

(76) スロット穿孔機を用いた 硬岩トンネルの無発破掘削

株式会社 奥村組 正員 萩森健治 株式会社 奥村組 正員 本田裕夫
株式会社 奥村組 正員 榊本 正 山口大学 工学部 正員 古川浩平
山口大学 工学部 正員 中川浩二

1. まえがき

硬岩の掘削は発破工法によることが経費および工期の面から最も有利であることはよく知られている。しかし発破振動が構造物に与える影響や公害振動、騒音などの面から既設重要構造物の近くや市街地近郊では低振動発破工法が要求されたり、あるいは発破が全面的に禁止されることがしばしばある。そのため有効な低振動、低公害さらには無発破の硬岩掘削工法の開発が今日の社会的要請であるといえる。

このような状況にもかかわらず、TBMによるものを除けば無発破硬岩トンネル掘削に関するまとまった研究はほとんど見られない。本研究はこれらのことを考慮し、まず硬岩トンネルの無発破掘削工法に関する検討を行った後、無発破硬岩トンネル掘削で重要な3段階である ①自由面作成 ②岩盤の1次破碎 ③岩盤の2次破碎のうち①と③について現場実験および実施工のデータを基に検討を行ったものである。②の1次破碎におよぼすスロットの効果に関してはすでに発表している¹⁾ので、本論文では省略する。

2. 硬岩トンネルの無発破掘削工法の検討

発破およびTBMを用いずに掘削された硬岩トンネルのうち文献等に公表されたり²⁾³⁾⁴⁾、あるいは筆者らが何らかの形で関与し、資料を入手し得たものをまとめたものが表-1である。この表によると硬岩トンネルの無発破掘削は基本的に何らかの処置をほどこして、岩盤切羽面のみかけの強度を低下させた上、ブレーカーで打撃、破碎することから成り立っているといえる。岩盤の節理等に関連する地山強度については一軸圧縮強度および弾性波速度で評価される。これについてはAトンネルがかなり低いことを別にすれば他はすべて一軸圧縮強度は100MPa以上であり、弾性波速度は4.0~5.2 km/secと硬岩トンネルそのものといえよう。掘削断面はFトンネルを除けばほぼ33~40m²程度のものである。

自由面については中央部自由面と外周部の縁切りの2つが考えられる。中央部の自由面は1次破碎における応力開放のためのみならずブレーカー破碎の破碎開始場所として重要である。自由面を作らずに掘削を行った例としては試験施工のHトンネルがみられるが、ここでは1m²の掘削に1300kg級ブレーカーで8時間を要したといわれている。また外周部の縁切りは特に有効であると考えられる。すなわちこの縁切りの自由面

表-1 硬岩トンネルの無発破掘削例

施工 区分	トンネル	岩 質			掘削断面 積 (m ²)	掘削延長 (m)	掘 削 方 法			
		岩 石 名	1軸圧縮強度 (MPa)	弾性波速度 (km/s)			中央部自由面	1次破碎	外周部縁切り	ブレーカー質量 (kg)
実 施 工	A ²⁾	硬質黒色千枚岩	35~75	3.3	上半 33	127	φ75, 100mm ボアホール群	なし	なし	800
	B	花崗岩	160~200	5.0~5.2	上半 39	55	φ100mm ボアホール 油圧くさび	油圧くさび	膨張性破碎剤	1100
	C ³⁾	黒雲母花崗岩	100以上		上半 35	130	φ100mm ボアホール 油圧くさび	油圧くさび	膨張性破碎剤	1200
	D	黒雲母花崗岩	70~200	4.0	上半 33	67	スロット	1部水圧破碎	スロット	1100
	E	花崗閃緑岩	80~200	4.0~5.0	39	200	スロット	1部水圧破碎	スロット	1860
試 験 施 工 お よ び 実 験	F	花崗岩	150	4.8~5.2	11	15	スロット	膨張性破碎剤	スロット	200
	G ⁴⁾	花崗岩	240	4.0~4.5	33	20	スロット	水圧破碎 油圧くさび 膨張性破碎剤	スロット	1500
	H	花崗閃緑岩	100~150	4.0~5.0	41	—	なし	なし	なし	1300
	I	花崗閃緑岩	100~150	4.0~5.0	39	—	自由断面掘削機	なし	なし	1860

を1次破碎の応力開放面あるいは2次破碎の破碎開始位置として評価する以上に地山岩盤からの縁切りそのものが重要になると思われる。すなわち縁切りを行わずに打撃破碎により掘削を行った場合、この周縁部はブレーカー打撃を最もやりにくい場所である上、周縁部の掘削においてブレーカーの打撃エネルギーはその多くが地山に吸収され破碎効果は著しく低下する。このことは外周部に自由面を作らずに施工されたB、Cトンネルにおいて外周部には密な間隔で膨張性破碎剤を充てんし、それにより縁切りを行っていること、あるいは全く縁切りなしに行った掘削で1m³の掘削に1860kg級のブレーカーで1.4時間を要した試験施工のIトンネルの例からも認められる。

1次破碎についてはAトンネルを除いて油圧くさび、膨張性破碎剤、水圧破碎器が用いられている。その使用の程度についての詳細は不明である。Aトンネルで1次破碎が行われなかったのと、Eトンネルで部分的に水圧破碎器を用いているのみであるのを除けば、何らかの形で1次破碎はすべてのトンネルで行われており1次破碎の必要性が認められる。ここでAトンネルは前から述べているように岩盤強度がかなり低いことによるものであり、またEトンネルは外周部縁切りの効果に加えて、ブレーカー質量が1860kg級と特に大きいことが掘削を可能にしたものであろう。

2次破碎に用いるブレーカーの機種についてはそれぞれ施工の条件により種々の大きさのものが用いられているが、Aトンネルを除けばいずれも本体質量1000kg以上のものが基本といえ、かなり強力な打撃による破碎が行われていることがわかる。

以上のことから硬岩トンネルの無発破掘削を実用上可能にするための条件とし次のことを挙げることができる。

- 1) 1次破碎の応力解放面、2次破碎の破碎開始位置としての中央部自由面の他になんらかの形で周縁地山に対して外周部縁切りを行うこと
- 2) 岩盤の強度、節理の発達状況によるが必要に応じてなんらかの1次破碎法を併用すること
- 3) ある程度以上の大型ブレーカーを用いることにより破碎率を確保すること

3. 自由面作成のための連続削孔機とその削孔性能

最近自由面（スロット）削孔機が開発された⁵⁾。本研究ではこのスロット削孔機を用いた実験を行い、その結果から自由面作成における機械の性能の検討を行う。これらの実験は表-1中のGトンネルで行っている。スロットの削孔には2台のスロット削孔機を搭載した3ブーム油圧ジャンボを用い、延べ540時間にわたり稼働運転した。なお、スロットの深さは、1.5mである。

図-1に一軸圧縮強度と削孔速度との関係を示す。一軸圧縮強度は、シュミットハンマーの反ばつ硬度の測定値から換算した。削孔速度は、反ばつ硬度を測定した切羽面において、その面から1.5mの深さまでのスロットを10本前後削孔したときの速度の平均値と標準偏差とを示している。また、円形孔の削孔速度と比較するため、同じ形式のドリフトにより、他のトンネルで円形孔を削孔したときのデータをあわせて示している。岩質はC_H級の花崗岩で実験トンネルとほぼ同様の条件であるが、円形孔の孔径がφ100mmであった。そこで削孔速度は削孔断面積に反比例するものとみなして、スロットの断面積と同じ断面積の値（孔径φ118mmに相当する）に換算している。図-1によれば、スロット削孔速度は一軸圧縮強度と相関があり、円形孔の場合とほぼ同様の傾向がみられる。また、速度自体は、円形孔の削孔速度とくらべておよそ10%遅い程度である。図-1の値をスロット削孔と円形孔削孔のそれぞれの場合について分布形を示したものが図-2である。速度分布はいずれも正規分布に近い形となっている。スロット削孔機で速度が遅かったものは、ビットが節理にかみこみ、いわゆるジャーミングを起したことが原因であると考えられる。

以上のように連続孔方式による自由面作成機の削孔性能には、同断面積の大口径円孔を掘削する場合と

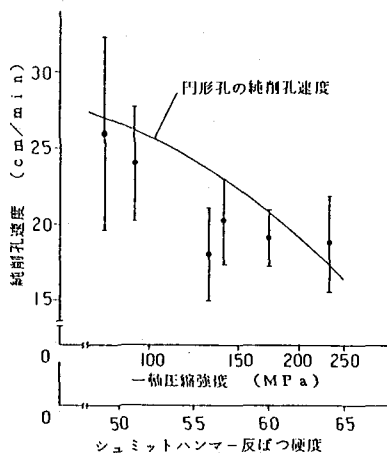


図-1 一軸圧縮強度と純削孔速度との関係

くらべて、特に大きな削孔効率の低下はみられない。また親子ビットあるいはリーミングビットを用い、単一孔を連結していく方法には削孔に手間がかかり削孔精度がよくないなどの問題点がみられる。一方、スロット削孔機はその後ドリルを大型化し、削孔できるスロット深さを2.2mと長くすることによって実質的な削孔速度が向上している。これらのことを考慮すると他の工法に比べて連続孔方式がはるかに実質上有利なことを意味する。また機械の特性上通常の油圧ジャンボに積載して使用可能であることから通常の削孔作業と同様に任意位置の削孔も可能である。

この任意位置での削孔可能であるという利点を明らかにするため、次のような比較を行う。表-1中B、Cトンネルでは外周部自由面を作成せずこの部分の縁切りに膨張性破砕剤を用いている。この工法は非爆性岩盤破砕工法としてY社から提案されており⁶⁾、油圧くさびによる岩盤破砕の補助工法として用いられている。今ここで同じ面積の外周側壁を破砕剤およびスロット削孔機で縁切りする場合の所要時間の比較を行う。破砕剤の場合は破砕剤孔の削孔と、破砕剤充てんに要する時間を含めてスロット削孔時間と比較したものが表-2である。この表からみられるように所要時間には両者に大差はなく膨張性破砕剤の膨張圧発現時間あるいは以下に述べる2次破砕のための自由面効果を考えるとスロット削孔による縁切りの方が有利であることが推測される。

4. ブレーカーによる2次破砕

TBMを用いない硬岩トンネルの無発破掘削とは、そのままでは破砕困難である岩盤を自由面の作成、1次破砕などの過程を経てブレーカーで破砕、掘削することといえる。従って、作成されるべき自由面の程度あるいは行われるべき1次破砕の程度は、掘削すべき岩盤の条件と2次破砕に用いるブレーカーの能力により定まることになる。そこでここではトンネル掘削においてはブレーカー質量が支配的要因となることを示し、さらに同一のブレーカーを用いる時には1次破砕の程度あるいは外周自由面が掘削能率に大きな影響を与えることを示す。

(1) トンネルにおける掘削能率とブレーカー質量

先に示した表-1中弾性波速度が4.0km/s以上の花崗岩のデータに限ってブレーカー質量と破砕能率との関係を示したものが図-3である。ここでは1次破砕の有無、程度は考慮せず図示している。これよりブレーカー質量が大きくなると破砕能率が著しく大となることが明らかである。

(2) 総掘削能率とスロット、1次破砕、ブレーカーとの関係

無発破トンネル掘削の掘削能率はスロット削孔機による自由面作成、ブレーカーの能力に応じた1次破砕、そしてブレーカーによる2次破砕の各工種の施工能率の合計で表わされる。自由面作成と1次破砕は節理の状況に応じて適宜省略することも

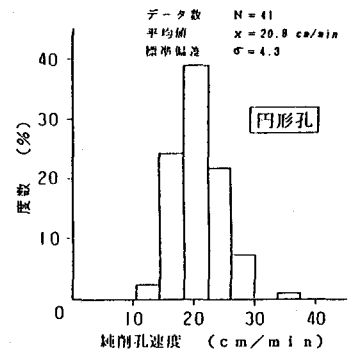
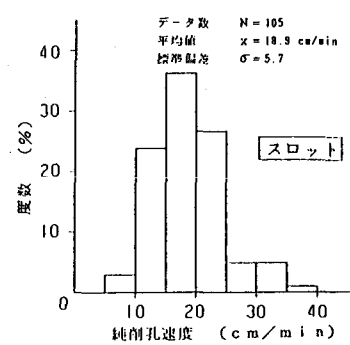


図-2 純削孔速度の分布

表-2 外周側壁部の縁切りに要する時間

縁 切 り 方 法	トンネル名	m ² 当りの時間 (h/m ²)
膨 張 性 破 砕 剤	B トンネル	0.79
	C トンネル	0.46
スロット削孔機	D トンネル	0.77
	E トンネル	0.82

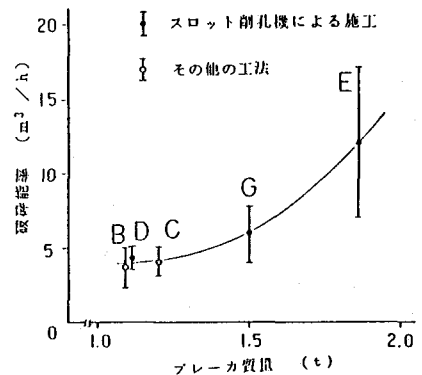


図-3 ブレーカー質量と破砕能率

可能となる。

今表-1中の花崗岩質のトンネルをブレイカー質量ごとに自由面削孔、1次破碎、ブレイカー破碎に分けて示したものが図-4である。これからみられるようにブレイカーのみによる掘削(H、Iトンネル)は特に掘削能率が悪く、また実施工されたトンネルでは外周部縁切りを必ず行っていることが認められる。また、B、CトンネルにくらべてDトンネルで著しく掘削時間が短くなっているが、これはB、Cトンネルでは自由面を積極的に作成していないのにくらべDトンネルでは外周に縁切り自由面を作成した掘削を行っているためである。その結果、1次破碎時間は短いにもかかわらずむしろ短いブレイカー使用時間で2次破碎が行われている。

またGトンネルではDトンネルにくらべてブレイカー能力が大きくなっているにもかかわらずむしろ掘削能率が低下している。これはGトンネルが実験トンネルであり施工能率よりも、データの採取を重視したため、1次破碎に多くの時間を要したことによる。このことはG、Dの両トンネルでスロット削孔時間がほぼ等しく、1次破碎時間はDトンネルの方が短くなっていることから認められる。

さらにEトンネルでは掘削時間が全体的に短くなっているが、この場合ブレイカーが大きいため自由面作成は外周部の縁切りのみとし、特に必要と思われる場合のみ1次破碎することで破碎、掘削が可能となっているためである。すなわちこの例は硬岩トンネルの無発破掘削においてブレイカー質量と自由面それも外周縁切り自由面が重要であることを示している。

5. 結論

以上のように本研究ではTBMを用いない硬岩トンネルの無発破掘削工法について、現場実験および実施工のデータをもとに検討を加えてきた。その結果得られた主な点を要約すると以下の通りである。

- (1) 無発破トンネル掘削における掘削能率を左右する大きな要因はブレイカー能力であり、そのトンネル断面で使用可能な最大のブレイカーを用いることが重要である。
- (2) 自由面を作成することは非常に有効である。自由面には外周部と内部の2種があるが、外周部の自由面作成には本研究で用いたスロット削孔機が最も能率的である。
- (3) 外周部、内部の自由面は共に1次、2次破碎に有効である。これらの必要量は節理を含めた岩盤強度との関係で決められる。
- (4) 全体の掘削能率は自由面作成、1次破碎、ブレイカーによる2次破碎の和で表わされ、節理を含む岩盤程度により、内部の自由面作成量及び1次破碎の要、不要を決めることができる。

参考文献

- 1) 本田裕夫、萩森健治、中川浩二、古川浩平；硬岩トンネルの無発破掘削におけるスロットの効果、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集Ⅲ、pp.783-784、1986年
- 2) 日本トンネル技術協会；硬岩の低振動・低騒音掘削に関する調査研究報告書、1978年
- 3) 名倉隆雄、市丸宏、寺坂典正；トンネル工事と環境保全対策、トンネルと地下、第17巻、第4号、pp.41-50、1986年
- 4) 萩森健治、村上進、本田裕夫；低公害岩盤掘削工法の実用化、土木学会第40回年次学術講演会概要集Ⅲ pp.247-248、1985年
- 5) 本田裕夫、村上進、萩森健治；硬岩の無発破トンネル掘削工法の開発、土木学会第39回年次学術講演会概要集Ⅲ、pp.489-490、1984年
- 6) 文献3) あるいは 山本鉄工所；『BIGGER、HRB-100』カタログ

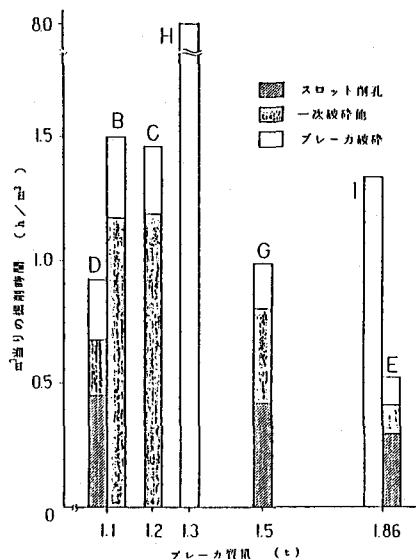


図-4 ブレイカー質量と掘削時間

(76) NON-BLASTING TUNNELLING METHODS IN HARD GRANITE
USED SLOT DRILLING MACHINE

Kenji Hagimori *
Hiroo Honda *
Tadashi Masumoto *
Kohei Furukawa **
Koji Nakagawa **

Abstract

In this study, non-blasting tunnelling methods in hard granite used slot drilling machine are discussed based on the actual tunnelling results and in-site testing data. Machine tunnelling with a TBM is excluded from this discussion.

Followings are obtained from the study.

1. The boring of the slot is very important because it not only provides the starting position of secondary demolition but also cuts off the tunnel face from the remaining side rock.
2. The preparatory demolition operation with expansive cement, hydraulic wedge or hydraulic fracturing equipment is highly advisable.
3. The efficiency of the secondary demolition with hydraulic breakers depends a lot on the weight of the breakers.

* Okumura Corporation

** Faculty of Engineering, Yamaguchi University