

トンネル換気システム改善への取組

清水建設(株) 土木技術本部機械技術部 正会員 ○前田 全規
清水建設(株) 関東支店土木部 正会員 真下 義章
(株)流機エンジニアリング 田中 誠
(株)エムシーエム 酒井 健二

1. はじめに

トンネル工事の坑内環境は、大気の 100 倍近い高濃度で粉じんを暴露するため、現在もトンネルじん肺は発生し続けており、トンネル工事に携わる者にとって最大の健康リスクであると同時に国家的にも大きな損失である¹⁾。このような状況下で、国は粉じん対策のより一層の充実を図ることを目的に、2008 年 3 月に「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」の改定を行なった。また、建設労働災害防止協議会は、2012 年 3 月に「ずい道等建設工事における換気技術指針」を全面改訂し、これが現在の設計・計画・施工・管理の基本となっている。一方、大型機械の導入、ANFO 爆薬の増加、機械掘削の増加など新たな課題も発生しており、今まで以上に効率的で質の高い換気技術が求められている。

中部横断自動車道八ノ尻トンネルでは、新しい換気方式の採用により、切羽作業環境の大幅な改善を実現した。本稿は、2 章で新たな換気システムに至るまでの開発概要を、3 章では八之尻トンネルで採用している換気システムについて記す。次いで 4 章では、同換気システムを用い、送気風管の吐出口位置と送気風量、集じん機吸込み口位置と吸込み風量等を変化させた実験を行い、切羽直近で良質なエアカーテンを形成するために必要なデータを得たことから、これらについて紹介する。また 5 章では実施工での課題と対応策について記す。

2. 換気システム改善のこれまでの取組み

トンネル工事における換気は、工事より発生する有害ガスや粉じん等を合理的に希釈もしくは除去することで良好な作業環境を保持するために行うものである。

筆者らはこれまで北陸新幹線峰山トンネル「以下峰山トンネルと記述」において換気システムの開発を行うとともに、独立行政法人土木研究所「以下土木研究所と記述」では粉じん低減の共同研究を行ってきた。換気方式はいずれも送気による吸引捕集式であり、土木研究所での共同研究では非常に良好な結果が得られた。峰山トンネルと土木研究所の試験概要を以下に記す。なお、八之尻トンネルでは、峰山トンネルで開発した換気システムと、土木研究所にて試験を行った結果をさらに改良したシステムとしている。

(1) 峰山トンネルにおける換気システム開発²⁾

峰山トンネルにおける換気システムの基本概念は、図-1 に示すように送風管の先端に特殊噴出管を取り付けてトンネル断面全体に切羽方向への新鮮空気の流れの壁（エアカーテン）を形成させ、粉じんの後方への拡散を防止し、さらに切羽周辺に集まった粉じんを伸縮自在な風管とコントラファンで集じん機に送り込んで除じんする送気・吸引捕集式とした。峰山トンネルで開発した試作機では、切羽方向に伸びるストローク長 10m の吸引管や集じん効率の高いバグフィルタ方式の集じん機を採用し、さらにこれらの設備をガントリーに搭載し切羽の進行とともに前進させた(写真-1)。その結果、切羽直近で 30～40mg/m³ の粉じん濃度が、切羽より 50m 後方では粉じん濃度目標レベルの 3mg/m³ 以下を達成していることが確認できた。また、粉じんはエアカーテンで後方拡散を遮断されていることも明らかとなった。一方、作業エリア確保の点からガントリー式換気設備を切羽へ近づけるには限界があったため、集じん機吸込み口をさらに切羽近傍まで伸ばすことが課題と

キーワード トンネル、送気・吸引捕集式、エアカーテン、伸縮風管、特殊噴出ダクト、機械掘削

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設(株) 土木技術本部機械技術部 TEL 03-3561-3880

して残った。

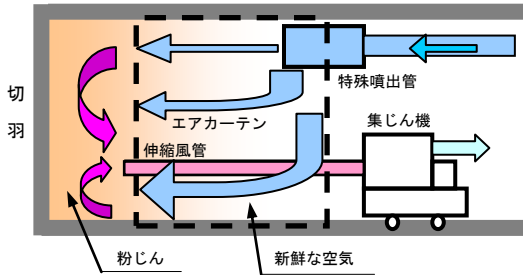


図-1 システムの基本概念



写真-1 峰山トンネルの換気システムの実機

(2) 土木研究所における粉じん低減の共同研究³⁾

実験は峰山トンネル工事で適用したエアカーテン式換気システムのコンセプトそのまま採用し、システムとしてはガントリーを用いない簡略化した設備で行った。実験では、送風量と集じん量のバランスによる粉じん封じ込めの違い、局所送気による切羽付近の視界向上効果、写真-2 の特殊噴出管による効果等の確認を行った。

本実験により特殊噴出管と伸縮風管を組み合わせたエアカーテン式換気システムを用いることで、掘削時に切羽から発生する粉じんをエアカーテンにより封じ込め、切羽より 30m 後方にて粉じんの拡散をほとんど完全に抑制できることが実証された。

そして、送気量と集じん量の量的バランスは封じ込め効果に対してあまり影響がないことや、吸込口と特殊風管の距離が短いと、後方の粉じん濃度が上がることが判明した。今後はこれらを定量的に把握する必要がある、また鋼製の特殊風管は非常に重いため実現場への採用にはさらなる工夫が必要であった。



写真-2 特殊噴出管

3. 八之尻トンネルの換気システム

(1) 工事概要

中部横断自動車道（静岡・山梨区間）は、新東名新清水 JCT から中央自動車双葉 JCT を結ぶ延長 74km の高速道路である。八之尻トンネルは、増穂 IC と六郷 IC 間に位置し、内空断面積 71.3m²、トンネル延長 2,464m の 2 車線道路トンネルである（図-2）。本工事では、300 kW 級軟岩トンネル掘進機を用いた全断面機械掘削工法を採用し、施工を行っている。

(2) 換気方式

八之尻トンネルの換気方式としては当初、送・排気組合せ方式で計画されていた。しかしながら、硬岩掘削が可能となる大型自由断面掘削機の採用により、切羽掘削時に多量の切削粉じん発生が予想されたため、送排気式よりも切羽で粉じんを回収する送気・吸引捕集式を採用した。

また、掘削オペレータの作業位置である切羽から 10m 地点にて粉じん濃度 3mg/m³ 以下を目指すために峰山トンネルと土木研究所の研究にて行った換気システムの改善を試みた。

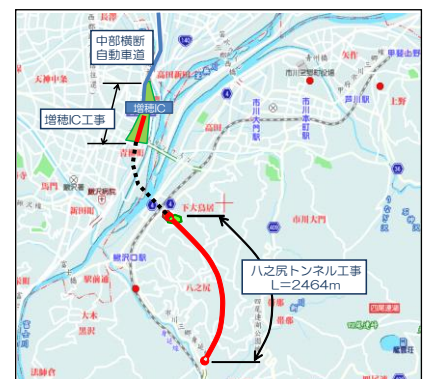


図-2 八之尻トンネル位置図

a) 換気レイアウト

八之尻トンネルの換気レイアウトを図-3 に示す。集じん機の吸込み口を伸縮風管にて切羽より 5m 付近まで延長できる設備とした。また、送気口には軽量化した特殊噴出ダクトを取りつけた。

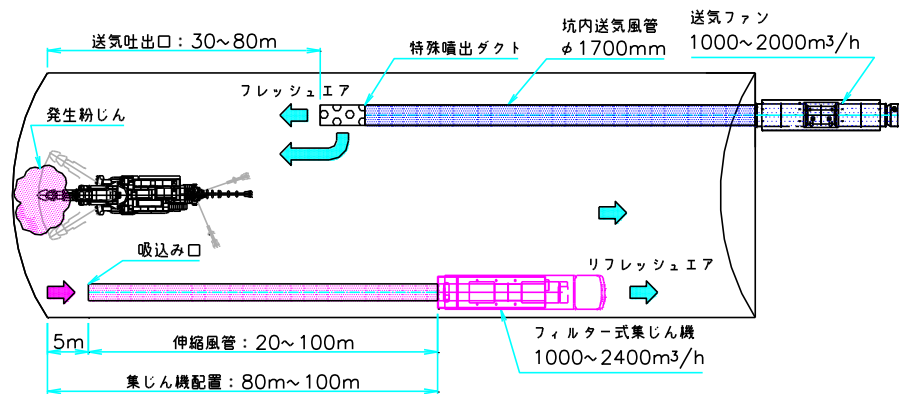


図-3 換気レイアウト図

b) 集じん機

機械掘削により多量の粉じんの発生が予想されたのでフィルタ式集じん機を採用した。フィルタに付着した粉じんは一定の間隔でフィルタ上部より噴出する圧縮空気により払い落とし、集じん機底部に設けられた掻き出し装置により自動的に集じん機の外部に排出される。これによりフィルタの目詰まりによる集じん能力の低下を防止する。

集じん機の風量は伸縮風管先端のダストセンサーと連動し、粉じん濃度が高い時には風量を自動的に大きくする。集じん機の外観を写真-3 に、その主要仕様を表-1 に示す。



写真-3 集じん機の外観

表-1 集じん機の主な仕様

型式	ABF2400P
処理風量	2400m³/min
フィルタ	径φ200×長さ1500mm、ポリエステル製プリーツ状成型カートリッジ×200本(8本×25列)
粉じん払い落とし	パルスジェット方式
集じん効率	98%(現場にて計測)
送風機	2400m³/min、2.94kPa 片側吸込みターボファン 160kW×6P×400V
コンプレッサ	3.7kW×7kPa
掻き出し装置	スクレーパ式+ロータリーバルブ
風量制御	インバータによる可変方式 粉じんセンサーによる自動制御

c) 伸縮風管

天井より吊り下げたガイドレール下を移動する伸縮風管により、集じん機の吸込み口は切羽から 5m 地点まで接近を可能とした。

伸縮風管は作業に合わせて風管全長を 20m~100m の範囲で伸縮させることが出来る。さらに、伸縮操作をリモコンにて行うことが出来るため箱抜きや避難連絡坑等の切羽後方作業にも影響が無いように計画した。また、風管を吊下げるガイドレールもリモコン操作で前方へ送り出すことが出来る設備とし、設備の盛替作業を簡略した。これにより、伸縮風管の先端を切羽から 5m 地点での維持を可能とした。伸縮風管の取付断面図を図-4 に、その状況を写真-4 に、主な仕様を表-2 に示す。

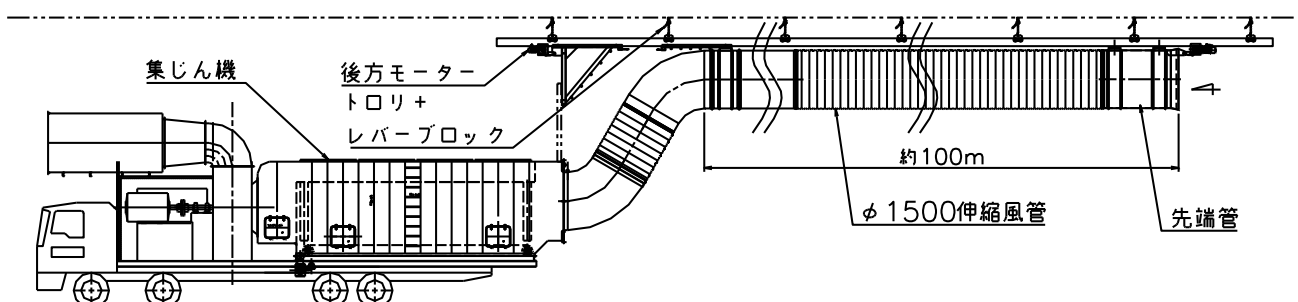


図-4 伸縮風管取付け断面図



写真-4 伸縮風管取付状況

表-2 伸縮風管の主な仕様

型式	吸引ダクトシステム
ダクト径	1500mm
ダクト延長	20m～100m
伸縮方法	天井より吊り下げたガイドレール下をリモコンによる伸縮
レール延長方式	リモコンによる送出し
伸縮速度	15m/min
レール送り速度	6m/min

d) 特殊噴出ダクト

送気風管先端から吐出する空気の流れの勢いが強いと、切羽で発生する粉じんを拡散させ、伸縮風管にスムーズに吸い込まれず後方へ飛散する現象が生じる。この送気流の勢いを減衰させ、切羽への送気の流れができるだけ均一にトンネル断面全体に流れるようにし、粉じんの拡散を抑えるために写真-5に示すような特殊噴出ダクトを採用した。この特殊噴出ダクトは多数の穴が開いており、先端は開口の面積を絞っているため送気はこの穴からトンネルの軸方向とは直角に吐出される。材質をビニール風管と同様のものとして軽量化を図った。また、送気風管の先端に風管と同じ形状のファスナーで簡単に接続できる構造として、通常行う風管の延伸作業と同じ要領で取付けできるものとした。



写真-5 特殊噴出ダクト

4. エアカーテン形成実験

(1) 目的

峰山トンネルでの換気システムの開発と土木技術研究所での実験では、切羽より 20m 程度でも良好な結果が得られていた。これは良質なエアカーテンの形成によって切羽から発生した粉じんを封じ込め、拡散する前に集じん機にて吸引捕集できたためである。そこで、以下の 3 項目に関し粉じん濃度を計測し、良質なエアカーテンの形成に必要な要素、管理項目を定量的に把握することとした。

- ①吐出口・吸込み口位置の関係による影響
- ②送気風量と吸込み風量の差による影響
- ③特殊噴出ダクトの効果

(2) 実験方法

a) 実験場所と粉じん発生方法

実験場所 : 前項の改良された換気システムを用いた八之尻トンネル切羽

粉じん発生方法 : 実掘進時の粉じんを切羽にて圧縮空気ですばらけさせた模擬粉じん(写真-6)

b) 粉じん濃度

測定器 : デジタル粉じん計 LD-3K2

測定位置 : 測定地点は図-5の平面図に示す位置で高さは地表約 1m(写真-7)

- ・切羽から 5m・集じん機吸込み口から 5m坑口方向
- ・切羽から 30m・切羽から 50m地点・集じん機の後方

c) 風向

測定器 : 気流検知管 AS-3

測定位置 : 粉じん濃度測定と同じ

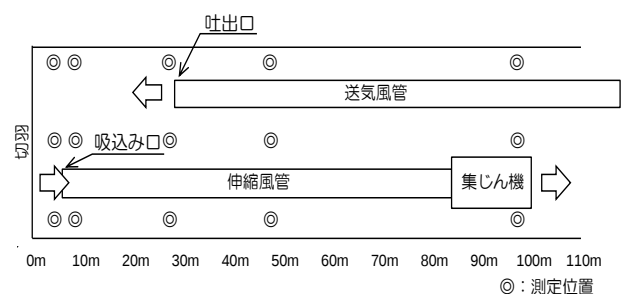


図-5 粉じん測定位置（平面図）

d) 風速

測定器 : アネモマスター風速計 MODEL6113

測定位置 : 粉じん濃度測定と同じ

(3) 実験結果

a) 吐出口・吸込み口の位置関係による影響

従来の送気集じん機モデル(ケース①)と、送気口と吸込み口間の距離を変化させたモデル(ケース②, ③, ④)との比較実験を行った。実験ケースを表-3 に、実験ケースにおける粉じん測定結果を図-6 に示す。さらに、ケース②とケース④についての風向測定結果を図-7 に示す。

今回の実験からは以下の結果が得られた。

- ・図-6 より、従来の送気集じん機モデルにあたるケース①では、切羽 50m 後方で粉じん濃度が $20\text{mg}/\text{m}^3$ 以上となっている。
- ・ケース②, ③, ④より集じん機吸込み口と送気口間の距離が離れている方が粉じん量が低い。
- ・ケース④では集じん機吸込み口と送気口間の距離が 80m の時に切羽より 10m 地点での粉じん濃度 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下となっている。
- ・図-7 よりケース②では吸込み口付近でも風向が整流されていない。
- ・図-7 よりケース④では吸込み口付近で風向が整流されている。

以上のことより集じん機の吸込み口と吐出口間の距離が 80m 程度あれば集じん機吸込み口付近に良質なエアカーテンが形成されることが明らかとなった。

また、送気口と吸込み口の位置関係が極めて重要であることが判明した。これは送気口からの吐出噴流が整流となりトンネル断面全体に行渡るためにはある程度の距離が必要であることを示している。



写真-6 粉じん発生状況



写真-7 測定状況

表-3 吸込み口・送気口位置関係実験ケース

実験ケース	①	②	③	④
送気風量 $Q_a(\text{m}^3/\text{min})$	1,000	1,000	1,000	1,000
送気口位置(m)	30	30	50	80
吸込み風量 $Q_b(\text{m}^3/\text{min})$	2,000	2,000	2,000	2,000
吸込み口位置(m)	無し	5m	5m	5m

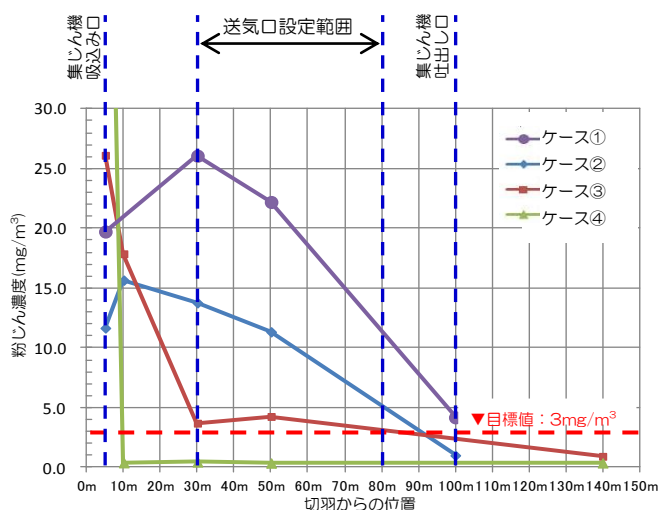


図-6 吸込み口・送気口位置の効果実験の粉じん測定結果

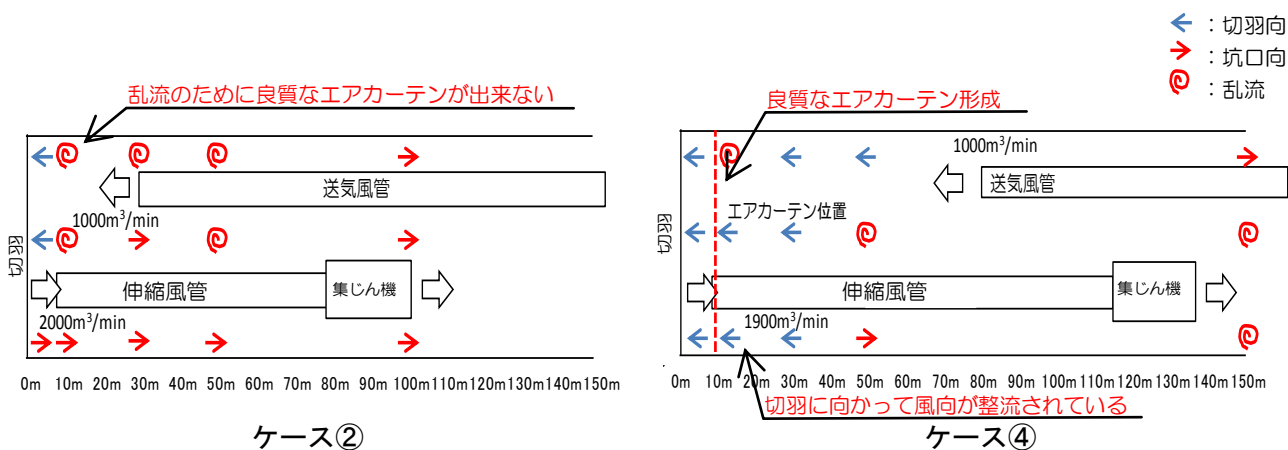


図-7 風向測定結果（ケース②, ④）

b) 送気風量と吸込み風量の差による影響

次に、送気風量と吸込み風量の差によるエアカーテンへの影響を検証した。実験ケースを表-4に、実験ケースにおける粉じん測定結果を図-8に示す。

今回の実験からは以下の結果が得られた。

- ・ケース⑥を除くすべてのケースで切羽より10m地点での粉じん濃度 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下となった。
- ・すべてのケースで良質なエアカーテンの形成が確認できた。

以上より、以下の知見を得た。

- ・送気口からの吐出風量と吸込み風量の量的バランスは粉じんの封じ込め効果に対しあまり影響がない。
- ・ケース⑤より良質なエアカーテン形成には集じん機前方の坑内風速 $0.27\text{m}/\text{s}$ ($1300\text{m}^3/\text{min}$ 、坑内断面積 80m^2)程度でも可能であることが確認できた。なお技術指針⁴⁾では $0.4\text{m}/\text{s}$ 以上としている。

これらの知見は土木研究所の実験結果と同様であり、その結果を裏付けるものとなった。

c) 特殊噴出ダクトの効果

これまでの試験結果より、エアカーテンの形成には送気口からの噴流の抑制による気流の整流が必要であることが分かった。送気口からの噴流の具体的な抑制方法としては送気風管吐出口を吸込み口より離すことが挙げられるが、現場の条件によりこれらの処置がとれないことがあることから、送気口に多数の穴をあけた特殊噴出ダクトを設置して送気風量の整流を試みた。実験ケースを表-5に、実験ケースにおける粉じん測定結果を図-9に示す。さらに、ケース②とケース⑨についての風向測定結果を図-10に示す。

今回の実験からは以下の結果が得られた。

- ・ケース②では50m地点での粉じん濃度が $11\text{mg}/\text{m}^3$ と $3\text{mg}/\text{m}^3$ を大きく超えている。
- ・特殊噴出ダクトを取りつけたケース⑨では10m地点での粉じん濃度が管理基準の $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下となった。
- ・ケース②では吸込み口付近でも風向が整流されていない。
- ・ケース⑨では吸込み口付近で風向が整流されている。

以上より、特殊噴出ダクトにより送気口からの噴流が通常よりも短い距離で整流することが分かる。これは、特殊噴出ダクトにより送気口からの噴流が

表-4 風量バランスによる影響実験ケース

実験ケース	④	⑤	⑥	⑦	⑧
送気風量 $Q_a(\text{m}^3/\text{min})$	1,000	1,000	1,000	1,500	2,000
送気口位置 (m)	80	80	80	80	80
吸込み風量 $Q_b(\text{m}^3/\text{min})$	2,000	1,300	1,000	2,000	2,000
吸込口位置 (m)	5	5	5	5	5

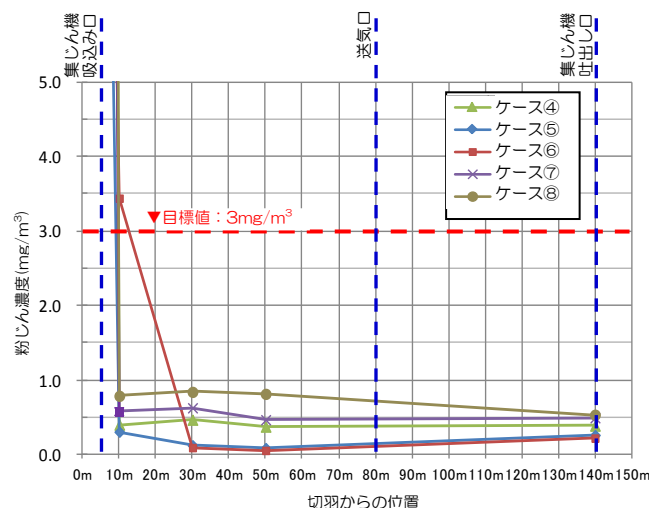


図-8 風量バランスによる影響実験の粉じん測定結果

表-5 特殊風管の効果実験ケース

実験ケース	②	⑨
送気風量 $Q_a(\text{m}^3/\text{min})$	1,000	1,000
送気口位置 (m)	30	30
吸込み風量 $Q_b(\text{m}^3/\text{min})$	2,000	2,000
吸込口位置 (m)	5	5
特殊噴出ダクト	無	有

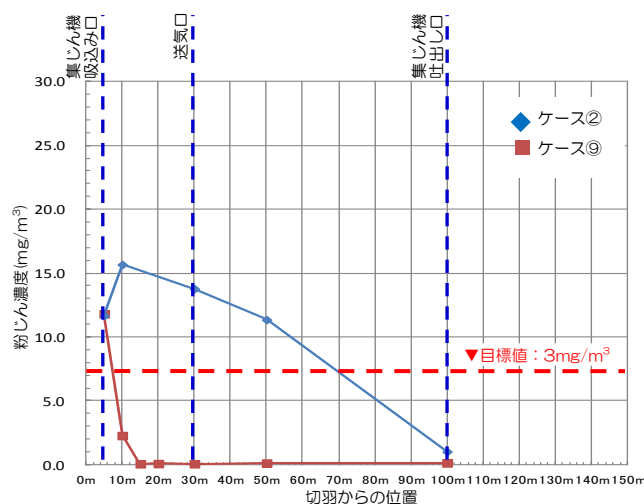


図-9 特殊風管の効果実験の粉じん測定結果

トンネル壁方向に分散されるためである。

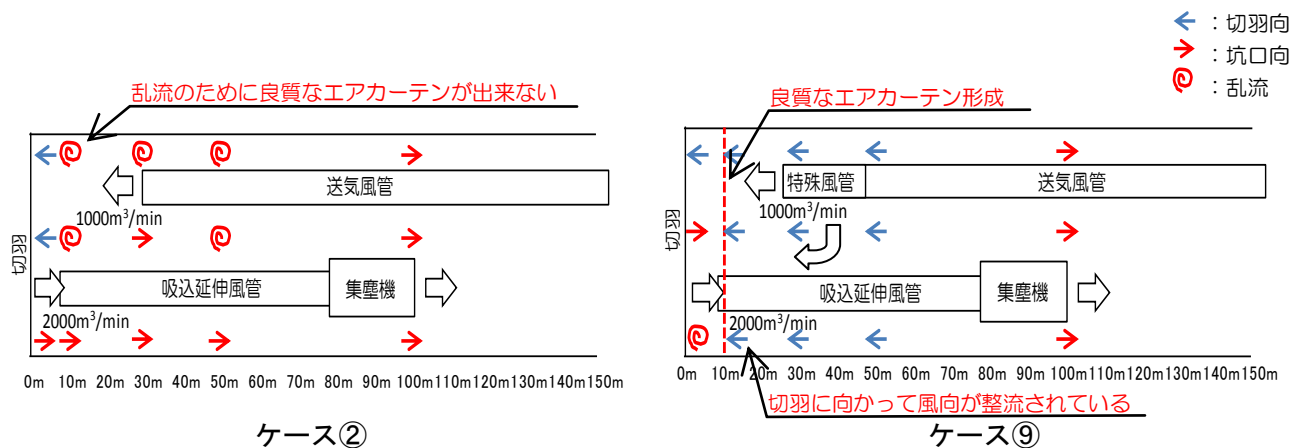


図-10 風向測定結果（ケース②，⑨）

(4) 実掘削時の計測結果

実験結果を基に本現場にて換気システム(送気風量：1000m³/min，吸込み風量：2000m³/min，送気口・排気口距離：80m，特殊噴出ダクト：無し)を使用して機械掘削時の粉じん濃度測定を行い以下の結果を得た。

- ・切羽掘削に伴う発生粉じんは切羽より 5m 地点で 145mg/m³であった。
- ・切羽から 10m 地点の掘削オペレータの位置では 0.2～2.4mg/m³であった。

これより実掘削時においても写真切羽近傍でのエアカーテンによる粉じんの封じ込めが実証できた。実掘削時の粉じんの封じ込め状況を写真-8 に示す。



写真-8 実掘削状況

5. 実施工に向けての対策事項

(1) 実施工に向けての課題

今回の実験結果を実施工に適用するに当たり，いくつか対策を講じなければならない事項がある。以下に本現場で生じた課題を挙げる。

- ・夏場の切羽は気温は 30℃弱であるが湿度が 80%程度と高い。作業員は暑さをしのぐために送風機の吐出口をできる限り切羽に近付け，送風機の風量を上げて風を受けようとするため吐出口・吸込み口の位置関係が崩れてしまう。
- ・封じ込められた粉じんは厚い層となりオペレータの位置で 10m 前の切羽が見にくい。
- ・掘削ずりの搬出のために出入りするホイールローダや掘削補助のための油圧ブレーカ機からの排ガス噴出によりエアカーテンが乱される。
- ・年中ほぼ一定の坑内温度に対して送られてくる外気は季節によって温湿度が異なる。これにより送風されてくる空気の性状が季節によって異なる。たとえば冬季には外気温が坑内気温より低いいため送風口から排出された空気は坑内断面の下側を流れる。反対に夏季には空気は坑内断面の上側を流れようとする。これらの気温差による影響が整流条件にも作用しエアカーテンが崩されることがある。

(2) 本現場での対応策

前項を受けて本現場にて対策の一助となった工法として補助ファンによる気流制御を挙げる。これはエアカーテンの弱い部分や視界の見えづらい場所に補助ファンによる気流を加えてエアカーテンを制御するものである(図-11)。本現場では $\phi 300\sim 600$, $0.5\sim 1.5\text{ kW}$ 程度の軸流ファンを人の操作による ON・OFF, 方向制御を行うことで暑さ対策やエアカーテンの角度変更, エアカーテン形成補助として利用できることが確認できた。

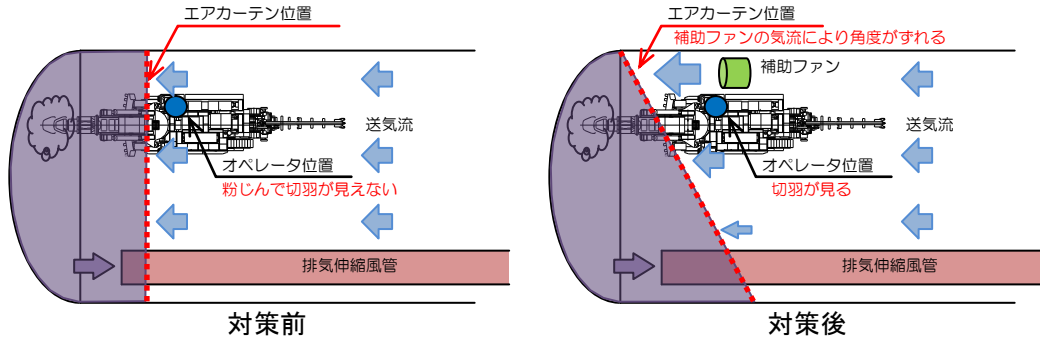


図-11 補助ファンによる掘削視界の確保

6. まとめ

今回のエアカーテン形成実験の結果から以下のことを確認できた。

- ・発生粉じんの封じ込めには良質なエアカーテンの形成が重要である。
- ・エアカーテンの形成には空気の流れが整流になることが必要である。
- ・空気の流れが整流になるためには、 80m^2 程度のトンネル断面では吐出口と吸込み口間の離れを 80m 程度とる必要があることが判った。
- ・吐出口と吸込み口間の離れが十分確保できない場合、特殊噴出ダクトが有効である。
- ・吐出口と吸込み口間の離れを十分に取った場合、送気量と排気量の量的バランスが整流となるために与える影響は小さい。

また、実際の掘削作業に本システムを適用した結果、以下のことが確認できた。

- ・ $100\text{mg}/\text{m}^3$ 以上の粉じんを切羽より 10m 地点で $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下に低減することが出来た。
- ・暑さ対策や視界の確保、気温差によるエアカーテンの乱れは補助ファンが有効であることが確認できた。

現場の条件は様々であるが、エアカーテンを作りたい位置までに風向をそろえるよう空気の流れを整流する風向管理により良質なエアカーテンの形成が可能と考える。今後は、実施工に向けての課題についてより効果的な対応策の研究に取り組んでいく予定である。本システムがトンネルの粉じん削減に貢献できれば幸いである。

最後に、本システムの開発に当たり、機軸エンジニアリング土田雄史氏、大谷雅之氏、機軸エムシーエム酒井喜久雄氏をはじめ多数の皆さまには多大なご協力をいただきました。本誌面を借りまして心より感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 西村章：進化するトンネル換気技術，建設の施工企画，pp47-53，2010.9
- 2) 木内勉・清水雅之・古戸幸博・北本廣平・宮沢和夫・鈴木圭一・鈴木正憲・大久保誠介：エアカーテン式トンネル換気システムの開発，土木学会土木建設技術シンポジウム論文集，pp.225-232，2006.7
- 3) 共同研究報告書：山岳トンネル工事における機械掘削時の粉じん低減に関する研究，2009.3
- 4) 建設業労働災害防止協会：新版ずい道等建設工事における換気技術指針，2012.3