

(7) 実岩盤の節理内流れに関する実験と考察

東電設計備応用地質部 菊地 宏吉
三室 俊昭
小林 隆志
早稲田大学大学院 水戸 義忠

Experimental study for groundwater flow in actual jointed rock masses

Kohkichi KIKUCHI, Tokyo Electric power services Co.,Ltd.
Toshiaki MIMURO, Tokyo Electric power services Co.,Ltd.
Takashi KOBAYASHI, Tokyo Electric power services Co.,Ltd.
Yoshitada MITO, Graduate school of Sci & Eng, Waseda University

Abstract

The nature of groundwater flow through the joints in actual rock masses has not been known in detail. The purpose of this study is to understand the ground water flow characteristics (especially actual velocity of flow) in jointed rock masses by field measurement.

This paper presents the results of the in-situ test related to groundwater flow through joints.

1. はじめに

土木構造物の基礎としてしばしば用いられる硬質塊状岩盤は、岩石構成粒子の結合力が強く、岩質部分の透水性が非常に低い。このような場合、岩盤内に多数存在する節理を通過する流れが岩質部分を通過する流れに比して岩盤全体の流れを支配するため、硬質塊状岩盤における浸透流は節理系を主たる浸透経路とする流れと考えられている。しかしながら現在まで、現実の節理内における実際の流動形態や流れの性質については基礎的な知見が十分に得られておらず、そのため、現在まで提案されている各種水理モデルの理論的な根拠となる基礎式は未だ仮定の域を脱却していないのが現状である。このように、節理内の流れの実態が不明確であるために、現状では岩盤内の浸透過程を正確に把握することが困難となっている。

著者らはこのような実状を踏まえ、実際の岩盤における浸透流の流動形態や流れの性質を知るべく、堅硬な花崗岩の分布する地点において現場実験を実施し、その内容・結果を報告した¹⁾。今回はその実験の結果について考察を行うものである。

2. 調査・実験の概要

詳しい実験内容は文献¹⁾に譲り、ここでは調査・実験の概要のみ説明する。実験サイトは花崗岩の分布する石切り場であり、新鮮・堅硬・ち密な花崗岩の岩盤が露出している。地形の概要を図-1に示す。図のように本サイトは前面の鉛直な崖面と背面の崖で囲まれた地点であり、鉛直な崖面には自然湧水の生じている今回の実験の対象とする節理が位置している。本調査・実験

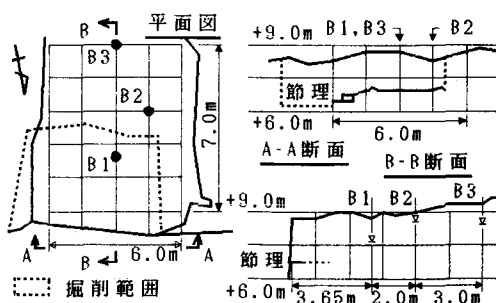


図-1 実験サイトの地形概要

では図に示した対象節理内の地下水流動状況を把握することを目的として、以下に示すような各種項目を実施した。

2. 1 露頭面に関する調査

①節理調査……実験サイトの節理分布性状を把握することを目的とし、節理の分布性状の調査を行った。

②地形調査（露頭面）……露頭面の地形を把握することを目的として、簡易測量を実施した。

2. 2 ボーリング孔を用いた調査

図1に示すようにボーリングを3本削孔し、以下に示すような実験を行った。

①ルジオン試験……対象岩盤の透水性を把握することを目的として、3本のボーリング孔において8ステージの各区間でダブルバッカー方式のルジオン試験を実施した。

②定水位透水試験……対象節理の湧水量の分布を把握し、ダルシー則の成立の是非を検討するために、B1孔において水頭を3段階（ボーリング口元水位： $h = 46, 101, 150\text{cm}$ ）変化させた定水位透水試験を実施し、対象節理の区間湧水量及び注入流量を測定した。また、地下水の流速を推察することを目的として、口元水頭40cmの状態では色素水を注入して、各区間における色素水の浸出までの時間を計測した。

2. 3 掘削面における調査

流路のトレーサーとしてB1孔からグラウト液（超微粒子セメント）を注入した後、図-1に示す掘削範囲（約 30m^2 ）を発破・静的破碎工及び人力で慎重に掘削し、次のような調査を実施した。

①地形調査（掘削面）……掘削面の地形を把握することを目的として、簡易測量を実施した。

②地下水流路調査……地下水流動経路を推定することを目的とし、グラウト付着状況を記載した。

③グラウトの厚さの計測……地下水流路の大きさを把握することを目的として、付着したグラウトの厚みを計測した。計測箇所は約200箇所である。

3. 調査・実験の結果及び考察

節理調査の結果、本サイトの節理系の密度は約 $10\text{個}/\text{m}^2$ 、平均トレース長は約1m、平均開口幅は0.5mm程度であることが判明した。ルジオン試験の結果として得られた透水係数は $10^{-6} \sim 10^{-3}\text{cm/sec}$ の間に分布しており、壁面の対象節理と応答関係がある節理を含む区間で 10^{-3}cm/s 程度であった。また注入圧力を上昇するとともに図-1に示す水平面の右半部より、水が湧いてきた。

図-2は定水位透水試験の結果である。口元水頭 $h = 46, 101, 150\text{cm}$ の場合について各条件下の平均値で Q 、 Q' を求め、水頭差 ΔH との関係を示したものである。図には区間湧水量として湧水量の大きいNo.1とNo.3の Q' と Q も併記している。 Q と Q' の関係からも明らかのように、注水量の80~90%が対象節理から湧出しており、このことから対象節理内に本サイトの主要な水みちが存在することがわかる。また対象節理内においてNo.1区間、No.3区間の湧水量の和が Q' のおよその相当量を示すため、本サイトの主要な水みちがこれらの区間に流出するチャンネルであることがわかる。またこれらの水頭差と流量との関係は流入側も流出側もほぼ直線関係を呈しており、今回の対象節理のような透水性が高い節理においても地下水流がダルシー則に従っていることがわかる。一方、表-1は定水位透水試験（ $h = 40\text{cm}$ ）による各区間の色素水の到達時間である。本表によれば、No.4区間以外は色素水が100~200秒で対象節理区間に到達している。

図-3は掘削面におけるグラウト固結箇所の分布であり、図-4は図-3のグラウト固結箇所を連結させた推定流路図である。推定流路図からもわかるように本サイトには大きく2系統のチャンネルング経路が認められ、更に壁面に流出する際には5つの経路に分岐しているこ

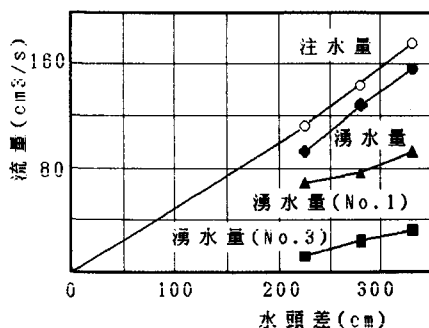


図-2 水頭差と流量の関係（定水位透水試験）

とがわかる。また、本図より節理面積に対する流路面積の割合を有効間隙面積率として求めて整理したものが図-5である。平均の有効間隙面積率は24.8%であり、全体としては2～66%の範囲にわたっている。

図-6は付着したグラウトの厚み（流路の厚み）の分布である。平均の厚みが1.14mmであり、全体としては0～3.5mmの範囲にわたっている。

表-1 定水位透水試験による対象節理への地下水到達時間（口元水頭：46cm）

区間No.	1	2	3	4	5	6	7	8
到達時間(sec)	99	130	130	—	194	173	147	154

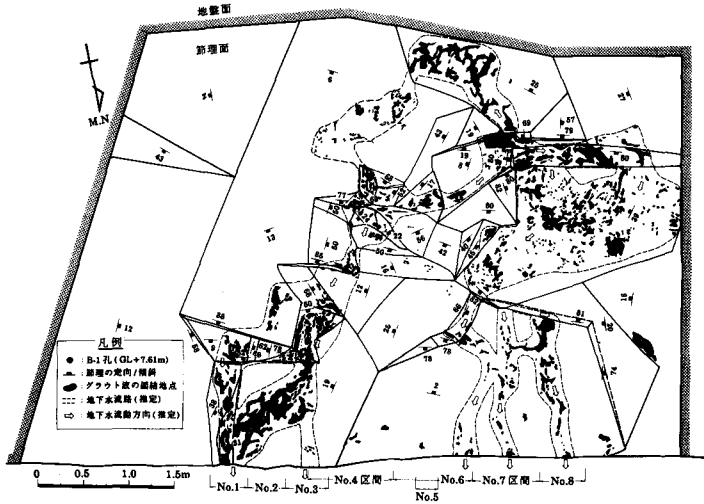


図-3 掘削面におけるグラウト固結地点の分布

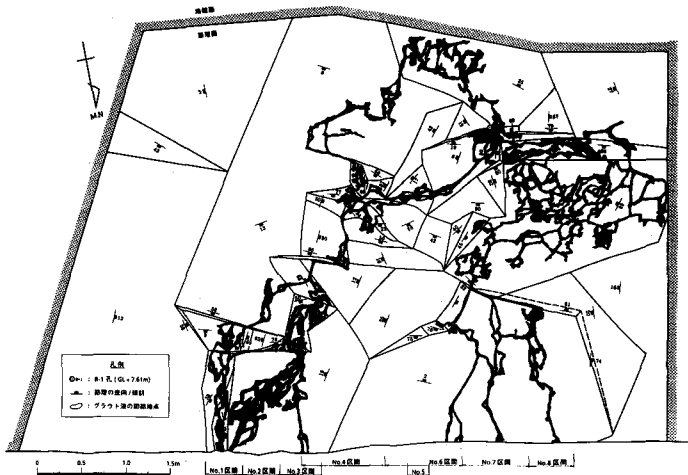


図-4 推定流路図

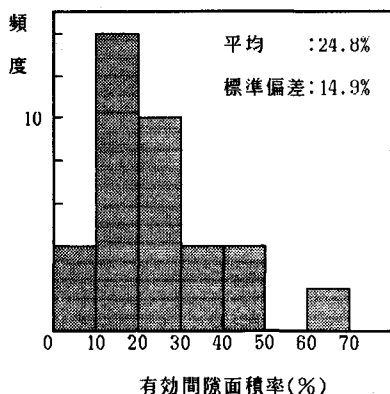


図-5 有効間隙面積率の分布

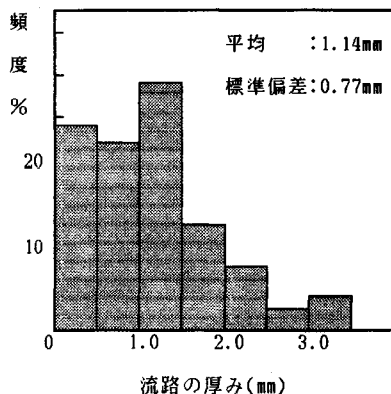


図-6 流路の厚みの分布

4. 単純な流れモデルによる試験結果の解析

ここでは、単純な流れモデルを用いることによって、定水位透水試験の結果をもとに本サイトにおけるチャネリング機構の解析を試みる。まず、図-4をもとに1次元要素モデルでチャネリング経路を表現する。要素内の流れモデルとしては図-7に示すような円管の集合体を考える。

円管内においてPoiseuille流れを仮定すると、管内の平均流速 v' は

$$v' = \frac{g(t/2)^2}{8\nu} i = \frac{g t^2}{32\nu} i \quad (1)$$

となる。但し、 g : 重力加速度、 t : 管の直径、 ν : 動粘性係数、 i : 導水勾配である。従って円管の個数を N とすると、流量 Q は、

$$Q = N \pi (t/2)^2 v' = \frac{N \pi g t^4}{128 \nu} i \quad (2)$$

となる。いま円管の個数 N を流路の面積 A と流路長 L を用いて $N = A/Lt$ と定義すると流量 Q は、

$$Q = \frac{A N \pi g t^3}{128 \nu L} i \quad (3)$$

で表わすことができる。この基礎式のもとに、B1における水頭（口元水頭: 46cm）と流出した区間流量を境界条件として有限要素法によって解析を行った。但し、流出口にあたる5つの経路を左から経路1, 2, 3, 4, 5とすると、それぞれ、 Q_1 、 Q_2 の和、 Q_3 、 Q_4 の和、 Q_5 、 Q_6 の和、 Q_7 、 Q_8 が各経路の湧水量となるようにして計算している。

図-8に水頭分布を示す。本図をみると左側の経路1、経路2において水頭がほぼ壁面の対象節理と同程度の高さであり、これは右半部では対象節理を介して殆ど抵抗なく水が抜け出していることを示唆している。一方、経路3, 4, 5においては対象節理よりも2mほど高くなっている。このことはルジオン試験において、注入圧力

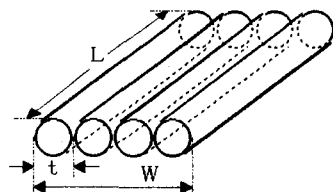


図-7 円管モデルの概念図

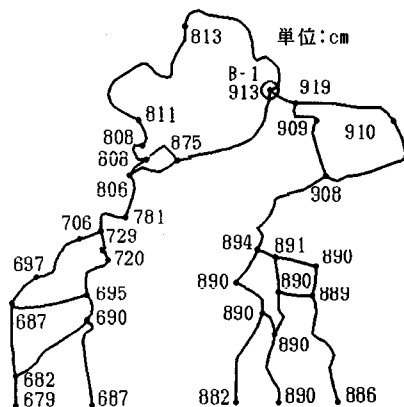


図-8 水頭分布図

上昇時に右半部より湧水があった事実関係と一致する。

図-9には各要素における流れの向き及び流速を示してある。各要素の流速は粒状媒質で普通に考えられている流速のオーダー及び流速分布形態とは明白に異なっていることが判明した。図-10は流速の頻度分布である。対数平均した流速は7.98cm/sであるが、全体的には $10^{-1} \sim 10^3$ cm/sにわたっている。

解析結果よりボーリング孔から壁面まで最短経路を通過した場合の地下水到達時間を求めると、経路1、2でそれぞれ11秒、13秒と実測値よりかなり小さい結果がでた。これは実験の際に色素水の注入によって水頭を急激に変化させたため飽和状態が満たされていなかったためと推察する。一方、経路3,4,5ではそれぞれ190秒,222秒,207秒と実測値のオーダーと整合性のとれる値となった。

5. おわりに

本論文では、節理内流れの実態を知るべく現場調査及び試験を実施し、その結果を纏めるとともに単純な流れモデルを用いて実験結果の解析を試みた。調査の結果、本サイトの節理内流れは、節理面の2～66%の空隙面積を満たす複雑なチャンネリング形態を呈しており、一様な平板流ではないことが判明した。また実験の解析結果は現場の状況と比較的よく対応するものであり、透水係数が 10^{-3} cm/secのオーダーに対して、計算によって得られた経路各所の流速は今回のような実験条件のもとで $10^{-1} \sim 10^3$ cm/secのオーダーの範囲に分布するという結果が得られた。

参考文献

- 1) 菊地宏吉 他：節理性岩盤における岩盤浸透流の流れモードに関する実験的研究，第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.334-337，1987。

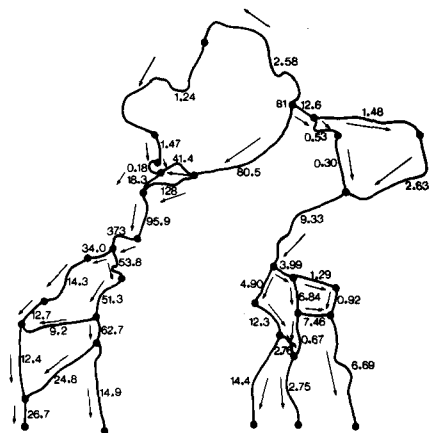


図-9 流速分布図

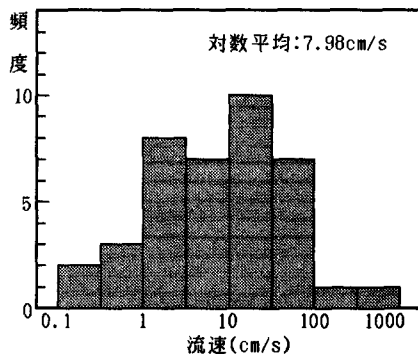


図-10 流速頻度分布図