

高精度電子雷管とICTの活用による制御発破

犬塚 隆明¹・手塚 康成²・岩野 圭太³
土岐 浩之⁴・佐々木 栄治⁵・橋本 基⁶

¹正会員 鹿島建設株式会社 機械部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)
E-mail: inuzukat@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)
E-mail: tezuka-yasunari@kajima.com

³正会員 鹿島建設株式会社 機械部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)
E-mail: iwanokeita@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設株式会社 白井地区道路工事事務所 (〒028-8311 岩手県下閉伊郡普代村白井77-96)
E-mail: doki@kajima.com

⁵正会員 鹿島建設株式会社 白井地区道路工事事務所 (〒028-8311 岩手県下閉伊郡普代村白井77-96)
E-mail: sasaki@kajima.com

⁶正会員 鹿島建設株式会社 白井地区道路工事事務所 (〒028-8311 岩手県下閉伊郡普代村白井77-96)
E-mail: hashimmo@kajima.com

白井トンネルは、岩手県の震災復興のリーディングプロジェクトであり、早期供用が望まれるため、コンピュータジャンボを主軸とした工程の短縮に取り組んでいる。トンネル延長2,059mのうち約270mの制御発破の区間においては、コンピュータジャンボの活用とともに、高精度電子雷管、最新の遠隔型発破振動計測システムを適用し、発破振動の低減と工程短縮の両立を図った。具体的には、コンピュータジャンボの穿孔情報、電子雷管の起爆順序、発破振動の波形から振動値の高い孔を特定し、孔数や薬量の修正を行った。また、振動波形の自己相関係数を求め、振動を最小とする最適な電子雷管の秒時差の検討を行った。このような発破条件の修正を継続的に日常サイクルで行い、制御発破区間を最適な発破（進行長）で掘進した結果、通常発破と遜色ない掘進速度で制御区間を突破することができた。

Key Words : computer jumbo, control blasting, electronic detonator, delay time

1. はじめに

山岳トンネルの発破工法は他工法と比べて効率的であるが、トンネル周辺に民家などが存在する場合、発破に伴う振動や騒音を低減した掘削を必要とする。防音扉など発生後に対策可能な騒音と異なり、振動は切羽での発生源で抑制する以外に有効な対策がないため、各火薬メーカーの提唱している発破振動推定式¹⁾に基づき、1発破あたりの進行長、装薬量を控えたり、昼方のみの施工に留めることが一般的である。そのため、制御発破区間の掘進速度の低下による工程遅延が懸念される。本現場では、高精度電子雷管、遠隔型の発破振動計測システムを適用し、コンピュータジャンボと組合せて、発破振動の低減と工程短縮を両立させる最適な発破条件の検討を行い、実践した結果、通常区間と同等の掘進速度で制御区間の掘削を完了することができた。

2. 現場概要

白井トンネルは、トンネル延長2,059m、掘削断面108m²の長大トンネルであり、震災復興のリーディングプロジェクトである三陸沿岸道路の一部である（表-1）。本トンネルは、早期供用に向けてコンピュータジャンボを導入し、工程の短縮を図っている。

本トンネルの地質は、中世代後期白亜紀の花崗閃緑岩が全線に分布しており、弾性波速度は、トンネル位置で

表-1 白井トンネル工事諸元

工事名	国道45号白井地区道路工事
発注者	国土交通省 東北地方整備局
工事場所	岩手県下閉伊郡普代村～野田村～久慈市
トンネル延長	2,059m
掘削断面積	108m ²

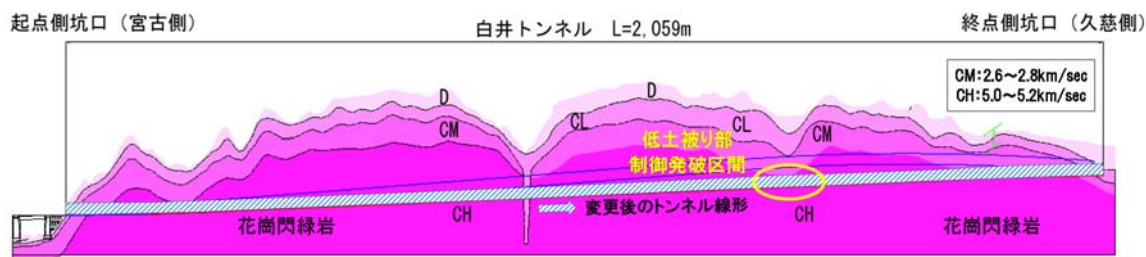


図-1 低土被り部の制御発破区間（民家との最小離隔距離約46m）

2.6～2.8km/sec, 5.0～5.2km/secと中硬岩以上であるため（図-1）、全線発破掘削の計画である。そのため、トンネル直上に民家や工場、構造物（鉄塔）の存在する低土被り部において、発破振動による影響が懸念されていた。そのほかトンネル掘削に起因する井戸水の枯渇も懸念されていたこともあり、土被りを大きくする目的でトンネル縦断線形の片勾配を3%から約1.7%へ変更を行った。この結果、低土被り部の民家との最小離隔距離は34mから約46mと大きくなったが、線形変更後においても、事前検討の結果、制御発破が必要であることが分かった。

3. 制御発破区間の事前検討

(1) 事前検討

本トンネルの当初設計では、発破振動の管理値は、発破振動の周波数が50Hz以上であることから、人に対しては昼間1.3kine（85dB相当）、夜間0.2kine（70dB相当）、構造物に対しては2.0kineと設定された（表-2）。また、発破振動の予測式は $V=K \cdot W^m \cdot D^n$ （ V ：振動速度， K ：発破係数， W ：斉発薬量， D ：離隔距離）を用いて、火薬メーカーの提唱する係数（ $m=2/3$, $n=-2$ ）にて発破振動の予測を行った。K値も同じく火薬メーカーの提案する $K=700$ （芯抜き相当）を用いて、各管理値を満たす離隔距離と斉発薬量の関係を求めた（図-2）。低土被り部（最小離隔距離46m）では、夜間の管理値0.2kine以内に収まる斉発薬量は約0.5kgとなり、夜間発破においては、進行長が制限される結果となった。

(2) 試験発破

K値、および振動速度と振動レベルの関係式（管理値）の見直しを目的として試験発破を行った。試験発破のレイアウトを図-3に、発破諸元を表-3に示す。なお、振動速度と振動レベルの関係は、 $VL=20\log V + \alpha$ （ VL ：振動レベル， V ：振動速度）の式が提案されており、事前検討の段階では $\alpha=83$ が用いられ、振動レベルから換算した振動速度の値（夜間：70dB→0.2kine）が管理値となっている。

表-4に示す試験発破の結果、振動速度予測式のK値は

表-2 発破振動の管理目標値（当初設計）

対象	項目	振動（周波数）	
		10～50Hz	50Hz
人（dB）	昼間	79	85（1.3kine）
	夜間	64	70（0.2kine）
構造物（kine）	強度の明確な構造物	2.5	5.0
	一般構造物（民家）	1.0	2.0
	重要な構造物	0.5	1.0

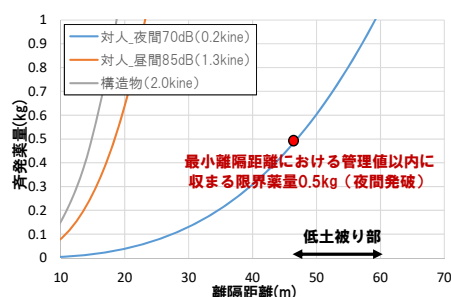


図-2 管理値を満たす限界斉発薬量（K=700）



図-3 計測点とトンネル線形の平面図

表-3 試験発破の諸元

発破試験	孔数（孔）	総薬量（kg）	斉発薬量（kg）
case1	108	125.4	1.2
case2	114	166.8	1.8
case3	114	154.4	1.6
case4	114	135.0	1.4

表-4 試験発破によるK値の見直し

発破試験	振動速度(kine)					平均K値
	M3	M4	M5	M6	M7	
case1	0.29	0.11	0.15	0.08	0.08	2,913
case2	0.26	0.10	0.15	0.08	0.07	2,200
case3	0.28	0.11	0.20	0.13	0.08	2,624
case4	0.26	0.09	0.20	0.13	0.07	2,559
						2,574

2,574となり、当初設計の700より大きくなった。これは、地表面まで岩盤が良好で振動を伝播しやすいためであると考えられる。また、振動レベル式の α は79となり、再計算した結果、昼の管理値85dB相当は2.0kine、夜の管理値70dBは0.35kineとなった。この条件下で、昼夜の管理値を満たす離隔距離と斉発薬量の関係のプロット図を図-4に示す。低土被り部（離隔距離46m）において、夜間の管理値0.35kine以内に収まる斉発薬量は約0.15kgとなった。本トンネルでは紙巻含水爆薬（1本あたり0.2kg）を使用しているため、民家に近接する低土被り部では、発破が困難であることが予想された。

4. 情報化施工による制御発破

低土被り部の制御発破区間において、コンピュータジャンボの活用とともに、高精度電子雷管、最新の発破振動計測システムを適用し、これらから得られたデータをもとに、発破パターンなどの発破条件を見直す情報化施工を行った（図-5）。

(1) ICTの活用

a) 穿孔・発破

穿孔はコンピュータジャンボを採用していたため、計画どおりの穿孔が可能のほか、穿孔した実績をデータとして記録することができる。高精度電子雷管eDevIIは、設定した起爆秒時に対して高精度に起爆し、個々の雷管に秒時を設定できるため、1孔1斉発による振動低減が可能²⁾³⁾である。

b) 振動計測

計測には、遠隔型の発破振動計測システム NCVIB を適用した。本システムは、携帯電話回線を使った地理GISと連動型の発破振動速度の遠隔測定・分析システムである（図-6）。オートトリガで自動計測した後、クラウドサーバへ計測データが自動転送されるため、担当者が計測器を都度回収する必要はない上、K値などの発破の分析機能を備えているため、専門家が常駐しなくとも、振動データを把握することができる。本システムの導入により、リアルタイムに振動分析ができるため、1日に数回行う発破に対し、日常サイクルの中で発破パターンや秒時差の改善を図ることができる。

(2) 発破パターンの修正

発破パターンの見直しは、図-7に示すように穿孔データと電子雷管の起爆順序、振動波形の比較により、振動値の高い孔位置を特定し、孔数や抵抗線などの修正や、芯抜きや踏前、払い孔などの発破部位ごとに薬量の修正を行った。

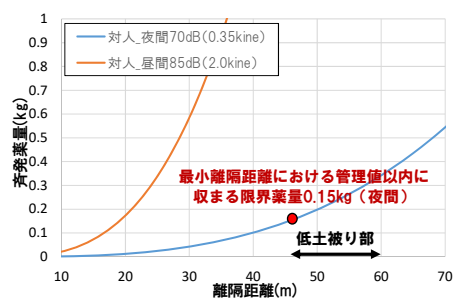


図-4 試験発破後の限界斉発薬量の見直し (K=2,574)

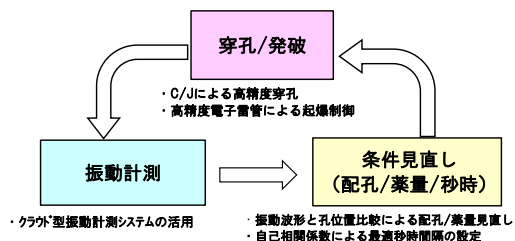


図-5 制御発破における発破条件の見直しサイクル



図-6 遠隔型の発破振動計測システム (NCVIB)

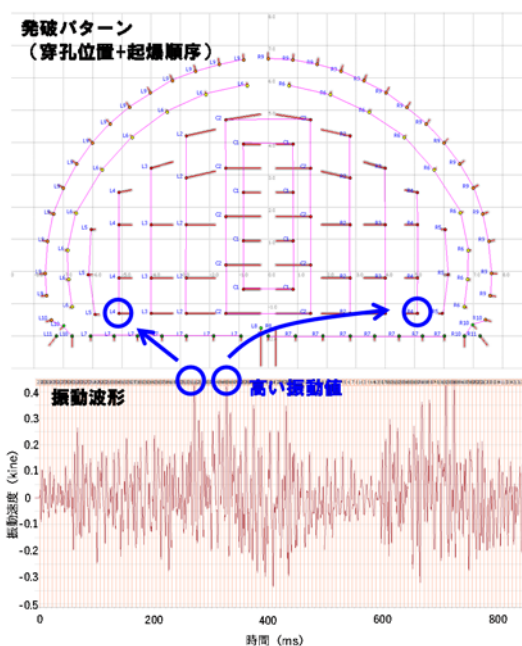


図-7 振動波形と孔位置の比較による発破パターン修正

図-8にM5、M6（測点の位置は図-3参照）における振動値および孔数と薬量の変遷を示す。実際の施工では、住民とヒアリングを重ねた結果、管理目標値を0.5kineに設定した。制御発破の初期は、MS/DS雷管を併用し、斉発薬量を抑えて施工を進めたが、TD1,380付近で、振動値の増加を受けて、1孔1斉発のeDev IIに切替えた。eDev IIの適用により、振動の要因である斉発薬量を低減させながらも、進行長、総薬量を保った発破掘削を行うことができた。TD1,420通過以降の振動値増加に対しては、孔数を増やし、1孔あたりの斉発薬量を更に低減させて振動を抑制した。ここで、一時的な管理値の超過がみられるが、eDev IIによる発破は、発破継続時間を短縮でき、既往の研究⁴⁾でも示されている振動体感の低減効果があることや、振動の卓越周波数が人が感じにくい高周波帯であることから（表-5）、苦情なく掘削を進めることができた。

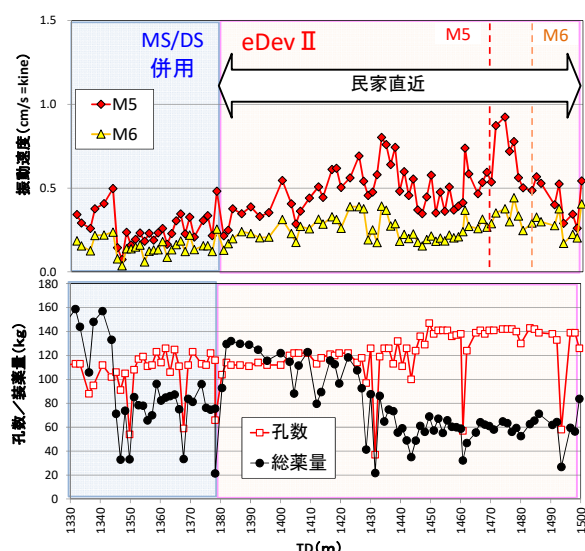


図-8 制御発破区間の振動と発破条件の変遷

(3) 最適秒時差の検討

その後、TD1,440付近から、斉発薬量を限界の0.4kgまで低減したが、M5で振動の増加が再び見受けられたため、電子雷管の最適秒時差の検討を行った。最適秒時差の検討では、図-9に示すように、起爆した孔同士が干渉しない程度に秒時間隔を広げ、1孔の起爆による振動波形（＝単発波形）を取得し、その単発波形の自己相関係数を求めた。自己相関係数が最小となる秒時差が単発波形が重なり合った際に最も打ち消し合い、段発波形の振動を最小とする最適な秒時差である。最適な秒時差を検討した結果、それまで設定していた起爆秒時差7msは発破振動の面で不利であることが分かり、2番目の極小値である13msを採用することとした。計算上では1番目の極小値である4msが最も振動を抑えられる秒時差となるが、これまでの経験上、極めて短い秒時差は重なり合って振動値を増幅させる傾向にあることから、4msを避けて13msに設定した。秒時差を7msから13msへ変更した結果（図-10）、振動値を平均30%低減することができた。

表-5 eDev II の特性（一例）

雷管	孔数	発破継続時間 (s)	卓越周波数 (Hz)
MS/DS	112孔	5.3	110
eDev II	112孔	0.8 (7ms × 111)	143 (1,000/7ms)

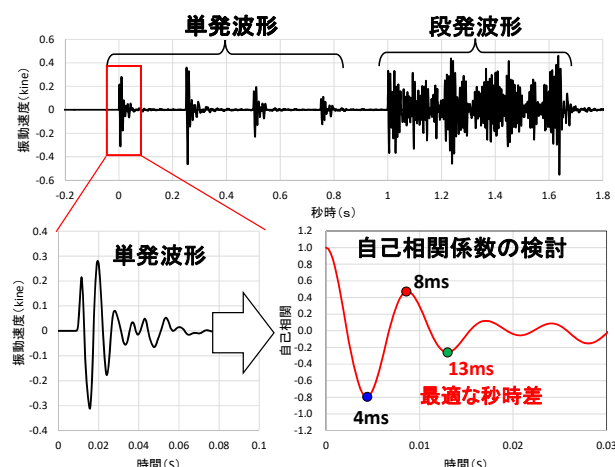


図-9 電子雷管の最適な起爆秒時差の検討

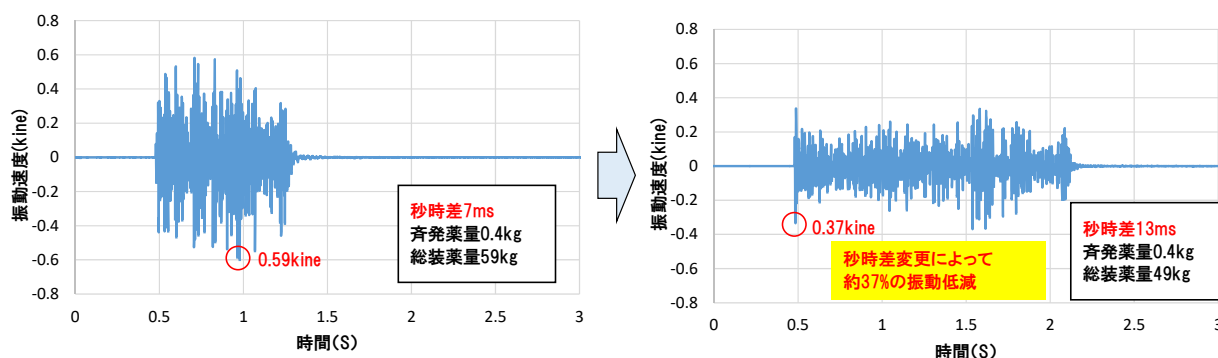


図-10 eDev II の秒時差変更による振動低減の一例（測点 M5）

5. おわりに

事前検討では、夜間の発破が困難であることから、掘進速度を落とさざる得ないことが予測された。しかしながら、本現場では、コンピュータジャンボや電子雷管、遠隔型の計測システムの最新鋭の技術を駆使し、都度発破条件の見直しを行った結果、発破振動を低減しつつ最適な発破（進行長）で昼夜の発破を継続することができた。その結果、制御発破区間を月進 122m と通常発破の区間と遜色ない掘進速度で掘削でき、工程短縮に大きく貢献した。一時的に自主管理値を超えることもあったが、eDev II の発破振動継続時間の短縮による体感的な負荷を軽減したことや継続的な住民へのヒアリングなどコミュニケーションを図ったことにより、住民の理解を得られ、苦情が寄せられることはなかった。

本トンネルで検討した最適な発破条件は、トンネルの施工条件や地質条件によって異なるが、今回行った雷管

の起爆順序と振動波形の比較による発破パターンの修正や自己相関係数による最適な秒時差の検討といった発破条件の見直しは、制御発破を行う上で、有効な検討方法である。今後の制御発破に活かしていく所存である。

参考文献

- 1) 日本火薬工業会：発破事例集，p.3，2002.
- 2) 犬塚ほか：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，pp.1-3，2015.
- 3) 西川ほか：高精度電子雷管を用いたトンネル制御発破による近接鉄道に対する影響検討，土木学会第 70 回年次学術講演会講演論文集，VI-747，pp.1,493-1,494，2015.
- 4) 公害防止技術と法規編集委員会：新・公害防止の技術と法規 2010 騒音・振動編，p.181，2010.

(2018.8.10 受付)

APPLICATION OF CONTROL BLASTING TECHNIQUE WITH ELECTRONIC DETONATOR AND ICT

Takaaki INUZUKA, Yasunari TEZUKA, Keita IWANO,
Hiroyuki DOKI, Eiji SASAKI and Motoi HASHIMOTO

Blasting is quite economical and efficient method compared to others such as mechanical method. However, in the case of residential area near the tunnel, charge amount is often required to be reduced due to its vibration and noise. Therefore, it is quite difficult to keep excavation advanced rate as usual.

On the other hand, in recent years, due to the advanced blasting technique such as computer jumbo and high precision electronic detonator, tunnel blasting vibration can be controlled. In addition to that, new vibration measurement system is also introduced and makes it possible to monitor the blasting vibration and simultaneously analyze it. These advanced techniques are applied to the tunnel site where its excavation schedule is quite tight, and the blasting conditions such as the number of holes, charge amount, and delay time of the electronic detonator is optimized. As a result, the control blasting area is excavated as same excavation advanced rate of normal blasting area.