バラスト軌道トンネルを伝播する圧縮波の現地測定と数値計算

Field measurement and numerical simulation of compression wave propagating through a ballast-tracked tunnel

○正 宮地徳蔵（鉄道総研） 正 福田傑（鉄道総研） 小澤智（東京工科大）

Tokuzo MIYACHI, Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo

Takashi FUKUDA, Railway Technical Research Institute

Satoru OZAWA, Tokyo University of Technology, 1404 Katakura, Hachioji-shi, Tokyo

The distortion process of the compression wave in a ballast-tracked tunnel was investigated by field measurement and numerical simulation. The field measurement was conducted in an actual Shinkansen ballast-tracked tunnel of about 4 km. The numerical simulation corresponding to the field measurement was carried out on the basis of a one-dimensional compressible flow analysis in which the effects of steady and unsteady friction were included and of an acoustic analysis on the effect of side branches. The results of the numerical simulation agreed well with those of the field measurement. It indicates that the ballast is effective for reducing pressure gradient of the compression wave generated by a high-speed exceeding 350 km/h.

Key Words: Pressure wave, Micro-pressure wave, Railway, High-speed train, Ballast

1. はじめに

高速鉄道における環境問題の一つであるトンネル微気圧波⁽¹⁾の低減対策は、これまで、列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の波面を緩やかにする“入口対策”（トンネル緩衝工⁽¹⁾、列車先頭部最適化⁽²⁾）を中心として行われてきた。しかしながら 350 km/h を超えるような高速域においては、入口対策を補完するため、新たにトンネル内での対策が必要になることが考えられる。

本報では、まず、スラブ軌道トンネルに比べて発生する微気圧波が小さいバラスト軌道トンネルにおいて、トンネル内を伝播する圧縮波の変形を調べるために行った現地測定の結果について述べる。次に、バラスト軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形に関する数値計算モデルを提案する。さらに、その数値計算モデルを用いて、微気圧波のトンネル内対策として、スラブ軌道トンネルにバラストを敷設した場合の効果について検討する。

2. バラスト軌道トンネルにおける現地測定

バラスト軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形を、現地測定により調べた。現地測定の概要を図1に示す。図1中の x はトンネルの起点側坑口を原点としたトンネルに沿った座標である。本坑のバラスト軌道部を除いた中空部の断面積は 62.9 m² である。下り列車突入坑口（東側）にはトンネル緩衝工は設置されておらず、上り列車突入坑口（西側）には長さ 10 m の緩衝工が設置されている。現地測定を実施したトンネルには、図1に示す位置に、1 形器材坑（断面積 6.9 m²、奥行 2 m）および 2 形器材坑（断面積 9.9 m²、奥行 4.3 m）がほぼ向かい合って設置されている。

本測定では、トンネル内を伝播する圧縮波の圧力波形を測定するために、図1に示すトンネル内の3箇所（ST 研究所 PD80HA）に圧力変換器（ST 研究所 PD80HA）を設置した。圧力変換器からの信号は DAT データレコーダ（ソニー・プレジジョンテクノロジー PC-216Ax）に記録した。また、列車速度はスピードガン（ACI 社 ストーカースポーツ）を用いて測定した。

現地測定で得られた各測定点における圧縮波の波形例を図2（圧力波形）、図3（勾配最大値の変化）に示す。図2(a)、図2(b)の測定波形は、入口緩衝工の無い東側坑口から突入する下り列車によるものである。また、図2(c)の測定波形は、長さ 10 m の入口緩衝工の有る西側坑口から突入する上り列車によるものである。ここで、図2、図3中の○のプロットは現地測定結果であり、曲線は第3節で述べる数値計算結果である。図2より、伝播に伴って波面が緩やかになり、波面圧力勾配が小さくなっていくことがわかる。また、圧縮波の伝播に伴い、波面前面の肩部が丸みをおびてくるのが特徴的である。図3より、本現地測定のトンネルおよび列車の条件下では、圧力勾配最大値は伝播に伴って小さくなることがわかる。

波面前面の肩部が丸くなる特徴は、非定常摩擦による変形（減衰）にみられる特徴と一致している。このことから、次節において、バラスト軌道の効果を非定常摩擦の増大の効果に置き換える数値計算モデルを構築し、計算結果を現地試験結果と比較する。

Fig. 1 Arrangement of side branches and measuring points in ballast-tracked tunnel

Fig. 2 Compression waveform at three measuring points obtained by field measurement and numerical simulation

Fig. 3 Variation of pressure gradient $(\partial p / \partial t)_{\max}$ of compression waves

3. 数値計算

バラスト軌道による圧縮波減衰メカニズムはバラスト部への流体の浸入（以下バラスト部による吸い込みと呼ぶ）に着目したモデルが提案されている（文献(3)(4)など）。しかし、これらのモデルでは現地試験結果の再現性は十分ではない。図2にみられるような圧縮波の肩部が丸くなる特徴は非定常摩擦による変形に見られる特徴と一致している。バラスト層

の表面が粗いこと、およびバラスト層の吸い込みにより境界層がうすくなること、によりバラスト層表面における非定常摩擦が増大することが考えられる。また、吸い込み流量は非定常摩擦とよく似た式で表すことができる。そこで本報では、バラスト軌道トンネルによる圧縮波の減衰メカニズムを非定常摩擦の増大に置き換えたモデルにより数値計算を行った。

3-1 非定常摩擦増大モデル

一次元方程式を前進波近似により一変数にした場合、音速で移動する波面固定座標において熱の影響を無視すれば⁽¹⁾⁽⁵⁾、

$$p_x = \frac{\gamma+1}{2} \frac{p}{\rho_0 c_0^3} p_t - \frac{1}{2} \rho_0 \frac{4}{\rho d_H} (\tau_s + \tau_{us}) \quad (1)$$

となる。さらにバラスト層による吸い込みを考慮すると、

$$p_x = \frac{\gamma+1}{2} \frac{p}{\rho_0 c_0^3} p_t - \frac{1}{2} \rho_0 \frac{4}{\rho d_H} (\tau_s + \tau_{us}) + \frac{1}{2} \frac{c^2}{c_0} \frac{\dot{m}}{A} \quad (2)$$

となる。ここで、 p ：音圧（ $=p-P_0$ ）、 ρ ：密度、 c ：音速、 τ ：壁面摩擦、 d_H ：トンネル本坑水力直径、 $\dot{m}$ ：吸い込み流量、 A ：トンネル断面積、 γ ：比熱比、添え字0：大気条件、添え字 x または t ：それぞれによる偏微分である。

非定常摩擦項および吸い込み項は

$$\begin{aligned} \tau_{us} &\propto \int_0^\infty \frac{\partial p}{\partial t} (t-\phi) \frac{\exp[-B^* 4\nu\phi/d_H^2]}{\sqrt{\phi}} d\phi \\ &\approx \int_0^\infty \frac{\partial p}{\partial t} (t-\phi) \frac{1}{\sqrt{\phi}} d\phi \end{aligned} \quad (3)$$

$$\dot{m} \propto \int_0^\infty \frac{\partial p}{\partial t} (t-\phi) g(\phi) d\phi \quad (4)$$

と表される⁽³⁾。ここで、 ν ：動粘度である（ B^* は後掲の式(12)参照）。式(3)において、実際の列車・トンネル系のスケールでは $\exp$ の項はほぼ1と置くことできる。式(4)における重み関数 $g(t)$ は、トンネル内からバラスト層へ浸入する空気の流速のステップ応答であり、バラスト軌道の物性値や寸法で決まる関数である。このように、非定常摩擦項と吸い込み項はいずれも圧力勾配を含む畳み込み積分で表される。

そこで本報では式(3)(4)より

$$\left(\frac{4\tau_{us}}{\rho d_H}\right)_{\text{Ballast}} + \frac{1}{2} \frac{c^2}{c_0} \dot{m}/A = \beta_1 \left(\frac{4\tau_{us}}{\rho d_H}\right)_{\text{Slab}} + \frac{1}{2} \frac{c^2}{c_0} \frac{\dot{m}}{A} \approx \beta \left(\frac{4\tau_{us}}{\rho d_H}\right)_{\text{Slab}} \quad (5)$$

と仮定する。すなわち、表面粗さの増大と吸い込みにより境界層のプロファイルが変わり、バラスト軌道における非定常摩擦がスラブ軌道における非定常摩擦より増大する効果(β_1)と、吸い込みにより流量が減衰する効果の全てを非定常摩擦の増大で表すことにする。乗数 β は空隙率や敷設幅、敷設厚さの関数であると考えられる。

なお、吸い込みがない場合、熱の影響を考慮すれば以下に示す CFD と式(1)による計算結果はほとんど変わらないことが文献(5)に示されており、非定常摩擦が大きくなっても式(1)と次節に示す CFD による計算結果が変わらないことを確認している。

3-2 一次元 CFD による数値計算

トンネル本坑内を伝播する圧縮波の数値計算においては、空気を完全気体、流れを一次元非定常圧縮性流れ、トンネル壁面を等温壁と仮定した。また、静止気体中の音速 c_0 で移動する座標系で記述した方程式系を用いた。状態方程式および静止気体中の音速 c_0 で移動する座標系で記述した保存形の連続の式、運動量の式およびエネルギー式は次式となる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

$$p = \rho RT \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \mathbf{G} = 0 \quad (7)$$

ただし、

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ (e + p)u \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ f \\ q - c_0 f \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$f = f_s + f_{us} \quad (9)$$

$$f_s = \frac{\lambda \rho (u + c_0)^2}{d_H^2} \quad (10)$$

$$f_{us} = \beta \varepsilon \frac{4\rho\sqrt{\nu}}{\sqrt{\pi}d_H} \int_{-\infty}^t \frac{\partial u}{\partial t}(\phi) \frac{\exp[-B^* 4\nu t / d_H^2]}{\sqrt{t - \phi}} d\phi \quad (11)$$

$$B^* = 0.135 Re^{\log_{10}\left(\frac{14.3}{Re^{0.05}}\right)} \quad (12)$$

$$q = \frac{4C_p(T - T_w)}{(u + c_0)d_H P_r^{2/3} \tau_w} \quad (13)$$

ここで、 p : 圧力 (式(1)~(4)と定義が異なる)、 ρ : 空気密度、 u : 流速、 c : 音速、 R : 空気の気体定数、 T : 温度、 t : 時間、 e : 単位体積あたりの全エネルギー ($= p/(\gamma - 1) + \rho u^2/2$)、 γ : 比熱比、 f : 摩擦項、 f_s : 定常摩擦項、 f_{us} : 非定常摩擦項、 ε : 非定常摩擦項パラメータ、 λ : 定常乱流の管摩擦係数、 d_H : トンネル本坑水力直径、 q : 熱伝達項、 C_p : 定圧比熱、 P_r : プラントル数、 T_w : トンネル壁面温度、 ν : 動粘度、 τ_w : 壁面剪断応力 ($= f d_H/4$) である。

定常摩擦項 f_s 中の λ および非定常摩擦項 f_{us} 中の ε は、トンネル壁面の粗さや敷設されている軌道の状態に依存するため、実測データから推測する必要がある。本数値計算では、 λ についてはスラブ軌道トンネルと同じ $\lambda = 0.04$ とした。非定常摩擦項の係数 ε については、スラブ軌道と同じものを仮定しているから本報では $\varepsilon = 8$ とした。 β については、図 2(c) に示した圧力波形の現地測定結果と数値計算結果の比較から、 $\beta = 3.75$ とした。よって、非定常摩擦に関する係数は $\beta\varepsilon = 30$ となる。また数値計算は、Chakravarthy & Osher⁽⁸⁾の TVD スキームを用い、空間差分は 3 次精度風上差分、時間積分は 1

次の陽解法とした。圧縮波が枝坑設置部を通過するときの変形は、音響学的な解析⁽¹⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾から求めた。

数値計算と現地測定で得られた各測定点における圧縮波の圧力波形の例を図 2 に示す。計算に用いたトンネル条件を表 1 に示す。

Table 1 Specifications of the test tunnel

Main tunnel	Cross-sectional area A_{tun} (m^2)		62.9
	Perimeter (m)		31.7
	Hydraulic diameter d_H (m)		8
Short side branch	Type 1	Cross-sectional area A_b (m^2)	6.9
		Length l_b (m)	2
	Type 2	Cross-sectional area A_b (m^2)	9.9
		Length l_b (m)	4.3

図 2(a)、図 2(b) は下り列車の場合で $x = 0.4 \text{ km}$ の測定点における測定波形を初期波形としたものであり、図 2(c) は上り列車の場合で、 $x = 3.7 \text{ km}$ の測定点における測定波形を初期波形としたものである。図 2 より、数値計算による圧力波形は現地測定結果と良く一致していることがわかる。特に、バラスト軌道トンネル内を伝播する圧縮波の波面が変形し、波面前面の肩部が丸みをおびてくる特徴が数値計算結果で捉えられていることがわかる。

図 3 に、数値計算および現地測定で得られた圧縮波の伝播過程における圧力勾配最大値の変化を示す。ここで、図 3 (a) は下り列車、図 3 (b) は上り列車の場合の結果である。図 3 より、数値計算結果と現地測定結果はほぼ一致していることがわかる。

4. 微気圧波のトンネル内対策の検討

列車突入速度が 350 km/h を超える高速域での微気圧波のトンネル内対策として、バラストまたはバラストに相当する多孔質性物質をスラブ軌道トンネル内に敷設したときの効果について、数値計算により推定を行った。

本数値計算では基礎方程式を一次元としているため、非定常摩擦増大パラメータ β は断面平均(周長平均)の値である。そこでまず、第 3 節で用いたバラスト軌道トンネル内 (バラスト層 + コンクリート壁) の非定常摩擦増大パラメータ β から、バラスト層表面のみでのパラメータ β_B を求める。この β は、バラストの存在にのみ依存すると仮定する。よって、バラストの無い壁面では、スラブ軌道とバラスト軌道において非定常摩擦パラメータ ε は等しく、 $\beta = 1$ で一定とする。ここで、現地試験を実施したトンネルでは、バラスト敷設幅は約 7.1 m であり、表 1 よりトンネル周長は約 31.4 m である。 β について周長平均を用いることができるとすると、バラスト層表面での非定常摩擦増大パラメータ β_B は、

$$\frac{(31.4 - 7.1) \times 1 + 7.1 \beta_B}{31.4} = 1 \quad (14)$$

より、 $\beta_B = 13$ となる。

β_B はバラストの敷設厚さにより異なると考えられる。以下の検討では、現地測定を実施したバラスト軌道トンネルと同等の敷設厚さ (約 70 cm) があるとする。スラブ軌道トンネルに幅 b (m) にわたってバラストまたはバラストに相当する多孔質性物質を敷設したとき、

$$\beta\varepsilon = \frac{(31.4 - b) \times 1 + b \beta_B}{31.4} \varepsilon \approx 3.1b + 8 \quad (15)$$

となる。

本検討では、スラブ軌道トンネル内にバラストを敷設したときの微気圧波低減効果を、この $\beta\varepsilon$ を用いて数値計算により調べた。検討トンネル条件を表 2 に示す。

Table 2 Specifications of the model tunnel

Main tunnel	Cross-sectional area A_{tun}		63.4
	(m ²)		
	Perimeter (m)		31.7
Short side branch	Hydraulic diameter d_H (m)		8
	Type 1	Cross-sectional area A_b (m ²)	7.1
		Length l_b (m)	2
	Type 2	Cross-sectional area A_b (m ²)	7.1
		Length l_b (m)	5

表2に示すように、検討を行ったトンネルは、断面積を新幹線スラブ軌道トンネルの標準断面積とした。ただし、バラスト層が増えてもトンネル断面積は一定であるとし、バラストは与えられた敷設幅で線路方向に入口から出口まで敷設されていることを想定している。また、トンネル内の器材坑の配置は図4に示すように、2形器材坑が1000 m、1形器材坑が500 m 間隔に設置されているものとした。ここで初期波形は、現地測定で得られた図2(b)の $x = 0.4$ km での初期波形をもとに、同じの車両が300 km/h および350 km/h で突入したときの波形とした（圧力は速度の2乗に比例、時間は速度に反比例するとして速度換算）。

Fig. 4 Typical arrangement of short side branches in long Shinkansen tunnel

バラスト敷設幅を変えた場合の微気圧波低減効果について、図5に計算結果を示す。微気圧波のピークはトンネル出口における圧力勾配最大値に比例する⁽¹⁾ので、図5より、350 km/h を超えるような高速域においても、バラストを敷設することにより、伝播に伴う圧縮波の切り立ちを完全に抑制できる（初期状態から減衰し始める）と考えられる。今回の初期波形の場合、切り立ちを完全に抑制するために必要なバラスト敷設幅は、300 km/h では約4 m 程度（およそ上下線片側のみに敷設に相当）であり、350 km/h では一般的なバラスト軌道相当まで敷設する必要がある。

以上のように、今回の数値計算法により、微気圧波対策としてバラストを敷設した場合について、バラストの敷設幅や線路方向敷設距離、線路方向敷設場所を変更した場合の微気圧波低減効果を、ある程度予測をすることが可能となった。

5. まとめ

バラスト軌道トンネルの微気圧波低減効果を現地測定および数値計算により調べ、バラスト軌道トンネル内の圧縮波現象の解明を行った。また数値計算により、微気圧波のトンネル内対策としてバラストまたはバラストに相当する多孔質性物質を敷設した場合の効果について検討を行った。結果を以下にまとめる。

- (1) 現地測定によりバラスト軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形を調べた結果、波面の圧力が立ち上がったところ（肩部）が伝播に伴って丸みをおび、圧力勾配が緩やかになる特徴的な変形をすることがわかった。
- (2) 現地測定結果で得られたバラスト軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形の特徴より、バラストによる圧縮波減衰効果を、近似的に非定常摩擦に置き換えることができる可能性を指摘した。
- (3) バラスト軌道の効果をトンネル壁面非定常摩擦の増大効果に置き換えるモデルを用いて、バラスト軌道トンネル

Fig. 5 Effect of $\beta\epsilon$ on variation of $(\partial p/\partial t)_{\text{max}}$ of compression wavefront with propagation distance in ballasted-tracked tunnel

内を伝播する圧縮波の一次元非定常圧縮性流れの数値計算を行い、現地測定と良く一致する結果を得た。

- (4) スラブ軌道トンネルにバラストもしくは同等の効果を持つ多孔質物質を敷設するとき、バラストの敷設幅や線路方向敷設距離、線路方向敷設位置を変化させた場合の微気圧波低減効果について、ある程度予測をすることが可能となった。

今後の課題として、(1)バラスト敷設厚さによる微気圧波低減効果や、他の多孔質性物質の場合の効果の評価をできるようにすること、(2)吸い込みと物理的な非定常摩擦増大の効果を分離することなどがあげられる。

新幹線バラスト軌道トンネルにおける現地測定の実施に当たっては、西日本旅客鉄道株式会社の関係各位に多大なご協力をいただいた。ここに記し、感謝の意を表します。

文献

- (1) 小沢智, 鉄道技術研究報告, **1121**, (1979).
- (2) 飯田ほか, 機論, **62-596**, B(1996), 148-155.
- (3) Ozawa, S. et al., *Proc. Int. Cnf. Speedup Tech. Rail. and Maglev Vehicl.*, JSME, **2**, (1993), 299-304.
- (4) Ozawa, S. et al., *Proc. 9th Int. Symp. Aerodyn. Vent. Vehi. Tun.*, (1997), 935-947.
- (5) 宮地ほか, 機講論, 年次大会, (2006).
- (6) 福田ほか, 機論, **71-709**, B(2005), 2248-2255.
- (7) Fukuda, T. et al., *Proc. 12th Int. Symp. Aerodyn. Vent. Vehi. Tun.*, (2006).
- (8) Chakravarthy, S. R. et al., *AIAA Paper*, **85-0363**, (1985).