

個別要素法 (DEM) による城郭石垣の変状に影響を及ぼす地盤条件に関する考察*¹

Consideration on Ground Condition that Influences on Deformation of Castle Masonry Wall by DEM

森本浩行*², 西形達明*³, 西田一彦*⁴, 玉野富雄*⁵

By Hiroyuki MORIMOTO, Tatuaki NISHIGATA and Kazuhiko NISHIDA, Tomio TAMANO

概要：日本に現存する城郭石垣の多くは構築から 400 年前後経過しており、石垣の変状により崩壊の危機にさらされている箇所が数多く存在している。貴重な文化遺産である城郭石垣の保存のために、変状に影響する要因を解明する必要がある。城郭石垣の変状には地盤状態が大きく影響していると考えられる。そこで、石垣の変状に影響を及ぼす要因を把握するために、個々の石垣石の変形状態を捉えることのできる個別要素法 (Distinct Element Method: DEM) を用いて検討を行った。この結果、石垣の変状は石垣石の加工の程度や地盤の強度に影響されることが判明した。

1. はじめに

我が国に現存する石垣の構築技術の変遷や安定性の力学的機構を明らかにすることは、土木史的に意義が大きいだけでなく、これらの修築保存法の確立、および温故知新として現代における構造物の設計思想にも寄与することになる。筆者らはこのような考えのもと、これまでに、石垣構築技術の発展過程を詳しく調べるため、城郭石垣の加工状況や積み方を数値で表現し、定量的に明らかにした上で、石垣形状の変遷について判断する方法である数値評価法¹⁾の提案を行い、また現在までに発見されている古文書・古記録のうち、石垣構築技術に関する記述がある「後藤家文書」、「石垣秘伝之書」および「石塙書」の三つの構築手法について明らかにするとともに、反り曲線勾配部分について数式化することを試みてきた²⁾。そして石垣形状や地盤強度などの実測データを基礎資料とし、石垣を構築する上で影響を及ぼすと考えられる要素の歴史的変遷や安定性に影響を及ぼす各種要因についても検討を行ってきた^{3), 4)}。また石垣の変状に影響を及ぼすのは石垣石の加工の程度、石垣の形状、石垣背面土および基礎地盤の強度などの地盤条件の三つが挙げられる。文化財として価値の高い城郭石垣の遺構に、図-1 に示しているような孕み出しが見られる箇所が少なくない⁵⁾。このような孕み出しなどによる崩落を未然に防ぎ、修復・保存するためには、安定性に影響する要因の把握および石垣変状と地盤条件との関連性

を把握する必要がある⁶⁾。本研究では個々の剛体変位を把握することのできる 2 次元個別要素法解析を用いて、図-1 に示しているような城郭石垣の変状に影響を及ぼす地盤条件と石垣石の加工の程度について検討を行った。

2. 個別要素法解析による石垣解析モデルの作成

(1) 石垣モデルの形状

石垣モデルの作製は図-2²⁾に示す「後藤家文書」の標準設計例と写真-1 に示す大坂城天守閣石垣の A 断面部分を参考に決定した。

「後藤家文書」によると、図-2 に示すように高さ $h/3$ までは初期勾配 G の傾きで構築し、それより上部である石垣の反り勾配部分は、ある一定高さに対して、その前の勾配よりある一定量、すなわち a_0 だけ前面に張り出すことで、反りを設けていることが分かる。また「後藤家文書」における設計例より導き出された初期勾配 G と高さ h の関係、上底 a および下底 b と高さ h の関係は次式であらわされている²⁾。

$$G = 0.025h \quad (1)$$

$$b = 0.025h^2 \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{4}b \quad (3)$$

ここで、写真-1 に示した A 断面部分の大坂城石垣の高さは 15m であつたので、 $h_1=5m$, $h_2=10m$ とし、反り曲線勾配部分(h_2)を 10 分割($=n$)すると考え、あわせて式(1), (2), (3)より石垣形状の決定に用いた諸数値は表-1 のようになる。また、石垣石の個数は 17 個、それぞれの大きさは表-2 のように決定し、その形状を図-3 に示している。

(2) 石垣解析モデルの作製

地盤の挙動と石垣の変形の過程の状況を捉えるなど、

*1 keywords : 石垣, 変状, DEM

*2 正会員 博(工) 京都市立伏見工業高等学校建設工学科 (〒612-0011 京都市伏見区深草鈴塚町 13)

*3 正会員 工博 関西大学工学部都市環境工学科

*4 正会員 工博 関西大学工学部都市環境工学科

*5 正会員 工博 大阪産業大学工学部都市創造工学科

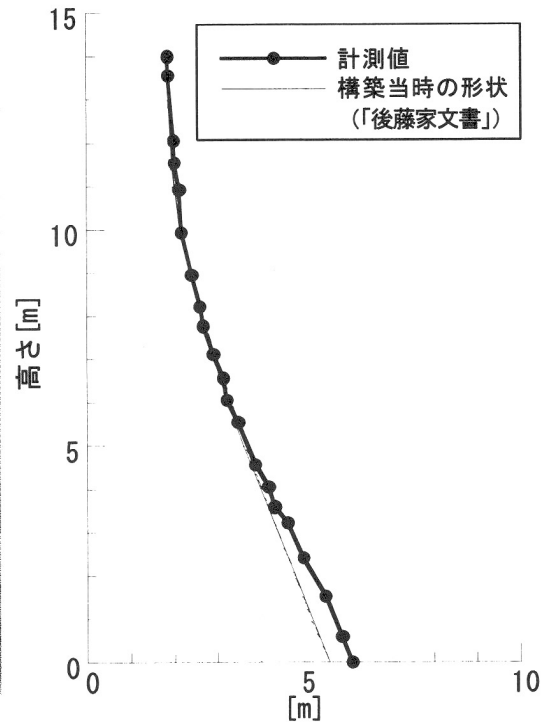


図-1 大坂城天守北面石垣の変状

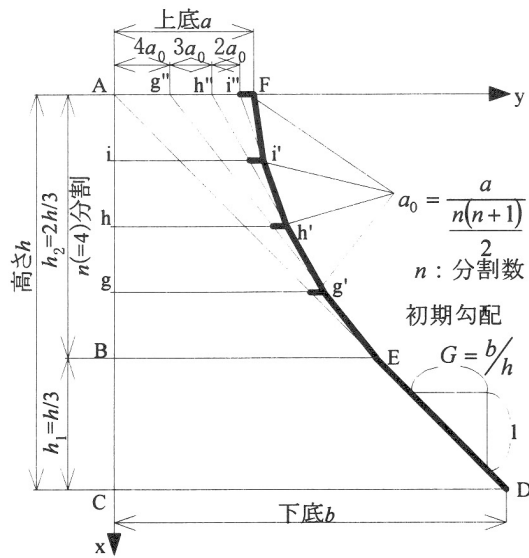


図-2 「後藤家文書」による設計

地盤強度と石垣変形特性との関係を把握し、さらには石垣石の間にできる隙間などの状況を表現することのできる2次元個別要素法解析を用いて検討を行った。検討に用いた石垣解析モデルを図-4に示している。

2次元個別要素法解析は、解析対象物を小要素の集合体として取り扱うことで、各要素ごとに独立した運動方程式を適用し、時間領域で差分近似して前進的に解いていく不連続体解析手法の一つである⁷⁾。本研究では、石垣石を形成するのに円形要素を用い、その半径は0.25mとした。また地盤を形成するのに用いた円形要素は半

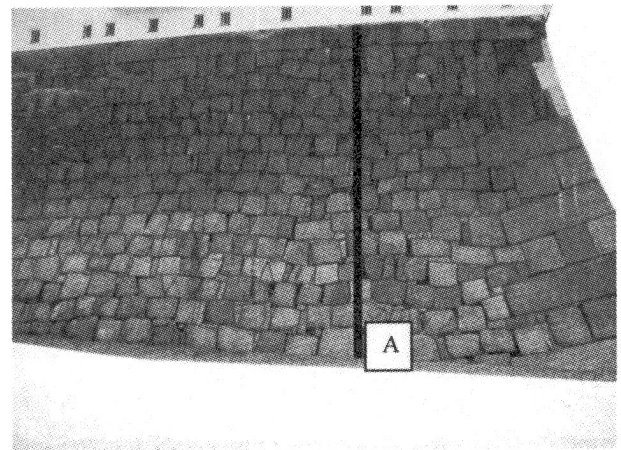


写真-1 大坂城天守閣

表-1 石垣形状の決定に用いた諸数値

石垣高さ h	15.000m
初期勾配 G	0.375
上底 a	1.406m
下底 b	5.625m
a_0	0.026m

径0.10～0.12mとした。

石垣石は円形要素を剛接することで一つの固まりとして作成し、これを所定の位置に配置することで石垣を構成した。また、基礎地盤および石垣背面の地盤については、石垣石の変形を拘束した状態で円形要素を石垣の背面に隙間なく締め固まるように自然落下させ、鉛直応

表-2 石垣モデルの石垣石の大きさ

石垣石番号	高さ [m]	奥行き [m]
17	1.00	1.25
16	0.70	1.30
15	0.80	1.36
14	0.70	1.40
13	0.80	1.44
12	1.10	1.50
11	1.00	1.54
10	0.60	1.57
9	0.60	1.60
8	1.10	1.65
7	0.90	1.71
6	1.10	1.77
5	0.60	1.80
4	0.80	1.84
3	1.00	1.89
2	1.20	1.95
1	1.00	2.00

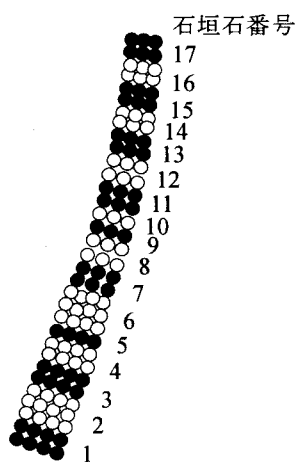


図-3 石垣モデル

力が理論値に近づいたことを確認してこれを初期応力状態とした。このようにして石垣構造を作製した後、石垣石の変形拘束を解除することで、変形解析を行った。この解析モデルの A 断面、B 断面において測定した鉛直応力の解析値および理論値を図-5(a), (b)に示している。実際の石垣背面には石垣と背面地盤の間に裏込め栗石があるが、石垣と地盤強度との関係を明確に把握するために、本研究ではこれを無視している。また解析方法として、石垣の変形と地盤強度の関係について比較するために3つの層を作り、この層の地盤強度条件を変えて解析を行った。その境界は、基礎地盤と背面土の石垣石番号2より下をⅠ層、石垣石番号2～10までをⅡ層、石垣石番号10～17までをⅢ層とする。

(3) 石垣石加工度の設定

石垣石は加工の程度により「野面積み」、「打込み接ぎ」、「切込み接ぎ」と分類されるが、本研究で用いた石垣石解析モデルは2次元モデルのため、石垣石の形状をそのまま表現すると、加工度の低い野面積みなどは石垣石と石垣石の接面が少なくなり、石垣形状を維持するこ

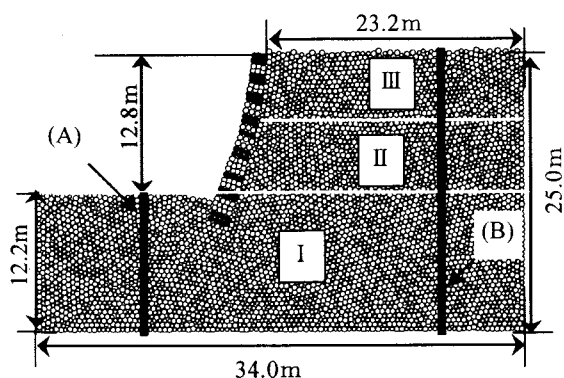
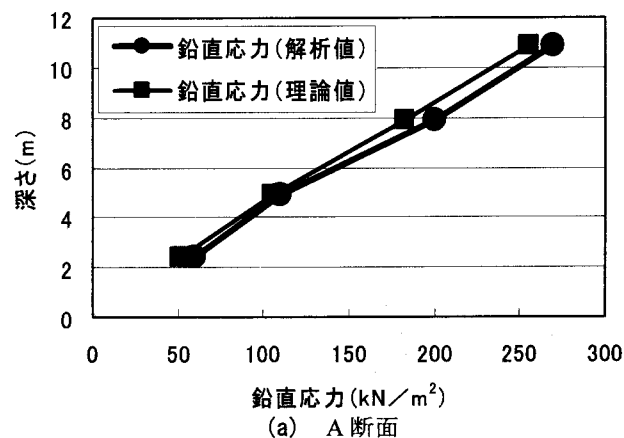
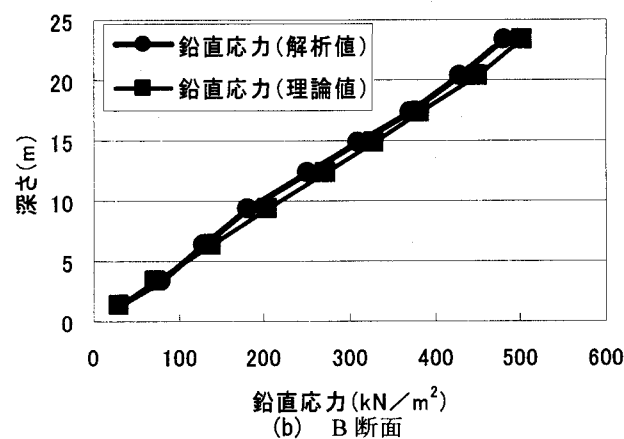


図-4 石垣解析モデル



(a) A 断面



(b) B 断面

図-5 石垣解析モデルの鉛直応力分布

表-3 解析に用いた石垣石の物性値

加工度	石垣石間の 粘着力 [N]	摩擦係数
低 (野面積み)	0	0.2
中 (打込み接ぎ)	0	0.6
高 (切込み接ぎ)	0	1.0

とが困難となる。そこで、加工の程度を表現するため、石垣の形状はそのままに、石と石の間の摩擦係数を変化させることによって対応することを試みた。表-3 に解析に用いた石垣石の物性値を示している。

表-4 地盤条件の違いとその物性値

地盤条件		I 層	II 層	III 層
①	一様な場合	土粒子間の粘着力 [N]		
		4.5×10^4		
②	基礎地盤 (I 層) が強い場合 (背面土が一様)	摩擦係数		
		0.8		
③	背面土下部 (II 層) に軟弱層がある場合	土粒子間の粘着力 [N]		
		5.0×10^6		
④	上部に行くほど地盤強度が弱くなる場合	摩擦係数		
		1.5		
		土粒子間の粘着力 [N]		
		5.0×10^6		
		摩擦係数		
		1.5		

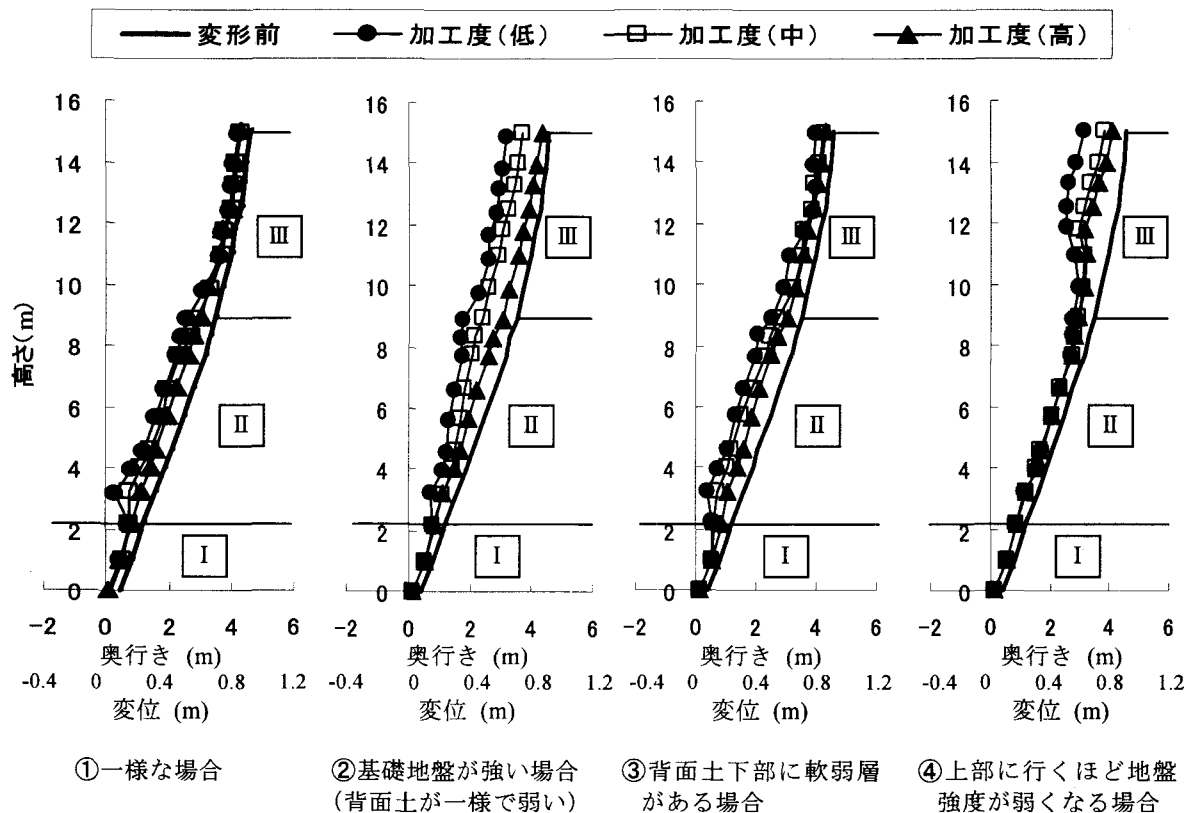


図-6 石垣石解析モデル変形状況

3. 地盤の強度特性と石垣の安定性

(1) 地盤の強度条件と物性値

地盤の強度条件の違いが石垣の変形状況に及ぼす影響を把握するために、図-4 における石垣解析モデルの I, II, III 層の物性値を変化させることで検討を行った。検討は表-4 に示す 4 ケースについて行った。

(2) 地盤条件と石垣変形状況

表-4 の 4 つのケースについての解析結果のうち石垣の変形状況については図-6 に示しており、変位量が把握しやすいように変位量を 5 倍にして表示している。また個々の石垣石の回転状況については図-7 に示しており、その回転角度は右回りを正(+)としている。図-8 には上下の石垣石間の目開き量を示している。なお、図-8 における目開き量は石垣前面側の開きを正(+)としてい

る。

a) 地盤強度が一様な場合 (ケース①)

図-6①より加工度が低いほど孕み出しが大きいことがわかる。これは、石と石の間の摩擦が大きいものほど地盤からの土圧に耐える力が大きいためである。また加工の度合いに関わらず石垣高さの中央部 (9m 付近) から下部にかけて孕み出し量が大きくなっている。これは背面土ですべりが生じたため、この辺りで孕み出し量が大きくなったと考えられる。次に、図-7①より、石垣石の回転は石垣高さの中央部から下部にかけて生じており、特に石垣石番号 9 での回転量がどの加工度においても最大であることがわかる。この位置は、石垣石間の変位量の差が大きくなる場所であり、その影響を受け回転量が大きくなったものと考えられる。また加工度が低いほ

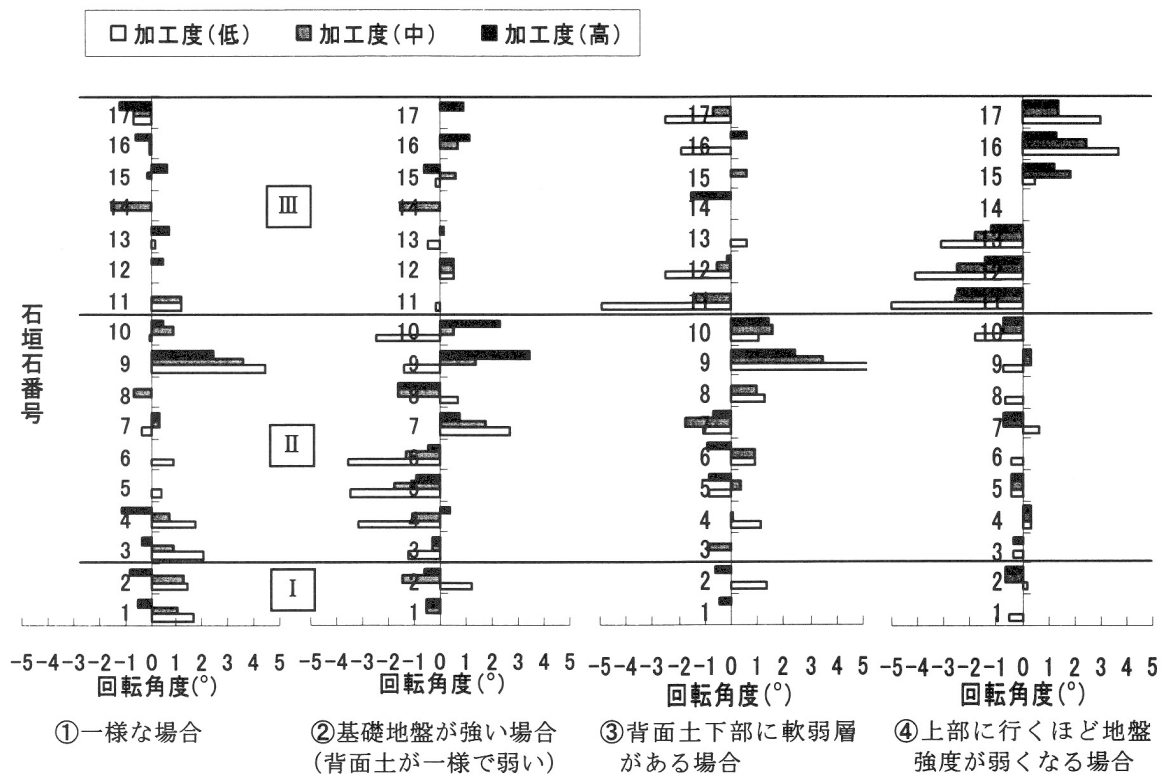


図-7 石垣石の回転角度

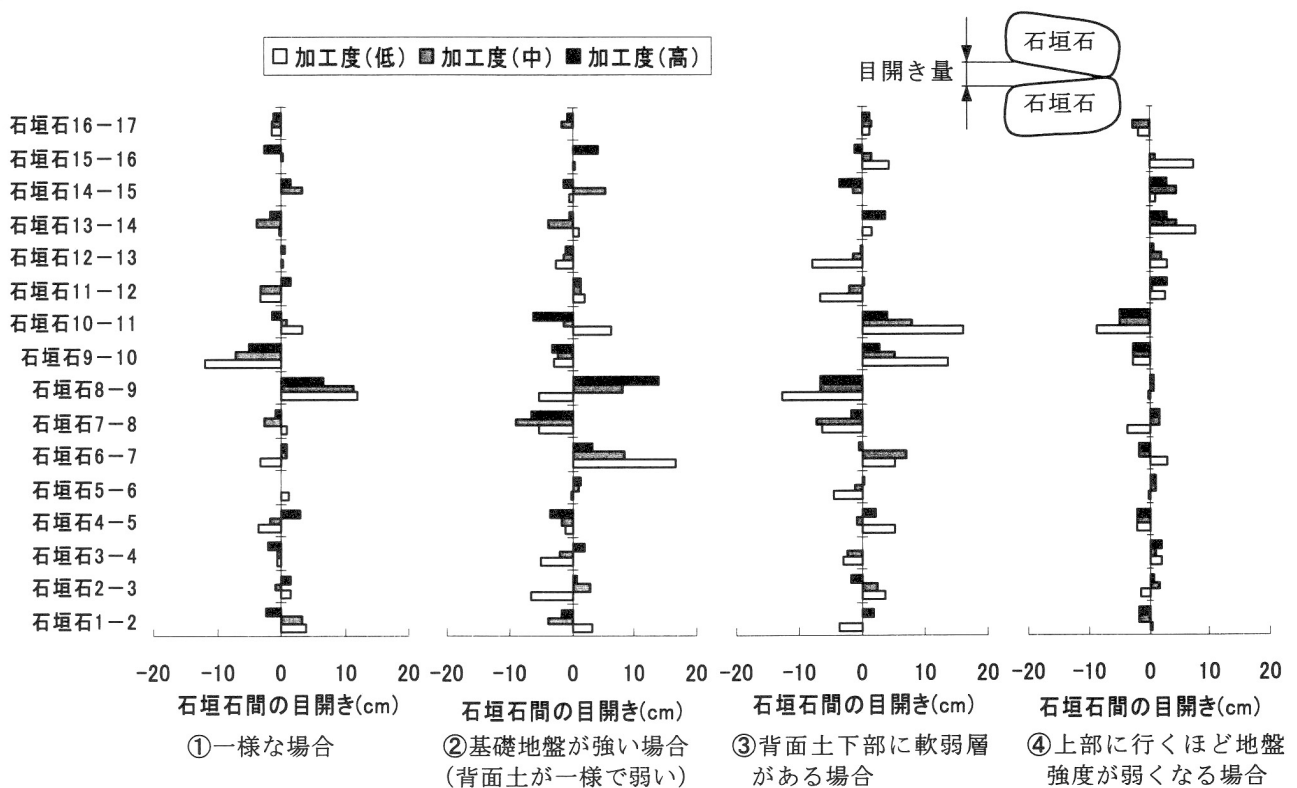


図-8 石垣石間の目開き量

ど回転量が大きくなる傾向にあることがわかる。次に、図-8①より、石垣石の加工の程度に関わらず、石垣石 8-9、9-10 で石垣石の目開き量が大きくなっていることがわかる。ここは孕み出し量が大きく、回転量も大きな箇所である。

b) 基礎地盤が強い場合 (ケース②)

石垣の変形状況は図-6②より加工の度合いに関わらず、石垣高さの中央部付近 (9m 付近) で孕み出し量が最大になっていることがわかる。これは背面土の高さの中央付近ですべりが生じているためである。また加工度の低

いものほど変位量が大きく、加工度の違いが顕著に現れていることがわかる。次に石垣石の回転は図-7②より石垣高さの中央部より下部で生じており、特にその傾向が加工度の低い石垣において顕著である。石垣下部に比べ石垣上部は石垣石の回転はあまり生じていないが、これは石垣上部の石垣石は初期の形状を保ったまま前面へ押し出されたためである。加工度の高い石垣は孕み出し量が最大となる付近の石垣石番号 9, 10 のみが他の石垣石に比べ回転が大きく生じている。図-8②より石垣石の目開き量は、石垣石の回転が正（+）から負（-）または負（-）から正（+）に大きく変化する石垣石間に大きく生じている。

c) 背面土下部に軟弱層がある場合（ケース③）

基礎地盤と背面土上部の間に軟弱層（Ⅱ層）がある場合、図-6③より加工の度合に関わらず、軟弱な層において孕み出し量が最大となることがわかる。その量は、加工の程度が低いものほど大きくなる傾向にある。次に石垣石の回転は、図-7③より地盤強度の変わる境界付近で大きく生じていることがわかる。特にその傾向が加工度の低い石垣石で大きい。また加工度の高い石垣石についても軟弱層部分（Ⅱ層）においては他の部分（Ⅲ層）より大きな回転が生じている。石垣石間の目開き量についても図-8③より地盤強度の変わる境界付近で大きく生じていることがわかる。

d) 上部に行くほど地盤強度が弱くなる場合（ケース④）

石垣変形状況を示した図-6④より、どの加工度においても石垣背面地盤の強度が弱い部分（Ⅲ層）で孕み出し量が大きく、その下の層（Ⅱ層）における変形状況は加工度の差が明瞭に現れていないことがわかる。また強度が弱い部分（Ⅲ層）での孕み出し量は、加工の程度が低いものほど大きな傾向にある。次に石垣石の回転は、図-7④より加工の程度の低いものほど大きな傾向にあるが、加工の程度に関わらず、すべてのモデルにおいて地盤強度の弱い層（Ⅲ層）での回転量が大きく、孕み出し量が最大となる付近を境に回転方向が逆となっていることがわかる。またⅡ層、Ⅲ層の境界付近と孕み出し量の大きな部分において、図-8④より目開き量が大きくなっていることがわかる。

以上の結果より、孕み出しの存在する石垣において、石垣石の回転により石垣石間の目開きが大きくなっている箇所は、その背面の地盤強度が弱い可能性がある。

4. まとめ

本研究では、「後藤家文書」の設計手法および大坂城天守石垣を参考に、2次元個別要素法解析のための石垣モデルを作製し、石垣石加工度の違いを、石垣石の間の摩擦を変化させることで表現した。このモデル解析により、石垣の変形状と地盤強度の影響について検討し、以下のような結論を得た。

- ① 地盤強度が一様な場合、背面土のすべりにより石垣高さの中央部から下部にかけて孕み出し量が大き

くなり、石垣石の上下の変位量の差が特に大きいところでは石の回転量も大きくなる。

- ② 基礎地盤強度が強く、背面土の強度が一様な場合、背面土のすべりの影響で、石垣石高さの中心付近において孕み出し量が大きくなる。石垣石の加工度が高くなるほど孕み出し量は小さくなり、加工度の低い石垣は、石垣高さの中央部から下部にかけて石垣石の回転が起こりやすい。
- ③ 基礎地盤強度が強く、背面土下部に軟弱な層がある場合、強度が弱いところとなる境界付近で孕み出し量の増加が大きく、その軟弱層で孕み出しも最大となる。また、背面土の強度が変わる境界付近で石垣石の回転も大きくなる。石垣石の加工の程度が高くなるほど、孕み出し量は減少していく。
- ④ 基礎地盤強度が強く、石垣上部にいくにつれ地盤強度が弱くなる場合、石垣上部で孕み出し量が大きく、下部にいくにつれ孕み出し量が小さくなる。また石垣上部では石垣石の回転も起こりやすい。石垣石の加工の程度が高くなるほど、孕み出し量および石垣石の回転量とも小さくなる。
- ⑤ 加工の程度の低い石垣石では地盤強度の影響を受けやすく、背面土の強度が弱いところで変位量が大きくなり、石垣石の回転も起こりやすいが、石垣石の加工度が高くなるにつれて、変位量が小さくなり、それに伴い石垣石の回転量や目開き量も小さくなる。
- ⑥ 実際の石垣において、孕み出し量が大きく、石垣石の回転により石垣石間の目開きが大きくなっている箇所は、その背面の地盤強度が弱い可能性がある。

参考文献

- 1) 森本浩行，西田一彦，西形達明，玉野富雄：城郭石垣の隅角部形状とその数値評価法，土木学会論文集，No.666/Ⅲ-53，pp.159-168，2000。
- 2) 西田一彦，西形達明，玉野富雄，森本浩行：城郭石垣断面形状の設計法とその数式表示に関する考察，土木学会論文集，No.750/Ⅲ-65，pp.89-98，2003。
- 3) 森本浩行，西田一彦，西形達明，玉野富雄：城郭石垣の断面形状と石垣構築技術の変遷，土木史研究，第23号，土木学会，pp.409-416，2003。
- 4) 森本浩行，西田一彦，西形達明，玉野富雄：城郭石垣の安定性に影響する各種要因の検討，土木史研究，第24号，土木学会，pp.255-260，2004。
- 5) 西田一彦，八尾眞太郎，西形達明，玉野富雄，森本浩行：姫路城の石垣と基礎，基礎工，Vol.32，No.1，総合土木研究所，pp.91-94，2004。
- 6) 玉野富雄，西田一彦，B.Shrestha，金岡正信，森本浩行：城郭石垣構造の力学安定，材料，Vol.53，No.1，日本材料学会，pp.5-8，2004。
- 7) 亀村勝美：不連続性岩盤における調査・解析事例（応力変形問題）（その1），土と基礎，Vol.48，No.4，pp.51-56，2000。