special issue: tunnel boring and shield machines for construction
トンネル・シールド 特集

トンネル換気設備の効率的な維持管理手法
—換気設備の電力量削減および点検・分解整備に係わる効率化—

川崎和來・中安真也・榎園正義・佐藤充弘

道路トンネルにおける換気設備は，走行車両から排出される煤煙を坑外に送風することで坑内環境を改善し，走行車両や歩行者の安全および快適性を確保するうえで重要な役割を果たしている。しかし，これらの設備は，多額の維持管理費用が必要で，道路管理者として，これらの費用削減は緊急の課題である。そこで，国土交通省近畿地方整備局では，これらトンネル換気設備の維持管理費の削減を目指し，平成12年度よりトンネル換気設備維持管理検討委員会（委員長　立命館大学・深川良一教授）を設立し，換気設備に係わる電力量削減および点検・分解整備の効率化の検討を実施してきたので，その概要を報告する。ここで，換気設備の電力量削減とは，換気ファン動力に直結する換気制御方式に着目し，実証実験によってその有効性を確認したものである。また，点検・分解整備の効率化とは，既往の点検・分解整備結果を踏まえた点検の重点化等による点検の省略，ジェットファン部材のステンレス化およびジェットファンの常時監視技術による点検・分解整備の省力化を図ったものである。

キーワード：道路トンネル，換気設備，換気制御，点検，ジェットファン，ステンレス化，常時監視技術

1. はじめに

トンネル換気設備は，トンネル利用者の安全性と快適性および円滑な交通を確保する上で重要な役割を果たしている。近年，交通量の増加や道路計画箇所における地形条件等によりトンネル箇所が増加する傾向にある。それに伴いトンネル換気設備が増加する傾向にあり，維持管理費の削減に向けた取組みが重要となっている。

トンネル換気設備の維持管理費を大別すると，換気ファン動力にかかる電気料金および点検・分解整備にかかる費用に分けられる。

本報文では，換気ファン動力に係わる効率化および点検・分解整備に係わる効率化を図ることで，維持管理費の削減に寄与することを目的に，

① 国土交通省近畿地方整備局が管轄するトンネルの換気設備に対する維持管理の現状分析，新技術の導入検討等，

② 供用中トンネルでの実証実験，

から，トンネル換気設備に関する維持管理の効率化についての検討結果を報告する。

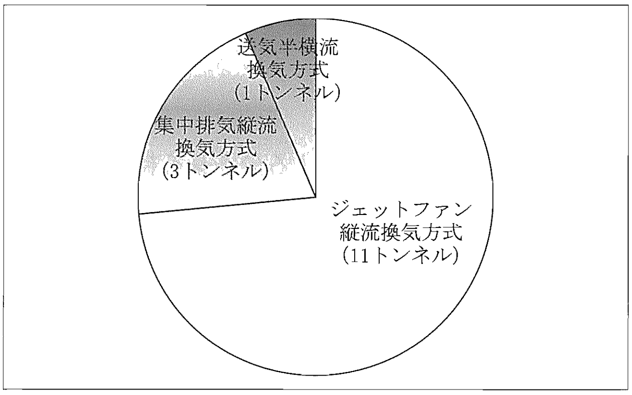
2. トンネル換気設備維持管理の現況

（1） 換気方式

トンネルの換気方式には，換気設備を必要としない自然換気と必要とする機械換気に分かれ，機械換気の中には，縦流換気方式や半横流換気方式等[1]に分けることができる。

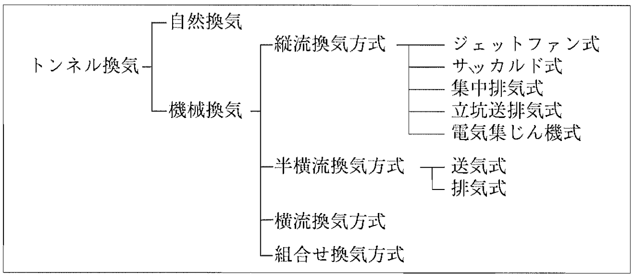
近畿地方整備局管内のトンネル換気設備設置数は，図—1に示すように，全15トンネル（平成15年度末現在）であり，そのうち，ジェットファン縦流換気方式が11トンネル，集中排気縦流換気方式が3トンネル，送気半横流換気方式が1トンネルとなっている。

一般的に，坑口からの排出に制限がある場合など，



図—1　近畿地方整備局管内全15トンネルの換気方式

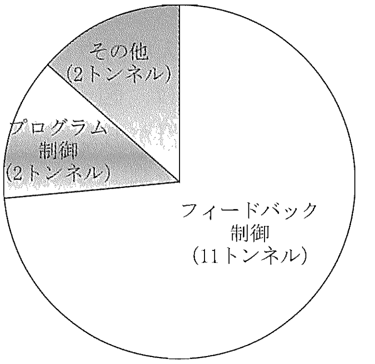
特殊な条件以外では，経済的な面と段階施工のしやすさから，ジェットファン式が採用されることが多い。



（2） 換気制御方式

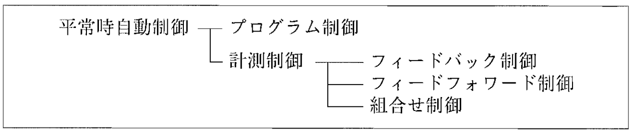
平常時の換気制御方式には，プログラム制御と計測制御がある。計測制御には，フィードバック制御やフィードフォワード制御など[1]に分類することができる。

近畿地方整備局管内 15 トンネルでの換気制御方式は，図―2 に示すように，フィードバック制御が 11 トンネル，プログラム制御が 2 トンネル，その他が 2 トンネルとなっている。



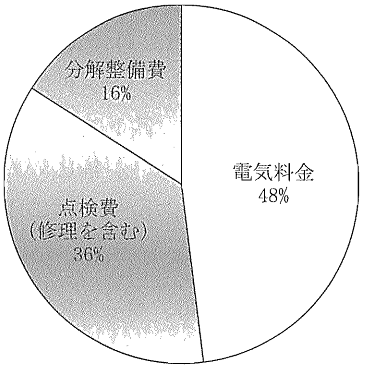
図―2　近畿地方整備局管内全 15 トンネルの換気制御方式

フィードバック制御は，煤煙透過率（*VI* 値）で坑内環境を把握し換気ファンを制御するもので，シンプルな方式で設備費が安価なことから適用例が最も多い。しかし，交通量の変動が大きいトンネルなどでは，坑内環境の変化に対して換気ファン制御の追従性が悪く，トンネル延長全体にわたって坑内環境を均一に維持することが難しくなり，その結果，換気ファンの制御が非効率となり使用電力量が多くなるといった課題がある。



（3） 維持管理費

トンネル換気設備に掛かる維持管理コストの占める割合は，図―3 に示すように，近畿地方整備局管内トンネルを対象にライフサイクルを 25 年間として算出すると，電気料金が約 5 割，残り 5 割が点検費および分解整備費となっている。



出展；近畿地方整備局管内トンネル換気設備に関するアンケート調査結果（平成 12 年度）（ライフサイクル 25 年間で算出）

図―3　近畿地方整備局管内の維持管理費（平均）

（4） 点検・分解整備頻度

トンネル換気設備の点検・分解整備を大別すると，現場にて行う点検と工場等に持帰り機器を分解して整備をする分解整備とに分けられる。点検は，

・日常点検，
・通常点検，
・定期点検[1,2,3]，

に分類することができる。

（a） 日常点検

日常点検は，パトロールカーなどで走行しながら日常的に実施される点検であり，トンネル測定装置内に設置してあるジェットファン（JF），煙霧透過率計（VI 計），一酸化炭素検出装置（CO 計），風向風速測定装置（AV 計）等の損傷などを発見するための点検である。

（b） 通常点検（月点検）

通常点検（月点検）は，概ね 1～4 カ月に 1 回程度実施される点検であり，清掃と目視を主とした設備の運転前，運転中，運転後の状況，機器の損傷に重点を置いた点検である。

（c） 定期点検（年点検）

定期点検（年点検）は，概ね 1 年に 1 回程度実施される点検であり，目視および工具や計測機器などを用いて機器の動作や機能等，設備全般を確認するための点検である。したがって，月点検に比べ点検項目も多岐にわたり，内容も詳細なものとなっている。

近畿地方整備局管内では，年点検を 1 年に 1 回，月点検を 4 カ月に 1 回実施しているトンネルが多い。た

だし，換気設備の稼働時間が極端に短い場合やトンネルの気象環境などによっては，月点検を6カ月に1回，または，1年に1回実施するというトンネルもある。

分解整備頻度については，各トンネル換気設備の稼働時間や劣化度合いなどの違いが幅広いため，一概には言えないが，一般的には，5～10年に1回が多いようである。

点検・分解整備の種類
- 点　検
  - 日常点検
  - 通常点検（月点検）
  - 定期点検（年点検）
- 分解整備

3. 対面通行トンネルにおける効率的な換気制御システムの開発

（1） 概　　要

換気ファン動力に係わる効率化の一環として，トンネル換気の制御方式に着目して，実証実験を踏まえた検討を行った。

対象とする従来制御は，国土交通省が管理するトンネルにおいて採用事例の多いフィードバック制御とした。

本検討で提案する「省エネルギー環境対応型ファジィ制御」（以後，新換気制御と言う）は，フィードバック制御のように坑内環境計測装置からの情報のみで制御する方法ではなく，図―4に示すように，交通量計（簡易タイプ）で計測した交通量情報から十数分先の交通量を予測してトンネル延長方向を任意の区間に分割し，各区間の交通走行分布を作成して，拡散方程式を用いて坑内環境を予測する方法である。

予測にあたっては，坑内環境計測装置からの実測データを活用して補正することで予測精度の向上を図っている。また，フィードバック制御のように，坑内環境計測装置の設置場所付近の環境のみで制御するのではなく，トンネル延長全域の十数分先の環境を予測しながら，ファジィ推論により換気ファン動作を決定し制御する新しい換気制御方式である。

実証実験は，近畿地方整備局豊岡河川国道事務所管轄の一般国道9号南但馬トンネル（対面通行，トンネル延長：1,224m，JF 1000：9台）において1年を通して実施した。

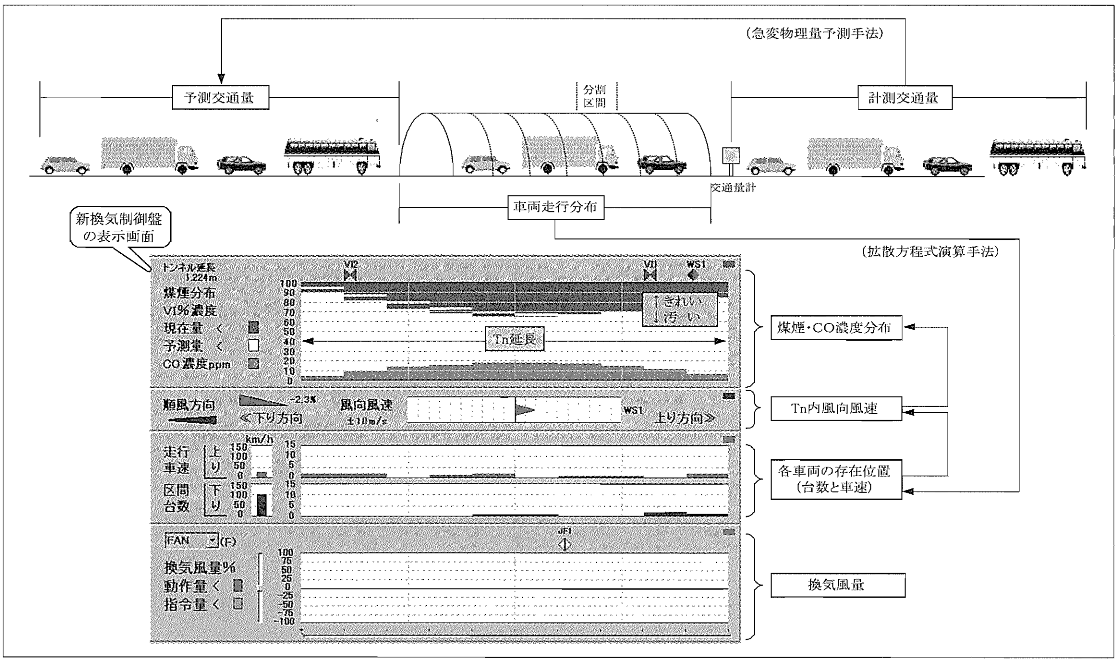
その結果，坑内環境を従来制御レベル以上に維持したうえで，過去3年間の平均で従来制御に比べ換気ファンの使用電力量を約70%，電気料金で約55%の削減を可能とした。なお，詳細は，建設の施工企画，2005，1月号 No. 659，「CMI報告」（pp. 62-64）を参照されたい。

（2） 他トンネルへの導入検討フロー

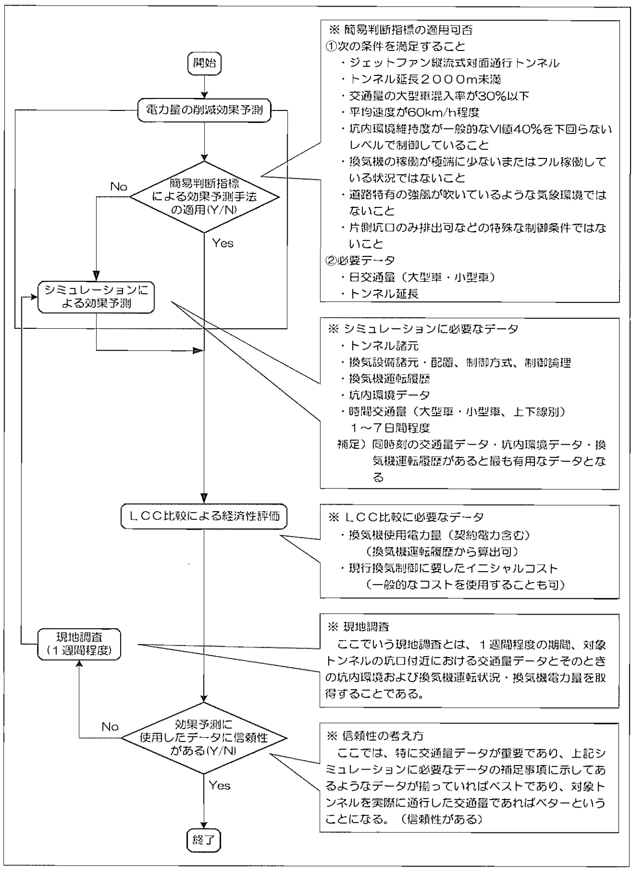
新換気制御の導入検討には，図―5に示すように，大きく分けて3つの検討項目がある。

（a） 電力量の削減効果予測

電力量の削減効果予測方法には簡易判断指標[4]によるものと換気シミュレーションによる2通りがあり，簡易判断指標が適用できる条件を満たしていればその指標を用いるものとし，それ以外は換気シミュレーショ



図―4　新換気制御のイメージ



図—5　新換気制御導入検討フロー

ンによるものとする。

（b）　LCC（ライフサイクルコスト）比較による経済性評価

イニシャルコストおよびランニングコストを算出し，償却期間を算出する。

（c）　効果予測に使用したデータの信頼性

上記（a）の検討に使用するデータに信頼性が欠けている場合，現地調査を実施し，信頼性のあるデータを取得する。

4.　トンネル換気設備における効率的な点検整備方法の提案

（1）　既往の点検整備結果を踏まえた提言

（a）　分解整備・更新の実態

換気設備メーカ7社へジェットファンの定期整備，修理，故障によって工場に搬入されたときの不具合事例の割合とその状況についてアンケート調査を実施したところ，主に次のような回答を得た。

・不具合の8～9割が腐食に関連するもの。
・更新時期はトンネル毎に異なる。

（b）　不具合の分類

換気設備に関する不具合の分類について，表—1に示すように，大きくは2種類に分類することができる。

表—1　換気設備の不具合分類

区　分		現　象	原　因
重大事故		ジェットファン本体・部品の落下	吊り金具の脱落 アンカーの脱落 構成部品（ボルト，ナット等）の脱落 腐食による構成材料等の脱落
故障	重故障	機能損失	羽根車とケーシングの接触 軸受焼損 絶縁破壊
	軽故障	即機能の損失には至らない	ボルト，ナットの緩み，変形 回転体のアンバランス 翼面の損傷，変形 ターンバックルの緩み

①　トンネル内を通行する車両に直接損傷を与える，または交通に対して傷害となるような重大事故に繋がる恐れのある不具合（重大事故），

②　換気設備の機能を損失する不具合（故障），

である。②の不具合には，完全に機能しなくなる故障（重故障）および即機能しなくなるわけではないが，修繕が必要なもの（軽故障）に分けることができる。

（c）　不具合事例

過去に起きたトンネル換気設備の不具合事例について，道路管理者（51事務所，115トンネル）および換気設備メーカ（6社に対して実施）へのアンケート調査を実施した結果，経年での不具合では，通行車両に損傷を与えるような重大な事故に至った事例はなく，換気設備の機能の損失，または，機能を損失させる恐れのある事例が報告されている。

以上より，基本的には年点検の強化と定期的な部品交換や調整，分解整備によって，不具合の発生を予防可能であると考えられる。

また，発生する不具合が重大な事故ではなく，機能の損失である場合には，臨時点検（設備の不具合が発生またはその可能性がある場合に実施する点検）で対応するという方法も考えられる。

（2）　ジェットファンのステンレス化

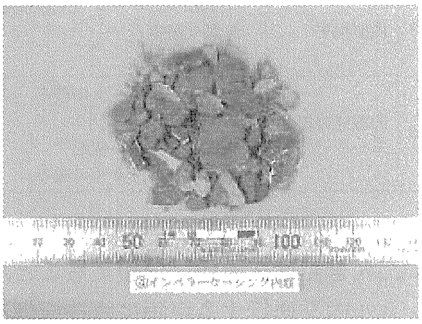
前述したように，換気設備メーカへのアンケート結果では，不具合の8～9割が腐食に関連するものであるとの回答を得た。そこで，ジェットファンの材質を従来の鋼製から耐食性に優れているステンレス製に変更した場合の効果について，検討を行った。

（a）　鋼製ジェットファンおよびステンレス製ジェットファンの腐食調査

①鋼製ジェットファン

主な腐食箇所は，ベルマウス先端部，外装板，内筒サポート部，インペラケーシング部であった。特筆す

べきは，インペラケーシング部のブリスタによる動翼との接触が生じていたことと，比較的大きな腐食生成物があったことである（図―6）（対象ジェットファンは供用開始後9年経過）。



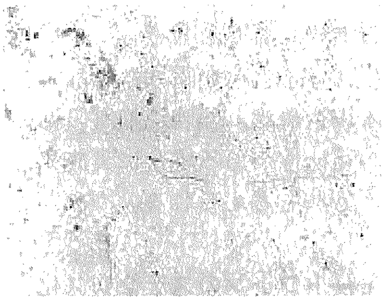
インペラケーシング内面の腐食生成物

インペラケーシングと動翼の接触

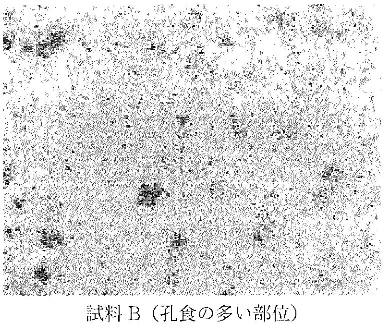
図―6　腐食生成物とインペラーケーシングと動翼の接触

②ステンレス製ジェットファン

全面腐食は発生しておらず，鋼製ジェットファンのような腐食生成物はなかった。孔食は発生しているものの，軽微であり面積当たりの腐食面積率が非常に小さく，ジェットファンの故障や部材の落下に繋がるような腐食は認められなかった（図―7）（対象ジェットファンは供用開始後6年経過）。



試料A（孔食の少ない部位）



試料B（孔食の多い部位）

図―7　酸洗浄後のケーシング表面

（b）LCC比較

ジェットファン材質をステンレス化することによって，表―2に示す効果が期待できる。

表―2　ジェットファン材質のステンレス化による効果

削減効果	削減内容
点検整備項目の削減	月点検，年体験時の塗装・腐食状況点検を削減できる。
分解整備サイクルの延長	現状は8年程度であるが，少なくとも12年程度に延長可能。更に，外装板の交換が不要。
更新サイクルの延長	現状は24年程度での更新であるが，延長の可能性は十分に考えられる。

これらの効果を考慮して，LCC試算をすると，表―3に示すように，鋼製ジェットファンよりもステンレス製ジェットファンの方が優位な結果となった。

表―3　ジェットファン材質の違いによるLCC比較

（比率：ステンレス製の全体コストを100とした）

比較項目 ＼ 材質別			材質 ステンレス製	材質 鋼製	摘要
導入コスト	JF-1000型		59	46	
維持管理コスト	定期点検	月点検	13	16	
		年点検	9	11	
	設備費用	8年後	—	20	
		12年後	19	—	
		16年後	—	20	
		24年後	更新	更新	
全体コスト			100	113	差13
定期点検を考慮しない場合			79	86	差 8

・鋼製ジェットファン：分解整備期間（8年），外装板交換，モータ分解点検
・ステンレス製ジェットファン：分解整備期間（12年），モータ更新
・ステンレス製ジェットファン定期点検費は，鋼製ジェットファンの80%として試算

（3）ジェットファンにおける常時監視技術の開発

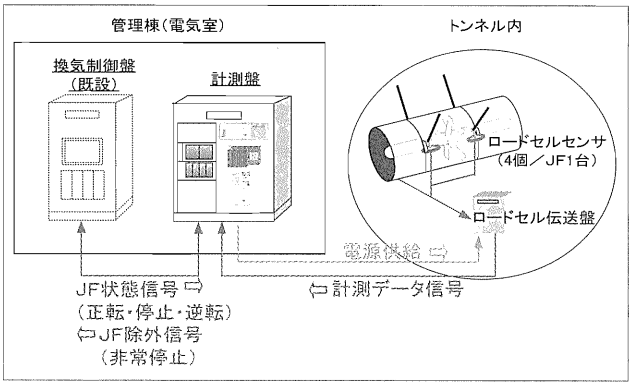
トンネル利用者の安全性を確保したうえで，維持管理コストを縮減するためには，トンネル利用者の安全を確保するための必要最小限の項目を常時監視する形での事後保全方式が有効であるとの認識から，ロードセルを用いたジェットファン異常を常時検知するシステムの開発を行った。

（a）技術の概要

技術の概要を図―8に示す

①　ロードセルセンサ

ジェットファンの支持部材であるアイボルト部にワッシャ型ロードセルセンサをジェットファン1台につき，4個取付ける。



図―8　ロードセル事後保全機器のシステム構成

②　ロードセル伝送盤

ロードセルセンサからの計測情報を計測盤に伝送する。また，計測盤から電源供給を受ける。

③　計測盤

ロードセルセンサからの計測情報，換気制御盤からのジェットファン稼働状況から後述する異常診断手法[5)]によって異常を判断し，異常の場合には警報信号を出力する。

（b）　異常診断（解析診断）手法

従来のしきい値管理では，外乱の影響を受けやすく誤作動する可能性があるため，精度良く初期異常を検知することが難しい。そこで，本ロードセル方式では，常時測定データを統計データ解析して異常診断を行う解析診断手法を採用している。これは，応答曲面法を用いてロードセル間の測定データの相関関係を求め，その変化を統計的検定手法で判定するものである。

（c）　検知可能な不具合（振動計方式との違い）

ジェットファンに起こりうる異常状態に対する振動計方式とロードセル方式の検知可能項目の比較を表―4に示す。

表―4　振動計方式とロードセル方式の検知可能項目比較

No.	点検項目	JF保全方式		振動計方式	ロードセル方式
		PM（予防保全）	BM（事後保全）		
1	アンバランス（ダスト付着，羽根車損傷）	―	●	○	○
2	支持部材の緩み	●	―	×	○
3	アンカーボルトの緩み	●	―	×	○
4	コンクリートの劣化	●	―	×	○
5	吸音材の劣化	―	●	×	×
6	パンチングプレート目詰まり	―	●	×	×
7	腐　食	―	●	×	×
8	車両との衝突	―	●	×	○
9	羽根車とケーシングの接触	―	●	○	○
10	軸受け異常	―	●	○	○
11	電動機の絶縁破壊	―	●	×	×
12	電動機の電圧不均衡	―	●	×	×
総合評価				×	○

○：検知可能；×：検知困難

表―4の点検項目は，ジェットファンに起こりうる異常の原因を網羅している。

特出すべきは，振動計方式では，予防保全としての点検項目に関しての異常検知が困難であるが，ロードセル方式では異常発生の初期段階で検知が可能である。

（d）　ロードセル方式の導入効果

①　初期異常時の迅速な対応

予防保全項目における異常のほとんどは，定期点検時にしか確認できないのが現状である。したがって，異常の初期よりも更に悪化した状況で初めて発見されるケースが殆どであると考えられる。

一方，ロードセル方式は，異常発生の初期段階で検知が可能であるため，迅速な対応が可能となり，信頼性が向上する。

②　ジェットファン本体の点検周期の延長

ロードセル方式を導入しても検知できない項目は，以下のとおりである。

・騒音の増大

吸音材の劣化，パンチングプレートの目詰まり

・腐　食

・運転不能

電動機の絶縁破壊，電圧不均衡

この中で，運転不能のトラブルについては，現在でも遠方監視装置が備えてあれば，現場に行かなくても検知できる。

次に，年点検を削減（点検周期の延長）した場合，換気ファンの「騒音の増大」や「腐食」がトンネル利用者の安全性および換気設備の信頼性に与える影響について検討した結果，騒音の増大については，重大な事故を起こす可能性は低いと考えられるが，腐食に関わるトラブルは，重大な事故を起こす可能性があるため，ロードセル方式とジェットファン材質のステンレス化で，ジェットファン本体の年点検を1年間隔から2年間隔程度に延長可能となる。このことは，交通規制の削減にも繋がるため，トンネル利用者を含めた経済効果が大きい。

③　ジェットファン本体の長寿命化

ロードセル方式の導入とジェットファン材質のステンレス化で換気ファンの信頼性，耐久性の向上が図られ，ジェットファン本体の耐用期間の延長が期待できる。

5.　おわりに

換気ファン動力の削減についての新換気制御方式は，実証実験によりその有効性を確認できた。この方式は，

ジェットファン縦流換気方式トンネルであれば，対面通行のみならず一方通行にも対応可能である。

また，集中排気縦流換気方式についても，近畿地方整備局豊岡河川国道事務所管内蒲生トンネルにおいて，実証実験を実施中であり，今後は，換気シミュレーションを確立させ，他トンネルでの導入検討が可能となるよう努めている。

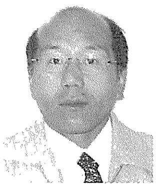
点検・分解整備の効率化については，換気ファンの信頼性を維持，向上したうえで，既往の点検整備結果を踏まえた点検の強化や新技術の導入によって，これまでの点検回数の省略や点検内容の省力化を図るものである。

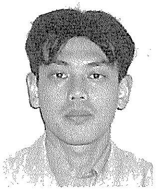
今回の取組み成果が広く他トンネルでも活用されトンネル換気設備の効率的な維持管理に貢献出来ることを期待するとともに，これを機会に道路トンネル換気設備の維持管理の一層の効率化や改善検討が活発化することを強く望むものである。 JCMA

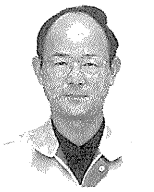
《参 考 文 献》

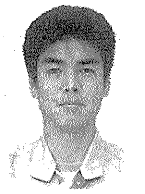
1) 社団法人日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説，平成13年10月
2) 社団法人日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，平成5年11月
3) 建設省建設経済局建設機械課：トンネル換気設備・非常用施設点検整備標準要領（案），昭和59年6月
4) 国土交通省近畿地方整備局：トンネル換気設備維持管理検討成果概要報告書，pp.19-21，平成17年3月
5) 岩崎，轟：インターネット利用の統計的損傷判定システム，非破壊検査，第52巻，4号，pp.188-193，2003年

[筆者紹介]


川﨑　和來（かわさき　かずき）
国土交通省
近畿地方整備局
豊岡河川国道事務所
機械課長


中安　真也（なかやす　しんや）
国土交通省
近畿地方整備局
豊岡河川国道事務所
機械課
機械係長


榎園　正義（えのきぞの　まさよし）
社団法人日本建設機械化協会
施工技術総合研究所
研究第一部
専門課長


佐藤　充弘（さとう　みつひろ）
社団法人日本建設機械化協会
施工技術総合研究所
研究第四部
研究員

大深度地下空間を拓く 建設機械と施工技術

最近の大深度空間施工技術について取りまとめました。
主な内容は鉛直掘削工，単円水平掘削工，複心円水平掘削工，曲線掘削工等の実施例を解説，分類，整理したものです。
工事の調査，計画，施工管理にご利用ください。

定価　2,310円（本体2,200円）　送料500円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8（機械振興会館）　Tel.03(3433)1501　Fax.03(3432)0289