

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

トンネル緩衝工の 微気圧波低減性能を向上する

高速鉄道における沿線環境問題の一つにトンネル坑口から放射される微気圧波があり、その代表的な対策法に、トンネル坑口に設置する緩衝工（フード）があります。緩衝工の効果はその長さだけでなく、断面積、側面開口部の面積や位置によります。ここでは、微気圧波の現象や新幹線トンネルに設置されている緩衝工について解説します。さらに、新幹線速度向上に対応した緩衝工の性能向上のために実施した、緩衝工断面積の効果や側面開口部の調整方法に関する模型実験結果について述べます。



福田 傑
Takashi Fukuda
環境工学研究部
熱・空気流動研究室
主任研究員（上級）



宮地 徳蔵
Tokuzo Miyachi
環境工学研究部
熱・空気流動研究室
主任研究員



斉藤 実俊
Sanetoshi Saito
環境工学研究部
熱・空気流動研究室長

はじめに

列車が高速でトンネルに突入すると、トンネル内に圧縮波（☞参照）が形成されます。この圧縮波がトンネル内を伝わって反対側の坑口に達したとき、大部分は膨張波（☞参照）となって反射します。このとき、パルス状の圧力波（トンネル微気圧波¹⁾、☞参照）が坑口から放射されます。微気圧波の現象は、(1) 圧縮波の形成、(2) 圧縮波の伝播^{でんぱ}、(3) 微気圧波の放射の三段階

に分けることができます。

微気圧波の大きさ（☞参照）は、「(3) 微気圧波の放射」の段階で、坑口に到達した圧縮波の波面（圧力の立ち上がり部）が急であるほど大きくなり、通常はこの傾き（圧力の時間変化率、圧力勾配）の最大値にほぼ比例します。また、「(2) 圧縮波の伝播」の段階で、圧縮波の波形は変形します。碎石を敷いたバラスト軌道では圧縮波の波面は伝播とともに緩やかになりますが、コンクリート製の路盤を敷いたスラブ軌

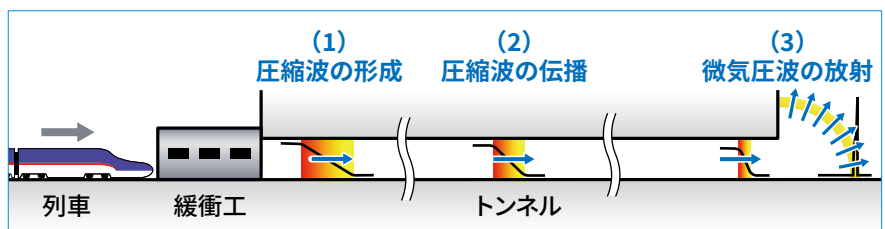


図1 微気圧波の現象

☞ 圧縮波と膨張波

空气中を波（圧力波）が伝わりある点を通ると、その点の圧力や密度が変化します。そのとき圧力や密度が増加する波を圧縮波、逆に減少する波を膨張波といいます。列車先頭部がトンネルに突入すると圧縮波、後尾部が突入すると膨張波がトンネル内に形成されます。

☞ 微気圧波の波形と大きさの評価値

微気圧波の波形は、継続的な圧力の振動波形ではなく、一つあるいは複数のピークを持つパルス状の圧力波形です。評価値として日本では、騒音のようなレベル値（単位 dB）ではなく、圧力パルスの最大値（単位 Pa）が多く用いられています。



図2 新幹線における緩衝工の設置例

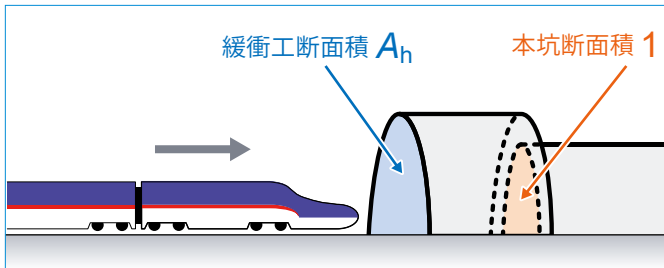


図3 緩衝工の断面積

道では、急になります。したがってスラブ軌道トンネルでは、一般に、トンネルが長いほど微気圧波は大きくなります。

微気圧波が大きくなると、坑口周辺で衝撃音が聞こえたり、家屋の建具が急に振動したりするといった沿線環境問題となることがあります。そのため、新幹線の新線を建設する、あるいは速度向上を行う場合には、微気圧波対策が必要になります。

微気圧波対策のために坑口周囲に防音壁を設置しても、その波長が長い場合有効ではありません。そのため、発生源である「(1) 圧縮波の形成」の段階で、圧縮波の波面を緩やかにする入口対策が多く用いられており、その地上側のものとしてトンネル緩衝工¹⁾の設置があります(図2)。

現在の緩衝工の仕様と課題

現在、新幹線のトンネルに設置されている緩衝工の基本的な仕様は次のとおりです。緩衝工断面積 A_h は、本坑断面積で基準化すると1.4~1.6と、本坑よりも一回り大きくなっています(図3)。また緩衝工の側面には開口部が設けられています。この仕様は、緩

衝工が設置され始めてから40年以上変わっていません。緩衝工は長いほどその効果は大きくなるため、スラブ軌道トンネルでは全長が長いほど緩衝工が長くなる傾向があります。当初、緩衝工の長さは10~30mのものがほとんどでしたが、速度向上に対応して、それよりも長いものが増えてきました。このように、列車速度や緩衝工の長さが緩衝工の断面積の仕様を検討した時期と異なってきているため、現在または今後の速度向上を想定した速度域や長い緩衝工については、最適な緩衝工断面積は現在の仕様と異なる可能性があります。

一方、緩衝工の側面開口部は、列車の先頭部形状や速度に合わせて、位置や面積を適切に設定する必要があります。側面開口部の設定が不適切な場合、緩衝工を長くしてもその効果を得ることができません。側面開口部の調整を容易にするため最近では、緩衝工全長にわたってあらかじめ開口部を離散的に設けておき、その開閉パターンを変えて最適なものを探索しています。し

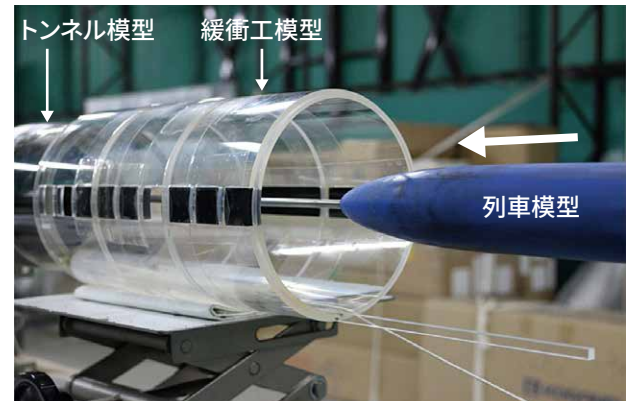


図4 緩衝工の効果を知る模型実験の実施状況

かしながら緩衝工が長くなり開口部数が多くなると、この最適化は難しくなります。例えば、側面に開口部が10か所設置されている場合、 $2^{10} = 1024$ 通りの中から最適なものを探索する必要があります。

緩衝工の現在の仕様には以上のような課題があることから、今後の速度向上に対応するために、鉄道総研では緩衝工の性能向上に関する研究開発を行ってきました。緩衝工の効果を知るために実施した模型実験(縮尺1/127)を図4に示します。この実験では、トンネルとして内径100mmの円管、列車として軸対称形状の模型を用いました。列車が高速でトンネルに突入するときの空気力学的な現象を模擬するため、実験速度を実列車と一致させています。そして、列車模型がトンネル模型に突入したときの圧縮波の波形を測定し、緩衝工の効果の評価します。ここで、列車の先頭部の長さは実物に換算して15m、速度は今後の新幹線の速度向上を想定して360km/hとしました。

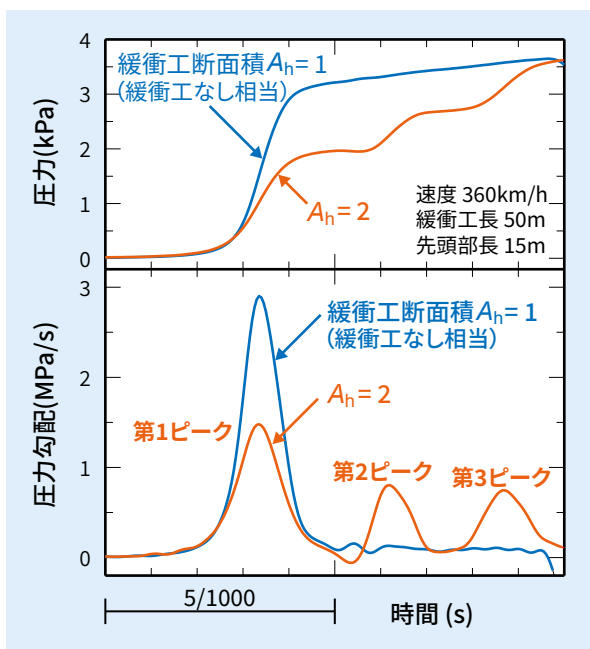


図5 緩衝工断面積による圧縮波の波形の違い (緩衝工側面に開口部なし)

緩衝工断面積の検討

模型実験²⁾で得られた緩衝工の断面積 A_h を変えたときの圧縮波の波形の例を図5に示します。緩衝工の断面積 A_h の効果のみを調べるため、ここでは緩衝工の側面に開口部はないものとしました。ここで、図5の上図は圧力の時間変化、下図は圧力勾配の時間変化です。微気圧波は坑口に到達した圧縮波の圧力勾配最大値に比例しますので、微気圧波の現象や低減対策を考えるときには、この圧力勾配波形が重要となります。

緩衝工断面積 A_h が1 (緩衝工と本坑の断面積が等しいため、緩衝工側面に開口部がない場合には、“緩衝工なし”に相当) のとき、圧力勾配波形は一つのピークをもっています。これは、列車先頭部が緩衝工の入口 (緩衝工がないトンネルの坑口に相当) に突入するときのみ形成されるためです。一方、緩衝工の断面積が本坑より大きい場合、列車先頭部が緩衝工の入口に突入するとき、緩衝工と本坑の接続部を通過するときに圧縮波ができます。また緩衝工の中で、圧力波は多重反射します。そのため、これらの三つの圧力波の重ね合わせで形成されるトンネル内の圧

縮波の圧力波形は三段の階段状になり (図5上)、その圧力勾配波形には三つの明確なピークがあらわれます (図5下)。

この三つのピークの値と緩衝工断面積 A_h の関係を図6に示します。ここで図6の縦軸は、緩衝工断面積 A_h が1のときを基準とした値で示しています。三つの圧力波の重ね合わせである圧縮波の圧力は、緩衝工断面積 A_h には依存しません (図5上)。しかしながら緩衝工断面積 A_h が大きくなるほど一つの圧縮波の圧力が低くなり、圧力勾配の一つ目のピークが小さくなります。そのため緩衝工断面積 A_h が大きくなるほど二つ目と三つ目の圧縮波の圧力が高くなり、圧力勾配の二つ目と三つ目のピークが大きくなります。

微気圧波の大きさが決まる圧力勾配最大値は、この三つのピークの中の最大のものとなります。圧力勾配最大値がもっとも小さくなるのは、図5において一つ目のピークと二つ目のピークの値が等しくなる場所となり、この

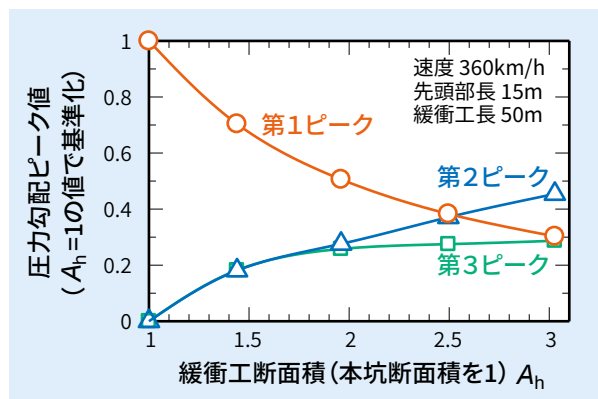


図6 緩衝工の断面積による圧力勾配波形の各ピーク値の変化

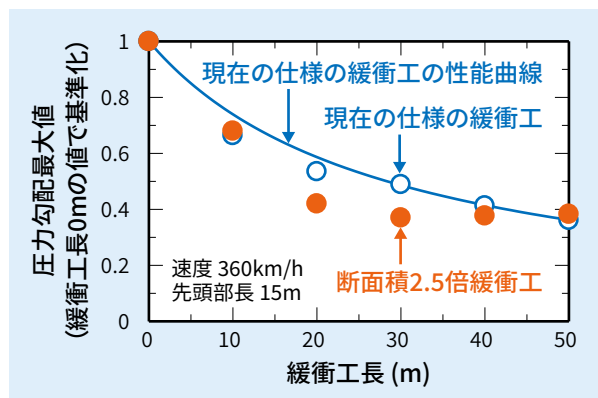


図7 緩衝工の効果と長さの関係

実験の条件下では緩衝工断面積 A_h が2.5のときです。

現在の仕様の緩衝工 (緩衝工断面積 A_h が1.4、側面開口部あり) および側面開口部のない緩衝工断面積 A_h が2.5の緩衝工 (以下、断面積2.5倍緩衝工) について、圧縮波の波面圧力勾配最大値と緩衝工長さの関係を図7に示します。また図7中の曲線は、緩衝工の必要な長さを検討するときに用いられている性能曲線です。

図7より、現在の仕様の緩衝工は、長いほど圧力勾配最大値が小さくなり、その長さに応じた効果が得られていることがわかります。一方、断面積2.5倍緩衝工は、長さ30mまでは長くなるほど圧力勾配最大値を小さくでき、現在の仕様のものよりも小さくなります。長さ30mの断面積2.5倍緩衝工の効果は、長さ50mの現在の仕様の緩衝工の効果と同等であること、言い換えれば、現在の仕様で長さ50mの緩衝工が必要なトンネルでは、断面積2.5倍緩衝工を

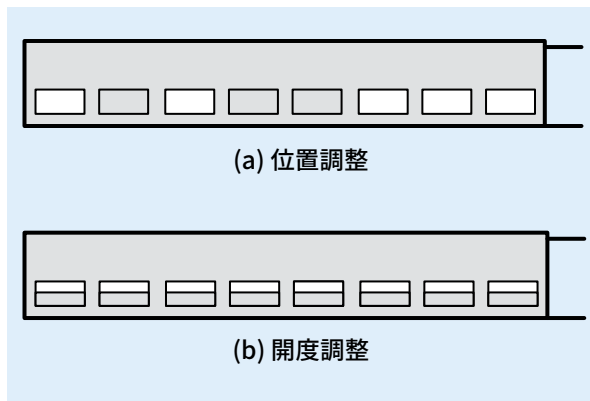


図8 緩衝工側面開口部の調整方法

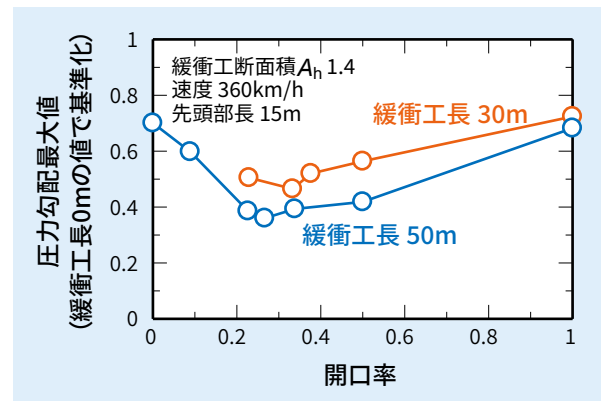


図10 緩衝工の効果と開口率の関係

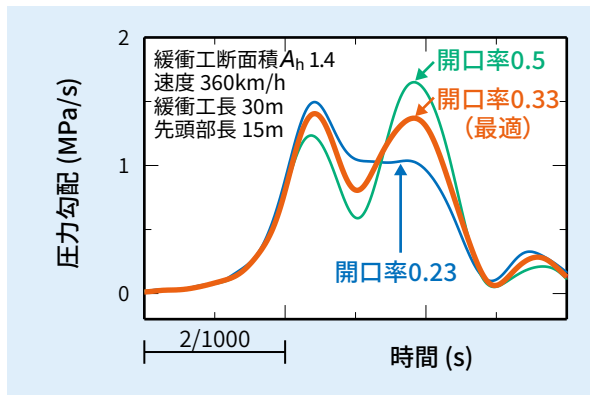


図9 側面開口部の開口率による圧縮波の波形の違い(緩衝工長30m)

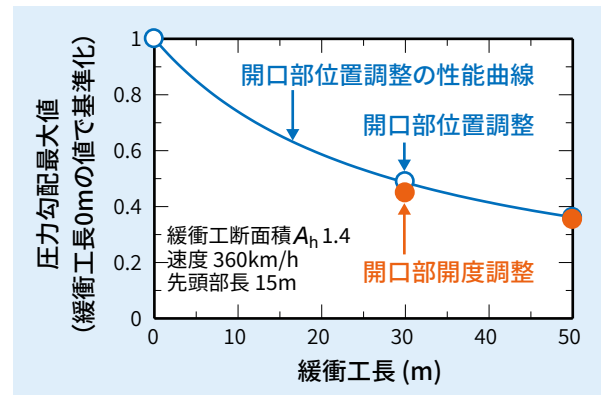


図11 開口部調整方式の効果の比較

用いれば必要な緩衝工の長さを20m程度短縮可能であることとなります。

開口部の調整方法の検討

現在、一般的に実施されている緩衝工側面開口部の調整方法は、開口部の設置位置や大きさを調整する位置調整方式です(図8(a))。図8(a)では、各開口部を全開または全閉とすることによって開口部の位置を調整しています。位置調整方式では開口部の数の分、調整箇所数があることになり、図8(a)の場合は8です。これに対し、各開口部の開口率のみを一律に調整する開度調整方式(図8(b))も考えられます。開度調整方式の調整箇所数は、開口率のみとなりますので、1となります。調整箇所を減らすと最適化は簡略化されますが、微気圧波を低減する効果が小さくなるおそれがあります。そこで、この効果を模型実験により検証しました³⁾。

側面開口部の開口率を変えたときの圧縮波の圧力勾配波形を図9に示しま

す。圧力勾配波形には二つのピークがあり、圧力勾配最大値がもっとも小さくなる最適な場合はこの二つのピークがそろうときです。最適な場合よりも開口部を閉めると左上がり、開けると右上がりの圧力勾配波形となり、その最大値は最適のものより大きくなります。このような特性を用いることにより、開度調整方式は容易に最適開口部が得られます。圧力勾配最大値と側面開口部の開口率の関係を図10に示します。圧力勾配最大値は、それがもっとも小さくなる最適な開口率を挟んで単調に減少または増加することがわかります。

それぞれの最適条件における圧力勾配最大値と緩衝工長さの関係を図11に示します。図11から、開口部開度調整方式と位置調整方式で得られる圧力勾配最大値の差はほとんどなく、緩衝工の効果はほぼ同等といえます。このことから開度調整方式による側面開口部の最適化は、緩衝工の効果を損ねることなく、開口部の調整に要する作

業量を大幅に低減可能であると考えられます。

おわりに

ここでは、地上側の対策の一つである緩衝工について、その性能を向上させるために実施した模型実験について述べました。今後も模型実験のほか、数値解析や現地測定などを実施し、微気圧波低減対策の性能向上を図っていく予定です。[RRR]

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) 福田傑，中村真也，斉藤実俊：微気圧波低減に効果的な緩衝工断面積の提案，鉄道総研報告，Vol.35，No.6，pp.11-16，2021
- 3) Tokuzo Miyachi, Takashi Fukuda：Model experiments on area optimization of multiple openings of tunnel hoods to reduce micro-pressure waves, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.115, 2021