

(69) スロット削孔機による第2新神戸トンネルの機械掘削

神戸市道路公社 正員 大野公男 ㈱ 奥村組 牧野卓三
㈱ 奥村組 正員 ○萩森健治 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

Non-blasting tunnelling with slot cut drill in Shinkobe road tunnel

Kimio OHNO, Kobe Municipal Highway Corporation Takumi MAKINO, Okumura Corporation
Kenji HAGIMORI, Okumura Corporation Kohei FURUKAWA, Yamaguchi University
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

The southern part of Shinkobe road tunnel is located in urban area and is close to some other tunnels. In this part, blasting was prohibited because of unacceptable levels of vibration, so non-blasting tunnelling method with slot cut drill was used.

The tunnel perimeter was fully slotted and additional slots were cut in the face. Then the rock mass was broken out with hydraulic impact breakers and removed.

The cycle-time is heavily influenced by rock properties. The shortest cycle-time is 18 hours and the longest one is 65 hours per 2m round.

An average advance rate of 23m per month was achieved in a hard and almost joint-free granite.

1. はじめに

近年、市街地近郊での硬岩トンネルの掘削工事が多くなり、また振動公害に対する規制が厳しくなったこととあわせて、発破が制約を受けたり、全面的に禁止されたりすることがしばしばある。このため、種々の無発破掘削工法の開発が進められ、いくつかの工法が実施工で用いられるようになってきた。

第2新神戸トンネルの市街地に近接した区間（延べ約 500m）においても、硬質の花崗岩であるにもかかわらず発破が使用できなかった。そこで、最近開発されたスロット削孔機¹⁾を用いる機械掘削工法を採用し平均月進23mでこの区間の掘削を完了した。本報告では、今回の施工で得られたデータの検討結果について述べる。

2. 現場の条件

第2新神戸トンネルは、神戸市の市街地と北神地区とを結ぶ延長 7.2kmの道路トンネルである。本トンネルの南坑口付近では、ルートの約50m直上に民家があり、直下 5.6mには鉄道トンネルが交差し、さらに新幹線、水路トンネルが近接するなど構造物が多いことや、民家からの発破の使用許可が得られなかったことから、発破を使わない機械掘削工法を採用した。

地質は布引花崗閃緑岩で、諏訪山断層の影響範囲である55m間を除けば、一部で開口した亀裂や粘土を狭む亀裂がみられるものの、全般に新鮮で硬質である。一軸圧縮強度は、100～225MPaで、弾性波速度は3.5～5.5km/sである。

機械掘削を行った区間は、断面積が63～80m²の本坑部の延長 315m、断面積が38～74m²のランプ部の延長

206mで掘削量の合計は約 31000m³である。

3. 施工概要

(1) 掘削方法

今回採用した機械掘削工法の概要は以下のとおりである。

- i. スロット削孔機によりトンネル外周部と中央部にスロットを削孔し、これを自由面とする（写真－1 参照）
- ii. 大型の油圧ブレーカにより打撃破碎し、ずり出しを行う

なお、当初施工したランプ部ではスロット削孔後、液圧破碎装置による一次破碎を行っていたが、3.0tonクラスの大型の油圧ブレーカを使用するようになってからは、スロット削孔後、直接ブレーカにより破碎した。

ランプ部では全断面掘削、ランプの拡幅部および本坑部では、上半先進下半ベンチカット掘削とした。

使用機械を表－1に示す。スロット削孔機は1台のドリフトで5連のロッド、

ビットに同時に打撃および回転を与える構造となっており、円形孔が連続した形状のスロットを削孔できる。スロット削孔機のフィード長は2.2 mであるので、1掘進長を2.0 mで計画した。施工では5台のスロット削孔機を3ブームおよび2ブームの油圧クローラジャンプに搭載して上半、下半にそれぞれ配置した。

油圧ブレーカは重量3 ton および2 ton の大型のブレーカを上半、下半に各1台配置した。掘削能率はブレーカ重量に大きく左右されることが、これまでの施工で明らかとなっており、トンネル内で使用可能な最大級のブレーカを用いることにした。なお、トンネル切羽の作業では横向きあるいは上向きの打撃が多くなるためこれに適するようにブームを改造した。

(2) スロット削孔パターン

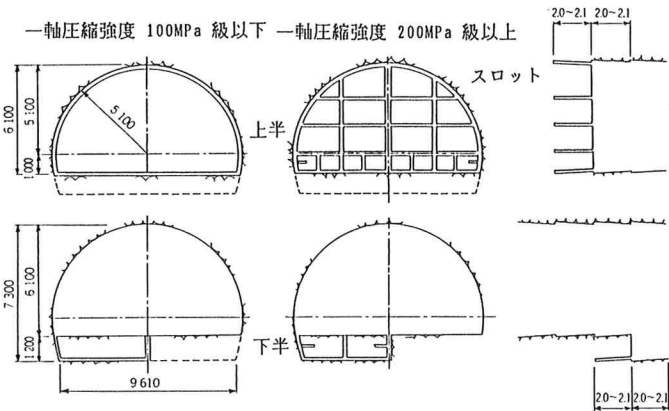
機械掘削における施工能率やコストは、岩質や使用機械の能力によって大きく左右されるほか、スロット削孔機による場合には、スロットをどの位置にどの程度配置するかによっても変わってくることが予想される。そこで、掘削に際しては各切羽ごとにスロット削孔時間とブレーカ破碎時間とを合わせた掘削時間がもっとも短くなるようにスロット削孔パターンを決定す



写真－1 スロット削孔状況

表－1 使用機械

工 種	名 称	仕 様	台 数
スロット削孔	スロット削孔機（Ⅱ型）	スリットエス 5（HD-300 フィード長 2.2m）	5
	ベースマシン（3ブーム 油圧式 クローラジャンプ）	JCH3-100（3ブーム SD機）	1
		JCH2-100（2ブーム SD機）	1
ブレーカ破碎	油圧ブレーカ	①日本ニューマチック H-20X	1
		②クランプ M.T.B. 2000	1
	ベースマシン（油圧ショベル）	①KATO HD-1880SE（1.8 m ³ ）	1
		②三菱 M.T.B. 300（1.6 m ³ ）	1



図－1 スロット削孔パターン

ることが重要となる。

岩質は各切羽ごとに異なるため、切羽の観察結果、シュミットロックハンマーによる反ばつ硬度から換算した一軸圧縮強度（以下強度と称する）、前回の切羽のサイクルタイムの実績をもとに評価した。そして、それまでの施工で得られたスロット削孔、ブレーカ破碎能率のデータをもとにスロット削孔パターンを選定した。このため各切羽でいろいろなスロット削孔パターンを適用することになったが、代表的なものを図-1に示す。外周部のスロットは岩質のいかんによらず、すべての切羽に配置した。外周部はブレーカによる打撃がもっともやりにくい場所であるうえ、外周部のスロットなしで打撃した場合、打撃エネルギーはその多くが地山に吸収され、破碎効率は著しく低下するからである。中央部のスロットは、亀裂が少く、強度が大きい岩質に対しては多く配置し、逆に亀裂が多く強度が小さい岩質に対しては少い配置とした。また亀裂の位置に応じて部分的にスロットの増減を行った。なお、下半部の掘削においても同様の考え方でスロット削孔パターンを決定した。

4. 実施工結果の検討

最初に施工したランプ部では、途中で機種の変更や、掘削断面の変化など施工条件が一定ではなかったが、ランプ部の貫通後に掘削を行った本坑では、これらの条件がほぼ一定となった。そこで、本坑上半部の約 150m 区間の施工結果をおもに検討する。

(1) スロット削孔

各切羽に配置したスロットの周長と強度との関係を図-2に示す。図によれば強度とスロット周長との間に相関はみられるが、バラツキが大きい。これは、スロット削孔パターンを決定する現場担当者が強度だけでなく亀裂の状況等も考慮に入れてパターンを決めた結果を反映している。

いくつかの切羽で実測したスロット削孔速度（いわゆるのみ下り）と強度との関係を図-3に示す。削孔速度は、シュミットロックハンマーによる測定を行った切羽面において、その面から 1.5～2.0mの深さまでのスロットを4～5本削孔したときの速度の平均値を示す。削孔速度は強度とほぼ直線的な相関がある。スロット削孔時間にはこのほか、ブーム移動、ビット交換等の時間が必要で、これらを含めた実削孔速度は図に示す値の60～70%となった。

つぎにスロット削孔能率と強度との関係を図-4に示す。スロット削孔能率は、スロット周長が異なる各切羽を3台のスロットドリルで削孔したときの所要時間をその切羽の掘削量で除したものである。したがってスロット削孔能率は、その切羽でのスロット周長と削孔速度との2つの要因に左右される。強度とスロット周長との関係は図-2に示すようにバラツキが大きいものであったが、図-4に示すように強度とスロット削孔能率は、かなり相関が高い結果となっている。

(2) ブレーカ破碎

ブレーカ破碎は、各切羽とも踏前部から打撃を開始し、順次上方の岩盤を打撃して下方へ落とすという同じ手順で実施した。ずり出しは破碎の途中で適時行った。

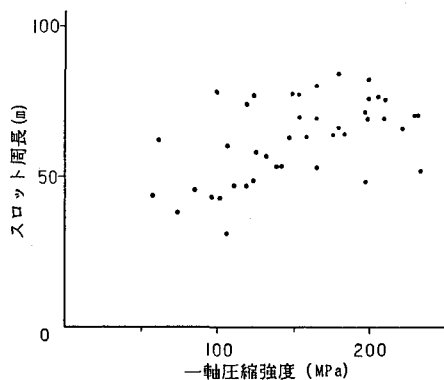


図-2 スロットの周長と強度との関係

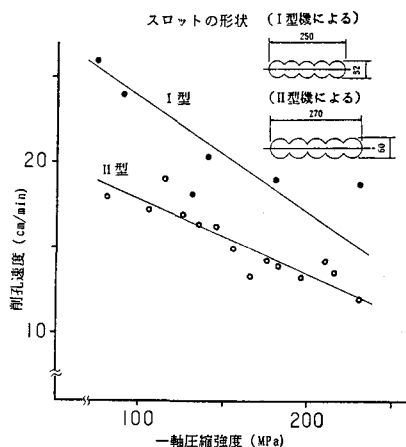


図-3 スロット削孔速度

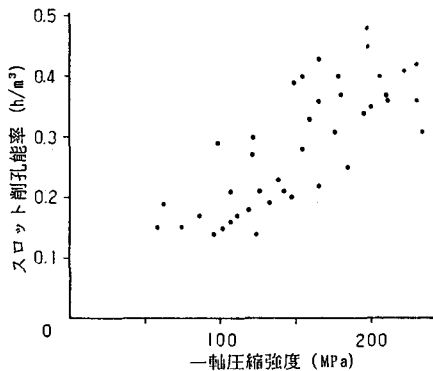


図-4 スロット削孔能率と強度

ブレイカ破碎能率と強度との関係を図-5に示す。大きくみて相関はあるがかなりバラツキが大きい。このことからブレイカ破碎能率は、強度のほか、岩盤の亀裂の状態、スロット周長（いいかえれば自由面の程度）に大きく左右されるものと考えられる。

(3) 掘削能率

掘削能率と強度との関係を図-6に示す。掘削能率はスロット削孔能率とブレイカ破碎能率とを合計したもので、ずり出し等の時間を除いている。スロット削孔能率と強度およびブレイカ破碎能率と強度との間には、それぞれ程度の違いはあるが、図-4、5に示したように大きくみて相関がある。これらを合計した掘削能率は、両方の影響が加わるため、図-6に示すように強度の違いを大きく反映する結果となっている。またずり出しや測量その他の作業を含めたサイクルタイムは18～65時間の範囲に分布した。このことを工事着手前に施工能率およびコストを積算する立場からみると、岩質を精度よく評価することの重要性がとくに強調されるところである。

つぎに今回採用した機械掘削工法と文献等に公表された他の機械掘削工法（TBMを除く）の平均月進の比較結果を図-7に示す。対象の岩質はいずれも硬質の花崗岩で、トンネルの断面積は35～52m²である。全般に強度が大きいほど月進が少なくなる傾向がみられるが、その中では今回の工法がやや有利なようである。

(4) 外周部スロットの効果

外周部のスロットは前述のようにブレイカの破碎能率をあげるために効果があるばかりでなく、トンネル周辺岩盤のゆるみ低減にも効果があると考えられる。

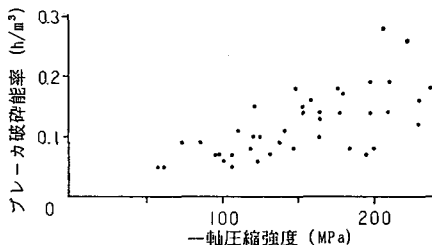


図-5 ブレイカ破碎能率と強度

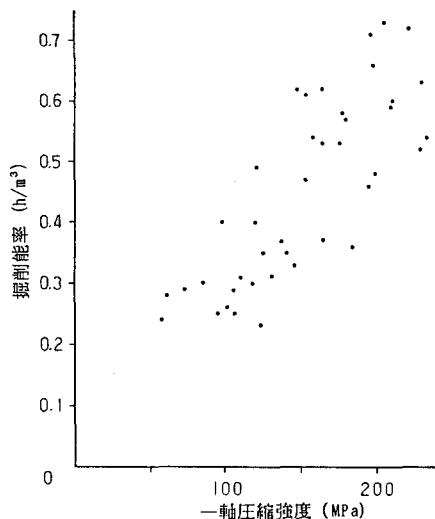


図-6 掘削能率と強度

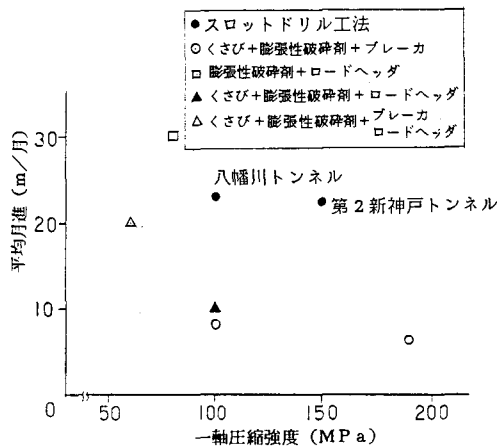


図-7 無発破掘削工法の月進比較

図-8に地中変位の測定結果を示す。地中変位計は先行して掘削したランプ部から設置し、本坑切羽の通過する前からの変位を測定した。本坑壁面にもっとも近い測点の最終変位は、トンネル幅の0.004%の0.44mmと極めて微少で、壁面から2m以上離れた測点の変位はほとんどない。

掘削壁面は、写真-2に示すように平滑にしかも精度よく仕上げることができたので、約65m²の大断面にもかかわらず、素堀りで掘削可能という状態であった。支保は厚さ5cmの吹付けコンクリートのみを施工した区間が大部分であった。

(5) 施工時の振動

下半部のスロット削孔およびブレイカ破碎時に坑内で振動計測を行った。結果を図-9に示す。スロット削孔時の振動はブレイカ破碎時の振動の1/10程度である。筆者らは、スロットを利用した低振動発破の発破振動を他のトンネルで計測したが²⁾、この結果では、20m離れた坑内測点での最大振動速度が約1cm/sであった。ブレイカ打撃時の振動はこの値の約1/5となっている。

また、地表の民家近くで公害振動レベル計により振動計測を行ったが、55dB以下でとくに問題とはならなかった。

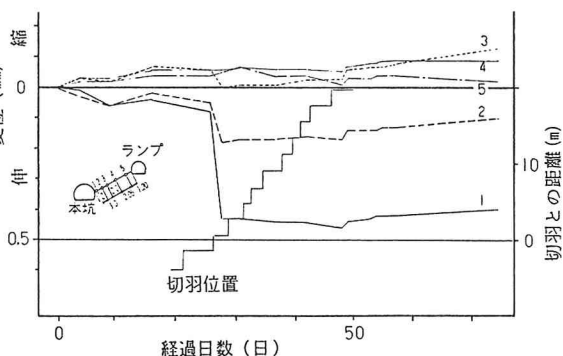


図-8 地中変位測定結果

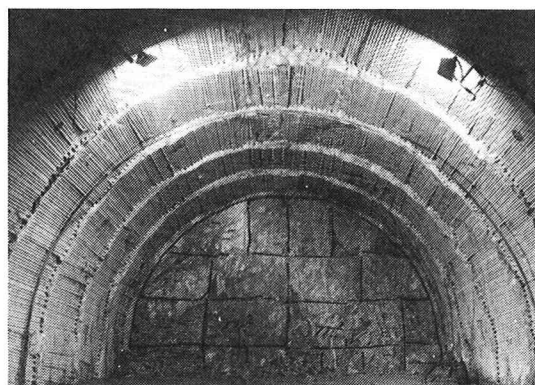


写真-2 掘削壁面の状況

5. おわりに

今回の機械掘削工法による施工で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- i. スロット削孔能率、ブレイカ破碎能率と岩盤の強度とは相関があり、特にこれらをあわせた掘削能率は、強度に大きく左右される
- ii. 強度から概略の掘削能率を想定することはできるが、精度を上げるためには強度以外に亀裂の状態をも考慮すべきである
- iii. 強度が平均 150MPaの岩質で平均月進23mとなり、他の機械掘削工法と比べ良好な結果が得られた

なお、各切羽で決定したスロット削孔パターンが最適であったかどうかの検証、亀裂を含めた岩盤の評価と施工能率との関係など今後検討したい。最後に、施工データの収集に多大の御尽力をいただいた新神戸OSDの各位に謝意を表します。

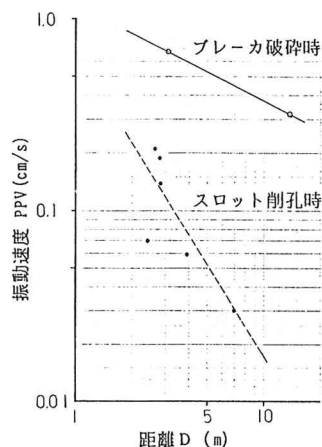


図-9 振動測定結果

参考文献

- 1) 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, 第 379号/VI-6, P.P. 55~64, 1987.3 2) 萩森健治・竹知芳男・古川浩平・中川浩二, 「スロット工法を用いた低振動発破工法に関する研究」, 土木学会論文集, 第 391号/VI-8, P.P. 142~150, 1988.3