

個別要素法による城郭石垣の安定性解析*

The stability analysis of castle masonry stone wall by the distinct element method

笠博義^{*2} 西田一彦^{*3} 西形達明^{*4} 森本浩行^{*5} 阿波谷宜徳^{*6} 山本浩之^{*7}

By Hiroyoshi KASA Kazuhiko NISHIDA Tatsuaki NISHIGATA Hiroyuki MORIMOTO
Yoshinori AWATANI and Hiroyuki YAMAMOTO

概要

城郭石垣の補修工の一つとして、抜け石を補充する間詰石工があるが、この工法による石垣の安定性向上効果を工学的に評価した事例は見当たらない。本研究では、実際の城郭石垣における間詰石工を対象に、レーザー探査によって求められた内部情報に基づいたモデル化を行い、個別要素法による解析を行った。その結果、石材間の間隙に飼石・間詰石を充填する間詰石工が、静的な条件においても、地震時においても石垣の安定性を向上する効果があることが確認された。

1 はじめに

我が国における城郭では土塁や石垣が構築される例が多く、明治維新期の取り壊しや火災等により建造物が消失した後に、こうした基礎構造物のみが往時の姿を留めているところも少なくない。こうした城跡は戦前～高度成長期にかけて学校や市役所等または都市内公園などの公共施設用地として活用されることも多かったが、近年になって、歴史的文化的価値が見直されるにつれて、櫓や天守などの建造物の復元・整備事業が進められる事例が増えてきた。こうした中で、石垣についても適切に維持・管理していくことが求められつつある。これは、貴重な文化財を後世に伝承する意味でも重要であるが、同時に多数の人が訪れる公園の安全管理や地震などに対する防災的な側面でも大きな課題となっている。

従来より、こうした城郭石垣の補修や維持・管理のあり方については、歴史的な側面や文化的価値に関する議論がなされてきたが、構造物の安定性に関する工学的な議論を綿密に実施した事例は多くはない。これは、こうした工事では伝統技術による施工を基本としなければならぬことに加えて、空石積みなどの石垣の安定性評価技術が未確立であることも一つの要因であると考えられる。

こうした背景から、本研究は、城郭石垣の安定性解析技術として個別要素法を適用することを試み、石垣の安定性の向上のために間詰石、飼石補充工を実施した吉田

城の石垣補修工事を事例¹⁾として、石垣のモデル化手法を提案すると同時に、補修工事による安定性向上効果について検討を行ったものである。

2 石垣安定解析手法

石垣の安定性評価手法としては、本研究で適用を試みる個別要素法の他に、有限要素法や不連続体解析手法(DDA)といった数値解析手法が適用されている。このうち、有限要素法による解析では本来独立した石材からなる石垣を表現するために、ジョイント要素を用いるとともに、裏栗石や間詰石などを表現する特殊な要素を用いる手法などが提案されている²⁾。また、DDAによる解析では、新たに構築された石垣について正確にモデル化し、実際の載荷実験との比較検討から、正確な評価が可能であることが報告されている³⁾。一方、個別要素法による解析は、これまで落石や土石流など、独立している要素が一体となって変形する現象の評価に多く用いられてきた手法であり、石垣への適用も検討されてきた⁴⁾が、地盤や石垣のモデル化やパラメータの設定方法などに課題が残っているとされている。

本研究では、こうした解析手法の中で地震時の安定性評価が容易であり、動的条件における石垣の変状を再現するのに適していると考えられる個別要素法を用いることとした。同時に、不定形からなる石材を極力現況に近い形に表現できるように工夫をすると同時に、石垣背面構造をモデル化するに当たり、現地での非破壊検査結果を活用することで、より正確な評価ができるようにした。また、地盤の物性を示すパラメータの設定に関しては、別途行った現場実験データ⁵⁾などを参考にして検討を行うことで、解析結果の妥当性を向上させるものとした。

3 検討対象石垣の概要

(1) 吉田城の概要

*keyword: 城郭石垣、安定解析、個別要素法、間詰石

*2 正会員 博士(工学) ㈱間組本店環境事業部
(〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

*3 正会員 工博 関西大学名誉教授
関西地盤環境研究センター

*4 正会員 工博 関西大学工学部都市環境工学科

*5 正会員 博士(工学) 京都市立伏見工業高等学校

*6 ㈱間組名古屋支店

*7 正会員 ㈱間組本店技術第二部

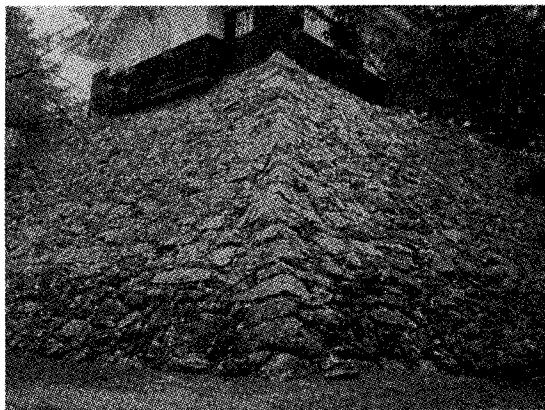


写真-1 吉田城鉄橋下の石垣（北西角）

今回の検討対象としたのは、愛知県豊橋市にある吉田城である。この城は現在の豊橋市役所付近に 1505 年（永正 2 年）に築造されたもので、当初今橋城と呼ばれていたものが後に吉田城と改称されている。現在、城跡は市役所、美術博物館、学校などの公共施設として利用されている他、旧本丸およびその周辺は豊橋公園として一般市民に開放されており、内堀や石垣が比較的良好な状態で保存されている。この公園内には 1954 年（昭和 29 年）に RC 造で再建された三層の鉄橋（くろがねやぐら）が吉田城のシンボリックな建造物として存在する（写真-1）。今回の補修工事はこの橋下の石垣に対して実施された。

鉄橋下の石垣は、高さが 10m 程度の北面および西面と 2.5m 程度の低い石垣からなる南面および東面からなり、このうち東面、南面および北面の上部は鉄橋再建時に解体・積み直されたものと考えられる。これに対して西面と北面の中部～下部は古い石垣が残っており、中でも北西角部は建造当初の石垣である可能性が高いとされている。この石垣は、写真-1 に示したように、全体に緩勾配であり、直線的形状を呈する。また、北西角部では野面石による算木積み構造が見られることから、石積み技術の発展を知る上でも貴重な石垣である。

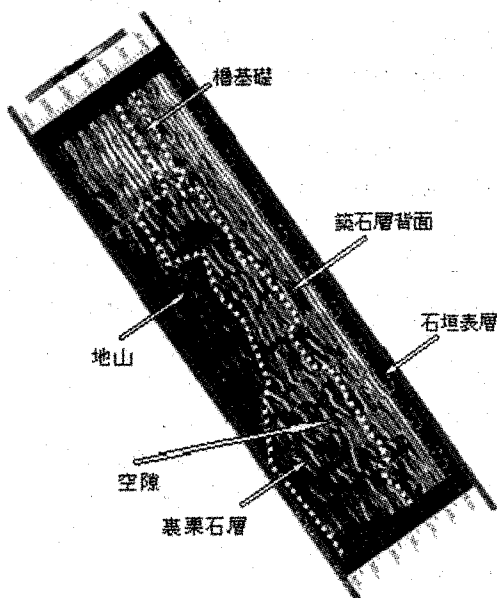


図-2 レーダーによる石垣背面探査結果

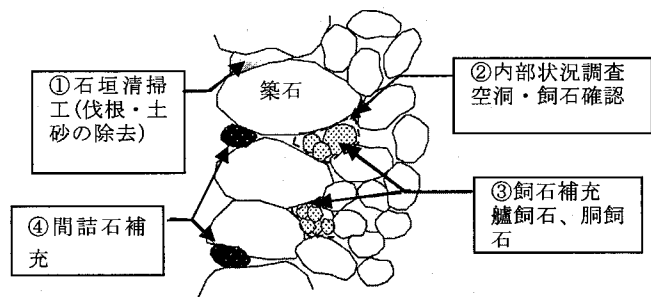


図-1 石垣補修工事の概要

(2) 石垣補修工事の概要

今回の補修工事は、高さが低く、石の積み方自体にも問題が大きいと判断された南面および東面は解体・積み直しを中心に、北面および西面は飼石および間詰石の補充による補修工法（間詰石工と称する）を行なうこととした。これは、後述する石垣の健全性調査結果をもとに検討を行ったもので、石垣の不安定化要因と橋直下石垣であるという条件を考慮して決定したものである。すなわち、本工事は野面石の石材同士の間隙に流入した土砂や植物の根を除去し、その部分に飼石および間詰石を充填し、石材間の噛合い効果を高めると同時に土砂流入や植物の侵入を防止して石垣の不安定化を抑えるものである。この補修工事の実施内容を模式的に図-1 に示した。

こうした間詰石工はこれまでも実施されて、経験的に安定性向上効果があることが知られてきたが、数値解析等の工学的な手法によって安定性に対する影響を評価した事例は見当たらない。

4 解析モデルの作成

(1) 石垣背面状況のモデル化

石垣背面のモデル化に際しては、石垣の健全性調査として実施されたレーダー探査結果を活用した。これは電磁波反射法による探査を石垣表面に沿って実施し、測線に沿った断面情報を得るものである。その結果は図-2 に

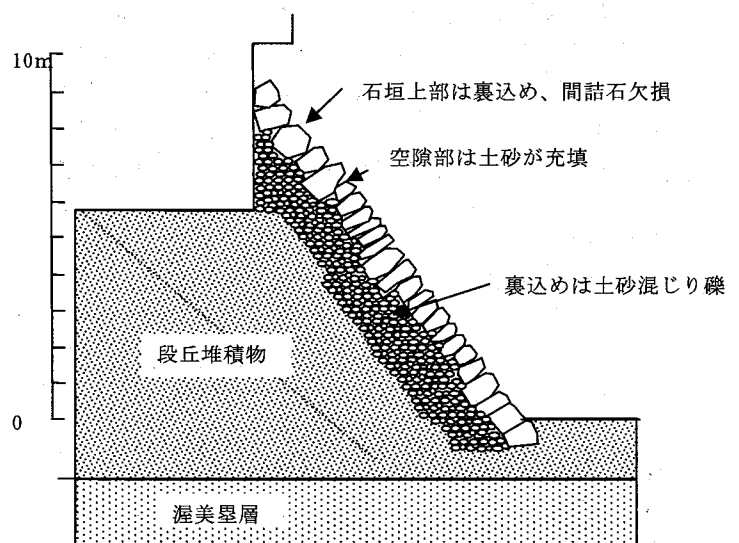


図-3 石垣背面構造の推定図

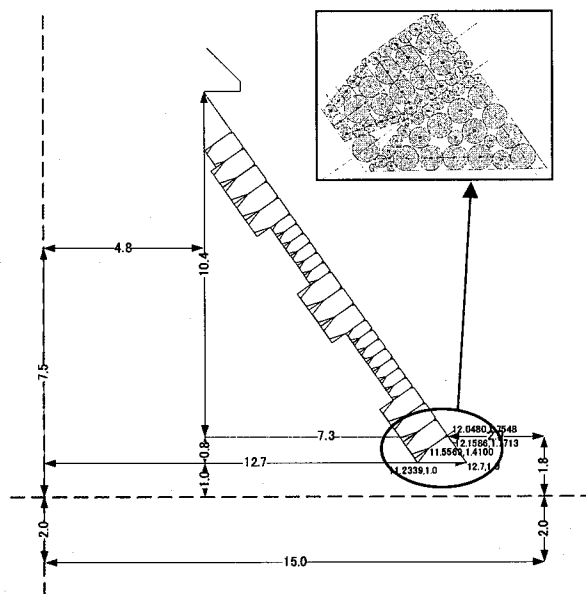


図-4 解析地盤モデルと石材のモデル化

表-1 解析に用いたパラメータ

名称	強度 (N 値)	粒径 (cm)	粒子間 摩擦係数	粒子間 粘着力 (kN)
段丘 堆積物	25~47	3~7.5	1.0	10
渥美垠層	10~40	3~7.5	1.0	1
築石	—	10~20	2.0	0
裏栗石	—	—	1.0	0
飼石、 間詰石	—	—	1.0	0

示したような電磁波の反射画像として得られ、それに石垣の孕み出しの有無等の変形状況なども考慮して図-3に示した石垣の背面構造を推定した。また、吉田城では、隣接した部分で市役所等の建築工事が実施されたことから、何地点かでボーリングによる地質調査が実施されており、これらのデータを基に地盤構造について推定した。

こうした結果をもとに構築したのが図-4に示した解析モデルである。このモデルは、一部単純化しているものの、全体としては図-3に示した断面構造を極力反映させたものである。

(2) 石材のモデル化

石垣を構成する石材は、石垣の主構造体をなす築石、石垣背面で地山との間に構築される裏栗石、築石同士の間隙を埋め上下の築石に確実に応力を伝達するための飼石と主に表面の間隙を埋める間詰石等から構成される。これらの石材のうち、築石は構築された時代や地域に加えて構造的な機能などから、大きさや形状が異なり、築石の状況は石垣の安定解析上における影響も大きいものと推定される。このため、解析においては築石の形状や

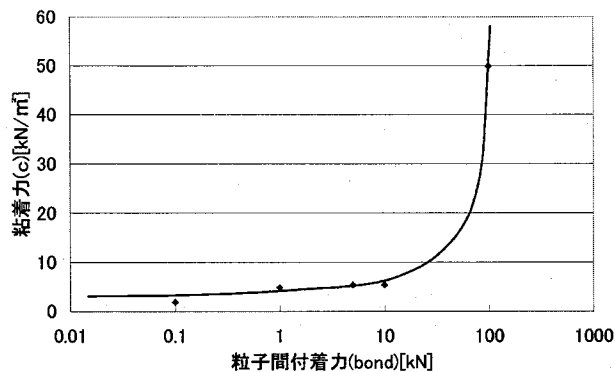


図-5 摩擦係数と内部摩擦角の関係

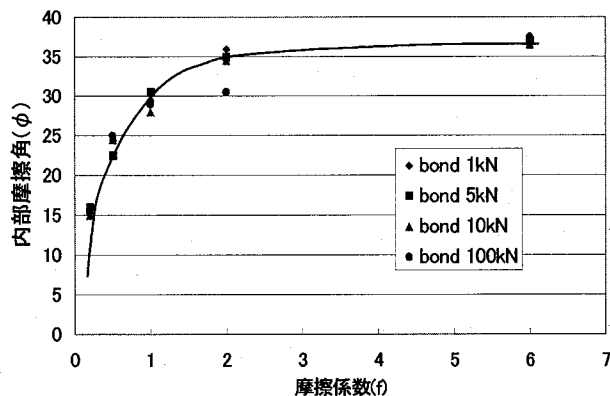


図-6 粒子間粘着力と粘着力の関係

大きさを極力正確に表現する必要がある。

このことから、本研究では、図-4中に示したように、築石を多数の要素を剛結した要素として表現することとした。こうすることにより多様な形状・大きさの石材を自由に表現することが可能となり、より現状に近い条件を反映した解析が可能となった。

(3) 地盤、石垣の物性値

個別要素法では、個々の要素に対して粒子間摩擦係数(f)と粒子間粘着力(bond)を与える必要がある。ここで、粒子間摩擦係数は各部材の内部摩擦角(ϕ)に、粒子間粘着力は粘着力(c)に相当するものと考えられるが、両者の関係は明確ではない。そこで、解析に先立って、両パラメータと対応する地盤の物性値について、8.0m×4.0mのモデル地盤を個別要素で構築し、このモデルを用いた仮想的な載荷試験を行い、入力パラメータと地盤乗数間の関係式を算出した。その結果を図-5、6に示す。これらの図に示したように、粒子間摩擦係数と内部摩擦角、粒子間粘着力と粘着力の間には一定の関係が認められ、内部摩擦角 35° 以下、粘着力 20kN/m^2 以下の領域においては実質的に地盤物性値を入力パラメータに読み替えて解析を実施することができるものと考えられる。

以上のような検討結果を受けて、地盤のボーリング結果等を用いて決定したパラメータを表-1に示した。ここで、地盤を構成する段丘堆積物および下位の渥美垠層(細

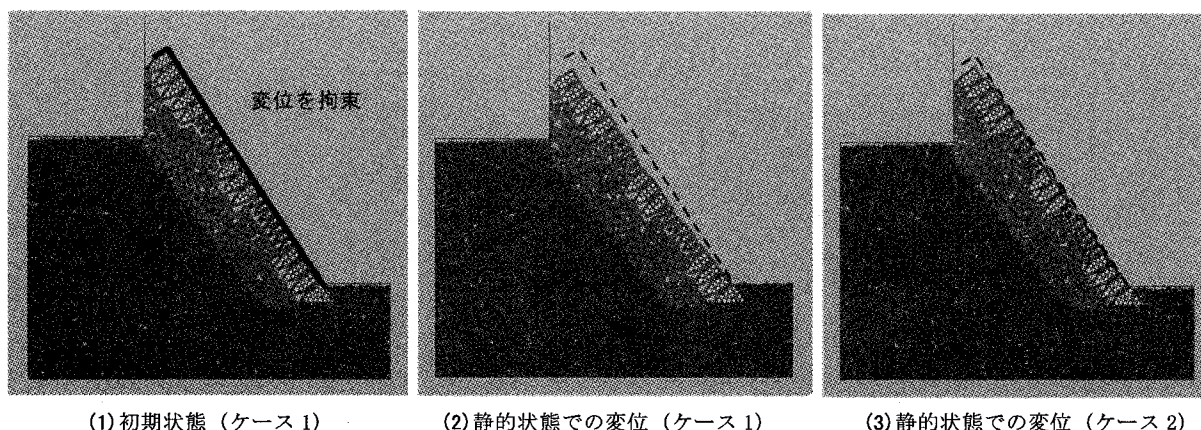


図-7 静的状態での変位状況

砂)を構成する部分は粒径3~7.5cmの個別要素の集合体としているが、これはそれぞれの実際の地盤を構成する粒子の寸法を示しているものではなく、一定の範囲でばらつきをもった粒子の集合体として地盤を表現したものである。こうすることにより、解析領域の要素数を解析可能な範囲内に収めることが可能となった。

また、粒子間摩擦係数(f)については、築石、間詰石が内部摩擦角換算で 30° とやや小さめの値となっているが、これは以下に示す理由によるものである。すなわち、図-6に示すように、 $\phi > 35^\circ$ では摩擦係数(f)の違いが内部摩擦角(ϕ)にほとんど反映しないこと、本石垣の築石が野面石であり、石材間の接触面が加工材に比較して小さいと推定されることや石材間の空隙が多いことおよび裏栗石との差を明瞭にするためである。なお、別途行なわれた原位置での石材摩擦実験では、打ち込みはぎによる加工石材での値ではあるが、内部摩擦角(ϕ)は $30^\circ \sim 40^\circ$ の値を示しており⁵⁾、今回の入力値はほぼ妥当なものであると考えられる。

(4) 解析手順

個別要素法による解析では、小さな粒子(個別要素)の集合体として地盤を構築することとなる。これらの地盤を構成する要素を所定の領域に自重で落下させることにより、背面地盤を構成した後、地盤形状を整形した。

次に裏栗石も同様にして形成し、前に述べた方法で作成した築石を所定の座標に設置して石垣を構成した。なお、この段階では石垣の全面に変形防止用の境界を設けており、石垣の変形を許さない状態としている(図-7(1))。

こうした方法により補修工事前の間詰石や銅石が欠落し、築石間の空隙が大きなモデル(ケース1)と、間詰石工実施後のモデル(ケース2)を構築した。

5 解析結果

(1) 静的解析結果

本研究における静的な状態での解析として、前述の変形防止用の境界を解除し、その後石材が安定した状況における変位量を評価することで静的な安定性を評価した。これは、石垣の施工直後は理想的な安定状況にあったものと仮定し、その後地盤や裏栗石の圧密沈下や石材の緩

みなどが落ち着いた段階の変形状況を表現したものを静的な状態での変形であると解釈したものである。

各ケースの解析結果を示したものが図-7(2)、(3)である。この図から、間詰石工を実施していないケース1では実施後のケース2と比較してやや変位量が大きく、全体的に背面に変位しているが、いずれのケースでも石垣表面は大きくは変位していない。このことから、地震動などが加わらない状態ではこの石垣は全体的に安定している状態にあると評価される。さらに、間詰石工はこうした静的な条件下においても安全性向上の効果があるものと言えることができる。

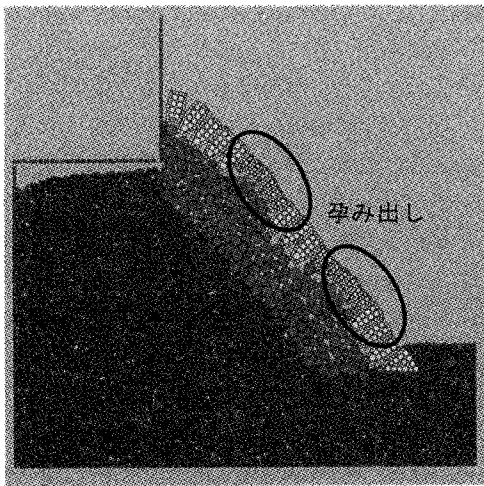
実際に吉田城の鉄櫓下の石垣では、外見上はほとんど孕み出しが見られず、ほぼ直線的な勾配(約 50°)を呈していることから、解析結果は現状にほぼ一致しているものと考えられる。

(2) 動的解析結果

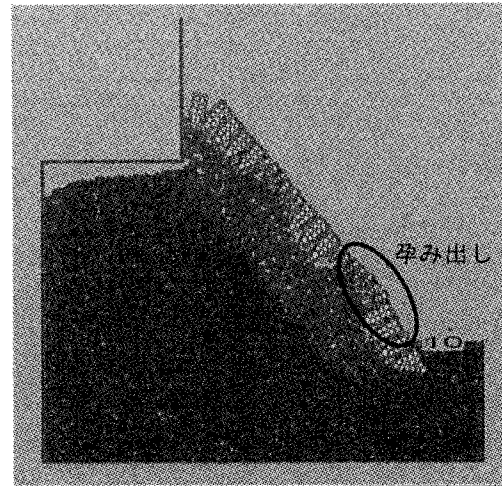
地震時の石垣の安定性を評価するために、それぞれのケースにおいて200galの地震波10波および20波を入力した結果を図-8に示す。なお、この解析では石垣下部の地盤変形を拘束しているが、これは地震動により地盤を構成する要素が対象領域外へと移動してしまい、地盤が全体として緩くなってしまう現象を抑制するためである。実際の現地状況も石垣下部の地盤はかなりよく締まっており、極端に支持力が低下することは考えにくい。

地震動10波を入力した状況においては、ケース1では全体に変位が発生し、根石上部と櫓下の控えが小さい部分で孕み出しが発生している。これに対して補修工を実施した石垣では、ケース1同様に石垣下部に孕み出しが見られるものの、全体的に変形は抑制されている。さらに地震動20波を入力した段階では、ケース1では石垣が大きく変形し、ほぼ崩壊に近い状況にあるのに対して、ケース2は石垣下部で大きな孕み出しが発生するものの石垣の構造体としては、その形を維持している。

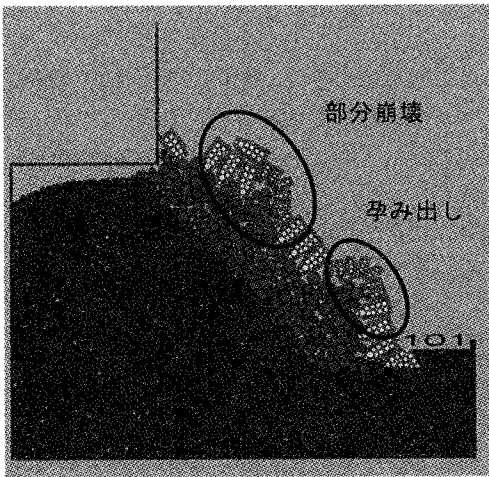
こうした解析の結果から、間詰石工による石垣補修工法は石垣の不安定化の抑制効果があり、特に地震時にはその効果が大きいことが示された。



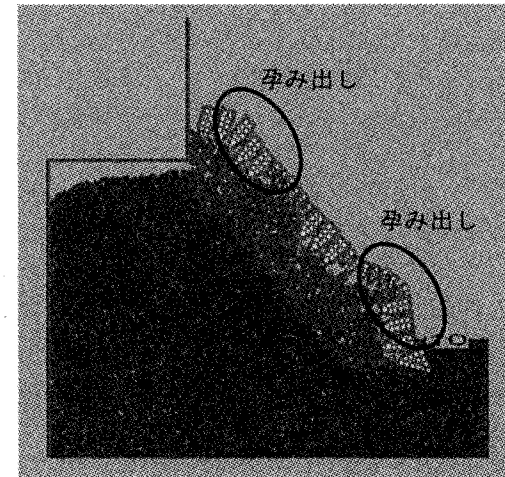
(1)地震動 10 波入力時 (ケース 1)



(2)地震動 10 波入力時 (ケース 2)

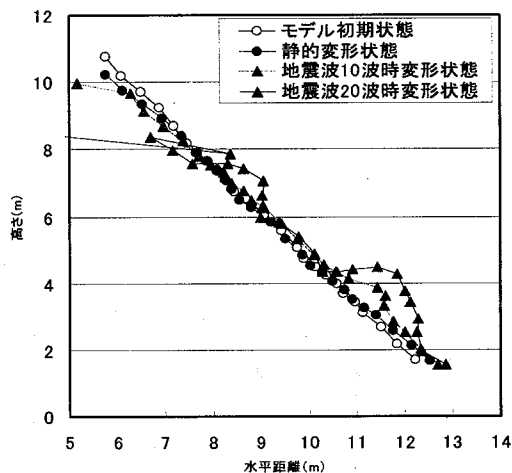


(3)地震動 20 波入力時 (ケース 1)

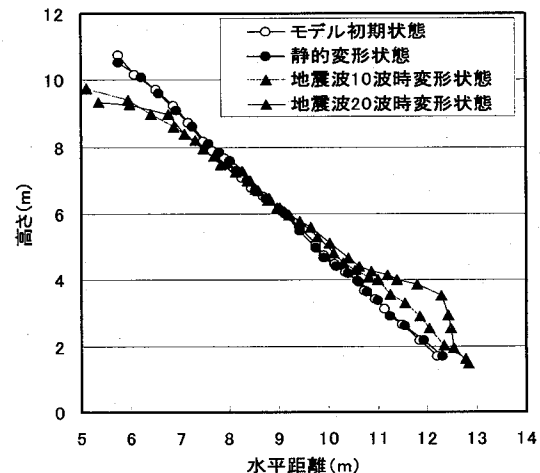


(4)地震動 10 波入力時 (ケース 2)

図-8 動的状態での変位状況



(1) ケース 1



(2) ケース 2

図-9 各状態での変位量のまとめ

6 間詰石工の効果の検討

以上の解析から、間詰石工は石垣の不安定化を抑制する効果があることが示された。各ケースにおける変位量を比較検討するために、初期状態から地震動 20 波を入力した段階での石垣の変位量をまとめたものが図-9 である。この図に示したように、ケース 1 では地震動 10 波入力において石垣下部（高さ 3～4m）で最大約 70cm

程度の孕み出しが生じ、20 波の場合はこの位置での孕み出しが 160cm 程度まで増大する。さらに、石垣上部（高さ 6m 以上）では孕み出しと同時に地震動で緩んだ背面への転倒が発生している。なお、ここで、孕み出し量は初期状態の石垣表面に対して同じ高さにおける石垣の水平変位量の中で最大となるものを示すものとした。

一方、ケース 2 では地震動 10 波入力時では、石垣下

表-2 最大孕み出し量のまとめ

ケース	最大孕み出し量 δ (cm)		
	静的状態	地震動 10 波	地震動 20 波
1	27	69	156
2	21	59	128
孕み出し 低減率(%)*	22.2	14.5	17.9

$$* \text{孕み出し低減率}(\%) = (\delta_{(\text{ケース}2)} / \delta_{(\text{ケース}1)}) \times 100$$

部で最大で約 60cm の孕み出しが生じ、20 波ではおよそ 130cm に拡大する。また、石垣上部はケース 1 同様に背面への転倒が生じる。これらのことをもとに、間詰石工の効果を検討するために、孕み出し量についてまとめた結果を表-2 に示した。この表に示したように、間詰石や銅石の補充により、ケース 2 ではケース 1 に比較して 14～18% 孕み出し量が低減しており、明確に地震動による変位が抑制されていることがわかる。こうした間詰石による変位抑制効果は前述の現場実験⁹⁾でも確認されており、今回の解析結果はこれを裏付けるものであると考えられる。

一方、石垣の安定性を示す指標としては、西田らが石垣の高さに対する孕み出し量の比で表す孕み出し指数を提案しており⁶⁾、今回の石垣の平均高さを 10m とした場合、この指標は地震動 10 波では 6～7%、20 波の場合は約 13～15% の値となる。前述の研究によると、経験的な値として孕み出し指数 6% 以上の石垣は不安定な状況にあるとされており、地震動 20 波の場合は補修後のケース 2 においても石垣はかなり不安定な状況になるものの、地震動 10 波の場合は、間詰石工により石垣の安定性は、ほぼ限界値ではあるが、孕み出し指数 6% 以内の領域まで改善される。

今回の動的解析において入力した地震動をそのまま実際の地震強度に置き換えて議論することはできないが、一般的に今回入力した 200gal の加速度は震度 5 強程度に相当するものと考えられている。ただし、実際の地震では 200gal の振動が連続して作用することはないことや、今回は地震動を正弦波として入力していることから、かなり厳しい条件となっており、概略的には、10 波入力のケース 1 で震度 5 強～震度 6 相当、20 波入力のケース 2 では震度 6 以上の巨大地震に相当するものと考えられる。

7 まとめと今後の課題

本研究では吉田城の石垣補修工事を対象にして個別要素法による安定性の評価を行った。特に地盤および背面地盤のモデル化や石材要素の構築方法に工夫を加え、より実際の石垣構造を正確に反映することに努めた。その結果、静的な条件下および地震動を加えた条件での石垣の変位状況を推定することによって同時に間詰石工が石垣の安定性を向上させる上で効果があることを解析的に確認することができた。

また、孕み出し量に着目した検討から、この補修工事により石垣の変位は 15～20% 程度抑制されることが示さ

れた。こうした効果は石垣の安定性向上に大きく資することとなり、石垣の維持・管理において、こうした補修工法の有用性が確認できたものと考えている。

なお、今回解析に用いた個別要素法は入力パラメータの設定方法等において、実際の地盤物性値を正確に反映させる方法が確立されておらず、こうした点については今後も研究開発を続けていく必要があるものと考えられる。すなわち、今回の検討は極力実際の石垣の状況を反映させての解析ではあるが、当然のことながら地盤、栗石、築石等からなる複雑な構造を単純にモデル化することの限界もあり、解析結果は必ずしも実際の変位を正確に反映するものではない。同時に、変位量についても実際の地震時における変位量を正しく表すものではないことに注意が必要である。

一方で、これまでほとんど定量的な評価が行われることがなかった石垣の安定性に対して、こうした数値解析による評価手法は、概略的な変位を予測し、いくつかのケースに対する比較検討が可能となることから、客観的な評価が可能であるという点で大きな意味を持つものと考えられる。特に、解体や破壊検査が容易に実施できない文化財的な価値を有する石垣に対しては、こうした手法が果たす役割は大きいものと考えられる。

今後は、解析技術の向上に努めると同時に、実際のさまざまな石垣において現地でのデータ収集や適用を進め、評価精度の向上に努めていきたいと考えている。

最後に、吉田城の石垣補修工事において多大なるご指導を頂いた、豊橋市都市計画部公園緑地課ならびに豊橋市美術博物館の関係者の皆様に心からお礼を申し上げます。

【参考文献】

- 1) 笠博義, 阿波谷宜徳: 櫓直下の石垣補修技術について, 土木学会土木建設技術シンポジウム 2006 論文集, pp.73～78, 2006.
- 2) 田中邦熙: 石垣の地震時挙動解析に FEM を適用する手法の可能性, 土木学会土木史研究講演集, vol.26, pp.287～298, 2006.
- 3) 西山哲, 大西有三, 大津宏康, 西村浩史, 梁川俊晃, 亀村勝美, 関文夫, 池谷清次: 不連続変形法 (DDA) による石積み擁壁の安定性に関する研究, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.1631～1632, 2003.
- 4) 森本浩行, 西形達明, 西田一彦, 玉野富雄: 個別要素法 (DEM) による城郭石垣の変位に影響を及ぼす地盤条件に関する考察, 土木学会土木史研究講演集, Vol.25, pp.317～322, 2005.
- 5) 笠博義, 阿波谷宜徳, 西田一彦, 西形達明: 石垣構成石材の原位置摩擦実験, 土木学会第 61 回年次学術講演会 IV, pp.457～458, 2006.
- 6) 西田一彦, 玉野富雄, 西形達明, 森本浩行: 城郭石垣断面形状の設計および構築に関する考察, 土木学会土木史研究講演集, Vol.21, pp.317～324, 2001.