

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

# トンネル内の圧力変動を予測して設備や車両の設計に役立てる

列車がトンネルに突入するとトンネル内部に圧力波が発生し、この圧力波の通過にともなってトンネル内の圧力が変化します。この圧力変動はトンネル内を走行する列車の車体やトンネル内設備、トンネル覆工に変動荷重として作用するため、これらの強度設計を行うためには圧力変動の大きさを把握する必要があります。そこで、実務で使用されているトンネル内圧力変動の予測方法について紹介します。



**斉藤 実俊**  
Sanetoshi Saito  
環境工学研究部  
熱・空気流動研究室  
室長  
【専門分野】 空気力学



**斎藤 寛之**  
Hiroyuki Saito  
環境工学研究部  
熱・空気流動研究室  
主任研究員  
【専門分野】 空気力学、  
熱工学



**梶山 博司**  
Hiroshi Kajiyama  
環境工学研究部  
主管研究員  
【専門分野】 空気力学、  
熱工学

## はじめに

列車がトンネル内を走行するとトンネル内部に圧力波（☞参照）が発生します。この圧力波はトンネル内を音速で伝播し、トンネル坑口で開口端反射（☞参照）し、逆方向に伝播します。また、トンネル内を走行中の列車の先頭部・後尾部やトンネル枝坑の取付部などでも圧力波は反射するため、トンネル内部には多数の圧力波が存在し、その結果、トンネル内の圧力は時間的に変動することになります（図1）。

トンネル内圧力変動の大きさは列車速度の2乗にほぼ比例し、新幹線などの高速列車では数kPa（大気圧の数%）程度の大きさになりますが、この圧力変動はトンネル内を走行する列車の車

体やトンネル内設備（機器箱、通路の扉、側溝の蓋など）、トンネル覆工などに変動荷重として作用するため、これらの強度設計を行うためにはトンネル内圧力変動の大きさを把握する必要があります。

トンネル内圧力変動の大きさは列車速度のほかにトンネルや列車の断面積や長さ、枝坑の有無、さらには列車の本数やすれ違いのタイミングなどさまざまな要因によって変化します。このようにさまざまな条件における圧力変動を予測するためには数値シミュレーションが有効な手段となります。そこで、数値シミュレーションによるトンネル内圧力変動の計算事例を紹介します。

### ☞ 圧力波、圧縮波、膨張波

空気中を伝播する波で、ある点を通るとその点の圧力や密度が増加する波を圧縮波、減少する波を膨張波といい、それらを総称して圧力波と呼びます。列車先頭部がトンネルに突入すると圧縮波が、後尾部が突入すると膨張波がトンネル内に発生します。

### ☞ 開口端反射

管内を伝播する圧力波が、開口端（閉じていない管）で反射する現象のことで、圧縮波が開口端反射すると膨張波となって戻ります。

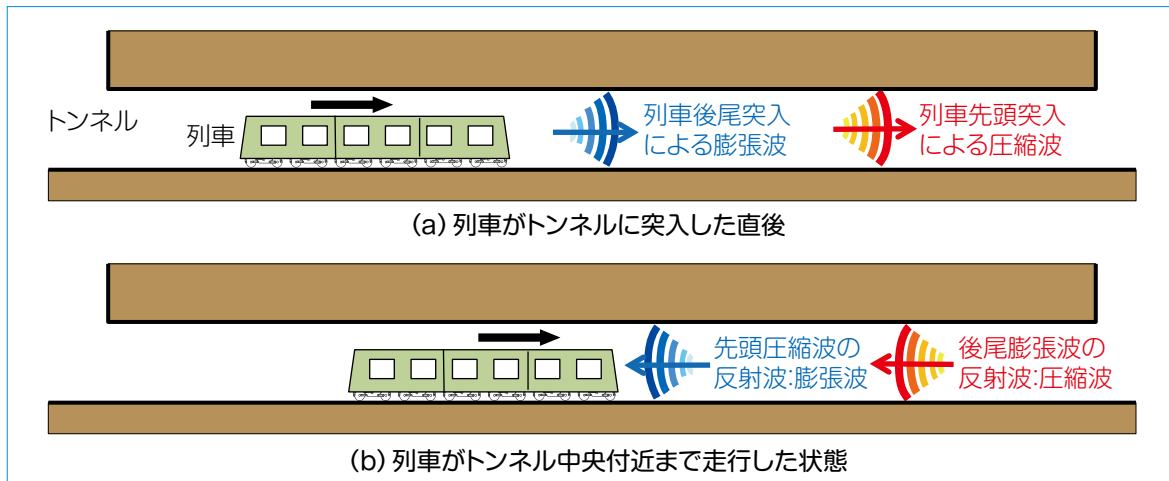


図1 トンネル内に発生する圧力波

### トンネル内圧力変動シミュレーション

トンネルはその断面に比べて非常に長く、トンネル内の圧力や流速は断面内ではほぼ一様とみなすことができます。そこで、予測を行う数値シミュレーションではトンネル内の流れ場を、圧力や流速が長手方向のみに変化する1次元モデルで再現しています。計算はトンネル全体を一定の距離ごとに区切って計算格子点を決め、初期値（通常は流れがない状態、流速=0、圧力=大気圧）を各格子点に与え、過去の値から次の時間ステップでの値を1次元流体の方程式を解くことで求めていきます。その際、列車の先頭部・後尾部の位置も同時に計算し、その地点において列車端部の境界条件式を解くことにより列車の影響を考慮し、圧力波の発生を再現します。

このように実際の流れ場を簡略化す

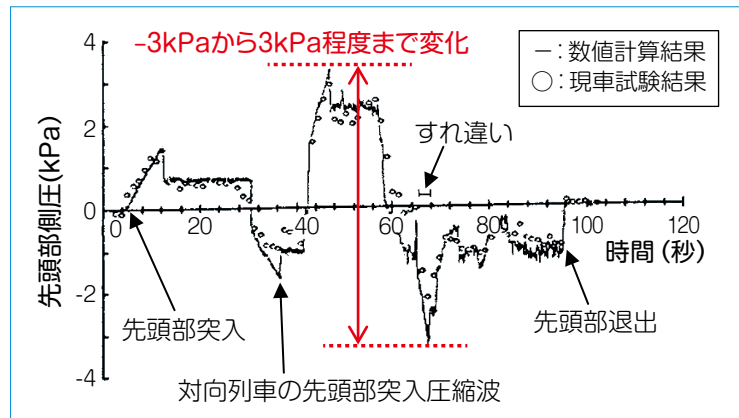


図2 トンネル内走行中の車体に作用する圧力の計算例<sup>2)</sup>

ることで計算速度が向上し、必要となる計算機のメモリー容量を少なくできるため、圧力変動シミュレーションは実用的なツールとして多くの検討に活用されています<sup>1)2)3)</sup>。

圧力変動シミュレーションの計算精度は、新幹線トンネルでの実測結果や模型実験結果などとの比較によって検証されています。その比較例として新幹線の車体に作用する圧力の計算事例を図2に示します<sup>2)</sup>。図2に示した事例は速度200km/hの新幹線がトンネル内ですれ違ったときに車体に作用する圧力を計算したものです。車体に作用する圧力は時間的に大きく変動し、最大で3kPa程度に達していることが

わかります。この圧力変動が車内に浸透すると、いわゆる“耳ツン”現象<sup>(注)</sup>が発生するため、それを防止するために新幹線の車体は気密構造となっており、トンネル内走行中でも車内圧は一定に保たれます。車体に作用する外力（変動荷重）は車体の外の圧力（外圧）と車内の圧力（内圧）の差によって発生します。気密構造の車体の場合は内圧が一定なので外圧の変動、つまり、トンネル内の圧力変動がそのまま変動荷重として車体に作用することになります。つまり、トンネル内圧力変動を計算することによって、車体に作用する変動荷重を見積もることが可能となります。

#### 注 耳ツン現象

気圧の急激な変化にともない鼓膜が引っ張られることで耳に感じる違和感のこと。エレベーターや飛行機などでも発生することがあります。

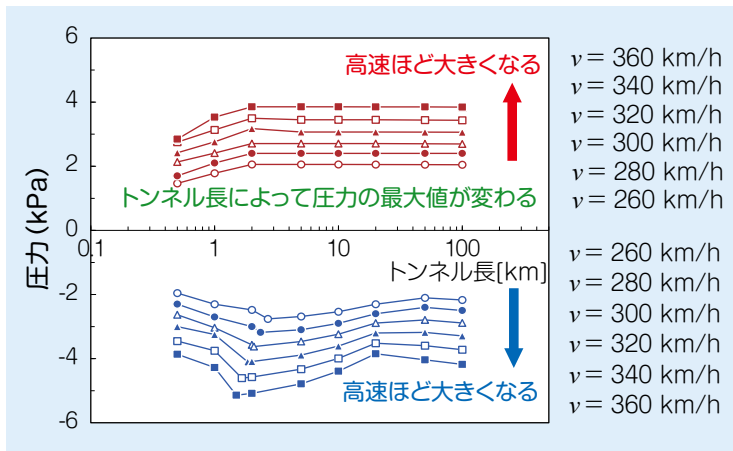


図3 トンネル内に発生する圧力最大値の計算結果<sup>4)</sup>

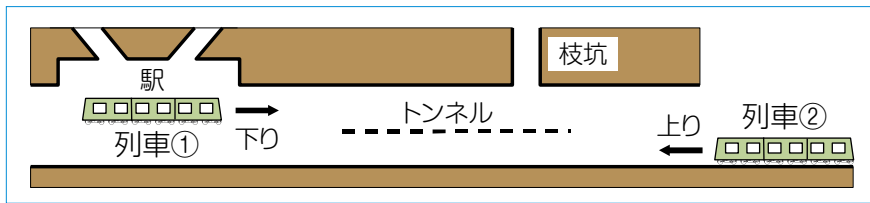


図4 地下トンネルの構成例

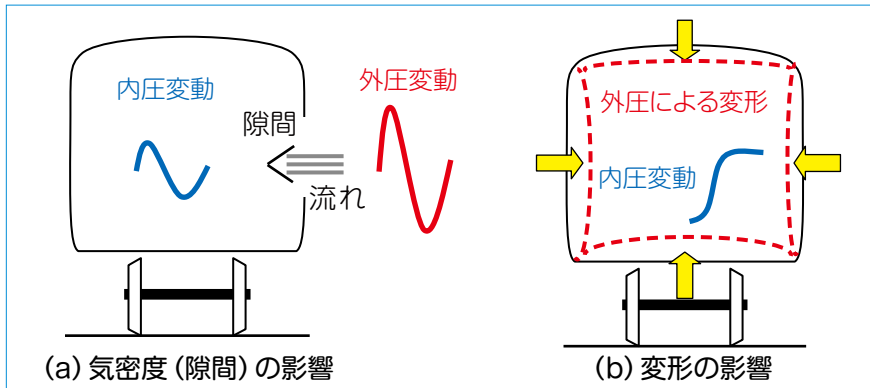


図5 気密モデルの考え方

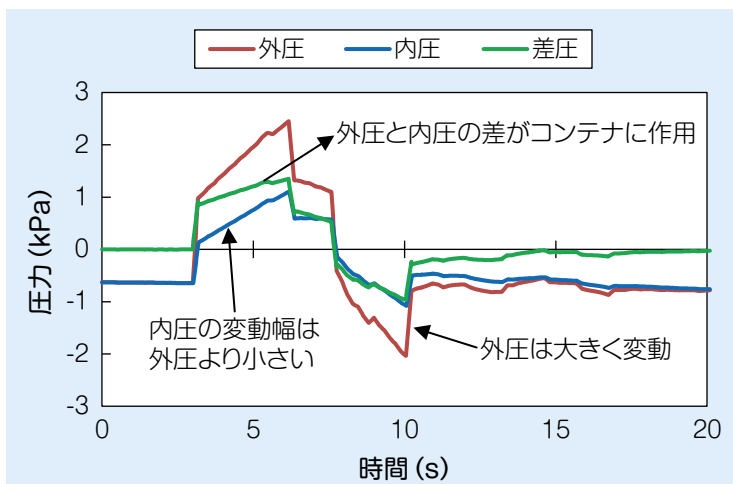


図6 新幹線とのすれ違い時にコンテナに作用する圧力の計算例

前述のようにトンネル内圧力変動の大きさは列車速度やトンネル・列車の断面積、長さ依存します。そこで、代表的な新幹線の条件に対して、トンネル長と列車速度を変えたときの圧力変動の正の最大値と負の最大値の計算結果を図3に示します<sup>4)</sup>。図3より、圧力変動の最大値は列車が高速になるにしたがって大きくなることがわかります。また正圧の最大値は2km以上のトンネルであればほぼ同程度であるのに対し、負圧の最大値は1~5kmのトンネルで大きくなる傾向がみられます。

この圧力変動シミュレーションは、図4のように、枝坑などの分岐部や地下駅などの断面拡大部、さらには地下鉄のように単線トンネル・複線トンネル・地下駅などが組み合わさった複雑なトンネル構成に対しても計算ができます。さらに、列車のすれ違いや続行運転、列車速度の変化にも対応することができるので、より実際に近い条件での検討に使用することが可能です。

### 気密モデル

新幹線の車体のような気密の構造物に作用する変動荷重は、その構造物に作用する外圧を計算すればよかったです。在来線の車体や貨物コンテナ、あるいは、トンネル内の機器箱など、気密でない構造物の場合は外圧の変化にともなって構造物の内圧も変化するため、差圧を求めるためには外圧だけでなく、内圧も計算する必要があります。この内圧の変化の仕方は、構造物の変形の大きさや気密度(隙間の大きさ)に依存します。内圧変動の考え方を図5に示します<sup>5)6)</sup>。

図5の左図は隙間の影響による内圧変動の模式図です。外圧が変動すると内部との圧力差によって隙間部分に流れが生じ、その流れによって内圧が変化します。隙間の抵抗のために内圧変

動は外圧変動より小さく、また、時間的な遅れが発生します。

一方、図5の右図は構造物の変形の影響を示したものです。車体やコンテナ、機器箱など箱状の構造物が圧縮変形や膨張変形をすると体積変化にともなって内圧が変化します。たとえば図5右図のように構造物に正の外圧が作用し、圧縮されることで体積が小さくなると内圧は大きくなります。

これらの影響を計算することで外圧変動にともなう内圧変動を計算することが可能となり、気密でない構造物に作用する変動荷重を見積もることができます。

一例として、新幹線と貨物列車がトンネル内ですれ違った場合を想定し、その際に貨車（コンテナなど）に作用する圧力の計算例を図6に示します。なお、本計算では、本来は気密試験などで決定すべき気密度（隙間の大きさ）と剛性を適当な数値で想定した結果ですので、本計算結果については定性的な評価にとどめます。外圧は前述のトンネル内圧力変動シミュレーションによって計算した結果です。外圧の変化にともない、内圧も変化していますが、その大きさは外圧より小さいため、差圧（外圧－内圧）が発生し、その結果、変動荷重が貨車（コンテナ）に作用することになります。隙間が大きくなると内圧は外圧とほとんど同じ変化を示しますので、差圧（荷重）はほとんど発生しなくなります。

新幹線などの車体の場合、剛性が高く、体積も大きいいため、変形による影響は小さく、無視することができると考えられますが、貨車（コンテナ）や機器箱など剛性が低く体積が小さい場合には変形による影響は大きくなります。両者を計算モデルでうまく組み合わせることによって、内圧を精度良く計算することが可能となります。

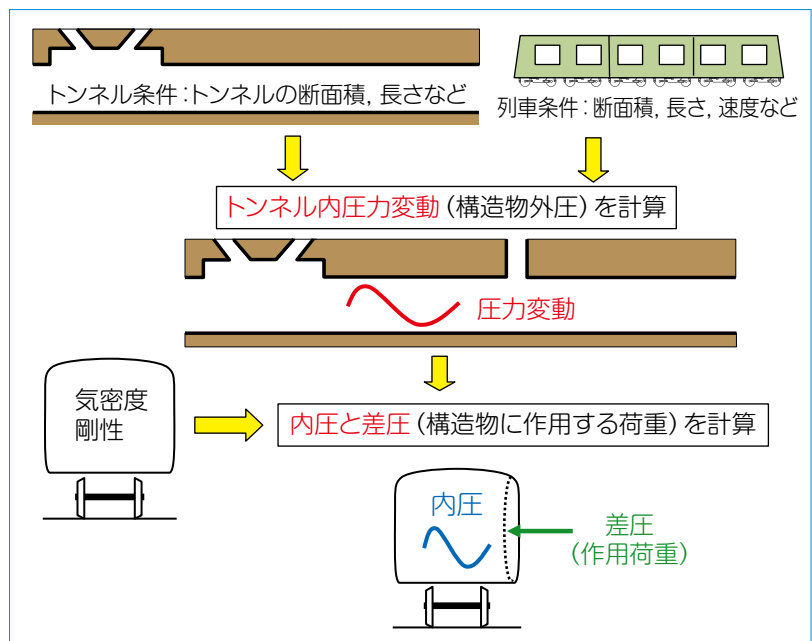


図7 構造物に作用する変動荷重の計算の流れ

### 構造物に作用する変動荷重の計算の流れ

計算の流れを図7に示します。まず、トンネルや列車の条件を入力パラメータとしてトンネル内の圧力変動を計算します。気密の車体やトンネル内設備にはこの圧力がそのまま荷重として作用します。検討対象が非気密構造の場合には、この外圧の計算結果と検討対象物の気密度、剛性から内圧変動を求め、得られた外圧と内圧の差（差圧）から変動荷重を算出することができます。

### おわりに

トンネル内に発生する圧力変動を予測する数値シミュレーションについて紹介しました。トンネル内圧力変動シミュレーションは多くの現地試験や模型実験の結果によって検証されており、また、圧力だけでなく流速も予測可能であるため、地下駅の階段部などにおける列車風の予測など、トンネル、地下駅などの空力現象の予測に数多く活用されています。一方、気密モデルに

ついては、現地試験や模型実験などによる精度検証がまだ不十分であり、今後、さらにデータを蓄積することが望まれます。引き続き、計算モデルの精度向上に取り組む予定です。RRR

### 文献

- 1) 山本彬也：列車とトンネルの空気力学，鉄道技術研究報告，No.1230，1983
- 2) 飯田雅宣，前田達夫：トンネル内圧力変動シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.4，No.7，pp.54-62，1990
- 3) 梶山博司，飯田雅宣，前田達夫：大深度地下鉄道の空気流動シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.7，No.7，pp.51-58，1993
- 4) 山内雄記，齊藤実俊，梶山博司：トンネル内圧力変動に関する数値計算結果，鉄道総研報告，Vol.30，No.7，pp.47-52，2016
- 5) 日本国有鉄道技術研究所：高速鉄道の研究，pp.374-377，1967
- 6) M.Sima：New unifying procedure for working with pressure tightness of rail passenger vehicles，Proceedings of 11th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels，pp.743-757，2003