

(51) 赤外線水分計を用いた岩石の含水量の推定

国立環境研究所 正会員 木村 強
地質調査所 " 高橋 学

Estimation of water Content in Rocks Using an Infrared Optical Moisture Meter

Tsuyoshi KIMURA, National Institute for Environmental Studies
Manabu TAKAHASHI, Geological Survey of Japan

Abstract

Water content in rocks is a fundamental parameter representing unsaturated characteristics associated with suction and unsaturated permeability. A conventional method to estimate water content in rocks is based on measuring the weights of the specimen in drying and saturation. In the method, however, the value of water content for the same specimen cannot be continuously obtained with time. In this study, the application of an infrared optical moisture meter, originally developed for monitoring of water content in papers, to rocks is examined. The absorbance X , related to water content, measured using the moisture meter is expressed by

$$X = \ln(R/S)$$

where S is the reflectance of a near-infrared ray with wave lengths at which spectra of water is intensely absorbed, and R is the reflectance of a referential near-infrared ray which is used to cancel an influence of surface condition, particle size and color of the specimen. Experiments are conducted with rock specimens whose side wall is sealed to make a condition of one dimensional water movement. When the 1 cm lower part of the specimen is submerged and capillary water goes upwards, the absorbance is measured on the top or side surface of the specimen. The experimental results show that the moisture meter is sufficiently applicable to rocks, although the relationship between the absorbance and water content in rocks may not be linear. In addition, velocity and attenuation of transmitted elastic waves are discussed, related to water content in the specimen.

1. まえがき

岩盤の水分飽和度は、不飽和特性を表す最も基本的なパラメータであり、不飽和浸透流解析においては、サクション圧や不飽和透水係数との関係で論じられる。また、弾性波の伝播特性を始めとして、水分飽和度と関連性の深い物性値は少なくない。この水分飽和度を求めるには、従来より、岩石の薄片を切り出して強制的に浸水・乾燥し、そのときの重量変化から算出してきた（乾燥重量法）。しかし、この方法では、同一地点の水分飽和度を時間とともに連続的に求めることができないなど実用的とはいえない。そこで、本研究では、紙の水分管理を目的に開発された赤外線水分計を用いて、岩石の水分飽和度を推定することを試みた。すなわち、水分が毛管上昇によって試験体内で1次元移動になるようにして、試験体の上端面および側面で吸光度を測定した。また、試験体を透過する弾性波の速度および振幅の変化を観測し、水分飽和度との関係を考察した。

2. 実験方法

本実験で用いたのは、赤外線吸収式水分計（J Tエンジニアリング製）である。赤外線水分計という呼称は、赤外線を試料を乾燥させ、その乾燥重量で水分を評価する器機に使われることがあるが、本水分計は

これとは異なる。その原理は、近赤外光を試料に照射し、その反射光を受けて試料の水分を測定するものである¹⁾。試料に近赤外光を照射すると、その試料の内容成分に応じて特定の波長域の光が吸収される。近赤外における水の吸収帯は、 $1.20\mu\text{m}$ 、 $1.45\mu\text{m}$ 、 $1.94\mu\text{m}$ および $2.94\mu\text{m}$ にあり、これらの波長の光を含水試料に照射すると含水量に応じた光の吸収が生じる。ただし、吸収波長の測定のための測定では、試料の表面状態、粒子の大きさ、色調などの影響を受けて安定した測定ができないので、水の影響を受けにくい近赤外線

(参照波長)を別に設定し、吸収波長と参照波長の光を交互に照射し、それぞれの反射光量から次式によって吸光度 X を求める。

$$X = \ln(R/S) \quad (1)$$

ここで、 S および R はそれぞれ吸収波長光、参照波長光の反射光量である。式(1)からわかるように吸光度は無次元量であり、この値が大きいくほど試料内の水分は多い。従来の水分量の測定方法と比較して、本水分計では、試料を破壊することなく数秒以内に測定を行うことができる、パーソナルコンピュータと接続して自動計測ができる、実験室内だけでなく現場にも携帯できるなどの特徴を有している。本水分計の仕様書によれば、試験体表面までの距離が 15cm のとき、スポットの直径が 2cm になる。

本水分計の岩石への適用性を調べるため、静岡県産の砂質凝灰岩を角柱に成形して、その下端の約 1cm を水に浸し、その後の毛管力によって水が上昇する過程を追跡した。このとき、試験体の側面にはシリコン・シーラントを塗布して不透水面としている。本研究では吸光度の測定を上端面で1回(実験-A)、側面で2回(実験-Bおよび実験-C)、異なる試験体を用いて行った。実験-Aでは、試験体(高さ 6cm)の上方に水分計を設置して連続的に吸光度を測定すると同時に、試験体の 2mm 上方に湿度センサー($6\text{mm} \times 10\text{mm} \times 1\text{mm}$)を設置して相対湿度もモニターした(図-1(a))。実験-Bでは、試験体(高さ 10cm)の数カ所の高さで吸光度を測定した(図-1(b))。実験-Cでは、試験体(一辺 $3.6\text{cm} \times$ 高さ 6.6cm)の向かい合った側面の下端部から 3.3cm と 4.8cm の位置に、直径 5mm で共振周波数が 500kHz の圧電素子を貼り付けて、試験体を透過する弾性波を観測するとともに、それぞれの高さで吸光度を測定した(図-1(c))。測定原理からわかるように、赤外線水分計は試料の表面を対象としており、試料内部の水分までは知ることはできない。しかし、側面の不透水層の厚さが 1mm 以内であれば、照射光は試験体の側面まで到達する。実験-Bおよび実験-Cでは、水分計の照射光の当たる部分には、シリコン・シーラントの代わりに顕微鏡用のカバーガラス(厚さ 0.15mm)をエポキシ樹脂で貼り付けた。また、試験体側面と水分計の距離が 15cm では測定対象範囲が大きいので、スポット径が 1cm になるように距離を 5cm まで近づけて測定を行った。

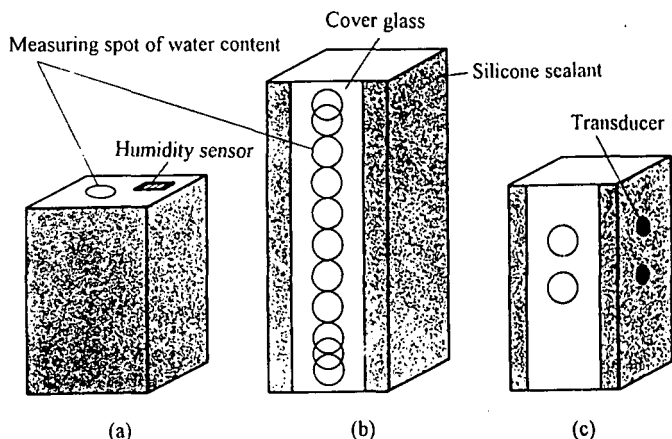


図-1 実験の概要

3. 実験結果および考察

3.1 実験-A

試験体の上端面で測定した吸光度を、実験室内の環境湿度と試験体直上の相対湿度とともに図-2に示している。実験を開始しておよそ10時間後に、まず上端面直上の相対湿度に変化が生じる。この変化は急激で、きわめて短時間でほとんど100%に達する。それに続いて吸光度が上昇し始めるが、その上昇する速度は相

対湿度に比べて遅い。このことは、毛管力によって水は岩石試験体内の微細な間隙を通して上部へ運ばれていくが、その毛管水のフロント部では液状水よりも水蒸気の形態にあることを意味している。吸光度は、下部からの水分の供給と上端部表面からの蒸発が平衡して、実験を開始して50時間後によく一定値になる。試験体がもっと長い場合には、吸光度が上昇し始める時期は遅くなり、一定の吸光度になるにも長い時間を要する。また、この場合には毛管力によって上端部まで輸送される水分量も少なくなるので、吸光度の値も小さくなるであろう。

3・2 実験-B

図-3には、試験体の側面で測定した吸光度を示している。6.7cmの高さで測定した吸光度の時間変化は、試験体の大きさだけからいえば、図-2に示したものにほぼ対応する（図-3の場合にはガラスカバーを通してあるので、吸光度が同じでも水分飽和度は異なる）。吸光度から水分飽和度を求めるには、既知の水分飽和度をもとに吸光度と水分飽和度の関係を前もって調べておかねばならない。水分飽和度の制御の容易な土壌についての実験結果²⁾によれば、水分飽和度と吸光度には線形の関係がある。したがって、岩石においては、最も実現しやすい2つの状態である飽和状態と完全に乾燥した状態についてそれぞれ吸光度を求め、これを内挿することで第1近

似としてはよい。図-4には、こうして求めた試験体内部の水分飽和度の分布を示している。ただし、ここでは完全に乾燥した状態の吸光度の代わりに、以下に述べるように実験を開始する前の水分飽和度を4%とし、そのときの吸光度と飽和時の吸光度をもとにしている。土壌や土質材料によくみられるように、時間とともに毛管水が上昇していく過程がよく表現されている。ここで、図中の黒く塗りつぶした■および▼の記号は、従来の乾燥重量法で求めた12時間後と24時間後の水分飽和度である。これは、水分計で測定したものと別に2本の試験体（試験体を切り出したブロックは同じ）を作成しておき、同じ実験条件の下で浸水さ

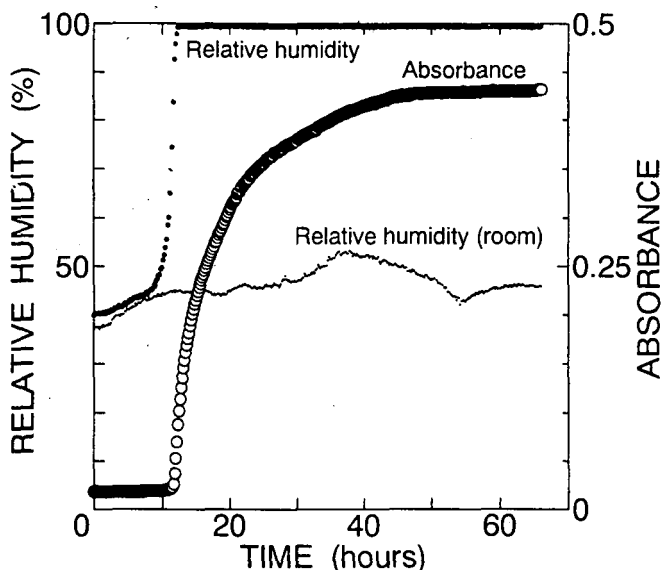


図-2 試験体上面での吸光度と相対湿度

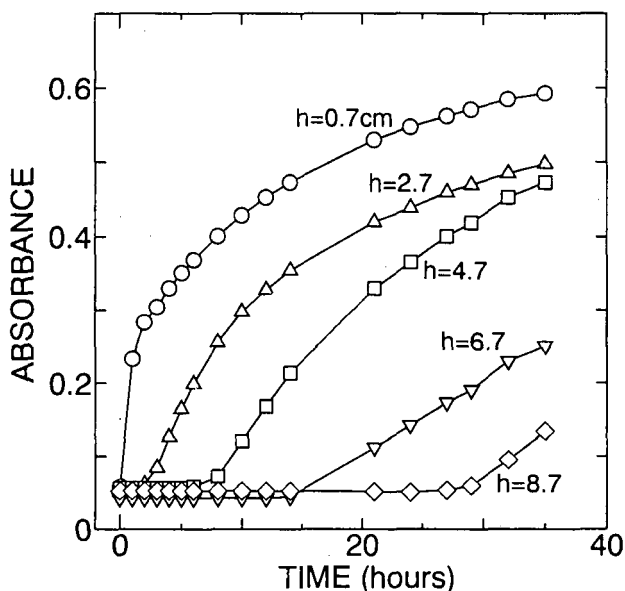


図-3 試験体側面での吸光度

せたもので、所定の時間になったときに試験体をたがねで15個程度の小さな岩片に砕いて、その小片の水分飽和度を求めている。浸水させてから12時間後では試験体の上部の半分が、また24時間後では上部3 cmの部分において水分飽和度に变化がなく、ほぼ4%であった。したがって、この値は、浸水前に実験室に放置しておいたときの水分飽和度であると考えられる。水分計で測定した水分飽和度の分布と乾燥重量法で得られたそれとは、12時間後および24時間後とも類似の傾向を示している。しかし、詳しくみると、上昇していく毛管水のフロント部において、水分計による水分飽和度は乾燥重量法によるものよりも大きい。また、12時間後の場合には試験体の下部で乾燥重量法で求めた方が大きい。これらの違いの原因として、水分飽和度と吸光度を線形近似したこと、試験体間の個体差などが考えられる。

3・3 実験-C

図-5には、試験体側面の2カ所で測定した吸光度の時間的変化を示している。また図-6には、弾性波のP波速度およびpeak-to-peakの振幅を、実験開始時の値で正規化して示している。異なる高さで測定した吸光度が時間とともに増加していく様子は、実験-Bと同じである。4.8 cmの高さで観測した弾性波の変化は、3.3 cmの高さのそれよりおよそ6時間ほど遅れて現れて

おり、この位置での毛管水の上昇速度は0.25 cm/secと計算される。これらの図をもとに、吸光度と弾性波速度および振幅の関係を示すと図-7のようである。異なった位置で得られたこの関係は非常によく似ている。図-4で述べたように吸光度と水分飽和度の線形近似には問題が残っているが、毛管水が上昇して水分飽和度が増加し、それとともに吸光度も単調に増加することに異論はなかろう。ここで注目すべき点は、吸光度（水分飽和度）の変化に弾性波速度はそれほど敏感ではなく、これに対して振幅は最終的には実験開始時の1/10以下にまで減衰することである。さらにその減衰は必ずしも単調ではない。柳谷ら³⁾によって行われた花崗岩の浸潤実験によっても同様のことが観察されているが、そこでみられる振幅の変化は、実験開始時の振幅よりもいったん大きくなり、その後で減少している。また、大理石を用いた一定荷重下での強制的な水の供給においても、振幅はいったん増加した後に急激に減少している⁴⁾。これに対して本実験では、振

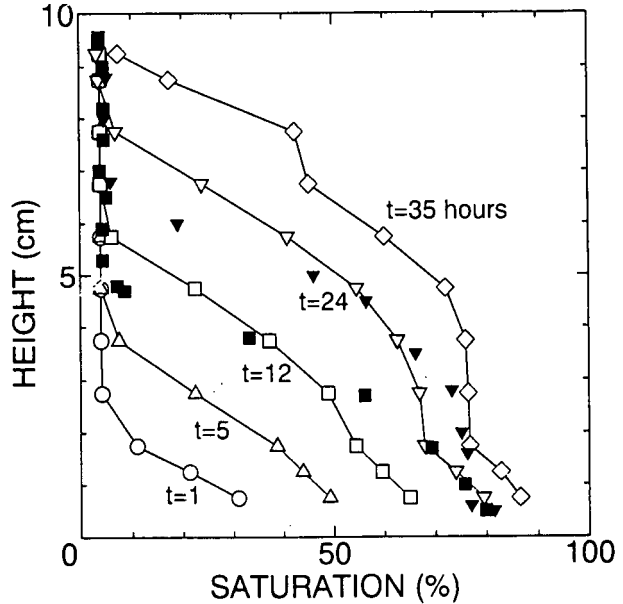


図-4 試験体内部の水分飽和度

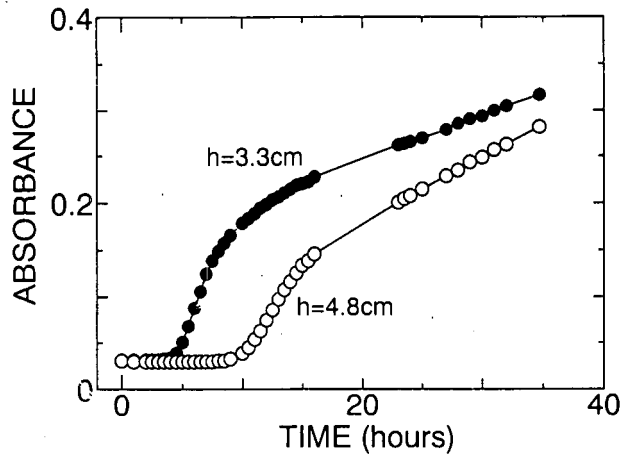


図-5 試験体側面での吸光度

幅は一時的に増加に転じるが実験開始時のそれを上回ることはいない。図-5および図-6でみると、振幅の極大値が現れるのは吸光度の上昇速度が最大のときであり、したがって吸光度の鉛直方向の変化率が最も大きいときである。このような状況では、試験体を透過する弾性波の波線は直線ではなく、上に凸の曲線となる。すなわち、弾性波は水分のより少ないところを伝播しており、その場合の振幅は見かけ上は大きくなりうる。しかし、柳谷らは、振幅の一時的な増加は本質的なものであると述べており、これを明らかにするにはさらに実験が必要である。

4. あとがき

本研究では、紙の水分管理のために開発された赤外線水分計を用いて、岩石の水分飽和度を推定することを試みた。その結果、土壌や土質材料でみられるように、岩石試験体でも下端面から毛管水の上昇していく過程を追跡することができた。水分計で計測される吸光度と水分飽和度の関係を線形で表すことには問題が残されているが、本水分計によれば非破壊でかつ連続的に計測が可能なので、岩石の不飽和特性を調べるには有効な手段となろう。

参考文献

- 1) 日本機械学会編(1992): 湿度・水分測定と環境のモニタ, 技報堂出版, 301-406.
- 2) 谷山一郎・芝山道郎(1989): 近赤外反射分光法による土壌水分の定量分析, 土壌の物理性, No. 59, 28-34.
- 3) 柳谷 俊・山田浩陽・寺田 孚(1986): 弾性波CTによる岩石内を浸潤する水の観察, 土木学会論文集, No. 370, 169-177.
- 4) 高橋 学(1991): P波速度および振幅比により観察される岩石内の水の浸潤について, 応用地質, Vol. 32, 232-239.

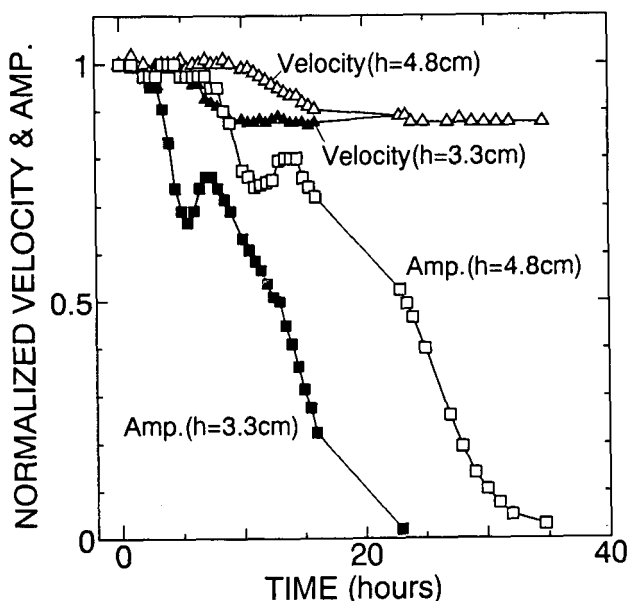


図-6 試験体内を伝播する弾性波の速度と振幅

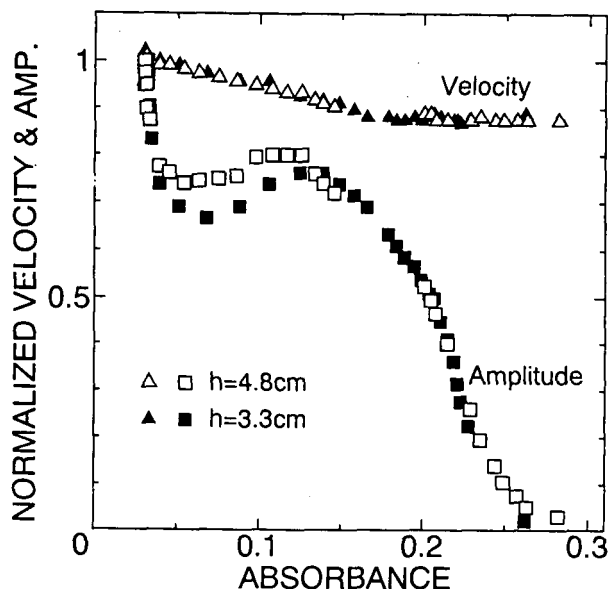


図-7 吸光度と弾性波速度および振幅の関係