

トンネル微気圧波
(Micro-Pressure Wave)

トンネル微気圧波の現象

列車が高速でトンネルに突入すると、反対側の坑口で突然ドーン、パーンという衝撃音が聞こえたり、家屋の窓枠や戸が急に振動してガタンと音をたてたりすることがあります。これはトンネル微気圧波と呼ばれる空気力学的現象であり、鉄道に特有の沿線環境問題です。微気圧波は速度依存性が高く、新幹線などの高速鉄道で特に大きな影響を及ぼします。

トンネル微気圧波は図1に示すようなメカニズムで発生します。列車先頭部がトンネルの入口に突入すると列車前方の空気が圧縮されて圧力が上昇し、これが圧縮波となって、トンネル内を反対側の坑口すなわち出口に向かってほぼ音速で伝播していきます。圧縮波が出口に到達すると大部分のエネルギーは反射して膨張波となって入口側に戻っていきますが、一部のエネルギーはパルス状の圧力波となって外部へ放射されます。この外部へ放射されるパルスをトンネル微気圧波と言います。図2は特に対策をしない場合の微気圧波の実測波形の例です。図の縦軸にあるように、通常、微気圧波の大きさは、その圧力波形の音圧ピーク値で評価され、単位にはPa(パスカル)が用いられます。

微気圧波の大きさ(音圧ピーク値)は車両、トンネルの種々の条件によって変わり、以下のような関係があります。

- (1) 短いトンネルでは、微気圧波の大きさは列車突入速度の3乗に比例します。
- (2) 長いトンネルではトンネル内の軌道種別の影響が現れ、スラブ軌道トンネル(10km程度以上の非常に長いトンネルは除く)ではトンネルが長くなるほど微気圧波が大きくなり、バラスト軌道トンネルではトンネルが長くなるほど微気圧波が小さくなります。
- (3) 列車とトンネルの断面積の比率が大きいほど、すなわち車両断面積が大きくトンネル断面積が小さいほど、微気圧波は大きくなります。
- (4) トンネル坑口と民家の距離にほぼ反比例して、微気圧波の大きさは減衰します。

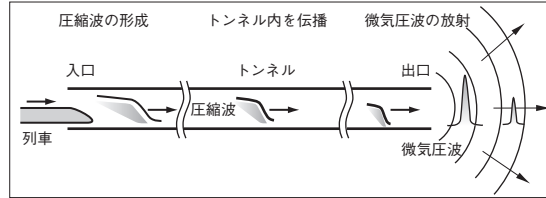


図1 トンネル微気圧波の発生

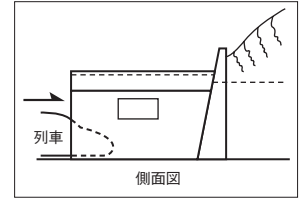


図4 トンネル入口緩衝工の模式図

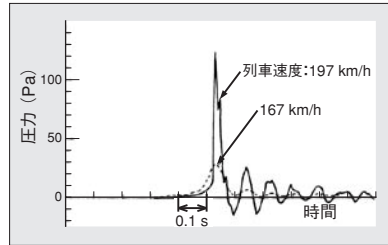


図2 トンネル微気圧波の実測波形例



図3 微気圧波低減効果の高い列車先頭部の例

ここで、微気圧波の大きさが軌道種別に依存するのは次のような理由によります。列車突入により発生した圧縮波がトンネル内を伝播する過程で、スラブ軌道トンネルでは波形が切り立っていくのに対し、バラスト軌道トンネルでは波形が緩やかに寝ていきます。トンネル出口から外部へ放射される微気圧波の大きさは、出口に到達した圧縮波の波形の勾配(圧力変化率)に比例するという関係があるため、切り立った圧縮波が到達するスラブ軌道トンネル出口では微気圧波が大きくなり、緩やかな圧縮波が到達するバラスト軌道トンネル出口では微気圧波が小さくなります。

トンネル微気圧波の低減対策

上述のように微気圧波の大きさはトンネル出口に到達した圧縮波の圧力勾配に比例します。したがって、圧縮波の圧力勾配を小さくすることによって微気圧波を低減できます。圧縮波の大きさそのものは突入速度と列車・トンネル断面積比でほぼ決まり、その低減は容易ではありませんが、圧縮波の圧力勾配であれば比較的簡単に低減でき、実用的な微気圧波対策が可能になります。

微気圧波対策として、列車先頭部のトンネル入口突入時に発生する圧縮波の圧力勾配を最初から小さくする対策、すなわち「入口対策(突入時対策)」が有効です。入口対策は車両・地上の双方で実施が可能です。

車両側の対策としては、車両断面の小型化、先頭部の延伸、先頭部形状(断面積分布)の最適化があります。小断面化は圧縮

波そのものの低減、先頭部の延伸・形状最適化は、圧力上昇時間を延ばす効果があります。旅客定員などの観点から、車両断面と先頭部長には制約があるため、先頭部形状の最適化が重要な対策となります。微気圧波低減効果の高い先頭部の例を図3に示します。近年の新幹線車両(E1, E2, E3, E4, 500, 700, 800系)の先頭部は、いずれも微気圧波低減に配慮した形状になっています。

一方、地上側の入口対策としては、トンネル入口緩衝工(図4)が代表的なものです。緩衝工はトンネル入口に設置された延長フードで、標準的なものはトンネルよりもひとまわり大きい断面をもち、側面に列車突入により圧縮された空気を抜くための開口部が空けられています。緩衝工は、先頭部の延伸と同様に、圧縮波の圧力上昇時間を延ばすことで圧力勾配を低減します。入口緩衝工は、はじめて微気圧波が顕在化したときに問題解決のため採用された対策であり、その後上越を除くすべての新幹線で実施されました(平成18年現在で合計約280のトンネル坑口に緩衝工が設置されています)。なお、上越新幹線では、トンネル内の斜坑や立坑の利用、あるいは複数トンネルのシェルター連結などの「トンネル内対策(伝播対策)」が採用されました。

(環境工学研究部 空気力学 飯田雅宜)

※記事に関するお問合わせ先
環境工学研究部(空気力学)
NTT: 042-573-7318
J R: 053-7318