

史跡「石城山神籠石」の保全のための計測管理手法

近久 博志^{1*}・太田 隆一²，河原 剛²・来山 尚義³，岡本 良徳³，佐々木 杏奈³

¹⁾山口大学 イノベーション推進機構 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

²⁾光市教育委員会 文化振興課 (〒743-0011 山口県光市光井9-18-3)

³⁾復建調査設計㈱ (〒732-0052 広島県広島市東区光町2-10-11)

*E-mail: chikahis@yamaguchi-u.ac.jp

神籠石は日本古代の山城の遺跡で、北九州と中国・四国に12カ所あることが知られている。このうち山口県光市で1909年に発見された石城山神籠石は、7世紀頃に築城された山城で、一辺が70 cm位の石積み列石、その背面と上部に版築された土塁、谷を通過する場所に設けられた数段の石積みを有する城門や水門から成っており、石城山の中腹から8合目あたりを約2.6 kmにわたって鉢巻き状に取り囲むように配置されている。現在、残されている石組みも、永年の降雨や植生によって変状が生じ始めており、早急な保存管理手法の確立が望まれている。これに対応するために、本書は、本史跡の構造的な特徴を述べた後に、保全のために計画した計測管理手法について報告するものである。

Key Words: *preserving historic masonry wall, image analysis, laser profiler measurement, photogrammetry*

1. はじめに

通常の大規模面や大規模盛り土の安定性を監視するために実施している現場計測では、設置される計測器の機能や経済的な制約から対象構造物の点状や線状の局所的な計測データを取得するのが一般的である。対象となる構造物の局所的な挙動だけでも構造物の安全性の判断するときの有用な情報となることは多くの現場で確認されているところである。しかしながら、今回の研究対象とした石城山神籠石は、石積みによって構築された城壁であり、個々の組石が、不連続挙動することが特徴である。このため、従来のような点状や線状の変位計測では、十分な安定性の確認が出来ないと言われてきていた。この課題を解決するために、筆者らが開発したレーザ・プロファイラ (LP; Laser Profiler) 測量と精密写真測量を組み合わせた画像解析システム¹⁾ (VGEシステム, Visual Geoengineering System) を用いて、計測管理を実施することとした。本文では、保全対象とする石城山神籠石の特徴を述べた後、適用した面的計測手法について述べる。

2. 史跡石城山神籠石

「神籠石」は、山を取り囲むように鉢巻き状に構築された石積み遺跡であり、九州や瀬戸内海地域に点在し、9箇所が国指定史跡に指定されている。神

籠石を築造した目的については、神域説か山城説かの論争が長く行われてきたが、発掘調査の結果、神籠石は城郭を造る土塁の前面基部に据えた土留め、または根固めの石であることがわかり、古代山城 (神籠石式山城) であることが確認された。しかしながら、神籠石の築造時期については7世紀前半説と後半説があり、未解決のまま現在に至っている。このうち、1909年に山口県光市で発見された「石城山神籠石」は、図-1に示すように列石線延長が約2,553 mであり、1935年6月7日に国史跡に指定された。列石線が谷間を横切る場所には、高い石垣とその中央部に水門を設けてあり、これまでに北水門・東水門・南水門・西水門が確認されている。こ



図-1 石城山神籠石の概要

これらの水門付近の石垣は、50～100cm程度の大きさの石を積み上げてあるが、永年の降雨や植生根によって変状が生じ始めており、特に平成16年6月の集中豪雨により東水門付近の石組みが崩落し、平成17年から18年にかけて復旧工事が行われている。

3. 神籠石保全のための計測管理計画

(1) 計測管理計画

対象とする神籠石（組石）自身は、堅固な石であり劣化は進んでいないが、築堤された背面地山や基盤は、長年の降雨や植生根の成長によって、緩みが進行しており、それに伴って、積み上げられた組石が崩れ落ちたり、抜け落ちたりしている。個々では、こうした状況にある神籠石の変状の状況を把握し、保全するために計測管理を実施する（図-2）。

まず、神籠石の現状と今後の変状の初期値を調べる目的で、表-1のような計測調査を実施した。このうち、観察と測量Aの項目は、日常計測調査として実施する。そして、これらの結果などによって神籠石の変状が懸念される場合には、計測Bの項目を実施する。

- 日常計測調査・・・日常的に実施する簡易な計測管理
- 詳細計測調査・・・日常管理によって異常が確認された場合、大雨や地震後などによって変状が懸念される場合に実施する詳細な計測管理

表-1 計測調査項目

組石の安定性の評価・対策方法の検討を行うための調査	
資料調査	
空中写真判読	
地表地質踏査	
原位置試験	簡易貫入試験
室内試験	単位体積重量試験、自然含水比試験、粒度試験、土粒子の密度試験
変状の進捗を調べるための計測と調査	
観察（日常計測調査）	目視観察、変状スケッチ、写真撮影
測量A（日常計測調査）	写真撮影、組石間開口測定、簡易測量
測量B（詳細計測調査）	レーザ・プロファイラー測量、写真測量、光波測量

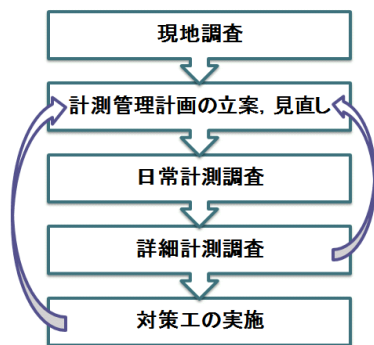


図-2 計測管理の流れ

特に、日常の計測調査は、地盤工学の知識を必要としない簡易な計測管理項目である。こうした日常の計測管理の結果から、変状が進行して、神籠石の崩落につながる、もしくは、安定性に問題が生じる可能性が高いと判断される場合、計測調査結果を用いてその変状の要因を探り、有効的な対策工を検討し、実施することになる。そして、対策工の有無に拘わらず、その後の組石の安定性や（実施された場合）対策工の有効性を確認するために、計測管理は継続して実施することになる。表-2に、計画時における初期値としての計測管理表を示す。本表は、日常管理を実施するときの目安値を示すものであり、それぞれの変状レベルの考え方については、表-3に示す。計測管理表（計測調査の項目や管理値など）は、計測管理中のデータや現場状況に応じて修正を加え、現状に相応しいものに近付けていくことが重要になる。例えば、 α 、 β 、 γ 、 δ は、今後の修正を前提にして、計測時点の目安値として7cmとする。また、対策工の有無に拘わらず、神籠石の安定性を確認するために計測管理は継続される。

表-2 計測管理表

		I 安定レベル	II 注意レベル	III 異常レベル	IV 限界レベル
組石	組石	組石間の開口なし	組石間の開口、突出	組石の太木か開口、すれ、抜出し	組石の抜落ち、浮き石、崩落
	組石間の開口	SL=0cm	0<SL< α /3cm	α /3<SL< α cm	α cm<SL
	組石の変位	SD=0cm	0<SD< β /3cm	β /3<SD< β cm	β cm<SD
	組石の天端の沈下	SS=0cm	0<SS< γ /3cm	γ /3<SS< γ cm	γ cm<SS
周辺地盤	背面地盤	変状なし	地表面の沈下	大沈下、地表に割れ目や崩落孔	地盤の崩落や流出
	背面地盤の沈下	GS=0cm	0<GS< δ /3cm	δ /3<GS< δ cm	δ cm<GS
	支持地盤	変状なし	地盤が沈下	地盤の大きな沈下	地盤の流出
	湧水	なし、しみ出し	少量流水程度	流水、流出	小川のような流れ、噴出
植生	湧水による劣化	なし	湧水に濡り	粒径の大きな土砂や小石の流出	土砂や組石の流出
	植生（樹木根）による劣化	なし	根の張り出し	根による地盤のゆるみや組石の大きな押し出し	根による組石の崩落

表-3 計測管理表の変状レベルの考え方

注意レベル	状態	対応策
レベルI	安定	通常の計測や観測を続ける
レベルII	注意	計測や観察の結果や現場の状況を総合的に判断して変状等の異常は何か主因となっているかを検討する。この間、計測・観察の頻度や精度を増し、地山の安定状態の確認に努める。必要に応じて対策工の資材の準備をする
レベルIII	異常	異常の原因追求に努め、主因に対する対策工を実施する。この場合、施工的に簡単な変更で済む対策工を採用する
レベルIV	限界	組石の積み直しも含めて、比較的大規模な変更が必要となる。この場合、現地の状況を十分に勘案し、適切な対策工の採用が望まれる。

(2) 目視観察表

日常の計測調査は、実施者が変わることが多いため、調査するべき項目と記載方法を明確にしておく必要がある。また、実施者は、調査対象の安定状況だけでなく過去の変状の進行状況や今後採用すべき概略の対応策を理解していることが重要である。こ

のため、調査項目と調査の注目点を明記しておくだけでなく、その時点までの変状の推移状況（進行状況）を分かり易く整理して残しておく必要がある。こうしたことを勘案して、表-4のような目視観察表を記載する。本表には、表-2の計測管理表の記載項目を参考して、変状レベルを記載する。

表-4 目視観察記録表

石城山神護石		（東、西、北）K門		（箇所）A, 3	
天候 (晴) 曇り, 雨		降雨量: 0 mm/hr		記入者: □□ □□, 記録日: 2010/07/29/	
撮影日: 2010/05/20/					
			<p>【記事】 3日前(7/25)の豪雨(2日間で75mm)の影響で、一部箇所(B)では、わずかながら土砂が流出した可能性が高い。これに伴って、C地点の石組みの隙間が、12.5cm(10.0cm, 09/12/01)になり、開口の進捗が伺える。また、10/05以降、A)の石組みの抜け出し挙動は大きくないようである。</p>		
<p>A) 組石の抜け出しが見受けられる(Ⅰ)</p> <p>B) 石組み間の開口が進展(Ⅱ)測線に沿った開口幅12.5cm(7/29)</p> <p>C) わずかながら土砂の流出後が見受けられる(Ⅲ)</p>			<p>この記録と並行して、気象庁の降雨と最高最低気温を記録として残しておく</p>		

(3) 組石間の開口測定

事前の現地調査の段階で、不安定な組石や注意すべき箇所を特定して、組石間の開口測定箇所を選定し、初期値測定を実施した。今後、同じ箇所を、継続して測定し、組石の変位挙動を調べていく必要がある。このとき、測定結果は、目視観察記録表（表-4）に記録として残しておく必要がある。また、他の目視観察項目などを中心に組石の変位挙動を調べながら、必要に応じて、開口測定場所を増やしたり、測定頻度を減らすなど、変状の進捗状況によって調整していく必要がある。

(4) 写真撮影

日常観察時には、極力、写真撮影を実施して、画像データとして状況を残しておくことが重要である。撮影された写真は、後日、すぐに活用できるように、撮影日時と場所を整理しておく必要がある。これは、後日、崩壊や変状の進行が進み始めたときに、変状開始時期と状況を評価するために活用するためである。特に、詳細な検討をする場合、後述する精密写真測量や画像計測を実施することを想定して、つぎのように写真撮影をしておくこととする。

- ① いつも同じ一眼レフ・カメラで撮影する（ここでは、NIKON-D700とAF-S DX Zoom-Nikkor 17-55mm f/2.8G IF-EDを用いる）
- ② 一つの撮影ブロックに対して、撮影位置を替えて5枚のステレオ・ペアな写真を撮る
- ③ 一つの撮影ブロックに対して、カメラは、マニュアル設定にして、焦点距離（一番短い25mm）とピントと絞りを固定して撮影する

特に、現地の変状が分かり易く撮っている写真は、目視観察記録表に貼り合わせて、変状の説明文を記入する。

(5) 精密写真測量^{2), 3)}

ここで用いる精密写真測量は、航空測量などで良く知られている技術であり、図-3のように数十m離れた位置から撮影した複数枚の（ステレオ・ペアな）写真から、撮影された対象物の3次元座標（形状や大きさ）を算定しようとするものである。多くの場面でいろいろな活用がなされているにもかかわらず、測量や計測に係わる施工現場の技術者が自ら活用できる技術として認識することは少ないようである。これは写真測量には、特殊なカメラと装置と熟練技術者が必要となるためであろう。しかし、最近、著しい発展を遂げた画像処理技術が、これまで特殊とされてきた写真測量を安価で手軽な技術にすることを實現した。特殊な機器や設備がなくとも、撮影位置や撮影条件に特に制約を加えることなく精密写真測量が実施できる。このとき必要なものは、つぎのものだけである。

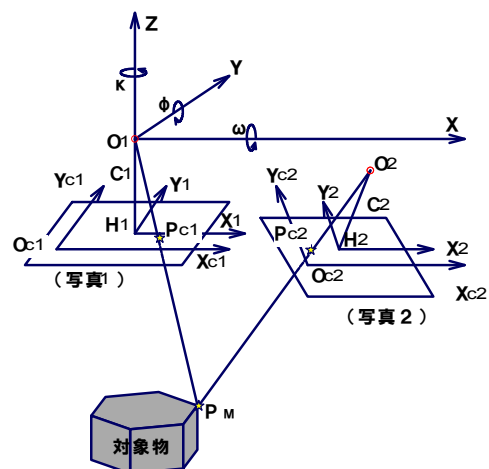


図-3 撮影対象物と撮影カメラの位置関係と共線条件

- ① 市販されている一般的なマニュアルフォーカス付きのデジタルカメラ（本文中の写真測量は、全てNIKON-D700を使用）
- ② パソコン（Windows98 搭載）で起動する精密写真測量システム

位置を変えて撮影された複数枚の写真は、そのまま重ねてもうまく重ならずにずれが生じることになるが、この視差の違いから対象物の形状や大きさを算定することになる。これは、幾何学的な知識があれば、当然、理論的には理解される場所であるが、現実には、つぎのような項目に関していろいろな誤差が生じることになる。

- ① 撮影位置（カメラの投影中心座標と傾き）
- ② カメラの焦点距離、主点位置のズレやレンズのひずみ曲収差
- ③ 写真座標の読み取り

通常用いられている測量用のカメラは、レンズにゆがみが少なく、内部評定要素と呼ばれる上記の②の項目は、既知の値を取ることになる。また、写真座標を精密に読み取るための特殊な装置が必要となったり、ときには、解析精度を上げるために撮影カメラの位置や傾きに制約を設けたりすることもある。これに対し、開発した精

密写真測量システムでは、対象物を異なる位置から撮影した複数枚の(ステレオ・ペアな)写真から、直接、レンズのひずみ曲収差などの内部評定要素や、撮影位置やカメラの傾きなどの外部評定要素をパソコンによって算定することになる^{2),3)}。

4. レーザ・プロファイラ測量(LP測量)⁴⁾

今回用いた地上型レーザ・プロファイラの主な仕様を表-5に示す。

表-5 地上型のレーザ・プロファイラの仕様

項目	内容
レーザ・タイプ	パルス半導体レーザ
レーザ波長	532 nm
レーザ・クラス	3R (IEC 60825-I)
測定距離	300 m
計測密度	12 mm以上
スキャン点数(最大)	20000点(水平), 5000点(鉛直)
測定範囲(最大)	360° (水平), 270° (鉛直)
測定精度(距離50m)	距離:4mm, 座標:6mm

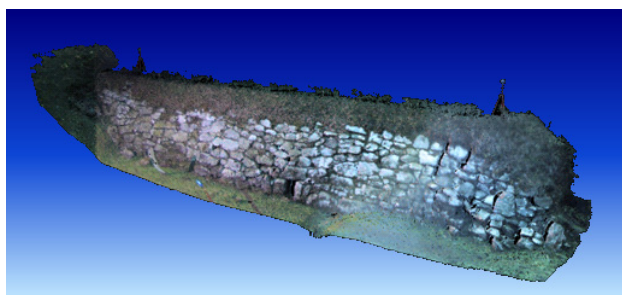


図-4 LP測量結果(石城山神籠石北水門)

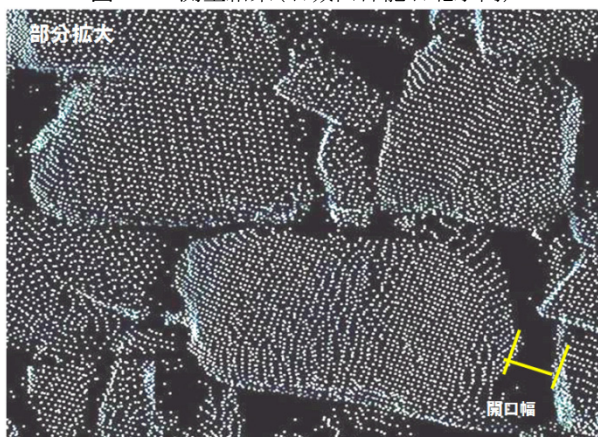


図-5 レーザ・プロファイラ計測結果(部分拡大)

計測時にはいずれの位置からも見渡せる位置に3つの標定(ターゲット)点を配置し、得られた計測データを合成するときの基準とした。また、その計測データと撮影写真を合成するために、17点の標定点を設けた。計測密度は、レーザ・プロファイラから10m離れた位置で1cm以下とした。図-4に、計測された点群データをRGB表示する。また、図-5には、点群データの部分拡大を示したが、組石の形状を精度良く計測できていることが分かる。

5. 精密写真測量とLP測量を組み合わせた画像解析

(1) 精密写真測量とLP測量

LP測量は、細かい間隔で対象物の表面の3次元座標を取得しているが、ランダムに並べられた不連続な点の集合としてしか認識されない。一方、撮影された写真は、連続した面的な色(RGB)情報を取得しているが、個別の地点の座標は不明である。ここでは、両者の特徴を生かすために開発したVGEシステム¹⁾を用いて実施した面的計測の概要について説明する。現地の精密写真測量を実施したときに得られた内部評定要素(カメラ焦点距離、主点の位置のずれ、レンズのひずみ曲収差関係の係数)を用いれば、ゆがみのない写真画像を作成することが出来る。このため、以後、写真画像とは、ゆがみが補正された画像を示すこととする。また、今回の計測管理は、石城山神籠石全体を対象にしているが、ここでは、理解のために、図-1に赤丸印で示した北水門での実施事例を紹介することとする。図-6に、精密写真測量と解析とレーザ・プロファイラ測量を組み合わせた画像解析手法を用いた計測管理の流れを示す。

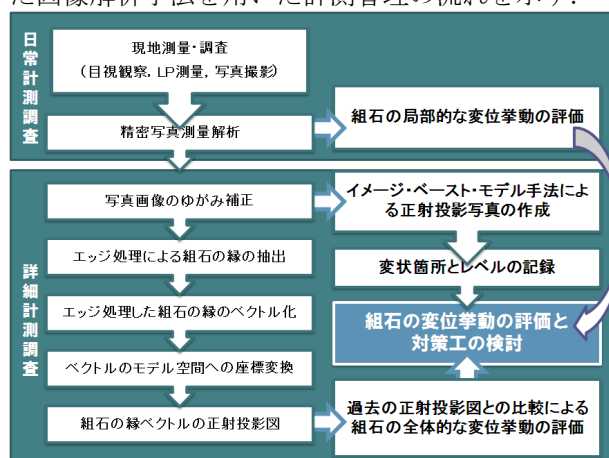


図-6 精密写真測量解析とレーザ・プロファイラ測量を組み合わせた画像解析手法を用いた計測管理の流れ

(2) 正射投影写真画像の作成

LP測量結果からドロネー三角形分割⁵⁾によって不整三角形網(TIN; Triangulated Irregular Network)表現の数値標高モデル(DEM; Digital Elevation Model)を作成する。不整三角形網は、地表面の物理的形状を表現し、3次元の標高座標を持った点を結んだ線が、重複のない三角形の集まりとして配列されたものである。作成された不整三角形網を撮影した写真に重ねると図-7のようになる。図中の橙色の標点は、LP計測データと写真画像を重ねるときに座標既知点として用いた基準点である。まず、LP測量データを用いて不整三角形網の正射投影図を作成する。この不整三角形網を利用して、違った位置から撮影された3枚の写真画像を貼り付けた結果を図-8に示す。この写真が、対象とした神籠石北水門の正射投影写真となる。この手法によるとつぎのような利点を有することになる。

- ① 撮影時に対象物を遮る樹木などを取り省いたイメージ・ベスト・モデルの正射投影写真を作成することが出来る
- ② いろいろな位置から撮影された写真を貼り付けることが可能なため、不鮮明な画像をなくすことが出来る
- ③ 正射投影写真であるため画像上で直接的な測距が可能になる
- ④ 一方、LP 測量結果と画像が結びつけることができるため、PC（パーソナルコンピュータ）上では、測距（面積、体積も含む）や方向（走向傾斜など）も容易に求めることができる、

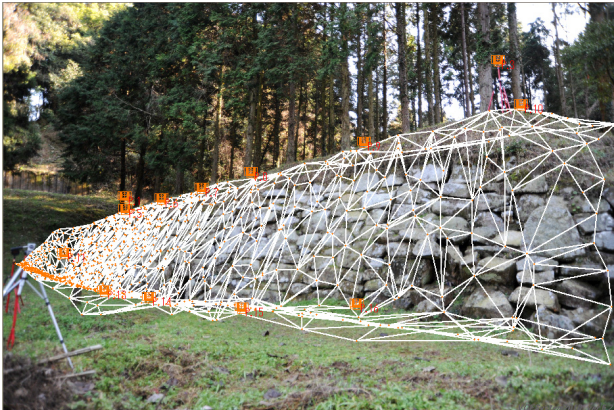


図-7 レーザ・プロファイラ測量結果から作成した不整三角形網を撮影写真に重ね合わせた結果

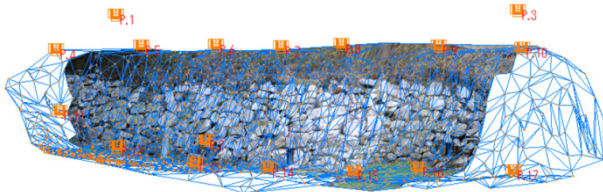


図-8 イメージ・ベスト・モデル手法による正射投影写真

(3) 神籠石（組石）の形状抽出

対象構造物は、不連続挙動を示す組石構造物であるため、個々の組石を抽出し、それぞれの組石の変位挙動を監視する必要が生じてくる。組石の抽出方法は、さまざまな研究がなされているが、ここでは、画像解析手法として良く用いられているエッジ処理を活用した例を紹介する。

まず、撮影された図-7にエッジ処理⁶⁾を施して、組石の縁取りを行った結果を図-9に示す。本図は、組石の縁に相当する画素の色（RGB）情報が、周辺に比べて小さな値となっており、黒色に近い色で表現されている。この写真画像からRGB情報の小さな黒色部分を抽出した後、組石の縁部分を点と線分からなる折れ線列に変換する。この処理は、図面ベクトル化と呼ばれ、画像データをCAD（Computer Aided Design）システムや地理情報システム（GIS; Geographic Information System）のデータとして取り扱う場合に良く用いられている。ベクトル化を施した結果を図-10と図-11に示す。この段階では、組石の縁部分を点と線分からなる写真座標系の折れ線で表現されていることになる。

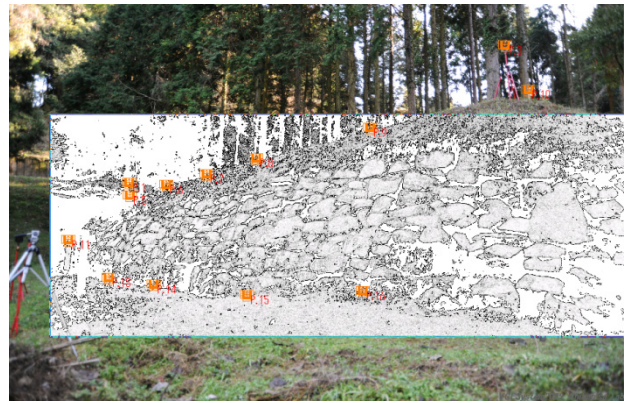


図-9 エッジ処理を施した写真画像

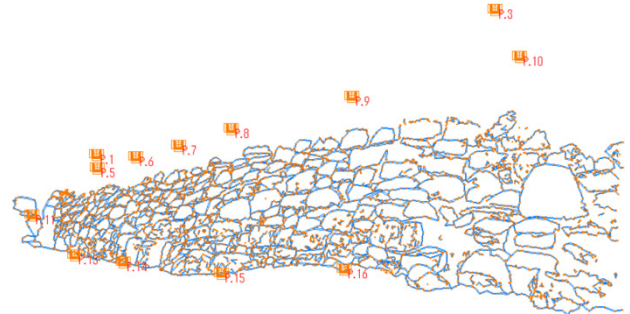


図-10 ベクトル化処理して表した組石の縁（ここでは、点と線分からなる折れ線で表示）



図-11 組石の縁のベクトル化処理の結果と写真画像の合成

(4) 組石の位置出し

写真座標（撮影位置）は、写真毎に精密写真測量解析によって、算定されることになる。このため、ここでは、写真座標によって得られている組石の縁（ベクトル）を一般化するために、LP測量結果を内装する手法によってモデル空間に変換する。図-12に、変換結果を正射投影図として表す。ここで得られたデータは、モデル空間での組石の縁取りベクトル（折れ線）であるため、このデータは、3次元CADデータとして一般的に良く用いられているDXF形式やMixed Reality手法⁷⁾などによる現地の加工空間の構築のためのデータにも容易に変換できる。また、ここでのデータは、モデル座標系の座標であるために、平面図の作成や寸法や面積も容易に算定できるため、個別の神籠石の認識や組石の位置関係（神籠石の積み重ね順序）を事前に調べることが出来るため、崩落後の積み直し時にも有用な情報を提

供することになる。

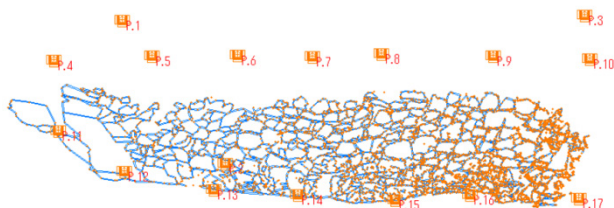


図-12 組石の縁のベクトルから作成されたモデル座標で表された正射投影図

6. まとめ

日常計測調査として目視観察と簡単な組石間の開口測定を実施する。そして、それらを通じて、組石に変状の進行があると判断された場合、精密写真測量解析によって、組石の部分的な変位挙動を調べることになる。しかし、写真測量解析の準備作業として実施する写真毎に写っている標点の設定は、標点数が多くなると膨大になってくる。このため、組石の全体的な挙動を評価する場合、LP測量と写真画像を用いた本画像解析手法を用いれば、大部分が自動的に行われることになるため、作業量は一段と少なくなる。さらに、離散的に挙動する組石の評価には、このような面的計測技術はますます発展していくことになると考えている。

今後、こうした可能性を踏まえて、本手法の更なる改良を加えていきたいと考えている。

参考資料

- 1) 近久博志: デジタル画像処理技術を用いた測量システム, 第 36 回名古屋工業大学共同研究センター講演会, pp.49-58, 2001
- 2) Brown,D.C.: Close-Range Camera Calibration, Photogrammetric Engineering, Vol.37-8, pp.855-866, 1971
- 3) Chikahisa,H., Matsumoto,K., Tsutsui,M., Ohnishi,Y.: Field Measurement and Estimation for Displacement Behavior of Slope Using a Photogrammetry System, the 3rd Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering pp.345-352, 2002.
- 4) 来山尚義,近久博志,河原剛,横手了,岡本良徳,佐々木杏奈: 史跡「石城山神籠石」保存に関するレーザ・プロファイラ測量の適用, 第 44 回地盤工学研究発表会, pp.125-126, 2009
- 5) Watson,D.F.: Computing n-dimensional Delaunay Tessellation with Application to Voronoi Polytopes, the Computer Journal Vol.24, pp.167-172, 1981
- 6) Duda,R.O., and Hart,P.E.: Pattern Classification and Scene Analysis, New York, John Wiley & Sons, Inc., pp.267-272, 1971
- 7) Tsutsui,M., Chikahisa,H., Kobayashi,K., Abo,T.: Stereo Vision-based Mixed Reality System and Its Application to Construction Sites, the 3rd Asian Rock Mechanics Symposium, pp.223-228, 2004.

FIELD MEASUREMENT AND IMAGE ANALYSIS SYSTEM TO PRESERVE HISTRIC MASONRY WALL

Hiroshi CHIKAHISA, Ryuichi OHTA, Takeshi KAWAHARA,
Naoyoshi KITAYAMA, Yoshinori OKAMOTO, Anna SASAKI

A lot of field measurements are carried out to monitor displacement of large scale slope and embankment in Japan. Though almost every measurement results are obtained at certain points or along liner portions, they brought us useful information concerning its stability. On the other hands, because masonry walls of our research object behave discontinuously and discretely, we have to conduct areal measurement to monitor their behavior. To solve this problem, we developed image analysis system combined laser profile measurement and photogrammetric analysis. In this paper, the developed image analysis system is demonstrated and it's adaptation on masonry walls is discussed.