

皇居東御苑内本丸中之門石垣の修復工事と 石垣修復支援システム

山内裕之・巽耕一・脇登志夫

皇居東御苑内本丸中之門石垣の修復工事を行った。高い精度を要求される特殊な石垣の修復工事において、石工をサポートする「仮想空間上で石材相互の干渉を予測」する技術等を創出して、工事を高品質で終らせた。それらの創出した技術をシステム化し「調査記録システム」「対話型設計シミュレーションシステム」「石垣安定検討システム」からなる「石垣修復支援システム」を開発した。この「調査記録システム」「対話型設計シミュレーションシステム」は連携している。3D レーザスキャナや写真測量により、3D モデル化された石垣及び個々の石材を、コンピュータ上の仮想空間で、石工や設計者と対話をしながら、石積のシミュレーションを行う。普請当時の形状を推定し、最適な石積み設計を行い、石工を支援するシステムである。

キーワード：歴史的遺産、3次元測量、3DCG、石垣修復支援システム、対話型設計システム、安定性検討、シミュレーション、石工

1. はじめに

日本には、修復が必要な歴史的な遺構としての石垣が、全国に100ヶ所以上あると言われている。これらの石垣は、江戸時代前半に普請されたものが多く、構築から400年前後の年月を経て、日本の歴史を語る貴重な遺産であり、維持管理し後世に遺すことが必要である。日本には、丁場からの石の切り出し、加工、据付という一連の流れで構成される石文化があり、各工程には伝統的な「匠の技」を持った石工が必要である。しかし、自然石積み工事の減少等により、伝統的技術そして石文化の伝承・継続も現在危ぶまれている。これに対し、石垣の修復を支援し工事の品質と生産性向上を目指した「石垣修復支援システム」は、伝統技術の伝承に大きく寄与するものと考えられる。

皇居東御苑の本丸中之門石垣（写真—1）は、1638年にその原形が熊本藩細川家により普請され、1703

年に地震で被災、翌年に鳥取藩池田家により修復されている。以後300年の年月の間に、はらみ出し、目地の開き、石材の剥離破損等が生じ、倒壊の危険性があったため、平成17年8月から平成19年3月まで修復工事を行った。中之門石垣は、特別史跡江戸城跡に指定されている。史跡である石垣の修復は、普請当時の形状・構造を検討・踏襲し、安定した構造に復元することが文化財の修復上重要な課題であり、既存石材の再利用が原則である。石垣の修復手法には定まった手法は無く、個々の案件で対応しているのが現実であり、十分な検証無しに修復されている場合もある。これに対し、石垣の修復を支援し工事の品質と生産性向上を目指し「石垣修復支援システム」を開発し、工事に適用した。システムは石垣の調査・記録・設計の一連の設計・施工作业を支援すると同時に、日本の石積技術の伝承をサポートするツールとすることも目指し、システム全体のコンセプトを「伝統技術と先端技術の融合された設計施工支援システム」とした。

2. 工事概要

(1) 中之門石垣修復工事概要

工事名：皇居東御苑内本丸中之門石垣修復工事

工期：平成17年8月～平成19年3月

発注者：宮内庁

工事目的：はらみ出し・目地の開き・石材破損等の発



写真—1 中之門石垣の修復工事完了後の全景

生した石垣を、安全性を確保した石垣に修復する。

工事数量：石垣解体修復 541 m²

延長 L = 42 m + 39 m 高さ H = 6 m

(2) 中之門石垣の特徴

日本の城郭石垣は、伝統的な技法である、「空積み」で作られている。「空積み」(図-2)は、築石(ちくいし)の組み立てにモルタル・コンクリートを用いない工法であり、石の隙間に飼石(かいいし)と呼ばれる石を設置し築石の配置を調整・固定する伝統的な技法である。現在の標準工法である、石の組み立てにモルタル・コンクリートを使う「練積み」(図-3)に比べ、より高度な技術が必要であり、設置する築石の選別・加工・固定には石工の「匠の技と目」が不可欠である。



図-1 位置図

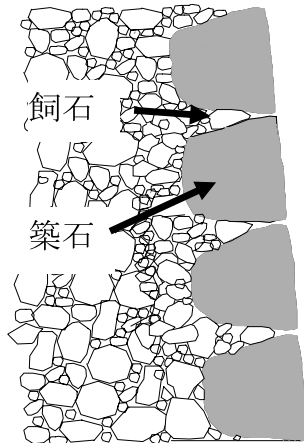


図-2 空積み工法

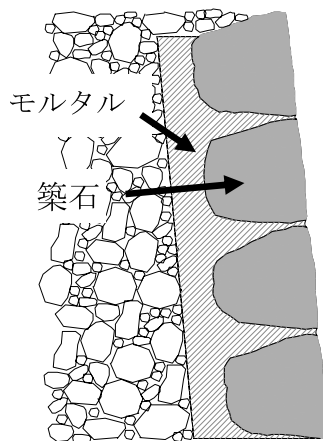


図-3 練積み工法

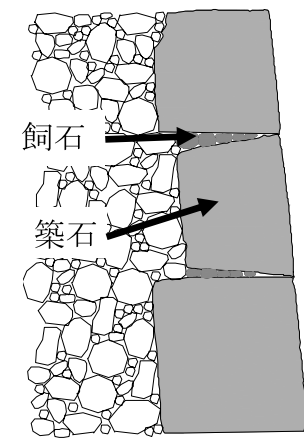


図-4 中之門石垣の空積み工法

中之門石垣は、空積み工法で施工されているが、一般の城郭の石垣と違い、①長方形の石を使用・巨石(最大 35 t 前後)の使用 ②隙間の小さい石垣 ③石

材の奥行きが小さく表面を大きく取った鏡張の石垣という特徴を持つ(図-4)。

石材同士の隙間が非常に小さいことは、築石同士の相互の干渉が石垣形状に与える影響が大きく、石材の積み重ね方の十分な検討が重要となる。このため、本工事での施工精度の向上と、施工能率の向上を目指して、石の積み方のコンピュータシミュレーションを始めとする一連の手法を創出した。

3. 石垣修復支援システム

(1) システムの構成

史跡等に指定されている石垣を修復する場合、石垣解体に並行して文化財調査を行うことが必要である。また、その調査成果を基に石垣の修復計画を行い、石積工を行う必要がある。したがって、石垣の調査・記録を効率よく、高精度に行い、その結果を効果的に計画に反映し施工するシステムが必要となる。

「石垣修復支援システム」は、三次元測量により石垣を調査・記録する技術、個々の築石を3次元モデル化し、かつ石垣全体の組立シミュレーションを行う技術、石垣の安定性検討技術で構成されている。図-5

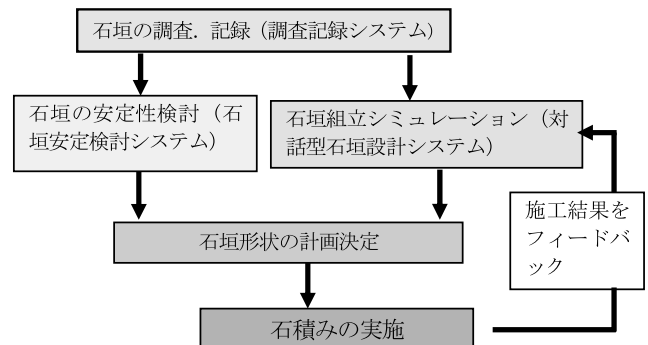


図-5 石垣工事と修復支援システム作業フロー

表-1 石垣修復支援システムの構成

機能	名称	内容
石垣の調査・記録	調査記録システム	3Dレーザと写真測量による、石垣外観と個々の石材形状の3次元データ化
石垣組立シミュレーション	対話型石垣設計システム	・仮想空間上での設計検討 ・想定線に沿った石材の半自動積み上げ ・石材同士の干渉計算 ・3DCAD (3次元コンピュータ設計システム) による各種データの立体図表示
石垣の安定性検討	石垣安定検討システム	・二次元個別要素法他の安定解析 (遠心載荷実験による解析結果の検証)

にシステム作業フローを、表—1 にシステム構成を示す。

本システムの最大の特徴として、3次元CADによる立体表示機能がある。この機能により、石垣修復形状設計への石工の効果的な参画（写真—2）が可能になるとともに、石積工事に先立って石垣の修復形状の視覚による確認が可能となる。



写真—2 石工の参画した設計状況

(2) システム詳細

(a) 調査記録システム

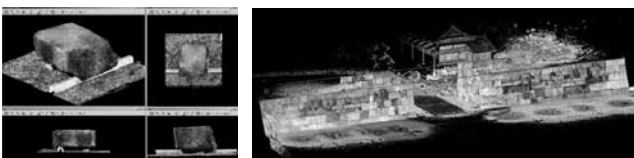
調査・記録は石垣の形状・構造について石垣解体工事に並行し効率良く高精度で行う必要がある。計測技術として、レーザースキャナによる3次元レーザー計測（写真—3、4）とデジタル写真測量を用い石垣全体と石材各面の3次元データを取得し（図—6）、これを重ね合わせ処理することにより個々の石材の3次元モデル（図—7）を作成した。この石材モデルを積



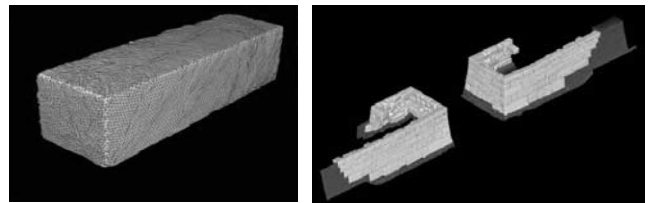
写真—3 Dレーザースキャナでの石垣表面の計測作業



写真—4 石材の計測作業



図—6 点群（スキャナデータ）で表現された石材と石垣

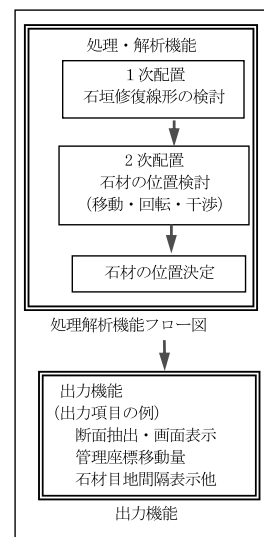


図—7 石材の3DCADモデルと現状配置

み重ね、修復前の石垣全体の形状を3次元コンピュータグラフィックス（以下3DCG）で再現する。測量成果は文化財調査成果としても使用する。

(b) 対話型石垣設計システム

3DCG化された石垣モデルを基本に石垣組立シミュレーションを行う。1次配置として石垣の勾配、目地間隔を設定し半自動で石材を仮配置し、石材相互の干渉の有無を判定し3DCG上での表示を行う。2次配置として石材相互の干渉状況をリアルタイムに計算、表示し（リアルタイム干渉解析システム^{a)}）、目視で確認しながら石材の配置を微調整し石垣形状を検討する。各ステップにおいて、石工の意見を反映させノウハウを取り込み、3DCG上で目視により確認し作業を



図—8 対話型石垣設計システム

a) リアルタイム干渉解析システム

対話型石垣設計システムを可能とするには、石材同士の干渉計算を短時間で行う必要がある。この問題を解決する為に「空間分割による計算」と、「石材の衝突判定の高速化」を採用し、干渉計算を短時間で処理している。

- ・空間分割：石材の衝突計算量の減少を図るために、石材を小集団に分割した上で衝突判定をおこなう。
- ・衝突計算の高速化：石材の衝突判定交差判定においては、Tomas Mollerが論文で公開発表している高速な計算手法（Tomas Mollerのアルゴリズム）をCramerの公式で解くことにより高速化を行った。

進める。図-8 にシステムフローを示す。

図-9 は、調査設計システムで作成した石垣全体の修復前の一部を背面から見た3DCAD 図に計画線を入れたものである。白い線が修復計画線である。

図-10 は修復計画に一定のルールに基づき、半自動で各石材を並べなおしたものである。図-9 で白い線よりはみ出した石材は白い線に沿って並べ直されている。



設定線

はらみ出し

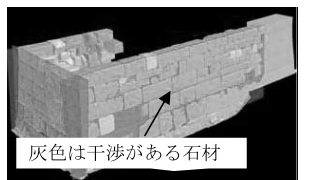


はらみ出し修正

図-9 現状の石垣と修復計画

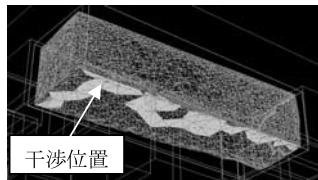
図-10 石垣半自動修復

図-11 は、干渉解析結果を表す図面で灰色が他の石材と干渉している石材を表す。図-12 は、各石材の干渉している部分（白い部分）を表示している。本システムでは、個々の石材を手動で移動、回転が可能で、干渉計結果を基に、部材を微調整して干渉をなくす方向に移動（図-13）し最終案を設定する。図-14 は修復断面の出力例で、外側の線が修復前、内側の線が修復後の断面形状である。



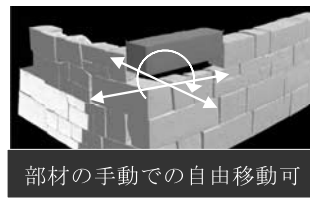
灰色は干渉がある石材

図-11 干渉解析結果



干渉位置

図-12 石材の干渉位置



部材の手動での自由移動可

図-13 石材の微小移動

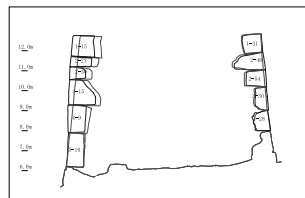


図-14 修復断面図の例

石垣修復形状は、基本となる石垣隅角の形状、勾配、反り等を変化させ、数種検討（図-15）し、石材の納まりを検討する。それらについての学識経験者の意見、見解を基に修復形状を最終決定する。3次元データを基に、石垣の断面図、立面図等の図面、施工データ等を出力し設計図面と同時に文化財調査成果図とし

	①案	②案	③案
と修復部隅角築石			
復線形案	の現況をそのままをそのま	を石を5その修復の現正目ま勾配をそ	結ると5ぶ天基段端進目配位置を勾配を適配
ムシステ			
評価	見いが中央のうん朋にで	ま全千り体涉がのせ良おず、いさ	す段2る目段が目、干渉4
	△	○	×

図-15 石垣修復案

て展開する。

(c) 安定性検討システム

石垣修復工の目的は安全性確保であり、地震時の安定性を検討し、改善策を盛り込んだ修復設計（図-16）を行う必要がある。一方、史跡の修復工事であり、「昔のままの状態に戻す」という文化財上の考えにより、コンクリートが使用できない等、採用工法には多くの制限が発生する。

調査によって得られた既存石垣の構造を踏襲し、文化財的な評価を得て計画することが基本となる。したがって適切な構造検討を行い石垣安定性の程度を把握することが重要となる。

設計的検討として石垣修復前後の安定性を試行くさび法（図-17）で行う。安定計算は石垣をもたれ擁壁と仮定し、背面のぐり石の安定性を評価した。中之門石垣は、修復前は中規模地震に対し安定性を保つことができないが、修復後は安定性を確保できるものの安全余裕が小さいとの評価が得られた。

解析的検討として、石垣の動的挙動を確認するために、石垣本体を2次元個別要素法（DEM）で、基礎

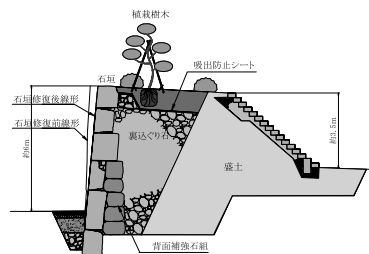


図-16 中之門石垣の断面図

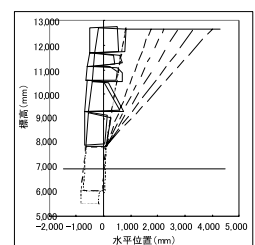
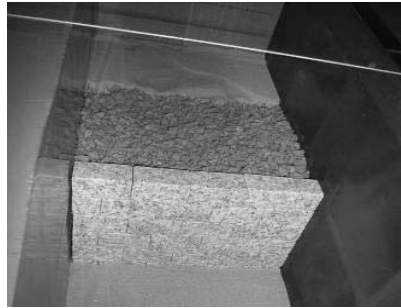


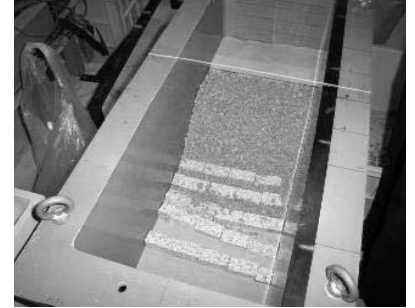
図-17 試行くさび法による検討



写真一五 遠心載荷装置

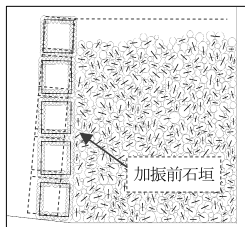


写真一六 石垣モデル

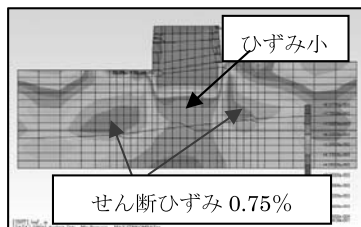


写真一七 石垣モデル倒壊状況

地盤を動的FEMで安定解析した。石垣本体が転倒しない範囲の最大入力加速度をパラメータとしてDEM解析し、500 galの大規模地震に対し安定性を保つ結果が得られた。図一18では石垣が前方に起き上がり裏込が沈下しているのが確認できる。大規模地震発生時の石垣基礎地盤は、動的FEM解析し、最大せん断ひずみは、0.75% (図一19)、残留沈下量は2 cm程度となり石垣の安定性に対する影響は無いとの結果が同様に得られた。石垣直下はその自重による「押え効果」によりひずみが小さくなっているのが分かる (図一19)。



図一18 DEMによる検討

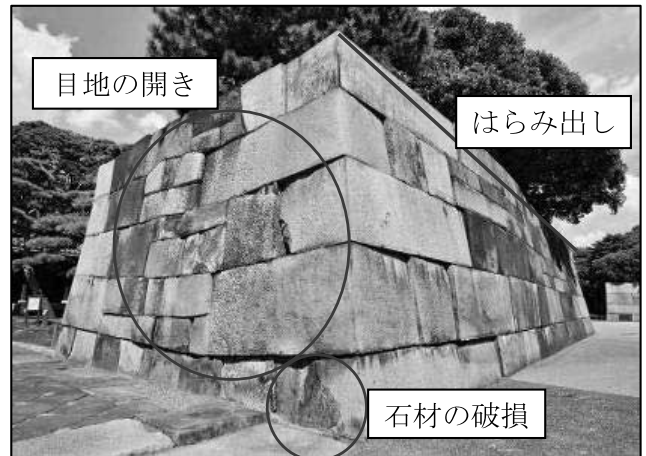


図一19 地盤地震時安定解析

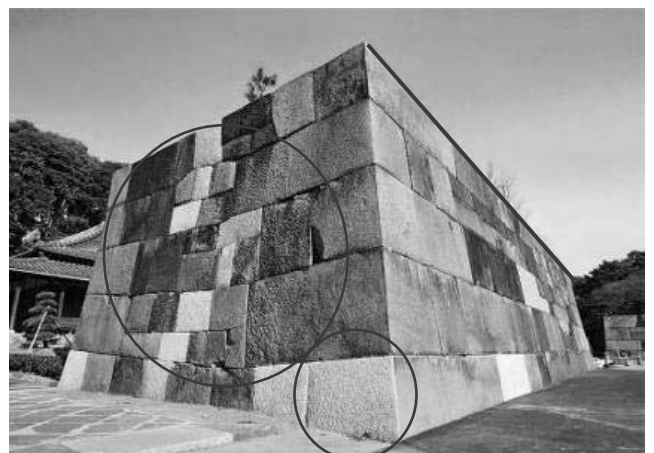
DEM解析と実現象の関連性を示し、耐震安定性評価を実証することを目的として遠心模型実験 (写真一5～7) を実施した。結果、石垣背面のぐり石層の条件を適切に設定すれば、石垣の動的挙動を適切に評価可能であることが示された。

4. 開発の効果

「石垣修復支援システム」は、石垣を3Dデータ化し、目視で石垣の修復設計を行うことができるシステムである。石工が設計に参加することにより、その技術を設計に反映し、事前に確認しイメージすることが可能となった。また、学識経験者、設計者、石工が共通認識を持って石積み工事に着手することができる技術である。写真一8は石垣の右側部の東面と南面の修復前の状況、写真一9はその修復後の状況である。開発に伴う効果を以下に示す。



写真一八 中之門石垣修復前状況



写真一九 中之門石垣修復後状況

(直接的効果)

①石垣修復工事では避けることのできない石垣の積み直し作業を最小限にすることができた結果、工費・工期の増加リスクを大幅に縮減。②IT技術の導入により、高精度な修復と文化財の調査～記録が可能。③石工が修復設計に参画し、その技術を取り込むことにより、より高品質な修復工事を提供。

(間接的効果)

最先端の3次元シミュレーション技術と解析技術が石工の「技と目」をサポートすることにより技術の伝承及び文化遺産保全の支援技術として貢献することが

可能である。

5. 今後の展開

「石垣修復支援システム」は石垣修復工事の設計・施工支援を目的にしたシステムであり、「皇居中之門石垣修復工事」で開発、採用され、その効果が確認された。石工の持つ伝統技術（匠の技）と最先端の計測、解析技術を融合させたシステムとなっている。開発者としては、今後は他の形式の石垣へ展開し、経験・情報の蓄積を行いシステムをよりレベルアップする予定である。3次元測量技術を基本とする今回のシステムは、石垣の修復事業のみならず、石橋等の他の石材構造物への応用が可能であり、全国に残る日本の土木文化財の保護に今回培った技術を展開したい。また、石工の持つ「目と技」を最先端技術でサポートすることで伝統土木技術の伝承に貢献し、文化財を次の世代へ継承していくことに役立てたいと思う。

本工法は、「第9回国土技術開発賞最優秀賞」「第二回ものづくり日本大賞総理大臣賞」を受賞している。

JCMA

【筆者紹介】

山内 裕之（やまうち ひろゆき）
清水建設㈱
土木東京支店
工事長



巽 耕一（たつみ こういち）
宮内庁管理部
工務課長



脇 登志夫（わき としお）
清水建設㈱
土木技術本部
主査



建設の機械化／建設の施工企画 2004年バックナンバー

平成16年1月号（第647号）～平成16年12月号（第658号）

1月号（第647号）
ロボット技術特集

5月号（第651号）
リサイクル特集

9月号（第655号）
維持管理特集

■体裁 A4判
■定価 各1部840円
(本体800円)

2月号（第648号）
地震防災特集

6月号（第652号）
海外の建設施工特集

10月号（第656号）
環境対策特集

■送料 100円

3月号（第649号）
地下空間特集

7月号（第653号）
安全対策特集

11月号（第657号）
除雪技術特集

4月号（第650号）
行政特集

8月号（第654号）
情報化施工特集

12月号（第658号）
新技術・新工法特集

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>