

(5) 花崗岩盤における割れ目内流れに関する基礎的研究

動力炉・核燃料開発事業団

新見 健

日鉄鉱業(株) 資源開発部 正会員 ○ 野口義文

清水建設(株) 原子力本部 正会員 堀田政國

Groundwater Flow-down Test in Natural Single Fractures in a Granitic Rock Mass

Ken NIIMI,

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

Yoshifumi NOGUCHI, Nittetsu Mining Corporation

Masakuni HORITA, Shimizu Corporation

Abstract

In order to study the behavior of groundwater flow nearby underground caverns, groundwater flow-down test in natural single fractures were carried out within the Kamaishi in-situ test.

As the result, channelling phenomena in single fractures were confirmed experimentally by means of cutting away rock around each fractures. Main flow paths had a thickness of more than 1 mm. The permeability of flow paths were estimated $10^{-2} \sim 10^{-4}$ cm/sec, using the 2-dimentional saturated-unsaturated flow analysis. Comparing with the permeability of non-flow path, these shouwed a value $10^2 \sim 10^4$ times as much.

1. はじめに

割れ目系岩盤における地下水流れは、岩盤に発達する割れ目を主たる経路としていると考えられる。特に空洞のごく近傍における地下水の挙動について経験されることは、位置によっては湧水がない割れ目があること、湧水している割れ目でも湧水量の位置的な偏りがあることなど均質な媒体とは考えられない現象が多い。また、空洞から実施した試験孔内の観察からも、湧水している割れ目と湧水していない割れ目とが存在していることは明らかである。

動力炉・核燃料開発事業団が釜石鉱山で実施している原位置試験において、上記のような空洞近傍の地下水流動現象を明らかにするための基礎的な試験として、割れ目面上の地下水の流路を実際に観察することを試みた。また、そこでの透水係数の分布を推定するために有限要素法による2次元飽和不飽和浸透流解析も行なった。

2. 試験および解析の概要

試験の模式図を図1示す。坑道壁面に現れた単一の割れ目の上下に注入孔と観測孔を穿孔し、水を注入してその割れ目の透水特性を試験した。注入には、サーボ制御の定圧注入装置を用い、浸出量は観測区間毎にメスシリンダーで計量した。また、トレーサーにエオシンを用い、注入孔から観測孔の各位置に到達する時間(以下では到達時間と呼ぶ)を測定した。その後、エオシンをエポキシ樹脂に溶き、それを注入した後割れ目面をはさむ岩盤の片方を切り出して割れ目面にお

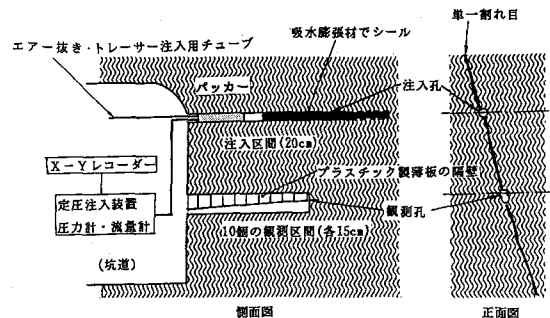


図1 地下水流下試験の模式図

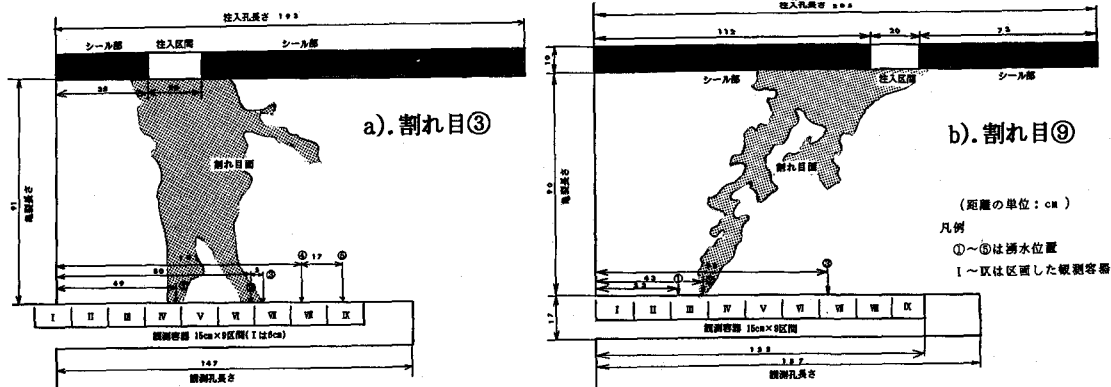


図2 試験の諸元とトレーサーにより復元した流路

ける流路をトレースするとともに、割れ目面の粗さ、流路の厚さを測定した。流路の厚さは、割れ目面上に残ったエポキシ樹脂の厚みをマイクロメーターで測定して得た。この樹脂は、コンクリートにおいては厚さ0.04mmの割れ目まで浸透するとされている。なお、粗さの測定には ISRM 指針¹⁾を用いた。

これらの試験から注入圧力、注入量、観測孔への浸出位置、到達時間、浸出量およびそれらの経時変化が得られる。これらの結果を用いた2次元不飽和浸透流解析では、浸出位置と到達時間を一致させるような割れ目面内の透水係数の分布を推定するものとした。

3. 試験の結果

3.1. 地下水流下試験の結果

図2a)b)に2個の割れ目における地下水流下試験の寸法と注入位置、観測区間の配置を示す。図には復元した流路、浸出位置も併せて記入した。

a). 割れ目③

割れ目③の注入量の推移を図3示す。注入圧は 0.5 kg/cm^2 の定圧である。注入水が間隙部と不飽和部に浸透する過程として、図に示したような非定常過程が現出したものと考えられる。同図より、30分後には定常に達したものと見なせる。この時の注入量は、 1.0 cc/min 程度というわずかな量であった。

図4は割れ目③の各観測区間における観測時刻毎の累積浸出量である。浸出箇所は5ヶ所で、そこへの到達時間は、12～14分程度である。区間ⅣとⅥには計量できるほどの量が達しなかった。また、区間ⅦとⅨへは岩盤の切り出しの際に割れ目充填物が複雑に破砕したため流路が復元されていないが、図2a)に示した流路は、岩盤奥に向かって斜め下方に細く流れるものが明瞭であり、注入区間に近いところで分岐しているものは広く薄く直下に流下する不明瞭なトレースである。分岐している部分ではトレーサーが薄く広がっており、ここで流下を阻まれた結果、滞留と時間をかけた浸透が生じたものと推定される。

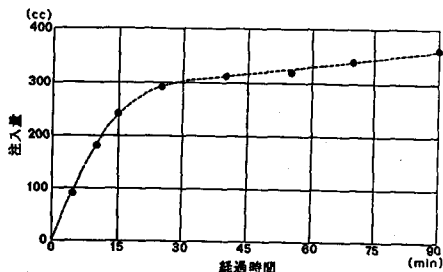


図3 割れ目③の注入量の推移

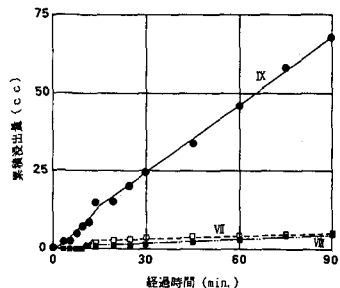


図4 各観測区間における累積浸出量

b). 割れ目⑨

注入圧 1.60kg/cm²、注水量は 853cc/minであった。各浸出部の位置と到達時間を表1に示す。浸出している位置によって明かに到達時間が異なり、割れ目面上の流れに分岐があり、かつその流速は均一でないことを示唆している。図2b)によると、注入箇所から坑道壁面側へ斜め下方に向い、途中で緩く蛇行しながら流下している。

表1 割れ目⑨での注入圧と到達時間

	浸出位置 (孔口からm)	注入圧 (kg/cm ²)	到達時間 (sec)
注入孔	-	1.60	-
観測孔	① 0.33	-	17
	② 0.43	-	52
	③ 0.93	-	69

3.3. 割れ目面の粗さについて

岩盤側の割れ目面で、面上に2cm間隔に測線を設け、長さ20cmの型どりゲージを用いて凹凸を測定した。しかし、充填物の挟在によって測定不可能な領域があり、ここでは、測定できた領域でISRM指針に従って、測線長10cm毎の粗さ形状としてまとめた。その結果をもとに、流路とそうでない部分に分けて、粗さ形状の頻度分布をとると図5a)b)のとおりである。いずれの割れ目においても、その粗さ形状の分布には流路と流路でない部分との差は顕著ではない。

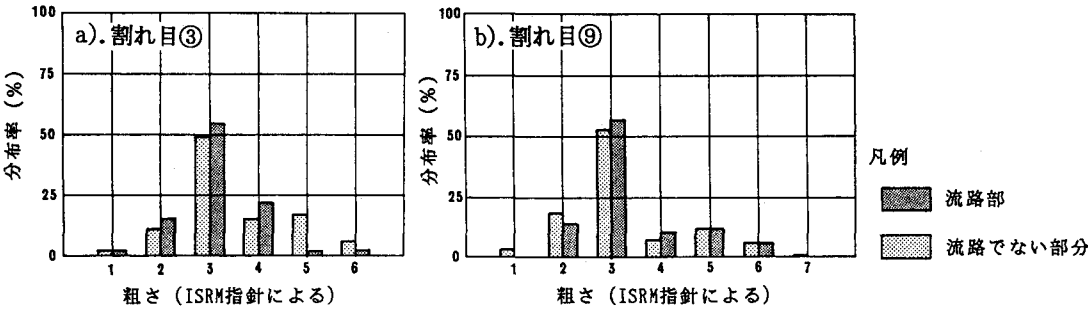


図5 割れ目面上の粗さの頻度分布

3.4. 流路の厚さについて

図6a)b)に割れ目③⑨の流路上でのエポキシ樹脂の厚さの頻度分布を示す。割れ目③においては、明瞭に現れた流路では0.2~2mmであり、中には2mmを越える部分も存在した。その対数平均値は1.03mmである。明瞭でない流路は、ほとんどエオシンのみが浸透しているように見え、厚さは測定できなかった。割れ目⑨では、厚いところで2~4mmに達する。その対数平均値は割れ目③とほとんど同じ1.03mmである。割れ目面上の分布をみると、1mm以上の部分が流路に沿って連続している。

ただし、ここで用いた手法は、水に比べて粘性が高いエポキシ樹脂を使ったため小さな値は十分には把握されていない。

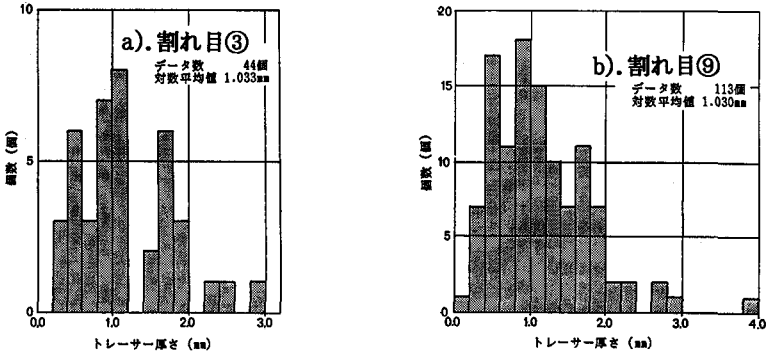


図6 割れ目面上の流路におけるエポキシ樹脂の厚さの頻度分布

4. 地下水流下試験の結果を用いた解析

割れ目③における試験結果を用いて、割れ目内における流路および透水係数の分布を推定した。解析領域および解析に用いた要素分割を図7に示す。同図は割れ目の鉛直断面に相当し、図の左側が坑道壁面側である。境界条件は図中のSection I、Section IIにおける節点a～yが浸出境界、Section III、Section IVが圧力水頭を1.0 mとした一定圧力水頭境界、Section V、Section VIIが不透水境界、注入区間のSection VIでは注入圧力を水柱5.0 mとした一定圧力水頭境界である。また、岩盤奥側では飽和状態であるものと仮定し、岩盤奥側の初期飽和度を1.0、それ以外の節点は飽和透水係数に対応して0.95、0.75とした。これらの値は、実際のデータが全くないため、解の収束性を主に考慮したものである。なお、解析に用いた不飽和特性曲線、間隙率および比貯留係数については文献²⁾に依った。

まず、最初の浸出位置と注入区間とを直線で結び、設定した境界条件のもとに到達した時間が同じになるまで割れ目内部の飽和透水係数を変化させて繰り返し計算を行い、透水係数の分布を計算した。その結果、図8に示すように、飽和透水係数は、最初に浸出した位置と注入区間を結ぶ要素で 4.6×10^{-4} cm/sec、2番目に浸出した位置と注入区間を結ぶ要素で 6.9×10^{-4} cm/sec、それ以外の要素内で 1.0×10^{-6} cm/secとなった。この時のポテンシャル分布、流速分布は図9 a) b) のようである。流路にあたる部分では流速が他の領域に比べて非常に大きくなっている。到達時間の試験結果を表2、計算結果を表3に示す。ここで、試験で得られた坑道壁面からの距離が80～85 cm、118 cmの2箇所に着目して計算結果を比較する。上記の2箇所には節点rおよびuがほぼ対応するが、到達時間は両者できわめてよく対応している。

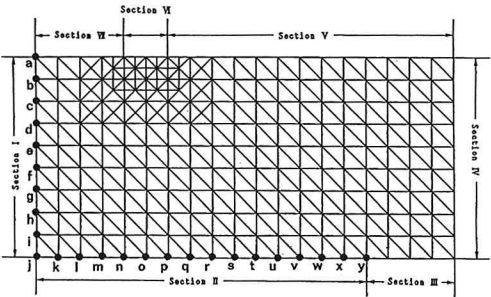


図7 メッシュ図と境界条件

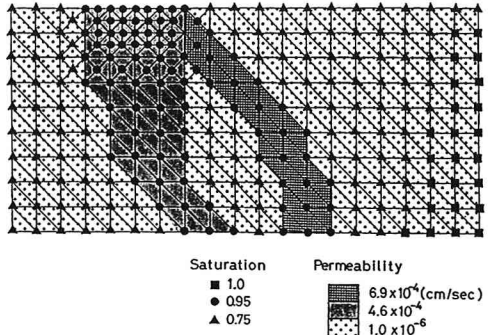
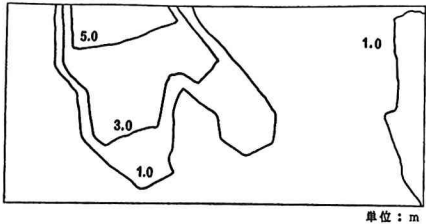
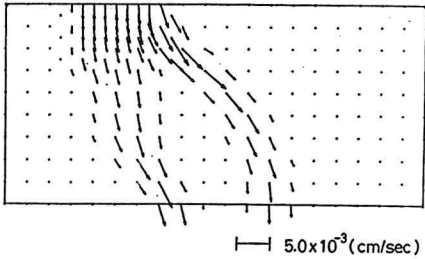


図8 解析による透水係数の分布



a). 5400sec後のポテンシャル分布



b). 5400sec後の流速分布

図9 ポテンシャルと流速の分布

表2 到達時間（試験結果） 表3 到達時間（計算結果）

坑壁からの距離(cm)	到達時間(sec)
80 ～ 85	732
118	840

節点	坑壁からの距離(cm)	到達時間(sec)
q	70	729
r	80	732
s	90	887
u	110	849
v	120	959

次に浸出量について述べる。観測孔において測定された各区間の浸出量を表4、計算で得られた5節点の各浸出量を表5に示す。なお、浸出量は試験値および計算値とも注入量で正規化した値で表している。表より、試験で得られた最も浸出量が多い区間と計算で得られた浸出量が最も多い節点位置は概ね一致しているが、浸出量比については両者の対応は得られなかった。

表4 トレーサー浸出量比（試験結果） 表5 トレーサー浸出量比（計算値）

区 間	坑壁からの距離(cm)	浸出量比
IV	36～ 51	0.000
V	51～ 66	0.000
VI	66～ 81	0.003
VII	81～ 96	0.040
VIII	96～111	0.010
IX	111～126	0.190

節点	坑壁からの距離(cm)	浸出量比
q	70	0.13
r	80	0.19
s	90	0.06
u	110	0.19
v	120	0.09

なお、割れ目⑩においても同様の計算を実施し、図10に示すように流路にあたる部分で $1.7\times10^{-2}\sim3.6\times10^{-3}$ cm/sec、それ以外の要素内で 10^{-6} cm/secのオーダーが得られた。

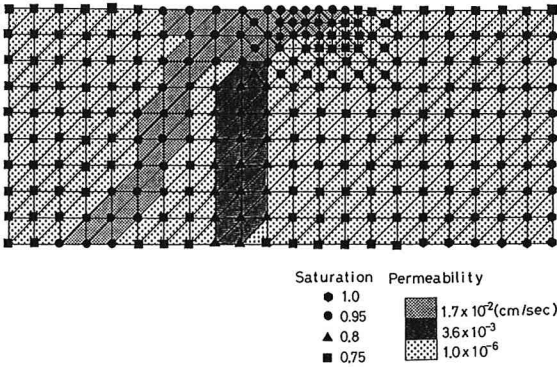


図10 割れ目⑩における透水係数の分布

5. おわりに

単一割れ目のチャンネリング現象を実験的に確かめ、主要な流路の厚みが1mm程度にも達することを明らかにした。また、飽和不飽和浸透流解析によって流路の透水係数は $10^{-2}\sim10^{-4}$ cm/secのオーダーであり、流路でない部分とは2～4オーダーの違いがあると推定された。

参考文献

- 1). 菊地宏吉ほか: 日本語訳ISRM指針 Vol. 3, 岩盤不連続面の定量的記載法, p. 37-51, 岩の力学連合会(1980)
- 2). 京谷孝史ほか: 日科技連 不連続性岩盤ワーキンググループ資料, p. 58-65, 日科技連(1990)