

トンネル内を伝わる圧縮波の前面の変形

小澤 智* 前田 達夫**

Distortion of Wave-Front of Compression Wave Travelling in Shinkansen Tunnel

Satoru OZAWA

Tokyo Engineering University

Tatsuo MAEDA

Railway Technical Research Institute

ABSTRACT

A pressure pulse—we call it ‘micro-pressure wave’—radiates out of the tunnel exit when a compression wave generated by a Shinkansen train entering a tunnel arrives at the tunnel exit. The micro-pressure wave depends on the shape of the compression wave arriving at the tunnel exit; the shape of the micro-pressure wave is approximately proportional to the time derivative of the pressure of the incident compression wave. The micro-pressure wave is large at the exit of a long tunnel with the concrete slab track because the wave-front of the compression wave steepens during propagation in the tunnel. This paper deals with the factors which counteract steepening of the wave-front of the compression wave due to nonlinear effect: ballasted track, side branches in a tunnel, frictional force at the tunnel wall.

Key Words: pressure wave, boom, tunnel, Shinkansen

1. はしがき

列車の高速化に伴い、空気力学的な問題、なかでも、トンネルに関連する問題が厳しくなる。列車がトンネルに突入すると圧縮波が作られ、トンネル内を音速で往復する^{1),2)}新幹線で最初に問題になった“列車・トンネル系の空気力学”の問題は、トンネル走行中の列車の乗客が耳に圧迫感を感じる、いわゆる‘耳つん’である。これは圧力波の‘大きさ’に関係する。トンネル内の圧力変動は1次元モデルのシミュレーションによりかなり正確に求められる^{2),3)}。

昭和50年3月の山陽新幹線の岡山・博多間開業に伴い、坑口から放射される圧力パルス（以後、“微気圧波”と呼ぶ）が問題になった⁴⁾。微気圧波はトンネル出口に到達した圧縮波の‘前面の形’に関係する。微気圧波の波形は、

低周波近似においては、トンネル出口に到達した圧縮波の時間微分に比例する⁵⁾。微気圧波はスラブ軌道の比較的長いトンネルの坑口で大きい。これは、トンネル内を伝播する圧縮波の前面が‘非線形効果’によって切り立ったためである。現在、‘入口フード’など各種対策がとられている⁶⁾。

微気圧波の問題はトンネル内を伝播する圧縮波の前面の変形の問題に密接に関係する。本報告は、非線形効果による圧縮波前面の‘切り立ち’を抑える因子 — バラスト軌道、トンネル内に存在する技坑（斜坑・立坑、器材坑）、トンネル壁面の摩擦 — の各効果について述べるものである。

2. 1次元モデルによる圧力波伝播の基礎方程式

トンネル内の圧力波伝播の解析は一般に特性曲線法によって行われるが、トンネル出口に到達するまでの圧縮波の前面のみに注目すると、特性曲線 $C+(dx/dt=u+c$; ただ

* 東京工科大学

** 鉄道総合技術研究所

し、 u : 流速, c : 音速) に沿う方程式を考慮することによって近似的に解析することができる。バラスト軌道の効果を考慮した基礎方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(c_0 + \frac{\gamma+1}{2} u \right) \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2} \left\{ f + \frac{\dot{m} c_0}{\rho_0 A} \right\} \quad (1)$$

と表される^{7),8)}。ここで、 u : 圧縮波に伴う流速 ($u \approx p / (\rho_0 c_0)$) ; ただし、 p : トンネル内の圧力, ρ_0 : 空気密度, c_0 : 音速, γ : 空気の比熱比, f : トンネル壁面の摩擦, \dot{m} : トンネル内からバラスト軌道内への空気の質量流量, A : トンネル断面積, x : 線路方向にとった座標, t : 時間。

式(1)右辺の第1項はトンネル壁面の摩擦の効果, 第2項はバラスト軌道の効果を表す。ここで

$$\dot{m} = -\rho_0 v b_B \quad (2)$$

である。ただし、 b_B : バラスト軌道幅, v : バラスト軌道の表面に垂直な流速 (バラスト軌道内に侵入する方向を正とする)。

3. トンネル壁面の摩擦の効果

一般に、トンネル壁面の摩擦は定常摩擦と非定常摩擦からなり、式(1)右辺の f は

$$f = - \left(\frac{\lambda}{2d_H} |u| + \frac{4\tau_u}{\rho d_H} \right) \quad (3)$$

の形に表される。上式の右辺第1項は定常摩擦 (λ : 水力的摩擦係数, d_H : トンネルの水力直径 (= $4A/L_T$, L_T はトンネル周長) である。また、第2項は非定常摩擦で、層流⁹⁾⁻¹²⁾ または乱流¹³⁾⁻¹⁵⁾ の場合に対して解析されている。また、摩擦係数 f による圧力波の減衰も調べられている¹⁶⁾。

Brownら¹³⁾は、 $\nu t/a^2 < 10^{-6}$ (ν : 空気の動粘性係数, t : 時間, a : トンネル半径) の範囲における乱流非定常摩擦は層流の場合の値とほとんど同じであるとしている。トンネル内圧縮波の波面前面の変形問題では、圧力波前面の圧力上昇時間は高々1s程度であり、上述の条件が満たされている。非定常の壁面せん断応力として、層流Rayleigh問題のせん断応力 τ_1 (Zielke¹⁰⁾ の解析結果の主要項に対応) を用いることができると考えられ、トンネル壁面における熱伝達によるエネルギー損失を考慮すると、式(3)の τ_u は

$$\tau_u = \frac{\rho \sqrt{\nu}}{\sqrt{\pi}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{\sqrt{\text{Pr}}} \right) \int_0^t \frac{\partial u}{\partial t} (\tau) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} \quad (4)$$

の形に書ける^{17),18)}。ただし、Pr : プラントル数。

トンネル壁面の非定常摩擦に関しては今後更に研究する必要がある。

4. トンネル内の枝坑の効果

トンネル内に存在する枝坑は圧縮波前面の勾配を緩やかにする効果を持つ。波長が枝坑の直径に比べて大きい平面波が枝坑を通過したとき、枝坑通過直後の平面波の圧力 p_2

と通過直前の圧力 p_1 との関係は

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{Z_b}{\rho_0 c_0 / (2A) + Z_b} \quad (5)$$

で表される¹⁹⁾。ここで、 A : トンネル断面積, Z_b : 枝坑の音響インピーダンス。

器材坑の効果

新幹線のトンネルには、電気機器を置くための1形器材坑 (奥行き2m, 断面積7.1m²) および2形器材坑 (奥行き5m, 断面積7.1m²) が図1のように配置されている。

器材坑のインピーダンス Z_b は

$$Z_b = -i (\rho_0 c_0 / A_b) \cot k l_1 \quad (6)$$

である。ここで、 A_b : 器材坑の断面積, k : 波数, l_1 : 開口端補正を施した枝坑の長さ。

式(5),(6)から、 p_2 と p_1 との関係は

$$\begin{aligned} p_2(t) = & \frac{2}{2+n} p_1(t) + \frac{4n}{(2+n)^2} p_1(t-2T_1) \\ & - \frac{4n}{(2+n)^2} \left(\frac{2-n}{2+n} \right) p_1(t-4T_1) \\ & + \frac{4n}{(2+n)^2} \left(\frac{2-n}{2+n} \right)^2 p_1(t-6T_1) - \dots \end{aligned} \quad (7)$$

となる⁴⁾。ここで、 $n = A_b/A$, $T_1 = l_1/c_0$ 。

隣接する器材坑を音波が往復する時間は約3sで、圧力波前面の圧力上昇時間に比べて大きいので、前面の変形の問題に対しては、器材坑間の相互影響は無視することができる。

大きな枝坑の効果

上越新幹線の榛名、中山両トンネルでは、トンネル内の大きな斜坑・立坑 (トンネル工事のとき掘削) を利用する微気圧波対策を開業以前に施した。その対策の効果は確認され、解析されている²⁰⁾。最近、トンネル内に大きな空洞を一定間隔で配置する対策が解析されている²¹⁾。

5. バラスト軌道の効果

スラブ軌道およびバラスト軌道トンネルにおける圧縮波前面の変形の様子を図2に示す。波面前面を緩やかにするバラスト軌道の効果が顕著である。バラスト軌道の効果は多孔質性に由来すると考えられている^{4),7),8)}。

いま、バラスト軌道を一種の吸音材と考える。厚さ h の

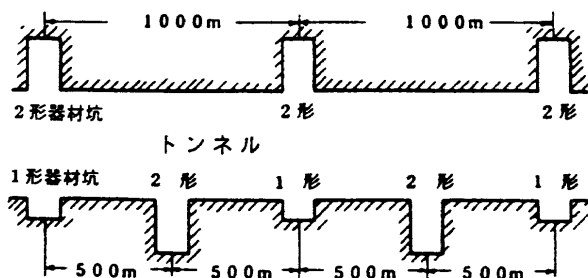


図1 トンネル内器材坑の標準配置

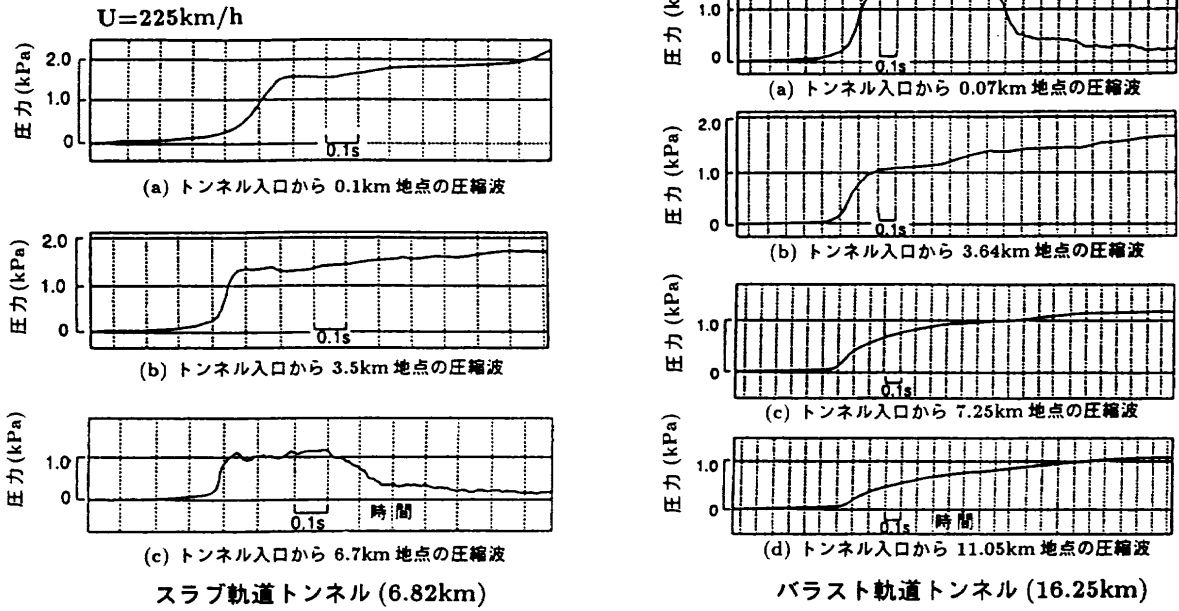


図2 圧縮波前面の変形

吸音材を剛体で終端した場合の垂直入射波に対する音響インピーダンス $Z_b (= p/(Sv))$; ここで, S : 断面積, p : 吸音材表面における圧力, v : 吸音材表面に垂直な流速) は数多く解析されている。特に, 吸音材が薄く, 圧力変動の周波数が比較的低い場合には, 集中定数モデルにより, p と v との関係は次のように表される²²⁾:

$$p = \left(j\omega \frac{1}{3} \frac{\xi \rho_0}{\epsilon} h + \frac{1}{3} r h + \frac{\rho_0 c_0^2}{j\omega r h \epsilon} \right) v \quad (8)$$

ここで, $j = \sqrt{-1}$, ω : 角振動数, ξ : 質量係数, h : バラストの厚さ, ϵ : 空隙率, r : 抵抗係数。上式は

$$p = \rho_0 c_0 \left(A_L \frac{\partial v}{\partial t} + A_R v + A_C \int v dt \right) \quad (9)$$

と書くことができる。ただし, $A_L = \xi h / (3\epsilon c_0)$, $A_R = r h / (3\rho_0 c_0)$, $A_C = c_0 / (r h \epsilon)$ である。

式(9)の解 ($v(0) = 0$, $p(0) = 0$) は

$$\rho_0 c_0 v(t) = \int_0^t \frac{\partial p}{\partial t}(\tau) g(t-\tau) d\tau \quad (10)$$

となる。ここで, $g(t)$ は単位応答。

式(10)を用いると, 式(1)右辺第2項のバラスト軌道の効果を表す項 $m c_0 / (\rho_0 A)$ は $\partial p / \partial t$ の履歴に関する時間積分を含む。ここでは, $\rho_0 c_0 v$ を別の簡単な式で表現することを考える。式(9)を t に関して1回, 2回, ... 微分を用いて表すと

$$\rho_0 c_0 v = \frac{1}{A_C} \left[\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{A_R}{A_C} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \left\{ \left(\frac{A_R}{A_C} \right)^2 - \frac{A_L}{A_C} \right\} \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} + \dots \right] \quad (11)$$

となる。

バラスト軌道の効果を明確にするため, 前進圧縮波(単純波)の場合を考え, $p \approx \rho_0 c_0 u$ の近似, および $\partial / \partial t \approx -c_0 \cdot \partial / \partial x$, $\partial^2 / \partial t^2 \approx c_0^2 \cdot \partial^2 / \partial x^2$, $\partial^3 / \partial t^3 \approx -c_0^3 \cdot \partial^3 / \partial x^3 \dots$ の関係を用いて, 式(11)右辺の t に関する偏微分を x に関する偏微分で表す。バラスト軌道の効果を表す項 $m c_0 / (\rho_0 A)$ は

$$\frac{m c_0}{\rho_0 A} \approx \alpha c_0 \frac{\partial u}{\partial x} + \nu^* \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \beta \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \quad (12)$$

となる。ただし, $\alpha = (b_B c_0 / A) \cdot (1 / A_C)$, $\nu^* = (b_B c_0^3 / A) \cdot (A_R / A_C^2)$, $\beta = (b_B c_0^4 / A) \cdot (1 / A_C) \cdot \{ (A_L / A_C) - (A_R / A_C)^2 \}$ である⁸⁾。式(12)の右辺第1項は音速に対する影響, 第2項は圧縮波のエネルギー散逸, また, 第3項は圧縮波の分散を表す。

バラスト軌道の定数に関しては更に詳しく調べる必要があるが, 現在のところ, バラスト軌道の空隙率 ϵ , 抵抗係数 r の測定から, $A_R \approx 5.0 \times 10^{-1}$, $A_L \approx 1.2 \times 10^{-3}$ (s), $A_C \approx 1.2 \times 10^3$ (s⁻¹) が得られ, $\alpha \approx 0.03$, $\nu^* \approx 1.5$ (m²/s), $\beta \approx 1.0$ (m³/s) なる値が得られている。

6. バラスト軌道, 2形器材坑, トンネル壁面摩擦の効果

圧縮波の前面の‘切り立ち’を抑える因子として, バラスト軌道, 枝坑, トンネル壁面摩擦がある。この三つの因子の効果を比較してみる。ここでは, バラスト軌道の定数として, $\nu^* = 2$ (m²/s), $\beta = 1$ (m³/s) を使い, 枝坑としては500mおきに配置された2形器材坑のみを扱い, また, トンネル壁面摩擦として式(4)を用いることにする。

これら三つの因子をいろいろ組合せた場合の圧力勾配最

大値比 ($x=0$ における圧力勾配最大値を用いて基準化, 列車速度: 240 km/h) の距離による変化を図3に示す⁸⁾。図3から三つの因子の効果に関して, [バラスト軌道] > [2形器材坑] > [トンネル壁面摩擦] であることがわかる。

7. ま と め

圧縮波の前面の‘切り立ち’を抑える三つの因子 — バラスト軌道, 2形器材坑, トンネル壁面摩擦 — の効果を調べた。バラスト軌道の効果が卓越していることが分かった。今後, 各因子に関して, モデルの精密化など更に詳しく調べる必要がある。

文 献

- 1) 原 朝茂: 鉄道技術研究報告, No.153, 1960
- 2) 山本彬也: 鉄道技術研究報告, No.871, 1973
- 3) 飯田雅宣, 前田達夫: 鉄道総研報告, Vol. 4, No. 7, 1990
- 4) 小澤 智: 鉄道技術研究報告, No.1121, 1979
- 5) 山本彬也: 日本物理学会春の分科会 応用数学・力学・流体物理予稿集, 1977
- 6) Ozawa, S., T. Maeda, T. Matsumura, K. Uchida, H. Kajiyama, K. Tanemoto: *Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, (Elsevier Science Publishers, 1991), pp.253-266, 1991
- 7) 小澤 智, 前田達夫, 松村 豪, 内田一男: 鉄道総研報告, Vol.5, No.12, pp.9-15, 1991
- 8) Ozawa, S., T. Maeda, T. Matsumura, K. Uchida: Proc. Int. Conf. on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, Vol.2, pp.299-304, 1993
- 9) Chester, W.: J. Fluid Mech. Vol.18, pp.44-64, 1964
- 10) Zielke, W.: J. Basic Engrg., Trans. ASME. Ser. D. Vol. 90, No.1, pp.109-115, 1968
- 11) Trikha, A.K.: J. Fluids Engrg., Trans ASME, Vol. 97, pp.97-105, 1975
- 12) Achard, J.L. and G.M. Lespinard: J. Fluid Mech. Vol. 113, pp.283-298, 1981
- 13) Brown, F.T. G.Knebel and D.Margolis: Engineering Project Laboratory, MIT, Report No. FRA-RT-72-22, 1971
- 14) Schultz, M. and H. Sockel: Proc. 6th Int. Symp. on

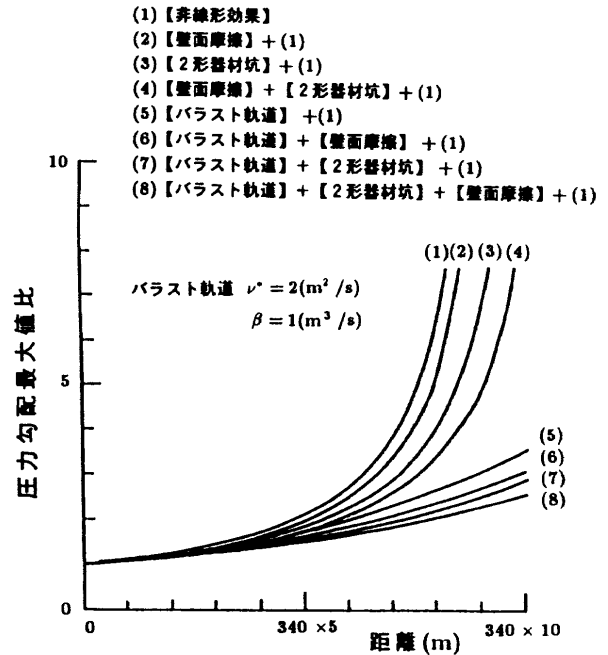


図3 バラスト軌道, 2形器材坑, 壁面摩擦の効果

the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.123-135, 1988

- 15) Vardy, A.E., Hwang Kuo-Lin, James M.B. Brown: J. Hydraulic Research, Vol.31, No. 4, 1993
- 16) Matsuo, K., T. Aoki, H. Kashimura, M. Kawaguti, N. Takeuti: *Aerodynamics and Ventilation Vehicle Tunnels*, (Elsevier Science Publishers, 1991), pp.239-252, 1991
- 17) Temkin, S.: J. Acoust. Soc. Amer. Vol.46, No.1 (Part 2), pp.267-271, 1969
- 18) Landau, L.D. and E.M. Lifshitz: *Fluid Mechanics* (Pergamon Press, 1969)
- 19) Kinsler, L.E. and A.R. Frey: *Fundamentals of Acoustics* (John Wiley & Sons 1950)
- 20) 山本彬也, 小澤 智, 前田達夫, 木下真夫, 種本勝二: 鉄道技術研究報告, No.1250, 1983
- 21) Sugimoto, S.: J. Fluid Mech. Vol.244, pp.55-78, 1992
- 22) 荒井昌昭: 日本音響学会誌, Vol.19, No.1, pp.9-16, 1963