

# 微気圧波を小さくする地上設備

福田 傑  
環境工学研究部  
(空気力学 主任研究員)

宮地 徳蔵  
同  
(同 研究員)

飯田 雅宣  
同  
(部長)



ふくだ たかし



みやち とくぞう



いいた まさのぶ

## はじめに

JR各社では、到達時分の短縮のために、新幹線の最高速度や曲線通過速度の向上を行なってきています。列車の速度が向上すると、それに伴い、空気力学的な問題が顕著になってきます。その中でも代表的なものにトンネル微気圧波があります。最近の車両では、車両先頭部形状の設計の際、微気圧波の低減を考慮した検討を行っており、その結果、アヒルのくちばしやカモノハシに例えられることもある独特の形状の先頭部を持つ車両が次々と登場しています。これについては、新幹線に乗車するときなどに目にする機会が多いため、ご存知の方も多いと思います。

しかし微気圧波の低減対策を、全て車両先頭部だけで行なおうとすると、とてつもなく長い先頭部が必要となってしまい、非現実的なものになります。そのため、効率的に微気圧波を低減させるためには、車両側対策だけでなく地上側の設備による対策も重要となっていますが、地上側の対策設備は車両先頭部による対策ほど一般的に知られてはおりません。そこで本稿では、地上側対策による微気圧波の低減対策の考え方、およびそのための代表的な地上設備についてご紹介したいと思います。

## トンネル微気圧波の現象と低減対策の原理

微気圧波の発生メカニズムを図1に示します。列車先頭部がトンネルに突入すると、トンネル内の空気は列車によって圧縮され、圧力が上昇します。この圧力上昇は、圧縮波（通過するとその点の圧力が高くなる波）となってト

ンネル内を反対側の坑口へ向かって伝わっていきます。圧縮波が反対側坑口に到達すると、大部分のエネルギーは反射し膨張波（通過すると圧力が低くなる波）となって列車突入側の坑口へ戻っていきませんが、エネルギーの一部がパルス状の圧力波として坑口からトンネルの外へ放射されます。このパルス状の圧力波を微気圧波と呼びます。微気圧波が大きくなると、トンネル坑口付近で衝撃音が聞こえたり、家屋の窓枠や戸が急に振動し、音を立てたりすることがあります。微気圧波の原因となる圧縮波が伝わる速度はほぼ音速（約340m/s）であり、列車の走行速度（新幹線で約80m/s）よりも大幅に速いことから、微気圧波は前触れ無く急に発生します。この点が、列車通過に伴う騒音や地盤振動などの他の環境問題とは異なる特徴です。

図1からわかるように、微気圧波の現象は、

- (1) 列車がトンネルに突入したときに圧縮波がトンネル内にできる、
- (2) 圧縮波が、トンネル内を反対側坑口へ向かって伝わっていく、
- (3) 圧縮波がトンネル坑口に達し、坑口で反射したとき、微気圧波が坑口から周囲へ放射される、

の三つの段階に分けて考えることができます。そして微気圧波の大きさ（圧力パルスの高さ）は坑口に到達した圧縮波の波面の傾き（図2）が急であるほど大きくなり、通常はこの傾きにほぼ比例します。したがって微気圧波を小さくするためには、この三段階のどこかで、圧縮波の波面の傾きを緩やかにしてやれば良いことになります。

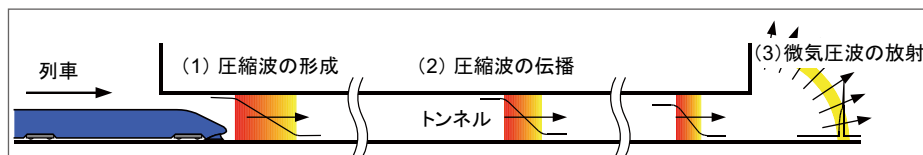


図1 トンネル微気圧波の発生メカニズム

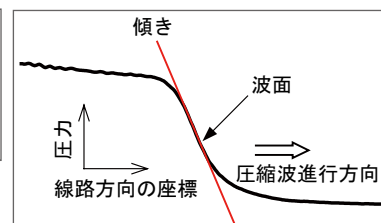


図2 トンネル内を伝わる圧縮波の波形と波面の傾き

## トンネル緩衝工による突入坑口対策

微気圧波の現象の一段階目の圧縮波ができる段階で、圧縮波の波面を緩やかにする方法の代表的なものがトンネル緩衝工です。圧縮波ができることでの対策方法ですから、緩衝工は列車が突入する側のトンネル坑口に設置します。

しかしながら新幹線のトンネルは複線トンネルですので、列車が突入する側の坑口は、当然、反対側から走ってくる対向列車の退出する側の坑口（すなわち対向列車による微気圧波が放射される坑口）でもあります。そのため緩衝工は微気圧波が放射される段階での対策で、自動車のマフラー（消音器）や銃のサプレッサー（減音器）のようなものであると誤解されることが多く、ウェブサイトや、書籍あるいは鉄道関係者が執筆した雑誌の記事などにさえそのように誤って記述されていることがあります。



図3 新幹線に設置されているトンネル緩衝工

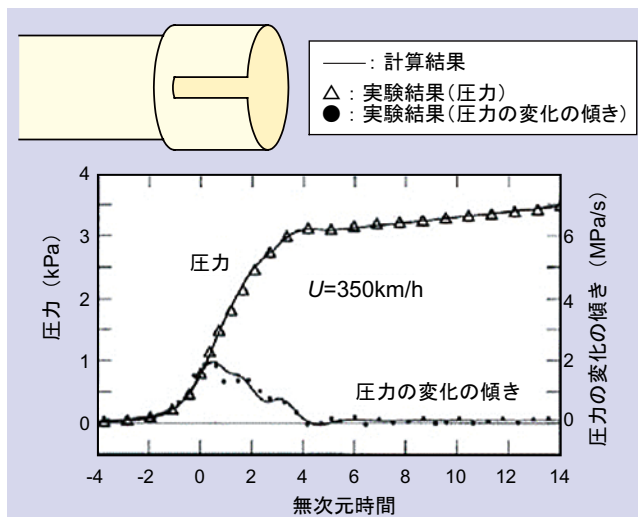


図4 トンネル緩衝工に関する数値計算と模型実験の比較（緩衝工長：12m相当、スリット設置位置：列車遠隔側側面）

図3に示すように、緩衝工はトンネル本坑の1.4倍程度の断面積を持つ覆いで、側面（あるいは天井面）には開口部を設けてあります。緩衝工は、長いほど列車突入時の圧縮波の波面の傾きを緩やかにできるため、長いほど反対側坑口の微気圧波を低減できます。

しかし微気圧波を効率的に低減するためには、緩衝工の長さを効率的に使う必要があり、そのためには緩衝工の長さや突入する列車の先頭部形状などに応じて、開口部の数、位置、大きさを適切に設定する必要があります。緩衝工の開口部を最適に設定するには模型実験が有効ですが、模型実験は列車や緩衝工の模型の製作費用や、最適な開口部を見つけるまでに何度も実験を繰り返す手間や時間などが必要になります。そこで鉄道総研では、音響理論による解析手法を、列車のトンネル突入時に圧縮波ができる現象に適用するための研究を、米国ボストン大学と共同で行ないました。その結果、緩衝工のあるトンネル内で発生する圧縮波を、少ない計算量・時間で効率的に求めることができるようになりました。図4は列車模型が緩衝工のあるトンネル模型に突入するときの、実験結果と計算結果の比較例です<sup>1)</sup>。図4より、実験結果と計算結果は良く一致しており、この手法が圧縮波がトンネル内に作られるときの現象を精度良く模擬できていて、緩衝工開口部の検討に有用であることがわかります。

ところで、トンネル内にできた圧縮波はトンネル内を反対側坑口まで伝わる間に変形します。一般に、圧縮波の波面の傾きは、コンクリート製のスラブ軌道を敷いたトンネルでは、トンネルが長いほど急になります。そこで鉄道総研では、この問題に関しても予測手法の検討を行い、計算によって圧縮波の変形を求めることができるようになりました。そして、上述のトンネル内に圧縮波ができる段階の計算と圧縮波がトンネル内を伝わる段階の計算を組み合わせ、微気圧波が放射される坑口で波面が最も緩やかになる最適緩衝工の開口部について検討を行ないました。

図5は、トンネル内を伝わる段階での圧縮波の変形を考慮して、1kmごとの各トンネル長さについて、緩衝工の最適開口部の検討を行なった例です<sup>2)</sup>。図5より、与えられた列車形式、速度、緩衝工の長さの条件の下では、圧縮波の変形を考慮せずに突入側坑口で圧縮波の波面の傾きが最小となるように緩衝工開口部を設定した場合に比べて、圧縮波の変形を考慮して微気圧波放射側坑口で圧縮波の波面の傾きが最小となるように緩衝工開口部を設定した場合は、長さ10kmのトンネルにおいて50%程度微気圧波を小

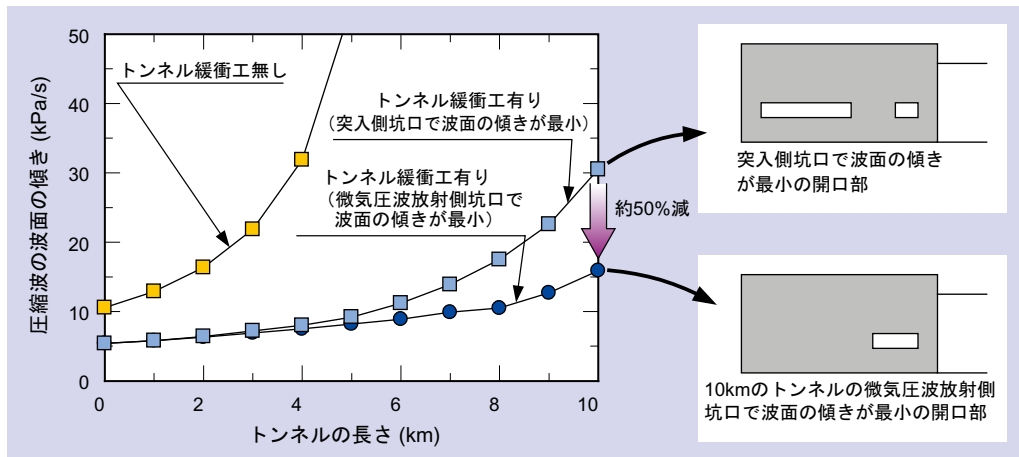


図5 圧縮波の変形を考慮して緩衝工の開口部の検討を行なったときの微気圧波低減効果 (緩衝工長：20m, 数値計算結果)

さくすることができるようになると予測されます。

### 枝坑によるトンネル内対策

微気圧波の現象の二段階目の圧縮波が伝わる段階で、圧縮波の波面を緩やかにし、微気圧波を低減するものに、トンネルの枝坑があります。長いトンネルを建設するときには、工事期間を短縮するために、いくつかの区間に分けて工事を行うことが多くあります。そのため、トンネルの本坑への進入路を確保するため、立坑、斜坑、横坑といった枝坑が設けられることがあります。トンネルの建設が終わっても、これら枝坑を埋め戻さないか、埋め戻すとしても本坑側の必要な奥行の分を残しておくことにより、微気圧波の低減対策として利用することができます。

図6に、トンネルの枝坑のある所を圧縮波が通過するときの様子を示します。圧縮波が枝坑の設置箇所を通過すると、圧縮波はトンネルの本坑と枝坑の両方に分かれて伝わっていきます。枝坑内へ伝わった圧縮波は、枝坑の端で反射して本坑へ戻ってきますが、枝坑の奥行が十分に（通常は30m程度）あれば、分かれて本坑側へ伝わった圧縮波と分離されるため、本坑側の圧縮波の圧力は減少し、波面は緩やかになります。枝坑の断面積が大きいほど圧力は減少するため、微気圧波の低減効果は大きくなります。

しかし枝坑の断面積が大きくなると、別の問題が発生します。枝坑の設置箇所を列車が通過すると、新たな圧力波（枝坑通過波）が発生し、枝坑通過波がトンネル坑口に到達すると、やはりそれによる圧力波が周囲に放射されます。この圧力波の大きさは、通常、微気圧波よりも小さいのですが、列車が高速、枝坑断面積が大きい、枝坑設置位置がトンネル坑口に近いなどの諸条件が重なると、無視できな

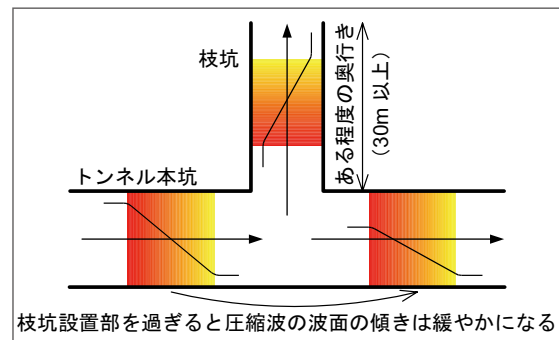


図6 枝坑による微気圧波の低減



図7 微気圧波と枝坑通過波の両方の低減を考慮に入れた本坑と枝坑の分岐部

い大きくなり、環境問題となるおそれがあります。

そこで最近建設された新幹線では、微気圧波低減効果を持たせながら枝坑通過波を小さくするために、図7に示すようなトンネル本坑と枝坑の分岐部を小さくしたオリフィス状の開口部にするという対策を行なっています。

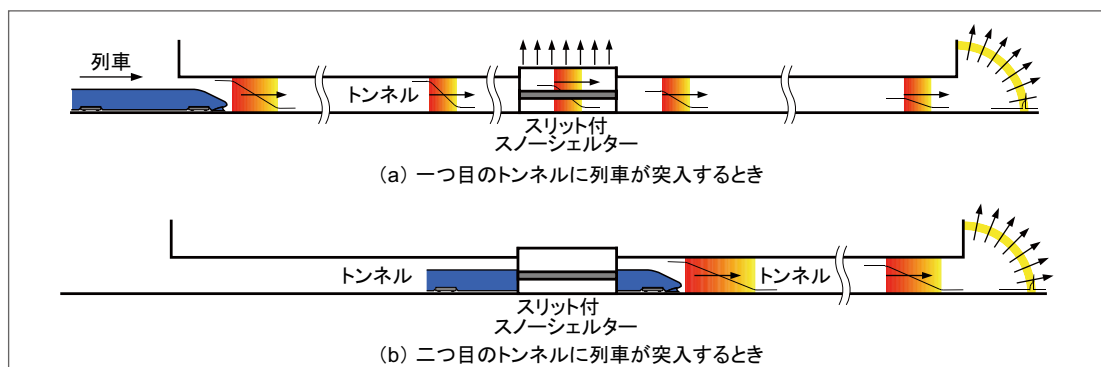


図8 スリット付スノーシェルターによる微気圧波の低減対策

### シェルターによるまばたき区間の対策

複数のトンネルが隣接して建設された区間を、まばたき区間と呼ぶことがあります。豪雪地帯を走る新幹線では、まばたき区間における雪害防止のため、スノーシェルター（覆い）が設けられています。そしてこのスノーシェルターの側面にスリットを設けることにより、微気圧波を低減することができます。

図8にスリット付シェルターによる微気圧波低減の原理、図9に新幹線に設置されているスノーシェルターの例を示します。図8 (a) に示すように、一つ目のトンネルへの列車突入により形成された圧縮波がシェルター設置部分に到達すると、微気圧波はスリットから徐々に放射されるために、シェルターが無いときに比べて小さくなります。それにともなって、シェルター内の圧縮波も急激に減衰した後に二つ目のトンネルに伝わるため、この圧縮波による二つ目のトンネルから放射される微気圧波は、非常に小さなものになります。また図8 (b) に示すように、次に列車が二つ目のトンネルに突入するときには、スリット付スノーシェルターが長い緩衝工の役割をするため、二つ目のトンネルへの列車突入による微気圧波を低減することができます。このことからスリット付スノーシェルターは、微気圧波の現象の一段階目の圧縮波ができる段階および三段階目の微気圧波が放射される段階での対策と言えます。また見

方を変えて、シェルターでつないだ複数のトンネルを一つのトンネルと見なせば、二段階目の圧縮波が伝わる段階での対策とも言えます。

先ほど述べたように、シェルターが設置された坑口では、微気圧波が細長いスリットから徐々に放射されるため、微気圧波の大きさは小さなものになります。そのため、これまで多くのトンネルでは、スリット付シェルターが設置されたのと反対側の坑口には、緩衝工を設置していませんでした。そのため、長いスラブ軌道のトンネルの場合、急峻な波面の圧縮波がシェルター内に到達することになり、微気圧波の大きさそのものは小さくても、衝撃音がシェルターの周囲で聞こえてしまうことがあります。そのため最近では、スリット付シェルターを設置する場合でも、反対側の坑口では緩衝工を設置する機会が増えてきました。

### おわりに

以上、本稿では微気圧波の地上側対策について述べました。微気圧波の低減対策のためには、列車先頭部の延伸・形状の最適化といった車上側対策だけではなく、ここに述べた地上側の対策も重要なものとなっています。実際、最初の微気圧波対策はトンネル緩衝工でした。微気圧波を効率的に低減するためには、車両側の対策と地上側の対策の両方をバランスよく組み合わせることが重要です。

多くの方は新幹線のトンネルなどの地上設備をご覧になることはあまり無いかもしれませんが、もし機会がありましたら、トンネル坑口に設置されている緩衝工などにも注目していただきたいと思います。RRR



図9 新幹線に設置されているスリット付スノーシェルター

### 文献

- 1) Howe, M. S., et al. : Journal of Sound and Vibration, Vol.311, 2008, pp.254-268
- 2) 宮地徳蔵 ほか：日本機械学会第17回環境工学総合シンポジウム講演論文集, 2007