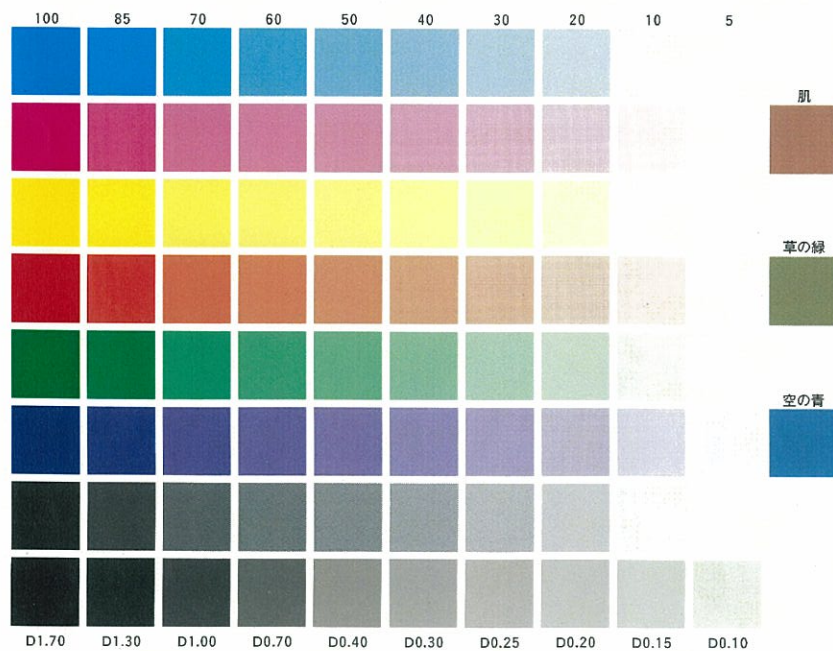


We conduct many of these
We conduct many of these
We conduct many of these



We conduct many of these
We conduct many of these
We conduct many of these



我が国における城郭石垣の形状および構造の 歴史的変遷に関する土木史的研究

2005（平成17）年3月

森本 浩行

論文内容の要旨

「世界の文化遺産および自然遺産の保護に関する条約（世界遺産条約）」が1972年の第17回ユネスコ総会で採択されて以来、それまで対立するものと考えられてきた「自然」と「文化」を、人類全体の普遍的な価値を有するかけがえのないものとして損傷や破壊などの脅威から保護し、次世代に残していくために関係機関が協力して調査し保全および保存することの大切さが認識されるようになった。我が国においては環境や景観を通じた心の豊かさ、およびこれらを含めた快適な住環境への要求や、その地域の歴史や文化を踏まえた環境の整備と遺産の保全と活用の重要性が高まるとともに、文化遺産の概念や価値の認識の拡大と深化にともなって、文化遺産を整備あるいは保存する事の大切さが認識されるようになった。このような社会状況のもと、国土交通省は平成15年7月に「美しい国づくり政策大綱」を発表しており、これを契機に、美しい国づくり・地域づくりについて、国民一人一人の広範な議論、具体的取り組みへの参画が促進されることを期待されているところである。また文化庁においても重要文化財の指定基準の改正や登録有形文化財制度の導入などを行うことで、歴史的土木建造物の保護が積極的に進められている。このように文化遺産を適正に保存し、活用することは今や国民的課題の一つであり、歴史的土木建造物の重要性を認識するとともに、従来から行われている歴史的、考古学的調査研究に加え、その建造物の実態の把握と修復・保存法に対する科学的、工学的な面からの研究が重要となっている。

我が国においては、歴史的土木建造物としての文化遺産の一つとして城郭石垣が挙げられる。城郭石垣は空積みで反り曲線勾配を有しているなど世界に類を見ない独自の構造をもち、建設文化として価値の高い歴史的遺産である。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が、構築後400年前後経過していること、また明治以降においてはあまり重要視されなかったため、老朽化が進行し孕み出しや崩壊の危険性にさらされている箇所が少なくない。さらに、城郭石垣の修復に際しても、石垣構築当時の設計図面が存在していることは極めて稀であるため、構築当初の形状に復元することが困難を極める状況にある。

そこで、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建造物の設計思想にも寄与することになる。よって本論文では、世界に類を見ない独自の構造を持つ我が国の城郭石垣の形状および構造の歴史の変遷を土木史的に明らかにするとともに、その安定性に影響を及ぼす各種要因の検討を行った。その内容は以下のように7章から構成されている。

第1章では、我が国の城郭石垣の重要性と崩壊の危険性にさらされている状況を示すとともに、土木史的観点から城郭石垣の形状および構造の歴史の変遷を明らかにすることの重要性を指摘している。

第2章では、石垣形状や構造に残されている技術的要素である遺存技術情報を的確に把握し、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、石垣形状の数値評価法を提案している。これは、石垣石の加工状況を判断する石垣石加工度 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つの指数である。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が、これらの数値でより正確に判定できるようになる。また算木積みに対する意図や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評価する事が可能となることを示している。さらに、この数値評価法を用いて、1984年に行われた大阪城大手前配水池改良工事に伴う発掘調査で発見された大坂城地下石垣を検討した結果、豊臣期大坂城石垣であると推定できたことから、構築年が未知である城郭石垣について、 D 、 S 、 R の諸数値を用いて評価すれば、ある程度の幅で構築年代を推定する事が可能であることを明らかにしている。

第3章では、城郭石垣の修復・保存のために現存の石垣形状を計測し把握するとともに、構築当初の形状の推定を行っている。

城郭石垣の形状を測定する方法として、ノンプリズムレーザー測距儀を用いて行うことを提案している。これは目標となる地点に反射板の設置が不要であり、石垣を傷つけることなく安全かつ簡便に計測できるものであり、検討の結果、十分な測定精度を有していることが確認でき、石垣断面を計測するうえで最も適したものであることを明らかにしている。

構築当時の石垣構築技術については「後藤家文書」、「石垣秘伝之書」および「石垣書」の3種類の文献があり、それらの構築手法を明らかにすることで構築当時の形状の推定を行っている。さらに、3種類の構築手法による反り曲線勾配部分についての数式化を試みている。これら3種類の構築手法による石垣の形状を比較検討した結果、反り曲線勾配が大きく変化するものについては多少の違いが認められるが、反りの変化が少なく直線に近い形状のものについては明瞭な差異が表れないことを明らかにしている。次に、現存する石垣の形状と3種の構築手法による石垣形状との比較により、石垣の構築当時からの変形量が推定でき、現在多くの城郭石垣で問題となっている孕み出しの大きさを算出する事が可能であることを示している。さらに、孕み出しなどの石垣の変形量に対する検討には「後藤家文書」の構築手法による形状を基準とすれば、実質的な対処が可能であることを指摘している。これらの数式表示は、石垣の崩壊の危険性や修復の必要

性の判断、および石垣遺構の保存あるいは修復に向けての活用ができることを示している。そして、現状の石垣の形状と3種の構築手法による石垣形状を比較した結果、石垣の孕み出しは中央部だけでなく、地盤に接している下部においても現れることを明らかにした。

第4章では、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の変遷を検討し、構築技術の推移を把握することを試みている。検討するための基礎資料として、構築年代の異なる石垣が存在する甲府城、岸和田城、姫路城、和歌山城と名古屋城、安土城、伊賀上野城、大坂城、丸亀城の計9ヶ所の城郭石垣の断面形状の実測データを用いている。これら現状の石垣断面形状と「後藤家文書」の設計手法による形状とを比較検討することにより、石垣構築技術の変遷を検討している。また、城郭石垣の断面形状をより正確に把握するために、実測データより高さ h および初期勾配 G 、上底 a 、下底 b を導き、さらには凹み量 d を算出している。この結果、石垣高さは石垣石が精加工されるほど高く構築することが可能となることを明らかにした。また石垣石の加工度が低く、いびつな形状である石垣石を積み上げた野面積みにおいては、構造物の重要度に応じて初期勾配を緩くとり、反りを大きく入れることで安定を図っていると指摘している。

城郭石垣を安定させる要因には初期勾配を緩くとり、反りを大きく設けることが挙げられ、これらは石垣の安定に重要な役割を果たしていると考えられることを指摘するとともに、石垣石が精加工され、より安定した構造体となると、初期勾配は急に、反りは小さくすることが可能となることを示している。反りを設けることは設計施工上において高い技術を要すると仮定すると、後の時代のものほど石垣石の加工の技術は高くなったが、構築技術そのものは低下していったと考えられる。また、「後藤家文書」に示された設計例は1800年代に入ってからそれまでの後藤家に伝わる設計技術を集大成したものであって、それに至るまでの変遷は読み取ることができない。しかし今回の研究によって、城郭石垣の石積み技術は早くから高度なものであったことが推測でき、それに時代とともに高さを高くするための工夫が加えられてきたことを示している。

第5章では、石垣の安定性に影響を及ぼす要因を把握することを試みている。石垣背面盛土は一般に強度の変化が少ないことから、石垣の安定性を決定づける重要な要因の一つとして基礎地盤の強度特性が挙げられる。そこで、基礎地盤の N 値と石垣の形状を決定づける要素である初期勾配 G 、凹み量 d との関係、および構築以降の変形状況と N 値との関係を把握することで安定性に及ぼす要因の検討を行っている。検討に用いたデータは第4章と同じく甲府城、名古屋城、安土城、伊賀上野城、大坂城、岸和田城、姫路城、和歌山城、丸亀城の9ヶ所の城郭石垣である。そして仮想モデルに対する FEM 解析をも行い、これらが安定性に及ぼす影響の把握を行っている。

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 石垣構築に関する歴史資料	4
1.3 従来の研究	4
1.4 本研究の目的と意義	6
1.5 本研究の構成	7
参考文献	8
第2章 城郭石垣の歴史の変遷に関する数値評価法	11
2.1 概説	11
2.2 城郭石垣の歴史の変遷	11
2.2.1 石垣石の加工の変遷	11
2.2.2 算木積み	12
2.2.3 石垣形状の変遷	12
2.3 歴史の変遷の判別のための数値評価法	13
2.3.1 石垣石加工度	14
2.3.2 石垣石控比	14
2.3.3 石垣石傾斜度	15
2.3.4 数値評価法を用いた時代的な変遷の傾向	15
2.4 数値評価法を用いた豊臣期大坂城石垣の検討	16
2.4.1 本願寺と豊臣期大坂城の歴史	16
2.4.2 豊臣期大坂城石垣の発見	18
2.4.3 豊臣期大坂城石垣の特徴	19
2.4.4 数値評価法による構築年代判定	20
2.5 結語	24
参考文献	24
第3章 城郭石垣断面形状の設計とその数式化	26
3.1 概説	26
3.2 石垣構築の設計手法に関する資料	26

この結果、基礎地盤の強度が低いほど、初期勾配を緩くし、凹み量を大きくする傾向にあることが判明している。またこのことは、石垣の安定化を図るのに必要なことであることを FEM 解析により明らかとしている。そして、現在において基礎地盤の軟弱な場所に構築されている石垣や野面積みで構築されている石垣は、構築当時に比べ変状が進んでいることが明らかとなり、その対策として地盤の補強や石垣石の間に補強材を挿入する工法、あるいは積み直しなどが必要であることを指摘している。

第6章では、石垣形状の違いが石垣の変形特性と安定性に与える影響を把握するため、水平積直線形状モデル、傾斜積直線形状モデルおよび垂直積曲線形状モデルの3種類について磁力式底面摩擦装置による模型実験を行っている。石垣を修復保存するために補強材を挿入することで対処することを考え、石垣に与える補強材の影響をこの模型による実験方法を用いることで検討を行っている。

その結果、石垣石を隅角部稜線に対して垂直に積むことにより、下部の滑動を防げることを明らかにしている。そして、曲線形状にすることによるアーチ効果が認められ、石垣全体が一体となって土圧に抵抗し、さらに曲線形状石垣は直線形状石垣に比べて変形抵抗が大きいことを明らかにしている。また、石垣に補強材を挿入することで、背面土の補強材挿入領域のダイレタンスが正から負に変化し、一体化され、孕み出しが抑制されることを明らかにしている。

最後に第7章では、第1章から第6章までの本研究で得られた結果を総括し、結論として取りまとめている。

第1章 序論

1.1 研究の背景

我々人類が認識している宇宙は、約150億年前の「ビッグバン」によって始まったと考えられている。その後、宇宙は膨張と冷却を続け、星が誕生し、星の集まった銀河が形成されていった。我々人類の生存する地球が所属している太陽系は、およそ46億年前に起こった超新星の爆発によって誕生した。そして地球には海や大陸が形成され、大気組成が変化し続け、その環境に育まれて約35億年前に原核生物と呼ばれる生命が誕生した。誕生した生物は時代の経過とともに爆発的に多様化していき、そのなかで人類が誕生したのはおよそ450万年前のことである。そして約250万年前に、人類最古の文化であるオ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。そのなかで様々な道具を発案し、ものづくりが行われ、土木建造物の建設も始まった。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・ビュイの町の北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であることがわかる。歴史を振り返ってみると、その時代その地域を背景とした様々な土木建造物が人類の発展とともに築き上げられてきていることがわかる。

例えば、ローマ帝国は紀元前19年頃に建設されたポン・デュ・ガール（写真-1.1³⁾）や2世紀

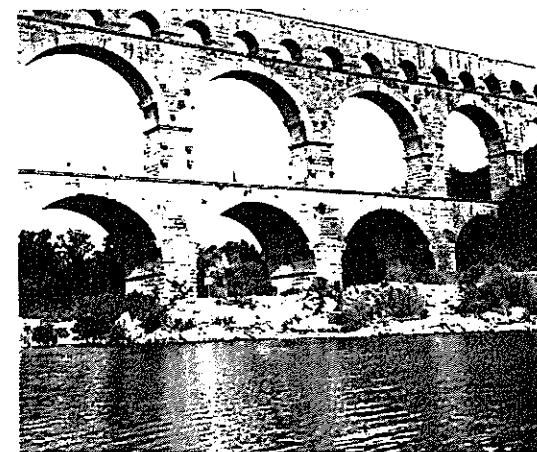


写真-1.1 ポン・デュ・ガール（世界遺産）

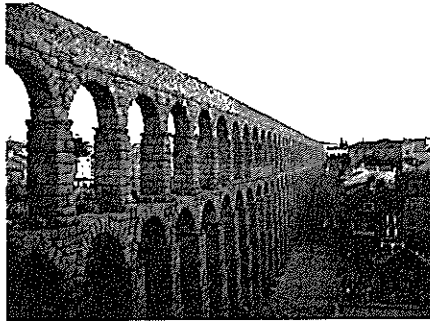


写真-1.2 セゴビアの水道橋（世界遺産）

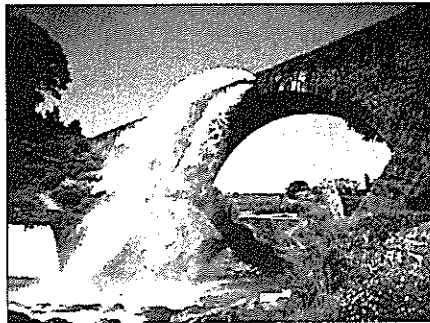


写真-1.3 通潤橋（重要文化財）
（提供：熊本県矢部町）

頃に建設されたセゴビアの水道橋（写真-1.2）などをはじめとして、各地に数え切れないほどの石造アーチ橋を架けている。また日本においても1854年に熊本県矢部町に灌漑用水のための水路橋として石造アーチ橋の通潤橋（写真-1.3）が完成している。

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保存に向けた市民の関心が高まってきている。また、古い土木構造物を保存するという行為の内に、その場所における時間間隔を継承するという実存の意味が含まれている⁹⁾ということも重要なことの一つである。

日本にも世界的に第1級の誇るべき建設文化としての価値を持つものがたくさんある。そのなかの一つに、写真-1.4⁹⁾に示しているように近世の城郭における石垣構造がある。日本の城郭石垣は接着剤を使わない空積みであり、また曲線形状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。ここで写真-1.4において「大坂城」と記したのは、大阪城を歴史的観点あるいは文化財として記述する場合は「大坂城」と表記するのが一般的であり、本論文もそれに従っているためである。

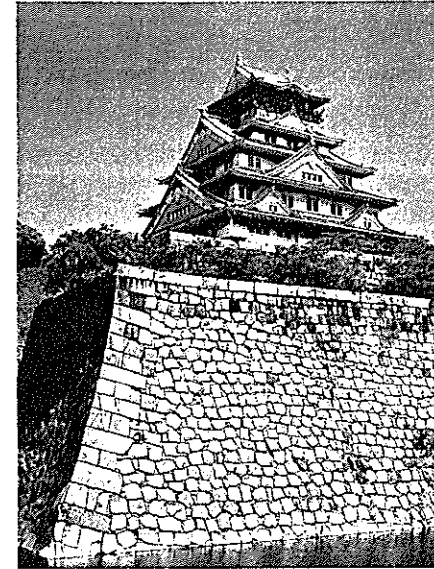


写真-1.4 日本の城郭（大坂城）

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。しかし、その基礎をなす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し、実際に崩落した事例も数多く報告されている⁹⁾。また崩落後の修復作業において、構築当時の形状に積み上げる作業についても、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^{7),8)}。

例えば仙台城は1960年代頃より孕み出しなどの石垣の変状や石材の破損が目立つようになり、石垣をそのまま放置すると隣接する道路に崩壊する危険性があるため、石垣全体を解体・積み直しによる修復の計画が仙台市より出され、1997年から発掘調査が行われた^{9),10),11)}。この調査により現存石垣の裏側から伊達政宗が1602年頃に最初に構築したⅠ期石垣および、それが1616年の地震で壊れた後に構築されたⅡ期石垣が発見された。すなわち修復対象の石垣はⅢ期石垣となり、この石垣はⅡ期石垣が1668年の大地震で崩壊した後に、1673年再建に着手し1683年に完成したものである¹²⁾。修復にあたっては構築時の形状を目指し、伝統工法を尊重して積み直しを行うことなどが要望されていたことから、修復に際して工学的に安定であるかの判断が重要な課題となった¹³⁾。2004年3月に修復工事は完了しているが、1683年の構築当時の形状であるかどうかは検証できないようである。また構築時期の異なる石垣が同じ場所で発見されたことから、内部構造

や土木技術の進化を明らかにするための今後の研究に期待が寄せられている。

この他にも、歴史的文化遺産である城郭を地域文化や街づくりなどの拠点として、盛岡城、甲府城、名古屋城、岡山城、丸亀城など全国各地の城郭で石垣の修復工事を実施、あるいは検討されている状況にある。

そこで本研究においては、我が国における城郭石垣の設計および構築に関する原理を解明するために、設計手法および形状の歴史的変遷を土木史的に明らかにするとともに、その安定性に影響を及ぼす各種要因の検討を行った。

1.2 石垣構築に関する歴史資料

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)など多数あるにも関わらず、石垣構築の設計について技術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¹⁴⁾。石垣構築の技術書としては現在のところ、穴太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、熊本藩細川家の穴太であった北川作兵衛が石垣構築に関する自家の家伝を1743年に記述した「石垣秘伝之書」、岩国藩の湯浅家によって1755年に技術相伝としてまとめられた「石垣書」、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4つが挙げられる。なお、「後藤家文書」は後藤家により1600~1800年頃にかけて作成された約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。

1.3 従来の研究

我が国の城郭に関する研究は、縄張りや城下町、あるいは櫓や天守閣などに関することについては文化的、政治的、そして技術的な面から歴史的観点も含めあらゆる角度から実施されており説明がすすめられているところであるが、石垣そのものについての研究は極めて少ない状況にあ

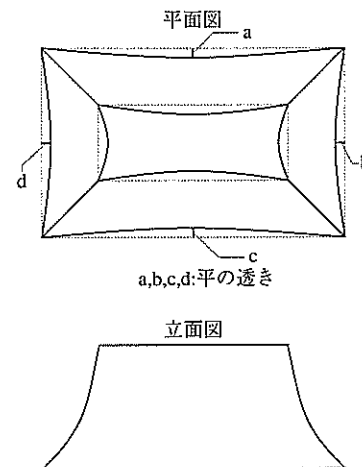


図-1.1 石垣全体の形状
(李達河他、「石垣築様目録」における石垣構築設計体系に関する研究)(1994年)の原図に加筆)

る。

石垣構築の技術書としては「石垣築様目録」、「石垣秘伝之書」、「石垣書」、「後藤家文書」が挙げられるが、これらのうち「石垣築様目録」は北垣^{15),16)}によって紹介されており、李¹⁷⁾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はなく、図-1.1に示すように石垣を平面的に見た場合にも「平の透き」と呼ばれる曲線が用いられていたことである。これは石垣全体がアーチによる安定の効果を期待して、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¹⁸⁾による大坂城石垣形状の実測データからも、平面的に見た場合の曲線を設けられていることが認められる。そして「石垣書」は「錦帯橋史」¹⁹⁾において紹介されており、さらに北垣によって「伝統技術からみた城郭石垣の勾配について」²⁰⁾のなかで石垣の反り曲線勾配についての解説がなされている。また「石垣秘伝之書」と「後藤家文書」については、北垣によって「石垣普請」²¹⁾のなかで反り曲線勾配のつけ方について詳しく解説されている。さらに、「後藤家文書」は喜内²²⁾により「金沢城郭史料」として整理され、石垣の構築に関する分野について詳しい解説が加えられている。

このように石垣構築技術に関する古文書を解説した例はいくつか挙げられるが、城郭石垣を工学的に解明した研究は極めて少ない状況にある。城郭石垣の安定性判定手法などに関しては田中^{23),24),25),26)}による一連の研究がある。しかし、これら一連の研究は解析に用いる石垣形状や土質データなどを仮定しているなど、仮定の多用とその仮定の上での統計的解析手法を用いているため、実用的および実態を正しく反映させるための研究に発展させることが望まれる。また桑原²⁷⁾

は熊本城の石垣を実測し、「後藤家文書」の石垣構築手法による形状との比較や示力線との比較を行った結果、熊本城の石垣は「後藤家文書」の形状および示力線の両者ともよく一致しており、力学的に合理的な曲線を有しているとしている。しかしながら、「後藤家文書」による石垣形状の決定の際に上底部分を等分割しているなど、「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部分もある。なお、本研究では「後藤家文書」による石垣構築手法について第3章で解説している。

1.4 本研究の目的と意義

「世界の文化遺産および自然遺産の保護に関する条約（世界遺産条約）」が1972年の第17回ユネスコ総会で採択されて以来、それまで対立するものと考えられてきた「自然」と「文化」を、人類全体の普遍的な価値を有するかけがえのないものとして損傷や破壊などの脅威から保護し、次世代に残していくために関係機関が協力して調査し保全および保存することの大切さが認識されるようになった。和辻哲郎は「風土」²⁸⁾のなかで自然と文化の密接な関連性について指摘しているが、自然と文化は密接な関係にあり、ともに守るべきものであるという考え方や行動が世界的に広まったのは「世界遺産条約」から始まったと考えられる。また、文化遺産とは、「人類の創造的資質を示す傑作。」「時代を超越して、構造物、都市計画および景観などの発展に重要な影響を与えたもの。」「ある様式の構造物、あるいは人類の歴史上、重要な発達段階を示す景観の代表的な例となるもの。」である。

我が国においても、環境や景観を通じた心の豊かさ、およびこれらを含めた快適な住環境への要求が高まってきており、その地域の歴史や文化を踏まえた環境の整備と遺産の保全と活用の重要性が高まってきている。このような背景のもと、国土交通省は平成15年7月に「美しい国づくり政策大綱」を発表しており、これを契機に、美しい国づくり・地域づくりについて、国民一人一人の広範な議論、具体的取り組みへの参画が促進されることを期待されているところである。また文化庁においても重要文化財の指定基準の改正や登録有形文化財制度の導入などを行うことで、歴史的土木構造物の文化財保護が積極的に進められている。

このように文化遺産の概念や価値の認識の拡大と深化に伴って、文化遺産を適正に保存し、活用することは今や国民的課題の一つであり、それを行うためには、従来から行われている歴史的、考古学的調査研究に加え、科学的、工学的観点からも調査研究を行うことが重要な課題となってきた²⁹⁾。

以上のような社会的環境のもと、我が国においては、歴史的土木構造物の文化遺産の一つとして城郭石垣が挙げられる。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、写真-1.5³⁰⁾に示している徳川初期（1620年頃）の大坂城



写真-1.5 大坂城石垣（高さ32m）

石垣は総延長12km、最大高さが32mにも及ぶ最大級の規模を誇り、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^{31),32),33)}。しかしながら、我が国における城郭石垣の多くは構築後400年前後経過しており、孕み出しなどの変状や崩壊の危険性にさらされている箇所が少ない。

大坂城に見られる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思想にも寄与することになる。

1.5 本研究の構成

本論文は前述した事柄を主目的とし、土木史的な観点から我が国における城郭石垣の形状および構造の歴史の変遷に関する一連の研究成果を取りまとめたものであり、7章から構成されている。以下に第1章から第7章までの論述の過程と概要を示す。

第1章では、歴史的土木構造物である我が国の城郭石垣の重要性を示し、本研究の目的と概要を明らかにした。

第2章では、石垣構築技術の発展過程を詳しく調べるために、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を提案する。またこの数値評価法を用いることによって、構築年が未知である城郭石垣について、ある範囲を持った構築年代を推定することを試みる。

第3章では、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「石墻書」の3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る。また現存する城郭石垣の形状を計測し、3つの構築手法による形状との比較を行うことにより、変形状況の検討を行う。

第4章では、日本に現存する9ヶ所の城郭石垣について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要因の変遷を検討し、構築技術の推移を把握することを試みる。

第5章では、石垣の安定性を決定づける要因の一つとして、地盤の強度特性を挙げ、 N 値と石垣の形状を構成している要素との関係、および構築当時からの変形状況と N 値との関係を把握することで安定性に影響を及ぼす要因の検討を行う。

第6章では、石垣形状の違いが石垣の変形特性と安定性に与える影響を把握するため、新たに考案した磁気式底面摩擦モデルを用いて、模型による実験を行う。またこの実験装置を用いて、石垣を修復あるいは補強するために補強材を挿入する工法が有用であるかどうかの検討を試みる。最後に第7章では、本研究で得られた結果を総括し、結論とする。

参 考 文 献

- 1) 横山祐之：『人類の起源を探る』，p.37，朝日選書，1987。
- 2) 横山祐之：『人類の起源を探る』，pp.188-189，朝日選書，1987。
- 3) Fritz Leonhardt 著，田村幸久監訳：『BRUCKEN』，p.70，メイセイ出版，1998。
- 4) 中井祐：歴史的構造物の保存とその意味，土木学会誌，Vol.87，No.10，p.29，2002.10。
- 5) 平井聖：『城』，第5巻，毎日新聞社，p.12，1996。
- 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。
- 7) 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。
- 8) 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』，p.155，小学館，1978。
- 9) 仙台市教育委員会生涯学習部文化財課：『仙台北城跡発掘調査（本丸1次）報道発表資料』，1997。
- 10) 仙台市教育委員会生涯学習部文化財課：『仙台北城跡整備基本構想（素案）』，2003。

- 11) 仙台市教育委員会生涯学習部文化財課：『仙台北城本丸跡 第1次発掘調査 中間報告』，2003。
- 12) 仙台市教育委員会生涯学習部文化財課：『第3期石垣の構造と構築技術（中間報告）』，2001。
- 13) 仙台市教育委員会生涯学習部文化財課：『仙台北城石垣修復工事専門委員会等の設置について（記者発表資料）』，2001。
- 14) 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』，p.155，小学館，1978。
- 15) 北垣聡一郎：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。
- 16) 北垣聡一郎：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。
- 17) 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。
- 18) 天野光三，西田一彦，久武勝保，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。
- 19) 永田新之允：『錦帯橋史』，岩国観光協会，pp.6-31，1953。
- 20) 北垣聡一郎：伝統技術からみた城郭石垣の勾配について，関西大学考古学研究室開設50周年記念考古学論叢，pp.1047-1070，2003。
- 21) 北垣聡一郎：『石垣普請』，法政大学出版社，pp.117-129，1987。
- 22) 喜内敏 監修・解説：『金沢城郭史料—加賀藩穴生方後藤家文書』，日本海文化叢書，第3巻，石川県図書館協会，1976。
- 23) 田中邦熙，山田清臣：石積み擁壁の安定性評価法，土木学会論文集，No.541/III-35，pp.9-20，1996。
- 24) 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。
- 25) 田中邦熙，新谷洋二，山田清臣：城郭石垣の三次元形態の発生源に関してFEMを適用する手法と解析事例，土木学会論文集，No.631/III-48，pp.383-396，1999。
- 26) 田中邦熙，新谷洋二，山田清臣：城郭石垣の形状寸法および間詰状態に関する安定性低減率を用いた安定性判定手法，土木学会論文集，No.638/III-49，pp.1-12，1999。
- 27) 桑原文夫：熊本城の石垣勾配，日本工業大学研究報告，Vol.14，No.2，pp.59-74，1984。
- 28) 和辻哲郎：『風土』，岩波書店，1935。
- 29) 西田一彦：文化遺産の調査と保存のための科学技術，『歴史遺産としての石造建造物の土木史的研究』，科学研究報告書（基礎研究B，課題番号12450208，研究代表者 天野光三），pp.2-8，2003。
- 30) 登野城弘，渡辺武：『大阪城の魅力』，淡交社，p.10，1994。

- 31) 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.
- 32) 天野光三, 西田一彦, 久武勝保, 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.
- 33) T.Tamano, B.Shrestha, M.Kanaoka, H.Q.Nguyen, K.Nishida, T.Nishigata & H.Morimoto: Stability of Japanese Castle masonry wall, Proceeding of International Conference on Reconstruction of Historical Cities and Geotechnical Engineering, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp.267-272, 2003.

第2章 城郭石垣の歴史的変遷に関する 数値評価法

2.1 概説

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遺存技術情報とよび、それを的確に把握し、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である数値評価法を提案する。これにより、大坂城などの大規模な石垣の構築が可能となるまでの石垣形状の変遷を明らかにした。このことは土木史的な意義があるとともに、重要な石垣遺構の修築保存法の確立に寄与することとなる。

さらに、1959(昭和34)年の「大坂城総合学術調査」において、現大坂城が豊臣秀吉創建のものではなく、すべて江戸時代初期の徳川幕府による築造であることが判明している¹⁾。また、この調査により、本丸天守台南側で地下深く埋れた石垣が発見された。その後、ガスや水道の埋設管敷設に係わる調査において、いくつかの地下石垣が発見された。特に、1984(昭和59)年に行われた大手前配水池南側の調査において、大規模な石垣の隅角部が発見された。これらの地下石垣は地上の石垣とは規模も積み方も異なり、豊臣時代の大坂城ではないかと考えられている。そこで数値評価法を用いて、この地下石垣の特徴について考察するとともに、石垣構築の技術的な面から構築年を推定した²⁾。

2.2 城郭石垣の歴史的変遷

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、それにともない石垣形状も大きく変化し、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。図-2.1に城郭石垣の一般的な構成を示している。城郭石垣は、石垣石、裏込め栗石、盛土、地山からなる。特に、裏込め栗石は、石垣石に水圧が大きく作用しないようにする水抜き役割と土圧をより均等に石垣石へ伝達する役割を果たしている。

2.2.1 石垣石の加工の変遷

石垣石の分類は、「鈐録」に記述されている「野面積み」, 「打込み接ぎ」, 「切込み接ぎ」の3

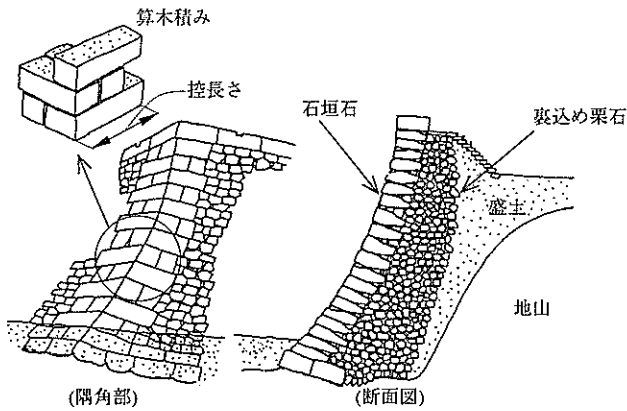


図-2.1 城郭石垣の一般的な構成図

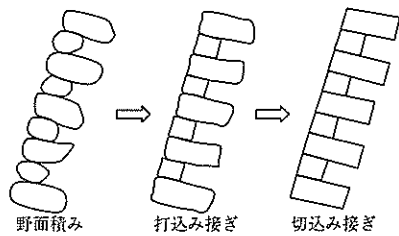


図-2.2 石垣石の加工の変遷

種類に分けられることが多い。これは、図-2.2 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のである。

2.2.2 算木積み

石垣の隅角部においては、石垣全体を強固な石垣構造にするために、図-2.1, 2.3 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。

2.2.3 石垣形状の変遷

石垣石の加工の程度や算木積みに加え、石垣の孕み出しなどを防ぎ安定させるためには、図-2.4

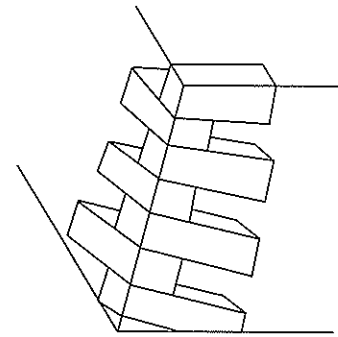


図-2.3 算木積み

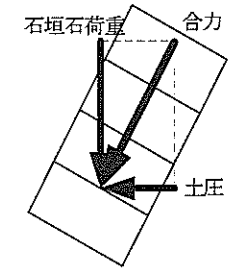


図-2.4 石垣石荷重と土圧の合力の模式図

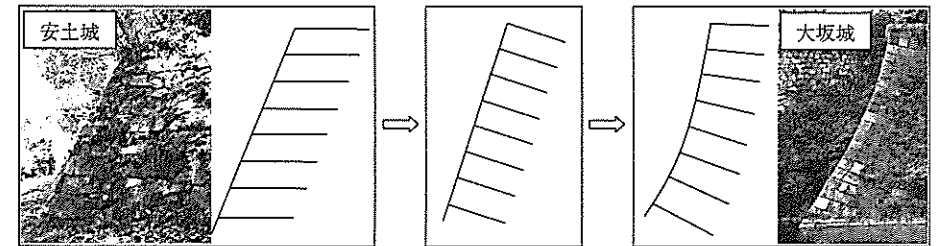


図-2.5 隅角部石垣形状の変遷

に示しているように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ことで、せん断力の軽減をはかる必要がある。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が重要となる。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-2.5 のようになる。

2.3 歴史の変遷の判別のための数値評価法

前述のように、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。さらに、石垣の変遷に関する調査や整理に、工学的または定量的に表示して分類を行う事は稀である。そこで、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み上げられているかどうかを判断

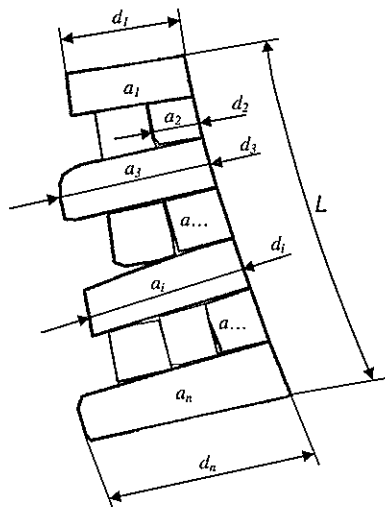


図-2.6 石垣石加工度と石垣石控比の説明図

するための石垣石傾斜度 \$R\$ の3つの指数を定義した³⁾。そして、10個の城郭石垣（大坂城⁴⁾、名古屋城⁵⁾、伊賀上野城⁶⁾、姫路城⁶⁾、熊本城小天守⁷⁾、彦根城⁸⁾、熊本城大天守、松代城⁹⁾、松本城¹⁰⁾、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。

2.3.1 石垣石加工度

石垣石の加工の状態を判定する石垣石加工度は図-2.6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。

$$\text{石垣石加工度 } D = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{d_i}}{L} \quad (2.1)$$

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。

2.3.2 石垣石控比

城郭石垣の算木積みを知るための石垣石控比は図-2.6に示すように、上下隣りあった石

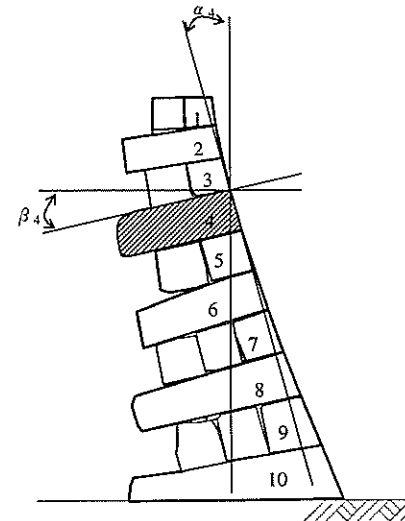


図-2.7 石垣石傾斜度の説明図

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。

$$\text{石垣石控比 } S = \frac{\frac{d_1}{d_2} + \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{d_n}{d_{n-1}}}{n-1} \quad (2.2)$$

2.3.3 石垣石傾斜度

石垣石を隅角部稜線に対して垂直に積む意図を判定するための石垣石傾斜度は、図-2.7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 \$\beta_i\$ を稜線側の面が鉛直軸に対してなす角 \$\alpha_i\$ で除した値を平均したもので、次式で示される。

$$\text{石垣石傾斜度 } R = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{\alpha_i}}{n} \quad (2.3)$$

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。

2.3.4 数値評価法を用いた時代的な変遷の傾向

図-2.8~2.10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

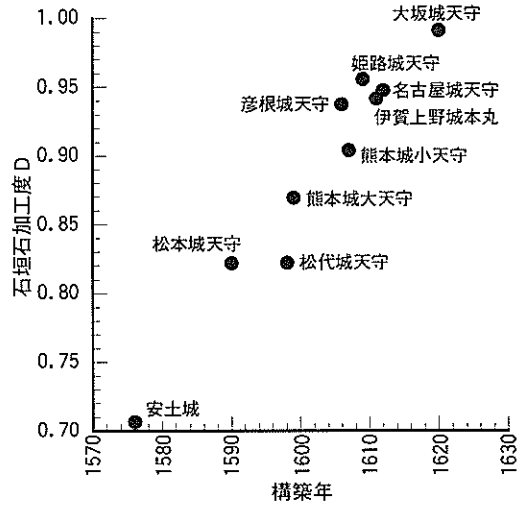


図-2.8 石垣石加工度と構築年の関係

したものである。

図-2.8 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-2.9 からは石垣石の控えを長くとした算本積みを行うことが、また図-2.10 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意図が時代とともに高くなっていることがわかる。

2.4 数値評価法を用いた豊臣期大坂城石垣の検討

2.4.1 本願寺と豊臣期大坂城の歴史

現在までのところ、中世の大坂、なかでも今の大阪城付近の様子については、今ひとつ明らかとはされていないが、室町時代後半の 1496(明応 5)年になって本願寺八世蓮如がこの地に坊舎を創始したことにより、難波廃都以来のひなびた集落がようやく町として再生した¹¹⁾。その後、1532(天文元)年に山科本願寺が細川晴元と協力する六角定頼と法華宗徒の連合軍に焼き打ちされると、その翌年の 1533(天文 2)年には、この大坂の地にある坊舎が本願寺の本山となった。この頃の「天文日記」や「私心記」によると、大坂(石山)本願寺は 1541(天文 10)年までの間に、12 回にわたって寺内およびその周辺の各所に堀を掘る、土居を築く、塀をつける、あるいは要害を普請

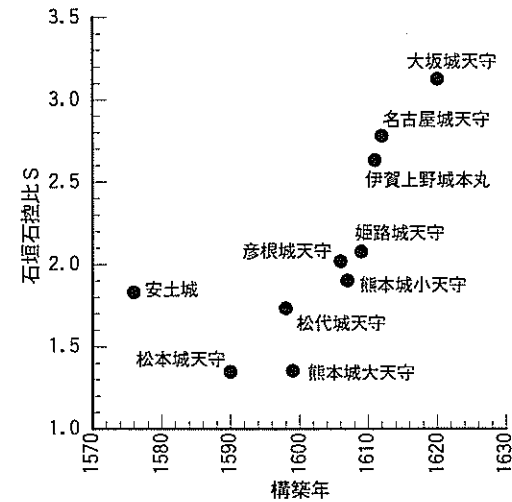


図-2.9 石垣石控比と構築年の関係

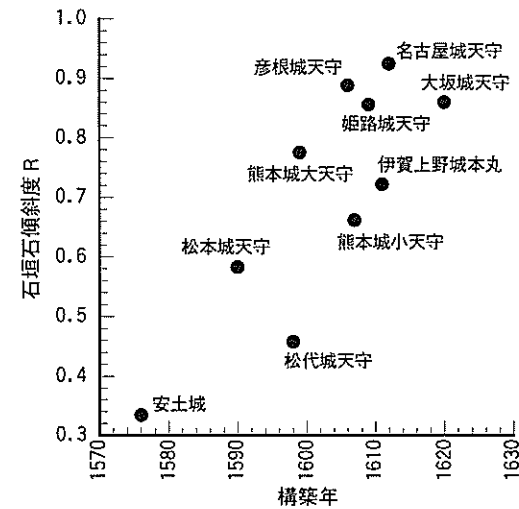


図-2.10 石垣石傾斜度と構築年の関係

表-2.1 大坂(石山)本願寺と豊臣期大坂城

西暦	和暦	事項
1496	明応5年	蓮如が後の大坂本願寺となる「一字の坊舎」を建立。大坂御坊と呼ばれた。
1532	天文1年	山科本願寺が細川晴元に協力する六角定頼と法華宗徒の連合軍に焼き討ちされる。
1533	天文2年	大坂御坊が本願寺の本山となり、大坂本願寺と呼ばれることになる。
1534	天文3年	「天文日記」、「私心記」によると1541(天文10)年までの間に、十二回にわたって寺内およびその周辺の各所に堀を掘る、土居を築く、塀をつける、あるいは要害を普請するという記載がある。
1553	天文21年	城を造る専門技術者松田三郎入道が招かれて、寺院の城郭化が進んだ。(「天文日記」)
1564	永禄7年	大坂本願寺焼失。復旧工事。
1565	永禄8年	隣接する火元の法安寺を立ち退かせる。
1570	元亀1年	信長との合戦はじまる。
1580	天正8年	信長と本願寺が和睦。顕如が大坂を退城して紀州の鷲の森に退去する。本願寺ならびに寺内町焼失する。信長は大坂本願寺跡(大坂城)を番城とし、丹羽長秀と織田信澄を常駐させる。
1582	天正10年	信長の没後に池田恒興が大坂城主となる。
1583	天正11年	秀吉が城主となり、築城を開始する。
1585	天正13年	天守閣が完成する。
1588	天正16年	普請、一応終了。
1594	文禄3年	大坂惣構堀の普請。
1598	慶長3年	三之丸の拡張工事。秀吉の没後に秀頼が城主となる。
1614	慶長19年	大坂冬の陣。和睦により、惣構堀・外堀を埋められる。
1615	元和1年	大坂夏の陣。大坂城落城し、豊臣氏滅亡する。

する¹²⁾ということが行われていたようである。また1553(天文21)年には、城を造る専門技術者である松田三郎入道が招かれて、寺院の城郭化を進めている。その後、1570(元亀元年)には本願寺と織田信長との合戦が始まり、10年後の1580(天正8)年に信長と本願寺が和睦をし、大坂本願寺の顕如は大坂を退城して紀州の鷲の森に退去している。1582(天正10)年に信長が没すると、池田恒興が大坂城主となったが、その翌年の1583(天正11)年には豊臣秀吉が城主となり築城を開始している。この築城工事を実際にその目を見たポルトガル人宣教師ルイス・フロイスの報告から岡本良一は、当初秀吉はとりあえず大坂本願寺城の城構えを最大限に利用するという方針で築城を開始したと述べている¹³⁾。これら大坂本願寺と豊臣期大坂城の関連事項を表-2.1にまとめている。

2.4.2 豊臣期大坂城石垣の発見

1899(明治32)年に小野清は「大坂城誌」¹⁴⁾において、現在の大坂城は豊臣秀吉創建のものではなく、徳川幕府が再構築したものであると記述したが、豊臣期大坂城に関する具体的な絵図が当時は発見されておらず、秀吉の城郭について明らかにすることはできなかったため、一般の注目を集めることはなかった。その後、1936(昭和11)年に桜井成広は陸軍築城部本部本邦築城史編纂委員会保管の「城塞釋史」¹⁵⁾所収のなかに「大坂城本丸」と題する絵図の写しを発見した。桜井は

この絵図が現在の大坂城本丸と比較して縄張の形状が大きく異なるため、秀吉築造の本丸を描いたものではないかと考え、翌年の1937(昭和12)年2月28日に大阪毎日新聞紙上にこの絵図と推定断面図を紹介し、簡単な考証を加えて発表した¹⁶⁾。ところが、戦後の1959(昭和34)年に大坂城の科学的調査を行うために組織された「大坂城調査委員会」では、調査の実施のため「大坂城総合学術調査団」を結成し調査を行った結果、現大坂城が豊臣秀吉創建のものではなく、すべて江戸時代初期の徳川幕府による築造であることが判明した¹⁷⁾。またこの調査により、本丸天守台南側で地下深くに埋れた石垣が発見された。当時の考えとして、この地下石垣は地上の石垣とは規模も積み方も異なることから、豊臣秀吉時代の大坂城かあるいは、豊臣期大坂城が築かれる以前の大坂本願寺の遺構ではないかと考えられた。

地下石垣の発見の翌年1960(昭和35)年に、鳥羽正雄と桜井成広はもと徳川幕府の京都大工頭であった中井家に伝わる城郭関係絵図のなかから、豊臣期大坂城本丸図を2枚発見した。この絵図は2枚とも40cm×30cm程度の小さなものであるが、内濠を含めた本丸が描かれており、そこには石垣をはじめ天守・御殿・番所・便所・井戸などの建物の平面図が描かれ、さらに石垣については長さおよび高さが書き込まれていた¹⁸⁾。ここで宮上茂隆は、さきの地下石垣の発見をもとにして、この本丸図を詳細に研究し、この図が豊臣時代の大坂城本丸図に間違いないと断定するとともに、先述の地下石垣を豊臣秀吉築造の本丸であるとするなど注目すべき論文¹⁷⁾を発表した。その後、1973(昭和48)年に北垣聰一郎により、広島市立中央図書館所蔵の浅野家文庫「諸国古城図」のなかから同系の絵図が発見された。この絵図も40cm×30cm程度と小さなものであった。

大坂城天守閣において、これらの絵図をもとに石垣が埋没していると考えられる箇所を選定し、地下に石垣が存在するかどうかを確かめるため、ボーリングによる調査が行われており、いくつかの地点において地下石垣の存在が確認された¹⁸⁾。また、財団法人大阪市文化財協会においても、特別史跡に指定されている現大阪城内の建設工事に係る埋蔵文化財調査を担当し、地下に石垣の遺構が存在していることを明らかにしている。このなかでも、1984(昭和59)年に行われた大阪城内大手前配水池改良工事に伴う発掘調査では、写真-2.1に示す豊臣期と考えられる貴重な石垣の隅角部が発見された。

2.4.3 豊臣期大坂城石垣の特徴

写真-2.1について、(財)大阪市文化財協会は、宮上茂隆による豊臣期大坂城本丸図と現大坂城との重ね合せ図¹⁹⁾から判断し、豊臣期大坂城の本丸詰ノ丸外郭東南部の石垣である可能性が高いとした。またこの石垣の特徴として、石垣石には一辺0.5~1.2mの花崗岩自然石が主に用いられ、隅角部の石垣石には難波宮の礎石の可能性も考えられる古代の礎石や古墳時代の石棺が転用されており、また積み方は野面積みであり、切石が多用される徳川期の石垣とは異なっているとして²⁰⁾、

比較のために、城郭石垣の技術的に頂点²¹⁾に位置する徳川期の大坂城天守石垣を写真-2.2に、

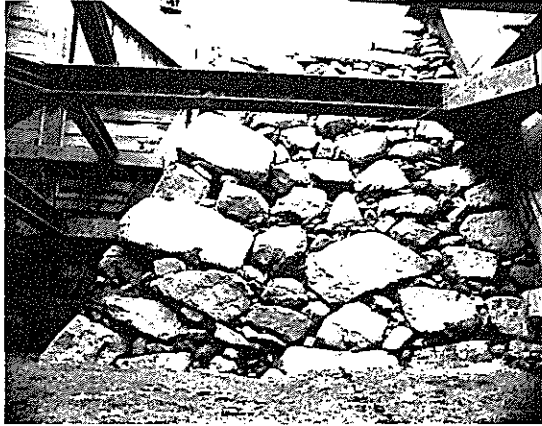


写真-2.1 大坂城地下石垣 (提供:財団法人大阪市文化財協会, 1985)

また近世の城郭石垣の原点と考えられる安土城石垣を写真-2.3にそれぞれ示す。これらの写真から大坂城地下石垣は徳川期大坂城石垣と対比して、その石垣石の加工具合や積み方が大きく異なっていることがわかる。また大坂城地下石垣を安土城石垣ならびに徳川期大坂城石垣と比較すると安土城石垣に近い積み方であると定性的には判断できる。また、安土城石垣は隅角部の石垣石をその他の部分の石垣石より大きなものを使用しようとする意図はあまりうかがえないが、大坂城地下石垣では徳川期大坂城石垣ほどではないものの、隅角部にはその他の部分より比較的大きな石垣石が意図的に使用されている。徳川期大坂城石垣の隅角部には控の長さが5~6mにも達する石垣石が使用されており、約1m程度の大坂城地下石垣ならびに安土城石垣とは格段の違いがある。また徳川期大坂城石垣は、最大高さが32mにも達する部分²²⁾があるが、前述した豊臣期大坂城本丸図の絵図のなかに記述されている最大の石垣高さは、およそ16mと大きな違いがある。

2.4.4 数値評価法による構築年代判定

大坂城地下石垣と、これに加えて安土城石垣および徳川期大坂城石垣について3種類の数値評価法²³⁾、すなわち石垣石の加工状況を判断する石垣石加工度 D と算木積みの程度を知るための石垣石控比 S および隅角部稜線に対して石垣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 を用いて比較を行った。 D 、 S 、 R のそれぞれの値を算出し、その結果を構築年との関係でまとめたのが図-2.11~2.13である。それぞれの城郭の構築年については、構築を開始した年代とした。ここで大坂城地下石垣の構築年は、豊臣期大坂城の築城が開始された1583(天正11)年と仮定して作図している。比較のために、現在までに調査した城郭石垣についても表示してい

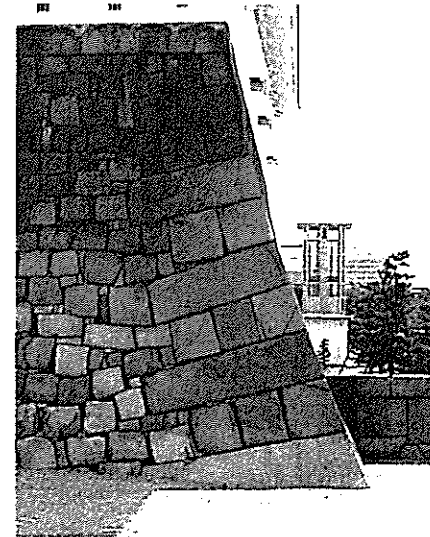


写真-2.2 徳川期大坂城



写真-2.3 安土城

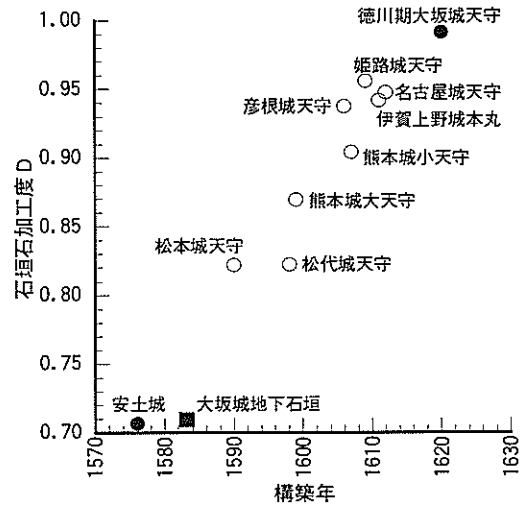


図-2.11 石垣石加工度と構築年の関係

る。なお、図中では大坂城地下石垣を四角の黒抜き(■)で、安土城と徳川期大坂城天守を丸の黒抜き(●)で示した。

石垣石加工度を示している図-2.11 より、大坂城地下石垣は安土城より少し大きな値を示しているが両者とも徳川期大坂城に比べると格段に低いことがわかる。これは、大坂城地下石垣および安土城石垣とも野面積みのため、ほとんど加工されずに使用されているためであり、石垣石の加工技術としては低い段階にあるといえる。

図-2.12 の石垣石控比からは、大坂城地下石垣は安土城より大きな値を示しているの、控の意識はあるが、徳川期大坂城に比べると低い値を示していることが読み取れる。このことから算木積みの意図については、安土城石垣よりも大坂城地下石垣の方がより意識されて構築されていることがわかる。

次に図-2.13 の石垣石傾斜度からは、大坂城地下石垣は安土城よりは大きな値を示しているが、徳川期大坂城に比べ低い値となっていることがわかる。このことから、安土城石垣よりも大坂城地下石垣の方が、石垣石を隅角部稜線に対して垂直にしようとする意図がより明確になっていることがわかる。

以上のことより、写真-2.1 に示した大坂城地下石垣では、3種の数値評価の値がいずれも安土城より大きな値を示していることから、大坂本願寺の遺構ではなく、豊臣期大坂城の石垣と推定することができる。また、豊臣期大坂城の石垣は安土城から徳川期大坂城に至る技術の発展過程上のものと判断できるが、その形態はまだ安土城に近いものであると考察できる。

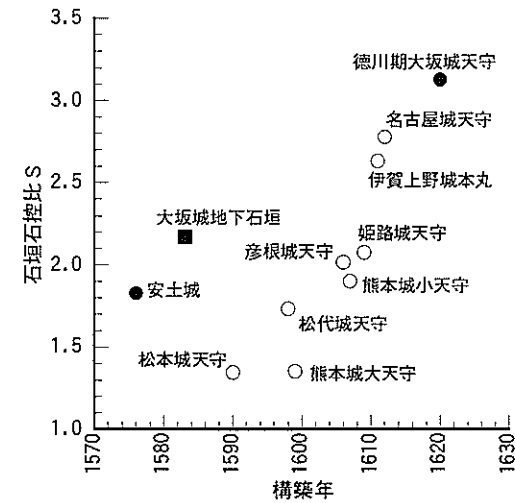


図-2.12 石垣石控比と構築年の関係

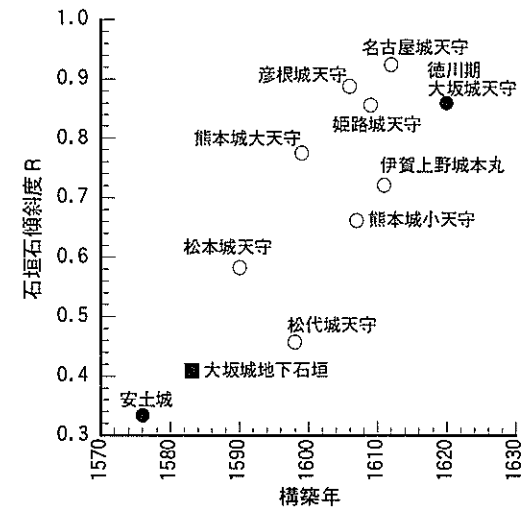


図-2.13 石垣石傾斜度と構築年の関係

2.5 結語

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。

さらに、この数値評価法を用いて、1984(昭和59)年に行われた大阪城大手前配水池改良工事に伴う発掘調査で発見された大阪城地下石垣を検討した結果、豊臣期大坂城石垣であると推定できた。このように、構築年が未知である城郭石垣について数値評価法を用いて諸数値を算出すれば、ある範囲を持った構築年代を推定することが可能である。

参 考 文 献

- 1) 渡辺武, 内田九州男, 中村博司: 豊臣時代大坂城遺構確認調査概報, 大阪城天守閣紀要, 第3号, 大阪城天守閣, pp.13~25, 1975.
- 2) 森本浩行, 西田一彦, 西形達明, 玉野富雄, 森毅: 数値評価法を用いた豊臣期大坂城石垣の特徴について, 土木史研究, 第20号, 土木学会, pp.263-268, 2000.
- 3) 森本浩行, 西田一彦, 西形達明, 玉野富雄: 城郭石垣の変遷に関する数値評価法, 第34回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp.247-248, 1999.
- 4) 平井聖監修: 『城』, 第4巻, 毎日新聞社, p.98, 1996.
- 5) 平井聖監修: 『城』, 第4巻, 毎日新聞社, pp.72-73, 1996.
- 6) 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.
- 7) 平井聖監修: 『城』, 第8巻, 毎日新聞社, pp.10-11, 1996.
- 8) 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.
- 9) 平井聖監修: 『城』, 第3巻, 毎日新聞社, p.39, 1997.
- 10) 平井聖監修: 『城』, 第3巻, 毎日新聞社, pp.8-9, 1997.
- 11) 松岡利郎: 『大坂城の歴史と構造』, 名著出版, p.11, 1988.
- 12) 岡本良一: 『大坂城』, 岩波新書, p.14, 1970.
- 13) 岡本良一: 『秀吉と大坂城—岡本良一史論集上巻—』, 清文堂出版, p.228, 1990.
- 14) 小野清: 『大坂城誌』, 名著出版, pp.136~140, 1890. 1973復刻.
- 15) 松岡利郎: 『大坂城の歴史と構造』, 名著出版, p.38, 1988.
- 16) 岡本良一: 『秀吉と大坂城—岡本良一史論集上巻—』, 清文堂出版, p.229, 1990.

- 17) 宮上茂隆: 豊臣秀吉築造大坂城の復元的研究: 建築史研究第37号, 彰国社, 1967.
- 18) 『天守閣復興五十周年記念 大阪城展』, 大阪城天守閣(大阪市経済局), p.88, 1981.
- 19) 宮上茂隆: 『大坂城天下の名城』, 草思社, pp.52~53, 1984.
- 20) 『大坂城公園石垣調査に係る報告書』, 財団法人大阪市文化財協会, p.4, 1999.
- 21) 天野光三, 西田一彦, 久武勝保, 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.
- 22) 西田一彦, 佐々木良作, 中村博司, 玉野富雄, 溝口昭二, 小野論: 大坂城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.
- 23) 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.

第3章 城郭石垣断面形状の設計とその数式化

3.1 概説

城郭石垣の多くは構築から400年前後経過しており、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。城郭石垣の保存のために、現在の形状を計測し把握するとともに、城郭石垣構築当時における状態を推定する必要がある。そこで、石垣構築技術についての記述がある「後藤家文書」[「石垣秘伝之書」]および「石塙書」の三つの構築手法を明らかにすることで反り曲線勾配部分について数式化することを試みた¹⁾。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り、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り、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。そこで本章では、ノンプリズムレーザー測距儀を用いて城郭石垣の形状の測定を行った。これは目標となる地点に反射板の設置が不要であり、石垣を傷つけることなく安全かつ簡便に計測できるものである²⁾。

以上のことから、現存する石垣の形状と3つの構築手法による石垣の形状との比較により、構築当時からの変形状況が把握でき、現在多くの城郭石垣で問題となっている孕み出しの大きさを算出することが可能となった。さらに、崩壊の危険性の判断や修復の必要性および修復形状などへの活用が可能となる。

3.2 石垣構築の設計手法に関する資料

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。現在までのところ城郭の天守閣や櫓などの建築物や縄張り、あるいは城下町などに関しては数多くの研究がなされ、解明がすすめられているところである。また天守閣や櫓などの建築物に関しては、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。しかしながら、城郭の基礎をなす石垣そのものの重要性についてはあまり認識されてこなかったため、その形状に関しても未解明の部分が多い。このように、これまでの城郭石垣への関心の低さから日本に現存する石垣遺構には老朽化が進行し、孕み出しなどによる変状により崩壊の危険性のあ

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³⁾。また崩壊の危険性のある箇所や崩壊後の修復作業において、石垣構築当時の形状に積み上げることについても、当時の設計図面などが存在していることは極めて稀であるため困難を極める状況にある⁴⁾⁵⁾。

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壊を未然に防ぎ修復・保存するためには、まず初めに現状の石垣形状を正確に把握し構築当時の形状と比較することで、その変形状態を把握しておく必要がある⁶⁾。

石垣構築の設計について技術的に説明した書物は極めて少ないが、ここでは「後藤家文書」⁷⁾⁸⁾、「石垣秘伝之書」⁹⁾および「石塙書」¹⁰⁾の合計3つの構築手法による石垣形状の数式化を試み、比較検討した。これらの結果と現状の石垣形状との比較により、構築当時からの変形状況を把握でき、石垣の崩壊の危険性の判断や修復の必要性および修復する場合の基準形状の決定のための資料とすることができる。

なお、「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約200点にのぼる後藤家に関する古文書・古記録であり、そこには由緒、役儀・相続、俸禄・給与、縁組・法事、遺書、勤方・家芸、調理留書、秘伝書、石垣積様秘伝絵図、金沢城絵図など膨大な記録が残されている。これらのうち秘伝書と石垣積様秘伝絵図の中には石垣の設計手法について、絵図を用いて詳細に記述されたものが多数含まれており、なかでも「唯子一人伝」(1824)は、それ以前の記録である「新積地形准繩極秘抄」(1615)をはじめとして、後藤家に秘伝書として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。「石垣秘伝之書」は熊本藩細川家の穴太であった北川作兵衛が石垣構築に関する自家の家伝を1743年に記述したものである。「石塙書」は1755年に岩国藩の湯浅家によって技術伝伝としてまとめられたものである。

3.3 「後藤家文書」による設計手法の解明とその数式化

3.3.1 「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-3.1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。
- 2) 下から $h/3$ ($=h_1$) の部分は、初期勾配 G で直線DEを引く。
- 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

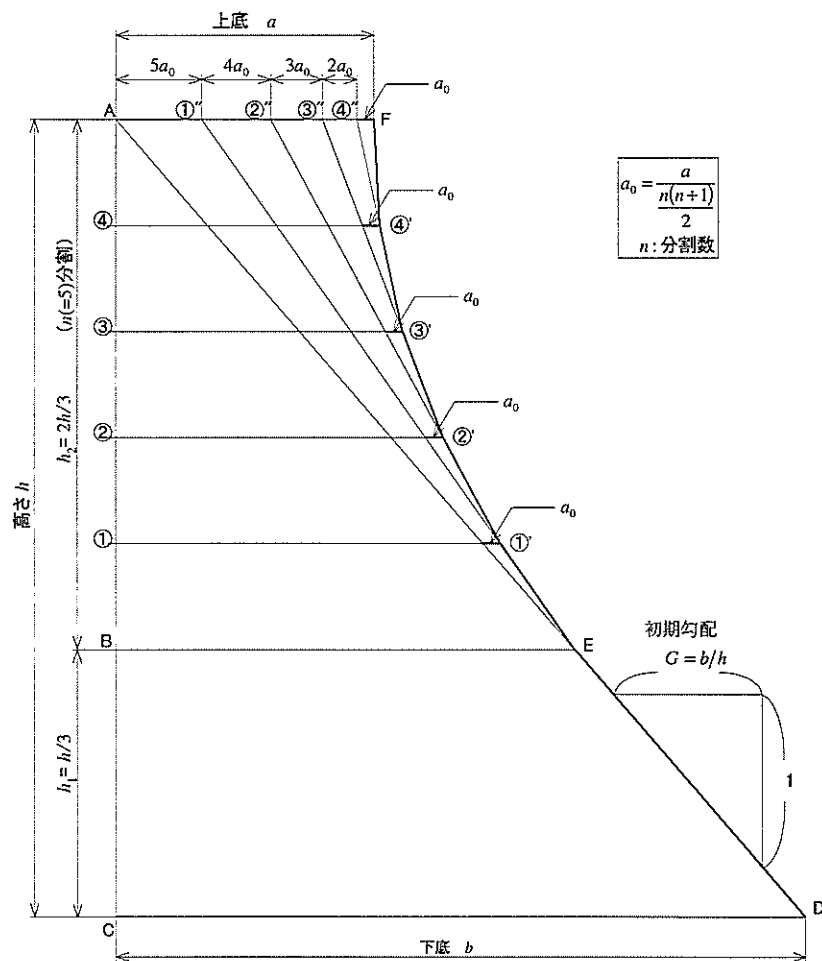


図-3.1 「後藤家文書」による設計

(0.303~1.515m)で分割している。なお、図では5分割している。)

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。

$$a_0 = \frac{a}{\frac{n(n+1)}{2}} \quad (3.1)$$

- 5) 点①の水平線とDEの延長線DAとの交点より a_0 だけ石垣前面に張り出した点を①'とする。
- 6) 点②の水平線とE①'の延長線E①'との交点より a_0 だけ石垣前面に張り出した点を②'とする。
- 7) 点③の水平線と①②'の延長線①②'との交点より a_0 だけ石垣前面に張り出した点を③'とする。
- 8) 点④の水平線と②③'の延長線②③'との交点より a_0 だけ石垣前面に張り出した点を④'とする。
- 9) 点E, ①', ②', ③', ④', Fを結ぶことで、EF間の石垣の形状を決定する。

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¹¹⁾。

「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ニ一寸一分五厘与成。」

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、下底は4丈5尺となる。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で上底の9尺を割れば1寸1分5厘となる。」

ここで、図-3.1との対応を示すと $a=9$ 尺, $b=4$ 丈5尺, $n=12$, $a_0=1$ 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_0 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初期勾配 G の延長線とある一定高さの交った点から 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-3.2に示している築城の様子を描いたとされる「築城図屏風」¹²⁾には、石垣前面に組まれた足場上と石垣背面の盛土上に

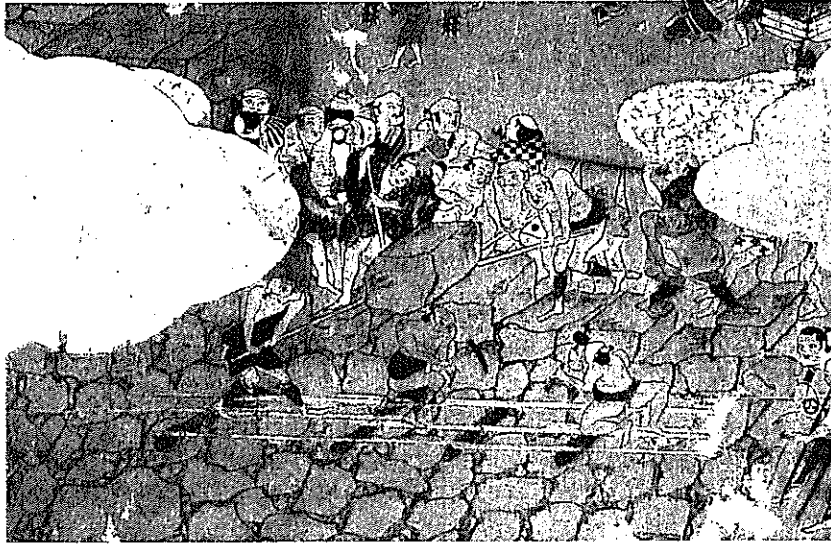


図-3.2 「築城図屏風」の一部
(原図：武田恒夫他,『戦国武家風俗図, 戦国合戦絵屏風集成, 別巻』(1981))

いる作業者が槌や鍬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。

3.3.2 石垣反り曲線勾配部分の数式化

「後藤家文書」による設計手法の分割数 n を無限に大きくした場合を考えることで、石垣形状を数式表示することができる。この曲線について以下で検討する。

図-3.3 に示すように点 A を原点とする座標軸を設定すると、 $n = 5$ 分割した場合の各折れ点の座標は表-3.1 のようになる。

表-3.1 より、 n 分割した場合の下から i 番目の x 座標と y 座標は次のような関係になると考えられる。

$$\begin{cases} x_i = h_2 - \frac{h_2}{n} \times i & (3.2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_i = \frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times i \right) + \{ a_0 \times i + a_0 \times (i-1) + a_0 \times (i-2) + \dots + a_0 \times 2 + a_0 \times 1 \} & (3.3) \end{cases}$$

n : 分割数, i : 折れ点の番号 ($0 \leq i \leq n$)

ここで、 x_i と y_i の関係を求めると次のようになる。

式(3.2)より

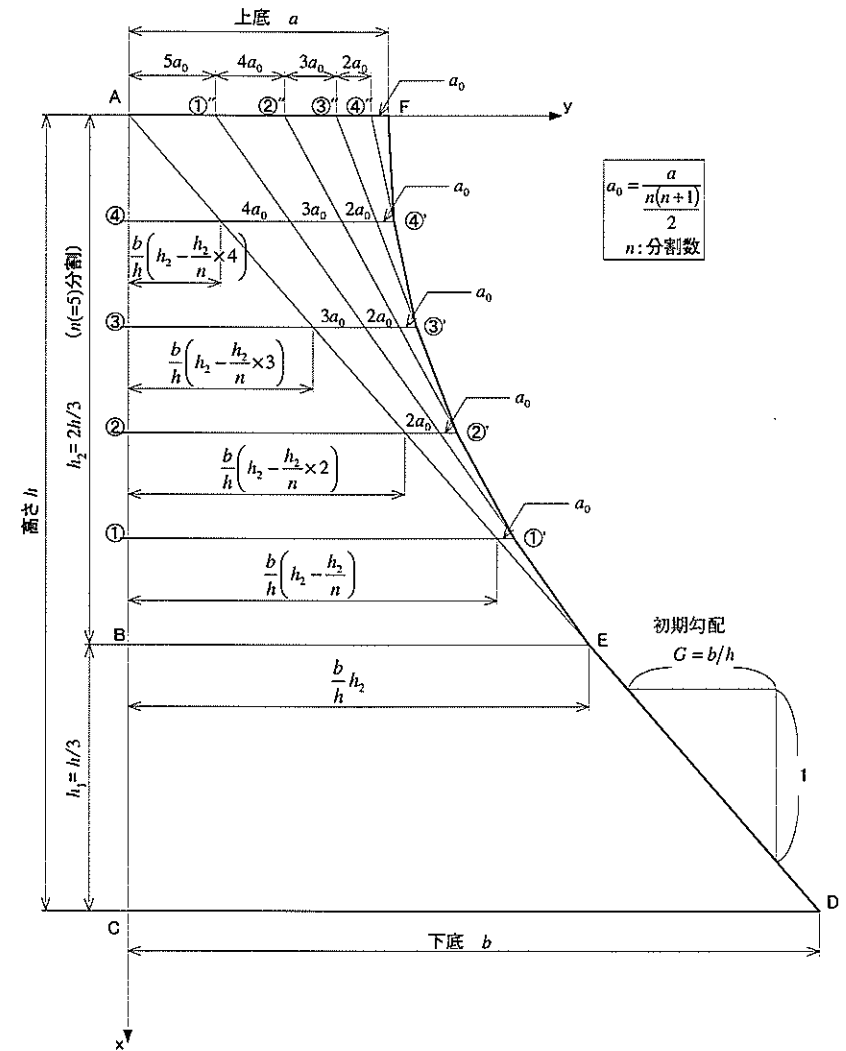


図-3.3 「後藤家文書」による設計の数式化

表-3.1 各折れ点の座標値

折れ点	x	y
E	h_2	$\frac{b}{h}h_2$
①'	$h_2 - \frac{h_2}{n} \times 1$	$\frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 1 \right) + a_0 \times 1$
②'	$h_2 - \frac{h_2}{n} \times 2$	$\frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 2 \right) + a_0 \times 2 + a_0 \times 1$
③'	$h_2 - \frac{h_2}{n} \times 3$	$\frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 3 \right) + a_0 \times 3 + a_0 \times 2 + a_0 \times 1$
④'	$h_2 - \frac{h_2}{n} \times 4$	$\frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 4 \right) + a_0 \times 4 + a_0 \times 3 + a_0 \times 2 + a_0 \times 1$
F	0	a

$$\frac{i}{n} = 1 - \frac{x_i}{h_2} \quad (3.4)$$

式(3.3)より

$$\begin{aligned} y_i &= \frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times i \right) + \{ a_0 \times i + a_0 \times (i-1) + a_0 \times (i-2) + \dots + a_0 \times 2 + a_0 \times 1 \} \\ &= \frac{b}{h} x_i + a_0 \times \frac{i(i+1)}{2} \\ &= \frac{b}{h} x_i + \frac{a}{n(n+1)} \times \frac{i(i+1)}{2} \\ &= \frac{b}{h} x_i + a \times \frac{i}{n} \times \frac{(i+1)}{(n+1)} \\ &= \frac{b}{h} x_i + a \times \left(1 - \frac{x_i}{h_2} \right) \times \frac{(i+1)}{(n+1)} \\ &= \frac{b}{h} x_i + a \times \left(1 - \frac{x_i}{h_2} \right) \times \frac{(i/n + 1/n)}{(1 + 1/n)} \end{aligned}$$

$$= \frac{b}{h} x_i + a \times \left(1 - \frac{x_i}{h_2} \right) \times \frac{\left(1 - \frac{x_i}{h_2} \right) + 1/n}{1 + 1/n} \quad (3.5)$$

ここで、 $n \rightarrow \infty$ のとき、

$$y = \frac{b}{h} x + a \times \left(1 - \frac{x}{h_2} \right)^2 \quad (3.6)$$

となる。

よって、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。

$$y = a \left(1 - \frac{x}{h_2} \right)^2 + \frac{b}{h} x \quad (3.7)$$

3.3.3 設計例による高さ、初期勾配、上底、下底の関係

「後藤家文書」による設計手法によれば、式(3.7)から明らかのように、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-3.1におけるEF間、すなわち反り曲線勾配部分は直線に近づき、上底 a を大きくすると反り曲線勾配部分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、初期勾配、上底、下底の関係がどのようになっているのかを以下で明らかにする。なお、本論文では1尺を0.303mとしている。

高さ h と初期勾配 G の関係は、図-3.4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。

$$G = 0.025h \quad (3.8)$$

次に、高さ h 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、次式のようになる。

$$b = Gh = 0.025h^2 \quad (3.9)$$

式(3.9)は図-3.5における高さと下底の関係を直線で近似した式ともよく一致している。

下底 b と上底 a の関係は、図-3.6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とする。

$$a = \frac{1}{4}b \quad (3.10)$$

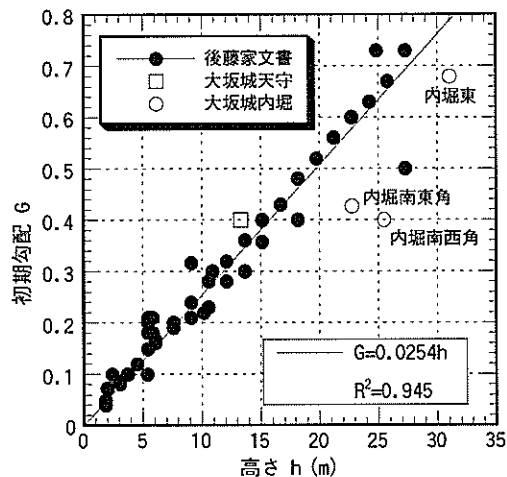


図-3.4 高さ と 初期勾配 の 関係

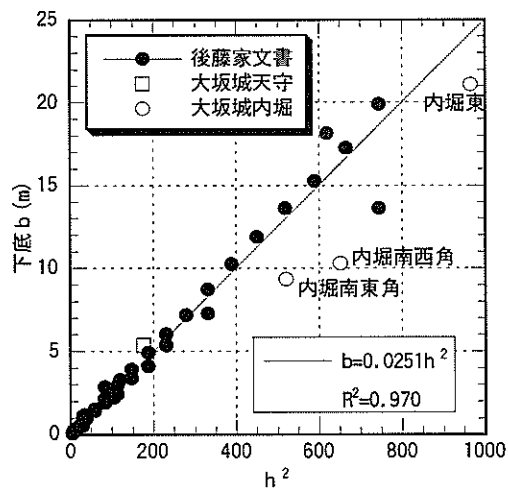


図-3.5 高さ と 下底 の 関係

以上の関係から、石垣高さ 5, 10, 15, 20, 25, 30m の石垣形状を求めると、図-3.7 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 $h_2 \left(= \frac{2}{3}h \right)$ 部分の勾配の変化の計算は、高さ 1m ごとに行った。

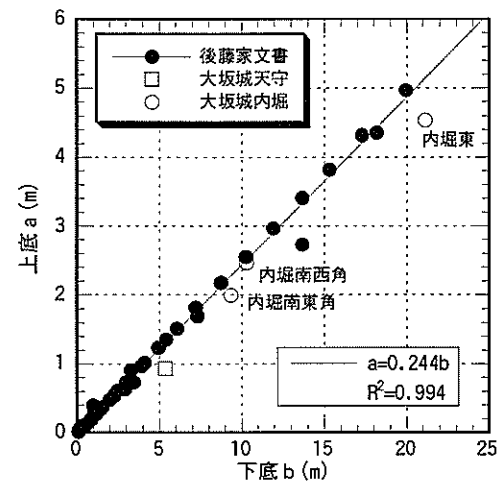


図-3.6 下底 と 上底 の 関係

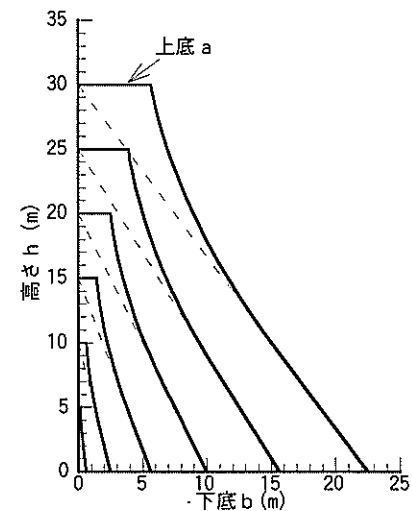


図-3.7 「後藤家文書」の設計例より導いた隅角部石垣の形状

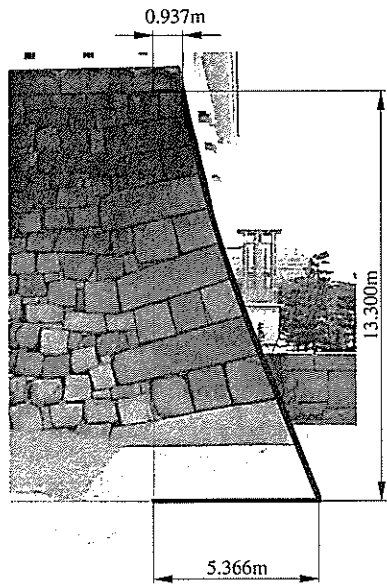


図-3.8 大坂城天守石垣北西角

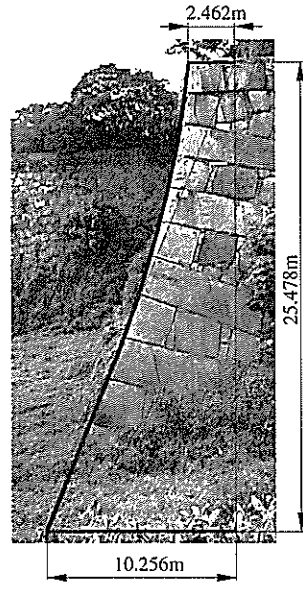


図-3.9 大坂城内堀石垣南西角

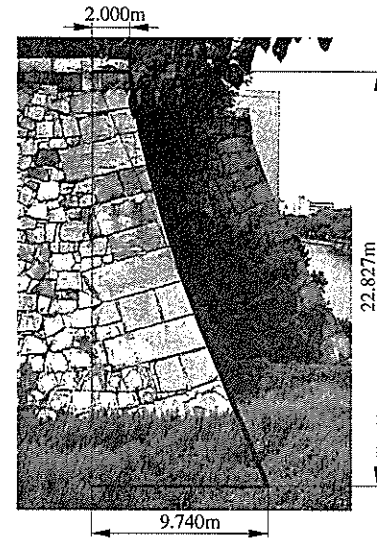


図-3.10 大坂城内堀石垣南東角

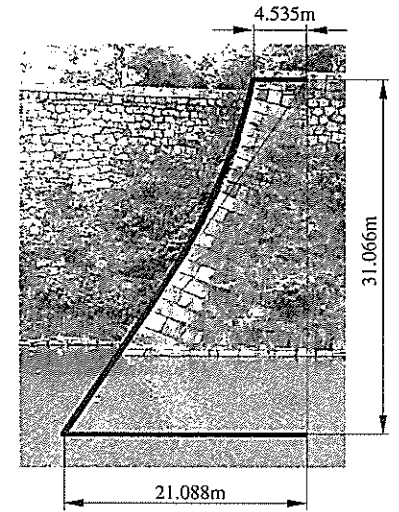


図-3.11 大坂城内堀石垣東

3.3.4 大坂城隅角部石垣への適用

現存する大坂城石垣と前述した「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-3.8～3.11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 $h_2\left(=\frac{2}{3}h\right)$ 部分の勾配の変化の計算は高さ1mごとに行った。図-3.8, 3.10, 3.11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」による設計手法が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-3.12に示している。この図より、大坂城石垣は天守台石垣をのぞいて、いずれも「後藤家文書」の設計例より導いた形状よりも勾配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-3.4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-3.13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

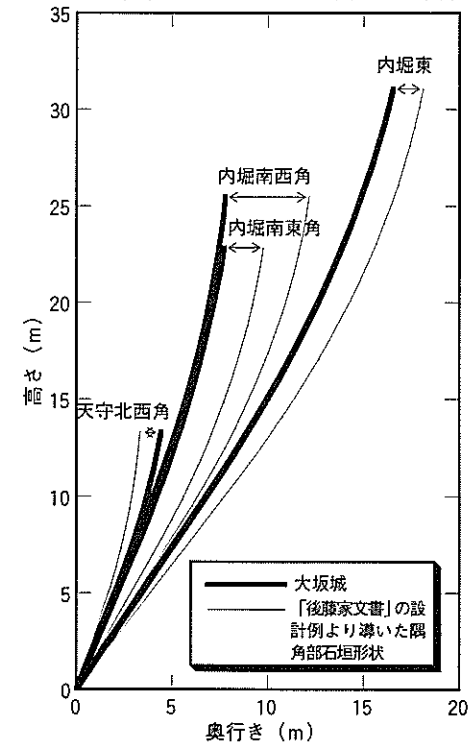


図-3.12 隅角部石垣形状の比較

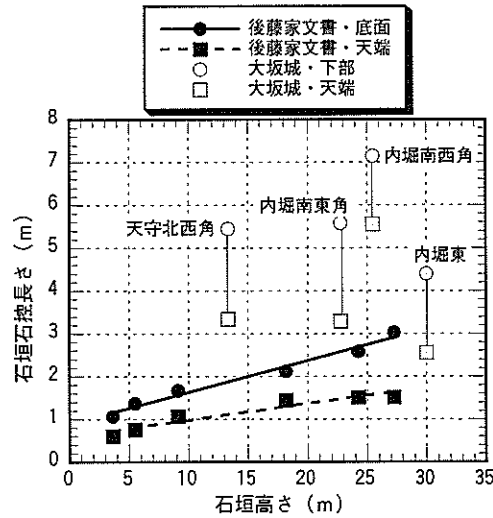


図-3.13 石垣石控長さの比較

石の奥行長さである石垣石控長さと石垣高さの関係を示したものに、現存する大坂城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。

3.4 「石垣秘伝之書」による設計手法の解明とその数式化

3.4.1 「石垣秘伝之書」の設計手法

「石垣秘伝之書」による城郭石垣の勾配のつけ方は、図-3.14 のように以下のような手順で定めたものと考えられる。

- 1) 高さ h (AC) に応じて、下底 b (CD) と上底 a (AF) を定める。
- 2) 下から1間の部分は、初期勾配 G で直線 DE を決定する。
- 3) 上底 a を n 分割した値 a_0 を次式から算出する。

$$a_0 = \frac{a}{n} \quad (3.11)$$

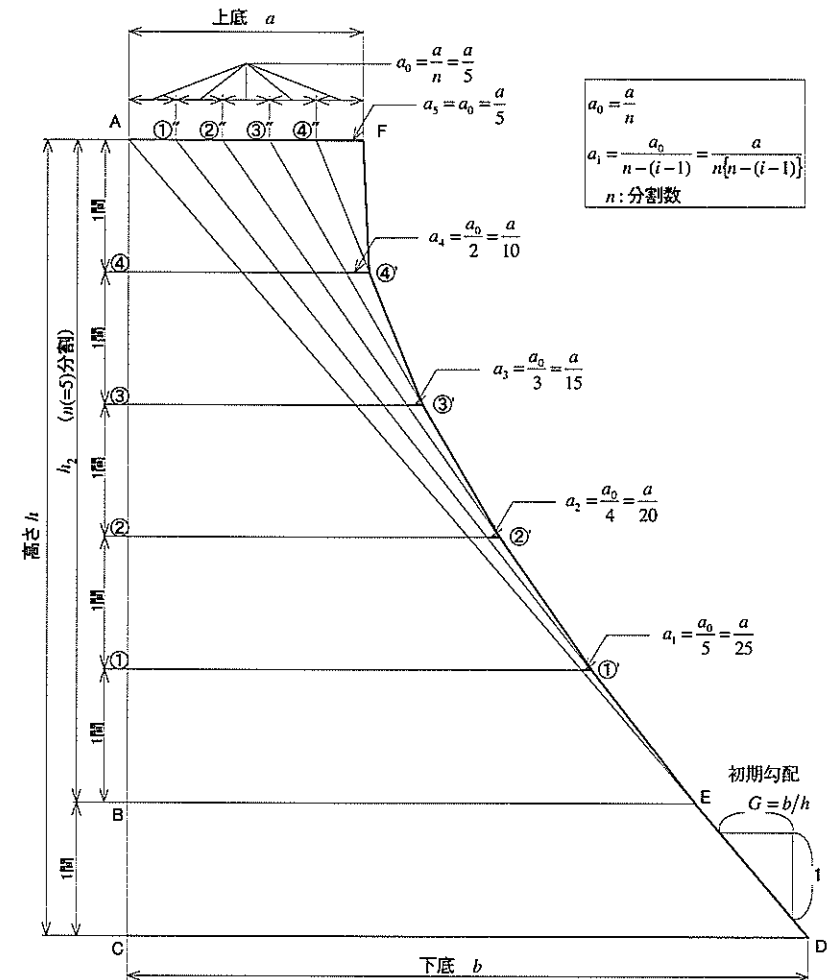


図 3-14 「石垣秘伝之書」による設計

ただし、 n ：分割数

4) 上へ1間上がるごとにその前の勾配より次式で算出される a_i だけ石垣前面に張り出す。

$$a_i = \frac{a_0}{n - (i - 1)} \quad (3.12)$$

例えば、図-3.14 に示す5分割の場合を例にとると以下ようになる。

- 1) 下から2間目では①を通る水平線とDEの延長線DAとの交点より $a_1 = a/25$ だけ石垣前面に張り出した点を①とする。
- 2) 下から3間目では②を通る水平線とE①の延長線E①'との交点より $a_2 = a/20$ だけ石垣前面に張り出した点を②とする。
- 3) 下から4間目では③を通る水平線と①②の延長線①②'との交点より $a_3 = a/15$ だけ石垣前面に張り出した点を③とする。
- 4) 下から5間目では④を通る水平線と②③の延長線②③'との交点より $a_4 = a/10$ だけ石垣前面に張り出した点を④とする。
- 5) 点E, ①, ②, ③, ④, Fを結ぶことで、EF間の石垣の形状を決定する。

ここで、原文の一部を以下に紹介する。

「高サ拾間の石垣ニ、四分ノ打田シト云時、六ニ四ヲ掛レハ、二丈四尺ノ打出ト知ル。五ノのりト云時、六ニ五ヲ掛レハ、下一間ニテ三尺ノノリト云。此三尺ヲ高十間ニ掛レハ、三丈ト成。此三丈ノ内ヨリ、打出シ二丈四尺ヲ引ハ、六尺残ル。此六尺ヲ高九間ニ割ハ、一間ニツキ、六寸六分ニアタル。」¹³⁾

これは次のような意味となる。

「石垣の高さが10間（6丈）で4分の打ち出しの時、6に4をかけると打ち出しは2丈4尺となる。1間（6尺）に5分ののりなので、6尺×0.5=3尺となる。この3尺に高さ10間をかければ下底3丈（30尺）となる。上底は3丈-2丈4尺=6尺である。この6尺を高さ9間でわれば、1間につき6寸6分となる。」

ここで図-3.14との対応を示すと $a=6$ 尺、 $b=3$ 丈、 $n=9$ 、 $a_0=6$ 寸6分となる。

3.4.2 石垣反り曲線勾配部分の数式化

「石垣秘伝之書」による設計手法の分割数 n を無限に大きくした場合、どのような曲線になるのかを以下で検討する。

図-3.15 に示すように点Aを原点とする座標軸を設定すると、 $n=5$ 分割した場合の各折れ点の座標は表-3.2 のようになる。

表-3.2 より、 n 分割した場合の下から i 番目の x 座標と y 座標は次のような関係になると考えられる。

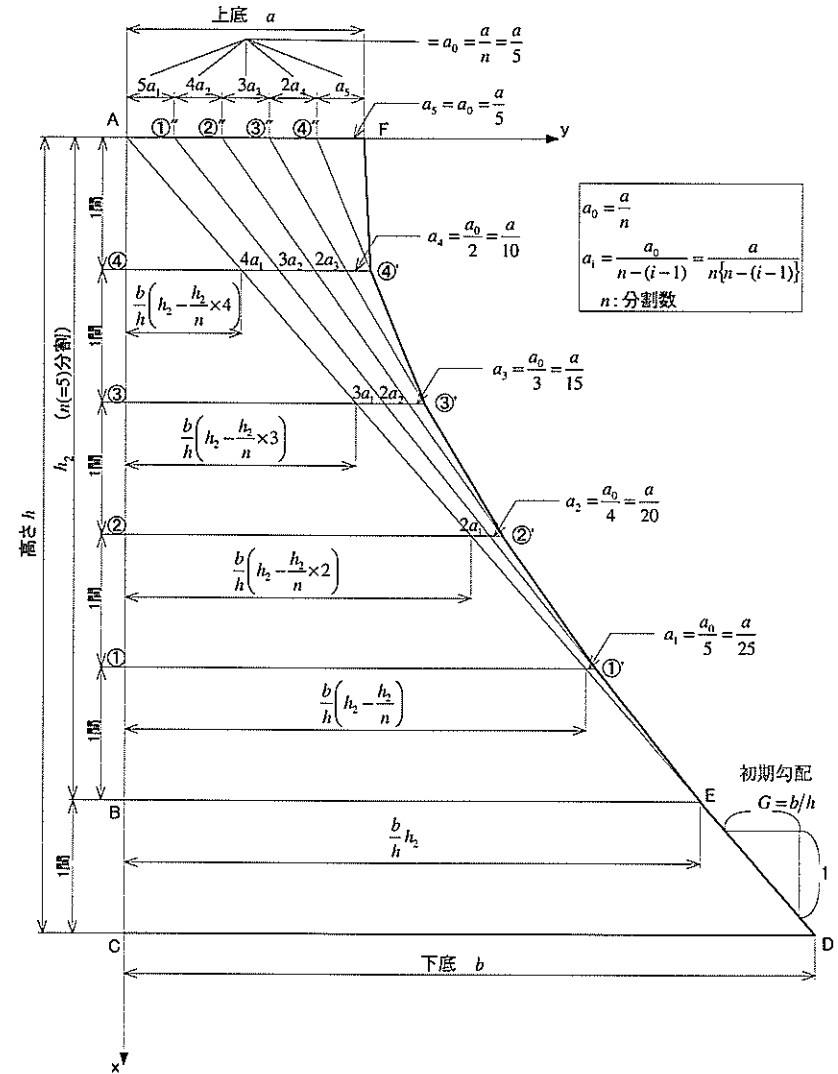


図-3.15 「石垣秘伝之書」による設計の数式化

表-3.2 各折れ点の座標値

折れ点	x	y
E	h_2	$\frac{b}{h} h_2$
①	$h_2 - \frac{h_2}{n} \times 1$	$\frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 1 \right) + \frac{a_0}{n} \times 1$ $= \frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 1 \right) + a_0 \left\{ 1 - (n-1) \frac{1}{n} \right\}$
②	$h_2 - \frac{h_2}{n} \times 2$	$\frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 2 \right) + \frac{a_0}{n} \times 2 + \frac{a_0}{n-1} \times 1$ $= \frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 2 \right) + a_0 \left\{ 2 - (n-2) \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} \right) \right\}$
③	$h_2 - \frac{h_2}{n} \times 3$	$\frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 3 \right) + \frac{a_0}{n} \times 3 + \frac{a_0}{n-1} \times 2 + \frac{a_0}{n-2} \times 1$ $= \frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 3 \right) + a_0 \left\{ 3 - (n-3) \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} \right) \right\}$
④	$h_2 - \frac{h_2}{n} \times 4$	$\frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 4 \right) + \frac{a_0}{n} \times 4 + \frac{a_0}{n-1} \times 3 + \frac{a_0}{n-2} \times 2 + \frac{a_0}{n-3} \times 1$ $= \frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 4 \right) + a_0 \left\{ 4 - (n-4) \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \frac{1}{n-3} \right) \right\}$
F	0	a

$$\begin{cases} x_i = h_2 - \frac{h_2}{n} \times i & (3.13) \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_i = \frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times i \right) + a_0 \left\{ i - (n-i) \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \dots + \frac{1}{n-(i-1)} \right) \right\} & (3.14) \end{cases}$$

n : 分割数, i : 折れ点の番号 ($0 \leq i \leq n$)

ここで, x_i と y_i の関係を求めると次のようになる。

式(3.13)より

$$\frac{i}{n} = 1 - \frac{x_i}{h_2} \quad (3.15)$$

式(3.14)より

$$\begin{aligned} y_i &= \frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times i \right) + a_0 \left\{ i - (n-i) \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \dots + \frac{1}{n-(i-1)} \right) \right\} \\ &= \frac{b}{h} x_i + \frac{a}{n} \left\{ i - (n-i) \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \dots + \frac{1}{n-(i-1)} \right) \right\} \\ &= \frac{b}{h} x_i + a \left\{ \frac{i}{n} - \left(1 - \frac{i}{n} \right) \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \dots + \frac{1}{n-(i-1)} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3.16)$$

ここで,

$$\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \dots + \frac{1}{n-(i-1)} = A \quad (3.17)$$

とおくと

$$\int_{h_2 - (i-1) \frac{h_2}{n}}^{h_2} \frac{1}{x} dx \leq A \leq \int_{h_2 - i \frac{h_2}{n}}^{h_2} \frac{1}{x} dx \quad (3.18)$$

となる。

そして,

$$\int_{h_2 - (i-1) \frac{h_2}{n}}^{h_2} \frac{1}{x} dx = [\log_e x]_{h_2 - (i-1) \frac{h_2}{n}}^{h_2} = \log_e \frac{h_2}{h_2 - (i-1) \frac{h_2}{n}} = \log_e \frac{1}{1 - (i-1)/n} = \log_e \frac{1 + 1/n}{1 - (i-1)/n} = \log_e \frac{1 + 1/n}{1 + 1/n - (1 - x_i/h_2)} \quad (3.19)$$

ここで, $n \rightarrow \infty$ のとき, 上式は次の式となる。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{h_2 - (i-1) \frac{h_2}{n}}^{h_2} \frac{1}{x} dx = \log_e \frac{h_2}{x_i} \quad (3.20)$$

また,

$$\int_{h_2 - i \frac{h_2}{n}}^{h_2} \frac{1}{x} dx = [\log_e x]_{h_2 - i \frac{h_2}{n}}^{h_2} = \log_e \frac{h_2}{h_2 - i \frac{h_2}{n}} = \log_e \frac{1}{1 - i/n} = \log_e \frac{1}{1 - (1 - x_i/h_2)} = \log_e \frac{h_2}{x_i} \quad (3.21)$$

となる。

よって, $n \rightarrow \infty$ のとき,

$$\log_e \frac{h_2}{x_i} \leq A \leq \log_e \frac{h_2}{x_i} \quad (3.22)$$

となるので,

$$A = \log_e \frac{h_2}{x_i} \quad (3.23)$$

である。

よって,

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

$$\begin{aligned}
 &= \frac{b}{h}x + \frac{a}{h_2} \left(\log_e \frac{x}{h_2} - 1 \right) x + a \\
 &= \left\{ \frac{a}{h_2} \left(\log_e \frac{x}{h_2} - 1 \right) + \frac{b}{h} \right\} x + a \quad (3.24)
 \end{aligned}$$

となる。

よって、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間は次式であらわすことができる。

$$y = \left\{ \frac{a}{h_2} \left(\log_e \frac{x}{h_2} - 1 \right) + \frac{b}{h} \right\} x + a \quad (3.25)$$

3.5 「石塙書」による設計手法の解明とその数式化

3.5.1 「石塙書」の設計手法

北垣¹⁴⁾によって紹介されている「石塙書」には城郭石塙の設計方法についての具体的な記述はなく、高さに応じて下から1間ごとの勾配が例として示されているだけである。それをまとめたものが表-3.3である。例えば、高さ3間と6間の石塙は図-3.16に示しているような形状となる。

それらより設計方法を導くと、勾配のつけ方は図-3.17のように以下のような手順で定めたものと推定される。

- 1) 高さ h (AC) に応じて、下底 b (CD) と上底 a (AF) を定める。
- 2) 下から1間の部分は、初期勾配 G で直線DEを決定する。
- 3) 上へ1間上がるごとにその前の勾配より次式で算出される a_i だけ石塙前面に張り出す。

表-3.3 「石塙書」による勾配のつけ方

高さ [間]	仰(ノリ)	1間目	2間目	3間目	4間目	5間目	6間目	7間目	8間目	9間目	10間目
	丈.寸.分	尺.寸.分	尺.寸.分	尺.寸.分	尺.寸.分	尺.寸.分	尺.寸.分	尺.寸.分	尺.寸.分	尺.寸.分	尺.寸.分
2	1.8.0	1.1.0	7.0								
3	3.5.0	1.4.5	1.2.5	8.0							
4	4.5.0	1.5.0	1.3.5	1.0.5	6.0						
5	6.5.0	1.8.0	1.6.5	1.4.0	1.0.5	6.0					
6	9.0.0	2.0.0	1.9.5	1.7.0	1.4.5	1.1.5	7.5				
7	1.2.0.0	2.3.0	2.2.0	2.0.5	1.8.5	1.6.0	1.2.0	8.0			
8	1.3.5.0	2.5.0	2.4.0	2.2.5	2.0.5	1.7.0	1.3.0	9.0	4.0		
9	1.5.0.0	2.6.0	2.5.0	2.3.0	2.1.0	1.8.0	1.5.0	1.1.0	7.5	3.5	
10	1.8.0.0	2.6.0	2.5.5	2.4.5	2.3.0	2.1.0	1.8.5	1.6.0	1.3.0	8.5	4.0

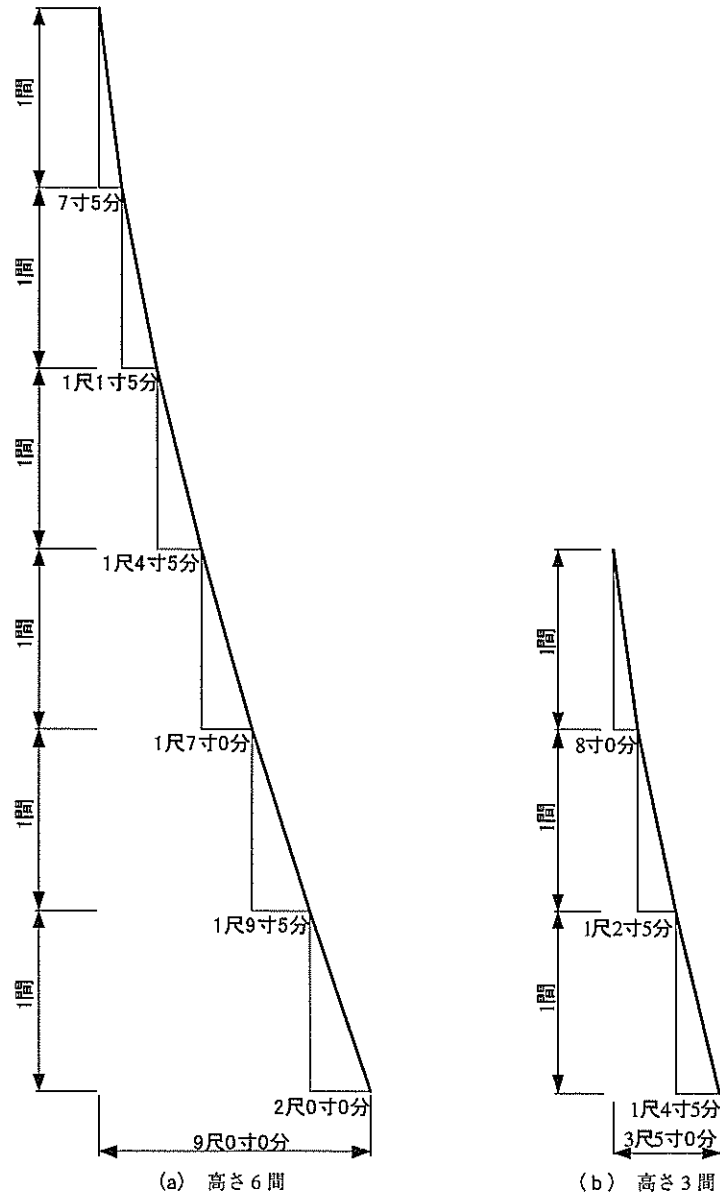


図3-16 「石塙書」による石塙形状

$$a_i = \frac{6a}{n(n+1)(n+2)}i \quad (3.26)$$

ただし、 n ：分割数

例えば、図-3.17 に示す 5 分割の場合を例にとると以下のようになる。

- 1) 下から 2 間目では①を通る水平線と DE の延長線 DA との交点より $a_1 = a/35$ だけ石垣前面に張り出した点を①とする。
- 2) 下から 3 間目では②を通る水平線と E①の延長線 E①' との交点より $a_2 = 2a/35$ だけ石垣前面に張り出した点を②とする。
- 3) 下から 4 間目では③を通る水平線と①②の延長線①②' との交点より $a_3 = 3a/35$ だけ石垣前面に張り出した点を③とする。
- 4) 下から 5 間目では④を通る水平線と②③の延長線②③' との交点より $a_4 = 4a/35$ だけ石垣前面に張り出した点を④とする。
- 5) 点 E, ①, ②, ③, ④, F を結ぶことで、EF 間の石垣の形状を決定する。

また、表-3.3 に示した「石塙書」に記述された値と、上記で推定した構築手法より得られた値とを比較したものが図-3.18 である。両者は非常によく一致していることから、上記の推定形状はほぼ正しいと判断することができる。

このように、3 種の構築手法とも曲線を有していることになるが、八尾ら¹⁵⁾の理論的解析によると、現存する城郭石垣断面の曲線は、石垣に働く土圧と石垣石の自重による合力の作用点を結んだ線である示力線とよく類似した曲線となり、石垣の安定は土圧の大きさに応じて変化する石垣の断面形状と初期勾配に支配されるとしている。

なお、本計算においては 1 尺=0.303m として計算している。

3.5.2 石垣反り曲線勾配部分の数式化

「石塙書」による設計手法の分割数 n を無限大とした場合に収束する曲線形状について、以下で検討する。

図-3.19 に示すように点 A を原点とする座標軸を設定すると、 $n=5$ 分割した場合の各折れ点の座標は表-3.4 のようになる。

表-3.4 より、 n 分割した場合の下から i 番目の x 座標と y 座標は次のような関係になると考えられる。

$$\begin{cases} x_i = h_2 - \frac{h_2}{n} \times i & (3.27) \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_i = \frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times i \right) + \{ a_1 \times i + a_2 \times (i-1) + a_3 \times (i-2) + \dots + a_{i-1} \times 2 + a_i \times 1 \} & (3.28) \end{cases}$$

n ：分割数、 i ：折れ点の番号 ($0 \leq i \leq n$)

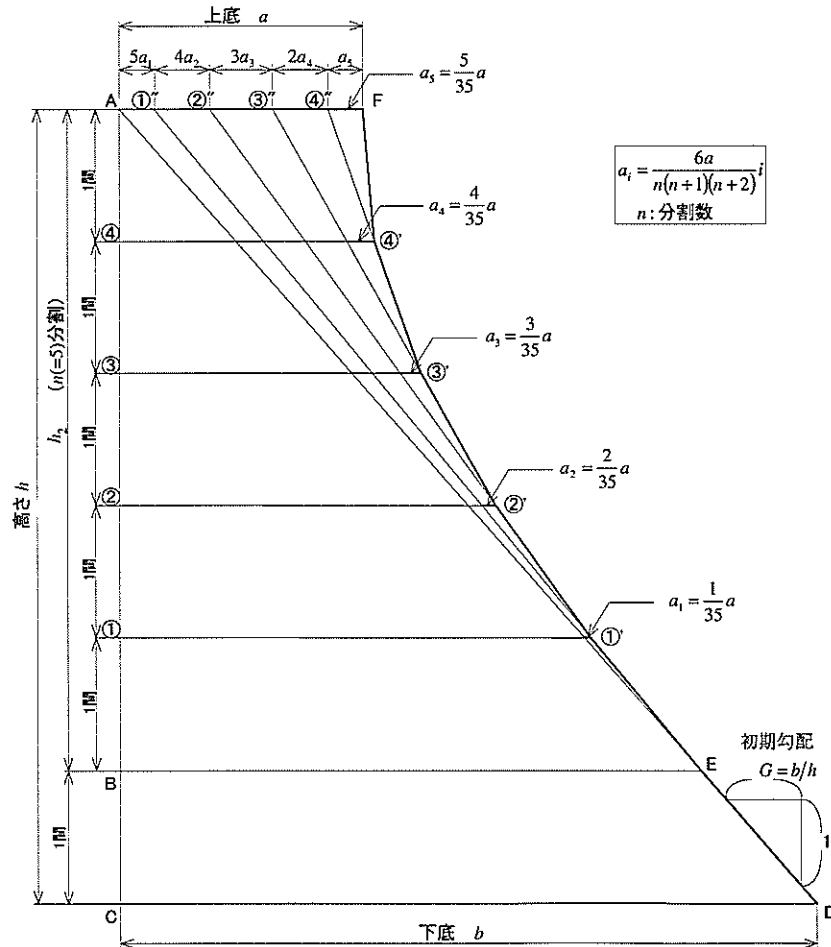


図-3.17 「石塙書」による設計

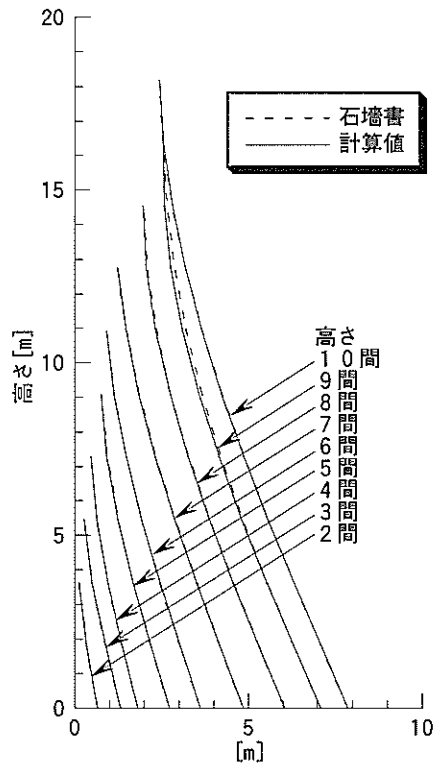


図-3.18 「石塙書」と計算値の比較

ここで、 x_i と y_i の関係を求めると次のようになる。

式(3.19)より

$$\frac{i}{n} = 1 - \frac{x_i}{h_2} \quad (3.29)$$

式(3.20)より

$$\begin{aligned} y_i &= \frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times i \right) + \{ a_1 \times i + a_2 \times (i-1) + a_3 \times (i-2) + \dots + a_{i-1} \times 2 + a_i \times 1 \} \\ &= \frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times i \right) + \{ a_1 \times i + a_1 \times 2 \times (i-1) + a_1 \times 3 \times (i-2) + \dots + a_1 \times (i-1) \times 2 + a_1 \times i \times 1 \} \\ &= \frac{b}{h} x_i + a_1 \{ i + 2(i-1) + 3(i-2) + \dots + (i-1)2 + i \} \end{aligned}$$

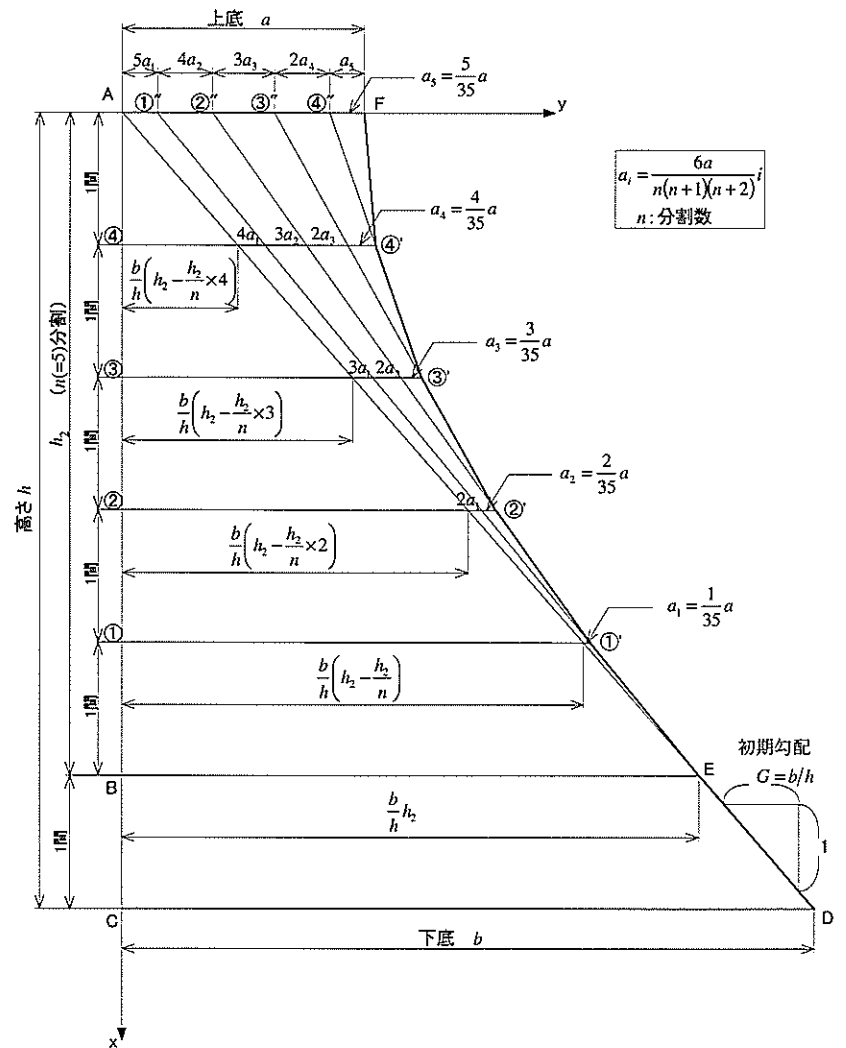


図-3.19 「石塙書」による設計の数式化

表-3.4 各折れ点の座標値

折れ点	x	y
E	h_2	$\frac{b}{h}h_2$
①'	$h_2 - \frac{h_2}{n} \times 1$	$\frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 1 \right) + a_1 \times 1$
②'	$h_2 - \frac{h_2}{n} \times 2$	$\frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 2 \right) + a_1 \times 2 + a_2 \times 1$
③'	$h_2 - \frac{h_2}{n} \times 3$	$\frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 3 \right) + a_1 \times 3 + a_2 \times 2 + a_3 \times 1$
④'	$h_2 - \frac{h_2}{n} \times 4$	$\frac{b}{h} \left(h_2 - \frac{h_2}{n} \times 4 \right) + a_1 \times 4 + a_2 \times 3 + a_3 \times 2 + a_4 \times 1$
F	0	a

$$\begin{aligned}
 &= \frac{b}{h}x_i + \frac{6a}{n(n+1)(n+2)} \times \frac{i(i+1)(i+2)}{6} \\
 &= \frac{b}{h}x_i + \frac{i(i+1)(i+2)}{n(n+1)(n+2)}a \\
 &= \frac{b}{h}x_i + \frac{i/n(i/n+1/n)(i/n+2/n)}{(1+1/n)(1+2/n)}a \\
 &= \frac{b}{h}x_i + \frac{(1-x_i/h_2)(1-x_i/h_2+1/n)(1-x_i/h_2+2/n)}{(1+1/n)(1+2/n)}a \quad (3.30)
 \end{aligned}$$

ここで、 $n \rightarrow \infty$ のとき、

$$y = \frac{b}{h}x + \left(1 - \frac{x}{h_2}\right)^3 a \quad (3.31)$$

となる。

よって、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3次曲線で表すことができる。

$$y = a \left(1 - \frac{x}{h_2}\right)^3 + \frac{b}{h}x \quad (3.32)$$

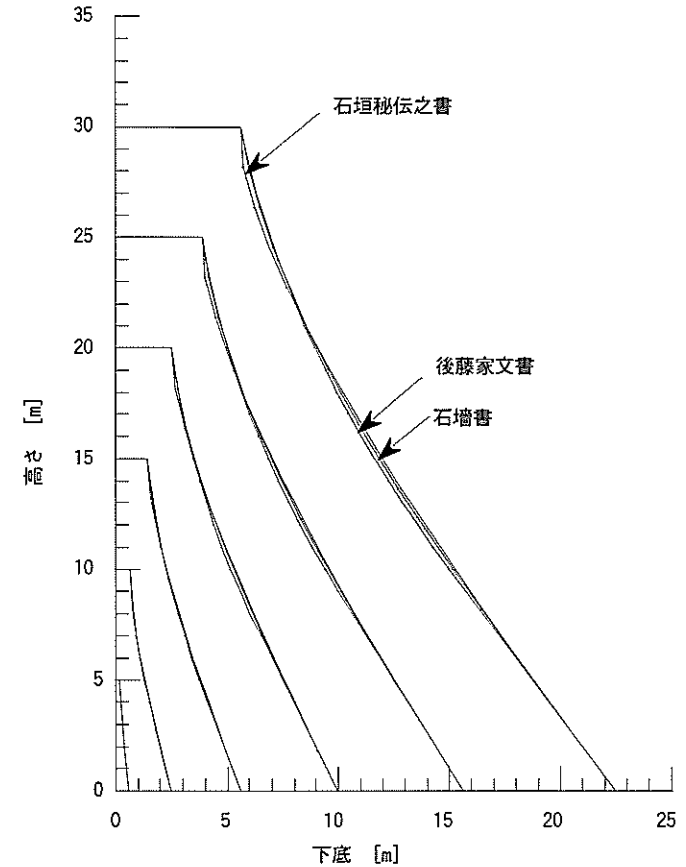


図-3.20 設計方法の比較

3.6 3種の設計手法の比較

以上に示した3種の構築手法により石垣形状にはどのような違いがあるのかを、高さ30、25、20、15、10、5mについて比較したものが図-3.20である。ここで、勾配の変化する部分の計算は高さ1mごとに行った。また、高さ h と上底 a および下底 b の関係は下記に示す式を用いた⁴⁾。

$$b = 0.025h^2 \quad (3.9 \text{ 再掲})$$

$$a = \frac{1}{4}b \quad (3.10 \text{ 再掲})$$

表-3.5 3種の構築手法による反り曲線勾配部分の数式

設計手法	数式
後藤家文書	$y = a \left(1 - \frac{x}{h_2} \right)^2 + \frac{b}{h} x$
石垣秘伝之書	$y = \left\{ \frac{a}{h_2} \left(\log_e \frac{x}{h_2} - 1 \right) + \frac{b}{h} \right\} x + a$
石墻書	$y = a \left(1 - \frac{x}{h_2} \right)^3 + \frac{b}{h} x$

なお、3種の構築手法の反り曲線勾配部分を数式化したものを表-3.5にまとめて示している。

高さ30mの石垣に注目すると、中央部では「後藤家文書」が他者と異なった曲線を描き、上部では「石垣秘伝之書」が他者と異なった曲線を描いていることが読み取れる。また上部付近と中央部付近では「後藤家文書」と「石垣秘伝之書」の水平方向の違いは50cm程度となっている。

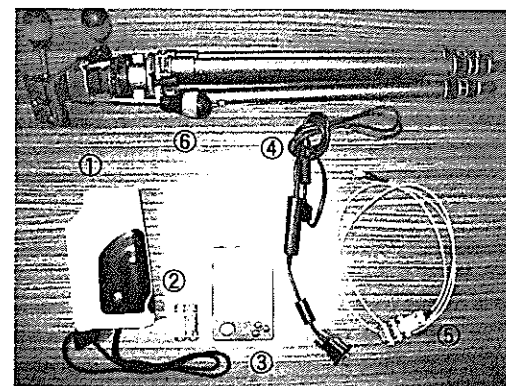
3.7 測定装置と石垣の測定方法

3.7.1 城郭石垣断面測定装置

石垣断面形状の計測に用いた測定装置を図-3.21に示す。測定装置は測定ポイントにプリズムなどの反射板を設置する必要のないノンプリズムレーザーであり、測定ポイントまでの距離と角度を同時に測定することが可能となっている。測定は対象とする石垣断面のほぼ正面に器械を据え付け、水平方向の軸を固定したまま鉛直方向に角度と距離の測定を行った。

測定装置の特徴を以下に列挙する。

- ・コンパクトで600gと軽量なため、持ち運びが簡単である。
- ・操作が簡便である。
- ・標準の単Ⅲアルカリ電池2個を使用して1日中使用可能である。
- ・レーザー光を測定ポイントに照射し、レーザー光が反射して戻ってくるまでの時間(測定時間)が0.3秒と早いため、距離と角度を同時に素早く測定することが可能である。
- ・測定ポイントにプリズムを設置しなくても測定が可能である。
- ・測定範囲が広いので、一平面を測定する上で測定装置の盛り替えの必要がない(障害物がなく見渡せる場合に限る)。



- ① ノンプリズムレーザー
 - ② 単三電池2個
 - ③ データコレクタ
 - ④⑤RS232-Cケーブル
 - ⑥ 三脚
- 距離範囲 最大 300m

図-3.21 測定装置

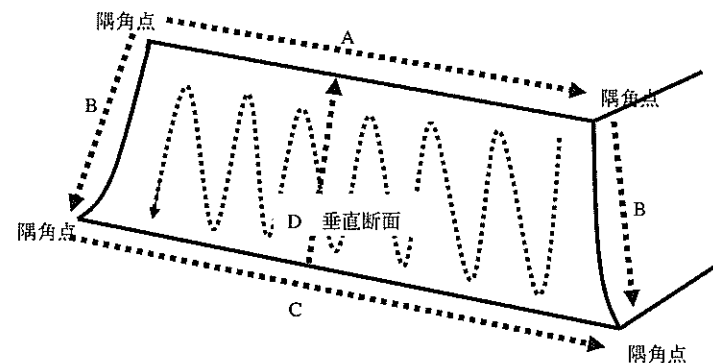


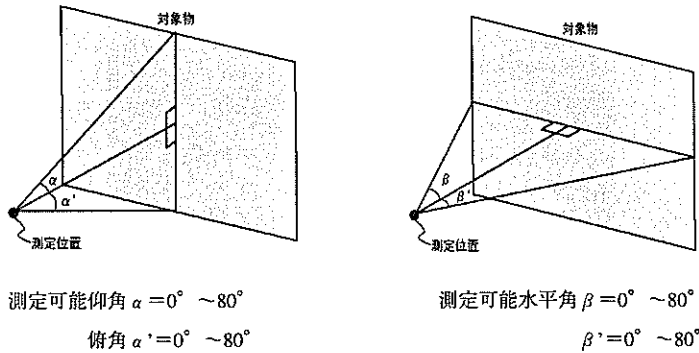
図-3.22 石垣断面計測手順

- ・貴重な文化遺産である石垣を傷つけることなく安全な場所から計測できる。
- 以上のように、本測定装置は安全かつ簡便に石垣を計測できるものといえる。

3.7.2 城郭石垣断面測定手順

石垣の測定は以下のような手順で行った。(図-3.22)

- 1) 対象となる石垣面の隅角点を計測する。



測定可能仰角 $\alpha = 0^\circ \sim 80^\circ$
 俯角 $\alpha' = 0^\circ \sim 80^\circ$

測定可能水平角 $\beta = 0^\circ \sim 80^\circ$
 $\beta' = 0^\circ \sim 80^\circ$

測定可能距離 300m (プリズムなし)
 5km (プリズムあり)

図-3.23 測定可能仰角・俯角，水平角説明図

- 2) 石垣面上の辺を計測する (図中 A) .
- 3) 石垣面の両側線を計測する (図中 B) .
- 4) 石垣面の下辺を計測する (図中 C) .
- 5) 垂直断面を計測する (図中 D) .
- 6) 石垣面全体をランダムに計測する

ここで手順 5) の垂直断面の計測方法について要点を説明する.

- ・ 石垣面の正面に機械を据え付ける.
- ・ 三脚の水平成分を固定することで，左右のぶれを抑制する.
- ・ 計測機器を垂直に少しずつ振り上げながら測定する.

以上の点に配慮し，極めて垂直な断面が計測できるようにした.

3.7.3 測定装置の精度

測定装置の測定可能範囲を図-3.23 に示している.

ここで，距離測定誤差を確認するために，対象物より 30m 離れた場所にノンプリズムレーザー測距儀を設置し，同一点を 100 回測定した. その結果を表-3.6 に示している. 図-3.24 は実測値の誤差とその回数との関係をグラフで表したものである. これより測定誤差は $\pm 5\text{cm}$ 以内であり，誤差 0 となる回数が最も多く，誤差が大きくなるにつれその回数は減少していくことがわかる.

本研究では一測定点につき複数回測定を行い，その平均をとることで誤差を最小限にとどめた.

表-3.6 距離測定誤差

番号	距離 (cm)	誤差 (cm)	番号	距離 (cm)	誤差 (cm)
1	2998	-2	51	2999	-1
2	3000	0	52	3000	0
3	3001	1	53	3001	1
4	3001	1	54	3003	3
5	2998	-2	55	2999	-1
6	3000	0	56	2999	-1
7	3000	0	57	2996	-4
8	2998	-2	58	2996	-4
9	2999	-1	59	3003	3
10	3001	1	60	3002	2
11	2999	-1	61	3000	0
12	3000	0	62	2999	-1
13	2995	-5	63	3004	4
14	3001	1	64	3002	2
15	2998	-2	65	2997	-3
16	3002	2	66	3002	2
17	3000	0	67	2999	-1
18	3002	2	68	3004	4
19	2996	-4	69	3000	0
20	2995	-5	70	2997	-3
21	3003	3	71	3001	1
22	2996	-4	72	3001	1
23	2995	-5	73	3002	2
24	3003	3	74	3000	0
25	2998	-2	75	3000	0
26	2999	-1	76	3000	0
27	2999	-1	77	3002	2
28	2999	-1	78	3000	0
29	2998	-2	79	3002	2
30	3003	3	80	2999	-1
31	3000	0	81	3003	3
32	2996	-4	82	3001	1
33	3001	1	83	3002	2
34	2999	-1	84	3002	2
35	3000	0	85	3001	1
36	3000	0	86	3000	0
37	2999	-1	87	2997	-3
38	3001	1	88	3003	3
39	2998	-2	89	3000	0
40	2998	-2	90	3003	3
41	3000	0	91	3000	0
42	3000	0	92	2999	-1
43	3001	1	93	3004	4
44	2997	-3	94	3001	1
45	2997	-3	95	2997	-3
46	2999	-1	96	3004	4
47	3000	0	97	3004	4
48	2998	-2	98	3004	4
49	2995	-5	99	2999	-1
50	3000	0	100	3004	4

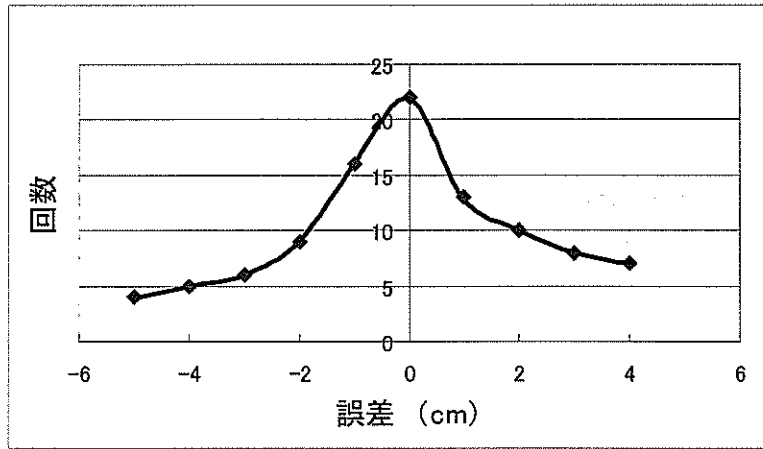


図-3.24 精度誤差分布図

以上のように、本研究において石垣断面の計測にノンプリズムレーザー測距儀を使用することを提案し、石垣表面の不規則な凹凸と石垣高さを考えると、その測定精度は石垣断面を計測するにあたり十分な精度を有していることが確認できた。さらに複数回計測することで、より精度を高めることについても確認できた。ノンプリズムレーザー測距儀は、石垣断面を計測するうえで他の測定装置と比べ最も適した性能があるといえる。

3.8 現存する城郭石垣と3種の設計手法の比較

計測を行ったいずれの石垣も構築手法が明らかとなっていないため、現状の城郭石垣を計測した値と「後藤家文書」、「石垣秘伝之書」および「石垣書」のそれぞれの構築手法による形状とを比較することで、対象石垣の構築手法について検討を加えた。その際に、対象とした石垣の形状が、構築当初のものであることを確認することは難しいことである。そこで同じ場所において、いくつかの断面形状を計測した結果から変状が少なく整った複数の断面形状のうちよく一致するものを初期形状と仮定し、比較検討を行った。

なお、孕み出しなどの変状と判断したところは、3種の構築手法の差以上の変形を現状の石垣が有している箇所とした。

3.8.1 現状石垣断面形状の測定

石垣断面形状の計測を図-3.21に示した測定装置を用いて実施し、計測は図-3.25に示している

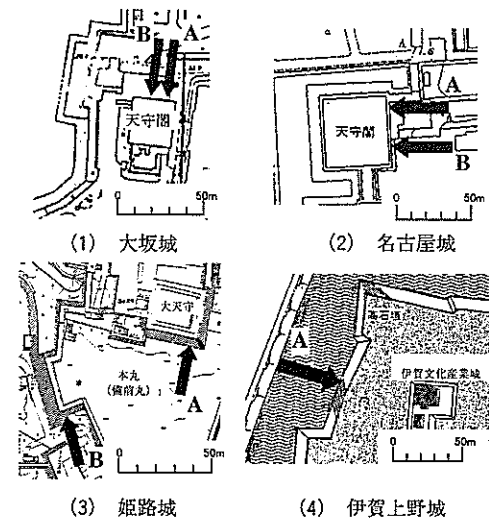


図-3.25 城郭石垣断面形状の計測地点

大坂城、名古屋城、姫路城、伊賀上野城の石垣について行った。

大坂城の計測は図-3.25(1)に示すとおり、天守閣北面のA地点とB地点において実施し、名古屋城は図-3.25(2)に示す天守閣東面石垣のA地点とB地点において行った。また姫路城は図-3.25(3)に示すA地点とB地点において、伊賀上野城は図-3.25(4)に示すA地点において、それぞれ石垣の計測を行った。

3.8.2 大坂城の石垣断面形状

大坂城の築城に関する年表を表-3.7に示している。図-3.26には大坂城天守北面石垣のA、B両地点で計測した値と3種の構築手法による形状を比較したものを示している。この図より3種の構築手法による違いはほとんど認められず、3種ともほぼ同じ形状を示していることがわかる。またこのことより、A地点では上部に少し孕み出しが、B地点では下部に50cm程度の孕み出しが認められる。このように構築手法を検討することで、構築当時の石垣形状を推定できれば、石垣の変状を把握することが可能となる。

3.8.3 名古屋城の石垣断面形状

名古屋城の築城に関する年表を表-3.8に示している。名古屋城天守東面石垣のA、B両地点のそれぞれの計測地点の計測値と構築手法3種を比較したものを図-3.27、3.28にそれぞれ示している。B地点(図-3.28)は石垣の高さがA地点(図-3.27)に比べると低く、また初期勾配も急なため、3種の構築手法に明確な違いは表れていない。しかしA地点における計測値は「後藤家

表-3.7 大坂城略年表

西暦	和暦	事項
1583	天正 11 年	秀吉が築城を開始する。
1585	天正 13 年	天守閣が完成する。
1588	天正 16 年	普請，一応終了。
1594	文禄 3 年	大坂惣構堀の普請。
1598	慶長 3 年	三之丸の拡張工事。秀吉の没後に秀頼が城主となる。
1614	慶長 19 年	大坂冬の陣。和睦により，惣構堀・外堀を埋められる。
1615	元和 1 年	大坂夏の陣。大坂城落城し，豊臣氏滅亡する。
1620	元和 6 年	徳川幕府が西国大名などに大坂助役を命じ，大坂城再築が開始される。
1626	寛永 3 年	天守竣工。
1629	寛永 6 年	3 期にわたる再築工事が完了する。

文書」による構築手法とよく一致していることがわかる。このことから，名古屋城石垣は「後藤家文書」による構築手法で築かれたのではないかと推測できる。

3.8.4 姫路城の石垣断面形状

姫路城の築城に関する年表を表-3.9 に示している。姫路城石垣の A, B 両地点における計測値と 3 種の構築手法を比較したものを図-3.29, 3.30 にそれぞれ示している。どちらの石垣形状も 3 種の構築手法によるものとよく似た形状を示している。

3.8.5 伊賀上野城の石垣断面形状

伊賀上野城の築城に関する年表を表-3.10 に示している。伊賀上野城の石垣形状は図-3.31 に示すように，勾配の変化が少なくほぼ直線に近い形で構築されているため，3 種の構築手法による違いが明瞭には表れていない。しかし，現状と構築手法の比較から，下部に孕み出しのあることがわかる。

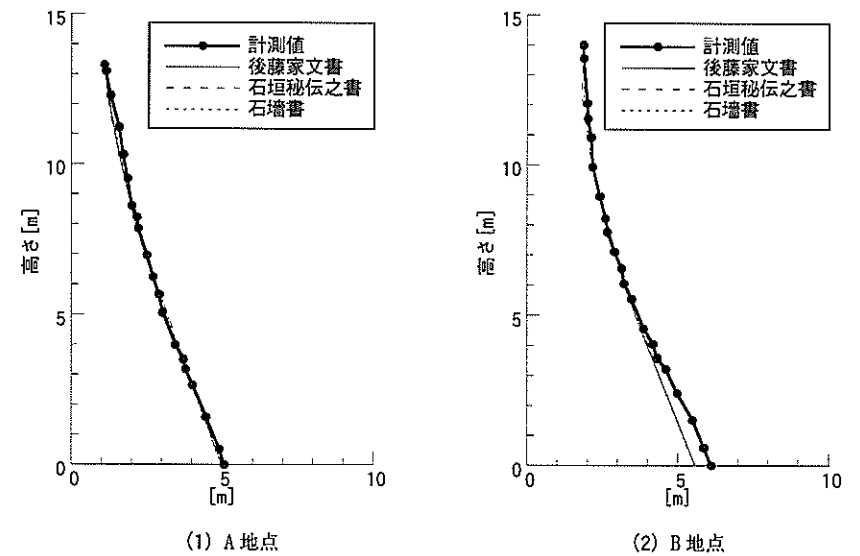


図-3.26 大坂城天守北面石垣

表-3.8 名古屋城略年表

西暦	和暦	事項
1610	慶長15年	徳川義直が築城を開始する。堀と石垣が完成する。
1612	慶長17年	天守と櫓が完成する。
1615	慶長20年	本丸御殿が完成する。

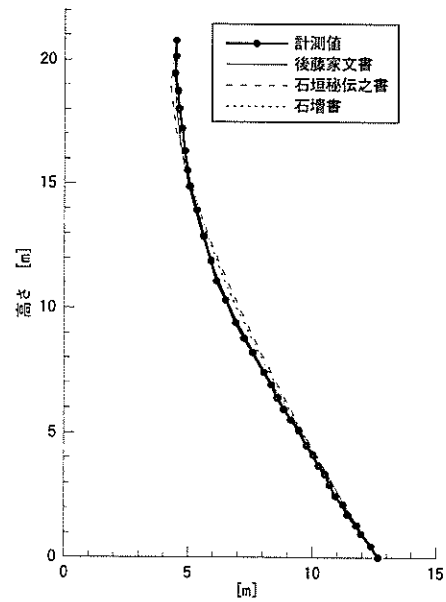


図-3.27 名古屋城天守東側面石垣 A

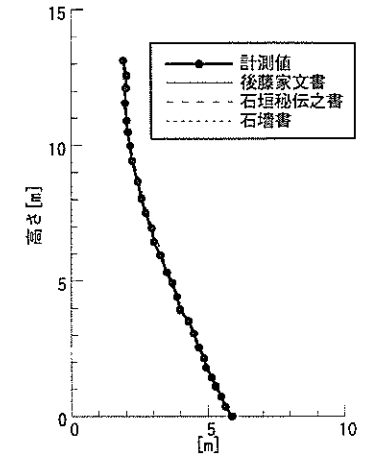


図-3.28 名古屋城天守東側面石垣 B

表-3.9 姫路城略年表

西暦	和暦	事項
1580	天正8年	黒田孝高が改築にかかる。
1581	天正9年	羽柴秀吉が三層の天守閣を築く。
1600	慶長5年	池田輝政が関が原の戦いの功績で城主となる。
1601	慶長6年	池田輝政が築城を開始する。
1609	慶長14年	築城終了。五層の天守閣となる。
1618	元和4年	本多忠政が西の丸を築き今日見られる全容を整える。

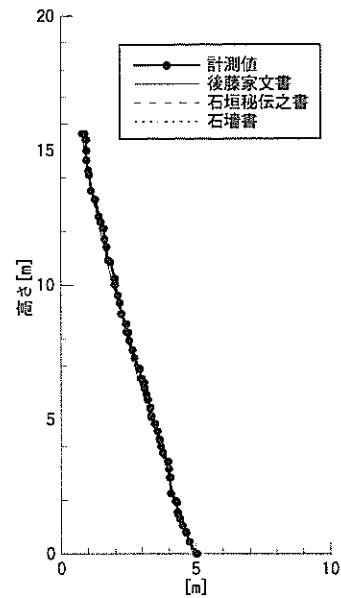
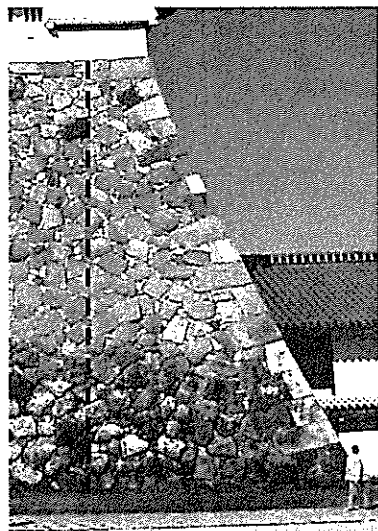


図-3.29 姫路城大天守南面石垣 A

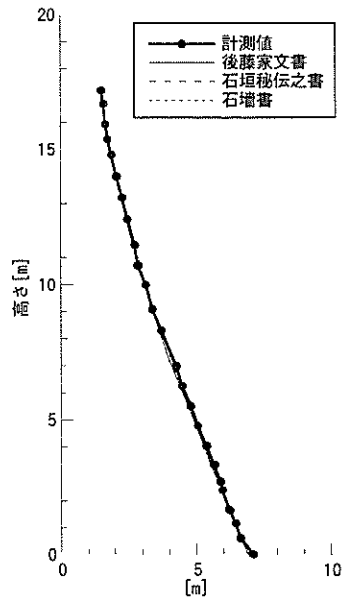


図-3.30 姫路城石垣 B

表-3.10 伊賀上野城略年表

西暦	和暦	事項
1581	天正9年	織田信長の次男である北畠信雄が伊賀を平定し、滝川雄利を守護に置く。築城を開始する。
1585	天正13年	筒井順慶の甥である筒井定次が城主となり大修理を行う。
1608	慶長13年	藤堂高虎が城主となり天守閣の増築に着工する。
1612	慶長17年	竣工直前の天守閣が暴風のため崩壊。以降、再建せず。

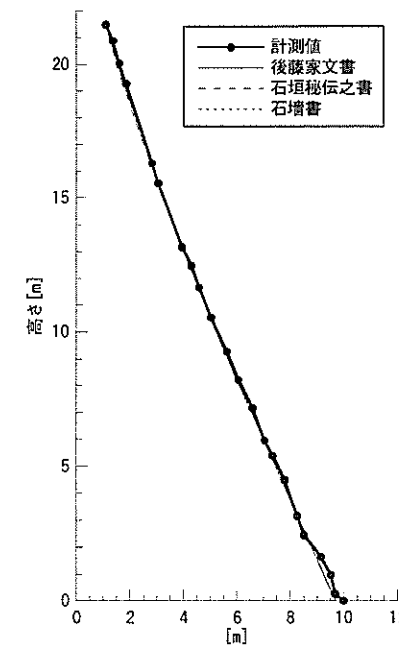


図-3.31 伊賀上野城石垣 A

3.9 結語

石垣の反り曲線勾配部分の構築手法およびその数式化について、「後藤家文書」および「石垣秘伝之書」、「石垣書」の3種類の文献をもとにそれらについて明らかにした。これら3種の構築手法による石垣の形状は、名古屋城石垣(図-3.27)のように反り曲線勾配が大きく変化するものについては違いが認められるが、伊賀上野城石垣(図-3.31)のように反りの変化が少なく、直線に近い形状のものには明瞭な差異が表れない。

石垣形状の測定にはノンプリズムレーザー測距儀を使用することを提案し、その測定精度は石垣断面を計測するにあたり十分な精度を有していることが確認でき、性能についても石垣断面を計測するうえで最も適したものであることが確認できた。

今回測定した、大坂城、名古屋城、姫路城、伊賀上野城のいずれの石垣においても、孕み出しなどの石垣の変形量に対する検討には、「後藤家文書」に記述されている設計手法による形状を基準と想定することで、実質的な対処は可能であることが判明した。このことにより、石垣の崩壊の危険性の判断や石垣遺構の保存あるいは修復に向けての活用についても期待できる。また、計測結果と3種の構築手法による石垣形状の比較により、石垣の変形量の推定が可能となった。この結果、石垣の孕み出しは中央部のみでなく、地盤に接している下部においても存在していることが明らかとなった。このことより、石垣の変形は地盤の強度特性と密接な関係を有しているものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 森本浩行, 西田一彦, 西形達明, 玉野富雄: 城郭石垣形状の設計に関する考察, 第37回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp.21-22, 2002.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 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) 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および構築に関する考察, 土木史研究, 第21号, 土木学会, pp.317-324, 2001.
- 7) 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.

- 8) 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, 1976.
- 9) 『佐敷花岡城跡保存整備工事報告集』, 芦北町, pp.5-19, 1998.
- 10) 永田新之允: 『錦帯橋史』, 岩国観光協会, pp.6-31, 1953.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 北垣聰一郎: 『石垣秘伝之書—北川作兵衛』, 佐賀県立名護屋城博物館, p.23, 2003.
- 14) 北垣聰一郎: 伝統技術からみた城郭石垣の勾配について, 関西大学考古学研究室開設50周年記念考古学論叢, pp.1047-1070, 2003.
- 15) 八尾眞太郎, 梶井健, 伊藤淳志: 城石垣の構造安定性に関する基礎的研究—その2 石垣の構造安全率—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造I, 日本建築学会, pp.533-534, 2001.

第4章 石垣断面形状の設計と歴史の変遷

4.1 概説

我が国における城郭石垣は、個々の石垣石の大きさや加工の状態、あるいは初期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。そして城郭石垣の構築技術は第2章で明らかとなったように、1600年前後のわずか40年ほどの間に急速な発達をみている。そのなかでも、写真-4.1に示している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¹⁾、石垣断面形状の反り曲線勾配に見られる構造美や、構造形式としての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。

このように我が国の城郭石垣は反りを有していることに加え、石垣石相互間に接着剤を用いない空積みであることなど、世界的に他に例を見ない独自の構造を持つ極めて優れた建設文化として価値の高い歴史的遺産である。

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。八尾ら²⁾の理論的解析においても現存する城郭石垣断面の曲線は、石垣に働く土圧と石垣石の自重による合力の作用線を結ん

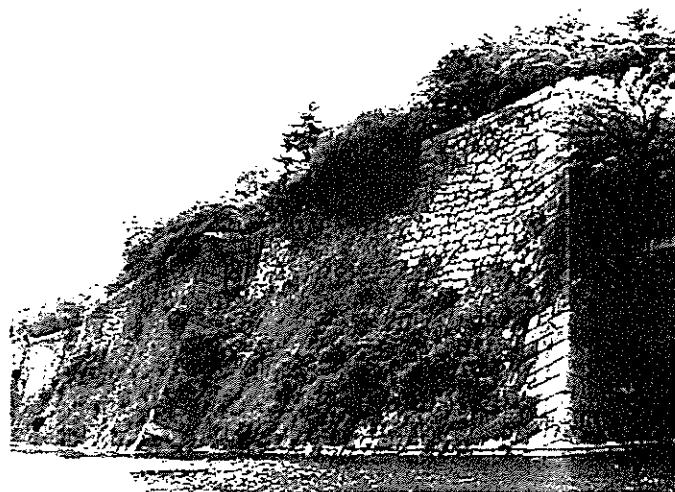


写真-4.1 大坂城内堀東側石垣

だ線である示力線とよく類似した曲線となり、石垣の安定は土圧の大きさに応じて変化する石垣の断面形状と初期勾配に支配されるとしている。また桑原³⁾の研究においても示力線と城郭石垣断面形状がよく一致しているという指摘がある。これらに加え、李ら⁴⁾によれば第1章の図-1.5で示したとおり、石垣を平面的に見た場合にも「平の透き」と呼ばれる曲線を設けていたことが判明している。これらは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、天野ら⁵⁾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。

そこで、本章においては、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⁶⁾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の変遷を検討し、構築技術の推移を把握することを試みた。

日本には数多くの城郭石垣が存在するが、構築年代の異なる石垣が存在する甲府城⁷⁾、岸和田城⁸⁾、姫路城⁹⁾、和歌山城¹⁰⁾と現在までに断面形状の計測を行うことができた名古屋城¹¹⁾、安土城、伊賀上野城¹²⁾、大坂城^{13),14)}、丸亀城¹⁵⁾の計9ヶ所の城郭石垣についての実測データを基礎資料とした。

なお第3章で明らかになったように、城郭石垣の設計手法^{16),17)}にはいくつかの方法があるが、本章では石垣構築当時の断面形状として「後藤家文書」¹⁸⁾の設計手法による形状を用いることとした。これは前章で指摘したように、城郭石垣の断面形状が「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も、実質的な対処が可能であることが判明したためである⁶⁾。よって「後藤家文書」の設計手法による石垣形状と現状の石垣断面形状とを比較検討することにより、石垣構築技術の変遷を把握した。

このように城郭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、土木史上の意義はもちろんのこと、世界的に貴重な石垣遺構の修復保存法の確立をはじめとして、現代における石造建造物の新たな設計手法の確立に対しても寄与することになるものと考えられる。

4.2 城郭石垣測定データ

4.2.1 城郭石垣の形状を決定づける要素

日本における城郭石垣の構築は16世紀後半から17世紀前半、すなわち戦国時代から江戸時代初期にかけて最も盛んに行われ、この時期に石垣構築技術は急速に発達した¹⁹⁾。また、それとともない石垣形状も大きく変化した。それらは石垣石の加工状況により荻生徂徠の「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種類に分類されることが多い。これは、図-4.1(a)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、図-4.1(b)に示している打込み接ぎは、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

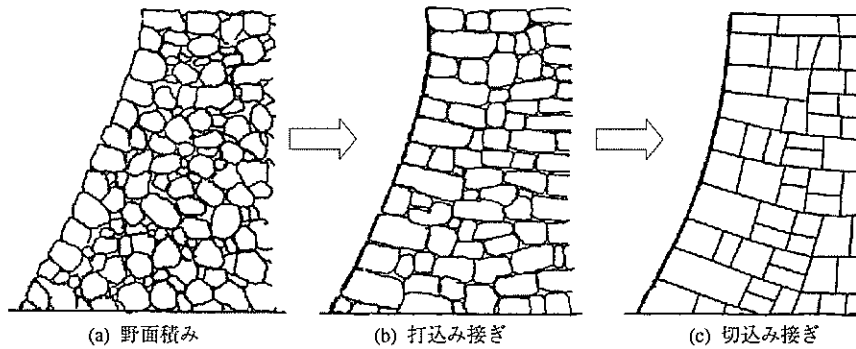
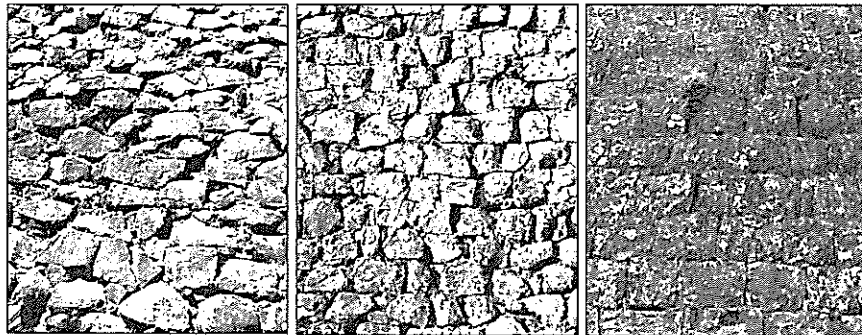


図-4.1 石垣石の加工状況による分類



(a) I期石垣 (野面積み) (1585年頃) (b) II期石垣 (打込み接ぎ) (1600年頃) (c) III期石垣 (切込み接ぎ) (1619年頃)

図-4.2 和歌山城

ある。さらに、図-4.1(c)に示す切込み接ぎは、石と石の接面が平面になるまで精加工されたものである²⁰⁾。このような石垣の例として和歌山城の石垣を図-4.2に示している。和歌山城は1585(天正13)年に豊臣秀長により創建されており、このときに構築された石垣がI期石垣である。またII期石垣とは浅野幸長が関が原の戦いの功績により1600(慶長5)年に城主となってから構築された石垣であり、III期石垣とは1619(元和5)年に徳川頼宣が城主となってから構築された石垣である。これら城郭石垣の設計は「後藤家文書」によると、第3章で解明したとおり、図-4.3²¹⁾に示すように高さ $h_1 (= h/3)$ 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わかる。前章において、AB間を無限に分割すると考えた場合、図-4.3のように座標軸を取ると、勾配の変化する部分EF間は次式で表すことができることを示した。

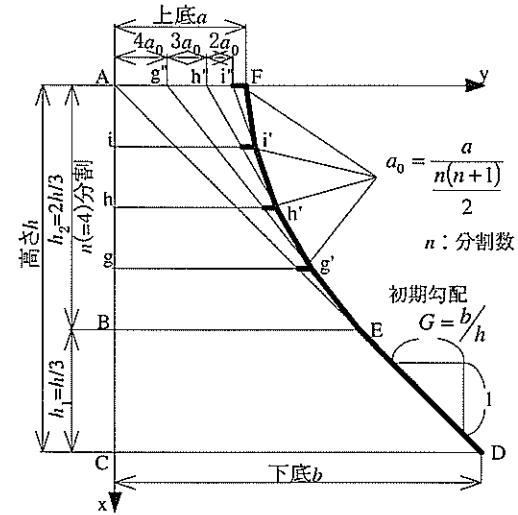


図-4.3 「後藤家文書」による設計

$$y = a \left(1 - \frac{x}{h_2} \right)^2 + \frac{b}{h} x \quad (3.7 \text{再掲})$$

本章では各城郭石垣の形状を決定づける要素として高さ h 、初期勾配 G 、上底 a 、下底 b に着目し、各城郭石垣におけるこれらの値を把握するために測量を行った。さらには石垣構造の安定に寄与していると考えられる日本の城郭石垣の特徴である反りを把握するために、図-4.4に示しているように、直線DFからそれに平行な直線D'Fと反り勾配部分EFとの接点までの距離、すなわち直線DFと石垣の反り勾配部分EFとの最大距離を凹み量 d とし、次式で算出した。

$$d = \frac{4ah}{9\sqrt{(b-a)^2 + h^2}} \quad (4.1)$$

4.2.2 城郭石垣の基礎データ

安土城、伊賀上野城、大坂城、岸和田城、甲府城、名古屋城、姫路城、丸亀城、和歌山城の計9ヶ所の城郭石垣における高さ h 、初期勾配 G 、上底 a 、下底 b 、凹み量 d の計測値と算出値を基礎データとして表-4.1に示している。

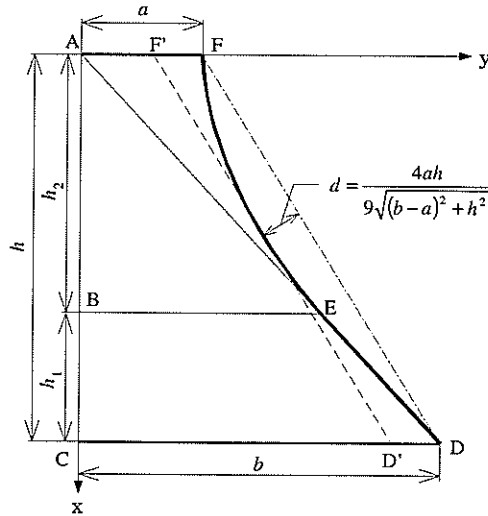


図-4.4 凹み量 d

表-4.1 城郭石垣の基礎データ

構築年	場所	高さ h [m]	上底 a [m]	下底 b [m]	初期勾配 G	凹み量 d [m]	積み方	
1575	安土城 A	5.35	0.53	3.34	0.624	0.21	野面積み	
	安土城 B	4.71	0.87	3.45	0.732	0.34		
	安土城 C	3.64	0.52	2.55	0.701	0.20		
	安土城 D	5.60	0.89	4.20	0.636	0.35		
	安土城 E	5.40	0.60	3.99	0.739	0.23		
1608	伊賀上野城 A	21.57	1.31	10.55	0.489	0.53	打込み接ぎ	
	伊賀上野城 B	22.32	1.10	10.53	0.472	0.45		
	伊賀上野城 C	21.25	1.31	10.35	0.487	0.54		
1620	大坂城 内堀	25.06	1.69	10.02	0.400	0.71	切込み接ぎ	
	大坂城 天守北 A	14.38	2.34	6.52	0.453	1.00		
	大坂城 天守北 B	13.99	2.32	6.52	0.466	0.99		
	大坂城 天守北 C	13.30	2.37	6.84	0.514	1.00		
	大坂城 天守西 A	13.88	2.31	6.62	0.477	0.98		
	大坂城 天守西 B	13.95	2.54	6.80	0.487	1.08		
	大坂城 天守西 C	14.56	1.34	5.31	0.365	0.57		
1598	岸和田城 I期 A	7.85	1.28	5.89	0.751	0.49	野面積み	
	岸和田城 I期 B	7.45	2.42	7.06	0.947	0.91		
	岸和田城 I期 C	7.80	1.37	5.81	0.745	0.53		
	岸和田城 I期 D	8.28	1.53	6.03	0.729	0.60		
	岸和田城 I期 E	7.00	1.11	3.92	0.560	0.46		
	岸和田城 I期 F	7.06	0.73	2.83	0.400	0.31		
	岸和田城 I期 G	9.79	0.61	3.58	0.367	0.26		
1640	岸和田城 II期 A	7.82	0.56	4.49	0.575	0.22	切込み接ぎ	
	岸和田城 II期 B	7.81	0.97	5.27	0.674	0.38		
	岸和田城 II期 C	8.03	1.28	5.42	0.675	0.50		
	岸和田城 II期 D	8.49	1.10	4.90	0.577	0.45		
1593	甲府城 I期 A	8.00	1.09	4.14	0.518	0.45	野面積み	
	甲府城 I期 B	7.00	0.75	3.10	0.443	0.32		
	甲府城 I期 C	6.00	0.75	2.90	0.483	0.31		
	甲府城 I期 D	13.20	2.29	7.79	0.590	0.94		
	甲府城 I期 E	13.60	1.13	5.63	0.487	0.47		
1720	甲府城 II期 A	9.00	0.30	3.00	0.334	0.13	打込み接ぎ	
	甲府城 II期 B	8.25	0.17	2.72	0.330	0.07		
	甲府城 II期 C	7.55	0.20	2.83	0.374	0.08		
	甲府城 II期 D	6.95	0.24	2.49	0.359	0.10		
	甲府城 II期 E	6.00	0.27	2.47	0.412	0.11		
	甲府城 II期 F	5.60	0.09	1.81	0.323	0.04		
	甲府城 II期 G	4.95	0.41	1.96	0.395	0.17		
1750	甲府城 III期 A	7.35	0.46	2.86	0.390	0.20	野面積み	
	甲府城 III期 B	7.00	0.33	2.89	0.412	0.14		
	甲府城 III期 C	6.85	0.24	2.79	0.407	0.10		
	甲府城 III期 D	6.70	0.39	2.74	0.409	0.16		
	甲府城 III期 E	6.50	0.34	2.74	0.422	0.14		
1612	名古屋城 天守西 A	21.04	5.41	14.23	0.676	2.22	打込み接ぎ	
	名古屋城 天守西 B	21.34	4.73	13.19	0.618	1.95		
	名古屋城 天守東 C	20.63	5.69	14.58	0.705	2.32		
	名古屋城 天守東 D	20.87	4.16	12.89	0.617	1.70		
	名古屋城 天守北 E	20.77	4.80	12.95	0.623	1.99		
	名古屋城 天守北 F	13.13	1.99	15.76	1.200	0.61		
1580	姫路城 I期	14.33	1.54	8.05	0.562	0.62	野面積み	
	姫路城 II期 A	20.48	0.73	10.16	0.496	0.29		
	姫路城 II期 B	25.62	3.52	14.87	0.580	1.43		
	姫路城 II期 C	16.66	1.37	9.27	0.556	0.55		
	姫路城 II期 D	19.57	0.98	8.66	0.443	0.40		
	姫路城 II期 E	17.44	1.70	7.29	0.418	0.72		
	姫路城 天守 A	15.35	0.95	5.01	0.327	0.41		
	姫路城 天守 B	15.53	0.81	4.94	0.318	0.35		
	姫路城 天守 C	15.64	0.90	5.04	0.322	0.39		
	姫路城 III期 A	15.90	0.72	8.21	0.516	0.29		
1618	姫路城 III期 B	15.52	0.67	7.00	0.451	0.27	野面積み	
	丸亀城 A	15.90	1.80	8.80	0.553	0.73		打込み接ぎ
	丸亀城 B	15.00	1.18	8.38	0.559	0.47		
丸亀城 C	16.00	1.21	9.01	0.563	0.48			
1585	和歌山城 I期 A	9.01	2.06	7.20	0.799	0.80	野面積み	
	和歌山城 I期 B	7.00	1.13	4.80	0.686	0.44		
	和歌山城 I期 C	7.20	1.19	5.24	0.727	0.46		
	和歌山城 I期 D	9.33	1.34	8.55	0.916	0.47		
	和歌山城 I期 E	11.80	1.62	7.27	0.616	0.65		
1600	和歌山城 I期 F	11.30	1.54	7.38	0.653	0.61	打込み接ぎ	
	和歌山城 II期 A	9.50	1.35	9.51	1.001	0.46		
	和歌山城 II期 B	7.60	0.95	4.80	0.632	0.38		
1619	和歌山城 III期 A	14.78	1.60	8.62	0.583	0.64	切込み接ぎ	
	和歌山城 III期 B	8.60	1.16	5.70	0.662	0.46		
	和歌山城 III期 C	14.10	2.36	9.19	0.652	0.94		
和歌山城 III期 D	11.93	1.25	6.89	0.578	0.50			

4.3 石垣断面形状の歴史的変遷

4.3.1 石垣高さと構築年の関係

本章で取り扱った城郭石垣のうち構築年が1575年頃の安土城から1585年頃の和歌山城、1593年頃の甲府城、1598年頃の岸和田城は野面積みで構築されている。次に、1585年頃および1600年頃の和歌山城から1605年頃および1612年頃の姫路城、1608年頃の伊賀上野城、1612年頃の名古屋城、1650年頃の丸亀城、1720年頃および1750年頃の甲府城においては打込み接ぎで構築されている。また、1619年頃の和歌山城から1620年頃の大坂城、1640年頃の岸和田城においては切込み接ぎで構築されている。このように1720年頃以降の甲府城を除き、時代が経つに連れて野面積み、打込み接ぎ、切込み接ぎと石垣石の加工をする技術が高まったことで、石垣構築の高さは、図-4.5に示しているように時代が経つに連れて高く構築されていることがわかる。

1720年頃以降に構築された甲府城の石垣は石垣構築技術が急速に発達した1600年前後よりおよそ100年ほど経過してから構築されていることから、石垣構築技術の衰退により1600年前後の傾向と異なったものになったと考えられる。

なお各城郭石垣の構築に関する古文書が存在することは極めて稀であるため、石垣の構築年を確定することは困難であるが、ここでは築城年などを参考に推定した年代を適用していることから、将来の歴史学的研究によって修正される可能性を含んでいる。

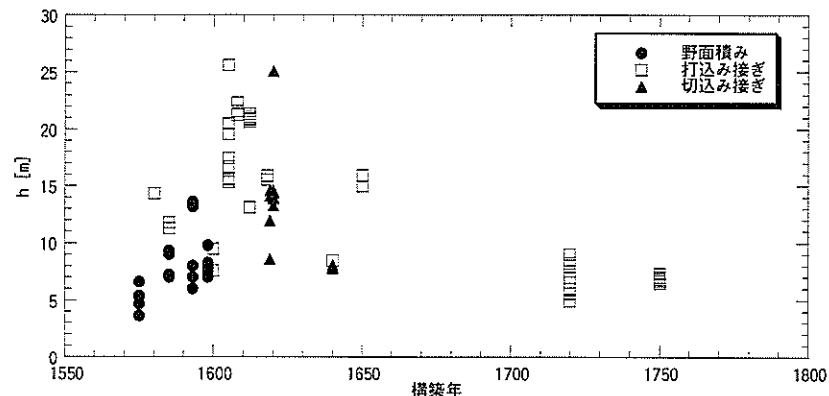


図-4.5 構築年と石垣高さ h の関係

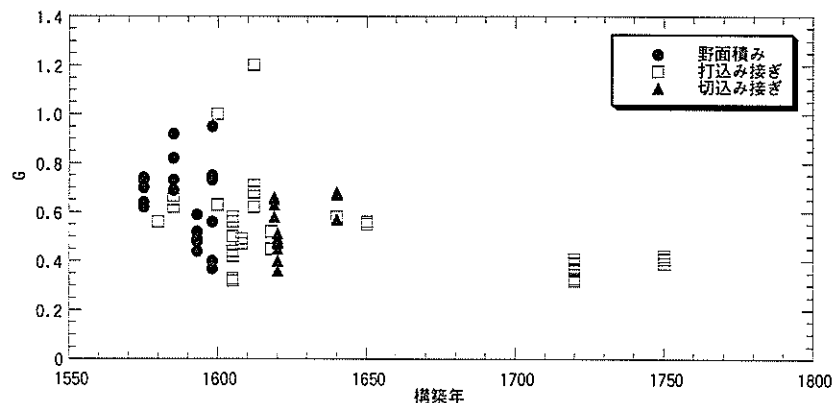


図-4.6 構築年と初期勾配 G の関係

4.3.2 初期勾配および凹み量と構築年の関係

構築年と初期勾配 G の関係を図-4.6 に示している。初期勾配 G は、時代が経つに連れて、また石垣石の加工の程度がよくなるに連れて緩勾配から急勾配へと変化している傾向がうかがえる。次に構築年と凹み量 d の関係を示したものが図-4.7 である。凹み量 d は構築年あるいは石垣石の違いによる明瞭な差異は表れていない。

初期勾配 G および凹み量 d は、両者とも高さ h あるいは石垣石の加工の程度や地盤の状況によって変化するものと考えられる。そこで、第 3 章において「後藤家文書」に記述されている 46 個の設計例より導き出した関係式¹⁹⁾より算出される値を基準とし、測定データとの比較を行うことで高さの影響の除去を行った。「後藤家文書」の設計例は現代における構造物の標準設計基準に

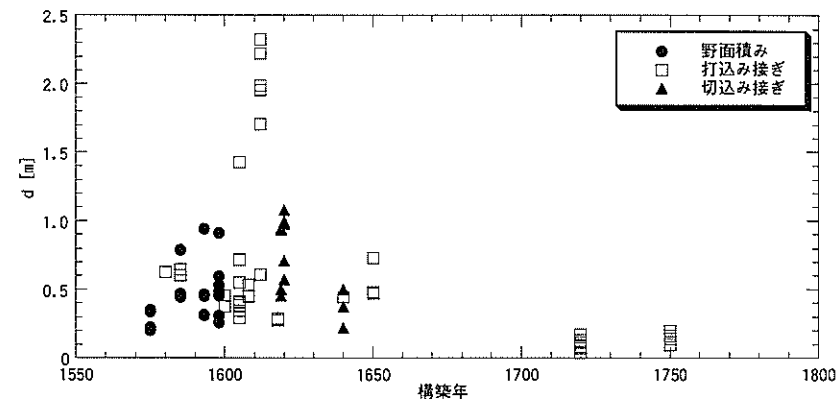


図-4.7 構築年と凹み量 d の関係

相当するものである。そしてこの設計基準は 1800 年代にそれまでの設計手法を集大成されたものであるため、その基本原理はさらに古い年代に成立しているものと考えられ、測定データとの比較を行うことで、その原理の成立時期をも解明することを試みた。

「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_0 と高さ h の関係は、次式で表される。

$$G_0 = 0.025h \quad (3.8 \text{ 再掲})$$

この式より h が大きな値となるほど、 G_0 も大きな値を示すことがわかる。

また、凹み量 d_0 を導くために必要な上底 a および下底 b と高さ h の関係は、「後藤家文書」の設計例によると、次式で表されることを示した。

$$b = 0.025h^2 \quad (3.9 \text{ 再掲})$$

$$a = \frac{1}{4}b \quad (3.10 \text{ 再掲})$$

これら式(3.9)と式(3.10)から算出される値を式(4.1)に代入すると次式が得られる。

$$d_0 = \frac{4h^2}{9\sqrt{9h^2 + 160^2}} \quad (4.2)$$

ここで、 d_0 と h の関係を示したものが図-4.8 である。この図より d_0 も h が増加するほど大きくなるのがわかる。

次に、「後藤家文書」の設計例より導かれた G_0 および d_0 を基準とし、これらと実測により得られた G および d とを比較した値、すなわち初期勾配比 G/G_0 と凹み量比 d/d_0 を算出した。例えば、和歌山城における野面積み石垣と切込み接ぎ石垣の形状などについては図-4.9 のようになり、得られるデータは表-4.2 のようになる。このようにして導かれた初期勾配比 G/G_0 および凹み量比

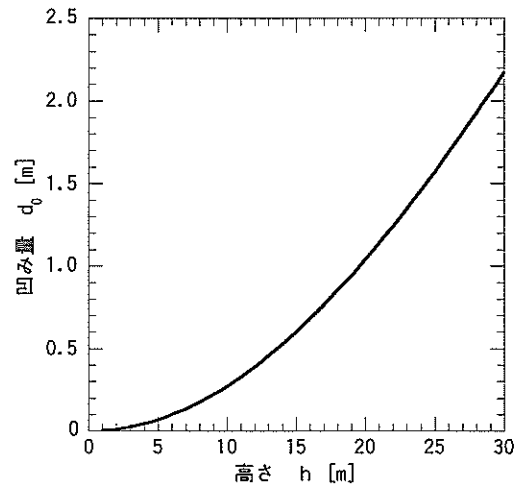


図-4.8 「後藤家文書」の設計基準による
高さ h と凹み量 d_0 の関係

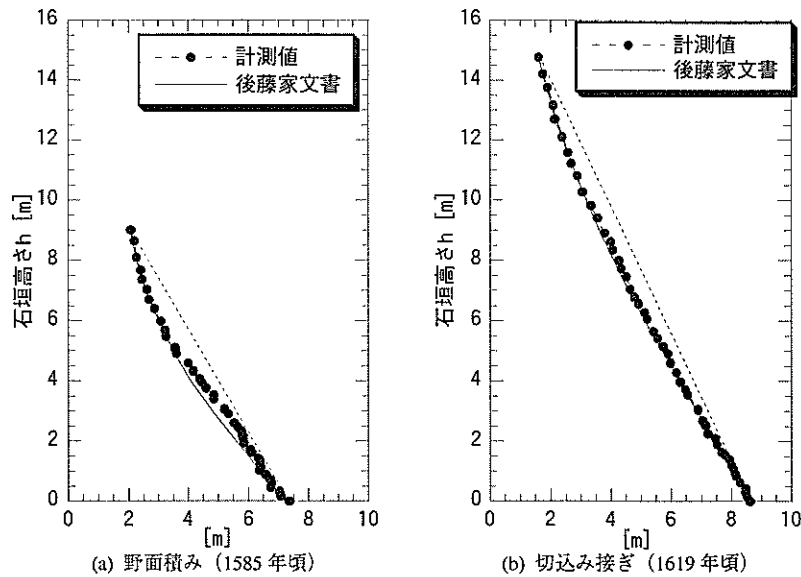


図-4.9 和歌山城

表-4.2 和歌山城のデータ

石垣の種類	計測値			後藤家文書による 標準設計例		初期勾配比 G/G_0	凹み量比 d/d_0
	高さ h [m]	初期勾配 G	凹み量 d [m]	初期勾配 G_0	凹み量 d_0 [m]		
野面積み石垣 (1585年頃)	9.01	0.799	0.80	0.225	0.22	3.55	3.58
切込み接ぎ石垣 (1619年頃)	14.78	0.583	0.64	0.370	0.58	1.58	1.10

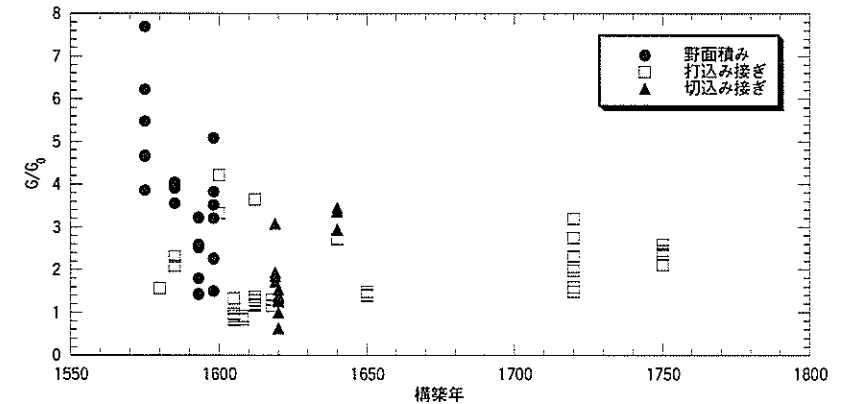


図-4.10 構築年と G/G_0 の関係

d/d_0 を構築年との関係であらわしたものを図-4.10 および図-4.11 に示している。図-4.10 より野面積みにおいては、基準値に比べ緩勾配で石垣が構築されていることがわかり、年代が経ち石垣石が打込み接ぎ、切込み接ぎと加工精度が高くなると急勾配で構築され基準値に近づいていることがわかる。また図-4.11 からは、野面積みにおける凹み量比は打込み接ぎや切込み接ぎより大きな値を示しており、こちらも年代が経ち加工精度が高くなると基準値に近づいていく傾向にあることがわかる。さらに、図-4.10, 4.11 とも野面積みのそれぞれの値は、幅広く分布していることがわかる。

4.4 石垣断面形状の構築技術の変遷

石垣の形状は石垣の高さ h が同じであっても初期勾配 G および上底 a 、下底 b の値によって異

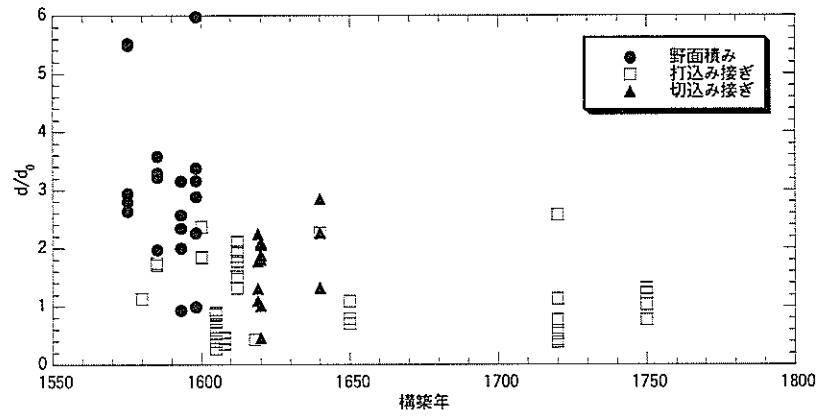


図-4.11 構築年と d/d_0 の関係

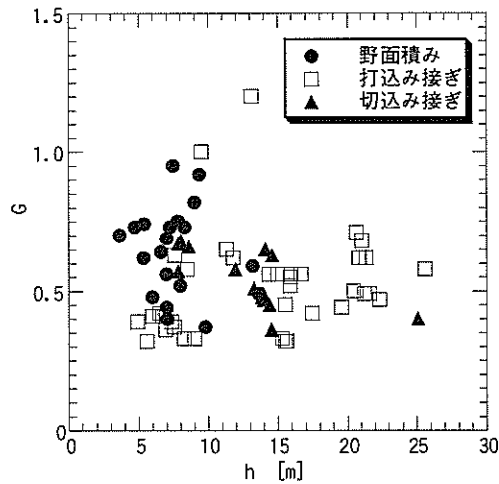


図-4.12 高さ h と初期勾配 G の関係

なった形状を示す。

そこで初期勾配 G について高さ h との関係を示したものが図-4.12である。比較検討のために、初期勾配比 G/G_0 と高さ h との関係に整理したものを図-4.13に、 G/G_0 と石垣石の加工状況との関係を図-4.14にそれぞれ示している。これらの図を見ると、野面積みにおいては基準より緩やかな勾配で石垣が構築されていることおよび、高さが比較的低いところに集中していることがわかる。打込み接ぎ、切込み接ぎにおいては高く構築されているにもかかわらず勾配が急になっている。本来ならば石垣高さが高くなるほど勾配は緩くなっていくのであるが、石垣石が精加工され

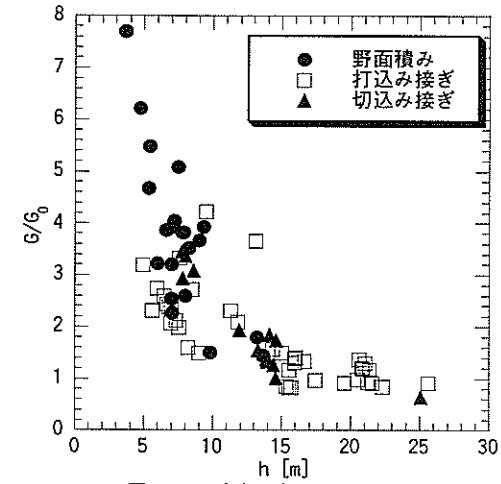


図-4.13 高さ h と G/G_0 の関係

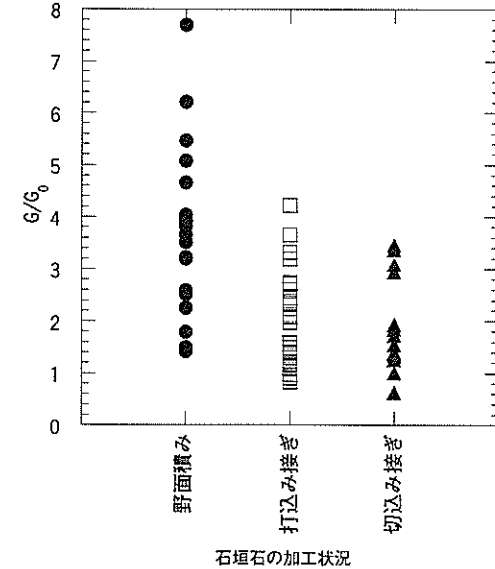


図-4.14 石垣石の加工状況と G/G_0 の関係

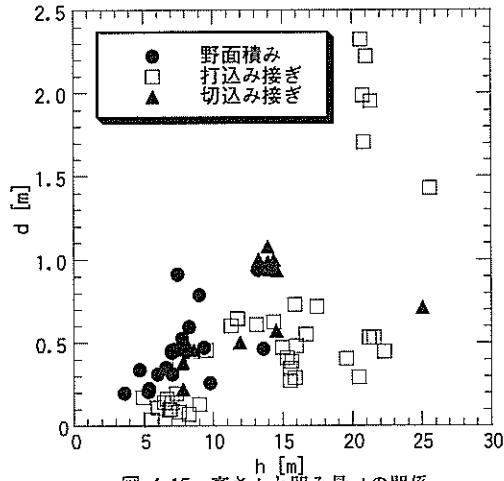


図-4.15 高さ h と凹み量 d の関係

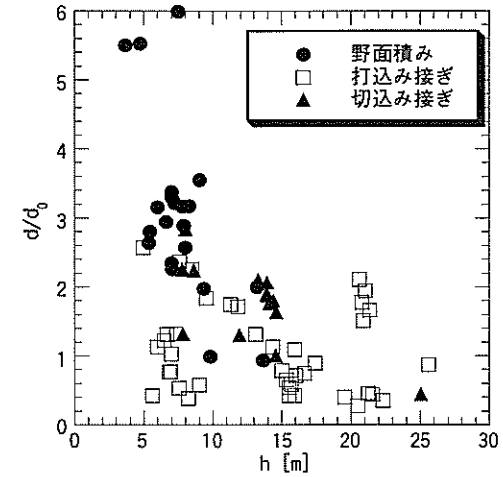


図-4.16 高さ h と d/d_0 の関係

ることによって高く構築することや勾配を急にすることが可能になったためであると考えられる。

次に、上底 a 、下底 b 、高さ h から決定される凹み量 d について高さ h との関係を示したものが図-4.15 である。この図から高さが高くなるほど凹み量が増加している傾向を読み取れる。ここで、凹み量比 d/d_0 と高さ h との関係である図-4.16 および d/d_0 と石垣石の加工状況との関係である図-4.17 をみると、野面積みは高さが低いにもかかわらず凹み量すなわち反りを大きくして石垣を構築されていることがわかる。これは、加工の程度の低い野面積みの石垣を安定させて積み上げるために必要なことであったと考えられる。さらに野面積みの場合は凹み量が幅広く分布している。これは重要な構造物においてより安定を図るために、凹み量をより大きく設計したのではないかと考えられる。

図-4.18 は初期勾配比 G/G_0 と凹み量比 d/d_0 との関係を示したものである。この図より野面積みは、初期勾配および凹み量ともに、他者と比べ大きな値に幅広く分布していることから、重要性に応じて緩やかな勾配かつ反りを大きく入れて構築されていることがわかる。

以上のことから、石垣を構築する場合、野面積み、打込み接ぎ、切込み接ぎのそれぞれの一般的な断面形状は、図-4.19 に示すように変遷していると考えられる。すなわち、石垣石は時代が経つに連れて野面積み、打込み接ぎ、切込み接ぎと精加工されていくが、それとともに高さは高くなり、初期勾配は急になり、反りは小さくなっていくことがわかる。

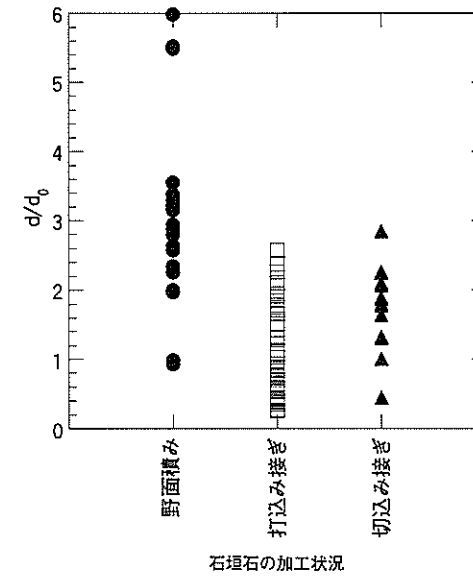


図-4.17 石垣石の加工状況と d/d_0 の関係

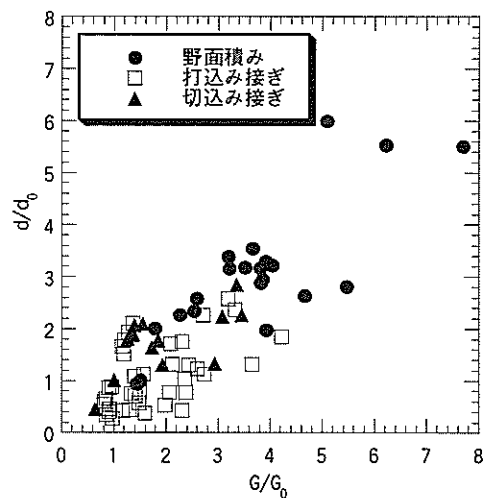


図-4.18 G/G_0 と d/d_0 の関係

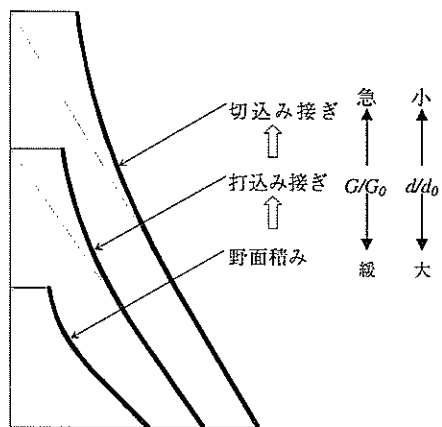


図-4.19 石垣形状の変遷

4.5 結語

城郭石垣の断面形状を把握するために、高さ h および初期勾配 G 、上底 a 、下底 b を計測し、さらには凹み量 d を算出した。この結果、石垣高さは石垣石が精加工されるほど高く構築することが可能となったことが判明した。また石垣石の加工程度が低い野面積みにおいては、構築物の重要度に対応して初期勾配を緩くとり、反りを大きく入れることで、いびつな形状である石垣石を積み上げた時の安定を図ったものと考えられる。また八尾²²⁾らの研究においても、石垣の形状は背面土の ϕ が小さくなるほど初期勾配を緩くし、反りを大きくする必要があると指摘している。このことから城郭石垣を安定させるためには初期勾配を緩くとり、反りを大きく設けることが必要であり、これらは石垣の安定に重要な役割を果たしているものと考えられるが、石垣石が精加工され、より安定した構造体となると、初期勾配は急に、反りは小さくすることが可能となる。反りを設けることは設計施工上において高い技術を要するものと考え、後の時代のものほど石垣石の加工の技術は高くなったが、構築技術そのものは低下していったのではないかと考えられる。

「後藤家文書」に示された設計例は1800年代に入ってからそれまでの後藤家に伝わる設計技術を集大成したものであって、それに至るまでの変遷は読み取ることができない。しかし今回の研究によって、城郭石垣の石積み技術は早くから高度なものであったことが推測でき、それに時代とともに高さを高くするための工夫が加えられてきたものと考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 八尾眞太郎, 梶井健, 伊藤淳志: 城石垣の構造安定性に関する基礎的研究—その2 石垣の構造安全率—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造I, 日本建築学会, pp.533-534, 2001.
- 3) 桑原文夫: 熊本城の石垣勾配, 日本工業大学研究報告, 第14巻, 第2号, pp.59-74, 1984.
- 4) 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.
- 5) 天野光三, 西田一彦, 久武勝保, 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.
- 6) 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.

- 7) 未公開資料：甲府市教育委員会。
- 8) 未公開資料：岸和田城管理事務所。
- 9) 山本博利：姫路城石垣研究の前提的作業（1），城郭研究室年報，第5号，姫路市立城郭研究室，pp.1-22，1995。
- 10) 北垣聰一郎：遺構保存状況と問題点，史跡和歌山城保存管理計画書，和歌山市経済労働部和歌山城管理事務所，pp.53-101，1993。
- 11) 未公開資料：名古屋城管理事務所。
- 12) 上野市教育委員会：史跡上野城石垣保存修理工事報告書，1990。
- 13) 建設文化としての大坂城石垣築造に関する総合的研究会：『建設文化としての大坂城石垣築造における土木施工技術の土木史的調査研究』，平成7・8年度文部省科学研究（基礎研究（B））研究成果報告書，1997。
- 14) 村山朔郎：大坂城の地盤調査と地下石垣の発見，大坂城天守閣紀要，第12号，pp.1-34，1984。
- 15) 未公開資料：丸亀市教育委員会。
- 16) 北垣聰一郎：『石垣普請』，法政大学出版局，pp.117-129，1987。
- 17) 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。
- 18) 喜内敏監修・解説：『金沢城郭資料—加賀藩穴生方後藤家文書』，日本海文化叢書，第3巻，石川県図書館協会，1976。
- 19) 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。
- 20) 内藤昌，河田克博，麓和善，水野耕嗣，湯浅耕三：ビジュアル版城の日本史，角川書店，pp.112-113，1995。
- 21) 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。
- 22) 八尾眞太郎，榎井健，伊藤淳志：城石垣の構造安定性に関する基礎的研究—その2 石垣の構造安全率—，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），構造I，日本建築学会，pp.533-534，2001。

第5章 城郭石垣の安定性に影響する 各種要因の検討

5.1 概説

建設文化の歴史的遺産である日本に現存する城郭石垣には，老朽化が進行し崩壊の危険性のある箇所が数多く存在しており，これらの遺構を修復保存するために，石垣の安定性の力学的機構を明らかにするとともに，安定性を評価判定する工学的手法の確立が必要とされている。石垣の安定性を決定づける要因の一つとして地盤の強度特性が挙げられる。そこで本章においては， N 値と石垣の形状を決定づける要素との関係，および構築当時からの変形状況と N 値との関係を把握することで安定性に影響を及ぼす要因の検討を行った。検討に用いたデータは現在までに計測を行うことができた甲府城¹⁾，名古屋城²⁾，安土城³⁾，伊賀上野城⁴⁾，大坂城^{4),5)}，岸和田城⁶⁾，姫路城⁷⁾，和歌山城⁸⁾，丸亀城⁹⁾の9ヶ所の城郭石垣である。さらには安定性に及ぼす要因の影響について仮想モデルによるFEM解析¹⁰⁾を用いて検討を行った。

5.2 基礎地盤強度と石垣形状

5.2.1 初期勾配比および凹み量比と N 値の関係

石垣形状を決定づける要素に図-5.1に示した初期勾配 G および凹み量 d がある。両者とも高さ h あるいは石垣石の加工の程度や地盤の状況によって変化するものと考えられる。そこで，第3章において明らかとなったように，城郭石垣の断面形状が「後藤家文書¹¹⁾」に記述されている石垣の設計手法¹²⁾によって構築されたものと想定しても，実質的な対処が可能であることが判明したため^{13),14)}，本章では第4章と同様に石垣構築当時の断面形状として「後藤家文書」による設計手法を用いることとした。よって，測定データである初期勾配 G および凹み量 d の値から高さの影響を除去するために，「後藤家文書」の設計例より導き出された G_0 および d_0 の値¹⁵⁾を基準とし，測定データとの比率である初期勾配比 G/G_0 と凹み量比 d/d_0 を導いた。両者と構築年との関係を示したものが図-5.2と図-5.3である。図の中の各データには N 値の値を記入している。ここでの N 値は深度5mまたは3mまでの平均の値である。構築年と初期勾配比 G/G_0 の関係を示した図-5.2より，初期勾配比 G/G_0 は時代を経るごとに減少していく，すなわち石垣の勾配が急になっていくことがわかる。さらに N 値が小さいほど G/G_0 は増加しており，勾配が緩くなることがわかる。図中に示した曲線は， N 値が50の場合に得られる初期勾配比の最大値と考えられる領域を結んだ

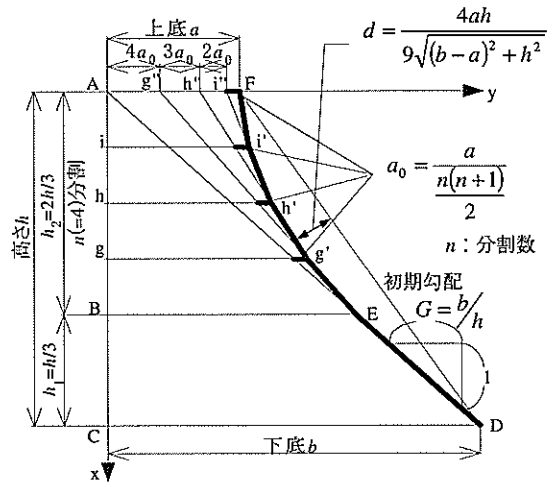


図-5.1 「後藤家文書」による設計

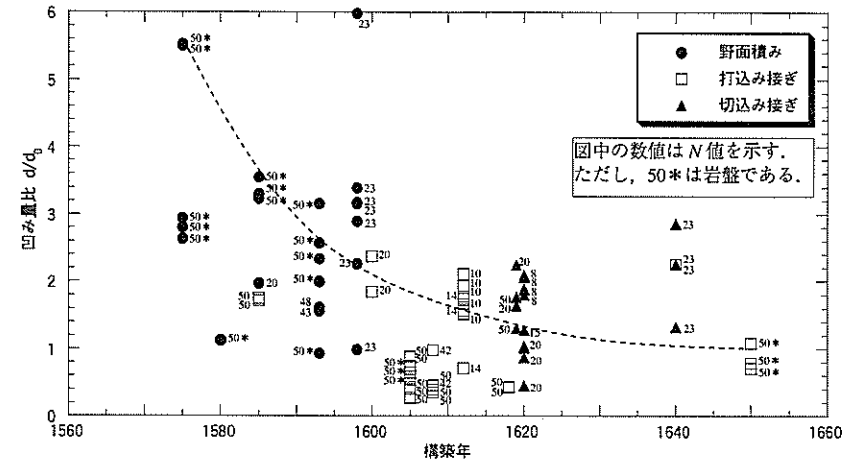


図-5.3 構築年と d/d_0 の関係

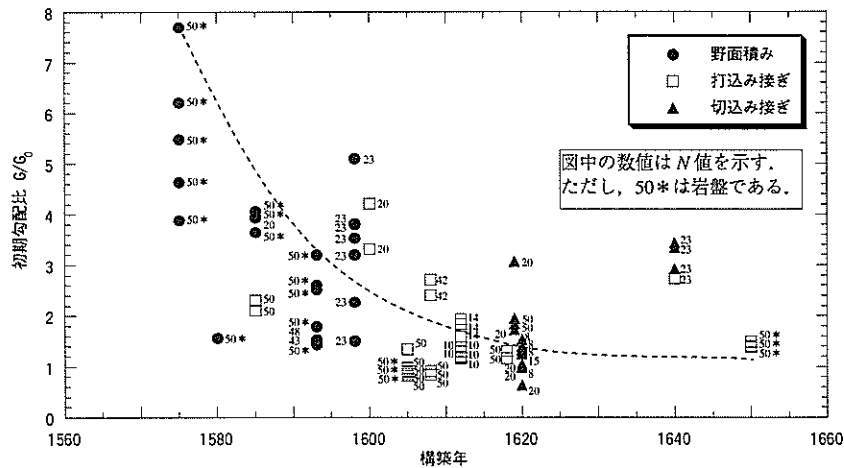


図-5.2 構築年と G/G_0 の関係

ものである。構築年と凹み量比 d/d_0 の関係を示した図-5.3からは、凹み量比 d/d_0 が時代を経るごとに減少していく、すなわち凹み量が少なくなっていくことがわかる。さらに N 値が小さいほど d/d_0 は増加する、すなわち凹み量が増加することがわかる。図中に示した曲線は、 N 値が50の場合に得られる凹み量比の最大値と考えられる領域を結んだものである。

次に、初期勾配比 G/G_0 および凹み量比 d/d_0 を N 値について整理すると、図-5.4 と図-5.5 を得

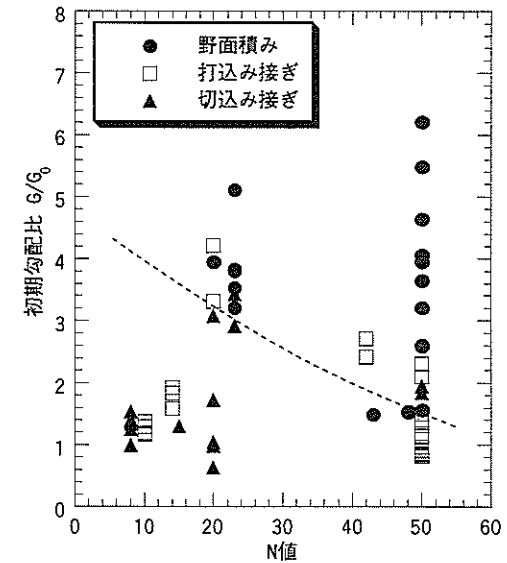


図-5.4 N 値と G/G_0 の関係

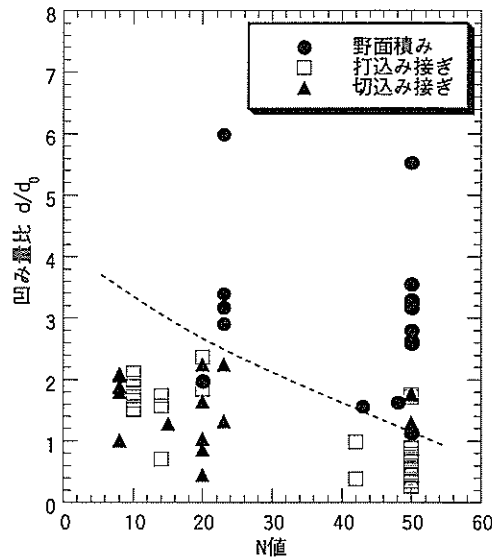


図-5.5 N値と d/d_0 の関係

ることができる。図-5.4から、野面積みと打込み接ぎについては、 N 値が増加するほどに初期勾配比 G/G_0 は減少する傾向にあることがわかる。切込み接ぎが用いられる城郭石垣は平野部あるいは盛土部が多く、 N 値が50前後のデータが少ないために傾向をつかむことは困難であるが、石垣石が精加工されていることから N 値が小さい地盤であっても初期勾配を急にすることが可能であったと考えられる。図中に示した曲線は、野面積みにおける各 N 値に対する初期勾配比の最小値と考えられる領域を結んだものである。図-5.5からも、野面積みと打込み接ぎについては、 N 値が増加すれば凹み量比 d/d_0 は減少する傾向にあることがわかる。切込み接ぎについては初期勾配比と同様、石垣石が精加工されていることから N 値が小さい地盤であっても凹み量を小さくすることが可能であったと考えられる。図中に示した曲線は、野面積みにおける各 N 値に対する凹み量比の最小値と考えられる領域を結んだものである。

以上のことより、地盤の強度が低い場合は、初期勾配を緩くし、凹み量を増加させることによって石垣の安定を図ったのではないかと考えられる。そして石垣石の加工の程度が低いものほどその傾向が顕著に現れていることがわかる。

5.2.2 N 値と石垣変形状況

石垣の変形状況を把握するために石垣構築当時の断面形状として「後藤家文書」による設計手

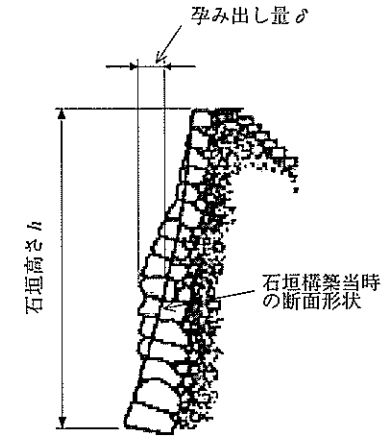


図-5.6 石垣の孕み出し量

法を用いることとし、図-5.6に示すように孕み出し量 δ を求めた。ここで式 (5.1) に示しているように、高さの影響を除去するために、孕み出し量 δ を高さ h で除して百分率で表した孕み出し度 D を算出した。

$$D = \frac{\delta}{h} \times 100 \quad [\%] \quad (5.1)$$

この孕み出し度 D を N 値について整理したものが図-5.7である。この図より N 値が小さくなるほど孕み出し度 D は大きくなっていることがわかる。これは、地盤が軟弱であるほど石垣の変状が大きいかをあらわしている。さらに N 値が50の場合においても、加工度の低い野面積みの場合は、打込み接ぎや切込み接ぎに比べ石垣形状の変状が大きいかことがわかる。

5.3 FEM解析による安定性に及ぼす N 値の影響

仮想モデルによる FEM 解析を用いて、初期勾配と凹み量が安定性に与える影響を把握するために、図-5.8に示した2つの形状モデルを対象に検討を行った。高さは今回計測したデータの平均的な値である15mとした。また初期勾配は高さが15m程度の場合の最小値付近である0.4と最大値付近である0.7とし、凹み量も高さが15m程度の場合の最小値付近である0.30mと最大値付近である1.05mとした。図-5.9は解析の基本モデルと解析メッシュを示したものである。解析には「PLAXIS」を用いて弾塑性解析を行った。また、解析に用いる物性値は表-5.1のとおりとした。 N 値の違いによる安定性への影響を検討するために、基礎地盤の N 値を10、30、50と3通

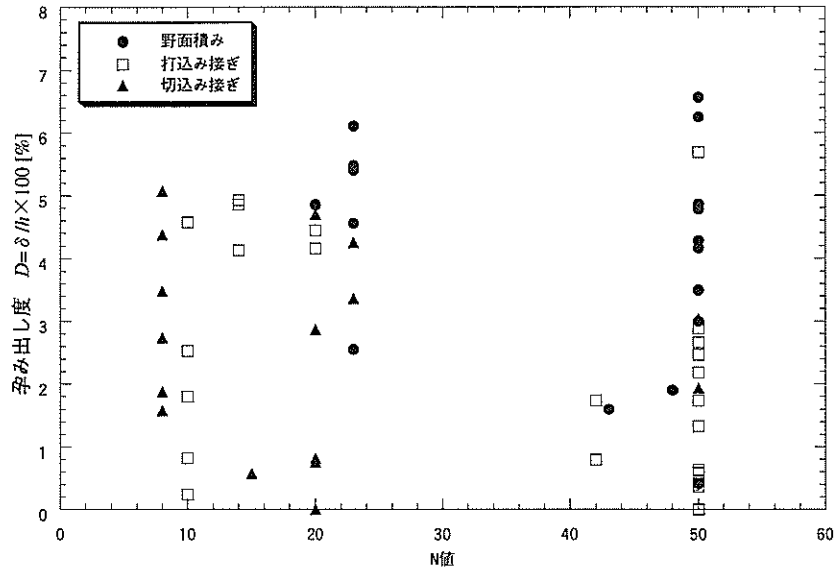


図-5.7 N値と孕み出し度Dの関係

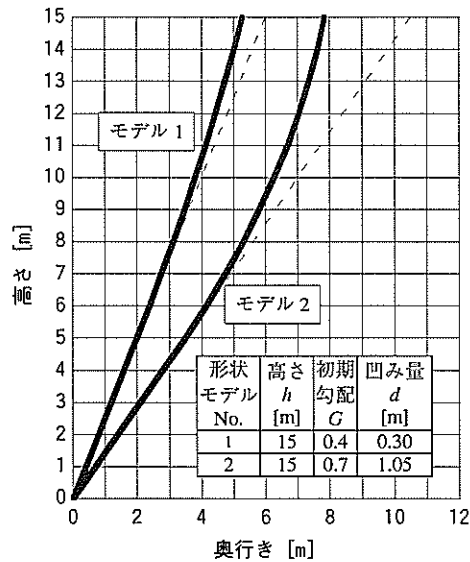


図-5.8 仮想石垣形状モデル

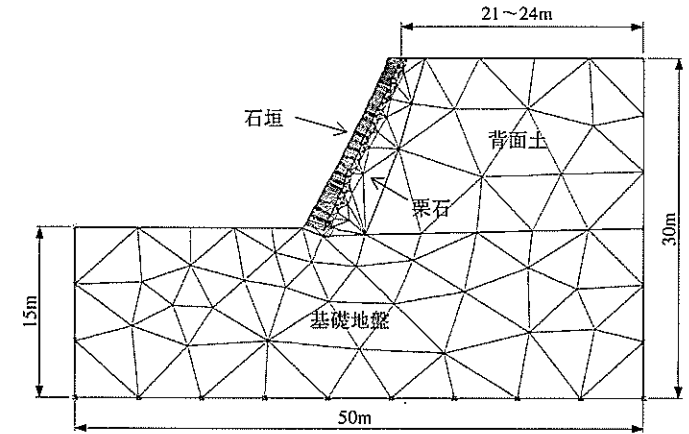


図-5.9 仮想モデル解析の基本モデルと解析メッシュ

表-5.1 仮想モデル解析の基本物性値

要素	要素の諸定数					
	石垣	栗石	背面土	基礎地盤1	基礎地盤2	基礎地盤3
N値	—	—	12	10	30	50
E (kPa)	4.0×10^5	5.0×10^5	33600	28000	84000	140000
ポアソン比	0.15	0.20	0.35	0.35	0.30	0.30
γ (kN/m ³)	26	21	18	18	18	18
ϕ (°)	50	45	28.4	27.2	36.2	42.4

りに変化させて解析を行った。これにより FEM 解析は表-5.2 のように 6 通りとなる。解析の結果を図-5.10~5.15 に示している。また各解析 No. における最大孕み出し量を表-5.2 に示した。ここで、解析が途中で終了したものは破壊したと考える。表-5.2 の結果より同じ石垣形状であれば基礎地盤の N 値が小さいものほど孕み出し量が大きく、不安定であることがわかる。また、初期勾配が急で凹み量が小さいものほど、孕み出し量が大きく不安定であることがわかる。

5.4 石垣変状の修復事例と基礎地盤

城郭石垣の変状を修復した事例として、姫路城がある。姫路城地盤は、主に砂岩質の堆積岩からなり、風化岩盤が所々地表面に露出している。こうした地盤状況から、大天守を含む城郭構造

表-5.2 仮想モデル解析の種類と結果

仮想モデル解析の種類		結果	
解析 No.	形状モデル No.	基礎地盤の N 値	最大孕み出し量 [cm]
①	1	10	17.4 で破壊
②	1	30	10.2
③	1	50	7.6
④	2	10	30.1 で破壊
⑤	2	30	6.4
⑥	2	50	5.5

物および石垣の大部分は、十分な強度を有する風化岩盤の上に巧みに設けられている。しかしながら、天守閣東南部に位置する帯櫓・帯郭櫓部石垣に関しては、盛土地盤上の 20m を超える石垣となっているため、大きな石垣変状を生じ、昭和 31 年（1956）から 39 年（1964）にかけて行われた昭和大修理において再築が行われている。この際に行われた調査結果などは、「姫路城保存修理工事報告書¹⁷⁾」にまとめられており、そこに示されている再築前の実測断面形状を図-5.16 に示している。この図より石垣の底部付近で孕み出しが大きく生じていることがわかる。その量は「後藤家文書」による断面形状を基準とすると 150cm である¹⁸⁾。図中には現在の実測断面形状も示しており、その形状は「後藤家文書」にほぼ合致するものとなっている。

5.5 結語

石垣の安定性に影響を及ぼす要因を把握するために、9ヶ所の城郭石垣についての初期勾配 G 、凹み量 d および N 値のデータを収集し、それらの関係を検討した。さらには仮想モデルに対する FEM 解析を行い、これらが安定性に及ぼす影響の把握を行った。この結果、基礎地盤の強度が低いほど、初期勾配を緩くし、凹み量を大きくする傾向にあることが判明した。またこのことは、石垣の安定化を図るのに必要なことであることが FEM 解析により明らかとなった。しかしながら、現在において基礎地盤の軟弱な場所に構築されている石垣や野面積みで構築されている石垣は、構築当時に比べ変状が進んでいることが明らかとなったため、地盤の補強や石垣石の間に補強材を挿入する工法¹⁹⁾などが必要ではないかと考えられる。

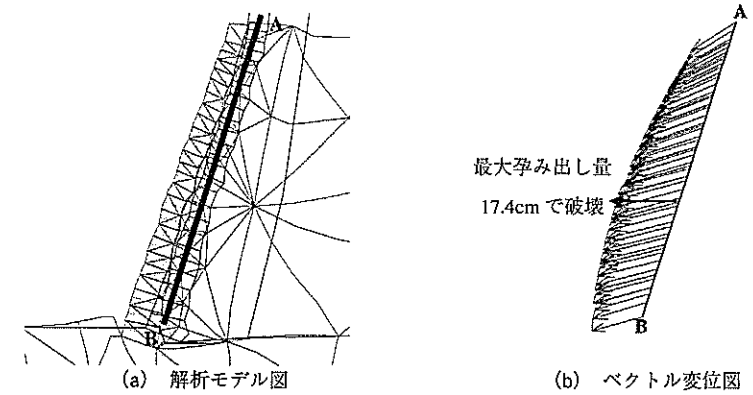


図 5-10 仮想モデル解析 No.①の結果

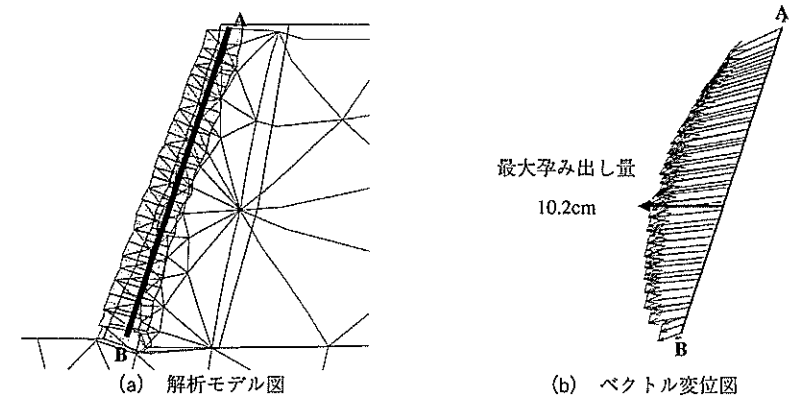


図 5-11 仮想モデル解析 No.②の結果

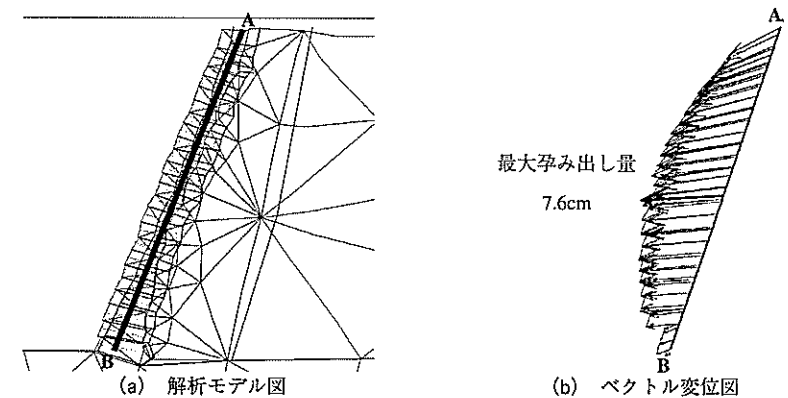


図 5-12 仮想モデル解析 No.③の結果

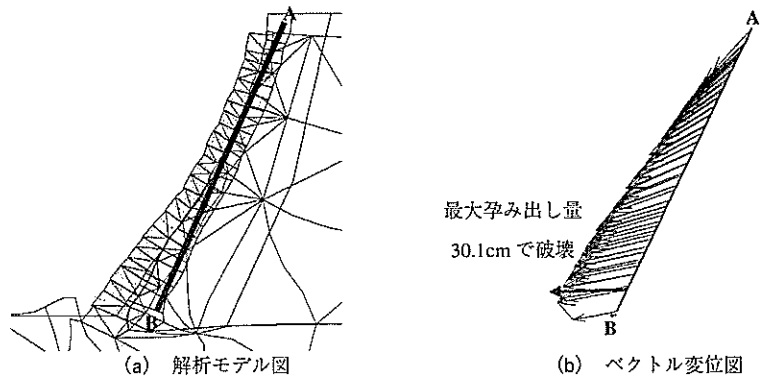


図5-13 仮想モデル解析 No.④の結果

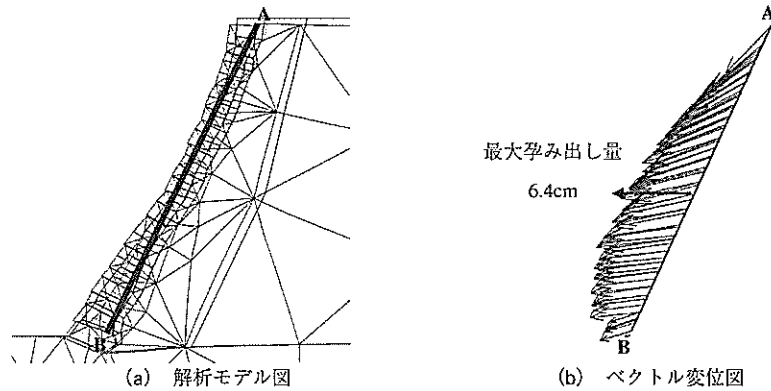


図5-14 仮想モデル解析 No.⑤の結果

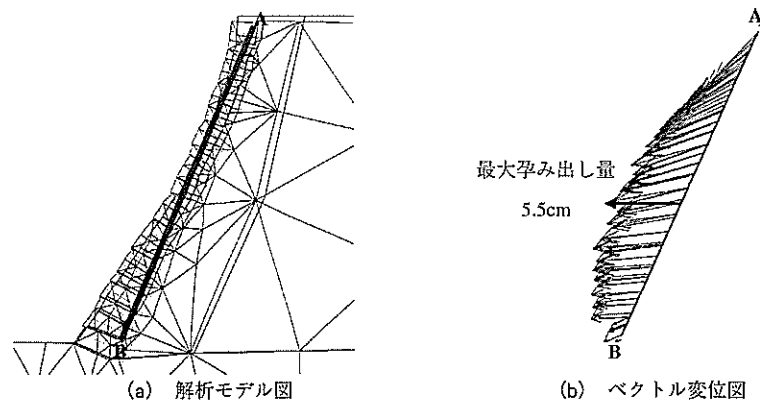


図5-15 仮想モデル解析 No.⑥の結果

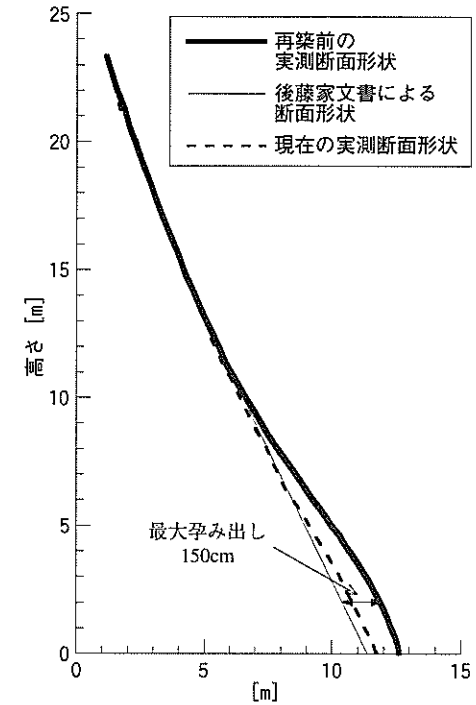


図-5.16 帯槽・帯郭槽部石垣の形状

参考文献

- 1) 未公開資料：甲府市教育委員会。
- 2) 未公開資料：名古屋城管理事務所。
- 3) 上野市教育委員会：史跡上野城石垣保存修理工事報告書，1990。
- 4) 建設文化としての大坂城石垣築造に関する総合的研究会：『建設文化としての大坂城石垣築造における土木施工技術の土木史的調査研究』，平成7・8年度文部省科学研究（基礎研究（B））研究成果報告書，1997。
- 5) 村山朔郎：大坂城の地盤調査と地下石垣の発見，大坂城天守閣紀要，第12号，pp.1-34，1984。
- 6) 未公開資料：岸和田城管理事務所。
- 7) 山本博利：姫路城石垣研究の前提的作業（1），城郭研究室年報，第5号，姫路市立城郭研究

- 室, pp.1-22, 1995.
- 8) 北垣聡一郎：遺構保存状況と問題点, 史跡和歌山城保存管理計画書, 和歌山市経済労働部和歌山城管理事務所, pp.53-101, 1993.
 - 9) 未公開資料：丸亀市教育委員会.
 - 10) 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.
 - 11) 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, 1976.
 - 12) 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.
 - 13) 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.
 - 14) 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.
 - 15) 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.
 - 16) 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.
 - 17) 文化財保護委員会：『国宝・重要文化財姫路城保存修理工事報告書』, 1965.
 - 18) 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.
 - 19) 森本浩行, 西田一彦, 西形達明：磁力式底面摩擦モデルによる城郭石垣の補修補強に関する検討, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集 2000年, 土木学会関西支部, pp.Ⅲ-67-1～Ⅲ-67-2, 2000.

第6章 磁力式底面摩擦モデルによる城郭石垣の補修補強に関する検討

6.1 概説

石垣の形状は, 時代とともに隅角部が直線形状から反りを持った曲線形状に変化していることや, 石垣石を水平に積み上げた石垣から隅角部稜線に対して石垣石の接触面が垂直になるように水平軸に対し角度をもたせて積み上げるように変化していることが知られている¹⁾. これら石垣形状の変遷が見られるのは, 石垣を安定させるために石垣形状の改良が経験的に行われていたためではないかと考えられる²⁾. そこで, 本章では石垣形状の違いが石垣の変形特性と安定性に与える影響を調べるため, 磁力式底面摩擦モデルを用いて簡単な模型による実験を行った³⁾.

さらに, 日本に現存する城郭石垣には老朽化が進み, 孕み出しによる崩落の危険性が指摘されている箇所が数多く存在する⁴⁾. 文化遺産として価値の高いこれらの遺構を修復保存するために補強材を挿入することで対処することを考え, 石垣に与える補強材の影響をこの簡単な模型による実験方法を用いることで検討を行った.

6.2 磁力式底面摩擦モデル

6.2.1 実験装置

実験は, 運動学的モデル⁵⁾を改良した磁力式底面摩擦モデルを考案して行った. これは, 図-6.1に示しているように, 水平面に置かれた二次元的な模型を, 水平面上でスライドさせて, 底面との摩擦力により自重をシミュレートするものである. 実験は, 図-6.1(a)に示すように, 鉄製リングでできた背面土と紙粘土で作製した石垣の模型をコの字型の型枠内に配置し, 固定した軌道に沿って型枠を上向きに推進させて行う. これにより模型の各要素に対して, 底面との間に働く摩擦力により自重をシミュレートすることができる. 底板には磁石シートが敷かれており, さらにその上に模造紙を敷いて型枠と模型を配置している. 模造紙の枚数を変えることにより磁力が変化することで, 背面土の模型である鉄製リングの底面に働く摩擦力を変化させることができる. すなわち模造紙の枚数を少なくすれば, 鉄製リングに働く摩擦力が増加し, シミュレーション上では背面土の重量が増加することになり, 石垣に作用する土圧が大きくなることになる.

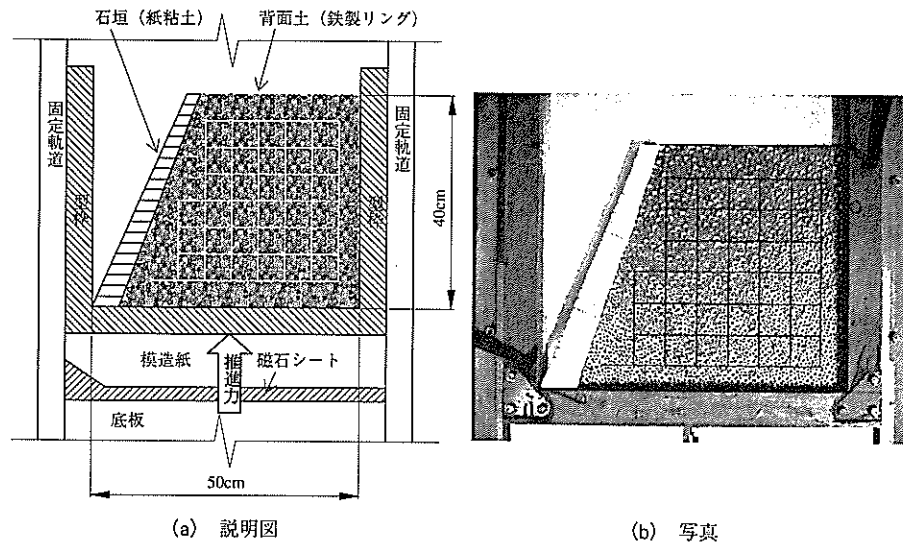


図-6.1 磁力式底面摩擦モデル実験装置

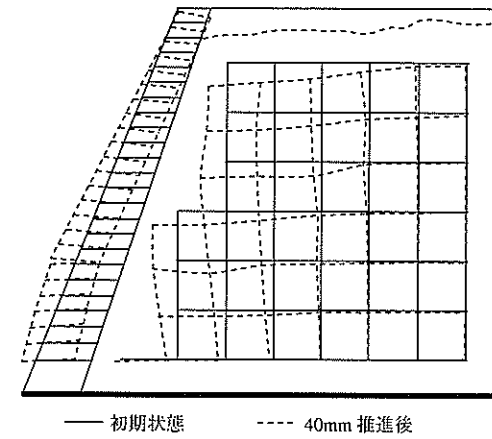


図-6.2 水平積直線形状モデル

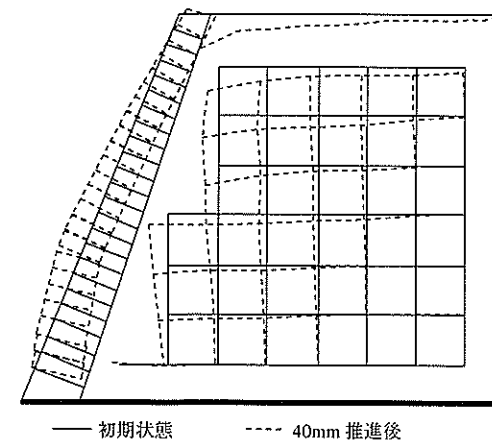


図-6.3 傾斜積直線形状モデル

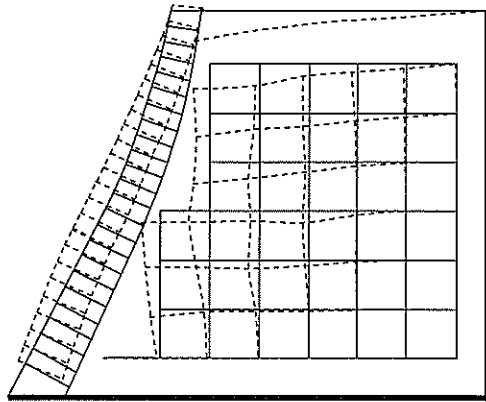
6.2.2 実験方法

石垣高さは20mのものを想定し、1/50モデルとして高さ40cmとして行った。背面土となる鉄製リングは、厚さが4mmで、直径が13mm、10mm、7.5mmの3種類を用いた。実験は、図-6.2～6.4に示しているように石垣石を水平に積んだ直線形状（水平積直線形状モデル）、石垣石を水平から傾斜させ、隅角部稜線に対し垂直に積んだ直線形状（傾斜積直線形状モデル）および曲線形状（垂直積曲線形状モデル）の3種類の石垣形状について行った。垂直積曲線形状モデルの控長さ、初期勾配および反り曲線勾配の取り方は、第3章で明らかにした「後藤家文書」による手法にしている。また、直線形状モデルはいずれも、曲線形状モデルの天端と底面を直線で結んだ形状とした。

今回の実験は、変形特性と安定性を検討するために石垣の孕み出しや破壊が起こるまでの過程を観察できるように、石垣が明確な破壊に至るよう土圧を最大限に作用させようような条件で実験を行った。なお、城郭石垣の多くは下部が地中に埋まり固定されていることから、モデルの一番下の石垣は型枠に固定している。

6.3 石垣安定に及ぼす形状の検討

図-6.2～6.4に石垣の初期状態と型枠を40mm推進させたときの各形状の変形および50mm間



— 初期状態 - - - 40mm 推進後
 図-6.4 垂直積曲線形状モデル

隔でとった背面土の変位状況を示している。

図-6.2の水平積直線形状モデルは、下部の石垣石が前面に滑動して大きくずれており、下からおよそ1/3の部分で折れ曲がり、口を開いた状態になっている。さらに、背面土の変形量が他の形状に比べ最も大きなものとなっている。図-6.3の傾斜積直線形状モデルは、水平積直線形状モデルに比べ下部の滑動は著しく減少している。これは、石垣石が隅角部稜線に対し垂直であることにより、石と石の間の接面に働く垂直応力が増加することで、せん断抵抗が大きくなることによる効果であると考えられる。しかしながら、水平積直線形状モデルと同じく、下からおよそ三分の一の部分で折れ曲がり、口を開いた状態になっている。図-6.4の垂直積曲線形状モデルは、傾斜積直線形状モデルと比べ、背面土の変形量に大きな違いは見当たらないが、石垣石の変形状態が大きく異なっている。垂直積曲線形状モデルの石垣は、石垣全体が一体となって土圧に抵抗しており、曲線形状によるアーチ効果が認められる。さらに、垂直積曲線形状モデルの変形後の石垣形状が、直線形状モデルの初期状態にほぼ等しくなっている。このことは、曲線形状石垣の破壊に対する安全性が直線形状に比べて大きいことを示しており、孕み出しに対しても安定性を保っていると判断することができる。

6.4 補強材による石垣の安定化の検討

6.4.1 実験方法

実験は、図-6.5に示しているように磁気式底面摩擦モデルを用いて行った^{6),7)}。ここでは、鉄

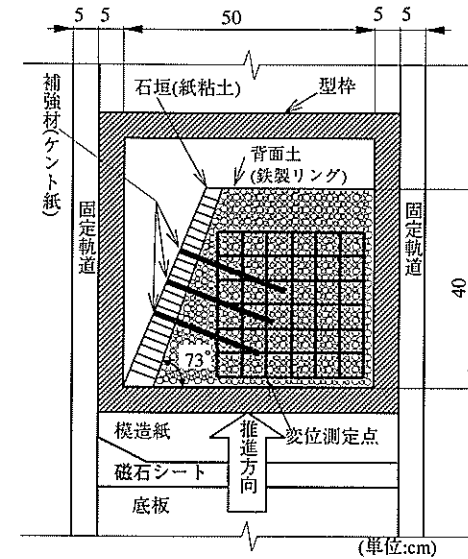


図-6.5 磁気式底面摩擦モデル実験装置

表-5.1 実験条件

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
補強材長さ[cm]	無補強	5	5	5	10	10	10	20	20	20
補強材本数		1	2	3	1	2	3	1	2	3
補強材材質	ケント紙									

製リングでできた背面土と紙粘土で作製した石垣石の模型を型枠内に配置し、固定した軌道に沿って型枠を上向きに推進させて行った。推進距離は5cmとした。石垣高さは20cmのものを想定し、1/50モデルとして高さ40cmとし、背面土となる鉄製リングは、厚さが4mmで、直径が13mm、10mm、7.5mmの3種類を用いた。補強材にはケント紙を用い、挿入が1箇所の場合は石垣の最下部から1/3の位置に、2箇所の場合はそれに追加して最上部から1/3の位置に、3箇所の場合はそれらに追加して中央部の位置にそれぞれ配置した。また、背面土の変形状態を把握するため、50mm間隔で測定点を設けている。実験は表-5.1に示しているように合計10通りの条件のもとで行った。

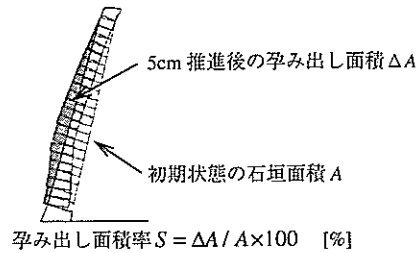


図-6.6 孕み出し面積率の説明図

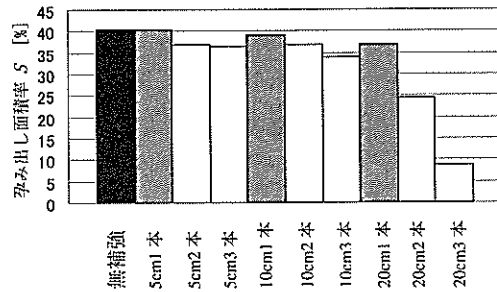


図-6.7 孕み出し面積率

6.4.2 補強材による石垣の挙動変化

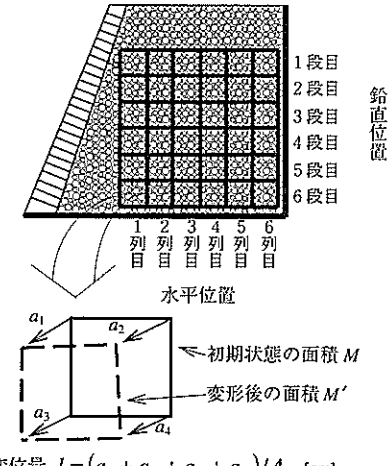
図-6.6 に無補強の場合についての石垣の破壊状況を示している。ここで、石垣の初期状態から 5cm 推進後に左側にはみ出た部分の面積 ΔA が初期状態の石垣面積 A に対する百分率で表したものを孕み出し面積率 S とし、次式で算出した。

$$\text{孕み出し面積率 } S = \frac{\Delta A}{A} \times 100 \quad [\%] \quad (6.1)$$

この結果を図-6.7 に示している。この図から、補強材の長さが 5cm, 10cm のときは、挿入本数を増加させても孕み出しを抑制する効果は微増であるが、20cm のときは挿入本数を増加させることで孕み出しを抑制する効果が顕著に認められることがわかる。これは補強材が長くなりすべり面に到達することで、補強材の剛性および引張強度によって、すべりに対する抵抗が発揮されるためだと考えられる。さらに補強材の本数が増加すると、挿入された領域において石垣と補強材周囲の背面土との一体化が起こることによって、これらの移動が抑制されるためであると考えられる。

6.4.3 石垣背面土の変形特性

背面土に設けた測定点を直線で結び、その交点で構成される 36 個の正方形について、それぞれ



$$\text{変位量 } l = \frac{(a_1 + a_2 + a_3 + a_4)}{4} \quad [\text{cm}]$$

$$\text{ダイレタンシー } D = \frac{(M' - M)}{M} \times 100 \quad [\%]$$

図-6.8 変位量とダイレタンシーの説明図

の変位量とダイレタンシーを求めた。ここでは、せん断変形に伴う面積の変化をダイレタンシーとしている。図-6.8 に示しているように、変位量は正方形を構成する 4 点の移動量の平均値とし、次式で算出した。

$$\text{変位量 } l = \frac{(a_1 + a_2 + a_3 + a_4)}{4} \quad [\text{cm}] \quad (6.2)$$

また、ダイレタンシーは変形による面積の増減量が初期状態の面積に対する百分率とし、次式で算出した。

$$\text{ダイレタンシー } D = \frac{(M' - M)}{M} \times 100 \quad [\%] \quad (6.3)$$

図-6.9 に無補強の場合と 20cm の補強材を 3 本挿入した場合の変位量を示している。この図より明らかなように、補強材が挿入されている 1~4 列目は無補強の場合に比べ変位量が格段に小さくなっている。これは、補強材が挿入されることでその位置までは補強材による変形拘束効果が周囲の鉄製リングの移動が抑制されるためであると考えられる。図-6.10 に無補強の場合と 20cm の補強材を 3 本挿入した場合のダイレタンシーを示している。各図の正のダイレタンシーに沿って示した線は、すべり面をあらわしていると考えられる。補強材のある場合は無補強の場合のすべり面に対して抵抗し、背面土の補強材挿入部分が負のダイレタンシーを示していることから石垣と補強材挿入部分の背面土が一体化していることがわかる。さらに膨張領域が補強材先端部より奥に移動していることがわかる。

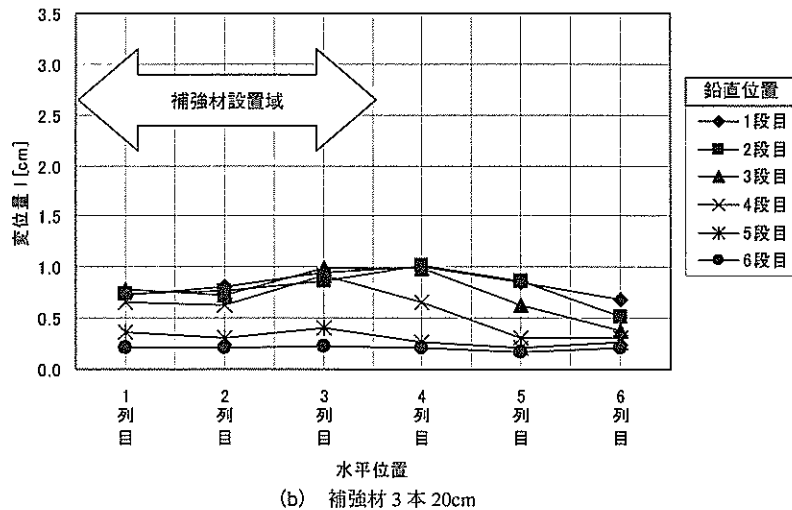
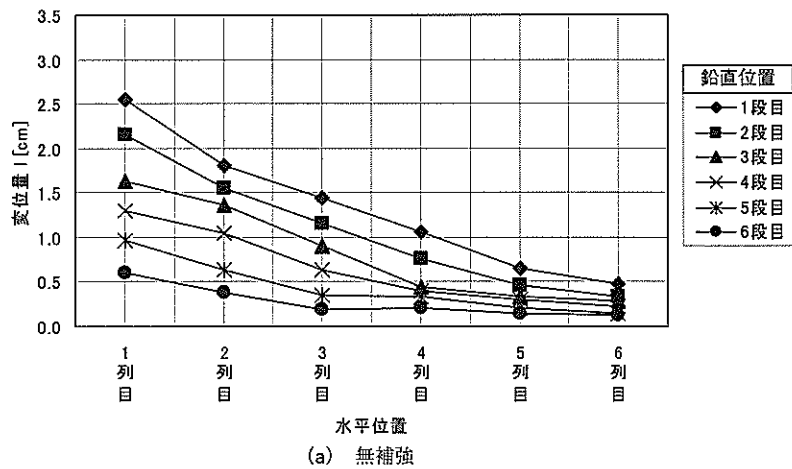


図 6-9 石垣背面土の変位量

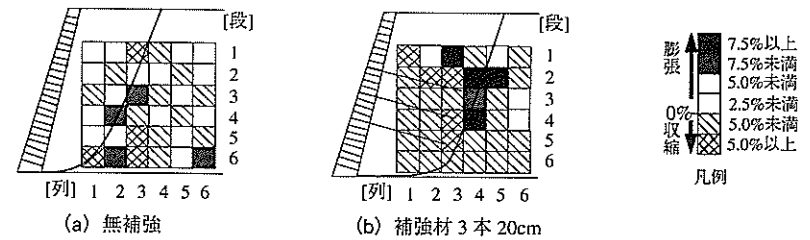


図-6.10 ダイレタンス

6.5 結語

石垣形状が安定性に与える影響を把握するため、水平積直線形状モデル、傾斜積直線形状モデルおよび垂直積曲線形状モデルの3種類について本研究において新たに考案した磁式底面摩擦モデルによって実験を行った。この実験から、石垣石を隅角部稜線に対して垂直に積むことにより、下部の滑動を防げることが判明した。そして、曲線形状にすることによるアーチ効果が認められ、石垣全体が一体となって土圧に抵抗し、さらには破壊に対する抵抗性も曲線形状は直線形状に比べて大きいことを明らかにした。

また石垣に補強材を挿入することで、背面土の補強材挿入領域のダイレタンスが正から負に変化していることから、膨張を抑えて一体化していることがわかり、このことにより孕み出しを抑制する効果があることが認められた。この際、補強材長さはすべりに対する抵抗を発揮するためにすべり面に達する長さであること、石垣と背面土を一体化させるために一定間隔で挿入する必要があることが判明した。

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.
- 4) 天野光三, 西田一彦, 渡辺武, 玉野富雄, 中村博司: 徳川期大坂城石垣構造の土木史的研究,

第7章 結論

- 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp.101-110, 2000.
- 5) R.E.Goodman 著, 赤井浩一他訳:『不連続岩盤の地質工学』, 森北出版, pp.217-225, 1978.
- 6) 森本浩行, 西田一彦, 西形達明:磁気式底面摩擦モデルによる城郭石垣の補修補強に関する検討, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集 2000年, pp.Ⅲ-67-1~2, 2000.
- 7) Kazuhiko NISHIDA, Tatsuaki NISHIGATA, Hiroyuki MORIMOTO & Tomio TAMANO:
Preservation of the Castle Masonry Wall as Historical Heritage in Japan, Material science Research International, Special Technical Publication-2, The Society of Materials Science, Japan, pp.33-36, 2001.

ユネスコにおける「世界遺産条約」や我が国における「美しい国づくり政策大綱」がまとめられているように、その地域の歴史や文化を踏まえた環境や景観への関心が大きく高まってきているとともに、文化遺産の概念や価値の認識の拡大と深化にともなって、文化遺産を整備あるいは保存する事の大切さが認識されるようになった。このような社会状況のもと、歴史的土木建造物の重要性を認識するとともに、従来から行われている歴史的、考古学的調査研究に加え、その建造物の実態の把握と修復・保存法の確立が科学的、工学的な面からも重要な課題となってきている。

我が国においては、歴史的土木建造物としての文化遺産の一つに城郭石垣が挙げられる。城郭石垣は空積みで反り曲線勾配を有しているなど世界に類を見ない独自の構造をもち、建設文化として価値の高い歴史的遺産であるが、そ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現存する城郭石垣の中には、老朽化が進行し崩落の危険性のある箇所が数多く存在している。変状の生じた城郭石垣の修復に際しても、石垣構築当時の設計図面などが存在していることは極めて稀であるため、構築当初の形状に積み上げることは困難を極める状況にある。そこで本論文では、世界に類を見ない独自の構造を持つ我が国の城郭石垣の形状および構造の歴史の変遷を土木史的に明らかにするとともに、その安定性に影響を及ぼす各種要因の検討を行ってきた。

第1章では研究するに至った経緯と本研究の位置付けについて説明し、本論文の目的と意義について明確化した。ついで、各章における内容の概説とその流れについて明らかにした。

第2章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である遺存技術情報を的確に把握し、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である数値評価法を提案した。これは、石垣石の加工状況を判断する石垣石加工度 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み上げら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つの指数である。

この数値評価法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よっ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事が可能となった。

さらに、この数値評価法を用いて、1984(昭和59)年に行われた大阪城大手前配水池改良工事に伴う発掘調査で発見された大阪城地下石垣を検討した結果、豊臣期大坂城石垣であると推定できたことから、構築年が未知である城郭石垣について、数値評価法を用いて D 、 S 、 R の諸数値を算

出すれば、ある範囲を持った構築年代を推定する事が可能となった。

第3章では、城郭石垣の修復・保存のために現在の形状を計測し把握するとともに、構築当時における形状を推定した。

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、ノンプリズムレーザー測距儀を用いて城郭石垣の形状の測定を行うことを提案した。これは目標となる地点に反射板の設置が不要であり、石垣を傷つけることなく安全かつ簡便に計測できるものであり、検討の結果、その測定精度は石垣断面を計測するにあたり十分な精度を有していることが確認でき、性能についても石垣断面を計測するうえで最も適したものであることが確認できた。

構築当時の形状については石垣構築技術についての記述がある「後藤家文書」[石垣秘伝之書]および「石垣書」の3種類の文献をもとに、それらの構築手法を明らかにすることで構築当時の形状を推定した。さらに3種類の構築手法による反り曲線勾配部分について数式化した。これら3種の構築手法による石垣の形状は、反り曲線勾配が大きく変化するものについては多少の違いが認められるが、反りの変化が少なく直線に近い形状のものについては明瞭な差異が表れないことが判明した。

現存する石垣の形状と3種の構築手法による石垣形状との比較により、石垣の構築当時からの変形量が推定でき、現在多くの城郭石垣で問題となっている孕み出しの大きさを算出する事が可能となった。さらに、孕み出しなどの石垣の変形量に対する検討には「後藤家文書」の構築手法による形状を基準とすれば、実質的な対処が可能であることも判明した。このことにより、石垣の崩壊の危険性や修復の必要性の判断など石垣遺構の保存あるいは修復に向けての活用について期待できる。そして、現状の石垣の形状と3種の構築手法による石垣形状を比較した結果、石垣の孕み出しは中央部だけでなく、地盤に接している下部においても存在していることが明らかとなった。石垣の変形は地盤の強度特性と密接な関係を有していると考えられる。

第4章では、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、土木史上意義だけでなく、重要な石垣遺構の修復保存法の確立をはじめとして、現代における石造建造物の新たな設計手法の解明に対しても寄与することになるものと考えられるため、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の変遷を検討し、構築技術の推移を把握することを試みた。

検討するための基礎資料として、構築年代の異なる石垣が存在する甲府城、岸和田城、姫路城、和歌山城と断面形状の計測を行うことができた名古屋城、安土城、伊賀上野城、大坂城、丸亀城

の計9ヶ所の城郭石垣についての実測データを用いた。これら現状の石垣断面形状と「後藤家文書」の設計手法による形状とを比較検討することにより、石垣構築技術の変遷を把握した。城郭石垣の断面形状の把握のために、高さ h および初期勾配 G 、上底 a 、下底 b を計測し、さらには凹み量 d を算出した。この結果、石垣高さは石垣石が精加工されるほど高く構築することが可能となったことが判明した。また石垣石の加工程度が低い野面積みにおいては、構造物の重要度に応じて初期勾配を緩くとり、反りを大きく入れることで、いびつな形状である石垣石を積み上げた時の安定を図ったものと考えられる。

城郭石垣を安定させる要因には初期勾配を緩くとり、反りを大きく設けることが挙げられ、これらは石垣の安定に重要な役割を果たしていると考えられるが、石垣石が精加工され、より安定した構造体となると、初期勾配は急に、反りは小さくすることが可能となる。反りを設けることは設計施工において高い技術を要すると仮定すると、後の時代のものほど石垣石の加工の技術は高くなったが、構築技術そのものは低下していったのではないかと考えられる。「後藤家文書」に示された設計例は1800年代に入ってからそれまでの後藤家に伝わる設計技術を集大成したものであって、それに至るまでの変遷は読み取ることができない。しかし今回の研究によって、城郭石垣の石積み技術は早くから高度なものであったことが推測でき、それに時代とともに高さを高くするための工夫が加えられてきたものと考えられる。

第5章では、我が国の城郭石垣は老朽化が進行し崩壊の危険性のある箇所が数多く存在しており、建設文化の歴史的遺産であるこれらの遺構を修復保存するために、石垣の安定性に影響を及ぼす要因を把握した。

石垣の安定性を決定づける要因の一つとして地盤の強度特性が挙げられる。そこで、 N 値と石垣の形状を決定づける要素である初期勾配 G 、凹み量 d との関係、および構築当時からの変形状況と N 値との関係を把握することで安定性に及ぼす要因の検討を行った。検討に用いたデータは第4章と同じく甲府城、名古屋城、安土城、伊賀上野城、大坂城、岸和田城、姫路城、和歌山城、丸亀城の9ヶ所の城郭石垣である。そして仮想モデルに対するFEM解析も行い、これらが安定性に及ぼす影響の把握を行った。

この結果、基礎地盤の強度が低いほど、初期勾配を緩くし、凹み量を大きくする傾向にあることが判明した。またこのことは、石垣の安定化を図るのに必要なことであることがFEM解析により明らかとなった。しかしながら、現在において基礎地盤の軟弱な場所に構築されている石垣や野面積みで構築されている石垣は、構築当時に比べ変状が進んでいることが明らかとなったため、地盤の補強や石垣石の間に補強材を挿入する工法、あるいは積み直しなどが必要ではないかと考えられる。

第6章では、石垣形状の違いが石垣の変形特性と安定性に与える影響を把握するため、水平積直線形状モデル、傾斜積直線形状モデルおよび垂直積曲線形状モデルの3種類について本研究において新たに考案した磁気式底面摩擦モデル実験装置を用いて模型による実験を行うとともに、

石垣を修復保存するために補強材を挿入することで対処することを考え、石垣に与える補強材の影響をこの模型による実験方法を用いることで検討を行った。

実験から、石垣石を隅角部稜線に対して垂直に積むことにより、下部の滑動を防げることが判明した。そして、曲線形状にすることによるアーチ効果が認められ、石垣全体が一体となって土圧に抵抗し、さらには破壊に対する抵抗性も曲線形状は直線形状に比べて大きいことを明らかにした。また石垣に補強材を挿入することで、背面土の補強材挿入領域のダイレタンシーが正から負に変化していることから、膨張を抑えて一体化していることがわかり、このことにより孕み出しを抑制する効果があることが認められた。この際、補強材長さはすべりに対する抵抗を發揮するためにすべり面に達する長さであること、石垣と背面土を一体化させるために一定間隔で挿入する必要のあることが判明した。

以上、本研究において得られた主要な成果について論述した。これらの研究成果が城郭石垣の修復・保全、さらには歴史的文化遺産である土木建造物の研究の発展に寄与できれば幸いである。

用いた記号一覧

記号	名称	単位	
a	: 石垣石表面積	m^2	式 (2.1)
a	: 上底	m	式 (3.7), (3.24), (3.31)
A	: 石垣面積	m^2	式 (6.1)
b	: 下底	m	式 (3.7), (3.24), (3.31)
d	: 控長さ(石垣石奥行長さ)	m	式 (2.1), (2.2)
d	: 凹み量	m	式 (4.1)
d_0	: 凹み量(「後藤家文書」の規準値)	m	式 (4.2)
D	: 石垣石加工度	無次元	式 (2.1)
D	: 孕み出し度	%	式 (5.1)
D	: ダイレタンシー	%	式 (6.3)
E	: 弾性係数	kPa	
G	: 初期勾配	無次元	式 (3.8)
G_0	: 初期勾配(「後藤家文書」の規準値)	無次元	
h	: 石垣高さ	m	式 (3.7), (3.24), (3.31)
h_1	: 石垣高さ(直線勾配部分)	m	
h_2	: 石垣高さ(反り曲線勾配部分)	m	式 (3.7), (3.24), (3.31)
l	: 石垣変位量	cm	式 (6.2)
L	: 石垣石稜線長さ	m	式 (2.1)
M	: 初期状態の面積	cm	式 (6.3)
M'	: 変形後の面積	cm	式 (6.3)
R	: 石垣石傾斜度	無次元	式 (2.3)
S	: 石垣石控比	無次元	式 (2.2)
S	: 孕み出し面積率	%	式 (6.1)
α	: 石垣石稜線面が鉛直軸に対してなす角	°	式 (2.3)
β	: 石垣石接触面が水平軸に対してなす角	°	式 (2.3)
γ_t	: 土の単位体積重量	kN/m^3	
δ	: 孕み出し量	m	
ΔA	: 石垣孕み出し面積	m^2	式 (6.1)
ν	: ポアソン比	無次元	
ϕ	: 内部摩擦角	°	

謝 辞

本論文は、関西大学教授西田一彦先生のもとで行った一連の研究成果をまとめたものです。この間、懇切かつ多大なご指導とご鞭撻を賜った同教授に心より感謝の意を表します。

本論文を取りまとめるにあたり、ご多忙中にも関わらず懇切なご助言とご指導を賜った関西大学八尾貞太郎教授、楠見晴重教授、河上省吾教授の各先生方に謹んで感謝申し上げます。また研究を遂行するにあたり、終始暖かいご指導とご鞭撻を賜った関西大学助教授西形達明先生、大阪産業大学教授玉野富雄先生に厚く御礼申し上げます。

大阪城天守閣館長の中村博司氏ならびに文学博士北垣聡一郎先生には、石垣構造物に関する資料の提示と歴史的観点からの懇切なご教示を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

さらに、本研究における実験や数値解析、測量などにご協力いただいた関西大学工学部都市環境工学科地盤工学研究室の卒業生諸氏に感謝の意を表します。

