

(104) 地下空洞における2重空調システムによる壁面保護の試み

— 釜石鉱山における現地試験 —

埼玉大学工学部	渡辺邦夫
埼玉大学工学部	○ 鈴木俊一
K&H AG (NAGRA)	Paul Bossart
埼玉大学工学部	大沢 聡
日 鉄 鉱 業	岩崎 浩
動力炉・核燃料開発事業団	新見 健

Tunnel wall deformation during the drying process and the evaporation control by using the double ventilation method. - Field test in the Kamaishi Mine -

Saitama University	Watanabe, K., Suzuki, S., Osawa, S.
K&H AG (NAGRA)	Paul Bossart
Nittetsu Mining Co.	Hiroshi Iwasaki
PNC	Takeshi Niimi

ABSTRACT: Tunnel wall is in usual drying up by the ventilation work. Groundwater evaporates from surface and the unsaturated zone is formed around the tunnel. The unsaturated zone thus created must change the groundwater flow around the tunnel and may cause the wall deformation. The deformation is important for the soft rock such as mud stone in Tertiary age. Although it has been pointed out that the deformation has not been measured for the crystalline rock. The deformation during the ventilation test was tried to be measured in the Kamaishi main, Japan. The strain of about 5×10^{-5} was observed until 10 days after the ventilation test start. Air of which relative humidity and temperature were about 10% and 50°C respectively was sent into a test section of about 7m long. The tunnel wall deformation during the ventilation test has been measured by using 2 extension-meters. The double ventilation method was also applied for this section. It was found that the double ventilation method is applicable to control the relative humidity over the tunnel wall.

はじめに

従来から、軟岩、とくに堆積性軟岩については、乾燥湿潤による割れ目発生を伴う壁面劣化が知られている。この原因の1つは、軟岩に含まれる粘土鉱物の膨張、収縮である。一方、花崗岩などの硬岩では、乾燥湿潤による影響は、ほとんど考えられていない。これは、トンネルなどでは、とくに壁面劣化を起こすような著しい現象が見られないことや、壁面変化を起こすにしても、その変化のメカニズムが想定しにくいことによるものであった。しかし最近、壁面乾燥に伴い花崗岩中で負圧が観測された。こういった大きな負圧は多少なりとも、壁面付近の変化を引き起こすことも否定し得ない。本研究の目的は2つである。1つは、現場で、乾燥に伴って、花崗岩の壁面の変化が起こるかどうかを調べることであり、他の1つは、軟岩、硬岩

を問わず、乾燥を防ぐ、空調システム（2重空調システム）の考え方を紹介するものである。ただ2重空調については、まだ研究の緒についたばかりであり、ここでは、基礎的な性質を述べるにとどめる。これらを通じて岩盤の不飽和帯の問題を解明してゆくことが大きな目的である。

1. 空調に伴う花崗岩質岩中の不飽和帯の発達と負圧の発生

従来、花崗岩中に発生する毛管水圧については、測定が困難であることもあって、ほとんど報告されていない。空調されたトンネルは、坑内湿度が100%以下であれば、壁面付近の岩盤中の水は蒸発する。もし、トンネルに向かう浸透量より蒸発量が大きければトンネル壁面付近が乾燥し、不飽和帯が発生するはずである。最近、スイス、グリムゼル地下研究所では、Thermo-Couple Psychrometerを用いて、顕著な割れ目のない花崗岩質岩中の毛管水圧が計測され¹⁾、70%程度の湿度

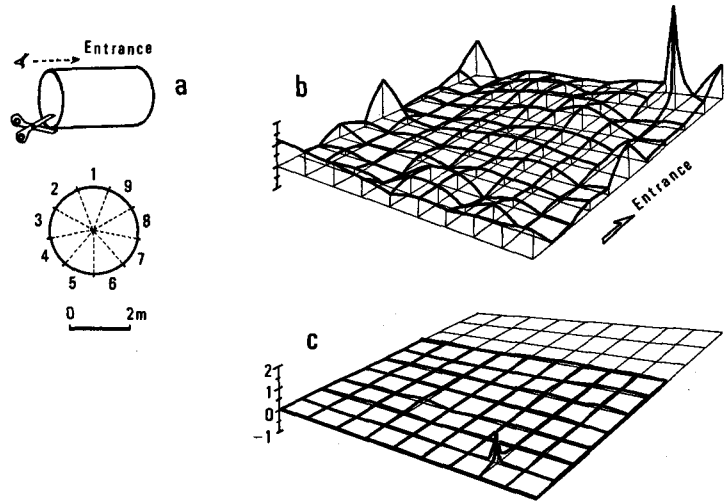


図-1 ストリバ鉱山における、掘削後1月、14月後の蒸発量分布

度の空気を1年程度送入した場合不飽和帯が少なくとも壁面から1.6m以上に広がり、2MPもの負圧が発生することが確認された。また、筆者らはスウェーデン、ストリバ鉱山において、Valiation Driftの掘削後約1ヶ月、14ヶ月の2回、割れ目のない花崗岩壁面からの蒸発量測定を行った²⁾³⁾⁴⁾。その結果、蒸発量がこの間に1/4~1/5に低下することを明かにした。図-1(b),(c)は、それぞれの測定で得られた割れ目のない部分からの蒸発量 ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}$) 分布をトンネル壁面の展開図(図-1(a))上に示したものであり、この図から、はっきりとした蒸発量の低下を読み取ることができる。この理由としては、まず、初期の蒸発量が浸透流量より大きかったことが考えられる。このことは、もともと間隙中に含まれていた水が空気におきかわってゆくこと、つまり、不飽和帯の拡大を意味している。また、不飽和帯が発生すれば、透水係数は低下するから、浸透流量が少なくなり、蒸発量は時間と共にさらに低下することになる。いずれにせよ、図-1(b),(c)は花崗岩質岩の不飽和帯の発達を意味していると考えている。グリムゼルにせよストリバにせよトンネルは、いずれも地下水面下にあり、これらの不飽和帯は空洞に伴った壁面からの水分蒸発によって形成されるものである。また、それらの岩の透水係数は、ほぼ、 10^{-8}cm/s 程度かそれ以下である。従って、これらの例から、地下水面下のトンネルであって岩盤の透水係数がかなり小さくとも、空調によってトンネル周辺に不飽和帯が形成され、極めて大きな負圧が発生することがわかる。しかし、不飽和帯の性質はほとんどわかっていない。その研究の1つとして花崗岩の乾燥に伴う変位の程度を調べたわけである。

2. 乾燥に伴う壁面変位計測の試みと2重空調の考え

試験は釜石鉱山550m坑道の、動力炉・核燃料開発事業団による原位置試験場のKD90坑道内で行わ

れた。この坑道内は現在5区間に分けられ、同事業団によってベンチレーションテストが行われており、その中の約7■の長さの1区間の壁面の一部を用いて、1991年12月10日より実験を行った。坑道の断面は、高さ約3■、幅約4■の長方形に近く、掘削は1990年冬にスームブラステイングを用いて行われた。従って試験は掘削後ほぼ、1年後に行われた。試験対象部分の大きさは約2■×3■である。試験対象部分の割れ目系を図-2に示す。これらの割れ目は、すべて緑泥岩もしくはカルサイトにより充填されており、最大の割れ目幅は5cm程度である。図中の顕著な割れ目について相互の連続性やズレの方向を基に、構造地質的な見地から見た形成過程の模式図を図-3に示す。まず、図-3(a)の正断層型の変位を持つ割れ目形が形成され、それが、図-3(b)の様に動くことにより、これらの割れ目を相互に結ぶ割れ目が形成される。もちろん、この解釈は、現象を単純化し過ぎている点があるものの、基礎的な形成過程はこのようなものと考えられる。このような地質的な検討が現位置試験では重要と考える⁵⁾。

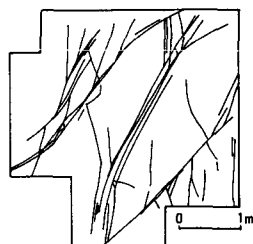


図-2 対象区域の割れ目系

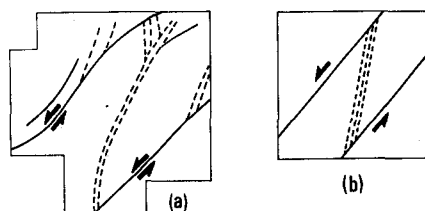


図-3 割れ目の形成過程モデル

計測に用いた変位計は非接触型の渦電流式変位センサーを持つもの(東京計測 EU-11)である。変位計測方法の模式図を図-4に示す。センサー部及び、ステンレス棒の端部は約10cm岩壁内に打ち込まれたボルトに固定されている。センサーも同様に、壁面に打ち込まれたボルトに固定されている。岩盤変位は、ボルトと隙間計測装置との間隔の変化により測定される。この変位計を用いて、ベンチレーションテスト中の変位の長期計測を試みた。試験の計測システムを図-5に示す。なお、図ではあわせて後述する2重空調実験も示してある。図中E_A、E_Bは変位計測器であり、各々85cm、85cmの間の岩盤の表面変位を計測する。なお、岩盤壁面からの蒸発は、5本のセンサーを持つ蒸発量計

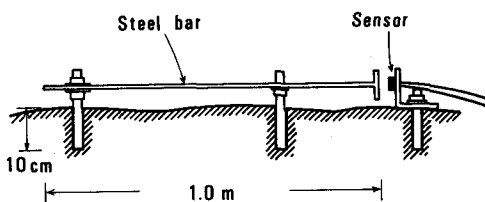


図-4 岩盤変位計測模式図

(東京計測 ETH-2005)により測定した。なお、この区間の温度・湿度も連続観測した。

図-6は、この坑道で行われているベンチレーションテストのシステムの概略図と2重空調システムの模式図を示す。尚、2重空調実験は最も入口に近い区間

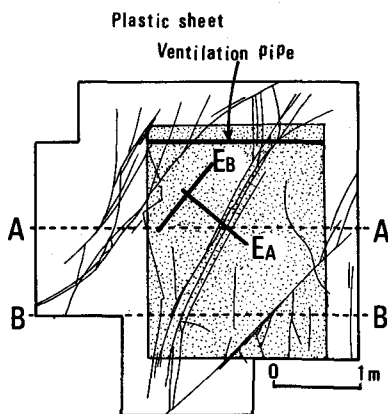


図-5 計測機器と2重空調

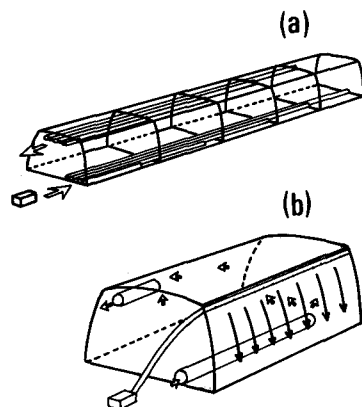


図-6 2重空調システム模式図

で行った。この空調ではトンネルの1つの区間内に、図-6(b)のように、もう一つ別の副次的な空調システムを考え、その副システムにより別の性質の空気を吹き付ける。もし低温で相対湿度の高い空気を送れば乾燥が抑制され逆に低湿度の空気を送れば、乾燥を促進する。このように、主空調とは性質の異なった空気を送ることにより、蒸発、乾燥をコントロールすることが、この2重空調の目的である。前述の図-4中に本実験で用いた副空調システム用のパイプ位置を示す。このパイプは、内径約2cmであり、その側面に20cmごとに直径2mmの細孔があげられ、下方に向かって、湿度の異なる空気が吹きつけられる。なお、図-4に示すようにこの副空調の効果をあげるために、壁面から約10cm離れたところにプラスチックシートの覆いをかけた。空気は、コンプレッサー(0.75KW, 約100リットル)を用いて、このベンチレーションテスト室の外部から送った。ベンチレーション室外では、空気温度、湿度は、それぞれ約12°C および100%であった。しかし、一般にコンプレッサーを通すと空気温度が上昇し、湿度が低下する。今回の実験では、この装置でどの程度の圧力で空気を送れば、温度、湿度がどの程度変化するかの特性を基礎的に調べることにした。これは、今後のシステムの確立に向けた、1つの基礎となるものと考えた。

3. 実験結果

この区間のベンチレーションは12月10日に開始された。送気、排気は、内径30cmのパイプを用いて行われた。図-7はテスト開始からほぼ1日たった12月11日の送気、排気の状態をパイプ出口で測定したものである。この図から送気空気の温度はほぼ50°C、湿度は約10%程度であることがわかる。図-8(a),(b),(c)は、テスト開始約10日間の、変位計 E_A , E_B で測定された総変位、試験部分付近の湿度、温度を示している。変位データは温度変化を補正していない。その点問題であるが、 E_B の方が E_A より大きくなっている。図-4

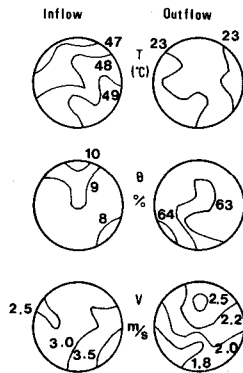


図-7 入気、排気の空気状態

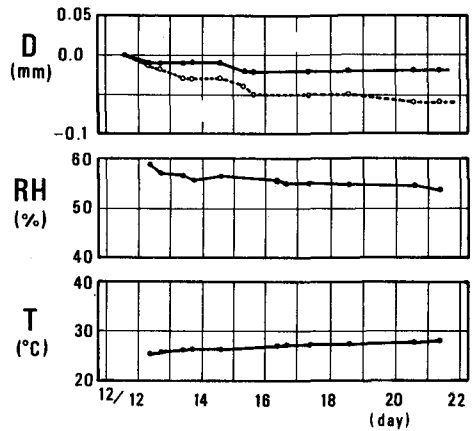


図-8 テスト開始10日間の変位

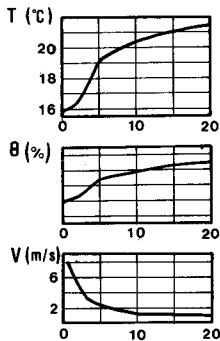


図-9 空気の混合状態

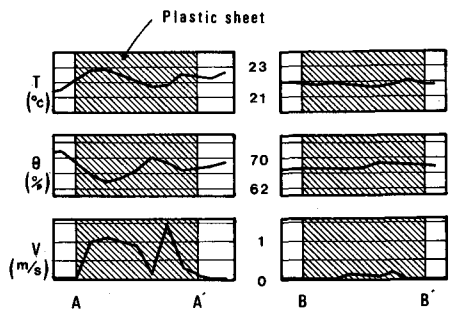


図-10 2重空調による、温度・湿度・風速の状態

に見られるように E_p は、鉛直に近い方向の変位を測定している。測定期間が短く、まだ判定することはできないが、この図からはトンネル軸方向の縮みに比べ、トンネル断面が縮小するような方向の変位が生じていると読み取れる。尚、この間の蒸発量はほぼ $1 \sim 5 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ 程度であった。

図-9、図-10は、12月11日行われた2重空調予備実験結果である。まず、図-9は、内径2 cmのパイプからコンプレッサーで送られた空気のベンチレーションテスト区間内の周囲の空気との混合状況を示している。この区間の湿度は図-8(b)でもわかるようにほぼ60%であった。図中の横軸は、このパイプ出口からの距離である。実際は、このパイプ側面に設けられた直径2 mmの小孔から空気が吹き出されるが、この図は混合状況の一つの目安を示したものである。図から、パイプ出口で30%程度の湿度の空気が20 cmの位置では外気と等しい60%となっていることがわかる。また、風速は著しく低下している。このことから、空気の混合が激しい場であるといえる。図-10は図-4のA-A', B-B'に沿った湿度、温度、風速の分布であり、図中のハッチ部がプラスチックシートで覆われた部分である。図-4で見られるように、これらの断面像は副空調パイプからそれぞれ1 m, 2 m隔たっている。A-A'では、風速も 1 m/s 程度と大きく、最大10%程度の低下がみられる。しかし、B-B'断面ではこの副空調の効果はほとんどみられない。今回の場合は、湿度の低い空気を吹き付けた場合であったが、湿度の高い空気を用いて乾燥防止を行ったとしても同様な結果となると思われる。副空調の効果をあげるためには、空気の混合を低下させる方法が必要であり、その点が今後の課題である。

4. 結論

トンネルの空調によって、壁面が乾燥し、トンネル周辺に不飽和帯が形成される。最近の報告で、この不飽和帯の拡大に関する情報が多くっており、また、極めて大きな負圧が測定されている。その点について、まず筆者らが計測したストリバ鉱山の蒸発量変化の状況を示した。ついで、本研究では花崗岩を対象として乾燥による壁面変位の計測を試み、また、乾燥の促進、抑制を目的とした2重空調の考え方を提案し予備実験を行った。その結果、まだ計測日数が少なく断定的なことはいえないが多少の変化が観測された。また、2重空調の技術を開発する上での今後の問題点が明かとなった。

参考文献

- 1) Schneebeli, M., Laser, H. P., Wyder, H., Fluhler, H., Wasserpotential und Wassergehalt in Ungesättigten Graniten des Felslabors Grimsel: Labormessungen, NAGRA Interner Bericht 90-20, pp. 1-25, 1990.
- 2) Watanabe, K., Evaporation measurement in the validation drift -Part 1-, Stripa Report, 91-06, pp. 1-132, 1991.
- 3) Watanabe, K., Osada, M., Evaporation measurement in the validation drift -Part 2-, Stripa Report, pp. 1-100 (in printing).
- 4) Watanabe, K., Evaporation measurements at the Grisel Test Site, NAGRA Interner Bericht 90-15, pp. 1-49, 1991.
- 5) Bossart P., Strukturgeologische Charakterisierung und Geometrie der Wasser-Fließwege in der Migrationsscherzone VT 420, Felslabor Grimsel, NAGRA Interner Bericht 90-44, pp. 1-21, 1990.