

スラブ軌道トンネル内バラスト敷設による微気圧波対策

福田 傑* 中村 真也* 宮地 徳蔵* 斉藤 実俊*
木村 宣幸** 松沼 政明***

Countermeasure for Reducing a Micro-pressure Wave by Spreading Ballast on the Slab Track in the Tunnel

Takashi FUKUDA Shinya NAKAMURA Tokuzo MIYACHI Sanetoshi SAITO
Nobuyuki KIMURA Masaaki MATSUNUMA

An impulsive pressure wave (micro-pressure wave) emitted from a tunnel portal is one of the environmental problems in high-speed railways. The magnitude of the micro-pressure wave emitted from long the ballast track tunnels becomes smaller than that emitted from the long slab track tunnels by the effect of the distortion of a compression wave propagating through the tunnels. In this study, the effect of spreading ballast on the slab track in the tunnel on the reduction of the micro-pressure wave is investigated by conducting four series of field measurement and numerical analysis. The results show that the ballasting is one of the useful countermeasures for complementing the frequently applied ones such as a tunnel entrance hood.

キーワード：トンネル微気圧波，速度向上，スラブ軌道，バラスト敷設，緩衝工

1. はじめに

列車が高速でトンネルに突入すると列車退出側の坑口からパルス状の圧力波（トンネル微気圧波）が放射される¹⁾。微気圧波が大きくなると、トンネル坑口付近で衝撃音が発生したり、坑口近傍の家屋の建具をがたつかせたりすることがあり、高速鉄道における環境問題の一つとなることがある。微気圧波の現象は、(1) 列車のトンネル突入時の圧縮波の形成、(2) トンネル内の圧縮波の伝播、(3) トンネル坑口からの微気圧波の放射の三段階に分けることができる。そして、微気圧波の大きさ（パルスのピーク値）は、坑口に到達したトンネル内の圧縮波の波面圧力勾配最大値に比例する。砕石を敷設したバラスト軌道のトンネルではトンネル内伝播過程において圧縮波の波面が緩やかになるため、トンネルが長いほど微気圧波は小さくなる^{1) 2)}。しかしながらコンクリート製のスラブ軌道が敷設されたトンネルにおいては、圧縮波の波面は非線形効果により急峻化するため、一般に微気圧波はトンネルが長いほど大きくなる。

これまで微気圧波の低減対策は、緩衝工のトンネル坑口への設置¹⁾や列車先頭部の延伸・形状の最適化³⁾など、列車のトンネル突入時に圧縮波の波面圧力勾配を低減させる対策が主に行われてきた。しかしながら今後の新幹線速度向上のためには、これまでの対策を補完する対策も求められることが考えられる。

そこで本研究では、圧縮波がトンネル内を伝播する段階での対策として、新幹線のスラブ軌道トンネル内にバラストを敷設し、その微気圧波低減効果を現地測定により調べた。さらに、バラストを敷設したスラブ軌道トンネル内を伝播する圧縮波の数値解析方法を検討した。そして数値解析を用いて実トンネルにおける速度向上を想定した検討を実施し、微気圧波対策としてのスラブ軌道トンネル内バラスト敷設の効果を調べた。

2. 現地測定

2.1 現地測定方法

スラブ軌道トンネル内へのバラスト敷設による微気圧波低減効果を現地測定により調べた。本現地測定は、図1に示すように新幹線のスラブ軌道トンネル（断面積約61.9 m²，全長約3.3 km，両坑口に長さ18 mの緩衝工を設置）において実施した。バラスト敷設条件については、バラスト敷設無し、およびバラスト敷設 Step 1，Step 2，Step 3の四段階とし、そのそれぞれの段階で現地測定を実施した。

図2にバラストの敷設状況の写真、図3に現地測定の概要を示す。現地測定を実施したトンネルは、両坑口から200 mの区間を除き枠形スラブ軌道⁴⁾（図2 (a)）が敷設されており、バラストの敷設は、この枠形スラブ軌道の区間において実施された。列車通過に伴う空気の流れによるバラスト飛散の防止のため、網袋（砕石バッグ，線路方向長さ580 mm × マクラギ方向幅200 mm × 厚さ100 mm）にバラストを詰め、それを固定して並べる

* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

** 東日本旅客鉄道株式会社（現 東鉄工業株式会社）

*** 東日本旅客鉄道株式会社

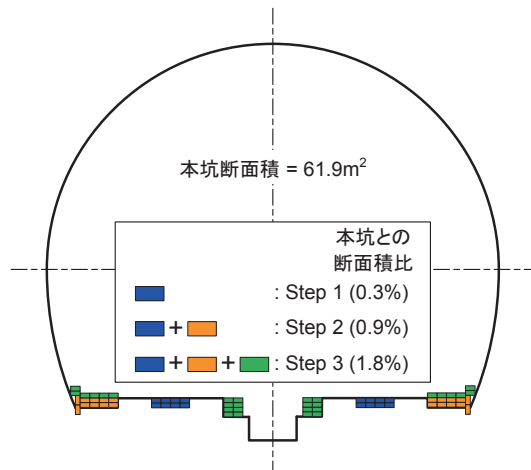


図1 バラスト敷設条件

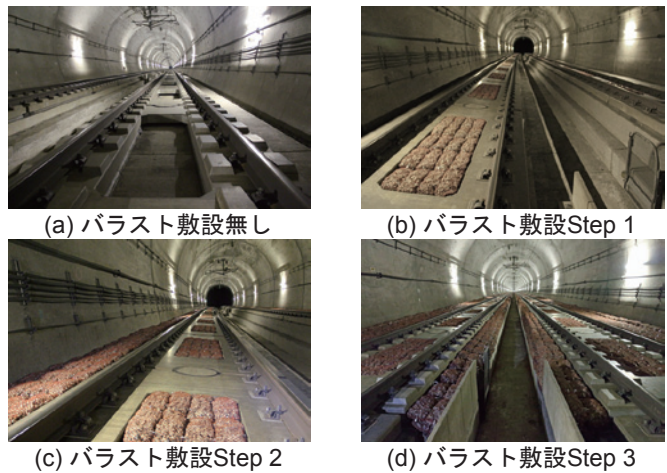


図2 バラスト敷設状況

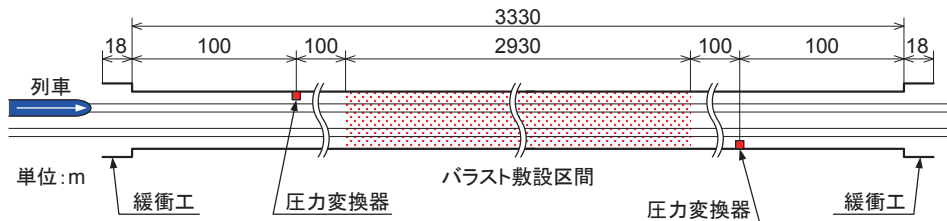


図3 現地測定の概要

方法でバラストを敷設した。バラスト敷設 Step 1 (図1, 図2 (b)) では、枠形スラブ軌道の枠内だけにバラストを充填した。すなわち、バラストは線路方向に連続的ではなく離散的に敷設されたことになる。バラスト敷設 Step 2 (図1, 図2 (c)) では、Step 1に加えてトンネル側壁側のスラブ軌道脇の路盤上にバラストを敷設した。さらにバラスト敷設 Step 3 (図1, 図2 (d)) では、Step 2よりトンネル側壁側のバラスト敷設量を増やすとともに、スラブ軌道脇中央通路側にもバラストを敷設した。敷設したバラストの層とトンネル本坑の断面積の比を図1に示す。ここで、枠形スラブ軌道の枠内に離散的に敷設したバラストについてはトンネル長手方向に連続的に敷設された場合の平均厚さに換算し、断面積を定義した。なお、別途実施した測定により、敷設したバラスト層の空隙率は0.56～0.60である。

列車のトンネル突入速度 U は、トンネル緩衝工口付近のレール側面に設置した車軸検知装置(カネコ, KS828)の車輪通過出力信号を用いて求めた。列車のトンネル突入により形成されトンネル内を伝播する圧縮波の圧力 p は、圧力変換器(SSK DP8H-01, レンジ: 1013 hPa ± 10 kPa, 固有振動数: 2.4 kHz)を用いて測定した。そしてこの圧縮波の波形から、波面圧力勾配最大値の変化を求め、スラブ軌道トンネル内バラスト敷設の微気圧波低減効果を調べた。

2.2 現地測定結果

現地測定で得られたトンネル内の圧縮波の波形の例を図4に示す。この波形例は、列車が起点側坑口(入口)から突入(図3において左から右へ走行)したときのものである。図4(a)～(d)の各図において、左側はトンネル入口側の測定点、右側は出口側の測定点のものである。入口側の測定点では圧縮波による圧力の上昇(図4(a)中C)に続いて列車先頭部の測定点通過による圧力変動(図4(a)中N)が観測される。また、出口側の測定点では圧縮波による圧力の上昇に続いてトンネル坑口からの反射波(図4(a)中R)が観測される。

図4より、列車のトンネル突入によりトンネル内に形成される圧縮波は、反対側の坑口(終点方坑口, 出口)まで伝播する過程で減衰し、圧力 p の上昇量は小さくなるのがわかる。しかしながら圧縮波の波面は非線形効果により急峻化し、圧力勾配 $\partial p / \partial t$ が増加する。また、スラブ軌道トンネル内にバラストを敷設することにより、圧縮波のトンネル内伝播過程における波面の急峻化が抑えられているのがわかる。

現地測定によって得られた圧縮波の波面圧力勾配最大値 $(\partial p / \partial t)_{\max}$ の変化を図5に示す。この圧縮波の波面圧力勾配最大値の変化を、微気圧波の予測に用いている圧縮波の伝播に関する経験式である式(1)、式(2)で近似する。

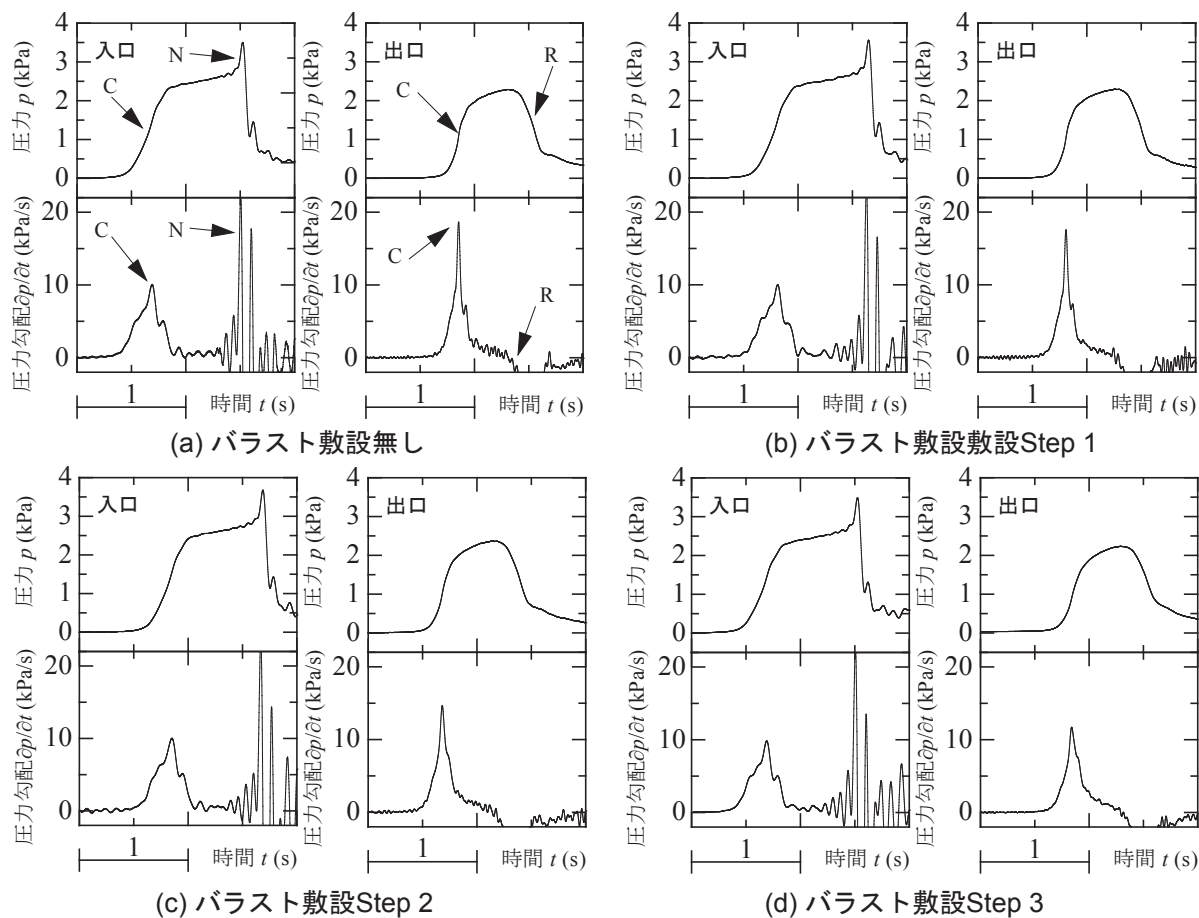


図4 圧縮波の波形例 (列車速度：約 315 km/h)

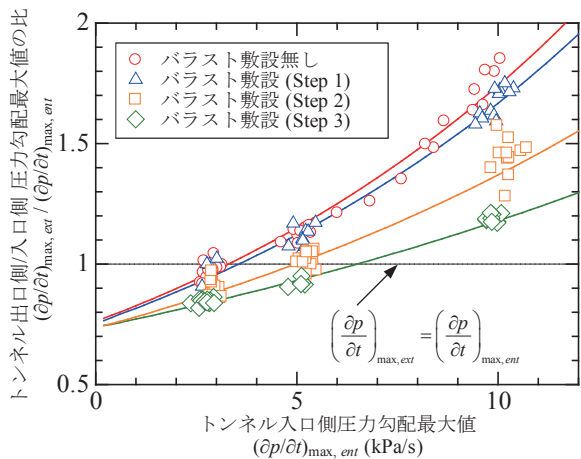


図5 圧縮波の波面圧力勾配最大値の変化

$$\frac{\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max,x}}{\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max,ent}} = \frac{G_x}{G_{ent}} = \exp\{(G_{ent} - G_{crit})\alpha X\} \quad (1)$$

$$G_x = \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max,x}}{\rho \frac{c^3}{d_H}}, \quad G_{ent} = \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max,ent}}{\rho \frac{c^3}{d_H}}, \quad G_{crit} = \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max,crit}}{\rho \frac{c^3}{d_H}} \quad (2)$$

ただし、 G ：無次元圧縮波の波面圧力勾配最大値、 X ：圧縮波無次元伝播距離 ($=x/d_H$, x ：圧縮波伝播距離, d_H ：トンネル水力直径 = 7.9 m)、 α ：急峻化係数、 ρ ：空気密度、 c ：音速である。添え字は、 x ：伝播距離 x における値、 ent ：列車突入坑口側における値、 $crit$ ：臨界値を表す。式(1)は圧縮波の波面圧力勾配最大値 $(\partial p/\partial t)_{\max}$ の変化が圧縮波の波形に依存せず、 $(\partial p/\partial t)_{\max}$ の初期値 $(\partial p/\partial t)_{\max,ent}$ のみに依存するという仮定、およびトンネル内伝播にともない $(\partial p/\partial t)_{\max}$ が指数関数的に増加すること、 $(\partial p/\partial t)_{\max,ent}$ がある値 $(\partial p/\partial t)_{\max,crit}$ を超えないと波面が急峻化しないことに基づいている。

圧縮波のトンネル内を伝播による波面圧力勾配最大値 $(\partial p/\partial t)_{\max}$ の変化を式(1)、式(2)にあてはめて最小二乗近似した結果を図5中に曲線で示す。図5より、Step 1, Step 2, Step 3 とバラスト敷設量の増加により、圧縮波の波面の急峻化が抑制されることがわかる。スラブ軌道トンネル内バラスト敷設による微気圧波低減効果を、圧縮波の波面圧力勾配の増大の差から図5より評価すると、たとえばトンネルの列車突入坑口側における圧縮波の波面圧力勾配最大値 $(\partial p/\partial t)_{\max,ent}$ が 10 kPa/s のとき、バラスト敷設 Step 1 で約 4%、Step 2 で約 20%、Step 3 で約 30% の微気圧波低減効果が得られている。

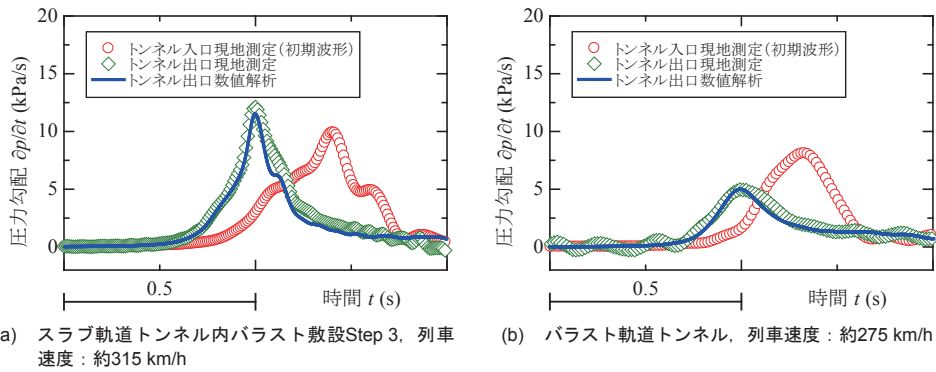


図6 現地測定結果と数値解析結果の比較例（圧縮波の圧力勾配波形の変形）

3. 数値解析

3.1 数値解析方法

バラスト敷設による微気圧波対策の効果を波形レベルで予測するため、バラストを敷設したスラブ軌道トンネル内を伝播する圧縮波の数値解析方法を検討した。鉄道総研で開発したトンネル内を伝播する圧縮波の数値解析法⁵⁾では、トンネル壁面の摩擦および熱伝達の効果が考慮されている。この数値解析の基礎方程式において、トンネル壁面摩擦は定常摩擦項と非定常摩擦項の和として記述されている。また、トンネル側壁の片側または両側に約500m間隔で設置されている器材坑の効果^{1) 6)}を考慮している。

本研究では、既報^{2) 6)}と同様にトンネル内に敷設されたバラストの効果を非定常摩擦項の効果に置き換えることを試みた。ただし、既報^{2) 6)}では定常摩擦項として乱流型定常摩擦項が用いられているが、本研究では文献⁵⁾で得られた知見に基づき、層流型摩擦項を用いた。そしてスラブ軌道トンネル（バラスト敷設無し）、スラブ軌道トンネル内バラスト敷設 Step 1, Step 2, Step 3だけでなくバラスト軌道トンネル（長さ約4km、本坑断面積62.9m²、両坑口にトンネル緩衝工無し、バラストと本坑の断面積比約10%）についても現地測定結果と数値解析結果を比較した。バラスト軌道トンネルに関する現地測定の詳細については、文献^{2) 6)}を参照されたい。

3.2 数値解析結果

現地測定および数値解析で得られた圧縮波の圧力勾配波形の例（スラブ軌道トンネル内バラスト敷設 Step 3 およびバラスト軌道トンネル）を図6に示す。また、数値解析結果と現地測定結果の比較により決定した非定常摩擦項のパラメータ ϵ_{us} とバラスト・本坑断面積比の関係を図7に示す。図6および図7より、非定常摩擦項のパラメータ ϵ_{us} を適切に設定することによりトンネル内に敷設されたバラストの効果を模擬することができること、敷設されたバラストの断面積の増加とともに、非定常摩擦項のパラメータ ϵ_{us} が増加することがわかる。

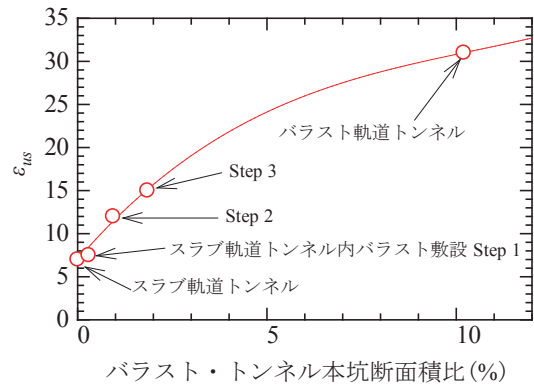


図7 定常摩擦項パラメータ ϵ_{us} とバラスト・トンネル断面積比の関係

4. 実トンネルへの適用の効果

新幹線の速度向上（速度 U を現状の260 km/h から320 km/h または360 km/h へ向上）を想定し、実際のスラブ軌道トンネルにバラストを敷設したときの微気圧波低減効果とそのときに現状非悪化となるために必要なトンネル緩衝工の長さを数値解析により調べ、微気圧波対策としてのスラブ軌道トンネル内バラスト敷設の効果を評価した。検討対象のトンネルの概要を表1に示す。ここで、速度向上前の条件として以下のものを想定する。

- 列車速度 U : 260 km/h
- トンネル緩衝工開口部 : I型車両（先頭部長9.1 m）に合わせて調整済み（現状開口部）
- 速度向上時導入車両 : II型車両（先頭部長15 m）
- 微気圧波現状値 : II型車両が現状長さ、開口部のトンネル緩衝工が設置されたトンネルに $U = 260$ km/h で突入したときの値（トンネルによって異なる）

トンネル坑口から放射される微気圧波の大きさ（ピーク値）は、トンネル坑口における圧縮波の波面圧力勾配最大値にほぼ比例するので¹⁾、本検討では微気圧波の大きさの比較を微気圧波放射坑口における圧縮波の波面圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{\max, \text{est}}$ の比較に置き換えて考える。そして、列車のトンネル突入時の圧縮波の波形をボストン大学

表1 検討対象のトンネルの条件

トンネル名	トンネル全長 (km)	トンネル緩衝工			
		起点側坑口		終点方坑口	
		長さ (m)	開口部設置側面*	長さ (m)	開口部設置側面*
A	3.8	12	遠隔側	24	遠隔側
B	4.3	23	遠隔側	19	遠隔側
C	2.3	13	近接側	13	近接側

*: 突入する列車から見たトンネル緩衝工側面開口部位置

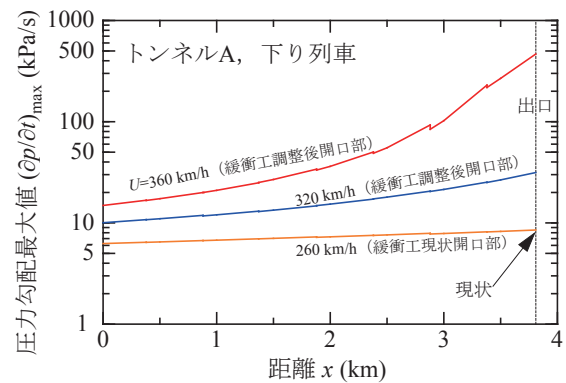


図8 トンネルAにおいて現状の緩衝工長(12 m)設置時のトンネル内伝播にともなう圧縮波の波面圧力勾配最大値の変化の例(数値解析結果)

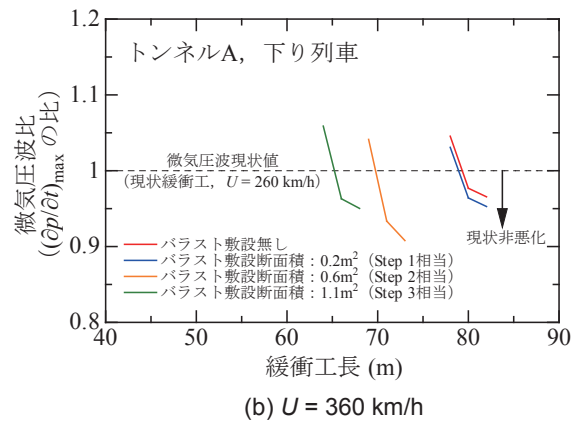
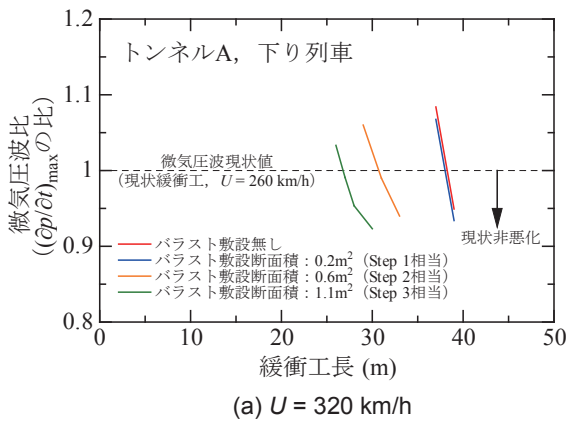


図9 微気圧波の大きさとトンネル緩衝工の長さの関係の例(トンネルA, 下り列車)

と鉄道総研が共同で開発した圧縮波高速計算法⁷⁾で求める。トンネル内を伝播する圧縮波の波形の変形は第3章で述べた方法を用いて求め、以下の手順で検討を行った。

- (i) 現状の長さ(表1)、現状開口部のトンネル緩衝工が設置されている各トンネルにII型車両が速度260 km/hで突入したときの、微気圧波放射坑口における圧縮波の波面圧力勾配最大値を求める。この値を微気圧波放射坑口における圧縮波の波面圧力勾配最大値の現状値とする。
- (ii) 現状長さのトンネル緩衝工について、列車速度320 km/hで側面開口部の全開閉パターンでの圧縮波形を求め、列車突入側坑口において最も圧縮波の波面圧力勾配最大値が小さくなる開閉パターンを求める。
- (iii) 上記(ii)で決定したトンネル緩衝工側面開口部の各トンネルにII型車両が列車速度320 km/hおよび360 km/hで突入したときの微気圧波放射坑口における圧縮波の波面圧力勾配最大値を求める。
- (iv) 上記(iii)で求めた値は現状値よりも大きいので、トンネル緩衝工の延伸およびトンネル内バラスト敷設による対策の検討を実施する。
- (v) 各トンネル内にバラストを敷設していないとき、およびStep 1～Step 3相当の量のバラストをトンネル全長

にわたって敷設したときの条件下で、トンネル緩衝工の長さを変えながら、圧縮波の形成および圧縮波の伝播の解析を実施する。次に微気圧波放射坑口における圧縮波の波面圧力勾配最大値が現状非悪化となるトンネル緩衝工の長さを求める。このとき、側面開口部の開閉パターンは列車速度320 km/hおよび360 km/hそれぞれについて列車突入側坑口において最も圧縮波の波面圧力勾配最大値が小さくなるように決定する。

検討結果の例として、トンネルA(トンネル緩衝工の現状の長さ: 入口12 m, 出口24 m)について述べる。伝播にともなう圧縮波の波面圧力勾配最大値 $((dp/dt)_{max})$ の変化を図8に示す。速度260 km/hにおけるトンネル緩衝工の開口部が現状の場合のトンネル出口の $((dp/dt)_{max})$ の値が、上記(i)で述べた圧縮波の波面圧力勾配最大値の現状値となり、速度向上時における現状非悪化の基準となる。また図8中の速度320 km/hおよび360 km/hのときのトンネル出口の $((dp/dt)_{max})$ の値は、上記(iv)で述べたように圧縮波の波面圧力勾配最大値の現状値よりも大きいことがわかる。このことから、列車速度を320 km/hまたは360 km/hへ向上させると、トンネル緩衝工の側面開口部の調整のみでは、微気圧波の大きさは現状非悪化とはならないことになる。

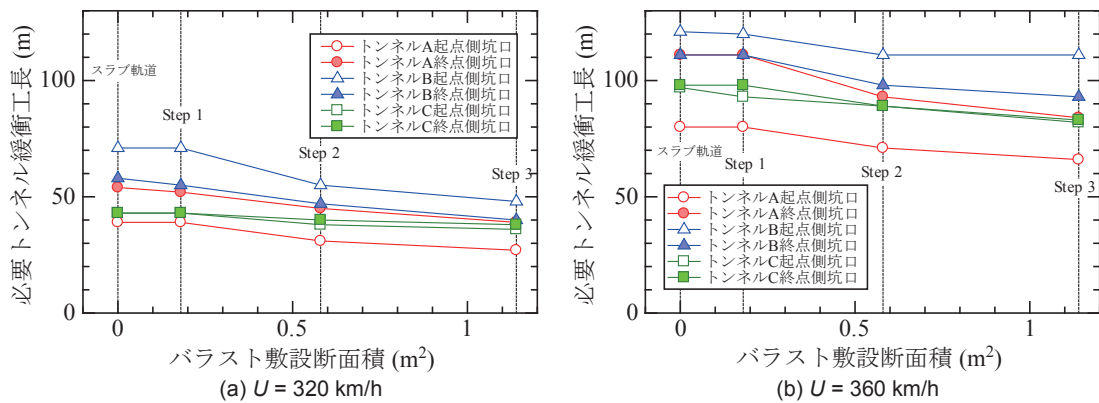


図 10 速度向上時に微気圧波の大きさを現状非悪化とするために必要なトンネル緩衝工の長さの検討結果

トンネル内バラスト敷設およびトンネル緩衝工の延長により微気圧波対策を実施したときの微気圧波の大きさとトンネル緩衝工の長さの関係を図9に示す。トンネル内バラスト敷設断面積が Step 1 相当の量（敷設断面積約 0.2 m²）では、微気圧波の大きさが現状非悪化となるために必要なトンネル緩衝工長（以下、必要緩衝工長）はバラスト敷設無しの場合とほとんど変わらないことがわかる。しかしながら、バラストの敷設断面積が Step 2 相当の量（敷設断面積約 0.6 m²）または Step 3 相当の量（敷設断面積約 1.1 m²）の場合には、バラストの敷設により必要トンネル緩衝工長をバラスト敷設無しの場合よりも短くできることがわかる。検討を実施した三トンネルについて、検討結果をまとめたものを図 10 に示す。列車速度 360 km/h でトンネル内バラスト敷設無しの場合には、必要トンネル緩衝工長が 100 m 前後と長大になること、トンネル内バラスト敷設に関しては、バラスト敷設断面積が Step 1 相当の量では必要トンネル緩衝工長はバラスト敷設無しの場合とほとんど変わらないこと、バラストの敷設断面積を Step 2 あるいは Step 3 相当の量にすると、必要トンネル緩衝工長をバラスト敷設無しよりも短縮できることがわかる。

5. まとめ

スラブ軌道トンネル内へのバラスト敷設によるトンネル坑口から放射される微気圧波対策の効果を、実トンネルにおいて実施した現地測定により調べた。さらに、スラブ軌道トンネル内バラスト敷設の効果を模擬する数値解析法を検討した。そしてその数値解析法を用い、実トンネルにおける速度向上を想定した検討を実施し、微気圧波対策としてのスラブ軌道トンネル内バラスト敷設の有用性を調べた。その結果を以下にまとめる。

(i) スラブ軌道トンネル内バラスト敷設時の現地測定結果より、バラストの敷設断面積の増加により圧縮波の波面の急峻化を抑えられ、微気圧波を低減できることを明らかにした。

(ii) 数値解析の支配方程式における非定常摩擦項のパラメータを適切に設定することにより、トンネル内バラスト敷設による微気圧波対策の検討を数値解析で実施することが可能となった。

(iii) 実トンネルを想定した検討の結果、スラブ軌道トンネル内バラスト敷設は、バラスト敷設断面積を十分に確保できる場合、必要トンネル緩衝工長をバラスト敷設無しよりも短縮することが可能である。

文献

- 1) 小沢智：トンネル出口微気圧波の研究，鉄道技術研究報告，No. 1121，1979
- 2) 宮地徳蔵，福田傑，小澤智：バラスト軌道トンネル内圧縮波の伝播の数値計算とその検証，鉄道総研報告，Vol. 21，No. 3，pp. 29-34，2007
- 3) 飯田雅宣，松村豪，福田傑，中谷浩二，前田達夫：トンネル微気圧波低減のための列車先頭部形状の最適化，日本機械学会論文集（B編），Vol. 62，No 596，pp. 1428-1435，1996
- 4) 羽賀修：スラブ軌道の今そしてこれから，日本鉄道施設協会誌，Vol. 38，No. 12，pp. 929-932，2000
- 5) Miyachi, T., Saito, S., Fukuda, T., Sakuma, Y., Ozawa, S., Arai, T., Sakaue, S. and Nakamura, S., "Propagation characteristics of tunnel compression waves with multiple peaks in the waveform of the pressure gradient (Part 1: Field measurements and mathematical model)," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 230, Issue 4, pp. 1297-1308, 2016.
- 6) Fukuda, T., Miyachi, T. and Iida, M., "Propagation of compression wave in a long slab-tracked tunnel and ballast-tracked tunnel," presented at the *12th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. 777-788, 2006.
- 7) Howe, M. S., Iida, M., Maeda, T. and Sakuma, Y., "Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 297, pp. 267-292, 2006.