

## III-175

## 球状熱源による原位置岩盤の温度伝導率測定

清水建設機技術研究所 正会員 ○若林成樹

**1 はじめに** 原位置で熱物性値を求める方法には、多数の熱電対を地盤内に埋設し、温度の経時変化にもっとも適合する物性値を最小自乗近似法により推定する方法<sup>1)</sup>や、3点のうち両端の2点の温度を境界条件として、中央の温度変化に適合する物性値を逆算する方法<sup>2)</sup>などがある。しかし、これらの方法では、計算の簡略化のため、初期の温度分布は一定、物性値は温度によって変化しないなどの仮定が必要であった。これらの点を解決するため、筆者は1次元熱伝導方程式を離散化することから得られる理論に基づき、面状熱源を用いて直接、原位置岩盤で熱物性値の一つである温度伝導率を測定してきた<sup>3)</sup>。

本論文では3次元極座標系の熱伝導方程式を離散化して得られる測定理論に基づき、球状熱源を用いて、栃木県宇都宮市大谷町の大谷石採石場跡地で温度伝導率を測定した結果を述べる。

**2 測定理論** 球熱源を用いた温度伝導率 $a$ の測定式は、3次元極座標表示された次の熱伝導方程式から導かれる。

$$a \left( \frac{\partial^2 \phi(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \phi(r,t)}{\partial r} \right) - \frac{\partial \phi(r,t)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

図1に示す等間隔  $\Delta r$  づつ離れた3点、 $r_1, r_2, r_3$ の温度を等時間 $\Delta t$ おきに3回、 $t_1, t_2, t_3$ の時刻に測定した9個の温度 $\phi(r_i, t_j)$ を用いて式(1)を離散化し、整理することによって球熱源を用いた温度伝導率の測定式(2)を得ることができる<sup>4)</sup>。

$$a \frac{\Delta t}{\Delta x^2} = \frac{\begin{bmatrix} -5 & 0 & 5 \\ -38 & 0 & 38 \\ -5 & 0 & 5 \end{bmatrix} \phi(r_i, t_j) - 3 \frac{\Delta r}{r_2} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \phi(r_i, t_j)}{16 \left( \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 \\ -2 & -8 & -2 \\ 1 & 4 & 1 \end{bmatrix} \phi(r_i, t_j) - 3 \frac{\Delta r}{r_2} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -4 & -1 \end{bmatrix} \phi(r_i, t_j) \right)} \quad \left( \begin{matrix} i=1 \sim 3 \\ j=1 \sim 3 \end{matrix} \right) \quad (2)$$

この測定理論に基づけば、球状の熱源を発熱させ、等間隔に離れた3点の温度を等時間おきに3回測定するだけで容易に温度伝導率を求めることができる。更に次のような特徴を持つ。

- ・熱源を埋設すれば岩盤の深部でも測定が可能である。
- ・初期の岩盤内の温度が一定でなくとも、温度上昇分で考慮すれば良い。

**3 測定方法** 今回製作した装置は外径17mm、内径14mm、長さ1mのセラミック製パイプの先端に直径24.5mmの球状熱源と、熱源中心から10~40cmの間に5cm間隔に8点の熱電対をとりつけたものである。測定地点A、Bの2箇所図2に示すようにこの装置を壁面に鉛直に穿孔した直径28mm、深さ約95cmのボアホ

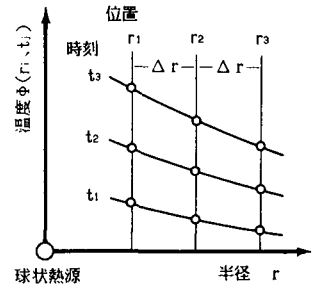


図1 温度変化のモデル図

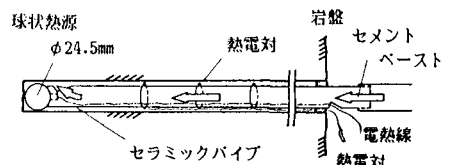


図2 測定装置の概略および埋設法

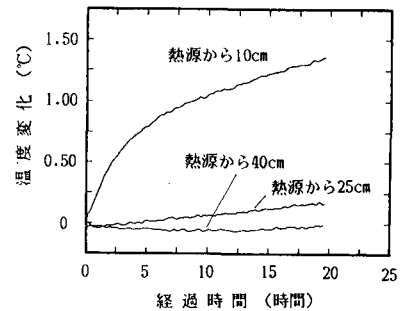


図3 測定地点Aの温度変化

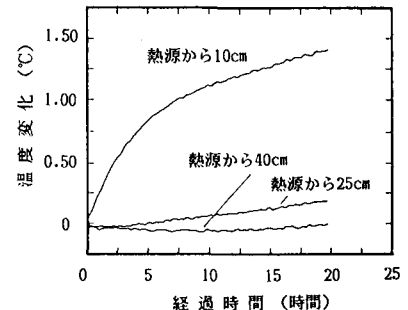


図4 測定地点Bの温度変化

ール内に挿入し、パイプの内側を通してセメントペーストを注入し、空隙を充填した。ボーリングコアの観察によれば、2箇所の岩盤とも亀裂は無く、ほぼ均質とみなせた。約2週間放置し、セメントペーストの固化、水和反応が終了したのちに測定を開始した。トランスを用いて熱源に10Vの電位差を与え、約10Wの一定発熱をさせた。また8点の温度は3分間隔に20時間後まで測定した。

**4 測定結果** 温度伝導率の算定は熱源から10、25、40cm離れた $\Delta r=15\text{cm}$ の3点で行った。岩盤内の初期温度分布は一定ではなく、空洞壁面に近い方が温度が高く、加熱に伴う温度変化量から測定式(2)に基づいて求めた。測定地点A、Bの温度変化量を図3、4に示す。温度上昇量は非常に小さく、熱源から10cm離れた位置で約 $1.5^\circ\text{C}$ であった。時間間隔 $\Delta t$ を4時間にとり、温度伝導率を求めた結果を図5、6に示す。温度の上昇量が非常に小さいため結果は若干ばらついているが、平均値は測定地点Aでは $1.42 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ （中央点、熱源から25cm、の平均温度 $=15.87^\circ\text{C}$ ）、測定地点Bでは $1.31 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ （同 $16.11^\circ\text{C}$ ）であり、ほぼ一致する温度伝導率が得られた。

また、有限差分法により、温度伝導率を与え、両端の温度を境界条件にして中央の温度を計算した。最小自乗法に基づき、計算値と実測温度の残差平方和が最小になるように繰り返し計算を行い、温度伝導率を求めた。その結果を図5、6に合わせて示す。最小自乗法から得られた値は測定地点Aで $1.27 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ 、Bで $1.15 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ で平均値より若干小さいがほぼ一致している。

さらに、同一採石場の他の空洞内で以前に面状熱源を使って測定した温度伝導率と比較した結果を図7に示す。面状熱源を用いた結果は、中央の温度 $5 \sim 50^\circ\text{C}$ で $1.2 \sim 1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ でほぼ一定値で温度依存性はみられなかった。球状熱源を用いた場合の平均値はこれよりも $0.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ 程度大きいだけであり、2種類の熱源を用いた測定結果は一致した。

大谷石は比較的均質であり同一採石場内であれば、熱物性値はほぼ等しいと考えられる。従って、球状熱源を用いても面状熱源と同様の精度で温度伝導率を測定できると考えられる。

**5 まとめ** 原位置の岩盤で球状熱源を用いて温度伝導率を測定した結果、次のことが得られた。

- ・大谷石の原位置岩盤の温度伝導率は約 $16^\circ\text{C}$ で $1.3 \sim 1.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ であり、最小自乗法を用いた逆解析の結果と面状熱源で測定した結果にほぼ一致した。
- ・球状熱源を用いれば、温度範囲は狭いが岩盤の深部でも温度伝導率の測定が可能であると考えられる。

#### <参考文献>

- 1) Jeffry J.A., Chan T., Cook N.G.W. and Witherspoon P.A. LBL-8423, 1979.
- 2) Vost K.R. Trans. I.M.M., A57-A62, 1979.
- 3) 若林、木下、羽根 第39回土木学会講演概要集 III, pp.653~654, 1984.
- 4) N.Wakabayashi, N.Kinoshita and T.Hane Proc. of 6th ISRM, Montreal, 1987. (投稿中)

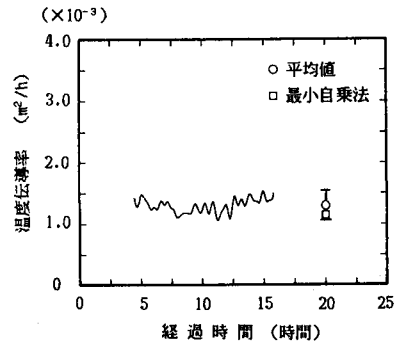


図5 測定地点Aの温度伝導率の変化

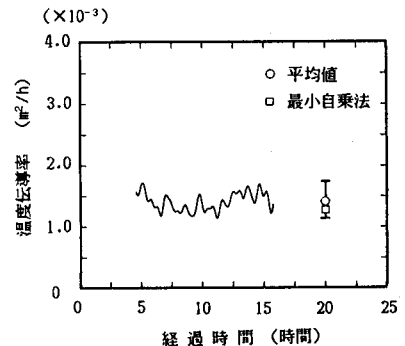


図6 測定地点Bの温度伝導率の変化

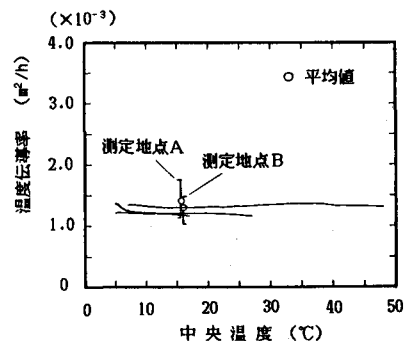


図7 球、面状熱源による温度伝導率の比較