

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

石崎 武志・朽津 信明・西浦 忠輝・ユッカ シムネック*

1. はじめに

タイ国アユタヤのレンガ建造物、パキスタンのモヘンジョダロ遺跡などは、塩類風化の影響を受けて建造物の劣化が進んでいる。塩類風化とは、乾燥期に水分が建造物材料表面で蒸発し、水分が表面近くまで運ばれる際に塩類が析出し、その析出の結晶圧で材料骨格の接合が破壊され徐々に劣化していく現象である。そのため、雨季、乾季を通じてレンガ建造物中の水分移動を把握することは非常に重要である。著者らは、1996年より、アユタヤのワットマハタット、ラチャブラーナー、スコタイのワットスリチュムなどのレンガ建造物での水分測定、析出塩類の調査、気象観測を行ってきた。その結果、雨季には石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) を中心とする微量の難溶性塩類しか見られないものが、乾季には、テナルダイト (Na_2SO_4) を中心とする可溶性塩類が多量に見られることが分かった¹⁾。本報告では、アユタヤのレンガ建造物中の水分量変化を、降水量や可能蒸発散量などの気象データと材料の水分特性のデータから、年間の水分量変化や表面近くでの水分移動量の変化等を有限要素法 (FEM) 水分移動解析プログラム (HYDRUS-2D)²⁾を用いて計算し実測結果と比較したので以下に報告する。

2. 現場測定の概要

現在観測を行っているタイ、アユタヤのワットマハタット (Wat Mahathat) と呼ばれるレンガ建造物の西方向から撮影した写真を図1に示す。この建造物は、アユタヤ王朝の初期 (14世紀後半) に建てられたものと言われている。図2に建造物を東西方向で切った断面図を示す。ほとんどレンガがむき出しの状況であるが一部漆喰が表面に残っている所もある。図中のAで示したところが塩類風化の激しいところで、乾季には塩類の析出が見られる場所である、一方Bで示したところは乾季でも塩類の析出があまり見られず、塩類風化の影響が少ないところである。この部分の解析をケース1とする。



図1 レンガ建造物の写真 (西から撮影)

* 米国農務省塩類研究所

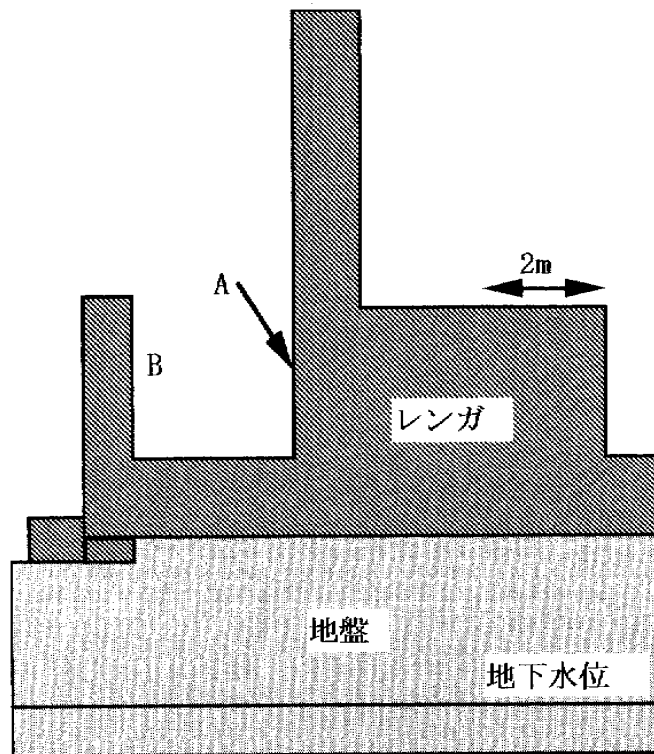


図2 レンガ建造物の東西断面の模式図

現場の測定から漆喰が残っている部分は、レンガのむき出しの部分より含水率が高く、塩類の析出が見られない。この漆喰の持つ意味に関して調査するために、アユタヤのワットマハタット近くに、高さ 105 cm, 幅 34 cm×30 cm のレンガの柱と表面に厚さ 2 cm 程度のモルタルを塗ったレンガ柱を建て (1996 年 11 月), その後, 継続して TDR 表面含水率測定装置を用いてレンガやモルタル表面の体積含水率の測定と, 地盤の体積含水率の測定を行ってきた。このレンガ柱写真を図 3 に南北方向の断面図を図 4 に示す。レンガ柱と表面にモルタルのあるレンガ柱の解析をケース 2 とする。



図3 レンガ柱の写真

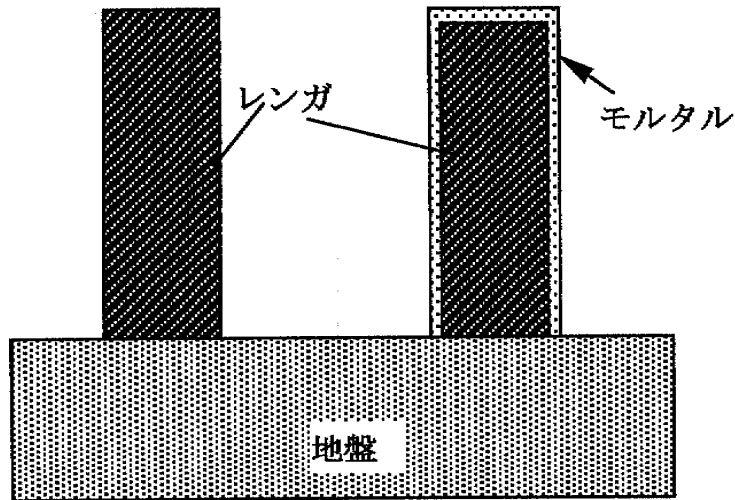


図4 レンガ柱の南北方向の断面図

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。これらは、タイの気象局のデータを用いた³⁾。これを図5に示す。このデータは、月平均の値であるので、月の日数で割り、日平均の降水量を計算し、入力データとした。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。レンガ建造物中の水分分布、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、モルタル、レンガ、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⁴⁾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。これらを図6に示す。縦軸には、体積含水率(%)を示し、横軸には、試料の水分のエネルギー状態を示す尺度であるマトリックポテンシャル (Matric Potential) と呼ばれるパラメータを示している。このマトリックポテンシャルは水頭圧(m)で示されている。例えば、マトリックポテンシャルが

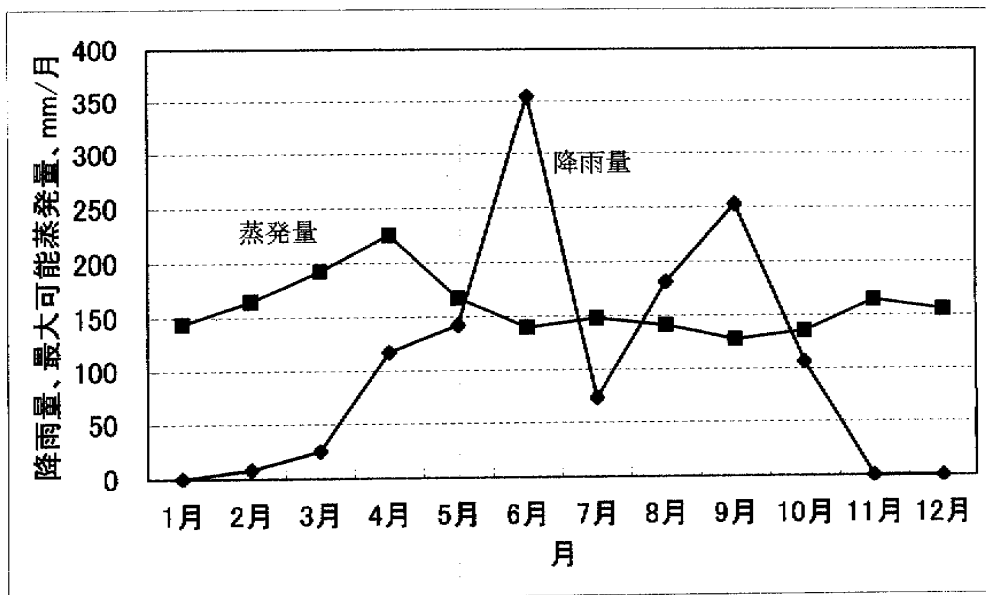


図5 アユタヤの降水量と蒸発量の季節変化

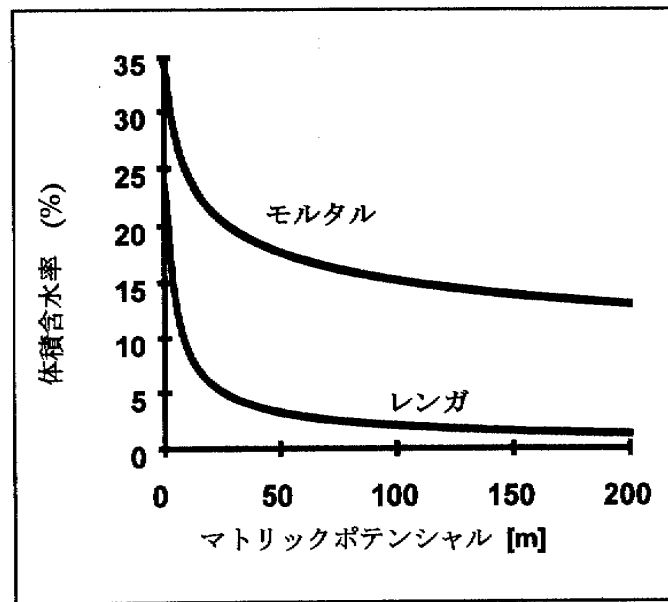


図6 モルタルとレンガの水分特性曲線

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。図 6 から、マトリックポテンシャルが大きくなるにつれて、体積含水率が低下していくことがわかる。また、図から、同じマトリックポテンシャルでは、モルタルの方がレンガより体積含水率が大きいこと、すなわち保水性が良いことがわかる。また、土の水分特性曲線としてはシルトロームのデータを用いた。

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方法で求めた⁴⁾。これを図 7 に示す。ここで、不飽和透水係数とは、不飽和状態の多孔質体の透水係数のことである。マトリックポテンシャルが大きくなるにつれて、透水係数が小さくなることがわかる。これは、マトリックポテンシャルが大きくなる

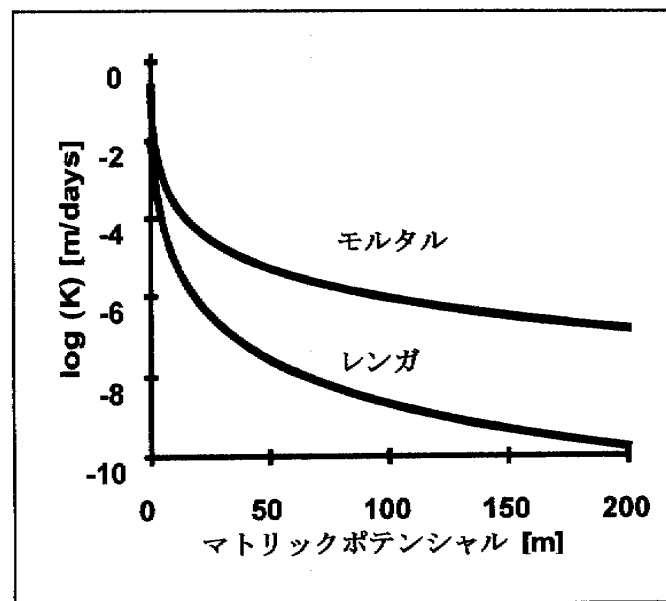


図7 モルタルとレンガの不飽和透水係数

につれて、体積含水率が小さくなり、多孔質体表面の水膜の厚さが薄くなるためである。

4. 計算方法

多孔質材料中の水分移動は、リチャーズ式と呼ばれる偏微分方程式で表される⁵⁾。例えば、不飽和状態の多孔質中の水分移動は、連続式と水流と駆動力の比例法則に従い、鉛直一次元では次のような式で表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + K(h)$$

ここで、 $\theta(h)$ は体積含水率、 h はマトリックポテンシャル、 $K(h)$ は不飽和透水係数である。この偏微分方程式は差分法や有限要素法によって数値解を得ることができる。この式には、2つの変数 θ と h が含まれているため、このままでは解くことができない。そこで、 θ と h の関係を示す水分特性曲線(図6)と不飽和透水係数 K と h の関係(図7)の2つの関係式が必要である。

ここでの計算には、米国塩類研究所で開発した2次元水分移動解析プログラム(HYDRUS-2D)を用いた。有限要素法の基本は、対象構造物を、3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。

境界条件としては、降雨がある場合は、レンガ構造物に鉛直下方に水が浸透し、乾季の水の表面からの蒸発に関しては、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、レンガ構造物と地盤中の水のマトリック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. 計算結果と考案

ケース1 ワットマハタットのレンガ構造物

図2で示したレンガ建造物の南北方向をメッシュに分割したものを図8に示す。レンガ建造物の3月、6月、9月、12月の体積含水率分布の計算結果を図9にしめす。計算結果から、乾季の終わりである3月は、レンガ全体の含水率が低くなっているのがわかる。雨季の6月では、徐々にレンガ表面から雨水が浸透し、体積含水率が徐々に増加している。特に、面積の多いD部分から

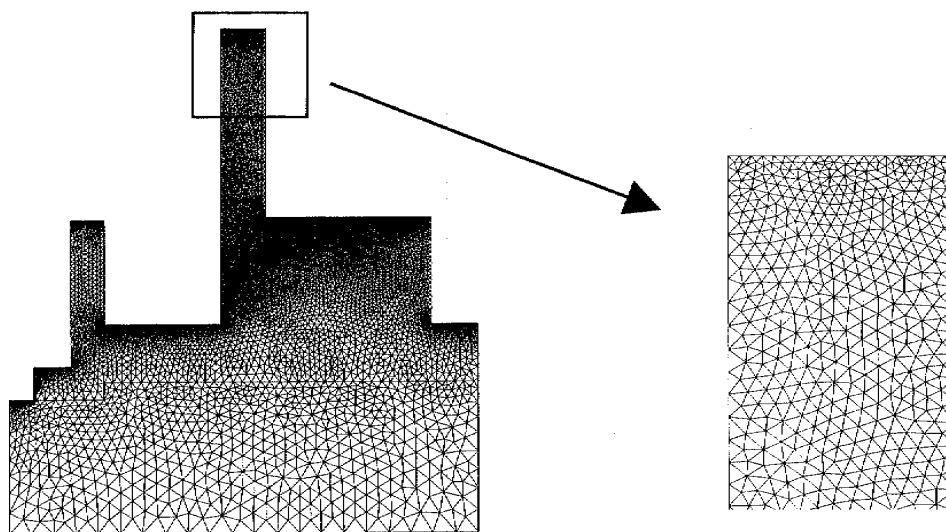


図8 レンガ構造物のメッシュ図

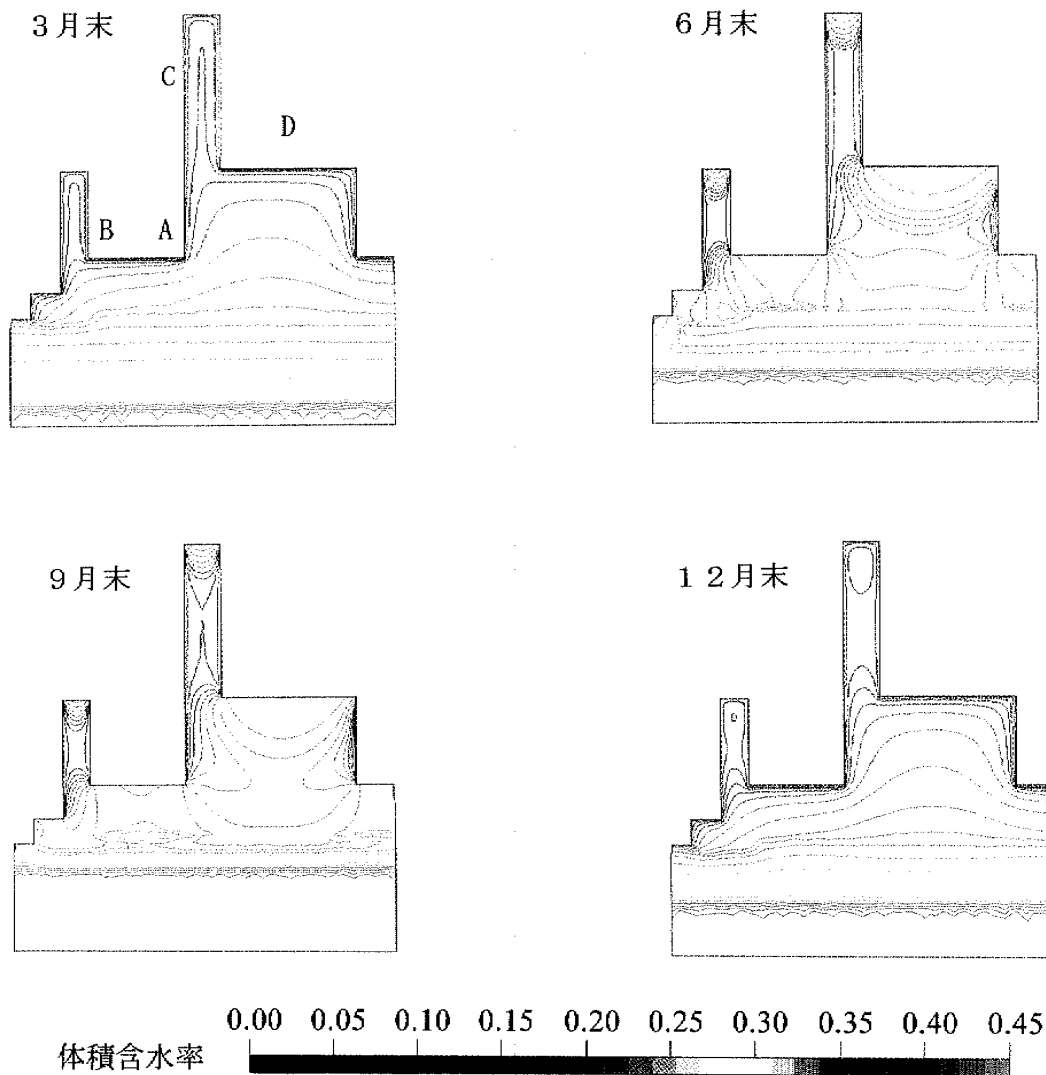


図9 体積含水率の変化 (計算結果)

の水の浸透が多いのがわかる。雨季の終わりの9月では、D部分に蓄えられた水が、表面の水の蒸発と共に表層へ流れてくる。A点とB点を比較すると、A点では、表面付近に大きな含水量の勾配があり水の流れが大きいものに対して、B点では、含水率の勾配が小さく水の流れが小さいことがわかる。これは、レンガ中に溶存した塩類が、A点で多く表面近くに運ばれていることを示している。このことは、A点でのレンガの劣化がB点よりも大きいという観測結果¹⁾に対応していると考えられる。

ケース2 レンガ柱と表面がモルタルに覆われたレンガ柱の含水率の計算結果

表面にモルタルが塗られていないレンガ柱の3月と9月の体積含水率の計算結果を図10に示す。なお、レンガ柱はそれぞれ、面対象なので、中心から表面までの半分だけを表示している。また、レンガ表面に約2cmの厚さのモルタルを塗ったレンガ柱の3月と9月の体積含水率の計算結果を図11に示す。図10と図11で3月末の体積含水率を比較すると、図10のレンガ柱の含水率が全体的に乾いているのに比較してモルタルで覆われたレンガのモルタル部分が高い含水率になっているのがわかる。これは、モルタルがレンガより保水性が高いためと考えられる。また、

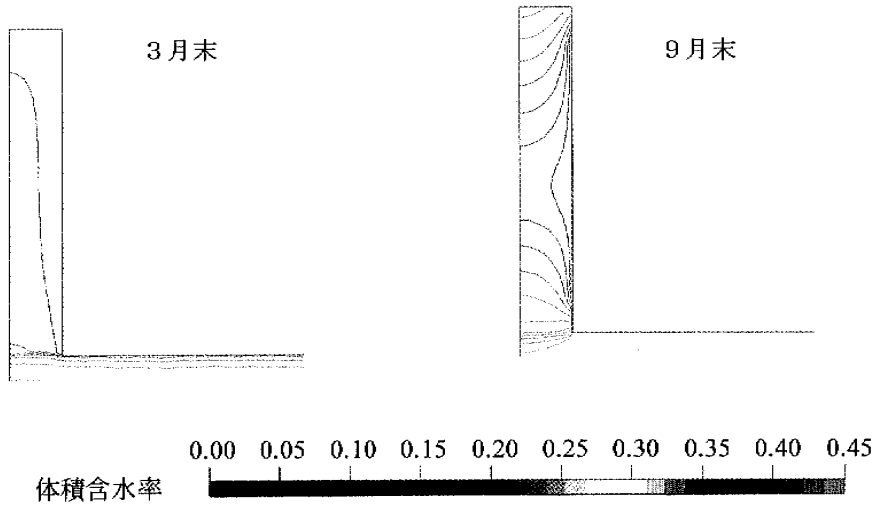


図10 レンガ柱の体積含水率分布 (計算結果)

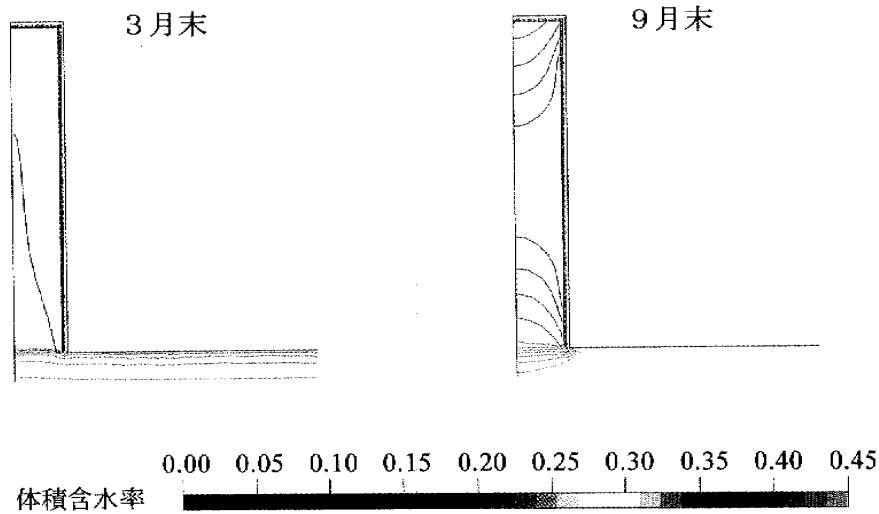
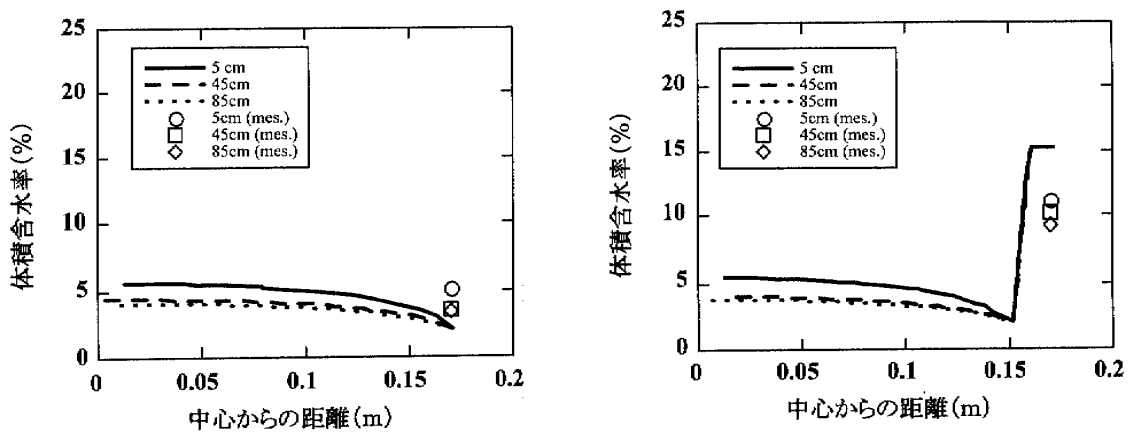


図11 モルタルで覆われたレンガ柱の体積含水率分布 (計算結果)



a) レンガ柱

b) モルタルに覆われたレンガ柱

図12 体積含水率の計算結果と測定結果

雨季の終わりの9月の結果を比較すると、やはり3月と同様に、モルタル部分で含水率が高くなっているのがわかる。図12には、レンガ柱の地面からそれぞれ、5 cm, 45 cm, 85 cmの位置の、レンガ柱内の体積含水率分布の計算結果とTDR表面含水率測定装置による測定結果を示す。TDR表面含水率測定は、1998年3月に行ったり。レンガ中の表面付近の含水率は、地表面から5 cmの高さで、5.1%、45 cmの高さで、3.5%、85 cmの高さで3.4%であった。また、モルタルに覆われたレンガ柱では、地表面から5 cmの高さで、11.1%、45 cmの高さで、10.1%、85 cmの高さで9.3%であった。これらの測定結果を図中に記号で示している。図12 a)では、体積含水率の測定結果と計算結果とのほぼ良い一致が見られる。一方、図12 b)では、測定結果がレンガ柱の表面での計算値より低い値を示している。これは、TDR表面含水率測定装置が表面付近(6 cm程度の深さまで)の含水率の平均を測定するため、含水率の高いモルタル部分と低いレンガ部分の平均値を示しているためと考えられる。この点を考慮すれば、図12 a), b)とも、計算結果と測定結果が良く対応していると考えられる。また、レンガ内部の含水率の計算結果は、モルタルが表面にないものとあるものでは大きな差のないことが図12の a)と b)を比較するとわかる。これは、モルタルの厚さが2 cmと薄いため、レンガ部分の体積含水率は、占める体積の大きなレンガの物性で決まっていることを示している。

6. まとめ

本報告では、アユタヤのワットマハタットのレンガ建造物と実験用レンガ柱の含水率分布の年間変化を降水量、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)を用いた。この解析では、特に、レンガの劣化の大きい所とレンガ材料内の水分移動の大きい場所と関係付けることができた。また、レンガ柱のシミュレーションでは、モルタル部分で含水率が大きくなることを示すことができた。このように、現場で観測されたいくつかの結果を、レンガ建造物中の水分移動をもとに考察することができた。今後は、建造物中の水分移動を予測するために必要な材料の水分特性曲線や不飽和透水係数などの物性値を、より高い精度で求めることが重要であると考えられる。今回の解析では、降雨が鉛直下方に降るとして風の影響は考慮していないことや、月平均の降水量を日平均になおし計算しているため、レンガ建造物上部からの雨水は、表面流出をせずに、ほとんどがレンガ建造物中に浸透する結果となっている。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ともに、入力条件をより現実に近いものに近づけていくよう研究を進めていく予定である。

謝 辞

本解析に用いたレンガの水分特性曲線は、青木建設(埼玉大学大学院)の尾崎哲二氏により測定された。またレンガ、モルタルの飽和透水係数の測定に関しては、東京大学大学院農学生命科学研究科の宮崎毅教授、井本博美技術官、望月秀俊氏に協力を受けた。さらに三重大学生物資源学科の溝口勝助教授には、解析手法に関して助言をいただいた。以上の方々に感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 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)
- 2) Simnek, J., M. Senjna, and M.T. 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, Int. Ground Water Model. Cent., Colo. School of Mines, Golden, Colo. (1996)

- 3) Meteorological Department, Agroclimatological data for Thailand (1994)
- 4) Van Geuchten, M.T., F.J. Leij, and S.R. Yates: The RESTC coda for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, USEPA Rep. 600/2-91-065, USEPA Office of Research and Development, (Washington, D. C., 1991)
- 5) 溝口勝, 取出信夫, 塩沢 昌: 土壌物理学分野におけるシミュレーション手法の現状と課題, 農業土木学会誌, **65** (3), 219-225 (1997)

Analysis of Water Regime in Historical Brick Buildings in Ayutthaya, Thailand

Takeshi ISHIZAKI, Nobuaki KUCHITSU,
Tadateru NISHIURA and Jirka SHIMNEK*

Historical brick buildings in Ayutthaya, Thailand and in Moenjodaro, Pakistan suffer deterioration due to salt efflorescence. Water vaporizes on the surface of brick buildings at the beginning of the dry season and water is induced to flow to the drying surface and salt crystallizes near the surface. This crystallization pressure is considered to cause severe damages to the brick. Since this process is mainly governed by the water and salt movement in a brick building, it is important to study the moisture movement in the brick building not only in the dry season and but also in the rainy season. The present authors have carried out field observation of moisture conditions and chemical composition of segregated salts in brick buildings and experimental brick pillars in Ayutthaya and measured climatic data since 1996. These observations revealed that poorly soluble salts such as gypsum were found in the rainy season and soluble salts such as thenardite were found in the dry season. This paper reports the analysis of water regime in the historical brick building and experimental brick pillars by finite element software of moisture transport in porous material (HYDRUS-2D) developed by USSL (United States Salinity Laboratory). The input data used here are material data such as moisture retention curve and unsaturated hydraulic conductivity of brick, mortar and soil and climatic data such as precipitation and potential evaporation. The calculated data shows at the beginning of the rainy season that the evaporation speed near the brick wall with a stage is higher than that without a stage. This corresponds to that the salt efflorescence is severer on the former brick wall than the latter. The calculated results show that the moisture content near the surface of the brick pillar covered with mortar is higher than that without mortar. This result also coincides well with the observation. These results showed the validity of water regime analysis of historical brick buildings by HYDRUS-2D software. For the future development of this technique, it is important to obtain precise material data of brick, mortar and soil of the study sites.

* United States Salinity Laboratory