

## トンネル発破時の超低周波音低減システムの開発

阿部 将幸 \*<sup>1</sup> 小谷 朋央 貴 \*<sup>1</sup>  
漆戸 幸雄 \*<sup>1</sup> 野間 達也 \*<sup>2</sup>

### 概 要

山岳トンネル工事において発破掘削時に生じる発破音には超低周波音～高周波音まで含まれているが、遮音のために坑口に設置される防音扉では低周波音を十分に低減させることは困難である。特に、一般的な防音扉の遮音性能は10～20Hzの超低周波音域で著しく低下し、コンクリート等による重量化を図った場合でも改善効果が十分に得られない場合がある。防音扉を透過した大音圧の超低周波音は人間の耳には聞こえないものの、近隣建物の窓ガラスや建具を振動させてしまう恐れがある。

そこで筆者らは、防音扉では遮ることが難しい超低周波音を、トンネル内部で減衰させる吸音装置「ドラムサイレンサー」を開発した。本報では、開発したドラムサイレンサーの吸音特性、及び山岳トンネル工事現場への適用事例と、その低減効果について報告する。

### Development of a system to reduce ultra-low frequency tunnel blasting sound

#### Abstract

Blasting sounds produced when tunnels are excavated include a range of sounds, from ultra-low frequency to high frequency sounds. Sound insulation doors are usually installed at a tunnel entrance to cut the sound. However, sound insulation doors cannot always sufficiently reduce sounds in the 10-20 Hz range, even if the door weight is increased by adding concrete. Although these strong ultra-low frequency sounds are inaudible to humans, they are transmitted through the doors and can cause vibrations in glass windows and fittings in houses near the tunnel.

In order to solve this problem, we have developed a “Drum Silencer” sound absorption system that dampens the ultra-low frequency sound. In this paper, we report on the sound absorption characteristics of “Drum Silencer” and its sound reduction effects when applied to the case of a tunnel construction site.

キーワード： 超低周波音、トンネル発破、ヘルムホルツ、再生ドラム缶

\*1 建設本部 環境エンジニアリングセンター  
\*2 建設本部 土木エンジニアリングセンター

## §1. はじめに

山岳トンネル工事において発破掘削時に生じる大音圧の発破音には超低周波音～高周波音まで含まれているが、騒音対策として坑口に設置される防音扉では低周波音を十分に低減させることは難しい。防音扉を透過し、坑外へ伝搬した大音圧の低周波音は大気中でのエネルギー損失や地表・草樹木による吸収が少なく、防音壁のような障害物に対しては回折現象による回り込みが生じ、遮音効果も期待できないため、近隣住宅の建具やサッシを振動させるなど、住環境を悪化させる恐れがある。低周波音を十分に低減させるためには、防音扉の複数枚設置や、コンクリート・砂充填等による重量化が必要になる場合がある。

ここで、坑口防音扉の設置効果(トンネル内外の音圧レベル差)の測定例<sup>1)</sup>を図1に示す。低周波音に対する防音扉の透過損失は、共振周波数 $f_0$ (一般的には20Hz付近に生じることが多い)で最も低下し、 $f_0$ 以上が質量則、 $f_0$ 以下では剛性則(スティフネス制御)によるとされ<sup>2)</sup>、 $f_0$ 付近の遮音欠損が原因となり、遮音効果が十分に得られていないことがわかる。

そこで筆者らは、ヘルムホルツ共鳴を利用し、防音扉の共振周波数 $f_0$ 付近の超低周波音をトンネル内部で減衰させる吸音装置「ドラムサイレンサー」を開発した。本報では、開発したドラムサイレンサーの吸音特性、及び山岳トンネル工事現場への適用事例と低周波音の低減効果について報告する。

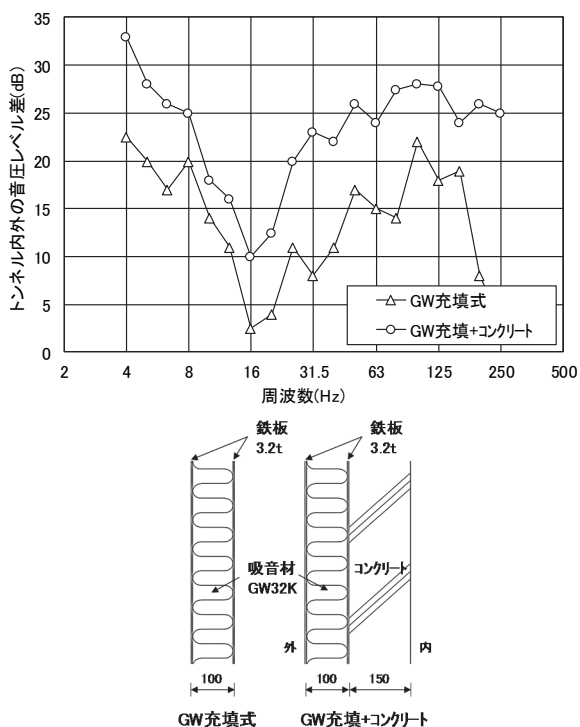


図1 防音扉の仕様と遮音性能測定例

## §2. ドラムサイレンサーの概要と吸音原理

### 2.1 ドラムサイレンサーの概要

開発したドラムサイレンサーの概要を図2に示す。本体には軽量かつ耐久性に優れた再生オープンヘッドドラム缶(580mmφ、h=890mm)を採用し、外形を円筒形状とすることで、発破時の大音圧による本体のたわみを抑制し、振動による吸音性能の低下が生じにくい構造となっている。天板部分に60×300mmのスリット開口を設け、内部に木製共鳴箱(320×380×228mm)を組み込んでおり、重量は約28kgである。超低周波音を対象としながら小型・軽量化を実現しているため、比較的断面積の小さなトンネルや、設置スペースの確保が難しい初期の掘削段階から適用可能であること、作業員一人でも移動や設置が可能であることを特徴としている。

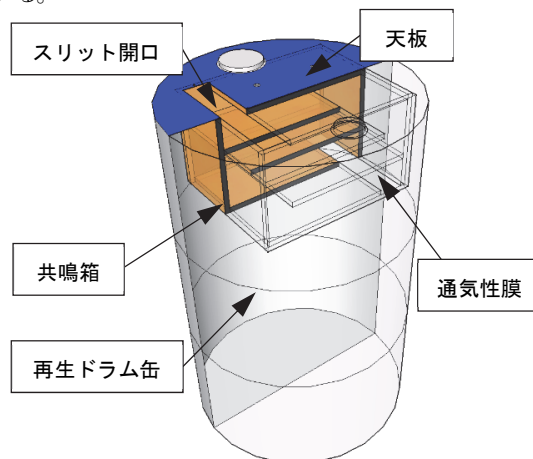


図2 ドラムサイレンサーの概要

### 2.2 吸音原理

天板開口から取り込まれた音波は、ヘルムホルツ共鳴現象によって回廊状の共鳴箱内空気を激しく振動させ、共鳴箱内壁の粘性摩擦、及び通気性膜による抵抗により熱エネルギーに変換される仕組みである。

ヘルムホルツ共鳴による吸音の共鳴周波数 $f_r$ は、音速 $c$ 、天板の開口面積 $S$ 、ドラム缶内容積 $V_d$ 、共鳴箱容積 $V_b$ 、回廊長さ $l$ 、開口端補正值 $\delta$ として式(1)で与えられる。ドラムサイレンサーの開口面積や共鳴箱の容積を変化させることで共鳴周波数 $f_r$ を容易に変更することができ、防音扉の共振周波数 $f_0$ に合わせてチューニングすることで効果を最大化することができる。今回は、ドラムサイレンサーの共鳴周波数 $f_r$ を超低周波音域の16Hzとなるよう設計し、検証を行った。

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{(V_d - V_b)(l + \delta)}} \quad \dots(1)$$

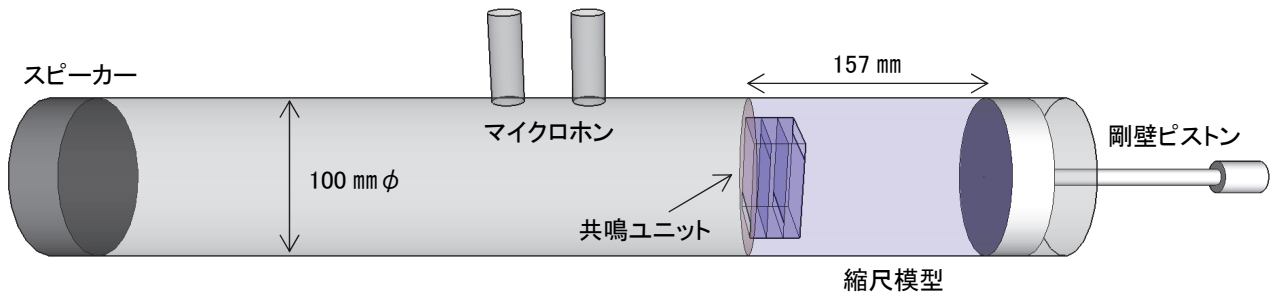


図3 垂直入射吸音率の測定概要

### §3. 縮尺模型による垂直入射吸音率、比音響インピーダンスの測定

#### 3.1 吸音率と比音響インピーダンスについて

ドラムサイレンサーの共鳴周波数 $f_r$ は式(1)により予測することが可能である。ここでは、共鳴箱の音響抵抗を最適化し、 $f_r$ における吸音率を最大化するため、縮尺模型を用いた音響管による垂直入射吸音率測定を行った。

比音響インピーダンス $Z$ 、及び垂直入射吸音率 $\alpha$ は式(2)、式(3)で定義される。虚数部の音響リアクタンス $x$ は、ヘルムホルツ吸音の共鳴周波数で 0 となるため、この時、実数部の音響抵抗 $r$ を 1 に近づけることで、垂直入射吸音率 $\alpha$ を最大化することができる<sup>3,4)</sup>。

$$Z = r + jx \quad \dots(2)$$

$$\alpha = \frac{4r}{(r+1)^2 + x^2} \quad \dots(3)$$

なお、音響抵抗 $r$ は、通気性膜などの抵抗材を配置することで調整可能であり、1 を超える場合には吸音率のピークは低くなるものの吸音する周波数領域は広く、抵抗材等を付加せず抵抗が小さな場合には、ピーク吸音率も低く、吸音領域も狭い特性となることが知られている<sup>5)</sup>。

#### 3.2 縮尺模型実験

共鳴周波数が低い、実物大のドラムサイレンサーの吸音特性計測は困難であるため、縮尺模型実験による検証を行った。図 3 に示す音響管の内径が縮尺模型の内径と一致するようにスケールを設定した。音響管端部に天板開口+共鳴箱(以降、共鳴ユニット)の縮尺模型(写真 1)を取付け、剛壁ピストンにより背後空気層厚を調整することで、音響管内にドラムサイレンサーの吸音機構を再現した。縮尺模型寸法、及び共鳴周波数を表 1 に示す。

測定は JIS A 1405-2 に準拠して行い、共鳴ユニットの音響抵抗、及び通気性膜による抵抗付加の効果を検討した。

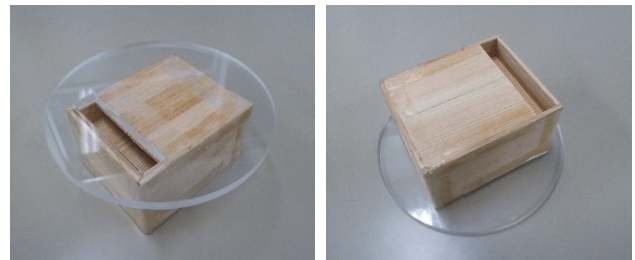


写真1 共鳴ユニットの縮尺模型

表 1 縮尺模型寸法と共鳴周波数

	実大寸法	縮尺寸法
内径(mm)	567	100
高さ(mm)	890	157
開口寸法(mm)	60×300	11×53
回廊長さ(mm)	900	159
共鳴周波数(Hz)	15.9	90.2

#### 3.3 測定結果

測定した縮尺模型の比音響インピーダンス、垂直入射吸音率を図 4、図 5 に示す。通気性膜による抵抗付加が無い場合(CASE-1)、共鳴周波数 $f_r$  (90Hz)付近の音響抵抗 $r$ が 0.4、ピーク吸音率は 0.8 程度を示し、共鳴ユニットのみでは音響抵抗が不足していることがわかる。これに対し、共鳴箱の天板側開口部に通気性膜を取付けた場合(CASE-2)、音響抵抗の増加により吸音の幅は広がったものの、抵抗値が 2 以上となり、ピーク吸音率は 0.85 程度にとどまっている。更に、共鳴箱の空気層側開口部に通気性膜を取付けた場合(CASE-3)、抵抗値が 1.5 程度となり、吸音率 0.95 と高い吸音性能を示しつつ、吸音の幅も広がることを確認した。

検討の結果、共鳴ユニットの吸音特性や、実際のトンネル工事現場へ設置した際に生じる通気性膜材の目詰まり等の影響を考慮し、空気層側に通気性膜材取付ける構造を採用した。

## §4. BEM(境界要素法)による低減量予測

### 4.1 解析条件

続いて、トンネル坑内にドラムサイレンサーを設置した場合の低減効果を予測するため、BEM(境界要素法)による解析を行った。対象周波数はドラムサイレンサーの共鳴周波数 $f_r$ (16Hz)とし、設置方法や設置数、トンネルの断面積の違いによる低減効果を予測した。

解析モデルを図 6 に示す。切羽から 10m 点(P1)と坑口(P2)に設けた受音点(GL+1.5m)間音圧レベル差を、吸音体設置エリア内へのドラムサイレンサー配置前後で比較することで低減量を算出した。ドラムサイレンサーは坑口から 50m 点から切羽側に向かって 1 体ずつ配置し、片側に配置した場合(CASE-1)、両側に設置した場合(CASE-2)について解析を行った。この時、ドラムサイレンサーは壁面から 1m 離して設置し、吸音特性として縮尺模型実験により得られたインピーダンスを与えた。なお、坑口には防音扉は設置せず、開口端としてモデル化した。

### 4.2 解析結果

トンネルの断面積を 77 m<sup>2</sup>とし、ドラムサイレンサーを片側に設置した場合(CASE-1)、両側に設置した場合(CASE-2)の 16Hz 帯域の音圧レベル低減量を図 7 に示す。設置方法による違いは殆ど見られず、200 体設置で約 4.5dB、600 体設置で約 11dB 程度低減され、設置個数に比例して増加することが分かった。

次に、ドラムサイレンサーの設置数を 200 体とし、トンネルの断面積を変化させた場合の低減量を図 8 に示す。断面積を変化させた場合も、設置方法による違いは殆ど見られず、同じ設置数でも小断面のトンネルほど低減効果が大きくなることが分かった。

## §5. 現場適用実験

### 5.1 実験概要

実験は、国道115号円淵トンネル工事(福島県相馬市)で行った。表 2 に工事概要、図 9 にドラムサイレンサーの設置位置と測定点を示した平面図を、図 10、11 に断面図を示す。ドラムサイレンサーは、坑内作業の妨げとならないよう安全通路の仕切りとして利用し、壁面から約 1.2m 離し、開口部が上向きとなるよう 1 体ずつ設置した。設置パターンは、トンネルの片側に 1 体ずつ配置した場合(CASE-1)と両側に 1 体ずつ配置した場合(CASE-2)について検証し、設置数はそれぞれ 200 体とした(写真 3、4)。

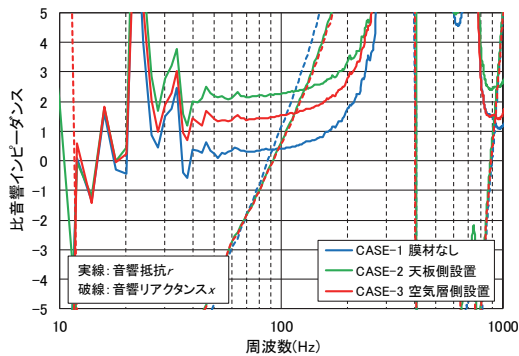


図 4 比音響インピーダンス

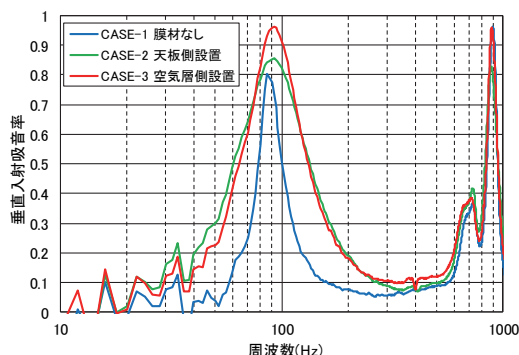


図 5 垂直入射吸音率

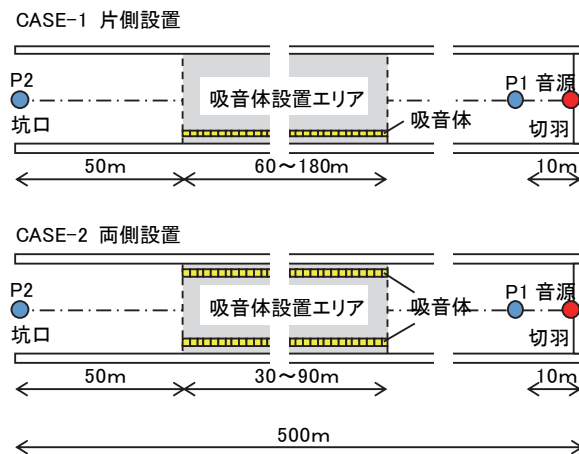


図 6 解析モデル

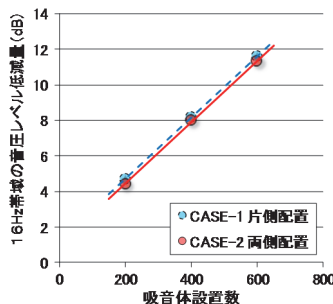


図 7 音圧レベル低減量  
(トンネル断面積 77 m<sup>2</sup>)

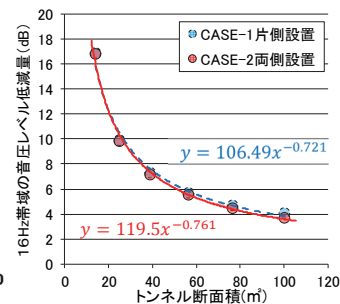


図 8 音圧レベル低減量  
(ドラムサイレンサー 200 体)

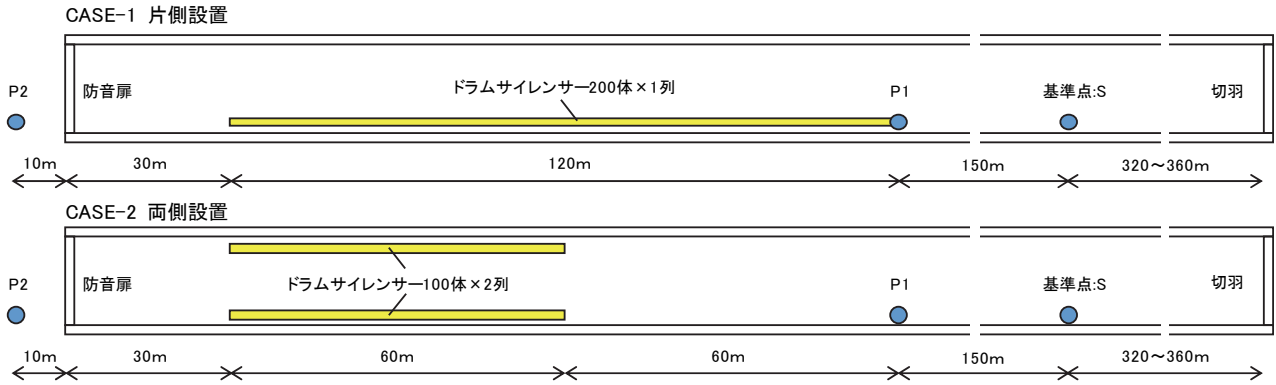


図9 トンネル平面図

表2 工事概要

工事名称	国道115号円淵トンネル工事
工事場所	福島県相馬市山上字円淵地内
発注者	国土交通省東北地方整備局
施工者	株式会社フジタ
工事概要	掘削工法：NATM 工法、トンネル：延長 L=963m、内空断面積：A=88.9 m <sup>2</sup>

図9に示す測定点(GL+1.5m)に大音圧低周波マイクロホン(ACO TYPE 4152NH)を設置し、発破音をデータレコーダー(RION DA-20)に収録した。測定量は 1/3 オクターブバンド音圧レベルの最大値、時間重み特性は Slow とした。また、切羽側に基準点 S を設け、発破音のバラつきを補正した P1(坑内)~P2(坑外)間の音圧レベル差をそれぞれ 3 回測定し、ドラムサイレンサー設置前後で比較することで低減量を求めた。

作成したドラムサイレンサーを写真2に示す。再生オープンヘッドドラム缶(200ℓ)の天板部分にレーザー加工によるスリット開口を設け、構造用合板(t12)で作成した共鳴箱が取り付けられている。共鳴ユニットと本体はレバーバンドにより容易に取り外すことができ、JIS Z 1600 規格のドラム缶であれば共鳴ユニットの載せ替えも可能である。

5.2 測定結果

図12、13に、ドラムサイレンサー設置による低周波音の低減量を示す。片側に200体設置したCASE-1における低減量は、発破ごとに多少のバラつきは見られるものの、ドラムサイレンサーの共鳴周波数 $f_r$ (16Hz)で概ね5dB以上、最大7.7dBの効果を得られている。両側に100体ずつ設置したCASE-2においても、共鳴周波数付近で最大7.4dB程度と、同程度の効果が確認できた。

数値解析結果(図8)より予測された16Hz帯域の低減量は、CASE-1で4.2dB、CASE-2で3.9dBであったが、実際の低減量は予測値よりも大きいことから、ドラムサイレンサーが天板面積以上の吸音力を有しているものと推察される。

§6. おわりに

本報では、トンネル発破音対策として、ヘルムホルツ共鳴を利用した超低周波音吸音装置「ドラムサイレンサー」を開発し、縮尺模型実験による吸音特性計測と、数値解析に

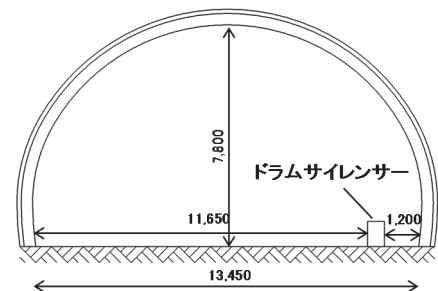


図10 トンネル断面図(CASE-1 片側設置)

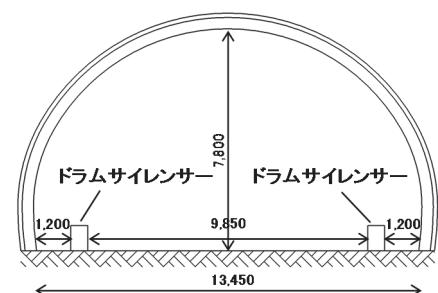


図11 トンネル断面図(CASE-2 両側設置)



写真2 作成したドラムサイレンサー



よる低減量予測、実現場適用実験による低周波音の低減効果を確認し、その有効性を示した。

ドラムサイレンサーの低減効果は設置数に比例して増加するため、今回の適用を行った比較的大きな断面積(88.9 m<sup>2</sup>)のトンネルであっても、300体程度の設置で10dB以上の低減効果を見込むことができ、断面の小さなトンネルに適用した際には更なる低減効果が期待できる。

また、ドラムサイレンサーは防音屏の共振周波数 $f_0$ (遮音欠損)に吸音のピークを合わせることで初めて効果が発揮される。今後は、防音屏ごとに異なる共振周波数 $f_0$ に対応できるよう、ドラムサイレンサーの共鳴周波数 $f_r$ の可変システムの開発や、吸音特性の広帯域化に関する取り組みを行っていく予定である。

参考文献

- 1) 日本騒音制御工学会低周波音分科会:発破による音と振動、山海堂、1996
- 2) 阪上 公博, 柏谷 旭彦, 森本 政之, 高田 重隆, "防音屏による低周波音の遮音特性に関する基礎的研究", 神戸大学大学院工学研究科紀要,2009
- 3) 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]、技報堂、2001
- 4) 岩瀬 昭雄, 白幡 桂子, 丹治 奈津季:"共鳴器型吸音の低周波数化について その2 共鳴周波数付近での音響特性とより効果向上を目指した検討結果", 日本音響学会春季発表会講演論文集, pp1203-1206、2013
- 5) Teruo Iwase, Satoshi Sugie, Masayuki Abe, Hiroyasu Kurono, Shinya Nishimura, Yasuaki Okada and Koichi Yoshihisa : Modeling and verification of perforated plate structure for high sound absorption at low frequency with extending parts behind holes into shallow air space, in15\_546.pdf in internoise proceedings Flash Memory, 2015

ひとこと

ドラムサイレンサーは、再生材の活用による環境配慮と、トンネル周辺の環境配慮を両立できる技術です。小型・軽量の利点を活かし、様々なトンネル現場に活用していきます。



阿部 将幸

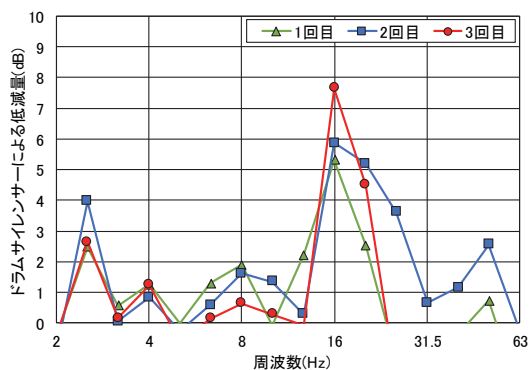


図12 音圧レベル低減量(CASE-1 片側設置)

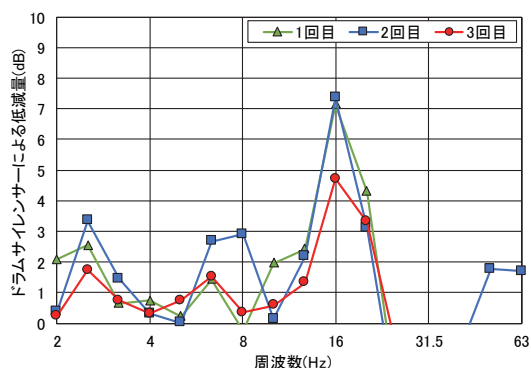


図13 音圧レベル低減量(CASE-2 両側設置)



写真3 坑内設置状況-1



写真4 坑内設置状況-2