

音響管の共鳴現象を利用した発破超低周波音消音装置の開発

安田 洋介*

Development of a Tube Resonance Type Silencer for Tunnel Blasting Infrasound

Yosuke YASUDA*

1. はじめに

このたび、飛鳥建設株式会社、株式会社藤崎商会、および本学の三者で、日本騒音制御工学会平成29年度環境デザイン賞を受賞した。本賞は、都市環境、住環境、作業環境等に関わる音・振動問題の改善のための計画や実施事例、またはそれらに関連する研究や技術開発等で優れた業績を上げた法人、グループ又は個人に贈呈されるものである。この場をお借りして、関係各位に厚く御礼申し上げますと共に、受賞内容について簡単にご報告させていただく次第である。なお、本稿は既往文献[1-8]から抜粋してまとめたものであることを付記する。

2. 背景と目的

トンネル工事では、発破掘削によって超低周波音が発生する。超低周波音とは20 Hz以下の音を指し、一般に人間の耳には聞こえないが、周辺地域の家屋等の建具や窓ガラスをがたつかせたり、人体へ圧迫感や振動感を与えたりすることから、トンネル工事に対する苦情発生の主要因となっている。発破音の対策としては、トンネル坑口へ防音扉を設置することが一般的であるが、超低周波音に対して十分な遮音性能が得られるほどの剛性を防音扉とその接合部において確保することは困難である。防音扉を複数設置して遮音性能を確保する場合もあるが、対策コストの増大の他、施工性の低下、扉間の共鳴による遮音性能の低下といった問題が発生する。

このような背景の下、ゼネコン各社を中心に、発破音対策として様々な消音装置の開発が進められている[9]。しかしながら、実機において10 Hz以下の超低周波音を対象としたものは見当たらない。そこで筆者らはその周波数域を対象とし、このたび音響管の共鳴現象を利用した消音装置を開発した。

本消音装置の基本的な考え方や各構成要素の物理的な仕組みに関しては、学術的に特段新しいものがあるわけではない。にもかかわらず受賞に至ったのは、実機において10 Hz以下の超低周波音への効果を確認している点、工事の進行に伴い変化するトンネル長さへの対応を考慮している点、開発にあたって多岐にわたる検討（1次元波動音場理論、3次元波動数値解析、模型実験、現場検証）を

経ている点等が総合的に評価されたためであろうと考えている。

3. 消音装置の概要

3.1 音響管の共鳴現象

ここで用いる音響管とは、一端が開口、他端が閉口のものである。よく知られているように、管の長さを l 、音波の波長を λ として、 $l + \Delta l = (2n - 1)\lambda/4$ のときに管が共鳴する。ここで、 n は正の整数、 Δl は開口端補正である。このとき管の開口面では、管内への入射波と管内からの反射波が干渉して音圧が0、粒子速度が極大となる。このように、干渉により音圧が0となる面を「ソフトな境界」と呼ぶことがあり、剛な境界同様、音響的には完全反射面として機能する。

3.2 消音装置の基本的な考え方

トンネル内に音響管を配置した例を図1に示す。超低周波音は波長が数十メートルと長いいため、トンネル内は1次元音場とみなせる。したがって、図のように音響管をトンネル内に配置すれば、防音扉のようにトンネルの断面を全て塞がずとも、音響管の対象周波数の音波に対して反射面を作ることが可能である。しかしながら、この反射面をトンネル内のどこに置かかで遮音効果は大きく異なる。

図1(a)は、音響管の開口面をトンネルの切羽（振動面）から $(2n - 1)\lambda/4$ となる位置に配置した場合である（図は $n = 1$ の場合）。このとき、振動面の位置はトンネル内にできる定在波音圧の腹（音圧極大）となることから、 $W = (1/2)\text{Re}[pv^*]$ で表されるトンネルからの音響放射パワーの値は増大する。ここで、 p 、 v はそれぞれ振動面における音圧と振動速度、 $*$ は複素共役、 $\text{Re}[\]$ は括弧内の複素数の実部を表す。一方、図1(b)のように音響管の開口面を振動面から $(n - 1)\lambda/2$ となる位置に配置した場合（図は $n = 2$ の場合）、振動面の位置が定在波音圧の節（音圧極小）となることから、振動面の振動速度 v が大きくても音響放射パワー W は小さくなる。

厳密には、音響管の挿入が振動速度 v の値に及ぼす影響（反射波による音響負荷の影響）、 p と v の位相差の影響、音響管の振動の影響、トンネル坑口側の共鳴の影響等も考慮する必要があるが、基本的には以上のように、音響管の挿入により振動面（切羽）における音圧を制御し、音響放射パワーを低減する仕組みである。

*教授 建築学科
Professor, Dept. of Architecture

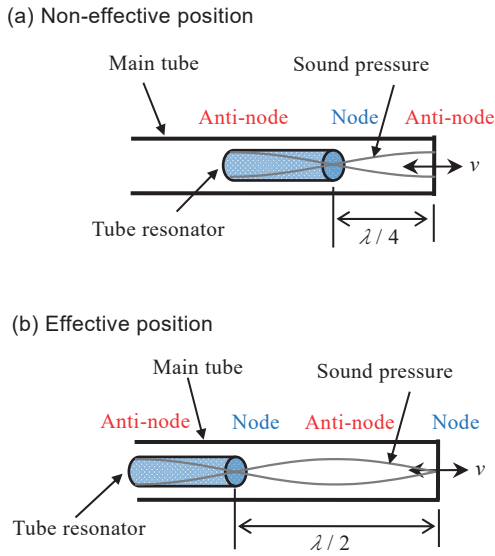


図1 トンネル内での音響管の配置とその効果

3.3 消音装置の配置

トンネル工事においては、掘削の進行に伴いトンネルが長くなり、切羽の位置が変化する。したがって、安定した遮音効果を得るためには、切羽位置に応じて音響管を適切な位置に移動する必要がある。しかしながら、これは施工サイクルへ悪影響を与えたり、設置位置のずれを誘引し遮音性能を低下させたりする恐れがある。そこで、切羽位置によらず安定した効果が得られるよう、トンネル坑口から約 10 m 切羽側に防音扉を設置し、防音扉を疑似的な振動源とみなして、その外側（坑口側）に消音装置を配置することとした。トンネル坑口付近の防音扉と消音装置の配置について図2に示す。このように、消音装置は対象周波数の異なる複数の音響管からなり、音響管の開口位置はいずれも防音扉から 1 m 坑口側となるように配置した。音響管の対象周波数の波長（数十メートル）に対し、1 m という長さはほぼ無視できることから、これは振動面（防音扉）から音響管の開口位置までの距離がほぼ 0 の場合（ $(n-1)\lambda/2$ で $n=1$ とした場合）に相当するとみなせ、図1(b)と同様の放射パワー低減効果が期待できる。

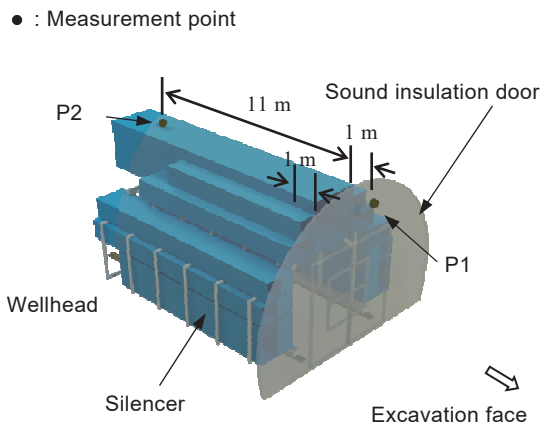


図2 防音扉と消音装置の配置

4. 1次元波動音場理論による検討[1,2,5,8]

4.1 検討方法

基礎的な検討として、古典的な1次元波動音場理論に基づく計算を行った。図1に示すように、トンネルを1次元の定常音場と捉え、その内部に遮音対象の音波の波長の 1/4 となる長さの音響管を挿入した場合の、トンネルからの音響放射パワーの変化について調べた。

4.2 結果と考察

計算結果の一例を図3に示す[8]。音響管の対象周波数 4 Hz（一般に発破で音響エネルギーが卓越する周波数）における、トンネル長さ l 、トンネル坑口から音響管開口までの距離 l_{02} 、トンネルからの音響放射パワーレベル L_w の関係について表したものである。以下に示す傾向からわかるように、発生する共鳴を適切に制御するためには、坑口の境界条件の把握や、切羽（振動面）から音響管開口までの距離の正確な把握などが必要である。

4.2.1 全体的な傾向

音響管なし (w/o) の場合、トンネル長さに関わらず L_w の値が高く、特に $l=75.3$ m と 118.1 m の場合は共鳴によるピークが見られる。一方、音響管あり (w/ silencer) の場合、全体的に L_w の値が大きく低減している。ただし、トンネル長さ l と音響管開口の位置 l_{02} の組み合わせによっては、ほとんど効果が得られない（図中の W）ばかりか、場合によっては逆効果となる（図中の E）。

4.2.2 トンネル坑口と音響管開口間での共鳴（共鳴 W）

$l_{02} = 53.7$ m, 96.7 m においてトンネル長さ l によらず見られる L_w のピークは、トンネル坑口と音響管開口の間で起こる共鳴によるものであり、トンネル坑口の境界条件が変化するとピークとなる l_{02} が移動する。

4.2.3 振動面と音響管開口間での共鳴（共鳴 E）

図中で斜めに現れる L_w のピークは、振動面から音響管開口までの距離が $(2n-1)\lambda/4$ となる場合に相当しており、このとき振動面での音圧が極大となることから放射パワーが増大する。この共鳴を避けるためには、掘削によってトンネル長さが増加するたびに切羽（振動面）から音響管開口までの距離を把握して音響管を適切な位置に移動する必要がある。

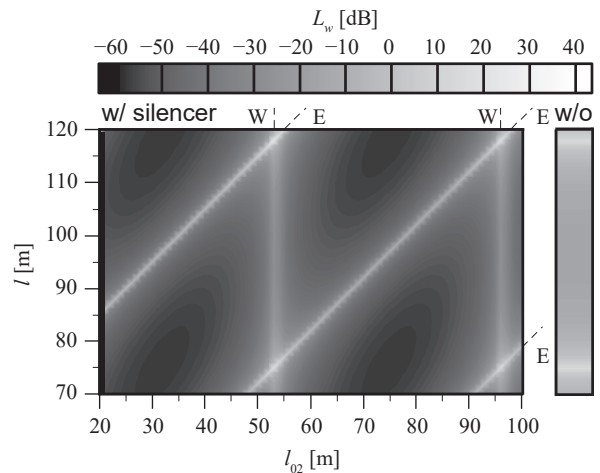


図3 トンネル長さ l 、音響管開口の位置 l_{02} と音響放射パワーレベル L_w の関係 (w/ silencer : 音響管あり, w/o : 音響管なし)

5. 波動数値解析による検討[3,6,7]

5.1 検討方法

解析モデルを図4に示す。トンネル坑口から防音扉までの領域をモデル化し、防音扉を速度振幅 1 m/s の振動面とした。トンネルの断面形状は半径 8.2 m の半円とし、坑口は現場実験（次節）との整合性を考慮して斜坑門とした。消音装置を構成する音響管は表1に示すものを想定し、いずれも管の開口が防音扉から 1.0 m となるように配置した。解析手法には境界要素法 (BEM) を用いた。厚み 0 の縮退境界を用いた法線方向微分型の定式化とし、防音扉を振動境界、その他の面を全て剛境界として扱った。

表 1 音響管の諸元 (波動数値解析, 現場実験)

Resonance frequency [Hz]	Type	Cross sectional area of tube [m ²]	Length of tube [m]	Number	
				Numerical analysis	Actual experiment
4	A	0.842	22.813	2	2
	B	1.684	18.981	2	2
	D	0.702	22.839	-	1
6	E	6.017	13.482	1	1
8	A	0.853	8.243	2	2
	C	1.416	9.600	2	3

響管を設置した場合、その対象周波数近辺で深いディップが発生しており、音圧低減効果が確認できる。一方で、その前後の周波数においてはピークが発生して音圧レベルが増大している。これは解析において減衰を全く考慮していないためである。実際の現場においては音響管の振動その他に起因する減衰が働くため、ピーク・ディップが抑えられると共に、その傾きも緩やかになるものと考えられる。

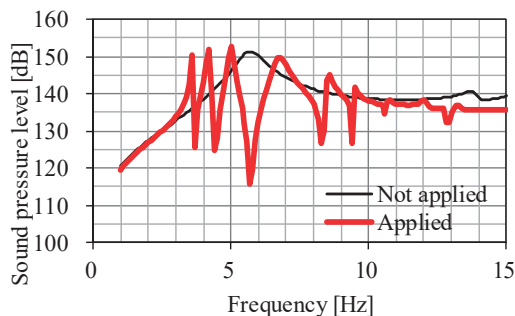


図 5 受信点 R における音圧レベル (波動数値解析結果)

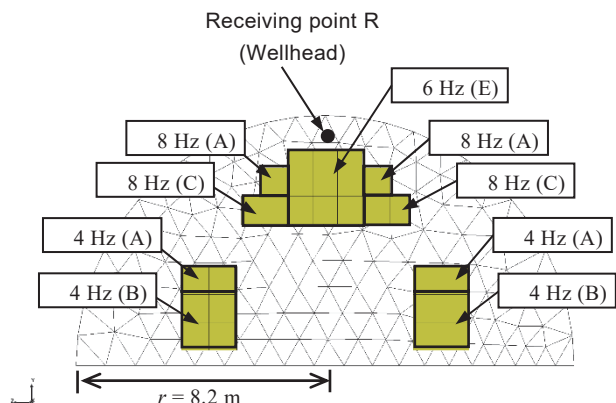
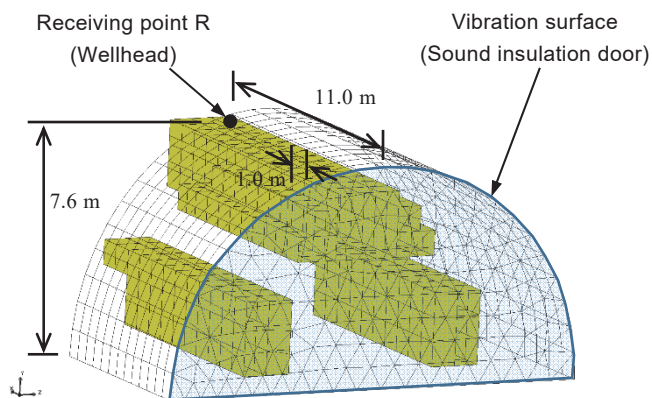


図 4 波動数値解析モデル

5.2 結果と考察

受信点 R (図4参照) における音圧レベルを図5に示す[7]。音響管がない場合、5.7 Hz 付近に音圧レベルのピークがあるが、これは振動面 (防音扉) から坑口までのトンネルの共鳴が原因である。音

6. 現場実験による検証[3,4,6,7]

6.1 実験方法

現場は設計掘削断面積が約 110 m² の山岳トンネルである。トンネル坑口付近に設置された消音装置の様子を写真1に示す。図2に示すように、防音扉の切羽側 (P1) と坑口側 (P2) の2箇所において、発破時の音圧レベルの最大値 L_{pmax} を測定した。ところで、一般に発破時の音圧レベルは、薬量やトンネル長さだけでなく、岩質や発破箇所、雷管の数や段数等の様々な要因によって決まることから、測定された音圧レベルそのものを評価量として用いることはできない。そこで、測定点 P1 と P2 における音圧レベルの差 $\Delta L = L_{pmax,P1} - L_{pmax,P2}$ を評価量とした。音響管の種類は表1に示した6種類であり、トンネル断面に対する面積比は、対象周波数ごとにそれぞれ 5% 程度とした。発破に関する諸元を表2に示す。No. 1, 2 は消音装置がない場合、No. 3~5 は装置がある場合である。



写真1 トンネル現場での消音装置の設置状況 (撮影: 西山芳一)

表 2 発破の諸元

No.	Length of tunnel [m]	Quantity of explosive [kg]	Silencer
1	491.1	23.4	not applied
2	492.3	58.6	
3	499.5	97.8	applied
4	503.1	79.4	
5	505.5	96.4	

6.2 結果と考察

音圧レベル差 ΔL の測定結果を図6に示す[7]。消音装置を設置したNo. 3, 4, 5では、対象とした4, 6, 8 Hz付近にそれぞれピークが現れており、遮音効果を確認できた。ピークの起こる周波数での ΔL の増加量の平均値は、3.75 Hzで3.5 dB、5.75 Hzで10.5 dB、7.5 Hzで8.7 dBであった。また、現場実験結果では上述の数値解析結果に比べてピーク・ディップが緩やかであり、数値解析結果においてピーク前後に見られたディップ(遮音性能の低下)は認められなかった。これは、数値解析で考慮されていなかった音響管の鋼板の振動等による減衰の影響によるものと考えられる。

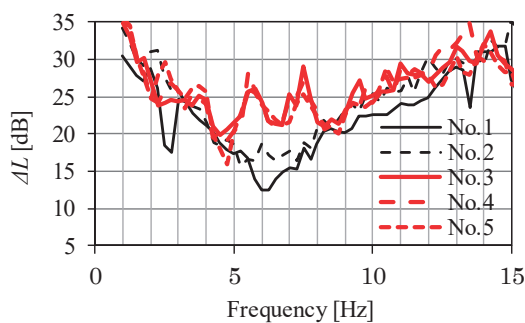


図6 測定点P1・P2間の音圧レベル差 ΔL (現場実験結果)

7. おわりに

以上、音響管の共鳴現象を利用した発破超低周波音消音装置の開発研究の一部をご紹介した。既に述べた通り、本装置の効果は現場において確認されており、現在は実用化されて実際のトンネル工事現場において使用されているとのことである。その上、このたび受賞という形で評価され、工学系の研究者として率直に嬉しく思う次第である。

参考文献

- [1] 村澤優也, 関根秀久, 安田洋介, 岩根康之, 小林真人, 内田季延, 音響管による1次元音場内の騒音低減—理論計算による検討—, 日本音響学会講演論文集(春季), 1001-1004 (2016. 3).
- [2] 岩根康之, 小林真人, 内田季延, 村澤優也, 関根秀久, 安田洋介, 音響管による1次元音場内の騒音低減—実験による検討—, 日本音響学会講演論文集(春季), 1005-1006 (2016. 3).
- [3] 岩根康之, 小林真人, 内田季延, 川澄卓也, 関根秀久, 安田洋介, 共鳴型消音装置による発破超低周波音の消音効果に関する検討, 日本音響学会講演論文集(春季), 793-794 (2017. 3).
- [4] 岩根康之, 小林真人, 内田季延, 川澄卓也, 関根秀久, 安田洋

介, 超低周波音を対象とした音響管の共鳴周波数と板剛性の関係, 日本音響学会講演論文集(秋季), 951-954 (2017. 9).

[5] 川澄卓也, 関根秀久, 安田洋介, 岩根康之, 小林真人, 内田季延, 音響管を用いた断面縮小型の消音装置によるトンネル発破超低周波音の低減—1次元音場理論と模型実験による検討—, 日本音響学会講演論文集(春季), 853-854 (2018. 3).

[6] 小林真人, 岩根康之, 安田洋介, トンネル発破で発生する超低周波音の消音装置, 騒音制御, 41 (6), 258-261 (2017. 12).

[7] 岩根康之, 小林真人, 内田季延, 川澄卓也, 関根秀久, 安田洋介, 発破超低周波音を対象とした共鳴型消音装置の開発, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, 71-74 (2018. 10).

[8] 川澄卓也, 関根秀久, 安田洋介, 岩根康之, 小林真人, 内田季延, トンネル発破低周波音を対象とした共鳴型消音装置の配置について—1次元音場理論による検討—, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, 75-78 (2018. 10).

[9] 特集 トンネル発破における最新の防音対策技術, 騒音制御, 41 (6), 253-293 (2017. 12).