

山岳トンネルにおける長孔発破の施工実績

鉄建建設(株)		田辺 洋一
鉄建建設(株)	正会員	川島 義和
鉄建建設(株)	正会員	○島根米三郎

1. はじめに

紀伊半島では、中京圏、関西圏と三重県南部地域を結ぶ広域ネットワーク形成を目的として、近畿自動車道紀勢線等の道路整備が行われている。その中核事業となる一般国道42号熊野尾鷲道路は、高速道路に並行する自動車専用道路であり、紀勢自動車道と一体として①自然や歴史的文化遺産等への観光、②生活環境の充実、③豪雨等による災害時の代替道路として重要な役割を担う延長18.6kmの自動車専用道路である。

熊野尾鷲道路はトンネルや橋梁が多く計画され、そのひとつである亥谷山トンネル(図-1)は、尾鷲市に位置し三木里ICから賀田ICの間に全長3,197mの本坑および避難坑から成る道路トンネルである。トンネル施工に出現する基盤岩は、極めて硬質な熊野酸性岩類花崗斑岩と想定され、非常に新鮮で亀裂も少なく、設計段階における掘削支保パターンは多くがBパターンで設計されていた。本文では、当該トンネルの賀田工区(L=1,511m)の本坑支保パターンBを対象として、従来の設計一掘進長(L=2.0m)に対して平均一掘進長6.3m以上の長孔発破を実施したので、その施工内容について報告する。



図-1 熊野尾鷲道路

2. 工事概要

工事名称： 平成20年度 熊野尾鷲道路 亥谷山トンネル賀田工区工事
工事場所： 三重県尾鷲市賀田町
発注者： 国土交通省中部地方整備局 紀勢国道事務所
施工者： 鉄建建設株式会社
工期： 平成21年2月26日～平成24年7月31日
工事内容： 本坑・避難坑 トンネル延長1,511m
避難連絡坑 4箇所
掘削断面積 本坑 75.6m²～95.7m²
避難坑 16.0m²～18.7m²

3. 地形・地質概要

計画ルート of the terrain is composed of the Tertiary Cretaceous Kumano acidic rock class granite porphyry in the Kigakusan mountain, and the steep slope of the mountain is composed of small起伏山 from the ground. The Kumano acidic rock class granite porphyry is composed of minerals with coarse and uneven grain size. Generally, the bedding is excellent and the texture is rough. Especially, the bedding is prominent in the sheet-like texture, and the bedding is mostly open. The degree of weathering is also progressing.

キーワード 長孔発破, 硬岩地山, アンホ爆薬, 粒状エマルジョン爆薬

連絡先 〒101-8366 東京都千代田区三崎町 2-5-3 エンジニアリング本部土木技術部 TEL 03-3221-2298

トンネル最大土被りは約 500m あり，事前弾性波探査速度は 4.8km/s～5.0km/s，平均一軸圧縮強度 114 MN/m²，RQD70 以上の硬質なCH級岩盤が分布する。

4. 長孔発破の施工計画

4.1 発破工法の背景

山岳トンネルでは硬岩地山を対象とし発破工法で施工され，近年においては，経済的かつ効率的な掘進長を検討する目的として長孔発破による一掘進長延伸が多く検討されている．国内における長孔発破の施工延長は 3.0～4.5m の事例が多く報告^{1)～4)}されている．しかし，日本の地質状況は施工実績より地山区分CⅡとDⅠの占める割合が多いことや，硬軟の変化に富む複雑な地質状況である等の理由から，切羽の安定性が低く安全性や経済性に劣る。また，削孔精度を確保するために汎用機械以外の機械やマーキングシステム等の導入が必要となることも課題として挙げられる。

今回施工した亥谷山トンネルでは，事前地質調査よりトンネル施工基面に極めて硬質な花崗斑岩が分布していると想定されたため，掘削支保パターンBを対象として，設計一掘進長 2.0m に対し，平均一掘進長 6.3m 以上の長孔発破を計画し施工した．本坑支保パターンを図-2 および標準断面図を図-3 に示す。

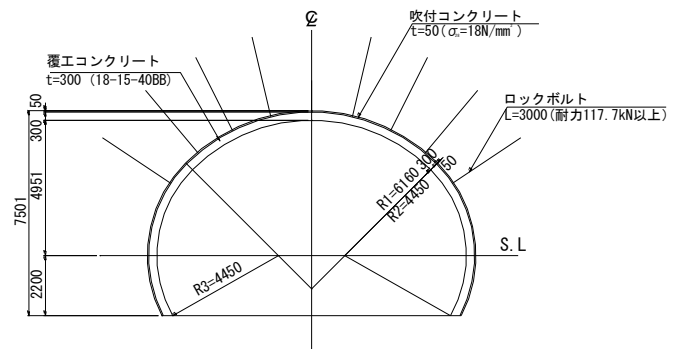


図-2 本坑支保パターンB

4.2 長孔発破の施工課題

長孔発破の施工を確実に行うために，過去に実施された長孔発破施工事例を参考として課題を以下に示す。

① 岩盤評価

長孔発破の実施対象を掘削支保パターンBとしているため，事前判定するための切羽前方探査精度の向上が必要である。

② 爆破技術

- ・削孔精度の確保（心抜き部，最外周部）
- ・発破パターン（心抜き部，ボアホールの孔径と孔数，爆薬仕様，最外周孔の孔間隔，最小抵抗線長）
- ・作業の習熟度の向上

③ 機械性能

- ・高精度かつ高能力な削孔機械の配置

④ 地山のゆるみ最小限化

- ・地山のゆるみを最小限とするための早期支保，平滑面の保持や余掘り量の低減対策

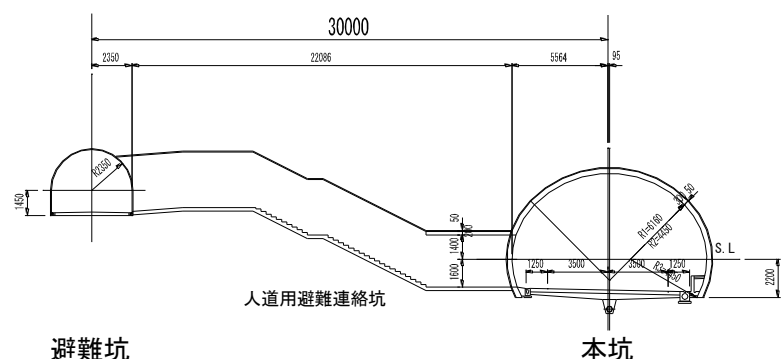


図-3 標準断面図

4.3 施工方針

掘削工法は，地山が硬質な花崗斑岩（深部では弾性波速度 5.0km/s と把握され，一軸圧縮強度 200MN/m²を超えると想定される）が大部分を占め，設計支保パターンBのため全断面工法を採用した．安全面として肌落ち，岩塊崩落等が懸念されるため，装薬方法を自動装填式とし，切羽付近に接して行う作業を減らした．ずり出し作業や吹付コンクリート作業を2分割とし，早期に支保設置できる対策とした．

長孔発破の発破パターンは，掘進長や断面の大きさに制約を受けない大口径パラレル方式を採用し，高い削孔精度が必要となるためコンピューター制御ジャンボ（図-4）を導入した．さらに，発破パターンの重要

となる心抜き部や最外周部には切羽面に削孔位置をレーザーで自動照射する自動マーキングシステムを採用し精度の確保に努めた。その他にずり出しに用いる重機（油圧ブレイカー、油圧ショベル、ホイールローダ、ダンプトラック）や削岩機、吹付け機の大型化による施工の効率化を図った。使用機械を表-1、長孔発破施工フローおよび2分割施工順序図を図-5に示す。

4.4 事前地山評価

長孔発破は、標準支保パターンB（1掘進長L=2.0m）と比較すると、発破後から支保構築までの素掘り状態の時間が長くなるので、事前に地山状態を把握することが重要となる。その地山状態を確実に把握することを目的として、先行して施工される避難坑の施工実績により本坑の地山評価を把握し、また本坑掘削時には探り削孔による定量的な地山評価を実施した。

4.5 削孔精度の向上

長孔発破は一掘進長が標準支保パターンより長いため、高い削孔精度が要求される。特に心抜き部（トンネル1自由面に対して、自由面を増やすために空隙を作ること）は、この空隙により順次、岩盤を起爆していくため確実な削孔が求められる。最外周部においては、余掘り量の低減や周辺地山の損傷を最小限とすることが求められる。

ジャンボ本体には多くのセンサーが取付けられ、そのデータをコンピュータ制御することにより削孔作業をリアルタイムに確認できる。事前にトンネル線形や機械の詳細座標、削孔箇所の距離程、発破パターン、削孔長、削孔角度等入力し、削孔時



図-4 ドリルジャンボ

表-1 使用機械

項 目			仕 様
掘 削 工	削 岩	削孔方法	コンピュータ制御 3 ブームドリルジャンボ ドリフタ重量 170kg 超級
		ロッド継ぎ足し	ロッドチェンジャー搭載式ガイドシェル
		削孔精度の 確保	コンピュータ制御モニターによる削孔 自動ナビゲーションシステム
		こそく	1.6t 級大型ブレイカー
	ずり 出 し	ずり積み込み	山積み 3.0m ³ 級 サイドダンプ式ホイールローダー
		ずり運搬	30t 積みダンプトラック
		ずり掻き寄せ	山積み 0.7m ³ 級バックホウ
	支保工	吹付け	25m ³ /h 級 一体型コンクリート吹付け機
ロックボルト		3 ブームドリルジャンボ	

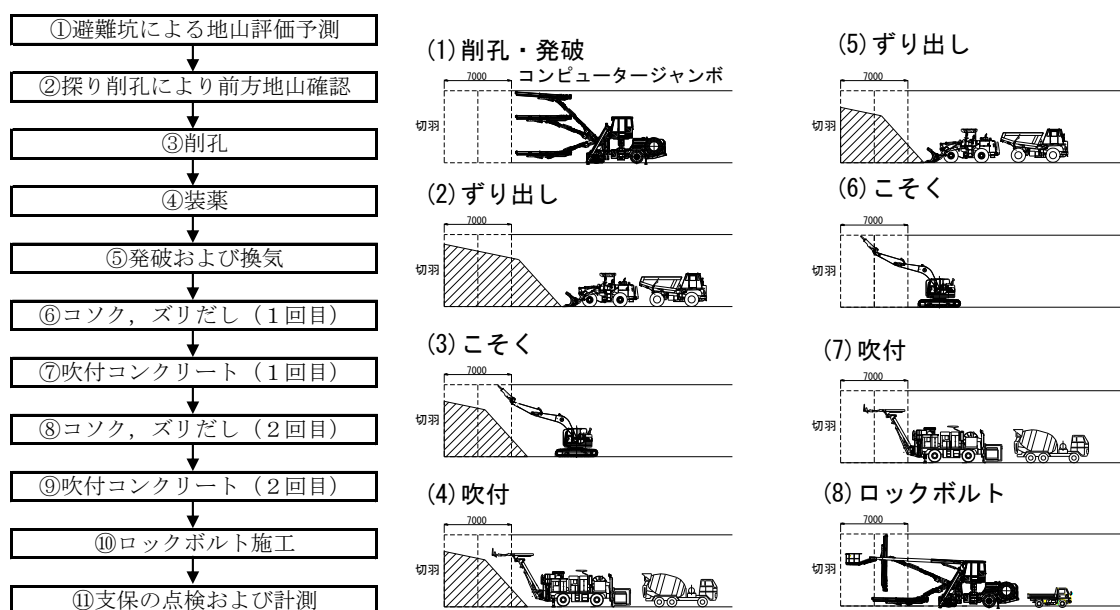


図-5 長孔発破施工フローおよび2分割施工順序図

には、削孔速度等の施工時データとして、計画削孔長、実測削孔長、ブームの位置、削孔速度、打撃データ等がリアルタイムにモニターで確認できる。このため削孔精度は向上し、発破孔の連結や削孔誤差の拡大を抑制可能とした。

4.6 発破計画

(1) 概要

一般的に多く用いられている心抜き方法はくさび形（削孔を切羽面に対して急角度とする）であるが、長孔発破においては削孔長が長くなるので、平行カット工法を採用（図-6、図-7）した。以下に平行カット工法の特徴を示す。

- ・掘削長と同じ長さの進行が得られる。
- ・掘進長を変更しても削孔パターンを変更する必要がない。
- ・切羽面に対して平行な削孔となるため、くさび形と比較してずりの飛散が少ない。
- ・過装薬による焼結現象が発生する。
- ・自由面が確実に得られるまでの起爆は、順次1孔もしくは2孔ずつ起爆させる必要が生じ、段数を多く必要とする。
- ・削孔が平行となるため、発破の連結や、亀裂の拡大による削孔不良などが生じることがある。

以上の特徴から、発破方法の課題に対する対策は削孔精度を高めること、および爆薬や雷管等の選定も重要となる。

(2) 爆薬および雷管

使用した爆薬は、アンホ爆薬、粒状エマルジョン爆薬（粒状の含水爆薬）、含水爆薬（紙筒）の3種類を装薬位置および、発破目的により表-2のように配置した。

アンホ爆薬は通常使用される紙筒の含水爆薬と比較して、爆薬性能は小さいが、削孔径を大きくし、密充填による装薬を実施することにより、高い爆薬性能が期待できる。また、削孔数を低減することにより掘削サイクルを短縮することが期待できる。しかし、アンホ爆薬は耐水性に乏しく、後ガス量が多く、帯電性の課題がある。耐水対策として、粒状エマルジョン爆薬（耐水性を有した粒状の含水爆薬）を踏まえ部に採用した。後ガスに対する課題は、長孔発破に使用する爆薬量は通常発破に比べ膨大になるため、換気設備の大型化のみでは対応が困難である。よって、坑内環境測定を実施して換気時間を通常より長くとるこ

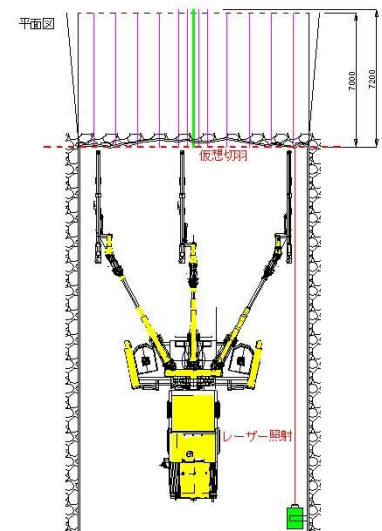


図-6 削孔イメージ

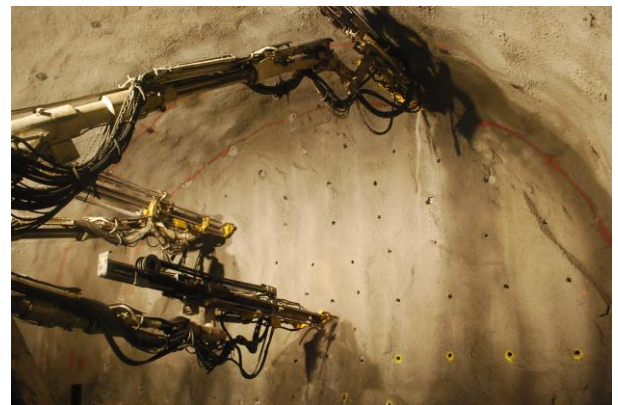


図-7 削孔状況

表-2 使用爆薬および雷管

爆薬の使用位置	使用する爆薬	雷 管	装填方法
心抜き部	アンホ爆薬	導火管付雷管(10.2m)	機械装填
一般孔	アンホ爆薬	導火管付雷管(10.2m)	機械装填
最外周部	含水爆薬(紙筒)	導火管付雷管(10.2m)	人力装填
踏まえ部	粒状エマルジョン爆薬	導火管付雷管(10.2m)	機械装填

とにした。帯電性に対しては、非電気式雷管を用いることで対処した。

最外周部については、アンホ爆薬を密充填すると、高い爆破威力によって必要以上にトンネル外周面を損傷させ、余掘り増加や支保の不安定化を助長させるので、軽装薬による体積デカップリング効果を期待して、含水爆薬（φ30mm、200g/本）を用いた。

雷管は斉発性の良好な非電気式の導火管付雷管（10.2m）を採用した。耐電気性に優れ、雷管の内部には高い精度を有する延時装置を持ち、秒時精度が正確である。これにより心抜き部が正確に起爆され、高い精度による効果として確実な自由面を形成することが可能となる。

(3) 発破パターン

長孔発破に用いた発破パターンを図-8に示す。

空孔は3孔（削孔径φ127mm）とし、装薬孔は118孔（削孔径φ64mm、最外周削孔径φ30mm）とした。空孔径や装薬孔径は、発破効率、機械性能、既存のビット径などから総合的に判断し決めた。

4.7 施工時の安全性確保

今回の施工は平均掘進長 6.3m 以上となるため、一サイクル時間が長くなるので、発破後の素掘り状態の時間が長くなることや、切羽直近の連続作業が増加する。したがって、切羽直近の安全性を確保する目的として以下の事項を実施した。

① 機械装填による装薬

切羽から離れて装薬が可能であり、サイクル短縮の効果により切羽付近作業を短縮できる。

② ずり出し、吹付コンクリートの2分割施工

ずり出しや吹付作業を一括とした場合、素掘り面直下の作業が多くなることや、素掘り面の解放時間が長くなることで、支保の不安定化が懸念される。そのため、ずり出しと吹付コンクリートを2分割する施工とした。

③ 支保の点検と計測

一発破毎に、吹付コンクリート面のクラック、浮き、湧水の有無・変化、仕上がり面の状態を点検し、発破区間毎に計測Aを実施することによって、地山や発破による損傷を定量的に観察した。

5. 施工実績

本坑支保パターンBを対象として計13回の長孔発破を実施し、平均一掘進長 6.45m（最長 7.2m）の施工結果を得ることができた。以下に今回実施した長孔発破実績を記載する。

5.1 地山評価

長孔発破実施区間の地山評価は、切羽観察による切羽評価点（Bパターンは評価点 65 点以上）に準拠して実施した。対象地山は非常に硬質な花崗斑岩であったが、亀裂の発達が顕著であり、部分的に風化が確認されたため、施工段階では支保パターンBの施工区間は短くなった。

5.2 一掘進長および施工サイクルタイム

長孔発破を計13回実施した結果として平均一掘進長 6.45m、サイクルタイムは平均 26 時間を得ることができた。これは、長孔発破のためのドリルジャンボ入替えや、削岩機がコンピューター制御されているため操作に不慣れであることが挙げられる。時間を要した作業工程は、削孔時間と装薬時間でサイクルの半分以上を占める。今後、サイクルタイム向上のために削孔機の仕様や爆薬装填機の改良、削孔パターンの配置などを再

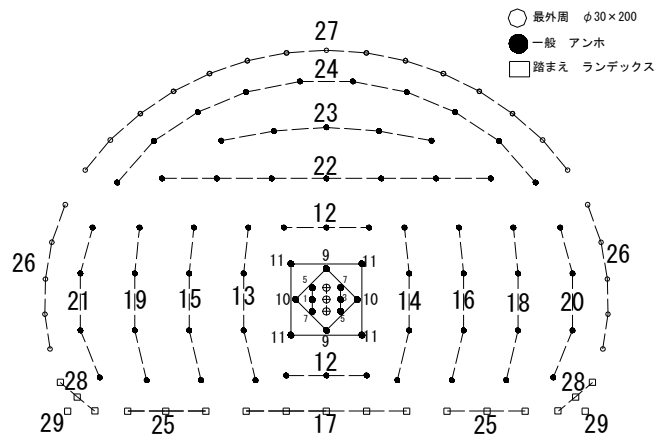


図-8 発破パターン

検討する余地がある。

5.3 スムースブラスティング

長孔発破直後の状況を図-9に示す。掘削余掘りは平均280mm程度あり、当初計画段階で設定した通りであった。ずり出し後のトンネル壁面状況を図-10に示す。当初想定した以上にトンネル壁面は平滑に保持され、のみ跡が多く確認できることから、硬質地山に対し削孔精度が高く、周辺岩盤の損傷を最小限に抑制できたと判断できる。削孔長に対して、のみ尻の残長は僅かであり最適な破碎効果が挙げられたと判断できる。

発破後のずりの粒度は、くさび形（Vカット）方式を採用した標準設計支保パターンC Iと比較して、小さくなった。これは、アンホ爆薬による密充填の破碎威力の効果であり、ずり出しの施工性向上に有効であった。

最後に長孔発破を実施するにあたり、中川浩二 NPO 法人臨床トンネル工学研究所理事長、ならびに火薬、機械、測量メーカー等に多大なご協力を頂き、関係各位に深い感謝の意を表します。



図-9 発破直後の状況



図-10 トンネル壁面状態

参考文献

- 1) 加納 米二, 大塚 昌彦, 前田 正一 : 4mの長孔発破に挑む 今市発電所導水トンネル, トンネルと地下, pp. 15-27, 1983. 2.
- 2) 小池 弘昭, 柴田 浩, 小早川 忠行, 小泉 直人 : NONEL雷管とANFO爆薬による長孔発破 北陸新幹線 五里ヶ峯トンネル 上田工区, トンネルと地下, pp. 7-12, 1994. 11.
- 3) 剣持 三平, 木村 宏, 小早川 忠行, 西村 清亮 : 長大山岳トンネルにおける急速施工 北陸新幹線 五里ヶ峯トンネル, トンネルと地下, pp. 17-23, 1996. 2.
- 4) 齋藤 貴, 田口 芳範, 宇田 誠, 貝原 登 : 不動の滝直下20mを制御発破で施工 JR吾妻線付替工事 川原湯トンネル, トンネルと地下, pp. 7-14, 2004. 12.