# 大型振動台実験に基づく城郭石垣の安定性評価手法の一提案

ハザマ　正会員○山本浩之，正会員　笠　博義
関西大学　正会員　西形達明
関西地盤環境研究センター　正会員　西田一彦

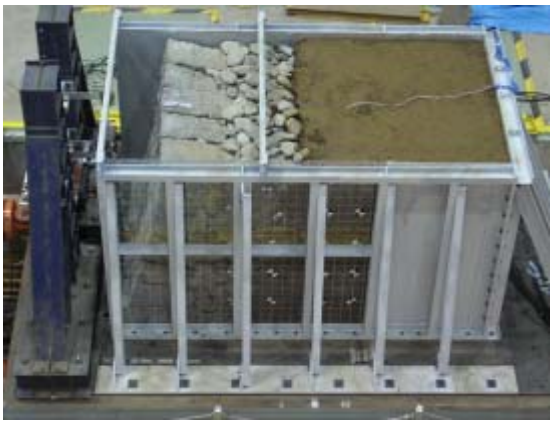
## １．目的

伝統構造物である城郭石垣は，モルタルやコンクリートなどを使用しない空積みであることから，現在の基準などにしたがった安定性の評価が困難であり，それ自体が文化財であるため現場での実験や損傷を伴う調査が困難である場合が多く，安定性評価は歴史分野の専門家を中心とした経験的な評価に頼らざるを得ない側面がある．

そこで，筆者らは動的状態での城郭石垣の安定性評価に対する基本的なデータを得ることを目的に，大型三軸振動台を使用し，実物大の石垣の動的変形挙動を再現した．さらに，実験結果に基づき，動的状態において不安定化する現象を明らかにするとともに，城郭石垣の定量的な安定性評価手法について考察したので報告する．

## ２．実物大大型振動実験の概要

今回構築した石垣は，幅 2m×高さ 2.1m×奥行き 3.65m の規模であり，小田原城（神奈川県）や高槻城（大阪府）をモデルとして設計した．石積み技法は城郭石垣で最も一般的である「打込みはぎ」で行い，平均勾配は 1:0.3 で反りを入れた形状とした．石材は蔵王産の安山岩，栗石は直径 50～400mm の亜円礫の砂利を使用し，背面地山は関東ロームとし 20cm ごとに撒き出しし締め固めを行った（**写真－１**）．

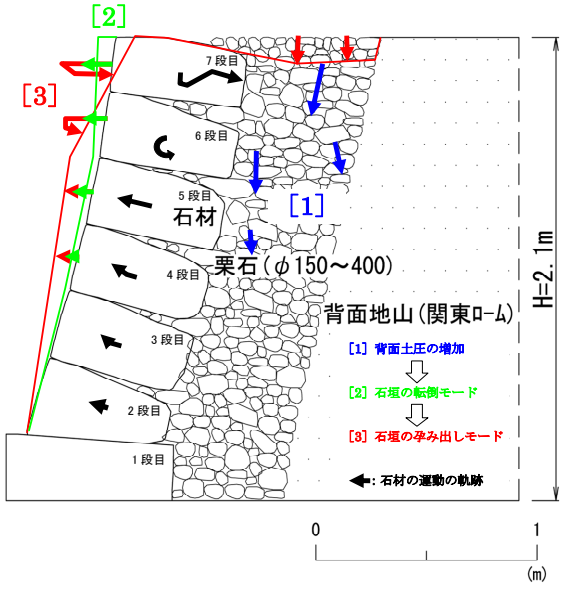


写真－１　実物大大型振動実験状況

入力した地震波は，3Hz の正弦波（20 波）とし，加速度振幅は，段階的に 50～100gal 増加させ，最大設定加速度 750gal まで 9 ケース実施した．振動方向は，石垣面に直交する水平一方向とした．なお，振動台に設置した加速度計での実測値では，223～825gal まで段階ごとに加速度が増加している．

## ３．実験より得られた城郭石垣の変形過程

本実験より得られた城郭石垣の変形過程の概念図を**図－１**に示す．石垣の地震時挙動は，入力加速度の増加に伴い［1］背面土圧の増加（0～474gal 間）→［2］石垣の転倒モード変形（474～688gal 間）→［3］石垣の孕み出しモード変形（688～825gal 間）の過程を経ることが確認された．さらに，擁壁構造物と比較した場合，今回の実験において 825gal 加振後の状態でも，石垣は連続体的挙動から不連続体としての挙動へ移行することにより転倒や崩壊には至らないことが確認された．最終的な累積残留変位の最大値は約 60mm であり，この実験により動的状態において高い力学的安定性を保持する優れた構造物であることが明らかになった．

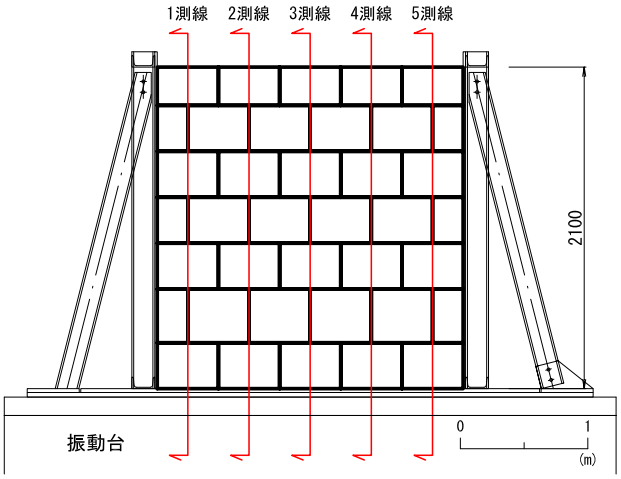



図－１　変形過程の概念図

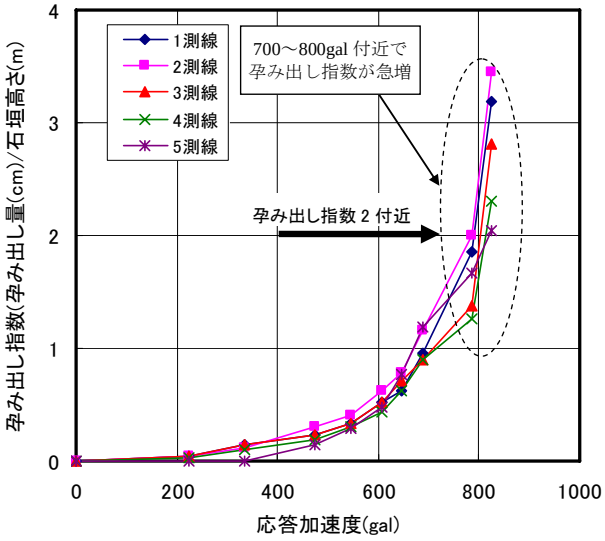
## ４．城郭石垣の安定性評価手法

本実験において，**図－２**に示す測線ごとの応答加速度に対する累積残留変位量が得られている．そこで，応答加速度と西田

キーワード　城郭石垣，動的挙動，孕み出し指数，安定性評価
連絡先　〒105-8479　東京都港区虎ノ門 2-2-5　TEL：03-3588-5770，FAX：03-3588-5755




図－２　実物大大型振動台実験正面図




図－３　応答加速度と孕み出し指数との関係

ら[1)]が提案している安定性評価指標の一つである孕み出し指数との関係を整理した．**図－３**に本実験における応答加速度と孕み出し指数との関係を示す．ここで，孕み出し指数とは，孕み出し量 δ（cm）を石垣孕み出し高さ H（m）で除した安定性評価指数であり，名古屋城など 5 つの城郭石垣の崩壊事例を含めた調査データに基づき，6 を超えると豪雨や地震などにより不安定化し崩壊する可能性が高いとされるものである．

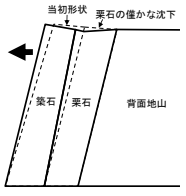
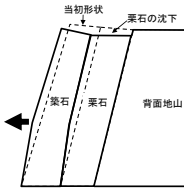
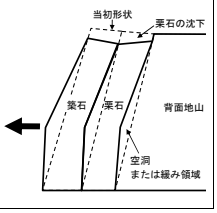
**図－３**より，700～800gal 付近で孕み出し指数が 2 付近より急増しており，石垣の不安定化が急速に進行している状況が見られる．このことは，変形状態からも 700gal 付近より「転倒モード」から「孕み出しモード」へ移行し，不安定化が進行していることが確認されている．ただし，孕み出し指数 2 程度の状態は，内部的には不安定化が進行しているものの見かけ上は大きな変位が生じていないため，城郭石垣の安定性評価において経験的な目視判断では見落とす可能性がある．そこで，このような孕み出し指数が急激に変化する点を DEM 解析などにより予測し，崩壊予知の安定性評価の一指標とすることが考えられる．実験結果に基づいた安定性評価基準例を**表－１**に示す．

具体的な運用方法としては，対象となる石垣断面形状を測量し現状の孕み出し指数を算出する．次に，DEM 解析などにより孕み出し指数が急激に変化する点を見出し，現状がどの管理レベルにあるかを判断し対策の必要性を判断するものとする．これにより，城郭石垣の崩壊への進行度合いを定量的に評価し早期対策を実施することにより，城郭石垣の崩壊を未然に防ぐことが可能になるものと考える．

## ５．まとめと今後の課題

実物大の城郭石垣の振動台実験を行い，実際の石垣の動的挙動を再現した．この実験により，応答加速度の増加に伴い孕み出し指数が急増する点が確認された．そこで，この変化点を DEM 解析などにより算出し城郭石垣の安定性評価の一指標とすることを提案した．今回実験した石垣は，高さ 2m 程度であることから，今後高石垣モデルによる指標値を検証する必要がある．

表－１　文化財城郭石垣の安定性評価の基準例

| 対応区分 ＼ 計測区分 | 管理基準値Ⅰ | 管理基準値Ⅱ | 管理基準値Ⅲ |
|---|---|---|---|
| 対応区分 | 健全 | やや不安定 | 不安定 |
| 計測区分 | 通常管理 | 観測強化<br>応急対策の検討・実施 | 対策検討<br>対策実施 |
| 計測区分 | 外観調査<br>石垣清掃（除草） | 石垣外観・内部調査<br>間詰石、介石補充工<br>石垣清掃（伐根・土砂の除去） | 解体・積み直し工 |
| 変位モード | 「転倒モード」 | 「孕み出しモード」 | |
| 孕み出し指数 | 0～2 | 2～6 | ６以上 |
| 概念図 |  |  |  |



**参考文献**　1)西田一彦：「石垣修理と土木工学」－石垣の現状把握と安全な修理工事のために－，文化庁山梨県教育委員会第 7 回全国城跡等石垣整備調査研究会資料集，pp.1-12，2010