

関西大学環境都市工学部 学生会員 ○蔦野 温也¹
関西大学大学院 学生会員 井上 貴玄²
関西大学 正会員 西形 達明³

1.はじめに

城郭石垣とは石垣石、栗石層、背面地山層の3層で形成された複合構造物である。これらの石垣は普請から400年以上経過しても、現存する優れた構造物であるといえる。しかし近年、集中豪雨や地震により、石垣の崩壊や損傷が多発している。例えば、東日本大震災によって東北地方の仙台城や白河小峯城の石垣が大規模に崩壊したという事例も報告されている。このような石垣では補修復旧が必要となるが、そのためには修復手法について検討する必要がある。しかし、石垣の安定性を高めるために考察すべき点は数多く残されている。その中でも栗石層については、石垣内部の排水効果という役割だけでなく、石垣自体の安定性にも影響を与えているものと考えられる。そこで、本報告では栗石層が石垣の変形と安定性に与える影響について検討を行った。

2.実験手法

本研究では、(1) 栗石層厚の影響と、(2) 栗石層の相対密度の影響の2点について遠心载荷実験より検討を行った。

(1)に関する実験で使用した石垣モデルを図-1に示す。石垣モデルの形状は、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)により決定し、石積み技法としては切り込みはぎ(成形加工した積み石)を模擬した。また、図に示すように、非接触変位計による石垣石表面の変位と石垣石および栗石層の応答加速度、根石(石垣最下段の石)下の反力を測定した。モデルに使用した材料の物性値は表-1に示すとおりである。栗石層厚が石垣変形に与える影響について考察するために、栗石層厚は石垣石控え長さの2.0倍(80mm)、1.5倍(60mm)、1.0倍(40mm)の3ケースとした。加振は遠心加速度を30G载荷した状態で周波数1.0Hzの地震加速度を100gal、150gal、200galと順次繰り返して行った。次に(2)に関する実験では、栗石の密度が石垣変形に及ぼす影響を考察するため、栗石相対密度を80%、50%、20%の3ケースで行った。加振条件としては遠心加速度を20G载荷した状態で周波数1.5Hzの地震加速度を300gal、350gal、400galと順に载荷し、以後、崩壊するまで400galを繰り返し载荷した。その他、モデル寸法や計測は(1)の条件と同様である。

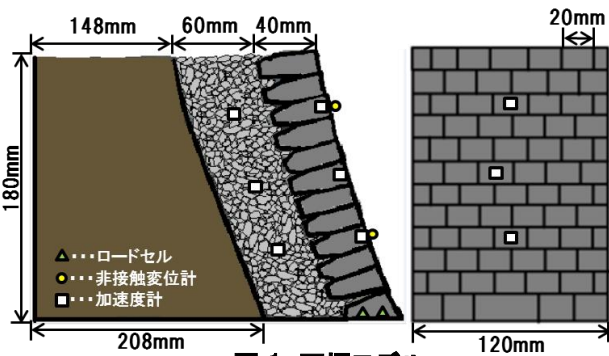


図-1 石垣モデル

表-1 モデル物性値

名称	材料	寸法(mm)	粒径(mm)	密度(g/cm ³)
石材	アルミニウム	20×15×40	—	2.7
栗石・介石	6号砕石	—	5~13	1.331~1.603
背面地山	豊浦標準砂、 藤森粘土	—	—	2.1

3.実験結果

はじめに、(1)栗石層厚の影響について考察する。図-2は3種の栗石層厚について各入力加速度における石垣石水平変

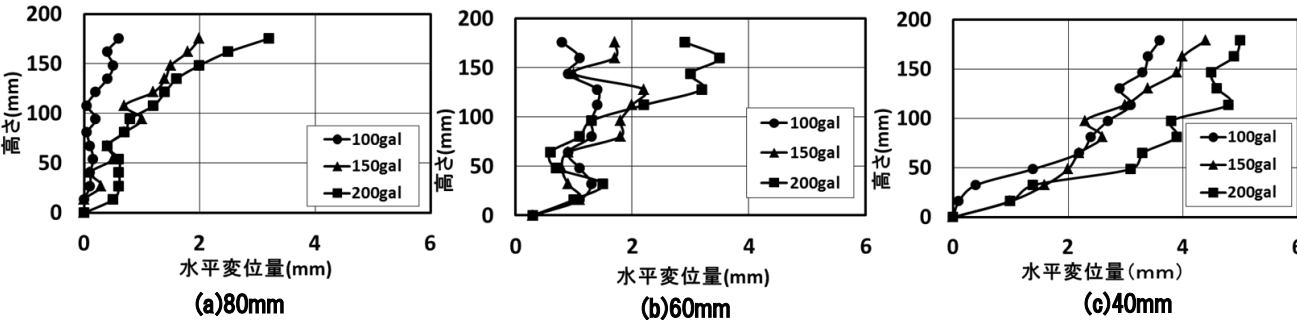


図-2 栗石層厚の変化による石垣石水平変位量

位置を示したものである。図より栗石層厚が大きい程、水平変位量が小さくなっており、栗石層厚が石垣石の変位量に影響を与えていることがわかる。石垣石の変形モードについては、栗石層厚が小さい場合には石垣崩壊の原因となりやすい孕み出しモードになっており、栗石層厚が大きくなると前倒れモードになっていることがわかる。以上より、栗石層厚が石垣の地震時の変形モードに影響を与えることがわかる。

次に図-3 に根石下部の荷重計の測定結果から得られた地盤反力の合力の作用位置を示す。作用位置は石垣前面から合力の作用位置までの距離を石垣石の控え長さで除した値で示しており、図中の破線は、安定性の限界を示す条件(Middle third)を表している。

栗石層厚を小さくする(40mm)と、150gal 付近から地盤反力の作用位置が石垣石控え長さの 1/3 より前方にあり、不安定な状態に至っていることがわかる。これは図-2(c)に示した石垣石水平変位量が 200gal 時に孕み出しモードとなったことが原因であると考えられる¹⁾。今回の結果では、栗石層厚が 80mm の場合に變形が最も抑制されていることから、栗石層厚は少なくとも石垣石の控え長さの 2 倍にすることが望ましい。

次に(2)の栗石層の相対密度の影響について述べる。図-4 に背面地山水平変位量を、図-5 に石垣石水平変位量を示す。背面地山水平変位量は各ケースとも同様の値を示したため、今回は $Dr=20\%$ のときの結果を示している。石垣石水平変位量については、 $Dr=80\%$ の場合に 400gal を 3 回加振した時点で石垣石の天端から 1/3 までの部分で滑りが発生し崩壊に至った。一方、

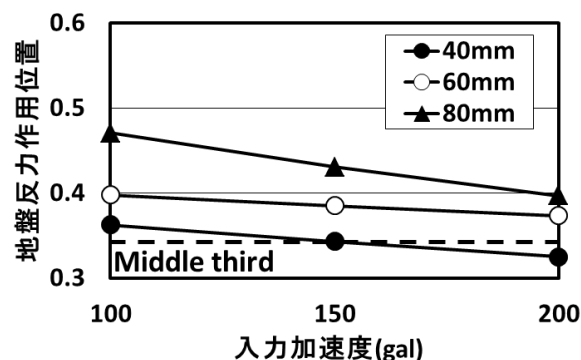


図-3 根石に作用する地盤反力作用位置

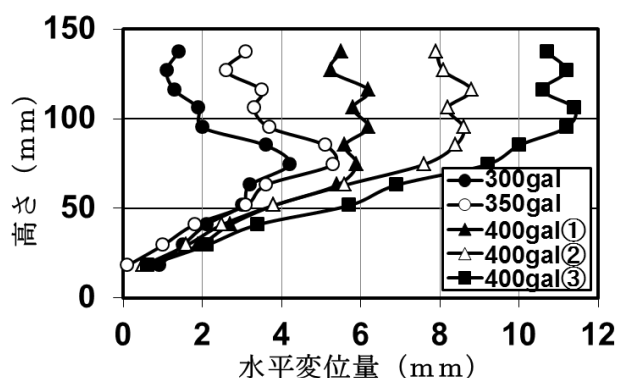


図-4 背面地山水平変位量

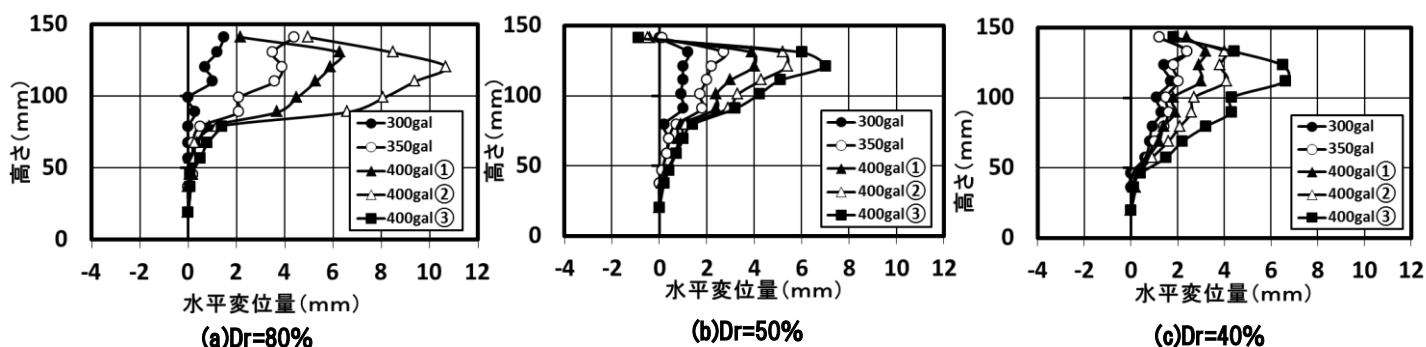


図-5 栗石相対密度による石垣石水平変位量への影響

$Dr=50\%$ 、 20% では $Dr=80\%$ よりも変位量が小さくなっている。また、石垣石水平変位量と地山水平変位量を比較すると、 $Dr=80\%$ の場合は石垣石と地山の変位量が同様の値を示しており、 $Dr=50\%$ 、 20% の場合は石垣石の変位は地山に比べて小さくなっている。このように、栗石層が密な場合は空隙が少ないため、個々の栗石が自由に運動できず、地山の変形や土圧の影響を直接石垣石に伝達したものであると思われる。一方、栗石層が疎な場合は空隙が多く、栗石が自由に運動した結果、緩衝材の役割を果たしたものであると考えられる。このような結果から、栗石層の施工については、締固め度を大きくし過ぎると、石垣に過大な変形を引き起こす可能性があるものと考えられる。

4.まとめ

本実験の結果より栗石層は地震時の石垣の変形に大きく関与していると考えられる。すなわち、栗石層厚には十分な厚さを確保する必要がある、栗石層の密度については、過度な締固めは避けるべきであるといえる。

参考文献

- 1) 山本浩之, 西形達明, 西田一彦, 八尾眞一郎, 笠博義: 実物大モデルを用いた城郭石垣の地震時挙動の検討, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.1, pp.43-57, 2010.