

## タイ国スコータイ遺跡の大仏中の水分移動解析

石崎 武志・西浦 忠輝・ユッカ シムネック\*・マルチヌス ヴァンゲニヒテン\*

### 1. はじめに

東南アジアにある石造文化財、レンガ造建造物は、塩類風化などの物理的劣化や、苔や地衣類の繁茂による生物的劣化などによって大きな被害を受けている。これらの劣化の一つの要因に水分状況がある。タイのアユタヤのレンガ造建造物は、雨季に多量の水分がレンガ中に入り、乾季にレンガ表面から徐々に水が蒸発する事に伴って、レンガ表面に塩類が蓄積し、レンガを破壊するという塩類風化現象が起きている。そのため、この劣化の原因を正しく理解し、適切な保存対策を構築するためには、構造物中の年間を通しての水分分布の変化、水分移動状況を定量的に見積もることが重要である。著者らは、この際のレンガ造建造物中の水分移動を有限要素法を用いて解析したり。解析により、アユタヤのワットマハタットのレンガ造建造物では、塩類風化に寄与する水分が、主として降水から供給されていて、地下水からの寄与が小さいことが分かった。

現在、東京国立文化財研究所は、タイ国芸術総局と共同で、スコータイ遺跡のスリ・チュム寺院大仏の保存修復に関する共同研究を行っている。この大仏は、表面層が藻類などの繁茂により、脆弱化が起こっていた。この保存対策を考える上で、年間を通して、大仏中の含水率分布の変化および水分移動について理解することが重要であると考え、大仏中の水分移動解析を行ったので以下に報告する。

### 2. 現場の概要

タイ国中央部にあるスコータイ遺跡は、13～14世紀に栄えたスコータイ王朝の都市遺跡である。スリ・チュム寺院はレンガ造建造物であるが、屋根部分が失われ解放状態になっている。本堂の内側いっばいに高さ15mの大仏が納められている。大仏は、レンガを積んで大体の形を造ってから漆喰を盛りつけて成形し、表面層を漆喰で仕上げたものである。大仏の表面には生物（苔類、藻類、地衣類、黴類）が繁殖していた。雨水が十分に供給される雨季には、生物が活性化し、緑色になり、雨がほとんど降らない乾季には、生物が仮死状態になり黒変する。これを図1に示す。また、生物の繁茂による表面漆喰層の劣化（脆弱化：特に水平面で著しい）が見られた。このため、保存対策として、表面層のクリーニングと表面層強化防水処理が、日・タイの共同事業として行われた<sup>2)</sup>。ここでは、表面層強化防水処理前の状態での大仏中の水分移動解析をケース1、表面層のクリーニングと表面層強化防水処理後の状態での大仏中の水分移動解析をケース2とする。

### 3. 入力条件

気象条件として重要なのは、降水量と可能蒸発散量である。本共同研究において、1996年より、現地の降水量、外気温度、湿度などを測定している。また、1997年より、この大仏近くで地下水位を計測している。降水量は、現地で測定した1997年の日降水量を用いた。また、可能蒸発散量は、タイ気象局のデータを用いた<sup>3)</sup>。このデータは、月平均の値であるので、月の日数で割り日平

\* 米国農務省塩類研究所

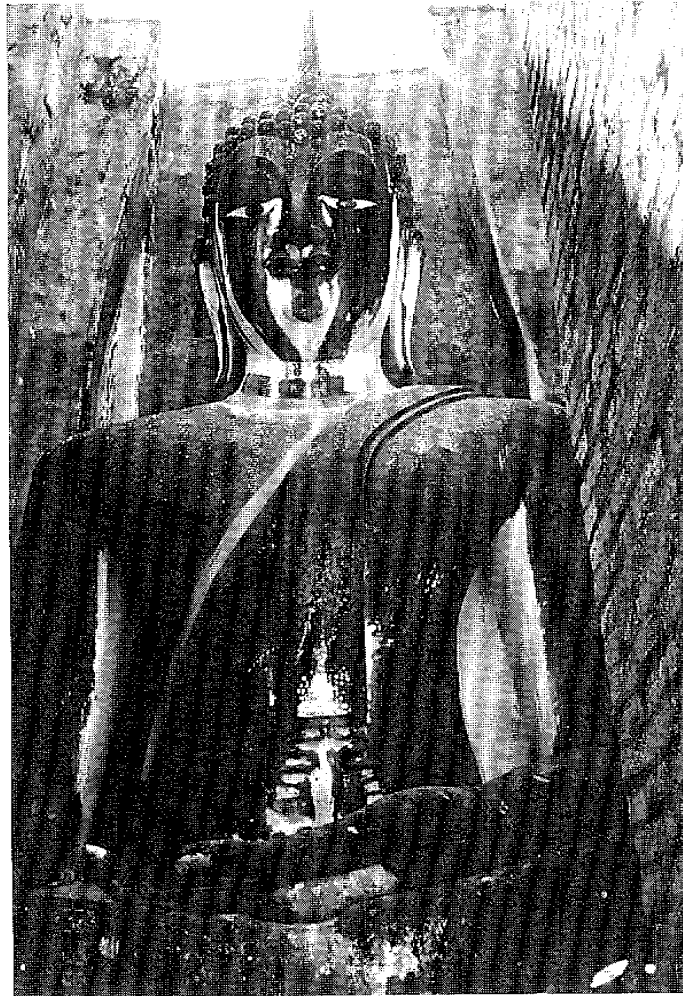


図1 表面層のクリーニング前のスリ・チュム大仏

均の可能蒸発散量を計算し入力データとした。これらのデータを図2に示す。また、地下水位は1997年9月から1998年3月までの測定値から外挿して求めた。大仏中の水分分布、水分移動量などを計算するためには、これらの環境データの他に、レンガ、モルタル、土の水分特性曲線、不飽和透水係数などの物性値が必要である。モルタルの水分特性曲線は、朽津ら<sup>4)</sup>によって得られたデータを用いた。レンガに関しては、非常に乾燥した状態までデータが取られている尾崎らの結果を用いた。これらの図は、石崎ら<sup>3)</sup>に示されている。また、土の水分特性に関してはシルトロームのデータを用いた<sup>5)</sup>。

不飽和透水係数に関しては、測定した飽和透水係数と水分特性曲線のデータから、米国塩類研究所のヴァンゲニヒテンらの開発した以下の方法で求めた<sup>6)</sup>。ヴァンゲニヒテンらは、水分特性曲線における体積含水率 ( $\theta$ ) とマトリックポテンシャル ( $h$ ) の間の関係を以下のように求めた。

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad (1)$$

ここで、 $\theta$  は体積含水率、 $h$  は多孔質体 (レンガ、漆喰、土) のマトリックポテンシャル、 $S_e$  は有効飽和度、 $\theta_r$  は、残留体積含水率、 $\theta_s$  は飽和体積含水率である。 $\alpha$ 、 $n$ 、 $m (= 1 - 1/n)$  は実験から求められるパラメータである。ここで、マトリックポテンシャルとは、試料の水分のエネルギー状態を示している。例えば、マトリックポテンシャルが10 mとは、多孔質中の水の圧力が10 mの負圧 (約1気圧) と釣り合うだけ大気圧より低くなっていることを示している。また

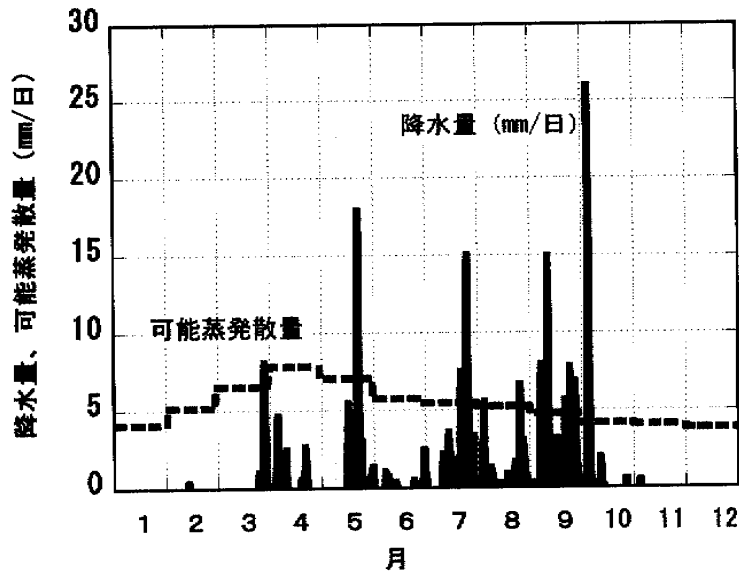


図2 スコータイでの降水量，可能蒸発散量の測定結果（1997年）

ヴァンゲニヒテンは，不飽和透水係数（ $K$ ）を有効飽和度（ $S_e$ ）の関数として以下のように示した。

$$K(\theta) = K_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m] \quad (2)$$

ここで， $K(\theta)$  は不飽和透水係数， $K_s$  は飽和透水係数である。この透水係数はミュアラム<sup>6)</sup>の飽和透水係数と水分特性曲線を考慮した統計的な間隙径分布モデルから計算されたものである。上式は，一般にヴァンゲニヒテン式とも呼ばれ，今回の計算において用いた。

#### 4. 計算方法

不飽和状態にある多孔質体中の水の流れは，リチャーズ式<sup>7)</sup>と呼ばれる以下の偏微分方程式で書き表せる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K_{ij}(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}(h) \right] \quad (3)$$

ここで  $K_{ij}(h)$  は不飽和透水係数テンソル， $t$  は時間， $x_i$  は空間座標である， $(x, y, z)$ 。Z 軸は上向きを正にとる。

リチャーズ式の解は，差分法や有限要素法など色々な数値解析手法から得ることができる。ここでは，シムネックら<sup>8)</sup>らにより開発された有限要素法 (FEM) による多孔質中の 2 次元水分・塩分移動シミュレーションプログラム HYDRUS-2D を用いた。有限要素法の基本は，対象構造物を三角形の小さなメッシュと呼ばれる要素に分け，すべての要素で，そこでの圧力勾配による水分の移動を時間経過とともに計算する手法を用いている。

このリチャーズの式は，初期条件と境界条件を与えると解くことができる。境界条件としては，降雨がある場合には，大仏に鉛直下方に水が浸透し，乾季に関しては，大仏表面から垂直方向に蒸発するものと仮定した。また，初期条件としては，大仏と地盤中の水の全ポテンシャルが地下水位と一致する状態，すなわち水分移動がない状態とした。

## 5. 計算結果と考察

### ケース1 表面層強化防水処理前の大仏

図3は、高さ15mのスリ・チュム寺院大仏の縦断面の有限要素メッシュを示したものである。このメッシュは31,661個の三角形要素と16,231個のノードルポイント（節点）からなっている。厳密には、3次元で解析する必要があるが、計算時間の制約からここでは、2次元軸対象モデルとして計算を行った。大仏の物性値としては、表層3cmは漆喰の物性値、内部はレンガの物性値を用いた。

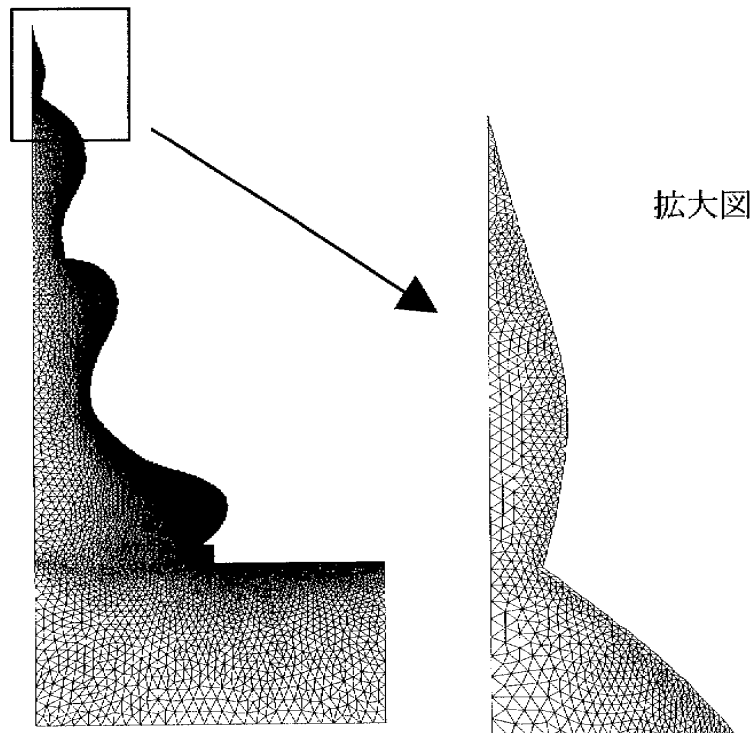


図3 大仏の有限要素メッシュ図

図4には、3月末、6月末、9月末、12月末の大仏中の体積含水率分布の計算結果を示した。3月から6月にかけて、表面から徐々に水が浸透していき、含水率が表面付近から高くなっていくのが分かる。また、雨季の終わりの9月末には、大仏中の体積含水率が一番高くなり、乾季に入った12月末には、徐々に表面から水が蒸発していき、体積含水率が小さくなっている。これらの計算結果は、藻類や地衣類が雨季に成長し、乾季に仮死状態になることに対応している。

### ケース2 表面層強化防水処理後の大仏

図5には、表面層のクリーニングと表面層強化防水処理後の6月末と12月末の体積含水率分布の計算結果を示したものである。計算条件としては、西浦らの室内実験の結果<sup>9)</sup>をもとに、降水の大仏中への浸透はなく、蒸発速度は、無処理の場合の36%に減少するという境界条件を用いた。表層に、厚さ3cmの漆喰層があり、漆喰層の保水性がレンガより高いため、表面層での体積含水率が若干高くなっている。また、大仏中の体積含水率は、表層からの水分の蒸発により徐々に小さくなっているが、その変化速度は非常に小さくなっている。

これらの解析結果を評価するため、大仏表面近くの体積含水率の測定をTDR表面体積含水率

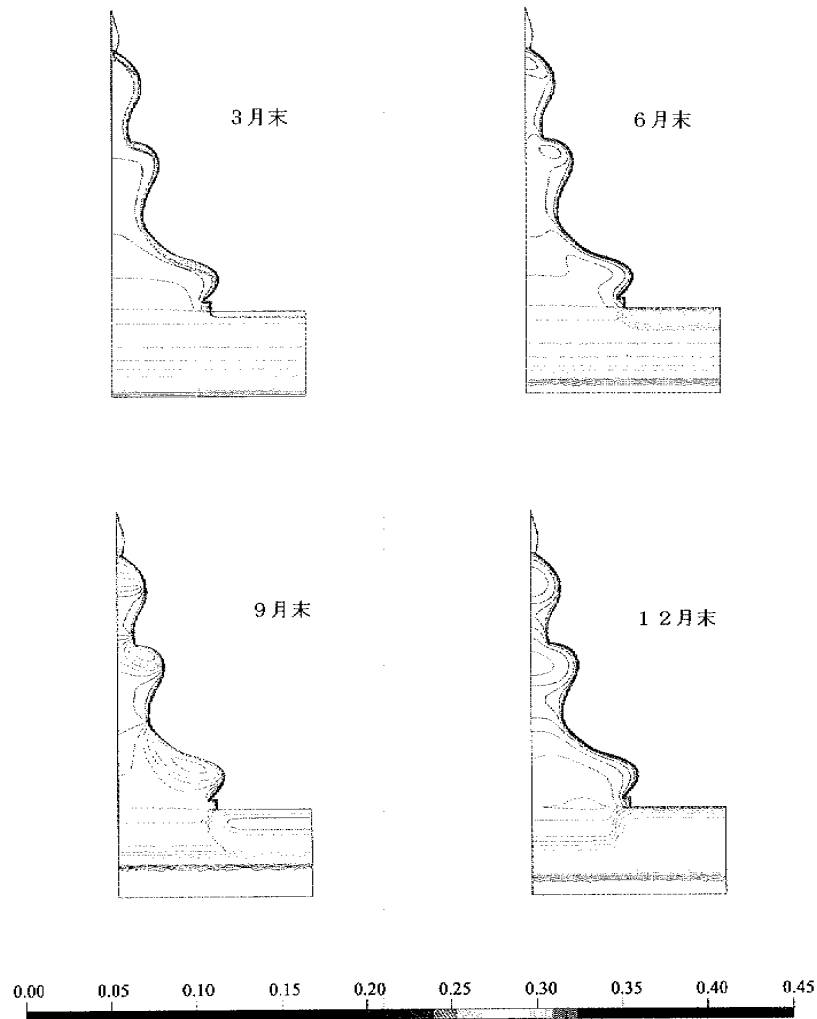


図4 大仏内の体積含水率の計算結果（表面層防水処理前）

測定装置を用いて行った。この測定装置は、表面から6 cm程度の深さまでの平均的な体積含水率を測定できる。測定結果を図6に示す。これは、樹脂処理をしなかった台座部分と、樹脂処理をした大仏の腹部、足部の体積含水率の測定結果を示したものである。台座部分では、乾季に体積含水率は下がり、雨季に体積含水率が上がる結果になっているが、樹脂処理をした大仏の腹部、足部部分は、年間を通してほぼ一定の体積含水率になっている。これは、計算結果と良く対応していると考えられる。

## 6. まとめ

本報告では、タイ国スコータイ遺跡のスリ・チュム寺院大仏中の体積含水率分布の年変化を降水量、可能蒸発散量などの気象データと水分特性曲線や不飽和透水係数などの物性値を用いて計算した。解析には米国塩類研究所で開発した水分、塩分移動解析プログラム (HYDRUS-2D) を用いて計算した。解析は、表面層強化防水処理前と強化防水処理後に関して、降水の浸透条件、蒸発条件を変えて行った。解析結果から、処理前の大仏中の体積含水率は、雨季に大きくなり、乾季に小さくなること、また、処理後は、大仏中の体積含水率は、その変化は非常に小さいが、徐々に小さくなることが分かった。この結果は、TDR 表面体積含水率測定装置による測定結果と良く対応している。この様に、雨季にも表面層強化防水処理などにより大仏表面近くの体積含水率を低く押さえることができれば、生物劣化を防ぐ上で有効であると考えられる。また、本解析

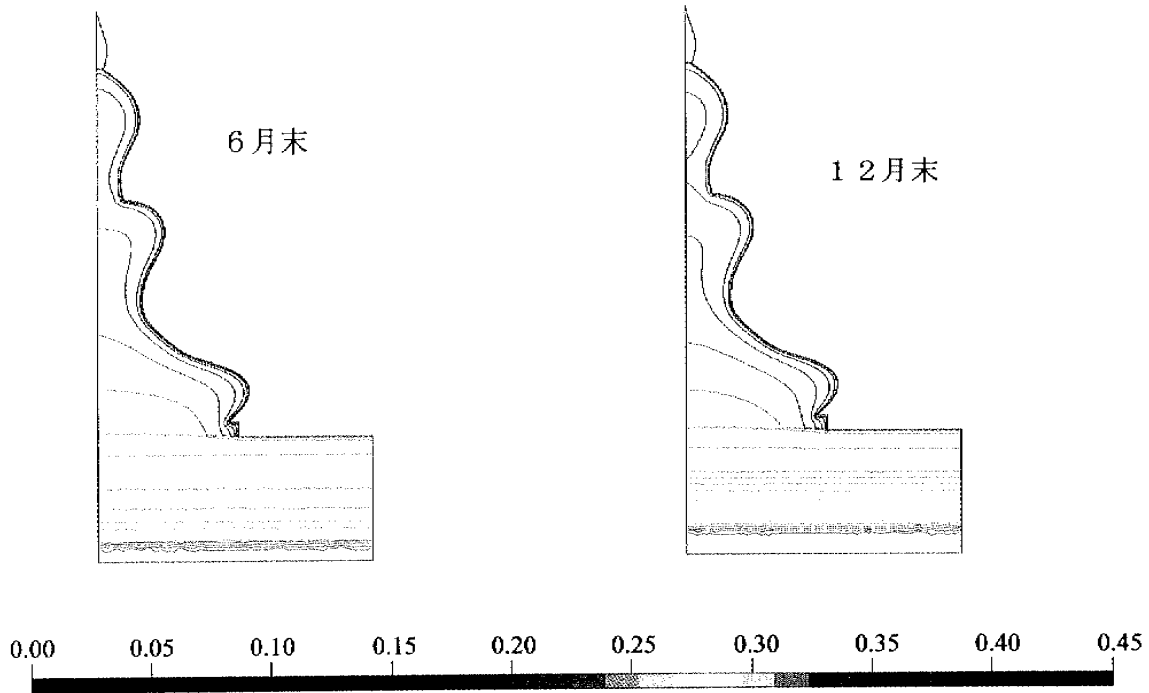


図5 大仏内の体積含水率の計算結果（表面層防水処理後）

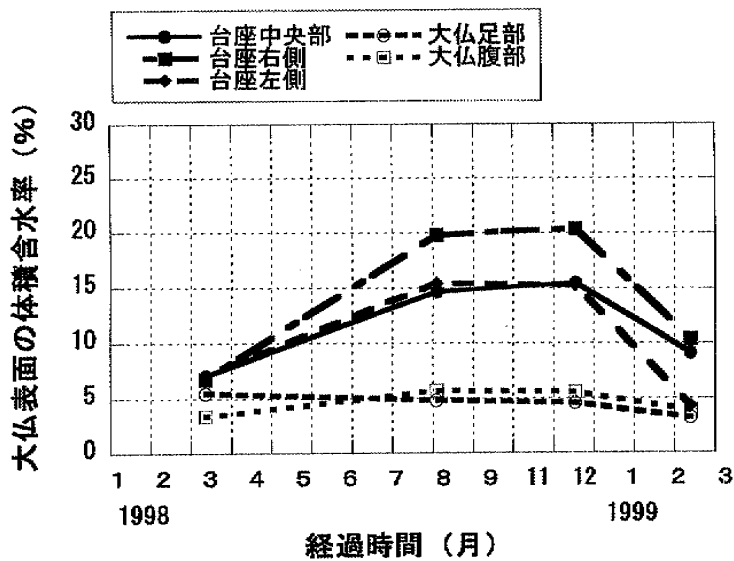


図6 TDRで装置で測定した、大仏表面層の体積含水率変化

手法は、大仏中の水分分布、水分移動を予測する上で、有効であることが分かった。水の存在は文化財の劣化に大きく関係しているが、含水率の分布などを非破壊で測定するのは非常に難しいので、この様な数値解析手法は、特に文化財保存の研究分野で有効であると考えられる。今回の解析では、計算時間の制約から、降水量の日平均値を用いているが、実際には短時間に集中的に降雨がある場合が多く、表面流出も大きい。そのため、今回の計算結果は、実際の雨水の浸透量より大きくなっていると考えられる。この点に関しては、米国塩類研究所のユッカ シムネック博士らとプログラムの改良を行っていくと共に、入力条件をより実際に近づけていくよう研究を進めていく予定である。

### 謝 辞

本研究を行うにおいて、タイ国芸術総局のチラポン アラニャナク、キッチャ ユホー氏に種々ご協力を頂いたので、ここに感謝致します。

### 引用文献

- 1) 石崎武志, 朽津信明, 西浦忠輝: タイ国アユタヤの歴史的レンガ建造物中の水分移動解析, 保存科学 **38**, 154-163 (1999)
- 2) 西浦忠輝, 石崎武志, チラポン アラニャナク, キッチャ ユホー: タイ国スコータイ遺跡のスリ・チュム寺院大仏の保存修復 (I), 保存科学 **38**, 146-153 (1999)
- 3) Meteorological Department, Agroclimatological data for Thailand
- 4) 朽津信明, 石崎武志, 西浦忠輝: タイ・アユタヤ遺跡の劣化と保存に関する応用地質学的調査, 日本応用地質学会平成10年度研究発表会講演論文集, 121-124 (1998)
- 5) Carsel, R. F., and R. S. Parrish: Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics, *Water Resour. Res.*, **24**(5), 755-769, 1988
- 6) van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **44**: 892-898, 1980
- 7) Richards, L. A.: Capillary conduction of liquids in porous mediums, *Physics*, **1**, 318-333, 1931
- 8) Simunek, J., M. Sejna, and M. Th. van Genuchten: The HYDRUS-2D software package for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media, version 1.0, IGWMC-TPS-53, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, CO, 1996
- 9) 西浦忠輝, 大石不二夫, 吉川俊夫: 石材保存用樹脂の評価試験 (IV) —樹脂含浸処理石材の水蒸気透過性(2)—, 文化財保存修復学会第20回大会講演要旨集, 120-121 (1998)

## Numerical Analysis of the Water Regime of Buddha Monuments in Skhothai, Thailand

Takeshi ISHIZAKI, Tadateru NISHIURA,  
Jiri SIMUNEK\* and Martinus Th. van GENUCHTEN\*

Many historic brick buildings and monuments in Asia suffer from surface deterioration due to salt efflorescence and microorganisms. Water infiltrates into these brick structures and monuments during the rainy season, and then flows back during the dry season towards the surface where it evaporates. An important giant Buddha statue in Sukhothai historic site in Thailand suffered from severe discoloration and deterioration due to the propagation of microorganism (mosses, algae, lichens etc.). In the rainy season, the surface color is green but in the dry season it turns to dark brown. The joint team of the Fine Art Department, Thailand and the Tokyo National Research Institute of Cultural Properties, Japan made investigations on its deterioration and carried out examinations for its conservation measures. For the evaluation of conservation measures it is important to know the water regime in the giant Buddha statue before and after cleaning and application of water repellent material on the surface. This paper reports on the results of numerical analyses of the water regime of the Buddha monument in Sukhothai before and after the treatment. The analyses were performed using the HYDRUS-2D finite element program for calculating variably-saturated water flow and solute transport in porous materials, developed at the U. S. Salinity Laboratory in Riverside, California. The calculated results corresponded well with the surface water content measurements taken with TDR surface probe. The calculated results showed that the application of water repellent material was effective in reducing the surface water content in the rainy season and in reducing the microorganism propagation on the surface.

---

\* United States Salinity Laboratory, USA