

1. まえがき

道路トンネルは、自動車排出する有害成分に対し安全なトンネル環境を確保するため換気が必要である。トンネルでは狭い空間内を自動車が走行することによって自動車が1種のピストンとして作用するため交通換気力が生じる。この交通換気力は、換気設計上の重要な要素の一つであり縦流換気方式などにより車道空間を用いて換気風を流している換気方式では特にそうである。また、従来は対面交通のトンネルが多く交通換気力は抵抗としてのみ扱われていたが、最近では一方通行のトンネルの出現により交通換気力の効果を換気系の一部分に取り込むことにより、換気設備の合理化、省エネルギー化へ努力が払われている。しかし、このためには、交通換気力に関する諸数値をさらに精度のよいものとするための見直しが必要となってきた。これに対して実大のトンネルにおいて実験を行い、解析検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

実験は、土木研究所内にある実大トンネル実験施設(延長400m)において行った。試験車としては交通換気力に対する影響が最も大きい大型トラックを用いた。試験車をトンネル内で走行させ、それによって発生するトンネル内の風速および風圧等を測定した。風速は、トンネル中央において図-1のように風速計を設置して測定を行った。トンネル内の圧力は、微圧変換器(100mmHg)を走行車線側と追越車線側の両路肩に設置した。試験車群の走行条件としては、表-1に示すように、台数、車頭間隔、走行速度を変えて行った。

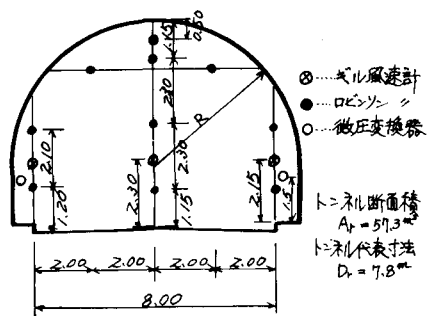


図-1 トンネル内の風速計、圧力計の配置(中央)

3. 解析方法

実験の結果により得られたデータの例を図-2, 3に示す。図-2は、トンネル中央で測定した圧力変動記録、図-3は、トンネル中央で測定した坑内風速記録と模式的に示したものである。これらのデータから下記の方法により交通換気力を解析した。

3.1 風圧による解析

交通換気力は、自動車が空気から受ける抗力の反作用力としてトンネル内の空気柱に加えられるものである。自動車1台当りの交通換気力(抗力) F_0 は一般に次式で表わされる。

$$F_0 = \frac{\rho}{2} \zeta_c A_c (V_c - V)^2 \quad (1)$$

ここに ζ_c : 自動車抵抗係数, V : 風速(%), ρ : 空気密度

A_c : 自動車の前面投影面積(8.4 m²), V_c : 車速(%)

図-2に示す自動車が通過する前後の圧力差 ΔP および(1)式より自動車の抵抗係数 ζ_c は、次式により求めることができる。

$$\zeta_c = \frac{2 F_0}{\rho A_c (V_c - V)^2} = \frac{2 A_r}{\rho A_c (V_c - V)^2} \cdot \Delta P \quad (2)$$

ここに A_r : トンネル内空断面積(m²)

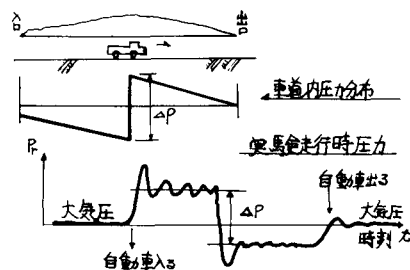
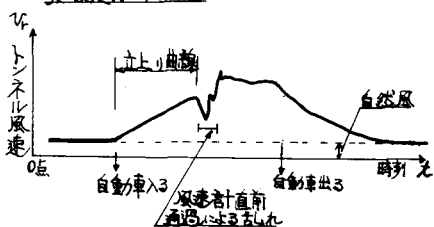
図-2 トンネル圧力分布および中央測定における圧力変動
実験車走行時の風速

図-3 トンネル内走行時の風速測定例(中央)

3.2 坑内風速による解析

交通換気力 Q が作用する結果に生じるトンネル内風速をもとに自動車の抵抗係数を求めることも可能である。トンネル内の空気柱に作用する力について運動方程式をかくと次のとおりである。

$$\rho \ell A_r \frac{dV}{dt} = \frac{\rho}{2} N \xi_c A_c (V - V_0)^2 - \frac{\rho}{2} A_r (V_0^2 - V^2) \left(1 + \xi_m + \frac{\lambda \ell}{D} \right) \quad \text{--- (3)}$$

ここに ℓ : トンネル延長(m), V_0 : 自然風によって生じる坑内風速(m/s), N : 交通量

ξ_m : トンネル入口損失係数, λ : トンネル壁面摩擦損失係数, D : トンネル代表寸法(m)

(3) 式の左辺は空気柱の慣性力, 右辺第1項は交通換気力, 第2項はトンネル通気抵抗力である。この微分方程式を初期条件 $t=0$ 、とき $V=V_0$ として解くと次式がえられる($V_0, V > 0$ の場合)。

$$V = \frac{\sqrt{D}}{a \left(1 - \frac{2a(V_0 + b - \sqrt{D})}{2a(V_0 + b + \sqrt{D})} \right) e^{NPN\sqrt{D}}} - \frac{b - \sqrt{D}}{2a} \quad \text{--- (4)}$$

ここに $a = 2 - \beta$, $2 = \frac{N A_m}{2 \ell A_r}$, $\beta = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\xi_m}{2} + \frac{\lambda}{D} \right)$

$$D = 4\beta \{ 2V_0^2 + (\beta - 2)V_0^2 \}$$

(4) 式および図-3に示す坑内風速データから自動車の抵抗係数 ξ_c を求めることができる。なおここでは、図-3に示す風速の立上り部において Δt 時間における風速の増加分 ΔV を用いて解析した。

4. 解析結果および考察

前項で述べた(2), (4)式から求めた自動車の等価抵抗係数 ξ_c の値を表-1に示す。この表より一般的傾向として圧力(2)式から求めた値よりも風速(4)式から求めた値の方が大きい(15~80%程度)に出る。この原因としては、圧力、風速の計測方法やデータの読み方が考えられるが今後検討するつもりである。なお、以下の考察では便宜的に(データ数の多い)風速から求めた値を用いることにする。

(1) 最も基本的な大型車1台を走行させた場合の(実験ケースA, C, E) ξ_c は、概ね1.5~2 (平均1.8)程度であった。

(2) 大型車2台が走行車線と追越車線を同時に走行する場合の(実験ケースB, D) ξ_c は、概ね2~4 (平均2.8)程度で1台走行した時の値よりも5割程度大きい値であった。これは、トンネル内空断面積に対する占積率(A_c/A_r)が2倍(2.5から3.0)となったことによるものであり、 ξ_c が占積率に大きく影響されていることを示している。

(3) 今回は走行速度を40~80%の範囲で行ったが ξ_c の値に対する走行速度の変化(実験ケースA-1~3, B-1~3, E-1~3)の影響はなれものと思われる。

(4) 車が連続して走行する場合、車頭間隔が小さいと先行車と後続車の交通換気力が相互に干渉するであろうことを予測して実験を行った(実験ケースC-1~5, D-1~5)が、データのバラツキが大きく差を見出すことができなかった。

なお、参考として現在の換気設計に用いられている値を示すと、大型車における前面投影面積 $A_c = 5.37 \text{ m}^2$ 抵抗係数 $\xi_c = 1.0$ である。

表-1 自動車の等価抵抗係数

実験ケース	実験(走行)条件			自動車の等価抵抗係数 ξ_c	
	車群構成 (台・列)	車頭間隔 (m)	車速 (km/h)	(2)式より 得た値	(4)式より 得た値
A	1	1×1	—	1.21, 1.10 1.10, (1.14)	
	2	"	60	1.31, 1.33 1.31, (1.32)	1.51
	3	"	80	1.28, 1.34 1.18, (1.28)	
B	1	2×1	—	40	2.73
	2	"	60	2.03, 2.16 2.26, (2.15)	2.80
	3	"	80	2.07, 2.08 2.20, (2.12)	2.62
C	1	1×10	25	60	1.51, 2.04 2.15, 1.61 1.50, 1.74 1.84, (1.77)
	2	"	50	"	1.07, 1.98 1.95, (1.67)
	3	"	100	"	2.14
D	1	2×5	25	60	3.90, 3.28 2.98, 2.40 1.98, (2.90)
	2	"	50	"	3.33, 2.88 2.66, 2.79 (2.90)
	3	"	100	"	2.86, 2.61 (2.73)
	4	"	200	"	3.13, 2.32 (2.72)
	5	"	200	"	2.51, 3.24 (2.82)
E	1	1×10	400	40	1.17
	2	"	60	60	1.20
	3	"	80	80	1.06
備考	凡例 2台×1列 +○ +□ +△				

※複数で示した数値は複数の実験回数から求めた値であり、複数で示した数値は複数の実験回数から求めた値であり、複数で示した数値は複数の実験回数から求めた値であり、複数で示した数値は複数の実験回数から求めた値である。