

電気集じん機を用いたトンネル換気集じんシステムの開発

浜田 元* 萩森健治** 横山哲哉**
 水原憲三*** 須田博幸** 清水智明*

1. まえがき

山岳トンネル工事における粉じん障害防止対策の一層の充実を図ることを目的として、厚生労働省より、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^{1), 2)} (以下、ガイドラインと呼ぶ) が策定された。同ガイドラインの策定以降、コンクリート吹付け時の発生粉じん抑制対策や風管換気と大型集じん機を組合せた粉じん低減対策など、坑内作業環境の改善対策が、これまで以上に積極的に進められている。

筆者らは、供用中のトンネルで実績のある電気集じん技術³⁾を応用したトンネル工事用電気集じん機を開発している^{4), 5)}。同集じん機は軽量・コンパクトな大風量機器であり、すでに数十件のトンネル現場で採用され粉じん対策に効果をあげている。

一般に、集じん機は、切羽作業に支障のない切羽後方70～100 m付近に設置される。この場合、集じん機後方では粉じん濃度を1 mg/m³程度にまで大幅に低減できるが、前方の切羽側の区間では粉じん濃度をガイドラインで規定の3 mg/m³以下とすることは困難な場合が多い。

そこで、筆者らは、電気集じん機を用いた切羽近傍での集じん方法を開発し、現場実験からガイドラインで規定の目標レベルをクリアできることを確認した。ここでは、開発した集じん方法と実験結果を報告する。

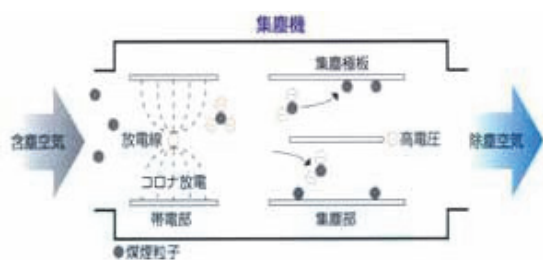


図-1 集じん原理

2. トンネル工事用電気集じん機

2.1 集じん原理と特徴

電気集じん機の集じん原理を図-1に示す。同図の集じん機に吸引される空気中の粉じんや煤じんが帯電して集じん極板上に捕集される。

帯電部では放電線に高電圧を印加し、コロナ放電空間を形成する。含じん空気がこの空間を通過する時に空気中の粉じんや煤じんが帯電する。次の集じん部では荷電極板に高電圧を印加し、荷電極板と集じん極板との間に電界空間を形成する。帯電した粉じんや煤じんはクーロン力を受けて集じん極板上に捕集される。

電気集じん機は、内部の極板が平行平板構造であるため空気の流れがスムーズで、風速が9～10 m/secと大きくても高い集じん効率が維持される。また、粒径7～10 μm以下の浮遊粒子に対し集じん効率が低い。

2.2 搭載形式と仕様

実験現場で採用されたトンネル工事用電気集じん機には、集じん機本体の搭載形式により、4 t車搭載型（以下、車載型と呼ぶ）とクローラ台車搭載型（以下、クローラ型と呼ぶ）がある。なお、いずれの形式も処理風量2,000 m³/minの集じん機を搭載した。

車載型電気集じん機を例として、その外形を図-2に示す。集じん機本体、送風機（ファン）、高圧発生盤、制御盤、ダクトなどで構成されている。

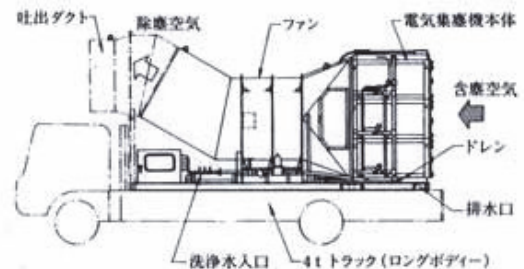


図-2 トンネル工事用電気集じん機

*技術研究所 **技術本部技術開発部 ***技術本部

3. 切羽近傍での集じん方法

以下に、開発した切羽近傍での集じん方法を示す。

3.1 分離幕を併用する方法

電気集じん機の側面に沿ってトンネル延長方向に天端より幕（以下、分離幕と呼ぶ）を設置する方法である。集じん機側（以下、分離幕内側と呼ぶ）の前方では分離幕とトンネル側壁により大口径で延長の長い吸込みダクトが形成される。

分離幕により形成される吸込みダクトは、断面積がトンネル断面の 1/4~1/5 であり、集じん機の吸込み口面積に比べ 3~4 倍と大きい。吸込み面積の拡大により、切羽近傍の広い範囲を対象に粉じん空気を効率良く吸込むことが期待できる。また、吸込みダクトの延長は集じん機の機長に比べ約 2.5 倍と長い。集じん処理の区間長が延伸されることにより、集じん効果の向上が期待できる。なお、分離幕には軽量のシートを用いており、設置、撤去は比較的容易である。

3.2 クローラ型電気集じん機による方法

クローラ台車に搭載することにより、電気集じん機を切羽近傍へ配置する方法である。クローラ型集じん機は、作業に応じ切羽近傍へ比較的容易に移動できるよう開発したものであり、写真-1に概観を示す。

本機は軽量・小型であり、走行時の安定性や機動性に優れている。コンクリート吹付け時には切羽後方 20~30 m 付近へ容易に配置でき、コンクリート吹付け後には切羽作業に支障のない後方まで容易に移動できる。走行操作はリモートコントロール方式である。

切羽近傍へ集じん機を配置することにより効率的な集じんが期待できる。

3.3 遮風シートを併用する方法

集じん機の吸込み口付近にトンネル横断方向に広がる遮風シートを設置する方法である。遮風シートは集

じん機にあらかじめ装備された形となっており、拡張・収納は容易である。

遮風シートを設置することで集じん機による集じん範囲が拡大され、粉じん空気を効率良く吸込むことが期待できる。本方法を先述の 2つの方法と組み合わせることで集じん効果の更なる向上を期待できる。

4. 切羽近傍集じん実験の方法

4.1 現場概要と換気条件

前章に示した集じん方法について、奈良県下にある 2箇所のトンネル工事現場で実験を行った。

両トンネルの概要を表-1に示す。換気条件は両トンネルとも風管換気法による送気方式である。コントラファンや風管の仕様は両トンネルとも同じであるが、送風風管の設置位置が異なる。風管は、Aトンネルではトンネル中央の天端部に、Bトンネルでは切羽に向かって左側のトンネル肩部に設置された。

導入された電気集じん機は、両トンネルとも処理風量 2,000 m³/min の機器であるが、Aトンネルは車載型、Bトンネルはクローラ型である。集じん機は、両トンネルとも切羽に向かって左側（以下、トンネル左側と呼ぶ）に配置された。

以下、文中の左右は切羽に向かった時の方向とする。

4.2 実験ケース

実験ケースを表-2、3に示す。表-2にはAトンネル、表-3にはBトンネルの実験ケースを示した。

Aトンネルの実験状況を写真-2、3に示す。写真-2には分離幕の設置状況を、写真-3には遮風シートの設置状況を示した。実験では、集じん機と切羽の距離をほぼ一定とした条件で、分離幕や遮風シートの併用による切羽近傍での集じん効果を確認した。



写真-1 クローラ型電気集じん機

表-1 実験現場の概要と換気条件

諸元	Aトンネル (複線鉄道トンネル)	Bトンネル (2車線道路トンネル)
地質	花崗岩主体	花崗片麻岩主体
掘削延長	1,939m	1,827m
掘削断面積	58~80m ²	58~77m ²
施工方法	発破NATM	発破NATM
換気方式	送気方式	送気方式
換気設備	800~1,500m ³ /min	800~1,500m ³ /min
	80kW×2台	80kW×2台
	風管径1,400mm	風管径1,400mm
	風管位置：中央	風管位置：左
集じん機	2,000m ³ /min 車載型	2,000m ³ /min クローラ型

Bトンネルの実験で用いたクローラ型集じん機は先の写真-1に示した。実験では集じん機の配置条件を変えて切羽近傍での集じん効果を確認した。

4.3 計測概要

計測項目と計測機器の一覧を表-4に示す。

風向風速および粉じん濃度は、トンネル軸方向に中央・左右の3測線を設け5~10m 間隔を基本に計測した。左右の測線は中央からの離隔が2.5~3 m である。

風向風速の計測は掘削路盤を基準に高さ1m と3m で行い、計測時間は各計測点で30 秒間とした。

粉じん濃度の計測はコンクリート吹付け時を対象に実施した。計測は掘削路盤を基準に高さ1m で行い、各計測点で1 分法により3~4回の計測とした。

粉じん濃度は、相対濃度で示された計測値にガイドラインで規定の質量濃度変換係数を乗じて算出した。

集じん効率は電気集じん機の吸込み口とダクト吐出し口で計測された粉じん濃度の比率から算出した。計測はコンクリート吹付け作業中、連続して行った。

5. 実験結果と考察

5.1 Aトンネルでの実験

実験結果の一例を図-3~6に示す。図-3および図-5は集じん機を切羽後方55 m 付近に配置したケースA2の結果、図-4および図-6は分離幕と遮風シートを併用したケースA2(ab)の結果である。

図-3に示したケースA2の粉じん濃度分布をみると、集じん機後方で粉じん濃度は1.5mg/m³程度にまで低減している。また、トンネルの中央・左右で粉じん濃度を比較すると、ほぼ同じ値である。送風風管が中央に配置されたことにより、空気の流れがトンネル横断面方向で一様化され、粉じん濃度が断面内のいずれの測線でもほぼ同じ値になったと考えられる。

一方、図-5に示した同ケースの風向風速分布をみると、切羽~切羽後方50 m 付近の区間では、切羽から坑口方向に向う空気の流れが確認される。中央に設置された送風風管からの空気が切羽で反転して坑口方向に流れたものである。また、集じん機吐出し口の後方約30m地点では、空気の流れが切羽方向へ反転する様子がみられる。この反転流は集じん機吸込み口付近まで到達しているが、集じん機吸込み口より前方には現れていない。この反転流は粉じん空気とともに集

ん機に再び吸込まれるものと考えられる。

図-4に示したケースA2(ab)の粉じん濃度分布を

表-2 実験ケース (Aトンネル)

試験ケース	集じん機		分離幕	遮風シート
	稼動状態	位置		
A 1	停止	—	—	—
A 2	運転	57m	—	—
A 2 (a)	運転	51m	有	—
A 2 (b)	運転	56m	—	有
A 2 (ab)	運転	52m	有	有

表-3 実験ケース (Bトンネル)

試験ケース	集じん機		遮風シート
	稼動状態	位置	
B 1	停止	—	—
B 2	運転	84m	—
B 3	運転	37m	—
B 3 (a)	運転	47m	—
B 4	運転	28m	有



写真-2 分離幕の設置状況



写真-3 遮風シートの設置状況

表-4 計測項目と計測機器

計測項目	計測機器
風向風速	3次元超音波式風向風速計 KAIJO製マイクロニックWA-590
粉じん濃度	光散乱式デジタル粉じん計 柴田科学製P-5L2型 (粉じんガイドラインの指定機器) (質量濃度変換係数K=0.04)
集じん効率	光散乱式デジタル粉じん計 柴田科学製AP-632T型

みると、切羽後方 50 m 付近の粉じん濃度は、分離幕外側（図中の右側）で $2\text{mg}/\text{m}^3$ 程度と低くガイドラインの目標レベル以下である。一方、分離幕内側（図中の左側）では粉じん濃度が $4\text{mg}/\text{m}^3$ 程度であり、分離幕外側に比べて高い。また、切羽後方 10~30 m 区間をみると、ケース A 2 に比べ粉じん濃度が低くなる。

一方、図-6 に示した同ケースの風向風速分布をみると、集じん機吐出し口の後方約 30 m 地点では空気が切羽方向へ反転する様子がみられ、この反転流は分離幕外側を通過し分離幕の切羽側先端部まで到達している。分離幕外側から切羽近傍へ後方の粉じん濃度の低い空気が供給されている。また、切羽から分離幕内側の先端部に向う空気の流れがみられる。

ケース A 2 (ab) の粉じん濃度が切羽後方 10~30 m 区間でケース A 2 に比べて低くなったのは、分離幕外側から切羽近傍へ供給される粉じん濃度の低い空気と送風風管からの新鮮な空気とが合流して切羽の粉じんを希釈したためと考えられる。また、分離幕外側では切羽方向に向う粉じん濃度の低い空気によりエアーカーテンが形成され、粉じん空気が分離幕内側へ効率良く吸込まれたことにより、ケース A 2 よりも粉じん濃度が低下したと考えられる。

分離幕と遮風シートを併用した方法では、粉じん空気と清浄な空気の流れを分離し、双方ができるだけ混

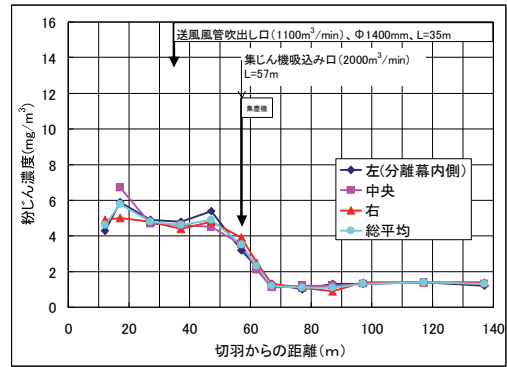


図-3 粉じん濃度計測結果（ケース A 2）

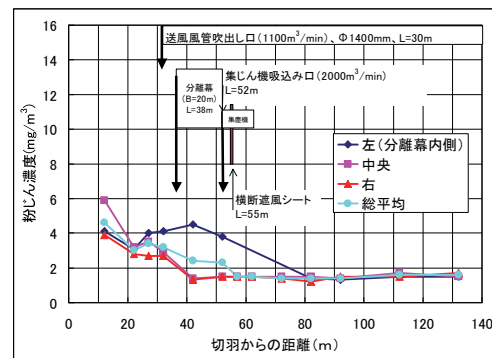


図-4 粉じん濃度計測結果（ケース A 2 (ab)）

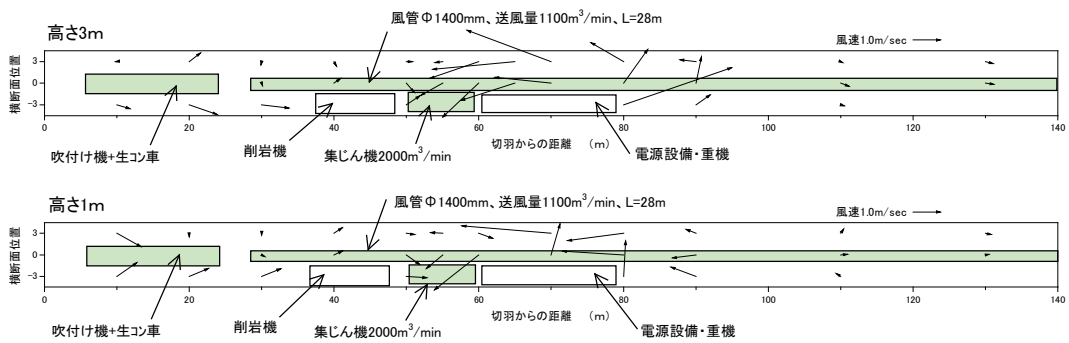


図-5 風向風速計測結果（ケース A 2）

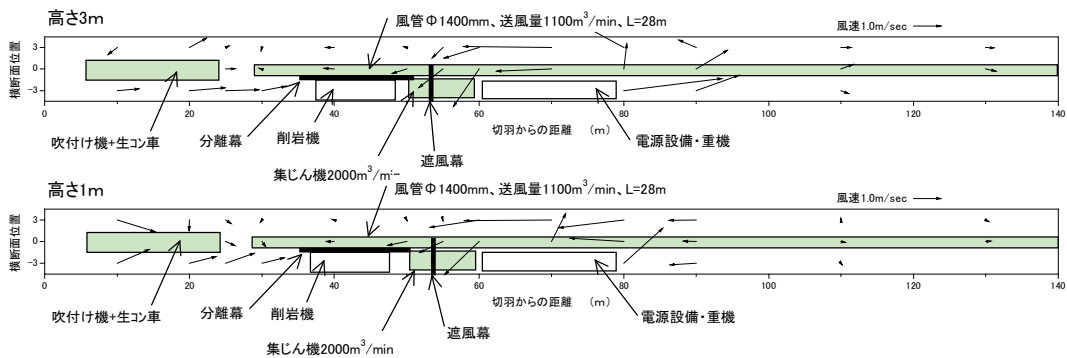


図-6 風向風速計測結果（ケース A 2 (ab)）

合しないようスムーズな流れを形成できたことが、切羽近傍での効率的な集じんに繋がったと考えられる。

5.2 Bトンネルでの実験

実験結果の一例を図-7~11 に示す。図-7は集じん機を切羽後方 85 m 付近に配置したケースB 2の結果、図-8および図-10 は集じん機を切羽後方 35~40 m 付近に配置したケースB 3の結果、図-9および図-11 は集じん機を切羽後方 25~30m付近に配置したケースB 4の結果である。

図-7に示したケースB 2の粉じん濃度分布をみると、集じん機後方で1mg/m³程度にまで低減している。また、トンネルの中央・左右で粉じん濃度を比較すると、右側が高い値である。送風風管が左側に設置されたことにより新鮮な空気が左側を切羽方向へ流れ、粉じん空気が右側を坑口方向へ流れたためと考えられる。

図-8に示したケースB 3の粉じん濃度分布をみると、切羽後方 50 m 付近では粉じん濃度が2mg/m³程度であり、ガイドラインの目標レベル以下である。また、切羽後方 10~20 m 区間では粉じん濃度がケースB 2とほぼ同じ値である。

一方、図-10 に示した同ケースの風向風速分布をみると、切羽~切羽後方 35 m の区間では、左側で切羽方向に向う空気の流れが、右側で坑口方向に向う空気の流れがみられる。また、集じん機吐出し口の后方約 20m地点では、空気の流れが切羽方向へ反転する様子がみられる。この反転流は、集じん機吸込み口付近まで到達しており、粉じん空気とともに集じん機に再び吸込まれるものと考えられる。

図-9に示したケースB 4の粉じん濃度分布をみると、切羽後方 50 m 付近では粉じん濃度が2mg/m³程度であり、ガイドラインの目標レベル以下である。一方、切羽後方 10~20 m 区間ではケースB 2、B 3と比べて粉じん濃度は高い値となっている。

一方、図-11 に示した同ケースの風向風速分布をみると、切羽~集じん機前方の区間では切羽方向に向う空気が送風風管の設置側と逆の右側を流れ、坑口方向に向う空気が左側を流れている。ケースB 3の空気の流れとは逆である。また、集じん機吸込み口~後方 20 m の区間では、空気の流れが複雑で、ケースB 3でみられた集じん機による反転流はみられない。坑口方向に向う集じん機からの吐出し風と切羽方向に向う送風風管からの吹出し風が干渉したため、集じん機前

方の区間では送風風管の逆側を切羽方向に空気が流れ、集じん機後方では複雑な空気の流れが形成されたと考えられる。

ケースB 4の粉じん濃度が切羽後方 10~20 m 区間でケースB 2、B 3と比べて高い値となった理由は以下のように推定される。切羽近傍の粉じん空気は坑口方向に流れ集じん機へ吸込まれるが、一部は集じん機に吸込まれず後方へ通過する。一方、集じん機後方では複雑な空気の流れによりエアーカーテンが形成され、粉じん空気が切羽側に滞留する。滞留した粉じん空気は送風風管からの吹出し風と合流して切羽へと供給され、切羽の粉じん濃度を高めたものと考えられる。

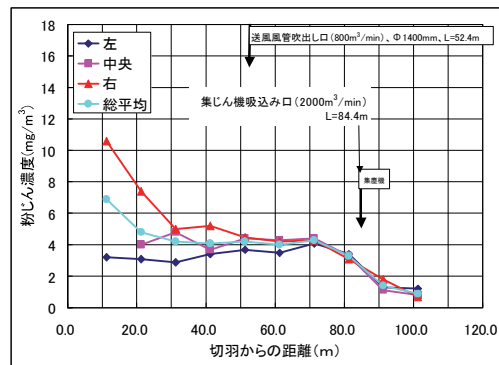


図-7 粉じん濃度計測結果 (ケースB 2)

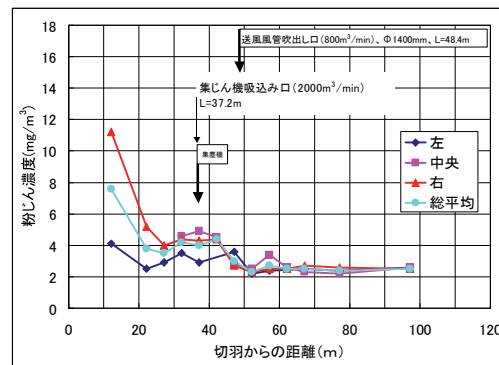


図-8 粉じん濃度計測結果 (ケースB 3)

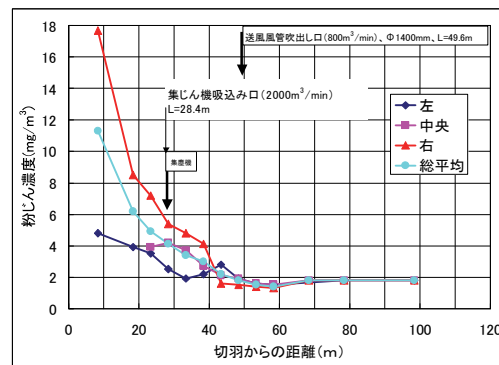


図-9 粉じん濃度計測結果 (ケースB 4)

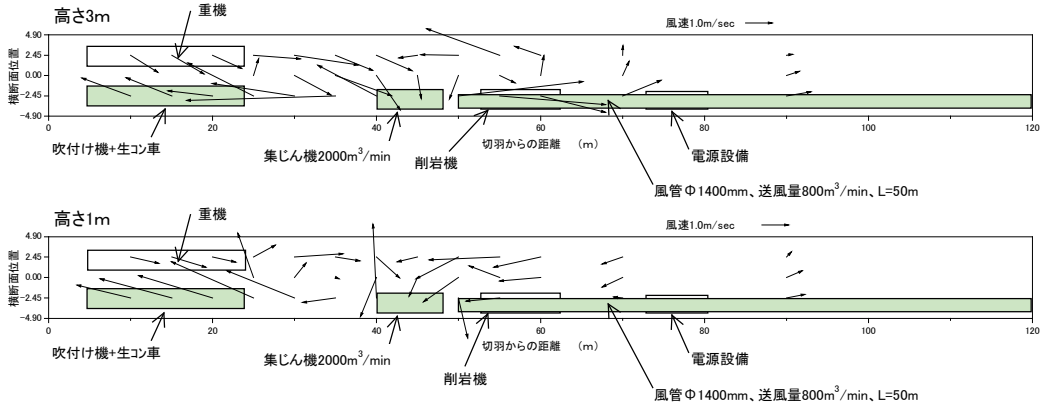


図-10 風向風速計測結果 (ケースB3)

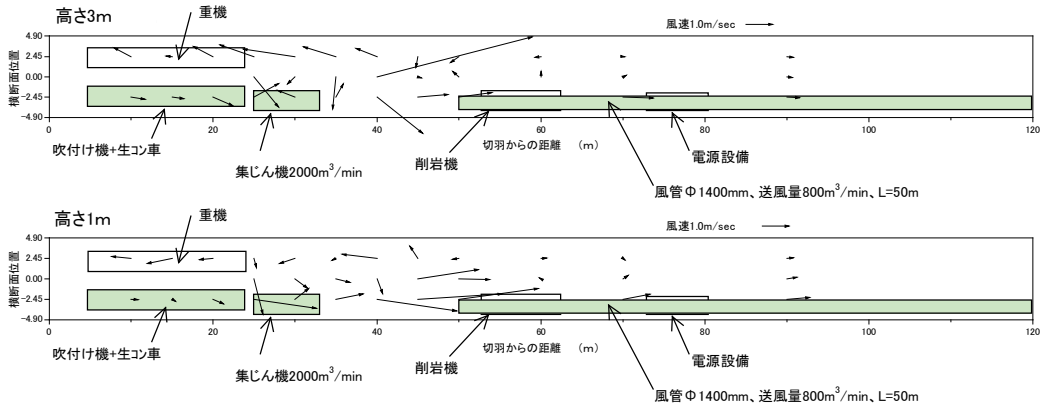


図-11 風向風速計測結果 (ケースB4)

切羽近傍にクローラ型集じん機を配置する方法により、粉じんガイドラインで規定の目標レベルをクリアできた。しかし、送風風管や集じん機の位置関係によっては粉じん空気を切羽側に滞留させ、切羽環境の悪化を招く。送風風管や集じん機の適切な配置が重要であることが示された。

5.3 集じん効率

集じん効率は、A、Bトンネルとも 82～86%と同程度であり、高い集じん性能が確認された。

6. あとがき

本報では、分離幕と遮風シートを併用する方法、クローラ型集じん機による方法に関する現場実験の結果を述べた。開発したいずれの方法ともガイドラインで規定の目標レベルをクリアできることを確認した。

今後は現場展開を更に進め、合理的な集じん機配置について知見を深めたい。なお、本開発は、松下エコシステムズ(株)、(株)エムシーエムとの共同研究の成果である。最後に、本開発にあたり終始ご指導いただいた

(株)コンテクの定塚正行社長、ならびに現場実験にご協力をいただいた工事所の関係各位に感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 厚生労働省環境改善室・建設業労働災害防止協会、「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解説」、2001. 3
- 2) 建設業労働災害防止協会、「改訂 ずい道工事等における換気技術指針〈設計及び粉じん等の測定〉」、2002. 3
- 3) 井伊谷綱一、「集じん装置の性能」、産業技術センター、1976. 10
- 4) 萩森健治・酒井喜久雄・片谷篤史・村中浩昭、「車載型電気集じん機を用いたトンネル工事換気システムの開発」、建設の機械化 No. 608, pp. 21～27、2000. 10
- 5) 浜田元・萩森健治・阿久津秋秀・茂木正史・畑山栄一、「電気集じん機を用いた坑内集じんシステムの開発」、奥村組技術研究年報 No. 27, pp. 7～12、2001. 10