

高性能自在制御発破工法の低周波音低減効果について

手塚 康成¹・西岡 和則²・渕先 弘一³・北村 義宜⁴

¹正会員 鹿島建設 土木管理本部 土木工務部トンネルGr (〒107-8348 東京都港区赤坂六丁目6-11)
E-mail:tezuka-yasunari@kajima.com

²正会員 鹿島建設 土木管理本部 土木工務部トンネルGr (〒107-8348 東京都港区赤坂六丁目6-11)
E-mail:nishiokk@kajima.com

³正会員 鹿島建設関西支店 箕面トンネル西工事事務所 (〒563-0252 大阪府箕面市下止々呂美301)
E-mail: fucci@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設関西支店 箕面トンネル西工事事務所 (〒563-0252 大阪府箕面市下止々呂美301)
E-mail: y-kitamura@kajima.com

箕面トンネル西工事では坑口と住宅地との距離が短いため、高精度秒時電子雷管を用いた高性能自在制御発破工法を国内の道路トンネルに初めて適用し、住環境に配慮しながら掘削を進めていた。その後、切羽の進行に伴い通常の電気雷管に切り替えて掘進していたが、切羽位置が坑口から600m付近で地山が堅硬になり、1回の発破に使用する爆薬量が80kg程度に増加したことなどに起因して、近隣住宅から屋内の建具ががたつくとの苦情が寄せられた。そのため、再度、高性能自在制御発破工法による発破を行った結果、低周波音に起因する建具のがたつきに対する明確な低減効果が認められた。本報文では、箕面での状況を報告するとともに、低周波音低減に対する最適な起爆秒時間隔について、高精度秒時電子雷管を用いた予備試験を実施したので、その結果を述べる。

Key Words : *high accuracy and flexible timing blast method ,low- frequency noise reduction*

1. はじめに

トンネルの坑口部に住宅地が近接する場合、発破に伴って発生する騒音、低周波音および地盤の振動が近隣の住環境を悪化させる要因となる。このうち騒音については防音設備の強化により比較的容易に住環境への影響を低減することができるが、低周波音は防音設備を透過しても十分に減衰せず、また地盤の振動は発破位置から住宅地への伝播を減衰させる有効な手段がないため、発破掘削ではおもにこれらが近隣住民からの苦情の原因となる。また、地盤の振動は距離減衰が期待できるため、発破位置と住宅地の距離が大きくなるにつれて住宅地での振動は小さくなるが、低周波音は距離減衰がそれほど期待できないため、掘削が進捗しても住宅地での音圧レベルが低下せず、問題が長期化することが多い。

箕面トンネル西工事では、坑口と民家との離隔が上り線で85m、下り線で130mと近接しており、当初設計どおり上り線では坑口より約210m、下り線では坑口より約125mの位置から発破掘削を行ったが、この際、一般的な段発電気雷管（DS雷管）を用いて発破すれば、住宅

地に有感レベルの地盤振動が生じると予想されたため、最大500段までの段発が可能で、かつ1ms刻みで秒時間隔を任意に設定できる高精度秒時電子雷管を用いた高性能自在制御発破工法により一定の短い秒時間隔で発破を行い、斉発薬量を1孔あたりの薬量にまで完全に分離することで、発破掘削の初期段階で問題となる地盤の振動を抑制した¹⁾。

その後、発破振動が通常発破でも問題が無い距離まで切羽が進んだところで電気雷管に切り替えて掘進を継続していたが、坑口から切羽までの距離が600m程度となった時点で地山が堅硬になり、1回の発破に使用する爆薬量が80kg程度に増加し、また、避難連絡坑の掘削により上下線が一つの空洞となり、坑内環境が変化したことなどに起因して、近隣住宅から屋内の建具ががたつくとの苦情が寄せられた。

そこで、再度、高精度秒時電子雷管を用いた高性能自在制御発破工法を適用した結果、低周波音に起因する建具のがたつきを解消することができ、切羽距離が1000mを超えた現時点でも、同工法を継続しないと苦情が寄せられる状況が続いている。

ここでは、箕面トンネル西工事での低周波音低減実績を報告するとともに、同種の問題が生じた別の現場において、低周波音低減に対する最適な秒時間隔に対する予備試験を実施したので、そこから得られた予見についても併せて報告する。

2. 箕面トンネル西工事の概要

(1) 全体工事概要

箕面トンネルは新名神高速道路（高槻第一JCT～神戸JCT 全長40.5km）のうち、大阪府箕面市北部を東西に横断する全長約5kmの2車線双設道路トンネルである。箕面トンネル西工事ではこのうち西側約3kmを担当している（図-1参照）。本工事の諸元と工事概要を表-1～2に示す。

(2) 地質概要

箕面トンネル西工事では、坑口から貫通点まで古生代の砂岩または砂岩優勢砂岩・頁岩互層が大部分を占め、一部で石英斑岩や流紋岩が貫入する。地山の弾性波速度は断層部で3.0～3.8km/s、断層部以外で4.6～5.0km/sと比較的速く、支保パターン比率はCⅠが70%、CⅡが15%、DⅠが11%となっており、全体的に良好な地質であると想定されていた。土被りは最大380mである。またトンネル坑口近傍は五月山断層が南西から北東の方向に発達しており、坑口から約420mまでの区間に断層破碎帯が断続的に出現する。本トンネルの地質縦断図を図-2に示す。

(3) トンネル坑口と民家の近接状況

本工事は図-3に示すようにトンネル坑口と隣接民家との離隔が上り線で85m、下り線で130mと近接しているだけでなく、上り線では坑口より約210m、下り線では坑口より約125mの位置から発破が必要となる硬岩が出現した。発破の開始位置が住宅地と極めて近接しており、発破に伴って生じる地盤の振動のみならず、騒音・低周波音による住宅地への環境影響の低減に特段の配慮が必要となった。



図-1 箕面トンネル西工事の位置図

表-1 トンネル諸元

道路規格	第1種第2級B規格
平面線形	直線～R2,500m
縦断勾配	2.0%
掘削断面積	76.2～99.0 m ²
内空断面積	73.4 m ²

表-2 工事概要

工事名称	新名神高速道路 箕面トンネル西工事
工事場所	大阪府箕面市下止々呂美
発注者	西日本高速道路株式会社 関西支社
施工者	鹿島建設株式会社
工期	2012(H.24).6.5～2016(H.28).6.13
工事内容	トンネル掘削 上り線 2916m 下り線 2895m 非常駐車帯 8か所 避難連絡坑 4か所

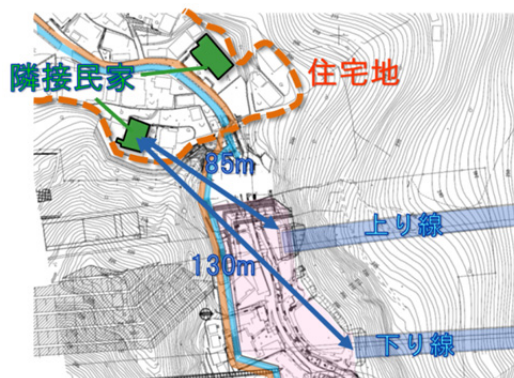


図-3 トンネルと民家の離隔

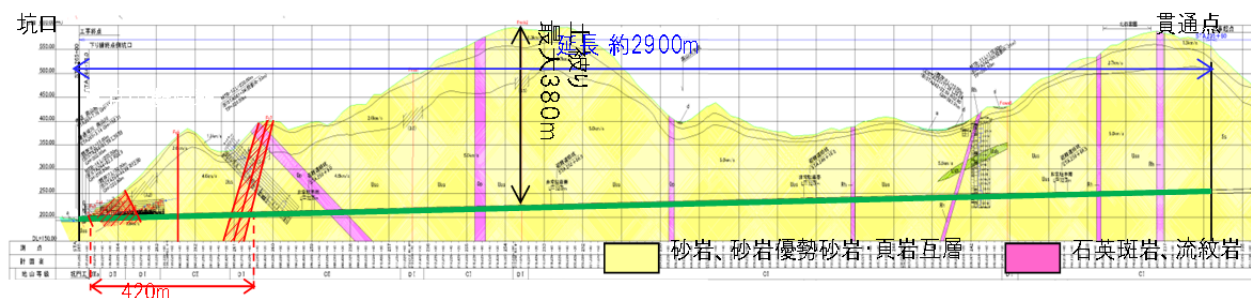


図-2 地質縦断図

3. 苦情が寄せられるまでの低周波音対策と経緯

(1) 苦情が寄せられる前の低周波音対策

前述の通り、坑口の隣接民家との距離が近いこと、幾度かの発破試験を経て、防音対策として表-3のような防音設備を講じていた。とくに上り線の坑口には、低周波音対策としてコンクリートパネル型の二重扉を設置しており、これによって、通常の電気雷管による段発発破でも、低周波音に起因した苦情は寄せられていなかった。

(2) 苦情が寄せられた経緯

苦情が寄せられるまでの段発発破では、1回の爆薬使用量は50kg前後であったが、前述の通り坑口から切羽までの距離が600m程度となった時点で地山が堅硬になり、1回の発破に使用する爆薬量が80kg程度に増加し、また、避難連絡坑の掘削により、上下線が繋がって一つの空洞となった。

これによって、それまでは80dB後半であった近隣民家における低周波音が90dBを超えるまで上昇し、屋内で建具ががたつくとの苦情に至った(と推察された)。

4. 高性能自在制御発破工法による低周波音対策

(1) 問題解決へのアプローチ方法

低周波音による建具のがたつきが問題となる場合、環境省が公表している「低周波音問題対応の手引書(平成16年6月)」の物的苦情に関する参照値(表-4、同書より抜粋)が目安となる。

これを参考に、苦情が発生した家屋の敷地内で、段発電気雷管(DS雷管)と高性能自在制御発破工法による発破を行った際に低周波音を測定し、1/3オクターブバンド中心周波数別の音圧レベルを把握し、実際の建具のがたつき状況も踏まえて、問題となる閾値を求めて評価することとした。

(2) 比較試験結果

上下線にて段発電気雷管と高性能自在制御発破工法による発破を行い、図-4に示す調査対象住宅内で建具のがたつきを体感するとともに、対象住宅の庭地にて低周波音を計測した。このときの発破諸元を表-5に示す。なお、高性能自在制御発破の秒時間隔は17msの連続秒時としている。

表-6に建具のがたつき調査結果を示すが、上り線にて段発電気雷管を用いたときのみ建具のがたつきが発生し、高性能自在制御発破工法を用いた際には一切がたつきは生じなかった。また下り線で段発電気雷管を用いた場合もがたつきは生じなかった。

上り線の発破時に計測した周波数別の低周波音レベルを図-5に、下り線の発破時に計測した結果を図-6にそれぞれ示す。高性能自在制御発破工法は、段発電気雷管と比較して低周波音レベルのピークが現れる周波数が高周波側に移行しており、物的苦情に関する参照値も全ての

表-3 箕面トンネルの防音設備

トンネル	形 式	設置数	設置位置
上り線	コンクリートパネル二重扉	1	坑口
	グラスウール充填扉	1	T.D.25付近
下り線	グラスウール充填扉	2	T.D.25付近 T.D.400付近

表-4 物的苦情に関する参照値²⁾

1/3 オクターブバンド 中心周波数 (Hz)	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50
1/3 オクターブバンド 音圧レベル (dB)	70	71	72	73	75	77	80	83	87	93	99

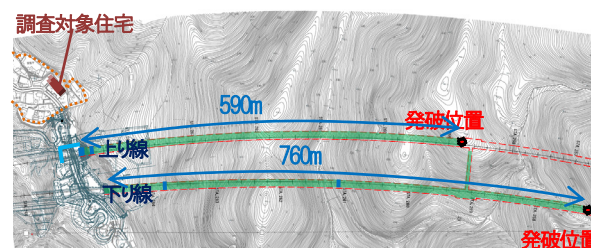


図-4 がたつき調査対象家屋

表-5 発破諸元

発破回数	発破位置	坑口からの距離	使用雷管	総装薬量
1回目	上り線	570m	段発電気雷管	42.8kg
2回目		593m	段発電気雷管	72.5kg
3回目		594m	高性能自在制御発破工法	71.0kg
4回目	下り線	756m	段発電気雷管	75.3kg
5回目		757m	高性能自在制御発破工法	38.4kg

表-6 建具がたつきの調査結果

発破回数	発破位置	使用雷管	建具がたつき調査結果
1回目	上り線	段発電気雷管	激しくがたつく
2回目		段発電気雷管	ややがたつく
3回目		高性能自在制御発破工法	がたつかない
4回目	下り線	段発電気雷管	がたつかない
5回目		高性能自在制御発破工法	がたつかない

周波数において下回っている。一方、上り線にて段発電気雷管を用いて発破した際に建具ががたついた時は、10～20Hzの周波数帯で80dBを超える比較的大きな低周波音が観測されたが、下り線の発破時には80dBを超える低周波音は生じなかった。このため、10～20Hzの周波数帯で80dBを超える低周波音が発生すれば建具ががたつくと判断し、上り線のみ高性能自在制御発破工法に変更して掘削を続けたところ、その後の苦情は生じなかった。

このように、高性能自在制御発破工法を用いることで、切羽が600m以上進んでもなお発生する、極低い周波数域の音圧に起因する建具のがたつきを、効果的に抑制することが可能であることが分かった。

5. 低周波音対策に対する最適秒時間隔について

前章に述べた通り、建具のがたつきのような低周波音に起因する物的苦情に対しても、高性能自在制御発破工法は有効な手段であることは確認されたが、そのメカニズム、とくに起爆秒時間隔の設定については、ノウハウ

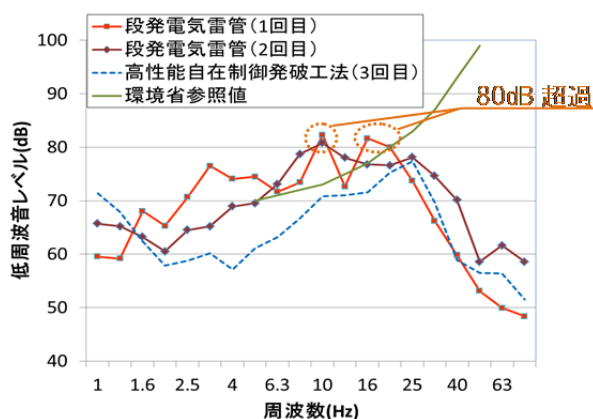


図-5 周波数別の低周波音レベル（箕面上り線）

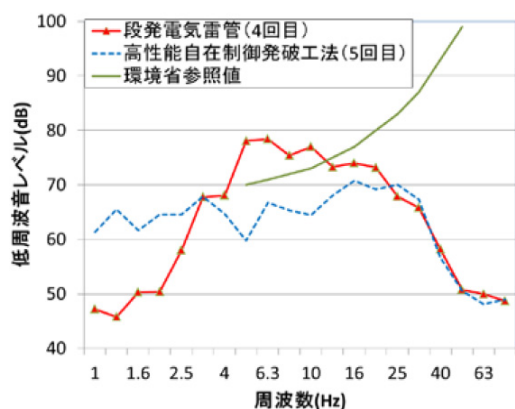


図-6 周波数別の低周波音レベル（箕面下り線）

が確立されていない。

そこで、箕面トンネル西工事と同種の問題が生じた別の現場（以下Aトンネルと称す）において、上記を確立するための予備試験を実施した。

(1) Aトンネルでの状況

Aトンネルは市街地に建設中の道路トンネルであり、坑口部の両脇20m程度の離隔で民家が建ち並んでいる。

本トンネルでは、切羽位置が坑口から80mの地点から発破工法を採用したことに伴い、低周波音に起因した建具のがたつきの苦情が寄せられたため、高性能自在制御発破工法を適用した結果、図-7に示すように、1/3オクターブバンド中心周波数別の音圧レベルは、距離が近い分値は全体的に大きいですが、その分布は箕面トンネル西工事で見られた傾向と同じで、高性能自在制御発破工法を適用することにより、苦情も寄せられなくなった。

なお、防音設備は、重機稼働騒音に対して坑口前に防音ハウスがあり、民家に隣接する坑口へのアプローチ道路部は防音壁が設置されているが、発破に対しては坑内に防音扉が1枚設置されているのみで、一般的な市街地トンネル工事での防音設備となっている。

(2) 予備試験の内容とアプローチ方法

Aトンネルにおいても秒時間隔は17msを採用したが、前述のメカニズム解明のため、予備試験を実施した。

a) 予備試験の内容

低周波音は空気を媒体とした弾性波であり、基本的な考え方は地盤振動と変わらず波の重ね合わせで検討できるものと考え、既往の明かり発破における研究³⁾も参考に、発破時に1孔単発の音圧波形を収録した。測定条件を図-8に、また収録した波形を図-9に示す。

b) メカニズム解明のアプローチ方法

トンネル発破の低周波音は、切羽と防音扉との間の閉鎖空間内での伝播であるため、図-9の単発波形は副次の波が観測されることが分かる。したがって実際の発破

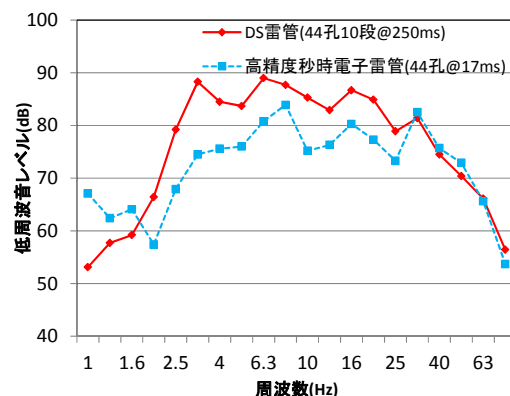


図-7 周波数別の低周波音レベル（Aトンネル）

ではこれらのn次波が重なり合って干渉が発生するため、非常に複雑になることが予見されるが、ここでは問題を単純化するため、初波（最初に到達した波）に着目した。

単発②の初波の拡大波形を図-10に示すが、今回の測定環境下では、初波は矩形波に近い波形を示している。これは、発破によるエネルギーによって体積圧縮された閉鎖空間内の空気が爆風（幅を有する圧力波）となって到達していることを示しており、このことから、低周波音の坑内距離減衰は得られ難いことが分かる。

同図には、単純に数値化したフィッティング波形も示しているが、このフィッティング波形を秒時間隔に応じずらして重ね合せた時に得られる波形の差から、最適な起爆秒時間隔の考察を試みた。

①測定位置(防音扉から40m前方で切羽まで164mの位置で測定)



測定器(マイクロフォン)の仕様

周波数特性: 2~250Hz (FLAT)

測定レンジ: 0.5~500Pa

分解能: 0.25Pa

サンプリングレート: 1024Hz



②発破パターン(一度の起爆で遅延を設定)

1 孔単発①→(4.25sec 遅延)→1 孔単発②→(4.25sec 遅延)→残り 30 孔連続@17ms

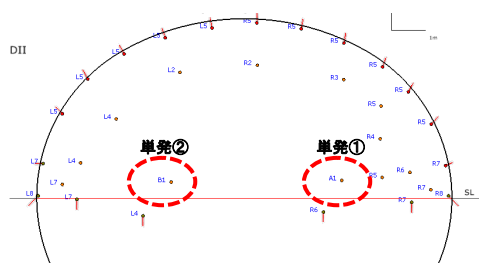


図-8 予備試験の測定条件 (Aトンネル)

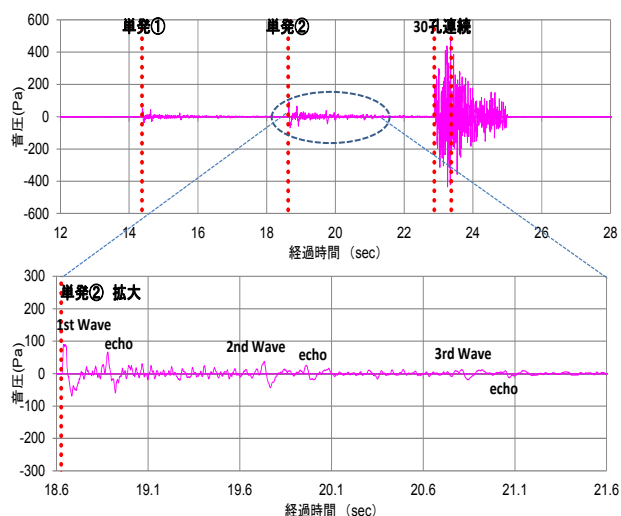


図-9 収録した波形 (Aトンネル)

(3) フィッティング波形の重ね合せから得られた知見

秒時間隔をパラメータ(7,17,30,42ms)として20孔連続して単発波を重ね合せた結果を図-11に、また、この図より波形を時間積分して総和を求めた結果を図-12に示す。これらより、

- ① 秒時間隔を縮めると三角波に近づき、広げると矩形波に近づく。
- ② 秒時間隔を極端に縮めると時間積分の総和が急増し、秒時間隔を広げると総和はなだらかに漸増する傾向にある。

ことが分かる。このことは、波形の振幅を最小化する、すなわち時間積分の総和が最小になる最適秒時が存在する

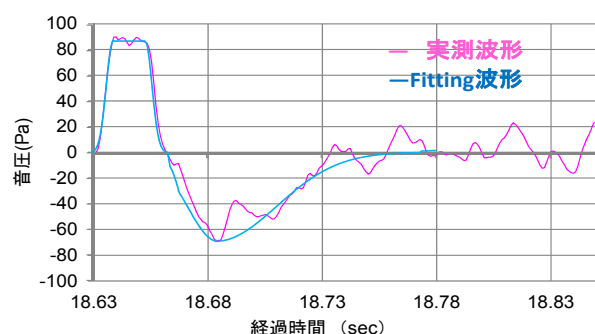


図-10 単発②初波の波形 (Aトンネル)

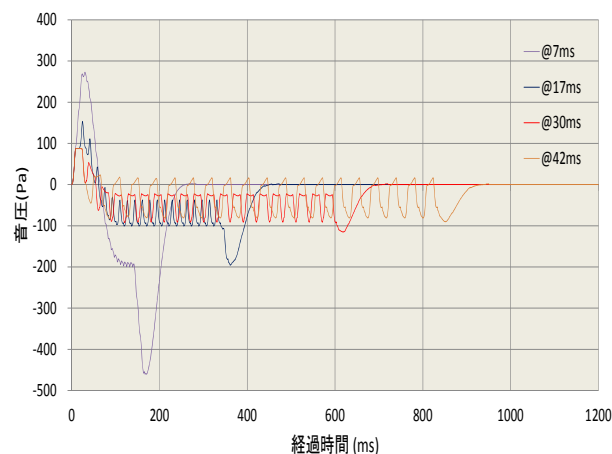


図-11 起爆秒時間隔別の重ね合せ波形の相違

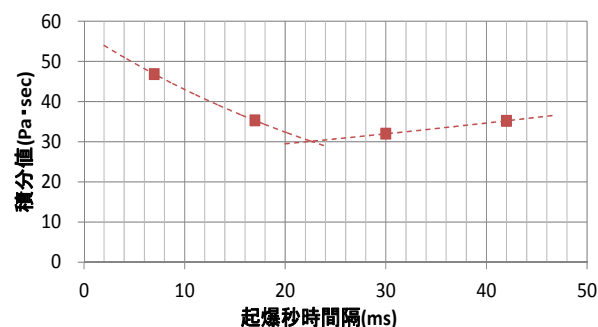


図-12 起爆秒時間隔別の波形積分値の相違

ることを示唆しており、今回の測定結果ではその値は23ms前後になっていることが予見された。そこで17msと23msの波形（図-13）について、FFTによる周波数別のパワースペクトルを求めた結果（図-14）、波形の振幅は23msの方が小さく、また防音扉が不得手とされる10～20Hzの極低周波の領域においては、23msの方がやや小さいスペクトル分布となることが確認できた。

以上のように、単発波の音圧波形を測定して秒時間隔をパラメータとして重ね合せ、その波形の時間積分の総和とパワースペクトルから、建具のがたつきが問題となる極低い低周波音の低減に対して、現場に則した最適な起爆秒時間隔を求めることが可能であると考えられる。

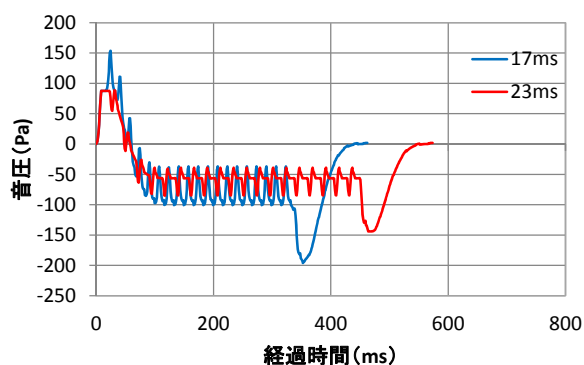


図-13 17msと23msの重ね合わせ波形

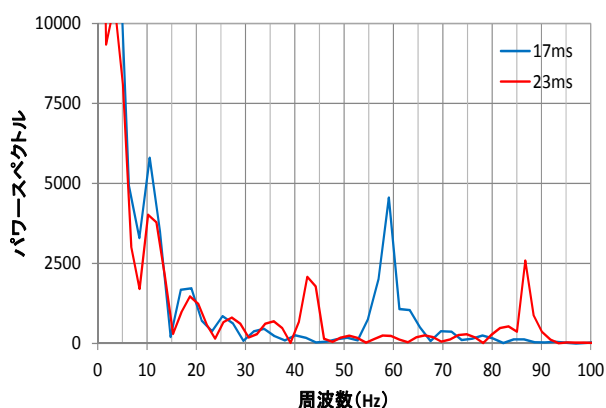


図-14 17msと23msのFFTによる周波数別パワースペクトル

6. おわりに

以上のように、高性能自在制御発破工法は建具のがたつきのような低周波音に起因する物的苦情に対しても有効な手段であり、予備試験で得られた知見を活かせば、さらに、より現場に則した起爆秒時間隔の設定が可能であることが分かった。

ただし、予備試験での知見にも示した通り、実際の発破ではn次の波形が重なり合って複雑化することもあるため、最適秒時間隔を実測で確認するには至っていない。

しかしながら、トンネル坑口部での住環境保全に対する対策は、立地条件の多様化から今後益々高度な技術を求められる一方で、坑口部の早期の発破掘削着手は、工事コストの削減と工期の短縮にも寄与すると考えられるため、本工法について、今後も引き続き検証を進める予定である。

参考文献

- 1) 北村義宜,手塚康成,岩野圭太,佐野雄紀,田中満：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.
- 2) 環境省：低周波音問題対応のための「評価指針」、低周波音問題対応の手引書（平成16年6月）,pp.1,2004.
- 3) 當麻玄大,村田澄彦,三小田昌史,石田裕之,正代知幸,湯浅友輝,奈良禎太,石田毅：発破低周波音振動低減のための最適起爆秒時差,Journal of MIJ Vol.129,pp.626～634,2013.

(2015.8.7 受付)

STUDY ON LOW-FREQUENCY NOISE CAUSED BY TUNNEL BLASTING WITH HIGH PERFORMANCE ELECTRONIC DETONATOR

Yasunari TEZUKA, Kazunori NISHIOKA, Hirokazu FUCHISAKI
and Yoshinori KITAMURA

The low-frequency noise caused by tunnel blasting is one of the annoying problems for resident surround the tunnel portal. In Minoh tunnel construction site, as rock on tunnel face become hard, the low-frequency noise by blasting with conventional “electric” detonator cause the furniture vibration and that leads to the resident complaint. Blasting test with different detonators clarified the condition to prevent furniture vibration and showed the superiority on high performance electronic detonator. Another feasibility test examined the optimum delay time on high performance electronic detonator to minimize the low-frequency noise.