

個別要素法による城郭石垣における鉄筋挿入工法の補強メカニズムの検討

関西大学大学院
安藤ハザマ

学生会員
正会員

○ 葛野 温也
山本 浩之

関西大学
安藤ハザマ
安藤ハザマ

正会員
正会員
正会員

西形 達明
笠 博義
野間 康隆

1. 目的

城郭石垣は経年劣化や自然災害により損傷・崩壊を起こしているものが多数存在し、様々な補修が行われている。現行の補修方法は、一般的に解体積み直しが行われるが、莫大な費用がかかる上に、元の状態に復元することが困難であるため歴史的遺産の損失に繋がる。そこで本研究では、城郭石垣の新たな補修方法として、地山補強土工法に用いられる鉄筋挿入工法を城郭石垣に適用した。城郭石垣に鉄筋挿入工法を適用することで、石垣を安定化でき、解体積み直しの際の解体範囲を最小限に留めることが可能である。また、鉄筋補強材の挿入を栗石層までと制限することで、背面地山を傷つけることなく歴史的遺産の損失を防ぐこともできる。本研究では、その補強効果の有無と補強メカニズムについて既往の研究である遠心載荷実験の結果に加え、3次元個別要素法より検討し、鉄筋挿入工法が城郭石垣の補修工法として有効であることを確認した。

2. 解析手法

本研究では、城郭石垣のような分離した構造を有し、かつ大変形が予測される構造物を解析する上で最も有効であると思われる個別要素法を採用した。3次元個別要素法において作製した石垣モデルを図-1に示す。図には個々の石垣石は白および灰色で色分けして示されているが、奥行き方向に先細りとなるような形状とし、石の加工技法は切り込みはぎ(成形加工した積み石)を模擬している。石垣モデルの高さは3.52mとし、石垣表面の曲線形状は18世紀に石垣設計手法を記した後藤家文書の手法(2次曲線)に従った。石垣全体の構造は石垣石、栗石層および背面地山の3層構造としている。次に、解析モデルの物性値を表-1に示す。

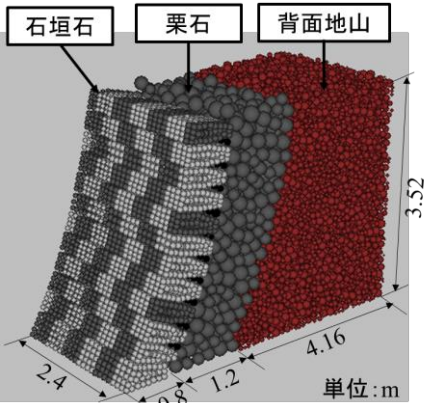


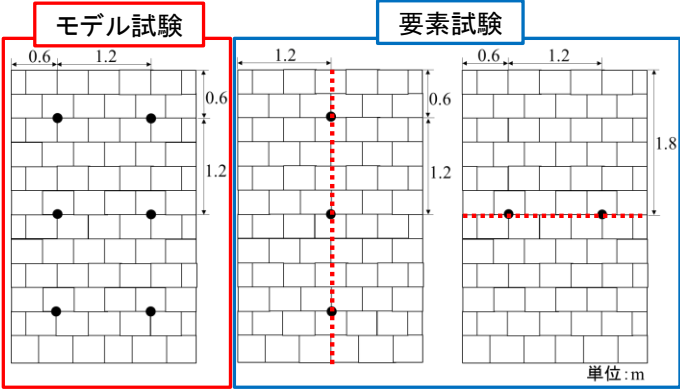
図-1 石垣モデル(3次元個別要素法)

表-1 解析モデル物性値

	石垣石	介石	栗石	背面地山
粒径(cm)	5	4.5~6.5	17~25	5~15
密度(kg/m³)	2650	2650	2650	2650
ばね定数(N/m)	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶
粒子間摩擦係数	2	0.65	0.65	0.21
粒子間粘着力(kN)	0	0	0	0

個別要素法では物性値の設定が大変重要になる。そこで、3

軸圧縮シミュレーションを実施した結果から得た内部摩擦角と摩擦係数、粘着力と粒子間粘着力の関係等を参考に物性値の決定を行った。本研究では、石垣の変形対策として鉄筋挿入工法を念頭に置いているため、その補強材の打設ケースを図-2に示す。打設ケースは、一般の地山補強土工で多用される2㎡に1本の打設密度に相当する等間隔打設(6本)をモデル試験とし、補強メカニズムを考察するために鉛直方向のみに打設した縦打設(3本)と水平方向に打設した横打設(2本)を要素試験として検討した。また、鉄筋補強材の挿入は文化財保護の観点から、栗石層までの挿入とした。これらのモデルに周波数1.5Hzの400galの正弦波20波を加振し、補強メカニズムの解明を行った。



(a) 等間隔打設 (b) 縦打設 (c) 横打設
図-2 打設ケース概略図

キーワード 城郭石垣、鉄筋挿入工法、個別要素法

連絡先 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 関西大学環境都市工学部 TEL 06-6368-1121

3. 解析結果

図-3に解析における各打設ケースの石垣石水平変位量を示す。等間隔打設は無補強に比べて、水平変位量を約1/2に抑制していることから、補強効果は十分発揮されているといえる。ここで、縦打設と横打設において、石垣上部の変形モードが異なる結果となっている。以下でその要因を考察する。

図-4に各石材間のせん断剛性の低下率を示す。等間隔打設は全体的にせん断剛性の低下が抑制されているのに対し、他3ケースではせん断剛性の低下が大きいことがわかる。このことから、等間隔打設のような石材を囲むような打設を行うことで、各石材が拘束され一体化するような現象が発生し、石材間の摩擦特性が維持されたため、補強効果が発揮されるものとする。一方で、横打設と縦打設には大きな違いが見られないため、この要因については以下でさらに考察するものとする。

図-5に加震後の栗石の沈下量を示す。石垣石10段目の高さ(2.83m)の栗石層で、石垣石側から地山方向へ水平に0.3mごとの栗石を対象とした。ここで、横打設と縦打設の沈下量に着目すると、横打設の方が沈下量が小さくなっている。このことから、鉄筋補強材を水平に打設することで得られる栗石の沈下抑制が、石垣の変形を抑制することに大きく寄与しているものと考えられる。

図-6に加震後の栗石の水平変位量を示す。石垣石10段目(2.83m)、7段目(1.92m)、4段目(1.06m)の高さにおける栗石を対象に検討した。横打設と縦打設を比較すると、横打設の方が変形量が小さい。前述の栗石の沈下量と合わせて考えると、水平に広く打設することで、栗石の拘束効果が大きく発揮され、石垣変形に及ぼす影響を抑制するものと考えられる。

図-7に無補強と等間隔補強の周波数と応答変位倍率の関係を示す。

無補強の固有振動数は1.5Hzであるのに対し、等間隔補強の固有振動数は2.5Hzにある。補強することで固有振動数が高周波側に移行していることから、石垣全体が柔な状態から剛な状態に移行したものといえる。

以上のことより、鉄筋挿入工法の補強効果には①個々の石垣石の変形拘束効果、②栗石の拘束効果が大きく影響しているといえる。このような効果が発揮されることで、石垣全体が一体化し補強効果が得られる。

4. まとめ

鉄筋補強材を打設することで、石材間の摩擦特性の維持と栗石の拘束効果が発現するといえる。そして、これらの両者が発現すると石垣全体が一体化し、石垣変形の抑制に繋がると考える。

参考文献

・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定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, pp. 444-456, 2013.

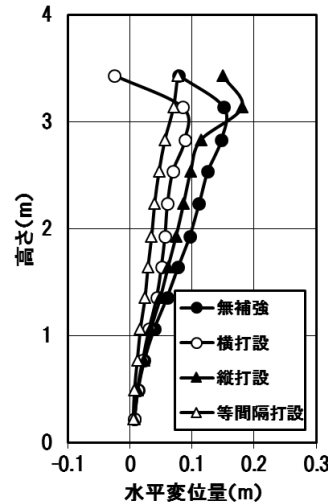


図-3 石垣石水平変位量

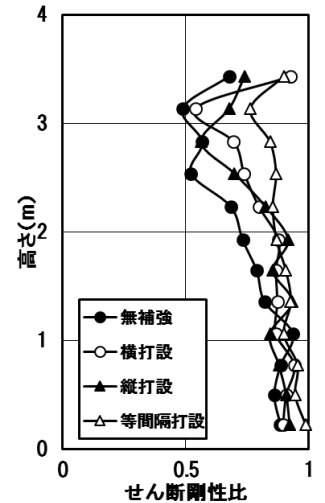


図-4 石材間のせん断剛性比

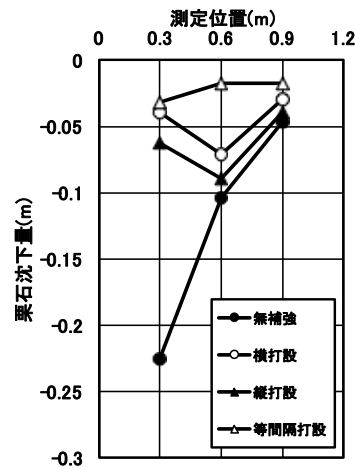


図-5 栗石の沈下量

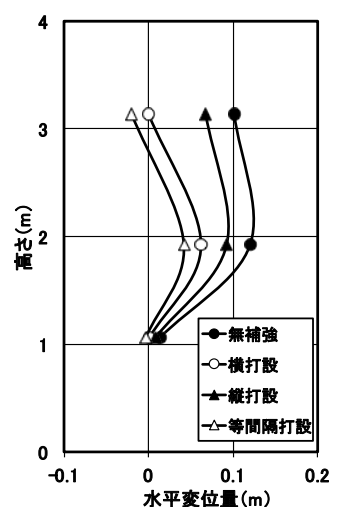


図-6 栗石の水平変位量

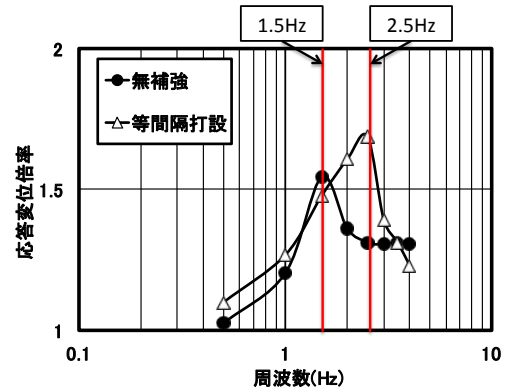


図-7 周波数と応答変位倍率の関係