

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2014～2016

課題番号：26303010

研究課題名(和文) アンコール遺跡バイヨン寺院の安定化と修復・保存に向けた地盤・岩盤工学的検討

研究課題名(英文) A study on the consevation of Bayon Temple, Angkor -soil and rock mechanics approach

研究代表者

小山 倫史 (Koyama, Tomofumi)

関西大学・社会安全学部・准教授

研究者番号：20467450

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、バイヨン寺院中央塔の安定化と修復・保存にむけて、以下に挙げる項目について検討を行った。すなわち、地盤工学的調査、物理探査による基壇内部の地盤構造の把握および解析モデルの高精度化、塔体・基壇の変状の現状把握、変状メカニズムの解明および変状要因の特定のための各種計測、基壇内部の地盤に対する土質試験および地盤構成モデルの高精度化、地盤解析技術を用いた基壇内部の地盤の応力-浸透連成解析および基壇と塔体の連成挙動の把握、塔体・基壇の構造安定化のための修復方法・対策工の設計およびその効果の検証、対策工実施後の構造安定性評価のための各種計測・モニタリングシステムの構築である。

研究成果の概要(英文)：In this study, for the consevation and maintenace of Bayon Cntral Tower (BCT), Angkor the following six issues were investigated, 1) investigation of geological structure of the basement of BCT using geophysical exploration and creation of sophisticate geological mode, 2) investigation of deformation/displacment of masonry joints and cracks and thir measurement using photo grammetry, 3) laboratory tests for the soil obtained from rammed earth and original ground to determine the mechanical properties for elasto-plastic sonstitutive model, 4) coupled stree-flow simulations for the stability of BCT and foundation ground using NMM-DDA, 5) investigation of the methodolgy for the reenforcement and its effects, 6) development of the measuremnt and monitoring system during and after restoration (for preventive conservation).

研究分野：地盤・岩盤工学

キーワード：バイヨン中央塔 アンコール遺跡 修復・保存 数値シミュレーション 現場計測・モニタリング 物理探査 土質試験

## 1. 研究開始当初の背景

アンコール遺跡は、1992年にユネスコ世界遺産リストに登録されると同時に、「危機にさらされている遺跡」としても登録され、保存修復が急務とされた。これを受けて、日本政府は1994年にアンコール遺跡の修復保存事業 JSA (Japanese Government Team for Safeguarding Angkor) を結成し、2005年までにバイヨン寺院北経蔵、アンコール・ワット寺院北経蔵、プラサート・スープラ N1/N2 塔の修復工事を完了した。「アンコール遺跡調査報告書」(1995~2008)、「バイヨン寺院北経蔵修復工事完了報告書」(2000)、「プラサート・スープラ塔修復工事完了報告書」(2005)、「バイヨン寺院全域の保存のためのマスタープラン」(2005)など。

2006年以降、第三期事業として、「バイヨン寺院南経蔵の修復工事」とともに、「バイヨン回廊の浮き彫り保存の研究」と「バイヨン寺院中央塔の構造的安定化のための補強方法の研究」に着手した。事業はユネスコ文化遺産保存日本信託基金を主な財源として進められているが、現事業段階に入り予算が大幅に削減されたため、本事業に対して求められている課題を克服するために十分な研究予算が確保できない状況である。

現在の塔体(基壇も含めた)の状態は、計測・モニタリングにより変状が著しく、更なる不安定化が進行している状況が伺える。また、1933年にフランス極東学院(以下 EFEO)により実施された既往の補強処置からは既に半世紀以上の年月が過ぎており、補強材の劣化も著しく、安定化と保存を実現する方策が切望されている。特に、塔体の変状に大きく関与していると考えられる基壇内部の地盤の変状・劣化の把握については、必ずしも十分な調査がなされているとは言えず、定量的な安定性評価までは至っていない。したがって、修復補強の具体策の提案のためには、変状メカニズムの把握を含めて検討する必要がある。詳細な地質調査、土質試験に基づいた精緻な数値解析モデルを用いた安定解析が必要不可欠である。

## 2. 研究の目的

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・ワットと双壁をなしその極点にある遺構である。本申請課題はバイヨン寺院中央塔の安定化を図り、保存するための実践的研究である。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。塔の変状を引き起こす要因と作用を詳細に把握し、適切な修復補強法を提案することで、塔を安定化・保存することが可能である。このために学際的な調査・研究・知見を結集して取り組む必要

がある。本研究は、特に、バイヨン寺院中央塔の地盤基礎構造と塔体構造の工学的挙動(相互作用)に着目し、塔および基壇の変状の把握およびメカニズム解明を目的とした計測・モニタリングを実施し、ボーリング・物理探査などの地盤調査に基づいた精緻な数値解析モデルを用いた安定解析によって塔体の工学的挙動を定量的に評価した後、修復補強の具体策の提案、実施および修復後の維持管理システムの構築を行い、バイヨン寺院中央塔の早急かつ恒久的な安定化・保存を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下に挙げる 6 つの研究項目について検討を行った。すなわち、①地盤工学的調査、物理探査による基壇内部の地盤構造の把握および解析モデルの高精度化、②塔体・基壇の変状の現状把握、変状メカニズムの解明および変状要因の特定のための各種計測、③基壇内部の地盤に対する土質試験および地盤構成モデルの高精度化、④地盤解析技術を用いた基壇内部の地盤の応力-浸透連成解析および基壇と塔体の連成挙動の把握、⑤塔体・基壇の構造安定化のための修復方法・対策工の設計およびその効果の検証、⑥対策工実施後の構造安定性評価のための各種計測・モニタリングシステムの構築である。

まず、①では、電気(比抵抗)探査を用いてバイヨン中央塔基壇の地質構造、特に、基壇内部のラテライトブロックの分布を明らかにした。②では、精密写真測量技術を用いて塔体および基壇部の石積の目地開きおよびクラックの進展を調査した。③では、数値シミュレーションに必要な地盤定数を決定するために、版築および原地盤より採取した土試料に対し、各種土質を実施するとともに、弾塑性構成モデルに必要なパラメータの同定を行った。④では、弾塑性構成モデル(下負荷面修正 Cam-clay モデル)を導入した応力-浸透連成 NMM-DDA (マニフォールド法-不連続変形法連成解析)を新たに開発し、石積構造物の安定性評価を実施した。⑤では、中央塔基壇内部に存在する弱部の補強方法の検討および地盤改良による効果の検証を④で開発した数値シミュレーションにより検証した。⑥では、塔体・基壇内部に設置した各種計測機器(土壌水分計、クラックゲージ、地下水位計、気象観測装置など)を統合し、遠隔で監視できるシステムの構築を試みた。

## 4. 研究成果

バイヨン中央塔基壇で実施した電気探査の測線位置および比抵抗分布を図-1 および図-2 にそれぞれ示す。図-2 において、600~1000  $\Omega \cdot m$  の層はラテライト層である。電気探査の結果、ラテライト層は、中央塔を取り

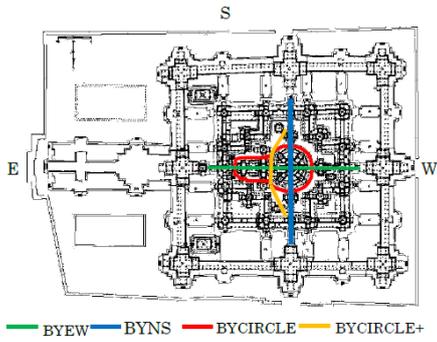


図-1 電気探査の測線位置.

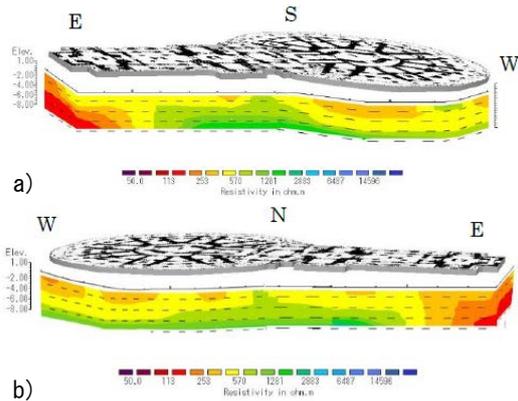


図-2 測線 BYCIRCLE における比抵抗分布,  
a) N からの鳥瞰, b) S からの鳥瞰.

巻く回廊の石畳の直下に分布しており、石塔直下にはラテライト層は存在していない可能性が高いことが明らかになった。このことは中央塔の変状メカニズムの解明において重要な知見であると考えられる。

塔体および基壇の石積の変状（目地開き・クラック）を調べるため、単写真測量を実施した。計測箇所は、特に変状が著しいとみ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）の計 13 地点である（図-3 参照）。図-4 に基壇部の計測結果を示す。計測の結果、いずれの場所においても、周期的な開・平衡を繰り返しており、変動幅は±1mm 程度である。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する。

版築土の力学特性を調べるため、現地で採取した土試料に対して圧密試験および三軸圧縮試験（CD 条件下）を実施し、弾塑性構成則の1つである下負荷面修正 Cam-clay モデルに用いるパラメータの同定を行った。図-5a, b に圧密試験と三軸圧縮試験およびこれらの再現解析の結果を示す。また、表-1 にパラメータの同定結果を示す。これらの結果より、バイオン中央塔の基壇版築土の力学挙動は、飽和化圧密土に対する下負荷面修正 Cam-clay モデルで十分表現できることが分

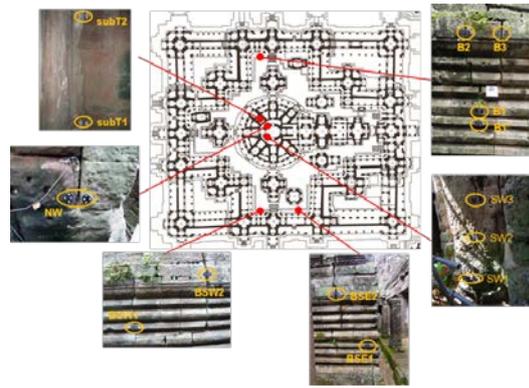


図-3 精密写真測量による計測位置.

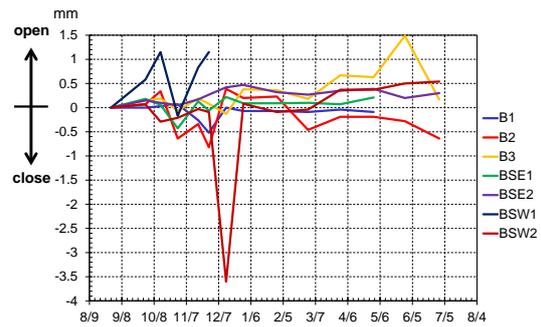
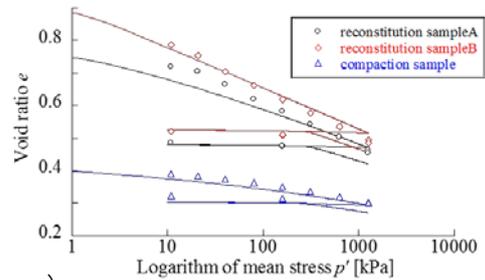
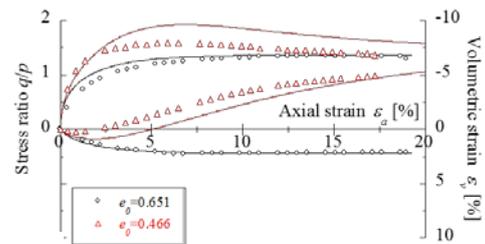


図-4 基壇部石積の目地開きの経時変化.



a)



b)

図-5 版築土に対する土質試験の結果, a) 圧密試験, b) 三軸圧縮試験(CD)

かった。

下負荷面修正 Cam-clay モデルを導入し応力-浸透連成問題に拡張した NMM-DDA (マニフォールド法-不連続変形法連成解析) を用いて、基壇内部に存在する弱部の補強方法の検討および地盤改良による効果の検証を行った。図-6 に今後実施が予定される基壇の補強工事時の掘削が周辺地盤および塔体に与える影響を検討することを目的として実施した掘削時安定解析の結果、すなわち掘削

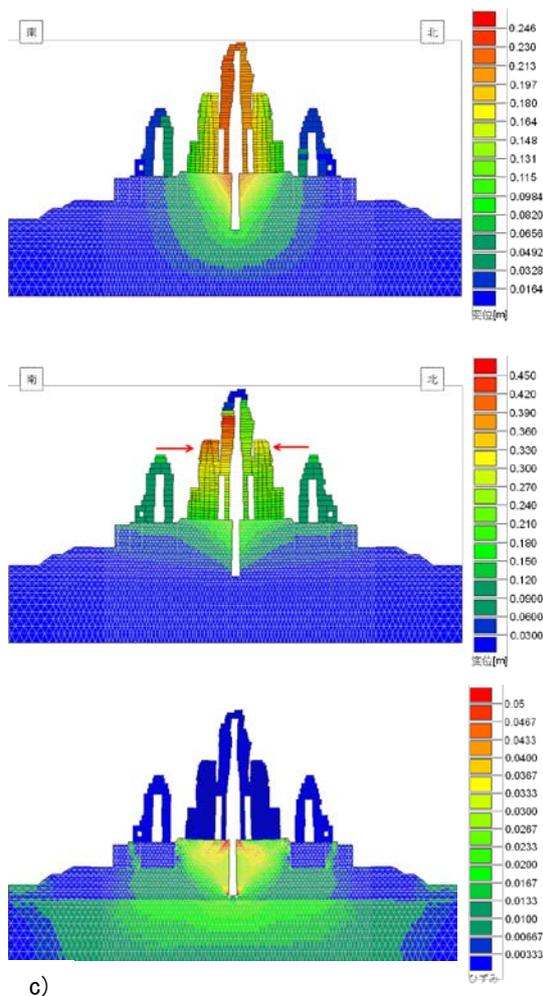


図-6 基壇内部の弱部に対する掘削安定時解析の結果、a) 鉛直変位、b) 水平変位、c) 偏差ひずみの分布。

後の水平・鉛直方向の変位および地盤内の偏差ひずみの分布をそれぞれ示す。新たに開発した NMM-DDA では、石積と地盤の相互作用を考慮した解析が可能であり、地盤の変状が塔体（石積）に与える影響を定量的に評価できる。また、図-6 より、掘削孔周辺の地盤の沈下、掘削孔へのせり出しが生じることにより、副塔は中央塔中心方向への傾斜が進行する。また、掘削後、掘削壁面の最下部および、主塔脚部直下でせん断が進むが、地盤の全面的な破壊には至らないことが分かった。

また、図-7 に基壇の石積のオーバーラップ幅を変化させたときに地盤内に発生する偏差ひずみの分布を示す。本図より、石積のオーバーラップ幅を変化させることで、地盤の破壊形態（すべり面の発生位置）が変化することが確認された。また、石材の厚み、オーバーラップ幅、段数を変化させることで、石材間の力の伝達形態が変化し、荷重分担率が変化することが明らかになった。また、これらのことが、地盤の破壊形態に大きな影響を与えることが分かった。

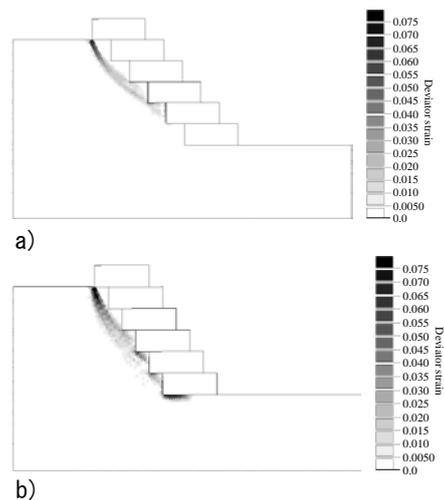


図-7 地盤内の偏差ひずみ分布、a)  $l/B=0.65$ 、b)  $l/B=0.75$

塔体・基壇内部に設置した各種計測機器（土壌水分計、クラックゲージ、地下水位計、気象観測装置など）を統合し、無線 LAN により遠隔で監視しできるシステムの構築を行い、試験運用を実施した。その結果、各種計測データが一括で管理することができるようになった。ただし、現地のインターネット回線の状況によりデータの送信が不安定になることが確認されたため今後、ネット環境も含めて改善が必要である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- 1) Hashimoto, R., Kikumoto, M., Koyama, T., and Mimura, M. Method of deformation analysis for composite structures of soils and masonry stones. *Computers and Geotechnics*, 2017; 82(2): 67-84 (査読有)。
- 2) 橋本涼太, 小山倫史, 菊本統, 三村衛. 節点ベース要素で拡張した弾塑性 NMM-DDA の開発と検証, 地盤工学ジャーナル, 2016; 11(2): 163-177 (査読有)。
- 3) Hashimoto, R., Koyama, T., Kikumoto, M., Saito, T. and Mimura, M. Stability analysis of masonry structure in Angkor Ruin considering the construction quality of the foundation. *Journal of Civil Engineering Research, GIZ2014 special issue*, 2014; 4(3A): 78-82, DOI: 10.5923/c.jce.201402.13 (査読有)。

〔学会発表〕（計 13 件）

- 1) Hashimoto, R., Koyama, T. and Kikumoto, M. Applicability of NMM-DDA with node-based element for the bearing capacity of cohesive-frictional ground. Proc. of the 9th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS9), Bali, Indonesia, 18-20, October, 2016 (査読有)。
- 2) Hashimoto, R., Koyama, T., Kikumoto, M.

- and Mimura, M. Numerical study on the bearing capacity of masonry building foundation in Cambodia, Proc of Int. Mini Symposium CHUBU (IMS-CHUBU), Nagoya, Japan, 26-28, May, 2016, paper ID: No.11 (査読有) .
- 3) 中西由起, 小山倫史, 橋本涼太, 岩崎好規. 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. 第44回地盤工学に関するシンポジウム講演集, 2016, p. 137-142, (2016年1月8, 9日, 九州大学伊都キャンパス), 福岡 (査読有).
  - 4) 橋本涼太, 小山倫史, 菊本統, 三村衛. 石積基壇構造の支持力特性に関する数値解析的検討. 第51回地盤工学研究発表会講演概要集, 2016, pp. 135-136, (2016年9月13~15日, 岡山大学, 岡山).
  - 5) 福田光治, 岩崎好規, 本郷隆夫, 小山倫史, 桑島流音, 中川武, 石塚充雅. アンコール遺跡砂岩とラテライトの風化レベルと強度. 第51回地盤工学研究発表会講演概要集, 2016, pp. 133-134 (2016年9月13~15日, 岡山大学, 岡山).
  - 6) 桑島流音, 小山倫史, 橋本涼太, 福田光治, 岩崎好規, 石塚充雅. プレア・ヴィヘア寺院第三ゴープラにおける地盤調査と石積構造物の変状分析. 第51回地盤工学研究発表会講演概要集, 2016, pp. 137-138 (2016年9月13~15日, 岡山大学, 岡山).
  - 7) Nakagawa, K., Iwasaki, Y., Araya, M., Yamada, S., Shimoda, I., Nakagawa, T. and Koyama T. Resistivity profiles and foundation structure of Central Tower in Bayon Temple, Angkor Thom. Proc of the 10th Asian Regional Conference of IAEG, Kyoto, Japan, Sep. 26-27, 2015.
  - 8) Hashimoto, R. Koyama, T., Kikumoto, M. Development of soil-water coupled NMM-DDA. In: Proc of the 49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, USA, June 28- July 1, 2015, paper ID: ARMA 15-460, pp. 1-7 (査読有) .
  - 9) 中川康一, 岩崎好規, 房前友章, 新谷真人, 山田俊亮, 下田一太, 福田光治, 原口強, 中川武, 小山倫史. バイヨン寺院(アンコールトム)直下の比抵抗断面と地下構造. 日本応用地質学会関西支部研究発表会講演論文集, 2015, pp. 25-28 (2015年5月20日, 大阪市立大学, 大阪).
  - 10) 橋本涼太, 小山倫史, 菊本統, 三村衛. 土-水連成 NMM-DDA の開発と検証解析. 第50回地盤工学研究発表会講演概要集, 2015, pp. 803-804 (2015年9月1日~3日, 北海道科学大学, 札幌市) .
  - 11) 中西由起, 小山倫史, 橋本涼太, 岩崎好規. アンコール遺跡バイヨン中央塔における精密写真測量を用いた塔体・基壇の石積み変状の計測. 第50回地盤工学研究発表会講演概要集, 2015, pp. 37-38 (2015年9月1日~3日, 北海道科学大学, 札幌市) .
  - 12) 橋本涼太, 小山倫史, 齊藤徹, 菊本統. NMM-DDAによるアンコール遺跡バイヨン寺院の基壇掘削時安定解析. 第49回地盤工学研究発表会講演概要集, 2014, pp. 29-30 (2014年7月15~17日, 北九州国際会議, 北九州市) .
  - 13) 齊藤徹, 菊本統, 橋本涼太, 小山倫史. アンコール遺跡バイヨン寺院の版築および周辺の自然地盤の力学特性. 第49回地盤工学研究発表会講演概要集, 2014, pp. 27-28 (2014年7月15~17日, 北九州国際会議, 北九州市) .
- [その他]
- Annual technical report on the survey of Angkor monument 2014-2015, Safeguarding of Bayon Temple of Angkor Thom, JASA: JAPAN+ APSARA Authority, 222p.
6. 研究組織
    - (1)研究代表者
 

小山 倫史 (KOYAMA, Tomofumi)  
関西大学・社会安全学部・准教授  
研究者番号：20467450
    - (2)研究分担者
 

原口 強 (HARAGUCHI, Tsuyoshi)  
大阪市立大学・理学研究科・准教授  
研究者番号：70372852

中川 康一 (NAKAGAWA, Koichi)  
大阪市立大学・都市研究プラザ・名誉教授  
研究者番号：80047282

岩崎 好則 (IWASAKI, Yoshinori)  
(一財)地域地盤環境研究所・専務理事  
研究者番号：80450899

菊本 統 (KIKUMOTO, Mamoru)  
横浜国立大学・都市イノベーション研究院・准教授  
研究者番号：90508342