

非定常音響解析によるトンネル微気圧波の予測

大久保 秀彦* 福田 傑* 宮地 徳蔵* 斉藤 実俊*

Prediction of the Micro-Pressure Waves Using an Unsteady Acoustic Analysis

Hidehiko OKUBO Takashi FUKUDA Tokuzo MIYACHI Sanetoshi SAITO

The micro-pressure waves (MPWs) radiated from the tunnel portal are numerically analyzed by the unsteady acoustic analysis. Two types of the hoods are considered. Each type of the hood is different in length and has different number of openings. First, the shape of the compression waves at the tunnel entrance are decided by the linear acoustic analysis. Next, the unsteady deformation of the compression waveform accompanying tunnel propagation is calculated by the 1D theoretical propagation equation. Finally, the radiated MPWs are calculated by point source approximation. From this research, it is shown that even if the difference in the waveform of the compression waves is slight at the tunnel entrance, it appears as considerable difference in peak value of the MPWs when the unsteady effects are considered.

キーワード：トンネル微気圧波，トンネル内圧縮波，非線形効果，非定常音響解析

1. はじめに

新幹線などの高速列車がトンネルに突入すると、トンネル内に圧縮波が形成される。この圧縮波はトンネル内を伝播し、反対側の坑口に達した際に一部が外にトンネル微気圧波^{1) 2)}（以後、微気圧波）として放射される。微気圧波は坑口近傍で破裂音や建具の振動といった環境問題を生じさせるため、今後、新幹線がさらなる高速化を図るためには、微気圧波の低減は解決しなければならない問題の一つである。

微気圧波の音圧のピーク値は、トンネル出口地点に到達した段階における圧縮波の波面圧力勾配最大値に比例する^{1) 2)}。そのため、代表的な微気圧波の低減対策である、列車先頭部の延伸・形状の最適化³⁾や、トンネル緩衝工（以後、緩衝工）の設置²⁾などは、圧縮波形成段階における波面圧力勾配最大値を小さくするものである。しかし、スラブ軌道が敷設されたトンネル内を圧縮波が伝播する場合は、非線形効果により圧縮波の勾配が急峻化する。さらに、新幹線の速度が向上した場合には、トンネル内に形成される圧縮波の圧力上昇量と圧力勾配最大値はさらに大きくなるため、この影響はさらに顕在化すると考えられる。そのため、微気圧波をより高精度に評価するためには、圧縮波のトンネル内伝播段階における非定常的な波形の変形も考慮する必要がある。以上のように、新幹線が高速化した場合には、微気圧波に関する現象はより複雑化すると考えられるため、これらを詳細に調査するためには、数値解析的アプローチが有効である。これまでに微気圧波に関して実施された数値解

析は、図1に示されるように、現象を三段階（①：圧縮波の形成、②：圧縮波の伝播、③：微気圧波の放射）に分け、特定の段階のみに焦点を当てた解析が行われてきた。例えば、①の圧縮波形成段階においては線形音響理論に基づく圧縮波高速計算法^{4) 5)}、②の圧縮波の伝播段階においては、一次元非定常圧縮性流れに関する各種保存式を連立させた数値解析⁶⁾および音響学的手法に基づく伝播解析^{7) 8)}、③の微気圧波の放射の段階においては、坑口からの放射を点音源近似でモデル化した手法¹⁾やトンネル坑口周りの地形の影響を考慮した解析⁹⁾などが代表的である。しかし、これらの研究事例のように、微気圧波の現象を構成する各段階における数値解析手法が確立されているにも関わらず、微気圧波に関する一連の現象を網羅できるような解析を行った事例は少ない。微気圧波一連の現象のパラメータスタディの結果は、データベースとしての活用が期待できるにもかかわらず、筆者が知る限りそれを行ったのは、文献2および文献10のみである。ただし、微気圧波の現象を体系的に理解するためには、さらに設定パラメータ数や試行数を増やす必要がある。そこで本研究では、異なる緩衝工条件および列車速度条件に対して圧縮波の形成、スラブ軌道トンネル内の圧縮波の伝播、微気圧波の放射に対してそれぞれ音響学的手法に基づく数値解析を実施し、微気圧波の現象を一連の非定常現象として総合的に解析した。

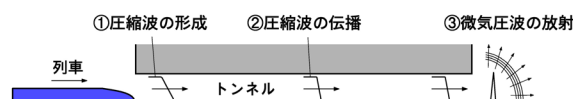


図1 微気圧波現象の段階

* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

2. 数値解析手法

2.1 圧縮波の形成

トンネル内の圧縮波形成時点の解析には、線形音響理論^{4) 5)}を用いる。解析条件を表1に示す。列車、トンネル、緩衝工の断面形状はそれぞれ円形と仮定し、地面の影響は鏡像法により考慮している。本研究の緩衝工は図2に示すように長さ $L=20\text{m}$ および $L=40\text{m}$ で、側壁に複数の開口部（横 $2.5\text{m} \times$ 縦 2.6m 、鏡像込み）が等間隔で配置された形状を考える。開口部の数は $L=20\text{m}$ の場合では最大で4個、 $L=40\text{m}$ の場合では最大で9個であり、各窓の全開、全閉の組み合わせパターンに関して解析を行う。また、列車の走行位置はトンネルおよび緩衝工の中心軸から水平方向に 2.16m 偏心（実際の新幹線の走行条件と同じ）させ、緩衝工の開口部は列車の走行位置から見て遠隔側の壁面に設けられているものとする。その他の条件として、緩衝工/トンネル本坑の断面積比は1.4、列車速度は $U=260\text{km/h}$ 、 320km/h 、 360km/h 、列車先頭部は長さ $l=15\text{m}$ の半回転楕円、列車とトンネルの断面積比は $\sigma=0.19$ に設定している。なお、 σ の値は、スノーブラウからの流れのはく離による断面積の見かけの増加¹¹⁾を考慮し、実際の新幹線よりも大きな値に設定している。

表1 圧縮波形成時における解析条件

列車速度 U (km/h)	260, 320, 360
列車断面積 (m^2)	12
先頭部形状	回転楕円
先頭部長さ l (m)	15
列車/トンネル断面積比 σ	0.19
偏心量 (m)	2.16
緩衝工長さ L (m)	20, 40
緩衝工/本坑断面積比	1.4

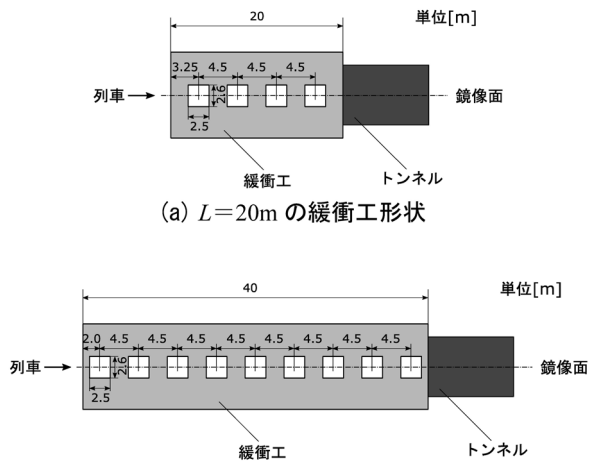


図2 緩衝工形状（鏡像込み）

2.2 圧縮波の伝播

トンネル内圧縮波の伝播解析には、一次元波動伝播の理論式^{7) 8)}である次式(1)を用いる。

$$\frac{\partial p^*}{\partial x^*} = \frac{\gamma+1}{2} p^* \frac{\partial p^*}{\partial t^*} - \alpha p^* - \beta \frac{2}{\pi} \int_0^t \frac{\partial p^*}{\partial t^*} \frac{1}{\sqrt{t^*-s}} ds. \quad (1)$$

ここで、 p^* : 無次元圧力、 x^* : 無次元座標、 γ : 比熱比、 t^* : 無次元時間である。なお、無次元化は式(2)で行っている。

$$t^* = \frac{t}{d_0/c_0}, \quad x^* = \frac{x}{d_0}, \quad p^* = \frac{p}{\gamma p_0}. \quad (2)$$

ここで、 d_0 : トンネル水力直径（トンネル断面を円管と見なした場合の直径に相当）、 c_0 : 音速（ 340m/s ）、 p_0 : 大気圧（ 101.3kPa ）であり、上付き添え字*は無次元量を表す。また、式(1)の右辺第二項と第三項の係数 α および β は式(3)、式(4)のように定義される。

$$\alpha = \left(1 + \frac{\gamma-1}{\text{Pr}^{2/3}}\right) \frac{16}{\text{Re}_c} \varepsilon_s, \quad (3)$$

$$\beta = \left(1 + \frac{\gamma-1}{\text{Pr}^{2/3}}\right) \frac{1}{\sqrt{\text{Re}_c}} \varepsilon_{us}. \quad (4)$$

ここで、 Pr : プラントル数、 Re_c : レイノルズ数（ $\text{Re}_c = c_0 d_0 / \nu$ 、 ν : 空気の動粘度）、 ε_s : 定常摩擦係数、 ε_{us} : 非定常摩擦係数である。なお、式(1)の右辺における α と β が関係する項は、圧縮波に作用するトンネル壁面からの摩擦の効果を表す。 ε_s と ε_{us} の値の設定に関しては文献7、文献8を参考にした。

圧縮波伝播時の数値解析で用いた解析条件を表2に示す。圧縮波の初期波形は、前節で述べた圧縮波形成段階における数値解析より出力された波形を用いた。また、図3に示すようにトンネル内には、 500m ピッチで2型器材坑（断面積： 7.1m^2 、奥行き： 5m ）、 1000m ピッチで1型器材坑（断面積： 7.1m^2 、奥行き： 3m ）を配置する。器材坑のある地点を圧縮波が通過する際の変形に関しては、平面波の伝播に対する音響学的な手法^{6) 7) 8)}を適用することにより計算する。

表2 圧縮波伝播時における解析条件

トンネル断面積 A (m^2)	63.4
トンネル水力直径 d_0 (m)	8.1
プラントル数 Pr	0.72
レイノルズ数 Re_c	1.8×10^8
定常摩擦係数 ε_s	1500
非定常摩擦係数 ε_{us}	5
空間刻み幅 Δx (m)	5, 10
時間刻み幅 Δt (s)	0.001
1型器材坑	1000mピッチ
2型器材坑	500mピッチ

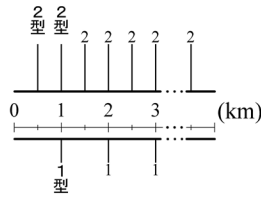


図3 器材坑の標準配置

2.3 微気圧波の放射

トンネル内を伝播してきた圧縮波がトンネル出口に達した際、微気圧波の音圧のピーク値 P_{max} とトンネル出口における圧縮波の圧力勾配最大値 $(\partial p / \partial t)_{max,Exit}$ との関係は、坑口からの圧力波の放射が点音源的なものであると仮定すると、次式により与えられる¹⁾。

$$P_{max} = \frac{2A}{\Omega c_0 r} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{max,Exit} \quad (5)$$

ここで、 A :トンネル断面積 (=63.4m²)、 Ω :放射立体角、 r :トンネル坑口から観測点までの距離 (=20m) である。なお、本研究ではトンネル出口に緩衝工は設置していないものと仮定している。また、放射立体角 Ω の値は、トンネル出口の地形に依存するが、本研究ではトンネル出口付近の地形を平面と仮定し、 $\Omega=2\pi$ と設定した。

3. 数値解析結果

3.1 圧縮波の生成に関する数値解析結果

圧縮波形成段階において、圧縮波波形の勾配最大値が小さくなる開口部の開閉パターンの上位三組を表3に示す。なお、同表中では開口部の開閉の状態を二進数表記で記述しており、図4に示すように、1であれば開、0であれば閉の状態を表す(図4に示しているのは、 $L=40m$ 、 $U=360km/h$ において最も圧力勾配最大値が小さくなるパターン)。まず、各条件の開閉パターンに着目すると、 $L=20m$ の緩衝工を設置した場合には列車速度が異なっても、上位三組の開閉パターンは変化していない。一方で、 $L=40m$ の緩衝工を設置した場合には、列車速度が異なると上位三組の開閉パターンが変化していることがわかる。このことは、緩衝工長さが同じ場合でも、他のパラメータ(本研究では列車速度)が異なる場合には、最適な開口部の開閉パターンが変化する可能性があることを示唆している。

図5に、表3で示したNo.1～No.3の開口部開閉パターンを適用した場合の圧力勾配波形を示す。なお、圧縮波形成段階における非線形の影響を考慮するため、圧縮波波形には式(6)～(8)で計算される、補正係数 c_r を乗じている。

$$c_r = \frac{\Delta p_{nl}}{\Delta p_l} \quad (6)$$

$$\Delta p_l = \frac{1}{2} \rho U^2 \frac{2R(1+R)}{1-M^2} \quad (7)$$

$$\Delta p_{nl} = \frac{1}{2} \rho U^2 \frac{1-(1-R)^2}{(1-M)(M+(1-R)^2)} \quad (8)$$

ここで、 ρ :空気密度、 U :列車速度、 R :ブロッケージ比、 M :マッハ数であり、式(7)は線形音響理論上のトンネル内圧力上昇量^{4) 5)}、式(8)は非線形の影響も考慮した場合のトンネル内圧力上昇量¹²⁾である。また、図4中には比較のために、緩衝工を設置しない場合の解析結果も示している。図5に示す結果より、緩衝工の有無による圧力勾配波形の差異は明らかであり、適切に開口部を配置した緩衝工を設置することにより、波形は台形状になる。その結果、 $L=20m$ の緩衝工を設置した場合には40%程度、 $L=40m$ の緩衝工を設置した場合には60%程度、緩衝工未設置の条件よりも圧力勾配波形の最大値が小さくなっている。一方で、開口部条件No.1～No.3の間の圧力勾配最大値の差異に着目すると、 $L=20m$ の場合では最大で6%程度の差、 $L=40m$ の場合では1%程度の差である。 $L=20m$ の場合で開口部条件ごとの差が大きい理由は、緩衝工長さが短い場合は一つの開口部が圧縮波に与える影響が相対的に大きくなるためであると考えられる。しかし、これらの差は緩衝工の有無や緩衝工長さの違いによる影響と比べると非常に小さい。そのため、短いトンネルの場合では、この程度の差であれば微気圧波に与える決定的な影響にはならないと考えられる。

表3 圧縮波形成時点において圧縮波の勾配最大値が小さくなる開口部開閉パターン(1:開, 0:閉)

(a) $L=20m$

		開口部 (←緩衝工口側, 本坑側→)			
$U=260km/h$	No. 1	1	1	1	1
	No. 2	0	1	1	1
	No. 3	1	0	1	1
$U=320km/h$	No. 1	1	1	1	1
	No. 2	0	1	1	1
	No. 3	1	0	1	1
$U=360km/h$	No. 1	1	1	1	1
	No. 2	0	1	1	1
	No. 3	1	0	1	1

(b) $L=40m$

		開口部 (←緩衝工口側, 本坑側→)								
$U=260km/h$	No. 1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
	No. 2	0	1	1	0	1	1	1	1	0
	No. 3	1	1	1	0	1	1	1	0	1
$U=320km/h$	No. 1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
	No. 2	1	1	0	1	1	1	1	0	1
	No. 3	1	1	1	1	0	1	1	0	1
$U=360km/h$	No. 1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
	No. 2	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	No. 3	0	0	1	1	1	1	1	0	1

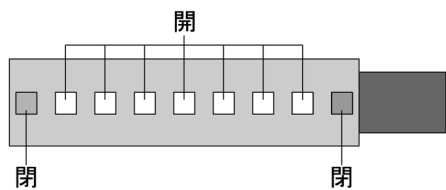
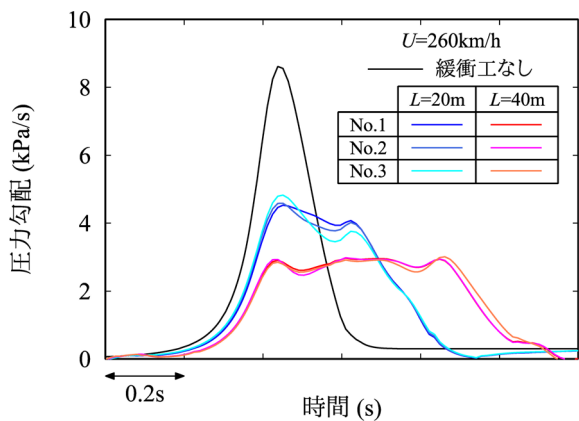
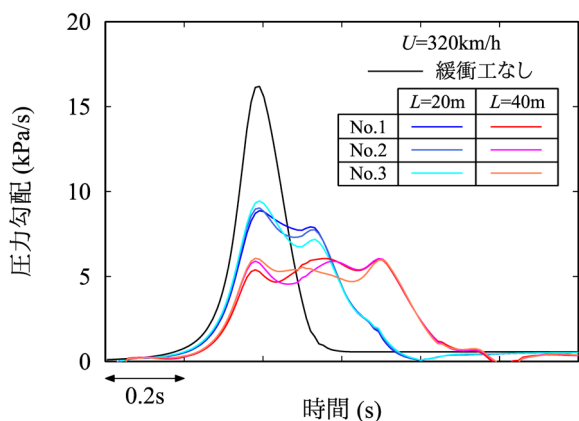


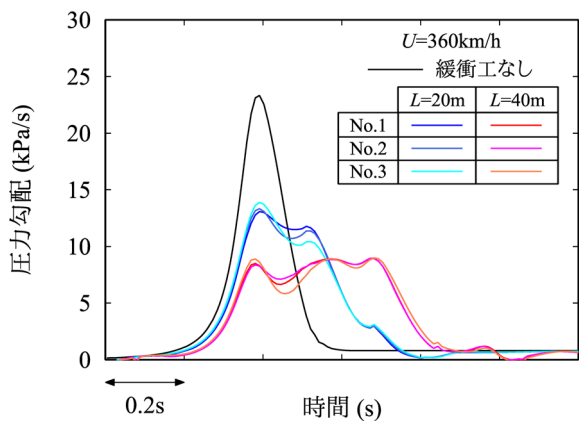
図4 緩衝工開口部開閉パターンの概略図
($L=40\text{m}$, $U=360\text{km/h}$ におけるNo.1開口部)



(a) $U=260\text{km/h}$



(b) $U=320\text{km/h}$



(c) $U=360\text{km/h}$

図5 圧縮波形成段階の圧力勾配波形

3.2 伝播に伴う微気圧波ピーク値の変化

前節で得られた波形を初期条件として式(1)を数値的に解くことにより圧縮波を伝播させ、さらにトンネル出口地点における圧縮波の圧力勾配最大値を式(5)に代入することにより、坑口から放射される微気圧波の音圧ピーク値を定量的に見積もることが可能である。図6にトンネル長さとして坑口から20m地点における微気圧波の音圧ピーク値の関係を示す。まず、図6(a)の列車速度が $U=260\text{km/h}$ の条件に着目すると、 $L=20\text{m}$ の緩衝工を設置した場合には、トンネル長さが20kmの場合において微気圧波のピーク値が最大となり、トンネル長さがそれよりも長くなると微気圧波は減少していることがわかる。これは、長距離を圧縮波が伝播する場合は、ある伝播距離において摩擦による圧縮波減衰の効果が、非線形効果による圧縮波急峻化の効果を上回るようになることに起因すると考えられる。これと同様の特性は、現地試験の結果⁸⁾でも確認されている。また、トンネル長さが20km付近の緩衝工開口部条件毎の差異に着目すると、微気圧波はNo.3の開口部条件で最も小さく、No.1の開口部条件で最も大きくなっている。さらに、この間の微気圧波ピーク値の差は20Pa以上あり、音圧としては顕著な差となっている。そのため、トンネル入口において微気圧波低減に最適であると考えられていた条件は、圧縮波の伝播段階の影響まで考慮すると必ずしも最適条件とはならないことがわかる。また、この事実は伝播に伴う非定常的な圧縮波の変形が、圧縮波の波形形状そのものに依存している可能性があることを示唆している。一方で、 $L=40\text{m}$ の緩衝工を設置した場合には、トンネル長さが20km~22.5kmの間で微気圧波の値が最大となっているが、 $L=20\text{m}$ の緩衝工の場合と比べると大幅に小さい。そのため、微気圧波に関する一連の非定常現象を総合的に解析しても、緩衝工の延伸が微気圧波低減に効果的であることがわかる。

次に、図6(b)と(c)に示す、列車速度が $U=320\text{km/h}$ および $U=360\text{km/h}$ の条件に着目すると、これらの条件では非線形効果による影響が顕著に表れており、トンネル長さがある値を超えると、微気圧波ピーク値が100Paを超過している。なお、圧縮波が過度に切り立つ場合には、式(5)の適用範囲外(過大評価)となるため、図6では縦軸の上限を100Paと設定している。図6(a)の列車速度が $U=260\text{km/h}$ の場合と同様に、 $L=40\text{m}$ の緩衝工を設置した場合には、 $L=20\text{m}$ の緩衝工を設置した場合に比べて微気圧波ピーク値が100Paに達するトンネル長さが長くなっており、 $U=320\text{km/h}$ の場合では約3km、 $U=360\text{km/h}$ の場合では約2kmの差異が生じている。そのため、このような高速度域においても緩衝工延伸によって、圧縮波伝播段階の非線形効果抑制が可能であることが確認できる。また緩衝工開口部条件の違いで

比較すると、列車速度が $U=320\text{km/h}$ かつ緩衝工長さが $L=40\text{m}$ の条件では開口部条件 No. 1 および No. 2 と開口部条件 No. 3 の間の結果に明確な差異が生じており、開口部条件 No. 3 の場合で微気圧波ピーク値が 100Pa に達するまでのトンネル長さが最も長くなっており、伝播時における波形依存性は、列車速度が速くなくても生じる可能性がある。以上を踏まえると、特に数 km 以上の長いトンネルにおいては、緩衝工の開口部は、圧縮波伝播特性の影響も考慮して総合的に決定するべきであるということがわかる。

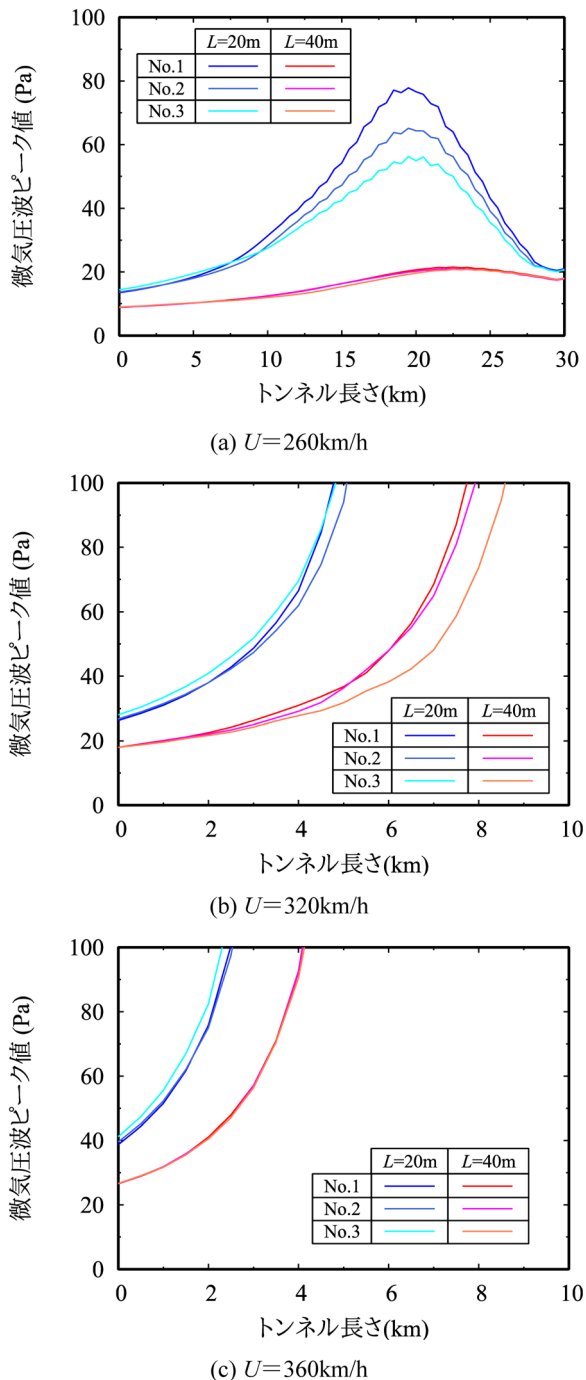


図6 トンネル長さと微気圧波ピーク値の関係

3.3 限界トンネル長さによる微気圧波の評価

前節より、列車速度が高速度域においては、トンネル長さが長くなると、伝播に伴う非線形効果によって、坑口から放射される微気圧波ピーク値は 100Pa を超えるような極めて大きな値になることがわかった。現在、坑口で破裂音が生じないための目安とされているのは、坑口から 20m 地点における微気圧波ピーク値が 50Pa 以下¹³⁾ である。そのため、微気圧波ピーク値が 100Pa となるような条件は、坑口で極めて大きな破裂音が生じてしまうことが懸念される。そこで、本研究では新たに、坑口から 20m 地点における微気圧波の音圧のピーク値が 50Pa 以下となる最大のトンネル長さを限界トンネル長さとして定義し、微気圧波の放射に関する評価指標として用いることとする。図7に、列車速度と限界トンネル長さの関係を示す。図7中に点で示しているのが数値解析結果、線で示しているのが式(9)～式(11)を連立し、伝播距離 x に関して列車速度 U の関数として解くことにより求めた予測式の結果である。

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max,0} = \frac{D}{D+L} \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max,0,\text{緩衝工なし}}, \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max,0,\text{緩衝工なし}} = \frac{U \Delta p_{nl}}{(l+8.9)\eta}, \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max,x} = \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max,0} \exp\left\{\left[\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max,0} - \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max,\text{cri}}\right]ax\right\}. \quad (11)$$

ここで、 $(\partial p/\partial t)_{\max,x}$: 伝播距離 x 地点の圧力勾配最大値、 $(\partial p/\partial t)_{\max,0}$: トンネル入口地点の圧力勾配最大値、 $(\partial p/\partial t)_{\max,0,\text{緩衝工なし}}$: 緩衝工未設置条件におけるトンネル入口地点の圧力勾配最大値、 $(\partial p/\partial t)_{\max,\text{cri}}$: 臨界圧力勾配最大値 (圧縮波波面が切り立つ最小の値)、 a : 圧縮波の波面の切り立ちを表す係数、 D : 緩衝工の特性長さ (最小二乗近似で決定) である。式(9)は緩衝工の圧力勾配低減効果を評価するために頻りに用いられており、式(10)中の η は列車先頭部の効率¹⁶⁾ を表す。式(11)は、伝播時の圧力勾配最大値の変化を示す経験式^{14) 15)} であり、 a および $(\partial p/\partial t)_{\max,\text{cri}}$ の値は、それぞれスラブ軌道トンネル内を伝播する条件に対応させるため、文献14、文献15を参考にし、 $a=0.027(\text{km} \cdot \text{kPa/s})^{-1}$ 、 $(\partial p/\partial t)_{\max,\text{cri}}=2.7\text{kPa}$ と設定した。式(11)からわかる通り、この予測式はトンネル入口の圧力勾配最大値に依存しており、波形依存性は考慮されていない。また、緩衝工 No. 1 開口部条件における D および η の値は $U=260\text{km/h}$ の場合では、 $D=33.2$ および $\eta=0.568$ 、 $U=320\text{km/h}$ の場合では $D=36.2$ および $\eta=0.566$ 、 $U=360\text{km/h}$ の場合では $D=38.5$ および $\eta=0.565$ であり、図7中に示す予測式ではこれら三つの列車速度条件の平均値を用いた。図7に示す結果より、限界トンネル長さは、列車速度の増加や緩衝工長さの減少により短くなり、緩衝工開口部条件が変化することによってこの値に差が生じる可能性があることが確認で

特集：空気力学・騒音

きる。ただし、これらの結果は、概ね先頭部長さ $l=15\text{m}$ の場合の予測式（図中には、 $l=12\text{m}$ および $l=18\text{m}$ の場合も示している。）の曲線上にプロットされている。そのため、トンネル入口地点における圧縮波のデータから、 D および η の値を算出しさえすれば、式 (11) により限界トンネル長さの近似値を見積もることができる。

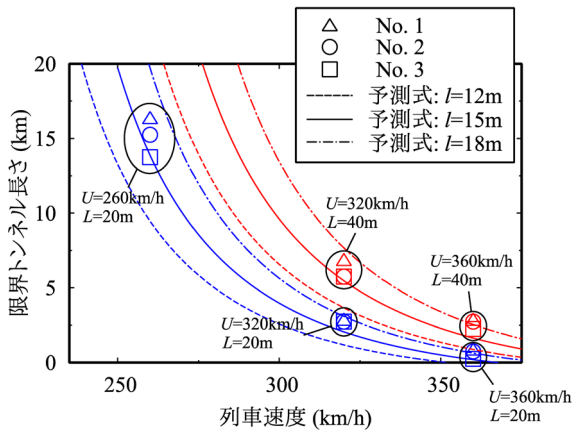


図7 列車速度と限界トンネル長さの関係
(青は $L=20\text{m}$ 、赤は $L=40\text{m}$ を表す)

4. まとめ

本研究では、圧縮波の形成、スラブ軌道トンネル内の圧縮波の伝播、微気圧波の放射に対してそれぞれ数値解析を実施し、微気圧波の現象を一連の非定常現象として総合的に解析した。得られた結果を以下にまとめる。

- (i) 圧縮波形成段階においては、適切に開口部を配置した緩衝工を設置することにより、圧縮波の勾配最大値を大幅に低減できる。列車先頭部形状が回転楕円の場合では、勾配最大値の低減効果は、緩衝工未設置条件から、 $L=20\text{m}$ の緩衝工では最大で 40%、 $L=40\text{m}$ の緩衝工では最大で 60% 程度である。
- (ii) 圧縮波伝播段階では、非線形効果により波形は急峻化するが、緩衝工の延伸によりその効果のある程度抑制することができる。
- (iii) 緩衝工開口部条件の影響は、圧縮波形成段階においては微小であったとしても、伝播段階の影響を考慮すると無視できない差になる可能性がある。
- (iv) 限界トンネル長さは、列車速度の増加や緩衝工長さの減少により短くなり、緩衝工開口部条件によって変化する場合もある。ただし、実験的予測式を用いてトンネル入口地点におけるデータからこの近似値を見積もることが可能である。

文献

- 1) 山本彬也：トンネル出口からの微気圧波，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
- 2) 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
- 3) 飯田雅宣ほか：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) Howe, M. S., et al. "Theoretical and experimental investigation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a flared portal," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 425, pp. 111-132, 2000.
- 5) Howe, M. S., et al. "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.
- 6) 福田傑ほか：長大スラブ軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形，日本機械学会論文集（B編），Vol. 72，No. 709，2005
- 7) 宮地徳蔵ほか：新幹線スラブ軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形の基礎方程式，日本機械学会論文集（B編），Vol. 78，2012
- 8) Miyachi, T., et al. "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.
- 9) 宮地徳蔵：トンネル坑口周りの地形を考慮した微気圧波放射モデル，鉄道総研報告，Vol. 24，No. 9，pp. 23-28，2010
- 10) 宮地徳蔵ほか：長大スラブ軌道トンネルにおける微気圧波低減方法に関するシミュレーション，環境工学総合シンポジウム講演論文集，2007
- 11) 福田傑ほか：列車トンネル突入時に形成される圧縮波の三次元・軸対称列車モデルを用いた実験，日本機械学会論文集（B編），Vol. 78，No. 793，2012
- 12) 原朝茂：列車が高速で隧道に突入する場合の流体力学的諸問題，鉄道技術研究報告，153，1960
- 13) 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計標準・同解説，pp. 119-120，2008
- 14) Miyachi, T., et al., "Numerical simulation of compression wave propagation in German slab-track tunnel," presented at the WCRR, Milan, Italy, 2016.
- 15) 中村真也ほか：トンネル緩衝工の長さの検討方法，鉄道総研報告，Vol. 32，No. 11，pp.47-52，2018
- 16) Miyachi, T., et al. "Nondimensional maximum pressure gradient of tunnel compression waves generated by offset running axisymmetric trains," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 157, pp. 223-35, 2016.