

(37) 実岩盤の節理内流れに関する実験と考察 (その2)

早稲田大学大学院 水戸 義忠
東電設計㈱応用地質部 菊地 宏吉
東電設計㈱応用地質部 鶴田 修
早稲田大学大学院 本多 眞

Experimental study for groundwater flow in actual jointed rock masses (part 2)

Yoshitada MITO, Graduate school of Sci & Eng, Waseda University
Kohkichi KIKUCHI, Tokyo Electric power services Co.,Ltd.
Osamu TSURUTA, Tokyo Electric power services Co.,Ltd.
Makoto HONDA, 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.

The authors have published this study concerning about the flow through the joint system consisted of several joints as mentioned at this symposium, 1989. In this paper with focused on a single joint in actual rock masses the same study for groundwater flow are reported.

1. はじめに

近年、岩盤地下空間のもつ安全性や土地の有効利用の観点から、燃料用貯蔵空洞や放射性廃棄物処分場などの地下立地が検討され、すでに一部実施されているのが現状である。これらの岩盤構造物の対象となる岩盤はいわゆる節理性岩盤が多い。節理性岩盤の透水性に関する問題の検討は構造物の安定性及び機能の確保に不可欠であり、近年これに関する研究が各機関で行われている。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得られていないのが現状である。

このため著者らは前回までに、実際の節理系中の地下水の流動形態および流れの性質を把握するため、現場実験を実施し、その結果および検討について報告した¹⁾。今回はボーリング孔からの水平方向の放射流として境界条件を与えたが、今回は対象を1つの節理にしぼり、トレンチを掘

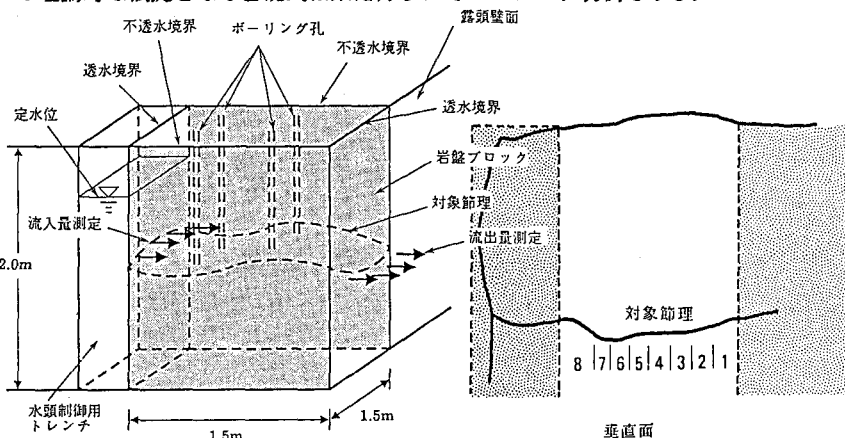


図-1 実験供試体の概念図

削し流入側境界を面として境界条件を与え、単一節理内の流れの性質と節理の透水係数を調べることを目的として現場実験を実施した。本論文はその実験についての結果および検討内容について報告するものである。

2. 調査・実験の概要

調査・実験サイトは、花崗岩の広く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。岩盤ブロックの大きさは幅3m×奥行き3m×高さ2mであり、前面の壁面には実験対象とする節理が露出している。図-1に実験供試体の概要を示す。

今回実施した調査・実験は、境界条件を明確に設定した供試体中に存在する単一の節理内の流れの性質を調べることを目的とするものである。境界条件の設定には、供試体の一壁面にトレンチを掘削し、透水境界および不透水境界を明確にする。このトレンチ内に定水位に水を張り、対象節理内を浸透させたのち相対する透水境界で流出量を測定して、対象節理内流れに関する実験を行う。実験項目は以下の通りである。

2.1 節理調査

対象節理と交わる節理系を調べ、対象節理内の浸透流を検討する際の基礎資料とするものであり、水平面および壁面において節理調査を実施し、節理トレース図を作成した。

2.2 流速測定実験

トレンチ内に着色水を注入し、壁面節理において浸出時間を測定して、対象節理面における流速を算定する。本実験では浸透流の到達時間を計測し、供試体の平均長さから、流路が直線状と仮定した場合の節理内流れの実流速を算定するものである。

2.3 定水位透水試験

本試験はトレンチ内の水頭を6段階（対象節理トレースの代表高さとの水頭差：92, 102, 132, 162, 132, 102cm、動水勾配：0.591, 0.656, 0.848, 1.041, 0.848, 0.656）変えて実施し、各段階ごとに対象節理の流量が定常状態になるまで、流入量と流出量の測定を続ける。水頭の変化は、水頭の低い状態から所定の水頭値に段階的に順次上げ、4段階目が終了した後は先に実施した水頭に段階的に低下させる。

対象節理からの流出量は、流出口を複数の区間に分割して測定して、各区間の流出量分布を把握する。本試験の概念図を図-2に示す。

(1) 対象節理の流出量分布

定水位透水試験時の各区間の流出量から、対象節理の流出量分布を把握する。このデータは流路が推定された後の節理内浸透流シミュレーションに用いる。

(2) 対象節理の透水係数

定水位透水試験結果を用いて、設定した動水勾配と流量から対象節理の透水係数を算定する。また、平板モデルを仮定した場合の平均開口幅を算定する。

(3) 対象節理内の水頭分布

定水位透水試験中の対象節理の水頭を4つのボーリング孔で観測し、水頭増加から試験中の節理内水頭分布を推定する。

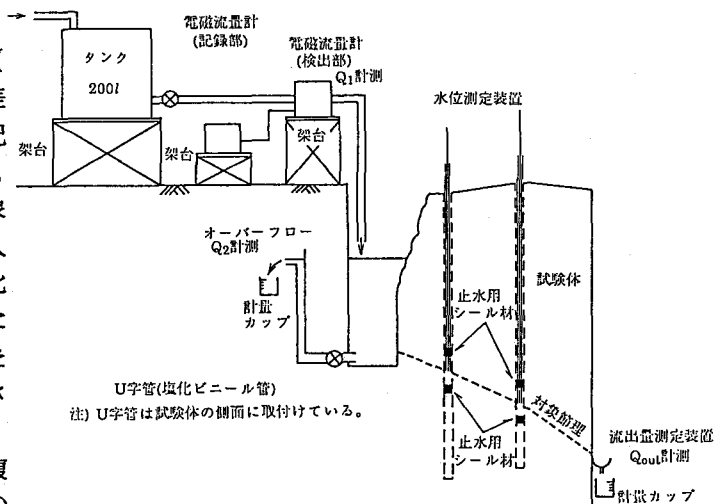


図-2 定水位透水試験の概念図

(4) ダルシー則の適用性

4段階の動水勾配で実施した定水位透水試験結果から水頭値と流量の関係が線形であるか調べ、対象節理においてダルシー則が適用できるか検討する。

2. 4 流路調査

トレンチからトレーサーとしてグラウト液を注入し、その固結を待って対象節理より上部の岩盤を掘削する。対象節理面上のグラウト液の固結地点を調査することにより、対象節理における流路を推定・記載する。また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する。

3. 調査・実験の結果

3. 1 節理調査の結果

節理調査の結果、本サイト各露頭壁面の節理系の密度は、水平面、側面、正面の順に6.7、5.0、3.3個/㎡であり、前回の実験サイトの節理密度約10個/㎡と比較して、全般に低い値となっている。

本実験の対象節理は、走向傾斜がN53W10NEであり、正面における平均開口幅は2.19mmである。

3. 2 流速測定実験の結果

表-1 流速測定結果

流速測定実験は対象節理を9区間に分割し、それぞれの区間ごとに到達時間を測定した。表-1はその結果を示したものである。流出した区間は、No.3～No.6であり、節理内の流速はNo.3～No.5では約0.64～0.80cm/S、No.6では0.071cm/Sであった。

節理区間	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
到達時間(秒)	注)	注)	207	193	243	2181	注)	注)	注)
流速(cm/s)	—	—	0.752	0.806	0.640	0.071	—	—	—

注) 2700秒(45分)測定して流出しなかった。

また実験中の動水勾配は0.584～0.590であり、大きな変化はない。

3. 3 定水位透水試験の結果

定水位透水試験の結果湧水の認められた区間はNo.3,4,5の各区間である。今回の実験では、注水量の90～100%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判明した。また対象節理内においてNo.3区間の湧水量が注入量の相当量を占めており、本サイトの主要な水みちがこの区間に流出するものであることがわかった。定水位透水試験の結果から求めた水頭差と平均流量の関係を図-3に示す。

本図より、動水勾配が大きくなるにしたがって、湧水量が増加していることがわかるが、水頭差と平均流量の間には線形関係は認められず、水頭差が大きくなるにしたがって平均流量の増加の割合が大きくなっている。

また、一般に透水係数はダルシー則が成立する範囲内で定義されるものであるが、ここでは流れの特性を調べる目的で透水係数を算定した。尚ここでの透水係数は単位トレース長当りの流量と動水勾配の関係として与えられるものである。図-4に動水勾配と

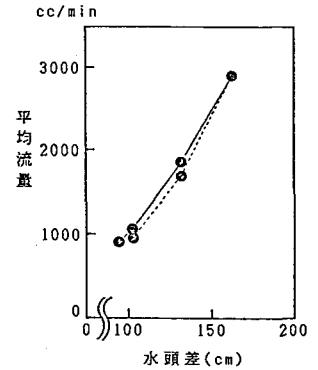


図-3 水頭差と平均流量の関係

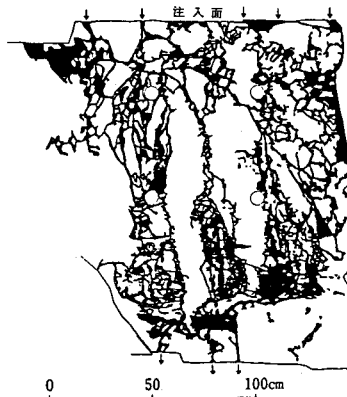


図-5 グラウト固結分布図

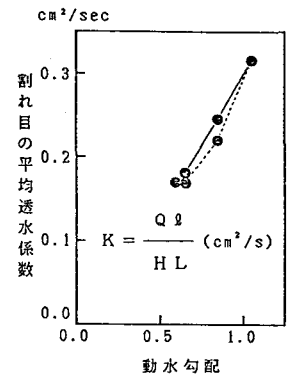


図-4 動水勾配と割れ目の透水係数の関係

透水係数の関係を示す。この図から動水勾配の増加とともに透水係数が増加しているのかわかる。

3. 4 流路調査

図-5がグラウト液固結後、上部の岩盤を掘削し、その掘削面における付着したグラウト固結の分布を示したものである。本図より明らかに各所でチャンネルフローが生じていることがわかる。

また、図-6は付着したグラウトの厚みの分布である。平均の厚みが0.537mmであり、全体としては0～2.0mmの範囲にわたっている。

4. 単純な流路モデルによる試験結果の解析および考察

ここでは流路モデルを用いて、本試験の結果をもとに実施した数値解析結果について述べる。

4. 1 解析モデルと境界条件

解析モデルは流路調査結果をもとに、1次元要素からなるネットワークモデルとして作成した。また各要素における透水係数は、平行平板を仮定した場合の透水係数値としている。

境界条件は表-2に示すとおりで、流出口の境界条件を変えて2タイプ設定した。また、解析手法は1次元要素を用いたFEM解析とし、飽和状態の定常解析である。定水位透水試験では流入側の水頭値（ポテンシャル値）を6段階変化させており、それぞれについての解析をおこなった。

4. 2 解析結果

1) TYPE-Aの解析結果

図-7は6段階の水頭変化で、水頭差92cm（上昇過程）についての各節点における圧力水頭分布を示したものである。本図を見ると流出口における圧力水頭が負の値（-1.6～-1.9m）となっていることがわかる。また他のケースもすべて負の値となっており、水頭差が最も大きい（162cm）場合には、流出口での圧力水頭は-7.3mになっている。

以上のような結果の生じた原因について以下の二つが考えられる。

一つは、設定した流路モデルの全体的な透水係数が実際の値よりも小さく評価されている可能性があることで、そのために境界条件として設定した流量を流出口から強制的に抜き取る形となり、流路内が負圧になっているものと考えられる。

もう一つは、推定した流路以外に卓越する流路が存在していることである。この場合、流路モデルが適切に評価されておらず、卓越した流路を欠くモデルを用いたことになる。

2) TYPE-Bの解析結果

TYPE-Aと同様に、6段階の水頭変化のうち水頭差92cm（上昇過程）についての各要素における流量分布

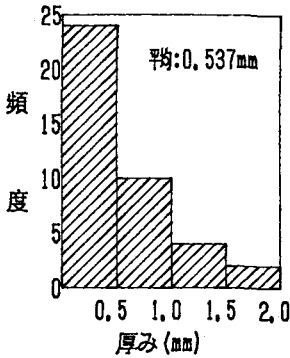


図-6 グラウトの厚みの頻度分布

表-2 境界条件と解析タイプ

解析タイプ	流入口	流出口	検討項目
TYPE-A	ポテンシャル指定	流量指定	流出口での圧力水頭
TYPE-B	ポテンシャル指定	ポテンシャル指定	流出口での流出量

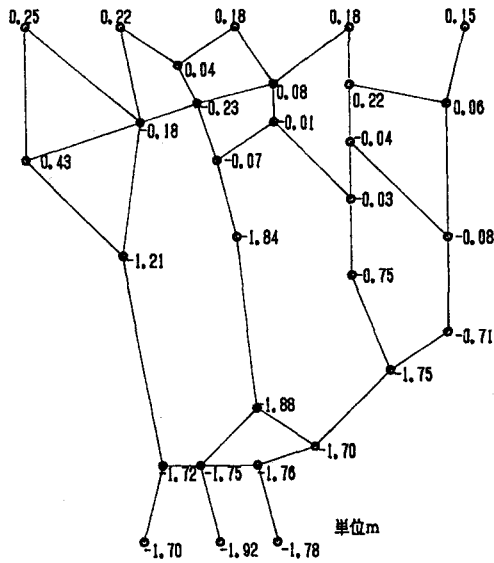


図-7 圧力水頭分布図（TYPE-A、水頭差92cm）

図を図-8に示す。この結果から流出量についてみると計算値と測定値が1オーダー小さくなっている。このことから流路の全体的な透水係数が実際の値よりも小さく評価されているか、またはこれ以外に卓越する流路が存在することが考えられる。

尚、図-9は解析から得られた要素流速の頻度分布を示したものである。対数平均した流速は5.13cm/sであり、実験から得られた実流速よりも1オーダー大きな値を示している。

4.3 平均開口幅の算定結果との比較

流路内で計測したグラウトの厚み（開口幅）の平均が0.537mmであったのに対して、定水位透水試験より平板モデルを仮定した場合の平均開口幅が0.325mmであり、この差はPoiseuille流れを仮定した場合の透水係数や流量の評価に1～2オーダーの違いを生じる。

5. おわりに

本研究は、境界条件を明確に設定した単一節理の浸透流実験をとりまとめたものである。ここでは、これらの実験結果および流路モデルを用いた解析を試みた。調査の結果について以下にまとめる。

① 流速測定実験の結果、実流速は0.64～0.80cm/sが得られ、前回に比して1オーダー小さな値であり、各節理により異なることが確認された。

② 定水位透水試験より、動水勾配が大きくなるにしたがって、流出量が増加している。同時に節理の透水係数も大きくなっている。これは注入部での水頭を上げるにより岩盤内部の水頭分布が変化し、新たな水みちを形成することによって、結果として透水性が高まったものと考えられる。

③ 節理内の流れの形態は前回と同様、複雑なチャンネリングを成しており、流路面積の節理面に占める割合は33.2%であった。

④ 単純流れモデルによる数値解析を行った結果、水頭値、流量、流速ともに実際の現象と大きな差を生じており、推定した流路モデルが合理的なものでないと思われる。その原因としては、推定した流路以外に卓越する流路が存在するか、流路全体の透水係数が実際の値よりも小さく評価されていると考えることにより、何れも説明することができる。

今後は、チャンネリング形態の幾何学的な解析等を行い、チャンネリングのパターン及び性質について検討を行っていく所存である。

参考文献

1) 菊地宏吉 他：実岩盤の節理内流れに関する実験と考察，第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，1989

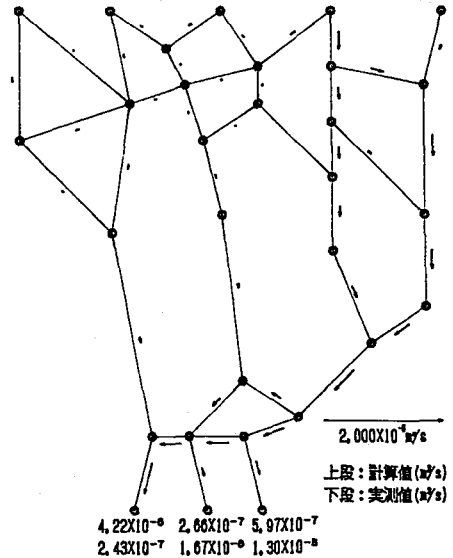


図-8 流量分布図（TYPE-B，水頭差92cm）

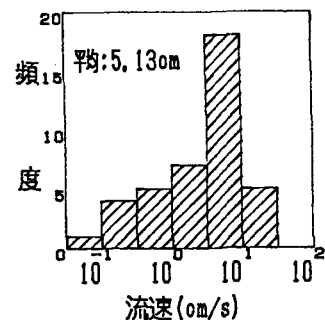


図-9 要素流速の頻度分布