

先頭部形状を考慮した列車通過時トンネル内圧力変動の予測

環境工学研究部 熱・空気流動研究室
室長 齊藤 実俊

1. はじめに

列車がトンネル内を走行する際に発生する圧力変動はトンネル内構造物や車体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際には圧力変動の大きさを正確に予測する必要がある。この圧力変動には列車がトンネルに突入・退出した時に発生する圧力波によるものと、列車先頭部・後尾部周りの圧力場の通過によるものがある。前者はトンネル断面内で様な大きさであるため、製作の容易な軸対称形状模型による実験や一次元流れの数値シミュレーションによって現象を再現できる⁽¹⁾⁽²⁾のに対し、後者は列車からの断面内距離によって大きさが異なり、特に列車近傍では先頭部形状の影響を強く受けるため、上記の方法では正確に再現することができない。

そこで、列車先頭部形状の影響を考慮できるように、軸対称列車模型用の発射装置を任意形状の列車模型での実験が可能のように改良するとともに、従来の一次元流れの数値シミュレーションに三次元ポテンシャル流れによる数値シミュレーションを組み合わせた手法を開発した。

2. 模型発射装置の改良⁽³⁾

列車模型発射装置は上下の回転輪で列車模型を挟み込んで発射するため、列車模型は軸対称形状であることが要求される⁽⁴⁾。そこで、実車両と相似な模型による実験が可能となるよう、回転輪で加速される軸対称形状の発射体によって、トンネルに突入する供試体模型を押し出す方式を採用した(図1)。発射体先端は回転輪に接触しないよう細くなっており(以下、細い部分を接続棒と呼ぶ)、実形状列車模型をトンネル手前で接続棒に接触させて設置する。実形状模型と回転輪の間には発射体用の制動装置がある(図1(a))。バネによって送り出された発射体は回転輪によって加速し、同時に実形状列車模型も発射体に押されることで加速する(図1(b))。その後、発射体用制動装置によって発射体のみ停止し、押されていた実形状列車模型は慣性でそのまま走行してトンネル模型に突入し、列車模型用制動装置で停止する(図1(c))。

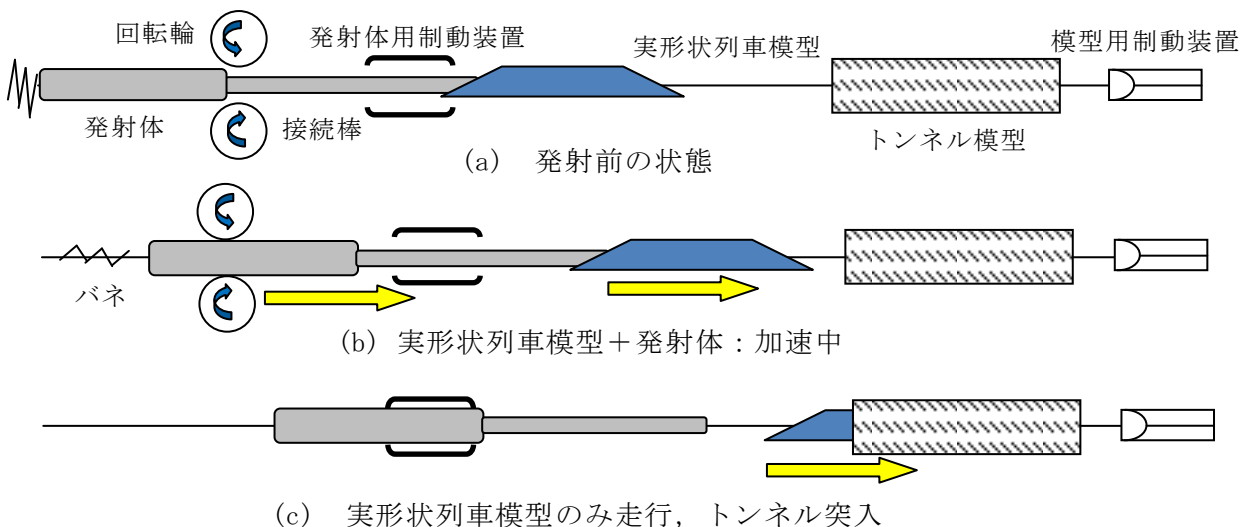


図1 列車模型の発射方法の概略図

3. 模型実験結果

模型実験の概略を図2に示す。実形状模型は縮尺 1/70、軸対称模型は縮尺 1/87 に相当する。トンネル入口から圧力計までの距離はいずれも実寸換算で 43 m、列車模型速度は 250 km/h、複線トンネルを模擬し、列車模型の断面内走行位置はトンネル中心から偏心している（図2参照）

模型実験結果と現地試験結果を図3に示す。模型実験結果に対しては時間軸を実スケールに変換している。列車模型が実車に比べて短いことや、測定点のトンネル入口からの距離が異なるために列車通過直前の圧力値が異なる。そこで比較のために列車通過前の模型実験の圧力測定値を現地試験結果に一致するよう上下にシフトしてある。

先頭部通過時の車両遠隔側圧力は、軸対称模型、実形状模型とも現地試験と良く一致しているが、車両近接側では軸対称模型は現地試験より圧力最大値を過小評価している。一方、実形状模型は現地試験と良く一致しており、先頭部形状の影響が大きい車両近傍における圧力変動を正確に再現できることがわかる。

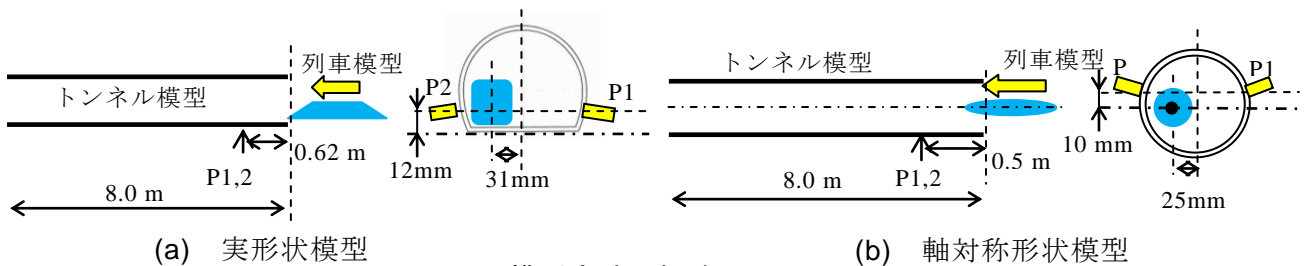


図2 模型実験の概略図

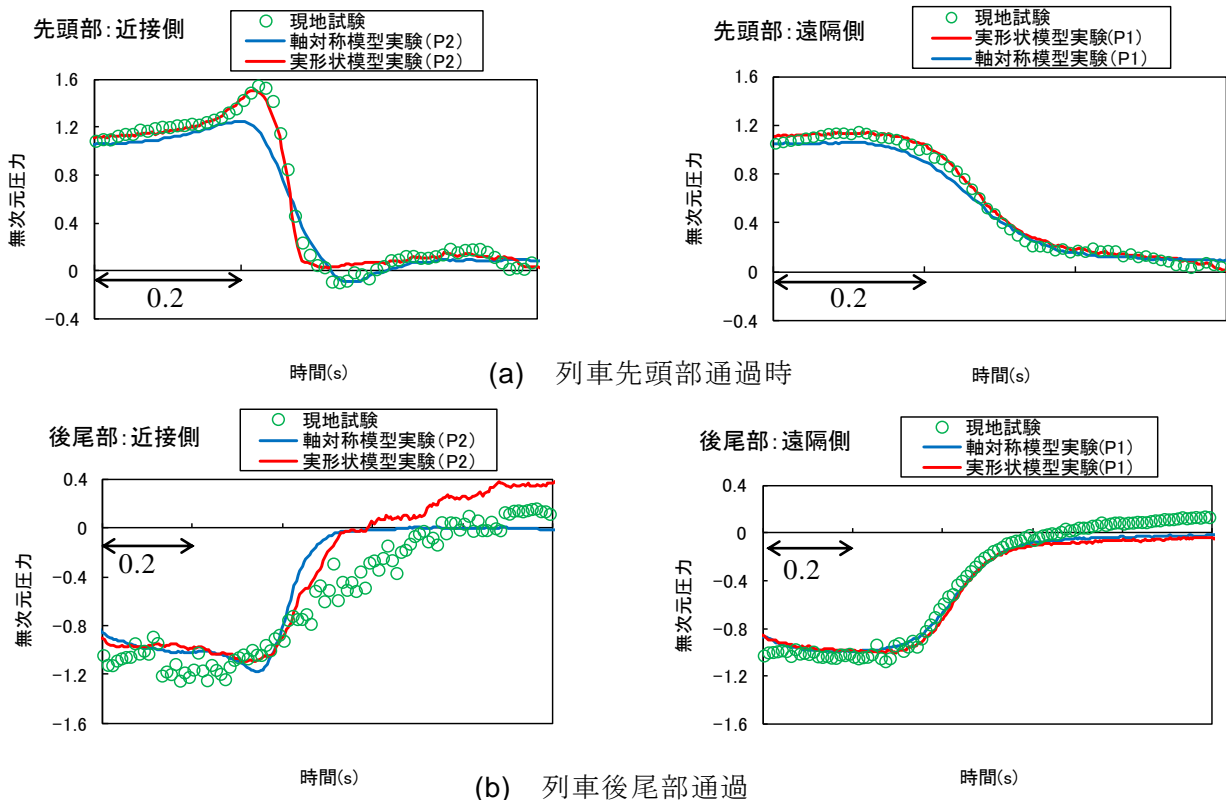


図3 模型実験結果と現地試験結果の比較

今回の軸対称模型による実験結果は実形状模型より過小評価となったが、この傾向は先頭部形状や測定位置によって異なる。例えば、くさび形のように二次元的な先頭部形状の場合、軸対称模型は車両側面では同程度、車両上面では過小評価の傾向が見られる。

つぎに、後尾部通過時の圧力変動を比較すると、車両遠隔側においては軸対称模型、実形状模型とも現地試験と良く一致しているが、車両近接側においては軸対称模型、実形状模型とも圧力上昇に要する時間が現地試験より短いことがわかる。これは列車後尾部付近での流れのはく離による影響と考えられ、レイノルズ数（模型縮尺）や編成長の違いによってはく離状況が異なったためと推定される。

4. 数値解析

トンネル内における列車周りの圧力場に関する数値計算方法としては三次元流れの数値流体シミュレーション（CFD）による方法⁽⁵⁾などがある。しかし、CFDによる方法は、車両など複雑な形状周りに計算格子を作成する必要があるが、また、列車に比べて長大なトンネル内を往復する圧力波を計算するためには多数の計算格子が必要で、計算時間が長くなる。そこで本研究では、精度はCFDより悪化するが、より簡便な方法による計算を試みた。

列車がトンネル内を走行する際には列車のトンネル突入により発生した圧縮波や膨張波が音速でトンネル内を往復するために圧力や流速はたえず変動しており、列車前方の流速（列車固定座標における流速）は明かり区間のように列車速度とは一致しない。つまり、トンネル内における列車先頭部周り（図4点線内）の流れ場を計算する場合、その上流側と下流側の境界面における圧力や流速は時間と場所によって大きく異なることになる。そこで、圧力波による圧力変動（流速変動）を特性曲線法による非定常一次元圧縮性流れの数値シミュレーション⁽²⁾によって求め、求めた圧力と流速の値を三次元計算の上流側・下流側の境界条件として与える。

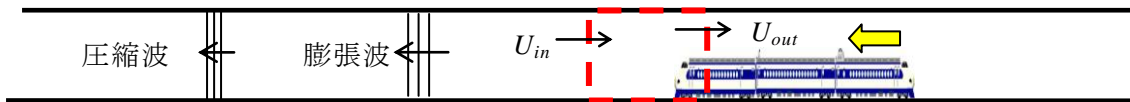


図4 計算領域の概略図

流線型の先頭部を列車中心軸上に分布する線わき出し（後尾部は吸い込み）でモデル化し、流れ場を非圧縮の三次元ポテンシャル流れとして取り扱う。列車先頭部を線わき出しでモデル化することは、列車を軸対称断面でモデル化することに対応する。先頭部のモデル化としては車体表面上にわき出しを分布させるなどの方法によって三次元的な形状を模擬する方法もあるが、今回は簡単化のため Howe に従い、線わき出しでモデル化した⁽⁶⁾。そのときの速度ポテンシャルは、

$$\nabla^2 \phi = U_s \frac{\partial A_T}{\partial x} (x + Ut) \delta(y) \delta(z - z_T) \quad (1)$$

となる⁽⁶⁾。ここで、 $A_T(x)$ ：車両先頭部の断面積分布、 x ：列車進行方向座標、 y ：上下方向座標、 z ：まくらぎ方向座標である。わき出し流速 U_s は、前方境界値である流入速度 U_{in} と後方境界値である列車側面からの流出速度 U_{out} を用いて質量保存則を満たすように次式で決定する。

$$U_s = (U_{out} - U_{in}) \frac{A}{A_0} \quad (2)$$

ここで、 A ：トンネル断面積、 A_0 ：列車断面積である。列車進行方向の計算領域は 0.6m（車両先頭部長さの約 6 倍）とし、線わき出しは計算領域中央（流入境界から 0.3m 点）から x の正方向に分布させた。直交直線格子を使用し、 x 方向 400 個、 y 、 z 方向 100 個の計 400 万セル、格子間隔は $\Delta x=150\text{mm}$ 、 $\Delta y=\Delta z=146\text{mm}$ である。出力点は図 1 の P1（列車遠隔側）、P2（列車近接側）に相当する計算格子点である。

先頭部通過時の近接側と遠隔側のトンネル壁面に作用する圧力変動波形について、計算結果と軸対称模型による実験結果を比較したものを図5に示す。一次元計算では列車端を流路断面積が不連続に変化する境界（先頭部は流路急縮小，後尾部は流路急拡大）として取り扱うため圧力は不連続に変化し、実際の波形のようになめらかな変化にならない。これに対し、三次元ポテンシャル流れの数値シミュレーションでは、先頭部の断面積変化をわき出し（後尾は吸い込み）分布でモデル化しているために圧力のなめらかな変化が再現できており、軸対称模型による実験結果と良く一致している。ただし、3章で示したように、車両近傍では軸対称模型による実験結果は現地試験結果とは完全には一致せず、三次元ポテンシャル流れの数値シミュレーションも軸対称模型による実験と同程度の誤差がある。

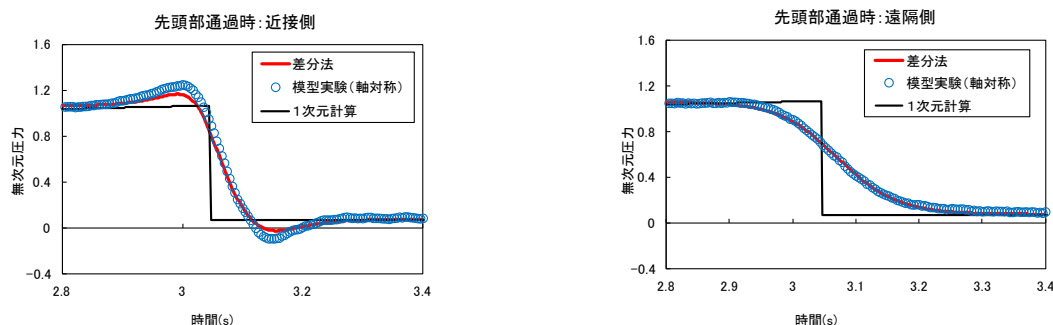


図5 線わき出しモデルによる三次元ポテンシャル流れの数値計算結果

5. まとめ

トンネル内における列車通過時の圧力変動について、先頭部形状の影響が考慮可能な模型実験手法と簡便な数値計算方法を開発した。結果を以下にまとめる。

- ①実形状模型を使用することにより、列車先頭部形状の影響を強く受ける車両近傍の圧力変動を正確に再現できた。
- ②先頭形状の影響を考慮した列車通過時のトンネル内圧力変動予測手法として、線わき出しモデルによる三次元ポテンシャル流れの数値シミュレーションを一次元流れのトンネル内圧力変動シミュレーションに組み合わせる方法を開発し、軸対称模型による実験結果と良く一致することを確認した。

文献

- 1) 山本彬也：新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気，鉄道技術研究報告，No. 871 (1973).
- 2) 斉藤実俊，飯田雅宣，梶山博司：鉄道トンネル内における1次元非定常圧縮性流れの数値シミュレーション，日本機械学会論文集（B編），Vol. 75，No. 760，(2009)，pp. 82-91.
- 3) 斉藤実俊，福田傑：トンネル内圧力変動に対する車両先頭部形状の影響，鉄道総研報告，Vol.28，No.3，pp.35-40，(2014).
- 4) 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，Vol.63，No.9，pp.543-548，2007.
- 5) 小川隆伸，藤井孝蔵：高速車両トンネル内走行時の流れ場の三次元粘性計算，航空宇宙技術研究所特別資料 SP22，pp203-208，(1995).
- 6) Howe M.S.，:The compression wave produced by a high-speed train entering a tunnel，Proceedings of Royal Society of London A454，(1998)，pp.1523-1534.