特集>>> 地球温暖化対策,環境対策

トンネル工事の発破に伴う低周波音の低減装置

サイレンスチューブ

角 田 晋 相・石 橋 知 大

山岳トンネルの施工においては、近隣への環境対策として発破に伴う騒音の低減が求められる。現場では、 騒音対策としてトンネル坑口に防音扉を設置するが、低周波音に対しては十分に低減することは難しく課題となっている。一方、近年では共鳴器を利用した低周波音の低減装置が開発され実用化されてきている。 そこで、音の共鳴現象による低減方法として開管の共鳴に着目し、両端が開口された音響管による低周波音低減装置「サイレンスチューブ(以下、「本装置」という)」を開発した。

ここでは、実際のトンネル現場での適用事例と低周波音の低減効果について報告する。

キーワード: 山岳トンネル、騒音対策、発破音、低周波音、共鳴、消音器

1. はじめに

トンネル工事における発破作業時に発生するエネルギーは、低周波帯域を含む広帯域の音圧となって坑口から周辺地域に伝達していく。特に低周波音は距離による減衰が小さく遠距離まで伝搬し、近隣への影響として不快感や圧迫感など人への心理的影響と窓や戸のがたつきなど建具への物的影響を与える。

一般的にトンネル工事での発破騒音対策として用いられる防音扉は、可聴域の音圧低減に対して効果が得られるが、低周波音に対して効果を得るには複数枚の扉が必要になるなど経済性や工程面に課題がある。

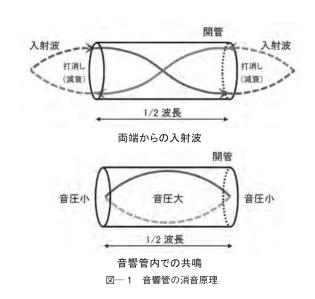
低周波音の対策には、吸音材はほとんど効果がないため、波長の干渉・共鳴などを利用した消音装置が様々な分野で用いられている。

そこで、消音原理の一つである開管の共鳴に着目して両端開口の音響管を用いた発破低周波音低減用の本装置を開発し、縮尺モデル実験で効果の検証を行った¹⁾。

ここでは、開発した本装置を実際のトンネル工事に 試験導入し、現場での適用性および低周波音の低減効 果を確認した現場実証実験²⁾ について報告する。

2. 技術の概要

図―1に共鳴による消音原理を示す。音響管による消音原理は、開管の共鳴を利用し共鳴周波数帯付近の音圧を低減することである。音響管の両端から同位相で入射する音の波は、管の内部で互いに逆位相とな



り打ち消しあう。このとき、管の中では共鳴が生じ、 両端の開口面では共鳴周波数帯の音圧が小さくなる。 最も音圧低減効果が期待できるのは、音響管の長さが 1/2 波長に相当する周波数帯である。

図―2に技術の概要を示す。本装置は、両端開口の音響管をU字形状にして開口面を同一断面上に配置することで、同位相の音の波を管内に入射させて音圧低減を図る技術である。

また、音響管型の消音装置は、その特性として特定 周波数帯の音圧を大幅に低減できるが、減音周波数帯 の前後に増音領域が生じるといった課題がある。その ため、本装置の開口面には通気抵抗体を設け、増音領 域の減衰を図っている。

実際のトンネル工事に導入した本装置を写真―1に

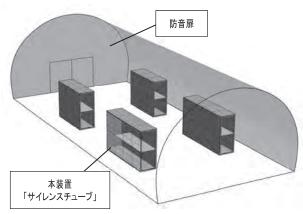


図-2 低周波音低減技術の概要



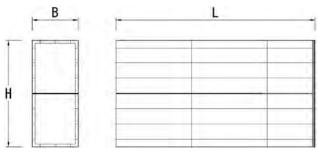
写真-1 現場に導入した本装置

示す。音圧の低減対象となる周波数帯は音響管の長さに依存するため、現場では鋼製型枠による組立式にすることで管の長さを調整できるようにし、現場の状況に柔軟に対応できるようにした。

3. 現場実証実験

(1) 本装置の仕様

現場では、音圧の低減対象として 16 Hz 帯と 20 Hz 帯の周波数帯に効果が得られるように 2 種類の大きさの本装置を導入した。導入した本装置の仕様を図一 3 および表一 1 に示す。現場に導入した本装置は、施工性や移設時の作業性を考慮して 1 基当りの重量が 1 t 程度となるようにした。



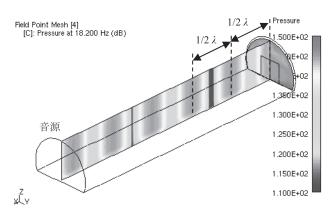
図─3 現場導入した本装置の概略図

表一1 本装置の仕様

仕様	寸法 (m)			重量
	幅 B	高さ H	長さ L	(t)
20 Hz 用	0.91	2.12	3.95	0.82
16 Hz 用	0.91	2.12	4.85	1.00

(2) トンネル坑内の配置

発破時におけるトンネル坑内空間の音圧分布を解析的に検証した結果を図—4に示す。防音扉で閉ざされた筒状の空間内では、閉塞端部(防音扉部)で音圧が最大(音圧の腹が生じる)となり、そこから音源側に向けて1/2波長の間隔で音圧の腹が分布する。したがって、音圧の腹となる防音扉から対象周波数の1/2波長間隔に本装置の開口面を配置することで、入射波の音圧が最大となり音圧低減効果が効率よく得られる。



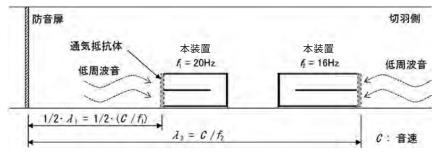
図―4 トンネル坑内の音圧分布 (解析結果)

トンネル坑内における縦断方向の本装置配置を図—5に示す。縦断方向には、本装置の開口面と防音扉の離隔が音圧低減対象とする周波数の1/2波長の倍数となるように配置した。

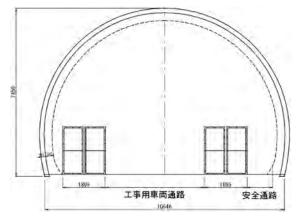
トンネル横断方向の本装置配置を図―6に示す。 横断方向には、工事用車両通路を確保し、1 断面当り 4 基の消音器を設置することでトンネル一次支保内の 内空断面積に対する音響管の開口面積がそれぞれ 10%となるように配置した。

(3) 音圧計測

本装置による低周波音の低減効果を確認するため,施工時に音圧計測を行い発破時の周波数特性を把握した。音圧低減効果を確認する計測位置は、防音扉の外側と遠隔地点として防音扉から 100 m および 200 m 離れた地点とした。また、トンネル坑内において本装置の開口面での音圧計測も行い、発破時に通気抵抗体に作用する圧力を確認した。



図一5 トンネル坑内の縦断配置図



図―6 トンネル横断方向配置図

表一2 音圧計測ケース

計測ケース	本装置設置
CASE-1	なし (防音扉のみ)
CASE-2	設置(抵抗体なし)
CASE-3	設置+抵抗体1
CASE-4	設置+抵抗体2

音圧計測ケースを表―2に示す。本装置を設置するケースでは、開口面に設置する通気抵抗体の材質による効果を検証するため、通気抵抗体は2種類の素材を用意し(CASE-3、CASE-4)、通気抵抗体のない場合(CASE-2)と比較した。本装置を設置したトンネル坑内の状況を写真―2(通気抵抗体なし)および写真―3(通気抵抗体あり)に示す。



写真-2 本装置設置(通気抵抗体なし)



写真-3 本装置設置(通気抵抗体あり)

表-3 通気抵抗体の材料諸元

実験条件	材質	厚 さ (mm)	重 さ (g/m²)
抵抗体 1	ポリエステル繊維	12.5	300
抵抗体 2	ガラス繊維クロス	0.16	139

実験に用いた通気抵抗体の材料諸元を表—3に示す。通気抵抗体には、縮尺モデル実験¹⁾で効果が確認できたガラス繊維クロスと、それとは通気性の異なるポリエステル繊維の不織布を用いて実験を行った。

4. 音圧低減効果

(1) 本装置による効果

防音扉の外側における各ケースの音圧計測結果を図 一7に示す。音圧低減効果を期待した周波数付近 (16 Hz 帯, 20 Hz 帯)では、本装置を設置することで 音圧レベルを低減できていることが確認できた。

各計測位置における周波数ごとの音圧低減量の比較を図 $-8\sim10$ に示す。ここでは、本装置を設置したケース(CASE-2、CASE-3、CASE-4)について、設置しないケース(CASE-1)との音圧レベルの差分を音圧低減量として比較した。なお、CASE-4において200 m 地点の計測データは暗騒音の影響が大きく適切な評価が困難だったためデータ不良として除外した。

比較の結果、本装置を設置したケースでは、音圧低

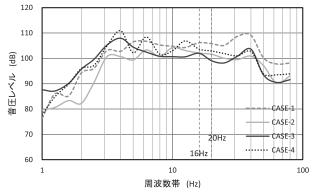
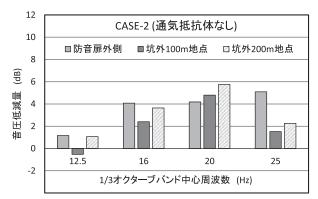
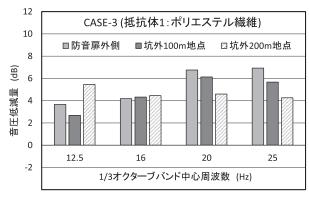


図-7 防音扉外側での音圧計測結果



図一8 各計測位置での音圧低減量(CASE-2)



図一9 各計測位置での音圧低減量(CASE-3)

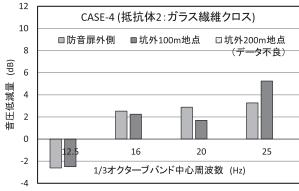


図-10 各計測位置での音圧低減量(CASE-4)

減効果を期待した16 Hz 帯と20 Hz 帯において全ての 計測位置で音圧低減が確認できた。

(2) 通気抵抗体の効果

図―8に示す本装置の開口面に通気抵抗体を設置 していない CASE-2 の結果では、低減対象周波数前後 の周波数帯(12.5 Hz 帯, 25 Hz 帯)で音圧低減量が 小さく. 100 m 地点では逆に音圧が増幅(音圧低減量 がマイナス)している部分もある。

一方、ポリエステル繊維の通気抵抗体を設置した CASE-3 では、12.5 Hz 帯から 25 Hz 帯にかけてほぼ 一様に音圧低減効果が得られている(図―9)。

今回の現場実証実験では、通気抵抗体としてポリエ ステル繊維の不織布を設置した場合が音圧低減に対し て最も効果的である結果が得られ、低減対象の周波数 帯で4~7dBの音圧を低減することができた。

(3) 通気抵抗体の材質による影響

縮尺モデル実験¹⁾ で通気抵抗体としての効果が得 られていたガラス繊維クロスを設置したケース (CASE-4) では、他のケースと比べ全体的に音圧低減 量が小さく、また12.5 Hz 帯においては音圧が増幅す る結果となった (図— 10)。

縮尺モデル実験時と今回の現場実証実験の本装置開 口面での音圧レベルおよび圧力の換算値を表一4に 示す。同表に示すように縮尺モデル実験時と現場実証 実験時では、開口面での圧力が大きく異なる。

開口面での計測値 実験ケース 材質 音圧レベル 圧力換算値 OA 値(dB) (Pa) 縮尺モデル実験 ガラス繊維クロス $94 \sim 100$ $1 \sim 2$ ポリエステル繊維 CASE-3 141 224 CASE-4 ガラス繊維クロス 143 283

表一4 本装置開口面での音圧および圧力

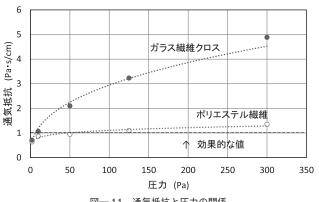


図-11 通気抵抗と圧力の関係

各材質の通気抵抗と圧力の関係を図― 11 に示す。 ポリエステル繊維は圧力に依存せずほぼ一定の通気抵 抗であるが、ガラス繊維クロスでは圧力の増加に伴い 通気抵抗が大きくなる。

縮尺モデル実験では、開口面に作用する圧力が $1\sim 2$ Pa であり、その圧力に対するガラス繊維クロスの通気抵抗は 0.7 Pa・s/cm 程度である。

一方、実際の発破では、開口面での圧力は $224 \sim 283$ Pa で、その圧力下におけるガラス繊維クロスの 通気抵抗は $4 \sim 5$ Pa・s/cm であるのに対し、音圧低 減効果が高かったポリエステル繊維の通気抵抗は $1.1 \sim 1.3$ Pa・s/cm である。

よって、本装置の開口面に設置する通気抵抗体としては、通気抵抗が1Pa・s/cm程度の材質が効果的であるといえる。

5. おわりに

開発した本装置消音器の現場実証実験により, 現場での適用性および実規模での低周波音の低減効果を検証することができた。また, 実現場において本装置消音器の開口面に設置する通気抵抗体の材質には, ポリ

エステル繊維の不織布が適していることが確認できた。

今後は、周辺環境への騒音対策技術として積極的に 現場適用を行い、実績を積み重ねていきたい。

J C M A

《参考文献》

- 1) 角田晋相, 安部剛, 笠水上光博ら: 両端開口管を用いた低周波音低減 技術の研究, 第70 回土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-751, pp.1501-1502, 平成27年9月
- 2) 角田晋相, 笠水上光博, 石橋知大: 両端開口管による低周波音低減装置の現場実証実験, 第71 回土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-412, pp.823-824, 平成 28 年 9 月



[筆者紹介] 角田 晋相(つのだ しんすけ) ㈱錢高組 技術本部 技術研究所 主任研究員



石橋 知大(いしばし ともひろ) (㈱アイ・エヌ・シー・エンジニアリング 機械システム部