

大坂城石垣の歴史的崩壊記録と安定に関する考察

Historical Breaking Document and Stability of Osaka Castle Stone Wall

西田 一彦^{*1} 山野 寿男^{*2} 中村 博司^{*3}
久武 勝保^{*4} 玉野 富雄^{*5} 中川 光雄^{*6}

by kazuhiko NISHIDA, Hisao YAMANO, Hiroji NAKAMURA,
Masayasu HISATAKE, Tomio TAMANO, Mitsuo NAKAGAWA

概要

徳川期大坂城石垣は、近世における石垣築造（普請）の技術的頂点に位置し、わが国が誇るべき建設文化である。本報文では、総延長12^{km}、最大32^m近くの高さを有する長大な大坂城石垣を普請する技術系譜はどのようなものであったのかを歴史的文献および力学的な面より調査・研究を行っている。まず、大坂城石垣の普請直後に発生した大規模な崩壊跡の現場調査記録を紹介し、その崩壊の再築時における技術的改良事項を文献学的調査により抽出した。次に、石垣の平面および断面形状に着目して、石垣の力学的安定性について考察し、石垣構造の安定における三次元効果およびそりをもった石垣勾配の力学的合理性について考察した。

はじめに

徳川期大坂城石垣（以後、本文では単に大坂城石垣と呼ぶ。また「大阪城」でなく「大坂城」と記す。）は、近世における石垣築造（普請）の技術的頂点に位置する。総延長12^{km}、最大32^m近くの高さ（東内濠）を有する長大な石垣を普請する技術系譜はどのようなものであったのか。我が国が誇るべき建設文化として、大坂城石垣の石積み構造、力学的安定性、および機械化以前における石垣普請を考えることは意義あることといえよう。

本報文では、まず、大坂城石垣の普請直後に発生した大規模な崩壊跡の現場調査記録を紹介し、その崩壊個所の再築時における技術的改良事項を文献的調査により抽出する。次に、石垣の平面および断面形状に着目して、石垣の力学的安定性について考察する。

keywords: 大坂城、石垣、崩壊記録、安定性

*1 正会員 工博 関西大学工学部土木工学科

〒564 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号

*2 (前) 大阪市下水道局

*3 大阪城天守閣副館長

*4 正会員 工博 近畿大学理工学部土木工学科

*5 正会員 工博 大阪産業大学工学部土木工学科

*6 正会員 (株) C R C 総合総合研究所

南外濠石垣崩壊記録

大坂城の南外濠は、図-1に示すように一番から七番まで7つの櫓が立ち並んでいた二の丸側（城内）の石垣とそれに相対する形で築かれている城外側の石垣、および追手・玉造両土橋を形成する石垣によって囲まれている。南外堀の外観を写真-1に示す。今、これらの石垣の内、城外側石垣のそれぞれに東から順に番号をふつていけば①号壁～⑩号壁となる。石垣の高さは、濠底より10.6^m程度である。現在の⑥・⑦・⑧号壁の付近の状況を写真-2に示す。

昭和40年頃から南外堀において減水が始まり、その結果、濠底が露出される状態が長期間続くこととなった。こうしたなか、日本古城友の会・石垣刻印調査研究会専門部会によって⑦号壁直下の濠底に存在する石材群が注意されたが、昭和46年、同部会の手によってこの石材群の調査が実施され、その際、志村清氏により作成されたのが「大坂城南外堀石垣崩落跡調査図」と題される図-2である。

図-2によれば、濠底石材群は、直線状の東部分と大きく北に張りだした西部分に分けることができる。

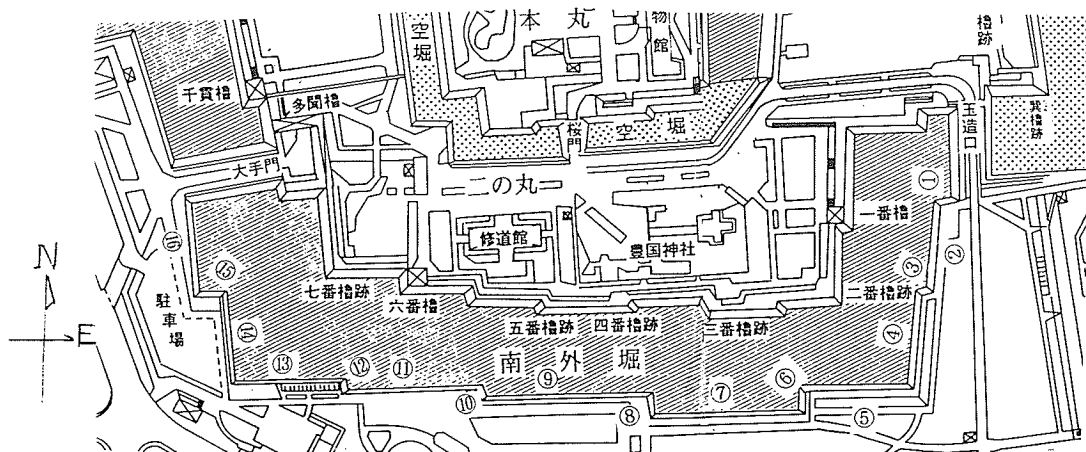


図-1 大坂城南外堀平面概要

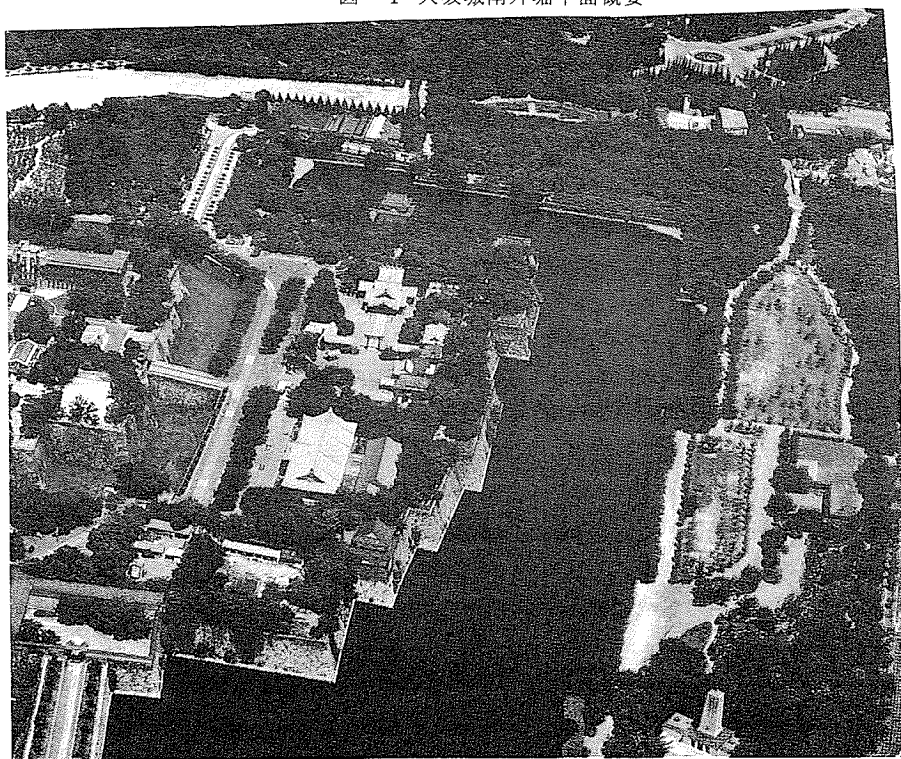
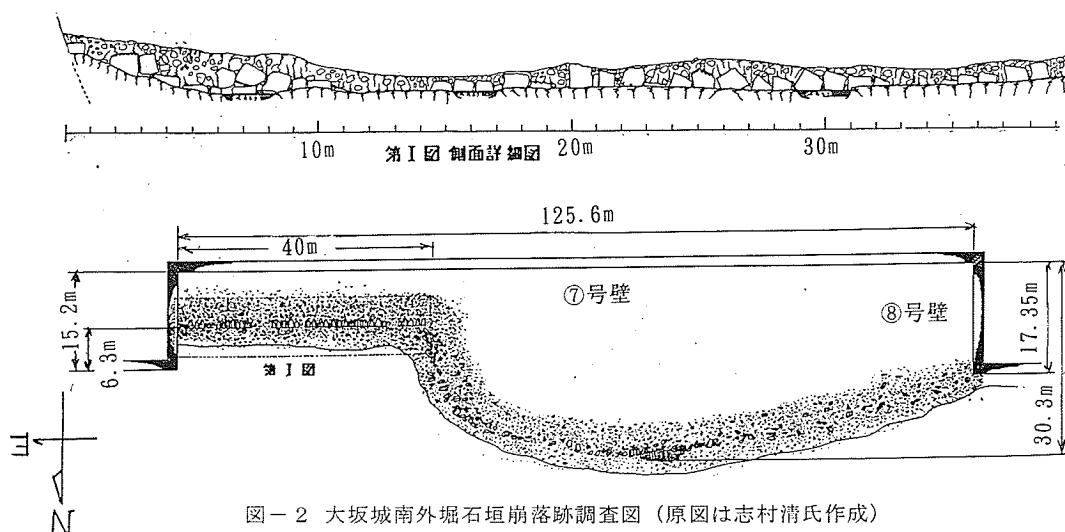


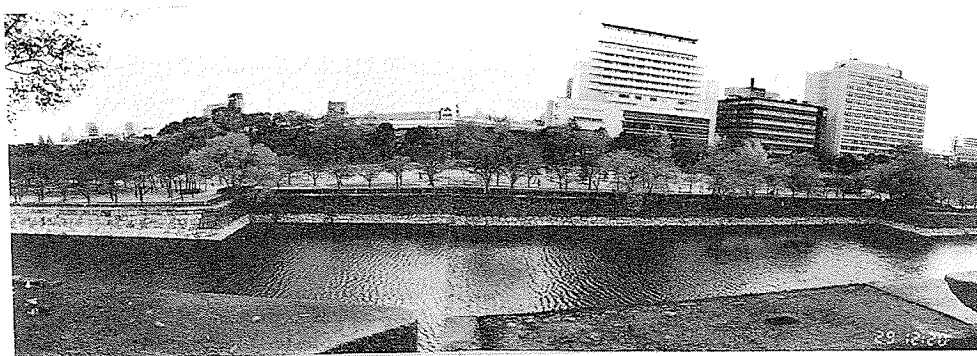
写真-1 大坂城南外堀概観

まず、最初に直線状の東部分から検討していくと、石材は大きいもので小口の一辺およそ0.8～1㍎、控えの長さ(奥行き)およそ2㍎の花崗岩の割石で、現在の大阪城石垣にある石垣石とほぼ同じ大きさで同様に加工されたものである。更に石のあるものには刻印のほどこされているものもあることから、これらの石が徳川幕府による大阪築城時に切り出されたものであることはまず間違いないものと思われる。

また、これらの石は⑦号壁から北へ8～9㍎でごとく小口を整えて北面する石列になっていること、しかも一部に2段に積まれている箇所が残されており、こうした点からみて、これらの石材群はかつてここに積まれていた石垣の残存部分であろうとみなしうるのである。その場合、これらの石材の前後に散乱する多数の小石群は石垣の裏込めとしての栗石と考えられる。



図－2 大坂城南外堀石垣崩落跡調査図（原図は志村清氏作成）



写真－2 大坂城南外堀石垣⑦号壁付近

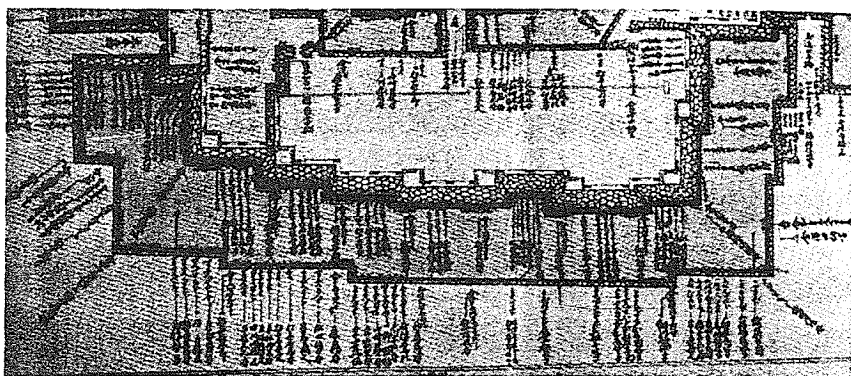
一方、西部分は、おおよ幅86にわたって北向きにゆるやかな弧を描いた状態で石材が散乱するという状況を呈している。これらの石材群も東部分の石材群と同様、大坂城用に切り出されたものである。結局、これらの石材群は元来一連のものであって西半分の状況は、それがあ時期に崩壊した名残であるとみなすのが適当であろうと考えられる。

さて、西半分の石垣の崩壊状況は、⑧号壁東端から40～50の地点を中心点として北北東方向に崩れ落ちたものであり、崩壊部の幅は、現状でおよそ86に達する。しかも、かなりの大石がまとまって最大20近くも一気に前方へ押し出されるという石垣の大崩壊が歴史的にあった事を示している。おそらく、崩壊部より両方向の石垣においてもかなり広範囲で再築が必要とされる状況にあったであろうと推測できる。

南外濠石垣の再築

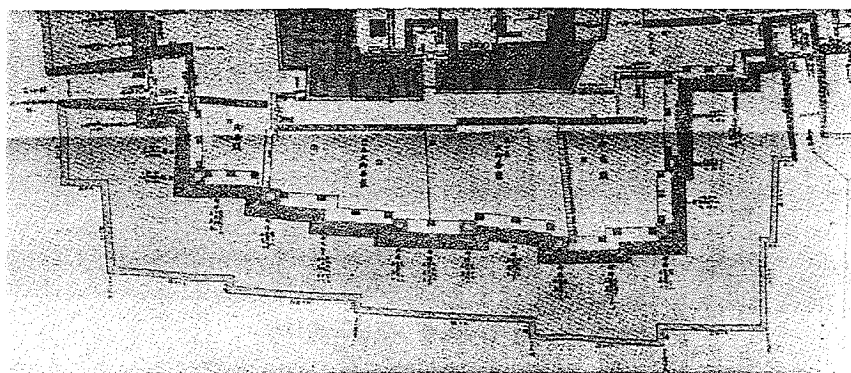
徳川幕府による大坂城普請は、およそ三期に分けて実施されたがその開始年時と場所は、第一期が元和6年（1620）で二の丸の東・北・西の三面と北の外曲輪（三の丸）、第二期が寛永元・二年（1624・25）で本丸、第三期が寛永五年（1628）で二の丸の南面という区分であつた。

図－3は元和六年（1620）から寛永五年（1629）に至る大坂城の全石垣普請にかかる諸大名の丁場割を示した図の一部である。ここに見られる南外濠の石垣線は寛永五年に築かれた時の状況を示している。図－4は慶安三～明暦元年（1650～55）頃の状態を示す大坂城図の一部で、南外濠の石垣線は既に、図－1に示す現在の石垣線と同じものになっている。また、寛永八・九年につくられた図－5に示す「大坂御城並町中之図」と題する絵図の一部では、南外濠の石垣線は既に図－1



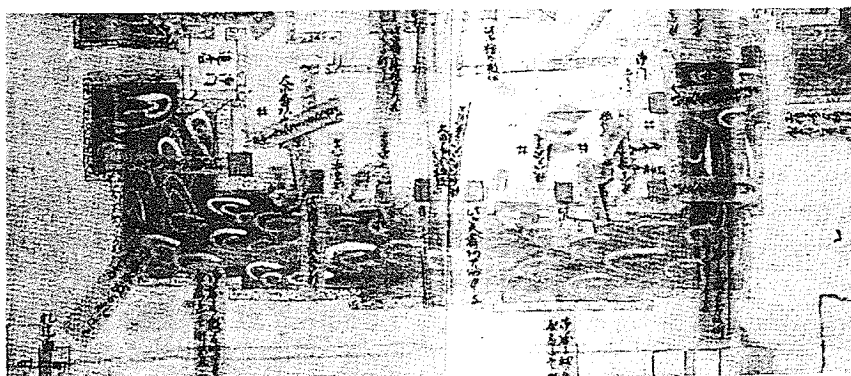
大阪城天守閣蔵

図一 3 大坂城普請丁場割之図（模）部分



大阪城天守閣蔵

図一 4 大坂御城図（縮・模）部分



南波松太郎氏蔵

図一 5 大坂御城並町中之図部分

および4の状態に変化している。

これらの図内容の比較と石垣の崩壊残存石状態より、図一3に見える長大な石垣がある時期に崩壊したため、再度築き直すことにしたが、その際、今後の崩壊を防ぐ技術的配慮としてこの石垣平面形状に屈曲部を設けたことが推測できる。

このような大規模な再築工事が行われた時期は、図一3・4・5によって寛永六年（1630）から同九年（1634）に至る4年間にしぼられることになる。

ところで、「熊本県資料 近世篇第三」に収める細川家資料によれば、崩壊した石垣の再築工事が寛永七年（1630）に実施されており、その工事に動員された大名は、寛永五年における第三期工事の時とほとんど同じである。このことは、再築場所、すなわち、崩壊場所が南外濠であったことを示すとともに、再築範囲が相当大規模なものであったことを示している。

以上の考察によって、大坂城南外濠の濠底から発見された石材群は、寛永5年に実施された第三次の石垣普請の際に積まれたもので、それが何らかの理由によって崩壊したため、寛永7年に普請を担当した諸大名を再動員して築き直したこと、その際、石垣の再度の崩壊を防ぐため寛永5年築造時には270 cm にも及ぶ長石垣であったものを、石垣平面形状に屈曲部を設けて鍵の手状としたこと（その結果、今日見るような⑥～⑧号壁となった）が推測されるに至った。

ここで示した石垣再築の方法は、石垣の平面形状、すなわち三次元効果が石垣の安定に大きく関係することを、石垣断面の反り勾配と共に当時の石垣普請として熟知しもちいていた事を伺わせる事例である。

以下に、これらの力学現象について考察する。

石垣構造の三次元効果

大坂城のような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り、過去の石垣崩壊事例でも出角部付近が長さ方向中央部に比べて安定な状態であったことや土圧論による工学的判断からも、三次元効果を考えることは妥当なことであろう。ただ、石垣の長さ方向にどの程度

の範囲まで三次元効果が及ぶと考えられるかは明確ではない。

ここでは、簡単な力学的検討として、石垣の平面的な長さ、すなわち出角部から出角部および入角部から入角部までの一辺の長さを石垣高さ（濠底地盤面よりの高さ）で除した値（これを石垣構造比と呼ぶ）から力学状態を調べた。

図一6は、大坂城全堀における石垣長さと石垣高さの関係、図一7に石垣高さとし石垣構造比の関係を示す。両図より石垣高さとし平面形状の決定（縄張り）の際には、出角部を多く作ることで石垣が高くなれば石垣長さを短くした、すなわち、石垣高さが高くなるほど石垣構造比を小さくしたのではないかと考えられる。たとえば、南外堀の城内側石垣は高さが17.4 m から18.2 m の間にあるのに対して石垣構造比は2.47～4.6と小さいが城外側では石垣高さが10.6 m に対して7.31から13.68と大きい。⑦号壁面部では、再築前の石垣構造比は25.47で再築後では7.31である。

これらの検討より、石垣構造比により石垣構造の安定状態は大きく影響されることは容易に推定できる。石垣の支持地盤特性や施工状態が同じであれば石垣構造比が大きい程、石垣は静的にも耐震的にも不安定状態に向かうことになる。

大坂城の石垣平面形状の縄張り時に石垣構造比が考慮されたことが推測できるが、歴史文献学上の記録としては確認できていない。

石垣勾配と石積み角度の力学的検討

石垣の積み方や勾配などは、普請の年代によって特徴がある。初期（天正・文禄）の石垣の勾配は直線的で、その後曲線を持った形状となる。

石垣のいわゆる「扇の勾配」は、静的および耐震的に有利であることが、大坂城石垣が建設後、今回の阪神・淡路地震をふくめ過去5回の大地震を経験しているにもかかわらず現在まで保全されていることから伺える。

石垣断面の反り勾配の付け方には、「唯子一人伝」等で各種の方法が示されている。大坂城の石垣勾配がいずれの方法によったかは明確ではないが、「唯子一人伝」に示されたような技術系譜によるものと

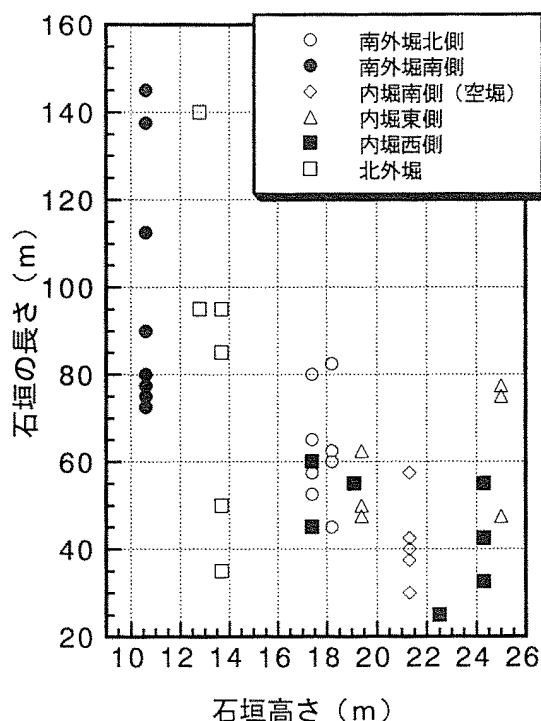


図-6 石垣高さと石垣長さの関係

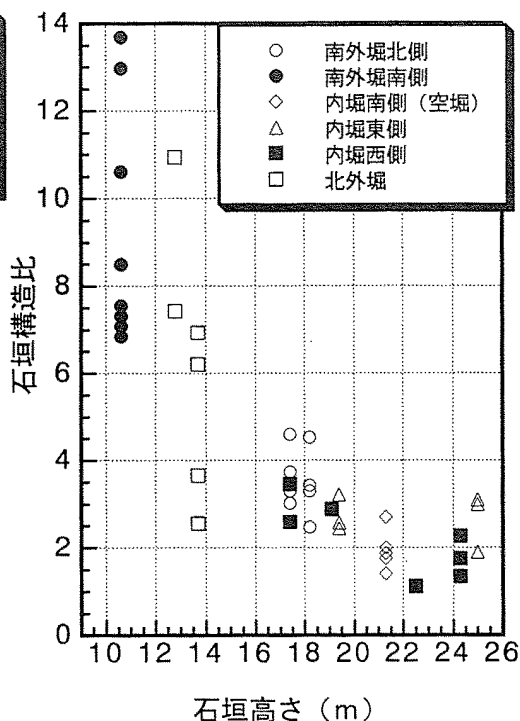


図-7 石垣高さと石垣構造比の関係

いえよう³⁾。

石積み工法では、石の核に圧力の合力の入る曲線が石の力学上より合理的である。時代とともに、また石垣高さが高くなるほど石垣勾配が直線から反りの持った曲線に移行した歴史的事実は、石垣の反り勾配が経験的に優れたものとして導かれたものであることを示しているといえよう。

写真撮影より推定・モデル化した出角部の高さ2.4mの石垣形状をもちいて、定性的な力学状態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。石の積み上げに角度をもたせた現状断面と石を水平に配置した石垣断面を用いた自重解析、水平方向に重力の20%の荷重をかけて震度法による解析を行った。これらの解析結果より最大主応力面と石垣底面の角度の関係を比較し安定性を検討した。

図-8に現状、図-9に水平に石を配置した場合での自重解析、また図-10に現状に対して震度法による解析を行って得られた主応力ベクトル図を示す。図-11は三つの解析での最大主応力面と石底面の関係を表したものである。

これらを比較・検討してみると、現状の角度を持った石底面の方向は自重解析から得られる最大主応力面にほぼ等しい。このことは、現状の石垣構造は力学的合理性を定性的に有することを示している。それに対し、石を水平に積んだ場合では下方に位置する石垣ほど最大主応力面と石の底面の角度差は大きくなっており石垣が前方にはらみ出しやすい構造となっていることがわかる。また、震度法による解析では、図-12に定義した θ がマイナス方向に少し変化している程度である。地震時においても安定な力学状態となっている。しかし、主応力の大きさは、高さ方向3分の2位から下の位置で静的な場合に比べてかなり大きくなっている。

これらの簡単な解析結果からも、出角部での反り勾配をもち石に角度をもたせた石の積み方は、静的・耐震的にも力学的合理性を有することが推測できる。それに対し、出角部以外の石垣の長さ方向中央部では、石の積み方が出角部に比べ多少水平に近いことより石垣が膨みやすい不安定な状態にあることが考察できる。このことは実際の各所での石垣変

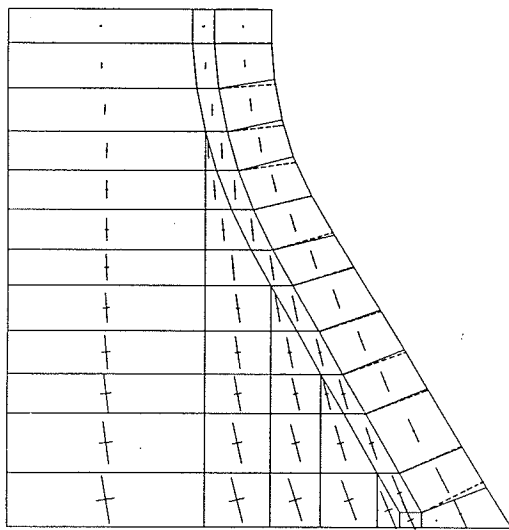


図-8 FEM自重解析による主応力ベクトル図
(現状断面・高さ2.4 m)

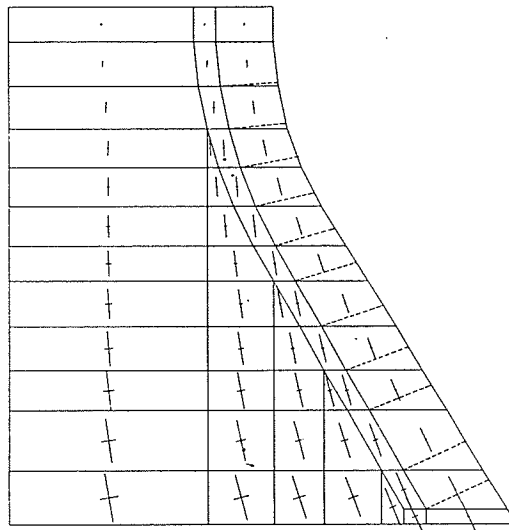


図-9 FEM自重解析による主応力ベクトル図
(水平な石の配置断面・高さ2.4 m)

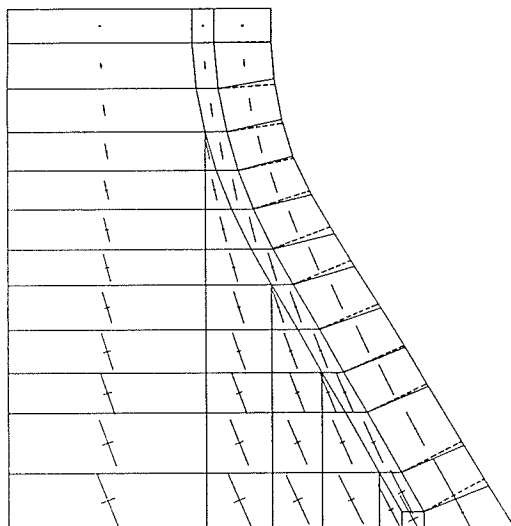


図-10 FEM解析による主応力ベクトル図
(現状断面に自重及び水平に重力の20%
荷重をかけた解析・高さ2.4 m)

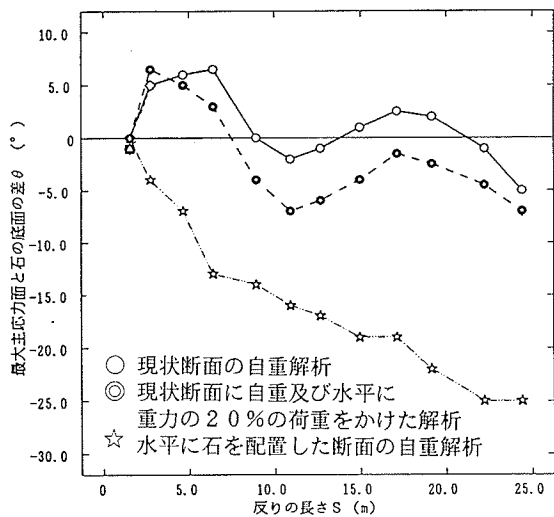


図-11 反りの長さSと、最大主応力面と
石底面のなす角 θ の関係

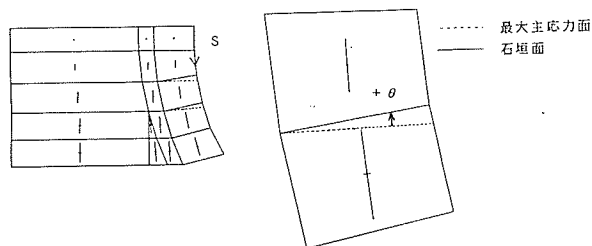


図-12 FEM解析での主応力面と石底面の関係説明図

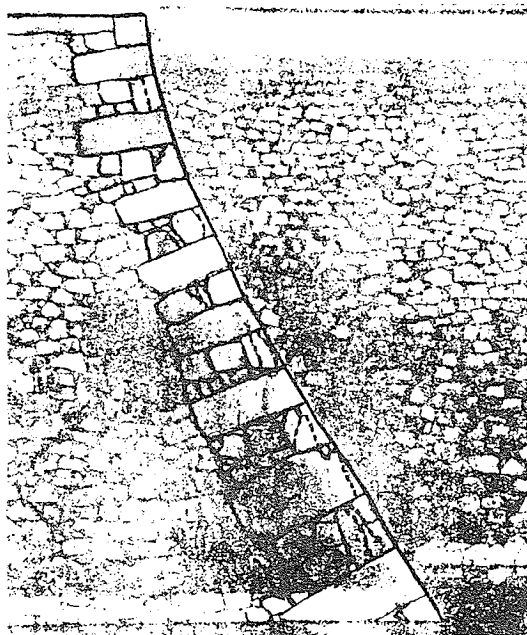


図-1 3 石垣におけるクラック状態
(西外堀城内側千貫櫓部)

形挙動と符合している。また、石垣の反り構造で石底面と最大主応力方向が直角であることが、石の接合のために接着材を必要としない我国の独自の石垣構造を可能としたといえよう。

次に、有限要素法解析とあわせて大坂城石垣の力学的安定状態の考察をするために、大坂城石垣全周の出角部の石垣におけるクラックの入り方を調べた。その一例を図-1 3、1 4に例示する。クラックは、高さ方向3分の2付近より下部で石の表面方向に生じている。ほとんどの出角部の石でクラックがほぼ同様な傾向で入っている。石と石との接し方は、面ではなく多数の点での接触に近い状態であることより、これらのクラックは、たとえば地震時での圧縮力の増大により生じた割裂クラックではないかと推測できよう。

おわりに

石垣構造の破壊形態は、全体的な滑り崩壊、膨み出し現象とそれが進行した状態での崩壊、地震時での動的な崩壊、等に分類できる。また、石垣構造の安定には、石垣の高さおよび平面形状、石垣基礎の支持地盤および構造、土圧・水圧と関連しての石垣

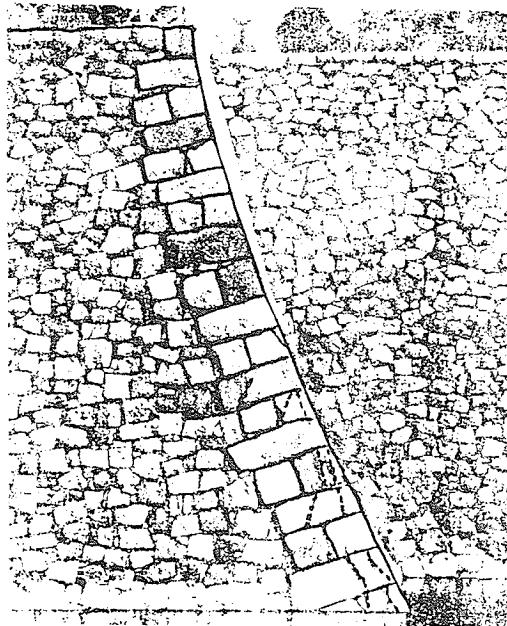


図-1 4 石垣におけるクラック状態
(西外堀城内側)

背面の裏込めおよび地山状態、石の積み方および接合状態、石垣断面勾配、濠内の水の有無および水深、石垣の上部構造、石の大きさおよび強度・変形特性、石と石との接着方法、等の多くの要因が関係する。

大坂城石垣普請におけるこれらの技術系譜について、歴史的な面、地盤・岩盤工学的な面、等の多方面から現在研究を進めている。本論文は現時点での成果を整理したものである。

なお、本研究は、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) 中村 博司：大阪城南外濠濠底に眠る石垣遺構について、大阪城天守閣紀要、第13号、1985年
- 2) 渡辺 武：図説大阪城再見、大阪都市協会、1991年。
- 3) 北垣総一郎：石垣普請、法政大学出版局、1993年。