

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：14101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630232

研究課題名(和文)素粒子を用いた歴史的組積造建造物の内部構造探査に基づく耐震調査

研究課題名(英文) Seismic Assessment of Historical Masonry Structure on the basis of Inner Structural Survey utilizing Muography

研究代表者

花里 利一 (Hanazato, Toshikazu)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60134285

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙線から生じて地表に降り注ぐ素粒子(ミュオン)探査技術を用いて、歴史的組積造建造物の内部構造を探査し、その結果を用いて耐震解析を行うことにより、組積造建造物の耐震評価が可能であることを示した。本研究では、2006年ジャワ島中部地震で被災したインドネシア世界遺産プランバナン寺院シヴァ祠堂を対象として実施し、不明確であった内部空洞の寸法を明らかにするとともに、有限要素法を用いた地震応答解析を実施した。解析の結果、内部構造は損傷していないと判断した。このように、素粒子探査と構造解析を組み合わせた本手法の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Taking into account that muon cosmic-ray can penetrate rocks and soils and give us projection if the path density, we applied this technology to the survey of the inner structure of a historical masonry monument. In the present study, this non-destructive test was successfully utilized to survey Candi Siva, the Prambanan World Heritage Temple of masonry, Indonesia, which was severely damaged by 2006 Central Java Earthquake. It revealed the size of the inner unknown space of the structure. On the basis of such knowledge from the muography, the earthquake response analysis employing the finite element model was conducted to assess the seismic safety of the inner structure of Candi Siva. The analysis demonstrated that the inner structure would not be damaged by the earthquake in 2006 and that the technology would be useful for non-destructive test of masonry heritage structure.

研究分野：地震工学

キーワード：歴史的建造物 組積造 非破壊調査 耐震

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 素粒子探査による内部構造調査

宇宙線が大気に衝突して発生した素粒子(ミュオン)は、厚さ 1km の岩盤も透過するが、吸収率が密度に比例する性質を有する。研究分担者(田中)は、この素粒子の探知技術を用い、火山の内部構造を映し出すことに成功している。その後、鉄筋コンクリート部材の鉄筋の本数と位置を探知することにも成功している。また、鉄鋼メーカ溶鉱炉の炉壁損耗度の探査にも応用している。

一方、歴史的建造物の構造調査では、非破壊もしくは微破壊による調査法を適用することが国際原則である。歴史的建造物では、設計図書もなく、内部構造も不明なものも少なくない。地震国における歴史的組積造建造物にも、内部の構造条件がわかっておらず、耐震性評価が困難なものもあり、非破壊検査技術の研究開発は急務である。

### (2) 世界遺産プランバナンの耐震評価

歴史的組積造建造物は地震地域にも数多く存在しており、幾多の地震を経験してきた。インドネシア世界文化遺産プランバナン寺院群(写真 1)もその一つである。2006 年 5 月 27 日ジャワ島中部地震(Mw=6.3)では、強震動により寺院群は大きな被害を受けた。本研究は、被災した建物群のなかで最大の建造物であるシヴァ祠堂を対象とする。この祠堂は、20 世紀半ばにオランダ人によって再建され、鉄筋コンクリート構造が導入されている。ここで、シヴァ祠堂の保存修復計画における最大の課題は、オランダが行った再建時の内部構造に関する図面や設計資料の欠如である。これまで内部の破損状況や構造を調査する適切な方法がみあたらず、正確な内部の構造はわかっていない状況であった。



写真 1 プランバナン寺院

## 2. 研究の目的と意義

### (1) 目的

本研究は、素粒子を用いた内部構造探査法を海外の地震国における歴史的組積造建造物に適用し、その結果に基づいて耐震解析を行い、保存修復計画に必須な知見を得るものである。具体的には、世界遺産プランバナン寺院シヴァ祠堂を対象とする。

### (2) 研究の意義

X 線とは異なり人体に安全な素粒子を用いた内部構造探査技術を歴史的建造物の耐

震診断に初めて適用する。非破壊調査を国際的な原則とする歴史的建造物の構造調査に当該技術を適用し、その適用性を明らかにすることは極めて有意義である。また、海外歴史遺産の保護に寄与することになり、文化遺産国際協力の面からも有意義である。地震で被災した世界遺産プランバナン寺院・シヴァ祠堂の内部構造の損傷評価と耐震評価を行うもので、保存修復計画の策定に資する。

## 3. 研究の方法

### (1) 素粒子探査(ミュオグラフィ)

プランバナン寺院・シヴァ祠堂において非破壊で内部構造を探る試みとして、本研究では研究分担者(田中宏幸)が開発・研究を進めるミュオグラフィ観測技術を採用し、シヴァ祠堂においてモニタリングを行う(図 1 参照)。前述のように、ミュオンは岩盤も透過することができ、大きなエネルギーを持つミュオンほど通過可能距離は長い。物質を通過することによりミュオンフラックスは減衰することが分かっており、その減衰から通過した経路の密度情報を得ることが可能となる。

観測に用いた装置は、プラスチックシンチレータと光電子増倍管を組み合わせたシンチレーションカウンターによりミュオンを検出するものである。これを図 2 に示すように並べ、位置敏感型検出器(PSD)をつくる。PSD を 2 段、直交状に重ね、データを記録する PC に繋いだものが図 1、写真 2 に示すミュオン観測装置である。図 3 に示すように、シヴァ祠堂の躯体を通り抜け内室に飛来したミュオンがこの平行な 2 枚の PSD 双方を通過した場合、反応した上下のセルの位置関係からミュオンの飛来した方向を求め、その方向ごとに分けてカウントすることができる(図 3 参照)。

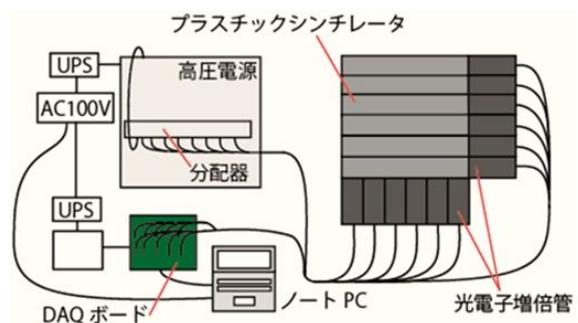


図 1 ミュオン観測システム

今回の観測では、シヴァ祠堂の最も大きな中央内室の北西隅に観測機器を設置した。断面図と測定範囲を図 5 に示す。この断面図は想像で描いたであろうと考えられている。ミュオン・モニタリングは、2013 年 10 月 18 日の機器設置以降、2014 年 2 月 13 日の機器撤去まで約 4 か月間行った。また、この期間中の 2013 年 12 月 17 日、機器の個性の補正のため検出器を 180 度回転させ、モニタリングを継続している。

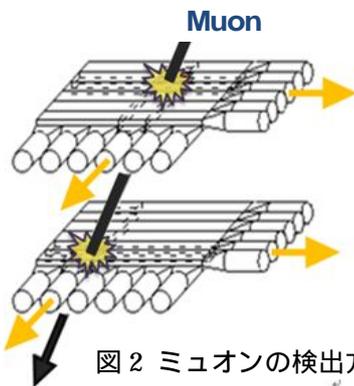


図2 ミュオンの検出方法



写真2 祠堂内に設置したミュオン観測機器

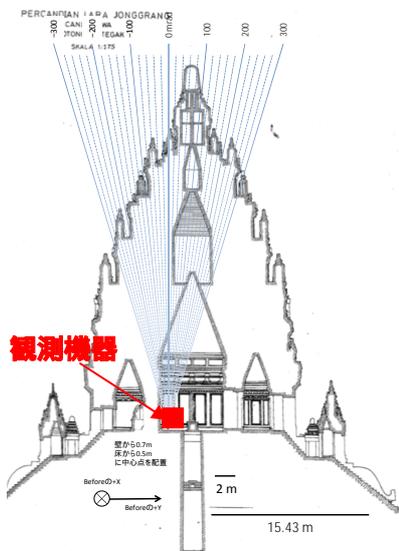


図3 ミュオン観測角度

(2)耐震解析

1) 多質点系簡易モデル

本研究で用いた簡易モデルを図4に示す。地盤と建物の動的相互作用を考慮した。躯体は一様にコンクリートと仮定し、埋め込みSRモデルを用いた。地盤パネの減衰定数は10%とした。今回は既往のモデルをModelとし、下部の内室部を空洞として考慮したModel、さらに最も確からしいと結論付けた2倍容積の上部空洞を考慮したModel計3モデルを用い、空洞の有無による影響を検証した。地震応答解析では、プランバナン寺院で2010年9月12日に観測された地震記録を入力波として用いた。マグニチュードは5.0、震源深さ48km、震央からの距離は11kmであった。

2) 3次元有限要素法

3次元有限要素法による解析は構造物内部の詳細な応力評価に有効である。ミュオグラフィ観測による結果を踏まえ、2倍容積の上部空洞を考慮したFEMモデルを作成し、固有値解析・地震応答解析を行なった。

図5は、シヴァ祠堂の既往のFEMモデル(X断面)である。シヴァ祠堂の内部構造の詳細は不明であったため、すでに研究代表者(花里)によって構造解析が行なわれ、内部構造が明らかであった高さ22mのガルダ祠堂の解析モデルを、高さ47mのシヴァ祠堂に合わせ相似形で拡大して作成した。

中詰コンクリートはガルダ祠堂における材料調査結果を用いた。なお、2006年5月ジャワ島中部地震でのプランバナン寺院群周辺および震源域での記録が無いことから、過去に歴史的組積造建築物に被害を与え、マクニチュードなどの条件が類似している地震記録を入力地震動に用いることとした。1999年9月にギリシャ・アテネ周辺で発生したマグニチュード(Mw)5.7の地震で、SPLA1サイトでの地震記録(ピーク速度12.4kine)を使用した。距離減衰式よりプランバナン寺院群でのピーク速度が約10kineと推定されている。

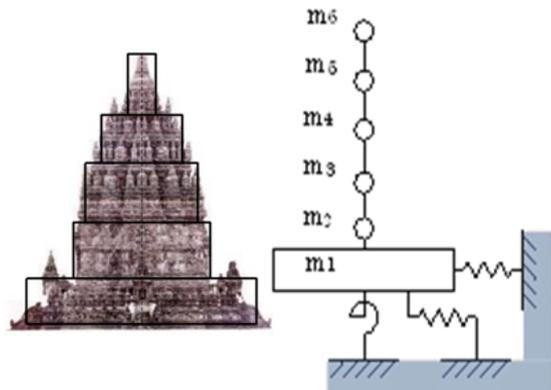


図4 動的相互作用を考慮した多質点系モデル

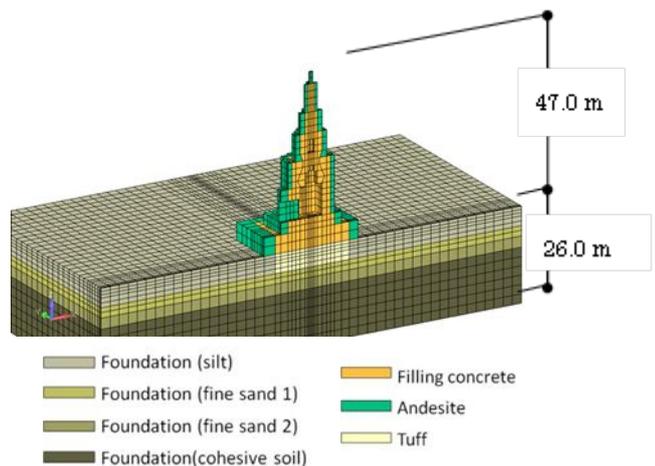


図5 有限要素モデルと構成材料

4. 研究成果

(1)素粒子探査(ミュオグラフィ)結果  
空洞規模を判断するためのシミュレーショ

ンにおいて、プランバナン寺院群の図面集に記載のシヴァ祠堂断面図上にある上部空洞の大きさ(底面:1辺5m正方形,容積113m<sup>3</sup>)を1と仮定し、その容積を変化させたモデルを作成した。容積倍率はそれぞれ0倍、0.5倍、1倍、2倍、3倍、4倍である。空洞の形状の1例を図6に示す。これらのモデルは1辺0.5mの立方体で構成され、図上には観測機器の直上方向を直線で示している。

各モデルにおいて、観測器の中心点から各方向へ延びるミュオン経路の経路長(ミュオンが通過する躯体の厚さ)を算出した。また、各角度領域のバルク密度を算出した。ここで、ガルダ祠堂の材料調査より、約2.2g/cm<sup>3</sup>の内部コンクリートが使用され、表面には約1.9g/cm<sup>3</sup>の安山岩が使用されている。シヴァ祠堂も同様の材を使用していると推定し、躯体密度は一律に2.0g/cm<sup>3</sup>と仮定した。

本観測においては検出器自体の個性が認められたため、観測期間中である2013年12月中旬に検出器を鉛直軸周りに180度回転させ、回転前後で得られたミュオン強度のデータの比(回転前/回転後)で個性を補正、シミュレーション結果との比較を行なった。

以上より、内部空洞の規模に関する検討を行なった。この結果をグラフにまとめたものが図7である。横軸が、シヴァ祠堂の断面図上に示された空洞寸法による容積を1としたときの各シミュレーションでの空洞容積倍率、縦軸が先述の条件を満たすセルの数を表す。「0σ」「1σ(68.3%)」「2σ(95.5%)」「3σ(99.7%)」は下限の信頼度を示す。これより、祠堂上部の観測範囲内には約90%を超える高い確率で容積1倍以上の空洞が存在することがわかった。同様に、容積2倍以上の空洞のシミュレーション結果のグラフは1σの線に近い値を示しており、約70%の確率で存在することが明らかとなった。空洞容積3倍・4倍と仮定したシミュレーション結果では、存在の確率が著しく低い。以上の結果から、シヴァ祠堂の上部に存在するであろう内部空洞の容積として、断面図上に描かれた大きさの2倍と仮定したモデルが最も確からしいと結論付けた。

また、ミュオグラフィの手法によりシヴァ祠堂上部の密度分布を画像化し図8に示す。青く示された領域は密度2.0g/cm<sup>3</sup>の躯体であり、密度が低くなるほど色は赤に近づく。色の境目がぼやけ、曲線的になっているのは、一辺50cmの立方体で構成されたモデルをもとに一定の角度ごとに算出した経路長分布の値をスプライン補間により拡張し、解析に用いているためと考えられる。また観測機器の設置位置が内室の中央でなく隅であったことから、実際は水平に切断した上部の密度分布を正確に表すものではないが、中央部に空洞が存在していること確認できる。

(2) 素粒子探査(ミュオグラフィ)による成果のまとめ

シヴァ祠堂において、ミュオグラフィを用いた非破壊内部調査をおこなった。観測デー

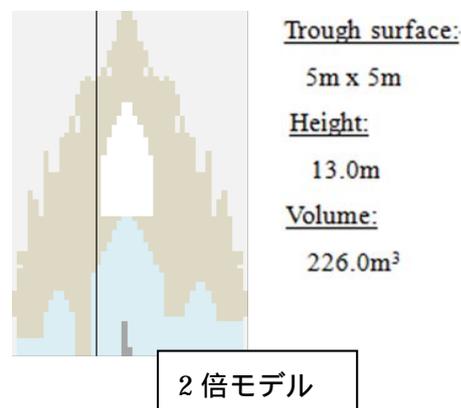


図6 空洞体積のシミュレーションモデル

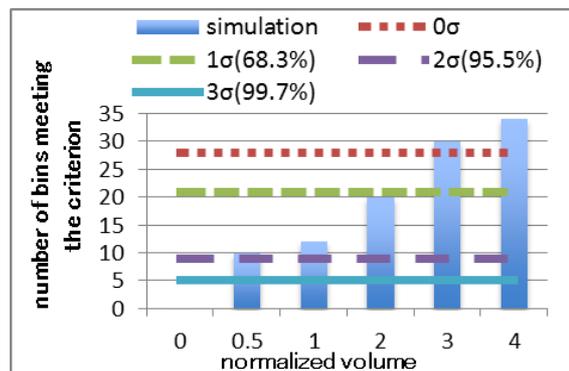


図7 シミュレーション計算結果の信頼度

タに基づくシミュレーションにより、シヴァ祠堂上部には、図面集の断面図に記載されている容積の2倍以上の空洞が約70%の確率で存在していると結論づけられた。一方、3倍以上の容積の空洞が存在している確率は50%以下であった。この結果は、構造解析に用いる解析モデルをより実物に近い正確なものとするために有用な知見である。

世界遺産建造物におけるミュオグラフィ観測としては近年例のない取り組みであり、本件のような歴史的・文化的価値の高い遺跡を扱う上で、非破壊での内部構造調査を可能とするミュオンを用いた探査技術は有効である。

(3) 耐震解析の成果

1) 多質点系モデルによる解析結果  
当該研究室では、すでに地盤・構造物系の動的相互作用効果を考慮したシヴァ祠堂の多質点系モデル(SRモデル)を作成し、推定した地震動レベルに適合する実地震記録(歴史的組積造建造物に大きな被害を与えた地震)を入力波とした地震応答解析を行ない、実際の地震時の挙動と比較しながらモデルの検証を行なっている。その際には内室や上部空洞が考慮されておらず、密実なものとして仮定された。本研究では、前章のミュオグラフィ結果を踏まえて既往のモデルを修正した質点系モデルによる解析を行い、空洞の有無と大きさが地震応答特性にどのような影響を及ぼすのか検討した。

固有値解析の結果、Model I,II,IIIの固有振動数はそれぞれ2.0Hz、2.0Hz、2.1Hzとなり、空洞による顕著な差は見られなかった。地震応答解析によるEW方向最大応答加速度の比

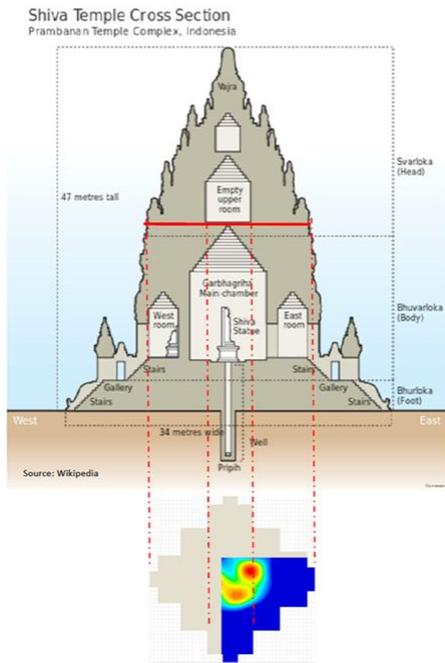


図8 ミュオグラフィによる密度分布

較を図9に示す。モデル、のMass 6における加速度の最大値は、EW方向でそれぞれ26.1、27.7、27.2galであり、Modelとで6%の増加、とで4%の増加に留まった。固有値解析と同じく、モデル間で応答特性にほとんど差が見られなかった。

ここで空洞部分がゼロであるModelと、3つのモデルの中で最も空洞部分を多く見積もったModelで質量を比較すると、空洞部を増やしたことによる質量の減少は、モデル全体の質量の5%であり、妥当な結果である。

空洞容積は図面の2倍モデルが最も確からしいとの結論に基づき、簡易質点系モデルに修正を加え、より実際の状態に近いモデルを作成した。このモデルを用いて固有値解析・地震応答解析を行なったが、いずれの結果においても既往の研究での結果を大きく覆すほどの相違は見られなかった。空洞部分を考慮してもモデルの体積の減少が5%程度に留まることを考えると、簡易解析のように概略の挙動を把握するための解析では差異が表れにくいいため、FEMモデルを用いたより詳細な解析によるチェックが必要である。

2)3次元有限要素法による解析結果

3次元有限要素法による解析は、構造物内部での応力の集中を判断するのに有効である。ミュオグラフィ観測による結果を踏まえて2倍容積の上部空洞をもつFEMモデルを作成し、固有値・地震応答解析を行なった。

固有値解析の結果、固有振動数がModel1、2ともに1.9Hz、固有周期は0.5秒であった。質点系モデルによる簡易解析の結果と比較的一致した。

地震応答解析の結果、最大応答加速度はModel1で1555.8gal、Model2で1561.0galとなった。頂部における最大加速度応答倍率は

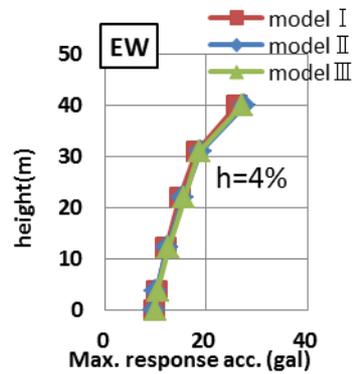


図9 最大応答加速度分布の比較

13.5であった。図10は構造物に生じる引張応力度分布を表している。なお、Model2の結果のみ代表して示している。最大圧縮応力は身舎下部の河口部付近で生じ、その値は2215.9kN/m<sup>2</sup>であった。また最大引張応力は屋根頂部の基部で生じ、その値は1,267.1kN/m<sup>2</sup>であった。安山岩の強度が13,600kN/m<sup>2</sup>であること、引張強度はこの1/10とすれば1,360kN/m<sup>2</sup>であることから、ジャワ島中部地震により生じた最大圧縮応力・最大引張応力はこれらを超えていないと判断できる。コンクリートの圧縮強度を22,000kN/m<sup>2</sup>とすると、こちらも同様に最大引張応力はコンクリートの引張強度以下であると考えられる。せん断応力は身舎下部の開口部および基壇周囲に集中する傾向が見られた。

シヴァ祠堂の躯体内部には、オランダによる修復時に入れられた補強用のRCの骨組が入っている。これについては、内部に存在していることは分かっているものの、その断面寸法や形状については不明である。本解析のモデルでは、図11に示すRC骨組を想定した梁要素が入れている。この骨組全体の形状は、シヴァ祠堂の修復にオランダが用いた手法を真似てインドネシアが修復を行なったとされる他の祠堂がこのような構造になっていることから推測したものである。

また、断面形状はガルーダ祠堂の解体作業から明らかになったものと同形状を想定し、上部と下部でそれぞれ25cm角と35cm角の断面とした。35cm角の部分の断面形状を図11に示す。コンクリート強度が十分であり、引張鉄筋により降伏モーメントが決まるとして、許容曲げモーメントを算定した。

鉄筋は、日本で用いられている構造用鉄筋のうち強度の小さなSD295(短期引張許容応力度295N/mm<sup>2</sup>)と推定し、屋根頂部のRC骨組の許容曲げモーメントはM=30.8kNmと計算される。Model2における最大曲げモーメントは12.6kNmであったため、ジャワ島中部地震時の曲げモーメントは短期許容応力時の曲げモーメントより小さく、RC骨組が損傷した可能性は低いことが分かった。

図12に各モデルの空洞部周囲の要素のみに着目した応力度分布を示す。最大値と最大値を示す要素位置も同図上で示している。Model1

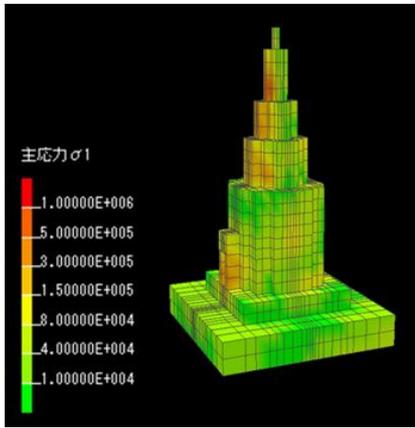


図 10 応力分布(最大引張応力)

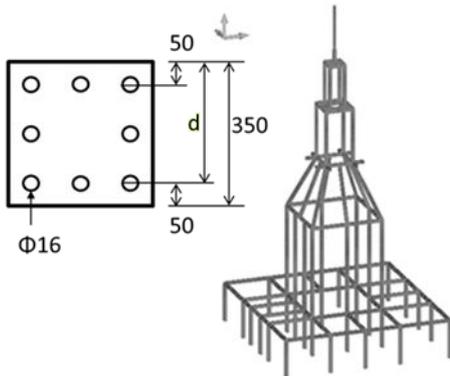


図 11 推定した RC 骨組と柱断面

から Model 2 への最大値の上昇率は、圧縮応力約 7%、引張応力とせん断応力で約 5%となった。この増大を考慮しても安山岩の圧縮・引張強度を超えることはないものの、モデルの空洞部の応力が上昇することが確かめられた。

大きな被害を受けた 2006 年 5 月ジャワ島中部地震を想定した地震波を入力して地震応答解析を行った結果、構造材料に生じる応力は部材の耐力を超えるものはなく、また RC 骨組みに生じる最大曲げモーメントも想定する断面形状での短期許容曲げモーメントを超えなかった。従って、ジャワ島中部地震によりシヴァ祠堂の内部構造が損傷した可能性は小さいと判断された。

(4) 研究成果のまとめと今後への展望

本研究では、歴史的の高い世界遺産建造物であるプランバナン寺院・シヴァ祠堂において、ミュオグラフィ技術を用いた非破壊での内部構造調査をおこなった。主に火山の内部調査に用いられているミュオグラフィ技術だが、マッシブな組積造の建造物での内部探査における適用性を示す事が出来た。この観測に基づくシミュレーションの結果、シヴァ祠堂上部には既存断面図に示されているものの 2 倍以上の容積の空洞が存在する可能性が高いと判断した。また、この結果に基づいて修正した FEM モデルを用いて地震応答解析を行ない、2006 年ジャワ島中部地震によりシヴァ祠堂内部の構造体が損傷した可能性は低いと結論付けた。

シヴァ祠堂の修復事業は 2014 年 10 月に終了し、現在、再び内室が一般開放されている。

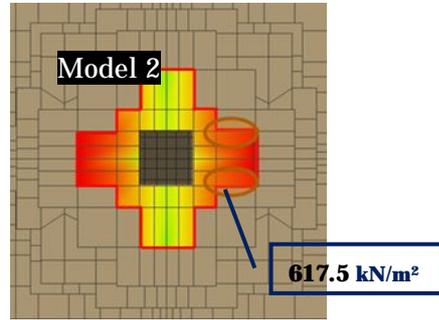


図 12 空洞周囲の要素の引張応力

本調査で用いたミュオグラフィ観測機器もすでに取り外され、現在は世界遺産ポロブドゥール寺院の内部探査への適用が検討されている。今回のシヴァ祠堂での挑戦を契機に、非破壊を原則とする歴史的建造物の構造調査におけるミュオグラフィ技術の普及が期待される。

5. 主な発表論文等

[学会発表] 計 3 件

岡本裕美子,花里利一,田中宏幸,上北恭史:組積造世界遺産建造物プランバナン寺院シヴァ祠堂の耐震評価 ミュオグラフィ観測結果に基づく構造解析,建築学会大会学術講演梗概集,2015年9月6日(東海大学)

岡本裕美子,花里利一,田中宏幸,草茅太郎,上北恭史,小野邦彦:ミュオグラフィ観測による世界遺産組積造建造物の内部構造調査-インドネシア・プランバナン寺院シヴァ祠堂の調査-,建築学会大会学術講演梗概集,2014年9月13日(神戸大学)

Toshikazu Hanazato, Yumiko Okamoto, Taro Kusagaya and Hiroyuki Tanaka : Muon Radiography Monitoring for Structural Survey of the Prambanan World Heritage Temple, 日本惑星地球科学連合会,ユニオンセッション U-02 Particle Geophysics (招待講演),2014年4月28日(パシフィコ横浜)

6. 研究組織

(1)研究代表者

花里利一 (HANAZATO, Toshikazu)  
三重大学・工学研究科・教授  
研究者番号 60134285

(2)研究分担者

田中宏幸 (TANAKA, Hiroyuki)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号 20503858

(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・教授  
研究者番号 00232736  
小野邦彦 (ONO, Kunihiko)  
サイバー大学・世界遺産学部・教授  
研究者番号 50350426