

2次元拡張個別要素法を用いた石垣構造に対する耐震補強策の検討

中央大学大学院 学生会員 ○村上 友基

東京大学生産技術研究所 正会員 沼田 宗純

東京大学大学院情報学環/生産技術研究所 正会員 目黒 公郎

1. 研究の背景と目的

本研究は、2次元拡張個別要素法¹⁾を用いて石垣構造物の地震動応答解析を行い、石垣構造物に対する耐震補強策を検討するものである。

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を用いた石垣の地震動応答解析を行い、耐震性能の把握や耐震補強の有効性などを検討する。

既往の研究では、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できず、個別要素法では耐震性能の把握や解析結果を基にした耐震補強の検討までは十分に行われていない。

本研究では各要素の挙動を追える拡張個別要素法を用いて解析を行う。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. 地震動解析

石垣断面は「栗石」、「平石」、「地面」の3つから構成されており、それぞれに入力パラメータ²⁾(表1)を設定した。

本研究では、解析を行う上で接触判定の容易さを優先し、円形要素を用いた。

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、実際の栗石は円に比べて回転しにくい形状であ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³⁾において、空積み碎石の内部摩擦角を 20° としており、本モデルで安息角測定し約 20.4° の値を示した慣性モーメントの値(100倍)を使用した。

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。

また、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を入力した。

地震動を加えた結果、石垣は崩壊に至った。各平石の変化量を比較した結果を図1に示し、その挙動図を図2に示す。

解析の結果、7.0[s]付近で石垣が崩壊に至った。

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	$2650 (kg/m^2)$	$2200 (kg/m^2)$	$2650 (kg/m^2)$

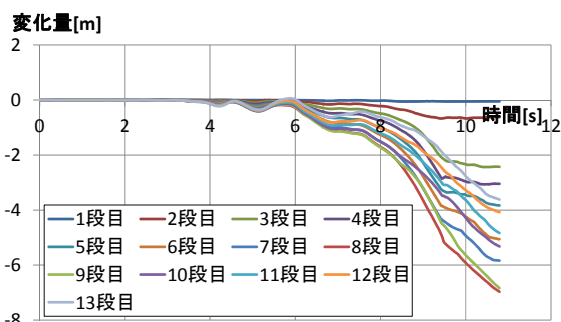
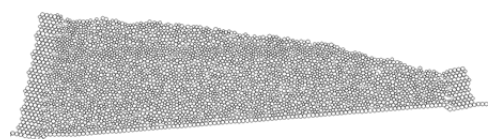
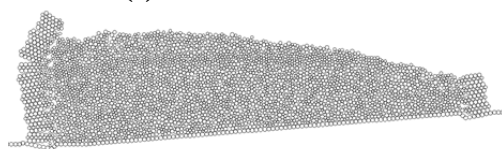


図1 X方向の変化量比較



(a)地震動応答図_0.0[s]



(b)地震動応答図_7.0[s]

図2 地震動応答図

この時 X 座標の変化量が最も多い 9 段目の平石が、最も地震動によって影響を受けることが分かった。

3. 耐震補強策の検討

2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。そこで、石垣に対し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。

石垣構造物は文化財保護の観点から基本的には加工を加えるような施工は行えないため、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を行った。アンカーを石垣の内部に再現すると栗石の動きを制限してしまう。そのため今回の解析では石垣の外側に圧縮に対して抵抗するばねを設置し、疑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．

アンカー補強をする際，2章の結果より，9段目平石を中心に補強した．アンカーのパラメータ^{4), 5)}を表2，アンカー補強の再現図を図3に示す．

まず，アンカー設置場所数で比較した(図4)．その結果，3箇所各1本アンカー補強をした場合から補強効果が見られた．

次に，どこに補強すると効果が高いのかを確認するため，使用するアンカー3本で比較した(図5)．9段目に3本補強する場合と，8.9.10段目に補強する場合と，7.9.11段目に補強する場合を検討した．その結果，8.9.10段目に補強する場合が最も効果が高いことが分かった．無補強時との挙動の比較を図6に示す．

従って，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，その効果は連続でアンカー補強された部分の面積に起因す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	$1184.5mm^2$

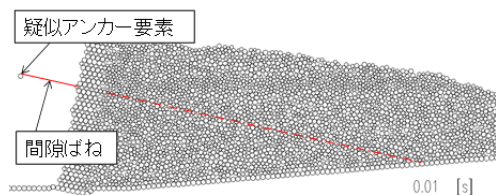


図3 アンカー補強再現図
(例：アンカー1本_9段目)

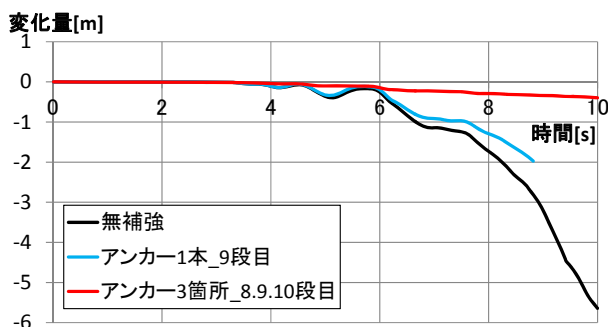


図4 アンカー設置場所数による比較

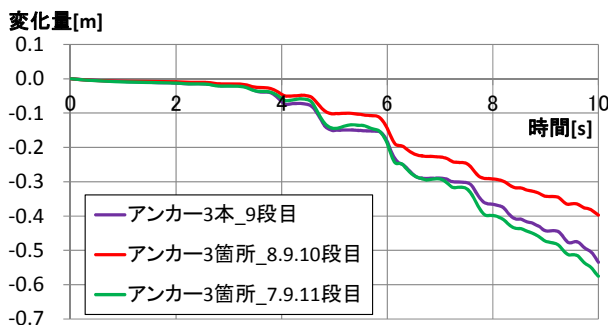
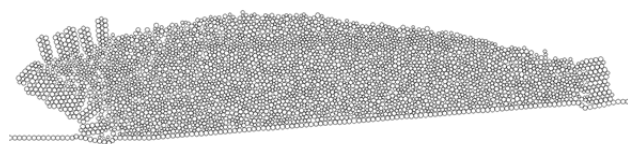
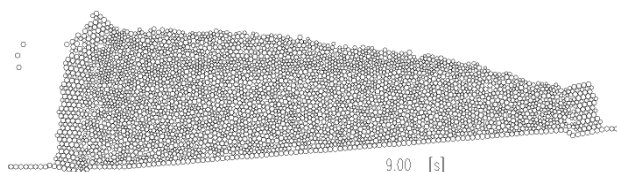


図5 アンカー3本での比較



(a)無補強



(b)アンカー3箇所_8.9.10段目

図6 地震動応答図による比較_9.0[s]

4. 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．しかし，栗石を完全な円形の要素として再現していることや，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た．

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，比較する必要がある．

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，他の補強案も考慮・比較を行い，さらに石垣が崩壊した際の危険範囲の推定などにも拡張していくことを目指す．

5. 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) 宮内庁管理部：江戸城跡 皇居山里門石垣修復工事報告書．
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) VSL協会：VSL永久アンカー工法 設計・施工指針，2008