

徳川期大坂城石垣構造の力学的考察

Stabilizing Mechanism of Osaka Castle Stone Wall in Tokugawa Period

天野 光三^{*1} 西田 一彦^{*2} 久武 勝保^{*3}

玉野 富雄^{*4} 矢野 順子^{*5} 西田 美津子^{*6}

by Kozo AMANO, Kazuhiko NISHIDA, Masayasu HISATAKE,
Tomio TAMANO, Junko YANO, Mitsuko NISHIDA

要旨：徳川期大坂城の石垣構造は、我国の明治以前における、すなわち機械化以前の土木施工技術からみて、世界的に第一級の建設文化としての価値を持つものである。

最大高さ32mを有する大規模な石垣構造は、天正年間（1574～1590年）以降、進歩してきた高石垣構造の技術的頂点を示している。また、このような大規模な大坂城の石垣構造物が、建設後現在まで過去4回の大地震を経験しているにもかかわらず安定な状態で保全されている。このことから、その技術の優秀性が実証されている。

本報文では、まず、大坂城石垣形状の詳細な調査結果を基に、石垣の平面および断面形状に着目した石垣形状比により、石垣構造の安定性を考察した。次に、大坂城石垣中で最大の高さである32mの東内堀内側石垣の各石垣面内での湾曲形状を分析し、石垣構造を明確にした。また、連続体解析手法である有限要素法を用いて、力学特性に及ぼす石垣断面形状の影響解析、および不連続体解析手法である個別要素法を用いて地震時動的解析を行い、大坂城石垣構造の静的・動的力学特性を明らかにした。

1. まえがき

徳川期大坂城（以後、本文では単に大坂城と呼ぶ）の石垣構造は、我国の明治以前における、すなわち機械化以前の土木施工技術からみて、世界的に第一級の建設文化としての価値を持つものである。

最大高さ32mを有する大規模な石垣構造は、天正年間（1574～1590年）以降、進歩してきた高石垣構造の技術的頂点を示している。また、このような大規模な大坂城の石垣構造物が、建設後現在まで過去4回の大地震を経験しているにもかかわらず安定な状態で保全されている。このことから、その技術の優秀性が実証されている。

本報文では、まず、大坂城石垣形状の詳細な調査結果を基に、石垣の平面および断面形状に着目した石垣形状比により石垣構造の安定性を考察する。次

Key Words：大坂城、石垣、安定性評価、地震解析

*1 正会員 工博 大阪産業大学学長

〒574 大阪府大東市中垣内3丁目1番1号

*2 正会員 工博 関西大学工学部土木工学科

*3 正会員 工博 近畿大学理工学部土木工学科

*4 正会員 工博 大阪産業大学工学部土木工学科

*5 学生会員 近畿大学大学院工学研究科土木工学専攻

*6 学生会員 大阪産業大学大学院工学研究科土木工学専攻

に、大坂城石垣中で最大の高さである32mの東内堀内側石垣の各石垣面内での湾曲形状を分析し、石垣の構造を明らかにする。

また、連続体解析手法である有限要素法を用いて、力学特性に及ぼす石垣断面形状の影響解析、および不連続体解析手法である個別要素法を用いて地震時動的解析を行い、大坂城石垣構造の静的・動的力学特性を明らかにするものである。

2. 石垣構造の形状

（1）石垣構造比

大坂城のような高石垣の安定を考える場合、石垣形状の三次元的な効果を見逃すことはできない。出角の石垣は、算木積みと呼ばれる強固な作りである。過去、全国の石垣崩壊事例でも出角部より長さ方向中央部で崩壊が多いことなどの工学的判断から、出角部石垣には三次元安定効果が存在すると考えることは妥当と思われる。

図-1に大坂城石垣平面形状を示す。ここでは、簡単な力学的検討として、出角部から出角部及び入角部から入角部までの一辺の長さを石垣高さ（堀底根

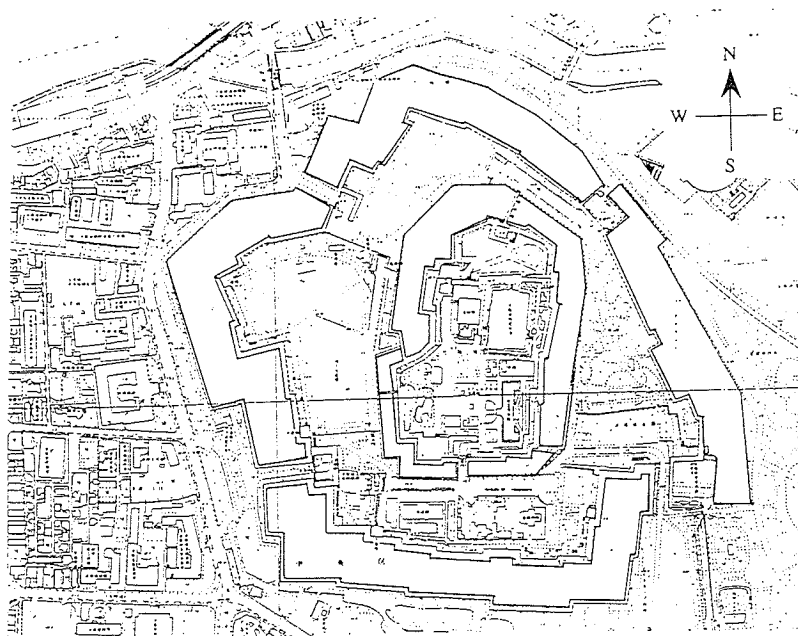


図-1 大坂城石垣平面図

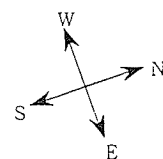


写真-1 大坂城石垣平面外觀

石地盤面よりの高さ)で除した値を石垣構造比と定義しこれにより石垣の力学的安定状態を考察する。図-2に大坂城全堀における石垣高さと石垣構造比の関係を示す。図中に示している石垣構造比安定上限曲線よりも大きく上に出ている二つの石垣は、歴史的にみて実際に崩壊している事例である。図より、石垣高さが5m近くになれば上限曲線の値は大きくなり、逆に石垣高さが24mから30mをこえると上限曲線の値は3.0近くに収束する傾向が認められる。石垣の支持地盤や施工状態が同じであれば、石垣が高く石垣構造比の値が大きい程、石垣は不安定な状態となる。

以上の検討より、大坂城石垣築造に際しては、石垣の崩壊を防ぐ技術的配慮として、出角・入角部の三次元形状効果を考えたのではないかと推察できる。石垣断面形状の反り勾配と共に、石垣の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は、熟知していたことが伺われる。

写真-1は、大坂城を南東方向より撮影したものであり、南外堀内側と東内堀内側での石垣形状の外観を示す。

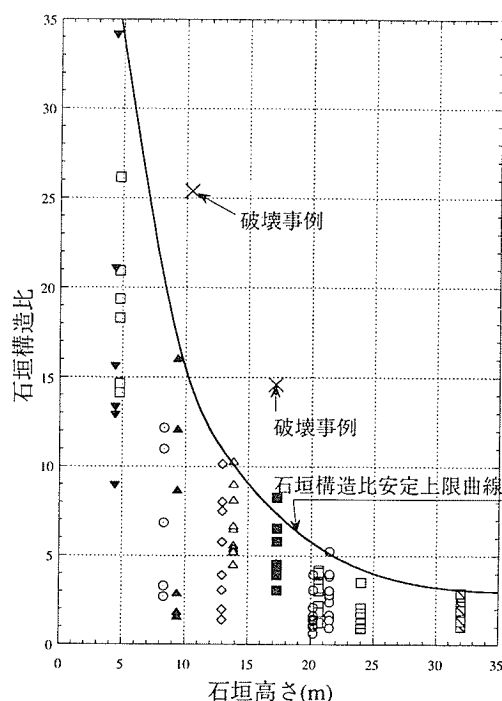


図-2 石垣高さと石垣構造比の関係

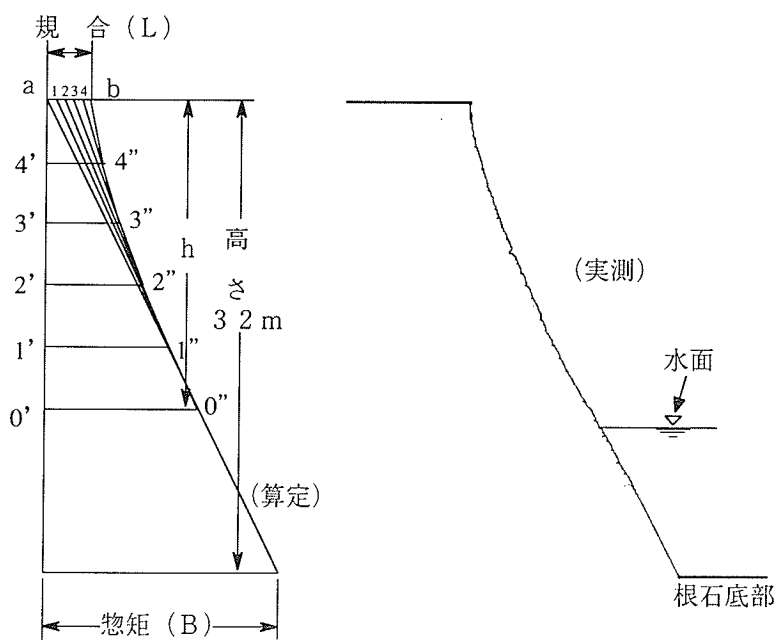


図-3 石垣断面形状の実測結果と唯子一人伝による算定結果
(東内堀内側南端部石垣)

(2) 石垣の断面形状

写真測量と水中・土中でのサウディングにより石垣の断面形状を調査した。図-3に大坂城石垣の中で最も高い32mの東内堀内側の断面形状を例示する。また、唯子一人伝での手法²⁾により算定した石垣断面形状を図中に示す。唯子一人伝の方法として、底部惣矩(B)に対し、上部規合(L)を $L = (3/16)B$ 、底部より1/3の高さまでを直線とし、その上部を5分割しての算定例である。分割数を増やせばよりなめらかな断面勾配となる。実測断面形状と算定断面形状は比較的良好一致しているといえよう。他の石垣断面においても同様の断面形状の一致が見られた。

(3) 東内堀内側における石垣面内形状

石垣構造比および断面形状について考察したが、石垣面の立体形状は、いくぶん内側へ湾曲していることが外観より伺える。ここでは、大坂城石垣中で最も高い石垣である東内堀内側に着目して、写真測量により得られた正確な石垣の実測形状をもとに、石垣面のくぼみが水平・鉛直方向でどのような形状になっているかを数値的に表し、考察する。

なお、石垣面のくぼみとは、図-4の説明図に示すように各石垣面の南端側出角部の石垣断面を基準石垣断面(例えばA面であれば図-3に示す石垣断面の実測形状)とし、この面と検討石垣断面との奥行き水平離れの距離をくぼみと表現する。

東内堀内側の石垣形状の平面寸法を図-5に示す。写真-1中に示したA・B・C石垣面内を鉛直方向に1.5mピッチ、水平方向に7から8mピッチで区分

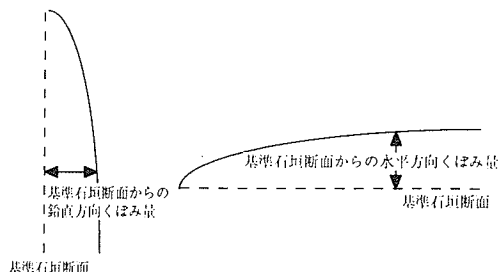


図-4 くぼみ量の説明図

してフレームを組み、基準石垣断面からのくぼみ量を図-6に示した。くぼみ方向を負とし、水平破線フレーム(破線)より上方向に、また鉛直破線フレームより右方向に、くぼみの量を曲線で表している。また交点のくぼみ量を数値で記載している。なお、各石垣面での南端部石垣断面形状は、前述したように唯子一人伝の手法により算定した断面形状とよく一致している。

A面については、石垣上部のくぼみは最大6cm程度と湾曲が少ないが、石垣中部から下部にかけてのくぼみは、石垣上部と比べると大きく、最大67.2cmである。B面の石垣上部については、最大5.9cm、石垣中部から下部にかけては、最大19.8.2cmのくぼみである。それに対し、C面では、石垣面全体でほとんど湾曲が見られない。C面が、A・B面に比べて湾曲がないということは、築造後ではらみ出しの傾向が生じた結果とも考察出来る。

(4) 石垣クラックの発生状況

大坂城石垣の個々の石には多くのクラックが生じ

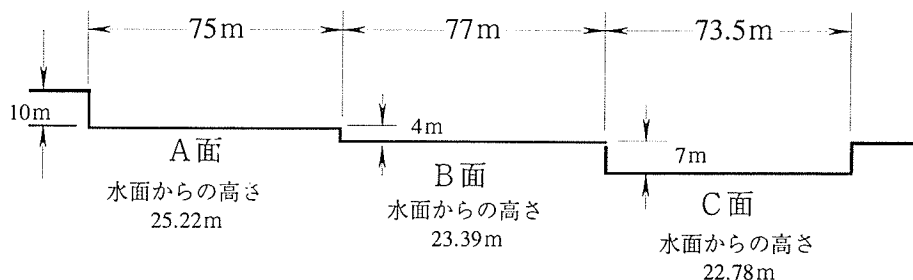


図-5 東側内堀内側石垣の平面寸法関係図

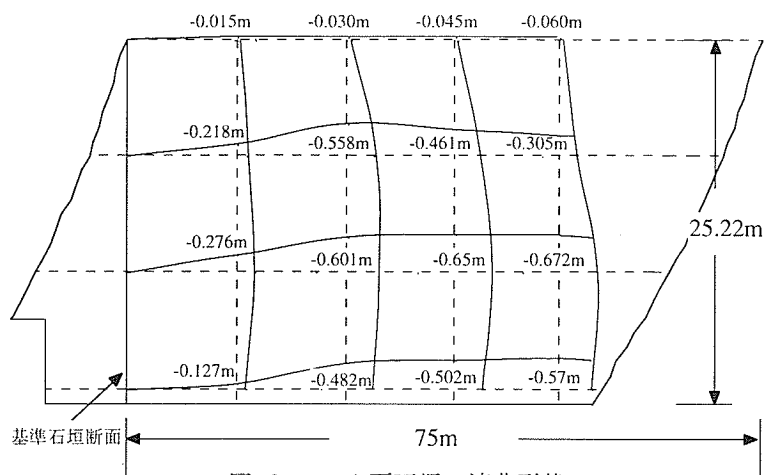


図-6 (A) A面石垣の湾曲形状

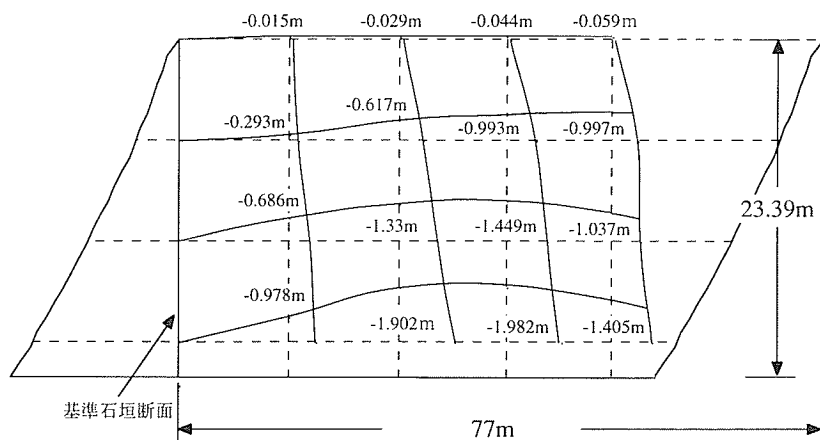


図-6 (B) B面石垣の湾曲形状

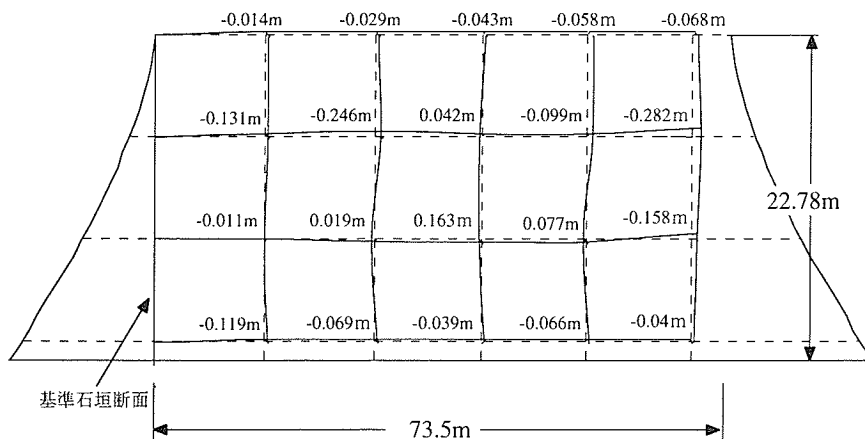


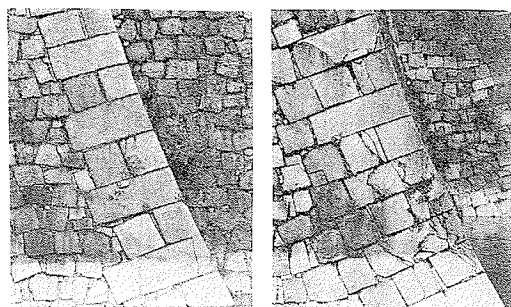
図-6 (C) C面石垣の湾曲形状

ている。一見乱雑に発生しているように見えるクラックの形態をクラックの生じている出角部石垣断面について調査した。まず、図-7の説明例に示すように、クラックの形態をほぼ一本の縦方向のクラックが入っているAクラック形態、多くのクラックが石全体に入っているBクラック形態に分類した。図-8に調査できた水面より上部で、クラックの入っている高さ方向の位置とクラック形態について示す。A形態のクラックは、高さ方向に万遍なく生じ、B形態のクラックは石垣高さの中間部付近に集中して生じている。A形態のクラックは、石自体の強度的な特性の影響が卓越し、B形態のクラックは高さ方向での応力集中や地震時での力学的影響が卓越した結果として生じたと考えられる。

3. 力学特性に及ぼす石垣断面形状の影響解析
高さ32mの東内堀内側石垣の出角部の石垣形状を基本にして、石垣のはらみだしがその石垣の安定性に及ぼす定性的な影響力を知るために、有限要素法によるパラメトリック解析を行った。

表-1に示した入力パラメータを使用し、現状石垣、反りが無い直線形状の場合、上・中・下部がそれぞれはらみ出た場合の5パターンの静的解析を行い、その結果発生した主応力ベクトル図を図-9から図-13に示す。また、発生主応力より計算した石垣高さ方向での最大せん断応力分布図を図-14から図-17に示す。

これらの比較検討より、はらみだしを生じさせている石垣形状は、3パターンともはらみだし部分で最大せん断応力が大きくなっている。また、下部がはらみだしている石垣が最も安定性が悪く危険である。中部がはらみだしている石垣もかなり大きな影響を受けている。これらに比べると、上部がはらみだしている石垣はあまり大きな影響は受けていないことが分かる。直線形状の石垣は、下から1/3のところは現状とあまり変わらないが、1/3から上部ではかなり影響を受けている。これは、現状の石垣形状の下から1/3までは直線であり、1/3から上部で反り勾配がついていることが関係していると推察できる。



A：単純なクラック例 B：複雑なクラック例

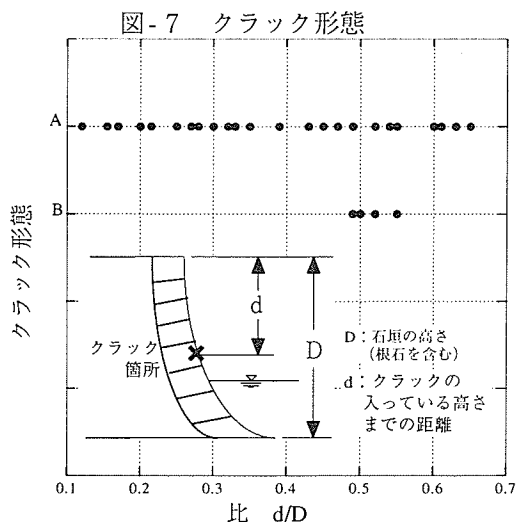


図-8 クラックの位置と形態の関係

表-1 材料定数一覧表

四辺形要素の諸定数					
要素特性	石	灰込	土		
			砂	粘土	砂礫
弾性係数 E (Pa)	0.39×10^{11}	0.49×10^9	0.13×10^8	0.17×10^8 0.25×10^8	0.53×10^8
ポアソン比 ν	0.15	0.2	0.3	0.49	0.25
質量密度 γ (kg/m ³)	2600	2100	1800	1600	2000
内部摩擦角 ϕ (°)	50.0	45.0	32.0	0	41.1
ジョイント要素の諸定数					
	石と石	石と灰込	灰込と土		
			砂	粘土	砂礫
ジョイント表面の圧縮強度 q_c (Pa)	0.1×10^7	0.1×10^6	0.6×10^5	0.6×10^5	
四角により生じるせん断強度 C (Pa)	0	0	3.0	3.0	
せん断弾性率 K_s (Pa)	0.19×10^{13}	0.28×10^{13}	0.1×10^{10}	0.28×10^{11} 0.41×10^{11}	0.35×10^{10}
最大強度に対する残留強度比 β	0.3	0.4	0.5	0.5	
ジョイントが閉合できる最大量 V_{max} (m)	0.01	0.03	0.05	0.05	
垂直固着性 K_v (Pa)	0.17×10^{13}	0.21×10^{11}	0.48×10^9	0.56×10^9 0.83×10^9	0.21×10^{10}
摩擦角 ϕ (°)	50.0	45.0	32.0	0	41.0
膨張率 α (°)	1.0	3.0	2.0		

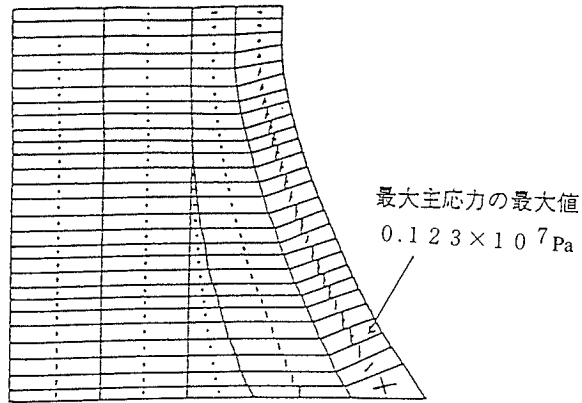


図-9 現状の石垣形状での解析図

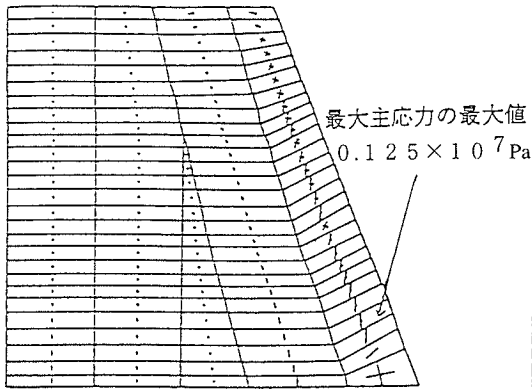


図-10 反りなしの石垣形状での解析図

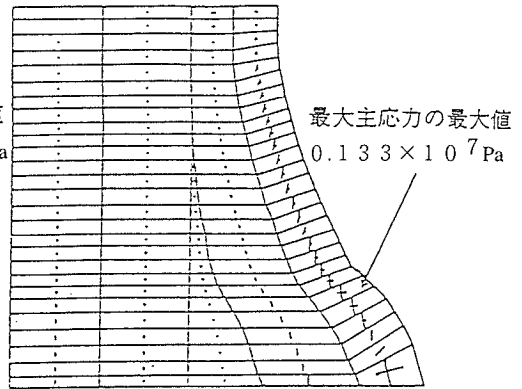


図-11 下部はらみだしの石垣形状での解析図

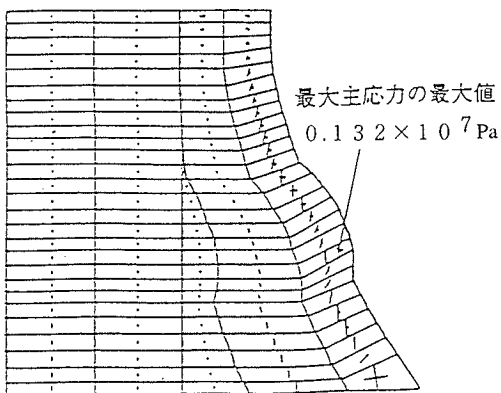


図-12 中部はらみだしの石垣形状での解析図

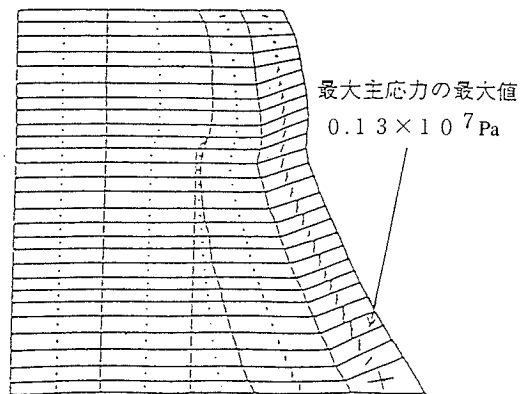


図-13 上部はらみだしの石垣形状での解析図

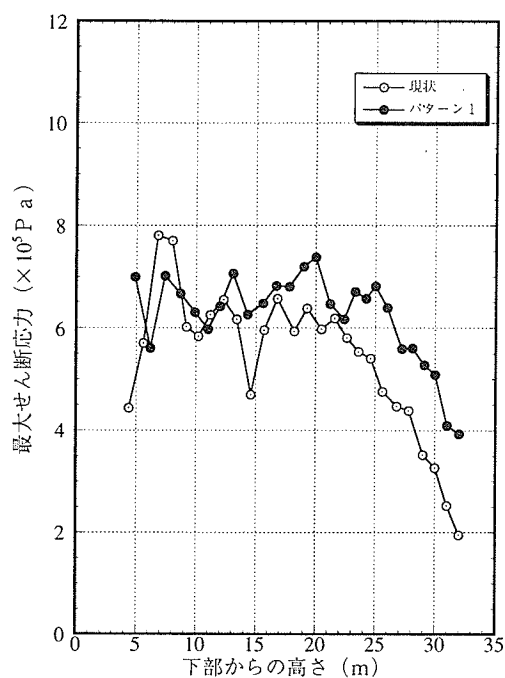


図-14 高さとせん断応力の関係
(現状と反りなし)

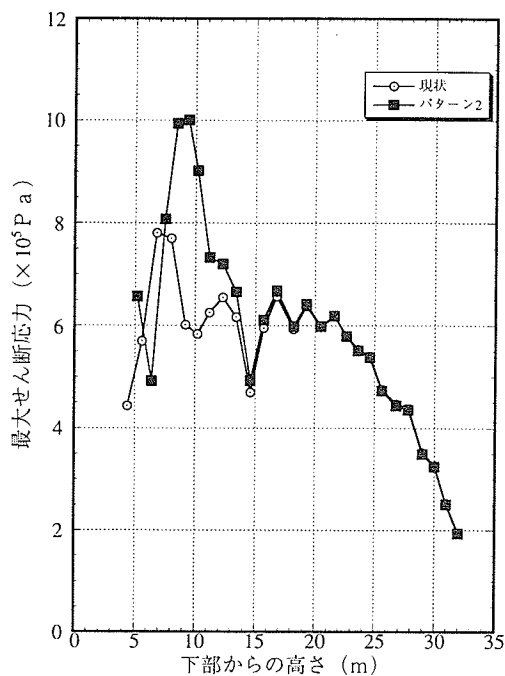


図-15 高さとせん断応力の関係
(現状と下部はらみだし)

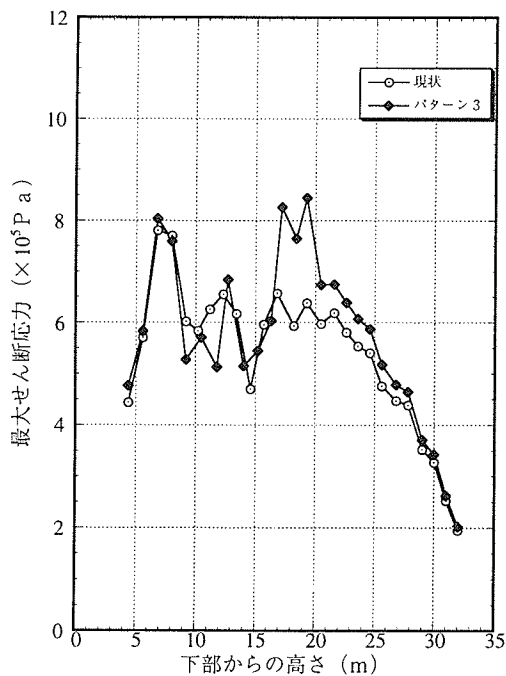


図-16 高さとせん断応力の関係
(現状と中部はらみだし)

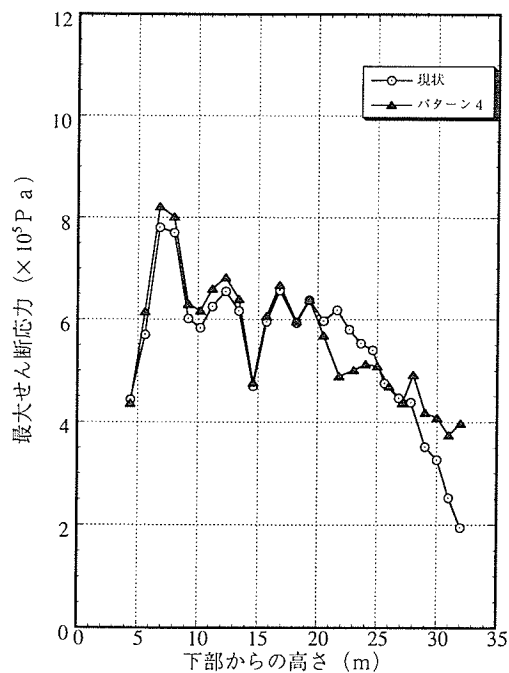


図-17 高さとせん断応力の関係
(現状と上部はらみだし)

4. 地震解析

(1) 解析手法の概要

今までは構造物の常時の安定状態や、地震時の崩壊に至るまでの解析に主眼をおいた連続体解析が用いられてきた。しかし、先の雲仙普賢岳や阪神大震災により構造物の崩壊挙動と崩壊後の被害状況を明らかにする必要性が高まり、不連続体解析の重要性が認識されるようになってきた。

連続体解析とは地盤を連続体と近似して解析する手法であり、有限要素法や境界要素法等がその代表である。この方法では地盤が崩壊し、不連続な状態に至る解析は困難である。それに対し、個別要素法を代表とする不連続体解析は対象とする地盤などを土砂や岩石といった不連続な要素からなる集合体として扱い、各要素毎に運動方程式をたてる。要素間は接触点を通して力が伝達されるとして、各要素の挙動を動的に時間領域で追跡できる。この方法では、破壊の発生から進行に至るまでの連続的な解析が可能である。個別要素法の原理を図-18に示す。

解析は次の手順によって行う。

- ① 現状の大坂城石垣モデル（図-19）を作成する。
- ↓
- ② 大坂城のボーリング調査によって得られた諸定数、及び一部仮定した定数を入力して、上記モデルの自重解析を行い、初期地盤を作成する。
- ↓
- ③ 初期地盤モデルに地震動をかけて解析する。

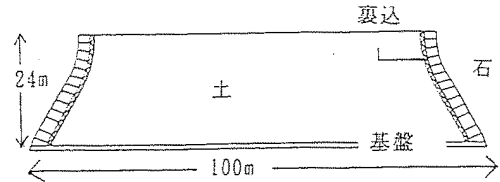


図-19 大坂城石垣モデル

(2) 入力定数

本解析で採用する入力データは、ボーリング調査によって求めた値を用いるが、要素間の摩擦抵抗角やバネ定数等は仮定した。入力定数を表-2に示す。なお、パターン1、パターン2は摩擦角の値のみを変えた解析である。

表-2 材料定数一覧表

	石	裏込	土	基盤と要素の間
弾性係数 E (Pa)	0.39×10^{11}	0.49×10^9	0.12×10^8	
ポアソン比 ν	0.15	0.2	0.3	
質量密度 γ (kg/m ³)	2600	2000	1800	
体積弾性係数 K (Pa)	0.19×10^{11}	0.27×10^9	0.10×10^8	0.20×10^{12}
せん断弾性係数 G (Pa)	0.17×10^{11}	0.27×10^9	0.10×10^8	0.20×10^{12}
摩擦角 ϕ (°)	パターン1	50	45	32
	パターン2	40	30	25
粘着力 C (Pa)				0.50×10^8
引張力 T (Pa)				0.50×10^8

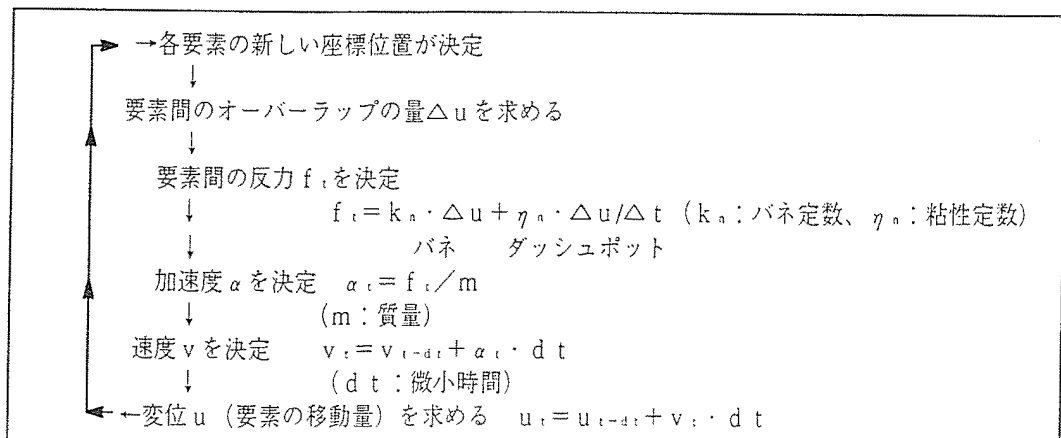


図-18 個別要素法の原理

(3) 入力地震波

本解析で採用する地震波は、阪神大震災において神戸海洋気象台で得られた図-20に示す上下波及び東西波の両者を図-19に示す解析モデルの基盤に入力した。なお、解析モデルでの石垣高さは、前述した図-2での石垣構造比安定上限曲線が石垣高さ24m程度より高くなると3.0程度に収束する傾向にあることにより、大坂城石垣の一般的な高さとして24mを採用した。

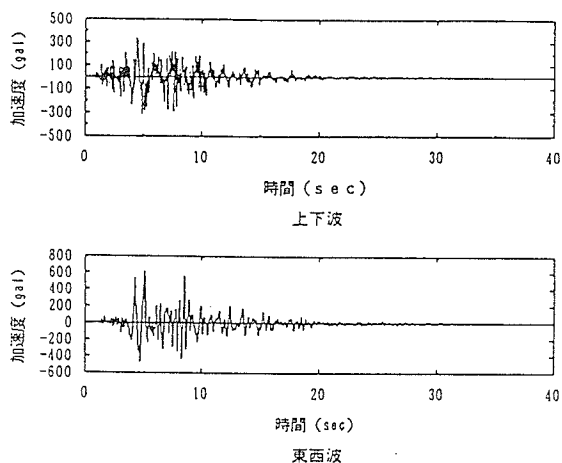


図-20 入力地震波

(4) 解析結果及び考察

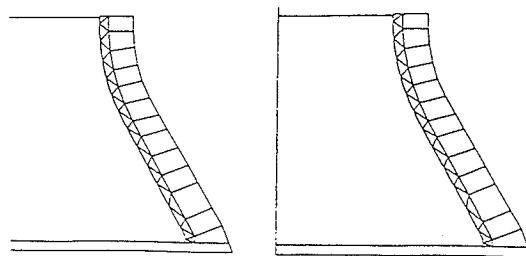
a) 石垣、裏込の経時挙動

図-21(A)はパターン1の場合について、自重解析終了時、および地震解析9秒時における石垣と裏込の状態を示している。これより、裏込が沈下し、また石垣中部高さにおいて裏込と石垣石との間に隙間が発生しているのがわかる。また下部石垣石間に隙間が発生しており、不安定な状況になっているのがわかる。

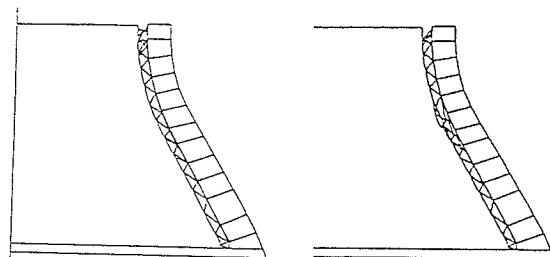
図-21(B)はパターン2の場合について、同様の結果を示している。この場合には摩擦抵抗角がより小さいために裏込の沈下量、及び石垣中部高さにおける裏込と石垣石との間の隙間は共にパターン1に比べて大きい。またこの場合には石垣中部高さにおいて、石垣石の裏込側に隙間が発生している。

このことより、裏込は地震によってかなりの影響を受けるが、一方石垣石そのものは一部不安定な状

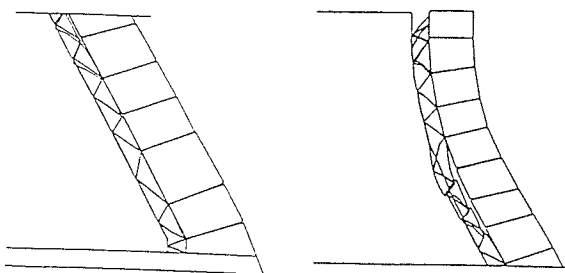
況にさらされてはいても、崩壊に至るまでには至っていない事がわかる。しかし、石垣石はその背面において裏込からの抵抗を一部期待できないために、初期状態に比べて安定性は低い。



(a) 自重解析終了時 (a) 自重解析終了時



(b) 地震解析9秒後 (b) 地震解析9秒後



(c) 9秒時の石垣 下部拡大 (c) 9秒時の石垣 上部拡大

(A) パターン1 (B) パターン2

図-21 石垣、裏込の経時挙動

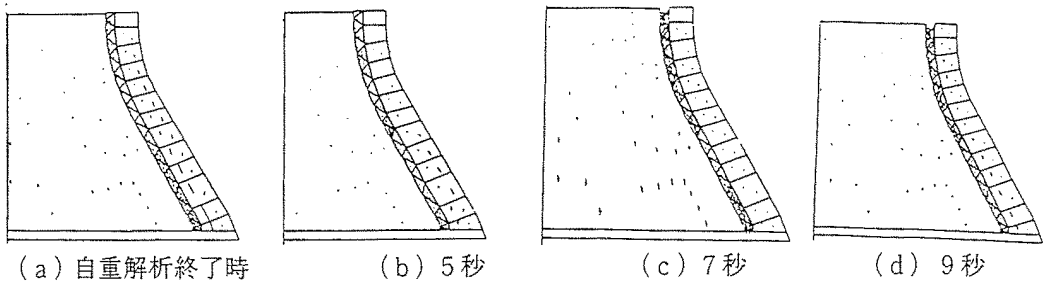


図-2 2 (A) パターン1の結果

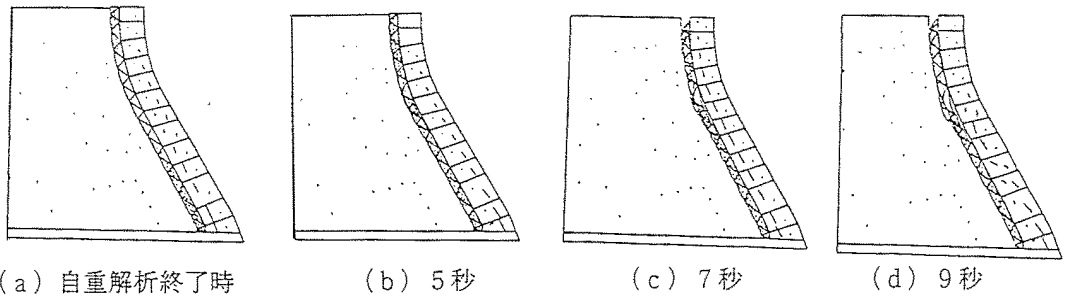


図-2 2 (B) パターン2の結果

b) 主応力の分布

図-2 2は、地震入力前、及び入力5秒、7秒、9秒時の主応力を表している。最大主応力の最大値は石垣の中部高さ以下に発生しており、また最大主応力の方向は石垣の外面方向に発生する場合がある。しかし石垣石は下部になるほど水平から反時計方向に傾いて配置されているのでこのような石垣外面方向に主応力が作用する場合において、この配置は安定性に効果があるものと思われる。

c) セン断応力比について

各石垣石の上下接触面に発生するせん断応力をその面でのせん断強度で除した値を「せん断応力比」と定義し、この値が1に達した回数について、1秒ごとに加算した結果を図-2 3に示す。

また、せん断応力比の経時変化の一例を図-2 4に示す。せん断応力比が1になるということはせん断応力が限界状態に達している事を示しており、またその回数が多くなるほど石垣石の安定性が低下し、崩壊の危険性が高くなることを示している。石垣石間の摩擦抵抗角が小である場合ほど、また石垣上部になるほど、当然の事ながらその回数は多い。しかし本解析においては、せん断応力比の値が1に達する回数は多くても、1の状態が長時間維持される状況になかったことから、滑りの発生が持続されな

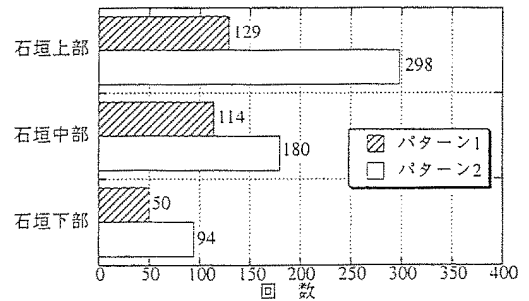


図-2 3 地震解析9秒間にせん断応力比が1に達した回数

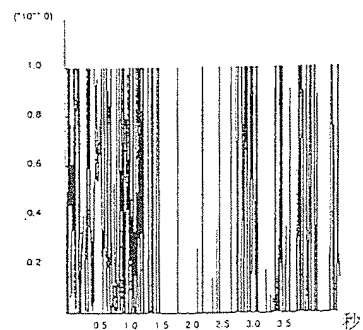


図-2 4 セン断応力比の経時変化の一例

く、その結果石垣石の抜け出しや崩壊には至らなかったと思われる。

5. 結論

本報文を要約すると以下の通りである。

- (1) 大坂城全堀における石垣高さと石垣構造比の関係を示した。石垣の支持地盤や施工状態が同じであれば、石垣が高いほど、また石垣構造比が大きい程、石垣は不安定な状態となる。
- (2) 唯子一人伝での手法により算定した石垣断面形状と実測断面形状は、よく一致している。
- (3) 大坂城石垣中の最大高さ(3.2 m)の東内堀内側の石垣面の湾曲状態を明らかにした。
- (4) 石垣のはらみだしがその石垣の安定性に及ぼす定性的な影響を知るために有限要素法によるパラメトリック解析を行った。その結果、下部がはらみだしている石垣が最も安定性が悪いという傾向が見られた。
- (5) 地震時には裏込が沈下し、石垣の安定性は低くなると考えられるので、裏込はよく締め固め隙間なく詰めることにより安定性を確保する必要がある。
- (6) 最大主応力の最大値は石垣の中部高さ以下に

発生し、また最大主応力の方向は石垣の外面向方に発生する場合があることから、大坂城の石積み工法は地震時の安定性に効果があるものと思われる。

- (7) 裏込のダメージは石垣の中部高さにおいて最も大きい。

本研究では、平成7・8年度文部省科研として行っている「建設文化としての大坂城石垣総合研究」(委員長 天野光三、副委員長 西田一彦・渡辺武)の一環として行ったものであり、関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 西田一彦・山野寿男・中村博司・久武勝保・玉野富雄・中川光雄：大坂城石垣の歴史的崩壊記録と安定に関する考察、土木史研究、土木学会、No.16, pp.601-608, 1996.
- 2) 喜内敏：我が国の築城技術に用いられていた石積み工法、基礎工、特集最近の擁壁・土留め、pp.47-54、Vol.14、No.7、1988年7月。
- 3) 西田一彦・久武勝保・玉野富雄・矢野純子・西田美津子：徳川期大坂城石垣構造の力学的安定に及ぼす形状効果、第32回地盤工学会研究発表会講演集(投稿中) 1997年7月。