

光ファイバ温度計測システム（FOTM）による透水係数の算出

(株) ダイヤコンサルタント 東京事業部* 正会員

○永井哲夫

(財) 電力中央研究所**

Martin Schreck

(株) ダイヤコンサルタント 東京事業部

武富康浩

1. はじめに

分布型光ファイバ温度センサ技術¹⁾ (Distributed optical fiber temperature sensing : DTS) によると、一本の光ファイバで数千点の温度計に相当するデータをほぼ同時に長期間にわたって収集することができる。つまり、空間的かつ時間的に連続して温度計測が可能である。光ファイバ温度計測システム: FOTM (Fiber optic temperature measurement / monitoring) は DTS をベースにしており、温度分解能が 0.1°C (計測時間、光ファイバの種類および長さにより変動する)、距離分解能が 25cm と高精度で温度計測を行うものである。著者らは、水の流れを温度という指標を用いて把握するためには、 0.1°C オーダーの温度分解能が必要であると考え、透水割れ目の検知および透水係数の算出に対する FOTM の適用性を原位置試験により検証した。本報では、まず FOTM の概要について述べ、次に試験概要、硬岩地域において実施した試験結果および考察をまとめて示す。

2. 原位置試験の概要

まず、光ファイバケーブルを図-1に示すような形で塩化ビニル管 (外径43mm) の外側に貼付してボーリング孔内 (孔径 $\phi 76\text{mm}$, 孔底深度 G.L.-201.3m) に挿入した。このとき、光ファイバケーブルは、横断面で見ると直交4方向に位置するように取り付けられている。そして、自然状態における深度方向の孔内温度分布を計測した。次に、温水注入および揚水試験を実施し、注入開始前 (自然状態時)、注入時、および揚水時の孔内温度分布をそれぞれ経時的にモニタリングした。試験方法は以下の通りである。

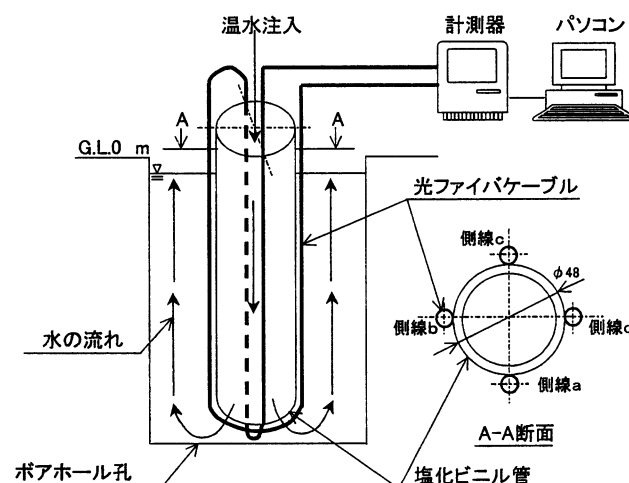


図-1 光ファイバケーブルの布設状況

(1) 孔内への温水注入

まず、自然状態時において塩化ビニル管内に孔口から温水 (約 50°C) を圧入して孔内水を温水置換する。温度分布が平衡状態に達すると注入を終了する。

(2) 孔内温水の揚水

温水注入により温度分布が平衡状態に達すると注入を終了し、その後、塩化ビニル管内より孔内水をポンプで揚水して強制的に低下させる。孔内水の温度が平衡状態に達すると揚水を終了する。

3. 温度と割れ目流量との関係

揚水状態において、孔内の温度プロファイルに影響を与える要素を以下に示す。

- (1) 割れ目 (あるいは透水性の相対的に高い領域) からボーリング孔内へ地下水の流入
- (2) ボーリング孔内の水の対流
- (3) 岩盤と孔内水の熱交換
- (4) 塩化ビニル管と孔内水の熱交換

光ファイバ、温度検層、透水係数、割れ目、モニタリング

* 〒330-8660 埼玉県大宮市吉野町 2-272-3, Tel. 048-654-5265, Fax. 048-654-3178

** 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646, Tel. 0471-82-1181, Fax. 0471-83-3182

これらから、熱量の平衡を仮定して割れ目流量 $Q(Z, t) = \frac{\pi(r_B^2 - r_I^2) \frac{\Delta T}{\delta t} - H_f \frac{T_B - T_F}{\rho_w C_w} - C_l \frac{T_B - T_l}{\rho_w C_w}}{\frac{\Delta T}{\delta z}} = 0 \dots (1)$ 量 Q を算出すると次式が得られる。

ここで Q : 流量 (m^3/s), Z : 深度 (m), t : 時間 (s), r_B : ボーリング孔径 (m), r_I : 塩化ビニル管内径 (m), T : 温度 ($^{\circ}C$), H_f : 孔壁, T_B : 孔内温度 ($^{\circ}C$), T_F : 岩盤温度 ($^{\circ}C$), T_l : 塩化ビニル管の温度 ($^{\circ}C$) ρ_w : 水の密度 (kg/m^3), C_w : 水の熱容量 (J/kgK), C_l : 塩化ビニル管と孔壁間での熱交換定数 (W/mK) とする。Schreck (1999) ²⁾ によると、多深度において経時的な温度変化 ($\delta T / \delta t$ 及び $\delta T / \delta z$) を計測すれば、各割れ目に対応する流量および透水係数を算出することができる。

4. 計測結果および考察

計測結果の代表的な例として揚水時の温度の経時変化を図-2に示す。計測結果の評価に際しては図-2の温度分布曲線の変曲点(図中の凸または凹の箇所、曲線勾配の変化点)、経時変化図における変化率(各温度分布曲線の疎密状態)、圧力低下に伴う各変曲点の現われ方などを読み取る。このような温度分布の様々な情報を総合して考察することにより透水割れ目位置を検知することが出来る。また、式(1)より算出した割れ目流量および透水係数結果と、別途実施した低圧ルジオン試験などの結果をまとめたものを図-3に示す。図-3に示すように G.L. -76m, G.L. -93m など計17箇所で揚水時に地下水の流動があると考えられる。また、温度計測により算出した透水係数はルジオン試験結果と良い整合を見せている。ルジオン試験における透水係数の距離分解能は5m であるが、FOTM における透水係数の距離分解能は1m と高精度である。

HLW 処分場の選定にあたっては、岩盤中に見られる高透水な割れ目や地層が問題となる。今回、FOTM を用いることにより高透水部の位置の検知および算出した透水係数が正確であることが確認できた。

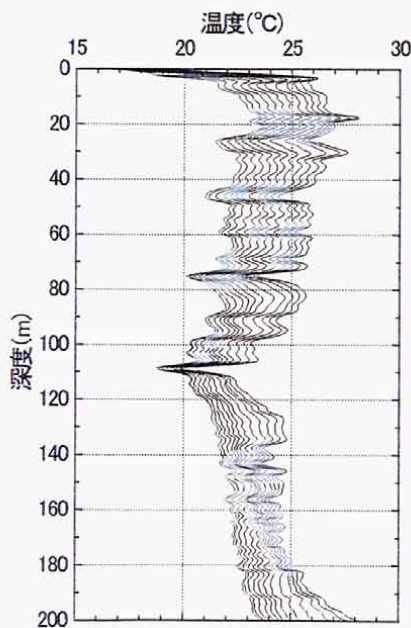


図-2 揚水時の温度変化

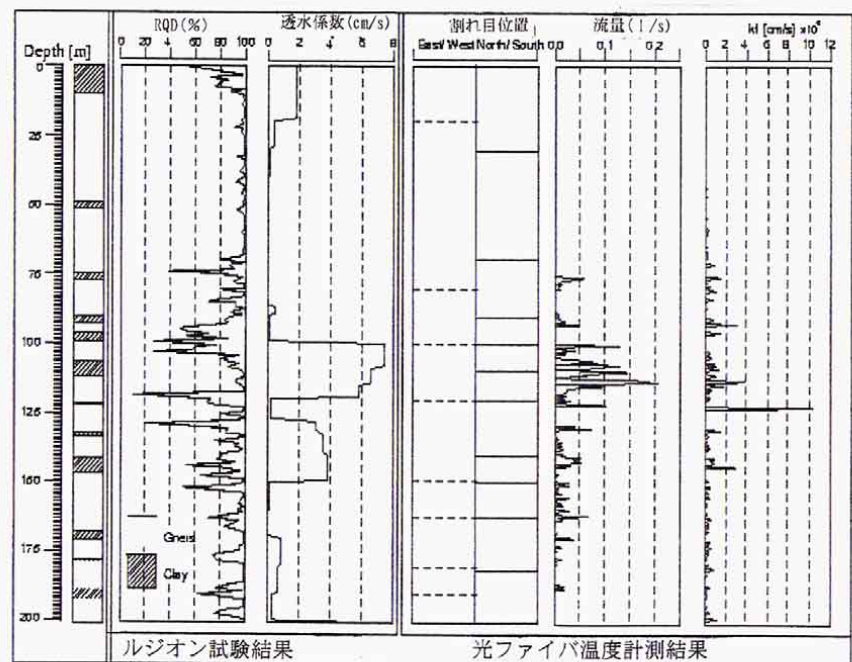


図-3 光ファイバ温度計測結果とルジオン試験結果との比較

本試験は、岡山大学環境理工学部、西垣誠教授指導の基、(財)電力中央研究所および(株)ダイヤコンサルタントの共同研究により実施した。現地等でお世話になった方々に心より感謝の意を表します。
(参考文献)

- 1) Dakin, J.P.: Distributed optical fiber sensors, Fiber Optic Sensors, Critical Reviews Vol. CR44, pp.162-199, 1992.
- 2) Martin Schreck: Research on the Application of Distributed Intrinsic Fibre Optic Temperature Sensing for Geotechnical Engineering, The Graduate School of Natural Science and Technology, OKAYAMA UNIVERSITY, 1999.
- 3) 末永弘, Schreck Martin, 宮川公雄, 中川加明一郎 (2000): 光ファイバ温度検層による水みち推定への適応性検討, 電力中央研究所