

機関番号：14101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20404013

研究課題名（和文）海外の地震国における歴史的組積造建築物の耐震性に関わるモニタリング調査

研究課題名（英文） Monitoring Survey on Seismic Performance of Historical Masonry Buildings in Foreign Seismic Countries

研究代表者

花里 利一（HANAZATO TOSHIKAZU）

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60134285

研究成果の概要（和文）：海外の地震国における世界遺産組積造建築物として、ギリシャ・パルテノン神殿およびインドネシア・プランバナン寺院において、耐震性に関わるモニタリング調査を行った。建造後 25 世紀の間、地震で大きな被害を受けた記録のないパルテノン神殿では、常時微動および地震観測を行い、その基礎的な振動特性を明らかにするとともに、歴史地震による地震動を推定した。また、2006 年ジャワ島中部地震によって大きな被害を受けたプランバナン寺院では、地震観測および亀裂変位・温湿度観測を行い、地震被害の原因および現状の構造安定性を確認した。本研究では、これらの他、ネパール・カトマンズの世界遺産塔婆建築の振動調査を行った。

研究成果の概要（英文）：

Structural monitoring survey of the World Heritage of masonry structures in the foreign seismic countries was conducted to study seismic performance and safety. In the present research, earthquake monitoring and microtremor measurements were conducted at Parthenon Athens, Greece, which have survived for 13 centuries against historical earthquakes. Fundamental dynamic characteristics were obtained by the microtremor records. Seismic intensity due to historical earthquakes at the Acropolis was also estimated. Furthermore, monitoring of earthquake and crack movements with temperature/humidity was performed to understand the cause of the damage and structural safety at the present state at Prambanan Temples, Indonesia, which was severely damaged by the Central Java Earthquake of 2006.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2009 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：地震工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：世界遺産、組積造、地震、構造モニタリング、修復

1. 研究開始当初の背景

『海外の文化遺産の保護に係わる国際的な

協力の推進に関する法律』が 2006 年に制定され、本研究はこの文化遺産国際協力の動向

をふまえ、国際共同研究を積極的に行い、文化遺産の保存・保護に関する国際協力活動を進めるものとして位置づけている。国内においては、歴史的木造建築の耐震診断・補強法は文化庁指針等で示されているものの、歴史的組積造建築物の耐震診断法や構造修復法が研究課題として残されていた。

歴史的建築物の耐震診断・補強では、構造調査を行う場合、文化財としての価値を損なわないようにするため、原則として非破壊調査を行うことが求められる。モニタリング調査は、構造調査における非破壊調査法として有用である。

本研究で主な対象とした世界遺産組積造建築物は、ギリシャ・パルテノン神殿とインドネシア・プランバナン寺院である。ともに、長い歴史において、修復もしくは再建がなされてきている。前者は、地震地域にあり幾多の歴史地震を受けてきたものにもかかわらず、地震による大被害を受けた記録がない建造物、後者は、近年の大地震で被災した建造物である。パルテノン神殿の耐震性に関しては、研究代表者らが約 25 年前に実施した解析的研究があるが、その妥当性の検証が課題になっていた。また、プランバナン寺院の耐震性については、修復計画を策定するために、耐震に関わるデータの収集とその分析が急務になっていた。本研究では、これらの建造物のほか、地震国ネパールの組積造世界遺産建造物の調査も実施している。これは、近い将来、カトマンズにおいて大きな地震が発生する可能性が高いとされており、世界遺産建造物の耐震対策が課題になっていたことをふまえたものである。

2. 研究の目的

海外の地震国における歴史的組積造建築物を対象としたモニタリング調査を行い、長い間、強振動に耐えてきた建築物および近年の大地震で被災した建築物の耐震性を明らかにし、その修復方法の検証を行なうものである。

ギリシャ・パルテノン神殿に関しては、研究代表者らによる既往の解析的なアプローチによる耐震性能評価が妥当であることを実証し、さらに、提案した修復方法の有効性を確認する。さらに、1999 年アテネ地震で被災した世界遺産ダフニー修道院、地震による被災記録のない世界遺産オシオス・ルーカス修道院の耐震性に関する知見を得る。

インドネシア・プランバナン寺院(に関しては、修復計画の立案に向けて被害の原因を明らかにするとともに、現状の安全性を評価することを目的とする。

ネパール・カトマンズの世界遺産建築物につ

いては、塔婆建築に着目して、耐震評価に有用な振動特性を把握する。

3. 研究の方法

3.1 研究の体制

本研究は学際的な研究組織により、各国の専門家も参加した国際的な協力体制のもとで実施する。

3.2 ギリシャ世界遺産建築物の調査

ギリシャ・パルテノン神殿(写真 1 参照)については、平成 20 年度に地震計を神殿の基壇と屋根に設置し(写真 2 参照)、地震モニタリングを実施している。さらに、平成 20 年度および平成 21 年度に、建物とアクロポリス丘の常時微動測定を行っている。これらの調査は、アテネ工科大学地震工学研究所ムザキス准教授、ギリシャ文化省ミルティアドウ博士、アクロポリス修復事務所長イオアンニドウ博士の協力を得て実施した。モニタリング調査のうち、常時微動測定(写真 3 参照)から得られた固有振動特性を、研究代表者らによる既往の研究で提示した解析モデルと比較した。さらに、パルテノン神殿の歴史地震、修復・災害史に関する文献調査を行い、パルテノン神殿の構造の変遷および歴史地震による地震動レベルを推定する。この調査では、地震記録が得られている 1981 年コリンス地震、1999 年アテネ地震の記録を分析する。



写真 1 パルテノン神殿



写真 2 パルテノン神殿に設置した地震計

ダフニー修道院およびオシオス・ルーカス修道院(ともに世界遺産ビザンチン教会)の調査では、上記のギリシャ人研究協力者が地震モニタリングおよび亀裂・温度モニタリン

グを実施しており、それらの記録に基づいた検討を行った。



写真3 パルテノン神殿における常時微動測定

3.3 インドネシア世界遺産建築物の調査

インドネシア・プランバナン寺院(写真4参照)の調査では、建造物と地盤に地震計を設置し、地震モニタリングを実施している(写真5参照)。寺院内陣には、計8棟の祠堂があるが、日本政府による緊急支援調査(本研究課題の開始前2007年)にアンサ祠堂に設置している。その後、2010年に最も大規模な建造物であるシヴァ祠堂に移設している。また、亀裂変位、温湿度モニタリングもシヴァ祠堂で2007年から実施しており、本研究でも機器の維持管理をしつつ、継続観測を行っている。このプランバナン寺院の調査は、ガジャマダ大学およびインドネシア政府文化観光局の協力で実施している。さらに、プランバナン寺院で地震観測を実施したアンサ祠堂およびシヴァ祠堂に関する解析モデルを作成し、地震シミュレーション解析を行っている。



写真4 プランバナン寺院全景



図5 プランバナン寺院に設置したクラックゲージと地震計

3.4 ネパール世界遺産建築物の調査

ネパール・カトマンズにおける世界遺産組積造建築物の調査では、クンベスワー寺院五重塔およびラドハクリシュナ寺院三重塔(写

真6参照)の常時微動測定を実施した他、伝統的な共同住宅の微動測定を行った。調査は、2009年にトリヴバン大学スベリ准教授の協力で実施した。



写真6 カトマンズで微動調査を行った世界遺産の三重塔と五重塔

4. 研究成果

(1) ノン神殿におけるモニタリング調査

建物の常時微動測定の結果、耐震性検討の基礎データとなる固有振動数は以下のように得られた。西側柱列と東側柱列の測定位置を図1に示す。

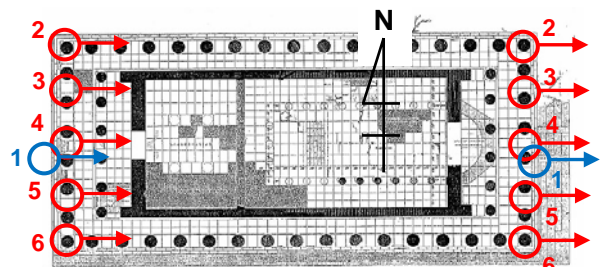


図1 西側,東側柱列における微動測定点と方向

- ① 西側柱列の構面 面内,面外方向の固有振動数は3.0Hz, 2.4Hzであった。面外方向の伝達関数(梁上/基壇)および振動モードを図2,3に示す。図に示すように、両端の拘束効果のため、柱列中間部が膨らむ形状を示している。

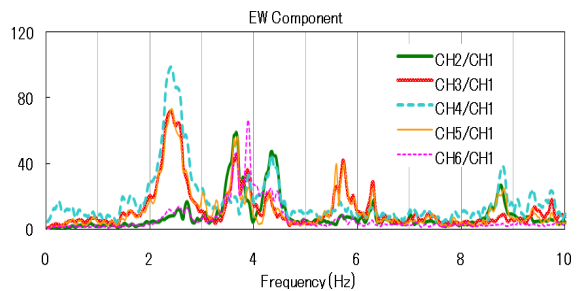


図2 西側柱列の伝達関数(面外方向)屋根/基壇

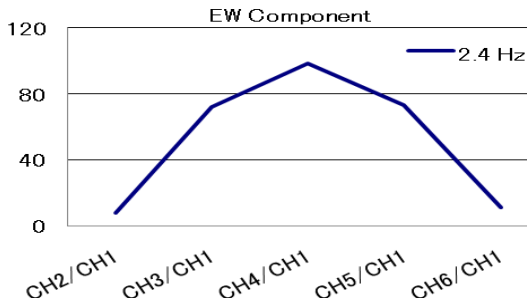


図3 西側柱列の振動モード(面外方向)

- ② 東側柱列 面内, 面外の固有振動数は 3.7Hz, 2.7Hz と測定された。また、振動モードは南東隅角部に向かって膨らむ形となったが、これは南側柱列の欠損によって拘束力が低くなっているためである。
- ③ 北側柱列 面内方向の固有振動数は 3.7Hz と測定された。面外方向の伝達関数ピーク振動数は位置により変動し、2.7-3.6Hz にみられた。
- ④ 南側の独立柱 9 個のドラムを積み重ねた柱の固有振動数は 6.4Hz であった。
- ⑤ 内部柱列と内壁 内部柱列と内壁の固有振動数はそれぞれ 5.8Hz, 9.7Hz と測定された。内部柱列には内壁の固有振動、内壁には内部柱列の固有振動による影響がみられ、相互に動的挙動が作用していることがわかった。

以上、示したように、常時微動測定からパルテノン神殿の基礎的な振動特性として、固有振動数と振動モードを得た。

隣り合う2つの柱列構面が直交する隅角部では、柱列の挙動に一体性がみられた。この一体性は耐震性の向上に寄与するものである。

さらに、常時微動による構造物の固有振動数は研究代表者らによる解析モデル(図4参照)と対応した。ただし、境界条件の評価が課題である。

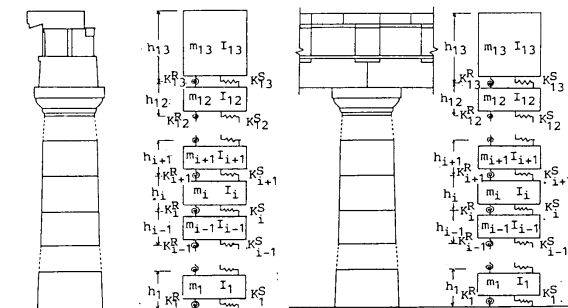


図4 既往の研究で提示した解析モデル

アクロポリス丘の地形効果による増幅特性について、常時微動記録からの検討を試みた。丘の麓と頂の測定結果から伝達関数を求めると、約 12Hz にピークがみられた。この振動数は研究代表者らの既往の研究による丘の地形効果である約 10Hz と対応した。しかし、常時微動は測定点近傍のローカルな影響を強く受けるため、次に示すように、地震観測による評価が必須である。

2008年9月の地震計設置以降、アテネ周辺の地震活動は比較的低い状態が続いている。2010年に停電対策のために地震計をリプレイス後、小規模地震の記録が得られた。2010年9月2日に発生したマグニチュード4.3、震源距離56kmの地震である。パルテノン神殿の基壇における加速度波形、加速度応答スペクトルを図5に示す。ピーク加速度は0.7Galであった。レベルとしては小さく、今後も観測を継続する必要がある。

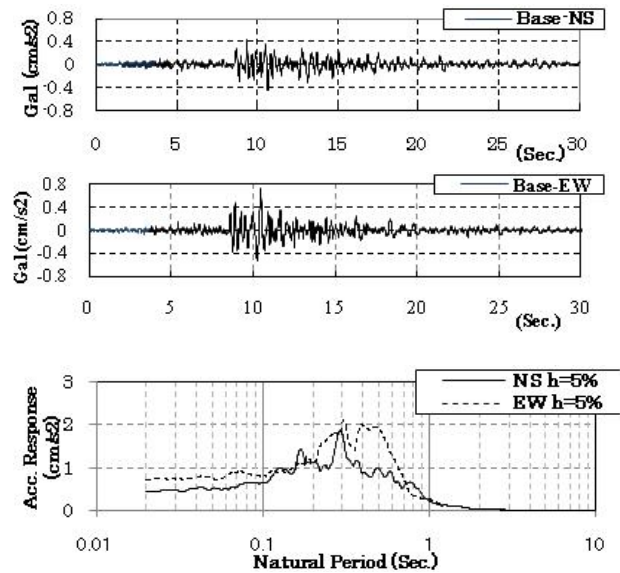


図5 2010年9月2日地震記録

さらに、本研究では、災害および修復史を整理するとともに、歴史地震による地震動レベルを推定した。まず、地震動レベルに関する既往の距離減衰式の調査を行い、地震記録が得られている1981年コリンス地震、1999年コリンス地震に適用して、距離減衰式の検証を行った。これにより妥当性を確認した距離減衰式に対して、歴史地震のマグニチュードと震源距離から地震動レベルを推定した。その結果、パルテノン神殿がその建設以降25世紀の間に受けた地震動レベル(アクロポリス丘の麓)は約0.2Gを超えている可能性は小さいと推定された。

(2) プランバナナ寺院のモニタリング調査

プランバナナ寺院などの石造高層建造物の地震観測記録は本研究を除いてみあたらず、地震被害の原因および耐震対策を立案する上で必須であり、工学的にも貴重なデータを与えるものである。図6にシヴァ祠堂に設置した強震計の配置を示す。

図7に2010年9月12日にジョグジャカルタ近郊で発生した地震記録(地表地震動)を示す。

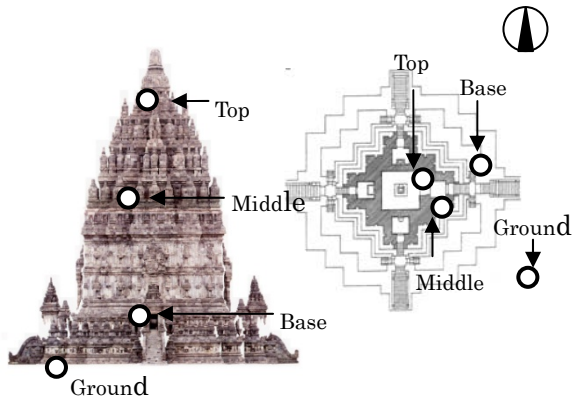


図6 シヴァ祠堂の地震モニタリング

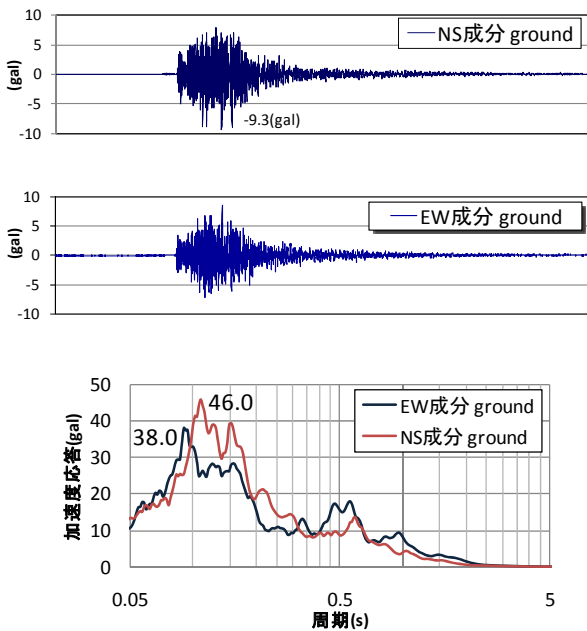


図7シヴァ祠堂の地震モニタリング記録(2010年9月12日地震の加速度波形と応答スペクトル)

シヴァ祠堂では、図8に示すように、地震モニタリングとともに、構造の安定性をチェックするために、亀裂変位・温湿度モニタリングを2008年10月より実施している。この長期モニタリングの結果によれば、亀裂変位は安定(温度変化による変動がある)しており、被災建物ではあるが、内部の構造は安定

していると判断された。

2010年9月12日には、近郊で図7に示すようにマグニチュード5.0の地震が発生した。図9からわかるように、地震による変動は観測されておらず、温度変化による影響はみられるものの安定していると判断される。このことは、修復計画を立案する上で重要な知見である。

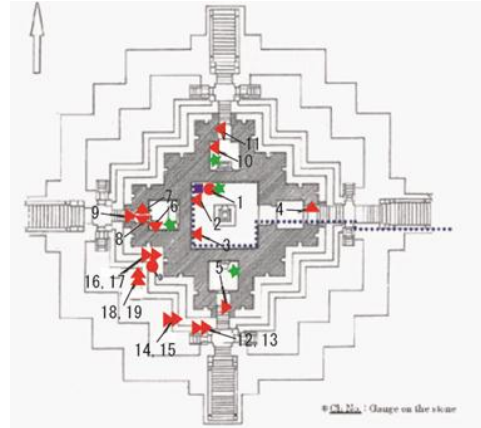


図8 シヴァ祠堂における亀裂変位・温湿度モニタリング観測点

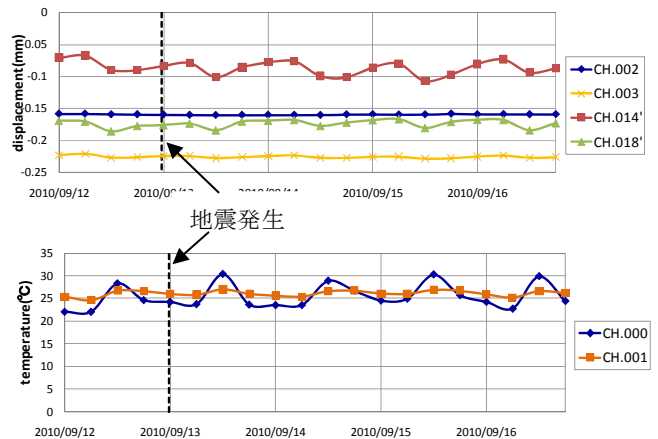


図9 シヴァ祠堂における亀裂変位・温湿度モニタリング観測記録(2010年9月12日地震の前後)

(3) ネパール・カトマンズ世界遺産建築でのモニタリング調査

常時微動測定により、耐震性能の基本的な振動特性として、クンバスワ寺院五重塔およびラドハクリシュナ寺院三重塔の固有周期が、それぞれ0.50秒、0.48秒と得られた。なお、クンバスワ寺院五重塔は1934年カトマンズ地震で崩壊し、その後、再建された建物である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

1) 花里利一, 文化財建築物の防災に関わるモニタリング研究- 海外および国内のモニタリング-, 建築の研究.No.198, pp1-7, 2010 査読無

2) H.P.Mouzakis, A. Miltiadou, M.

Ioannidou, T. Hanazato, Y. Uekita, et. al.(11 名), Dynamic Performance of Greek Temple in Comparison with Japanese Timber Pagoda, Proc. of 13th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp1436-1443, 2010, 概要査読有

3) T. Hanazato, S. Yamato, Y. Uekita, et.al (9 名), Seismic Assessment for Restoration of Prambanan World Heritage Temples Damaged by the Central Java Earthquake of 2006, Indonesia, Proc. of International Masonry Conference, Vol.1, pp1571-1580, 2010, 査読有

4) T. Hanazato, S. Yamato, Y. Uekita, et al. (9 名), Seismic Assessment for Restoration of Prambanan World Heritage Temples Damaged by the Central Java Earthquake of 2006, Indonesia, 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering & 5th International Conference on Earthquake Engineering, No.1, pp1025-1032, 2010, 査読無

5) 花里利一, 被災建築物のその後 世界遺産インドネシア・プランバナン寺院群 (ジャワ中部地震), 花里利一, 建築防災 368号, pp.20~24, 2008年, 査読無

[学会発表] (計 4 件)

1) 花里利一: 国際セミナー『五重塔はなぜ倒れないか、ギリシャ神殿はなぜ倒れないか』, 2010年11月20日, 市川市法華経寺

2) 大村真理子, 花里利一他 4 名: 海外の地震国における世界遺産組積造建築物の耐震性に関わるモニタリング調査その 2 常時微動測定によるギリシャ・パルテノン神殿の耐震性の検討, 建築学会大会, 2010年9月11日, 富山市

3) 山村広樹, 花里利一他 4 名: ジャワ島中部地震により被災した世界遺産プランバナン遺跡群, その 10 地震と構造安定性に関するモニタリング調査, 建築学会大会, 2010年9月11日, 富山市

4) 花里利一, 上北恭史他 11 名: 海外の地震国における世界遺産組積造建築物の耐震性に関わるモニタリング調査その 1 ギリシャ・パルテノン神殿とインドネシア・プランバナン寺院の調査概要, 建築学会大会, 2009年8月27日, 仙台市

[その他]

[ホームページ]

国立大学 53 工学系学部長会議運営サイト, 何でも探検隊: 世界遺産に科学の目を〜地域と世界の文化遺産を守る〜

<http://www.mirai-kougaku.jp/explore/pages/100201.php>

[報道関連情報]

(1) 読売新聞 2008年8月16日 『顔』 ギリシャ・パルテノン神殿の耐震に関する国際共同調査を五重塔の耐震研究と合わせて紹介。

(2) 読売新聞 2009年1月16日 『記者ノート』 日本とギリシャの建築の耐震の知恵について、研究活動の紹介。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

花里 利一 (HANAZATO TOSHIKAZU)
三重大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 60134285

(2) 研究分担者

無

(3) 連携研究者

上北 恭史 (UEKITA YASUFUMI)
筑波大学・人間総合科学研究科・准教授
研究者番号: 00232736