

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

Development of Silencer System to reduce Low frequency sound by Open pipe resonance

角田晋相*1 安部 剛*2 笠水上光博*3 森川真圭*4

概要

山岳トンネルの施工においては、発破による騒音対策としてトンネル坑口に防音扉を設置することが多い。しかし、防音扉では発破に伴う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。それに対し、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いる。

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、両端が開口された音響管による低周波音低減技術を開発した。

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、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。一般的に、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っている。

一方、近年では低周波音に対して共鳴器を利用した消音装置が開発され実用化されている。

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」(図-1)を開発した。

開発では、縮尺モデルによる音響実験で音圧低減効果の検証を行い、実際のトンネル工事に導入して現場での適用性および低周波音の低減効果を確認した。

2. 音響管の概要

2.1 消音原理

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付近の音圧を低減することである。

図-2 に共鳴による消音原理を示す。両端の開口から同位相で入射する音の波は、音響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、両端の開口部では共鳴周波数の音圧が小さくなる。最も効果が期待できるのは、管の長さが1/2波長に相当する周波数である。

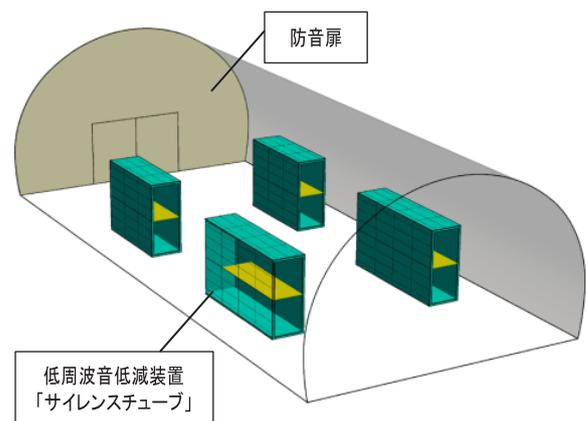


図-1 低周波音低減技術のイメージ

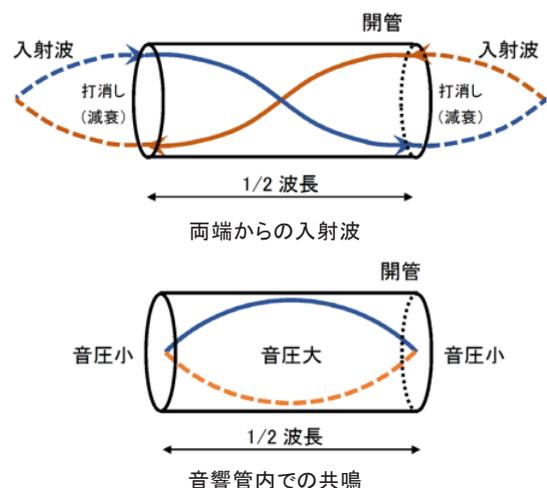


図-2 音響管の消音原理

*1 Shinsuke TSUNODA

技術本部技術研究所 主任研究員

*2 Takeshi ABE

技術本部技術研究所 研究員

*3 Mitsuhiro KASAMIZUKAMI

技術本部技術研究所 主席研究員

*4 Masayoshi MORIKAWA

東北支店土木部

2.2 音響管の配置

音響管のトンネル坑内への設置方法について効果の得られる配置を解析的に検証した。

トンネル坑内空間の音圧分布を図-3 に示す。防音扉で閉ざされた閉塞空間内では、閉塞端部（防音扉部）で音圧の腹（音圧が最大）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 波長間隔に音響管の開口を配置することで、入射波の音圧は最大となり消音効果が最大となる。

音響管の配置形状は、図-4 に示すように直管をトンネル軸と直交する向きに設置することで、管内への入射波は同位相となり共鳴による消音効果が期待できる。

また、図-5 に示すように直管をトンネル軸方向に設置した場合には、各々の開口において逆位相となるため共鳴は生じない。

車両通路の確保および設置の容易さを考慮すると、図-6 に示すように音響管をU字状とし、両端の開口を坑内空間の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共鳴による音圧低減が図れる。

各配置形状での音響解析結果を図-7 に示す。直管を軸直角向きに配置したケースとU字状のケースでは、音圧低減効果が表れるが、軸方向に直管を配置したケースでは音圧を低減できない。

3. 縮尺モデル実験

3.1 実験概要

両端開口の音響管による音圧低減効果を確認するため、1/5 縮尺のトンネルを模擬した空間内で音響実験を実施した。

実験空間を写真-1 に示す。実験空間は、40~100Hzの周波数帯において一次音現場（平面波）が成立するように、直径3.0mの半円筒（断面積4.7m²）で長さは6.0mとした。

音響実験の概要を図-8 に示す。実験は、実験空間の端部に設置したスピーカ（写真-2）からピンクノイズを発生させて行い、他端側の空間内部においてマイクロホン（写真-3）により音圧を計測した。

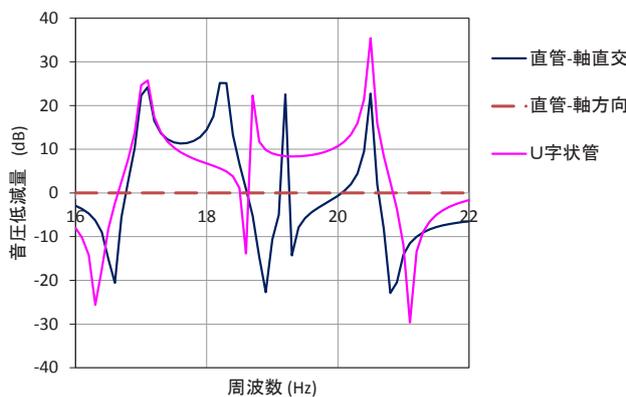


図-7 解析による各ケースの音圧低減量

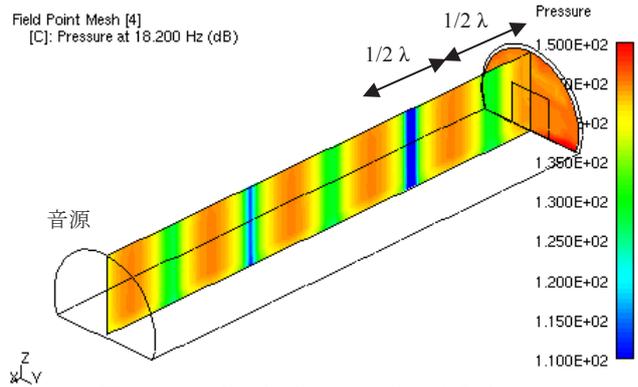


図-3 トンネル坑内の音圧分布(解析値)

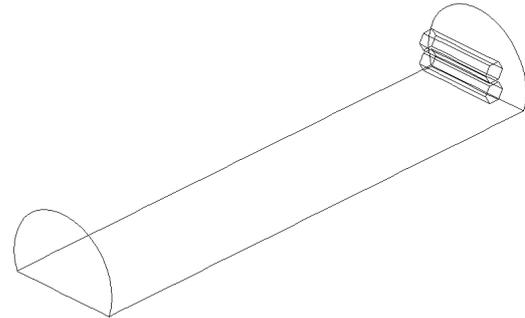


図-4 直管のトンネル軸直交配置

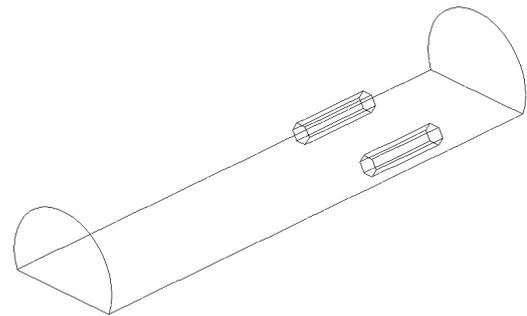


図-5 直管のトンネル軸方向配置

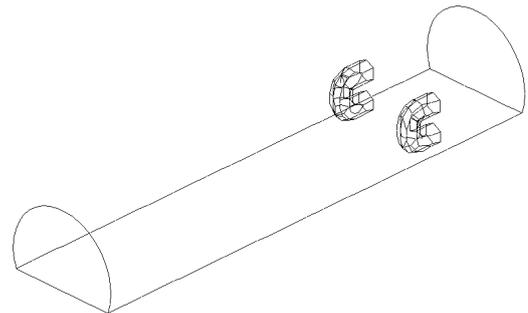


図-6 U字状音響管配置

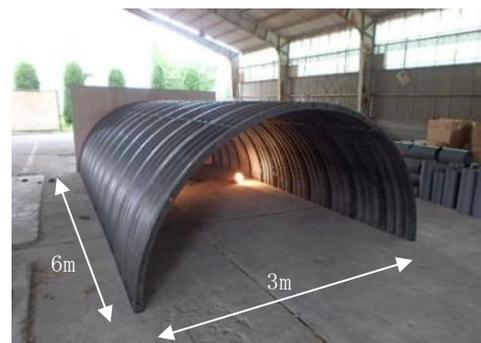


写真-1 縮尺モデル実験空間

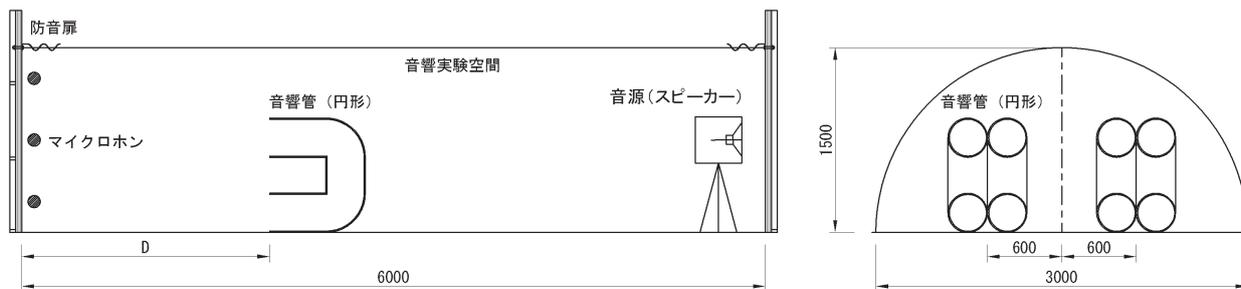


図-8 音響実験の概要



写真-2 音源スピーカー



写真-3 計測用マイクロホン



写真-4 円形断面音響管の設置

実験に用いた音響管の仕様を表-1に示す。

音響管の長さは、実規模の16Hzに相当する80Hz付近の周波数帯を低減する長さとした。

管の断面形状は、円形断面(写真-4)のほか坑内への配置効率を考慮し矩形断面(写真-5、図-9)とした。

実験では、音響管の断面形状や設置本数、開口面積による音圧低減効果への影響を確認した。

3.2 実験結果

(1) 実験空間の特性

実験空間に音響管を配置せず、ピンクノイズ駆動により計測した音圧レベルを図-10に示す。

計測結果では、100Hz以下の周波数帯では、すべてのマイクロホンで音圧レベルが一致しており、一次音現場が実現できていた。

よって、周波数が100Hz以下の帯域においては、実験により適切な評価が可能と考えられる。

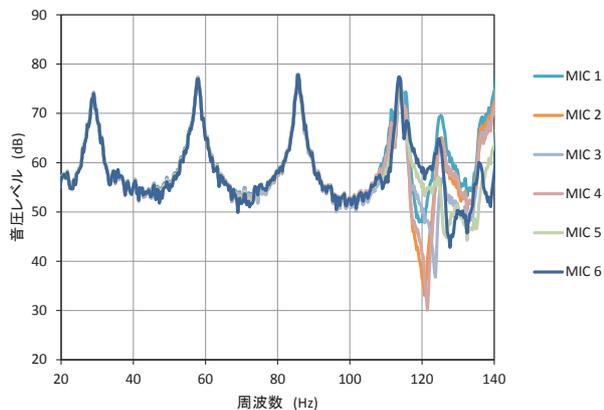


図-10 実験空間の音圧特性



写真-5 矩形断面音響管の設置

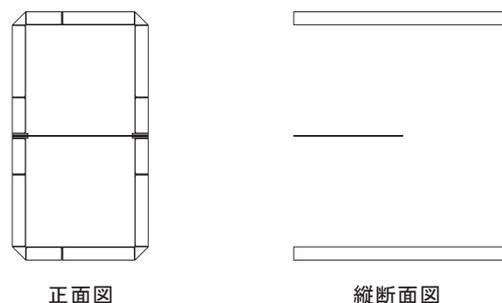


図-9 矩形断面音響管図

表-1 実験に用いた音響管の仕様

断面形状		材質	使用本数(本)
形状	寸法		
円形	φ300	塩ビ(VU)	2~4
	φ200	塩ビ(VU)	2~9
	φ65	塩ビ(VU)	4~20
矩形	□450*450	鋼製型枠	1~2
	□450*300	鋼製型枠	1~2
	□300*300	鋼製型枠	1~3

(2) 音響管の効果

図-11 に音響管がない場合とφ300mmの音響管4本を防音扉に向けて配置した場合の音圧計測結果を示す。

音響管を配置することで、74~89Hzの周波数帯域幅において音圧が低減した。また、開口端補正長を含めた管の長さに対応する周波数が音圧低減のピークとなることが確認できた。

音響管がない場合との差分を音圧低減量として図-12に示す。低減周波数帯域幅では、音圧を15~20dB程度低減できていた。

(3) 開口の向きによる影響

空間内に設置する音響管の開口方向について、表-2に示す実験ケースを実施し、音響管の向きの違いが音圧低減効果に及ぼす影響を確認した。

各ケースの音圧低減量を図-13に示す。各ケースとも同じような音圧低減効果が得られているが、図-14に示すように低減効果を比較すると、開口を軸直角方向に設置したcase 3は、やや効果が低く表れている。

これは、実験を行った空間内において、音圧の腹となる空間断面に対して、音響管の開口位置がずれるためと考えられる。

したがって、音響管の開口は対象波長の音圧が卓越する空間断面に軸方向に向けて設置する方が効果的である。

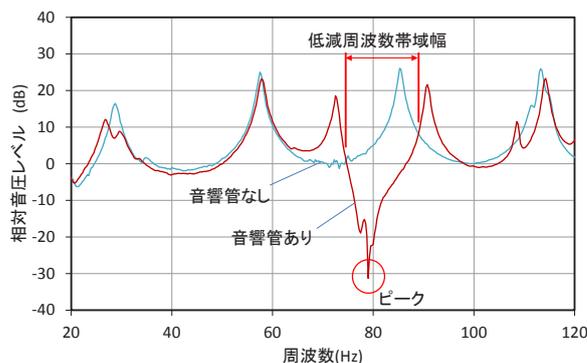


図-11 音圧計測結果

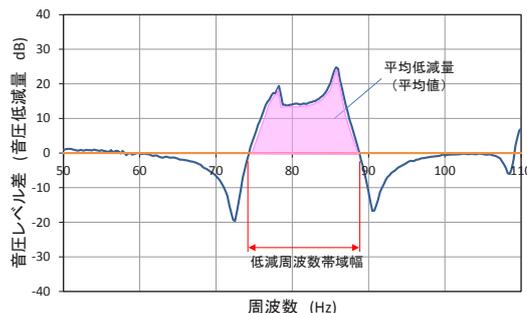


図-12 音響管による音圧低減量

表-2 開口方向に関する実験ケース

実験ケース	断面形状	設置本数 (本)	開口方向
case 1	φ 300	4	防音扉側
case 2	φ 300	4	音源側
case 3	φ 300	4	軸直角方向

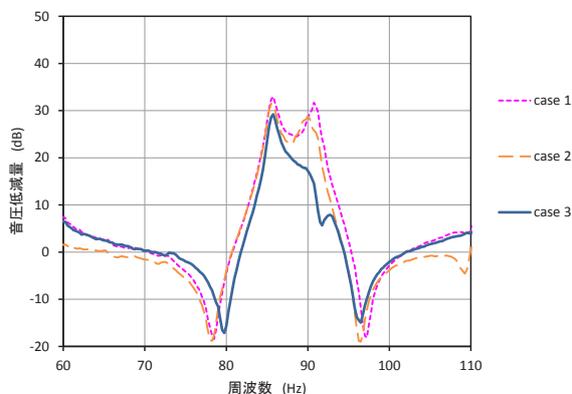


図-13 開口方向の違いによる実験結果

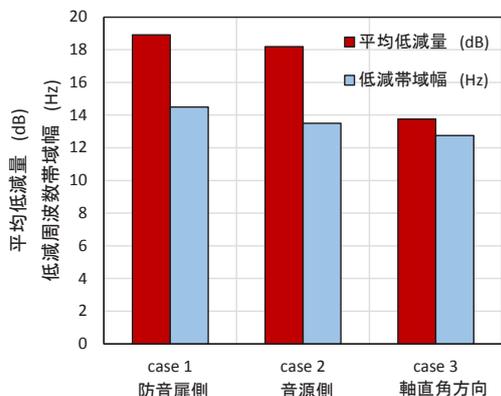


図-14 開口方向の低減効果の比較



写真-6 音源側に向けた配置



写真-7 軸直角方向に向けた配置

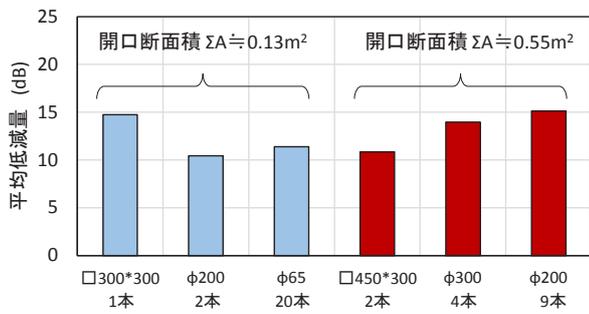


図-15 各実験ケースの平均低減量

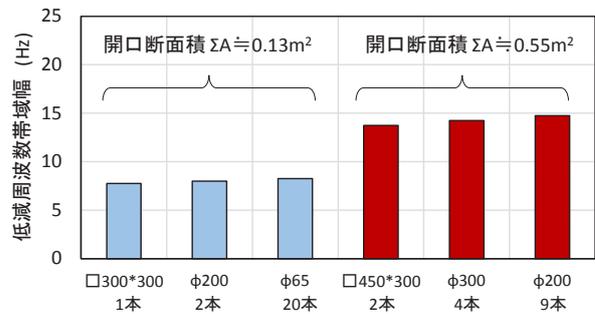


図-16 各実験ケースの低減周波数帯域幅

(4) 断面形状・設置本数による影響

音響管による音圧低減効果を定量的に評価するため、低減周波数帯域幅とその周波数域内における音圧低減量の平均値を指標にとり、断面形状および設置本数の影響について検討した。

図-15 に設置する音響管の開口断面積の総和が、ほぼ同一の場合における音圧低減量を示す。

音圧の平均低減量については、各ケースとも 10dB 以上あり、音響管の断面形状や本数、開口断面積との関係性はあまり見られない。

同様に、低減周波数帯域幅についての比較を図-16 に示す。開口断面積が同一の場合、断面形状や設置本数によらず低減周波数帯域幅はほぼ一様であり、開口断面積が大きくなれば低減できる周波数の幅が広がる傾向が見られた。

ここで、実験空間の断面積に占める音響管の開口断面積の割合を開口面積比とし、実施したすべてのケースについて、低減効果との関係性を確認した。

開口面積比と音圧低減量の関係を図-17 に示す。開口面積比が大きくなれば、平均低減量もやや増加する傾向にあるが、相関性はあまり高くない。実験では、開口面積比が4%以上で10dBの音圧低減ができていた。

開口面積比と低減周波数帯域幅の関係を図-18 に示す。

ここでは、各実験ケースの周波数帯域幅を一様に評価するため、帯域幅を中心周波数で除した比帯域を用いて比較した。

両者には比較的高い相関性が見られ、音響管の総開口面積を大きくすることで低減する周波数帯域幅が広がることが確認できた。

(5) 音圧増幅部の減衰

前述より、両端開口の音響管による音圧低減効果が期待できることが確認できたが、低減周波数帯域幅の前後には音圧が増幅する領域が見られる。

そこで、音響管の開口面に通気性のある抵抗体を付加することで入射波の粒子速度を低下させて増幅部分の減衰を図った。

実験では、抵抗体としてガラスクロス (EP16A) を使用し、開口面に1枚付加した場合と2枚を重ね合わせて付加した場合について比較した。

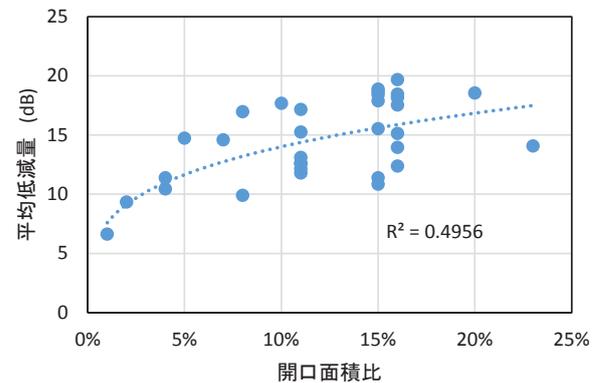


図-17 平均低減量と開口面積比の関係

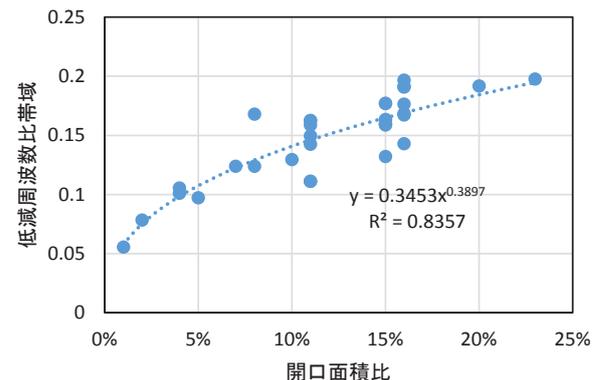


図-18 低減周波数比帯域と開口面積比の関係



写真-8 抵抗体を付加した音響管

抵抗体の有無による音圧低減量を図-19 に示す。

開口部に抵抗体を設けることで、低減対象域前後の音圧増幅を大幅に抑えることが確認できた。

抵抗体の枚数による低減効果の比較を図-20 に示す。音圧の入射抵抗を大きくすることで、増幅量を抑えられ

る傾向にあるが、低減量も減少するため、実用にあたっては適切な抵抗体の選定を検討していく必要がある。

4. 現場導入による効果の検証

(1) 適用現場の概要

工 事 名：大船渡綾里三陸線小石浜トンネル築造工事
 工事場所：岩手県大船渡市三陸町綾里地内
 発 注 者：岩手県
 工事概要：NATM トンネル (L=854m)

(2) 音響管の配置

トンネル坑内への音響管の設置状況を写真-9 に示す。トンネル横断方向には左右に音響管を配置し、内空断面に対して1断面あたりの開口面積比を8%とした。縦断方向には2列配置し、それぞれ異なる周波数帯を対象とする音響管を用いた。

音響管の開口面には、抵抗体としてガラスクロス1枚を設置した。

(3) 発破音計測結果

防音扉の外側で計測した音圧レベルを図-21 に示す。音響管を設置することで、低減対象とした10~20Hzの周波数帯域において音圧を約4dB低減できていることを確認した。

5. まとめ

開発において実施した実験から、両端開口の音響管による音圧低減効果と開口面積との関係性が確認できた。また、現場導入により、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、本開発は(株)アイ・エヌ・シー・エンジニアリングとの共同研究により行ったものであり、開発においてご指導ご協力を頂きました関係各位に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 角田他：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、平成27年9月



写真-10 現場での音圧計測

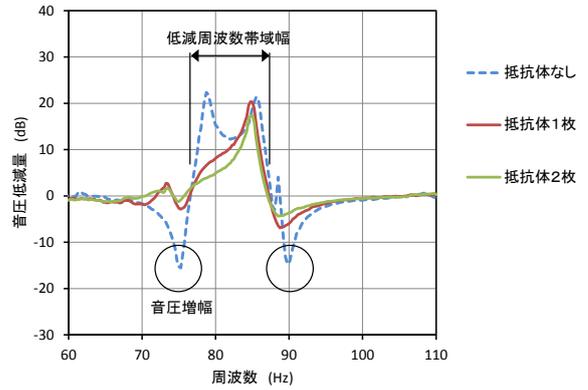


図-19 抵抗体の有無による音圧低減量

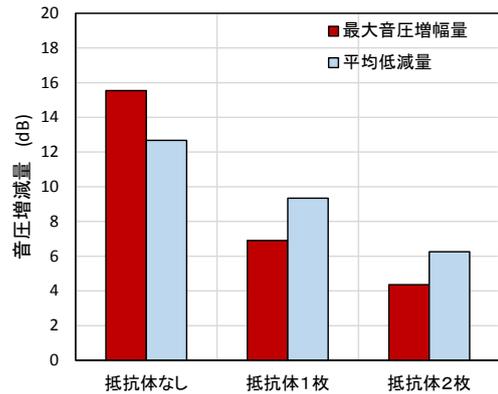


図-20 抵抗体による低減効果の比較



写真-9 現場での音響管配置

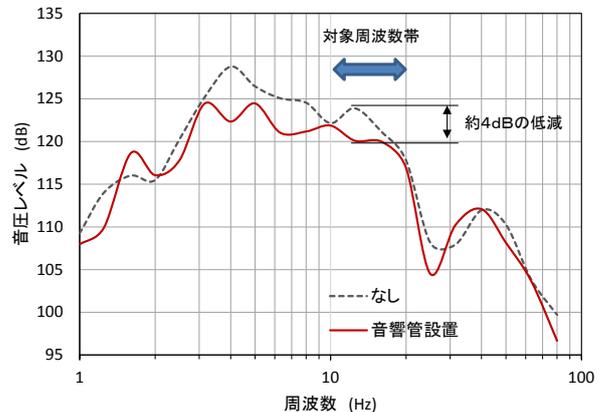


図-21 現場での音圧計測結果