

硬岩トンネルの無発破掘削に関する研究

STUDY ON NON-BLASTING TUNNELLING METHODS IN HARD GRANITE

本田裕夫*・萩森健治**・古川浩平***・中川浩二****
By Hiroo HONDA, Kenji HAGIMORI, Kohei FURUKAWA
and Koji NAKAGAWA

In this study, non-blasting tunnelling methods in hard granite 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.

Keywords: non-blasting tunnelling, hard granite, machine tunnelling, in-site testing

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。

最近このように発破が禁止されるような地域での硬岩の掘削はますます増加する傾向にある。この理由としては地価の高騰による土地の有効利用のためや、予想以上に急速に都市化した地域の基本的な生活施設の整備のため、あるいは重要施設の新設に際しての立地困難さからやむを得ず既設構造物に隣接して用地を拡張するためなどいろいろである。しかしいずれも今日の社会の発展に伴う生活基盤の整備という立場から、たとえ施工そのものが高価なものになるとしても避けることのできない

面を有している。換言すれば有効な低振動、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。

いま硬岩掘削の例をトンネルにとると、日本トンネル技術協会では昭和 53 年に『硬岩の低振動、低騒音掘削に関する調査研究報告書』¹⁾をまとめている。そこでは硬岩トンネルの無発破掘削法の基本的考え方を紹介するとともに、ブレーカーをはじめとする硬岩トンネルの掘削に有用と考えられる建設機械をそれぞれの使用実績をもとに紹介している。この研究報告書では、硬岩トンネルの無発破掘削が今後ますます増加すると予測し、そのための機械、材料、施工法の開発の必要性を強調している。それ以来、岩盤の破砕装置や破砕材料、あるいは種々の自由面削孔機等の開発がなされ、それらにより、硬岩の無発破掘削工法は当時と比べて格段の進歩を遂げている。

このような状況にもかかわらず、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みられない。本研究はこれらのことを考慮し、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 次破砕、③ 岩盤の 2 次破砕、のおのおの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行ったものである。

* 正会員 奥村組技術研究所土木研究課 主席研究員
(〒559/大阪市住之江区浜口西 3-5-8)

** 正会員 工修 奥村組技術研究所土木研究課 主任研究員
(同上)

*** 正会員 工博 山口大学助教授 工学部建設工学科
(〒755/山口県宇部市常盤台 2557)

**** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科 (同上)

なお硬岩トンネルの無発破掘削に岩石トンネル掘進機 (TBM) が今日も小断面、長大水路の掘削を中心に用いられている²⁾が適用例は今のところ限られているようであり、本研究の検討の対象からは省く。

2. 硬岩トンネルの無発破掘削工法の問題点

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^{1),3),4)}、あるいは著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施して、岩盤切羽面の見掛けの強度を低下させようえ、ブレーカーで打撃、破砕することから成り立っているといえる。

この方法で掘削された最初のトンネルは表-1 中のトンネル A である国道 33 号線舟戸トンネルであろう。前述の『硬岩の低振動、低騒音掘削に関する調査研究報告書』(以下前述の報告書)では舟戸トンネルの施工例が詳しく紹介され、この施工実績を当時のトンネル掘削法の 1 つの指針として評価し、さらに施工能率を上げるための条件として「岩盤の節理」、「物理的性質-圧縮強度」および「自由面」の重要性を挙げている。筆者らはこれら 3 つの条件のほか、より重要な要因として「ブレーカーの能力」を加え、本研究においてはこれらについて検討を行う。

すなわち、まずこれらの 4 要因を実施工の観点から、① 自由面作成、② 岩盤の節理などを考慮した岩盤の 1 次破砕、③ ブレーカーによる岩盤の 2 次破砕、に分け、その問題点を過去の実施工や現場実験から抽出し、これらのデータに基づき、検討を加えた。

なお、表-1 中の G トンネルは砕石場跡地に実験のために設けたもので、4., 5. はおもにここでの実験結果をもとにしている⁴⁾。今後特にトンネル名を記さない場合のデータは、この G トンネルのものである。

(1) 自由面作成

岩石は圧縮に対しては著しく大きな抵抗力を発揮するのに比べて引張に対しては弱いことは周知の事実である。すなわち、岩盤にいかにして引張応力を生じさせるかが、岩盤掘削の難易を支配する最大の要因になる。この引張応力を生じさせるために、最も基本となるのは自由面の存在である。

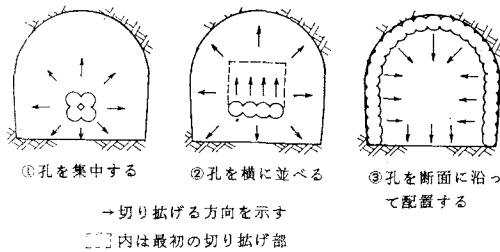
岩盤を無発破で掘削する場合、破砕に用いられる瞬間的なエネルギーは発破の場合に比べて著しく小さい。このことは発破掘削の場合と比べてより多くの自由面作成とその有効な利用が要求されることを意味する。すなわち岩盤中に引張応力を発生させ、破壊を生じさせるためには岩盤の局部的移動が必要でありそのためにはできるだけ多くの自由面が岩盤中に存在することが望ましい。ブレーカーによる破砕や 1 次破砕に用いられる膨張性破砕剤、油圧くさび、水圧破砕器等による岩盤破砕メカニズムを考慮すると切羽面のみでは自由面が不十分であり切羽に垂直な方向の自由面が必要とされる。

舟戸トンネルを参考にした前述の報告書中の「施工案」においては、自由面の作成法として、断面内に大型ドリルで複数本の孔を削孔することにより空間を形成し、そのまわりをブレーカーで拡孔することが考えられている。そこでは図-1 のように、① 孔を集中する、② 孔を横に並べる、③ 孔を断面に沿って配置する、の 3 つの方法が提案されている⁵⁾。さらにこれらの方法の効果について一軸圧縮強度 200 MPa に近い硬岩では施工そのものの可能性が問題にされており、また ③ の方法では最も施工能率は上がると考えられるが削孔本数が多くなるため施工時間中の削孔時間に問題があるとされている。

自由面削孔のための機械開発は特に最近になって著しいように思われる。これは次に述べる 1 次破砕法の 1 つである膨張性破砕剤の発達等によって自由面の重要性が

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次破砕	外周部縁切り	ブレーカー質量 (kg)
実 施 工	A ¹⁾	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	600
	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	膨張性破砕剤	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	膨張性破砕剤	1200
	D	黒雲母花崗岩	70~200	4.0	上半 33	87	スロット	1部水圧破砕	スロット	1100
	E	花崗閃緑岩	80~200	4.0~5.0	39	200	スロット	1部水圧破砕	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	膨張性破砕剤	スロット	200
	G ⁴⁾	花崗岩	240	4.0~4.5	33	20	スロット	水圧破砕 油圧くさび 膨張性破砕剤	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



図一 自由面作成のための削孔パターン⁵⁾

再認識され、連続孔的な広がりをもつ自由面が要求されるようになったためであろう。

これらの自由面作成工法に関し実施のデータがほとんどなく工法の実用性がいまだに明らかでない。そこで、本研究では 4. で今日最も有効な自由面作成法と思われるスロット削孔機を用い、その削孔性能について検討する。

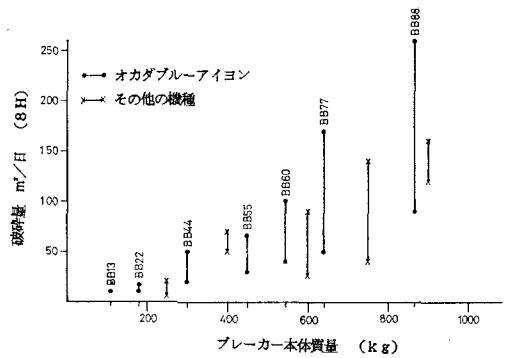
(2) 岩盤強度の低下 (1次破碎)

岩盤の強度を低下させるために人工のクラックを岩盤中に作成する種々の工法が考えられ、かつ実用化されている。それらのうち、トンネルで使用できる代表的なものとして、① 膨張性破碎剤、② 油圧くさび、③ 水圧破碎器、の3種を挙げることができる。これらはいずれも岩盤中に穿たれた孔に充填あるいは挿入載荷することにより岩盤に引張応力を生じさせクラックを発生させるものである。これによりもともとブレーカーの打撃を受けつなかつた堅硬な岩が人工のクラック等を多数含む破碎岩へと変化し、ブレーカーにより容易に破碎されることになる。

これら3種の工法に関する効率、経済性などについては膨張性破碎剤⁶⁾を除いて過去ほとんど資料がないが、実施に適用するためにはこれらの工法の長短所、適用範囲、効率、経済性などに対する検討が不可欠である。本研究では 5. でこの検討を試みる。

(3) ブレーカーの能力 (2次破碎)

岩盤の掘削をブレーカーの打撃で行う場合、ブレーカーの能力によりその掘削効率が著しく異なることが予想される。前述の報告書においてもその重要性は認められ、空圧および油圧のブレーカーの比較あるいはブレーカー本体の質量による破碎能率の比較などが行われている。そこではブレーカー本体の質量による破碎能力の比較として図-2に示すような碎石場小割破碎量(硬質砂岩 118~186 MPaのもの)が示されている⁷⁾。これによるとブレーカー本体の質量は破碎効率と著しく強い相関を有していることがわかる。実際のトンネルにおいてもブレーカー質量と作業能率との関係に対する考慮が必要であるが、これらに関してもいまだまとまった研究はない。本研究では 6. でこの問題に対し検討を行う。



図二 ブレーカー質量と破碎量⁷⁾

3. 最近の無発破トンネル掘削例の検討

先に示した表-1の施工例を前章の硬岩トンネルの無発破掘削工法の問題点の立場から検討する。ここでは実施されたものと試験施工および現場実験のものに分類している。これらのうち実施されたものはその経済性等の評価は別にしても工法として成り立つものであると考えられる。また試験施工についてはここに挙げたもののほかに実施に至らなかった例がいくつか存在することが考えられる。

まず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 100 MPa 以上であり弾性波速度は 4.0~5.2 km/s 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 33~40 m² 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。前述の報告書にもあるとおり、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 1 m³ の掘削に 1300 kg 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前述の報告書に「最も施工能率は上がる」と評されているように、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うえ、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填し、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、何らかの形での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き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。

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て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囲の地山からの縁切りを行うこと。
- 2) 岩盤の強度、節理により必要ならばなんらかの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能率を確保すること。

トンネル掘削において掘削断面積に応じた大型のブレーカーを用いることは通常可能である。そのとき1次破碎の効果は自由面の作成と密接な関連をもつことから、中央部自由面のみならず外周部縁切りを行い得るだけの削孔機の使用が望まれることになる。

4. 自由面作成のための連続孔削孔機とその削孔性能

硬岩トンネルの無発破掘削において自由面の作成は前述の報告書の中で施工能率を上げるための条件の第1に挙げられ、その重要性はよく知られている。また前述のように膨張性破碎剤の利用の中で特にその重要性が強調され、種々の自由面掘削法が提案されてきた。岩盤を削孔するということからすれば回転打撃式削岩機によるのが最も合理的であることから、円孔を連ねて自由面を作る方法が主体のようである。前述の報告書の中でも種々の方法が紹介されているが、実用性を考えた場合、親子ビットあるいはリーミングビットによる回転打撃式の

方法が主体であったようである。

いま、自由面を1次破碎のための応力解放面のみならず2次破碎のための破碎開始点として考えるとき、自由面に望ましい条件として次のようなことが考えられる。

- 1) 1サイクルの掘進長を考慮少なくとも削孔長が1.5m以上あること。
- 2) 打撃破碎における自由面幅としてズリの排除等を考え合わせると幅が50mm程度あること。
- 3) 削孔速度は削孔本数(連続孔とした場合のその個々の本数の合計)が著しく大きくなるので速ければ速いほどよいこと。
- 4) トンネルでの使用を主目的とすることから現在のトンネル掘削システム中の諸機械類との親和性があること。

などであろう。

ここで最近自由面(スロット)削孔機としてO社から開発されたものがある⁶⁾。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。この間の削孔性能の調査結果を以下に述べる。なお、スロットの深さは、1.5mである。写真-1にスロット削孔機による削孔状態を示す。1度に5孔が

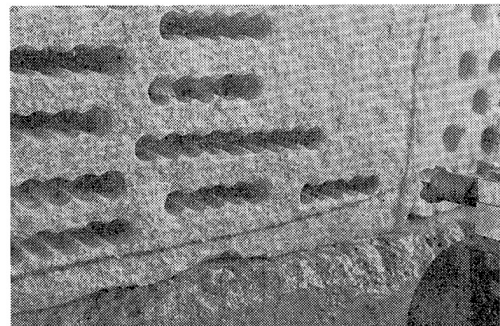


写真-1 スロット削孔機による削孔状態

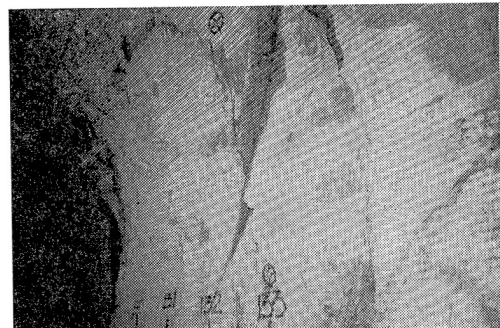


写真-2 スロット削孔機で削孔された壁面状況

スロット状に削孔されることがわかる。この1度の削孔によるスロットの幅および長さはそれぞれおよそ 54 mm および 250 mm である。写真—2 にスロット削孔機により削孔された壁面の状況を示す。これにより滑らかな自由面が削孔により作成されていることがわかる。

(1) 削孔時間の構成

スロット削孔機による1つの断面でのスロットの削孔作業は、通常の削岩機による削孔作業と同様、次の項目から構成される。

- ① 機械の移動、据付、撤去
- ② ブームの移動、位置決め
- ③ 座ぐり
- ④ スロット削孔
- ⑤ ロッド引抜き
- ⑥ ビット、ロッド交換
- ⑦ トラブル、修理
- ⑧ 点検
- ⑨ 休けい
- ⑩ その他

②～⑤ の1回の作業でスロット1本(円孔としては5本分)を削孔し、これを必要なスロットの数だけ繰り返す。⑥ は定期的に行い、⑦、⑧ はランダムに発生する。

これらの作業に要した時間の割合を図—3 に示す。スロット削孔の時間は 70% 程度となっている。

移動、据付、撤去	0.3%
ブーム移動位置決め	7.5
座ぐり	7.6
スロット削孔	68.3
ロッド引き抜き	1.3
ビット、ロッド交換	2.9
トラブル修理	3.9
点検	0.2
休 憩	0.1
そ の 他	7.8

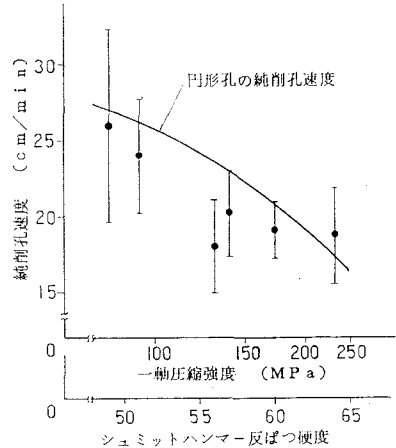
図—3 スロット削孔作業の時間割合

(2) 削孔速度

図—4 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発硬度の測定値から換算した。削孔速度は、反発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、同じ形式のドリフタにより、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 φ100 mm 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の値(孔径 φ116 mm に相当する)に換算している。

図—4 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比べておよそ 10% 遅い程度である。



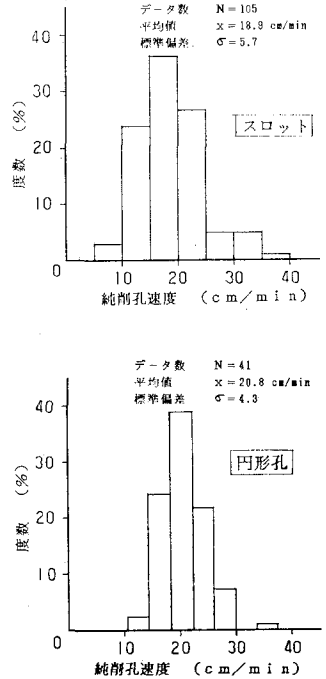
図—4 一軸圧縮強度と純削孔速度との関係

図—4 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—5 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こ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、同断面積の大口徑円孔を掘削する場合と比べて、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る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



図—5 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

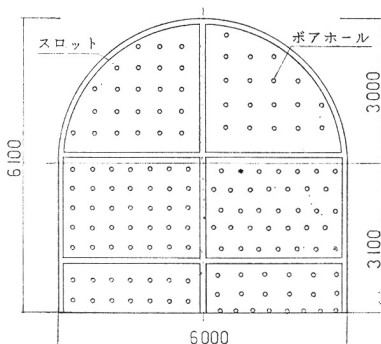
ンネルでは外周部自由面を作成せずこの部分の縁切りに膨張性破砕剤を用いている。この工法は非爆性岩盤破砕工法としてY社から提案されており⁹⁾、油圧くさびによる岩盤破砕の補助工法として用いられている。いまここで同じ面積の外周側壁を破砕剤およびスロット削孔機で縁切りする場合の所要時間の比較を行う。破砕剤の場合は破砕剤孔の削孔と、破砕剤充填に要する時間を含めてスロット削孔時間と比較したものが表—2である。この表からみられるように所要時間には両者に大差はなく以下に述べる1次破砕、2次破砕のための自由面効果を考えるとスロット削孔による縁切りの方が有利であることが推測される。

5. 1次破砕に及ぼすスロットの効果と1次破砕法の検討

岩盤が堅硬であり節理等が少ない場合にはたとえブレイカー破砕の開始位置として自由面が形成されていても岩盤の強度がブレイカーの能力を上回ることがしばしばある。この場合、堅硬な岩中に人工のクラックを作成することにより強度を低下させ、ブレイカー破砕を可能にするのが1次破砕である。

表—1のトンネル掘削では1次破砕が行われた場合には特にブレイカー破砕が問題となったことはないようである。すなわち1次破砕によるクラックの発生が生じた場合にはブレイカー破砕に対する1次破砕の効果は特に1次破砕法によらないようである。そこで本節では水圧破砕器、油圧くさび、膨張性破砕剤の3種類の方法を1次破砕に対するスロットの効果の検討とあわせて破砕時間、作業性、経済性の面から比較する。実験に用いた代表的な削孔パターンを図—6に示す。

(1) 水圧破砕



図—6 代表的な削孔パターン

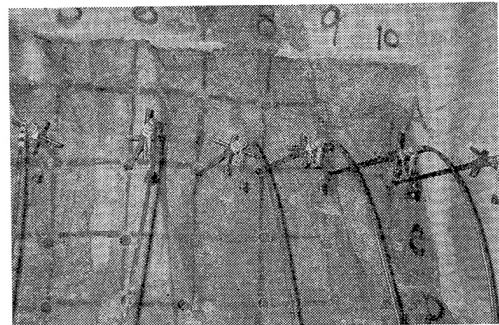
水圧破砕装置¹⁰⁾は孔にゴムチューブを介して高水圧を作用させ材料を破砕するものであり、孔に挿入する複数本の液圧管とこれらに高圧水を供給するポンプおよびバルブユニットから構成される。それぞれの孔に作用する内圧は、圧力変換器によって測定する。

実験では、内径 50 mm の孔を 40~50 cm 間隔で、基本的には図—6 に示すような配置で削孔し、1列にならんだ孔を 3~5 本同時に加圧する方式で、スロットに近い孔から順次破砕を行った。

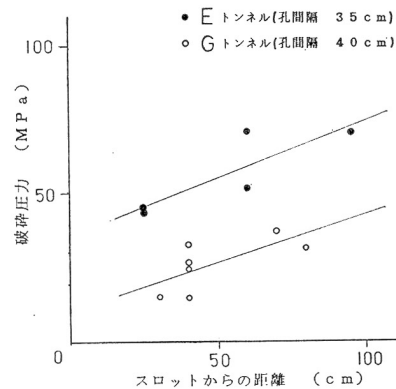
破砕状況を写真—3 に示す。水圧管への給水を開始して約 1 分後に圧力が上昇しはじめ、2~3 分後に破砕音を伴って破砕が起こる。同時に加圧した孔での破砕圧力は、各孔間が同時につながる場合には、ほぼ同じ圧力値を示すが、節理に支配されて、節理の方向にクラックが生じた場合には隣接する孔の圧力値が異なることが多い。

このとき、同時に加圧した孔での破砕圧力の平均値とスロットからの距離との関係について表—1の G, E トンネルで行った測定結果を整理し、図—7 に示す。

同図によれば、スロットの近傍では比較的低い圧力で破砕され、スロットから離れるほど高い圧力で破砕が起こっていることがわかる。なお、図には示していないが、E トンネルでスロットを設けずに加圧したところ、



写真—3 水圧破砕装置による破砕状況



図—7 水圧破砕装置の破砕圧力とスロットからの距離との関係

最高加圧力である 100 MPa でも破砕できなかった。

Gトンネルでの破砕圧力値に比べてEトンネルでのそれは全般に高い傾向を示す。岩石の強度はGトンネルの方が大きい。節理を含めた岩盤としての強度がGトンネルの方が小さいために、このような結果が生じたものと考えられる。

(2) 油圧くさび

油圧くさび装置としては、D社の装置を使用した¹¹⁾。孔の内径を 46 mm、孔間隔を 40 cm として、3本の油圧シリンダを同時に加圧した。破砕順序は水圧破砕の場合と同様である。

破砕状況を写真-4 に示す。加圧を開始してから約1分半後に、孔間をつなぐ方向にクラックが生じた。油圧シリンダを孔に設置する際、孔間を結ぶクラックが発生するようくさびの方向を定めているが、このことにより、クラックの方向が節理に支配される影響は少ないようである。

図-8 に Gトンネルにおける破砕時の圧力とスロットからの距離との関係を示す。ただし、圧力はシリンダに作用する油圧であり孔壁に作用する応力ではない。同図から、前述の水圧破砕の場合と同様、スロットの近傍ほど低い圧力で破砕できることがわかる。

(3) 膨張性破砕剤

破砕剤充填孔径は 42 mm と 60 mm で、孔間隔は 30

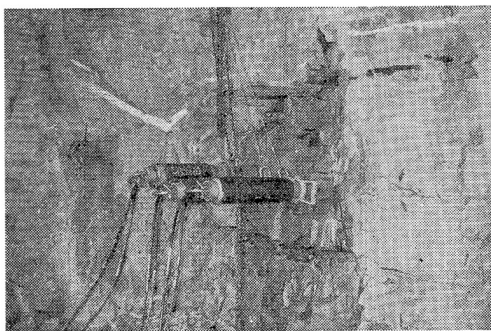


写真-4 油圧くさびによる破砕状況

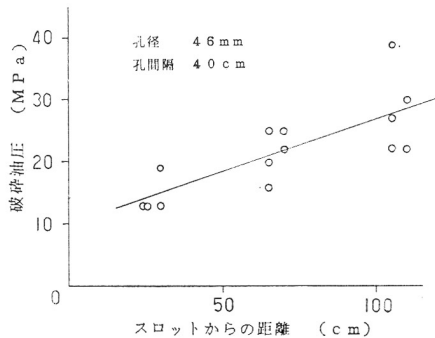


図-8 油圧くさびの破砕圧力とスロットからの距離との関係

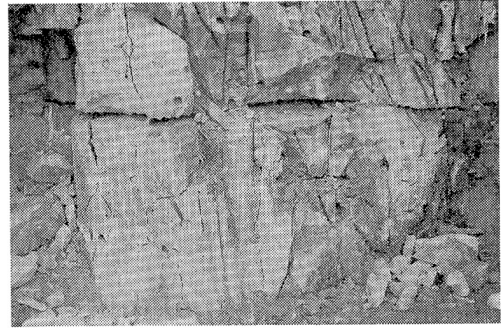


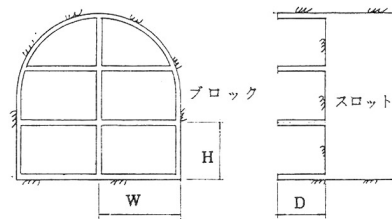
写真-5 膨張性破砕剤による破砕状況

~50 cm とし、カプセルタイプの破砕剤を使用した。破砕剤充填 15 時間後の切羽の状況を写真-5 に示す。

膨張性破砕剤の使用に際して破砕剤の膨張圧を正確に計測するのは困難である。また充填後、時間の経過とともに膨張圧は変化していくがクラックの発生時刻は特定しにくい。このことから水圧破砕器や油圧くさびの場合のようなスロットからの距離と圧力との関係は求めている。しかし、本実験の切羽では節理の発達著しく、クラックの発生、発達は節理の影響をかなり受けていたが、自由面の近くではクラックの発達が比較的容易なことが認められた。

これらのことからスロットの削孔量と1次破砕量との関係を検討するため、単位体積当たりの自由面面積とクラック発達程度という概念を導入した。すなわち、単位体積当たりの自由面面積は単位掘削量に占める自由面の面積を表わし、自由面としては切羽面とスロットの面積をあわせたものとした。算定の方法は図-9 に示すとおりである。また破砕剤によるクラックの発達程度については次の考え方によった。すなわちブロック内の各孔間に亀裂が発生している状況を4つに大別した。亀裂の発生が予定された孔間のうち、4分の1以下の孔間しか亀裂が形成されなかった場合から、4分の3以上の孔間に亀裂が形成された場合の4区分である。

図-10 に単位体積当たりの自由面面積と膨張性破砕剤の使用量との関係を示す。これによれば、単位体積当

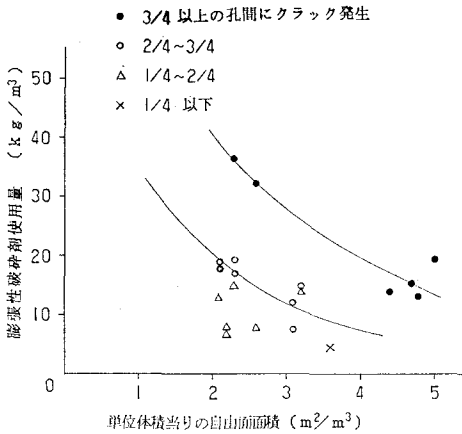


ブロックの体積 $V = W \cdot H \cdot D$

ブロックの自由面面積 $S = W \cdot H + 2D(H + W)$
(切端面) (スロット)

単位体積当たりの自由面面積 $F = S / V$

図-9 単位体積当たりの自由面面積の定義



図一10 膨張性破砕剤の使用量と自由面積との関係

たりの自由面積が大きいほど破砕剤の使用量は少なくてすむことがわかる。また、図に示していないが、B、Cトンネルの場合、切羽面だけを自由面として外周部の縁切りに膨張性破砕剤を用いているが、このとき自由面密度は $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 程度となり、破砕剤の使用量は $80 \sim 100 \text{ kg/m}^3$ であったといわれている。

一方、破砕剤メーカーの資料によれば、硬岩のベンチカットの場合の使用量は $12 \sim 20 \text{ kg/m}^3$ とされている¹²⁾。ベンチカットの場合、一般に単位体積当たりの自由面積は $2 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 程度となることから、同図を適用すると実験で得られた値よりもやや少ない量であるが、大幅な違いはみられない。

これらのことから、スロットは自由面として有効に機能し破砕剤の使用量を減らす効果が大きく、そして減少の程度は単位体積当たりの自由面積すなわちスロット削孔量に関係することがわかる。

(4) 1次破砕方法の比較

今回の実験では、前述したように水圧破砕、油圧くさび、膨張性破砕剤を1次破砕の方法として使用したが、これらの方法について、定性的な比較を行った。

経済性、施工時間、施工性などの面で定量的に比較することが望ましいが、これらを同一の基準に換算して評価することは実験に多大の時間と経費を要すること、施工時の岩盤の条件等に大きく左右されること、膨張性破砕剤および油圧くさびは比較的多くの施工実績を有するが、水圧破砕はまだ実験段階であり今後とも性能の向上とコストダウンがはかられ、最終的な評価は定まってい

表一3 1次破砕方法の比較

名称	破砕時間 (h)	破砕力 (MPa)	孔径 (mm)	質量 (kg)	消耗品
水圧破砕	6.0	100	50	3	ゴムチューブ
膨張性破砕剤	14.5	60	60	1	破砕剤
油圧くさび	7.8	108*	46	36.5	ウグーリッス

* カタログでは衝撃力として表示されているが、これをカタログ指定の仮定のもとに破砕力に換算した。

ないことなどの理由により、定性的な比較にとどめその特徴を表一3に示す。

比較結果を要約すれば以下のとおりである。

- 1) 載荷孔の間隔を適切に設計すれば、いずれの方法によっても自由面を利用して効果的に破砕することができる。
- 2) 破砕時間の面では、現状では水圧破砕、油圧くさびによる方法が膨張性破砕剤と比べて有利である。
- 3) 作業性の面では、重量の小さい膨張性破砕剤、水圧破砕が有利である。
- 4) 経済性の点では、3種類の方法はほぼ同等である。

6. ブレーカーによる2次破砕

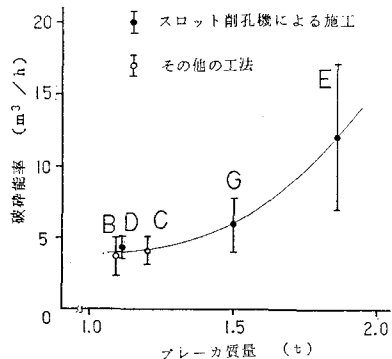
前述のとおりTBMを用いない硬岩トンネルの無発破掘削とは、そのままでは破砕困難である岩盤を自由面の作成、1次破砕などの過程を経てブレーカーで破砕、掘削することといえる。したがって、作成されるべき自由面の程度あるいは行われるべき1次破砕の程度は、掘削すべき岩盤の条件と2次破砕に用いるブレーカーの能力により定まることになる。そこで本節ではまずトンネル掘削においてはブレーカー質量が支配的要因となることを示し、さらに同一のブレーカーを用いるときには1次破砕の程度あるいは外周自由面が掘削能率に大きな影響を与えることを示す。

(1) トンネルにおける掘削能率とブレーカー質量

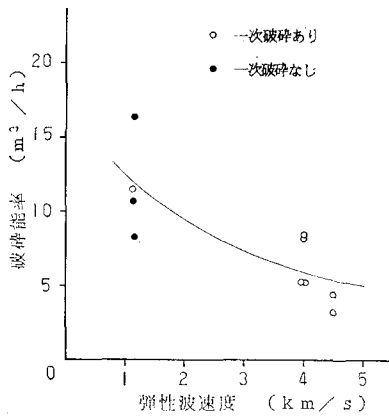
先に示した表一1 中弾性波速度が 4.0 km/s 以上の花崗岩のデータに限ってブレーカー質量と破砕能率との関係を示したものが図一11である。ここでは1次破砕の有無、程度は考慮せず図示している。これよりトンネルにおいても先の図一2と同様ブレーカー質量が大きくなると破砕能率が著しく大なることが明らかである。

(2) 弾性波速度と破砕能率

岩盤を構成する岩石が硬く、一軸圧縮強度が高くても岩盤中の節理の発達が著しい場合にはブレーカーによる



図一11 ブレーカー質量と破砕能率



図一12 弾性波速度と破砕能率

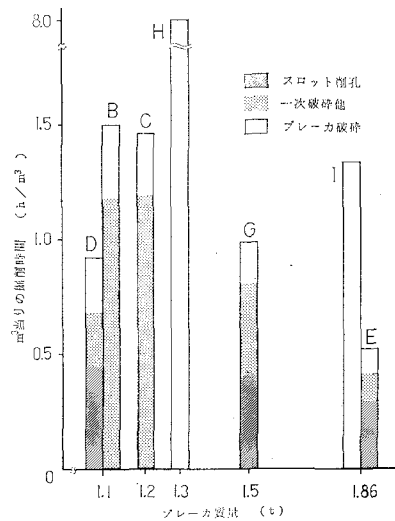
破砕掘削は困難ではない。この節理の発達状況は岩石の強度が同じ場合には弾性波速度が1つの指標となることがよく知られている。この弾性波速度とブレイカーの掘削の能率との関係を示したものが図一12である。図一12は表一1に示したGトンネルにおいていくつかの切羽を同一のブレイカーを用いて打撃掘削した結果を示している。前述のようにGトンネルの岩質は一定であるが、坑口近くは発破による岩盤の亀裂が著しく、掘削後にトンネル壁面で測定した弾性波速度は、坑口付近で低い値を示した。この図からみられるようにブレイカーの機種を一定とした場合、破砕能率は岩盤中の弾性波速度と強い相関を有する。

このことは岩盤が堅硬な場合には使用するブレイカーに対して適当と思われる状態にまで1次破砕を行い、見掛けの弾性波速度の低下をはかれば破砕が可能となることを意味している。すなわち、1次破砕の程度は節理等を含めた岩盤強度と用いるブレイカーとの関係で決めることになる。

(3) 総掘削能率とスロット、1次破砕、ブレイカーとの関係

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、ブレイカーの能力に応じた1次破砕、そしてブレイカーによる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可能となる。

いま表一1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次破砕、ブレイカー破砕に分けて示したものが図一13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トンネルに比べて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比べDトンネルでは外周に縁



図一13 ブレイカー質量と掘削時間

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次破砕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次破砕が行われている。

またGトンネルではDトンネルに比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次破砕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次破砕時間は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次破砕することで破砕、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。

7. 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とおりである。

(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、ブレードによる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および1次破碎の要、不要を決めることができる。

(5) 1次破碎における使用機剤として、膨張性破碎剤は水圧破碎器、油圧くさびに比べて作業時間がかかる。

(6) 本研究で用いたスロット削孔機による外周の縁切りは、孔を密にあげて膨張性破碎剤を用いる方法より能率がよい。

参考文献

- 1) 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。
- 2) たとえば，杉木 清・吉川 太・大澤康男：新愛本水力

- 発電所導水路トンネルにおける TBM 施工の現状，建設の機械化，第 416 巻，pp. 17～23，1984 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) 文献 1) と同じ，p. 19。
 - 6) たとえば，河野俊夫：静かで安全な破碎に！非爆性破碎剤“ブライスター”，火薬と保安，第 13 巻，第 2 号，pp. 13～18，1981 年。
 - 7) 文献 1) と同じ，p. 25。
 - 8) 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。
 - 9) 文献 3) あるいは山本鉄工所：『BIGGER, HRB-100』カタログ。
 - 10) 橋本堅一・工藤洋三・中川浩二・萩森健治：液圧による岩質材料の破碎について，第 17 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 91～95，1985 年。
 - 11) オカダ鑿岩機：『ダルダ』カタログ。
 - 12) たとえば，小野田セメント：『ブライスター』カタログ。
- (1986.6.13・受付)

14年ぶりの全面改訂版・水のバイブル

水理公式集 昭和60年 改訂版

B5判 642ページ上製・ビニールケース入り 14000円 会員特価 12000円(〒とも)

- 主要目次●
- 第1編 基礎水理編** 1. 水理の基礎 2. 開水路の水理 3. 管水路の水理 4. 浸透流 5. 渦 6. 拡散 7. 噴流 8. 密度流 9. 流体力および流体力弾性振動 10. 波 11. 環境水理 12. 資料解析 13. 数値解析
- 第2編 水文編** 1. 水文統計 2. 流域と流出過程 3. 流出解析 4. 水文予測 5. 水資源計画
- 第3編 河川編** 1. 流れと観測 2. 河川の不等流 3. 局部流 4. 洪水流 5. 流砂 6. 土砂生産と流出 7. 河床変動 8. 河川構造物の水理
- 第4編 発電編** 1. せきと越流頂 2. ゲートおよびバルブ 3. 跳水と減勢工 4. 水撃作用 5. サージタンク 6. 地震時動水圧 7. 貯水池の環境水理 8. 冷却水取放水
- 第5編 上下水道・水質保全編** 1. 地下取水とその保全 2. 送配水と下水の集水 3. 流量計およびポンプ 4. 水処理 5. 市街地雨水流出・汚濁流出 6. 汚泥の流動と脱水 7. 水域の水質環境
- 第6編 海岸・港湾編** 1. 波浪 2. 波浪推算と波浪の長期統計 3. 波の変形 4. 波と構造物 5. 漂砂および海浜過程 6. 潮汐・潮流および長周期水位変動と流れ 7. 津波および高潮 8. 沿岸域における密度流現象 9. 沿岸における水質拡散

● お申込みは土木学会または全国主要書店へ ●