

防音扉の遮音性能と設置方法に関する考察

高村 浩彰¹・稲留 康一²・平野 享³・塚本 耕治⁴

¹正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-0004 東京都港区新橋六丁目17-21)

E-mail:hiroaki_takamura@nishimatsu.co.jp

²株式会社奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)

E-mail:koichi.inadome@okumuragumi.jp

³正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-0004 東京都港区新橋六丁目17-21)

E-mail:toru_hirano@nishimatsu.co.jp

⁴正会員 株式会社奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)

E-mail:koji.tsukamoto@okumuragumi.jp

トンネル工事における発破掘削音は、1日に数回、数秒間の瞬間的な騒音、低周波音であるものの、周辺民家に与える影響が大きいため、防音扉などの対策工が用いられることが多い。詳細設計ならびに施工計画において、予測式などにより対策工の必要性などを検討しているが、予測誤差が大きい場合が多く、試験発破などを利用した計測管理によって対策工が見直される場合がある。

本報告では、防音扉の遮音特性に着目し、防音扉の隙間の影響がどの程度発生するのか、2基設置する場合の扉間隔で遮音性能が変化するかなどについて、現場での測定事例と模型実験の結果から考察した結果を述べる。

Key Words : *blasting sound, Tunnel Construction, soundproof door, sound insulation performance*

1. はじめに

トンネル工事における発破掘削音は、1日に数回、数秒間の瞬間的な騒音、低周波音であるものの、周辺民家に与える影響が大きいため、防音扉などの対策工¹⁾が用いられることが多い。詳細設計ならびに施工計画において、船津らが提案した予測式²⁾などにより対策工の必要性などを検討しているが、予測誤差が大きい場合が多く、試験発破などを利用した計測管理によって対策工が見直される場合³⁾がある。発破騒音、低周波音における予測誤差の要因は、現場ごとに異なる保全対象までの距離減衰特性、防音扉の遮音性能および切羽から坑口に伝搬する音圧特性（以下、坑内音圧）などが挙げられる。

防音扉の遮音性能については、1層式扉に関する既往研究⁴⁾やメーカの測定実績にもとづく性能表があるものの、規格化された調査方法がないこと、同じ材質でもトンネル形状ならびに扉構造の違いによっても遮音性能が異なる場合が想定される。また、現場ごとの坑口形状に合わせて防音扉を設置するため、トンネルと防音扉境界部の隙間の養生方法によっても遮音性能が異なると考えられる。さらに、2基以上の防音扉を設置する場合は、

防音扉の設置間隔に依存する共鳴、反共現象によって遮音性能が変化することも知られている¹⁾。

本報告では、防音扉の遮音特性に着目し、防音扉の隙間の影響が遮音性能にどの程度影響するのか、2基設置する場合の扉間隔で遮音性能が変化するかなどについて、模型実験の結果から考察した結果を述べる。さらに、これらの知見から、実施工時の留意点についてまとめた。

2. 防音扉の遮音性能の評価法

本報では、防音扉の遮音性能について、周波数ごとの特性を把握するため、坑口に設置された防音扉の切羽側（坑内）ならびに坑外側で同時に発破音圧を測定した結果を単発暴露レベルでオクターブバンド分析し、坑内側音圧と坑外側音圧の差分で評価する。はじめに、本章で現場測定の事例をもとに、評価方法について説明する。

(1) 現場での計測方法

現場測定は、和歌山県Aトンネルでコンクリート2層式防音扉を対象に、2015年4月24日、T.D.639.5m、装薬

量 17.2kg (DS 雷管 7 段) の条件で実施した。

坑内音圧の測定点は、扉からの反射波影響を分離するため⁹⁾、最小間隔 0.15m、最大間隔 12m の 4 か所とした。測定点の配置を図-1、間隔ごとの入反射分離解析可能周波数を表-1 に示す。坑外音圧の測定は、写真-1 に示すように扉から 5m 離れた地点で実施した。音圧計は、周波数 1Hz ～ 8000Hz の測定が可能な機器とし、周波数フィルターをかけずに (F 特性) 利用した。計測波は、坑内側 4 台の音圧計を 1 台の記録計に同期させて、坑外についても記録計にサンプリング周波数 51200Hz で記録した。また、防音扉の振動加速度について、坑内側ならびに坑外側の両扉部材の車両通行部ならびに一般部材部の合計 4 か所で面外方向の測定を実施した。

(2) 測定結果

坑内 (StD) ならびに坑外で測定した音圧の物理波形を図-2 に示す。図-2 では、坑内計測波について StD 測点の計測波形を代表に、入反射分離後の入射波波形と反射波波形を併記した。図より、入射波の 60% 程度の振幅を有する反射波がほぼ同じ波形性状で発生していることが読み取れる。

音圧の物理波形を 1/3 オクターブバンド解析した結果を図-3 に示す。なお、坑内音圧については、StA ならびに StD の計測波と入反射分離後の入射波を併記した。この結果をもとに、坑内音圧と坑外音圧の差分で防音扉の遮音性能を評価した結果を図-4 に示す。また、坑内音圧の測定場所と反射場所 (防音扉) の離隔距離 L_r が、波長の $(2n-1)/4$ 倍離れているときに切羽から伝搬する入射波と防音扉からの反射波が逆位相となって音圧波が打ち消し合い小さく評価される特異周波数、波長の $n/2$ 倍離れているときに同位相となって大きく評価される特異周波数について、両図の上部ならびに表-2 に示す。

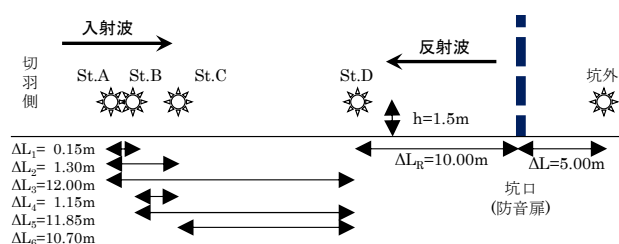


図-1 音圧の測定点配置

表-1 音圧計の配置間隔と解析可能周波数

測点-測点	ΔL (m)	f_{min} (Hz)	f_{max} (Hz)
St. A-St. B	ΔL_1	0.15	115.0
St. A-St. C	ΔL_2	1.30	13.3
St. A-St. D	ΔL_3	12.00	1.4
St. B-St. C	ΔL_4	1.15	15.0
St. B-St. D	ΔL_5	11.85	1.5
St. C-St. D	ΔL_6	10.70	1.6

図-3から、坑内音圧と坑外音圧に差が生じており、本報告では、この差分を防音扉の遮音性能と考えている。ここで、周波数帯毎に確認した図-4 の遮音性能から、計測波形と分離解析後の入射波で、上述した反射波影響による特定周波数で大きな差が発生している。この差は、防音扉の遮音性能を検討するうえで大きな誤差となった



写真-1 測定対象としたコンクリート2層式防音扉

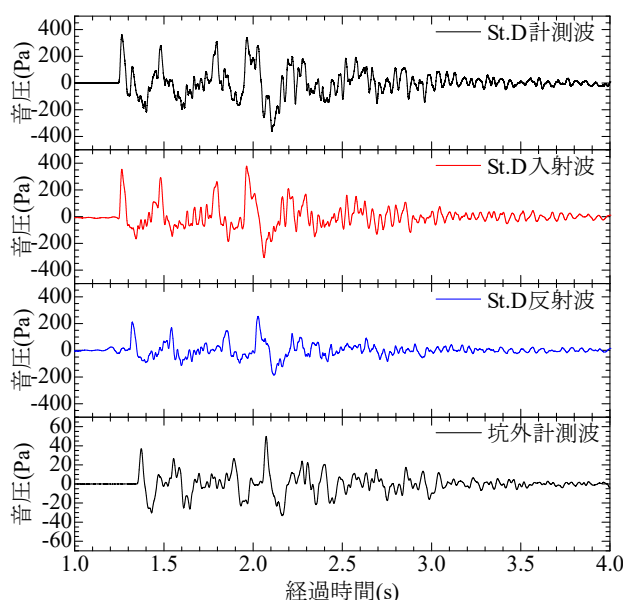


図-2 計測ならびに解析した音圧の物理波形

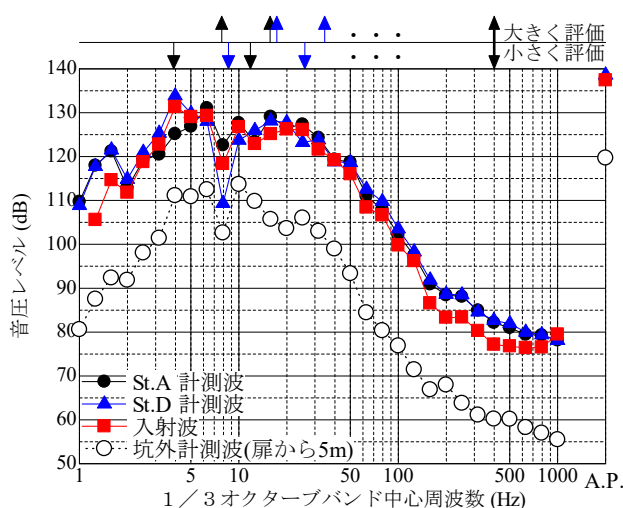


図-3 音圧の1/3オクターブバンド解析結果

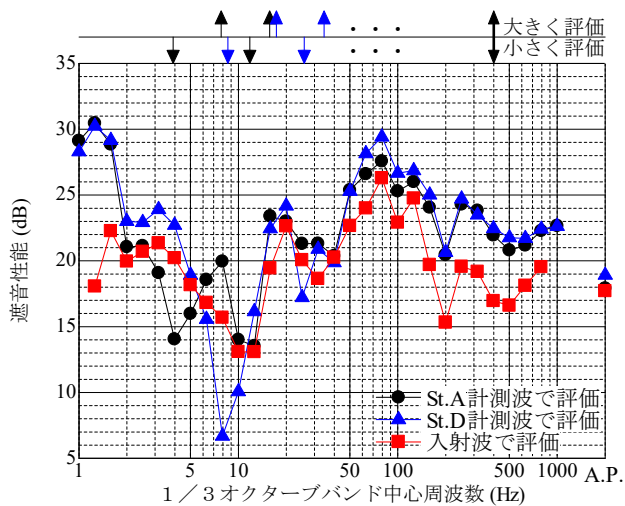


図-4 防音扉の遮音性能

表-2 測点に対応した特異周波数一覧

次数	St.A		St.D	
	小さく評価	大きく評価	小さく評価	大きく評価
1次	3.9 Hz	7.8 Hz	8.6 Hz	17.3 Hz
2次	11.8 Hz	15.7 Hz	25.9 Hz	34.5 Hz
3次	19.6 Hz	23.5 Hz	43.1 Hz	51.8 Hz

め、本稿では入射波と坑外計測波の差分で防音扉の性能を評価することとしている。しかし、入反射分離後の入射波波形で評価した結果においても、周波数帯ごとに遮音性能にばらつきがあることが示されている。特に波長の短い高周波数域では、入反射分離解析の仮定条件である1次元波から外れやすくなっていることも影響していると考えられるが、扉の固有周波数など振動特性に大きく影響されると考えられる。

図-5 に計測した扉部材の面外方向振動加速度の時刻歴波形、図-6 に1/3 オクターブバンド解析結果を示す。両図から、一般部材部は、坑内側で25Hz 付近の、坑外側で40Hz 付近の振動が卓越している。これは、部材剛性に起因する固有周波数と考えられる。

つまり本件の2層式扉は一体であり、部材剛性も同じであるにもかかわらず、坑外側と坑内側で固有周波数が異なることを示している。これは、坑内側だけトンネルと接合されているため、坑内外で拘束条件が変化していることが原因と考えられる。さらに部位別でみると、車両通後部は、開閉のためヒンジで拘束しており、扉本体の部材剛性が大きくても拘束が小さいため、特に低周波数域で大きな振動が発生していることが読み取れる。

ここで、防音扉を透過して坑外に伝搬する音圧は、切羽で発生した爆風（音圧）が防音扉の隙間から漏れないと仮定すると、すべて防音扉の振動に起因することとなる。すなわち、切羽からの爆風（音圧）を外力に防音扉が振動し、その振動が音響放射として（防音扉がスピー

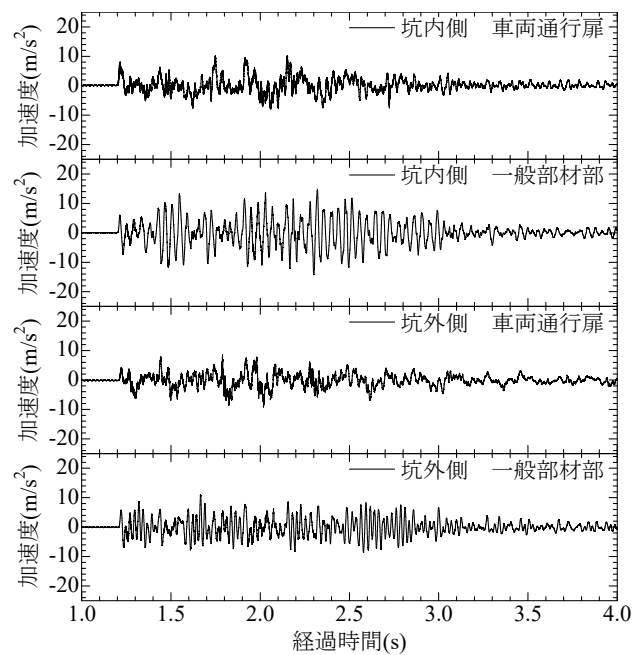


図-5 防音扉部材の振動加速度の物理波形

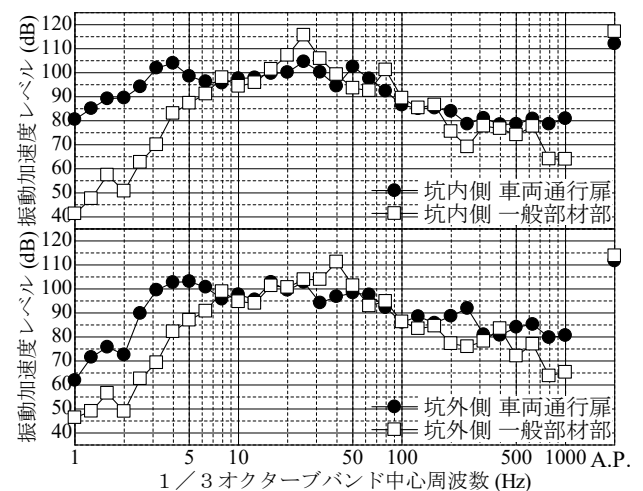


図-6 振動加速度1/3オクターブバンド解析結果

カーとなって）、坑外に発破音を伝搬させていることとなる。無限平板からの音響放射については、垂直振動ならびに曲げ振動を考慮して、式(1)に示す音響放射パワー W_s と平板の振動速度 V_{rms} の関係⁹⁾が知られている。さらに、音響放射パワーは、式(2)により音圧レベルに変換される。

$$W_s = \rho c k V_{rms}^2 \quad (1)$$

$$L = 10 \log \frac{W_s}{1 \times 10^{-12}} \quad (2)$$

$$\approx L_{va} - 20 \log f + 10 \log k + 30.6$$

ただし、 W_s は音響放射パワー(W)、 k は放射係数

($k=1$), ρ は空気の密度 (kg/m^3), c は音速 (m/s), L は音圧レベル (dB), L_{va} は振動加速度レベル (dB), f は周波数 (Hz)を示している。

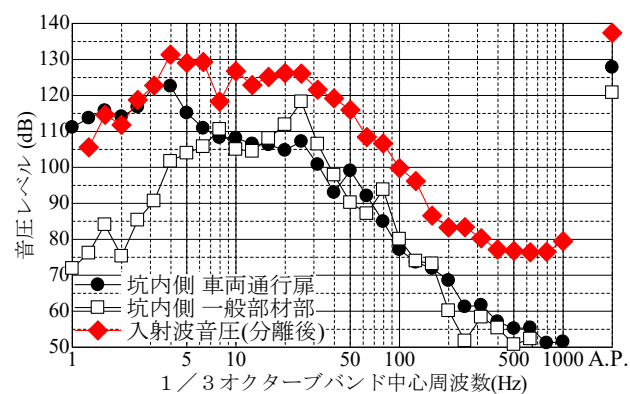
この関係を用いて、坑内外で測定した音圧と扉の振動に起因する音響放射を比較した結果を図-7 に示す。図より、外力が直接作用する坑内側の音響放射が坑外側に比べて大きいこと、端部の拘束条件が弱い車両通後部は、低周波成分で大きく音響放射し、一般部材部と最大加速度は同程度でも、変位量が大きくなることが読み取れる。

さらに、音響放射特性が車両通行部と一般部材部で大きく異なる 7Hz 以下では、両部材の音響放射の中間付近が坑外音圧となっている。例外として、 10Hz 付近に存在する坑外音圧の極大値は、振動に起因する音響放射より大きくなっており、坑内側扉と坑外側扉に囲まれた幅 2m の閉鎖空間または隙間が影響していると推察される。

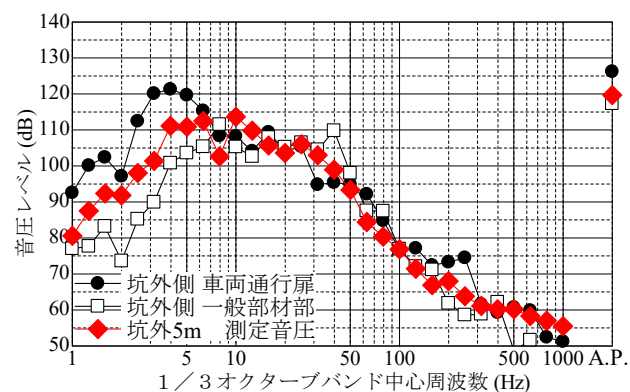
以上をまとめると、図-4 で認められた防音扉の周波数ごとのばらつきは、扉部材の固有周波数、2 層式扉内の閉鎖空間ならびに扉部材間の隙間などに大きく影響されて変動していると考えられる。

3. 模型実験

影響する要素が複合した結果である現実をより良く理解するために、模型実験での検討を行った。



(a) 坑内側扉の音響放射と坑内入射波音圧の特性



(b) 坑外側扉の音響放射と坑外音圧の特性

図-7 防音扉部材の音響放射と音圧の特性比較

(1) 模型実験の方法

模型実験は、実トンネルの1/15程度の寸法で模擬した試験体（硬質塩化ビニール管 $L=10\text{m} \times \phi 450\text{mm}$ ）で行った。その概念図を図-8 に示す。管の片側（切羽を想定）にスピーカーを設置し、もう片側（坑口を想定）に防音扉の模型を設けた。音圧計は、図中の管内4か所（St.A～St.D）、管外1か所（St.F）に設置した。実験に先立ち、1層式の扉模型（St.E）に加速度計を設置して、インパルスハンマー加振による固有値測定を実施している。

1層式の扉模型は、剛性を変えた厚さ6, 8, 10, 12mmの四種とし、6, 12mm厚の扉模型は、開口影響をみるため、開口無しと扉中央に開口率1, 2, 4, 8%の孔のあるものを用意した。なお開口率は1孔で径を変える方法と、孔数を増やす方法の二種類とした。2層式の扉模型は、固有値測定結果を考慮して、表-3 に示す扉の組合せとした。それぞれの実験状況を写真-2に示す。

模型においても入反射分離解析を行うものとして、スピーカから 200Hz （実大換算で 13.2Hz ）が卓越するトーンバースト波形を管内に入射し、このときに管内の各測定点で得られた音圧波形を用いて入反射分離を行った。本実験の音圧計配置における入反射分離解析可能周波数範囲を、表-4 に示す。

坑内音圧の計測波を入射波ならびに反射波に分離した

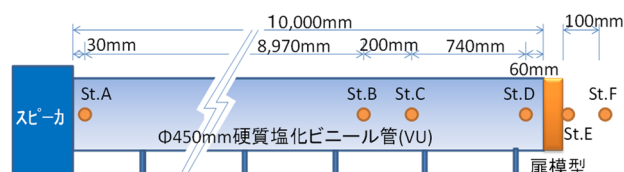


図-8 模型実験概念図

表-3 2層式扉模型の実験パラメーター一覧

		板厚	扉模型 間隔	坑内扉の1次 固有周波数	坑内扉の2次 固有周波数
				扉間隔の 共鳴周波数	扉間隔の 反共鳴周波数
①	坑内側	12mm	520mm	164Hz	—
	坑外側	12mm		332Hz	166Hz
②	坑内側	6mm	870mm	98Hz	367Hz
	坑外側	6mm		198Hz	99Hz
③	坑内側	6mm	870mm	98Hz	367Hz
	坑外側	12mm		198Hz	99Hz
④	坑内側	12mm	520mm	164Hz	—
	坑外側	6mm		332Hz	166Hz
⑤	坑内側	6mm	1740mm	98Hz	367Hz
	坑外側	12mm		98Hz	50Hz
⑥	坑内側	6mm	100mm	98Hz	367Hz
	坑外側	12mm		1725Hz	862Hz
⑦	坑内側	8mm	100mm	123Hz	466Hz
	坑外側	12mm		1725Hz	862Hz
⑧	坑内側	10mm	100mm	141Hz	550Hz
	坑外側	12mm		1725Hz	862Hz

結果を図-9 に示す。なお、St.Aの0.1sec以降の波形は、扉からの反射波がスピーカーに戻り二度目の反射をして入射波（進行波）となったものである。遮音性能の評価においては、これを含めないで算出した。

(2) 開口の無い1層式扉模型の遮音性能

最も単純なケースとして、開口無し1層式扉模型の遮音性能に関する実験結果を図-10 に示す。図中には、各扉模型厚さの固有周波数（固有値）を併記した。

既往の知見のとおり、図より、固有周波数は剛性が大きく（厚くなる）なるほど高周波数側に移行し、この周波数で遮音性能が極小となることが模型で再現できている。また、100～200Hzに現れる1次固有周波数より低周波数側で、剛性則により、剛性が大きい（厚い）ほど遮音性能が向上していることも再現できている。しかし、10mm厚ならびに12mm厚模型では、60Hz～80Hz付近に固有周波数では説明できない極小値が認められる。これは、模型実験の拘束条件に起因した実験誤差と考える。すなわち、剛性が大きい場合は、扉模型の変形がボルト接合部に影響したものと推測する。

さらに、1次固有周波数より高周波数側では、質量則によって厚いほど遮音性能が向上するはずであるが、本実験で対象とした範囲では優位な差は認められなかった。



(a) 1層式開口無し (b) 1層式2%開口孔数1個



(c) 1層式2%開口孔数48個 (d) 1層式2%開口孔数432個



(e) 1層式4%開口孔数864個 (f) 2層式扉間隔520mm

写真-2 扉模型

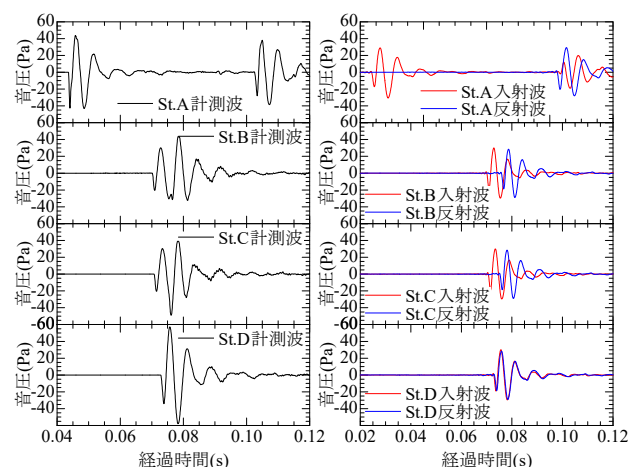
(3) 開口を有する1層式扉模型の遮音性能

開口（実機扉では主に隙間に相当）が扉におよぼす影響として、1層式で扉模型厚さ6mmの結果を図-11～図-13に、扉模型厚さ12mmの結果を図-14～図-16に示す。

1孔の径を変える方法で開口率を変化させた図-11または図-14の結果から、開口がある扉模型の遮音性能は、開口の大きさが影響して決まっていることがわかる。すなわち、大きな開口があれば、剛性が大きく（硬く）重い扉模型も、剛性が小さく（軟らかく）軽い扉模型と同じ遮音性能まで性能が低下することを示している。また、孔数を増やす方法で開口率を設定した図-12、図-13、図-15および図-16の比較から、同じ開口率であっても、1か所の孔だけから漏れる音波よりも、複数孔から漏れる

表-4 測点間隔と解析可能周波数の関係

解析対象測点	$\Delta L(m)$	$f_{min}(Hz)$	$f_{max}(Hz)$
St.B-St.C	0.20	85.0	765.0
St.C-St.D	0.74	23.0	206.8
St.B-St.D	0.94	18.1	162.8



(a) 計測波形 (b) 分離解析後の波形

図-9 模型実験で利用した音圧波形の特性

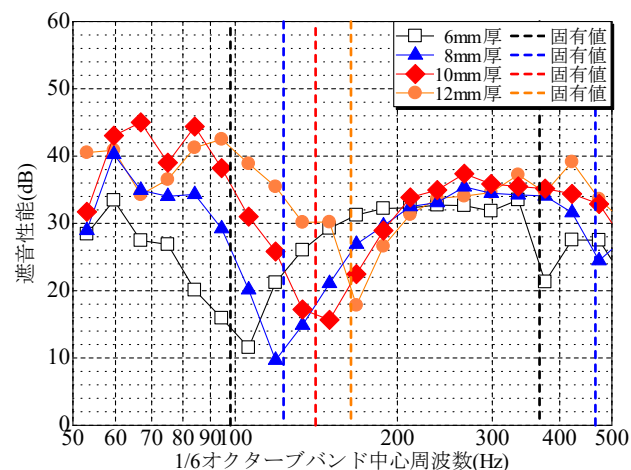


図-10 1層式扉模型（開口無し）の遮音性能

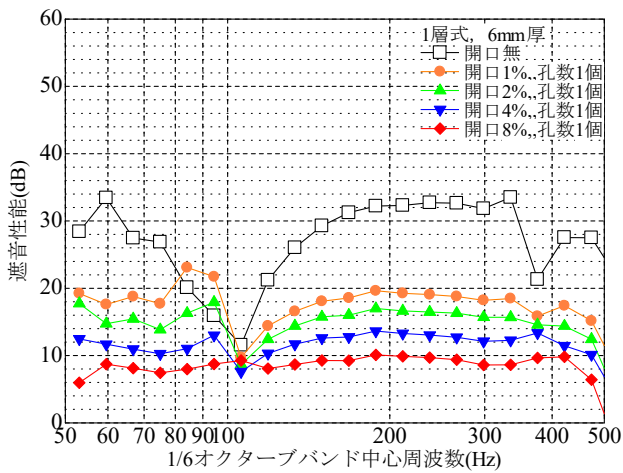


図-11 1層式6mm厚の扉模型の遮音性能（開口1孔）

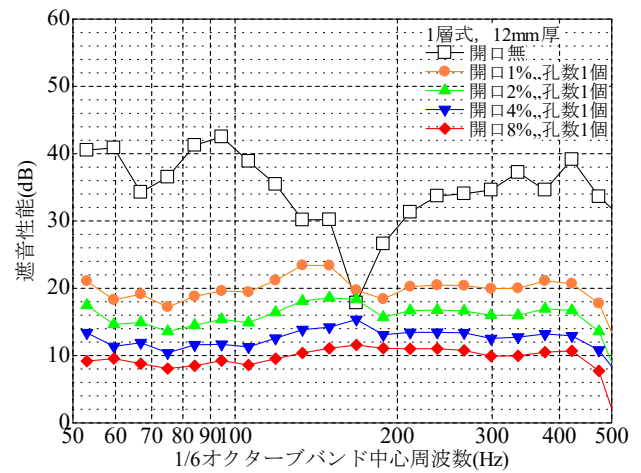


図-14 1層式12mm厚の扉模型の遮音性能（開口1孔）

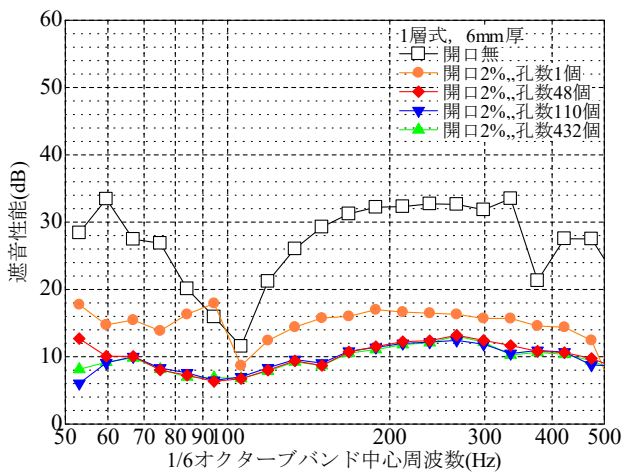


図-12 1層式6mm厚の扉模型の遮音性能（開口率2%）

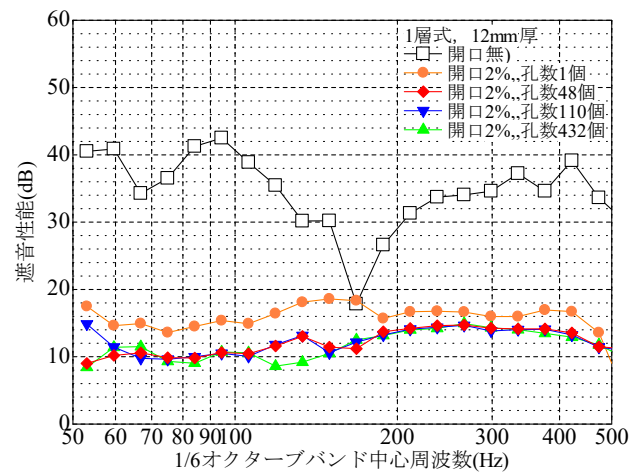


図-15 1層式12mm厚の扉模型の遮音性能（開口率2%）

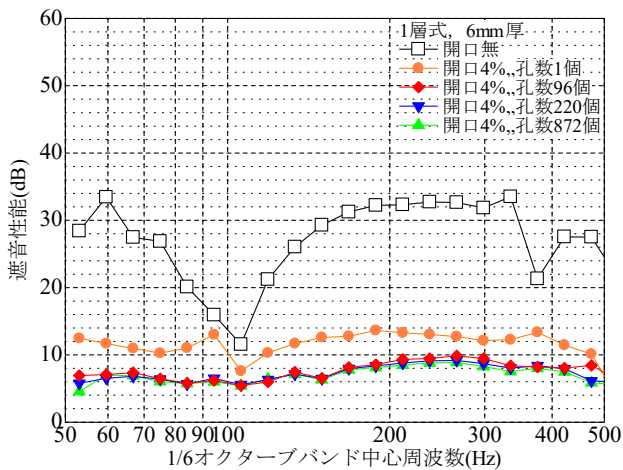


図-13 1層式6mm厚の扉模型の遮音性能（開口率4%）

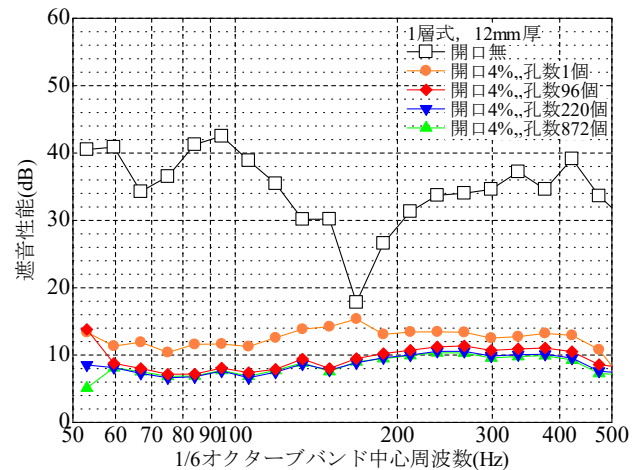


図-16 1層式12mm厚の扉模型の遮音性能（開口率4%）

音波のほうが大きくなることが遮音性能から把握できる。また、ある程度孔数が増えれば、数でなく開口率で遮音性能が決定される傾向にあることもわかる。実際の扉を考えると、隙間が多点に存在し得るときの防音扉の遮音性能は、隙間の面積である程度想定できることを示唆している。

そのほか、剛性の小さな扉では開口率の差による性能低下は比較的小さいが、剛性が大きく重い扉では性能低下が非常に大きい。実物に照らせば、剛性が大きく重い扉は高価な反面、隙間の影響を受けやすいことを示唆している。性能を期待して高価な扉を設置する場合、施工精度に十分配慮する必要がある。

(4) 扉の組合せを変えた2層式扉模型の遮音性能

扉が2層式となると、1層式の遮音性能の単純な加算にはならず、坑内側扉の固有周波数と2層の扉で挟まれた空間（以下、中間層と称す）の共鳴および反共鳴の影響を大きく受ける。そこで条件として、坑内側扉の固有周波数が中間層の反共鳴周波数と同じで、かつ、扉に開口無しの場合に固定して実験を行った。この条件は2層式での遮音効果が得られやすいケースである（詳細は次節(5)で説明する）。実験は厚さ6、12mmの二種類について、2層組合せ4ケース（内側mm：外側mm＝6：6、6：12、12：12、12：6）を設定した。図-17、図-18に測定した遮音性能の結果を示す。両図より、2層の扉が同じ厚さの場合は、扉の固有周波数より低周波数域で遮音性能が極端に低下している。一方で、高周波数域では2層の扉の厚さの選択に関係なく遮音性能がほとんど変化しない。例外として、図-17の150Hz付近に遮音性能で6：6が勝る部分を認めるが、これは比較相手（6：12）で中間層の共鳴による性能低下が発生していることの差である。

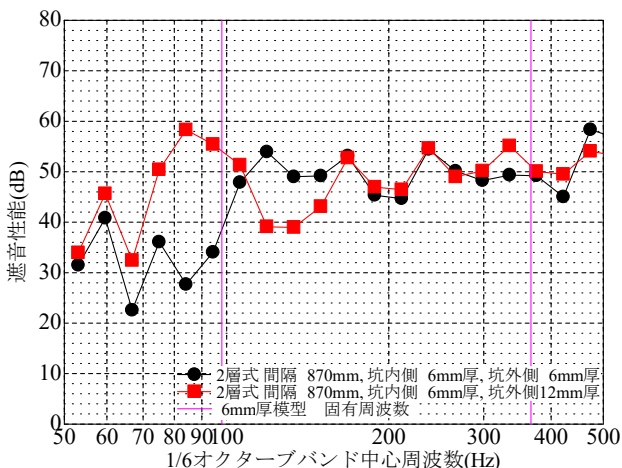


図-17 2層式扉模型の遮音性能（坑内側6mm厚の固有周波数に扉間隔に起因する反共鳴周波数を一致）

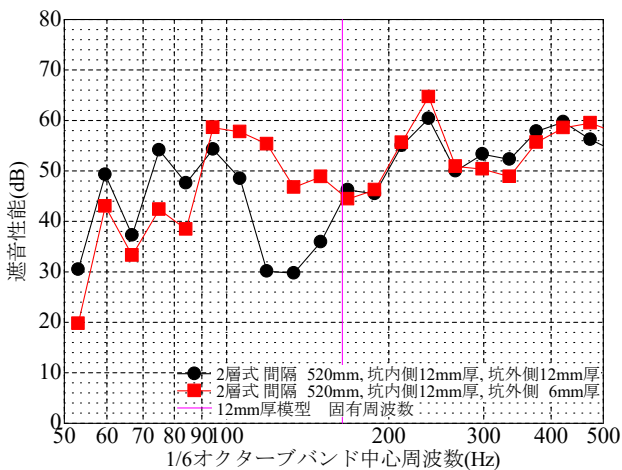


図-18 2層式扉模型の遮音性能（坑内側12mm厚の固有周波数に扉間隔に起因する反共鳴周波数を一致）

(5) 扉間隔を変えた2層式扉模型の遮音性能

扉の2層組合せを（6：12）に固定して、坑内側扉（6mm）の固有周波数が中間層の共鳴、反共鳴周波数どちらにも一致しない扉間隔100mm、反共鳴周波数に一致する870mm、共鳴周波数と一致する1740mmの3ケースについて、遮音性能を図-19に示す。坑内側扉の固有周波数が反共鳴周波数に一致する870mmの遮音性能が一番良い。共鳴周波数に一致する1740mmは、坑内側扉の1次固有周波数を極小値として遮音性能が低下する。共鳴、反共鳴どちらにも関係しない100mmでも、中間層が機能せずに2層の扉が一体的に振動するため、固有周波数近傍で遮音性能が低下する。これより、共鳴する扉間隔に加え、狭すぎる扉間隔でも遮音性能が低下することがわかった。ここで、2層式の扉間隔を共鳴、反共鳴どちらにも関係しない100mmに固定し、扉の2層組合せを（6：12、8：12、10：12）と変えたときの遮音性能を図-20に示す。坑内側扉を変えたことの影響は、坑内側扉の固有周波数付近で若干現れる程度で、大勢には影響しないことも把握した。

ついで図-21に、前記反共鳴周波数に一致する870mm

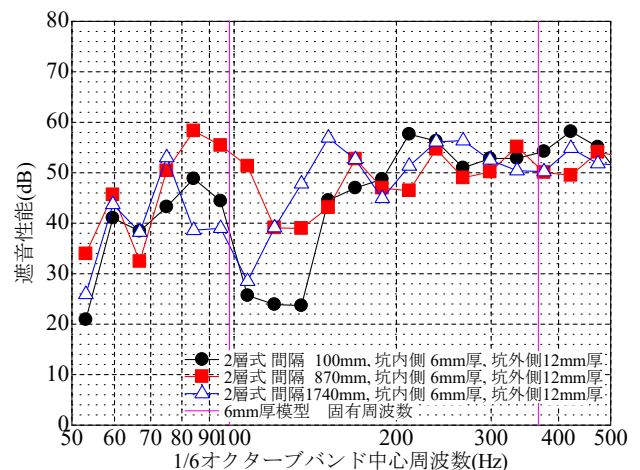


図-19 2層式扉模型の遮音性能と扉間隔の関係

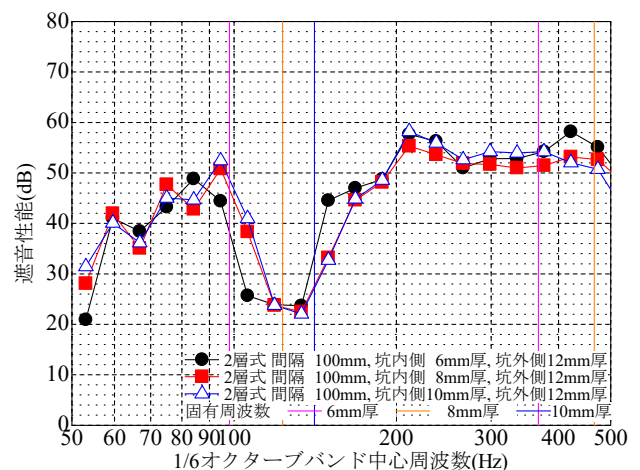


図-20 2層式扉模型の遮音性能と坑内側扉剛性の関係

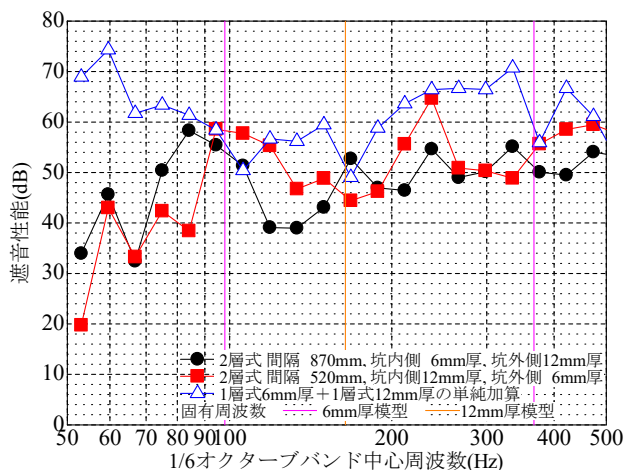


図-21 2層式扉模型の遮音性能と1層式扉模型の単純加算による遮音性能の比較

の2層式扉（6：12）の遮音性能と、1層式で扉の厚さ6、12mmの各遮音性能を単純に加算した遮音性能とを比較した結果を示す。図では参考として、2層式扉を前記と逆の組合せ（12：6）とし、内側扉の厚さ変更により反共鳴間隔も520mmに変わった場合も追記した。図から2層式で反共鳴する間隔に設定していても、得られる遮音性能は1層式扉の性能を単純加算したものに到達していないことがわかった。

(4)と(5)節で示した遮音性能の全体を通じて、坑内側扉の1次固有周波数より高周波数側では、検討のパラメータとした扉の厚さ、扉の組合せ、扉間隔等をどのように設定したとしても、大勢として遮音性能への影響が小さいことがわかる。これは、防音扉の実機遮音性能が騒音レベルの周波数帯において、重ねるだけ遮音性能が向上することの裏づけになる結果と考えられる。

4. まとめ

現場計測ならびに模型実験によって、防音扉の遮音性能は、扉部材の固有周波数、2層式扉で囲まれた空間、

扉に存在する隙間などに大きく影響されることを確認した。また、現場計測では開閉機能を有する車両通後部において、材質が硬くて重いものでも、拘束条件が弱いために、低周波音に対する遮音性能が極端に低下していることもわかった。

開口影響に関する模型実験の結果から、剛性の小さな（実機では安価な）防音扉を設置した場合、開口影響による性能低下は小さいが、剛性が大きく重い（実機では高価な）防音扉の場合は性能低下が非常に大きいことを把握した。このため、性能を期待する高価な扉を設置する場合は、施工精度に十分配慮しないと、防音扉への投資価値が損なわれるものと考えられる。

2層式扉に関する模型実験の結果から、坑内側扉の1次固有周波数ならびに扉間隔に起因する共鳴、反共鳴周波数の影響で遮音性能が大きく低下する帯域のあることがわかった。また、その周波数より高周波数域では、遮音性能がほとんど変化しないこともわかった。

参考文献

- 1) SHIBA Yoshihiko, TAKAMURA, Hiroaki, NAKAMURA Satoki : Blasting Sounds Caused by Various Types of Controlled Blasting, ICEB2011 The 6th International Conference on Explosives and Blasting, pp.71-77, 2011.10.
- 2) 船津弘一郎, 内山恒光 : トンネル発破の特性と予測, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, pp.57-60, 1987.9.
- 3) ジェオフロンテ研究会発破技術WG : 山岳トンネル発破の勘どころ, p.147. 2014.12.
- 4) 坂上公博, 柏谷旭彦, 森本政之, 高田重隆 : 防音扉による低周波音の遮音特性に関する基礎的研究, 神戸大学大学院工学研究科紀要第1号, pp.22-28, 2009.
- 5) 高村浩彰, 稲留康一, 平野享, 塚本耕治 : トンネル坑内における発破音圧特性の測定・評価手法に関する検討, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.72, No.3, p.I_28-I_35, 2016.
- 6) 時田保夫監修 : 音と環境と制御技術第I巻, 株式会社フジ・テクノシステム, p.61, 1999.10.20.

(2017.8.11 受付)

CONSIDERATION ON SOUND INSULATION PERFORMANCE AND INSTALLATION METHOD OF SOUNDPROOF DOOR

Hiroaki TAKAMURA, Koichi INADOME, Toru HIRANO and Koji TSUKAMOTO

Blasting sound in tunnel construction is instantaneous noise / low frequency sound of several seconds a day, but it has a large influence on neighboring private houses, therefore, countermeasures such as soundproof doors are often used .

In this report, we focused on the sound insulation properties of the soundproof door, how much the effect of the clearance of the soundproof door occurs, how the sound insulation performance changes with the door interval when installing 2 soundproof doors, The results considered from the results of the model experiment are described.