

高精度電子雷管を用いたトンネル発破の騒音・ 低周波音低減に関する考察

岩野 圭太^{1*}・犬塚 隆明¹・手塚 康成²・上南 隆³・志賀 弘史³・花岡 紀恵⁴

¹鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

²鹿島建設株式会社 土木管理本部（〒107-8348 東京都港区赤坂6-6-11）

³鹿島建設株式会社 横浜支店（〒410-0822 静岡県沼津市下香貫塩満1766）

⁴静岡県沼津土木事務所 工事第1課（〒410-0055 静岡県沼津市高島本町1-3）

*E-mail: iwanokeita@kajima.com

坑口周辺に民家が密集する（仮称）静浦トンネルでは、発破掘削に起因する近隣の住環境負荷の低減が求められてきた。そこで、振動低減に実績のある高精度秒時電子雷管を適用し、騒音・低周波音に着目した試験発破を行った結果、特に低周波音について従来の電気雷管に比べ、発生源で6~7dB低減し、周辺の住宅地でも同様に低い値を示すことが明らかとなった。低周波音は防音扉等の遮音設備の遮音効果が得られにくい帯域であるため、住民の不快感の著しい低減が期待できる結果である。また、同電子雷管による1孔のみの音圧波形（単発波形）を収録し、波形の重ね合わせによる検討を行い、低周波音の低減効果が最大限発揮される最適秒時差についての知見を見出すことができた。

Key Words : tunnel blasting, electronic detonator, delay time, blasting noise, low-frequency noise

1. はじめに

近年、トンネルの立地条件が厳しくなり、坑口部が住宅地に近接する場合も多くなっている。この場合、掘削に伴う住環境負荷を軽減する観点から、坑口部や市街地近接部では、機械掘削等の掘削制限を受けることがあり、これにより工程やコストを圧迫し、硬岩出現時には掘削不能に陥る場合もある。経済的な掘削方法である発破掘削は、振動・騒音が近隣の住環境を悪化させる要因となりうるが、特に低周波音では地盤を伝播する振動と異なり、圧縮性の空気を媒体とする音圧であるため、トンネル特有の筒型形状により切羽が進行しても坑内距離減衰があまり期待できず、長期にわたる近隣住民から苦情の原因となりうる。また低周波音は、防音扉等の遮音性能が低い帯域であることから、十分に減衰しないまま民家に伝わり、家具のガタツキの原因になる一方で、それを低減する有効な方法がなかなか見いだせないのが現状であった。そこで、近年の立地条件が厳しいトンネル事情と同様に発破掘削に起因する坑口周辺の住環境負荷の低減が命題となっている道路トンネルにおいて、秒時精度が高く、任意の秒時間隔に設定できることよりこれまでも振動の低減に十分な効果が認められている高精度秒時電子雷管^{1,2)}を適用し、騒音・低周波音の低減効果につ

いて検証した。また、低周波音を最大限低減することを目的として、この電子雷管の最適な孔間秒時差についても検討したので併せて報告する。

2. （仮称）静浦トンネルの工事概要

(1) 工事概要

（仮称）静浦トンネル（以降、本トンネル）は、下田市と沼津市を結ぶ国道414号の朝夕の通勤時間帯や観光シーズンの慢性的な渋滞解消を目的とした静浦バイパスの一部として、静岡県沼津市下香貫地区と大平地区を結ぶ全長1,177mのトンネルである（表-1）。

表-1 工事概要

工事名称	国道414号（仮称）静浦トンネル本體工
工事場所	静岡県下香貫塩満
発注者	静岡県沼津土木事務所
工期	2014（H26）.3.20～2016（H28）.12.15
工事内容	トンネル本體工（南側2車線） L=1,177m 内空断面積（標準部）=70.7m ² 坑門工2基、法面工

(2) 地質概要

本トンネルは沼津市の南西端に位置する徳倉山（標

高256m)を貫くもので、その地質は新生代第三紀中新世～鮮新世の白浜層群および湯ヶ島層群の安山岩を主体とし、同質の火山礫凝灰岩、凝灰岩質の薄層を挟み、部分的に熱水変質帯が分布している(図-1)。また下香貫側の坑口は地すべり地形内にある。

(3) トンネル坑口(下香貫側)の施工環境

下香貫側の坑口は、写真-1のように、閑静な住宅が広がっており、工事車両による騒音・低周波音を抑制するため防音ハウスおよび高さ4mの防音壁を設置しているが、夜間のずり搬出は制限されているなど厳しい施工環境となっている。

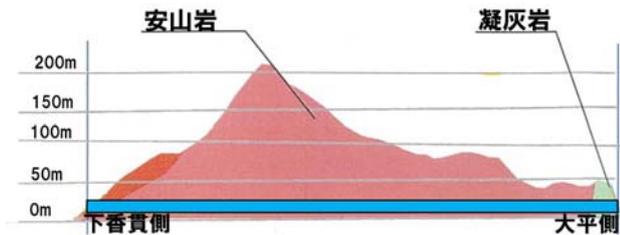


図-1 地質縦断面図



写真-1 下香貫側坑口

側、計測点Bは防音ハウス内である。計測点D-Hは、工事ヤード外で振動・振動の対象物件を中心に配置した。今回の一連の発破試験は、切羽がTD80mを越えた位置から行ったこともあり、振動については当初の予測から電気雷管(DS雷管)を使用した場合でも極めて小さい振動レベルに留まると想定された。実際に最初の発破試験の結果、最も発破点に近いH点においても最大0.05kine(cm/s)とほぼ無感に近い値となったため、振動については問題ないことが確認できた。一方、騒音・低周波音では坑口が常に音源となり、トンネルの特有の形状から、切羽の進行による坑内減衰が期待できないため、今回の一連の発破試験は、騒音・低周波音に焦点を当てたものとなる。

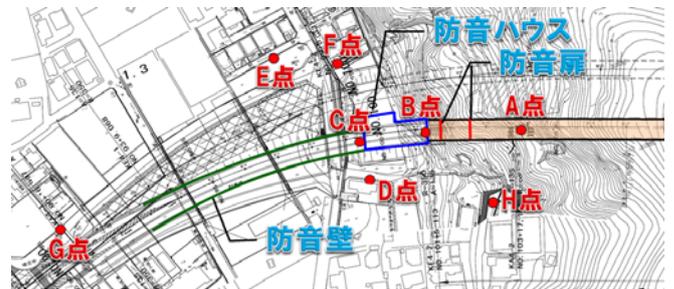


図-2 騒音・低周波音の計測位置



計測点A(防音扉内)



計測点B(防音扉外)



計測点C(防音ハウス外)



計測点E(民家周辺)

写真-2 騒音・低周波音の各計測点

3. 高精度秒時電子雷管による騒音・低周波音低減

(1) 発破試験の概要

以上のような厳しい施工環境下、切羽に中硬岩が出現したことを受け、発破に伴う振動や騒音による住宅地への環境影響を最大限に低減する配慮が求められた。そこで秒時精度が高く、任意の秒時間隔に設定できることからこれまでも振動・騒音の低減の効果が認められている高精度秒時電子雷管(以降、高精度電子雷管)を用い、複数回にわたる試験発破を実施した。なお試験発破では従来の発破との比較のため通常の電気雷管(DS雷管)による発破も実施した。また、夜間施工における騒音を考慮し、当初より設置していた坑内の防音扉を追加設置(合計2枚)することによる騒音・低周波音の低減効果についても検証した。

図-2の平面図にて計測位置を示す。計測点A~Cは、工事ヤード内であり、そのうち計測点Aは坑内防音扉の内

(2) 雷管の違いによる騒音・低周波音の差異

高精度電子雷管と電気雷管による騒音・低周波音の比較を行った。それぞれの雷管で複数回の発破を実施したが、表-2では発破位置も近く、発破緒元もほとんど同じであるケースを示した。表-3および図-3にそれぞれの発破の騒音・低周波音レベルを示す。騒音レベルでは各計測点にて、高精度電子雷管が電気雷管に比べ、ほぼ同じまたは数dB(2~3dB)低い値を示す程度であったのに対し、低周波音に関しては、高精度電子雷管が電気雷管に比べ、概ね6~7dB低い値を示している。また図-4

表-2 発破緒元

	発破位置	孔数	総薬量	斉発薬量
電気雷管	TD138	37	13.0 kg	2.0 kg
高精度電子雷管	TD137	40	15.0 kg	0.4 kg

表-3 雷管の違いによる騒音・低周波音レベル

		工事ヤード内			工事ヤード外			
		A点	B点	C点	D点	E点	F点	H点
騒音レベル	電気雷管	126.4 dB	112.0 dB	81.0 dB	69.2 dB	61.5 dB	66.5 dB	65.8 dB
	高精度電子雷管	123.7 dB	109.9 dB	79.4 dB	66.2 dB	59.9 dB	66.0 dB	61.9 dB
	差	2.7 dB	2.1 dB	1.6 dB	3.0 dB	1.6 dB	0.5 dB	3.9 dB
低周波音レベル	電気雷管	140.8 dB	129.7 dB	111.5 dB	101.4 dB	98.7 dB	98.1 dB	96.2 dB
	高精度電子雷管	136.4 dB	123.1 dB	103.0 dB	94.2 dB	93.8 dB	91.8 dB	90.0 dB
	差	4.4 dB	6.6 dB	8.5 dB	7.2 dB	4.9 dB	6.3 dB	6.2 dB

※計測点Gは欠測

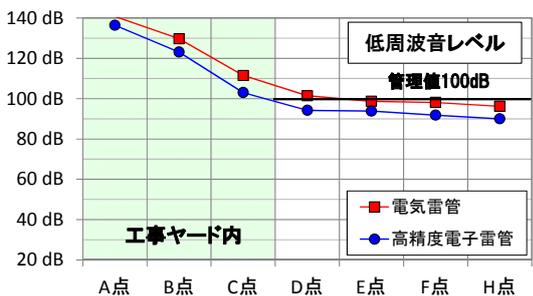
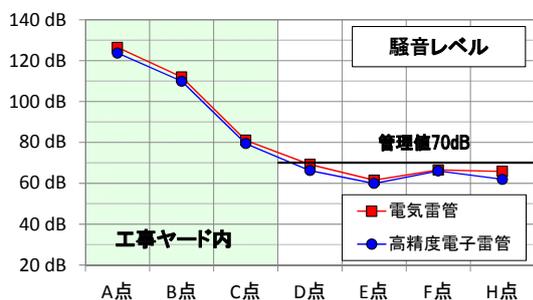
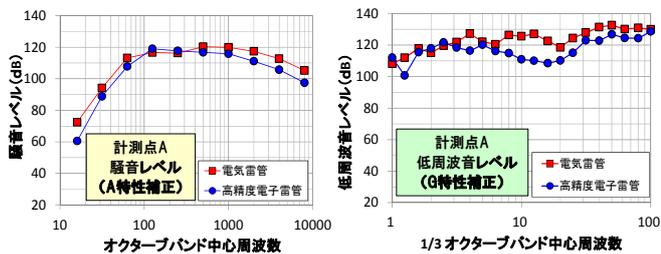


図-3 騒音・低周波音レベル



計測点A(防音扉内)

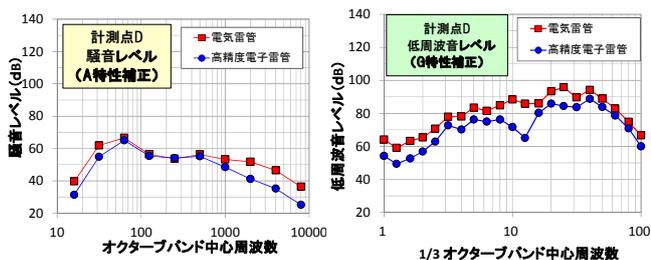


図-4 騒音・低周波音の周波数分析

では坑内の計測点Aと民家前の計測点Dにおける周波数分析結果を示すが、図-3の結果と同様に、低周波音レベルでは1/3オクターブバンドの各中心周波数で総じて高精度電子雷管が5dB以上低い値を示していることが分かる。同様の試験結果は、他トンネル現場における試験発破でも得られており³⁾、高精度電子雷管が電気雷管に比べ、低周波音を音源から低減する効果があることを確認できた。防音扉や防音ハウス等の遮音設備は、一般的に低周波音帯域の遮音効果が得られにくいいため、高精度電子雷管にて音源から低周波音成分を減じる効果は住民の不快感の低減に大いに寄与するものと思われる。

(3) 防音扉追加設置の効果

前節(2)にて高精度電子雷管の騒音・低周波音レベルの低減効果を確認した。発破試験の結果、電気雷管による発破では、騒音・低周波音レベルの管理値(騒音レベル:70dB, 低周波音レベル:100dB)を上回る場合も見られるため、夜間の管理値を満足するために防音扉の追加設置の効果についても検証した。使用する雷管は防音扉の追加設置後を考慮して電気雷管に統一した。表-4に防音扉1枚の場合と追加設置した場合(合計2枚)の場合の騒音・低周波音レベルを示した。防音扉を1枚から2枚に追加設置することにより、防音扉前後の計測点AおよびBの差異は騒音レベルで3~4dB, 低周波音レベルで8~9dB得られている。また、この結果を計測点C~Eについて表-3と比較すると“電気雷管+防音扉2枚”は“高精度電子雷管+防音扉1枚”とほぼ同等かそれ以下まで騒音・低周波音レベルを低減できている。逆に言えば、高精度電子雷管による発破は防音扉の追加設置と同等の騒音・低周波音レベルの低減効果があると言うこともできる。

表-4 防音扉枚数の違いによる騒音・低周波音レベル

	孔数	総薬量	防音扉	工事ヤード内			工事ヤード外		
				A	B点	C点	D点	E点	
				防音扉内	防音ハウス内 (B点-A点)	防音ハウス外	郊外	郊外	
騒音レベル	37	13.0kg	1枚	126.4 dB	112.0 dB	14.4 dB	81.0 dB	69.2 dB	61.5 dB
	64	24.4kg	1枚	125.9 dB	111.2 dB	14.7 dB	77.9 dB	65.6 dB	57.8 dB
	31	11.6kg	2枚	120.1 dB	97.6 dB	22.5 dB	68.8 dB	※61.0dB	※56.4dB
	26	10.2kg	2枚	121.6 dB	97.0 dB	24.6 dB	69.0 dB	57.5 dB	50.4 dB
低周波音レベル	37	13.0kg	1枚	140.8 dB	129.7 dB	11.1 dB	111.5 dB	101.4 dB	98.7 dB
	64	24.4kg	1枚	138.8 dB	127.0 dB	11.8 dB	107.4 dB	97.8 dB	96.4 dB
	31	11.6kg	2枚	136.9 dB	122.5 dB	14.4 dB	105.4 dB	91.7 dB	89.5 dB
	26	10.2kg	2枚	139.5 dB	124.0 dB	15.5 dB	107.1 dB	94.3 dB	93.5 dB

※セミの鳴き声が入ったため参考値

4. 低周波音低減のための最適秒時差の検討

(1) 検討の概要

過去の検討から、振動については高精度電子雷管を用

いた1孔1斉発の発破によって、斉発薬量を低減することができるため、振動低減効果が確認されるとともに、孔間秒時差の設定が任意にできることにより振動継続時間やピーク周波数のコントロールが可能となる知見を得てきた¹⁾。また、高精度電子雷管の発破の再現性が高いことから、1孔のみの単発波形を重ね合わせることによる振動波形の予測についても試みている⁴⁾。そこで音についても、圧縮性の空気を媒体とした弾性波であるため地盤振動ほど明確ではないものの、振動と同様に単発波形の重ね合わせから、発破音全体のエネルギーが小さくなる最適秒時差が検討できるものと考えた。具体的には図-5に示すように防音扉より40m離れた坑内地点を計測点Aとし、既往の研究⁵⁾を参考に図-6に示すように、最初の2孔の孔間秒時差を4.0秒とすることで他孔の音圧波形から切り離れた2回分の単発波形を収録した。1回の単発波形を拡大すると単孔発破による1波目の音圧と防音扉からの反射波があり、再び切羽に反射しての2波目、さらに3波目と続いていることがわかる。

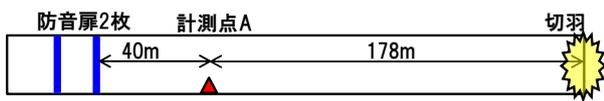


図-5 坑内計測点 (A点) のレイアウト

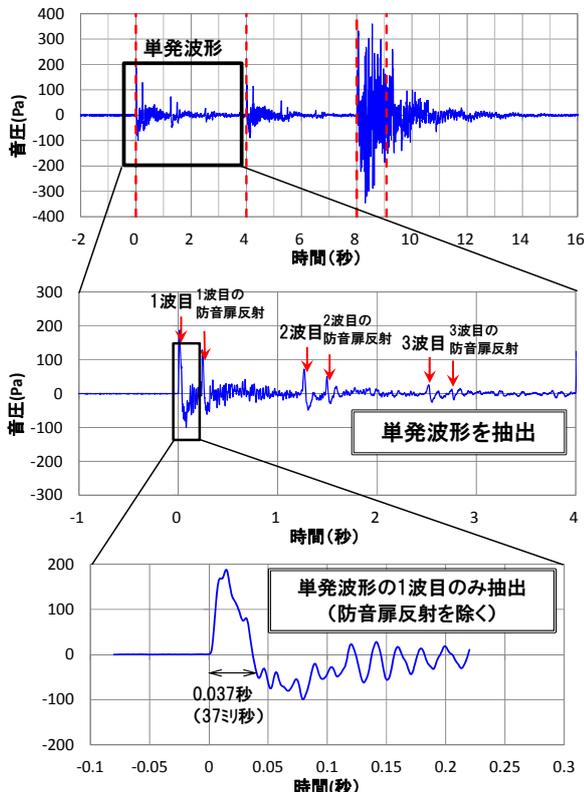


図-6 防音扉内 (計測点 A) の収録波形

(2) 最適秒時差の検討

坑内の計測点Aで収録した単発波形の重ね合わせを行った。この時、重ね合わせをする単発波形は防音扉に到

達する音圧を想定すると計測点Aで収録した単発波形のうち、防音扉から切羽に向かう防音扉からの反射は除く必要がある。そこで、単発波形としては簡単のため、図-6の3段目に示すように防音扉の反射や2波目以降を除き、1波目到達から約0.2秒分とした。またこの単発波形の場合、最初の正側の立ち上りの部分は約37ミリ秒であった。次に20孔連続して起爆することを想定し、秒時差をパラメータ (3ミリ秒, 7ミリ秒, 17ミリ秒, 23ミリ秒, 30ミリ秒, 42ミリ秒) として20波形分の重ね合わせを行った。図-7には一例として秒時差17ミリ秒の場合の20波形の重ね合わせを示す。これによると立ち上がりから起爆秒時差に孔数を乗じた時間の部分 (発破継続時間部分) とそれ以降のなだらかな波形の部分 (コーダ部分) に分けられる。図-8には、各秒時差の20波形の重ね合わせを示した。これによると秒時差3ミリ秒および7ミリ秒の場合は、単発波形の最初の正側の立ち上がりおよび次に続く負側の立ち上がりが重なり合うため、大きく増幅している。また、17ミリ秒以降の秒時差の場合、徐々に最初の正負の立ち上がりが打ち消し合っているが、コーダ部分が一樣に残ることが分かる。図-9には各秒時差で重ね合わせた波形の時間積分

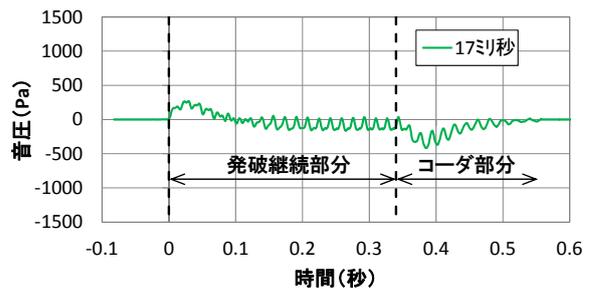


図-7 単発波形の20波形の重ね合わせ (秒時 17ミリ秒)

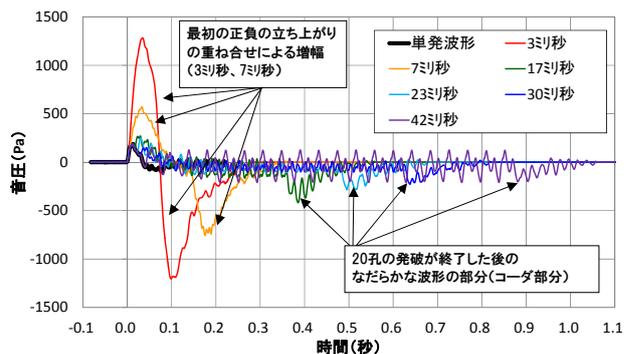


図-8 秒時差毎の単発波形の重ね合わせ

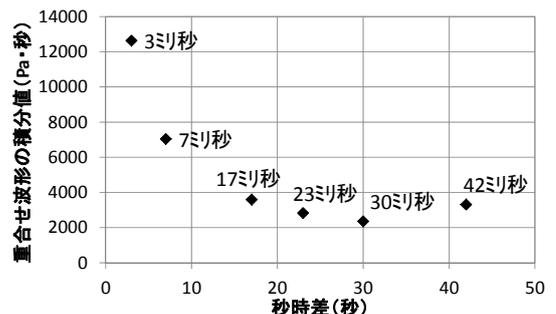


図-9 秒時差毎の波形積分値

和を示したが、秒時差が3ミ秒→7ミ秒→17ミ秒となるに従い、波形の時間積分和は急減し、30ミ秒が極小となることが分かった。これは、既往の研究^{5) 6)}において総エネルギーが特定の秒時差で極小となる傾向であるという報告と同じであった。

実際に騒音・低周波音に配慮した発破を進めていく場合、心理的側面も含めて住民の方々がどのように体感されかが重要であり、単純に音のエネルギーだけでは議論できないことは明らかである。発破継続時間の観点で見れば、単純に秒時差が短いほど体感的にも短く小さい発破と感じる傾向があるため、今回の波形の重ね合わせで時間積分和にそれほど差異がない17ミ秒、23ミ秒、30ミ秒で比較すると、必ずしも30ミ秒が住民の体感的に最小と感じるとは限らない。従って、今回の異なる秒時差による波形の重ね合わせの結果を踏まえ、住環境の違う現場ごとに最適な秒時差を設定していく必要があると思われる。

4. おわりに

騒音・低周波音に対し厳しい施工環境となっている道路トンネルの発破に際し、高精度電子雷管を適用することで、従来の電気雷管に比べ、特に低周波音の低減に大きく寄与することが確認できた。低周波音は防音扉や防音ハウス等の遮音効果が得られにくい帯域であるため、発破音源から低周波音を低減することは住民の不快感低減にも大いに寄与するものと思われる。

また、高精度電子雷管を適用するに当たり、低周波音の低減を図る上で最も効果的な秒時差の検討を行った結果、秒時差30ミ秒付近に波形の時間積分和の極小値を持

つことが分かった。一方で、住民の体感は今回検討した波形の時間積分和のみならず、発破継続時間をはじめとした他要因の影響を受けられること、また、今回の検討は防音扉内側の音源に対してであるが、坑外に放出される音圧は防音設備を透過した音圧であるため、防音設備の応答性を加味して評価することも重要であるため、今回の机上検討をベースに住環境の異なるトンネル現場ごとに最適秒時差の設定をすることが重要である。

このような検討の積み重ねはトンネル坑口部の住環境保全を図りながらの発破掘削に大いに寄与するものと考えられるため、今後、益々トンネル立地条件が厳しくなることを踏まえ、引き続き検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 岩野圭太ほか：高精度電子雷管を用いた住宅地直下における環境負荷低減発破，第 24 回トンネル工学研究発表会 I-35,2014.
- 2) 北村義宜ほか：高性能自在制御発破工法による住宅地の環境影響低減に関する考察，第 24 回トンネル工学研究発表会 I-36,2014.
- 3) 岩野圭太：周辺環境に優しい制御発破技術，土木技術，70 巻 8 号，pp26-31, 2015.
- 4) 犬塚隆明ほか：高精度電子雷管を用いた発破の振動特性と振動波形予測手法の適用，第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2015.
- 5) 當麻玄大ほか：発破低周波音振動低減のための最適起爆秒時差，Journal of MMIJ, Vol.129, pp626-634, 2013.
- 6) 手塚康成ほか：高性能自在制御発破工法の低周波音低減効果について，第 25 回トンネル工学研究発表会，2015（投稿中）。

STUDY OF IN-SITU TUNNEL BLASTING TEST WITH HIGH PERFORMANCE ELECTRONIC DETONATOR TO REDUCE LOW-FREQUENCY NOISE

Keita IWANO, Takaaki INUZUKA, Yasunari TEZUKA, Takashi UENAMI,
Hiroshi SHIGA and Norie HANAOKA

The Shizuura tunnel has to pay too much care to reduce the low-frequency noise. Several tests clarified that blasting with high-performance electronic detonator is quite effective to reduce low-frequency noise by 6-7dB compared with conventional detonator. Low-frequency band seems to be most difficult to be sealed by insulate facilities. Therefore, this effect with high-performance electronic detonator might be quite useful to reduce the annoyance of neighbors. And through further tests of overlapping the single-hole blasting waves with different delay time, it was found that it has an optimal delay time to minimize the wave energy. This knowledge is also quite useful to minimize noise for other tunnel site.