

(43) 空洞掘削に伴う周辺不連続性岩盤の透水特性変化

PERMEABILITY CHANGES OF DISCONTINUOUS ROCK MASS AROUND UNDERGROUND OPENINGS
DUE TO EXCAVATION

木下直人*・石井 卓*・安部 透*・竹村友之**

Naoto KINOSHITA, Takashi ISHII, Tohru ABE and Tomoyuki TAKEMURA

Permeability tests were conducted in order to investigate the excavation induced permeability changes of discontinuous rock mass around two underground openings.

The measurements showed that the permeability in the surrounding rock mass changed systematically during excavations, and that the zones of the permeability increased by a factor of 5 or more differed greatly in thickness depending on the scale of the underground openings.

The results indicated that the major causes of the permeability change would be blast-induced damage and opening or closing of the existing fractures due to the redistribution of stresses.

1. はじめに

地下空洞の掘削に伴う周辺岩盤の透水特性の変化を予測することは、地下構造物に要求される機能を確保するため、また、建設工事の周辺への影響を評価する上で重要である。既存の研究結果によれば、空洞掘削に伴う周辺岩盤の透水性は、掘削前と比較して変化しない場合もあれば、数百倍に増加する場合もある。透水性の変化する領域の広がりに関しても様々であり、既存のデータだけに基づいて空洞掘削時の透水性変化領域の広がりと変化の程度を予測することは困難である。したがって、空洞掘削に伴う周辺岩盤の透水性変化のメカニズムの解明にも役立つ、質のよい実測データを取得することおよび透水性変化の予測手法を開発することは非常に重要である。そこで、このような考え方に基づいて、不連続性岩盤を対象にして、原位置透水試験およびボーリング調査、ボアホールテレビによる割れ目の調査を実施したので、その結果を報告する。

2. 調査・試験の概要

2.1 調査地点

調査・試験は、岐阜県の神岡鉱山内で実施した。付近の地質は、主に飛騨変成岩類に分類される片麻岩、「混成型花崗岩」とよ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。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。そして、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。

2.2 新規坑道掘削時の調査・試験

土被り約770 mの地点において、新規坑道の掘削前後に透水試験を実施した。坑道はほぼ矩形断面（幅約5.4m、高さ約3.8m）であり、その断面積は約20 m²である。

透水性の変化が主として応力の再配分の影響によるのであれば、測定する方向によって得られる結果が異

* 正会員 清水建設株式会社

** 三井金属鉱業株式会社

なると予想されるので、図-1に示すように、ほぼ直交する2方向について、既存坑道の壁面から、各2本ずつボーリング孔をほぼ水平方向に削孔し測定を行った。No.1孔およびNo.2孔は、新規坑道に平行な方向であり、それぞれ坑道から1.4 mおよび3.4 m離れている。一方、No.3孔およびNo.4孔は、新規坑道にはほぼ直交する方向であり、その先端はほぼ底盤に向いている。測定区間長は、

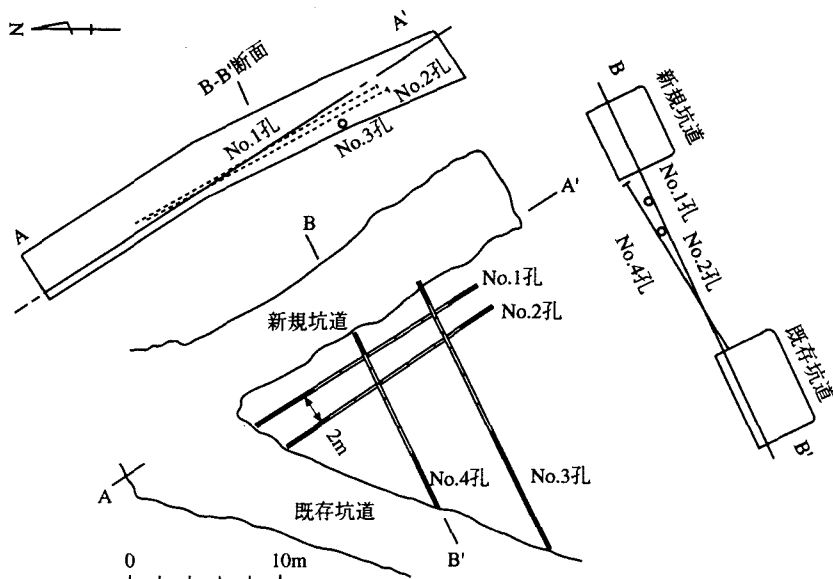


図-1 測定位置図 (新規坑道)

原則として2.0 mとしたが、No.3孔およびNo.4孔の、新規坑道に近い3区間だけは、それぞれ1.0 mとした。

原位置透水試験は、岩盤の透水試験方法としては最も一般的な方法である、一定水頭注入法を用いて行った。具体的な試験方法および得られたP-Q曲線から透水係数を求める方法は、基本的には、既に筆者らが報告した方法¹⁾と同じである。

不連続面の調査としては、透水試験ボーリング孔のコア観察およびボアホールテレビ (BTV) による孔内観測を行った。

2.3 地下大空洞掘削時の調査・試験

東大宇宙線研究所が、現在神岡において、スーパー神

岡地下実験装置 (スーパーカミオカンデ) を建設中である。空洞の規模、形状は、直径40 m、高さ58 mのサイロ型で、土被りは約1000 mである。空洞掘削時の周辺岩盤の透水性の変化は、空洞の規模によって異なると予想されるので、坑道掘削時のそれと比較するために、この大空洞の建設に伴う周辺岩盤の透水性の変化の測定を行った。透水試験は、図-2に示すように、空洞の側壁において、3回実施した。1回目は、ドーム部の掘削時、2回目は、透水試験孔の先端部まで掘削が進行した時、そして3回目は掘削が全て終了した時である。測定区間長は、深度11.8 mから31.8 mまでの区間では4.0 m、深度31.8 mから深度39.8 mまでの区間では2.0 mとした。透水試験の方法および不連続面の調査方法は、坑道掘削時におけるそれと同じである。なお、BTVによる孔内観測は、透水試験と同様に計3回実施した。

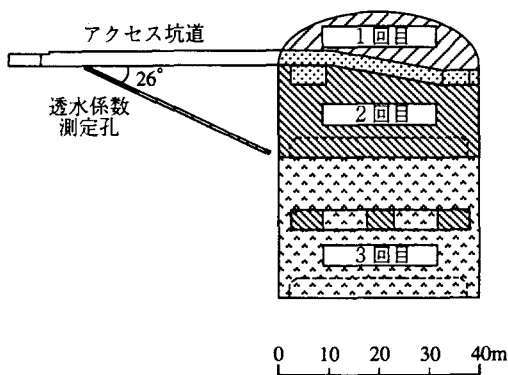


図-2 測定位置図 (大空洞)

3. 調査・試験結果

3.1 新規坑道掘削時の周辺岩盤の透水性変化

各ボーリング孔毎の、ボーリングコア観察による割れ目密度、BTV観測による開口割れ目密度および透

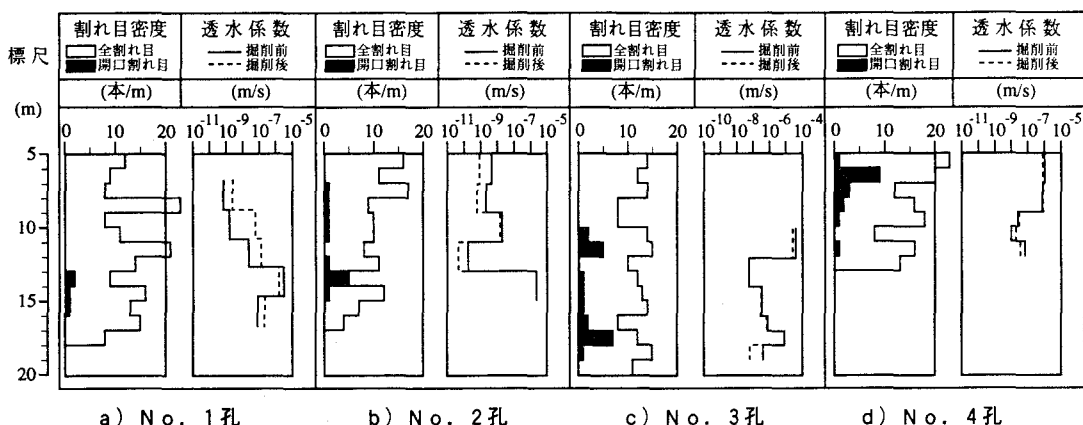


図-3 新規坑道掘削時の各ボーリング孔の透水試験および不連続面の調査結果

水係数分布を図-3に示す。本論文では、BTV観測による開口幅1.0mm以上の割れ目を開口割れ目として扱うものとする。なお、掘削後に実施したBTV観測結果では、全てのボーリング孔において、割れ目の開口幅の変化は全く観測されなかった。

掘削前の透水係数は、測定区間毎に大きくばらついており、 10^{-5}m/s のオーダーの値を示すところから、 10^{-10}m/s のオーダーを示すところまである。全体的にひん岩の岩脈の貫入の影響を受け、割れ目密度が高く、その影響で、土被りが大きいものにもかかわらず、比較的透水係数が大きい区間が多くなっている。

割れ目の密度と透水係数との間にはあまり明瞭な相関性は認められない。一方、開口割れ目の密度と透水係数との間にははっきりとした相関性が認められ、開口割れ目密度が高くなると透水係数が大きくなっていることがわかる。

坑道掘削後のNo.1孔の透水係数は、一つの区間(深度12.7~14.7m)を除いて、掘削前に比べて3.7~34倍に増大しており、No.1孔全体としては透水係数は増大したといえることができる。No.2孔では、No.1孔とは逆に、掘削前に比べて1.0~0.19倍に減少している。No.3孔およびNo.4孔では、いずれも新規坑道に最も近い区間で掘削前に比べて透水係数がそれぞれ0.17倍および0.45倍に減少している以外は、掘削前よりもわずかに透水係数が増加するかまたはほとんど変わらない値を示している。

このように、岩盤の透水係数は、割れ目の影響により大きくばらついているものにもかかわらず、掘削による透水性の変化には明瞭な規則性がみられる。

3.2 大空洞掘削時の周辺岩盤の透水性変化

不連続面の調査結果および透水試験結果を図-4に示す。掘削前の透水係数(第1回目の測定値)は、深度28m(空洞壁面から約14m)以浅では 10^{-11} から 10^{-12}m/s のオーダーであり、非常に小さな値を示している。深度11.8~27.8mの平均透水係数は $1.6 \times 10^{-11}\text{m/s}$ である。深度28m以深では、 10^{-7} から 10^{-8}m/s のオーダーであり、1000mの深度の透水係数としては大きめの値を示している。深度27.8~39.8mの平均透水係数は $2.5 \times 10^{-7}\text{m/s}$ である。割れ目密度では両者の違いはあまり明瞭ではないが、開口割れ目密度は明瞭に異なっている。10~28mの区間における平均開口割れ目密度は0.17本/mであるのに対して、28m以深でのそれは、1.08本/mであり、後者の方が開口割れ目密度が高くなっている。第2回目および第3回目の

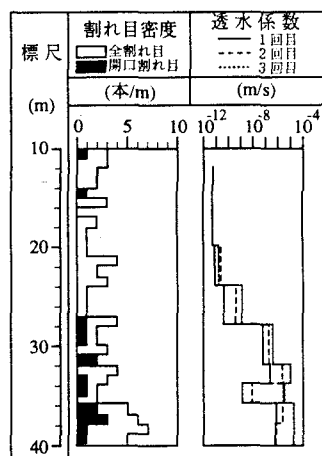


図-4 大空洞掘削時の透水試験および不連続面の調査結果

測定結果によれば、深度20 m（空洞壁面から約21 m）以深では、掘削により透水性が増大している。2回目の測定では、最も透水性が増大しているところでも、約9倍であったが、3回目の測定（掘削終了後）では、大幅に透水性が増大しており、最大3桁透水性が増大している区間もある。

第2回目の測定においては、割れ目の開口幅の変化は全くみられなかった。第3回目の測定でも、割れ目の開口幅の変化は少ししかみられず、わずかに、深度38～40 m（空洞壁面から約3～5 m）の区間において、3本の割れ目の開口幅が増大しただけである（いずれも0.5mm以下）。したがって、空洞周辺の岩盤は、力学的には全く安定している状態で、透水性だけが大きく変化したと考えられる。

4. 空洞掘削に伴う周辺岩盤の透水特性変化のメカニズムの検討

不連続性岩盤における空洞掘削に伴う透水性変化のメカニズムについて検討を行ってみた。問題を簡単にするために、図-5に示すような円形断面の場合で考えることにする。不連続性岩盤の場合には、空洞周辺の不連続面の分布状況によっては、壁面近傍に、応力再配分に伴う荷重の増大を負担できないゾーンが発生することが考えられる。不連続性岩盤における「ゆるみ領域」はこのようなゾーンであると考えれば、ゆるみ領域内では、半径方向応力 σ_r も円周方向応力 σ_θ も掘削に伴い大幅に減少するので、どちらの方向の透水性も増大すると予想される。その外側では、円周方向応力 σ_θ は、ゆるみ領域と接する部分において最大となり、そこから離れるにしたがって急激に低下するのに対して、半径方向応力 σ_r は、ゆるみ領域と接する部分で非常に小さな値を示し、そこから離れるにしたがって急激に増加することが予想される。このような応力の再配分に伴って、壁面に沿った方向の既存割れ目は開口し透水性は増大するのに対して、壁面に直交する方向の割れ目は閉合し、透水性は減少することが予想される。図-5に示した応力再配分に基づく岩盤の透水係数の変化を示す曲線は、多田ら²⁾が提案した、割れ目の透水係数～垂直応力関係式を用いて計算したものである。新規坑道掘削時に、No.2孔の透水性が全体的に低下しているのは、このような応力再配分に伴う既存割れ目の閉合の影響によると考えられる。

掘削断面が円形になっていない部分では、上に述べたのとはやや異なった透水性の変化がみられると予想される。例えば、空洞の隅角部では、ゆるみが存在しなければ、応力集中により全ての方向の割れ目が閉合し、透水性が低下すると考えられる。No.3およびNo.4孔の、坑道に最も近い区間は、ちょうど応力集中部に位置しているので、その影響により透水性が低下したと考えられる。また、このことから、坑道周辺では、掘削によるゆるみ領域はほとんど発生していないと考えられる。

空洞の壁面のごく近傍では、ゆるみ領域が発生しない場合でも、発破により新たな割れ目の発生や既存の割れ目の進展が生じることにより透水性が増大すると考えられる。No.1孔の透水性が掘削により増大しているのは、この影響によると考えられる。このように、坑道周辺岩盤の透水係数は、割れ目の影響により大き

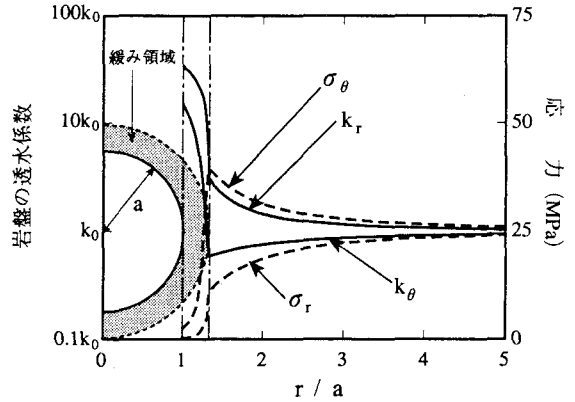


図-5 空洞掘削に伴う周辺不連続性岩盤の透水性変化

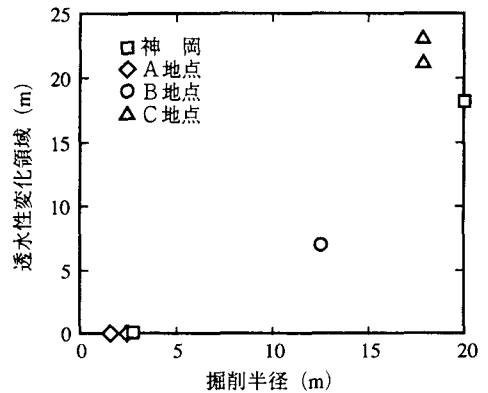


図-6 花崗岩質岩盤での透水性変化領域の広がり空洞の規模の関係

くばらっているのにもかかわらず、坑道掘削時の透水性の変化には明瞭な規則性がみられ、それは、発破による直接損傷と、応力再配分による既存割れ目の開口幅の変化によるとして説明できる。

小規模空洞（坑道）における透水試験結果と、大規模空洞（スーパーカミオカンデ）における試験結果を比較すると、小規模空洞の掘削時には、周辺岩盤の透水性は少ししか変化していないのに対して、大規模空洞の掘削時には、広い領域にわたって透水性が変化し、その領域内では大幅に透水係数が増大しており、空洞の規模によって透水性の変化領域が異なるという結果が得られている。前に述べたことから明らかなように、この結果もまた、応力再配分に伴う割れ目の開口幅の変化によるとして説明することができる。

国内の、 $C_H \sim B$ 級（電研式岩盤分類）の良好な花崗岩質岩盤内に掘削された空洞において、掘削前後の透水性の変化を測定したデータ^{3) - 6)}に基づいて、空洞の規模と透水性変化領域の広がりについてまとめた。その結果を図-6に示す。横軸は、空洞を円形に置き換えたときの相当半径をとっている。また、縦軸は、掘削によって透水性が5倍以上になったところを透水性変化領域の広がりとしている。小断面の空洞では、透水性変化領域がほとんど発生していないのに対して、大断面の空洞では、ほぼ半径に近い変化領域が発生している。そして、今回の神岡での測定データも、同じ特徴を示している。

掘削に伴う岩盤の透水性の変化は割れ目の開口によるとして、透水試験結果から水理学的開口幅の変化を計算してみると、透水性の変化が顕著であった大規模空洞の壁面近傍でも、区間長1mあたりわずかに0.1~0.2mm程度である。通常メカニカルな開口幅の変化と水理学的な開口幅のそれとは一致せず、前者の方が大きいことを考慮しても、BTVの分解能からみて、広い範囲にわたって透水性が変化したことと、割れ目の開口幅の変化がほとんど観測されなかったことは矛盾しない。

6. おわりに

空洞掘削に伴う周辺不連続性岩盤の透水性の変化を調べるため、岐阜県神岡鉱山において、原位置透水試験およびボーリング調査、BTVによる割れ目の調査を実施した。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 小規模空洞（坑道）および大規模空洞（スーパーカミオカンデ）の掘削に伴う周辺岩盤の透水性の変化を測定した結果、周辺岩盤の透水性は、発破による直接損傷および応力の再配分による既存割れ目の開口幅の変化によるとして説明できるような規則的な変化をしていることがわかった。
- 2) 国内の $C_H \sim B$ 級の良好な花崗岩質岩盤内に掘削された空洞の場合、小断面の空洞では透水性変化領域がほとんど発生していないのに対して、大断面の空洞では、ほぼ半径に近い変化領域が発生しているが、今回の測定結果も同じ特徴を示している。

参 考 文 献

- 1) 木下直人, 安部 透, 竹村友之, 横本誠一: 原位置透水試験によるトンネル周辺岩盤の水理特性の調査, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.481-485, 1993.
- 2) 多田浩幸, 木下直人, 若林成樹: 岩石割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の透水特性変化の予測手法, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.139-144, 1994.
- 3) 本島 勲: 地下空洞掘削に伴う周辺岩盤における透湿度の変化に関する一考察, 第12回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.121-125, 1979.
- 4) 世一英俊, 蓮井昭則, 他: 地下空洞掘削時における周辺岩盤の物性変化に関する計測結果とその評価について, 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.193-198, 1984.
- 5) 青山成夫, 長 久, 福田和寛, 吉岡 正: 深部岩盤の透水性評価手法とその適用性, 地下空間利用シンポジウム1989, pp.149-154, 1989.
- 6) 福田和寛: 花崗岩中のトンネル掘削に伴う岩盤挙動と物性変化, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.231-236, 1990.