

遺跡レンガの物理性の測定：

I. 水理特性

登尾浩助*・佐々木博子*・石崎武志**

1. はじめに

タイ国のアユタヤ遺跡では塩類風化の影響による遺跡レンガの劣化が進行中である。アユタヤ遺跡のようにレンガやモルタル等の多孔質体で作られた遺跡の劣化原因の一つとして、多孔質体から水分が蒸発することにより孔隙に塩類が集積、結晶化することにより発生する風化がある。石崎ら(1999)は、このような風化の状況を定量的に把握するために、数値モデルを使うことが有効であることを示唆している。多孔質体中における物質とエネルギー移動を予測するための数値モデルの利用は、1960年代以降コンピューターの発達と共に急速に発展してきた。従来、このような数値モデルは限られた研究者や技術者のみの道具であったが、近年パソコン用に開発されたソフトウェアを使用することにより、多くの人々が使えるような環境が整ってきつつある(石崎ら1999; 登尾2001)。

どのようなソフトウェアを使うにしても数値モデルを使用する際には、前もって対象となる多孔質体の物理的な性質を把握しておく必要がある。即ち、多孔質体中の水分移動解析には水理特性と含水率を把握する必要がある。水理特性は、対象とする多孔質体と多孔質体の含水率によって変化し、例えば同じレンガであっても製造方法や材料の違いによって異なるので、そのつど把握する必要がある。吸引法や加圧板法といった従来法によるレンガの水理特性の測定には多大な時間と労力を要する。しかし、近年のコンピューターと数値モデルとの発達により、数値モデルを使った逆解析手法による土壤水分特性の推定が比較的簡単に行うことが可能となった(Simunekら1998)。

そこで本研究では、タイ国アユタヤ遺跡の補修に使われているレンガの水理特性を蒸発法と逆解析法を使って推定し、従来法により求めた水理特性と比較したので報告する。遺跡本体に対して数値モデルを適用するためには、計算対象とする遺跡本体に使用されているレンガ(遺跡レンガ)に対する水理特性を求める必要がある。しかし、本研究では、比較的新しい測定法のレンガに対する適用性を検討することを主目的としたので、アユタヤ遺跡本体に使用されている貴重な遺跡レンガで

*岩手大学農学部：〒020-8550 盛岡市上田3丁目18-8

** (独)文化財研究所 東京文化財研究所：〒110-8713 台東区上野公園13-43

キーワード：水分特性曲線 (water characteristic curve), 透水係数 (hydraulic conductivity), 逆解析 (inverse analysis), 多孔質体 (porous media)

はなく、同遺跡で遺跡補修のために使われている入手が容易であったレンガ(補修用レンガ)を使って実験を行った。

2. 理論

均一な組成のレンガ中における鉛直 1 次元方向の液状水移動は、次のようなりチャーズ式で表される(Richards, 1931)。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x} - K(\theta) \right) \quad (1)$$

ここに、 θ = 体積含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)、 ψ = 圧力ポテンシャル (m)、 $K(\theta)$ = 不飽和透水係数 (m s^{-1})、 x = 鉛直方向の距離 (m)、 t = 時間 (s) である。 θ と ψ の関係は水分特性曲線と呼ばれ、さまざまな近似式が提案されているが、汎用性が高いことから、式(2)で表される van Genuchten (1980) の式が一般的によく利用される。

$$\Theta = \frac{1}{(1 + \alpha |\psi|^n)^m} \quad (2)$$

ここに、 $\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ で表される有効飽和度 ($0 \leq \Theta \leq 1$) で、 θ_s と θ_r はそれぞれ飽和含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) と残留含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) を表し、 α (m^{-1})、 n 、 m は適合係数で、 $m = 1 - 1/n$ で表される。さらに、van Genuchten 式の利点として挙げられるのは、式(2)で表される水分特性曲線の係数をそのまま適用して不飽和透水係数を推定できる点である。van Genuchten (1980) は不飽和透水係数 $K(\theta)$ を

$$K(\theta) = K_s \Theta^{0.5} \left[1 - (1 - \Theta^{1/n})^m \right]^2 \quad (3)$$

と表した。ここに、 K_s = 飽和透水係数 (m s^{-1}) である。

順解析では、式(2)(3)における既知の適合係数 α 、 n 、 K_s を使って、支配方程式(1)を差分法や有限要素法により解き、対象位置での圧力ポテンシャルと含水率の経時変化を計算する。一方逆解析では、ある位置における圧力ポテンシャル ψ と表面における水分フラックス(蒸発量から推定) $J_w = -K(\theta) \partial \psi / \partial x - K(\theta)$ を経時的に測定し、その測定結果から式(2)(3)の未知の適合係数 α 、 n 、 K_s を推定する。まず、仮に決めた適合係数 α 、 n 、 K_s を使って式(1)(2)(3)から計算した圧力ポテンシャル ψ を実測値と比較し、その 2 乗差が最小になるように α 、 n 、 K_s の値を変化させながら計算を繰り返す。本研究では、Simunek ら(1997)が開発した Hydrus-1D と呼ばれる 1 次元有限要素解析モデルを利用したソフトウェアを使用して逆解析を行った。使用した Hydrus-1D では、最適値探索に Levenberg-Marquardt 法が用いられている。

3. 実験方法と材料

レンガの経時的な圧力ポテンシャルの変化は、熱放散式ポテンシャルセンサー (Heat

Dissipation Sensor, HDS) (キャンベル社 モデル 229) を使用して測定した。HDS の水分浸透性多孔質体 (直径 14mm, 長さ 28mm) の内部には熱電対とヒーターとを内蔵した注射針が埋設されており、ヒーターに電流を流すことにより発生した熱による注射針の温度上昇を熱電対で測定することにより、水分浸透性多孔質体の熱伝導率を測定する。温度変化の測定とヒーターへの電流制御は、データロガー (キャンベル社 CR10X) で行った。HDS の水分浸透性多孔質体が、埋設されている周囲のレンガの圧力ポテンシャルと平衡に達した時の熱伝導率を測定することにより、あらかじめ決定しておいた熱伝導率—圧力ポテンシャルの関係から、圧力ポテンシャルを推定する。

Reece (1996) は、HDS の熱伝導率 λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) の逆数と圧力ポテンシャル ψ (m) の対数とは広範囲の圧力ポテンシャル ($\psi = -1 \sim -120\text{m}$) に対して線形関係にあることを見出した。HDS の熱伝導率 λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) は次式から求められる (Reece, 1996)。

$$\lambda = \frac{q \ln(t_2) - \ln(t_1)}{4\pi T(t_2) - T(t_1)} \quad (4)$$

ここに、 q = ヒーターに加えた熱量 (W m^{-1})、 $T(t_1)$ 、 $T(t_2)$ はそれぞれ時間 t_1 と t_2 におけるヒーター温度 ($^{\circ}\text{C}$) である。熱伝導率—圧力ポテンシャルの関係 (Reece, 1996) は、

$$\lambda_{rel}^{-1} = b_0 + b_1 \ln(|\psi|) \quad (5)$$

の線形関数で表される。ここに、 b_0 、 b_1 は実験定数で、相対熱伝導率の逆数は $\lambda_{rel}^{-1} = \lambda^{-1} / \lambda_{dry}^{-1}$ で表され、実測熱伝導率の逆数 λ^{-1} の乾燥時における熱伝導率の逆数 λ_{dry}^{-1} に対する値である。多孔質体の熱伝導率は通常、 $\lambda \geq \lambda_{dry}$ であつ飽和多孔質体の λ の大きさが有限であるので、 $0 < \lambda_{rel}^{-1} \leq 1.0$ で表される。

比較としてサイクロメーター法により圧力ポテンシャルを測定した。実験には、熱電対式サイクロメーター (デカゴン社 Tru Psi) と冷却鏡式サイクロメーター (デカゴン社 WP4) を使用した。圧力ポテンシャルを測定したい試料を小さなチャンバ内に閉じ込めると、サンプルの水分と、チャンバ内の水蒸気との間で水交換が行われ、平衡状態に達する。この時点でチャンバ内の空気中の湿度を測定することによりチャンバ内の水分ポテンシャルが求められる。圧力ポテンシャル以外の水分ポテンシャル (重力ポテンシャル、浸透ポテンシャル) がゼロになっているので、全水分ポテンシャルは圧力ポテンシャルとして表すことが出来る。試料には、レンガを金槌で砕き、直径 1cm 位の破片にしたものを使用した。まず、数十個のレンガの破片を蒸留水に浸し飽和させ、飽和したら破片を取り出し、並べて乾燥させる。この時、扇風機を使って蒸発を速めた。

また、飽和透水係数 K_s は、定水位法により測定した (土の試験実習書編集委員会, 1991)。レンガを概ね $3 \times 3 \times 4.5\text{cm}$ の直方体に切断し、 $3 \times 3\text{cm}$ の面を通水面となるよう PVC パイプに入れ、レンガの中のみを水が通過するように、レンガと PVC パイプの間隙間にパラフィンを溶かし入れて固めた。3 個の試料を使って平均値を求めた。

実験に使用したレンガは、タイ国アユタヤ遺跡(首都バンコクより北に約90Kmに位置)において仏教寺院の補修用に使われているものである。補修用レンガ(約 $30 \times 14 \times 5$ cm)を三等分した内の1つ($9.7 \times 14.2 \times 4.8$ cm)を使用した。 9.7×4.8 cmの面(表面積 $A=46.6\text{cm}^2$)を蒸発面として、蒸発面から2cm下の短側面側に圧力ポテンシャル測定用センサーの穴をあけた。その後、デシケータにレンガと蒸留水を入れ、負圧(約-9m)を約1時間掛けたあとそのままの状態に1昼夜放置して飽和した。飽和後、レンガの質量を測り、蒸発面以外からの蒸発を抑制するために側面と底面をプラスチックラップで包んだ。圧力ポテンシャル測定用センサーと埋込み用穴の隙間には、レンガの削りかすを水で溶いたものを充填してレンガとセンサーの緊密な接着を図った。

飽和後、HDSを埋設して蒸発面以外をプラスチックフィルムで包んだ試料を電子天秤上に置き、試料上部から扇風機を使って強制蒸発させた。電子天秤は、RS-232Cポートを通してコンピュータにより制御した。蒸発速度(水分フラックス J_w)は1時間毎に測定した試料の質量変化から推定した。さらに、1時間毎にHDSのヒーターに $I=0.30\text{A}$ の電流を20秒間印加することにより熱伝導率を測定し、式(5)から圧力ポテンシャル ψ を推定した。使用したレンガ試料の乾燥密度は、 $\rho_s=1.98\text{Mg m}^{-3}$ であった。最後に、1時間毎に測定した圧力ポテンシャルと水分フラックスの測定値をHydrus_1Dのワークシートに入力して解析を行った。

同様の蒸発実験をレンガ試料に先立って岩手大学農学部下台圃場において採集した壤土(砂43%、シルト29%、粘土28%)を使って行った。壤土をPVCカラム(直径10.0cm、高さ10.4cm)に均一になるように充填した後、カラム下方から蒸留水を徐々に加えて飽和させた。土壤表面から2cm深さのところにテンシオメーター(直径10mm、長さ27mm)とHDSをそれぞれ向かい合うように埋設した。この土壤試料全体を電子天秤に載せて土壤表面から自然蒸発させながら、1時間毎に質量の変化を測定した。テンシオメーターとHDSによる圧力ポテンシャルの測定も1時間毎に行った。ここでのテンシオメーターとHDSによる圧力ポテンシャルの測定値を比較することにより、式(5)中の b_0 、 b_1 の実験定数を決定した。また、この土壤に対して吸引法(中野ら, 1995)と遠心法(土の試験実習書編集委員会, 1991)により圧力ポテンシャルと体積含水率の関係を求めた。

4. 実験結果と考察

本実験で使用したHDSに対する式(5)の実験定数は、壤土においてテンシオメーターとHDSとを同一場所に埋設して得られた圧力ポテンシャルと相対熱伝導率の逆数との関係から、 $b_0=0.2754$ 、 $b_1=0.0980$ 、 $r=0.998$ ($P < 0.001$)を得た(図-1)。 $-0.5 > \ln[-\psi(\text{m})]$ に対して非常に有意な線形関係が得られたことから、Reece(1996)の提案した式(5)の関係は、本実験で使用したセンサーにも適用可能であることが判明した。図からもわかるように $-0.5 < \ln[-\psi(\text{m})]$ では $\lambda_{\text{rel}}^{-1} \approx 0.22$ となったことから、使用したHDSの測定範囲は、 $0.22 \leq \lambda_{\text{rel}}^{-1}$ であり、また定義から $\lambda_{\text{rel}}^{-1} \leq 1.0$ であるので、式(5)から $-1.8 > \psi > -1,600\text{m}$ 程度と推定される。

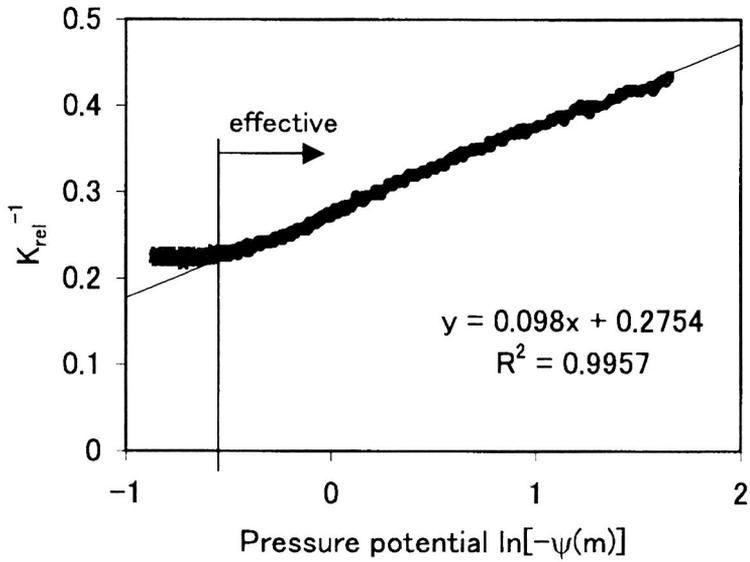


図-1 HDS ポテンシャルセンサーの校正に用いたテンシオメーターによる圧力ポテンシャルとHDSポテンシャルセンサーによる相対熱伝導率の逆数の関係。直線回帰には矢印の右側の範囲の値を使用した。
 (Fig. 1. Relationship between pressure potential measured with a tensiometer and reciprocal numbers of relative thermal conductivity determined with a heat dissipation sensor. Data on the right hand side of the arrow were used for a linear regression.)

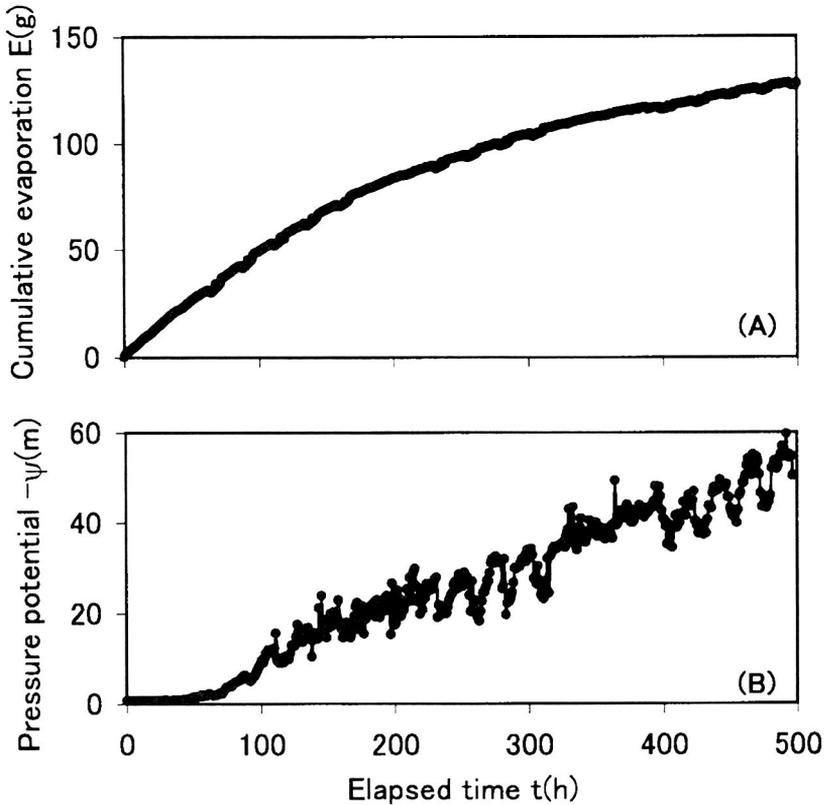


図-2 レンガに対する逆解析に使用した累加蒸発量(A)と圧力ポテンシャル(B)の経時変化。
 (Fig. 2. Temporal changes in cumulative evaporation (A), and pressure potential (B) used for an inverse procedure for bricks.)

図-2には、レンガ試料に対する累加蒸発量(A)と校正したHDSを使って測定した圧力ポテンシャル(B)の経時的な変化を示す。累加蒸発量は、180時間までは盛んな蒸発をしたが、その後時間の経過と共に緩やかな蒸発となっていった。圧力ポテンシャルの経時変化には、100から310時間と400時間以降に周期的な変動が見られる。これは、実験室の温度変化(冬期間の実験室は昼間に暖房が入り夜間と週末には暖房が切られる)を反映したものと考えられる。300時間付近を見ると、-20m程度の圧力ポテンシャル範囲を変動している。この変動は、熱伝導率でみると約5%の変動に相当する。

不飽和土壌の熱伝導率は、土壌の温度に依存することが良く知られている。土性によらず特に中水分域での温度依存性が大きい(HiraiwaとKasubuchi 2000)。例えば、30℃の温度変化に対しては、粘性壤土では体積含水率が0.2 m³ m⁻³の時には、25%程度熱伝導率が変化する(HiraiwaとKasubuchi 2000)。したがって、同じ多孔質体であるHDSの多孔質体の熱伝導率も温度に依存していると考えられ、先に示した5%程度の熱伝導率の変動は温度依存性によるものと想定される。しかし本報では、圧力ポテンシャルの温度補正は行わなかった。HDSセンサーの温度依存性に対する補正は今後の課題である。

逆解析法により推定したレンガの水分特性曲線をサイクロメーター法により測定した値と共に図-3に示す。レンガが湿潤である場合($\psi > -100\text{m}$)は、逆解析とサイクロメーター法による水

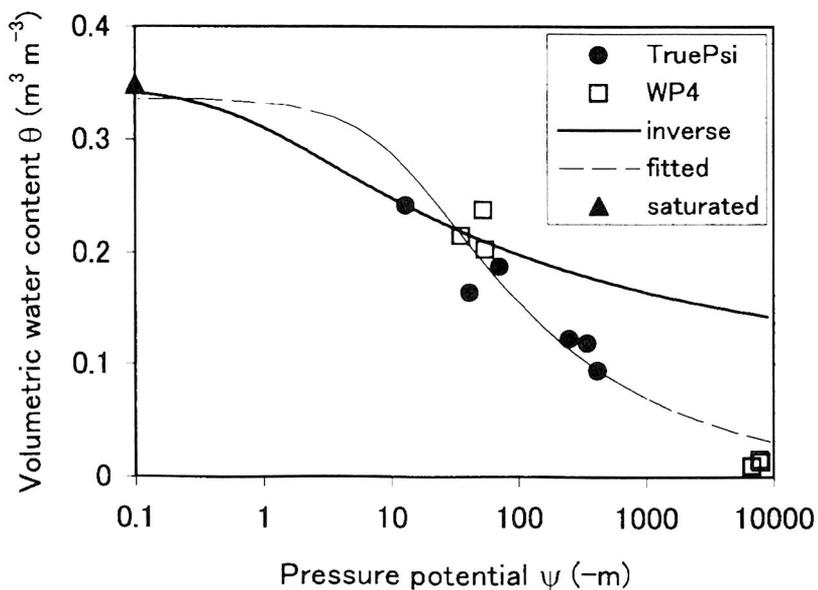


図-3 レンガに対する体積含水率—圧力ポテンシャルの関係。凡例中の「Fitted」は、サイクロメーター法と飽和時におけるデータに式(2)を当てはめた。「Tru Psi」は熱電対式サイクロメーターを、また「WP4」は冷却鏡式サイクロメーターを使って測定した圧力ポテンシャルである。

(Fig. 3. Relationship between volumetric water content and pressure potential for bricks. "Fitted" indicates that data obtained with psychrometry and at saturation were fitted to Eq. 2. "Tru Psi" and "WP4" indicate pressure potential measured with a thermocouple psychrometer and a cooled-mirror psychrometer, respectively.)

分特性曲線は比較的良好な一致を見た。しかし、 $\psi < -100\text{m}$ の乾燥した領域になると逆解析による体積含水率の推定値はサイクロメーター法による測定値を過大評価した。境界となった圧力ポテンシャルの値は、Hydrus_1Dへの入力値として与えた圧力ポテンシャルの測定範囲($\psi > -60\text{m}$)とほぼ一致していることから、逆解析による推定は測定範囲内に対してのみ有効であると考えられる。さらに、通常 $\psi < -310\text{m}$ の圧力ポテンシャルで保持されている水分は、液体ではなく水蒸気体のみで移動すると考えられている(Brady 1990)。Hydrus-1Dは液状水のみを移動を考慮しているので、例えば、 $\psi = -310\text{m}$ 付近までのデータが入力可能であっても、液体と水蒸気体との水分移動が起きていると考えられる乾燥領域における推定精度の低下は避けられないと考えられる。

図-4には壤土に対する水理特性曲線を示す。従来法である吸引法と遠心法による測定値と逆解析法による結果は、 $\psi > -5\text{m}$ では良好に一致した。しかし、低圧力ポテンシャル領域では逆解析法は従来法に比較して体積含水率を過小評価した。壤土に対してもテンシオメーターで測定した $0 > \psi > -5\text{m}$ の範囲の圧力ポテンシャルをもとに逆解析を行ったので、レンガの場合と同様に測定範囲に対してのみ有効な値を推定すると考えられた。

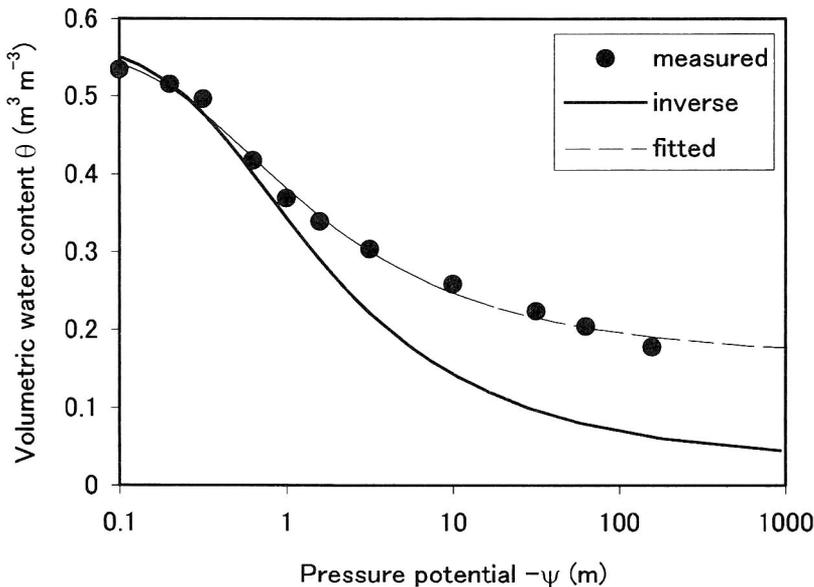


図-4 壤土に対する体積含水率—圧力ポテンシャルの関係。Fittedは、従来法によるデータに式(2)を当てはめた。
(Fig. 4. Relationship between volumetric water content and pressure potential for a loamy soil. "Fitted" indicates that data obtained with psychrometry and at saturation were fitted to Eq. 2.)

逆解析法により推定した飽和含水率と飽和透水係数を従来法で測定した値と比較した結果を表-1に表す。飽和含水率は、レンガと壤土のどちらについても従来法と逆解析法とによる値は良好に一致した。飽和透水係数については、壤土に対しては同一のどちらの方法も 10^{-6} オーダーでの一致が見られたが、レンガについては従来法のほうが1オーダー大きい値を示した。レンガの透水係数は、 $3 \times 3 \times 4.5\text{cm}$ の直方体のレンガ試料を切り出して測定したため非常にばらつきが大きかった

(標準偏差= $6.44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$)。肉眼でも試料に亀裂や孔隙が観察されたことから、このような大きな間隙を通して水分が選択的に流れたために従来法での飽和透水係数が大きくなったと考えられる。

表—1 逆解析法と従来法とによる飽和含水率、飽和透水係数、式(2)の係数の比較
(Table 1. Comparison of saturated water contents, saturated hydraulic conductivities, and fitting parameters in Eq. 2 determined with an inverse procedure and conventional methods.)

	Brick		Loamy soil	
	Conventional	Inverse	Conventional	Inverse
Saturated water content $\theta_s(\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$	0.348	0.345	0.534	0.576
Saturated hydraulic conductivity $K_s(\text{m s}^{-1})$	5.73×10^{-5}	1.03×10^{-6}	8.0×10^{-6}	2.31×10^{-6}
$\alpha(\text{m}^{-1})$ in Eq. 2	0.0862	1.585	3.779	2.854
n in Eq. 2	1.351	1.179	1.439	1.471

5. おわりに

レンガを飽和状態から徐々に乾燥させていく過程での蒸発量と蒸発面から2cm下方における圧力ポテンシャルを経時的に測定し、この測定値をもとに逆解析法を使ってレンガの水利特性を推定した。飽和含水率は、逆解析法による推定値と従来法とではほとんど同一の値となった。飽和透水係数に対しても従来法と比較して逆解析法のほうが幾分小さめの値を推定したが、1オーダーを超えるような大きな違いではなかった。体積含水率—圧力ポテンシャルの関係は、実測圧力ポテンシャルより低い領域では、レンガに対しては体積含水率を過大評価し、壤土に対しては過小評価した。しかし、実測した圧力ポテンシャルの範囲内では従来法と逆解析法とは良好な一致を見た。したがって、逆解析法によるレンガの水利特性の推定は、特に飽和含水率、飽和透水係数と体積含水率—圧力ポテンシャルの関係を一度に推定することが可能なことから、実測した圧力ポテンシャルの範囲内では有効な方法と考えられる。

謝 辞

サイクロメーターによる圧力ポテンシャルの測定には、鈴木葉子氏(岩手大学)と滝野沢聡子氏(東京芸術大学大学院)の協力を得た。また、壤土の物理性測定には熊谷美香氏(岩手大学)の協力を得た。岩手大学農学部教授藤井克己博士には熱電対式サイクロメーター Tru Psi を貸与していただいた。この研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究B(2)(課題番号：11558009、代表：石崎武志)および科学研究費補助金基盤研究C(2)(課題番号：11650605、代表：石崎武志)の補助を受けて行われた。深謝いたします。

(2001. 10. 22 受理)

引用文献

- 石崎武志・朽津信明・西浦忠輝・ユッカ・シムネック (1999) タイ国アユタヤの歴史的レンガ構造物中の水分移動解析. 保存科学 38:154-162
- 土の試験実習書編集委員会 (1991) 土の試験実習書(第二回改訂版). (社)地盤工学会
- 中野政詩・宮崎毅・塩沢昌・西村拓 (1995) 土壌物理環境測定法. 東京大学出版会
- 登尾浩助 (2001) 土壌中の水分・溶質移動解析への汎用PDEソルバーの適用. 土壌の物理性 88:19-25
- Brady, N.C. (1990) The nature and properties of soils. Macmillian Publishing Company, New York
- Hiraiwa, Y., and T. Kasubuchi. (2000) Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5-75°C). Euro. J. Soil. Sci. 51:211-218
- Reece, C.F. (1996) Evaluation of a line heat dissipation sensor for measuring soil matric potential. Soil Sci. Soc. Am. J. 60:1022-1028
- Richards, L.A. (1931) Capillary conduction of liquids through porous medium. Physics 1:318-333
- Simunek, J., M. Sejna, and M.Th. van Genuchten (1997) The HYDRUS-1D software package for simulating water flow and solute transport in one-dimensional variably saturated media. Ver. 1.0. IGWMC-TPS-70. Int. Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mine, Golden, CO.
- Simunek, J., O. Wendroth, and M.Th. van Genuchten (1998) Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 62:894-905
- Van Genuchten, M.Th. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-898

Measuring Physical Properties of Bricks Used for Repairing Heritage Buildings: I. Hydraulic Properties

Kosuke Noborio*, Hiroko Sasaki*, and Takeshi Ishizaki**

* Faculty of Agriculture, Iwate University, 3-18-8 Ueda, Morioka-shi, Iwate 020-8550, Japan

** Tokyo National Research Institute of Cultural Properties, 13-27 Ueno Park, Taito-ku, Tokyo 110-8713, Japan

Weathering and degrading cultural properties, such as temples at Ayutaya Remains in Thailand, made from bricks have been a great concern in terms of losing our cultural heritage. Use of simulation models to quantitatively investigate weathering processes involved in water and salts movement in bricks would be very effective. We evaluated an inverse procedure to estimate hydraulic properties of a brick using a one-dimensional finite element model, Hydrus_1D. The brick was first saturated with distilled water. Water naturally evaporated from one side of the brick, and changes in mass of the brick was recorded every an hour. A heat dissipation pressure potential sensor was imbedded at 2cm below the evaporation surface, and changes in pressure potential were recorded every hour. Temporal changes in mass and pressure potential were used for input data to Hydrus-1D. Inversely estimated values of saturated water content and saturated hydraulic conductivity for the brick agreed well with those measured with conventional methods. The relationship between volumetric water content and pressure potential estimated with the inverse procedure also agreed well with that by psychrometry up to the pressure potential where the measurement was terminated. The inverse procedure would be very effective to simultaneously estimate saturated water content, saturated hydraulic conductivity, and volumetric water content vs. pressure potential.