

トンネル発破超低周波音を対象とした音響管による消音効果の検討

Study on noise reduction using tube resonators for infrasound occurred by tunnel blasting

岩根 康之^{*1}

Yasuyuki Iwane

筒井 隆規^{*2}

Takanori Tsutsui

小林 真人^{*1}

Masahito Kobayashi

渡邊 博^{*3}

Hiroshi Watanabe

内田 季延^{*1}

Hidehito Uchida

安田 洋介^{*4}

Yosuke Yasuda

【要旨】

トンネル工事の発破により発生する超低周波音は、近隣民家などの建具のがたつきや人体への圧迫感を生じさせている。発破音対策として防音扉が用いられてきたが、超低周波音領域における遮音量が十分でなかった。そこで、遮音量を確保するために共鳴型消音器を用いた手法が適用されている。共鳴型消音器による消音効果は消音器の設置位置に大きく依存するものの、これについて詳細に検討した例はない。そこで本報では、トンネルを一樣断面を持つ管とみなして平面波の伝搬理論と模型実験から消音器の最適な設置位置を検討した。

検討の結果、大きな消音効果を得られる消音器の設置位置は、低減対象とする周波数に応じて振動面および開口から消音器開口までの距離によって決定できることを明らかにした。

【キーワード】 トンネル発破 超低周波音 共鳴型消音器 設置位置

1. はじめに

トンネル工事の発破により発生する超低周波音は、近隣民家などの建具のがたつきや人体への圧迫感を生じさせるなどの被害を発生させている。発破音対策として、グラスウール、砂、またはコンクリートなどを充填した鋼製の防音扉による対策が用いられてきたが、これらの場合、超低周波音領域での遮音量は十分ではなかった。超低周波音領域での対策としてHelmholz共鳴器や音響管などの共鳴現象を利用した手法があるが、その効果は消音装置の設置位置と音場の関係によって大きく変動し、場合によっては逆効果となり得る。本報ではトンネルを一樣断面を持つ管と仮定し、音響管の設置位置と音場の関係による消音効果について平面波の伝搬理論と模型実験から検討した結果を報告する。

2. 管内の音響伝搬理論

断面形状が一樣な長さ l 、断面積 S の管を考える。管と平行に z 軸をとり、両端が $z=0$ 、 $z=l$ にあるものとする。ここで、管内の音圧 p および質量速度 v は次式で表される。

$$p(z) = Ae^{-jkz} + Be^{jkz} \quad (1)$$

$$v(z) = \rho_0 Su(z) \quad (2)$$

ここで、 k は波数、 ρ_0 は空気密度、 u は粒子速度である。音速を c_0 とすると、特性インピーダンス Y_0 は式(3)で表される。

$$Y_0 = \frac{P}{v} = \frac{c_0}{S} \quad (3)$$

式(1)の第1項を入射進行波、第2項を反射後退波とみなすと、管内の任意の点における音圧反射係数 r と音響インピーダンス ζ は次式で表される。

$$r(z) = \frac{B}{A} e^{2jkz} = \frac{\zeta(z) - Y_0}{\zeta(z) + Y_0} \quad (4)$$

$$\zeta(z) = \frac{p(z)}{v(z)} = Y_0 \frac{Ae^{-jkz} + Be^{jkz}}{Ae^{-jkz} - Be^{jkz}} \quad (5)$$

終端($z=l$)における音圧反射係数 r_{term} または音響インピーダンス ζ_{term} を用いると、式(1)、(2)、(5)は以下のように表せる。

1. 技術研究所 研究開発G 第二研究室
3. 九州支店 大寧寺トンネル作業所

2. 土木事業本部 土木技術部 トンネルG
4. 神奈川大学 工学部

$$p(z) = Ae^{-jkz} \left(1 + r_{term} e^{2jk(z-l)} \right)$$

$$= Ae^{-jkz} \left(1 + \frac{\zeta_{term} - Y_0}{\zeta_{term} + Y_0} e^{2jk(z-l)} \right) \quad (6)$$

$$v(z) = \frac{A}{Y_0} e^{-jkz} \left(1 - r_{term} e^{2jk(z-l)} \right)$$

$$= \frac{A}{Y_0} e^{-jkz} \left(1 - \frac{\zeta_{term} - Y_0}{\zeta_{term} + Y_0} e^{2jk(z-l)} \right) \quad (7)$$

$$\zeta(z) = Y_0 \frac{1 + r_{term} e^{2jk(z-l)}}{1 - r_{term} e^{2jk(z-l)}}$$

$$= Y_0 \frac{\zeta_{term} \cos k(z-l) - jY_0 \sin k(z-l)}{Y_0 \cos k(z-l) - j\zeta_{term} \sin k(z-l)} \quad (8)$$

管の始端 ($z=0$) が質量速度 v_0 相当で振動している場合、式 (7) より、

$$A = \frac{Y_0 v_0}{1 - r_{term} e^{-2jkl}}$$

$$= \frac{(\zeta_{term} + Y_0) Y_0 v_0 e^{jkl}}{2(Y_0 \cos kl + j\zeta_{term} \sin kl)} \quad (9)$$

管の終端 ($z=l$) が閉じており完全剛 ($\zeta_{term} = \infty$, $r_{term} = 1$) な場合、式 (8) より、

$$\zeta(0) = -jY_0 \cot(kl) \quad (10)$$

一方、終端が開いている場合、 ζ_{term} は式 (11) に示す Y_{rad} と等しくなる。ただし、管の断面が半径 a の円形であり、 $ka < 0.5$ を満たす場合である。

$$Y_{rad} = R_{rad} + jX_{rad} \quad (11)$$

このとき、フランジがない場合、

$$R_{rad} = Y_0 \left(\frac{k^2 a^2}{4} \right) \quad (12)$$

$$X_{rad} = Y_0 (0.6ka) \quad (13)$$

である。

図-1に示すように、トンネルを長さ l 、断面積 S_1 の

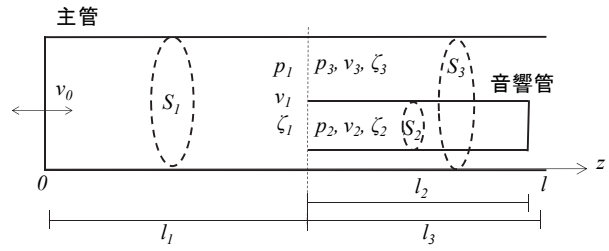


図-1 主管と音響管の配置図

主管とみなし、内部に長さ l_2 、断面積 S_2 の音響管を配置する場合を考える。主管は閉口が質量速度 v_0 相当で振動しており、音響管の開口が $z=l_1$ の位置にあるとする。この位置での音圧、質量速度、音響インピーダンスをそれぞれ図-1のように定義する。

$z=l_1$ での音圧および質量速度の連続性から、以下の関係が成り立つ。

$$p_1 = p_2 = p_3 \quad (14)$$

$$v_1 = v_2 + v_3 \quad (15)$$

$$\frac{1}{\zeta_1} = \frac{1}{\zeta_2} + \frac{1}{\zeta_3} \quad (16)$$

z を $z=l_1$ における局所座標系とする。式 (8)、(10) の関係より、音響インピーダンス ζ_2 、 ζ_3 は以下のように表せる。

$$\zeta_2 = -jY_2 \cot(kl_2) \quad (17)$$

$$\zeta_3 = Y_3 \frac{1 + r_{3,term} e^{-2jkl_3}}{1 - r_{3,term} e^{2jkl_3}}$$

$$= Y_3 \frac{\zeta_{3,term} \cos kl_3 + jY_3 \sin kl_3}{Y_3 \cos kl_3 + j\zeta_{3,term} \sin kl_3} \quad (18)$$

ここで、 $r_{3,term}$ および $\zeta_{3,term}$ はそれぞれ主管開口端での音圧反射係数および音響インピーダンスである。 ζ_1 については、得られた ζ_2 、 ζ_3 を用いて式 (16) より算出することができる。

主管開口端からの放射パワー w は、管内で音響散逸がない場合、任意断面における音圧 p 、質量速度 v 、音響インピーダンス ζ を用いて式 (19) により表される。

$$w = \frac{1}{2\rho_0} \text{Re}(pv^*) = \frac{|p|^2}{2\rho_0 \text{Re}(\zeta)} = \frac{|v|^2 \text{Re}(\zeta)}{2\rho_0} \quad (19)$$

ここで、 $*$ は複素共役、 Re は実部を表す。

3. 実験方法

3.1 実験モデル

図-2に実験モデルを示す。スピーカーに主管（長さ $l_1=2.0$ m, $\phi 200$ mm, アクリル製）を接続し、主管内部に音響管（長さ l_2 , $\phi 40$ mm, 硬質塩化ビニル管）を2本設置した。このときの主管の断面に対する音響管開口部の面積比は8%である。

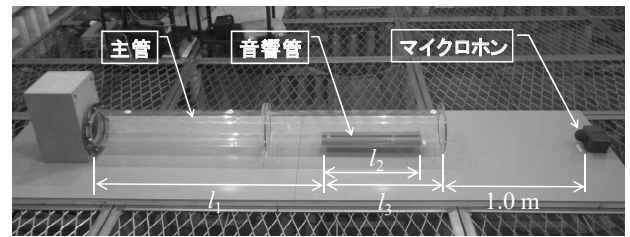


図-2 実験モデル

3.2 計測方法

音源はスピーカーから対象周波数の正弦波を発生させた。主管内に設置した音響管の開口がスピーカー直近 ($l_1=0$ m) から主管開口 ($l_1=2.0$ m) に来るよう5cm間隔で移動させ、主管開口から1.0 m地点での音圧レベルSPLを計測した。

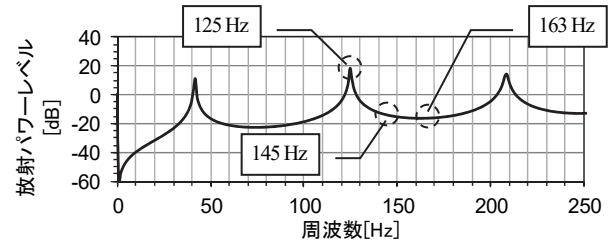


図-3 放射パワーレベルと周波数の関係（主管のみ）

3.3 検討対象周波数と主管との関係

図-3に主管のみの状態での理論計算による放射パワーレベル L_w と周波数の関係を示す。ここでは、検討対象周波数として放射パワーがピークとなる125 Hz（共鳴周波数）、ディップとなる163 Hz（反共鳴周波数）、そのどちらでもない145 Hz（一般的な周波数、とする）の3つを選定した。表-1に対象周波数と音響管の長さを示す。

表-1 対象周波数と音響管の長さ

周波数 f [Hz]	音響管の長さ $l_2(=\lambda/4)$ [m]	主管との関係
125	0.687	共鳴周波数
163	0.527	反共鳴周波数
145	0.593	一般的な周波数

※音響管長さは開口端補正を含む。

4. 結果と考察

図-4から図-6に検討対象とした周波数における音響管の設置位置と消音効果の関係を示す。図中では、主管のみの場合と主管内部に音響管を設置した場合の放射パワーレベル L_w の差を求め、相対レベルとして表している。実測の音圧レベルSPLについても同様である。

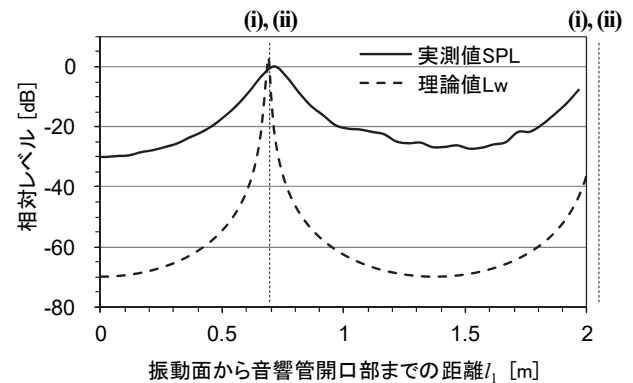


図-4 音響管の設置位置と消音効果の関係（125 Hz）

4.1 共鳴周波数（125 Hz）での挙動

図-4から、 L_w は $l_1=0.69$ mにおいてピークとなり、音響管がない状態と比べ3 dB増加している。一方で $l_1=0$ m, 1.37 mにおいてディップとなっており、音響管による消音効果が最大となる。SPLについても、ピークまたはディップになる l_1 は、 L_w と同様の傾向となることが確認できる。

4.2 反共鳴周波数（163 Hz）での挙動

図-5より、 L_w がピークとなるのは $l_1=0.53$ m, 1.00 m, 1.59 mの3点であり、これらの位置においては消音効果が小さく、 $l_1=0.53$ mにおいては負の効果となっていることがわかる。一方で $l_1=0.76$ m, 1.29 mのように、前述のピークとなる設置位置の中間点ではディップが生じ、大きな消音効果を得ることがわかる。さらに $l_1=0.76$ mと1.29 mを比較すると、1.29 mのほうがディップが深いことがわかる。これにより、隣接する2つ

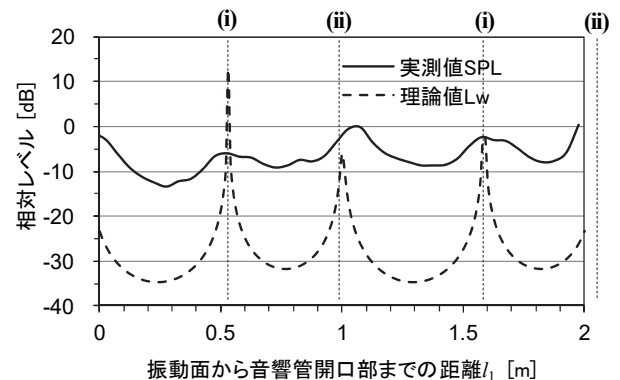


図-5 音響管の設置位置と消音効果の関係（163 Hz）

のピークを取る l_1 の間隔が大きいほどその中間点における消音効果が大きくなる傾向が確認できる。SPL と L_w を比較すると、 l_1 に多少のずれがあるものの、ピークおよびディップとなる音響管の設置位置はおおむね同様の傾向が確認できる。ずれが生じた原因として、理論計算と実測において分解能に違いがあることや、開口端補正による影響などが考えられる。

4.3 一般的な周波数 (145 Hz) での挙動

図-6より、 $l_1 = 0.58 \text{ m}$, 0.88 m , 1.77 m の3点において L_w がピークとなることがわかる。一方で大きな消音効果が得られる設置位置については、「4.2. 反共鳴周波数 (163 Hz) での挙動」と同様にピークを取る l_1 の中間点 ($l_1 = 0.73 \text{ m}$, 1.33 m) において L_w はディップとなり、隣接する2つのピークを取る l_1 の間隔が大きいほど消音効果が大きいことがわかる。SPL についても、ピークおよびディップとなる音響管の設置位置は L_w とおおむね同様の傾向が確認できる。

上述の結果を主管の振動面 (スピーカー) または開口に対する音響管開口の位置関係に着目し整理する。

例えば図-6の一般的な周波数 (145 Hz) において L_w がピークとなる $l_1 = 0.58 \text{ m}$ と 1.77 m は、(i) 主管の振動面から音響管の開口までの距離が $(2n-1)\lambda/4$ に相当する。ここで、 n は正の整数である。もうひとつのピークである $l_1 = 0.88 \text{ m}$ は、(ii) 主管の開口から音響管の開口までの距離が $(n-1)\lambda/2$ に相当する。またディップとなり大きな消音効果が得られる設置位置は、隣接する (i) と (ii) の中間点であり、(i) と (ii) の間隔が大きいほど中間点における低減効果は大きいといえる。

ここで (i) および (ii) について、主管の振動面から音響管の閉口、もしくは主管の開口から音響管の閉口までの経路長について考える。(i) の経路長は $n\lambda/2$ に相当する。(i) では音響管の設置によって L_w が増幅している場合もあり、主管の振動面と音響管の閉口の間で共鳴が生じているという捉え方も可能である。一方 (ii) の場合、(i) のような増加傾向はみられないが、経路長は $(2n-1)\lambda/4$ に相当し、主管の開口と音響管の閉口の間で共鳴が生じうる延長とすることができる。逆にこれらから最も離れた (i) と (ii) の中間点において、消音効果は最大になると考えられる。

Summary Infrasound occurred by tunnel blasting causes complains because of making vibration of doors and windows, and feeling of pressure. Resonators have been applied for reduction of infrasound. However, effects of resonators depend heavily on the position. Then, optimum position of resonator was examined by theoretical and experimental study.

As a result, it was found that the optimum position was determined from relation between the target wavelength and the position of the resonator opening (the distance from the vibration source and opening of the tunnel).

Key words : Tunnel blasting, Infrasound, resonator, position of resonator

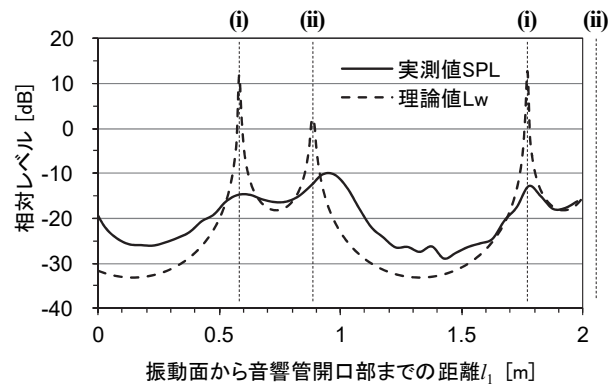


図-6 音響管の設置位置と消音効果の関係 (145 Hz)

5. まとめ

本報では、トンネルを一樣断面を持つ主管とみなし、主管内における音響管の設置位置と消音効果について検討した。その結果、大きな消音効果を得るには主管の振動面および開口に対する音響管の設置位置が重要であることを明らかにした。

共鳴型消音器をトンネル発破に適用する場合には、トンネルの延伸に伴い適切な位置に消音器を設置する必要がある。消音器が低減対象とする周波数とトンネルの境界条件を考慮することで、消音器の最適な設置位置を決定できる。

現在、消音器の試作を完了しトンネル現場に適用中である。これによる検証結果は次報にて報告する。

【参考文献】

- 1) 本田泰大, 他: 音響管を用いた消音器によるトンネル発破音の低周波音低減効果に関する検討, 日本音響学会講演論文集, pp.1061-1062, 2016.3.
- 2) M. L. Munjal: Acoustics of ducts and mufflers (2nd Ed), John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- 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・応用編], 3.3 ダクト系の音響伝搬, 技報堂出版, 2001.
- 4) 村澤優也, 他: 音響管による1次元音場の騒音低減—理論計算による検討—, 日本音響学会講演論文集, pp.1001-1004, 2016.3.
- 5) 岩根康之, 他: 音響管による1次元音場の騒音低減—実験による検討—, 日本音響学会講演論文集, pp.1005-1006, 2016.3.