

(37) ベンチレーション試験時の坑道近傍における飽和度の推定

日鉄鉱業(株) ○ 中村直昭、横井浩一
日鉄鉱業(株) 正会員 野口義文
埼玉大学大学院 藍沢稔幸(現、清水建設)
埼玉大学大学院 荒井紀之

Evaluation of Saturation Ratio of Rock Mass behind the Tunnel Wall during the Ventilation Test

Naoaki NAKAMURA, Koichi YOKOI , Nittetsu Mining Corporation
Yoshifumi NOGUCHI , Nittetsu Mining Corporation
Toshiyuki AIZAWA , Graduated Student, Saitama University
Noriyuki ARAI , Graduated Student, Saitama University

ABSTRACT

The ventilation test was carried out in test section of 10m long in a tunnel of the Kamaishi Mine. That is to say, two air-tight walls had been constructed at the both ends of the part to cut off the air flow in the tunnel. Then, the warm and dry air was sent into the part for drying up the wall surface. The evaporation measurement and resistivity survey was also performed on the drift wall during the test period. From the measured data of the evaporation rates and the resistivity, the saturation ratio of the rock mass just behind the wall surface was successfully evaluated.

The obtained results are as follows;

- 1). The difference of evaporation rate at each point on a rock wall suggested to depend on the permeability of nearby rock and amount of groundwater supplied to the tunnel.
- 2). Unsaturated zones will be able to find with evaporation measurement. At that place, the evaporation rate decrease to zero in the process of ventilation.
- 3). It is thought that the result of resistivity survey represents the change of degree of saturation just behind the tunnel wall. In addition, this survey is available to locate wet fractures at a surrounding rock of tunnel.

1. はじめに

近年、鉱山の旧坑を産業廃棄物の処分地とすることが構想され、既にいくつかの鉱山では一定の性質を有するものについて実施されている¹⁾。この時、処分空洞を含む周辺岩盤の地下水の挙動に大きな関心が寄せられ、議論が尽くされるところである。

湧水量が比較的少ない亀裂系岩盤内の坑道では、掘削作業中の連続的な強制通気によって岩盤表面が乾燥する現象が認められる。このような坑道壁面において不飽和部が生じた場合、地下水をもたらししている亀裂に連続していない亀裂では、亀裂充填物に乾燥収縮が生じ、その部分の間隙率が増加すると考えられる。もし、このような坑道内に廃棄物を貯蔵した後、地下水が浸入したとすると、間隙率が大きくなった部分は透水性が高いと考えられるから、坑道に平行なその部分に沿って廃棄物の成分が流出する可能性がある。地下水が達している亀裂群はもちろんであるが、上記のような部分を予め把握できればグラウト工事などの対策が必要な範囲を推定できるものと考えられる。このような目的に有効と考えらる手法として蒸発量測定²⁾実施されている。本論文では、花崗岩体内の坑道において実施したベンチレーション試験時に、坑道壁面からの蒸発量を測定し、同じ位置で比抵抗探査を行うことによって壁面近傍の飽和度の分布

の非定常変化を検討した結果について述べる。

2. 試験の概要

岩手県釜石鉱山の花崗岩体にて掘削された探鉱坑道で、湧水量が比較的少ない、難透水性岩盤における坑道規模の透水性試験の実施を目的として、坑道での湧水量を評価するためのベンチレーション試験を実施した。試験区間の構造を図-1.に示す。隔壁は木材とプラスチックシートを用いた簡単なもので、温風機による通気を行った。通常、坑道通気の温度は13℃、相対湿度はほぼ100%であるが、これをそれぞれ27℃、59%に至るまで徐々に変化させた。

上記のような過程において、試験区間内の坑道壁面で蒸発量測定と比抵抗探査を行った。図-2.は、試験区間の亀裂マップに蒸発量測定位置、比抵抗探査の測線の位置を示したものである。

3. 坑道壁面からの蒸発量測定

壁面上のある点での蒸発量は、壁面からの高さが異なる2点で絶対湿度、換言すれば相対湿度と温度を測定することによって求めることができる²⁾。ベンチレーション試験中、岩盤および亀裂部分の計22ヶ所で1日1回の測定を行った。その内15点は比抵抗探査の測線上である。得られた蒸発量の経時変化(以下では、蒸発量曲線と呼ぶ)を図-3.に示す。図で明らかとなり、温風通気を停止した後の蒸発量は1週間程度の差はあるものの、いずれもゼロになっている。これは自然通気の温度、相対湿度の条件に合うような蒸発量に戻ったことを意味している。一方、温風通気を実施した期間における挙動は、測定対象とした場所によって大きく異なっている。この時の蒸発量の変化には、通気の温度と相対湿度のほかに、岩盤奥からの地下水の供給量やそこでの透水性というような岩盤の性質に起因する条件も関与しており、結果として蒸発量に偏在性を生じさせているものと考えられる³⁾。この間の事情を模式的に描くと、図-4.のような3つのタイプ分けが可能と思われる。すなわち、温風による通気の間、蒸発量が増加し続けるタイプA、温風による通気を開始してからしばらくの間は増加するが、ある時点で減少に転じ、その後ほぼ横ばい状態になるタイプB、そして初期にはタイプBと同じ挙動をするが、その後ゼロになるタイプCである。

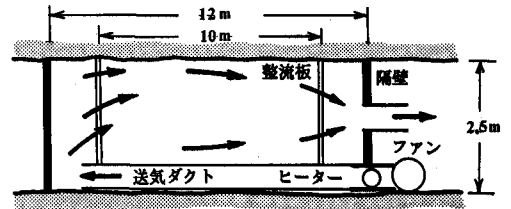


図-1 試験区間の構造

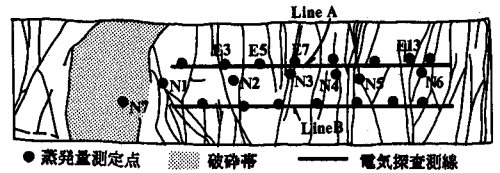
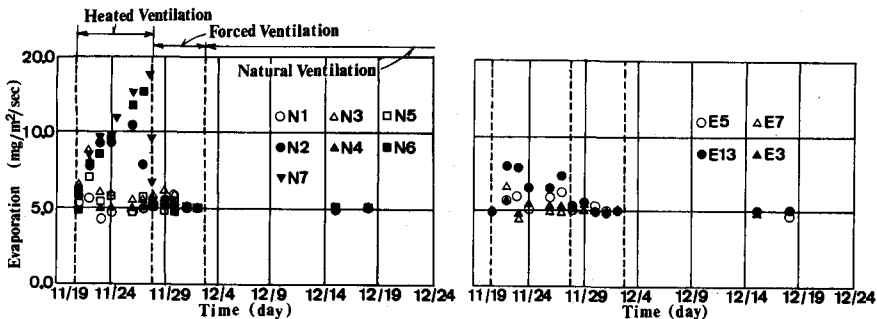


図-2 試験区間の亀裂マップおよび比抵抗探査測線・蒸発量測定位置



(a) 割れ目からの蒸発量

(b) 岩盤基質部からの蒸発量

図-3 蒸発量の経時変化

タイプAでは壁面近傍の岩盤の透水性が比較的高く、かつ蒸発量を上回る量の地下水が供給されているものと思われる。これに該当する測定結果は、図-4.の N6 と N7 がある。N6は壁面での開口幅が3mmあり、温風通気の最後の段階（以下では、乾燥状態と呼ぶ）まで濡れが残った比較的最長い亀裂に連続している。N7は、主にクロライトを含んだ破碎帯上の一点であり、ここも乾燥状態まで湿った状態が継続した。タイプBでも比較的高く、蒸発量と釣合う量の地下水が供給されているのであろう。図-4.では E5や E13、N2、N3、N5がこれに当たる。E5や E13は新鮮な岩盤部分である。N2は1mm未満の開口幅を有する亀裂、N3とN5はスチルバイトやカルサイトが充填し若干の変質を伴う亀裂である。いずれも亀裂の規模は小さいが、乾燥状態まで湿っていた亀裂に遠くで交わっている。タイプCでは、透水性が非常に低いために蒸発量に見合う地下水の供給がなくなったものと思われる。図-4.では、岩盤部分の E3や E7が該当する。なお、タイプB、Cで蒸発量曲線にピークが見られるのは、初期に壁面に付着していた水分の蒸発過程も含まれているためと考えられる。

ここでタイプCの挙動は注目される。これは、壁面および間隙部分から蒸発する水分がなくなったにも拘らず、通気の相対湿度が低下し、かつ岩盤の温度が上昇する環境が継続する状態である。その間に壁面からある程度岩盤内に入ったところまで、乾燥あるいは飽和度が低下している部分が生じている可能性がある。

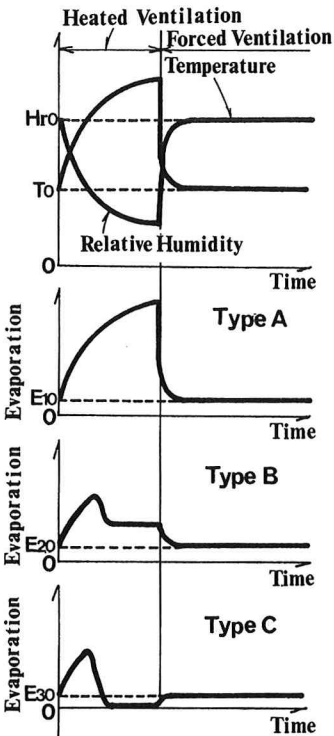


図-4 蒸発量曲線の分類

4. 比抵抗探査の結果と飽和度

4.1. 坑道壁面における比抵抗探査

ベンチレーション試験の実施前と、乾燥状態、自然通気に戻した段階の3つの状態において坑道壁面における比抵抗探査を実施した。それぞれに 20cm間隔で 30個の電極を設けた2本の測線で測定した。電極は、壁面に穿孔した直径 16mm、長さ 20mmの小孔に銅網を埋め込んだもので、予めベントナイトを充填し、接地抵抗をできるだけ下げたようにした。接地抵抗の最大値は 100k Ω であった。測定にはダイポールダイポールの電極配置を用い、電極隔離係数 $n = 1 \sim 7$ で実施した。この配置で得られた電圧 V と送信電流値 I から、次式で見かけ比抵抗 ρ (Ωm) が算出できる。

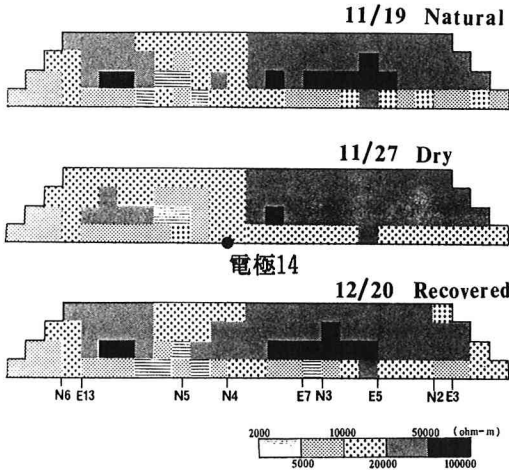


図-5 逆解析による比抵抗断面図

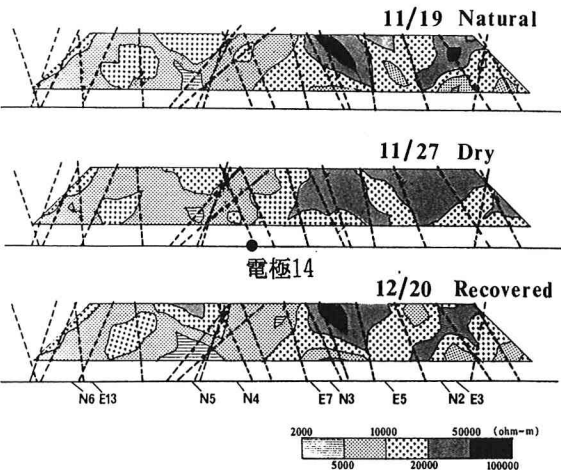


図-6 逆解析による見掛け比抵抗値分布

$$\rho = \pi \cdot n \cdot (n+1) \cdot (n+2) \cdot V / I$$

比抵抗分布の計算は、2次元逆解析によった。測定した範囲を図-5.に示すように一辺 20cmのセルで4層に分割し、計 96個のセルで最適な比抵抗値を求めた。逆解析の初期モデルは 20000Ωmの均質モデルとした。与えた比抵抗モデルに対する見かけ比抵抗の計算には2次元差分法を用い、修正マルカート法で実測した見かけ比抵抗値に最も近い値が得られるような比抵抗分布を求めた。

図-6.は図-1.に示した測線Aについて、逆解析で得られたモデルから計算した見かけ比抵抗の分布図であり、ベンチレーション試験の実施前、乾燥状態そして自然通気に戻した状態を示している。同図には、予想される壁面近傍の亀裂も、亀裂調査の結果を延長させて破線で併記した。電極 14から右側では温風通気によって高比抵抗域が拡大し、自然通気の状態では再び比抵抗が低下している。これは、それぞれの段階で生じた乾燥の進展、もとの状態への回復を表しているものと考えられる。この付近は比較的亀裂が少ない部分である。一方、電極 14から左側の低比抵抗域では3つの状態に大きな変化が見られない。この低比抵抗域は、亀裂が比較的多い部分であり、乾燥状態でも濡れが残った亀裂が存在した。また、低比抵抗域は亀裂の分布と方向にも調和的である。

4.2. ボーリングコアにおける飽和度と比抵抗

ベンチレーション試験を実施した坑道近くで行われたボーリングのコアを用いて、岩石の飽和度と比抵抗との関係を調べた。供試体は直径45mm、長さ50mmに成型し、13個（長さ 20mm のもの3個を含む）製作した。まず、採水した現地の地下水中に浸して、真空ポンプで4時間脱気した後、24時間水中に放置した。これを飽和状態と見なした。その後、乾燥剤を徐々に増やしながらデシケーター内で含水率を変化させ、強制乾燥は、送風乾燥機に110℃で 24時間かけた状態とした。結局、飽和状態から飽和度約40%までの7つの状態が得られ、その時々々の比抵抗を2極法を用いて測定した。測定結果を図-7.に示す。

岩石の比抵抗 R (Ωm) は地下水の比抵抗 R_w (Ωm) と飽和度 S 、有効間隙率 ϕ を用いて次式で表されることが知られている。

$$R = a \cdot S^{-n} \cdot R_w \cdot \phi^{-m}$$

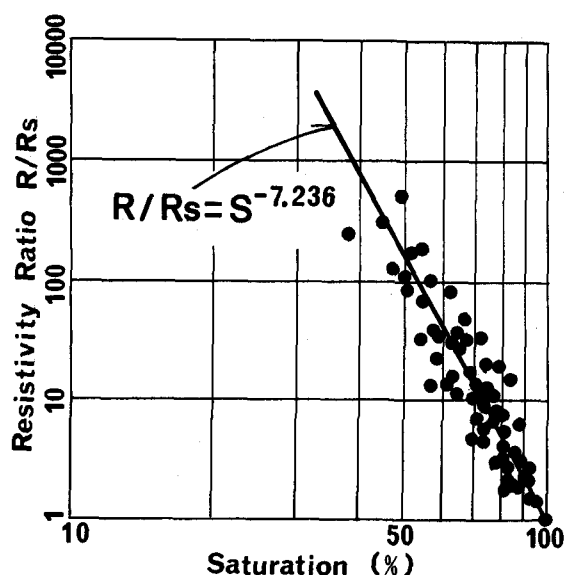


図-7 飽和度と比抵抗比

ここで、 a 、 n 、 m は定数である。測定結果を最小自乗法によってフィティングした結果、 $a=0.659$ 、 $n=7.236$ 、 $m=1.017$ が得られた。図-7.は飽和状態における比抵抗 R_s とある飽和度における比抵抗 R の比で整理したものである。この比抵抗比と飽和度とは図中に示すような直線関係にあり、この結果を岩盤にも適用することにする。

5. 坑道近傍の飽和度と蒸発量曲線に関する考察

図-5.は、測線Aについて逆解析で得られた比抵抗分布図である。図の壁面側第1層のセルの比抵抗に注目する。まず、試験実施前の岩盤を飽和状態と考える。図の初期状態がその時の比抵抗分布である。次に、各セルで初期状態と乾燥状態の比抵抗の比を求め、既に述べたコアによる比抵抗比と飽和度との関係から乾燥状態における壁面近傍の飽和度を推定する。更に、この飽和度の低下分から、そのセルで乾燥によって減少した水分量を算出する。その対象としたのは、測線A、B上で蒸発量曲線を得た計15点に該当するセルである。図-8.では、蒸発量曲線を既述の3タイプに分け、水分の減少量との関係で整理した。

タイプAでは、水分減少量がゼロであった。もともと低比抵抗の部分であり、地下水の供給量が多く飽和度が変化しなかったものと考えられる。地質的には、亀裂が発達し透水性の高い部分と思われる。タイプCで水分減少量が最も大きい。ここは高比抵抗に該当する点が多く、亀裂が少ない部分である。蒸発量測定の結果では、このタイプで平均 $0.5\text{mg/m}^2/\text{sec}$ 程度という値が得られたが、これは比抵抗の変化から推定した水分減少量 $0.2\sim 0.5\text{mg/m}^2/\text{sec}$ とオーダー的には一致するといえる。おそらく、地下水の供給がないために水分減少量と蒸発量とが一致したのであろう。タイプBでは比較的小さな比抵抗変化が得られた。この変化には壁面上の水分の減少が寄与して

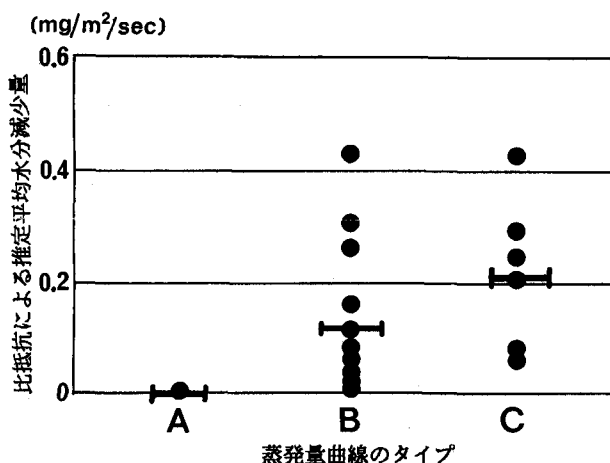


図-8 蒸発量曲線のタイプと推定水分減少量

いるものと思われる。従って、水分減少量は、ばらつきが大きいものの前2者の中間的な値を示した。

以上のことから、この水分減少量は、壁面に付着していた水分量および地下水の供給量と蒸発量との差であると考えることができ、値が小さければ供給量が多く、逆に大きければ乾燥が進んでいる可能性があると思なせよう。蒸発量曲線で示される過程と比抵抗の変化を併せて考えると、乾燥が進んで不飽和部が形成される可能性があるのは、蒸発量曲線でタイプCの挙動をする部分だけであると結論される。

6. おわりに

ベンチレーション試験時に実施した坑道壁面からの蒸発量と比抵抗探査の結果から、次のような成果が得られた。

- 1). 蒸発量の位置的分布は、壁面近傍の岩盤の透水性、地下水の供給の多寡を反映しているものと考えられる。
- 2). 蒸発量曲線のタイプから、ある温度と相対湿度の条件下で飽和度が低下したところを予測できそうである。つまり、不飽和状態は、ここで分類したタイプCでのみ検討すればよい。今回の試験では比較的亀裂が少ない部分であったが、原理的にはグラウト工を要するような部分も検知できるものと考えられる。
- 3). 比抵抗探査は、壁面近傍の飽和度の変化をよく捉えているものといえた。また、壁面近傍の含水した割れ目を比較的よく探知していた。

謝辞

本試験の計画、実施段階から有益な御助言を頂き、また貴重な議論の場を設けて頂いた埼玉大学工学部 渡辺邦夫助教授に記して深く感謝の意を表する。

なお、本稿で用いたデータは動力炉・核燃料開発事業団が釜石鉱山で実施している『花崗岩における原位置試験』の成果の一部である。貴重なデータを御提供頂いた同事業団に深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1). 例えば、廃棄物の地層処分、資源・素材'90 (つくば), 平成2年度資源・素材関係学協会合同秋季大会 分科研究会資料 [S], 1990
- 2). 渡辺邦夫, 藍沢稔幸, 小野誠, 柳沢孝一, 佐久間秀樹, 山本肇, 神田信之; 蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定 (その1) 測定方法と室内試験, 応用地質30巻4号, pp.11-18, 1989
- 3). Watanabe, K., Sakuma, H., Noguchi, Y., Arai, N.; Field Measurement of Spatial Variability of Evaporation Rate along some Fractures on a Tunnel Wall, Flow Heterogeneity and Site Evaluation, OECD, 1990