

箕面トンネル西工事における環境保全対策 ～水源枯渇の可能性調査および発破に伴う住環境への影響低減～

鹿島建設(株) 正会員 ○北村 義宜
西日本高速道路(株) 正会員 勘定 茂
鹿島建設(株) 正会員 洲先 弘一

1. はじめに

箕面トンネルは新名神高速道路（高槻 JCT・IC～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。当トンネルは箕面市の観光・景勝地である箕面大滝の水源直下を通過するため、地元行政より水源枯渇の防止を強く求められただけでなく、坑口直近で民家が連坦するため、近隣住民から発破に伴う住環境への影響を可能な限り低減することも要請された。

このような環境下においてトンネル施工を円滑に進めるため、掘削に伴う水源枯渇の可能性を事前に調査できる超長尺先進ボーリングと発破に伴う住環境への影響を低減できる電子制御雷管を国内の道路トンネルに初適用した。また、更なる環境影響の低減を図るため以下に示す 2 つの新技术を開発し、実施工にて適用してその効果を確認した。

① 湧水データの連続計測技術

超長尺ボーリングの削孔と同時に切羽前方の湧水圧・湧水量を正確かつ連続的に自動で計測できるシステム（スイリモ）を開発し、湧水区間の正確な位置とその程度を推定することが可能となった。

② 最適な起爆秒時間隔の設定による住環境への影響低減技術

起爆秒時間隔が住宅地における低周波音レベルに影響を与えることを見出し、発破時における住環境への影響を低減する最適な起爆秒時間隔の設定方法を確立した。

本報文では、箕面トンネル西工事にて初適用したこれらの新技术による環境影響の低減効果について説明する。

2. 工事概要

(1) 工事諸元

箕面トンネル西工事は、大阪府箕面市北部を東西に横断する箕面トンネルの西側約 2.5km を施工するものである（図-1 参照）。本工事の工事概要と諸元を表-1 に示す。



図-1 箕面トンネル西工事の位置図

表-1 トンネル工事概要と諸元

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
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).6.5～2017(H.29).6.8
工事内容	トンネル掘削 上り線 2510m 下り線 2475m 覆工コンクリート 上り線 2577m 下り線 2524m 非常駐車帯 6 か所 避難連絡坑 3 か所

キーワード 超長尺先進ボーリング、湧水圧、電子制御雷管、低周波音、起爆秒時間隔

連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設 土木設計本部 TEL 03-6229-6754

(2) 地質概要

箕面トンネル西工事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（図-2）。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。

3. 湧水データの連続計測技術

本トンネルではおよそ 600m ごとに上下線それぞれ 3 ヲ所の非常駐車帯を設置した。このうち下り線の非常駐車帯 2 ヲ所から超長尺先進コントロールボーリング（以下、超長尺ボーリングと称す）を実施し、切羽前方の地質及び湧水状況を確認するとともに水源枯渇の可能性を予測した。ここでは、超長尺ボーリングの施工実績と湧水圧及び湧水量を削孔と同時に連続的に計測できる「スイリモ」の適用結果について紹介する。

(1) 超長尺先進ボーリングの概要

当工事では図-2 に示すように下り線に配置された非常駐車帯⑥及び⑤の拡幅部に施工基地を設け、それぞれ 700m と 600m の超長尺先進ボーリングを実施した。なお 2 回の超長尺ボーリングでは箕面大滝の水源直下を通過するため、超長尺先進ボーリングにより取得したデータに基づき、水源枯渇の可能性を調査した。

(2) 超長尺ボーリングを構成する機材

超長尺ボーリングを構成する主な機材を図-3 に示す。ボーリングマシンのほかに運転制御を行う制御ユニット、削孔方向をコントロールする孔曲り計測モニター、最大 14.7MPa の高水圧を生み出す送水ポンプ、削孔水を回収してスライムと清水に分離する水槽及びマッドスクリーン等で構成される。

ロッドの先端に取り付けた削孔ツールはトリコンビット、ダウンホールモータ及び孔曲り計測ユニットで構成される。送水ポンプから送られた高圧水がダウンホールモータ内に設けられたらせん状の水路を通過する際にトルクが生まれ、先端のトリコンビットが回転することで岩盤を切削する。掘削機の回転をロッドに伝える場合と比べて、深度増によるロッド重量及び摩擦の増加による掘進能力の低下が生じにくく、日進 50m/day 以上（2方作業）が実現できるように工夫されている。またこれらの後部に設置した孔曲り計測ユニットにて方位角度や傾斜角度等を制御している。

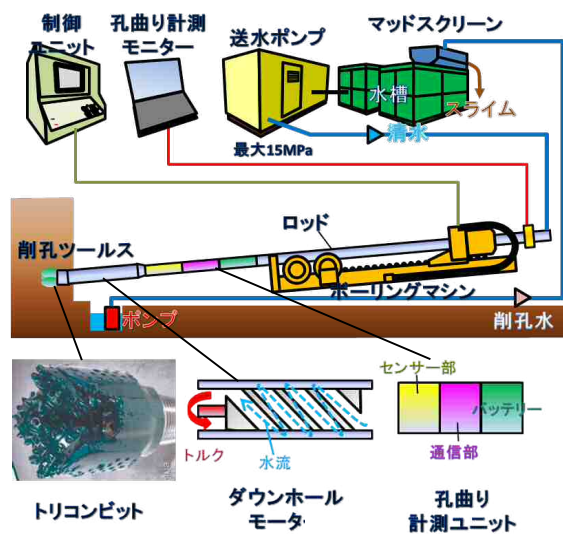


図-3 超長尺ボーリングの構成機材

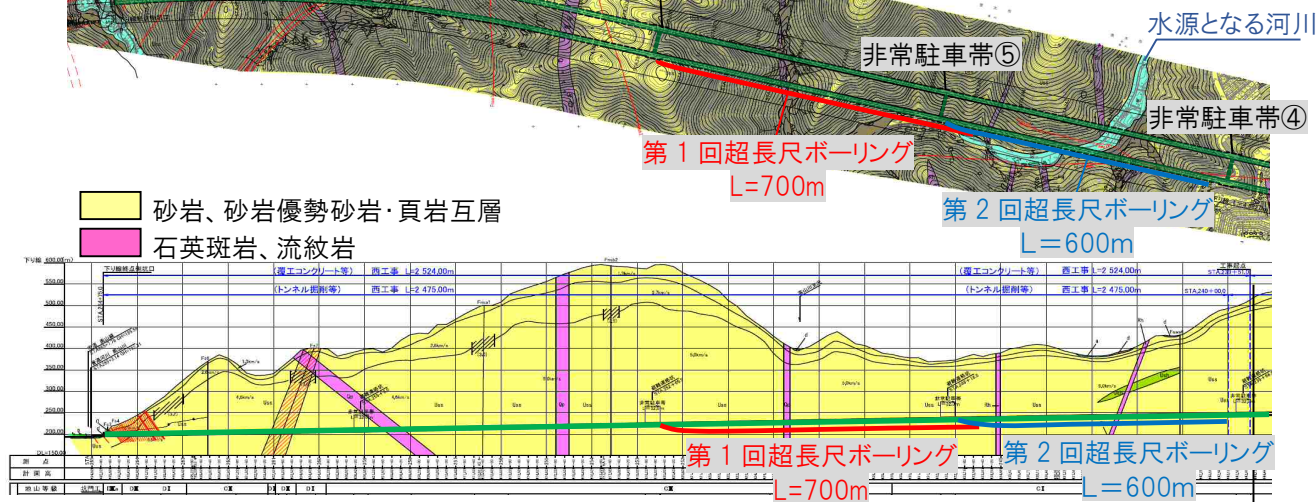


図-2 超長尺ボーリングの施工位置

(3) 湧水データの連続計測技術(スイリモ)の概要

超長尺ボーリングは、コントロールボーリングを行いながら確実に 500m以上の深度を削孔できることに主眼を置いた削孔システムとなっているが、これまで同システムの湧水に関する情報は、口元で断続的かつアナログ的にデータを取得する程度であり、湧水区間の正確な湧水圧・湧水量データを把握することは困難であった。そこで切羽前方の湧水区間における湧水圧・湧水量を削孔時に正確かつ連続的に計測できるシステム「スイリモ（水（すい）リサーチ・モニター）」を開発した（図-4）。本システムは以下の2つの計測技術を組み合わせたものである。

a) 先端水圧部の測定

ボーリング長が長くなった場合、口元での湧水圧測定では、削孔距離による圧力損失や削孔区間に存在する複数の湧水区間により、先端の正確な湧水圧が測定できなかった。そこでボーリングマシン先端部に電源内蔵型水圧計ユニットを追加設置し、削孔中の先端部の湧水圧を計測できるようにした。これにより、ロッドと計測システムの入れ替えやパッカーを設置する手間も無く、複数の湧水区間の位置や湧水の程度を精度良く把握することが可能となった。

b) 口元湧水量の自動計測

これまで作業員がバケツ等で一定量の湧水が溜まる時間を手動計測するアナログな方法に代わり、口元に電磁流量計を設置することで、削孔深度に伴う湧水量を自動かつ連続的に計測することが可能となった。

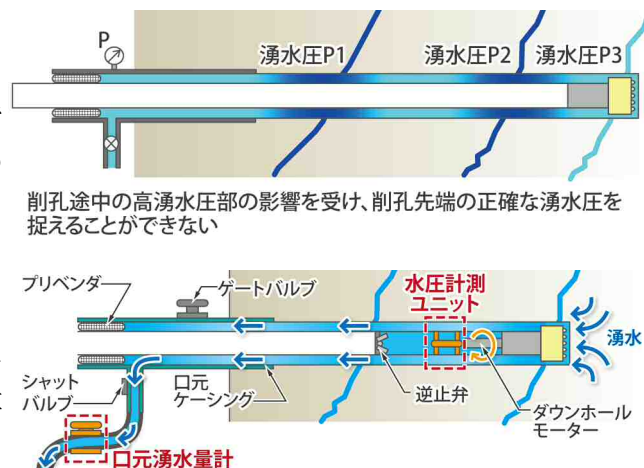


図-4 スイリモの概要図

(4) スイリモによる湧水量・湧水圧の計測結果

第1回の超長尺ボーリングにてスイリモにより計測した湧水圧および湧水量データと掘削エネルギーの推移をそれぞれ削孔深度毎に整理したものを図-5に示す。なお、ボーリング孔の崩壊を防ぐため、削孔深度 280m まで掘削した後、保孔のためのケーシングを挿入した。削孔深度 280m 付近における著しい湧水量の低下は、ケーシングの挿入による通水断面の減少によるものである。

超長尺ボーリングとそれに適用したスイリモでの計測の結果、図中の①～③に示す区間では、湧水圧もしくは湧水量の上昇が確認されるとともに、削孔エネルギーが低下する傾向が確認できる。特に、③の区間では著しく脆弱な岩盤が出現したため、孔崩れが頻繁に発生して削

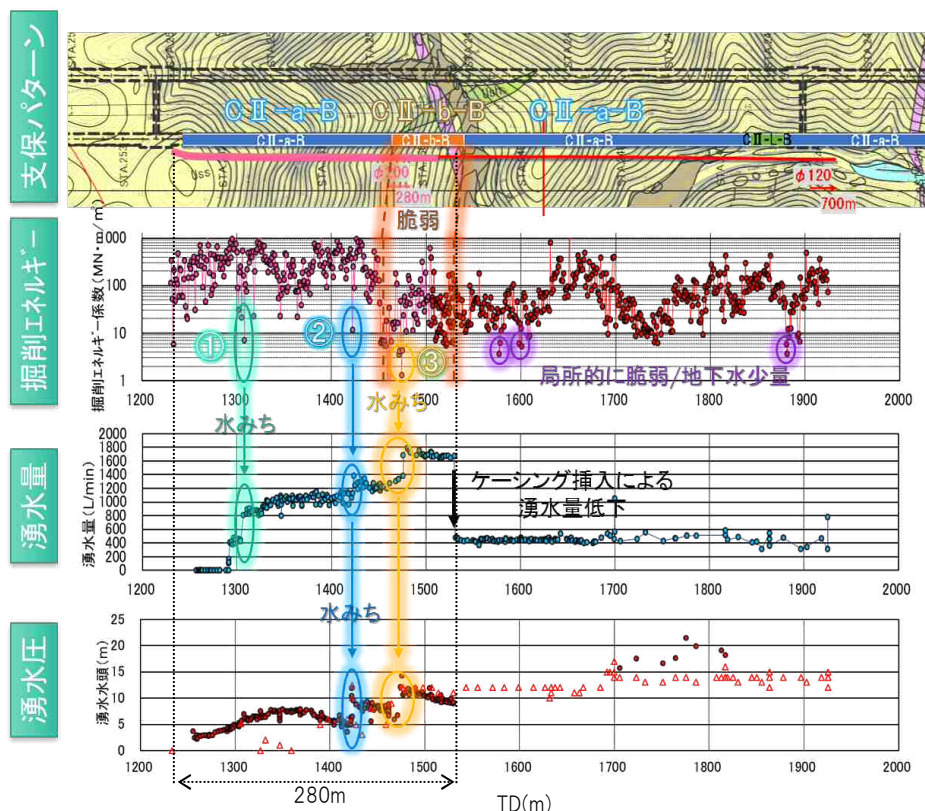


図-5 スイリモによる湧水量・湧水圧の計測事例

孔に難渋したが、同区間の削孔エネルギーが顕著に低下していることから、地質の硬軟と削孔エネルギーに相関があることも分かった。

これらの計測結果をもとに、同区間の下り線掘削時には、切羽観察や計測データを注視しながら掘削管理を行った。実際の切羽掘削時に確認された地質は、いずれの懸念箇所も亀裂の発達や軟質な岩質が確認され、相対的には他区間より脆弱な地山であった。さらに、①、③区間では掘削時に切羽から湧水が確認されたことから、スイリモによる湧水量や湧水圧の計測結果が実際の水利状況とも合致していることが検証できた。

(5) 水源枯渇の可能性判定

第2回の超長尺ボーリングでは箕面大滝の水源直下を通過したが、図-6に示すように湧水量の急激な増加は確認されなかったことから、トンネル掘削による水源枯渇の可能性は低いと判断した。また図-7に示すように、トンネル掘削期間を通して水源の流量は減少せず、

河川の枯渇も生じることはなかった。

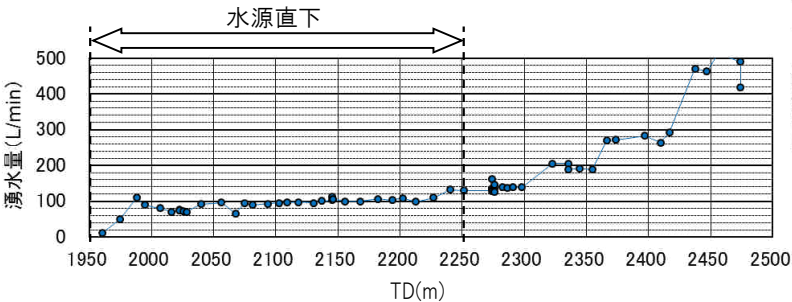


図-6 水源直下における超長尺ボーリングの湧水量

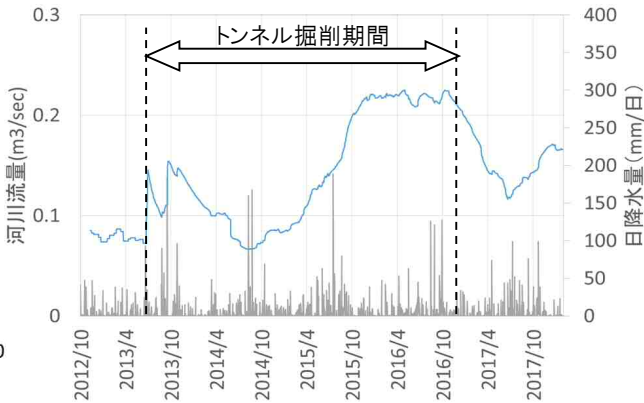


図-7 河川流量の経時変化

4. 最適な起爆秒時間隔の設定による住環境への影響低減技術

本工事は図-8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と騒音・低周波音がもたらす住宅地への環境影響を極限まで低減する必要があった。このため高精度秒時電子雷管を用いた制御発破により坑口に隣接する住宅地に対する発破振動・発破騒音の抑制を図りながら掘削を進めた。ここでは、高精度秒時電子雷管の概要と低周波音に起因する住環境への影響低減方法について説明する。

(1) 高精度秒時電子雷管の特徴

箕面トンネル西工事で使用した高精度秒時電子雷管（図-9参照）の特徴を表-2に示す。この雷管を用いることで斉発薬量を1孔あたりの薬量にまで完全に分離することが可能となる。



図-9 高精度秒時電子雷管の構造

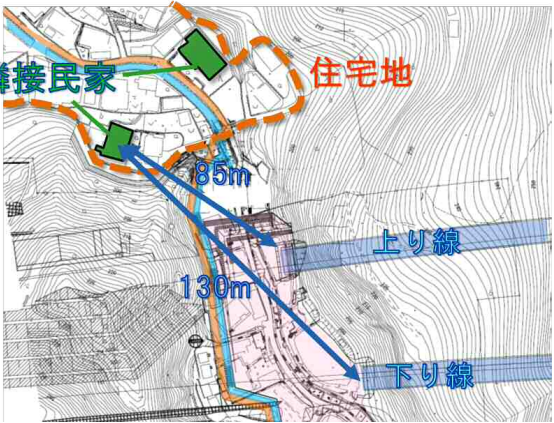


図-8 トンネル坑口と住宅地の位置関係

表-2 高精度秒時電子雷管の特徴

起爆秒時	1ms 刻みで0～20s までの起爆秒時を任意に設定可能
最大段発数	500 段
秒時精度	設定起爆秒時±0.01%
秒時差/発破順序	専用スキャナにより雷管固有のIDを読み取ることで、任意の秒時差、発破順序の設定が可能
結線作業	雷管脚線端末のプラスチック製コネクタをハーネスワイヤーに挟み込むことにより結線作業が完了
起爆信号	専用発破器からの信号のみに反応 迷走電流、静電気による誤爆なし

(2) 起爆秒時間隔と低周波音レベルの低減

秒時間隔を一律 17ms として発破した際に坑内で計測した音圧レベルをスペクトル解析した結果を図-10 に示す。この結果より、秒時間隔 17ms の逆数である 59Hz ($\div 1000\text{ms}/17\text{ms}$) の音圧レベルが卓越していることが確認できる。

ここで、防音設備による周波数別の減音効果を調べるために図-11 に示す位置にて発破を行い、周波数別の低周波音音圧レベルを観測点 A～D で計測した。なお、観測点 A～B 間には 2 枚の防音扉、観測点 C～D 間には防音壁が介在している。

観測点 A と B の差分により防音扉による周波数別の減音効果を、観測点 C と D の差分により防音壁による周波数別の減音効果を算出できる。図-12 と図-13 から防音扉は 6.3 ～40Hz、防音壁は 20～40Hz の周波数域で減音効果が得られにくいことが判明した。

防音扉や防音壁から高い減音効果を得るためには、図-14 に示すように防音設備固有の減音効果が得られにくい周波数帯を避ける必要があるが、高精度秒時電子雷管により適切な起爆秒時間隔を設定することで、上述した周波数帯を回避できることが分かった。当工事で設置した防音設備は卓越周波数を 6.3Hz 以下または 40Hz 以上とする必要があるが、近隣住民に対するヒアリングの結果、卓越周波数を 6.3Hz 以下とする場合は発破継続時間が長くなり、心理的な不快感が増幅されることが分かったため、卓越周波数を 40Hz 以上となるように秒時間隔を 25ms 以下とするのが望ましいと判断した。

(3) 低周波音による近隣住宅の建具がたつきに関する考察

本工事では段発電気雷管(DS 雷管)を用いて発破しても地盤の変位速度が 0.03kine 以下の完全な無感レベルとなる距離まで高精度秒時電子雷管の使用を継続した。これ以降は段発電気雷管を用いて掘進したが、爆薬の使用量が増加したことにより、近隣住宅の建具ががたつくとの苦情が寄せられた。このため、段発電気雷管と高精度秒時電子雷管を用いた発破を行い、このときに発生する低周波音を比較して、建具ががたつく要因を検証した。

a) がたつきを調査した住宅と発破条件

上下線にて段発電気雷管と高精度秒時電子雷管による発破を行い、図-15 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。

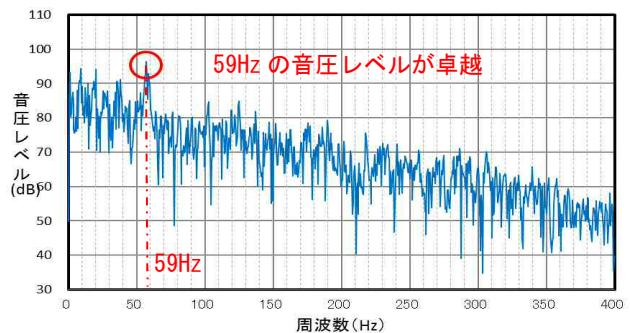


図-10 音圧レベルのスペクトル解析結果
(秒時間隔 17ms とした際の計測結果)

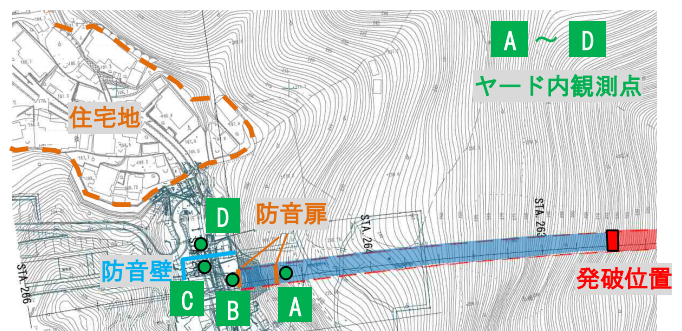


図-11 発破位置と低周波音の観測点



図-12 防音扉による周波数別減音量
(観測点 A-観測点 B)

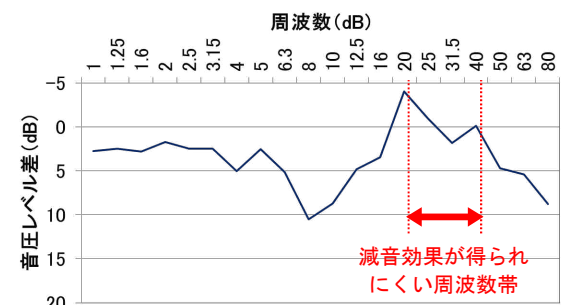


図-13 防音壁による周波数別減音量
(観測点 C-観測点 D)

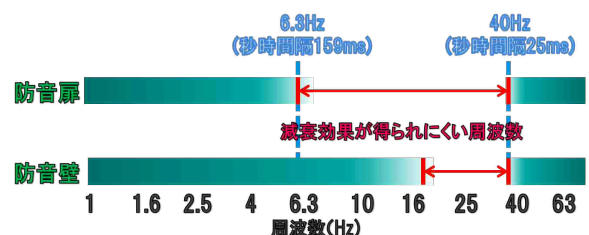


図-14 防音設備による減音効果が得られにくい周波数帯

b) 建具がたつきの調査結果

図-15 に示す位置で表-3 に示す諸元にて発破した際に、調査対象家屋の建具ががたつくかどうかを調査した。この結果、表-4 に示すように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、高精度秒時電子雷管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が、これは坑口から調査対象住宅までの距離が上り線よりも大きく、かつ下り線の坑口が上り線よりも奥まった位置にあるためと考えられる。

c) 低周波音の計測結果と建具がたつきの原因

調査対象住宅の庭地にて周波数別の低周波音レベルを計測した。上り線の発破時に計測した結果を図-16 に、下り線の発破時に計測した結果を図-17 にそれぞれ示す。なお、これらの図には参考のため、低周波音問題対応の手引書¹⁾に示される物的苦情に関する参照値（以下、環境省参照値と称する）も示している。

高精度秒時電子雷管は段発電気雷管と比較して低周波音圧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、物的苦情に関する環境省参照値も下回ることが分かった。また、上り線にて段発電気雷管を用いて発破した際には、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（図-16 参照）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（図-17 参照）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推定した。また、上り線で用いる雷管を高精度秒時電子雷管に変更して掘削したところ、建具のがたつきが発生しなくなった。

(3) 段発電気雷管と高精度秒時電子雷管による低周波音特性の違い

a) 音圧レベルがピークとなる周波数

本工事では発破時の低周波音による近隣住宅の建具ががたつきを抑制するため、高精度秒時電子雷管を継続して使用した。また、およそ100m掘進するごとに段発電気雷管を用いた試験発破を実施し、住宅地に伝播する低周波音の特性が高精度秒時電子雷管の使用時とどのように異なるかについて検証を行った。

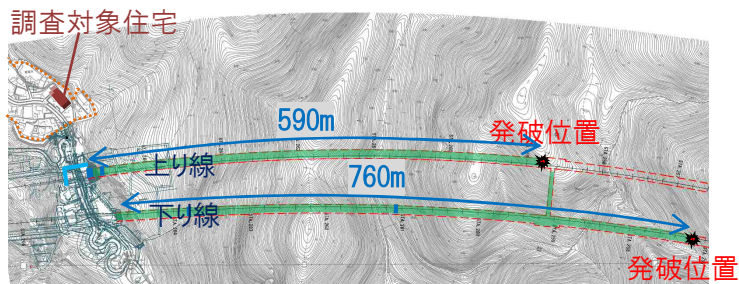


図-15 発破位置とがたつき調査対象家屋

表-3 発破諸元(建具のがたつき検証時)

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	高精度秒時電子雷管	71.0kg
4回目	下り線	756m	段発電気雷管	75.3kg
5回目		757m	高精度秒時電子雷管	38.4kg

表-4 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		高精度秒時電子雷管	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		高精度秒時電子雷管	がたつかない

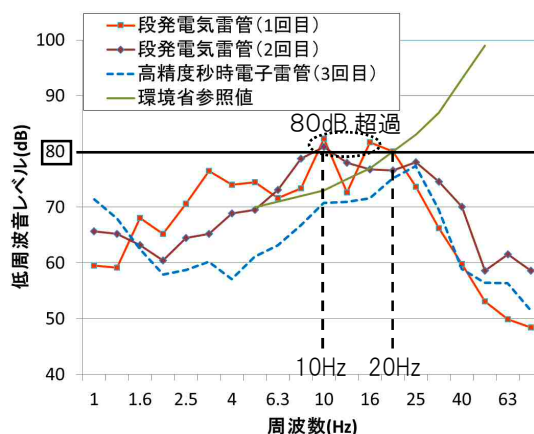


図-16 上り線発破時の低周波音圧レベル

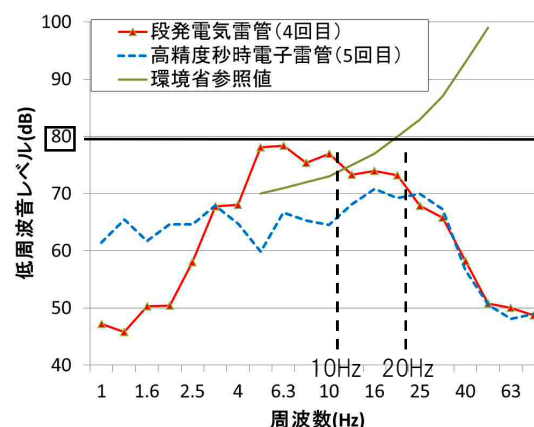


図-17 下り線発破時の低周波音圧レベル

図-18と図-19に上り線にて段発電気雷管と高精度秒時電子雷管を用いて発破した際に発生した周波数別の低周波音圧レベルを調査対象住宅の庭地にて計測した結果を示す。

図-18 の平均値より段発電気雷管の音圧レベルは 4Hz にてピークが現れることが分かる。これは、段発電気雷管の秒時間隔が 250ms であるため、 $1s/250ms=4Hz$ における音圧が最大となったものと考えられる。一方、高精度秒時電子雷管の秒時間隔は 17ms に設定して発破を継続したが、図-19 の平均値に示すように 4Hz から 16Hz の領域はおおむね一定の音圧レベルを示しており、明瞭なピークは現れないことが分かった。

b) 距離減衰特性と低周波音レベルの差

低周波音レベルの大きさは一般に以下の船津式²⁾で表される。定点で観測する場合は総装薬量 W と坑外距離 R に支配され、坑口から発破位置までの距離（坑内距離）に依存しないとされている。

$$L_c = A + 7\log(W) - 20\log(R) + \Delta L \quad \text{式 (1)}$$

L_c : 低周波音レベル (dB)

A : 雷管固有の設定値 (dB)

W : 総装薬量 (kg)

R : 坑外距離 (m)

ΔL : 減衰補正量 (dB)

図-20 は坑口から発破位置までの距離に応じた低周波音レベル（平坦特性）を雷管別に示している。なお総装薬量の平均値は段発電気雷管で 80kg、高精度秒時電子雷管で 76kg とおおむね同等である。

同図より、トンネルの進捗に応じた音圧レベルの低下は確認できないことから、坑内距離による減衰は生じにくいことが裏付けられる。また、低周波音レベル（平坦特性）の平均値は段発電気雷管で 94dB、高精度秒時電子雷管で 86dB となっていることから、高精度秒時電子雷管の使用により低周波音レベルを 8dB 程度低減できることも分かった。

5. おわりに

箕面トンネル西工事では、地元行政より求められた箕面大滝の水源保全と近隣住民から求められた発破時の住環境保全が工事を円滑に進めるための最重要課題であった。このため、超長尺先進ボーリングや電子制御雷管などの新技術の積極的な活用にとどまらず、環境影響の抑制効果を最大限に高めるための技術開発に取り組むことで、当該トンネル特有の厳しい環境保全要求を克服できた。本報告が環境課題の解決が求められるトンネル工事の参考となれば幸甚である。

参考文献

- 1) 環境管理局大気生活環境室., 低周波音問題対応の手引書, pp. 9~10, 平成 16 年 6 月
- 2) 日本火薬工業会, あんな発破 こんな発破 発破事例集, pp. 34, 平成 14 年 3 月

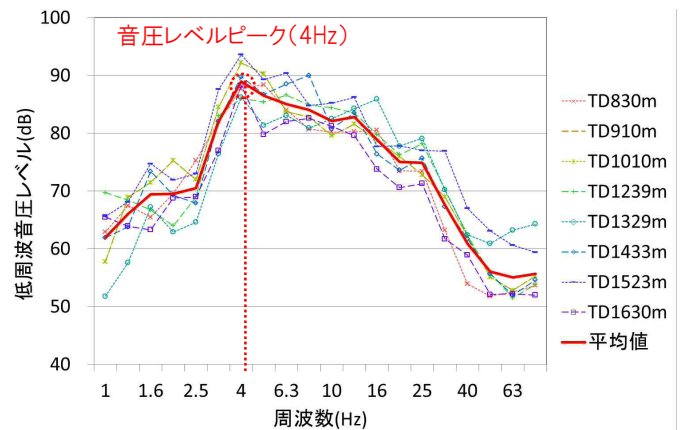


図-18 段発電気雷管の使用時の低周波音圧レベル

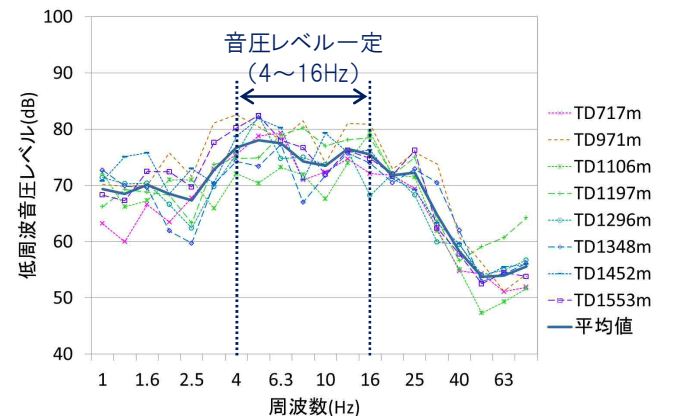


図-19 高精度秒時電子雷管使用時の低周波音圧レベル

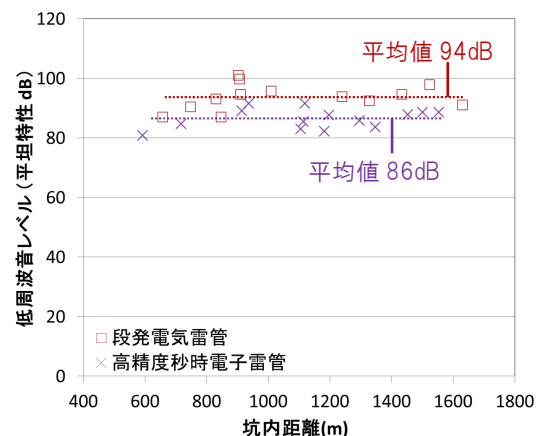


図-20 雷管別の坑内距離と低周波音圧レベル（平坦特性）