

## 遠心模型実験による石垣の地震時安定性に関する検討

清水建設(株) 正会員 ○吉田 順, 山内 裕之  
宮内庁 巽 耕一, 根岸 明廣

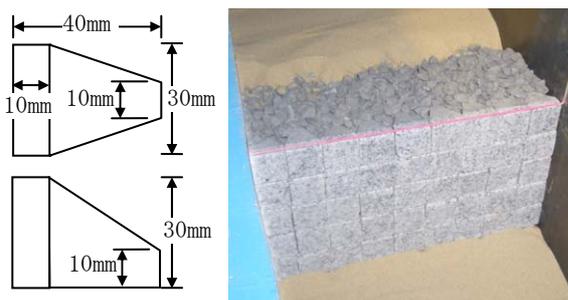
### 1. はじめに

皇居・山里門では大規模修復工事が実施され、安定計算や数値解析による検討から石垣安定性が確保されることを示した<sup>1)</sup>。しかし、これらの結果は実証されていないことから、地震時の動的挙動をある程度反映したものであることを確認するために、安定計算の断面を想定した遠心模型実験を行った。実験条件は、以前に実施した皇居・中之門を対象とした実験<sup>2)</sup>に準拠したものであり、最大入力加速度をパラメータとした正弦波加振を実施し、石垣の耐震性について検討したものである。また、本報告では遠心実験モデルを模擬した DEM 解析についても述べることにする。

### 2. 遠心模型実験

#### 2.1 実験条件

石垣模型の材料は花崗岩であり、図-1 に示す楔型の石を標準として用いた。なお、この形状は山里門の石垣で用いられている石を想定したものである。石垣前面の配置は格子状と千鳥状の2種類とし、力石と呼ばれる胴(奥行き)の長い石の効果を確認するため、長さ60mmの石を中段(5段積み：



(a) 築石寸法 (b) 模型前景  
図-1 遠心実験模型

実スケールで5.0mの石垣高さに相当)に配置して、力石のない場合との比較を行った。石垣背面の栗石は10mm篩を通過した粗骨材を用い、背面および底部地盤は豊浦砂で作成した。実験ケースと石垣の配置を表-1に示す。

荷重条件は、遠心加速度を33Gと想定し、1G場換算での石垣高さを5.0mとした。動的入力波形は正弦波、振動数60Hz、载荷時間0.5秒として、振幅を6.0Gから徐々に増加させ、石垣が倒壊に至るまで加振した。

#### 2.2 実験結果

各ケースにおける倒壊までの荷重条件を表-2に示す。ここで、Case1とCase2にあまり差が認められないが、载荷回数が異なり、Case1では予備加振後11.1G、11.2Gの2回の加振で倒壊したのに対し、Case2では11.2Gから11.9Gの9回の加振を要している。また、Case4ではかなりの変形は生じたが倒壊に至っていない。図-2に各ケースの倒壊状況を示す。ケース毎に倒壊パターンは異なるが、倒壊に至るまでの変形状況に見られる共通点は以下のとおりである。

- 背面に隙間のできる築石形状のため、変形は上下・左右とも中央部がせり出すような形となる。
- 最上段の築石は直下の石の傾斜に沿って背面へ後退する。

また、今回の実験における課題として側壁部の摩擦の影響があり、初期にはある程度の余裕があるが、中央部の築石がせり出して築石間に隙間ができた場合に栗石が進入することにより、両側壁に築石を押し付けるような効果が見られ、アーチ状の構造が形成されることがある。

キーワード：石垣, 地震, 安定性, 遠心模型実験, 皇居, 力石

〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17, tel:03-3820-8309, fax:03-3820-5959

表-1 実験ケース

Case	配置	寸法(単位:mm)	備考
1	格子	30×30×40 (5段)	
2	格子	30×30×40 (4段) 30×30×60 (1段)	力石中段
3	千鳥	30×30×40 (4段) 30×30×60 (1段)	力石中段
4	格子	30×30×60 (5段)	未倒壊

表-2 倒壊時の荷重条件 (単位:G=9.8m/s<sup>2</sup>)

Case	遠心加速度	加振加速度	換算加速度
1	37.1	11.2	0.302
2	38.1	11.9	0.312
3	38.7	12.8	0.331
4	37.4	15.9	0.425

### 3. 考察

#### 3.1 築石の形状・寸法と耐震性

今回の実験では築石の奥行き寸法 40mm の Case1 と 60mm の Case4 を換算加速度で比較すると 1.4 倍程度となり、寸法比より差が小さくなっているが、前回の実験で築石を直方体 30mm とした場合には、遠心加速度 31.4G、加振最大加速度 6.63G、換算加速度 0.211G であり、相対的に小さい入力で倒壊に至ったことがわかる。築石の胴が長い方が、安定性が高いことは明らかであるが、築石の形状に起因する背面摩擦の影響も大きく、背面が滑らかな前回の実験に比べて凹凸の大きい今回の実験で入力加速度が大きくなったことは背面摩擦により安定性が高くなっていることを表している。

また、今回の実験では、格子状 (Case2) と千鳥状 (Case3) の配置によるほぼ同条件の実験を実施した。表-2 の結果では最大入力加速度に差が生じたが、Case2 では 11G 以上の加振を 9 回実施しているのに対し、Case3 では最大値は大きいものの 11G 以上の加振としては 3 回目で倒壊していることから、有意な差があるとまで断言できない。

#### 3.2 力石の効果

Case2 および Case3 で中段に配置した力石により、Case1 と比較するとある程度の耐震性改善は認められるものの効果は比較的小さいものとなった。模型を対象とした安定計算では Case1 で静的震度 0.245 に対し、Case2, 3 では 0.274 と算定されており、その差は 1 割程度である。したがって、今回の遠心実験の結果と安定計算は整合しており、今回設定した程度の寸法の違いでは力石の効果は限定的なものと考えられる。また、実験から得られた震度 (換算加速度) は安定計算のものよりも大きく、静的な安定計算での評価が安全側であることを示しており、山里門石垣の安定性が高いことが確認された。

### 4. まとめ

石垣の安定性について、動的遠心模型実験を用いて検討し、築石の形状や配置により倒壊状況が異なることが確認されたが、想定される耐震強度は築石 (平均的な) の寸法にある程度依存することや不整形の影響を受けることが確認された。また、今回の実験で得られた倒壊加速度は実地震換算ではかなり大きめのものであり、検討対象とした山里門の石垣の耐震安定性が高いことが示された。

**参考文献** 1) 山内裕之他:「石垣修復支援システム」を用いた石垣の大規模修復工事—その 1, 第 64 回土木学会年次学術講演会, 投稿中 2) 吉田順他: 皇居・中之門石垣の地震時安定性に関する検討—その 2 解析的・実験的検証, 第 62 回土木学会年次学術講演会, 2007

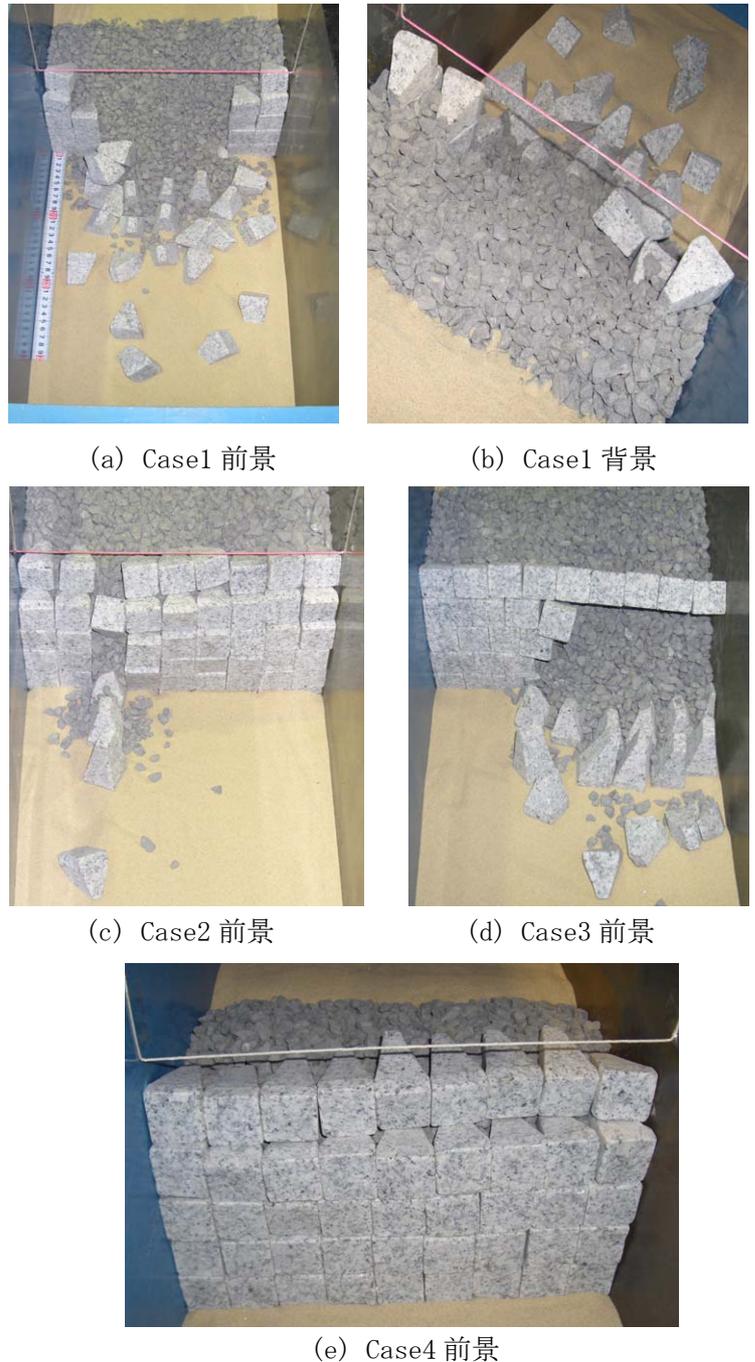


図-2 加振後の最終状態