

道路トンネルの換気における一様分流管及び合流管 の主管内静圧ならびに分岐管開度計算法

正員 伊 吹 山 西 郎*

The Calculation Methods of Static Pressures in the Ventilation
Ducts of Uniform Area with Slots of Equal Size at Equal
Intervals and Opening Areas of Those Slots.

(Trans. ASCE, No. 47, Aug. 1957)

Shirō Ibukiyama, C.E. Member

Synopsis : In ventilating tunnels, the ventilating ducts of uniform area, which have equal size slots at equal intervals, are commonly used. The writer, after having performed some fundamental model experiments, presumed to have obtained reasonable methods of calculation. This paper shows the new methods of calculation of static pressures in ducts and opening of those slots, using the results of model tests.

要旨 道路トンネルの機械的換気に際して、一様分流管ないしは合流管の形が用いられることが多い。これについては、先に Ole Singstad の公式があるが、一般性を欠いているので、あらためて基礎実験を行い、その実験結果に基づいて、風圧を求める計算方法および分岐管の開度の計算方法について述べたものである。

1. はしがき 道路トンネルの換気に際して、一様な換気が行われるために、図-1に示すごとき、一様な間隔に設けられた一定断面の開口部より、一定量の空気を分流（車道からみれば送気）、または合流（車道からみれば排気）することが、普通行われる。そして、この場合、主換気ダクトの断面は、施工上一様な断面とする。

このような管路を一様分流管または一様合流管とよぶこととする。

そして、このように一様な流量が分流または合流するためには、分岐管（支管）に適当な絞りを設けて、流量が各孔で同一となるように調節しなくてはならない。この絞りは、分岐管の入口に調節板を設けて、開口面積を加減することによつて行う。この開く程度を、分岐管の開度とよぶ。

本論文は、換気組織の容量を計算するに必要なこの主ダクト内の静圧分布の計算方法および分岐管の開度の計算法についてのべる。

2. 在来の研究 在来の研究としては、Ole Singstad の公式¹⁾として、

$$\text{(一様分流管)} \quad T.P. = \frac{12y}{D} \left\{ \frac{w_1^2}{2g} \left[\frac{aLZ^3}{3m} - \frac{1}{2}(1-K)Z^2 \right] + \frac{bLZ}{2gm^2} \right\} + P_0 \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{(一様合流管)} \quad S.P. = \frac{12y}{D} \left\{ \frac{w_1^2}{2g} \left[\frac{aL}{(3+c)m} Z^3 + \frac{3}{2+c} Z^2 \right] + \frac{bLZ}{2gm^2(1+c)} \right\} + P_0 \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{(摩擦係数)} \quad f = a + \frac{b}{m^2 w^2} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $T.P.$ = 総送気静圧 (水柱 in), $S.P.$ = 総排気静圧 (水柱 in)

y = 空気密度, D = 水の密度 (lbs/ft³), w = 空気速度 (ft/sec)

w_1 = ダクトに流入する空気速度 (ft/sec), g = 32.2 ft/sec²

P_0 = バルクヘッドにおける静圧 (水柱 in), a = 0.0035, b = 0.01433

c = 排気孔における渦流に対する係数, L = ダクトの全長 (ft), $Z = \frac{L-x}{L}$

x = ダクト入口より任意の断面までの距離 (ft), m = hydraulic mean radius (ft)

K = 0.615 渦流に対する係数

を与えている。いまこの(3)式を用いて、一般式を求めると、(1)式の[]内の第2項に相当するものは $-mZ^2$ となる。Singstad は K に対して、0.615 という値を与えているから、 $\frac{m(1-K)}{2} Z^2$ は $0.1925 mZ^2$ となる。

* 建設省関門国道工事々務所調査設計課長

ゆえに, Singstad の a, b を用いれば, この項は負号であるから, (1) 式の右辺は全く大きな値を与える。

本来この公式は, 特定の実験式であつて, 一般性はないようである。その後の他のトンネルの事例でもあてはまらなかつたという報告が出ている。

この外に, Vögel²⁾, Peterman³⁾, Kinne⁴⁾ および沖⁵⁾の研究等があるが, いずれも主管流量と支管流量との比が 1 以下であつて, 小さく, 道路トンネルの換気のように多孔管の場合にはあてはまらない。

3. 基礎式およびその係数の値^{6),7)}

図-1 において, (a), (b) に対し, 支管の数を N 個とし, ピッチを l (m), 主管の長さを L (m), 主管の流量を Q (m^3/s), 支管の流量を q (m^3/s) とする。いま n 点と $(n+1)$ 点の間断面 (n 断面とよぶ) における主管内平均流速を V_n (m/s), 静水頭を h_n (m), 全圧水頭を H_n (m) とし, $\Delta h_n, \Delta H_n$ で管端 ($n=0$) と n 断面間の, それぞれ静圧および全圧水頭差を表わし, r, τ_{aq} をそれぞれ使用流体と水の単位体積重量 ($kg\ m^3$) とする。

しかるときは,

$$\Delta H_n = H_n - H_0 \dots\dots\dots (4)$$

$$H_n = h_n + \frac{V_n^2}{2g} \cdot \frac{r}{\tau_{aq}} \dots\dots\dots (5)$$

である。

図-2 において, λ を主管内の流体摩擦係数, d を主管断面の代表寸法 (m) ($d=4$ m), ζ_1 を n 点における分流または合流による主管の損失係数とすれば, Q に比べて q が十分小であるときは,

$$H_n - H_{n-1} = \pm \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 \right) \frac{V_n^2}{2g} \cdot \frac{r}{\tau_{aq}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \oplus \text{分流} \\ \ominus \text{合流} \end{array} \right.$$

しかるに, (4) 式より,

$$\Delta H_n = (H_n - H_{n-1}) + (H_{n-1} - H_{n-2}) + \dots + (H_1 - H_0)$$

であるから,

$$\Delta H_n = \pm \sum_{n=1}^n \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 \right) \frac{V_n^2}{2g} \cdot \frac{r}{\tau_{aq}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \oplus \text{分流} \\ \ominus \text{合流} \end{array} \right.$$

もし等流量分布が実現しているものとすれば, この場合 λ を常数として取扱うこととして,

$$V_1 = \frac{V_n}{n}, V_2 = \frac{2}{n} V_n, \dots, V_{n-1} = \frac{n-1}{n} V_n$$

であるから,

$$\sum_{n=1}^n \lambda \frac{l}{d} \frac{V_n^2}{2g} \cdot \frac{r}{\tau_{aq}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{V_n^2}{2g} \cdot \frac{r}{\tau_{aq}} \frac{\sum_{n=1}^n n^2}{n^2}$$

ゆえに

$$\Delta H_n = \pm \left(\lambda \frac{n l}{d} \frac{(n+1)(2n+1)}{6n^2} + \sum_{n=1}^n \zeta_1 \right) \frac{n^2 V_1^2}{2g} \cdot \frac{r}{\tau_{aq}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \oplus \text{分流} \\ \ominus \text{合流} \end{array} \right. \dots\dots\dots (6)$$

となる。

$$\frac{(n+1)(2n+1)}{6n^2} = \frac{1}{3} + \epsilon$$

とおけば, n が大なるとき $\epsilon \rightarrow 0$ となる。(4) 式において,

$$\Delta H_n = H_n - H_0 = \left(h_n + \frac{V_n^2}{2g} \cdot \frac{r}{\tau_{aq}} \right) - \left(h_0 + \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{r}{\tau_{aq}} \right)$$

であつて, $V_0=0$ であるから, これに (6) 式を代入すると,

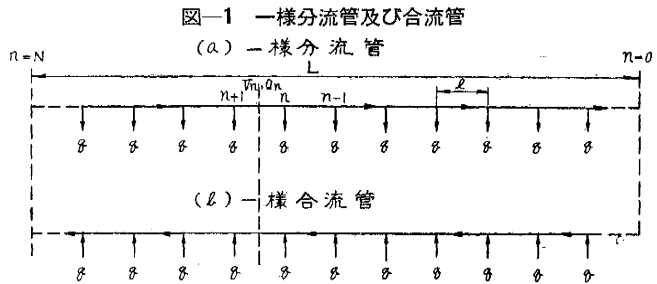


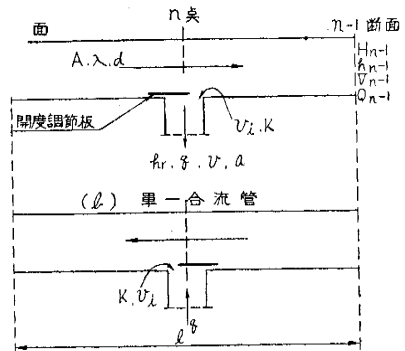
図-1 一様分流通及び合流管

(a) 一様分流通

(b) 一様合流管

図-2 単一分流管及び合流管

(a) 単一分流管



(b) 単一合流管

$$h_n = h_0 \pm \left\{ \frac{\lambda n l}{3 d} \mp 1 \right\} \frac{(nV_1)^2}{2g} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_{aq}} \pm \sum_{n=1}^n \zeta_1 \frac{(nV_1)^2}{2g} \cdot \frac{r}{r_{aq}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \oplus \oplus \oplus \text{分流} \\ \ominus \oplus \oplus \text{合流} \end{array} \right. \dots\dots\dots(7)$$

となる。

また、図-2において、 h_r を車道の静圧(大気圧)(mAC)、 v を支管の車道端(支管出口)の風速(m/s)、 $V_{n-1} = 0$ としたときの、分岐管による抵抗係数を ξ とし、支管の分流または合流損失係数を ζ_2 とすれば、(a)、(b)ともに

$$h_n + \frac{V_n^2}{2g} \mp \lambda \frac{l}{2d} \frac{V_n^2}{2g} = h_r + \frac{v^2}{2g} + \xi \frac{v^2}{2g} + \zeta_2 \frac{V_n^2}{2g} \quad \left\{ \begin{array}{l} \ominus \text{分流管} \\ \oplus \text{合流管} \end{array} \right. \dots\dots\dots(8)$$

となる。

上記(7)式および(8)式中の、 ζ_1 、 ζ_2 および ξ は、820 mm×820 mm×40 mの風管に、関門国道トンネルの送気管および排気管のそれぞれ約1/2および1/7の模型を付けて、50 HPの送風機により送風することにより実験的に求めた。

このとき最大風速 21 m/sであつて、実験最大レイノルズ数は 1.15×10^6 であつた。この実験の詳細なる内容については、別の機会に発表する予定であるが、次の図-3、4、5、6、7および図-8は、分流管および合流管

図-3 一様分流管の主管の分流損失係数 ζ_1

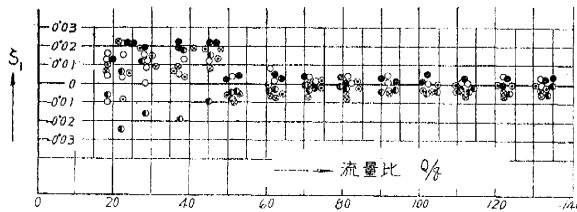


図-4 一様分流管の分岐管の分岐損失係数 ζ_2 の値

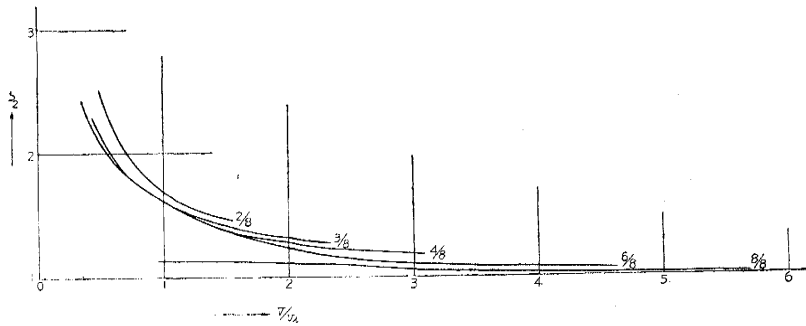


図-5 一様分流管の分流抵抗係数 ξ

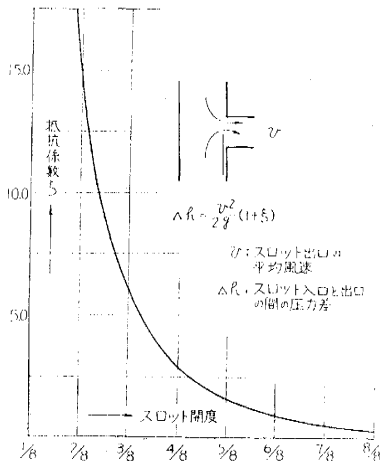
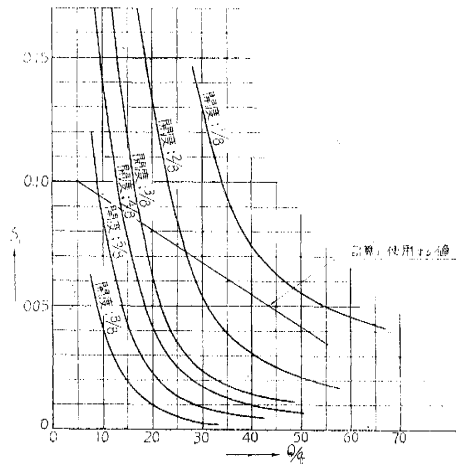
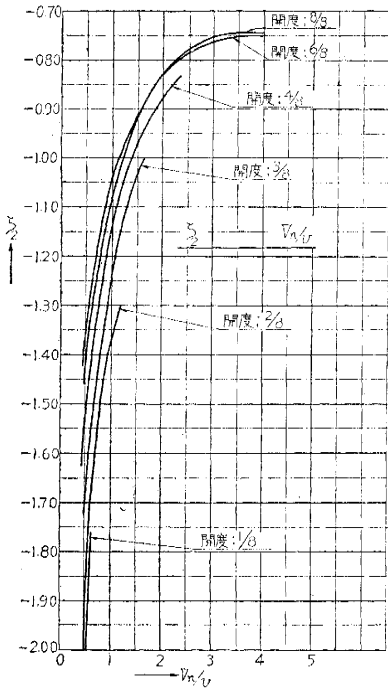


図-6 一様合流管の本管の合流損失係数 ζ_2 の値



図一七 一様合流管の支管の合流損失係数 ζ_2 の値



における ζ_1 , ζ_2 および ξ の実験結果を示している。

4. 一様分流通管 (送気ダクト) 内の静圧計算法

一様分流通管の場合, (7) 式の $\oplus\oplus\oplus$ をとると, 図一三 より n が大であれば, $\zeta_1=0$ とおいてもさしつかえないことがわかるから, (7) 式は簡単になつて,

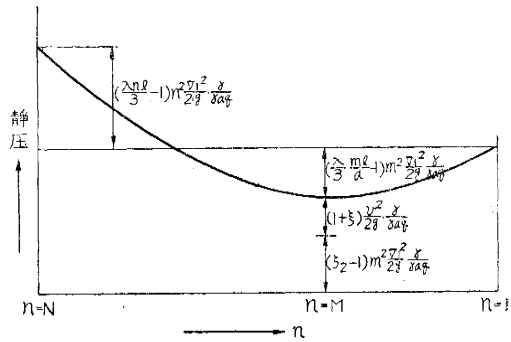
$$h_n = h_0 + \left\{ \frac{\lambda nl}{3d} - 1 \right\} n^2 \frac{V_1^2}{2g} \cdot \frac{r}{r_{aq}} \dots\dots\dots (9)$$

となる。

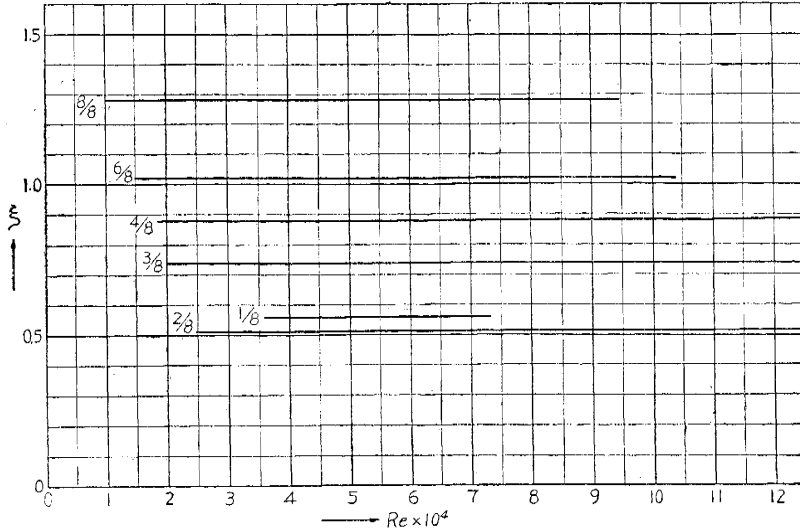
この式は nl の値によつて, 図一九 に示す形をとる。

したがつて, この静圧の最低点において, 空気が分岐管を通つて車道に吹き出すだけの静圧を有していなければならない。

図一九 一様合流管の静圧曲線



図一八 一様合流管のスロット抵抗係数 ξ の値



当然ここで分岐絞りは全開となる。

この点における $n=m$ とすれば, その静圧は (8) 式より

$$h_m = \lambda \frac{l}{2d} \frac{V_m^2}{2g} = h_r + \left[(1+\xi) \frac{v^2}{2g} + (\zeta_2 - 1) \frac{V_m^2}{2g} \right] \frac{r}{r_{aq}}$$

を得る。

h_r は車道の静圧であつて, 大気圧であるから, $h_r=0$ とおき, 主管の断面積を A , 支管の断面積を a とすれば,

$$\frac{v}{V_1} = \frac{q}{a} \cdot \frac{A}{q} = \frac{A}{a}$$

であるから,

$$h_m - \lambda \frac{l}{2d} \cdot \frac{V_m^2}{2g} = \left\{ (1+\xi) \left(\frac{A}{a} \right)^2 + (\zeta_2 - 1)m^2 \right\} \frac{V_1^2}{2g} \frac{r}{r_{aq}}$$

ゆえに、(9) 式より

$$h_n = -(h_m - h_0) + h_m + \left(\frac{\lambda nl}{3d} - 1 \right) n^2 \frac{V_1^2}{2g} \frac{r}{r_{aq}} \\ = \left\{ (1+\xi) \left(\frac{A}{a} \right)^2 + (\zeta_2 - 1)m^2 + \left(\frac{\lambda nl}{3d} - 1 \right) n^2 - \left(\frac{\lambda ml}{3d} - 1 \right) m^2 \right\} \frac{V_N^2}{N^2 2g} \frac{r}{r_{aq}} \dots\dots\dots (10)$$

(10) 式の { } 内の第1項の ξ 、第2項の ζ_2 は全開の場合の係数であり、 m とともに与えられたダクトに対して一定であるから、第1、2および4項は一定となる。

また V_N はダクト始端の風速で、風量およびダクト断面積が与えられれば一定となる。 N は分岐管の数であるから一定である。

よつてこれらの値をあらかじめ計算しておけば、任意の点の静圧がきわめて簡単に計算される。

計算例 $Q=93 \text{ m}^3/\text{s}$, $A=7.76 \text{ m}^2$, $d=1.92 \text{ m}$, $l=4.5 \text{ m}$, $N=88$, $a=0.24 \text{ m}^2$, $\lambda=0.015$ の場合の計算値を示すと、表-1のごとくである。 m は表-1の(1)列の計算によつて $m=55$ であることがわかる。したがつて、

$$\left(\frac{\lambda ml}{3d} - 1 \right) m^2 = -1076.3$$

である。よつて、図-5より $\xi=0.3$ であるが、安全側にとつて $\xi=0.4$ とする。また図-4において、 ζ_2 は V_n/v_i の函数として表わされているが、この v_i は支管の入口流速、すなわち、ダクト側の絞られた部分を通過するときの風速であつて、開度を K とすれば、 $K=8/8$ では、

$$\frac{V_n}{V_i} = \frac{Q_n}{q} \cdot \frac{a}{A} \cdot K = 2.6$$

となる。図-4より、 V_n/V_i に対する ζ_2 を求めると、 $\zeta_2=1.08$ であるから、これを $\zeta_2=1.1$ とすると、

$$(1+\xi) \left(\frac{A}{a} \right)^2 = 0.4 \times \left(\frac{7.76}{0.24} \right)^2 = 1463.32$$

$$(\zeta_2 - 1)m^2 = 0.1 \times 55^2 = 302.5$$

ゆえに、表-1の(1)にこれらを加えると、(10)式の{ }内は表-1の(2)に示す値となる。また、

$$\frac{V_N^2}{N^2} \frac{1}{2g} \frac{r}{r_{aq}} = \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \cdot \frac{1}{N^2} \cdot \frac{1}{2g} \frac{r}{r_{aq}} = \left(\frac{93}{7.76} \right)^2 \times \frac{1}{(88)^2} \times 0.0612 = 0.001136$$

であるから、表-1の(2)にこの値を乗じて得られた表-1の最右列に示す値が、求むる各点の静圧値である。

5. 一様合流管(排気ダクト)内の静圧計算

式(7)の符号 $\oplus\ominus\ominus$ をとつて、

$$h_n = h_0 - \left\{ \frac{\lambda nl}{3d} + 1 \right\} \frac{(nV_1)^2}{2g} \frac{r}{r_{aq}} - \sum_{i=1}^n \zeta_i \frac{(nV_1)^2}{2g} \frac{r}{r_{aq}} \dots\dots\dots (11)$$

この場合、 ζ_i の値は一様分流通とちがつて0とみなし得ず、 n によつて変化する。実際の取扱上は、 $n=p$ ごとに階段的に変化するものと考えてさしつかえないから、いま h_n, h_{n-p}, h_{n-2p} について考える。図-10において、 $h_{n-p} \sim h_{n-2p}$ 間の ζ_i の値を ζ_{n-p} 、 $h_n \sim h_{n-p}$ の間の ζ_i の値を ζ_n であるとする。図-10において、 c より水平線を引いて、 h_n との交点を A とすれば、

$$AB = h_n - h_{n-p}$$

いま、 ζ_n を用いて h_n, h_{n-p} を計算したものが、 B', C' であるとすれば、 $B'C'$ 曲線は BC 曲線に平行となる。よつて C' より水平線を引いて、 h_n との交点を A' とすれば、

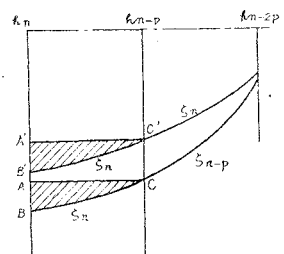
$$A'B' = AB$$

となる。しかるに、 $A'B'$ は (11) 式より

表-1 様分流通管の静圧計算値

n	nl	$\frac{1}{3} \times \frac{nl}{d}$	-1	$\times (n^2)$	$\frac{+3025+146332}{+107630}$ (2)	$\frac{1}{(2)} \times 0.001136$	静圧
1	45	0.0117	-0.9883	-0.98	2.84113	3.23	
5	225	0.0586	-0.9414	-23.54	2.81859	3.20	
10	450	0.1171	-0.8829	-68.29	2.75383	3.13	
15	675	0.1757	-0.8243	-185.47	2.65665	3.02	
20	900	0.2343	-0.7657	-306.28	2.53584	2.88	
25	1125	0.2928	-0.7072	-442.00	2.40012	2.73	
30	1350	0.3514	-0.6486	-583.74	2.25838	2.57	
35	1575	0.4099	-0.5901	-722.83	2.11925	2.41	
40	1800	0.4685	-0.5315	-850.40	1.99172	2.26	
45	2025	0.5271	-0.4729	-957.63	1.88449	2.14	
50	2250	0.5856	-0.4144	-1036.00	1.80612	2.05	
55	2475	0.6442	-0.3558	-1076.30	1.76583	2.01	最低値
60	2700	0.7028	-0.2972	-1069.92	1.77220	2.01	
65	2925	0.7613	-0.2387	-1008.51	1.83361	2.08	
70	3150	0.8199	-0.1801	-882.49	1.95963	2.23	
75	3375	0.8784	-0.1216	-684.00	2.15812	2.45	
80	3600	0.9370	-0.0630	-403.20	2.43892	2.77	
85	3825	0.9956	-0.0044	-31.79	2.81033	3.19	
88	3960	1.0307	0.0307	+23.784	3.07496	3.50	

図-10 一様合流管の静圧曲線



$$\begin{aligned} \therefore A'B' = h_{(n, \zeta_n)} - h_{(n-p, \zeta_n)} = & - \left[\left(\frac{\lambda nl}{3d} + 1 \right) \frac{(nV_1)^2}{2g} \frac{\tau}{\tau_{aq}} + \sum_{n=1}^n \zeta_n \frac{(nV_1)^2}{2g} \frac{\tau}{\tau_{aq}} \right] \\ & + \left[\left(\frac{\lambda(n-p)l}{3d} + 1 \right) \frac{(n-p)^2 V_1^2}{2g} \frac{\tau}{\tau_{aq}} + \sum_{n=1}^{n-p} \zeta_n \frac{(n-p)^2 V_1^2}{2g} \frac{\tau}{\tau_{aq}} \right] \end{aligned}$$

しこうして、 n が十分大なる場合、

$$\sum_{n=1}^n n^2 = \frac{1}{6} n(n+1)(2n+1) = n^3 \times \frac{(n+1)(2n+1)}{6n^2} = \frac{n^3}{3}$$

としてさしつかえないから、

$$\begin{aligned} h_n - h_{n-p} = AB = A'B' = & - \left[\left\{ \frac{1}{3} \left(\lambda \frac{nl}{d} + n \zeta_n \right) + 1 \right\} n^2 \right. \\ & \left. - \left\{ \frac{1}{3} \left[\lambda \frac{(n-p)l}{d} + (n-p) \zeta_n \right] + 1 \right\} (n-p)^2 \right] \frac{V_1^2}{2g} \frac{\tau}{\tau_{aq}} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

(12) 式は常に負号をとるから、このようにして求めた一様合流管の静圧は n が増加するとともに減少する。すなわち、図-11 に示すごとくなる。したがって、 $n=1$ における静圧は車道の静圧 (大気圧) h_r より q を吸込むだけ、低い値をとらなければならない。このとき、分岐管は当然全開であるから、図-2(b) における

$$\begin{aligned} h_n + \lambda \frac{l}{2d} \frac{V_n^2}{2g} \frac{\tau}{\tau_{aq}} \\ = \left\{ (1+\epsilon) \frac{v^2}{2g} + (\zeta_2 - 1) \frac{V_n^2}{2g} \right\} \frac{\tau}{\tau_{aq}} \end{aligned}$$

において、8/8 の開度における h_1 を求めれば、 $n=1$ のとき、 V_n は小であるから $\lambda \frac{l}{2d} \cdot \frac{V_n^2}{2g}$ と $(\zeta_2 - 1) \frac{V_n^2}{2g}$ は無視してさしつかえなく、

$$h_1 = (1+\epsilon) \frac{v^2}{2g} \frac{\tau}{\tau_{aq}} = (1+\epsilon) \left(\frac{A}{a} \right) \times \frac{V_1^2}{2g} \cdot \frac{\tau}{\tau_{aq}} \dots\dots\dots (13)$$

となる。

よつて (12), (13) 式より、

$$\begin{aligned} h_n = \frac{1}{N^2} \cdot \frac{VN^2}{2g} \cdot \frac{\tau}{\tau_{aq}} \times & \left[(1+\epsilon) \left(\frac{A}{a} \right)^2 + \left\{ \frac{1}{3} \left(\lambda \frac{nl}{d} + n \zeta_n \right) + 1 \right\} n^2 - \left\{ \frac{1}{3} \left(\lambda \frac{(n-p)l}{d} + (n-p) \zeta_n \right) + 1 \right\} (n-p)^2 \right. \\ & + \left\{ \frac{1}{3} \left(\lambda \frac{(n-p)l}{d} + (n-p) \zeta_{n-p} \right) + 1 \right\} (n-p)^2 - \left\{ \frac{1}{3} \left(\lambda \frac{(n-2p)l}{d} + (n-2p) \zeta_{n-p} \right) + 1 \right\} (n-2p)^2 \\ & + \dots\dots\dots + \left. \left\{ \frac{1}{3} \left(\lambda \frac{pl}{d} + p \zeta_p \right) + 1 \right\} p^2 - \left\{ \frac{1}{3} \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta_p \right) + 1 \right\} + \left\{ \frac{1}{3} \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 \right) + 1 \right\} \right] \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

となる。

計算例 $Q=93 \text{ m}^3/\text{s}$, $N=46$, $A=8.07 \text{ m}^2$, $d=2.23 \text{ m}$, $l=9 \text{ m}$, $\lambda=0.015$, ζ_1 (表-2に示す), $p=5$ とすれば、計算結果は表-2に示すごとくなる。すなわち n は 5 番目ごとにとり、式 (14) の [] 内の第 2 項以下に相当する部分を表-2 の (1) 列以下に 2 段書きとして、その差 Δ を表-2 の (2) 列のごとくもとめる。

また式 (14) の [] 内の第 1 項は、 $n=1$ における分岐管の抵抗係数を 8/8 の場合、図-8 より求め、

$$(1+\epsilon) \left(\frac{A}{a} \right)^2 = (1+1.3) \times \left(\frac{8.07}{0.5} \right)^2 = 599.19$$

を得る。よつて表-2 の (3) 列の $\Sigma \Delta$ にこれを加えれば、(4) 列を得る。しこうして、

$$\frac{1}{N^2} \cdot \frac{VN^2}{2g} \cdot \frac{\tau}{\tau_{aq}} = \frac{1}{N^2} \cdot \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \cdot \frac{1}{2g} \cdot \frac{\tau}{\tau_{aq}} = \frac{1}{(46)^2} \times \left(\frac{93}{8.07} \right)^2 \times 0.0612 = 0.003842$$

図-11 一様合流管の静圧曲線

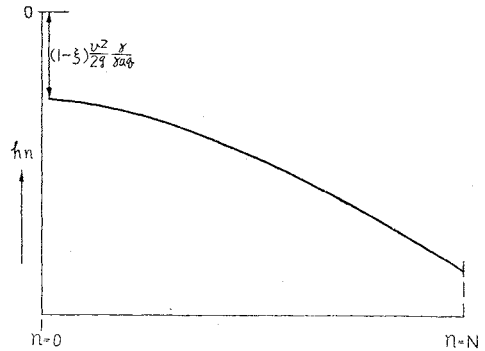


表-2 一様合流管の静圧計算値

n	1/a * Q/A	ε	1/3 * (λnl/d + nζn) + 1	1/3 * (λ(n-p)l/d + (n-p)ζn) + 1	x n^2	(2)	Δ	Σ Δ	1/3 * (λpl/d + pζp) + 1	1/3 * (λl/d + ζ1) + 1	1/3 * (λl/d + ζ1) + 1	Σ Δ
1	0.0202	0.180	0.0600	1.0000	1.00	1.00	1.00	609.27	-2.31			606.96
5	0.1011	0.180	0.1467	1.2678	31.70	30.65	31.73	630.72	-2.67			628.05
10	0.2022	0.095	0.1503	1.5189	123.94	120.40	152.73	733.32	-2.69			730.63
15	0.3033	0.070	0.2060	1.7733	225.22	224.27	396.49	1129.81	-3.03			1126.78
20	0.4044	0.080	0.2333	1.9757	400.00	397.84	788.20	1818.01	-3.33			1814.68
25	0.5055	0.075	0.2650	2.1305	625.00	623.56	1187.34	3005.35	-3.52			2998.83
30	0.6066	0.070	0.3033	2.2666	900.00	898.50	1720.47	4725.82	-3.68			4722.14
35	0.7077	0.060	0.3400	2.3800	1225.00	1223.54	2487.93	7213.75	-3.85			7209.90
40	0.8088	0.055	0.3733	2.4800	1600.00	1598.57	3400.30	10614.05	-3.98			10610.07
45	0.9099	0.050	0.4033	2.5666	2025.00	2023.59	4577.63	14591.68	-4.09			14587.59
50	1.0110	0.050	0.4300	2.6400	2500.00	2498.60	5920.00	19511.58	-4.18			19507.40

を得る。よつて表-2 の (3) 列の $\Sigma \Delta$ にこれを加えれば、(4) 列を得る。しこうして、

であるから、これを(4)列に乗じた(5)列の値が、求める静圧である。

6. 分岐管開度計算法

(8)式より

$$h_n + \lambda \frac{l}{2d} \frac{V_n^2}{2g} - h_r = (1+\epsilon) \frac{v^2}{2g} + (\zeta_2 - 1) \frac{V_N^2}{2g} \quad \begin{matrix} \ominus \text{分流通管} \\ \oplus \text{合流管} \end{matrix}$$

上式の左辺は、分岐点 n と車道との静圧差であつて、上述の計算によつて求められたものである。ゆえに、分岐管入口に適当な絞りを与えて、それによつて生じた静圧降下を上式の右辺により計算し、左辺と一致すれば、その開度は求める開度である。

前述のごとく、

$$\frac{V}{v_i} = \frac{Q}{q} \times \frac{a}{A} \times K$$

であつて、 $Q/q = n$ であり、 a/A は一定であるから、 K を仮定すれば、 ζ_2 の値が求まる。また ϵ の値は開度のみの函数である。 v は分岐管出口流速で一定である。

開度が全開(8/8)の位置(m 点)は、あらかじめわかっているから、その前後の点から、逐次試算法で行えば、各点3回以上で開度を求めることができる。

また実際上の取扱いとして、分岐管ごとに開度を変化させる必要はなく、10個ごとに変えれば十分である。

計算例 $Q=93 \text{ m}^3/\text{s}$, $N=88$, $A=7.76 \text{ m}^2$, $d=1.92 \text{ m}$, $l=4.5 \text{ m}$, $a=0.24 \text{ m}^2$, $\lambda=0.015$ の送気(一様分流通管)の場合の $n=45$ の開度を求める。

与えられた条件は、表-1の場合と全く同一であるから、 $m=55$ で最低となつて、ここで全開となる。

したがつて、10個離れた $n=45$ では、7/8~8/8の開度をとることが予想される。

$$q = \frac{Q}{N} = 1.056 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore v = \frac{q}{a} = \frac{1.056}{0.24} = 4.40 \text{ m/s}$$

$$\therefore \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{r}{r_{aq}} = 1.18 \text{ mmAq}$$

開度 8/8 と仮定すると、図-5のごとく $\epsilon=0.3$ であるから、

$$(1+\epsilon) \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{r}{r_{aq}} = 1.3 \times 1.18 = 1.53 \text{ mmAq}$$

また $N=88$ のとき、

$$\frac{(V_{88})^2}{2g} \cdot \frac{r}{r_{aq}} = \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \frac{1}{2g} \cdot \frac{r}{r_{aq}} = \left(\frac{93}{7.76}\right)^2 \times 0.0612 = 8.80 \text{ mmAq}$$

したがつて、 $n=45$ のとき、

$$\frac{(V_{45})^2}{2g} \cdot \frac{r}{r_{aq}} = 8.80 \times \left(\frac{45}{88}\right)^2 = 2.30 \text{ mmAq}$$

また、 $Q_n/q=45$ に対して開度 8/8 のとき、

$$\frac{V_n}{v_i} = \frac{Q_n}{q} \times \frac{A}{a} \times nK = 1.39$$

である。よつて、図-4より $\zeta_2=1.13$ であるから

$$(\zeta_2 - 1) \frac{V_n^2}{2g} \cdot \frac{r}{r_{aq}} = 0.13 \times 2.30 = 0.3 \text{ mmAq}$$

ゆえに、右辺=1.53+0.3=1.83となる。

しかるに、 $n=45$ の静圧は表-3の(1)列に示すごとく 2.14 mmAq であるから、もつと閉めなくてはいけないことがわかる。

よつて開度を 7/8 とすれば、 $V_n/v_i=1.22$ 、したがつて $\zeta_2=1.32$ 、また $\epsilon=0.5$ となるから、

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= (1+0.5) \times 1.18 + (1.22-1) \\ &\times 2.30 = 2.51 \text{ mmAq} \end{aligned}$$

となつて、今度は閉じすぎたことになる。

表-3 開度計算値

71	静圧(1)	(2) Q_n/q	(3) V_n/v_i	(4) ζ_2	(5) ϵ	(6) $V_n^2/2g$	(7) $\zeta_2(V_n^2/2g)$	(8) $(V_n/v_i)^2$	(9) $(V_n/v_i)^2 \times 2.30$	(10) 比較	決定開度	
5	3.20	0.0284	5/8 0.97	1.63	0.8	1.6	3.07	3.25	OK	5/8	5/8	
15	3.02	0.256	5/8 0.92	1.67	0.8	1.5	3.25	3.13	OK	5/8	5/8	
25	2.73	0.71	6/8 1.08	1.32	0.23	0.7	2.01	2.24	小	6/8	6/8	
35	2.41	1.39	6/8 1.08	1.48	0.67	0.6	1.89	2.56	大	6/8	6/8	
45	2.14	2.30	7/8 1.22	1.13	0.30	0.3	1.53	1.83	小	7/8	7/8	
55	2.01		8/8	1.11	0.53	0.5	1.53	2.06	OK	8/8	8/8	
65	2.08	4.80	8/8	2.01	1.11	0.53	0.5	1.53	2.06	OK	8/8	8/8
75	2.45	6.39	7/8	2.11	1.25	0.80	0.4	1.65	2.45	OK	7/8	7/8
85	3.19	8.71	6/8	2.13	1.10	1.48	0.7	2.01	3.19	大	6/8	6/8
88	3.50	8.80	7/8	2.21	1.17	1.50	0.7	2.01	3.21	OK	7/8	7/8

よつて、開度 $7.5/8$ とすれば $\epsilon = 0.4$,
 $\zeta_2 = 1.21$ となつて、

右辺 $= 2.13 \text{ mmAq}$

よつて、求むる開度は $7.5/8$ となる。

表-3 は各点の開度の計算結果を示し、図-12 は静圧分布曲線と、それに対応する開度曲線を示す。

以上は一様分流通管（送気）の場合であるが、一様合流通管（排気）の場合には、開度によつて ζ_2 の値が変化するため、このようにして求められた開度によつて静圧分布を再計算し、それに対して開度を求めるという操作をくりかえさなくてはならない。

7. 結 び

ここにのべた計算法は、基礎的な理論

および模型実験からみちびいたものであるが、きわめて簡単で、分岐管の数が多くても複雑にならないという特長をもつていて、任意の点の静圧が容易に求められるから、実用上の利用価値が大きいものと考えられる。また得られる結果は、Singstad の計算より約 20% 低く、より合理的な値となつている。

静圧の値がわかれば、分岐管の開度を求めることも、また簡単である。

本稿が、今後予想される道路トンネルの換気設計に役立てば、筆者の幸とするところである。

本文を執筆するにあたり、九州大学葛西泰二郎教授ならびに佐藤雄二助教授の懇切なる御指導をうけた。ここに深謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Ole Singstad, "Ventilation of Vehicular Tunnels" Proc. World Eng. Congress, 1929, Tokio
- 2) Vögel, "Verlust in rechtwinkligen Rohrverzweigungen", Mitteilungen des hydraulischen Instituts der technischen Hochschule, München, Heft. 1, 1926
- 3) Peterman, "Beiträge zur Kenntniss der hydraulische Verlust in Abzweigstücken", Heft. 3, 1929.
- 4) Kinne, "Der Verlust in schiefwinkligen Rohrverzweigungen", Heft. 4, 1931
- 5) 沖, 川口, 平塚, 機械学会論文集, 昭和 26 年, 17 卷 56 号
- 6) 伊吹山四郎「自動車隧道換気の際の一様分流通管内合流管の損失について」土木学会第 11 回年次学術講演会, 昭和 30 年 5 月
- 7) 佐藤雄二「一様流量分配管および集合管の所要圧力の算定について」日本機械学会第 29 期定時総会, 昭和 27 年 4 月 2 日

(昭.31.12.3)

図-12 静圧曲線と開度曲線

