

(9) 岩盤中に設けられた熱源近傍の非定常地下水流れに関する実験的研究

埼玉大学 工学部 正会員 ○ 渡辺邦夫
" " 学生 古川和也

はじめに

最近、岩盤中に各種放射性物質を貯蔵する計画がすすめられている。貯蔵における最大の問題は、それら物質の地下水へへの溶解と拡散状態の正確な評価であろう。この評価のためには、①貯蔵に伴って発生する熱の輸送、②周辺岩盤中の地下水流れ、③物質の溶解・拡散の3つの相互作用を十分把握しておかねばならない。熱の発生は一般に非定常性が強いと考えられ、また物質の溶解は、たとえば転倒攪拌型（いわゆる Dickson type）熱水反応装置¹⁾を用いた実験にみられるように、物質周辺の流れの状態に影響されると考えられる。したがって、この問題では貯蔵場所（熱源）近傍の非定常現象を十分調べておくことが重要であろう。このとき、岩盤は破砕帯などの割れ目を多く有し、非均質性の大きい場であることを十分認識しておく必要がある。今回の研究は、以上の観点から、前報²⁾にひきつづき、岩盤中の熱源近傍の非定常地下水流れと熱輸送の定性的な性質を実験によって基礎的に調べたものである。

1 従来の研究と問題点

熱と地下水流れとの相互作用については、従来から地熱工学などの分野で、理論・解析・実測各面からの研究がすすめられ、多大な成果があげられている³⁾。それらを基に、ある程度大きな岩盤中の熱と地下水流れが多く数値解析されている⁴⁾。広域岩盤においては、岩盤中には多数の割れ目があるものの、割れ目と岩塊（Intact rock、以下地山と表現する）の透水係数などの物性を平均化して取り扱うことが可能であり、また流れの局所的な乱れはほとんど無視しうる。たとえば図-1は筆者らの計算した例である。図では、水平方向に $1/1000$ の動水勾配のある 10°C 、透水係数 10^{-5}cm/s の花崗岩中に黒長方形で示す 200°C の熱源が設けられた場合の約半年後の地下水流速ベクトル分布を示している。岩盤大きさは $120\text{m} \times 270\text{m}$ を想定している。

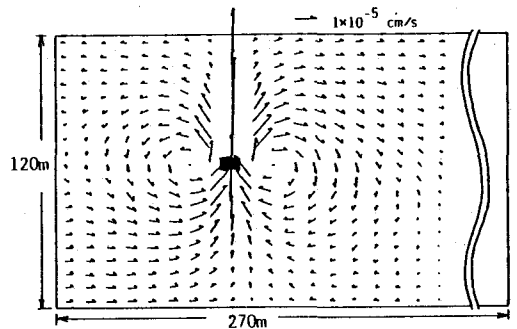


図-1 岩盤中の非定常地下水流れ解析例

一方、熱源のごく近傍のせいぜい 10m オーダーの小スケール場を対象にする場合は、破砕帯など1本1本の割れ目と地山との相互作用を詳しく解析することが必要となる。さらに、たとえば熱源直上部の高透水性割れ目中に想定される熱伝導層の崩壊などの不安定現象を調べるのが大事となる。このような場での流れを、ある程度対象としたものとして、たとえば Elder^{5), 6)} の数値解析に基づく研究や、Kassoy⁷⁾ の研究があげられる。しかし、これらも小スケールで不均質な岩盤という場を主要な対象としておらず、詳しい性質はまだ十分わかっていない。したがって、基礎的な実験を重ね、まず定性的な特徴を明らかにすることが必要と考える。

2 実験装置

用いた実験装置の模式図を図-1に示す。実験装置は基本的に底面にラバーヒーターをはりつけた土槽より成り、土槽中に種々のガラスビーズをつめて岩盤モデルとした。図中、斜線で示した中央部に破砕帯を考え、粒径の大きいガラスビーズ（粒径 $2.5 \sim 3.5\text{mm}$ 、 $1.5 \sim 2.5\text{mm}$ 、 $0.5 \sim 0.8\text{mm}$ の3種類）をつめた。一方、地山部には平

均粒径約0.1mmの細粒ガラスビーズをつめた。なお、破砕帯形状は、図示するような底面に直角なもの以外に、 θ° 傾斜したものを用いた。透水係数は前者が $10^{-1} \sim 10^0$ cm/s オーダー、後者が約 5.0×10^{-3} cm/s である。またガラス玉の熱伝導率は、約 6×10^{-3} J/cm $\cdot$ s $\cdot$ K、比熱は0.7J/g $\cdot$ K である。透水係数は実際の岩盤に比べてかなり大きい、定性的な現象の特徴を調べることはできよう。なお、ラバーヒーターにより与える熱フラックスは、スライダックスにより調節できる。下底面境界条件としては、従来一定温度境界がよく設定されてきたが、フラックスタイプの条件の方がより实际的であろう。

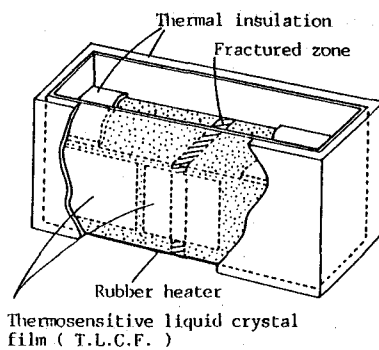


図-2 実験装置模式図

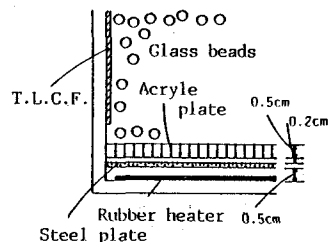


図-3 実験装置前面および底面付近の詳細図

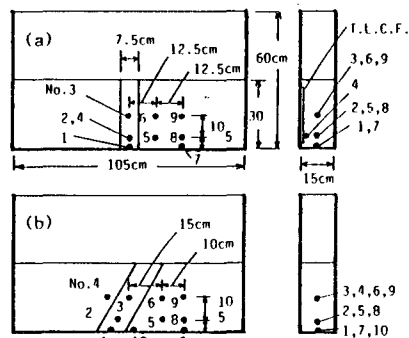


図-4 実験装置寸法およびサーミスターセンサーの配置図

土槽前面の裏側には、図に示すように感温液晶(Thermosensitive liquid crystal film, 以下適宜 T.L.C.F. と略す)がはりつけられ、土槽前面付近の2次元的な温度分布が調べられる。感温液晶フィルムは温度によって変色し、温度分布を可視化することができる。今回用いた液晶は、 17°C から 22°C までの間で虹のような7色が2サイクル変化するタイプである。また土槽は図に示すように周囲が発泡スチロール板で囲まれ、断熱されている。

図-3 は土槽前面および底面付近の詳細図である。ラバーヒーター上部にはステンレス板、アクリル板が図のように重ねられ、土槽全面に均一に熱フラックスが与えられる。さらに土槽中には9~10本のサーミスターセンサーがうめこまれ、土槽内温度の非定常変化を測定している。図-4 は、実験装置寸法およびサーミスターセンサーの配置図である。(a) は、破砕帯モデルが底面に直交している場合、(b) は 60° 傾斜している場合である。図中の黒丸はセンサー位置、数字はその番号を示している。以下温度計測結果の説明は、このセンサー番号、位置に基づいて行う。

3 実験結果

3-1 サーミスターセンサーによる温度変化測定

図-5 は図-4 (a) に示される実験モデルの非定常温度変化である。底面よりの熱フラックスは $0.38 \text{ cal/min}\cdot\text{cm}^2$ に設定した。図-5 (a) は破砕帯モデルのガラスビーズ径が $2.5 \sim 3.5 \text{ mm}$ と大きい場合であり、図-5 (b) は、 $0.5 \sim 0.8 \text{ mm}$ の場合である。実験開始時の初期温度は(a) 約 25°C 、(b) 約 12°C であった。(a) より、破砕帯中に置かれた NO. 2, 3 センサーが大変特徴的な変化を示していることがわかる。NO. 2 は、実験開始約4時間後より急激な温度上昇を示し、その約1時間後より逆に急速な温度低下を示した。NO. 3 では、約5時間後に急激な温度上昇がみられ、その約30分後よりゆっくりとした温度低下がみられる。同じ破砕帯中の NO. 1, NO. 4 でも、NO. 2, 3 程顕著ではないが一時的な温度低下を示す。これに対し、地山中のセンサー、たとえば NO. 5, 8 などは、図-4 (a) にみられるように、NO. 2, 4 と同じ高さにあるに聞はず、ほぼ連続した温度上昇を示す。この結果、6時間後では、NO. 2, 4 と NO. 5, 8 とは約 5°C の温度差が生じ、破砕帯中では低温となっている。逆に、同じ

高さのNO.3とNO.6では、破碎帯中のNO.3の方が約4~5℃高くなっている。さらに、同一破碎帯中でも同じ高さのNO.2,4の間に一時的に5℃程度の温度差が認められ、温度分布が様となっていないことがわかる。なお4~6時間後の平均的Rayleigh数を、モデル上下面の温度差により求めれば、特性長を岩盤モデル厚さとして、破碎帯内：約500、地山中：約1.0となる。Rayleigh数の大きさも考慮すると、NO.2,3で観察された急激な温度の上昇、低下は

水中の熱輸送を詳しく調べている浅枝ら^{8),9)}が報告しているように、熱源直上部に形成された高温の熱伝導層からのサーマルの上昇(プルーム)に起因する不安定現象と考えられる。一方、地山部では伝導による熱輸送が中心であり、破碎帯近傍(たとえばNO.6)を除いて一様な温度上昇を示す。

一方、図-5(b)は破碎帯部の粒径の小さい場合で、全体になめらかな温度上昇を示す。破碎帯中と地山中の同一高さの点、たとえばNO.2とNO.5,8とを比較するとやや地山中の方が高温である。しかし図-5(a)のような大きな差は認められない。なお、5~6時間後の破碎帯中のRayleigh数は約50の程度である。

図-6は2.5~3.5mm粒径を持つ破碎帯が60°傾斜した場合で図-4(b)に対応している。図-5(a)と同様、破碎帯部のNO.1, NO.2で温度の急上昇、低下が顕著に認められる。

図-5 サースターセンサーによる温度変化(図-4(a)モデル)

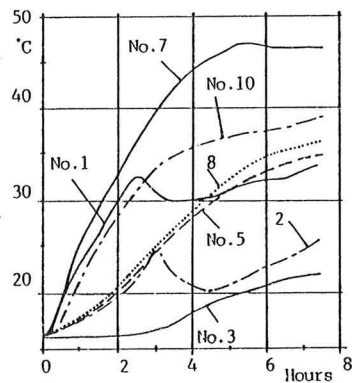
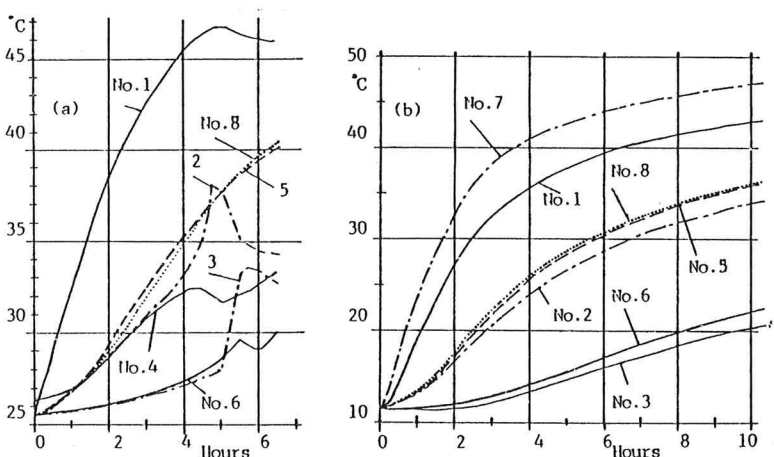


図-6 破碎帯が傾斜した場合の温度変化(図-4(b))

3-2 感温液晶フィルムによる温度分布の可視化

つぎに感温液晶フィルムによって調べられた土槽前面付近の非定常温度変化について述べる。感温液晶フィルムの同一色調部分は等温線に対応しており、2次元の温度分布をたやすく可視化しうる。図-7(a), (b)は、それぞれ図-5(a), (b)に対応した条件での4時間半、7時間後の状態である。ただし、図-7(a)は、初期温度16℃からはじめている。まず(a)から、破碎帯部温度が熱源付近において、地山部に比べ大きく低下していることが明瞭に認められる。これは、破碎帯部におけるプルームの発生によって、熱量が急速に上方に運ばれ、

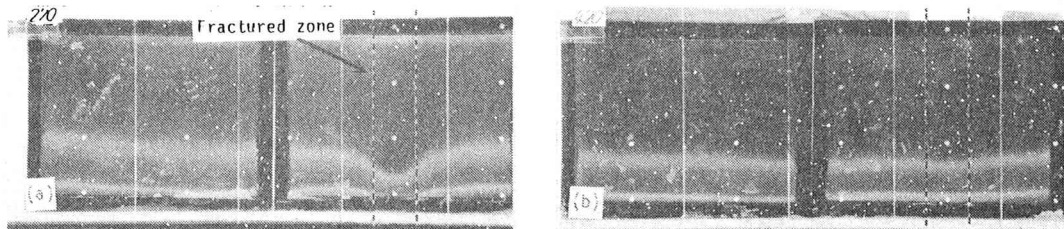


図-7 感温液晶フィルムにみられる温度分布、(a)は図-5(a)、(b)は図-5(b)にそれぞれ対応する。

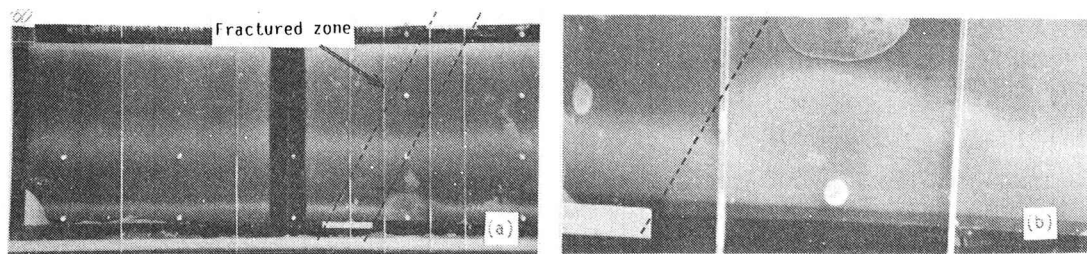


図-8 感温液晶にみられる温度分布。傾斜破砕帯。図-6に対応する。

温度が平均化することによるものである。一方、図-7(b)では破砕帯部の透水係数が小さいため、(a)程大きな温度低下はみられず、地山部、破砕帯部共に温度分布となっている。

図-8は図-6に対応した傾斜破砕帯における6時間後の状態であり、(b)は(a)の一部である。図から下面付近の破砕帯下盤側で2つのプルームの形成がみられる。このように感温液晶フィルムによって、熱輸送と地下水流れの2次的特徴を容易に把握しうる。

4. 考察と今後の問題

岩盤という不規則性の大きい場の中に設けられた熱源付近の地下水流れは大変複雑で理論的な解析が難しい。とくに、開口割れ目や透水性の大きな破砕帯が存在すると不安定性が卓越し、不規則な流れとなる。今回の研究によって、流れの定性的な2~3の特徴が明らかとなったが、今後は、実際の岩盤の性質をふまえて、定量的な考察、たとえばプルームの発生頻度、流速、熱輸送量などを計算してゆくことが必要と考える。またあわせて、熱源付近の不安定な流れによって、物質の溶解・拡散がどうなるかを調べてゆくことが大事であろう。今後このような方向の研究をすすめてゆくつもりである。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、内容全般にわたって御討議いただいた埼玉大学浅枝隆先生に心より感謝いたします。また感温液晶の性質について教えていただいたジャパンカスタム(株)田中章介氏にお礼申し上げます。なお本研究は、文部省特定研究(代表関陽太郎埼玉大学教授)、同科学研究(代表渡辺邦夫)費の補助をうけたものであることを記し、関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) たとえば、日本機械工業連合会、岡山大温泉研究所、熱水・岩石反応装置の動向に関する調査研究、日本機械工業連合会、57機関、1-81、1983。
- 2) 渡辺邦夫、古川和也、感温液晶を用いた岩盤モデル中の熱・地下水流れの可視化、昭和58年応用地質学会研究発表会、1983。
- 3) Combarrous, M.A., Borjes, S.A., Hydrothermal convection in saturated porous media, *Advances in Hydroscience*, 10, 231-306, 1975。
- 4) Runkel, A., Maini, T., The impact of a high level nuclear waste repository on the regional groundwater flow, *Int. J. Rock Mech. Geomech. Abs.*, vol.17, 1980。
- 5) Elder, J.W., The unstable interface, *J. Fluid Mech.*, vol.32, 69-96, 1968。
- 6) Elder, J.W., The temporal development of a model of high Rayleigh number convection, *J. Fluid Mech.*, vol.35, 417-437, 1969。
- 7) Kassoy, D.R., Zebib, A., Convection fluid dynamics in a model of a fault zone in the earth's crust, *J. Fluid Mech.*, vol.88, 967-992, 1978。
- 8) 浅枝隆、玉井信行、高橋由多知、大水深および大きなRayleigh数における熱対流の性質について、*土木学会論文報告集*, 323, 1982。
- 9) 浅枝隆、二宮嘉朗、乱流熱対流中に発生するプルームの特性について、*第27回本理講演会論文集*, 157-164, 1983。
- 10) 笠木伸英、感温液晶の応用、流れの可視化, vol.2, no.7, 5-12, 1982。

(9) Experimental study on the transient behavior of groundwater flow above heat source in idealized model of fractured rock

Kunio Watanabe*

Kazuya Furukawa*

Abstract

Transient and unstable behavior of thermally induced groundwater flow immediately above a heat source in idealized model of fractured rock was experimentally studied. Experiments were performed in soil box (dim. ; 105cm×60cm×15cm) surrounded with insulating plates. The soil box was divided into three parts by two interfaces which were inclined θ degrees to horizontal plane. The central part simulating fractured zone was filled by larger glass spheres of diameter 2.5-3.5mm or 0.5-0.8mm, and the remaining parts were filled by finer glass spheres of diameter 0.1mm to represent intact rock mass. Water could freely flow through the interfaces. Heat was electrically supplied from bottom of the soil box by the use of rubber heater seat. Change of temperature distribution was measured by means of 10 thermistors buried in the model and thermosensitive liquid crystal film (T.L.C.F.) set in front of the model. T.L.C.F. is very convenient to see the two dimensional form of temperature distribution.

Obtained results were as follows :

- (1) It was found very clearly by the use of T.L.C.F. that temperature in high permeable fractured zone was considerably lower than it in intact rock at lower part of the model.
- (2) Unstable flow such as plume was generally observed in high permeable fractured zone.
- (3) Quantitative study on the unstable flow above heat source should be needed to evaluate heat transfer rate in fractured zone.

* Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa, Saitama, Japan.