

不連続変形法に基づく2001年芸予地震時の 石積み擁壁の崩壊シミュレーション

酒井 久和¹・山地 智仁²・小川 悟史²

¹広島工業大学工学部建築工学科 准教授
(〒731-5193 広島市佐伯区三宅2-1-1)

E-mail: h-sakai@cc.it-hiroshima.ac.jp

²広島工業大学工学部建築工学科 学部生

生活に隣接した石積み擁壁の崩壊は、居住や通行中の人命に対する安全面だけでなく、前面の道路における交通機能を阻害する要因となる可能性が高い。本研究では、近年、落石や岩盤崩壊などのシミュレーションで使用実績が多い不連続変形法（DDA）を採用し、DDAが石積み擁壁の耐震性評価手法だけでなく、積み石の崩壊域の評価手法としての妥当性を有するかを検証するため、2001年芸予地震における石積み擁壁の崩壊シミュレーションを行った。また、DDAでは要素数が多くなると解が不安定になる問題が生じたため、解析モデルの簡略化の影響についても検討を行った。

Key Words : *stone masonry walls, discontinuous deformation analysis, seismic assessment, collapse simulation*

1. はじめに

石積み擁壁は、現地の転石を利用し景観的にも良好な構造物であり、安全という1つの観点からのみコンクリート擁壁等に改修すべきものではなく、今後も存続してゆく構造物であろう。広島市や呉市など山地斜面部を利用して住宅地が開発されているエリアでは、生活に密接した石積み擁壁が多数存在し、2001年芸予地震の呉市、2005年福岡県西方沖地震の玄海島においては、多数の石積み擁壁が崩壊した。これらの地震では、幸い人的被害は小さかったが、石積み擁壁に接する道路では交通機能が長時間に渡り損なわれた。このように生活に密着した石積み擁壁の崩壊は、人命を危険にさらすだけでなく災害復旧やライフラインとしての交通路の遮断など大きな2次被害を誘引する可能性がある。そのため、予め耐震性の低い石積み擁壁に対して地震対策を行う必要があるが、そのスクリーニング手法として現在、自治体ごとに簡易な耐震性評価手法が採用されている。

田中ら¹⁾は、城郭など石積み擁壁の構築プロセスが確認される石積みに対し、建設当時の石積み技術の水準から変位量を求推定し、安定性を評価する評価手法を示している。渡嘉敷ら²⁾は、石積み擁壁の基本的な動的安定挙動を検討するため、石積み擁壁模型による動的載荷実験を行い、図を用いた評価手

法を提案している。田中ら³⁾は、石積み擁壁の斜面高さ、傾斜角、背面土の土性値および石垣の物性値等に対し、円弧すべり法による評価手法を提案している。しかし、これらの簡易的な評価手法は、必ずしも十分な精度を有していないのが現状である。

一方、詳細解析法として有限要素法（FEM）を用いて、石積み擁壁の耐震性評価も行われている^{4),5)}が、崩壊に至るまでの安定性の評価は行えるものの、積み石の流動域検討などの大変形を伴う評価には適していない。また、個別要素法（DEM）や剛体パネモデルではパラメータの物理的意味合いが不明確で設定が解析ケースごとに異なったり、落石のように物体の動きが速くなると解の安定性が得られなかったりするなどの問題点を有する。また、近年、不連続変形法（DDA）による耐震性評価も行われている。池谷ら⁶⁾は石積み擁壁の実物大モデルを用いた載荷実験の実験結果と DDA の解析結果を比較し、DDA が定量的に実際の構造物の挙動を再現できること示している。西山ら⁷⁾は石積み擁壁の現地加振実験と DDA によるシミュレーションを行い、石積み擁壁の挙動を DDA で精度良く追従できることを示している。

本研究では耐震性評価手法としてだけでなく、交通機能面から積み石の崩壊域の推定法としての解析精度についても検証することを目的として、2001年芸予地震の際の石積み擁壁の崩壊シミュレーショ

ンを行う。また、DDA では要素数が多くなると解が不安定になる現象が確認されたため、モデルの簡略化が解析精度に及ぼす影響も検討する。

2. 方法

(1) 検討対象構造物

本研究では、石積み擁壁の耐震性評価だけでなく、交通機能面から擁壁が地震時崩壊後に道路を閉塞するか否かを定量的に把握することも求めている。そのため、検討対象構造物は、崩壊後の状況が記録されていることが必要である。検討対象構造物として、同一箇所で被害程度の異なる 2 地区の構造物を採用する。1 地区は、呉市宮原の道路に面した高さの異なる 3 種類の石積み擁壁であり、その被災状況を写真 1 に示す。写真 1 より①と③が崩壊、②が非破壊と 3 種類の被災状況が異なることが分かる。ここで、3 種類の石積み擁壁は高さ下表のように異なっている。もう 1 地区の対象構造物は、呉市西片山地区の通路に面する崩壊した石積み擁壁と同地区内で崩壊しなかった 2 種類の石積み擁壁である。崩壊した方の石積み擁壁は、木村ら⁸⁾の資料より、裏込め土が約 3m の滑りが生じていたと記録されている(写真 2 参照)。また、同地区内で崩壊しなかった石積み擁壁を写真 3 に示す。これらの石積み擁壁は構造が異なり、呉市宮原の石積み擁壁は、二段積み構造、呉市西片山地区の石積み擁壁は、一段積み構造となっている。



写真 1 宮原地区の石積み擁壁⁹⁾

	擁壁高さ
①	5m
②	5.5m
③	3m

(2) 解析パラメータ

DDA で解析を行う際のパラメータの中には、DDA 特有のパラメータとしてペナルティ係数、粘性係数がある。ペナルティ係数は、大西ら¹⁰⁾の論文によると、静的な解析の場合、一般にブロックのヤング率より大きな値を用いる。この値がヤング率



写真 2 西片山地区の崩壊した石積み擁壁⁸⁾



写真 3 西片山地区の無被害の石積み擁壁

より小さい場合には収束が悪くなり、ときには、ブロックどうしが重なって、ペナルティ係数が効かなくなる場合がある。ただし、落石のような動的な運動が卓越するモデルでは、ペナルティ係数を大きくするとブロックどうしの反発力が大きくなり、過剰な跳躍運動になることがあるため、ヤング率と同様の値が推奨されると示されている。よって、本研究では、ペナルティ係数はヤング率と同様の値を設定する。

一方、粘性係数については、関ら¹¹⁾の論文で、落石解析に DDA を適用し、斜面から落石が跳躍する際のエネルギーロスや飛翔中の空気抵抗を解析に組み込むために、DDA に一律の粘性係数が導入されている。また、粘性係数を 0.05, 0.10, 0.15 とした 3 ケースで数値シミュレーションを行い、ビデオ解析結果との比較により、0.10 が合致していること示している。さらに、立花ら¹²⁾は、落石対策工事の設計に際し、DDA を用いて粘性係数を 0.05, 0.10, 0.15 として解析し、0.10 のケースがもっとも現地の落石状況と適合することを示している。よって、本研究においても、粘性係数は 0.10 に設定する。

ペナルティ係数、粘性係数を表 1 に示す。また、その他各種物性パラメータは、西山ら¹³⁾の論文を参考に設定した。(表 2 参照)

表 1 解析制御パラメータ

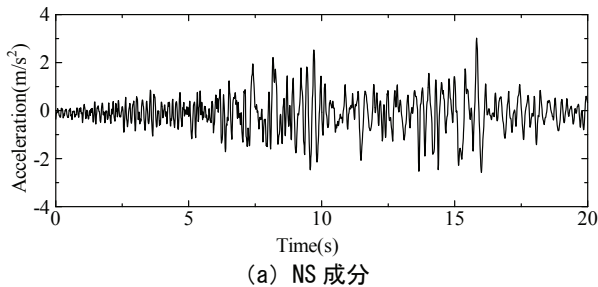
ペナルティ係数 (kN/m ³)	8.0×10 ⁴
粘性係数 (Pa・s)	0.1

表 2 DDA に用いた各種物性パラメータ

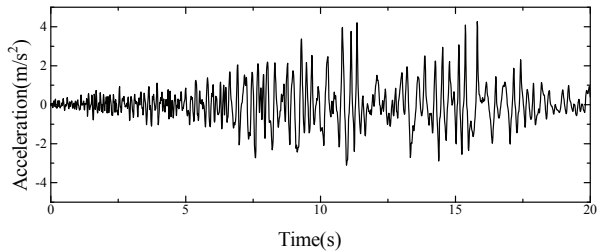
種類	積み石	裏込栗石	裏込土	固定版
単位体積重量 (kN/m ³)	2.6	2.6	1.9	1.9
ヤング率(kN/m ²)	1.0×10 ⁷	1.0×10 ⁷	3.0×10 ⁴	8.0×10 ⁴
ポアソン比	0.25	0.25	0.3	0.3
内部摩擦角(°)	45	45	33	33
粘着力(kN/m ²)	0	0	2.3	2.3
引張強度(kN/m ²)	0	0	0	0

(3) 入力地震動

本研究で解析に用いる地震動は、2001年3月24日芸予地震における当該地点に最も近い地震観測記録 K-NET 呉 (HRS019) の加速度記録のうち、対象モデルの面内方向成分の地震波を採用する。(図 1 参照)



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図 1 芸予地震加速度波形(K-NET 呉)

(4) 解析モデルの簡略化の検討

DDAは要素数が多くなると解析時間を要し、解の安定性が低下することが確認された。そのため本研究では、a)項で、裏込め土厚さ、b)項で裏込め土の簡略化が解析結果に及ぼす影響を検討する。検討対象構造物は、(1)節で示した呉市宮原の高さ3mの石積み擁壁(写真 1の③)とし、入力地震動は、(3)節の芸予地震におけるK-NET呉のNS成分の地震波を採用する。

a) 裏込め土厚の影響評価

本項では、裏込め土厚さが石積み擁壁の耐震性に及ぼす影響を検討するため、裏込め土厚さのみが異なる3種類の解析モデル(裏込め土厚さ 3m, 5m, 10m)に対する耐震性評価を行う。3種類の解析モデルを図 2~図 4に示す。また、裏込め土厚さを変化させた石積み擁壁における地震応答解析の結果として、残留変形図を図 5~図 7に示す。

図 5~図 7に示すように、裏込め土厚さのみが異

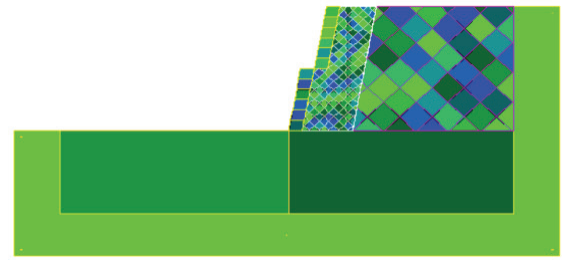


図 2 解析モデル(擁壁高さ 3m, 裏込め土厚さ 3m)

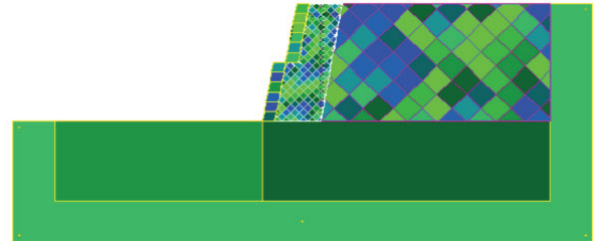


図 3 解析モデル(擁壁高さ 3m, 裏込め土厚さ 5m)

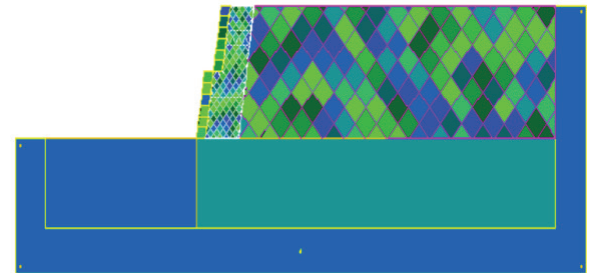


図 4 解析モデル(擁壁高さ 3m, 裏込め土厚さ 10m)

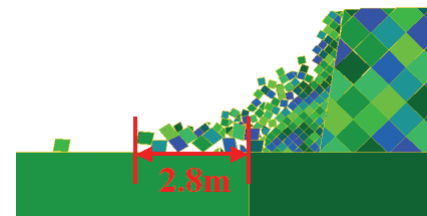


図 5 残留変形図(擁壁高さ 3m, 裏込め土厚さ 3m)

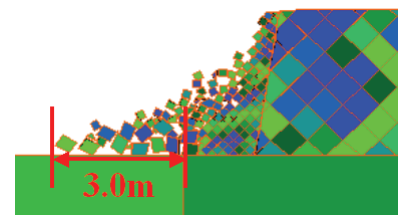


図 6 残留変形図(擁壁高さ 3m, 裏込め土厚さ 5m)

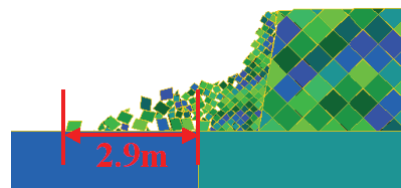


図 7 残留変形図(擁壁高さ 3m, 裏込め土厚さ 10m)

なる3種類の解析モデルは、いずれも、裏込め土と裏込め栗石の一部が沈下した状態で残存し、一番下

に位置する 1~2 個以外の積み石と残りの裏込め栗石が崩壊している。また、崩壊した積み石、裏込め栗石の崩壊形状が円弧状になっており、定性的にはほぼ同じ結果が得られている。一方、積み石などの流動域の観点からは、裏込め土厚さ 3m のケースでは、図 5 に示すように積み石が 1 個だけ 5.5m に達しているものの、大多数の積み石は 3m 以内にあり、裏込め土厚さ 5m と 10m のケースとほぼ同等の崩壊状況となっている。したがって、裏込め土厚さ 5m 以上では定量的にも裏込め土厚さの影響は小さく、同等の結果が得られていると考える。

b) 裏込め土簡略化の影響評価

本項では、裏込め土の簡略化が石積み擁壁の耐震性に及ぼす影響を検討する。a) 項の結果より裏込め土厚さは 5m とする。裏込め土の簡略化モデルを図 8 に示す。また、簡略化モデルの石積み擁壁における残留変形図を図 9 に示す。比較対象は、解析モデルが図 3、残留変形図が図 6 となる。

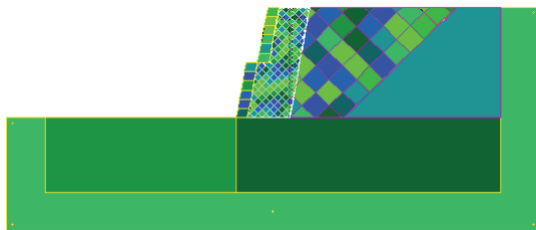


図 8 裏込め土を簡略化した石積み擁壁の解析モデル

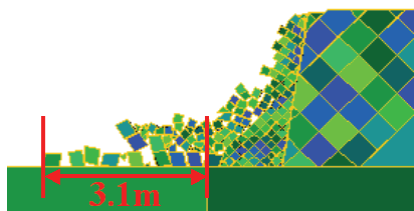
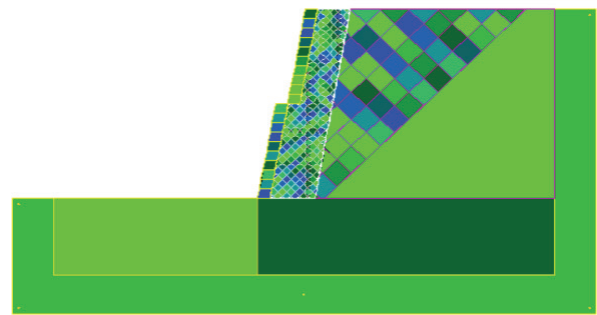


図 9 残留変形図（裏込め土の簡略化モデル）

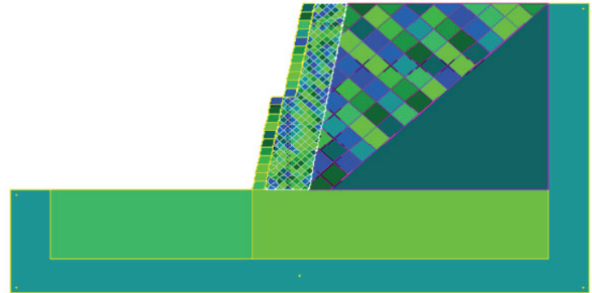
簡略化後の残留変形状態は、図 9 に示すように、裏込め土と裏込め栗石の一部が沈下した状態で残存し、一番下に位置する 1 個を残し、残りの積み石と裏込め栗石の一部が崩壊している。また、崩壊した積み石、裏込め栗石の崩壊形状が円弧状になっており、積み石の崩壊域に関しては、積み石が 3.1m 前面に転がるように崩壊している。これらの残留変形状況は、前節の簡略化前の崩壊状態と定性的、定量的にはほぼ同等の結果を示していると考えられることができる。

(5) 石積み擁壁の耐震性評価

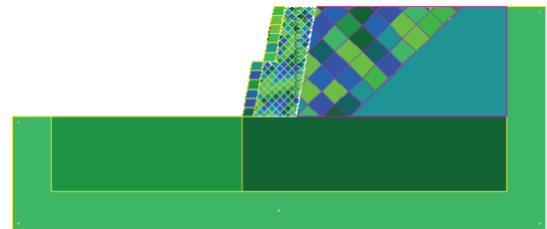
本節では、解析の妥当性を検証する。ただし、上述のように、対象構造物の石積み擁壁は、裏込め土厚さ、裏込め土の簡略化が擁壁の耐震性能に及ぼす影響が小さいと考えられることから、裏込め土厚さを擁壁高さと同程度以上とし、裏込め土を簡略化した石積み擁壁モデルで耐震性評価を行なう。宮原地区、西片山地区の石積み擁壁の解析モデルを図 10 に、残留変形図を図 11 に示す。



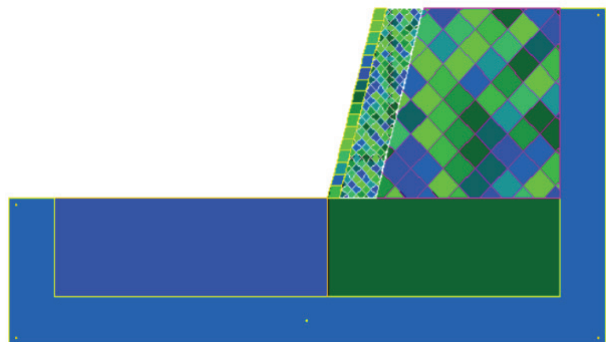
(a) 宮原地区①（擁壁高さ 5m, 裏込め土厚さ 5m）



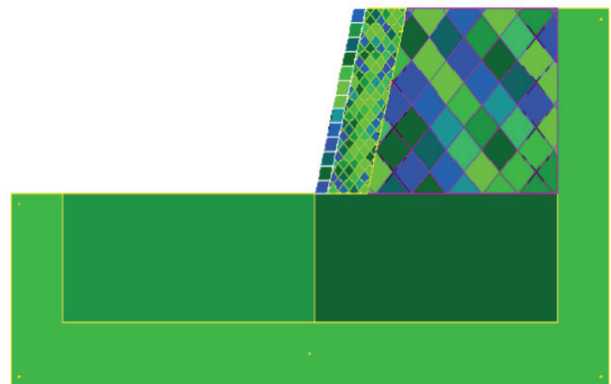
(b) 宮原地区②（擁壁高さ 5.5m, 裏込め土厚さ 5m）



(c) 宮原地区③（擁壁高さ 3m, 裏込め土厚さ 5m）



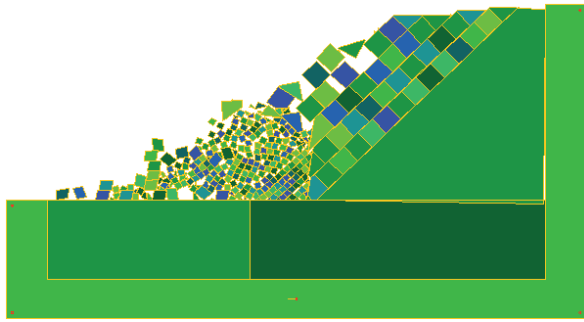
(d) 西片山地区（崩壊）



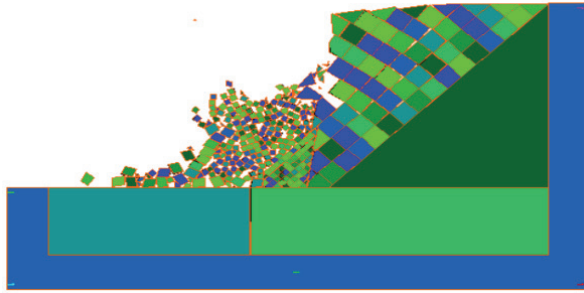
(e) 西片山地区（無被害）

図 10 石積み擁壁の解析モデル

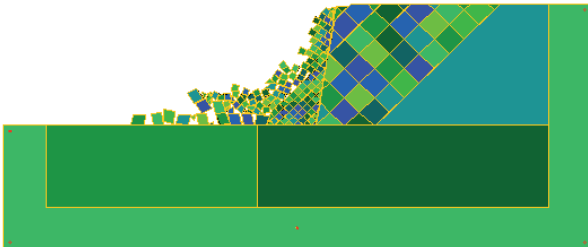
まず、呉市宮原の道路に面した高さの異なる 3 種類の石積み擁壁に対する DDA 解析の結果、図 11



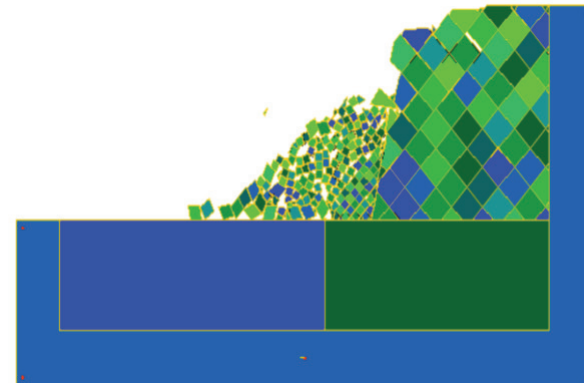
(a) 宮原地区①（擁壁高さ 5m, 裏込め土厚さ 5m）



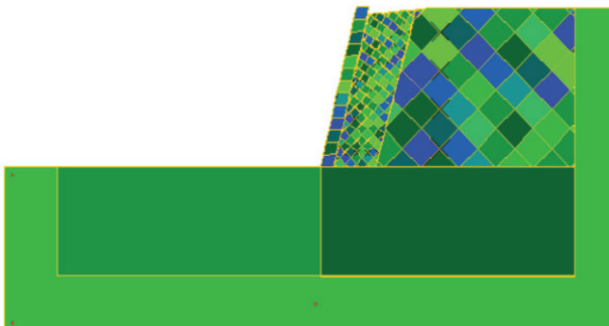
(b) 宮原地区②（擁壁高さ 5.5m, 裏込め土厚さ 5m）



(c) 宮原地区③（擁壁高さ 3m, 裏込め土厚さ 5m）



(d) 西片山地区の石積み擁壁（崩壊）



(e) 西片山地区の石積み擁壁（無被害）

図 11 残留変形図

(b)に示すように、石積み擁壁②は解析では崩壊に

至ったが、実被害では崩壊まで至らず数値解析結果が実現象と異なっている。ここで、土木学会の調査報告¹⁴⁾では、呉市の斜面地の表層地質は脆弱な風化花崗岩からなるマサ土あり、花崗岩は風化耐性が低く水が浸入すると深層風化を引き起こし擁壁の崩壊に繋がると指摘されている。石積み擁壁②では、擁壁上部から石積み擁壁①と②の間には排水経路が整備されており、石積み擁壁①、③と比べて排水状況が良く、マサ土の風化が進んでいなかったことが崩壊しなかった一因であるとも考えられる。

一方、その他の構造物は、図 11(a), (c)に示すように、石積み擁壁①と③が石積み擁壁の下方の積み石を残して崩壊している。実現象（写真 1）とは残存する積み石の数は異なるものの、定性的に整合する結果であった。ここで、積み石の流動域に関しては、写真 1に示すようにガードレールが転石域の抑制に寄与できることが確認される。

また、呉市西片山地区の通路に面した石積み擁壁は図 11(d)に示すように、積み石、裏込め栗石が約 4m 前面にころがり、裏込め土は滑り面が約 3m 生じ崩壊している。ここに、木村ら⁸⁾の資料では、前述のように図 11(d)に示す崩壊とほぼ同量の崩壊域が記録されている。また、同地区内で被害がなかった石積み擁壁は、図 11(e)に示すように、裏込め栗石が約 15cm 沈下しているが落石や崩壊までには至っていない。

上記のように、5つの解析ケースのうち1箇所の石積み擁壁で実際の被害状況の異なる耐震性評価が得られたが、残りの4箇所の石積み擁壁では被害状況と解析結果は整合している。したがって、解析の妥当性が検証されたと考える。

4. 結論

本論文では、不連続変形法（DDA）に基づき、解析モデルの簡略化の影響を検討し、さらに、2001年芸予地震の際に呉市で被害を受けた石積み擁壁の数値シミュレーションを実施した。その結果、下記の成果を得た。

- ①石積み擁壁の耐震性に及ぼす裏込め土厚さの影響を検討するため、特定の地震動に対して 3m の擁壁高さを有する地震応答解析を実施したところ、石積み擁壁の崩壊形状や積み石の流動域など、定性的、定量的にほぼ同等の結果が得られた。したがって、本解析条件下では、擁壁の高さ以上の裏込め土厚さを有する場合、裏込め土厚さのスリム化が石積み擁壁の耐震性評価に及ぼす影響が小さいことが確認された。
- ②石積み擁壁の耐震性に及ぼす裏込め土の簡略化の影響を検討するため、特定の地震動に対して 5m の裏込め土厚さを有する地震応答解析を実施したところ、石積み擁壁の崩壊形状や積み石の流動域など、定性的、定量的にほぼ同等の結果が得られた。そのため、本解析条件下では、裏込め土モデルの簡略化が石積み擁壁の耐震性評価に及ぼす影

響が小さいことが確かめられた。

- ③2001年芸予地震の際に被災し、同一地区に位置して被害程度の異なる石積み擁壁に対して、耐震性評価を行ったところ、5箇所中4箇所被害状況と解析結果が整合し、解析の妥当性が検証された。

謝辞：本研究を行うに当たり、京都大学大学院工学研究科 西山哲准教授、元京都大学大学院生 赤尾悟史氏には深夜までDDAの解析に関して懇切丁寧なご指導を頂いた。地震応答解析ではK-NET呉の地震記録を使用した。ここに関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 田中邦熙, 新谷洋二, 山田清臣: 石垣の安定性に関する各種の判定手法の比較検討, 土木史研究, 第18号, pp.139-152, 1998.
- 2) 渡嘉敷直彦, アイダンオメル, 大洞光央, 赤木知之: 石積み擁壁の動的安定性に関する実験および解析的検討, 第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, No.22, pp.115-120, 2006.
- 3) 田中邦熙, 山田清臣: 石積み擁壁の安定性評価, 土木学会論文集, No.541/I-35, pp.9-20, 1996.
- 4) 鈴木智貴, 若井明彦, 平出務, 源田真宏: 石積み擁壁の耐震性能を定量化するための基礎的研究, 第43回地盤工学研究発表会講演集, pp.1385-1386, 2008.
- 5) 若井明彦: 石積み擁壁の耐震性評価を目的とした動的弾塑性FEMの拡張のための基礎的研究, 第61回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第III部門, pp.907-908, 2007.
- 6) 池谷清次, 梁川俊晃, 西山哲, 関文夫: 石積み擁壁の道路構造物への適用に対する課題と展望, 土木計画学研究講演集, Vol.29, 2004. (CD-ROM)
- 7) 西山哲, 大西有三, 大津宏康, 西村浩史, 梁川俊晃, 亀村勝美, 関文夫, 池谷清次: 不連続変形法 (DDA) による石積み擁壁の安定性に関する研究, 地盤工学会, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1631-1632, 2003.
- 8) 木村紋子: 芸予地震による石積み擁壁の被害特性, 広島大学卒業論文集, 2004.
- 9) 日本建築学会: 2000年鳥取県西部地震災害調査報告・2001年芸予地震災害調査報告, pp.353-360, 2001.10.
- 10) 大西有三, 佐々木猛, Gen-Hua shi, 不連続性岩盤解析実用化研究会: 不連続変形法 (DDA), 計算レクチャーシリーズ6, 丸善, 2005.5.
- 11) 関博, 伊藤興一, 笹原克夫, 吉中龍之進, 進士正人: 落石防護工設計への不連続変形法の適用, 第26回岩盤力学に関する講演論文集, pp.391-395, 1995.
- 12) 立花規弘, 本村将司: 落石対策工事設計におけるDDA解析の適用例, 第36回地盤工学研究会, pp.2511-2512, 2001.6.
- 13) 西山哲, 大西有三, 大津宏康, 西村浩史, 梁川俊晃, 亀村勝美, 関文夫, 池谷清次: 不連続変形 (DDA) による石積み擁壁の安定性に関する研究, 第38回地盤工学研究発表会, pp.1631-1632, 2003.7.
- 14) 土木学会芸予地震被害調査団: 2001年3月24日芸予地震被害調査報告, <http://www.jsce.or.jp/report/13/01/report.pdf>, 2009.2.13.

COLLAPSE SIMULATION OF STONE MASONRY WALLS DURING THE 2001 GEIYO EARTHQUAKE USING DISCONTINUOUS DEFORMATION ANALYSIS

Hisakazu SAKAI, Takashi FURUTANI and Akihiro KUMUJI

Collapse of a stone masonry wall around human living environment does not only cause safety problems to residents and passers-by but also cause a hindrance to the traffic. In this study, we perform collapse simulations of stone masonry walls during the 2001 Geiyo earthquake using discontinuous deformation analysis (DDA) in order to verify the utility of the DDA for the prediction of the stones spreading area as well as for the seismic assessment of the walls. We also studied the influence of the simplification of the analytical model, because the DDA tends to be unstable in the analysis for models of a large number of mesh elements.