

三菱金属(株) 中央研究所 (埼玉大学石炭生) 正会員 ○ 佐々木 康夫  
埼玉大学 工学部 正会員 佐藤 邦明

はじめに

岩石・岩盤中の伝熱問題は地熱開発やエネルギー備蓄などに係わって注目されつつあるが、きれつ系岩盤のきれつの伝熱パラメーターに及ぼす影響に関しては十分判っていない。実際、現位置の伝熱パラメーターを考える場合には、きれつの影響を知ることは不可欠である。本論では、この点を踏まえ、単一きれつの存在する岩盤モデルによる、二・三の室内実験を行い、きれつの影響を実験的に検討したので報告する。

1. 実験装置・実験方法

本伝熱実験では人工的にきれつを作った花崗岩、玄武岩、砂岩の3種類の試料を用い、各々浸透流速を変化させた8例について行った。実験装置の概略と装置の全景を図-1、写真-1に示した。装置各部の機能を図-1により述べると、①は圧裂引張により中央部にきれつを作ったある50×100×150mmの柱状試料、②は温度測定用プローブで、試料上端から30、75mmの距離のきれつ中、きれつから10、20mm離れた6個所に設置されている。③、④の恒温プレートは試料の上・下面と一定温度に保持するためのもので、③の上部恒温プレートは熱水により、④の下部恒温プレートは冷却水により一定温度に保たれる。⑤は浸透熱水の石柱計測用パイプ、⑥は試料上面に熱水を供給し続ける越流パイプ、⑦は熱水タンク、⑧は5kWの投入電熱ヒーターである。⑨は浸透流量計測用メスシリンダー、⑩は発泡スチロールの断熱材、⑪は冷却水給水パイプ、⑫は自動温度記録計である。以上の装置を用い断熱材で周囲を囲まれた試料の上面に熱水を供給し、きれつ中を含む6個所の温度の経時変化を測定して、きれつのない場合と比べきれつによる伝熱の影響を調べる。

実験は所定の形状に成形した試料に上・下部恒温プレートと取付け、温度測定用プローブを設置し断熱材中に収納する。次に、冷却水を通じ熱水タンクから熱水を上部恒温プレートに送込み記録計を起動させ開始する。実験は試料上端から30mmの距離の温度が飽和に近くなるまでの1時間とした。浸透圧力は試料上面の石柱計測用パイプと浸透流量計測用パイプとの水柱差と読取り用い、浸透流量はメスシリンダーにより計量した。

2. 実験結果

上記の実験手順に従い、単一きれつのある3種類の岩について実験を行い、その結果を同様にして行ったきれつのない場合と比較した。結果は表-1に試料の物性値とともに示してある。実験に用いた試料は実験した圧力、時間の範囲では岩質部からの浸透は認められなかったので、きれつのある場合、きれつのない場合の試料内の温度分布は、各々、次のような式で示される。まず、きれつのない場合でかつ浸透が起らない時の温度分布を示す式は

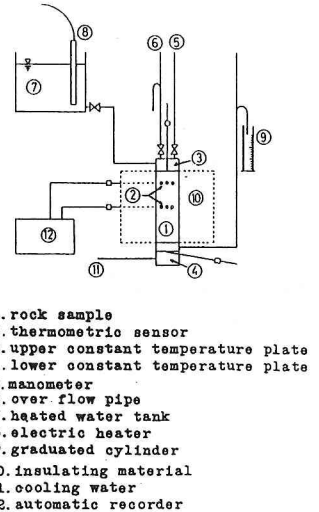


図-1 実験装置の概略



写真-1 実験装置の全景

表-1 実験試料の物性と実験結果

| sample name | 浸透速度<br>( $\times 10^{-4}$ m/s) | 吸水率<br>(%) | 空隙率<br>(%) | 比熱<br>(J/kgK) | きれつのある場合の実験<br>に用いた試料の浸透速度<br>( $\times 10^{-4}$ m/s) | きれつのある場合の実験<br>に用いた試料の浸透速度<br>( $\times 10^{-4}$ m/s) | きれつのある場合の実験<br>に用いた試料の浸透速度<br>( $\times 10^{-4}$ m/s) |
|-------------|---------------------------------|------------|------------|---------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| granite     | 2.64                            | 0.202      | 0.553      | 0.816         | 2.81                                                  | 4.70                                                  | 0.431                                                 |
| basalt      | 2.44                            | 2.84       | 6.79       | 0.908         | 2.12                                                  | 3.45                                                  | 0.553                                                 |
| sand-stone  | 2.18                            | 12.7       | 24.6       | 1.13          | 1.81                                                  | 2.65                                                  | 1.37                                                  |

$$\frac{T-T_0}{T_0-T_0} = \frac{x}{l} + \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(T_0-T_0)}{(T_0-T_0)} \cdot \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{(2S-1)} \cdot e^{-\frac{(2S-1)^2 \pi^2}{l^2} t} \cdot \sin \frac{(2S-1)\pi}{l} \cdot x + \frac{2}{\pi} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(-1)^s}{S} \cdot e^{-\frac{S^2 \pi^2}{l^2} t} \cdot \sin \frac{S\pi}{l} \cdot x \quad (S=1,2,3,\dots) \quad (1)$$

となる。きれつのある場合のきれつ中、試料内の温度はきれつ部分のみから熱の伝導が行なわれ、試料上面からの熱の伝導はなく、しかも、きれつ壁面の熱伝導率が大きいと仮定すると、それぞれ

$$T_u = \operatorname{erfc} \left[ \frac{\frac{k \cdot x}{(\rho c)_f \cdot b}}{2U/\alpha(t-x/U)} \right] \quad (a) \quad T_v = \operatorname{erfc} \left[ \frac{\frac{k \cdot x}{(\rho c)_f \cdot b} + Z \cdot U}{2U/\alpha(t-x/U)} \right] \quad (b) \quad (2)$$

となる<sup>1)</sup>。ここに、 $T$ ,  $T_0$ ,  $T_1$ は試料内、上端、下端、および初期温度、 $x$ ,  $z$ は浸透または伝熱方向、きれつ面からの距離、 $l$ は試料長、 $\alpha$ は温度伝導率、 $\rho$ は密度、 $c$ は比熱、 $t$ は時間、 $k$ は熱伝導率、 $b$ はきれつ幅の $1/2$ 、 $U$ はきれつ中の浸透速度、 $T_u$ はきれつ中の温度、 $T_v$ はきれつ壁面からの伝導による試料内の温度である。図-2は砂岩の場合の理論的な温度分布を示したもので、(a)はきれつ中、(b), (c)はきれつから $0.01\text{m}$ ,  $0.02\text{m}$ 離れた点、(d)はきれつのない場合である。きれつのある(a), (b), (c)の場合を見るとある時間の伝熱範囲はきれつから離れるに従って小さくなっており、きれつからの距離が $0.02\text{m}$ の場合には特に顕著である。これはきれつ中の浸透流による影響がきれつ近傍で大きく、きれつから離れるに従って急激に小さくなることを示している。また、きれつのある場合となり場合(d)を見ると、(d)の場合初期の伝熱範囲はきれつからの距離が $0.02\text{m}$ より大きく、 $0.01\text{m}$ より小さくなっており、きれつから離れてる場合には試料上面からの伝熱の才が卓越する形になっている。図-3は浸透流速 $U = 4.79 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の砂岩のきれつ中とそれに直交する方向の点の温度上昇率を示したもので、それはきれつ、及び試料上端から離れるに従ってフラットになっている。もし、岩質物へのきれつからの熱の伝導がなければ、その位置にかかわらず左右対称なガウス分布の形式を示すはずであるがそうならない。これは図-2からも判るようにきれつからの伝熱がかなり起まっていることを示している。図-4は浸透流速 $U = 1.65 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の砂岩の場合の実験結果と測定条件を用いて式(1), (2)より求めた理論値を示したものである。"ず水の個所の測定値も各きれつ面、試料上面からの伝導の場合の理論値より温度は高くなっているが、試料上端から $0.075\text{m}$ の点の初めのオの温度は、きれつのない場合の理論値の方がきれつからの伝導の方より高くなっている。この部分が試料上面からの伝導が卓越している時間帯と考えられる。

#### 参考文献

- 1) H.S. CARLAW AND J.C. JAEGER: CONDUCTION OF HEAT IN SOLIDS, Oxford at the Clarendon Press, PP.88-126

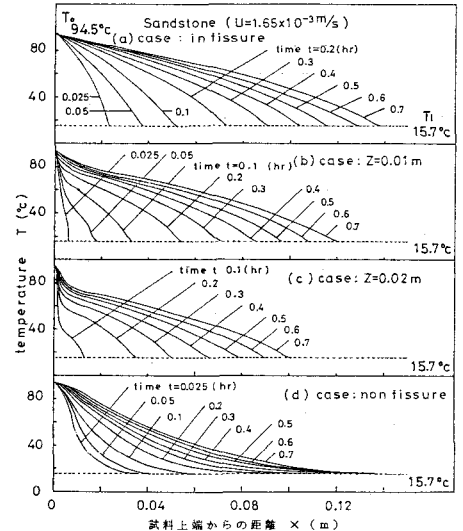


図-2 理論的な割れ目と周辺温度分布

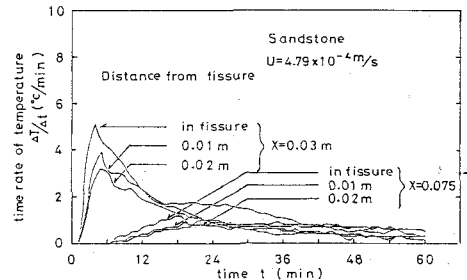


図-3 砂岩の場合の温度上昇率

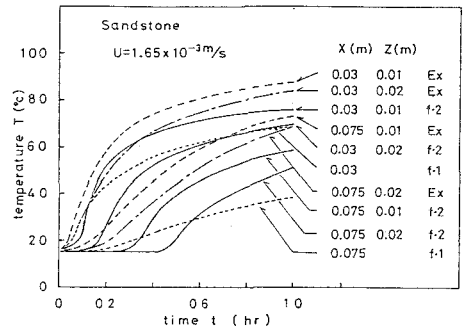


図-4 砂岩の場合の実験結果と理論値  
X: 試料上端から熱水浸透方向への距離 Z: き裂面と直交するき裂面からの距離 Ex: 実験値 f-1: 式(1)による理論値 f-2: 式(2)による理論値