

Unsteady Flow Generated by a Bluff-Nose Train Entering a Tunnel

Takao MIKAZUKI, Tokyo Univ. of Agriculture and Technology 2-24-16, Nakamachi, Koganei-shi

Yutaka SAKUMA, Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikaricho, Kokubunji-shi

Model shooting experiments and numerical simulations are conducted to study the unsteady flow generated when a train enters a single-track tunnel. Model experiments for two varieties of rounded corners of the fronts of circular cylindrical trains entering a circular tube are carried out to measure the compression wave. In addition, to calculate the unsteady flow, two dimensional numerical analysis are performed with a CFD software, Fluent. Model experiment results show that the pressure waves in the tunnel are considerably different between square- and round-ended trains. Numerical simulation results are compared with model experiment ones and then the agreement between them is found to be qualitatively good.

Keywords : Railway, Numerical Simulation, Tunnel, Compression Wave, Micro-Pressure Wave

1. 緒言

列車が高速でトンネルに突入するとトンネル内に圧力変動が発生する。これが原因となり、トンネル坑口付近に騒音・振動等の環境問題を引き起こしたり、車体や乗客への負担となることがある。この問題に対して、在来線の切妻型先頭部を対象として、現車試験と模型実験によりトンネル突入時の圧力変動に関する研究が行われた¹⁾。その結果、角張った先頭形状の車両が突入した際の圧力変動は丸まった先頭形状の車両より大きくなることが確認された。この主原因は、角張った先頭部周りの大きな流れのはく離により見かけの列車断面積が増加しトンネル突入時の圧力上昇が大きくなるためである。この研究では、車両表面の圧力測定および流れの可視化は行われているものの、先頭部周りの空間的な流れ場は測定されていないことから、はく離を伴う先頭部がトンネルに突入する時の流れの様子は不明であった。そこで、先頭部で大きなはく離を伴う車両がトンネルに突入する際の流れのメカニズムを定性的に解明することを目的として模型発射装置を用いた模型実験と数値計算が行われた¹⁾。そして、列車先頭部周りの流れの大きなはく離の有無により、トンネル内の圧力上昇やトンネル坑口からの噴出流れの様子が異なることが定性的に確認された。しかし、トンネル内の圧縮波の圧力の比較は、模型実験と数値計算とで行われていない。さらに、圧縮波形成時の重要なパラメータである先頭部の見かけの断面積分布について、トンネル突入時の変化の様子はほとんど考察されていない。そこで、本研究では前報²⁾の続報として、これらについて示すことを目的とした。

2. 実験

実験方法は前報²⁾と同様である。実験にはピッチングマシンのようにローラーで模型を発射する装置を用いた。トンネル模型は内径 100mm、全長 7000mm の透明なアクリルパイプを、列車模型には直径 $\phi 54$ mm、全長 1000mm の樹脂製の円柱形状の模型を用いた。模型の縮尺は 1/89 である。単線トンネルへの列車突入を再現するため列車

模型の通過位置をトンネル中心とした。模型実験では圧力測定を行った。圧力センサは入口から 970mm の位置に設置した。図 1 に列車模型の先頭部を示す。はく離が発生する角型(図 1(a))と、はく離が発生しないように直径の 30%の面取りをした丸型(図 1(b))の 2 種類で実験を行った。模型発射速度は、120、150、180km/h(33.3、41.7、50.0m/s)の 3 パターンとした。レイノルズ数 Re は代表長さを列車模型の直径 $\phi 54$ mm、代表速度をトンネル突入速度 33.3m/s として、 $Re=1.2 \times 10^5$ である。

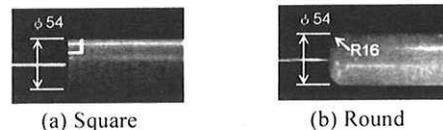


Fig. 1 Front end of train model

3. 数値計算

数値計算は前報²⁾から格子の改良や条件の変更などを行った。計算は 2 次元(軸対称ではない)で行い、流体解析ソフト Fluent(ver.14.0.0)を使用した。図 2 に計算領域を示す。節点数は約 60 万点、境界条件はトンネル壁面と列車表面はすべり無しとし、その他の境界を無限に領域が広がっている(反射が発生しない)と定義する圧力無限境界とした。スライディングメッシュ機能を使用し、車両部のメッシュをトンネル側へ移動させることでトンネル突入時の状態を模擬した。トンネル寸法および列車の寸法は模型実験と同じとした。また、圧力の観測位置はトンネル入口から 970mm とした。列車の速度は 120km/h(33.3m/s)、レイノルズ数は模型実験に合わせ $Re=1.2 \times 10^5$ 、流体は圧縮性流体とし、乱流モデルには $k-\epsilon$ Realizable を使用した。

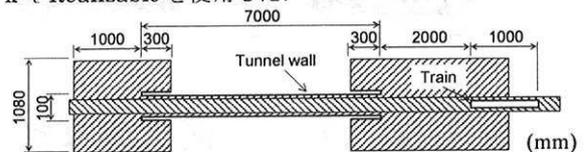


Fig. 2 Calculation model

4. 結果と考察

図3に実験と計算による圧力(基準圧力は大気圧)と圧力勾配を示す。図4に、トンネル突入前後の見かけの列車断面面積分布の変化を確認するため、計算による流速コンターを示す。図3の無次元圧力は丸先頭部のトンネル突入時(図中の時刻(c))における圧力振幅値が1となるようにして無次元化を行った。無次元圧力勾配は無次元圧力から中心差分によって求め、 U/d で割ることで無次元化を行った。ここで U :列車速度、 d :車両直径である。図4は x 方向の流速の等値線を示しており、黒線はトンネル固定座標系で -33.3m/s (列車速度等値線)、白線は 0m/s (見かけの列車断面面積の目安)を表している。図4中の(a)~(d)は時刻を表し、列車模型先頭部の突入時刻を(b)0msとした。なお、圧縮波は伝播速度約 340m/s で圧力計位置 970mm に到達することから、その遅延時間分(2.9ms)をずらして図3の波形を表示した。

トンネル突入前の時刻(a)では、図4より角先頭部では列車側面において明確な離領域が存在するが、丸先頭部では列車側面には離が見られないことが分かる。

先頭部がトンネルに突入する時刻(b)では、図3より角先頭部と丸先頭部でトンネル内の圧力が上昇し、圧力勾

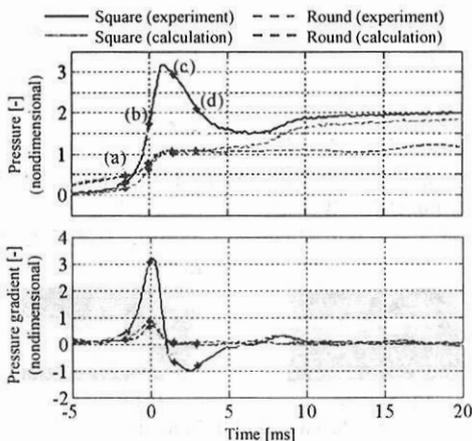


Fig. 3 Pressure and pressure gradient

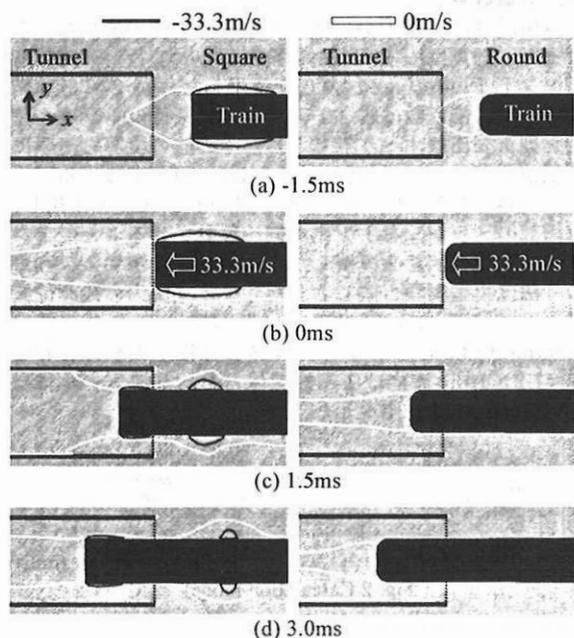


Fig. 4 X-velocity contour (CFD)

配がほぼ最大値を示すことが確認される。時刻(b)から(c)で、実験値と計算値のどちらにおいても角先頭部の圧力はオーバーシュートしており、圧力勾配のピークは丸先頭部よりも大きくなるのが分かる。これらのことから、実験で発生した現象を計算により定性的に模擬できるといえる。図4より、角先頭部周りの逆流領域(黒線内部)が時刻(b)では一つの大きな領域だったのに対し、時刻(c)では逆流領域が分離され、はく離領域が先頭部周りでは薄く、側面部では部分的に山型に変形していることが分かる。この変形は、前報²⁾の可視化結果より、列車のトンネル突入時に、明かり区間での列車側面のはく離領域とトンネルから噴出する流体がトンネル坑口付近で衝突したためと考えられる。以上のことから、トンネル坑口断面(図中の点線)における見かけの列車断面面積が時刻(b)の直後で最大となり、その後減少することにより、圧力がオーバーシュートしたと考えられる。

角先頭部がトンネルに突入後の時刻(d)について、図3より圧力が時刻(c)に比べて減少している。その減少後も丸先頭部に比べて角先頭部の圧力は一定値大きいままであることが分かる。図4(d)より角先頭部のはく離領域は、列車先頭部とトンネル外の列車中間部の二つに分かれており、列車は進行するものの、中間部周りの大きなはく離領域はトンネルからの噴出流体との衝突により、トンネル坑口の外に留まることが確認できる。なお、図3中の時刻7~10msにおける実験値の圧力上昇は、模型中間部に加速のための断面積増加部を設けたことによるものであり、本研究の考察の対象とはしない。

図4(b), (c)において、列車前面の流速0の等値線は角先頭部では列車幅より広く、丸先頭部では狭い。ゆえに、列車前方のトンネル内の流体を、丸先頭部よりも角先頭部の方が多く列車進行方向へ押し込んでいると考えられる。

5. 結言

列車のトンネル突入時の流れ場を理解するため、模型実験と数値計算により圧力を、数値計算により流速コンターを求めた。模型実験には軸対称模型を用いた。数値計算には2次元の計算格子を用いた。その結果、角先頭部周りの大きなはく離領域が列車のトンネル突入時にトンネル内外の二つに分離すること、その分離に伴いトンネル坑口断面での列車の見かけの断面面積が変化することで圧力のオーバーシュートが発生すること、さらに列車前方のトンネル内の流体を丸先頭部よりも角先頭部の方が多く列車進行方向へ押し込んでいることが定性的に確認された。今後は数値解析を3次元に拡張し、実験結果との定量的な比較を行う。

最後に本研究を進めるにあたり、多大なるご助言を頂いた東京農工大学工学府機械システム工学専攻新井紀夫教授に謝意を記します。

参考文献

- 1) 佐久間豊, 宮地徳蔵, 福田傑, 鷹崎徹: 切妻型車両のトンネル突入時に発生する圧縮波, (第1報, 圧縮波の性状と地上側低減対策法, 第2報, 車両側低減対策法), 日本機械学会論文集(C編), 76巻770号, pp.2472-2486, 2010.
- 2) 三日月敬郎, 佐久間豊: 列車のトンネル突入時に発生する非定常流の可視化実験と数値シミュレーション, 日本機械学会 2012年度年次大会講演論文集, G050013, DVD-ROM, 2012.