

打掛け発破を用いた偏平大断面トンネル下半部の 効率的な施工について

EFFICIENT EXCAVATION USING LEAVE-OUT BLASTING FOR THE BOTTOM SECTION OF THE FLATTERED LARGE SECTION TUNNEL

吉田武男¹⁾・荒 勇²⁾・森 正彦³⁾・井上博之⁴⁾

Takeo YOSIDA, Isami ARA, Masahiko MORI and Hiroyuki INOUE

To improve the cycle time of excavation at bottom section, Leave-out blasting which is bench blasting without removing muck pile is applied. Applied tunnel is the flattered large section tunnel which excavated cross section is 188 to 178 m². Compared to usual excavated method at bottom section, cycle time is 15% reduced. And tunnel face excavation is not obstructed when the bottom section is excavated. Fly rock are not happen except of over charge, and the equipment to excavation are not damaged.

Key Words: leave-out blasting, flattered large section tunnel, bottom section excavation

1. はじめに

大断面トンネルの掘削工法として上半先進ベンチカット工法を採用した場合の下半部施工は、上半への通行路を確保しながら実施するため幅員を二分割し、左右どちらかを対象として発破を行い、掘削を進めている。この際の発破は、装薬用の穿孔を下半盤から水平に実施し、上半切羽の場合と同様に手前及び上半盤の自由面に向かって爆砕する「水平穿孔による発破」が一般的である。ただしこの方法には以下の課題がある。

- ① 発破作業毎に、飛石により上半部の設備等に損傷を与える危険性がある。
- ② 1回の起砕量(奥行き)に限界があるうえ、次サイクルの装薬穿孔を行う前にずり出し、1次支保(吹付けコンクリート+ロックボルト)を完了する必要がある。
- ③ 下半1サイクル毎または下半掘削箇所を左右変更する毎に、上半の施工を一旦中断する必要がある。

当工事が担当する第二東名高速道路掛川第一トンネルは、掘削断面積が188~178 m²の偏平大断面トンネルであり上り線526m、下り線641mの掘削延長を有する。そのため掘削工に関する施工単位数量が大きく、これがトンネル工事全体の工程を大きく左右すると考えられた。そこで上半掘削の進行をできる限り制約することなく、しかも下半を効率よく進めることを重点目標と定め、ここにその一つの方向を示唆する方法について一定の成果を得た。また、今後も第二東名、名神高速道路で偏平大断面トンネルの施工が続くことを考えると、下半の施工を効率的に進めるための方法を確立することがトンネル工事全体の効率化においても必要不可欠となる。本書では、下半部の効率的な発破作業方法の一つとして当工事で計画し、試験的に実施した「打掛け発破を用いた下半掘削」について報告するとともに、今後の課題について考察することとする。

1) 日本道路公団静岡建設局 掛川工事事務所

2) 前田・日特・太平共同企業体 掛川第一トンネル工事作業所

3) 前田・日特・太平共同企業体 掛川第一トンネル工事作業所

4) 前田建設工業(株) 技術研究所

2. 打掛け発破工法の概要

打掛け発破とは明り工事で行うベンチ発破の応用であり、多列発破で起砕された爆落石（以下「ずり」とする。）を積み込み除去せず、そのままにして次の発破を実施する発破方法である。これは、そのままの状態に残した、緩んだずりがクッションになり、以降の発破における飛石防止層となることに期待した発破方法である。打掛け発破を採用することによる利点のうち主要なものを以下に示す。

- 1)発破の際、ベンチ面（トンネルの場合下半切羽）での飛石がなくなり、ベンチ上面（トンネルの場合上半盤）が1 m程度盛り上がる状態にとどまる。この時上方への飛石は全くなく坑内設備等に対する保安上好都合となる。
- 2)ある程度ずりを残した区間延長が長くなれば、穿孔作業とずり積み込み・運搬作業を独立して実施することができる。このため下半掘削サイクルが短縮できる。
- 3)打掛け発破を先行して実施しておけば、下半のずり積み込み・運搬作業や、支保工設置～吹付けコンクリート工、ロックボルト工を実施する間に上半の掘進を中断することなく進めることが可能となる。

図－1 および図－2 に打掛け発破を坑内作業に利用した場合の概略図をしめす。通常明り工事においてこの方法を採用する場合、ベンチ発破であることから主にアンホ爆薬を使用する。アンホ爆薬は含水爆薬等と比べ爆速は小さいが、穿孔した孔に密充填できることから岩盤の起砕効率がよく、このため穿孔数を少なく（穿孔ピッチを大きく）することが可能である。一方、打掛け発破を坑内で採用するにあたってはいくつかの問題点が考えられた。以下にこれらの問題点をまとめてみる。

- 1)アンホ爆薬は後ガスが悪く耐水性もないので、狭い坑内で水穿孔を行うトンネルでは何らかの措置を必要とする。
- 2)アンホ爆薬は装填中に静電気が発生する可能性がある。トンネルで一般的に用いられている電気雷管との使用には不向きとされている。
- 3)上半盤からの穿孔については、上半がある程度先行していなければ穿孔に必要な場所がとれず、上半作業を止めて施工することとなる。
- 4)トンネルにおける打掛け発破の穿孔作業に、明りでの施工同様エンジン式のクローラードリルを使用したのでは排気ガス等坑内環境に問題がある。

打掛け発破を下半掘削に用いるためには、以上の問題点を克服したうえで上半支保工の脚部を緩めず、断面の安定を損ねることのない装薬パターンを選定する必要がある。以下に、これらの問題点に関し種々の検討を行った後、試験的に実施した施工方法について詳細を報告する。

3. 掛川第一トンネルにおける打掛け発破実施状況

掘削工のうち下半部の施工については、着手時施工検討会の時点から重点項目として検討を行った。したがって、先に掘削に着手した上り線の坑口付け当初から、この検討を受けて計画された「打掛け発破による下半部の施工」を試験的に実施することができた。上り線の掘削期間とこれに続く下り線の掘削期間にあたる約22ヶ月間で、ほぼサイクルが固まった打掛け発破による下半の施工方法に関しその詳細を示す。

(1) 発破パターン

今回の施工で採用した発破(装薬)パターンを図－1 および図－2 にしめす。掛川第一トンネル工事では、起爆用爆薬(親ダイ)として含水爆薬($\phi 30 \times 200g$)を、主爆薬(増しダイ)としてAN-FO(ブリリットC)を使用した。また親ダイ用の雷管として静電気に対して問題のない、非電気式導火管付雷管(ノネル雷管 U-500)を使用し、これらの各導火管を接続するためにコネクター(SL-25)を使用した。なお以下にしめす図中の数量

は、作業員3名による標準的な施工数量である。

上半盤からの穿孔深さはインバート底面までを目安とする。穿孔角度は図に示すとおり縦断方向へはベンチ発破と同様15°程度の傾斜をもたせ横断方向へは上半支保工の脚部プレート直下を緩めないよう、のみ先を断面外側へ向けて傾斜させることとした。穿孔ピッチは、1孔あたりの装薬量とも関係するが、 $0.30 \sim 0.45 (\text{kg}/\text{m}^3)$ の火薬使用量を目安に図に示すとおりとした。なお当工事における発破の対象地山は中新世第三紀のCM級泥岩であり、 $\sigma_c \approx 60 (\text{N}/\text{mm}^2)$ 、 $\text{RQD} = 60 \sim 80\%$ であった。

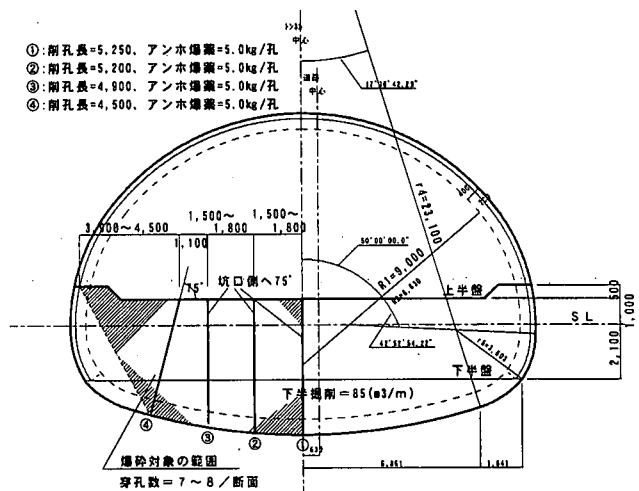


図-1 下半の打掛け発破穿孔配置横断面図

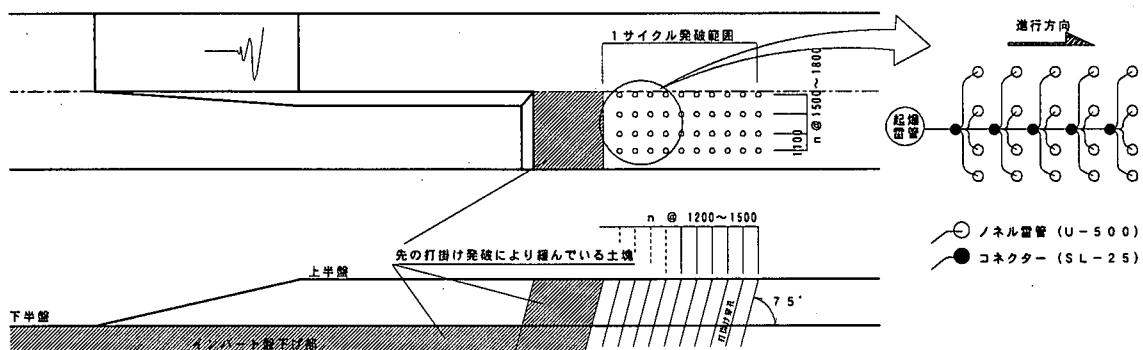


図-2 下半の打掛け発破穿孔配置平面・縦断面図

表-1 穿孔に関する諸元表

岩質:泥岩	断面積:42 m ² (下半+盤下げの1/2)
穿孔径:65 mm	穿孔比:0.35 孔/m ²
進行長:30~35 m	起砕量:1,260 m ³ /方
穿孔長:4.5~5.3m	爆薬使用量 520.0 kg/方
孔数:100	爆薬原単位 0.410 kg/m ³

表-2 装薬配分表

孔長	孔数	一孔あたり装薬量 (kg)	装薬量 (kg)
4.9~5.3m	75	(アンホ、増しダイ)5.0	375.0
4.5m	25	(含水爆薬、親ダイ)0.2	125.0
計	100	5.2	520.0

また、トンネル下半の打掛け発破に使用する削岩機は坑内の作業環境を考慮して、エンジンにより駆動するクローラードリルを使用せずジャンボを用いることとした。ただしこのジャンボによる穿孔にあたっては、通常の水穿孔を採用していない。打掛け発破では爆砕効率の良さからアンホ爆薬を使用するが、アンホ爆薬は水と反応して急速に溶解してしまう特性を有する。このため今回の下向き穿孔においては、水に代えて圧縮空気をくり粉の排出に用いることとした。使用するジャンボには圧縮空気供給用のコンプレッサーと、くり粉を坑内に拡散させないために集塵機を搭載するなどの改造を施した。

(2) 施工次第および施工フロー

掛川第一トンネルでは、打掛け発破による下半掘削を上り線、下り線のほぼ全線で実施することとした。上半掘削作業と打掛け発破作業、下半掘削土の積み込み・運搬作業の各施工位置関係を図-3に示す。施工の進捗にあわせて各作業箇所の相対的な距離は逐次変化するが、図-3が全体の工程を計画するうえでの基本パターンとなる。またこれまでのトンネル掘削において実施されてきた、水平穿孔による下半の発破を基にした掘削施工フローと、打掛け発破を採用した場合の掘削施工フローの比較をあわせて記載する。

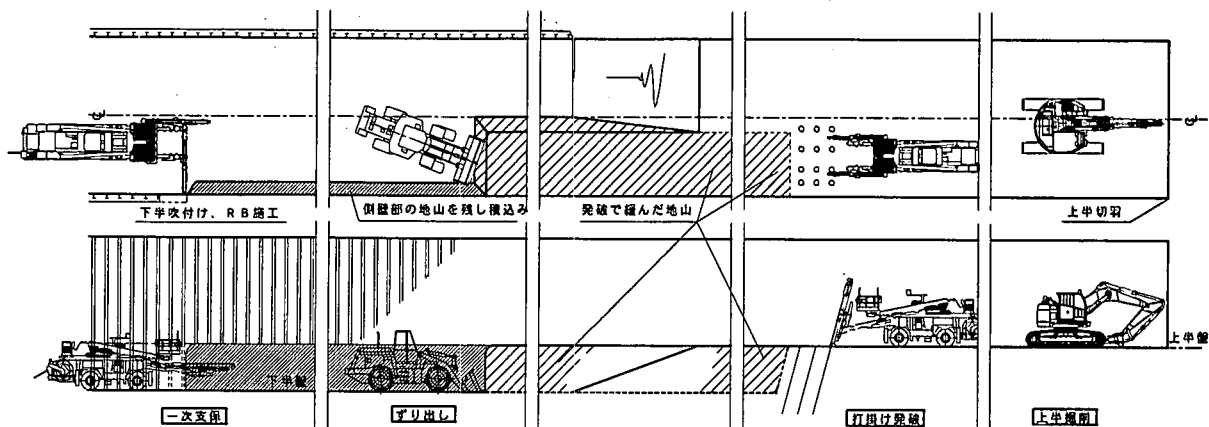
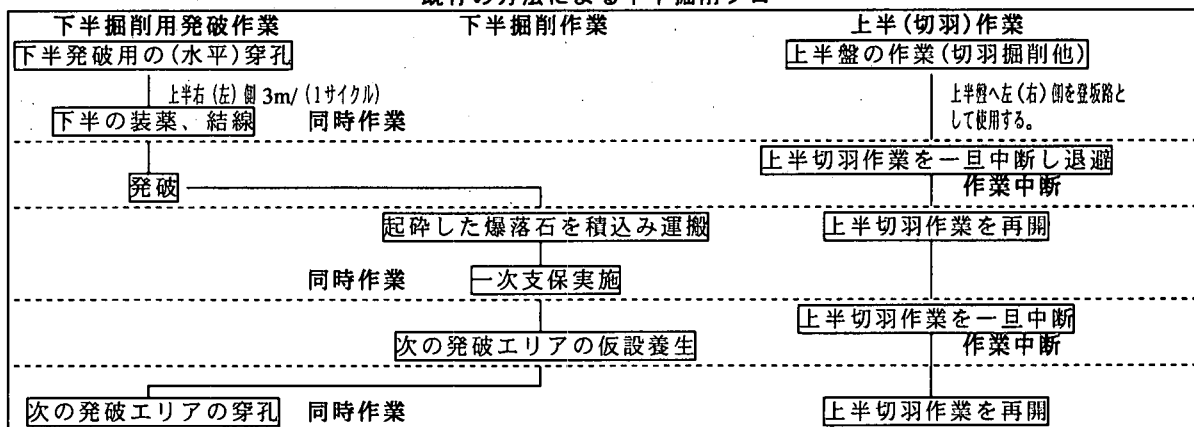
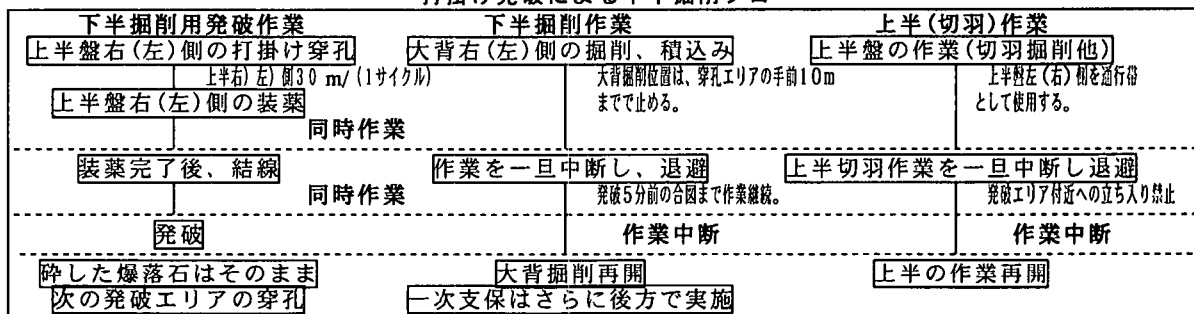


図-3 打掛け発破により下半掘削を行う場合の坑内作業区分

既存の方法による下半掘削フロー



打掛け発破による下半掘削フロー



アンホ爆薬を坑内で使用すると後ガスの問題が懸念される。これにはサイクル上の特性を活かし対処することとした。打掛け発破の1サイクルが4～5時間となるように穿孔数を決めることにより、発破を正午の休憩前および夕方(早朝)の昼夜勤交代前に実施する。発破後を坑内作業の休止時間に合致させることにより、次の作業開始前に十分換気を行うことができる。1サイクルの穿孔数として30～35孔、昼(夜)勤1方で60～70孔程度が適当と考えられる。

4. 実施結果

打掛け発破を用いた下半の施工に関して、「打掛け発破の実施結果」、「下半掘削工の実施結果」にわけて以下に詳述する。

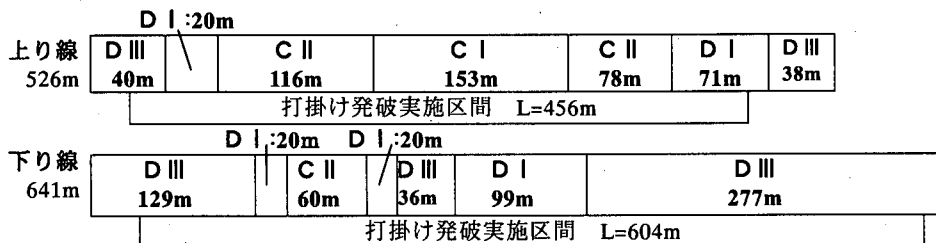
(1) 打掛け発破

表－3 掛川第一トンネル 打掛け発破実績表

掘削延長	① 1,167m	上下線合計
打掛け発破実施延長	② 1,060m	各線坑口を除く
火薬使用量	③ 31,500kg	アンホ + 含水
雷管使用数	④ 6,060 個	ノネル雷管
発破作業工数	⑤ 58 方	昼夜勤施工
発破回数	⑥ 95 回	

当工事で実施した打掛け発破に関して、その結果を表－3に示す。この表からも判るとおり打掛け発破1サイクルの穿孔数は概ね60個(④/⑥)、火薬使用量は330kg(③/⑥)であった。インバートを含む下半の掘削断面積は85m²であり、下半に対する平均の火薬使用量は③/(②×85)=0.35(kg/m³)、同雷管使用量は④/(②×85)=0.07(個/m³)となる。

当工事に代表される第二東名神高速道路の偏平大断面トンネルは、爆破掘削における下半の火薬使用量の目安(Dパターン)が0.4(kg/m³)程度、同雷管の使用量の目安が0.45(個/m³)程度となっている。当掛川第一トンネルは、図－4に示すとおり掘削延長の65%が一軸圧縮強度=60(N/mm²)程度のDパターンである。このことを考慮に入れても、打掛け発破による火薬の使用量削減効果は高いものと考えられる。ただし使用する非電気式導火管付き雷管(ノネル雷管)の単価的な問題や、前項で述べた打掛け発破穿孔専用削岩機(ジャンボ)の改造製作費など、金銭的なデメリットも未だ残されている。



図－4 掛川第一トンネル施工延長内訳図(上り、下り線)

(2) 下半掘削(ずり出し及び一次支保)

下半掘削の実績を評価するために、下半掘削のサイクルを調査、分析した。まず下半のうち打掛け発破に費やした施工日数(昼夜勤各々の実施方数)とのべ人数、ずりの積み込み・運搬(ずり出し)に費やした施工日数とのべ人数、一次支保に費やした施工日数と延べ人数を表－4に示す。

表中の各施工方数は、掛川第一トンネルの掘削工事のうち図－4において「打掛け発破実施区間」と区分したL=1,060mにおける数値である。この間で下半の作業に費やした施工方数は374方であり、この間ののべ就労人数は1,754人であった。第二東名神高速道路の偏平大断面トンネルにおける下半のサ

表－4 下半関係作業の施工日(方)数比較表

作業名	施工日(方)数	のべ人数	のべ就労時間
打掛け発破	29(58)	174	1,566 h
ずり出し	71(142)	710	6,390 h
一次支保	87(174)	870	7,515 h
合計	(374)	1,754	4.7人/方

イクルタイムは、5人前後の班編成で210(min/m)程度が目安となっている。1方の作業時間を9時間とした場合、進行の目安は2.57(m/方)となり、1,060mを掘進するのに412方(約2,060人)を要することとなる。つまり今回の施工におけるサイクル上のメリットは、時間にして2.6(時間/m)ということになる。図－5に打掛け発破を用いた場合と第二東名神高速道路における目安を採用した場合の作業時間内訳を比較する。

打掛け発破を用いた場合	発破 8.5	ずり積み込み・運搬 (側壁部ブレーカ掘削含) 34.5	一次支保(支保工, 吹付け, RB) 42.3	効率 UP 14.7
第二東名神の目安の場合	発破(穿孔, 装薬) 24.0	4.8	コソク, ずり出し 22.6	一次支保(支保工, 吹付け, RB) 48.6

図－5 下半各作業時間の内訳比較

先に示したとおり、打掛け発破の場合1サイクルを4～5時間として作業計画をたてることにより、換気による待機時間を正午や昼夜勤交替時の休憩時間にあわせることができる。また装薬に関しても1サイクルの施工延長が20m程度と長いので、穿孔作業の途中から連続して実施することができる。このため穿孔作業完了と装薬作業の完了にほとんど時差が生じないことが判った。したがって「打掛け発破を用いた場合」のサイクルには「爆破～換気」に該当する項目がなく、「発破(穿孔)」、「ずり出し」、「一次支保」を併せた部分の効率UPはサイクル全体の約10%ということになる。各作業の効率UP(DOWN)の要因を考察する。

- ①「発破」作業におけるサイクルは約15%低減した。これは、調査対象区間における穿孔延長の違いが大きく影響している。打掛け発破の場合、6,060の穿孔数に対し平均5.2mの穿孔を削岩機1台で行う。従来の発破の場合は削岩機2台を使用して、 $0.9(\text{t/m}^2)$ の穿孔を掘進2m毎に実施する。結果、約40,000孔を $L=2.1\text{m}$ の穿孔長で穿孔することとなる。のみ下がりを用いた場合、対象区間において穿孔に要する時間を比較すると、打掛け発破による方が従来の方法の75%になる。実際は先に記述したとおり、打掛け発破の穿孔についてはくり粉の排出に水を使わないので極端にのみ下がりが悪くなる他、穿孔長が長く継ぎのみを必要とする事等が影響し、サイクル自体は15%程度の低減にとどまったものと考えられる。
- ②「ずり出し」作業におけるサイクルは、打掛け発破を用いた場合従来の方法の12%増となっている。これは打掛け発破の特性によるところが大きい。当工事における打掛け発破は、対象地山を完全に爆砕するというよりも岩盤内に亀裂を誘発し緩みを増進させる方法と言える。特に上半脚部については穿孔位置や方向を考慮し、爆砕の程度を抑えている。このことから、「ずり出し」作業においてブレイカーによるコソク(削岩)の時間が長く、作業全体のサイクルタイムを押し上げたものと考えられる。
- ③「発破」作業と「ずり出し」作業をあわせたサイクルタイムの比較では、打掛け発破を用いた場合3.6%のサイクルタイム低減が実現している。個々のサイクルについては①や②の要因があるが、「発破」と「ずり出し」の作業が独立しているため、作業間における段取り替えが省略された効果も考えられる。
- ④「一次支保」作業におけるサイクルタイムの低減は6.3%となっている。これは打掛け発破を用いる場合「一次支保」作業が他の作業と独立して実施できるため、従来の方法で掘進2m毎に必要な作業間の段取り替えが省略できたことに起因するものと考えられる。

特に①や④は掘削幅員が広く、加えて下半掘削土量の多いトンネルにおいて顕著な傾向と考えられる。つまり偏平大断面トンネルの下半掘削に対し、打掛け発破が有効である最大の要因がここにあると言える。

また打掛け発破を採用した区間における代表的な断面の計測結果をみると、上り線坑口付近において従来の方法で下半施工を実施した区間と比較しても、天端沈下はどちらも最終的に15mm程度で収束しており、内空変位に関しては10mm以下にとどまる。打掛け発破後ずり出しまでの天端沈下は脚部とともに2～3mm程度(最終変位量の20%以下)で、ほとんどその影響はなかった。

5. 今後の展望と課題

今後この種の断面を有するトンネルの施工においては、上半の掘削はもとより下半の施工をいかに効率的に進めるかが大きな課題といえる。そういった意味では、今回サイクルタイムベースで約15%の改善がみられたことは非常に有意義であると考えられる。しかしサイクルの低減に対しある程度の目途がたった一方、使用する雷管材料費等コスト面での課題が未だ残るほか、施工用専用機械の製作改造費も考慮する必要がある。これに対しては連続して着手できる一定の施工延長を確保することや、機械の有効な転用を計画的に実施することが必要条件となってくる。いずれにしても今回得られた結果は、先に示した地質的及び地形的な好条件によるところも大きく、適応する地質や施工方法に関する技術的な課題は未だ残されている。しかし一定の条件がそろえば今回実施した施工方法は今後のトンネル施工において安全で、早く、安価な工法であることも検証できたと考える。今後適応する諸条件を明確にしていく事により、広く採用されることを望む。