

スコータイ遺跡におけるレンガ造大仏の劣化に関する研究

正会員 ○吉田有里* 同 銚井修一**
同 小椋大輔***

4. 環境工学—9. 湿気

保存環境 スコータイ遺跡 含水率
熱移動 水分移動

1. はじめに

1.1 研究の背景

東南アジアには数多くの石造・レンガ造の遺跡が存在する。世界文化遺産に指定されているものも多いこの地域の遺跡は、高温多湿な屋外環境にさらされている場合が多く、物理的要因や生物的要因による劣化が見受けられる。このような文化財の劣化には、多孔質材料中の水分分布や水分移動が大きく関連している。

本研究では、スコータイ遺跡のスリチュム寺院内の大仏を検討対象とする。この大仏では藻などの繁茂が見られる。藻生育のための水分源としては、その時々降雨や結露など外部からの水分だけでなく、それ以前に侵入し内部に存在する水分も考慮する必要がある。また、大仏台座や本堂の壁では塩の析出が顕著に表れている。これにはレンガ構造物内からの水分移動と蒸発が関係している。現在大仏本体に目立った塩類風化は見られないが、表面の一部に茶色の変色が見られる。これも同様の現象によるものと推測される。本報では、大仏内部の熱と水分移動に関する解析モデルを作成し、内部の水分の移動・蓄積の解析および蒸発量の算定を行い、変色との関係を明らかにするとともに今後の劣化を予測する。実態に近い状況を再現するため三次元のシミュレーションを行い、今後の遺跡保存のための基礎資料を得ることを目的とする。

2. スコータイの地域特性とスリチュム寺院周辺の概要

スコータイ遺跡はタイ北部に位置する。熱帯モンスーン気候に属し、一年は雨期（5月～10月）と乾期（11月～4月）に大きく分けられる。

スリチュム寺院はスコータイ遺跡の城壁外、北側に位置する。温度は一年を通して高温で（年平均気温は28.3℃）、日平均気温は4月に最高33℃、12月に最低23℃をとる。日較差は乾期に大きく、雨期に小さい。相対湿度は年平均値が70%、日平均値が雨季では85%、乾季では40%と高温多湿な環境である。日射量は東京の1.5倍程度である。降雨は雨季に集中し、乾季にはほとんどない。

本堂は、23m四方、高さ14.5m、壁の厚さは約3mで、大仏の顔正面に幅2mの縦長の開口を有するレンガ造建造物である。現在、本堂には屋根がなく、直接雨や日射がさし込む。大仏は高さ15m、両膝間の幅は11.3mで、この本堂の内部いっぱいに鎮座している。

3. 気象条件が大仏内含水率・温度に及ぼす影響

3.1 解析対象のモデル化

大仏を3次元の簡単な形状にモデル化した（図1）。大仏の内部はレンガでできているものとし、その外側には厚さ10cmの漆喰層がある。モデルの寸法は大仏を近似して、高さ14.5m、胴体の幅が6.8m、両膝間12m、奥行き4.2mとする。大仏表面に入射する日射量は、測定値をベルラーゲの式とブーガの式を用いて直散分離して算出する。天空放射は背面を除くすべての面にあたり、直達日射は水平面（頭・肩）のみにあたるとする。天空率は部位に応じて決めた。数値計算には、コントロールボリューム法を用いる。空気層には温湿度の実測値を入力し、降水は実測値を水平面（頭・肩・膝）に与える。底面の温度・化学ポテンシャルは一定とし、それぞれ現地の外気温湿度の年平均値に相当する値とした。初期条件は、底面と同じ値とした。

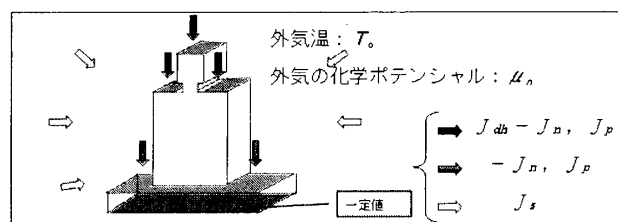


図1 解析対象モデル

3.2 大仏内部の含水率の年変動と降雨の影響

図2に、年周期的定常状態における3ヶ月ごとの大仏内部の含水率分布を示す。これらは胴体中央の断面（内部の面）での結果である。胴体内部では3月末（乾季終期）に最も低い0.15%を示し、6月末（雨季初め）から上昇し、9月末（雨季終期）に最も高くなり0.25%を示す。12月末（乾季初め）には、胴体側面から水分が蒸発し低くなっている。また、12月末には頭・肩・膝の水分は下方に浸透しているのがわかる。頭・肩・膝では年間を通して含水率が他の部位より高くなっている。図3に降雨前、降雨直後、3日後、9日後の含水率分布の結果を示す。降雨時は、頭・肩・脚の水平面の含水率が高いが、その後水分が蒸発し、9日後には降雨前とほぼ変わらない含水率分布となっている。

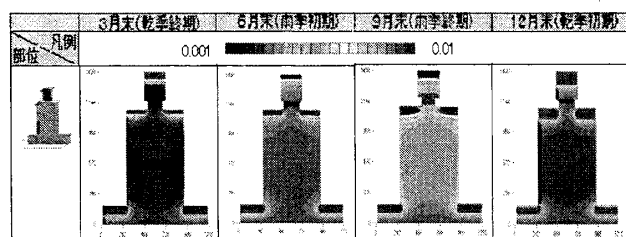


図2 大仏内部の含水率分布の年変動 (3ヵ月ごと)

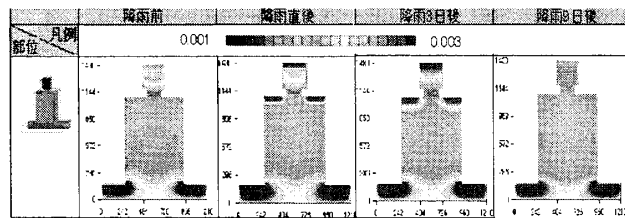


図3 降水前後の含水率分布の変動

4. 大仏表面の変色と水分との関係および劣化予測

大仏周辺で見られる塩類風化は、レンガ内の塩類が、乾燥期に水分の蒸発によって表面に移動することで起こる¹⁾。大仏の膝部分などで見られる茶色く変色している部分の原因については不明であるが、塩類風化と同様に内部からの水分蒸発に関係があるかについて検討する。

まず、大仏の右膝部分に関して、表面の性状が類似した部分で分類した(図4)。それぞれの特徴を以下に示す。Ⅰ) 藻が生え黒緑色をしている。降雨が直接当たる場所である。Ⅱ) 見た目に際立った特徴はない。降雨が直接当たらない鉛直に近い場所である。Ⅲ) Ⅱと同様に降雨が直接当たらない場所であるが、茶色い変色が観察される。

モデルは側面に凹凸を付け、実際に近い形状にした(図5)。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの特徴を有するブロックの矢印方向(図5・右)の年間の日積算蒸発量を図6示す。藻類繁茂が見られるⅠでは水分蒸発量が多く、特に雨季に集中している。降雨が外に蒸発・流出するためだと考えられる。流出する水分の一部は藻類に水分供給していると考えられ、藻類が雨季に成長し、乾季に仮死状態となることに対応している。Ⅱ、Ⅲでは、藻類繁茂に十分な水分蒸発量に達していないと推測できる。Ⅰ、Ⅱでは乾季における蒸発はほぼないが、茶色の変色がみられるⅢでは、乾季の間も、水分蒸発が継続している。雨季に侵入した水分は内部に蓄積され、乾季を含む年間を通して、膝(脚部)の下部から蒸発し、その際に、内部のレンガの成分が表面に移動した可能性が考えられる。

次に大仏全体について、側面のブロックの矢印方向の蒸発量を算定した。計算結果が、類似したものを大まかにⅠ～Ⅳに分類した(図7)。Ⅳは年間を通して水分の出入りが小さく1kg/dayに満たないため、Ⅴでは劣化は小

さいと予測される。乾季に継続的に蒸発が見られる部位であるⅢに該当する頭部の頬下、脇、下腹部では、実際に茶色い変色が観察される(図8)。このことから、レンガの成分が表面に現れてきた可能性は高いと考えられる。

5. 結論

本研究では、スリチュム寺院の大仏を対象として、その内部における温度・含水率を算出するモデルを作成した。その結果、大仏内部における水分の移動・蓄積の状況、年間の蒸発量と大仏表面における変色部分と関係の可能性を示した。これらの結果は、今後の遺跡保存のための基礎資料として有効に利用できると考えられる。



図4 右膝の劣化の分類

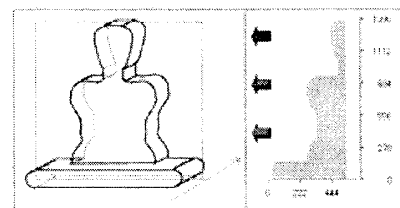


図5 解析モデル(全体図, 立面図)

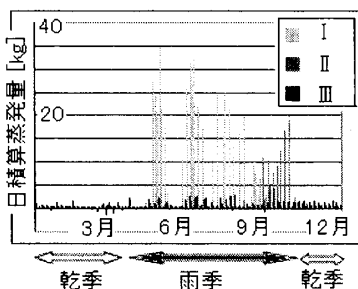


図6 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲの年間の日積算蒸発量[kg/day]

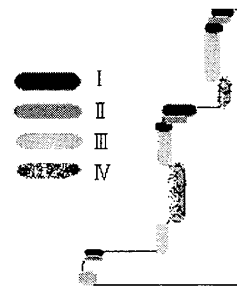


図7 蒸発状況の分類

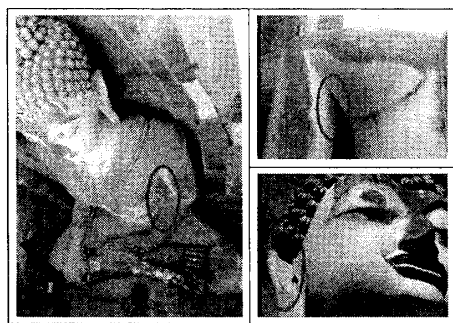


図8 頭部の頬下、脇、下腹部における変色

参考文献

- 1) 東京国立文化財研究所編：石造文化財の保存と修復 昭和52～59年度特別研究報告書, 1985.

*京都大学大学院工学研究科 修士課程

**京都大学大学院工学研究科 教授・工博

***京都大学大学院工学研究科 准教授・工博

* Graduate Student, Graduate School of Eng., Kyoto University

** Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

*** Associate Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.