

# 全周波数帯域に対応したトンネル発破消音器の開発

伊藤 哲・本田 泰大・木梨 秀雄

トンネルの発破音は、広い周波数帯域にわたり、衝撃的で非常に大きなエネルギーを発生する特徴がある。とくに低周波音は、窓やサッシなどの建具ががたつく物的苦情や不快感や耳鳴りなどが生じる心身にかかわる苦情の原因となることがある。従来はその対策として、コンクリート充填式や砂充填式の重厚な防音扉が用いられてきたが、低周波音の低減効果は小さかった。そこで、防音扉に替わる新技術として音響管を用いた消音器と平行吸音板を用いた消音器を併用した、全周波数帯域に対応する山岳トンネル発破消音器を開発した。山岳トンネル現場でその効果を検証したところ、16 Hz～4 kHz オクターブバンドで防音扉を上回る約 10～25 dB の低減効果が得られた。

キーワード：消音器，音響管，吸音材，低周波音，騒音，発破，山岳トンネル

## 1. はじめに

トンネルの発破は広い周波数帯域にわたり非常に大きなエネルギーを瞬間的に発生するため、発破音は周辺環境に大きな影響をおよぼす。とくに低周波音（100 Hz 以下の音）は、500 m 以上離れた民家でも窓やサッシなど建具のがたつきが発生する物的苦情や不快感、耳鳴りなどが発生する心身にかかわる苦情の原因となることがあるが、低周波音は 100 Hz 超の音に比べて坑内で減衰しにくい<sup>1)</sup>ため、掘削期間中は常時周辺環境に対する配慮が必要となる。従来の発破音対策は、コンクリート充填式や砂充填式の重厚な防音扉が用いられてきたが、既往の文献<sup>2)</sup>や著者らがトンネル現場で実施した測定結果によれば、防音扉による低周波音の低減効果は小さく、必ずしも有効な対策とは言えなかった。

著者らは、従来の防音扉に替わる低周波音を低減する新技術として、音響管を用いた消音器を開発した<sup>3)</sup>。この方式は、自動車のマフラーなどの定常的な騒音に対して利用されるもので、発破音のような衝撃性の音に対しては本技術が初めての適用である。しかし、トンネルで発破の低周波音を低減するには、音響管を非常に大きくする必要があるのであるため、その配置や構造を工夫した。それに加え、100 Hz 超の発破音を低減できる平行吸音板式消音器を設置して、全周波数帯域に対応した山岳トンネル発破消音器を開発した。本論文では、システムの概要と、縮尺模型実験による消音器の

開発、および山岳トンネル現場での適用事例について述べる。

## 2. トンネル発破消音器の概要

トンネルの発破音は低周波音から 100 Hz 超の音まで広範囲に及ぶため、本発破消音システムは、低周波音に対しては音響管を用いた消音器、100 Hz 超の音に対しては平行吸音板式消音器を用いた 2 種類の消音器による構成とした。以下に各消音器の概要を示す。

### (1) 低周波音対策（音響管式消音器）

低周波音を低減するために音響管を用いた消音器（以下音響管式消音器と記す）を開発した<sup>3)</sup>。その消音原理を図-1 に示す。片側を閉じた音響管に音波が入射すると、端部で反射波が生じる。管の長さを波長の 1/4 とすると、開口部付近の入射波（図-1 の実線）と反射波（図-1 の波線）が逆位相となり、相互に打ち消し合うことで低減効果が得られる。一方で、発破の低周波音は 100 Hz 以下の周波数帯域の騒

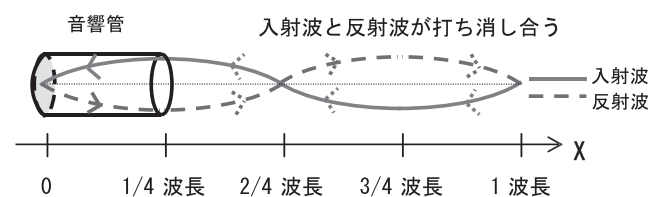


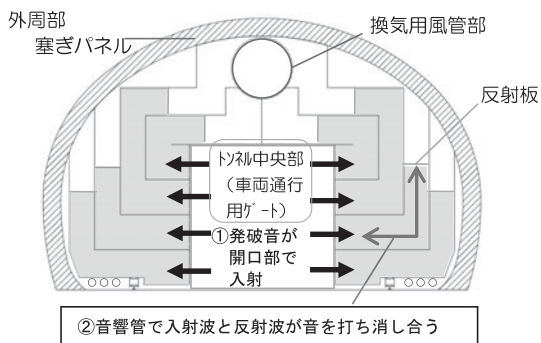
図-1 音響管式消音器の消音原理

音である。単体の音響管では特定の周波数でしか低減効果が得られないため、長さの異なる複数の音響管を組み合わせる構成とした。

写真一1に音響管式消音器の設置状況、図一2にその概要を示す。トンネル施工中に重機、車両が走行するトンネル中央部と換気用風管部分は開口しており、発破音はここを通過する。この開口に音響管を設置することで、発破音を低減する。一方、低周波音は波長が長く、音響管の長さは、18 Hzで約5mとなるため、図一2のように音響管をトンネル断面に収まるようにトンネル中央部の開口部から断面内で折り曲げた形状として配置した。なお、折曲げて低減効果の損失はない。音響管1本あたりは幅1m×高さ1mであり、同様の音響管をトンネル縦断方向の6mの範囲に配置して消音器を構成する。音響管の種類は、表一1のように16～63 Hz帯域の各周波数(1/3オクターブバンド)で低減効果が得られるように設定した。



写真一1 音響管式消音器の設置状況



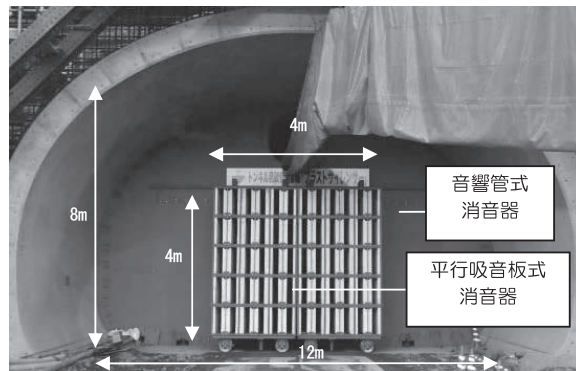
図一2 音響管式消音器の概要

表一1 共鳴周波数と音響管本数

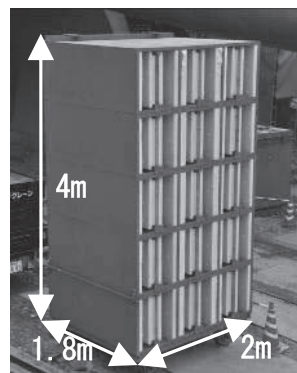
共鳴周波数 (Hz)	トンネル中央部						換気用風管部				
	63	40	36	28	25	20	18	63	45	30	18
音響管本数 (本)	4	2	2	3	5	4	4	2	1	2	1

(2) 100 Hz 超の発破音対策 (平行吸音板式消音器)

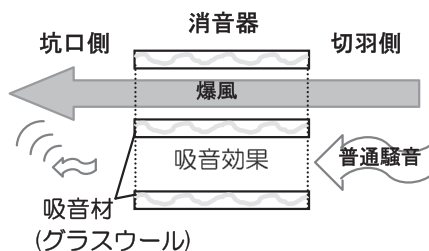
100 Hz 超の発破音の対策として、ダクトの内側に吸音材を貼り付けた平行吸音板式消音器を開発した<sup>4)</sup>。この消音器は、音響管式消音器の坑口側のトンネル中央部に設置する。幅4m×高さ4mと断面積が小さく設置・撤去が容易である。写真一2, 3に平行吸音板式消音器の設置状況を示す。幅2m×高さ4m×奥行き1.8mの箱形消音器2つから成る。幅0.3m×高さ0.8m×長さ1.8mのダクトを60本重ねた内側に、厚さ100mmの吸音材を貼付けた構造とした。部材は鋼板(t=2.3mm)とアングル(40mm×40mm×5mm)の組み合わせである。図一3に平行吸音板式消音器の消音原理を示す。100 Hz 超の発破音が消音器を通過する際、壁面の吸音材(グラスウール)に吸音され、騒音が低減する。従来の防音扉はトンネルの全断面を塞いで音を封じ込めるため、発破の爆風



写真一2 平行吸音板式消音器



写真一3 平行吸音板式消音器 (片側)



図一3 平行吸音板式消音器の消音原理

が扉をゆらして二次的な騒音が生じる問題があった。しかし、本消音器は爆風を坑外に通しながら騒音を低減できることから、この問題が解消する。また、音響管式消音器の開口部分は全断面の約25%であり、小さい面積の対策で効果が得られる。なお、本消音器1個の重量はグラスウールを含めて3tと軽量で、現場での主な設置作業はクレーンでの揚重作業のみである。本消音器は、発破時以外はレールにより左右に開放するため、掘削作業の妨げとならない。消音器の開閉は人力で行うことができる。

### 3. 音響管式消音器の縮尺模型実験

音響管式消音器の設計に際し、発破音に対する低減効果を確認するため、発破音を模した衝撃性の音源を用いた1/32縮尺の音響模型実験を実施した。設計は以下の3つの手順で行った。

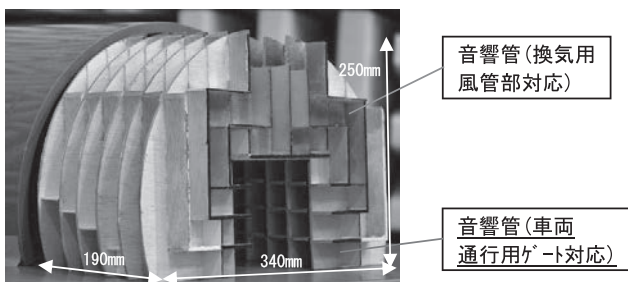
①各音響管の共鳴周波数の確認

折り曲げた音響管の縮尺模型とスピーカーおよびマイクロフォンを用いて、音響管の長さに対する共鳴周波数を確認する。

②音響管配列の設計

16～63 Hz 帯域 (1/3 オクターブ中心周波数) で低減効果を得られるよう、共鳴周波数の異なる様々な長さの音響管を組み合わせた配列ケースを検討する。

写真一四に音響管式消音器の縮尺模型を示す。

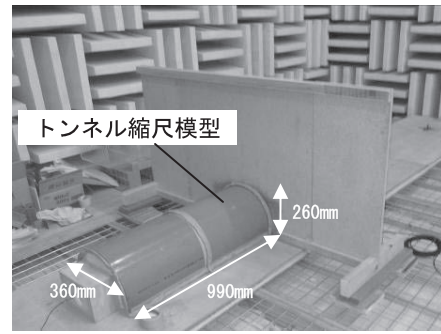


写真一四 音響管式消音器模型写真

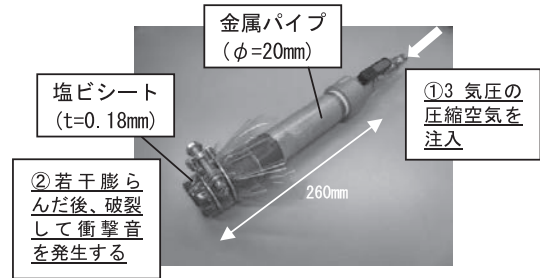
③縮尺模型による低減効果の確認

写真一五に示すトンネルの縮尺模型に、音響管式消音器の縮尺模型を挿入し、低減効果が最大となる音響管の長さや配置の最適化を図る。実験には、発破を模した音響模型用音源<sup>5)</sup>を用いた(写真一六)。

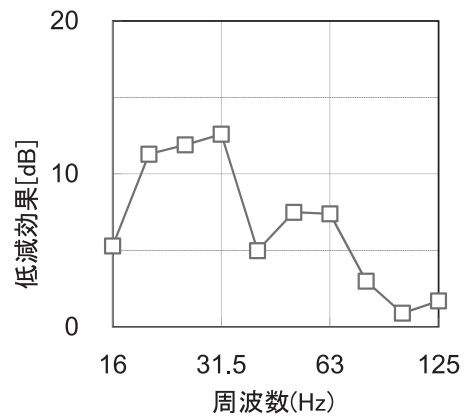
図一四に模型実験の低減効果の測定結果を示す。縮尺模型実験では対象周波数である16～63 Hz帯域で約5～13 dBの低減量が得られた。



写真一五 トンネルの縮尺模型写真



写真一六 音響模型用音源



図一四 音響管式消音器の低減効果(縮尺模型)

### 4. 山岳トンネル現場での適用

全周波数帯域消音システムを採用した事例の低減効果の検証結果を示す。消音器はトンネル坑口より8mの地点に設置した。写真一七、八に消音システムの設置状況を示す。



写真一七 坑口部の状況



写真一八 消音システム設置状況

(1) 測定条件

低減効果は、消音システムの設置前後の騒音測定値を比較することにより検証した。音源は実際の発破音と、発破音を模した広帯域衝撃性音源<sup>6)~8)</sup>(写真一九)の2種類で行った。表一2に騒音測定時の発破諸元を示す。切羽の状況により各発破の火薬量、発破条件が異なる。測定結果のばらつきの影響を排除するため、消音システムの設置前後で計4回測定した。図一5に騒音測定時の切羽と消音システムおよび音源と騒音測定点の位置関係を示す。騒音測定点P1は、坑口から30mの坑外の地点とした。



写真一九 広帯域衝撃性音源

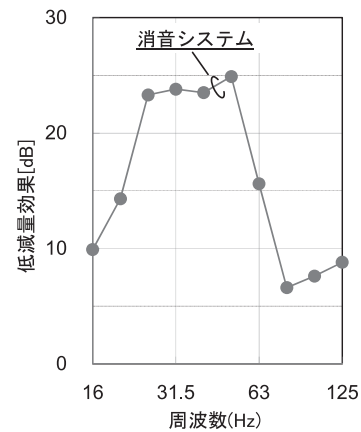
表一2 騒音測定時の発破諸元

	切羽位置	岩盤等級	雷管	全装薬量
消音器 設置前	坑口～ 約330m	D I	DS 電気雷管	約6kg
				約5kg
消音器 設置後	坑口～ 約330m	D I	DS 電気雷管	約7kg
				約7kg

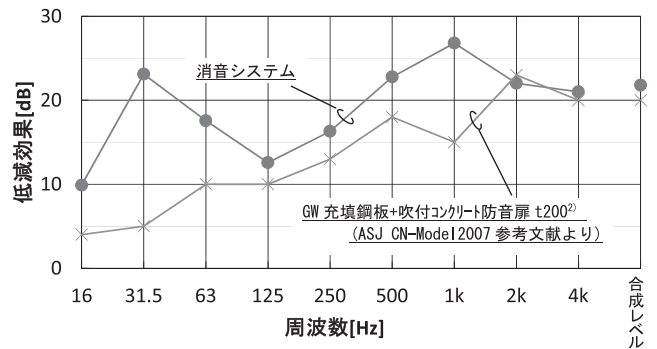
(2) 測定結果

低周波音は実発破の測定結果をもとに算出し、100 Hz以上の騒音は、暗騒音の影響を受けていたため広帯域衝撃性音源の測定結果をもとに算出した。全周波数帯域の測定データに対しては、一般的な騒音対策などで用いられるオクターブ分析を、低周波音に対しては環境省の低周波音の測定マニュアル<sup>9)</sup>に準じて、1/3オクターブ分析により詳細に行った。図一6に低周波数帯域における消音システムの低減効果を、図一7に100 Hz超の騒音を含む全周波数帯域の低減効果を示す。

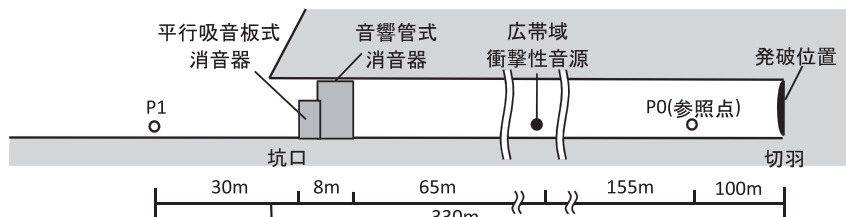
音響管式消音器の低減効果は、対象周波数である16～63 Hz帯域において、約10～25 dBであった。次に、全周波数帯域を見ると、音響管式消音器によ



図一六 トンネル発破音消音器による低周波数域の低減効果測定結果 (1/3オクターブ分析結果)



図一七 トンネル発破音消音器による低減効果測定結果 (オクターブ分析結果)



図一五 騒音測定時の切羽、消音システムおよび音源と騒音測定点の位置関係

り 16 ~ 63 Hz 帯域は約 10 ~ 25 dB の低減効果が、平行吸音板式消音器により 125 ~ 4 kHz 帯域は約 15 ~ 25 dB の低減効果が得られていた。比較として一般的な防音扉（グラスウール充填の鋼板  $t = 100$  mm + 吹付コンクリート  $t = 100$  mm）の低減効果<sup>2)</sup>を併せて示す。本システムは防音扉の挿入損失測定結果と比べると、100 Hz 超の騒音に対する低減効果は同等以上であり、低周波音に対する低減効果は 16 ~ 63 Hz 帯域で 5 ~ 20 dB 大きい。

## 5. おわりに

トンネル発破音対策の新技术として、全周波数帯域に対応した山岳トンネル発破消音システムを開発した。発破騒音は広帯域に及ぶため、限定的な周波数のみの対策では不十分であるが、本システムを用いることで発破音を全周波数帯域で抑制することが可能となった。発破で掘削しているトンネル現場に本システムを適用し、低周波音で約 10 ~ 25 dB (16 ~ 63 Hz 帯域)、100 Hz 超の騒音で約 15 ~ 25 dB (125 ~ 4 kHz 帯域) の低減効果を確認した。

本消音システムでは、低周波音は音響管の共鳴現象により発破音自体のエネルギーを使って消音され、100 Hz 超の騒音は吸音材の吸音効果により低減されるため、動力は不要であり環境負荷が一切無い。また、ブロック構造で設置・撤去が容易かつ転用が可能のため、コストダウンが可能となる。

本消音器はこれまで 5 現場で設置実績がある。今後多数の山岳トンネル工事における有効な技術として、多くの現場へ普及して環境負荷の低減に貢献するとともに更なる技術の発展をしていきたい。

J C M A

## 《参考文献》

- 1) 船津弘一郎, 内山恒光: トンネル発破の特性と予測, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, pp.57-60, 1987.9.
- 2) 日本音響学会建設工事騒音予測調査研究委員会: 建設工事騒音の予測モデル ASJ CN-Model2007, 音響学会誌, 64, pp.229-260, 2008.
- 3) 諏訪蘭和彦, 本田泰大, 西野俊論, 松野徹, 伊藤哲, 三村聡: 音響管を用いた発破消音器の開発と現場適用事例, 土木学会全国大会講演論文, pp.123-124, 2012.9.
- 4) 山下信一, 本田泰大, 渡辺充敏, 荒川晃士, 木梨秀雄, 伊藤哲, 中村亮: 広帯域型トンネル発破消音器の開発と現場適用結果, 土木学会全国大会講演論文, pp.825-826, 2013.9.
- 5) 渡辺充敏, 本田泰大: 音響模型実験における仮設防音扉の挿入損失に関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.261-262, 2012.9.
- 6) 土肥哲也, 加来治郎, 佐野昌伴, 西ヶ谷忠明: 模擬発破音発生装置を用いたトンネル発破音の放射指向特性, 日本騒音制御工学会講演論文集, pp.185-188, 2005.9.
- 7) 横田考俊, 土肥哲也, 牧野康一, 岡田恭明, 吉久光: 広帯域・高音響エネルギーレベル衝撃性音源の開発と伝搬実験への適用, 日本音響学会講演論文集, pp.819-820, 2007.3.
- 8) 横田考俊, 縄岡好人, 橘秀樹: 広帯域衝撃性音源を用いたトンネル発破音の音響エネルギーレベル推定, 日本音響学会講演論文集, pp.1443-1444, 2008.3.
- 9) 環境省大気保全局: 低周波音の測定方法に関するマニュアル, pp.19, 2000.10.

## 【筆者紹介】



伊藤 哲 (いとう さとし)  
 ㈱大林組  
 生産技術本部 トンネル技術部 技術第二課  
 副課長



本田 泰大 (ほんだ やすひろ)  
 ㈱大林組  
 技術研究所 環境技術研究部  
 主任



木梨 秀雄 (きなし ひでお)  
 ㈱大林組  
 生産技術本部 トンネル技術部  
 副部長