

東 栗 子 ト ン ネ ル 換 気 設 備
Ventilating Facilities of Higashi-Kuriko Tunnel

大 沼 清 寿* 坂 本 明**
Seiji Ōnuma Akira Sakamoto

要 旨

近年における自動車交通量の増加は、都市のみでなく全国的に拡大されてきたため、換気設備のないトンネルにおいては、機械換気の必要が各所で発生している。

国道 13 号線は改良工事が昭和 41 年 5 月に完成したが、換気設備は当分の間、交通量増加の様子をみながら数年後に設置する予定であったが、開通時の交通量が予想をはかるに上まわったため、急ぎ設置されたものである。

本トンネルは、延長 2,376 m で交通量 1,580 台/時に対し換気量は 372 m³/s となっている。両坑口送気半横流式が採用され、わが国では本方式を採用したトンネルとしては最長のものである。本稿は計画値の算出方法、設備の概要および現地試験の結果について記述したものである。

1. 緒 言

国道 13 号線(福島―秋田)のうち、最大の難関とされていた、栗子国道の全面的な改良工事が昭和 36 年より始められた。この国道にある東栗子トンネルは昭和 38 年工事に着手し、41 年 5 月に開通の運びとなったものである。換気計画はすでに完了しており、数年後の交通量増加の傾向により、換気設備を据え付ける予定となっていた。しかし開通と同時に予想以上の交通量があったため、トンネル内かなりの煤煙(ばいえん)および CO ガスが停滞し、交通に支障を起こす状態がしばしば発生した。このため換気設備の設置が早められ、42 年 8 月には据付け、試運転を完了するようになり、計画どおりの換気能力を発揮している。

本トンネルには両坑口からの送気式半横流換気が採用されている。以下換気設備の計画設計およびその内容について概要を紹介する。

2. 換気の基本計画

換気計画の基本となった換気量および風圧の決定経過について次に述べる。

2.1 設 計 諸 元

計画に使用した諸元は表 1 に示すとおりである。

2.2 換 気 量

換気量を算定するには、交通量、車種構成、機関排気量、走行速度、トンネル内こう配、路面照度などがあらかじめ決定されていなければならない。これらの条件により、トンネル内に発生する自動車排気ガス中の有害成分を許容限度まで希釈するのに必要な換気量を算出をすればよい。

ここに、ディーゼル車およびガソリン車の発生する有害成分の濃度の平均値と標準偏差をそれぞれ μ_D' , μ_G' , σ_D' , σ_G' とし、排気量(m³/km)を V_D , V_G とすれば、各車種の発生する有害成分発生量の平均値および標準偏差 μ_D , μ_G , σ_D , σ_G は

$$\begin{aligned} \mu_D &= \mu_D' \cdot V_D & \mu_G &= \mu_G' \cdot V_G \\ \sigma_D &= \sigma_D' \cdot V_D & \sigma_G &= \sigma_G' \cdot V_G \end{aligned}$$

となる。

次に両者が混合されたときの有害成分発生量および標準偏差を μ , σ とすれば(ディーゼル車とガソリン車の比率 P_D , P_G)

$$\mu = P_D \cdot \mu_D + P_G \cdot \mu_G$$

* 建設省東北地方建設局福島工事事務所
** 日立製作所川崎工場

表 1 設 計 諸 元

No.	記 号	項 目	数 値	備 考
1	L	ト ン ネ ル 延 長	2,376 m	
2		交 通 方 式	2 車線対面交通	
3	N	交 通 量	1,580 台/時	(最大時間交通量) ($\therefore 10,500$ 台/日 $\times 0.15 = 1,580$ 台/時)
4		車 種 構 成		
		トラック (ディーゼル)	19.4 %	
		バ ス (ディーゼル)	10.6 %	
		小形トラック (ガソリン)	10.2 %	
		普通乗用車 (ガソリン)	28.2 %	
		小形乗用車 (ガソリン)	22.2 %	
		軽自動車 (ガソリン)	9.4 %	
5		換 気 方 式	両坑口送気半横流式	
6	V_L	車 速	50 km/h	
7		ト ン ネ ル 内 路 面 照 度	30 lx	ナトリウム灯
8	τ	許 容 透 過 率	35 %	100 m 当たり
9	A_r	車 道 断 面 積	28.2 m ²	
10	D_r	車 道 代 表 寸 法	6.22 m	
11	A_b	ダ ク ト 断 面 積	9.60 m ²	
12	D_b	ダ ク ト 代 表 寸 法	2.44 m	
13	λ_r	車 道 壁 面 摩 擦 係 数	0.05	
14	λ_b	ダ ク ト 壁 面 摩 擦 係 数	0.02	
15	l_s	ス ロ ッ ト 間 隔	9.6 m	
16	a_s	ス ロ ッ ト 面 積	0.36 m ²	

表 2 平地における煤煙濃度

車 種	煤煙濃度 μ'	濃度偏差 σ'
ディーゼル車	0.593	0.504
ガソリン車	0.046	0.025

表 3 車 種 別 平 均 排 気 量

車 種	気 筒 容 積 cc	排 気 量 m ³ /km
ディーゼル車	ト ラ ッ ク	6,500
	バ ス	7,500
ガソリン車	大形トラック	3,500
	小形トラック	1,500
	普通乗用車	3,500
	小形乗用車	1,500
	軽自動車	360

$$\sigma^2 = P_D \{ \sigma_D^2 + (\mu_D - \mu)^2 \} + P_G \{ \sigma_G^2 + (\mu_G - \mu)^2 \}$$

トンネル延長 1 km 当たりの内空容積を A (m³)、トンネル内有害成分の許容濃度を K 、自動車の平均車頭間隔を T (s) とすれば、所要換気量 Q^* (m³/s/km) は次式で表わされる。

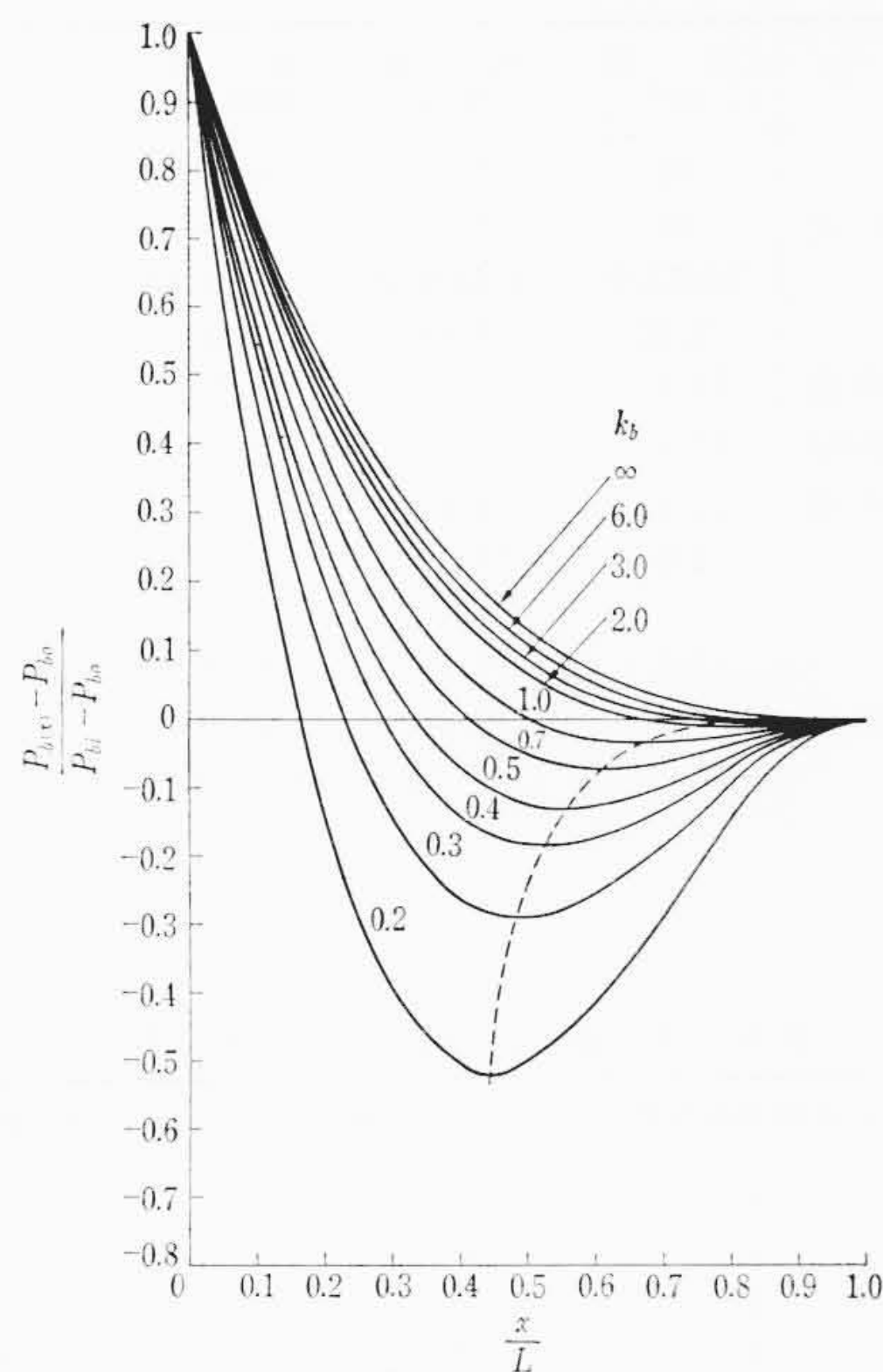


図1 送気ダクトに沿う圧力分布図

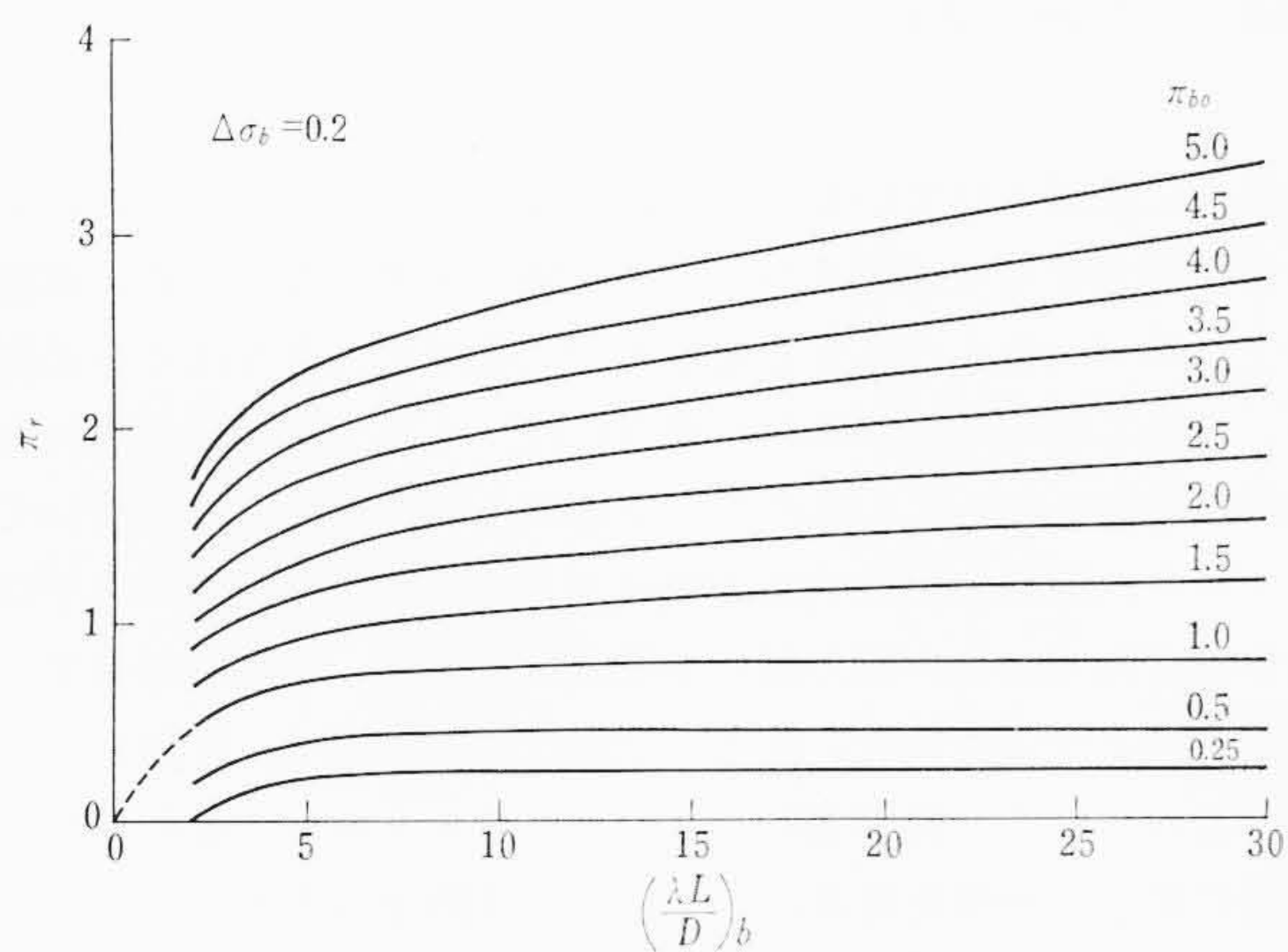


図2 送気ダクト余裕圧決定線図

$$Q^* = \left\{ \frac{3\sigma + \sqrt{9\sigma^2 + 8\mu KA}}{\sqrt{8AT \cdot K}} \right\}^2$$

以上の式に表2の煤煙濃度、および表3の車種別排気量を使用して計算した結果、 $Q^*=126.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$ となった。

ただし許容濃度 K は許容透過率 τ より次式によって求めた値である。

$$K = -1/100 \cdot \log \tau$$

さらに高度補正10%とこう配補正12.5%を追加し、トンネル全延長換気量 $Q=372 \text{ m}^3/\text{s}$ を得た。

2.3 換気風圧

各部における風圧を算出し、その合計から換気風圧を求める。

(1) ダクト始端動圧

ダクトをトンネルに対し2分割したので、ダクト当たり換気量 $Q_b=186 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。

$$\text{ダクト始端風速 } V_{bi} = Q_b / A_b = 19.38 \text{ m/s}$$

$$\text{ダクト始端動圧 } V_{bi}^2 \gamma / 2g = 22.9 \text{ mmAq}$$

(2) ダクト始端静圧 P_{bi} と末端静圧 P_{bo} との差

$$P_{bi} - P_{bo} = K_b \cdot V_{bi}^2 \gamma / 2g = 51.6 \text{ mmAq}$$

ただし

表4 各車両抵抗面積

車種	前面面積 $A_t \text{ (m}^2\text{)}$	抵抗係数 ζ_t
大形車	トラック, バス	5.5
中形車	小形トラック, 普通乗用車	3.5
小形車	小形乗用車, 軽自動車	2.3

$$K_b = \left(\frac{\lambda L}{3D} - 1 \right)_b = 2.24$$

ダクト延長の圧力分布を無次元表示すると図1のようになる。

(3) 余裕圧力差

坑口間圧力差 $|\Delta P_{M.T.W}|_{\max} = 10 \text{ mmAq}$, 最低風量 $Q_{b \min} = 186 \text{ m}^3/\text{s}$, 変動率 $\Delta \sigma_b = 0.2$ とすれば,

$$\pi_r = \frac{|\Delta P_{M.T.W}|_{\max}}{\frac{\gamma}{2g} \left(\frac{Q_{b \min}}{A_b} \right)^2} = 0.435$$

ダクトパラメータ

$$\left(\frac{\lambda L}{D} \right)_{b,eq} = \left(\frac{\lambda L}{D} \right)_b + 3 \left(\frac{A_b}{A_r} \right)^2 \left(\frac{\lambda L}{3D} + 2 \right)_r = 10.73$$

図2より $\pi_{b0} = 0.5$ を得る。

したがって、余裕圧力は

$$P_{b0} - P_{r0} = \pi_{b0} \cdot V_{bi}^2 \gamma / 2g = 11.45 \text{ mmAq}$$

となる。

(4) 車道内風圧

換気風と車両ピストン作用による、車道内圧力分布を計算する。

対面交通の交通比率を $N_+ : N_- = 3 : 2$ とする。

$$N_+ = 0.263 \text{ 台/s}, N_- = 0.176 \text{ 台/s},$$

トンネル内に吹き込まれた空気は、両坑口に分離して流れる。この分岐点を中性点とよぶ。

中性点圧力 P_r^* , 中性点より x_m の地点における圧力を $P_{r(x)}$ とすれば,

$$\begin{aligned} P_r^* - P_{r(x)} = & \left(\frac{q_b}{A_r} \right)^2 \left(1 + \frac{\lambda_r x}{6 D_r} \right) x^2 \frac{\gamma}{g} \\ & \mp \beta \left\{ \frac{1}{3} (N_+ - N_-) \left(\frac{q_b}{A_r} \right)^2 x^2 \mp N \frac{q_b}{A_r} V_t x \right. \\ & \left. + (N_+ - N_-) V_t^2 \right\} x \frac{\gamma}{g} \end{aligned}$$

ここに

$$\beta = \frac{A_t \zeta_t}{2 A_r A_t} = 2.31 \times 10^{-3}$$

$$q_b: 1 \text{ m 当たり換気量} = Q/L \text{ (m}^3/\text{s/m)}$$

$A_t \zeta_t$: 自動車前面抵抗面積 (各車種について表4の値を使用した)

(+)……逆流域, (−)……順流域

上式中の x に適当な値を代入して、 $P_r^* - P_{r(x)}$ を算出した結果をグラフにすると図3のようになる。図より両坑口間圧力差0のときにおける、車道内圧力の最高は17mmAqである。

(5) 建物および接続ダクト圧力損失

各部分ごとに吸入口よりトンネル送気口までの損失を計算し、これを表示したのが表5である。

(6) 送風機所要全圧

以上の計算項目を合計することにより送風機所要全圧 P_{tot} を次式により算出する。

$$\begin{aligned} P_{tot} = & V_{bi}^2 \gamma / 2g + (P_{bi} - P_{b0}) + (P_{b0} - P_{r0}) \\ & + 1/2 \cdot |\Delta P_{M.T.W}| + \text{車道風圧} + \text{建屋風圧} = 122.72 \text{ mmAq} \end{aligned}$$

10%の余裕をみて135mmAqと決定する。

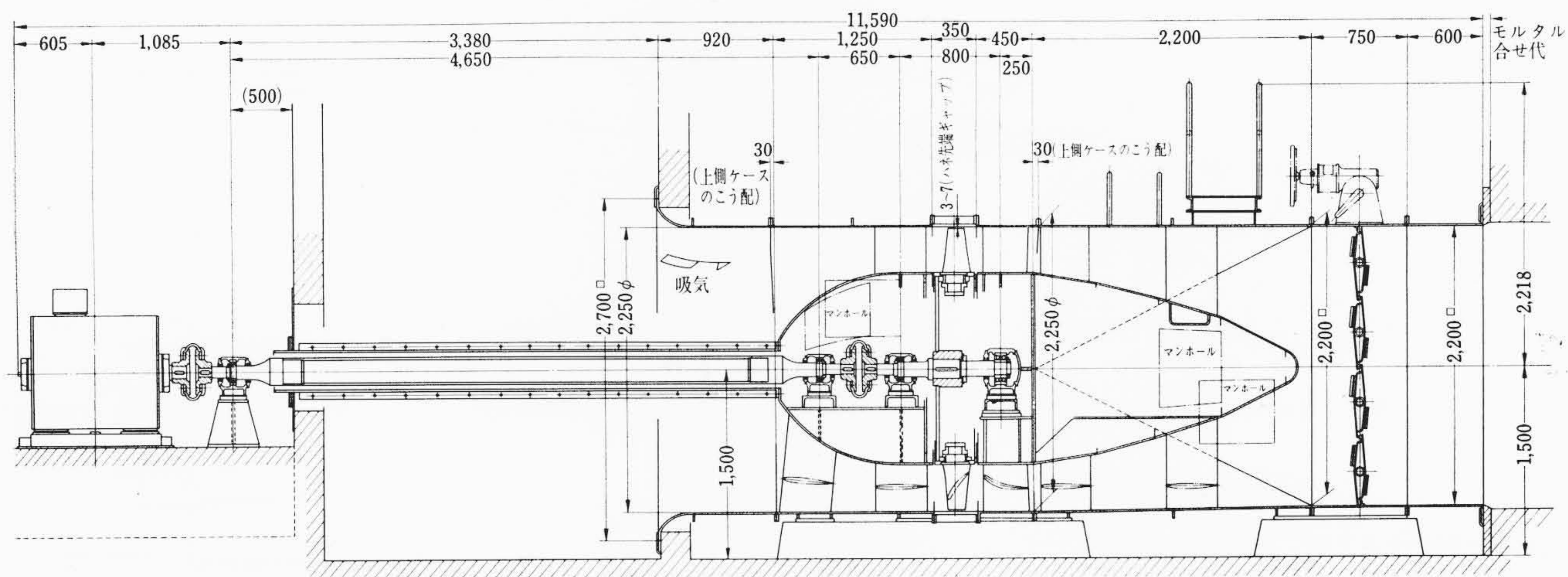


図 6 送 風 機 断 面 図

となっている。火災時には送風機を逆転して、排気式半横流換気に切り換え、トンネル内の煙や炎の拡大を防止するよう計画されている。

これらのノッチ選定はトンネル内交通量による煤煙の変動を透過率計により測定しながら、指令を受けるものである。

4. 送風機と付属設備

4.1 送風機の仕様

送風機の仕様は前述の所要換気量 $372 \text{ m}^3/\text{s}$ 、所要圧力 135 mmAq から決定され、6台の送風機によって処理されている。

今回は交通量と見合わせて4台を据え付けており、交通量の増加したとき2台を追加して6台とする計画となっている。

送風機仕様は次のとおりである。

形 式	横 軸，外装電動機駆動，1段軸流送風機
口 径	2,250 mm
風 量	$62 \text{ m}^3/\text{s}$
全 風 圧	135 mmAq (20°C ， 760 mmHg において)
温 度	$-15 \sim +30^\circ\text{C}$ (ただし火災時 100°C)
回 転 数	725/575 rpm

電動機仕様

形 式	開放防滴二重かご形，三相誘導電動機
出 力	120/65 kW
電 圧	415 V
周 波 数	50 Hz
極 数	8/10 P
定 格	連続
起 動 方 式	起動補償器法
逆 転 運 転	逆相式運転
絶 縁	A種

4.2 送風機の構造

送風機は1段軸流送風機で、羽根車と主軸は中間軸を介して電動機に連結し、それぞれの軸間にはラブリックスカップリングを使用し、軸間の心狂い、基礎の変形に対しても支障のない構造をもっている。

(1) 羽 根 車

羽根車の羽根は耐食性の高いアルミニウム合金鋳物(AC7A-F)製で、鋼板製溶接構造のボスに取り付けられている。羽根は1枚ごとに $\pm 10^\circ$ (1度おき)の角度変更ができるようになっている。

羽根の表面はポリウレタン系焼付塗装され排気ガスによる腐食

から十分保護されている。

(2) ケ ー シ ン グ

ケーシングは2,250mmの円筒形鋼板製溶接構造で、外筒、内筒、静翼およびステーなどより構成されている。運転、組立、内部点検に便利のように上下に分割されており、さらに軸方向に対しても数個に分割されている。これらはいずれも容量3tのクレーンで処理されるように設計されている。

内筒を空気の流入損失の少ない形状とし、流出側の尾筒も徐々に風速を落とし、効率よく動圧を回収できるようにしている。また軸受、カップリングの点検が簡単にできるように、マンホールが適宜設けられている。

(3) 主 軸，中間軸

主軸は炭素鋼製、中間軸は炭素鋼および圧力配管用鋼管の溶接構造である。いずれも十分な熱処理により内部応力を除去しており、運転中に曲がりを生じないものである。第一次危険回転数は常用回転数より高くとられており、安定した連続運転ができるようになっている。

(4) 軸 受

コロガリ軸受を使用し、グリース潤滑を採用している。主軸のスラスト側はアンギュラーコンタクト玉軸受、その他はすべて球面コロ軸受が使用されている。いずれも形式・寸法はグリース潤滑限界速度以下の十分安全なものとなっている。

(5) 保 安 装 置

送風機運転中保護のため各軸受には温度計をそう入し、電動機室の計器盤にて温度を測定すると同時に、異常温度上昇に際しては故障表示を行ない、かつ送風機を自動停止するようにしてある。

(6) ダ ン パ

ダンパは送風機吐出側に取り付けられ、送風機の運転中は全開となり、送風機停止時は全閉となる。かくして1~2台運転時に停止している送風機へのバイパスを防ぐものである。

送風機の運転、停止と連動してダンパは開閉するので、開閉時に過負荷トルクがかかると電動機を停止させる保護装置を持っている。

(7) そ の ほ か

吸込筒の上部90度曲がりにコーナープーンを取り付けて曲がり損失の減少を図った。またトンネル天井板(シボレックス)よりの吹出口にスロット調整板(ステンレス製)を取り付けて、等流量分布となるようにしてある。

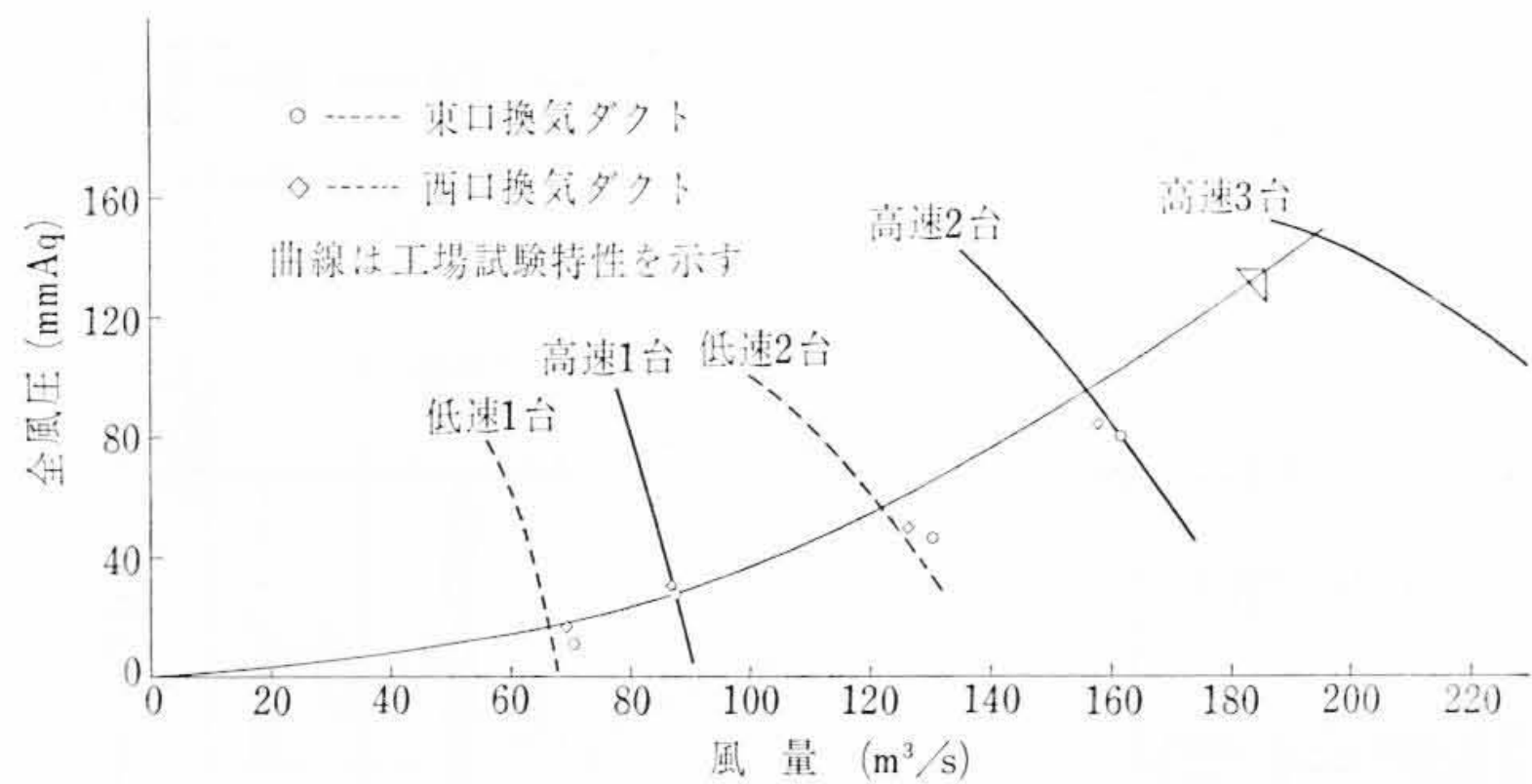


図7 現地における送風機作動点

5. 現地試験

送風機の据付け完了後、送風機運転検査およびスロット開度調整を行なった。このうちおもな結果について述べる。

5.1 送風機作動点

スロット開度調整後、交通量のある状態で測定した送風機作動点を図7に示す。計画風圧に対して低くなっている理由として、(a)交通量が少ないので車道内圧力が低い、(b)自然風圧10 mmAqにて計画したが、測定時にはこれが小さかったことなどによるものと考えられる。しかし本測定により計画時の換気は十分に行なわれることがわかった。

5.2 トンネル内圧力

トンネル車道およびダクト内静圧の測定結果を図8に示す。点線は計算値でトンネル内交通量0の場合である。実線の実測値はトンネル内に多少の交通量がある場合に計測したため車道内静圧はピストン作用が加えられるので大きく計測されている。またダクト内静圧が大きくなったのは計算時の換気量 $156 \text{ m}^3/\text{s}$ に対し、実測時は $162 \text{ m}^3/\text{s}$ であったためと、ダクトの壁面摩擦係数を逆算すると0.026程度となり計算に使用された0.02よりやや大きくなっていることによるものと考えられる。

トンネル内に交通量があったため本測定の変動が大きく影響され、測定条件は悪かった。しかし余裕圧力差を加圧したダクトとしたので、スロット開度調整には一応支障なく測定されたものとする。

5.3 火災実験

夜間に交通を止めて、火災実験を行なった。これはトンネル内にてアルコールを燃焼させ、温度上昇、風速、風向と発煙筒による煙の拡散状態を調査したものである。火災時には送風機を逆転させて、トンネル内に煙の拡大するのを防止するようになっているが、火災発生場所が坑口側のときはよいが、トンネル延長の中央近くるときには煙の天井ダクトに吸い取られる動きが遅く、そのため煙の

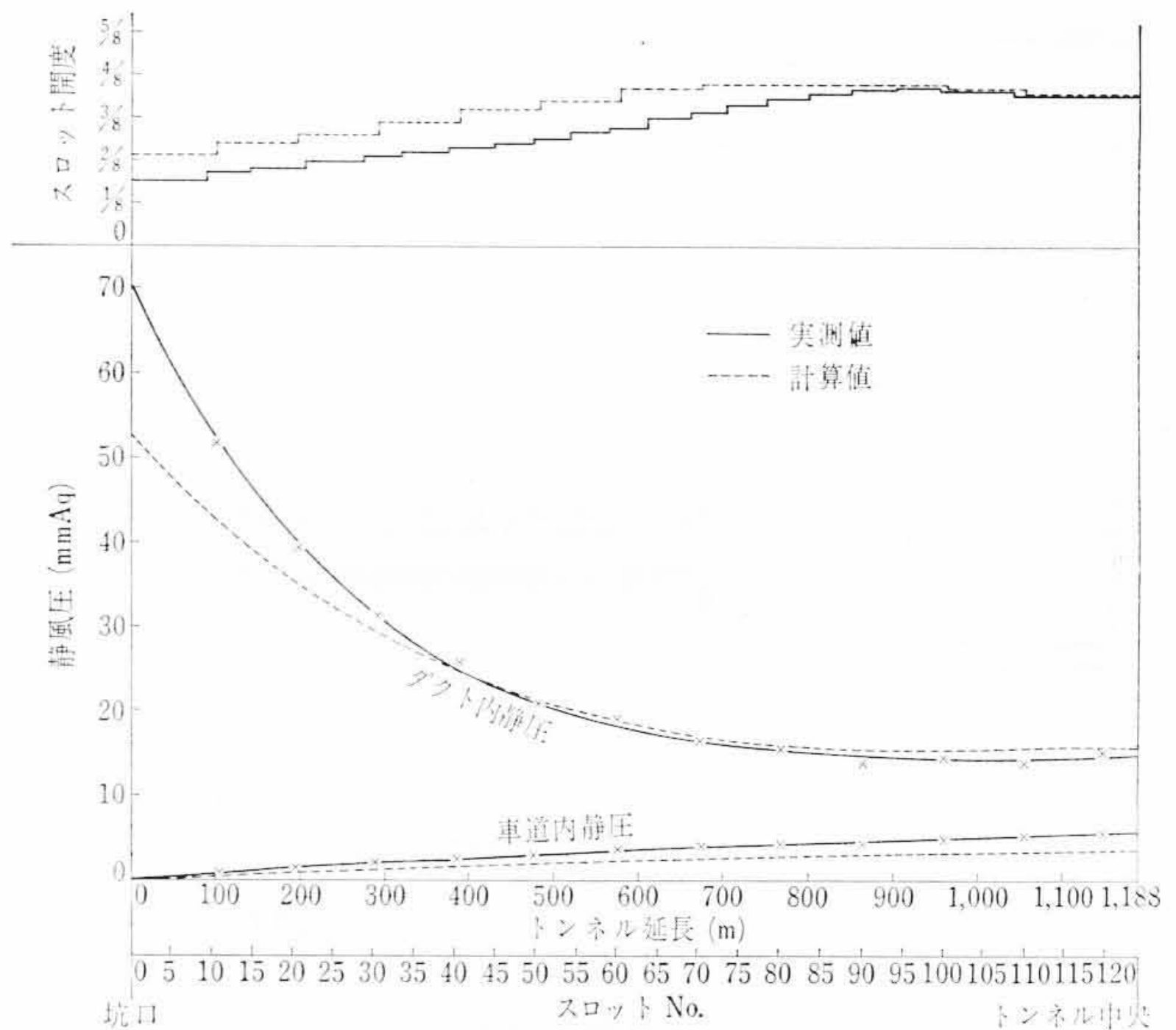


図8 トンネル内静圧分布図

拡大が激しかった。このような場合には、火災発生区間を排気に、他の区間は送気のままとしたほうが、排煙作用がよくなった。これらは実験の積み重ねによりさらに定量的なものを測定する必要があると考える。

6. 結 言

激増する交通量に対して全国各地に道路建設の計画がすすめられており、機械換気を必要とするトンネルが増加している。従来長大トンネルには横流式が採用されるのが常識となっていたが、東栗子トンネル程度の長さでは半横流式でも十分であることが立証された。さらに半横流式換気の限界長さは延長されていくと考えられるが、トンネル内火災に対する安全性は従来いわれているように横流式、半横流式の順に高いことには変わりがないので、長大トンネルにおける半横流式の採用については十分な検討が必要であると考えられる。

終わりに本換気設備の完成に終始ご指導をいただいた建設省東北地方建設局、および福島工事事務所の関係各位に深く感謝するとともに、本稿がトンネル換気の計画の一助となれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 日本道路公団：トンネル換気設計便覧
- (2) 伊吹山四郎：道路トンネルの換気