

きれつ系岩盤の浸透流による伝熱・溶質分散に関する実験的研究
Experimental Study of Solute dispersion and
heat transport by Seepage flow in rock fracture

埼玉大学工学部 正会員 佐藤 邦明
三菱金属中央研究所 " ○佐々木 康夫

はじめに

岩盤における伝熱、溶質拡散・分散は岩石と割れ目系の両者で同時に起こるが、割れ目系の浸透流がそれらを支配することは明らかであり、岩石自体の伝熱、溶質分散に係わる水理パラメーターに加えて、きれつ系のそれを知る必要がある。そこで、本研究では岩盤中の割れ目が岩石自体の伝熱、溶質分散にどの程度付加的効果をもつかに注目し、硬岩と軟岩を用いて、単一割れ目中の移流伝熱、溶質分散実験を行なって、岩石と割れ目の伝熱、溶質分散特性、およびパラメーターを明らかにしようとしたものであり、きれつ系岩盤の浸透流による伝熱、溶質分散現象のモデル化の基礎となる結果を得たのでここに報告する。

1. 実験装置・岩石試料

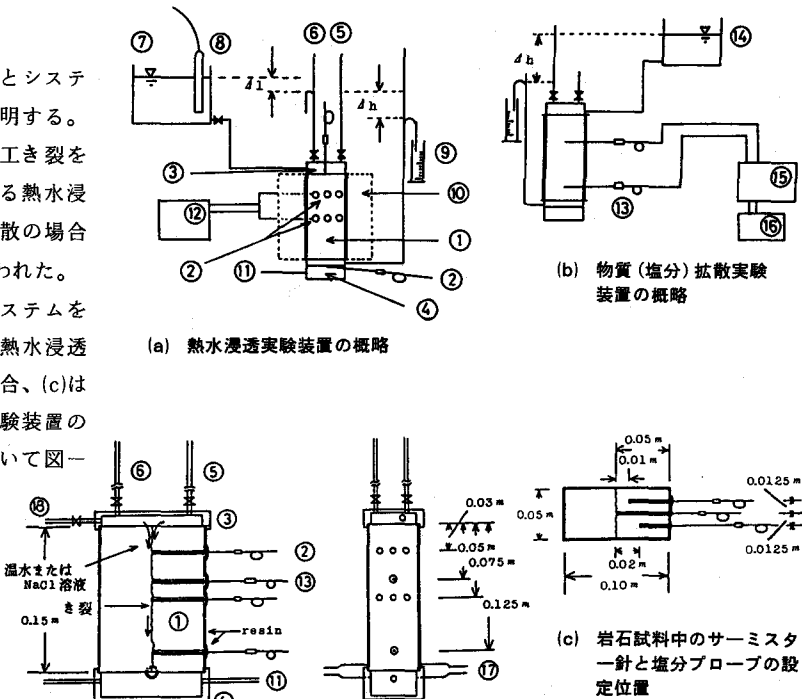
(1) 実験装置と実験方法

ここで、実験装置の概略とシステム、及び実験方法を順次説明する。

本実験では、大別して人工き裂を有する岩石のき裂中における熱水浸透の場合の伝熱と、物質拡散の場合の二つについて実験が行なわれた。

二つの実験装置の概略とシステムを図-1に示してあり、(a)は熱水浸透の場合、(b)は物質拡散の場合、(c)は試料部分の詳細である。実験装置の各部の機能と実験方法について図-1に従って説明する。

図-1中、装置の各部は番号に対応し、①岩石試料、②サーミスタブローブ針(径0.0032m、長さ0.25m)、③上部矩形板状恒温部、④下部矩形板状恒温部、⑤作用水頭指示パイプ(硬質透明パイプ)、⑥温水溢流パイプ、⑦温水タンク、⑧棒状電気ヒーター、⑨メスシリンダー、⑩断熱材(発泡スチロール)、⑪循環冷

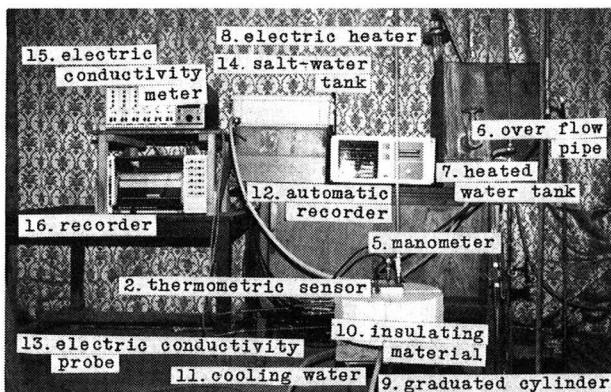


- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1. rock sample | 10. insulating material |
| 2. thermometric sensor | 11. cooling water |
| 3. upper constant temperature plate | 12. automatic recorder |
| 4. lower constant temperature plate | 13. electric conductivity probe |
| 5. manometer | 14. salt-water tank |
| 6. over flow pipe | 15. electric conductivity meter |
| 7. heated water tank | 16. recorder |
| 8. electric heater | 17. seepage water pipe |
| 9. graduated cylinder | 18. heated water supply pipe |

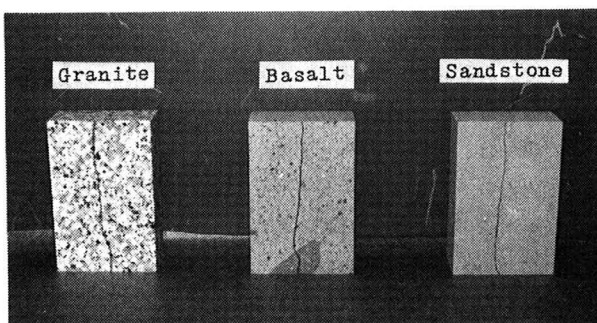
図-1 実験装置の概略

却水、⑭自動温度記録計、⑮電気伝導度測定プローブ針（径0.004m、長さ0.5m）、⑯塩水タンク、⑰電気伝導度計、⑱記録計、⑲浸透水集水パイプ、⑳温水供給パイプである（写真－1参照）。

まず、図－1、(a)に示す熱水浸透の実験では、③の上部矩形板状恒温部と④の下部矩形板状恒温部で定温差を与え、かつ試料中央部の人工き裂部分に③の上部矩形板状恒温部と同じ温度の温水を浸透させ、試料中のき裂、き裂から0.01m、0.02m離れた定点（試料上端から $x = 0.03\text{m}$ 、 0.075m ）の6箇所での温度の経時変化を測定する。実験手順は、圧裂引張試験の要領で中央部に人工的にき裂を生じさせた岩石を幅0.10m、厚さ0.05m、長さ0.15mの柱状に整形し、径0.004mのサーミスタープローブ針挿入孔と塩分拡散実験の場合の径0.006mのプローブ針挿入孔を所定の位置に穿孔する。つぎに、試料周囲とサーミスタープローブ針、電気伝導度用プローブ針を樹脂でコーデングおよび固結し、上・下面に矩形板状恒温部を樹脂で同様に固結する。この状態の試料を断熱材中に格納し、下部恒温部に冷却水を循環させ試料全体が冷却水の温度になるまで放置する。試料の温度が冷却水のそれとほぼ等しくなったら、温水タンクでヒーターにより加熱沸騰させてある温水を



写真－1 熱水浸透・物質拡散実験装置の各部



写真－2 岩石試料

水供給パイプを通じ、上部矩形恒温部に送りこみ、き裂中に熱水の浸透を起こさせると同時に自動温度記録計を作動させる。このような手順で試料中の温度の経時変化を計るが、上部矩形恒温部を実験時間中一定温度に保持するため、常に温水タンクから沸騰水を供給して、オーバーフローパイプから溢流させた。供給される温水量は両者の水頭差 Δh を調整して決定した。また、浸透水圧 Δh の大きさは、上部矩形恒温部に設けた作用水頭指示パイプの示す水頭と浸透水量測定用パイプの水頭差を読み取り用いた。

図－1(b)に示す物質（塩分）拡散実験では、⑭電気伝導度測定プローブ針（径0.004m、長さ0.5m）、⑯塩水タンク、⑰電気伝導度計、⑱記録計のみが熱水浸透実験装置に加わり、試料も同一のものをを用いた。プローブ針は人工的に生じさせたき裂の面の、試料上面から $x = 0.05\text{m}$ 、 0.125m の2箇所にて設けた。実験手順は、塩水タンクから上部矩形板状恒温部に塩水を送りこみ、き裂中に浸透を起こさせると同時に、電気伝導度計、記録計を作動させ実験を開始する。実験は電気伝導度が一定になるまで継続し、その時の作用浸透水圧は熱水浸透実験と同様に作用水頭指示パイプの示す水頭と浸透水量測定用パイプの水頭差を読み取り用いた。使用した溶液は濃度が0.1%、0.5%、1.0%の塩水である。

(2) 岩石試料とその物性

実験に用いた岩石試料は茨城県産の花崗岩、千葉県産の砂岩、兵庫県産の玄武岩で、花崗岩は中粒、砂岩

は比較的シルト分が多く、玄武岩は密度や空隙率などが示すように比較的変質の進んでいる岩石である。これらの岩石試料は透水実験の結果、いずれも実験時間内（100 時間前後）での浸透量は認められなかったもので、本実験におけるき裂中の浸透実験では基地への浸透はほとんど無視できると考えられる。岩石自体の物性値については、密度、空隙率、吸水率、比熱および飽和状態の温度伝導率が計られた。これらの値については本実験の結果と表－1 にまとめて示した。表中、空隙率 p と吸水率 w は液浸法により、岩石の比熱 c の

表－1 岩石試料の物性値と実験結果

試料名	密度 ρ ($\times 10^3$ kg/m ³)	空隙率 p (%)	吸水率 w (%)	比熱 c (kJ/ kg $\cdot$ K)	き裂つがない場合の伝熱実験						き裂つがある場合の伝熱実験		
					熱伝導率 κ (W/m $\cdot$ K)		温度伝導率 α ($\times 10^{-3}$ m ² /hr)		き裂幅 b ($\times 10^{-3}$ m)		浸透流速 $\bar{u}$ ($\times 10^{-3}$ m/s)	透水係数 k ($\times 10^{-3}$ m/s)	
					$x=0.05$ m	$x=0.10$ m	平均値	$x=0.05$ m	$x=0.10$ m	平均値	(き裂長さ l)		
花 崗 岩	2.64	0.553	0.202	0.816	2.75	2.87	2.81	4.6	4.8	4.7	0.431 (51.0)	2.00 4.16 4.44	3.06 3.18 2.00
玄 武 岩	2.44	6.79	2.86	0.908	2.15	2.09	2.12	3.5	3.4	3.45	0.553 (51.0)	3.87 5.60	29.5 28.6
砂 岩	2.18	24.6	12.7	1.13	1.85	1.78	1.81	2.7	2.6	2.65	1.37 (50.5)	0.479 1.13 1.65	0.738 0.869 0.846

試料名	実験 番号	拡散実験による浸透流速 u ($\times 10^{-4}$ m/s)			拡散係数 D ($\times 10^{-6}$ m ² /s)			透水係数 k ($\times 10^{-3}$ m/s)	レイノルズ数 Re ($\times 10^{-1}$)
		$x=0.05$ m	$x=0.125$ m	平均 値	$x=0.05$ m	$x=0.125$ m	平均 値		
花崗岩	G-1	5.81	26.6	16.2	6.45	31.7	19.1	8.67	9.80
	G-2	6.76	21.2	14.0	4.40	22.0	13.2	21.4	7.74
	G-3	3.08	8.99	6.04	3.37	7.92	5.65	3.53	3.51
玄武岩	B-1	0.690	3.45	2.07	0.327	4.93	2.63	87.4	1.36
	B-2	—	20.8	20.8	—	26.5	26.5	90.8	9.92
砂 岩	S-1	4.17	4.17	4.17	5.75	50.3	28.0	2.65	4.95
	S-2	3.46	3.46	3.46	1.68	11.6	6.64	2.66	4.02

測定は容量（0.16×0.2×0.08 m）の断熱箱の中に純水を1.5リッター程度入れ、別の温度の岩石試料を投入し、安定した断熱箱中の水の温度変化を計ることによって、 $c = m_w (T_2 - T_1) / m_s (T_0 - T_2)$ より決定した。ここに、 m_w 、 m_s ：各々水、岩石の質量、 T_0 ：岩石の初期温度、 T_1 、 T_2 ：各々初期、終期の温度である。

表－1 の空隙率 p 、吸水率 w 、比熱 c は花崗岩、玄武岩、砂岩の順に大きくなり、密度 ρ は逆にその順で小さくなっており、各々の岩石物性の違いがはっきりしていることがわかる。

2. 実験結果とその考察

(1) 実験結果

表－1 に示したように、大別して二種類の実験、つまり、一つは花崗岩、玄武岩、および砂岩の岩石試料の単一割れ目の伝熱実験 8 ケース、他は同じ岩石試料による単一割れ目の溶質（塩水）分散実験 7 ケースであった。ここではそれぞれの場合について得られた実験結果を示すことにしよう。

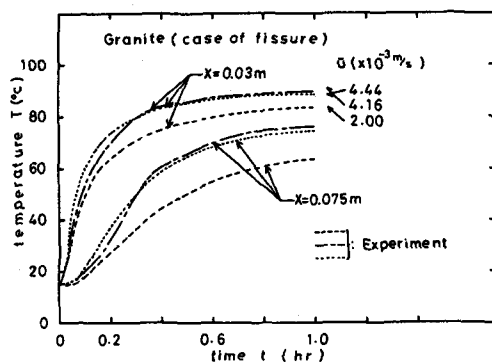
初めに、単一き裂つ中の上流端から $x=0.03$ m、 0.075 m の位置でのサームスタープローブにより計測された温度の経時変化を示したものが、図－3 である。図中、最上側は(a)花崗岩の場合であり、中段は(b)玄武岩の場合、最下側が(c)砂岩の場合である。縦軸が温度、横軸は経過時間であって、花崗岩では浸透流速 $\bar{u} = 4.44 \times 10^{-3}$ m/s、 4.16×10^{-3} m/s、 2.00×10^{-3} m/s の場合、玄武岩では $\bar{u} = 5.60 \times 10^{-3}$ m/s、 3.87×10^{-3} m/s の場合、砂岩では $\bar{u} = 1.65 \times 10^{-3}$ m/s、 1.13×10^{-3} m/s、 0.479×10^{-3} m/s の場合に分けて、単一き裂つ中の温水移流による温度の経時変化である。まず、測定された温度経時変化は測定位置 $x=0.03$ m の結

果の方が、 $x = 0.075$ mのそれらより、温度変化が早期に発生し、温度変化率が大いという共通した性質が認められる。この事は単一きれつ内の温水移流による伝熱を平行間隙中のそれと類似させて考えれば、当然と理解されるが、ただ単一きれつではあっても、きれつ内壁の凹凸のため、熱拡散が大いものと思われる。この事は温度の経時変化率 $\Delta T / \Delta t$ が初めのサーミスタープローブと二番目のそれとの差が 0.045 mであるにもかかわらず、二番目のプローブで得られたものの方がかなり、ゆるやかであることから判る。さらに、この事は平均流速 $\bar{u}$ の違いによっても明確に表われている。つまり、 $\bar{u}$ が大いほど温度変化の立ち上りが早い。

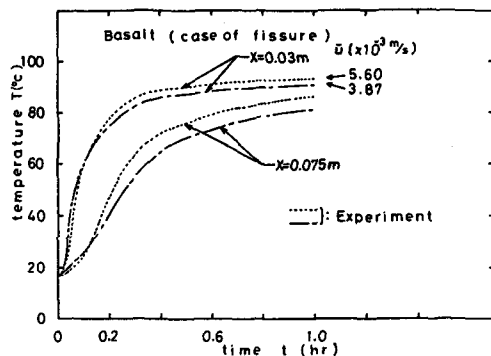
つぎに、砂岩の場合に注目して、図-3(c)に示した測定結果から、縦軸に温度変化の時間変化率、 $\Delta T / \Delta t$ をとり、横軸に時間 t をとって整理したものが図-4(a)である。ここで示した $\Delta T / \Delta t \sim t$ の関係から判るように、 $x = 0.03$ m の位置で計られたものと、 $x = 0.075$ m のそれでは明らかに違いが認められ、 $x = 0.075$ m の方が $\Delta T / \Delta t \sim t$ が一層フラットになっている。また、きれつ中の平均流速 $\bar{u}$ が小さいほどこの傾向が強いことがはっきりしている。さらに、もし、きれつの壁面へ向う岩石中への伝熱がなければ、測定位置や流速の大小にかかわらず、分布は左右対称のガウス分布となるはずであるが、岩石内への伝熱のため立ち上り部は $\Delta T / \Delta t$ が急であるのに、てい減部分ではゆっくりと減少しているのが特徴的である。この事をさらに明確に知るため、単一きれつに垂直方向に距離 $d = 0.01$ m、 0.02 m の位置に埋め込まれたサーミスタープローブで測定された温度の経時変化を図-3(c)と同じ場合について示したものが図-4(b)、(c)である。流下方向の距離 x にかかわらず、 $d = 0.01$ m、 0.02 m の場合共に平均流速 $\bar{u}$ が大いほど経時変化の立ち上りが早く、急激となっていることが明らかである。

以上、単一きれつ中を一定流速で流れる温水による伝熱は、まずきれつ中を移流によって速く運ばれ、つぎに、きれつ中の流れに垂直な岩石中に向う伝導がそれに遅れて始まる形式で起こることになる。図-3(a)、(b)、(c)と図-4(b)、(c)に示した温度の経時変化の測定結果からこの事を示している。

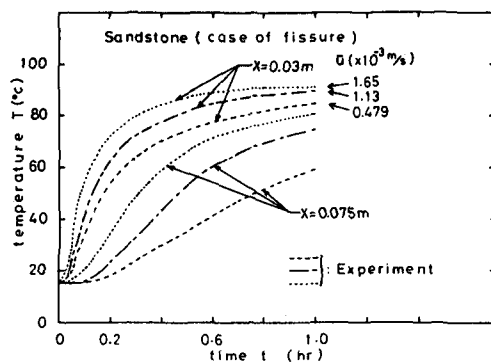
一方、伝熱の場合と同じ岩石試料を用いて、溶質拡散実験を行なった結果を示したものが図-5(a)、(b)、(c)であり、縦軸に比濃度 C/C_0 、横軸に時間 t をとり、流下距離 $x = 0.05$ m、 0.125 m の測定結果が示され



(a) 花崗岩の場合



(b) 玄武岩の場合



(c) 砂岩の場合

図-3 岩石きれつ中の温度の経時変化

ている。この結果によると、砂岩の場合は $C/C_0 \sim t$ 曲線が $x = 0.05\text{m}$ の方が 0.125m のそれに比べて早く立ち上っているが、花崗岩と玄武岩の場合は予測されるような結果とはなっていないことが判る。つまり、上流側の $C/C_0 \sim t$ 関係の方が遅く立ち上り、分散・拡散も大きくフラットとなっている。この事はきれつ幅が一定でない事、また塩分濃度測定プローブ針の先端が必ずしもきれつ中心を捉えていなかったことも考えられる。

(2) 考 察

上述した実験結果から単一きれつと岩石の伝熱が明らかになり、溶質のきれつ中の濃度の経時変化も示された。ここで、これらの結果に基づいて伝熱パラメータと分散係数について考えてみよう。

まず、きれつがない一様岩石の温度伝導率 a を一次元伝熱方程式によって求めてみると、解は、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \begin{matrix} x=0, T=T_0 & t \geq 0 \\ x=l, T=T_l & t \geq 0 \end{matrix}$$

$$a = \frac{\kappa}{\rho c} \quad t=0, T=T_i \quad x > 0$$

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

となる。ここで、 $s=1,2,3 \dots$, T : 温度、 T_0 : 上端温度、 T_l : 下端温度、 T_i : 初期温度、 x : 距離、 l : 試料長、 κ : 熱伝導率である。^{1), 2)}

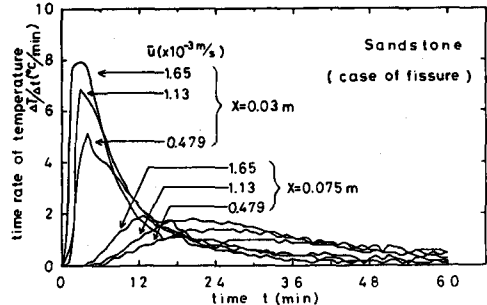
式(1)を用いて、解曲線と実験曲線から a の値を求めたものが、表-1に一括示されている。

つぎに、単一きれつ中の分散・拡散係数 D は、

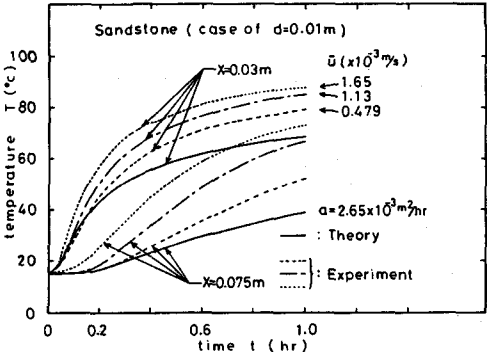
$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \begin{matrix} C(0, t) = C_0, & t \geq 0 \\ C(\infty, t) = 0, & t \geq 0 \\ C(x, 0) = 0, & x > 0 \end{matrix}$$

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x-ut}{2(Dt)^{1/2}} \right\} + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{ux}{D} \right) \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x+ut}{2(Dt)^{1/2}} \right\}, \quad (2)$$

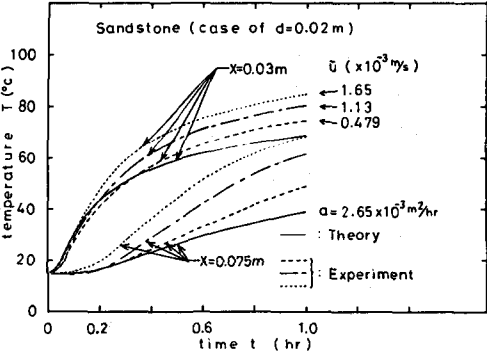
によって求める。ここに、 C : 濃度、 C_0 : 初期濃



(a) 砂岩の浸透速度の違いによるきれつ中の温度変化率

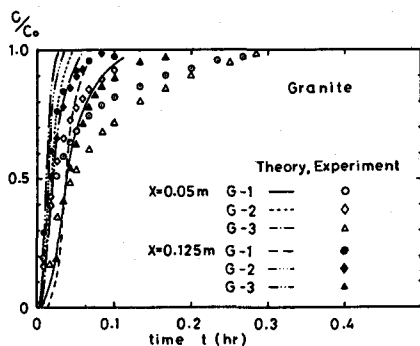


(b) きれつから 0.01 m 離れた位置の浸透速度の違いによる温度の経時変化

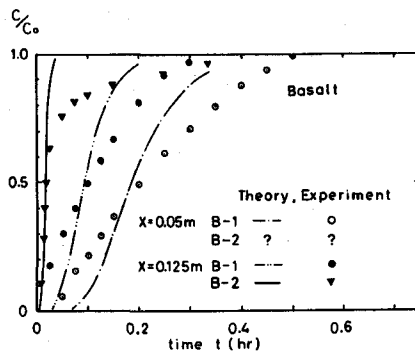


(c) きれつから 0.02 m 離れた位置の浸透速度の違いによる温度の経時変化

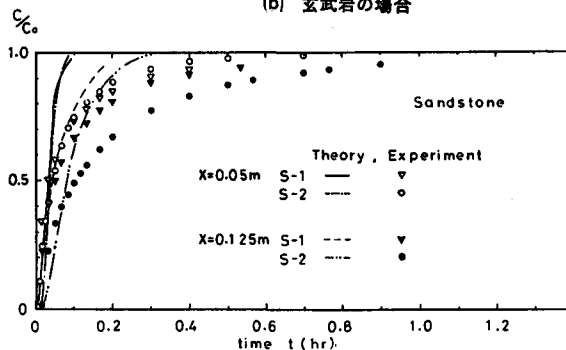
図-4 砂岩の場合のきれつ中の温度変化率ときれつからの距離の大きさによる温度の経時変化



(a) 花崗岩の場合



(b) 玄武岩の場合



(c) 砂岩の場合

図一五 きれつ中の理論破過曲線と実験値

度、 u : 流速である。

式(2)によって、解曲線と実測結果から D を求めたものが表一に示されているが、図一5には理論解の適応程度を示すため、表一で得られた拡散係数を用いた理論曲線が同時に示されている³⁾。岩石中への溶質拡散は砂岩の場合は考えられるが、花崗岩の場合は考えにくく、実測破過曲線の tail 効果は単一きれつに付随している微小クラックへの拡散によるものと判断される。

む す び

きれつ系岩盤の伝熱、溶質分散の物理機構を追求するための第一歩として、三種の岩石モデルに単一割れ目を設けて、割れ目浸透流による伝熱、溶質分散の経時変化を測定して、諸パラメーターの検討を行なった。きれつ系岩盤における移流熱輸送現象や溶質分散はいずれも、割れ目中で支配され、岩石中の熱輸送や分散は二次的であることが実験的に明らかにされたものと思うが、伝熱現象の場合は分散のそれといく分違った側面があり、割れ目中の流れの Reynolds が小さいと、岩石中の伝熱によって支配されることになる。本実験で得られた単一割れ目の場合の結果を用いて、一連の割れ目システムのモデルを行なっていきたい。

最後に、本研究の実験を進めるに当たって、埼玉大学工学部建設基礎工学科和栗肇君の助力があったことを記して心よりお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 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、土木学会第27回水理講演会論文集、1983.2 pp.253 ~ 258
- 2) 佐藤邦明：飽和多孔媒体およ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、1982、pp.57 ~ 65
- 3) 佐藤邦明・佐々木康夫：岩の溶質分散・拡散係数の実験的研究、土木学会第27回水理講演会論文集、1983.2 pp.265 ~ 270