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3報, 等断面積多孔壁フードの影響)

鹿毛 一之^{*1}, 奥 林 豊 保^{*1}
今 田 克 孝^{*2}, 川 越 茂 敏^{*3}

Numerical Study of Compression Waves Produced by High-Speed Trains Entering a Tunnel (3rd Report, Effects of Constant Area and Perforated Hood)

Kazuyuki KAGE, Toyoyasu OKUBAYASHI,
Katsutaka IMADA and Shigetoshi KAWAGOE

In this study, compression waves produced by high-speed trains which enter a tunnel with the perforated hood of which the cross-sectional area equals the tunnel were numerically investigated. The equations of the one-dimensional, unsteady and compressible flow with the mass removal 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 tunnels with various hoods of which porosities are different in the cases in which the speeds of the train are 200km/h and 300km/h, and the effects of the porosity of the hood for the shape and the pressure gradient of compression waves were quantitatively clarified. The results show that the pressure gradient with time of compression waves is affected largely by the porosity of the hood.

Key Words: High-Speed Train, Tunnel, Compression Waves, Compressible Flow, Characteristic Method, Perforated Hood, Pressure Gradient with Time

1. ま え が き

近年における鉄道車両の著しい高速化は、トンネル出口からの微気圧波放出による騒音発生などの新たな問題を生みだしており⁽¹⁾⁽²⁾, それに対応する騒音低減策として、列車がトンネル内に進入する際に発生するトンネル入口波の制御, 圧縮波が長いトンネル内を伝ばする際の非線形効果の制御, トンネル出口から放出される微気圧波の制御などを模索していろいろな角度からの研究がなされている^{(3)~(11)}. 入口波対策の一つとして, トンネル入口に設けたフードによって入口波の圧力こう配がかなり減少することが, 模型実験および列車速度 200 km/h 程度の実機試験の結果で明らかにされているが⁽¹⁾, 今後さらに予想される列車速度の増加に対応して, フードのどの因子が入口波のどの特性に影響を与えるのかを明らかにし, 入口波の圧力波形, 強さ, および圧力こう配の最大値を理論的に予測して, 入口波の制御策を向上させることは重要であると思われる。

トンネル入口波に関して, 著者らは第1報⁽³⁾で, トンネル入口波の形成過程における列車速度, 列車鼻部の長さおよび列車断面積の影響を, 第2報⁽⁴⁾で, フード形状の影響を数値解析によって明らかにしたが, 本報では, 列車速度 200 km/h および 300 km/h について, トンネル断面積と等しい一定断面の多孔壁フードの場合に, 多孔壁の開口率と長さをパラメータとして特性曲線法によって数値解析し, フード多孔壁からの抽気によって, 入口波の圧力波形, 強さ, 時間的最大値などの特性量がどのように変わるかを評価し, 多孔壁フードの付いたトンネル入口波の形成メカニズムを明らかにして, 騒音低減により効果的な多孔壁フードの条件を考察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, 列車の先端がフード入口直前に位置している。 A_{r0} , および A_r は列車の断面積, 列車の鼻部断面積で, L_n は列車鼻部の長さ, D はトンネル等価直径, L は計算に供した流れ場の長さである。図1(b)は流れ場の格子点で, ΔX の等間隔微小区間に分割し, フード入口および流れ場末端が $i=1$ と $i=i_{\max}$ に対応する。列車進入によって誘起され

* 原稿受付 平成4年7月8日。

^{*1} 正員, 大分大学工学部(〒870-11 大分市旦野原700)。

^{*2} 学生員, 大分大学大学院。

^{*3} 正員, 久留米工業高等専門学校(〒830 久留米市小森野町1232)。

るトンネル内流れの方程式は、トンネルの有効断面積を時間と距離に関する変数とし、壁からの質量流出を考慮に入れた次元の非定常圧縮性流れの式として次のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\rho u}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\phi}{A} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial t} - a^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{(x-1)p}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} & \\ \dots\dots\dots (1) & \\ -a^2 u \frac{\partial \rho}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\phi}{A} = a\beta \frac{A}{D} \rho_{\text{out}} \left[\frac{2x}{x-1} RT_s \left\{ 1 - \left(\frac{P_0}{P_s} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right\} \right]^{1/2} \end{aligned}$$

ここで、 u , p , ρ , a , x , A , ϕ , 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、単位長さ当たりの壁から流出する質量流量、時間およびトンネルに沿った距離を示す。また、 ρ_{out} , R , T_s , p_s , p_0 , α および β はそれぞれ壁から流出する抽気流れの密度、気体定数、抽気流れのよどみ温度、よどみ圧力、大気圧、縮流係数および多孔壁の開口率である。なお、 L がトンネルの等価直径の10倍程度のため、壁面摩擦力は無視した。

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、 $C = a/a_0$, $U = u/a_0$, $C_a = a/a_0$, $U_{\text{out}} = U_{\text{out}}/a_0$, $X = x/L$, $\tau = a_0 t/L$ 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。

$$\begin{aligned} C^+ \text{ 特性線: } dX/d\tau = U + C \text{ に沿って} \\ dC = \frac{x-1}{2} dU = \frac{C}{C_a} dC_a - \frac{(x-1)C}{2xA} \frac{dA}{d\tau} d\tau \\ - \frac{(x-1)CU}{2A} \frac{dA}{dX} d\tau \\ - 2(x-1)a\beta \frac{L}{D} \frac{\rho_{\text{out}}}{\rho} CU_{\text{out}} d\tau \end{aligned}$$

図1 流れ場の概要

$$C^- \text{ 特性線: } dX/d\tau = U - C \text{ に沿って} \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} dC = \frac{x-1}{2} dU = \frac{C}{C_a} dC_a - \frac{(x-1)C}{2xA} \frac{dA}{d\tau} d\tau \\ - \frac{(x-1)CU}{2A} \frac{dA}{dX} d\tau \\ - 2(x-1)a\beta \frac{L}{D} \frac{\rho_{\text{out}}}{\rho} CU_{\text{out}} d\tau \end{aligned}$$

$$\text{粒子軌跡: } dX/d\tau = U \text{ に沿って}$$

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

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、 $a_a/a = (p_0/p)^{(\kappa-1)/2\kappa}$ で与えられ、 u_{out} は抽気流れの流速で、 ρ_{out} とともに、管内から大気中への等エントロピー抽気流れの条件から得られる。境界条件はフード入口 ($i=1$) では圧力が常に大気圧に等しいとし、流れ場末端 ($i=i_{\text{max}}$) 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 が大気圧に等しく $p_0=0.101$ MPa とし、トンネル断面寸法は文献(1)を参照して、等価直径 $D=9$ m 断面積 $A_0=63.4$ m² とした。トンネル断面積に対する列車断面積の比 $R=0.216$ 、列車鼻部長さ $L_N=5$ m、計算領域の長さ $L=100$ m とし、フード断面積がトンネル断面積と等しい場合について、列車速度 $U_T=200$ km/h, 300 km/h, フード長さ $L_H/D=0.5\sim 2.0$ 、多孔壁の開口率 $\beta=0.01\sim 0.20$ について計算を行った。また、フード全長にわたって多孔壁になっている場合と、フード入口側の一部が固体壁になっている場合について計算した。計算で用いた距離の格子点数は801点で、時間刻みは $\Delta\tau=0.9\Delta X$ とした。

3. 計算結果と考察

図2は列車速度 $U_T=300$ km/h、フード長さ $L_H/D=1.0$ 、多孔壁の開口率 $\beta=0.05$ の多孔壁フードについての計算結果を示したものである。図2(a)は各時点におけるトンネル内の圧力分布で、点CHが列車進入によって発生する圧縮波の先端で、点FHが列車鼻部の先端、点FTが後端である。図2(b)はトンネル各点における圧力の時間的変化を示したもので、 t は列車進入後の経過時間である。圧力こう配の大きい圧縮波の後にこう配のゆるやかな圧縮波が続く、さらに、その後に弱い膨張波が続く。点CHから点CTまでをトンネル入口波とみなすことができるが、 X_2 ($x/D=2.22$) から X_4 ($x/D=4.44$) まで入口波の形はほとんど変わらない。その形成メカニズムについては後述

する。図2(c)は入口波における時間的圧力こう配の時間変化を示したもので、その形は $x/D \approx 2$ 以上ではほとんど変わらず、入口波はこう配が大きい前半部と、こう配が小さい後半部で構成されているのがわかる。

異なる開口率、長さをもつ多孔壁フード、およびフードの前半部が固体壁になっている多孔壁フードにおける入口波の時間的圧力波形、および時間的圧力こう配分布を図3～5で比較することによって、入口波の形成メカニズムを考察する。図3は β の影響を調べたもので、図3(a)は $U_T=300$ km/h, $L_H/D=1.0$ について、 $X/D=3.33$ における入口波の時間的圧力変化の

分布形状と時間的圧力こう配の分布形状を、 β をパラメータとして示したものである。 $\beta=0$ (フードなしに対応する)では、入口波は列車鼻部の進入に伴うトンネル有効断面積の時間的減少によって発生する圧縮波のみで構成され、時間的圧力こう配は入口波の後部ほど大きくなっている。 $\beta=0.01$ では、前記の圧縮波が、それが多孔壁フードを伝ばする際に発生する弱い膨張波(大気中には多孔壁を通して圧縮波が放出され抽気が起こる)と干渉して、圧縮波の先端部が少し打ち消され、入口波先頭の到達が少し遅くなる。 β が大きい

図2 トンネル入口波の様相
($U_T=300$ km/h, $L_H/D=1.0$, $\beta=0.05$)

図3 入口波形成における β の影響

ほど、この膨張波が強くなり、入口波先頭の到達は遅れる。列車進行方向に伝ばする膨張波は入口波を弱め、その圧力こう配を緩やかにする作用をもつが、列車鼻部が多孔壁フードを通過するとき多孔壁から次々と発生する圧縮波(大気中には多孔壁から膨張波が放出されて抽気量が減少する)のうち、列車進行方向に向かう圧縮波は先行する前記の圧縮波に追いついて入口波を強め、圧力こう配を大きくする作用をもつ。この圧縮波は β が大きいほど強くなる。入口方向に伝ばした圧縮波は入口で反射し、反射膨張波として入口波に後続する。このように、多孔壁フードで形成される入口波は、有効断面積の時間的縮小による圧縮波に前述の膨張波と圧縮波が合併し、さらにその後部に続く膨張波によって構成される。多孔壁フードで形成されるトンネル入口波における圧力の最大値(圧力分布の最大値)、および圧力こう配の最大値は、これら圧縮波と膨張波の非線形的な干渉によって定まる。 β が大きいほど入口波先端の到達が遅くなり、また、圧力の最大値が大きくなるが、圧力こう配の最大値は $\beta=0$ と比較して、 $\beta=0.01$ ではわずかに大きく、 $\beta=0.05$ ではほぼ同じで、 $\beta=0.1$ ではかなり小さく、 $\beta=0.2$ では再び増加して $\beta=0$ より少し大きくなっている。図3(b)は $U_T=200$ km/hにおける入口波について示したもので、入口波の時間的圧力変化の分布形状、圧力こう配の分布形状、およびそれらの最大値への β の影響の仕方は図3(a)の $U_T=300$ km/hの場合と定性的に全く同じである。図4は入口波におけるフード長さ L_H の影響を調べたもので、図4(a)は $U_T=300$ km/h、 $\beta=0.05$ について示したものである。 L_H が小さい($L_H/D=0.5$)と、多孔壁から大気中に流出する抽気量の増減に伴う膨張波と圧縮波の発生時間が短く、それらの圧力波が有効断面積の時間的減少による圧縮波と合併し、 $L_H=0$ に比べて幅は少し広がるが、圧力および圧力こう配の最大値が少し大きい入口波が形成される。 L_H が大きくなると、多孔壁での膨張波と圧縮波の発生時間が長くなり、これら圧力波の合併によって形成される入口波は、圧力の最大値は大きくなるが、幅がきわめて大きく、圧力こう配の最大値も $L_H/D=1.0$ で $L_H=0$ のそれとほぼ同じ、 $L_H/D=2.0$ では6割程度に減少する。図4(b)は $U_T=200$ km/hについて示したもので、入口波における圧力分布の形状、圧力こう配の分布形状、およびそれらの最大値に対する L_H の影響の仕方は、図4(a)の $U_T=300$ km/hと定性的に全く同じである。図5は多孔壁フード入口側の一部を固体壁にした場合、固体壁長さ L_{sw} による影響を調べたもので、図5(a)は $U_T=300$ km/h、 $L_H/D=2.0$ 、

$\beta=0.05$ について示したもので、 L_{sw} が大きくなると、入口波における圧力および圧力こう配の最大値は $L_{sw}=0$ (フード全長にわたって多孔壁)に比べて少し大きくなる程度であり大きな差は生じない。図5(b)は $\beta=0.1$ について示したもので、入口波特性に対する L_{sw} の影響の仕方は図5(a)の $\beta=0.05$ の場合と定性的に同じである。

圧縮波は伝ばとともに急峻になる非線形性を有し、トンネル出口で発生する音の強さは、出口における圧縮波の時間的圧力こう配に比例することから、それを左右する入口波の強さ、および時間的圧力こう配の大

(a) $U_T=300$ km/h, $\beta=0.05$

(b) $U_T=200$ km/h, $\beta=0.05$

図4 入口波形成における L_H の影響

きさが重要な尺度となる。すなわち、入口波の強さと時間的圧力こう配の最大値が小さい入口波ほど、トンネル出口における圧縮波の時間的圧力こう配は小さいと予測できるのは、これらの特性量と多孔壁フードにおけるパラメータとの定量的関係を図6～8に示す。図6は入口波の特性量 $p_{\max}$, p_e , $(dp/dt)_{\max}$ と開口率 β の関係をフード長さ L_H をパラメータとして示したもので、 $p_{\max}$, p_e , $(dp/dt)_{\max}$ はそれぞれ、入口波圧力の最大値、入口波後部を構成する膨張波後の圧力値(この膨張波は入口波の伝ぱとともに、圧力最大値 $p_{\max}$ を p_e まで小さくする作用をするので、入口波強さの尺度として適当と考えられる)、入口波の時間的圧力こう配の最大値である。いずれの L_H についても、 β が大きくなるほど $p_{\max}$ および p_e は大きくなり、その増加割合は L_H が大きいほど大きい。が、 p_e の値は $\beta=0$ (フードなし)と比較してそれほど大きくはならな

い。 $(dp/dt)_{\max}$ の値は、 $L_H/D=0.5$ では β の増加とともに大きくなるが、 $L_H/D=1.0$ では、 $\beta=0.1$ で $\beta=0$ (フードなし)より小さく、他の β では同程度で、 $L_H/D=2.0$ になると、 $\beta=0.05, 0.1$ で $\beta=0$ (フードなし)の6割程度に減少し、それより β が大きいと、 $\beta=0$ での値近くまで増加する。図7は $p_{\max}$, p_e および $(dp/dt)_{\max}$ と L_H の関係を β をパラメータとして示したものである。いずれの β についても、 L_H が大きいほど $p_{\max}$, p_e は大きくなるが、 p_e の増加割合は小さい。 $(dp/dt)_{\max}$ の値は、いずれの β についても、 $L_H/D=0.5$ までは少し増加するかほぼ変わらない程度で、 $\beta=0.01$ と 0.2 では、 L_H のそれ以上の増加でわずかに減少する程度であるが、 $\beta=0.05$ と 0.1 では $L_H/D=1.0$ から $L_H/D=2.0$ までの増加で大きく減少する。図8は $L_H/D=2.0$ の多孔壁フードにおいて、入口側固体壁の長さ L_{sw} について特性量比較を示したものであ

図5 入口波形成における固体壁長さ L_{sw} の影響 $p_{\max}/p_0$, p_e/p_0 と β の関係 $(dp/dt)_{\max}$ と β の関係図6 入口波の特性量における β の影響

図7 入口波の特性量における L_H の影響

る。 $p_{\max}$, p_e に対する L_{sw} の影響はきわめて小さく、 $(dp/dt)_{\max}$ についても、 $L_{sw}/D=1.0$ で $L_{sw}/D=0$ (フード全長にわたって多孔壁) より少し大きく程度である。これらの考察から、等断面積多孔壁フードでは、 $L_H/D=2.0$ 程度のフード長さが取れば、 $\beta=0.05 \sim 0.1$ のフードが優れていると評価することができる。

4. 結 論

高速列車が等断面積多孔壁フードの付いたトンネルに進入する際に形成されるトンネル入口波について、特性曲線法による数値解析を行い、次の結論が得られた。

(1) 等断面積多孔壁フードが付いたトンネルで形成される入口波は、列車鼻部の進入に伴うトンネル有効断面積の時間的減少によって発生する圧縮波に、多孔壁から流出する抽気量の増減に伴って発生する膨張波と圧縮波が合併し、さらに入口で反射された膨張波

図8 入口波の特性量における L_{sw} の影響 ($L_H/D=2.0$)

が後部に続いて全体が構成される。

(2) 強さとかう配が異なる圧力波の非線形的な合併によって入口波の圧力こう配が定まるため、その時間的圧力こう配の最大値に対するフード長さおよび開口率の影響の仕方は単調なものとはならない。

(3) 入口波の強さは多孔壁フードによって少し増加するが、長さがトンネル等価直径の2倍程度のフードでは、開口率が0.05から0.1の範囲で時間的圧力こう配の最大値が最も減少し、その値はフードなしに比べて6割程度で、多孔壁フードの効果はかなり大きいと考えることができる。

(4) フード前半部が固体壁の多孔壁フードで形成される入口波の特性量は、全長にわたって多孔壁であるフードとあまり大きな差異はない。

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) 鹿毛・ほか2名, 機論, 58-547, B(1992), 815.
 - (4) 鹿毛・ほか2名, 機論, 59-560, B(1993), 1161.
 - (5) Barrows, T. M. *J. Sound Vib.* 50-4(1977), 571.
 - (6) Pope, C. W., *Tech. Mem. Aero.*, 12(1976),
 - (7) 鹿毛・川越, 機論, 57-542, B(1991), 3345.
 - (8) 松尾・ほか3名, 機論, 58-546, B(1992), 331.
 - (9) 鹿毛・川越, 機論, 57-546, B(1992), 338.
 - (10) 青木・ほか3名, *Proc. Symp. Shock Waves Jpn.* '92(1992), 43.
 - (11) 中野・ほか2名, 可視化情報学会誌, 11, Suppl. 2(1991), 183.
-