

制御発破によるリニア大断面トンネルの施工

CAUTIOUS BLASTING AT LARGE SECTION TUNNEL ON MAGLEV TEST LINE

安波盛雄*・高田 章**・寺田丈男***

Morio YASUNAMI, Akira TAKADA, Takeo TERADA

This work is to construct one of Maglev test line tunnels, Hatsukari tunnel, which is under construction in Yamanashi prefecture.

The special points to mention on the work is the control of the blasting vibration which affects the old quarrying site called "OOKUZURE" located at the middle of the tunnel, the precision machine factory and the housing development near the tunnel exit.

This report is the outline of the SD(slot drilling) method with blasting and the effect of the method on a reduction of vibration.

Keyword : Maglev test line, vibration control, cautious blasting, SD method,

1. まえがき

超電導磁気浮上式鉄道は、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なうため、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る高巖山を貫く延長462mのトンネルで、甲府方から東京方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の急崖があるうえに、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な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。

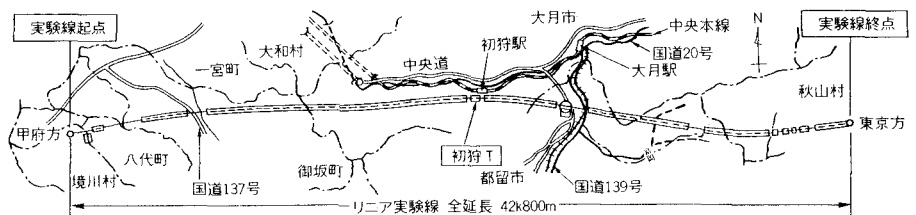


図-1 初狩トンネル位置図

* 正会員 日本鉄道建設公団

** 日本鉄道建設公団

*** 奥村・勝村・東鉄リニア初狩T共同企業体

2. 工事概要

2・1 地形 地質概要

トンネル周辺は、標高600m～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の高巖山を中心とし、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に流れる宮川沿いに集落が点在する程度である。

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以上である。図-3に地質縦断図を示す。地山は、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”岩質である。最大土被りは約110mで湧水はほとんどない。

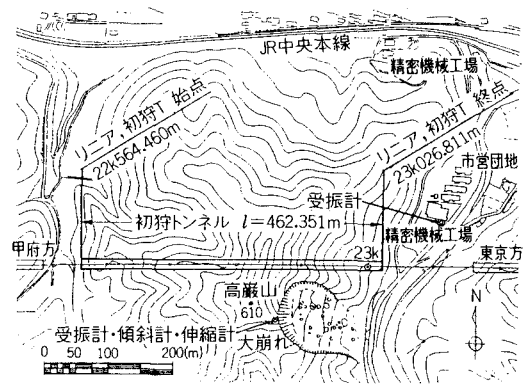


図-2 初狩トンネル平面図

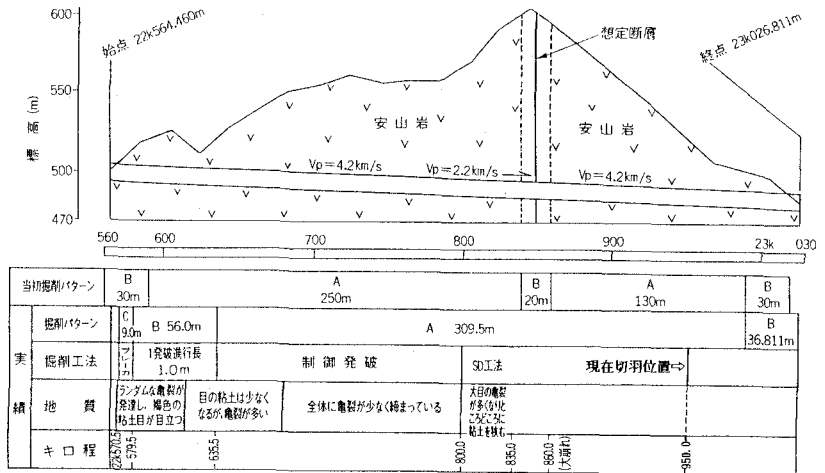


図-3 初狩トンネル縦断図

2・2 工事概要

工事概要を以下に記す。

工 事 件 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

及びミニベンチ工法(当初)

ショートベンチ工法(変更後)

図-4に、掘削・設計パターンを示す。

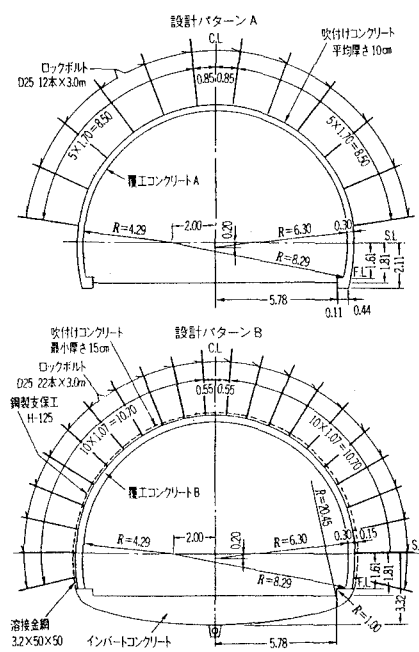


図-4 掘削設計パターン図

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急崖“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。

(a) “大崩れ”

通称“大崩れ”と呼ばれる急崖は、初狩トンネル 22*860^m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80m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わけを行なうとともに計測計画を立案した。この結果、特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、全体崩壊予想土量は最大約25,000m³と推定された。また、“大崩れ”の下には県道があり、崩壊した場合には通過交通に対する影響が懸念される。図-5に崖の立面図を示す。

(b) 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の位置および約280mの位置の2箇所があり、昼夜(夜間は無人)で稼動している。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。

(a) 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0.03~0.05kineの地震を5回、0.05kine以上の地震を2回計測した。自然地震振動と発破振動では性格が異なるが、この7回の地震においても、精密機械工場の製品の品質に影響がなかったことなどから見直しを行ない、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もっと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(有感振動)を振動管理限界値とした。



写真-1 大崩れ全景正面

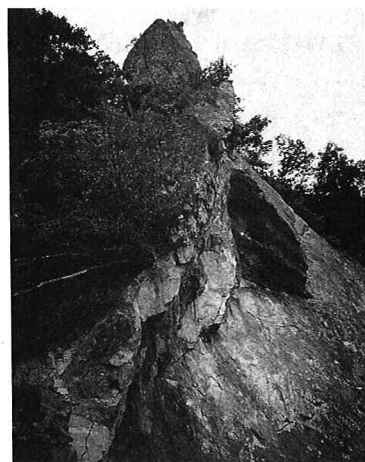


写真-2 大崩れ頂部側面

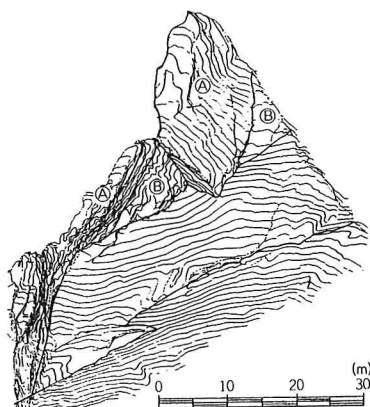


図-5 大崩れ立面図

(b) “大崩れ” および市営団地の振動管理限界値

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。また、市営団地に対する振動管理限界値も、前述した「人の感ずる限界値」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に受振計1台を設置した。計器設置位置を図-2に、またこれらの計器の仕様を表-1に示す。測定ケーブルは、800m離れた企業体事務所まで延長し、連続自動計測により振動管理を行なっている。

3・3 発破振動低減対策

(a) 制御発破工法

発破計画を立てるにあたり、切羽において2回の試験発破を行ない、その結果に基づき、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なうとともに、制御発破区間の設定、および制御発破基本計画(表-2)を作成した。

$$V = K \cdot L^{0.75} \cdot R^{-2.0}$$

ここに、V：変位速度 (kine)

K：係数 芯抜き K=555

払い K=320

L：一段当りの爆薬量(kg)

R：爆源からの距離 (m)

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孔当りの爆薬量・全体爆薬量などを修正、発破掘削を行なった。

(b) 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。制御発破に代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なった。

① 管理限界値以下に振動が抑えられること。② 発破振動のばらつきが少なく、十分振動管理ができる工法であること。③ 岩盤強度に影響されることなく、工期内に工事完了可能な進捗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)を設け、内部を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、発破掘削に於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、より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、計画どおりの進捗を上げることができ、経済的にも有利である。
- ③ 掘削壁面を痛めないのが岩盤の緩みを少なく抑えることができる。

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)	63213F	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)	〃	ポテンシオメーター型	容量 0~50mm	精度 1%FS以内	
大崩れ傾斜	傾斜計	DC-15	差動トランス型	=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	調整器(USA-3)×1台					
傾斜	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					

本工事では、表-3、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。

表-2 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 / m³	kg/m³	0.96	0.74	0.61	0.24
穿孔数(平均)	孔	192	192	192	81
穿 孔 数 / m³	孔/m³	2.8	2.8	2.8	1.2

表-4 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	0.008~ 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~ 0.028

表-3 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/cm²
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

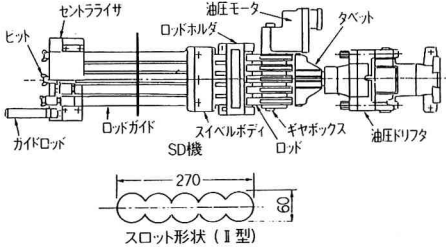


図-6 SD機およびスロット形状

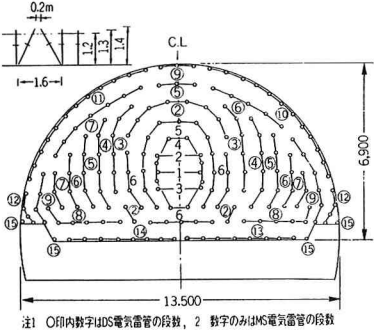


図-7 制御発破パターン

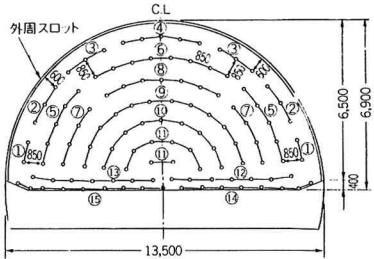


図-8 SD工法発破パターンⅠ

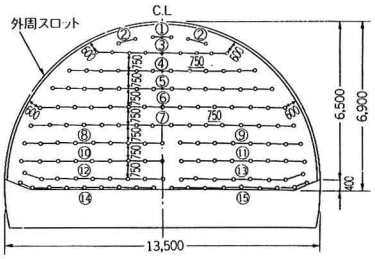


図-9 SD工法発破パターンⅡ

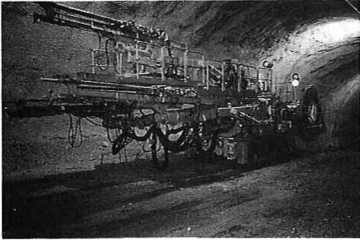


写真-3 SD機搭載クローラジャンボ



写真-4 発破終了後切羽状況

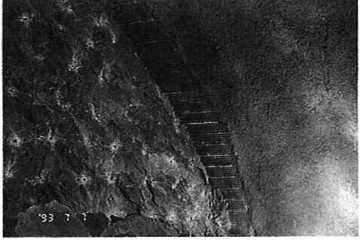


写真-5 発破終了後スロット削孔部壁面状況

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

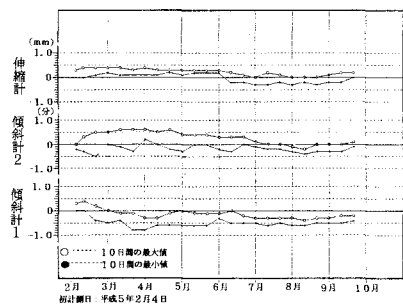


図-10 伸縮計・傾斜計測定結果グラフ

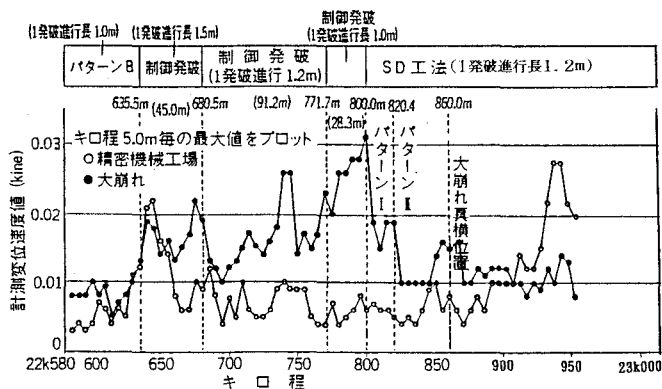


図-11 発破振動測定結果グラフ

する。③ 雷管の段数を出来るだけ多く用いる。④ 穿孔数を増やす。を基本に施工した。

図-7 に、制御発破パターンの代表例を示す。制御発破を行ない計測した結果、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でた。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、切羽が近づくにつれ上下方向(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-4に制御発破及びSD工法の施工実績を示す。また、図-10,11に伸縮計、傾斜計、発破振動、の測定結果グラフを示す。図に示す通り、ほぼ計画どおり振動を制限することができた。また、伸縮計・傾斜計も温度変化のみの変位で、振動による変位はなかった。

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(“大崩れ”手前60m)の地点で振動管理限界値 0.03 kine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部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を図-8に示す。この発破パターンIの場合、外周部の1～4 段の振動値が特に大きく計測された。これは外周部の発破が スロット外壁面に衝撃を与えるためと考えられた。そのため外周部の段数を分割しパターンの変更を繰り返してみた結果、外周部に対して10 分割の水平に破砕するパターンIIの方が、各段毎の振動が平均化され 良好な結果が得られた。薬量を比較すると、パターンIの方がパターンIIより少なく効率的な発破であるが、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、22k820mよりパターンIIを採用して掘削を進めている。現在切羽は22k950mで“大崩れ”を無事通過した。振動についても制御発破1.2m進行で“大崩れ”横を通過した場合の振動計算予測値は0.062kineであったが約1/4の0.016kineで通過することができた。精密機械工場に対しては 終点側坑口に近づくにつれ振動値が急激に増加してきた。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。

5. おわりに

今回は、毎回の発破の波形を記録し、雷管の各段毎に修正を加えることにより 効果的な制御発破が行なうことができた。今後、発破作業に伴う振動を抑制しなければならない環境などは増加する一方であり、また、対象物もさまざまなケースが発生するものと思われる。振動管理が必要な条件での施工に携わった時、今回の報告が読者のみなさまの一助になれば幸いである。