

列車退出側坑口におけるトンネル微気圧波低減対策

環境工学研究部 熱・空気流動研究室
室長 齊藤実俊

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）は列車速度に応じて急激に増加するため、新幹線などの高速化においてはなんらかの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）での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い。現在最も多く利用されている地上側対策として、トンネル入口緩衝工（以下、緩衝工）と呼ばれる窓付きのフードがある。これ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る傾向にあり、現在では40m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40m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、低減効率が悪くなる⁽⁴⁾。そこで、本研究では、40m程度以上の長い緩衝工が必要とされる場合に、緩衝工を延長する代わりとして、これまで有効な方法がなかった微気圧波の放射段階、つまり列車退出側の坑口（トンネル出口側）での低減方法を提案する。これは、緩衝工内部を壁（以下、内壁）で2分割し、分割した一方の坑口を閉鎖、すなわち固定端とする構造の緩衝工（以下、内壁付き緩衝工）で、トンネル出口側に設置するものである。

2. 基本原理

低周波遠方場近似のもと、トンネル出口から放射される微気圧波は以下の式で示される⁽¹⁾⁽²⁾。

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

ここで、 ρ ：空気密度、 A ：トンネル断面積、 c ：音速、 u ：坑口での流速、 p ：圧力、 t ：時間、 Ω ：坑口からの地形の拡がりを示す放射立体角、 r ：坑口から観測点までの距離である。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、緩衝工はそのために設置されている。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できることがわかる。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小さくしても、断面の急縮小による圧力上昇によって式(1)の $\partial p/\partial t$ が大きくなるため、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。そこで、坑口における流速を増加させずに放射断面積を小さくする方策として、図1に示すように、トンネルの出口付近を内壁によって分割し、その片側を閉鎖させる。

この内壁付きトンネルから放射される微気圧波について、一例として図2で示したように内壁によって開口端の断面積がトンネル断面積のちょうど半分である場合を考える。トンネル出口に伝播してきた圧縮波（大きさを+1とする。+は圧縮波、-は膨張波に相当）は分割区間をそのままの大きさで進行する（壁の厚さは無視し、壁での反射は考えない）(①)。分割区間を進行した圧力波はそれぞれ開口端反射及び閉鎖端反射をして戻ってくる(②)。両者は分割開始点で合流するが、それぞれの波の

重ね合わせにより、開口端反射と同様、位相を逆転させて再度端部に伝播していく(③)。反射した圧力波は再度、開口端反射及び閉鎖端反射をする(④)。両者は同じ大きさ(-1)であるため、分割開始点で合流し、そのままトンネル入口側へ伝播する(⑤)。

微気圧波は開口端反射の際に放射される。図 2②、④に示される通り、圧力波の大きさは内壁がない場合と同じ大きさ(+1)であるが、開口部断面積が元の 1/2 倍であるため、放射される微気圧波の大きさは 1/2 になる。すなわち、開口部断面積が元のトンネルの半分の場合、1/2 の微気圧波が 2 回放射されることになる。

以上の議論を一般化すると開口端から放射される i 番目の微気圧波の大きさ $|P_i|$ は以下のように示される⁽⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} |P_1| &= \sigma|P| \\ |P_i| &= 2\sigma(1-2\sigma)^{i-2}(1-\sigma)|P| \quad i \geq 2 \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで、 σ : 開口率(開口端断面積/トンネル断面積)、 $|P|$: 内壁のない通常のトンネル($\sigma=1$ の場合)から放射される微気圧波の大きさである。式(2)の関係を図 3 に示す。前述のとおり、 $\sigma=0.5$ の場合は大きさが 1/2 の微気圧波が 2 回放射されることがわかる。その他の開口率の場合は 3 波以上の微気圧波が放射され、 $0.5 < \sigma < 1.0$ の範囲では微気圧波低減率は開口率と等しいことがわかる。

3. 内壁付き緩衝工

3.1 実際への適応方法

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 1 のように内壁で内部を分割して片側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、緩衝工のように本坑より断面積の大きいフードを設置し、その内部を内壁によって分割することで放射時対策を実施する。また、複線である新幹線トンネルでは微気圧波対策として両側の坑口に緩衝工が設置されていることが多いので、既設の緩衝工を活用することもできる。トンネル緩衝工は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 内壁付き緩衝工の概略

内壁付き緩衝工の主要諸元を図 4 に示す。トンネル本坑内を伝播してきた圧力波 $p(t)$ は開口端または閉鎖端と J 点で反射し、さらに O 点や C 点で反射または透過するため、それらの波が繰り返し開口端に到達して微気圧波を放射する。このため開口端に到達する圧力波は 2 章で検討した場合より複雑になるが、同様の考え方で予測することが可能であり、微気圧波低減率は $0.5 < \sigma < 1.0$ の範囲では開口率と等しくなる(図 3 と同様)。

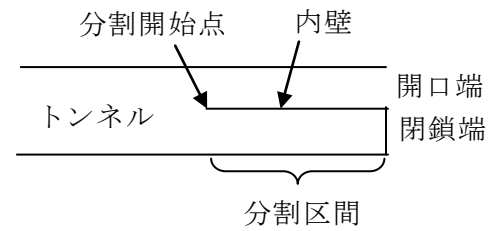


図 1 内壁付きトンネルの概要図

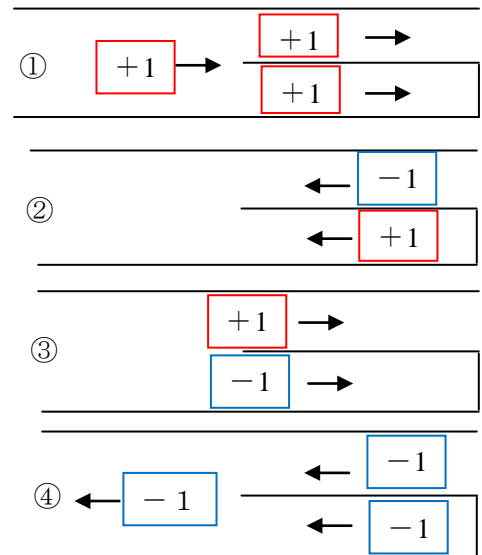


図 2 内壁付きトンネル内の圧力波

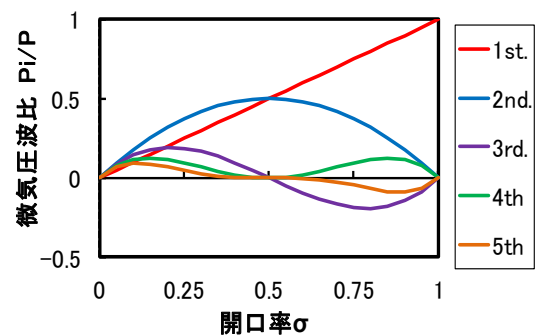


図 3 開口率と微気圧波の関係

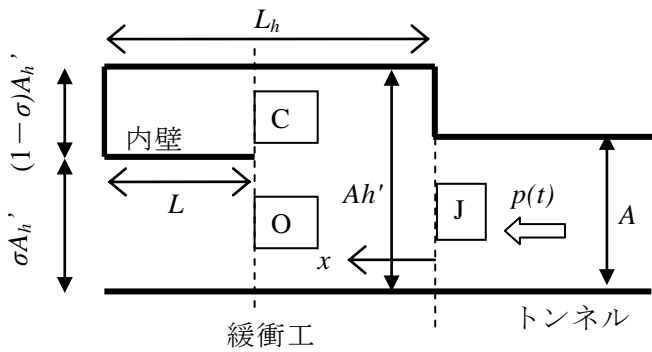


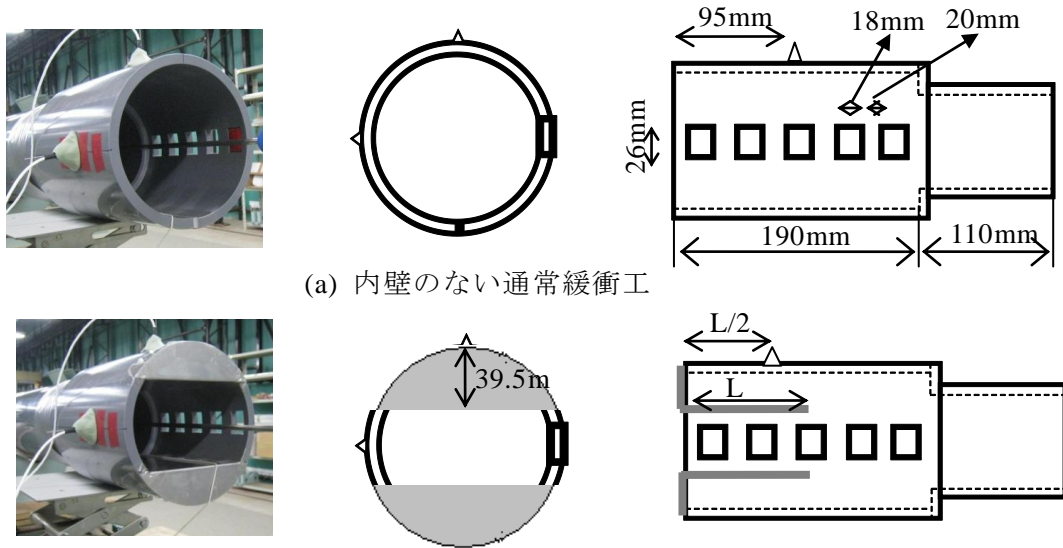
図4 内壁付き緩衝工の概念

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	直径	125 mm
	全長	12000 mm
緩衝工	直径	146 mm
	全長	190 mm
列車・トンネル断面積比		0.17
トンネル・緩衝工断面積比		1.36

3.3 模型実験による効果確認

内壁付き緩衝工による微気圧波低減効果を確認するために、鉄道総研の列車模型発射装置による模型実験を行った。実験に使用した緩衝工模型の外観ならびに主要寸法を図5に、主な諸元を表1に示す。地面効果を鏡像で模擬しており模型の縮尺は約1/120に相当する。列車模型の速度は350、400km/hで、内壁付き緩衝工の開口率は0.7である（図5(b)）。



(a) 内壁のない通常緩衝工

(b) 内壁付き緩衝工

図5 緩衝工模型

内壁付き緩衝工に到達したトンネル内圧縮波の波形を図6に示す。図6より、400km/hの場合は圧力勾配最大値が大きく、圧縮波の立ち上がり部分の長さも350km/hの場合より小さい。これらの圧縮波によって放射される微気圧波の大きさを内壁長さLについて整理した結果を図7に示す。図7の横軸は内壁長さLを図6に示したそれぞれの速度における圧縮波の立ち上がり長さ l_w によって無次元化している。また、縦軸は開口率1.0の通常の緩衝工からの微気圧波によって基準化した比率（微気圧波比）を示しており、横軸の0は通常の緩衝工（開口率 $\sigma=1.0$ ）のことである。図7より、いずれの速度においても $L/l_w=0.15$ 以上で微気圧波比が開口率0.7にほぼ等しい大きさで一定となって

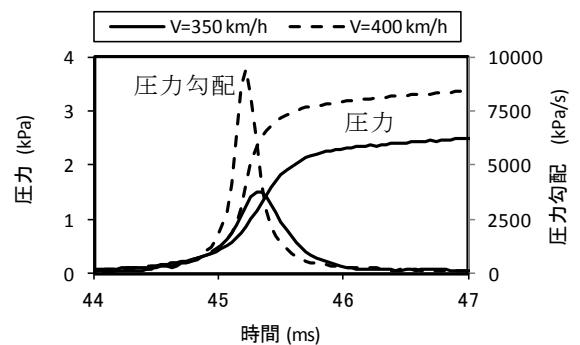


図6 内壁付き緩衝工に到達した圧縮波波形

おり、最大で25~30%程度の微気圧波低減効果が得られている。

列車模型速度 $V=350\text{km/h}$ において、最大の25%の微気圧波低減効果が得られた内壁長さ $L=150\text{mm}$ ($L/l_w=0.23$) の場合と、十分な効果が得られなかった $L=50\text{mm}$ ($L/l_w=0.08$) の場合の微気圧波の波形を図8に示す。十分な効果が得られているときの微気圧波の波形は2波に分離しているのに対し、効果が不十分なときは微気圧波の1波目と2波目がピーク付近で重なっていることがわかる。したがって、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 (=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、 $\Delta t=2L/c$) が長ければ良い。すなわち内壁長さは $l_w/2$ 以上であれば良いことになるが、図7に示したとおり、実験では内壁長さが $l_w/7 \sim l_w/6$ 程度と $l_w/2$ より短い条件で十分な微気圧波低減効果が得られた。これは、図8(b)に示されるように、完全に2波に分離する必要はなく、1波目と2波目のピーク値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。実際に $l_w/2$ よりどの程度まで内壁を短くできるかは、圧縮波の波形に依存することになる。

4. 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低減させるための新たな対策方法を提案し、音響学的な検討を行うとともに模型実験によって効果を確認した。結果を以下にまとめる。

- (1) トンネル出口側 (微気圧波の放射側坑口) に、内部を壁で2分割し、その一方の坑口を閉鎖した緩衝工を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。
- (2) 十分な微気圧波低減効果を得るためには、内壁長さをトンネル出口に到達した圧縮波の波面幅の1/2倍以上にすれば十分である。

参考文献

- (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)、pp2248-2255
- (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 Int. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, (1991), pp.253-266
- (5) 齊藤実俊、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 (2010)、pp41-44

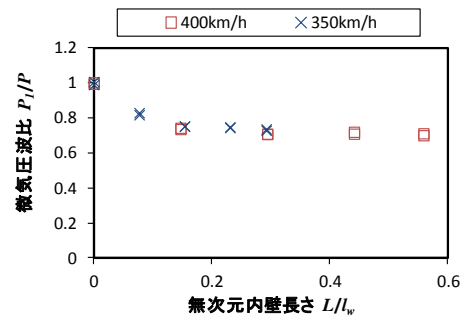
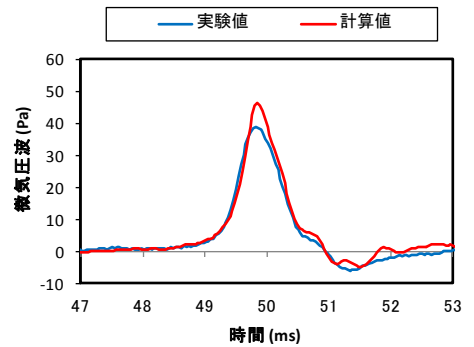
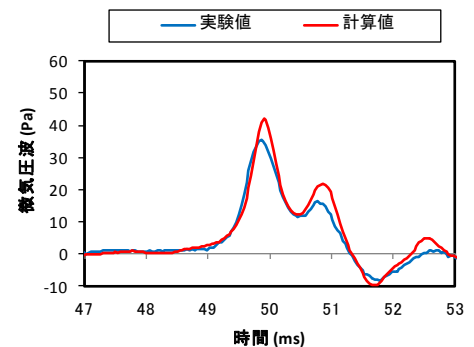


図7 内壁付き緩衝工からの微気圧波 ($\sigma=0.7$)



(a) 内壁長さ $L=50\text{mm}$



(b) 内壁長さ $L=150\text{mm}$

図8 微気圧波測定結果 ($V=350\text{km/h}$)