

トンネル換気の調整試験

—名神高速道路天王山・梶原トンネルの場合—

中道 文基*

要旨 本文は、昭和 38 年 6 月中旬から名神高速道路尼崎～栗東間の一部供用の始まった 7 月中旬までの 1 カ月間に行なわれた、天王山および梶原両トンネルの換気調整試験の状況とその結果について述べたものである。

1. まえがき

わが国における道路トンネルのうち、換気装置が設けられているのは、関門トンネルが始めてのものであったが、昭和 38 年 7 月 15 日を境として、第 2 番目の、かつ高速道路としては初めての換気装置をもったトンネルとして、天王山および梶原トンネルが誕生した。

そして、その換気方式も、一般に、半横流式 (Semi-Transverse System) と呼ばれる形式が採られていて、トンネル車道を換気系の一部としてふくんでいるがために、常に、交通状況、気象状況の変動による影響を受けるものである。

本文は、非常に影響の受けやすい換気系から (特に天井部の送気ダクトから) 一様等流量の換気を車道全体にわたって分布させるための二、三の基礎実験をふくめた換気調整試験の状況とその結果について述べようとしたものである。

試験は、供用開始前のあわたしい時期に行なわれたためか、あまり満足すべき結果は得られなかったようであるが、今後建設されるトンネルの換気の基本パターンとして逐次採用されるであろうこの換気方式について、なんらかの参考資料となればと思い、あえて報告する次第である。

2. 名神高速道路天王山および梶原トンネルとその換気施設の概要

天王山・梶原両トンネルについては、本誌などにおいてしばしば紹介されているが、以下簡単にその概要についてふれることにする。

両トンネルの位置および規模は表-1 および 図-1, 2 にそれぞれ示すとおりである。

両トンネルは、高速道路トンネルとしての機能を十分に果たすために、換気、照明、防災、統御、内装などの各施設が設けられている。

特に、換気施設はわが国で最初の半横流式換気方式を採用したもので、従来の CO ガスばかりでなく、煤煙に対しても十分な走行上の安全を確保できるような容量をもつものである。換気系の概要は以下に記すとおりである。

すなわち、図-3 の見取図に示されているように、まず、送風機の設置されている換気塔から、トンネル天井

表-1 梶原および天王山トンネルの概要

		梶原トンネル	天王山トンネル
区間	自	大阪府高槻市大字梶原	大阪府三島郡本町大字大蔵
	至	大阪府三島郡島本町大字桜井	京都府乙訓郡大山崎村大字大山崎
延長	上り線	904 m	1 453.5 m
	下り線	960 m	1 388 m
幅員		8.7 m	8.7 m
天井高さ		4.5 m	4.5 m
縦断勾配	上り線	0.19%	0.85%
	下り線	1.08%	1.50%

図-1 天王山・梶原トンネルの位置図

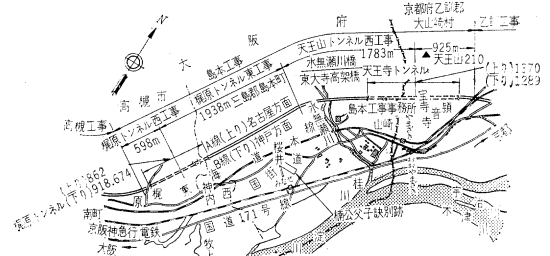
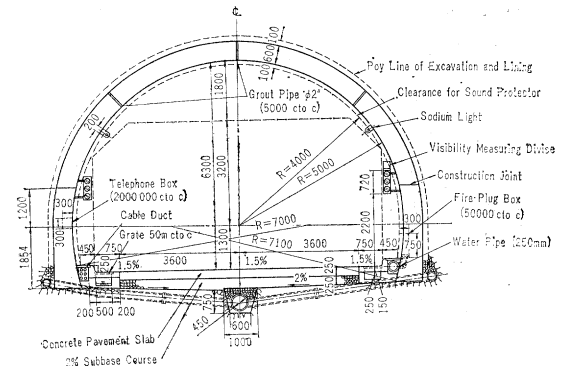
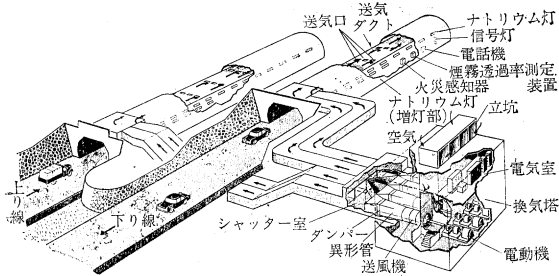


図-2 トンネル標準断面図



* 正員 日本道路公団企画調査部技術課

図-3 換気系の見取図



部の送気ダクトまでの間をボックスカルバートのダクトで接続し、新鮮な空気の通風路とし所定の圧力をもって送られた換気量は、それぞれ天井部の送気ダクトに等間隔（約 5 m）に設けられている換気孔から車道に吹出され、車道内をクリアーにしながら車道を排気ダクトとしてトンネル坑外に排出されてゆくものである。

このような方式の換気施設そのものの設計、諸元などについては、あえてここではふれないが、送風機そのものの容量を表-2 に示す。

表-2 天王山および梶原トンネル送風機仕様一覧表

項目	天王山トンネル	梶原トンネル
形式	横置1段軸流型 自動静翼付 歯車減速電動機駆動式	同 左
風量	最大 75 m ³ /sec	同 左
圧力(送風)	最大 80 mmAq	最大 70 mmAq
圧力(排風)	80 mmAq	70 mmAq
吸込温度	標準 20°C 最低 0°C	同 左
口径-長さ	φ 3 000 mm - 5.5 m	同 左
動翼回転数	420/315 rpm	350/260 rpm
電動機形式 および出力	交流三相誘導電動機 極数変換型 100 kW/70 kW	同 左 90 kW/40 kW

2. 換気調整試験の目的と内容

送風機から送られる換気量(天王山トンネル300m³/sec, 梶原トンネル 150 m³/sec)を天井ダクトに設けられている換気調整孔を通じて、一様等流量に配分し換気の適正化をはかることが本試験の主目的である。

理論上、および関門トンネルの実験結果からも明らかのように、換気調整孔（以下スロットと呼ぶ）から出る流量は、スロットを境として、(1)送気ダクトと車道との差圧、(2)スロットの開度、(3)スロットからの吹出風速とダクト内主流風速との比によってきまる。

したがって、以上の関係を実験的に確かめた関門トンネルの場合の諸数値を用いれば、一義的に送気ダクトの理論開度は決定されるものである。

しかし、現実には半横流式換気方式の特質でもある車

道を排気ダクトとして用いる方法の場合、車道内の圧力は強力な自然気象のため、かつまた、供用開始後は交通換気力のためいちじるしく変動し、その差圧自体を理論上とらえることは困難である。

したがって理論上、気象条件を仮定に入れたとしても供用開始前の交通のない状態においてさえ、等流量分布が車道換気に実現しているかどうかを確かめてみる必要がある。そしてさらに、その場合に必要な送風機圧力の程度から、余裕風圧がどの程度あるかを知り、それをもって供用中の交通換気圧に対処しうるかどうかを判断し、一連の換気系を整備しようと試みた（設計上、交通換気圧に対して天王山トンネル 30 mmAq、梶原トンネル 20 mmAq の余裕がとられている）。

以上、二つの問題を試験するには、それぞれの圧力、吹出風量を測定すればよいのであるが、その測定に入るまでに二、三基礎的な問題を解決するために行なわねばならない基礎試験が必要であった。

すなわち、以下に述べるようなものである。

(1) トンネルダクト風速分布測定試験

スロットの開度を決定するためには、送気ダクト内の静圧分布を測定しなければならない。

静圧分布の測定はピトー管をダクト内に設置して行なわれたが、まず、ダクト横断面のどの位置にピトー管を設置すべきかが問題である。このために、ダクト内の風速分布を測定し、平均風速点を求める基礎実験を必要とした。

(2) スロット流量係数の測定試験

スロット開度を調整するという事はいい換えればスロットよりの風量を均一にすることである。風量は、スロットから出る風速とその断面積の積で与えられることはいふまでもないことであるが、その場合の風速および断面積が、スロットよりの風速は断面全体にわたって等速ではないこと、また吹出断面積も流れがダクト主流の影響を受けて斜めに吹出されることにより、その有効流出断面積がそれぞれのスロット位置、形状によって異なることなどにより、正確に把握できないうらみがあった。

また、時間をかけて行なうことが許されるならば、各スロットごとに綿密に風速を測定し、流れの方向を見定めてその風量を求めることは可能であるが、スロットの数は相当数にのぼり、さらに供用開始を目前に控え、できるだけ簡便な方法で各スロットからの風量をチェックしなければならない。

このため、スロットの位置、形状に応じて平均風速を測定しさえすれば、その点の流量が把握できるように流量係数なるものを導入することとし、係数測定の基礎実験が行なわれた。

かくして、以上の基礎実験を先行させながら、逐次、天王山、梶原トンネルのスロット調整が行なわれた。以下に、その実験内容と結果を記すことにする。

3. 基礎実験と調整試験

(1) 使用測定器具

試験は前述のように、基礎実験と調整試験に大別されるが、ここで使用した主要測定器具を羅列しておく。

ピトー管	12φ~1000 mm	48本
多管マンメーター		
動圧用	U-20	3組
静圧用	U-20	3組
精密マンメーター (ゲッチング)		1式
風速計		
ピラム式		16台
熱線式微風計		3台
その他		
ビニール管	4φ-6φ	56000 m
ビニール接続管など		600個

(2) 基礎実験

a) トンネルダクト風速分布測定試験 図-4 に示す天井部ダクトを可能な限り細分し、熱線式微風計を用いて、各点の風速を任意の3点 (No. 20, No. 58, No. 100) について測定した (写真-1 参照)。

その結果、図-4 のようなダクト内の風速分布が得られた。そしてピトー管設置位置としては、平均風速点としてダクト中心線から 700 mm 離れ、天井板上から 200 mm の点を選ばれた。風速分布図は、非常に複雑であっ

写真-1 トンネルダクト内風速分布測定状況

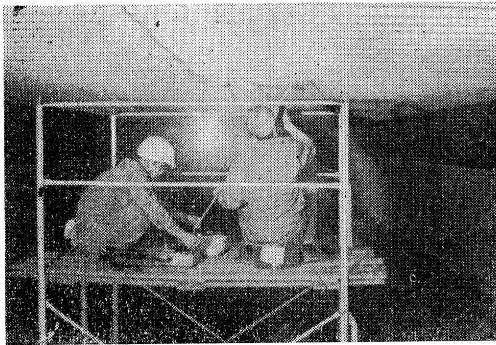
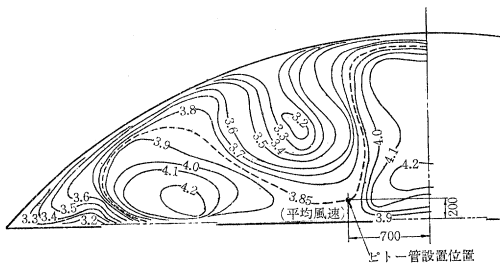


図-4 天王山(東-A)トンネルダクト内風速分布図 (等速線図) スロット No. 59 (m/sec)

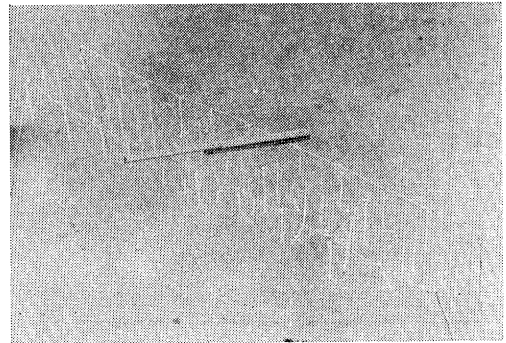


て、時々刻々変化し、正確には模型実験などから得られるべきものであるが、天井板つり棒の影響、吹出口の影響などがほぼ察知できるようである。

b) スロット流量係数の測定実験 エアーダクトのバルクヘッドより順次スロットの番号を付し、それらのうち No. 10, 40, 70, 100, 130 と約 150m 置きのスロットを選び、各スロットから得る風量を開度パラメーターとして測定することとした。

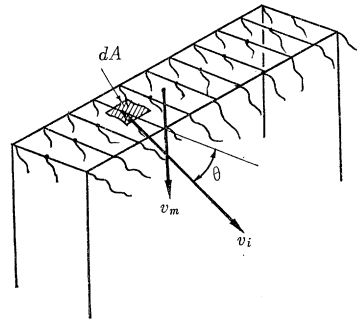
吹流し糸は、写真-2 に示すように、スロット最大開

写真-2 吹流し糸



度 (1000 mm×150 mm) の断面を 550 個の核点に細分し、その吹流し糸をつけたわくを選ばれたスロットにおいて、それから得る流量を得ることとした。すなわち、図-5 によるノーテーションにしたがえば、スロットから

図-5 吹流し概念図



でる風量 q は次式で与えられよう。

$$q = \int v_i \cos \theta_i \alpha A \dots \dots (1)$$

観測結果によると、各糸の吹流し角度は一定ではないが、ほぼ等しいと見なせたので

$$\theta_i = \theta = \text{const} \dots \dots (2)$$

とすれば、式 (1) は

$$q = A \cdot \cos \theta \bar{v}_i \dots \dots (3)$$

で表わされる。

一方、スロット中央の風速を標準風速と考えて、その値から、風量を求めると

$$q' = A \cdot v_m \dots \dots (4)$$

で表わされる。

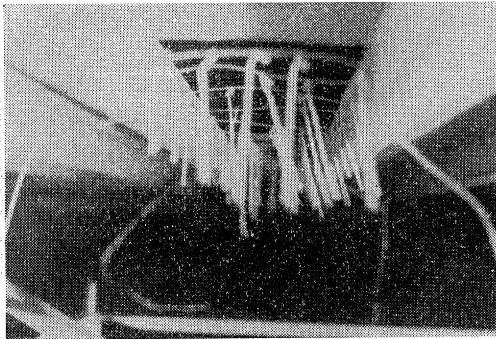
以下に続く、スロット開度調整を迅速かつ正確に行なうための基礎的な係数を求めるのがこの試験の目的であり、 v_m のみを測定すれば、風量 q が得られるために、

v_i と v_m の相互の関係は式 (3), (4) から

$$K = \frac{q}{q'} = \frac{A \cdot \cos \theta \cdot \bar{v}_i}{A v_m} = \frac{\bar{v}_i}{v_m} \cos \theta \dots\dots\dots(5)$$

で表わされる。流量係数 K を導入すればその目的が達成されることになる。かくして、各スロットごとに開度を種々変化させて、各吹出し糸のおおのの風速を熱線微風計にて測定し、吹出し角度を分度器でにらみそれぞれデータを得た (測定状況は写真-3 のとおりである)。

写真-3 スロット流量係数の測定状況

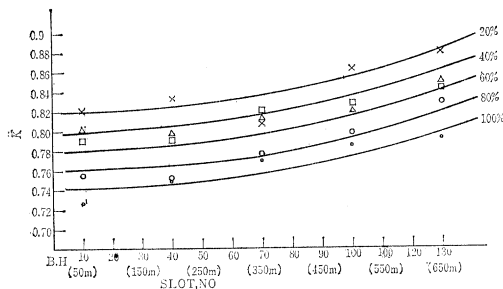


データの詳細は割愛するが、全体としていえることはつぎのようである。

流量係数には、スロットナンバーが増すほど (主流に対する分流比が少なくなるほど) 増加し、スロット開度が減る。すなわち、スロットの開口形が正方形に近づくにつれて増すという傾向を示している。

全体の結果は、図-6 に示すとおりである。

図-6 天王山トンネル (西-B) スロット係数測定



(3) 換気調整試験

トンネルダクトの静圧および車道部静圧を測定し、その差圧より各スロットからの吹出換気量を一定に保ち、トンネル内のいかなる場所でも煤煙による汚れのむらを起こさせないようにするのが本調整試験の目的である。

したがって、本試験の内容は

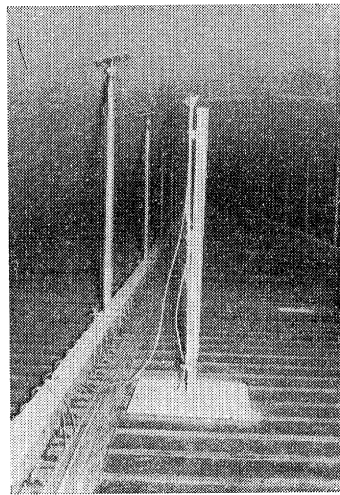
- ① トンネルダクト内の静圧分布
- ② 車道内の静圧分布
- ③ 各スロットからの風量

の測定を行なうことにつきる。

a) トンネルダクト部静圧測定 ダクト内の静圧は 3. (2) で得た平均風速点に (50 m または 100 m 間隔に) ピトー管を設置し、それぞれのピトー管より、換気塔付近のシャッター室に設置されてある多管マンメーターにビニールパイプでもって接続し、同時測定により得ることとした。

なお、トンネル車道部よりピトー管をそう入し、個々に測定した値をも参考とした。ダクト内の試験器具配置状況および、マンメーターによる測定状況は、写真-4, 5 に示すとおりである。

b) トンネル車道部静圧測定 トンネル車道部静圧測定は、車道天井のデッキプレートに 100m 間隔に静圧測定用ニップルを取りつけ、これよりビニールチューブを接続し、ダクト静圧と同様多管マンメーターに導き、同時に読みとられた。



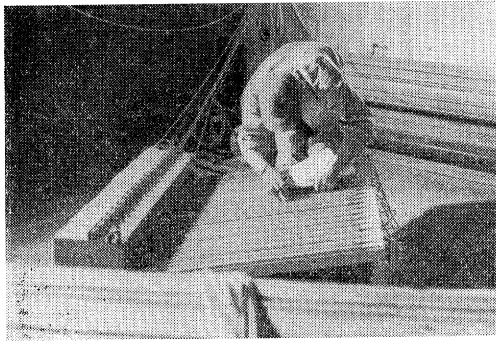
c) スロット風量 スロットよりの風量は、各スロットの仮設定開度の中心風速 v_m

をスロットナンバー5個単位 (25 m おきに) 測定し、3. (2) b) で得た流量係数を用いて算出された。

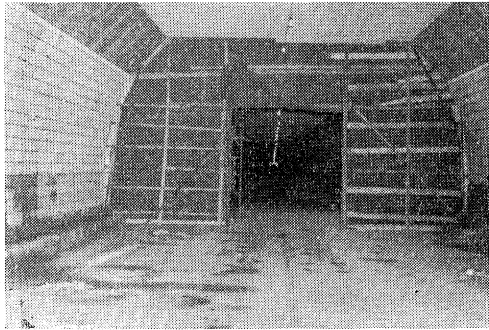
d) 風量調整 風量調整は、上述の3項目を同時に測定しながら、最初、計算上仮定された開度を修正し逐次、等流量分布を実現させるべく試行実験を行なわねばならなかった。スロットは、トンネル長手方向に約 5 m ピッチに3カ所設けられていて、各スロットとも 1000 mm × 150 mm の開口面積から 0 まで、調整板によって調整可能になっている。

ある箇所のスロット開度を変化させると、その影響がそのスロット前後の流量におよび、さらに、そこを調整すると、また、ほかに影響がおよぶという具合にすべてのスロットが関連しているがために本調整は第1次設定から順次、全体を通して試行する以外に方法がなく、また、特に、天王山トンネルではトンネル本体の難工の結果そのダクト面積が一様でないため、流れに乱れが生じ、第5次におよぶ開度設定を行なってもなおかつ、不均等な流量配分が生じる始末であった (なお、天王山トンネルの換気系は、両坑口からトンネル中央に向かって送風する形式であり、1本のトンネルが2系統の換気系に

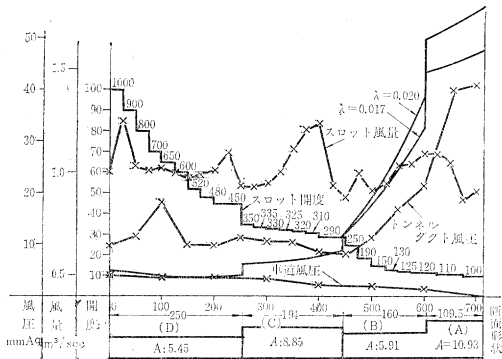
写真一五 マノメーターによるダクト内圧力測定状況



写真一六 トンネル中央の仕切り幕設置状況



図一七 天王山東（上り線）スロット開度およびスロット風量、トンネルダクト風圧、車道風圧



支配されているのでお互いに影響をおよぼし合うものである。

それゆえに、自然風の影響などによって換気系が影響を受けないよう、かつ中性点（車道内で風向きのない点）を常にトンネル中央におくようにするため、写真一六に示すしゃへい幕を設置し、試験のモデル化を計った。

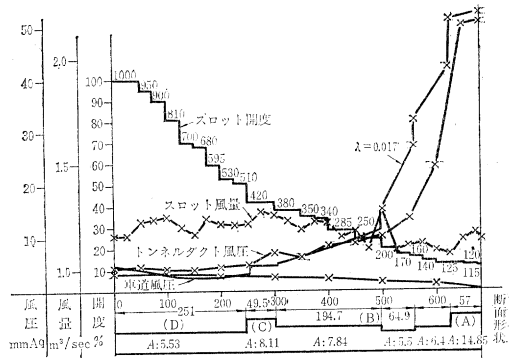
各ダクト内の静圧分布とその調整開度は図一七～一十二のとおりである。

4. 実験結果について

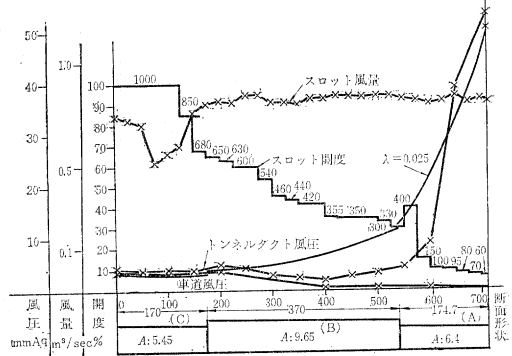
(1) ダクト内の静圧分布について

a) 天王山（東）上り線送気ダクト 車道部の静圧

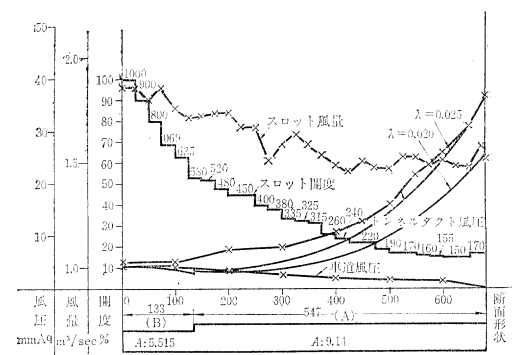
図一八 天王山東（下り線）スロット開度およびスロット風量、トンネルダクト風圧、車道風圧



図一九 天王山西（上り線）スロット開度およびスロット風量、トンネルダクト風圧、車道風圧



図一〇 天王山西（下り線）スロット開度およびスロット風量



分布はほぼ計算値どりの結果である。トンネルダクトは図一七に示されているように、A～D部まで断面積が異なっていて、その断面変化の静圧におよぼす影響が想像以上に複雑であった。

まず、A部の損失風圧は計画より小さく測定されているが、これはその前にある弓形異形曲管の影響と考えられる。B部は、恐らく断面いっぱい風が流れず、弓形天井部に渦流層を残し、風速が計画より増速されていると思われる。λは、実際には0.015程度と考えられるものであろうが、増速のため見掛上0.017～0.020になっ

図-11 梶原西（上り線）スロット開度およびスロットの風量、トンネルダクト風圧

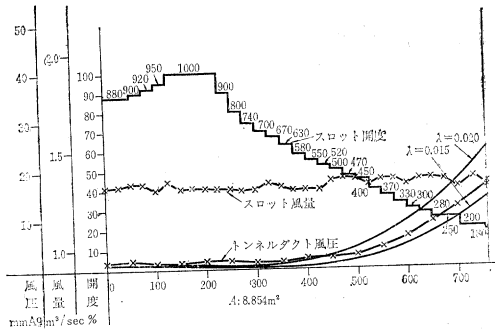
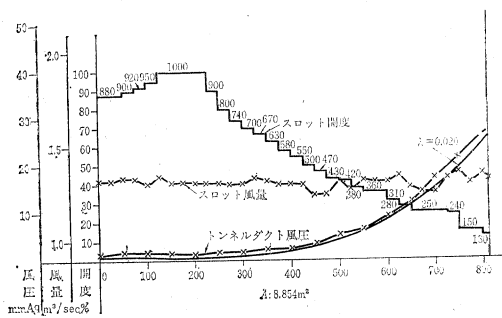


図-12 梶原西（下り線）スロット開度およびスロット風量、トンネルダクト風圧



ているように見える。

C部は、B部の計画値より大きい風速が減速されて風圧がいちじるしく回収されるので、摩擦抵抗に打ちかかって見えるのが測定結果であろう。

D部の測定風圧の上昇は、ビニールパイプが長くなることなどによる測定の失敗と考えられ、このような異常な値が得られるはずがないと思われる。

b) 天王山（東）下り線送気ダクト 車道部の風圧測定は、他工事の都合で割愛した。

トンネルダクトは、送気部入口からみて面積の異なった4区分からなり（図-8 参照）、A、B、C およびD部の測定風圧はほぼ計画どおりと見てよい。

c) 天王山（西）上り線 車道部の測定風圧が計画より低いのは、自然風の影響かと思われる。ほかと同様に、ダクトは3種の断面からなっていて、特にA部はトンネル補強上、H-200のSupportが施こされていて、実際には断面の減少はもちろん、ほかの渦流損失が非常に大きいことが明らかとなっている。

このことは、B部における静圧の回収が大きいことから、A部の有効断面積の減少の大きいことを示している。C部は計画どおりと考えられよう。

d) 天王山（西）下り線送気ダクト 車道部の測定風圧は計画どおりであろう。トンネルダクトはほかにくらべ変化が少なく、静圧曲線から見て、 λ はほぼ0.020

～0.025の範囲にあるようである。

e) 梶原（西）上り、下り線送気ダクト 天王山にくらべ、断面の変化は全くなく、いずれも、計画通りの測定風圧を示しているようである。

f) 全体として 全般に本試験で得られた静圧分布は、各所について不明な点が多く、目に見えない風にほんろうされたのが実情である。摩擦係数 λ は全ダクトを通じて、閘門の場合のP C版に比しやや大きい(0.05)程度と思われた。

(2) 開度調整について

実験結果から明らかなように、梶原トンネルのごとくトンネルダクトが一樣な断面の場合、設定開度は計算開度にほぼ等しくなり、設定がきわめて容易であったが天王山トンネルのごとく、トンネルダクトが広くなったり狭くなったりして、かつ、それらの変化が急激になされているような場合には、流れが大きく脈動して随所に渦流をとまっております、測定値が、時々刻々変化するので流量測定のみで開度の設定が非常に困難であった。なお、天王山トンネルに関しては、両換気系を分離し、車道中央をしゃへいしたにもかかわらず相互に影響があるようであり、かつ、供用開始後の交通換気などの影響を考慮して、トンネル中央部に向かって、いくぶん換気量が増すよう、調整を行なった。

できるだけ一樣換気を目指して調整は行なわれたのであるが、梶原トンネルをのぞき、天王山トンネルに関しては、ほとんどその目的を果たせなかった現状である。

その理由としては、しばしば触れてきたように(1)トンネルダクトが、一定でないこと、(2)調整期間に制限があったことなどがあげられよう。

5. 終わりに

この調整試験が終わってみて感じたことは、とにかく大変は試験であったということのみである。「労多くして功少なし」と思われる試験であったかも知れない。

いずれにしても、目に見えないものを相手に、1カ月の準備とそれにつづく1カ月の期間で、なにがなんでも調整をしなければならなかった事情や、他工事の総仕上げに遠慮しながら進めねばならなかった供用開始前のあわただしい状態下で行なわれた実験としては、満足すべきものと自分にいい聞かしているようである。

今後、各地に生まれる道路トンネルが、必ず遭遇する換気調整の仕事の困難さと、失敗の数々の良いサンプルとして、本報告書をご批判下さらんことを祈りつつあえてここに報告する次第である。

最後に、本試験にご協力をお願いした日立製作所の各位に紙上より深くお礼申し上げる。

(1964.3.23・受付)