

音響管を用いたトンネル発破消音器の開発

(株)大林組 技術研究所
○本田泰大, 渡辺充敏

1 はじめに

国土の約7割が山地で占められている日本では、都市を結ぶ道路や鉄道軌道において多くの山岳トンネルが施工されている。一方、住宅地は都市への人口集中等により、平野部から山地へと拡大している。住宅地周辺で山岳トンネルを施工する場合、民家への騒音・振動等の影響が懸念されるため、通常掘削当初のみ、騒音等が比較的小さい機械掘削を実施し、ある程度掘り進んだ段階でより効率的な発破による掘削に切り替える。この発破の際発生する発破音は、比較的広帯域（広い周波数帯域）で非常に大きなエネルギーを瞬間的に発生するという特長を持つ。特に低周波音は、数百m離れた民家の窓やサッシの揺れやガタツキの原因となる可能性があるが、坑内ではほとんど減衰しないため、掘削が進んで切羽から坑口までの伝搬距離が長くなっても常に配慮が必要となる[1]。このため、従来は対策としてコンクリート製や砂充填型の重厚な防音扉が用いられてきたが、主に質量により低減効果を得ているため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[2]。

そこで、低周波音を効果的に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。この方式は、比較的定常的な音を対象として車のマフラー等で利用されていたが、発破音のような衝撃性の音に対してはこれまで実用化されていなかった。また、発破音の低周波音を対象とする場合は音響管が非常に大型化するため、坑内に収まるように形状等を工夫する必要があった。

本開発では音響管の配置方法や構造を工夫し、低周波音に対応した発破音消音器（以下 “ブラストサイレンサー[®]” と呼称する）を作製し、トンネル現場でその効果を確認した。

2 音響管を用いた消音器の概要

2.1 消音原理と防音扉との違い

図1に消音器の消音原理のイメージを示す。片側を閉じた音響管に音波が入射すると、端部で跳ね返り反射波が生じる。管の長さを波長の1/4とすると共鳴現象が生じ、開口部付近の入射波(図の実線)と反射波(波線)が逆位相となり、お互い打ち消し合うことで低減効果が得られる。単体の音響管では特定の周波数しか低減出来ないが、様々な長さの音響管を組み合わせることで、比較的広範囲の周波数の音波を低減できるようにできる。

図2に従来の防音扉の例と開発した音響管による消音器との違いを示す。従来の防音扉は、主に質量により低減

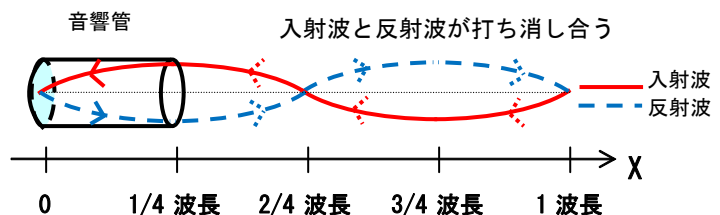


図1. 1/4 波長音響管による消音原理のイメージ

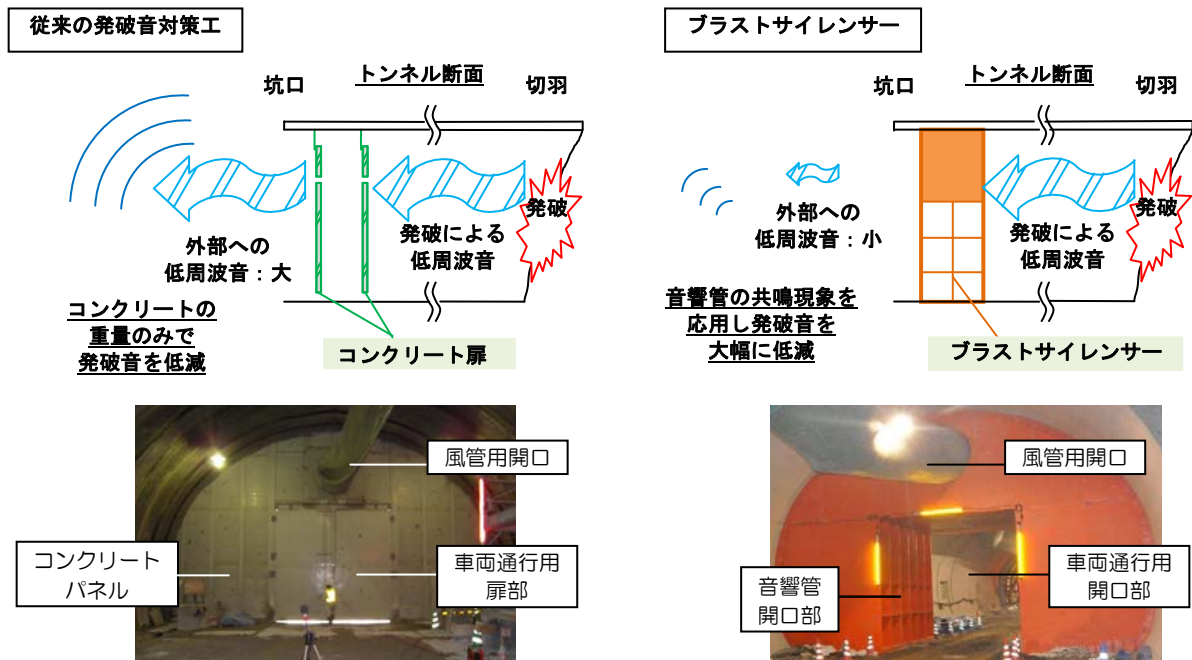


図 2. 防音扉の例と開発した音響管による消音器との違い

効果を得ているため、周波数が低くなるに連れて低減効果も小さくなるという特性を有する。これに対して音響管を用いた消音器は、共鳴現象を用いて、入射音の大きさに比例した打ち消し音を発生させるため、低周波音においても坑外への伝搬音を大幅に低減できる。なお、従来の防音扉と併用してもブラストサイレンサー®の低減効果は変わらず、併用することでより広い帯域の騒音を低減することができる。

2.2 消音器の概要

図 3 に開発した消音器のトンネル延長方向を正視した場合の断面概要図を、消音器の全体写真を図 4 に示す。重機が通行するトンネル中央部および換気用風管部分は常時開口している。各開口部の周辺に左右に約 1m×1m の断面を有する音響管を配置したものを一列として、トンネル縦断方向(トン

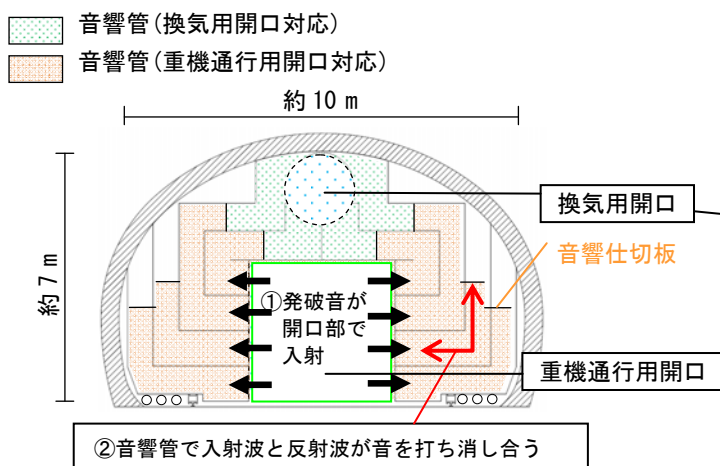


図 3. 消音器断面概要図



図 4. 消音器写真

表 1. 共鳴周波数と音響管本数

| | 重機通行用開口 | | | | | | | 換気用開口 | | | |
|-----------|---------|----|----|----|----|----|----|-------|----|----|----|
| 共鳴周波数[Hz] | 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 |

ネル切羽～坑口方向)に 6 列重ねて一つの消音器を構成した。音響管は、重機通行用開口に開口端が 48 本、換気用開口に 24 本面している。切羽で発生した発破音は、消音器の開口部を通過する際に音響管に入射し、入射波と反射波が打ち消し合い、発破音を低減する仕組みである。なお、音響管の本数、長さは、実験室内で実施した 1/32 縮尺模型実験の結果に基づき、対象周波数である 20～63Hz 帯域(1/3 オクターブバンド中心周波数、以下同様)の低周波数域での低減効果が得られるよう表 1 に示すように定めた。

2.3 低減効果の検証実験

・実験概要

熊本 3 号津奈木トンネル新設工事現場で、低周波音の低減効果の検証を行った[3]。図 5 に消音器設置状況および音源位置、現場内測定点位置を、図 6 にトンネル周辺測定点位置を、表 2 に切羽位置および発破諸言の概要を示す。測定箇所は、発破音が消音器を通過して坑口部に到達する防音ハウス内、および近隣民家付近にある公民館位置（坑口から約 450m 点）とした。図 7 に示すように坑口外部には騒音対策として防音ハウスが設置されていたため、建家内で生じる音圧レベル分布の影響を考慮し、音源発生時毎の受音点 P2～P4 のエネルギー平均値を計算して、音源発生回数分の算術平均値を用い消音器設置前後の音圧レベル差（挿入損失）を求めた。切羽状況により各発破の火薬量、発破条件が異なるため、消音器の設置前後で計 6 回測定し、バラツキの影響を排除して低減量をもとめた。図 8 に測定状況写真を示す。

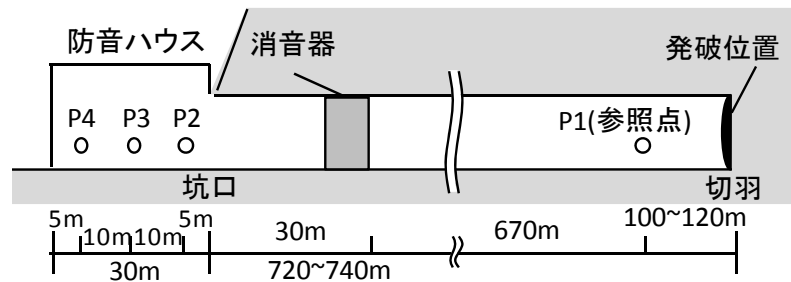


図 5. 消音器設置状況と音源および現場内測定点



図 6. トンネル周辺測定点位置

表 2. 切羽位置と発破諸言の概要

| | | 切羽位置 | 岩盤等級 | 雷管 | 段数 | 全装薬量 |
|------------|---|--------------|------|------------|----|-------|
| 消音器 設置前 | 1 | 坑口～ 約720m | D I | DS 電気雷管 | 10 | 約30kg |
| | 2 | | | | 10 | 約9kg |
| | 3 | | | | 10 | 約22kg |
| 消音器 設置後 | 1 | 坑口～ 約740m | C II | DS 電気雷管 | 10 | 約45kg |
| | 2 | | | | 10 | 約25kg |
| | 3 | | | | 10 | 約34kg |



図 7. 坑口周辺状況写真



図 8. 防音ハウス内測定状況写真

・低減効果の測定結果

図 9 に坑口周辺に設置された防音ハウス内、および近隣民家付近の公民館位置での低周波音の低減量測定結果を示す。測定量は最大値(L_{Smax})とし、低減量は消音器の設置前後の音圧レベル差として算出した。防音ハウス内では、対象周波数である 20~63Hz 帯域において、約 15~23dB の低周波音の低減量が得られていた。また、公民館位置では暗騒音の影響により 31.5Hz 帯域以上は測定出来なかったものの、25Hz 帯域以下では数百 m 離れた防音ハウス内とほぼ同様の低減量となっていた。

2.4 ブラストサイレンサー[®]によるメリット

トンネル掘削では、掘り始めに、コストは割高でありながらも、大きな音の発生しない機械掘削を通常採用する。坑口周辺の環境条件によっては、坑口から長い区間を機械掘削で施工せざるを得ないケースもある。しかしながら、今回開発した消音器を設置することにより、周辺環境に対する低周波音の影響を低減出来るため、掘削工程の早い段階において、低コストで効率のよい発破掘削が可能となり、全体の工期短縮、コストダウンを実現できる。

3 まとめ

トンネル発破音の低周波音を対象とし、音響管の共鳴現象を用いて発破音を低減する消音器“ブラストサイレンサー[®]”を開発した。トンネル現場でその効果を検証したところ、低周波数域で 15dB 以上の低減効果が得られた。

参考文献

- [1] 環境省環境管理局大気生活環境室, 低周波音対策事例集 pp. 29, 2004, 6 月.
- [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, 229-260 (2008).
- [3] 本田他, 日本音響学会騒音振動研究会 N-2012-29, 2012.
- [4] 土肥他, 騒制工講論 (秋), pp185-188, 2005.
- [5] 横田他, 音講論 (春), pp819-820, 2007.

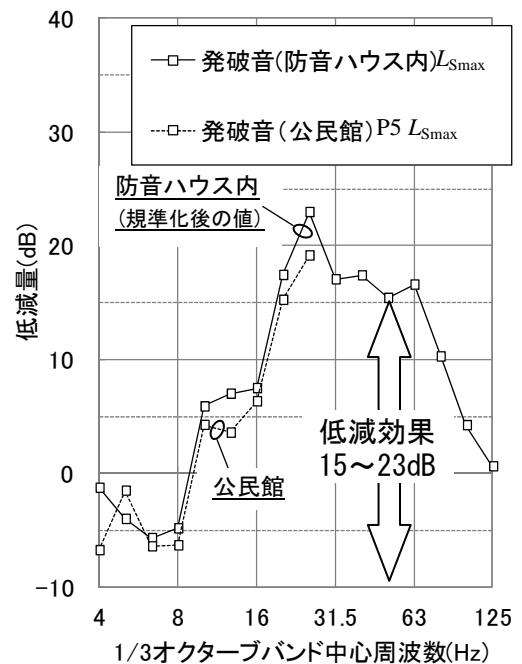


図 9. 消音器による低減量測定結果