

城郭石垣の隅角部形状とその数値評価法

森本浩行¹・西田一彦²・西形達明³・玉野富雄⁴

¹正会員 工修 京都市立伏見工業高等学校教諭 建設工学科 (〒612-0011 京都市伏見区深草鈴塚町 13)

²正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-0073 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

³正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科 (〒564-0073 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

⁴正会員 工博 大阪産業大学教授 工学部土木工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

現在までのところ、城郭石垣の安定性について、様々な観点から検討がなされている。そして、この安定性を検討する上で、石垣の断面形状が大きく影響していると考えられる。そこで、本研究では石垣構築技術書として「後藤家文書」を主に取り上げ、隅角部石垣形状の設計手法について詳細に述べるとともに、現存する城郭石垣に適用したものを例示した。さらに、石垣形状の変遷について客観的に把握するため、簡便な数値評価法によって判断する方法を提案した。

Key Words : masonry wall, Gotou-ke Monjyo, construction technology, numerical evaluation

1. はじめに

人類が誕生したのは、およそ 450 万年前と言われている。そして、250 万年前に人類最古の文化であるオールドワイ文化がアフリカで誕生している¹⁾。人類は誕生とともに社会生活を営むようになり、共同して作業を行うようになった。そして土木構造物の建設が始まった。たとえば、95 万年前のフランス南部オーヴェルニュ地方のロワール川源流地帯にあるル・ピュイの町の北 10km にあるソレイヤック遺跡では、人類最古の建造物である石垣が発見されている²⁾。湖岸に沿って幅 1.5m の石垣が 20m ほど続いていることから、風と波を防ぐためのものだと考えられている。これら人類の発展とともに築き上げられてきた土木構造物を、文化遺産としての保存に向けた市民の関心が高まってきている。また、その重要性を広めるのは土木界に関わる者の勤めであろう。我が国にも世界的に第一級の誇るべき建設文化としての価値を持つものが多くある。その一つに近世の城郭における石垣構造がある。我が国の城郭石垣は、接着剤を使わない空積であり、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、建設文化の遺産として価値の高いものである。この城郭石垣の構築技術は中世後期から近世に発達し、1600 年前後に急速な発達をみている。そのなかでも、徳川初期の大坂城石垣は最大高さが 32m

にも及ぶ最大級の規模を誇り³⁾、石垣断面形状の反り曲線勾配に見られる構造美や、過去 4 回の震度 4 以上の大地震⁴⁾にも全体として安定を保っている力学的合理性からみて、石垣構築技術の頂点に位置するものと考えられる。

このような大規模石垣の構築が可能となるまでの石垣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、これらの重要な石垣遺構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手法にも寄与することになる。そこで、本研究では石垣形状や構造に残されている変遷に関わる技術的要素を的確に把握し、石垣構築技術の発展過程を詳しく調べるために隅角部における石垣石の加工状況および石垣石の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を提案する。

2. 石垣構造に関する歴史資料

築城は当時の最高の技術で行われたが、同時に最高の軍事機密でもあったため、軍学・兵法関係の一般的な書物は「鈴録」(荻生徂徠)、「武教全書」(山鹿素行)、「軍詞之巻」(有沢永貞)、「海國兵談」(林子平)など多数あるが、石垣構築を技術

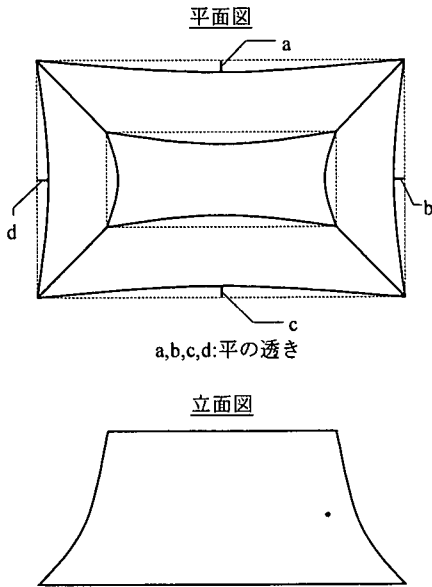


図-1 石垣全体の形状

(李建河他, 「石垣築様目録」における石垣構築設計体系に関する研究」(1994年)の原図に加筆)

的に説明した書物は極めて少ない。また、当時の社会的な状況から石垣構築に関する技術者も世襲が多く、特別の場合のほかは他人に教えることなく秘伝書あるいは口伝として子孫または特定の者にのみこの秘法を伝えた。明治維新以降は社会情勢の変化によって、この方面の関心が薄くなったために、貴重な資料が散逸または廃棄されたものが多いと考えられる⁵⁾。石垣構築の技術書としては現在のところ、穴太⁶⁾の一族である堀金出雲他3名により1655年に記述された「石垣築様目録」および、細川家の穴太であった北川作兵衛の自家の家伝を1743年に記述した「石垣秘傳之書」、加賀藩主に代々仕えた穴生方である後藤家により1600～1800年頃にかけて作成された「後藤家文書」の3つが挙げられる。これらのうち「石垣築様目録」は北垣^{6), 7)}によって紹介されており、李⁸⁾によって石垣構築設計体系について研究がなされている。このなかで注目すべき点は、石垣に見られる曲線は隅角部石垣の反り曲線勾配だけでなく、図-1に示すように石垣を平面的に見た場合にも「平の透き」と呼ばれるものを設けることで曲線が用いられていたことである。石垣全体がアーチによる効果を期待して、設計されていたものと判断することができる。実際に、天野⁹⁾による大坂城石垣形状の実測

データからも、平面的に見た場合にも曲線を設けられていることが認められる。そして「石垣秘傳之書」と「後藤家文書」については、北垣によって「石垣普請」のなかで詳しく解説されている。さらに、「後藤家文書」は喜内¹⁰⁾により「金沢城郭史料」として整理され、解説が加えられている。この「後藤家文書」は「唯一人伝」をはじめとして、設計手法について詳細に記述されたものが多数含まれており、石垣構築技術を考察する上で貴重な資料となるものである。そこで、本研究では「後藤家文書」に記述されている隅角部石垣形状の設計手法について詳細に考察するとともに現存する大坂城石垣に適用することを試みた。

3. 隅角部石垣の設計手法

「後藤家文書」に記述されている内容を整理することで、勾配のつけ方および各種設計データから、高さ、初期勾配、上底、下底のそれぞれの関係を探り、隅角部石垣の形状を一般化した。なお、1尺=0.303mとして計算している。

(1) 勾配のつけ方

「後藤家文書」による隅角部勾配のつけ方は、前述の「石垣普請¹¹⁾」において一つの事例を取り上げ解説されているが、ここでは一般的な形状を示した上で反り勾配部分を数式化することを試みた。その結果、以下のように判明した。

まず反り勾配は、図-2に示すように、次のような手順で定めていると考えられる。

- 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」では高さに応じて 1～5 尺で分割している。なお、図-2 では 4 分割としている。)
- 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。

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

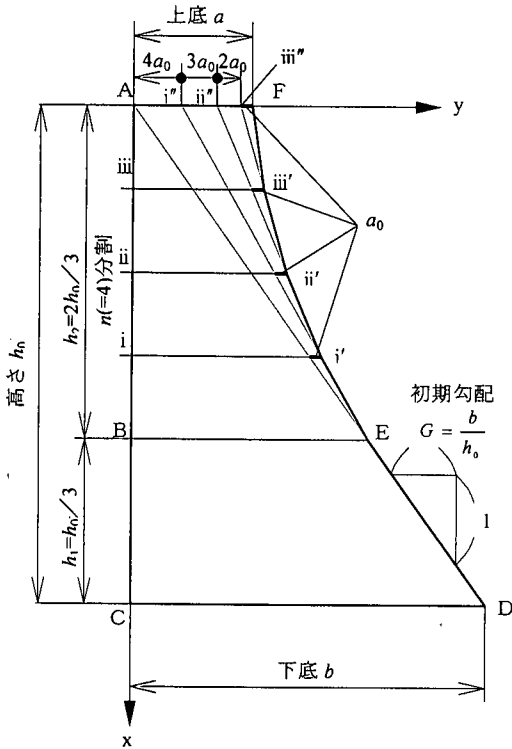


図-2 「後藤家文書」による隅角部石垣の勾配のつけ方

- 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 Ei' の延長線 Ei'' 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。

このような隅角部石垣の勾配のつけ方を「級数分割法」と名づけることにする。

ここで、上から $\frac{2}{3}h_0 (=h_2)$ 、すなわち AB 間の等分割部分を無限に分割すると考えた場合、図-2 のように座標軸をとると、勾配の変化する部分 EF は次式であらわすことができる。

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

なお、「後藤家文書」では、初期勾配を「^{のりかた}矩方」、上底を「^{のりかた}規合」、下底を「^{のりかた}惣矩」とよんでいる。また喜内¹²⁾によっても、「後藤家文書」の「唯子

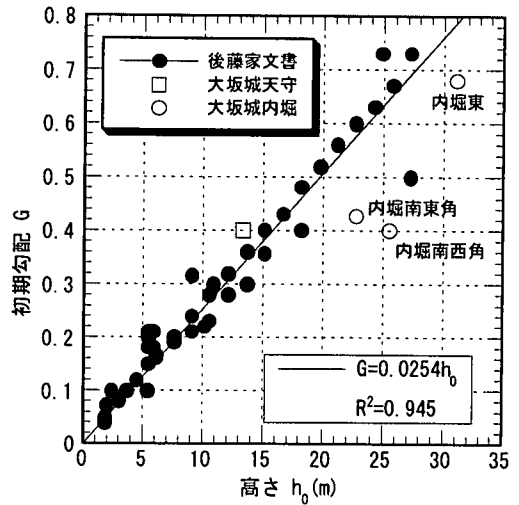


図-3 高さ^と初期勾配の関係

一人伝」より導いた勾配の式として、式 (3)、式 (4) が提示されている。しかし、この式は「後藤家文書」では示されていない、上底を等分割すると考えて導かれているため、「後藤家文書」の設計手法を正しく表しているとは考えられない。

$$y = x \left\{ \frac{a}{h_2} \log \left(\frac{x}{h_2} \right) + \left(\frac{b}{h_0} - \frac{a}{h_2} \right) \right\} \quad (3)$$

$$y = \frac{1}{2} \left\{ \frac{C}{(1+k)} x^{1+k} - \frac{1}{C(1-k)} x^{1-k} \right\} \quad (4)$$

ただし、 $C = \frac{b + \sqrt{h_0^2 + b^2}}{h_0^{1+k}}$ 、 $k = \frac{a}{b}$ 、 $0 < k < 1$

(2) 高さ、初期勾配、上底、下底の関係

「後藤家文書」で説明されている隅角部石垣の 46 個の設計例から、高さ、初期勾配、上底、下底の各値を抽出し、その関係を明らかにする。

高さ h_0 と初期勾配 G の関係は、図-3 のように直線で近似でき、また各々のデータについて初期勾配を高さで除した値の平均値は 0.0253(1/m)であった。よって、両者の関係を次式で表すこととする。

$$G = 0.025h_0 \quad (5)$$

次に、高さ h_0 と下底 b の関係を求める。下底は高さに初期勾配を乗ずることで求められ、次式のようにになる。

$$b = Gh_0 = 0.025h_0^2 \quad (6)$$

図-4 の高さ^と下底^{との}関係を直線で近似した値とも

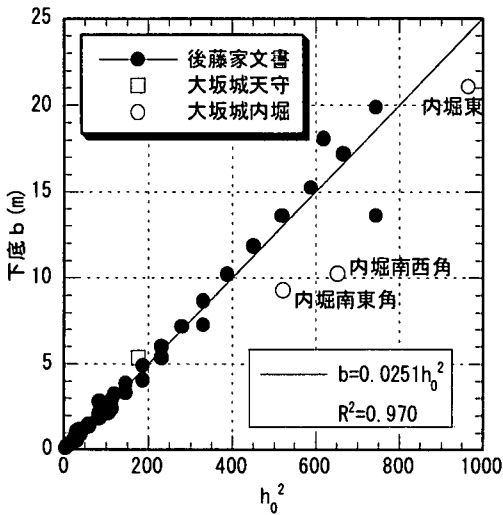


図-4 高さ と 下底 の関係

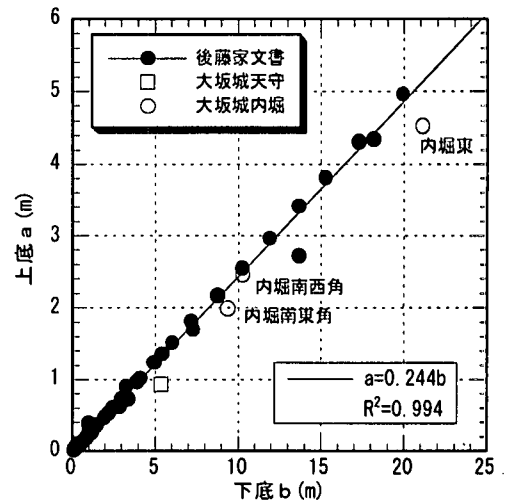


図-5 下底 と 上底 の関係

よく一致している。

下底 b と上底 a の関係は、図-5 の近似式および各々のデータについて上底を下底で除した値の平均値が 0.257 であることや、「後藤家文書」に「規合（上底）は惣矩（下底）を四つ割する」という記述も見られることから、 a と b の関係は次式で表すことにする。

$$a = \frac{1}{4}b \quad (7)$$

以上の関係から、石垣高さ 5, 10, 15, 20, 25, 30 m の石垣形状を求めると、図-6 のようになる。これは「後藤家文書」の設計例より導いた形態であり、必ずしも現存する石垣と一致するものではない。

なお、上部 $h_2 \left(= \frac{2}{3}h_0 \right)$ 部分の勾配の変化の計算は、高

さ 1m ごとに行った。

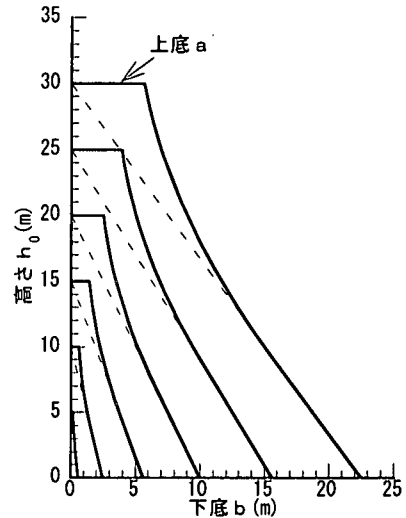


図-6 「後藤家文書」の設計例より導いた隅角部石垣の形状

4. 隅角部石垣設計手法の現存石垣への適用

現存する大坂城石垣と前述した級数分割法（「後藤家文書」による設計手法）を用いて算出した石垣形状を比較したものが図-7～10 である。図中に示した太線が、それぞれの写真から高さ・上底・下底の各長さを推定し、この長さを用いて 3. (1) で説明した級数分割法により計算した結果を表したものである。

なお、上部 $h_2 \left(= \frac{2}{3}h_0 \right)$ 部分の勾配の変化の

計算は高さ 1m ごとに行った。図-7, 9, 10 は石垣

構築には無関係と考えられる天端に設置された狭間のための石を除外して計算している。どの図においても写真と太線の隅角部石垣形状がよく一致していることから、大坂城石垣は「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構築されたと判断することができる。

ここで、現存する大坂城石垣形状とその各々の高さに応じて「後藤家文書」の設計例より導いた隅角部石垣形状とを比較したものを図-11 に示している。この図を見ると、大坂城石垣は天守台石垣のぞいて、いずれも「後藤家文書」の設計例より導い

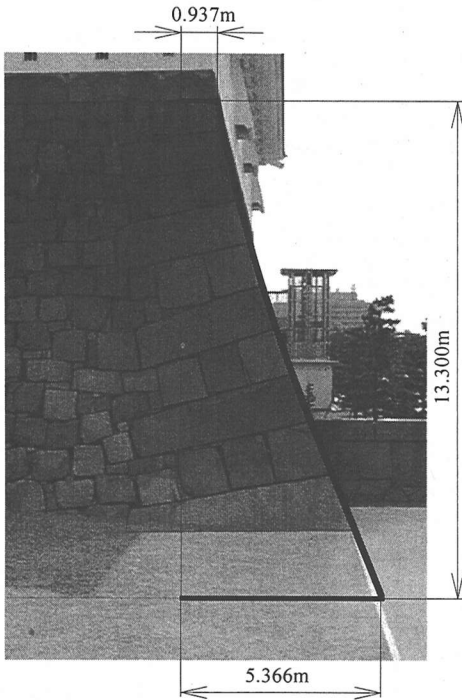


図-7 大坂城天守石垣北西角

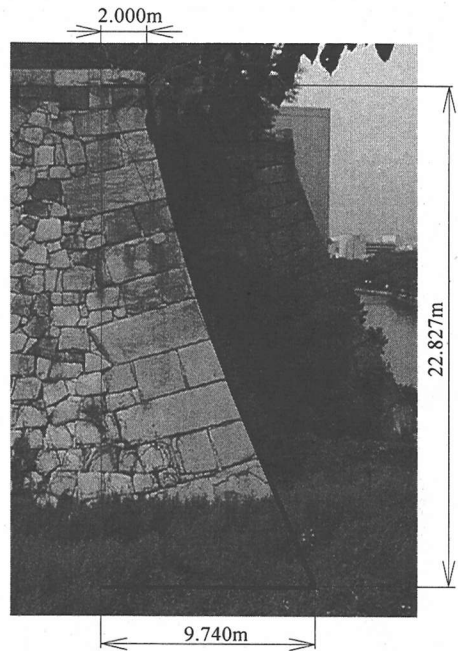


図-9 大坂城内堀石垣南東角



図-8 大坂城内堀石垣南西角

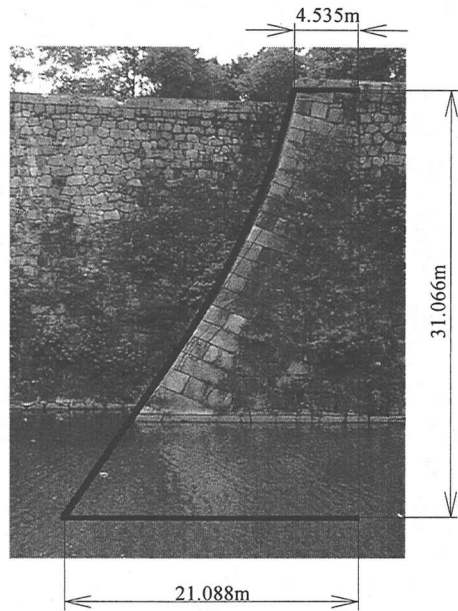


図-10 大坂城内堀石垣東

た形状よりも傾斜がきつくなっている。両者の高さに対する初期勾配の違いは図-3 に示すように、大

きな値となっている。これら石垣形状の違いの原因の一つには、図-12 に示しているように、大坂城に用いられている石垣石の大きさが格段に大きいことがあげられる。この図は「後藤家文書」に記述されている、石垣石の奥行長さである石垣石控ええさと石垣高さの関係を示したものに、現存する大坂城

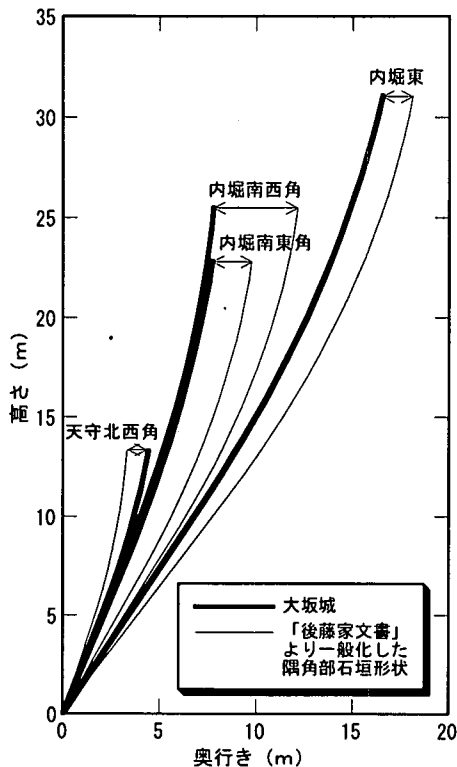


図-11 隅角部石垣形状の比較

石垣の値をプロットしたものである。なお、大坂城石垣の底面は地下に埋もれているため、地上部にて実測できる最下部の値を示している。このため、底面の石垣石控長さはもう少し大きな値となる。

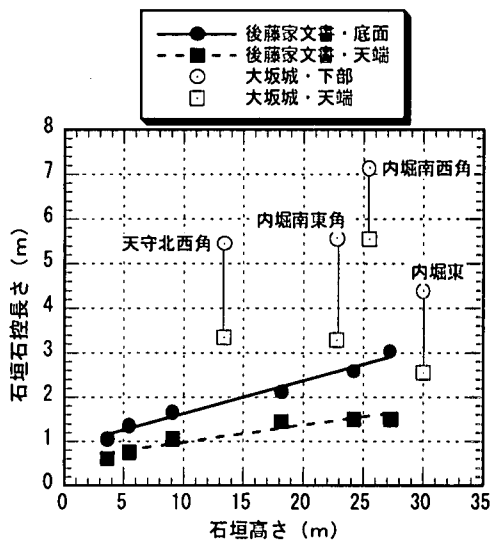


図-12 石垣石控長さの比較

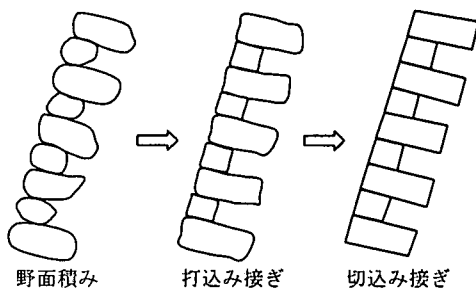


図-13 隅角部石垣石の変遷

5. 隅角部石垣形状の変遷と数値評価

日本において、城郭石垣の構築は16世紀後半から17世紀前半に最も盛んに行われ、この時期に石垣構築技術は急速に発達した。また、それとともに石垣形状も大きく変化した。それらは石垣石の加工状況や隅角部の石組法により各種の分類がなされている。

石垣石の分類は、「鈴録」に記述されている「野面積み」、「打込み接ぎ」、「切込み接ぎ」の3種類に分けられることが多い。これは、図-13に示すように、「野面積み」は形状がいびつな自然石または切り出した石をそのまま積み、「打込み接ぎ」は石の加工がやや進みその形状が大まかに加工されたものである。さらに、「切込み接ぎ」は石と石の接面が平面になるまで精加工されたも

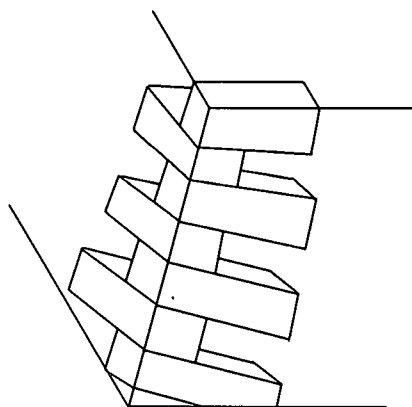


図-14 算木積み

のである。

また、石垣の隅角部においては、石垣全体を強

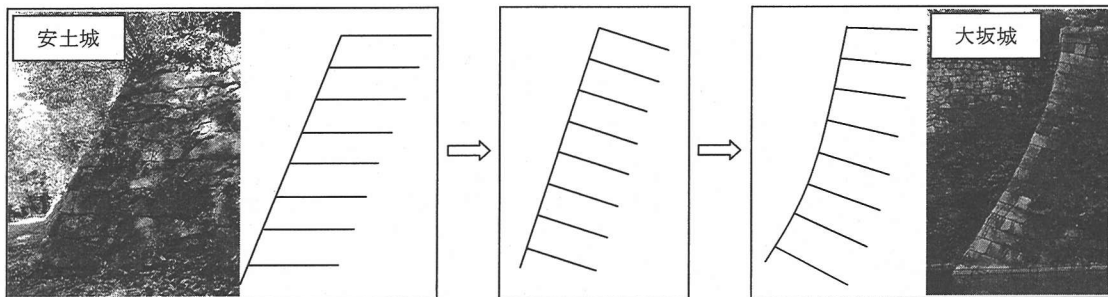


図-15 隅角部石垣形状の変遷

固な石垣構造にするために、図-14に示すように直方体の石材を用いて長短の面を交互に組み合わせる「算木積み」と呼ばれる石組みがみられ、構造上重要な役割を果たしている。石垣を安定させる上で、この石垣石の控長さを長く取ることが重要ではないかと考えられる。これらに加え、石垣の孕み出しなどを防ぎ安定させるためには、石垣石の荷重と土圧の合力を石垣石の接面に対して垂直に働かせる必要がある。このため、石垣石を水平より角度を持たせて積み上げることも重要ではないかと考えられる。また、石垣の構築年代が新しくなるにつれて、石垣の下部の勾配を緩くとり、上方になるにつれて反り返しを行って、隅角部を曲線状にする積み方がみられる。これらの石垣形状の変化を模式的に示すと図-15のようになる。

以上のように、従来から行われている石垣の分類は、見た目の判断でなされる場合が多く、そこには主観による曖昧さが残る。また、田中・新谷¹³⁾は、石垣の変遷に関して一般に調査方法・整理方法に工学的又は定量的な表示が少ないと指摘している。そこで、本研究では隅角部における石垣石の加工状況および石垣石の積み方を数量的に表現するため、野面積みなどの見た目の判断の替わりになる石垣石加工度 D 、算木積みの程度を知るための石垣石控比 S 、隅角部稜線に対して石垣石が垂直に積まれているかどうかを判断するための石垣石傾斜度 R の3つの指数を定義した。そして、10個の城郭石垣(大坂城、名古屋城¹⁴⁾、伊賀上野城¹⁵⁾、姫路城¹⁶⁾、熊本城小天守¹⁷⁾、彦根城¹⁸⁾、熊本城大天守、松代城¹⁹⁾、松本城²⁰⁾、安土城)について隅角部石垣を撮影した写真や各種文献の図面よりこれらの値を算出し、その時代的な変遷の傾向を調べた。

石垣石加工度は図-16に示すように、隅角部のすべての石垣石について、それぞれ表面積 a_i を控長

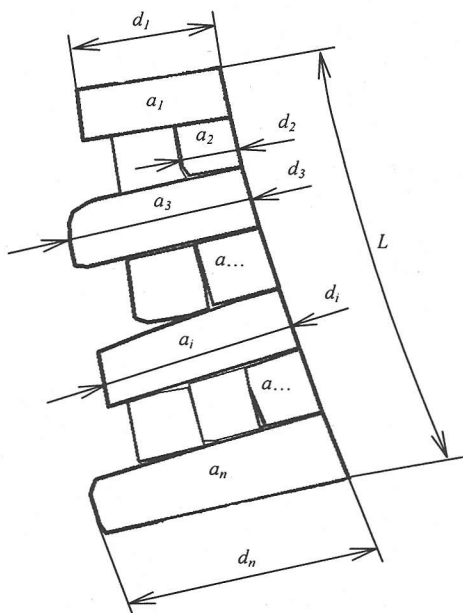


図-16 石垣石加工度と石垣石控比の説明図

さ d_i で除した値を合計し、さらにそれを稜線の長さ L で除した値であり次式で示される。

$$\text{石垣石加工度 } D = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{d_i}}{L} \quad (8)$$

この値は、 a_i を d_i で割ることで個々の石垣石の実質高さが算出され、さらにその合計を L で除しているため、石垣石が精加工され長方形であれば $D = 1$ となり、石垣石が自然石に近く石と石の間に空隙が多いほど、小さい値をとることになる。

石垣石控比は図-16に示すように、上下隣りあった石垣石において、控長さが長い方の石垣石が短い方の石垣石に対する比を隅角部全体について算出し平均した値で、次式で示される。

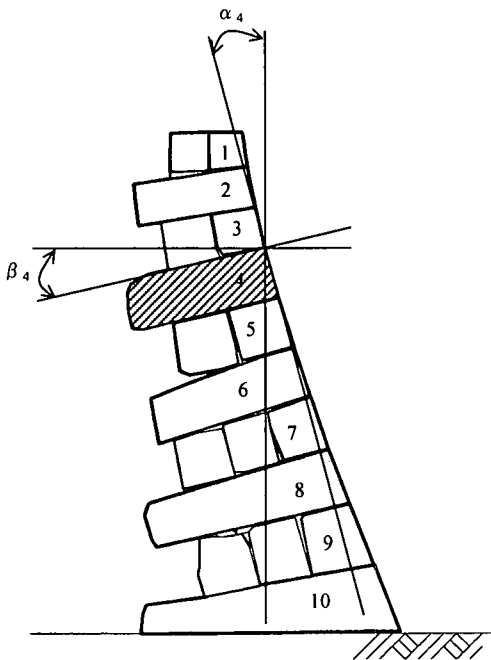


図-17 石垣石傾斜度の説明図

$$\text{石垣石控比 } S = \frac{d_1 + d_3 + \dots + d_n}{d_2 + d_2 + \dots + d_{n-1}} \quad (9)$$

石垣石傾斜度は、図-17 に示しているように隅角部すべての石垣石について、それぞれ上辺の接触面が水平軸に対してなす角 β を稜線側の面が鉛直軸に対してなす角 α で除した値を平均したもので、次式で示される。

$$\text{石垣石傾斜度 } R = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i}{n \alpha_i} \quad (10)$$

この値は隅角部稜線に対して石垣石が垂直に配置されていれば $R = 1$ となり、石垣石が水平に配置されるほど 0 に近い値となる。

図-18～20 はそれぞれ 10 個の城郭石垣について、上記の 3 つの指数を構築年との関係で示したものである。

図-18 をみると、わずか 40 年ほどの間に石垣石の加工技術が急速に発達したことがわかる。また、石垣石加工度 D 、石垣石控比 S 、石垣石傾斜度 R の 3 つの指数は、いずれも構築年と正の相関関係がみられる。よって、図-19 からは石垣石の控えを長くとした算木積みを行うことが、また図-20 からは石垣石を水平より角度をもたせて隅角部稜線に対して垂直になるように配置することの設計上の

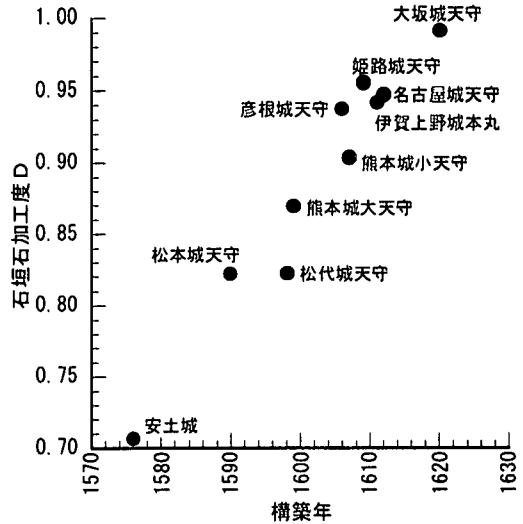


図-18 石垣石加工度と構築年の関係

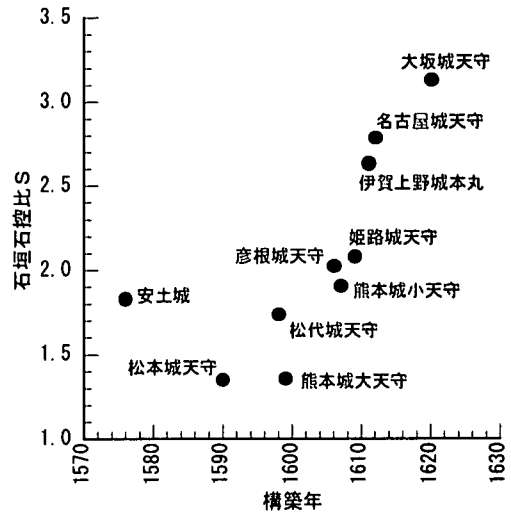


図-19 石垣石控比と構築年の関係

意図が時代とともに高くなっていることがわかる。

6. まとめ

「後藤家文書」に示されている設計手法を明らかにし、この方法を「級数分割法」と名づけ、さらに勾配の変化する部分を数式化した。このことにより現存する城郭石垣のうち級数分割法を用いて設計・構築されているものはどれなのかを判別することができる。さらには、石垣の初期状態の推定に勾配の式を用いることで、現在多くの城郭石垣で問題

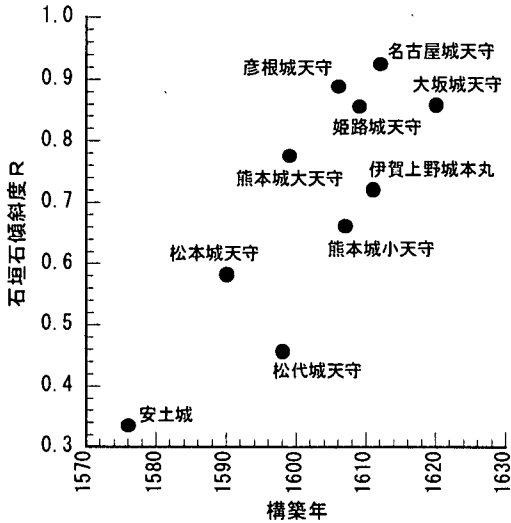


図-20 石垣石傾斜度と構築年の関係

となっている、孕み出しの大きさを算出することができ、この値から石垣孕み出し指数²¹⁾を求めることで、崩壊の危険性を判断することができる。石垣孕み出し指数とは最大孕み出し量(単位を cm で表す)を孕み出しの生じている区域の石垣高さ(石垣孕み出し高さとして、単位を m で表す)で除した値と定義されており、この石垣孕み出し指数が 6 程度以上になれば、崩壊の危険性が高いとされている。

「後藤家文書」の 46 個の設計例から各種データの関係を明らかにし、一般化した隅角部石垣形状を示した。これは、後藤家による一種の理想的な形態である。

大坂城石垣は級数分割法の考え方に基づいて構築されており、石垣に使用されている石材の大きさは「後藤家文書」に記述されているものに比べ格段に大きく、そのことが高さ 32m にも及ぶ大規模かつ急傾斜の石垣を可能にした。

石垣形状の遺存技術情報を的確に把握するため、石垣石加工度 D 、石垣石控比 S 、石垣石傾斜度 R の 3 つの指数を定義し、これを用いることで 1600 年前後の石垣形状の変遷を定量的に明らかにした。これら諸数値を算出することにより、従来は石垣の分類を見た目の判断で野面積み・打込み接ぎ・切込み接ぎなどとしていたものを、数値で判断することができるようになり、また算木積みに対する意図や本研究において初めて明らかになった隅角部稜線に対して石垣石を垂直に積むことの意図についても数値で判断することが可能となる。

謝辞：本研究は、平成七・八年度文部省科学研究で組織した「建設文化としての大坂城石垣築造に関する総合研究会(会長:大坂産業大学学長 天野光三, 副会長:関西大学教授 西田一彦, 大阪城天守閣館長 渡辺武)」における研究の延長上の成果であることを記して、研究会会員の方々に謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 横山祐之:『人類の起源を探る』, 朝日選書, p.37, 1987.
- 2) 横山祐之:『人類の起源を探る』, 朝日選書, pp.188-189, 1987.
- 3) 西田一彦, 佐々木良作, 中村博司, 玉野富雄, 溝口昭二, 小野諭:大坂城郭石垣築造に関する現地調査の結果と考察, 土木史研究, 第 17 号, 土木学会, pp.369-376, 1997.
- 4) 天野光三, 西田一彦, 久保勝保, 玉野富雄, 矢野順子, 西田美津子:徳川期大坂城石垣の力学的考察, 土木史研究, 第 17 号, 土木学会, pp.377-388, 1997.
- 5) 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.
- 6) 北垣聰一郎:史料紹介「石垣築様目録」, 大阪城天守閣紀要, 第 13 号, 大阪城天守閣, pp.26-34, 1985.
- 7) 北垣聰一郎:史料紹介「石垣築様目録」, 大阪城天守閣紀要, 第 14 号, 大阪城天守閣, pp.27-34, 1986.
- 8) 李建河, 内藤昌, 仙田満:「石垣築様目録」における石垣構築設計体系に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 459 号, pp.129-135, 1994.
- 9) 天野光三, 西田一彦, 久保勝保, 玉野富雄, 矢野順子, 西田美津子:徳川期大坂城石垣の力学的考察, 土木史研究, 第 17 号, 土木学会, pp.377-388, 1997.
- 10) 喜内敏 監修・解説:『金沢城郭史料-加賀藩六生方後藤家文書』, 日本海文化叢書, 第 3 巻, 石川県図書館協会, 1976.
- 11) 北垣聰一郎:『石垣普請』, 法政大学出版局, pp.117-129, 1987.
- 12) 喜内敏:我が国の築城技術に用いられた石積工法, 基礎工, vol.14, No.7, pp.47-54, 1988.
- 13) 田中邦照, 新谷洋二:日本の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.
- 14) 平井聖監修:『城』, 第 4 巻, 毎日新聞社, p.98, 1996.
- 15) 平井聖監修:『城』, 第 4 巻, 毎日新聞社, pp.72-73, 1996.
- 16) 兵庫県立歴史博物館編:『特別展「城郭のデザイン」図録』, p.34, 1994.
- 17) 平井聖監修:『城』, 第 8 巻, 毎日新聞社, pp.10-11, 1996.
- 18) 井上宗和, 江崎俊平, 藤岡道夫:『図説日本城郭史』, 新

人往来社, p.198, 1984.

19) 平井聖監修:『城』, 第3巻, 毎日新聞社, p.39, 1997.

20) 平井聖監修:『城』, 第3巻, 毎日新聞社, pp.8-9, 1997.

21) 西田一彦, 玉野富雄, 西田美津子, 鈴木功二:城郭
石垣の力学的安定性に関する考察, 第33回地盤工学
研究発表会, 地盤工学会, pp.271-272, 1998.

(1999. 11. 15 受付)

SHAPE OF JAPANESE CASTLE'S MASONRY WALL AT CORNER AND ITS NUMERICAL EVALUATION

Hiroyuki MORIMOTO, Kazuhiko NISHIDA, Tatuaki NISHIGATA
and Tomio TAMANO

The purpose of this study is to investigate minutely development processes of construction technology in masonry wall. This study is carried out for understanding the shape of masonry wall correctly and technical factor on stability of constructions. Three index numbers are defined for investigating the process of development masonry wall stone at corner in numerical method. The index numbers D , S , and R are defined for "masonry wall stone process degree", "masonry wall stone depth ratio", and "masonry wall stone slope degree", respectively. As result, the objective numerical judgment with the index numbers is practicable for transition of masonry wall shape.