

# 低周波音低減装置「サイレンスチューブ®」の現場実証実験

## Field Test of Silencer System to reduce Low frequency sound by Open pipe resonance “SILECE TUBE”

角田晋相\*1 笠水上光博\*2 星野毅志\*3

### 概 要

山岳トンネルの施工では、近隣への環境対策として発破にともなう騒音の低減が求められる。現場では、発破騒音対策として防音扉が用いられるが、低周波音に対して効果を期待するには複数の扉が必要になるなど、コストアップの要因となる。

筆者らは、消音原理として開管の共鳴に着目した両端開口管による低周波音低減装置「サイレンスチューブ」を開発し実用化した。

本報では、実際の山岳トンネル現場での適用事例と実機における低周波音の低減効果について報告する。

key words : 山岳トンネル、発破音、共鳴器

### 1. はじめに

山岳トンネルの施工においては、発破による騒音対策が求められる。特に低周波音は不快感や圧迫感など人への影響と窓や戸のがたつきなど建具への影響を与える。

一般的に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、低周波音に対応させるためには複数の扉が必要になるなどコスト面や工程面に課題がある。

そこで、音の共鳴現象による消音方法として開管の共鳴に着目し、両端開口の音響管による低周波音低減装置「サイレンスチューブ」を開発した<sup>1)2)</sup>。

本報では、サイレンスチューブを実際のトンネル工事に試験的に導入し、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<sup>3)</sup>について報告する。

### 2. 技術の概要

図-1 にサイレンスチューブの配置イメージを示す。サイレンスチューブは、両端開口管をコの字型にして開口面を同一断面上に配置することで、同位相の音圧を管内に入射させて共鳴により音圧低減を図る音響管型消音器である。

消音原理を図-2 に示す。音響管による消音原理は、開管の共鳴により共鳴周波数帯付近の音圧を低減することである。また、音響管型消音器は、特性として特定の周波数帯の音圧レベル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

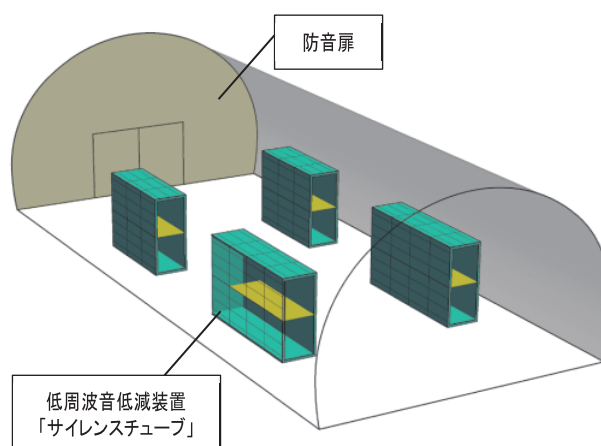


図-1 低周波音低減技術の配置イメージ

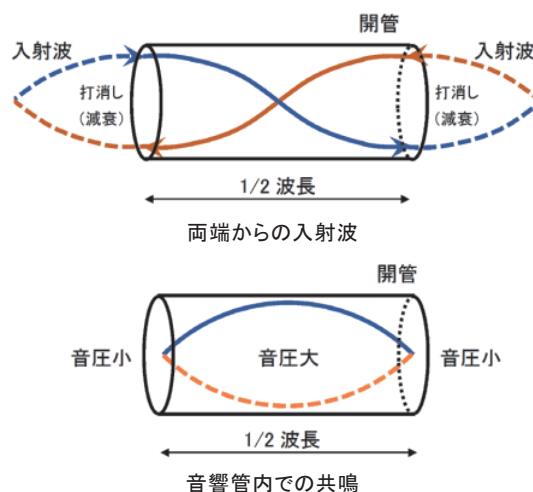


図-2 音響管の消音原理

\*1 Shinsuke TSUNODA

技術本部技術研究所 主任研究員

\*2 Mitsuhiro KASAMIZUKAMI

技術本部技術研究所 主席研究員

\*3 Takeshi HOSHINO

大阪支社土木統轄部 作業所長

のため、増音領域の減衰を図る目的で、サイレンスチューブの開口面には通気抵抗体を設ける。

現場でのサイレンスチューブの設置状況を写真-1に示す。音圧の低減対象となる周波数帯は音響管の長さ依存する。そのため、サイレンスチューブ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

#### 3.1 適用現場の工事概要

工事名：高松自動車道志度トンネル工事  
 工事場所：香川県さぬき市鴨部～志度  
 発注者：西日本高速道路株式会社四国支社  
 トンネル工：NATM 工法  
 (掘削断面 A=65.1~69.2m<sup>2</sup>、延長 L=564m)

#### 3.2 サイレンスチューブの導入

##### (1) サイレンスチューブの仕様

現場では、音圧の低減対象として 16Hz と 20Hz の周波数帯に効果が得られるように 2 種類の長さのサイレンスチューブを導入した。

導入したサイレンスチューブの仕様および概略図を図-3と表-1に示す。今回導入したサイレンスチューブは、施工性や移設時の作業性を考慮して1基当たりの重量が1t程度となるようにした。

開口面に付加する通気抵抗体には発破時に非常に大きな音圧が外力として作用するため、抵抗体を平織網で挟み込んで養生し発破に対する耐久性を持たせた(図-4、写真-2)。

##### (2) トンネル坑内の配置

トンネル坑内における縦断方向のサイレンスチューブ配置図を図-5に示す。発破時のトンネル坑内のように防音扉で閉ざされた閉塞空間では、閉塞端である防音扉部で音圧の腹(卓越点)が生じ、そこから音源となる切羽側に向けて1/2波長間隔で音圧の腹が分布する。

そのため、トンネル坑内の縦断方向には、消音効果が効率よく得られるようにサイレンスチューブの開口面側と防音扉と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サイレンスチューブ配置を図-6に示す。

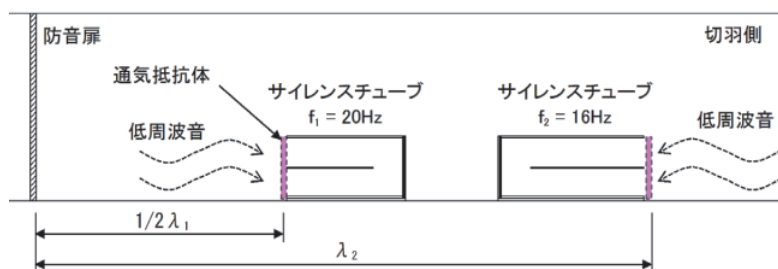


図-5 坑内の縦断方向配置図



写真-1 通気抵抗体を設置したサイレンスチューブ

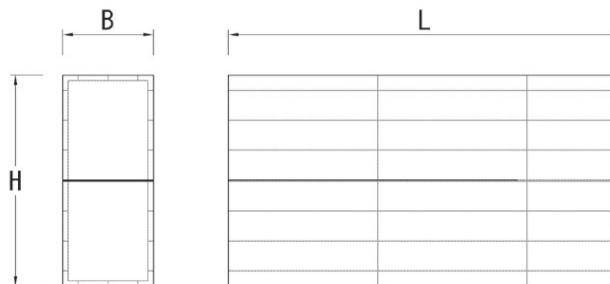


図-3 サイレンスチューブの概略図

表-1 サイレンスチューブの仕様

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

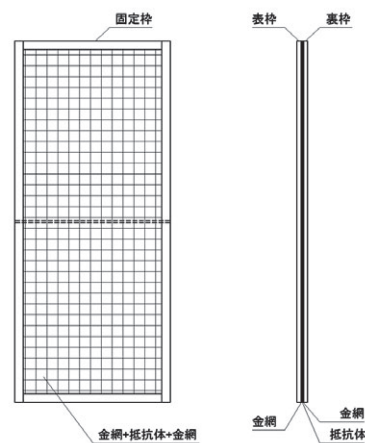


図-4 開口抵抗体の養生方法



写真-2 開口抵抗体の設置

横断方向には、工事用車両通路および安全通路を確保し、1断面当り4基のサイレンスチューブ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サイレンスチューブの開口面積がそれぞれ10%となるようにした。

### 3.3 音圧計測計画

#### (1) 計測方法

現場においてサイレンスチューブによる低周波音の低減効果を確認するため、発破時に音圧計測を行った。

計測に使用した機材を表-2に示す。計測方法は、トンネル内外に設置したマイクロホンおよび低周波音レベル計により音圧レベル波形を取得してFFTによる狭帯域分析を行い、周波数特性を把握した。

現場での音圧計測位置を図-7に示す。音圧低減効果を確認する計測位置は、防音扉の外側と防音扉から100mおよび200m離れた地点とした。また、サイレンスチューブ開口部前面の音圧計測も実施し、発破時に通気抵抗体に作用する外力を確認した。

現場での音圧計測状況を写真-3～写真-5に示す。

各計測位置において計測点は1点とした。

#### (2) 計測ケース

音圧計測ケースを表-3に示す。トンネル掘削の発破に使用する火薬量は毎回異なるため、現場実証実験では、サイレンスチューブ設置前（防音扉のみ）において複数回計測を行い比較することとした。

サイレンスチューブを設置するケースでは、開口面に設置する通気抵抗体の素材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-7, 8）、通気抵抗体がない場合（CASE-6）と比較した。

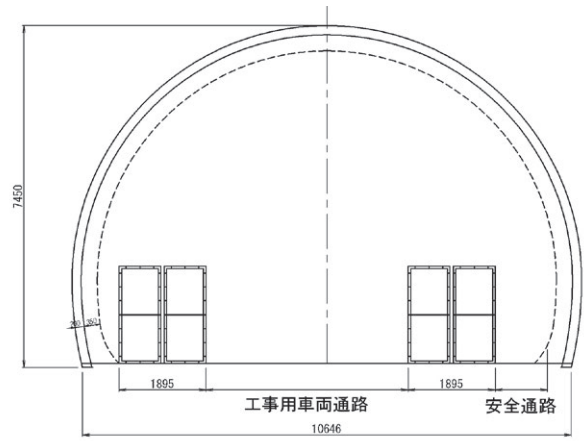


図-6 トンネル横断方向配置図

表-2 音圧計測機材

名称	形式	数量	計測位置
騒音計ユニット	UN-14	2	坑内・防音扉部
マイクロホン	UC-24	2	坑内・防音扉部
低周波音レベル計	XN-1G	2	遠隔地点
データレコーダ	DA-40	1	坑内・防音扉部
	DA-20	2	遠隔地点

表-3 音圧計測ケース

計測ケース	サイレンスチューブ設置	火薬量 (kg)	掘削延長 (m)
CASE-1	なし (防音扉のみ)	88.2	243.6
CASE-2	なし (防音扉のみ)	38.6	244.8
CASE-3	なし (防音扉のみ)	70.6	249.6
CASE-4	なし (防音扉のみ)	86.6	254.4
CASE-5	なし (防音扉のみ)	27.0	256.8
CASE-6	設置 (抵抗体なし)	18.4	304.8
CASE-7	設置+抵抗体1	62.4	307.2
CASE-8	設置+抵抗体2	89.6	310.8

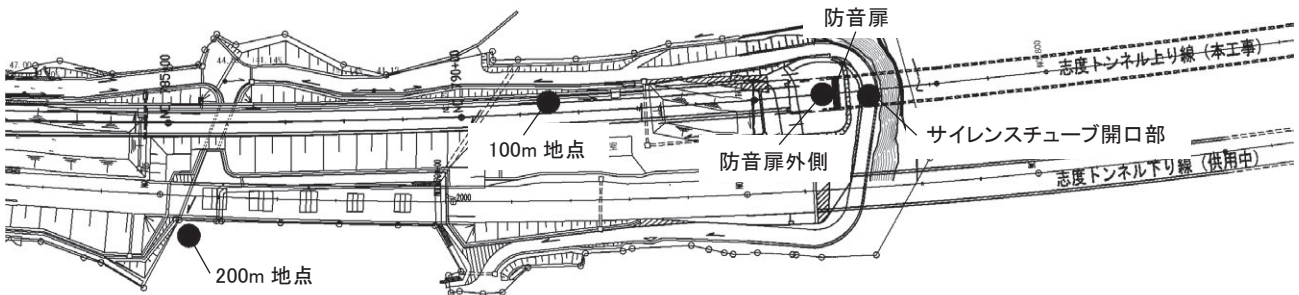


図-7 音圧計測位置



写真-3 防音扉外側での計測



写真-4 開口部での計測



写真-5 遠隔地点での計測

実験に用いた通気抵抗体の材料諸元を表-4に示す。

通気抵抗体には、縮尺モデル実験<sup>1)</sup>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。

計測時の掘削延長については、防音扉のみの計測期間中に地山状況が変化したため、同様の地山での発破において比較できるようにサイレンスチューブ設置後の計測は60m程度切羽が進んだ時点で実施した。

また、トンネルの内空幅以下の波長(約10.5m)を持つ音域については、断面方向に音圧分布を持つことが考えられる。今回の実験では、計測点を1点に固定しているため、音源となる切羽からの距離が異なると波長の短い周波数帯の評価が困難となる。したがって、実験では32Hz(≒340m/s/10.5m)以下の周波数について評価することとした。

#### 4. 実験結果

##### 4.1 音圧低減効果の検証

###### (1) 発破時の音圧

防音扉のみのケース(CASE-1~5)における防音扉外側での計測結果を図-8に示す。また、16Hz帯と20Hz帯の火薬量と音圧レベルの関係を図-9に示す。音圧低減を図った周波数付近では、各周波数帯で火薬量によらずほぼ一定の音圧レベルであることが確認できる。

そこで、防音扉のみのケースについては、各周波数の音圧レベルを平均化し、サイレンスチューブを設置するケースと比較した。

###### (2) サイレンスチューブの効果

サイレンスチューブを設置したトンネル坑内の状況を写真-6(通気抵抗体なし)および写真-7(通気抵抗体あり)に示す。

防音扉外側における各ケース(CASE-1~5は平均値)の音圧計測結果を図-10に示す。

効果を期待した周波数付近では、サイレンスチューブ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。

表-4 通気抵抗体の材料諸元

実験条件	材質	厚さ (mm)	重さ (g/m <sup>2</sup> )
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

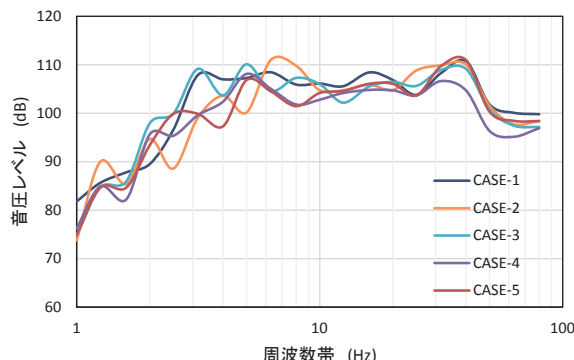


図-8 防音扉外側での計測結果(防音扉のみ)

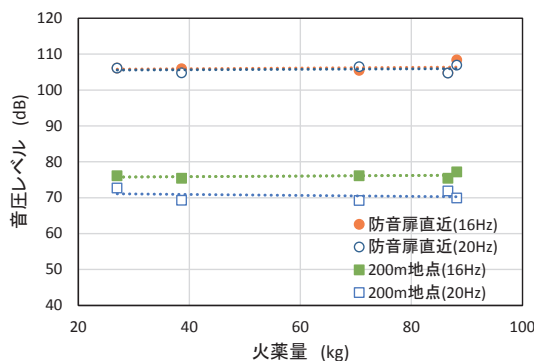


図-9 火薬量と音圧レベルの関係

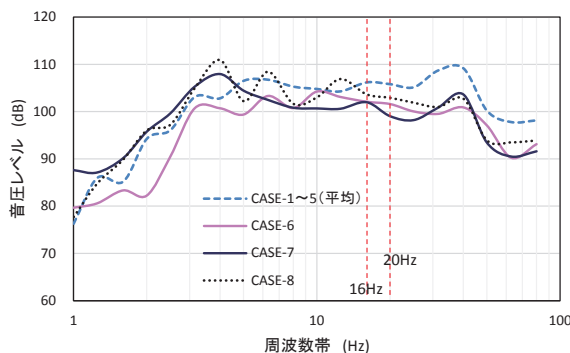


図-10 防音扉外側での音圧計測結果(比較)



写真-6 サイレンスチューブ設置(通気抵抗体なし)



写真-7 サイレンスチューブ設置(通気抵抗体あり)

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-11～図-13に示す。

ここでは、サイレンスチューブを設置したケース(CASE-6～CASE-8)について、設置しないケース(CASE-1～CASE-5)の平均値との差分を音圧低減量として比較した。なお、CASE-8における200m地点の計測データは、暗騒音の影響が大きく評価が困難なためデータ不良として除外した。

その結果、各ケースとも低減効果を期待した16Hz帯と20Hz帯においては、全ての計測位置において音圧低減ができていた。

また、CASE-6では低減対象周波数前後の周波数帯(12.5Hz, 25Hz)では、音圧の低減量が小さく計測位置によっては逆に音圧が増幅している(図-11)。

一方、通気抵抗体を設置したCASE-7では、12.5Hzから25Hz帯にかけてほぼ一様に音圧低減効果が表れている(図-12)。

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ケース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の音圧を低減できた。

**(3) 通気抵抗体の材質による影響**

縮尺モデル実験<sup>1)</sup>にて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-8)では、他のケースと比べ全体的に音圧低減量が小さく、12.5Hz帯においては音圧が増幅する結果となった(図-13)。

縮尺モデル実験時と今回の現場実証実験のサイレンスチューブ開口部での音圧レベルを表-5に示す。ここで、圧力値は下式により算出した。

$$Lp = 20 \cdot \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad \begin{array}{l} \text{ここに、} \quad Lp : \text{音圧レベル (dB)} \\ \quad \quad \quad P : \text{圧力 (Pa)} \\ \quad \quad \quad P_0 : 2.0 \times 10^{-5} \text{ (Pa)} \end{array}$$

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、圧力が大きく異なる。

そこで、通気抵抗体の材質による影響を定量的に評価するため、各素材に対して通気性試験を実施した。

試験はフラジール形法とし、通気面の圧力をパラメータにとり実施した。試験の状況を写真-8に示す。

各材質に対する通気性試験の結果を図-14に示す。

試験結果から、ポリエステル繊維は圧力と通気量がほぼ線形関係にあるのに対し、ガラス繊維クロスではその関係が非線形特性を持っている。

ここで、圧力を通気量で除した値の逆数を通気抵抗として示したものを図-15に示す。

ポリエステル繊維は圧力によらずほぼ一定の通気抵抗値であるが、ガラス繊維クロスでは圧力の増加にともない通気抵抗が大きくなる。

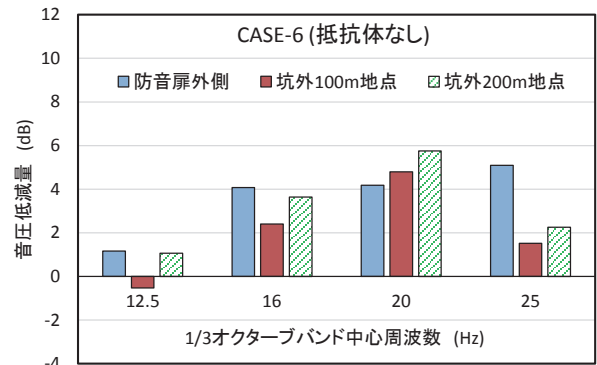


図-11 各計測位置での音圧低減量 (CASE-6)

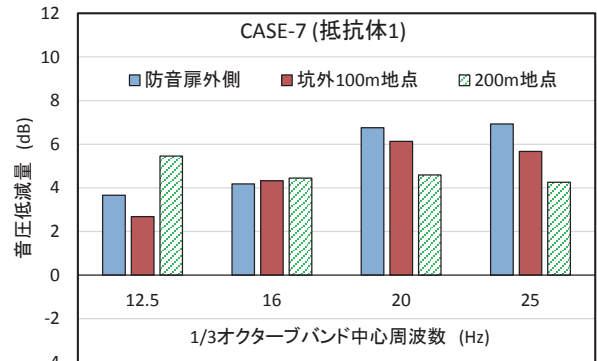


図-12 各計測位置での音圧低減量 (CASE-7)

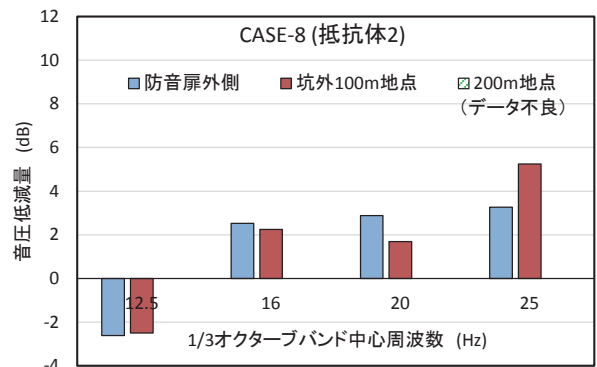


図-13 各計測位置での音圧低減量 (CASE-8)

表-5 サイレンスチューブ開口部での音圧レベル

実験ケース	材質	開口面での計測値	
		音圧レベル OA値 (dB)	圧力 (Pa)
縮尺モデル実験	ガラス繊維クロス	94～100	1～2
CASE-7	ポリエステル繊維	141	224
CASE-8	ガラス繊維クロス	143	283



写真-8 通気性試験状況 (フラジール形法)

縮尺モデル実験では、開口面での圧力が1~2Pa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0.7Pa・s/cm程度である。

一方、現場実証実験における実際の発破では、224~283Paと縮尺モデル実験に比べて非常に大きな圧力が作用していた。その圧力下におけるガラス繊維クロス等の通気抵抗は4~5Pa・s/cmであるため、サイレンスチューブ内に入射する音圧の減衰が縮尺モデル実験時よりも大きく、音圧低減効果が低くなったと考えられる。

現場実証実験で音圧低減効果の高かったポリエステル繊維の通気抵抗は圧力によらず1.1~1.3Pa・s/cmと一定であるため、サイレンスチューブに設置する通気抵抗体としては、通気抵抗が1Pa・s/cm前後の材質が効果的であると考えられる。

#### 4.2 耐久性の検証

サイレンスチューブの開口部で計測した発破時の音圧記録を図-16に示す。発破時には、最大1.8kPaの圧力が通気抵抗体に外力として作用していた。

現場では、通気抵抗体を平織網で養生したものと養生を行わないものを試験的に配置して発破に対する耐久性を比較した。

1ヶ月間施工を継続した後のサイレンスチューブの状態を写真-9に示す。養生を行わなかった通気抵抗体には破れ等の損傷が生じたのに対し、養生を行ったものには損傷は見られず、十分な耐久性が検証できた。

#### 5. まとめ

現場実証実験により、サイレンスチューブの現場での適用性および実規模での低周波音低減効果を検証することができた。

今後は、周辺への環境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。

なお、本実験にあたりご協力を頂きました(株)アイ・エヌ・シー・エンジニアリングの関係各位に謝意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 角田晋相ほか：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、錢高組技報 No. 40, pp. 9-14, 2015年
- 2) 角田晋相ほか：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, pp. 1501-1502, 平成27年9月
- 3) 角田晋相ほか：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, pp. 823-824 平成28年9月

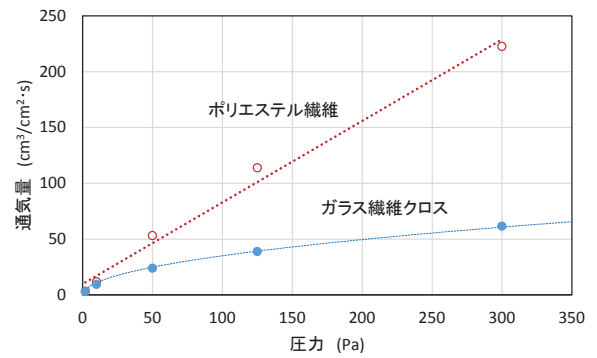


図-14 通気性試験結果

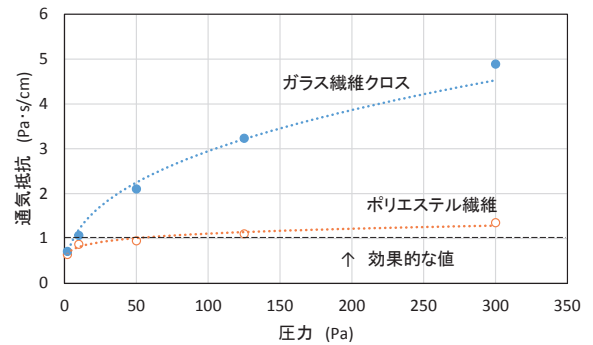


図-15 圧力と通気抵抗の関係

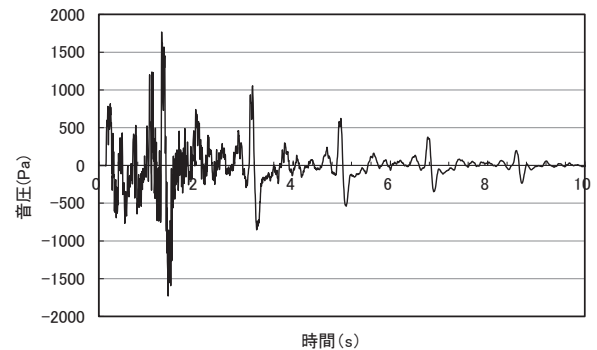


図-16 サイレンスチューブ開口部での音圧記録



写真-9 施工継続後のサイレンスチューブの状態

(左:養生あり、右:養生なし)