

皇居・中之門石垣の地震時安定性に関する検討—その 1 修復前後の安定性評価

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

1. はじめに

皇居東御苑内本丸中之門の石垣は江戸城築城以降の年月の間に、地震等の影響によって石垣のはらみ、目地の開き、石材の破損等が発生し、安全性確保を目的とした修復工事を実施することとなった。その修復計画に当り、修復前後の状況を把握し、地震時安定性を確認することが必要となった。中之門石垣は、図-1 に示すように門の櫓のあった枡の部分とその側方の単純な石垣の部分で構成されており、地震時安定性の観点から課題となるのは単純な石垣面に直角な方向であると考えられる。本報告では、そのうち過去の地震で最も大きい影響を受けたと考えられる最もはらみ出しの大きい断面を選定し、修復前後の安定性を検討した結果について述べる。なお、別途動的な安定性を解析的・実験的に検討した結果については、「その 2」で報告している。

2. 石垣の修復計画の概要

中之門石垣は、特別史跡江戸城に指定されており、皇居内でも最大級の巨石により構成された石垣である。この修復計画は、石垣普請当時の形状・構造を推定し、かつ、安定性を向上させることが要求された。これに対し、「3D モデル配置システム」を開発し計画を行った¹⁾。このシステムは、石垣を構成する個々の築石を 3D モデル化し、コンピュータグラフィックス上で築石の配置シミュレーションを行うことが出来る(図-1 参照)。また、石垣の奥行き方向の形状確認も立体的に出来るため、構造上の弱点の分析、対策工の計画も効果的に行うことが出来る。石垣の微妙な線形、勾配、構造等を視覚で確認できるため、修復計画への石工の参画と、その伝統的技能を反映させることが可能となった。

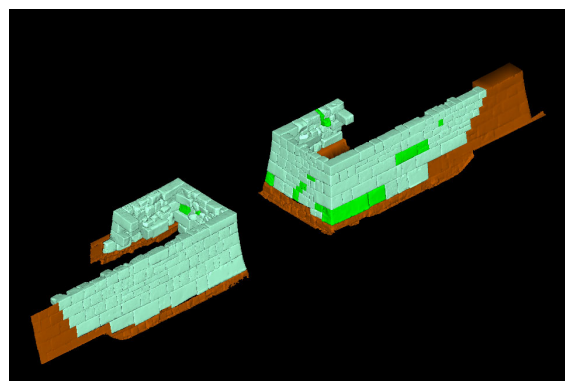


図-1 中之門石垣 3Dモデル(修復後)

3. 安定計算の方法および条件

石垣の安定計算は、「道路土工—擁壁工指針」²⁾に準拠して実施した。用いた手法は試行くさび法であり、石垣をもたれ擁壁と仮定し、背面の栗石の安定性を評価する。修復前の状態は、図-2 に示すようなものであり、根石は固定されていると仮定し、その上面をすべり開始点とした安定計算である。通常は、栗石背面の版築層も考慮した安定性評価となるが、本検討ではすべり面が版築層にかからないために栗石層のみを対象としている。

各種の材料試験結果などから、材料物性としては表-1 のようなものを仮定している。荷重条件は、石垣および栗石層の自重のみであり、上載荷重は考慮していない。また、地震荷重は指針に準拠して、静的震度 $i=0.18$ と仮定する。修復後の

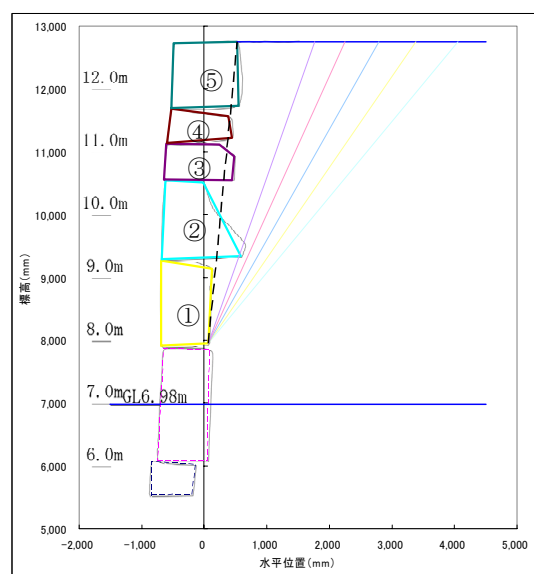


図-2 修復前の安定計算モデル

キーワード：江戸城、石垣、修復、安定性、すべり面、地震

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

安定計算では、石垣前面の勾配を 1 : 0.1 と仮定し、積み直した形のモデルを用い、図-3 に示すように石を平行移動して、前面の勾配に合わせており、重心位置移動分だけ安定性が向上する。

4. 修復前の安定計算結果

$\omega = 50 \sim 70^\circ$ を 5° 刻みで算定した結果を表-1 に示す。 $\omega = 65^\circ$ の場合が最も滑動、転倒の荷重が大きくなっており、安定性評価の対象となる。滑動に対しては安全余裕があるものの、地震時（震度 $i=0.18$ ）では転倒モーメントが抵抗モーメントを大きく上回っており（1 : 0.50）、修復前の断面は中規模地震でも安定性が保証されないことが示され、擁壁工指針に従えば修復が必要なものと判断される。また、このモデルで 65° の転倒モーメントと同等の地震時抵抗モーメントが得られる震度は $i=0.10$ であり、現状でもある程度の地震までは耐えられることがわかる。

5. 修復後の安定計算結果

修復前後では、限界値を与えるすべり面傾斜角が異なる結果となっており、修復前の計算では 65° が最大荷重を与えたのに対し、修復後では 60° で最大荷重となる。

修復前後（表-3、表-4）を比較すると修復により、荷重の低減および抵抗力の増加が見られており、石垣前面の傾斜を 1:0.1 とすることにより、かなり効果があることがわかる。

修復前と同様に、滑動に対しては安全余裕が大きいが、地震時の転倒モーメントについては、抵抗モーメントがやや上回る結果となっており（1 : 1.04）、中規模地震に対しては安定性が確保されることが示されている。すなわち、修復前には、震度 $i=0.18$ に対して半分程度の抵抗モーメントしかなかったものが、勾配を復帰させることにより同じ震度に対して安定となっていることから、修復の顕著な効果が認められる。

6. まとめ

皇居・中之門石垣の試行くさび法による安定性検討を実施し、修復工事により中規模地震に対する安定性が確保できることを示した。動的挙動についての検証はその 2 において報告する。

参考文献 1) 西村正三他：皇居東御苑内本

丸中之門石垣－3Dモデル配置システム，第62回土木学会年次学術講演会，投稿中 2) 日本道路協会：道路土工－擁壁工指針，1999，202p.

表-1 材料定数

物 性	単位	数値
密度（石材）	kg/m ³	2700
密度（栗石）	kg/m ³	1900
内部摩擦角（栗石）	°	45
石垣背面の摩擦角	°	30

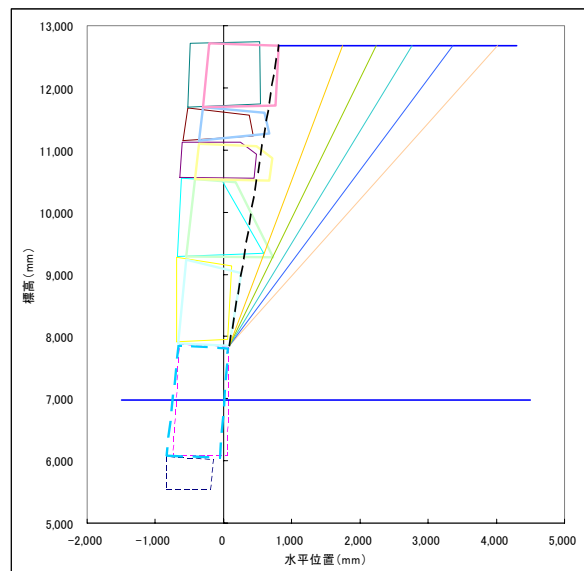


図-3 修復後の安定計算モデル

表-3 試行くさび法による安定計算（修復前）

すべり 傾斜角	くさび 重量	作用 荷重	滑動力	地震時 抵抗力	転倒 モーメント	地震時 抵抗 モーメント
°	kN	kN	kN	kN	kNm	kNm
50	161.0	14.9	13.5	97.8	21.8	15.6
55	130.7	23.4	21.4	101.4	34.4	18.8
60	104.0	27.3	24.9	103.1	40.1	20.2
65	79.8	27.4	24.9	103.1	40.2	20.2
70	57.5	24.3	22.1	101.8	35.7	19.1

表-4 試行くさび法による安定計算（修復後）

すべり 傾斜角	くさび 重量	作用 荷重	滑動力	地震時 抵抗力	転倒 モーメント	地震時 抵抗 モーメント
°	kN	kN	kN	kN	kNm	kNm
50	147.0	13.4	12.5	96.3	19.9	33.0
55	117.3	20.8	19.4	99.0	31.0	35.6
60	91.0	23.7	22.1	100.0	35.3	36.7
65	67.3	23.0	21.5	99.8	34.3	36.4
70	45.4	19.2	17.9	98.4	28.6	35.1