

地震時における城郭石垣の変形挙動に関する検討

—修復前と修復後の相違について—

宮内庁 (正)浅羽 英男 (正)根岸 明廣

大林組 ○(正)稲川 雄宣 (正)山本 彰

(正)疋田喜彦 (正)塙 守幸 田中 修平

1. はじめに

皇居の石垣のうち、梅林坂・汐見坂間では孕み出し等の変状をきたしていることから、現在解体修復工事を実施している。前報¹⁾²⁾では当石垣の修復工事に先立って実施した、裏込めぐり石の現場転圧試験による適性配合の選定方法、大型三軸圧縮試験による大粒径裏込めぐり石の力学特性の評価方法とその試験事例について報告した。本報告では当石垣の安定性評価の一環として行なった地震応答解析の結果について述べる。

2. 解析方法

解析は FEM による非線形解析であり、石垣修復前と修復後の石垣について行なった。解析に用いた FEM メッシュを図-1、図-2 に示す。解析では地盤と裏込めぐり石を非線形材料（Hardin-Drnevich モデル）、石（積み石）を線形弾性体とし、石と石の間および石と裏込めぐり石の間にはジョイント要素を設置している。解析定数は基本的に地質調査および土質試験結果を基に設定し、調査等で得られていない定数は既往の資料に基づき設定した。表-1 に解析定数一覧を示す。

入力地震波は兵庫県南部地震の観測波であり、当該地域の工学的基盤（東京礫層）に観測波を入射して解析モデルの基盤面での地震波を一次元の地盤応答解析（SHAKE）にて求め、解析時の入射波とした。図-3 は入射波を示しており、最大加速度は 800gal である。

3. 解析結果

図-4、5 に石垣修復前と修復後における、石垣天端の加速度と水平方向変位、および裏込め部天端の鉛直変位の応答波形を示す。これらの図から、石垣修復前の応答加速度は最大 1000gal 程度となっているのに対し、修復後は 800gal 弱となっており、修復によって応答加速度が低下する結果となっている。

応答変位の最大値は、修復前後とも 180 mm 程度となっているが、残留変位については修復後が 50 mm と修復前に比べて大きな値となっている。一方、裏込め部天端の鉛直変位の最大値は修復前が 40mm 程度であるのに対して修復後は 25mm 程度となっている。また、修復前の残留沈下は 35mm 程度であるのに対して、修復後はほとんど残留沈下

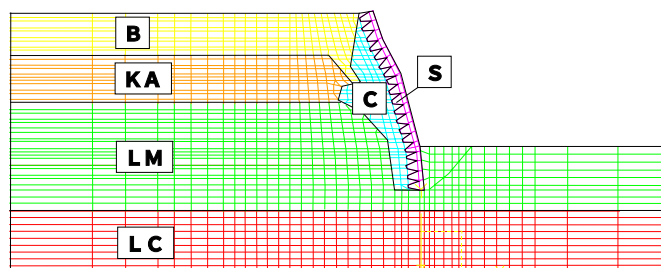


図-1 石垣修復前解析モデル

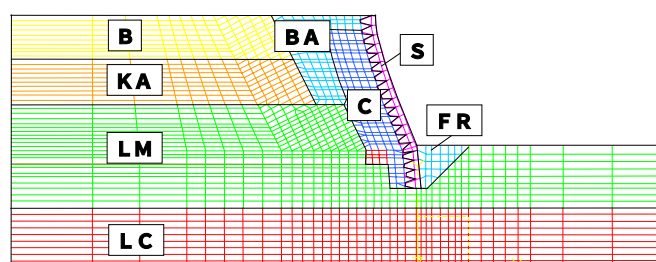


図-2 石垣修復後解析モデル

表-1 主な解析定数

	N 値	γ t t/m ³	ϕ	C t/m ²	Vs m/s	G_0 t/m ²	ν
B (ローム盛土)	5	1.43	20	2.28	171	4267	0.45
KA (焼土、瓦土)	9	1.53	26	0	166	4302	0.40
Lm (ローム盛土)	6	1.43	0	2.59	182	4833	0.45
Lc (凝灰粘土)	5.2	1.43	15	2.59	173	4367	0.45
BA (ローム安定処理土)		1.43	20	8.26		15464	0.45
FR (安定処理土 1)		1.94	20	8.26		15464	0.45
KISO (裏込め栗石)		1.84	44	0		16604	0.30
C (修復前裏込め栗石)		1.84	44	0		16604	0.30
C (修復後裏込め栗石)		1.84	44	0		16604	0.30
S (石)		2.45	44	40		50000	0.20

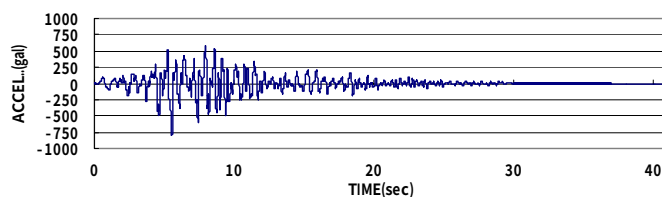


図-3 入力加速度

キーワード：石垣補修、FEM 解析、地震応答解析、非線形モデル

連絡 先：東京都清瀬市下清戸 4-640 TEL.0424-95-0910 FAX.0424-95-0903

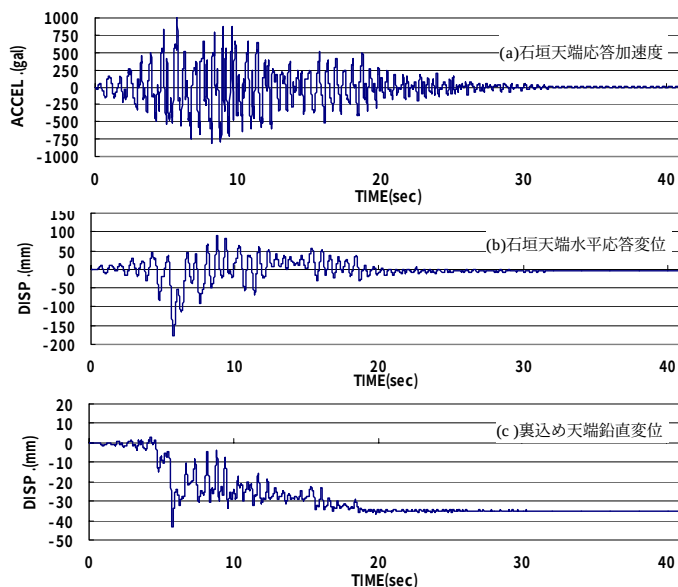


図-4 地震応答解析結果（修復前）

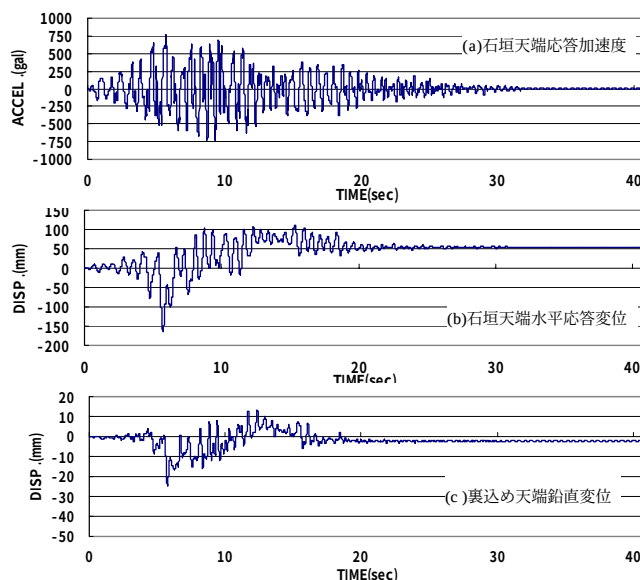


図-5 地震応答解析結果（修復後）

が見られない。太田ら³⁾は石積み壁の振動台実験を実施し、石積み壁では地震による慣性力によって石積み壁が前面に変形し、その際に裏込めぐり石が石積み背面に沈み込むこと、および地震時にこのような石積み壁の変形と裏込めぐり石の沈み込みの運動を繰り返すことによって石積み壁の変形が徐々に進行するという結果を得ている。地震応答解析によって、修復前の石垣は地震時に裏込め部天端に大きな残留沈下を生じる結果となっており、地震時に石垣が変形して不安定化しやすい状態にあると考えられる。

図-6に残留時における石垣の変形および石垣部分のせん断応力分布を示す。この図から、修復前の変形は中腹部分が最も大きく、天端では逆に背面に倒れ込むような変形モードとなっており、既に変状している中腹部分の変形は地震によってさらに進行し不安定化すると考えられる。一方、修復後については石垣全体が一様に前面に滑動するような変形モードを示しており、局部的に変形が進行し、不安定化するといった傾向は見られない。なお、修復後の石垣全体の前面側への変形は背面地盤を含めた地盤全体の変形によるものである。また、せん断応力の分布から、補修前の石垣では法尻付近の石において最も大きなせん断応力が作用しており、根石までせん断応力が十分に伝達されていない。一方、修復後は最下段の根石部分に大きなせん断応力が作用しており、修復後の石垣では地震時に石垣に作用するせん断応力が根石部分に十分に伝達されることが分かる。

これらのことから、伝統的な寺勾配による石垣の修復（再構築）、および根石周辺の地盤強度の確保は地震時における石垣の安定性を確保する上で極めて重要と考えられる。

4. まとめ

石垣の安定性評価の一環として地震応答解析を行なった。その結果、変状した修復前の石垣における地震時の不安定化メカニズムを明らかにするとともに、修復後における石垣の安定性を地震応答解析によって明らかにすることができた。

参考文献 1)浅羽英男、根岸明廣、疋田喜彦、古屋弘、塙守幸、田中修平：城郭石垣修復時の裏込め材料試験（その1）、第39回地盤工学研究発表会、2004、2)浅羽英男、根岸明廣、山田祐樹、山本彰、鳥井原誠、塙守幸、田中修平、疋田喜彦：城郭石垣修復時の裏込め材料試験（その2）、第39回地盤工学研究発表会、2004、3)太田直之、杉山友康、斎藤善樹、山本彰、鳥井原誠、岡田勝也：石積み壁の振動台実験（その1）、土木学会第57回年次学術講演会、2002。

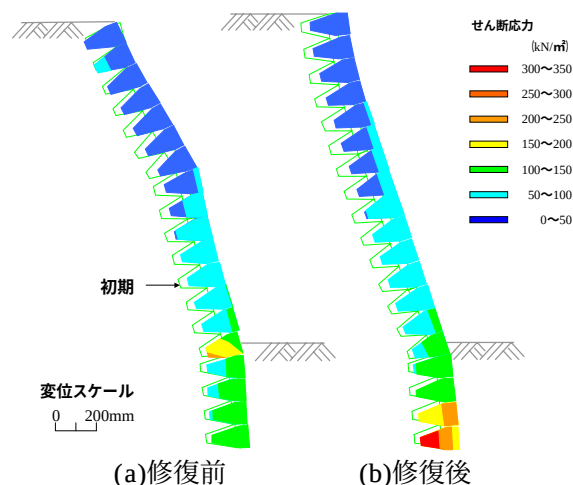


図-6 石垣部加振後せん断応力分布図