

徳川大坂城石垣の曲面形状*

Curved Surfaces on Tokugawa-Osaka Castle Masonry Walls

玉野富雄**, 金岡正信***, 西形達明****, 松尾信裕*****, 西田一彦*****, 森本浩行*****

By Tomio TAMANO, Masanobu KANAOKA, Tatsuaki NISHIGATA, Nobuhiro MATSUO,
and Kazuo NISHIDA, Hiroyuki MORIMOTO

Abstract

The Japanese kinse castle masonry walls, constructed from the late 16th century to the middle of the 17th century, is appreciated as one of the world's finest and most outstanding construction culture. The walls are excellent for their mechanical rational structure and magnificent and elegant on two-dimensional curved line and on three-dimensional curved surfaces (hereafter called hiranosuki) of the walls. 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 masonry walls. Next, the mechanical effects of hiranosuki are discussed, based on the analytical results of the field measurement data and three-dimensional FEM analyses.

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建設技術を見た場合、世界的に第一級の誇るべき建設文化としての歴史的・文化的価値をもつものとして、16世紀後半から17世紀中期にかけて築造された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、隅角部における断面曲線や石垣面内における曲面形状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¹⁾。

今日、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、まず近世城郭石垣構造の石垣面の形状設定法や石垣安定の力学原理を知ることが重要となる。石垣

形状については、森本ら²⁾、西田ら³⁾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ことを明らかにしている。

また、玉野らは、近世城郭石垣構造の力学メカニズムについて、種々の提案を行なっている^{4)・5)}。

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^{6)・7)}。この“平の透き”の設定法および力学効果については、現在のほらみ出した近世城郭石垣を築造時原形に戻すための修復時および再築時における最も大きな不明な点として残されている。

こうした観点から、本論文では、近世城郭石垣の技術的頂点に位置する元和6年(1620)～寛永6年(1629)にかけて徳川秀忠により徳川幕府による天下普請として建設され、ほとんどの石垣が建設時の健全な状態に保たれている徳川大坂城石垣の“平の透き”について、詳細な3次元形状計測法による石垣面内曲面形状を示すとともに、その形状計測をもとに“平の透き”の設定法およびその力学効果についての考察を行なう。

なお、徳川大坂城は、現在我々が目にするものであり、豊臣秀吉により築造された大坂城が大坂夏の陣の後、その上部に盛土を行い、豪壮華麗に築き直されたものである⁸⁾。また、本論文では、現在の大坂の地名は明治以前では大坂と表現する。

2 徳川大坂城石垣

2.1 土木工学的調査

図-1に徳川大坂城南外堀石垣を示す⁸⁾。この図からも、

*keywords: Kinse castle masonry wall, Tokugawa-Osaka Castle, Goto-ke monjyo, Hiranosuki

**正会員 工博 大阪産業大学工学部都市創造工学科
(〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)

***正会員 博(工) 大阪産業大学工学部都市創造工学科

**** 正会員 工博 関西大学環境都市工学部都市システム工学科

***** 大阪城天守閣

***** 正会員 工博 関西地盤環境研究センター

***** 正会員 博(工) 京都市立伏見工業高校

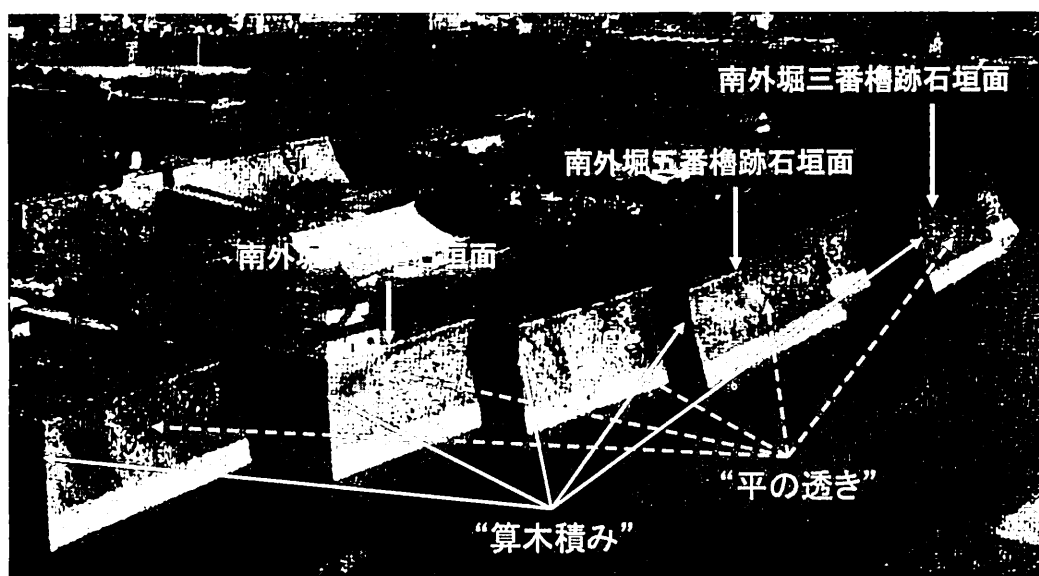


図-1 徳川大坂城南外堀石垣

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。

一般的に近世城郭石垣形状に関係する事項に、隅角部石垣断面曲線、石垣面内曲面、石垣面上端の長さ・高さの比（“石垣構造比”と呼ぶ）、および石垣石の大きさ・控え長さ（石垣石の表面からの奥行き）・加工状態・積み上げ角度がある。ここでは石垣面内曲面形状を考える上で重要な徳川大坂城石垣における石垣形状を形成する石垣石の加工および積み方、隅角部石垣断面形状、および“石垣構造比”についての説明をする。

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。石積みの最高芸術と称される総延長約12km、最大石垣高さ32mの近世城郭石垣中の最大規模の石垣は、瀬戸内海の島々から石産みされた直方体形状の約100万個の花崗岩の切石加工された花崗岩で積み上げられた。

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、稜線に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ものである。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、徳川大坂城石垣において技術的頂点に到達した⁵⁾。

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“算木積み”と呼ばれる隅角部の断面曲線の付け方と徳川大坂城東内堀月見櫓跡石垣断面北隅角部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²⁾・³⁾。この『後藤家文書』による方法では、上辺の長さ L_a 、下辺の長さ L_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、分割数を増やすほどよりなめらか2次曲線形状となる。今日の近世城郭石垣の修築・再築時にはこの断面形状の設置法が基本的手法となっている。

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“石垣構造比”の関係から求めた“石垣構造比安定上限曲線”と名付けた曲線を示す。“石垣構造比安定上限曲線”の具体的な求め方は、石垣の基礎からの高さと“石垣構造比”の関係をプロットし、その上端を曲線として描いたものであり、スムーズな曲線がひける¹⁾・⁵⁾。

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”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的な効果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、

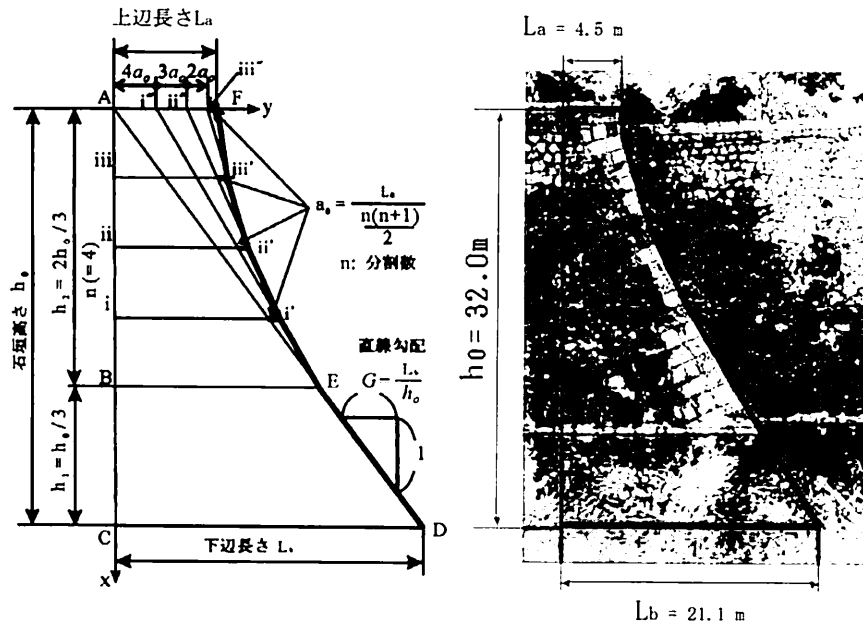


図-2 『後藤家文書』による隅角部の断面曲線および計測断面曲線
(徳川大坂城石垣東内堀月見櫓跡石垣断面北隅角部)

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うことが考察できる。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、徳川大坂城石垣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。

図中に示した石垣高さ22mの南外堀南側石垣は、寛永6年(1629)の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寛永7年(1630)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ことが考察できる。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になる。

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”に関する唯一ともいえる史料として北垣が『石垣築様目録』(岡本保司所蔵)を紹介している⁹⁾。『石垣築様目録』は承応4年(1665)に堀金出雲ら4名により記されたものである。この『石垣築様目録』について

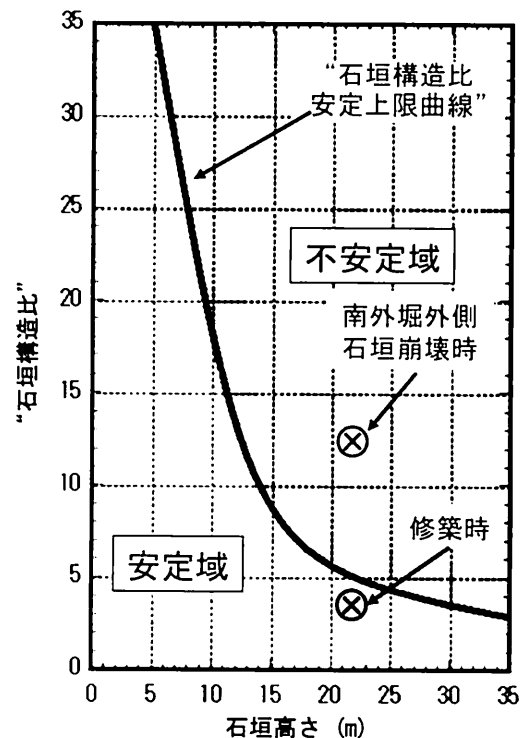
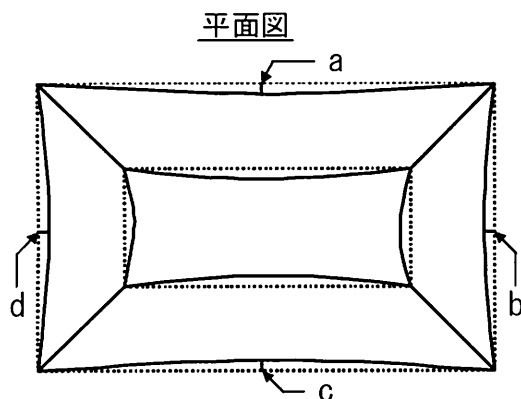


図-3 徳川大坂城石垣における石垣高さと“石垣構造比”の関係

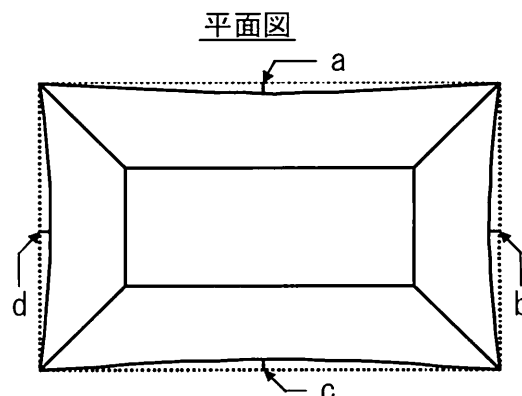
李ら⁷⁾により詳細な検討が行われ、表-1に示す“平の透き”の設定法が示されている。なお、1間を6尺5寸としてmで表示したものを表中に加筆している。

李らは、“平の透き”を図-4のように図示している。図-4をみると上辺にもくぼみが見られるが、徳川大坂城石垣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おり、より高度な“平の透き”構造となっている。



a, b, c, d: 平の透きの最大くぼみ量 C_{max}

図-4 李らによる“平の透き”の説明図⁷⁾



a, b, c, d: 平の透きの最大くぼみ量 C_{max}

図-5 徳川大坂城石垣の“平の透き”の説明

表-1 “石垣築様目録”における“平の透き”設定法⁷⁾

石垣高さ	石垣横距	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

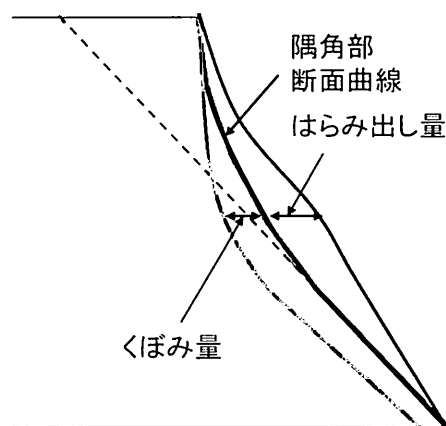


図-6 くぼみ量とはらみだし量の説明図

『石垣築様目録』を著した堀金出雲ら4名が徳川大坂城石垣の建設にどのように関係したなどについては、現在のところ不明である。

以下、本論文では徳川大坂城石垣における“平の透き”の計測，“平の透き”の設定法，および“平の透き”の3次元力学効果について検討を進める。

4 “平の透き”の計測

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させ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は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。

現存する近世城郭石垣では，石垣面のはらみ出しにより，建設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場合が多い。その

点，徳川大坂城石垣では，隅角部石垣に関しては，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，実測対象としては最適である。

図-7に3次元形状計測結果を解析した17箇所の石垣面と石垣面中央断面部の水面高さにおけるくぼみ量（ C と表記する）を示す。西外堀の水面ラインにおけるくぼみ量 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が多少生じているものと考えられる。

ここで，石垣面内の議論では最大くぼみ量を C_{max} ，縦方向石垣断面の議論では最大くぼみ量を C_{Hmax} ，横方向石垣断面の議論では最大くぼみ量を C_{Bmax} と表記する。なお，石垣最下端の中央部では C_{max} ， C_{Hmax} ， C_{Bmax} は一致する。

5 “平の透き”設定法

5.1 石垣面内横方向における“平の透き”

前述したように隅角部石垣の断面曲線の設定法は『後藤家文書』に示されている方法によることがわかった²⁴⁾。それに対し，“平の透き”の設定法が不明である。

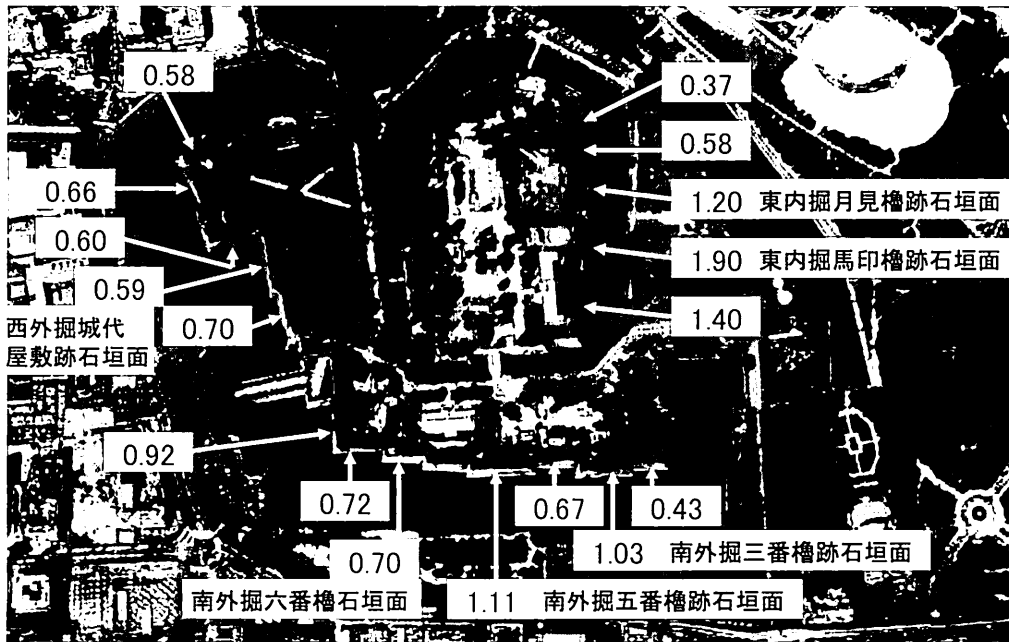


図-7 徳川大坂城の全景と石垣面中央断面の水面高さにおけるくぼみ量C(m)

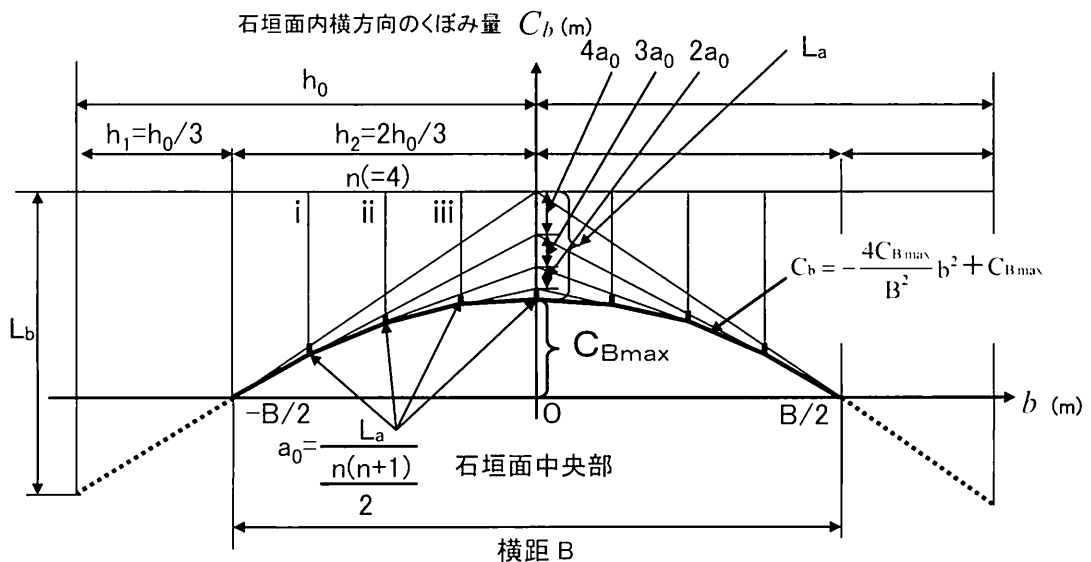


図-8 石垣面内横方向のくぼみ量 C_b の設定法

計測形状より判断して、縦および横方向とも考えられる方法は、次の3方法、『後藤家文書』による隅角部石垣断面曲線の2次曲線部のみを水平にして用いる方法（図-8参照）、『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、円弧を用いる方法、である。

もっとも可能性の高い方法と考えられるのは、図-8に示す『後藤家文書』による石垣断面曲線の2次曲線部形状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、図示が簡単であること、石垣曲面で直線部分が実測できていないこと、円弧を用いる方法は円弧の半径が350m以上にも及び図示することが難しいと推論で

きることがあげられる。また、石垣を設計するうえで、石垣隅角部と石垣面内の設定法で同じ方法を用いることは好都合である。

石垣面内横方向における2次曲線は次式で示される。

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

ここで、 B ：石垣面内横距(m)、 C_{Bmax} ：石垣面内横方向での最大くぼみ量(m)、 C_b ：石垣面内横方向の中央点よりの長さ b (m)でのくぼみ量である。

図-9に南外堀三番櫓跡石垣面における高さ方向の上端面より2～26m間の7段の各高さでの実測値と式(1)により求めた2次曲線との形状比較を例示する。なお、縦軸 C_b 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。図-9より2次曲線で石垣横方向の“平の透き”を推定できると判断できる。ここでは、南外堀三番櫓跡石垣面について例示したが、後述する他の6箇所の石垣面でもほぼ同様である。

5.2 石垣面内縦方向における“平の透き”

次に、石垣面内縦方向の“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ある。図-10に設定法を示す。石垣面内縦方向の2次曲線は次式で示される。

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

ここで、 H ：石垣上端面より石垣底までの石垣高さ(m)、 C_{Hmax} ：石垣面内縦方向の最大くぼみ量(m)、 C_h ：石垣面内縦方向のくぼみ量(m)、 h ：石垣上端部よりの石垣高さ(m)である。

図-11に7箇所の石垣面における中央断面部での縦方向として捉えたくぼみ量の実測形状を示す。7箇所の石垣面は図-7中に示している。図-11中に式(2)による2次曲線を記入している。 C_{Hmax} を繰り返し仮定して与え最も実測したくぼみ量 C の深さ方向分布により近い場合の石垣底部のくぼみ量 C の値を C_{Hmax} としたものである。実測値と計算値がよく一致していることがわかる。

5.3 石垣面における“平の透き”の設定法

以上のことから石垣面における“平の透き”の設定法は次のように考察できる。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_{Hmax} を設計条件として決める。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_h 分布を求める。徳川大坂城石垣では上端部ではゼロである。そして、式(2)より求めた高さ h でのくぼみ量 C_h を石垣横方向中央部の最大くぼみ量 C_{Bmax} とし、式(1)より石垣面内横方向のくぼみ量 C_b 分布を求めれば、石垣面全体の曲面“平の透き”が設定できることになる。また、施工時には石垣面内横方向に両端からロープを張り、決められたくぼみ量 C 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、表-1で示した『石垣築様目録』における最大くぼみ量 C_{max} をみると、最大で1尺6寸(0.48m)と記されており、徳川大坂城石垣での最大くぼみ量 C_{max} 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 および石垣横方向長さ 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-12に石垣高さ H と最大くぼみ量 C_{max} の関係、図

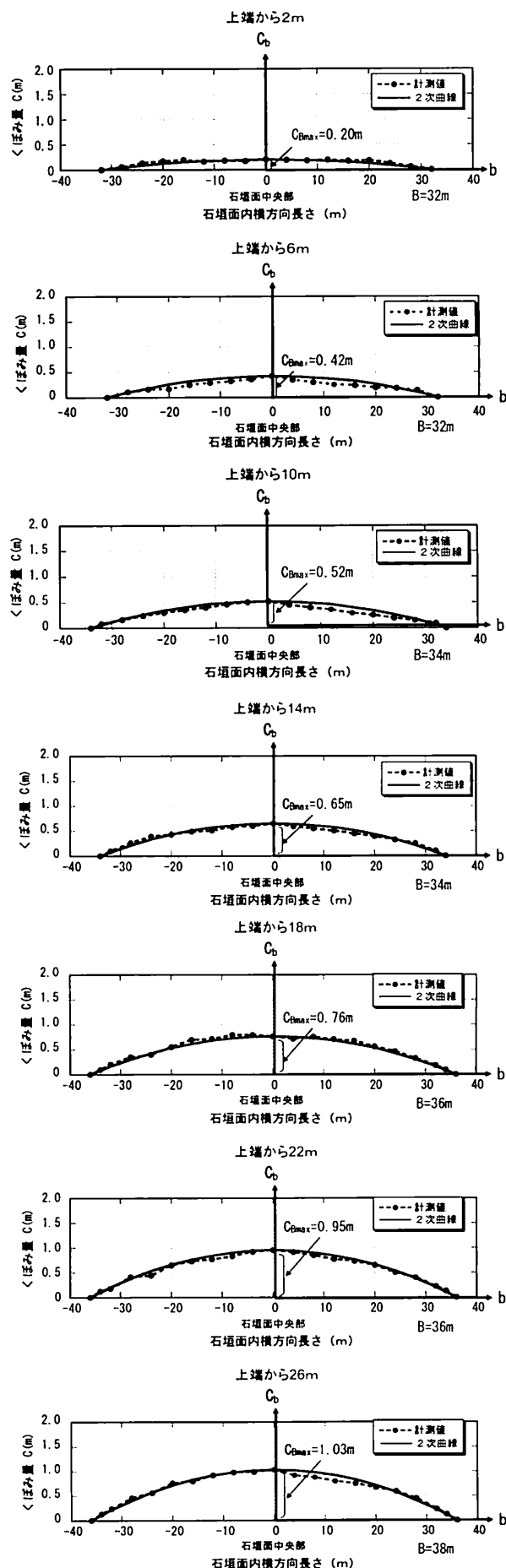
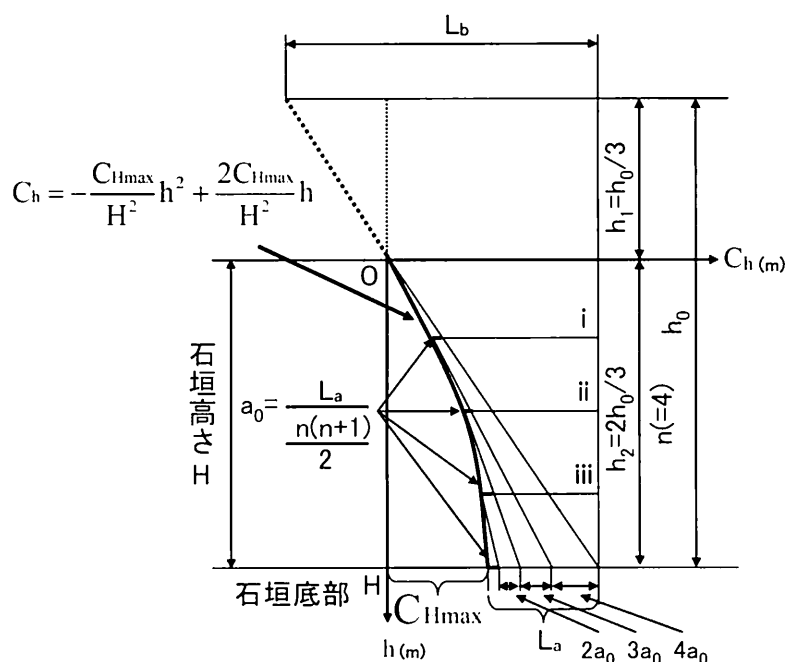


図-9 石垣面内横方向の計測値と2次曲線との形状比較 (徳川大坂城石垣南外堀三番櫓跡石垣面)



C_h : 石垣面内縦方向のくぼみ量(m), h : 石垣上端部よりの石垣高さ(m)

図-10 石垣面内縦方向のくぼみ量 C_h の設定法

図-13に石垣上端部における石垣横方向の長さ 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-12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』と徳川大坂城石垣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-13に示した石垣上端部における石垣横距 B と最大くぼみ量 C_{max} の関係では、徳川大坂城石垣の場合には、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』での値に比べて全体としてみればかなり大きく連続性は読み取れない。しかしながら、図に示すように4箇所の石垣面に限定してみれば連続性があるといえる。

6 石垣における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、はらみ出しが石垣面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力学的に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-14、3次元FEM解析に用いた石垣構造モデルを図-15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

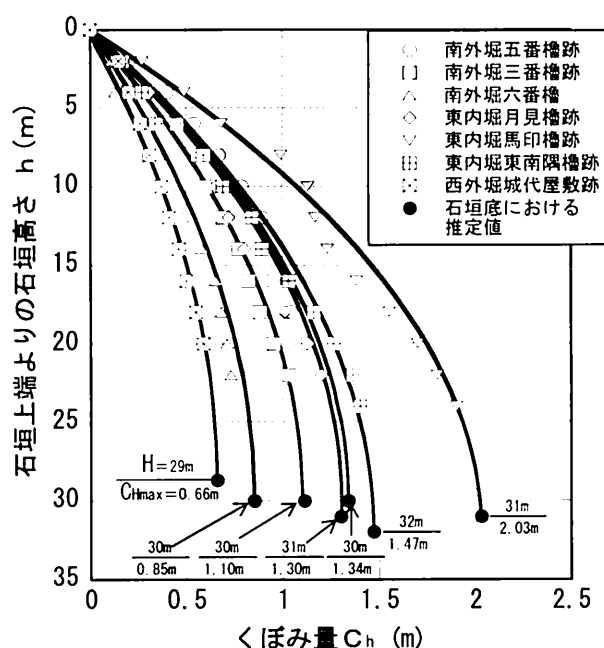


図-11 徳川大坂城石垣における石垣面内中央断面縦方向の計測値と2次曲線で近似したくぼみ分布

ていない。その理由として、玉野らが行った丸亀城石垣に対するひずみ計測結果^{51)・9)}では石垣は圧縮状態にあることから、本研究でのFEM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-15の説明図に示すような石垣構造に対して、“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-16に石垣長さを50～

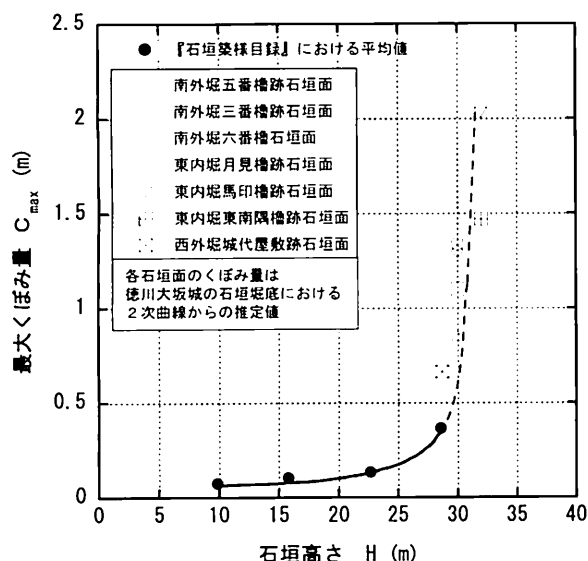


図-12 徳川大坂城石垣における石垣高さHと最大くぼみ量 $C_{H \max}$ の関係

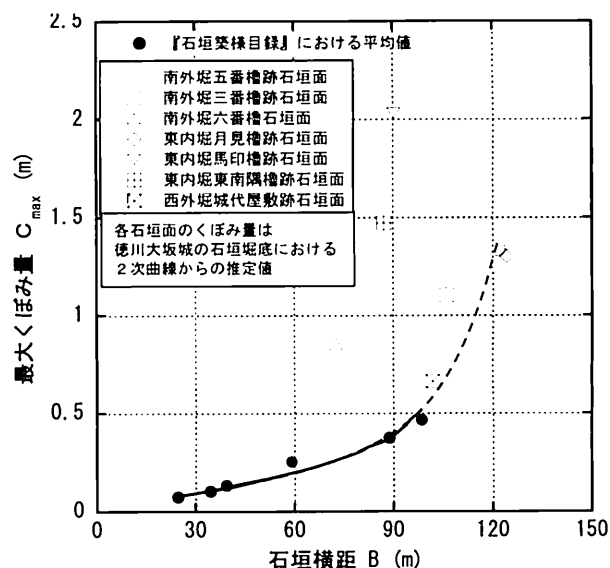


図-13 徳川大坂城石垣における石垣横距Bと最大くぼみ量 $C_{B \max}$ の関係

表-2 材料定数

要素特性	弾性	弾性	弾性
弾性係数E (kN/m ²)	4.0×10^7	5.0×10^5	1.3×10^4
ポアソン比 ν	0.15	0.2	0.3
単位体積重量(kN/m ³)	26	21	18

250mまで変化させた場合での石垣面中央断面の石垣底部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FEM解析の場合と等しくなる。

“石垣構造比”が7～8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に示した大坂城石垣の石垣高さと“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

石垣曲面における“平の透き”形状は、3次元力学効果や美的効果を期待して設計していたと判断できる。ここでは、“平の透き”の3次元力学効果について3次元“平の透き”FEM解析により検討してみる。

図-17に解析モデルを示す。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に図-17中に示した①・②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”を石垣横距77mに対して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、石垣石外側の1番目と2番目要素の圧縮応力が大きくなり、“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。このFEM解析結果よ

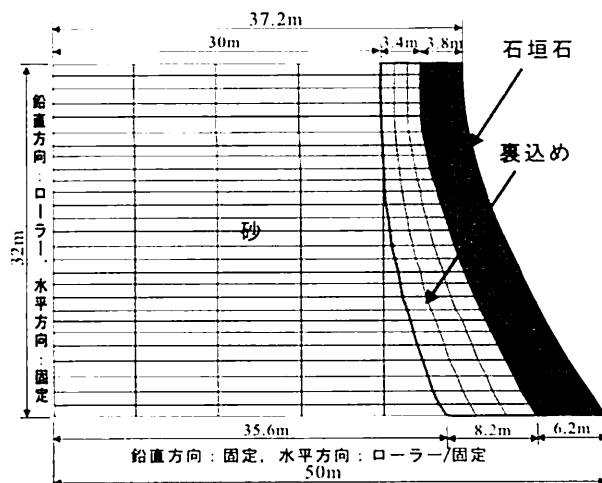


図-14 2次元FEM石垣構造モデル

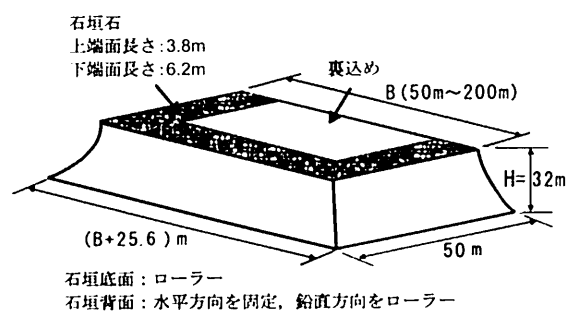


図-15 3次元FEM石垣構造モデル
(背面地盤：すべて裏込め、
石垣底面：ローラー)

り、前述した石垣横距が70mを越えるような徳川大坂城石垣面で実測した2m程度の最大くぼみ量 C_{max} の設定レベルでは3次元力学効果は小さいものであることが考察できる。

当時の“平の透き”設定の目的については、美的効果を目指したものであるのかを含め『石垣築様目録』のような史料の発見が望まれるところである。

7 まとめ

本論文を要約すると次のようである。

- 1) 徳川大坂城石垣の3次元形状計測法より堀水面での石垣面内の“平の透き”の計測を行った。その結果、西外堀石垣面の堀水面でのくぼみ量 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、石垣面内縦および横方向とも『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。また、この方法によれば石垣積み上げ施工も合理的に出来ると考えられた。
- 3) 石垣高さ H と最大くぼみ量 C_{max} の関係では、『石垣築様目録』と徳川大坂城石垣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_{max} が増大していることがわかった。
- 4) 3次元FEM解析結果より、“石垣構造比”が7～8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“石垣安定上限曲線”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。

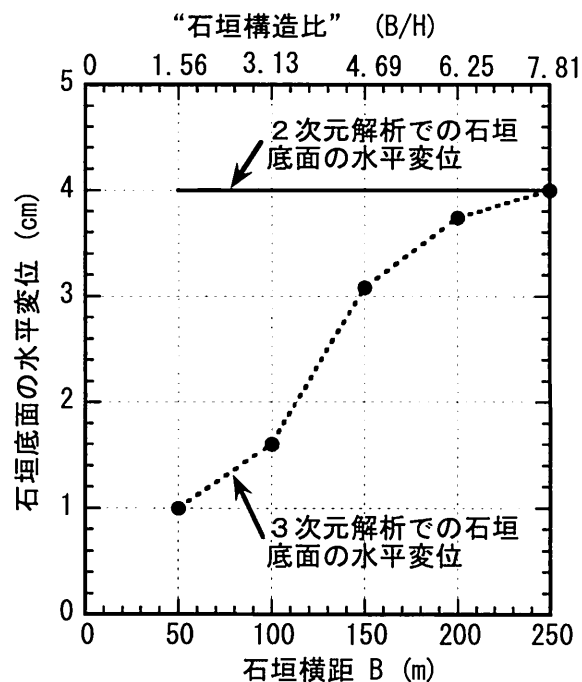


図-16 2次元・3次元解析における石垣底面の水平変位の比較

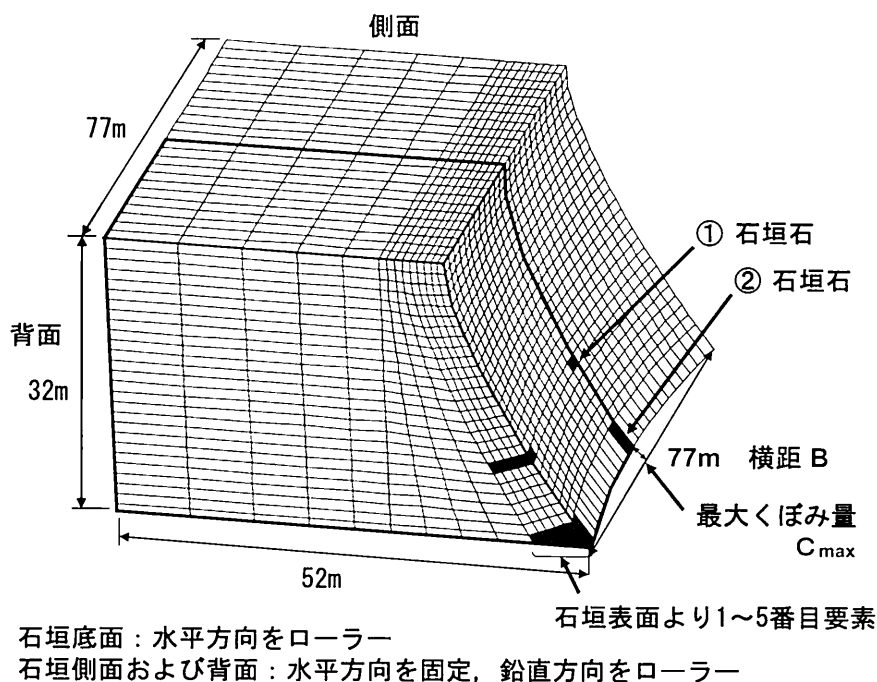


図-17 3次元FEM“平の透き”解析モデル（背面地盤：すべて裏込め、石垣底面：ローラー）

表-3 ①・②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 ①	最大くぼみ量 C_{max}	要素番号	1番目	2番目	3番目	4番目	5番目
	0m	$\sigma_{max} (kN/m^2)$	7.56	62.18	517.30	1472.60	2446.78
		$\sigma_{min} (kN/m^2)$	-1830.67	-761.78	-126.11	26.80	13.50
		水平変位 (mm)	4.70				
	2m	$\sigma_{max} (kN/m^2)$	8.61	77.99	607.68	1582.01	2570.61
		$\sigma_{min} (kN/m^2)$	-1806.00	-725.14	-132.80	-32.12	13.63
		水平変位 (mm)	4.70				
	5m	$\sigma_{max} (kN/m^2)$	9.80	99.33	687.21	1724.30	2778.41
		$\sigma_{min} (kN/m^2)$	-1924.93	-768.92	-148.34	-29.36	22.10
		水平変位 (mm)	4.40				
石垣石 ②	0m	$\sigma_{max} (kN/m^2)$	113.26	561.31	935.15	1253.11	4197.49
		$\sigma_{min} (kN/m^2)$	-2023.23	-1585.77	-1056.67	-457.28	310.20
		水平変位 (mm)	6.40				
	2m	$\sigma_{max} (kN/m^2)$	113.82	580.53	969.09	1321.04	4429.20
		$\sigma_{min} (kN/m^2)$	-1777.33	-1466.31	-694.00	-42.67	785.20
		水平変位 (mm)	6.40				
	5m	$\sigma_{max} (kN/m^2)$	118.66	605.71	1013.63	1400.98	4665.40
		$\sigma_{min} (kN/m^2)$	-1853.85	-1522.16	-433.77	-472.92	1186.73
		水平変位 (mm)	6.20				
	10m	$\sigma_{max} (kN/m^2)$	4707.34	1409.69	1042.65	623.03	122.12
		$\sigma_{min} (kN/m^2)$	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

5) “平の透き”の3次元力学効果について3次元FEM解析により検討した。その結果、石垣横距が70mを越えるような徳川大坂城石垣面では計測した2m程度の“平の透き”設定レベルでは3次元力学効果は小さいものであることが考察できた。

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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.

- 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 : 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.
- 9) 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.