写真測量技術を用いた土構造物の安定性に関する研究 - タジキスタン共和国アジナ・テパ仏教遺跡の例 -

Study on the stability of the earthen archaeological structure using photogrammetry:

the case of the buddhism monastery of Ajina Tepa, Tajikistan

藤井幸泰」

1 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科・fujii@meijo.ac.jp

概 要

遺跡構造物の風化や劣化には様々な要因が考えられるが,乾燥地帯においては塩類風化が問題になるこ とが多い。タジキスタン共和国アジナ・テパ仏教遺跡の土構造物を対象に,写真測量を用いた記録活動を 実施した。さらに Fujii et al. (2009)において塩類風化のメカニズムも明らかにし,土構造物が風化侵食でオ ーバーハング状態となり,小規模な崩壊が起きていることを報告している。この報告では崩壊が生じた土 構造物について,その形態や破断面の状況から崩壊メカニズムを検討し,下部侵食により片持ち梁の様相 を示し,自重により崩壊すると考えた。同様に遺跡内の崩壊に瀕した土構造物についても,写真測量によ る記録結果を示し,その危険度について検討を試みた。さらに塩類風化による侵食への対策として,遺跡 修復時には下部構造を厚くした。

キーワード:立体写真,三次元モデル,塩類風化,浸食,崩壊

1. はじめに

遺跡構造物の風化や劣化の要因として,自然現象(風雨・塩類風化など)・生物(植物・動物)・人為的破壊など が挙げられる。中でも自然現象による風化や劣化は,長期 間にわたって継続するものであり,地盤工学や応用地質学 分野の専門家が積極的に関われる領域である。実際に塩類 風化などのメカニズムの解明が,遺跡や構造物の修復保存 に役立っている事例もある^{1,2}。

土木や資源といった工学分野では、地すべりなどの安定 性解析が多数行われている。特に北海道・豊浜トンネルの 事故以来、岩盤崩落のメカニズム解析等が行われている ³⁻⁵⁾。塩類風化のメカニズムを推定した Fujii ほか¹⁰の報告 には、土構造物が塩類風化を受けてオーバーハング状態と なり、小規模であるが崩落が起きている。人類の遺産とな りうる遺跡の修復・保存のためにも、また地球にやさしい 土構造物の安定性維持のためにも、土構造物の崩落メカニ ズムを探り、安定性向上のための対策が必要である。ここ では三次元写真測量で記録を取得できた、タジキスタン共 和国アジナ・テパム教遺跡の土構造物を対象に、崩壊現象 に焦点をあてた研究の一例を紹介する。

2. アジナ・テパ仏教遺跡について

タジキスタン共和国,首都ドシャンベから南方およそ 100 kmに位置する(図1),古シルクロード沿いの仏教遺 跡がアジナ・テパである。紀元7~8世紀に建造された幅 50 m長さ100 mのほぼ長方形の遺跡で,北西の仏塔を中 心とする「塔院」部と,南東の四角い庭を囲む「僧院」部 から形成される(図2)。8世紀後半ごろには周辺地域がイ スラム化され,遺跡は意図的な破壊を受けた。その後墳丘 として存在していたが,1960~75年にかけて旧ソ連の考 古学者らによる大規模な発掘作業が実施され,多数の記録



図 1 タジキスタン共和国とアジナ・テパ遺跡の位置図

が採られた ⁰。しかしその後は適切な処置がとれられず, 2005 年にユネスコによる修復プロジェクト開始時には, かなりの劣化が進んでいた (Fodde ほか⁷⁾)。

アジナ・テパの建造物はパフサ(藁などを混ぜた粘土塊) と日干しレンガで造られている。遺跡全体を対象に地形図 を作製すると同時に,倒壊の危険性の高い壁について,立 体写真測量を用いた三次元記録活動を実施した。



図 2 アジナ・テパ遺跡の地形標高図

3. 写真測量による三次元記録活動

写真測量とは、写真上で被写体の計測を行う技術である。 写真測量技術による遺跡の計測については、藤井⁸⁾や Fujii ほか¹⁾に詳しい記載がなされている。はじめに対象物とな る遺跡の壁などを写し込んだ左右二枚のデジタル写真撮 影を実施する(図3)。立体写真撮影時の左右カメラの位 置と撮影方向の情報があれば、対象物に関する両画像間の 視差差から対象物の三次元情報を取得することができる。 しかし写真撮影時に、カメラ位置と撮影方向を精密に測定 することは難しい。そこで標定点と呼ばれる既知のポイン トを複数点設置し、写真撮影時に対象物と共に写し込む。 これら標定点の写真上での位置と視差差と実位置から、撮 影時のカメラ位置と撮影方向を最適解として計算するこ とになる。これら標定点は、遺跡内に設置した基準点を用 いてトータルステーションで測量し、遺跡内の統一座標系 として利用した。

上記で撮影したデジタル立体写真をコンピューターに 取り込み,写真測量解析ソフトを用いて標定点からカメラ 位置と撮影方向を計算する。立体写真を撮影時の状態に復 元する標定作業の後,解析ソフトは自動的に左右立体写真 の同じ位置を見つけ出し,三次元モデルを作成できる(図 4)。さらに三次元モデル上には写真を張り付けることがで き,テクスチャーマッピングとしての表現が可能である。



図 4 土構造物の三次元モデルとテクスチャーマッピング



図5 土構造物の断面線

三次元モデル作成後は,任意面での断面線作成などが可 能となる。図5に一例を示す。これは二組の立体写真から 二つの三次元モデルを作成し,それぞれから作成した同一 面での断面線を組み合わせたものである。

上記のような立体写真撮影と三次元モデル作成を図 6 に示す4つの土構造物に適用し(Wall-A~D),5か所において断面線の作成を実施した。

Cross-Sections of damaged Walls



図6 遺跡内の土構造物の断面図(Fujii ほか¹⁾より)

4. 構造物の崩壊について

4.1 崩壊メカニズムの検討

修復プロジェクト中に崩壊が生じた壁-A を対象に、その崩壊メカニズムの検討を行う。図6中 a2断面図から判断できるように、土構造物の下部が浸食され、オーバーハング状態となっていた。また壁-A の崩壊部分が浸食深さと一致していた。崩壊後の破断面を観察すると(図7)、上部は比較的滑らかな構造を示しているが、下部の破断面構造は粗い。これらの構造から、初期段階は引張応力により上部からクラックが進行し、その後に崩壊に遷移したものと推定できる。なお、遺跡の大半は日干しレンガで構成されているが、長年の風化によって、日干しレンガの接合面を含むオリジナル形状を認識するのは難しい。



図7 図6中壁Aのa2断面付近の崩壊

そこで片持ち梁にかかるモーメント等を考慮してその 破壊過程を推定する。図8右上の破線赤丸付近にかかる引 張り応力は下記の方程式であらわされる。

 $\sigma_x = 3W^2 \rho g/H$ $\vec{z}(1)$

ここでHは構造物の高さ,Wは構造物下部の浸食深度,

ρは日干しレンガの密度,gが重力加速度である。

壁-Aの a_2 断面では実際に崩壊が起きており, H=3.17 m, W = 0.69 m であった。そこで日干しレンガの密度を ρ = 1,240 kg/m³ と仮定すれば⁹,最大引張応力として σ_c = 5.5 kN/m²が得られる。



図8 断面図と下部侵食による片持ち梁様相へのモデル化

この強度は妥当な値であろうか? 日干しレンガ等の 土構造物の一軸圧縮強度試験結果によれば¹⁰⁾,乾燥状態の 土構造物の強度は 1,000 kN/m² 程度と高いが,含有水分の 増加により強度は下がり,水分が 15%以上含まれると 100 kN/m²以下となる。さらに岩石の強度試験ではあるが,圧 縮強度に対して引張強度は 1/10 程度の大きさとなってい る¹¹⁾。これらの事実を考慮すれば,遺跡内の土構造物の引 張強度として σ_{c} = 5.5 kN/m²という値は、崩壊が生じた冬 季の雨季も考慮すれば,それほど外れた値ではない。

Fujii ほか¹⁾に示されているように、壁下部の浸食は、塩 類風化によるものであり、季節変化等に応じて年々進行す るものと考えられる。浸食深度 W がある値に達して、自 重に耐えられなくなった際に、オーバーハング部分が崩壊 するものと考えられる。このような流れを図9に示す。



図 9 塩類風化による壁の浸食・崩壊の過程 (Fujii ほか¹⁾より)

4.2 他の壁の状況について

図 6 には壁-A 以外の壁の断面線も示されている。した がってこれらの壁の高さ(H) と浸食深度(W)の計測も 可能である。これらの結果を図 10 に示す。図 10 には式(1) と上記の σ_c を利用した H = $3W^2 pg/\sigma_c$ の曲線を実線で示し ている。四角点が壁-A の a_2 断面の H-W 状況であり、ダイ ヤモンド点がその他の壁の状況を示している。土構造物の 高さ(H) が変化することは無く、浸食深度(W)が年々



図 10 遺跡内の壁の高さ(H)と浸食深度(W)関係と限界線

増加していく。すなわち最終的にこの深度が限界線(実線) に到達した場合に,壁のオーバーハング部の崩壊が起きる と考えられる。このような進行を破線矢印で示す。最も侵 食が進んだ壁においても,まだ10cm以上の余裕が存在し, 崩壊前の壁-Aに比べればまだ安全と考えられる。

5. 考察と修復作業

1960~75年にかけて旧ソ連の考古学者らによる大規模 な発掘作業の記録のによれば、土構造物のオリジナルの厚 さは最大 2.4 m であったとされる。発掘作業後にどれくら いの厚さが残されたかは不明であるが、図6に示した断面 図を見る限り、かなり薄くなっていることがわかる。特に 壁-D は 0.5 m 程度の厚さしか残っておらず、両脇には崩壊 によって堆積した土が存在することがわかる。すなわち図 9に示す塩類風化による下部の浸食と、上部の崩壊が何度 か起きていると予想できる。すなわちこのまま放置してお けば、図 10 の破線矢印に示すように浸食と崩壊がさらに 進むと予測される。

そこで修復保存作業として、新しい日干煉瓦と土の漆喰 を用いて、オリジナルの土構造物を覆うように修復を行っ た。この際、オリジナルの構造物と新しい部分の境界がわ かるように砂をつめ、将来的にタジキスタン共和国の技術 者らが再発掘できる構造とした。さらにここで述べてきた 塩類風化による浸食と崩壊への対策のため、下部を厚く健 固な構造とした(図 11)。本来は排水溝を設置して水の動 きを制御したり、覆い屋を用いて蒸発散量の抑制を行うべ きだが、プロジェクトの期間と予算の制限によりかなわな かった。

6. おわりに

アジナ・テパ仏教遺跡は古シルクロード沿いに存在する。 2014年「シルクロード:長安-天山回廊の交易路網」が世界 文化遺産に登録された。中国とカザフスタンとキルギスタ



図 11 修復後の壁-A

ンでの3か国33資産で構成される。残念ながらタジキス タンは、その波には乗れなかったようである。修復作業後、 ちょうど10年が経過した。現在の状況は分からない状況 であるが、保存状態が気になる昨今である。

7. 謝辞

三次元記録活動は,外務省ユネスコ文化遺産保存日本信 託基金によるプロジェクト(2005~2008年)で行われた 内容の一部である。修復専門家としてプロジェクトに参加 し,現地やラボで共同研究を実施頂いた,埼玉大学教授で あった故渡辺邦夫氏,英国 Bath 大学の講師であった故 Enrico Fodde 氏には大変お世話になった。また現地作業に おいて,当時は埼玉大学大学院生だった村上和哉氏ならび に张寒冰氏にもご協力をいただいた。紙面を借りて感謝申 し上げます。

参考文献

- Fujii, Y., Fodde, E., Watanabe, K., Murakami, K.: Digital photogrammetry for the documentation of structural damage in earthen archaeological sites: the case of Ajina Tepa, Tajikistan. Eng. Geol. 105, 124–133, 2009. http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo. 2008.11.012.
- Kuchitsu, N., Ishizaki, T., Nishiura, T.: Salt weathering of the brick monuments in Ayutthaya, Thailand. Eng. Geol. 55, 91–99, 1999.
- (新地宏吉,水戸義忠:国道229号線豊浜トンネル上部斜面の岩盤崩落,メカニズムに関する地質工学的考察,応用地質,Vol.39,No.5, pp.456~470,1998.
- 4)米田哲朗,林謙二,ダカールゴネス,柏谷公希,金子勝比古:北 海道積丹半島における火砕岩の特性と岩盤崩壊の要因について, 地すべり,Vol.39,No.1,pp.14~21,2002.
- 5) 桑野 健, 佐々木靖人, 脇坂安彦:多変量解析による岩盤崩壊物 質の到達範囲の検討, 応用地質 Vol.45, No.1, pp.31~41, 2004.
- Litvinskij, B., Zejmal, T.I.: The Buddhist Monastery of Ajina Tepa, Tajikistan. Isiao, Rome. 190 pp, 2004.
- Fodde, E., Watanabe, K. and Fujii, Y.: Preservation of earthen sites in remote areas: the Buddhist monastery of Ajina Tepa, Tajikistan, Conservation and Mgmt. of Arch. Sites, Vol. 9 No. 4, 194–218, 2007.
- 8)藤井幸泰,渡辺邦夫,村上和哉:写真測量技術を用いた文化遺産の3次元調査:アジナ・テパ仏教遺跡(タジキスタン)における修復・保全活動,応用地質,Vol.48,No.5,pp.258-264,2007.
- 9) 浦 憲親:「土」に関わるが、泥舟にならないか? 北陸支部 Web 広報誌, No.36, 2010.
- Warren, J.: Conservation of Earthen Structures, Butterworth-Heinemann, p.71, 1999.
- 11) 山口梅太郎,西松裕一:岩石力学入門,東京大学出版会,331p, 1991.