

(23) 硬岩トンネルのスロット発破工法に関する研究

榊 奥 村 組 正 員 萩森健治

榊 奥 村 組 正 員 竹知芳男

榊 奥 村 組 正 員 藤井哲夫

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. はじめに

山岳トンネルの掘削には発破が通常用いられる。しかし、近年住居近くでのトンネル施工が多くなり、また振動公害に対する規制が厳しくなったことと合わせて、発破が制約を受ける割合が非常に高くなってきている。時には掘削すべき岩盤が硬岩であるにもかかわらず発破が全面的に禁止され、やむを得ず無発破工法によらざるを得ない場合もある。そこで振動を極力抑えた発破の工夫が古くから種々なされてきている。しかし、発破振動を抑えるということと掘削の効率を上げるということは一般に背反するものであり、必ずしも納得のいく工法が確立されているとは言い難い。

筆者らはスロット削孔機¹⁾を用いて、切羽外周部あるいは切羽中央部に溝を掘り、従来の工法よりはるかに少量の薬量で発破することにより、発破振動を非常に小さくできる発破工法を考案した。本研究ではこの工法を硬岩トンネル掘削の実施工に用い、種々の検討を加えた結果を報告する。

2. 施工と振動計測

(1) 現場の条件

スロット発破を適用したトンネルの概要を、図-1に示す。すなわちこのトンネルは図のように既設作業坑から分岐し、既設の2段双設トンネルの直下を通過する。作業坑の両坑口付近には多くの民家があるため振動、騒音の少ない発破工法の採用を要請された。許容振動値はとくに定められていないが、これまでの施工の経験から住民から苦情の出ない値として、住居地域における振動値が0.05~0.1 kine以下となるよう管理されていた。

トンネル付近の地質は、おもに黒雲母花崗岩からなり他に閃緑岩が分布する。岩石の一軸圧縮強度は160~200 MPa、地山の弾性波速度は5.0 km/s内外の新鮮な硬岩である。

(2) 施工概要

作業坑との交差部をスロット削孔機とブレーカーにより無発破掘削したのち、図-1の①の区間を外周スロット発破で、②の区間を心抜スロット発破および通常制限発破、③の区間を外周スロット発破で施工した。本研究で実測したのはこの①②の区間の全発破である。掘削断面積は9.1m²で、外周スロット発破は全断面発破とし、心抜スロット発破と通常制限発破は2分割発破とした。1回の進行長は1.1~1.2 mである。発破には、D5段発雷管とスラリー爆薬を使用した。スロットの幅は52 mm、深さは1.2~1.3 mで、削孔には2ブーム油圧ジャンボに搭載された2台のスロット削孔機を使用した。

(3) 振動計測方法

発破振動の計測は、図-1に示すように既設作業坑内に3ヶ所(A, B, C測点)、既設トンネルに1ヶ所(D測点)、地表に1ヶ所(E測点)それぞれ3成分の速度型ピックアップを設置した。ここで計測した3成分の方向はトンネル軸に垂直な水平方向をX、トンネル軸方向にY、鉛直方向にZとした。

(4) 実験の経過

図-2(a)は今回の実験で行った全26断面のそれぞれの発破におけるE点で計測された最大の振動速度値

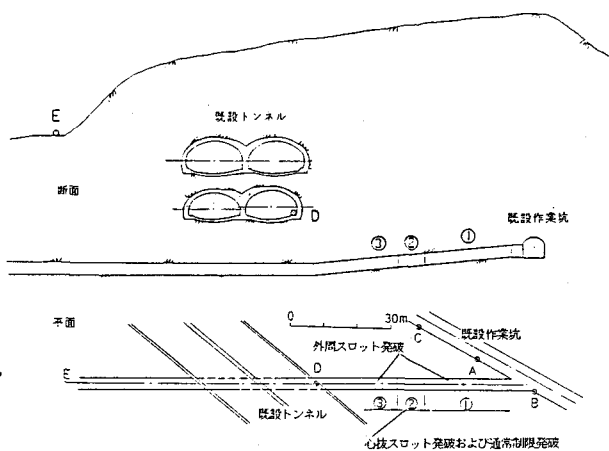


図-1 実験したトンネルの位置、実験箇所および計測位置

を示している。E 点は全試験発破において切羽から 113～139 m の距離を有し、住民に与える振動状況を把握するのに適していると考えられたためである。図中振動値を与える○印に付した数値および記号 (X, Y) はその最大の振動速度を生じた雷管の段数およびその振動速度を生じた方向である。

No.1～No.20 の発破は外周スロット発破であり、No.1, No.2 とパターンを変化させながら試験的に発破した後、No.3 を地元住民立合いのもとに行い発破の了承を得た。その後 No.5 でほぼ満足のいく結果を得たが No.8 のパターンでまた起砕不良を生じた。そこで No.5 をもとに外周スロット発破のパターンを確立することとし、No.11 まで若干の変更を除いてほぼ同一のパターンで掘削した。このパターンによれば安定した起砕が得られることを確認した。その後、No.12～No.20 で種々の外周スロット発破パターンの検討を行ったが、特に有効と思われるものは得られなかった。

No.21, 22 では心抜スロット発破を行ったが No.22 で心抜スロットの部分が閉塞し起砕できず、いわゆるハチを打った状態となった。No.23, No.24 で通常制限発破を行い、No.23 では右側壁部に若干の起砕不良を生じたが、No.24 ではほぼ妥当な発破結果を得た。しかし、No.24 の発破を終了した時点で地元住民より発破振動が大きいとの苦情を受けた。そこでやむを得ず通常制限発破は 2 回の実験のみとし、その後、No.25 と No.26 で心抜スロット発破を行い実験を完了した。以後の区間は No.11 までで確立した外周スロット発破 (No.10 のパターン) により施工を行い、住民からの苦情はないままに施工を完了した。

以上のことから、以下に考察する 3 種の発破工法の各実験発破番号および回数は外周スロット発破は No.5, No.7, No.8, No.9, No.10, No.11 の 6 回、心抜スロット発破は No.21, No.25, No.26 の 3 回、通常制限発破は No.23, No.24 の 2 回である。

3. 実施結果の検討

発破振動は爆薬の爆発により生じるエネルギーが波動となって地盤中を伝わることにより生じるものである。そのため発破振動は爆源の状況、伝達経路、受振点の状況等により大きく影響され、その大きさを理論的に求めることは困難である。そこで今日では発破振動の予測に対しては経験的に求められた次式

$$PPV = KW^{\alpha} D^{-\beta} \quad (1)$$

が用いられることが多い。ここで PPV : 受振点の最大速度振幅、W : 同一段で発破される合計薬量、D : 発破位置と受振点との距離、K、 α 、 β : 定数 である。この式においては、発破振動速度は薬量 W および爆源と受振位置との距離 D に直接支配されるとし、その他の要因はすべて定数 K に含ませている。本研究でもこの式を用いて、薬量と K の低減効果を明らかにする。

(1) 薬量の低減効果

図-2 (b)、(c) にそれぞれの発破に用いた合計薬量と段毎の最大斉発薬量を示す。ここで最大斉発薬量に付した数字はその値を与える段の雷管の段数である。心抜スロット発破と通常制限発破は合計薬量が大きくなるため 2 回分割発破としている。そのため図-2 (b) には、発破振動の検討対象とした下半部のみの薬量を示している。

薬量を低減すれば一般的に振動は小さくなる。図-2 (a) と図-2 (b)、(c) を比べれば大きく見て相関があり、薬量を低減することにより振動が小さくなることは本研究の結果からも認められる。一般に実施工において用いられる薬量は過装薬ぎみであるといわれており、これは実施工において起砕不良による手もどり

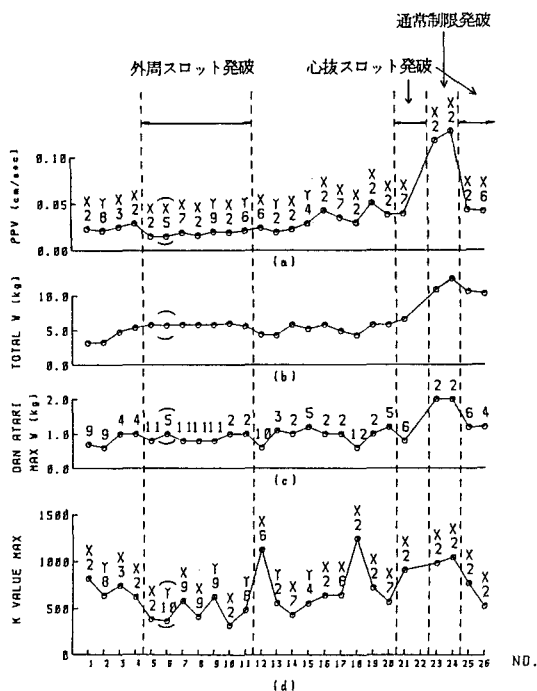


図-2 発破振動計測結果

を現場が非常に嫌うところに大きな理由がある。本研究で用いた3種の発破パターンにおいても、用いた薬量が各パターンにおける最適薬量であったか否かの検討を行ってはじめて、厳密な意味で薬量が振動低減に及ぼす影響を論ずることができる。

本研究で用いた通常制限発破の上下半加えた全薬量は約15.5および16.3 kg (1.4~1.5 kg/m³)となっており断面積、岩盤の状況からみて、ほぼ適切と思われた。No.21 と22の心抜スロット発破での上下半の全薬量は11.8 kg であり、No.22 ではスロット部が閉塞した。そのためこの薬量はほぼ限界近いものと考えられる。No.25, No.26では安全のため心抜部分の孔数を増加し全薬量を14.8 kg、13.2 kgとして発破し、良好な破碎結果を得ている。外周スロット発破は外周部に設けられた大きな自由面に向って開放方向に発破されるため荷が非常に軽くなると考えられる。そのため薬量は踏前部を除いて孔当たり 100 gで十分と思われたが確実を期すため主として孔当たり 200 gとすることにした。そのためこの発破においては若干の孔配置や平行削孔の乱れが生じて起砕状況はいずれの発破も良好であった。

このように、3種の発破パターンの薬量は起砕状況などからしてほぼ適切な薬量と考えることができる。以上のことから大まかにみて、通常制限発破にくらべて心抜スロット発破では4/5 に、外周スロット発破では2/5 に薬量を低減することが可能であるといえる。

(2) K値の低減効果

発破振動は種々の要因の合成効果として現れるためにその要因分析は必ずしも容易ではない。通常用いられる発破振動予測式では薬量、発破点距離以外のすべての効果を定数Kに含めることによりK値の大小を用いて発破振動効果を論じているようである。本研究においても振動効果の評価をK値で行うことにする。

いま通常制限発破、心抜スロット発破、外周スロット発破のそれぞれの代表的な発破として No.23, No.21, No.10をとることにする。これはNo.23 およびNo.21 については両者とも若干の起砕不良を生じたが、発破そのものはほぼ成功しており、かつ薬量が限界に近いと考えられたこと、またNo.10 は前述のように現場実験終了後の実施工に用いたパターンであることによる。これらの発破について各段毎、全測点、3成分について計測された全データを用いて、最小2乗法で回帰すると $PPV = 414 \cdot W^{0.58} \cdot D^{-2.1}$ 、 $139 \cdot W^{0.27} \cdot D^{-1.9}$ 、 $155 \cdot W^{0.85} \cdot D^{-2.0}$ となり、距離Dの指数であるβの値は通常用いられる 2.0を用いても特に大きな差はないことが認められた。これに対して薬量Wの指数であるαの値はかなり大きく異なっていることから、ここでは一般的に用いられるβを用いて検討することとした。

3種類の発破工法における発破振動効果を検討するためにE点における振動速度から

$$PPV = KW^{2/3} D^{-2} \tag{3}$$

を用いて求めたK値を比較したものが表-1である。K値の比較は初段（ここではいずれの発破工法でも瞬発雷管を用いることによる振動の増大を避けるため、

初段にはDS2段の雷管を用いている）発破におけるK値とそれ以外の段の発破におけるK値とを区別し、計測方向X、Y、Zごとに示している。表-1によるとまず初段発破によるK値は計測方向により相違はあるが通常制限発破においてX方向で最大 1016、と著しく高く、続いて心抜スロット発破の 800となり、外周スロット発破では 335となって外周スロット発破のK値が特に小さくなっていることがわかる。またその他の段における発破では初段ほどではないが、K値の順序は初段と同じ順となり、平均値として外周スロット発破のK値は通常制限発破の3/4 程度となっている。ここで通常制限発破における最大の振動を生じるX方向のK値は、心抜き、払いの場合とも一般に言われている値²⁾と大差なく、ほぼ合理的な値と思われる。

全発破について最大のK値とその段数及び方向を示したものが図-2(d)である。これによると外周スロット発破では初期の数回の発破とスロット削孔が不良であったNo.12、試験的に1孔ずつ発破したNo.18を除いてK値は最大 700程度であり、心抜スロット発破、通常制限発破でK値が最大1000程度となることとの

表-1 3種の発破工法におけるK値の比較

		通常制限発破	心抜スロット発破	外周スロット発破
初	X	1016	800	335
	Y	471	440	285
	Z	277	333	167
段 平均		588	525	262
そ	X	460	354	272
	Y	217	217	237
	Z	148	202	136
他 平均		275	258	215
全 平均		302	281	220

差は明確である。また外周スロット発破の場合には最大K値はさまざまな段数で生じるのに比べて、心抜スロット発破、通常制限発破ではことごとく2段（初段）で生じている。これは外周スロット発破では各段の荷の重さが初段を含めて平均化されているのにくらべて、心抜スロット発破および通常制限発破においては初段の荷が特に重くなることを表わしているといえる。

（3）発破振動の低減

以上のように心抜スロット発破、外周スロット発破とすることにより通常制限発破とくらべて総薬量はそれぞれ4/5, 2/5 程度に低減され、E点において最大の振動速度を与えるX方向のK値は初段で4/5, 1/3 に、他の段のX方向K値は4/5, 3/5 に低減されることが明らかになった。ここで発破振動の管理は最大の振動速度でなされるため、必ずしもこれらの単純な組み合わせとはならない。すなわち、たとえば図-2(a)にみられるように通常制限発破および心抜スロット発破ではすべての発破で初段（2段）の発破が最大のPPVを与えているが、外周スロット発破ではさまざまな段で最大振動速度が生じている。またいくつかの発破ではX方向でなくY方向の振動速度が最大となったものもみられる。

この状況を3種の発破工法の代表例である No.23, No.21, No.10の発破についてX方向の振動について薬量およびK値と振動速度の各段毎の変化を示したものが図-3である。K値について示した図-3(b)によると、心抜スロット発破と通常制限発破では各段毎のK値に特に大きな差はなく、初段で1000程度、その後300~600 程度でほぼ一定となる。これに比べて外周スロット発破では初段で著しくK値は低くなるのみならず、各段毎のK値もかなり低くなり、200~300 の値を示すことが認められる。図-3(c)にはこれに対応する振動速度を示している。図-3(c)では図-3(b)に対して各段毎の薬量の影響（図-3(a)）が加わるため通常制限発破、心抜スロット発破、外周スロット発破のそれぞれの振動値の差が拡大されるのが認められる。

ここでそれぞれの発破で生じた最大の振動速度を表-2に示す。これらの最大振動速度値を距離の影響を除いて比較するためPPVの値を D^{-2} で除して求めた値を同表に併せて示している。これからわかるように、平均値としての最大振動速度値は通常制限発破にくらべて心抜スロット発破では33%、外周スロット発破では19%程度になるといえる。

4. まとめ

本研究で得られた主な点をまとめると以下のとおりである。

- (1) 外周スロット発破によれば、通常制限発破と比べて全体の薬量は2/5 程度、初段のK値も1/3 程度となり、生じる最大振動速度は1/5 程度となる。
- (2) 心抜スロット発破によれば、通常制限発破より少ない薬量での心抜が可能となり、通常制限発破とくらべ、全体の薬量は4/5 程度、振動速度は1/3 程度に低減できる。

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、pp.55-64、1987年3月。2) 例えば、日本トンネル技術協会：トンネル工事の発破振動および騒音対策に関する調査研究報告書、p.24 1977年。

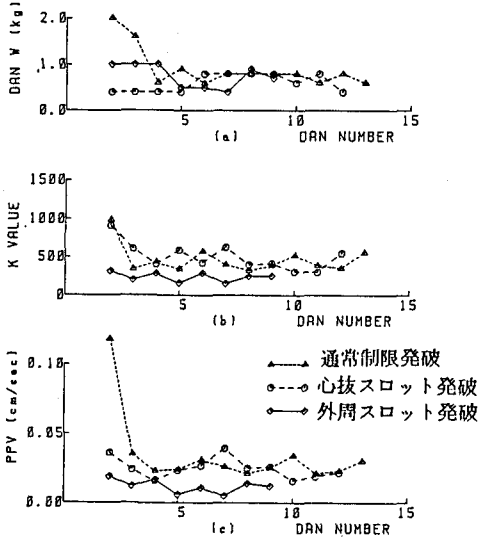


図-3 3種の代表的な発破パターンにおける段毎の薬量、K値、振動速度の比較

表-2 3種の発破工法における最大の振動速度の比較

	通常制限発破	心抜スロット発破	外周スロット発破	
PPV _{max} (cm/sec)	0.118 0.128	0.039 0.043 0.042	0.015 0.016 0.019	0.019 0.020 0.021
平 均	0.123	0.041	0.018	
PPV _{max} D ⁻²	1562 1665	539 548 525	274 276 316	333 339 345
平 均	1613	537	314	

(23) Blasting Methods with Continuous Slots in Tunnelling Hard Rock

Kenji Hagimori *
Yoshio Takechi *
Tetsuo Fujii *
Kohei Furukawa **
Koji Nakagawa **

Abstract

This paper describes the low vibration blasting methods with continuous slots based on the field tunnelling tests. There are two methods, which are blasting with a peripheral slot and blasting with a center slot. In the former blasting method, a continuous slot around the tunnel periphery is drilled with the slot drill machine and then rock surrounded by the slot is excavated by blasting. According to field tunnelling, the vibration velocity was reduced to one fifth of that in the conventional blasting method and the total charge was reduced to two fifth. In the latter method, the center slot is used as the center cut holes. The vibration velocity was reduced to one third and total charge was reduced to four fifth.

* Okumura Corporation

** Faculty of Engineering, Yamaguchi University