

# 音響管を用いたニューマチックケーソンの排気騒音低減装置の開発

Development of reduction device using acoustic tubes for exhaust noise from the material lock of Pneumatic caisson.

角田晋相\*1

## 概 要

ニューマチックケーソン工法は、他の基礎工法と比べ有利な特徴を持っていることから広く採用されている。しかし、市街地での施工においては高圧空気の排気に伴う騒音発生が問題となる。一般的には、消音マフラーによる騒音対策が行われるが必ずしも全周波数帯で十分な効果は得られていない。

そこで、音響管の共鳴原理を用いた消音装置を従来の消音マフラーに付加することで、消音効果を向上させる技術を開発した。開発においては、縮尺モデルによる実験で排気騒音に対する適用性および効果を確認し、実施工に導入することで実機での音圧低減効果を検証した。

key words : ニューマチックケーソン、排気騒音対策、音響管、共鳴

## 1. はじめに

土木工事では、建設機械の稼動により発生する騒音・振動が周辺の環境に与える影響が大きいため、施工現場ではそれらを低減する対策が求められる。基礎工法の一つであるニューマチックケーソン工法は、他の工法に比べ騒音・振動の少ない工法であるが、市街地ではマテリアルロックからの高圧空気の排気に伴う騒音発生が問題となる。一般的な排気騒音対策として用いられる消音マフラー（図-1）は高音域の音圧を大幅に低減するが、中音域以下の周波数帯に対しては効果が小さく十分な対策になっているとは言い難い。

そこで、中音域の音圧低減を対象に音響管を用いた消音装置を考案し、排気音に対する適用性を検討した。

本稿では開発において実施した縮尺モデル実験<sup>1)</sup>と実

際の施工に適用して効果を検証した結果について述べる。

## 2. 技術概要

### 2.1 消音原理

音響管の共鳴原理を利用した消音装置として、片端閉塞管による反射波を利用して特定周波数帯の音圧レベルを低減するサイドブランチ型消音器が様々な分野でよく用いられる。

サイドブランチ型消音器の原理を図-2に示す。消音の原理は、主管に対して枝管となる音響管を取り付けて音響管内の音波が主管の音波の逆位相になるように音響管の長さを調節して音圧を低減する技術である。

消音対象となる音域は、音響管の長さが1/4波長に相当する周波数帯である。

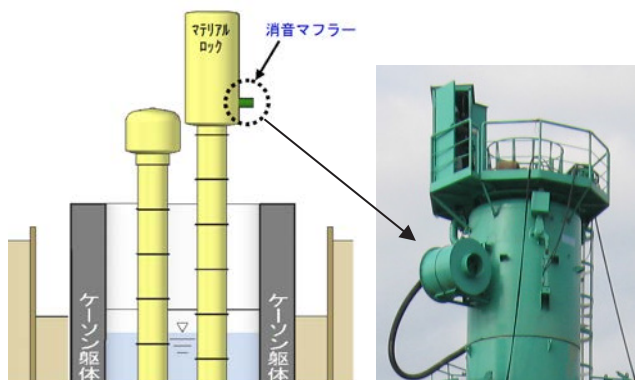


図-1 一般的な排気騒音対策

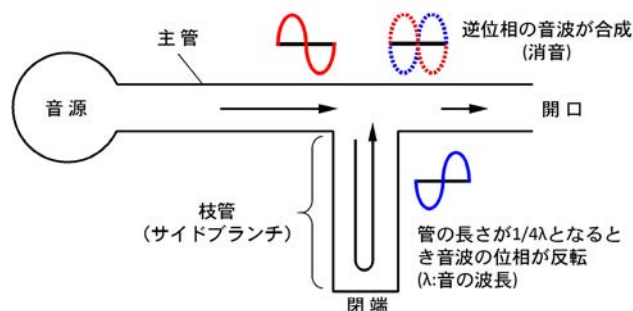


図-2 サイドブランチ型消音器の原理

\*1 Shinsuke TSUNODA

## 2.2 課題と対策

音響管による消音装置は、対象となる特定周波数帯の音圧低減に大きな効果がある一方、ニューマチックケーンにおける高圧空気の排気のように流速が速い部分で消音を行う場合には、**図-3**に示すように音響管の入口で乱流が発生する。その結果、消音とは逆に音圧上昇を引き起こすといった課題がある。

そのため、本技術では**図-4**に示すように音響管の入口に通気性のフィルターを設置することで、排気主管の内面を平滑にして乱流の発生を防止する構造とした。

## 2.3 開発技術

開発した消音装置の概要を**図-5**に示す。本消音装置は、従来の消音マフラーと併用することを前提に既存のマフラー出口(**写真-1**)に容易に設置可能な構造とした。

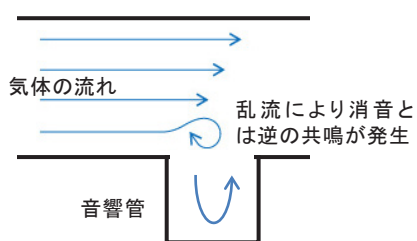


図-3 音響管による乱流の発生

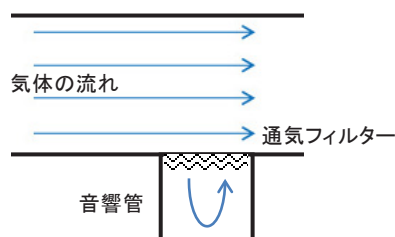


図-4 通気フィルターによる乱流の防止イメージ

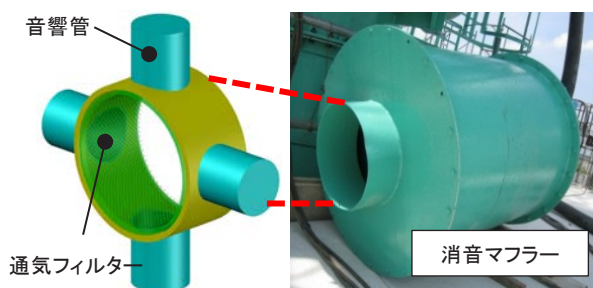


図-5 消音装置の概要図 写真-1 既存の消音マフラー

## 3. 縮尺モデル実験

### 3.1 試験音響管

音響管による音圧低減効果を把握するため、1/5 縮尺の試験音響管を用いた実験を実施した。製作した試験音響管を**写真-2**に、その詳細を**図-6**に示す。音響管の取付け向きは、開口面が主管断面に直交する方向とした。

音響管の効果を効率よく得るには、主管内で平面波が

成立する必要がある。また、平面波が成立する最大の周波数は主管の直径に依存する。したがって、実験において消音対象とする最大周波数  $f_{max}$  は以下の通りとした。

- ・ 管径による平面波成立周波数 (最大周波数)

$$f_{max} = 0.5861 \times c / a \text{ [Hz]}$$

( $c$ : 音速 = 340 [m/s],  $a$ : 主管の直径 [m])

- ・ 試験音響管の主管径  $a = 80.7\text{mm}$

$$f_{max} = 2,469 \text{ [Hz]} \approx 2.5 \text{ [kHz]}$$

周波数と波長の一覧を**表-1**に示す。音響管の共鳴は、管の内部だけでなく開口端付近の空気も付加的に振動する。このため、音響管の共鳴周波数は、管の長さから算出される周波数よりも小さくなる。実験では音響管の開口端補正を考慮した上で 2.0~2.5kHz 付近に効果が得られるように音響管長さを設定した。

また、気体の流れで発生する乱流を防止するために設置する通気フィルターには、ポリエステル繊維不織布を用いた。



写真-2 製作した試験音響管

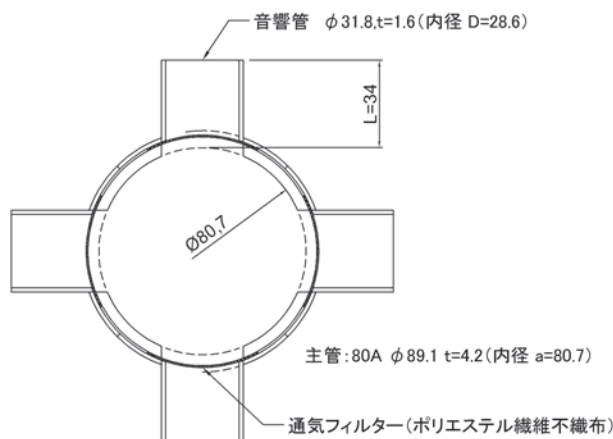


図-6 試験音響管の詳細図

表-1 波長と周波数の一覧

周波数 $f$ (Hz)	音速 $c$ (m/s)	波長 $\lambda$ (m)	$1/4\lambda$ (mm)	管長 $L$ (mm)	開口端補正 $1/4\lambda - L$
2,000	340	0.170	42.5	34.0	8.5
2,200	340	0.155	38.6	34.0	4.6
2,500	340	0.136	34.0	34.0	0.0

### 3.2 模擬音波による音響実験

#### (1) 実験概要

音響管の適正な配置と音圧低減効果を確認するため、スピーカーからの模擬音 (Pink-Noise) による音響実験を実施した。音響実験の概要を写真-3、音圧計測状況を写真-4に示す。実験に使用した機材を表-2に示す。実験では、試験音響管の前方に配置したマイクロホンおよび騒音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って周波数特性を把握した。

実験における音響管の配置を表-3に示す。実験では、主管の断面積に対して配置する音響管の総断面積の比を因子にとり、音圧低減量との関係を確認した。

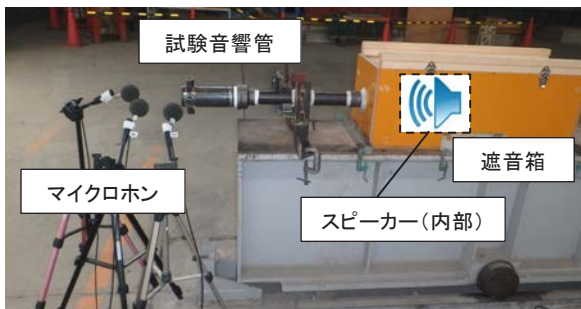


写真-3 音響実験の概要



写真-4 音圧計測状況

表-2 使用機材

名称	形式	メーカー	数量
騒音計ユニット	LA1440	小野測器	3
周波数分析器	DS2000	小野測器	1
データレコーダ	DA-40	リオン	1
ノイズ発生器	SF-06	リオン	1
パワーアンプ	DA-250D	TOA	1
小型音源スピーカー	MS-P08A	エレコム	1

表-3 音響管の配置

試験体名	主管 $\phi 80.7$	音響管 $\phi 28.6$		断面積比 $\Sigma A_r/A$
	A (mm <sup>2</sup> )	数量	$\Sigma A_r$ (mm <sup>2</sup> )	
N0	5,115	-	-	0%
N1	5,115	1	642	13%
N2	5,115	2	1,285	25%
N4	5,115	4	2,570	50%
N6	5,115	6	3,854	75%
N8	5,115	8	5,139	100%

#### (2) 実験結果

試験体 N0、N4、N8 の音圧計測結果を図-7に示す。音響管がない試験体 (N0) に対し、音響管を設置した試験体 (N4、N8) では、2kHz 付近の音圧レベルが大幅に低いことが確認できた。

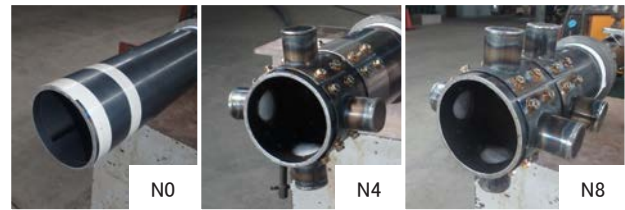


写真-5 試験体の一例

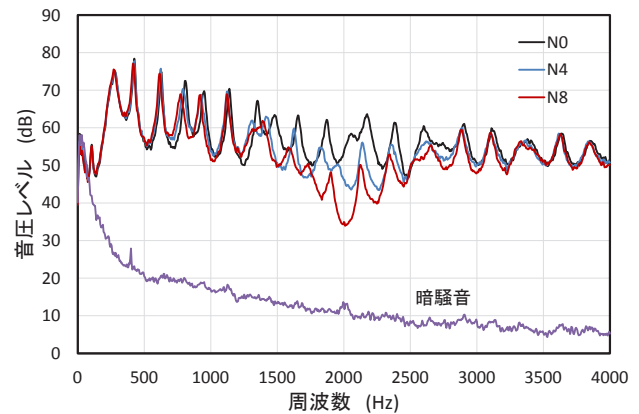


図-7 音圧計測結果 (N0, N4, N8)

各ケースの 1/3 オクターブバンドでの音圧低減量を図-8に示す。音響管による音圧低減効果は、音響管を配置しない試験体 N0 の音圧測定結果を基準に、各ケースの測定結果との差分を音圧低減量として評価した。

音響管を配置した全てのケースにおいて消音対象とした周波数帯の音圧レベルを低減できており、音響管の本数が多いほど効果が大きい結果が得られた。

1/3 オクターブバンド中心周波数 2kHz における音圧低減量と断面積比の関係を図-9に示す。音圧低減量は断面積比とほぼ比例関係にあり、断面積比が 100% の試験体 N8 においては、消音対象である 2kHz 帯の音圧レベルを 14dB 以上低減することが確認できた。

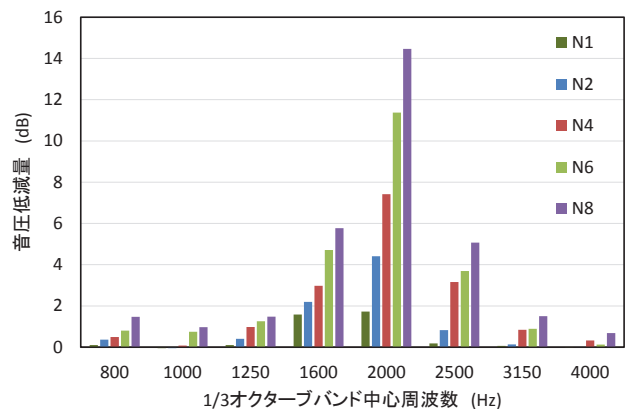


図-8 各ケースの音圧低減量

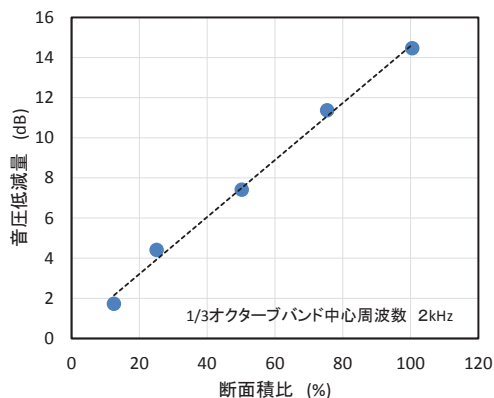


図-9 音圧低減量と断面積比の関係

また、N2 試験体においては写真-6 に示すように、音響管の配置を対向配置および直交配置についても実験を行い、その向きによる影響を確認した。

音響管を対向または直角に配置した場合の音圧計測結果を図-10 に示す。

音響管を主管の同一円周上に複数配置する場合は、音響管の開口面を対向する向きに配置することで、向き合う音響管同士の相乗効果により、音圧低減効果が高まると考えられる。

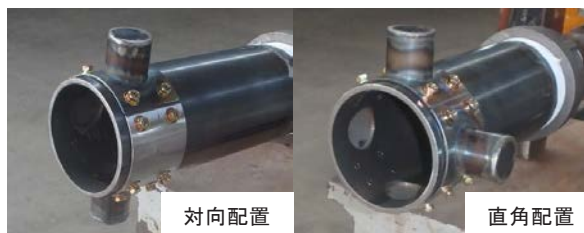


写真-6 N2 試験体における音響管の配置

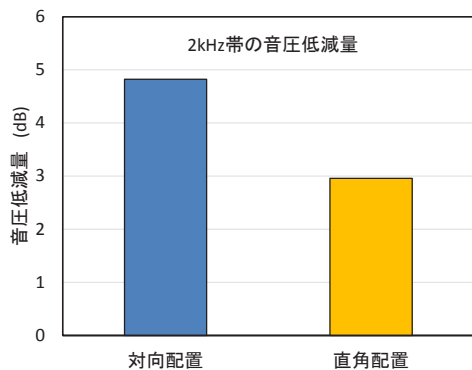


図-10 音響管向きの違いによる音圧低減量の比較

### 3.2 送風実験

#### (1) 実験概要

高压空気の排出に伴う排気音に対する音響管の効果および配置の影響を確認するため、コンプレッサーを用いた吐出空気による送風実験を実施した。

実験に使用した機材を表-4 に、実験の状況を写真-7、写真-8 に示す。実験時の排気流速は、熱線風速計を用いて計測した。なお、音圧の計測および分析方法は音響

実験と同様とした。

送風実験に用いた試験体を写真-9 に示す。実験は、音響管を配置しない試験体 N0 を基準に、試験体 N8 に対して通気フィルターの有無による 2 ケースを行った。

表-4 送風実験での使用機材

名称	形式	仕様	数量
コンプレッサー	PDS-390S	吐出空気量: 11m <sup>3</sup> /min	1
熱線風速計	Model 6113	風速~50m/s (KANOMAX製)	1



写真-7 使用コンプレッサー



写真-8 送風実験における計測状況



音響管のみ 通気フィルター設置

写真-9 送風実験の試験体

#### (2) 実験結果

各ケースの音圧計測結果を図-11 に示す。なお、実験時の排気流速は 43.0~49.2m/s であった。送風実験においても音響管により、2~2.5kHz 付近の音圧を大幅に低減できていることが確認できた。通気フィルターの有無

で比較すると、音圧低減のピーク周波数においては、音響管のみの方が低減効果は高い結果が見られる。これは、通気フィルターが抵抗となり音響管内に入射する音圧が減衰するため、音響管のみの場合に比べピーク周波数における低減効果が抑えられてしまうと考えられる。

1/3 オクターブバンドで評価した音圧低減量を図-12に示す。音響管のみのケースでは、1,250Hz 帯において音圧低減量がマイナスとなり音圧増幅する領域が見られたが、通気フィルターを設置したケースでは音圧増幅が抑えられる結果が得られた。

また、前述のとおり通気フィルターを設けた場合は、ピーク周波数での音圧低減は小さくなるが、1/3 オクターブバンドで評価すると、音響管のみよりも通気フィルターを設置した方が全体的に音圧低減効果は向上することが確認できた。

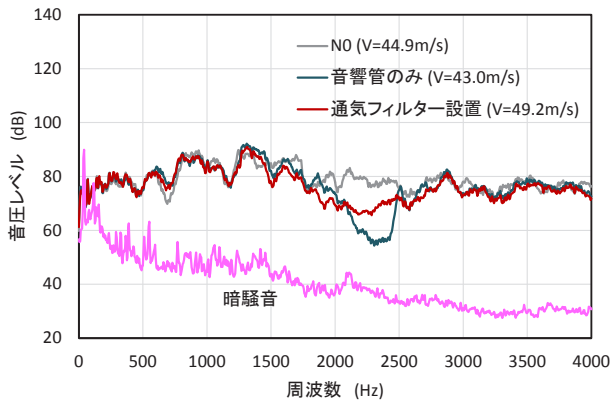


図-11 送風実験での音圧計測結果

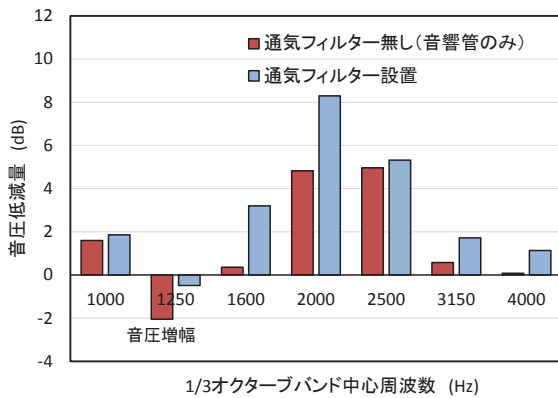


図-12 送風実験における音圧低減量

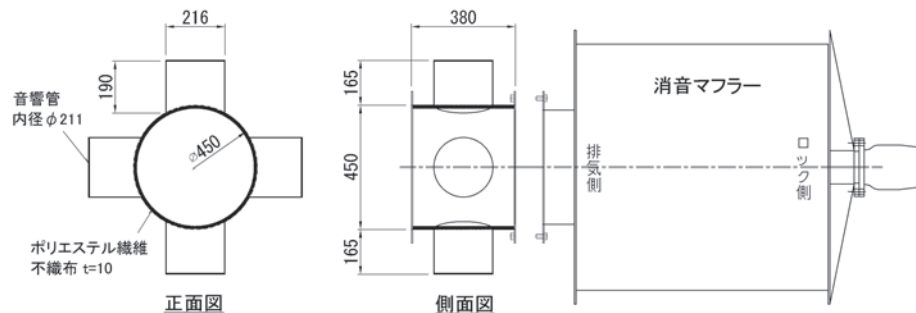


図-13 実機消音装置の概要

#### 4. 現場実証実験および適用事例

##### 4.1 目的および概要

開発した排気騒音低減装置をニューマチックケーソン工法による橋梁下部工事に導入し、実機における音圧低減効果を検証した。

導入現場の概要を以下に示す。

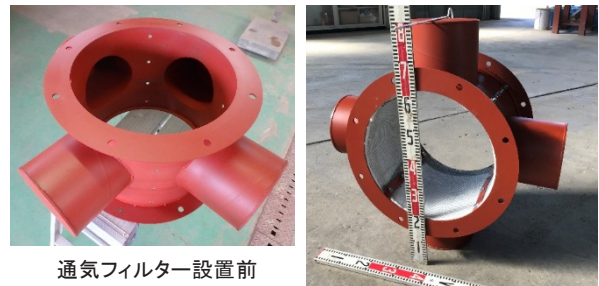
工事名：横浜湘南道路小雀高架橋下部(その4)工事  
 工事場所：神奈川県横浜市戸塚区小雀町地先  
 工事内容：ニューマチックケーソン基礎工 5基  
 発注者：国土交通省関東地方整備局

現場導入に向け設計した消音装置の概要を図-13に、製作した実機の消音装置を写真-11に示す。実機における消音対象は350~450Hz (400Hz帯)とし、排気主管の断面積に対する音響管の総断面積の比は88%とした。

現場での計測に用いた機材を表-5に示す。また、計測の状況を写真-12に示す。実験では、消音装置の出口から1.5m離れた位置にマイクロホンを設置し音圧計測を行った。



写真-10 ニューマチックケーソン施工状況



通気フィルター設置前

写真-11 製作した消音装置

表-5 現場計測に用いた機材

名称	形式	メーカー	数量
騒音計	NL62	リオン	1
熱線風速計	Model 6113	KANOMAX	1



写真-12 現場での計測状況

4.2 現場計測結果

現場では、音響管による消音装置を配置したケース(写真-12)と消音マフラーのみのケース(写真-13)について、それぞれ複数回の計測を行い、計測時の排気流速が同様だった計測ケースについて比較を行った。

音圧の計測結果を図-14に示す。この時の排気流速は、音響管配置ケースが 16.9m/s、消音マフラーのみのケースが 16.4m/s である。計測の結果、消音対象とした 400Hz 帯において 8.4dB の音圧低減が確認できた。

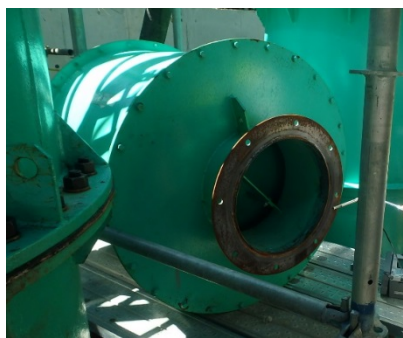


写真-13 消音マフラーのみ

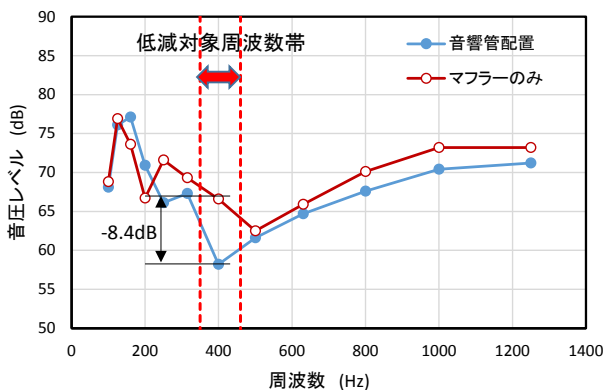


図-14 現場での音圧計測結果

5. まとめ

考案した排気騒音低減装置において実施した縮尺モデル実験の結果、以下のことが確認できた。

- ・配置する音響管の総断面積と音圧低減効果は線形管径にある。
- ・音響管の開口面を対向する向きに配置することで、音圧低減効果が高まる。
- ・音響管の開口面に通気フィルターを設置することで、排気流速による音圧増幅が抑えられ、全体的に音圧低減効果が向上する。

また、本装置の実現場への適用により、実機においても音圧低減効果を検証することができた。

本技術は、音響管の長さを調節することで様々な周波数帯の音圧低減に対応できるため、状況に応じた設計が可能である。

今後は、環境対策技術として積極的に現場適用を行うとともに、排気を伴うその他の対策にも展開していきたい。

【参考文献】

- 1) 角田晋相、原田尚幸：音響管を用いたニューマチックケソン排気騒音低減技術の開発、土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会、VI-1076、令和元年 9 月。
- 2) 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、銭高組技報 No. 40、pp. 9-14、2015 年
- 3) 宮崎哲也ほか：両端開口管によるトンネル発破低周波音低減装置、日本音響学会 振動・騒音研究会資料、N-2017-49、2017 年