

転石群に近接するトンネルの低振動掘削

Excavation methods applied to prevent ground vibrations on the tunnel close to unstable rock groups

佐藤晶彦¹・大野和民²・山本正³・橘高豊明⁴

Akihiko Sato, Kazutami Ohno, Tadashi Yamamoto and Toyoaki Kittaka

¹ 国土交通省中部地方整備局名古屋第四国道事務所 (〒467-0847 名古屋市瑞穂区神穂町5番3号)

² 正会員 ㈱奥村組名古屋支店土木工部 (〒453-8555 名古屋市中村区太閤3丁目1-18 名古屋KSビル8F)
E-mail:kazutami.oono@okumuragumi.jp

³ ㈱奥村組名古屋支店土木工部 (〒453-8555 名古屋市中村区太閤3丁目1-18 名古屋KSビル8F)

⁴ 正会員 ㈱奥村組技術本部東京土木技術部 (〒108-8381 東京都港区芝5丁目6-1)

There were unstable rock groups direct over a tunnel portal. Those rock groups likely to fall to a present road by tunnel blasting vibration. Then, several excavation methods to reduce vibration, such as control blasting methods using electronic delay detonators, slot assisted control blasting and slot assisted non blasting excavation method, were adopted according to the distance from the unstable rock groups to the tunnel faces in approximately 110m section. As a result, excavation ended without influencing the unstable rock groups, since construction was carefully advanced while doing the vibration measurement.

Key Words : ground vibration, control blasting, slot drilling method, electronic delay detonator, non blasting tunnelling method

1. はじめに

一般国道153号は、名古屋から豊田市足助町、飯田市等を経て塩尻市に至る幹線道路である。足助第1トンネルは、国道153号の足助町を中心とする現道の幅員狭小や線形不良区間を改良し、交通の安全確保と行楽シーズンの交通渋滞解消を目的とする足助バイパス整備事業の一環として建設される延長が879mのトンネルである。

本トンネルの起点側の現道直上には、不安定な転石群があり、トンネル発破に伴う発破振動によりこれらの転石群が緩み、現道に落下する恐れがあった。そこで、転石群に近接する約110m区間では、振動を抑制するため、転石群からの離隔距離に応じて、切羽にスロットを形成しIC雷管を併用する低振動発破工法を始め種々の制御発破工法や機械掘削工法を採用し、振動計測管理を行いながら慎重に施工を進めた。その結果、転石群に影響を及ぼすことなく掘削を終了したので施工概要を報告する。

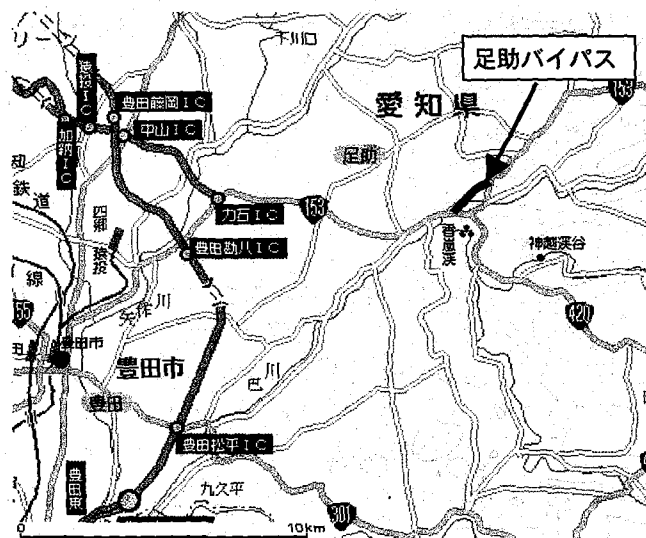


図-1 足助トンネル位置

2. 工事概要

工事名称:平成16年度153号足助第1トンネル工事
発注者:国土交通省中部地方整備局
工事場所:愛知県豊田市足助町

工 期：平成 17 年 03 月 19 日
～平成 19 年 02 月 28 日

道路規格：3 種 2 級，幅員 10.5m

工事内容：トンネル延長 879m

掘削方式 発破掘削（NATM）

掘削工法 補助ベンチ付き全断面工法，
上半先進ベンチカット工法

3. 地形，地質概要

本トンネルは，愛知県の東部に広がる三河高原の西端部，足助川と巴川の合流点付近に位置する．この付近の山地の標高は 300m 内外であるが，巴川河床の標高 100m 付近まで急斜面が続いており，特に標高 200m 付近から下は傾斜 40 度以上の著しい急斜面となっている．

当区域の山地を構成する岩石は，領家花崗岩類に属する伊奈川花崗岩である．伊奈川花崗岩は，木曾山地南部～東濃地方南部～三河地域まで分布し，中部地方の領家花崗岩類のうちもっとも広く分布する花崗岩である．

トンネル付近の地質は，中粒の花崗閃緑岩が主体であり，弾性波速度は 4.8km/s 前後で一軸圧縮強度は $100\sim150\text{MN/m}^2$ の新鮮な硬岩が分布する．トンネル中央付近と起点側から約 150m の位置に断層が認められ，走行は北東～南西方向及び北北西～南南東方向である．これは，南東の鳳来寺山麓を北東にのびて発達している中央構造線と平行する断層系及びこれらの共役断層系と考えられる．本トンネルの花崗岩中には，これらの断層と同じ方向性をもつ節理の発達が認められた．

4. 施工概要

施工は，終点側坑口から起点側坑口に向けて発破 NATM により掘削し，C 区間では補助ベンチ付き全断面工法，D 区間では上半先進ベンチカット工法による施工を行った．標準設計断面を図-2 に示す．

本トンネルの掘削に際して，終点側坑口部，中間部，起点側坑口部において，振動や騒音対策が課題となり，以下の対策工を施工したが，これらの区間以外については，地質条件も良好で地下水量も全体で 50L/min と少なく，順調に掘削することができた．

(1) 終点側坑口の近接家屋に対する振動・騒音対策

坑口付近に近接して多くの民家があり，発破振動・騒音及び吹付けプラントやずり搬出時の騒音対策が課題となった．

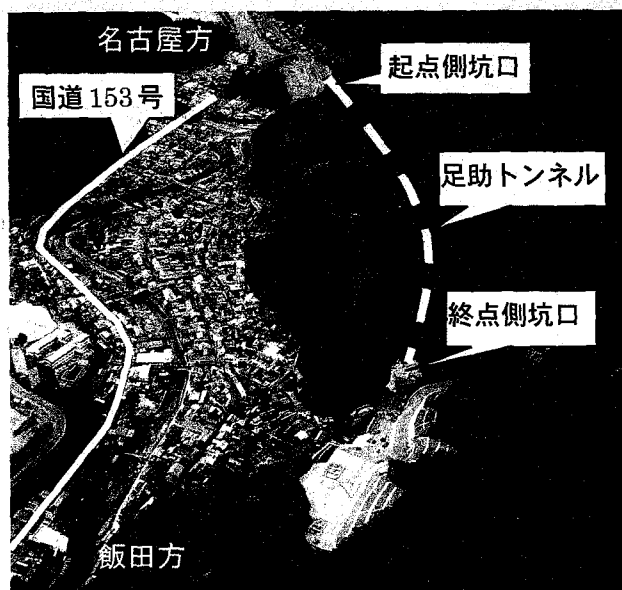


写真-1 足助町の町並みと足助トンネル

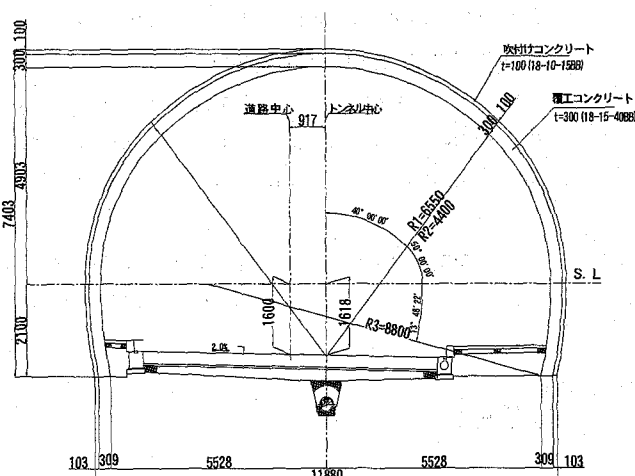


図-2 標準設計断面 (C I, C II)

そこで，施工に際して，騒音，低周波音，振動の自主管理値を定め，管理値以下となるよう対策をたて，計測管理を行った．

坑口部の仮設ヤードに設置した吹付けプラントやずり搬出時の騒音対策として，仮設ヤードの敷地境界部に高さ 3m の防音壁を設置した．

また，掘削方法として，坑口付近は 3 トン級のブレーカを用いた機械掘削，硬岩が出現した時点から 30m までは昼間のみ発破掘削を行った．坑口部に防音扉を設置してからは，発破時間を 7～22 時の間に制限する変則 2 交代による発破作業を進め，約 100 m まで進行した時点で，2 基目の防音扉を坑口から 50m 位置に設置し，それ以降は通常の昼夜施工を開始した．なお，この区間では，段当たり火薬量を低減した制御発破工法を採用した．

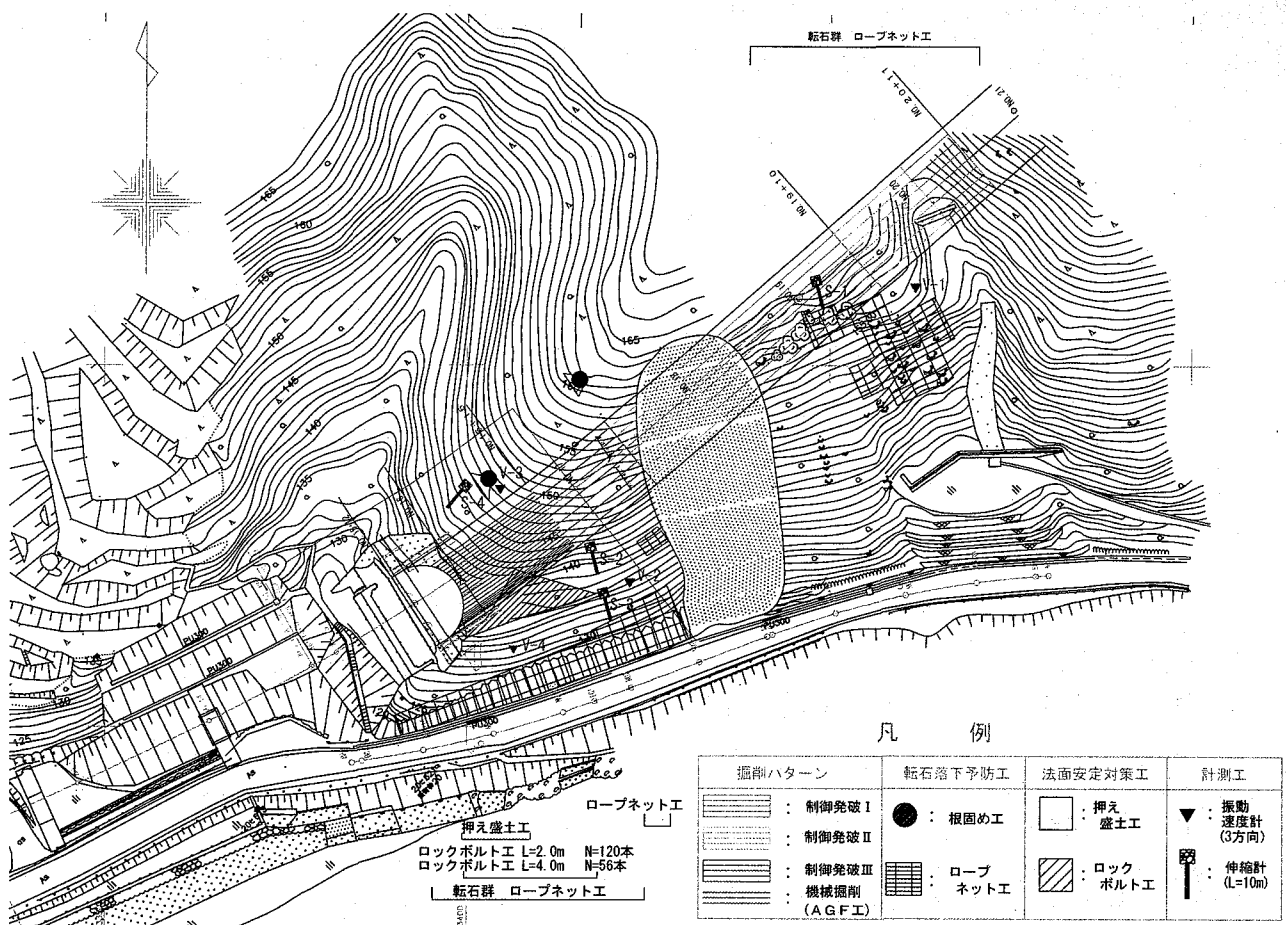


図-3 坑口付近転石防護と小土被り対策工の概要

(2) 中間地点付近の直上の火薬庫に対する発破振動対策

坑口から約 350m 奥では、土被り 36m 直上に民間の火薬庫があり、これに対して発破振動の影響を与えないよう施工する必要があった。愛知県からは、火薬の消費許可の条件として、火薬庫を中心とする 200m 区間の施工では、火薬庫内の火薬類を別の場所に保管した上で火薬庫の建物に対する振動値を 0.5kine 以下にするよう義務付けられた。

そこで、火薬庫の 150m 以上手前から振動計測を行いながら切羽を進め、火薬庫から約 120m 手前で MS 雷管と DS 雷管を併用する制御発破（以下、MS・DS 発破）に変更した。

火薬庫の直下に接近するのに伴い振動値が 0.5kine を超えそうになったため、火薬庫直下の約 34m 区間では、IC 雷管を使用する制御発破（以下 EDD 発破）を採用した。EDD 発破では、段当たり火薬量を 0.4～0.6kg として 40～108 段の多段数の制御発破を行うことにより、火薬庫直下の発破振動を 0.5kine の振動規制値以下に抑制することができた。

その後、振動計測結果を見ながら順次、MS・DS 発破、DS 発破へと移行し、火薬庫に影響を及ぼすこと

なく施工することができた。

(3) 起点側坑口付近の転石防護と小土被り対策 a) 状況と対策工の概要

起点側坑口付近は、地山斜面に転石群が点在し、直下には県道が隣接している。このため、通常の発破工法によるトンネル掘削では、地表の急崖斜面やその斜面上にある転石（群）を緩め、直下の県道の通行の安全に影響を及ぼす落石等が生じる懸念があった。

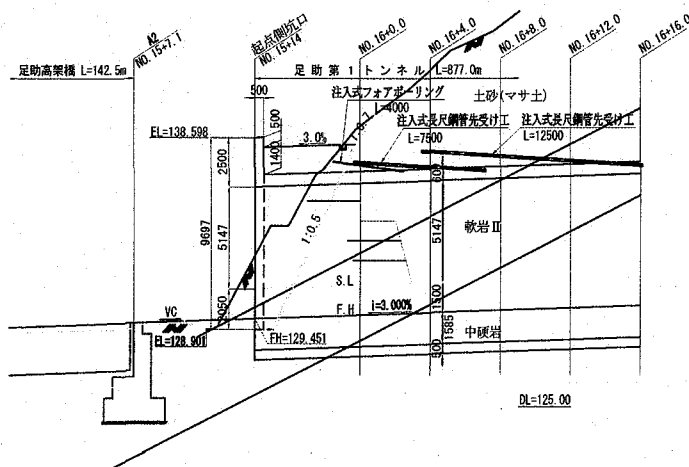
さらに坑口直近では、トンネル上半部の地山が不良（土砂、強風化岩）で土被りが 4m 以下と薄く、掘削に伴う振動の影響や切羽の崩落や地表部の陥没が懸念された。

そこで、当区間の対策工について発注者、設計者、施工者で構成される工事監理連絡会で検討した結果、隣接する県道の安全確保を最優先に考え、以下の基本方針と具体的な対策工を採用した（図-3 参照）。

b) 転石（群）の防護対策

- ① 発破振動を低減するため、IC 雷管を用いた多段発破、IC 雷管とスロットを併用する制御発破、スロットと油圧くさび割岩による機械掘削工法

側面図



No. 16+8

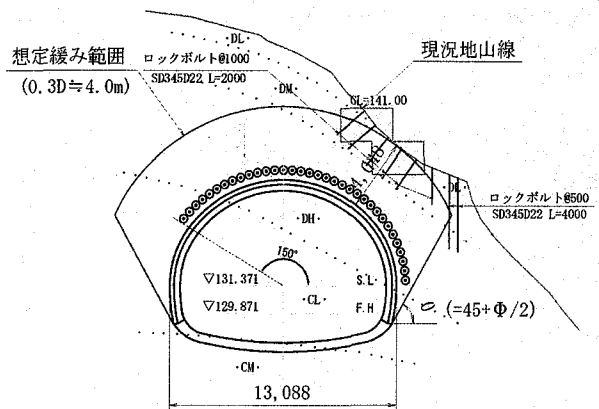


図-4 小土被り区間の防護対策と補助工法

を採用した。1) 2) 3)

- ② 前述の対策を行うことにより隣接する県道への安全確保を図ることができるが、念のため可能な限り転石を除去した。
- ③ 上記②で除去しきれない転石群について、移動抑止のためロープネット工により固定した。また、不安定岩塊については根固め工を施工した。
- ④ 発破に際し、目視観察で安全が確認できる昼間は発破時のみ県道の通行止めを行い安全確認後に解放するが、目視観察が十分できない夜間は全面通行止めを行うなど第三者被害防止のために万全の措置を講じた。

c) 小土被り区間の防護対策と補助工法

- ① この区間では、切羽の天端付近は著しく風化しているが、上半部の踏前や下半は比較的硬質の花崗岩が分布している。このため、掘削による天端付近や側方の地山の緩みを抑制するため、注入式長尺先受け工法を採用した(図-4)。
- ② 表層にはすべり面が想定されており、この部分のすべりを抑制するため、地表からロックボルトを打設した。
- ③ 川側部は土被りがきわめて薄いため、アーチゾーンの形成が困難でトンネル支保に偏圧が作用する可能性がある。このため、この部分に軽量盛土を施工した。

5. 振動抑制対策と計測管理

(1) 振動管理値の設定

転石群に対する発破振動対策のこれまでの事例を調査した結果、転石群に対する振動管理値は 1～

3kine の値が採用されている場合が多い。一方、岩盤斜面に対する振動の影響に関して Oriad の提案⁴⁾によれば、5kine 以下であれば影響はないとしている。これらを参考に当区間では、発破振動の管理上限値を 3kine に設定した。

さらに、転石群に対してロープネットによる固定等の対策工や発破時には通行止めとすることを考慮すれば、県道の通行車両に対する安全性は十分確保できると考えた。

(2) 発破計画

発破計画に際しては、設定された振動管理上限値を超えないよう、切羽と転石群との離隔距離に応じて適切な制御発破方法を選定する方針とした。制御発破方法には、雷管の段数を増やすか、または進行長を短くして斉発薬量を低減する方法と発破係数K値の低減を図る方法とに大別できる。ここでは、振動管理基準を遵守しながら経済性、施工性を考慮し、転石群に遠い方から転石群と切羽との距離に応じて以下の制御発破を計画した。

- ① 制御発破Ⅰ：MS・DS 発破 (MS 雷管と DS 雷管を併用した制御発破)
- ② 制御発破Ⅱ：EDD 発破 (IC 雷管を用いた多段数制御発破)
- ③ 制御発破Ⅲ：心抜きスロット EDD 発破 (心抜き部にスロットを形成し、IC 雷管を併用する多段数制御発破)
- ④ 制御発破Ⅳ：外周スロット EDD 発破 (トンネル外周部にスロットを形成し、IC 雷管を併用する多段数制御発破)
- ⑤ 機械掘削：SD 割岩工法 (スロットと油圧くさ

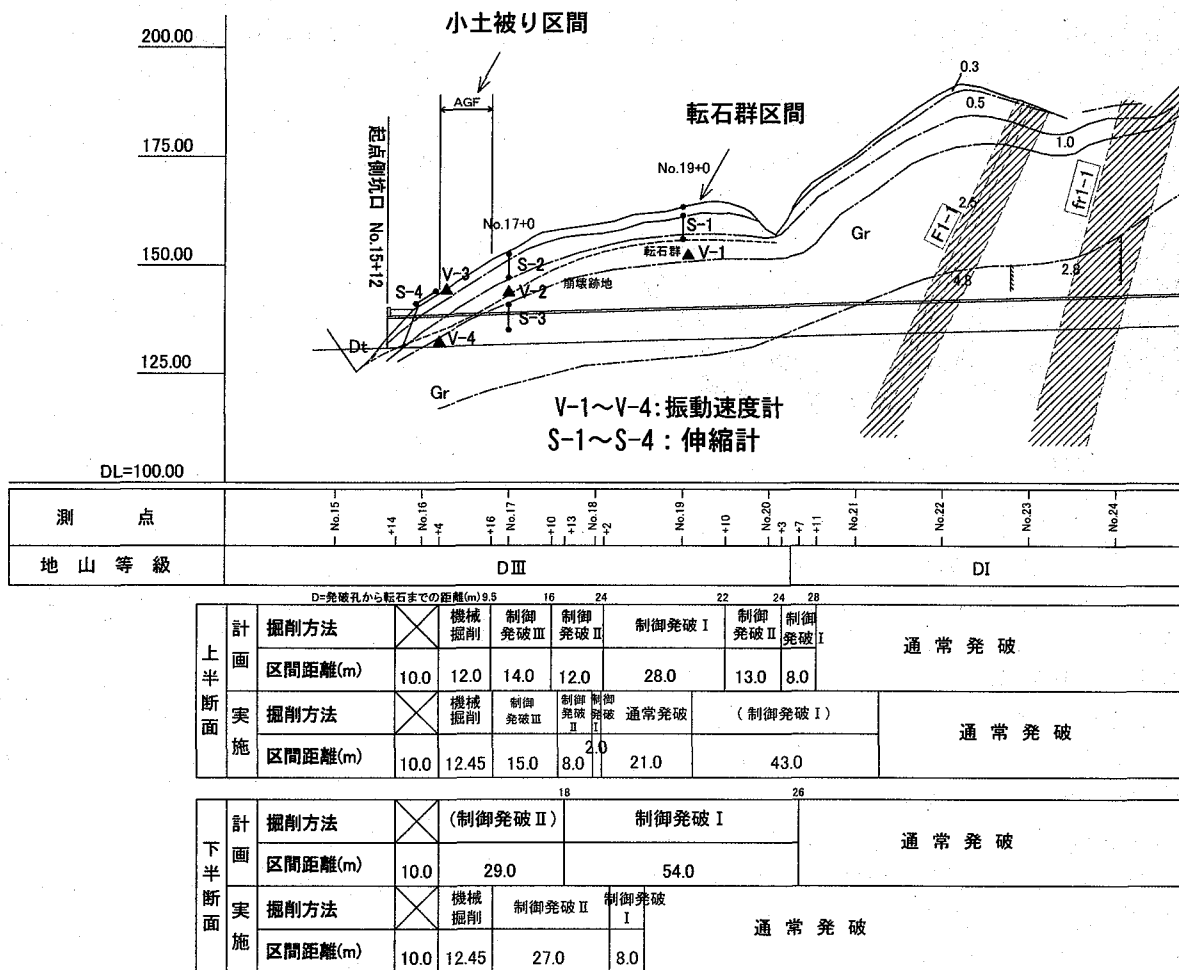


図-5 起点側坑口付近転石対策工縦断面図

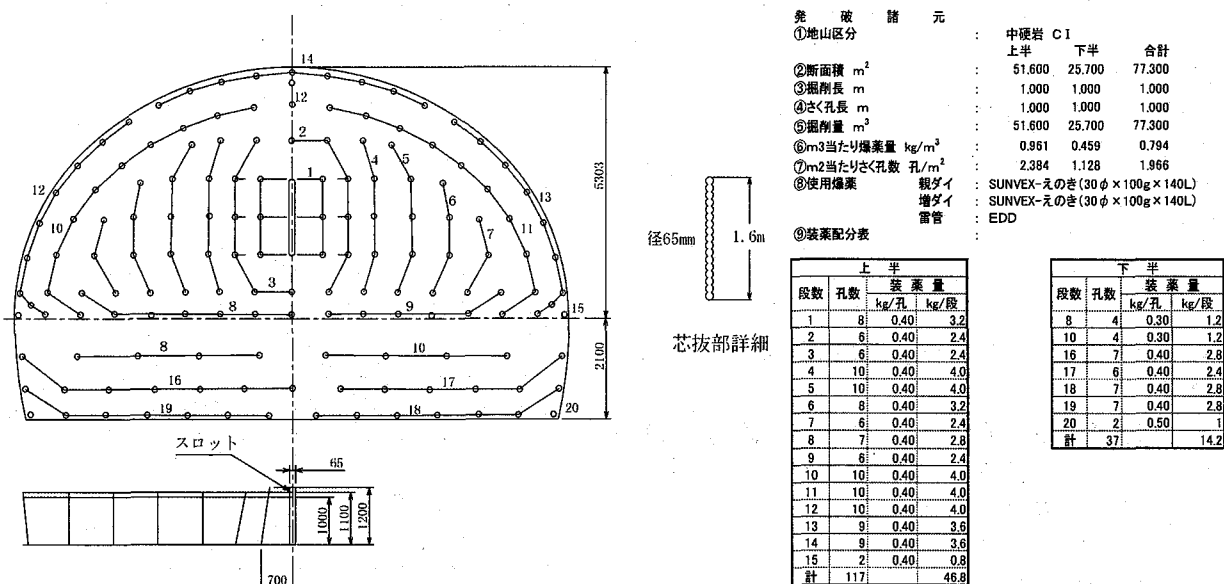


図-6 芯抜きスロット EDD 発破パターン

びを併用する割岩工法)

各発破を開始する位置や具体的な斉発薬量の計画
には、以下に示す発破振動予測式を用いた。

$$PPV = K \cdot W^n \cdot D^{-m}$$

(1a)

ここで、PPV: 振動速度振幅 (kine または cm/s)

K: 発破係数



写真-2 心抜きスロット EDD 発破

W : 斉発火薬量 (kg)

D : 対象物と切羽との離隔距離 (m)

n, m : 定数であるがここでは $n=3/4$, $m=2$ とする。

なお、発破係数のK値は、ベンチカット発破やトンネル掘進発破などの発破の種類、発破の掛かり方（発破効果）、使用する爆薬の種類、振動を受振する地盤の状況や振動の伝搬経路状況などの要因により変化するとされている。火薬メーカーで多くの振動計測結果の実績をもとに提案された値によれば、心抜き発破の場合通常 500～1000 であるのに対して、払い発破やベンチカットの場合 200～500 とされている。

本トンネルにおいて火薬庫直下の発破時に火薬庫付近で計測した振動速度から逆算したK値は、心抜き発破で 301～1118、払い発破で 194～567 であった。この値は、火薬メーカーの提案値と概ね一致している。

そこで、発破係数K値について以下の値を用いた。

トンネル発破の心抜きの場合 : $K=1000$

払いの場合 : $K=500$

心抜き部にスロットを形成する場合 : $K=500$

外周部にスロットを形成する場合 : $K=300$

このようにして、切羽と転石群または小土被り区間との距離に応じて①～④までの各種の制御発破を図-5 に示すように配置した。

心抜きスロット EDD 発破パターンを図-6、写真-2 に、スロットと油圧くさびを併用する割岩工法の掘削パターンを図-7 に示す。

(3) 計測管理

転石群に対する発破振動の影響を監視するため、転石群と県道斜面の4箇所に3成分の振動速度計を設置した。また、小土被り区間での地表部の変位を監視するため、想定すべり面を横切る方向に4箇所伸縮計を設置した（図-5 参照）。発破振動計測シス

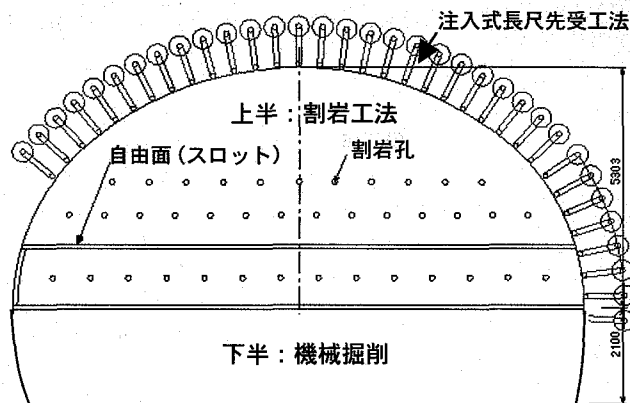


図-7 スロットと油圧くさび割岩工法の掘削パターン

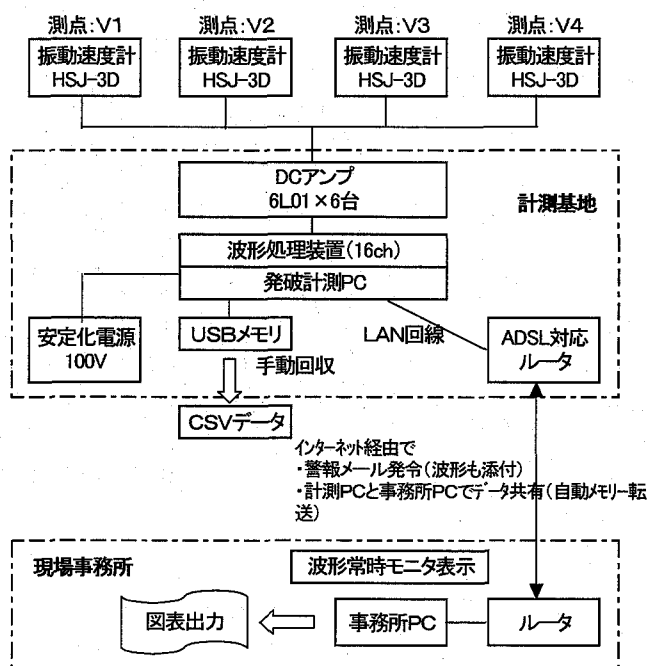


図-8 発破振動計測システム

表-1 振動速度の管理レベル

管理レベル	設定方法	発破振動	対応
I	基準値 × 0.5	1.5 kine	挙動を監視し施工
II	基準値 × 0.8	2.4 kine	次工種を準備
III	基準値	3.0 kine	次工種に移行

表-2 斜面変位の管理レベル

管理レベル	地表面の変位速度	対応
I	5mm以上/10日	点検・要注意または観測強化
II	5～50mm/5日	対策検討
III	10～100mm/1日	警戒・応急対策
IV	100mm以上/1日	厳重警戒および一時退避

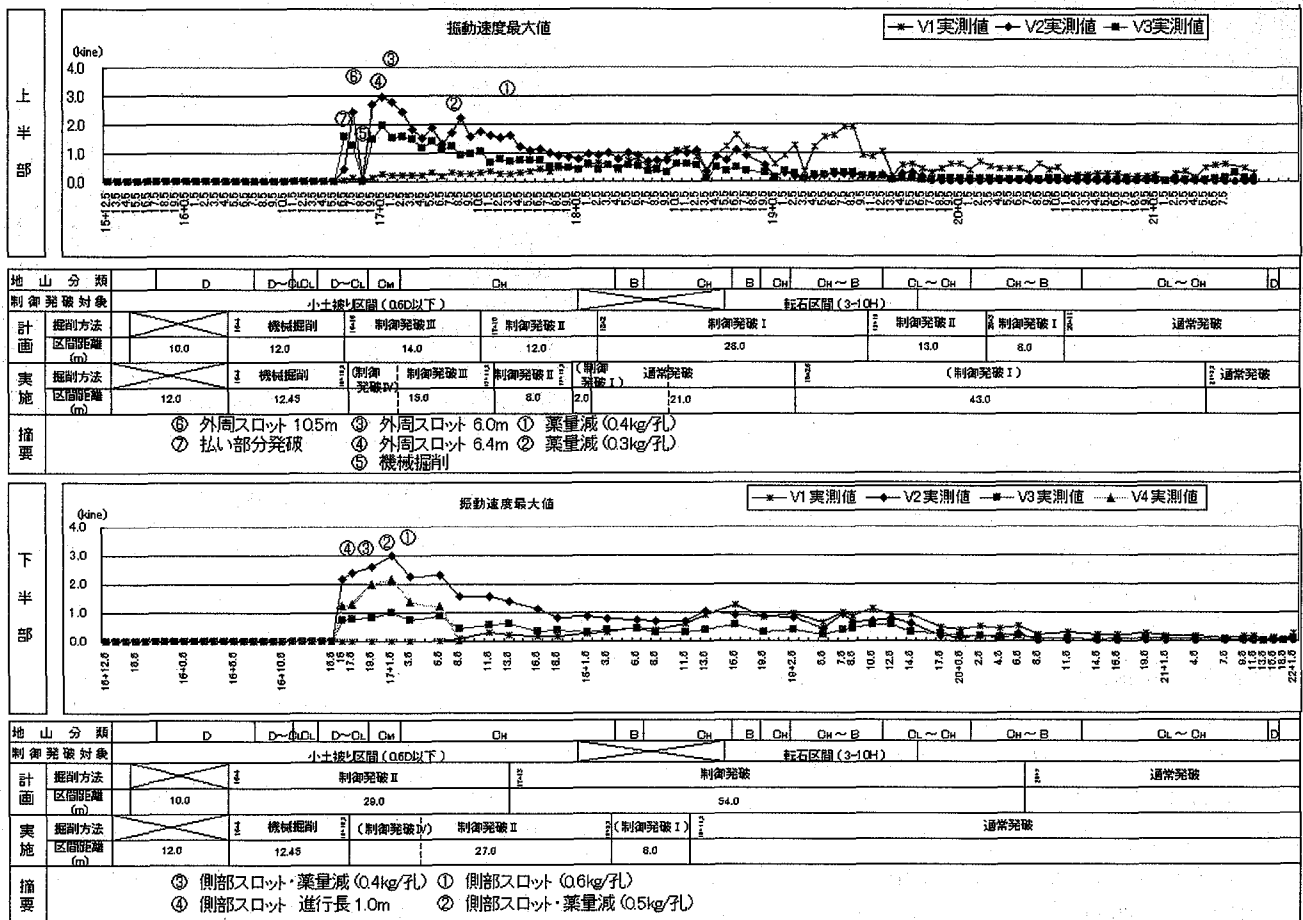


図-9 振動計測結果と対応

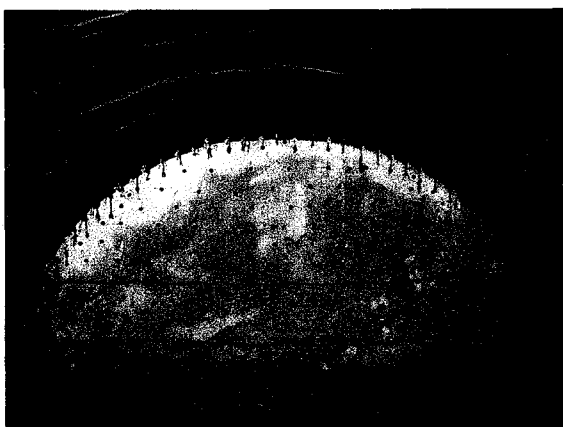


写真-3 スロットと油圧くさび割岩パターン



写真-4 油圧くさび割岩状況

テムを図-8に示す。また、振動速度と伸縮計の管理レベルを表-1、表-2のように設定した。

(4) 施工、計測結果

切羽が転石群に接近するNo. 22付近から計測を開始し、計測結果を考慮しながら制御発破の施工区間を当初の計画から適宜に変更しながら施工を進めた。このため、実際に施工した制御発破の種別と施工区間は、図-5および図-9に示すように当初計画とは異

なる結果となった。

油圧くさび割岩工法の施工状況を写真-3、4に示す。

a) 振動計測結果と対応

振動計測結果を図-9に示す。上半部では、転石群に近づいた地点から制御発破Ⅰにより施工を行ったが、転石区間に入ると転石付近の測点V1の振動計の実測値が大きくなり、最大2.0kineとなった。しかし、管理レベルⅡ以内であり、制御発破Ⅱへの変更

の必要はないと判断し、制御発破Ⅰで対応し、転石群に影響を及ぼすことなく通過できた。

次に、小土被り区間に入ると測点 V2 での振動値が大きくなったため、制御発破Ⅰから制御発破Ⅱ、制御発破Ⅲに移行した。さらに切羽が測点 V2 に近接すると振動値は最大 3.0kine となり、管理レベルⅢを超えるため、順次以下のように対応した。

- ① 火薬量を 0.4kg/孔から 0.3kg/孔に低減
- ② 心抜き部以外に外周部にもスロットを設ける制御発破Ⅳに変更
- ③ 機械掘削に変更

このような対応により、発破区間では振動の実測値は 3.0kine 以内に抑制することができた。

下半部でも同様の方法で発破管理を行った。切羽直近での振動値が 3.0kine を超えそうになった時点で、側壁部のスロットの削孔、薬量の低減、進行の低減（掘進長 1.0m）などにより対応した。

b) 伸縮計計測結果

転石群に設置した測線 S1 の計測値は、最大 -1.8mm（マイナスは収縮）で、最大変位速度も -1.8mm/10 日となり、管理レベルⅠであり特に問題はなかった。

No.17 付近の斜面の挙動監視用に設置した測線 S2 では、上半部の掘削時に -8.9mm、最大変位速度 -6.4mm/5 日（管理基準Ⅱ）となった。そこで発破振動の計測値も考慮して、前述のように機械掘削により対応した。

引き続き下半部の掘削では制御発破Ⅳによる掘削後、最大変位は -21.5mm、最大変位速度が -12.1mm/5 日（管理基準Ⅱ）に達したため、それ以降を機械掘削に変更した。坑内より増しロックボルトの施工を準備し収束傾向を監視したが、最大変位 -40mm 以下で収束した。

No.17 付近の県道上部斜面の挙動監視用に設置した測線 S3 では、最大変位は -15mm、最大変位速度 -4.1mm/10 日（管理基準Ⅰ）であった。

坑口部斜面の挙動監視用に設置した測線 S4 では、最大変位速度 +7.0mm/5 日（管理レベルⅡ）となったが、50mm/5 日以下で収束した。

伸縮計の数値がマイナス（収縮）となったのは、上半、下半の掘削によって地表沈下が生じて伸縮計が収縮したものであり、地表部のすべりが生じたのではないと想定される。

6. おわりに

トンネルに近接する県道直上の転石群と小土被り部に対する発破振動の影響を防止するため、切羽に

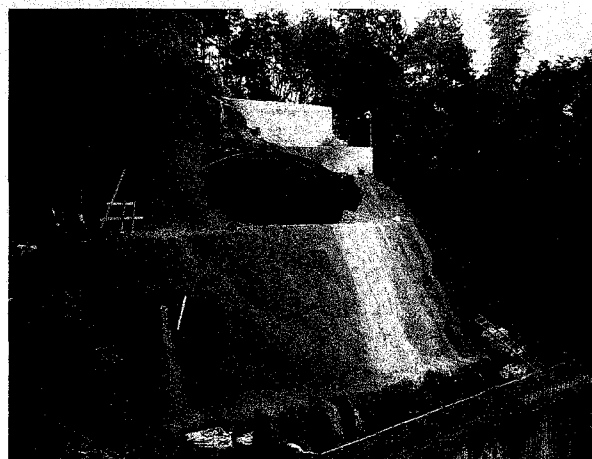


写真-5 貫通後の起点側坑口

スロットを形成し IC 雷管を併用する低振動発破工法を始め種々の制御発破工法を採用した結果、転石群に影響を及ぼすことなく掘削を終了した。

今回採用した制御発破方法の一つであるスロットと IC 雷管を併用する発破方法は、通常の発破と比べて振動を大幅に低減でき振動規制がきわめて厳しい条件下でも効果的な発破が可能であることがわかった。本発破工法の施工能率とコストは無発破工法と比べて優れているが、通常の発破工法より劣ることが課題であり、今後施工能率の向上とコストダウンを図って普及に努めたい。最後に本工法の採用にご協力いただいた関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 萩森健治, 竹知芳男, 古川浩平, 中川浩二: スロット工法を用いた低振動発破工法に関する研究, 土木学会論文集 391 号/VI-8, pp. 142-150, 1988.
- 2) 山本雅昭, 松岡秀之, 須田博幸, 塚本耕治: スロットと EDD を併用した低振動掘削工法, 火薬学会 2002 年度年会, pp. 5-6, 2002.
- 3) 喜田雅紀, 森良弘, 萩森健治, 西村修平: 不安定岩塊に近接するトンネルの低振動発破掘削, トンネル工学報告集第 15 巻, pp. 129-134, 2005.
- 4) ジェオフロンテ研究会掘削工法分科会: 現場技術者のための制御発破工法の実践, 1996.
- 5) SD 工法協会編: SD 工法技術・積算資料, 2006.