

発破振動に起因する不思議音の発生と対策結果

Noise Problems Related to Blasting Vibration

寺西 淳次* 辻岡 高志**
 Jyunji Teranishi Takashi Tsujioka
 福山 新二*** 高村 浩彰****
 Shinji Fukuyama Hiroaki Takamura

要 約

一般的な発破による騒音問題は、切羽から坑口を通過して放出された音が、空气中を伝搬する現象を対象にしている。しかし、小土被り部ならびに貫通間際の出口側坑口において、発破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。一般的な振動問題では、低い周波数成分が卓越し揺れていると認知されるが、地盤または居室の床などが高い周波数成分で振動した場合、人は揺れていると認知できずに、振動が空気の圧力変動に変化することで音として認知する。

本報告では、平成24年度名護東道路3号トンネル工事において発生した発破振動に起因する固体伝搬音の発生状況を説明し、その対策結果を報告する。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 工事概要
- §3. 発破振動に伴う固体伝搬音の特徴
- §4. 発破振動に伴う固体伝搬音の対策と予測
- §5. おわりに

§1. はじめに

一般的な発破による騒音問題は、切羽から坑口を通過して放出された音が、空气中を伝搬する現象を対象にしている。しかし、小土被り部ならびに貫通間際の出口側坑口において、発破等の掘削音が聞こえてくる¹⁾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(図-1参照)。一般的な振動問題では、低い周波数成分が卓越し揺れていると認知されるが、地盤または居室の床などが高い周波数成分で振動した場合、人は揺れていると認知できずに、振動が空気の圧力変動に変化することで音として認知する現象となる。

発破振動に起因する固体伝搬音が家屋内で発生した場合、家屋の振動に伴って居室の床、壁ならびに天井から

* 九州(支)名護東トンネル(出)(現:新幹線久山西(出))

** 九州(支)名護東トンネル(出)(現:八丁峠トンネル(出))

*** 九州(支)名護東トンネル(出)(現:鹿屋土木(出))

**** 技術研究所地域環境グループ

音響放射が発生し、振動の卓越周波数によっては大きな騒音レベルとなる場合^{2), 3)}がある。

本報告では、平成24年度名護東道路3号トンネル工事において発生した発破振動に起因する固体伝搬音の発生状況を説明し、その対策結果を報告する。

§2. 工事概要

名護東道路は、高規格幹線道路である沖縄自動車道と名護の市街地を結ぶ延長6.8kmの4車線道路である。那覇空港や那覇港などの広域交流拠点と地域開発拠点を結び、北部地域の活性化を支援・促進する道路として期待されている。本工事は、この名護東道路にあって名護市世富慶(よふけ)と同市数久田(すくた)をつなぐ延長557m、掘削断面積78.7~194.1m²の二車線道路トンネルの工事である(表-1、図-2参照)。起点(世富慶)側にはインターチェンジが計画されており、トンネル内に分流・合流車線を有しているため、坑口部の断面は拡幅され、最大断面は194.1m²と非常に大きくなっ

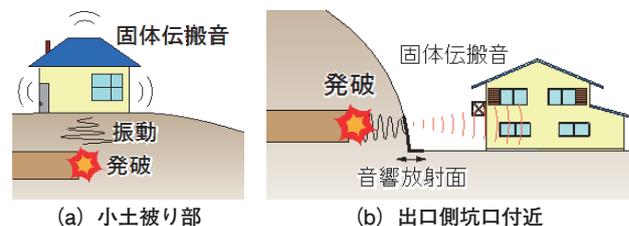


図-1 発破振動に起因する固体伝搬音の概念図

表-1 工事概要

工事名	平成 24 年度名護東道路 3 号トンネル工事
発注者	沖縄総合事務局 開発建設部
施工者	西松建設株式会社・株式会社屋部土建 特定建設工事共同企業体
施工場所	沖縄県名護市世富慶地内～数久田地内
工期	平成 25 年 2 月 7 日～平成 26 年 11 月 20 日 (～平成 28 年 5 月 31 日 第 9 回設計変更)
トンネル延長	L=557m
掘削断面積	A=78.7m ² ～194.1m ²
掘削方式	発破掘削方式



図-2 平面図

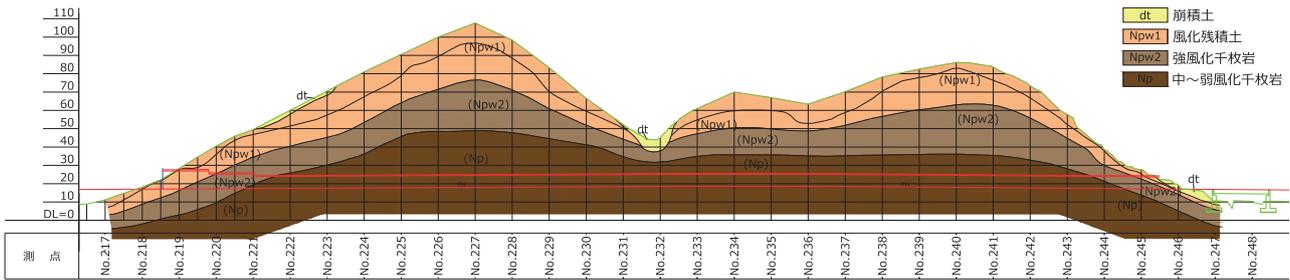


図-3 名護東道路 3 号トンネル地質縦断面図

ている。

本トンネルの地山を構成する国頭層群名護層は、本地域の基盤岩類であり黒色千枚岩からなっている。図-3の地質縦断面図に示すように、弾性波探査の結果では、地表に近い層順から地下深部に向かって風化の程度によりいくつかの岩級に区分され、最も表層に近い部分は褐色の粘土化した礫混じり粘土・シルトとなりN値30以下、深部では黒色～黒灰色の新鮮色を呈し、岩質も硬くなると想定されていた⁴⁾。そのため、地山深部において地山等級CⅡでの掘削が計画されていたが、実際の掘削では応力解放による地山の強度低下が大きく、坑口部のDⅢ区間を除いて全線DⅠでの掘削となった。

§3. 発破振動に伴う固体伝搬音の特徴

3-1 不思議音の発生

トンネル発破掘削では、度々その振動・騒音が工事運営上のトラブルとなるため、細心の注意を払い、火薬学会の提言値⁵⁾を管理基準と定め、振動・騒音を随時測定しながら施工を進めることとした。当初、騒音測定値は、起点側の保全対象となる民家の境界上で夜間管理基準値(70 dB)を満足できず、発破作業は掘削が進み坑内距離減衰によって管理基準を満足するまで、6:00から22:00までの時間制限を設けて施工を行った。掘削はT.D.160 m程度まで進み、ようやく起点側での測定値が夜間管理基準値を満足し、発破掘削に設けられた時間制限を解除しようとしたところで、切羽との直線距離で約280 m、山を隔てたトンネル側方に位置する民家で不

思議な音がするとの相談を受けることとなった。相談を受けた集落と切羽ならびに坑口の位置関係を図-4および図-5に示す。

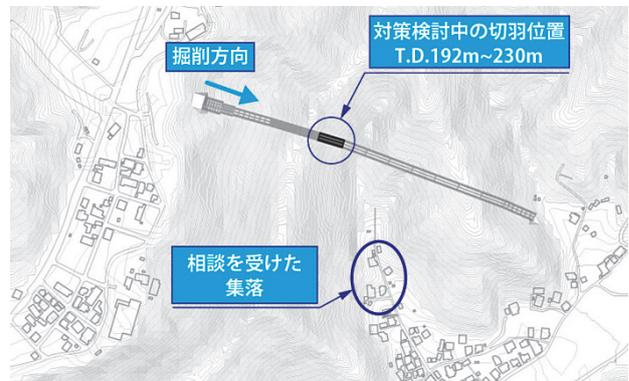


図-4 平面図

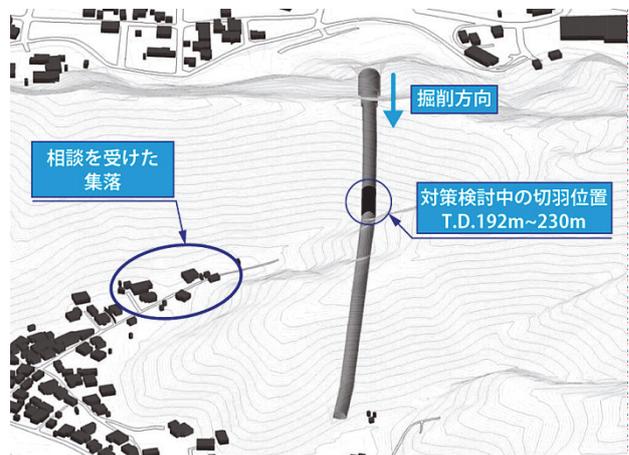
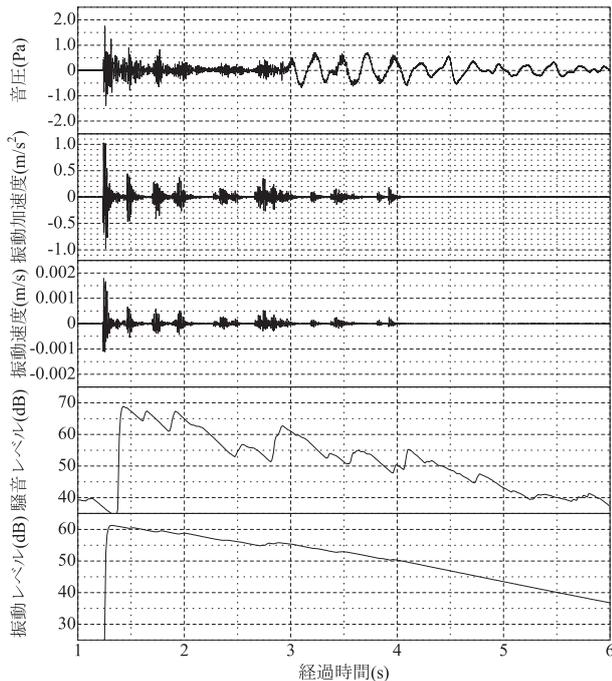


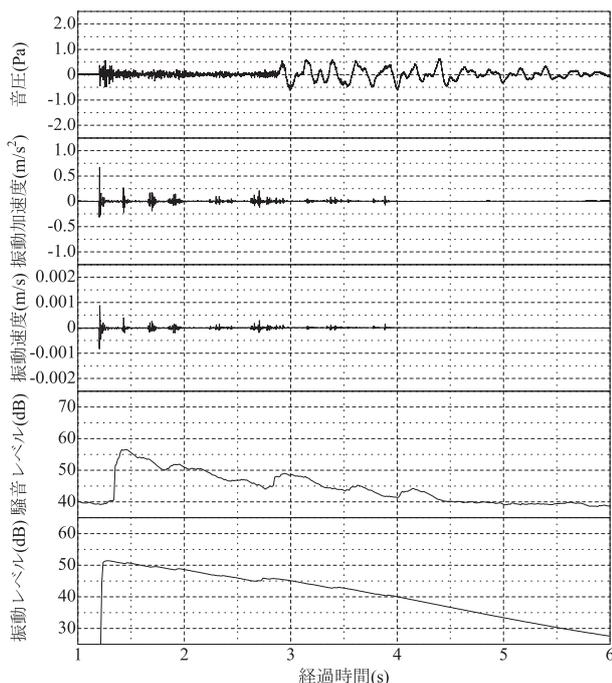
図-5 施工現場の3次元表示

3-2 計測結果

相談を受けた集落の内、鉄筋コンクリート造の戸建て住居3軒の居室で測定を実施した結果、2軒の居室における騒音レベルが55 dB～69 dB、振動レベルが49 dB～62 dBで測定されており、住居前面の密粒舗装の道路上（屋外）よりも10 dB程度騒音・振動共に大きく伝播していることがわかった。残り1軒においても、道路上（屋外）よりも大きな騒音が発生していた。保全地区の居室ならびに道路上で測定した結果の一部を図-6に示す。



(a) 居室内の測定結果



(b) 道路上での測定結果

図-6 標準起爆（切羽からの離隔距離 245 m）

(a) は居室内での、(b) は道路上（屋外）での同時に測定した結果を示しており、それぞれ、音圧と振動加速度の物理量を測定した。また、音圧計は1 Hz～20,000 Hzの周波数成分が計測可能な(株)アコー製精密騒音計 Type6238Lを、振動は1 Hz～3,000 Hzの周波数成分が計測可能な(株)アコー製圧電式加速度計 PV-87で床（地盤）の上下方向を計測した。それぞれの図では、上から音圧物理量、加速度物理量、速度物理量、騒音レベルおよび振動レベルの時系列波形を示している。なお、発破振動の予測など管理に有用な速度については、数値積分によって加速度から変換し、音圧ならびに加速度の物理量を、JIS^{6), 7)}に則って騒音レベルならびに振動レベルに変換した。また、詳細は後述するが、切羽との離隔距離245 m、標準となるDS電気雷管10段の装薬量55.0 kg、最大斉発量8.7 kg（DS5段時）での結果である。

図-6 (a) より、居室内で計測された音圧と床の加速度（速度）波形は、特に3秒以下で波形形状が酷似していることより、発破振動に起因する固体伝搬音が発生していることがわかる。3秒以降の音圧波形については、坑口から回折伝播した低周波音成分である。さらに、居室内と道路上の比較より、騒音・振動共に道路上より居室内で10 dB以上大きくなっていることが読み取れる。

3-3 固体伝搬音の特徴

発破振動に起因して発生する固体伝搬音の特性は、高村ら³⁾によって以下のようにまとめられており、本事例でも同様な現象が発生していることを把握した。

固体伝搬音の騒音レベルは、振動に依存して変化する。とくに、理論上では、振動速度が倍になると騒音レベルは6 dB程度大きくなる。このため、発破振動の大きさに寄与する、斉発量・伝搬距離等に依存して騒音レベルが変化する。

居室内に伝搬する固体伝搬音は、建物構造（木造・RC造等）によって、居室内に伝搬する振動（速度）が大きく変化する。このため、建物付近の振動速度が同じでも、構造の異なる居室ごとに騒音レベルが変化する。また、居室の吸音性能によっても騒音レベルが変化することに留意すべきである。

計測事例に示すように、居室内で発生する固体伝搬音は、建物付近の道路上で発生する固体伝搬音より予測式上10 dB程度大きくなる場合が想定されるとの報告もあり、計測管理を行う際は、可能な範囲で居室での騒音レベルを計測すべきである。

3-4 固体伝搬音の管理方法

一般的に、施工現場において発破騒音を管理する場合、野外の測定結果を基準に管理目標値を設定する。たとえば、火薬学会の提言値⁵⁾は、夜間における騒音レベルを70 dBとしているが、居室内で夜間に70 dBの騒音を許容しているわけでない。火薬学会の提言値に関する設

定根拠は、以下のように考察できる。窓サッシを閉めきった場合には、一般的な住宅の遮音性能より 15 dB 程度⁸⁾の低減が見込め、睡眠に影響を与える騒音については、背景騒音レベル（発破以外の騒音）と最大騒音レベルの差を 10 dB 以下にすべきとの報告⁹⁾がある。また、一般的な集合住宅の居室における遮音性能は、45 dB 未満¹⁰⁾で設計されている。

(提言値 70 dB - 住宅のサッシ性能 15 dB = 集合住宅の遮音性能 45 dB + 睡眠影響 10 dB = 55 dB)

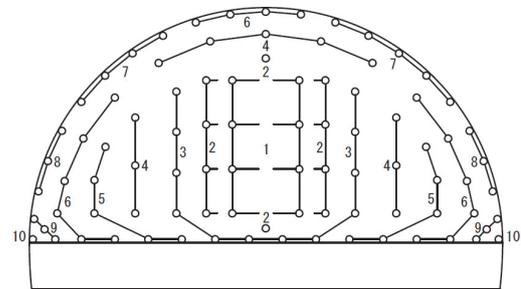
これより、提言値である 70 dB は、睡眠に影響を及ぼさない程度で管理できる目安と考えることができる。

一方で、発破振動に起因する固体伝搬音は、測定結果から、野外に比べて居室内で騒音レベルが大きくなっている。これらのことから、発破振動に起因した固体伝搬音については、空気伝搬音を対象としている従来の管理手法を追従することができない。このため、本現場では居室の騒音レベルで管理することとし、夜間の管理目標値を 55 dB と設定した。

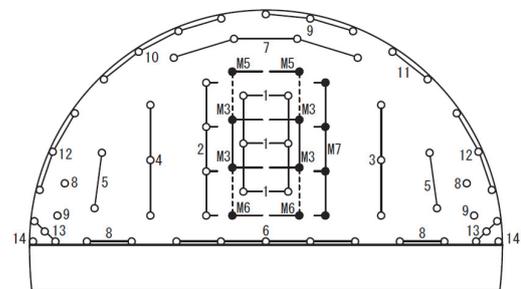
昼間の管理目標値についても、火薬学会提言値で示す暗騒音を建物の一般的な遮音性能である 45 dB と考えて、火薬学会の提言値である暗騒音 + 30 dB に準拠することとして、75 dB (45 dB + 30 dB) とした。一覧を表-2 に示す。

表-2 管理目標値一覧

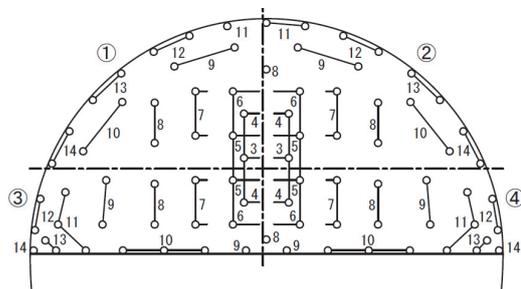
	昼間	夜間
火薬学会提言値 (保全対象位置-野外)	100dB 暗騒音+30dB	70dB 暗騒音+20dB
本現場の管理目標値 (保全対象-居室)	75dB (45dB+30dB)	55dB (45dB+10dB)



(a) 標準



(b) MS + DS 雷管多段化



(c) 段発破器による多段化

図-7 発破パターン図

§ 4. 発破振動に伴う固体伝搬音の対策と予測

4-1 制御発破による試験施工結果

発破振動に伴う固体伝搬音の管理目標値について、標準の起爆方法では夜間遵守できないため、振動低減を目的とした制御発破を 2 種類試験的に施工した。まず、補助心抜きを利用した MS + DS 電気雷管による多段化を 8 回実施した。さらに、段発破器^{11), 12)}を用いて、上半断面を 4 分割して DS 電気雷管 62 段の多段化を 2 回実施した。米国 REO 社製の段発破器とは、あらかじめ設定した秒時間隔で連続して電気雷管に点火をおこなう発破器で、エリア分割ごとに 25 ms 間隔で点火した。上半断面の起爆パターンを図-7 に、雷管種と薬量の関係を表-3 に、制御発破の居室における測定例を図-8 に示す。さらに、振動加速度の周波数分析結果を図-9 に示す。

装薬量（斉発量）ならびに切羽からの離隔距離が異なるため、制御発破の効果を定量的に評価することはできないが、測定結果から以下のことを把握した。

- 1) MS + DS 雷管による多段化による制御発破を実施している際は、居室での騒音レベルが 53 dB ~ 60 dB、振動レベルが 51 dB ~ 57 dB となり、標準の起爆に比べ騒音・振動共に 5 dB 程度低減することを確認した。
- 2) 段発破器による制御発破を実施した結果、居室での騒音レベルが 53 dB ~ 55 dB、振動レベルが 49

表-3 雷管種と薬量の関係一覧

標準			MS+DS雷管多段化			段発破器による多段化			
雷管種	孔数	装薬量(kg)	雷管種	孔数	装薬量(kg)	雷管種	孔数	装薬量(kg)	分割数
DS 1	8	6.3	DS 1	6	1.2	DS 1			
DS 2	10	7.2	MS 3	4	2.4	DS 2			
DS 3	12	7.2	MS 5	2	1.2	DS 3	2	0.2	2
DS 4	11	8.7	MS 6	2	1.2	DS 4	4	0.2	4
DS 5	10	5.4	MS 7	4	3.2	DS 5	4	0.6	4
DS 6	16	7.7	DS 2	4	3.2	DS 6	4	0.6	4
DS 7	9	4.4	DS 3	3	2.4	DS 7	8	0.6	4
DS 8	6	3.6	DS 4	3	2.0	DS 8	10	0.6	4
DS 9	6	3.4	DS 5	4	3.0	DS 9	10	0.6	4
DS 10	2	1.2	DS 6	5	3.0	DS 10	10	0.6	4
			DS 7	4	2.4	DS 11	9	0.6	4
			DS 8	6	2.0	DS 12	8	0.6	4
			DS 9	5	1.6	DS 13	8	0.6	4
			DS 10	4	1.2	DS 14	6	0.6	4
			DS 11	2	1.6				
			DS 12	6	4.2				
			DS 13	6	3.9				
			DS 14	2	1.4				
合計	90	55.1	合計	72	41.1	合計	83		47.4

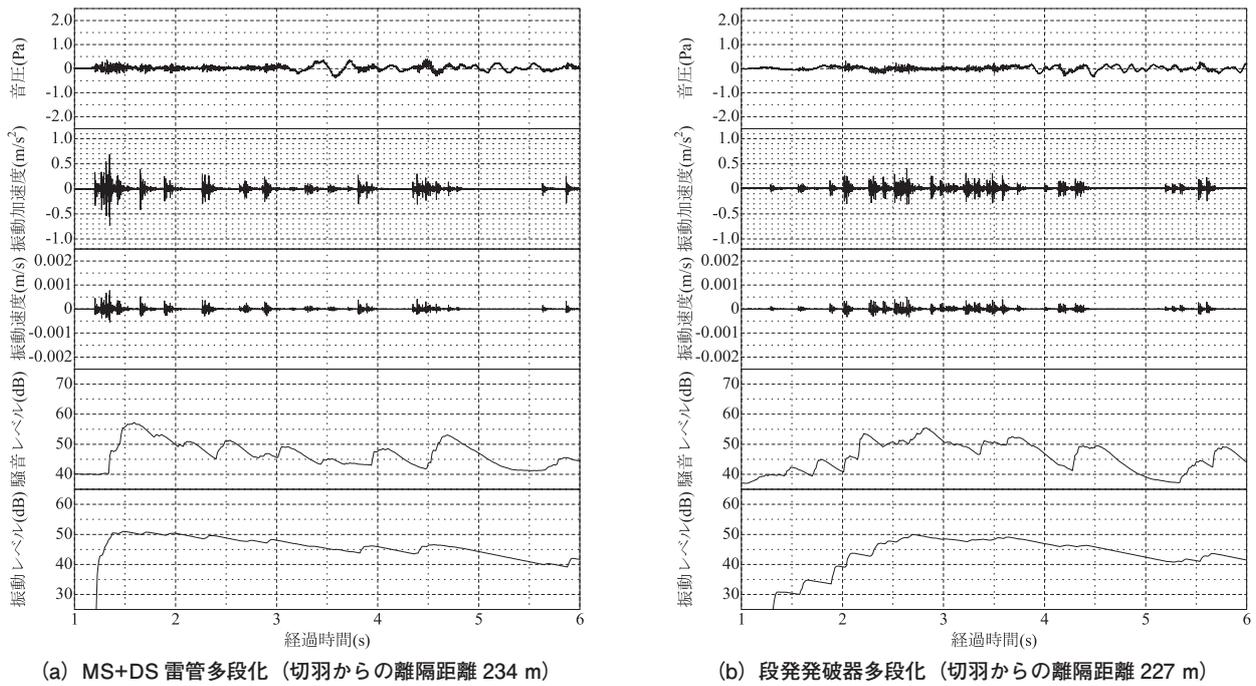


図-8 制御発破時の居室内での計測結果

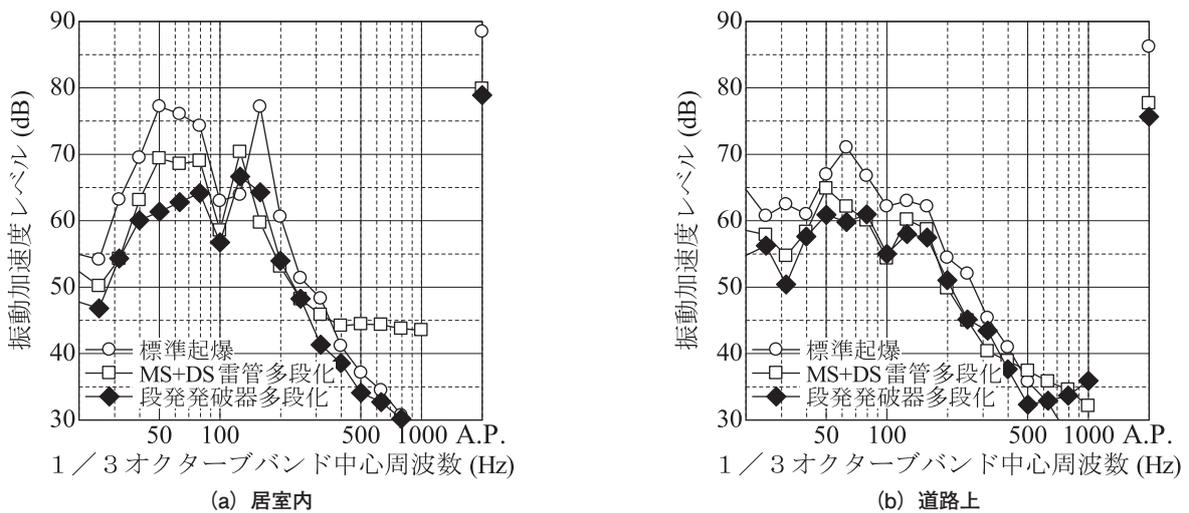


図-9 1/3 オクターブバンド周波数分析結果

dB ~ 51 dB となり、標準の起爆に比べ騒音・振動共に 11 dB 程度、MS + DS 雷管による多段化に比べ 6 dB 程度低減することを確認した。

3) 振動の周波数分析から、居室における振動の卓越周波数帯が家屋内増幅の影響で、道路上に比べ高周波数帯で卓越し、この振動が音に変換されていることがわかる。また、標準起爆に比べ制御発破では、卓越周波数帯を低周波数側にずらしていることも確認した。

ただし、制御発破では、標準の起爆に比べて高段の電気雷管まで使用するため、発破の継続時間が 2 秒程度から 4 秒程度まで長くなっている。保全地区の住民からも、大きな音に驚くことは無くなったとの評価を受けながらも、音が長くなったことについては意見を頂くこととなった。

4-2 保全地区の騒音レベル予測

高村ら³⁾によって示された発破振動に起因する固体伝搬音の予測式を以下に示す。

振動伝搬予測

一般的な発破による最大振動速度の伝搬予測式¹³⁾のうち、日本化薬の推定式を用いて式(1)で算定する。ただし、K 値については、計測結果から同定した。

$$V = KW^{0.75}D^{-2} \quad (1)$$

V : 最大速度 (cm/s)

K : 発破条件や岩盤特性によって変化する係数

W : 段当たりの薬量 (kg)

D : 発破場所からの地盤内を伝搬する距離 (m)

居室内での騒音予測

$$L_{Amax} = 20 \log V_{max} + 10 \log \left\{ 1 - e^{-T_d/\tau} \right\} - 10 \log \frac{\bar{\alpha} S_A}{S} + 112.1 + \beta' \quad (2)$$

- L_{Amax} : 最大騒音レベル (dB)
- V_{max} : 振動速度の最大値 (cm/s)
- S : 音響放射面積 (m²)
- $\bar{\alpha}$: 平均吸音率
- S_A : 室内表面積 (m²)
- T_d : 振動の継続時間 (卓越周波数 1 周期分)
- τ : 音圧計の時定数 (FAST:0.125)
- β' : 卓越周波数帯の A 特性補正值

標準による発破 5 回、MS + DS 雷管多段化による発破 8 回および段発破器多段化による発破 2 回において、同じ場所で行った計測結果から、予測式の係数を同定した。予測結果と測定結果の比較を図-10に示す。これより、±5 dB 未満で予測できることを確認した。この結果を用いて、保全対象に切羽が近づいていった場合の騒音レベルを予測した結果を図-11に示す。ただし、予測にあたり、斉発量を標準は 8.0 kg、MS + DS 多段化は 4.8 kg および段発破器多段化は 1.2 kg と設定した。これより、段発破器による多段化を実施しても、切羽との離隔距離が 220 m 以下になると管理目標値を満足できないことがわかった。

4-3 本工事で実施した保全対策

上記した測定事例ならびに予測結果を踏まえ、関係者で協議した結果、予測式から管理目標値を遵守できる場合は、遵守可能な起爆方法で発破掘削を継続する。予測式上制御発破でも管理目標値が遵守できないと想定される場合は、機械掘削に変更することとした。

本現場では、昼間については段発破器による制御発破を継続し、夜間については自由断面掘削機による機械掘削により施工を進めた。ただし、自由断面掘削機の準備ができるまでの 1 ヶ月間については、夜 10 時までの発破掘削について地元からの理解を頂いた。

なお、制御発破については、本工事で採用した起爆方法以外にも 1 孔 1 段の起爆ならびに分割発破などがある。電子雷管などの特殊雷管については、沖縄での施工である特殊性から入手が非常に困難であり、かつ高額となることから、試験発破時の計画段階で採用しないこととした。発破掘削を複数回に別けて実施する分割発破は、作業員の安全性確保、掘削の進捗ならびに起爆回数の増加に対する観点から、本工事中では採用を見送った。

図-12に示す対象区間では、昼間の一方施工とする終点側坑口 50 m までの 232 m 区間で保全対策を継続した。昼間については、段発破器による発破掘削を継続し、保全家屋の前面道路上での振動計測により、居室で

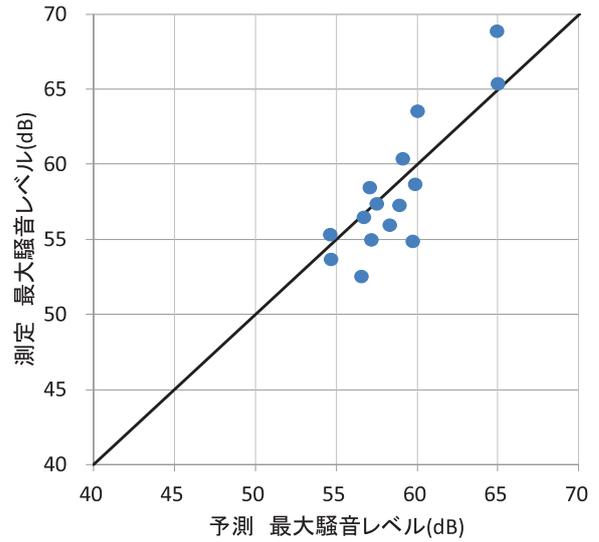


図-10 予測値-測定値 相関関係

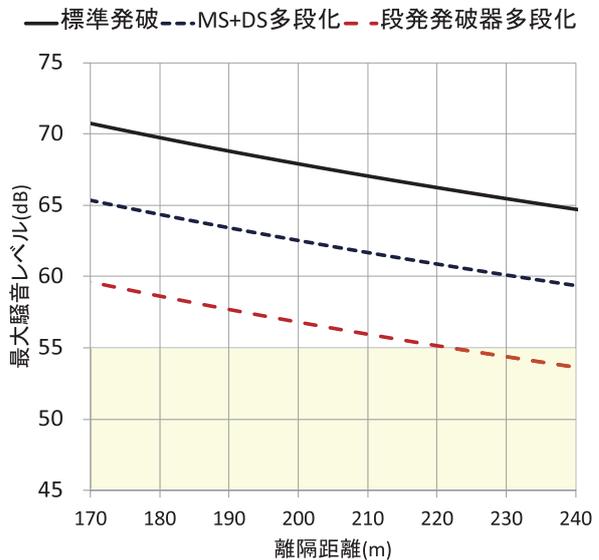


図-11 切羽接近時の騒音レベル予測

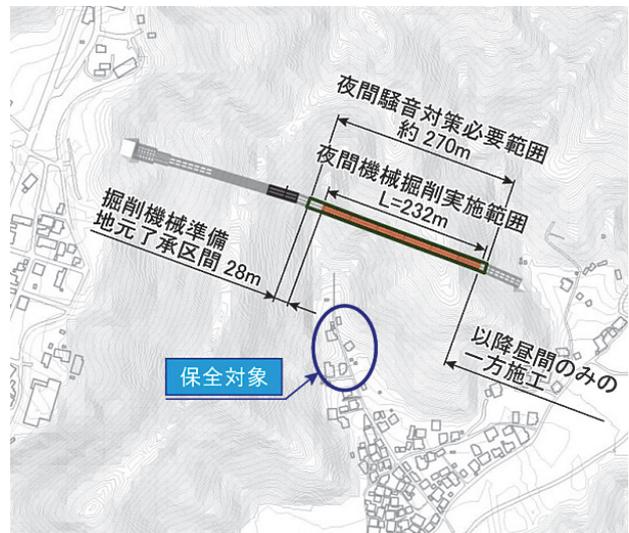


図-12 対策範囲と保全対象の関係

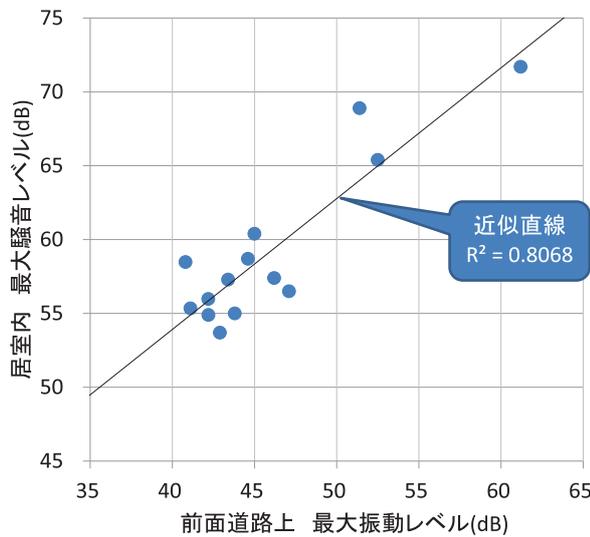


図-13 居室内騒音レベルと道路上振動レベルの相関

の騒音レベルと道路上での振動レベルの相関（図-13参照）から、居室が管理値以下であることを確認しながら実施した。夜間も同様の計測と住民へのヒアリングから、居室での騒音が暗騒音以下であることを確認しながら施工を進めた。

なお、発破掘削を夜間だけ機械掘削に変更した結果、対象区間の掘削が地山等級D Iであるため、昼夜発破掘削に比べて進捗は若干低下したものの、制御発破の費用も含めて直接工事費の増額はほとんど無かった。

§5. おわりに

今回のように岩盤の状況や発破振動の卓越周波数、保全対象物件の固有周波数などの関係によって、保全対象において人が音として認識する周波数帯の振動が大きくなり、大きな騒音問題を引き起こすことがある。市街地や山間のトンネル施工でも、思いがけない位置で同様の事象により騒音問題が発生する可能性について留意する必要がある。ただし、この固体伝搬音による騒音の問題は、対象となる範囲を事前に特定することが難しい。不思議な音が聞こえた場合に、トンネルの発破が原因である可能性を考慮した、迅速な対応が必要不可欠である。本報告が同種工事の管理に役立てられれば幸いである。

謝辞. 本論文は、沖縄総合事務局開発建設部 永山盛久 建設監督官と著者らが共著で公表した「発破振動に起因する固体伝搬音の発生と対策、トンネルと地下、Vol.47, no.2, 2016.2.」に追記したものです。本報告の機会を与えて頂いた関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 高村浩彰, 岩間史明, 吉田正樹, 柴吉彦, 石山宏二: 発破振動に起因する固体伝搬音の予測手法に関する検討, 第41回岩盤力学に関するシンポジウム, 2012.1, pp.95-pp.100.
- 2) 松原健, 村瀬晃, 芦田良太: 発破振動に起因する地表建物内の騒音を制御した合理的なトンネル施工, (社)日本トンネル技術協会 第64回施工体験発表会, 2009.10, pp.107-117.
- 3) 高村浩彰, 石田能康, 若月和人, 三宅卓也, 小林真人: 発破振動に起因する固体伝搬音について, 土木学会論文集F1(トンネル工学)特集号 Vol.68, No.3, 2012.11, pp.I_81-I_89.
- 4) 株式会社 建設技術研究所: 名護東道路3号トンネル詳細設計業務報告書(トンネル本体工), 平成20年3月.
- 5) 火薬学会発破専門部会: 発破振動・騒音・低周波音の規制値に関する提言(数値の提案), EXPLOSION Vol.4, No.3, 1994, pp.159-161.
- 6) 日本工業規格: JIS-C-1509-1:2005 電気音響—サウンドレベルメータ(騒音計)—, 2005.
- 7) 日本工業規格: JIS-C-1517:2014 振動レベル計—取引又は証明用, 2014.
- 8) 日本工業規格: JIS A4706, サッシ(Windows), 2000.
- 9) B. Griefahn: Environmental noise and sleep. Review-need for further research, Applied Acoustics, Vol.32,1991, pp.255-268.
- 10) 日本建築学会編: 建築物の遮音性能と設計指標(第二版), 技報堂出版, 1997, pp.8.
- 11) カヤク・ジャパン株式会社: 段発発破器と電気雷管による多段発破の概要, 技術資料, 2012.6, p.6.
- 12) 吉田隆司: 段発発破器による制御発破について, 発破 No.53, 2014, pp.25-30.
- 13) 日本火薬工業会: あんな発破 こんな発破 発破事例集, 2002.3, p.80.