

# 大阪城石垣の技術史

玉野 富雄, 金岡 正信

The Technical History of the Osaka Castle Masonry Walls

TAMANO Tomio, KANAOKA Masanobu

## Abstract

Considering Japanese construction culture before the Meiji era, the castle masonry walls in the modern age are without equal in the world. The Osaka Castle masonry wall in the Tokugawa period represents an extremely excellent and unparalleled construction culture in the world from the point of view of the beauty of the structure observed in the corner wall profile curve, as well as the wall curved surface, and the mechanical rationality as the structural form. That is a magnificent and graceful construction culture which was uniquely developed and accomplished in Japan. This paper presents the technical history of the Osaka Castle masonry walls, discussing the historical and scientific studies on the masonry walls in the Toyotomi period and in the Tokugawa period.

Key words: modern age castle masonry wall, Osaka Castle in the Toyotomi period, Osaka Castle in the Tokugawa period, technical history

## 1 はじめに

明治以前の我が国における建設文化を考える際、世界に誇る建設文化として近世城郭石垣(以下、単に石垣と呼ぶ)がある。石垣は、安土城石垣に始まり、豊臣期大坂城石垣(以下、単に豊臣期石垣と呼ぶ)を経て、徳川期大坂城石垣(以下、単に徳川期石垣と呼ぶ)において最高技術レベルに到達した。また、明治以前では大坂、明治後は大阪と表記する。

徳川期石垣は、石垣形状での2次元断面曲線および3次元石垣曲面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見て、世界的に他に例を見ない極めて優れたものであり、我が国で独自に展開し花開いた建設文化であるといえる<sup>1)-8)</sup>。また、豪壮な堀は、文禄3年（1594）の太閤堤および文禄5年（1596）の文禄堤に始まる大規模な近世の河川治水技術の集大成ともいえるものである。このような豊臣期石垣と徳川期大坂城石垣の持つ歴史的・建設文化的な価値をより明確にするためには、その技術系譜を歴史史料により検証するとともに実証的に探究することが重要といえる。こうした見地より、本稿では、大坂城石垣の技術史としての豊臣期石垣と徳川期石垣の構造論について、地盤工学的調査などにに基づき述べる。

## 2 石垣構造を支える地盤

図-1 に徳川期大坂城全景（現在の大阪城の全景）を示す。石垣構造を支持する地盤状態は、

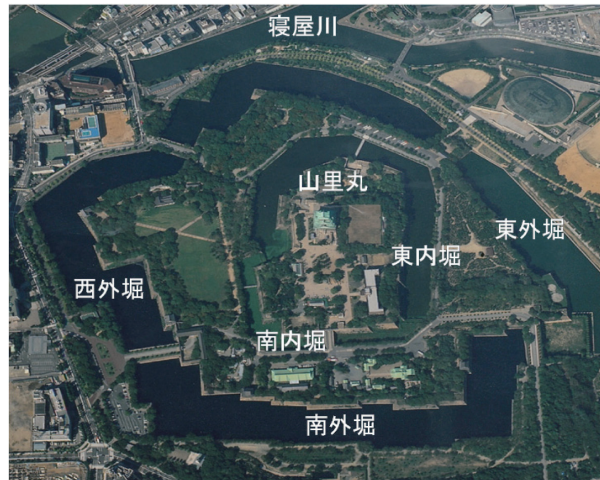


図-1 大阪城全景（Google画像に加筆）

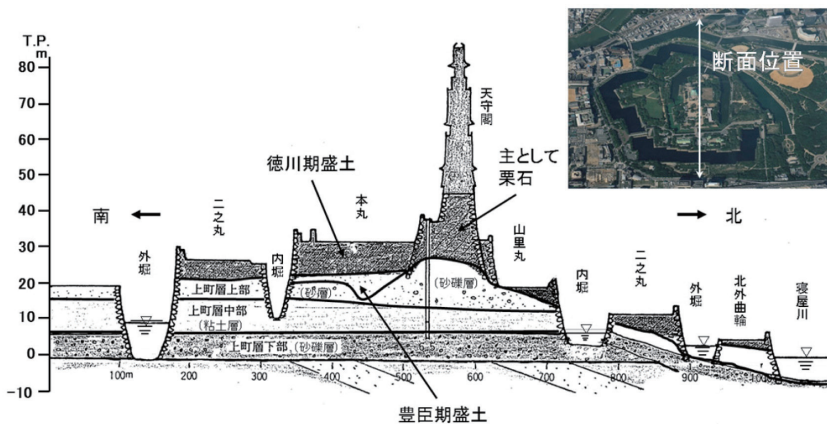


図-2 石垣を支える地盤：南北方向地盤説明図<sup>1)</sup>

石垣構造の力学安定に大きく関係する。図-2に、平成7-8年度・平成11-13年度文科省科研研究（研究代表者：天野光三）で行った詳細な地盤情報収集に基づく徳川期大坂城地盤図：南北方向地盤説明図を示す<sup>1), 2)</sup>。

図より、徳川期石垣は南内堀（空堀）を除き十分な支持力を有する上町層下部の砂礫層に石垣基礎の支持地盤を求めていることがわかる。巨大重量構造物である天守閣石垣も上町層上部の砂礫層に基礎地盤を求めている。また、各堀の高さは、堀の掘削時およびそれに続く石垣築造時に、地下湧水を近接した河川に排水しやすい高さに設定されている。また、西外堀の北側には工事用の運河の存在が確認され、石垣石や資材の船による搬入が行われたと推測できる。運河部の堀底の高さは標高（T.P）-1.3m程度に設定されている。施工上から見れば、石材などの資材の運搬と掘削時の排水の点で極めてよく考えられた施工高さである。こうした「縄張り」は、豊臣期石垣から徳川期石垣の築造に際し掘削された井戸からの地盤情報を基に行われたと想定できる。

### 3 豊臣期石垣から徳川期石垣への技術進歩

図-3に渡辺により示された石垣構造の説明図を示す<sup>8)</sup>。図-4に石垣隅角部の「算木積み」構造の進歩の説明図を示す。天正15年頃（1577頃）の安土城石垣では石垣隅角部は直線勾配で石垣石はほぼ水平に積まれている。「算木積み」構造は未成立であるが、より大きい石垣石を方向を変え交互に積み上げることがなされている。それに対し、元和元年-寛永6年（1620-1629）の徳川期石垣では「算木積み」構造が完成した状態の反り勾配であり、その稜線にほぼ直角に石垣石が配されている。豊臣期石垣はその成立過程にある。図-5に安土城石垣と豊臣期石垣である詰ノ丸石垣を示す。豊臣期石垣では、「算木積み」の完成状態にはないものの、石垣石は大きくしっかりした構造となってきた。

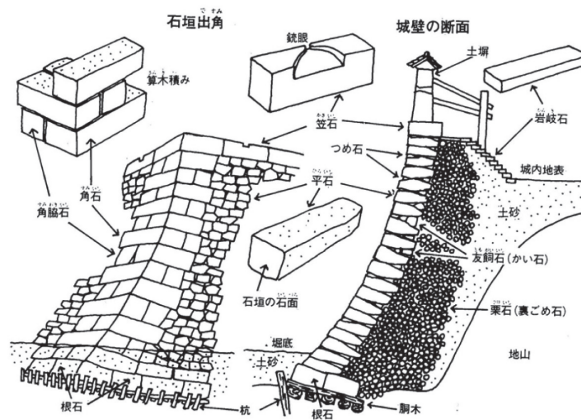


図-3 石垣構造の説明図<sup>8)</sup>

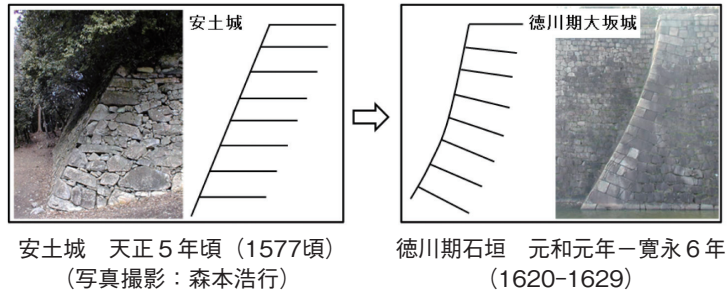


図-4 「算木積み」石垣構造の進歩<sup>9)-12)</sup>



安土城石垣: 天正5年頃(1577頃)  
(写真撮影: 森本浩行)



豊臣期石垣: 詰ノ丸石垣天正11年(1583)  
(写真提供: 大阪市文化財協会)

図-5 安土城石垣と豊臣期石垣

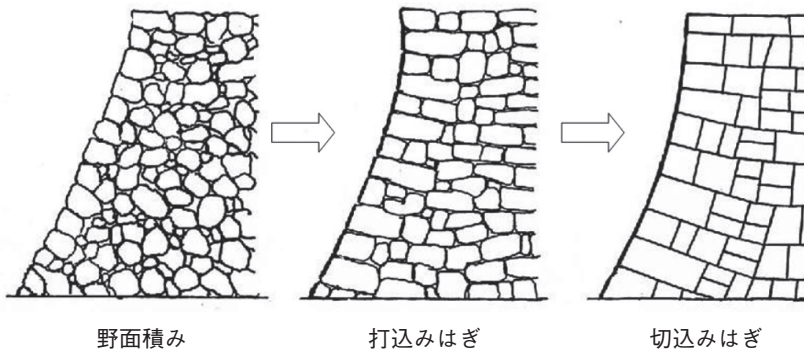


図-6 平石部石垣構造の進歩<sup>9)-12)</sup>

図-6に平石部石垣構造の進歩の説明図を示す。「野面積み」⇒「打込みはぎ」⇒「切り込みはぎ」への進歩があり、豊臣期石垣は「野面積み」、徳川期石垣は「算木積み」部が「切り込みはぎ」で平石部が「打込みはぎ」である<sup>9)-12)</sup>。これらの石垣構造と力学的強さの関係を

詳細に調べることが重要となり，数値力学解析，現場計測による力学解析，および模型実験による力学解析が行われてきている<sup>13) - 17)</sup>。

#### 4 「算木積み」構造の発達とその数値評価

徳川期石垣では，石垣断面曲線に対し，石垣石間の接面が，ほぼ直角になるように積み上げられている。断面曲線に直角の接面角度をもった石垣石の積み上げ方は，上部からの圧縮応力を石垣石間の接面により垂直に作用させることになり，石垣がはらみ出そうとするのに抵抗する石垣石間の摩擦抵抗力を最も大きくすることができる。このことは，石垣構造の力学的な観点からみて，きわめて重要で力学的に合理的なものである。

徳川期石垣の石垣石の控長さは，他の石垣での石垣石に比べて格段に長いものであり，岡山県牛窓町前島における徳川期石垣残石群の石材寸法調査および徳川期石垣の隅角部角石の石材寸法調査では，正方形に換算した表面の一辺長さと控長さとの比が3.0程度になっている<sup>1)</sup>。また，控長さは，石材の積み上げ時の施工性などの点から規格化されたと推測できる。石垣石の控長さの大小は，力学的な意味から重要である。石垣が多少はらみ出した場合でも，控長さが長ければ，上部からの圧縮応力をスムーズに下部石垣方向に流すことができる石垣石長さが奥行き部分で残っていることになる。また，図-3中に示す石垣石と石垣石の間につめる「かい石」や「つめ石」と呼ばれるような小ぶりの石の存在は石垣での力の伝達をスムーズにする意味で力学的に極めて重要である。

徳川期石垣は，完成後今日まで，安政元年（1854）の安政東海地震・南海地震を含め11回の震度4以上の地震を経験しているが，ほぼ安定な状態で保全されており，耐震構造としての優秀性が実証されている。地震時において，石垣石間で生じる大きな摩擦抵抗力や石垣背面の「裏ごめ」栗石部での揺れのエネルギーを吸収する力学作用により安定が保たれたと考えることができる。

このように，石垣構造は，石垣石の控長さが長いほど，石垣石が直方体に近くなるほど，石垣石の設置傾斜度が石垣稜線に直角になるほど力学的に強くなる。それぞれを，石垣石控比，石垣石加工度，石垣石傾斜度と呼ぶ。石垣石のそれぞれの控比を石垣高さで平均化すれば石垣石控比が求まる。また，図-7に石垣石加工度の説明図と算定式を示す<sup>9) - 12)</sup>。これらの諸式を用

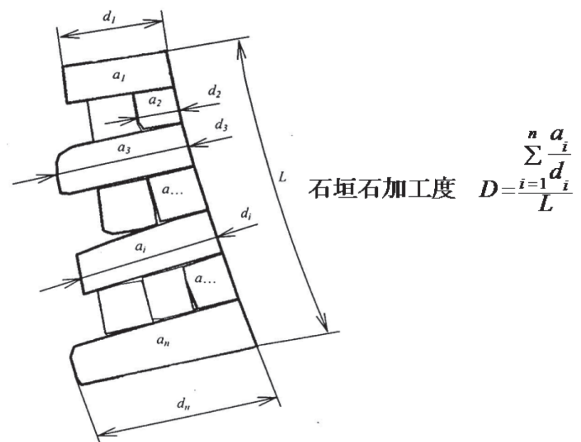


図-7 石垣石控比と石垣石加工度の説明図<sup>9) - 12)</sup>

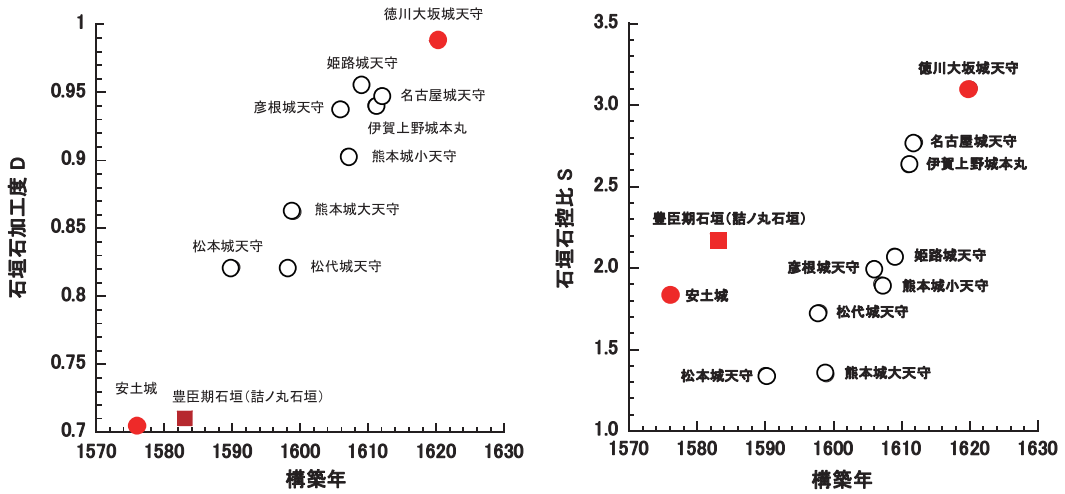


図-8 石垣石加工度・石垣石控比と石垣構築年の関係<sup>9)-12)</sup>

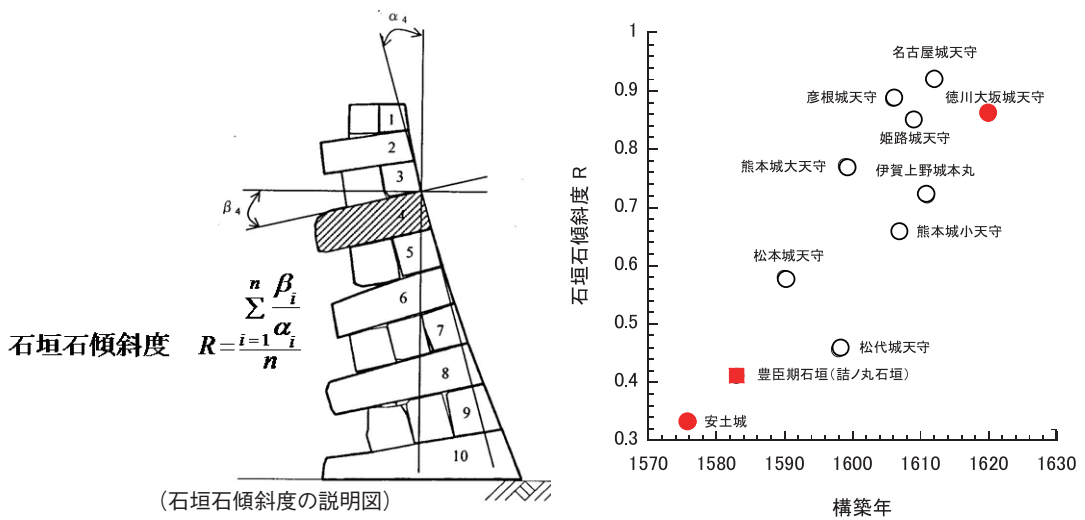


図-9 石垣石傾斜度説明図および石垣構築年の関係<sup>9)-12)</sup>

い、安土城から豊臣期石垣をへて徳川期石垣に至る石垣の構築年と各々の数値の関係を図-8に示す。石垣石加工度は安土城石垣と豊臣期石垣（詰ノ丸石垣）では0.7程度、徳川期石垣（天守閣石垣）では1に近く直方体である。石垣石控比は、安土城石垣で1.8、豊臣期石垣で2.2、徳川期石垣で3.1となっている。次に、図-9に石垣石傾斜度の説明図と式および構築年との関係を示す。石垣石傾斜度では、安土城石垣で0.33、徳川期石垣で0.85であり、石垣構造の進歩が数値化され明瞭に示されている。

## 5 「算木積み」断面形状の設定法

図-10に金沢藩後藤家に伝わる『後藤家文書』による隅角部の断面形状の設定法（以下、『後藤家文書曲線』と呼ぶ）と東内堀月見櫓跡石垣面北隅角部における石垣断面形状を示す。図中に示した方法で算定した断面形状と徳川期石垣の実測断面形状はみごとに一致する。なお、『後藤家文書曲線』については西田らにより詳細に研究がなされている<sup>9)-12)</sup>。

この方法では、図中に示すように石垣高さ $H$ 、下辺の長さ $L_b$ 、下端部から $1/3$ の高さまでの勾配 $G$ を設計条件とすれば $DE$ が求まる。次に、上辺の長さ $L_a$ を決め、 $E$ 点から上端部 $F$ にかけて $AB$ 間を $n$ 等分する水平線を引く。そして、 $n$ 等分した各段の石垣を積み上げるとに $a_0$ だけ前面に張り出し $F$ 点に到達させる。 $n=4$ の場合、 $a_0$ は図-10の上辺での関係より $L_a = (4+3+2+1)a_0$ で計算できる。本事例では $n=4$ としたが $n$ の数を増していけば、 $EF$ は直線の組み合わせた形状から2次曲線に近い形状（以下『後藤家文書曲線』と呼ぶ）となる。この断面曲線の力学的効果は、力が稜線に沿って流れ、力学的に安定することにある。また、石垣石の接面角度は $20^\circ$ から $0^\circ$ （水平）に変化している。逆解析による断面曲線の直線勾配は $62^\circ$ 、石垣高さは $31\text{m}$ である。

石垣面における力の流れは一種のアーチ構造と考えられ、石垣に作用する力を両側方の「算木積み」構造部と下端の地盤に力を流すように機能すると考えられる。石垣が、力学安定するには、石垣面すべてのところで圧縮力が生じていることが力学安定要件となる。櫓や塀があれば上部での力学的拘束効果が生じることになる。

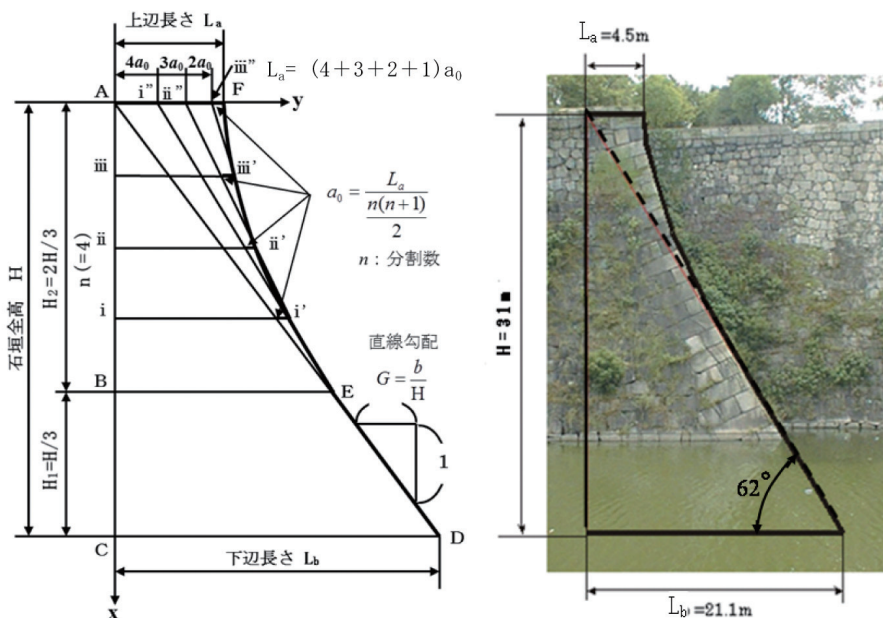


図-10 「算木積み」断面形状の設定法（東内堀月見櫓跡石垣面北隅角部）<sup>9)-12)</sup>

## 6 石垣構造比

徳川期石垣のような高い石垣構造の力学安定を考える場合、「縄張り」時の石垣平面形状設定に際し、出角部と入角部の付け方により生じる3次元力学効果を期待したと考えられる。そこで、石垣面の上辺の長さを石垣高さで除した値を「石垣構造比」と定義し考察する<sup>3), 16)</sup>。

図-11に徳川期石垣における石垣高さと石垣構造比の関係を示す。図より「石垣構造比安定上限曲線」と名付けた曲線より上に出ている石垣は、歴史史料および現地調査により確認できた石垣の崩壊事例である。南外堀南側石垣での崩壊事例では、寛永6年(1629)の崩壊後の寛永7年(1630)に修築が行われ、長さを270mから125m 鍵の手錠に平面形状が変更されている。

石垣高さが20mであるので、「石垣構造比」は13.5から6.25になるように石垣平面形状に屈曲を与えている。

次に、東外堀本丸側石垣面における崩壊事例では、平成8年(1996)に東外堀を運動場からもとの水堀に戻す工事中に胴木が発見され、崩壊・修築が過去においてあったことが考えられた。胴木以下の石垣をそのまま使用し、その上に新たに石垣を積み直したことを示し、石垣面全体での観察からもそのことが顕著にわかる。その原因としては、万治3年(1660)の青屋口火薬庫の落雷による大爆発時の石垣崩壊の可能性が高いと考えられる。また、石垣長さは180mと長く、石垣高さは18.5mである。結果として、「石垣構造比」は9.7となり力学的に不安定な石垣であったことになる。

また、図-11より石垣高さが5m近くになれば、「石垣構造比安定上限曲線」の値は大きくなり、3次元効果のない力学状態であることがわかる。一方、石垣高さが18mをこえると「石垣構造比安定上限曲線」の値はかなり小さくなる。また、3次元有限要素法による石垣の力学解析<sup>16)</sup>で3次元力学効果がゼロになる「石垣構造比」の値は7.81であり、ほぼ「石垣構造比安定上限曲線」の変曲点に位置している。

なお、この「石垣構造比」に関する研究当初は、すべての石垣面で正確に石垣底からの純高さを知ることができなかつたため、水面よりの石垣高さを含めて図示していた。その場合でも、ほぼ同じ「石垣構造比安定上限曲線」が得られ力学的考察が可能であった。本稿での図-11はすべて純石垣高さで作成したものであり、より精度は高いものとなっている。なお、この徳

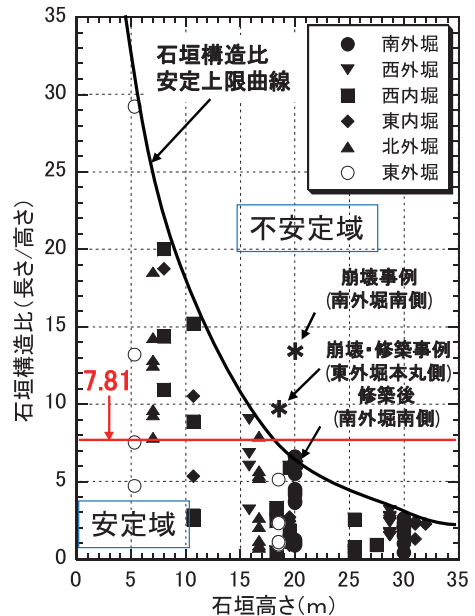


図-11 徳川期石垣の「石垣構造比」<sup>3), 16)</sup>



川期石垣での関係は、他の石垣でそのまま援用できないことに注意が必要である。徳川期石垣と他の石垣では石垣構造の技術レベルが大きく異なるためである。

以上の検討より、徳川期石垣築造に際しては、石垣崩壊を防ぐ技術的配慮として、3次元形状効果を考えたと明確に推察できる。石垣平面形状が石垣の安定に大きく関係することを、当時の石垣普請の際に熟知していたことになる。

## 7 「平の透き」曲面形状の設定法

隅角部稜線の「算木積み」断面曲線と石垣面内平石部の「平の透き」曲面の設定法は深く関係して技術進歩がなされたと考えられる。ただ、「平の透き」曲面には、3次元有限要素法による力学解析結果より、力学的な効果はそれほど小さくなく、技術者の美意識のようなものが

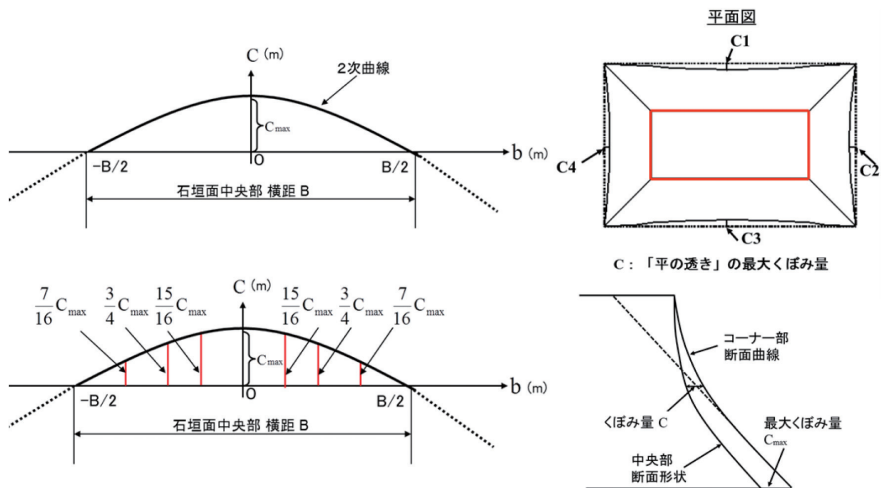


図-12 二次曲線による「平の透き」曲面の設定法

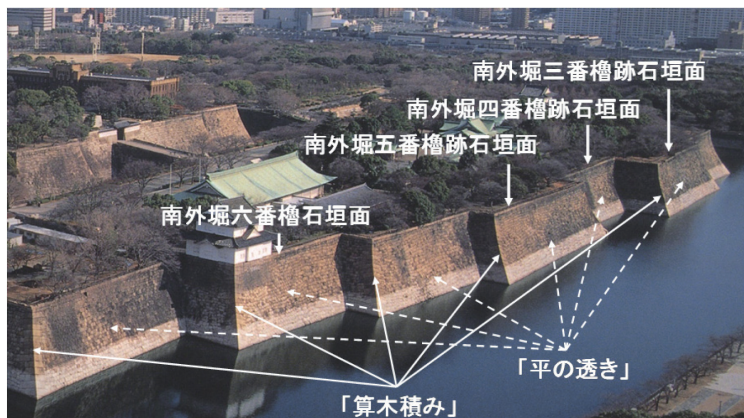


図-13 南外堀本丸側石垣面

強く感じられる<sup>16)</sup>。「平の透き」曲面に関する唯一の歴史史料として北垣により見出された『石垣築様目録』<sup>18)-20)</sup>がある。ただ、「平の透き」曲面の設定法は明確ではないのが現状である。

「平の透き」曲面の説明図を図-12に示す。図-13に南外堀本丸側石垣面を例に徳川期石垣での「平の透き」曲面を示す。徳川期石垣では、石垣面の上端が直線であり、より高度な技術となっている。この石垣面はイギリスの女性探検家イザベラ・バードが明治の初めにその優雅さを著書『日本奥地紀行』の中で紹介している<sup>21)</sup>。まさに、豪壮華麗な石積みの芸術と称される石垣である。

「平の透き」曲面の設定法には、出角-出角面（たとえば、南外堀三番櫓跡石垣面）、出角-入角面（たとえば、南外堀六番櫓跡石垣面）、入角-入角面（たとえば、南外堀四番櫓跡石垣面）がある。まず、基本となる出角-出角面について考える。「くぼみ量」の定義の説明図を図-12中に示す。石垣面両端の「算木積み」石垣稜線の断面形状からのくぼみを「くぼみ量」と考えるものである。

「平の透き」曲面の設定法として前項で示した『後藤家文書曲線』を援用する。図-12中に石垣面内横方向のくぼみ量の設定法の説明図を示す。2次曲線とすれば石垣の横幅あるいは高さで「算木積み」断面曲線からの最大くぼみ量を設計条件として与えれば「平の透き」曲面が単純な比例計算より決まる。本研究の当初は、円弧による「平の透き」設定法が有力な手法であると考えた。図-14に示す円弧による方法においても2次曲線による方法と同程度に実測値とほぼ一致する形状を見出すことができる。しかし、 $B$ と $r$ の2変数によりくぼみ量は決まることになるので1回の設定ごとに膨大な算定作業が必要となり、実務的に利用することが困難であることが分かってきた。

近年の研究では、2次曲線を用いた方法により、容易に曲面形状が設定できることが考察できた<sup>20)</sup>。2次曲線による「平の透き」曲面の設定法では、 $B$ と $C_{max}$ を決めればすべてのくぼみ

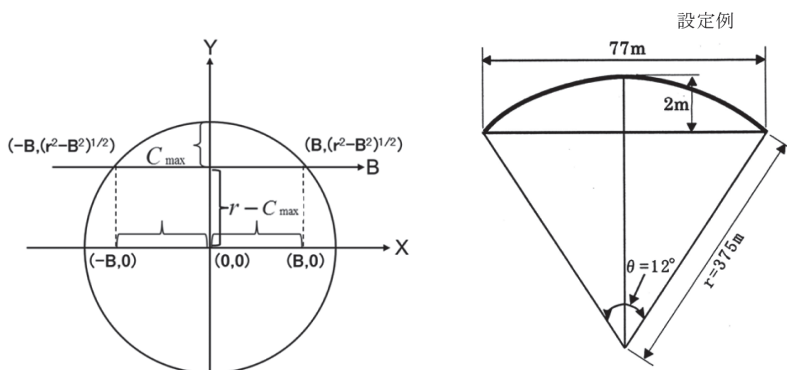
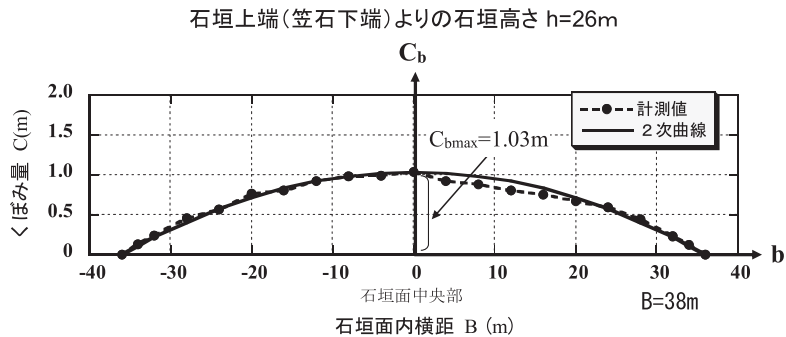
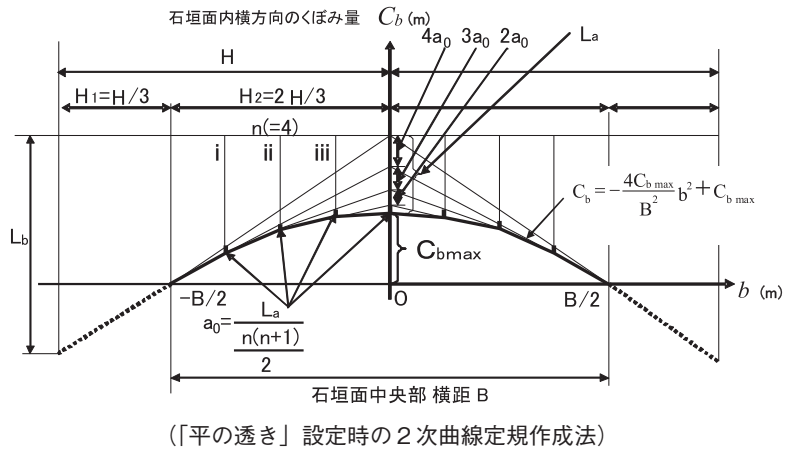


図-14 円弧による「平の透き」曲面の設定法



(出角—出角：南外堀三番櫓跡石垣面の堀水面付近横方向)

図-15 石垣面内横方向の「平の透き」曲面の設定法

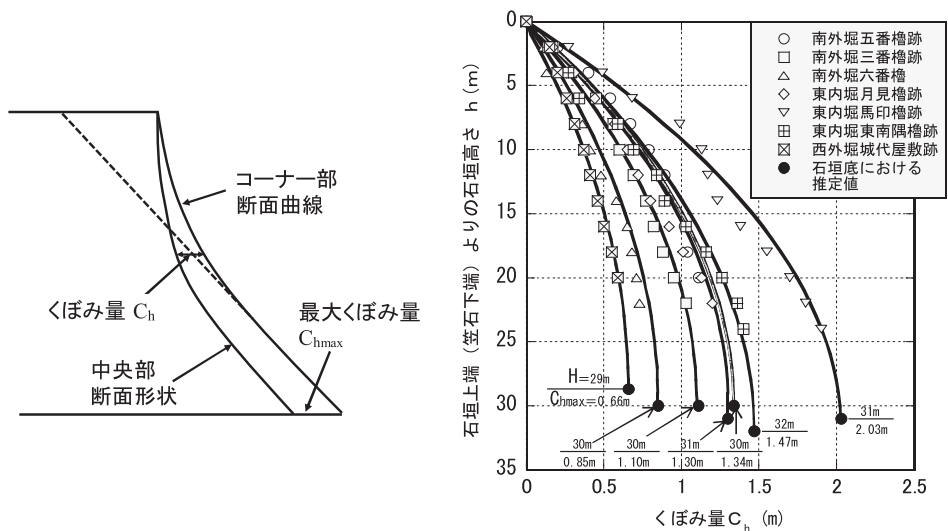


図-16 中央断面縦方向の計測値と2次曲線で近似したくぼみ分布と最大くぼみ量

量が比例計算で簡単に求まる。

図-15に南外堀三番櫓跡石垣面の実測形状と「平の透き」の設定を例示する。図-16に石垣面中央断面部での縦方向として捉えた実測形状を例示する。これらの関係より、2次曲線と実測形状がよく一致していることがわかる。以上のことから、「平の透き」曲面の設定法は次のように考察できる。

まず、石垣面の石垣高さ $h$ と石垣中央断面下端における最大くぼみ量を設計条件として決める。次に、『後藤家文書曲線』により石垣中央断面における縦方向くぼみ量分布を求める。徳川期石垣の石垣面では上辺は直線であり、くぼみ量ゼロである。そして、この縦方向くぼみ量分布を石垣横方向の最大くぼみ量分布とし読みかえる。これより各高さにおける石垣面内横方向くぼみ量分布を求めれば、石垣面全体の曲面形状を設定できることになる。

具体的な作業として、一つの『後藤家文書曲線』の定規を作成しておけば、あとは簡単な比例計算で「算木積み」断面曲線および「平の透き」曲面を算術することができる。また、石垣積み上げ施工時には石垣面の両端から麻縄を張り、石垣面のくぼみ量をチェックしながら石垣石を積み上げていけばよい。

出角-入角面および入角-入角面についても、出角-出角面での方法を援用すれば、容易に

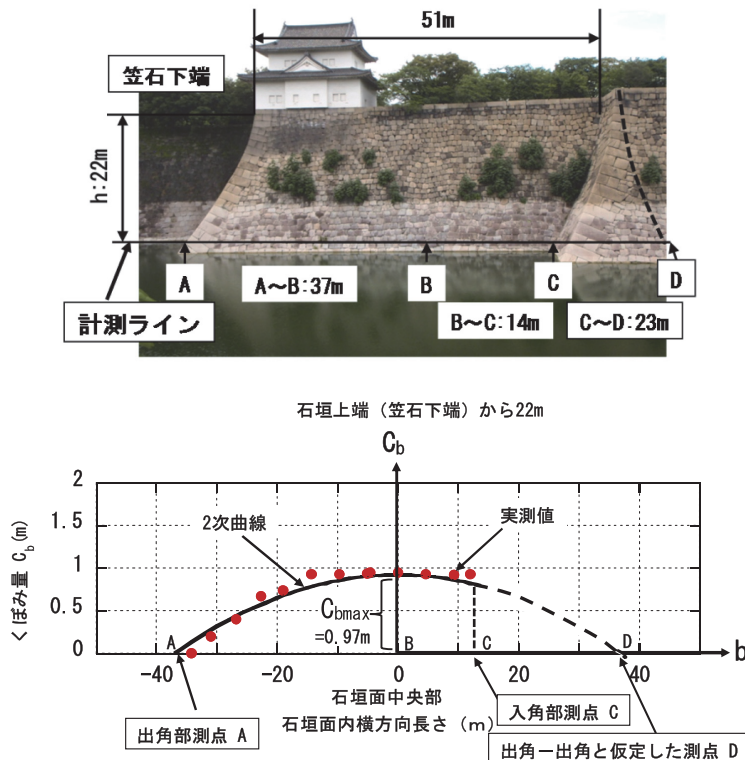


図-17 出角-入角面における「平の透き」曲面の設定法 (南外堀六番櫓跡石垣面)

「平の透き」を設定できる。その際、隣面の出角の断面曲線を利用して出角－出角石垣構造を推定する。出角－入角面について、図-17に南外堀六番櫓跡石垣面を例に説明図を示す。入

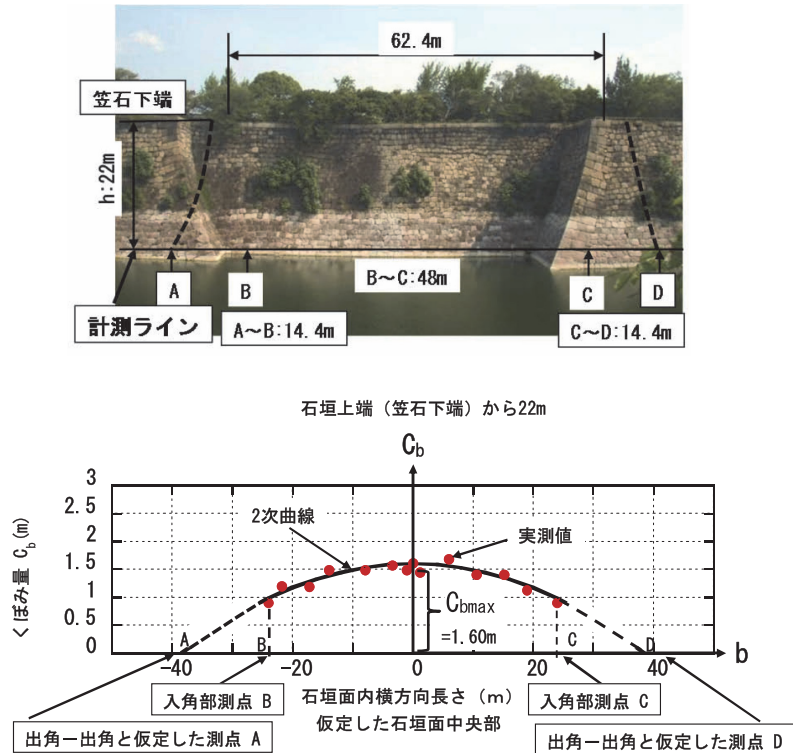


図-18 入角－入角面における「平の透き」曲面の設定法（南外堀四番櫓跡石垣面）

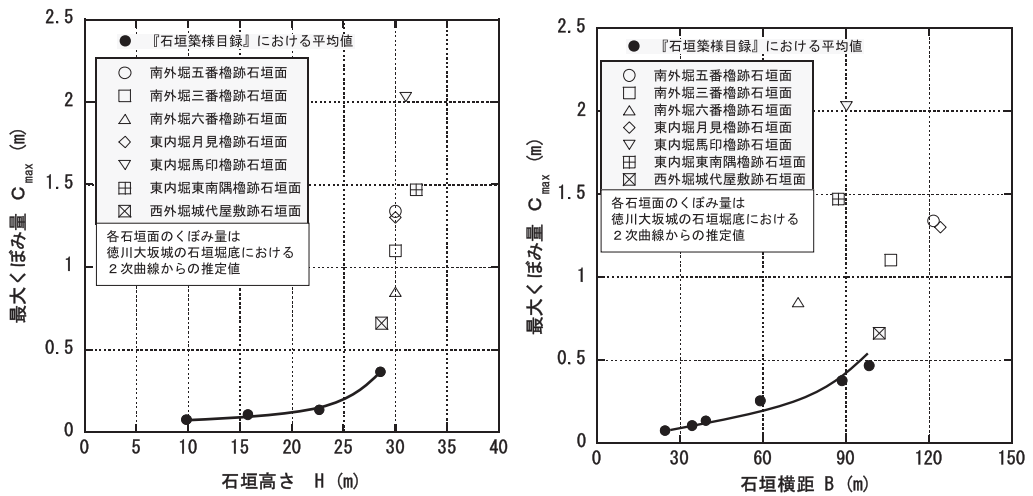


図-19 石垣高さ・石垣横距と最大くぼみ量の関係

角－入角面について、**図－18**に南外堀四番櫓跡石垣面を例に説明図を示す。その際、両隣面の出角の断面曲線を利用して出角－出角石垣構造を推定する。上端横距に対応する出角－出角面を仮定する設定法である。

**図－19**に徳川期石垣での実測値による石垣高さ・石垣横距（ここでは、石垣底での横距）と最大くぼみ量の関係を示す。図中には、李らにより整理されたこの歴史史料での関係を示す<sup>18) - 20)</sup>。それに対し、徳川期石垣では最大くぼみ量がかなり大きいことがわかる。

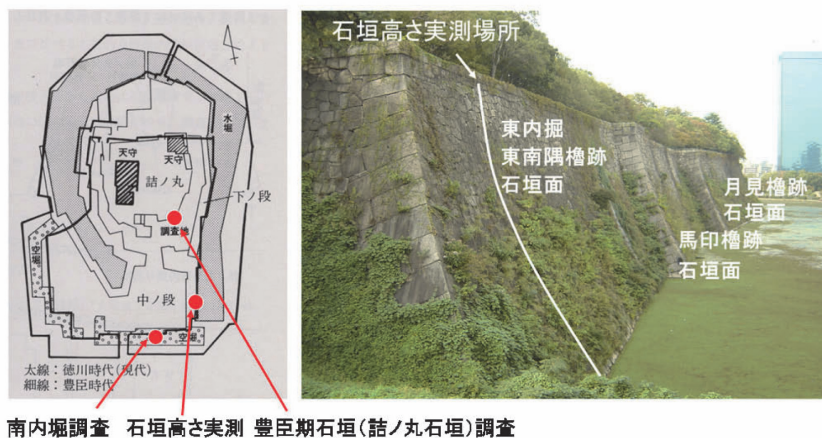
今日、徳川期石垣においてもはらみ出しによる変形が生じているが、多くの石垣面で建設当時の「平の透き」曲面が観察できる。「平の透き」曲面は、我が国にある石垣の中で徳川期石垣でのみ検証できる構造論といえる。「平の透き」に関する新たな歴史史料の発見が期待される。

## 8 豊臣期石垣と徳川期石垣の石垣高さ

徳川期石垣の石垣高さについて、歴史史料<sup>22), 23)</sup>と実測より東内堀東南隅櫓跡石垣面および南外堀五番櫓跡石垣面で考える。**図－20**に実測か所を示す。その結果、次のことがわかった。

歴史史料<sup>22), 23)</sup>での石垣高さの表示は、根石底から笠石を含めた石垣上端までの高さであり、その最大高さは東内堀東南隅櫓跡石垣面で17間2尺（約34.0m）である。東内堀東南隅櫓跡石垣面での実測値は根石上端から笠石下端までを石垣高さと考えると32.0mである。また、笠石と根石の高さを約2mとすると約34.0mとなり、歴史史料による17間2尺（約34.0m）と一致する。

一方、豊臣期石垣の本丸部での最大高さは、豊臣期石垣高さは最大で8間4尺5寸（約17m）と歴史史料<sup>22), 23)</sup>より推定できる。徳川秀忠は徳川大坂城築城に際し、普請総奉行の藤堂高虎に「石垣を旧城の2倍に、堀の深さも2倍に」と指示している。徳川期石垣の最大高さ



**図－20** 東内堀本丸側石垣における石垣高さ実測点

が17間2尺（約34m）であるとすれば、そのことに符合することになる。

先に南外堀堀底で発見された石垣遺構が豊臣期石垣ではないかという見解が示されてきている<sup>22) 23)</sup>。もしそうであるならば、徳川期石垣は豊臣期石垣の本丸側に位置し、豊臣期と徳川期ではほぼ同じ地盤高さとするれば、豊臣期石垣と徳川期石垣が同じ高さで30mと推測できることになる。天正16年（1588）時点で南外堀石垣において高さ30mの施工が可能かということになる。南外堀は城中で最も地盤が強固であること、加藤清正による熊本城では高さ約20mの高石垣が築かれたこと、藤堂高虎による伊賀上野城では約29.6mの高石垣が築かれていること、これらことから考えて、豊臣期石垣の最大高さ約30mが成立するのか興味あるところである。

## 9 豊臣期石垣・徳川期石垣の「裏ごめ」構造

石垣構造における「裏ごめ」構造の力学効果は次の諸点である。耐震性に大きく関係し、揺れのエネルギーを減少させること、透水性が大きく水はけがよく、石垣背面に作用する水圧が小さくなること、土圧の再配分現象（上部方向で土圧が増大する力学現象）が軽減されることである。

豊臣期石垣・徳川期石垣の「裏ごめ」構造の状況を図-21に示す。豊臣期の詰ノ丸石垣では小さい形状の多様な石材が用いられ、徳川期石垣の玉造口石垣面では大きな栗石で構成されている。

## 10 豊臣期石垣と徳川期石垣の二重構造

図-22に東内堀本丸側石垣部における豊臣期石垣と徳川期石垣の二重構造に関する説明図を示す。この二重構造調査は平成7-8年度文科省科研研究で行ったものである<sup>1)</sup>。図中には東内堀本丸側石垣における石垣高さの実測のために行ったボーリング調査結果等を示す。その



豊臣期石垣：詰ノ丸石垣  
（写真提供：大阪市）



徳川期石垣：玉造口石垣  
（写真提供：大阪市）

図-21 石垣の「裏ごめ」構造

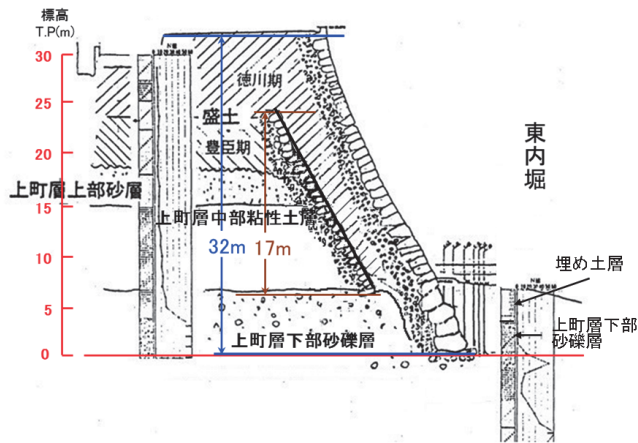


図-22 豊臣期石垣と徳川期石垣の二重構造説明図（東内堀本丸側石垣：東南隅櫓部～馬印櫓部）

結果より，東内堀本丸側の東南隅櫓部では石垣は地山の上町層下部砂礫層に支持されていること，その上部は埋め土であることがわかる。この地盤調査結果より考えて図に示すような二重構造が存在する可能性が高いと考察できた。なお，図中の豊臣期石垣は黒田家での歴史史料<sup>22), 23)</sup>より推定したものである。この豊臣期石垣と徳川期石垣の二重構造は，極めて重要な歴史遺跡であり，今後のさらなる調査研究が期待される。

## 11 豊臣期石垣・徳川期石垣と地震

天正地震（M：8）は，天正14年（1586）に生じた。豊臣期大坂城は，天正11年（1583）に築城を開始し，天正12年（1584）に大坂城本丸が完成しているので天正地震を経験している。文禄元年（1592）に秀吉が地震のことを「鯨」と表現し，地震対策を重視した。文禄2年（1593）には伏見城が完成した。

伏見地震（M：8）は，慶長元年（1596）に生じた直下型大地震であり，伏見城倒壊，大坂城下川沿いの家々が崩壊，堺が壊滅的被害，大坂城外域での地滑り，などの大きな地震被害が生じた。しかしながら，豊臣期石垣には大きな被害はなかったことが想定できる。詰ノ丸石垣の掘り出し時にも地震被害の痕跡は見つかっていない。この伏見地震を契機として，石垣構造において，熊本城⇒姫路城⇒伊賀上野城をへて徳川期石垣に至る飛躍的な技術進歩があったことが想定できる。

徳川期石垣と地震については，安政元年（1854）の安政の東海および南海の両地震で櫓と石垣に被害・地割れが生じたと嘉永雑記に記載されている<sup>23)</sup>。

ここで，石垣が地震波でどのような力学挙動を示すのかを考えてみる<sup>25), 26)</sup>。まず，東内堀本丸側馬印櫓跡石垣面で行った常時微動計測結果について示す。図-23に計測地点を示す。



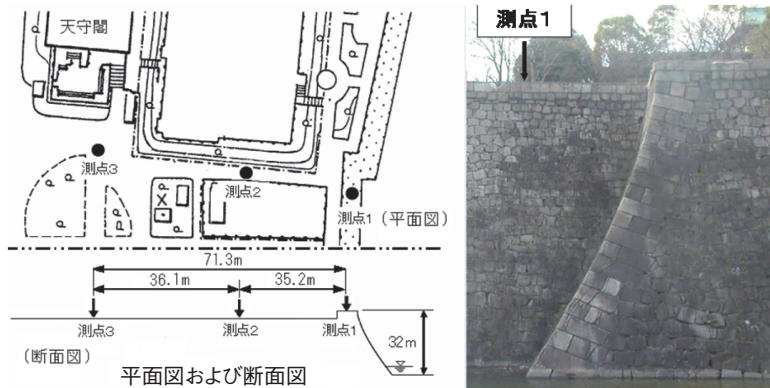


図-23 常時微動計測位置

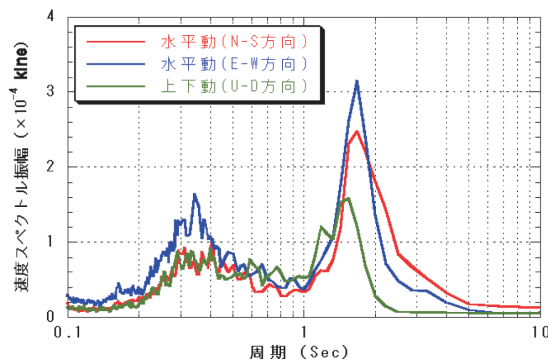


図-24 常時微動のフーリエ解析結果（測点1での計算事例）

石垣上部と本丸地盤内の2か所である。石垣上部のNo.1測点での水平動(N-S方向とE-W方向)と鉛直動の3成分のフーリエ解析結果を図-24に示す。図より3成分の揺れに対し、石垣が揺れやすい周期(卓越周期)は0.3~0.4秒と1.5~1.8秒であることが読み取れる。この周期をもつ地震動に対し石垣がよく揺れることになる。これらの計測結果は本丸内の測点No. 2とNo. 3でもほぼ同じであった。

次に、図-25に示す平成7年(1995)に生じた兵庫県南部地震波を入力波として石垣の地震時力学挙動を解析した。卓越周期が0.35秒と0.8秒あたりにある地震波である。図-26に解析モデル説明図を示す。解析モデルは標準構造断面モデルと豊臣期石垣を考慮した二重構造断面モデルである。

解析結果を石垣高さ方向の加速度分布で図-27に例示する。1gは重力加速度である。図より以下のことが考察できる。石垣高さ方向で上端より0~10mの間が崩壊の危険性が大きいこと、標準構造断面の水平方向揺れの最大値は0.97g、二重構造断面での最大値は0.77gで標準構造断面の79%に減少していること、標準構造断面の鉛直方向揺れ最大値は0.35g、二重構造断

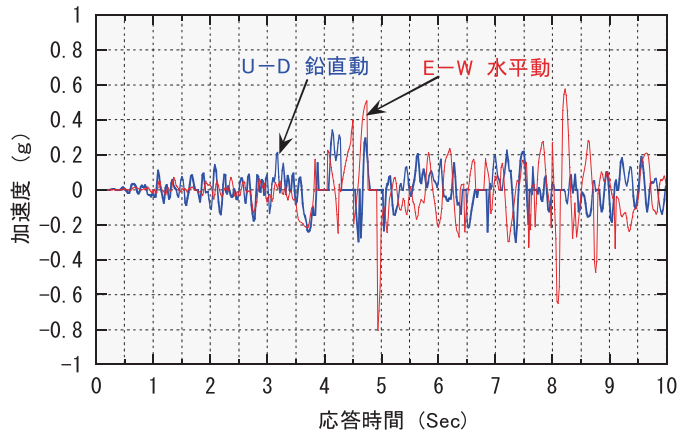


図-25 兵庫県南部地震時の加速度地震波（神戸海洋気象台）

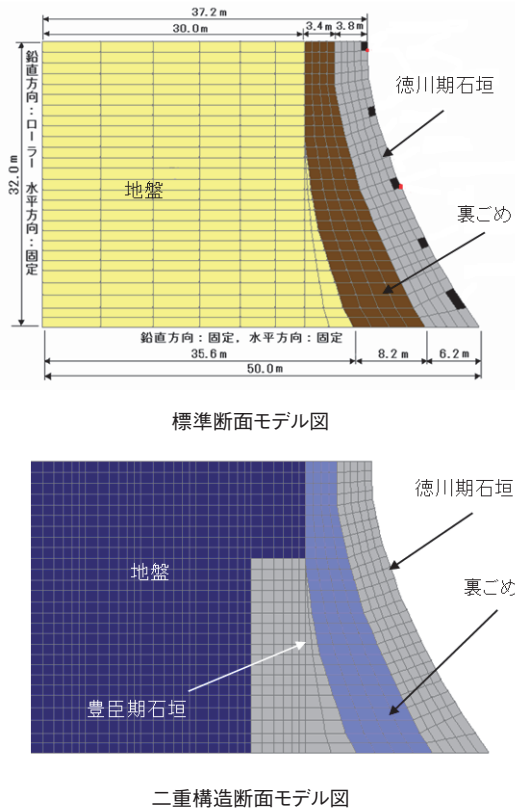


図-26 徳川期石垣の力学解析モデル図

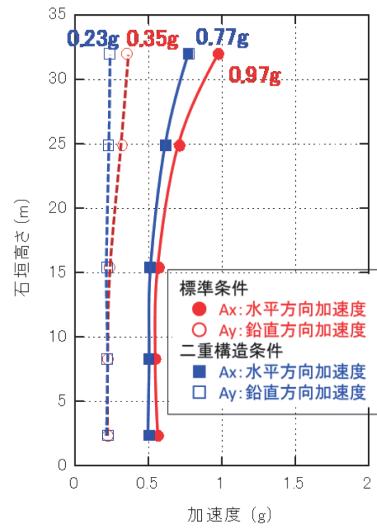


図-27 石垣高さ方向の加速度分布解析値

面での最大値は0.23gで標準構造の66%に減少していることである。豊臣期石垣と徳川期石垣の二重構造であれば地震に強いことが理解できる。



単純なクラック例（南外堀本丸側六番櫓下） 複雑なクラック例（南外堀本丸側四番櫓下）

図-28 徳川期石垣に発生しているクラック形態

地震時に石垣にどのように力が作用したかを石垣石に生じているクラックより考えてみる。図-28に徳川期石垣に発生しているクラックの形態を示す。単純なクラックと複雑なクラックが「算木積み」部に生じている。いずれも割裂クラックと呼べるものであり、地震時での衝撃上下動により生じた破壊形態と考えられる。単純な割裂クラックは、84か所の「算木積み石垣中の79か所の隅角部石垣で水面上の高さ方向に万遍なく生じている。一方、複雑なクラックは、南外堀内側石垣部を含めて5か所（「算木積み」部で2か所、外堀部で3か所）で生じている。「算木積み」部でこうしたクラックが集中するのは、「算木積み」部が強固に地震時衝撃力に抵抗できる石垣構造であることを示している。

地震対策が緊急課題とされる昨今の状況下で大阪城は緊急避難場所としての機能が期待されている。その意味では、石垣は現役の土木構造物である。過去の地震被害を詳細に学び対策を考える必要があるといえよう<sup>24) - 26)</sup>。

## 12 徳川期南内堀（空堀）の地盤と石垣構造

徳川期南内堀（空堀）の石垣構造を地盤工学的に調べた。図-29に地盤状態と石垣を示す。南内堀空堀での地盤調査でわかった事項は次のとおりである。

- ・ 石垣底支持層は上町層中部の粘土層である。石垣高さ22.5mは支持力として限界高さである。
- ・ 地盤調査時の動的貫入試験による探査より石垣基礎に根石があると推測できる。
- ・ 基礎底を砂礫層に設けると堀幅は14.7m程度になる。
- ・ 徳川期盛土は5 m、豊臣期盛土は3～5 m程度である。（強熱減量試験による分析）

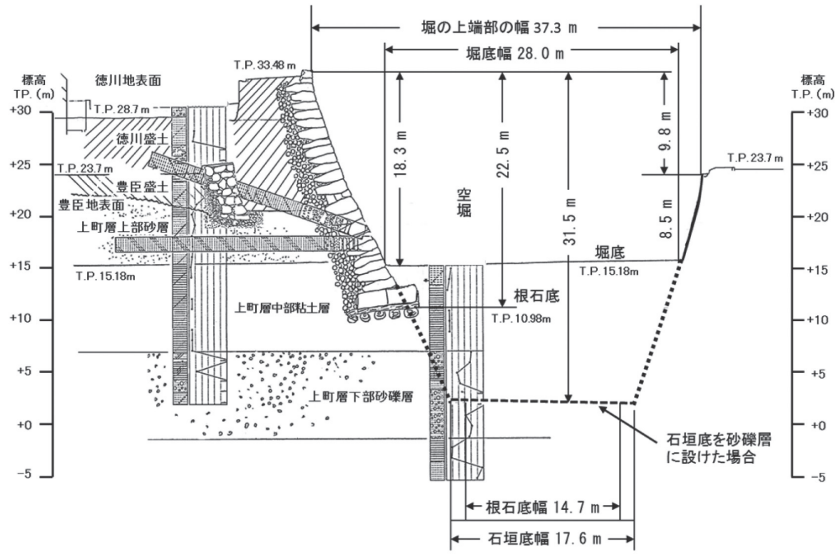


図-29 南内堀（空堀）の地盤と石垣断面・石垣構造<sup>1), 27)</sup>

南内堀を空堀でなく水堀にするためには、東内堀や南外堀の堀や石垣の規模にすることが必要となる。その結果として、縄張り上で空堀とすることが選択されたと考える<sup>27)</sup>。

### 13 まとめ

本稿を以下に要約する。

#### (石垣構造論上のまとめ)

- (1) 「算木積み」断面曲線：3次元構造，力を巧みに流す。石垣稜線に直角に石を積み上げることで大きい力学効果を期待できる。
- (2) 「平の透き」曲面：3次元構造，景観上の効果が大きい。
- (3) 空石積み：地震時での揺れのエネルギーを吸収する。
- (4) 控長さ：徳川期石垣では3程度，控長さが長いほど石垣は強い。
- (5) 「裏ごめ」：水圧を軽減する。土圧分布の局所集中を防ぐ。石垣の地震時での揺れのエネルギーを軽減させる力学効果を期待できる。
- (6) 石垣を支える地盤：石垣力学安定上で重要，多くの井戸掘削で地盤調査。
- (7) 「つめ石」と「かい石」：石垣力学安定上で重要。
- (8) 石垣の縄張り：「石垣構造比」は石垣安定上で重要。
- (9) 力学安定機構：背面からの土圧と水圧や上部からの上載荷重（塀や櫓）を上下方向と隅角部の算木積み構造の側方部に分配し，石垣面内ですべての石垣石が圧縮力を受けている力学状態になる。

## (技術史上のまとめ)

- (10) 豊臣期石垣から徳川期石垣において、慶長元年（1596）の伏見地震を契機として、優れた耐震性を有する石垣構造が成立した。
- (11) 豊臣石垣から徳川期石垣における技術進歩の中で成立した石垣断面曲線や石垣曲面における構造美や構造形式としての力学的合理性から見て、世界の建設文化史上の最高傑作である。
- (12) 我が国独自の建設文化として、華麗で精緻な芸術美への感性が示されているとともに、優れた科学技術がその中に認められる。

## 参考文献

- (1) 科研研究報告書（1996-1997，一般研究B，課題番号：07455206，研究代表者：天野光三），建設文化として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，1998. 3.
- (2) 科研研究報告書（2000-2002，基盤研究B，課題番号：12450208，研究代表者：天野光三），歴史遺産としての石造構造物の土木史的研究，2003. 3.
- (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-49，2000. 10，pp. 101-110.
- (4) 玉野富雄：徳川大坂石垣の築造技術，第4回なには歴史シンポジウム，pp. 19-28，2004. 11.
- (5) 玉野富雄：美しさには力学的な意味がある，大阪人，（財）大阪都市協会，Vol. 60，pp. 34-35，2006. 4.
- (6) 大坂城石垣群シンポジウム実行委員会：資料「大坂城の歴史と石垣」，大坂城天守閣，2008. 11.
- (7) 玉野富雄，松尾信裕，西形達明，金岡正信：資料「徳川大坂城の石垣構造」，徳川大坂城石垣シンポジウム「大坂城の謎」を解く，大阪市他主催，pp. 37-47，2009. 8.
- (8) 渡辺 武：図説再見大坂城，（財）大阪都市協会，1983. 9
- (9) 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，土木学会，No. 20，pp. 301-310，2000. 6.
- (10) 森本浩行，西田一彦，西形達明，玉野富雄：城郭石垣の隅各部形状とその数値評価法，土木学会論文集，No. 666，III-53，2000. 12，pp. 159-168.
- (11) 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法，土木学会論文集，No. 750，III-65，pp. 89-98，2003. 12.
- (12) 森本浩行，西形達明，西田一彦，玉野富雄：城郭石垣の断面形状と石垣構築技術の変遷に関する考察，土木学会論文集，Vol. 806，pp. 45-54，No. 73，2005. 12.
- (13) 玉野富雄，西田一彦，B. Shrestha，金岡正信，森本浩行：城郭石垣構造の力学安定，材料，Vol. 53，No. 1，pp. 5-8，2004. 1.
- (14) 玉野富雄，B. Shrestha，西田一彦，西形達明：近世城郭石垣再築時の力学計測，地盤工学会誌，Vol. 55，No. 6，pp. 38-41，2004. 6.
- (15) 西形達明，玉野富雄，金岡正信，森本浩行，西田一彦，引場敬太，辻 清仁：遠心載荷実験による城郭石垣構造の変形挙動，歴史的地盤構造物の構築技術および保存技術に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp. 107-112，2008. 6.
- (16) K. Nishida, T. Tamano, H. Morimoto, B. Shrestha: Geotechnical Aspect of Japanese Castle Masonry Wall and Mechanical Analysis for its Preservation, Proceedings of the 16th International Conference on SMGE, ISSMGE, pp. 2769-2772, 2005. 9.

- (17) 玉野富雄, 金岡正信, 西形達明, 西田一彦: 石垣構造物における力学安定評価時の「温度—ひずみ係数」, 地盤工学ジャーナル, 地盤工学会, Vol. 9, No. 4, pp. 619-632, 2014. 12.
- (18) 北垣聰一郎: 史料紹介『石垣築様目録』, 大阪城天守閣紀要, 第13号, pp. 26-34, 1995. 3.
- (19) 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, pp. 129-135, 1994. 5.
- (20) 玉野富雄: 徳川大坂城石垣の曲面形状, 地盤工学会誌, Vol. 59, No. 25, 2010. 9, pp. 48-49.
- (21) イザベラ・バード (金城清則編訳): 極東の旅2, 平凡社, pp. 93-126, 2005. 10.
- (22) 中村博司: 徳川幕府による大坂城再築の一樣相, 城郭史研究, 30号, pp. 36-48, 2010. 2.
- (23) 中村博司: 天下統一の城大坂城, 新泉社, 2008. 2.
- (24) 宇佐美龍夫, 渡邊 健, 八代一彦: 安政東海・南海地震による大阪市内の被害分布, 歴史地震, 第15号, pp. 171-200, 1999.
- (25) 玉野富雄, 金岡正信, 高岡光夫, 西田一彦, 西形達明, 森本浩行: 大阪城石垣の地震時力学挙動, 第7回地盤改良シンポジウム, 日本材料学会, pp. 277-282, 2006. 10.
- (26) 金岡正信, 玉野富雄, 西形達明, 森本浩行, 西田一彦, 濱砂 誠: 近世城郭石垣構造の地震時力学挙動解析, 歴史的な地盤構造物の構築技術および保存技術に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会, pp. 101-106, 2008. 6.
- (27) 玉野富雄, 松尾信裕: 徳川大坂城の「縄張り」, Electronics Communication, 近畿化学協会エレクトロニクス部会, No. 25, pp. 27-32, 2009. 8.