

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2013～2016

課題番号：25303022

研究課題名(和文) アンコール遺跡バイヨン中央塔の総合的な安全性評価と対策の実践に関する研究

研究課題名(英文) Structural stability evaluation study of Bayon main tower, Angkor Thom in Cambodia

研究代表者

新谷 真人 (ARAYA, MASATO)

早稲田大学・理工学術院・名誉教授

研究者番号：30434319

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000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塔体構造の工学的挙動の観測システム及び分析手法の構築、離散体力学数値計算手法による構造的な安全性評価方法の提案を行い、塔体の工学的挙動、安全性を定量的に評価する研究を展開した。具体的な成果としては、3次元データの利用による風洞実験の実施、石積み耐力に関する水平載荷試験、バイヨン主塔の構造安定性の評価、バイヨン主塔の亀裂箇所のモニタリング、といった各項目の研究を実施し、これらの総合的な評価に基づいて、バイヨン中央塔の構造工学的研究を展開した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we conducted the structural engineering study mainly about building monitoring system of structural movement and structural stability assessment by Discrete dynamics. As concrete result, we obtained such as wind tunnel test using the model by 3D laser scanning data and 3D printer, horizontal loading test of dry masonry, assessment of structural stability of Bayon main tower, and assessment and monitoring of crack movement. Based on the each research result, we conducted the overall assessment about structural stability of Bayon main tower.

研究分野：建築構造

キーワード：アンコール遺跡 バイヨン寺院 組積造 構造安全性評価

1. 研究開始当初の背景

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る。その建設から現在にいたる約 800 年間に様々な要因と作用によって劣化・変状が進み、ほぼ 1/3 強の塔構成石材が既に落下している。これ以上の中央塔の落石が進行するならば、バイヨン寺院はバイヨン寺院でなくなるとも危惧される状況にある。現在は突発的な落石が起こるなど塔の部分的崩壊の危険性が指摘され、補強対策が求められている。(Fig.1、Fig.2 にバイヨン中央塔の 1930 年代の EFE0 の修復前の様子と現在の様子を示す。)



(左) Fig.1 1930 年代の様子

(右) Fig.2 現在の様子

2. 研究の目的

修復補強の具体策の提案・実施、バイヨン寺院中央塔の早急かつ恒久的な安定化と保存の実践に繋げることを主たる目的に研究を展開した。これらの研究成果は、当該建物のみではなく、多くの歴史的建造物に適用可能な研究成果となるべく研究を展開した。

3. 研究の方法

本研究では、バイヨン寺院中央塔の塔体構造の工学的挙動の観測システム及び分析手法の構築、離散体力学数値計算手法による構造的安全性評価方法の提案を行い、塔体の工学的挙動、安全性を定量的に評価した。次節にて、3 次元データの利用による風洞実験の実施、石積みの耐力に関する水平載荷試験、バイヨン主塔の構造安定性の評価、バイヨン主塔の亀裂箇所のモニタリング、といった主な研究実施事項について報告する。これらの総合的な評価に基づいて、研究を展開した。

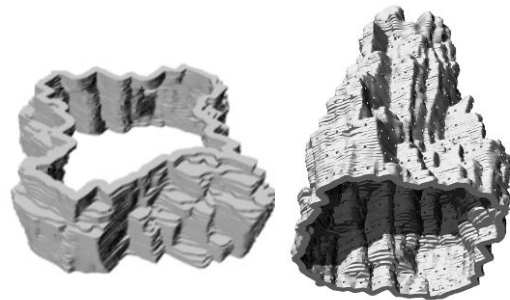
4. 研究成果

4 - 1. 3 次元データの利用による風洞実験の実施

3D レーザースキャニングデータから 3D プリンタを用いて風洞試験用模型を作成する新たな手法を提案し実践した。そうした手法は、図面化並びに模型製作が非常に困難である建造物において、非常に有用かつ汎用的な手

法となり得ると考える。本研究では、そうした流れでアンコール遺跡バイヨン寺院を対象とした風洞試験の実施と評価を示す。

Fig.5 は風洞実験の実施のために制作した模型の表面の様子であり、中央塔の G.L.+26m から主塔頂部(G.L.+42m)までを 1/50 の縮尺で製作したものである。製作の手順は、東京大学池内・大石研究室で作成された中央塔の 3 次元レーザースキャニングデータに厚みを与え、その 3D データに風圧測定用の孔をあけた後、3D プリンタで出力した。この手順の中で、スキャニングデータから風洞試験模型用に一定の厚みでモデルを作成するアルゴリズムを新規に提案し実践している。



(左) Fig.3 切断面を積層している様子

(右) Fig.4 出力前の 3 次元データ

風洞試験の諸条件は以下のように設定した。風向角は風向の上流側にバイヨン寺院中央塔の北面が正対する時を 0° とし、0° から 360° まで 5° ピッチで 73 風向の測定を行った。測定点は合計で 430 点を設けた。また、設計風速 40m/s から算定された実験気流は、模型頂部における平均風速を 10m/s とし、接近流は地表面粗度区分 となるように模擬した。相似則は幾何学的縮尺 1/50、風速縮尺 1/4、時間縮尺 1/12.5 として、実時間 10 分間のデータを 10 サンプルずつ各風向で測定した。サンプリング周波数は 1/800Hz とし、風圧係数の算定には塔頂部の速度圧で基準化を行った。また、汎用解析ソフト ANSYS を用いて算出した気流図と照合することで、平面的な形状の影響により、隅角部の他に、剥離点後方の凹部で渦が発生し、大きな負圧が生じる場合があることを確認した。



Fig.5 風圧模型の表面



Fig.6 風洞試験の様子

4 - 2 . 石積みの耐力に関する水平載荷試験
 石積みの耐力を検証する目的で、室内にて石積みの水平載荷試験を Fig.7 のように実施した。得られた試験結果より、石積みの耐力の簡易算定式について検証した。石積みの崩壊形式としては、転倒モードと滑動モードの 2 種がある (Fig. 8)。諸条件により、転倒モードまたは滑動モードの発生荷重が算定され、それらの最小値が石積みの耐力として算定される。実験では、石積みの最下部に亀裂を模擬した不連続面を設け、亀裂角度を Fig.9 のように 0 度、15 度、25 度の 3 種に対して、載荷位置をパラメータとして各種試験を行った。その結果から概ね石積みの耐力の簡易算定式が概ね正しいことを確認した。

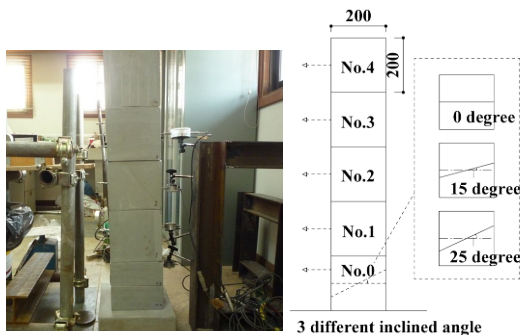


Fig.7 石積みの水平載荷試験の様子と概要



Fig.8 転倒モード(左)と滑動モード(右)の様子

4 - 3 . バイヨン主塔の構造安定性の評価
 前節で示した風洞試験及び石積みの耐力試験結果に基づき、バイヨン主塔上部の構造安

全性の評価を実施した。その際の石積みの断面および計算のための形状は、3 次元スキャニングデータから抽出した立面及び高精細写真より作成した。

評価結果を Fig.9 に示す。Fig.9 において、黒色に着色された箇所が、上記の設定の必要耐力を満たさない箇所であり、補強について議論される必要がある。灰色に着色された箇所は、必要耐力を満たす結果であった。過去に実施された EFE0 による目地のコンクリートの接着効果や鋸工などを考慮した評価も最小限の補強工事を計画する上では肝要である。また、主塔の周囲に足場等を設置した上で、石材の劣化状況や亀裂の状況、石積みの状態を詳細に観察した上での対策も肝要である。

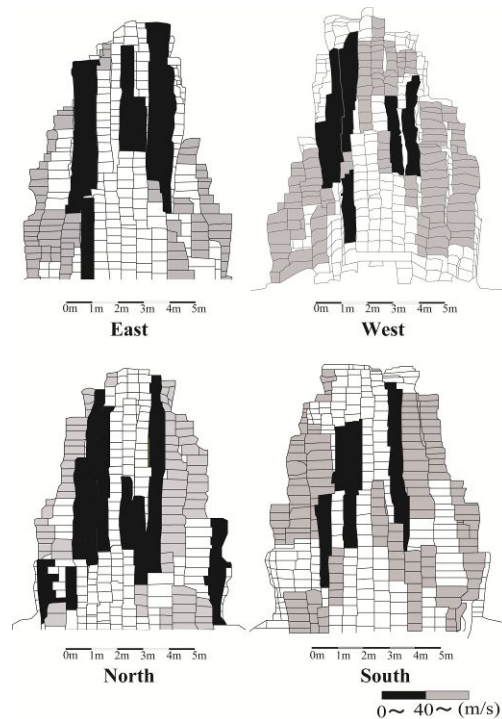


Fig.9 強風による崩落危険箇所の評価

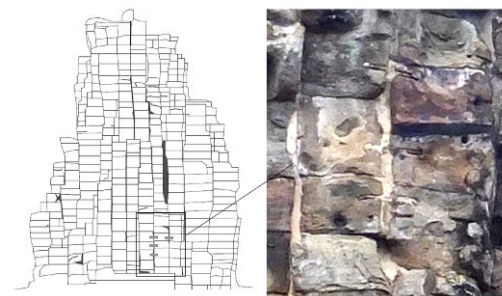


Fig.10 主塔頂部の EFE0 による修復痕の様子

4 - 4 . バイヨン主塔の亀裂箇所のモニタリング

バイヨン主塔中段ではクラックの進展の観察が構造的に重要であると選定された箇所を中心に、変位計を用いたモニタリングを実施してきた (Fig.11)。それら観測された時系列データを周辺環境因子と比較すると、気温や

降雨量の変動は亀裂の開閉に高い影響があることが示唆されてきた。バイヨン中央塔におけるいくつかの亀裂付近に変位計、含水率、表面温度等を観測し分析した。それら観測された亀裂変位に対して、影響度が高いと推定される気温及び降雨を要因とした線形モデルを構築することで亀裂変位の分析を行った。

まず過去の1年間にバイヨン寺院で測定された亀裂、目地の変動幅の時系列データに対して、気温、降雨量の時系列データを成分とした亀裂幅変動モデルを提案することで現象の分析を実施した (Fig.12)。モデルに関しては単純な一次式を想定し、重回帰分析を用いてパラメータを決定した。降雨量モデルには、タンクモデルのように降雨量の蓄積、排出を考慮したモデルとした。

本分析手法を用いて、ある測定箇所において分析すると、降雨の影響が強い箇所となっているなど、各測定箇所において、各影響成分の影響度が異なることを示すなどの結果を得た。

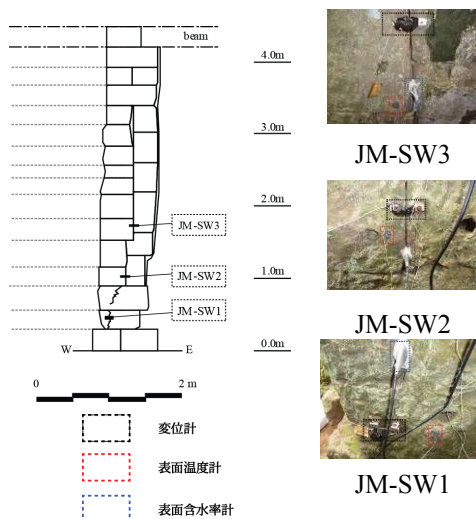


Fig.11 亀裂箇所の観測システムの概要

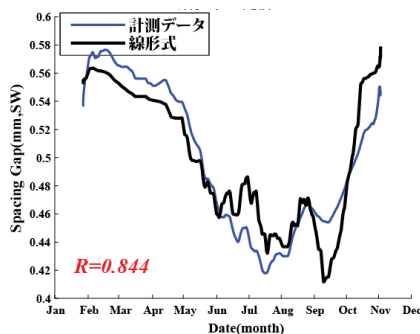


Fig.12 1年間の亀裂変位の観測結果とシミュレーション結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計12件)

1. S.YAMADA, M.ARAYA, A.YOSHIDA, T.O HISHI, “Structural stability evaluation study applying wind tunnel test and monitoring of Bayon main tower, Angkor Thom in Cambodia”, Spain, 15th International Conference on Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, 2017.5、査読有
2. 本多裕作、山田俊亮、吉田昭仁、大石岳史、新谷真人、田村幸雄、「複雑な形状を有する遺跡建造物の風洞試験実施のための3Dスキャニングデータと3Dプリンタの利用による風圧模型の製作手法の提案」、風工学論文集、日本風工学会、第41巻第1号、p24-27、2016.1、査読有
3. K.NAKAGAWA, Y.IWASAKI, M.ARAYA, S.YAMADA, I.SHIMODA, T.NAKAGAWA, T.KOYAMA, “Resistivity profiles and foundation structure of Central Tower in Bayon Temple, Angkor Thom”, 10th Asian Regional Conference of IAEG, TP3-02,1082852,2015.09、査読有
4. Y.HONDA, S.YAMADA, M.ARAYA, T.O HISHI, A.YOSHIDA, “Evaluation of the wind pressure by wind tunnel test using the 3D laser scanning data in Bayon temple, Cambodia”, 9th International conference of structural analysis of historical construction, topic08-12, Mexico, 2014、査読有
5. Y.OGAWA, S.YAMADA, M.ARAYA, Y.IWASAKI, M.FUKUDA, “Behavior of Joints and Crack of Masonry Stones Based upon In-situ Monitoring at the Central Tower, Bayon, Angkor Thom, Cambodia”, 9th International conference of structural analysis of historical construction, topic06-04, Mexico, 2014、査読有
6. 小川祐季、山田俊亮、新谷真人、「遺跡建造物における亀裂変位の環境因子による変動の分析手法に関する研究」、日本建築学会学術講演梗概集、739-740、2014.09
7. 本多裕作、山田俊亮、新谷真人、大石岳史、吉田昭仁、「アンコール遺跡バイヨン寺院における3次元スキャニングデータの使用による風洞実験の実施と風圧力評価」、日本建築学会学術講演梗概集、897-898、2014.09
8. Hashimoto, R., Koyama, T., Kikumoto, M., Yamada, S., Araya, M., Iwasaki, Y., Ohnishi, Y., “Development of elasto-plastic NMM-DD A with modified Cam-clay model considering subloading surface and its application to the stability analysis of masonry structure in Angkor Thom, Cambodia”, Frontiers of Discontinuous Numerical Methods and Practical Simulations in Engineering and Disaster Prevention, Chen, Ohnishi, Zheng & Sasaki (Eds). Taylor & Francis Co. Ltd., pp. 357-363, 2013., 査読有
9. R. Hashimoto, T. Koyama, M. Kikumoto

, S. Yamada, M. Araya, Y. Iwasaki, Y. Ohnishi, “Application of coupled elasto-plastic NMM-DDA procedure for the stability analysis of Prasat Suor Prat N1 Tower, Angkor, Cambodia”, *Geosystem Engineering*, 16:1, 62-74, 2013, 査読有

10. 福田光治, 岩崎好規, 中川武, 新谷真人, 山田俊亮, 下田一太, 「アンコール遺跡基壇の支持力と再構築」, 第58回地盤工学シンポジウム発表論文集, p241-248, 地盤工学会, 2013.11, 査読有

11. 橋本涼太, 小山倫史, 菊本統, 山田俊亮, 新谷真人, 岩崎好規, 大西有三, 「弾塑性 NMM-DDA によるプラサート・スープラ N1 塔の安定解析および補修効果の事後検討」, 第13回岩の力学国内シンポジウム & 第6回日韓ジョイントシンポジウム講演論文集 vol.13 岩の力学連合会 p271-276, 2013., 査読有

12. Hashimoto, R., Koyama, T., Kikumoto, M., Yamada, S., Araya, M., Iwasaki, Y., Ohnishi, Y., “Stability analysis of masonry structures in Angkor Thom, Cambodia using elasto-plastic NMM-DDA with subloading Cam-clay model”, In Proc. of the 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco, USA. 23-26 June. paper No.13-362 (CD-ROM). 2013. , 査読有

〔学会発表〕(計4件)

1. 山田俊亮, 「遺跡建造物の保存修復のための3Dプリンタの利用」, Vectorworks 教育シンポジウム 2016, 東京, 2016.8

2. S.YAMADA, M.ARAYA, Y.IWASAKI, Technical Report on Reinforcement Study of Bayon Main Tower, Bayon Symposium 2015, Japanese government team for safeguarding Angkor and APSARA authority, Siemreap, Cambodia, 2015.12

3. Y.IWASAKI, M.FUKUDA, S.YAMADA, T.KOYAMA, Foundation of Main Central Tower, Bayon, Bayon Symposium 2015, Japanese government team for safeguarding Angkor and APSARA authority, Siemreap, Cambodia, p1-4, 2015.12

4. 新谷真人, 山田俊亮, バイヨン寺院における構造調査・研究報告、日本政府アンコール遺跡救済チーム主催バイヨン保存修復報告会、早稲田大学、東京、2015.5

〔図書〕(計2件)

1. Y.IWASAKI, S.YAMADA, et.al, “Chapter5: Preparation Work for the Stabilization of the Central Tower”, Supervisor: T.NAKAGAWA, Annual Technical Report on the Survey of Angkor Monument 2014-2015, Japanese Government Team for Safeguarding Angkor, pp115-132, 2015.12

2. S.YAMADA, M.ARAYA, etc., “Chapter 6: Studies on the Structural Stability of the Central Tower of the Bayon Temple”, Annual Technical Report on the Survey of Angkor

Monument 2012-2013, Japanese Government Team for Safeguarding Angkor, pp114-134, Total pages:188p, 2014

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早稲田大学・理工学術院総合研究所・名誉教授

新谷真人 (ARAYA, Masato)

研究者番号: 30434319

(2) 研究分担者

早稲田大学・理工学術院・名誉教授

中川武 (NAKAGAWA, Takeshi)

研究者番号: 30063770

一般財団法人地域地盤環境研究所・

専務理事

岩崎好規 (IWASAKI, Yoshinori)

研究者番号: 80450899

安田女子大学・家政学部・助教

山田俊亮 (YAMADA, Shunsuke)

研究者番号: 80580076