

# 狭小トンネルへの発破超低周波音消音装置の適用 —理論計算と実機試験による効果の検証—

Application of a Silencer for Infra-Sound from Blasting for a Narrow Tunnel  
(Verification of Effects by Theoretical Calculation and Actual Machine Test)

川 澄 卓 也 <sup>*1</sup> Takuya Kawasumi	岩 根 康 之 <sup>*1</sup> Yasuyuki Iwane	内 田 季 延 <sup>*1</sup> Hidenobu Uchida
小 林 真 人 <sup>*1</sup> Masahito Kobayashi	菅 原 健 <sup>*2</sup> Ken Sugawara	藤 本 克 郎 <sup>*2</sup> Katsurou Fujimoto

## 【要旨】

トンネル工事の発破掘削時に発生する超低周波音は、近隣建物の建具をがたつかせる要因となり問題となっている。そこで筆者らは、音響管の共鳴現象を利用した発破超低周波音消音装置（以下、消音装置）を開発し、施工中の大断面山岳トンネルにおいてその消音効果を確認した<sup>1)</sup>。この消音装置は音響管の対象周波数において大きな効果が見込めるものの、広帯域での効果は原理的に期待しにくい。一方、1次元音場に断面拡張・縮小部を設けることで広帯域での消音効果が得られることが一般的に知られており<sup>2)</sup>、トンネル騒音を対象とした計算事例も報告されている。そこで筆者らは、トンネルと消音装置の断面積比を確保し易い狭小断面水路トンネルにおいて、断面縮小部と音響管を併用した消音装置を設置することを想定し、適切な適用方法を検討するため理論計算を行った。その後、理論計算結果を基に行った実機試験により消音効果を調べた。本報では、これらの検討から得られた知見を報告する。

【キーワード】 発破超低周波音 消音装置 音響管 断面縮小 狭小トンネル

## 1. はじめに

トンネル工事の発破掘削時に発生する超低周波音は、近隣建物の建具をがたつかせる原因となり問題となっている。そこで筆者らは、音響管の共鳴現象を利用した消音装置を開発し、大断面山岳トンネルにおいてその消音効果を確認した<sup>1)</sup>。この消音装置は音響管の対象周波数において大きな効果が見込めるものの、広帯域での効果は原理的に期待しにくい。

一方、1次元音場に断面拡張・縮小部を設けることで広帯域での消音効果が得られることが一般的に知られてる。また、断面拡張・縮小部の長さ起因して、音響透過損失における周波数軸上に減衰の谷ができるが、これに適切な長さの音響管を併用することで消音効果のさらなる広帯域化が可能となる<sup>2)</sup>。

本報では、断面縮小と音響管を併用した消音装置をトンネル現場へ適用することを想定し、理論計算によりその消音効果を確認した。また、減衰の谷となる周波数の他に複数の音響管を追加し、有効な適用方法を検討した。その後、断面積比を確保し易い狭小断面水路トンネルにおいて、理論計算結果を基に設計した消音装置を適用し、消音効果の検証実験を行った結果について報告する。

## 2. 理論計算による事前検討

### 2.1 理論の概要

トンネル内の消音装置の配置を図-1に示す。トンネル（長さ $l$ 、断面積 $S_1$ ）の内部に消音装置（長さ $l_3$ ）を配置する。トンネルの一端は振動面（質量速度 $v_5$ ）である。消音装置の両端に複数の音響管が接続されており、その接続面 $x$ における $i$ 番目の音響管の長さ、断面積、音圧、質量速度、音響インピーダンスをそれぞれ $l_{xi}$ 、 $S_{xi}$ 、 $p_{xi}$ 、 $v_{xi}$ 、 $\zeta_{xi} = p_{xi}/v_{xi}$ と表す。どの面も剛であり、管内での音響散逸はない。その他の接続面での各値を図-1のように定義する。また、長さ $l$ の管の断面積を $S_1$ 、音速を $c_0$ 、その特性インピーダンスを $Y_1 = c_0/S_1$ と表す。

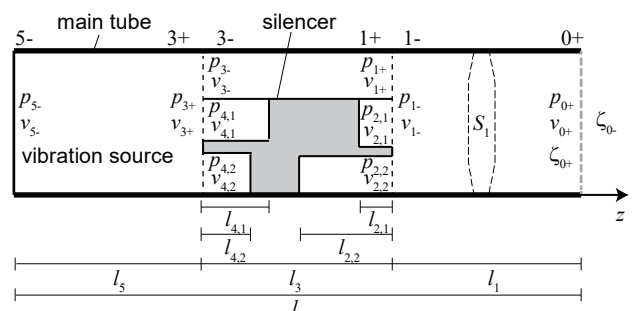


図-1 トンネル内の消音装置の配置

## 2.2 伝達行列による表現

各接続面での音圧と質量速度は、理論計算上では伝達行列を用いて以下のように表現することができる。

$$\begin{bmatrix} p_{0+} \\ v_{0+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \zeta_{0+} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ v_{0+} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} p_{1-} \\ v_{1-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl_1 & jY_1 \sin kl_1 \\ \frac{j}{Y_1} \sin kl_1 & \cos kl_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{0+} \\ v_{0+} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} p_{1+} \\ v_{1+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sum_{i=1}^{N_2} \frac{1}{\zeta_{2,i}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1-} \\ v_{1-} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} p_{2,i} \\ v_{2,i} \end{bmatrix} = p_{1-} \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{\zeta_{2,i}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} p_{3-} \\ v_{3-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl_3 & jY_3 \sin kl_3 \\ \frac{j}{Y_3} \sin kl_3 & \cos kl_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1+} \\ v_{1+} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} p_{3+} \\ v_{3+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sum_{i=1}^{N_4} \frac{1}{\zeta_{4,i}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{3-} \\ v_{3-} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} p_{4,i} \\ v_{4,i} \end{bmatrix} = p_{3-} \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{\zeta_{4,i}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} p_{5-} \\ v_{5-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl_5 & jY_5 \sin kl_5 \\ \frac{j}{Y_5} \sin kl_5 & \cos kl_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{3+} \\ v_{3+} \end{bmatrix} \quad (8)$$

これらの関係式を連立させて解くことで、すべての接続面における音圧と質量速度を求めることができる（例えば $v_{0+}$ を与えれば、全ての接続面における音圧と質量速度が順次算出できる）。本検討では、消音装置の有無によらず $v_5$ が一定であると仮定して計算した。また、解析周波数を0.1 Hz刻みとした。

## 2.3 音響透過損失の算出

接続面0+を無反射端とし、接続面5-, 0+における進行波音圧を $A_{5-}$ ,  $A_{0+}$ とすると、消音装置による音響透過損失 $TL$ は次式により表される。

$$TL = 10 \log_{10} \left| \frac{A_{5-}}{A_{0+}} \right|^2 \quad (9)$$

## 2.3 計算対象および検討方法

図-1において、主管、縮小部共に円形断面（それぞれ断面積 $S_1 = \pi r^2$ ,  $S_3 = \pi r_3^2$ ）を想定し、半径をそれぞれ $r = 2$  m,  $r_3 = 1$  mとし、主管の長さは $l = 40$  mとした。適用する現場における消音装置の大きさの制約を考慮し、縮小部の長さについては $l_3 = 10$  mに固定した。音響管は縮小部の両側に2本ずつ、計4本配置するものとし、1本あたりの面積を等しく $S_{2,1} = S_{2,2} = S_{4,1} = S_{4,2} = (S_1 - S_3) / 2$ とした。音響管の対象周波数は、DS雷管の起爆秒時差0.25 sに起因して卓越する4 Hz、縮小部の長さ起因して起こる減衰の谷となる16 Hz、これらに加え、効果の得たい超低周波数の8 Hz、6 Hzとした。

対象周波数の異なる音響管を設置し、各音響管の組み合わせ（計3通り）における音響透過損失を算出した。

## 2.4 結果と考察

音響管の組み合わせが音響透過損失 $TL$ に及ぼす影響を図-2に示す。断面縮小部と音響管を併用することで、トンネル断面の縮小部の場合に比べていずれの条件も音響透過損失の増加が認められ、より広帯域での消音効果が得られることを確認された。

各組み合わせにおける計算結果を比較すると同じ側に設置された音響管の対象周波数が近傍する場合、その周波数間の谷が深くなり、やや性能が低下する傾向が見られることが分かった。10 Hz以下の音響透過損失に着目すると、4 Hz、6 Hz管は5 Hz付近で、4 Hz、16 Hz管は7 Hz付近で消音効果がほとんど得られないことが確認された。このことから、10 Hz以下の超低周波数域で広帯域な消音効果を期待する場合、開口側に4, 8 Hz管、音源側に6, 16 Hz管を設置することが望ましいと言える。

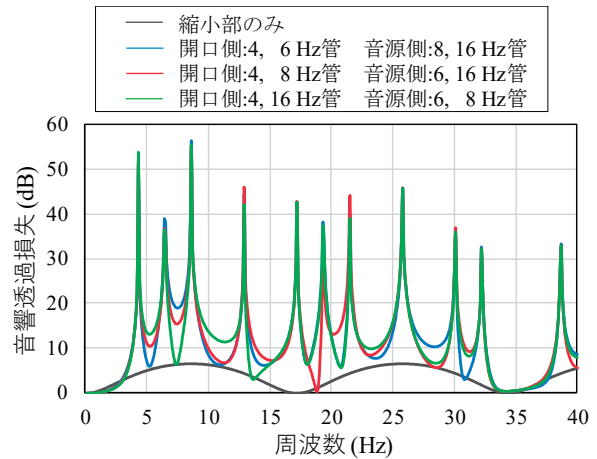


図-2 音響管の組み合わせが $TL$ に及ぼす影響

## 3. 実機試験による消音効果の検証

### 3.1 実機試験の概要

理論計算の結果から超低周波数領域において高い消音効果が期待できる消音装置を適用した実機試験を行った。試験は「平成28年度豊川用水二期東部幹線併設水路赤羽根下流工区工事」の下流区間にて行った。トンネルの内空断面は標準断面で約6 m<sup>2</sup>であり、NATMとしては極めて狭小である。図-3に消音装置の設置位置を示す。坑口から26.2 m区間は拡幅部となっているため、トンネルと消音装置の断面積比が確保しやすい、標準断面となる位置に音響管の端部が来るよう消音装置を配置した。また、坑口にはコンクリート吹付け式（ $t = 150$  mm）の防音扉を設置した。

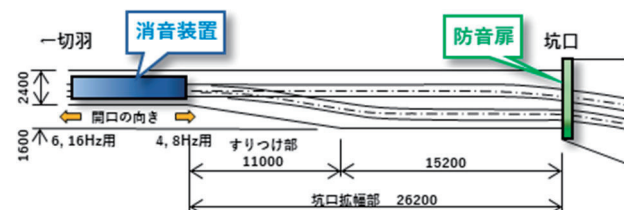


図-3 諸運装置の設置位置



図-4 測定位置

図-4に測定位置を示す。測定位置は坑口(A)と敷地境界に近い3地点(B~D)とした。各測定位置で測定した音圧レベルの最大値を評価量とし、消音装置がある場合で2回(No.1, No.2)、消音装置が無い場合で2回(No.3, No.4)の計4回測定し、消音効果の検証を行った。

### 3.2 消音装置の概要

表-1に音響管の諸元を示す。音響管の対象周波数は前節の理論計算で有効と考えた4Hz, 6Hz, 8Hz, 16Hzとした。トンネルの内空断面に対する各音響管の開口面積は約7%となっている。音響管の長さについて、開口端補正は $0.6r$ とした。ここで、 $r$ は開口面積 $S$ に対する等価半径 $\sqrt{S/\pi}$ である。4Hz, 6Hz用は管長が長いので折れ曲がり形状とし、8Hz, 16Hz用は直管形状とした。

図-5に消音装置の構造を示す。形状の異なる4本の音響管を、坑内外への移設が容易となるように、車輪のついた台車に搭載し、重機でけん引する構造とした。音響管の組み合わせについては、前節の理論計算結果から、開口側に4Hz, 8Hz管、音源側に6Hz, 16Hz管を設置することとした。また、消音装置は発破作業時に坑内に移設し、そのほかの作業中は仮設ヤードに仮置きした。

### 3.3 結果と考察

各測定位置における音圧レベルの測定結果を図-6に示す。図中のO.A.は2~20Hzの1/3オクターブバンドレベルのオーバーオール値である。消音装置を設置していないNo.3, No.4の結果を見ると、すべての測定位置において、4Hzと6.3Hzに2つピークが確認できる。4HzはDS雷管の起爆秒時差が0.25sに起因して卓越したと考えられる。また、6.3Hzにおいては、坑口拡幅部の長さが26.2mであり、これが6.3Hzの1/2波長に相当するため、この拡幅部がトンネル内で膨張型消音器として作用し、6.3Hzが透過率のピークとなった可能性がある。

消音装置の有無について測定結果を比較すると、4箇所の平均で4Hzは2.7dB、6.3Hzは7.2dB、8Hzは4.0dB低減している。また、O.A.においても3.0dB音圧レベルが低減したことが確認できる。これはトンネルの断面積に対する消音装置の断面積が35%程度であり、断面縮小による消音効果の広帯域化が寄与したと推察される。

表-1 音響管の諸元

対象周波数 $f$ (Hz)	開口面積 $S$ (m <sup>2</sup> )	長さ $l$ (m)	形状
4	0.405	21.253	折れ曲がり
6	0.420	14.093	折れ曲がり
8	0.420	10.515	直管
16	0.420	5.164	直管

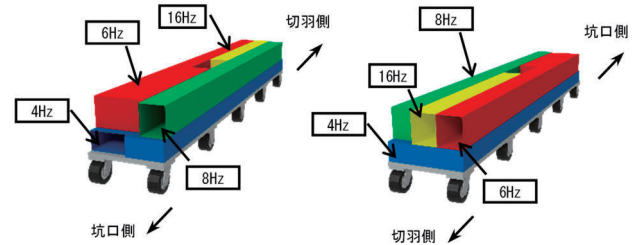


図-5 消音管の構造

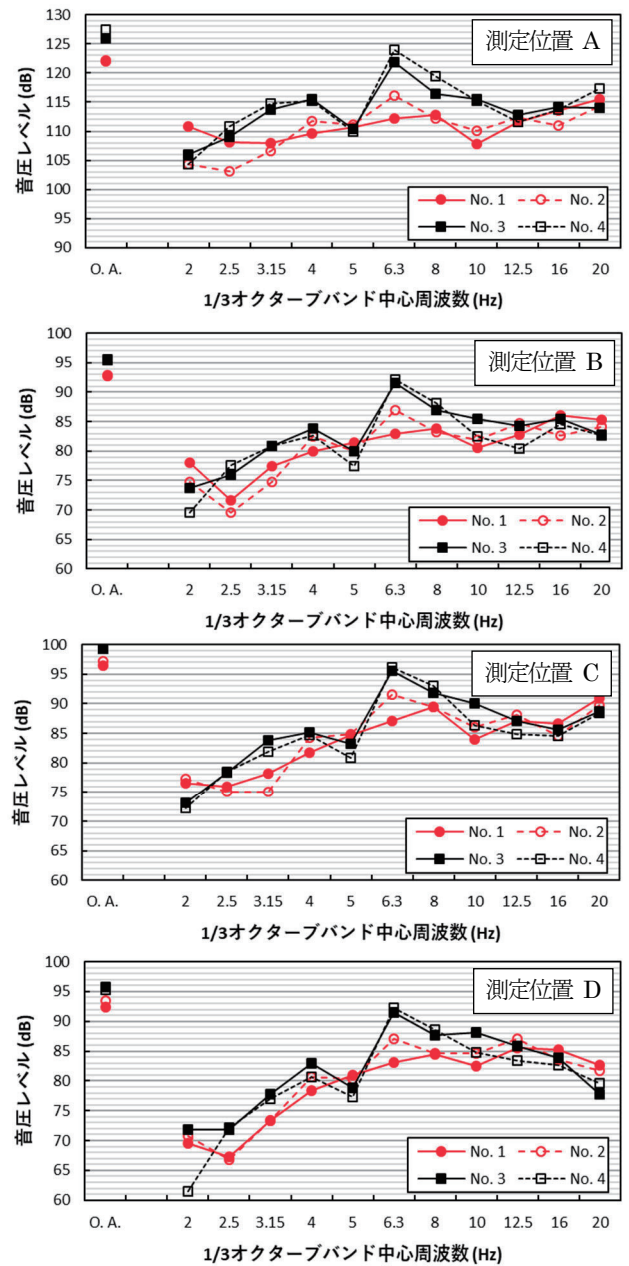


図-6 各測定位置での音圧レベル測定結果



一方、16 Hz においては明確な消音効果が認められなかった。音響管による消音効果は、設置位置に依存することが知られており<sup>3)</sup>、本試験では16 Hz用の音響管の開口部がトンネル内の音圧分布における節の位置と一致したことが影響したと推察される。

また、当該工事では、仮設備ヤード周辺の敷地境界(図-4のB, C, D)における超低周波音レベルの自主管理基準値を100 dB以下としている。低周波音レベル(図-6のO.A.値)は坑口の正面になる測定位置Cが最も大きく100 dB程度であったが、消音装置を設置することで3 dBの低減効果を得ており自主管理基準値を満足したことが確認できる。他の測定位置でも同様の効果が確認できる。

これらの結果から、消音装置を適用することで周辺家屋をがたつかせる原因となる超低周波音を低減し、自主管理基準値を遵守した発破掘削を行うことができた。

#### 4. まとめ

理論計算による事前検討により、対象周波数が異なる音響管を同一方向に向けて近接して設置すると、対象周波数間において、消音効果が低下することが分かった。

実機試験により、対象周波数とした4, 6, 8 Hzにおいて平均で3~7 dB程度の低減効果を確認した。同じく対象周波数である16 Hzにおいては明確な消音効果が得られなかった。その原因はトンネル内の音圧分布と音響管の開口位置の関係によるものと推察されたため、消音効果を高めるためには設置位置の変更が必要であることが示唆された。

#### 【参考文献】

- 1) 特集 トンネル発破における最新の防音対策技術, 騒音制御, 41 (6), pp.253-293, 2017
- 2) M. L. Munjal, Acoustics of ducts and mufflers (2nd Ed.), John Wiley & Sons Ltd, UK, 2014.
- 3) Y. Iwane, et al.: Study on reduction of tunnel blasting infrasound using silencer with tube resonators, Acoust. Sci. & Tech., 39 (6), pp. 428-431 (2018).

**Summary** Infra-sound produced from blasting during excavation in tunnel construction is deemed a problem because it rattles the furniture in neighboring buildings. Therefore, we developed a silencer for the Infra-sound from blasting by using the resonance phenomena of an acoustic tube, and verified the silencing effect in a large cross-sectional mountain tunnel under construction.<sup>1</sup> Although this silencer was predicted to provide a large effect in the frequency corresponding to the acoustic tube, the broadband effect was difficult to anticipate in principle. On the other hand, the silencing effect can be obtained by providing cross-sectional expansion and reduction parts in a one-dimensional acoustic field,<sup>2</sup> and the calculation results concerning tunnel noise are reported. Thus, we performed theoretical calculations to study the proper application method by assuming the installation of a silencer commonly using the cross-sectional reduction part and an acoustic tube in a narrow cross-sectional waterway tunnel where the cross-sectional area ratio of the tunnel and the silencer was easy to secure. We then studied the silencing effect in an actual machine test based on the theoretical calculation results. This paper reports the findings obtained from these studies.

**Key Words:** *Infra-sound from Blasting, Silencer, Acoustic Tube, Cross-Sectional Reduction, Narrow Tunnel*