

土壁中の水分移動に関するモデル実験と解析

石崎 武志*

Experimental Study of Water Redistribution Measurement in the Model Earthen Wall and its Numerical Analysis

Takeshi ISHIZAKI*

* National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo

Abstract

In the Asian countries, there are many important wall paintings on earthen walls of temples and other historical buildings. Because earth can be considered as a porous material, there is water redistribution in the walls due to the change of the surrounding environmental conditions. Water evaporates under dry conditions from the wall surface and salts accumulate near the surface zone and can cause salt efflorescence damages in the wall paintings. In order to develop suitable protective measures, it is necessary to know the water content profiles and water movement in the earthen walls. For this purpose, a model earthen wall has been built up in the historical folklore museum in Sapporo. The water redistribution in the earthen wall was measured by using a TDR (Time Domain Reflectometry) apparatus. The numerical simulation of water movement in the model wall was performed with the Delphin4 program developed by the TU Dresden. The material data, such as moisture retention curve, liquid water conductivity and water vapor diffusivity of the model earthen wall and climate data of the location Sapporo were taken into account for simulation. For development of suitable protective measures, it is quite important to have non destructive methods to understand the water regime in porous materials. The good agreement between simulation results and measured moisture profiles in position and time show the validity of using the Delphin4 program for development and evaluation of conservation measures of historical buildings and stone monuments.

Key words : historical building, earthen wall, water redistribution, TDR (time domain reflectometry), numerical analysis

1. はじめに

歴史的建造物、石造文化財、土構造物などは、物理的、化学的、生物的要因で劣化する。これらの劣化のうち物理的劣化が文化財を構成する材料に対して、急激かつ大きな影響を与える。寒冷地においては温度が0℃以下になり、歴史的建造物の壁体中の水が凍結すると、水は凍結面へ吸い寄せられてきてそこで水として析出する。この水の成長による膨張が壁体を劣化させる原因の一つとなっている。

一方、タイとかパキスタンなどの乾季、雨季のある地

域では、歴史的レンガ建造物が塩類風化と呼ばれる現象により劣化が進んでいる。例えば、世界遺産に登録されているタイのアユタヤの歴史的レンガ建造物において、雨季には水はレンガ中に蓄積され、乾季にレンガ表面から蒸発する。この水の移動の際に、レンガの間隙水に溶け込んでいた塩類がレンガ表面近くで析出し、この結晶成長に伴う間隙の膨張によりレンガが劣化する (Ishizaki *et al.*, 2001)。

中国、敦煌の莫高窟は世界遺産に登録されている仏教の石窟群であり、4世紀に開削がはじまった石窟が492あり、描かれた壁画の総面積は45,000 m²にも達する。こ

* 東京文化財研究所 〒110-8713 東京都台東区上野公園 13-43

キーワード : 歴史的建造物, 土壁, 水分分布, TDR (時間領域誘電率測定) 法, 数値解析

こでも、石窟内壁表面からの水分蒸発の際の塩類の析出による壁画の剥落が見られ、塩類風化が壁画の劣化の主要な原因となっている (Kuchitsu and Xiuye, 1997)。

このように、歴史的レンガ建造物、石造文化財や壁画などの文化財の劣化には、石材や土壁などの多孔質体中の水分分布や水分移動が大きく関連している。このため、これらの文化財の劣化を防ぐためには、石材や土中の水分分布を正しく評価することが重要である。

最近、高松塚古墳の壁画が2001年にカビが大発生し劣化したことが報道されている。同じ2001年に、1万6千年前に描かれたフランスのラスコー洞窟の壁画周囲でもカビが大発生した。カビの種類も類似していることが報告されている。このカビ発生の一つの要因としては、地球温暖化による気温の上昇、もう一つは、石室や洞窟周囲の水分状況の変化が考えられる。これらの問題の原因を明らかにする上でも、石室や洞窟周囲の水分状況を正しく評価することが必要である。

ここでは、土壁中の水分分布、水分移動に関する評価手法を検討するため、北海道開拓の村に試験土壁を作成し、土壁作成時の土壁の水分分布変化を小型 TDR 水分測定装置により測定し、水分分布変化に関するシミュレーション解析を行ったので以下に報告する。

2. 土壁の構造

日本や中国の歴史的建造物の壁として土壁がある。図-1は、北海道開拓の村内の歴史的建造物の写真を示したものである。

土壁は、以下の手順で作られる。土壁の一番中心部の



図-1 札幌、開拓の村の土壁のある歴史的建造物

Fig. 1 Japanese traditional house with earthen wall in Hokkaido Historical Village, Sapporo.

下地は、竹の小割材を格子状に編んで木舞を作り、これを太い間渡し竹で支え、その間渡し竹を柱に固定する。下塗り層は粘土分の著しく多い荒土に切りわらをスサとして混入したものが用いられる。土壁層を数回に分けて重ね塗りし、中塗り、上塗り層に近づくに従って砂分を多くする。土壁の中心部分が粘性土であることにより、土壁が強い吸放湿性能をもつことになる。また、表層近くに砂分を多くすることにより、外気の大きい湿度変化によっても、伸縮の度合いが小さく、乾燥割れ目などが出にくい構造となっている。この土壁の構造は、経験的に決められたものであるが、土の物理的な性質から考えても、理にかなったものであると考えられる。そして、土壁の一番表層部分には漆喰を塗る。

この土壁の重ね塗りは、それぞれ数 cm 程度の厚さの土を塗り、その後、塗った層が完全に乾くまで待ち、次の層を塗るという作業を繰り返す。この過程は、土壁が薄いときは数ヶ月で済むが、土壁が厚いときは数年に渡る作業となる。

3. 試験土壁の構造と施工工程

3.1 試験土壁の構造

土壁作成時の土壁中の水分移動を調べるために、札幌の北海道開拓の村に試験土壁を作成した。木枠は長さ 108 cm × 幅 15 cm × 厚さ 4 cm × 2 枚の木板と長さ 100 cm × 幅 15 cm × 厚さ 4 cm × 2 枚の木板からなり、木枠は一辺 108 cm の正方形である。木枠の内側 (1 辺 100 cm の正方形) には ϕ 1 cm 程度の根曲がり竹を縦 4 本、横 5 本を骨組みの芯として、外枠内側の切り込みに固定させたのち、芯の間に ϕ 5 mm 程度の葦を 2 本ペアーとして約 3 cm × 3 cm 程度の格子状になるように縦 21 組、横 17 組を麻ひもで固定した (図-2)。土壁の基礎となる骨組みは、表 (おもて) 面となる木枠面からほぼ 9 cm、裏面となる木枠面からほぼ 5 cm の位置に設置した。

土壁中の水分分布を測定するための TDR センサーは、土壁面のほぼ中央に 4 点、下部に 4 点、計 8 点を下塗り・中塗りの壁仕上げの施工毎に設置した。センサーケーブルは表面から裏面に引き込みし、センサーは骨組みの葦にそれぞれ固定した。重力や測定場所の影響で水分量の相違があるかどうかを把握するために、センサーはモデル土壁のほぼ中央部と壁最下部中央にそれぞれ設置した。

TDR 土壌水分測定には、Campbell scientific 社製の TDR100 と同社のデータロガー CR10X を用いた。CR10X は本体内部にメモリーと CPU を内蔵しており、予めプログラムすることにより独立して計測・制御・記録を自動的に行える装置である。また、データ回収には、CR

10X用サポートソフトウェアPC208Wを用いた。計測波形や壁の電気伝導度（EC）のデータ収集には、TDR 100用のサポート用ソフトウェアPCTDRを用いた。

TDRセンサーは、今回、壁面埋設用に開発したものを使用した（図-3）。プローブの長さは4cm、間隔は6mmであり、プローブ長が短いために、体積含水率の低い領域では、測定値のバラツキが大きかった。

3.2 試験土壁の施工工程

以下に施工工程毎について記述する。完成するまで5工程あり、施工の呼び名は施工業者に準じた。なお、各工程における壁材の体積含水率測定には、イムコ社製のポータブル水分計TRIME-FM3とサーフェースプロー



図-2 裏面からみた試験壁の外形と骨組み

Fig. 2 Bamboo mesh structure of the model wall seen from the rear side.

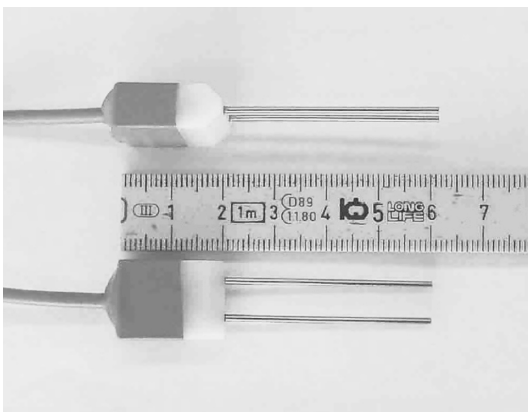


図-3 体積含水率測定のための小型 TDR センサー

Fig. 3 Tiny TDR sensor for measuring volumetric water content.

ブ TRIME-F3F を使用した。試験壁作成時の様子を図-4 に示す。

工程1 だんご付け（下塗り）

体積含水率 38% の壁材（粘土とわら少々）を用いて、図-2 の枠にだんご付け（下塗り）を行う。土壁の厚さは 6cm である。TDR センサー P#1（中央部）、P#5（下部）は下壁の内部（骨組みに固定）に、P#2（中央部）、P#6（下部）は、仕上げ表面（大むら直しとの境界部）にそれぞれ埋設する。P#1、P#2、P#5、P#6 の土壁表面からの埋設深さはそれぞれ、19 mm、4 mm、14 mm、4 mm であった。なお、通常、裏面は構造上金銀仕上げにはしないが、表裏両面からの乾燥で反り返しが強くなる可能性があり、反り返しを軽減するために、金銀仕上げを行う。また、裏面には壁の乾燥に伴う壁全体のそり返しを防止するために抜きを1本入れる。施工直後の土壁の色は全体にネズミ色がかっている。

工程2 大むら直し（中塗り）

下塗り施工 14 日後では、骨組の形状に沿ってひび割れが生じており、土壁材の伸縮が大きかった。体積含水率 35% の壁材（赤土少々とわら含む）で大むら直しを行い、TDR センサー P#3、P#7 を壁内部に完全に埋設する。土壁の厚さは 1 cm 増加し、7 cm になった。P#3、P#7 の土壁表面からの埋設深さはともに 4 mm であった。P#2、P#6 は、工程 1 では表面から 4 mm の位置であったが、1 cm 土壁の厚さが増加したため、表面から 14 mm の位置に変わっている。施工直後の土壁の色は下塗りの壁材よりやや明るいネズミ色を帯びている。



図-4 試験土壁作成の様子

Fig. 4 Making earthen wall by putting mud on the bamboo.

工程3 再大むら直し (中塗り)

大むら直し施工5日後、小むら直しを行う工程であったが、大きくひび割れる。ひび割れの形状は骨組みの形状とは無関係に大きく割れ、大むら直しの土壁材の伸縮性が大きかったことを示す。大きく反ってしまったため、小むら直し施工が行えない。このため、下塗り部分のみを残し大むら直し部分を壊す。小むら直しとして準備していた壁材(赤土混じりの粘土、体積含水率33%)で再度大むら直しを行う。再度、P#3, P#7を中塗り材料の再大むら直し内部に再埋設する。土壁の厚さは7cmのままで、TDRセンサーの位置も同じである。施工直後の土壁の色は、前回の工程仕上げよりも赤土の配合が多いため、全体に赤みがかっている。なお、反り返しを抑えるため裏面に少しうち水を施し、表面には直射日光が土壁に直接当たらないように半透明の養生板の内側に高さ180cm×幅90cm×厚み約10cmのスタイロホームで全体に日影を作る。

工程4 小むら直し (中塗り)

乾燥状態では前回の工程の乾燥時よりもひび割れは少ない。再大むら直しの土壁材の方の伸縮性が小さいことを意味する。乾燥後の色も全体的に赤みを帯びる。再大むら直しの10日後、体積含水率44%の中塗りの壁材(赤土混じりの粘土)で小むら直しを行う。土壁の厚さは1cm厚くなり8cmになった。この工程でP#4, P#8を壁内部に埋設し、全センサーの設置が完了する。P#4, P#8の土壁表面からの埋設深さはともに4mmであった。施工直後の土壁の色は前回の工程時よりもやや赤みを帯びている。全体の土壁の厚さは8cm、最終的なTDRセンサーP#1, P#2, P#3, P#4, P#5, P#6, P#7, P#8の土壁表面からの埋設深さはそれぞれ、39mm, 24mm, 14mm, 4mm, 34mm, 24mm, 14mm, 4mmであった。

工程5 仕上げ (上塗り)

小むら直しの9日後、土壁の仕上げとして、まず、砂漆喰を塗り、漆喰面が十分に乾燥した後、白漆喰仕上げを行った。

4. 試験土壁周囲の環境

試験土壁周囲の温度、湿度は、温湿度センサー(HMP45C, バイサラ社製)を用いて測定し30分ごとにデータロガーに記録した。また、北海道開拓の村の敷地内に微気象観測ステーション(キャンベル社製)を設置し、気温、湿度、日射、風向、風速は1時間ごとに測定し、データロガーに記録した。土壁中の水分移動のシミュレーションに必要な環境データは、これらの測定値を用いた。

5. 土壁の物性値の測定

5.1 土壁の水分特性

土壁の水分特性曲線はデカゴン社製、Water potential meter (WP4)で測定した。土の粒度分布はレーザーを用いた粒度分析装置(Sald3000, 島津製作所製)を用いて測定した。また、土壁の飽和含水率、乾燥密度、土粒子の真比重なども測定した。試験土壁に用いた土試料の飽和状態の体積含水率は39%であった。

測定で得られた土壁の水分特性曲線、吸着等温線は、土壁中の水分量変化のシミュレーションに使われた。また入力データは、(Grunewald and Bomberg, 2002)の方法により測定データを補間して求めた。求めた土壁の水分特性曲線と吸着等温線のグラフを図-5, 図-6に示す。

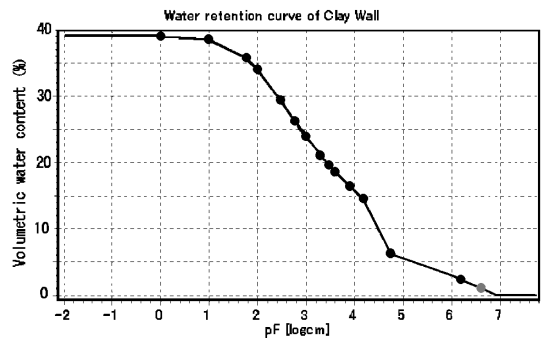


図-5 試験土壁に用いた土の水分特性曲線

Fig. 5 Water retention curve of the soil used for the model wall.

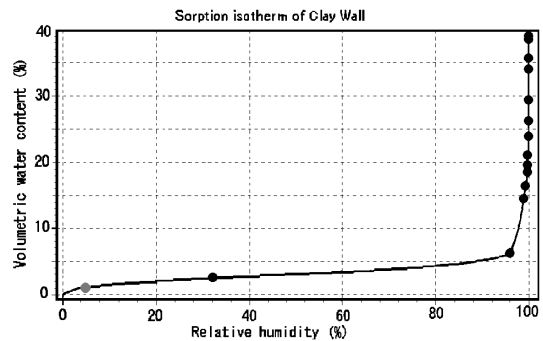


図-6 試験土壁に用いた土の吸着等温線

Fig. 6 Sorption isotherm of the soil used for the model wall.

5.2 土壁の透水係数

土壁の不飽和透水係数は飽和透水係数と水分特性曲線から、間隙モデル (Burdine, 1953) の方法で下記のように求めた。間隙モデルによると、体積含水率 θ の透水係数 $K(\theta)$ は式(1)で示される。また、飽和透水係数 $K_{cap} = K(\theta_{cap})$ を用いると、飽和透水係数との比で表した相対透水係数は、式(2)で表される。

$$K(\theta) = \int_{\theta_{dry}}^{\theta} \left(\frac{1}{p_c(\theta)} \right)^2 d\theta \tag{1}$$

ここで、 $p_c(\theta)$ は、体積含水率 θ の時の間隙圧である。

$$K_r(\theta) = \frac{K(\theta)}{K(\theta_{cap})} \tag{2}$$

ここで、飽和透水係数の値を K_{cap} として式(2)に代入すると、以下の式になる。

$$K(\theta) = K_r(\theta) K_{cap} \tag{3}$$

ここで、飽和透水係数は、粒度分布の測定結果から求めた粘土の割合 (f_{clay}) を用いて Dane and Puckett (1992) の方法により、下記の式(4)で求めた。

$$K_{cap} = \frac{4.36 \times 10^{-5} \times e^{-(0.198 f_{clay})}}{g} \tag{4}$$

ここで、 g は重力加速度である。得られた飽和透水係数は、 4.2×10^{-5} m/s であった。

得られた不飽和透水係数と体積含水率の値の関係を図-7に示す。

5.3 水蒸気拡散係数

水蒸気拡散係数は、水蒸気圧勾配と水蒸気の拡散速度を関係づけるものである。水蒸気拡散のパラメータとし

て、湿気伝達抵抗 μ_{dry} がある。湿気伝達抵抗 μ_{dry} は、ハイグロスコピックな領域の下限での値を示している。等方均質な多孔質体中の水蒸気拡散を仮定し、水と水蒸気の並列、直列混合モデルにより、Grunewald and Bomberg (2002) らは、(5)式を提案している。パラメータ p は、水と水蒸気の並列移動の体積割合を示している。水と水蒸気移動に関する直列移動は、 $1-p$ の体積割合になる。

$$D_V(\theta, T) = \frac{D(T)}{\mu_{dry}} \frac{(1-\theta_r)}{[p + (1-\theta_r)^2(1-p)]} \tag{5}$$

ここで

$$\theta_r = \frac{\theta - \theta_{dry}}{\theta_{por} - \theta_{dry}}$$

$D(T)$ は、空気中の水蒸気拡散係数、 θ_{por} は、間隙率である。

(5)式から計算した水蒸気拡散係数の値を図-8に示す。

6. 土壁中の水分移動解析

土壁中の水分移動解析は、ドレスデン工科大学のグレンワルドの開発した、多孔質体中の熱、水分移動解析プログラム Delphin 4 を用いた (Grunewald, 2000)。

土壁作成の工程 1~5 に関して、土壁中の水分量の測定結果と水分移動解析によって得られた結果の比較を行った。

計算に用いる入力画面を図-9に示す。図には工程 4 の過程での、TDR センサーの位置が示されている。P#2, P#3, P#4 の土壁表面からの埋設深さはそれぞれ、24 mm, 14 mm, 4 mm であった。また、工程 1 から工程 4 までの土壁内部の体積含水率測定結果とシミュレーション解析

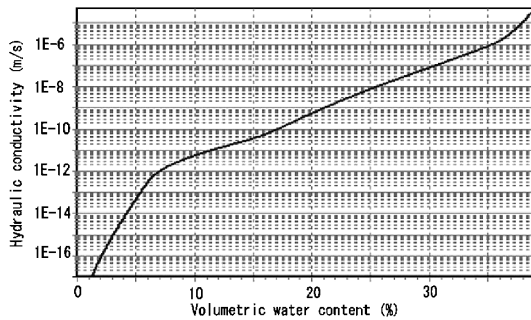


図-7 試験土壁に用いた土の透水係数

Fig. 7 Liquid water conductivity of the soil used for the model wall.

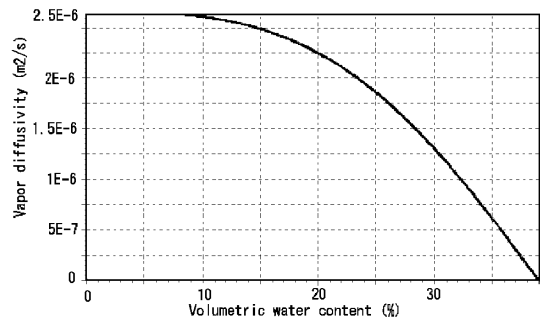


図-8 試験土壁に用いた土の水蒸気拡散係数

Fig. 8 Vapor diffusivity of the soil used for the model wall.

の結果を図-10に示す。ここで、測定結果は点で示し、計算結果は曲線で示している。縦軸は体積含水率、横軸は、1月1日を1とした経過日数を示している。

工程1の下塗りの過程では、土壁内の体積含水率が施工後、徐々に減少している。10日ほどの間に、表面から4mmの深さの所(P#2)は、初期の38%から5%程度まで急激に減少している。工程1の後、14日経ってから工程2の中塗りをを行った。表面から4mmの深さの点(P#3)は、工程1と同様に5日間の間に、初期の36%から10%程度まで減少した。一方、表面から14mmの深さの点(P#2)は中塗り土を塗った時に、15%程度まで体積含水率が上がったが、また減少した。工程2の後、土壁表面に大きな乾燥亀裂が出来たため、表層1cm程度の土を取り再度中塗りをを行った(工程3)。この過程でも体積含水率は工程2と同様な変化をした。工程4では、さらに1cmの厚さの土を塗った。この際に表面か

ら4mmの点(P#4)の体積含水率は、飽和状態から急激に減少した。また、表面から14mmの点(P#3)と24mmの点(P#2)の点の体積含水率は、15%程度まで増加した減少した。ただ、体積含水率の小さいところでは、測定値が大きくばらついている。これは、プローブ長が短いため、TDRセンサーの測定精度が含水率の低い部分で落ちるためと考えられる。

多孔質体中の熱、水分移動解析プログラム Delphin 4で計算した体積含水率を計算結果は、曲線で示している。工程1~4において、TDRプローブによる測定結果と良く対応しているのが見られる。

7. まとめ

アジアの国々では、歴史的建造物に土壁が使われている。寺院では、多くの貴重な壁画が土壁上に描かれている。土壁は、寒冷地では凍結による劣化を受けるし、雨季、乾季のある地域では、塩類風化により劣化する。これらの劣化は、土壁中の水分移動と大きな関係がある。これらの劣化に対して適切な保存対策を立てるためには、土壁中の水分分布とその変化を把握することが必要である。この目的のために、北海道開拓の村の敷地内に試験土壁を作成し、実験を行った。土壁中の体積含水率は、土壁中に埋設した小さなTDRセンサーにより測定した。試験土壁は、伝統的な方法により作成した。土壁中の体積含水率は、それぞれ工程1から工程4までの間で大きく変化した。

試験土壁中の体積含水率は、ドレスデン工科大学で開発した多孔質体中の熱、水分移動解析プログラム Delphin 4で計算した。このシミュレーションの入力条件として、試験土壁周囲の相対湿度、温度等が測定された。また、計算に必要な土壁の物性値として、水分特性曲線、不飽和透水係数などが得られた。計算によって得られた土壁中の体積含水率と測定結果の間には良い対応が見られた。このことは、解析に用いた熱、水分移動解析プログラム Delphin 4が、土壁中の水分移動を評価する上で有効であることを示している。歴史的に貴重な文化財の研究において、非破壊的な方法で調査することは重要である。本報告で示したシミュレーション解析手法は、気象条件や対象の物性値などから内部の水分分布や水分移動を評価できるため、文化財の調査にはとても有効であると考えられる。

引用文献

Burdine (1953): Relative permeability calculations from pore size distribution data. Petroleum Trans. Am. Inst. Mining Eng., 198: 71-78.

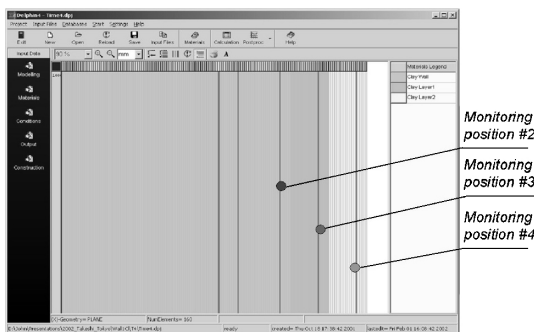


図-9 解析ソフトの入力画面と体積含水率計算位置(工程4)

Fig. 9 Location of the monitoring position of water content (Stage 4).

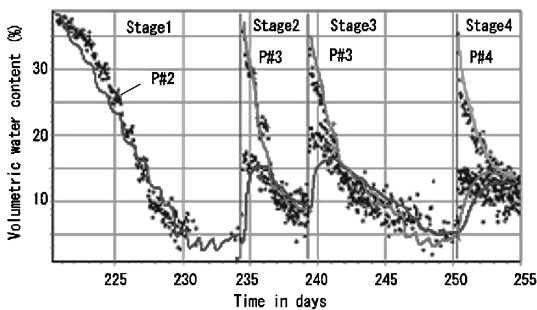


図-10 体積含水率の測定値と計算値(工程1~4)

Fig. 10 Measured volumetric water content and calculated (Stage 1~4).

- Dane, J.H. and Puckett, W.E. (1992) : Field Soil Hydraulic Properties Based on Physical and Mineralogical Information. In : van Genuchten M.T. *et al.* (ed.) (1993), Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, Riverside (California) USA, 389-403.
- Grunewald, J. (2000) : Documentation of the Numerical Simulation Program DIM3.1, Volume 1 : Theoretical Fundamentals and Volume 2 : User's Guide. Delphin4.1 program installation available on the ftp-server ftp : //141.30.41.194 of the Institute of Building Climatology.
- Grunewald, J. and Bomberg, M. (2002) : An engineering approximation of material characteristics for input to Heat, Air and Moisture transport simulations. 11. Bauklimatisches Symposium an der TU Dresden.
- Ishizaki, T., Simunek, J. and van Genuchten, M. Th. (2001) : Deterioration Mechanism of Stone, Brick and Soil Building Materials, Proc. Corrosion & Prevention-01, Durability of Materials, 41st Annual Conference, Newcastle, Australia, 20 : 1-13.
- Kuchitsu, N. and Duan Xiuye. (1997) : Geological Environment of the Mogao Grottes at Dunghuang. Proc. of Conservation of Ancient Sites on the Silk Road, 244-248.

要 旨

寺院や歴史的建造物の土壁の内側に貴重な壁画が描かれている場合がある。土は多孔質体であるので、壁画を取り巻く環境の変化によって土壁中の水分が移動する。土壁の周囲の湿度が低下すると、土壁中の水分は表面から蒸発し、その水の移動に伴って動いた塩類が土壁表面で析出し壁画を傷める。この現象を塩類風化という。壁画の保存対策を考える上で、土壁中の水分分布や水分移動を定量的に求めることは重要である。ここでは、試験土壁を作成し、小型 TDR 水分測定装置を用いて、土壁作成時の水分分布の変化を測定した。一方、土壁中の水分分布の変化は、ドレスデン工科大学で開発した熱、水分移動解析プログラム Delphin 4 を用いて解析した。実験と解析結果から、本シミュレーション解析手法が土壁中の水分移動を評価する上で有効であることが分かった。

受稿年月日：2005年5月18日

受理年月日：2005年6月9日