

373  
土 研 資 料 第 1202 号  
マイクロフィルム第 号

## 土木研究所資料

### 立坑送排縦流換気に関する研究報告

昭和52年 2 月

建設省土木研究所  
道路部トンネル研究室

## ま え が き

換気は道路トンネルの計画、設計および運営の各段階において極めて重要な位置を占めるものである。最近道路トンネルの長大化に伴って換気設備の規模が大きくなり、建設費および維持管理費に多額の費用を要するようになってきている。このための換気の経済化は長大トンネルの建設においてさらに重要な問題となっている。

最近、一方通行のトンネルの換気方式として縦流換気が見直されているが、車道を通気ダクトとするため一方通行トンネルでは自動車のピストン作用を換気の動力の一部として有効に利用できる。他の換気方式に比べて経済的となるという理由による。長大トンネルに縦流換気を適用する場合には、トンネルを適当な換気区間に分割してその接点に立坑を設け、この立坑から汚れた空気を排出すると同時に新鮮な空気を供給する、いわゆる立坑送排縦流換気のシステムが構成される。

立坑送排縦流換気が成立するためには、立坑底における給排気口間の流れを換気効果上有害な短絡または通り抜けが生じないようにすることが必要である。本書は、この立坑底の送排気口間の流れに関して、実験的および理論的に検討を行なった結果、ならびに、これに基づいて立坑送排縦流換気方式の適用性について試算により検討した結果を報告するものである。

道路部トンネル研究室

室 長 今 田 徹

主任研究員 水 谷 敏 則

堀 内 浩三郎

## 目 次

### ま え が き

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1. 概 要 .....                   | 1  |
| 2. 立坑送排縦流換気 .....              | 2  |
| 3. 給排気点における空気の流れ .....         | 2  |
| 4. 立坑送排縦流換気の試算例 .....          | 15 |
| 5. 立坑送排縦流換気の適用範囲 .....         | 22 |
| 6. 給気ノズルからの吹き出しが交通に与える影響 ..... | 23 |
| 7. 立坑が2ヶ所以上の場合の立坑送排縦流換気 .....  | 25 |
| 8. ま と め .....                 | 26 |

## 1. 概 要

わが国の道路トンネルで本格的な換気設備の設けられた近代的道路トンネルが完成したのは関門国道トンネルが完成した昭和33年である。以来、20年たらずの間に道路整備の進展に伴って換気設備を有する数多くのトンネルが建設され、その数、規模ともに増大する傾向にある。最近完成した恵那山トンネル( $L=8.6\text{ km}$ )は今までに蓄積されたトンネル技術の精華と見ることができる。現在では恵那山トンネルよりも2 km 以上も長い関越トンネル( $L=10.9\text{ km}$ )が着工されようとしている。また、10年前までは超長大道路トンネルと考えられていた3 km 以上のトンネルが普通の計画として数多く計画されるようになってきている。道路トンネルにおいて長大化をする上で最大の障害は換気の問題である。換気の所要動力は換気区間長の約4乗に比例して増大する。トンネルが長大化すれば、一般的に換気区間長は増大し換気に要するコストは著しく大きくなり、技術的な困難性も増大していく。恵那山トンネルの換気の設備動力は12,000 kw にも達し、関越トンネルでは恵那山と同様の換気方式とすると20,000 kw に達するとの試算がある。このように長大トンネルにおいては設備動力が著しく増大し、長大トンネルの建設にあたっては換気動力の節減が重要な課題となる。特に石油ショック以後のエネルギーコストの増大と省資源に対する要請は、これを一層重要なものとしている。

換気動力を節減するための手段としては、換気系の風速をできるだけ低くすること、自動車のピストン作用による換気作用を有効に利用することなどがある。縦流式換気方式では、車道を風路として使用することから必然的に風速は低くなり、また、一方通行の場合には自動車のピストン作用による交通換気力を有効に利用することができる。従って、縦流換気方式は換気動力を節減するうえで最も適した換気方式であるといえることができる。しかし、縦流換気は車道内風速に限界があることなどから適用できる長さに限界があり長大トンネルにおいては用いることができなかった。

立坑送排縦流換気は長大なトンネルにも縦流換気方式を適用できるようにした換気方式であり、以下にその概要を述べる。

## 2. 立坑送排縦流換気

立坑送排縦流換気はトンネルの中間部に1ヶ所以上の空気の給排気点を設けて、トンネルを縦流換気の可能な適当な長さの換気区間に分割して、給排気点において汚染された空気と新鮮な空気とを入れ換える換気方式である。図-1にその概念図を示す。通常、給排気点には立坑が設けられるため立坑という字が付いているが、斜坑あるいは横坑であってもかまわない。

この換気方式は一方通行のトンネルに適用されるのが一般的であり、車道内の風向と交通の方向とは一致する。

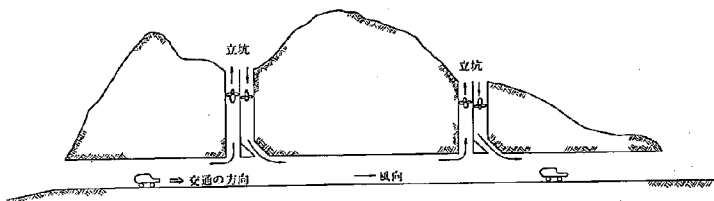


図-1 立坑送排縦流換気概念図

この換気方式で最も問題となる点は、給排気点で車道に供給された新鮮な空気が逆流して同地点の排気口から吸い出されること、すなわち給排気口間に短絡流れが生じ、供給した新鮮空気が有効に使われないことである。これを防ぐためには、新鮮空気をトンネルの長さ方向に高速で吹き出し、これによって生ずる圧力上昇を利用するのが一般的である。また、本質的には、給排気点前後のトンネルの圧力が問題であるので、給排気点の前後に接続するトンネルの抵抗を減少させるようブースタファン等による圧力の調整が行なわれることもある。

## 3. 給排気点における空気の流れ

給気に噴流機構を用いた場合、給気によって生ずる圧力上昇は式-(4.1)により求めることができる。

$$\Delta P_b = P_2 - P_{1b} = \rho v_b^2 \left( \frac{A_b}{A_r} \right) \left\{ k_b \cos \theta_b - \left( \frac{A_b}{A_r} \right) - 2 \left( \frac{v_1}{v_b} \right) \right\} \dots\dots\dots (4.1)$$

$\Delta P_b$  : 給気による車道の圧力上昇

$P_2$  : 給気ノズル直後の車道の静圧

$P_{1b}$  : 給気ノズル直前の車道の静圧

- $A_b$  : 給気ノズルの断面積 (流れに直角な方向の断面)  
 $A_r$  : 車道の断面積  
 $v_1$  : 給排気口間の車道の風速  
 $v_b$  : 給気ノズルの吹き出し風速  
 $k_b$  : 給気の運動量係数  
 $\theta_b$  : 給気の吹き出し角度

式-(4.1)は図-2の中に(a)で示される検査面に運動量の式を適用して求めたものであり、 $k_b$ は吹き込まれた運動量が圧力上昇に有効に使われた程度を示す係数である。実験により求められた $k_b$ の値は図-3~図-5に示すとおりであり、ノズルの形により異なるが $k_b=0.8\sim 1.2$ 程度の値を取る。1以上の値をとるのは、ノズル付近の車道断面積が変化する場合にも近似的に式-(4.1)を適用したことや、ノズル内の風速分布を無視したことによるものであると解釈できる。

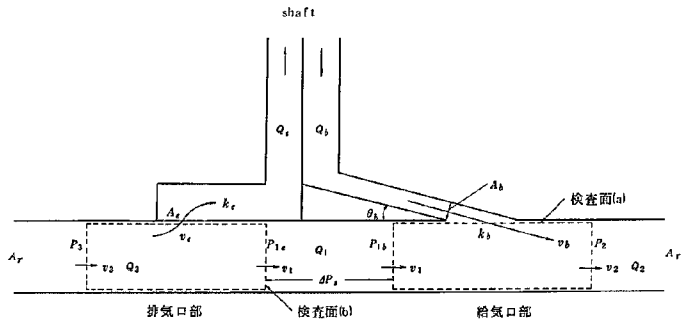


図-2 給排気口部詳細

排気によって生ずる車道の圧力変化 $\Delta P_e$ は、給気の場合と同様に図-2の中の(b)で示される検査面に運動量の式を適用して、式-(4.2)から求めることができる。

$$\Delta P_e = P_{1e} - P_3 = -\rho v_e^2 \left( \frac{A_e}{A_r} \right) \left\{ k_e - \left( \frac{A_e}{A_r} \right) - 2 \left( \frac{v_1}{v_e} \right) \right\} \quad \cdots \cdots (4.2)$$

$\Delta P_e$  : 排気による車道の圧力変化

$P_{1e}$  : 排気口直後の車道の静圧

$P_3$  : 排気口直前の車道の静圧

$v_e$  : 排気口の風速 (排気量を $A_e$ で割った値)

$A_e$  : 排気口の断面積

$k_e$  : 排気の運動量係数

$k_e$ は排気によって持ち出される運動量を示す係数であるが、排気口の平均風速 $v_e$ に対する係数

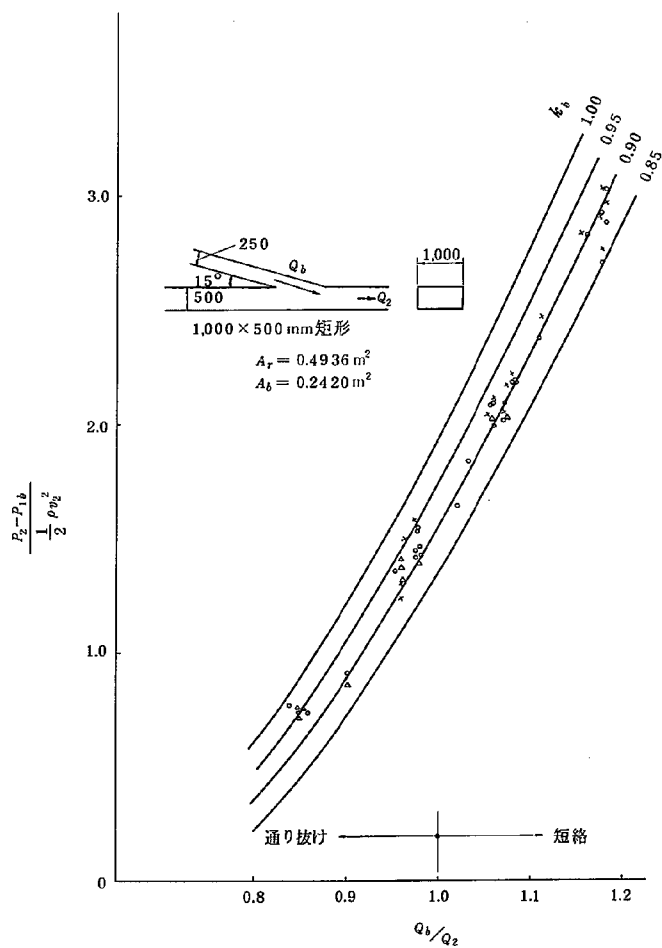


図 - 3  $k_b$  (斜め吹き込み, 矩形断面)

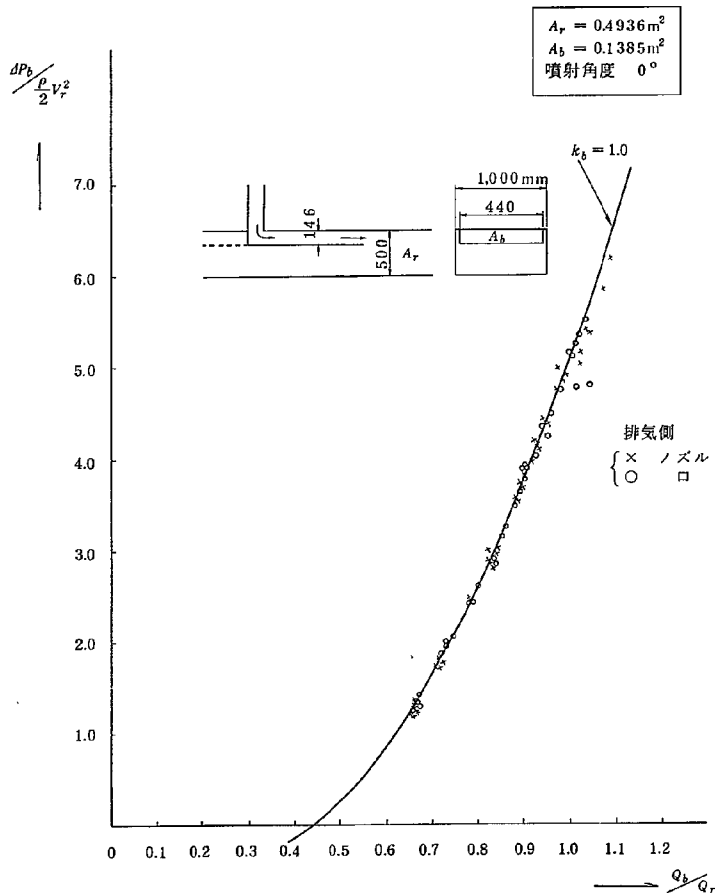


図-4  $k_b$  (ダクト吹き込み, 矩形断面)

図-5  $k_b$  (斜め吹き込み, 矩形断面)

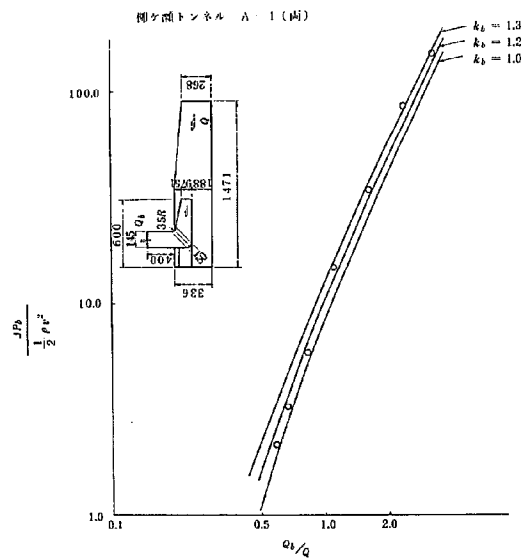


図-5-(a)

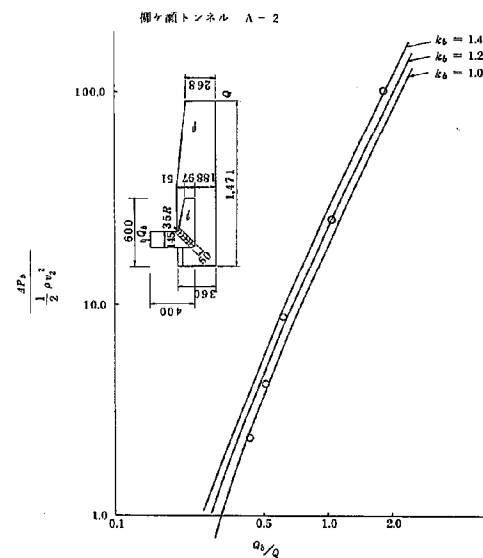


図-5-(b)

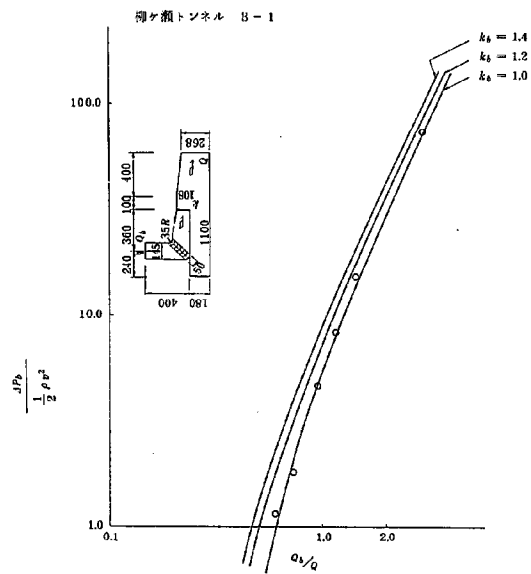


図 - 5 - (c)

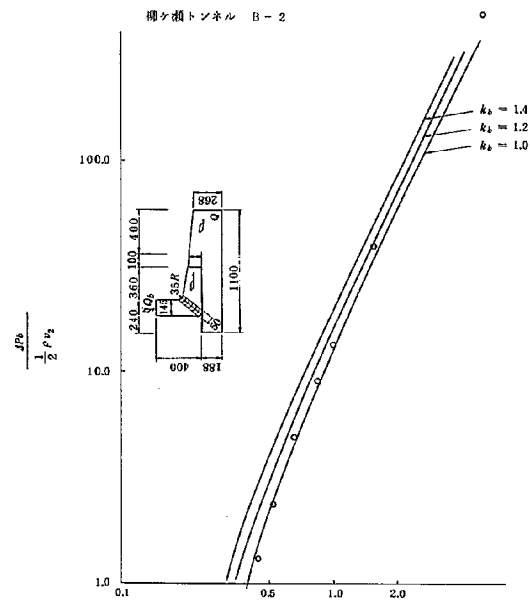


図 - 5 - (d)

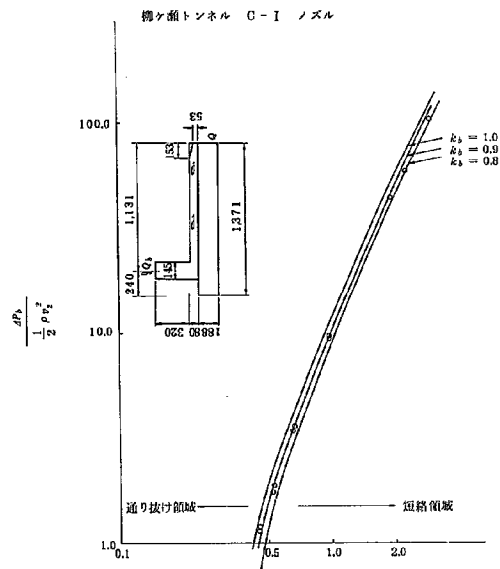


図-5-(e)

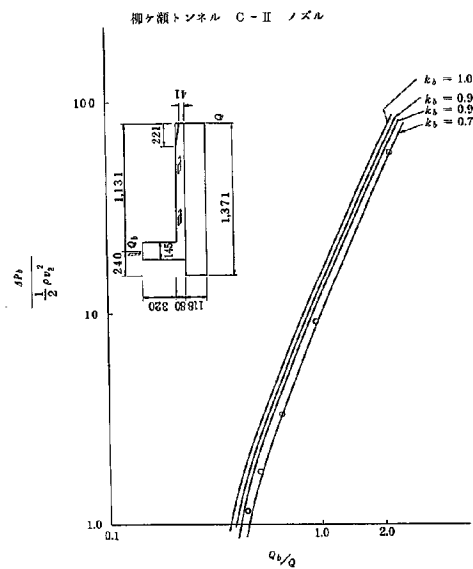


図-5-(f)

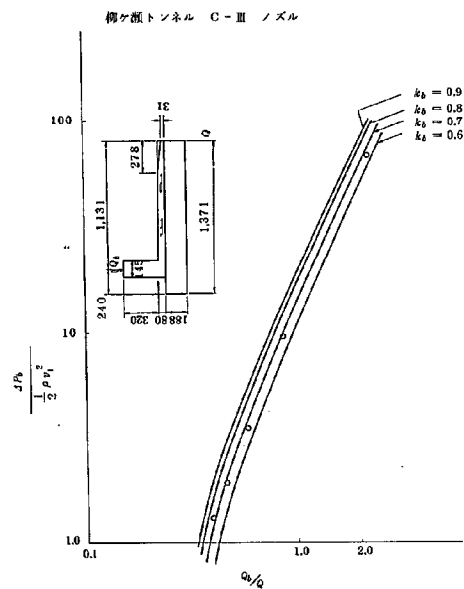


図 - 5 - (g)

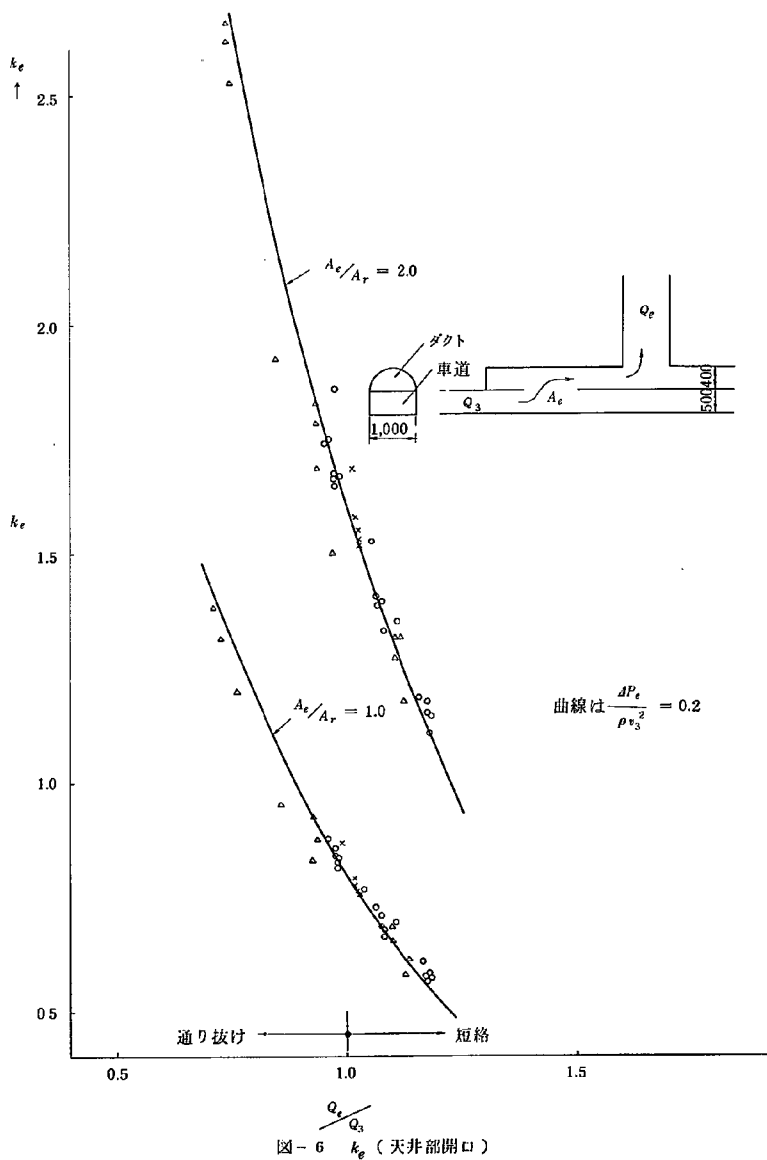


図-6  $k_e$  (天井部開口)

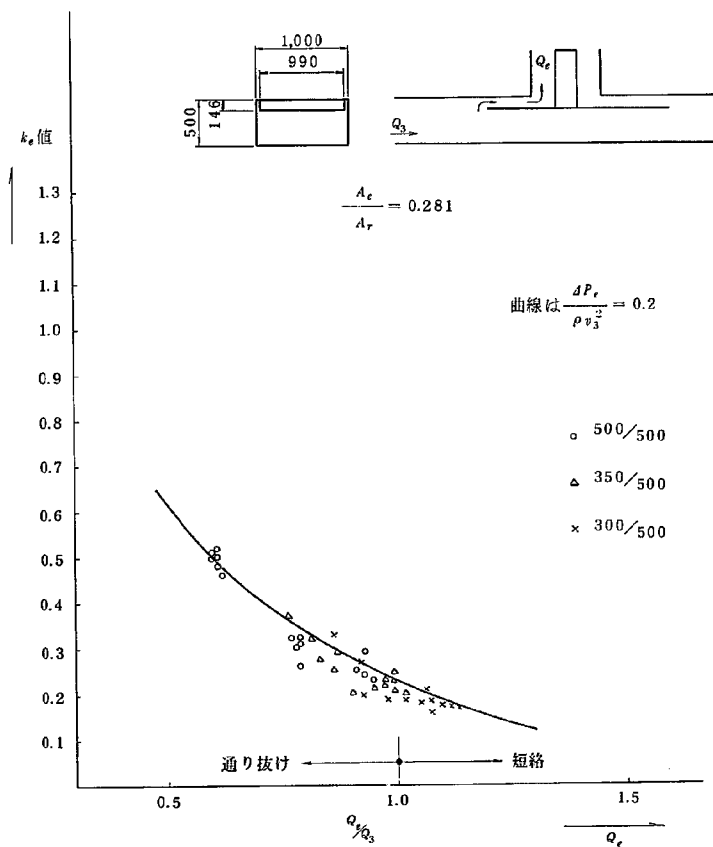


図-7  $k_e$  (天井ダクト吸い込み)

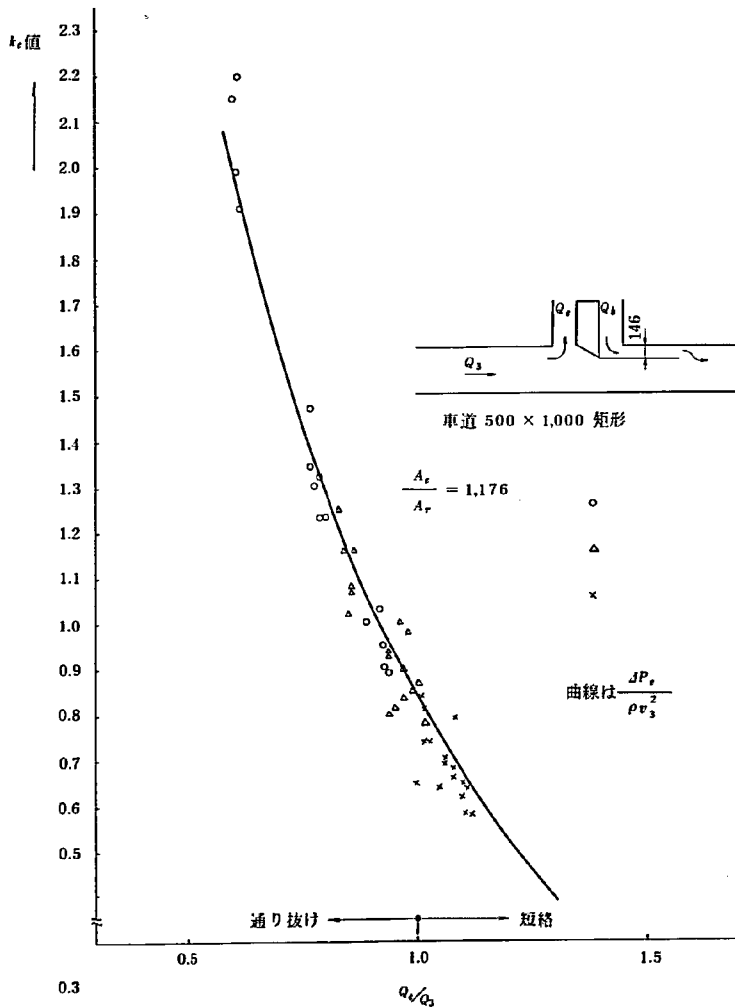


図-8  $k_e$  (天井吸い込み)

となっているので、流出角度、実際の流出速度等をすべて包含する係数となっている。 $k_e$ の値は図-6~8に示すものが得られている。図中の曲線は $\Delta P_e$ が排気口直前の車道風速の動圧の40%であるとして式-(4.3)から求めたものであり、立坑送排縦流換気で問題となる流量比の範囲では式-(4.3)により $k_e$ を求めることができる。

$$k_e = \frac{A_e}{A_r} \left\{ 2.0 \left( \frac{Q_3}{Q_e} \right) - 0.2 \left( \frac{Q_3}{Q_e} \right)^2 - 1.0 \right\} \quad \text{..... (4.3)}$$

$Q_3$  : 排気口直前の車道風量

$Q_e$  : 排気風量

いま、給排気口間の車道の圧力差として $\Delta P_e$ を導入して $P_{1b}$ と $P_{1e}$ との関係が

$$P_{1e} = P_{1b} + \Delta P_e \quad \text{..... (4.4)}$$

で表わされるものとする、給排気口前後の圧力差は式-(4.1)および式-(4.2)から式-(4.4)を用いて $P_{1e}$ 、 $P_{1b}$ を消去して次式のように求めることができる。

$$P_2 - P_3 = \rho v_b^2 \left( \frac{A_b}{A_r} \right) \left\{ k_3 \cos \theta_b - \left( \frac{A_b}{A_r} \right) - 2 \left( \frac{v_1}{v_b} \right) \right\} - \rho v_e^2 \left( \frac{A_e}{A_r} \right) \left\{ k_e - \left( \frac{A_e}{A_r} \right) - 2 \left( \frac{v_1}{v_e} \right) \right\} - \Delta P_e \quad \text{..... (4.5)}$$

ここで、 $P_2$ および $P_3$ はそれぞれ排気口直前の車道の静圧および給気口直後の車道の静圧であるが、 $P_2$ 、 $P_3$ は車道の抵抗および交通の状態から求めることができる。給排気点が1ヶ所の場合は、 $P_2$ 、 $P_3$ は次のようになる。

$$P_2 = \lambda_r \frac{L_o}{D_r} \cdot \frac{1}{2} \rho v_2^2 - T_d \cdot L_o \cdot R_c \cdot \frac{1}{2} \rho (V - v_2)^2 \quad \text{..... (4.6)}$$

$$P_3 = - \left( 1.0 + \zeta_e + \lambda_r \frac{L_i}{D_r} \right) \cdot \frac{1}{2} \rho v_3^2 + T_d \cdot L_i \cdot R_c \cdot \frac{1}{2} \rho (V - v_3)^2 \quad \text{..... (4.7)}$$

$\lambda_r$  : 車道の摩擦損失係数

$D_r$  : 車道の代表寸法

$L_o$  : 出口側のトンネルの長さ

$L_i$  : 入口側のトンネルの長さ

$v_2$  : 出口側の車道の風速

$v_3$  : 入口側の車道の風速

$T_d$  : トンネル単位長さあたりの自動車の台数

$R_c$  : 自動車の平均抵抗係数

$V$  : 自動車の走行速度

$v_2$ 、 $v_3$ は $v_b$ および $v_e$ が与えられれば連続の関係から

$$v_2 = \left( \frac{A_b}{A_r} \right) v_b + v_1 \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

$$v_3 = \left( \frac{A_e}{A_r} \right) v_e + v_1 \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

となり、また、 $\Delta P_s$  は給排気口間の風路抵抗のみの場合は

$$\Delta P_s = \lambda_r \frac{L_s}{D_r} \cdot \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

$L_s$  : 給排気口間の車道の長さ

で表わすことができるから、結局、式-(4.5)は  $v_1$  を未知数とする2次方程式となり、給排気量および交通条件が与えられれば、給排気口間の短絡あるいは通り抜け風速  $v_1$  を求めることができる。

#### 4. 立坑送排縦流換気の試算例

立坑送排縦流換気の具体的な例として次の条件を仮定し、基本的な性質を調べることにする。

設計条件：

トンネルの長さ： 4,000 m

立坑の位置： トンネルの中央

所要換気量：  $0.12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}/\text{台}$  (ディーゼル車混入率 30 % の時の平均換気量)

自動車の前面投影面積： トラック 5.37  $\text{m}^2$

乗用車 2.13  $\text{m}^2$

自動車の抵抗係数： トラック 1.0

乗用車 0.5

給気ノズル最大風速： 30  $\text{m}/\text{s}$

トンネルの断面積： 50  $\text{m}^2$  (図-9)

排気口の大きさ： 100  $\text{m}^2$

設計交通量： 2,000 台/時

車道の摩擦損失係数： 0.025

まず、給気ノズルの断面積を決める必要がある。給気ノズルの大きさは、短絡を生じない範囲でできるだけ低い吹き出し風速とすることが必要であるが、とりあえず吹き出し風速を 30  $\text{m}/\text{s}$  として所要断面積を求めると

$$A_b = \frac{0.12 (\text{m}^3/\text{s}/\text{km}/\text{台}) \times 2 (\text{km}) \times 2,000 (\text{台})}{30 (\text{m}/\text{s})} = 16.0 (\text{m}^2)$$

となる。図-9の車道断面内に 16  $\text{m}^2$  の断面積を取ることは建築限界を侵すことになるのでノズル部においてトンネルの断面を拡大するか、あるいは、適当な間隔をおいて2ヶ所にノズルを設ける必要がある。ここでは、断面を拡大することにし、トンネルの軸と平行な方向に吹き出すものとする。吹き出し風速を小さくしても短絡が生じないような条件であれば、斜めの方から吹き込むことも考えられるがこの場合は適当でない。

図-10は各交通量に対して必要となる換気量を立坑から給排気したときの車道風速(左右のトンネルの風速は等しい)の状況を示したものである。図によると交通量が 1,280 台/時より多くな

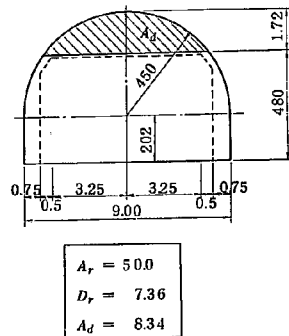


図-9 仮定断面積 (50  $\text{m}^2$ )

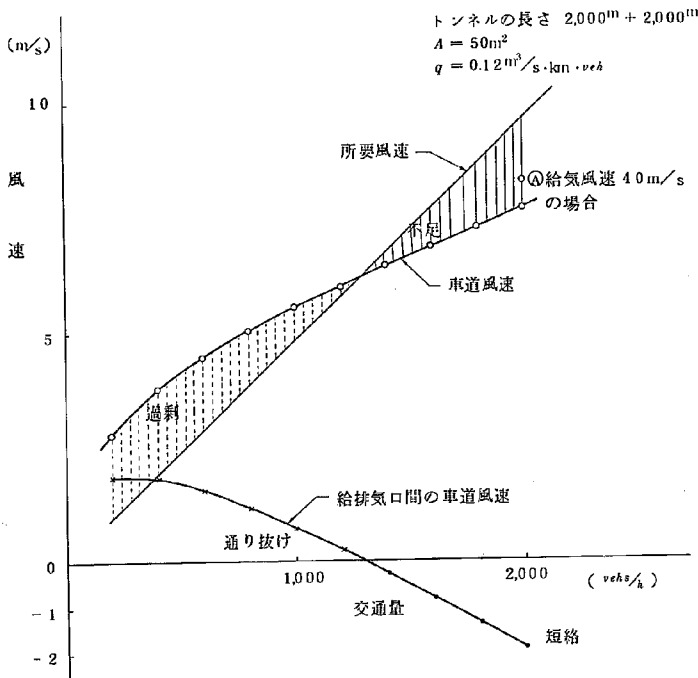


図-10 車道風速および給排気口間車道風速

ると短絡が生じ必要な換気ができなくなる。これを防ぐためには、

- (1) 吹き出し風速を上げて給気ノズルの昇圧力を大きくする
- (2) 前後のトンネル部にジェットファンを設けて給排気口前後の車道圧力を低くする
- (3) トンネル断面を大きくし風速を低くして給排気口前後の圧力を低くする方法

が考えられる。しかし、(1)の方法では給気風速を  $30\text{m/s}$  以上に上げるということであり、自動車に与える影響を考慮すれば望ましい方法ではない。また、たとえ風速を  $40\text{m/s}$  に上げたとしても、 $2,000$  台/時の車道風速  $7.63\text{m/s}$  が  $8.24\text{m/s}$  (図-10 ④点) に上がるだけで短絡を防止するには至らない。(2)の方法で短絡を防止するために必要な昇圧力は  $47.5\text{mmAq}$  であり、この昇圧力を得るためには大型ジェットファン(吐出口径  $1,080\text{mm}$ )でも約  $38$  台を用いる必要がある。これに要する電力は約  $1,100\text{kW}$  となる。また、(3)の方法で必要とするトンネルの断面積は図-11に示すように約  $67\text{m}^2$  で  $17\text{m}^2$  のトンネル断面積の増大が必要となる。(2)の方式をとるべきか(3)の方式を

とすべきかは、経済性、維持管理の容易さ、使いやすさなどを考慮して総合的に判断すべきものである。

ここでは⑧の方式を採用することとし、その具体的な断面として図-12を仮定して、各種のパラメータが立坑送排換気に与える影響を検討する。図-12の断面では給風の最大風速を $3.0\text{ m/s}$ とした場合必要となるノズル断面積 $16\text{ m}^2$ は建築限界外のアーチ部で確保することができ、ノズル設置のための断面の拡大は必要としない。

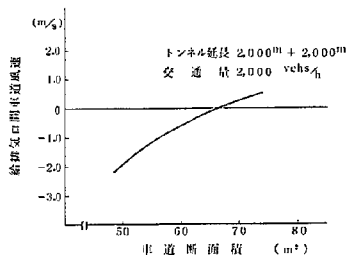


図-11 車道断面積と給排気口間風速の関係

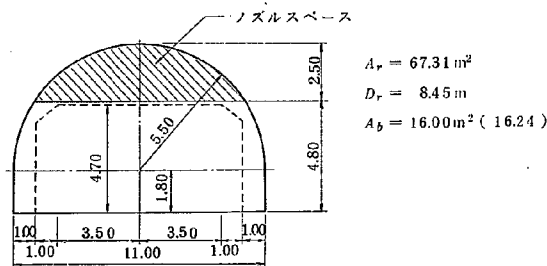


図-12 仮定断面積 ( $67\text{ m}^2$ )

図-13は交通量と車道風速との関係を示している。立坑送排の場合は、各交通量にみあった換気量を給排気しているものとして計算している。交通量が $2,050$ 台/時以下では、車道風速は所要風速よりも大きく十分設計条件を満たしている。交通量が小さい間は相当の通り抜け状態となることがわかる。通り抜け風は短絡風の場合とは異なり、給排気点で濃度が $0$ に回復しないということだけで、換気上なんら支障を与えるものではない。また、図中点線で示した曲線はトンネル全長を1換気区間としたときのもので $\Delta P$ は坑口間の自然換気圧を示している。トンネル全長を1換気区間としても $\Delta P = 0$ の場合交通量が $550$ 台/時程度までは換気可能であることがわかる。しかし、 $\Delta P = -5\text{ mmHg}$  (トンネル内自然風換算で $2.4\text{ m/s}$ ) の場合は対応できる交通量が $350$ 台/時まで低下し、さらに $\Delta P$ が大きくなるとトンネル全長を1換気区間として換気することはできなくなることがわかる。

図-14はトンネル内の静圧分布の例で交通量 $2,000$ 台/時のときの値を示している。交通量が $2,000$ 台/時の場合でも車道の静圧は非常に低い範囲にあることがわかる。実際には自動車による

局部的な圧力変動が図に示された線に加わり、図の線を中心に相当大きく変動するであろうことが予想される。

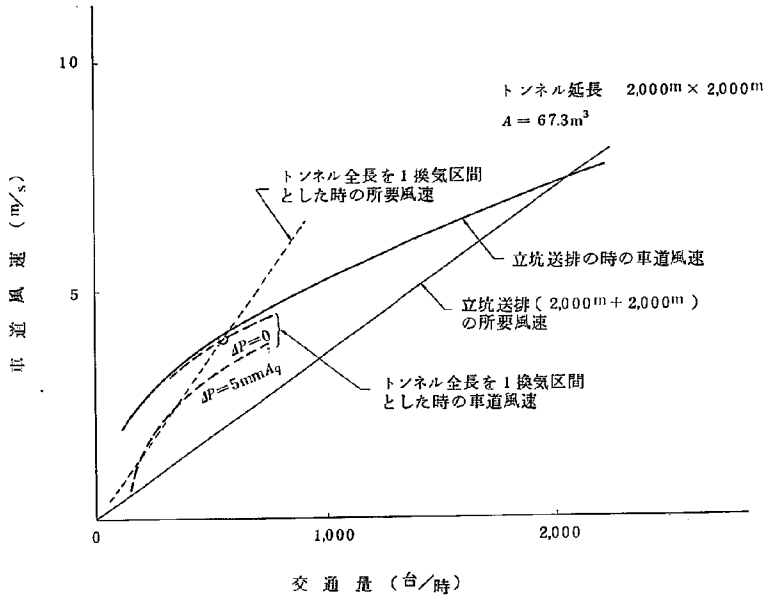


図-13 交通量と車道風速との関係

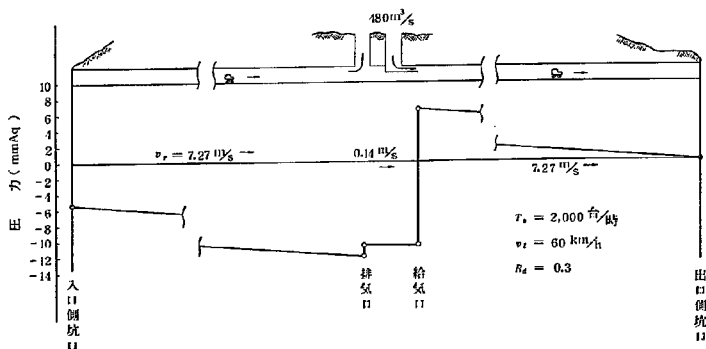


図-14 トンネルの圧力分布の例

図-15は坑口間圧力差の影響を示した図である。交通量400, 1,000, 2,000台/時における車道風速を坑口間圧力差との関係で示している。交通量が少ない400台/時の場合は坑口間圧力差の影響を比較的受けやすいが、この場合は通り抜け傾向が強いので坑口間圧力差が12.5mmA<sub>q</sub>(自然風速 4m/s 程度)まで支障なく換気を行なうことができる。交通量が多くなると坑口間圧力差の影響は小さくなり、交通量が2,000台/時の場合自然風速 3m/s 相当の坑口間圧力差が作用したときの車道風速の減少の程度は5%程度にすぎない。この程度の風速の減少は實際上ほとんど問題にならないと考えて良いであろう。このように、立坑送排縦流換気は坑口間圧力差の影響に対し十分な安定性を持っていることがわかる。

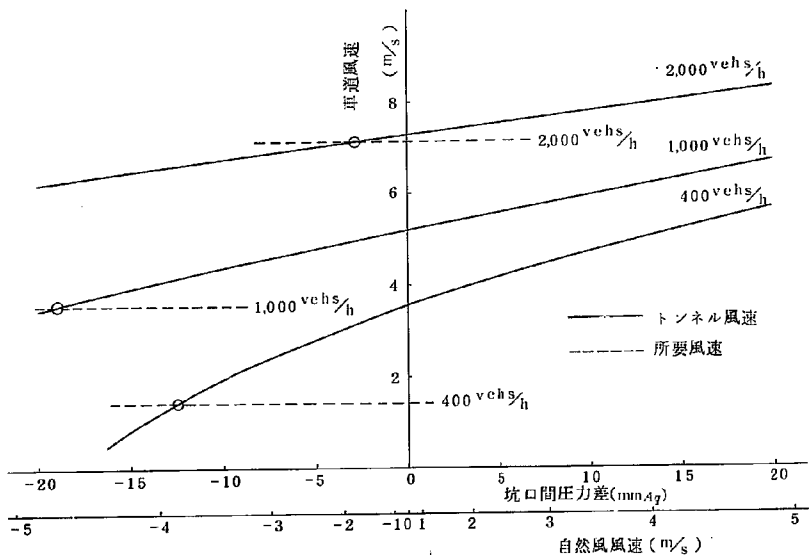


図-15 坑口間圧力差の影響

図-16および図-17は交通が停止した場合に立坑における給排気のみによってどの程度の風速を確保できるかを示している。図-16は最大換気量 480m/sを給排気した場合について坑口間圧力差との関係を示したもので、トンネル内の自然風換算で3m/sの坑口間圧力差が作用した場合でも4m/s以上の風速を確保することができることがわかる。本来この換気方式は渋滞交通が生じないように交通管制を実施することが前提となっているが、万一事故などにより交通が停止した場合でも相当量の換気が行なえることがわかる。

図-17は交通量がない場合における給排気量と車道風速の関係を坑口間圧力差が0の場合について示したものである。なお、この計算では停止した自動車によるトンネルの抵抗の増加は考慮さ

れていないので、実際の場合よりも大きめの値を得ているものと考えておく必要がある。

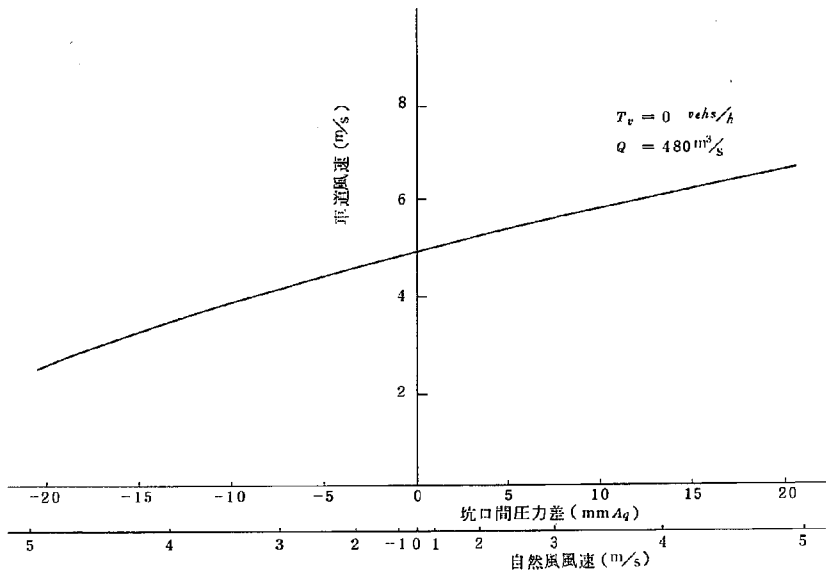


図-16 交通量がない場合における坑口間圧力差の影響

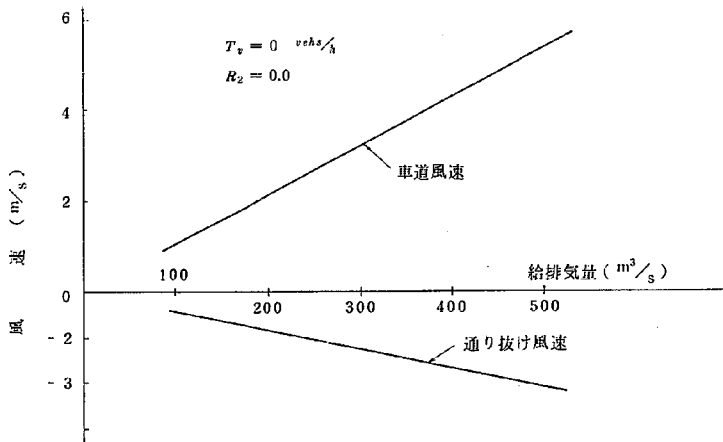


図-17 交通量がない場合における給排気量と車道風速の関係

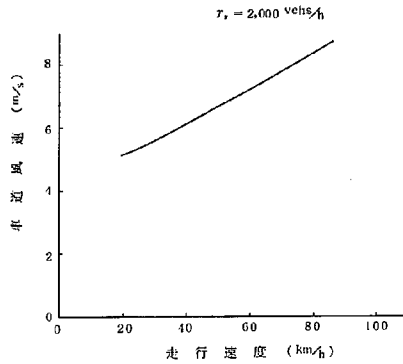


図-18 自動車走行速度の与える影響

図-18は自動車の走行速度の影響を示している。この図は交通量が2,000台/時の値を示すものであるが、走行速度の影響を直接的に受けていることがわかる。交通換気力を最大限に利用するのがこの換気方式の特徴であるから当然のこととすることができる。

図-19は車道の摩擦損失係数の影響を示したものである。当然のことではあるが摩擦損失係数の影響を、直接的に受けるので、本方式では車道の摩擦損失係数を正確に評価することおよび車道に設けられる標識、信号等の設備の設計を行なう場合には摩擦損失が増加しないように配慮することなどが必要である。

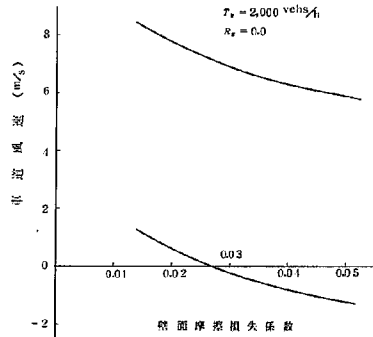


図-19 摩擦損失係数の影響

## 5. 立坑送排縦流換気の適用範囲

前節の適用例から明らかなように立坑送排縦流換気の適用範囲は、単位長さあたりの換気量、交通量、走行速度、換気区間長、トンネルの断面積などの種々の条件が関係する。

図-20は短絡が生じない条件を換気区間長と交通量との関係において図示したものである。試算の条件はトンネルの断面積  $50\text{m}^2$ （通常の2車線トンネルの断面積）で給気口の断面積は  $16\text{m}^2$ （給気ノズル部は車道断面積を  $58\text{m}^2$  に拡大）としている。図中の  $q$  はトンネル単位長さあたり、自動車1台あたりの換気量で、トンネルの設計目標濃度、勾配、車種構成、走行速度によって決まる値である。換気区間長が大きくなると処理可能な交通量は大幅に低下することがわかる。 $q=0.1\text{m}^3/\text{s}/\text{km}/\text{台}$  のとき、換気区間長が  $1,000\text{m}$  では  $4,800\text{台}/\text{時}$  の交通量が処理可能であるが、換気区間長が  $2,000\text{m}$  になると  $1,700\text{台}/\text{時}$  に低下する。また、換気区間長  $1,500\text{m}$  の場合、 $q=0.1$  では  $2,600\text{台}/\text{時}$  の交通量を処理できるが、 $q=0.2$  では  $1,000\text{台}/\text{時}$  に低下する。換気区間長を大きく取れるようにするためには  $q$  をできるだけ小さく取ることが有利であることがわかる。

図-21は車道断面積の影響を示したものである。試算の条件は換気区間の延長を  $2,000\text{m}$  としている。断面積を大きくすることが処理交通量を大きくするうえで有効であることがわかる。

図-22は短絡が生じないで換気できる車道風速を換気区間長との関係で示したものである。試算の条件は図-20の場合と同様である。また、図-23は同様の条件を車道断面積との関係で示したもので、試算の条件は図-21の場合と同様である。これらの図から立坑送排縦流換気で経済的

に用いられる風速の範囲は  $5 \sim 9\text{m}/\text{s}$  程度であることがわかる。この風速は在来縦流式換気の許容車道風速と考えられていた  $8 \sim 12\text{m}/\text{s}$  の範囲にあり、車道風速として十分適用限界内にあると考

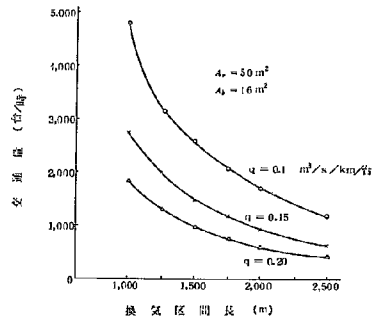


図-20 短絡が生ずることなく換気できる交通量と換気量、換気区間長との関係

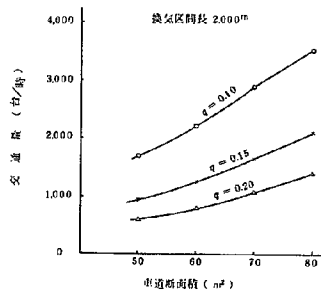


図-21 短絡を生ずることなく換気できる交通量と換気量、車道断面積との関係

えることができる。また、車道風速をいたずらにあげても縦流換気として経済的ではないことを示している。

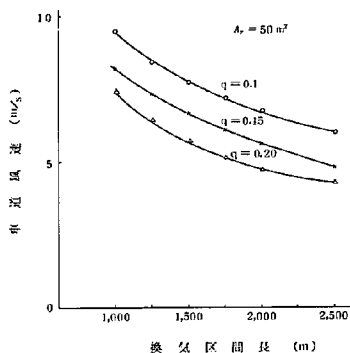


図-22 短絡を生ずることなく換気できる車道風速と換気量，換気区間長との関係

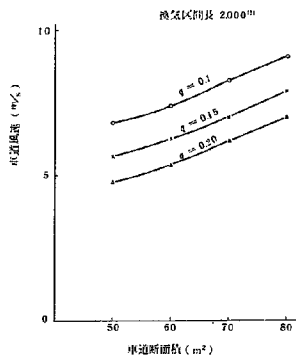


図-23 短絡を生ずることなく換気できる車道風速と換気量，車道断面積との関係

## 6. 給気ノズルからの吹き出しが交通に与える影響

この換気方式ではノズルから車道に高速の空気が吹き出される。このための高速で吹き出された空気が走行車輛に影響を与えることが懸念される。図-24はこの影響を調べるため給気ノズル部の車道の風速分布を調べたものである。図によると給気ノズル直後の建築限界外の部分では相当な高風速となっている部分があるが、建築限界内では著しい高速域は生ぜず、給気口から $30D_0$  ( $D_0$ : 給気ノズルの代表寸法) 程度離れるとほぼ一様な風速分布になることがわかる。したがって、給気ノズルからの吹き出しが走行車輛に与える影響はほとんどないものと考えることができよう。このことは、今までのジェットファンの経験からも推定することができる。

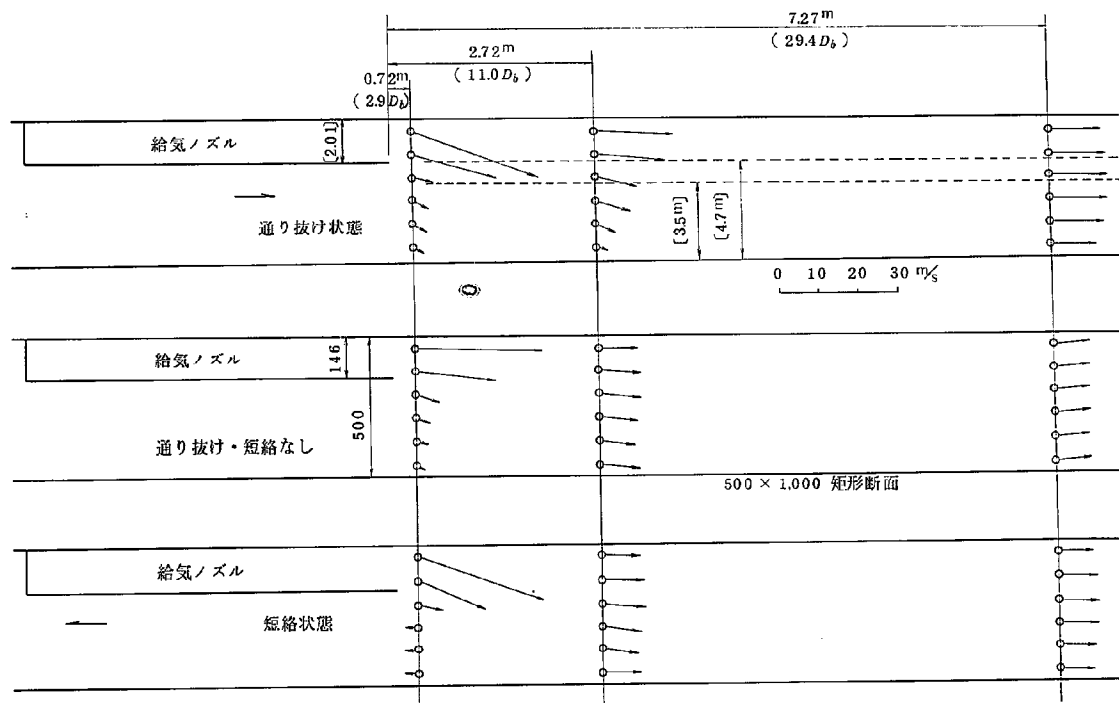


図-24 給気ノズル部下流車道部の風速分布

## 7. 立坑が2ヶ所以上の場合の立坑送排縦流換気

以上の試算の例は立坑を1ヶ所に設けた2換気区間の場合に関するものである。立坑を2ヶ所以上に設けた場合も基本的には、立坑を1ヶ所に設けた場合と同様であり、式-(4.5)を各立坑に対して適用して短絡、通り抜け風を求めることができる。

たとえば、立坑が2ヶ所の場合は図-25を参照して各区間に対して次の諸式が成立する。

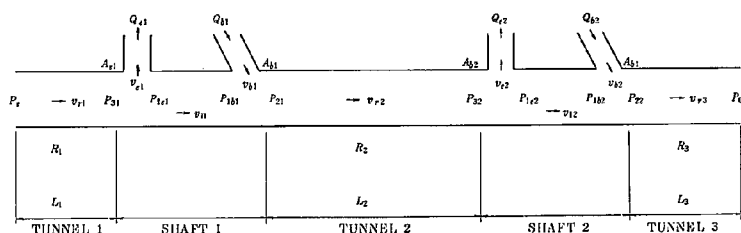


図-25 立坑が2ヶ所にある場合の立坑送排縦流換気記号

$$P_{31} = R_1 \cdot \frac{1}{2} \rho v_{r1}^2 + R_{e1} \cdot \frac{1}{2} \rho (V - v_{r1})^2 \quad \dots\dots\dots (8.1)$$

$$P_{31} - P_{21} = \rho v_{e1}^2 \left( \frac{A_{e1}}{A_r} \right) \left\{ k_{e1} - \left( \frac{A_{e1}}{A_r} \right) - 2 \left( \frac{v_{11}}{v_{e1}} \right) \right\} - \rho v_{b1}^2 \left( \frac{A_{b1}}{A_r} \right) \left\{ k_{b1} \cos \theta_{b1} - \left( \frac{A_{b1}}{A_r} \right) - 2 \left( \frac{v_{11}}{v_{b1}} \right) \right\} + \Delta P_{s1} \quad \dots\dots\dots (8.2)$$

$$P_{32} - P_{21} = R_2 \cdot \frac{1}{2} \rho v_{r2}^2 + R_{e2} \cdot \frac{1}{2} \rho (V - v_{r2})^2 \quad \dots\dots\dots (8.3)$$

$$P_{32} - P_{22} = \rho v_{e2}^2 \left( \frac{A_{e2}}{A_r} \right) \left\{ k_{e2} - \left( \frac{A_{e2}}{A_r} \right) - 2 \left( \frac{v_{12}}{v_{e2}} \right) \right\} - \rho v_{b2}^2 \left( \frac{A_{b2}}{A_r} \right) \left\{ k_{b2} \cos \theta_{b2} - \left( \frac{A_{b2}}{A_r} \right) - 2 \left( \frac{v_{12}}{v_{b2}} \right) \right\} + \Delta P_{s2} \quad \dots\dots\dots (8.4)$$

$$-P_{22} = R_3 \cdot \frac{1}{2} \rho v_{r3}^2 + R_{e3} \cdot \frac{1}{2} \rho (V - v_{r3})^2 \quad \dots\dots\dots (8.5)$$

$$v_{r1} = \frac{A_{e1}}{A_r} v_{e1} + v_{11} \quad \dots\dots\dots (8.6)$$

$$v_{r2} = \frac{A_{b1}}{A_r} v_{b1} + v_{11} \quad \dots\dots\dots (8.7)$$

$$v_{12} = v_{r2} - \frac{A_{e2}}{A_r} v_{e2} \quad \dots\dots\dots (8.8)$$

$$v_{r3} = \frac{A_{b2}}{A_r} v_{b2} + v_{12} \quad \dots\dots\dots (8.9)$$

ただし、

$$R_1 = - \left( 1.0 + \zeta_e + \lambda \frac{L_1}{D_r} \right) \quad \dots\dots\dots (8.10)$$

$$R_{e1} = T_d \cdot L_1 \cdot R_c \quad \dots\dots\dots (8.11)$$

$$R_2 = - \lambda \frac{L_2}{D_r} \quad \dots\dots\dots (8.12)$$

$$R_{e2} = T_d \cdot L_2 \cdot R_c \quad \dots\dots\dots (8.13)$$

$$R_3 = - \lambda \frac{L_3}{D_r} \quad \dots\dots\dots (8.14)$$

$$R_{e3} = T_d \cdot L_3 \cdot R_c \quad \dots\dots\dots (8.15)$$

第2立坑の給排気口間の車道風速  $v_{12}$  は式-(8.8)から第1立坑の給排気口間の車道風速  $v_{11}$  がわかれば求めることができ、また、第3換気区間の車道風速も式-(8.9)から  $v_{11}$  を知れば得ることができる。したがって、 $P_{31}$ 、 $P_{32} - P_{21}$ 、 $P_{22}$ などはすべて  $v_{11}$  の2次方程式となり、式-(8.1)～式-(8.5)を適当に消去し  $v_{11}$  に関する2次方程式を解くことによって、トンネル内の各点の風速、圧力を求めることができる。

$v_{11}$  が求められれば、式-(8.6)～式-(8.9)から各点の風速が求まるが、各立坑で等量の給排気を行なう場合は、各立坑の給排気口間の車道の風速はすべて等しく、また、各換気区間の車道の風速もすべて等しくなる。図-26は各立坑で等量の給排気を行なった場合の試算例である。図-27は図-26の交通量2,000台/時の時のトンネル圧力分布の様子を示したものである。

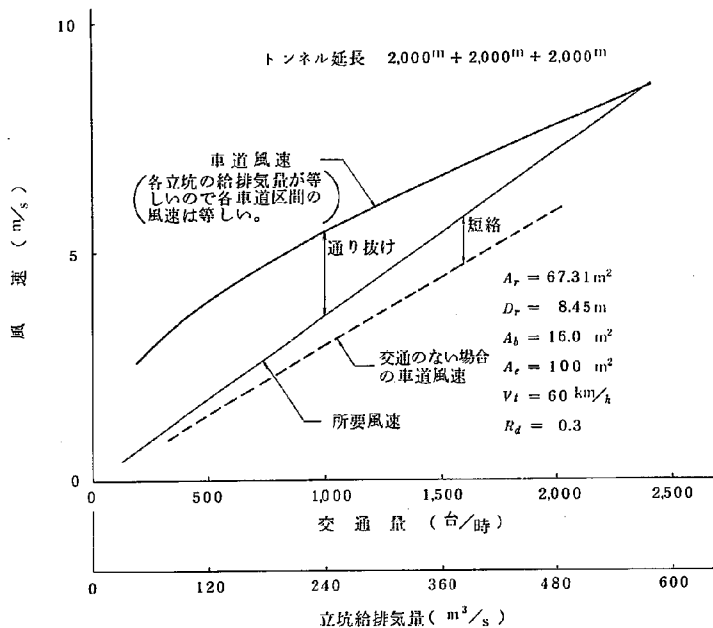


図-26 立坑が2ヶ所の場合の車道風速の試算例

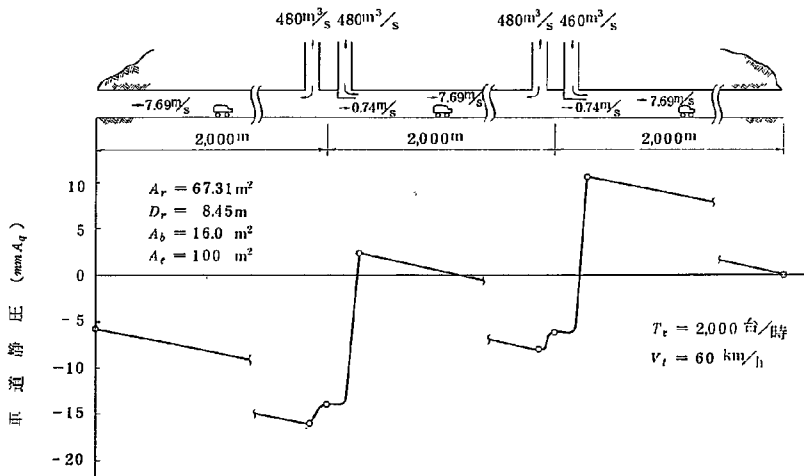


図-27 立坑が2ヶ所の場合の圧力分布の例

## 8. ま と め

立坑送排縦流換気の基本である立坑底部における流れについて行なった模型実験の結果をもとに、本換気方式の諸性質を試算により検討した。その結果、次のことを明らかにすることができた。

- (1) 立坑送排気部の流れは式-(4.1), 式-(4.2)で表わすことができる。
- (2) 立坑送排縦流換気が適用できる1換気区間長は、換気量、交通量、トンネル断面積により異なるが、車道内風速 $5 \sim 9 \text{ m/s}$ 程度が限度であり、これ以上となる場合には経済的な適用がむずかしい。
- (3) 立坑送排縦流換気は、交通条件の変動、自然換気条件の変動に対しても十分な安定性をもつ換気方式である。

なお、今後必要な検討事項としては次のようなものがある。

- (1) 本換気方式においては、車道部の通気損失および交通換気力が大きく影響するので、これら諸数値の正確な把握
- (2) 本換気方式の運転制御方法の検討
- (3) 自動車火災時の対策(換気制御方法、渋滞を起さないようにするための交通管制方法、などの検討)

## 参 考 文 献

- 1) 今田, 水谷, 堀内「立坑送排縦流換気模型実験」土木研究所資料第1,070号, 昭和50年8月
- 2) 日本道路公団「柳ヶ瀬トンネル換気基本設計(その2)報告書」昭和48年11月