

エアカーテン式トンネル換気システムの開発

木内勉¹・清水雅之²・古戸幸博²・北本廣平²・宮沢和夫³
鈴木圭一⁴・鈴木正憲⁵・大久保誠介⁶

¹正会員 清水建設株式会社 土木技術本部技術第二部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)

²正会員 工修 清水建設株式会社 土木技術本部技術第二部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)

³清水建設株式会社 土木技術本部技術開発部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)

⁴博(工) 清水建設株式会社 技術研究所施設基盤技術センター (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

⁵清水建設株式会社 土木技術本部機械技術部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)

⁶正会員 工博 東京大学 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

トンネルの掘削により発生する粉じん濃度を低減することは、作業環境向上の為の重要課題のひとつである。さらに、近年の機械の大型化や高速掘進により、切削時の発生粉じん濃度の増加も懸念される。本論文は、軟岩地山を機械掘削により急速施工した掘削断面80m²のトンネルに、エアカーテン式トンネル換気システムを用いた結果、粉じん濃度を効率的に改善できたことを報告する。本換気システムの基本概念は、送気風管の先端に特殊噴出管を取り付けることによりトンネル周(壁面)方向に新鮮空気を放射状に噴出してエアカーテンを形成し、切羽で発生する粉じんを切羽に封じ込め、この切羽近傍の粉じんを吸込管により集塵機に導き効率的に坑内粉じん濃度の低下を図るものである。

キーワード：トンネル工事, エアカーテン, 粉じん, 換気システム,

1. エアカーテンを使った換気システム

(1)はじめに

トンネル工事における坑内作業環境は、十数年前に比べ、改善された状況となっている。しかし、そのような状況であっても掘削作業等に伴い発生する粉じんによる健康障害の要因が無くなった訳ではなく、より一層の坑内作業環境の向上にむけて、発注者、施工者、メーカー等は技術開発を継続しているのが現状である。

平成12年12月厚生労働省から示された「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」は、ずい道等建設工事における粉じん対策のより一層の充実を図ることを目的とし、対策方法や目標値について具体的に示された最初の指針である、特に切羽後方50m地点における坑内粉じん濃度の管理目標値が3.0mg/m³として挙げられているが、これを満足するためには、発生粉じんの抑制や発生してしまった粉じんの効率的な処理が必要となる。本稿

では、切羽で発生した粉じんを効率よく捕集し、坑内作業環境を大幅に改善できる可能性を持ったエアカーテン式の新しい換気システムの開発と実現場への適用について報告する。

(2) 従来のトンネル換気方式の概要

換気方式は、ファンを用いた強制換気とファンを用いない自然換気に大別されるが、一般にトンネル工事では強制換気が行われている。強制換気には、外部から切羽付近にまで風管を設置して内部に新鮮空気を送ったり、逆に汚染空気を外部に放出する風管換気法と、トンネル自体を風管として活用する坑道換気法があり、現状は風管換気法が一般的である。さらに風管換気法にもいくつか方式があり、送気式、排気式、送・排気併用式、送・排気組合せ式などがある(図-1)。図-1に示す換気方式のうち、現在多くのトンネルで採用されている風管換気法は送気用と排気用の2系列の換気設備を持つ、送排気組合せ式である。

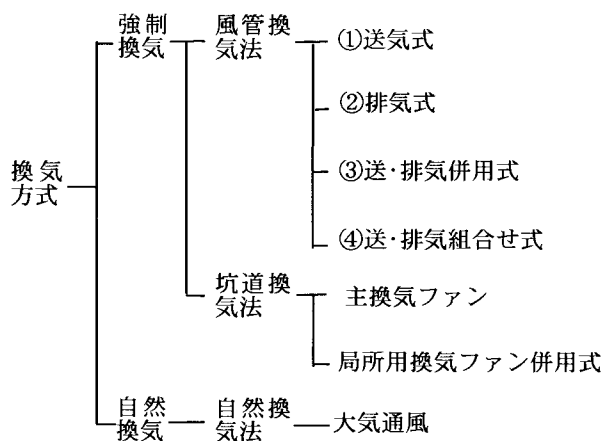


図-1 換気方式¹⁾

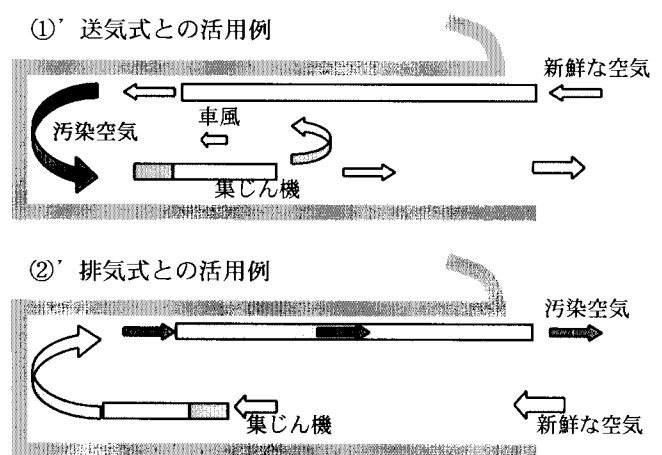


図-2 集じん機を組合せた換気法

また送気式や排気式に集じん機を組合せて改良した方式も使われている。図-2 にその概念図を示す。①' の送気式と集じん機の組合せは、送気によって希釈した汚染空気を集じん機で除じん処理し、坑内に再放出する方法である。このとき送気量より集じん機の風量を大きくすることで、集じん機から坑口への気流とともに、切羽への逆流を発生させ（車風）、汚染空気の後方への拡散防止と集じん機の捕集効率を高めることができる。

②' の排気式と集じん機の組合せは、集じん機を排気口へ汚染空気を誘導する補助ファンの代わりに使ったものである。

以上に示した従来の換気方式は、それぞれのトンネルの施工条件を考慮して使用されている。しかし、いずれの換気方式も切羽で発生した粉じんを希釈し、一度拡散させてから処理する方法であり、切羽作業範囲のより一層の環境改善が課題となっていた。

2. 新しい換気システムのコンセプト

従来の換気方式で課題となっていた問題を解決し、なおかつガイドラインで示された管理目標値 $3.0\text{mg}/\text{m}^3$ を満足する新しい換気システムの開発を行うこととした。具体的開発目標は、以下のとおりである。

- ① ガイドラインに示された、切羽後方 50m 地点での粉じん濃度管理目標値 $3.0\text{mg}/\text{m}^3$ 以下を達成する
- ② 切羽作業員の作業範囲においても、 $3.0\text{mg}/\text{m}^3$ 以下を達成する

- ③ 後方作業箇所に切羽で発生した粉じんの影響を与えない
- ④ 換気設備の延伸が切羽の掘削サイクルを妨げない
- ⑤ 換気設備の延伸等、段取り替えが、切羽作業と併行して行える

開発にあたり困難が予想されるのは最初の 3 項目であった。それをクリアするためには切羽で発生した粉じんを拡散させずに切羽近傍に封じ込め処理することが最も望ましいと考えこの方法を開発することとした。

まず集じん機を使った方法は、切羽後方への粉じん拡散を抑制する効果はあるが、切羽作業範囲には発生粉じんがそのまま残ることになる。また、トンネル断面方向に空気の壁（エアカーテン）を設置する方法は、設置位置を切羽直近に設置することが難しいため、切羽から長い範囲に発生粉じんが滞留する。さらに、車両の通行や換気による空気の流れ等で、エアカーテンが壊れ十分な効果が期待できないともいわれている。

このような状況を踏まえ、車両の通行や換気による空気の流れに強く、切羽直近まで発生粉じんを押し込める新たなエアカーテン式の方法を開発することとした。

この方式の特徴を以下に示す。また、エアカーテン式の概略図を図-3 に示す。

- ① 坑外からの新鮮空気を、特殊噴出管から壁面方向に放射状に噴出する
- ② 切羽近傍まで延ばした吸込管で切羽付近の汚染空気を吸入し、集じん機に導く

- ③ 切羽付近の汚染空気は、集じん機で処理し後方へ放出する

特殊噴出管から吸込管口までのトンネル断面全体に、切羽方向に一樣に流れる気流（エアカーテン）が形成されるため、切羽で発生した汚染空気を切羽近傍に封じ込めることができる²⁾。

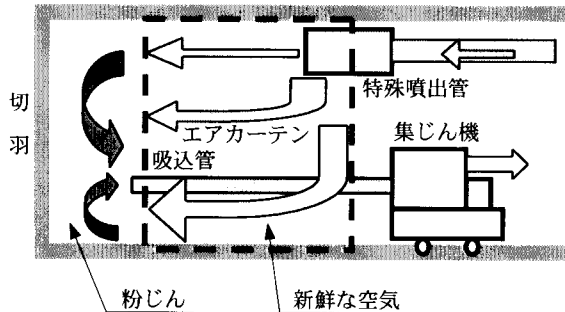


図-3 エアカーテン式の概念図

3. シミュレーションによる検証

エアカーテン式の換気方法では、噴出管、吸込管と集じん機の各風量のバランスや噴出方向がエアカーテンの安定性に大きく関係すると考えられる。しかしながら妥当な既往研究や調査がなかったため、気流解析シミュレーションにより、風量バランスおよび噴出方法とエアカーテン形成の関係について検討した。ここでは集じん機を想定した吸込管の風量を固定し、噴出管の風量と方向を変えた3ケースについて紹介する。図-4にシミュレーションの概念図を示す。

(1) 計算条件

- ・ $k-\varepsilon$ 乱流モデルを含む3次元気流解析モデル
(k :乱流運動エネルギー、 ε :分子粘性逸散率)
- ・ トンネルの大きさ: $4.8 \times 9.6 \times 100\text{m}$ の馬蹄形、一端は開口（圧力境界）条件とする
- ・ 排気ダクトの流量: $750\text{m}^3/\text{分}$ （全ケース共通）
- ・ 排気ダクトの位置: 切羽から 5m
- ・ 給気ダクトの流量: case1: $188\text{m}^3/\text{分}$
(噴出方向: 切羽)
case2: $375\text{m}^3/\text{分}$
(噴出方向: 切羽)
case3: $1000\text{m}^3/\text{分}$
(噴出方向: 壁面に一樣)

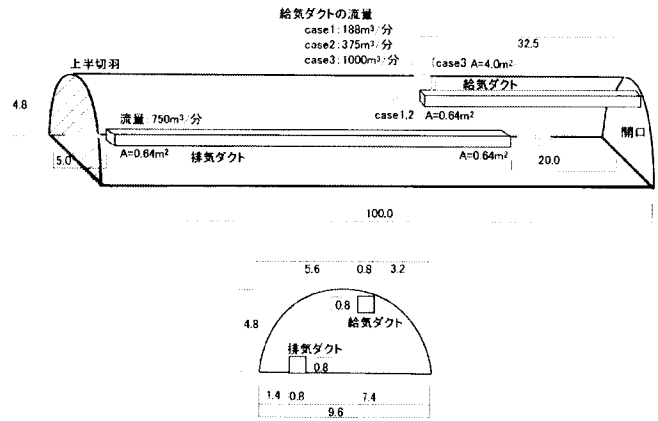


図-4 シミュレーションの概念図

(2) 解析結果

図-5～図-7に、各ケースの流速分布の解析結果を示す。図中、スペクトラムは流速と方向を示している。スペクトラムの濃淡（色合い）が濃くなるに従って流速は大きくなる。この解析条件下ではエアカーテンは切羽から $10 \sim 80\text{m}$ 付近に形成される。とくに切羽に近い部分での流速分布がすべて切羽方向であれば安定的にエアカーテンが形成され、汚染空気が切羽付近に封じ込められているといえる。なお切羽方向であっても、流速が弱いと掘削機の動作や車両走行により、エアカーテンが崩れ、汚染空気が坑内に流れるおそれがある。

・ case1: 図-5 の切羽から 10m および 20m の流速分布に示すように、中央付近はおおむね $0.3 \sim 0.6\text{m/s}$ の気流が切羽方向に吹いており、汚染空気が 10m 以内に封じ込められていると考えられる。ただし、壁面付近で若干、開口方向への気流が生じている。

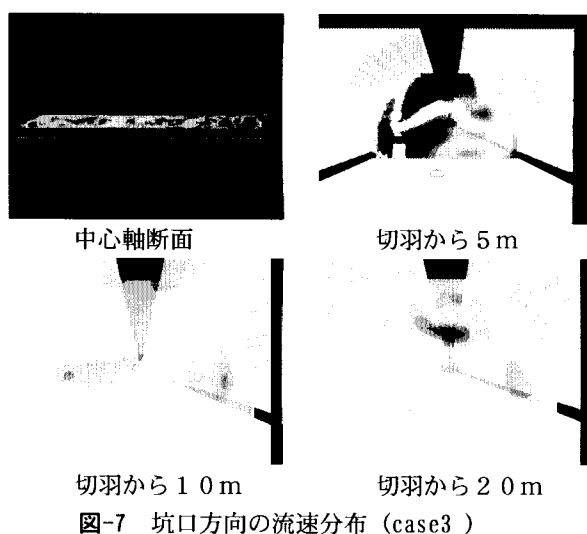
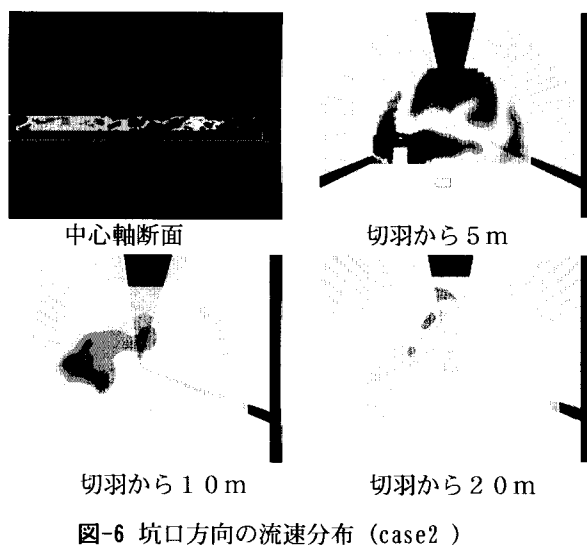
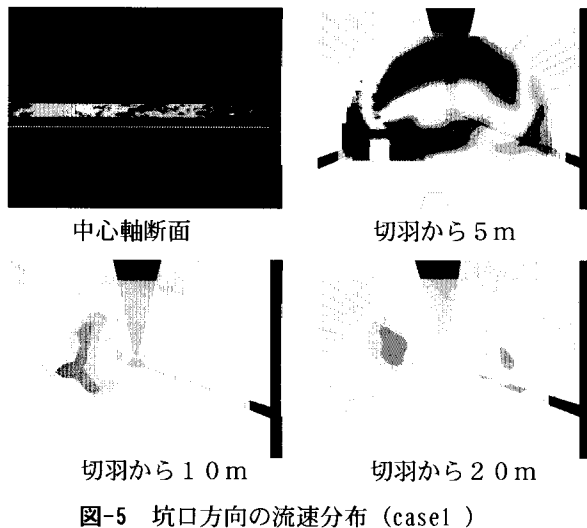
・ case2: 図-6 の 10m と 20m の流速分布に示すように、中央付近はおおむね $0.2 \sim 0.7\text{m/s}$ の気流が切羽方向に吹いている。図-6 の右側部分が流速が弱くなっている。

・ case3: 図-7 の 10m と 20m の流速分布に示すように、中央付近はおおむね $0.3 \sim 0.6\text{m/s}$ の気流が切羽方向に吹いている。分布のムラが3ケースのなかでは最も少ない。

若干の分布のムラが生じるが、どのケースでもほぼ切羽付近に汚染空気を封じ込められることが分かった。ただし吸込管の設置位置が切羽から 5m と、あまり現実的ではない条件であったことを追記しておく。

流速の方向として、本図では、判別し難いが以下の濃淡で示す。

- 開口（坑口）方向に流速が大きい
- 切羽方向に流速が大きい



4. 模型実験による検証

シミュレーションは計画段階で比較的簡易に実施できるため、計画断面や諸条件を踏まえて、本システムの風量バランスなどを決定するのに大変有益で

ある。そこで、シミュレーションの結果が現実のトンネルの状況が反映されているかどうかの適合性を検証するために約 1/20 の縮小模型実験による検証を実施した。切羽付近を想定した縮小模型の内部に送気・排気のできる風管を導入し、それらの風量をパラメータにした実験をおこない、内部の気流性状を測定した。

装置の直径は 0.5m の円形で、全長は 4m である。一端は開口とし、もう一端は切羽を想定し蓋をした。写真-1 と写真-2 は、2 本の吸込管を切羽から 0.8m の位置に設置し、1.8m の位置に噴出管を設置した装置を示す。風量を縮小による相似則から計算し、設定した状態で、切羽から 0.5m の位置で炭酸マグネシウムの粉末を放出させ、粉末の流動はレーザーシートによる P V I 追跡法により測定し、装置内の汚染具合は目視により観測した。写真-3 は内部の流速を風速計により測定している様子を示す。

写真-4 では、同じ縮小の掘削機を入れ、模型を炭酸マグネシウム粉末の代わりに発煙片により褐色の煙を発生させ、風量バランスをパラメータにした実験を行い、内部の煙流動や汚染具合などを目視により観測した。煙の汚染部分の区間などがシミュレーション結果とほぼ一致することが判明した。

性能評価におけるエアカーテン形成の判定方法として、噴出口から吸込口の間に、断面全域にわたり切羽方向の流れが存在している横断面があればよいとした。このような横断面を越え、切羽からの粉塵を含んだ気流が坑口のほうに流れることは考えられないため、評価方法として妥当と考えられる。



写真-1 実験装置 (左が切羽、中央上部に吸込管、右上部に噴出管)

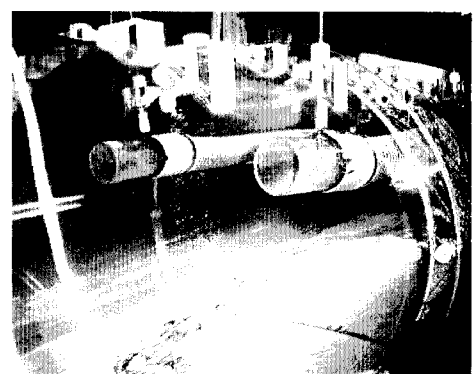


写真-2 吸込管付近

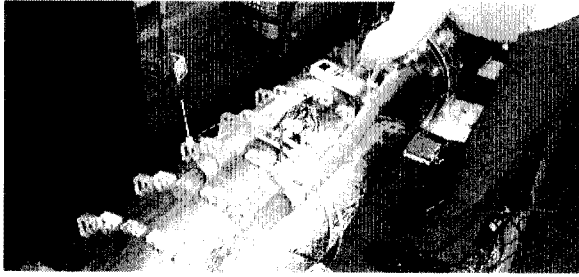


写真-3 風速の測定



写真-4 汚染の封じ込めの様子

5. 実機による実証試験

従来の換気設備では、トンネル天端または肩部にメッセンジャーワイヤーを張り、これに風管を懸架し切羽手前 30～50m に風管口をセットできるようにする方法が一般的である。集じん機については、さらに後方の 50～100m 程度の位置に置くことが一般的である。このような位置関係は、切羽で稼働する機械の作業性を確保し、風管延伸等の段取り替えも切羽作業範囲外で行えることを考慮している。しかし、このような位置関係では、切羽作業範囲の環境改善は希釈による手段に限られていた。

本換気システムにおいても、集じん機から延びる吸入管口が従来の位置を踏襲し、切羽から遠く離れていては切羽作業環境の改善にはならず、封じ込めることでより高濃度の粉じん滞留帯を切羽作業場所に作ってしまう恐れがある。そこで、以下の 3 つの方策を組み合わせることで、切羽直近までエアカー

テンを形成させることとした。これにより、切羽作業範囲を含め、ガイドラインの粉じん濃度管理目標濃度 $3.0\text{mg}/\text{m}^3$ を達成できると考えた。

①自走式換気架台（ガントリー）

架台には、エアカーテンを形成するのに必要な、集じん機と吸入管及び特殊噴出し管を搭載する。切羽作業機械が通過できる通行帯を確保し、独立して移動可能となることで、切羽作業に干渉せず段取り換えが可能となる。

②トンネル壁面から独立した吸込用伸縮風管

吸込用風管は、切羽直近まで届かせる必要があるとともに、換気架台の切羽側に切羽作業スペースを確保する必要もある。従ってそれに必要な長さが求められる。従来の方式であれば、トンネル天端等から吊ることによって保持することになるが、これでは段取り替えの際、切羽を止めての延伸作業となるため、換気架台から支持する方式とした。また、作業状況により管口の位置を移動させることも考慮し、架台を移動せずに対応できるように伸縮機能を持たせた。

③かき込みローダ（ベルトコンベア式連続積込機）

切羽作業において最も動きの大きい作業は、ズリ出しである。サイドダンプショベルでのズリ積み込みは、直上にある吸入管にバケットを当ててしまう可能性がある。そこで、かき込みローダを採用することにより、吸入管の設置スペースを確保できるようにした。

また送気式換気で集じん機を使う場合、送気ファン能力の 2～4 割集じん機風量を大きくするとされている¹⁾。本換気システムの換気方式も基本は送気式であるが、エアカーテンを有効に利用することから、送気ファン能力より若干（2～3 割）集じん機風量を小さく設定している。これによって、換気設備の運転費を低く押さえられる可能性がある。

以上の検討から、実機を製作し、実トンネルの施工現場に設置し効果を検証するため環境計測を実施した。

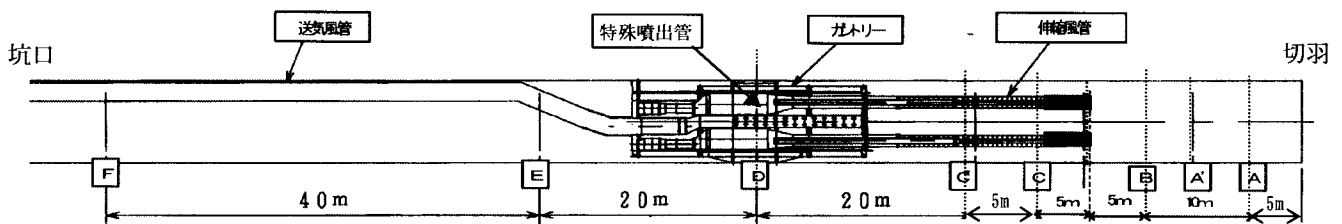


図-8 風向・風速測定位置図

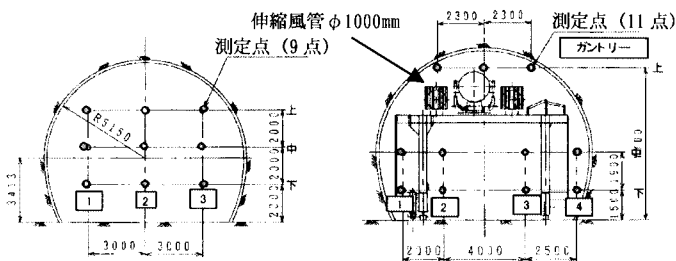


図-9 風向・風速測定位置図（断面位置）

(1) トンネル内の風向・風速の測定

a) 測定時の風量等の条件

トンネル全体の換気流の状況を把握するため、計測断面を決め、各断面における風向・風速を計測した。計測時の条件は表-1のように設定した。

表-1 計測条件

試験 No.	1	2	3
ガントリーの位置	できるだけ切羽に近づけた状態とする。		
集じん機風量 (m³/min)	2000 (1657)	2000 (1657)	2000 (1657)
送風量 (m³/min)	2500 (2467)	2000 (1933)	1500 (1199)

※ () 内数値は測定時の実測値
伸縮管径：φ1000mm

b) 測定位置

計測位置図を図-8、図-9に示す。測定はA～Fの箇所では風向・風速の計測を実施した。

Dのガントリー部分については11点、その他の部分については9点計測を実施（風向・風速測定位置図参照）。

c) 測定結果

トンネル内の風向・風速測定結果のベクトル線を図-10～図-12に示す。

試験No.1, 2, 3すべての測定結果から、シュミレーションや模型実験と同様、特殊噴出管から、伸縮風管口（測点C, C'）までの区間で、切羽方向の流れがほぼ全ての測点で確認されており、エアカーテンが形成されていると判断される。

(2) 粉じん濃度測定結果

a) コンクリート吹付け時

図-13に粉じん測定位置図、図-14、図-15に測定結果を示す。図示したa～gの箇所にて1断面につき床上1.5mの高さで、左右のトンネル壁から約1.5m離れた地点と、中心の3点でデジタル粉じん計P-5L型にて測定した。測定位置及び併行測定位置については、最も切羽に近い位置aを含めて管理目標値を満足している。

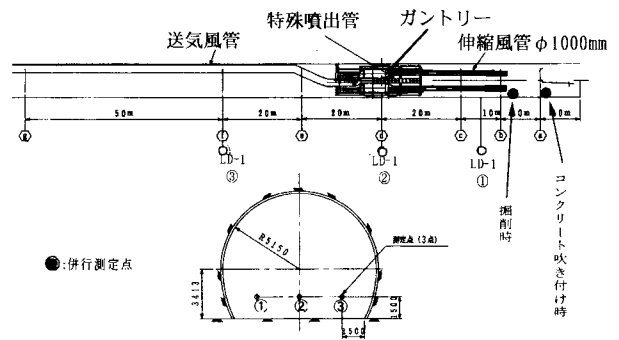


図-13 粉じん測定位置図

b) 掘削時

図-16に測定結果を示す。掘削時は車輛の通行が頻繁となり、aの①～③とLD-1①～③の位置だけの測定とした。掘削時には切羽付近で高濃度の粉じんが発生しているが、エアカーテンの「効果で後方b, cでは急激に粉じん濃度が減少している。

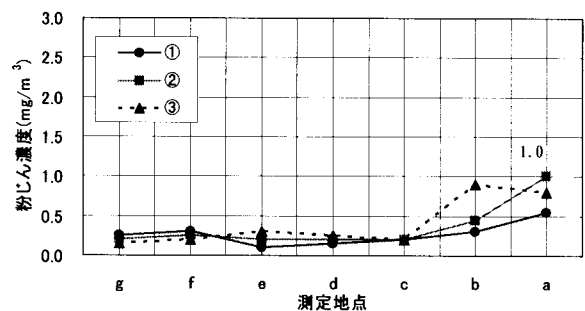


図-14 コンクリート吹付け時(10:45～10:55)

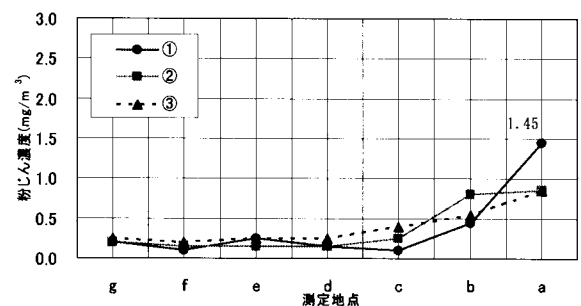


図-15 コンクリート吹付け時(10:57～11:05)

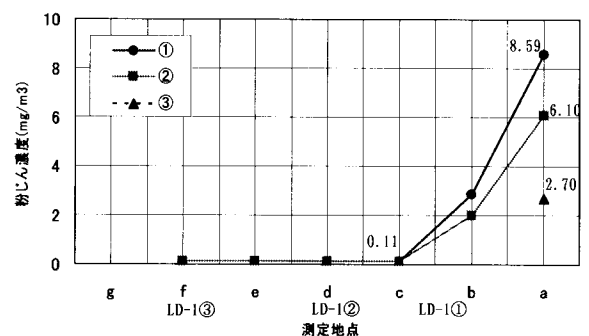


図-16 掘削時(7:39～7:58)

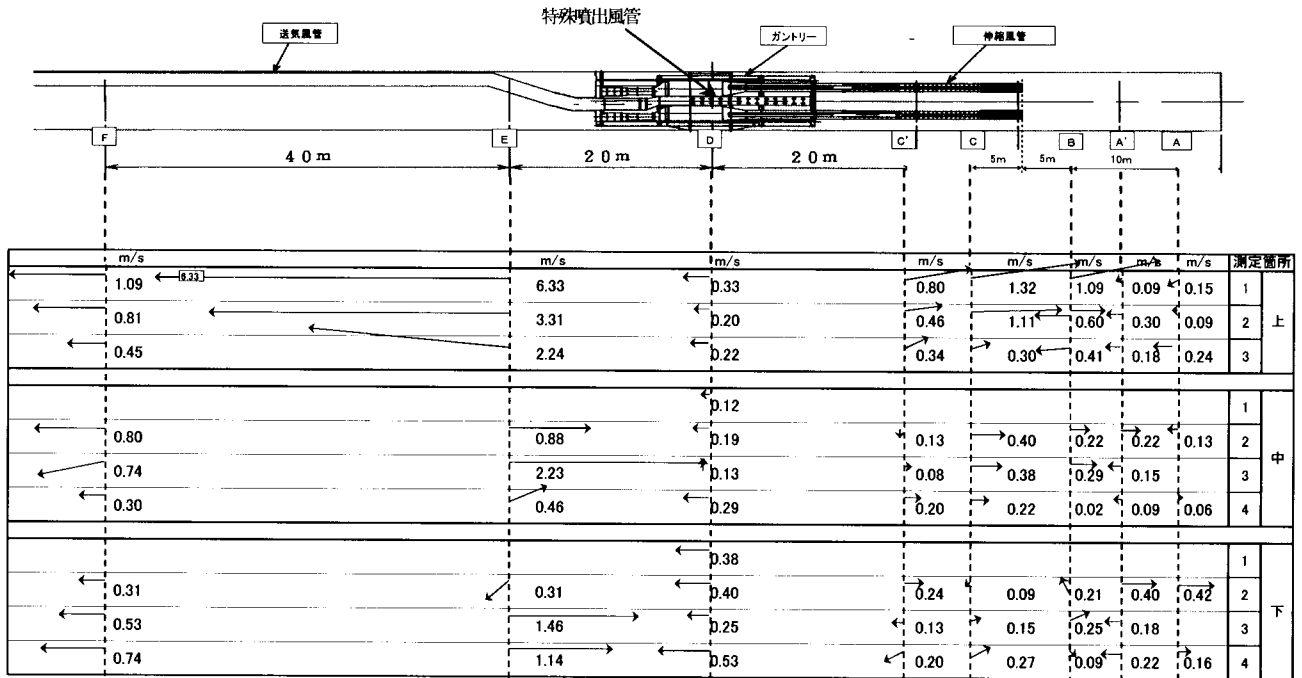


図-10 試験No.1 風向・風速測定ベクトル線図(10:20~11:56)

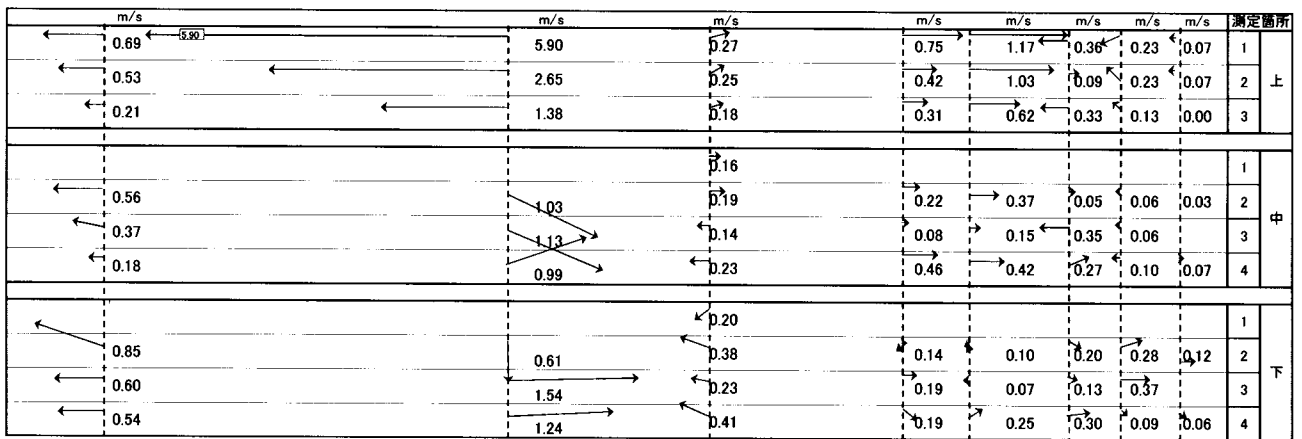


図-11 試験No.2 風向・風速測定ベクトル線図(13:26~15:00)

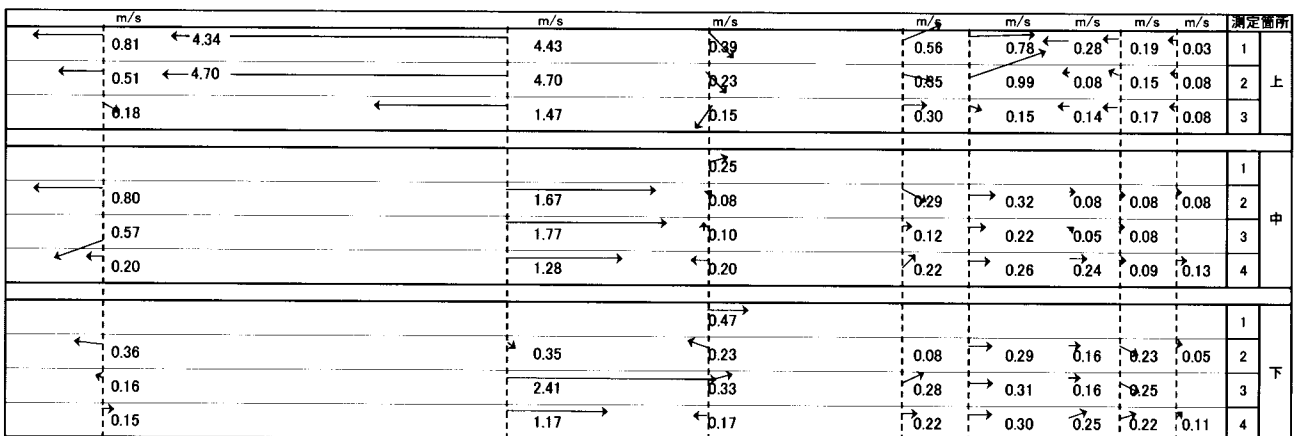


図-12 試験No.3 風向・風速測定ベクトル線図(15:45~17:00)

6. 本換気システムの効果の考察

試験No.1, 2, 3とも特殊噴出し管から伸縮風管口までの区間(測点:c, c')で切羽方向の流れがほぼ全ての測点で確認されている。このことから、切羽で発生した粉じんの封じ込め効果は十分期待できるものと思われる。粉じん濃度測定結果でも、吹付けコンクリート施工時において、b測点からc測点の間で明らかに粉じん濃度が低下している。掘削時においても、切羽近傍とc測点やや前方の比較であるが、同様の傾向となっており、封じ込め効果によるものと考えられる。

今回の実証試験は、送気ファンと集じん機的能力を3ケース設定して行ったが、それぞれ少しずつ違う気流の流れを示している。集じん機風量より送気風量が810 m³/min多い試験No.1では、特殊噴出し管直下の坑口側の測点dでは気流は坑口に向かっているが、280 m³/min多い試験No.2ではトンネル上部で切羽方向へ、下部で坑口方向とほぼ半々の計測結果となった。逆に、集じん機風量より送気風量を460 m³/min小さくした試験No.3では、特殊噴出し管直下の坑口側でも切羽方向への気流が卓越している。

7. まとめと今後の課題

今回の実証試験結果から、エアカーテン式の換気システムの有効性が高いことが確認できた。本換気システムで切羽作業環境の良好な範囲をより拡大するためには、計測結果からも明らかなように伸縮風管の先端を切羽近傍までできるだけ伸ばすことが、もっとも重要であるといえる。切羽作業への影響を抑えつつ、風管延伸方法の一層の工夫が必要である。また掘削機などへの吸込み口の設置や、切羽付近の汚染空気を吸込管口に誘導する補助ファンの採用も有効な手段の一つとして考えられる。

また、シミュレーションや現場試験結果からも得られているように、送気ファン風量と集じん機風量のバランスにより、トンネル内の気流が変化している。このことから、送気ファン風量と集じん機風量をパラメータとした最適値の検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 建設業労働災害防止協会: ずい道等建設工事における換気技術指針(設計及び粉じん等の測定), 2002年3月12日
- 2) 清水雅之, 木内勉, 多川博章, 和田利彦, 鈴木正憲: 公開特許公報(A)・トンネル坑内の換気方法及び換気装置, 2003年5月15日