

列車のトンネル突入時の空気力学的現象を再現する

福田 傑

環境工学研究部
(熱・空気流動研究室 主任研究員)

斉藤 実俊

同
(同 室長)



ふくだ たかし



さいとう さねとし

はじめに

新幹線などの高速鉄道のように、空気中を物体が高速で移動すると、様々な空気力学的現象が顕著になってきます。空気力学的現象に影響をもたらす鉄道の特徴として、列車が、(1)非常に細長いこと、(2)地面上を走行すること、(3)対向列車と近接してすれ違うこと、(4)トンネル内を走行すること、などを挙げることができます。新幹線の場合、飛行機の離陸速度に匹敵する約300km/hの速度でトンネルに突入することから、列車のトンネル突入時における空気力学的現象の解明および緩和・低減対策法の検討は、高速鉄道における重要な課題の一つとなっています。

列車のトンネル突入による空気力学的現象

図1に、列車の先頭部がトンネルに突入するときの流れの様子を示します。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り排除されるために、列車側面とトンネル壁面の間では列車進行方向と逆向き流れが生じ、列車突入側坑口から空気が吹き出します。また同時に列車前方のトンネル内の空気は圧縮され圧力が上昇します。そしてこの圧力の上昇により、トンネル内には圧縮波(通

過するとその点の圧力が上昇する波)が形成されます。この圧縮波がトンネル内を伝わることにより、トンネル内には流れが誘起されます。

列車のトンネル突入により形成された圧縮波は、トンネル内をほぼ音速(約340m/s)で伝わり、トンネル坑口において反射し、トンネル内を往復します。また列車の後尾部がトンネルに突入すると、膨脹波(圧縮波とは逆に、通過するとその点の圧力が下降する波)が形成され、圧縮波と同様にトンネル内を往復します。そのため、圧縮波と膨脹波の通過や列車の通過により、トンネル内で空気の圧力が変動します(図2)。このトンネル内圧力変動は、トンネル

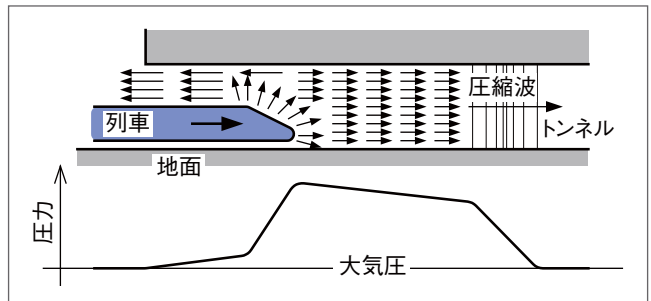


図1 列車先頭部がトンネルに突入するときの流れと圧力

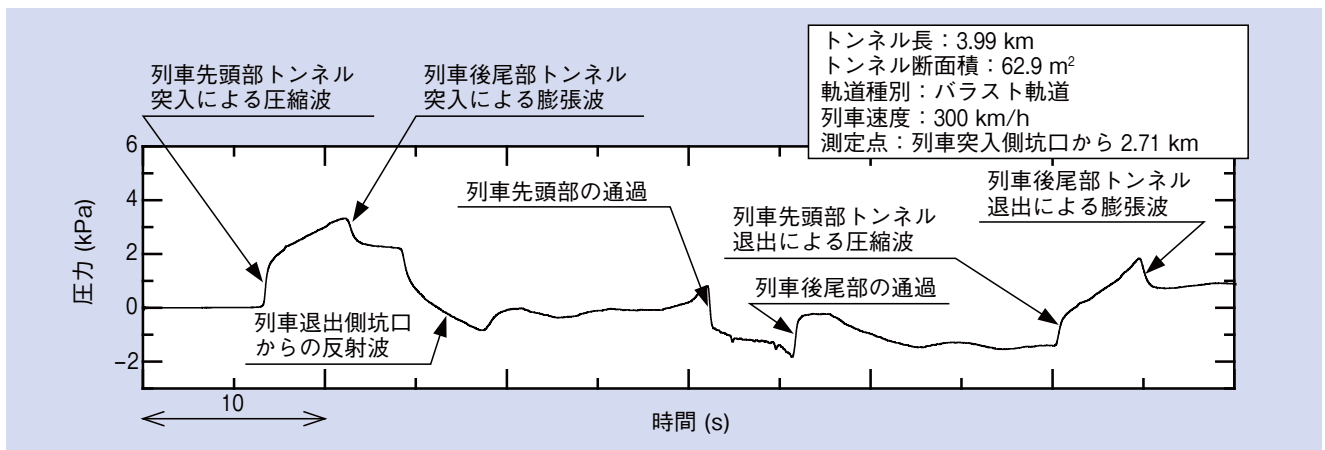


図2 新幹線のトンネル内における圧力変動の測定例

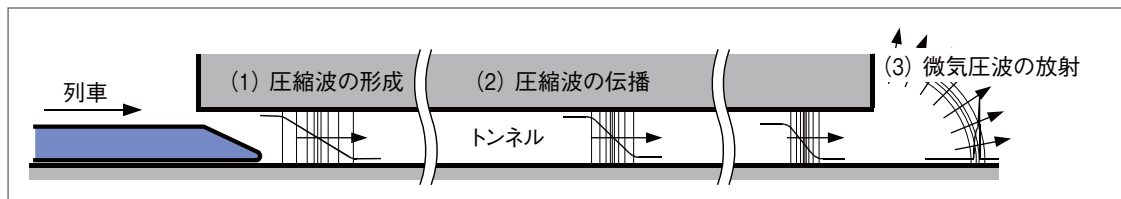


図3 トンネル微気圧波の発生メカニズム

内を走行する列車やトンネル内の設備に作用する力や、列車の気密が不十分な場合には乗客の耳ツンの原因となります。

またトンネル内圧力変動のほかに、列車突入時の圧縮波による空気力学的現象にトンネル微気圧波があります(図3)。トンネル内を伝わる圧縮波がトンネルの坑口に到達して反射するとき、上述のように大部分のエネルギーは反射し膨張波となって列車突入側の坑口へ戻っていきますが、エネルギーの一部は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ほかの環境問題とは異なる特徴です。

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、微気圧波の低減対策のためには、トンネル坑口への入口緩衝工(列車の突入側坑口に設置するトンネル本坑よりも断面積が大きく側面に開口部を有する覆い、図4)の設置や列車先頭部の延伸・形状の最適化など、圧縮波の形成の段階で波面の傾きを緩やかにする対策が有効です。そのため、列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の波形を、精度良く予測する必要があります。

模型実験の考え方

列車のトンネル突入時の空気力学的な現象を再現するためには、列車と空気、地面およびトンネルの相対的な運動を再現する必要があります。空気力学的な模型実験の方法の代表的なものに風洞実験があります。風洞実験は固定した列車の模型に空気の流れを当てることにより列車と空気の相対的な運動を再現するもので、列車から見て移動する地面の効果は移動地面板で模擬することも可能ですが、ト



図4 トンネル坑口に設置されている入口緩衝工

ンネルとの相対的な運動を模擬することは困難です。そこで鉄道総研では、実際の列車とトンネルのように、列車の模型をトンネルの模型に突入させる模型実験を行っています¹⁾。

列車のトンネル突入速度を U とすると、列車のトンネル突入により形成される圧縮波の圧力は U^2 に比例し、時間のスケールは U^{-1} に比例します。また縮尺模型を用いた実験では、時間のスケールは、実物に対して縮尺に比例して縮みます。そのため列車とトンネルの断面積比やトンネル坑口および列車先頭部などの幾何学的形状が実物と模型で同一の場合、圧力については U^2 、時間スケールについては U^{-1} と縮尺で補正することにより、模型実験で得られた圧縮波の波形を実物のものに換算することができます。

列車の先頭部が流線形で、車体表面に沿って空気が流れ剥離が生じない場合、列車先頭部を表現する模型は実物の三次元的な詳細な形状を模擬する必要は無く、大まかな形状の変化を模擬しておけば良いと考えられます。ただし、列車先頭部およびトンネルの軸方向の形状の変化は、圧縮波の波形に大きな影響を及ぼすので、正確に再現する必要があります。このような考え方に基づいて列車とトンネルを再現したものが、列車とトンネルを軸対称の形状で表わした模型です。この模型では、列車として先頭部の断面積の変化を実列車と同一にした回転体、トンネルとして円管を用います。

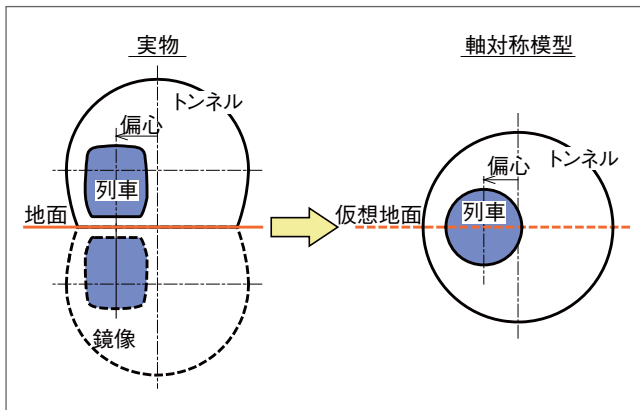


図5 軸対称の列車・トンネル模型を用いた模型実験の考え方

列車およびトンネルの形状のほかに圧縮波の波形に大きな影響を及ぼす因子として、(1)地面、(2)列車中心軸とトンネル中心軸の間の偏心(複線トンネルの場合)の二つがあります。地面の効果については、地面を面対称の対称面とする鏡像法により軸対称模型を用いても模擬することができます。また中心軸間の偏心は、列車模型中心軸とトンネル中心軸をずらすことにより模擬することができます。図5に、列車とトンネルを軸対称の模型で表現し、複線トンネルを偏心、地面効果を鏡像法で模擬する模型実験の考え方²⁾を示します。

模型実験装置の概要と実験結果の例

列車模型をトンネル模型に突入させる模型実験装置は、現在では我が国だけでなく海外にもいくつかありますが、ここでは鉄道総研の実験装置についてご紹介します。図6は国鉄時代の1958年に製作された初代の実験装置の概要です。トンネル模型(円管)の内部の軸方向にピアノ線を張り渡し、これに沿って軸対称形状の列車模型が滑り動くようになっています。この基本的な構成は、この後に製作された装置にも踏襲されています。列車模型はゴム紐のバネで射出され、列車模型最高速度は50km/h程度でした。

現在用いられている実験装置の一つの概要を、図7に示

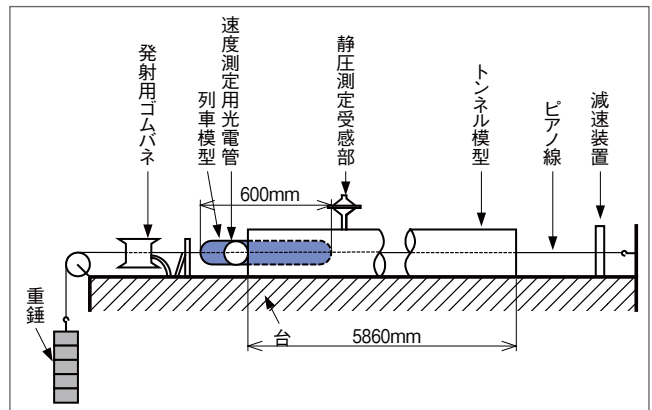


図6 最初に製作された模型実験装置の概要

します。この実験装置では、列車模型は四対のゴム付発射輪で加速されます。装置の全長は約38m、トンネル模型を設置できる測定部は約16mあり、長いトンネル模型を設置できることから、列車のトンネル突入時の実験だけでなく、トンネル中間部の枝坑や地下駅における空気力学的現象に関する実験も可能となりました。また、高速で発射された列車模型を壊さずに止めることにも技術的な困難さがあります。そこで本装置では列車模型制動装置として、列車模型が衝突した後に一体となって台の上を滑って行く空気ダンパー構造の筒を用いています。また、列車模型制動装置に列車模型が衝突する前に十分に減速させるため、列車模型制動装置の前には、複数のゴム製摩擦板による列車模型減速装置も備えています。以上のような機構を採用することにより、本装置の列車模型最高速度は約550km/hに達しています。なお本装置は、国土交通省の補助金を得て製作されました。

新幹線のトンネル坑口に設置する入口緩衝工について、側面開口部の効果の検討を軸対称の列車・トンネル模型を用いて行った実験結果の例を図8に示します。図8より、緩衝工の設置により圧縮波の波面の圧力勾配(圧力変化の傾き)が小さくなること、そして側面開口部の開閉パターンを変えることにより、圧力勾配波形が変化することがわ

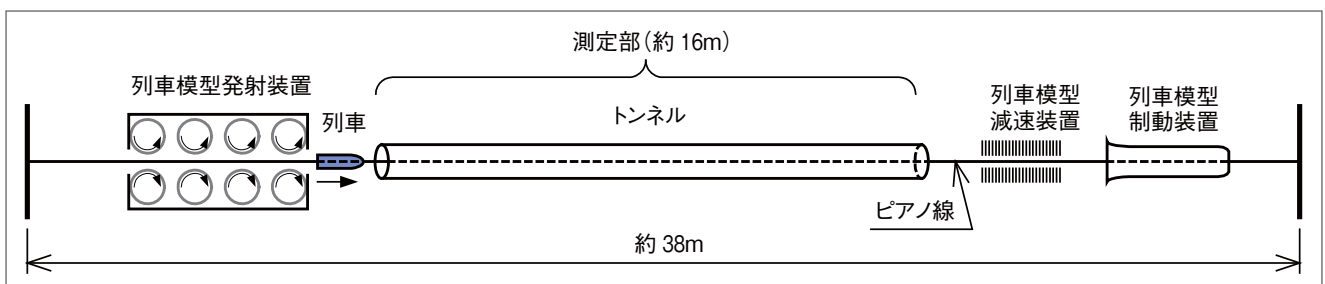


図7 四対の回転輪を有する発射装置を備えた模型実験装置の概要

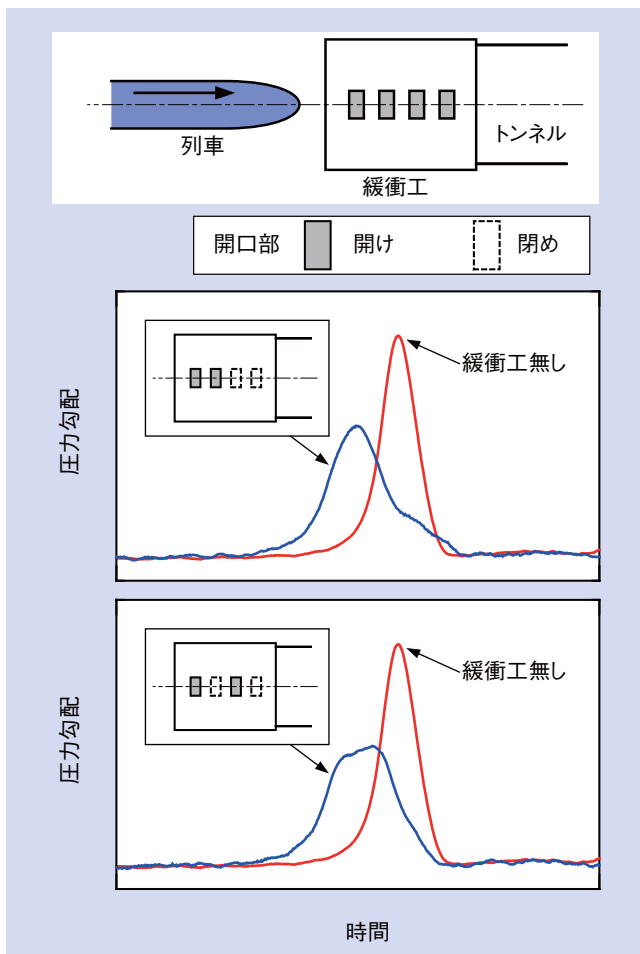


図8 緩衝工の開口部調整に関する模型実験結果の例

かります。このように開閉パターンを変えて繰り返し実験を実施することにより、実際のトンネルに設置する緩衝工の側面開口部の、適切な開閉パターンの検討を行うことができます。

模型実験の精度向上を目指して

実物の列車には先頭部下部にスカートやスノープラウが設置されており、その端部において流れが剥離していることが考えられます。また、車体下面と地面の間の流れが、圧縮波の形成に影響を及ぼしていることが考えられますが、このような流れ場を軸対称の列車・トンネル模型で再現することはできません。

そこで最近、鉄道総研では三次元の列車・トンネル模型を用いた実験を行っています³⁾。図9に三次元模型を用いた実験の実施状況を示します。実際の状況と同じように、実形状に相似な三次元形状の列車模型が地面上を移動し、馬蹄形断面のトンネル模型へ突入します。図10に模型実験と新幹線の実トンネルにおける現地測定で得られた圧縮



図9 三次元模型実験の実施状況

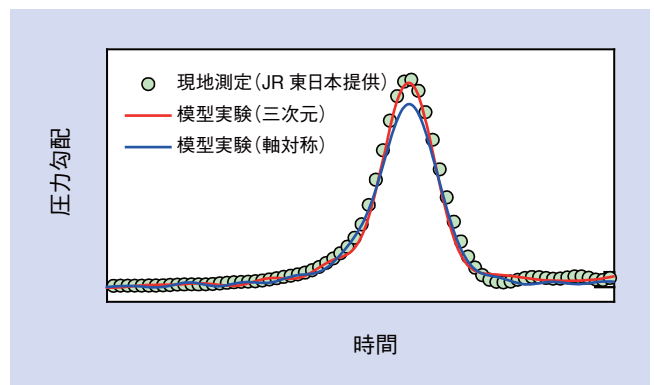


図10 模型実験結果と現地測定結果の比較

波の波形を示します。三次元模型を用いることにより、軸対称模型よりも現地測定結果に近い圧縮波の圧力勾配波形が得られていることがわかります。

おわりに

現在、300km/hを超える速度域への新幹線の速度向上が計画されており、微気圧波の大きさの評価および低減対策法の検討に用いる予測手法の精度向上の必要性が高まっています。鉄道総研では、本稿で紹介した模型実験だけではなく、理論・数値解析方法の開発や精度向上を行い、微気圧波の予測・評価方法の確立や低減対策法の検討を進めています。[RRR]

文献

- 1) 福田・飯田：日本音響学会誌，Vol.63，No.9，pp.543-548，2007
- 2) 田中ほか：日本機械学会論文集（B編），Vol.69，No.683，pp.1607-1614，2003
- 3) Fukuda, T., et al.: Proceedings of the 10th International Workshop on Railway Noise, Nagahama, Japan, pp.419-426, 2010