

埼玉大学 工学部 正会員 ○ 渡 辺 邦 夫

反り目 好 男

日本原燃産業㈱ 正会員 佐々木 泰

はじめに

岩盤中に熱源が設けられると、透水性の高い割れ目中にブリュームが発生し^{1),2)}、複雑な流れが形成される。その流れに乗って、熱源近傍では、熱や物質が輸送されてゆく。とくに、割れ目中の高透水部においては、強い上昇流が発生し、急速な物質輸送が生ずる。一方、岩盤中の熱源としては、たとえば、放射性廃棄物などの貯蔵空洞が考えられる。その空洞の掘削に際しては熱伝導性の高いロックボルトが多数打設されることが予想しうる。ロックボルトは、熱源周辺の熱輸送状態を大きく変化させる。本研究は、熱伝導性の大きいロックボルトが、どのように割れ目内流れを変化させるかを実験的に調べたものである。とくに、ロックボルトの配置を考えることにより、割れ目内高透水部で生じる強い上昇流を減少させ、物質輸送を低下しうることができるといえる、工学的に重要性が高いと思われる点に注目した。

1. 対象とする現象のモデル化と実験装置

いま、空洞上に1つの鉛直な割れ目を考える。現象を単純化するため、その割れ目が開口しているものとし、図-1(a)のように、その一部がとくに大きく開いているものとする。割れ目下部より一様に熱が与えられると、ブリュームが底面より発生する。ブリュームの発生時間 t_v は、すでに報告しているように、以下の式で表現することができる。

$$t_v = C_1 (\alpha k F h / \rho c \kappa^2)^{-1} = C_1 A^{-1} \quad \text{-----(1)}$$

ここに、 C_1 は定数、 α は水の体積膨脹係数、 Fh は与えられる熱フラックス、 C は水比熱、 ρ は水密度、 κ は水の熱伝導率である。従って、ブリュームの発生は、間隙幅のより大きな高透水部で早く開始することになり、透水性が大きいと、より上方に発達していく。この上昇流を止めるために、図-1(b)に示すように高透水部周辺に多数のロックボルトを打設することを考える。この場合、高透水部周辺の温度が上昇し、その部分に与えられる熱フラックスが大きくなるため、より早くブリュームが発生し、全体に、高透水部へ向う流れが形成されるはずである。本研究では、この現象を実験的に調べることを主眼に置いた。

用いた実験装置の概念図を図-2に示す。実験装置は、厚さ1.5cm、長さ2m、高さ30cmの2枚の亚克力板を間隙2mmで平行に並べたヘルショウセルである。このセル内に2mmのゴム板を鉛直に挟み込むことにより図に示すように、幅62cmの2つのモデルをつくる。各モデル共、中心部約2cmを残し、1mmの薄亚克力

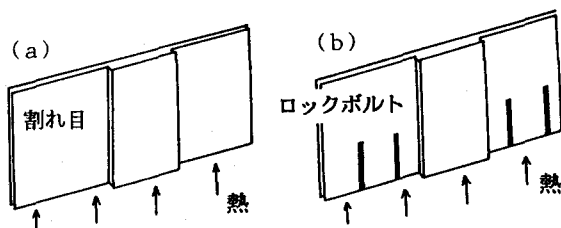


図-1 現象のモデル化

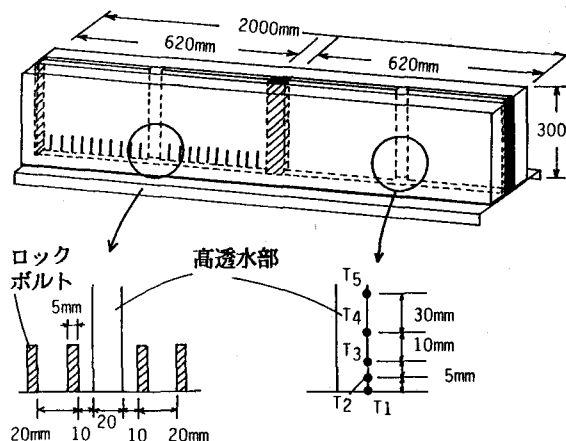


図-2 実験装置概念図と温度計測点

板を片側のセル内面にはりつけている。従って、セル間隙幅は、中心部が 2mm で、他は 1mm となる。このことは、図-1 (a) のような、場所的に開口幅の異なる割れ目を作ることに対応している。図中左側モデルには、ロックボルトを模す縦長の銅板 (幅 5mm、高さ 3cm) が 2cm おきに内側壁面に設置されている。熱は、ラバーヒーターによりステンレス底板を介して一様に与える。なお、ヘルショウセルを構成するアクリル板とステンレス底板の間には、厚さ 2mm のゴムパッキンを介している。一方、セル内の水は、直接ステンレス板上に接している。ロックボルトを模す銅板は、ステンレス板から直接立ち上がっている。そのため、熱は、水および銅板に主に伝わり、アクリル板には伝わりにくい。なお、温度計測は、ロックボルトのないモデルについて、図-2 に示す 5 点で行った。そのうち、 T_1 はステンレス板の上に設置してある。ステンレス板の温度については、両モデル共等しいとしてよい。各モデル中形成される流れは、各モデル底面に一様にトレーサー (ウォーターブルー水溶液) をあらかじめ底面に流しておくことにより観察した。なお実験は、ロックボルトのない場合の熱フラックスが $0.005 \sim 0.06 \text{ cal/cm}^2/\text{s}$ の状態で行った。

2. 形成された流れの可視化

各モデル内に形成された流れの変化の状態を模式的に図-3 に示す。図の結果は、ロックボルトのない場合の底面熱フラックスが、 $0.036 \text{ cal/cm}^2/\text{s}$ の状態である。(a) がロックボルト設置モデル、(b) がロックボルトがない場合を示している。図中に付記された時間は、実験開始後の経過時間である。まず、①、②から、(a) では、1 つ 1 つのロックボルトに対してプリュームが発生し、小対流が形成されていることがわかる。一方、(b) では、間隙幅の大きい部分にプリュームがまず発生し、それが上方に上昇してゆくことがわかる。(a) 図の②において、間隙幅の大きい部分にプリュームが発生しているが両側のロックボルトの部分に形成された、より大きな対流の下降流により、上方への発達を押さえられていることがわかる。その後、(a) では、③、④、⑤に従って、各ロックボルトに対応した小対流がまとめられ、より大きな対流へと統合してゆく。しかしながら、間隙の大きい部分は、両側の対流の下降域となり、そこでの上昇流はほとんど発達していない。一方、(b) では、間隙の小さい部分にも対流が生じるが、間隙の大きい部分を上昇域とした対流が大きく上方に発達している。(a)、(b) 共、④、もしくは、⑤の状態では上方の水面境界の影響を受けはじめてきており、その後の検討はできない。

図-4 に、各モデルの、図-3 中の②、および④の状態の写真を示す。(a) はロックボルトモデルであり図中の数字は、実験開始後の経過時間である。図-4 に示される流れは、他のすべての熱フラックス条件においても共通して見られた。従って、これらのことより、ロックボルトを用い、高透水部周辺の熱伝導性を上げることによって、高透水部に生じる強い上昇流を下降流に変化させることが明らかになった。

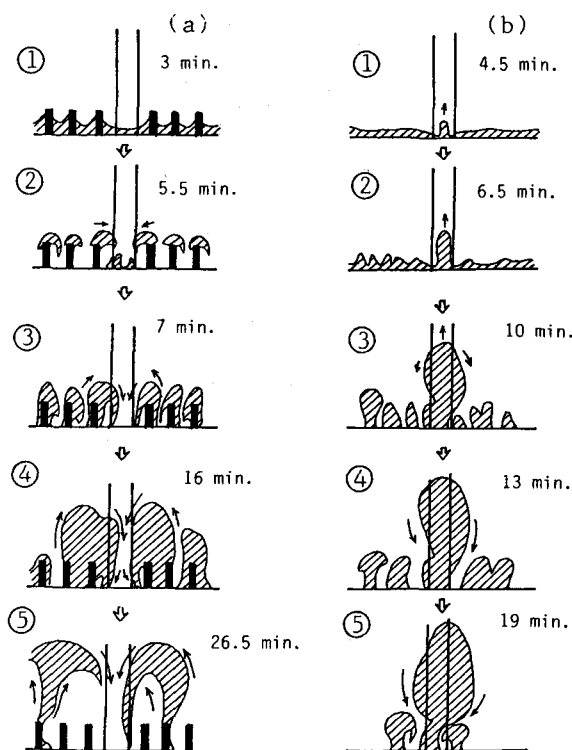


図-3 トレーサーの動きと流れの状態の模式図。
(a) はロックボルト、(b) はロックボルトなしの各モデル

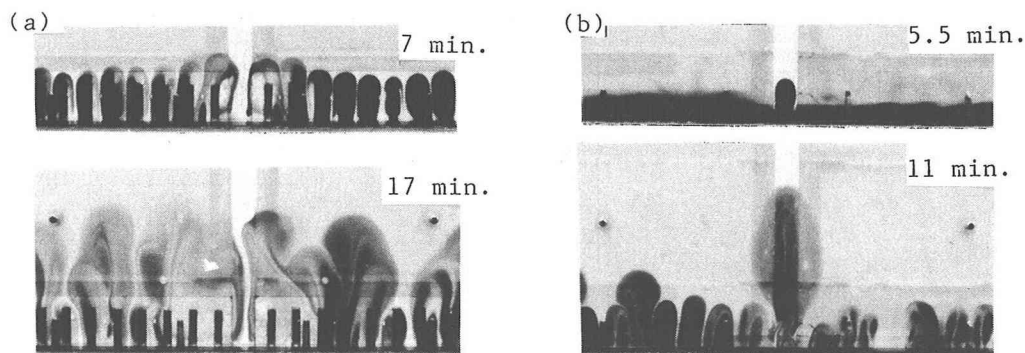


図-4 トレーサーの動き。各モデルの②、③の状態を示す。

このことは、熱源からの物質移動に対して、より安全側に移行することという。

3. 割れ目高透水路における温度変化とブリュームにより運ばれる熱量

つぎに、ロックボルトのないモデルについて、間隙の大きい部分の温度変化を調べてみる。図-5は、例として、熱フラックス $0.036 \text{ cal/cm}^2/\text{s}$ における T_1 、 T_2 、 T_3 の位置の温度変化を調べたものである。温度の急変部は、大きなブリュームの発生と対応して生じたものである。しかしながら、このような温度変化とは異なった変化パターンを示す場合もみられた。そのパターンは周期5～6秒で1～2℃の規則的な変動を示すものである²⁾。このパターンは、小さなブリュームがほぼ連続的に生じるものである。図-5のようなパターンと小周期の変動が、どのような条件で各々発生するかはよくわっていない。今回の検討では、図-5のようなある程度大きなブリュームについて論ずることとする。図-6は

熱フラックス $0.036 \text{ cal/cm}^2/\text{s}$ において、間隙が大きい部分の鉛直温度分布を調べたものである。既に筆者らが報告しているように、底面直上に薄い熱伝導層が形成されているため²⁾、底面付近温度勾配が大きくなっていることがわかる。熱伝導上部では対流により、温度勾配が小

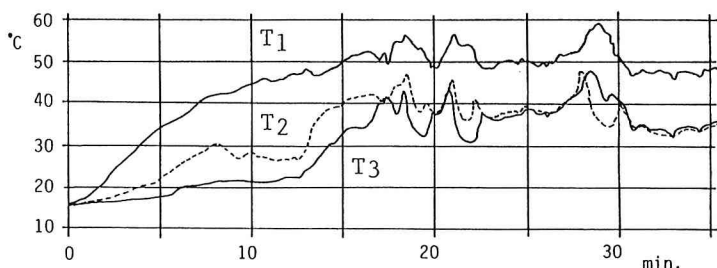


図-5 温度経時変化の計測例

さくなっており、逆勾配を示す時点も存在する。いま、形成された熱伝導層厚さが近似的に温度測定点 T_1 と T_2 の差 5mm とすると、この間の温度勾配がほぼ15分以降、わずかながらも変化していることがわかる。一般に温度勾配が1つの限界を超えた時点で、ブリュームが発生し、このブリュームにより熱量が奪われるため、温度勾配が小さくなる性質を持っている。したがって、この熱伝導層内の平均的な温度勾配と、勾配差を調べることで、ブリュームにより運ばれる熱量が近似的に見積りうると考えられる。このことを考慮して、 T_1 、 T_3 間における温度勾配を調べてみた。その結果例を図-7 (a), (b), (c) に示す。

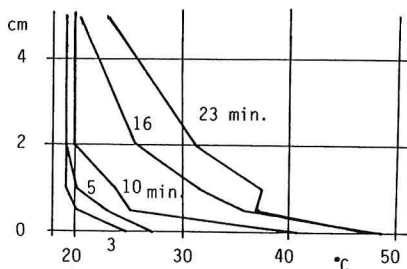


図-6 鉛直温度分布変化の計測例
(熱フラックス $0.036 \text{ cal/cm}^2/\text{s}$)

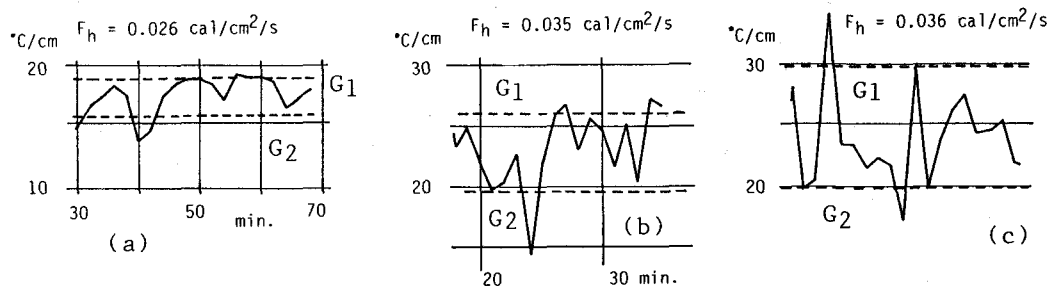


図-7 底面付近における温度勾配測定例

これらの図は、熱フラックスがそれぞれ 0.026、0.035、0.036 cal/cm²/s の状態の結果を示している。但し、実験初期においては、温度変化の非定常性が大きいため、初期の時点の変化は考慮していない。ここで平均的な最大、最小勾配（図中破線で示す。）を G_1 、 G_2 とし、熱フラックスとの関係を整理したものが図-8である。 G_1 はいわば熱伝導で運ばれる熱量に関する量であり、 G_1 と G_2 の差がプリュームにより運ばれるものと考えることができる。図から G_1 、 G_2 共ほぼフラックスと線形関係を持っていることがわかる。 G_1 は熱フラックスの小さい間は、 G_2 に等くなる、つまり、プリュームが発生せず熱がほぼ伝導でのみ上方に運ばれると考えうる。熱伝導で輸送し切れない熱は、プリュームにより運搬されるが、相対的に大きなプリュームによって、一度に輸送しても良いし小さなプリュームによって少しずつ輸送しても良いはずである。小さなプリュームは、前述した小周期の温度変動に対応するものといえる。しかし、その輸送形態の違いが何故生じるのかは今後の課題である。

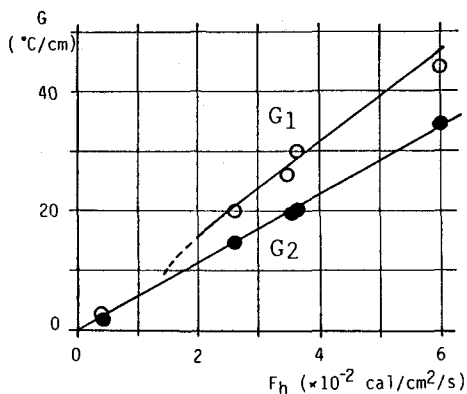


図-8 熱フラックスと平均限界温度勾配 G_1 、 G_2

まとめ

本研究より、まず、ロックボルトの配置を妥当に考えることにより、高透水部で生じる熱源近傍の上昇流がかなり低減しうることが明らかとなった。また、相対的に大きなプリュームにより、上方に運ばれる熱量を推定する基礎として、プリューム発生前後の底面付近の温度勾配を調べ、それが熱フラックスで、良く整理しうることを明らかにした。この熱量については、今後さらに実験を進め検討する。

参考文献

- 1) 渡辺邦夫、大野博之、浅枝隆、(1985)、第17回岩盤力学シンポジウム論文集、PP. 186-190.
- 2) 渡辺邦夫、佐々木泰、浅枝隆、(1986)、第18回岩盤力学シンポジウム論文集、PP. 411-415.

(44) Influence of rock bolt on thermally induced flow in an open fracture

Kunio Watanabe

Yoshio Sorime

Tai Sasaki

Abstract

Thermally induced flow of groundwater around a heat source in rock mass has recently become a subject of great concern in the field of Rock Mechanics, because some dangerous substances such as radioactive nuclides are thought to be transported by the flow. The mechanism of the flow in an open fracture should be basically studied to clarify the nature of the flow in a large rock mass having many types of fractures in it.

The flow in an open fracture may be strongly influenced by the permeability distribution in the fracture. Generally speaking, thermal plumes successively generated in the high permeable part of fracture forms a large convection. Consequently, it can be said that substances come from the heat source are mainly transported through the high permeable part. Flow pattern of the convective motion can be altered by partly increasing the thermal conductivity of the fracture, and the conductivity can be easily increased by inserting some rock bolts into rock mass.

The influence of these rock bolts on the induced flow in a model of an open fracture was experimentally studied by the use of a Hele-Shaw cell with following results:

- (1) Intense upward motion takes place in the high permeable part of an open fracture. This motion is sustained by successive generation of plumes.
 - (2) The heat mass transported by a plume can be roughly estimated from the transient change of the temperature gradient just above the heat source.
 - (3) Rock bolts inserted into the vicinity of the high permeable part considerably decrease the upward motion.
-