

自然風・交通換気力を活用した トンネルの新換気制御方式に関する検討

STUDY ON VENTILATION CONTROL METHOD IN CONSIDERATION OF TRAFFIC AND NATURAL CONDITIONS

森本 智^{1*}・石村 利明²・角湯 克典³・三谷 敦史⁴

Most ventilation facilities in service stage are operated by selecting the constant pattern to confirm the required environment in tunnel, regardless of traffic ventilation force and natural wind force. This study aims at the establishment of economical ventilation control method considering their influences.

New ventilation control system was proposed considering the natural wind force and traffic ventilation force and its effect was evaluated through some experiments in site. The results were obtained as follows; As for the ventilation system considering the difference of air pressure at both portals and the result of traffic volume, the environment inside tunnels was kept good and the driven time of ventilation facilities decreased, comparing with the current feedback system.

Key Words : road tunnel, ventilation control method, natural wind force, traffic ventilation force

1. はじめに

道路トンネルの換気設備は，トンネル延長，交通量，換気対象物質である自動車排出ガス量等の諸条件に加えて，自然風と自動車の走行による交通換気力を考慮して設計が行われている．しかし，供用後の換気設備の運用は，時々刻々と変化する自然風や交通換気力とは関係なく，所要のトンネル内環境が確保されるように一定パターンに従った制御をしている場合が多い．このため，換気設備の運用に自然風と交通換気力を活用した制御を行うことで，換気設備のランニングコストを大幅に削減できる可能性があり，より一層の経済的な換気設備の運用を実施するためには，時々刻々と変化する自然風と交通換気力を活用した制御方法の確立が必要となる．

本稿では，時々刻々と変化する自然風と交通換気力の特性を把握し，これらが坑内風，坑内環境に及ぼす影響を検討したうえで，これらを活用した新換気制御方式の検討，効果，および適用性について，実証試験，および換気シミュレータによる解析により検討を実施した結果について報告する．

2. 自然風・交通換気力を活用した新換気制御方式の概要

筆者らは，これまでトンネル内の自然風と交通換気力について，坑口間差圧から自然風を，交通量から交通換気力をそれぞれ概ね適切に予測できることを確認した^{例2)}．これらについて継続的な計測を行うことで自然風と交通換気力を活用した換気制御が可能となる．

新換気制御方式の概要を図-2.1に示す．新換気制御方式は，時々刻々と変化する外乱（自然風，交通流）をトンネル両坑口に設置する高精度の大気圧計，交通量調査のための検出器によって継続的に計測し，各計測値から自然風，交通流（交通換気力）を予測する機能を有していることを特徴とする．具体的な制御方法および機能は下記のとおりである．

(i)坑内風速，煤煙透過率(VI)，一酸化炭素(CO)，坑口間差圧，交通量など各計測データと交通モデル，換気モデルなどを組み合わせ，自然風，交通換気力，VI，CO発生量の推定・予測機能を有する．

キーワード：道路トンネル，換気制御方式，自然風，交通換気力

¹正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ(ト研) (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6) *E-mail: morimoto@pwri.go.jp

²正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ(ト研) (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

³非会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ(ト研) (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

⁴非会員 株式会社創発システム研究所 開発・技術グループ (〒650-0047 神戸市中央区港島南 5-5-2)

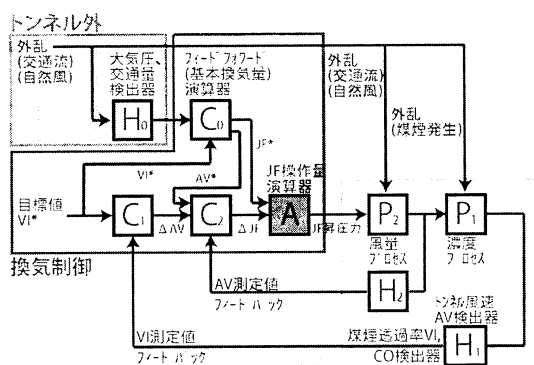


図-2.1 新換気制御方式の概要

(ii)(i)の予測データにもとづき、自然風と交通流による交通換気風速・風向との関係を考慮したフィードフォワード量（基本換気量）と坑内風速やVI、CO制御目標値との偏差に対するフィードバック補正とを組み合わせた予測制御機能を有する。

(iii)第1の風速フィードバック制御と第2のVI, COフィードバック制御を備え、第1のフィードバックループを包含するように第2のフィードバックループを形成するカスケード制御機能を有する。

3. VI値によるフィードバック換気制御方式の実態把握

(1) 実態把握調査

一般的なVI値によるフィードバック換気制御方式で運用している表-3.1、図-3.1に示すAトンネルにおいて、換気施設の運転状況の実態を把握するとともに、自然風と交通換気力を予測するためにトンネル内の両坑口付近に設置してあるVI計（測定区間長100m）とCO計に追加してトンネル内に風向風速計、自然風を予測するために両坑口（坑外）に大気圧計、交通換気力を予測するために西側坑口（坑外）に交通量計を新たに設置し計測を行った。調査期間は連続した24時間以上とした。Aトンネルにおいては換気制御は10分毎に行っており、両坑口のVI値を基にVI値が低い方向へジェットファン（JF）を運転している。また、JFの運転台数は上限VI値が91%を超えると2台停止、90%を超えると1台停止となり、下限VI値が80%未満で1台追加、70%未満で2台追加となる制御となっている。なお、VI値が40%を下回った場合、またはCO値が100ppmを超えた場合は5台のJFすべてを運転することとなっている。

図-3.2に交通量と交通量に占める大型車の割合（大型車混入率），図-3.3にVI値・CO値・JF運転実績，図-3.4に坑内風向風速をそれぞれ示す。調査期間中における交通量は，両方面ともに24日の日中から18時頃まで，およ

表-3.1 Aトンネルの概要

トンネル名	延長(m)	断面積(m ²)	交通形態
Aトンネル	約1,500	62.3	対面
平面曲率(m)	縦断勾配 (%)	坑口高低差(m)	坑口方位
4,000	-1.0(最大)	3.4	東-西
換気方式	JF台数	トンネル内の計測器	交通量 (台/日)
ファードバック	高風速型5台 φ1250mm	VI計2台 CO計1台	約23,000

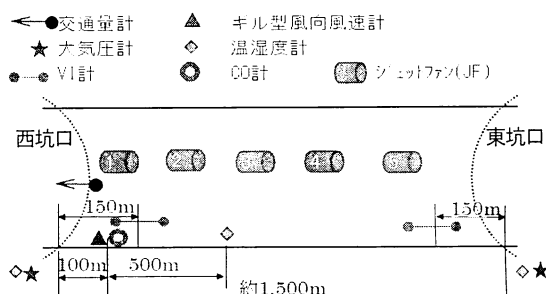


図-3.1 トンネルの概要および計測項目

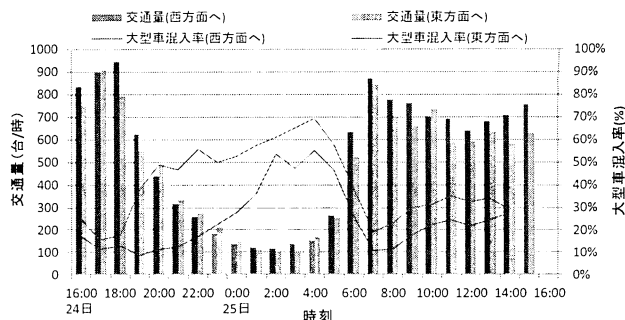


图-3.2 交通量

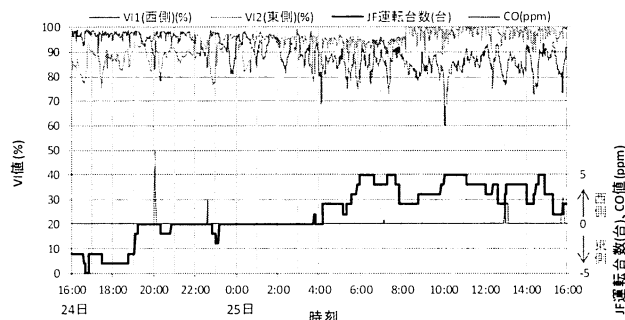


図-3.3 VI値・CO値・JF運転実績

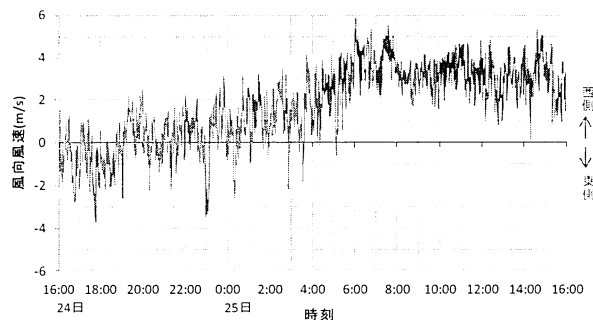


図-3.4 坑内風向風速

び翌日の午前7時から計測終了の16時頃までの昼間が多く、毎時600台/車線程度以上であった。一方、21時から5時頃までの夜間から朝方にかけては毎時300台/車線程度未満で推移している。大型車混入率は、両方向とも

に昼夜よりも夜間が高い傾向にあり、その値は計測期間を通じて西方面がより高かった。JFは交通量が多い時間帯において主に稼働し、その時間帯におけるJFの平均運転台数は3.4台であった。また、JFの運転方向は24日が東方向へ、25日は西方向への運転であった。VI値はJFの運転方向に対して風下側の値が悪化しており、悪化している側のVI平均値は87%であった。トンネル内の風向風速は、24日の19時頃までは東向き、その後は西向きに生じており、JFの運転方向と同じであった。また、その値は瞬間的に乱れるが、概ね2m/sから4m/s程度であった。

(2) 換気シミュレータによる再現解析

Aトンネルを対象に実態把握調査期間中における坑内風速値とVI値について、換気シミュレータによる再現解析を実施し実測値と比較した。換気シミュレータの主な解析モデルを表-3.2に示す。再現解析では、Aトンネルのトンネル条件（延長、断面積等）を用いて、自然条件（坑口間差圧等）、交通条件（交通量、交通速度、大型車混入率等）、ジェットファン運転実績等は、実態把握調査から得た値を用いた。

図-3.5に坑内風向風速、図-3.6にVI値について示す。大気圧差、交通量、JF運転等の実績をもとに再現解析により算出した坑内風速は、実測値と解析値で概ね良く一致している。また、VI値についても一時的なVI値の低下までは再現できていないが、概ね良く傾向を再現している。これらのことから、実トンネル内の状況について、概ね換気シミュレータによる解析により再現できることが確認できた。

図-3.7に再現解析から求めた、自然風と交通換気風の成分を示す。図には自然風と交通換気風を合計した風速もあわせて記す。自然風と交通換気風を合計した風速は、自然風が東側へ一時的に卓越する24日の17時頃～19時を除いて、概ね西側に作用している。このことから、実態把握調査期間中におけるJFの運用は、西側へ行うことが適切であったと考えられる。

4. 新換気制御方式の効果等の検証

(1) 換気シミュレータによる効果の検証

実態把握調査期間中に得られた自然条件、交通条件等をもとに、Aトンネルにおいて新換気制御方式を用いた場合を想定した換気シミュレータによる解析を実施し、VI値によるフィードバック換気制御方式を採用する既設換気制御による実態把握調査結果と比較することで、新換気制御方式の効果等について検証を行った。換気シミュレータによる解析に入力する自然条件、交通条件は、3. で示した再現解析と同様とし、入力データに基づき

表-3.2 主な解析モデル

項目	概要
風速モデル	一次元非圧縮モデル
汚染濃度モデル	一次元移流拡散方程式
交通モデル	ミクロ交通モデル

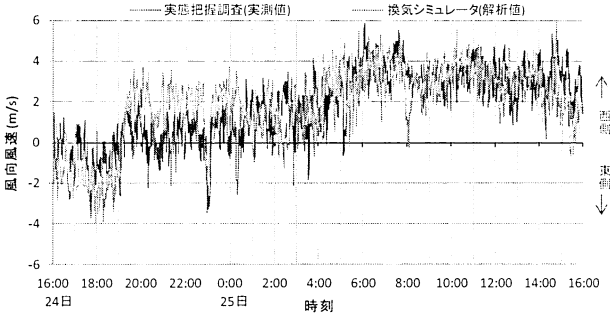


図-3.5 坑内風向風速（実測値と解析値）

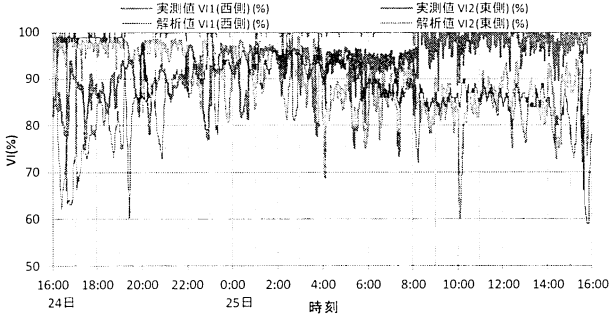


図-3.6 VI値（実測値と解析値）

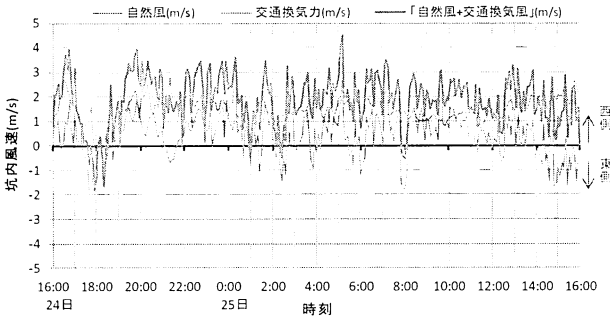


図-3.7 自然風・交通換気風の成分（解析値）

必要となるJF運転台数、およびVI値を算出した。

図-4.1にJF運転台数、および悪化側のVI値を示す。JFの運転は、既設制御は24日は東側へ、25日は西側へ運転しているのに対し、新換気制御は両日ともに西側への運転となった。既設制御は自然換気力と交通換気力を把握していないが、JFを起動する際は両坑口のVI値を比較し、値の低い方向に運転することで、その際に生じている主な換気成分である自然風と交通換気風の作用方向を包含した運用となる。その後は、目標VI値を計測しながら運転台数を変化させる制御となっている。このため、24日については起動時は東側へ自然風と交通換気力が作用していたと考えられるが、その後、ある時点で逆方向へ作用し、JFの運転方向と逆向きになったと考えられる。25日については西側へ起動後、自然風と交通換気力がその方向に作用し続けたため、JFと同方向の運転となったと考えられる。一方、新換気制御は自然風と交通換気

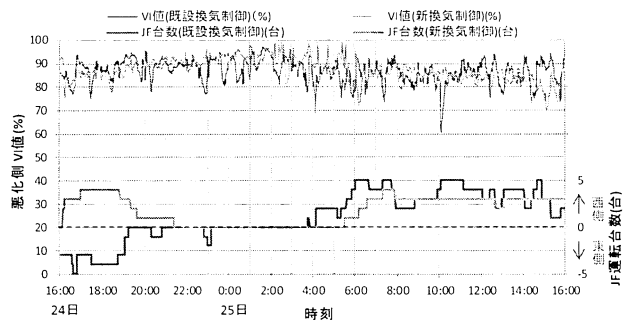


図-4.1 新換気制御による効果（解析）

力の作用する方向を一定間隔で把握し、その方向にJFを運転していることがわかる。この期間におけるJFの延べ運転時間は、既設制御が31,020分、新換気制御は26,030分であり、新換気制御による運用により2割程度の運転時間が縮減される結果となった。なお、この期間におけるVI平均値は、既設制御が87%、新換気制御も同じく87%であり、一時的に悪化した際の値は既設制御が60%、新換気制御が70%であったことから、新換気制御を想定した換気シミュレータによる解析では、坑内環境を悪化させることはなかった。

(2) 実証試験による効果の検証

新換気制御の効果と適用性を検証するため、Aトンネルにおいて実証試験を行った。実証試験は、3. で示した新換気制御に必要となる各計測データを収集、坑口付近の電気室内に集約し、計測データに基づき換気運転台数等を新換気制御プログラムにより演算処理を行い、その指示に従ってJFの運転を実施することにより行った。換気制御方式は、表-4.1に示す2方式とし、各方式とも平日の概ね24時間実施した。実証試験は連続する2日間において実施し、既設換気制御、新換気制御ともそれぞれ24時間ずつ実施した。

図-4.2に実証試験期間中の同時刻における、交通量、および自然風の成分について示す。交通量は、両方向とも時間帯毎に変化し、その量は同程度であった。また、自然風については、両日とも概ね似通った傾向を示している。これらから、実証試験期間中の自然条件、および交通条件は概ね同程度であったとして、既設換気制御と新換気制御について比較を行う。

図-4.3に各換気制御におけるVI値・CO値・JF運転実績を示す。Aトンネルでは昼間の交通量が多く、実証試験中において一部昼間の時間帯で東坑口方向の車両によりトンネル内で交通渋滞が発生した。図中にはトンネル内のほぼ全線にわたり交通渋滞が発生した時間帯（ピンク網掛け部）、夜間の交通量が少なく交通渋滞が発生していない時間帯（グレー網掛け部）を示した。図よりVI値は、両制御ともにトンネル内での交通渋滞等によって一時的に低下する時間帯が発生したが設計濃度40%を下回

表-4.1 検証を実施した換気制御方式

換気制御	既設換気制御 (フィードバック)	新換気制御
制御の基本的考え方	両坑口のVI値を基に、VI値が低い方向へJFを運転する。	両坑口間の大気圧差・交通量を基に自然風、交通換気力を推定し、JF運転を行う。
具体的な手法	制御ピッチ 10分間隔で制御	
	上限VI値 91%超：JF2台停止 90%超：JF1台停止	
	下限VI値 80%未満：JF1台追加運転 70%未満：JF2台追加運転	

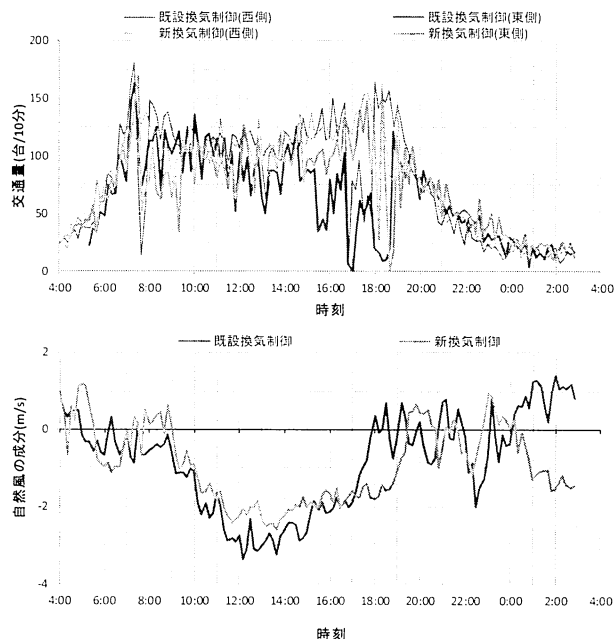


図-4.2 実証試験期間中の交通量と自然風成分

ることはなかった。また、既設制御では概ね6時～20時まではJF5台での連続運転に対して、新換気制御では短い周期でJF運転台数が変化することでVI目標値が確保されている。CO濃度は新換気制御で一時的に悪化した場合に5～15ppmを示したが設計濃度100ppmに対して十分小さい値であった。

図-4.4にトンネル内の風向風速を示す。図には両坑口の大気圧差、交通量等、JF昇圧力から算定した、自然風、交通換気風、JF換気風もあわせて示す。本トンネルでは西坑口の1箇所のみで交通量を計測したため東坑口を先頭としたトンネル内のみの交通渋滞に対して交通換気力を十分な精度で把握できず、実測と計算の風速が合致していない時間帯があった。そこで、交通状態が明らかな時間帯（網掛け部）でトンネル内の風速の実測と計算を比較する。トンネル全線で交通渋滞が発生した時間帯での風速の実測と計算は比較的よく整合していることがわかる。また、交通渋滞が発生していない夜間の時間帯も風速の実測と計算は比較的よく整合している。次に、トンネル内の風速（実測）に影響を与える各成分（交通換気風等）の方向・大きさを比較する。本実証試験中にお

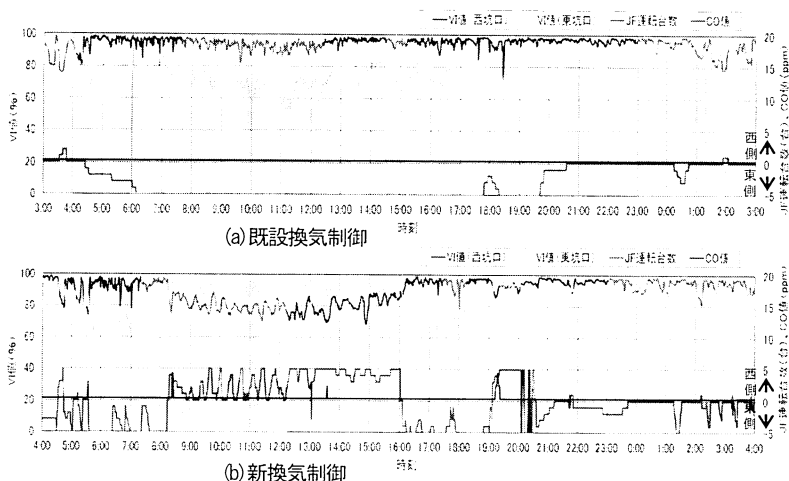


図4.3 VI値・CO値・JF運転実績

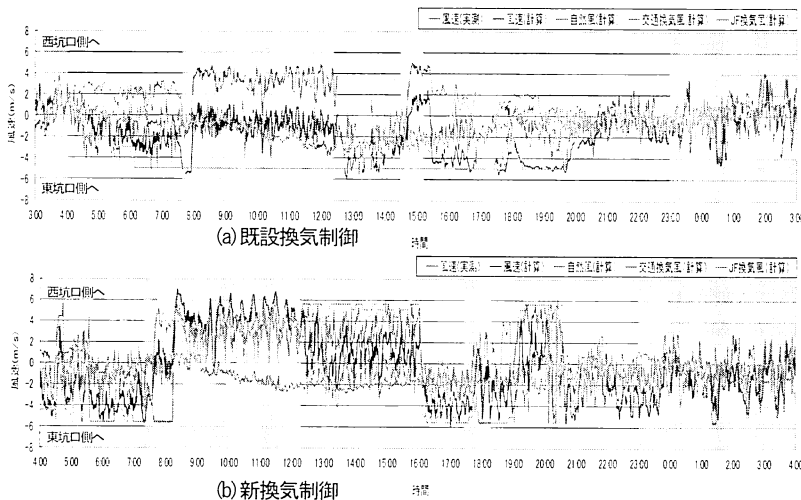


図4.4 坑内風向風速

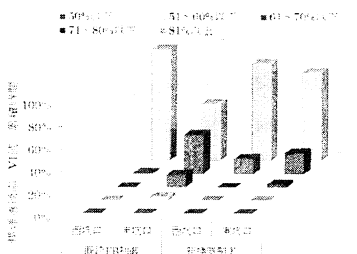


図4.5 各VI値の累積時間割合

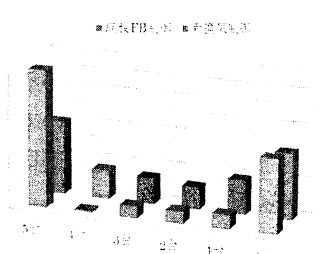


図4.6 JF台数毎の運転時間

いては交通換気風とJF換気風が大きく、トンネル内風速には自然風よりも交通換気風とJF換気風が大きく影響を与えていたと考えられる。渋滞時（ピンク網掛け部）の時間帯の交通換気風とJF換気風の方法は、既設制御では逆方向、新換気制御は同方向であり、新換気制御の機能が現れている。

図4.5に両制御の各VI値の累計時間割合を示す。これより、既設制御は東坑口側のみVI値が低下する時間帯が多いが、新換気制御は両坑口ともに同程度の時間割合である。

図4.6にJF台数毎の運転時間を示す。これより、JF5台運転は既設換気制御で約800分、新換気制御で約400分で

あり、新換気制御のJF運転実績は既設換気制御に比較して全体的に少なくなり、JFの稼働実績から算出した使用電力量の試算では、新換気制御が既設換気制御に比較して約8割であり、2割程度の電力量の縮減となった。

5. 換気シミュレータによる新換気制御方式の適用性等の検証

一般的なフィードバック制御では、現状のVI値やCO値と目標値を比較し、その偏差（現状値－目標値）から換気機の風量や運転台数を求め、目標値とするレベルを下回らないように制御する。また、自然風、および交通換気力を把握していない場合、JF運転方向については両坑口に設置してあるVI計の値を比較し、値が小さい方向へ運転することが一般的である。そのため、自然風、または交通換気力がJF運転方向に対して逆側へ発生した場合はVI値が悪化し、JF運転台数を増加する等の対応が必要となる。このようなVIの悪化により所要のトンネル内環境が確保されなくなることを防ぐため、自然風、および交通換気力を把握していない従来制御においては、予め、目標とするVI値（目標VI値）のレベルを高めに設定し、制御を行っていることがある。

一方、新換気制御においては、時々刻々と変化する自然風と交通換気力を把握できるため、JFの運転方向、およびその台数を適切に設定することができ、目標VI値を予め高く設定する必要がない。

ここでは、3. で示した一般的なVI値によるフィードバック換気制御方式による

Aトンネルにおいて、換気設備の運転実績と、実態把握調査時に収集した自然条件、交通条件等をもとに、新換気制御により目標VI値を80%、70%、および60%に設定した場合、また、JFの運転方向を自然風と交通換気力の合計風速に対して常に逆向きとなる方向へ固定した場合を想定した換気シミュレータによる解析を行い、JFの運転状況について比較を行った。

図-5.1にVI目標値を80%、70%、および60%に設定した場合、図-5.2にJFの運転方向を自然風と交通換気力が作用する方向と常に逆の向きとなる東側へ固定した場合の結果を示す。JFが1台以上運転していた時点におけるJFの平均運転台数は、既設制御における実績では3.2台で

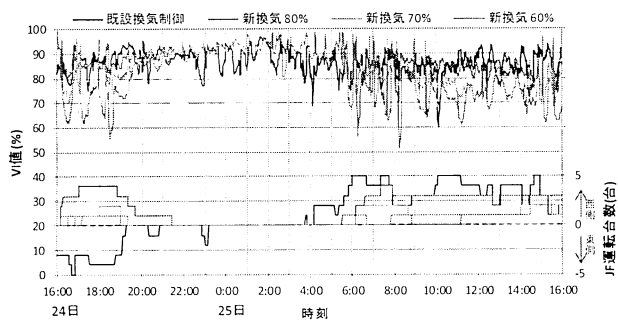


図-5.1 VI・JF運転実績 (VI目標値80,70,60%)

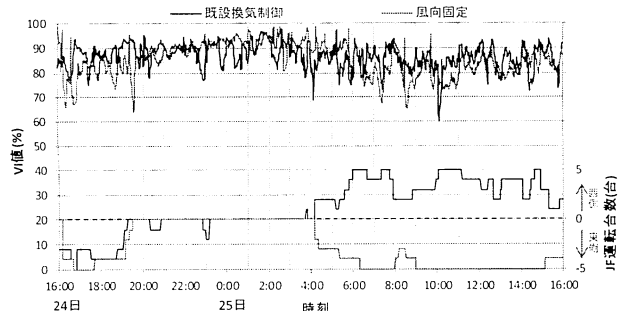


図-5.2 VI・JF運転実績 (風向固定)

あった。一方、新換気制御を想定した換気シミュレータによる解析では、目標VI値80%の場合は2.8台、70%の場合は1.5台、目標VI値60%の場合は1.1台と既設制御における実績と比較し減少している。その際のVI値は、いずれの換気制御方式においても、所要のトンネル内環境を確保している結果となった。また、図-5.2からJFの運転方向を東側へ固定した場合のJF平均運転台数は4.4台と増加しており、平均VI値は85%となっている。

図-5.3に各制御におけるVI値の累計時間割合を示す。新換気制御におけるVI累積時間は、目標VI値を下げることでVI値は低下しているが、所要のトンネル内環境を下回ることにはなかった。

図-5.4に各制御におけるJFの延べ運転時間の割合を示す。既設制御におけるJFの延べ運転時間の実績を100%とした際、新換気制御を導入することにより80%程度に、また、目標VI値を80%から70%にすることで40%程度に、60%にすることで20%程度に延べ運転時間を大幅に縮減できる可能性があることがわかった。一方、自然風と交通換気力がJFの運転方向と逆に作用した場合は、130%程度に増加することがわかった。

6. まとめ

本検討において、時々刻々と変化する自然風と交通換気力を活用する新換気制御方式の検討を行うとともに、実証試験、および換気シミュレータによる解析を通して、その効果、および適用性について検証を行った。これらより、以下のことがわかった。

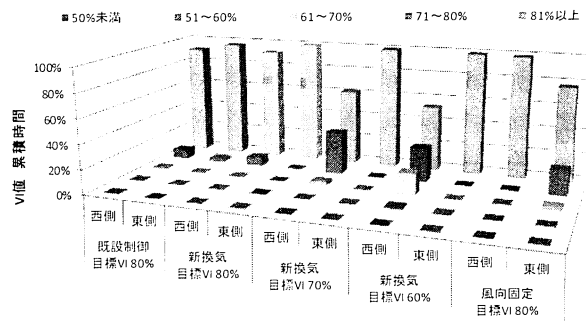


図-5.3 各VI値の累積時間

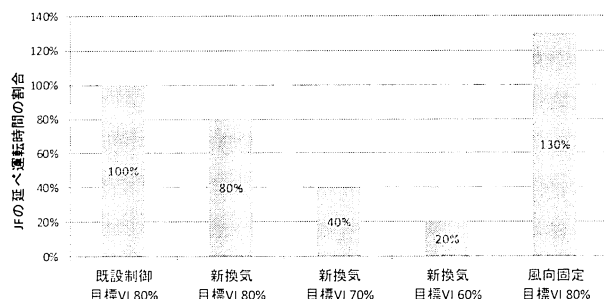


図-5.4 JFの延べ運転時間の比較

1) トンネルの両坑口での大気圧差と交通量計測結果を反映させた新換気制御方式は、実証試験を実施したAトンネルのVI値によるフィードバック換気制御方式に比較して、トンネル内環境が顕著に悪化することなく維持できるとともに、換気機の運転時間も短縮されることが明らかとなり、新換気制御の機能の有効性とその効果が検証できた。

2) 一般的なフィードバック制御では、自然風と交通換気力を把握していないため、目標VI値を予め高く設定する場合があるが、自然風と交通換気力を活用する新換気制御においては目標VI値を高く設定する必要が無く、目標VI値を適切に設定することで、JFの運転台数を大幅に縮減できる可能性があることがわかった。

今後は、新換気制御により効率的な運用が可能となる自然条件、交通条件等の検討、交通渋滞の発生等にも対応できる交通量データの把握方法の検討、トンネル内の風向転換のタイミング等の検討等を行うことで、さらに効率的な換気方式として提案するとともに、実トンネルへの普及を図っていきたい。

参考文献

- 1) 森本 智, 石村 利明, 角湯 克典: 道路トンネル内の自然風および交通換気力の予測に関する研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 16 巻, 土木学会, 2011 年 1 月