

掘削段階に応じたトンネル発破音低減システムの開発

ANC による低周波音局所制御システムと多孔質材による可聴音低減システム

阿 部 将 幸

山岳トンネル工事における発破掘削は、昼夜を問わず一日に複数回行われ、非常に大きな騒音が発生する。掘削の初期段階では全周波数帯域の音が問題となる一方、掘削距離が進むにつれて可聴音が減衰し低周波音が卓越した周波数特性となる。本稿では、掘削段階により周波数特性が異なる発破音対策として開発した、ANC を利用した低周波音の局所制御システム、多孔質吸音材と坑内作業足場を利用した可聴音低減システムの概要を示すとともに、実際の山岳トンネル工事現場での検証結果について報告する。

キーワード：トンネル、発破音、アクティブノイズコントロール、多孔質吸音材

1. はじめに

山岳トンネル工事における発破掘削は、昼夜を問わず一日に複数回行われ、非常に大きな騒音が発生する。掘削の初期段階では全周波数帯域の音が問題となる一方、掘削距離が進むと可聴音が減衰するため低周波音が卓越した周波数特性になるなど、掘削段階によりその特性が異なることから、近隣の住環境に配慮した発破音対策は技術的難易度が高いものとされている。

筆者らは、騒音対策として坑口に設置される防音扉では遮ることの難しい 20 Hz 以下の超低周波音をトンネル内部で減衰させる吸音装置を開発し、これまで様々な山岳トンネル現場に適用してきた¹⁾。

本稿では、新たに開発したアクティブノイズコントロール（以下、ANC）を利用した 100 Hz 以下の低周波音制御システム、多孔質吸音材と既設坑内設備を利用した 100 Hz 以上の可聴音低減システムについて報告する。

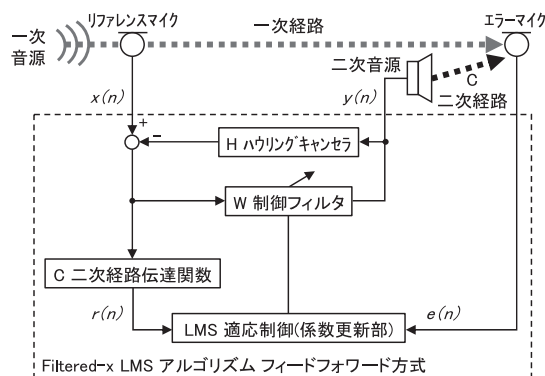
2. 低周波音の局所制御システム

音の波動性を利用した ANC は、波長の長い低周波音の低減に適した手法である。最近のデジタル信号処理装置の性能向上と低廉化により騒音対策技術の選択肢の一つになりつつあり、様々な分野への適用例が報告されている^{2), 3)}。

本章では、ANC による発破音の制御範囲を坑外の特定エリアに限定した局所制御システムの概要と、実際のトンネル発破音に適用した事例を報告する。

(1) ANC システム

図—1 に Filterd-x LMS アルゴリズムによるフィードフォワード制御システムのブロック図を示す。フィードフォワード方式の ANC システムでは、騒音源に近い上流側で参照信号となる一次音を検出するリファレンスマイク、低減効果を観測するための制御点（エラーマイク）、一次音を打ち消す二次音を発生する二次音源装置（スピーカ）で構成される。リファレンスマイクで検出された参照信号をエラーマイクの位置で一次音と逆位相となるように制御フィルタによって加工し、スピーカから二次音として放射する。エラーマイクでは一次音と二次音の差分である誤差信号を検出し、制御フィルタは誤差信号が最小となるようにフィルタの係数を調整し、二次音の信号を作成する。フィードフォワード方式ではリファレンスマイクで検出した一次音に基づいて二次音の信号を作成するため、一次音の伝搬経路やソフトウェアの演算時間、ハー



図—1 Filterd-x LMS アルゴリズムによるフィードフォワード制御システムのブロック図

ドウェアの応答時間を把握し、リファレンスマイクと二次音源を因果律を満たす距離をとって設置しなければならない。

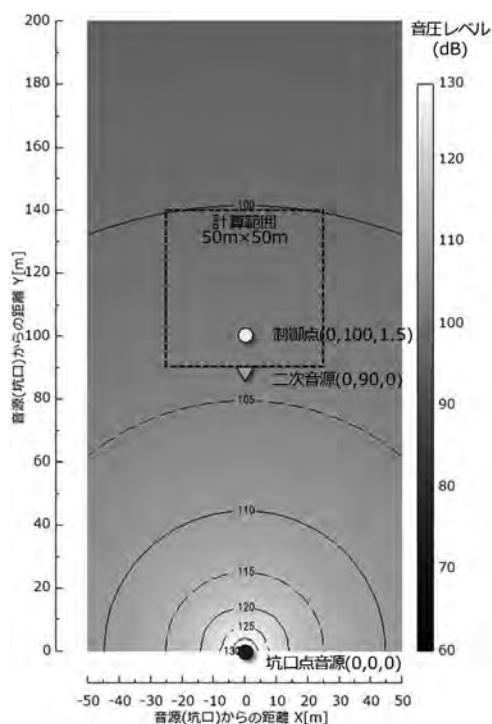
(2) 制御対象エリア

通常、騒音源、二次音源、エラーマイクが直線状に配置されたフィードフォワード (1-1-1) 制御方式において、制御エリア拡大のためには、二次音源を騒音源近傍に配置する必要がある。トンネル発破音を対象とする場合、坑口、若しくは坑内に二次音源を配置することが理想的であるが、一般的なスピーカでは発破音と同振幅の逆位相音を発生させることが困難であり、発破音への適用事例は極めて少ない^{4), 5)}。

ここでは、ANCによる制御対象範囲を坑外の特定期間（近隣民家の敷地内を想定）に限定することにより、二次音源の設置数や出力を抑えることを目的とした局所制御システムの効果検証を行った。

制御対象とする近隣民家が坑口から100 m点に存在すると想定し、坑口と二次音源の距離を90 m、二次音源と制御点の距離を10 mとし、坑口、二次音源、制御点を直線状に配置した場合の位相干渉による発破音低減効果を波動音響解析により検証した。

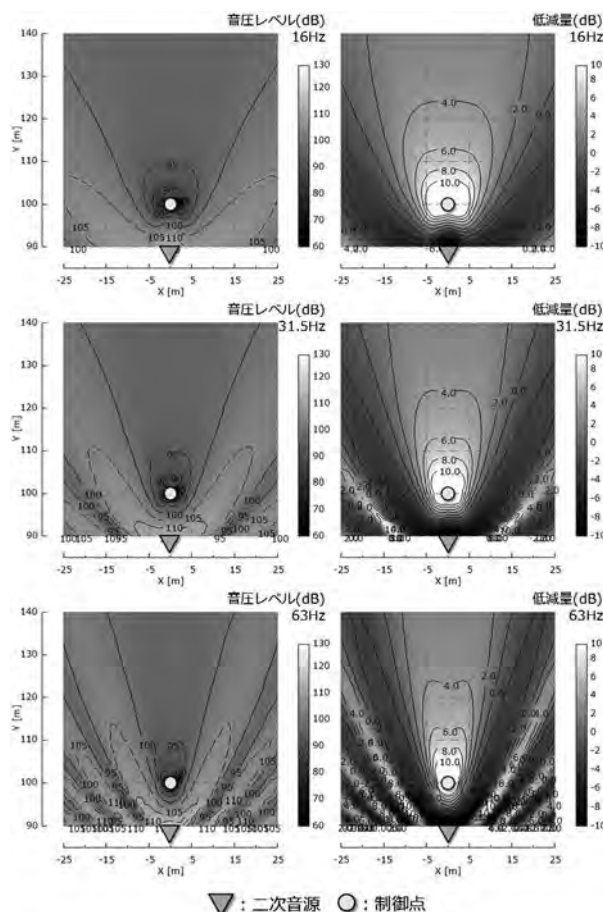
解析モデルを図一2に示す。x-y面 ($z=0$ m)、z-x面 ($y=0$ m) を対称面とし、 $x=0$ m、 $y=0$ m、 $z=0$ m に点音源 (振幅: 100 [Pa]、位相 0 [deg.])、 $x=0$ m、 $y=90$ m、 $z=0$ m に二次音源 (点音源) を配置し、



図一2 解析モデル
ANC 制御前の音圧レベル分布 ($z = 1.5$ m)

$x=0$ m、 $y=100$ m、 $z=1.5$ m の制御点で音圧が 0 となるよう二次音源の振幅、位相を設定した。制御点周辺 $x=-25 \sim 25$ m、 $y=90 \sim 140$ m、 $z=1.5$ m における 16 Hz、31.5 Hz、63 Hz の音圧レベル、及び制御前と比較した低減量分布を図一3に示す。いずれの周波数においても、制御点近傍では 10 dB 以上の低減効果が得られ、二次音源、制御点の直線上に制御エリアが広がっていることがわかる。しかしながら、制御点から直線方向に遠ざかるにつれ低減効果が小さくなり、制御点から水平方向に離れるにつれ、一部で増幅エリアが生じていることがわかる。これは、三次元空間での伝搬音は距離の二乗に反比例して減衰するため、坑口からの伝搬音と二次音源からの発生音の振幅のズレが制御点から離れるにつれ大きくなること、坑口からの伝搬音が平面波に近い形状であるのに対し、二次音源からの発生音が球面波に近い形状となり、波長の短い高周波音になるほど位相のズレが大きくなることが要因である (図一4, 5)。

しかしながら、制御対象を 100 Hz 以下の低周波音に限定することで、スピーカ 1 台で約 200 m² 程度の範囲内を 5 ~ 10 dB 程度低減させることが可能であることや、二次音源を水平方向に並列配置することで水



図一3 ANC 制御後の音圧レベル分布、及び低減量分布 ($z = 1.5$ m)

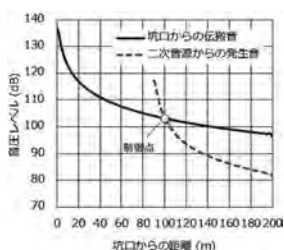


図-4 音の距離減衰

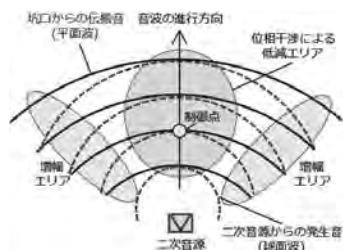


図-5 波面合成

平方方向の低減エリアを拡大することも可能であることから、予め制御対象エリアや坑口からの伝搬距離、制御周波数帯域などの条件を確認し、システム設計を行うことで有効な発破音対策ツールとなると思われる。

なお、本検証モデルのように、坑口から 100 m 離れた点における制御音圧レベルが約 100 dB の場合、音源方向に離隔距離 10 m で設置する二次音源は約 117 dB/1 m 程度の出力が必要となるが、これは市販のスピーカでも出力可能なレベルであることから、特殊な二次音源を必要とせず、市販品のみでシステム構成が可能であることを確認した。

(3) 現場適用実験

実際のトンネル発破音に対する ANC 制御の効果を検証するため、トンネル坑口から約 150 m 点の橋上にある工事用ユニットハウスを制御対象とした現場実験を行った。ANC システムは参照点 1 箇所、制御点、

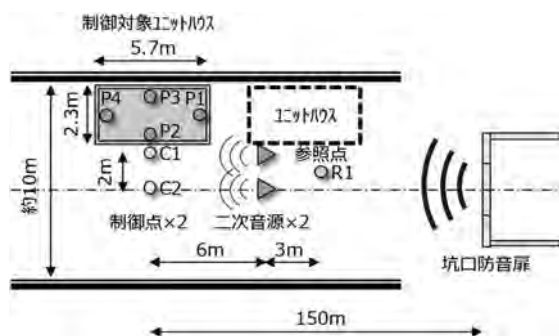


図-6 現場適用実験の概要



写真-1 現場適用実験状況

二次音源をそれぞれ 2 箇所とするフィードフォワード (1-2-2) 制御とし、図-6、写真-1 に示す様に、ユニットハウスからの反射音の影響を最小限に抑えるレイアウトとした。

制御時間は発破音継続時間と同程度とし、発破音を複数回制御することにより制御フィルタを更新した。測定量は 1/3 オクターブバンド音圧レベルの最大値、時間重み特性は Slow とした。

発破毎に参照点 (R1) - 制御点 (C1) 間の音圧レベル差を測定し、予め ANC 非制御時に測定した参照点 (R1) - 制御点 (C1) 間の音圧レベル差の 5 回平均値と比較することで、制御点 (C1) における低減効果を求めた (図-7)。ANC の制御回数が増すにつれ徐々に低減量が増大し、制御 4 回目に 31.5 Hz, 63 Hz 帯域で最大 8 dB の低減効果を確認した。なお、4 回目以降の制御効果には大きな差が見られていないことから、比較的少ない制御回数でも制御フィルタが収束していることがわかる。同様に、参照点 (R1) とユニットハウス内受音点 (P1 ~ P4) との音圧レベル差を ANC 非制御時の 5 回平均値と比較した結果を図-8 に示す。50 Hz 以上の低減量に多少のバラつきがあるものの、ユニットハウス内の各点で制御点と同様の低減効果が得られていることを確認した。

ここで、ANC 制御 5 回目に観測したユニットハウ

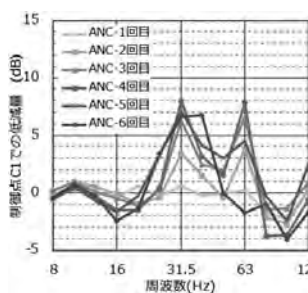


図-7 制御点 (C1) における低減量

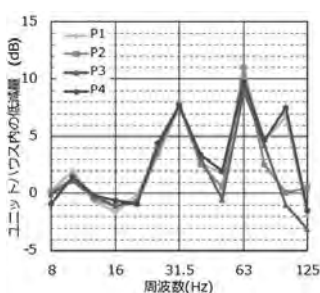


図-8 ユニットハウス内低減量 (ANC5 回目)

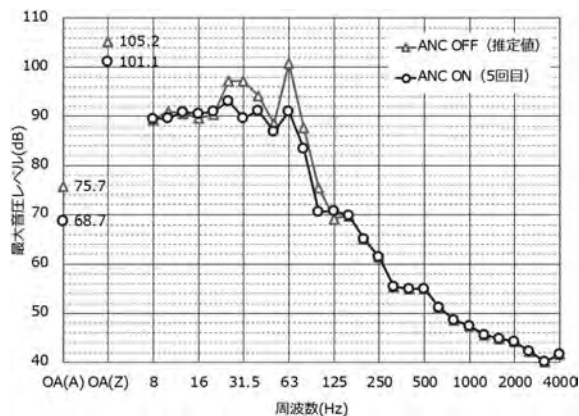


図-9 ユニットハウス内平均音圧レベル

ス内平均音圧レベルと、各受音点にユニットハウス内の低減量（図—8）を加算した後に平均した ANC 非制御時の室内音圧レベル推定値との比較を図—9に示す。ANC 非制御時のユニットハウス内音圧レベルは 25 ～ 63 Hz 帯域が卓越した周波数特性であったと推定されたが、ANC 制御により卓越成分が低減され、騒音レベルで 7.0 dB、低周波音レベルで 4.1 dB 低減できていることがわかる。

実際のトンネル現場では発破ごとに防音扉を開閉するため、坑口付近に二次音源や参照点を固定配置することが難しく、発破の直前に二次音源を配置し、経路同定作業を行う必要がある。制御対象エリアを限定した局所制御システムの場合、参照点や二次音源、制御点を対象エリアに近接して固定配置する為、発破毎の機材配置や経路同定作業も不要になるなど、発破の作業効率の低下を防げることも特長の一つである。

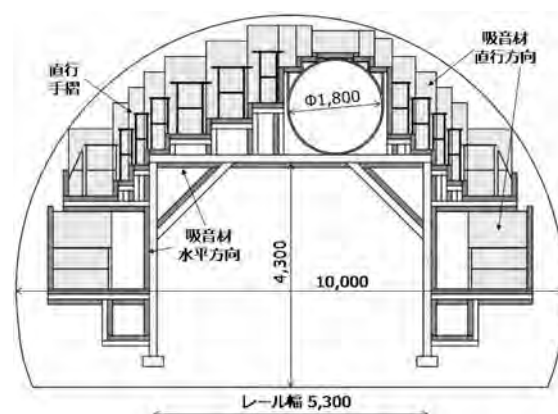
3. 可聴音低減システム

切羽から坑口までの距離減衰が見込めない発破掘削の初期段階では、防音扉設置後も 100 Hz 以上の可聴音が問題となることがある。

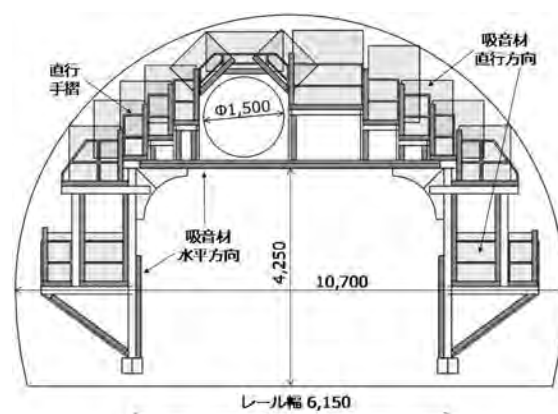
そこで筆者らは、既設作業台車に多孔質吸音材を取付けることで坑内にサイレンサー構造を形成する可聴音低減システムを考案した。本章では実際のトンネル現場への適用事例と低減効果について報告する。

(1) システム概要

トンネル A、B に導入した可聴音低減システムの概要を表—1、図—10、11 に示す。何れのトンネルもシート張り台車の骨組部や作業床、手摺部を利用してグラスウールボード（以下、吸音材）を複層させて取付けることで開口サイズの異なる多数の消音ダクト構造を形成した。吸音材は作業床の裏面、及びトンネル進行



図—10 トンネル A 吸音材設置レイアウト



図—11 トンネル B 吸音材設置レイアウト

方向に直行した手摺部にも取付けている。

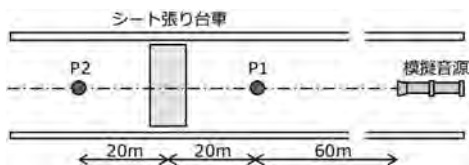
なお、可聴音が問題となる掘削初期にサイレンサーとして利用した後、作業床の吸音材を撤去することで通常の作業足場として利用することが可能であり、設置コストも抑えられることを特長としている。

(2) 現場適用実験

シート張り台車への吸音材設置前後の音圧レベルを測定することにより、吸音材の設置効果を検証した。図—12 に測定点、音源位置を示す。

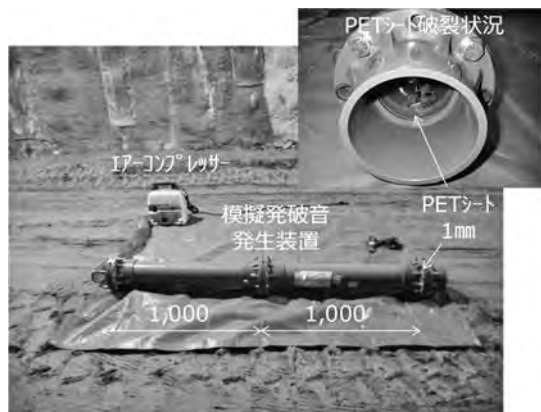
表—1 可聴音低減システムの概要

	トンネルA		トンネルB	
吸音材	グラスウールt50mm (48kg/m3)			
写真	吸音材設置前	吸音材設置後	吸音材設置前	吸音材設置後
				
内空断面積	58.1m2		62.0m2	
シート台車奥行	6,0m		4.65m	
吸音材設置面積	320m2		350m2	



図一 12 坑内測定点

実発破では、吸音材設置前後の切羽状況や火薬量、坑内設備のレイアウト等を同一条件で評価することが困難であるため、検証用音源には発破音を模した広帯域の衝撃性音源装置⁶⁾を用いた。写真一 2 に音源装置の概要を示す。内径 0.15 m、長さ 1 m の塩化ビニル管を 2 本連結し、一方を閉管、もう一方の開口部に厚さ 1 mm の PET シートを取付けている。エアーコンプレッサーにより管内を加圧し、取付けた PET シートを破裂させることで圧縮空気を瞬時に放射し、広帯域の周波数成分を含む衝撃音を発生させた。

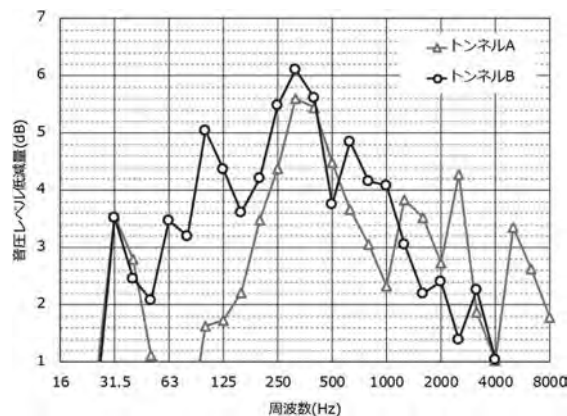


写真一 2 模擬発破音発生装置の概要

シート張り台車の中心から前後 20 m 点に設置した P1-P2 間の音圧レベル差をそれぞれ 5 回測定し、吸音材設置前後で比較することで低減量を求めた。測定量は 1/3 オクターブバンド音圧レベルの最大値、時間重み特性は Fast とした。

図一 13 に吸音材設置による音圧レベル低減量を示す。トンネル A、B とも 250 ~ 500 Hz 帯域の低減量が最も大きく、最大 5 ~ 6 dB の低減効果が得られている。また、1 kHz 以下の周波数では、シート張り台車の奥行が長いトンネル A に比べ、奥行きが短いものの吸音材の設置面積が大きいトンネル B の低減量が大きく、100 ~ 1 kHz 帯域で 4 ~ 5 dB 程度の低減効果を確認した。

なお、高音域の吸音率が高い多孔質吸音材を設置しているにもかかわらず 1 kHz 以上の帯域で低減効果が殆ど得られていない。これは、坑内路面や周壁の吹付コンクリートが高音域で比較的高い吸音性能を有しており、吸音材設置による坑内吸音力の増加が見込め



図一 13 吸音材設置効果

ないことが要因であると考えられる。

4. おわりに

ANC を利用した低周波音の局所制御システム、多孔質吸音材と既設坑内設備を組合せた可聴音低減システムについて、波動音響解析、現場適用実験により低減効果を確認した。坑口防音扉や、超低周波音吸音装置¹⁾と組合せることで広周波数帯域の発破音を効率的に低減させることが可能となった。

何れのシステムも特殊な装置を必要とせず、汎用品のみで構成することができるため、比較的低コストで実現可能である。今後は、システム改良による低減効果の拡大を図るとともに、周辺環境配慮技術として積極的に適用していく。

J C M A

《参考文献》

- 1) 阿部将幸, 小谷朋央貴, 漆戸幸雄, 野間達也: トンネル発破時の超低周波音低減システムの開発, フジタ技術研究報告第 52 号, 2016.
- 2) 漆戸幸雄, 阿部将幸: 建設重機が発生する低周波音のアクティブノイズコントロールによる制御, フジタ技術研究報告第 49 号, 2013.
- 3) 西村正治, 宇佐川毅, 伊勢史郎, 梶川嘉延: 新版 アクティブノイズコントロール, コロナ社, 2017.
- 4) 稲葉秀雄, 福田雅司, 上田泰孝: アクティブノイズコントロールによる発破音低減の試み, 土木学会第 67 回年次学術講演会論文集, 2012.9.
- 5) 後藤達彦, 江波戸明彦, 西村修, 佐野雄紀, 三浦悟, 松井信行: トンネル発破音に対するアクティブノイズコントロール適用性の検討, 日本音響学会 2012 年秋季研究発表会講演論文集, 2012.9.
- 6) 横田孝俊, 土肥哲也, 牧野康一, 岡田恭明, 吉久光一: 広帯域・高音響エネルギーレベル衝撃性音源の開発と伝搬実験への適用, 日本音響学会 2007 年春季研究発表会講演論文集, 2007.3.

〔筆者紹介〕

阿部 将幸 (あべ まさゆき)

(株)フジタ
建設本部 建築エンジニアリングセンター
環境技術部
主任

