

アユタヤWat Krasai仏塔の保全に関する一考察

Consideration on Conservation of the Wat Krasai Pagoda in Ayutthaya

石田優子¹・伊藤肇²・深川良一³

Yuko Ishida, Hajime Ito and Ryoichi Fukagawa

¹立命館大学授業担当講師 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Part-time Lecturer, Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

²JIPテクノサイエンス株式会社 解析ソリューション事業部 (〒532-001 大阪市淀川区西中島2-12-11)

Technical Manager, JIP Techno Science Corporation

³立命館大学特命教授 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Specially Appointed Professor, Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University

The Wat Krasai pagoda in Ayutthaya, Thailand, inclines mainly toward the north. The soft clay in the foundation ground and the deterioration of the bricks and joint mortar that composed the pagoda are the main causes of the deformation. In 2013, the lower part of the pagoda was covered with new restoration bricks and the base was reconstructed. The purpose of this study is to extract the necessary considerations on the occasions in the restoration plan based on conditions of the pagoda after restoration for better conservation of similar brick buildings. The results show it is important to consider surface protection, drainage planning, and the additional weight of new bricks.

Keywords: Historical brick buildings, Conservation, Deterioration of bricks, Differential settlement

1. はじめに

タイ王国アユタヤには、王朝時代(1351-1767)に築かれた歴史的レンガ造建造物が数多く遺されている。アユタヤの町はチャオプラヤー川と2つの支流に囲まれており、地盤は氾濫により堆積した土砂で構成されているため弱く、多くの建造物に不同沈下による亀裂や傾斜が生じている。これらの建造物には適切な保全が求められるが、歴史的建造物の修復・補修・補強技術については十分な研究がなされておらず、採用された対策方法の是非についても持続的な検証がなされていない場合が多い。

そこで、本研究では2013年に修復されたレンガ造建造物の調査に基づいて、修復計画時に検討すべき事項の抽出を試みる。筆者らはこれまで、アユタヤ歴史公園より南西に位置するWat Krasaiの傾斜した仏塔を対象とし、①仏塔の傾斜原因と対策②気候変動による将来的な豪雨や洪水増加が仏塔の沈下傾斜に与える影響③修復用レンガの乾湿繰返しによる劣化と漆喰による表面保護の効果等について調査研究を行ってきた。本稿では、2014年以降に実施した周辺地盤調査、地下水位変動計測、雨量計測、仏塔の傾斜計測、表面水分計測結果等に基づき、2013年の修復以降の仏塔の傾斜状況および表面風化状況を報告し、歴史的なレンガ造建造物のより良い修復・保全の在り方について考察する。

2. アユタヤ遺跡建造物の修復・保全

(1) アユタヤの歴史概要

アユタヤは、首都バンコクから北約 90km、タイ中部の中央平野チャオプラヤー川流域デルタ地域に位置

する。1351年にラーマティーンボディー1世（ウートン国王）によって建都され、1767年ビルマ軍によって破壊されるまでの417年間、アユタヤ王朝の都であった。アユタヤの町は東にパーサク川、北にロップリー川、西にチャオプラヤー川の3つの河川に囲まれ、南側の下流で合流した川はチャオプラヤー川として海へと続いている。16世紀末以降多くの外国人が渡来し、日本からも交易のために商人らが訪れており、最盛期には約1000～3000人がアユタヤ国王から与えられた居留地で日本人町を形成し暮らしていたとされる¹²⁾。アユタヤの肥沃な土地では農業が栄え、水運に恵まれた地形により17世紀には国際貿易都市として繁栄した。また仏教が盛んで、アユタヤ王朝時代には3つの宮殿と400以上の寺院が建造された。これらの建造物の多くは、その後ビルマの侵攻によって破壊されたが、100を超える仏教寺院や遺跡が残されており、1991年には「Historic City of Ayutthaya（古都アユタヤ）」として世界遺産に登録されている。本研究で対象とするWat Krasaiは世界遺産の登録区域の外側に位置する。アユタヤおよびWat Krasaiの位置を図1に示す。



図1 アユタヤおよび Wat Krasai 位置図
(Google earth に加筆)

(2) レンガ造建造物の傾斜, 変形要因

アユタヤのレンガ造建造物の傾斜要因には、地形地質、構造材料の劣化、洪水の影響が考えられる。タイ中央平野南部の南北方向の地質断面図を図2に示す³⁾。チャオプラヤー川の河口から約100km上流のアユタヤの標高はわずか約5mで、地形勾配が1/100,000から1/50,000と非常に緩やかである。平野は砂や砂礫の層と粘土、シルトの互層で構成される。基盤岩は平野北端に近いチャイナット郡では深さ50mで確認され、バンコク付近で深さ660m以上、さらに南側のチャオプラヤー川河口付近で深さ800mほどに存在するとされ、基盤岩の表面は北から南に傾斜しており、アユタヤ付近においても地表から深いところに難透水性の固結した基盤岩があると考えられている。地表付近には、やや固結した粘土の上位に軟弱粘土が堆積したバンコク粘土が分布し、その最大厚さは26mほどとされる⁴⁾。レンガ造建造物の傾斜は、軟弱な地盤上に建造されたことで不同沈下が生じたことに起因すると考えられる。特に仏塔は、狭い面積に高く積み上げられた構造から単位面積当たりの載荷重が大きく、沈下が生じやすいと考えられる。

また傾斜だけでなく、偏心荷重により割裂やせん断ひび割れ、孕み出しが生じたレンガ造建造物も散見される。その要因としては、不同沈下だけでなくレンガの目地モルタルの接着の弱さも影響していると考えられる。目地には石灰モルタルが使用されているが、石灰モルタルはポルトランドセメントモルタルに比して接着性や強度が低いいため、レンガとレンガの間のひび割れや孕み出しが生じやすい。

さらにレンガ自体の劣化も構造上の歪みをもたらすと考えられる。粘土に少量の砂や切り藁等を混ぜて水でこね、型に入れて成形し、日干しや低温焼成して製造されたレンガは、古くから構造材料として世界中で利用されてきた。レンガは多孔質で透水性が高く、風雨に弱い特徴がある。タイで歴史的建造物の修復に使用されるレンガは低温で焼成され、日本の赤レンガ等と比べて強度が低く風化しやすい。レンガの劣化要因には、①風雨や日射等の高温多湿な環境②塩類析出による塩類風化⁵⁾⁶⁾③植物根等の生育④生物の食害等が挙げられる。劣化が進行すると、表面の剥落やひび割れ、抜け落ち等でレンガブロックの体積は減少し、構造体に空隙や歪みが生じる原因となる(写真1)。ICOMOS Thaiは、水によるレンガとモルタルの劣化はタイのモニュメントが直面するリスクの1つであるとしている⁷⁾。

レンガ造建造物の傾斜を促進する原因として、洪水の影響が僅かながら考えられる。2011年の洪水後に実施されたタイ芸術庁と東京文化財研究所の専門家らの調査結果⁸⁾によると、アユタヤ遺

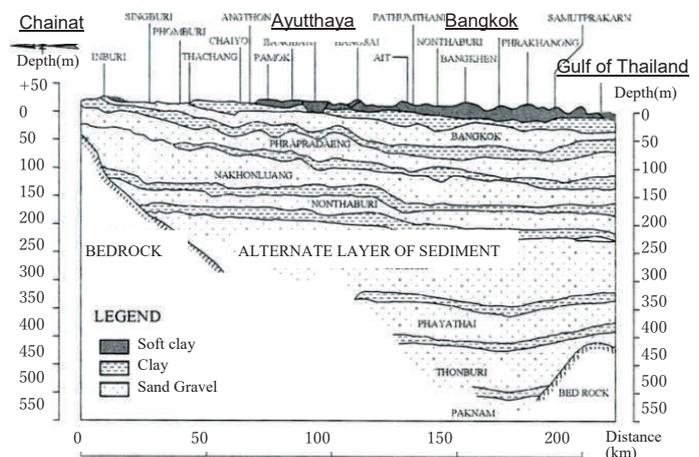


図2 タイ中央平野南部の南北地質断面図³⁾に加筆

跡への洪水の直接的な被害は限定的であり、被害規模は比較的軽微なものであったと報告されている。洪水による地盤の変状に起因するレンガ造構造物の大規模な傾斜や亀裂は、洪水発生以前の状態の記録がないことから検出できず、また構造物下部に見られた劣化や崩壊は洪水発生以前に生じていたものと考えられた。ただし、このような劣化や崩壊が、将来的に発生する洪水によって進行する可能性があるとは結論づけられている。筆者らは、Wat Krasai 仏塔を対象に洪水の影響について圧密沈下解析を実施し、洪水発生により僅かながら傾斜が促進されることを明らかにしたが、沈下量は小さく、直ちに仏塔を倒壊させるほどの傾斜は発生しないと考えられた⁹⁾。



写真1 Wat Krasai の劣化した修復レンガ

(3) レンガ造構造物の表面修復

建設当初のアユタヤのレンガ造構造物の表面には、スタッコと呼ばれる白い化粧漆喰が塗布されていたとみられるが、現在では大部分が剥落し、レンガは厳しい環境に暴露されている。漆喰は石灰を主成分とする表面仕上げの建築材料であり、世界各地で使用されているが混合される材料や組成は異なっている。日本の歴史的建造物では、7世紀末から8世紀初頭に高松塚古墳の壁画が漆喰地の上に描かれている¹⁰⁾。また姫路城に代表される城郭の白壁や神社仏閣等にも漆喰が使用されている。漆喰は不燃材料（国土交通省告示第1178号、平成16年10月1日施工）であり、調湿性や耐久性に優れる。筆者らは、アユタヤ遺跡で文化財補修用に使用されているレンガブロック（以下、タイ補修用レンガ）の表面に漆喰を塗布した場合の防水性能を調べる目的で、吸水試験を実施した。アユタヤ遺跡に使われた漆喰の材料や配合は再現できないため、実験条件は実際の状況とは異なる。石灰にはホームセンターで市販されている消石灰を用い、現地の砂の代わりにタイ補修用レンガを削って0.15mmふるいを通過したものをを用いた。また水は蒸留水を使用した。それらを1:1:1の割合で混合して実験用漆喰とし、タイ補修用レンガに約2~3mmの厚さで塗布した供試体を3体、塗布しない供試体3体を用意した。吸水条件は、JIS A 1435の建築用外装材料の凍結融解試験方法の片面吸水凍結融解法を参考に、バットに蒸留水を十分含ませたフェルトを敷いて漆喰塗布面が接するように静置し、片面から吸水させた。吸水時間は現地のスコールを想定し30±5分とした。吸水前後の質量を計測し、式(1)により吸水率を算出した。

$$\text{吸水率(\%)} = \{(w_2 - w_1) / w_1\} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 w_1 : 吸水前の供試体質量 (g)

w_2 : 吸水後の供試体質量 (g)

吸水試験の結果を図3に示す。漆喰を塗布したタイ補修用レンガの平均吸水率は2.3%で、塗布しないレンガの平均吸水率6.7%に比べて低く、漆喰の防水効果が認められた。スタッコは装飾的な役割だけでなく、レンガブロックの風化抑制にも効果を発揮していたと考えられる。

アユタヤでは、幾つかのレンガ造構造物の表面修復に関する研究や事例がある。畑中ら¹¹⁾は、塩類風化による劣化の現状を定量的に調査し、小面積において材料の劣化防止処理を行いながら最適な文化遺産保存の処理方法を開発することを目的として2006年からアユタヤ遺跡で研究を行い、Wat Som および Wat Chai Watthanaram にて高含侵性強化剤を用いた煉瓦の脆弱（劣化）部の強化および漆喰の劣化防止処理（剥落防止・表層劣化防

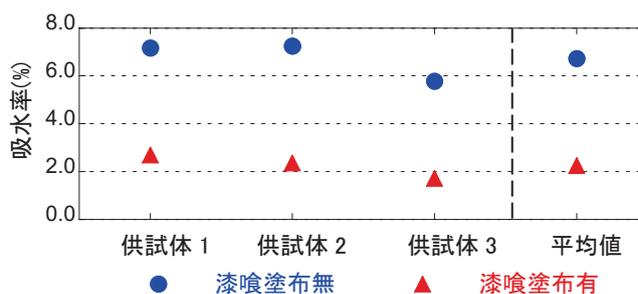


図3 タイ補修用レンガブロックの吸水試験結果

止)を実施した。World Monument Fundのプロジェクトチーム¹²⁾は、2013年からWat Chai Watthanaramにおいて文化遺産の保存修復家とタイ芸術庁職員向けのトレーニングプログラムを開始し、スタッコの再塗布等の修復事業を進めている。

3. Wat Krasaiの修復

Wat Krasai 仏塔は、川で囲まれたアユタヤ歴史公園の南西に広がる水田の中にポツンと立っている。観光客は殆ど来訪しないが、近隣住民にとって大切な寺院であり参拝者の供物が絶えない。現地の看板によるとアユタヤ王朝時代後期に建造され、1767年の第二次ビルマ-シヤム戦争ではビルマ軍の基地として使用されていたとされる。Wat Krasaiでは2013年に新しい文化財修復用のレンガを用いて、建設当初の仏塔形状や失われた寺院と周囲の壁を部分的に復元する大規模な修復工事が行われた。

修復前の仏塔は特に下部の損傷が著しく、土台部分は地中に埋没していた。また仏塔以外の構造物は破壊され、土に埋もれていた。修復前後のWat Krasai 仏塔を図4に、Wat Krasai 全景を図5に示す。また修復時に作成された東から西に向いて投影した断面図を図6に示す。仏塔は高さ約27mで、主に北に傾斜している。仏塔下部の内側の細い線は修復前の形状を、外側の点線は修復後の形状を示す。修復に用いられた文化財補修用レンガの単位体積重量に基づいて試算すると、修復前の塔の総重量は約19,600kNと推計された。また修復により仏塔下部表面が修復レンガで覆われ、基壇が本体の周囲に設けられたことにより、さらに約7,000kNが追加重量として地盤に載荷された。仏塔内部は空洞になっており、修復前には入口があったが修復により塞がれて現在は内部に入ることはできない。仏塔には対角上の4方向に横約17cm、縦約20cmの孔があり、内部の空洞と外部は孔によって繋がっている(写真2、3)。孔の内部を確認すると、4孔全てにおいて手前の修復レンガと奥の修復以前からあるレンガの傾きが連続しており、レンガブロックの方向と傾斜が修復前後で変わらず整合している。仏塔表面で観察される修復後のレンガブロックは全体に主に北に向かって傾斜するように積み上げられており、新しいレンガ表面に漆喰は塗布されていない。



図4 修復前後の Wat Krasai 仏塔
(左：修復前 2013 年撮影，右：修復後 2015 年撮影)



図5 修復前後の Wat Krasai 全景
(上：修復前 Google earth 2010.3.20 撮影，
下：修復後 Google earth 2013.2.20 撮影)

4. Wat Krasai の劣化状況の調査

(1) Wat Krasai 仏塔の劣化状況

2014年～2020年に実施した年2回(計12回)の現地調査において、仏塔および再建されたレンガ構造物でひび割れ、孕み出し、変形、レンガの風化や目地モルタルの剥落等が認め

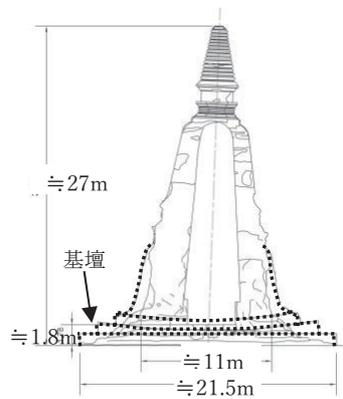


図6 仏塔断面図(東面)

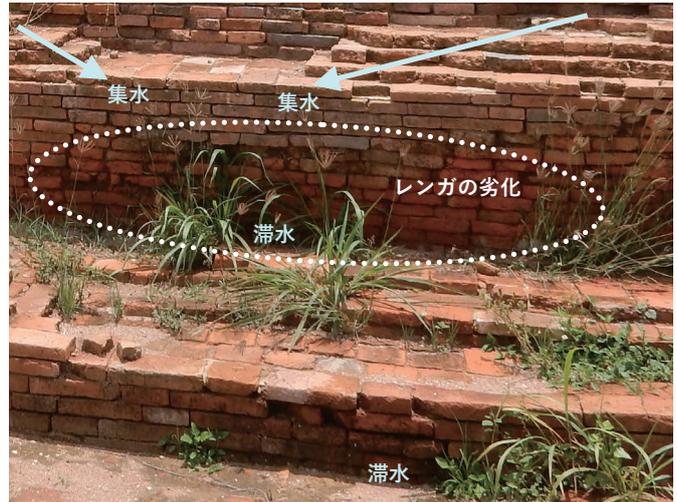


写真2 仏塔孔内部



写真3 仏塔全景(2014.8.24撮影)

られた。2013年の修復で追加されたレンガ表面には防水処理や漆喰塗布は施されておらず、2014年8月の調査時点で仏塔の北面と北西面において部分的にレンガブロックの割れや欠け落ち、目地に近い部分の表面が風化し剥落したものやブロック全体に微細なひび割れが生じ雨水が浸透して脆くなったもの等がみられ、付近の仏塔表面には植物が繁殖していた（写真4）。特にレンガの劣化が著しいのは3ヶ所で、修復1年後の劣化速度が最も顕著で、その後の劣化進行は緩やかにみられたが2017年には土の塊に見えるほど劣化が進行しているブロックが確認された。



(2) Wat Krasai 仏塔の劣化原因の考察

特に劣化が顕著な場所は、a) 仏塔が傾斜する方向でかつ日当たりの悪い北および北西面、b) レンガの傾斜配列により雨水が集まる付近、c) 水平な基壇の上位に積まれた段の底部付近であった。北および北西に向かって仏塔は傾いており、水が集まる上に日当たりが悪いため、レンガ内部に浸透した雨水は蒸発しにくくレンガ内部に長く水分が留まると推測される。仏塔表面にあたった雨水は目地に沿ってレンガの傾斜方向に流れ、集まった水が水平な基壇上に滞水することで、周辺レンガの水分が多くなる。さらに風雨で運ばれて溜まった土や風化して剥落したレンガ風化物を土壌として植物が繁殖することで、より水を貯えやすくなり、このサイクルが劣化を促進するものと考えられる。

この考察を検証する目的で、2020年2月にレンガ表面の水分状態を計測した。計測には、高周波容量式のコンクリート・モルタル水分計（㈱ケット化学研究所製HI-520-2）を使用した。一般的な高周波静電容量測定法は、2枚の電極板を材料に当てて電極間に高周波(20MHz)を印可し静電容量を測定する。各種材料の誘電率は、空気を1とすると10以下であるが、水の誘電率は80で各材料よりも大きいため、材料が水分を含むと見掛け上の誘電率が増加する。当該計測器は上記の原理を応用し、誘電率に代わる高周波容量の変化を検出して水分を測定する。代表的な材料の水分と高周波容量との関係は事前に求められて計測器に入力されているため水分(%)が直接デジタルで表示されるが、関係が不明な材料についてはDモードで計測することで水分に対応する数値（以下、D値と呼ぶ）が表示される。D値は高周波容量に匹敵するので水分が多いものほど大きな値を示し、0～1999目盛で表示される。測定により検証したいのはレンガの劣化が著しい北および北西面の水分量がその他の面に比較して多いことである。そこで仏塔1面につき向かって左側、中央、右側の上下2段で計6箇所を8面で測定し、各測定地点のD値を直接比較することで、仏塔8面におけるレンガの含水状態を相対的に評価することとした。仏塔は地表面から四角形の基壇、その上に八角形の段、さらに八角形の段、そして仏塔本体が積みあがったような構造となっており、各段の高さは8面で異なっている。沈下が大きい北面では段を低く、南側では段を高く積むことで、傾斜を再現している。そのため各面6箇所の計測位置を地表面からの高さで規定すると異なる段で計測することになる。今回の調査では各計測位置の標高は異なることになるが、4角形基壇のすぐ上位の八角形段の下から3～7段目のレンガブロックを計測下部、その上の八角形の段の4～9段目のレンガブロックを計測上部として調査した。測定位置に幅があるのは、計測機器の特性から測定面は平面が望ましく水分検出部分をよく密着させる必要があり、表面の凹凸が大きく密着性の悪いレンガブロックや風化して計測できないブロックは避け、できるだけ平滑な面のあるブロックを選ぶことを優先したためである。計測結果を図7に示す。計測下部では北西面、東面、北東面で相対的に高いD値が計測されたが計測上部では顕著な差は認められなかった。劣化の著しい北および北西面において部分的に水分の多いレンガブロックはあるものの、劣化の少ない東面と北東面で高い水分が検出されたため、

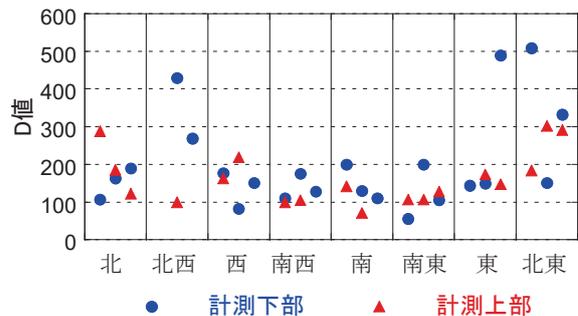


図7 修復レンガ表面の水分状態

必ずしもレンガブロックの水分量と劣化に相関があるとは言えない。今回の計測は夕方16～17時頃に実施しており、日照時間や降雨後の経過時間によって水分状態は変化するため、レンガの水分と劣化との関係を検証するには、計測条件を再考して調査分析を進める必要がある。

Wat Krasai 仏塔のレンガや目地モルタルの劣化状況の調査結果と考察から、水が劣化に及ぼす影響は大きいと考える。劣化の一因とされる塩類風化は水分の侵入と蒸発により塩類が表面に蓄積されることで進行し、植物根等による劣化も水があることで繁殖が促される。よって、より良い保全のためには、レンガ建造物の修復に新しいレンガを用いる場合は、レンガや目地モルタルの劣化防止のために漆喰等の表面保護材による雨水の浸透防止対策を検討することが肝要と考える。また修復レンガを水平に積まずに傾斜させて積んだのは、オーセンティシティの観点からオリジナルの仏塔の傾斜の再現を重視したものと考えられるが、このような傾斜建造物の補修時には、雨水の流下方向を考慮し、排水機構を設ける等、滞水させない方法を検討することも必要と考えられる。

5. Wat Krasai 仏塔の傾斜状況の調査

(1) Wat Krasai 仏塔周辺の地質と傾斜状況

2013年の修復に先立ち、図8に示すBH-1、2で地盤調査（標準貫入試験 SPT）がGL-26m付近まで行われた。2地点間の距離は約12mであるが、基本的な地層構造は同じでも各層の厚さは異なっており、第2層の軟らかい粘土の層厚は北側で南側より2.5m厚く、第4層の固い粘土は南側で北側より3.0m厚くなっていた。2016年に地下水位観測孔設置を兼ねて追加の調査をBH-3、4で実施した結果と合わせて各調査地点の層厚を表1に示す。4地点の層厚と土質情報を基に仏塔直下を含む3次元地盤モデルの構築を試みたが、第1、2層の粘土は北側で厚く、第4層の粘土は南側で厚い傾向がみられるものの、第3層のシルト質砂の分布や各地点によって異なる同一層の土の固結状態の違いから仏塔直下の地盤状況を推定するには至らなかった。4箇所の地盤調査データから推定断面図を作成し、基壇上の八角形の仏塔本体直下（図8における茶色の八角形点線下）における地層厚を推計し、展開図にしたものを図9下部に示す。また、仏塔表面のレンガブロックの傾斜度を4方位の孔を基準に、孔の下端から2段下を下段、孔の上端から10段上を上段として1面6箇所8方位で計測した結果を模式図にして図9の上部に示す。仏塔は全体の構造として概ね北および西方向に約2°傾斜しているが、表面のレンガブロックは場所によって約0°～11°の傾きがあり、仏塔は歪な形状をしている。特に南西～北西面での表面レンガブロックの傾きが大きく最大約11°あった。図9の地層の展開図と仏塔表面レンガの傾きをみると、第2層の軟らかい粘土層の厚さが増加する北に向かってレンガブロックは傾斜している。

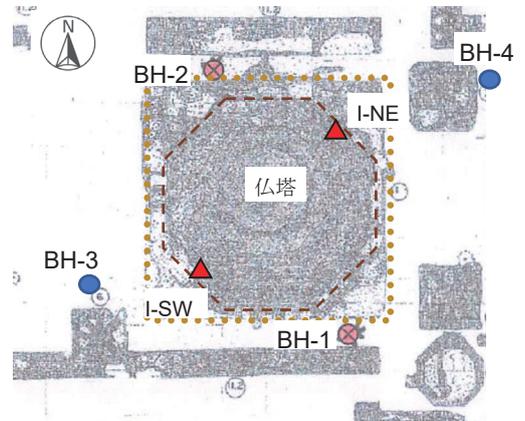


図8 Wat Krasai の地盤調査位置図

表1 4つの地盤調査地点における各層の厚さ

		単位(m)			
		BH-1	BH-2	BH-3	BH-4
第1層	粘土	3.0	4.0	2.5	4.0
第2層	粘土	3.5	6.0	1.5	6.0
第3層	シルト質砂	3.5	4.5	0.0	1.5
第4層	粘土	9.0	6.0	15.0	7.5
第5層	シルト質砂	-	-	-	-

図9の上部に示す。仏塔は全体の構造として概ね北および西方向に約2°傾斜しているが、表面のレンガブロックは場所によって約0°～11°の傾きがあり、仏塔は歪な形状をしている。特に南西～北西面での表面レンガブロックの傾きが大きく最大約11°あった。図9の地層の展開図と仏塔表面レンガの傾きをみると、第2層の軟らかい粘土層の厚さが増加する北に向かってレンガブロックは傾斜している。

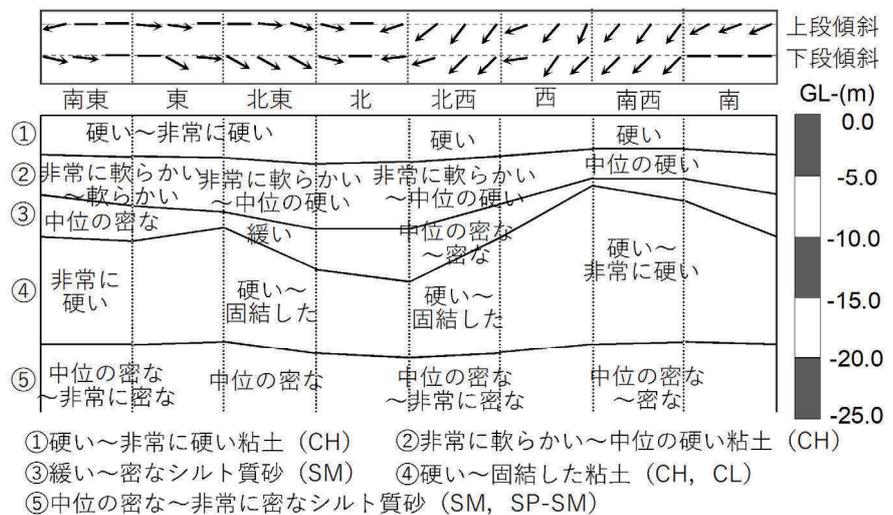


図9 Wat Krasai 仏塔の8面のレンガ表面傾斜と推定地盤断面図

(2) Wat Krasai寺院の構造物の傾斜状況

2015年1月の調査において、Wat Krasai 仏塔の南東に復元された小さい仏塔基壇（高さ約 50cm）にひび割れを確認した（写真5）。第2層の軟らかい粘土層厚が薄い南側において荷重の小さい構造物にひび割れが生じたこと、これまでの調査で降雨後に地表面が泥濘化し波打っている状況や構造物の基礎地盤が流出し一部が浮いた状態になっている状況等を確認してきたことから、地表面付近の浅い地盤（第1層）もレンガ造構造物の沈下傾斜の原因として対策を検討する必要があると考えられる。2020年2月までの調査で、小仏塔基壇のひび割れ幅の拡大や、復元壁においても新たなひび割れの発生やひび割れ幅の拡大が認められた。また仏塔の東一南一西側にかけて、4角形の基壇とその上の8角形の段との境目に亀裂が生じており、2019年8月と約6ヶ月後の2020年2月の計測で隙間の増大が確認された¹⁴⁾。FEM圧密解析では、修復によって新たなレンガの重量が地盤に载荷されると更なる沈下が急速に発生する結果が得られている¹³⁾¹⁴⁾。2013年の修復によって復元された基壇と表面を被覆された仏塔との境目の目地で縁が切れて、修復で追加された载荷重は基壇に分布せず、表面を被覆された8角形の仏塔中心部に荷重が集中し、さらに傾斜を促進している可能性がある。



写真5 レンガ構造物に生じたひび割れ
(2015.1.25撮影)

筆者らは、仏塔の傾斜状況を把握する目的で、2018年から図8に示すI-NE（北東孔）とI-SW（南西孔）の仏塔孔内（写真2）に傾斜計を設置し、モニタリングを行っている。計測には傾斜計のPHP-5HTを用いた。この計測器は5Vの電圧を与えると±5°の1軸方向の傾斜を10～90%の電圧で出力する。1計測地点につき2個の傾斜計を直角方向に設置し、2方位の傾斜を測定した結果を図10に示す。北東孔では2019年2月中旬頃から南西方向への傾斜が増加し、2019年3月のデータ回収日までに0.87°の傾斜が観測された。しかし、その間南西孔では大きな動きはなく、緩やかに北西、北東方向に傾斜した。この結果から、仏塔は一体として挙動していないと考えられた。2019年3月中旬から2019年8月中旬までは計測器の不具合のため各孔1方向の計測しかできなかったが北東孔では南西方向の傾斜が増加し、南西孔では顕著な動きは認められなかった。2019年8月以降は4計測器で明瞭な傾斜が確認された。北東孔では南西方向への傾斜が計測限界角を超えた。また南西孔では南東および北東に傾斜が発生した後、逆方向に急激に揺り戻すような現象が捉えられている。その後は比較的緩やかに南西、北西方向へ傾斜が進行している。タイの気候は、11月～3月が乾季、4月～5月が雨季で雨量は少ないがスコールが降ることがあり、6月～10月は雨季である。乾季は仏塔の傾斜変動は緩やかな動きで、雨季に顕著な変動が認められることから、降水による仏塔重量の増加や雨水浸透による地盤変状が仏塔傾斜に影響を与えている可能性が示唆される。仏塔の傾斜モニタリングから、現在も仏塔は動いており、全体としておおむね西向きに傾斜が進行していると考えられた。この結果

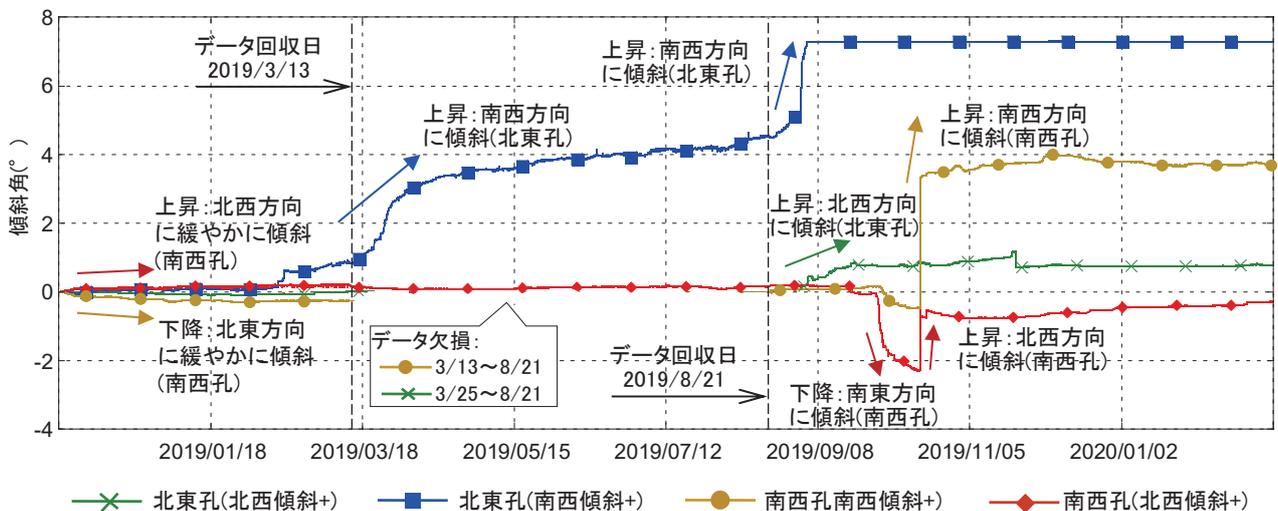


図10 Wat Krasai 傾斜計測結果 (2018.11.21-2020.2.29)

は、現地で確認された基壇と仏塔間で生じた亀裂が東-南-西面で確認されたことから北方向に傾斜しているという推測と整合しない。仏塔全体の動きを正確に捉えるには、仏塔内部の傾斜計測を継続するとともに、隙間の拡大量を定点観測し、総合的に判断する必要がある。

6. おわりに

本稿では、これまでに実施したアユタヤ Wat Krasai 寺院での調査計測に基づいて劣化および傾斜状況を報告した。傾斜したレンガ造建造物のより良い保全のためには、修復計画時に以下を検討することが望まれる。1)レンガ表面の雨水浸透による材料劣化を防止するための表面保護および排水計画、2)修復レンガの載荷重による沈下傾斜の予測および地盤補強等の対策、3)修復後の沈下傾斜のモニタリングおよび亀裂や経年変化などの劣化状況の継続的な記録。また、修復完了後は実施した修復をレビューし、ブラッシュアップを図り、情報を蓄積することが必要と考えられる。

謝辞：タイ王国芸術庁第三事務所およびアユタヤ歴史公園事務所には、資料提供、調査計測許可等多大な協力を賜った。またチュラロンコン大学Chaweewan Denpaiboon教授、カセサート大学Weerakaset Suanpaga准教授、Chalemnchai Trakulphudphong先生には現地調査の支援をいただいた。立命館大学政策科学部鐘ヶ江秀彦教授、豊田祐輔准教授、理工学部藤本将光准教授および卒業生の大矢綾香氏、千々和詩織氏、岡野哲也氏、栗原建伸氏、名久井宏樹氏、城西大学現代政策学部酒井宏平助教らには現地調査等において協力をいただいた。立命館大学理工学部福山智子准教授には、調査のための機材を貸与いただいた。立命館大学工作センター浅田敬司氏には計測装置の製作にご協力いただいた。漆喰の防水試験には大阪府立大学工業高等専門学校卒業生の声元勝氏に実施協力を、近畿壁材工業株式会社の代表取締役濱岡淳二氏には漆喰材料の選定や製造塗布方法について助言および実技指導をいただいた。本研究は、立命館大学「アジア・日本研究推進プログラム」および立命館大学歴史都市防災研究所の助成を得て実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 泰日協会：アユタヤ旧日本人町の発生と発展，日本人町ガイド，発行年不明（2018年配布取得）。
- 2) タイ国政府観光庁日本事務所：アユタヤ王朝以前の遺跡と外国人居留跡，<https://www.thailandtravel.or.jp/area/info/ayutthaya/>，2020.12.27 Access..
- 3) Noppadol Phienwej, Hiroyasu Otsu, Nutthapon Supawiwat, Kenji Takahashi : Land Subsidence Caused by Groundwater Pumpage in Bangkok, Soils and Foundation, Vol. 53, No. 2, Ser. No. 565, pp.16-18, 2005.
- 4) JICA, タイ王国 パサック川東部アユタヤ地区洪水対策計画 協力準備調査報告書（詳細設計）, pp.2-8-2-9, 2012.
- 5) 朽津信明：タイの遺跡における使用せきざいとその劣化に関する調査報告，保存科学, No.38, pp.59-68, 1998.
- 6) 朽津信明：文化財材料としての煉瓦の劣化，マテリアルライフ学会誌, Vol.17, No.1, pp.7-11, 2005.
- 7) ICOMOS Thailand., Heritage at Risk, Thailand, https://www.icomos.org/risk/world_report/2000/thai_2000.htm, 2019.5.25.
- 8) National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo: Report on the investigations of the flood damage of cultural properties in the Ayutthaya Historical Park, pp.1-47, 2012.
- 9) Yuko Ishida・Ayaka Oya・Weerakaset Suanpaga・Chalemnchai Trakulphudphong・Chaweewan Denpaiboon and Ryoichi Fukagawa : Influence of floods on the inclination of stupas in Ayutthaya, Thailand, Proceeding of 8th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials and Environment, pp.926-931, 2018.
- 10) 北田正弘・高妻洋成・坂上万里・建石徹：高松塚古墳の石室に使われた漆喰の劣化機構，日本金属学会誌，第82巻，第8号，pp.319-325, 2018.
- 11) 畑中重光・長谷川哲也：文化財の保存技術への挑戦，コンクリート工学, Vol.51, No.1, pp.132-136, 2013.
- 12) World Monument Fund : Building capacity for conservation and stewardship of Thailand's heritage, <https://www.wmf.org/project/wat-chaiwatthanaram>, 2020.12.27 Access..
- 13) Yuko Ishida・Hajime Ito and Ryoichi Fukagawa : Inhibitory effect of ground improvement on the settlement of the leaning pagoda, International Journal of GEOMATE, Vol.20, Issue 79, pp. 111-118, 2021.
- 14) Hajime Ito・Yuko Ishida・Veerasak Sansaard・Tomohide Takeyama and Atsushi Iizuka: Leaning Pagoda of Ayutthaya analysis with three-dimensional effects and ground uncertainty, International Journal of GEOMATE, Vol.20, Issue 82, pp.161-169, 2021.