

トンネル枝坑坑口からの微気圧波の低減方法

齊藤 実俊* 宮地 徳蔵* 飯田 雅宣**

Reduction of Micro-pressure Wave Emitted from Portal of Side Branch of High-speed Railway Tunnel

Sanetoshi SAITO Tokuzo MIYACHI Masanobu IIDA

When a high-speed train enters a tunnel equipped with branches, micro-pressure waves emit from the portals of the branches as well as from those of the main tunnel. They can cause environmental problems for high-speed railways, especially in urban areas. In this study, we investigate a countermeasure against the micro-pressure wave from the portals of the branches. It is shown that a branch divided in two parts by a partition inside near the portal end, one side as closed, can be effective to reduce the magnitude of the micro-pressure wave.

キーワード：微気圧波，圧力波，高速鉄道，トンネル枝坑

1. はじめに

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300km/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必要がある。

高速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、これが反対側坑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と呼ばれ、20Hz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る。また、20Hz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。そのため、山岳トンネルに高速列車が突入する際の微気圧波の問題については、これまでに数多くの研究が行われてきた¹⁾。都市圏の地下トンネルには避難、換気用の枝坑が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、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微気圧波（以下、枝坑微気圧波）の発生要因に関する概略図を図1に示す。図1のように枝坑微気圧波の主な要因としては、列車がトンネルに突入した際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)）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)）がある。前者については、本坑出口から放射される微気圧波対策として設置されるトンネル入口緩衝工によって低減できる可能性がある。しかし、後者については緩衝工の効果がないため、枝坑微気圧波を低減させるためには、トンネル入口緩衝工以外の対策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²⁾、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、微気圧波対策のため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換気性能等を損なわないよう、枝坑断面積を大きく減らすことなく、枝坑先端部で効果的に微気圧波を低減する方法について検討した。

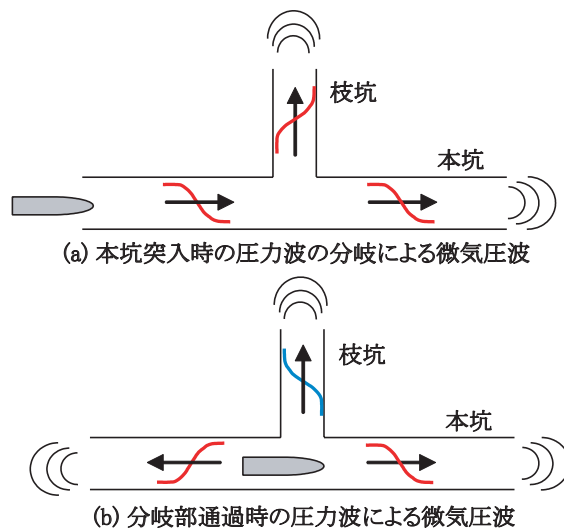


図1 枝坑からの微気圧波概念図

* 環境工学研究部（空気力学）

** 環境工学研究部

特集：浮上式鉄道技術とその応用

2. 枝坑微気圧波の低減策

2.1 音響学的基礎検討

枝坑坑口の開口断面積をなるべく減らすことなく、枝坑微気圧波を低減させる方法として、枝坑内部に坑口から仕切り壁（以下、分割壁）を設けて2分割し、一方の坑口を閉鎖した枝坑について検討を行った。

分割壁を有する枝坑の概略図を図2に示す。解析にあたっては、枝坑に伝播してくる圧縮波の波面幅（図2の l_w ）は枝坑断面直径 d_b より十分長く（低周波近似、 $l_w \gg d_b$ ）、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（ $l \gg l_w$ ）。また、枝坑は十分に長いと仮定し、枝坑坑口での反射波が本坑との接続部で再度反射した波については考慮しない。なお、分割壁の厚さおよび摩擦による減衰は無視する。

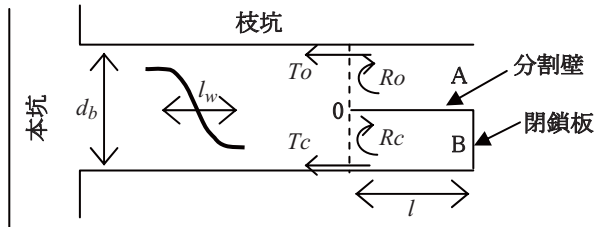


図2 分割壁付き枝坑の概略図

枝坑内の分割壁に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、枝坑内の圧力波は、分岐点Oと開口端・閉鎖端間で反射を繰り返し、往復することになる。

本坑から分岐点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 $p_{o,i}$ および閉鎖端に到達する $p_{c,i}$ 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。

$$p_{o,i}(t) = -R_o p_{o,i-1} \left(t - \frac{2l}{c} \right) + T_c p_{c,i-1} \left(t - \frac{2l}{c} \right) \quad (1)$$

$$p_{c,i}(t) = -T_o p_{o,i-1} \left(t - \frac{2l}{c} \right) + R_c p_{c,i-1} \left(t - \frac{2l}{c} \right) \quad (2)$$

$$p_{o,1}(t) = p_{c,1}(t) = p \left(t - \frac{l}{c} \right) \quad (i \geq 2) \quad (3)$$

ここで、 t は時間、 c は音速である。式(1)(2)の第1項の負の符号はA点での開口端反射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・B側への、 T_c はB側からO・A側への透過係数であり、図2に示した枝坑の開口率（A側の開口部面積/枝坑全体の断面積）を σ ($0 < \sigma < 1$) とすると、以下の式で近似される³⁾。

$$R_o = \sigma - 1, \quad T_o = \sigma \quad (4)$$

$$R_c = -\sigma, \quad T_c = 1 - \sigma \quad (5)$$

(1)～(5)式より、開口端に向かう i 番目の圧力波は、

$$p_{o,i}(t) = (1 - 2\sigma)^{i-2} (1 - \sigma) \left\{ p_{o,1} \left[t - (i-1) \frac{2l}{c} \right] + p_{c,1} \left[t - (i-1) \frac{2l}{c} \right] \right\} \quad (6)$$

$$= 2(1 - 2\sigma)^{i-2} (1 - \sigma) p \left[t - \frac{l}{c} - (i-1) \frac{2l}{c} \right] \quad (i \geq 2)$$

と表すことができる。

低周波遠方場近似のもとでは、自由空間に放射される微気圧波は以下の式で示される¹⁾。

$$P(t) = \frac{\rho A}{2\pi r} \frac{\partial u(t-r/c)}{\partial t} = \frac{A}{2\pi r c} \frac{\partial p(t-r/c)}{\partial t} \quad (7)$$

ここで P : 微気圧波、 A : 放射坑口の断面積、 r : 坑口からの距離、 ρ : 空気密度、 u : 圧縮波に伴う空気の流速である。

従って、分割された枝坑から i 番目に放射される微気圧波 $P_i(t)$ は、

$$P_i(t) = \frac{\rho A}{2\pi r c} \frac{\partial p_{o,i}(t-r/c)}{\partial t} \quad (8)$$

となるので、 i 番目に放射される微気圧波の大きさ P_i と分割壁のない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、

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

$$\frac{P_1}{P} = \sigma$$

となる。式(9)の関係を図3に示す。図3より、1番目の微気圧波は開口率に比例することがわかる。また、 $\sigma = 0.5$ の場合は3番目以降の微気圧波は発生せず、分割壁のない通常枝坑の半分の大きさの微気圧波が2回放射されることになる。

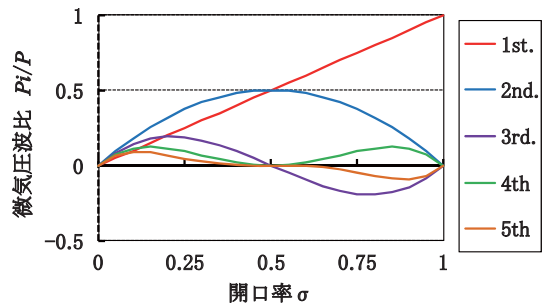


図3 分割壁付き枝坑からの微気圧波（計算値）

2.2 模型実験による検証

2.2.1 実験概要

模型実験は、軸対称の列車模型を高速で発射できる列車模型発射装置⁴⁾を使用した。模型の主要寸法を表1に、トンネル模型の配置図を図4に示す。枝坑微気圧波の測定は精密騒音計（リオン NL-32）を使用し、枝坑坑口の真横に設置した。トンネル本坑と枝坑、列車模型の断面は円形であり、枝坑断面積は本坑断面積の約1/2である。

実験は通常の枝坑と、分割壁の有無、分割壁の長さおよび開口率を変えて行った。実験に使用した分割壁付き

表1 模型実験の主要寸法

列車模型	直径 d'	34.6 mm
	全長 L'	1300 mm
トンネル本坑	直径 d	100 mm
	全長 L	14650 mm
枝坑	断面積 d_b	67 mm
	全長 L_b	2100 mm

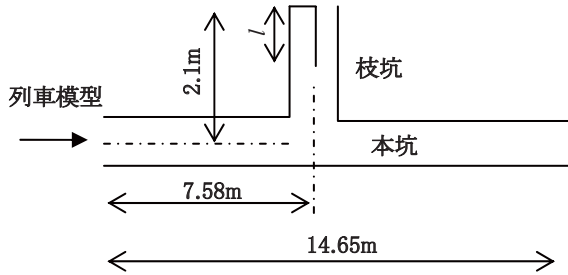


図4 トンネル模型配置図



図5 分割壁付き枝坑模型 ($\sigma=0.5$, $l=0.3m$)

の枝坑を図5に示す。列車模型の発射速度 V は 200 ~ 500km/h である。

2.2.2 実験結果

(1) 分割壁長さの影響

列車模型速度 300km/h, 開口率 0.5 で, 分割壁長さを変更した場合の枝坑からの微気圧波比を図6に示す。図6より, 分割壁長さ l が 0.3m より長くなると微気圧波の低減効果は一定となった(微気圧波比約 0.6)。圧力の測定結果から, 分割壁に到達した圧縮波の波面幅 l_w は約 0.58m であることから, 十分な効果が得られる分割壁長さは $l/l_w > 0.52$ と, 2.1 節における検討の前提条件である $l/l_w \gg 1.0$ より短くてもよいことがわかった。枝坑微気圧波の低減効果が一定となっている条件の例として $l=0.3m$ の場合の微気圧波波形と, それより分割壁長さが短い場合の例として $l=0.1m$ ($l/l_w=0.17$) の波形を図7に示す。

微気圧波低減効果が十分な場合, 微気圧波の1波目と2波目が完全に分離している(図7(b))のに対し, 低減効果が不十分な場合は, 1波目と2波目が一部分重なっている(図7(a))ことがわかる。従って, 十分な効果を得るためには1波目の微気圧波の放射時間 (= 分割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(圧力波が分割壁を往復する時間)が

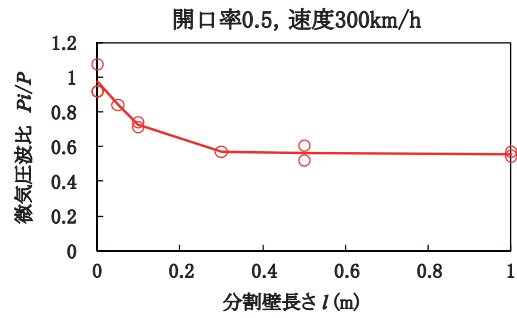
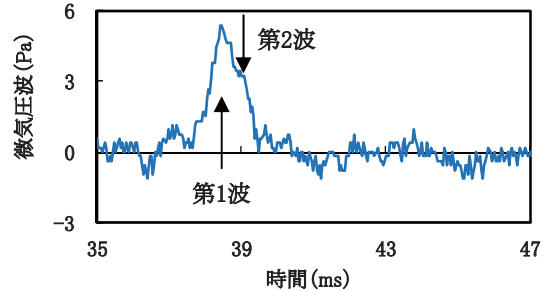
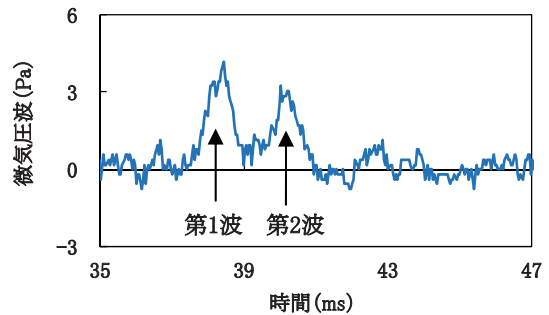


図6 微気圧波に対する分割壁長さの影響



(a) 分割壁長さ $l=0.1m$



(b) 分割壁長さ $l=0.3m$

図7 枝坑微気圧波の測定波形 ($V=300km/h$, $\sigma=0.5$)

長ければ良いことになる。よって, 必要な分割壁長さ l は以下の式で示される。

$$t_w = \frac{l_w}{c} < \frac{2l}{c} \quad \text{より,} \quad (10)$$

$$l > \frac{l_w}{2}$$

よって, 式(10)より, 分割壁の長さは, 分割壁に到達した圧縮波の波面幅の半分より大きければ十分な低減効果が得られることになる。

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, 緩衝工がない場合, 以下の式で示される⁵⁾。

$$l_w \sim \frac{l_c}{M} \quad (11)$$

ここで M は列車のマッハ数, l_c は特性長さで, トンネル半径または列車先頭部長さの長い方である。現在の新幹線を想定し, マッハ数を 0.24 ($V=300km/h$), 特性長さを列車先頭部長さ程度の 10m とすると, $l_w=41.7m$ となり, 必要分割壁長さは約 20m となる。式(10)で示される圧縮波の波面幅はトンネル入口における値であり, スラブ軌道トンネルの場合, 一般に伝播によってさらに短くなる

特集：浮上式鉄道技術とその応用

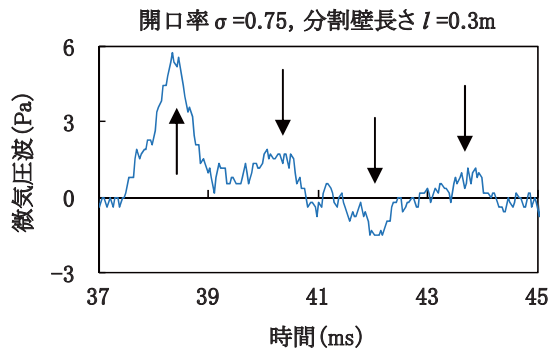


図8 枝坑微気圧波の測定波形 (V=300km/h)

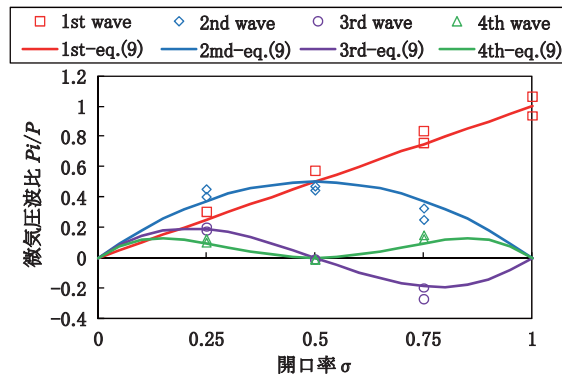


図9 微気圧波に対する開口率の影響 (V=300km/h)

ため、必要な分割壁長さも短くなる。

(2) 開口率の影響

分割壁長さ $l=0.3\text{m}$ 、開口率 $\sigma=0.75$ の場合の微気圧波の波形を図8に示す。式(6),(8)に示されるとおり、分割壁を往復する時間差 ($2l/c=$ 約 1.7ms) 毎に正負の微気圧波が放射されていることがわかる(図8の矢印)。そこで、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)の計算結果とともに図9に示す。

図9より、実験結果と計算結果はほぼ一致しているが、第1波の大きさは実測値の方が若干大きい。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、図7(b)より、第1波の方が第2波より大きく、第1波の大きさは微気圧波比で約0.6となった(図6, 9)。この傾向は列車速度が高速であるほど顕著であるため、到達した圧縮波の高周波成分による反射率の影響などが要因として考えられる。

分割壁に到達した圧縮波(300km/hの場合)の波面幅 $l_w=0.58\text{m}$ をトンネル直径で無次元化すると $l_w/d=5.8$ となり、概ね実際の新幹線トンネルの場合と同程度である⁶⁾。従って、現車においても、この程度の立ち上がり時間の圧縮波であれば開口率0.5で微気圧波は60%程度まで低減できることになる。

分割壁を設けず単に坑口の一部を閉鎖した場合と、分割壁がある場合の微気圧波最大値を図10に示す。図10より、分割壁がなく閉鎖板(図2参照)のみ設置した場

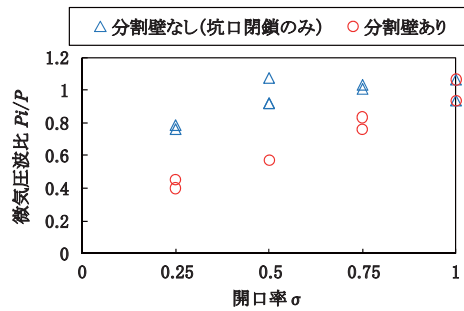


図10 微気圧波低減に対する分割壁の影響

合の微気圧波比は、開口率を0.25まで小さくしても0.75~0.8程度であるのに対し、分割壁を設けた場合の微気圧波比は開口率0.75で0.8程度と開口率にはほぼ等しい結果となっている。

分割壁を設けず、単純に坑口の断面積を減少させた場合、放射断面積は減少するものの、坑口から流出する流量(式(7)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、分割壁を設けた場合は、2.1節で述べたように、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。

3. 結論

枝坑微気圧波低減策として、枝坑坑口の一部を閉鎖し、それに接続する分割壁を枝坑内に設置することで、開口率にほぼ等しい微気圧波低減効果が得られることを確認した。

なお、本研究は国庫補助を受けて行った。

文献

- 1) 小沢智:トンネル出口微気圧波の研究, 鉄道技術研究報告, No.1121, 1979
- 2) 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, pp.175, 2005
- 3) Lighthill, J., Waves in Fluids, Cambridge University Press, Cambridge, pp105, 1978.
- 4) 齊藤実俊, 飯田雅宣, 梶山博司:立坑を有するトンネルを高速列車が走行した際のトンネル内圧力変動の予測, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集, No.05-32, P.174, 2005
- 5) 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, pp.35-40, 2002
- 6) 齊藤実俊, 宮地徳蔵, 飯田雅宣, 若林雄介, 栗田健:長大スラブトンネル内における圧縮波の伝播特性, 日本機械学会2007年度年次大会演説論文集(2), pp.267-268, 2007