

# 制御発破を用いた住宅地における 騒音・振動・低周波音対策効果の検討

林田 恵夢<sup>1</sup>・小松 有由美<sup>2</sup>・真田 博司<sup>3</sup>・森田 泰智<sup>4</sup>・  
扇 裕次<sup>5</sup>・澤山 健一<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 九州新幹線建設局 長崎鉄道建設所  
(〒852-8003 長崎県長崎市旭町13-5)

E-mail:hayashida.meg-pk4n@jrtr.go.jp

<sup>2</sup>正会員 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 九州新幹線建設局  
(〒812-8622 福岡市博多区祇園町2-1)

E-mail:komatsu.ayu-3h67@jrtr.go.jp

<sup>3</sup>正会員 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 九州新幹線建設局  
(〒812-8622 福岡市博多区祇園町2-1)

E-mail:sanada.hir-br2f@jrtr.go.jp

<sup>4</sup>正会員 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 九州新幹線建設局 長崎鉄道建設所  
(〒852-8003 長崎県長崎市旭町13-5)

E-mail:morita.yas-ye27@jrtr.go.jp

<sup>5</sup>正会員 鹿島・梅林・長崎西部九州新幹線(西九州), 新長崎トンネル(西)他  
特定建設工事共同企業体(〒852-8102 長崎県長崎市坂本三丁目489-12)

E-mail:ougi@kajima.com

<sup>6</sup>正会員 鉄建・りんかい日産・西海興業九州新幹線(西九州), 経ヶ岳トンネル他  
特定建設工事共同企業体(〒852-8102 長崎県長崎市田中町279-17)

E-mail:kenichi-sawayama@tekken.co.jp

九州新幹線(西九州ルート)の新長崎トンネル(西)工区及び経ヶ岳トンネル工区では,当初,電気雷管での多段発破で掘削を進めていた.しかし,新長崎トンネル(西)工区においては,振動が原因で近隣住民から苦情が寄せられ,夜間施工ができない状況であった.一方,経ヶ岳トンネルでは,坑口近傍の住宅への騒音・低周波音対策が課題となり,防音設備での対策により騒音・低周波音を低減したが,苦情が発生した.両工区でのこれらの課題を解決するため,高精度電子雷管を使用した制御発破に切替えた結果,振動・騒音・低周波音が低減され,昼夜施工が可能となった.本稿では,制御発破による振動レベルの低減効果及び騒音等の継続時間短縮による低減効果について報告する.

**Key Words :** *controlled blasting, high precision electronic detonator, blasting vibration, low-frequency noise*

## 1. はじめに

九州新幹線(西九州ルート)は,武雄温泉・長崎間(工事延長約67km)の工事実施計画が2012年(平成24年)6月に認可され,2022年度(平成34年度)の完成に向け整備を進めている.西九州ルートは,延長の約6割がトンネル区間である.これらの中には住宅地に近接していても,地山の状態と経済性,効率性の面等から発破掘削が有効となる場合もあり,このような施工条件では発破

による騒音・振動・低周波音が一般的に問題となる.また,防音設備等や制御発破により管理値以下に騒音・振動・低周波音を抑えることができて,人の感じ方は個人差が大きく,感覚的に受け入れられない場合があり,周辺住民の理解が得られず工事の中止を求められることがある.周辺住民の受忍の範囲内で発破掘削を進めるためには,それぞれの現場で周辺住民と対話を重ねたうえで,経済的で効果の高い対策を検討していく必要がある.そこで本稿では,騒音等を抑えた周辺環境に優しい制

御発破のデータについて、九州新幹線（西九州ルート）のトンネル工事を対象に、電気雷管と比較した高精度電子雷管の効果について報告する。具体的には、新長崎トンネル（西）他工区では振動、経ヶ岳トンネル他工区では騒音及び低周波音に着目して検討を行った。

## 2. 工区概要

両工区とも、長崎市に位置する山岳トンネルであり、NATMによる発破掘削で施工を進めている（図-1）。

新長崎トンネル（西）工区は、新長崎トンネル（L=7,460m）の内、終点側3,575mの施工を行うものである。地質は、新第三紀の軟質な凝灰角礫岩及び硬質な安山岩が主体であり、トンネル直上部には土被り80m程度で民家が密集していることが特徴である（図-2）。

経ヶ岳トンネル工区は、全長1,930m、最大土被り190mで、地質は新第三紀の安山岩が主体であり、トンネル掘削部の安山岩は主に軟岩～中硬岩が分布している（図-3）。長崎方坑口付近には家屋が多く存在しており、発破に伴う騒音・低周波音に配慮した施工が必要である。

## 3. 本検討における問題点と着目点

発破掘削で発生する騒音・振動・低周波音により、耳に聞こえる可聴音と家屋などの「揺れ」が問題となる。また「揺れ」は、直接の地盤振動と低周波音による「感覚的な揺れ」に分類され、後者は、発破の低周波音（空気の揺れ）が窓枠や屋内の棚などを揺らし、がたつき音を発生させる事象である。



図-1 トンネル位置図

新長崎トンネル近傍には、斜面に住宅が密集している地域があり、トンネルと最近接の寺院との純距離（斜距離）は約90mである。この寺院は長崎四国八十八ヶ所霊場の一つである。寺院近傍には500体あまりの石仏と不安定な巨石があり、転倒や落石の防止のため地盤振動対策が必要であった。

一方、経ヶ岳トンネルでは、長崎方坑口近傍に位置する住宅への騒音・低周波音対策が課題となり、これらへの対策を検討した。また、防音設備での対策により、騒音・低周波音が、火薬学会の提言値以下となっているにも関わらず、苦情が発生していた。その原因の1つとして、発破による騒音・低周波音の継続時間が長く、間隔的な揺れを感じやすいことが考えられた。

以上を踏まえ、本検討では、制御発破による振動レベルの低減効果及び騒音・低周波音の継続時間短縮による低減効果に着目し整理した。

## 4. 高精度電子雷管の使用による改善

両工区ともに、当初は電気雷管での多段発破で施工したが、周辺住民より苦情が寄せられた。そこで、他の雷管を使用する発破として、従来型電子雷管と高精度電子

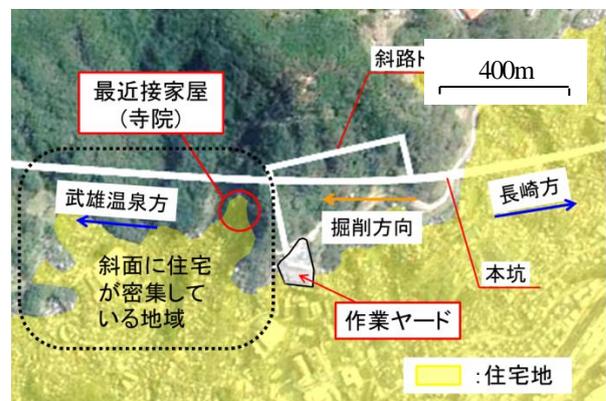


図-2 新長崎トンネル（西）工区ヤード周辺位置図

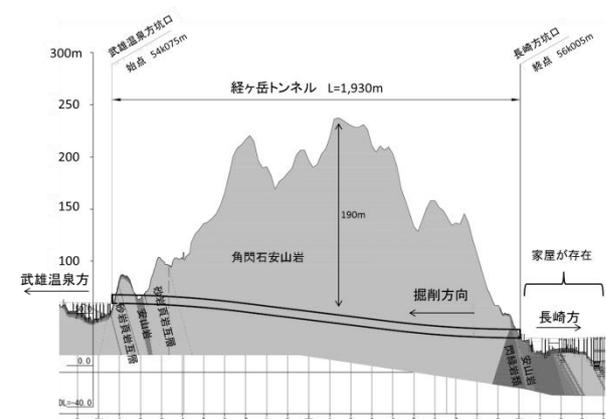


図-3 経ヶ岳トンネル工区地質縦断面図

雷管を比較検討し、高精度電子雷管を採用した。標準的な制御発破で使用する従来型電子雷管は秒時間隔が30ms程度に固定されるのに対し、高精度電子雷管は秒時間隔を現場で1ms単位（設定秒時±0.01%）に設定できるため、振動の増幅や低周波音の低減を図ることが可能となる。また、秒時間隔を短く設定することで、発破継続時間を短縮し、振動値と体感振動を抑える事が期待できる。ここでは高精度電子雷管を使用し、近隣住民への騒音、振動、及び低周波音を数値的に抑え、かつ発破継続時間を短縮することで周辺住民の心理的な圧迫感を低減することを目指すこととした。電気雷管、従来型電子雷管及び高精度電子雷管の各発破条件及び評価を表-1に示す。

## 5. 新長崎トンネル（西）工区における対策

### (1) 制御発破の検討

新長崎トンネル（西）工区では、電気雷管での発破掘削時に苦情があり、昼間一方施工を余儀なくされた。本工区は九州新幹線（西九州ルート）武雄温泉・長崎間の完成までの工程が厳しく、一方施工での掘削では工程に大きく影響を与える事から、近隣住民への振動・騒音の影響を抑え、かつ工程を確保するため、高精度電子雷管を使用した制御発破に切り替えた。

### (2) 振動・騒音管理値の設定

一般的に発破振動による影響は、家屋やコンクリート構造物に与える物理的要素と人体が感じる感覚的要素の2種類を考える。構造物に対する影響を評価する場合には、物理的要素を表す変位速度（単位はcm/sec=kine（カ

イン））で表す場合が多く、人体への影響を評価する場合には、感覚的要素を考慮した振動レベル（単位はdB）で評価する場合が多い<sup>1)</sup>。

トンネル発破の騒音・振動に関しては行政の規制値が定められていないことから、騒音・振動の管理値を設定するにあたっては、火薬学会より提言されている規制値及び類似施工事例を参考に、それぞれ以下のとおり定めた<sup>12)</sup>。また、振動については昼間と夜間でそれぞれ管理値を設定した。なお、試験発破においては高精度電子雷管の低周波への低減効果も確認するため、参考として低周波の管理値も設定して試験した。

（振動・騒音・低周波音の管理値）

振動 : 昼間 70dB(0.2kine)

夜間 64dB(0.1kine)

※寺院周辺は昼夜64dB(0.1kine)

騒音 : 70dB

低周波音 : 100dB

### (3) 試験発破

高精度電子雷管の採用にあたり、効果の検証のため、起点方掘削時に図-4に示す位置（図中A～G）に計測器を設置し、振動レベル・振動速度・低周波音を測定する試験発破を実施した。

また、高精度電子雷管の起爆間隔を極力短くする事による発破継続時間の短縮を目指すため、5ms, 7ms, 17ms に設定し試験を行い、すべての起爆間隔において騒音・振動・低周波音の低減効果を確認した。

### (4) 適用範囲の検討

試験発破の測定結果及び管理値を基に振動予測式<sup>①)</sup>より、管理値を超える発破位置からの距離D (m) を逆

表-1 雷管別比較表

項目	電気雷管(標準)		従来型電子雷管		高精度電子雷管	
	新長崎T(西)	経ヶ岳T	新長崎T(西)	経ヶ岳T	新長崎T(西)	経ヶ岳T
秒時間隔	250ms		30ms (1000分の30秒) 精度: ±1ms		1ms (1000分の1秒) 精度: 0.01%	
設定最大段数	20段		200段		500段	
現地での段数	12段	10段	106段	50～90段	106段	50～90段
発破継続時間	約3秒	約3秒	約3秒	約1.5～3秒	約0.7秒	約1秒
特徴	振動を段毎に分離する事が可能		全孔分離が可能 工場出荷時に秒時間隔が固定		全孔分離が可能 現場で秒時間隔を設定可能	
評価	×		△		○	

算した。次に、算定したDを対象家屋からの純離隔として高精度電子雷管による制御発破の適用範囲を設定した。適用範囲を図-5に示す。なお、K値については試験発破により設定した。

$$V=K \times W^{0.75} \times D^2 \dots \text{式①}$$

ここに、V：変位速度 (cm/sec,kine)

K：地質等により変化する係数 (K=640)

W：一段あたりの装薬量 (kg)

D：発破位置からの距離 (m)

## (5) 施工結果

振動速度について、高精度電子雷管による制御発破実施時の計測結果は、切羽が寺院に最近接した際 (D=88m) には、振動速度0.082kine (<0.1kine) となり、管理値を下回ることができた。

振動レベルを測定したA, B, C及びD地点のうち、B地点において、電気雷管による発破では夜間の管理値である64dBを超えたが、高精度電子雷管による発破では、全ての地点で夜間の管理値以下に抑えられた。

低周波音についても、測定した全ての地点で高精度電子雷管による発破時の値が、電気雷管による発破時の値を下回った。

また、発破継続時間を短縮し体感振動を抑えることにより地元から振動に対する苦情を寄せられることもなく、近隣住民の受忍の範囲内での振動で夜間も発破掘削し、所定の進捗を確保しながら施工することができた。

## 6. 経ヶ岳トンネル工区における対策

### (1) 防音設備による対策

経ヶ岳トンネル工区は坑口が住宅地に位置しており、

坑口の正面付近には民家があり騒音・低周波音の影響が予想されたため、当初より防音扉を1枚設置していたが、坑口周辺の住民から発破による騒音・低周波音について苦情が多く寄せられ、夜間の施工ができず、限られた工期内に掘削を完了することが難しい状況であった。

そこで、騒音・低周波音を極力ヤード外に漏らさないように、以下の対策 (図-6, 図-7) を順次追加しながら、騒音・低周波音を測定しつつ周辺住民への説明を行った。

対策①：トンネル発破音 (騒音・低周波音) をトンネル坑外に漏らさない対策：防音扉×3枚

対策②：トンネル発破音 (騒音・低周波音) をヤード外に漏らさない対策：ヤード外周の防音壁、防音型パネル

対策③：ダンプのズリ積み下ろし時の騒音対策：ズリピットの周囲に防音型パネル等設置

対策④：ズリ小割時の騒音対策：トンネルズリの小割をヤード外に変更

これらの対策を行った結果、防音扉1枚設置時では夜間の騒音が75dB、低周波音が110dBであったのに対し、防音扉を1枚追加し、合計2枚を設置した時点では騒音が60dB程度、低周波音が95dB程度となり、火薬学会の提言値である夜間の騒音70dB、低周波音100dB以下に抑えることができた。しかし、騒音・低周波音がともに提言値を下回っているにもかかわらず、周辺住民から夜間工事の開始について理解を得ることができず、夜間工事の了承には至らなかった。低周波音では、建具の種類によっては約75dBからがたつき始めるといわれており<sup>9)</sup>、今回のケースでは、家屋の構造の違いや感じ方に個人差があることから、住民の受忍の範囲に収まらず、苦情が発生したものと考えられる。

防音設備については、発破音のばらつき (最大値) 自体を抑えることが難しいこと、覆工コンクリート施工時に防音扉を移設する必要があることなどから、施工性を踏まえると、これ以上の追加対策には限界があった。そ

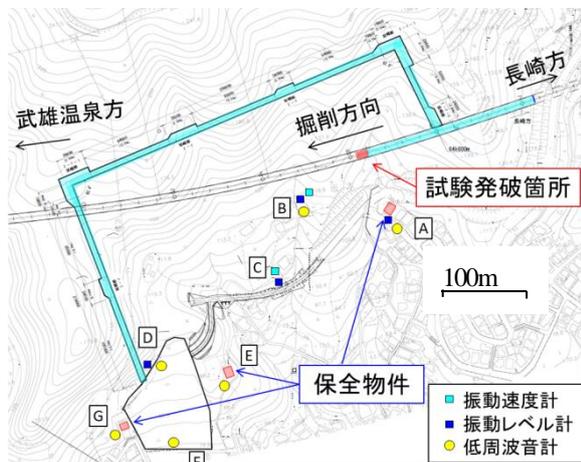


図-4 試験発破時の計測箇所

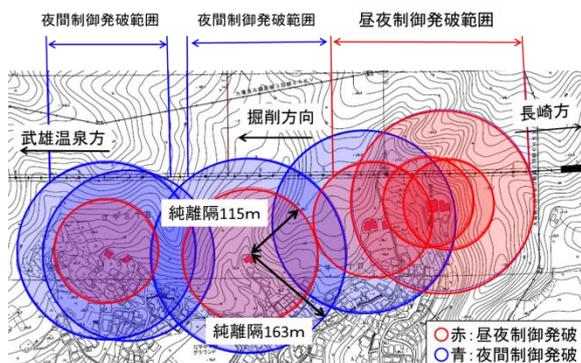


図-5 制御発破適用範囲

ここで、夜間での施工に理解を得るために、試験的に制御発破での対策を実施し低減効果を確認することとした。

## (2) 発破の工夫による対策

経ヶ岳トンネル工区では防音設備での対策により火薬学会の提言値以下となっているにもかかわらず、苦情が発生している原因としては、発破による騒音の継続時間が長く、感覚的な揺れを感じやすいことが考えられた。そのため、継続時間を極力短くするための制御発破に着目して対策案の検討を行った。

### a) 発破継続時間の短縮

人の感覚への影響を抑えるには、振動や騒音の大きさだけではなく感じている時間を短くする方法がある。時間的に長く続く振動や騒音は心理的な圧迫感を与える。また人間は、経験した事のない振動や騒音は過去の体験と照合して知覚するため、発破振動は地震と錯覚しやすく、振動、騒音を人の感覚閾値の観点から低減するためには、発破の継続時間を1秒未満に短くすることが有効であると言われている<sup>3) 4)</sup>。

### b) 高精度電子雷管の検討

当初、本工区では電気雷管（約5～10段）で発破を行っていた。電気雷管では設定できる起爆秒時間隔は250ms、設定できる段数が20段である。発破継続時間は当工区で10段で適用した場合、約2.7秒程度と長い。また、従来型電子雷管では起爆秒時間隔が30ms、設定で

きる段数が200段程度であり、当工区は50～90孔で発破しているため、従来型電子雷管を使用した場合振動の継続時間が約1.5秒～3秒程度となる。そこで、発破継続時間を1秒未満に設定可能な高精度電子雷管に着目し、これら電気雷管、従来型電子雷管及び高精度電子雷管について比較検討を行った。（表-1）

高精度電子雷管は現場で1ms単位（設定秒時±0.01%）に設定でき、1孔1段で最大500段まで設定出来るため当初の電気雷管（10段）より多段に分けられることで1段当りの斉発薬量を小さくでき、騒音・低周波音を抑えることができる。また起爆秒時間隔を短く設定することで、当工区で適用した場合発破継続時間を約1秒程度まで短縮し、体感騒音等を低減することができる。さらに、起爆秒時間隔を高精度で制御できるため、周波数の重なりが少なく騒音や低周波音の低減が可能である。

以上のことから、本工区においては、高精度電子雷管を使用し、騒音と低周波音をさらに数値的に抑え、かつ発破継続時間を短縮することで周辺住民の心理的な圧迫感を低減することを目指した。

## (3) 試験計画

坑口より623m～702m間の掘削時において、電気雷管と高精度電子雷管によりそれぞれ防音扉を閉じた状態で発破を行い、測定箇所での騒音・低周波音及び周波数を測定し、高精度電子雷管の効果について確認した。

当該箇所での掘削断面積は73.88㎡、岩質は風化がやや進んだ安山岩であり、一軸圧縮強度は推定で10～40N/mm<sup>2</sup>で、孔数は約50～90孔、装薬量は1発破あたり50～90kg程度である。

起爆秒時間隔の設定は、極力短くする事による発破継続時間の短縮を図ったうえで、地質等によって秒時差による騒音、低周波音への影響が異なるため、最適な起爆

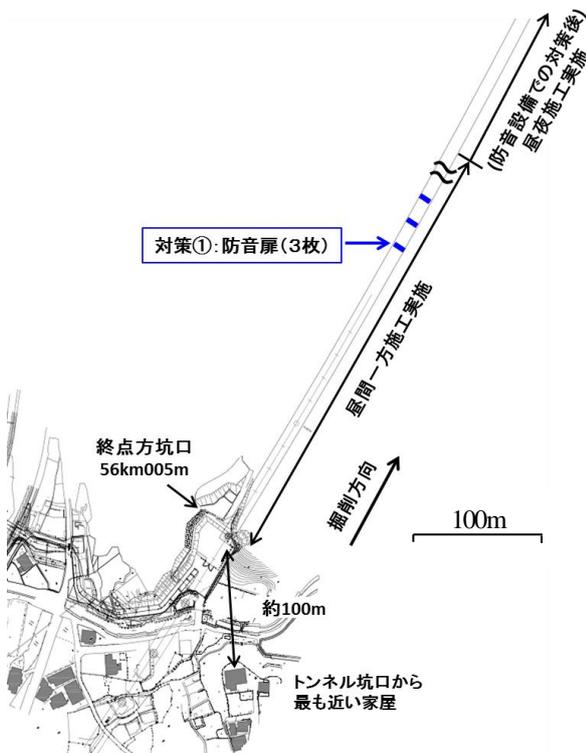


図-6 対策①位置図

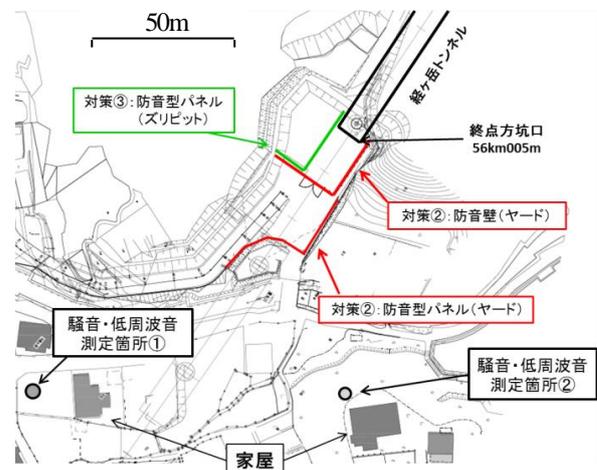


図-7 対策②、③位置図

秒時間隔を調べるため新長崎トンネル（西）工区での施工で騒音・振動・低周波音の低減において効果を確認できた17msを中心に前後いくつかの起爆秒時間隔を設定し、比較することとした。

#### (4) 測定結果

##### a) 騒音の測定結果

騒音の各測点（図-7）での騒音レベルの測定結果を図-8に示す。高精度電子雷管で起爆秒時間隔を5～29msに設定した時の、起爆秒時間隔毎の測定値を示している。今回の結果では騒音に関しては起爆秒時間隔と騒音レベ

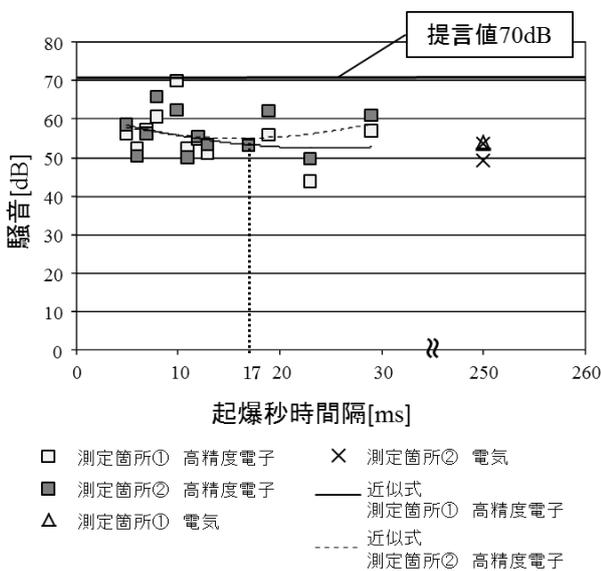


図-8 騒音測定結果

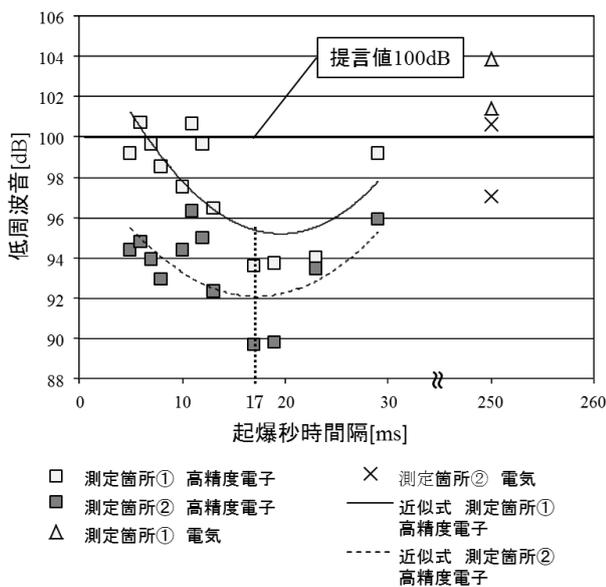


図-9 低周波音測定結果

ルとの明確な関係は見いだせなかった。

また、電気雷管と高精度電子雷管の測定値に顕著な差異が出なかったが、その理由としては、騒音値自体が50～60dBと暗騒音に近いレベルまで低減されているため（現地で計測した暗騒音は深夜で50～60dB）、これ以上の低減が見込まれないことからと推測される。

##### b) 低周波音の測定結果

低周波音の測定値を図-9に示す。起爆秒時間隔毎に見ると当工区では起爆秒時間隔を17msに設定した場合が一番音圧レベルが低い。17msより起爆秒時間隔を短くすればより発破継続時間を短くすることができるが、低周波音は大きくなってしまふことが分かった。これにより当工区においては、起爆秒時間隔を17msに設定することが最も効果的であることを確認した。また、起爆秒時間隔を250msとした電気雷管と高精度電子雷管で比較した場合、高精度電子雷管の方が低周波音が低くなることも確認できた。騒音の継続時間を短縮することを高精度電子雷管使用の目的の一つとしたが、騒音自体は周囲の音や反響の影響で正確に継続時間を確認できなかった。

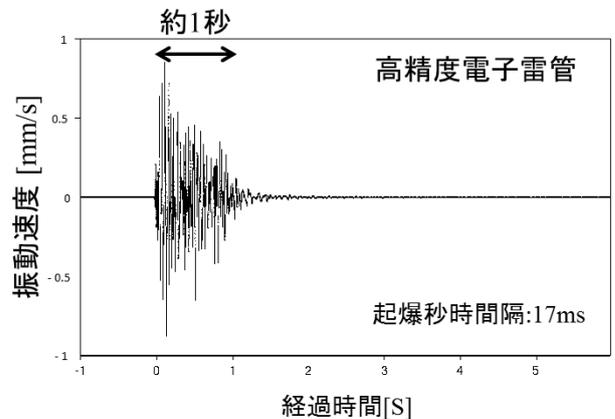
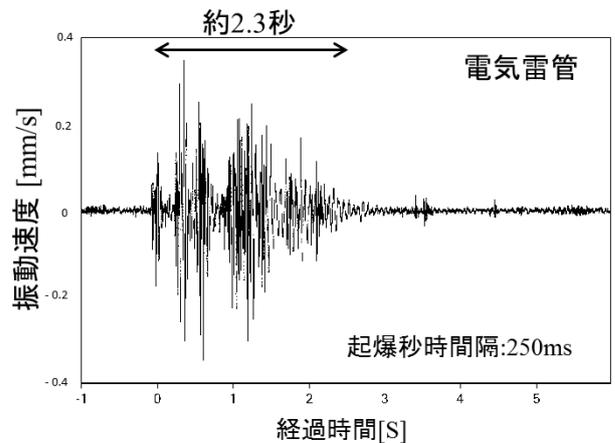


図-10 振動時間波形

そのため、反響等の影響を受けにくい振動について、振動の時間波形で電気雷管と高精度電子雷管の発破継続時間を比較した。

電気雷管と高精度電子雷管のそれぞれの時間波形を図-10に示す。電気雷管では起爆秒時間隔250msの場合、発破継続時間は2秒程度となっているのに対し、高精度電子雷管では起爆秒時間隔17msの場合、発破継続時間は概ね1秒程度であることが確認できた。これにより、高精度電子雷管を使用すれば、発破継続時間が短いことから、人が識別しにくくなり、心理的な圧迫感を与えにくくなることが考えられた。

## (5) 施工結果

夜間での発破掘削において高精度電子雷管（17ms）を使用して施工を行い、周辺住民に聞き取りしたところ、夜間においても概ね気にならない程度まで低減したとの意見が多いことを確認できた。これは数値的にさらに騒音や低周波音は小さくなったことに加え、発破継続時間が短くなり、体感的な負担が小さくなった事も要因となっているものと考えらる。

以上を踏まえ、本工区においては昼夜とも発破においては電気雷管を基本的に使用するが、地質が堅硬な場合で夜間の苦情が発生した場合は、部分的に高精度電子雷管を使用し、周辺住民への聞き取りを行いながら工事を進めている。

## 7. おわりに

高精度電子雷管による制御発破を行うことで、新長崎トンネル（西）工区では、昼夜二方施工を可能とし、工程を確保しつつ振動を抑え住宅地近傍を掘削することができた。また振動予測式を用いて適切な制御発破適用区間を設定できた。

一方、経ヶ岳トンネル工区では、発破による低周波音

に対し、高精度電子雷管を使用することで、低周波音の音圧レベル自体を低減できることに加え、発破継続時間を短くすることで、周辺住民からの理解が得られ、昼夜二方施工を可能とした。

トンネル工事に伴う発破については法令による規制がなく、施工者において管理値を自主的に定め周辺住民の理解を得ながら工事を進める必要があり、周辺住民の理解がない中では工事を行えないのが実情である。そのため、限られた工期の中で工事を進めていくためには、周辺住民への積極的な説明、対話が必要不可欠であり、今回対象とした両工区においても改めてその重要性を認識した。

これからも今回の施工実績を反映させるとともに、住民の方の気持ちに立ち発破施工前の広報活動、情報公開を積極的に進め、工程を確保しつつ工事を進めていきたい。

**謝辞：**本工事に際し、ご協力いただいた周辺住民の方々に感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 山田隆昭：わかりやすいトンネルの発破技術，pp.49-51，土木工学社，2008.
- 2) 日本火薬工業会：あんな発破こんな発破 発破事例集，pp.3-33，2004.
- 3) 大石康智，後藤真孝，伊藤克亘，武田一哉：音楽情報処理最前線！「歌声」と「話し声」はどう違うか？人間の”声”を理解するコンピューターの実現を目指して，DTM マガジン，p.108，音楽情報科学研究会，2009.
- 4) 「トンネル新技術への挑戦」連載講座小委員会：トンネル新技術への挑戦(23) -市街地における最新の制御発破技術-，トンネルと地下，第48巻10号，pp.67-75，土木工学社，2017.

(2018.8.10 受付)

## MEASURES AGAINST NOISE, VIBRATION, AND LOW FREQUENCY NOISE USING CONTROLLED BLASTING IN THE RESIDENTIAL AREA

Megumu HAYASHIDA, Ayumi KOMATSU, Hiroshi SANADA, Yasutomo MORITA, Yuji OUGI and Kenichi SAWAYAMA

Shin-Nagasaki Tunnel and Kyogatake Tunnel were initially being drilled by blasting with electric detonators. In the Shin-Nagasaki Tunnel, measures against vibration were necessary to prevent megaliths falling in the temple near the tunnel. On the other hand, in the Kyogatake Tunnel, although noise and low frequency noise were reduced with soundproof doors, noise and low frequency noise to the houses in the vicinity of the portal were problems. As a result of switching to controlled blasting using high precision electronic detonators, vibration, noise, low frequency noise were reduced.