

## 熊本城飯田丸五階櫓石垣における補強仕様検討事例

大林組 正会員 ○川本 卓人                      大林組 正会員 森田 晃司  
 大林組 正会員 粕谷 悠紀                      大林組 正会員 岡渕 直樹  
 熊本市役所 非会員 馬渡 浩司                熊本市役所 非会員 下高 大輔

### 1. はじめに

平成 28 年熊本地震により熊本城飯田丸五階櫓石垣の一部が崩落した。飯田丸五階櫓石垣は、前震と本震を受けて崩落してもなお、櫓を隅石で支えていたことから「奇跡の一本石垣」と呼ばれた（写真-1）。平成 17 年に木造復元にて再建された櫓は、解体され、石垣の一部も解体された。石垣は、文化財であり、その本質的価値を維持する必要があるため原形復旧が基本となるが、石垣と直上の櫓の全体系に熊本地震と同等規模の地震が発生した場合に来城者の安全・安心を担保するためには、石垣の補強も視野に入れておく必要がある。本稿では、石垣の補強方法とその仕様を検討するために実施したグリグリッド工法適用時の模型石垣振動台実験結果について報告する。



写真-1 崩落後の南面石垣

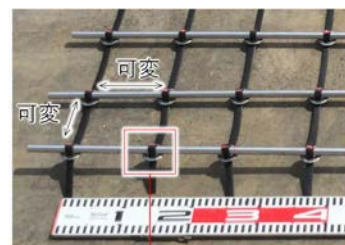


図-1 グリグリッド

### 2. グリグリッド工法の概要

グリグリッド工法は、一般的なジオグリッドを縦材，ステンレス鋼を横材とし，交点部をワッシャーで接合した格子状の補強材（図-1）を用いた補強土壁形式の可逆性のある石垣補強工法である。格子交点部にワッシャーを用いることで、栗石の粒径（最大 300mm 程度）に合わせて格子間隔を調整できる。手詰めで栗石を噛み合わせる在来工法による修復を可能とし、栗石のロッキング効果を活かした補強が可能である。

### 3. 実験概要

#### 3.1 実験模型

実験模型の概要を図-2 に示す。模型スケールは、実物の南面石垣の 1/8 スケールとした。築石は  $2.7\text{g/cm}^3$  のコンクリートで製作し、実物の石材調査をもとに各段の築石の控え長を設定した。積形式は、実物に近い布積みとした。鋼製土槽背面に縞鋼板を斜めに設置し、実物と同様に埋設石垣を模擬した。栗石層は、実物石垣解体時の発掘調査結果をもとに粒子形状と粒径を考慮した 3 層構造とし、相対密度  $D_r=50\%$  に設定した。鋼製土槽内に模型石垣を構築した後、実物の櫓の重量に相当する載荷板（重量 85kg）を設置した。

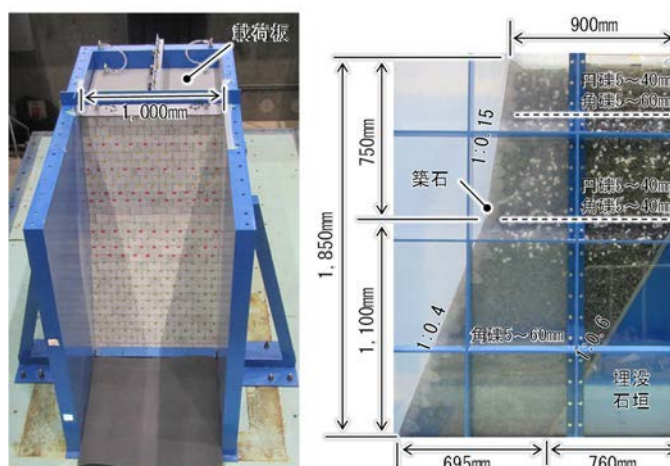


図-2 実験模型

#### 3.2 実現象・実施工の模擬

無補強の状態で作成した模型石垣に対し、sin 波 5Hz にて 50gal 毎の段階加振を実施し、模型上部を崩落させることで前震後の状態を模擬した。崩落後も段階加振を続け、模型下部を本震後の実物の変形量と同等の

キーワード 石垣，ジオグリッド，補強土壁，振動台実験

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 (株) 大林組 TEL 03-5769-1302

変形量まで変形させた。模型上部は、200gal 加振時に崩落し、250gal 加振後に模型下部が実物の石垣下部の変形量と同等になった。このとき、模型上部の崩落高さも実物と同等であった（図-3）。変形量は、3D レーザースキャナーを用いて計測した。下部の変形を残した状態で上部を実物と同じ深さまで解体し、補強を施しながら再構築した。

実物の石垣において、上部解体範囲は、一部は当初（江戸期）に構築された石垣であったが、大半が明治期と平成期の修復履歴のある石垣であり、下部非解体範囲は江戸期から残る石垣である。文化的価値を鑑み、非解体としている。

### 3.3 実験ケース

実験ケースを図-4 に示す。石垣は、文化財であるため補強範囲を必要最低限とすることが求められる。そこで、ケース1は、実物の崩壊高さから試行くさび法で求めた地震時最大土圧となるすべり面（想定崩壊面）を補強対象とした。ケース2は、実物の崩壊高さとその背面全域（解体した江戸期栗石範囲を含む）を補強対象とした。補強に用いた模型版グリグリッドを図-5 に示す。縦材間隔 35mm、横材間隔 50~70mm とした。

sin 波 5Hz にて初期値を 300gal とする 150gal 毎の段階加振を実施した。

### 4. 実験結果

ケース1の加振結果を図-6 に、ケース2の加振結果を図-7 に示す。補強後の要求性能を「熊本地震と同等の地震（600gal）が発生した場合においても崩落しないこと」と定めた。ケース1は、450gal 加振時に補強領域背面を通るすべりによって崩落した。これに対し、ケース2は 600gal 加振時においても崩落することなく、要求性能を満たした。ケース1の補強領域であれば補強範囲を最小限に留めることができるものの、変形が残留する石垣下部へ抜けるすべりを抑止できない。一方でケース2は、補強範囲が拡大するものの石垣下部へ抜けるすべりを抑止でき、耐震性が向上したものと考えられる。

### 5. まとめ

一般的な補強土壁と同様に石垣に補強土壁構造を適用した場合においても補強範囲を拡大することで、補強範囲外を含む全体としての安定を確保でき、耐震性が向上する。実物の石垣においても本実験で検証した補強仕様を用いることで要求性能を満たすことができるものと判断した。石垣の本質的価値の残存状況と有効な補強範囲が一致した結果、2022年度、本実験の補強仕様が実際に適用される。

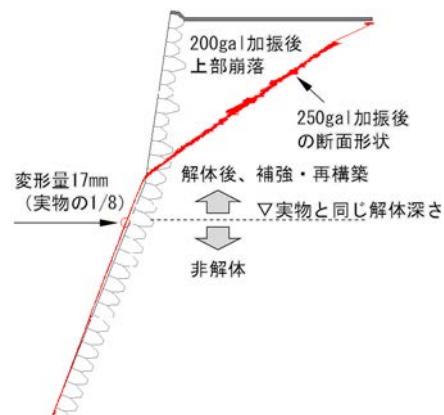


図-3 上部崩落後の模型断面図

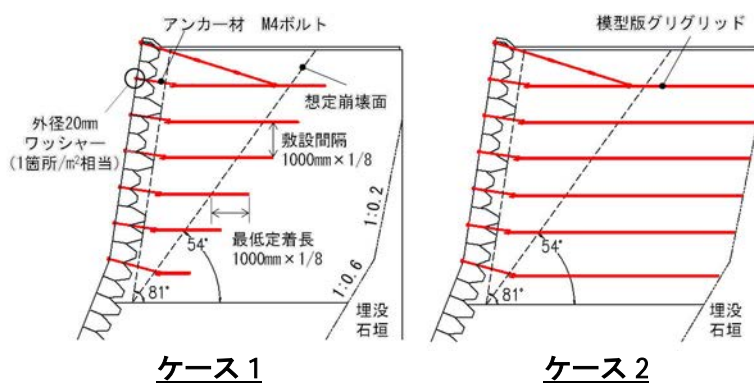


図-4 実験ケース（模型上部の補強断面図）



図-5 模型版グリグリッド



図-6 ケース1 加振結果

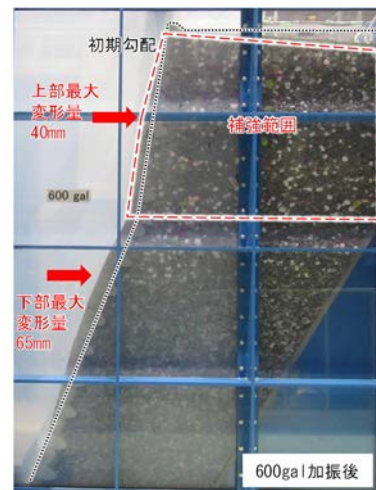


図-7 ケース2 加振結果