トンネル枝坑坑口から放射される圧力波の低減対策*

斉藤 実俊^{*1}, 宮地 徳蔵^{*1}, 飯田 雅宣^{*1}Countermeasure for Reduction Pressure Wave Emitted from Portal of
Side Branch of Railway TunnelSanetoshi 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 high-speed train enters a tunnel equipped with branches, pressure waves are radiated from the portals of the branches as well as from those of the main tunnel. They can cause wayside environmental problems for high-speed railways, especially in urban areas. In this study, we investigated a countermeasure against the pressure waves radiated from the portals of the branches. It has been shown that a branch with an inside partition which divides the inside of the branch into two parts in the vicinity of its portal with the end of one part closed, can be effective in reducing the magnitude of the micro-pressure wave.

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

1. 緒 言

都市圏では新規路線を敷設する用地の確保が困難なこともあり、将来的には高速列車が地下トンネル内を走行することが想定される。既に海外では地下トンネル内で 300 km/h 走行による営業運転を行っており、日本においても、地下トンネル内を高速鉄道が走行した場合に発生する空気力学的問題について検討しておくことが重要である。

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⁾⁽³⁾⁽⁴⁾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、また、衝撃音は聞こえない場合でも、民家の建具を揺らす等の低周波音としての影響が現れることがあり、高速鉄道における沿線環境問題のひとつとなっている。都市圏の地下トンネルには通常の山岳トンネルと異なり、避難・換気用の枝坑が多数設置されることが想定され、それらの坑口はその目的のために完全に閉鎖することができず、また、市街地に設けられることになるので、トンネル出口と同様に、そこから放射される微気圧波が環境問題となる可能性がある。

枝坑から放射される圧力波の発生要因に関する概略図を図 1 に示す。図 1 のように枝坑から放射される圧力波の主な要因としては、列車がトンネルに突入した時に発生した圧力波が枝坑で分岐し、枝坑坑口に到達した際に放射されるもの（図 1(a), 枝坑微気圧波）と、列車がトンネル本坑と枝坑の分岐部を通過する際に発生した圧力波によるもの（図 1(b), 枝坑通過波）がある⁽⁵⁾⁽⁶⁾（以降、枝坑微気圧波と枝坑通過波を総称して、単に微気圧波とする）。前者については、トンネル入口緩衝工（以下、緩衝工）⁽²⁾によって低減できるが、後者については緩衝工の効果がないため、他の対策方法を検討する必要がある。枝坑から放射される微気圧波は、図 1 に示した(a)(b)いずれの場合も、枝坑断面積を小さくすることで低減できるが⁽⁵⁾、避難・換気のために必要な断面積を確保することが必要となるので、その対策のためだけに極端に小さくすることはできない。そこで、本研究ではなるべく

* 原稿受付 2012 年 3 月 6 日

^{*1} 正員, (公財)鉄道総合技術研究所 (〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail:saitou@rti.or.jp

枝坑断面積を減らすことなく，効果的に枝坑から放射される微気圧波を低減する方法について検討を行った．

Fig. 1 Two types of the micro-pressure waves emitted from the branch portal

2. 主な記号

- a : 管の半径
 - A : 坑口断面積 (=微気圧波放射断面積)
 - c : 音速 (静止大気)
 - d : 等価直径 ($= 2\sqrt{A/\pi}$)
 - k : 圧力波の波数
 - l_w : 圧縮波の立ち上がり長さ (波面幅)
 - l_E : 開口端補正量
 - L : 内壁長さ
 - p : 圧力
 - P : 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
 - Ref : 管端での圧力波の反射率
 - t : 時間
 - Δt : 圧力波が内壁を往復する時間 ($=2L/c$)
 - t_w : 圧縮波の立ち上がり時間
 - 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
 - V : 列車速度
 - σ : 開口率
 - Ω : 坑口からの放射立体角
 - ρ : 空気密度 (静止大気)
- (添え字)
- c : 閉鎖端側
 - i : 反射回数
 - o : 開口端側

3. 音響学的基礎検討

図2のように枝坑のあるトンネルに高速列車が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や枝坑坑口に到達すると外部にコンピルス状の圧力波(トンネル微気圧波)が放射される.

圧縮波の波長がトンネル半径（または枝坑半径）より十分大きく、坑口から微気圧波の観測点までの距離がトンネル半径（または枝坑半径）より十分大きい場合では、トンネル出口や枝坑坑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⁾（低周波遠方場近似）。

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

Fig.2 Schematic illustration of a train entering a tunnel

したがって、圧力勾配最大値を減らせば微気圧波の大きさ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、単純に枝坑の断面積 A を小さくすると、到達する圧縮波 $p(t)$ が大きくなるため、断面積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⁾。さらに、枝坑断面積を小さくした場合、火災などの非常時の換気性能や避難路を確保できなくなる可能性がある。また、枝坑全体の断面積は小さくせず、オリフィスのようなものを坑口に設置して開口部の断面積を縮小すると、断面の急縮小によって圧縮波 $p(t)$ の圧力上昇量が増加するために、式(1)の $\partial p / \partial t$ が大きくなり、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と推定される。そこで、圧力上昇量を増加させずに放射断面積を縮小する方法として、平面波のまま圧縮波を分岐させるため、図3に示すように、枝坑の坑口付近の内部を壁によって分割し、その片側の終端部を閉鎖させる構成について検討する。この内壁付きの枝坑から放射される微気圧波の大きさを求めるために以下の前提条件を設定する。圧縮波の波面幅は枝坑直径より十分長く（低周波近似、 $l_w \gg d$ ）、内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、枝坑は十分に長く、本坑との接続部からの反射波の影響はないものとした。また、枝坑断面積に比べて小さい分割壁の断面積（厚さ）は無視し、さらに内壁の長さはトンネルや枝坑全長に比べて短く、この区間における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。

平面波として伝播してきた圧縮波は分岐点 O で開口端側（ A 側）と閉鎖端側（ B 側）に分かれる。それらは、それぞれ A 点で開口端反射、 B 点で閉鎖端反射し、再度平面波として分岐点 O に戻り、そこでそれぞれ反射、透過を行い、再度、開口端、閉鎖端に向かう。このように、圧力波は分岐点 O と開口端・閉鎖端間で反射・透過を繰り返し、多数の圧力波が開口端に到達することになる。

枝坑に伝播し、分岐点 O に到達した圧縮波を $p(t)$ で表すと、 i 回目に開口端に到達する圧力波 po_i および閉鎖端に到達する圧力波 pc_i は A 点および O 点での開口端補正を無視すると、以下のように示される。

$$po_i(t) = -R_o po_{i-1} \left(t - \frac{2L}{c} \right) + T_c pc_{i-1} \left(t - \frac{2L}{c} \right) \quad (i \geq 2) \quad (2)$$

$$pc_i(t) = -T_o po_{i-1} \left(t - \frac{2L}{c} \right) + R_c pc_{i-1} \left(t - \frac{2L}{c} \right) \quad (i \geq 2) \quad (3)$$

$$po_1(t) = pc_1(t) = p \left(t - \frac{L}{c} \right) \quad (4)$$

式(2)(3)の第1項の負の符号は A 点での開口端反射による位相の逆転に対応するものである。また、 R_o 、 R_c はそれぞれ分岐点の開口端側、閉鎖端側における反射係数、 T_o は A 側から $O \cdot B$ 側への、 T_c は B 側から $O \cdot A$ 側への透過係数であり、坑口の開口率（= A 側の開口部面積／枝坑全体の断面積） σ （ $0 < \sigma < 1$ ）を用いて、以下の式で近似される⁽⁷⁾。

$$R_o = \sigma - 1, \quad T_o = \sigma \quad (5)$$

$$R_c = -\sigma, \quad T_c = 1 - \sigma \quad (6)$$

(2)～(6)式より、開口端に向かう i 番目の圧力波は、

$$\begin{aligned} p_{oi}(t) &= (1 - 2\sigma)^{i-2}(1 - \sigma) \left\{ p_{o1} \left[t - (i-1) \frac{2L}{c} \right] + p_{c1} \left[t - (i-1) \frac{2L}{c} \right] \right\} \\ &= 2(1 - 2\sigma)^{i-2}(1 - \sigma) p \left[t - \frac{L}{c} - (i-1) \frac{2L}{c} \right] \quad (i \geq 2) \end{aligned} \quad (7)$$

と表すことができる。

式(1)において、 p を開口端に到達する圧縮波 p_{oi} に、坑口の断面積 A を分割後の断面積 σA に置き換えると、内部が分割された内壁付きの枝坑から i 番目に放射される微気圧波 $P_i(t)$ は、

$$P_i(t) = \frac{2\sigma A}{\Omega r c} \frac{\partial p_{oi}(t - r/c)}{\partial t} \quad (8)$$

となるので、 i 番目に放射される微気圧波の大きさ P_i と通常の枝坑から放射される微気圧波の大きさ P との比 (以下、微気圧波比) は、式(1)(7)より、

$$\frac{P_i}{P} = 2\sigma(1 - 2\sigma)^{i-2}(1 - \sigma) \quad (i \geq 2) \quad (9)$$

$$\frac{P_1}{P} = \sigma \quad (10)$$

となる。式(9)、(10)の関係を図4に示す。 $\sigma \geq 0.5$ 場合、微気圧波比の最大値 (1 番目の微気圧波比) は開口率に一致することがわかる。特に、 $\sigma = 0.5$ の場合は3番目以降の微気圧波は発生せず、通常トンネルの場合の半分の大きさの微気圧波が $2L/c$ の時間間隔で2回放射されることになる。また、このような方法によれば、非常時には閉鎖板 (図3 Cover) を開放することで換気流量や避難路を確保することが可能となり、枝坑本来の機能を損なうことはない。

Fig.3 Schematic illustration of the branch with an inside partition

Fig.4 Calculation of the micro-pressure wave radiated from a portal of a tunnel with an inside partition

4. 模型実験

4・1 実験概要

音響学的な検討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⁽⁸⁾による模型実験を行った。使用した模型の主要寸法を表1に示す。地面効果を鏡像で模擬しており⁽⁹⁾、縮尺は約1/137である。トンネル本坑と枝坑、列車模型の断面は円形で、枝坑坑口の真横に微気圧波測定用の精密騒音計（リオン NL-32）を設置した（図5のM）。騒音計（マイクロホン）の設置位置を図6に示す。図6より、枝坑中心からマイクロホンまでの距離はおおよそ250 mmであるが、開口部断面の重心からの距離は開口率によって異なる。そこで、微気圧波の大きさは距離に反比例するとして、開口部断面重心～マイクロホン間距離が250 mmとなるように測定値を補正した。また、内壁に到達する圧縮波を測定するために、枝坑坑口から1.5L離れた枝坑内に圧力計（KuliteXCS-190-5G）を設置した（図5のp）。列車模型の発射速度は300, 400, 500 km/hである。

Table 1 Specifications of test models

Train	Diameter	34.6 mm
	Length	1300 mm
Tunnel	Diameter	100 mm
	Length	14650 mm
Side branch	Diameter	67 mm
	Length	2100 mm
	Partition Length	0, 50, 100, 300, 500, 1000 mm
Cross-sectional area ratio of train to tunnel		0.12

Fig.5 Tunnel model and locations of measurement

Fig.6 Location of microphone for measuring the micro-pressure wave radiated from the branch portal

4・2 実験結果と考察

4・2・1 内壁長さの影響

列車模型速度 300 km/h, 開口率 $\sigma=0.5$ で, 内壁に到達した枝坑内の圧力波形を図 7 に, 枝坑微気圧波の測定例として内壁長さ $L=0.1$ m ($L/l_w=0.13$) と $L=0.3$ m ($L/l_w=0.38$) の場合の波形を図 8 に示す. 開口率 $\sigma=0.5$ の場合, パルス状の圧力波が 2 回放射されていることがわかる. そこで, 内壁長さ L に対する枝坑微気圧波の大きさ (図 8 に示したパルス波形の最大値) を図 9 に示す. 図 9 の縦軸は内壁がない通常の枝坑 (開口率 1.0) の微気圧波最大値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 m は通常の枝坑 (開口率 $\sigma=1.0$) のことである. 図 9 より, 内壁長さ L が 0.3 m (実寸 41 m 相当) より長くなると微気圧波の低減効果は一定 (微気圧波比約 0.6) となっている. 図 7 より, 内壁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 780 mm ($l_w/d=11.6$) であることから, $L/l_w>0.38$ で効果は収束しており, 3 章での検討の前提条件である $L/l_w>>1$ より内壁はかなり短くても効果が得られる.

前提条件より内壁長さが短くても効果が得られた原因について図 8 の微気圧波波形をもとに考察する. 微気圧波低減効果が一定となる場合, 微気圧波の 1 波目と 2 波目 (式(9)における $i=1$ の波と $i=2$ の波) が完全に分離している (図 8(b)) のに対し, 低減効果が収束していない場合は 1 波目と 2 波目が一部分重なっている (図 8(a)). 従って, 最大の効果を得るためには 1 波目の微気圧波の時間幅 (=内壁に到達した圧縮波の立ち上がり時間 $t_w=l_w/c$) より, 1 波目と 2 波目の時間差 (圧力波が内壁を往復する時間, $\Delta t=2L/c$) が長いことが必要となる. よって, 内壁長さは,

$$L/l_w > 0.5 \quad (11)$$

を満たす必要があり, 圧縮波の波面幅の半分より長い内壁であれば最大の低減効果が得られることになる. 図 8 で示された実験結果は波面幅の半分より短くても ($L/l_w>0.38$ で) 最大の低減効果が得られることを示しているが, これは 1 波目と 2 波目が完全に分離せずとも最大値付近で重ならないためである. 式(11)よりさらにどの程度まで内壁を短くできるかは, 圧縮波の波形, 具体的には圧力勾配波形の最大値付近の長さ (時間幅) に依存する.

Fig.7 Measured waveform of the pressure and the pressure gradient arriving at the inside partition

Fig.8 Measured waveform of the micro-pressure waves for $L=0.1$ and 0.3 m ($V=300$ km/h, $\sigma=0.5$)

Fig.9 Variation of micro-pressure wave ratio with inside partition length

4・2・2 開口率の影響

内壁長さ $L=0.3$ m, 開口率 $\sigma=0.75$ の場合の微気圧波の波形を図 10 に示す. 式(7)に示されるとおり, 圧力波が内壁長さ L の区間を往復する時間差 ($2L/c \approx 1.8$ ms) 毎に正負の微気圧波が放射されていることがわかる (図 10 の矢印). これらパルス状に放射される微気圧波のうち, 1~4 番目に放射される微気圧波の大きさをそれぞれの開口率の場合について, 式(9)(10)の計算結果とともに図 11 に示す.

図 11 より, 実験結果と計算結果は測定データのばらつき程度の差違であり, 両者はほぼ一致している. ただし, 例えば開口率 0.5 の場合, 計算では同じ大きさ (微気圧波比 0.5) の微気圧波が 2 回放射されるはずであるが, 実験結果では第 1 波の方が第 2 波より少し大きい. この傾向は 500 km/h の条件でより顕著であり, さらに第 3 波と第 4 波も放射されていることがわかる.

開口率 σ の場合に放射される微気圧波について, 遠方場近似のみ課した場合, 式(8)は文献(10)の反射率 Ref と開口端補正量 l_E を用いて以下のように修正される.

$$P_i(t) = \frac{\sigma A}{\Omega r c} (1 + Ref \cdot e^{-ikl_E}) \frac{\partial p o_i(t - r/c)}{\partial t} \quad (12)$$

反射率 Ref は入射波と反射波の振幅比であり、開口端補正量 l_E とともに管半径 a と圧力波の波数 k との積 ka に依存する。反射率、開口端補正量と ka の関係を図 12 に示す⁽⁴⁰⁾。図 12 より、 $ka \approx 0$ (低周波近似) では $Ref=1$, $l_E=0.61a$ となり、ここで開口端補正量を見捨てる、 $l_E=0$ とした場合が式(8)に相当する。圧縮波の波数 k は波面幅 l_w より $k = 2\pi/l_w$ として見積もり、管半径 a は開口端側の断面積 σA から $a = \sqrt{\sigma A/\pi}$ として求まる。したがって、 ka が大きくなる、すなわち圧力波の波面幅が短くなる(高周波になる)、あるいは開口率(管半径)が大きくなると、反射係数 Ref は 1 より小さくなり、さらに、開口端補正量 l_E は大きくなることから、微気圧波の大きさは式(8)の値より小さくなる。本実験では、列車模型速度が高いほど波面幅は短くなり、また、開口率 σ が大きいほど管半径 a が大きくなるので、微気圧波の大きさは式(8)の値より小さくなる傾向にある。

内壁に到達した圧縮波の圧力勾配波形 ($V=500$ km/h, $l_w=0.25$ m) を入力波形として、1 波目の微気圧波の大きさを式(8)および式(12)により計算した。式(12)による計算では、低周波近似 ($Ref=1$, $l_E=0.61a$) の場合と、低周波近似を用いずに反射率および開口端補正量を図 12 から求めた場合について行った。ここで、計算と実験の比較結果を図 13 に示す。

低周波近似で、かつ、開口端補正量を見捨てる式(8)による計算結果は、同じ仮定に基づく音響学的計算結果(式(10))とほぼ一致する。一方、式(12)による計算結果のうち低周波近似 ($Ref=1$, $l_E=0.61a$) による場合、実験値と同様に音響学的計算結果より大きくなる傾向が確認できる。さらに、反射率と開口端補正量として図 12 の値を用いると、計算結果は実験値により近づいている。よって、実験結果において、微気圧波の第 1 波が音響学的計算結果より大きくなったのは、圧縮波の高周波成分による反射率と開口端補正量の影響によるものと考えられる。

Fig.10 Measured waveform of the micro-pressure wave for $L=0.3$ m ($V=300$ km/h, $\sigma=0.75$)

Fig.11 Variation of the micro-pressure wave with opening ratio σ

Fig.12 Values of reflection coefficient Ref and end correction l_E for plane wave issuing from open end of unflanged pipe⁽¹⁰⁾

Fig.13 Variation of the micro-pressure wave with opening ratio σ ($V=500\text{km/h}$)

4・2・3 内壁の効果

内壁を設けず単に坑口の一部を閉鎖した場合と、内壁がある場合 ($L=0.3\text{ m}$) の微気圧波比を図 14 に示す。図 14 より、内壁がなく坑口に閉鎖板 (図 3 の cover) のみ設置した場合、開口率を 0.25 まで小さくしても微気圧波比は 0.75~0.8 程度であるのに対し、内壁を設けた場合は開口率 0.75 で微気圧波比 0.8 程度を達成している。

内壁を設けずに単純に坑口の断面積を減少させると、放射断面積は減少するものの、坑口から流出する流量 (式 (1) の Au に相当) は、断面の急縮小による反射分しか減少しないため、微気圧波の低減効果は小さい。一方、内壁を設けた場合は、3 章で述べたように圧縮波の一部は平面波のまま固定端側を伝播するため、坑口から流出する流量 (変化率) は開口率に応じて減少し、微気圧波の低減効果はより大きくなる。

Fig.14 Variation of the micro-pressure wave with opening ratio σ ($V=300\text{ km/h}$)

5. 結 論

枝坑を有するトンネル内を高速列車が走行した際に枝坑から放射される微気圧波を低減させるための対策方法を提案した。低周波近似のもと、微気圧波低減効果について、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) 枝坑坑口付近の内部を壁で 2 分割し、その一方の坑口を閉鎖することで枝坑から放射される微気圧波を効果的に低減できる。対策前の微気圧波に対する対策後の微気圧波の比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必要な内壁長さは、枝坑坑口に到達した圧縮波の波面幅の 1/2 倍以上あれば十分である。
- (3) 簡易な音響学的検討による計算式によって微気圧波の低減効果を予測することができる。

なお、本研究は国庫補助を受けて行った。

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) Vardy, A., Brown, J., “An overview of wave propagation in tunnels”, *TRANSAERO - A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation, Notes on Numerical Fluid Mechanics, Springer*, 79 (2002), pp.249-266
- (4) Ehrendorfer, K., Peiterer, M., Sockel, H., “Numerical investigation of the micro pressure wave”, *TRANSAERO - A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation, Notes on Numerical Fluid Mechanics, Springer*, 79 (2002), pp.322-341
- (5) 福田傑, 飯田雅宣, 村田香, “トンネル内枝坑による微気圧波の低減と枝坑通過波の形成”, 鉄道総研報告, Vol.14, No.9(2000), pp.17-24.
- (6) 宮地徳蔵, 福田傑, 高見創, “立坑を有するトンネルの坑口から放射される圧力波”, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集, No.05-32(2005), pp.175
- (7) Lighthill, J., *Waves in Fluids* (1978), p.105, Cambridge University Press, Cambridge.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Morse.P.M., Feshbach, H., *Method of Theoretical Physics Part 2* (1953), McGraw Hill, pp.1535-1537