

熱帯地域世界遺産組積造遺跡の構造・環境モニタリングに基づく保存修復計画

Conservation and restoration planning of World Heritage masonry structures in Torropical countries on the basis of structural and environmental monitoring

三重大学工学研究科 教授 花里 利一

1. 研究計画の概要

熱帯の地震地域にも多くの組積造世界遺産建造物が現存している。西欧や日本などの温帯以北の気象条件とは異なり、高温多湿・多雨の気象条件は建造物の保全に対して、より一層の科学的アプローチを必要としている。本研究は、このような気象条件において、保存修復計画上の課題が顕在化している世界遺産組積造建造物であるインドネシア・ボロブドゥール遺跡を対象として、建築物の安定性の評価、また、実際の修復計画に役立つ実践的な調査研究を実施したものである。その目的は、建築物の長期変動の挙動から現状の安定性を確認するものである。ボロブドゥール遺跡（写真1）を対象として、建築物の現状の安定性を確認するために、長期変動モニタリングを行なっている。本研究の位置づけは、図1に示すように、ユネスコによるモニタリング・プロジェクトの「2. Monitoring of Structural Stabilities」における「2. Monitoring of Structures Stability, 3. Monitoring of Environment, 7. GPS measurements」に当たる。

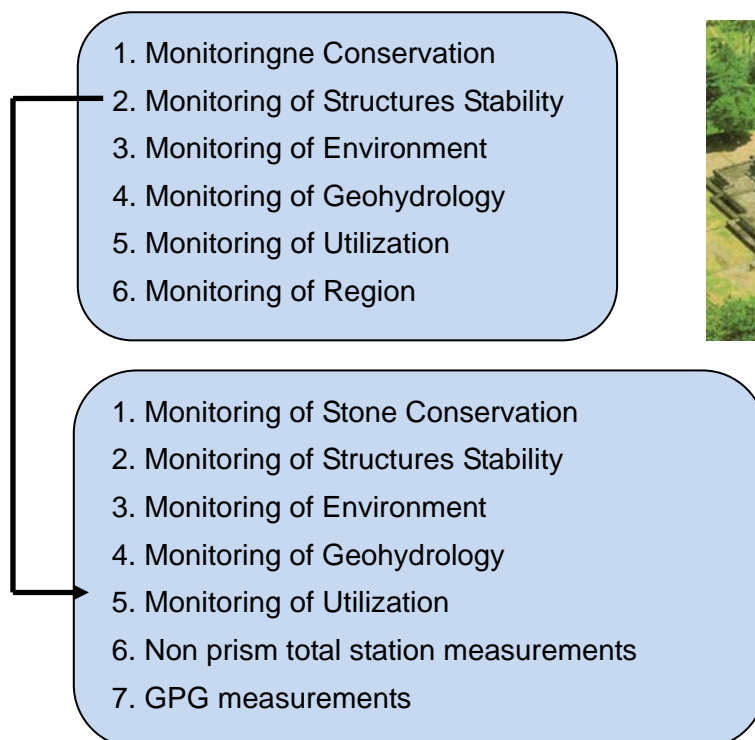


写真1 世界遺産ボロブドゥール遺跡

図1 ボロブドゥール遺跡保存修復計画におけるモニタリング

ボロブドゥール遺跡は、インドネシア共和国ジャワ島中部、ジョグジャカルタ市から北西約42kmのケドゥ盆地に位置している。創建は8世紀後半頃で、仏教の寺院遺跡である。1991年に、周辺のム

ンドゥ寺院・パオン寺院と共に「ボロブドゥール寺院遺跡群」としてユネスコ世界遺産に登録された（図2）。ボロブドゥール遺跡は、自然の土の上に版築土を盛り、目地材は用いず安山岩の石材を積み上げた組積造建造物である。

ボロブドゥール遺跡は、火山灰により地中に埋もれていたが、19世紀にイギリスのトーマス・ラッフルズに発見され、一部が発掘された。発掘調査が進められたが、崩落の危険性があるため、埋め戻された。1900年にはオランダ政府によって発掘調査が行われ、1907年から1911年にはオランダ人のファン・エルプによって復元工事が行われた。1960年初頭、崩壊寸前の危機にあったが、ユネスコ主導のもと、修復工事が行われた（図3）。その修復工事では、地盤沈下を防ぐために石材の下にコンクリートスラブを打設し、浸水を防ぐために排水システムが導入され、止水処理が施された。現在、水量は減少したが、漏水が確認されており、石材の耐久性の低下が懸念される等、修復工事の効果を確認する必要がある。



図2 世界遺産ボロブドール遺跡群

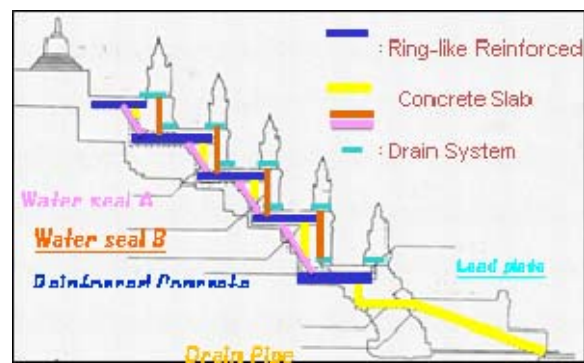


図3 ボロブドール遺跡の構造断面
（ボロブドール遺跡保存事務所提供）

GPS(Global Positioning System)とは、24個の人工衛星が約20200km上空を11時間58分2秒の周期でGPS電波を発信しながら円軌道上を飛行周回している宇宙部分と、人工衛星を制御する部分、GPS受信機や解析システム等で構成される利用者部分の3つのセグメントで構成されるシステムである¹⁾。

今日、GPSによる長期変動モニタリングは、主に、ダムなど社会基盤施設とその周辺地盤の挙動を日常的に監視するために用いられている。規模の大きい建造物や広い領域を対象とする場合、限られた予算と人員によって継続的・連続的に計測監視をすることは必ずしも容易ではない。そのため、継続的かつ効果的な安全監視・計測システムに対する要求が強く、近年になりGPSの利用が急速に広がっている。

GPS測位法には大別して、「単独測位法」と「相対測位法」とがある²⁾。単独測位法とは、GPS衛星から電波を1台の受信機で受信し、受信位置の絶対的な緯度、経度、高さを瞬時に得る方法である。単独測位法では安価に測位できるが、位置の計測精度が数m～数10mのため、建造物の長期変動モニタリングなどの精密計測には利用できない。相対測位法とは、2台の受信機で電波を受信し、2点間の相対的な座標を高精度に与える方法である。中でも、GPS電波の位相を利用する干渉測位法は高精度測量に利用されている。干渉測位法の一つであるスタティック測位法は、2箇所に固定した受信機で一定時間受信データを取得した後に基線解析と呼ばれる解析をすることによって、座標を求める方法である。スタティック測位法はmm単位の高精度計測が可能で、標準的な計測精度は5～10mm程度であり、誤差要因に対する補正および平滑化処理を実施することで計測精度をさらに向上させ、1mm以内程度とすることができる。

以上より、GPSによる変位計測は、継続的・効率的かつ高精度な計測が必要となるボロブドゥール遺跡の長期変動モニタリングに適していると考えられる。

また、世界遺産ボロブドゥール寺院遺跡群を構成するムンドゥ寺院(写真3)において、積石材間のギャップ変位および温度に関する長期のモニタリング観測を実施している。設置した変位計を写真4に示す。

2. 調査によって得られた新しい知見

図4に示すようにNo. 1～No. 2の5点を設定し、写真2に示すGPS受信機を設置している。No. 5の点を基準点として、No. 1～No. 4の相対的な変動のモニタリングを行なっている。2016年11月6日から2017年2月6日におけるGPSデータの解析結果を図5に示す。GPSデータは1時間毎のもので、基線解析や座標変換を行なった。各GPS測定点の相対変位を図5に示す。図5から判断して、長期の変位の顕著な変動はみられず、この期間では安定していると判断された。さらに、長期のモニタリングを継続的に実施することにより、より正確な判断が可能になるであろう。



図4 GPS観測点



写真2 GPSアンテナ(基準点No. 5)

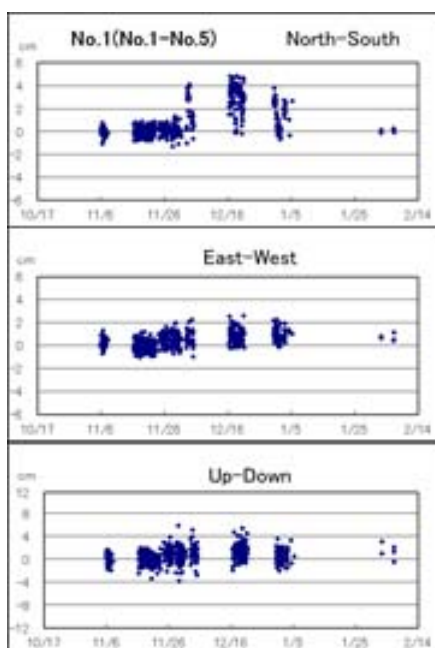


図5-1 相対変位 (No. 1-No. 5)

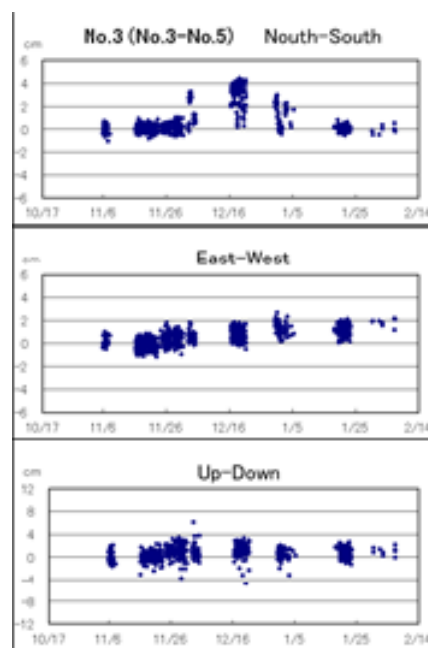


図5-2 相対変位 (No. 2-No. 5)

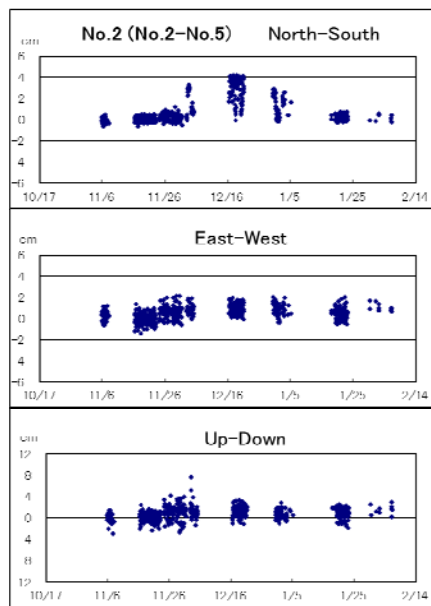


図5-3 相対変位 (No. 3-No. 5)

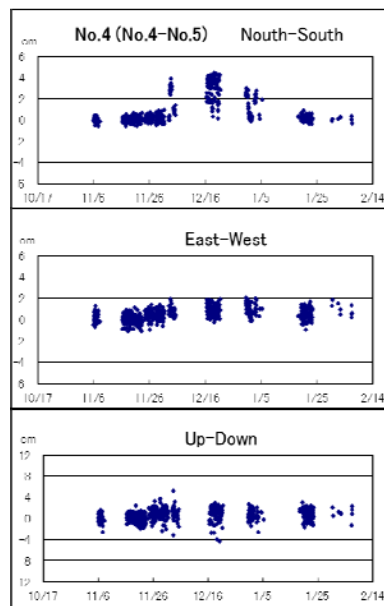


図5-4 相対変位 (No. 4-No. 5)

ムンドゥ寺院は、交通量の多い道路沿いに立地しており、保存事務所のスタッフによれば、交通振動による影響が懸念されているという。石材間のギャップに関する約1年間(2016年)の変位モニタリング記録を図6に示す。図6には、建造物の変位に影響を及ぼす温度に関する記録も合わせて示す。図6では、観測期間中、計測の欠損期間がみられるが、長期的には安定していると判断される。



写真3 ムンドゥ寺院



写真4 変位計

・まとめ

GPS受信機から得られたGPSデータの基線解析を行ない、長期変位変動の状況を把握した。2016年12月中旬に、各観測点ともに北方向、東方向に変動している傾向がみられるがおおむね安定していると判断された。対象建造物の安定性を確認するためには、今後もデータを積み重ね、長期的なモニタリングを継続していく必要がある。今後、より正確なデータを計測するために、降水や植生のGPS電波受信への影響の確認を行う。ムンドゥ寺院では、石材間の変位モニタリングを温度観測とともに実施した。変位は温度と相関がみられるが、変位変動は顕著な変動はみられず、年間で安定しており、構造的には安定していると判断された。

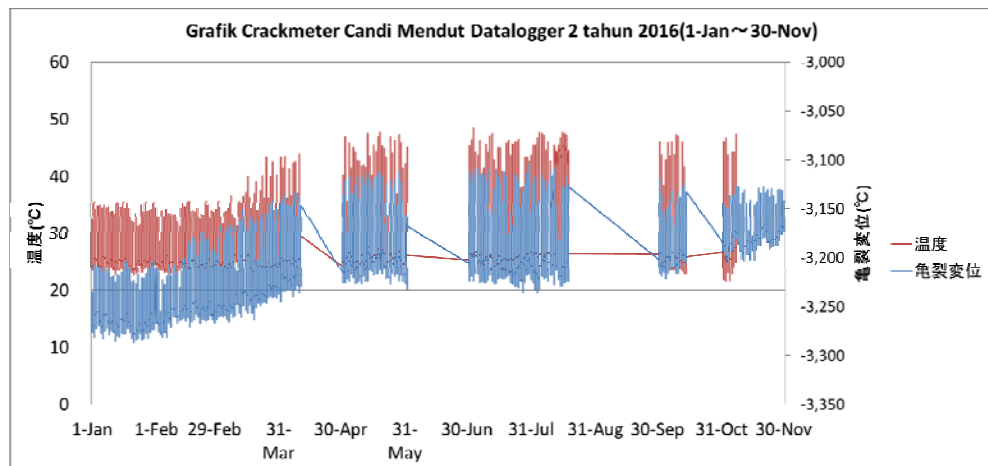


図6 亀裂変位・温度モニタリング記録(2016年1月1日～11月30日)

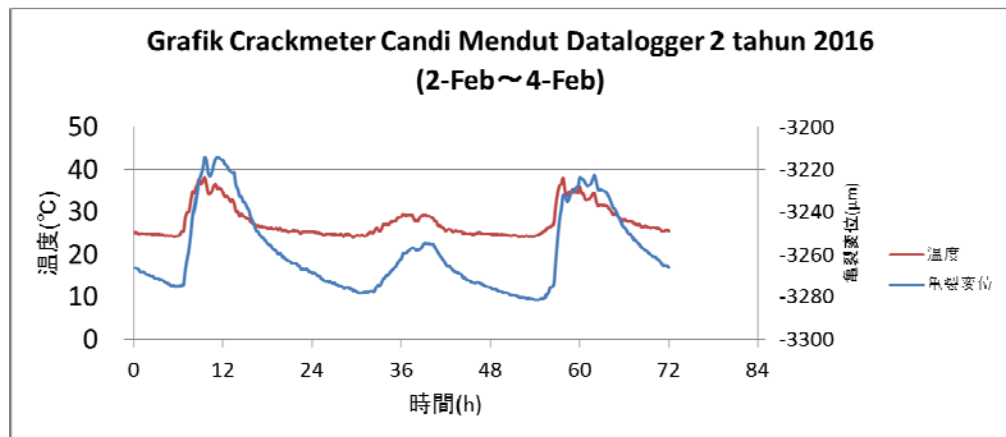


図7 亀裂変位・温度モニタリング記録(2016年2月2日～2月4日)

参考文献

- 1)ダム工学会計測管理研究部会,“フィルダムの変位計測に関するGPS利用マニュアル”,2014
- 2)清水則一 他,ISRM suggested method for monitoring rock displacements using the Global Positioning System (GPS),Rock Mechanics and Rock Engineering, 47巻1号313項～328項,2014

3. 発表論文

浅井真直, 増成友宏, 花里利一, 下田一太: 世界遺産組積造建造物の安定性に関わるモニタリング調査 - ボロブドゥール遺跡におけるGPSによる変動モニタリング調査, 建築学会大会講演梗概集, 2017年

謝辞

本研究は、三重大学工学研究科、ガジャマダ大学工学部、筑波大学・芸術学系・世界遺産専攻およびボロブドゥール遺跡保存事務所による国際的な協力によって実施している。ヨヨク・スプロト・ガジャマダ大学教授、マルシス・ストポ・ボロブドゥール遺跡保存事務所長に記して謝意を示す。