トンネル工事の換気に関する研究*

中山泰喜^{*1}, 青木克己^{*1}, 沖 真^{*1}, 平田忠久^{*2}, 小菅 智^{*3}
古鍛冶千賀三^{*3}, 坂下文夫^{*3}, 大浦修三^{*4}

Study on Ventilation in Tunnelling

Yasuki NAKAYAMA, Katsumi AOKI, Makoto OKI, Tadahisa HIRATA, Satoru KOSUGE,
Chikazou KOKAJI, Fumio SAKASHITA and Syuzou OOURA

The purpose of this study is to clarify the most suitable ventilation method for tunnelling around the face. The test-tunnel models were a 1/20-scale model for the air experiment and a 1/100-scale model for the water experiment. Flow patterns for both models were studied by flow visualization techniques. The velocity distribution and dust concentration of the 1/20-scale model were measured.

First of all, the wind direction and air-speed in an actual tunnel and in a 1/20-scale tunnel model were measured. Then, the flow similarity between the actual tunnel and the scale model was confirmed. After that, the velocity distribution and dust concentration were measured for the five different ventilation methods mentioned above. The tracer method was applied for the two-dimensional flow visualization by using laser light sheet, and the tuft grit method was applied for three-dimensional flow visualization.

According to these results, it became clear that the most suitable ventilation method in tunnelling around the face was the air pumping type, setting the duct at side position and air exhausting type with lower local fan.

Key Words : Flow Visualization, Velocity Distribution, Three-Dimensional Flow
Tunnelling, Ventilation Method

1. 結 論

工事中のトンネルにおける空気浄化は、安全施行や作業環境の面から欠くことのできない重要な課題である。最近の山岳トンネル工事においては、有害粉塵の主な発生源の一つである吹き付けコンクリート作業を伴うNATM(New Austrian Tunnelling Method)が普及し⁽¹⁾、トンネル内特に作業及び作業員が集中する切羽付近の環境がさらに悪化しつつあり、その改善の為の抜本的な対策が早急に望まれている。しかし、この研究に関する報告は少なく^{(2),(3)}、換気方式やダクトの設置などについての細かな設計基準もないため、経験的な判断や試行錯誤により決定がなされているのが現状である。

本研究では切羽付近を対象に最も適した換気方式を明らかにすることを目的とし、ベンチ式掘削工法トンネル(小倉山トンネル)とその約1/20縮尺模型内の流速分布を比較検討し、それらの流れの相似を確認した後、全断面掘削工法トンネルの1/20縮尺模型を用い、トンネル内特に切羽付近を対象として流速分布⁽⁴⁾、⁽⁵⁾と粉塵濃度を換気方式及びダクトの位置、局所ファンの影響について調査した。また、あわせて注入トレ

ーサ法、懸濁法、タフト法⁽⁶⁾を用いて可視化を行いその現象を確かめた。この結果を用いて切羽付近の作業員に対する空気を清浄にするための最適な換気方法を明らかにした。

2. 使用記号

A : 坑道断面積	m^2
De : 坑道水力直径($4A/S=0.47m$)	
d : ダクトの内径	m
S : 坑道周囲長さ	m
s : 比重	
u_0 : ダクト出口での平均流速	m/s
u_{max} : ダクト出口での最大流速	m/s
U_m : 坑道平均風速	m/s
u_c : ダクト中心軸上の流速	m/s
u_f : 局所ファン出口の平均流速($8m/s$)	m/s
x : 切羽からの距離	m
x_d : ダクトからの距離	m
Re_1 : ダクト出口でのレイノルズ数($u_0 \cdot d / \nu$)	
Re_2 : 坑道レイノルズ数($U_m \cdot De / \nu$)	
ν : 動粘度	m^2/s
ϕ : 粒径	m

* 原稿受付 平成2年4月2日。

^{*1} 正員、東海大学工学部 (〒259-12 平塚市北金目1117)。

^{*2} 正員、高松市役所 (〒760 高松市番町1-8-15)。

^{*3} 正員、東海大学大学院 (〒259-12 平塚市北金目1117)。

^{*4} 佐藤工業(株) (〒103 中央区日本橋本町4-12-20)。

^{*5} 正員、佐藤工業(株) (〒243-02 厚木市三田47-3)。

て)に発生させ10分間における平均相対濃度 (cpn値, $1\text{cpn}=0.01\text{mg}/\text{n}^3$ ただし $0.3\mu\text{n}$ のスチレン酸にて)を測定し, 質量濃度変換係数 (K 値 $=0.013$)を用い質量濃度 (ng/n^3)に変換した。それらの測定位置を図2に示す。

4.3 流れの可視化

可視化条件を表2に示す。

表2 可視化条件

Tunnel and model	Visualization method	Kind of tracer	Fluid	u_0 (m/s)	Re_2
Tunnel	Tuft method			20	1.4×10^5
1/20	Injection tracer method	Styrene foam※	Air	16	1.0×10^4
	Tuft method				
1/100	Suspension method	Nylon 12※	Water	1.4	3.6×10^3

※ Styrene foam ($\phi=0.5\sim 1.0\text{mm}$), Nylon 12 ($s=1.01\sim 1.02$, $\phi=0.5\sim 0.7\text{mm}$)

5. 結果及び考察

5.1 相似性

図3に実際のトンネルとトンネル模型の流速分布を示す。

これより両者とも同じようなフローパターンを示し, かつY0-Y0断面において, $x/De=0\sim 0.8$ の間に換気流とは別の流れが発生しているのが確認できる。これらのことより形状が相似でともに乱流領域であれば大きさが違っても両者の間においてほぼ流れの相似が成立していることがわかる。これを利用して以後モデル実験により実際のトンネルの流れを推定することとする。

a) Actual tunnel $u_0=20\text{m/s}$ $Re_2=1.4 \times 10^5$

b) Tunnel model $u_0=16\text{m/s}$ $Re_2=5.0 \times 10^3$

図3 実際のトンネルとトンネル模型の流速分布

5.2 送気式の場合

送気式における流速分布の一例を図4に可視化結果の一例を図5に示す。

図4, 図5よりダクトがセンタの場合は, $x/De=0\sim 1.0$ の間において流れの停滞する区域 (以下淀み域と称す)が発生している。従ってこの淀み域においては新鮮な空気が到達していないものと考えられる。

また, $u_0=24, 48\text{m/s}$ においては $x/De=0\sim 1.25$ の間に流れの還流する区域が発生している (ここで $u_0=24, 48\text{m/s}$ の結果は省略する) [図5-(c)参照]。この発生理由は換気流速が増加することによって風圧が増加するが, トンネル内には坑口以外に気流の逃げ場がないため切羽付近の空気圧が上昇して, 気流が干渉する事により淀み域が構成するためと考えられる。このことより, ダクトがセンタに位置する場合は換気流速を増加させても換気流は直接切羽に届くとは考えられない。しかし, ダクトをサイドに設置するとこの淀み域がなく, 換気流が切羽まで届いている。また, これらの事は図5の可視化写真からも確認できる。

以上より図6にダクト中心軸上の流速と最大流速の比 (u_c/u_{max}) の距離 (x/d) による減衰の変化をまとめた。この図よりダクトがセンタ及びサイドの噴流は解放大気中の自由噴流⁽⁸⁾・⁽⁹⁾とは大変異なった拘束噴流としての特徴を持っていることがわかる。

a) Duct center $u_0=16\text{m/s}$ $Re_2=1.0 \times 10^4$

b) Duct side $u_0=16\text{m/s}$ $Re_2=1.0 \times 10^4$

図4 送気式における流速分布

図5 トレーサ法による可視化写真

図6 送気式における uc/U_{max} と x/De の関係

特にサイドの場合は壁の影響で流れが拘束され安定することによって、切羽まで換気流が到達しているものと考えられる。このダクト中心軸上の流速の減衰して行く特性を式にまとめると、 $x_d/d > 5$ に対して次式のようなになる。

センタの場合

次に図7の粉塵濃度分布を図7に示す。この図からわかるように、ダクトはサイドの方がセンタに比べて質量濃度が低く、特に $x/De = 0 \sim 1.0$ においてサイドの方がセンタに比べ質量濃度が $1/3$ 以下に低くなっていることを示している。また、このような現象は実際のトンネルにおいてもほぼ同じであると推定される。以上の事よりダクトはサイドの方が切羽付近を速く換気でき、汚染源から遠いところにダクトを設置できることがわかる。しかし坑道全体を考えた場合、 $x/De = 6.0 \sim$ 坑口における坑道では流速が非常に小となり、センタとサイドの質量濃度にはあまり差がなくなるため、坑道の距離が長くなるほど坑道全体の浄化が困難となる様子がわかる。

5.3 排気式の場合

排気式における切羽付近の流速分布の一例を図8、粉塵濃度を図9に示す。

図8の流速分布からダクトの設置位置を変えても切羽からダクト口近傍に流れ込み域が発生することがわかる。次に図9の粉塵濃度からわかるように換気流速を変えても質量濃度には大きな変化は見られない。また、前記の送気式と比べると $x/De=0\sim1.0$ では非常に高い質量濃度($7.8\sim22\text{ng}/\text{n}^3$)を示している。その理

図7 送気式における質量濃度と x/De の関係

由は坑口からの空気を吸い込みそれを排気しているためと考えられる。しかし、ダクトを通じて粉塵などを直接排気するため、坑道全体を汚染しないと考えられる。以上より排気式を単独で用いる場合は、ダクトの設置位置を切羽にできる限り近づける必要がある。

5.4 局所ファンの影響

5.4.1 送気式に局所ファンを併用した場合

送気式(ダクトセンタ)に局所ファンを併用した場合の流速分布、粉塵濃度を図10、11に示す。

図10の流速分布より局所ファンを上部に設置した場合と下部に設置した場合では大きな違いがあることがわかる。上部に設置するとダクトから送気された空気を局所ファンが吸い込み、再び換気流速を増加する

図9 排気式における質量濃度と x/De の関係

図8 排気式における流速分布

図10 送気式に局所ファンを併った流速分布

ことより淀み域は発生しない。しかし、下部に設置すると $x/De=0\sim1.5$ において淀み域が発生するのを確認できる。その原因の1つとして、ダクトより送気された空気を局所ファンが再び吸い込んでいるのではないかと考えられる。また、図11の粉塵濃度からわかるように、 $x/De=0\sim1.0$ において局所ファンを上部に設置した方が下部のそれと比べて質量濃度が約半分になっている。

5.4.2 排気式に局所ファンを併用した場合

排気式（ダクトセンタ）に局所ファンを併用した場合の粉塵濃度、流速分布を図11、12に示す。

図12の流速分布より、局所ファンを上部に設置した場合は $x/De=0\sim1.75$ において淀み域が発生することがわかる。しかし下部に設置した場合は $x/De=0\sim1.75$

図11 質量濃度と x/De の関係

図12 排気式に局所ファンを伴った流速分布

における淀み域は発生しないことが確認できる。また、図11の粉塵濃度からわかるように $x/De=0\sim1.5$ において、局所ファンを上部に設置した場合、下部のそれと比べて質量濃度が約2~5倍の高い値を示す。以上よりダクトがセンタにある場合、局所ファンの設定位置は非常に重要であることがわかる。

5.5 送・排気式の場合

送・排気式における流速分布、粉塵濃度を図13、14に示す。

図13の流速分布（Z-Y2断面）は図4（b）の送気式とあまり変化は見られないが、図14の粉塵濃度からわかるように $x/De=2.0\sim7.0$ において、送・排気式は送気式（ダクトサイド）に比べて質量濃度が低い値を示す。この換気方式は送気式と排気式の長所を合わせ持っているため坑道全体を換気できると考えられる。しかし、作業環境上（特にスチールフォーム）の問題よりあまり実際には行われないうである。

図13 送・排気式における流速分布

図14 送・排気式における質量濃度と x/De の関係

6. 結 論

トンネル工事における換気方式及びダクトの位置、局所ファンの影響について切羽付近を対象に流速分布と粉塵濃度を測定した結果、以下の事が明らかとなった。

- (1) とともに乱流領域であれば実際のトンネルとトンネル模型との間に流れの相似性が成立する。
- (2) 送気式では、ダクトをサイドに設置する方がセンタに設置するよりも切羽付近まで新鮮な空気を到達させることができ粉塵濃度を下げ、空気の清浄化にも効果的である。
- (3) 送気式でダクトをセンタに設置する場合は、換気流を切羽側に送るように局所ファンを上部に併用するのが有効である。
- (4) 排気式で換気する場合は、ダクトの位置を切羽にできる限り近づけるか、もしくは換気流を切羽側に送るように局所ファンを下部に併用するのが有効である。
- (5) 送気式と排気式を併用することにより、坑道全体の換気を一層効率よく行うことができる。

参考文献

- (1) 大塚 編, トンネル工学, (1974), 22-30, 朝倉書店
- (2) 松垣・畠山, トンネル工事における換気・集じんシステムの実験的研究, 間組研究年報, (1981), 51-60
- (3) 村上・須山, トンネル掘削時の切羽付近の換気手法の最適化に関するシミュレーション, 生産研究, Vol.38 (1986), 23-28
- (4) 平田・中山・青木 ほか3名, トンネルの換気に関する研究, 流れの可視化, Vol.8 No.30 (1988), 241-246
- (5) Kokaji, C., ほか3名, FLICOME 88 (1988), 437-441
- (6) 流れの可視化学会 編, 新版 流れの可視化ハンドブック, (1986), 136-155, 朝倉書店
- (7) 村上・加藤・赤林, レーザ光を用いた気流の可視化システム開発研究, 日本建築学計画論文報告書, 第361号 (1986), 1-8
- (8) 原田・尾崎 共編, 流子工学, (1981), 72-89, 養賢堂
- (9) 野村 訳, 噴流, (1981), 20-43, 森北出版