熊本地震で被災した百間石垣に対する SPH-DEM 法による崩壊シミュレーション

将也1·桒原 陸人2·伊吹 竜一3·石川 大地4小野 祐輔5 篠崹 酒井 久和6・末冨 岩雄7・福島 康宏8・橋本 隆雄9 1学生会員 法政大学大学院 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: masaya.shinozaki.3s@stu.hosei.ac.jp 2 非会員 神戸市 水道局 (〒650-8570 神戸市中央区加納町 6-5-1 神戸市役所 4 号館 6 階) E-mail:humanground213@gmail.com 3正会員 元法政大学大学院 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: ryuuichi.ibuki.6s@stu.hosei.ac.jp 4 正会員 株式会社日建設計シビル 施設設計部 (〒112-0004 東京都文京区後楽 1-4-27 後楽ビル) E-mail: ishikawa.daichi@nikken.jp 5 正会員 鳥取大学大学院教授 工学研究科 (〒680-8550 鳥取県鳥取市湖山町南4丁目 101 番地) E-mail:ysk@tottori-u.ac.jp 6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 7 正会員 株式会社エイト日本技術開発 東京支社防災保全部(〒164-8601 東京都中野区本町 5-33-11) E-mail: suetomi-i@ej-hds.co.jp 8 正会員 株式会社エイト日本技術開発 中国支社防災保全部 (〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町 3-1-21) E-mail: fukushima-ya@ej-hds.co.jp

> ⁹正会員 国士館大学教授 理工学部 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷 4-28-1) E-mail:thashimo@kokushikan.ac.jp

石積み擁壁は土留め構造物として多用され,地震に対して脆弱な構造物であるが,対策工も含め,安全性評価や崩壊時の状態を十分に再現する手法は未だ確立されていないのが現状である. 本研究では,石積み擁壁の大変形解析手法の確立を目的として 2016 年熊本地震時における熊本城 百間石垣を対象として石垣崩壊の再現シミュレーションを行った.解析は,大変形を伴う土粒子 に対して SPH法,積み石に対しては剛体として回転を考慮できる DEM を用いる SPH-DEM 法を採 用した.ただし,解析にあたっては DEM の接触力算定手法やより安定化した SPH 法を導入した. 解析の結果,熊本地震における前震時に積み石が孕み出し,本震時に崩壊するという実被害と定 性的に整合する石垣の崩壊挙動を再現できた.

Key Words: Kumamomoto earthquake, Hyakken-ishigaki ,SPH-DEM coupling method, deformation analysis

1. 研究の背景と目的

石積み擁壁は材料となる石材の確保が比較的容易なこ とや、他の土留め構造物よりも景観に優れていることな ど¹⁾から、城郭石垣以外にも道路構造物や鉄道構造物、 宅地擁壁など土木や建築の分野において様々な場面で古 くより利用されてきた.しかし、石積み擁壁は地震に対 して脆弱な構造をしており、近年の発生した 2011 年東 北地方太平洋沖地震や 2016 年熊本地震でも多数被害事 例が報告されている²⁾. 2016 年熊本地震では,熊本城の 石垣が甚大な被害を受け,その修復方法の検討が行われ ている.被災した石積み擁壁は同様の被害を起こさない ためにジオテキスタイルやアンカー等を用いた補強が必 要という意見がある一方,城郭石垣は文化遺産で原状復 帰が基本とする向きもある.そのため,原状復帰以上の 対策を採るためには,特にその有効性を示すことが必須 となる. しかしながら,石垣擁壁の地震時の崩壊を精 度良く再現する解析手法や対策工の耐震性向上に対して 十分に評価できる解析手法は未だ確立されていない. そ のため,石積みの崩壊メカニズムの解明を目的とした数 値シミュレーションがこれまで多くの研究者によって行 われている.

たとえば、浅羽ら³は、皇居の孕み出した石垣の解体 修復工事に対して、修復前後のモデルを FEM により、 安定性評価を行った.結果、修復前後の石垣天端の加速 度、水平方向変位および裏込め天端の鉛直変位を示し、 修復前の石垣における地震時の不安定メカニズムを明ら かにするとともに、修復後における石垣の安定性を地震 応答解析によって明らかにした.しかし、大変形を伴う 解析精度について検証は行われていない.

野間ら⁴⁾は, Distinct Element Method (DEM) に基づい て実物大城郭石垣モデルの振動台実験の再現を試みた. 結果,築石の変位量や変形モード再現でき,崩壊に至る までの不安定化現象を含んだ変形過程を定量化に予測で きる可能性を示した.ただし,パラメータについては, 静的な要素実験によるもので,剛性,減衰の取り扱いが 一般的な動的非線形解析におけるものと異なることを課 題としている.

本研究ではまず,熊本城百間石垣の熊本地震時の崩壊 シミュレーションを実施し,手法の妥当性を検討した.

2. 解析手法

(1) 対象構造物の概要

本研究で対象とする熊本城百間石垣は,熊本市二の丸の北側に位置する石垣で,埋門から西の二の丸御門へと続いている.石垣は全長 136m にわたる直線石垣であり,高さ7.6m となっている.

百間石垣は 2016 年熊本地震を受け、3 箇所での被害が 確認され約 62m が崩れ落ちた. 図-1 は東側の崩壊箇所 であり、図-1からもその被害規模が確認できる⁹. 今回の地震後、現在も熊本市及び土木学会主導のもと百 間石垣の地震時における挙動解明及び石垣の修復計画の ための周辺地盤の調査が行われている.また熊本城調査 研究センターからは百間石垣の崩落状況が報告されてい る.報告 %によると、百間石垣東側は熊本地震本震によ って崩壊されたものとされており、その崩壊挙動は図-2 の紫色の積み石付近ではらみ出しが起き、はらみ出し部 分の下部付近から崩壊が始まったものと考えられている. また航空写真(図-3)から積み石の崩落個所も確認され ている.

(2) SPH-DEM法

本研究では、大きく変形する土要素を SPH 法により 計算し、剛体である積み石を DEM で計算するという 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 粒子だけでは表現できなかった積み石 (剛体要素)の回転も再現でき、より正確な石積み擁壁 挙動を再現することができる.本研究における SPH-DEM 法は、全ての粒子の計算終了後 SPH の粒子の速度 や位置などの情報を更新し、その後、剛体の挙動を考慮 して DEM 粒子の速度及び位置情報を更新する.



図-1 百間石垣の被害状況⁵⁾



図-2 百間石垣東側崩落図⁶



図-3 百間石垣東側崩落空撮写真⁶



図-4 SPH-DEM法の計算フローチャート

また SPH 粒子と剛体粒子の接触によって発生する力 の計算は DEM のアルゴリズムに従って計算する.計算 フローを図4に示す.

(3) 仮想粒子を用いた DEM 接触力算定手法

積み石を粒状要素の集合で表現した時,図-5に示すようにDEMブロック同士間の噛み合わせにより過大な摩

擦力が発生する.そのため、下記の仮想粒子を用いた接触力算定手法^つを導入する.

伊吹は DEM において,図-6 に示すように仮想粒子 (virtual particle)を用いて粒子間に他ブロック要素の粒 子の侵入を防ぐような接触力算定手法を提案している.

一般的に多面体要素を用いた 2 次元の DEM では,辺と 辺,辺と頂点,頂点と頂点の3種類の接触タイプを定義 している.この手法においては,そのうち辺の代わりに 仮想粒子との接触を計算することで全ての接触タイプを



図-5 DEM ブロック 噛み合わせイメージ



図-6 仮想粒子のイメージ⁷⁾

粒状要素同士の接触へと帰着させる.ここで、着目する 粒子iとその最近傍の2粒子 j_1 、 j_2 の中心を結ぶ直線との 距離Lを用いて接触判定を行う.さらに、その直線状に 仮想粒子を配置し、粒子iと仮想粒子の接触を計算こと で、平滑な面間の相互作用力を算定する.

(4) SPH 法の安定化

SPH は発散性の強い解析手法であるため、人工粘性の 導入により安定的な解析結果が得られた石川らの手法⁸ を導入した.また、石川らが粒子間距離の短縮が発散性 抑制に有効であることを示していることから、粒子間距 離を小さくしながら残留変形状態の収束性の確認も行っ た.

3. 百間石垣崩壊シミュレーション

(1) 数値解析モデル

解析モデルは,,熊本城調査研究センター主導のもと 行われたトレンチ調査⁹から得られた石垣の断面図を反 転し(図-7),これを基に作成した.百間石垣の積み石を DEM,栗石層・表土・背面地盤を SPH 法の円形の粒状 要素でモデル化している.粒子間隔を 0.1m 間隔で格子 状に配置し,粒子の総数は 17,772 個となった.境界条件 については,解析モデルと設定した外側の領域ではすべ り面の発生や崩壊が生じていないことから底面,側面共 に固定した.作成した解析モデルを図-8 に示す.



図-8 百間石垣モデル

	密度	ヤング率	粘着力	内部摩擦角
	(t/m^3)	(MN/m ²)	(kN/m^2)	(°)
背面地盤 (盛土)	1.31	66.3	17.2	27.7
背面地盤 (地山)	1.57	157	39.5	33.7
表土	1.53	56.7	30	24.3
裏込め層 (栗石)	2.00	40.0	0	43.0

表-1 SPHパラメータ

(2) 材料パラメータ

熊本城百間石垣では、現在地盤調査が行われている段 階であり、その内部構造や材料特性の詳細に関しては不 明である。そのため、桒原は百間石垣の近隣にある熊本 市立熊本博物館のボーリング調査結果と株式会社千代田 コンサルタントによる百間石垣のトレンチ調査⁹・表面 波探査¹⁰⁾を照らし合わすことで、解析対象の地盤種類 を推定し地盤物性値の設定を行った。

また,摩擦係数は機械工学便覧¹¹⁾記載の石と石,石 と土の摩擦係数を使用し,DEM 粒子同士の接触におけ る摩擦係数を0.6,DEM 粒子とSPH 粒子との接触におけ る摩擦係数は0.3 と設定した.表-1,表-2 に設定したパ ラメータを示す.

(3) 入力地震動

入力地震動は熊本県熊本市中央区大江で観測された前 震(観測日時:2016年4月14日21時46分),本震 (観測日時:2016年4月16日1時25分)の地震記録で,

表-2 DEM パラメータ

密度(g/cm ³)	2.7	
		DEM & DEM	DEM と SPH
ばね係数 (N/m)	法線方向	1.0×10 ⁸	1.0×10 ⁸
	接線方向	1.0×10 ⁷	1.0×10 ⁷
減衰係数 (N・s/m)	法線方向	1.0×10^{3}	1.0×10 ³
	接線方向	1.0×10^{3}	1.0×10^{3}



図-9 入力地震波形

対象断面の面内方向として観測波の NS 成分を用いる. ここで、観測時間全ての地震加速度で解析を行った場合、 解析時間が膨大となるため、石垣に影響を大きく与える 主要動部の加速度を用いる.解析に使用した観測地震波 形を図-9 に示す.図-9 は前震と本震の主要動部の加速度 を結合させた波形である.本震の記録は17 秒以降で、 前震と本震の最大加速度はそれぞれ364Gal,627Gal であ る.

(4) 解析結果

解析の実行に関わるパラメータを表3に示す. 本解析では初期段階のモデルでは重力が作用していない 状態にある.地盤のせん断強度,積み石間の摩擦抵抗は 拘束圧に依存するため,自重解析を行う必要がある.こ の際,急速に重力を作用させると,地盤強度の低い土が 塑性化し変形が過剰になるため,徐々に重力を作用させ る.初期応力解析時の入力加速度を図-10 に示す.図の ように,この加速度は、3 秒間で重力加速度-9.8m/s²に達 し 2 秒間維持する.自重解析後の残留変形状態を図-11 に示す.また,栗石層最上部の粒子の水平方向と鉛直方 向の速度を図-12 に示すが、図のように解が収束してい ることが確認できる.

地震応答解析では,初期自重解析後の各粒子の位置や 速度,加速度等の情報を引き継ぐ.

地震応答解析での加振開始後約8秒後の変形状態を図-13に、40秒後の変形状態を図-14に示す.図-13は、熊本地震前震後の状態に対応し、石垣上部に少し孕み出し

表-3 解析の実行パラメータ

積分時間間隔		1.0×10 ⁻⁵ 秒		
解析ステップ教	汝	4500000		
解析時間		45 秒		
影響半径		0.13m(粒子間隔の1.3倍)		
拘束条件		底面と側面の粒子を固定		
人工演奏反粉	η	1		
八工阀泵悕剱	ξ	2		













図-11 自重解析後の残留変形状態(5.00秒)

が確認できる.図-14 は本震の加振後の状態に対応し石 垣は崩壊挙動を確認できる.図-3 や図-7 と比べると残存 する石積み擁壁の数が少なく全体的に崩壊を過大評価し ているが、栗石の残留変形角度や崩壊した積み石のうち 図-2 中の青や紫で塗られた上方に位置していた石が最も 前方に転がっている様子など、概ね被災結果と整合した 結果が得られた.

4. 結論

本研究では、2016 年熊本地震によって被害を受けた 熊本城北部百間石垣を対象に、SPH-DEM 法を用いた数 値シミュレーションにより石垣の崩壊挙動を再現した. 解析では伊吹らの提案する接触力算定手法¹⁰を SPH-DEM法のプログラムに導入し、積み石間の噛み合わせ 図-13 変形状態(8.34秒)



による過度な摩擦力を改善するとともに、石川らの研究 ¹¹⁾において人工粘性による解の安定化手法を導入した. 結果,,前震時で孕み出しを確認し、本震時に崩壊する という熊本市の調査報告結果と整合する変形状態を十分 な精度で表現できた.

謝辞: 本研究は,公益社団法人土木学会城壁の耐震 診断・補強に関する研究小委員会の活動の一環として実 施し,委員,熊本市,熊本城調査センター様には,ご助 言及び資料・調査結果を提供して頂いた.本研究は JSPS 科研費 18H01526 の助成を受けました.ここに各位 に謝意を表する.

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.
- 宅地災害復旧についての留意点—地盤品質判定士会ネットホームページ <u>https://www.jiban.or.jp/jagekai/pdf</u> kgfairkuma-

moto 2017/2017kgfairkummoto-sato.pdf (2019.1.22 閲覧)

- 浅羽英男,根岸明廣,稲川雄宣,山本彰,疋田喜彦,塙 守幸,田中修平:地震時における城郭石垣の変形挙動に 関する検討,土木学会第59回年次学術講演会,2004.9.
- 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, 2013.
- 5) KKT くまもと県民テレビ:熊本城と加藤清正,http:// www.kkt.jp/matome/kumamoto-castle/008737.html (2019.1.22 閲 覧)
- 6) 熊本城調査研究センター嘉村哲也:第8回「石垣の積み 方一石材の回収工事からみえてきたこと一」, (2017.6. 定期講座「熊本城学」配布資料)
- 7) 伊吹竜一, 酒井久和, 小野祐輔: 個別要素法 (DEM) に

おける簡易な接触力算定手法の提案,土木学会第 73 回 年次学術講演会,2018.9.

- 石川大地,酒井久和,小野祐輔:SPH 法による盛土の地 震時安定性に関する三次元効果の検討,土木学会第73 回年次学術講演会,20189.
- 9) 株式会社千代田コンサルタント:トレンチ調査の概要, (2017.1.委員会配布資料)
- 10)株式会社千代田コンサルタント:表面波探査の概要, (2017.1.委員会配布資料)
- 11) 日本機械学会:機械工学便覧 基礎編 o2 機械力学,丸 善出版, p27, 2004.12.

??

A COLLAPSE SIMULATION BASED ON SPH-DEM COUPLING METHOD FOR THE HYAKKEN MASONRY STONE WALL IN THE KUMAMOTO CASTLE DAMEGED DURING THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Masaya SHINOZAKI, Rikuto KUWAHARA, Ryuichi IBUKI, Daichi ISHIKAWA, Yusuke ONO, Hisakazu SAKAI, Iwao SUETOMI, Yasuhiro FUKUSHIMA and Takao HASHIMOTO

Althought, stone masonry retaining walls are vulnerable structures damaged frequently during severe earthquakes, the estimations of the seismic stability and the large deformation have not been established yet as well as the those of their reinforced structures.

In this study, we conducted large deformation simulation for the Hyakken stone wall severe damaged during the 2016 Kumamoto earthquake. The earthquake response simulation is based on the SPH-DEM coupling method: soils are modeled by the SPH and masonry stones by the DEM particles. The imaginary particle methodology proposed by Ibuki was introduced into the program code in order to calculate adequately the friction between DEM elements. The stable method with artificial viscus damping was also implimented and the modified effective radius was used for obtaining the adquate numerical solutions.

As the results, the numerical simulation coinsident well to the practical damage, regarding with the time and quarity of the deformation as follows:

The stone masonry wall was bulged out at the middle height of the wall during the foreshock and collapsed during the mainshock. In spite that the number of the uncollapsed stone were understimated, the residual deformation of the wall was good agreement with the practical damaged one.