

第 100 回

トンネル入口緩衝工

はじめに

新幹線などの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ます。この圧縮波は図1に示すようにトンネル内を音速に近い速度で伝播し、トンネル出口に到達した際に一部がパルス状の圧力波（トンネル微気圧波、以後単に微気圧波とよぶ）として放射され、トンネル出口周辺で破裂音や建具の振動などの環境問題を生じさせる原因となります。微気圧波の大きさは列車の速度とともに

に急激に大きくなるため、新幹線の速度向上を図るためには微気圧波は解決しなければならない問題の一つです。微気圧波は、東海道新幹線が開通した1964年当初は問題とはなりませんでしたが、これは圧縮波減衰効果の高いバラスト軌道が用いられたことが理由です。しかし、山陽新幹線の岡山以西では軌道がスラブ化され、1975年にこの区間において博多開業のための試験運転が開始されてからはじめて微気圧波が問題として報告されました。その後の調査により微気圧波のピーク値は、

トンネル出口に到達した圧縮波の圧力の時間変化率（圧力勾配）の最大値に比例することが明らかとなりました¹⁾。これにより、今日にいたるまで、微気圧波低減の方針としてはトンネル内に形成される圧縮波の勾配を低減させることが主となっています。現在、日本でおもに実施されている微気圧波対策は、トンネル内に圧縮波が形成される段階においてその勾配を小さくする入口対策です。入口対策の代表例としては、列車先頭部の延伸・形状の最適化²⁾や、図2に示すようなトンネルの入口

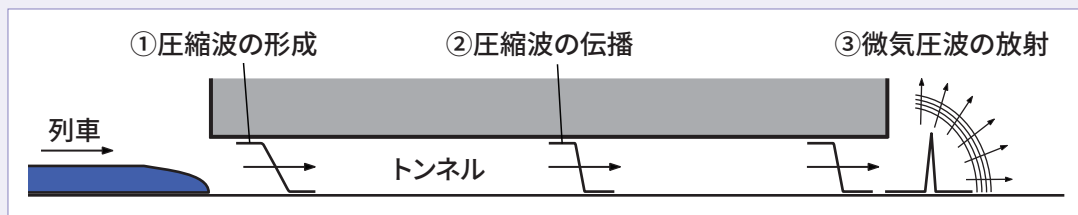


図1 トンネル微気圧波の段階



図2 実際のトンネル入口緩衝工

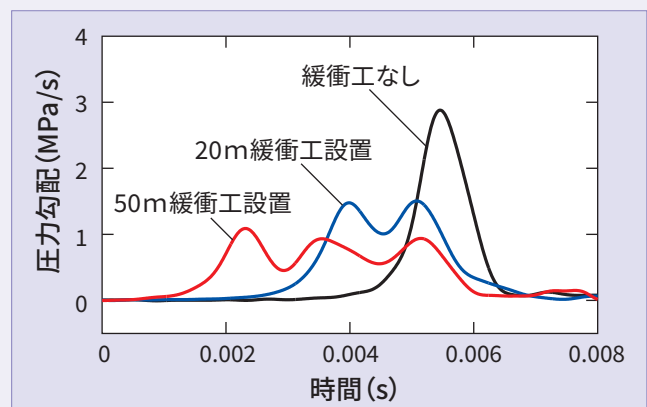


図3 トンネル入口緩衝工に関する模型実験結果の例（列車のトンネル突入時に形成された圧縮波の勾配波形）

に緩衝工（トンネル本坑の断面積よりも一回り大きな断面積を有する構造物）を設置するなどがあげられます。とくに、緩衝工の設置は、圧縮波の勾配最大値の低減効果が大きく、現在の日本では上越新幹線を除く新幹線のほぼすべてのスラブ軌道のトンネル区間において、微気圧波低減を目的にこの構造物が設置されています。なお、上越新幹線のトンネル区間では、立坑や斜坑を利用するなど、圧縮波の伝播段階での微気圧波対策が採用されています。

今回はこのような幅広いトンネル微気圧波対策の中でも緩衝工による対策に焦点を当て、その歴史や海外での動向、そして今後の展望に関して触れたいと思います。

緩衝工の歴史と現在の緩衝工

1975年に山陽新幹線で微気圧波が問題となった後、その同年から鉄道総研の前身である国鉄当時の鉄道技研において、この問題を解決するために模型実験が開始されました³⁾。この模型実験により、トンネルの入口にスリット状の開口部を配置することや、トンネルの入口をラッパ状に拡大するフード状の構造物を設置することが微気圧波低減には有効であると提案されました。そこで、模型実験の結果を実際のトンネルに試験的に適用して効果を調べるために、当時の山陽新幹線の中でもとくに微気圧波が深刻であった、広島県の備後トンネルの両坑口にフード状の構造物が建設されました。このときに建設されたフードの形状は、坑口の立地条件や経済的都合上、断面積がトンネルとの接続部においておよそ1.5倍に拡大し、側壁に開口部をもつ形状が考えられました。そして、このフードの設置によりトンネル出口から放射される微気圧波が大幅に低減できること



図4 列車の高速化にともない長大化する緩衝工



図5 列車の高速化にともなう既存緩衝工からの延伸

がわかりました⁴⁾。このフードは、トンネル内に形成される圧縮波を緩やかにすることから、「トンネル入口緩衝工」と命名されました。備後トンネルにおける試験の成果により、ほかの山陽新幹線のトンネルや、その後建設された東北新幹線のトンネルにおいても緩衝工が用いられることになり、それらの標準形式を決定するために実施された模型実験結果⁵⁾が今日に至るまでの緩衝工設計の基盤となっています。

上述の一連の結果に基づき、現在定着している緩衝工の基本的な仕様は、断面積がトンネル本坑に対して1.5倍程度かつ緩衝工の長手方向の断面積は一樣であり、同方向の側壁に複数の離散的な開口部を有する形状となっています。また、現在の日本のトンネルに設置されている緩衝工は10～30m程度の長さが一般的です。しかし、図3に示すように、圧縮波の圧力勾配ピーク値の抑制効果、すなわち微気圧波の

低減効果を向上させるには、緩衝工を長くする必要があります。そのため、列車が300km/hを超える高速度で走行する区間では、微気圧波を十分に低減するために、図4に示すような80mもの長さになる緩衝工を設置しているトンネルも存在します。一方で、すでにトンネルの入口に緩衝工が設置されており、列車の速度向上による微気圧波の悪化が懸念される場合には、図5に示すように既存の緩衝工部分を延伸することにより微気圧波低減が図られています。

緩衝工の仕様決定方法

トンネル入口に緩衝工を新たに設置する場合や、既存の緩衝工を延伸する場合には、微気圧波の低減目標値を満足するために必要な緩衝工長さ、延伸量を理論式や経験式により決定します。この際に用いられる微気圧波の低減目

標値は事業者によって異なりますが、坑口中心から20m点での微気圧波ピーク値が50Pa以下かつ坑口近傍の家屋点での微気圧波ピーク値が20Pa以下⁶⁾となるように設定するのが代表的です。民家が坑口近傍に存在するような場合では、緩衝工によっては坑口の位置をずらすことにより坑口から家屋点までの距離を長くし、微気圧波低減を図る事例も存在します。

必要な緩衝工長さが求まると次は緩衝工に設けられる開口部の配置が決定されます。通常、開口部配置の決定には数値解析や模型実験を用い、緩衝工の側壁に離散的に設けられた窓の開閉パターンを変化させ、その中で微気圧波低減効果の高い条件が調査されます。そして、開口部を適切な位置に配置することにより、緩衝工の微気圧波低減効果をより向上させることが可能です。例として、**図6**に模型実験において、緩衝工側壁の開口部の開閉パターンを任意で変化させた場合の圧縮波の圧力勾配波形を示します。同図より、開口部 **(a)** と開口部 **(b)** の条件を比較すると、後者の条件の方が圧力勾配波形のピーク値が小さくなっていることがわかります。また、緩衝工の微気圧波低減効果が最適となる開口部配置は、列車速度や緩衝工長さなどの条

件によって異なります。そのため、列車の速度向上が図られる場合においても、その都度、模型実験や数値解析を用いて、微気圧波低減効果の大きい条件を決定するのが一般的です。

模型実験による調査

緩衝工の微気圧波低減効果を調査するために、多く用いられるのが模型実験です。微気圧波現象やトンネル内の空気力学現象の調査を目的とした模型実験装置は、国内外の企業や研究機関で数多く開発されていますが、ここでは紙面の都合上、鉄道技研および鉄道総研において開発、製作された主な模型実験装置を紹介します。

縮尺模型上で、列車がトンネルに突入した際にトンネル内に形成される圧縮波形状を再現するためには、列車とトンネルの断面積比、緩衝工とトンネルの断面積比を実物と一致させるほか、列車速度と音速の比(マッハ数)も実物と一致させる必要があります。そのためには、列車模型の速度を実物と同じまで安定的に加速させる技術が重要となります。

1958年に、トンネル内の空気力学的問題の基礎検討を行うため、鉄道技研において最初の模型装置が開発され

ました。この模型実験装置は、トンネルを円管で模擬し、トンネル模型内部の軸方向に張り渡したピアノ線に沿って、軸対称形状の列車模型を滑らせる機構でした。列車模型はゴム紐のばねにより加速され、最高速度は50km/h程度でしたが、その他の基本的な構成はその後に開発された模型装置でも踏襲されています。1975年には、列車模型を玩具のゴムパチンコのような機構で駆動することにより、最高速度はおよそ140km/hまで向上し、微気圧波に関する調査も可能となりました。

現在用いられている模型実験装置は、野球のピッチングマシンのように4対の車輪をモーターにより回転させ、その間に列車模型を通すことにより、列車模型を加速させています(**図7**)⁷⁾。本模型実験装置では、列車模型をおよそ550km/hまで加速できるため、リニア新幹線の営業速度域での実験も可能となりました。

海外の緩衝工と微気圧波事情

日本で東海道新幹線が開通して以降、海外でも欧州を中心に高速鉄道の建設が進み、フランスのTGV、ドイツのICEなどが営業運転を開始しました。欧州の高速鉄道は、バラスト軌道のト

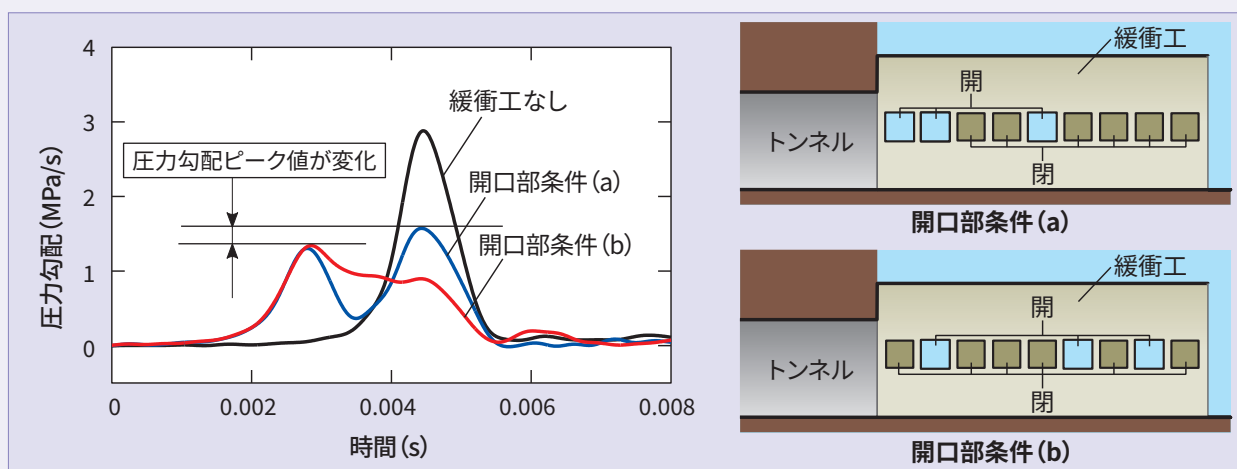


図6 緩衝工の開口部調整に関する模型実験結果

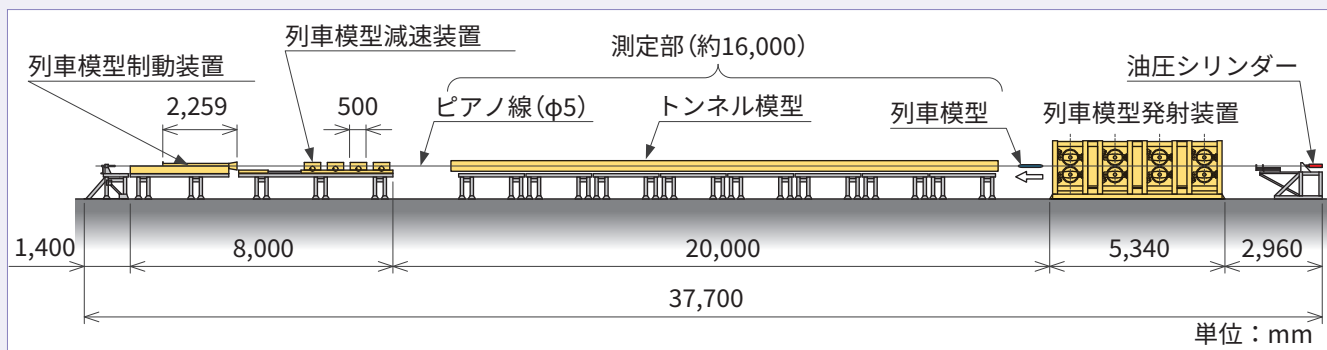


図7 4対車輪による発射装置を有する模型実験装置の概略図⁷⁾

ンネルが多いため、日本ほど微気圧波が問題となることはありません。しかし、一部のスラブ軌道トンネルでは微気圧波が懸念されるため、日本と同様に緩衝工が設置されています。ここでは、ドイツの鉄道トンネルに設置されている緩衝工に関して紹介します。

2012年以降、ドイツでも微気圧波低減を目的にトンネル緩衝工が本格的に設置されるようになりました。緩衝工の形状は日本を参考にしているため、断面積がトンネルの1.5倍を有しているなど基本的には同じ(図8)ですが、側面の開口部の配置や形状、さらにはトンネル本坑と同じように地面の下に埋め込む形の緩衝工など、日本と異なる構成のものもあります。さらに、日本のトンネルにはない特徴として、ドイツの一部トンネルでは、トンネル内火災に対する安全対策ために、上下線を分離した単線トンネルを採用しており、上下線それぞれの坑口に緩衝工が設置されています。また、トンネル内にはおよそ500m間隔で上下線トンネルを結ぶ接続坑があり、これらによる圧縮波の伝播段階における低減効果も期待できます。

おわりに

トンネル入口緩衝工は、微気圧波を大幅に低減することから、高速鉄道に



図8 ドイツの高速鉄道トンネルに設置されている70m緩衝工⁸⁾

とって不可欠な存在です。しかし、新幹線の速度向上が進むと、現在の緩衝工の仕様では、長さが100mを超えるようなきわめて長大なものが必要となる懸念されます。長大な緩衝工の設置には多大な費用を要し、さらに坑口周辺の地形条件によっては設置が不可能な場合があります。また、長大化した緩衝工では、開口部を配置する最適位置の探索が模型実験や数値解析を用いても困難となるのが現状です。そのため、今後は、低コストかつ微気圧波低減効果の高い緩衝工を、既存の緩衝工の仕様にとらわれずに開発していくことが重要になると考えられます。

(大久保秀彦/環境工学研究部
熱・空気流動研究室)

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 応用数学，力学，流体物理学予稿集，1977
- 2) 飯田雅宣，松村豪，中谷浩二，前田達夫：トンネル微気圧波低減のための列車先頭部形状の最適化，日本機械学会論文集（B編），Vol. 62，No. 596，1996
- 3) 小沢智，塚本京市，前田達夫：トンネル微気圧波低減対策に関する模型実験，鉄道技術研究報告，No. 990，1976
- 4) 小沢智，内田俊孝，前田達夫：入口緩衝工による備後トンネル微気圧波の低減，鉄道技術研究報告，No. 1054，1977
- 5) 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
- 6) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，2008
- 7) 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
- 8) 宮地徳蔵：ドイツの鉄道事情とドイツ鉄道システム技術会社（DBST）との共同研究，RRR，Vol. 73，No. 5，2016