

(15) 原位置での温度伝導率の測定（その2：原位置での測定結果の検討）

清水建設㈱研究所 正員 羽根 義 清水建設㈱研究所 正員○木下 直人
清水建設㈱土木技術部 正員 石井 卓 明治大学工学部 藤井 石根

§ 1 はじめに

本論文では、前論文で示された温度伝導率の測定法の応用例として、大谷石岩盤内に設けられた空洞壁面において温度伝導率を測定し、同じ場所からサンプリングした大谷石試料を用いた従来の測定法による測定結果、および熱伝導解析結果と比較することにより、その測定精度の検討をおこなった結果について述べる。

§ 2 大谷石岩盤の温度伝導率の測定結果

大谷石岩盤内に設けられた空洞は、幅約4m、高さ約3m、奥行約15mである。

温度センサの仕様は、図2.1に示すように、硬質塩化ビニールパイプ（外径18mm、内径13mm）に銅—コンスタンタン熱電対（0.2mmφ）を250mmピッチに4点設置した後、パイプ内部をセメントモルタルで充填したものである。

空洞側壁の奥行約5m、高さ約1.2mの位置において、水平方向に穿孔された直径25mm、深さ1050mmのボーリング孔に温度センサを挿入し、セメントモルタルで空隙を充填した。

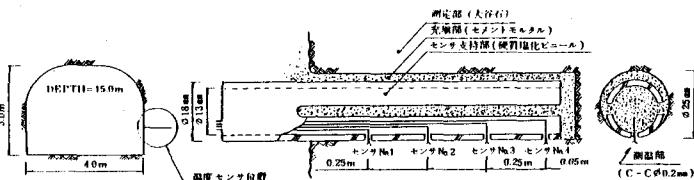


図2.1 温度センサの仕様

表2.1 各温度センサの回帰係数と相関係数

$\sigma(t) = A_0 + A_1t + A_2t^2 + A_3t^3$: t は時間(h), $\sigma(t)$ は温度(°C)

センサ	A_0	A_1	A_2	A_3	相関係数 r	サンプル数 N
No.1	8.348	-9.822×10^{-2}	5.800×10^{-4}	-1.464×10^{-6}	0.99950	185
No.2	10.936	-5.575×10^{-2}	1.700×10^{-4}	-2.770×10^{-7}	0.99961	185
No.3	11.170	-1.303×10^{-2}	-1.000×10^{-4}	3.540×10^{-7}	0.99926	185
No.4	11.100	7.300×10^{-4}	-9.000×10^{-5}	1.954×10^{-7}	0.99656	185

温度測定には、基準接点補償器内蔵の多点温度記録計（江藤電機製サーモダックⅢ，分解能0.1°C）を用いた。

空洞全体を冷凍機を用いて冷却し、約9日間わたって岩盤内の温度応答を測定した。実験開始時の空洞の温度は約11°C，相対湿度は約95～100%であった。

岩盤表面より250mm（センサNo.1），500mm（センサNo.2），750mm（センサNo.3），1000mm（センサNo.4）入った位置での1時間毎の各々の温度応答データを平滑化および補間するために、温度応答データの多項式回帰をおこなった。表2.1に、その回帰係数と相関係数を示す。

温度センサNo.1～No.3，およびNo.2～No.4の多項式回帰式による温度応答データ（ 10^{-4} 桁まで採用）を用いて温度伝導率を求めた結果を、それぞれ図2.2，図2.3に示す。前者では実験開始後80～135時間，後者では110～170時間における温度応答曲線を用いて温度伝導率を求めている。

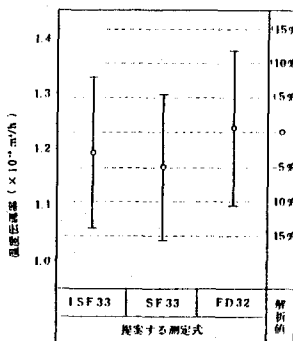


図2.2 原位置での温度伝導率の測定結果

（25cm—50cm—75cm）

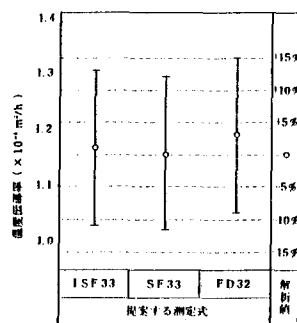


図2.3 原位置での温度伝導率の測定結果

（50cm—75cm—100cm）

図 2.2 および図 2.3 の解析値は、逆解析によって求めたものであり、各々 No.1 と No.3, No.2 と No.4 の温度を境界条件として、No.2 および No.3 の差分法による解析値と、実測データから得られた多項式回帰による値との差の平方和が最小になるような温度伝導率を表わしている。

図 2.2 および図 2.3 より、提案する測定式 ISF33, SF33, FD32 で測定された温度伝導率と解析値を比較すると、その差異はいずれも 5 % 以下であることがわかる。

§ 3 試料を用いた温度伝導率の測定結果

原位置における温度伝導率の測定結果を検討するために、同じ場所からサンプリングした 2 種類の試料（試料 A および試料 B）を用いて、半無限固体近似法¹⁾により、温度伝導率の測定実験をおこなった。測定方法は前論文と同様とした。

試料 A, B のそれぞれについて、以下に示すような条件下で温度伝導率の測定をおこなった。

条件 A－(Ⅰ) 試料 A を整形した後、約 2 日間ポリエチレンフィルムで包み室内に放置、試料をセットし、5℃, 95 % RH の恒温恒湿槽に 2 日間放置後、温度伝導率を測定。

条件 A－(Ⅱ) 条件 A－(Ⅰ) の測定終了後、更に 5℃, 95 % RH の恒温恒湿槽に約 2 週間放置し、温度伝導率を測定。

条件 A－(Ⅲ) 条件 A－(Ⅱ) の測定終了後、同試料を約 2 時間水中に放置。試料をセットし、全体をポリエチレンフィルムで包んだ状態で、5℃の恒温槽に 2 日間放置後、温度伝導率を測定。

条件 B－(Ⅰ) 試料 A と同じ場所から採取（ただし、試料 A よりやや表層に近い）した試料 B を整形した後、約 1 週間ポリエチレンフィルムで包み室内放置。試料をセットし、5℃, 50 % の恒温恒湿槽に 2 日間放置し、温度伝導率を測定。

条件 B－(Ⅱ) 条件 B－(Ⅰ) の測定終了後、同試料を約 2 時間水中に放置。試料をセットし、全体をポリエチレンフィルムで包んだ状態で、5℃の恒温槽に 2 日間放置後、温度伝導率を測定。

上記の条件下で測定して得られた温度伝導率の平均値と標準偏差を図 3.1 に示す。

B－(Ⅰ) と B－(Ⅱ) を比較することにより、大谷石のように空隙の多い岩石では、含水状態により温度伝導率が大きく異なることがわかる。また、試料 A と B の温度伝導率は約 20 % 異なっているが、これは、風化度等の違いによって生じているものと考えられる。

§ 4 温度伝導率の測定誤差

原位置において、本提案による測定法を用いて温度伝導率の測定をおこなうときの測定誤差の要因を表 4.1 に示す。

4.1 測定理論に基づく温度伝導率の測定誤差 (δ_T)

厳密解に基づく温度データを用いておこなった数値実験結果によれば、離散化フーリエ数 $a\Delta t/(\Delta x)^2$ が 0.5 ～ 3.0 の範囲内になるように適当に時間間隔 Δt (h) およびセンサ間隔 Δx (m) を定めれば、測定誤差 δ_T は

$$\delta_T = \pm 1.0 \text{ (％)} \quad \text{..... (4.1)}$$

となる。²⁾ ここで a は温度伝導率を表わしている。

4.2 温度センサ位置のずれに基づく温度伝導率の測定誤差 ($\delta_{\Delta x}$)

温度センサの位置のずれを Δx^* とすれば、熱の相似則により、温度伝導率の測定誤差 $\delta_{\Delta x}$ は

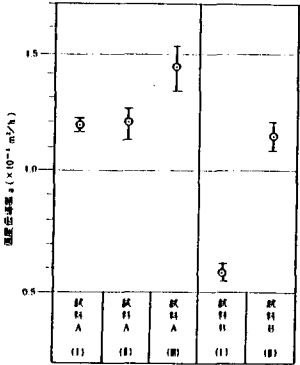


図 3.1 試料を用いた温度伝導率の測定結果

表 4.1 原位置での温度伝導率の測定誤差の要因

誤 差 の 要 因	温度伝導率の測定誤差(%)	温度の測定誤差(℃)
1. 測定理論に基づく誤差	δ_T	
2. センサ位置のずれに基づく誤差	$\delta_{\Delta x}$	
3. 測定時間間隔のずれに基づく誤差	$\delta_{\Delta t}$	
4. 熱源の大きさによる誤差		$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_S \\ \epsilon_R \\ \epsilon_B \\ \epsilon_D \end{array} \right.$
5. 熱源表面の粗滑度		
6. センサの熱慣性		
7. センサ・デテロガー		

$$\delta\Delta x = \left(1 - \frac{(\Delta x + \Delta x^*)^2}{\Delta x^2}\right) \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

となる。今回の測定における温度センサの位置のずれは1.0mm以下なので、 $\delta\Delta x$ は最大で0.8%である。

4.3 温度測定時間間隔のずれに基づく温度伝導率の測定誤差 ($\delta\Delta t$)

測定時間間隔のずれを Δt^* とすれば、熱の相似則により、温度伝導率の測定誤差 $\delta\Delta t$ は

$$\delta\Delta t = \left(1 - \frac{\Delta t}{\Delta t + \Delta t^*}\right) \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

となる。一般に、 Δt^* は Δt よりもはるかに小さいので、 $\delta\Delta t$ は無視できる。

4.4 熱源の大きさの影響による測定温度誤差 (ϵ_s)

原位置において温度伝導率を測定する場合、熱源の大きさは有限なので、多次元熱流が生ずる。熱源の大きさを S 、深度 x における1次元熱流による温度を $\theta_{x,1}$ 、多次元熱流による温度を $\theta_{x,M}$ 、熱源および無限位置での温度をそれぞれ θ_0 、 θ_∞ とし、測定温度誤差 ϵ_s を次式で表わすものとする。

$$\epsilon_s = \frac{\theta_{x,M} - \theta_{x,1}}{\theta_0 - \theta_\infty} \times 100 \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

ϵ_s はある深さにおいて最大となるが、その深さにおける ϵ_s を数値実験により求めた結果を図4.1に示す。

4.5 熱源表面の粗滑度による測定温度誤差 (ϵ_R)

原位置において温度伝導率を測定する場合、熱源表面は必ずしも滑らかでなく、その結果複雑な熱流が生じ、正しい温度分布が得られない場合がある。そこで、最も危険側に考えて、表面を図4.2の左上に示すようにモデル化し、数値実験により測定温度誤差 ϵ_R を求めてみた。 ϵ_R が最大となる深度において、 $D/W = 2.0$ の場合について ϵ_R を求めた結果を図4.2に示す。

4.6 センサ埋設により生ずる熱橋による測定温度誤差 (ϵ_B)

センサ部分と測定対象部分(岩盤)との熱物性の差異により、多次元熱流が生じ(熱橋)、その結果測定温度誤差が生ずる。センサ部分の半径を10mmとし、センサの深度 x およびセンサの温度伝導率 a_s と測定対象部分の温度伝導率 a_i の比をパラメータにとって、数値実験により測定温度誤差 ϵ_B を求めた結果を図4.3に示す。

4.7 温度センサおよび温度測定機器の誤差 (ϵ_D)

温度センサおよび温度測定機器による温度測定誤差 ϵ_D を次式で表わすものとする。

$$\epsilon_D = \frac{(\theta - \theta^*)}{\theta_0 - \theta_\infty} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

ここで、 θ は真の温度、 θ^* は誤差を含んだ測定値である。

4.8 測定温度誤差($\epsilon_{\theta_{max}}$)と測定温度伝導率誤差($\delta\theta_{max}$)

との関係および温度伝導率の最大誤差(δ_{max})

4.4から4.7によって得られた測定温度誤差の和

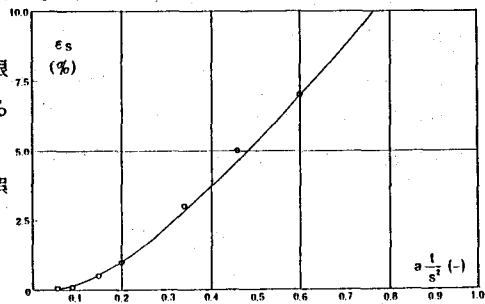


図4.1 熱源の大きさの影響による測定温度誤差

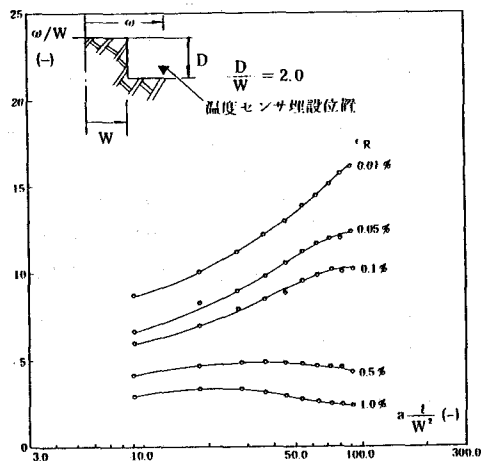


図4.2 熱源表面の粗滑度による測定温度誤差 ($D/W = 2.0$)

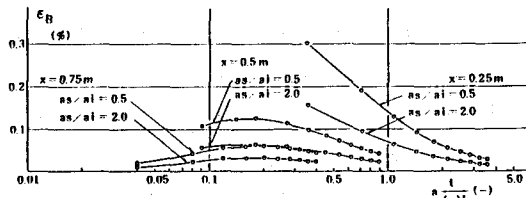


図4.3 温度センサ埋設により生ずる熱橋による測定温度誤差

$|\epsilon_{\theta \max}| \leq |\epsilon_g| + |\epsilon_R| + |\epsilon_n| + |\epsilon_D|$ と、測定温度伝導率の誤差 ($\delta_{\theta \max}$) との関係を図 4.4 に示す。また、温度伝導率の最大誤差 $|\delta_{\max}|$ は次式で表わされる。

$$|\delta_{\max}| \leq |\delta_T| + |\delta \Delta x| + |\delta \Delta t| + |\delta_{\theta \max}| \cdots (4.6)$$

4.9 原位置での温度伝導率の測定誤差

表 4.2 に原位置での温度伝導率の測定誤差を示す。

表 4.2 より、温度センサの深度が 25cm～75cm での領域において提案する測定式 ISF33, SF33, FD32 を用いて測定をおこなった温度伝導率の最大誤差は 11.2～11.3 % であり一方、温度センサの深度が 50cm～100cm の領域において測定された温度伝導率の最大誤差は 11.6～11.8 % であり、十分な測定精度で、原位置での温度伝導率が測定された。

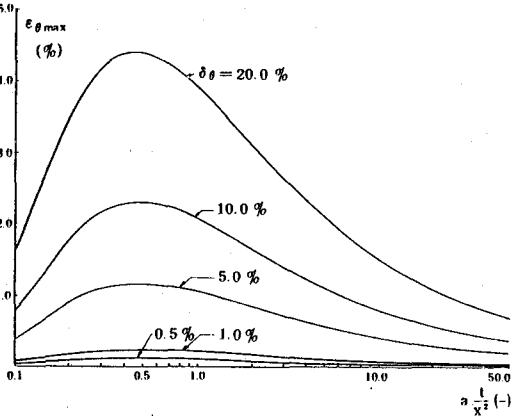


図 4.4 測定温度誤差 ($\epsilon_{\theta \max}$) と測定温度伝導誤差 ($\delta \theta$) との関係

表 4.2 原位置での温度伝導率の測定誤差 (25cm—50cm—75cm)

解析値 a_s (m^2/hr)	1.2301 $\times 10^{-3}$																	
提案する測定式	ISF33						SF33						FD32					
測定値 a_e (m^2/hr)	1.1933 $\times 10^{-3}$						1.1682 $\times 10^{-3}$						1.2371 $\times 10^{-3}$					
$(a_s - a_e)/a_s \times 100(\%)$	-2.992						-5.032						0.569					
離散化フーリエ数 (-)	0.5155						0.5046						0.5344					
測定時刻 (h)	80		135				80		135				80		135			
ϵ_D (%)	0.56						0.56						0.56					
ϵ_g (%)	0.08		0.27				0.08		0.25				0.08		0.28			
ϵ_n (%)	1.00		0.92				1.0		0.92				6.0		0.91			
表面からの深度 (cm)	25	50	75	25	50	75	25	50	75	25	50	75	25	50	75	25	50	75
ϵ_D (%)	0.09	0.17	0.07	0.05	0.07	0.07	0.09	0.11	0.07	0.05	0.07	0.07	0.09	0.17	0.07	0.05	0.07	0.06
ϵ_{max} (%)	1.73	1.80	1.71	1.80	1.82	1.82	1.73	1.75	1.70	1.78	1.80	1.79	1.73	1.80	1.70	1.80	1.82	1.81
δ_{max} (%)	9.6	7.9	10.9	12.1	8.0	8.5	9.4	7.6	10.9	12.0	7.9	8.4	9.6	7.8	10.5	12.4	8.0	8.4
平均 δ_{max} (%)	11.3						11.2						11.2					

§ 5 考察および結論

筆者らが提案した温度伝導率の測定式を用いて、大谷石岩盤において温度伝導率の測定をおこなった結果、解析値と比較して5 %程度しか差異はなかった。また、種々の要因に基づく測定誤差について検討した結果、最大でも 12 %程度の測定誤差であることがわかった。したがって、この方法を用いることにより、原位置において、十分な精度で温度伝導率を測定できると結論される。

また、小試料を用いた温度伝導率の測定結果によれば、ほぼ同一の場所から採取した試料であっても、風化度等の違いにより約 1.2 倍、また、同じ試料でも含水状態の違いにより約 2 倍の温度伝導率の差がみられた。このことは、小試料を用いた従来の方法により原位置の温度伝導率を推定すると、かなりの誤差を含む可能性があることを示しており、この点からも、原位置で直接温度伝導率を測定できる本方法が有効であると結論される。

参考文献

- (1) 片山ら：日本機械学会論文報告集，34 巻，267 号，1968
- (2) 羽根：清水建設研究所報，38 号，1983

(15) A METHOD OF IN-SITU THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT (II)

The Research Institute of Shimizu Construction Co., Ltd.,
HANE Tadashi, KINOSHITA Naoto

Construction Technology Department Civil Engineering Division of Shimizu Construction

ISHII Takashi

Department of Mechanical Engineering, Meiji University

FUJII Iwane

In general, small specimen is frequently used for the thermal properties measurement, but thermal diffusivity for actual structures vary too much with water content of a material, the related temperature and applied thermal boundary conditions.

Therefore, the measured thermal diffusivity using small specimen is not always reliable.

Under such circumstances, a new and simpler measurement method of in-situ thermal diffusivity has been studied by the authors.

In this paper, through the application of this method to the actual cavern located at Ohya region in Tochigi prefecture, the accuracy of this method is discussed.

Then, the other experiments were performed using the specimen sampled the same cavern to compare the results with those already obtained for actual cavern.

The testing conditions on specimens are as follows;

Condition A-(I) First the specimen A was entirely wrapped with polyethylene film and kept for several days under the conditions of the room.

Then, it was in a constant temperature and humidity (5°C, 95%RH) for two days.

Condition A-(II) The specimen A-(II) is the same specimen A, used for the previous experiment, it was kept in constant temperature and humidity (5°C, 95%RH) for two weeks.

Condition A-(III) The specimen A-(III), used for the experiments, it was left in the water for two hours.

It was wrapped with polyethylene film, it was kept in constant temperature and humidity (5°C, 95%RH) for two days.

Condition B-(I) The another specimen B was also sampled from the same cavern.

It was wrapped with polyethylene film, left in the room for a week, and kept in constant temperature and humidity (5°C, 50%RH) for two weeks.

Condition B-(II) The specimen B-(II), used for the experiments, was left in the water for two hours.

Then, after wrapping with polyethylene film, it was kept in constant temperature and humidity (5°C, 50%RH) for two weeks.

In these experiments, it is concluded that the measurement of in-situ diffusivity is possible with adequate accuracy.

On the other hands, it is recognized that usual method for thermal diffusivity measurement would never give representative values for actual structures.