

(100)原位置透水試験によるトンネル周辺岩盤の水利特性の調査

清水建設(株)技術研究所	正会員	○木下直人
清水建設(株)技術研究所	正会員	安部 透
三井金属鉱業(株)資源開発部		竹村友之
三井金属鉱業(株)資源開発部		横本誠一

Investigation of Hydraulic Properties in Rock Mass Around Tunnels Using Injection Test

Naoto KINOSHITA, Tohru ABE	Institute of Technology, Shimizu Corporation
Tomoyuki TAKEMURA, Seiichi YOKOMOTO	Mitui Mining & Smelting Co.,LTD.

Abstract

Hydraulic properties and fracture characteristics of crystalline rock around tunnels were investigated from five locations at different depths in a particular area.

The measurements showed that the increase in permeability due to tunnel excavation was confined to a shallow zone close to the tunnel. In most locations, the extension of this zone was 0.6m at maximum.

The experimental results indicated that the permeability of the rock mass decreased significantly with depth. The decrease in it was principally due to a decrease in the fracture aperture. By contrast, the permeability of the intact rock was no significant variation with depth. The value of the intact rock permeability was much smaller than that of the rock mass permeability even at a depth of about 1 km.

1. はじめに

一般に、地下深部になると、岩盤の透水性は低下する傾向があることが知られている。例えば、Carlsson¹⁾は、スウェーデンにおける結晶質岩からなる岩盤の透水係数と深度の関係に関する測定例をまとめて、岩盤の透水係数は、深度の増大に伴って大幅に低下することを報告している。わが国では、厚い風化帯が存在したり、岩種が途中で変わったりするケースが多いこともあって、スウェーデンの例のような明瞭な関係がみられるのはむしろ例外的であり、全体としての傾向はまだはっきりしていない。そこで、比較的一様な岩盤が浅部から地下深部まで分布しているとみなすことができる、結晶質岩盤内の、深度の異なる5地点において、トンネルの側壁部に穿孔したボーリング孔を利用して、原位置透水試験および岩盤の不連続面の調査を行った。そして、岩盤の透水性と深度および不連続面の特性の関係について検討を行った。

また、わが国における、空洞掘削による周辺岩盤の透水性変化に関する既存の計測結果によれば、掘削前と比較して、透水性がほとんど変化しない場合もあれば、数百倍に増加する場合もある。透水性が増大する範囲も様々である。そこで、トンネル周辺岩盤の透水特性に対する掘削の影響についても同時に検討を行った。本論文では、これらの検討結果について報告する。

2. 調査試験概要

2.1 調査地点

調査試験は、鉱山の坑道を利用して行った。その断面積は約16m²である。付近の地質は、片麻岩、「混成型花崗岩」と呼ばれる花崗岩質の変成岩および石灰岩からなり、いずれの岩石も約1.8億年前に大きな変成作用を受けた結晶質の岩石である。周辺には、破碎帯を伴う大規模な断層から節理までの多様な割れ目が分布

している。調査地点としては、大規模な断層を避け、幅が数cm以下の小規模な割れ目だけが存在するところからA、B、C、D、Eの5地点を選んだ。調査地点の深度（土被り）は、A地点で150m、B地点で240m、C地点で290m、D地点で660m、E地点で940mである。したがって、最も浅いA地点と、最も深いE地点との間には約800mの差があることになる。またA、B、Cの3地点とD、Eの2地点とは南北方向に約5km離れている。割れ目の密度、開口幅、挟在物の有無に関しては調査地点毎に差異は認められるが、挟在物はいずれも粘土、方解石、石英、緑簾石等からなり、挟在物の種類に関する大きな違いは認められない。

2.2 調査試験方法

(1) ボーリング調査およびボアホールテレビによる割れ目の調査

透水試験の事前調査として、透水試験用ボーリング孔における割れ目の分布・性状を把握するため、採取したボーリングコアの観察およびボアホールテレビによる孔内観測を行った。ボーリングコアの観察内容は、岩相分布、RQD、割れ目密度、挟在物の種類等である。

(2) 原位置透水試験

各地点において、トンネルの側壁部からほぼ水平に穿孔したボーリング孔を利用して、一定水頭注入法により岩盤の透水係数を測定した。A、B、Cの3地点では各1本、D、Eの2地点では各2本のボーリング孔について、試験を実施した。試験装置としては、ルジオン試験装置を改良し、高精度かつ低透水係数まで測定できるようにしたものを用いたが、できるだけ広範囲にわたって透水係数の測定を行うことができるようにするため、容量がそれぞれ1.2ℓ、6.0ℓおよび12.0ℓの3種類の注水用タンクが装備されている。透水試験の測定区間長は、トンネル壁面に近いところでは原則として2.0m、壁面から離れたところでは原則として5.0mとし、壁面から15m前後の深さまでの透水係数の測定を行った。なお、ダブルパッカー法により測定を行っており、パッカーの設置区間が必要なため、トンネル壁面から0.6m以浅については測定を行うことができなかった。透水試験は、注入圧力を段階的に昇圧および降圧して行い、各試験区間について、原則として昇圧時5回、降圧時4回の計9回行なった。各注入圧力の値は、予め測定した実測間隙水圧から測定装置の限界圧力である1MPaまでを5等分した値である。そして、各圧力段階において、5分間放置した後、10分間における注水量を測定することを基本とした。しかし、今回測定対象とした岩盤は、全体的に透水性が低く、時間的な制約から、定常状態に達しない状態で注水量を測定せざるを得ない場合が多かった。そして、特に透水性が低い場合には、昇圧時だけの測定とし、原則として10分間放置した後、60分間における注水量を測定した。なお、透水係数が 1×10^{-12} m/s前後以下になると、測定区間が5mの場合でも、今回の装置では測定が困難であった。

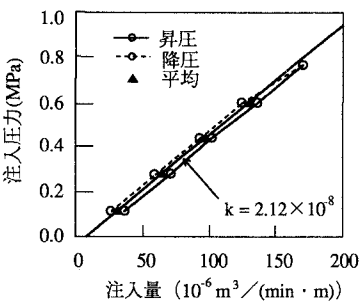
(3) 室内透水試験

A、B、DおよびE地点から、顕著な割れ目を含まないコアを採取し、それぞれについて、透水係数の応力依存性を調べるため、有効応力を0.98, 2.94, 9.8, 27.5 MPaと変化させて透水試験を実施した。試験方法としては、トランジェントパルス法²⁾を用いた。

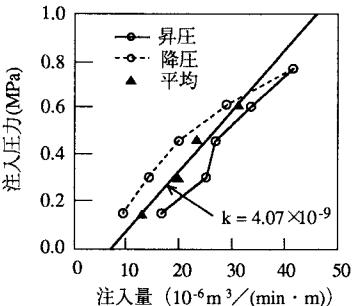
3. 調査試験結果および考察

3.1 P-Q曲線から透水係数を求める方法

原位置透水試験によって得られたP-Q曲線の例を図-1に示す。全体的に、岩盤の透水性が低いため、注入圧力Pと注入流量Qとの関係は、(a)の例のように、昇圧時と降圧時の両者がほ

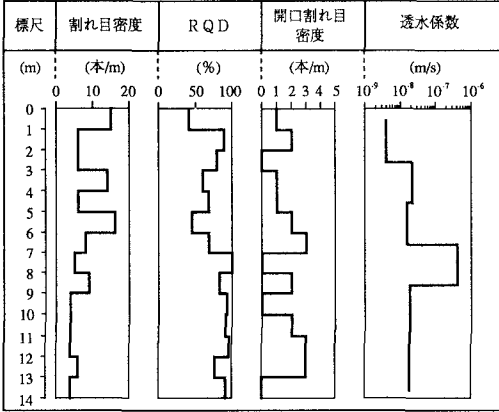


a) ほぼ直線を示す例
(A地点2.6~4.6m)

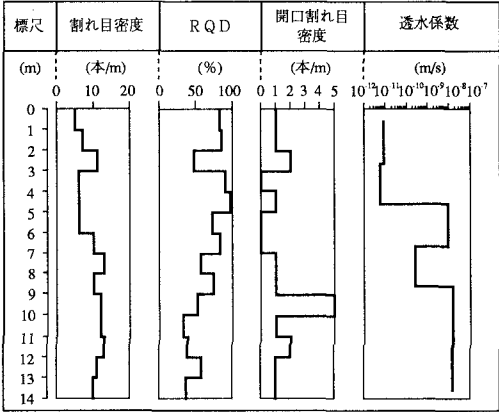


b) ループ状を示す例
(A地点0.6~2.6m)

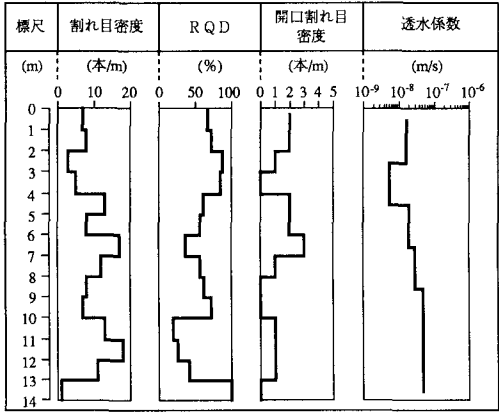
図-1 P-Q曲線の例



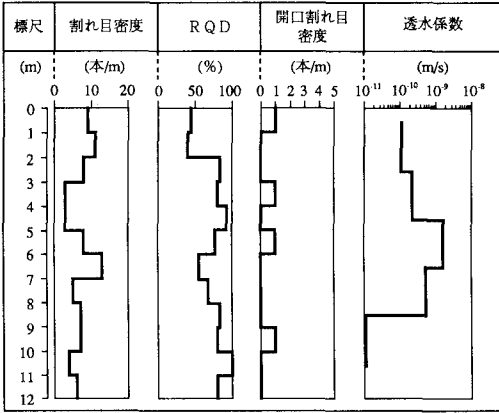
a) A地点



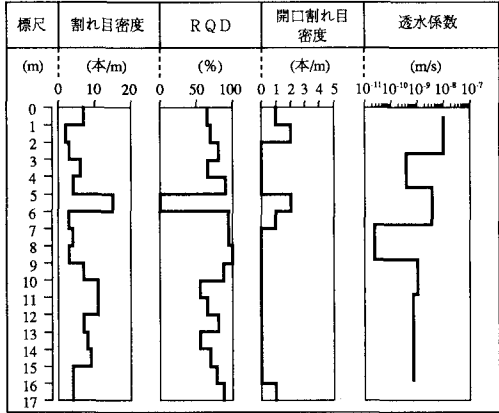
b) B地点



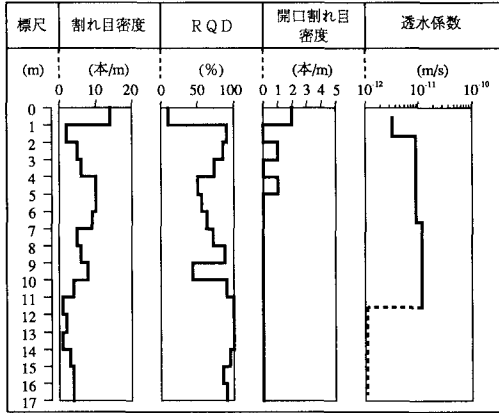
c) C地点



d) D-1地点



e) D-2地点



f) E-1地点

図-2 各ボーリング孔の透水試験結果および不連続面調査結果の比較

ば一致し、直線的になる場合は少なく、多くの場合（透水係数が 10^{-9}m/s 以下のオーダーの場合）は、（b）の例のように、昇圧時と降圧時のデータを結んだ曲線の形状がループ状になっている。その傾向は透水係数が小さい区間ほど著しい。このように、ループ状になる原因は以下のように考えられる。昇圧時において、注入区間からの水の流れが定常状態にならないうちに次の圧力段階に移行すると、測定される流量が定常時のそれよりも大きくなる。一方、降圧時には、前圧力段階で現圧力よりも大きい圧力で注水しているため、測定される流量が定常時のそれよりも小さくなる。以上の理由によって、昇圧時のP-Q曲線の勾配と降圧時のP-Q曲線の勾配が異なり、それは透水係数が小さいほど顕著になると考えられる。したがって、このようなP-Q曲線から透水係数を求めようとする場合、昇圧時の曲線または降圧時の曲線のどちらかだけを用いるのは適当でない。そこで、各圧力段階毎に、昇圧時の注水量と降圧時のそれとの平均値を求め、それをその圧力での注水量とする。このようにして得られたP-Q曲線から最小自乗近似により透水係数を求めた。

3.2 各ボーリング孔の透水係数およびトンネル掘削の影響

各地点毎の、ボーリングコア観察による割れ目密度、R Q D、ボアホールテレビ観察による開口幅1.0mm以上の割れ目密度および透水係数分布を図-2に示す。なお、本論文では、以下、ボアホールテレビ観察による開口幅1.0mm以上の割れ目を単に開口割れ目と記すものとする。また、E-2地点では、ほとんどの測定区間において、透水性が非常に低く、透水係数を求めることができなかったため、図に示してない。A、DおよびE地点では、例外はあるが、トンネル壁面から1.0mまでの範囲における割れ目密度が他の区間より大きく、またR Q Dが他の区間より小さくなっており、トンネル掘削の影響を受けた可能性がある。一方、透水試験結果からみると、トンネル掘削の影響を受けた可能性がある箇所はほとんどみられず、わずかにD-2地点のトンネル壁面から0.6~2.6 mの区間において、緩みにより、透水性が増大した可能性があるだけである。したがって、D-2以外の地点では、トンネルの掘削により、新たな割れ目が生じたり、既存の割れ目が開口したりすることによって、透水性が増大した可能性があるのは壁面から0.6mまでの範囲に限られると考えられる。

3.3 岩盤の透水係数と深度の関係

各ボーリング孔毎の、平均的な透水係数、割れ目密度および開口割れ目密度を表-1に示す。トンネル壁面に近い部分は、掘削の影響を受けている可能性があるため、それを除外するため、これらの値を求める際には、壁面から約2m以深における調査試験データを用いた。平均透水係数kは、次式を用いて求めた。

$$k = \frac{\sum k_i L_i}{\sum L_i}$$

(1)

ここで、Lは測定区間長である。また、E-2地点では、前に述べたように、透水性が非常に小さく、透水係数を求めることができなかったが、透水試験装置の測定限界を考慮して、その透水係数を $1.0 \times 10^{-12}\text{m/s}$ として表に示した。図-3に示す室内透水試験結果によれば、D地点から採取した岩石の透水係数は、微細な

表-1 各地点の平均透水係数および不連続面調査結果の比較

地点	深度 (m)	平均透水係数 (m/s)	割れ目密度 (本/m)	開口割れ目密度 (本/m)
A	150	8.8×10^{-8}	7.2	1.42
B	240	8.0×10^{-9}	9.8	1.25
C	290	3.3×10^{-8}	9.7	1.00
D-1	660	5.9×10^{-10}	6.4	0.30
D-2		1.1×10^{-9}	6.8	0.27
E-1	940	7.1×10^{-12}	5.2	0.13
E-2		(1.0×10^{-12})	4.1	0.07

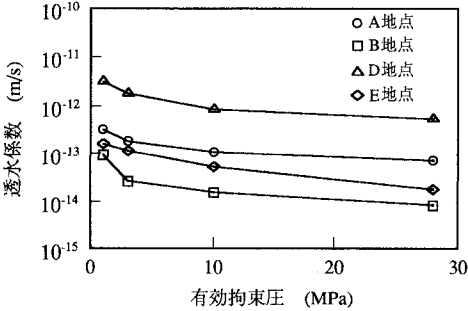


図-3 室内透水試験結果

クラックが発達しているため、やや透水係数が大きく、 10^{-13} m/s から 10^{-12} m/s のオーダーの値を示しているが、それ以外の地点から採取した岩石の透水係数は、いずれも採取深度にかかわらず、 10^{-14} m/s から 10^{-13} m/s のオーダーの値を示している。一方、岩盤の透水係数は、図-4 に示すように、深度の増大に伴って大幅に低下している。最も深度の浅いA地点と最も深いE地点とを比較すると、後者の方が約4桁透水係数が小さい。原位置試験によって得られた岩盤の透水係数と室内試験によって得られた岩石の透水係数とを比較すると、深度が浅い地点では約6桁、最も深度が深く、両者の差が小さいE地点でも1桁以上前者の方が大きな値を示している。したがって、今回対象とした岩盤の透水性は、深さ1 km程度までであれば、割れ目の透水性だけで決定されるとみなすことができる。

次に、岩盤の透水特性と不連続面の特性との関係について検討を行う。表-1 に示したデータによれば、岩盤の透水係数と割れ目の密度との間にはあまりはっきりとした相関性は認められない。例えば、A地点とD地点とを比較すると、両者の割れ目密度はわずかしき違わないのにもかかわらず、透水係数は前者の方が約2桁大きい。一方、透水係数と開口割れ目の密度とを

比較してみると、両対数グラフ上でほぼ直線関係を示しており、両者の間には、明瞭な相関性が認められる(図-5)。これは、地下深部になると、地山応力が増大し、割れ目の開口幅が減少することにより、岩盤の透水性が低下するというを示している。

4. おわりに

結晶質岩盤内の深度の異なる5地点において、トンネルの側壁部に穿孔したボーリング孔を利用して、透水試験を行い、周辺岩盤の透水特性を調べた。また、ボーリングコアの観察やボアホールテレビ観察により、岩盤不連続面の調査を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 今回調査を行った地点では、岩石基質部分の透水性は非常に低く、深さ1 km程度までであれば、岩盤の透水性は、割れ目の透水性だけで決定されるとみなすことができる。
- 2) 岩盤の透水係数は、深度の増大に伴って、主として割れ目の開口幅が減少するため、大幅に低下する。
- 3) 今回調査した大部分の地点では、トンネル掘削により岩盤が劣化し、透水性が増大した可能性があるのは、壁面から0.6 m程度までのごくわずかな範囲に限られる。

今後更にデータを蓄積し、今回得られた結果がどの程度わが国における結晶質岩の水理特性に関する一般的特徴を反映しているのかについて検討を行っていく必要がある。

参 考 文 献

- 1) Carlsson, L., Winberg, A. and Rosander, B.: Investigations of Hydraulic Properties in Crystalline Rock, Materials Research Society Symposia Proceedings, Vol.26, pp.255-267, 1984.
- 2) 奥野哲夫, 斎藤 章: 透水性の低い岩石の室内透水試験方法, 第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.381-385, 1986.

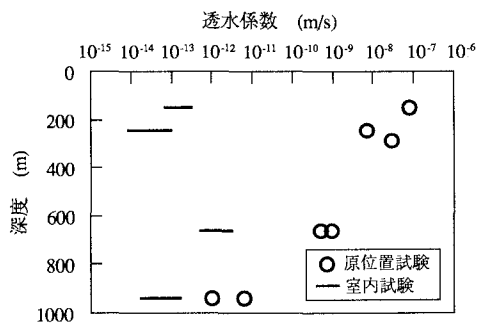


図-4 岩盤、岩石の透水係数と深度の関係

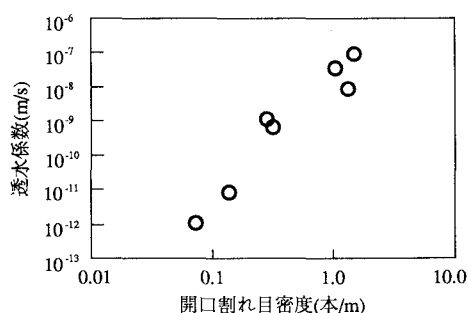


図-5 平均透水係数と開口割れ目密度の関係