

(31) 節理性岩盤におけるボーリング孔を用いた現場浸透流実験とそのシミュレーション

京都大学大学院 ○ 神田耕治
京都大学工学部 菊地宏吉
京都大学工学部 水戸義忠
三井建設(株) 中田雅夫

In situ experimental study of seepage flow using borehole.

Kohji Kanda, Graduate School, Kyoto Univ.
Kohkichi Kikuchi, Faculty of Engineering, Kyoto Univ.
Yoshitada Mito, Faculty of Engineering, Kyoto Univ.
Masao Nakata Mitsui Corporation

Abstract

In order to develop system for the analysis of seepage flow in jointed rock masses, the authors have carried out several in situ tests and examined the system we have developed. In this system, seepage flow is analyzed with a joint network model in which the joints are distributed statistically. Although the results of the simulation expressed in situ tests considerably, the flow was forced to flow along one direction.

Therefore we newly carry out in situ test similar to Lugeon-test whose flow is considered radial, and we apply this system to the test. In addition, we observed the boreholes through BT V and use their data for analysis effectively.

1. はじめに

著者らは節理性岩盤の浸透流解析システムを構築するために、これまでに数回にわたり現場浸透流実験を実施し、システムの開発・検討を行ってきた^{1) 2) 3) 4) 5)}。本研究では、新たに実施した現場実験に基づき、本システムに更なる検討を加えることを目的としている。

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。本システムはその考えに基づき、節理を浸透経路としたネットワークモデルを作成し、浸透流解析する流れになっている。このシステムで過去の実験をシミュレートした結果、解析値は実測値と良い対応を示した。しかしながら、これまでは浸透方向を一方向に強制した条件下での実験に留まっていたため、今回の実験では、ルジオン試験に類似した形でボーリング孔からの注水試験(図-1)を実施し、放射状の流れに対して本システムの適用を試みた。また、ボアホールテレビジョン(BTV)によるデータをネットワークモデルの作成に利用した解析も行った。

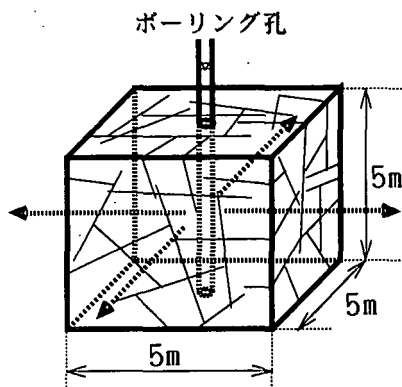


図-1 注水試験の概念図

2. 調査・実験の概要

2.1 試験ヤードとその調査

注水試験までの主な項目を以下に順を追って概説する。

(1) 露頭面の成形（試験ヤードの設定）

実験サイト周辺の瓦礫や表土を取り除き、十分な地下水位を確保できるまで新鮮な岩盤を掘削し、表面を概ね平らに整形することによって、調査・実験対象となる露頭面を成形した。この露頭面において設定した試験ヤードの大きさは、縦7m×横7mである（図-3）。

(2) 節理調査

調査は30cm以上のトレス長を持つ節理を対象として、走向、傾斜、トレス長および開口幅等を測定した。

(3) コンクリート打設

注水試験を行うにあたり、対象岩盤の境界条件を設定するためにコンクリートを打設した。図-2, 3に試験ヤードの断面図と平面図を示す。まず5m×5mの露頭面に厚さ50cm程度でキャップコンクリートを打設して不透水境界とする。その周囲の幅50cmは打設せず、更にその周囲に幅50cm、厚さ50cm程度で打設した。従ってコンクリートを打設していない部分が溝となり、これは試験時に水頭一定の透水境界となる。

(4) ボーリング孔の削孔

図-3に示す配置で径66mm、深さ5mのボーリング孔を5本削孔した。試験時にはこれらのうち1本を注入孔、残りの4本を水頭チェック孔とした。

(5) BTVによる調査

5本のボーリング孔にボアホールカメラを挿入し、節理やその他の不連続面を観察した。

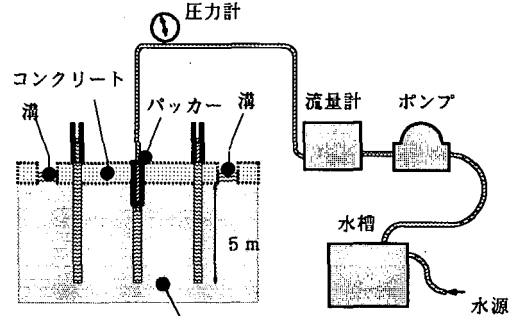


図-2 試験ヤードの断面図

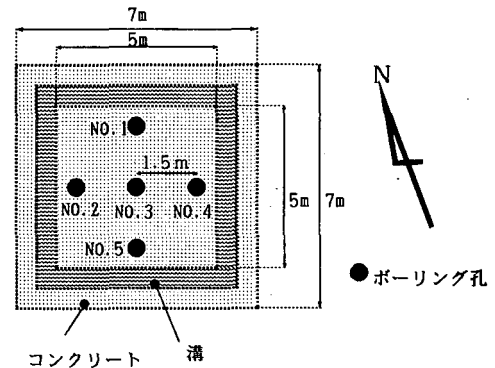


図-3 試験ヤードの平面図

2.2 注水試験

ルジオン試験に類似した形で、シングルパッカー方式によってボーリング孔からの注水試験を実施した。以下に試験装置と試験方法について概説する。

2.2.1 試験装置

まず図-2に示すように、試験ヤードのすぐ側にある水源から汲み上げた水を水槽に蓄える。注水ポンプによって水槽からパッカーへ水を送る。ポンプとパッカーの間に流量計を配置し岩盤への注水量を測定した。この流量計では流量と圧力の値がチャート上に示されるため、これによって定常状態を確認した。パッカー上部には圧力計を設置し、口元注入圧力を測定した。注水孔以外の4本の孔には、透明なビニールホースを用いて作った水位測定装置を取付け、コンクリート面から約650cmまでの水位を測定できるようにした。

2.2.2 試験方法

- (1) 試験前に各ボーリング孔の水位を測定し、これを初期水位とする。
- (2) 注水ポンプを作動させ、岩盤への注水を開始し、対象岩盤の飽和状態が確認できるまで注入圧力を上げる。飽和状態は、水頭チェック孔の水位が全て岩盤面よりも上になることと、試験ヤードを囲む溝の水位が一定に保たれることによって達成される。

- (3) まず口元注入圧力と流入量が一定になるように注水ポンプを調整する。それと同時に水頭チェック孔の水位が一定になれば定常状態とみなし、以後5分間の流量と、口元圧力および各孔の水位を測定した。
- (4) 測定を終了した後、注入圧力を下げ、次の圧力段階で同様の試験を繰り返す。圧力段階は原則として5段階とし、順次圧力を下げて試験を行った。
- (5) 以上のような試験を、NO.1～NO.5まで順次パッカーを入れ替えて行った。

3. 実験の結果と考察

3.1 節理調査結果

調査平面の全節理をシュミットネットに投影し卓越方向解析を行った結果を図-4に示す。N80E85NW、N13E70SE、NS15Wの順で卓越しており、これら3つの節理群で全体の80%以上を占める。

平面調査と同様に、BTVで観察された全節理の卓越方向解析を行った結果を図-5に示す。平面調査結果と比較してみると、各群の卓越する順番には違いが認められるものの、その方向において概ね対応していることがわかる。

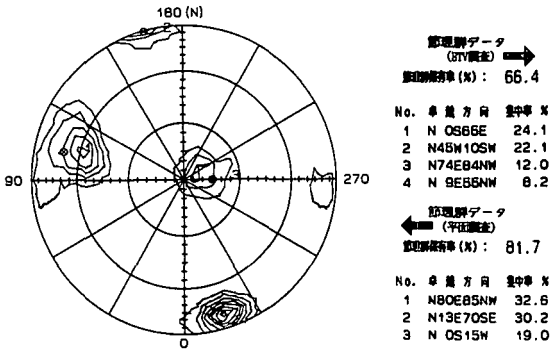


図-4 卓越方向解析結果(平面調査)

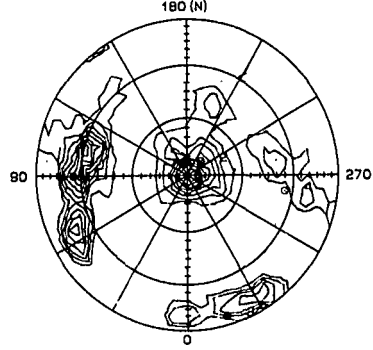


図-5 卓越方向解析結果(BTV調査)

3.2 注水試験結果

図-6、図-7は、それぞれNO.1～NO.5の孔から実施した注水試験における、有効注入圧力と注水量との関係を表している。いずれの試験も有効注入圧力と注水量の関係はほぼ線形となっている。従って、試験の対象岩盤においてはほぼダルシー則が成立している。表-1は、注水試験結果より得られた換算ルジオン値と、換算式 $1Lu=1.3 \times 10^{-5} (\text{cm/sec})$ から求まる透水係数をまとめたものである。前回の浸透流実験は本サイトに隣接する位置で行っており、透水係数は $1.54 \times 10^{-4} (\text{cm/sec})$ であった。今回の実験結果はこれとオーダー的に良い対応を示しており、妥当な試験結果であるといえる。

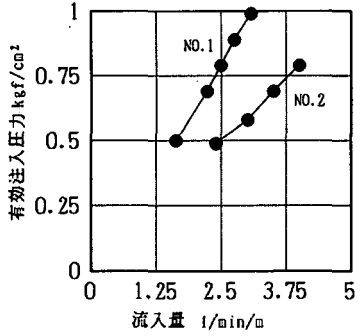


図-6 流量-有効圧の関係
NO.1,2から注水

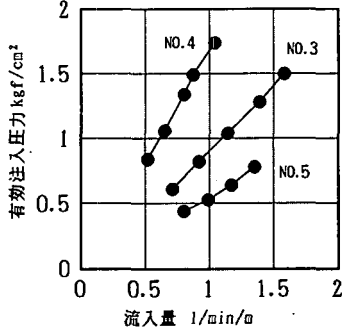


図-7 流量-有効圧の関係
NO.3,4,5から注水

表-1 注水試験結果

孔 NO.	換算ルジオン値 $1Lu'$	透水係数 (cm/sec)
1	28.1	3.78×10^{-4}
2	52.7	6.85×10^{-4}
3	11.2	1.46×10^{-4}
4	5.6	0.73×10^{-4}
5	15.6	2.03×10^{-4}

図-8～図-12は、それぞれNO.1～NO.5の孔から実施した注水試験における、有効注入圧力と各孔の水頭との関係を表している。いずれの試験も有効注入圧力と各孔の水頭の関係はほぼ線形となっている。また、図より孔間の相関性がわかる。まずNO.1の孔から注水した場合NO.2の孔が敏感に反応し、NO.2の孔から注水した場合NO.1の孔が敏感に反応している。このときNO.4とNO.5の孔はほぼ同じ挙動を示している。同じことがNO.4とNO.5の孔から注水した場合にも当てはまり、このときNO.1とNO.2はほぼ同じ挙動を示している。よってNO.1とNO.2、NO.4とNO.5がそれぞれ強い相関性を持っているといえる。

このような岩盤の透水異方性は、節理の分布性状によって支配されると考えられる。節理調査の結果、最も卓越した方向はN80Eである。図-3でこの方向とボーリング孔の位置関係を見てみると、節理の方向性が、NO.1とNO.2、NO.4とNO.5が相関性を示した要因になったものといえる。

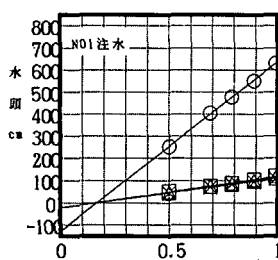


図-8 有効注入圧-各孔の水頭

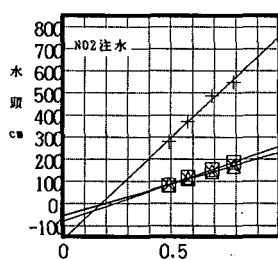


図-9 有効注入圧-各孔の水頭

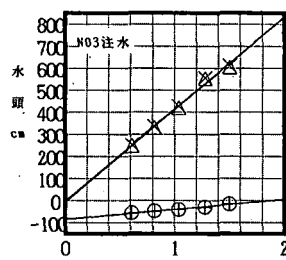


図-10 有効注入圧-各孔の水頭

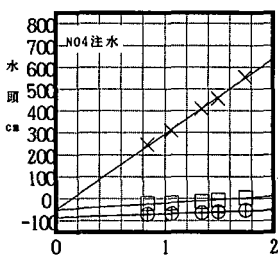


図-11 有効注入圧-各孔の水頭

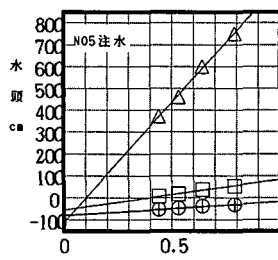


図-12 有効注入圧-各孔の水頭

凡 例	
+	孔 NO1の測定水頭
○	// NO2 //
□	// NO3 //
△	// NO4 //
×	// NO5 //

4. 現場実験のシミュレーションとその結果

本解析システムは、浸透流解析モデルとして流路の規模や形態を考慮した3次元ネットワーク解析（割れ目系モデル）を取り扱い、浸透流路を1次元要素に設定し、ダルシー則に従う浸透流の支配方程式を、有限要素法により定式化することによって問題の解析をおこなうものである。詳細は文献^{1) 2) 3) 4) 5)}に譲る。今回は、従来の平面節理調査に基づく解析手法に加え、ボーリング孔のデータを取り入れた解析を試みた。

4.1 ボーリング孔のデータのモデル化への適用性に関する検討

まずボーリング孔のデータを解析に用いるために、調査平面のデータとの比較・検討を行った。調査平面では7つの節理特性要素（方向性、連続性、開口性、稠密性、連結性、挟在性、粗面性）を調査するが、BTVによる調査の性質を考えて、方向性、稠密性の2点に絞って検討した。

方向性に関しては、3.1で述べたように、概ね同じ方向に卓越方向が現れていることから、ボーリング孔のデータを調査平面のデータと同様にモデル化に用いて良いものと考えられる。

次に稠密性に関しては、平面調査から得られる2次元密度と、BTVから得られる1次元密度を直接比較することはできない。そこで、まず調査平面のデータを用いてモデル化を行い、3次元空間（5m立方）に節理を疑似発生させた。同時にボーリング孔の位置も入力した。そしてこれらの節理の内、5本のボーリング孔いずれかに交差する節理の本数を計算した。全部で30通りのモデルについて計算したが、いずれも160本

前後の値を示した。これに対して実際にBTVで観察された節理の本数は170本である。このことから、稠密性に関しても調査平面のデータと同様にBTVから得られたデータをモデル化に用いて良いものとする。

4.2 ボーリング孔のデータを用いた3次元幾何学モデルの作成

本研究では4.1の結果を踏まえ以下の3つのタイプのモデルを考え、ボーリング孔のデータを用いた解析を行った。

Aタイプ：従来通り、調査平面のデータだけを用いてモデル化を行う。

Bタイプ：方向性、稠密性についてはボーリング孔のデータを用いる。

Cタイプ：BTVで実際に観察された節理については、その位置、方向、開口幅を決定論的にモデルに入力。残りの空間にはBタイプと同様にして節理を確率的に発生させる。

以上の3つのモデルから分かるように、C, B, Aの順でボーリング孔のデータをより多く取り入れている。

4.3 解析結果と考察

解析は、NO.3から注水した条件で各タイプ30ケース行った。図-13～図-15はそれぞれ、A, B, Cタイプの解析結果を対数頻度分布図にまとめたものである。横軸がルジオン値の対数で、縦軸が頻度である。A, B, Cとも実測値付近を中心とした分布となっており、現実を良く反映した結果となっている。また、平均値はいずれも実測値(11.2Lu)よりも高めにでているが、オーダー的には良い対応を示している。さらに、ボーリング孔のデータをより多く用いたもの程妥当な結果を得たことになる。

透水性状という点においては、ボーリング孔のデータをモデル化に適用できるのではないと言える結果を得た。特にCタイプのように、決定論的に扱える節理をモデル化に反映することが効果的となった。

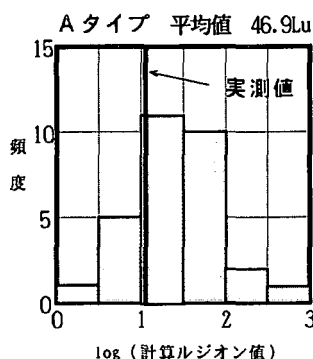


図-13 Aタイプ解析結果

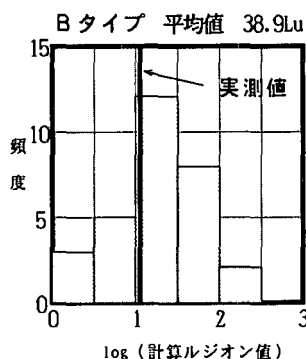


図-14 Bタイプ解析結果

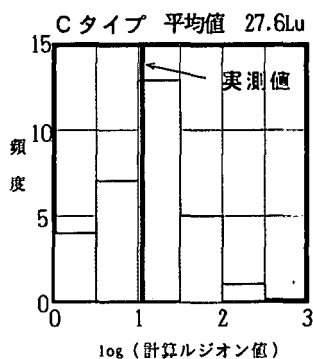


図-15 Cタイプ解析結果

参考文献

- 1) 菊地宏吉・三室俊昭・小林隆志・水戸義忠(1989)：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
- 2) 水戸義忠・菊地宏吉・鶴田 修・本多眞(1990)：実岩盤の節理内流れに関する実験と考察（その2）；第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集
- 3) 菊地宏吉・水戸義忠・三室俊昭・本多眞・山本佳正(1991)：節理性岩盤の浸透流に関する実験的研究；第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集
- 4) 水戸義忠・菊地宏吉・山本佳正・吉川浩二(1993)：節理性岩盤における3次元浸透流解析システムの提案；第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集
- 5) 菊地宏吉・水戸義忠・吉川浩二・神田耕治・中田雅夫(1994)：節理性岩盤の現場浸透流実験とその解析；第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集