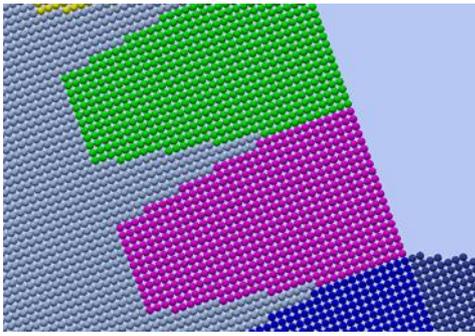


図-13 間知石の粒子配列

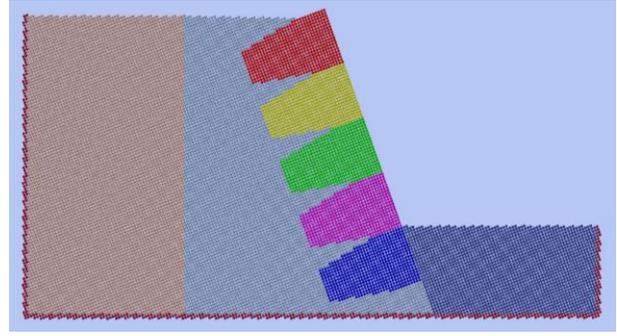


図-14 解析モデル (改良解析)

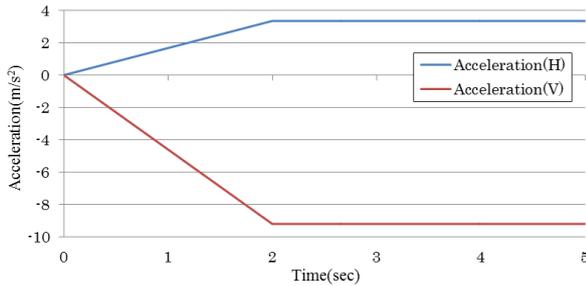


図-15 入力加速度 (自重解析)

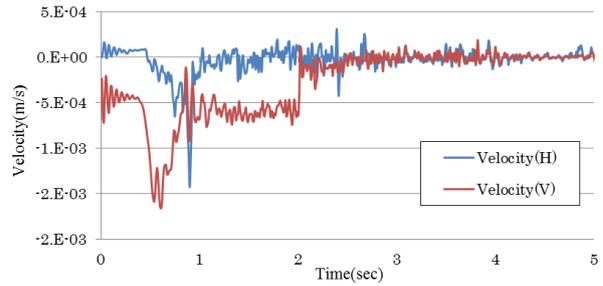


図-16 自重解析における粒子の速度

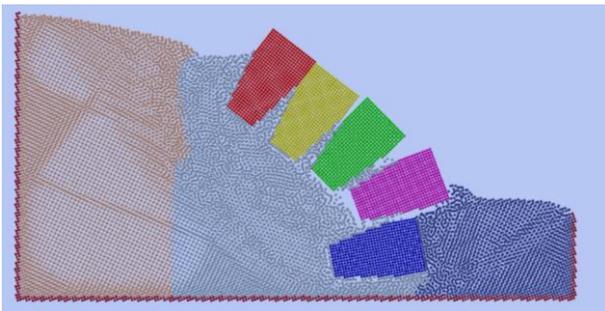


図-17 間知石の引き抜きの様子

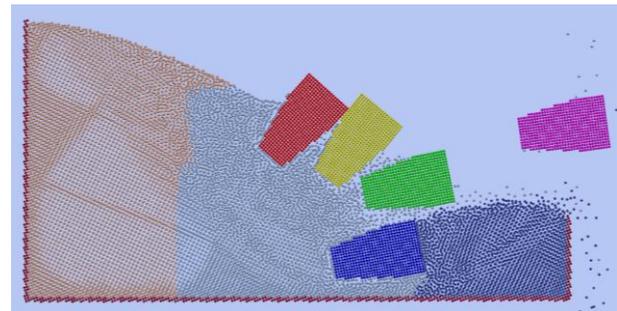


図-18 最終残留変形形状 (改良解析その1)

図-16 には、最も不安定だと考える背面地盤上部の珪砂 3 号のある粒子の水平方向と鉛直方向の速度を示す。解がほぼ収束状態にあるため、引き抜き崩壊実験の解析では、この初期応力状態を引き継いで計算を行う。

d) Case-1 の解析

基本解析と同様に引き抜き荷重の最大値が 1.50kN, 2.00kN, 2.67kN, 3.00kN となるような加速度を入力した。

その結果、全てのケースにおいて、引き抜き荷重が約 1.50kN になると間知石の変位が大きくなり始めることがわかった。さらに、引き抜き荷重が約 2.50kN を超えると、図-17 に示すような間知石の引き抜きが確認できた。実験では引き抜き荷重の最大値は 2.67kN であることから、実験と解析において間知石を引き抜くのに必要となる力の大きさが概ね一致していると判断できる。また、引き抜き後に間知石が後方へ転倒し、階段状になる状態を定性的に再現することができた (図-18 参照)。しかし、解析では背面地盤は実験よりも大きな崩壊が発生し

た。これは、間知石に非常に大きな加速度が作用し、引き抜きが急激に行われることで、他の間知石が追従して前方へ移動するためであると考えられる。

(3) 改良解析その2

a) プログラムの改良

間知石が急激に引き抜かれる挙動を解決するために、間知石の速度に制限を与えるように解析プログラムを改良した。これは、引き抜かれる間知石のある粒子の水平方向と鉛直方向の速度を合成した値が設定した値を超えたときに、それ以降のステップでの入力加速度を決められた数値まで下げることで間知石の速度を抑えるものである。これによって、図-19 の左に示すような加速度を入力したとき、間知石の速度が設定した値を超えれば、加速度が下限値 (赤) まで下がり右のような加速度へと変換される。また、引き抜かれた間知石に対しても加速度が与えられ続けるため、引き抜き完了後に間知石が前

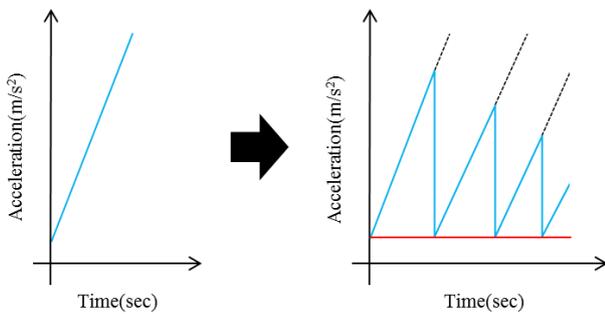


図-19 入力加速度の変換イメージ

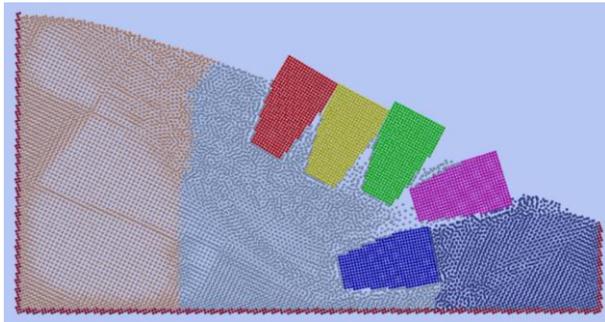


図-20 最終残留変形形状 (改良解析その2)

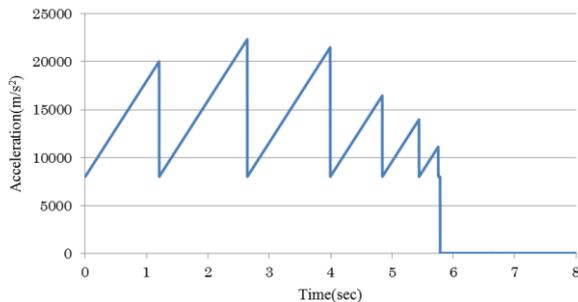


図-21 変換後の入力加速度

方へ大きく移動した。そこで、間知石の変位量にも制限を設けた。

b) Case-1の解析

ここでは、初期値が $8,000(\text{m/s}^2)$ であり、1秒ごとに $10,000(\text{m/s}^2)$ ずつ増加していく加速度を入力した。また、間知石の速度の上限は $0.4(\text{m/s})$ 、変位量の上限は実験での最終残留変形形状から $0.4(\text{m})$ と設定した。

解析結果を図-20、変換された入力加速度を図-21に示す。間知石の速度に上限を設けることで、実験のような段階的な引き抜きを表現できた。また、引き抜き荷重の最大値は約 2.8kN であった。さらに、変位量に上限を与えることで、より実験結果に近い最終残留変形形状が再現できた。

しかし、実験結果よりもすべり線が後方で形成され、過大な背面地盤の崩壊が生じた。そのため、背面地盤の

崩壊は、間知石が急激に引き抜かれるためではないと判断できる。さらに、間知石が引き抜かれるとその直下の間知石も前方に移動し、すべり線が形成されることから間知石同士の摩擦力を過大評価していると考えられる。これは、間知石同士の接触面を直線にしても、DEM粒子の噛み合わせが完全に除去されていないためであると考えている。また、間知石が最大の面積をとる断面において解析モデルを構築しているため、三次元的な形状を再現できていないことも背面地盤の崩壊の規模に影響を与えていると考えられる。

6. 結論

本研究では、石積み擁壁に対する評価手法の確立を目的として、2016年度に鉄道総合技術研究所によって実施された引き抜き崩壊実験⁸⁾について、SPH-DEM法を用いて数値シミュレーションを行った。

解析では、解析モデルを傾けて間知石同士の接触面を水平にし、DEM粒子の噛み合わせを減らすことで、集中荷重による間知石の引き抜きを確認した。その際、実験と解析において引き抜き荷重の最大値が概ね一致した。

また、引き抜き後には上部の間知石が実験と同様に後方へ転倒し、階段状になっており、引き抜き後の擁壁の最終残留変形形状を定性的に再現できた。しかしながら、背面地盤には過度な崩壊が生じ、崩壊形状の再現はできなかった。

今後、より精度の高い数値シミュレーションを行うためには、解析の三次元化や粒子の噛み合わせが無い解析モデルの構築、噛み合わせによる力が発生しない解析プログラムの作成が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局河川環境課：河川の景観形成に資する石積み構造物の整備に関する資料，2006.8.
- 2) 被災宅地危険度判定連絡協議会：被災地事例 (<http://www.hisaitakuti.jp/case.html>(2016.12閲覧))
- 3) 東日本大震災における建築物等の被害状況—山形県ホームページ (<https://www.pref.yamagata.jp/ou/kendoseibi/180025/publicfolder200801239976624633/higashinihonhantei.pdf> (2016.12閲覧))
- 4) 平成28年熊本地震建築物被害調査報告書—埼玉県建築士事務所協会 (<http://www.saijikyoo.or.jp/news/file/kumamoto0627.pdf> (2016.12閲覧))
- 5) 酒井譲，山下彰彦：SPH理論に基づく粒子法による

- 構造解析の基礎的検討, 日本機械学論文集(A 編)67 巻 659号(2001-7),2000.8.
- 6) 小野祐輔, 西田真悟, 清野純史: SPH 法による土構造物の弾塑性解析, 応用力学論文集, Vol9, pp.717-723, 2006.8.
 - 7) 小野祐輔: SPH 法による斜面の地震応答と崩壊挙動の解析, 土木学会論文集 A1,Vol69, pp.650-660, 2013.
 - 8) 湯浅友輝, 高柳剛, 櫻健典, 酒井久和, 小野祐輔, 伊吹竜一: 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) Lucy, L.B.: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, The Astronomical Journal, Vol.82, NO.12, pp.1013-1024, 1997.
 - 10) Monaghan, J.J.: Simulating Free Surface Flows with SPH Journal of Computational Physics, Vol.110, pp.399-406, 1994.
 - 11) 小野祐輔, 中村晋: 2011 年東北地方太平洋沖地震による宅地造成盛土の崩壊を対象とした SPH 解析, 土木学会, 第 33 回地震工学研究発表会講演論文集, 2013.10.
 - 12) 野間康隆, 山本浩之, 西村毅, 笠博義, 西形達明, 西田一彦: 城郭石垣の地震時変形予測と安全性評価に関する研究, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69, No.4, 444-456, 2013.
 - 13) 板谷知洋: 個別要素法による粒状体群のせん断シミュレーションにおける摩擦処理, 法政大学大学院修士学位論文, 2014.
 - 14) 公益社団法人地盤工学会: 地盤調査の方法と解説-二冊分の 2-, pp.697-716, 2013.
 - 15) 駒延勝広, 篠真陽, 森二三人, 東原健一: 柔構造を有する箱型擁壁の耐震性検討(その 3): 変位の解析結果と実験結果の比較, 第 39 回地盤工学研究発表会, pp.1619-1620, 2004.
 - 16) 太田直之: 間知石を用いた石積壁の地震時の安定性評価と耐震補強工法に関する研究, 博士論文, 2008.3.
 - 17) 小野祐輔, 相澤類, 酒井久和, 太田直之, 中島進, 藤原寅士良, 高柳剛, 湯浅友輝, 池田勇司: 石積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, 第 36 回地震工学研究発表会, 2016
 - 18) 中瀬仁, 沼田敦紀: 個別要素法における接触モデルの改良, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 2011.

(2017.9.1 受付)

NUMERICAL SIMULATION FOR MODEL TEST OF MASONRY RETAINING WALL BASED ON SPH-DEM ANALYSIS

Ryuichi IBUKI, Yusuke ONO, Hisakazu SAKAI,
Tsuyoshi TAKAYANAGI, Tomoki YUASA and Yuji IKEDA

Masonry retaining walls are very fragile structures against earthquakes and a great number of the damages have been reported. We should elucidate the failure mechanism and make the appropriate safety assessment and the countermeasures.

The objective of this study is to establish the analytical methodology for the seismic evaluation of the masonry retaining wall. We conducted some numerical simulations for the model experiments based on a coupled DEM (Distinct Element Method) and SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) analysis, and improved the program code as well as the analytical model by focusing on the inconsistent between the analytical and experimental results. The calculated residual shape of the masonries was a good agreement with the experimental one, and some points to be improved were classified.