

## 道路トンネルの換気について

伊 吹 山 四 郎\*

## 1. は し が き

道路においては、工費の面からいっても、トンネルを設けることは極力これを避けるべきであるが、わが国のような山の多い平野の少ない国においては、トンネルを設けることによっていちじるしく距離が短縮され、勾配が楽になる場合が少なくない。

このような場合に、道路トンネルを設けることになるが、道路トンネルには、鉄道トンネルに比して、いちじるしく困難な換気の問題が生じてくるのである。

道路トンネルの換気は、まず第1に炭坑などにくらべていちじるしく大きな空気量を必要とすることである。そのため工費を非常に増加させるものであるということである。しかし交通量の多い、あるいは延長の長いトンネルにおいては、必要欠くべからざるものであることは、外国の例を引くまでもなく、わが国の既存の関門トンネル、大町トンネル<sup>1)</sup>、魚見山トンネルなどの事例でも明らかである。以下、この問題について具体的に述べて見たいと考える。

## 2. 換 気 の 必 要 性

換気が必要な理由は何かということ、アメリカにおいても、ヨーロッパにおいても、自動車の排気ガス中の一酸化炭素(CO)であると考えられていた。そして、医学的に空気中の4/10 000以下にすればよいとされていた。

このほかに、自動車の排気ガス中には、過酸化窒素(NO<sub>2</sub>)、ホルムアルデヒド(HCHO)、鉛分(Pb)などの有害成分がふくまれているが、これは微量で実際上の害はないと見なされるものである。

しかし、欧米においても、実際にトンネルが開通してみると、COが、この4/10 000(0.04%)に達しない前に、煤煙によって、視界がさまたげられる障害がおこることが発見された。その結果、これを2.5/10 000(0.025%)に切り下げることが行なわれるようになった。

さらに、近來、ディーゼル車が発達してくると、このディーゼル車は、ガソリン車に比べてCOを1/10ぐらいしか発生しないのに、煤煙は10倍以上の濃度のものを発生するから、この傾向にますます拍車をかけることとなった。

ドイツのKretz, H.H.<sup>2)</sup>は、良好な視野を得られるためには、COは7/100 000(0.007%)に押さえるべきだと述べている。

さて、わが国の場合はどうであろうか。いうまでもなく、わが国の交通において、トラック、バスなどのディーゼル車の占める率は、欧米のように自家用車(ガソリン車)を主とする交通に比べて、はるかに多いのである。したがって、トンネル内の交通は、COではなくて、煤煙のために動きがとれなくなるのである。

筆者は、この点を確かめるために、関門トンネルが開通してから、交通を通したまま換気装置を止めるという実験をきわめて暴挙であると思うが、数回実施してみた。まず換気装置を止め、交通は依然として通したままにしておく、煤煙は次第に蓄積されて、次第に遠くから霧がかかって来たようになる。180mおきに設置した信号灯がかすんでくる。レーンマークの黄色いペンキ2本線が見えなくなる。濃い霧がせまってくる。自動車が霧の中から突然姿をあらわすようになる。人影がはっきりしなくなる。人影が動いているのか、停止しているのかわからなくなる。

このようになると、当然自動車の速度は低下し、危険感が生じてくる。逆に、もしこの状態で通常で走行をするならば、事故がおこることは当然考えられることである。したがって、このような状態に立ち至れば、道路トンネルとしての交通機能は全く低下してしまったといっても過言ではなからう。この状況で、距離50mの透光率55%、CO濃度0.0029%であった。

すなわち、わが国の交通では、欧米よりもさらに煤煙の発生が多く、そのための障害がいちじるしいものと思われる。

このような状態から、換気装置を運転し始めよう。霧は、次第に晴れて来て、視界は近くから遠くへとだんだんはっきりして来て、およそ5分間でもとの澄んだ状態にもどすことができる。

このことから、読者は換気装置が何のために必要か、換気装置がないとどうなるかということとともに、換気装置の有用さがわかりになったと思う。

## 3. 自 然 換 気

しかしながら、道路トンネルであっても、その延長、または交通量によって換気装置を設ける必要のない場合

\* 正員 建設省土木研究所 道路研究室長

が大部分である。問題は、どこまで自然換気でのいかなの限界である。

自然換気の状態を左右するものとして、自然風（ことに卓越風）、温度差、気圧差および交通換気などが考えられる。

卓越風の方向が、たまたまトンネルの方向に一致しているような場合、自然換気は非常に行なわれやすいことは想像がつく。たとえば、サンフランシスコのブロードウェイ トンネル (488 m) は、一方向トンネル2本で、卓越風の方向（太平洋側から内陸に向かう方向）に交通する分では、この自然換気を勘定に入れて、送風機の馬力を大巾に削減している。

また、アルプス山脈の壁を貫いて、フランスとイタリアとを結ぶモンブラン トンネル (11 900 m) について、イタリアの Vittorio Zignoli は、 $43 \text{ m}^3/\text{sec}$  の自然換気が期待されることを計算<sup>1)</sup>している。

しかしながら、このような推定のつく場合は、山脈が一山であるような単純な例外的に限られた場合にすぎない。多くの場合、トンネルは幾重にも複雑な山間の谷に入っていくのが普通である。そのような場合に自然風とこの谷間の風とがどのような関係にあるかすら、一般的にはわかっていないのである。自然風は、もし、そこに摩擦も何もないとすれば、100 km について 1 mb の気圧傾度があると数メートルの風になる。これが、谷間の抵抗、坑門の抵抗、トンネル壁の抵抗に打ち勝って流れて行くのを追跡することはまず不可能に近い。

そして、このようにわずかな気圧差によって風が生ずるのであるから、両坑門の気圧差を測定することは、通常の気圧計精度が 1/10 mb であるからむずかしい。

炭坑のように、高低差が数百メートルもある、したがって気圧差が大きく、これによる自然換気を主に考える場合と全く条件が違うのである。

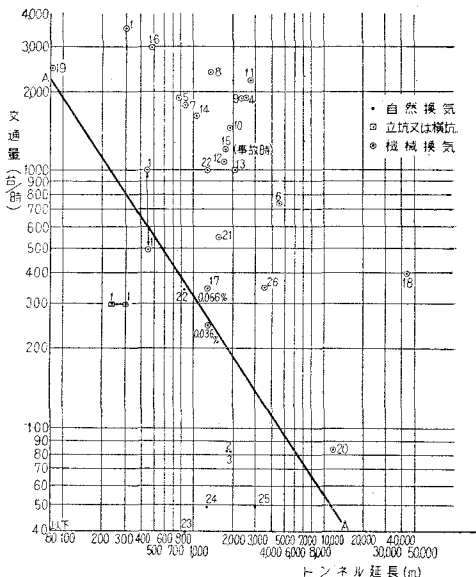
また、トンネルの両坑門の日照時間、温度差がわかれば、自然換気が推定できるのではないかという質問もよく受けるのである。しかし、これも簡単ではないようである。まず、日向の日照によって地面があたためられるのは事実だが、気温はこれに比例して変化しない。まして、これに風が吹くと温度差が、自然風が分離できなくなる。また風の流れの方向によって、出口の方が温度が低いという逆の観測結果も出ている。

さて、以上のように自然換気は、定量的にとらえることはむずかしいのである。そしてもし、これをなんらかの方法によって予測したとしても、たとえば春、秋のように、温度差のなくなるとき、あるいは風向が変わる途中の風速りとなる時間はどうかであろうか。このような自然換気をとらえるために、建設省、道路公団、電源開発など各方面で多くの実測が行なわれたが、いずれもはっきりした結果は得られていない。まず自然換気は不安定

であると判断した方が良さそうである。

しかし、多くのトンネルがそうであるように、短かい、あるいは交通量の少ないトンネルにおいては、現に自然換気でまかなえているのである。したがって、ごくざっぱな予想を立てて見るために、在来の道路トンネルの時間当たり交通量と延長とをプロットして、それから、自然換気限界長を求めた 図-1 は参考となる。

図-1 自然換気の限界



- |                        |                   |
|------------------------|-------------------|
| 1. チャンピオンの意見           | 14. マーストンネル       |
| 2. ブラックウォールトンネル        | 15. リバティトンネル      |
| 3. ロゼリーストンネル           | 16. ブロードウェイトンネル   |
| 4. ホランドトンネル            | サンフランシスコ          |
| 5. バッテリーストリート地下自動車トンネル | 17. ワフオンナトンネル     |
| 6. マーシートトンネル           | 18. 英仏海峡トンネル (計画) |
| 7. ブロードウェイトンネル, オークランド | 19. スゴットサークルトンネル  |
| 8. ボジーチューブ             | 20. モンブラントンネル     |
| 9. リンカーントンネル           | 21. テームトンネル       |
| 10. クイーンミッドタウントンネル     | 22. 魚見山トンネル       |
| 11. ブルックリンバッテリートンネル    | 23. 栗子トンネル        |
| 12. デトロイトウインソートンネル     | 24. 三国トンネル        |
| 13. アンバースジェルドトンネル      | 25. 笹子トンネル        |
|                        | 26. 関門国道トンネル      |

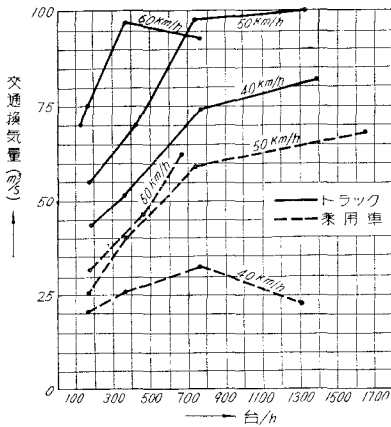
#### 4. 交通換気

上述の自然換気よりも、はっきりした形で表われるのが交通換気である。図-2は、北九州道路において実験した結果である。一方向トンネルの場合、この交通換気は、はっきりした形をとって表われ、自然風を逆向きさせるものである。

しかし、換気が最も必要な情態、すなわち交通が混雑して、自動車の速度が落ちてくると、風速が落ちる欠点があり、またなんらかの原因で交通が停止すると、この交通換気もとまってしまうのである。このように換気の必要なときの交通の停止によって、換気設備のなかつ

たりバティ  
トンネルで  
は、CO 中  
毒者が続出  
した事故が  
起っている  
のである。  
また、こ  
の交通換気  
は、2方向  
交通のトン  
ネルになる  
と、その効  
果は打ち消

図-2 交通換気



されてしまっ  
て、坑門 20~30m しか期待できないこと  
が、実測してみても明らかである。

以上のことから、自然換気あるいは交通換気というものを期待することのできるのは、延長と交通量との関係によってある限度があると考え、そしてそれ以上については機械的換気による考えた方が良いでしょう。すなわち、交通量が多ければ延長が短かくても換気設備が必要であって、たとえば、オランダのベンゼントンネルは、延長はわずか768mであるが交通量が多いから、当然、換気設備が必要であり、笹子トンネルは延長2953mであるが交通量が少ないから換気設備が要らないということが図-1においても明らかである。

### 5. 換気量および換気回数

さて、ここで道路トンネルの換気がどの程度のものであるかを示すために、換気量および換気回数について述べよう。表-1は、各国で使用している道路トンネルの換気量の基準を、交通量2000台/hのときの、2車線トンネルの換気量に換算して比較したものである。

表-1 道路トンネルの換気量比較

国別	提案者	方向	条件	勾配(%)	トンネル1000m当り換気量(m <sup>3</sup> /sec)
アメリカ	Ole Singstad <sup>2)</sup>	一方向交通	乗用車 75%, バスおよびトラック 25%	+3.5	309.3
				0	232
ドイツ	H. Kretz <sup>3)</sup>	一方向交通	乗用車 62%, トラック 38% 速度 10 km/h	±5 平均	245.9
				"	229.5
イギリス	H. Kretz <sup>3)</sup>	二方向交通	乗用車 20, トラック 15 乗用車 20, トラック 15	"	198.5
				"	204.3
イタリア	Vittorio <sup>4)</sup> Zignoli	二方向交通	モンブラントンネルの交通量 300台/hの値より2000台/h に換算	2.4%	自然換気 43
				0.25%	機械換気 172
日本	設計時、乗用車 20%, 小型 トラック 30%, 中型トラック 40%バスおよび大型トラック 10%と仮定 <sup>5)</sup> 完成後のテスト結果 <sup>6)</sup>	二方向交通	"	0%	計 215
				±4%	198
				0%	229
					320

また、一般に換気量の表現方法として、対象とする空間の空気量を、1時間に入れ換えることのできる回数で表わすことがある。これを換気回数といって、トンネルの場合は車道の空気量の1時間に何回入れ換えることができるという換気設備の必要能力を示すものである。

いま、これを普通の建築物などの換気設備と比較してみると表-2のごとくである。

表-2 換気回数比較表

区別	名称	換気回数(回/h)
道路トンネルの場合	関門トンネル	28
	リンカーントンネル	42
	ホランドトンネル	42
建築物の換気の場合	集会場 <sup>7)</sup>	6~12
	デパート <sup>8)</sup>	4~8
	劇場 <sup>7)</sup>	2~20

この換気回数で60分を割ったものが、空気を1回入れ換えるための計算上の時間であって、トンネルの場合は1.5分とか2分とかいったオーダーであって、普通の建築物にくらべて、はるかに大きいことがわかっていく。

### 6. 換気方式

換気方式としては、道路トンネルの初期においては、やはり、炭坑あるいは鉄道トンネルのような縦流式が用いられた。そして今日のような横流式が用いられるようになったのは、ホランドトンネルの建設者ホランドによって始められたのである。

その後、この変形である半横流式、半横流一縦流式あるいは、単位式が使われるようになったのであって、これらを図示すれば、図-3~7のごとくである。

縦流式は図-3のごとく、車道を縦に空気を流す方式で、その空気の送り方によって、立坑を利用するものとして立坑型、坑口より吹込む、吹込型、車道の途中で空気を加速する加速型の3種類がある。

図-3 縦流式



また、半横流式は、図

図-4 半横流式

4のごとく、排気あるいは送気ダクトのみを設け、トンネル断面に対して、空気は一部横流し、一部は縦に流れる方式である。

なお、図-5は、交通換気を利用して一方向トンネルに利用される半横流一縦流式である。

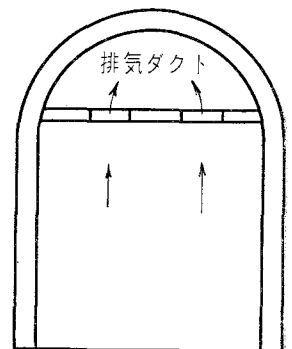


図-5 半横流-縦流式

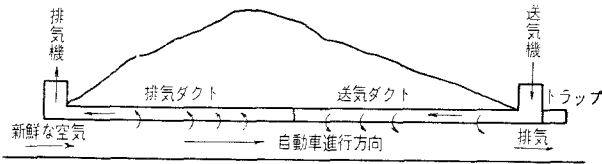


図-6 横流式

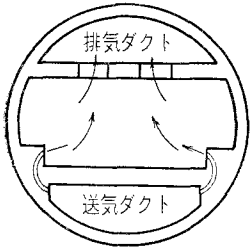
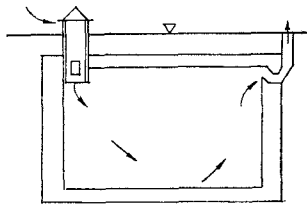


図-7 単位式



横流式は、図-6 に示すごとく、送気ダクトおよび排気ダクトを備えた最もオーソドックスの方式である。なお、この方式に斜壁型という、送気ダクトと排気ダクトとを背中合わせに合わせてダクト断面の節約をはかる形がある。単位式は、図-7 に示すごとく、地表面よりの距離が近い場合にダクトを設けず、短い区間ごとに小送風機をもって直接大気を吸入し、排気ガスを放出する方式である。

これらの換気方式の利害得失およびその実施例は、表-3 に示すごとくであってそのいずれを選ぶべきかは、トンネルの延長、交通量、地形などによる最も経済的な

表-3 換気方式比較表

名称	縦流式			半横流式			横流式		単位式
	立坑型	吹込型	加速型	送気型	排気型	縦併用型	標準型	斜壁型	
ダクト	なし	なし	なし	送気	排気	延長の送気 半分送気 排気	送気および排気	同左	なし
適当な交通方向	一方向	一方向	一方向	二方向	二方向	一方向	二方向	二方向	二方向
交通換気	利用	利用	利用	利用せず	利用せず	利用	利用せず	利用せず	利用せず
自然換気	逆風は不可	逆風は不可	逆風は可	関係なし	関係なし	逆風は不可	関係なし	関係なし	関係なし
濃度分布	下流ほど大	下流ほど大	下流ほど大	下流ほど大	下流ほど大	不均一 あり	一様	一様	一様
火災	危険	危険	危険	危険	安全	可逆にすれば安全	安全	安全	安全
騒音	小	大	大	小	小	小	小	小	小
工事費	中	小	小	中	小	小	大	短長小り浅ければ小	地かぶり浅ければ小
可能延長	短	短	短	短	中	中	長	中	長
確実性	欠	欠	中	大断面は可	大断面は可	大断面は可	大	最も大	大
適用	山のあまり深い短いトンネル	延長の短いトンネル	延長の短いトンネル	大断面トンネル	中程度のトンネル	中程度のトンネル	中程度のトンネル	中程度のトンネル	市街地のトンネル
実例	リパブレイ	ブローウェイ	オーウェ	マーシー	モビル	スクレル	関門トンネル	メアリ	バクリート

ものをとるべきであろう。一番安全確実な方法は、やはり横流式であるが、山トンネルの場合、半横流または縦流式が経済的な場合もあり、都会地の地下道では、単位換気方式が賢明であろう。

7. 道路トンネルの換気のための工事費

最初に、換気のための工事費の増が膨大なものとなると述べたが、この点について検討して見よう。換気のための費用を考えるにあたって、最初の工事費のみならず、将来の維持費を最小にすることを考えなければならない。維持費は送風機の消費する電力である。

一般に、送風機の動力は

$$PS = \frac{QH}{102^n} \dots \dots \dots (1)$$

- ただし、  
 PS: 送風機動力 (kW)  
 Q: 送風量 (m³/sec)  
 H: 風圧 (mm 水柱)  
 n: 送風機効率 (%)

で表わされる。

Qは、交通量、その送風機の分担して受持つべきトンネル延長によって定まるものであって、もしこのQを一定とれば、送風機馬力は、風圧によって左右される。風圧は、風速の2乗に比例するから、ダクトの断面積が半分になれば、風圧は4倍になる。これがすなわち圧縮機を使って、小径のパイプで空気を送るというわけに行かないで、適当な大きさのダクト (通常 8m² ぐらい) を設ける必要のある理由である。

また、このQが一定でなく、たとえば、その送風機の分たするトンネル延長が2倍になったとしよう。このとき、Qは2倍になるとともに、同じ面積のダクトであれば、風速は2倍になり、したがって、風圧Hは4倍になる。式(1)において動力は実に8倍になるのである。

それでは、縦流式のように、車道を使って空気を流そうと考えると、延長が長くなると、流量Qが大きくなって、交通車両に障害をあたえ、火災の延焼を避けなくなるのである。したがって、おのずから、縦流式のトンネルの長さは制限されたものとなる。

このように、トンネルの延長の3乗に比例して送風機動力が増大するということが、長大トンネルの換気がむずかしいといわれる理由である。

したがって、ある程度の大きさのダクトを設け、しかも、トンネルを延長方向にいくつか区切って、立坑あるいは横坑を掘って、各区間ごとに送風機をつなぐことにするよりほかはない。しかしながら、長大トンネルを掘るような場所は、山も深く、不便なところである。一口に立坑を掘るといっても、断面も大きいし容易なわざではない。このことから、立坑、横坑、ダクトのための

工事費、送風機格納建物などの換気のための土木工事費というものが、かさんでくることになる。

このような考慮のもとに、換気設備を設計するのであるが、立坑の必要性は、トンネルの延長によってきまり、その位置は、トンネルの換気設備のバランスによって定めるとしても、やはり個々の山の、立坑適地によって左右されるであろうから、一般的法則を立てることはできない。

表—4 は、中央道の積算にあたって、数個のトンネルを個々に設計したのから、換気量の占める割合を表わしたものであって、中央道の長大トンネルの地勢上の制約、地質条件等の下であり、幹線道路として将来 2000 台/h の交通量を対象とするものであるが、この表においても、トンネル延長が長くなるに従って、全工事費の

表—4 中央道トンネル工事費の内  
換気設備費の占める割合 (1 m 当り)

延長区分 (km)	工事費 %	内 訳				トンネル 1本当り 所要動力 (kW)
		主トン ネル費 (%)	換気施設費		照 明 信号費 (%)	
			土木工事 費 (%)	機械費 (%)		
0.5 未満	100	86	0	0	14	0
0.5以上~1.5未満	100	75	9	6	10	72
1.5〃~2.5〃	100	67	15	10	8	850
2.5〃~3.5〃	100	65	15	14	6	1400
3.5〃~4.5〃	100	64	14	16	6	2000
4.5〃~5.5〃	100	63	14	17	6	2685
5.5〃~6.5〃	100	62	16	17	5	3400
6.5〃~7.5〃	100	62	16	17	5	4305
7.5〃~9.0〃	100	60	18	17	5	6750

中に換気設備費の占めるパーセントおよび換気所要動力がいちじるしく増加することが、うかがわれる。

## 8. む す び

以上、道路トンネルの一般的な説明をのべたものであるが、最近のような交通量の全国的な急増を見るとき、そのトンネルの交通上の重要性にもよるが、延長 500m 以上、少なくとも 1000 m 以上のトンネルには、将来換気設備を設けるための考慮が必要であろうと筆者は考えるものである。この拙文が、道路トンネルの建設にあたる読者になんらかの参考になれば、幸甚とするところである。

## 参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所、日本道路公団：長大トンネル 煤煙状況調査報告書、昭和 34 年 12 月
- 2) Abbett, R. : American Civil Engineering Pract : CI Vol. 1. Ole Singstad p. 10-10, John Wiley, 1956
- 3) Kretz, H. : Wagenburg Tunnel の換気計画, 道路公団資料
- 4) Mont Blanc Tunnel Will Be the Worlds Longest Short Cut. ENR Mar. 26. 1959. pp. 30~34
- 5) 伊吹山四郎・染川 豊：換気風圧計算、閘門技術 4 巻 7 号, p. 3
- 6) 伊吹山四郎：トンネルの換気と照明、土木学会編、トンネルと掘削工法, p. 226, 昭和 34 年 8 月
- 7) 井上宇市：空気調和ハンドブック, p.226, 丸善, 昭和 32 年 3 月
- 8) 飯野 香：ダクトの設計, 理工図書, p. 52, 理工図書, 昭和 33 年 9 月

(原稿受付：1960.11.24)

## 書 評

### 港 湾 技 術 要 報 No. 28 運輸省港湾局監集 日本港湾協会刊 マネージメント・リサーチ特集

経営学は近年おどろくほどの発達をとげ、その知識はわれわれがたずさわっている仕事の上にも、非常に必要なものになりつつある。

いつの時代でも大きな組織を持っている国、社会、あるいは大企業は人材を渴望している。しかもマネージメントについての能力と知識をもっている人はそうたくさんいない。このときにあたり、非常に豊富な内容を持っている経営の技術者、若い技術者の諸君が、マネージメント・リサーチ・サークル (M.R.C.) をつくり、グループ・ディスカッションの過程を通じて体系化し探究していく努力が示されている。

本書には巻頭に、ドラッガー教授の有

名な句“人間こそ企業のみならず 1 国 1 社会の真実の資源である”で始まり、特に民間企業としてでなく、行政機関の立場からみた経営学への強い研究の必要性和、その基礎的な法則、本質を究明している成果はみとめられるが、具体的な技術として、港湾における諸問題にまで、直接結びつけていくというまでにいたっていないのが非常に惜しまれる。

その内容は、  
トップ・マネージメント  
ミドル・マネージメント  
ロー・マネージメント  
ラインとスタッフ  
ヒューマン・リレーションズ  
パブリック・リレーションズ

会議のすすめ方

コミュニケーション

から成っている。

高度の経済の成長率を維持するためには、狭い国土、少ない資源のわが国においては、技術の高度化はもちろん、経営すなわちマネージメントの技術を真剣に勉強し、適用していくことが不可欠と考えられるので、近代的科学的管理の入門書として、港湾技術者のみならずこの方面に興味を持たれる方々すべてにとって非常に有益な本が現われたととても過言ではないと思われる。

著者：運輸省港湾局内マネージメント・リサーチ・サークル (M.R.C.)

体裁：B5 判, 155 ページ, 定価 280 円 (千 30 円) 昭.35.12.8 発行。

日本港湾協会：東京都新宿区四谷 1 丁目 13 番地 Tel (351) 1620-6063  
振替東京 63105 番

(城所・記)