掘進切羽の局部通気冷却に関する実験研究*

島田 莊平¹ 大村 昭士²

[UDC 622.41]

Experimental Study on Cooling of Heading Face by Local Ventilation

by Sohei SHIMADA¹ and Shoji OHMURA¹

1. Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

An about one-tenth scale model experimental apparatus was used to investigate the cooling effectiveness of local ventilation and the heat transfer at the heading face.

The following two major results were obtained through this experimental study.

- 1) For the purpose of effective cooling at the heading face, there is an optimal setting place for the local ventilation duct.
- 2) The following heat transfer relationship was obtained.

$$Nu = C \cdot Re^{0.9} \cdot Pr^{0.5}$$

where, Nu : Nusselt Number defined by the authors.

Re : Reynolds Number defined by the authors.

Pr : Prandtl Number of air.

C : Coefficient dependent on the position of the air duct and the support dimensions.

KEY WORDS: Ventilation, Heat Transfer Coefficient, Model-Experiment, Heading Face, Cooling

1. ま え が き

我が国においては、トンネル工事や鉱山において、高温岩盤内に坑道を掘進しなければならない場合が多い。この際、掘進切羽での熱環境の制御は、作業員の健康維持および掘進能率維持の面から、重要かつ不可欠である。

貫通している坑道を通気している場合の通気温度計算や伝熱に関しては、今まで、理論的研究¹⁾や実験的研究²⁾、さらに、現場計測³⁾⁴⁾なども行われているが、局部通気されている掘進切羽に関しては掘進切羽近傍の流れが複雑かつ伝熱状態が非定常で解析や実験が困難であるため、この種の研究はほとんど行われていない。

筆者らは、縮尺約10分の1の模型実験装置を用い、高温岩盤内を局部通気しながら掘進している切羽の冷却、および伝熱に関し、作業環境温度と風管配置方法との関係、平均熱伝達係数を求める基礎実験を行った。実験は第一段階として容易さの面から定常状態で、次の非定常状態での伝熱の解析を行うための基礎データを取得することを目的とした。

2. 実験装置・方法

図1に実験装置の系統図を示す。局部通気は小型のファン①を用いて行い、風量調節弁②で流量を調節した。風量は風管③の内部に設けたピトー管⑧の動圧から計算によって求めた。すなわち、ピトー管を風管断面中央に設け、管内では流れが乱流であるので、

乱流の分布則、すなわち1/7乗則に従うものとして管の中心の動圧から流速および風量を計算した。高温岩盤は、銅の二重管④の内部に温水を循環させることにより実現した。熱の外部への散逸をできる限り少なくするため、風管と銅の二重管の外部は発泡ス

1. ファン, 2. 風量調節弁, 3. 風管, 4. 銅製模型坑道, 5. 断熱材, 6. 二次ヒータ, 7. コントローラ, 8. ピトー管, 9. ポンプ, 10. 一次ヒータ, 11. 温水タンク, 12. スキャナ, 13. デジタルマルチメータ, 14. デジタル圧力メータ, 15. 定電流電源, 16. 入出力拡張装置, 17. パーソナルコンピュータ, 18. プリンタ

図1 実験装置の概略および測定系統図

* 1989年7月1日受付 1990年7月31日受理
1. 正会員 工博 東京大学助教授 工学部資源開発工学科
2. 正会員 東京大学助手 工学部資源開発工学科
キーワード: 通気, 熱伝達係数, 模型実験, 掘進切羽, 冷却

図2 模型坑道寸法

- L : 風管出口から切羽までの距離
 l : 測定点から切羽までの距離
 ① 温度および速度分布測定具
 ② 模型坑道
 ③ 風管

図3 支保模型

チロール製の断熱材⑤を用いて断熱した。水の加熱には一次ヒータ⑩と二次ヒータ⑥を使用した。一次ヒータは、所定の水温付近になるまで加熱するもので、ほぼ希望の水温が得られたあとは、二次ヒータの出力をコントローラ⑦で調節し、水温を一定に保った。温水はタンク⑪に保存し、ポンプ⑨で銅製二重管内を強制循環させた。

図2に模型坑道の寸法を示す。断面形状を実際の坑道の形状に近い馬蹄形とするため、下盤として平らなウォータージャケットを設けた。坑道のアーチ部の半径は200mmである。風管には内径50mm、外径70mmの亚克力パイプを用い、坑道の中央上部に設けた。また、断熱の目的で風管外部に厚さ約10mmの発泡スチロールを巻いた。下盤から風管中心までの高さは200mmである。

坑道内には、寸法の異なるベニヤ板製の模型支保(図3)をセットした。模型支保は4種類で坑道軸方向の長さは1300mm、またその等価半径(r)^{a)}、支保厚さ(e)、枠間(w)の値は表1に示す通りである。

掘進切羽空間内の温度測定、風速測定には、いずれもサーミスタを使用した。サーミスタは直径約2mmの球状である。坑道内全体にわたって、温度、風速の測定を可能にするため、図4のような真鍮製の特殊なアームの先端に38mmの間隔で7個のサーミスタを固定し、アームを前後に移動、および、垂直から30度ごとに最大120度まで回転した。

測定系統は図1に示す通りである。水温は銅製模型坑道内の上部循環流内に500mm間隔で設けた4個のサーミスタで測定し、その平均値を使用した。また、風管出口温度は風管出口から50mm入った風管内でサーミスタを用いて測定した。この他、坑道内通気温度などサーミスタで測定した温度のデータは、スキャナ⑫、デジタルマルチメータ⑬を介して、パソコン⑭のフロッピーディスクに保存した。風速のデータも同様の系統で保存したが、風速測定の場合には、サーミスタの一定発熱のために定電流電源⑮を使用した。一方、ピトー管の圧力測定にはデジタルマノメータ⑯を使用した。

a) 坑道断面積を円の面積とした場合の半径。

表1 支保寸法

支保タイプ	等価半径 r (mm)	支保厚さ e (mm)	枠間 w (mm)	枠間比 w/e	高さ比 e/r
A	179	—	—	—	—
B	167	14	75	5.4	0.084
C	163	18	100	5.6	0.110
D	159	23	125	5.4	0.145
E	153	30	165	5.5	0.197

(注) 支保タイプA: 無支保

図4 通気温度測定用サーミスタ配置(a)と坑道断面内測定方法を示す図(b)

タ⑭を使用し、そのデータも温度のデータと同様にフロッピーディスクに保存した。

今回の実験では、風管出口における通気温度は約20℃、水温は約38, 46, 54℃とした。風管出口から切羽面までの距離 L は、 $L=700, 900, 1100$ および1300mmのように変化させた。通気温度測定点と切羽面までの距離 l は、最大1200mmとし、ほぼ300mmごとに測定した。

本実験に先立ち、風管の断熱の程度を調べるためファン直下流にサーミスタを設け、風管内での通気温度変化を測定した。その結果、今回の実験条件下で最大0.3℃であった。従って、風管と外部通気流との熱交換はほとんど無視できるものとした。また、潜熱による熱交換は無いものとし、乾燥空気の場合につき測定している。

図5 坑道鉛直中心軸上の温度分布および風速分布
($L=1100\text{mm}$, $t_r=46^\circ\text{C}$, $Q=1.63\text{m}^3/\text{min}$, 支保タイプB)

図6 坑道横断面内の温度分布および風速分布 ($L=1100\text{mm}$, $l=600\text{mm}$, $t_r=46^\circ\text{C}$, $Q=1.63\text{m}^3/\text{min}$, 支保タイプB)

3. 風速分布・温度分布

掘進切羽空間での風速分布、温度分布の測定例を図5、図6に示す。本実験では、定常状態を考え、また、岩盤表面として銅管を用いていることから、岩盤表面温度は水温に等しいものとしている。

図5は坑道中心軸上での垂直断面の分布図である。風管出口から切羽面までの距離は $L=1100\text{mm}$ 、岩盤表面温度 $t_r=46^\circ\text{C}$ 、通気流量 $Q=1.63\text{m}^3/\text{min}$ 、支保タイプBである。測定箇所は切羽面から10、300、600、900mmの距離である。

ここで風速、温度は次式で無次元化した値を用いた。

$$\text{無次元風速} = \frac{\text{測定風速}}{\text{局部通気風量が坑道内を流れる場合の風速}} \dots (1)$$

$$\text{無次元温度} = \frac{\text{測定温度} - \text{風管出口温度}}{\text{岩盤表面温度} - \text{風管出口温度}} \dots (2)$$

サーミスタ風速計では、風速の絶対値は測定できるが、風向までは特定できない。従って、図5の無次元風速で、切羽面から

b) 局部通気量を坑道断面積で割って求める。支保がある場合は支保内のみで求めた坑道断面積を採用。

の距離が10mmの場合の風速は、切羽面に沿う流れの速度と考えることができる。切羽面から離れた位置では、図の値がほぼ坑道軸方向の速度成分と等しいと考えられる。Weselyは縮尺約2分の1の模型坑道を用いて強制通気している掘進坑道内の風速分布を測定している⁵⁾。その結果と図5を比較すると、強制通気噴流の最大速度は、切羽面に接近するにつれて下盤側に移動する。また、切羽面から $1.5\sqrt{A} \sim 2.0\sqrt{A}$ (A : 坑道断面積)の地点で戻り流の速度が最大となる等の共通点が見られる(文献5, 図9)。温度に関しては、風管出口流の影響を受ける位置では温度が低くなっている。切羽面から300mmの距離以内では、垂直断面全体にわたって、ほぼ一定の温度となっている。

図5の切羽面からの距離が600mmでの位置における、坑道横断面での温度分布、速度分布を示したのが図6である。図6は図4のサーミスタによる測定法の図の、下盤を中心に回転したような図示をしている。実際の回転中心軸はCとマークした点である。温度についてみると、局部通気流の影響の少ない回転軸付近の水平方向では、ほぼ一定の温度分布となっていることがわかる。また、坑道壁面付近では、やや温度が上昇している。

4. 作業环境温度

高温岩盤内での掘進作業中の局部通気の目的の一つは、作業箇所の冷却である。このような観点から、風管の位置、局部通気風量(局部通気噴流速度)、岩盤表面温度により切羽付近の温度がどう変化するか調べた。本実験では局部通気風量と風管寸法の相似性を考慮してある。作業环境温度としては、切羽での作業員の位置を考慮し、切羽面からの距離が300mm、下盤からの高さ95mmの平均温度を用いた。これは現場では切羽面から3m、下盤からの高さ約1mに相当する。ここでも、前章で用いた無次元温度を採用している。

$$\text{無次元作業环境温度}(\theta_w) = \frac{\text{作業环境温度} - \text{風管出口温度}}{\text{岩盤表面温度} - \text{風管出口温度}} \dots (3)$$

用いた支保タイプは、無支保(A)、B、Cである。

図7は岩盤表面温度と無次元作業环境温度の関係を示している。無次元化した温度でみると、岩盤表面温度の影響はほとんど無いと

いってよい。これは、岩盤表面温度が上昇すると作業環境温度が上昇することを示している。

図8は風管の位置と無次元作業環境温度の関係を示したものである。風管出口から切羽面までの距離は $L^*=L/2r$ で無次元化してある。風管が遠く離れていると、通気が十分切羽面に到達しないため作業環境温度は高くなるが、一方、逆に切羽面に近づきすぎても、作業環境温度が高くなっている。これは、切羽面に風管が近づくと、局部通気がまず、切羽面に衝突し、その際暖まった通気が作業箇所へ到達するためと考えられる。このように、作業箇所の冷却という面から考える限り、局部通気風管の位置には最適位置が存在することがわかる。局部通気噴流の拡がり、噴流の到達距離等を考慮して、風管を設置する必要がある。

図9は(4)式で定義するレイノルズ数(後述)と作業環境温度との関係を示している。図9の風管出口と切羽面の距離の場合($L=1100\text{mm}$)には、本実験では、レイノルズ数の増加、すなわち風量の増加により作業環境温度は低下している^{c)}。

5. 熱伝達係数

局部通気している掘進切羽での熱移動は複雑である。風管から噴出する冷たい空気と暖められた戻りの空気との混合、高温岩盤と支保を介しての熱交換、通気流内の自然対流、さらに、現場では作業用機械や作業員による通気流の障害なども熱移動に大きな影響を与える。

掘進切羽付近では、通気流の方向が不明確、局部通気の行きと

図7 岩盤表面温度と無次元作業環境温度の関係 ($L=1100\text{mm}$, ○: 支保タイプA, □: 支保タイプB, △: 支保タイプC)

図8 風管の位置と無次元作業環境温度の関係 ($t_r=46^\circ\text{C}$, ○: 支保タイプA, △: 支保タイプB, □: 支保タイプC)

戻りの流れの境界が不明確などの条件があるため、局所熱伝達係数を求めるのは容易ではない。

以上の点を考慮し、切羽付近における岩盤から通気への熱移動を総括的に表す平均熱伝達係数を求めることにした。つまり、切羽面から 1200mm ^{d)}までの距離にある、坑道壁面と通気流の熱交換から切羽の熱伝達係数を求めた。

$l=1200\text{mm}$ の位置では、戻りの通気流はほぼ坑道軸と平行に流れ、また、支保が設置してある場合には、温度分布はほぼ一様になっていることを確かめた^{e)}。

使用した支保タイプは無支保(A), B, C, D, E である。複雑な掘進切羽空間での流れを定量的に評価する方法として、測定データを次のように無次元化して整理した。

レイノルズ数を Re , ヌッセルト数を Nu とすると、

$$Re = du/\nu \quad \dots\dots\dots (4)$$

d : 坑道の等価直径(支保内での計算)

u : 局部通気風量が上記坑道内を流れる場合の速度

ν : 空気の動粘性係数(風管出口温度と測定点温度の平均温度での値)

$$Nu = h \cdot d/k \quad \dots\dots\dots (5)$$

k : 空気の熱伝導率(風管出口温度と測定温度の平均温度での値)

h : 熱伝達係数

$$h = \frac{(t_2 - t_1) Cp \cdot Q \cdot \gamma_a}{(t_r - t_1) A} \quad \dots\dots\dots (6)$$

t_r : 岩盤表面温度

t_1 : 風管出口温度

t_2 : 測定温度(排気温度)

Q : 局部通気風量

A : 排気温度測定断面まで($l=1200\text{mm}$, 無支保の場合の $L^*=3.35$)の熱交換面積(枠がある場合も無支保の場合の面積を使用)

Cp : 空気の定圧比熱

γ_a : 空気の比重

図10, 図11に、それぞれ、風管出口から切羽面までの距離を $L=900\text{mm}$, 1100mm とした場合のレイノルズ数とヌッセルト数の関係を示す。高さ比が大きくなる(支保タイプE)ほど熱伝達係数が小さくなっている。これは、支保が存在すると、通気流と

図9 レイノルズ数と作業環境温度の関係 ($L=1100\text{mm}$, ○ $t_r=38^\circ\text{C}$, A: ● $t_r=46^\circ\text{C}$, A: □ $t_r=38^\circ\text{C}$, B: ■ $t_r=46^\circ\text{C}$, B: △ $t_r=38^\circ\text{C}$, C: ▲ $t_r=46^\circ\text{C}$, C)

c) 一般には、風量の増加により、作業環境温度が低下するが、風管出口が切羽面に近づくと($L=700\text{mm}$) 風量の増加により、作業環境温度がかえって増加することもある。

d) 坑道アーチ部直径の3倍となる。

e) $L=1300\text{mm}$ の場合は、測定点よりも後方に風管出口があるが、測定点までの距離が 100mm しかないで、噴流の拡大は少なく、切羽面へ向かう流れと戻りの流れの境界は明確であり、戻り流については、このことがあてはまる。

図10 レイノルズ数とヌッセルト数の関係 その1
($L=900\text{mm}$)

図12 レイノルズ数とヌッセルト数の関係 その3
(支保タイプD)

図11 レイノルズ数とヌッセルト数の関係 その2
($L=1100\text{mm}$)

岩盤壁間に速度の小さい空気層が存在し、岩盤壁面での速度勾配を小さくし、熱交換を抑制するためと考えられる。

図12には、支保タイプDとし、風管出口から切羽面までの距離を変えた場合のレイノルズ数とヌッセルト数の関係を示してある。風管出口が切羽面に近づくほど熱伝達係数は大きくなっている。これは、作業環境温度のところでも述べたように、局所通気噴流が直接、切羽面に衝突し、岩盤からの熱伝達が促進されるためであると考えられる。

以上の実験結果から、ヌッセルト数はレイノルズ数の0.9乗に比例することがわかる。また、熱伝達の実験式を求めると次のようになる。

$$Nu = CRe^{0.9}Pr^{0.5} \quad (7)$$

Pr : 空気のプロントル数 (=0.72)

C : 風管出口から切羽までの距離、支保形状(高さ比)によって決まる係数

$$C = C(L^*, e/r) \quad (8)$$

図13に C の値を示す。

なお、本実験で求めたレイノルズ数は、現場でのレイノルズ数より若干小さい値となっているが、いずれも乱流域であり十分適用できるものと考えている。

6. ま と め

縮尺約10分の1の模型実験装置を用い、局所通気している掘進切羽空間の定常状態での通気温度、風速を測定した。今回の実験

図13 係数 C の値

で求められたことをまとめると次のようになる。

1) 掘進切羽空間の冷却という観点からみると、局所通気風管の位置には最適設置場所が存在する。

2) (1)式、および(2)式で定義したレイノルズ数とヌッセルト数を使用した場合、掘進切羽空間では、ヌッセルト数はレイノルズ数の0.9乗に比例し、支保の高さ比と関係する。

3) 熱伝達の実験式は(7)式、および(8)式で表される。

終わりに、本実験の遂行にあたり、実験装置の製作に多大のご協力をいただいた、東京大学工学部、杉浦哲雄助手に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 柳本竹一・内野健一：日本鉱業会誌，90〔1039〕，583～587，(1974)
- 2) 幾世橋広・石浜 渉：日本鉱業会誌，91〔1051〕，595～600，(1975)
- 3) 平松良雄・小門純一・藤中雄三：日本鉱業会誌，69〔778〕，109～112，(1953)
- 4) 幾世橋広・京 宗輔・石浜 渉：日本鉱業会誌，93〔1078〕，931～937，(1977)
- 5) Wesely, R.: Proceedings of 3rd International Mine Ventilation Congress, 73～82, (1984)