

フード状構造物による列車退出側坑口での トンネル微気圧波低減対策

齊藤 実俊* 宮地 徳蔵** 飯田 雅宣***

Countermeasure for Reducing Micro-pressure Wave Emitted from Railway Tunnel
by Installing Hood at the Exit of Tunnel

Sanetoshi SAITO Tokuzo MIYACHI Masanobu IIDA

Because a micro-pressure wave radiated from a tunnel exit portal is one of the important wayside environmental problems in high-speed railways, many studies on its countermeasures have been conducted. In this paper, a new countermeasure of installing a tunnel exit hood to reduce the micro-pressure wave has been proposed. 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. It has been shown that the tunnel exit hood can be effective in reducing the magnitude of the micro-pressure wave.

キーワード：微気圧波，圧力波，鉄道，トンネル

1. はじめに

高速鉄道の沿線環境問題のひとつであるトンネル微気圧波（以下、微気圧波）は列車速度の向上に伴い急激に増加するため、新幹線などの高速化の際には対策を講じる必要がある。微気圧波の大きさは列車が突入した坑口とは反対側の坑口（トンネル出口）付近のトンネル内圧縮波の波面圧力勾配（圧力の時間微分）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く、現在の主な地上側対策であるトンネル入口緩衝工（以下、緩衝工）や車両先頭部形状の工夫は圧縮波の圧力勾配最大値を列車が突入する坑口（トンネル入口）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大きい。しかし、列車速度の向上に伴って必要とされる緩衝工は長くなる傾向にあり、現在では40 m以上の緩衝工も少なくない。緩衝工は、ある程度以上（現在の新幹線では40 m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、本稿では微気圧波を低減させるための列車退出側坑口、すなわち微気圧波放射段階での対策方法を提案する。放射段階での微気圧波低減対策としては消音用ボックス⁵⁾を用いたものなどが提案されているが、今回提案する方法は、著者らが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提案した手法⁶⁾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認した。

2. 微気圧波低減効果の検討

2.1 基本原理

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。圧縮波がトンネル出口に到達するとエネルギーの一部が外部に向かって放射され、パルス状の圧力波（トンネル微気圧波）が発生する。

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）では、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 $P(t)$ は以下の関係がある^{1) 2)}。

* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室
** 環境工学研究部 車両空力特性研究室
*** 環境工学研究部

特集：環境技術

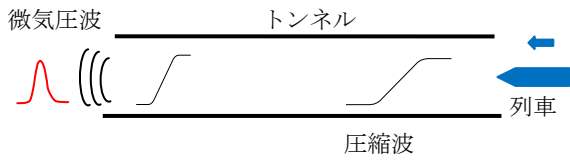


図1 トンネル微気圧波の概念図

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

ここで、 ρ ：空気密度、 A ：トンネル坑口断面積、 Ω ：坑口からの放射立体角、 r ：坑口中心から測定点までの距離、 t ：時間、 c ：音速、 p ：圧縮波の圧力、 u ：坑口における管内流速である。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 が増加するために放射断面積 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、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、ほぼ予測通りの効果が得られることを模型実験で確認した⁶⁾。しかし、この方法をトンネル本坑の微気圧波低減策として直接使用することは、トンネル断面が建築限界（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）に近接していることから、列車走行を阻害することにな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の低減を図る方法を考えた。

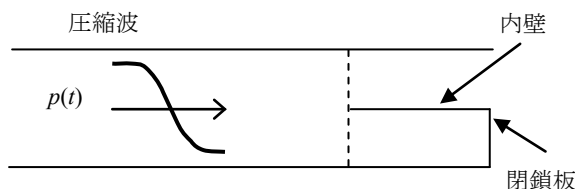


図2 内壁付き坑口

2.2 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の波形を求めす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。圧縮波の波面幅 lw はトンネル直径 d より十分長く（低周波近似、 $lw \gg d$ ）、内壁の長さ L は圧縮波の波面幅よりも十分長い

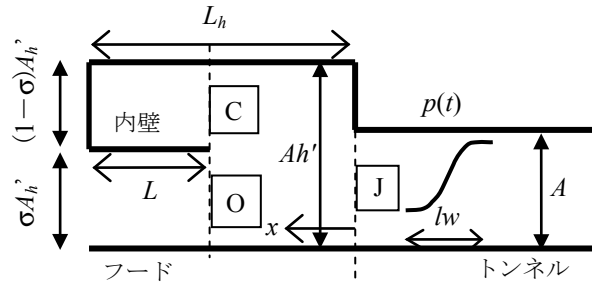


図3 内壁付きトンネル出口フード

と仮定する ($L \gg lw$)。さらに、図3に示した坑口と反対側のトンネル入口での反射波の影響、分割壁の厚さ、摩擦による減衰や非線形効果による波面の変化は無視する。

トンネル本坑内を伝播してきた圧力波 $p(t)$ 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する。それぞれの坑口で開口端反射、閉鎖端反射を行った後、O点、C点に戻り、そこで反射および透過して、再度、両坑口に進む波と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・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 po, pc は、以下のように示される。

$$po(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \{ po_i(x,t) + po_i^*(x,t) \} \quad (2)$$

$$pc(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \{ pc_i(x,t) + pc_i^*(x,t) \} \quad (3)$$

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

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

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

ここで、 L_h はフード長さ、 l_E は緩衝工口での開口端補正量である。C点、O点、J点での開口端補正は小さいので無視する。

i 番目の圧力波 po_i, pc_i は $i-1$ 番目の圧力波によって以下の式で示される。

$$po_i(x,t) = R_o po_{i-1}^* \left[x, t - \frac{2(x - L_h + L)}{c} \right] + T_c pc_{i-1}^* \left[x, t - \frac{2(x - L_h + L)}{c} \right] + T_o R_j po_{i-1}^* \left[x, t - \frac{2x}{c} \right] + T_c R_j pc_{i-1}^* \left[x, t - \frac{2x}{c} \right] \quad (i \geq 2) \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 pc_i(x,t) = & T_o po_{i-1}^* \left[x, t - \frac{2(x-L_h+L)}{c} \right] \\
 & + R_c Pc_{i-1}^* \left[x, t - \frac{2(x-L_h+L)}{c} \right] \\
 & + T_o R_j po_{i-1}^* \left[x, t - \frac{2x}{c} \right] \\
 & + T_c R_j pc_{i-1}^* \left[x, t - \frac{2x}{c} \right] \quad (i \geq 2) \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$po_1(x,t) = pc_1(x,t) = T_{-j} p \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (8)$$

ここで、 R は反射係数、 T は透過係数であり、添え字は反射または透過する地点を示している。たとえば R_o は O 点における $-x$ 方向の圧力波の反射係数を、 T_{-j} は J 点における $+x$ 方向の圧力波の透過係数を示す。反射係数、透過係数は開口率 σ （フード断面積 Ah' と開口部断面積の比、図3参照）と緩衝工断面積比 $\sigma_h' (=Ah'/A$ 、図3参照）を用いて以下のように示される⁷⁾。

$$\left. \begin{aligned}
 T_o = \sigma, \quad R_o = \sigma - 1, \quad T_c = 1 - \sigma, \quad R_c = -\sigma \\
 R_j = \frac{\sigma_h' - 1}{\sigma_h' + 1}, \quad T_{-j} = \frac{2}{\sigma_h' + 1}
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

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⁸⁾。

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

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、開口端側坑口に到達する圧力波 po_i および放射断面積 $\sigma A_h'$ を用いて、

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

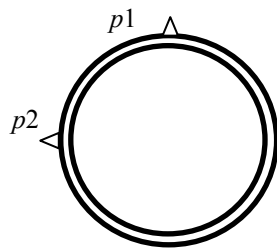
と示される。式(11)より、内壁長さ L が十分に長い場合、 $0.5 < \sigma < 1$ の範囲における微気圧波の大きさは、現状の新幹線トンネルのように内壁がないフード（緩衝工）がトンネル出口に設置されている場合（式(11)で $\sigma=1$ 、 $i=1$ ）の σ 倍（開口率倍）となる。トンネル出口に緩衝工がない場合を基準とした時の微気圧波比は式(8)、(10)、(11)より、 $\alpha = 2\sigma\sigma_h' / (\sigma_h' + 1)$ となり、開口率 σ より大きくなる。

3. 低減効果確認のための模型実験

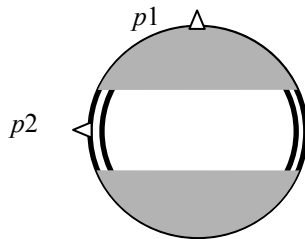
3.1 実験概要

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⁹⁾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¹⁰⁾、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)）。

表1のとおり、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、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、列車模型の断面形状は全て円形で、内壁付き出口フード坑口の真横（断面中心から400 mm）に微気圧波測定用の精密騒音計（リオンNL-32）を設置した。また、圧力計（Kulite XCS-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（ p_0 ）と、内壁付き出口フード内の閉鎖端側（ p_1 ）ならびに開口端側（ p_2 ）の内壁中央に設置した（図4参照）。トンネル入口緩衝工は設置していない。なお、内壁付き出口フードおよび緩衝工には側面開口部はない。



(a) 内壁なしフード(緩衝工)



(b) 内壁付きフード

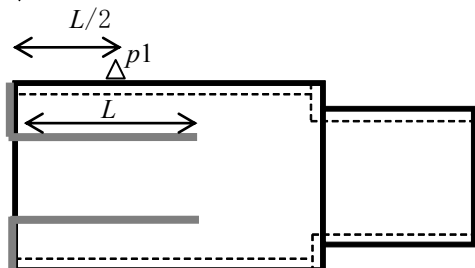
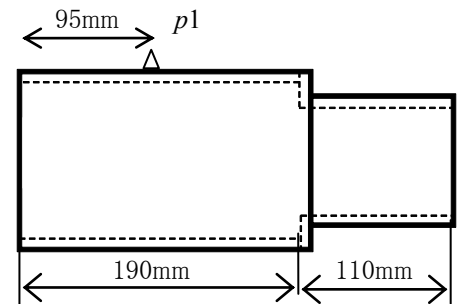


図4 トンネル出口フード模型

表1 模型の主要諸元

列車模型	直径	52 mm
	全長	1000 mm
トンネル模型	直径	125 mm
	全長	12000 mm
フード模型*	直径	146 mm
	全長	190 mm
列車・トンネル断面積比		0.17
フード・トンネル断面積比		1.36

*側面開口部閉鎖 (図4 赤色部分)

3.2 実験結果

緩衝工に到達した圧縮波の波形を図5に示す。図5に示した波形は $L=0$ mm の条件で測定された波形であるが、トンネル出口手前に到達した圧縮波の波形 (p_0) は、内壁付き出口フードの条件 (長さ, 開口率など) には依存せず、 $L=50$ mm, 150 mm の場合でも同じ波形となる。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 lw (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 lw によって無次元化している。縦軸は開口率1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 (開口率 $\sigma=1$) が出口に設置された場合のことである。また、図6には 350 km/h 時の p_0 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 $L/lw=0.15$ 以上で微気圧波比はほぼ一定となり、その大きさは開口率にほぼ等しく約 $0.7 \sim 0.75$ である。また、式(11)による計算結果は実験結果と良く一致していることがわかる。

$V=350$ 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 ($L/lw=0.23$) の場合と、それより低い効果しか得られなかった $L=50$ mm ($L/lw=0.08$) の場合の微気圧波の波形を図7に示す。図7には、 p_0 の測定結果 (図5) を入力波形としたときの式(11)による予測波形も併せて示してある。微気圧波および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放射される微気圧波の波形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と緩衝工には側面開口部がないが、実際の緩衝工のように側面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。

効果が一定となったときの微気圧波は2波に分離しているのに対し、効果が収束していないときの微気圧波は

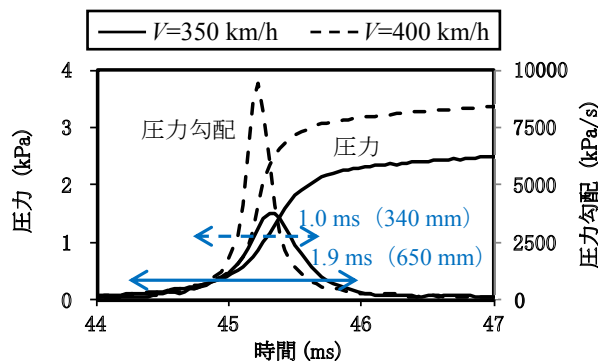


図5 内壁付き出口フードに到達した圧縮波 (p_0) の波形

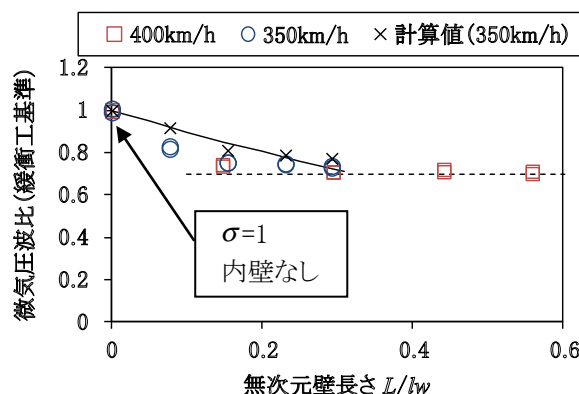


図6 内壁付き出口フードから放射される微気圧波

1波目と2波目が重なっている。1波目と2波目が完全に分離するためには $lw/2$ 以上の内壁長さが必要であるが、実験結果によれば効果が収束する内壁長さは $lw/7 \sim lw/6$ 以上であり、 $lw/2$ より短い内壁でも開口率にほぼ等しい低減率が得られることがわかる。これは、開口率に等しい低減率を得るために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。最大の微気圧波低減効果を得るために必要な内壁長さについて、全長 9.7 km のトンネルにおける現地試験結果¹¹⁾をもとに見積ると、トンネル出口における圧縮波の波面幅は約 60 m であることから、必要となる内壁長さはその半分の約 30 m となる。実際には上述のように、圧縮波の波形に依存するものの、 30 m より短くてもほぼ最大の効果が得られるものと推定される。

4. 考察

実際の新幹線トンネルの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比について検討する。新幹線トンネルは複線トンネルであり、両方向の列車に対して微気圧波対策を行っているため、トンネル両坑口に緩衝工が設置されていることが多い。そこで、トンネル出口に、内壁のない通常の緩衝工が設置されている場合と内壁付き出口フードが設置されている場合とを比較するこ

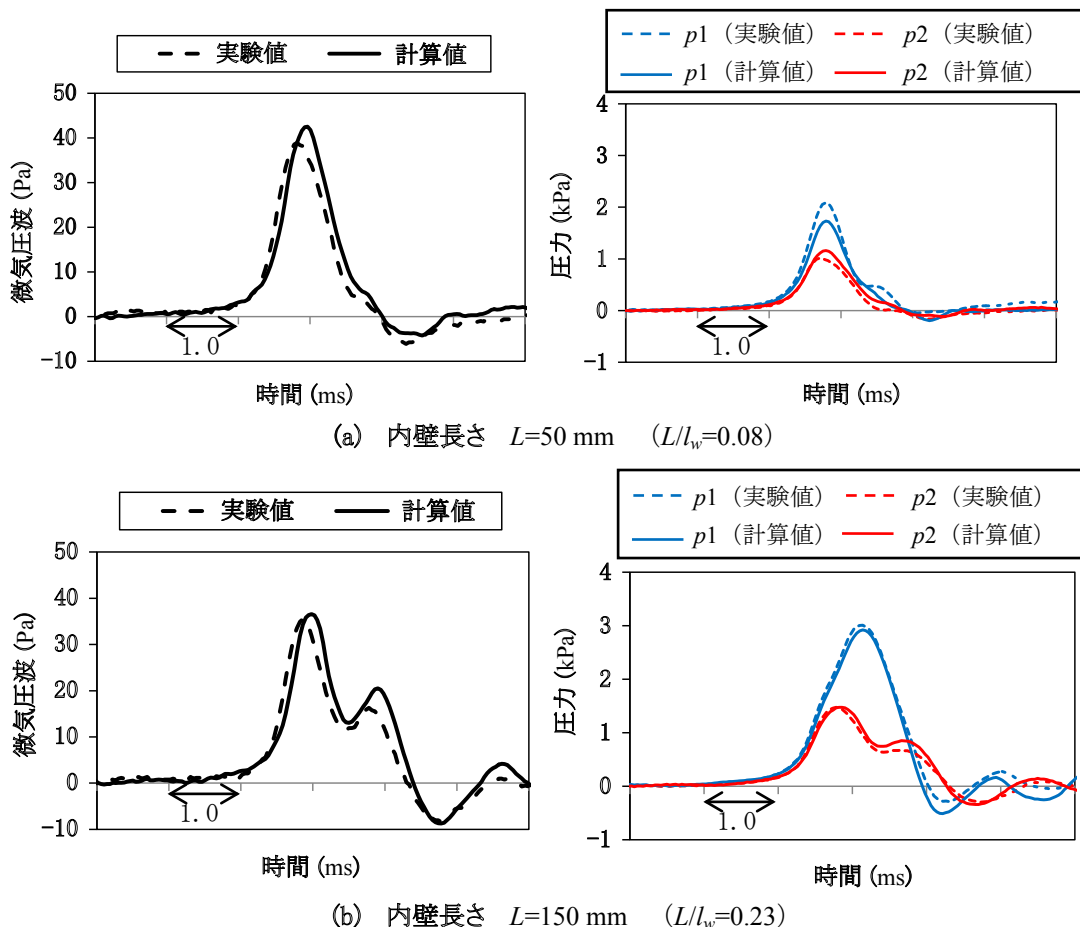


図7 微気圧波とフード内圧力の波形 ($V=350\text{ km/h}$)

とで、微気圧波比を求める。

微気圧波比は式(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、式(1)(8)(9)より開口端補正量 l_e を無視すると、以下のように示される。

$$P(t) = \frac{2A_h}{\Omega rc} \frac{2}{\sigma_h + 1} \frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (12)$$

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 、トンネル本坑との断面積比を $\sigma_h (=A_h/A)$ 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して以下のように示される。

$$PO(t) = \frac{2\sigma_h A_h'}{\Omega rc} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\partial p_{o_i}}{\partial t} \left(L_h, t - \frac{r}{c} \right) \quad (13)$$

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乗以上の係数が作用し、1, 2波目と比較すると十分小さいので検討から除外する。

式(6)～(9),(13)より、1波目、2波目は以下のようになる。

$$PO_1(t) = \frac{2\sigma_h A_h'}{\Omega rc} \frac{\partial p_{o_1}}{\partial t} \left(L_h, t - \frac{r}{c} \right) = \frac{2\sigma_h A_h'}{\Omega rc} \frac{2}{\sigma_h + 1} \frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{L_h}{c} - \frac{r}{c} \right) \quad (14)$$

$$PO_2(t) = \frac{2\sigma_h A_h'}{\Omega rc} \frac{\partial p_{o_2}}{\partial t} \left(L_h, t - \frac{r}{c} \right) = \frac{2\sigma_h A_h'}{\Omega rc} \frac{2}{\sigma_h + 1} \frac{\partial p}{\partial t} \left\{ 2(1-\sigma) \frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{L_h}{c} - \frac{2L}{c} - \frac{r}{c} \right) + (1-2\sigma) R_f \frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{3L_h}{c} - \frac{r}{c} \right) \right\} \quad (15)$$

式(14)の係数と式(15) (第1項)の係数を比較すると、 $\sigma < 0.5$ の場合、第2波が第1波より大きくなるのがわかる。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(15)に示されるとおり、微気圧波比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 $0.5 < \sigma < 1$ と考えられ、その場合、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(14)) によって決定される。よって、両者から放射される微気圧波の大きさを比較すると、式(12), (14)より、

$$\frac{PQ_1(t)|_{\max}}{P(t)|_{\max}} = \sigma \frac{1 + \frac{1}{\sigma_h}}{1 + \frac{1}{\sigma_h'}} \quad (16)$$

となり、微気圧波比は開口率 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 $\sigma_h=1.4$ とした場合の式(16)の関係を図8に示す。内壁付き出口フードの断面積が緩衝工断面積と等しい($\sigma_h'=\sigma_h=1.4$)場合、微気圧波比は開口率 σ に等しいが、緩衝工より断面積が大きい内壁付き出口フードを設置した場合($\sigma_h'>\sigma_h$)では、微気圧波減率は開口率より大きくなる(微気圧波低減効果は悪くなる)。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必要がある。

たとえば、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、 $\sigma_h=\sigma_h'=1.4$ であることから、式(17)より微気圧波比は開口率 σ と等しくなる。この場合($\sigma_h'=1.4$)、開口部分の断面積としてトンネル本坑程度の大きさを確保する($\sigma_h'=1$)と $\sigma=0.7$ となり、微気圧波比は開口率と同じであるから、30%の低減効果が期待できる。ただし、反対方向の列車に対しては、突入する側の坑口の断面積がトンネル本坑程度と通常の緩衝工より小さくなる。したがって、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⁾⁽¹²⁾や、開口率を大きく($\sigma \sigma_h'>1$)して列車突入断面積を確保するなどの方策により、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。

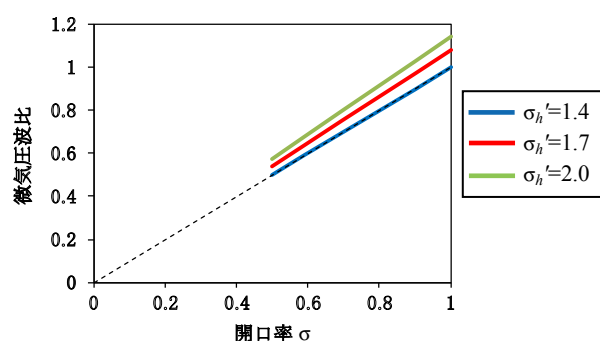


図8 内壁付き出口フードによる微気圧波低下効果

5. 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の放射段階での低減対策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検討によって予測するとともに、模型実験によって低減効果を確認した。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。その低減率は開口率にほぼ等しい。ただし、側面開口部がある場合には測定位置によって低減率が変化する可能性がある。

- (2) 開口率に等しい微気圧波比を得るためには、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。実際にはさらに短くてもほぼ最大の効果を得ることができるが、必要長さは圧縮波の波形に依存する。
- (3) 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の波形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，pp2248-2255，2005
- 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 Int. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.253-266, 1991.
- 5) 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バッシブコントロール，可視化情報学会誌，Vol.22，No.1，pp.309-312，2002
- 6) 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の低減方法，鉄道総研報告，Vol.24，No.1，pp.41-44. 2010
- 7) Lighthill, J., Waves in Fluids, Cambridge University Press, Cambridge, pp.105, 1978.
- 8) 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，pp.23-28，2010
- 9) 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，pp.543-548，2007
- 10) 田中靖幸，飯田雅宣，菊地勝浩：単純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，pp.1607-1614，2003
- 11) 斉藤実俊，宮地徳蔵，飯田雅宣，若林雄介，栗田健：長大スラブ軌道トンネル内における圧縮波の伝播特性，日本機械学会年次大会講演論文集2007(2)，pp.267-268，2007
- 12) M.S.Howe, "The genetically optimized tunnel-entrance hood," J. of Fluids and Structures 23, pp.1231-1250, 2007.