

31. 作業環境にやさしい“トンネル内新換気システム”

鹿 島：横田 依早弥，木下 健二

*青野 隆

I. はじめに

近年、山岳トンネルの施工技術が著しく進歩するにつれ、トンネル工事が高規格化してきており、トンネルの長大化が進んでいる。また、NATM が標準工法として定着し、各種補助工法の発展によってミニベンチカット工法、全断面掘削工法などの大きな加背で施工されることが多くなっている。それに伴い、坑内で使用する施工機械が大型化し、使用材料も多量化している（1回に使用する吹付けコンクリート量が多くなったり、発破工法の場合、1回の発破に使用する火薬量が多くなっている）。また、排気ガスを発生するタイヤ工法の採用が主流となっている。こういった状況下で、トンネル坑内の作業環境が悪化しやすくなっているのが現状である。

そこで今回、長大山岳トンネルにおける新しい換気設備を開発し、実工事への適用で良好な結果を得たので本システムの概要について述べる。

II. 開発概要

1. 開発の経緯

山岳トンネル工事に使用する換気ファンには、大きく分けて遠心式と軸流式の2種類があるが、これまでの当社における換気ファンの使用状況を調査した結果によると、風量 2,000 m³/min, 静圧 500 mm Aq, モータ出力 220kW の軸流式ファンが主流であった。

しかし、軸流式のファンを使用する換気方式では、長大トンネル工事（3,000m 級）の場合、風を送る圧力が不足することから、坑内に圧力上昇のためのファンを直列に設置して使用する必要があること、ファンや風管の接続部に漏風などのロスが生じ、ファンの騒音が大きいことなどが問題となっていた。また、必要時に最適な換気を行うための運転制御方法などに、大きな問題点をかかえていた。

そこで、これらの問題点を解決し、作業員が常に好環境下で作業が行えるように、低騒音かつ高効率で、必要な時に最適な換気を行えるシステムの構築が望まれていた。

2. 開発計画

今回の開発においては、換気システムの核となる新型ファンの開発、センサを高度に利用した制御システムの開発に取り組むこととした。

まず、開発の第一段階として施工延長距離 2,000~3,000m の片押し施工の長大トンネルをモデルに、大風量、高静圧かつ低騒音な換気ファン、及び高効率の運転制御システムの開発を目標とした。

III. 基本システム

1. 概要

本システムは、主ファンとして従来主流である軸流式のファンに代えて、遠心式のターボファンを使用し、補助ファンには効率の高い軸流式のファンを用いた。また、これらのファンは新たに開発した消音装置により低騒音化が図られている。

さらに、ファンの運転制御にインバータと各種センサを用いることにより作業状況に応じた最適かつ高効率な換気が実現できるシステム（図-1 坑内配置図参照）である。

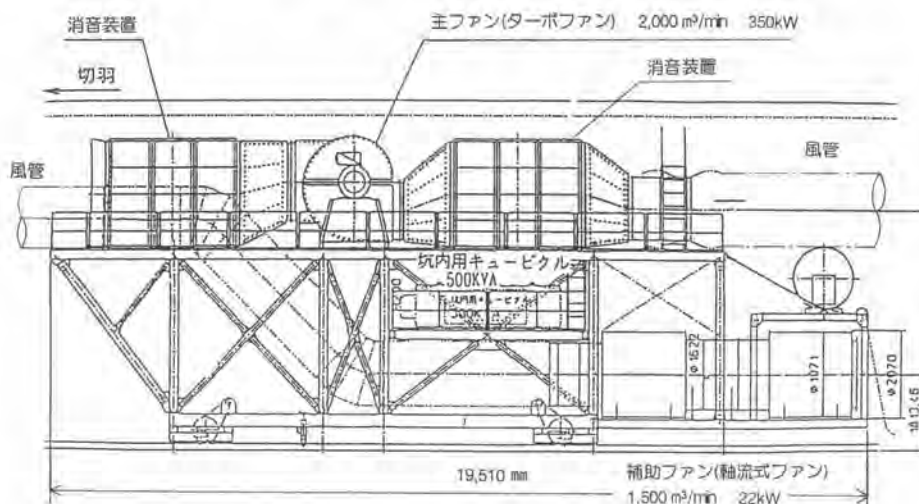


図-1 換気台車に搭載した坑内配置図

2. システム内容

(1) 換気方式

換気方式は、切羽の汚染空気を拡散させずに坑外に出すように主ファンを坑内に設置し、切羽には補助ファンを設置する排気方式とした。

(2) 送風機

軸流ファンは、静圧が低く換気量が多い場合に広く使用されている。羽根を直列に複数個設置したコントラファンのような高静圧なものもあるが、静圧 500 mm Aq が限界である。

これに対して、遠心式のターボファンは、高静圧を出すことができるため、高静圧、大風量を必要とする場合に適しており、ファン効率も高効率が望めるので採用した。ただし、軸流式のファンに比べ、風の方向がモータ軸に対して直角となるため、ファンと風管の配置に工夫が必要となった。

今回開発した主ファン及び補助ファンの仕様を表-1 に示す。

表-1 ファンの仕様

項目	口径	風量	送風機全圧	回転数	電動機	電圧	極数	重量
主ファン	1500 mm	2000 m ³ /min	800 mm Aq	1770 rpm	350kW	440V	4P	8100 kg
補助ファン	1500 mm	1500 m ³ /min	43 mm Aq	870 rpm	22kW	440V	8P	1720 kg

(3) 運転制御

一般に換気設備の能力は、必要換気風量、風管径、風管延長距離、圧力損失などによって決定される。

換気風量は、各作業ごとに必要な風量の内の最大風量で決定される。これは作業内容によって必要とされる換気量変動することを示している。したがって、換気風量を多く必要とする作業時に大風量を発生させ、その他の作業時には通常運転に戻す方式を採用した。

本システムは、坑内で行われている作業状況や粉塵発生状況などを常時センサが検知しており、より多くの換気量を必要だと判断すると換気量を増加させるよう自動的に制御する。

このセンサは大きく2種類に分けられる。一つは、作業状況を調べるセンサである。強力な換気を必要とする作業の開始をセンサで検知して換気量を増加させるものであり発破・吹付けといった坑内の空気が非常に汚れる作業前に強力な換気量を発生させ作業環境が悪化する前に換気体制を十分に整えるものである。



写真-1 新換気システム

もう一つは、坑内の環境を測定するセンサである。坑内の粉塵濃度、温度などの状況を検知し、空気中に含まれる粉塵量などが一定の基準を超過すると自動的に換気量が増加され、坑内の状況に応じた最適な換気を行うものである（写真-1に新換気システム設置状況を示す）。

(4)騒音対策

送風機をトンネル内に設置する場合、騒音が作業環境上問題となる。騒音レベルの大きな環境下での作業は、意思の疎通、坑内走行車両の接近音による危険の察知・退避ができにくくなるなどの安全上の支障、難聴などの聴力障害など、作業員へ悪影響を与えるためである。

そこで、主ファン及び補助ファンでの騒音レベルを大幅に低減する消音装置を開発した。

a)主ファン用消音装置

送風機の消音装置は、一般に吸音材をケーシング(鋼板)内に取り付けられたものが用いられていた。しかし、本換気システムでは、主ファンをダスト、粉塵などを含んだ汚染空気を坑外に直接排出するのに用いるため、その吸気側、排気側に消音装置を取り付けた場合、消音装置内の吸音材(グラスウール)にダスト、粉塵などが付着し吸音材が目づまりして吸音効果が低下することが予想された。このため吸音材を簡単に着脱できる方式を採用した。

また、消音装置のケーシングの内側に取り付ける吸音材としては、超軽量発砲コンクリートを用いた。この吸音材は以下のような特徴がある。

- ①グラスウールなどの吸音材と同程度の吸音効果を持つ。
- ②コンクリート製であるため遮音効果がある。

③耐水、耐候、加工性に優れている。

さらに、ダンピングシートを超軽量発泡コンクリートと消音装置ケーシング内壁間に貼り付けた。こうすることにより、ダンピングシートが消音装置ケーシング壁と剛体である超軽量発泡コンクリートに挟み込まれることで、すりによる消音装置ケーシングの大きな制振効果が得られ、消音装置ケーシング壁の振動による騒音放射が低減できた。さらに、超軽量発泡コンクリートの遮音効果とも相まって、消音器ケーシング壁外側へのラギング(防振・遮音)処理も不要となった。主ファンの消音装置(吸気側)を写真-2に示す。



写真-2 主ファンの消音装置

b) 補助ファン用の消音装置

補助ファンは、その機構上、送風機ケーシング内の中央部には空気の流れが少ないことから、消音器中央部には円筒状吸音体（グラスウール充填）を組み込みその消音装置ケーシング内壁には吸音材を貼る形式を採用した。

今回開発した消音装置は、上記の機構に加えて送風機と吸気側消音装置の間に整流機構を設置して乱流音を低減するとともに、送風機と消音装置のケーシング外壁にはダンピングシートを貼り、その上に薄い鋼板を貼り、さらにグラスウールと鋼板で被ったラギング処理をすることにより、ケーシングと薄い鋼板の間にダンピングシートが挟みこまれることによる、すりの制振効果でケーシング壁の振動によるケーシング内外への音放射を低減している。

Ⅳ. 導入実績・効果

本システムは北陸新幹線五里ヶ峯トンネル（坂城工区）工事で実証実験を行い、運転制御に係わる各種データを取得した。この結果をもとに換気システムを確立し、九州新幹線第2紫尾山トンネル工事に導入した。現在までに得た各種データ計測結果を報告する。

(1) 送風機の性能試験結果

今回開発した主ファン及び補助ファンは、性能試験の結果から設計性能を満足できるものであり、回転数と風量、圧力と動力の関係は、理論式とほぼ一致した結果であることが確認できた。

図-2に、運転周波数60Hzにおける主ファンの性能を示す。この送風機の定格点は静圧800mm Aq、風量2,000 m³/minであり電動機出力350kWのポイントである。また、最大出力が1,000mm Aq、最大風量が3,000 m³/minであり、電動機出力は風量に比例して増大する傾向がある。また、図-3に示す特性曲線からは、周波数に比例して風量が増加していることが読み取れる。

図-4は、運転周波数60Hzにおける補助ファンの性能を示す。この送風機の定格点は静圧43mm Aq、風量1,500 m³/min、電動機出力22kWのポイントである。また、図-5に示す特性曲線からは、周波数に比例して風量が増加していることが読み取れる。

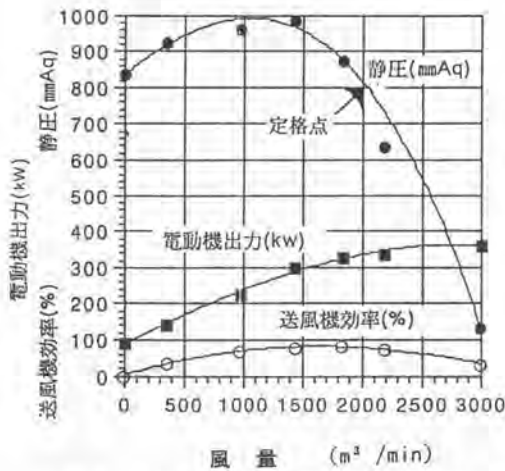


図-2 主ファンの出力-圧力-風量特性(60Hz)

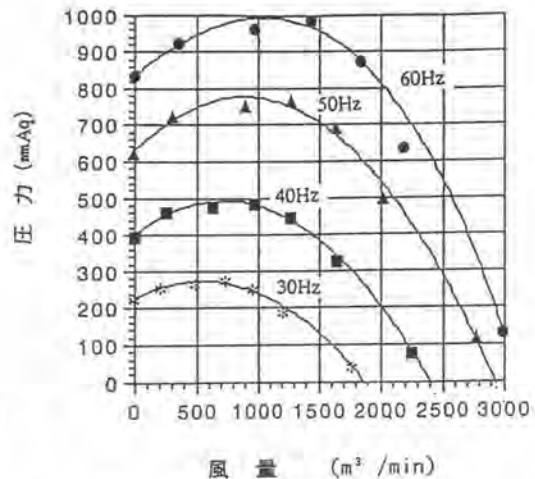


図-3 主ファンの圧力-風量特性

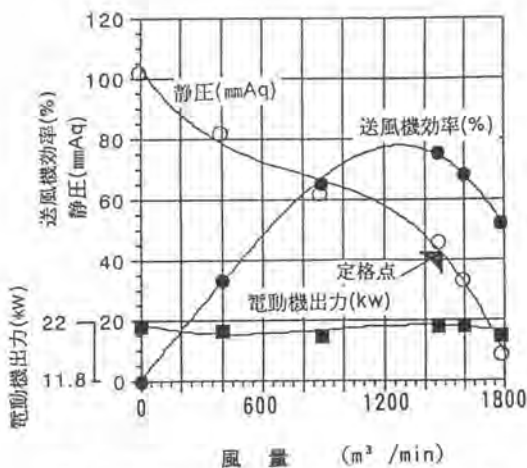


図-4 補助ファンの出力-圧力-風量特性(60Hz)

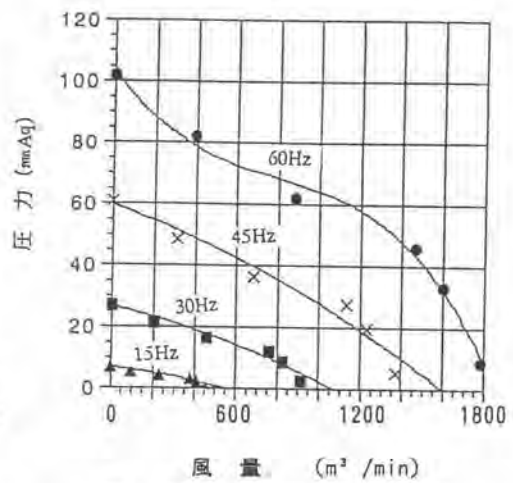


図-5 補助ファンの圧力-風量特性

(2) 自動運転制御による効果

従来の軸流式ファンでは、換気量が一定であるが、本システムでは、インバータ制御により風量調整が自由に出来るため、作業状況に応じた効果的な運転が行われる。したがって、自動運転時の粉塵濃度を測定した結果、図-6に示すように予想通りの結果であることが検証された。

(3) 開発した消音装置の消音効果

a) 主ファン用消音装置の効果

本消音装置の消音効果は、吸気口から斜め45度方向1.5m地点で、定格の回転(1,770rpm)時の騒音レベルが108dB(A)であったものが、84dB(A)に低減した。送風機から5mくらい離れた地点では74dB(A)程度であった。1.5m地点での結果を図-7に示す。

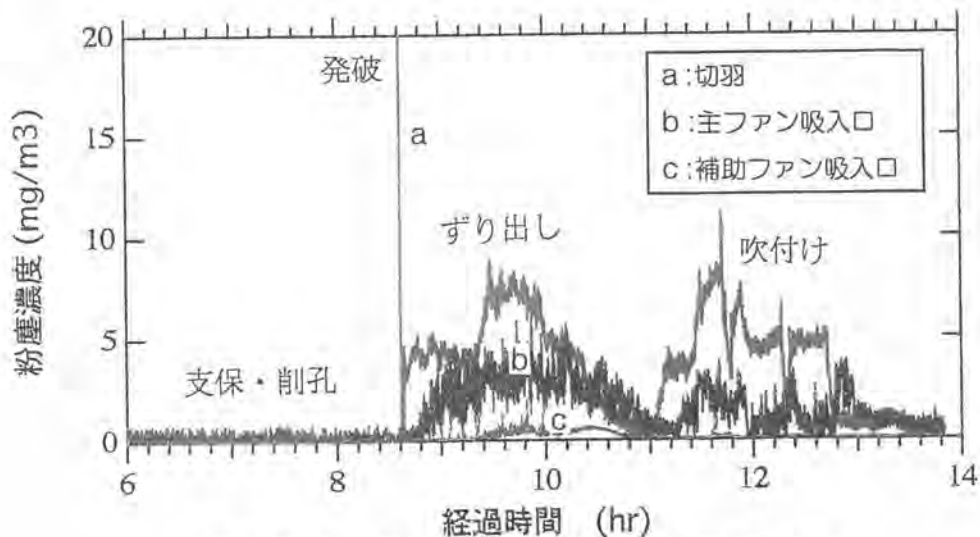
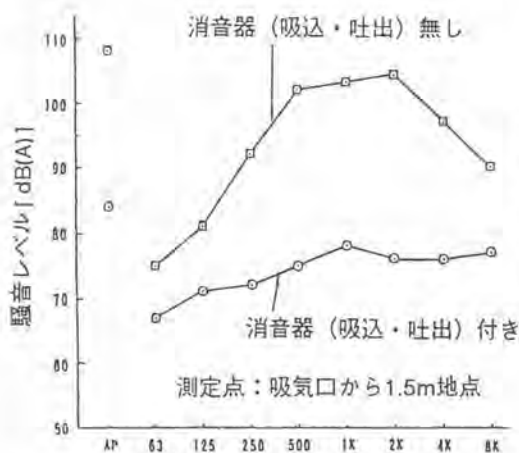
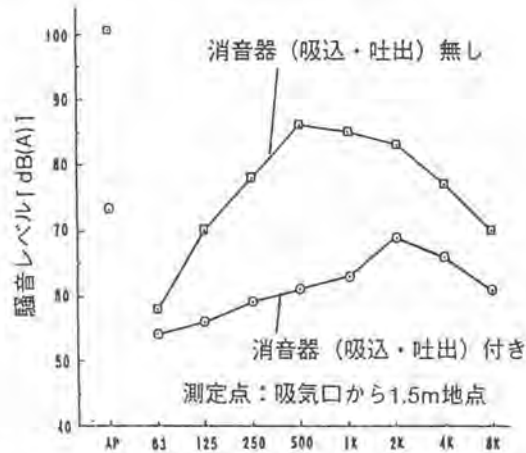


図-6 自動制御運転における各作業時の粉塵濃度(計測データ)



1/1 オクターブバンド中心周波数 [Hz]

図-7 主ファン用消音装置の消音効果



1/1 オクターブバンド中心周波数 [Hz]

図-8 補助ファン用消音装置の消音効果

b) 補助ファン用消音装置の効果

本消音装置の消音効果は、吸気口から斜め45度方向1.5m地点で、定格の回転(780rpm)時の騒音レベルが101dB(A)であったものが、73dB(A)に低減した。送風機から5mくらい離れた地点では、63dB(A)程度であった。1.5m地点での結果を図-8に示す。

V. むすび

作業状況によって時々刻々と変化する坑内環境にあつて、常に良好な状態を維持することは安全衛生上重要な課題である。本換気システムは、長大トンネルの効果的な換気を低騒音で実現でき、常に作業環境を最適な状態に保ちかつ作業性・安全性の向上に役立つものである。