

発破振動に起因する固体伝搬音の坑外伝搬予測について

A Study on The Prediction Method of The Solid Borne Sound Caused by Blasting Vibrations

高村 浩彰*

岩間 史明**

Hiroaki Takamura

Humiaki Iwama

吉田 正樹**

柴 吉彦**

Masaki Yoshida

Yoshihiko Shiba

要 約

本報告では、発破振動に起因する坑外での固体伝搬音に関する予測式を構築した結果について報告する。さらに、国土交通省中国地方整備局岡山国道事務所大田防災大田トンネル工事において確認された固体伝搬音の測定結果と比較すると共に、利用方法について検討した。振動ならびに音圧の測定結果から、現場条件によっては、500Hz～1000Hzの周波数成分が卓越し、可聴音として放射される音圧成分が顕著となる場合があることが確認された。また、構築した予測手法は、現象を再現できることを把握した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 予測理論式
- § 3. 測定結果との比較
- § 4. 提案する予測式
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

発破の騒音問題は、一般に発破箇所（音源）から放出された音が空気中を伝搬する音を対象にしている。しかし、トンネル工事における貫通していない出口側坑口付近において、発破ならびにブレイカ等の掘削音が聞こえてくることがある。これは、固体伝搬音といわれる、地盤等が振動することによって音を放射する現象である。

本報では、先ず発破振動に起因する固体伝搬音の予測手法を検討する。さらに、国土交通省中国地方整備局岡山国道事務所大田防災大田トンネル工事の出口側坑口付近において測定した振動に起因する音響放射（固体伝搬音）の事例を報告すると共に、構築した予測手法と比較した。これらの結果を踏まえて、施工計画時に利用可能な最大騒音レベル予測式を提案した。

§ 2. 予測理論式

2-1 音響放射エネルギー

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} の関係が知られている¹⁾。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。

$$W_s = kz_a V_{rms}^2 \quad (1)$$

$$L = 10 \log \frac{W_s}{1 \times 10^{-12}}$$

$$\approx 20 \log V_{rms} + 10 \log k + 146.5 \quad (2)$$

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

ここで、 W_s は音響放射パワー [W] を、 k は放射係数を、 z_a は空気の固有音響抵抗 ρc [kg/s m²] を、 ρ は空気の密度 [kg/m³] を、 c は音速 [m/s] を、 V_{rms} は振動速度の実効値 [m/s] を、 L は平均音圧レベル [dB] を、 L_{va} は振動加速度レベル [dB] を、 f は周波数 [Hz] を示している。なお、放射係数 k は、地盤が垂直振動した場合、音場に与えるエネルギーのロスがないために $k=1$ となり、地盤が曲げ振動した際は、エネルギー損失があるために、 $k < 1$ となる係数である。放射係数については後述する。

* 技術研究所地域環境グループ

** 西日本（支）中国（支）

2-2 振動伝搬予測

式(3)は、一般的に用いられている発破による最大振動速度の伝搬予測式の1つである²⁾。振動加速度は、式(3)に示す振動速度の伝搬特性同様に距離の-2乗に比例した距離減衰特性を有することとし、式(4)から算定する。

$$V_{\max} = KW^{0.75}D^{-2}/100 \quad (3)$$

$$L_{\nu a}(f) = L_{\nu a0}(f) - 20 \log D^2 + 20 \log D_0^2 \quad (4)$$

ここで、 V_{\max} は最大速度振幅 [m/s] を、 K は発破条件や岩盤特性によって変化する係数を、 W は段当たりの薬量 [kg] を、 D は発破場所からの地盤内を伝搬する距離 [m] を、 D_0 は切羽から測定点までの距離 (基準距離) [m] を、 $L_{\nu a}(f)$ は予測地点の振動加速度レベル [dB] を、 $L_{\nu a0}(f)$ は測定点の振動加速度レベル [dB] を示している。

2-3 振動測定結果を用いる固体伝搬音予測式

発破振動が地山を伝搬し、面積 S を有する地表面 (音響放射面) から大気中に音圧として放射され、地表面 (音響放射面) から距離 R 離れた予測地点に伝搬する音圧レベルは、式(2)および式(4)を用いて式(5)で予測することができる。予測に用いる測定結果が振動加速度レベル $L_{\nu aE0}$ の場合と速度 V_{rmsE} の場合に分けて示した。また、振動の測定結果を単発暴露レベルで評価することで、単発暴露音圧レベルとして予測結果を得ることができる。なお、建設工事騒音の予測モデル "ASJ CN-Model 2007"³⁾ に従えば、空気伝搬音を対象とした発破騒音ではあるものの、最大音圧レベル L_{\max} は、単発暴露音圧レベル L_E に時定数を FAST とした場合は 4 dB、時定数を SLOW とした場合は 3 dB 加算することで得られるとしている。また、騒音レベルとして評価する際は、各オクターブバンド周波数毎に A 特性補正値を加算すればよい。

$$\begin{aligned} L_E &\approx L_{\nu aE0} - 20 \log f - 20 \log D^2 + 20 \log D_0^2 \\ &+ 10 \log k - 20 \log \frac{R}{\sqrt{S}} + 22.6 \\ &\approx 20 \log V_{rmsE} - 20 \log D^2 + 20 \log D_0^2 \\ &+ 10 \log k - 20 \log \frac{R}{\sqrt{S}} + 138.5 \end{aligned} \quad (5)$$

2-4 最大速度予測からの固体伝搬音予測式

固体伝搬音を予測する上で、起爆方法 (総薬量、斉発量、雷管種) などを用いた予測が可能となれば利便性が向上する。このため、式(3)に示す最大振動速度予測式と上述した速度実効値を用いる式(5)に示す予測モデルを

組み合わせることで再度予測式を構築し直すこととする。

ここで、式(3)は、振動速度の最大値を予測する式であり、式(5)は振動速度の実効値を用いる式である。両式の整合を取るためには、音圧計の時定数を考慮する必要がある。国松ら⁴⁾ は、衝撃正弦波を仮定して時定数と実効値の関係を示している。すなわち、最大音圧が予測できたとしても、音圧計で算出される音圧レベルを予測することができないため、最大音圧と継続時間から、音圧の実効値を算出し、音圧レベルを予測する。国松らと同様の仮定から式(5)を書き直すことで以下のようになり、一般的な固体伝搬音の予測が可能となる。

$$\begin{aligned} L_{\max} &\approx 20 \log(KW^{0.75}D^{-2}) + 10 \log \left\{ 1 - e^{-T_d/\tau} \right\} \\ &+ 10 \log k - 20 \log \frac{R}{\sqrt{S}} + 98.5 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 L_{\max} は最大音圧レベル [dB] を、 K は発破・岩盤条件によって変化する係数を、 W は段当たりの薬量 [kg] を、 D は切羽から音響放射面までの離隔距離 [m] を、 k 放射係数を、 R は音響放射面から予測地点までの距離 [m] を、 S は音響放射面の面積 [m²] を、 T_d は振動の継続時間 [s] を、 τ は音圧計の時定数 (FAST : 0.125, SLOW : 1) [s] を示している。

ただし、音響放射面での振動測定または音圧測定が1度も実施できていない場合は、以下のような問題も残されており、次章に示す測定結果との比較結果から4章にて再度検討する。

- 周波数特性を把握していないため、騒音レベルに変換できない。
- 継続時間について、振動または音圧特性を把握しないまま設定する必要がある。

§ 3. 測定結果との比較

3-1 音響放射面の測定条件および結果

発破振動に起因する固体伝搬音について、まず音響放射面 (坑口法面) の特性を把握する目的で、振動および音圧を測定した。測定は、中国地方整備局発注の大田防災大田トンネル工事 (トンネル延長 581 m) にて、TD.515 m 前後の計 2 回の発破振動を対象とした。測定地点となる出口側坑口法面は、写真-1 に示すように盤下げが完了し岩盤が露頭している。

振動測定はリオン(株) 圧電式ピックアップ PV-87 (最大測定加速度 : 300 m/s², 周波数範囲 : 1~3,000 Hz) およびリオン(株) 汎用振動計 VM-83 を、音圧測定はアコー(株) 精密騒音計 6238L (測定範囲 : 39~130 dB (Z 特性), 周波数範囲 : 1~20,000 Hz) を用いて、リオン(株) データレコーダ DA-20 にサンプリング周波数 24 kHz

で記録した。測定機器の設置状況を写真一2に示す。切羽（発破箇所）と測定点（音響放射面）の離隔距離は、1回目 66.5 m、2回目 65.3 mであった。

測定結果を以下に示す。表一1に発破条件および測定した最大値一覧を、図一1および図一2に物理波形の時刻歴波形を、図一3および図一4に単発暴露レベルとしてオクターブバンド解析を実施した結果を示す。

物理波形の経時変化より、振動加速度（振動速度）と音圧の相関が非常に高く、固体伝搬音であることが確認できる。

オクターブバンド解析の結果から、100 Hzより高周波数領域の音圧特性は、暗騒音の影響を受けていないと考えられる。このため、振動加速度の周波数特性がそのまま音圧の周波数特性に変換されていることが確認できた。

式(2)を用いて、放射係数 k をパラメータに、測定結果と予測を比較した結果を図一5に示す。

これより、放射係数 k は、岩盤面が同位相垂直振動したと仮定できる $k=1$ と設定して問題ないと想定される。すなわち、曲げ振動の混在または振動面の凹凸によるエネルギー損失の影響は無いと考えられる。ただし、予測結果が測定結果より小さく（危険側）なった原因は、放射面に対して測定器が正確に法線方向に設置できていないため、振動測定結果を過小に評価したものと考えられる。また、音圧の測定位置が、地表から1mの高さであり、想定している音響放射面と異なる地盤面からの音響放射の影響を受けた可能性もある。

3-2 振動測定結果を用いる予測式との比較

ここでは、切羽との離隔距離が近接したときの固体伝搬音を上述した音響放射面での振動特性を用いて予測すると共に、音圧測定の結果と比較し考察する。ただし、音響放射面の特性把握は、写真一1に示す状況下で実施したが、その後、坑口法面の安定を考慮して掘削ずりによる押さえ盛土が実施され、音圧測定は写真一3に示す状況で実施している。固体伝搬音は、放射面の物性が軟らかくなることで低減される効果を有している。このため、予測結果と測定結果には、押さえ盛土の効果（低減効果）の影響が反映される結果となった。音圧の測定状況を写真一4に示す。音圧測定は、坑口法面から押さえ盛土を挟んで76m離れた敷地境界で実施しており、放射面（幅12m×高さ8.5m≒100m²）からの距離減衰を考慮するため、式(5)を用いて最大レベルを算出した。音圧の測定には、リオン(株)製の低周波音レベル計 NA-18A およびリオン(株)製の普通騒音計 NL-20 を用いた。

図一6に騒音レベル、図一7に低周波音レベルの予測ならびに測定結果を示す。ただし、横軸の離隔距離とは、切羽から音響放射面までの距離 D で整理した。

岩ずりで構築された押さえ盛土は、振動伝搬における減衰層に相当するため、放射面の振動特性が変化し、特



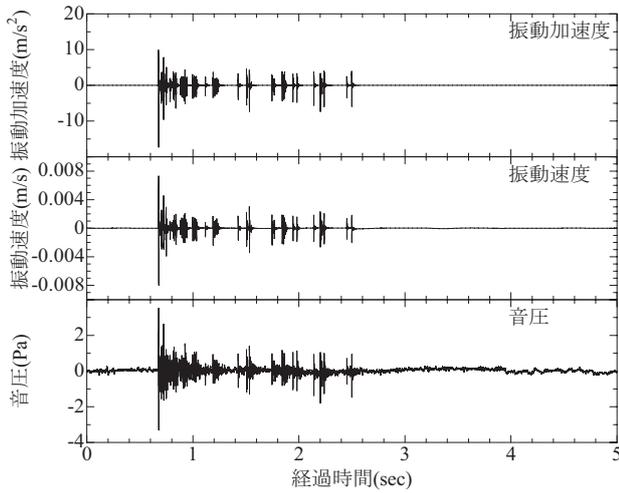
写真一1 出口側坑口法面の音響放射面測定時の状況



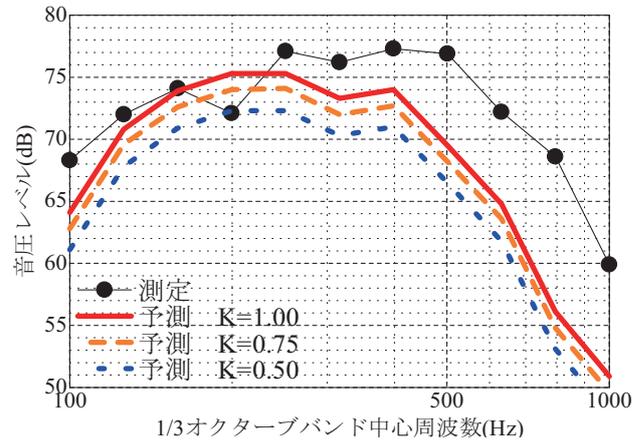
写真一2 坑口法面（音響放射面）に設置した測定機器の状況

表一1 起爆条件および音響放射面測定結果の最大値一覧

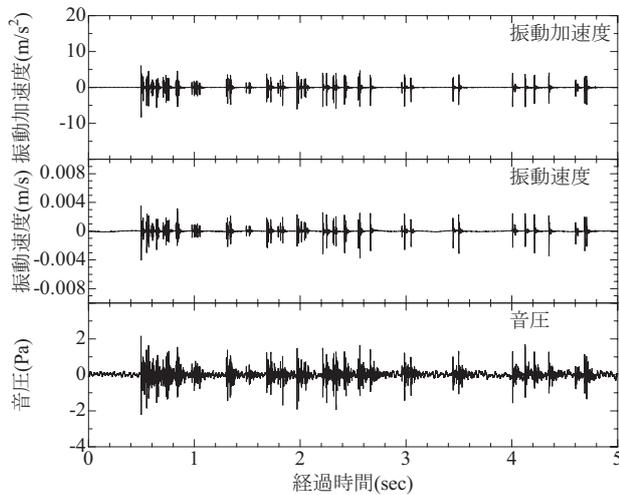
		測定1回目	測定2回目
総薬量	kg	43.2	53.2
最大斉発量	kg	4.0	4.0
使用雷管と段数		MS 雷管 1-10 段 DS 雷管 3- 8 段	MS 雷管 1-10 段 DS 雷管 3-14 段
離隔距離	m	66.5	65.3
最大加速度	m/s ²	17.4	8.2
最大速度	m/s	0.0073	0.0035
最大音圧	Pa	3.53	2.20
最大振動加速度レベル (時定数 FAST;0.125sec)	dB	104.8	100.2
最大音圧レベル (時定数 FAST;0.125sec)	dB	87.9	85.2
最大騒音レベル (時定数 FAST;0.125sec)	dB	81.7	80.0



図一 物理量の経時変化 (1回目-上半掘削)



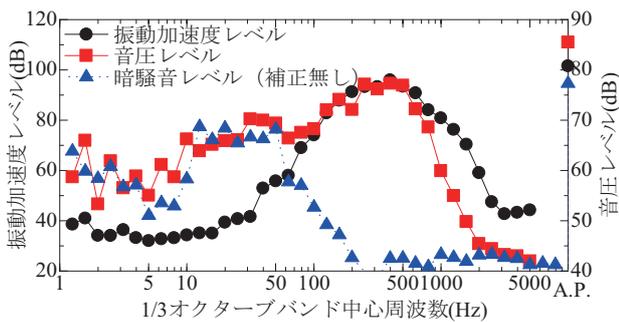
図一五 音圧特性の予測結果 (1回目-上半掘削)



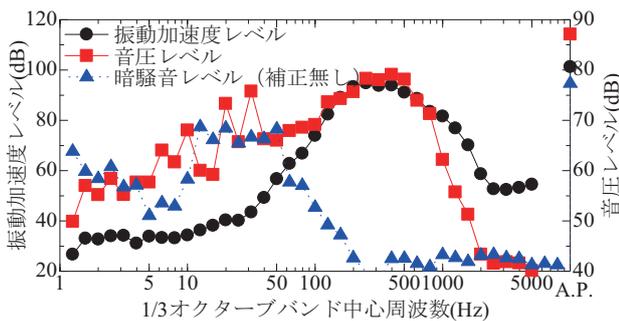
図二 物理量の経時変化 (2回目-上下半掘削)



写真一三 出口側坑口法面の音圧測定時の状況



図一三 オクターブバンド分析結果 (1回目-上半掘削)



図一四 オクターブバンド分析結果 (2回目-上下半掘削)

に高周波数側の振動成分が低減される。比較結果から、低周波音圧レベルの相関が高いものの、騒音レベルでは、押さえ盛土の低減効果により測定結果が予測結果に比べて約 15 dB 低減されており、押さえ盛土の減衰効果を踏まえて予測方法に問題がなかったものと考えられる。

ただし、詳細検討ができないものの、音響放射面での振動測定結果が若干小さく（危険側）になっているため、音圧の予測結果にも影響を及ぼしている可能性を否定できない。



写真-4 音圧測定のための機器設置状況

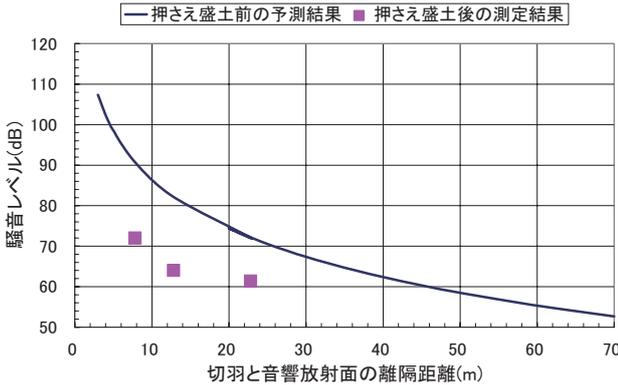


図-6 発破固体伝搬音（騒音レベル）の比較結果

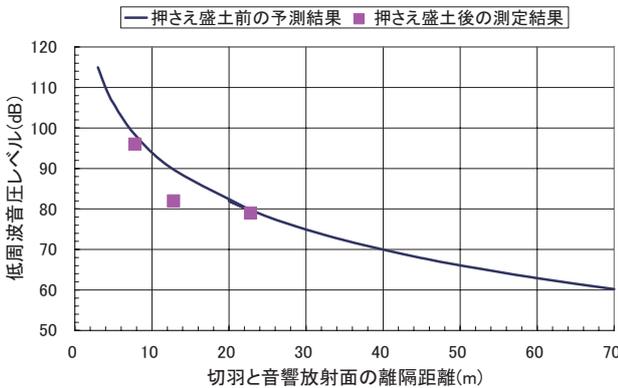


図-7 発破固体伝搬音（低周波音圧レベル）の比較結果

3-3 最大速度からの予測式の利用法検討

ここでは、音響放射面での測定結果を用いて、式(6)に示す予測式の継続時間などに関して考察する。そのため、表-1に示す測定された最大速度と最大音圧および最大音圧レベルの関係を予測式との比較結果を表-2に示す。

予測では、まず式(7)から最大速度を算出する。ついで、岩盤と空気の境界（音響放射面）では、放射効率を1とすれば式(8)が成立しているため、最大音圧を算出する。さらに、最大速度を用いて、式(9)に示す最大音圧レベルを算出した。

$$V_{\max} = K \times W^{0.75} \times D^{-2} = 700 \times 4.0^{0.75} \times 66.5^{-2} = 0.0045 \quad (7)$$

$$P_{\max} = \rho c V_{\max} = 1.3 \times 345 \times 0.0073 = 3.27 = 1.3 \times 345 \times 0.0045 = 2.01 \quad (8)$$

$$L_{F\max} \approx 20 \log V_{\max} + 10 \log \left\{ 1 - e^{-T_d/\tau} \right\} + 10 \log k + 146.5 \quad (9)$$

継続時間の設定は、図-1に示される振動速度の波形性状から、卓越周波数（380 Hz）の1波分の時間（ $T_d = 0.0026$ s）とした。さらに、A特性補正值を考慮する騒音レベルは、卓越周波数（380 Hz）の補正值-5 dBを代入した。

これより、最大速度に関する予測が正確であれば、最大音圧を把握することができる。また、最大騒音レベルは、継続時間ならびにA特性補正值の設定に難があるものの、精度良く予測できる可能性があることがわかった。

§ 4. 提案する予測式

式(6)を基に、発破振動に起因する騒音レベルの坑外伝搬予測式を構築するにあたり、発破振動特性に影響を受ける式(10)の周波数特性を図-8に示す。

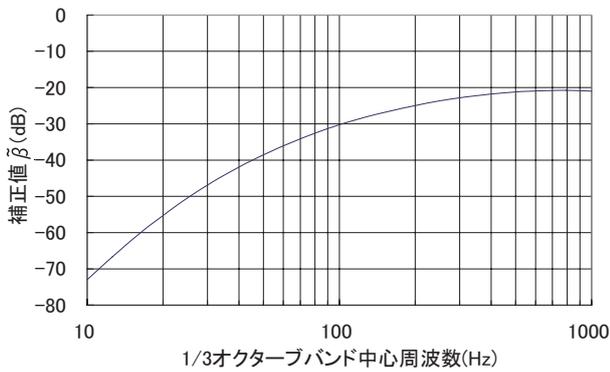
$$\tilde{\beta} = 10 \log \left\{ 1 - e^{-T_d/\tau} \right\} + \beta \quad (10)$$

ただし、 T_d は振動の継続時間（卓越周期1波分）[s]を、 τ は音圧計の時定数（FAST：0.125）[s]を、 β は卓越周波数帯のA特性補正值[dB]を示している。

これより、予測結果を安全側とする（騒音レベルを大きくする）最大値-20 dBを式(6)に代入し、施工計画時に利用可能な発破振動に起因する騒音レベルの坑外伝搬予測式を提案する。ただし、提案する騒音レベル予測式は、放射面からの距離減衰（空気伝搬成分）を考慮する場合ならびに考慮しない場合に分けて示した。

表-2 音響放射面の測定および予測結果の比較

			測定 1回目	予測 (音圧から)	予測 (速度から)
最大速度	V_{\max}	m/s	0.0073		0.0045
最大音圧	P_{\max}	Pa	3.53	3.27	2.01
最大音圧レベル (時定数考慮)	$L_{F\max}$	dB	87.9	87.0	82.7
最大騒音レベル (時定数考慮)	$L_{A\max}$	dB	81.7	82.0	77.7



図一八 補正值βの周波数特性

なお、低周波音圧レベルの予測については、卓越周波数が 100 Hz 未満の場合だけに限定される。しかし、このような場合には、音よりも振動が問題になる場合が多いと想定されるため、提案する予測式を最大騒音レベルに限定した。

$$\langle R \geq \sqrt{S} / \pi \text{ (音響放射面からの距離減衰考慮)} \rangle$$

$$L_{pAmax} = 20 \log V_{max} - 20 \log \frac{R}{\sqrt{S}} + 118 \quad (11)$$

$$\langle R < \sqrt{S} / \pi \text{ (放射面からの距離減衰無し)} \rangle$$

$$L_{pAmax} = 20 \log V_{max} + 126 \quad (12)$$

$$V_{max} = KW^m D^n / 100 \quad (13)$$

なお、 L_{pAmax} は最大騒音レベル [dB] を、 V_{max} は最大振動速度 [m/s] (式(3)参照) を、 D は切羽から音響放射面までの離隔距離 [m] を、 R は音響放射面から予測地点までの距離 [m] を、 S は音響放射面の面積 [m²] を、 K は発破条件や岩盤特性によって変化する係数を、 W は段当たりの薬量 [kg] を、 D は発破場所 (切羽) から音響放射面までの地盤内を伝搬する距離 [m] を示している。

§5. まとめ

本検討結果から、発破振動に起因する固体伝搬音は、音響放射面となる地表面の状態によっては、大きな騒音レ

ベルで発生する可能性を有していることがわかった。

また、音響放射面の物性によっては、1000 Hz 程度までを振動測定で対象とする必要があり、従来から用いられている速度計 (一般的には 100 Hz 未満を測定対象) を用いることができないことがわかった。

構築した 2 種類の予測式は、以下の特徴を有していることを把握した。

測定結果を用いた予測式は、音響放射面での振動測定が必要であるものの、切羽の進行に併せて精度良く最大騒音レベルを評価することが可能となる。

これに対し、施工計画時に利用可能な提案予測式は、発破条件だけで予測可能となるものの、振動速度の予測誤差が、騒音レベルの予測精度を大きく低減させる可能性を有している。

なお、本報告では、音響放射面の設定方法などに関して考察していない。すなわち、坑外に伝搬する固体伝搬音がどこから聞こえる (発生する) かについては、議論の余地が多数残されている。例えば、発破の段数と時間間隔が認知できる場合は、音響放射面が固定されていると考えられるものの、発破の段が確認できずに数秒間に渡って聞こえる場合は、振動伝搬と音響伝搬の経路差 (伝搬速度の相違) のある音が同時に聞こえてきていると考えられる。ただし、音響放射面の設定については、以下のような物理法則を把握した上で、保全対象地点付近の地形から判断すべきである。

- ① 発破振動の距離減衰は、倍距離で 12 dB 減衰するのに対して、面源から発生する音圧は、倍距離で 6 dB 未満の距離減衰特性を有していること。
- ② 表土などの軟らかい物性面より、岩盤などの固い物性面での音響放射が大きいこと。

参考文献

- 1) 時田保夫監修：音の環境と制御技術 第 I 巻基礎技術, (株)フジ・テクノシステム, p. 1017, 2000. 2.
- 2) 日本火薬工業会：あんな発破こんな発破 発破事例集, p. 3, 平成 14 年 3 月.
- 3) (財) 日本音響学会編：建設工事騒音の予測モデル “ASJ CN-Model 2007”, p. 11, 2008. 7.
- 4) 国松直, 三浦房紀, 今村威, 中川浩二：速度波形を用いた振動レベルの推定, 土木学会論文集第 391 号 VI-8, pp. 134-141, 1988. 3.