

城郭石垣の反り曲線勾配部分への2次曲線の適用に関する考察*¹

A Study about an Application of a Second Curve to an Incline of Castle Masonry Wall

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：我が国の文化遺産の一つである城郭石垣は構築から400年前後経過しており、変状や崩壊の危険にさらされている箇所が少ないため、修復あるいは修復を検討されている箇所が多数存在している。これら修復のためには、日本の城郭石垣の特徴である反り曲線勾配を把握し、構築当時の形状を決定する必要がある。そこで、「後藤家文書」より導き出した2次曲線を用いて現状の石垣に適用することを試みた。

1. はじめに

わが国に現存する城郭石垣は、石垣石相互間に接着剤を用いない空積みであり、また反り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。また城郭石垣は、個々の石垣石の大きさや加工の状態、基本勾配や反りの量などの違いにより様々な断面形状を形成しており、同じ形状のものは存在しない。そしてわが国における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。さらに日本の城郭石垣を特徴づける反りは、石垣構造の安定に大きな影響を与えており、このような構造形態は将来も十分に利用価値のあるものと考えられる。筆者らは、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、石垣構築技術に関しての記述がある「後藤家文書」、「石垣秘伝之書」および「石塙書」の3つの設計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、実存する城郭石垣の断面形状をノンプリズムレーザー測距儀³⁾を用いて実測することで、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を検討し、構築技術の推移を把握することを試みてきた⁴⁾。また、城郭石垣の断面形状が「後藤家文書」に記述されている、一

般に「唯子一人伝」と呼ばれている石垣の設計手法^{3),5)}によって構築されたものと想定しても、これまでの多くの石垣の調査例から精度上問題はないと既に筆者らの研究²⁾により判明している。

本研究においては、城郭石垣の修復に必要な構築当時の形状を決定するため、「後藤家文書」の設計手法を明確に述べるとともに現状石垣への適用について詳細に記述し、「後藤家文書」より導き出した反り曲線勾配部分を表現する2次曲線を用いて、現状の石垣に適用することを試みた。

また、「後藤家文書」は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に関する約200点にのぼる古文書・古記録であり、その中には石垣の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いる。なかでも「唯子一人伝」(1824)は「新積地形准繩極秘抄」(1615)をはじめとして、後藤家に伝わる石垣構築に関する文書を設計手法について具体的に整理・整備し集大成したものであり、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。

2. 「後藤家文書」の設計手法

「後藤家文書」による城郭石垣の勾配のつけ方は、図-1～5のように以下のような手順で定められていると考えられる。

- 1) 高さ h (AC) に応じて、下底 b (CD) と上底 a (AF) を定める。(図-1)
- 2) 下から $h/3$ ($=h_1$) の部分は、基本勾配 G で直線 DE を引く。(図-2)
- 3) 上から $2h/3$ ($=h_2$) の部分、すなわち AB 間は高さに応じて n 個に分割する。分割点に下から上へ①, ②, ③, ④と記号をつける(「後藤家文書」では高さに応じて1～5尺(0.303～1.515m)で分割し

*1 keywords : 石垣, 勾配, 曲線

*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 関西大学名誉教授, 関西地盤環境研究センター

*5 正会員 工博 大阪産業大学工学部都市創造工学科

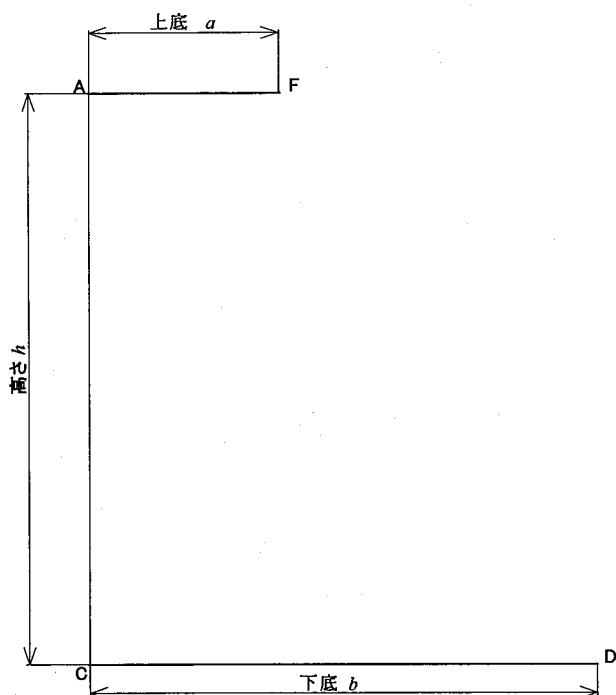


図-1 「後藤家文書」による設計手法 (1)

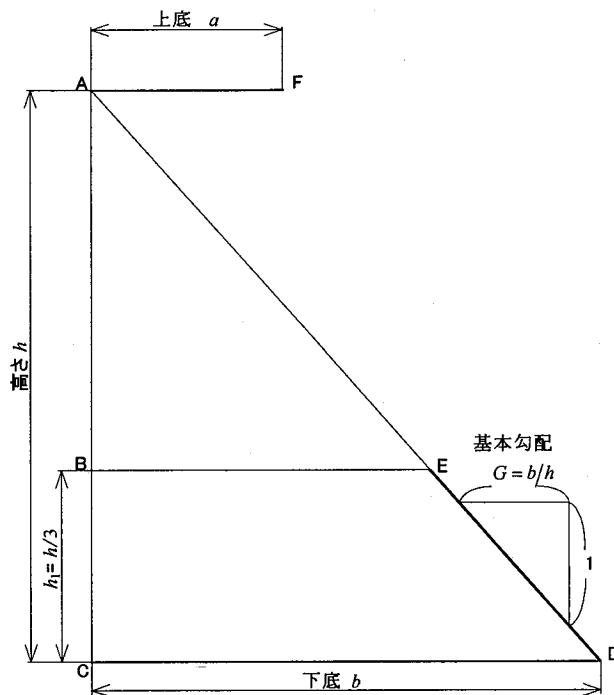


図-2 「後藤家文書」による設計手法 (2)

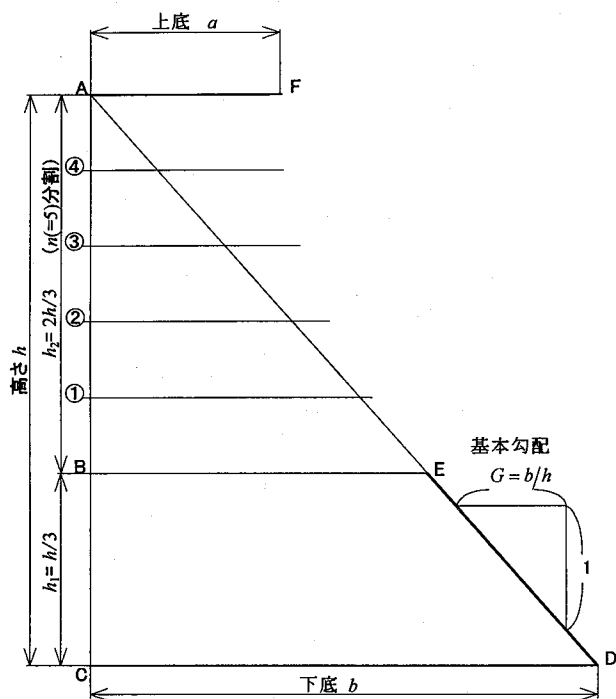


図-3 「後藤家文書」による設計手法 (3)

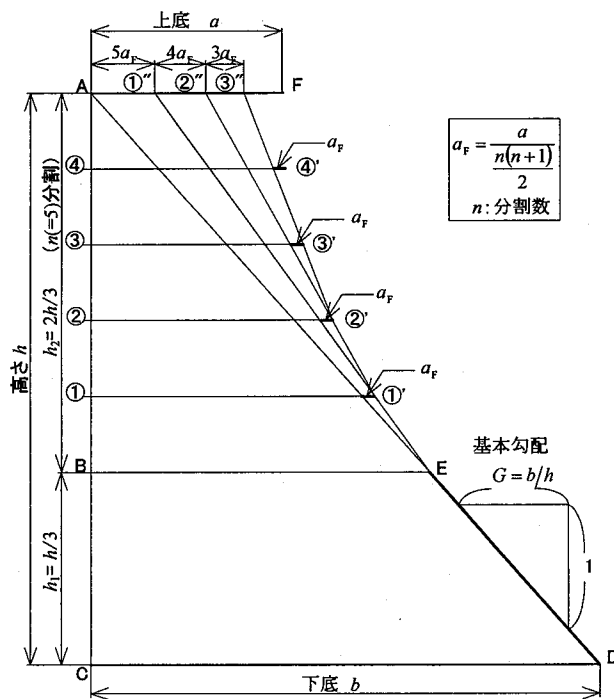


図-4 「後藤家文書」による設計手法 (4)

ている。なお、図では5分割している。). (図-3)

- 4) 上底 a を $1 \sim n$ までの自然数の和で除した値 a_F を次式のように算出する。(図-4)

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

- 5) 点①の水平線と DE の延長線 DA との交点より a_F だけ石垣前面に張り出した点を①'とする。(図-4)
6) 点②の水平線と E①'の延長線 E①' との交点より

a_F だけ石垣前面に張り出した点を②'とする。

(図-4)

- 7) 点③の水平線と①'②'の延長線①'②' との交点より a_F だけ石垣前面に張り出した点を③'とする。
(図-4)

- 8) 点④の水平線と②'③'の延長線②'③' との交点より a_F だけ石垣前面に張り出した点を④'とする。
(図-4)

- 9) 点 E, ①', ②', ③', ④', F を結ぶことで, EF

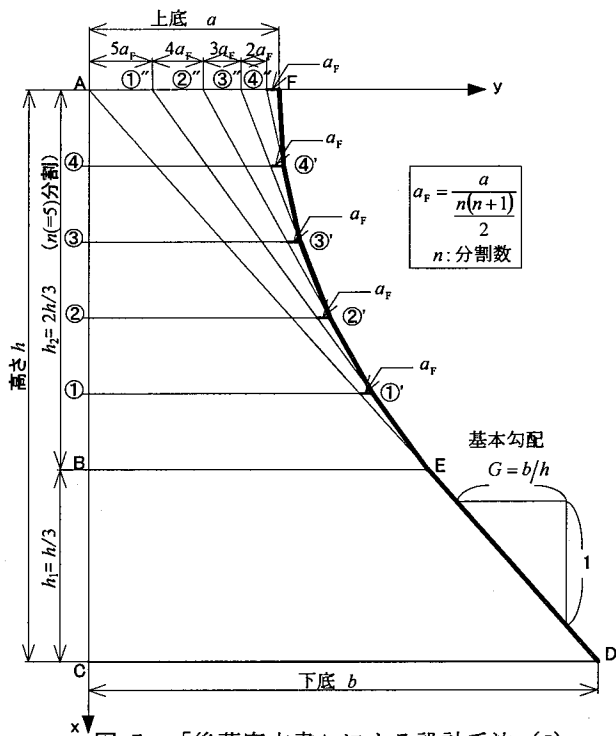


図-5 「後藤家文書」による設計手法 (5)

間の石垣の形状を決定する。(図-5)

また、直線 AF と③'④'の延長線③'④'との交点より a_F だけ石垣前面に張り出した点は点 F と一致する。

ここで、「後藤家文書」の中に多数ある設計例の原文の一部を以下に紹介する⁶⁾。

「本高サ水ヨリ九丈尺に五寸矩ノ四丈五尺惣矩也。内九尺規合高サ九丈内三丈ハ五寸矩ニ而積上る。三丈一尺目より規合付る。右六丈ヲ五尺間ニすれば十二返シニなる。此割付様左之通。一二三四五六七八九十十一十二与置立れば七八と成。是ヲ左ニ置規合九尺をわれば五尺間二一寸一分五厘与成。」

これは次のような意味となる。

「高さが9丈の場合、尺に5寸の勾配ならば、惣矩(下底)は4丈5尺となる。規合(上底)は9尺で、下から3丈の高さまでは尺に5寸の勾配で積み上げる。3丈の高さより上に勾配の変化をつける。高さの残りの6丈を5尺で分ければ12となる。この割付の仕方は次の通りである。1 から 12 までの自然数の和は78。この78で規合(上底)の9尺を割れば1寸1分5厘となる。」

ここで、図-5 との対応を示すと $a = 9$ 尺、 $b = 4$ 丈5尺、 $n=12$ 、 $a_F = 1$ 寸1分5厘となる。

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_F だけ前面に張り出すことで、反りを設けていることがわかる。

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基本勾配 G の延長線と、ある一定高さ

の交った点から a_F 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、ある一定高さの交った点から a_F 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。

また、図-5 に示しているように、点 A を原点とする座標軸を設定し、AB 間を無限に分割すると考えた場合、勾配の変化する部分 EF 間は次式の2次曲線であらわすことができる⁷⁾。

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

3. 現存する石垣への「後藤家文書」の設計手法の適用

名古屋城天守東側石垣へ「後藤家文書」の設計手法の適用を試みた。

計測した結果を図-6(a)に示しており、この石垣形状に対する「後藤家文書」の設計手法の適用手順を以下に示す。

- 1) 高さが 20.773m なので、高さ h の 2/3 は 13.849m となり、勾配の変化を 1m ごとにつけるとすると上端から 13m までが勾配変化領域となり、その分割数は 13 となる。よって、勾配一定領域は下端から 7.773m となる。(図-6(a))
- 2) 勾配一定領域を直線で結び、その延長線 (①) と石垣上端の水平線 (②) との交点 A と石垣前面 F までの距離が石垣の上底 a となる。ここでは、 $a=4.500$ m と読み取ることができる。また、点 A からおろした垂線 (③) と石垣下端の水平線 (④) との交点 C と石垣前面 D までの距離が石垣の下底 b となる。ここでは、 $b=12.600$ m である。よって、基本勾配 G および a_F は次式で算出される。(図-6(b))

$$G = \frac{12.600}{20.773} = 0.607 \quad (3)$$

$$a_F = \frac{4.500}{\frac{13 \times (13+1)}{2}} = 0.04945 \text{m} \quad (4)$$

- 3) 勾配変化領域は 1m ごとにその前の勾配より $a_F=0.04945$ m 前面に張り出していくことで、勾配を決定することができる。

このように、名古屋城天守東側石垣の場合、現存する石垣とよく一致していることが図-6(c)からわかる。

次に、現存の石垣と 2 次曲線を比較したものを図-7 に示している。この場合、勾配変化領域は高さ h の 2/3、すなわち 13.849m となり、この領域において 2 次曲線とみごとに一致していることがわかる。ここで、2 次曲線は次式であらわされる。

$$y = 4.500 \left(1 - \frac{x}{13.849} \right)^2 + \frac{12.600}{20.773} x \quad (5)$$

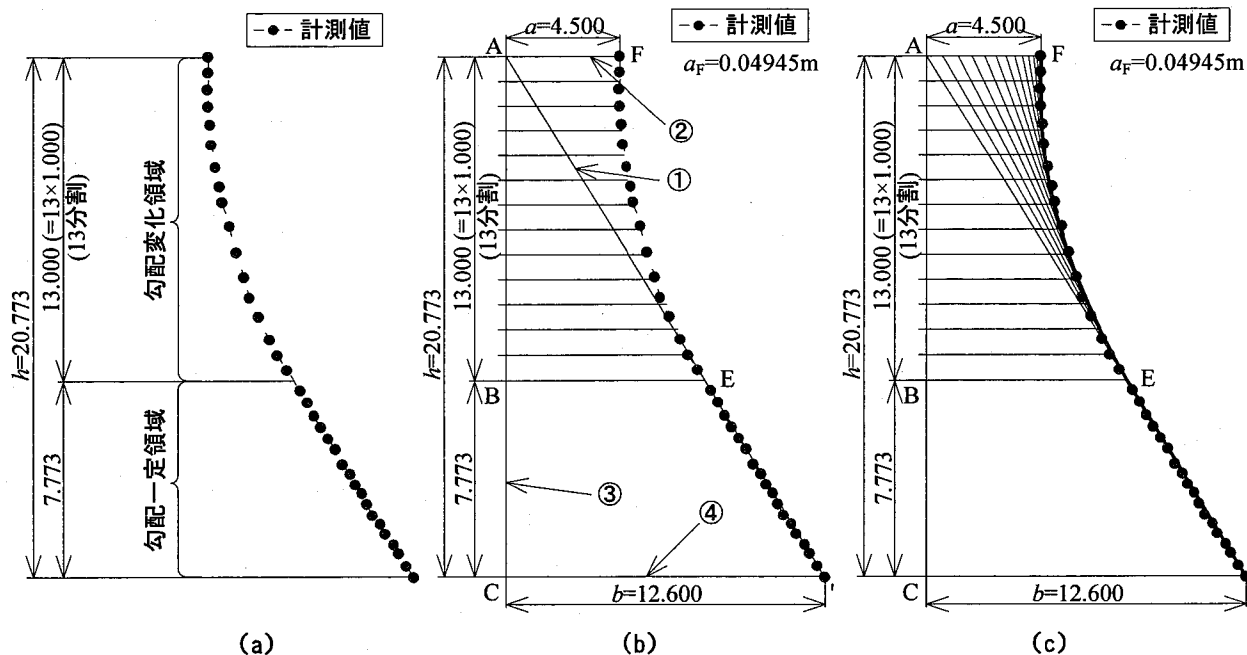


図-6 名古屋城天守東側石垣と「後藤家文書」の設計手法

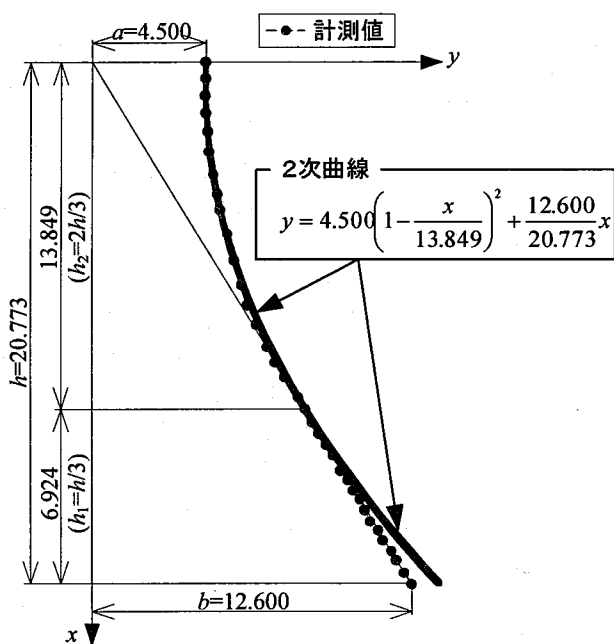


図-7 名古屋城天守東側石垣と2次曲線

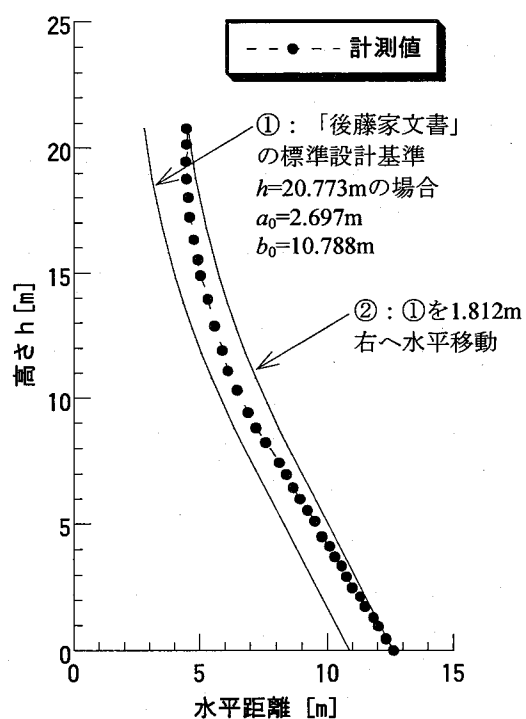


図-8 名古屋城天守東側石垣と「後藤家文書」の標準設計基準

4. 「後藤家文書」による標準設計例との比較

「後藤家文書」による設計手法によれば、式(2)から明らかなように、高さ h が定まれば上底 a および下底 b を任意に与えることで、様々な勾配の変化を得ることができる。例えば、下底 b を一定にした場合、上底 a を 0 に近づけると図-5 における EF 間、すなわち勾配変化領域は直線に近づき、上底 a を大きくすると勾配変化領域は大きく反りが入ることになる。このように、上底 a および下底 b を任意に与えることで城郭石垣は様々な形状となるが、「後藤家文書」では隅角部石垣について 46 個

の設計例が示されており、これらの高さ、基本勾配、上底、下底の関係から導いた「後藤家文書」の標準設計基準は次式のようにになっている¹⁾。

$$G_0 = 0.025h \quad (6)$$

$$b_0 = G_0 h = 0.025h^2 \quad (7)$$

$$a_0 = \frac{1}{4}b_0 \quad (8)$$

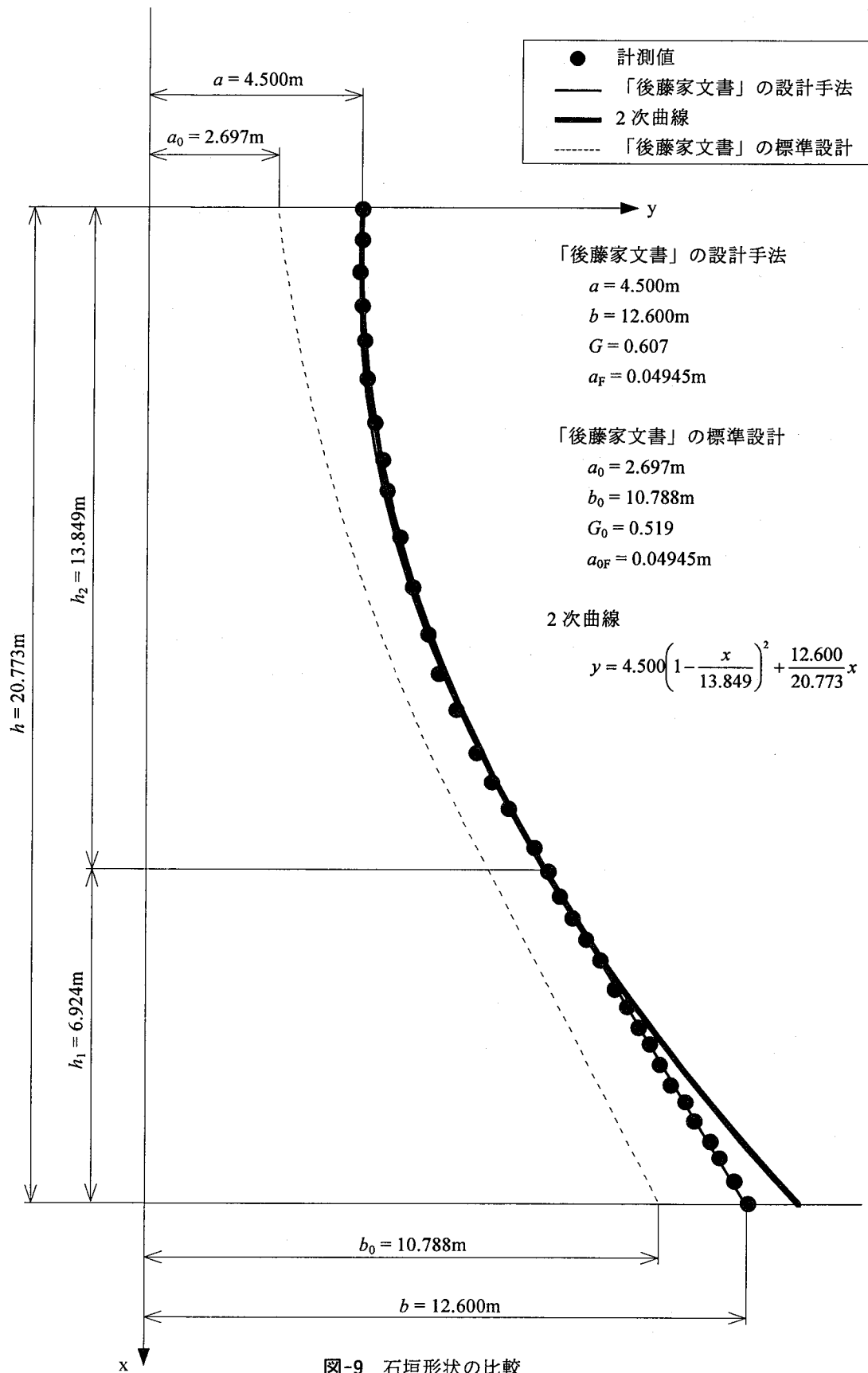


図-9 石垣形状の比較

名古屋城天守東側と同じ高さ $h=20.773\text{m}$ の場合、それぞれの値は次のようになる。

$$G_0 = 0.025 \times 20.773 = 0.519 \quad (9)$$

$$b_0 = 0.025 \times 20.773^2 = 10.788\text{m} \quad (10)$$

$$a_0 = \frac{1}{4} \times 10.788 = 2.697\text{m} \quad (11)$$

図-6(c)のように勾配変化領域を 1m ごとの 13 分割と
考えて計測値とともに図示したものが図-8 の①である。
この図からわかるように、名古屋城天守東側石垣は基準
に比べ基本勾配がゆるく反りが大きく入れられているこ
とがわかる。ここで基準の形状を右へ 1.812m ($=b-b_0$)
水平移動して計測値の下端と一致させると②のようにな
る。この図から明らかなように両者は形状が異なるにも
かかわらず、下端部と上端部が一致していることがわか
る。これは、名古屋城天守付近の地盤の強度 (N 値) に
対応させて安定化を図るとともに、天守閣の土地を確保
するため、勾配をゆるくし、反りを大きく入れたのでは
ないかと考えられる。

図-9 には、名古屋城天守東側石垣に適用した 3 種の
形状を合わせて図示している。この図からも明らかなよ
うに、勾配の変化する領域においては、式(2)で示した 2
次曲線を利用することで、石垣形状を表現することが可
能であることがわかる。これは、現状の城郭石垣の計測
値より導き出された高さ h と上底 a 、下底 b を式(2)に適
用することで曲線近似するものである。

謝辞：本研究において、現地測量および測量データの提
供にご協力いただいた名古屋城管理事務所および関係各
位に謝意を表す次第である。また、北垣聰一郎氏には懇

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) 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: 城郭石垣形状の計測と変状の評価に関する考察, 土木史研究, 第 22 号, 土木学会, pp.103-110, 2002.
- 4) 森本浩行, 西形達明, 西田一彦, 玉野富雄: 城郭石垣の断面形状と石垣構築技術の変遷に関する考察, 土木学会論文集, No.806/Ⅲ-73, pp.45-54, 2005.
- 5) 北垣聰一郎: 『石垣普請』, 法政大学出版局, pp.117-129, 1987.
- 6) 喜内敏 監修・解説: 『金沢城郭史料—加賀藩穴生方後藤家文書』, 日本海文学叢書, 第 3 巻, 石川県図書館協会, p.433, 1976.
- 7) 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, pp.301-310, 1999.