

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820273

研究課題名(和文)歴史的組積造建造物における振動計測を用いた非破壊検査による性能評価に関する研究

研究課題名(英文)Study for nondestructive inspection by vibration monitoring on historical masonry structure

研究代表者

山田 俊亮 (YAMADA, SHUNSUKE)

早稲田大学・重点領域研究機構・招聘研究員

研究者番号：80580076

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究においては、今後広く歴史的組積造建造物の保存修復に適用可能な振動計測を用いた性能評価に関する事項を中心に研究を進めた。対象としては、国内外の石積みの組積造建造物、煉瓦造建造物を対象に研究を進め、以下の項目について研究成果を得た。

石積みの振動特性に関する基礎的な性能試験 石積みの不連続面の剛性の非線形性に関する評価 石積みの水平載荷試験による耐力及び剛性の評価ならびにその試験結果の振動特性との関係性の分析 石積みの現地での振動計測及び耐力評価 煉瓦造の組積造建造物の振動特性評価ならびに耐震性評価 煉瓦造の組積造建造物の補強部材の試験と補強後の性能評価

研究成果の概要(英文)：In this research, we propose a study about an assessment method of vibration characteristics of historical masonry construction. And, we set a target of study as domestic and foreign historical dry masonry construction and domestic brick masonry construction. Then, we resulted as follows. 1. Test result of basic vibration characteristic of dry masonry. 2. Non-linear characteristic of discontinuous plane between stones by laboratory test. 3. Horizontal loading test result of dry masonry and consideration about relationship the result and vibration characteristic. 4. Vibration test result and structural assessment of domestic dry masonry construction. 5. Vibration test result and structural assessment of domestic brick masonry construction. 6. Laboratory test of reinforcement components of brick masonry construction.

研究分野：建築構造

キーワード：歴史的建造物 組積造 振動計測

### 1. 研究開始当初の背景

組積造建造物に限らず、歴史的建造物において、具体的な対策を講じるとき歴史的な構法の性能を適切に評価することで、独自の構法を活かしながら、オーセンシティに配慮した補強デザインを追及することが肝要であると考えられる。その際重要なことは、既存の歴史的な構法の構造的な性能を如何に正確に評価するかである。歴史的な構法の多くは、現代において定量的に評価及び理論化が適切にできないことが問題になることが多くある。組積造建造物においても上記の通りである。日本における組積造建造物となると、概ね、城壁、石垣や近代に建設された煉瓦造建造物などが対象となるが、まちの歴史文化の象徴であることがほとんどであり、組積造建造物の構造的な補強方法や適切な安全性評価手法に関する研究は、重要な研究課題と言える。

### 2. 研究の目的

本申請課題においては、今後広く歴史的組積造建造物の保存修復に適用可能な振動計測を用いた性能評価に関する事項を中心に研究を進めた。対象としては、国内外の石積みの組積造建造物、煉瓦造建造物を対象に研究を進めた。

### 3. 研究の方法

以下の項目について実験、現地調査、数値解析を実施した。

- 石積みの振動特性に関する基礎的な性能試験
- 石積みの不連続面の剛性の非線形性に関する評価
- 石積みの水平載荷試験による耐力及び剛性の評価ならびにその試験結果の振動特性との関係性の分析
- 石積みの現地での振動計測及び耐力評価
- 煉瓦造の組積造建造物の振動特性評価ならびに耐震性評価
- 煉瓦造の組積造建造物の補強部材の試験と補強後の性能評価

### 4. 研究成果

- 石積みの振動特性に関する基礎的な性能試験

石積みの振動特性を分析する上では、各振動モードを抽出し分析する手法が必要となる。各計測箇所の振動計測データに対して、同時に主成分モード分析を適用し、それぞれの振動波形に共通するそれぞれのモード成分を抽出することで、ロッキング成分やスウェイ成分などの石積みの各振動成分を特定する方法の検証を実施した。上記の方法としては、振動波形から主成分モード分解を用いて各モードに分解する。それぞれの振動波形が同時に計測されている場合において、主成分モード分解を用いて図1のように各振動モード

に分解することを可能とした。元の計測波形から石積みの振動モードを推定することは困難であるが、主成分モード分解を用いて分解された振動軌跡をプロットすることで、図1のように亀裂の影響によりこういった振動モードが励起されるかを視覚的に捉えることを可能とした。

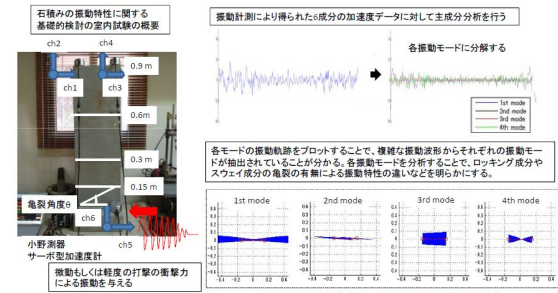


図1 分析方法の概要

### 石積みの不連続面の剛性の非線形性に関する評価

石積みにおける不連続面の剛性評価を目的として圧縮試験を実施した。試験概要は図2に示すように、不連続面に型変位計を設置し、下部にロードセルによる圧縮力を計測し、載荷を行うという形式とした。石材は新材の砂岩であり、偏心距離を変化させ、偏心による影響についても評価した。得られた実験結果からは偏心 0mm 時の応力変位関係は、応力が低い時に剛性が低く、応力が高い時に剛性が高くなる、という非線形性を強く示している。これら現象は、既往研究の岩盤の不連続面において示される挙動と同様の現象であり、石積みにおいて不連続面の变形特性を考慮する上で、これら現象の考慮の必要性が示されている。これら非線形特性の定式化について既往研究を参考にし、提案式にて概ね不連続面の応力・変位特性を示すことが確認された。得られた実験結果は、石積みの振動特性の模擬や不連続変形法の非線形構成則に適用するものである。



図2 石積みの不連続面の圧縮試験

石積みの水平載荷試験による耐力及び剛性の評価ならびにその試験結果の振動特性との関係性の分析

石積みの耐力及び剛性を検証する目的で、室内にて石積みの水平載荷試験を図3のように実施した。得られた試験結果より、石積みの耐力及び剛性を算出し、数値計算との比較を行った。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、亀裂角度の異なる試験体を用いて、載荷位置をパラメータとして各種試験を行った。得られた静的試験結果と振動計測結果の比較により、振動特性の理論化の際の考察を行った。



図3 石積みの水平載荷試験時の転倒モード(左)と滑りモード(右)の様子

石積みの組積造建造物の現地での振動計測及び耐力評価

国内の石積み構造物を対象に、保全のための耐震性評価を目的として、振動計測ならびに安定性評価を実施した。こうした国内の石積み構造物の振動性能のデータは十分とはいえ、こうしたデータの蓄積が今後の保全に活用されると考えている。実施した熊本県天草市及び金沢県能登市での得られた測定結果及び評価結果は、今後の保全対策の策定に貢献した。



図4 現地計測した熊本県天草の石垣(左)と金沢県能登の石垣(右)

煉瓦造の組積造建造物の振動特性評価ならびに耐震性評価

国内の明治期に建設された煉瓦造建造物を対象に、振動計測による振動特性の評価を実施した。既往研究などからも指摘されるように、面外曲げ振動モードが卓越しており、そうした面外曲げモードが地震時にどのように建物の安全性に影響するかの評価を実施した。当該建物は耐震補強工事が進められており、耐震補強後にも再度振動計測することで、耐震補強効果を検証する予定である。

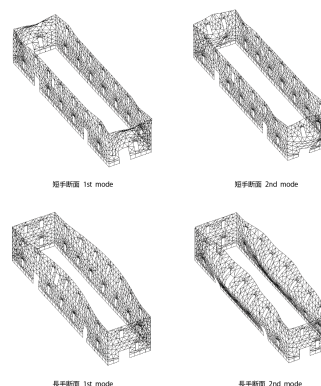


図5 対象とした建物の各面外振動モード

また、煉瓦造建造物の屋根は概ね木造にて建設されるのが一般的である。そこで、木造トラスの安全性評価(接合部の健全性評価)を目的として、インパルス加振による打撃振動試験を行い、各木造トラスのゆるみ等の性能が振動特性にどのように表れるか、またトラスの健全性を診断する方法の研究的試みとして実施した。

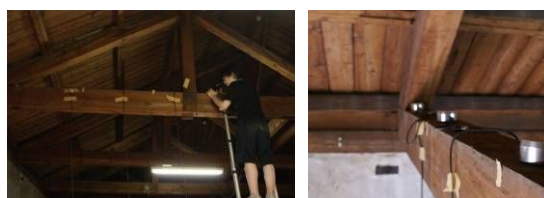


図6 木造トラスにおける振動計測の様子

煉瓦造の組積造建造物の補強部材の試験と補強後の性能評価

煉瓦造建造物を補強する際に、アンカーボルトは必須であるが、煉瓦造建造物に適用した際の強度や剛性については未だ研究の余地がある。そこで、煉瓦造建造物に用いるアンカーボルトに関して各種の強度試験を実施した。また、本試験で用いたアンカーボルトを用いて補強予定の煉瓦造建造物が補強工事が完了した際には、振動計測等を実施し、アンカーボルトによる補強効果等の検証についても実施する予定である。



図7 アンカーボルトの各種強度試験の様子



5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 8 件)

1. S.YAMADA, Y.HONDA, M.ARAYA, T.OHISHI, A.YOSHIDA, “Structural Assessment of Bayon Main Tower in Angkor Thom Based on Wind Tunnel Test and Laboratory Loading Test of Masonry”, Proceedings Geotechnical Engineering of for Conservation of Cultural Heritage and Historical Sites, 2014, Reviewed
2. Y.HONDA, S.YAMADA, M.ARAYA, T.OHISHI, A.YOSHIDA, “Evaluation of the wind pressure by wind tunnel test using the 3D laser scanning data in Bayon temple, Cambodia”, 9<sup>th</sup> International conference of structural analysis of historical construction, topic08-12, Mexico, 2014.Oct, Reviewed
3. 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”, 9<sup>th</sup> International conference of structural analysis of historical construction, topic06-04, Mexico, 2014.Oct, Reviewed
4. Hashimoto, R., Koyama, T., Kikumoto, M., Yamada, S., Araya, M., Iwasaki, Y., Ohnishi, Y.: “Development of elasto-plastic NMM-DDA 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., Reviewed
5. 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, Reviewed
6. 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、地盤工学会 第 58 回地盤工学シンポジウム発表論文集、241-248、2013、査読有
7. 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、査読無
8. 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、査読無

〔学会発表〕(計 4 件)

1. (講演) 新谷真人、山田俊亮、「アンコールトム・バイヨン寺院における構造調査・研究報告」、2015 年度 日本国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
2. (講演) 山田俊亮、Structural assessment and reinforcement planning at Bayon main tower, Workshop for Bayon, Japanese Government Team for Safeguarding Angkor, Siemreap, Cambodia, 2014.12
3. (講演) 山田俊亮、「本庄煉瓦倉庫の構造設計について」、建築学会文化施設小委員会ミュージアムワーキンググループ、本庄市、2014
4. (講演) 山田俊亮、「本庄煉瓦倉庫の構造評価」、埼玉県本庄市主催市民シンポジウム、本庄市、2013

〔図書〕(計 1 件)

1. S.YAMADA, M.ARAYA, etc. (Supervise : T.NAKAGAWA), “Chapter6: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・総合研究機構・招聘研究員  
山田俊亮 (YAMADA SHUNSUKE)  
研究者番号 : 80580076