

2次元拡張個別要素法による 石垣構造物の地震動応答解析

村上 友基¹・沼田 宗純²・目黒 公郎³

¹学生会員 中央大学大学院理工学研究科

E-mail: yuki-m@iis.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学生産技術研究所助教 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: numa@iis.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学大学院情報学環／生産技術研究所教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: meguro@iis.u-tokyo.ac.jp

石垣構造物の地震時による崩壊を防ぐためには、事前に耐震性能を把握し、その性能が不十分な場合は、適切な耐震補強を実施することが不可欠である。そこで本研究では、2次元拡張個別要素法を用いて石垣構造物の地震動応答解析を行い、その結果を踏まえて、耐震補強策を検討した。具体的には、道路橋示方書の地震動データを用いて解析し、その時の石垣の挙動を把握した。耐震補強策として、施工範囲の小ささと見た目の維持を優先して、石垣に対する耐震補強法としてアンカー補強を選択した。

その結果、無補強時とアンカー補強時の比較に加え、アンカー補強の違いによるパターン分けで、石垣構造物に対する耐震補強の必要性と補強パターンによる地震動応答の変化の傾向を示し、アンカー補強の有効性を確認した。

Key Words : *Extended Distinct Element Method, Stone wall structure, Antiseismic reinforcement policy, Numerical analysis, Historical structure*

1. 研究の背景と目的

交通インフラに接している例が多い江戸三十六見附などの石垣が、地震時に崩壊し文化財の消失につながることを防ぐには、事前の耐震性能の把握、その結果に基づく耐震補強が不可欠である。そこで本研究では、2次元拡張個別要素法(Extended Distinct Element Method, EDEM)¹⁾を用いた石垣の地震動応答解析を行い、耐震性能の把握と耐震補強の有効性などを検討する。

既往の研究^{2)・4)}では、石垣構造の解析を行う際は有限要素法や個別要素法が用いられている。しかし、有限要素法では石垣の崩壊過程までを追跡することは一般に難しく、個別要素法では連続体的に挙動する石垣の解析が難しい。

そこで本研究では、連続体から非連続体までの挙動を扱うことができる拡張個別要素法を用いて解析を行う。そして、石垣全体をモデル化することで、石垣に対する地震動の影響範囲や、崩壊のメカニズムを把握する。これにより、石垣の構造的弱点を見出し、効率的に耐震補

強を行う方法を検討する。

2. 拡張個別要素法(Extended Distinct Element Method, EDEM)

本研究では、解析手法として拡張個別要素法(EDEM)を採用した。これは、個別要素法に要素同士の間隙に存在する物質の効果を間隙ばねを導入することで、解析対象物の連続体から非連続体に至る一連の挙動の解析を可能とした方法である。

このEDEMは、もともと非連続体解析法を母体としているので、間隙ばねが破断した後、要素同士が完全に離れて大きな変形を生じたり、初期と違った要素と接触して新たな応力場を形成したりする現象も、問題なく解析できる。EDEMモデルは、間隙ばねが破断されていくにしたがって、徐々に塑性化し、モデル全体としての非連続体性が自然に表現される特徴をもっている。

また、地盤やコンクリート等の粒状物質の集合体において、特徴的に見られるダイレタンシーの効果や、応力

やひずみの局所化の効果を自然に取り込むことができる点でも優れている。

3. 地震動応答解析

石垣の断面は「栗石」、「平石」、「地面」の3つから構成されている。本解析では東京都内の石垣を解析対象に選び、江戸城壁の石垣に関する既存論文を参考とし、それぞれに入力パラメータ³⁾を設定した。(表-1)

本研究では、石垣内部の栗石を1つの円形要素として扱っている。実際の栗石は楕円形や多角形であるが、解析を行う上で接触判定の容易さを優先して円形要素に簡略化して扱った。表面を構成する平石に関しては、複数の要素を間隙ばねで接続して表現した。

また、本解析では、慣性モーメントを用いて要素の回転しやすさに制限を設けている。これは、実際の栗石は円形要素ではなく楕円形や多角形など、円に比べて回転しにくい形状をしている点を疑似的に再現するためである。制限の程度は、既存論文「石積み擁壁の地震時挙動把握のための基礎的研究」⁴⁾において、空積み砕石の内部摩擦角を 20° としているため、安息角測定において約 20.4° の値を示した慣性モーメントを使用した(図-1)。

平石は図-2のように構成した。平石モデルについては、間隙ばねを用いて要素同士を結合させることで表現した。なお、平石による擁壁部は地表だけでなく、地中にも構成されていると考えられるため、今回の解析では平石と地面の要素を同径で表現した。石垣断面モデルは図-4のように構成した。

本解析では東京都の石垣を対象に解析を行っていることから、道路橋示方書から都市部で発生した兵庫県南部地震の大阪での波形⁵⁾(図-3)を用いた。

図-4の解析モデルに対し、地震動を与えた結果、図-5のように挙動した。各平石の変化量を比較した結果を図-6と図-7に示す。

解析の結果、7.0[s]付近で石垣が崩壊に至った。また、このとき最も大きく変位したのは9段目の平石であることが分かった。

表-1 入力パラメータ

	平石	栗石	地面
鉛直要素ばね定数	$2.0 \times 10^8 (N/m)$	$2.0 \times 10^8 (N/m)$	$2.0 \times 10^8 (N/m)$
せん断要素ばね定数	$5.0 \times 10^7 (N/m)$	$5.0 \times 10^7 (N/m)$	$5.0 \times 10^7 (N/m)$
鉛直間隙ばね定数	$8.0 \times 10^7 (N/m)$		
せん断間隙ばね定数	$2.0 \times 10^7 (N/m)$		
要素密度	$2,650 (kg/m^2)$	$2,200 (kg/m^2)$	$2,650 (kg/m^2)$

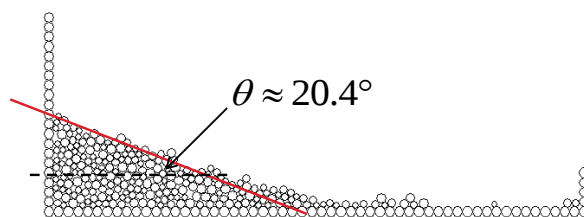


図-1 安息角測定図

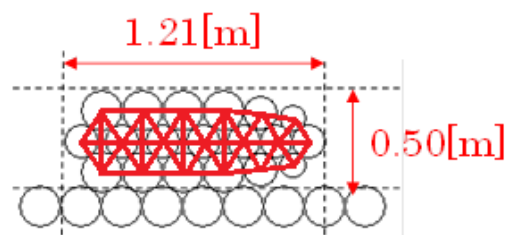


図-2 平石寸法、平石間隙ばね配置図

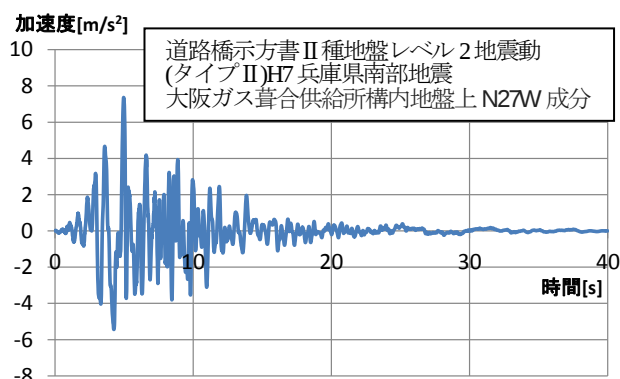


図-3 入力地震動波形

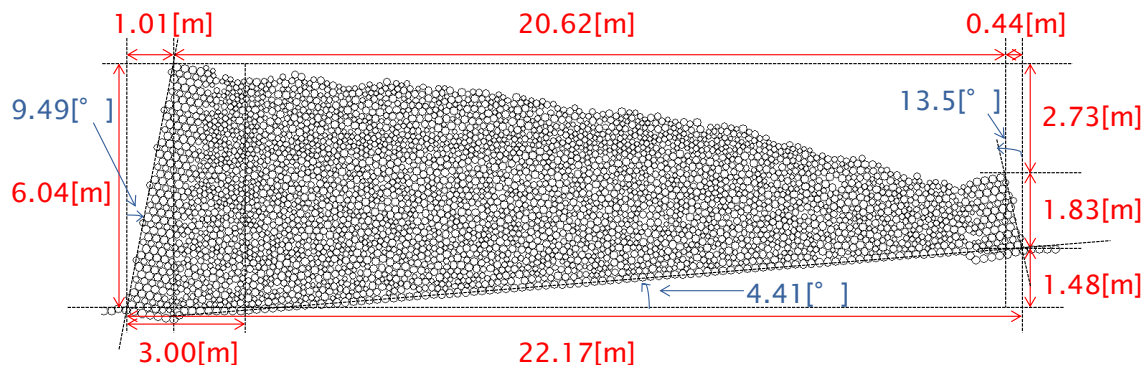
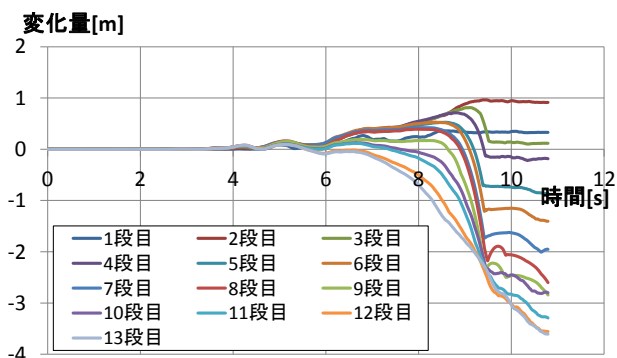
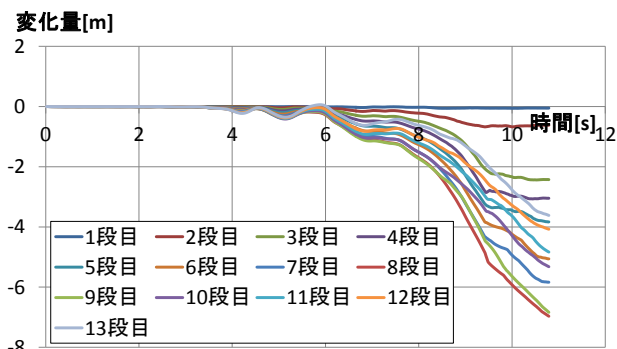
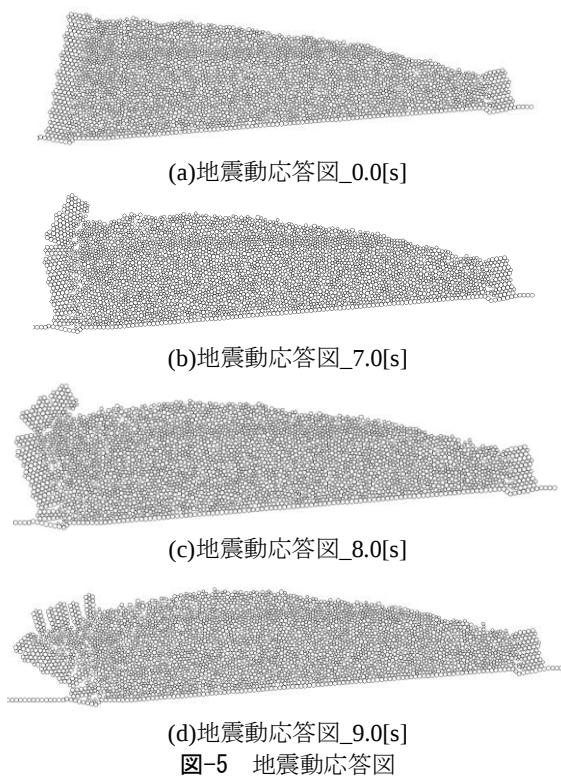


図-4 石垣断面モデル



4. 耐震補強策の検討

東日本大震災において、仙台市内の石垣が崩壊した事例を鑑みると、補強は不可欠であると考えられる。3章の解析結果より、9段目の平石が最も地震動の影響を受けて挙動が大きくなることが分かった。したがって、本モデルにおいて耐震補強を行う際は、

9段目の平石を中心に行うことが効果的であると考えられる。

石垣の耐震補強法としては、アンカー補強やコンクリート充填、前方擁壁設置などが考えられる。しかし、今回対象とした石垣構造物は文化財として指定されているため、文化財保護の観点から、加工を加えるような施工は基本的に行えない。そこで、文化財保護と耐震補強の必要性のバランスを考えて、施工範囲の小ささと見た目の維持を優先してアンカー補強が適すると考えた。その上でアンカー補強の解析を行い、無補強のデータと比較することでアンカー補強の有効性を検討する。

今回の解析では石垣の外側に、圧縮に抵抗するばねを設置して、擬似的にアンカー補強を再現した。また、アンカーは破断しないと仮定して解析を行った。

無補強時とアンカー補強時の比較に加え、本解析ではアンカー補強の違いによる効果も比較する。アンカー補強を考察する際、アンカーの本数と、アンカーを打つ場所の数でパターン分けが出来る。3章にて9段目の平石が最も地震動の影響を受けていることが分かったので、今回の解析では、補強を行う場所を9段目に固定した。3箇所アンカー補強を行う場合は、8, 9, 10段目を補強対象とした。

表2は解析パラメータ⁶⁾であり、図-8と図-9はアンカーの補強図である。図-10～15は解析結果の比較である。解析は無補強の石垣が崩壊するまでの時間を対象とした。

解析の結果、アンカーを1箇所に3本打った場合(図-10)と、アンカーを3箇所に打った場合(図-11)に石垣が自立を保ち、崩壊には至らなかった。

アンカーを1箇所に3本打った場合、無補強時と同じ変化量-2.0[m]を持つまでの時間が、それぞれアンカー1本の場合0.57[s]、アンカー2本の場合は1.09[s]延長されて破壊に至り、アンカー3本の場合においては崩壊を防ぎ、自立を維持した。アンカーを3箇所打った場合も同様に、自立した。

使用するアンカーを3本に固定して比較した場合(図-12)、アンカー3本を1箇所に集めて補強する場合よりも、1本ずつ3箇所に分散して配置する方が、より耐震補強の効果が高いことが分かった。また、3個の平石を補強する場合は、連続した3個の平石を補強する方が補強結果が高くなった。

連続した3個の平石を補強することを前提として、補強する場所を変えて比較した場合、無補強時に最も地震動応答が大きかった9段目の平石を中心に補強するパターンが、変位量が少ないことが分かった。図-13～15は、9段目の平石を中心に補強した場合の挙動について、6段目、9段目、12段目の平石を比較したものである。図-16は、9.0[s]時における「無補強」とアンカーの効果と比較したものである。

以上より、アンカー補強は石垣の耐震補強策として有効性を持っていると言え、その効果は1つの平石に集中的にアンカー補強するよりも、連続した平

石にアンカー補強した方が補強効果が高いことが分かった。そして無補強時に最も地震動応答が大きかった平石を中心に連続した平石を補強した場合に、最も高い補強効果が得られるという結果になった。

表-2 アンカーの入力パラメータ

鉛直間隙ばね定数	$E = 2.0 \times 10^5 (N/mm^2)$
種別(ユニット)	E5-12
PC鋼より線本数	12
鋼材断面積	$1184.5mm^2$

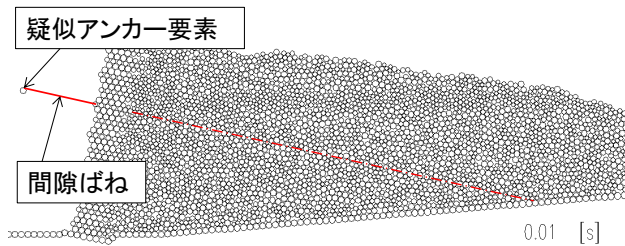


図-8 アンカー補強再現図 (例：アンカー1箇所)

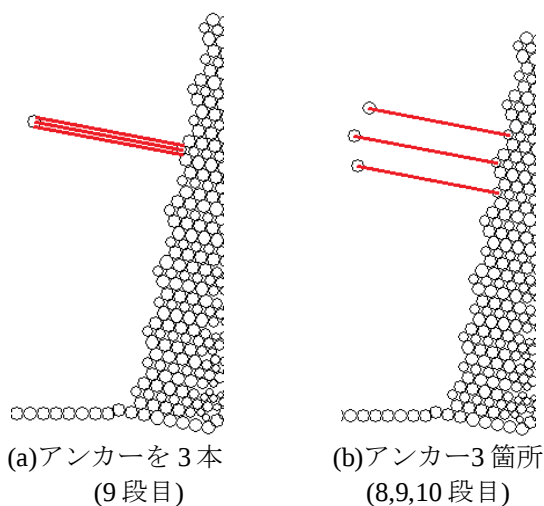


図-9 アンカー補強例

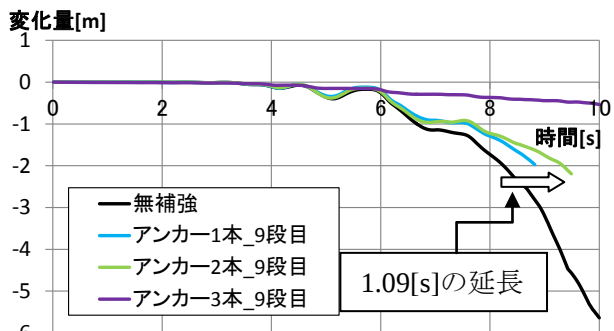


図-10 アンカー本数による比較

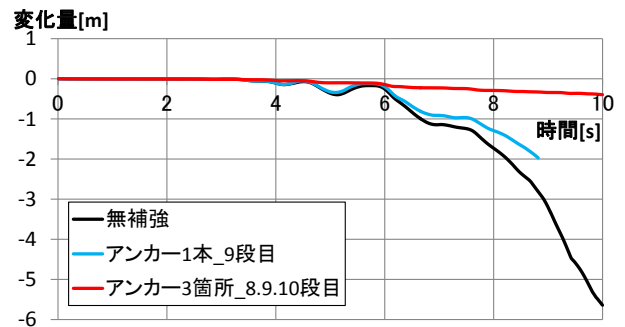


図-11 アンカー設置場所数による比較

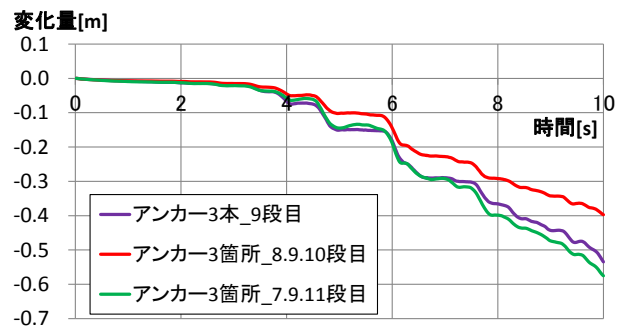


図-12 アンカー3本での比較

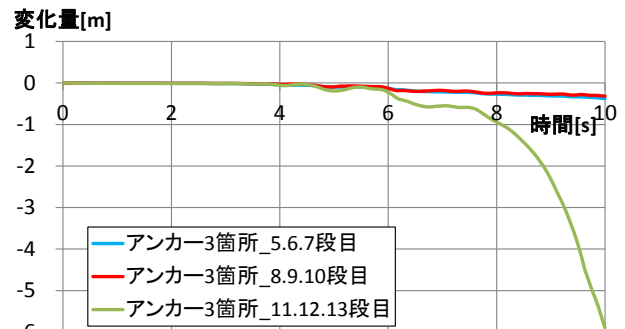


図-13 アンカー3箇所での比較_6段目平石比較

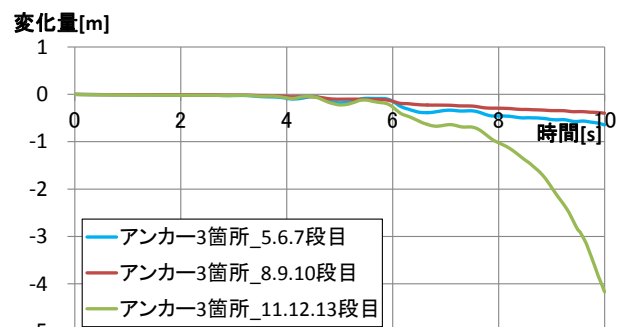


図-14 アンカー3箇所での比較_9段目平石比較

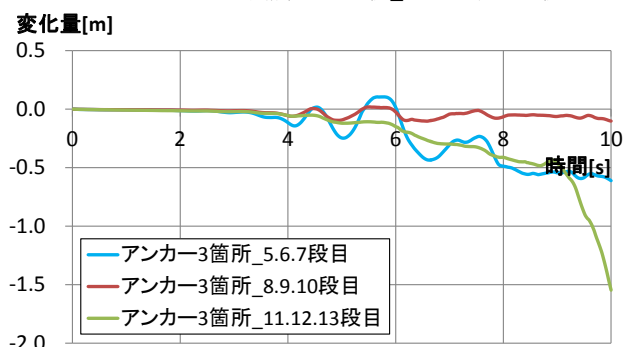


図-15 アンカー3箇所での比較_12段目平石比較

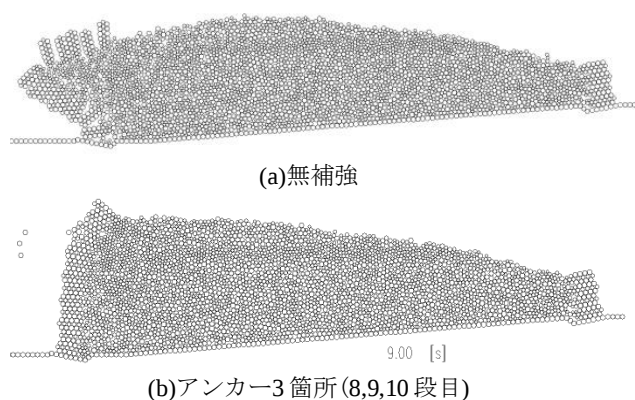


図-16 地震動応答図による比較(9.0[s]時点)

5. まとめ

今回の解析で、石垣構造物に対する耐震補強の必要性と、それに対するアンカー補強の有効性と補強パターンによる地震動応答の変化の傾向を示した。使用するアンカーを3本に限定して解析した場合、無補強時に最も地震動応答が大きかった9段目の平石を中心に3本を連続的にそれぞれ異なる平石に補強する場合が最も大きな補強効果が得られた。しかし、栗石を完全な円形の要素として再現している点や、平石同士のインターロッキングの問題などが課題として残っている。

また、本研究では様々な地震動に耐えうるようなアンカー補強策を提案するには至っておらず、入力する地震動を周波数と振幅でパターン分けして、比較するなどを行う必要がある。

今後は以上の課題を解決したうえで更に解析の精度、解析モデルの再現性を高めると共に、他の補強法とも比較を行う予定である。さらに石垣が崩壊し

た際の危険範囲の推定なども検討していきたいと考えている。

謝辞:本研究を行うにあたり、パシフィックコンサルタンツ（株）の小沼恵太郎様、以後有希夫様には多大なご協力をして頂いた。記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 伯野元彦：破壊のシミュレーション - 拡張個別要素法で破壊を追う -, 森北出版, 1997.
- 2) 川村國夫・西岡幹雄：金沢城石垣の安定性, 地盤工学研究発表会発表講演集 37 巻, pp.1803-1804, 2002.
- 3) 田中邦熙・新谷洋二・小林善勝・谷優作・木村真也：FEM-3D(L27)による石垣挙動の数値解析実験, 土木学会土木史研究講演集 No.24, pp.261-268, 2004.
- 4) 田中邦熙：石垣の地震時挙動解析に FEM を適用する手法の可能性, 土木史研究講演集 vol.26, pp.287-298, 2006
- 5) 宮内庁管理部：江戸城跡 皇居山里門石垣修復工事報告書.
- 6) 塚原健太・田中成季・畠中優・若井明彦・吉田直樹・池本敏和：石積み擁壁の地震時挙動把握のための基礎的研究, 擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム講演論文集, pp.53-56, 2012.
- 7) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 IIIコンクリート橋編, 2012.
- 8) VSL 協会：VSL 永久アンカー工法 設計・施工指針, 2008.

The seismic response analysis of the stone wall structure by Two-dimensional Extended Distinct Element Method

Yuki MURAKAMI, Muneyoshi NUMADA and Kimiro MEGURO

To prevent the stone wall structure from collapsing by an earthquake, it is indispensable to grasp the anti-seismic performance and enforce the wall by retrofitting if necessary. In this study, the authors has conducted an analysis of seismic response of historic stone wall structure and examined the retrofitting method based on the Two-dimensional Extended Distinct Element Method.

As a result, the anchor-reinforcement method was selected as an anti-seismic reinforcement, for its minimum intervention and visual impact to the historical stone wall. By comparing the movement of the wall with or without anchor reinforcement and recognizing the pattern by various applications, the study indicated the necessity of anti-seismic reinforcement as well as the tendency of response behavioral change and examined the validity of anchor reinforcement.