

新しい自由面形成と割岩方法による 硬岩トンネルの機械化掘削

野間達也¹・土屋敏郎²・波田光敬³

¹正会員 工修 株式会社フジタ 技術研究所土木研究部 (〒224横浜市都筑区大圃町74)

²フジタ・大本組共同企業体 (〒737広島県呉市築地町3-4)

³フェロー 工修 株式会社フジタ 技術研究所土木研究部 (〒224横浜市都筑区大圃町74)

市街地近郊,あるいは重要構造物近傍において硬岩トンネルを掘削する場合には,発破工法の採用が制限される傾向にあり,機械掘削となる場合が多い。ここで,掘削対象地山を構成する岩石の圧縮強度が100MPaを超過すると,自由断面掘削機やブレーカなどの単一機械による施工は困難となる場合が多く,自由面を形成した後に切羽を破砕する割岩工法が主体となる。本報では,硬岩トンネルにおける無発破機械掘削において,連続孔穿孔による急速自由面形成工法と,ゴムチューブ式割岩機を用いた岩盤破砕による新しい硬岩トンネル掘削工法の開発について述べる。

Key Words : tunnel, non-blasting, mechanical excavation, free face, fracturing

1. はじめに

岩盤を掘削するには,発破工法が最も効率が良く,経済性も高い。しかしこの方法は大きな騒音・振動を伴うため,住居近傍あるいは重要構造物近傍における採用は困難である。都市域が拡張する現在,このような問題は特に硬岩が都市域に分布する西日本において最近増加する傾向にある。現在呉市で掘削中の上二河トンネルは,この問題に直面しており,以下のような制約条件下にある。

- 1) 施工現場の周辺には住居が隣接している。
- 2) トンネル路線には多くの転石が点在しており,防護対策を施したうえでも発破による振動で転落するおそれがある。

このため,トンネル全線にわたり発破は使用できない。また,トンネル掘削対象岩石は圧縮強度200MPaを超過するような花崗岩が出現し,自由断面掘削機・ブレーカのような単一機械による掘削は困難となった。このため,トンネル切羽に連続孔穿孔による自由面を形成した後,この自由面に向かって岩盤を破砕する割岩工法が最適となる。

自由面を形成するための様々な方法が提案されてきた

ものの^{1)・2)・3)},形成するために特殊な装置を必要とする点や,形成する効率,連続性の精度に問題があった。このため,筆者らは汎用のドリルジヤンボを用い,在来工法と比較して効率がよく連続性の高い工法の開発を行った^{4)・5)・6)}。

さらに,筆者らは新しい岩盤破砕工法にも取り組んでいる。これまでも,静的破砕剤,油圧クサビ,高圧水・ガスといった様々な静的(無発破)岩盤破砕工法が開発されてきた⁷⁾。しかしながら,安全面や装置が大掛かりになるといった問題を有していた。なお,本報では静的破砕とは,岩盤中にき裂を発生させることにより強度を低下させた(一次破砕)後に,ブレーカ・リップ等を用い完全に破砕(二次破砕)することを指す⁸⁾。

筆者らは,これらの問題に対処するために,一次破砕を簡易かつ効率的に行えるような高耐圧ゴムチューブを用いた液圧による破砕工法の開発に取り組んできた^{9)・10)}。この工法をトンネル掘削用に拡張し,実際の施工への適用を試みた。

本報では,連続孔急速穿孔方法による自由面形成と新しい岩盤破砕システムについて述べ,実際のトンネル掘削への適用を示すものである。

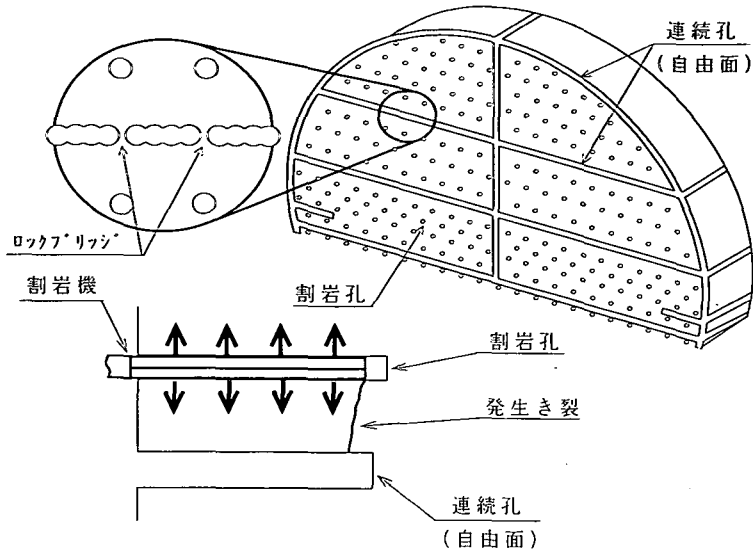


図-1 自由面形成の概念図

2. 自由面の意義

割岩工法とは、自由面を形成した後、岩石・岩盤の引張強度が圧縮強度の $1/8 \sim 1/20$ 程度であることを利用し、割岩孔の壁面に割岩機により力を与え、自由面に向けて引張応力を発生させることにより岩盤にき裂を発生させ破碎する工法である。

割岩工法における自由面は発破工法の心抜きに相当するものであるが、割岩工法においては破碎に用いられる割岩機のエネルギーは発破工法に比べて著しく小さく、自由面形成が特に重要な点となる。すなわち、発破工法においては、その卓越したエネルギーにより、適当な心抜き方法を用いればトンネル切羽のみを自由面とするいわゆる1自由面でも掘削可能である。一方、割岩工法では1自由面のみでは岩盤の破碎は事実上不可能であり、トンネル切羽に対して垂直となる溝状の自由面を形成することにより2自由面以上を確保する必要がある。割岩孔と自由面の距離、および割岩孔の間隔は掘削対象地山の圧縮強度に比例するものと考えられる⁸⁾。対象地山が硬質になれば、それだけ自由面の数も増加させ割岩孔との距離を短くする必要がある。これは、発破における最小抵抗線の考えと同様に、割岩孔と自由面との距離は、対象地山の強度に依存するためである。

ここで、一般的に自由面はトンネル外周部および中心

部に形成されるのであるが、その位置によって掘削外周部の連続孔を外周連続孔と呼び、外周連続孔以外の連続孔を補助連続孔と呼ぶことにする。外周連続孔は、一次破碎時の応力解放、すなわち一次破碎時の岩盤の移動空間として必要であるが、それ以上に掘削対象岩盤を地山から縁切りして掘削断面を効率的に形成するために必要である。補助連続孔は割岩時の岩盤の応力解放や、破碎開始場所として効率を向上させるために必要である。

自由面を形成する際、自由面の連続性の確保が割岩工法の効率を考えるうえで重要な点となる。図-1に自由面形成の概念図を示すが、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）が残ると、これを破碎するために強大な圧縮力が必要となり、割岩効率に非常に不利となる。従って、自由面形成工法を開発するうえで重要となる点は、高い形成効率を目指すとともに、自由面の連続性の精度にも注目しなくてはならないことは明らかである。

さらに、形成される自由面の幅（厚み）は、割岩時の破碎効率に影響するものと考えられる。上述したように、自由面は割岩時のき裂の発生時の応力解放、および発生後における岩盤の移動空間として機能するのであるが、形成される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。

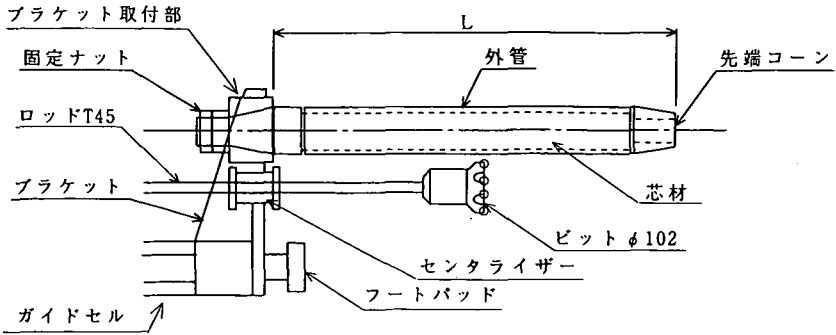


図-2 SABロッドの構成図

3. 自由面形成方法

新しい自由面形成方法を開発するにあたり留意した点は、前述したように、①効率の高い方法とする、②連続性の精度を十分に保つ、他に③汎用のドリルジャンボを用いることを可能とする、ことにある。以下、本方法の概要とその効率性について述べる。

(1) 連続孔穿孔による自由面形成

最近の穿孔技術の進展に伴い、150kgf級のドリフタを用いれば、岩石の圧縮強度が200MPaを超過するような硬質岩盤に対しても、φ100mmのビットを用い1m/分程度の穿孔速度が得られる。この点に注目し、開発した自由面形成方法は、汎用ドリルジャンボを用い、またこの能力を最大限に発揮可能である単一孔を連続的に穿孔する方式を採用した。

ここで、単一孔を連続的に穿孔する場合を考えた際、穿孔時にはロッド・ビットが隣接する既設孔方向に孔曲がりしやすい性質がある。この性質を利用して、連続孔を穿孔する際に隣接する既設孔にSAB (Spinning Anti-Bend) ロッド (φ89mm) を挿入し、ビットをSABロッドに接触・打撃させながら穿孔する方式を開発した。

図-2にSABロッドの構成図を示す。穿孔時にビットをSABロッドに接触・打撃させることによりビットとロッド間に空隙を生ぜず、自由面の連続性が確保される。このSABロッドは回転可能な構造であり、穿孔時の接触・打撃による抵抗を減少することにより高速穿孔が可能となる。

SABロッドは汎用削岩機のガイドセル先端のブラケットに取り付ける方式であり、ガイドセルのスライドにより挿入・引き抜きを行う。

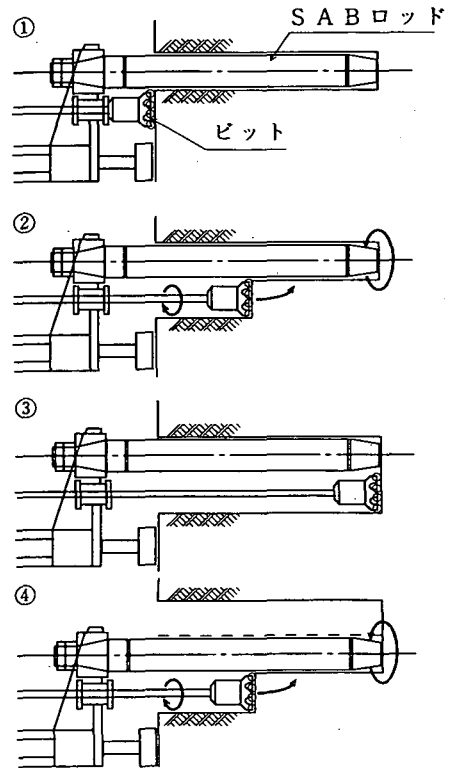


図-3 連続孔穿孔手順

図-3に穿孔手順を示す。穿孔手順は以下の通りである。①既設孔にSABロッドを挿入する。②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。ビットの回転力によりSABロッドは回転し、高

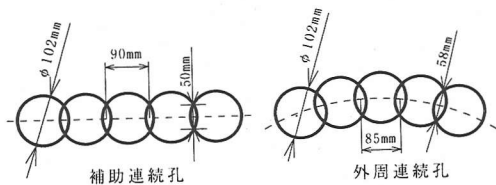


図-4 連続孔形成の実測図

速穿孔可能となる。③所定の深さまで穿孔する。④順次SABロッドの挿入，穿孔を繰り返す，連続孔（自由面）を形成する。ビットがSABロッドを接触することにより，連続性の高い自由面形成が可能となる。

さらに，SABロッドが回転可能なことより，ロッド・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。また，SABロッドの消耗部品は厚肉パイプのみであり，経済性も高い。

以上述べたように，汎用削岩機は一般的にロックボルト打設および割岩孔穿孔等に使用しているが，この汎用削岩機にSABロッドを装着することで連続孔の穿孔を可能とするため，専用機は不要となる。

(2) 自由面の連続性の検討

連続孔穿孔に使用するビット径は $\phi 102\text{mm}$ であるが，連続孔穿孔には必ず切削部に重複部分が必要となる。一穿孔当たりの連続孔切削長（連続孔とするために生じる重複部分を除いた一孔当たりの切削幅）は図-4に示すように実測値より外周連続孔が85mm/孔，補助連続孔が90mm/孔であった。この計測結果は，外周連続孔においては17mm，補助連続孔においては12mmの重複部分の存在を示している。また，重複部の幅も，外周連続孔では58mm以上，補助連続孔では50mm以上確保されていることになる。この重複部を有する連続孔を穿孔することより，形成される自由面のすぐれた連続性が確保される。さらに，形成される自由面の幅は従来の方法よりも広くなり，前述したように割岩効率に有利となる。

(3) 自由面形成効率の検討

自由面形成能力を定量的に表現するために，ここでは削岩機1ブームにより1時間に形成される連続孔形成面積を評価するものとする。

本工法における自由面形成能力を図-5に示す。本トンネルのような硬質花崗岩で，ビット径102mmを用い，穿孔深さ1.1mとし，3.5~4.5 m^3/h 程度可能となっており，既存の工法¹⁾と比較しても2倍以上の形成能率を有していることが分かる。なお，ここで示した岩石の一軸圧縮強度は，基本的にロックシュミットハンマーの反発値より得たも

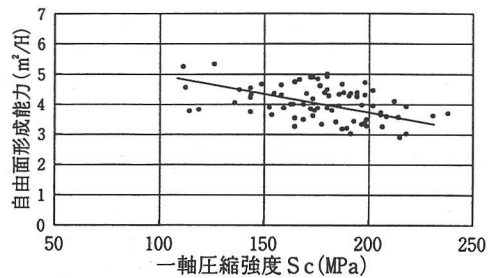


図-5 岩石強度に対する自由面形成能力

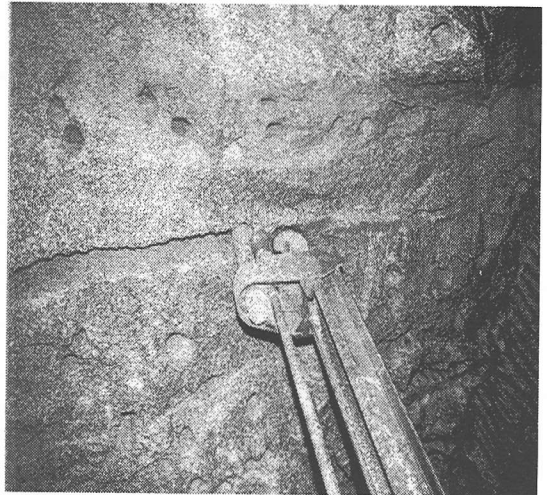


写真-1 連続孔穿孔状況

のであるが，対象とした岩盤の強度が高いため，牧野ら¹¹⁾の提案した方式を採用しており，一部ブロックサンプリングにより一軸圧縮試験を行い，その結果を比較することによりその妥当性を検証している⁹⁾。

写真-1に連続孔穿孔状況を示す。

次に，自由面形成能力を検討するために，単一孔である割岩孔穿孔と，連続孔穿孔の岩石強度に対する穿孔速度の比較を行った。図-6，7に両者の結果を示す。

図に示されているように，連続孔穿孔の方が10~20%程度穿孔速度が上回っていることが明らかである。

これは，連続孔の方が重複部を有するために，穿孔面積が減少することとともに，掘削時のスライムの形成過程の差によるものと考えられる。

図-8，9に両者の穿孔時の模式図を示す。

岩盤を穿孔する際，ビットに伝達された削岩機の打撃力と回転力は岩盤を数mmから2cm程度の小片状に破碎する。単一孔の穿孔では，図-9に示すように破碎された

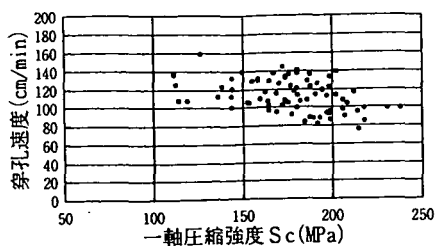


図-6 岩石強度にたいする連続孔穿孔速度

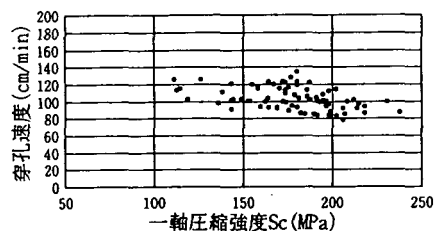


図-7 岩石強度にたいする単一孔穿孔速度

小片はそのままの形状ではビットと岩盤の空隙を通過できず、孔外には排出されない。すなわち、破碎された小片はビットにより更に二次的に粉碎され、穿孔水とともに1mm以下のスライムとして排出される。他方、連続孔穿孔においては、図-9に示すように、隣接孔が自由面となった状態で穿孔するため、単一孔と比較して大きく割れやすく、破碎された小片はそのままの形状で、SABロッドの回転に伴い穿孔水とともにスライムとして既設孔側に排出される。従って、破碎された小片を二次的に粉碎するエネルギーを必要とせず、削岩機のエネルギーの殆どを穿孔のみに使用しているため、穿孔速度が速くなるものと考えられる。

これを検証するために、穿孔時における両者のスライムをサンプリングし、粒度試験を行った。粒度分析結果を図-10に示す。単一孔穿孔時では、排出されるスライムはほぼ1mm以下なのに比べ、連続孔では、大半が1mm以上となっていることは明らかである。これより、上記の考えは検証されるものと考えられる。

また、単一孔の穿孔では、切羽に凹凸があるために、座繰り時においてガイドセル、ビットの移動（いわゆるブレ）を生じ、これに対処するためにドリフタに与えるスラスト・トルクを制限しなければならない。これに対して、連続孔の穿孔では、SABロッドとフートパットによってガイドセル、ビットは固定され、穿孔の位置決めが容易

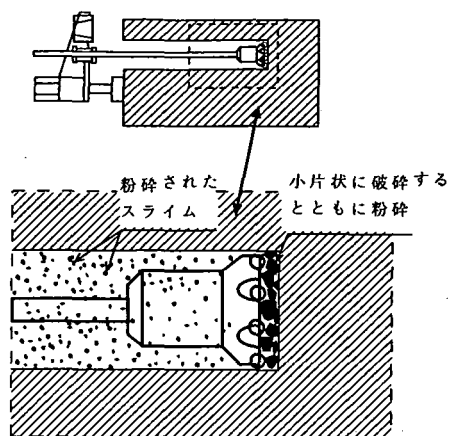


図-8 単一孔穿孔の概念図

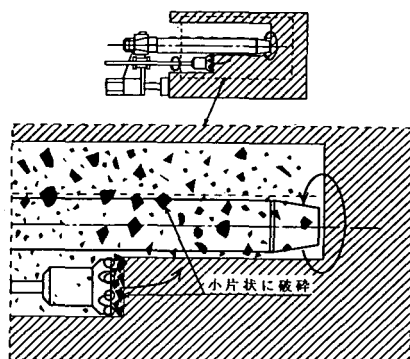


図-9 連続孔穿孔の概念図

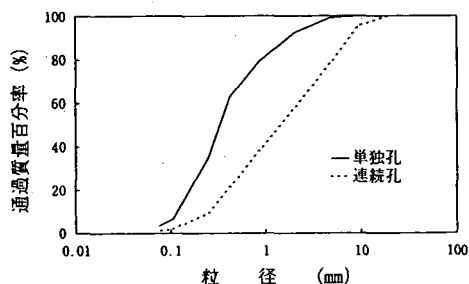


図-10 スライムの粒度分布

となりスラスト・トルクの制限は不要となる。

以上の効果により、連続孔は単一孔よりも穿孔速度が上昇するものと考えられる。

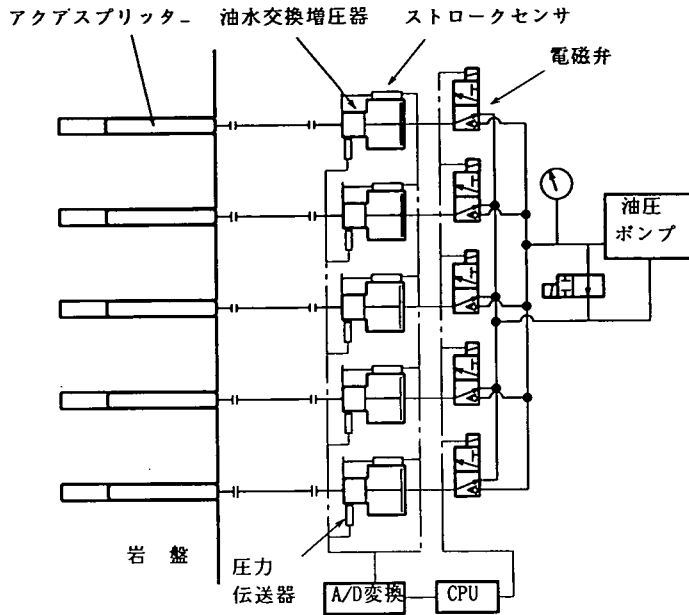


図-12 破碎システムの概念図

(4) 本工法の特長

以上述べたように、本方法の特長は、高い施工能力、および連続性を確保されることのみではなく、SABロッドを簡単に着脱できる点にもあり、割岩孔やロックボルト打設が同一の機械により施工することにより坑内の施工機械の増加を招かない。

本工法の特長をまとめると以下ようになる。

- ①200MPaを超過するような岩石で構成される岩盤に対しても、3.5~4.5m³/h程度の自由面形成能力を有する。
- ②自由面の連続性が高い。
- ③専用機を必要とせず、汎用機に簡便に装着可能である。
- ④ビット・ロッド以外の消耗品は市販の厚肉パイプのみであり、経済性が高い。

4. 静的破碎装置およびシステム

筆者らは、岩盤を静かに、簡易に、効率的に、安全に、経済的に破碎することを目的とした静的破碎工法の開発を進めてきた。ここでは、ゴムチューブ式割岩機（以下アクアスプリッターと称す）とそのシステムについて述べる。

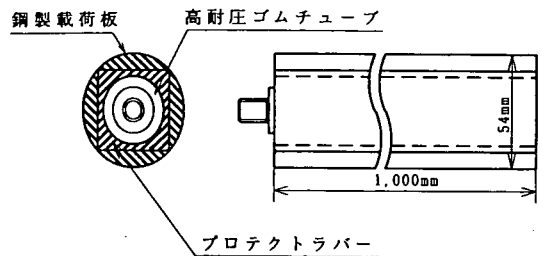


図-11 アクアスプリッターの構成図

(1) アクアスプリッター

図-11にアクアスプリッターの概念図を示す。アクアスプリッターは高耐圧ゴムチューブ、ラバープロテクター、鋼製載荷板により構成されている。アクアスプリッターはゴムを主要部材としているために軽量(8kgf)にもかかわらず高い破碎力を有する(最大加圧力:50MPa)。またその形状より、繰返し使用が可能であり、発生させるき裂の方向も制御できる。さらに、多数の割岩機を同時に稼働可能(1ユニットにつき10台)なために、効率の高い破碎作業を可能としている。

また、トンネル掘削などで通常無発破岩盤掘削として

用いられる大型油圧クサビは、割岩孔が大口径（通常はφ100mm）となり、クサビを機能させるために穿孔時に余長を伴う。これに対してアクアスプリッターの穿孔径は58～60mmであり、余長も不要なため、割岩孔の穿孔効率が高い。

アクアスプリッターの破碎機構は以下の通りである。最初に、アクアスプリッターを割岩孔に挿入する。次に、高耐圧チューブに圧力を作用することにより、高耐圧チューブとラバープロテクターが膨張し、鋼製載荷板に圧力を伝達する。なお、詳細の破碎機構は既報⁹⁾に示してある。

(2) 破碎システム

図-12に破碎システムを示す。このシステムは、油圧ユニット、制御マイコン、アクアスプリッターにより構成されている。油圧ユニットは、油圧ポンプで発生させる圧力を、油水交換増圧器により水圧に変換するとともに増圧を行っている。油水交換する理由は、油によるゴムの劣化を回避するためである。

制御マイコンは、圧力と送水量を管理している。アクアスプリッターに圧力を作用させる油水交換増圧器は、ピストンと一次・二次シリンダにより構成されている。この油水交換増圧器のシリンダ部に圧力伝送器を設置することにより前述の圧力を、ピストンの突出量をストロークセンサにより計測することによりアクアスプリッターへの圧力水の注入量を求めることができ、圧力・注入量とも管理することができる。すなわち、岩盤に大きなき裂が生じ、圧力が急激に低下したならばその段階で載荷を中止する。また、ストロークにある設定値を設け、圧力の低下が見られなくても規定のストロークに達したならば載荷を自動的に中止する。本制御方法を用いることにより割岩機への過度の膨張を制御することが可能となり、割岩機本体の損傷を大きく減少させられる。

(3) 破碎システムの特長

本工法の既報⁹⁾からの改善点としては、

- ①トンネル掘削を対象とするため、アクアスプリッターの長さを拡張し、径を若干大きくしたこと。
 - ②トンネルを対象としたため、最大20本のアクアスプリッターを同時に加圧可能としたこと。
 - ③制御機構を改善し、アクアスプリッターの破損を減少させたこと。
- である。

以上より、本破碎システムの特長をまとめると以下のようになる。

- ①アクアスプリッターは軽量なため操作性が良好ながら大きな破碎能力を有す。

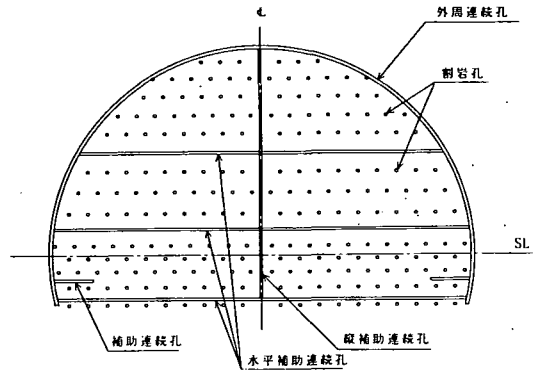


図-13 連続孔・割岩孔穿孔状況

- ②アクアスプリッターは、その形状により繰り返し使用が可能であり、発生き裂の方向も制御可能である。
- ③複数のアクアスプリッターを同時に載荷可能なため、効率的な破碎が可能となる。
- ④穿孔する割岩孔が従来の装置と比較して小口径となり、余長も不要となる。

5. トンネル掘削への適用

(1) トンネルの概要

上二河トンネルは、延長550m、全幅員9.75m、内空断面約60㎡の規模のトンネルであり、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成している。

前述したような周辺状況の制約条件により全線無発破掘削となっており、掘削当初は自由断面掘削機により進行したが、坑口より50mに至った段階で岩石の一軸圧縮強度200MPaを超過するような岩盤に遭遇した。このため、自由断面掘削機やブレーカなどによる単一機械掘削では掘削が不可能となり、自由面形成後、割岩による掘削を採用することになった。

(2) 自由面形成

本トンネルにおける割岩工法時の作業手順は、マーキング、割岩孔穿孔、連続孔穿孔、アクアスプリッターによる一次破碎、ブレーカによる二次破碎、ズリ出し、吹付けコンクリート、ロックボルト打設である。

図-13に割岩孔・連続孔の穿孔パターンを示す。岩石の一軸圧縮強度が150MPaを超過する岩盤の場合には、外周連続孔および補助連続孔として中心部に垂直方向に1本、水平方向に2本の自由面を形成し、6つのブロックに分割した後にアクアスプリッターによる破碎を行う。

実際の施工時のトンネル1サイクル当たりの掘進長

表-1 連続孔・単一孔消耗材量比較 (100m穿孔当たり)

品名	規格・形状	単位	連続孔	単一孔
ビット	T-45 φ102	個	0.39	0.41
ロッド	T-45L=3.66m	本	0.18	0.17
シャックロッド	T-45	本	0.17	0.15
スリーブ	T-45	個	0.18	0.18
SABロッド	φ90 L=1.1m	本	0.026	—

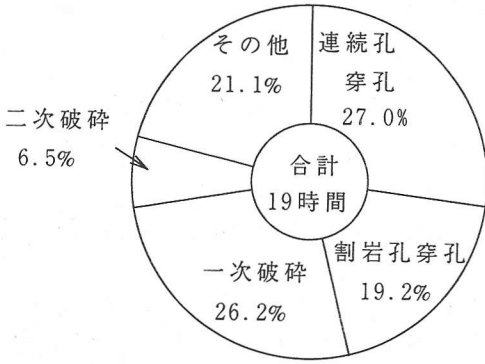


図-14 サイクルタイム

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。図-13における連続孔の総延長は62mであるが、これより1サイクル当たりの連続孔穿孔面積は約68㎡となる。

自由面形成時の穿孔には、φ102mmのビットを使用しており、前述したように連続孔とするには重複する部分が必要とするため、全穿孔数は約700孔となる。

連続孔による自由面形成にはこのように多くの穿孔数が必要となるが、連続孔穿孔能力は前述したように3.5～4.5㎡/hであり、さらに本トンネルでは3ブームの削岩機を使用しているために、連続孔穿孔がサイクルタイムにおいて占める割合は図-14に示すように27%程度である。さらに、102mmのビットを採用しているために、在来工法(主として60～65mmのビットを使用)に比べて自由面となる幅が大きく、また前述したようにSABロッドに接触・打撃させながら穿孔する機構としたため高い連続性を確保される。これより、2.で述べたように、割岩作業に有利となりサイクルタイムの縮小を図れる。

なお、表-1に連続孔穿孔と単一孔穿孔における消耗材の比較を示す。本工法の特長はSABロッドに接触・打撃することにより連続性を保ち、形成効率を高める点にある。開発当初は、SABロッドを回転可能な構造としておらず、このため単一孔と比較してビットの損耗が多く、またSABロッドの損傷も大きかった。しかし、SABロッドを回転可能な構造としたことにより、表に示されるように、連続孔と単一孔では消耗材の差はほとんど認められなくなった。

写真-2に穿孔終了状況を示す。



写真-2 穿孔終了状況

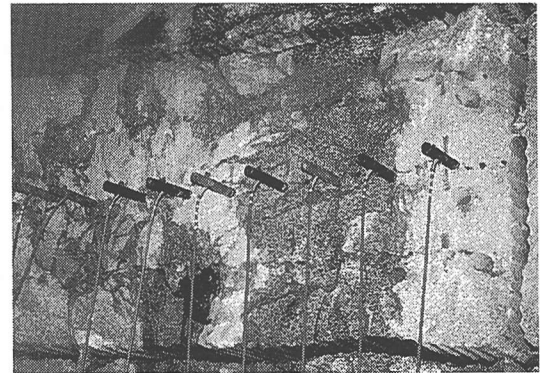


写真-3 き裂発生状況

により破碎する。アクアスプリッターの破碎能力は5MNであり、一般的とされている在来工法(油圧クサビ、破碎能力10MN)より劣っている。このため、油圧クサビと比較して孔間隔を狭め、また複数のアクアスプリッターを同時に載荷することにより岩盤を破碎する。実際の施工時には、各ブロックに17～20本の割岩孔を水平に穿孔した後、アクアスプリッターをそれぞれの割岩孔に挿入する。ここで、2台の油圧ユニットを用いて載荷することにより、一度に長大なき裂を発生させることが可能である。すなわち、一度の操作により長大なき裂が発生するこ

(3) 割岩

連続孔形成の後、トンネル切羽をアクアスプリッター

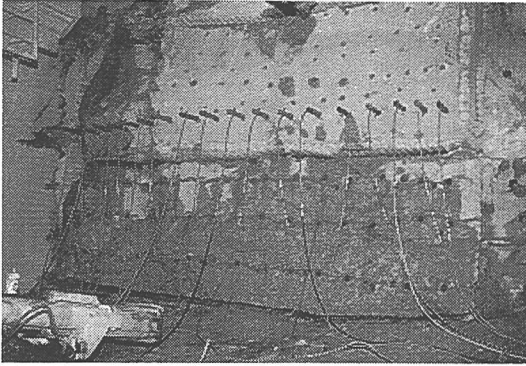


写真-4 割岩状況



写真-5 二次破碎状況

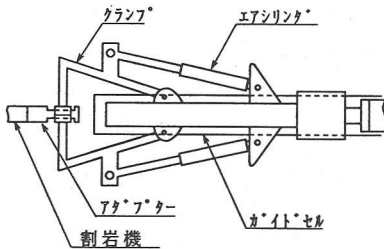


図-15 着脱装置の概念図

とにより、効果的な一次破碎を実施できる。垂直方向の割岩孔の間隔は、40～50cmであり、この間隔により容易に二次破碎が可能となる。写真-3にアクアスプリッターによるき裂発生状況を、写真-4に割岩作業状況を示す。

破碎する際にアクアスプリッターに作用する圧力は20～30MPa程度であり、破碎に必要な時間は2分程度である。なお、アクアスプリッターの繰り返し使用回数は30回以上であった。

しかしながら、長大なき裂を発生させることにより、切羽の崩壊を招く恐れがあり、切羽近傍に近づくのは危険を伴う。従って、アクアスプリッターの挿入・引き抜きは、人力に頼らず機械化を行う必要がある。このため、図-15に示すような着脱装置¹²⁾をドリルジャンボのドリフター部に搭載し、この着脱装置によりアクアスプリッターの挿入・引き抜きをジャンボの運転席より行えるようにした。これは、着脱装置のクランプがアクアスプリッターの末端部に接続されたアダプターを掴み、ドリフターのスライドによりアクアスプリッターの挿入・

引き抜きを行う仕組みである。これより、割岩時の安全性も確保された。

これらの作業を繰り返した後、ブレーカによる二次破碎をおこない、掘削終了となる。写真-5に二次破碎状況を示す。

6. 結論

本報では、硬岩トンネルにおける新しい機械掘削工法について示した。これまで述べてきたようにこの工法には自由面形成と割岩に特長がある。

新たに開発した自由面形成工法は、SABロッドを用いた連続孔穿孔による工法である。本工法は高い効率性や自由面の連続性に優れた点のみではなく、汎用の削岩機を利用できる点にある。

割岩工法としては、アクアスプリッターによる一次破碎の開発である。この方法は、一度の操作により長大なき裂を発生させることが可能であり、割岩孔は小口径でかつ余長の不要な点に特長がある。

本工法はトンネル掘削時にトンネルの周辺を損傷することが少ないために、廃棄物処理等種々のトンネルに最適なものと考えられる。

謝辞：本研究におけるアクアスプリッターの開発は、(株)ブリヂストンとの共同研究によるものである。化工品技術開発本部中山伸二氏をはじめ、関係者各位に記して深謝致します。

参考文献

- 1) 氏本幸伸, 萩谷忠則, 中村吉男, 石山彰一, 中島康行: 低騒音, 低振動掘削工法(4), トンネルと地下, vol.24, No.7, pp.563~568, 1993.
- 2) 本田裕夫, 萩森健治, 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.
- 3) 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. 597~604, 1991.
- 4) 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-FONDリル工法-, 第51回土木学会年次学術講演会, VI-322, 1996.
- 5) Noma, T., Tsuchiya, T., Sakai, S. and Nakayama, S.: New rock-fracturing excavation method for hard rock tunneling, *Proc. 2th NARMS Congr. on Rock Mechanics*, Montreal, pp.725~730, 1996.
- 6) (社) 日本建設機械化協会: 建設機械化技術・技術審査証明報告書, 「連続孔穿孔機械装置(FONDリル工法)」, 1996.
- 7) 萩森健治, 豊田久里夫, 栗原信介, 大山宏, 村上誠: 低騒音・低振動掘削工法(5)-割岩工法の現状と施工事例-, トンネルと地下, vol.24, No.8, pp.645~651, 1993.
- 8) 萩森健治: スロット削孔機を用いた硬岩トンネル掘削の研究, 名古屋大学博士学位論文, 1990.
- 9) 野間達也, 村山秀幸, 門田俊一, 上田滋夫: 液圧を用いた岩盤・コンクリートの静的破碎工法の開発, 土木学会論文集, 第427号, pp.203~211, 1991.
- 10) Noma, T., Hada, M., Kadota, S., Murayama, H. and Ueda, S.: Development and practical application of the static rock-mass fracturing method using hydraulic pressure, *Proc. 8th ISRM Int. Congr. on Rock Mechanics*, Tokyo, pp. 653~656, 1995.
- 11) 牧野卓三, 大塚勝司: 大口径TBM工法とSD工法による舞子トンネルの施工, 日本トンネル技術協会第30回施工体験発表会, p.28, 1992.
- 12) 波田光敬, 野間達也, 仲沢武志: チューブ式割岩機の挿入・引抜き機械化, 第51回土木学会年次学術講演会, VI-321, 1996.

(1997. 1. 7 受付)

MECHANICAL EXCAVATION METHOD FOR HARD ROCK TUNNELING BY NEW FREE FACE FORMING AND ROCK FRACTURING

Tatsuya NOMA, Toshiro TSUCHIYA and Mitsutaka HADA

The blasting is not suitable for building tunnel near residential areas because this method involves tremendous shock waves and noise. For hard rock tunneling by non-blasting, after forming a slot (free face) by drilling continuous holes at the tunnel face, excavation of the tunnel is carried out using a rock-fracturing method that fractures rock toward the slot.

In this paper, we describe using general purpose equipment in the slot method, and a continuous hole drilling method which was superior to conventional methods in terms of efficiency and accuracy of continuity. Furthermore, we describe also currently working on a rock-fracturing method that used a rubber tube type rock-fracturing machine.