

# 徳川大坂城石垣の曲面構造の実測と解析

金岡 正信, 玉野 富雄

Field Measurements and Analyses of Curved Surfaces of Tokugawa-Osaka Castle  
Masonry Walls

KANAOKA Masanobu, TAMANO Tomio

## Abstract

The Japanese castle masonry wall (hereafter simply "wall"), constructed from the late 16th century to middle of the 17th century, is appreciated as one of the world's finest and most outstanding example of construction. The walls are meted for their mechanical rational structure, especially the two-dimensional curved surfaces (hereafter referred to as *hiranosuki*) found on the three-dimensional structures. Regarding *hiranosuki*, further study is needed to clarify the technique of attaching them to the wall during reconstruction.

In accordance with this viewpoint, this paper presents field measurements of the *hiranosuki* of Tokugawa-Osaka Castle walls. Next, the mechanical effects of *hiranosuki* is discussed, based on the analytical results of the field measurement data and three-dimensional FEM analyses.

Key words: Kinse-castle masonry wall, Tokugawa-Osaka Castle, Goto-ke monjyo, Hiranosuki

## 1 はじめに

我が国の明治以前に、すなわち機械化施工以前における土木施工技術を見た場合、世界的に第一級の誇るべき建設文化としての価値をもつものとして、近世城郭石垣がある。石垣石と石垣石の間に接着材を用いない石垣構造（空石積み構造と呼ばれる）に特徴があり、2次元曲線・3次元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は極めて優れたものである。

世界的に他に例を見ない、きわめて優れたものといえよう。特に、石垣石と石垣石の間に接着剤を用いない石垣構造であることに特徴があり、我が国で独自に展開し花開いた建設文化である<sup>1)</sup>。

今日、我が国に現存する近世城郭石垣は、築造後350～400年近くを経過し老朽化が進み、維持・補修・再築の検討を必要とする場合が多く、緊急に石垣構造の安定性の工学的評価を行い、補修を必要とするか否かについての判断が求められている事例も少なくない。こうした検討作業を行うに際し、まず城郭石垣構造の安定の力学原理を知ることが重要となる。こうした見地から、著者らは、「隅角部の“算木積み”石垣断面曲線の付け方は『後藤家文書』に示されている方法に合致する」などを明らかにした<sup>2), 3)</sup>。

さらに、石垣構造の力学メカニズムについて、「3次元力学効果を説明する“石垣構造比”」、「石垣の力学安定レベルを評価する“石垣はらみ出し指数”」、「“ひずみ計測法”による石垣の力学評価法」などの石垣構造の力学メカニズム解明に関する多くの提案を行なってきた。これらは、今日、徳川大坂城石垣研究にとどまらず日本各所における城郭石垣の修復および再築時の検討手法として用いられている<sup>4)</sup>。

しかしながら、石垣面には、隅角部の断面曲線だけでなく、石垣面内においても“平の透き”と呼ばれる石垣曲面が設けられていることが多い。この“平の透き”の設定法が現在の近世城郭石垣の修復時および再築時における不明な点として残されている。

こうした観点から、本研究では、近世城郭石垣の技術的頂点に位置する徳川大坂城における石垣構造について概観するとともに、“平の透き”についての詳細な実測値や3次元FEM解析などに基づく考察について述べる。

なお、本論文では、現在の大阪の地名は明治以前では大坂と表現する。

## 2 徳川大坂城の石垣構造

### 2.1 土木工学的調査

図-1に大阪城の全景写真を示す。この全景写真からも、上町台地北端部で行われた徳川大坂城石垣の平面形状や高さなど、いわゆる“縄張り”には当時の技術水準の高さを彷彿とさせるものがある。

石垣安定に寄与する諸要因を整理すると次のようである。①石垣断面曲線、②石垣曲面、③石垣面上端の長さや高さの比（“石垣構造比”と呼ぶ）、④隅角部の“算木積み”石垣構造、⑤地盤と石垣基礎構造、⑥裏込めの透水性と施工範囲、⑦盛土や地山の強さ、⑧石垣石の材質・強度・大きさ・控え長さ（石垣石の表面からの奥行き）・加工状態・積み上げ角度、である。ここでは石垣石の加工および積み方、石垣基礎地盤、石垣断面形状、および“石垣構造比”についての説明をする。



図－1 徳川大坂大坂城全景

## 2.2 石垣石の加工および積み方

石垣石の加工状態は，“野面積み”，“打ち込みはぎ”，“切り込みはぎ”へと進歩してきた。豊臣大坂城石垣では“野面積み”であり，徳川大坂城石垣では，隅角部の“算木積み”部は“切り込みはぎ”で，石垣面内の平石部が“打ち込みはぎ”である。

徳川大坂城石垣では，隅角部の“算木積み”石垣構造に見られるように，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もった石垣石の積み上げ方は，上部からの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出来る。このことは，石垣構造の力学的な観点からみてきわめて合理的なものである。安土城石垣築造時からわずか40年のほどの間に石垣石の加工技術，施工技術が急速に発達し，徳川大坂城において技術的頂点に到達した<sup>5)</sup>。

## 2.3 隅角部石垣断面形状

図－2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曲線の付け方と徳川大坂城の実測断面曲線を例示する。両断面曲線はみごとに一致する<sup>4), 5)</sup>。この『後藤家文書』による方法では，上辺の長さ $a$ ，下辺の長さ $b$ を決め，下端部からの高さ $(1/3)H$ までは直線勾配とし，そこから上端部にむけ曲線が付けられる。説明図では，分割数 $n$ を4としたが，分

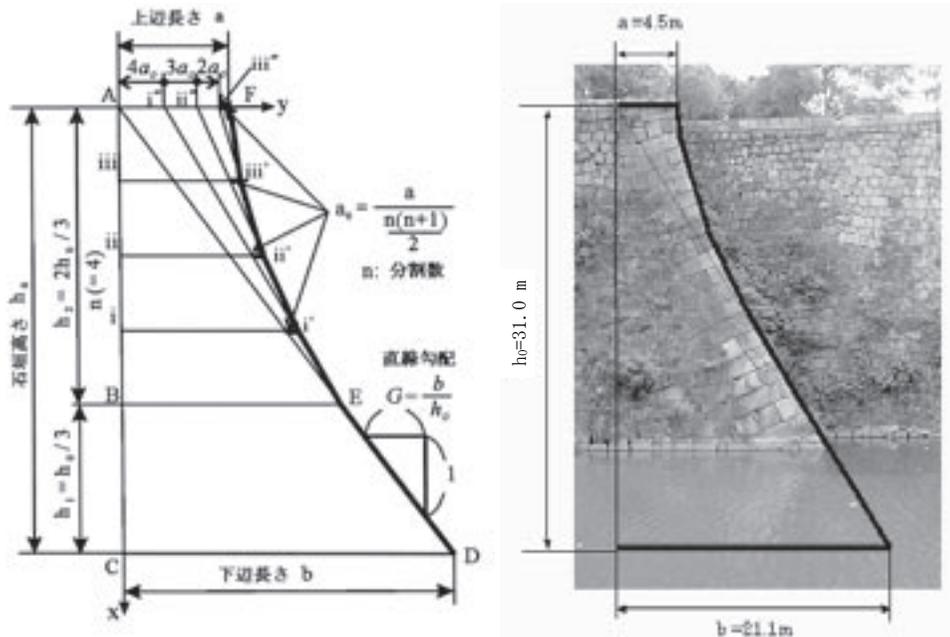


図-2 『後藤家文書』による隅角部の断面曲線および実測断面曲線  
(東内堀月見櫓跡石垣面北隅角部)

割数を増やすほどなめらか2次曲線形状となる。

## 2.4 “石垣構造比”

図-3 に徳川大坂城石垣における石垣高さとして求めた“石垣構造比安定上限曲線”と名付けた曲線を示している。“石垣構造比安定上限曲線”の具体的な求め方は、石垣高さが不明な石垣面は水面より上の石垣高さ、堀底よりの高さがわかっている石垣面は堀底よりの石垣高さ、および石垣の基礎からの高さがわかっている石垣面はその石垣高さ、とする3種類の石垣高さとして描いたものであり、スムーズなきれいな曲線がひける。

石垣面の“石垣構造比”が、“石垣構造比安定上限曲線”より上にあれば力学的に不安定、下にあれば力学的に安定を意味する。また、“石垣構造比”

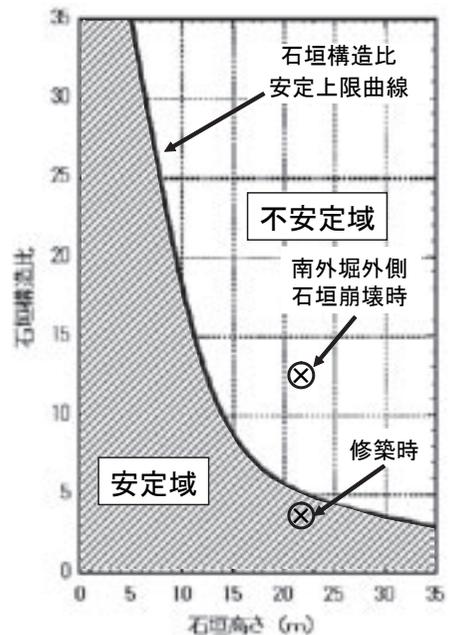


図-3 徳川大坂城石垣における石垣高さとして求めた“石垣構造比安定上限曲線”と名付けた曲線を示している。“石垣構造比安定上限曲線”の具体的な求め方は、石垣高さが不明な石垣面は水面より上の石垣高さ、堀底よりの高さがわかっている石垣面は堀底よりの石垣高さ、および石垣の基礎からの高さがわかっている石垣面はその石垣高さ、とする3種類の石垣高さとして描いたものであり、スムーズなきれいな曲線がひける。

が小さくなるほど3次元力学効果が期待できることになる。この3次元力学効果は、石垣面背面から作用する力が、石垣面側方、すなわち“算木積み”構造である隅角部方向と石垣断面内の上下方向の両方向にアーチ作用により伝達されることを意味する。

図より、“石垣構造比安定上限曲線”が“石垣構造比”7～8のあたりで屈曲しており、それより“石垣構造比”が大きくなると3次元力学効果が小さくなるといったことが考察できる。石垣の安定には前述した多くの要因が関係することから課題は残されているが、徳川大坂城での関係から求めたこの石垣構造比安定上限曲線は他の近世城郭石垣における力学安定状態の検討時にも援用できるものである<sup>1)</sup>。

図中に示した推定石垣高さ22mの南外堀外側石垣は、崩壊前には石垣長さが250m近くあり、“石垣構造比”は“石垣構造比安定上限曲線”より大きく上に逸脱していたが、崩壊後には石垣平面形状を鍵の手状に屈曲させ、石垣長さを80m程度に短くし、安定した石垣になるように修築が行われている。

以上のことから、徳川大坂城石垣の“縄張り”に際しては、石垣崩壊を防ぐ技術的配慮として、石垣平面形状を綿密に考えたと考察できる。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築造の際に経験的に熟知していたことが推測できる。

### 3 “平の透き”の定義

石垣面には、隅角部の断面曲線だけでなく、石垣面内においても“平の透き”と呼ばれる石垣曲面が設けられている。“平の透き”については“平の隙”あるいは“平ノスキ”とも記述されるが本論文では“平の透き”と表現する。

“平の透き”については、北垣が大阪城天守閣紀要第13号（1985. 3）に史料紹介として『石垣築様目録』（岡本保司所蔵）を紹介している<sup>6)</sup>。承応4年（1665）に堀金出雲の他3名により記されたものである。37項目で構成されている。この『石垣築様目録』については、李ら<sup>7)</sup>により詳細な検討が行われ、表-1に示す“平の透き”の付け方が示されている。なお、1間を6尺5寸として表記しmで表示したものを表中に加筆している。

李らは、“平の透き”を次のように説明し、図-4のように図示している。すなわち、「“平の透き”の意味は、石垣を平面的にみた場合、隅が直角でなく、鋭角になっており、平石垣の中央部が内側に凹の状態になることの意であると考えられる。」と記述している。

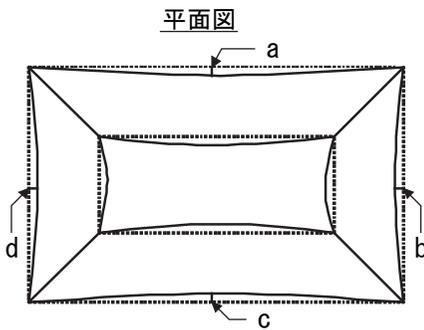
図-4をみると上辺にもくぼみが見られる。後述するように徳川大坂城では明らかに直線であり、図-5に示すような石垣曲面となっている。よりも高度な“平の透き”構造となっているといえよう。

以下、本論文では図-5に示す形状の“平の透き”の実測、その3次元力学効果について検討を進める。

表-1 “石垣築様目録”による“平の透き”の設置法<sup>7)</sup>

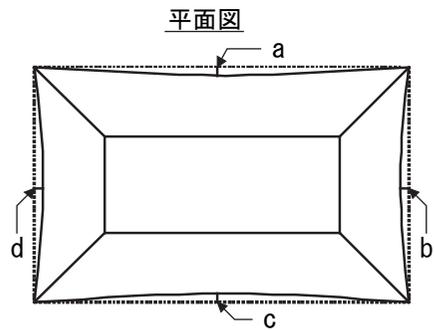
石垣の高さ	石垣横の長さ	平の透き
4～6間 (7.88～11.82m)	10～15間 (19.7～29.55m)	2～3寸 (0.06～0.09m)
7～9間 (13.79～17.73m)	15～20間 (29.55～39.4m)	3～4寸 (0.09～0.12m)
11～12間 (21.67～23.64m)	20間内外 (39.4m内外)	4～5寸 (0.12～0.15m)
14～15間 (27.58～29.55m)	≤30間 (≤59.1m)	8～9寸 (0.24～0.27m)
	40～50間 (78.8～98.5m)	1尺2寸～1尺3寸 (0.36～0.39m)
	50間内外 (98.5m内外)	1尺5寸～1尺6寸 (0.45～0.48m)

1間：6尺5寸：1.97m      1尺：30.3cm      1寸：3.03cm



a, b, c, d: 平の透きの最大くぼみ量

図-4 李らによる“平の透き”の説明図<sup>7)</sup>



a, b, c, d: 平の透きの最大くぼみ量

図-5 徳川大坂城の“平の透き”の説明図

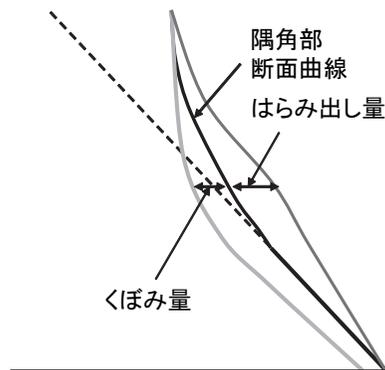


図-6 “くぼみ量”と“はらみ出し量”の説明図

#### 4 “平の透き”の実測

図-6に示すように、隅角部の断面曲線を基準線とし、そこから内側に変形している量を“くぼみ量”，外側に変形している量を“はらみ出し量”と定義する。

徳川大坂城石垣“平の透き”の3次元計測に基づく“くぼみ量”の算定は、石垣面両端の隅角部での実測断面曲線を基準にしたくぼみ量として把握する。端部が入角部の場合と同じくその実測断面形状を用いる。端部での実測断面形状は、前述したように『後藤家文書』による隅角部の断面曲線と明確に一致する。

近世城郭石垣の大部分では、石垣面の“はらみ出し”により、築造時の石垣形状が保たれていないため、“平の透き”の実測対象としては適当ではない。その点、徳川大坂城では、隅角部算木積みの石垣に関しては、ほぼ全隅角部石垣で変状は見られず、また、石垣面内での変状も比較的小さいと判断でき、実測対象としては適当であるといえる。

図-7に計測結果を解析した石垣面と石垣面中央断面部の水面部のくぼみ量(Cと表記する)を示す。西外堀石垣面におけるくぼみ量Cは0.58~0.7m、東内堀では0.37~1.9m、南外堀では0.43~1.11mである。これらは建設時での値ではなく現在の値であり“はらみ出し”の大小の影響も多少受けているものと考えられる。また、建設時期との関係は明確ではない。

図-8・9に石垣面中央断面付近での縦方向として捉えたくぼみ量の実測形状を示す。実測

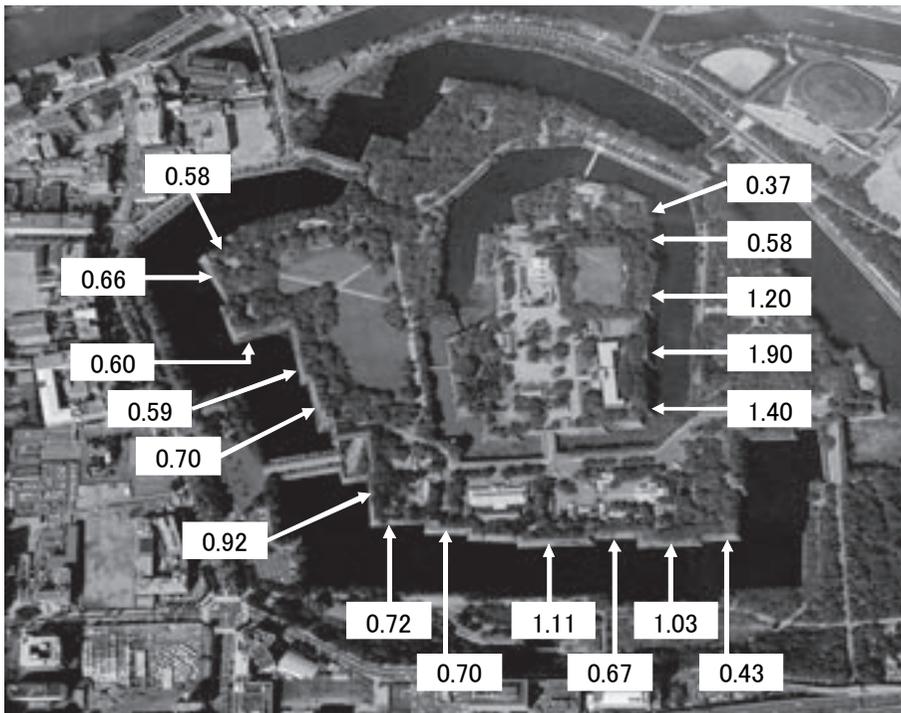


図-7 石垣面の水面高さにおけるにおける“くぼみ量”の実測結果(単位:m)

形状では上端面から深さ方向に水面に向け直線的に増大する石垣面と放物線（以下、2次曲線と呼ぶ）として増大する石垣面が存在する。2次曲線形状がより建設時点の形状に近く直線形状ははらみ出しが生じた結果の形状と考えられる。いずれにしても深さ方向にくぼみ量は増大しており、水面下でも増大し石垣基礎部で石垣面中の最大くぼみ量（ $C_{max}$ と表記する）が生じていると考えることができる。

図-10に2次曲線形状のみられる7箇所の石垣面におけるくぼみ形状を示す。また、それらを一つの図として整理したものを図-11に示す。

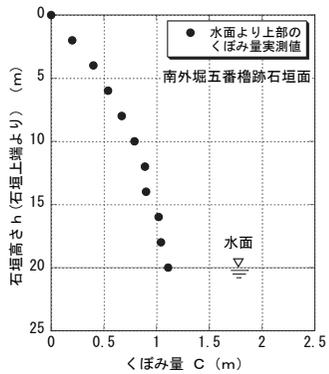
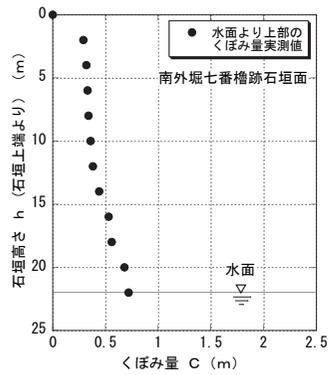
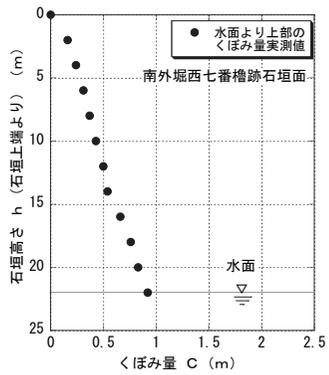
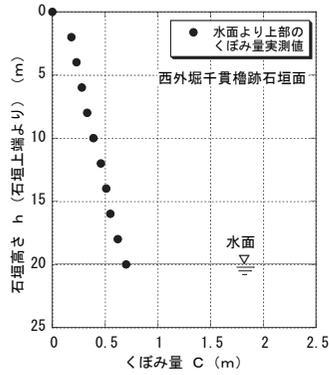
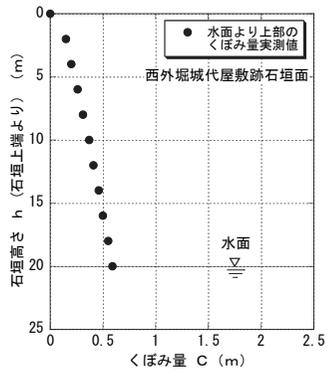
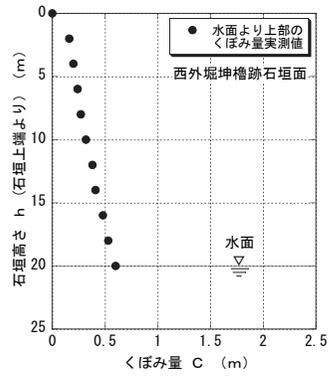
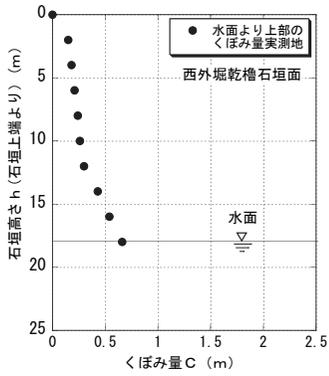


図-8 水面より上部の“くぼみ”実測値(1)

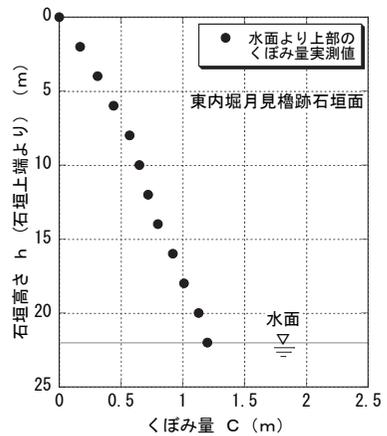
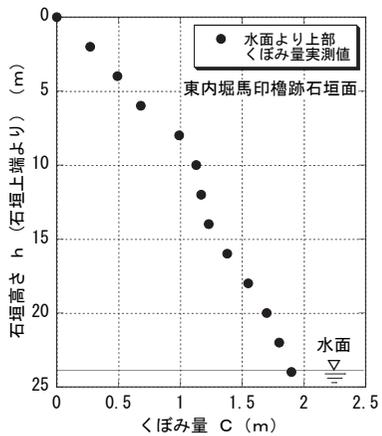
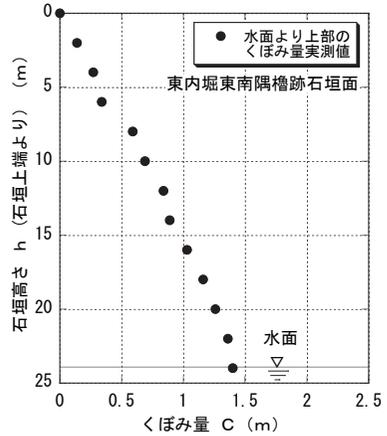
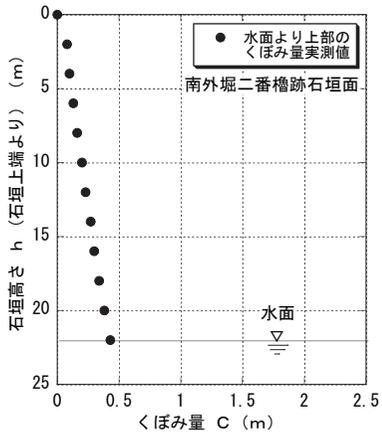
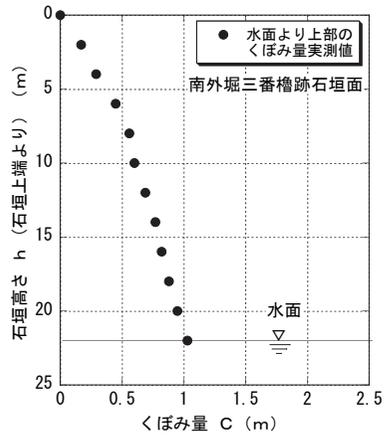
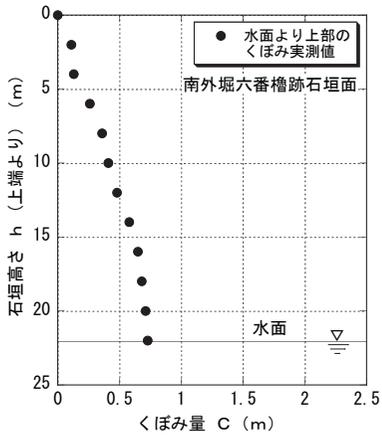


図-9 水面より上部の“くぼみ”実測値(2)

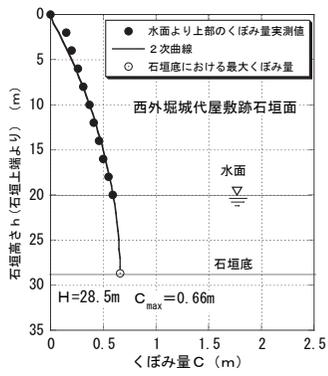
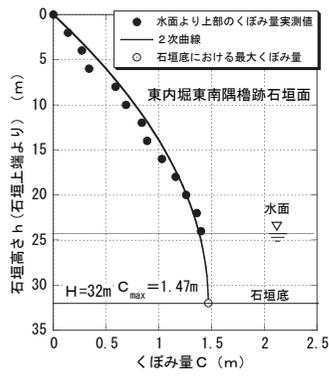
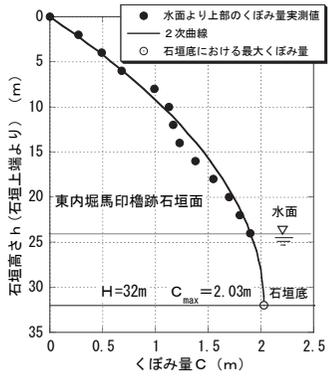
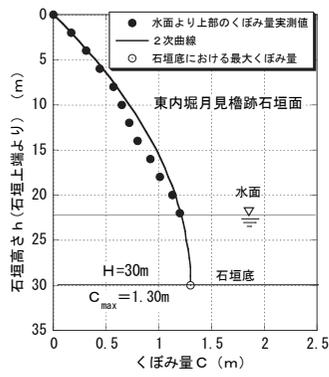
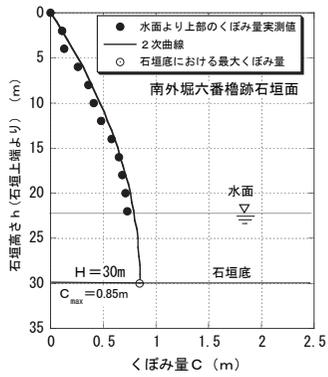
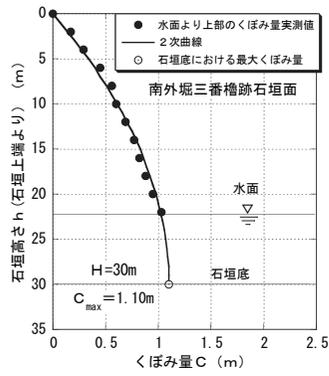
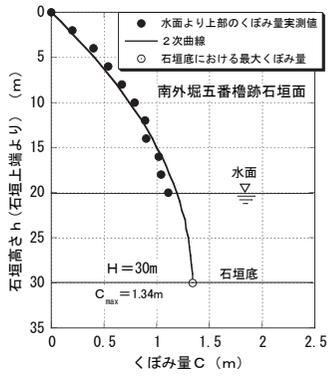


図-10 “くぼみ” 実測値と2次曲線より推定した“くぼみ量”との関係

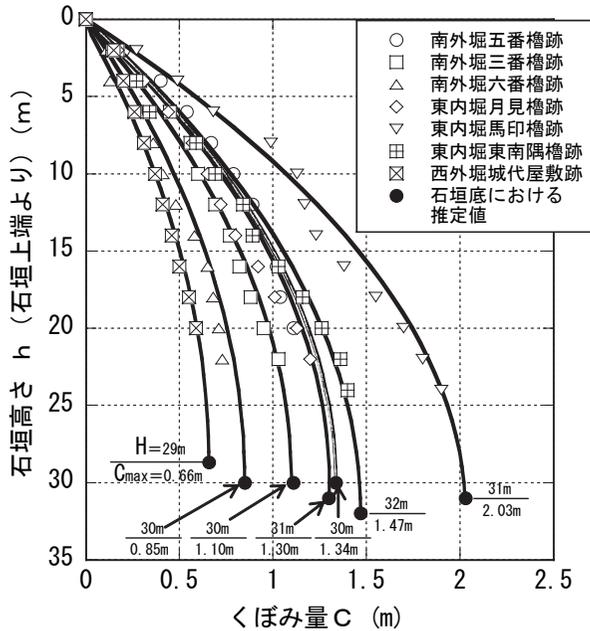


図-11 2次曲線で近似した縦方向くぼみ分布

2次曲線

$$C = -\frac{C_{\max}}{H^2} h^2 + \frac{2C_{\max}}{H} h$$

## 5 “平の透き” 設定法と最大くぼみ量 $C_{\max}$ の推定

前述したように隅角部石垣の断面曲線の付け方は『後藤家文書』に示されている方法によることがわかったが、それに対し、“平の透き”の設定法が不明である。縦・横方向とも考えられる方法は、次の3方法である。

- ①『後藤家文書』による隅角部石垣断面曲線の2次曲線部を水平にして用いる方法（図-12 参照）
- ②『後藤家文書』による隅角部石垣断面曲線を水平にして用いる方法
- ③円弧を用いる方法

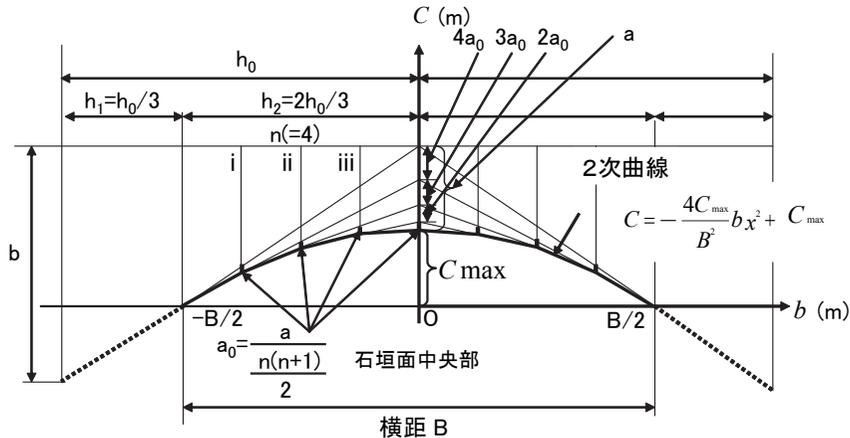


図-12 『後藤家文書』による隅角部石垣断面曲線の2次曲線部を利用した“くぼみ量”の設定法

もっとも可能性の高い方法と考えられるのは、図-12に示す①の『後藤家文書』による石垣断面曲線の2次曲線部を水平にして用いる方法である。

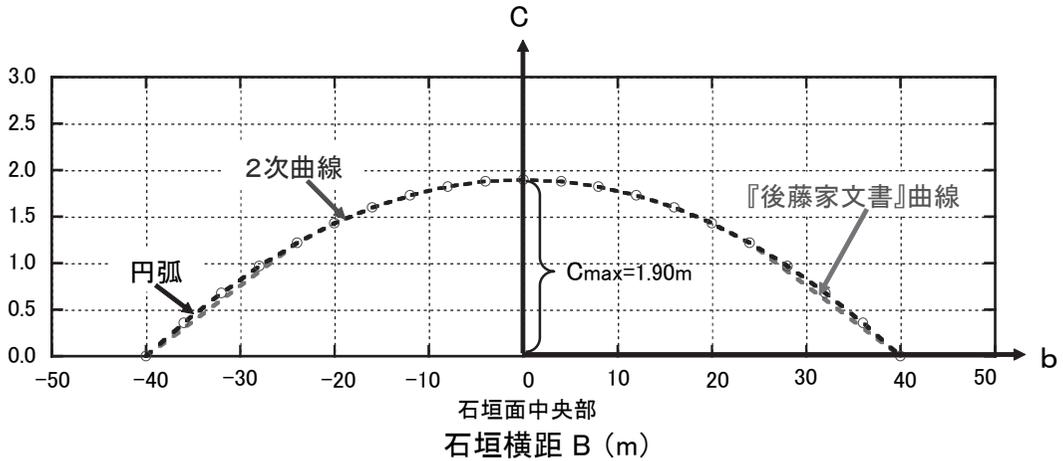
その理由として、隅角部断面曲線が『後藤家文書』に基づく方法で設定されていることから①の方法は図化が簡単であること、②の方法は石垣曲面で直線部分が明瞭に実測できていないこと、③の円弧を用いる方法は原理的に簡単であり可能であるが円弧の半径が数百mにも及ぶものであり図化することが①の方法に比べて難しいと推論できることがあげられる。より明確な根拠については、古文書記録等の発見に待たねばならんと考えられ、これからの研究課題といえよう。

図-13に①、②、③の3方法の比較例として、東内堀馬印櫓跡石垣面の水面部（石垣横距：80m、くぼみ量C：1.9m）で比較してみる。全体として3つの方法で差異は見られない。なお、縦軸Cのスケールが横軸bのスケールと大きく違うことに注意が必要である。①の2次曲線は次式で示される。

$$C = -\frac{4C_{\max}}{B^2} b^2 + C_{\max} \quad (1) \text{式}$$

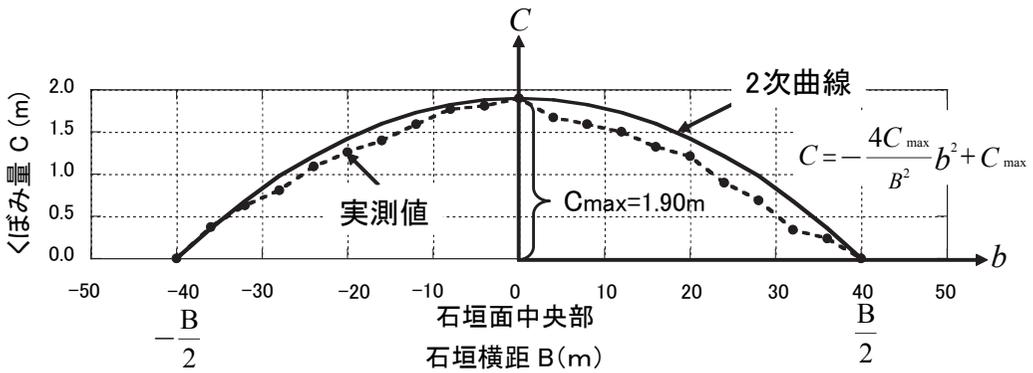
ここで、B：石垣横距（m）、 $C_{\max}$ ：最大くぼみ量（m）、C：くぼみ量（m）、b：中央断面部よりの石垣横方向の長さ（m）である。

図-14に東内堀本丸側石垣部および図-15に南外堀本丸側石垣部の石垣面の横方向で水面部を例に①の2次曲線との比較を示す。実測値からははらみ出しの傾向が読み取れるが2次曲線で横方向の“平の透き”を推定できると判断できる。



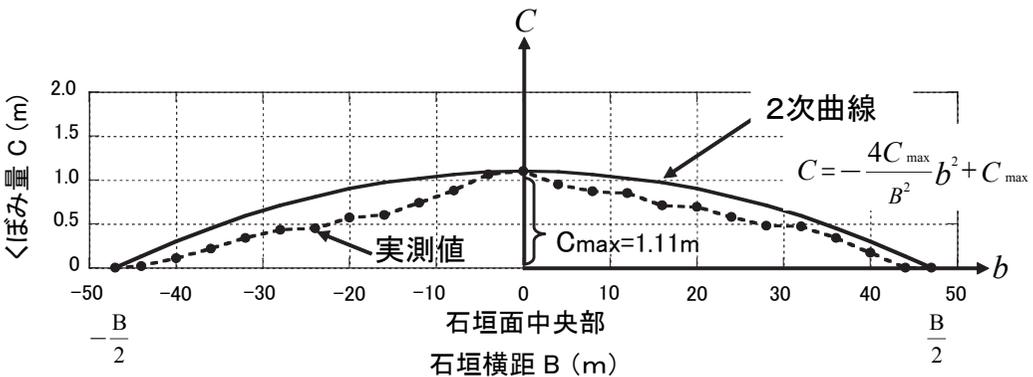
東内堀馬印櫓跡石垣内の水面部 (石垣横距 B : 80m, 最大くぼみ量 C<sub>max</sub> : 1.9m)

図-13 “平の透き” 設定法の比較



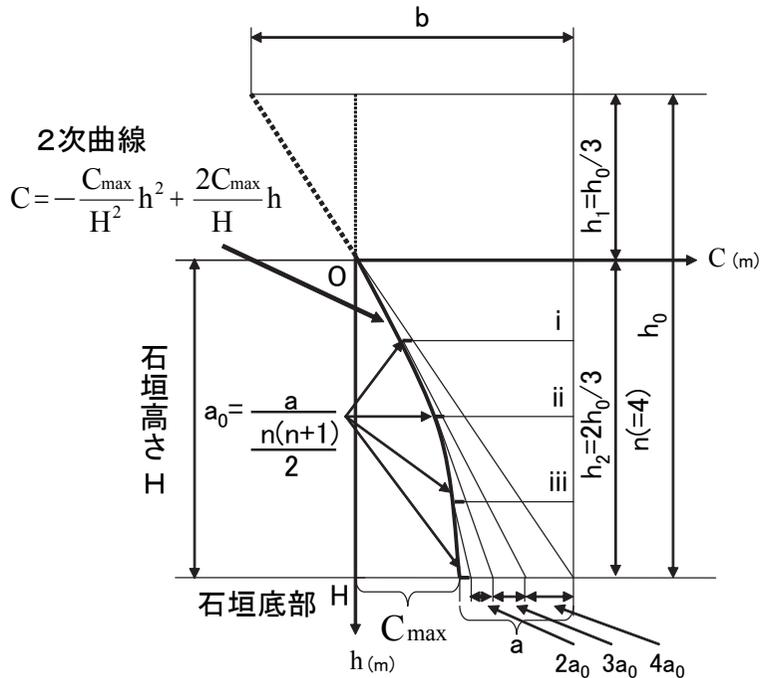
(堀の水面レベル: 石垣天端より24m, 横距B=80m)

図-14 横方向くぼみ分布 (東内堀本丸石垣部)



(堀の水面レベル: 石垣天端より20m, 横距B=94m)

図-15 横方向くぼみ分布 (南外堀本丸側石垣部)



C (m) : くぼみ量, h (m) : 石垣上端よりの石垣高さ

図-16 『後藤家文書』による隅角部石垣断面曲線の2次曲線部を利用した縦方向の“くぼみ量”の設定法

次に、縦方向の“平の透き”の設定法を考える。考えられる方法は横方向の場合と同じ①の方法である。図-16に設定法を示す。前述した図-11と13中に2次曲線を記入している。C<sub>max</sub>を繰り返し仮定して与え最も実測したくぼみ量Cの深さ方向の分布に近い場合の石垣底部の値をC<sub>max</sub>としたものである。なお、縦方向の2次曲線は次式で示される。

$$C = -\frac{C_{\max}}{H^2} h^2 + \frac{2C_{\max}}{H} h \quad (2) \text{式}$$

ここで、H : 石垣底までの石垣高さ (m), C<sub>max</sub> : 最大くぼみ量 (m), C : くぼみ量 (m), b : 石垣上端部よりの石垣高さ (m) である。

以上のことから石垣面における“平の透き”の付け方は次のようになる。まず、石垣面における石垣高さHと石垣下端部における最大くぼみ量C<sub>max</sub>を設計条件として決定する。次に、式(2)より石垣面上端からの高さ方向hでのくぼみ量C(徳川大坂城では上端部ではゼロである)を求める。そして、式(2)より求めたこのくぼみ量Cを石垣横方向中央部の最大くぼみ量C<sub>max</sub>とし式(1)より石垣横方向のくぼみ量Cを求めれば、石垣面全体の曲面“平の透き”

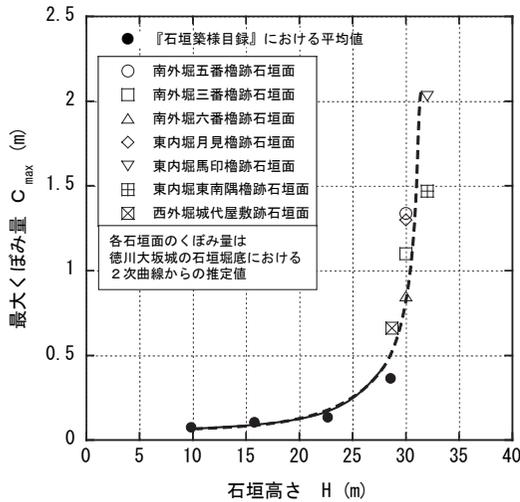


図-17 徳川大坂城における石垣高さHと最大くぼみ量 $C_{max}$ の関係

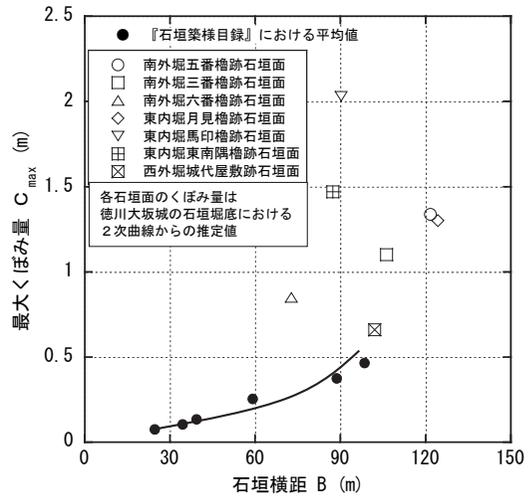


図-18 徳川大坂城における石垣横距Bと最大くぼみ量 $C_{max}$ の関係

が求まることになる。一つの2次曲線を定規として作成すれば、すべてのくぼみ量 $C$ は簡単な比例計算により算出できる。また、施工時には石垣面水平方向に両端からロープを張り、決められたくぼみ量をチェックしながら石垣を積み上げていけばよいことになる。

ところで、図-10と11で示した最大くぼみ量 $C_{max}$ をみると、『石垣築様目録』では、最大で1尺6寸(0.48m)と記されており、徳川大坂城石垣面での最大くぼみ量 $C_{max}$ に比べてかなり小さいことがわかる。

そこで、『石垣築様目録』示された石垣高さ $H$ および石垣横距 $B$ と最大くぼみ量 $C_{max}$ の関係を徳川大坂城石垣の場合と同じ図中に示し検討する。図-17に石垣高さ $H$ と最大くぼみ量 $C_{max}$ の関係、図-18に石垣横距 $B$ と最大くぼみ量 $C_{max}$ の関係を示す。なお、『石垣築様目録』での値は、表-1に示した値の平均値として表示した。

図-17より、石垣高さ $H$ が28mを超えると急激に最大くぼみ量 $C_{max}$ が増大していることがわかる。『石垣築様目録』と徳川大坂城で連続性のある関係として読み取れることは興味深いことといえる。それに対し、図-18に示した石垣横距 $B$ と最大くぼみ量 $C_{max}$ の関係では、徳川大坂城の場合には、どの石垣面においても最大くぼみ量 $C_{max}$ は『石垣築様目録』での値に比べてかなり大きいことがわかる。

## 6 3次元力学効果

### 6.1 “石垣構造比”の3次元力学効果

石垣構造の隅角部の算木積み構造が力学的に3次元力学効果を生じさせることについては、近世城郭石垣の過去の破壊事例で、ほとんどの場合、石垣面の中央部で崩壊していることや、“は

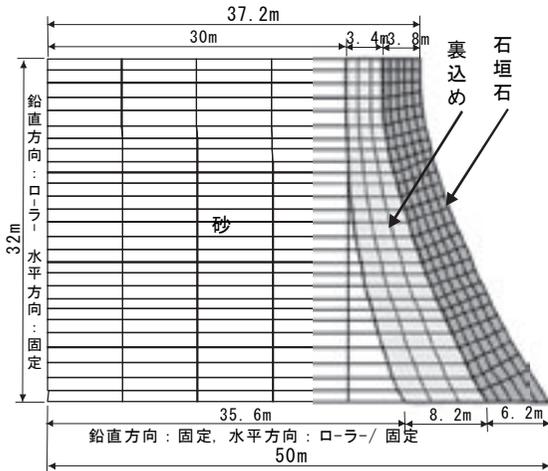


図-19 2次元FEM解析に用いた石垣構造モデル

らみ出し”が中央部で大きく生じていることから判断できる。

“石垣構造比”の3次元力学効果に与える影響を検討するため連続体の2次元および3次元FEM解析を行う。2次元FEM解析に用いた石垣構造モデルを図-19、3次元FEM解析に用いた石垣構造モデルを図-20に示す。地盤・境界条件は、ケースA（背面地盤：すべて裏込め）のフリーの場合とし、背面は水平方向を固定、垂直方向をフリーとする。なお、本解析ではジョイント要素を石垣石間には入れていない。その理由として、著者らが行った丸亀城の石垣石に対するひずみ計測結果では石垣面が多少はらみ出しても圧縮状態にあることから、本研究でのようなパラメトリック解析においては、連続体として単純化して取り扱うことが可能と判断したためである。また、表-2に解析に用いた材料定数を示す。

図-20の説明図に示すような石

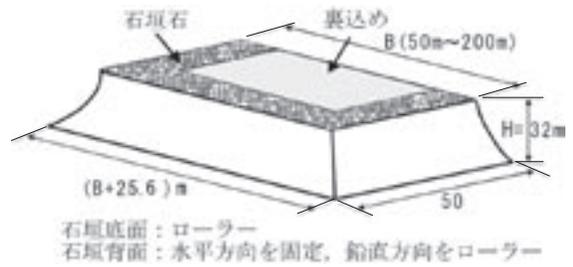


図-20 3次元FEM解析に用いた石垣構造モデル（ジョイント要素、背面地盤：すべて裏込め、石垣底面：ローラー）

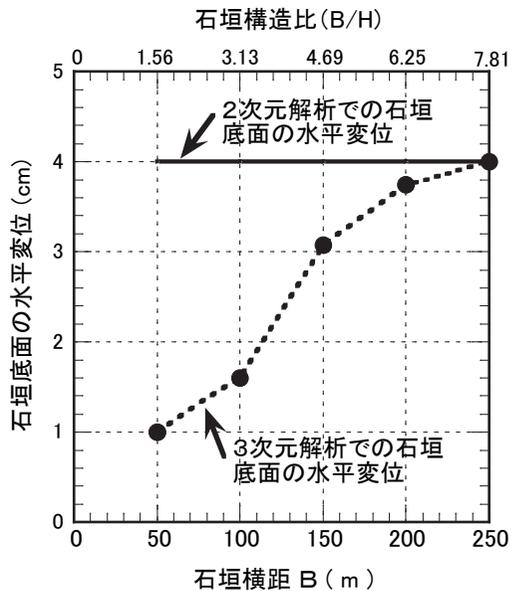


図-21 2次元・3次元解析における石垣底面の水平変位の比較

表-2 材料定数

要素	石垣石	裏込め	砂
要素特性	弾性	弾性	* 弾性
弾性係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	4.0×10 <sup>7</sup>	5.0×10 <sup>5</sup>	1.3×10 <sup>4</sup>
ポアソン比 ν	0.15	0.2	0.3
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	26	21	18

\*: E = 500 (N + 15)

垣構造に対して，“石垣構造比”を変化させ連続体の3次元FEM解析を行い，連続体の2次元FEM解析結果と比較する。図-21に石垣長さを50mから250mまで変化させた場合での石垣面中央断面の石垣底面における水平変位の解析結果を示す。石垣長さ50mでは水平変位1cmである。石垣長さ250m（“石垣構造比”7.81）になると4cmになり，2次元解析の場合と等しくなる。“石垣構造比”が7.8程度になると3次元の力学効果がなくなることがわかる。このことは，図-3に示した大坂城の石垣高さと“石垣構造比”の関係における安定上限曲線が，“石垣構造比”7～8で屈曲しているという力学傾向とよく一致している。

## 6.2 “平の透き”の3次元力学効果

前述したように，大規模な近世城郭石垣では隅角部石垣の曲線勾配だけでなく，“平の透き”と呼ばれる曲面が用いられており，石垣面全体に3次元力学効果を期待して設計していたと判断できる。徳川大坂城の“平の透き”の場合は石垣の上辺はほぼ直線であり，さらに高度な技術が用いられている。

図-22に“平の透き”3次元FEM解析モデルを示す。解析条件は，ジョイント要素なし，背面地盤すべて裏込めで石垣底面ローラーである。表-3にA・B石垣石の水平変位，最大主応力，最小主応力の解析結果を示す。

“平の透き”を2mおよび5mとした場合は，“平の透き”を付けない場合より水平変位が若干小さくなる程度であり，顕著な違いはない。それに対し，“平の透き”を10mと極端に大きくした場合には，水平変位は少し減少する程度であるが，石垣石外側の1と2番目要素に圧縮

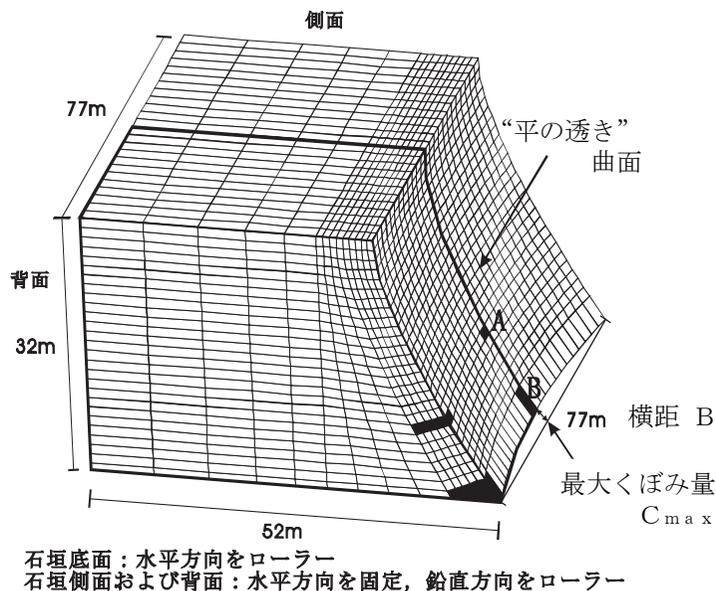


図-22 “平の透き”3次元FEM解析モデル（ジョイント要素なし，背面地盤：すべて裏込め，石垣底面：ローラー）

表－3 A・B石垣石の水平変位，最大主応力，最小主応力の解析結果

石垣石 A	平の透き	要素番号	1番目	2番目	3番目	4番目	5番目
	0 m	$\sigma_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	7.56	62.18	517.30	1472.60	2446.78
		$\sigma_{min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	-1830.67	-761.78	-126.11	26.80	13.50
		水平変位(mm)	4.70				
	2 m	$\sigma_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	8.61	77.99	607.68	1582.01	2570.61
		$\sigma_{min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	-1806.00	-725.14	-132.80	-32.12	13.63
		水平変位(mm)	4.70				
	5 m	$\sigma_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	9.80	99.33	687.21	1724.30	2778.41
		$\sigma_{min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	-1924.93	-768.92	-148.34	-29.36	22.10
		水平変位(mm)	4.40				
	10m	$\sigma_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	2472.11	1576.73	727.41	229.69	14.06
		$\sigma_{min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	34.50	-9.52	-121.13	-613.09	-1601.68
水平変位(mm)		3.90					
石垣石 B	平の透き	要素番号	1番目	2番目	3番目	4番目	5番目
	0 m	$\sigma_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	113.26	561.31	935.15	1253.11	4197.49
		$\sigma_{min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	-2023.23	-1585.77	-1056.67	-457.28	310.20
		水平変位(mm)	6.40				
	2 m	$\sigma_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	113.82	580.53	969.09	1321.04	4429.20
		$\sigma_{min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	-1777.33	-1466.31	-694.00	-42.67	785.20
		水平変位(mm)	6.40				
	5 m	$\sigma_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	118.66	605.71	1013.63	1400.98	4665.40
		$\sigma_{min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	-1853.85	-1522.16	-433.77	472.92	1186.73
		水平変位(mm)	6.20				
	10m	$\sigma_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	4707.34	1409.69	1042.65	623.03	122.12
		$\sigma_{min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	1213.81	889.66	-469.89	-1565.85	-1891.53
水平変位(mm)		5.80					

(+)：圧縮応力    (-)：引張応力    (+) 水平変位：外側への水平変位

応力が大きくなり，“平の透き”による3次元力学効果がかなり明確に生じてくる。

以上より，“平の透き”は，3次元力学効果よりも景観上の美的効果を意図して設けた可能性が高いと考えられる。この点についての更なる探求は今後の研究課題といえる。

## 7 まとめ

本論文を要約すると次のようである。

- ① 徳川大坂城石垣面の3次元計測結果より堀水面より上部の石垣面内の“平の透き”の計測を行った。その結果，西外堀石垣面では最大のくぼみ量Cは0.58～0.7m，東内堀では0.37～1.9m，南外堀では0.43～1.11mであった。
- ② “平の透き”の設定法は，縦・横方向とも『後藤家文書』による隅角部石垣断面曲線の2次曲線部を用いる方法によると考えられた。また，この方法により簡単に石垣面内に“平の透き”を設定できることを示した。
- ③ 石垣高さHと最大くぼみ量C<sub>max</sub>の関係では，『石垣築様目録』と徳川大坂城で連続性のある関係として読み取れ，石垣高さHが28mを超えると急激に最大くぼみ量C<sub>max</sub>が増大して

いることがわかった。それに対し、石垣横距 $B$ と最大くぼみ量 $C_{max}$ の関係では、徳川大坂城の場合には、どの石垣面においても最大くぼみ量 $C_{max}$ は『石垣築様目録』の値に比べてかなり大きいことがわかった。

- ④ 3次元FEM解析結果より、“石垣構造比”が7程度になると、3次元力学効果が小さくなることを明らかにした。また、徳川大坂城の石垣高さ“石垣構造比”の関係における安定上限曲線が、“石垣構造比”7～8で屈曲しているという力学傾向とよく一致していることがわかった。

## 謝 辞

本研究での大阪城石垣3次元計測は関西大学環境都市工学部都市システム工学科（西形達明准教授）および大阪城天守閣（館長松尾信裕氏）との共同研究として行なったものである。また、計測結果の解析につきましても多大なるご指導を賜りました。記して御礼申し上げます。

## [参考文献]

- 1) 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, III-49, pp.101-110, 2000.10.
- 2) 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.
- 3) 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, 日本材料学会誌「材料」, Vol.53, No.1, pp.5-8, 2004.1.
- 4) 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, pp.159-168, 2000.12.
- 5) 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.
- 6) 北垣聰一郎: 史料紹介『石垣築様目録』, 大阪城天守閣紀要第13号, pp.26-34, 1985.3.
- 7) 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.
- 8) 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「土と基礎」, Vol.55, No.6, pp.38-41, 2004.6.