

精密写真測量によるアンコール遺跡バイヨン 中央塔における塔体・基壇の石積みの変位計測

中西 由起¹・小山 倫史^{1*}・橋本 涼太²・岩崎 好規³

¹関西大学社会安全学部（〒569-1098 大阪府高槻市白梅町7-1）

²京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻（〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂）

³地域地盤環境研究所（〒540-0008 大阪市中央区大手前2-1-2 国民會館・住友生命ビル6F）

*t-koyama@kansai-u.ac.jp

バイヨン寺院中央塔は高さ42mにおよぶ砂岩による組積造の塔状建築であり、突発的な落石が起るなど塔の部分的崩壊の危険性が指摘され早急かつ恒久的な対策が求められている。中央塔の基壇は高さ約12mの盛土で、周囲は積み石擁壁構造であるが、降雨時には石積みの壁からの漏水が観察されている。1960年代以前の目地は、モルタル充填されているが、現状では、新たな縦目地が発生し、基礎部の石には、亀裂の発生・進展が見られる。これらの塔体および基壇の安定性に大きく影響を及ぼし、構造安定化に向けた修復・対策工法の検討のためには、変状の現状把握・変状要因の特定・変状メカニズムの解明が重要である。そこで、本研究では、石積みの挙動を正確に把握するため、精密写真測量を用いた計測を実施した。

Key Words : Bayon temple, Angkor remains, masonry structures, digital photogrammetry, displacement

1. はじめに

バイヨン寺院はカンボジアのクメール文明遺跡群の中でもアンコール・ワットと双璧をなしその極点にある遺構である（写真-1）。また、バイヨン寺院はアンコール王朝の最も繁栄した歴史の伝統文化の証であるとともに現在のアンコール観光の中心であり、カンボジア政府にとって最も重要な遺跡の一つとなっている。しかし、バイヨン寺院はアンコール遺跡群の中でも最も劣化・崩壊の危機に瀕した遺跡でもある。その上、現場での即応的な建築技術が適用された建物が高密度に集積された遺跡であることなどによって、その修復が技術的に最も困難な状況にある¹⁾。

バイヨン中央塔は高さ 42m におよぶ砂岩による組積造の塔状建築であり、その建設から現在にいたる数百年間に様々な要因と作用によって劣化・変状が進み、現在は突発的な落石が起るなど塔の部分的崩壊の危険性が指摘され早急かつ恒久的な対策が求められている。また、中央塔の基壇は高さ約 12mの盛土で、周囲は積み石擁壁構造であるが、降雨時には石積みの壁からの漏水が観察されている。1960年代以前の目地は、モルタル充填されているが、現状では、新たな縦目地（目地開き）が発生し、基礎部の石材には、亀裂の発生・進展が見られ

る（写真-2）。これらの変状は塔体・基壇の安定性に大きく影響を及ぼすと考えられ、基壇も含めた中央塔の構造安定化に向けた修復・対策工法の検討のためには、変状の現状把握・変状要因の特定・変状メカニズムの解明が重要である。そこで、本研究では、石積みの挙動（亀裂進展・目地開きに伴う石積みの動きなど）を正確に把握するため、精密写真測量（単写真測量）を用いた計測を実施した。本手法は、反射ターゲットを設置した石積みを定期的に写真撮影し、その3次元座標を取得し、その変分分析により、開閉口方向のみならず、面内せん断方向の動きを把握することが可能である。また、計測



写真-1 アンコール遺跡バイヨン寺院



写真-2 基壇部における石材の目地開き・亀裂

に外部からの電源を必要とせず、安価でターゲット設置も容易であり、耐候性・耐久性に優れ、「誰でも簡易に計測できる」という最大の特長がある。

2. 単写真測量を用いた目地開き・亀裂開口幅の計測に関する理論・方法^{2,3)}

(1) 計測手順

単写真測量を用いた目地開き・亀裂開口幅の計測手順を以下に示す。まず、図-1に示す反射ターゲットを基準尺としてひび割れの両側に設置する。設置の際は、強固な接着剤を用いる。遺跡での計測においては、計測終了後に取り外すことが要請されているが、その場合でも溶剤を用いて容易に取り外しができる。ターゲットは、暗い状況下（例えば、本研究においては副塔内部の亀裂の計測）においても計測を可能とするためにカメラフラッシュ光に対する乱反射を強めるためにガラスビーズを材料として作成されている。ターゲットには、4点の円が既知の間隔で印刷されており、これは基準尺としての役割を果たす他、後述する射影変換にも用いられる。はじめに、一方のターゲット上の4点の円の重心の二次元座標を算出する。任意の撮影位置から得られたデジタル画像は、射影変換を用いて正対して撮影した画像に変換する。したがって、撮影者は全く同じ場所から同じように撮影することを強要されず、任意の場所から撮影が可能である。次に、射影変換後の画像を用いて、両側のターゲット上の円の重心の二次元座標を算出し、算出された2つの円の重心間距離を用いて、ひび割れが開く方向とずれる方向の変位を評価する。

(2) 単写真測量の基本原則^{4, 5)}

本手法の計測精度は、ターゲット上の円の重心の二次

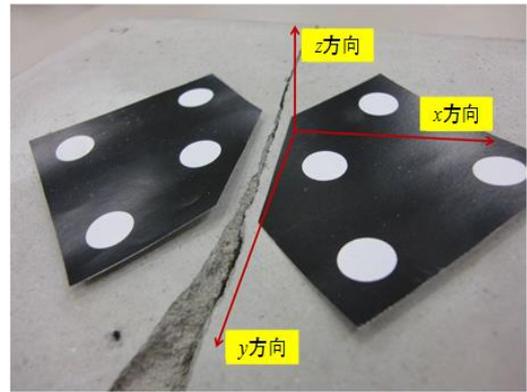


図-1 反射ターゲット

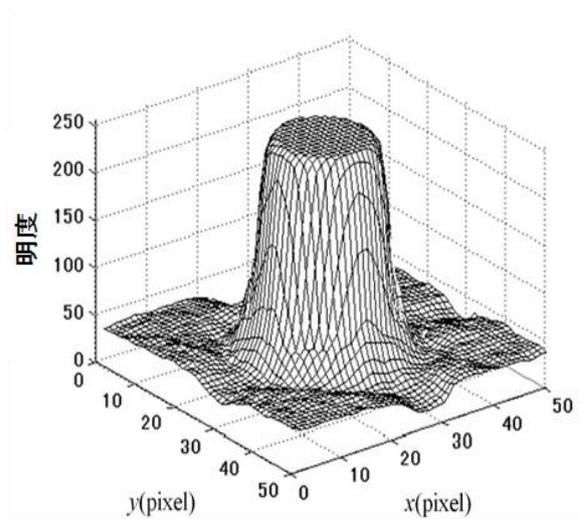


図-2 明度分布の一例

元座標の読取精度に大きく依存している。すなわち、いかに正確に円の重心を検出するかが、本計測において重要となっている。そのため、ガラスビーズで作製されたターゲットを計測箇所を設置した。ガラスビーズによりカメラフラッシュの入射光は強く反射され、この反射光の強さの度合いを「明度」とよぶ。画像上の円の明度分布の一例を図-2に示す。円の重心計算は、この明度分布を用いて二値化処理の後に算出される。明度は1画素当たり256段階で数値化されており、適当な閾値を定め（本研究では200とした）、閾値以下の明度についてはゼロとし、閾値以上の明度をもつ画素について明度を重みとして以下の式(1)および式(2)により面積重心計算を行う。

$$x = x_0 + a_x \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (q(i, j) \times x_{ij})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q(i, j)} \quad (1)$$

$$y = y_0 + a_y \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (q(i, j) \times y_{ij})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q(i, j)} \quad (2)$$

ここで、 (x_0, y_0) は重心計算範囲の原点、 (a_x, a_y) はそれぞれの画素サイズ、 $q(i, j)$ は画素 (i, j) の明度である。

次に、射影変換により元画像を修正・変換する。射影変換とは、**図-3** に示すようにある平面 L 上の点 (x, y) が、投影中心 O に関して、他の平面 L' 上の点 (x', y') として投影されるような変換をいう⁹⁾。本計測手法においては、

「斜めから撮影された画像を正面から撮影した画像に変換する」ことを指す。射影変換は、写真測量の基本原則である共線条件に基礎をおく。共線条件とは、**図-4** に示すように、対象空間上の計測点とその画像上の点、及びカメラの原点（レンズの中心）は一直線上に存在するという原理である。共線条件から以下の射影変換式(3)及び式(4)が導出され、斜めから撮影された画像の画像座標 (x, y) が正対した位置から撮影した画像の画像座標 (x', y') に変換される。この2式には8個の未知係数が存在しており、4点以上の基準点の画像座標を用いて最小二乗法をあてはめることにより求められる。したがって、ターゲットには4点の円を基準点として印刷されている。最後に、ひび割れの両側のターゲットの円の重心間距離を計算し、その距離の変化により、ひび割れ幅の変位を評価する。

$$x' = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_7x + b_8y + 1} \quad (3)$$

$$y' = \frac{b_4x + b_5y + b_6}{b_7x + b_8y + 1} \quad (4)$$

3. バイオン寺院中央塔における目地開き・亀裂開口幅の計測結果

図-5 にターゲットの設置位置を示す。石材の目地開きや亀裂の進展など、特に変状が著しいと見られる北テラス西側の基壇（ターゲット名：B1, B2, B3）、南テラス西側の基壇（BSW1, BSW2）、南テラス東側の基壇（BSE1, BSE2）、主塔の南西側（SW1, SW2, SW3）および北西側（NW）、北西側の副塔（SubT1, SubT2）において計13地点に写真測量用の反射ターゲットを設置した。なお、ターゲットの設置に当たっては石積み擁壁に接着

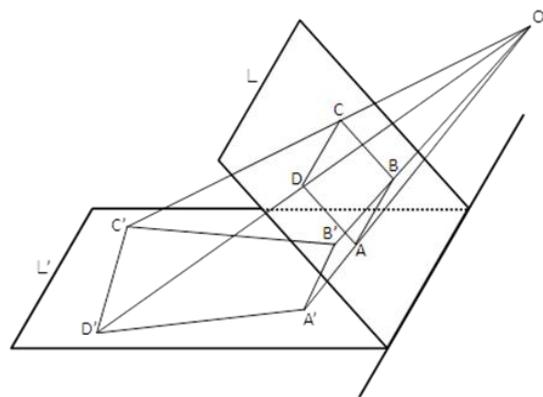


図-3 射影変換

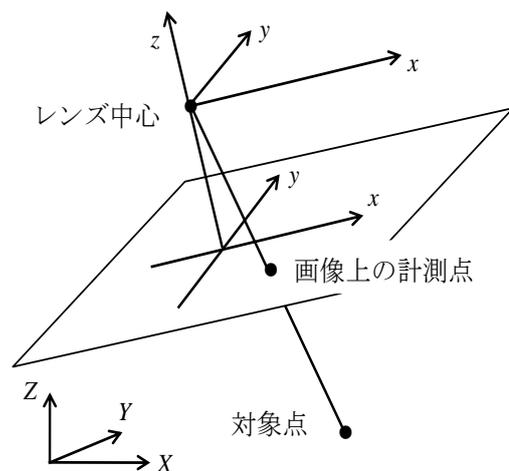


図-4 共線条件

剤で貼るのみでよく、穴をあけるなど石材を損傷することなく容易に設置できる。「石材を損傷しない」ということは、本遺跡で計測するに当たり強く要請された事項である。写真の撮影は、2014年8月29日より開始し、月に1回あるいは2回ずつ実施している。また、理論上は1枚の写真で重心間距離は計算できるが、計測精度向上のため、一回の撮影で各ターゲット5枚ずつ連続して撮影する。

図-6 に各計測地点におけるターゲット間距離（初期値）および5回計測したときの標準偏差を示す。標準偏差はいずれの地点においても数十mmのターゲット間距離に対して0.1mm以下であり、比較的よい精度で計測ができていることを示す。ただし、理論上、奥行き方向（Z方向）の成分は考慮していないため、可能な限り正面から写真撮影を行うことが望ましく、奥行き方向の段差がやや大きい箇所やや見上げる角度で撮影した場合、精度がやや落ちる傾向が見られる（例えば、ターゲットSubT1やBSW2など）。

図-7～**図-9**に2015年6月30日までの各計測地点におけるターゲット間距離の変動幅を示す（**図-7**に基壇に設置したターゲットB1, B2, B3, BSW1, BSW2, BSE1,



図-5 バイヨン寺院中央塔におけるターゲット設置位置 (図の上が北を示す)

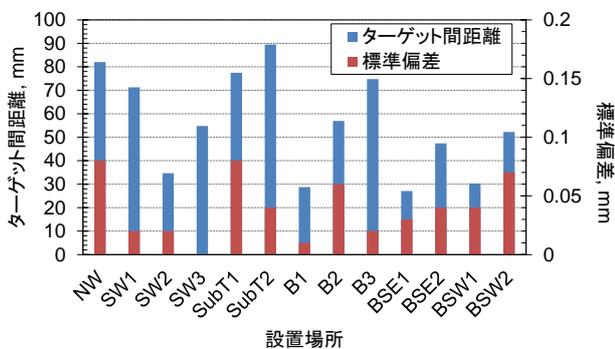


図-6 目地開き・開口幅の初期値および標準偏差

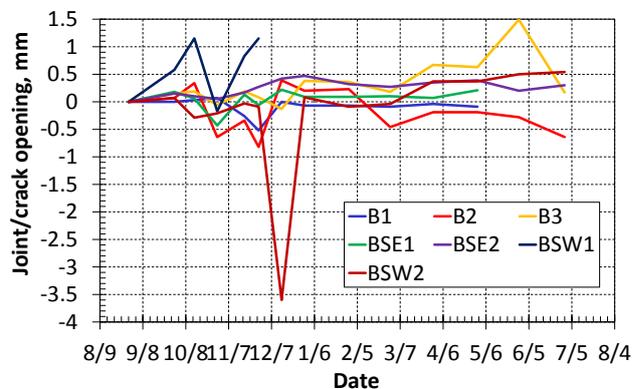


図-7 基壇部 (B1, B2, B3, BSW1, BSW2, BSE1, BSE2) における目地開き・開口幅の経時変化

BSE2について、図-8に主塔の上部に設置したターゲットSW1, SW2, SW3, NWについて、図-9に副塔内部に設置したターゲットSubT1, SubT2についてそれぞれ示す。ただし、本図では目地が開く方向を正とした。本図より、ほぼ全てのターゲットで、目地および亀裂は、開口あるいは閉口を周期的に繰り返しており、その変動幅も概ね1.0mm以下である。また、開口あるいは閉口が進展的に進むといった傾向は見られず、いずれの場所においても比較的安定していると考えられる。ただし、BSW2が2014年12月14日において3cm以上ターゲット間距

離が狭まっているが、12月30日にはほぼ元の距離に戻っている。12月14日においては、5枚の写真より計算したターゲット間距離の標準偏差が0.25mmとやや大きな誤差が発生していたことから、異常値であると判断した。また、BSW1は2014年12月にターゲットが損傷し、計測が不可能となった。さらに、撮影された写真に不具合(手振れ、ピンボケなど)が生じており、ターゲット間の距離が計算できなかったケースもいくつかあった。これは、図-2で示した明度分布のようにターゲットの黒色部分と円形の境界が明瞭で、明度の閾値が明確に定義で

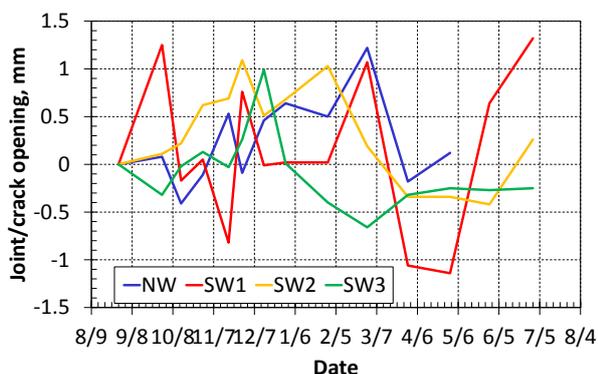


図-8 主塔上部 (SW1, SW2, SW3, NW) における目地開き・開口幅の経時変化

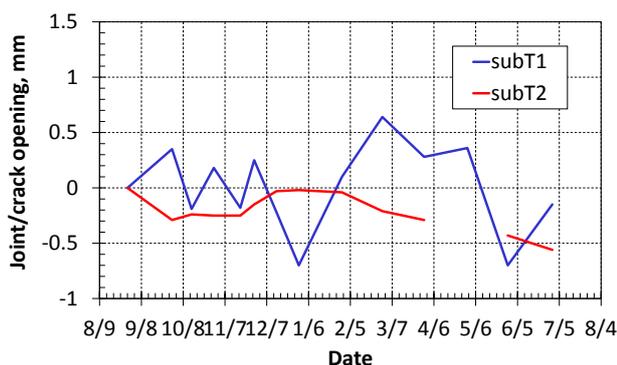


図-9 副塔内部 (SubT1, SubT2) における目地開き・開口幅の経時変化

きなれば、円形部分を認識できず、重心計算ができないためである。特に副塔内部に設置したターゲットは暗部に位置し、フラッシュを使用しても、手振れ・ピンボケなどが生じやすかったためであると考えられる。

4. まとめ

本研究では、バイヨン中央塔の基壇、主塔上部、副塔内部における石積みの挙動（亀裂進展・目地開きに伴う石積みの動きなど）を正確に把握するため、合計13か所に反射ターゲットを設置し、精密写真測量（単写真測量）を用いた計測を実施した。以下に本研究により得られた知見などをまとめる。

- 反射ターゲットを設置したいずれの場所においても、周期的な開・閉口を繰り返しており、変動幅は $\pm 1\text{mm}$ 程度である。
- また、開口あるいは閉口が進展的に進むような傾向はいずれの場所においても見られず、現時点で、安定性を保っているものと考えられる。
- 本計測手法は、計測に際し、電源を必要とせず、安価でターゲット設置も容易であり、耐候性・耐久性に優れ、「誰でも簡易に計測できる」という最大の

特長がある。

- 本手法は、クラックゲージを用いた計測のように常時、開口幅の経時変化をモニタリングするというタイプの計測方法ではなく、例えば、遺跡の管理者が定期的に点検を行う際、デジタルカメラを持参し、写真を撮影さえすれば、目地および亀裂の開口幅の測定ができ、過去の計測結果から、経時変化がわかり、石積みの変状が評価できるというものである。
- また、今後の課題としては、以下の点が挙げられる。
- 主塔の南西側においては別途パイ型クラックゲージを用いたリアルタイム計測が実施されており、異なる計測手法による結果の比較を行う必要がある。
 - 温度の変化による石材そのものの伸びや1日における目地・亀裂の開口幅の時間変化を調べる必要がある。
 - 別途実施している基壇内部の土壌水分の計測結果、主塔上部で計測している風速などの測定結果などとあわせて、中央塔およびその基壇の変状メカニズムの解明を行う必要がある。
 - 今後も計測データを蓄積することで、バイヨン中央塔の保全・修復計画の立案に有益な情報を提供していく必要がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、岡山大学環境生命科学研究所、西山哲教授ならびに京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻、矢野隆夫技術専門員に多大なる協力・指導を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本国政府アンコール遺跡救済チーム (JASA) : “アンコール遺跡救済 ユネスコ信託基金による日本政府第3期事業報告書 Book II, バイヨン寺院 保存修復研究報告書”, 2011.
- 2) Kanazawa A, Nishiyama S, Yano T and Kikuchi, T.: Measurement of the crack displacement using digital photogrammetry for evaluation of the soundness of tunnels. *Proc. of GEOMATE 2012*, KL Malaysia, Nov. 14-16, paper ID:250, 2012.
- 3) 金澤 彬, 西山 哲, 矢野隆夫, 菊地輝行: 構造物の維持管理のためのひび割れ幅の画像計測手法の研究, 第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.332-336, 2012.
- 4) Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K.: Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 22 (3), pp. 121-140, 1985.
- 5) Trinder, J. C.: Precision of digital target location. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55, pp. 883-886, 1989.
- 6) Penna, M. A.: Determining camera parameters from the perspective projection of a quadrilateral, *Pattern Recognition*, 24(6), pp. 533-541, 1991.

Crack/joint measurement of ancient masonry structures using photogrammetry at Bayon central tower, Angkor ruins, Cambodia

Yuki NAKANISHI, Tomofumi KOYAMA, Ryota HASHIMOTO
and Yoshinori IWASAKI

It is necessary and important to evaluate the stability of ancient masonry structures properly for the preventive conservation of the world heritage. In this study, Joint and/or crack measurement using photogrammetry was carried out to investigate the stability of Bayon temple, Angkor, Cambodia to investigate and its foundation. The adopted method is simple without any electricity and does not require any special skill for the measurement (just take photos of targets), which will be a merit to apply to the measurement of masonry structure registered as a world heritage. According to the measurement, each target does not show any progressive displacement and the masonry buildings will be stable in this stage.