

城郭石垣の工学的研究 —その3石垣の変状と数値解析—

Engineering research of castle masonry
No.3 Deformation and numerical analysis of masonry



笠 博義 Hiroyoshi KASA *1

研究の目的

本研究は、我が国の城郭石垣を対象とした工学的な研究シリーズの第三編であり、石垣の変状と安定性の評価方法について紹介するものである。石垣の変状については、多くの城郭石垣で見られる「孕み出し」や、目地の開口やずれ、間詰石の抜け落ちなどについて、実例をもとに整理した。一方、安定性の評価手法としては、これまで広く行われてきた目視による判断に加えて、実測値を統計的に処理した方法、土質力学や力の釣り合いに基づく手法を整理した。さらに、最近現場での適用が進みつつある数値解析手法については、これまでの研究事例の概要を整理したうえで、実施例をもとに代表的な方法について紹介するものとする。

研究の概要

日本の城郭石垣においては、写真-1に事例を示したように、孕み出しが広く観察される。この変状は、石垣の表面の一部が前方に突出するもので、石垣の不安定化を示す兆候として捉えられている。本報告では、現場において比較的容易に石垣の安定性を評価する手法として、石垣の高さに対する孕み出し量の比によって示される「孕み出し指数」による方法について紹介した。

一方、数値解析による石垣の変状解析について概要を整理したうえで、広く土木構造物の解析で用いられる有限要素法（FEM）による弾塑性解析と、不連続体である石垣をそのままモデル化する個別要素法（DEM）についての検討事例をもとにその特徴や課題について示した。FEMについての検討事例では、実際の石垣に対する静的条件ならびに動的条件下での解析結果から、栗石層内に発生するすべり面を塑性ひずみの分布から精度良く再現した事例を示した。図-1は、このうち静的解析により求めた塑性ひずみの分布について示したものである。一方、DEMについては、石垣の地震による変形状況を検討した。この解析では、図-2（左）に示したように、石垣の根石付近に孕み出しが生じる現象がかなり正確に再現されることが確認できた。また、この石垣では補強工法である「杵工」を施工し、背面地盤の改良なども合わせて実施しているが、これらの対策によって、図-2（右）に示したように、石垣下部の変形が大きく抑制される結果となり、杵工などの対策工が石垣の補強工法として有効であることを示すことができた。

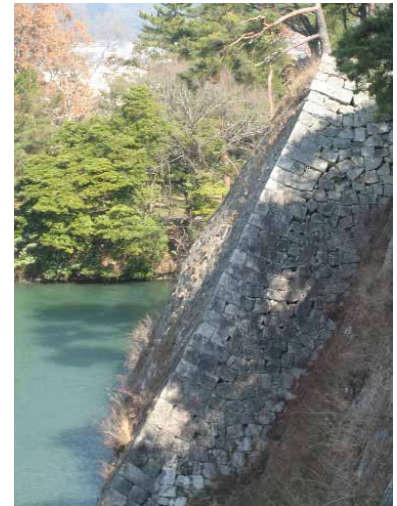


写真-1 石垣の孕み出し

結論

本研究では、石垣に見られる変状について整理し、孕み出し指数による方法や数値解析に基づく安定性の評価方法について整理した。石垣の維持管理や補修においては、文化財の専門家による歴史的・文化財的な価値に対する知見と、主として土木技術者が示す工学的な評価との双方から最適な方法を見出す必要がある。しかし、実際には両者の間で意思の疎通が十分に確保できず、双方の意図が正しく理解されないことも少なくない。この理由のひとつには、石垣に対する土木工学的な知見がまだまだ少なく、特に石垣の安定性に対する評価を明確に示すことができていないという実態があるものと考えられる。本研究が、こうした中で、両者をつなぐ一助となれば幸いである。

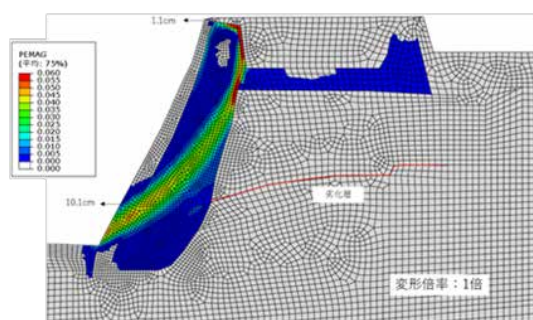


図-1 FEMによる静的解析結果（塑性ひずみ）

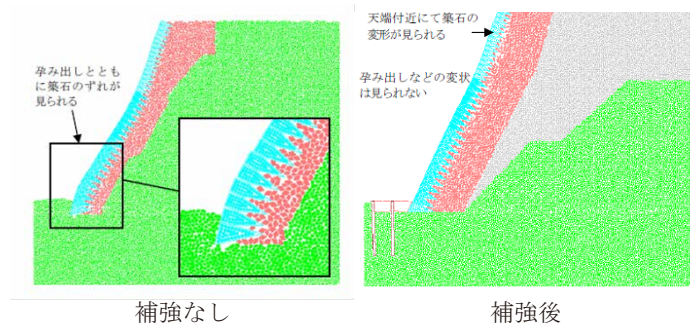


図-2 DEMによる動的解析結果