

熱伝導率計測による岩石の体積含水率の推定

－ 軟岩の不飽和浸透特性評価（その1）－

岡山大学 正会員 ○榎 利博 小松 満

原子力発電環境整備機構 國丸貴紀

電力中央研究所 正会員 長谷川琢磨

鹿島建設(株) フェロー会員 瀬尾昭治 正会員 栗原啓丞

1. 目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る地質環境調査では、母岩の特性を把握して評価することが重要である。不飽和状態の堆積岩の浸透特性を評価する室内試験法については明確な基準化に至っておらず、水分拡散係数もその一つである。その測定に必要となる岩石試料内の水分分布の経時変化の計測に誘電法を試した事例^{1,2)}があるが、ここでは堆積岩の水分拡散係数の室内試験手法の確立を最終目標とし、まず岩石試料中の水分の変化を計測する手段として熱伝導率に着目した。堆積岩は鉱物粒子、水、空気の三相からなる。水の熱伝導率は空気のそれより25倍程度大きいため、水が空隙を占める割合が高いほど三相の混合体としてのみかけの熱伝導率は高くなる。そこで、市販の熱伝導率計を用い、1) センサーの基礎特性である測定範囲、2) 堆積岩の体積含水率－熱伝導率の関係についてフィージビリティスタディ的な位置づけで以下の2つの予備試験を行った。

2. ニードルセンサーの測定範囲

本研究ではポータブル型の TEMPOS 熱特性計(米国 METER 社製)を用いた。岩石用に開発されたニードル状のセンサー(RK-3, 直径 3.9 mm, 長さ 6 cm, 図-1(左))を用いた。同機器はニードル部を一定時間加熱し、その時のニードルの温度変化より熱伝導率を算出するヒートパルス法(ASTM D5334-14)にもとづく。まずはニードルセンサーがどの範囲の熱伝導率を計測するのか、その「測定範囲」を把握する。ここでは、0.96 cm から 9.5 cm まで 12 種類の内径を持つ容器に豊浦標準砂を充填し熱伝導率を計測した。容器を大きいものから段階的に小さくし、容器外側の影響を受け始める時点での直径にもとづきニードルセンサーの測定範囲を推定した。様々な容器寸法に対応するため標準砂を便宜的に用い、堆積岩で想定される様々な含水条件における熱伝導率の範囲は乾燥・飽和状態の標準砂で包括できると仮定した。密充填で得られた乾燥密度は、気中充填で 1.59 g/cm^3 、水中充填で 1.64 g/cm^3 であった。各容器に標準砂を充填し、図-1(右)の上端面の中心位置にセンサーを挿入した後1分間の加熱時間で熱伝導率を計測した。図-2に、得られた熱伝導率を供試体の直径で整理した。乾燥砂では直径 1 cm より大きい場合に 0.21 W/mK 、飽和砂では 3 cm より大きな直径の場合に 2.6 W/mK 程度の熱伝導率でほぼ一定となった。これより小さな直径では、熱伝導率は容器外側の空気の影響により低い値となった。よって、1分間の加熱における RK-3 センサーの測定範囲は最大で直径 3 cm 程度(ニードルから半径 1.5 cm 程度)の範囲であることが判明した。



図-1 (左)熱伝導率センサー (RK-3), (右)乾燥砂への設置状況 (内径 0.96~9.5 cm の容器を使用)

キーワード 堆積岩, 浸透特性, 熱伝導率, 体積含水率, 測定範囲, 校正曲線

連絡先 〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1 岡山大学大学院 TEL 086-251-8160

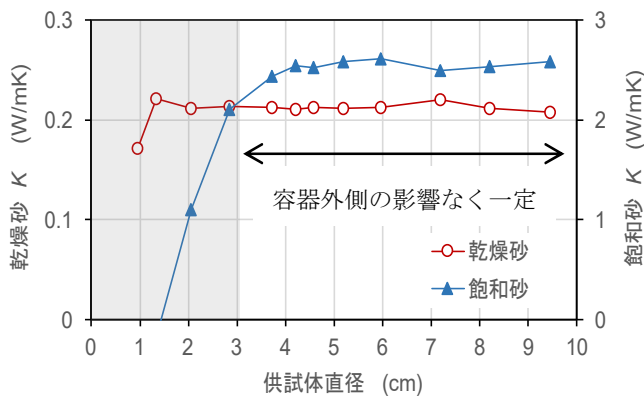


図-2 熱伝導率-供試体直径の関係

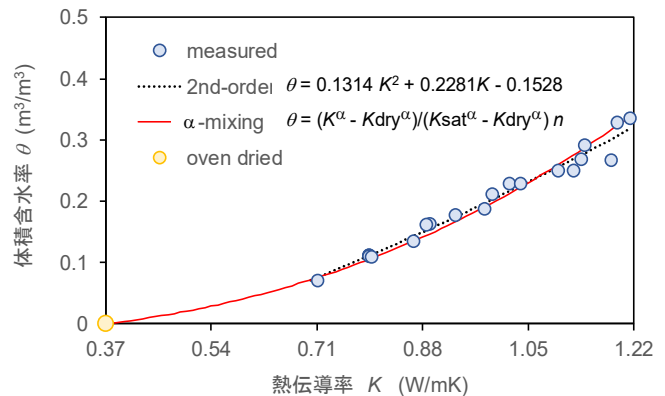


図-3 体積含水率-熱伝導率の関係（進行中）

3. 体積含水率-熱伝導率の関係

次に堆積岩供試体について、様々な含水状態における熱伝導率を計測した。ここで用いた堆積岩は、神奈川県横須賀市の葉山層群より採取した泥岩（直径 8.4 cm, 高さ 4.15 cm, 空隙率 $n = 33.6\%$ ）である。この供試体の高さは上述の測定範囲より大きくなるよう決定した。初期状態で飽和した円筒供試体の側壁中央に $\Phi 4.0$ mm のビットでパイロット孔を削孔した。ニードルと岩石の良好な熱的接触を確保するためのサーマルグリースを塗布した後に RK-3 センサーを設置した。その後、体積含水率を段階的に減少させながら 1 分間の加熱時間で熱伝導率を計測した。各段階において重量を変化させた後、蒸発防止のための養生を施し供試体中の含水分布ができるだけ一様になるよう十分な時間をおいた。得られた体積含水率-熱伝導率の関係を図-3 に示す。現在は乾燥過程が進行中であるが、別途炉乾燥中の供試体より得られた熱伝導率も併記した。図-3 より、体積含水率 θ の変化幅にわたって熱伝導率 K は 0.37~1.22 W/mK の値をとり、若干の非線形性はあるものの特定の含水範囲で熱伝導率の変化の感度が極端に異なる傾向はみられなかった。その関係を二次関数および α -mixing model³⁾ で表したものを図-3 中にあわせて示す。これらのモデルの係数は各岩種について異なるが、後者のモデルにおいて曲率を表す geometry factor α は今回の泥岩供試体では 2.5 であった。

4. 結論

熱伝導率計測による堆積岩の体積含水率推定の可能性を調べるため、岩石用ニードルセンサーの測定範囲について実験的に求めた。その結果、熱伝導率が高い場合で 1 分間の加熱時間では直径 3 cm 程度（ニードルから半径 1.5 cm 程度）までの範囲の熱伝導率を測定していることが確認できた。同センサーを泥岩供試体に設置し体積含水率を段階的に変化させた結果、熱伝導率は体積含水率の高低にかかわらず有意な感度で変化し、その関係を 2 種類の関数形で表した。これらの関係式を熱伝導率の計測値から体積含水率への変換のための校正曲線（キャリブレーション）と位置づけることが可能であることが確認できた。このキャリブレーションは、次段階として別途進行中である水分拡散係数算定のための堆積岩カラム供試体中の体積含水率分布の経時変化の推定に用いる。今回の知見により、キャリブレーション供試体が境界の影響を受けないためにはニードルと供試体端面の距離は 1.5 cm 以上必要であること、複数のニードルセンサーを設置するカラム試験では各センサーは主に 3 cm 程度までの幅の水分を反映することが分かった。

参考文献

- 1) Sakaki, T. and H. Rajaram (2009), Drying of a partially saturated rock matrix by fracture ventilation: Experiments and modeling in a single fracture-matrix system, *Water Resour. Res.*, 45, W02427.
- 2) 小松満, 藤田知大, 児島晃弘 (2010), 塩水環境下における堆積岩の不飽和浸透特性の計測法に関する研究, 土木学会中国支部研究発表会発表概要集, III-25.
- 3) Sakaki, T., A. Limsuwat, K. M. Smits, and T. H. Illangasekare (2008), Empirical two-point α -mixing model for calibrating the ECH₂O EC-5 soil moisture sensor in sands, *Water Resour. Res.*, 44, W00D08.