

発破超低周波音消音装置 TBI レゾネータ Type-F の開発と実用化

Development and Practical Application of Blasting Infrasound Reducer “TBI Resonator Type-F”

岩根 康之*¹
Yasuyuki Iwane
渡邊 博*³
Hiroshi Watanabe

小林 真人*¹
Masahito Kobayashi
安田 洋介*⁴
Yosuke Yasuda

内田 季延*¹
Hidenobu Uchida
片山 典信*⁵
Norinobu Katayama

筒井 隆規*²
Takanori Tsutsui

【要旨】

トンネル工事における発破音への苦情を防止するためには、建具や窓ガラスのがたつきの発生原因となる超低周波音対策が重要である。そこで、音響管の共鳴現象を利用して超低周波音を効果的に消音する“TBI レゾネータ Type-F”を開発し実用化した。

本報では、打撃試験によって音響管の共鳴周波数を調査し、壁面の振動が共鳴周波数に及ぼす影響についての検討結果、また、トンネル延長に係らず消音効果を発揮できる設置方法の数値解析と実機試験による検討結果とともに、消音対象周波数で最大で 13 dB 程度の効果を確認したことを報告する。

【キーワード】 トンネル 超低周波音 音響管 共鳴周波数 設置方法

1. はじめに

トンネル工事の発破音への苦情として最も多いのは、低周波音に起因した窓ガラスや建具などがたつき現象による物的苦情である¹⁾。またこのがたつきは、周波数が低いほど小さい音圧レベルで発生する傾向が示されており、20 Hz 以下の超低周波音の抑制が発破音対策として重要である。

発破音対策として、防音扉を用いた遮音による対策が行われてきた。しかし、低周波音の遮音量は十分ではなかった。また近年では、低周波音に効果的な対策として共鳴型の消音装置が開発されており、16 Hz から 63 Hz の周波数範囲での消音効果が確認されている^{2) 3) 4)}。そこで、よりがたつきの発生原因となり易い 10 Hz 以下の超低周波音を対象として、音響管の共鳴現象を利用した消音装置“TBI レゾネータ Type-F”（以下、消音装置）を開発した。

この消音装置について、音響管の共鳴周波数を打撃試験により確認した。また消音装置の効果的な設置方法を数値解析により検討し、実機試験で効果を検証した。本報ではこれらの結果について報告する。

2. 消音装置の概要

表-1 に消音装置に設置した音響管の諸元を示す。音響管は一端が開口、他端が閉口の中空の管であり、6種類の形状が異なる音響管を組み合わせて設置した。No. 1か

らNo. 3は延長が長いいため折れ曲り形状とし、No. 4からNo. 6は直管形状とした。なお、表-1 に示す l は音響管の外形の延長ではなく、開口から管底までの断面の中央を結んだ距離であり、管内の音波の伝搬経路長を意味する。

図-1 に消音装置の構成を示す。架台によって重機や

表-1 音響管の諸元

No.	形状	延長 l (m)	短辺 a (m)	長辺 b (m)	設置数 (本)
1	折れ曲り	22.420	0.914	0.914	2
2		18.588	0.914	1.829	2
3		22.752	0.762	0.914	1
4	直管	13.482	2.438	2.438	1
5		8.243	0.914	0.914	2
6		9.600	0.914	1.524	3

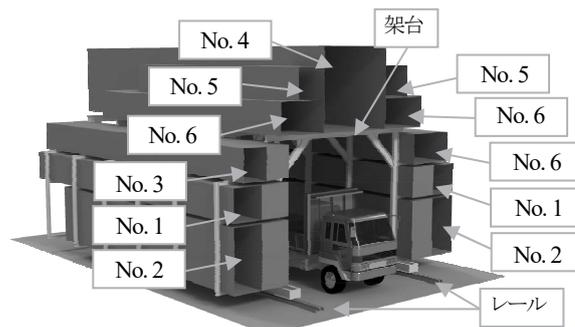


図-1 消音装置の構成

1. 技術研究所 研究開発 G 第二研究室 2. 東北支店 新幹線ニセコトンネル作業所
3. 九州支店 大寧寺トンネル作業所 4. 神奈川大学 工学部 5. 株式会社藤崎商会

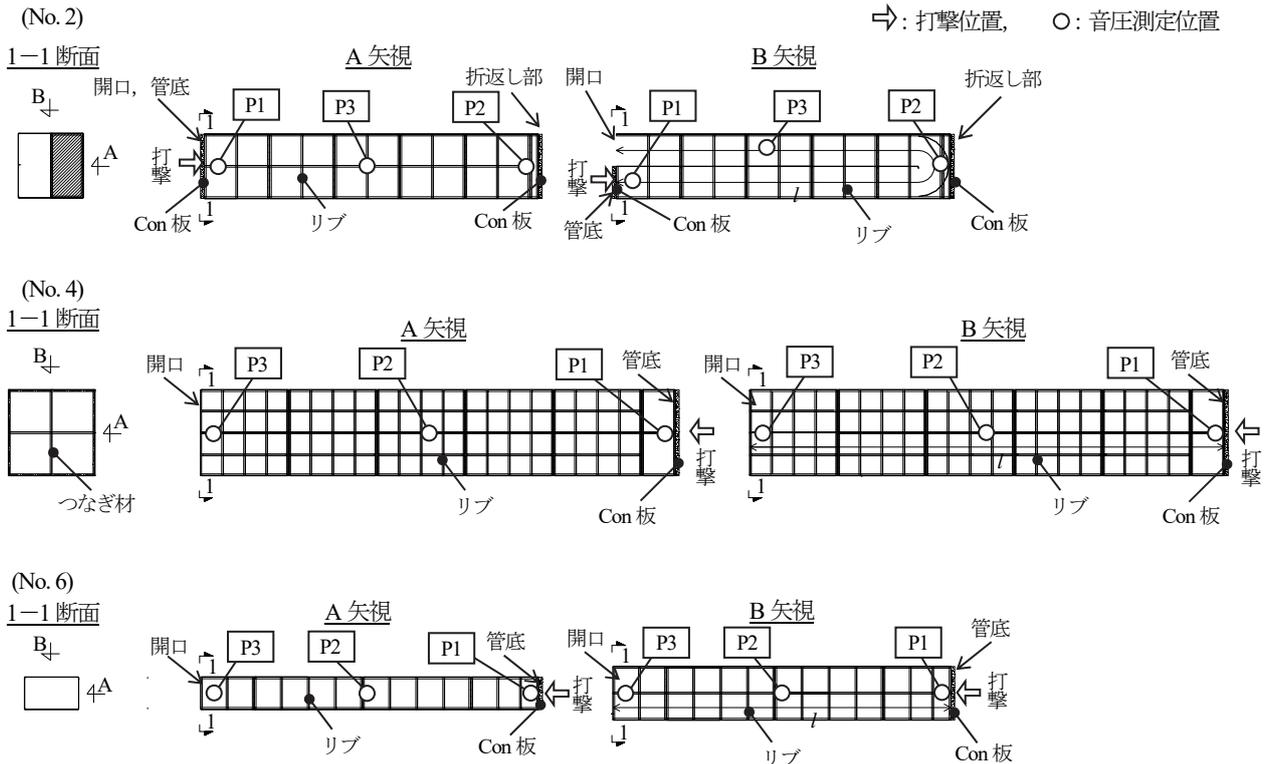


図-2 音響管の打撃位置と音圧測定位置

車両の走行路を確保し、形状の異なる複数の音響管をトンネル断面に収まるよう配置した。架台をレール上に設置することで、トンネル縦断方向に移動可能とした。

音響管の面板には厚さ $t=3.2\text{ mm}$ の鋼板を使用し、等辺溝形鋼(L-4×50×50)を用いたリブを設置して補強した。管底および4 Hzの折返し部分には、 $t=100\text{ mm}$ のコンクリート板を設置して剛性を高めた。

3. 音響管の共鳴周波数

3.1 音響管内の音圧分布

音響管が共鳴した場合(ただし、1次の共鳴周波数)、管内の音圧分布は管底で最大となり、開口に近づくほど低くなる。消音装置についてもこの現象が音響管内で生じていることを確認するため、打撃した際に管内で発生する音圧を測定した。測定対象とした音響管は、表-1のうち、No.2, No.4およびNo.6の3種類とした。図-2に音響管の打撃位置と音圧測定位置を示す。音響管の管底外側からをインパルスハンマーによって打撃した。音圧レベルの測定位置は、管底(P1)、管延長の中央付近(P2)、開口付近(P3)の3点とした。

音響管内の音圧レベルの周波数分析結果を図-3から図-5に示す。図-3より、No.2では3.8 Hzに卓越周波数が確認できる。3.8 Hzの音圧レベルは管底で最も大きく、開口に近づくほど小さくなる。図-4と図-5についても同様に、No.4は5.8 Hz, No.6は7.8 Hzが共鳴周波数であると判断できる。

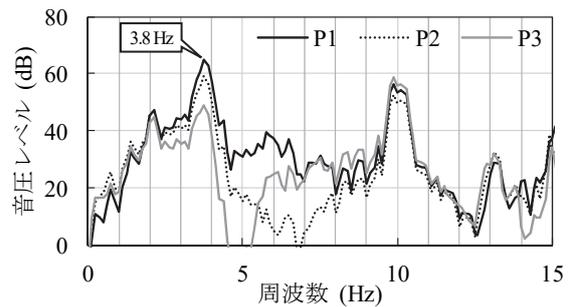


図-3 音響管内の音圧レベルの周波数分析結果 (No. 2)

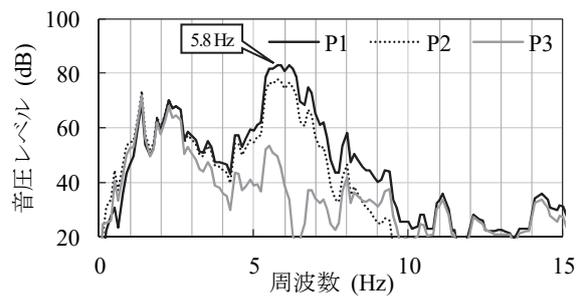


図-4 音響管内の音圧レベルの周波数分析結果 (No. 4)

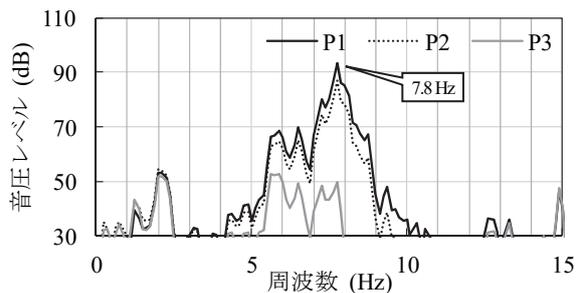


図-5 音響管内の音圧レベルの周波数分析結果 (No. 6)

3.2 共鳴周波数の理論値と実測値の比較

3.1節で実測した共鳴周波数が理論値と一致するかを確認した。矩形断面の音響管の開口端補正長 Δl は、開口部にフランジがない場合、式(1)で表される⁵⁾。

$$\Delta l \cong 0.61r \quad (1)$$

$$r = \sqrt{S/\pi} \quad (2)$$

ここで、 r は開口面積 S の等価半径である。音響管の共鳴周波数 f_0 は、波長 λ_0 が式(3)に相当する周波数として式(4)で求めることができる。

$$\lambda_0 = 4(l + \Delta l) \quad (3)$$

$$f_0 = c/\lambda_0 \quad (4)$$

ここで、 c は音速であり、 $c = 343.5 \text{ m/s}$ とした。

表-2に f_0 の理論値と実測値を示す。なお、実測値は3.1の方法で管底(P1)の卓越周波数から求めた。表-2より、No. 1, No. 3およびNo. 4では f_0 の理論値と実測値はおおむね一致することを確認した。一方、No. 2, No. 5およびNo. 6では明確なずれが生じ、理論値に比べ実測値が低くなる傾向が確認された。

小泉ら⁶⁾は角筒吸音体の吸音力に吸音体側面の振動が共鳴周波数に影響を及ぼすことを示しており、本検討でも音響管の側壁の振動が共鳴周波数に影響したことが考えられた。そこで、No. 2の側壁に補強材(L-4×50×50)を設置し、補強前後での共鳴周波数の変化を確認した。図-6に示すように、管底を打撃した際の管底の音圧レベルと側壁の振動加速度を測定した。図-7に音圧レベルの周波数分析結果を示す。また図-8にアクセラランスの周波数分析結果を示す。補強により、共鳴周波数は3.8 Hzから4.1 Hzに変化し、理論値(4.5 Hz)に近付いたことが確認できる。また、アクセラランスは18 Hzのピークが低減し、振動特性が変化したことがわかる。これにより、側壁の振動を抑制することで音響管の共鳴周波数が理論値に近付く傾向を確認した。

4. 消音装置の配置に関する検討

4.1 消音装置の配置の考え方

既報⁷⁾にて、音響管の消音効果はトンネル延長と音響管の設置位置に依存して変動することを示した。図-9に音響管の設置位置と消音効果の概念を示す。(i)のように、振動面が一定の速度 v で振動し、主管の $3\lambda/4$ に相当する周波数で共鳴している場合、主管内の音圧分布は振動面で高く、開口で低くなる。(ii)のように、開口位置が振動面から $\lambda/2$ となるよう音響管を設置した場合、音響管に反射した音波は振動面で音圧の節となり、(i)に対して音圧分布が逆転する。この場合、振動速度 v が一定でも放射パワーが小さくなるため、消音効果が大きくなる。一方(iii)のように、音響管の開口位置が振動面から $\lambda/4$ となる場合、音響管に反射した音波は振動面で音圧の腹となり、(i)との音圧分布に変化は現れない。このため、音響管による

表-2 共鳴周波数の理論値と実測値

No.	開口面積 $S(\text{m}^2)$	等価半径 $r(\text{m})$	開口端補正長 Δl	共鳴周波数 $f_0(\text{Hz})$	
				理論値	実測値
1	0.835	0.516	0.315	3.8	3.8
2	1.672	0.729	0.445	4.5	3.8
3	0.696	0.471	0.287	3.7	3.8
4	5.944	1.375	0.839	6.0	5.8
5	0.835	0.516	0.315	10.0	7.6
6	1.393	0.666	0.406	8.6	7.8

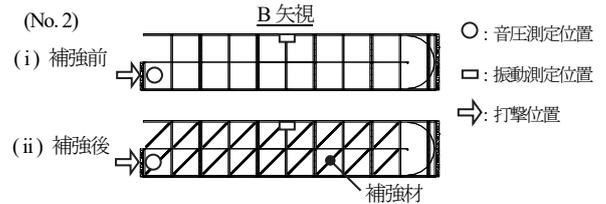


図-6 音響管の打撃位置と音圧および振動測定位置

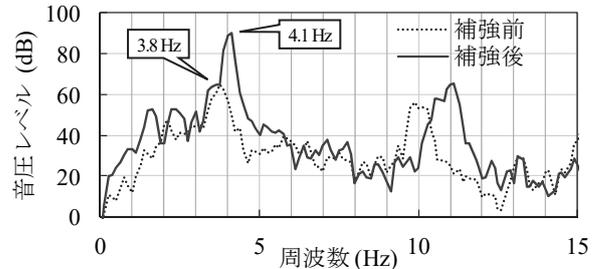


図-7 音圧レベルの周波数分析結果

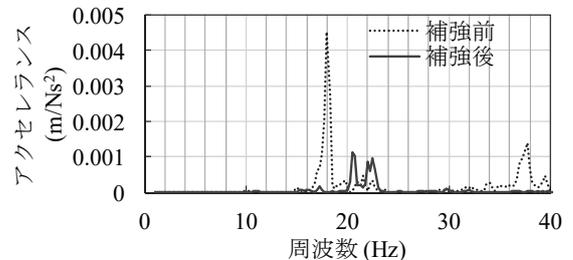


図-8 アクセラランスの周波数分析結果

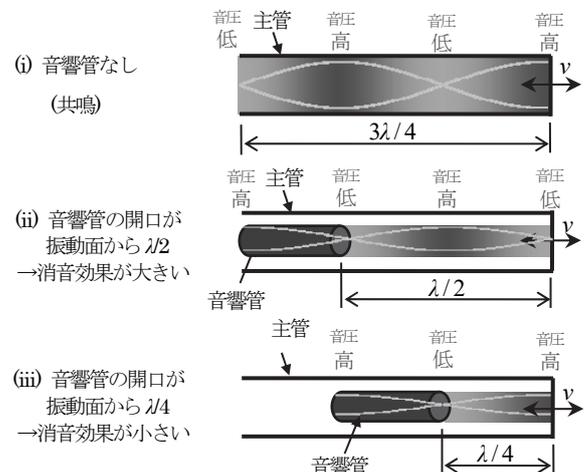


図-9 消音装置の設置位置と消音効果の概念

消音効果が小さくなる。

掘削に伴い延伸するトンネル内で消音装置が安定的な効果を発揮するためには、トンネル延長に応じて消音装置の設置位置を調整する必要がある。しかしながら、発破ごとに消音装置を移動することは、現場での施工性を考慮すると望ましくない。そこで、トンネル延長に係らず消音効果を得る消音装置の配置を検討した。

図-10に、消音装置の配置の概念を示す。坑内防音扉と坑口間の空間に消音装置を配置した。このようにすることで防音扉からの透過音を消音対象として、トンネル延長に関係なく効果を得ることができる。

4.2 数値解析による消音効果の検討

図-10の配置での消音効果を境界要素法による数値解析で検討した。図-11に解析モデルを示す。ここでは簡単のため、表-1に示したNo. 1, No. 2, No. 5およびNo. 6の音響管を解析対象とした。解析条件として、音響管の壁面は剛壁とした。トンネルは半径7.0mの半円とし、地表面は完全反射とした。防音扉を振動面とし、これが速度振幅1 m/sで振動したときの音圧レベル分布を求めた。

図-12に観測点の音圧レベル解析結果を示す。消音装置がある場合、音圧レベルは音響管の種類に対応した4つの周波数（No. 1 : 3.7 Hz, No. 2 : 4.5 Hz, No. 5 : 9.3 Hz, No. 6 : 8.3 Hz）でディップとなり、消音効果が現れていることが確認できる。一方、ディップ前後の周波数では

新たなピークが発生し、音圧レベルは増幅した。解析では減衰を考慮していないためピーク、ディップが鋭く現れたと考えられ、実際には減衰の影響で緩やかになることが予想される。

図-13に、音響管による消音効果が現れた周波数の観測面の音圧レベル分布を示す。観測面は音響管No. 1の断面中心高さであり、消音効果が現れた3.7 Hzで音響管内の音圧レベルが大きくなり、共鳴していることがわかる。また音響管の外では全体で音響管がない場合よりも

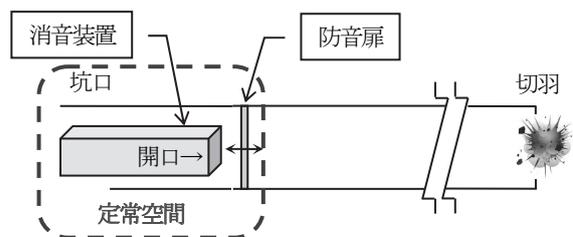


図-10 消音装置の配置の概念

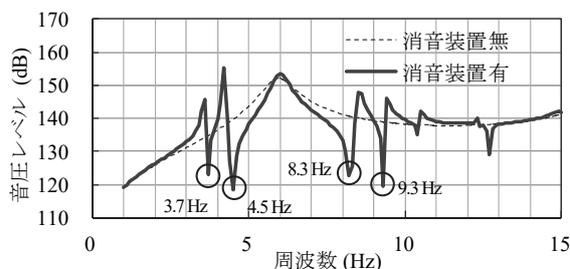


図-12 観測点における音圧レベル

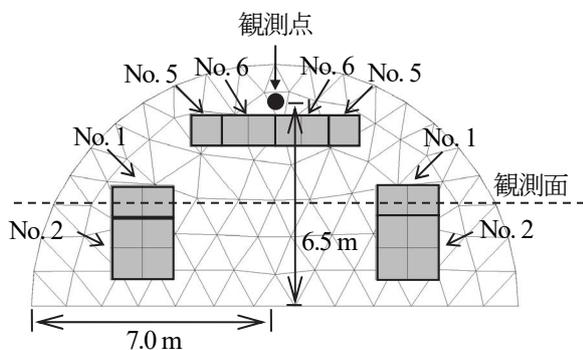


図-11 解析モデル

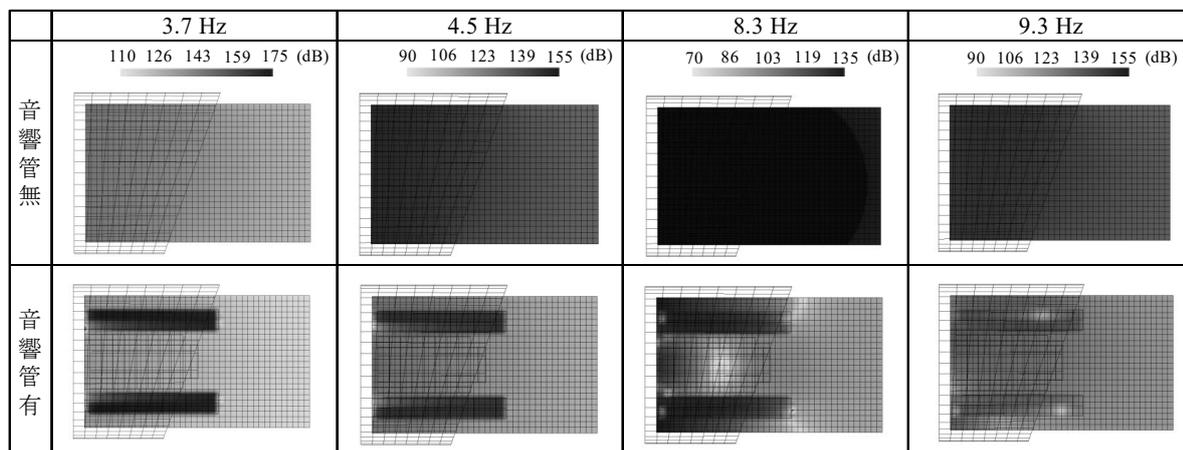
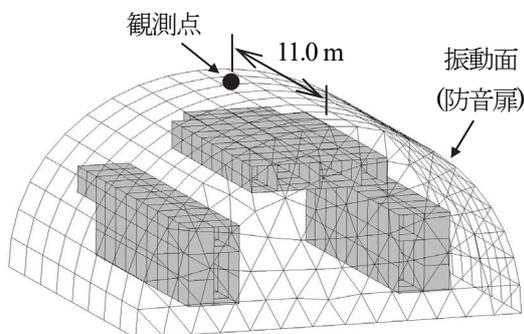


図-13 観測面の音圧レベル分布

音圧レベルが低く、音響管による効果が確認できる。一方、4.5 Hz, 8.3 Hz, 9.3 Hz は No. 1 の共鳴周波数ではないため音響管内での音圧レベルの増幅はないが、音響管の外ではいずれの周波数も音響管がない場合に比べ音圧レベルは低く、消音効果が現れていることが確認できる。これにより、本検討における消音装置の設置方法が妥当であることが確認できた。

5. 実機試験による消音効果の検証

5.1 実験条件

実機試験は、国土交通省山口河川国道事務所発注の「長門俵山道路 大寧寺第3トンネル北工事」現場にて行った。当該トンネルは、延長1,892 m、設計掘削断面が108.2 m² (CII断面) の大断面山岳トンネルである。

図-14に消音装置の配置と測定位置を示す。4章で検討したように、坑口から11.0 m切羽側に防音扉を設置し、音響管の開口が防音扉から1.0 mとなるよう消音装置を配置した。測定位置は防音扉から切羽側に1.0 m (P1) と坑口 (P2) の2か所とし、消音装置の有無について音圧レベルを測定した。ここで、消音装置を移動してその有無による違いを検証した場合、消音装置の容積による断面変化の影響を受けることが考えられた。そこで本検討では、木製の合板で音響管の開口に蓋をして空気を遮断することで、音響管がない状態を模擬した。



写真-1 消音装置設置状況

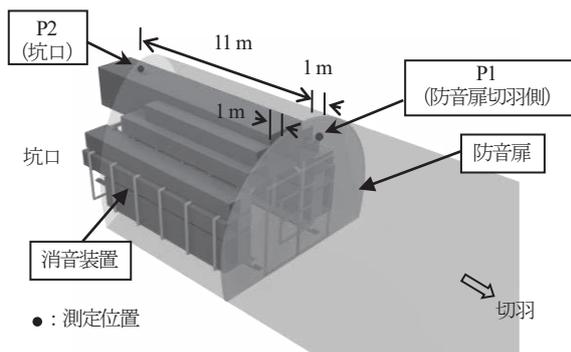


図-14 消音装置の配置と測定位置

図-15に消音装置の断面配置図を示す。吹付けコンクリート仕上がり時のトンネルの内空断面は104.2 m²であり、これに対する音響管開口の種類ごとの面積比は表-3に示すとおりである。

表-4に測定対象とした発破の諸元を示す。消音装置が無い場合について2回と、ある場合について3回の発破について測定を実施した。

5.2 測定結果

発破音の評価量は、音圧レベルの最大値 L_{pmax} とした。図-16と図-17に、P1 と P2 の音圧レベル測定結果を示す。P1, P2 の音圧レベルはいずれも発破ごとのばらつきが大きく、これらの比較によって消音装置の消音効果を読み取ることは難しい。そこで発破ごとのばらつきを軽減するため、式(5)より P1 と P2 の音圧レベル差 ΔL を求めた。

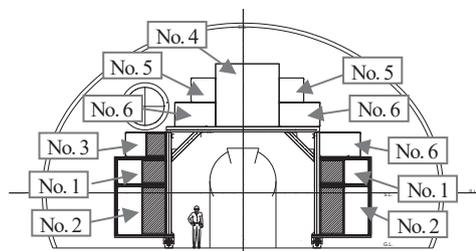


図-15 消音装置の断面配置図

表-3 トンネル断面に対する音響管開口の面積比

No.	1	2	3	4	5	6
面積比 (%)	1.6	3.2	0.7	5.7	1.6	4

表-4 発破の諸元

	日付	トンネル延長 (m)	総薬量 (kg)	消音装置
発破①	2017/1/30	491.1	23.4	無
発破②	2017/1/30	492.3	58.6	
発破③	2017/1/31	499.5	97.8	有
発破④	2017/2/1	503.1	79.4	
発破⑤	2017/2/1	505.5	96.4	

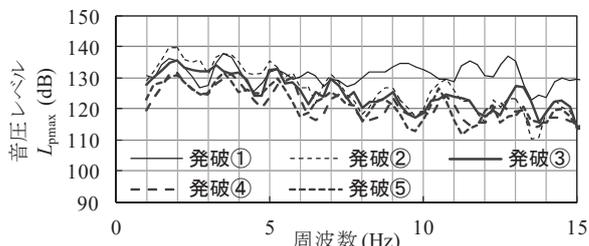


図-16 音圧レベル測定結果 (P1)

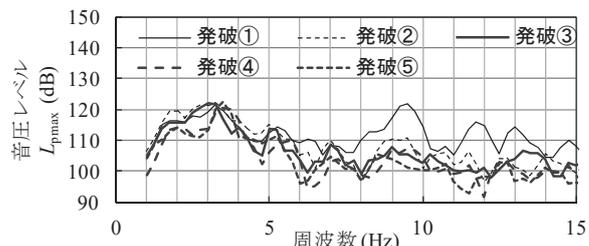


図-17 音圧レベル測定結果 (P2)

$$\Delta L = L_{p1max} - L_{p2max} \quad (5)$$

図-18に ΔL の測定結果を示す。図-18より、 ΔL は4 Hz付近で4 dB程度、6 Hz付近で13 dB程度、8 Hz付近で10 dB程度増加しており、発破条件に係らず音響管の効果が現れていることが確認できる。また、 ΔL が増加した周波数は、表-2に示した実測の f_0 とおおむね一致した。さらに、4 Hz付近の増加量が6 Hzと8 Hzに比べ小さい原因として、 f_0 が一致するNo. 1, No. 2およびNo. 3の音響管が折れ曲り形状であることが考えられ、直管形状に比べ減衰や反射、鋼板の振動性状に違いが出たことが考えられる。

6. まとめ

音響管の共鳴現象を利用した消音装置を開発し、実用化に向けて消音効果を検討した。

打撃試験の結果、一部の音響管の共鳴周波数に理論値とのずれが生じた。この原因は主に音響管の壁面の振動の影響によるものと考えられ、振動を抑制することで理論値に近づくことを確認した。

また、数値解析により消音装置の効果的な設置方法を検討した結果、防音扉を消音装置の切羽側に設置することで、トンネル延長に係らず消音効果を発揮できることを確認した。

さらに、実機試験の結果、音響管の共鳴周波数で最大13 dB程度の消音効果を確認した。しかし、折返し形状の音響管の消音効果は、直管形状のものに比べ小さかった。このことから、折返し形状では音響管内の伝搬経路におけるロスが大きく、剛壁として作用していないことが推察された。折返し部の形状や壁面の剛性を改善することで、さらなる消音効果を得られることが示唆された。

“TBI レゾネータ Type-F”は、2017年4月にNETIS新技術情報提供システムに登録され、特許についても同年8月に登録(特許第6175090号)された。今後、社内のトンネル現場にて適用実績を蓄積していくとともに、共同開発者である株式会社藤崎商会より社外に展開する。

謝辞：TBI レゾネータ Type-Fの開発に際し、山口河川国道事務所の皆様をはじめ、工事関係者の皆様にご協力頂きました。本紙面をお借りしてお礼を申し上げます。

Summary In order to prevent annoying blasting noise in tunnel construction work, it is important to take effective measures to reduce infrasound that causes doors, windows and windowpanes to rattle. To address this blasting noise problem, TBI Resonator Type-F, a blasting sound reducer designed to effectively reduce blasting infrasound by use of the resonance effect of an acoustic tube, has been developed. In this study, acoustic tube resonance frequency was determined through impact testing, and the effect of wall vibration on resonance frequency was evaluated. An installation method to reduce blasting infrasound effectively, regardless of tunnel length, was also developed through numerical analysis and field testing. This paper reports these results and concludes by reporting that the blasting sound reducing effect of up to about 13 dB was verified in the target frequency range.

Key Words : Tunnel, Infrasound, Resonator, Resonance frequency, Installation method

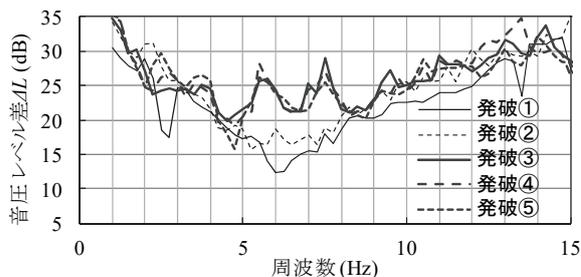


図-18 音圧レベル差測定結果 (P1-P2)

【参考文献】

- 1) 日本火薬工業会総務部会分科会小冊子作成委員会編：あんな発破こんな発破 発破事例集, p.31, 日本火薬工業会, 2002.
- 2) 本田泰大, 渡辺充敏：音響管を用いたトンネル発破低周波音消音器, pp.43-47, 音響技術 No. 160, 日本音響材料協会, 2012.
- 3) 八木直人, 田中ひかり, 増田潔, 須藤敏明：二重防音扉を利用したトンネル発破時の低周波音低減に関する研究 その4 現場における共鳴器型吸音体設置実験, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, pp.7-8, 2014.
- 4) 角田晋相, 安部剛, 笠水上光博, 森川真圭：両端開口の音響管を用いたトンネル発破低周波音低減装置の開発, 銭高組技報 No.40, pp.9-14, 2015.
- 5) 日本騒音制御工学会編：騒音制御工学ハンドブック [基礎編・応用編], pp.124-125, 技報堂出版, 2001.
- 6) 小泉穂高, 松岡明彦, 小林正明, 河井康人：気柱共鳴を利用した吸音体に関する基礎的研究 その3 角筒吸音体の断面形状が吸音力に及ぼす影響, 日本音響学会講演論文集, pp.943-944, 2016.
- 7) 岩根康之, 小林真人, 内田季延, 筒井隆規, 渡邊博, 安田洋介：トンネル発破超低周波音を対象とした音響管による消音効果の検討, とびしま技報 No.64, pp.1-4, 2016.