

(75) アブレイシブジェットと膨張性破砕剤を併用したトンネル掘削について

(株) 間組 技術研究所 正 会 員 ○ 蓮 井 昭 則
同 上 正 会 員 世 一 英 俊
同 上 正 会 員 山 下 亮

1. はじめに

近年、地下空間の有効利用が盛んになり、市街地や既設構造物の近傍でトンネル掘削が実施される例が増加している。また、地下構造物の用途の拡大や変化、あるいは補修やリフレッシュといった理由から、既設構造物内での岩盤掘削も実施されるようになってきている。これらの状況下では、周辺環境、周辺岩盤に対する振動や騒音の影響が問題となり、発破工法を用いない掘削、破砕方法への要望が高まっている。

このような方法の一つとして膨張性破砕（静的破砕）がある。膨張性破砕は、岩盤やコンクリートなどの被破砕物に穿孔、膨張性破砕剤を充填し、化学反応によって生じる膨張圧で、被破砕物に亀裂を発生させ破砕しようとするものであり、2つの問題点を持っている。1つは、破砕剤の充填から破砕が開始できるまでの養生時間が通常12～24時間と長いこと、もう1つは、自由面が少ない場合、破砕が非常に困難になることである。

本報告では、養生時間に対しては促進剤（日本油脂（株）製、キャップエース）を用いて化学反応を促し、自由面の不足に対してはアブレイシブジェットによるスリット（細溝）を設けて対応したトンネル掘削の概要と施工について述べる。

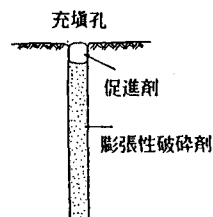


図-1 促進方法

2. 膨張性破砕の促進

膨張反応の促進方法は、破砕剤に熱を加えて化学反応を助長させるもので、本トンネル掘削に用いた促進剤は1孔分ずつバックされており、図-1に示すように破砕剤が充填された後、孔口部に詰められる。これは、生石灰系のものから構成されており、水和反応によって短時間に高熱を発生する。促進剤から発生された熱は、促進剤直下の破砕剤の化学反応を促進することになる。このとき、破砕剤は発熱しながら化学反応を起こすので、そこで発生した熱はさらに下方の破砕剤の反応を促進することになる。このようにして、孔全体の化学反応が促進され養生時間が短縮される。

これを確認するために、鋼管（φ40mm）を用いて膨張性破砕を促進した場合の時間と膨張圧力と破砕剤中の温度について測定した。圧力は鋼管表面のひずみゲージから温度による鋼材のひずみを除いて換算し、温度は熱電対を用いた。その結果を図-2に示すが、温度の上昇とともに膨張圧力が増加し、充填後約20分で孔底部まで達していることがわかる。

その他、岩石ブロックやベンチ掘削等においても試験的に実施したが、孔長約1mの充填孔で促進剤を用いて15～30分後には、二次破砕の可能な状態になることがわかった。

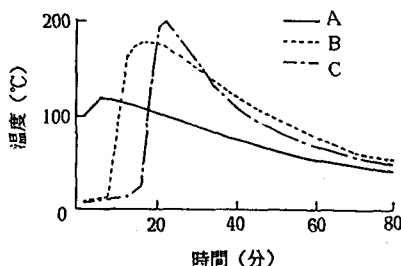
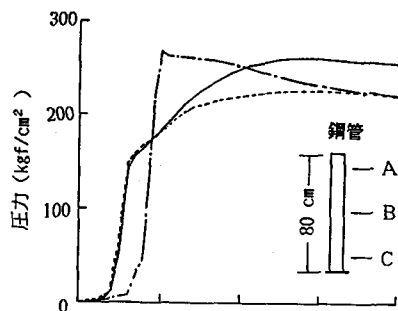


図-2 膨張圧と温度の推移

3. アブレイシブジェットによるスリット

3.1 アブレイシブジェット

アブレイシブジェットは、高圧水の噴流に研磨材（アブレイシブ）を混入し、それらによって物体を切断、あるいは切削しようとするもので、原子力発電所の解体方法の1つとして注目されている。図-3にアブレイシブジェットをトンネルにおけるスリットの形成に適用した場合の全体概要を、高圧発生装置の諸元を表-1に示す。また、ノズルを切羽まで運搬し、切羽面上で一定速度で移動させるために、ミニブレーカを改造し、ノズル移動装置を取り付け自走式にしたベースマシンを製作した。なお、研磨材にはガーネット（ざくろ石）を用いた。

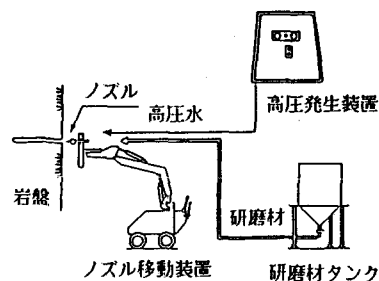


図-3 アブレイシブジェット概要

表-1 高圧発生装置諸元

型 式 名	JETPAC 40EQ (フロー社)
増 圧 比	10:1
最大吐出水压	2800kgf/cm ²
電 動 機	150KW、440V、60Hz
本体寸法	約2.5×1.3×1.2m
本体重量	1.9ton

3.2 スリットの効果

アブレイシブジェットでスリット（自由面）を切削し、膨張性破砕剤を用いた場合の引張応力の発生状況を簡単な平面ひずみ問題としてFEM解析で定性的に検証した。モデルは弾性係数 $E=10000 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\nu=0.3$ の等方等質な弾性体に孔径38mmの膨張性破砕剤充填孔を設けたもので、充填孔の間隔は30cm発生する膨張圧は300kgf/cm²とした。なお、初期地圧については考慮していない。その結果、充填孔近傍にはスリットの有無に係わらず引張応力が発生するが、スリットがないと引張応力作用領域が隣接孔間でつながらず、破砕された状態にならないこと、また、スリットが不連続だと孔間の中央部で引張応力作用領域が小さくなり、スリットの効果が減衰し破砕効果が低下することがわかる（図-4参照）。

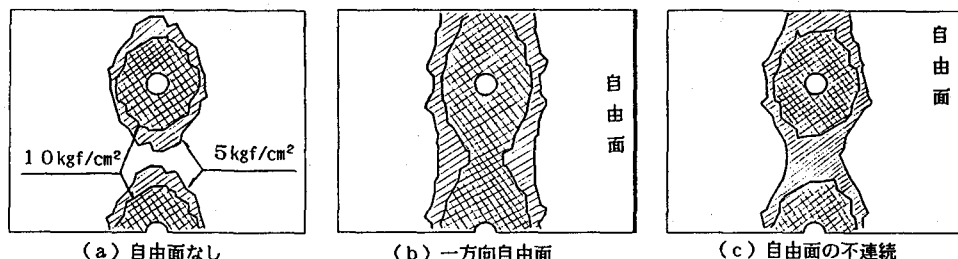


図-4 スリットの効果（引張応力）

4. 施工

4.1 施工概要

施工したトンネルは未湛水ではあるが既に完成したダム直下の基礎岩盤内に位置し、断面積5.4 m²の馬蹄形で、掘削延長は69mである。トンネルはまた、既設トンネルから分岐して掘削され、両トンネル間の距離は中心線間で最大約15mである。地質は比較的新鮮な緑色凝灰岩で、コアを用いた試験においては一軸圧縮強度は400～600kgf/cm²、引張強度は30～50kgf/cm²を示した。

スリットおよび膨張性破砕剤充填孔の標準パターンは切羽岩盤の一軸圧縮強度の大きさによって図-5に示すように分けた。各切羽岩盤の一軸圧縮強度はロックシュミットハンマーによって測定された値とその岩種の切羽占有率から計算して、切羽面一様として換算した数値（岩盤強度と呼ぶ）を用いた。パターンⅠは岩盤強度約500kgf/cm²以下の場合を、パターンⅡは岩盤強度約500kgf/cm²以上の場合を基本として適用した。なお、岩盤の状況によっては、さらにスリット、充填孔の増減、位置の変更を行った。施工手順は以下のようである。

- ①アブレイシブジェットによるスリットの切削
- ②レグドリルによる穿孔
- ③膨張性破砕剤の充填、養生（30分）
- ④0.09m³ 級バックホーに搭載したブレーカおよび
ハンドピックによる二次破砕
- ⑤ショベル、トラック（4 t）によるずり出し

4. 2 施工実績

スリット切削直後の切羽状況および膨張性破砕剤充填30分後のクラック発生状況を写真-1、2に示す。

また、トンネル延長中30m区間の岩盤強度の推移、スリット切削長の変化を図-6に示す。岩盤強度とスリット長の増減は一致した傾向を示しており、切羽面の強度に応じてスリットの長さを変えていることがわかる。また、スリットの切削深さは各スリット毎の平均深さでみると約50～55cmであったが、岩質によっては1m近くに達するものもあった。一方、膨張性破砕剤の掘削土量に対する充填量と岩盤強度の関係は図-7に示すようであり、岩盤強度に比例して増加する傾向があるが、バラツキが大きい。図-8に、岩盤強度と単位時間当りの二次破砕土量との関係を示すが、ランダムに分布しており相関はみられない。このことは岩盤強度によらず同程度の二次破砕が可能であったということであるが、反面、岩盤強度は本工事のような破砕の効率を検討する上での指標として不適當であったのではないかとと思われる。

次に、施工サイクルは実作業、段取り替え、機械等の故障などすべての時間を含んだ作業時間で表わすと図-9となり、スリット、穿孔・充填、二次破砕・ずり出しの各時間が同程度であることがわかる。本工事ではトンネルの掘削断面が小さく、有効な機械化施工ができなかったため、穿孔、二次破砕では主に人力に頼らざるを得ず、施工サイクルが長くなっている。特に二次破砕ではその傾向が強い。

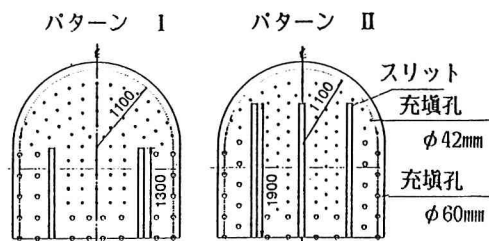


図-5 標準掘削パターン

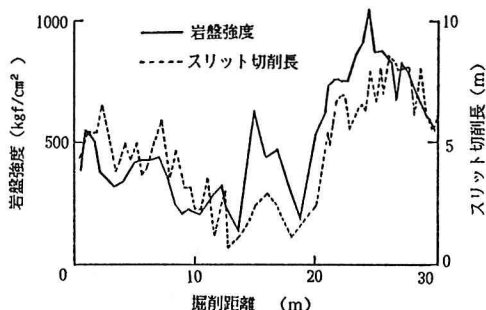
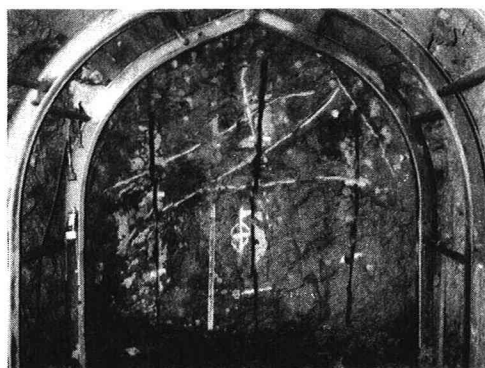
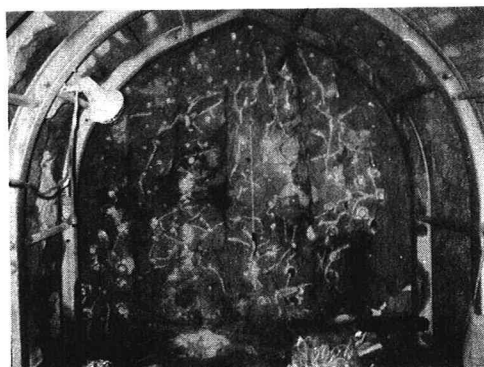


図-6 岩盤強度とスリット切削長の推移



切削条件
水圧、水量：2100kgf/cm²、17ℓ/分
研磨材：ガーネット、3kg/分
切削速度：5cm/分、2パス

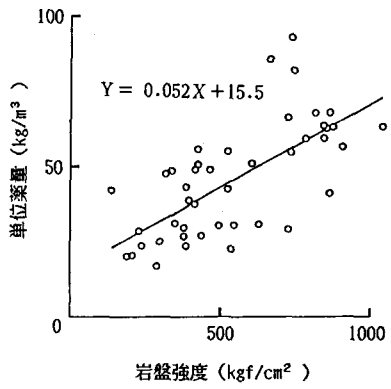
写真-1 スリット切削後の切羽状況



穿孔条件
穿孔径：42、62mm
孔数：69、26孔

写真-2 クラック発生状況（充填後30分）

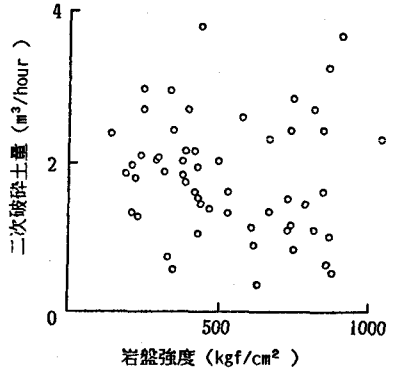
各作業中における振動および騒音の測定結果を表一2に示す。これらの数値をダイナマイトによる発破時の振動、騒音と直接比較することはできないが、発破工法に比べてかなり低振動・低騒音であることがわかる。



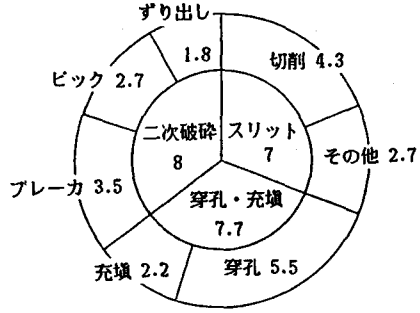
図一7 岩盤強度と充填量

表一2 振動・騒音測定結果(単位: dB)

切羽からの距離	振 動	騒 音		
		11.4m		
		X方向	Y方向	Z方向
スリット切削	111	45	47	54
穿 孔	114	40	44	44
ブレーカ	97	32	29	29
ハンドピック	109	31	30	40



図一8 岩盤強度と二次破砕土量



平均サイクル 22.7時間
平均掘進長 53cm

図一9 施工サイクル(時間)

5. あとがき

アブレイシブジェットと膨張性破砕剤を併用したトンネル掘削について述べた。この掘削方法は低振動・低騒音であり、大きな仮設等を必要とせず、また岩盤の変化にも柔軟に対応できる。反面、工費、施工サイクルなど、今後の課題とする点も多く、さらに検討を進めていきたいと考えている。今回の施工では、上記2つの方法を組み合わせたが、それぞれ他の工法との組み合わせも可能である。また、トンネル掘削以外の岩盤、コンクリートの掘削、破砕にも利用できると思われる。

最後に、本工事において、貴重な御助言、御助力を頂いた電源開発(株)下郷建設所、ならびに第一工区共同企業体、日本油脂(株)の皆様へ深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林、厨川、笠間：静的破砕剤による岩盤の破断方向制御に関する研究、採鉱と保安、1985.4
- 2) 山下、蓮井、世一：促進剤を用いた膨張性破砕剤の膨張圧力の測定、土木学会第41回年次講演会概要集、1986.11
- 3) H.Arasawa, et al: Controlled Cutting of Concrete Structure with Abrasive Water-Jet, 8th Int.Symp. on Jet Cutting Technology, September.1986
- 4) 石田、和田、蓮井、松本：アブレイシブジェットと膨張性破砕剤を用いた無発破トンネル掘削工法、建設機械と施工法シンポジウム論文集、1986.10

(75) NO-BLASTING AND NO-VIBRATION TUNNELING BY USING ABRASIVE-JET
AND EXPANSIVE DEMOLITION AGENT

A. Hasui, H. Yoichi & R. Yamashita
Hazama-Gumi, Ltd.

Abstract

Expansive demolition agent has been used as one of no-blasting and no-vibration tunneling techniques. But this technique has two problems in applying to the tunnel excavation. One is the long curing time of agent (usually 12-24 hours), and the other is that there is only one free-face at the tunnel face.

We tried an experiment using the accelerator which speeds up the chemical reaction of fracturing agent, and confirmed that the curing time became very short (15-30 minutes).

It was cleared by FEM analysis that some slits at the tunnel face improved the fracturing effect. So, abrasive water-jet was used for cutting the slits.

We have had a successful practice in tunnel excavation by applying the hybrid method using abrasive water-jet and expansive demolition agent, and used this method in the construction of a tunnel (cross section is about 5.4m^2 and tunnel length is about 69m). As the result of it, tunneling cycle time was about 22.7 hours and each excavation length was about 53cm on the average.