高速列車によって発生するトンネル入口波の数値解析*

(第1報, 列車の鼻部長さおよび列車断面積の影響)

鹿毛 一之^{*1}, 川越 茂敏^{*2}, 松尾 一泰^{*3}

Numerical Study of Compression Waves Produced by High-Speed Trains Entering a Tunnel (1st Report, Effects of Nose Length and Cross-Sectional Area of Train)

Kazuyuki KAGE, Shigetoshi KAWAGOE, and Kazuyasu MATSUO

In this paper, compression waves produced by trains which enter a tunnel at high speed were numerically investigated. The equations of the one-dimensional, unsteady and compressible flow in which the area of a tube is dependent on the time and the distance were numerically solved by the method of characteristics. The calculations were performed for trains with various speeds, nose lengths and cross-sectional area ratios, and the effects of these parameters for the shape and the strength of compression waves were quantitatively clarified. The results show that the pressure gradient of compression waves is affected largely by all of these parameters.

Key Words: High-Speed Train, Tunnel, Compression Waves, Compressible Flow, Characteristic Method, Numerical Simulation, Pressure Gradient

1. ま え が き

近年, 鉄道車両の著しい高速化に伴って, 列車がトンネル内に進行する際に発生する圧縮波が非常に強くなり, 長いトンネル内を伝ばすることによって圧力こう配の増した圧縮波が, 大気中に放出される際に騒音を発生する問題を生みだしており⁽¹⁾⁽²⁾, この問題に関連して, トンネル内を伝ばする圧縮波の様相やトンネル入口で発生する圧縮波の特性を明らかにすることは重要である。鉄道トンネルにおける空気力学的問題に関しては, トンネル内非定常流の摩擦力⁽³⁾, スリットのあるトンネル入口からの反射波⁽⁴⁾, トンネル入口波に対する列車鼻部形状の影響⁽⁵⁾, トンネル内を伝ばする圧縮波およびトンネル出口での微気圧波について⁽¹⁾⁽²⁾など多くの研究がなされているが, 列車の走行条件に応じて, どのような強さ, 圧力こう配および波形をもつ圧縮波が発生するかを予測する理論的研究は十分ではない。

本報では, トンネル入口における圧縮波発生メカニズムが, 列車鼻部の進行によるトンネル断面積の時間的減少に起因することに注目し, 断面積を時間と距離に関する変数とした一次元で非定常な圧縮性流れの基礎方程式を適用し, 列車の速度, 列車鼻部の長さおよび列車断面積をパラメータとして, 列車進入時に発生する圧縮波の特性を, 特性曲線法によって数値解析した結果を報告する。

2. 数 値 計 算 法

2・1 基礎方程式 流れ場の概要を図1に示す。図1(a)は初期状態($t=0$)で, 列車の先端がトンネル入口直前に位置している。 A_0, A_{T0}, A_T , および $(A_0 - A_T)$ は, それぞれトンネル断面積, 列車の断面積, 列車の先頭部断面積, トンネル有効流路断面積で, L_N は列車鼻部の長さ, L は計算に供した流れ場の長さである。図1(b)は進入開始後 t_1 の状態を示している。図1(c)は流れ場の格子点で ΔX の等間隔微小区間に分割し, トンネル入口と流れ場末端が $i=1$ と $i=i_{\max}$ に対応する。列車進入によって誘起されるトンネル内流れの方程式は次のように表される。

* 原稿受付 平成3年7月15日。

^{*1} 正員, 大分大学工学部(〒870-11 大分市旦野原700)。

^{*2} 正員, 久留米工業高等専門学校(〒830 久留米市小森野町1232)。

^{*3} 正員, 九州大学総合理工学研究科(〒816 春日市春日公園6-1)。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho u}{A} \frac{\partial A}{\partial x} &= 0 \\
\frac{\partial p}{\partial t} - a^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{(x-1)p}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\
-a^2 u \frac{\partial \rho}{\partial x} &= 0
\end{aligned} \quad (1)$$

ここで, u, p, ρ, a, x, A, t および x は, それぞれ流速, 圧力, 密度, 音速, 比熱比, トンネル有効断面積, 時間およびトンネルに沿った距離を示し $a = (xp/\rho)^{0.5}$ である. なお, L がトンネルの等価直径の10倍程度のため, 壁面摩擦は無視した.

2.2 特性方程式 流れの基礎方程式(1)は, 流れ場における C^+ 特性線, C^- 特性線および粒子軌跡の方向に沿っての状態量変化を示す特性方程式に変換され, $C = a/a_0, U = u/a_0, C_a = a/a_0$

C^+ 特性線: $dX/d\tau = U + C$ に沿って

$$\begin{aligned}
dC + \frac{x-1}{2} dU &= \frac{C}{C_a} dC_a - \frac{(x-1)C}{2xA} \frac{dA}{d\tau} d\tau \\
&\quad - \frac{(x-1)CU}{2A} \frac{dA}{dX} d\tau
\end{aligned} \quad (2)$$

C^- 特性線: $dX/d\tau = U - C$ に沿って

$$\begin{aligned}
dC - \frac{x-1}{2} dU &= \frac{C}{C_a} dC_a - \frac{(x-1)C}{2xA} \frac{dA}{d\tau} d\tau \\
&\quad - \frac{(x-1)CU}{2A} \frac{dA}{dX} d\tau
\end{aligned}$$

粒子軌跡: $dX/d\tau = U$ に沿って

$$dC_a = \frac{(x-1)C_a}{2xA} \frac{dA}{d\tau} d\tau$$

$X = x/L, \tau = a_0 t/L$ のように無次元化すると次のような無次元特性方程式が得られる. ここで, a_0 はトンネ

ル内気体の初期状態の音速, a_a は a, p の状態にある気体を等エントロピー的にトンネル内初期圧力 p_0 まで変化させたときの音速で, $a_a/a = (p_0/p)^{(k-1)/2k}$ で与えられる.

式(2)において, $(dA/d\tau)/A$ および $(dA/dX)/A$ の値が列車の進行に対応して与えられるとまず(2)の第3式より dC_a が求まり, 第1式と第2式より dU と dC が計算され, 各格子点の流れの諸量が次々に求められる. トンネル入口 ($i=1$) では圧力が常に大気圧に等しいという境界条件を用い, 流れ場末端 ($i=i_{\max}$) では流れの諸量が不変とした.

2.3 計算条件 計算ではトンネル内初期圧力 p_0 が大気圧 p_{at} に等しく $p_0 = p_{at} = 0.101 \text{ MPa}$ とし, トンネルの断面寸法は文献(1)を参照して, トンネル等価直径 $D=9 \text{ m}$, トンネル断面積 $A_0=63.4 \text{ m}^2$ とした. トンネル断面積に対する列車断面積の比 R は $R=0.216$ を基準として, 0.189, 0.175, 0.162 について計算を行った. 列車の鼻部の形状は, 断面積 A_T が零から A_{T0} まで直線的に増加するとし, 鼻部の長さ L_N は 2 m から 10 m までの範囲, 列車の速度 U_T は 180 km/h から 300 km/h までについて計算した. 計算における距離の格子点数は 801 点 ($i_{\max}=801$) とし時間間隔 τ は $\Delta\tau=0.9\Delta X$ とした.

3. 計算結果と考察

図2は $U_T=200 \text{ km/h}, R=0.216, L_N=5 \text{ m}$ の場合についての計算結果を示したものである. 図2(a)は列車進入後の各時点におけるトンネル有効断面積の距離方向変化を示し, $x/D=0$ がトンネル入口, $(A_0 - A_T)/A_0=1$ の点 FH が列車の先端 $(A_0 - A_T)/A_0=1 - R$ の点 FT が鼻部の後端に対応する. 図2(b)は各時点のトンネル内圧力分布の様子を示したもので, 点 CH が圧縮波の先端, 点 CT が圧縮波の後端で, 圧縮波の距離的な波形を表している. 列車進入時に生じる圧縮波が列車に先行し, 圧縮波通過後のトンネル内圧力は列車先端までほぼ一定で, 列車先端 FH から鼻部の後端 FT まで急激に減少して大気圧に等しくなる. 図2(c)はトンネル内に生じる気流の流速分布を示したもので, 流速 V は列車進行方向を正の符号にとっている. 圧縮波によって誘起された流速 2 m/s 程度の気流は列車先端から急激に減速されて, 流れの方向が逆転し, トンネル入口から約 9 m/s の速度で流出する. 図2(d)はトンネル内の $x/D=1.11(X1)$ と $x/D=2.22(X2)$ における圧力の時間変化の様子を示したもので, t は列車進入後の経過時間である. 圧縮波の先端の到達時点から圧縮波の後端の到達点まで圧力が増加

図1 流れ場の概要

し、圧縮波の時間的波形が表れている。その後、列車の先端の到達点から鼻部後端の到達点まで圧力は減少して大気圧に落ち着く。図2(e)は圧縮波内の圧力の時

間に関するこう配 dp/dt の分布を示したものである。圧縮波の先端から後端まで、少しではあるが直線的に増加している。図3は列車速度を 300 km/h に大きくした場合について示したものである。図3(a)は点 X1, X2 における p/p_0 の時間変化を示したもので、

(a) 流路面積の変化

(b) トンネル内の圧力分布

(c) トンネル内の流速分布

(d) 圧力の時間的変化

(e) 圧縮波内の時間的圧力こう配

図2 列車進入によって発生する圧縮波
($U_T=200$ km/h, $L_N=5$ m, $R=0.216$)

(a) 圧力の時間的変化

(b) 圧縮波内の時間的圧力こう配

図3 列車進入によって発生する圧縮波
($U_T=300$ km/h, $L_N=5$ m, $R=0.216$)

図2(d)に比べて、圧縮波による圧力上昇が急激で、圧縮波後端の圧力値を p_{cw} とすると圧力増分値($p_{cw} - p_0$)が2倍程度にもなっている。図3(b)は dp/dt の時間変化を示したもので、図2(e)に比べて圧縮波先端から後端までの増加割合が非常に大きく $(dp/dt)_{max}$ は3倍以上にも増加している。 $x/D=1.11(x=10\text{ m})$ の点における圧力の時間変化(p/p_0-t 線図)と圧力の時間こう配の変化($dp/dt-t$ 線図)の計算結果から、トンネル入口で生じる圧縮波の波形特性として、最も重要である強さ p_{cw}/p_0 と圧縮波の最大時間的圧力こう配 $(dp/dt)_{max}$ に対する列車パラメータの影響を調べたものを図4~7に示す。図4は列車速度の影響を示したもので、図4(a)より、圧縮波の強さに対する列車速度の影響は極めて大きく、速度の増加にほぼ比例して増加する。図4中の●印で文献(1)の実機のデータを示している。図4(b)より、最大圧力こう配に対する列車速度の影響は極めて大きく、列車速度の増加とともに急激に増加し、列車の鼻部長さが小さく列車速度が大きいほど影響が大きい。図5中の●印で文献(1)の

図4 列車速度 U_T の影響 ($R=0.216$) 図5 列車の鼻部長さ L_N の影響 ($R=0.216$) 図6 列車断面積比 R の影響 ($L_N=5\text{ m}$)

(a) 圧縮波の強さ

(b) 圧縮波の最大時間的圧力こう配

図7 列車断面積比 R の影響 ($U_T=300$ km/h)

実機データを示している。図5は列車の鼻部長さの影響を示したもので、図5(a)より p_{cw}/p_0 に対する L_N の影響は極めて小さく、 L_N が小さくなると p/p_0 がわずかに大きくなる程度である。図5(b)より、 $(dp/dt)_{max}$ に対する L_N の影響は極めて大きく、 L_N

が小さくなると、 $(dp/dt)_{max}$ は急激に増加する。図6と図7は列車断面積比 R の影響を示したもので、図6(a)より、 p_{cw}/p_0 に対する R の影響はかなり大きく、 R が小さくなれば P_{cw}/P_0 もほぼ直線的に小さくなるが、影響の程度は U_T によってあまり変わらない。図6(b)より、 $(dp/dt)_{max}$ に対する R の影響はかなり大きく R の減少につれ、 $(dp/dt)_{max}$ も減少するが、 U_T が大きいほど影響が大きい。図7(a)より、 P_{cw}/P_0 に対する R の影響の程度は L_N によってほとんど変わらない。図7(b)より $(dp/dt)_{max}$ に対する R の影響は L_N が小さいほど大きい。

4. 結 論

(1) 本論文で提案した数値計算法によって、列車がトンネルに進入するとき、どんな強さで、どのような波形をもつ圧縮波が生じるかを十分に予測できることを示した。

(2) トンネル入口で生じた圧縮波が長いトンネル内を伝ばしていく際の波形変化に最も強い関連をもつ圧縮波の強さと時間的圧力こう配に対する列車速度、列車の鼻部長さおよび列車断面積比の影響が数値計算によって定量的に明らかにされ、圧縮波の強さには列車速度の影響が大きく、圧力こう配には列車速度と鼻部長さが極めて大きく影響し、列車断面積比の減少によって圧縮波の強さ、圧力こう配ともかなり減少することが示された。

文 献

- (1) 小沢, 鉄道技術研究所報告, No. 1121 (1971).
- (2) 小沢・ほか3名, 鉄道技術研究所報告, No. 1023 (1976).
- (3) Schultz, M. and Sockel, H., *Proc. 6th Int. Symp. Aerodyn. Ventil. Vehicle Tunnels*, B3 (1988), 123.
- (4) Barrows, T. M., *J. Sound Vib.*, **50-4** (1977), 571.
- (5) Pope, C. W., *Tech. Memo. Aero.*, **12** (1976).