

岩の伝熱および熱水浸透流による熱拡散係数の実験的研究

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF ROCK THERMAL DIFFUSIVITIES WITH DIFFERENT HYDRAULIC CONDITIONS

佐藤 邦明*・佐々木康夫**

By Kuniaki SATO and Yasuo SASAKI

When we deal with the heat transfer problems in rock ground, the evaluation of heat transfer parameters becomes important as well as the determination of hydraulic parameters such as the permeability and storage coefficient. This paper presents how to determine the thermal diffusivity of rocks having different hydraulic conditions in a laboratory, and the values of thermal diffusivities with six kinds of rocks collected from different locations in this country were determined by using two inherent apparatuses. The utility of the apparatuses proposed in this paper was confirmed, and the rock thermal diffusivities were $0.333 \times 10^{-6} \sim 1.19 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ for many kinds of rocks.

1. はじめに

地熱, 地下エネルギー工学的諸問題などに係って岩石, 岩盤中の伝熱, 熱水水理問題は重要性を増しつつある. この種の熱諸問題を扱う際, 熱拡散係数や熱伝導率などの伝熱パラメーターは基本的に大切となり, 技術的のみならず科学的にも岩種や水理条件によってどうなるかあらかじめ知っておく必要がある. 従来, 熱拡散係数と熱伝導率はほとんど定常伝熱によって, 特定の多孔体や岩石について実験的に決定された経過がある. たとえば, Kunii, D. and Smith, J. M. (1961)¹⁾, Combarous, M. and Bories, S. (1975)²⁾, 松本・大久保 (1977)³⁾, 佐藤・佐々木 (1984)⁴⁾によるものがある. 一方, 最近に至って, これらパラメーターを非定常伝熱実験によって決定したものに, 佐藤 (1982)⁵⁾, Firdauss, M., Maalej, M. and Belin, B. (1983)⁶⁾, 佐藤・佐々木 (1983)⁷⁾がみられる. しかし, 岩の風化の程度, 含水状態, さらに熱水浸透流を伴う場合に伝熱パラメーターがどうなるか, 実験的研究が望まれているのが現状である.

物理学的に, 岩の伝熱は岩質部分の伝熱, 割れ目・クラック系の流体伝熱, 移流伝熱, 流体と岩質間の熱交換, および輻射からなる. しかし, 周知のように岩石の場合, 空隙率は砂やガラス球充填層のようなものに比べて十分小さいから, 伝導とクラック・割れ目中の流体伝熱が支配的となる. いうまでもなくクラックや割れ目系の構造は風化や岩石の生成プロセスに依存し, 伝熱は水理条件 (たとえば含水状態, 移流など) にも関係してくる. 従来得られている伝熱パラメーターの値自体は乾燥状態でしかも限られた岩種についてのみならず, 実用上伝熱方程式を現地へ応用しようとする際, いろいろな岩種, 水理条件における値が包括的に必要となってくる.

本研究はこのような背景にあって, 特殊に設計された2種類の岩伝熱装置を用いて, 本邦で代表的と思われる6種の岩石を採取し, 新鮮岩, 風化岩に関して水理条件をいろいろ変えて66個の岩石サンプルの伝熱パラメーターを実験的に決定した. そこで, これら多数の実験結果を実用上使いやすいように整理した. 非定常伝熱によって岩の伝熱パラメーターをどのように決定するかと, 併せ得られた値が実際上大変有効であると思われたのでここに報告する.

* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部地盤水理実験施設 (〒336 埼玉県浦和市下大久保 255)

** 正会員 三菱金属(株)中央研究所 (埼玉大学研究生) (〒330 埼玉県大宮市北袋町 1-297)

2. 実験に用いる基礎式とその解

一般に、岩盤自身は岩質とクラック・割れ目からなっており、乾燥状態で熱はこの両者を同時に伝わる。もし、岩盤が水に飽和されたとすれば、熱は岩石、クラック・割れ目系のみならず、流体や対流によっても伝わる。周知のように、対流には2つのタイプがあり、1つは流体密度差によるいわゆる自然対流であり、他は強制対流である。普通の岩石では空隙率が小さく、クラック系の間隙寸法も大きくないから、自然対流は発生・成長しにくい。そこで、小クラック程度を含む乾燥岩石や水で満たされた飽和岩石の伝熱を取り扱う場合、そのような小クラックの影響や局部的な伝熱の異方性を平均化した等価パラメーターを導入して、均質・連続固体の伝熱と同様に扱うと便利である。この考え方を導入すれば、均質・連続固体の一次元伝熱にフーリエの伝熱方程式を適用することが可能となり、クラックの存在や飽和水の伝熱に与える影響を熱拡散係数によって量的に簡便評価することができる。

一方、岩盤中を熱水が浸透しつつ伝熱するような場合は流れによる強制対流が上述の伝熱に加えて起こることになる。こういった場合はフーリエの伝熱方程式に対流項を付加した伝熱方程式が適用し得ることとなる。このようなことを踏まえて本論の実験では次の2つの場合に分けて伝熱実験を行い、別々の基礎式の条件から解を得て、適用する。

- 1) 均質・連続固体の伝熱
- 2) 強制対流項のある均質・連続固体の伝熱

以下これら2つの場合の基礎式、条件および解を提示しておくこととしよう。

(1) 均質・連続固体の伝熱方程式とその解

もし岩石が均質・連続固体とすれば、伝熱方程式は、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad a = \frac{\kappa}{\rho c} \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここに、 T ：温度、 t ：時間、 x ：座標、 κ ：熱伝導率、 c 、 ρ ：おのおの等価比熱、密度、 a ：熱拡散係数である。

式(1)の伝熱パラメーターは含水状態、岩種、クラック・割れ目の存在によって変わる。式(1)の解は条件 $x=0, T=T_0, t \geq 0$ } $x=l, T=T_1, t \geq 0$ } $t=0, T=T_i, x > 0$ } \dots\dots\dots (2)

のもとで

$$\frac{T-T_0}{T_1-T_0} = \frac{x}{l} + \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(T_1-T_0)}{(T_1-T_0)} \cdot \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{(2s-1)} \cdot e^{-a \frac{(2s-1)^2 \pi^2}{l^2} t} \cdot \sin \frac{(2s-1)\pi}{l} x$$

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

となる。ここに、 T_0, T_1 ：おのおの $x=0$ 、および $x=l$ での境界温度であり、 T_i ： $t=0$ での初期温度、 l ：岩石試料の長さ、である。

(2) 強制対流項のある均質・連続固体の伝熱方程式とその解

岩石が均質・連続固体であるとし、一方向一様強制対流があるとすれば、一次元伝熱方程式は

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{(\rho c)_f}{(\rho c)} u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\kappa}{(\rho c)} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで、 u ：平均移流速度、添字 f は流体の熱容量値を表わす。

式(4)において、一定移流速度 u は温度の違った流体が飽和岩石中へ浸入する流速であり、左辺第2項の $(\rho c)_f/(\rho c)$ は流れている流体の熱容量 $(\rho c)_f$ と流体・岩石の共存状態における熱容量 (ρc) の比を表わし、熱伝導率 κ はすでに述べた等価値である。式(4)の解は条件

$$\left. \begin{aligned} X=0, \theta=1, \tau \geq 0 \\ X=1, \theta=0, \tau \geq 0 \\ \tau=0, \theta=0, X > 0 \end{aligned} \right\}, \quad X = \frac{x}{l}, \quad \tau = \frac{ut}{l}$$

$$\xi = \frac{a}{lu}, \quad \epsilon = \frac{(\rho c)_f}{(\rho c)}, \quad \theta = \frac{(T-T_i)}{(T_0-T_i)} \dots\dots\dots (5)$$

のもとで

$$\theta = \frac{e^{\xi x} - e^{-\xi x}}{1 - e^{-\xi}} - \sum_{s=1}^{\infty} \frac{2}{s\pi} \frac{1}{\left[\left(\frac{\epsilon}{2\xi s\pi} \right)^2 + 1 \right]} \cdot e^{\xi x} \cdot \sin(s\pi x) \cdot e^{-\xi \left[s^2 \pi^2 + \left(\frac{\epsilon}{2\xi} \right)^2 \right] \tau} \dots\dots\dots (6)$$

のようになる⁵⁾。

式(3)と(6)から熱拡散係数の値を決定するためには理論条件式(2)、(5)と同じ条件下で実験を行い、岩石試料中の温度の経時変化と解曲線を比較して best fit curve を得る手順が合理的である。

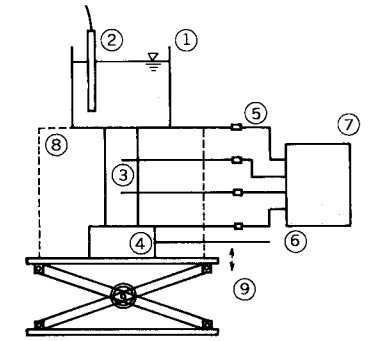
3. 実験装置、実験方法および岩石試料

岩石の熱拡散係数を決定するため、2種の伝熱実験が行われるが、装置の詳細および実験方法はおのおの次のようである。

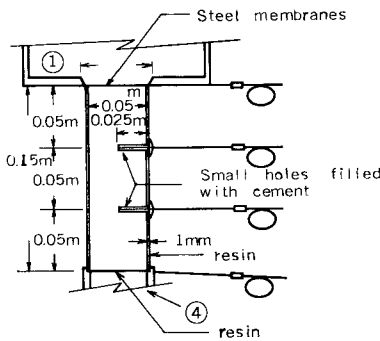
(1) 岩石の伝熱実験装置

Fig. 1(a) は乾燥、飽和岩石の伝熱を計る実験の装置の概略である。

本装置は、①熱水タンク（直径0.30 m、高さ0.30 mの鋼鉄製であり定温熱源）、②電気ヒーター（電圧200 V、容量5 kW）、③岩石試料（直径0.055 m、高さ0.15 m）、④下部定温デスク（直径0.055 m、高さ0.055 mの鋼鉄



(a) System of measurement



(b) Detail of rock sample setting

Fig. 1 Schematic presentation of apparatus for measuring heat conduction of rock.

製であり定温源), ⑤サーミスターセンサー (直径 3.2 mm, 長さ 0.25 m), ⑥冷却水, ⑦自動温度記録計 (タカラ自動温度集録装置 K-700, 36 チャンネル, 0.10°C 精度), ⑧断熱材 (発泡スチロール), ⑨可動台 (ホイールの回転により鉛直方向上下動可能である). これらの装置は 1. で述べた理論境界条件式 (2) と同じ条件を与えるように作られており, ②電気ヒーターによって熱水タンク中の水は 100°C の定温に保たれ, 岩石試料の下端は定温水の循環する下部定温デスクによって一定温度に保たれる. また, 岩石試料中の温度の経時変化は 2 本のサーミスターセンサーにより計られ, 試料上下端の定温は念のため 2 本のセンサーによって確かめられる. サーミスターセンサーは岩石の上端から 0.05, 0.10 m の点の深さ 0.025 m の直径 4.0 mm の小孔中に設置され, センサー元端から樹脂で充てん, 埋め込まれる (Fig. 1 (b) 参照).

実験は次の手順で行われる. まず, 乾燥岩石試料が飽和岩石試料かかいずれかにサーミスターセンサーを所定の位置に設置した後, 断熱材中へ収納して, 下部定温デスクに試料下部が接着固定される. 次に自動温度記録装

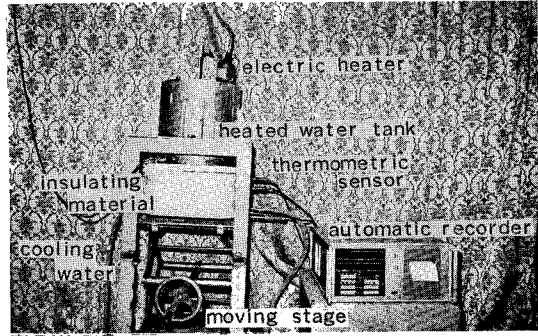


Photo 1 Picture of apparatus for measuring thermal diffusivity of dried and saturated rocks.

置を結線した後, 可動台上に岩石試料が置かれ, 可動台にあるホイールの回転によって岩石試料の上面が熱水タンクの下面に接触される. この岩石試料の上面と熱源との接触抵抗を少なくするため, Fig. 1 (b) のように薄いメンブレンが用いられた. このようにして, 岩石中と境界の温度の経時変化が計られる.

Photo 1 には実験装置の全景を示し, 各部の名称も示されている.

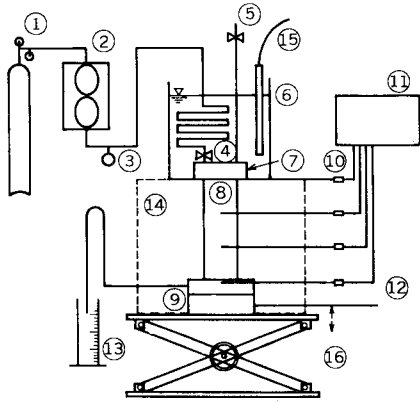
(2) 浸透流を伴う伝熱実験装置

Fig. 2 (a) は浸透流 (熱水の強制対流) を伴う伝熱の実験装置の概略を示したものである.

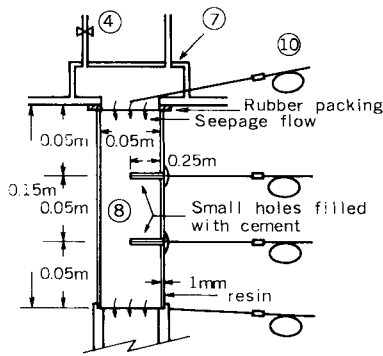
実験装置の詳細とそのシステムは次のようである.

①ガスタンク (浸透流の水圧を発生させるために用い, 窒素ガスで最大発生ガス圧は 14.7 MN/m²), ②圧力タンク (ガスタンクから導かれた窒素ガス圧をゴムバルーンの膨張に変えて水圧を得る, 直径 0.30 m, 高さ 0.50 m の鋼鉄製), ③圧力調整バルブ, ④, ⑤バルブ, ⑥熱水タンク (直径 0.30 m, 高さ 0.30 m), ⑦水圧デスク (高水圧の浸透熱水源となり, 直径 0.06 m, 高さ 0.06 m), ⑧岩石試料 (直径 0.055 m, 高さ 0.15 m), ⑨下部定温デスク (直径 0.06 m, 高さ 0.055 m), ⑩サーミスターセンサー (直径 3.2 mm, 長さ 0.25 m), ⑪自動温度記録計 (タカラ自動温度集録装置 K-700, 36 チャンネル, 0.10°C 精度), ⑫冷却水, ⑬メスシリンダー, ⑭断熱材, ⑮電気ヒーター (電圧 200 V, 容量 5 kW), ⑯可動台, からなっている. ⑥に示した熱水タンクは沸騰を伴う熱水で 100°C に保たれる. また, 岩石試料の断熱, およびサーミスターセンサーの設定位置は Fig. 2 (b) に示したようである.

実験の手順は次のようである. まず, 岩石試料は純水中で完全に飽和させた後, サーミスター挿入孔に水が満たされた状態でセンサーを挿入し, 樹脂で充てん設置する. 断熱材に岩石試料を収納したら, 下部定温デスクに試料下面を密着固定させる. そこで, 岩石試料を可動台



(a) System of measurement



(b) Detail of rock sample

Fig. 2 Schematic presentation of apparatus for measuring heat conduction accompanied with seepage flow in rock.

に置き、可動台のホイールを回転させて、温度自動記録装置を移動させるやいなや岩石試料上端を水圧デスクに圧着・固定する。ついですみやかに熱水バルブを開放して熱水浸透を起こして、浸透流を伴う伝熱による岩石試料中の温度の経時変化を測定するわけである。

Fig. 2(b)を参照して、岩石試料の最上部の水密、下端の定温条件の仕方、およびサーミスターセンサーの設定状態を知ることができる。熱水の浸透流量はメスシリンダーもしくはビューレットで計ることができる。

Photo 2は実験装置の全景を各部の名称とともに示している。

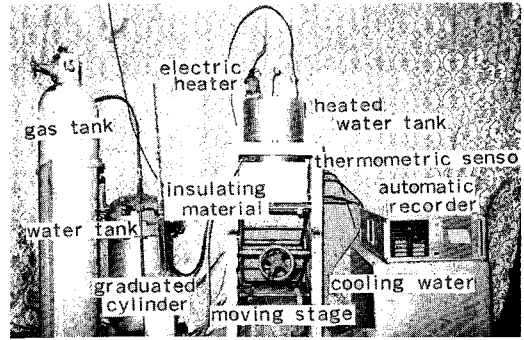
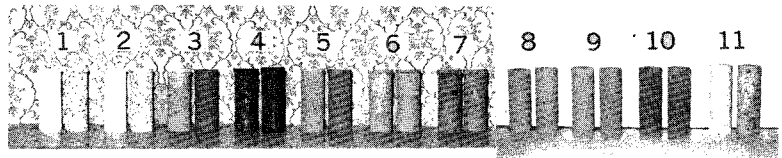


Photo 2 Picture of apparatus for measuring diffusivity of rock sample accompanied with seepage flow.

(3) 岩石試料と岩石物性

伝熱実験には6種の岩石試料が用いられた。これら岩石は本邦8か所から採取された代表的岩石である。岩石は凝灰岩として福島県産の白河、江持凝灰岩、栃木県産の大谷凝灰岩、花崗岩として岡山県産と茨城県産の花崗岩、兵庫県産の玄武岩、千葉県産の粗粒、細粒砂岩、和歌山県産の頁岩、神奈川県産の安山岩である。実験に用いられたすべての岩石試料は2種類に大別される。1つは採取されたままの自然状態（新鮮）のもの、他は実験室内における加熱（600°C、または200°C）と冷却（15°C）を履歴させた、いわゆる人工強熱風化と呼ばれるものである。

Table 1(a)には岩石試料の吸水率、空隙率、透水係数、比熱、密度などの物性が一括示されている。一般的には強熱風化によって吸水率、空隙率、透水係数は増加し、密度は減少する。また、岩石の色彩は強熱風化によって変化する。



- 1 Granite (Ibaraki prefecture)
- 2 Granite (Okayama pre.)
- 3 Basalt (Hyogo pre.)
- 4 Sandstone (Chiba pre.); Coarse grains
- 5 Sandstone (Chiba pre.); fine grains
- 6 Shale (Wakayama pre.); heat flow normal to layers
- 7 Shale (Wakayama pre.); heat flow parallel to layers
- 8 Tuff (Fukushima pre.); Shirakawa tuff
- 9 Tuff (Fukushima pre.); Emochi tuff
- 10 Andesite (Kanagawa pre.)
- 11 Tuff (Tochigi pre.); Ohya stone

Left samples are non-weathered, and right samples are weathered.

Photo 3 Test samples of rocks.

岩石試料は約1週間純水で脱気飽和させ、浸透流を伴う伝熱の場合には1mmの厚さに樹脂で円周方向を被覆し、加圧による漏水を防止している。空隙率、吸水率の測定はいわゆる液浸法による。伝熱物性として大切となる比熱は、容量 $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ の断熱ボックスを用いて求めた。それは、断熱ボックス中に純水を入れ、加熱岩石を投入し、十分時間が経過後の温度を計ると、次式によって比熱 c は

$$c = \frac{m_w(T_2 - T_1)}{m_s(T_0 - T_s)} \quad (7)$$

より求まる。ここに、 m_w 、 m_s ：おのおの純水および岩石試料の質量、 T_0 ：岩石試料の初期温度、 T_1 、 T_2 ：おのおの純水の初期、終期温度である。すべての岩石試料66個の岩石物性はTable 1にまとめて示されており、自然岩石33個、人工強熱風化33個であった。岩石試料はPhoto 3に番号を付して示したので概観することができよう。各番号の左側が自然状態のものであって、右側が強熱風化したもので、風化によって色彩が変化していることがわかる。

4. 実験結果と熱拡散係数の決定

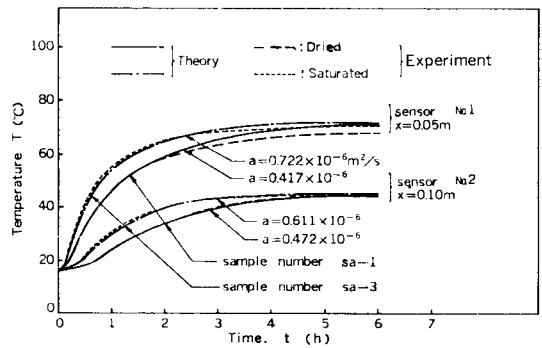
全岩石試料66個について試料中2点で温度の経時変化が計られたわけであるが、それら測定結果は非常に似たものになっているので乾燥状態、飽和状態および熱水浸透を伴う伝熱経時変化の代表的な結果として、砂岩の場合の結果をFig. 3に示すこととした。温度の経時変化を測定した位置は岩石試料上端から $x_1=0.05 \text{ m}$ 、 $x_2=0.10 \text{ m}$ である。

温度の経時変化は乾燥、飽和状態の場合は十分時間が経過した定常状態では、 $T = T_0 + (T_1 - T_0) \cdot x/l$ (T_0 、 T_1 ：おのおの岩石試料の初期、終期温度)となる。すべての実験結果からすると、定常状態に至る時間は3~4時間後であった。また、すべての実験結果によると、 $x=0.05 \text{ m}$ 、 $x=0.10 \text{ m}$ 点での実測定常温度は理論のそれらと±5%以内で合致していた。Fig. 3(a)は乾燥状態における自然状態試料 S_a-1 、 S_a-3 の温度の経時変化を示している。試料 S_a-1 と S_a-3 の違いはおのおの粗粒、細粒岩の違いがあるだけであるが、 S_a-3 の経時変化は S_a-1 のそれより構成粒子が細粒のため、温度の時間増加率が大きいことがわかる。これは岩石の構造や造岩鉱物によって伝熱速度が違ってくることをはっきり示しているものといえよう。

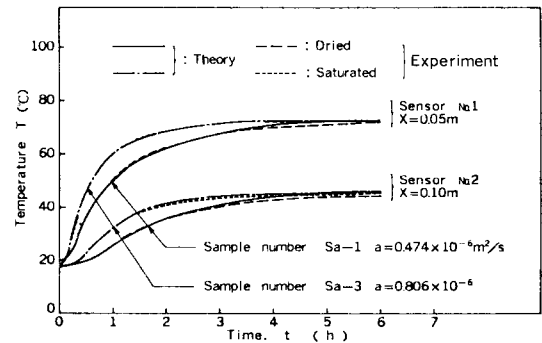
Fig. 3(b)は同様に飽和状態における温度の経時変化を示したものであるが、これらによると、乾燥状態における温度の経時変化に比べて飽和水の存在のため温度の時間増加率が大きいことが注目される。さらに、Fig. 3(c)は風化砂岩 S_a-2 、 S_a-4 の場合の浸透流を伴う温度の

経時変化を示したものである。これらの結果は初期における温度の経時変化を示しているが、時間が経過するにつれて浸透熱水のフロントが通過してしまうため、後述する熱拡散係数決定の都合もあって0~24分間の変化を描いたものである。

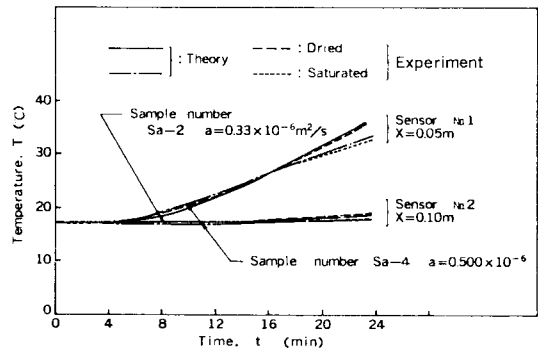
そこで、1.で述べた式(3)、式(6)を用いて熱拡散係数 a の値を乾燥、飽和状態および浸透流を伴う場合について求めてみることにする。



(a) Temperature change with time of non-weathered sandstone in case of dried and saturated conditions.



(b) Temperature change with time of weathered sandstone in case of dried and saturated conditions.



(c) Temperature change with time accompanied with seepage flow in case of sandstone.

Fig. 3 Some results of temperature change with time and best fitting curves.

Table 1 Rock sample properties and results of measurement.

(a) Rock samples and their properties

Name of rocks	Sampling locations	Sample number	Weathering conditions	Testing conditions	Water absorbing capacity (%)	Porosity (%)	density ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	Permeability (m/s)	Seepage Velocity (m/s)	Specific heat (KJ/kg \cdot K)
Granites	Ibaraki Prefecture	G-1	non-Weathered	dried	0.228	0.603	2.64	—	—	0.808
				Saturated Seepage	0.228	0.603	2.64			0.816
	Okayama Prefecture	G-2	Weathered (600°C)	dried	1.85(0.322)	4.69(0.874)	2.53	1.45×10^{-8}	9.00×10^{-6}	0.833
				Saturated Seepage	1.85(0.322)	4.69(0.874)	2.58			0.846
Basalt	Hyogo Prefecture	B-1	non-Weathered	dried	2.63	6.24	2.38	—	—	0.854
				Saturated Seepage	2.63	6.24	2.44			0.908
Sand-Stones	Chiba Prefecture (Coarse grains)	Sa-1	non-Weathered	dried	24.4	40.2	1.65	3.82×10^{-5}	5.02×10^{-5}	1.005
				Saturated Seepage	24.4	40.2	2.05			1.532
	Chiba Prefecture (fine grains)	Sa-2	Weathered (600°C)	dried	23.8(22.8)	40.1(39.0)	1.68	6.24×10^{-6}	8.05×10^{-6}	0.887
				Saturated Seepage	23.8(22.8)	40.1(39.0)	2.09			1.302
Shales	Wakayama Prefecture (heat flow normal to layers)	S-1	non-Weathered	dried	0.129	0.527	2.74	—	—	0.921
				Saturated Seepage	0.129	0.527	2.75			0.867
Tuffs	Fukushima Prefecture (Shirakawa tuff)	T-1	non-Weathered	dried	9.43	19.5	2.06	9.18×10^{-10}	6.59×10^{-7}	0.841
				Saturated Seepage	9.43	19.5	2.26			0.971
	Fukushima Prefecture (Emochi tuff)	T-2	Weathered (600°C)	dried	11.1	22.8(19.5)	2.05	5.54×10^{-9}	3.08×10^{-6}	0.787
				Saturated Seepage	11.1	22.8(19.5)	2.27			0.984
Andesite	Kanagawa Prefecture	A-1	non-Weathered	dried	9.63	19.6	2.17	5.44×10^{-7}	2.37×10^{-5}	0.820
				Saturated Seepage	9.63	19.6	2.37			0.896
Tuffs	Tochigi Prefecture (Ohya stone)	T-3	non-Weathered	dried	11.3	22.8	2.01	2.14×10^{-8}	1.19×10^{-5}	0.812
				Saturated Seepage	11.3	22.8	2.24			1.000
Shales	Wakayama Prefecture (heat flow Parallel to layers)	S-2	Weathered (200°C)	dried	0.196(0.181)	0.538(0.497)	2.74	—	—	0.938
				Saturated Seepage	0.196(0.181)	0.538(0.497)	2.74			0.837
Tuffs	Fukushima Prefecture (Shirakawa tuff)	T-4	Weathered (600°C)	dried	12.5	25.0(22.6)	1.99	6.85×10^{-8}	4.02×10^{-5}	0.804
				Saturated Seepage	12.5	25.0(22.6)	2.24			1.034
Andesite	Kanagawa Prefecture	A-2	Weathered (600°C)	dried	10.3	21.9(20.6)	2.11	2.67×10^{-5}	1.22×10^{-4}	0.846
				Saturated Seepage	10.3	21.9(20.6)	2.33			0.933
Note: Values of water absorbing capacity and porosity in bracket are those of initial condition before weathering.										

(b) Results of measurement

Name of rocks	Sampling locations	Sample number	Weathering conditions	Testing conditions	Thermal conductivities (w/m·K)			Thermal diffusivities (x10 ⁻⁶ m ² /s)		
					No.1	No.2	Average	No.1	No.2	Average
					X ₁ =0.05m	X ₂ =0.10m		X ₁ =0.05m	X ₂ =0.10m	
Granites	Ibaraki Prefecture	G-1	non-Weathered	dried Saturated Seepage	1.48 1.79	2.07 2.09	1.78 1.94	0.694 0.833	0.972 —	0.833 0.903
		G-2	Weathered (600°C)	dried Saturated Seepage	2.05 2.00 1.94	1.93 1.81 1.94	1.99 1.91 1.94	0.972 0.917 0.889	0.917 0.833 0.889	0.945 0.875 0.889
	Okayama Prefecture	G-3	non-Weathered	dried Saturated Seepage	2.21 2.38	2.40 2.56	2.30 2.48	1.03 1.14	1.11 1.22	1.07 1.18
		G-4	Weathered (600°C)	dried Saturated Seepage	1.97 2.38 1.61	1.97 2.38 1.61	1.97 2.38 1.61	0.919 1.03 0.694	0.919 1.03 0.694	0.917 1.03 0.694
Basalt	Hyogo Prefecture	B-1	non-Weathered	dried Saturated Seepage	1.70 2.34	1.86 2.09	1.78 2.21	0.833 1.06	0.915 0.944	0.875 1.00
		B-2	Weathered (600°C)	dried Saturated Seepage	1.45 2.02 1.71	1.57 1.84 1.71	1.51 1.93 1.71	0.722 0.885 0.750	0.778 0.806 0.750	0.750 0.847 0.750
Sand-Stones	Chiba Prefecture (Coarse grains)	Sa-1	non-Weathered	dried Saturated Seepage	0.691 1.49 1.13	0.783 1.49 1.13	0.737 1.49 1.13	0.417 0.474 0.361	0.472 0.474 0.361	0.444 0.474 0.361
		Sa-2	Weathered (600°C)	dried Saturated Seepage	0.745 1.21 0.907	0.745 1.21 0.907	0.745 1.21 0.907	0.500 0.444 0.333	0.500 0.444 0.333	0.500 0.444 0.333
	Chiba Prefecture (fine grains)	Sa-3	non-Weathered	dried Saturated Seepage	1.07 1.99	1.27 1.99	1.16 1.99	0.611 0.806	0.722 0.806	0.667 0.806
		Sa-4	Weathered (600°C)	dried Saturated Seepage	1.34 1.92 1.33	1.34 1.92 1.33	1.34 1.92 1.33	0.778 0.722 0.500	0.778 0.722 0.500	0.778 0.722 0.500
Shales	Wakayama Prefecture (heat flow normal to layers)	S-1	non-Weathered	dried Saturated Seepage	2.45 2.71	2.73 2.91	2.59 2.81	0.972 1.14	1.08 1.22	1.03 1.18
		S-2	Weathered (200°C)	dried Saturated Seepage	3.00 2.67	3.00 2.67	3.00 2.67	1.17 1.17	1.17 1.17	1.17 1.17
	Wakayama Prefecture (heat flow parallel to layers)	S-3	non-Weathered	dried Saturated Seepage	2.88 3.16	3.02 3.16	2.95 3.16	1.11 1.19	1.17 1.19	1.14 1.19
		S-4	Weathered (200°C)	dried Saturated Seepage	2.94 2.66	3.08 2.79	3.01 2.72	1.17 1.11	1.22 1.17	1.19 1.14
Tuffs	Fukushima Prefecture (Shirakawa tuff)	T-1	non-Weathered	dried Saturated Seepage	1.08 1.83 1.28	1.33 1.71 1.34	1.21 1.77 1.31	0.625 0.833 0.583	0.764 0.778 0.611	0.694 0.806 0.597
		T-2	Weathered (600°C)	dried Saturated Seepage	0.826 1.44 1.15	0.896 1.43 1.24	0.861 1.43 1.20	0.514 0.644 0.514	0.556 0.639 0.556	0.535 0.642 0.535
	Fukushima Prefecture (Emochi tuff)	T-3	non-Weathered	dried Saturated Seepage	0.512 1.12 1.37	0.814 1.37 1.37	0.663 1.24 1.37	0.319 0.500 0.611	0.500 0.611 0.611	0.410 0.556 0.611
		T-4	Weathered (600°C)	dried Saturated Seepage	0.930 1.67 2.19	1.07 1.67 1.93	1.00 1.67 2.06	0.583 0.722 0.944	0.667 0.722 0.833	0.625 0.722 0.889
	Tochigi Prefecture (Ohya stone)	T-5	non-Weathered	dried Saturated Seepage	0.454 1.70	0.628 1.28	0.535 1.49	0.278 0.667	0.389 0.500	0.333 0.611
		T-6	Weathered (600°C)	dried Saturated Seepage	0.523 0.779 1.09	0.686 0.849 1.03	0.605 0.814 1.14	0.333 0.319 0.444	0.431 0.347 0.486	0.383 0.333 0.467
Andesite	Kanagawa Prefecture	A-1	non-Weathered	dried Saturated Seepage	0.896 1.42 1.59	1.19 1.65 1.77	1.05 1.54 1.69	0.500 0.667 0.750	0.667 0.778 0.833	0.584 0.722 0.792
		A-2	Weathered (600°C)	dried Saturated Seepage	0.919 1.40 2.17	1.05 1.48 2.17	0.977 1.44 2.17	0.514 0.639 1.00	0.583 0.681 1.00	0.550 0.661 1.00

Note: Seepage flow doesn't occur under maximum pressure 0.98MN/m² in case of notation (—).

まず、乾燥、飽和状態の岩石試料の熱拡散係数 a の決定法を式 (3) から述べる。理論解の式 (3) と実験から得られた温度の経時変化を対比して a を決定するため、あらかじめ式 (3) に取り得る範囲の a の値を代入して、トレーシング紙上に a の値をパラメーターにとった解曲線群を描いておく。そこで、この解曲線群を描いた用紙を実験で得られた温度の経時変化曲線上に重ねて、best fitting curve を探し出すと、その場合の a の値が求めようとする熱拡散係数である。その場合、best fitting の判断は a の値に $a \pm 0.05 a$ の範囲内で決定・選定することとした。したがって、すべての a の値は $\pm 5\%$ の範囲内で決定されたものといえる。このようにして決定された a の値を用いて得られる解曲線と実験曲線の合致程度は Fig.3(a), (b) に示してある。解曲線と実験のそれはよい一致を示していることがわかる。Table 1 (b) にはこのようにして得られた a の値を一括してまとめて掲げてある。また同時に、熱伝導率 κ は、 $\kappa = \rho \cdot c \cdot a$ から決まり、やはり Table 1 (b) にまとめて示してある。Table 1 (b) からわかるように、熱拡散係数の値は乾燥状態において風化岩石の方がクラックの存在のため自然状態の値より小さくなっていることが明白である。さらに、飽和岩石の方が乾燥状態のそれより熱拡散係数の値が大きくなっていることも興味深い。また、岩石の種類による差異に注目すると、頁岩の a の値が全体に大きく、砂岩、凝灰岩のそれらは小さくなっている。いま、熱伝導率 κ および熱拡散係数 a の値と、空隙率 λ の関係に注目して、両者の相関を導入してみることにする。本実験で得られた κ と a のすべての値を Table 1 から空隙率とともに読み取り、その相関を示したものが Fig. 4, 5 である。Fig. 4, 5 からわかるように熱伝導率 κ と

空隙率 λ の関係を

$$\kappa = \alpha \cdot e^{-\beta \cdot \lambda} \dots \dots \dots (8)$$

とおき、熱拡散係数 a と λ の関係も同様に

$$a = \alpha' \cdot e^{-\beta' \cdot \lambda} \dots \dots \dots (9)$$

とおく。ここに、 $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$: 定数である。式 (8) における α, β の値は乾燥岩石については、相関係数 $R = 0.909$ で $\alpha = 2.39, \beta = 0.0348$ となり、飽和岩石では $R = 0.864, \alpha = 2.54, \beta = 0.0196$ となる。いうまでもなく、 κ は λ の増加により減少し、乾燥岩石より飽和のその方が κ は全体に大きくなるのが明瞭である。一方、

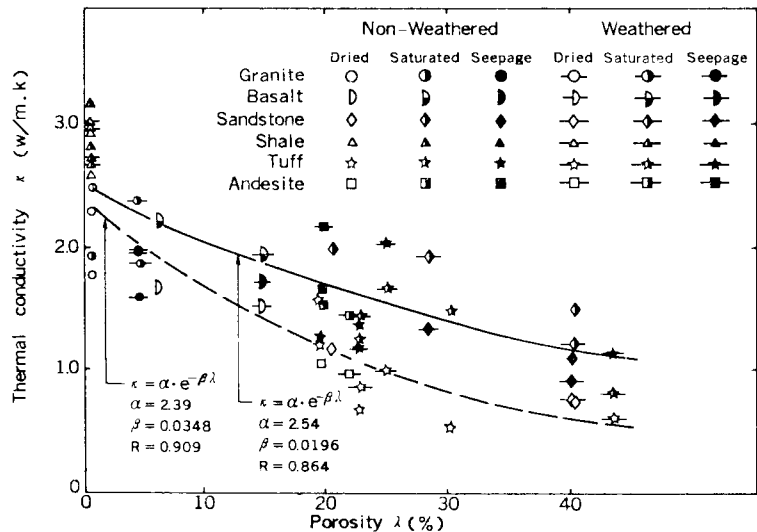


Fig. 4 Relationships between thermal conductivity (κ) and porosity (λ) in case of dried and saturated rocks.

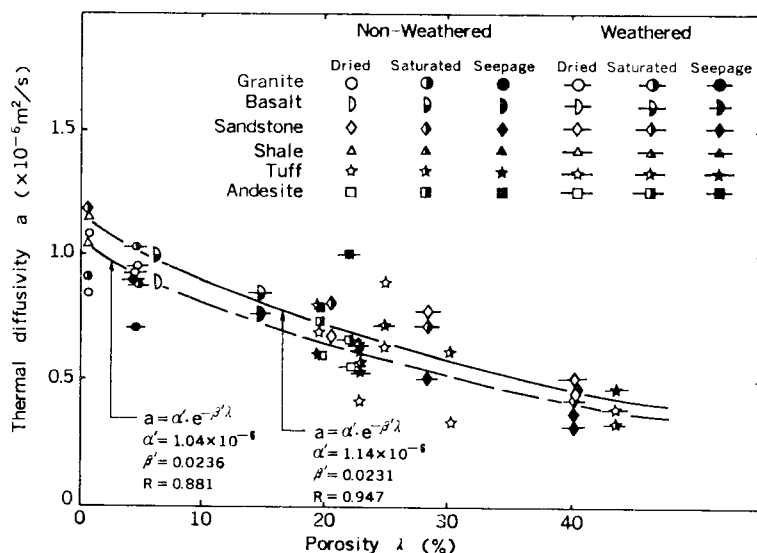


Fig. 5 Relationships between thermal diffusivity (a) and porosity (λ) in case of dried and saturated rocks.

からわかるように熱伝導率 κ と

熱拡散係数 a と λ の関係についても、乾燥岩石の場合、 $R=0.881$ 、 $\alpha'=1.04 \times 10^{-6}$ 、 $\beta'=0.0236$ となり、飽和の場合、 $R=0.947$ 、 $\alpha'=1.14 \times 10^{-6}$ 、 $\beta'=0.0231$ となり、 a は λ の増加につれて減少することがわかり、 $x \sim \lambda$ の場合と同様な傾向となっている。次に、熱水浸透を伴う場合についてみると、Fig. 4, Fig. 5 のいずれの場合も乾燥岩石や飽和岩石のように一定した傾向を示さず、かなりのばらつきが認められたため、乾燥岩石、飽和岩石のように α や β 、 R は求めていない。

式(8)、(9)の関係は実用上きわめて有効であって、 λ がわかれば x 、 a の値が容易に推察、概算できる。

次に、浸透流を伴う場合の熱拡散係数の a の値を式(6)からどのようにして求めるかを考えてみる。この場合も基本的には上述した乾燥、飽和岩石の場合と同様であって、あらかじめ式(6)の解曲線群を a をパラメーターとしてトレーシング紙上に描いておき、その曲線群を実験で得られた実験曲線上に重ねて、best fitting curve を決定すれば、 a の値は決まる。なぜなら、実験は理論式(6)を得た場合と同じ初期・境界条件のもとで実験が行われたから当然である。このようにして決定された a の値を用いて、理論曲線と実験のそれを比較したものが Fig. 3(c) である。実験結果と理論は非常によく一致していることが判読できよう。このようにして得られた a の値は同じく Table 1 にまとめて示されている。しかし、岩石によっては 0.98 MN/m^2 の水圧をかけて、1週間ほど放置しても浸透しなかったものもあったのでそのような試料の a の値は決定できなかった。Table 1 を参照すると、浸透流を伴う熱拡散係数の値は凝灰岩、花崗岩および玄武岩の場合、飽和岩のそれに比べやや大きい値をとっていることは注目に値する。これは岩石の微小クラックの空間構造による流路の分岐やクラックおよび流速の場所的違いなどによる、いわゆる流れの場の構造変化を反映しているものと思われる。しかし、一般論からして、透水係数の小さい岩石については、伝熱速度は飽和岩石の場合に比べて大差ないものと実験値から結論づけられよう。

5. 結 論

岩種、風化の程度、および水理条件による岩石の伝熱パラメーターは岩盤の伝熱問題を考える際に重要となることは冒頭に述べた。

本研究ではこのような伝熱の基本となるパラメーターを特殊設計された装置によっていかに決定するか、それら諸パラメーター間の関係がどうなるか、本邦で代表的な6種の岩石を用い66個について実験的に研究した。

本研究で得られた結論は次のように要約される。

- (1) 本論で用いた2種の特殊実験装置は岩石の伝熱パラメーターの決定に有効であった。
- (2) 乾燥状態の岩石の熱拡散係数、熱伝導率はクラック・割れ目の存在によって減少する。
- (3) 飽和状態の岩石の熱拡散係数はクラック・割れ目の存在によって増加し、強制対流によっても増加する。
- (4) 熱伝導率、熱拡散係数は空隙率の増加によって指数関数式に従って減少するという結果を得た。
- (5) 熱拡散係数は花崗岩で $0.694 \times 10^{-6} \sim 1.18 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、玄武岩で $0.750 \times 10^{-6} \sim 1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、砂岩で $0.333 \times 10^{-6} \sim 0.806 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、凝灰岩で $0.333 \times 10^{-6} \sim 0.889 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、および安山岩で $0.55 \times 10^{-6} \sim 1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲であった。

参 考 文 献

- 1) Kunii, D. and Smith, J. M. : Thermal Conductivities of porous rocks filled with stagnant fluid, J. Soc. Petro. Eng., Vol. 1, pp. 37~42, 1961.
- 2) Combarous, M. and Bories, S. : Hydrothermal convection in saturated porous media, Advances in Hydroscience, edited by Ven te Chow, Vol. 10, Academic Press, pp. 231~307, 1975.
- 3) 松本順一郎・大久保俊治：土の伝熱特性に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第257号，pp. 53~60, 1977.
- 4) 佐藤邦明・佐々木康夫：岩石・岩盤の伝熱パラメーターの測定について，土質工学会「土と基礎」，Vol. 32, No. 3, pp. 47~52, 1984.
- 5) 佐藤邦明：飽和多孔体及び温水浸透流における温度伝導率の実験的決定，土木学会論文報告集，第320号，pp. 57~65, 1982.
- 6) Firdauss, M., Maalej, M. and Belin, B. : Identification of the soil thermal diffusivity from the temperature in situ measurements in a semi-arid region, Numerical Methods in Thermal Problems, Proc. 3th International Conference, Pineridge Press, VK, pp. 219~226, 1983.
- 7) 佐藤邦明・佐々木康夫：岩盤熱水浸透流における温度伝導率の実験的研究，第27回土木学会水理講演会論文集，pp. 253~258, 1983.
- 8) 佐藤邦明：多孔媒体中の熱輸送に関する実験的研究，第26回土木学会水理講演会論文集，pp. 595~600, 1982.

(1984. 2. 25・受付)