

## スロット工法を用いた低振動発破工法に関する研究

## LOW VIBRATION BLASTING METHODS WITH CONTINUOUS SLOTS

萩森健治\*・竹知芳男\*\*・古川浩平\*\*\*・中川浩二\*\*\*\*  
By Kenji HAGIMORI, Yoshio TAKECHI, Kohei FURUKAWA  
and Koji NAKAGAWA

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.

**Keywords :** blasting, low vibration, continuous slot, tunnelling, slot drill machine

## 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。

発破振動が構造物あるいは人体に与える影響というのは基本的には程度の問題であるから、厳しい制約条件下でなら発破が許可される場合が多くある。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いがたい。

従来よりよく用いられてきた発破振動低減工法とし

\* 正会員 工修 奥村組技術研究所土木研究課主任研究員  
(〒559 大阪市住之江区辰巳西3-5-8)

\*\* 正会員 工修 本州四国連絡橋鷲羽山地区工事奥村・鉄建  
・大本共同企業体工事所

(〒711 倉敷市下津井吹上 213-1)  
\*\*\* 正会員 工博 山口大学助教授 工学部土木工学科  
(平成25年 1月26日発行 価格 6,000円)

\*\*\*\*\* 丁全昌 工博、山口大學教授、工営科建設工学科（同上）

て、低爆速爆薬を用いるとか、同時に起爆される爆薬量を極端に少なくするといった方法が挙げられる。しかしこれらの中では著しい孔数の増加や一発破当たりの掘削量の減少をもたらし、掘進の非能率化という点で問題が多い。

著者らはスロット削孔機<sup>1)</sup>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. 発破振動の軽減法

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對しては経験的に求められた次式

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,  $K$ : 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  $K$  に含まれている。

これに対して雑候<sup>2)</sup>はこの  $K$  の値を

$$K = C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 \dots \dots \dots \quad (2)$$

の形に表わすことにより薬量と距離以外の要因を分析している。ここに  $C_1$  : ベンチカット発破、トンネル掘進発破など発破の種別により定まる要素、 $C_2$  : 発破のかかり方（破碎効果）の良否によって変わる要素、 $C_3$  : 受振点の地盤状況の差異によって変わる要素、 $C_4$  : 装薬された爆薬の種類による要素、 $C_5$  : 発破域に対する受振地の方向の差により変わる要素である。式(1)、(2)を合わせて考えると、発破振動を軽減するためにはこれらの式に含まれる定数あるいは変数を低下 ( $D$  の場合は増加) させるか、あるいはここには含まれていない発破振動の伝播経路の特性に何らかの工夫を加える方法を考案することによって与えられる。

いま、これを発破振動の軽減方法の立場から考え、1：振動源対策、2：伝播経路対策、3：受振点対策の3つに分類するとすれば大まかには

1. 振動源対策 :  $W, C_1, C_2, C_4$
2. 伝播経路対策 :  $D, C_5$ , 経路特性
3. 受振点対策 :  $C_3$

を変化させ得る発破工法を工夫することとなろう。

一般にトンネルの発破による発破振動を考えるとき、対象が複数の民家あるいは保安構造物であることが多い、かつ振動源である切羽は順次移動していく。これは  $D$  は切羽進行に伴って順次変化し、 $C_3$  は多数の受振点ゆえに特定しにくいことを意味し、これらを意図的に操作することは難しいと考えられる。また  $C_5$  を変化させることも不可能である。このことを考慮すると発破振動軽減方法は主として振動源対策あるいは伝播経路特性対策に頼らざるを得ないことが多い。

振動源対策としては、先の定数あるいは変数である  $W, C_1, C_2, C_4$  をできるだけ小さくするという目的に適合した方法が種々工夫されてきており、それらの例を挙げると以下のようなものがある。

- (i) 低爆速の爆薬やコンクリート破碎器を用いることによって振動を小さくする方法<sup>3), 4)</sup> ( $C_4$  の低下)
- (ii) 起爆方法を工夫して、必要とされる薬量を適当な数の発破孔に分割し、DS, MS 雷管を用いた発破を行い、また最大の振動を与えることの多い心抜きに瞬発雷管の使用を避ける。これにより段ごとあるいは同時に起爆される爆薬の薬量を減じて振動を軽減する方法<sup>3)</sup> ( $W$  の減少)
- (iii) 爆轟波に対する適当な反射板をもつカプセルを

作ることにより、爆轟波を目的の方向に制御し破碎効果を上げかつ振動を下げる方法<sup>5)</sup> ( $C_2$  あるいは  $C_1$  あるいは  $W$  の低下)

また経路対策としては

- (iv) 切羽の外周部にプリスピリット発破による破碎帯を作り、波動の遮断を行って外部への振動の伝達を低減させる方法<sup>3)</sup>

が考えられる。しかし (iii) の方法についてはいくつかの解説<sup>6)</sup>はあるが、発破振動軽減効果については必ずしも明らかではなく、たとえば男沢ら<sup>7)</sup>のデータによれば振動が低減しているとはいがたい。また (iv) の方法は理論的な説明<sup>8)</sup>はあるが実施工における評価に対する効果の程度は疑問である。結局は (i), (ii) で挙げた低爆速爆薬等を用いるか、段別の薬量を小さくするか、あるいは両者の併用によることが多いようである。しかし、これらの方法は実施工の立場からすれば、はなはだわざらわしい方法であり、かつ振動軽減効果もわざらわしい割には小さく、掘削効果の問題を別にしても、現場ではあまり好まれない工法であると考えられる。

一方前述のように発破振動軽減に薬量の低減が大きな効果をもたらすことはいうまでもない。通常の硬岩トンネルの発破掘削において消費される薬量は現場によって大きく異なるが  $1\text{m}^3$  当たり  $1.0 \sim 2.0\text{ kg}$  程度が用いられている。一方、砕石などのベンチ発破においては石灰石山を例にとれば  $1\text{m}^3$  当たり  $200\text{ g}$  程度消費されるのが通常である。トンネル発破と明りの大規模なベンチ発破とではその規模や自由面の存在などを始めとして条件は大きく異なるが、トンネル発破の発破条件を何らかの手法によりベンチ発破のそれに近づけることにより、通常用いられている薬量をかなり小さくすることが可能であり、それによる振動軽減効果はかなり大きいと推測できる。

このような観点から本研究では、トンネル発破を2自由面発破に近づけることにより、上述の  $C_1, C_2, W$  の大幅な軽減をはかった低振動発破工法の確立を試みる。これはスロット削孔機<sup>1)</sup>を用いて、心抜き部分をスロット状に削孔したうえで発破を行う心抜スロット発破工法と外周部に地山との縁切りのための外周スロットを設けて発破する外周スロット発破工法とからなり、これにより生じる発破振動を通常制限発破工法のそれと比較検討する。後述するように心抜スロット発破は  $K$  値の大きいといわれる心抜き部にスロットを設けて1自由面発破を2自由面発破とし、荷を軽くして薬量と  $K$  値の低減をはかるものである。また外周スロット発破は切羽の外周部にスロットを設けることによって発破全体を自由面の大きな2自由面発破とすることに主眼がある。その結果、薬量を大きく減じ、かつ荷を軽くすることによりい

わゆる  $K$  値を小さくし、さらにはスロットにより振動伝播を遮断することにより発破振動を小さくするという先の(iv)に述べたプリスプリットの効果を完全なものとするものである。またここで通常制限発破とは進行長を短く、かつ同段の雷管で起爆される薬量を小さくした分割発破のことをいっている。

### 3. 実施工と振動計測

#### (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。

許容振動値は特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により掘削した。その後②の区間で心抜スロット発破および通常制限発破を実施したが、地元から振動あるいは騒音に対する苦情があり再び③の区間で外周スロット発破に変更している。本研究で実測したのはこの①②の区間の全発破である。

各発破の代表的な発破パターンを図-2に示す。これらを代表的発破パターンとした理由は後に4.(3)で述べる。発破に際しては破碎状態と計測された振動値により発破パターンの変更と薬量の増減を行うという手順で掘削を進め、発破孔数や薬量を変えた種々のパターンを実施検討することとした。そのため外周スロット発破については作業効率も含めてほぼ合理的と思われるパターンを得ている。しかし心抜スロット発破、通常制限発破については前述のように住民からの苦情のため3回および2回しか実施できなかった。

掘削断面積は $9.1 \text{ m}^2$ 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、DS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

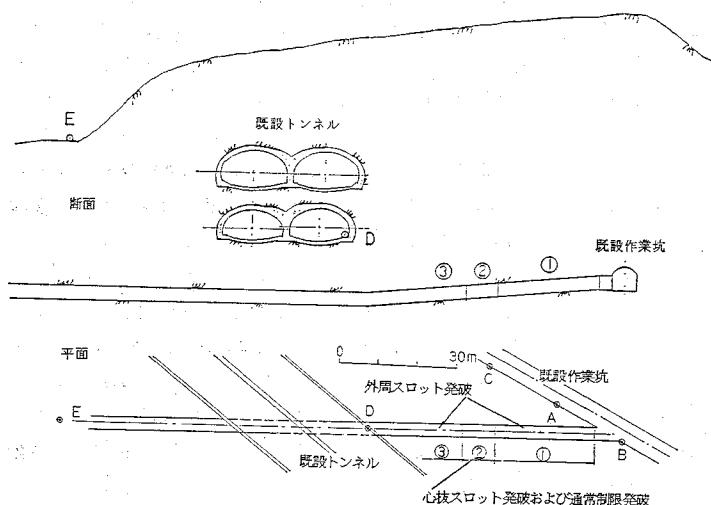
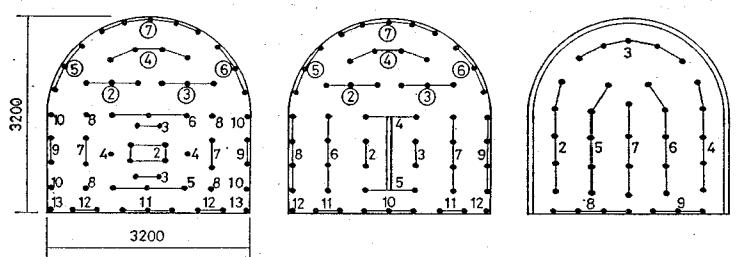


図-1 実験したトンネルの位置、実験箇所および計測位置

通常制限発破 (No.23) 心抜スロット発破 (No.21) 外周スロット発破 (No.10)



段数	孔数	孔当り薬量	段当り薬量
1	4	0.5	2.0
2	4	0.4	1.6
3	4	0.3	1.2
4	3	0.3	0.9
5	3	0.2	0.6
6	4	0.2	0.8
7	4	0.2	0.8
8	4	0.2	0.8
9	4	0.2	0.8
10	4	0.2	0.8
11	3	0.2	0.6
12	4	0.2	0.8
13	2	0.3	0.6
合計	41		10.9

段数	孔数	孔当り薬量	段当り薬量
1	2	0.2	0.4
2	3	0.2	0.4
3	4	0.2	0.4
4	5	0.2	0.4
5	4	0.2	0.8
6	4	0.2	0.8
7	4	0.2	0.8
8	4	0.2	0.8
9	4	0.2	0.8
10	3	0.2	0.6
11	4	0.2	0.8
12	2	0.2	0.4
合計	33		6.6

段数	孔数	孔当り薬量	段当り薬量
1	2	0.2	1.0
2	5	0.2	1.0
3	6	0.2	1.2
4	5	0.1	0.5
5	5	0.1	0.5
6	4	0.1	0.4
7	4	0.1	0.4
8	4	0.2/0.3	0.9
9	3	0.2/0.3	0.7
合計	36		6.0

図-2 3種の発破の代表的な発破パターンと発破諸元

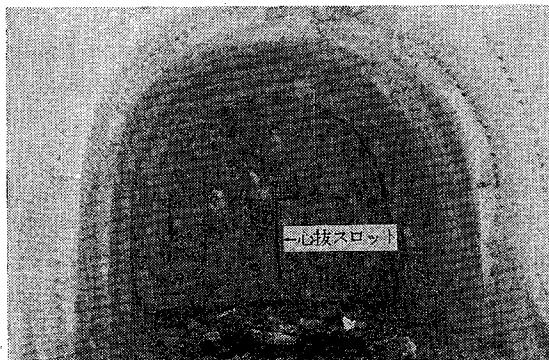


写真-1 心抜スロット削孔状況



写真-2 外周スロット削孔状況

ロット削孔機を使用した。

心抜スロット発破および外周スロット発破の削孔状況を写真-1, 2に示す。

### (3) 振動計測

発破振動の計測は、図-1に示すように既設作業坑内に3か所(A, B, C測点), 既設トンネルに1か所(D測点), 地表に1か所(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水平直交方向をX, トンネル軸方向にY, 鉛直方向にZとした。計測のシステムは図-3に示す計測プロック・ダイアグラムのとおりである。ここでA, B, Cの3点は切羽の側方あるいは後方にあたる作業坑の側壁部に設けられたものであり, D点はトンネル掘進方向上方の既設トンネル踏前隅部, E点はトンネル掘進方向上方の表土上に設けられている。

本研究の主目的は住民に及ぼす発破振動の影響を極力小さくする工法を考案するためであり, 以後検討のためのデータとしては主としてE点で得られたものを用いる。

## 4. 実施工結果の検討

### (1) 実験の経過

図-4(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を示している。前述のようにE点は全試験発破において切羽から113~139m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るため、E点のデータを用いて実験経過を概説する。図中振動値を与える○印に付した数値および記号(X, Y)は

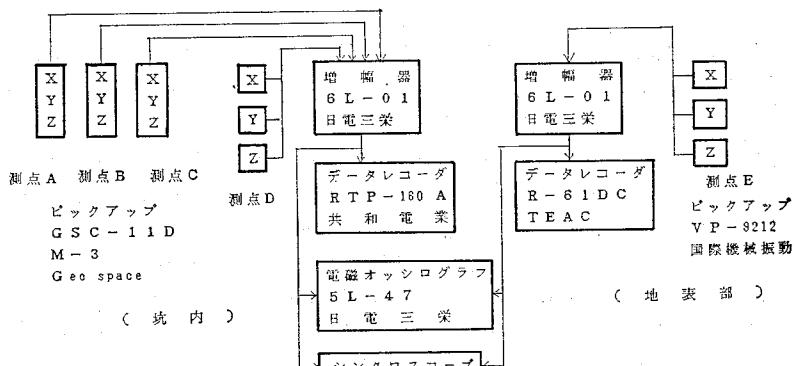


図-3 計測プロックダイアグラム

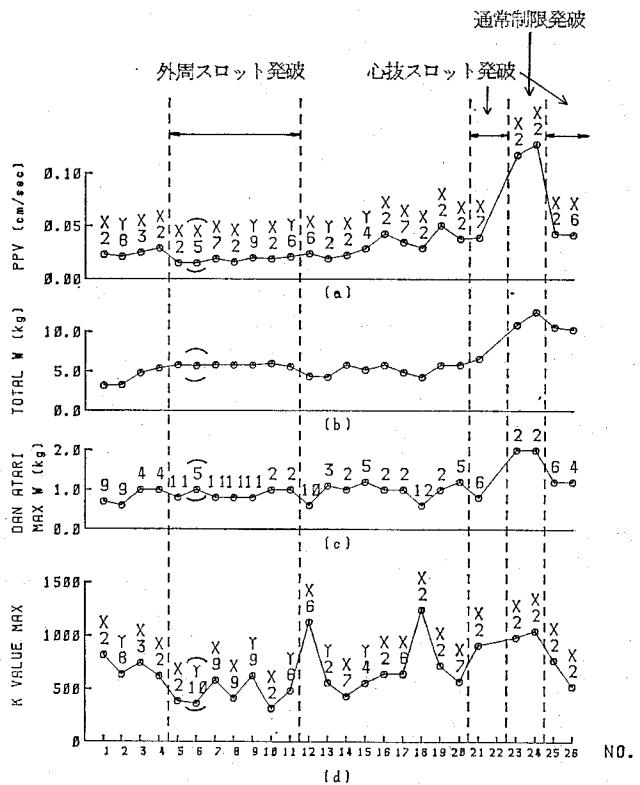


図-4 発破振動計測結果

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 を地元住民立会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. 6 のパターンでまた起碎不良を生じた。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削孔精度などに若干の問題はあっても安定した起碎が得られることを確認した。その後、さらに有効なパターンの検討を目標に、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 に至って坑口からの距離も十分と思われたことと外周スロット発破のパターンの確立ができたことから、心抜スロット発破と通常制限発破の検討を行った。No. 21 では 図-2(b) に示した心抜スロット発破のパターンにより発破したが若干の起碎不良を生じた。同じパターンで No. 22 の発破を行ったところ心抜スロットの部分が閉塞し起碎できず、いわゆるハチを打った状態となった。図-4 中の No. 22 の値が省かれているが、No. 22 は発破不成功とそれの再発破の結果であり、本研究の考察の対象から省いたためである。その後、No. 23, No. 24 で通常制限発破を行った。No. 23 では右側壁部に若干の起碎不良を生じたが、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。

## (2) 薬量の低減効果

図-4(b), (c) にそれぞれの発破に用いた合計薬量と段ごとの最大齊発薬量を示す。ここで最大齊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-4(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-4(a) と 図-4(b), (c) を比べれば大きくみて相関があり、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碎不良による手もどり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。本研究の通常制限発破の発破パターンは火薬メーカーにより提案されたパターンをもとに若干の修正を加えたものを採用し、これを基準発破として検討を進めることにした。本研究の通常制限発破においても発破パターンを工夫するなどしてさらに薬量を低減する工夫は否定されるものではないが、実施工における作業の繁雑さと削孔に要求される精度等を考えると必ずしもその方向は好ましいものではないと考えたからである。本実験における通常制限発破では 2 回のうち 1 回において一部起碎不良がみられたがほぼ妥当な起碎状況を示した。また上下半加えた全薬量は約 15.5 および 16.3 kg ( $1.4 \sim 1.5 \text{ kg/m}^3$ ) 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。

心抜スロット発破は心抜きのために必要とされる薬量を低減し、さらに初段部における 1 自由面発破を 2 自由面発破とすることにより心抜きおよび心助け部分の発破振動を小さくすることを狙ったものである。この発破パターンは先の通常制限発破の心抜き部分がスロットを用いることにより著しく簡単になったものと考えればよい。

この心抜スロット発破において No. 22 で上述のようにスロット部が閉塞し、いわゆるハチを打つことになった。この理由は削孔が平行でなかったため孔尻で発破孔とスロットとの距離が大きくなり、荷が重かったためと考えられる。この No. 22 の心抜スロット発破での上下半の全薬量は 11.8 kg となっている。上述のようにこの心抜スロット発破は発破孔とスロットとの距離に非常に敏感なため、この薬量はほぼ限界に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。

通常制限発破、心抜スロット発破の両者の工法では払い部分においても発破は切羽中央部へ向かって、すなわち発破孔が閉塞される方向へ向かって行われる。そのため孔当たりの薬量を極度に下げるることは困難と考えられ孔当たりの薬量は 200 g を標準とした。これに対して

外周スロット発破は図-2(c)にみられるとおり外周部に設けられた大きな自由面に向か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初期の試行パターンを除くと、起碎不良となることがなく、若干の孔配置や平行削孔の乱れが生じても起碎状況はいずれの発破も良好であった。またずりの飛散状況は切羽の手前 4 m 程度に堆積され、ずり径は最大 0.8~1.0 m と大きかった。これらのことは爆薬のエネルギーが起碎に効率よく用いられたためであるということができよう。

通常制限発破、心抜スロット発破、外周スロット発破におけるずりの飛散状況を写真-3, 4, 5 に示す。上述のずりの大きさおよびその飛散状況がよく理解できるであろう。外周スロット発破後の壁面の状況を写真-6 に示す。この写真からみられるようにスロット発破における掘削断面はスロット削孔位置によって決定され余掘りは非常に小さくなる。また目視によるかぎり発破による地山の損傷はほとんどみられない。

図-4(a) の最大振動速度を与える段数と最大許発薬量を与える段数とを比べるとその段数は必ずしも一致せずこの相違に関しては次の(3)で示す  $K$  値に関するデ



写真-3 通常制限発破におけるずりの飛散状況



写真-4 心抜スロット発破におけるずりの飛散状況



写真-5 外周スロット発破におけるずりの飛散状況

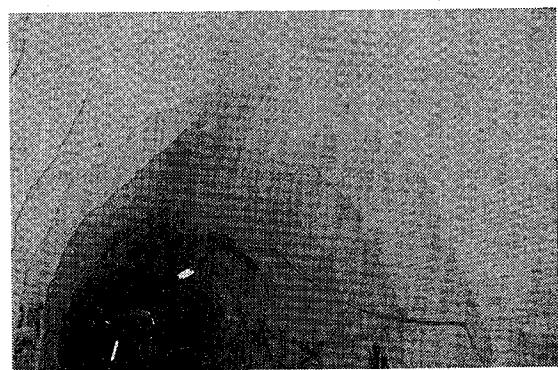


写真-6 外周スロット発破後の壁面の状況

ータと合わせて検討する必要がある。

前述のように、このようにして施工された 3 種の発破パターンの薬量は厳密にはいずれもそれぞれの発破法における最低限界の薬量であるとは言えず、特に通常制限発破および心抜スロット発破のパターンにはまだ検討の余地があるが、起碎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、通常制限発破に比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。

### (3) $K$ 値の低減効果

前述のように発破振動は種々の要因の合成効果として現われるるためにその要因分析は必ずしも容易ではない。特に薬量、発破点距離の影響は大きく、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。ここで問題とする外周スロット発破および心抜スロット発破において式(2)に示した  $C_1 \sim C_5$  の検討を行うと、これらの発破法特有の要因は  $C_1$  と  $C_2$  で表わされる発破の種別と発破のかかり方のみであり、 $C_3, C_4, C_5$  の受振点の状況、爆薬の種類、発破の方向については通常制限発破と同じである。そこで  $C_1$  および  $C_2$  の効果が合成されて  $K$  値

に現われるを考え、本研究においても振動効果の評価を  $K$  値で行うこととする。

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爆不良を生じたが、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ごと、全測点、3成分について計測された全データを用いて、距離と PPV の関係を図示したものが図-5, 6, 7 である。これらのデータを最小2乗法で回帰すると  $PPV = 414 \cdot W^{0.58} \cdot D^{-2.1}$ , 139.  $W^{0.27} \cdot D^{-1.9}$ , 155.  $W^{0.65} \cdot D^{-2.0}$  となり、距離  $D$  の指數である  $\beta$  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  $W$  の指數である  $\alpha$  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  $2/3$  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

$$PPV = KW^{2/3}D^{-2} \dots \dots \dots (3)$$

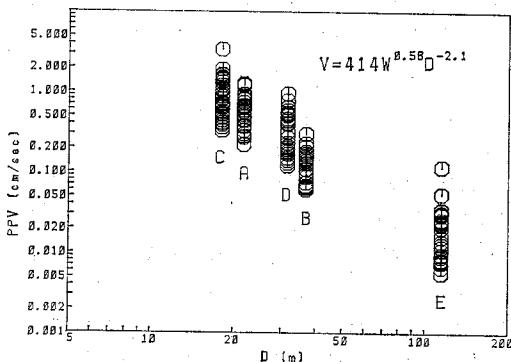


図-5 通常制限発破 (No. 23) における距離と振動速度との関係

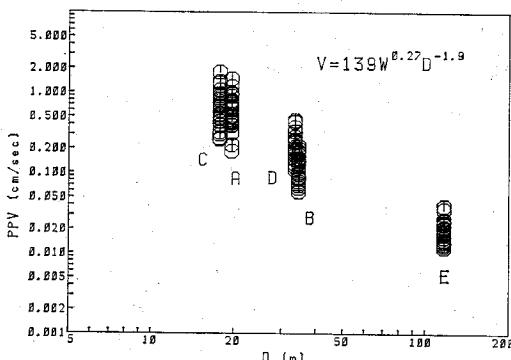


図-6 心抜スロット発破 (No. 21) における距離と  
振動速度との関係

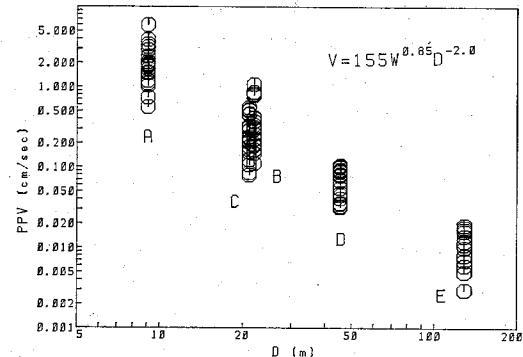


図-7 外周スロット発破 (No. 10) における距離と  
振動速度との関係

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 Y Z	1 0 1 6 4 7 1 2 7 7	8 0 0 4 4 0 3 3 3
	平均	5 8 8	5 2 5
			2 6 2
段	X Y Z	4 6 0 2 1 7 1 4 8	3 5 4 2 1 7 2 0 2
	平均	2 7 5	2 5 8
			2 1 5
全 平 均		3 0 2	2 8 1
			2 2 0

を用いて求めた  $K$  値を比較したものが表-1 である。ここでE点のみを検討の対象としたのはそれぞれ3種の発破工法を実施した位置にかなり隔たりがあるため、A, B, C, D 点はそれぞれの発破に対する距離や方向に差があり比較を行うのに必ずしも適切でないと考えたためである。 $K$  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 DS 2 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通常制限発破、心抜スロット発破、外周スロット発破の順となり、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いわれている値<sup>9)</sup>と大差なく、ほぼ合理的な値と思われる。

なお、これらの結果では  $X$  方向の  $K$  値が他の 2 方向に比べて著しく大きくなっているが、これはピックアップを設置した場所の受振点特性が大きく反映されたもの

と考えられる。

全発破について最大の  $K$  値とその段数および方向を示したものが図-4(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  $K$  値はさまざまの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比べて、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。

#### (4) スロットによる振動の遮断効果

外周スロット工法は図-2(c)にみられるように、発破する部分をスロットと称する幅 52 mm の溝で包囲するため、この部分で振動が遮断され発破振動の周囲への伝達が低減されることが期待される。

この点を検討するため、図-1 に示すスロットの遮断効果を大きく受けると考えられる A 点（切羽の斜後方）とスロットによる遮断効果をあまり受けないと考えられる C 点（切羽の斜前方）との距離がほぼ同じ程度となる No. 15~18 の外周スロット発破について A, C 点の振動を速度値で比較した。その結果は受振点特性の影響を大きく受けたためか、遮断効果が著しいと考えられる A 点の振動速度が C 点のそれに比べてはるかに大きく、本研究の実験データのみからはスロットによる振動遮断効果を論じることは不可能と思われた。

#### (5) 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比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合せとはならない。すなわち、たとえば図-4(a)にみられるように通常制限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の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 方向ではなく 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ごとの変化を示したもののが図-8 である。 $K$  値について示した図-8(b)に

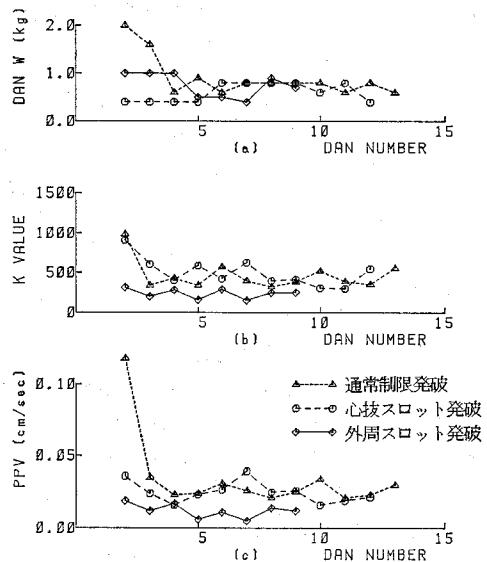


図-8 3種の代表的な発破パターンにおける段ごとの薬量、 $K$  値、振動速度の比較

よると、心抜スロット発破と通常制限発破では各段ごとの  $K$  値に特に大きな差はない、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、各段ごとの  $K$  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-8(c)にはこれに対応する振動速度を示している。図-8(c)では図-8(b)に対して各段ごとの薬量の影響（図-8(a)）が加わるために通常制限発破、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。特に初段の発破においては通常制限発破では  $K$  値が大きくなるのみならず、心抜きのために用いる薬量が多いため、振動値が著しく大きくなる。これに対して心抜スロット発破では初段の  $K$  値は通常制限発破の場合とほとんど変わらないにもかかわらず薬量が小さく、振動値そのものはかなり小さくなっている。特に外周スロット発破について検討すれば 2, 3, 4 段の扱いと 8, 9 段が比較的大きくなっている。これは 5, 6, 7 段の薬量が段当たり 0.4~0.5 kg であるのに比べて 2, 3, 4 段の扱いは段当たりの薬量が 1 kg と相対的に大きいことと、8, 9 段では薬量が 0.9, 0.7 kg であるのに加えて踏前としての荷の重さがあるためであろう。

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比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。

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 <sub>max</sub> (cm/sec)	0.118 0.128	0.039 0.043 0.042	0.015 0.016 0.019 0.020
平均	0.123	0.041	0.018
PPV <sub>max</sub> D <sup>-2</sup>	1562 1665	539 548 525	274 276 316 333 339 345
平均	1613	537	314

## 5. まとめ

以上のように、本研究で得られた結果は実施工中のものであるため細部にわたっては各発破における薬量や、雷管の段数など検討すべき多くの点を含んでいる。しかし、低振動発破工法として外周スロット発破および心抜スロット発破の有用性が十分に示されたと考える。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、通常制限発破と比べ、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。

(3) 外周スロット発破は全体的に荷の軽い発破であるため、特に発破孔の削孔精度を必要とせず、確実に破碎できる。またずりがやや大きいが飛散がほとんどない。

(4) 外周スロット発破によれば余掘りが少なく、また目視によるかぎり発破による地山の損傷はほとんどみられない。

このように、本工法によれば発破振動をかなり低減で

きることが明らかになった。今後、各孔、各段ごとの薬量と孔間隔、最小抵抗線距離との最適な組合せ、スロットによる振動の遮断効果の評価などの検討を行って、より発破振動を低減できるように工法の改良を行っていく所存である。

最後に本研究を行うにあたってご協力をいただいた関係機関には謝意を表する。また当該工事所の藤井哲夫所長には終始便宜をおはかりいただき、また励ましをいただいた。さらに本論文のとりまとめに関しては山口大学工学部の中尾絵理子技官のご協力を得た。あわせて謝意を表する。

## 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) 雜侯謙：発破振動の周辺への影響と対策、鹿島出版会, pp. 14~21, 1984年。
- 3) たとえば、藤井喬・谷本親伯：爆破振動の軽減法に関する検討、土木建設、19-12, pp. 33~40, 1970年。
- 4) たとえば、中野雅司：火薬類による構造物の解体、建設機械、Vol. 18, No. 10, pp. 53~60, 1982年。
- 5) たとえば、橋本博：無公害発破工法への接近、土木学会誌、第66巻、5号, pp. 57~60, 1981年。
- 6) たとえば、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, pp. 146~163, 1978年。
- 7) 男沢恭郎・大川公一・塩田正純・金沢純一：ABS工法と在来工法による発破振動の比較例、とびしま技報、34号, pp. 64~75, 1985年1月。
- 8) たとえば、勝山邦久：トンネル工事における爆破振動の軽減法、トンネルと地下、第5巻、2号, pp. 26~31, 1974年2月。
- 9) たとえば、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。

(1987.10.15・受付)