内壁付きトンネル出口フードによる放射段階での微気圧波低減対策*

斉藤 実俊^{*1}, 宮地 徳蔵^{*1}, 飯田 雅宣^{*1}

Countermeasure for Reduction of Micro-Pressure Wave from Railway Tunnels in Its Emission Stage by Installing Exit Hood at a Tunnel Exit with an Inside Partition

Sanetoshi SAITO^{*1}, Tokuzo MIYACHI and Masanobu IIDA

^{*1} Railway Technical Research Institute
Hikari-cho 2-8-38, kokubunji-shi, Tokyo, 185-8540 Japan

When a train enters a tunnel at high speed, an impulsive pressure wave, called a micro-pressure wave, is radiated from a tunnel exit portal. Because it is one of the important wayside environmental problems in high-speed railways, many studies about its countermeasures have been conducted. The principal countermeasure applied to the Shinkansen on the ground side is a tunnel entrance hood. The necessary length of the tunnel entrance hood increases with the increase of a train velocity, and some of them installed in recent years have over 40 m length. The reduction rate of micro-pressure wave by extending the hood length decreases in case the hood length is long. In this paper a new countermeasure to install a tunnel exit hood to reduce the micro-pressure wave has been proposed. While the tunnel entrance hood is installed at tunnel entrance portal, the tunnel exit hood is installed at tunnel exit portal from which the micro-pressure wave is radiated. The tunnel exit hood has an inside partition which divides the inside of the hood into two parts in the vicinity of its mouth with the end of one part closed. Its reduction rate of the micro-pressure wave has been estimated by an acoustic analysis and verified by model experiments.

Key Words : Micro-Pressure Wave, Pressure Wave, Railway, Tunnel

1. 緒 言

高速で走行する列車がトンネルに突入するとトンネル内に圧縮波が形成され、反対側の坑口（トンネル出口）に向かって音速で伝播する。この圧縮波がトンネル出口に到達すると外部にパルス状の圧力波が放射される。このパルス波はトンネル微気圧波⁽¹⁾⁽²⁾やトンネルソニックブームと呼ばれ、20 Hz 以上の可聴域成分が多く含まれていると衝撃音が聞こえる場合があり、20 Hz 以下の成分が多く含まれる場合には、衝撃音は聞こえないものの、民家の建具を揺らす等の低周波音としての影響が現れ、高速鉄道における沿線環境問題のひとつとなっている。トンネル微気圧波は列車速度の増加にともなって大きくなるため、新幹線などの速度向上時には低減対策を実施することが必須となる。

トンネル微気圧波（以下、微気圧波）の大きさはトンネル出口に到達した圧縮波の波面が切り立つほど大きくなり、低周波遠方場近似が成立する範囲では圧縮波の圧力勾配（圧力の時間微分）の最大値に比例する⁽¹⁾⁽²⁾。したがって、微気圧波を低減するためには圧縮波の圧力勾配最大値を小さくすればよい。

現在実用化されている主な微気圧波低減対策としてはトンネル入口（列車突入側の坑口）に設置される、側面に開口窓を有するフード（トンネル入口緩衝工、以下、単に緩衝工）⁽²⁾による地上側対策と、列車先頭部の延長および最適化による車上側対策がある。これらの対策はいずれも圧縮波の圧力勾配最大値をトンネル入口側で小さくすることを目的としたものである。スラブ軌道トンネルの場合、トンネル入口で発生した圧縮波はトンネル内を伝播する過程で波面が切り立ち（圧力勾配最大値が増加し）、入口における圧力勾配最大値が大きいくほど、そ

* 原稿受付 2013 年 7 月 12 日

^{*1} 正員、(公財)鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）
E-mail: saitou@rti.or.jp

の増加量は急激に大きくなる⁽³⁾ため、トンネル入口側で圧力勾配最大値を下げることは微気圧波の低減に対して非常に効果的である。列車速度の向上に伴って必要とされる緩衝工は長くなり、現在では 40 m 以上の緩衝工も少なくない。しかし、ある程度以上（現在の新幹線では 40 m 程度以上）長くなると、延長量に対する微気圧波低減量は小さくなり、低減効果は頭打ちになる⁽⁴⁾。そこで、効果的に微気圧波を低減させるための、微気圧波の放射段階（トンネル出口側）での低減対策方法を提案する。微気圧波放射段階における対策としては、消音用ボックス⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いたものが提案されている。また、実用化されているものとして、スノーシェルターによるトンネルの連結がある⁽⁷⁾が、これは 2 つのトンネルが比較的近く（実用的には 100～200m 以下の間隔）で連続して存在する場合にしか適用できない。そこで、単独のトンネルにも適用可能な実用的な微気圧波放射段階における対策を提案する。それは、トンネル枝坑から放射される微気圧波の低減対策として著者らが提案した手法⁽⁸⁾を応用したもので、内部を線路方向に長い壁（以下、内壁）で 2 分割し、分割した一方の坑口が閉鎖されている（すなわち固定端である）フード状構造物をトンネル出口側に設置するものである（以下、内壁付き出口フード）。

本研究では、内壁付き出口フードについて、音響学的に微気圧波低減効果の予測を行い、さらに、列車模型発射装置による模型実験によって微気圧波低減効果を確かめた。

2. 主な記号

A	: トンネル断面積
A_h	: (内壁のない通常の) 緩衝工の断面積
A_h'	: 内壁付き出口フードの全断面積
c	: 音速
d	: トンネル等価直径 ($= 2\sqrt{A/\pi}$)
M	: マッハ数 ($= U/c$)
lc	: 特性長さ
l_E	: 坑口における開口端補正量
l_n	: 列車先頭部長さ
l_w	: 圧縮波の立ち上がり長さ (波面幅)
L	: 内壁長さ
L_h	: 緩衝工長さ
p	: 圧力
P	: トンネル本坑から放射される微気圧波
PO	: 内壁付き出口フードから放射される微気圧波
r	: 坑口から測定点までの距離
R	: 管内断面積変化部での反射係数
t	: 時間
T	: 管内断面積変化部での透過係数
u	: 圧力波によって誘起される管内流速 (m/s)
U	: 列車速度 (m/s)
V	: 列車速度 (km/h)
σ	: 開口率
σ_h	: 内壁のない緩衝工の断面積比 ($= A_h/A$)
σ_h'	: 内壁付き出口フードの断面積比 ($= A_h'/A$)
Ω	: トンネル坑口からの放射立体角
ρ	: 空気密度
(添え字)	
c	: 閉鎖端側
i	: 反射回数

- o : 開口端側
 * : 反射波

3. 微気圧波低減効果の予測

3・1 トンネル本坑への適用方法

図1のように、列車がトンネルに突入するとトンネル内に圧縮波が形成され、トンネル出口に向かって音速で伝播する。トンネル出口に到達した圧縮波は出口側坑口で開口端反射し、膨張波としてトンネル入口側に戻るが、その際にエネルギーの一部が出口側坑口から外部に向かってパルス状の圧力波（トンネル微気圧波）として放射される。

Fig.1 Schematic illustration of a train entering a tunnel

圧縮波の波長がトンネル半径より十分長く、トンネル坑口から微気圧波の観測点までの距離がトンネル半径より十分大きい場合（低周波遠方場近似）においては、トンネル出口に到達した圧縮波 $p(t)$ と坑口から放射される微気圧波 $P(t)$ は以下の式で示される⁽¹⁾⁽²⁾。

$$P(t) = \frac{2\rho A}{\Omega r} \frac{\partial u(t-r/c)}{\partial t} = \frac{2A}{\Omega rc} \frac{\partial p(t-r/c)}{\partial t} \quad (1)$$

したがって、圧力勾配最大値を減らせば微気圧波を低減させることができ、その目的のために新幹線においては緩衝工の設置や車両先頭部の最適化などが実施されてきた。一方、式(1)によると、放射断面積 A を減らしても微気圧波を小さくすることができる。しかし、単純に、例えばオリフィスのようなものを坑口に設置して断面積を縮小すると、坑口における流速 u が増加するため、放射断面積 A の減少量に比例するほどには微気圧波は小さくならない⁽⁶⁾。そこで、著者らは、坑口における流速を増加させずに放射断面積を縮小する方策として、図2に示すように、坑口付近を内壁によって分割し、その片側を閉鎖させる構成を提案し、この手法をトンネル枝坑から放射される微気圧波の低減対策として適用し、模型実験によってほぼ予測通りの効果が得られることを確認した⁽⁸⁾。

Fig.2 The tunnel branch with an inside partition

実際の新幹線トンネルの断面は、建築限界（地上施設が車両に接触しないように定められた、建築可能な限界ライン）に近接しており、図2に示したように、内壁をトンネル内に設けて内部を分割し、その片側の坑口を閉鎖することは、列車の走行を阻害するため不可能である。そこで、トンネル出口側の坑口において、緩衝工のように本坑より断面積を大きくし、その内部を内壁によって分割したフード（以下、内壁付き出口フード）を設置することで、列車走行に支障することなく微気圧波を低減することを検討する。

既存の多くの新幹線トンネルには微気圧波対策として緩衝工が入口（列車突入）側坑口に設置されているが、現在の新幹線トンネルは全て複線トンネルであり、上下両方向の列車に対応するために両側の坑口に緩衝工が設置されることが多い。したがって、列車にとっては突入側だけでなく退出側（微気圧波が放射される側）にも緩衝工が存在することになり、この退出側の緩衝工を内壁付き出口フードとして有効活用することも考えられる。現状の緩衝工はトンネル本坑に比べて断面積が大きくなっている（通常はトンネル本坑の1.3～1.5倍）⁽²⁾、建築限界に対して余裕があり、内部を分割することは十分に可能である。

3・2 音響学的検討による低減効果の予測

内壁付き出口フードの微気圧波低減効果を予測するために、トンネル出口に到達した圧力波形から、放射される微気圧波波形を求めるための計算式を導出する。内壁付き出口フードの座標系を図3に示す。本坑とフードの接続部をJ点、フード内の内壁による分岐点のうち、閉鎖端側をC点、開口端側をO点とする。また、圧縮波の波面幅はトンネル直径より十分長く（低周波近似、 $l_w \gg d$ ）、分割壁の長さは圧縮波の波面幅よりも十分長いと仮定する（ $L \gg l_w$ ）。さらに、トンネルは十分に長く、図3に示した坑口とは反対側のトンネル入口での反射波の影響はないものとし、分割壁の厚さはフード断面積より十分小さいとして無視した。また、フード長はたかだか圧縮波の波面幅のオーダーであることから、フード内での摩擦による減衰や非線形効果による波面の変化も無視できると仮定する。

トンネル本坑内を伝播してきた圧力波 $p(t)$ は、断面積変化点であるJ点で反射・透過する。透過した圧力波は内壁によって分岐され、O側とC側に平面波のまま伝播し、それぞれの坑口で開口端反射、閉鎖端反射して、再度、O点、C点に戻ってくる。戻ってきた圧力波はそれぞれ分岐部であるO点、C点で反射および透過し、閉鎖端・開口端両坑口とJ点に進む波に分かれる。断面積変化部であるJ点まで到達した波は、そこで反射してO点、C点に戻る波と透過して本坑に伝播する波とに分かれる。以上のように、開口端および閉鎖端にはO点またはC点で反射または透過した波と、J点で反射した波が繰り返し到達することになり、開口端側及び閉鎖端側の座標 x ($L_h > x > L_h - L$) における圧力 p_o , p_c は、以下の式で示される。

$$p_o(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \{p_{o_i}(x, t) + p_{o_i}^*(x, t)\} \quad (2)$$

$$p_c(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \{p_{c_i}(x, t) + p_{c_i}^*(x, t)\} \quad (3)$$

開口端、閉鎖端での反射波 $p_{o_i}^*$, $p_{c_i}^*$ は低周波近似のもと、それぞれ以下のように示される。

$$p_{o_i}^*(x, t) = -p_{o_i} \left[x, t - \frac{2(L_h - x)}{c} - \frac{2l_E}{c} \right] \quad (i \geq 1) \quad (4)$$

$$p_{c_i}^*(x, t) = p_{c_i} \left[x, t - \frac{2(L_h - x)}{c} \right] \quad (i \geq 1) \quad (5)$$

ここで、フード口での開口端補正量 l_E は考慮するが、C点、O点、J点での開口端補正は無視する。また、トンネル本坑は十分長いと仮定したので、J点を本坑側に透過した圧力波が反対側のトンネル入口で反射して戻ってくる波は考慮していない。

i 番目の圧力波 p_{o_i} , p_{c_i} は $i-1$ 番目の圧力波によって以下のように示される。

$$p_{o_i}(x, t) = R_o p_{o_{i-1}} \left[x, t - \frac{2(x - L_h + L)}{c} \right] + T_c p_{c_{i-1}} \left[x, t - \frac{2(x - L_h + L)}{c} \right] \\ + T_o R_j p_{o_{i-1}} \left[x, t - \frac{2x}{c} \right] + T_c R_j p_{c_{i-1}} \left[x, t - \frac{2x}{c} \right] \quad (i \geq 2) \quad (6)$$

$$p_{c_i}(x, t) = T_o p_{o_{i-1}} \left[x, t - \frac{2(x - L_h + L)}{c} \right] + R_c p_{c_{i-1}} \left[x, t - \frac{2(x - L_h + L)}{c} \right] \\ + T_o R_j p_{o_{i-1}} \left[x, t - \frac{2x}{c} \right] + T_c R_j p_{c_{i-1}} \left[x, t - \frac{2x}{c} \right] \quad (i \geq 2) \quad (7)$$

$$p_{o_1}(x, t) = p_{c_1}(x, t) = T_{-j} p \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (8)$$

反射係数、透過係数の添え字は圧力波が反射または透過する地点に対応しており、地点の記号の前に負の符号が付いているのは、進行方向が x の正方向の圧力波についての係数を示す。たとえば R_o はO点における x の負方向の圧力波の反射係数を、 T_{-j} はJ点における x の正方向の圧力波の透過係数を示す。開口率 σ とフード断面積比 σ_h' により、O点、C点、J点における反射係数、透過係数は以下のように示される⁹⁾。

$$\left. \begin{aligned} T_O &= \sigma, & R_O &= \sigma - 1 \\ T_C &= 1 - \sigma, & R_C &= -\sigma \\ R_J &= \frac{\sigma_h' - 1}{\sigma_h' + 1}, & T_{-J} &= \frac{2}{\sigma_h' + 1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

開口端反射における位相差を考慮すると式(1)は以下のように修正される⁽¹⁰⁾.

$$P(t) = \frac{A}{\Omega r c} \left[\frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{r}{c} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{r}{c} - \frac{2l_E}{c} \right) \right] \quad (10)$$

したがって、内壁付き出口フードから放射される微気圧波 PO は、開口端側坑口に伝播する圧力波 po_i および放射断面積 $\sigma A_h'$ を用いて、

$$PO(t) = \frac{\sigma A_h'}{\Omega r c} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{\partial po_i}{\partial t} \left(L_h, t - \frac{r}{c} \right) + \frac{\partial po_i}{\partial t} \left(L_h, t - \frac{r}{c} - \frac{2l_E}{c} \right) \right] \quad (11)$$

と示される。5・2節で詳細に検討するが、式(11)より、内壁長さ L が十分に長い場合、 $0.5 < \sigma < 1.0$ の範囲における微気圧波の大きさは、現状の新幹線トンネルのように内壁がないフード（緩衝工）がトンネル出口に設置されている場合（式(11)で $\sigma=1.0, i=1$ ）の微気圧波を基準とすると σ 倍（開口率倍）となり、トンネル出口に緩衝工がない場合の微気圧波（式(10)）を基準とすると $2\sigma\sigma_h' / (\sigma_h' + 1)$ 倍となる。

Fig.3 Tunnel exit hood with an inside partition

4. 模型実験

4・1 実験概要

内壁付き出口フードによる微気圧波低減効果を確認するために、列車模型発射装置⁽¹¹⁾による実験を行った。実験に使用した模型の主な諸元を表1に、外観ならびに主要寸法を図4に示す。地面効果を鏡像法で模擬しており⁽¹²⁾、模型の縮尺は約1/120である。列車模型の速度は350と400 km/h、内壁付き出口フードの開口率は0.7とした（図4(b））。

Table 1 Specifications of test models

Train	Diameter	52 mm
	Length	1000 mm
Tunnel	Diameter	125 mm
	Length	12000 mm
Hood	Diameter	146 mm
	Length	190 mm
Cross-sectional area ratio of train to tunnel		0.17
Cross-sectional area ratio of hood to tunnel		1.36

内壁付き出口フードとトンネル本坑の断面積比は 1.36 であり、新幹線に数多く設置されている既存の緩衝工の標準的な大きさである。全長は 190 mm で、実寸で 23 m に相当する。トンネル本坑、内壁付き出口フード、列車模型の断面は全て円形である。精密騒音計（リオン NL-32）を内壁付き出口フード口の真横（断面中心から 400 mm）に設置して微気圧波を測定した。また、圧力計（KuliteXCS-190-5G）をトンネル出口側の坑口から本坑内に 1 m 入った地点（P0）と、内壁付き出口フード内の閉鎖端側（P1）ならびに開口端側（P2）の内壁中央に設置した（図 4 参照）。トンネル入口側の条件は、緩衝工のない場合と図 4(a) に示した緩衝工（側面窓全開）を設置した場合の 2 種類である。また、トンネル出口側に設置した内壁付き出口フードおよび緩衝工の側面窓は全開である。

Fig.4 Hood model at tunnel exit

4・2 実験結果

トンネル出口に到達した圧縮波の波形（P0）を図 5 に示す。図 5 に示した P0 の波形は $L=0$ mm の条件で測定された波形であるが、トンネル出口に到達した圧縮波の波形はトンネル出口に設置した内壁付き出口フードの条件には依存せず、 $L=50$ mm, 150 mm（それぞれ実寸で 6 m と 18 m に相当）の場合でも同じ波形である。図 5 より、内壁付き出口フードに到達した圧縮波の波面幅 l_w （圧力勾配が最大値の 5 % 以上の範囲）は 350 km/h の場合で約 650 mm（1.9 ms）、400 km/h の場合で約 340 mm（1.0 ms）である。

内壁長さ L に対する微気圧波比を図 6 に示す。図 6 の横軸は内壁長さ L を図 5 に示したそれぞれの速度における圧縮波の波面幅 l_w によって無次元化している。また、縦軸は開口率 1.0 の通常の緩衝工が出口に設置された場合の微気圧波によって基準化した微気圧波比を示しており、横軸の内壁長さ 0 は通常の緩衝工が出口に設置された場合を示している（したがって開口率 $\sigma=1.0$ ）。また、図 6 には 350 km/h の場合の P0 の測定結果（図 5）を入力波形とした式 (11) による計算結果も併せて示してある。図 6 より、いずれの速度においても $L/l_w=0.15$ 以上で微気圧波比はほぼ一定となっており、その大きさは開口率にほぼ等しく約 0.7～0.75 である。また、式(11)による予測結果は実験結果と良く一致していることがわかる。

列車模型速度 $V=350$ km/h において、微気圧波低減効果が一定となる内壁長さ $L=150$ mm ($L/l_w=0.23$) の場合と、それより低い効果しか得られなかった $L=50$ mm ($L/l_w=0.08$) の場合の微気圧波の波形と内壁付き出口フード内の圧力波形（P1, P2）を図 7 に示す。図 7 には、P0 の測定結果（図 5）を入力波形とした式 (6)～(8) による P1, P2 の波形と式(11)による微気圧波の波形の計算結果も併せて示してある。微気圧波および内壁付き出口フード内圧力の波形は実験と計算で概ね一致しており、到達する圧縮波の波形が得られれば、計算によって内壁付き出口フードからの微気圧波やフード内の圧力変動が予測可能であることがわかる。ただし、今回の実験では内壁付き

出口フードには側面開口部がなく、もし実際の緩衝工のように開口部がある場合には測定位置によっては計算結果とずれる可能性がある。

閉鎖端側での圧力最大値は、到達した圧縮波が固定端反射するために、開口端側の2倍程度になっている。また、効果が一定となったときの微気圧波の波形は2波に分離している（図7(b)）のに対し、効果が収束していないときの微気圧波は1波目と2波目が重なっている（図7(a)）ことがわかる。

Fig.5 Measured waveform of the pressure and the pressure gradient in the tunnel without entrance hood (P0)

Fig.6 Variation of micro-pressure wave with inside partition length ($\sigma=0.7$)

(a) Partition length $L=50\text{mm}$ ($L/l_w=0.08$)

(b) Partition length $L=150\text{mm}$ ($L/l_w=0.23$)

Fig.7 Waveform of the micro-pressure wave and the pressure in the hood ($V=350\text{km/h}$)

次に、実際の新幹線トンネルのように、入口側に緩衝工（内壁のない通常緩衝工，側面窓全開）を設置し，出口側に内壁付き出口フード（内壁長さ 150 mm）または内壁のない通常緩衝工を設置した場合について実験を行った。入口側に通常緩

衝工（側面窓全開）を設置した場合に、内壁付き出口フードに到達した圧縮波波形（ p_0 ）を図8に、微気圧波の波形を計算結果とともに図9に示す。

実験結果より、内壁付き出口フードからの微気圧波の大きさ（図9(b), 約17 Pa）は、通常緩衝工からの微気圧波（図9(a), 約18 Pa）とほぼ同じであり、低減効果は見られなかった。図8より、内壁付き出口フードに到達した圧縮波の圧力勾配波形は、入口緩衝工の効果によって2つのピークに分かれており、波面幅は入口緩衝工のない場合（図5）と比べて2倍以上の約1500 mm（4.5 ms）となっている。したがって、内壁長さ150 mmでは微気圧波の第1波と第2波を完全に分離することができなかったために効果が得られなかったものである。

Fig.8 Measured waveform of the pressure and the pressure gradient in the tunnel with entrance hood ($V=350$ km/h)

Fig.9 Waveform of the micro-pressure wave ($V=350$ km/h)

Fig.10 Components of the micro-pressure wave emitted from the hood with inside partition ($V=350$ km/h, $L=150$ mm)

図9(b)に示した微気圧波の計算結果について、第1波から第5波までの各成分(式(11)の $i=1\sim5$)を図10に示す。微気圧波の各成分の大きさを比較すると、反射係数・透過係数の影響によって高次成分ほど小さくなり、第5波は第1波の5%程度の大きさとなるため、これより高次の成分は無視できる。今回の実験条件の場合、第1波の2番目のピークと第2波の1番目のピークが重畳しており、その結果として、図9(b)のように微気圧波の2波目のピークが大きくなっている。したがって、内壁長さが不十分な場合には、トンネル出口に内壁付き出口フードを設けることによってかえって微気圧波が大きくなる可能性もあるので注意が必要である。

5. 考 察

5・1 新幹線トンネルにおいて必要な内壁長さ

内壁付き出口フードによって最大の微気圧波低減効果を得るためには微気圧波の第1波と第2波のピークを分離する必要がある。1波目と2波目が完全に分離するためには $l_w/2$ 以上の内壁長さが必要となるが、図6に示した実験結果より、効果が収束する内壁長さは $l_w/7\sim l_w/6$ 以上であり、 $l_w/2$ より短くても最大限の効果が得られることがわかる。これは微気圧波を完全に2波に分離する必要はなく、1波目と2波目のピーク付近で重ならなければ、波形の両端部分で重なっても最大値には影響しないためである。

そこで、実際の新幹線トンネルに適用する場合に必要な内壁長さを見積もる。列車がトンネルに突入した時にトンネル内に発生する圧縮波の波面幅は以下の式で示される⁽¹³⁾。

$$l_w = \frac{l_c + L_h}{M}, l_c \sim \max(d/2, l_n) \quad (12)$$

スラブ軌道トンネルの場合、圧縮波の波面はトンネル内を伝播する間に切り立つ⁽⁹⁾ため、内壁付き出口フードが設置されるトンネル出口での波面幅は式(12)で示されるトンネル入口での波面幅よりも小さくなるが、その変化量はトンネル長さや斜坑の有無などの影響によりそれぞれのトンネルで異なる。そこで、ここでは、トンネル出口における圧縮波の波面幅として、伝播による変形を無視し、トンネル入口での波面幅を用いる。

新幹線トンネルの等価半径は地面に関する鏡像を考慮すると、 $d/2 \approx 6(\text{m})$ となる。一方、近年の新幹線の先頭部長さは10～15 m程度であることから、特性長さ l_c として列車先頭部長さ l_n を採用する。仮に $l_c=15 \text{ m}$ の列車が速度300 km/hで緩衝工のないトンネル($L_r=0$)に突入した場合に発生する圧縮波の波面幅は約62 mとなり、必要となる内壁長さはその半分の約31 mとなる。実際には、上記のとおり伝播による波面の切り立ちがあり波面幅が62 mより短くなること、上述のように完全に2波に分離する必要はないので $l_w/2$ より短くても最大限の効果が得られることなどから、必要とされる内壁長さはこの値より短くなることを期待できる。なお、トンネル入口に緩衝工が設置されている場合の圧縮波の波面幅は増大するため、必要となる内壁はこれより長くなる。

5・2 微気圧波低減効果

3・2節の検討結果をもとに、実際の新幹線トンネル出口側に内壁付き出口フードを設置した場合の微気圧波低減率について検討する。ここでは、内壁長さ L が圧縮波の波面幅 l_w に対して十分に長い場合を想定する。微気圧波低減率は式(10)と式(11)を比較することで求められるが、ここでは微気圧波低減効果を比較しやすいように開口端補正量 l_e を無視して検討する。

内壁のない通常の緩衝工がトンネル出口に設置されている場合の微気圧波の大きさは、図3と同じ座標系を使用して考えると、式(1)(8)(9)を用いて開口端補正量 l_e を無視すると、以下のように示される。

$$P(t) = \frac{2A_h}{\Omega rc} \frac{2}{\sigma_h + 1} \frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (13)$$

ここで、内壁付き出口フードと区別するために内壁のない通常の緩衝工の断面積を A_h としている。一方、内壁付き出口フードからの微気圧波の大きさは式(11)で開口端補正による位相差を無視すると以下のように示される。

$$PO(t) = \frac{2\sigma A_h'}{\Omega rc} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\partial p o_i}{\partial t} \left(L_h, t - \frac{r}{c} \right) \quad (14)$$

ここで、式(14)の $p o_i(t)$ と式(13)の $p(t)$ の大きさを比較する(厳密には、それぞれの時間微分値を比較する必要があるが、圧縮波の波面幅は同じであるため、大きさを比較しても大小関係は変わらない)。式(6)～(8)より、 $PO(t)$ は反復する多数の波

の重ね合わせであるが、3 波目以降 ($i \geq 3$) の波は反射係数と透過係数の 2 次以上のオーダーであるから、1, 2 波目と比べて十分小さいので検討から除外する。

式(6)~(9)(14)より、 $PO(t)$ の 1 波目、2 波目は以下のように示される。

$$PO_1(t) = \frac{2\sigma A_h'}{\Omega rc} \frac{\partial p_{o1}}{\partial t} \left(L_h, t - \frac{r}{c} \right) = \frac{2\sigma A_h'}{\Omega rc} \frac{2}{\sigma_h' + 1} \frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{L_h}{c} - \frac{r}{c} \right) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} PO_2(t) &= \frac{2\sigma A_h'}{\Omega rc} \frac{\partial p_{o2}}{\partial t} \left(L_h, t - \frac{r}{c} \right) \\ &= \frac{2\sigma A_h'}{\Omega rc} \frac{2}{\sigma_h' + 1} \left\{ 2(1 - \sigma) \frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{L_h}{c} - \frac{2L}{c} - \frac{r}{c} \right) + (1 - 2\sigma) R_j \frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{3L_h}{c} - \frac{r}{c} \right) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

式(15)(16)より、 $\sigma < 0.5$ の場合、第 2 波が第 1 波より大きくなることからわかる。しかし、 $\sigma < 0.5$ の場合、列車が通過可能な開口部断面積 ($=\sigma A_h'$) を確保するためには、内壁付き出口フードの全断面積 A_h' をある程度大きくする必要があり設備が大規模になるうえに、式(16)に示されるとおり、微気圧波低減率も開口率に比例するほどには小さくならない。したがって、現実的な開口率は $0.5 < \sigma < 1.0$ と考えられ、その場合の内壁付き出口フードからの微気圧波の大きさは第 1 波の大きさ (式(15)) によって決定される。

トンネル出口に通常の緩衝工が設置されている現状の新幹線トンネルと、今回提案する内壁付き出口フード ($0.5 < \sigma < 1.0$) がトンネル出口に設置されているトンネルとで、放射される微気圧波の大きさを比較すると、式(13), (15)より、

$$\frac{PO_1(t)|_{max}}{P(t)|_{max}} = \sigma \frac{1 + \frac{1}{\sigma_h}}{1 + \frac{1}{\sigma_h'}} \quad (17)$$

となり、微気圧波低減率は開口率 σ と内壁付き出口フードの断面積比 σ_h' によって決定されることがわかる。現状の新幹線トンネルに設置されている緩衝工の断面積比 σ_h は約 1.4 であることから、 $\sigma_h = 1.4$ とした場合の式(17)の関係を図 11 に示す。実際の適用においては、開口部断面積 ($=\sigma A_h' = \sigma \sigma_h' A$) は列車が通過できるだけの大きさを確保するため、微気圧波低減効果を大きくするために開口率を極端に小さくすることはできず、 $\sigma \sigma_h'$ の値は制限を受けることになる。

日本の新幹線の場合、本坑断面積は建築限界に近接しており、列車通過を可能とするための最低限の断面積に近い。したがって新幹線トンネルに内壁付き出口フードを適用する場合、開口部の断面積は最低でも本坑断面積程度確保しなければならず、その場合、 $\sigma \sigma_h' \geq 1.0$ を満たす必要がある。たとえば、トンネル出口に設置されている既存の緩衝工の内部に壁を増設することで内壁付き出口フードに改造する場合を想定すると、 $\sigma_h = \sigma_h' = 1.4$ であるから、式(17)より微気圧波低減率は開口率 σ と等しくなる。 $\sigma \sigma_h' \geq 1.0$ の条件下で最も微気圧波低減効果が大きいのは $\sigma = 0.7$ の場合であり、この場合、微気圧波低減率は開口率と同じ 0.7 となることから、30 % の微気圧波低減効果が期待できる。ただし、この場合、反対方向の列車が突入するフード口の断面積はトンネル本坑程度であり、通常の緩衝工より小さくなるため、内壁付き出口フードに開口窓を設けて開口パターンの最適化⁽²⁾⁽¹⁴⁾や、開口率を大きくして列車突入断面積を確保する ($\sigma \sigma_h' > 1.0$) などの方策により、反対方向の列車によって反対側の坑口から放射される微気圧波に悪影響を与えないよう注意する必要がある。

Fig.11 Variation of micro-pressure wave with opening ratio of tunnel exit hood

6. 結 論

高速列車の沿線環境問題のひとつであるトンネル微気圧波を放射段階で低減させる方法として内壁付きトンネル出口フードを提案し、その効果について音響学的な検討により予測し、さらに模型実験によって予測結果を確認した。結果を以下にまとめる。

- (1) トンネル出口側（列車退出側、微気圧波の放射側坑口）に、内部を壁で2分割し、分割した一方の坑口を閉鎖したフード状構造物を設置することで、微気圧波を低減することができる。側面開口部がない場合、その低減率は開口率にほぼ等しい。
- (2) 開口率に等しい微気圧波低減率を得るためには、トンネル出口に到達した圧縮波の波面幅の1/2倍（新幹線トンネルでは30m程度）以上の内壁があれば十分である。
- (3) トンネル入口に緩衝工が設置された場合など、圧縮波の波形によっては内壁長さが不十分な出口フードを設置することでかえって微気圧波が大きくなることもある。
- (4) 簡易な音響学的検討による計算式によって、内壁付き出口フードからの微気圧波およびフード内圧力を予測することが可能である。

文 献

- (1) 山本彬也, “トンネル出口からの微気圧波”, 日本物理学会春の分科会予稿集, 4pH4(1977).
- (2) 小沢智, “トンネル出口微気圧波の研究”, 鉄道技術研究報告, 1121(1979).
- (3) 福田傑, 小澤智, 飯田雅宣, 鷹崎徹, 若林雄介, “長大スラブ軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形”, 日本機械学会論文集B編, Vol.71, No.709 (2005), pp.2248-2255.
- (4) Ozawa, S., Maeda, T., Matsumura, T., Uchida, K., Kajiyama, H., Tanemoto, K., “Countermeasures to Reduce Micro-pressure Waves Radiating from Exits of Shinkansen Tunnels”, *The 7th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels* (1991), pp.253-266.
- (5) 青木俊之, 仲尾晋一郎, 近藤信昭, 松尾一泰, “円管開口端における衝撃的騒音のパッシブコントロール”, 可視化情報学会誌, Vol.17, No.2 (1997), pp.27-30.
- (6) 青木俊之, 松浦利治, 松尾一泰, “高速鉄道トンネル出口から発生する微気圧波のパッシブコントロール”, 可視化情報学会誌, Vol.22, No.1 (2002), pp.309-312.
- (7) 鉄道・運輸機構九州新幹線建設局編, 九州新幹線工事誌（新八代・西鹿児島間）(2005), pp.208-303, 鉄道・運輸機構九州新幹線建設局.
- (8) 斉藤実俊, 宮地徳蔵, 飯田雅宣, “トンネル枝坑坑口からの微気圧波低減対策”, 日本機械学会論文集B編, Vol.79, No.802 (2012), pp.1062-1071.
- (9) Lighthill, J., *Waves in Fluids* (1978), p.105, Cambridge University Press, Cambridge.
- (10) 宮地徳蔵, “トンネル坑口周りの地形を考慮した微気圧波放射モデル”, 鉄道総研報告, Vol.24, No.9 (2010), pp.23-28.
- (11) 福田傑, 飯田雅宣, “列車・トンネル系の空気力学に関する模型実験”, 日本音響学会誌, Vol.63, No.9 (2007), pp.543-548.
- (12) 田中靖幸, 飯田雅宣, 菊地勝浩, “単純な形状の模型を用いてトンネル突入時の圧縮波形成を模擬する方法（列車中心軸の偏心と地面の影響）”, 日本機械学会論文集B編, Vol.69, No.683 (2003), pp.1607-1614.
- (13) 飯田雅宣, 村田香, 福田傑, “複数車種の突入を考慮したトンネル入口緩衝工長さの算出法”, 鉄道総研報告, Vol.16, No.12 (2002), pp.35-40.
- (14) M.S.Howe, “The genetically optimized tunnel-entrance hood”, *Journal of Fluids and Structures* 23 (2007), pp.1231-1250.