

超高速鉄道におけるトンネル圧縮波の伝播解析モデルの検討

東海旅客鉄道株式会社 正会員 ○高橋 和也 東海旅客鉄道株式会社 正会員 本田 敦
株式会社大崎総合研究所 正会員 野澤剛二郎 成蹊大学 小川 隆申

1. はじめに

超高速鉄道がトンネルに突入すると、トンネル内に圧縮波が発生し、トンネル内を音速で伝播して反対側坑口より放射される現象(微気圧波放射)が生じる。トンネル内を伝播する圧縮波は、有限振幅波の持つ非線形性の効果により徐々に波面が切り立つ。放射直前の圧縮波の圧力勾配が大きいほど外部に放射される微気圧波が大きくなるため、トンネル内を伝播する圧縮波の伝播特性を把握することは超高速鉄道のトンネル走行時の環境影響評価を行う上で重要である。圧縮波の波面切り立ちは非線形性効果に加え、トンネル突入時の初期圧力波形やトンネル壁面での摩擦の影響も受け、しかもこれらの効果は累積するため、長いトンネルにおける環境影響評価を行うにはこれらの影響を正確に予測することが必要となる。

本検討では、超高速鉄道のトンネル突入により発生する圧縮波の伝播特性を数値的に予測するため、トンネル壁面摩擦応力モデルを提案する。そして、山梨実験線で実測された圧縮波の伝播特性と比較することで、提案した壁面摩擦応力モデルの検証を行う。

2. 圧縮波の1次元伝播解析

圧縮波の伝播特性を数値解析により求めるには、圧縮性ナビエ・ストークス方程式を離散化して解く必要がある。ただし、非常に長い距離のトンネル内を伝播する圧縮波の解析を行うには膨大な計算量が必要になるため、現象をモデル化して1次元で解析を行うとともに、波面に合わせて移動する移動座標系を用いる。移動座標系を用いることで、非線形項の数値誤差を低減することも可能となる。圧縮波の非線形効果を高精度に再現するために、空間の離散化は5次精度風上差分を、時間積分には4次精度 Runge-Kutta 法を用いる。

3. トンネル壁面摩擦応力モデル

本検討で用いる1次元の伝播解析では、トンネル壁面全周で生じる摩擦応力を基礎方程式の運動量保存則に付加している。前田¹⁾はトンネル壁面摩擦応力として、速度の自乗と管摩擦係数に比例する定常摩擦項とせん断エネルギーの散逸効果を表した非定常摩擦項の和で与えている。しかし、定常摩擦項は乱流が十分に発達し、定常状態となった円管流れを想定しているため、圧縮波により静止状態から流れが励起されるような現象に適用することは問題がある。実際に山梨実験線の実測結果から同定した管摩擦係数は列車速度に依存して一定値となっておらず、定常の乱流状態を仮定した定常摩擦項を用いることの限界を示している。

そこで本検討では、流れのない静穏状態のトンネル内を伝播する圧縮波を対象としたトンネル壁面摩擦応力モデルを提案する。静穏状態から流れが励起されると、当初は流速も小さいため、壁面付近では層流境界層が形成される。次第に圧力が急激に大きくなると、流れが加速される。さらに、圧力が十分に高くなり、圧力上昇が緩和されると乱流化が促進され、乱流境界層が形成される。ただし、トンネル全体が乱流化するのではなく、壁面から乱流が徐々に発達していく乱流境界層が形成される非定常状態にある。以上の3つの状態を考慮したトンネル壁面摩擦応力 λ_a , λ_b , λ_c を、以下のように表現する。

$$\lambda_a = 4 \frac{0.664}{\sqrt{R_{ex}}}, \quad \lambda_c = 4 \left\{ 1.4 + 3.7 \log_{10} \left(\frac{x_l}{k_s} \right) \right\}^{-2}, \quad \lambda_b = \alpha \frac{2ad}{u^2} + [\lambda_a \text{ or } \lambda_c]$$

ここで、 R_{ex} は吹走距離と流速で決まるレイノルズ数、 x_l は吹走距離、 k_s は壁面の等価粒径粗さ、 a は流速の加速度、 α は加速域における管摩擦力で実測データから同定する必要がある。第一式は平板上の層流境界層を仮定した局所摩擦応力、第二式は粗面上を発達する乱流境界層の局所摩擦応力、第三式は円管加速流れの実験式²⁾に λ_a または、 λ_c を加えたものである。本モデルでは、3つのトンネル壁面摩擦応力を流速と加速度により使

い分ける．つまり，流速が乱流化する臨界流速に達したときに層流から乱流に変わるものとする．層流から乱流に変わる臨界流速は既往の文献²⁾や実測データをもとに定めている．

4. 実測結果との比較

上記で提案した壁面摩擦応力モデルを用いて圧縮波伝播解析を実施し，山梨実験線で得られた実測結果と比較する．列車が突入した坑口から 485m 地点で圧力時間履歴を測定し，それを基に等エントロピーの仮定から流速と密度を求めて初期状態における圧縮波波形とする．モデルパラメータ α と k_s は列車速度 550km/h で突入したときの实測値を元に同定し，それぞれ 0.0095, 0.067m とした．列車速度 500km/h 突入時の初期圧力の実測波形を図 1 に，約 10km 伝播時の圧力波形の解析と実測結果を図 2 に示す．伝播によって初期値よりも最大圧力値は低下すると同時に，圧力波形が急峻になっていることがわかる．解析結果は実測波形をよく再現できている．伝播距離に対する圧縮波の最大圧力値と最大圧力勾配を図 3 に示す．いずれも縦軸は初期値で除して無次元化している．圧力最大値は単調に減少していく一方，最大圧力勾配は 5km 過ぎまで初期値よりもわずかに上昇し，その後減少していく．伝播距離 7km 付近で実測データに段差が見られるのは，トンネル内に横坑があるためである．提案した壁面摩擦応力モデルは圧力最大値と圧力勾配が伝播距離に応じて変化する様子も定量的に再現できており，環境影響評価に用いるための十分な精度を有していると言える．

5. 結論

超高速鉄道トンネル突入時に発生する圧縮波の伝播特性を再現するためのトンネル壁面摩擦応力モデルを提案した．従来の静的なモデルと異なり，静穏状態から層流境界層，加速域，乱流境界層と変化する状態を定式化することで圧縮波による過渡的な現象を考慮したモデルとした．解析結果は山梨実験線で実測された圧縮波波形，伝播特性ともに再現できた．本検討で得られた知見を今後の環境影響評価に反映していく予定である．

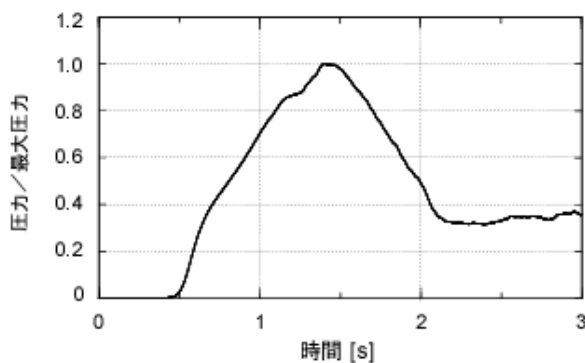


図1 1次元伝播解析の初期圧力波形

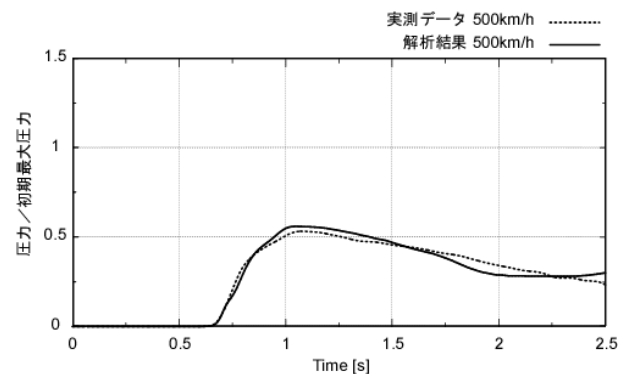


図2 10km 伝播圧力波形の実測との比較

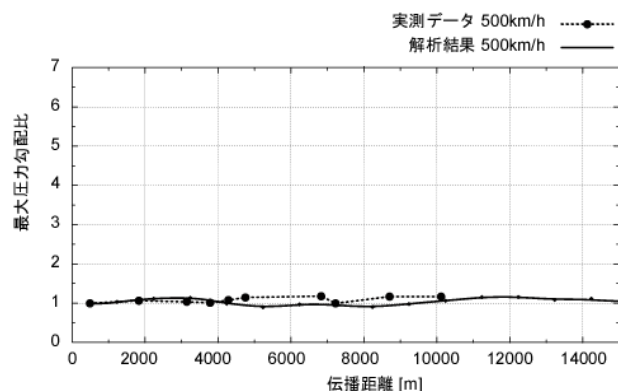
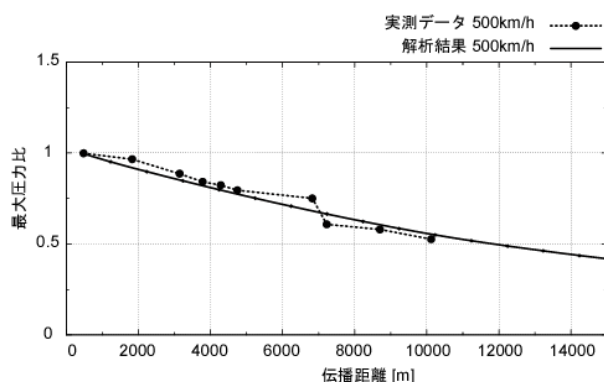


図3 1次元伝播解析の圧縮波最大圧力値(左)，最大圧力勾配(右)の実測との比較

参考文献

- 1) 前田「列車の空力学的特性およびトンネル内微気圧波低減対策法に関する研究」，鉄道技術研究報告，特別 20 号，1998.
- 2) 黒川ら「円管内の加速・減速流れに関する研究(第 1 報，速度分布と管摩擦係数)」，日本機械学会論文集(B 編)，51 巻，467 号，1985.