

發破併用SD工法の 振動對策

On the slot drilling method with a blasting

安波盛雄* 外 2人
M.Y. Ashanami

1. はじめに

超電導磁気浮上鉄道は、21世紀の交通機関として実現が期待されている。

平成2年8月、財団法人鉄道総合技術研究所、東海旅客鉄道株式会社と日本鉄道建設公団は、リニアモーターカーの実用化に向けて各種試験を行うため、山梨リニア実験線の建設を開始している。

実験線は、図-1に示すように山梨県の東八代郡境川村より都留市北部を経由し、南都留郡秋山村に至る42.8kmの路線である。

初狩トンネルは、この実験線のほぼ中央部にあたり、JR中央線初狩～笹子間の南方約300mの高嶽山を貫く延長462mのトンネルで、始点側から終点側に向けて掘削している。

始点側坑口では、図-2に示すように約350m離れて家屋がある以外問題はないが、トンネル中間付近の南側に接近して通称“大崩れ”と呼ばれる高低差約80mの急崖があるうえ、終点側坑口部から約100m離れた位置に精密機械工場や市営団地があり、防災上および環境上振動対策が必要である。

ここでは、振動対策として行ってきた制御発破および現在施工中の発破併用のSD (Slot Drilling) 工法に

よる振動の低減方法について報告する。

2. 工 事 概 要

2-1 地形・地質概要

トンネル周辺は、標高600～700m程度の山地で、北側を東西に笹子川が流れている。付近の地形は、標高610mの高嶽山を中心とし、南北方向の沢に区切られた小山塊をなしている。また、トンネルは初狩町市街地から約300m離れており、付近の民家は終点側坑口部に流れる宮川沿いに集落が点在する程度である。

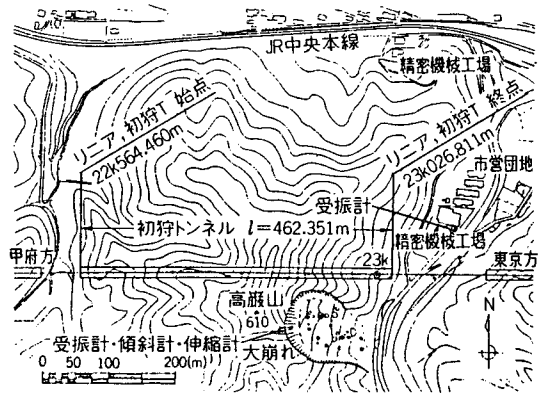


図-2 初狩トンネル平面図

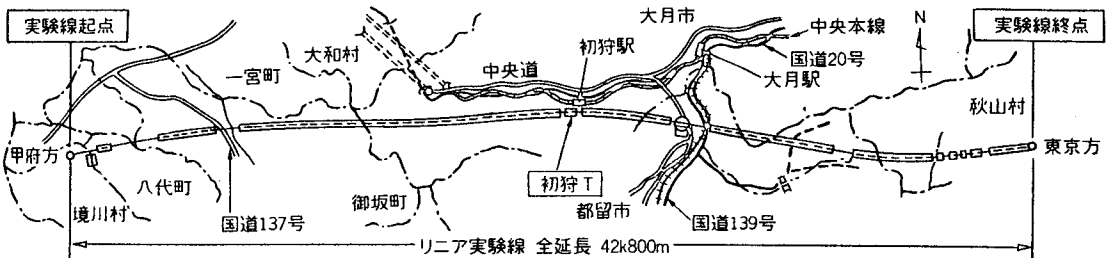
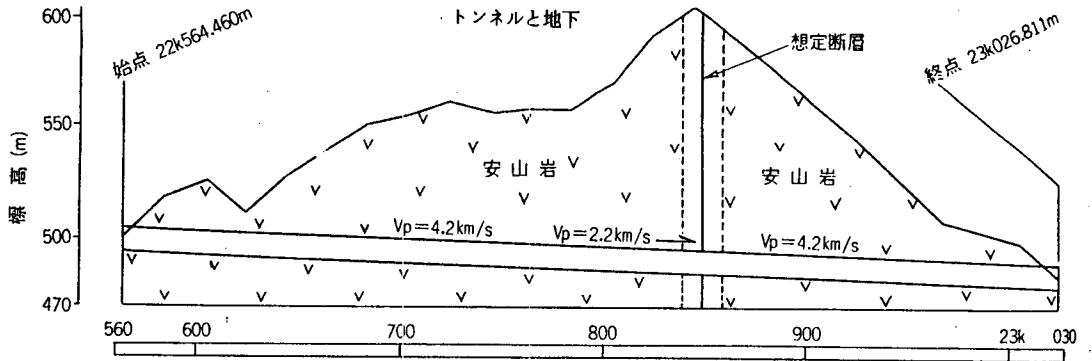


図-1 初狩トンネル位置図

* 日本鉄道建設公団山梨リニア実験線建設所長



当初掘削パターン	B 30m	A 250m	B 20m	A 130m	B 30m
掘削パターン	C 9.0m	B 56.0m	A 309.5m		
掘削工法	ブ シ カ	1発破進行長 1.0m	制 御 発 破	SD工法	4現在切羽位置 SD工法予定
地質	ランダムな亀裂が発達し、褐色の粘土目が目立つ	目の粘土は少なく なるが、亀裂が多い	全体に亀裂が少なく締まっている	大目の亀裂が多く、 粘土目には 粘土を挟む	
キロ程	22+570.5 579.5	635	800	835.0 860.0 (大崩れ)	

図-3 初狩トンネル横断面

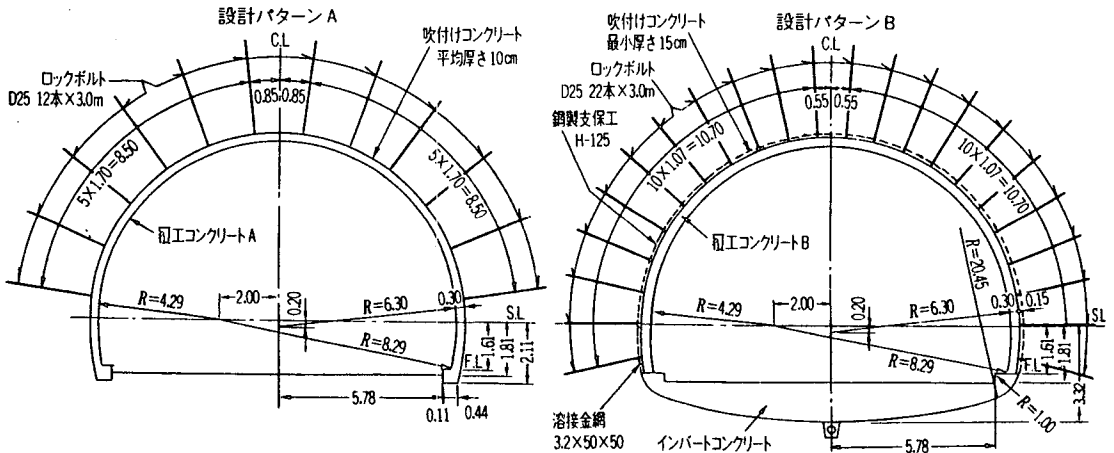


図-4 掘削設計パターン図

地質は、新第三紀中新世中期大月累層の安山岩を主体として一部凝灰角礫岩を含んでいる。地山弾性波速度は、4.2km/secで、一軸圧縮強度は1,000kgf/cm²以上と想定され、全体として中硬岩～硬岩である。図-3に地質縦断面図を示す。

地山には、節理やシームなどの亀裂がよく発達しているが、いわゆる“しわい”岩盤である。また、凝灰角礫岩を挟んでいるところが多い。

最大土かぶり約110mで、湧水はほとんどない。

2-2 工事概要

工事概要を以下に記す。

工 事 名：リニア・初狩T

工 事 場 所：山梨県大月市初狩町中初狩

トンネル延長：462m

掘 削 断 面：設計パターンA 89.71m²

設計パターンB 108.33m²

掘 削 工 法：全断面掘削およびミニベンチ工法

図-4に、掘削・設計パターンを示す。

2-3 “大崩れ”および精密機械工場など

本工事において、とくに発破振動に対し配慮が必要な対象として、トンネルに近接する危崖（大崩れ）および精密機械工場、市営団地がある。以下に、これらの状況を述べる。

(1) “大崩れ”

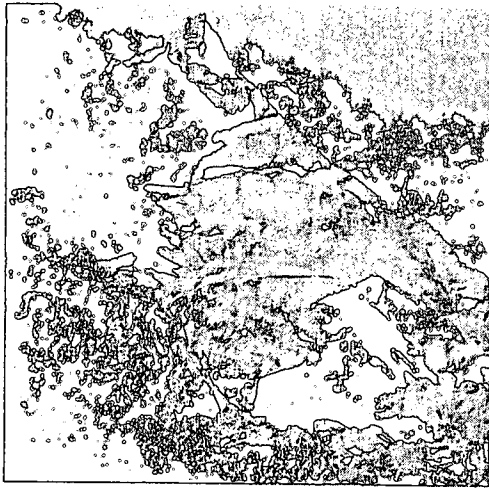


写真-1 大崩れ全景正面



写真-2 大崩れ頂部側面

通称“大崩れ”と呼ばれる急崖は、初狩トンネル22k 650m地点の南側の上方45°(水平距離約80m、高低差約80m)にその頂部が位置し、崖がトンネル終点側(東側)に広がっており、トンネルから約20mの位置まで接近している。写真-1に“大崩れ”の全体正面を、写真-2に頂部側面の様子を示す。

この“大崩れ”は採石場の跡地で、採石終了後2回大きな崩壊が発生して崖が広がり、現在のような高低差約60mの大きな急崖が形成された。

崖の上部南側は、岩盤ブロックがオーバーハング状を呈している。この崖に対しては、写真測量などによる地

形測量および地質調査を実施し、崩壊危険度の高いブロックの等級分けを行うとともに計測計画を立案した。

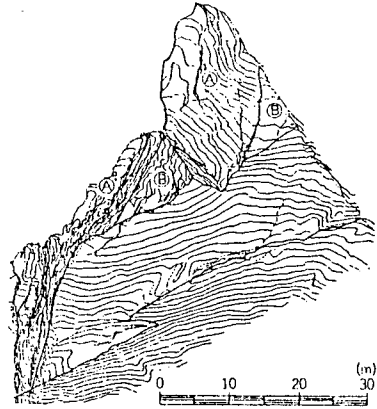


図-5 大崩れ立面図

この結果、とくに崩壊の危険度の高いものとして2つの要注意ブロックA、Bが判明し、その合計体積は約3,700m³と推定された。また、この崖の全体崩壊土量は最大約25,000m³と想定された。図-5に崖の立面図を示す。

(2) 精密機械工場および市営団地

精密機械工場は、トンネル終点側坑口より北側約100mおよび約280mの位置の2か所があり、昼夜(夜間は無人)で稼働している。

また、市営団地が精密機械工場に隣接し、トンネル終点側坑口より約130mの位置にあり、市営団地に対しても、工事から発生する振動を低減させる必要がある。

3. 振 動 対 策

3-1 振動管理限界値

振動の要素には、振動数、振幅、変位速度、加速度があるが、発破振動の場合、構造物に与える被害や人体感覚との関係については、変位速度で規定するのが一般的である。

本工事における振動管理においても同様に変位速度で管理限界値を定め管理することとした。

(1) 精密機械工場の振動管理限界値

2か所の精密機械工場については、以下の3種から発生する振動を精密機械位置で測定し、その最大値を振動管理限界値とした。

- ① 工場で定常的に発生している機械振動(暗振動)
- ② JR中央線の特急・貨物・普通列車通過時の振動
- ③ 自動車通過時の振動

以上を測定した結果、最大値は②JR中央線下り特急通過時の0.013kineであり、この値を当初の振動管理限

界値とした。

その後、計測を開始してから、輪島地震、仙台地震伊豆沖地震（図-9参照）、また局地的な山梨県東部の地震（図-10参照）などが設置した受振計で観測され、0.03~0.05kineの範囲で5回、0.05kine以上が2回計測された。自然地震振動と発破振動では性格が異なるが、この7回の地震では、精密機械工場の製品の品質に影響はなかったことから見直しを行い、精密機械工場に対しては、現在一般に用いられている振動規制値としては最も厳しいと考えられる「とくに注意深い人だけが感じる」変位速度0.03kine（有感限界）を振動管理限界値とした。

(2) “大崩れ”の振動管理限界値

斜面のブロック状の岩盤がどの程度の振動で崩壊するかを予測するのは極めて困難である。また、崩壊は必ずしも振動によってのみ発生するとは限らない。

今回は、過去における自然地震などの観測データから、精密機械工場に対するものと同じ変位速度0.03kineを振動管理限界値とした。

(3) 市営団地

市営団地に対する振動管理限界値もまた、前述した人の感ずる振動の限界値である0.03kineとした。

3-2 計測計画

計測は、発破掘削に先立ち平成5年2月6日より開始した。

“大崩れ”については、崖の頂部に受振計（x, y, z, 3方向成分）1台、伸縮計1台、傾斜計2台を岩盤上に設置した。

精密機械工場については、終点側坑口に近い方の工場脇の地下0.7mの位置にコンクリートを打設し、その上に“大崩れ”と同じ受振計を設置した。計器設置位置を図-2に示す。

また、これらの計器の仕様を表-1に示す。測定ケーブルは、約800m離れた企業体事務所まで延長し、24時間連続自動計測により振動の管理を行っている。

3-3 発破振動低減対策

(1) 制御発破工法

大韓火薬技術學會誌

表-1 計測機器一覧表

使用計器および仕様

計測項目	使用計器	仕 様				
		型 式	変換方式	感 度	周波数範囲	共振周波数
精密機械工場の振動	受振計 (加速度計)	63Z13F	圧電式	15000±20% PC/G	約1~300Hz	約1.5KHz
大崩れ頂部の振動	同上	”	”	”	”	”
大崩れ(水平)変位	変位計 (伸縮計)	—	ポテンショ メーター型	容量	精度	/
				0~50mm	1%FS以内	
大崩れ傾斜	傾斜計	DC-15	差動型 トランス型	=15分(角)	1%FS以内	/

記録装置および警報装置

計測項目	記録装置および警報装置
振動計測	チャージアンプ(6D07)×6台 デジタルオシロレコーダ(オムニエース RT3208)×1台
大崩れ頂部の変位 ” 傾斜	調整器(USA-3)×1台 警報機(ULA-3)×1台 打点式記録計(ARC-12)×1台 警報表示器(ALM-2)×1台

表-2 使用測定機器

受振計	Geo-Space社製, GSC-11D型 動電型速度計
記録計	TEAC社製, HR-30型 記録専用カセットデータレコーダ
モニタ	TEAC社製, MU-30E型 モニタユニット

表-3 使用解析機器

再生器	TEAC社製, MR-30型 カセットデータレコーダ
解析器	アドバンテスト社製, TR9402 デジタルアナライザ
印刷器	HEWLETT PAKARD社製 9872プロッタ

発破計画を立てるにあたり、発破による掘削開始地点22k580mより20.0mの22k600m（始点側坑口より約30m）の切羽で2回の試験発破を行った。

振動計測は、“大崩れ”、精密機械工場の他4か所に受振計（3成分）を設置して行い、発破基本計画を作成した。

また、22k680m（始点側坑口より約110m）の切羽でも2回の試験発破を1回目と同様に実施し、発破計画を修正した。試験発破の振動の計測・解析には、表-2, 3の機器を使用した。

試験発破の結果に基づき、本工事では以下の発破振動管理式を基本として管理を行うとともに、制御発破区間の設定、および制御発破基本計画を作成した。

表-4 制御発破基本計画

	単位	制御発破			SD工法
1発破進行長	m	1.5	1.2	1.0	1.2
施工延長	m	44.5	70.0	50.0	220.0
使用爆薬量(平均)	kg	99.4	61.0	41.8	19.6
爆薬量/m ³	kg/m ³	0.96	0.74	0.61	0.24
穿孔数(平均)	孔	192	192	192	81
穿孔数/m ²	孔/m ²	2.8	2.8	2.8	1.2

制御発破始点 22k635.5m

表-5 SD機(Ⅱ型)の仕様

寸法	全長5,507mm, 全幅500mm, 全高581mm
重量	480kg
ドリフタ	油圧式ドリフタZCA-6270
使用圧力	100~160kgf/cm ²
ロッド回転数	0~250r.p.m.
打撃数	2,300回/min
使用水量	70ℓ/min
フィード長	2,200mm
ビット	ビットゲージ60mm
ロッド	ロッドφ31.5mm, シャンク部25mm 6角
ベースマシン	3ブーム油圧ジャンボ

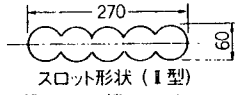
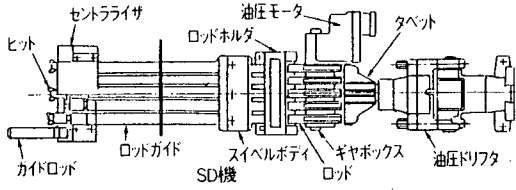


図-6 SD機およびスロット形状

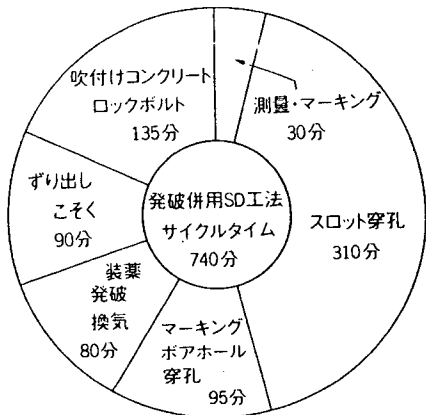
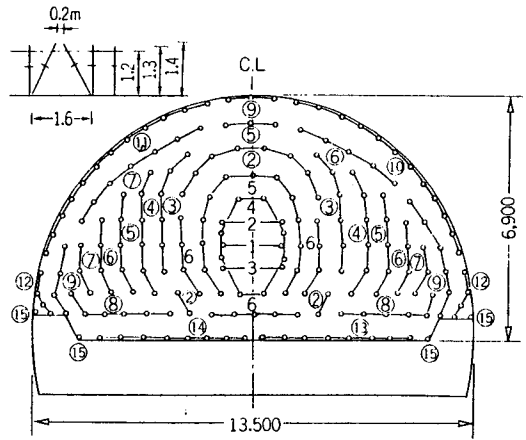


図-7 計画サイクルタイム



注1 O印内数字はDS電気雷管の段数, 2 数字のみはMS電気雷管の段数

発破諸元

	単位	数量
断面積	m ²	71.4
1発破進行長	m	1.0
使用爆薬量	kg	81.6
破砕量	m ³	71.4
爆薬量/m ³	kg/m ³	1.14
穿孔数/m ²	孔/m ²	2.7

雷管段数	穿孔数	装薬量	
		1孔あたり(kg)	小計(kg)
1	2	0.4	0.8
MS-2	2	0.4	0.8
3	2	0.4	0.8
4	8	0.4	3.2
5	13	0.4	5.2
6	13	0.4	5.2
DS-2	12	0.4	4.8
3	12	0.4	4.8
4	12	0.4	4.8
5	13	0.4	5.2
6	13	0.4	5.2
7	13	0.4	5.2
8	12	0.4	4.8
9	13	0.4	5.2
10	12	0.4	4.8
11	12	0.4	4.8
12	8	0.5	4.0
13	8	0.6	4.8
14	8	0.6	4.8
15	4	0.6	2.4
合計	192		81.6

図-8 制御発破パターン

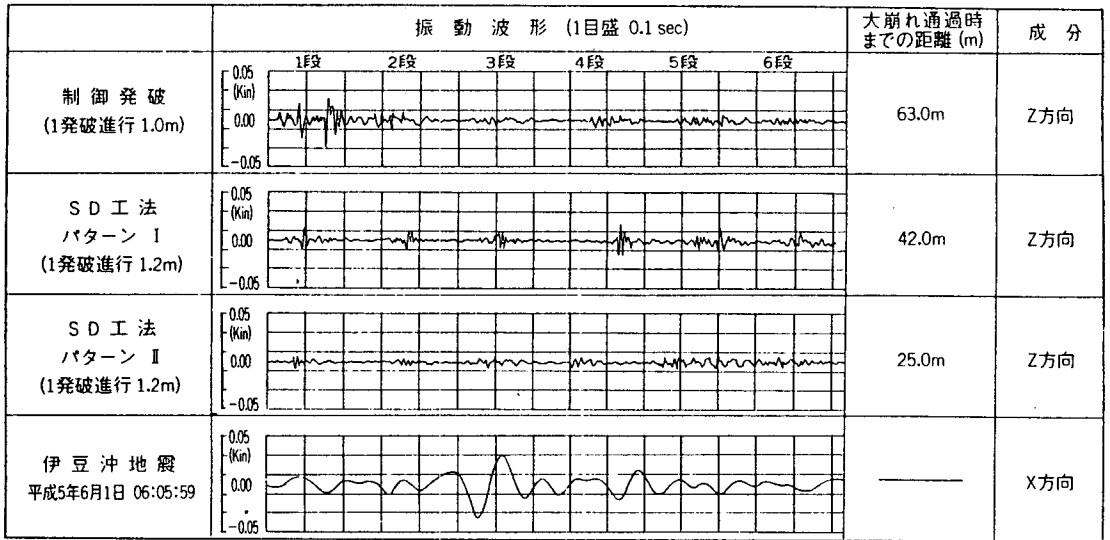


図-9 大崩れの発破振動波形例

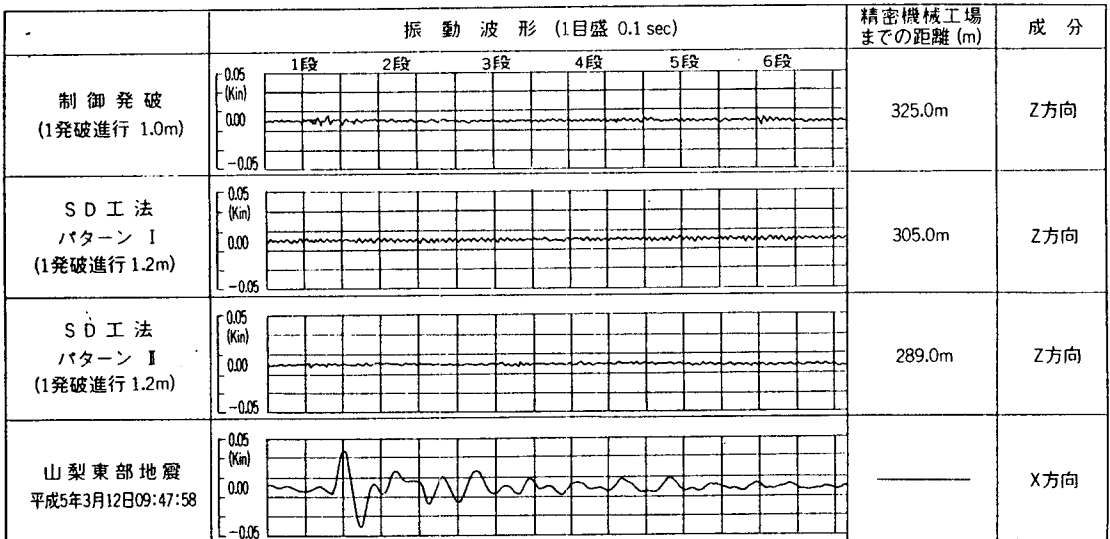


図-10 精密機械工場の発破振動波形例

$$V = K \cdot L^{0.75} \cdot R^{-1.0}$$

ここに、 V ：変位速度 (cm/sec), K ：係数 芯抜き $K=555$, 払い $K=320$, L ：1段あたりの爆薬量 (kg), R ：爆源からの距離 (m)

(*火薬は含水爆薬を使用)

表-4に、制御発破基本計画を示す。

なお、実際の発破にあたっては、上記式を基本として毎回の発破振動計測データにより、1発破進行長・穿孔数・穿孔位置・1孔あたりの爆薬量・全体爆薬量などを修正し、発破併用を行った。

(2) 発破併用SD工法

“大崩れ”横を通過するにあたり、制御発破工法では、

振動管理限界値以下に振動を抑えるのは困難であり、かつ振動のばらつきが大きいため危険と判断された。

制御発破に替わる掘削工法の選定にあたっては、以下の条件に留意して検討を行った。

- ① 管理限界値以下に振動を抑えられること。
- ② 発破振動のばらつきが少なく、十分振動管理のできる工法であること。
- ③ 岩盤強度に影響される事なく、工期内に工事終了可能な進行が得られる工法であること。
- ④ 安全性、および、経済性に優れていること。

その結果、発破併用SD工法を採用することとした。発破併用SD工法は、トンネル外周に溝 (スロット)

表-6 制御発破施工実績

	単位	制御発破			SD工法
1発破進行長	m	1.5	1.2	1.0	1.2
施工延長	m	45.0	91.2	28.3	施工中
使用爆薬量(平均)	kg	130.0	98.0	82.0	58.2
爆薬量/m³	kg/m³	1.19	1.12	1.13	0.67
穿孔数(平均)	孔	190	210	192	141
穿孔数/m³	孔/m³	2.6	2.9	2.6	1.9
大崩れ振動計測値	kine	0.013~0.022	0.010~0.026	0.020~0.031	0.010~0.019
精密機械工場振動計測値	kine	0.006~0.022	0.005~0.012	0.004~0.007	0.004~0.008

制御発破始点 22k635.5m

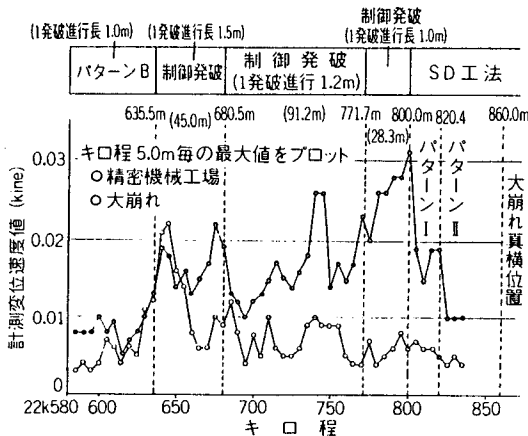


図-11 発破振動測定結果グラフ

を設け、内部を制御発破によって掘削する工法で、外周にスロットがあるため、発破振動が周辺の岩盤に伝わりにくくなり、振動を低減することができる。

本工法には、用途・条件に対応してさまざまな種類があるが、今回採用した方法は、発破掘削における振動の制御を目的とした「外周スロット発破併用SD工法」である。本工法は、今回の地山および施工条件では以下のような効果が期待される。

- ① 外周スロットが自由面となるので芯抜き発破が不要となるため爆薬量も半減し、その結果、振動を低減させることができる。
- ② 無発破工法と比較すると、岩の強度などに大きく支配されることがなく、計画どおりの進行をあげることができて、経済的にも有利である。
- ③ 掘削壁面を傷めないため、岩盤の緩みを少なく抑えることができる。

本工事では、表-5、図-6に示す仕様のSD機(Ⅱ型)を用いている。

SD機は、円型孔が一部重なりあった形状のスロット

を穿孔する機械で、5本のロッドに1台の油圧ドリフタで打撃を与え、油圧モータで回転を与えながら穿孔する構造となっている。ベースマシンは、クローラ式3ブーム油圧ジャンボである。

今回のスロット形状は、60×270mmで、“ふまえ”を除くトンネル外周に穿孔することとした。

図-7に、計画サイクルタイムを示す。

4. 施工実績

4-1 制御発破工法

制御発破工法については、振動低減のため

- ① 1発破進行長を制限する。
- ② 芯抜き爆薬量を制限する。
- ③ 雷管の段数をできるだけ多く用いる。
- ④ 穿孔数を増やす。

を基本に施工した。

図-8に、制御発破パターンの代表例を示す。図-9に“大崩れ”、図-10に精密機械工場での振動波形の代表例を示す。当初、爆薬量の多い払い発破で最大振動値がでると予想していたが、実測では払いの振動は予想より小さく、相対的に芯抜き発破の振動が大きくなることになった。

この原因としては、遅い段数の雷管は遅延時間のばらつきが大きく、振動が分散されるためと考えられる。

振動の方向成分は、“大崩れ”ではトンネル軸方向(x方向)が最大値を示し、切羽が近づくとつれ上下方向(z方向)が増える傾向を示している。

精密機械工場では、常に上下方向が卓越していた。

表-6に、制御発破およびSD工法の施工実績、および図-11に、発破振動測定結果グラフを示す。

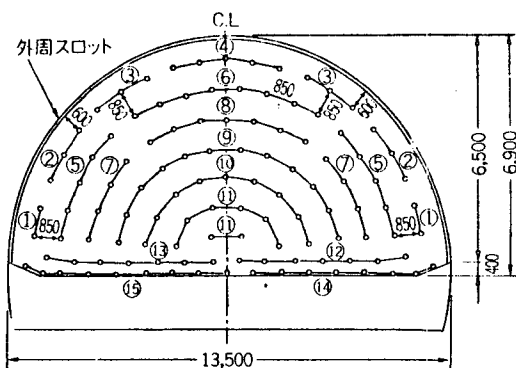
図に示すとおり、ほぼ計画どおり振動を制限することができた。

4-2 発破併用SD工法

制御発破工法の“大崩れ”での振動値は、22k800m(始点側坑口より約230m、“大崩れ”手前60m)地点で振動管理限界値0.03kineに達し、発破併用SD工法に変更した。

現在までの実績では、発破併用SD工法は以下の点で制御発破工法と異なる。

- ① 発破順序は外周部から内側に向かって順次発破する。
- ② 外周部に既にスロットが切られてより大きな自由面が得られること、また、芯抜き発破がなくなることから200孔程度の穿孔数が140孔程度までに減る。
- ③ 爆薬量は1.1kg/m³が0.6kg/m³程度まで減らせる。当初の発破パターンⅠを図-12に示す。



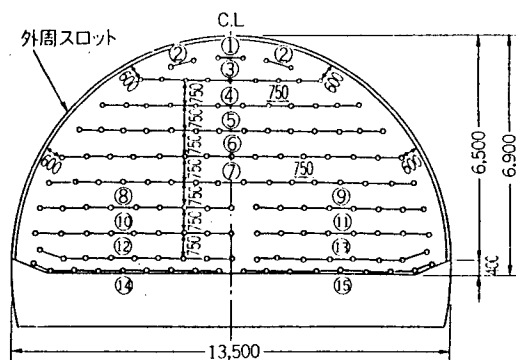
発破諸元

	単位	数量
断面積	m ²	72.6
1発破進行長	m	1.2
使用爆薬量	kg	52.9
破砕量	m ³	87.1
爆薬量/m ³	kg/m ³	0.61
穿孔数/m ²	孔/m ²	1.6

雷管段数	穿孔数	装薬量	
		1孔あたり (kg)	小計 (kg)
DS-1	4	0.4	1.6
2	6	0.4	2.4
3	6	0.4	2.4
4	5	0.5	2.5
5	10	0.4	4.0
6	8	0.4	3.2
7	8	0.5	4.0
8	7	0.4	2.8
9	12	0.5	6.0
10	9	0.5	4.5
11	8	0.5	4.0
12	7	0.5	3.5
13	7	0.5	3.5
14	8	0.5	4.0
15	9	0.5	4.5
合計	114		52.9

図-12 SDI法発破パターンⅠ

この発破パターンの振動は、図-9, 10に示すように“大崩れ”から約40m手前で、外周部の1~4段は0.01 kine強の振動値であった。また、このとき1~4段での振動値が遅い段数の値よりも大きいのは、外周部の発破がスロット外壁面に衝撃を与えるためと考えられた。



発破諸元

	単位	数量
断面積	m ²	72.6
1発破進行長	m	1.2
使用爆薬量	kg	58.2
破砕量	m ³	87.1
爆薬量/m ³	kg/m ³	0.67
穿孔数/m ²	孔/m ²	1.9

雷管段数	穿孔数	装薬量	
		1孔あたり (kg)	小計 (kg)
DS-1	2	0.4	0.8
2	4	0.4	1.6
3	9	0.4	3.6
4	12	0.4	4.8
5	14	0.4	5.6
6	15	0.4	6.0
7	16	0.4	6.4
8	9	0.4	3.6
9	8	0.4	3.2
10	9	0.4	3.6
11	8	0.4	3.2
12	9	0.4	3.6
13	8	0.4	3.2
14	9	0.5	4.5
15	9	0.5	4.5
合計	141		58.2

図-13 SDI法発破パターンⅡ

そのため、外周部の雷管段数を1~10段に増やし、さらに発破の衝撃を分散させた。この発破パターンⅡを図-13に示す。

この変更の結果、現在(平成5年7月5日)の切羽位置は、発破併用SDI法を採用してから約35m進行し、

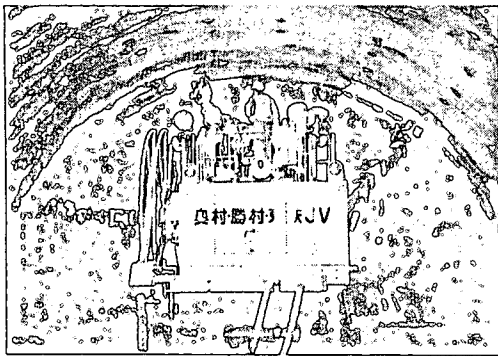


写真-3 切羽スロット穿孔状況1

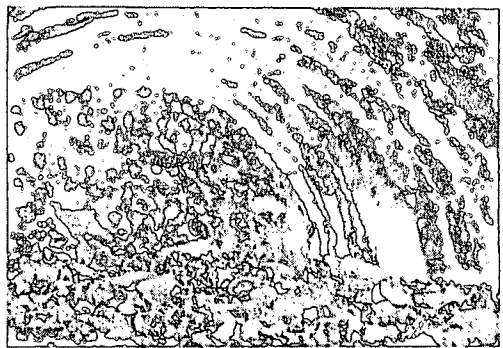


写真-5 発破終了後切羽状況



写真-4 スロット穿孔状況2



写真-6 発破終了後スロット削孔部壁面状況

“大崩れ”通過地点の手前約25m位置であるが、“大崩れ”での振動値は最大0.01kineである。

全薬量を比較すると、パターンⅠの方がパターンⅡより少なく発破自体は効率的であるが、振動低減効果についてはパターンⅡの方が有効である。

“大崩れ”に対しては、振動の低減を優先させる必要があり、パターンⅡを採用して掘削を進めている。

“大崩れ”通過時においても、最大振動値は0.02kine以下で通過可能と予測している。この値は、制御発破工法での予測値の1/3である。

さらに、本工法では、振動低減のみでなく、余掘り率は制御発破の1/2程度まで減り、また、発破による岩盤の緩みが少ないため地山条件のよいところではロックボルトを省いて施工している。

施工状況を写真-3, 4, 5, 6に示す。

今後、ますます“大崩れ”に近づくので、より確実に振動を抑えるため雷管の段数を増やす方法や、1発破進行長1.2mを1.0mに変更する方法などで振動管理に対応

していく予定である。

また、精密機械工場に対しては、現在は管理基準値より十分低い値であるが、“大崩れ”通過後終点側坑口に近づくにつれ振動は急激に大きくなると予想される。このため、市営団地への対策も含めて終点側坑口部数10mは無発破SD工法の採用を検討している。