



# 施工 連続孔の新穿孔工法による硬岩部の機械掘削

## 主要地方道呉平谷線 上二河トンネル

玄道高穂\* 藤元利夫\*\*  
野間達也\*\*\* 土屋敏郎\*\*\*\*

### 1. はじめに

主要地方道呉平谷線は広島県呉市中心部と、近年住宅団地を核に急速に発展している呉市北部を結ぶ全長約10.5kmの幹線道路で、今後の呉市を中心としたテクノポリス構想による経済発展や都市整備における重要な役割を担う路線である(図-1)。

本工事区間は、呉市中心部から北方約2.0kmの住居地域に位置する延長550mの2車線トンネルを含む約700mの道路改良工事で、完成後は現道を下り車線、トンネルを含む新道を上り車線専用として供用することになっている。

トンネル部は、住居地域および現道とほぼ並行するた

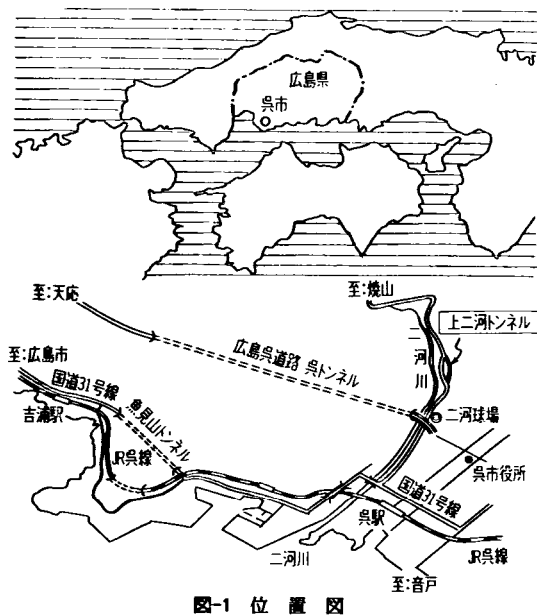


図-1 位置図

\*広島県土木建築事務所次長(兼)工事管理監  
\*\* " " 工務課主任  
\*\*\*(株)フジタ技術研究所土木研究部主任研究員  
\*\*\*\*フジタ・大本組共同企業体所長

め、トンネル掘削時におけるトンネル上部の急峻な斜面からの落石などを防止し、住居および通行車両の安全確保を目的として、機械掘削工法を採用した。

軟岩部はトンネル自由断面掘削機、硬岩部は連続孔により自由面形成後、3t大型ブレーカおよび割岩工法による掘削工法を採用した。割岩工法を採用する場合、自由面の存在は不可欠となる。自由面形成方法としては、トンネル切羽に溝状の連続孔を削孔する方法が主流であり、これまでも種々技術開発が行われてきたが<sup>1)~4)</sup>、それには専用機が必要となり、自由面の連続性・形成能力などに問題が残されていた。われわれは一般的なドリルジャンボを使用し、従来工法よりも自由面形成効率が高く、形成された自由面の連続性にすぐれた新しい自由面形成工法の開発を行った<sup>5)~7)</sup>。

本稿は、今回開発した新しい自由面形成工法による硬岩トンネルの無発破機械施工について報告するものである。

### 2. 地形・地質概要

#### 2-1 地形概要

本トンネルは、二級河川である二河川によって侵食さ

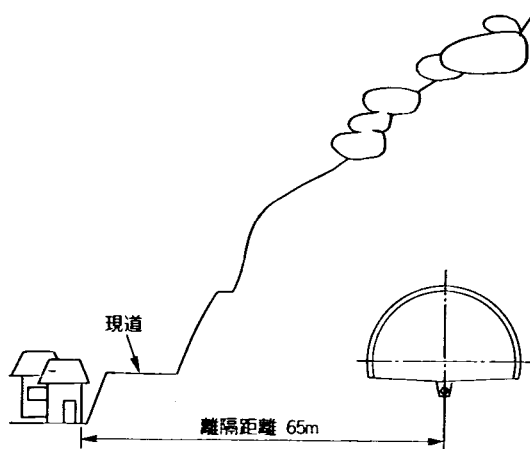


図-2 トンネル周辺環境図

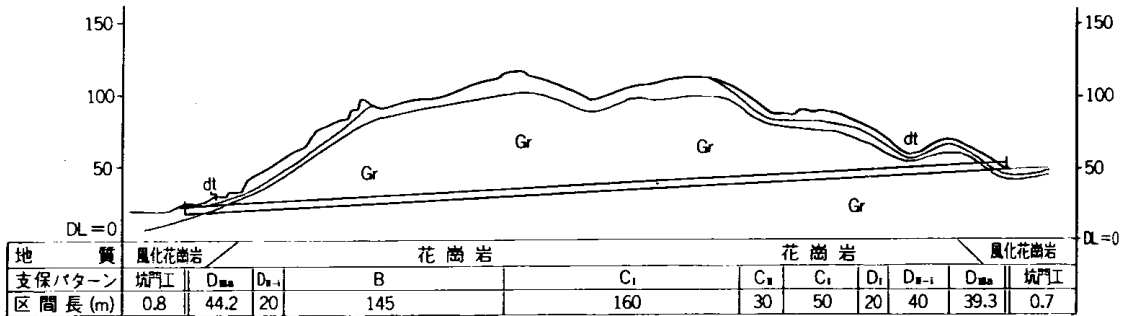


図-3 地質縦断面図

れた二河峽を谷側に見て施工する。トンネルは現道と二河川に並行に計画されており、現道の谷側には約50戸の住宅が密集し、山側は約45度の急斜面をもつ渓谷となっており、現道は山側を切り土して建設されている。斜面の花崗岩は、風化が進み転石群として路線全線にわたり露出していて危険な状態にある(図-2)。過去に幾度かの転石の落下を経験しており、トンネル掘削を行うにあたって発破振動による転石の落下が懸念されるため、住居近傍であることもあわせ無発破機械掘削施工が採用された。施工に際しては周辺環境に十分配慮し、落石防護工および防音設備工を完備した後、トンネル工事に着手する必要があった。

### 2-2 地質概要

本トンネルの地質は、中生代白亜紀の広島型花崗岩が主に分布し基岩をなしているが、山地の谷部には新生代第四紀に堆積した崖堆積層が分布している(図-3)。坑口部を除くトンネル本体の岩盤は、全体的に未風化の堅硬な岩盤(CM~CH級)と推定される。一部トンネル基盤面に破砕質な部分が出現する可能性もあるが、トンネルの施工には支障ないものと思われる。

トンネル掘削時には切羽より岩塊を採取し、一軸圧縮試験を行って、強度の確認を行いながら施工を行ったところ、一軸圧縮強度2,200kgf/cm<sup>2</sup>程度の岩盤が約70mにわたって出現した。そのほかの区間も1,800kgf/cm<sup>2</sup>程度の岩盤が約320m出現した。

## 3. 工事概要

### 3-1 トンネル概要

本トンネルは、延長550m、全幅員9.75m、内空断面積約60m<sup>2</sup>である。掘削当初は、対象岩盤の一軸圧縮強度は1,500kgf/cm<sup>2</sup>未満の広島型花崗岩であると想定した。これより、D~CII区間では自由断面掘削機、CI~B区間はトンネル切羽に連続孔を穿孔することにより自由面を形成した後、大型ブレーカ(3t級)にて掘削する単一機械掘削工法で工事に着手した。

### 3-2 施工概要

本工事は平成6年10月に坑口付けをし、全線にわたりNATMにより掘削を実施した。坑口部の岩盤が比較的軟質な部分は自由断面掘削機によりショートベンチ工法にて掘削を開始し、部分的には堅固な岩盤の出現を見たが、47mまで掘削したところ、一軸圧縮強度2,000kgf/cm<sup>2</sup>の岩盤が切羽全面に出現したため自由断面掘削機による掘削が不可能となったので下半掘削、インバートを施工し、その先の施工は全断面掘削に変更した。

全断面掘削時には、トンネル切羽に連続孔を穿孔した後、大型ブレーカ(3t級)にて掘削を開始したが、切羽岩盤が予想以上に硬質であり大型ブレーカの能力を超えていたこと、夜間のブレーカ作業は振動による固体伝播音により苦情が発生し中止せざるを得なかった。よって割岩工法を併用した掘削工法に変更した。割岩工法を採用した後も夜間のブレーカ作業およびずり出しに制限を受けての掘削作業となった。

施工機械は、表-1のとおりである。標準的トンネル掘削機械と比較して割岩機が増加している点と、ブレーカが大型化している点に割岩工法の特徴が示されている。しかしながら、開発を行った新しい自由面形成工法により、連続孔穿孔専用機を必要としないために従来の工法

表-1 主要機械一覧表

名称	仕様	台数	用途
ロードヘッダー	S200	1台	掘削(切削)
ジャンボ	3ブーム2バ スケット COP1440	1台	連続孔・割岩孔 ロックボルト
割岩機	油圧クサビ 1000t	2台	割岩(一次破砕)
ブレーカ	2t級	1台	砕岩(二次破砕)
バックホー	0.4m <sup>3</sup> 級	1台	結息
ずり積み機	サイドダンプ	1台	ずり積み込み
ダンプトラック	11t積	3台	ずり運搬
吹付け機		1台	コンクリート吹付け

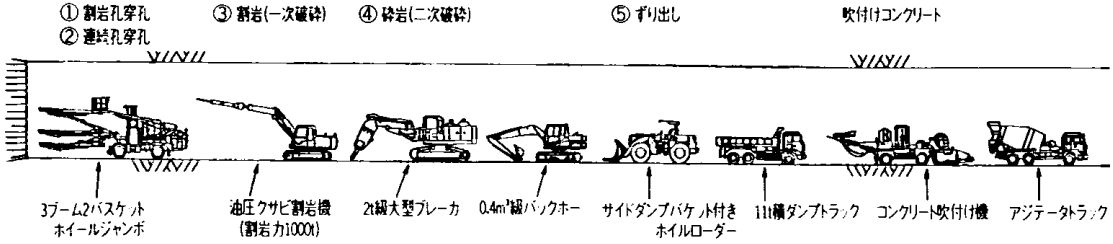


図-4 割岩法における施工順序

と比較して施工機械の削減が可能となっている。

図-4に割岩法における施工順序を示す。

本トンネルでは、施工順序として、①割岩孔穿孔、②連続孔穿孔(自由面形成)、③割岩(一次破砕)、④砕岩(二次破砕)、⑤ずり出し、吹付け、ロックボルト、としている。ここで、割岩孔を連続孔より先に穿孔する理由は、連続孔穿孔によって縁切りされた節理が崩落する危険があるためである。

#### 4. 自由面の意義

割岩法における自由面は発破法の心抜きに相当するものであるが、割岩法においては破砕に用いられる瞬間的なエネルギーが発破法に比べて小さいため、自由面形成がとくに重要となる。

自由面はその位置によって切羽の外周部縁切りと中央部自由面とに大別できる。外周部縁切りは一次破砕(割岩)時の応力解放、すなわち一次破砕時の岩盤の移動空間として必要であるだけでなく、切羽岩盤を地山から縁切りしてトンネル断面を効率的に形成するために必要である。中央部自由面は割岩における応力解放や、破砕開始場所として効率を向上させるために必要である(図-5)。

割岩法における自由面形成で重要となる点は、高い形成効率を確保するとともに、図に示されるような自由面を切断する柱状の不連続面(以下、ロックブリッジと

称す)を残さず施工することにある。ロックブリッジを残すとこれを破砕するために強大な圧縮応力が必要となり割岩に不利となる。したがって、自由面形成時には自由面の連続性を保つことが重要なポイントとなる。

#### 5. 自由面形成連続孔穿孔(FON ドリル工法)

##### 5-1 FON ドリル工法の概要

FON ドリル工法(Fast Onside & Non-Pareil drilling method)は、ドリルジャンボの能力を最大限に発揮させるために、単一孔を連続的に穿孔して自由面を形成する方式であり、連続孔穿孔時にロッド・ビットが隣接する既設孔方向に曲がりやすい性質を利用して開発したものである。連続孔穿孔手順は、まず SAB ロッド(Spining Anti-Bend Rod)を既設孔に挿入し、穿孔を開始する。このとき、ビットは孔曲がりによって SAB ロッドに接触・打撃しながら穿孔すると同時に、ビットの回転力により SAB ロッドは回転しながら所定の位置まで穿孔する。順次 SAB ロッドを挿入して穿孔をくり返し連続孔を形成していく。

##### 5-2 SAB ロッドの構造

SAB ロッド本体は、図-6 に示すようにブラケット取り付け部、芯材、外管(SCH80×80A)、先端コーンで構成されている。SAB ロッドの外径は89mmであり穿孔ビット径よりも一回り小さい。回転可能な部分は、外管と先端コーンでありそれぞれ単独で回転する。先端コーンは芯材にボルト止め構造となっており、外管の抜け落ちを防止すると同時に、外管の消耗時に簡単に取り外すことにより外管の交換を可能としている。外管は、芯材に差し込むだけの単純な構造となっている。外管と芯材は

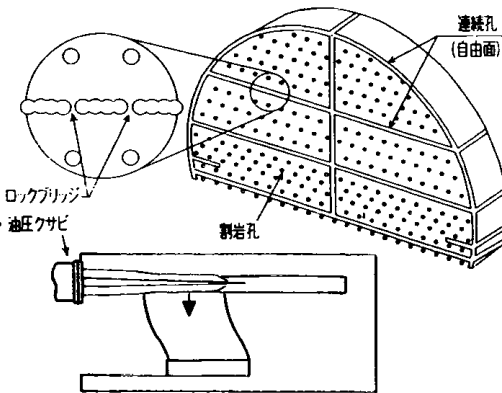


図-5 割岩法概念図

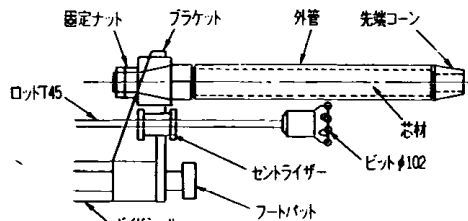


図-6 SAB ロッドの構造

既製品の厚肉パイプを使用しており、任意の長さに切断し、SAB ロッドを製作することが可能なため、実施工に合った SAB ロッドの製作が可能であり、材料のロスが少なく経済性に優れている。その他の部材は特注品となる先端コーン以外はほとんど消耗することはない。

連続孔を穿孔する際、SAB ロッドとビットが平行かつ固定されていることが重要な点となるが、ブラケット取り付け部をテーパ構造とし、ナットで締め付けることにより、簡単に平行を維持し固定可能となる。

ここで、SAB ロッドの挿入・引き抜きにはガイドセルのスライドを用いるが、この時ある程度の力が加わるため、ブラケットとガイドセルは強固に固定しておく必要がある。

### 5-3 連続孔穿孔手順

図-7に連続孔穿孔手順を示す。

- ① 連続孔穿孔開始位置に単一孔を穿孔し、SAB ロッドをガイドセルのスライドにより挿入する。
- ② 連続孔の穿孔を開始する。ビットは SAB ロッドに接触・打撃しながら穿孔するため連続性が保たれる。また、ビットの回転力により SAB ロッドが回転するため、ビットと SAB ロッドの消耗も低減される。
- ③ 所定の位置まで穿孔する。SAB ロッドの回転によりクリ粉が迅速に排出されるため単一孔穿孔よりも穿孔速度は速くなる。
- ④ SAB ロッドを引き抜き、移動して順次操作をくり返すことにより連続孔を穿孔し、自由面を形成する。

本工法の特長は、ビットを SAB ロッドに接触・打撃させることによりビットと SAB ロッド間にロックブリッ

ジが残らず、自由面の連続性が確保される点にある。また、SAB ロッドの回転により穿孔時のクリ粉の排出効率が向上するとともに、穿孔時の接触・打撃による抵抗を減少させ、高速穿孔を可能としている。さらに、ビットの消耗も低減され、SAB ロッド自体も均等に磨耗するために長時間使用可能である。

ここで、本工法の特長は、上述した高い施工能力だけでなく、SAB ロッドを簡単に脱着できる点にもあり、割岩孔やロックボルト打設を同一機械で施工することが可能なため、トンネル施工機械の増加を必要としない。

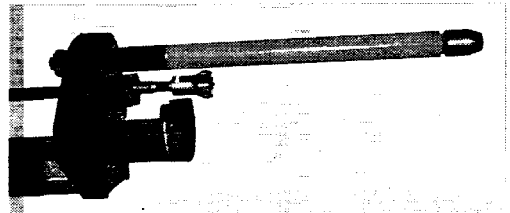


写真-1 SAB ロッド

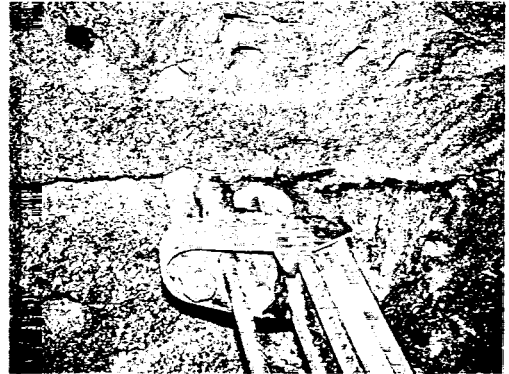


写真-2 連続孔穿孔状況

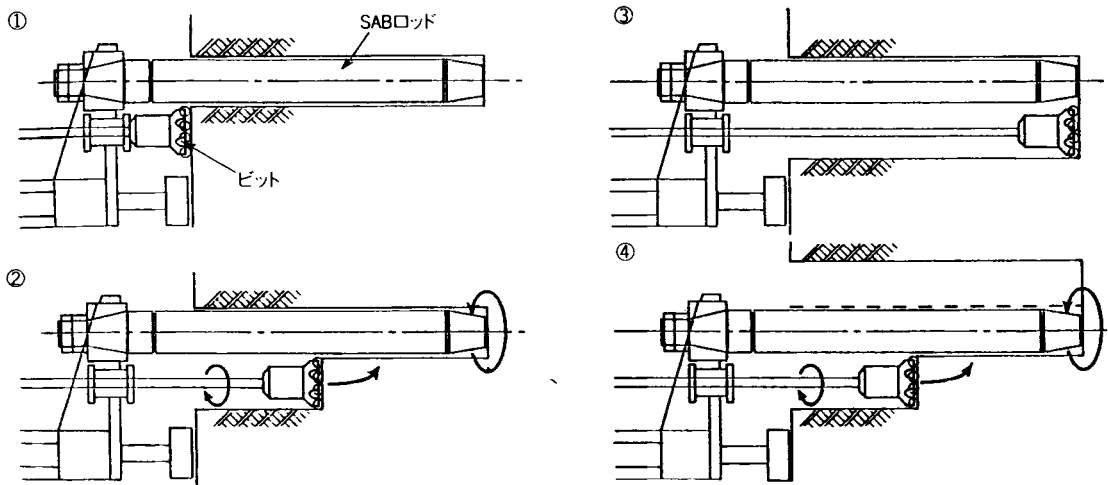


図-7 連続孔穿孔手順

さらに、本工法では基本的にφ102mmのビットを用いているために、形成された自由面の幅が広いことにも特長がある。自由面の幅は、割岩時の破碎効率に影響する。すなわち、自由面は割岩時の亀裂の発生時および発生後における岩盤の移動空間として作用するのであるが、自由面の幅が広いほどこの効果は大きく、割岩効率の上昇が図れる。写真-1にSABロッドを、写真-2に連続孔穿孔状況を示す。

5-4 FONドリル工法の施工

5-4-1 連続孔穿孔

連続孔穿孔を定量的に表現するには、連続孔の延長と深さによる面積を用いる。ここで、連続孔穿孔時には単一孔を連続的に穿孔するために、孔相互の重複部の存在は不可欠なものとなる。本工法は、連続孔穿孔時のビット径としては前述のように102mmを使用しており、ロックブリッジを残さず施工するには、図-8に示すように一孔あたりの見掛けの穿孔径は85~90mmとなる。

トンネル掘削時には図-9に示す連続孔穿孔パターン(Bパターン)によりほとんどの区間の施工を行った。この連続孔穿孔パターンにおける連続孔の延長は62mとなる。1サイクルあたりの掘進長の目標は1mであり、これに対して連続孔深さは1.1mとしている。したがって1サイクルあたりの連続孔穿孔面積は約68m<sup>2</sup>となる。

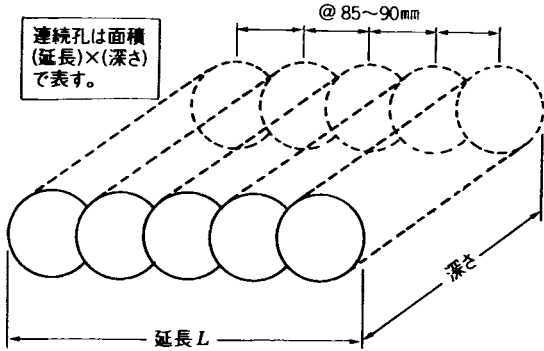


図-8 連続孔概念図

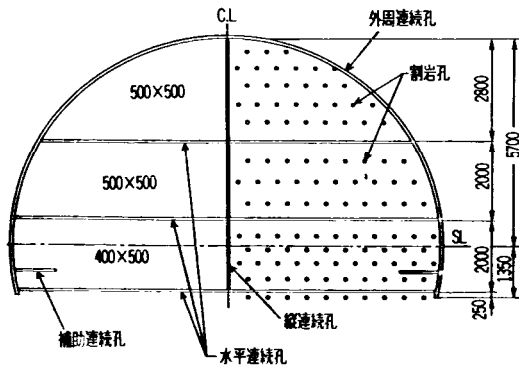


図-9 連続孔穿孔パターン図

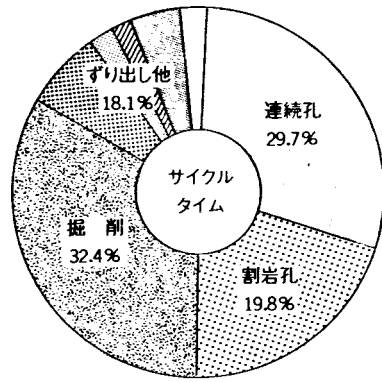


図-10 サイクルタイム

ここで、自由面の間隔を決定するには、割岩孔ピッチにより決定されるが、この割岩孔ピッチは試行錯誤により最適なものを求めた。

連続孔穿孔の占める割合は、図-8に示される連続孔延長62m時において1切羽あたり約700孔の穿孔が必要となり、全体のサイクルの30%を占める(図-10)。しかしながら、既存の自由面形成工法による形成能力と比較してみると、既存の工法の公表されている実績<sup>9)</sup>を適用すれば、このパターンにおける自由面形成に要する時間は、5ブーム(2ブーム+3ブーム)を用いてもサイクルタイムの50%を占めることになる。これに対して、本工法では3ブームによる施工ながら全体サイクルの30%と、大幅なサイクル短縮と省力化が可能となった。また、本工法では前述したように、形成された自由面の幅が広いこと、ロックブリッジが残らない施工が可能なことより、より確実な割岩作業が可能となる。さらに、連続孔と割岩孔を同一機械で施工するため、機械の入れ替えを必要とせず順次割岩孔穿孔作業から連続孔穿孔作業に移行できる利点もあり、ロスが少ない。

なお、割岩孔(φ102mm、深さ1.7m)は約300孔穿孔しているため、連続孔穿孔と合わせた1切羽あたりの総孔数は1000孔にも及び、ジャンボによる作業はサイクルタイムの50%を占める。すなわち、図-10に示すとおり穿孔作業が一連の掘削サイクルの半分を占めているも

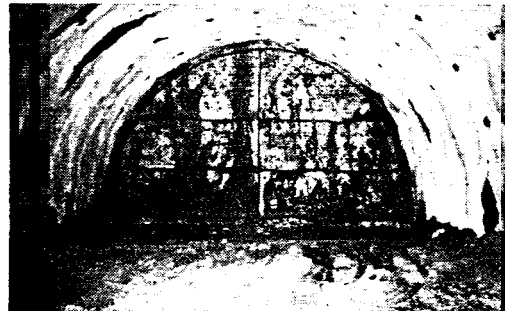


写真-3 連続孔・割岩孔穿孔完了

の、連続孔穿孔時の穿孔作業時間の短縮を実現したことは、ジャンボへの負担を軽減したことにもなる。写真-3に連続孔・割岩孔穿孔完了状況を示す。

#### 5-4-2 連続孔穿孔能力

連続孔の穿孔能力を定量的に表現するには、単位時間あたりの連続孔穿孔面積を用いる。

図-11は、連続孔延長62m、深さ1.1mの際の連続孔穿孔能力と岩盤の一軸圧縮強度の関係を示したものである。連続孔穿孔能力は、連続孔穿孔開始から完了までの

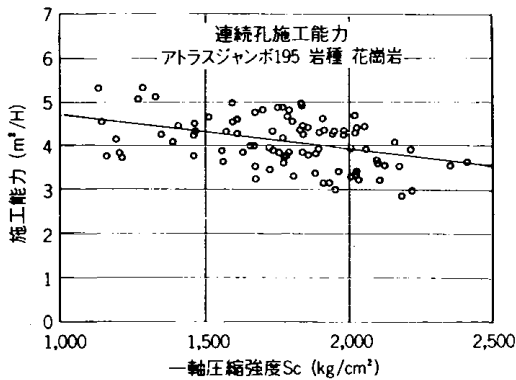


図-11 連続孔施工能力と一軸圧縮強度

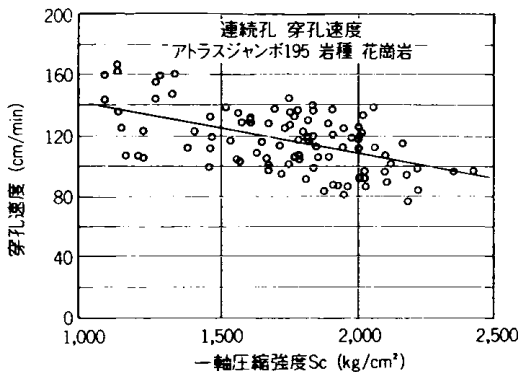


図-12 連続孔穿孔速度と一軸圧縮強度

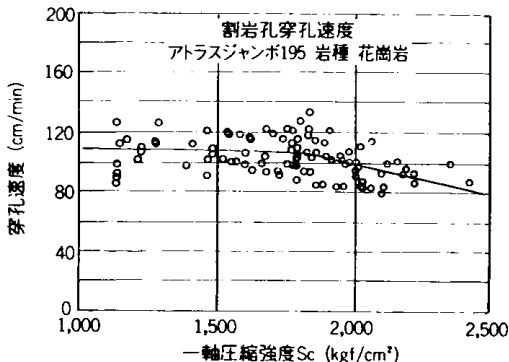


図-13 割岩孔穿孔速度と一軸圧縮強度

時間と施工面積から割り出したものである。したがって、これにはノミ移動やブーム移動を含んでおり、1切羽の総穿孔時間を平均化したものとなっている。現在まで、連続孔穿孔能力は岩盤の一軸圧縮強度  $1,500\sim 2,500\text{kgf/cm}^2$  において1ブームあたり  $3.5\sim 4.2\text{m}^3/\text{h}$  の実績を残している。

次に、穿孔時の一般的な歩掛りの表現は穿孔速度で表すため、図-12, 13に連続孔穿孔時と割岩孔(単一孔)穿孔時のそれぞれの岩盤の一軸圧縮強度と穿孔速度の関係を示す。削孔速度は移動などを含まない単純穿孔速度である。

これらの図に示されるように、 $1,800\text{kgf/cm}^2$  程度以上では連続孔と割岩孔の穿孔速度では10%程度連続孔穿孔の方が速く、強度に対する穿孔速度の傾きは同程度である。

一方、 $1,800\text{kgf/cm}^2$  程度以下では割岩孔の穿孔速度の傾きが緩やかになり、連続孔穿孔との差が開く傾向にある。これは、連続孔では既設孔側に空間があるために、単一孔を穿孔する割岩孔よりもクリ粉の排出が容易となる効果が顕著となり、穿孔能力のアップになっているためと考えられる。 $1,800\text{kgf/cm}^2$  付近以下で割岩孔の穿孔速度の傾きが鈍化するの、削岩機の穿孔能力に対してクリ粉の排出能力が不足し、クリ粉の排出能力に穿孔速度が依存するためと考えられる。

割岩孔のノミ移動時間は、ビット引き抜き、移動、位置決め、閘々取りで25~30秒程度かかるのに対し、連続孔では、SABロッドの引き抜き、移動、挿入、閘々取りでありビット引き抜きはSABロッド引き抜きと同時に15~20秒程度である。そのほとんどは引き抜き挿入に要する時間であり、移動と閘々取りは、SABロッドの存在によりほとんど時間がかからない。このことも、全体の施工能力アップにつながっている。

#### 5-4-3 施工機械および消耗材歩掛り

本工法は、前述したように基本的にガイドセル先端部にSABロッドを取り付けるだけの簡単な改造のため、一般的なジャンボにより施工可能であり、汎用性に優れているといえる。しかし、今回は $2,000\text{kgf/cm}^2$ を超える硬岩での施工となるため高速穿孔可能な削岩機を採用することにより、連続孔の高速穿孔に対応している。自由面形成による割岩工法において、自由断面掘削機などでは施工不可能な硬岩に採用されることが多いこと、発破掘削と比較して穿孔径が大きいこと、などを考慮して機械の選定をする必要がある。

表-2はFONドリル工法における主な消耗材と歩掛りを示している。SABロッドの消耗材としては、先端コーンと外管が主で $100\sim 120\text{m}^3$ (平均5切羽)程度で交

表-2 連続孔穿孔消耗材量(100m<sup>2</sup>あたり)

品名	規格・形状	単位	数量
ビット	T-45 φ102mm ボタン式	個	4.4
ロッド	T-45 L=3.66m	本	2.1
シャンクロッド	T-45	本	1.9
スリーブ	T-45	個	2.1
SAB ロッド	φ90mm L=1.1m	本	0.28

表-3 連続孔・割岩孔消耗材量(100m<sup>2</sup>あたり)

品名	規格・形状	単位	連続孔	割岩孔
ビット	T-45 φ102mm	個	0.39	0.41
ロッド	T-45 L=3.66m	本	0.18	0.17
シャンクロッド	T-45	本	0.17	0.15
スリーブ	T-45	個	0.18	0.18
SAB ロッド	φ90mm L=1.1m	本	0.026	—

換する必要がある。表の中でSABロッド100m<sup>2</sup>あたり0.28個となっているのは、芯材その他の消耗を含んでいるためである。芯材が消耗するのは、挿入、引き抜き時に過大な曲げ応力を加えてしまう場合である。

表-3は連続孔と割岩孔の歩掛かりを比較するためのものである。これをみると歩掛かり的にはほぼ同程度であるといえる。これより、SABロッドがビットの消耗に与える影響はほとんどないことがわかる。

FONドリル工法開発当初は、SABロッドを回転可能構造としていなかったためビットの消耗量が多かった。また、SABロッドが回転しない場合、ビットが接触する側の磨耗が著しく、SABロッドの消耗も激しかった。このことより、SABロッドを回転可能構造としたことは消耗材の削減に大きく貢献していることがわかる。ロッドの消耗量については、数量的に表面には現れないが、若干多くなる傾向にある。これは、SABロッド方向に

孔曲がりするため、曲げモーメントを受けて穿孔するためと考えられる。

## 6. おわりに

一軸圧縮強度2,000kgf/cm<sup>2</sup>を超える花崗岩が出現して連続孔穿孔・割岩工法による掘削を20か月、掘削延長約400mを斜面の転石の落下もなく無事故で施工してきた。これまで改良を重ねながらFONドリル工法によって形成した自由面面積は25,000m<sup>2</sup>にも及ぶ。

本トンネルは現在、貫通まであとわずかとなり、切羽にも風化層が見受けられるようになり、無事貫通を目指して着々と工事は進捗中である。

最後に、今回の報告が今後行われる同様な施工の一助となれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 本田裕夫・萩森謙治・古川浩平・中川浩二：硬岩トンネルの無発破掘削に関する研究。土木学会論文集，No.379，pp.55～64，1987。
- 2) 中川浩二・庄野豊・石井吉宏・仙石博嗣：割岩工法で環境問題を克服。トンネルと地下，vol.22，No.9，pp.17～24，1991。
- 3) Hagimori, K., Furukawa, K., Nakagawa, K., Yokozeki, Y.: Study of non-blasting tunneling by slot drilling method, proc. 7th ISRM Int. Congr. on Rock Mechanics, Aachen, pp. 1001～1004, 1991.
- 4) 氏本幸伸・粕谷忠則・中村吉男・石山彰一・中島康行：低騒音・低振動掘進工法(4)，トンネルと地下，vol.24，No.7，pp. 51～56，1993。
- 5) 上野博務：第36回施工体験発表会，最近の補助工法と機械化施工，日本トンネル技術協会，pp.9～16，1995
- 6) Noma, T., Tsuchiya, T., Skai, S., Nakayama, S.: New rock-fracturing excavation method for hard rock tunneling, Proc. 2th NARMS Congr. on Rock Mechanics, Montreal, pp.725～730, 1996.
- 7) 野間達也・上野博務・土屋敏郎・波田光敬・川崎俊彦：連続孔穿孔による新しい自由面形成工法，FONドリル工法，第51回土木学会年次学術講演会，VI-322，1996。

E. フック・E. T. ブラウン共著

# 岩盤地下空洞の設計と施工

理学博士小野寺透・工学博士吉中龍之進・斉藤正忠・北川隆 共訳

B5判・442頁・上製本 本体価格9,800円(〒450円)

 株式会社 **工本工学社**

〒162 東京都新宿区岩戸町16 メイジャー神楽坂  
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替00110-8-190072