

城郭石垣断面形状の設計および構築に関する考察^{*1}

A Consideration on Design and Construction of Castle Masonry Walls from Viewpoint of Cross-sectional Shape

西田一彦^{*2}, 玉野富雄^{*3}, 西形達明^{*4}, 森本浩行^{*5}

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

要旨：城郭石垣の設計手法および構築手法を推定するための重要な要素の一つに、現状の石垣断面形状を把握することが挙げられる。また城郭石垣の安定性に、石垣断面形状が大きく影響していると考えられる。そこで本研究では、石垣断面形状の設計手法および構築手法について考察するために、現存の城郭石垣の形状を計測し、反り曲線勾配部分について数式化することを試み、現存する城郭石垣に適用したものを例示した。また、この数式化した勾配の式を城郭石垣構築当時における状態の推定に用いることで、現在多くの城郭石垣で問題となっているはらみ出しの大きさを算出することが可能となった。また、この値を用いて崩壊の危険性をも判断した。

1. はじめに

日本の城郭石垣は個々の石垣石の間に接着剤を用いない空積であり、また曲線を有しているなど世界に類を見ない独自の構造を持ち、建設文化として価値の高い歴史的遺産である。現在までのところ石垣の上に建設された天守閣や櫓などについては数多くの研究がなされ、その建築方法や修理・修復方法などが確立されてきており、また再建されたところもあるが、石垣の重要性についてはあまり認識されてこなかった。このような状況から日本に現存する石垣遺構には老朽化が進行し崩落の危険性のある箇所が数多く存在するものと考えられ、実際に崩落した事例も数多く報告されている¹⁾。また崩落後に従来の形状に積み上げることについても、石垣構築当時の設計図面などが存在していることは稀であるため困難を極める状況にある^{2),3)}。

これら歴史的文化的遺産として価値の高い城郭石垣遺構の崩落を未然に防ぐために修復保存するには、まず最初に現状の石垣形状を把握し構築当時の形状と比べることで、その変形状態を正確に把握しておく必要がある。

城郭石垣の形状を測定する方法として光波測量や写真測量が挙げられる。光波測量は測定対象となる地点に反射板を設置する必要があるが、城郭石垣の中腹や上端部あるいは堀を隔てた場合など測定対象位置によっては反射板の設置が困難な場合が予想され、かつその設置を行う時間も必要となる。また写真測量を行うことで正確な値を知ることができるが、この場合は専門の知識を備える技術者に依頼する必要があるが、また多くの時間と費用

を必要とするため簡単に実施することは難しい。そこで本研究では、反射板の不要なレーザー距離計とトランシットを組み合わせたものを使用して城郭石垣の形状を簡易に計測できる測量方法を用いて測定を行った。

城郭石垣の設計手法にはいくつかの方法があると推察されるが、本研究では石垣構築当時の断面形状として「後藤家文書」に記述されている石垣の設計手法によって構築されたものと想定して、現状の石垣断面形状と比較検討することにより変形状態を把握し安定性の検討を行った。

2. 現状石垣断面形状の測定

(1) 測定装置

今回、石垣断面形状の計測に用いた測定装置を図-1に示している。これはトランシットにレーザー距離計を取り付けた構造であり、レーザー距離計は測定対象にレーザー光を照射して、測定対象までの距離を測定するために用い、トランシットはレーザー距離計によるレーザー光が照射された位置の水平方向の角度と鉛直方向の角度を測定するために用いる。

(2) 測定結果

測定は大坂城天守北面、姫路城天守南面、彦根城天守北面および東面において行った。それぞれの石垣を測定した結果を三次元で表示したものおよび測定対象の写真を図-2～9に示している。なお、各写真には測点の位置および石垣下端部の長さ、隅角部の石垣石の寸法を表示している。

*1 keywords : 石垣, はらみ出し, 形状計測

*2 正会員 工博 関西大学工学部土木工学科 (〒564-8680 大坂府吹田市山手町3丁目3番35号)

*3 正会員 工博 大坂産業大学工学部土木工学科

*4 正会員 工博 関西大学工学部土木工学科

*5 正会員 工修 京都市立伏見工業高等学校建設工学科

図-2 に示している大坂城天守北面石垣の形状は、石垣隅角部Y-y側の高さが11.65m、石垣隅角部X-x側の高さが13.27mと1.62mの差となっている。このことは図-3 において石垣隅角部Y-y側からX-x側へと地面が傾斜していることから明らかなように、石垣隅角部Y-y側よりもX-x側の方が石垣が高くなっていることによるものである。

図-2 における石垣下端側の測点f付近では石垣のはらみ出しが測定された。測点f付近の位置を撮影した図-4 から石垣下端部付近にはらみ出しの存在が確認できる。

図-5 に示している姫路城天守南面石垣では、石垣隅角部X-xの高さは14.28mであり、断面D-dの高さは14.06m、断面G-gの高さは13.97mと隅角部X-x側の石垣の高さが高くなっている。このことは、この領域を撮影した図-6 からも確認できる。

図-7 に示している彦根城天守北面石垣では、石垣隅角部X-xの高さは4.17m、C-c断面の高さは4.03m、石垣隅角部Y-yの高さは4.49mとなった。すなわち、測点xから測点cに向かって上方に傾斜し、測点cから

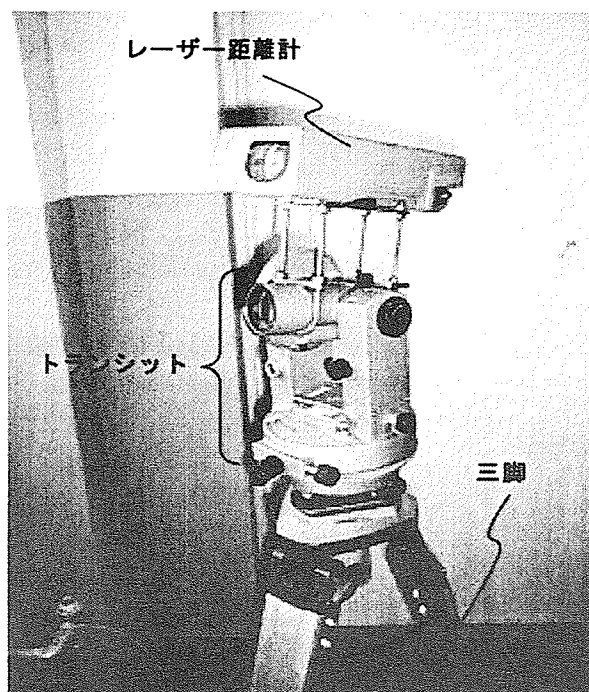


図-1 測定装置

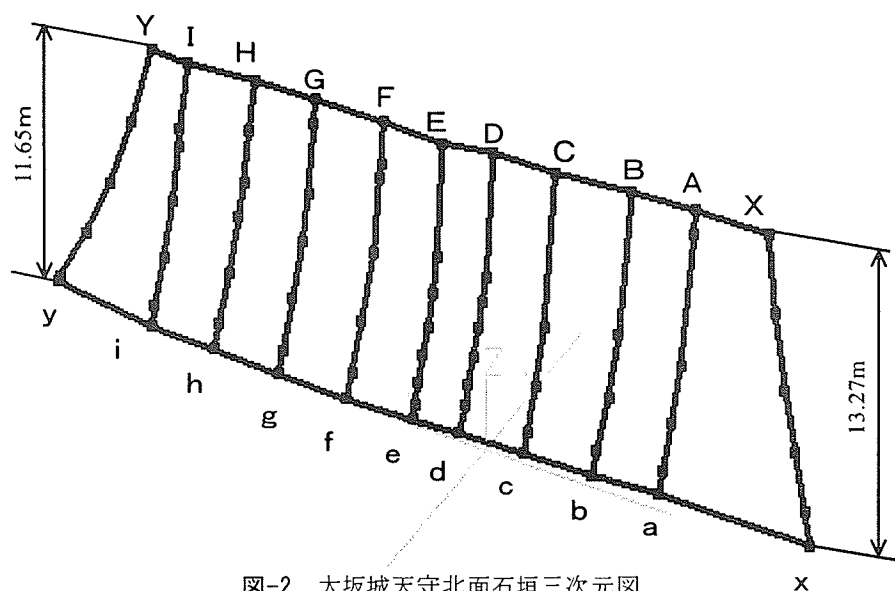


図-2 大坂城天守北面石垣三次元図

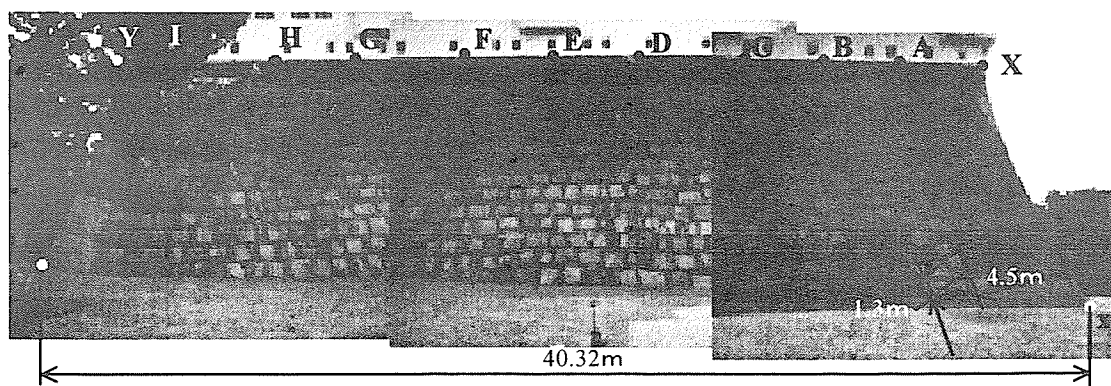


図-3 大坂城天守北面石垣（撮影：西田，2000）

測点yに向かって下方に傾斜していることを示している。この領域を撮影した図-8からも測点xから測点cに向かって上方に傾斜し、測点cから測点yに向かって下方に傾斜するということが確認できる。同様に彦根城天守東面石垣では、石垣隅角部Y-yの高さは4.49m、I-i断面の高さは4.96m、石垣隅角部Z-zの高さは5.80mとなった。すなわち、測点yから測点zに向かって下方に傾斜するという結果となった。この領域を撮影した図-9からも測点yから測点zに向かって下方に傾斜するということが確認できる。

以上のように、測定結果より得られた石垣の三次元形状は、写真から確認できる特徴を表現できていることがわかる。

3. 「後藤家文書」による設計手法との比較

城郭石垣の安定性を検討する上で最も重要なことの一つは、現在の石垣の状態が石垣構築当時の形状からどの程度変形しているのかを把握することである。

現状石垣の形状はレーザー距離計とトランシットを用いた計測によって簡便に測定できるが、構築当時の形

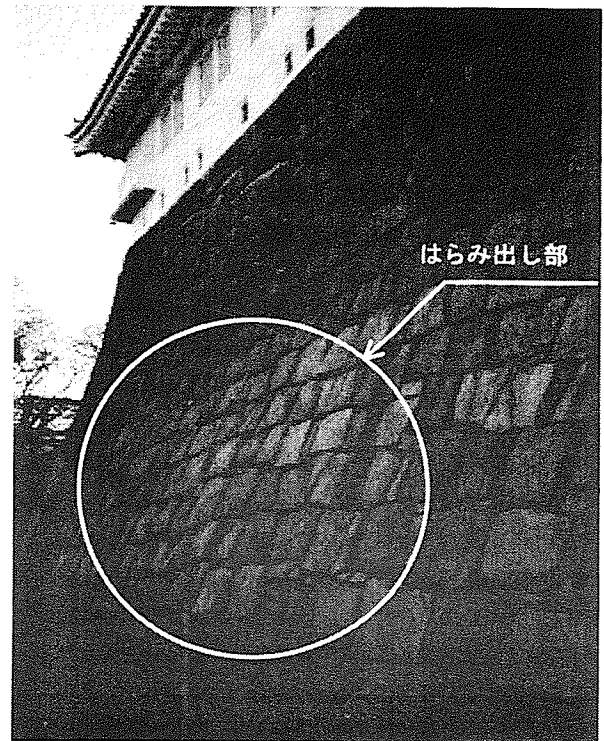


図-4 大坂城天守北面のはらみ出し部分（撮影：西田，2000）

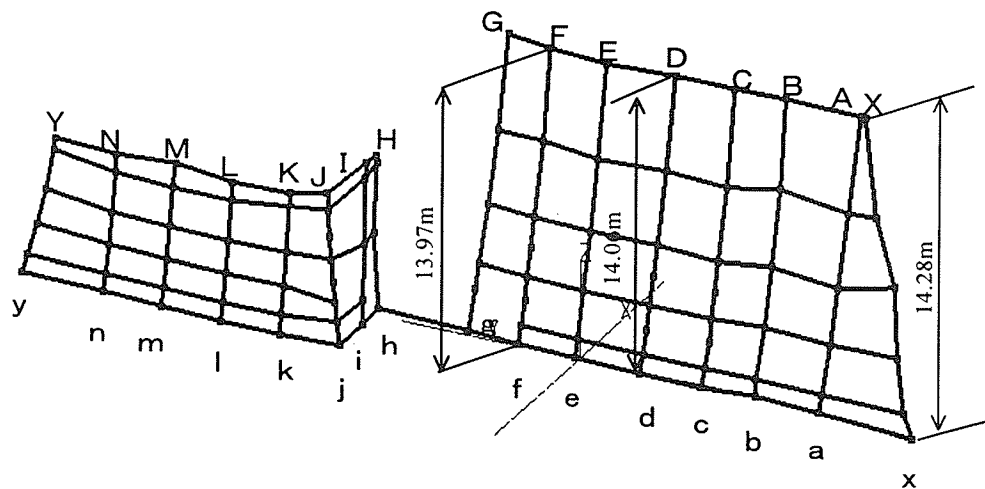


図-5 姫路城天守南面石垣三次元図

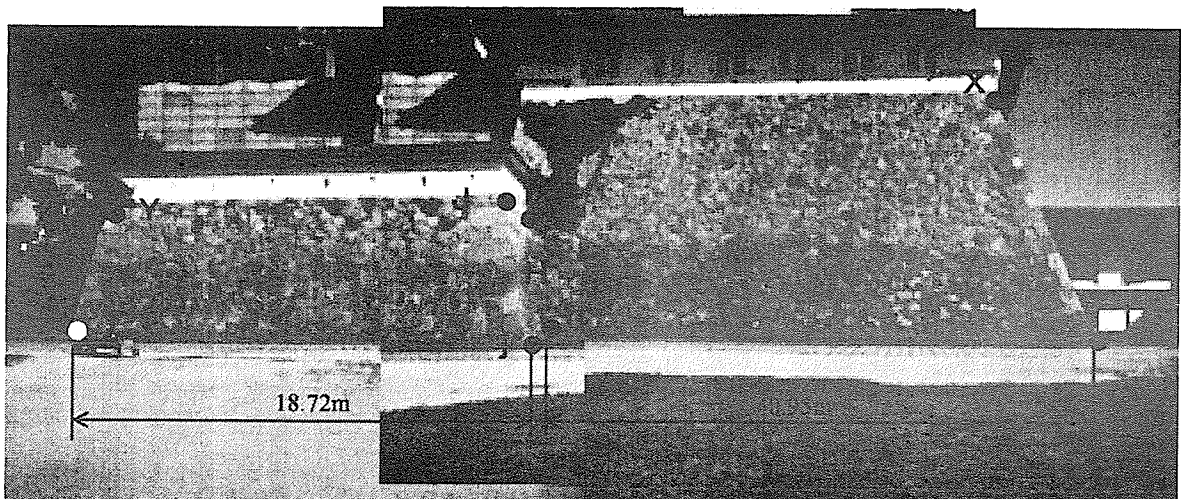


図-6 姫路城天守南面石垣（撮影：西田，2000）

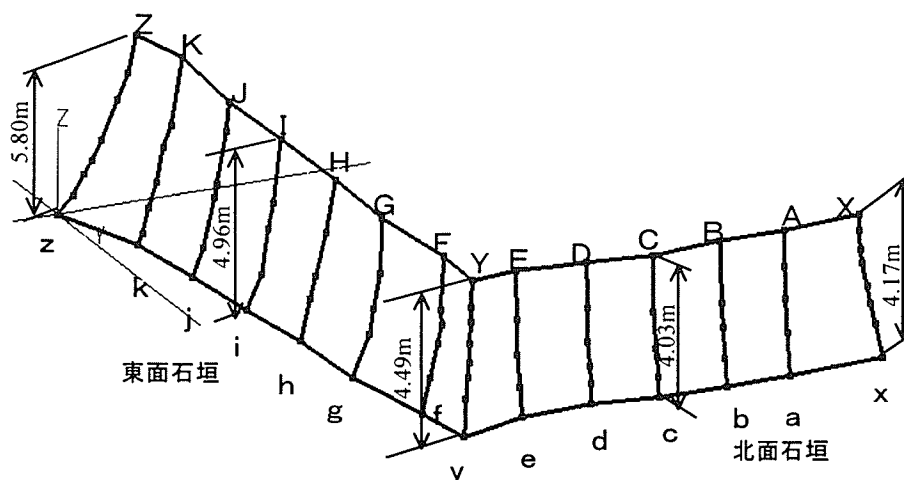


図-7 彦根城天守石垣三次元図

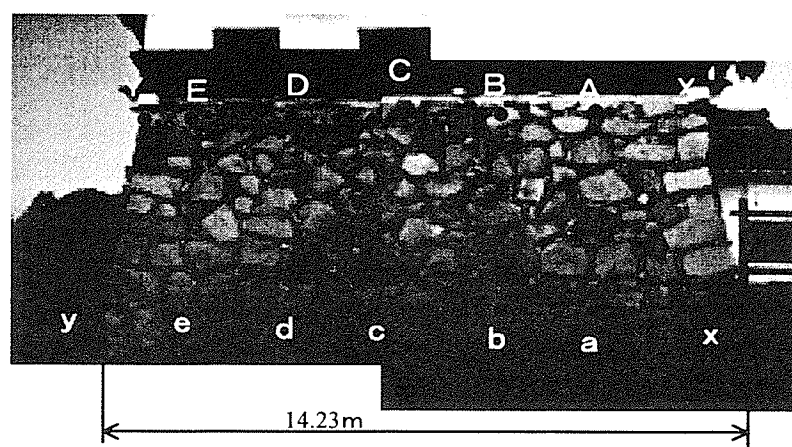


図-8 彦根城天守北面石垣 (撮影：西田，2000)

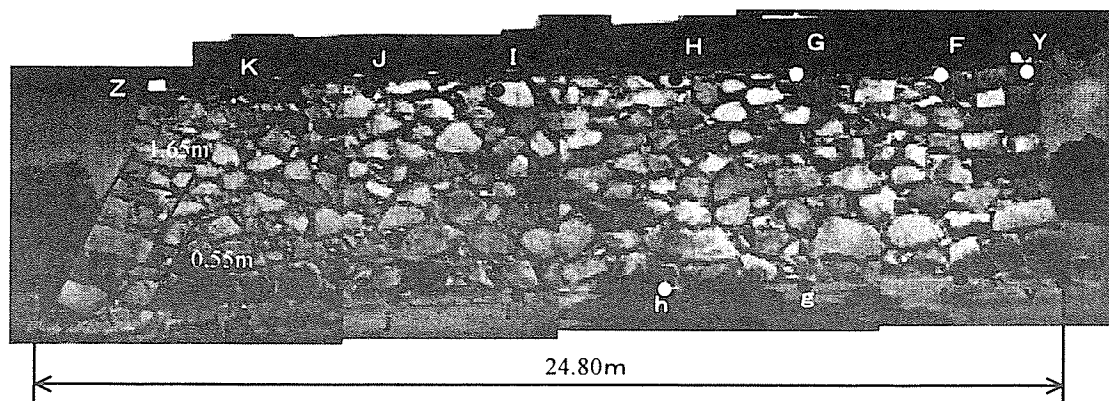


図-9 彦根城天守東面石垣 (撮影：西田，2000)

状については設計図面などが残っていることは極めて稀であるため、石垣構築当時の形状を推定する必要がある。城郭石垣の設計手法には数種類の方法があると推察されるが、本研究ではそれらのうちの一つである「後藤家文書」による設計手法によって構築されたと考えられる石垣について検討を行った。

「後藤家文書」による石垣断面形状の設計手法は、図-10 に示すように、次のような手順で定められていると考えられる⁴⁾。

- ① 高さ h_0 (AC) に応じて、下底 b (CD) と上底 a (AF) を定める。
- ② 下から $\frac{1}{3}h_0 (=h_1)$ の部分は、初期勾配 G で直線 DE を引く。
- ③ 上から $\frac{2}{3}h_0 (=h_2)$ の部分、すなわち AB 間は高さに応じて n 個に等分割する。分割点に下から上へ i, ii, iii と番号をつける。(「後藤家文書」では高さに応

④ 上底 a を $1 \sim n$ までの自然数の和で除した値 a_0 を次式のように算出する.

$$a_0 = \frac{a}{\frac{n(n+1)}{2}} \quad (1)$$

- ⑤ 点 i の水平線と AE 線との交点より a_0 だけ石垣前面に張り出した点を i' とする。
- ⑥ 点 ii の水平線と E i' の延長線 E i'' との交点より a_0 だけ石垣前面に張り出した点を ii' とする。
- ⑦ 点 iii の水平線と i' ii' の延長線 i' ii'' との交点より a_0 だけ石垣前面に張り出した点を iii' とする。
- ⑧ 点 E, i', ii', iii', F を結ぶ。

$$y = \frac{b}{h_0}x + a\left(1 - \frac{x}{h_2}\right)^2 \quad (2)$$

このように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「後藤家文書」による手法では 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。

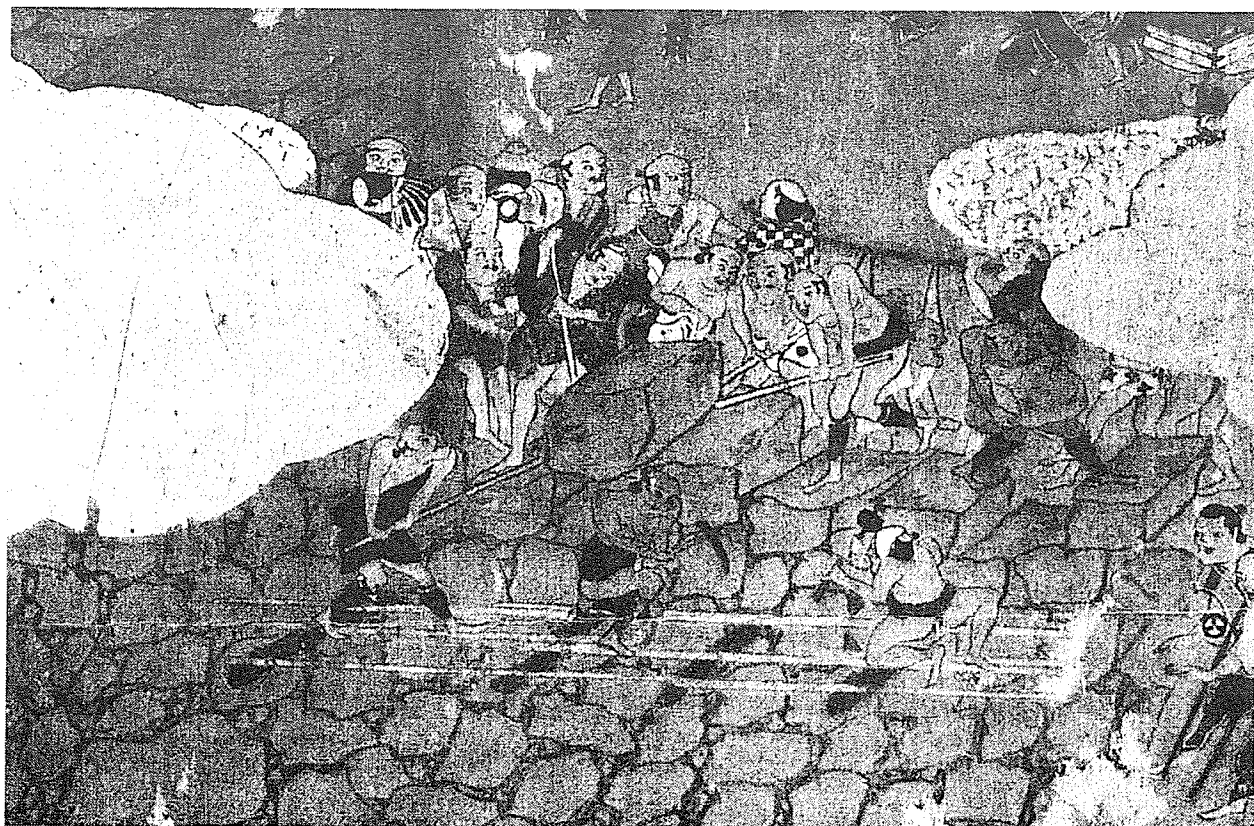


図-11 「築城図屏風」の一部分（原図：武田恒夫他、『戦国武家風俗図，戦国合戦絵屏風集成，別巻』（1981））

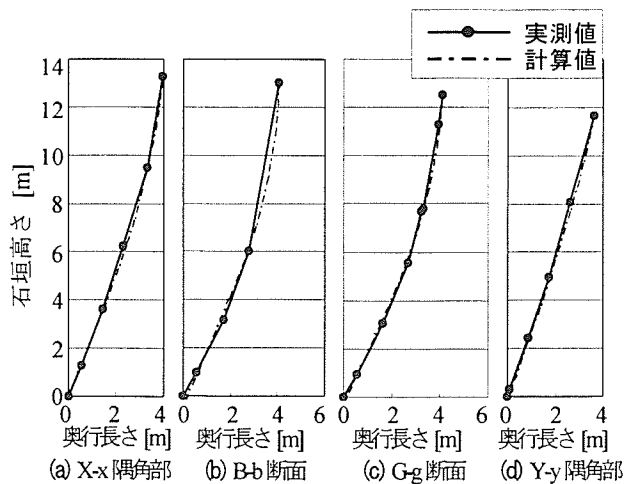


図-12 大坂城天守石垣北面

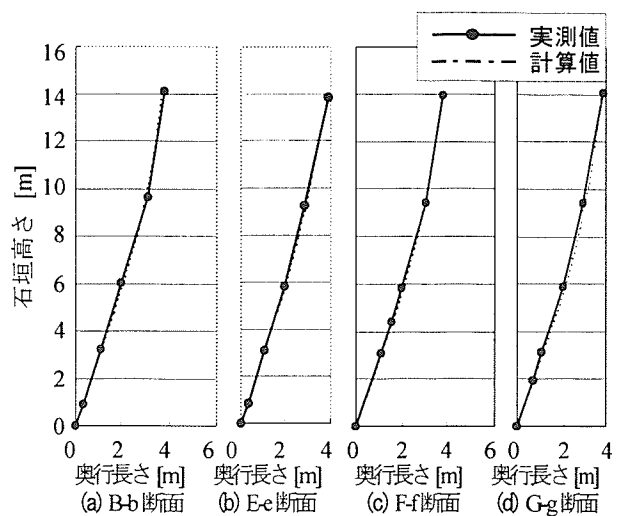


図-13 姫路城天守石垣南面

このような手順で石垣の反りを設けることは、実際の現場での施工に適したものであると考えられる。施工前に張り出し量を算出しておくことで、施工時には先に積まれた石垣の初期勾配 G の延長線とある一定高さの交わった点から a_0 だけ前面に張り出すことで、次の勾配が決まり、またその勾配の延長線とある一定高さの交わった点から a_0 だけ前面に張り出すことで次の勾配が決定する。これを繰り返していくだけで、反り曲線勾配が完成する。図-11 に示している築城の様子を描いたとされる「築城図屏風」⁵⁾には、石垣前面に組まれた足場上と石垣背面の盛土上にいる作業者が梃子や鎚を用いて微調整しながら石を積み上げていく様子が描かれている。

ここで、大坂城天守石垣北面、姫路城天守石垣南面、彦根城天守石垣北面および東面について行った測定の結果から石垣高さ h_0 、上底 a 、下底 b の値を推定し、これらの値を式 (2) に代入して得られた計算値による断面形状と実測値による形状を比較した結果を図-12～14 に示している。

いずれの石垣においても、実測値と計算値による形状がよく一致していることがわかる。以上の関係から大坂城、姫路城、彦根城においては「後藤家文書」による設計手法かあるいは同系統の設計手法を用いて城郭石垣を構築されたと判断することができる。

4. 安定性の評価

「後藤家文書」から導いた式による計算値を石垣断面形状の基準とし、実測値における形状と比較することで、城郭石垣の変形状況を把握することができる。また石垣はらみ出し指数⁶⁾によって安定性の検討を行った。

石垣はらみ出し指数とは図-15 に示しているように構築当時の石垣断面形状に対して現況の石垣断面形状中で最大のはらみ出し量 δ (単位を cm で表す) をはらみ出しが生じている区域の石垣高さ H (石垣はらみ出し高さおよび、単位を m で表す) で除した値として次式で定義されている。

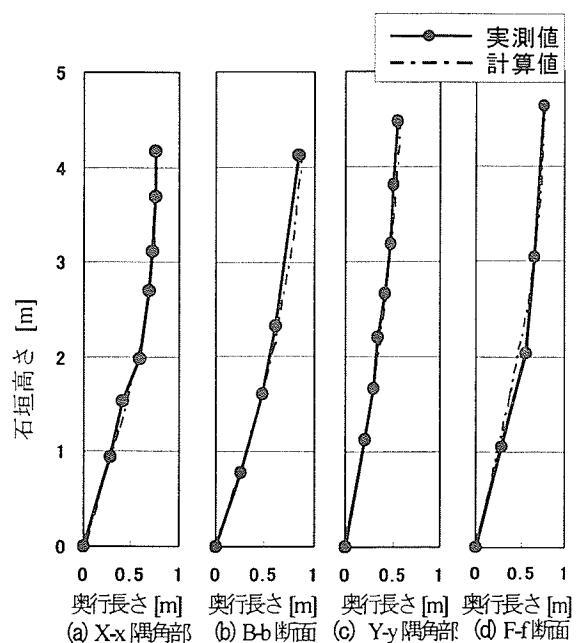


図-14 彦根城天守石垣

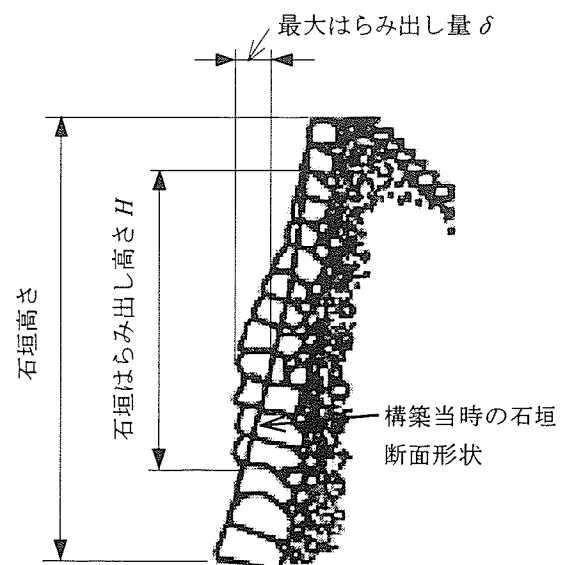


図-15 石垣はらみ出し指数の概念図

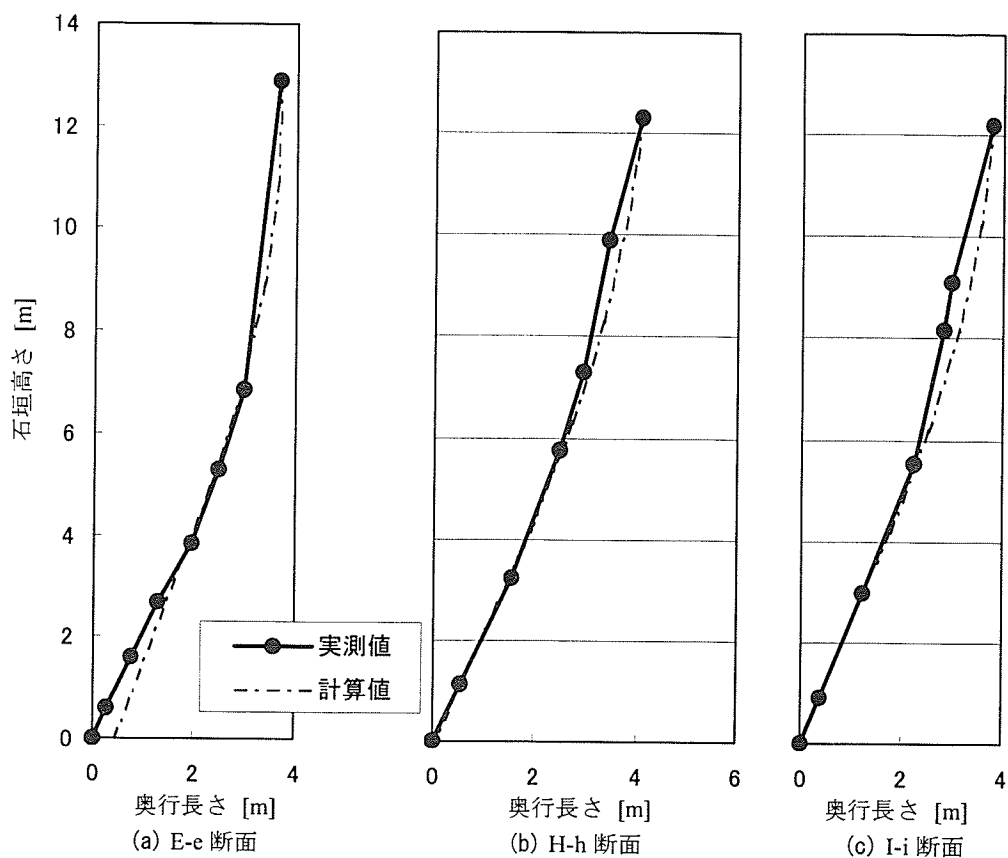


図-16 大坂城天守石垣北面

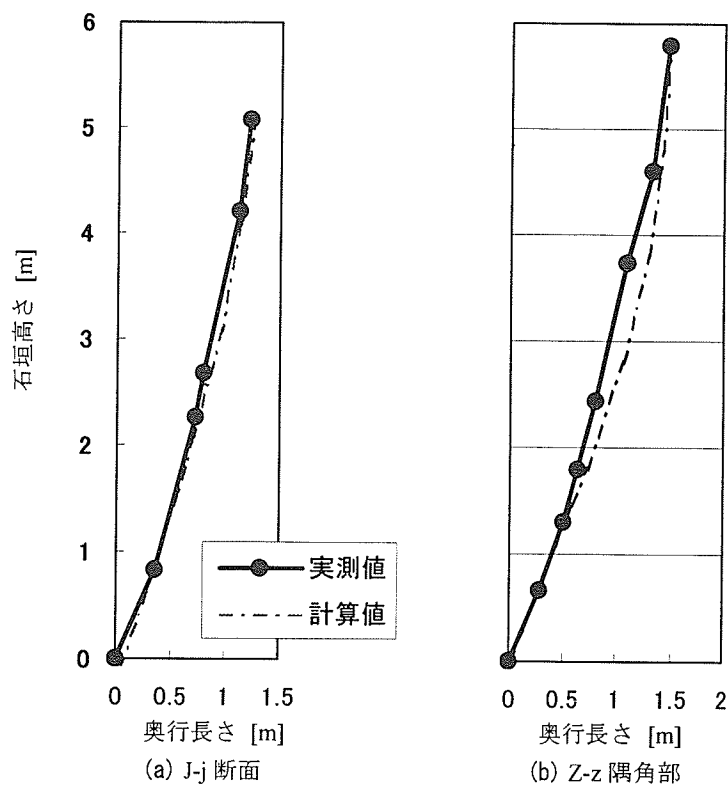


図-17 彦根城天守石垣東面

$$\text{石垣はらみ出し指数} = \frac{\text{最大はらみ出し量} \delta [\text{cm}]}{\text{石垣はらみ出し高さ} H [\text{m}]} \quad (3)$$

実測値と計算値における石垣断面形状の比較を行っ

たものを図-16, 17 に示している. これらの図より最大はらみ出し量と石垣はらみ出し高さを求め, 石垣はらみ出し指数を算出した.

石垣はらみ出し高さと石垣はらみ出し指数の関係を

図-18 に示している。なお図中の過去の未崩壊データとは、はらみ出しを確認されているが現状では崩壊に至っていない石垣であり、過去の崩壊データとは、はらみ出し指数を算出した後で集中豪雨や地震などによって崩壊に至った石垣である。

過去の崩壊データを見ると、崩壊前の石垣ははらみ出し指数は6程度であった。このことから石垣ははらみ出し指数が6程度以上にある石垣は、集中豪雨や地震等のような衝撃的な外力が加わると崩壊の危険性が大きいと判断できる。

5. まとめ

石垣の反り曲線勾配部分の構築手法は、施工のしやすさを考えると「後藤家文書」に示されている、ある一定高さごとに一定量前面に張り出していくという手法が合理的なものと考えられる。そしてこのことにより反り曲線勾配部分は二次曲線を描くことになる。

大坂城、姫路城、彦根城の石垣をレーザー距離計とトランシットを用いて計測した断面形状と「後藤家文書」に示されている設計手法による断面形状との比較がよく一致していたことから、これらの城郭石垣は「後藤家文書」に示されている設計手法かあるいは同系統の設計手法を用いて設計・構築されたと判断できる。

「後藤家文書」から導いた式による計算値を構築当時の石垣断面形状とし、レーザー距離計とトランシットを用いて計測した実測地における形状と比較することにより、石垣のはらみ出しの状態を把握することが可能となった。またこの比較を行うことによって最大はらみ出し量と石垣はらみ出し高さを求めることができ、この値を用いて石垣はらみ出し指数を算出することにより石垣の安定性を評価できる。

今後の課題として、最近、レーザー距離計とトランシットを一体化した製品が市販化されており、これを用いることでより簡便に現在の石垣断面形状を把握することが可能となると考えられる。また、反り曲線勾配により積み上げられた石垣は、「後藤家文書」に示された設計手法以外にも、「石垣秘傳之書」や「石垣築様目録」などによる方法がある。今後はこれらによる設計手法をも明らかにするとともに、石垣遺構の保存または修復のためにいずれの設計手法によって城郭石垣が構築されたのか分類・整理し、石垣構築当時の形状を把握しておく必要がある。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（B）（1）課題番号 12450208、研究代表者：天野光三）による研究である。現地測量において便宜を図っていただいた大阪

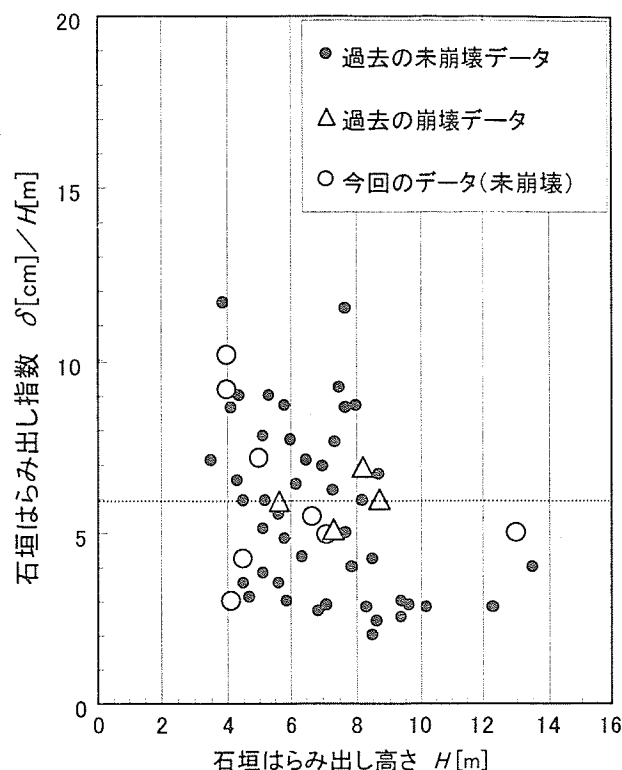


図-18 石垣はらみ出し高さと石垣はらみ出し指数の関係

城天守閣、姫路城管理事務所、彦根城観光課および関係各位に謝意を表す次第である。また、大阪城天守閣館長の中村博司氏には資料の提示ならびに懇切なご教示を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 田中邦熙，新谷洋二：日本城郭石垣の変遷と現状，土木学会論文集，No.576/IV-37，pp.101-110，1997.
- 2) 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.
- 3) 喜内敏：城石垣の秘法と史料，『探訪日本の城 別巻 築城の歴史』，小学館，p.155，1978.
- 4) 森本浩行，西田一彦，西形達明，玉野富雄：城郭石垣の遺存技術情報とその変遷，土木史研究，第19号，土木学会，pp.301-310，1999.
- 5) 武田恒夫，桑田忠親，鈴木敬三，狩野博幸：『戦国武家風俗図，戦国合戦絵屏風集成，別巻』，中央公論社，p.58，1981.
- 6) 天野光三，西田一彦，渡辺武，玉野富雄，中村博司：徳川期大坂城城郭石垣構造の土木史的研究，土木学会論文集，No.660/IV-49，pp.101-110，2000.