

低周波音吸音装置による トンネル発破音の低減化検討

谷川将規^{1*}・三原泰司²・西村晋一³・阿曾利光³・今津雅紀³

¹清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)

²清水・青木あすなる特定建設工事共同企業体 (〒022-0005 岩手県大船渡市三陸町吉浜字上野104-3)

³清水建設株式会社 土木事業本部 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1)

*E-mail: tanigawa @shimz.co.jp

トンネル発破掘削時に生じる発破音の対策のひとつとして、坑口に設置する防音扉が挙げられる。しかしながら、一般的な防音扉は低周波音に対する十分な遮音性能を確保することが難しい場合がある。また坑外に放射された低周波音に対し、一般的な防音扉などでは遮音効果が期待できない。今回、外部周辺環境の低周波音対策および良好な掘削作業環境を確保することを目的として坑内に設置する吸音装置を考案した。この吸音装置は一面に開口を有する簡素な箱形構造をしており、箱内部の共鳴現象などを利用して吸音する。本報では吸音装置の概要を述べ、工事中のトンネルにおける実際の発破音の低減効果の検証実験結果について報告する。

Key Words : Tunnel blasting sound, Sound absorption, Helmholtz resonator, Low frequency sound

1. はじめに

トンネル工事において、発破掘削時に生じる発破音は100Hz以下の低周波数成分を多く含む。この低周波音が坑外へ放出された際、近隣の住環境の悪化を招くなど騒音問題が生じる懸念がある。発破音に対する一般的な防音対策としては坑口に設置する防音扉が挙げられる。しかしながら、防音扉による発破音対策事例をまとめた報告はあるものの¹⁾、防音扉の種類や設置台数を判断する明確な基準は無い。また防音扉の遮音特性の精緻な予測はいまだ研究段階にある²⁾。このような状況から、実務的には防音扉の選定は簡易な遮音性能予測式³⁾が用いられるのが現状である。

トンネル坑口に設置される防音扉は内部をコンクリートや水で充填して重量のあるものを用いることが多い。このような防音扉の一般的な遮音性能を模式的に図-1に示す。防音扉の遮音性能は共振周波数を境に高周波数域は質量則に従い、低周波数域は剛性則に従うとされる。簡易予測式³⁾もこの仮定に基づく。図-1に示すように、共振周波数(一般的な防音扉の場合10~30Hz)付近で防音扉の遮音性能は低下する。そのため、低周波音に対しては、重い防音扉でも十分な遮音効果が得られない場合がある。

本研究は、このような防音扉の遮音上の弱点となる低

周波音をトンネル坑内で低減することを目的としている。今回開発した吸音装置(以下、吸音ボックスと記す)は、ヘルムホルツ共鳴吸収⁴⁾の原理を応用したものである。坑内に複数体設置することによって発破音のエネルギーを減衰させる。以下では発破音の特徴を整理し、対象とする低周波音について考察する。次に吸音ボックスの概要と実際の発破音を用いた実大実験の結果を述べる。

2. 発破音の性状

発破音の測定事例は多いものの¹⁾、その多くは騒音計を用いて測定され、時間平均された音圧レベルで評価される。また測定条件が必ずしも明らかでなく、非定常な発破音の詳細な性状を把握するには不十分なケースも多い。そこで発破音の特徴を抽出するため、吸音ボックスの設計に先立って行った実測例を示す。図-2は、発破掘削中のトンネル(坑道断面積は75m²)と坑内の観測点位置を表す。切羽から約200m地点に観測点A、切羽から約900m離れた坑口付近に観測点Bを設定している。

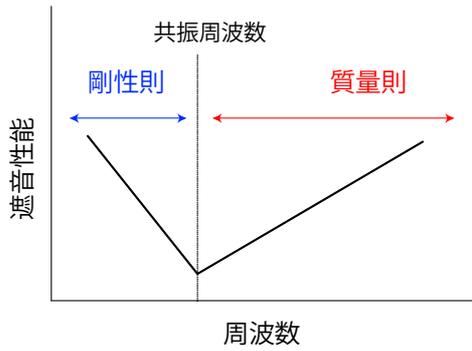


図-1 防音扉の遮音性能の概略

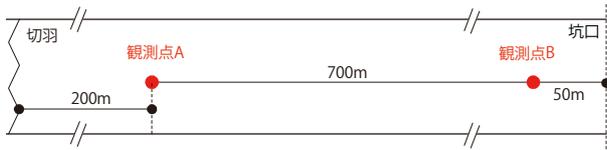


図-2 発破音の坑内観測点位置



写真-1 発破音の測定状況

いずれの観測点もトンネル断面中央位置にあつて、高さは1.2mである。実測時の切羽周辺の岩種は安山岩であり、発破は段数10、総孔数101、装薬量約 0.75kg/m^3 で実施された。測定には絶対圧計（SSK製DP8H）を用い、発破音の過渡応答をサンプリング周波数20kHzで収録した。写真-1は発破音測定の状況である。図-3は、3回測波形である。発破音の大きさは岩の種別や装薬条件等に左右されるためデータ間のばらつきは見られるが、切

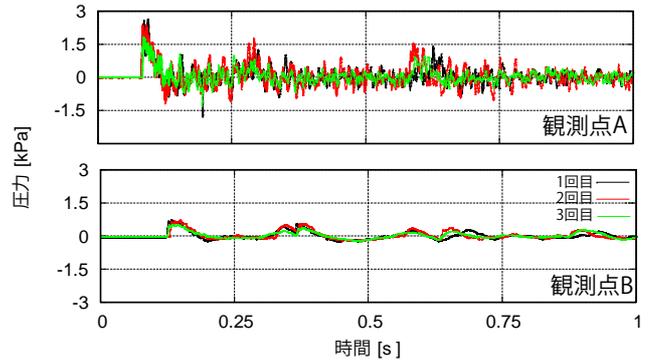


図-3 発破音の実測波形

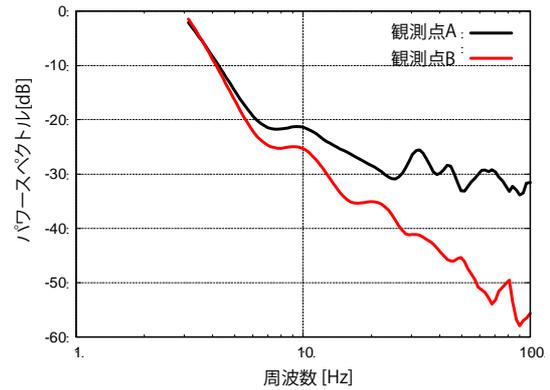


図-4 発破音の周波数特性

羽側の観測点Aでのピークは約1.5~2.5kPaであった。これを瞬時の音圧レベルに換算すれば約158~162dBに相当する。一方、観測点Bにおける音圧振幅は全体的に小さくなり、ピークは約0.5~0.7kPaであった。これを瞬時の音圧レベルに換算すれば約148~151dBに相当する。

図-4は、図-3の過渡応答から求めたパワースペクトルの例を示す。図-4から、観測点A、Bのパワースペクトルは低周波数では比較的一致はよく、30Hzまでは大きな差は見られない。一方、周波数が高くなるにつれて差が大きくなる。例えば100Hzの減衰量（観測点A、Bのパワースペクトルの差）は約23dBであるのに対し、20~10Hzでは約7~10dBである。すなわち、低周波音は坑内伝播に伴う減衰は比較的小さい。しかも20~30Hz付近は防音扉の共振周波数に近いので遮音性能が確保しにくく、坑外へ放射される低周波音が大きくなる。

3. 吸音ボックスの概要

図-5は吸音ボックスの寸法を表す。吸音ボックスは合板製で幅0.5m×高1.0m×奥行3mであつて内部に間仕切り壁があり、重量は約60kgである。ボックスの1

面には 100 cm^2 程度の開口を設けている。これを現場の状況に合わせて坑内に複数体設置する。発破により生じる低周波音は、開口から吸音ボックスの中に入り、ボックス内部で共鳴してエネルギーが損失される。その吸音原理はヘルムホルツ共鳴に基づくものである。

吸音効果のある周波数は吸音ボックスの寸法、開口面積、各面の板厚および剛性に依存する。そのため、空気が開口を出入りする際の摩擦、面の撓みの影響、吸音ボックス内部空間の共振などを電気回路網に置き換え、吸音面の音響インピーダンスを求める方法⁵⁾⁶⁾を用いて、吸音ボックスの仕様を決定する。詳細は紙面の都合上割愛するが、前報⁹⁾では内部仕切りの無い幅 0.9 m × 高 0.9 m × 奥行 5 m を用いた。図-5 に示すものはこれを改良し、壁面の剛性を約2倍にして、発破音による壁面のたわみを極力小さくしている。また設置時の坑内作業の障害とならないよう配慮して奥行き寸法を短くした。

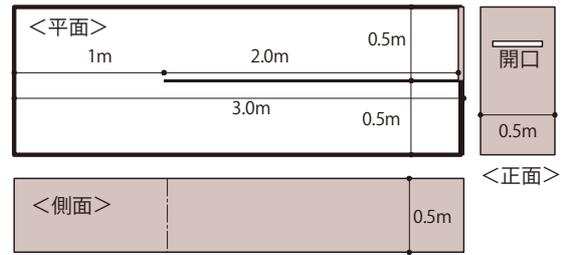


図-5 吸音ボックスの寸法

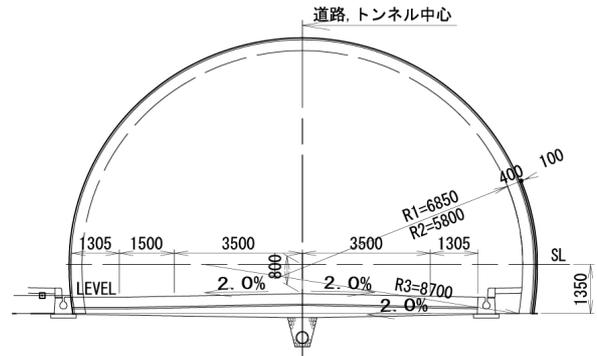


図-6 吉浜トンネルの断面

4. 低減効果の検証

(1) 適用現場

三陸沿岸道路 吉浜道路工事の（仮称）吉浜トンネル（岩手県大船渡市）では坑口に2重の防音扉を設置し、十分な発破騒音対策効果を上げている。坑内における吸音ボックスの低周波音低減効果を検証するため、図-5 に示すように防音扉から十分離れた位置に吸音ボックスを最大200個設置し、その前後の観測点において実際の発破音を計測した。

(2) 検証実験結果と考察

上述のトンネルにおける吸音ボックスの低周波音低減効果の検証実験の結果を示す。図-6 はトンネル断面を示し、図-7 は坑内での吸音ボックスの位置と観測点位置を示す。吸音ボックスの設置数は100, 150, 200個の3条件とした。写真-2 に示すように坑内の作業の妨げることを無きよう配慮し、吸音ボックスを4段積みにしてベルトコンベアの下部空間を利用して壁面寄りに設置した。

図-8 は、吸音ボックス200個設置時の発破音波形の一例である。発破音が吸音ボックスを通過することにより、発破音のピーク値が約20%小さくなる様子が確認される。また図-9 は、吸音ボックス数を100, 150, 200個とした場合の吸音体前後で観測された発破音のワースペクトルを表す。図-9 から、吸音ボックスによる低周波音低減効果は約20~80Hzにかけて現われる。吸音ボックスの数が多きほど低減効果は大きい傾向があり、200個の場合で約5dBとなることがあきらかとなった。

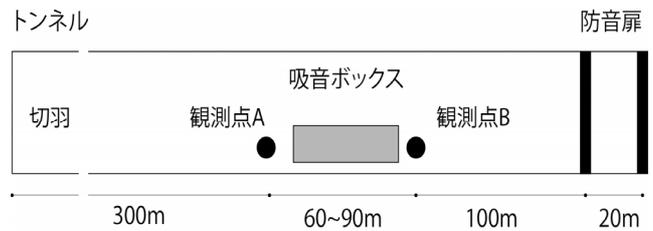


図-7 観測点と吸音ボックスの位置関係



写真-2 吸音ボックス設置状況

5. おわりに

トンネル発破掘削工事における発破音の低減のため、ヘルムホルツ共鳴の原理に基づく吸音ボックスを提案し、その効果を現場の実測にて検証した。その結果、20～80Hz付近で最大で約5dBの低減効果を確認できた。設置個数を多くすれば、より低減効果が期待できる。また吸音ボックスの仕様（寸法、開口面積）を変化させることで吸音周波数の制御が可能であることが示唆される。今後は、複数現場で転用可能な吸音ボックスを開発し、コストダウンにも取り組んでいきたい。

謝辞

（仮称）吉浜トンネルでの実測にあたり、ご協力頂いた国土交通省東北地方整備局の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高田重隆 ほか：住宅近傍で行われたトンネル工事における発破低周波音対策例，日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集，pp.189-192，2003.
- 2) 阪上公博 ほか：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，Vol.1，pp.22-28，2009.
- 3) 楠田真也，井上保雄；”剛性則による低周波音の遮音性能”日本機械学会第15回環境工学シンポジウム2005講演論文集，pp.39-42，2005.
- 4) 前川純一ほか：建築・環境音響学，第2版，pp.194-195，共立出版，2000.
- 5) 今津雅紀ほか：“トンネル発破音吸音機構に関する実験的検討”，第13回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.101-105，2013.
- 6) M Tayong, R. and Dupont, T. and Leclair, P.: On the variations of acoustic absorption peak with particle velocity in micro-perforated panels at high level of excitation, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.127, p.2875, 2010.

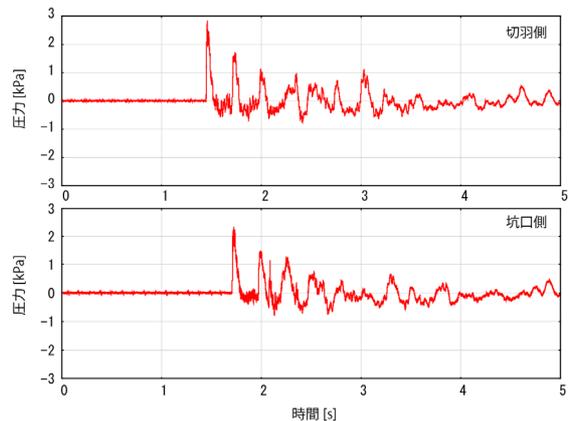


図-8 吸音ボックス（200個）前後の圧力波

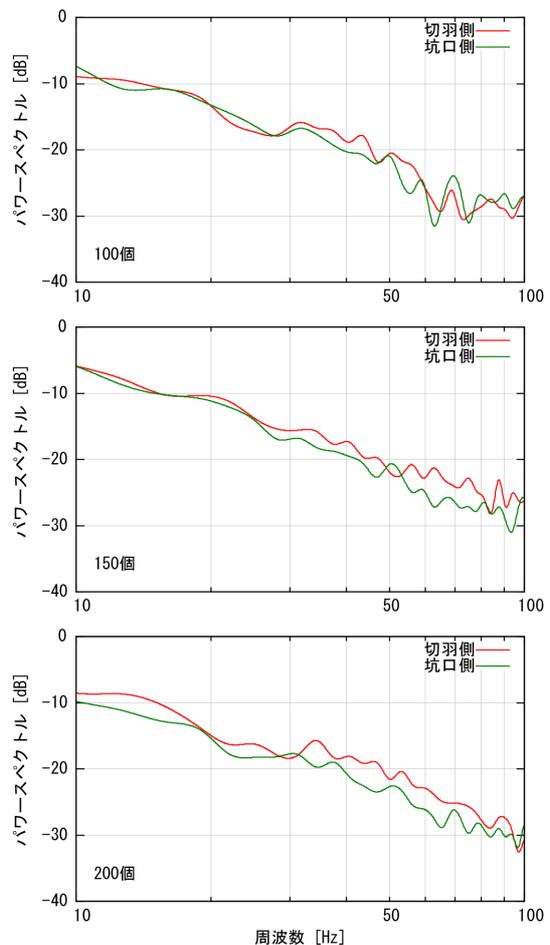


図-9 吸音ボックスによる低周波音低減効果

REDUCTION OF BLAST SOUND IN TUNNEL BY USING ABSORBER BASED ON HELMHOLTZ RESONATORS

Masaki TANIGAWA, Yasuji MIHARA, Shinichi NISHIMURA,
Toshimitsu ASO and Masanori IMAZU

This paper represents an experimental study on the absorbers of tunnel blasting sound, which is based on Helmholtz resonator tuned for high sound pressure amplitudes and low frequency. In order to verify the performance of this absorber, the insertion loss of these 200 absorbers arranged in actual tunnels are measured. As a result, the sound pressure level of blasting is reduced about 5dB for 20-80 Hz.