

既往水路の部分拡幅における硬岩トンネル掘削

野間 達也¹・小島 秋²・井上 正広²

¹正会員 株式会社フジタ建設本部土木ECトンネルシールド部（〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-25-2）
E-mail:tnoma@fujita.co.jp

²株式会社フジタ九州支店土木工事部（〒812-8568福岡市博多区下川端町1-1）

既存トンネルの部分拡幅工事において、機械掘削では対応できない硬岩地山に対して発破併用掘削を採用し、既存トンネルへの発破振動による損傷を防ぐために、段当たりの薬量を変化させた試験施工を実施したところ、1孔1段の発破は格段に発生振動が低くなることが明らかとなった。また、DS電気雷管および秒時差を現場で設定できる電子雷管による1孔1段、非火薬破砕剤、さらにブレーカによる掘削を併用することにより既設トンネルに損傷を与えることなく掘削を終了した。

Key Words : *partial enlargement, controle blasting, electronic detonator*

1. はじめに

大分川ダムは、大分川水系七瀬川の上流約21kmの位置に多目的ダムとして建設するもので、大分川の総合開発の一環をなすものであり、洪水調節、河川環境の保全、水道用水の取水を目的としている。

大分川ダム締切り堤工事は、大分川ダム本体建設工事に先立ち、上流側に河川を堰き止めるための堰を建設する工事であり、工事概要は、堤頂長135m、堤高18m、盛立数量43,000 m³の表面遮水型ロックフィルダムである。

本工事には、この堰構築工事の他、既存の15m²の仮排水路トンネルを、トンネル坑口から約360m入った地点において、放流設備操作室を構築するために長さ42mにわたって最大85m²にトンネルを拡幅する工事を伴っている。

この拡幅トンネルは、既存水路トンネルのコンクリートを損傷させないこと、また掘削対象地山の圧縮強度が20～60MPa程度の花崗岩と予測されたため、当初設計では65kW級の自由断面掘削による掘削が計画されていた。これに対して、掘削効率を考慮して240kW級の自由断面掘削機を採用することに変更した。

しかし、掘削開始後7m程度進んだ段階で部分的に150MPaを超過するような硬質な花崗岩が出現し、240kW級の自由断面掘削機でも掘削が困難となった。このため、発注者と協議の上、拡幅部分の前後境界で振動レベルを

計測する（図-1）という条件の下に試験発破を実施し、孔あたり500gの装薬と規定し、3孔1段、2孔1段、1孔1段の試験発破を実施したところ、1孔1段であれば発破に伴う発生振動は既存コンクリートに影響を与えず、坑口付近の民家への発破騒音の影響もほとんど認められない結果が得られた。

これより、機械・発破併用掘削に変更し、発破には普通電気雷管を使用して最大20段の1孔1段で掘削を実施したが、掘削面積の増加とともに発破孔も増加し、最大80孔程度必要となった。このため、電気雷管では分割発破となるが、これは工程上の遅延の問題と、分割発破に起因する発破後の切羽に作業員が何回も近づくという安全上の課題が残った。これに対処するために、最新の電子雷管（商品名eDev II）を採用し、分割発破とせず1回で発破が終了する電子雷管による制御発破に変更した。

さらに、終点側2.7mまで接近した段階では、発破では振動の影響が考えられるため非火薬破砕剤（商品名NRC）を採用して発生振動を1/3以下に低減し、また最終断面では硬質部に対してはブレーカによる機械掘削で仕上げることににより既存トンネルのコンクリートにはまったく影響を与えず掘削終了となった。

本報では、この制御発破併用による既往水路トンネルの拡幅施工について示す。

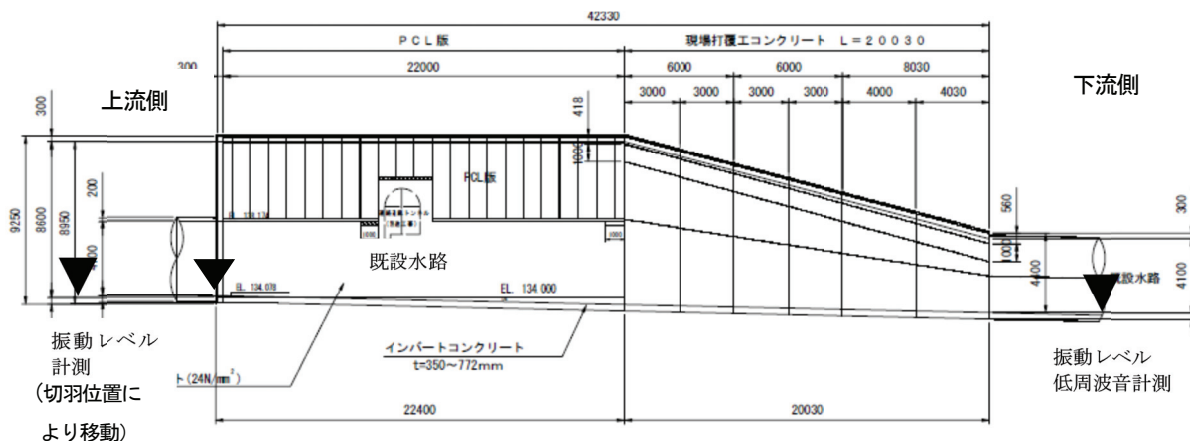


図-1 拡幅トンネルの縦断面図

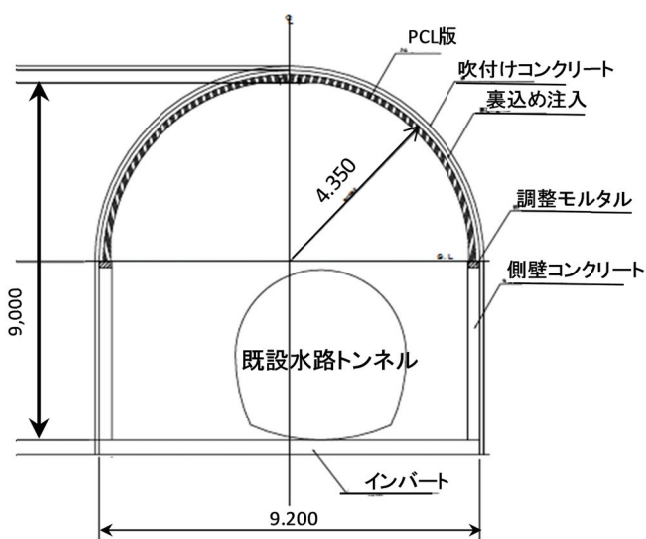


図-2 拡幅トンネルの終点側断面図

2. 拡幅トンネルの概要

図-1に今回施工した拡幅トンネルの縦断面図を、図-2に終点側の断面図を示す。

本トンネルは、既設水路トンネルの下流側坑口より約360m入った地点より掘削を開始し、長さ20mの断面拡大後、図-2の完成断面となる長さ22.4mの放流設備操作室を構築する。以後、断面を徐々に拡幅する部分を「擦り付け部」、一定となった断面を「拡幅部」と称す。

トンネルの掘削対象地山は荷尾杵花崗岩であり、CM級の岩盤、一軸圧縮強度は9.3～62.3（平均46）MPa、土被りは約65mとなっていた。

これより、当初は65kW級の自由断面掘削機を使用し、3段ベンチにより上部から掘削する計画となっていた。しかし、65kW級の自由断面掘削機で平均46MPaの花崗岩を掘削するには効率の低下が予測されたこと、検討を重ねた結果、この既設水路断面でも240kW級の自由断面掘削機を投入可能なことより、240kW級の自由断面掘削機を使用した2段ベンチによる機械掘削に変更した。

3. 掘削方式の検討

(1) 自由断面掘削機による機械掘削

前述したように、平均圧縮強度が46MPaの花崗岩であることを考慮して240kW級の自由断面掘削機を採用して掘削を開始し、当初は掘削が可能であった。しかし7m程度掘削した段階で部分的に圧縮強度が150MPaを超過するような硬質な岩盤が出現し、特に硬質な部分に対しては1日のビットの損耗量が50個を超過するような事態となった。さらに11m進んだ時点では、自由断面掘削機のみでは掘削が不可能となった。このため、硬質部の岩盤に対しては発破を併用することを検討するため、次に示すような試験発破を実施した。

(2) 電気雷管を使用した発破併用掘削

a) 試験発破

発破を採用するに当たり、既存の水路トンネルへの発破に伴う損傷や、坑口から約300m離隔した位置にある人家への騒音の影響を考慮する必要がある。

これより、当初は下流側の拡幅開始地点より5m手前で振動レベルと低周波音を、民家近傍で騒音を計測した。低周波音を同時に測定したのは、低周波音の到達とともに測定データが拡散することが想定されたためである。

さらに計測結果、および上流側へ発破点が移動することを考慮して途中より上流側でも振動レベルを計測した。

振動管理値は2kineとし、最大振動レベルより既設トンネルとの境界における変位速度を逆算して2kine以下（下流側の計測位置は境界より5m手前であるため目安として最大振動レベル83dB以下）となることを確認した。

試験発破の装薬量は、発破振動は段当たりの装薬量に依存すること、1掘進長を1.2mとすること考慮し、孔当たりの装薬量を0.5kgと規定して、3孔1段（段当たり1.5kg）、2孔1段（段当たり1.0kg）、1孔1段（段当たり0.5kg）、最大10段の発破とした。これより、各段当たり装薬量に対する振動レベル・民家における騒音を比較して、最適な発破パターンを決定することにした。

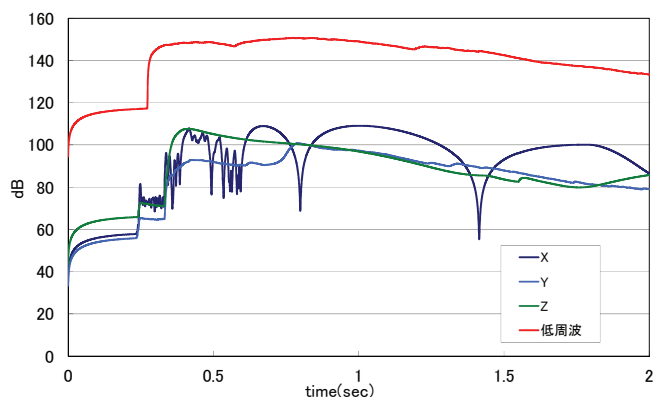


図-3 3孔1段 (1.5kg) の振動レベル測定結果

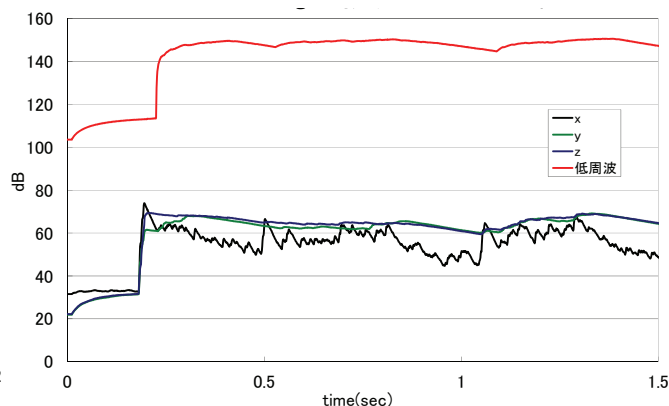


図-4 2孔1段 (1.0kg) の振動レベル測定結果

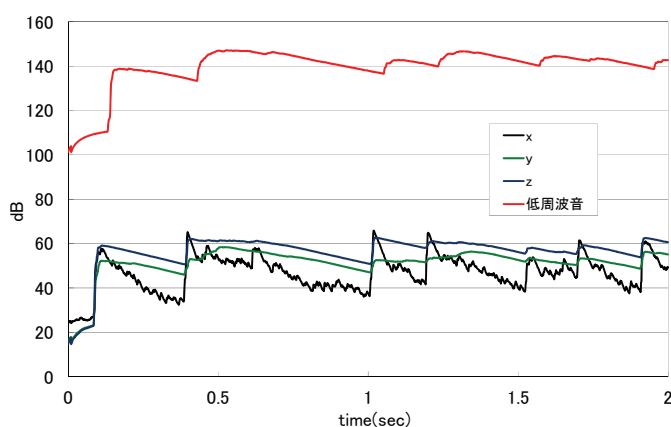


図-5 1孔1段 (0.5kg) の振動レベル測定結果

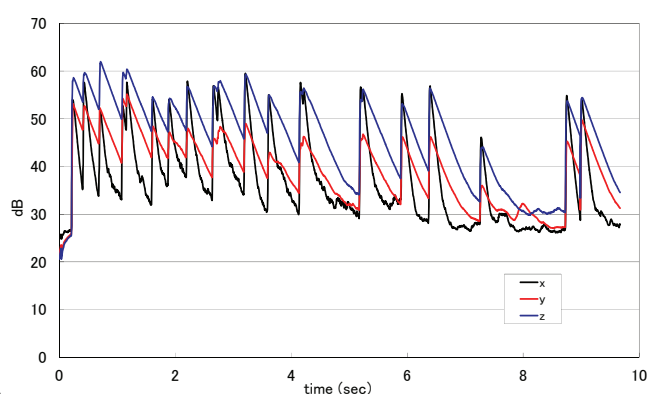


図-6 切羽奥 (上流側) における1孔1段 (0.5kg) の振動レベル測定結果例 (DS雷管20段)

ここで、試験施工は同一の切羽を使用している。

図-3～図-5に振動レベル・低周波音測定結果を示す。

図-3に示されている3孔1段 (段当たり1.5kg) では、瞬発雷管の波形と考えられる81.5dBの初期波動の後、低周波音の到来とともに大きく乱れ、最大約110dBの結果となっているが、これは初期波動と大きく値が異なり、低周波音の到来とともに測定器自身が振動してしまった結果と考えられ、実際の発破による地盤振動とは異なる。

図-4に示されている2孔1段 (段当たり1.0kg) では、瞬発雷管の波形と考えられる74dBが最大値となっており、低周波音が到来してもそれ以上の振動値とはならなかったが、段発を明瞭に示すような波形の低減は見られず、低周波音による影響によりそれ以降の振動値は不確定なものとなっている。

図-5に示されている1孔1段 (段当たり0.5kg) の波形は、瞬発雷管の波形以降低周波音が到来しても、振動の低減がみられ、ピーク値は60dB前後と格段に低い結果となった。ただし、1孔1段としても低周波音の影響が皆無とはいえないため、この結果より切羽手前における振動値は、瞬発雷管による初動を振動値として用いた。

民家における騒音測定では、3孔1段で74、2孔1段で69、1孔1段で63dBであった。

これより、3孔1段でも振動値の目安である83dB以下ではあったものの、1孔1段による振動低減効果は明瞭であり、また民家に対する騒音低減効果もあわせて、以降は発破を使用する場合は孔当たり装薬量を0.5kgとする1孔1段発破を採用することにした。

b) DS雷管による本施工

試験発破では最大10段までとしたが、1孔1段としたことよりも以降の電気雷管の発破ではDS雷管の最大の段数である20段発破を採用した。また、切羽手前の振動計測のみではなく、進行方向である切羽奥でも振動の計測が重要となる。これより、これ以降は両方で振動レベル計測を実施した。切羽奥における振動レベル測定例を図-6に示す。図に示されているように段発による波形の分離が明瞭に示されており、切羽奥では低周波音の影響が少ないものと考えられる。

なお、これらの結果は、今回の施工の場合既設トンネルの空間が自由面となるため心抜き発破は不要であり、すべて払い発破となった点にも一因がある。

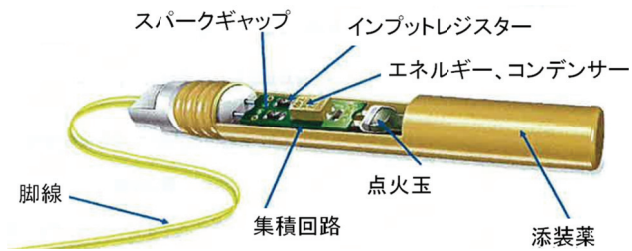


図-7 新型電子雷管の模式図²⁾

(3) 新型電子雷管を使用した発破併用掘削

以上述べたように、擦り付け部途中から発破併用掘削としてDS電気雷管を使用していたが、掘削断面が大きくなるにつれ硬質部の面積も増加し、最大80孔程度の発破孔が必要となった。

このような孔数を最大20段のDS電気雷管を用いて1孔1段で発破する場合、分割発破とせざるを得ないが、分割発破では掘削途中の切羽に作業員が何回も近づくという安全上の課題、またサイクルタイムの低下という施工上の課題が残る。

これより、電子雷管を導入して数十段の装薬孔を1回の発破により施工した。

電子雷管は従来より制御発破の1手段として用いられてきたが、これまでの電子雷管は標準的に出荷される秒時差は30msに固定されている。ここで、坑外への騒音・低周波音の観点で考えると、トンネルにおける発破騒音についての一般的な予想式ではMS雷管の使用ではDS雷管よりも大きな騒音を仮定していること、明かり発破ではDS雷管よりMS雷管の方が低周波音が大きくなった事例があることが示されている¹⁾。このため、MS雷管の25msに近い秒時差の30msでは坑外への騒音・低周波音の増加が危惧された。これより、電子雷管としては最新の電子雷管を採用した。

a) 新型電子雷管の概要

図-7に模式図を示す新型電子雷管（商品名eDev II、オリカ社製）は、以下の特徴がある²⁾。

- ・各雷管ごとに任意の秒時設定がその場で可能である。
- ・秒時設定は、0から10 000msまで1ms単位で設定することができる。
- ・設定される秒時の精度は、 $\pm 0.1\%$ である。
- ・静電気および落雷による誘導電流などの高い電圧から雷管内の集積回路を保護する安全装置が取り付けされている。
- ・点火用のコンデンサーを搭載しており、発破器との通信や点火に必要なエネルギーを貯蔵する。

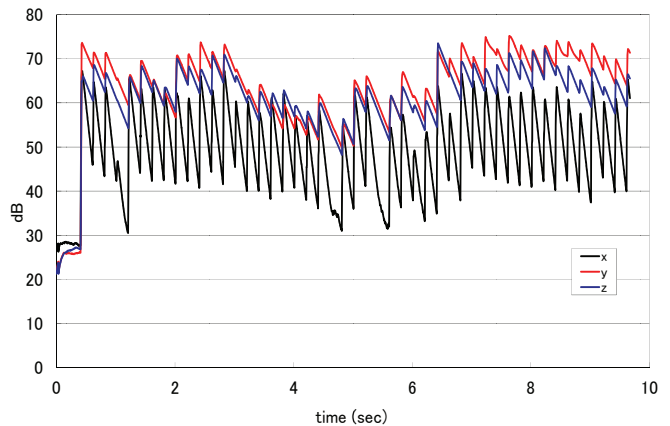


図-8 電子雷管秒時差200ms使用時の振動レベル測定結果
(切羽奥で計測)

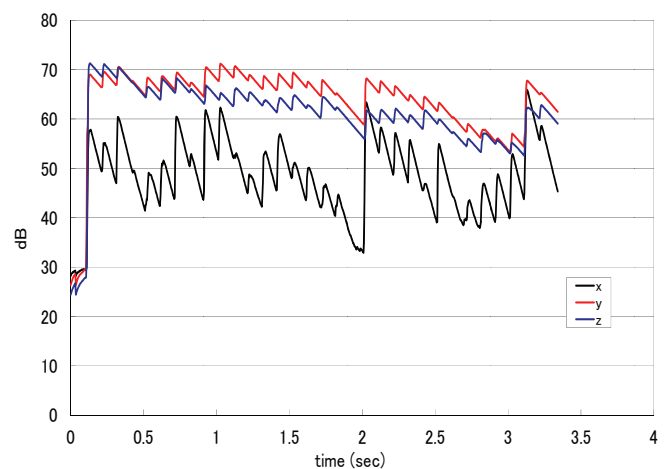


図-9 電子雷管秒時差100ms使用時の振動レベル測定結果
(切羽奥で計測)

・発破器は、最大500個の電子雷管を起爆可能である。

b) 新型電子雷管による試験施工

DS雷管の最小秒時差は250msであり、この秒時差で騒音の問題が発生しなかったことより、当初は電子雷管の秒時差を200msと設定したが、数十段の発破となると発破の継続時間が10秒近くなり、かえって環境に負荷を与えるおそれがある。これより、この半分となる100msの秒時差の設定も実施し、民家における騒音値を考慮して以降の秒時差を決定することにした。

200msと100msの試験施工時の切羽奥（上流側）における振動レベル測定結果を図-8, 9に示す。

秒時差の違いによる振動レベルの差異はほとんど見られず、また民家近辺における騒音測定結果も60dB程度と電気雷管使用時とほとんどかわらなかったため、以降は全体の発破時間の短縮が図れる100msの秒時差で施工を継続し、トンネル終点2.7mまでは発破併用掘削により施工を進めた。



カートリッジ



イニシエーター



コントローラー

図-10 非火薬破砕剤の構成

(4) 非火薬破砕剤による低振動掘削

終点側2.7mまで接近した段階では、発破では振動の影響が考えられるため非火薬破砕剤（商品名NRC）により発生振動を1/3以下に低減する工法を採用した。

a) 非火薬破砕剤の概要

非火薬破砕剤は、蒸気圧破砕工法のことを指し、国内で3種類（商品名 NRC、ガンサイザー、カルマック）が販売されているが、ここでは段発を確実に実施できるNRC（カヤクジャパン社製）を採用した。このNRCとは、テルミット反応による水蒸気圧で岩盤を破砕し、火薬に類似した破砕効果が得られる破砕方法であり、図-10に示すように発破工法における爆薬に相当するカートリッジ、雷管に相当するイニシエーター、発破器に相当するコントローラーにより構成されている。また、火薬類取締法や危険物取締法の規制は受けない。小騒音・小振動であり、破砕時の飛石や粉塵の発生はなく、破砕剤の取扱いは容易で熟練を要さず法的な取扱規制もない³⁾。

イニシエーターは秒時差25msに設定されており、40段までが一般的に市販されている。カートリッジの薬量としては、200、400、1000gのタイプがあるが、今回は400gを使用し、薬径が34mmであることから穿孔には発破孔と同様のφ45mmのビットを使用した。ただし、爆速に対応する反応速度は100～300m/sと含水爆薬の1/20以下であり、破砕効果は格段に劣るため、今回の施工では孔間隔を60cmとした。また、低振動とはいえ既設トンネルへの影響を考慮し、1孔1段としたため、分割破砕となった。

b) 施工結果

写真-1に既設トンネル周囲を破砕終了後の上部への結線状況を示す。60cm間隔を採用したこともあり、写真



写真-1 非火薬破砕剤の破砕・結線状況

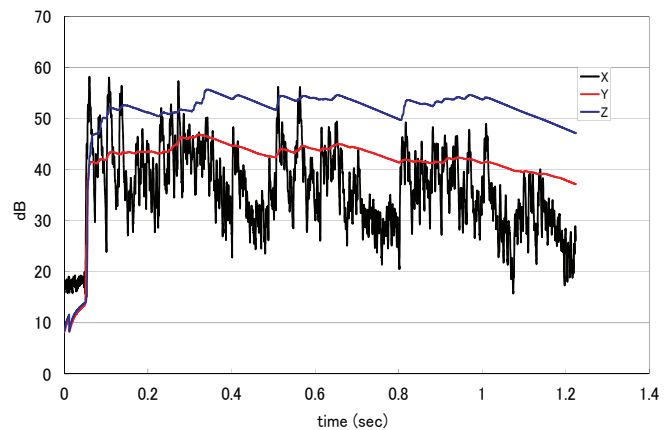


図-11 非火薬破砕剤の振動レベル

に示されているとおり良好な破砕状況を得ている。なお進行長は1.2mとしている。

図-11に破砕時の振動レベル計測結果を示す。ここでは、トンネル終点に近くなったため、測定位置は終点から15m後ろとしたが振動レベルとしては図程度であり、既設トンネルに影響を与えることはなかった。

なお、非火薬破砕剤はこの断面のみ使用し、残りの1.5mについては自由断面掘削機とブレイカーの組み合わせにより全て機械掘削としてトンネル掘削を終了させた。

4. 覆工コンクリートについて

本トンネルは、図-1に示したように擦り付け部は徐々に断面を拡大し、拡幅部はある程度一定の断面であるがトンネル長が22mと短いことより、通常のコンクリート覆工で使用する移動式型枠（セントル）が採用できない。さらにこの拡幅断面はすべて鉄筋コンクリートとなる。このため、スプリングラインまでの側壁部は型枠により現場打ちで打設した。

表-1 中流動コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		C	W	S1	G	SP
53.1	52.2	330	175	925	879	3.8

* 混和剤は高性能減水剤を使用



写真-2 PCL版設置状況

アーチ部については擦り付け部は手前より8,6,6mに3分割して木製型枠により現場打ちとしたが、打設時の流動性の確保と材料分離をなくすためコンクリートとしては表-1に示す配合の中流動コンクリートを使用した。

拡幅部については、46枚のプレキャストコンクリートによるPCL（プレキャストライニングコンクリート）工法を採用した。プレキャストコンクリートの設置には、写真-2に示すようにスピナー方式を採用し、6日間で設置を終了した。なお、コンクリート背面は裏込め注入により充填している。

写真-3に完成したトンネルを示す。



写真-3 完成したトンネル

ろ、1孔1段の発破は格段に発生振動が低くなることが明らかとなった。

②DS電気雷管及び秒時差を現場で設定できる電子雷管による1孔1段、非火薬破碎剤、さらにブレーカによる掘削を併用することにより既設トンネルに損傷を与えることなく掘削を終了した。

③通常のトンネル掘削では計測できない切羽奥における振動レベル計測を実施した結果、段発による波形の分離が明確に示されており、切羽奥では低周波音の影響が少ないものと考えられる。

今回の電子雷管による1孔1段発破は、心抜き発破の必要性がないことから秒時差は100msと固定して実施したものの、振動・騒音に最適な秒時差はまだ分かっていないのが現状である。今後、1孔1段発破における心抜き発破を含めた最適な秒時差を求める必要がある。

5. おわりに

既設トンネルの部分拡幅において、硬質な岩盤に対して発破併用掘削を採用し、以下の結果が得られた。

①既存トンネルの部分拡幅工事において、機械掘削では対応できない硬岩地山に対して発破併用掘削を採用し、既存トンネルへの発破振動による損傷を防ぐために、段当たりの薬量を変化させた試験施工を実施したとこ

参考文献

- 1) 日本火薬工業会：あんな発破 こんな発破 発破事例集，2002.
- 2) オリカ社：eDev II カタログ
- 3) カヤクジャパン社：NRC カタログ

(2014. 9.15受付)

HARD ROCK TUNNELING FOR CROSS-SECTIONAL ENLARGEMENT OF EXISTING WATER TUNNELS

Tatsuya NOMA, Akira KOJIMA and Masahiro INOUE

In the partial widening work at existing tunnel, in order to adopt a blasting combination drilling for hard rock excavating that are not adopted by the mechanical excavation, to prevent damage due to blasting vibration to an existing tunnel, the test construction with varying doses per stage where it was carried out, the generation vibration is reduced significantly became clear that the blasting of 1 hole 1 stage. Also, the finished drilling without damaging the existing tunnel by one hole one stage by the electronic detonator that can be set in the field seconds time difference and DS electric detonator, non-explosive fracturing agent, and a combination of drilling by breaker further.