

スロットと電子遅延式電気雷管を組合せた 制御発破工法による振動の低減

柴田 匡善¹・星野 直則¹・浜田 元¹・蛭子 清二²・安井 成豊³

¹正会員 株式会社奥村組東日本支社 (〒108-8381 東京都港区芝 5-6-1)

E-mail:masayoshi.shibata@okumuragumi.jp

E-mail:naonori.hoshino@okumuragumi.jp

E-mail:hajime.hamada@okumuragumi.jp

²正会員 株式会社奥村組技術研究所 (〒300-2612 つくば市大砂 387)

E-mail:seiji.ebisu@okumuragumi.jp

³正会員 社団法人日本建設機械化協会施工技術総合研究所

E-mail:yasui@cmi.or.jp

硬質な花崗斑岩がほぼ全長に分布する紀宝トンネルでは、工事振動に対する厳しい許容値が課せられ、切羽と民家の距離に応じて機械掘削区間と制御発破区間が設定された。制御発破区間で厳しい振動許容値を遵守することは難しい課題であったが、本トンネルでは、スロットと電子遅延式電気雷管を組合せた制御発破工法を用いるとともに、1発破ごとに振動速度の観測と施工へのフィードバックを行った。その結果、全線で振動許容値を遵守するとともに、当初設計よりも制御発破区間を長くでき、工期の短縮を実現できた。

Key Words : vibration reduction, control blasting, electronic delay detonator, slot drilling

1. はじめに

国道 42 号バイパス紀宝トンネルは三重県南牟婁郡紀宝町に位置し、掘削断面積は 85.7 ～ 161.0 m²、延長は 680 m である。トンネルのルート沿いには硬質な花崗斑岩が分布しており、その一軸圧縮強度は 150～250 MPa であった。そのため、硬岩地山における効率的で合理的な施工が一つの課題であった。

一方、トンネルのルート周辺には人家を始めとし多数の家屋が近接しており、工事の及ぼす環境負荷の低減が強く要請された。周辺住民との協議が行われ、とくに掘削時に伝播する振動を 0.1 kine (cm/s) 未満にしなければならぬという厳しい工事条件が課せられた。

振動の低減には機械掘削の採用が最も効果的である。しかし、地山が硬質であるため、機械掘削を適用する区間が長くなると工期延長や工事費増大を招く。そのため、本トンネルでは、制御発破の方法を工夫して振動抑制効果の向上を図り、厳しい振動許容値を厳守することが最重要の課題となった。これを解決することによって、発破掘削を行える区間が長くなり施工の合理化も可能になると考えた。

ここでは、振動抑制のために行ったスロットと電子遅

延式電気雷管（以後、EDD : Electronic Delay Detonator と称す）を組合せた制御発破工法による振動の低減について報告する。

2. 紀宝トンネルの概要

(1) 地質

紀宝トンネルの地質縦断を図-1 に示す。ほぼトンネルの全長に渡って新第三紀中新世熊野酸性岩類の花崗斑岩が分布する。その弾性波速度は 4.0 km/s 前後であり、岩盤は B ～ C 級に分類された。花崗斑岩の岩芯は新鮮堅硬であるが、柱状節理が発達し節理面に薄い粘土を挟在していることが多かった。また、節理は開口しており剥離しやすい状況であった。節理面の卓越方向はほぼトンネル軸に平行であり、柱状節理が発達した位置では切羽に直角および平行な開口節理が現れた。

掘削は図-1 右の熊野側坑口（終点側）から開始し、左の新宮側坑口（起点側）に到達した。この新宮側坑口付近には、相対的に軟質な C 級のシルト岩（弾性波速度：2.5 km/s 程度）が分布した。土被りは坑口付近を除き 50 m 以上あり、最大は 86 m である。なお、三重県内

における類似地質条件の施工実績が参考にされ、地山等級に対して1ランク重い設計支保パターンが選定された。

(2) トンネルの構造、掘削方式

トンネルの代表的な横断面を図-2 に示す。2車線の道路トンネルであるが、幅の広い歩道（3 m）があるため掘削幅が大きくて扁平な横断面形状となっている。

トンネルの平面を図-3 に示す。トンネルルートの線形は半径 500 m 区間が 142 m、半径 600 m 区間が 518 m、直線区間が 20 m であり、全体が緩やかにカーブしている。新宮側坑口の先にランプができるため、この坑口の 21.5 m 区間は標準の掘削幅 13.1 m を 17.4 m に拡幅した断面とされた。

当初設計ではトンネル全長が3区間に分けられ、機械掘削方式と発破掘削方式が割振られた。すなわち、掘削を開始する熊野側坑口部の 49 m 区間が機械掘削、その後の 471 m が発破掘削、さらに、新宮側坑口に向かう残りの 160 m が機械掘削とされた。

(3) 近接施工

図-1 に併記したが、距離程 No.52+14 付近には、トンネルの下半盤から下方約 3 m の位置に既設の導水路トンネル（内空幅 1.3 m、高さ 1.6 m）が近接して交差した。既設トンネルに及ぼす掘削の影響を把握するため、このトンネルの覆工コンクリートにひずみゲージと振動速度計を取付けてその健全性を監視した。

2. 発破振動の管理と監視体制

(1) 発破振動の管理値

周辺住民との協議等を経て、トンネル工事から発生する振動、騒音、低周波音に対して表-1 に示す許容値が設けられた。この地域では、発破掘削方式によるトンネル工事が過去に行われた際に、発破振動による影響が生じた経緯があり、このような厳しい値が発破施工時の振

動速度に対して設定された。
振動速度や騒音レベルの管理は、瞬間的に現れる最大値を問題視しなくて良いように、時間平均や1発破の平

表-1 許容値と管理値

監視項目	許容値		管理値	
	昼間	夜間	昼間	夜間
振動速度（最大値）（kine）	0.1	0.1	0.08	0.08
騒音レベル（L5 最大値）（dB）	65	55	62	53
低周波音レベル（Lpeak 最大値）（dB）	95	95	93	93

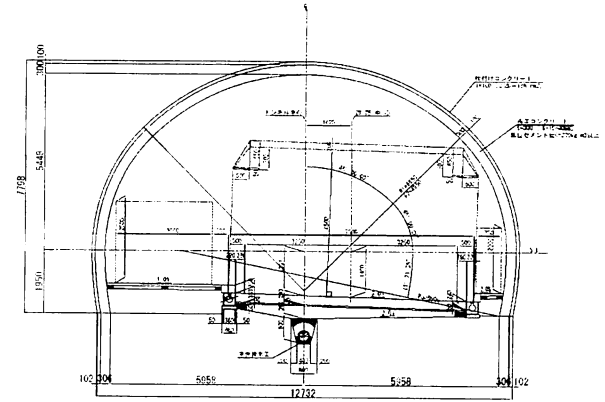


図-2 トンネルの代表的な横断面

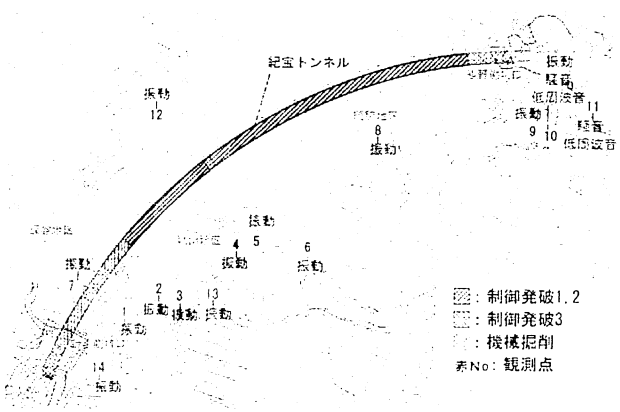


図-3 トンネルの平面

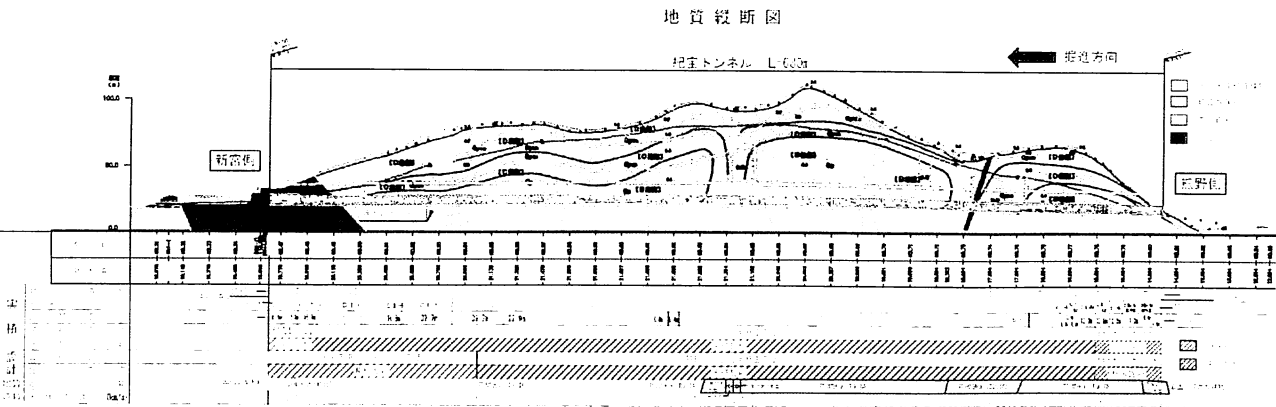


図-1 紀宝トンネルの地質縦断

均でならず方法が一般的である。しかし、今回は最大振動速度が対象となり、許容値 0.1 kine の厳守が求められた。そこで、この許容値を確実に守るために、表-1 に併記した 0.08 kine を振動管理値に設定するとともに、最大振動速度が管理値内に収まるように、通常よりも振動抑制効果の高い掘削方法を検討した。

(2) 監視の方法

工事期間中、図-3 に併記した合計 14 箇所の観測点で振動速度、騒音レベル、低周波音レベルを測定した。

観測点は、トンネルルート（トンネル軸）からの距離が 100 m 以内に位置する家屋を網羅するように選定された。合計 14 箇所の観測点の内、13 箇所で振動速度を測定した（No.1 ～ No.10 と No.12 ～ No.14）。騒音レベルと低周波音レベルは熊野側坑口近くの 2 箇所で観測した（No.10 と No.11）。ここで、振動発生源の位置となる切羽と振動計を設置した観測点との直線距離を離隔距離と呼ぶ。離隔距離は切羽進行ごとに変化するが、観測点 No.7 において最小の 47m となる。

(3) 振動測定の方法

振動測定には共振周波数 4.5 Hz の動線輪型振動速度計を使用し、観測点の鉛直方向の振動速度を測定した。速度計の仕様を表-2 に示す。

振動速度データを収録する際のトリガーは、観測点と切羽の離隔距離が大きな熊野側坑口部の機械掘削で 3×10^6 kine の高感度でスタートした。その後、発破掘削への移行や切羽が観測点に接近して離隔距離が短くなることに合わせて、トリガーを 1.25×10^4 kine に鈍くし、記録容量不足によるデータの収録漏れが無いようにした。

3. 振動低減掘削方法の工夫

(1) 当初設計の掘削方法

当初設計の掘削方法では、1 種類の機械掘削と 3 種類の制御発破掘削を設定した。

機械掘削は、外周と水平に SD（Slot Drilling）工法^{1)~3)}

でスロットを形成した後、一次破碎は油圧くさび（トンネルビッガー）を用いて割岩を行い、二次破碎は大型ブレイカで行う計画とした。

制御発破では、高性能な雷管を使用して発破段数を多くし、1 段当たりの斉発薬量の低減から振動の抑制を図る考え方とした。3 種類の制御発破の仕様を表-3 に示す。振動抑制効果が最も小さな制御発破 0 1 では、DS 電気雷管を使用して最大 20 段程度までの多段数発破を行う。次の制御発破 0 2 では、導火管付き雷管をコネクターと組合せて使用し最大 90 段程度までの多段数発破を行う。振動抑制効果が最も大きな制御発破 0 3 の発破パターンを図-4 に示す。この方法は、制御発破 0 2 の装薬パターンに加えて、大きな振動の発生する芯抜き部に鉛直方向のスロットを削孔して、より大きな振動抑制効果を期待した仕様である。

(2) 振動速度の推定方法

切羽進行すなわち発破ごとに観測点で測定した振動速度を累積して分析し、次切羽以降に観測点に伝播する振動速度を精度良く予測しなければならない。ここでは、一般に用いられている式（1）を用いて発破による振動速度を予測した。

$$PPV = K \cdot W^{2/3} \cdot D^{-2} \tag{1}$$

ここで、*PPV*：最大振動速度（kine）、*K*：地形や岩盤条件から定まる定数、*W*：1 段当たりの薬量（kg）、*D*：発破位置と観測点との直線距離（m）である。

発破を行うたびに観測点で振動速度を測定し、式（1）から *K* 値を逆算可能となる。逐次得られた *K* 値

表-3 3種類の制御発破の仕様

掘削方式名	スロット	雷管	段数
制御発破01	なし	DS電気	< 20
制御発破02	なし	導火管付き	< 90
制御発破03	芯抜き部鉛直	導火管付き	同上

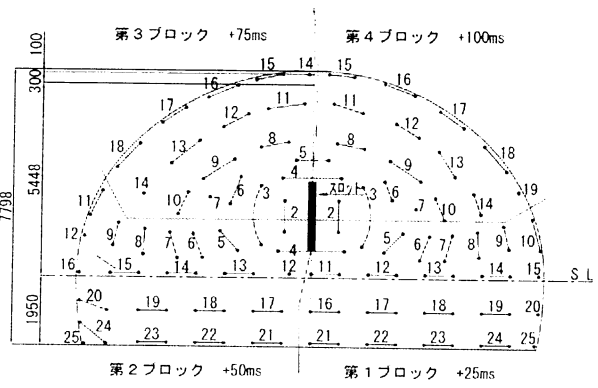


図-4 制御発破 0 3 の発破パターン

表-2 振動速度計の仕様

測定範囲	最大 50 kine
固有共振周波数	4.5 Hz (± 0.5)
コイル抵抗	825 Ω
ダンピング抵抗	3,900 Ω
センサ寸法	h 120 × φ 100
センサ重量	1.3 kg
感度	2.564 kine/V

を分析し、次の発破に対して K 値を修正して振動速度の予測精度を向上させることが、重要な課題であった。

(3) 試験発破

掘削方式を発破掘削に変更する前に、距離程 No.78 ～ No.77+2.7 の 17.3 m 区間で試験発破を行い制御発破工法による振動抑制効果を確認することにした。

試験発破の諸元の設定に先立ち、同じ熊野酸性岩類花崗斑岩の地質条件である高丸山トンネルで行われた試験発破の結果を分析した。これによると、 K 値は次のようになった。

芯抜き発破の K 値の平均値：1723 (1127～2617)

払い発破の K 値の平均値：848 (515～1036)

これらの値は火薬メーカーから示されている花崗斑岩の標準的な値に比較して約 1.7 倍に大きくなった。この K 値を前述した当初設計の制御発破 0 1～制御発破 0 3の方法に当てはめると、切羽との離隔距離が短くなる観測点で許容値を超えることが懸念された。

そこで、当初設計よりもさらに振動抑制効果を高めた制御発破の方法を必要とし、切羽外周スロットや水平方向スロットの追加および EDD により発破段数をさらに多くする方針とした。

上記の方針から設定した試験発破の仕様を表-4 に示す。なお、スロットを用いた試験発破時に用いた K 値は、以下のように、スロット併用制御発破の実績値⁴⁾を 1.7 倍にした値を用いた。

切羽外周+水平スロット併用制御発破の K 値：340

切羽外周スロット併用制御発破の K 値：510

試験発破区間に最も近い観測点 No.8 の最大振動速度と K 値を表-5 に示す。同表に示した試験発破の観測値はいずれも管理値を下回った。

スロットの配置が同じ試験発破 No.1, No.2, No.3 の振動速度を比較すると、振動速度は段当りの薬量に応じて大きくなった。試験発破を行った区間が短いため、この間は切羽と観測点の距離がほぼ一定であったと見なせるので、式 (1) による振動速度の予測が妥当であると判断された。

表-4 試験発破の仕様

試験発破番号	スロット	雷管	掘削断面	掘進長 (m)	薬量 (kg / 孔[段])
No.1	切羽外周+水平 (SL)	EDD	上半	0.7	0.4
No.2	切羽外周+水平 (SL)	EDD	上半	1.2	0.7
No.2'	切羽外周+水平 (SL)	EDD	上半	1.2	0.6
No.3	切羽外周+水平 (SL)	EDD	全断面	1.2	0.7
No.3'	切羽外周+水平 (SL)	EDD	上半	1.2	0.7
No.4	切羽外周	EDD	全断面	1.5	0.8

次に、 K 値を比較すると、試験発破 No.4 は試験発破 No.3 よりも大きく、切羽に水平スロットを追加した効果が認められた。しかし、掘進長の違いや上半断面掘削と全断面掘削の違いは、 K 値に現れなかった。

以上のように、スロットと EDD を組合せた制御発破工法の振動抑制効果を確認できた。また、一孔当たりの薬量を調整することにより、当初設計で機械掘削とした区間の一部を制御発破で掘削できる目処が得られた。

なお、観測点 No.8 の K 値の最大値は、次のようにスロット併用制御発破の実績値⁴⁾の 4 倍前後にまで大きくなった。この地域の花崗斑岩に特有な傾向と考えられるが、原因は良く分からない。

切羽外周+水平スロット併用制御発破の K 値：860

切羽外周スロット併用制御発破の K 値：1098

(4) 実施設計の掘削方法

試験発破の結果を基に、スロットと EDD を併用して当初設計で決めた 3 種類の制御発破工法の性能向上を図った。機械掘削も含め、これらの諸元とパターンを表-6、図-5 に示す。なお、振動低減効果は同表の機械掘削 1、制御発破 3、制御発破 2、制御発破 1 の順に大きく、掘削時間は逆にこの順に長くなる。

ここで、制御発破は SD 工法で形成するスロット (直径 65mm の連続した溝) と EDD を組合せた掘削工法である。最初に、SD 機を用いてトンネル軸方向に深さ 1.2 ～ 1.7 m の連続孔を削孔して切羽外周にスロットを形成し、切羽とその外側岩盤との間に自由面を設けて縁を切る。また、より大きな振動低減が必要な場合にはスプリングラインや下半盤に水平のスロットを追加する。次に、EDD を用いて多段数の発破 (1 段 1 孔) を行い、1 段当たりの薬量を少なくする。図-5 に示した孔番号の順に、発破は上半外周側から上半内側、そして下半へ行う。そのため、大きな振動が発生する芯抜き発破が無く、縁切りした外側に向かう払い発破だけを少ない薬量で行うことになり、発破振動を確実に低減できる。切羽と家屋との離隔距離が小さくなり、さらに振動を低減す

表-5 試験発破の振動測定結果 (観測点 No.8)

試験発破番号	最大振動速度 (kine)	K 値
No.1	0.025	859
No.2	0.038	860
No.2'	0.021	594
No.3	0.037	785
No.3'	0.022	474
No.4	0.060	1098

る必要が生じると、振動抑制効果が最も大きな制御発破3に変更した。逆に、振動速度の管理値に対して余裕が見込まれる場合には、薬量の増加やスロットの減から掘削の効率化を図った。すなわち、表-6 に示した1孔当たりの装薬量は目安とし、振動速度管理値に対する余裕に応じて、さらに細かな増減を行った。

一方、機械掘削では、外周と水平にスロットを形成した後、一次破碎は油圧くさび（トンネルビッガー）を用いて割岩を行い、二次破碎は制御発破の場合と同様に大型ブレーカで行った。

使用した機械の一覧を表-7に示す。

4. 施工の結果

振動速度を観測しながら3種類の制御発破工法と1種類の機械掘削工法を使い分けることにより、観測地点の最大振動速度を管理値以内に抑制して全線を掘削することができた。

表-6 実施掘削方式の諸元

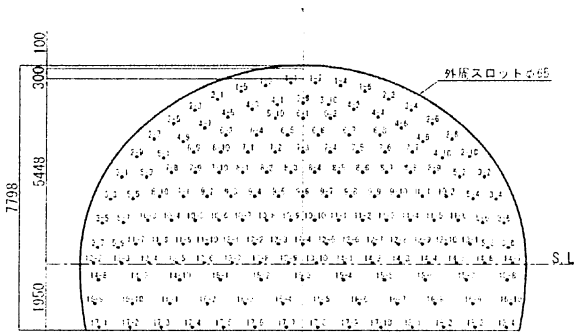
(a) 制御発破

掘削方式名	スロット	雷管	掘進長 (m)	薬量 (kg / 孔[段])	孔数	掘削体積当たり薬量 (kg / m³)	掘削面積当たり薬量 (kg / m²)
制御発破1	切羽外周	EDD	1.2	0.6	170	0.992	1.983
制御発破2	切羽外周＋水平（SL）	EDD	1.2	0.4	160	0.622	1.867
制御発破3	切羽外周＋水平（SL）	EDD	1.2	0.2	200	0.389	2.333

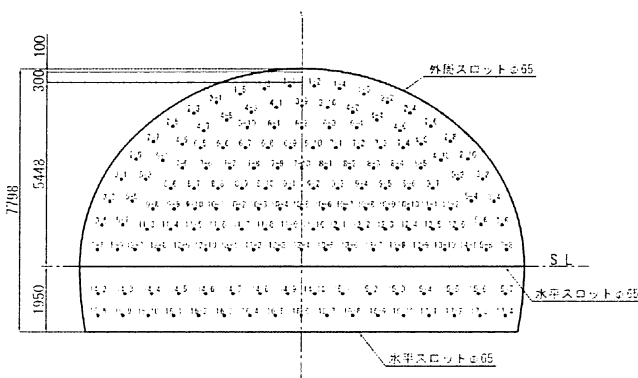
(b) 機械掘削

掘削方式名	スロット			割岩		
	配置	ビット直径 (mm)	周長 (m)	削孔延長 (m)	孔数	孔径 (mm)
機械掘削1	切羽外周，上半水平 上半SL水平，下半水平	65	61.6	360.9	119	102

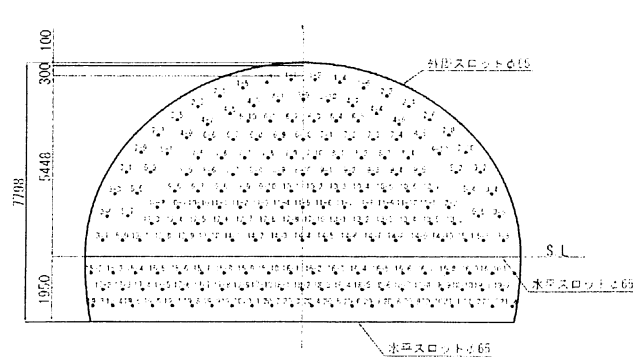
(a) 制御発破1



(b) 制御発破2



(c) 制御発破3



(d) 機械掘削1

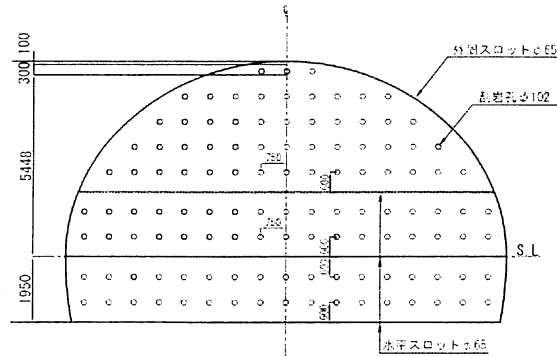


図-5 実施掘削パターン

表-7 使用機械の一覧

種類	規格	台数	制御発破1	制御発破2	制御発破3	機械掘削1	備考
S D Ⅲ型機	4連ビット 最大打撃圧：15.7MPa 最大回転圧：7.8MPa	3	○	○	○	○	スコットの削孔
ドリルジャンボ	170kg級、3ブーム	1	○	○	○	○	装薬孔、割岩孔の削孔
油圧式割岩機	割岩力：10.8MN	1	—	—	—	○	油圧クサビによる割岩
大型ブレーカ	3t級、4t級	2	○	○	○	○	制御発破：コソク 機械掘削：二次破碎
ホイールローダ	2.3m ³ 級	1	○	○	○	○	ズリ積込み
ダンプトラック	20t、10t	4	○	○	○	○	ズリ運搬
吹付け機	25m ³ /h	1	○	○	○	○	

表-8 工法別の実績施工延長

(a) 距離程別集計			
掘削方式	測点	延長 (m)	備考
機械掘削1	No.46+11.0 ～ No.48+8.3	37	新宮側坑口
制御発破3	No.48+8.3 ～ No.51+11.1	63	
機械掘削1	No.51+11.1 ～ No.53+10.7	40	既設導水路トンネル
制御発破3	No.53+10.7 ～ No.55+10.3	40	
制御発破2	No.55+10.3 ～ No.61+16.3	126	
制御発破3	No.61+16.3 ～ No.62+4.7	8	試験発破
制御発破2	No.62+4.7 ～ No.75+9.7	266	
制御発破1	No.75+9.7 ～ No.77+2.7	33	
制御発破1	No.77+2.7 ～ No.77+7.2	5	試験発破
制御発破2	No.77+7.2 ～ No.78+0.0	13	試験発破
機械掘削1	No.78+0.0 ～ No.80+8.88	49	熊野側坑口
合計		680	

(b) 掘削方式別集計		
掘削方式	延長 (m)	比率 (%)
制御発破1	38	6
制御発破2	405	60
制御発破3	111	16
機械掘削1	126	19
合計	680	100

表-9 4種類の掘削工法のサイクルタイムの比

掘削方式	サイクルタイムの比
制御発破1	1.00
制御発破2	1.09
制御発破3	1.21
機械掘削1	2.46

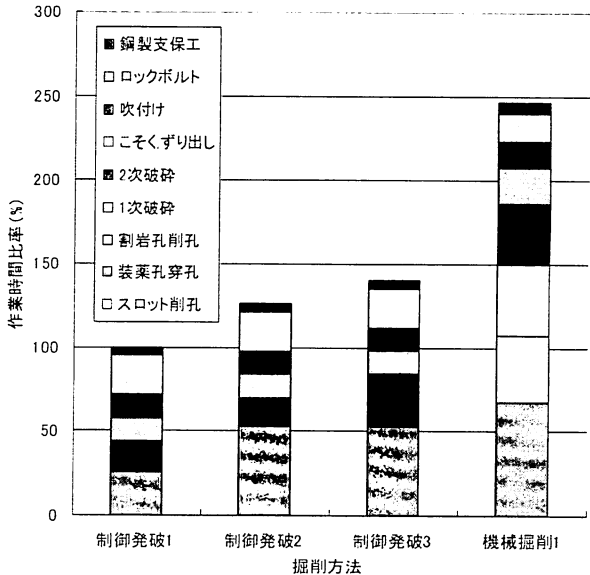


図-6 サイクルタイムの内訳

(1) 掘削実績

4種類の掘削工法の距離程、工法別の施工延長を表-8に示す。制御発破の振動抑制性能を向上させた結果、機械掘削の延長は当初に比較して82m短くなり、全長に対しては12%の減となった。その結果、工期は当初計画から110日分短縮できた。

(2) サイクルタイム

CⅡパターンを例にとり、4種類の掘削工法のサイクルタイムを比較して表-9に示す。ここで、サイクルタイムは制御発破1の時間を基準(1.0)とした比で表した。また、それぞれの掘削工法についてサイクルタイムの内訳を図-6に示す。

制御発破1に比較して制御発破2、制御発破3ではサイクルタイムがそれぞれ9%と21%に大きくなった。制御発破2、3では水平方向のスロットを追加したので、その削孔時間が伸びた。また、制御発破3は制御発破2に比較して装薬孔穿孔時間と二次破碎時間が伸びた。なお、制御発破の場合の施工速度は概ね1基/片番(1.2m/片番)であり、爆薬に関しては、親ダイ、増ダイともに含水爆薬(30mm×100g)を使用した。

機械掘削1ではサイクルタイムが制御発破1に比較して2.4倍に大きくなった。油圧くさびによる一次破碎、ブレーカによる二次破碎時間の増大が主な原因である。

SD工法に関しては、当初クロスビットを使用していたが、施工性と耐久性の面からボタンビットに変更し、

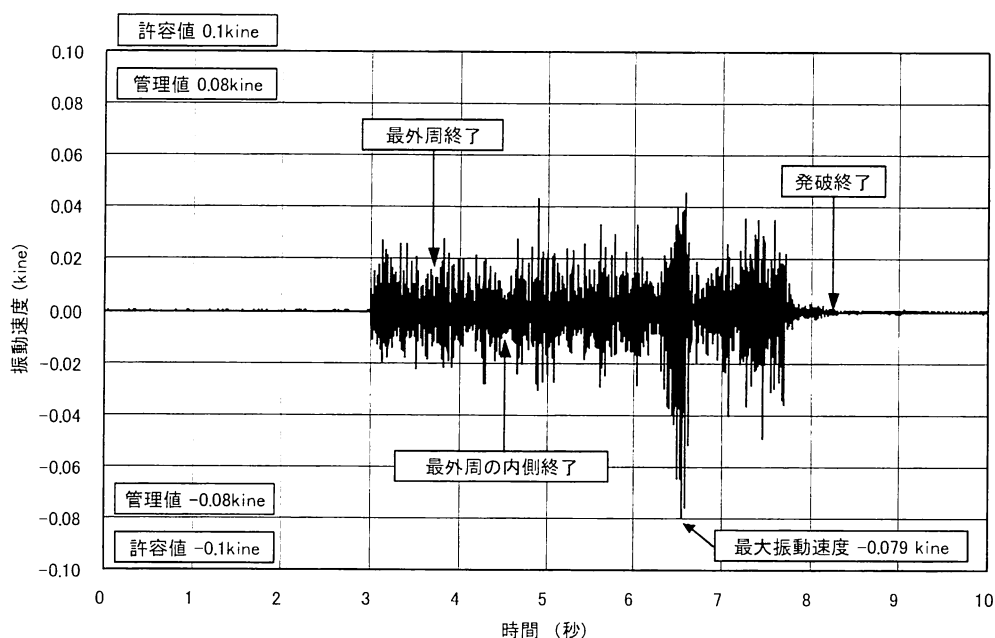


図-7 振動速度の観測波形（観測点 No.8，離隔距離：切羽の後方 91.2m，制御発破 2，孔当たり薬量：0.6kg）

削孔速度が 25 ～ 30 cm / 分程度になった。また，スロット形成の作業時間は，2 ブームの SD 機（4 連ビット）を 2 台使用して約 6 ～ 7 時間であった。

(3) 振動波形の分析

掘削の全期間を通じて，振動速度の最大値は観測点 No.8 で観測された。図-7 はそのときの波形であり，最大振動速度は 0.079 kine，離隔距離は切羽の後方 91.2 m であった。また，掘削方法は制御発破 2 であり 1 孔当たりの薬量は 0.6kg であった。

制御発破では EDD を使用して各孔の発破を秒時間隔 30 ms とし，振動波形の振幅が概ね一樣になることを目指した。図-7 から，振動の継続時間は長いが速度振幅はある程度には一樣に抑制された様子が窺えた。しかし，速度振幅には局部的に振動速度が大きくなった箇所があった。このような傾向は観測した振動波形全体に見受けられた。このピーク値を小さくすることができれば，1 孔当たりの薬量を多くしてより合理的な掘削に結び付く可能性がある。

次に，振動速度のピーク値は観測点に発破振動が到達してから 3.6 秒後に発生している。すなわち，最外周内側孔の発破が終わり，切羽中央部 SL 付近の発破で現れた。同じようなピーク値発生時間の傾向が全体に見出されれば，切羽中央部の孔間隔や点火順序を再検討する価値がある。そこで，各発破の振動波形から，観測点に振動到達後の最大振動速度発生秒時を調べた。結果を図-8 のヒストグラムに示す。最大振動速度が発生した秒時は，発破後 0.5 秒未満の頻度が最も高く，次いで 4 秒以降にも一定の頻度が認められた。今回の工事では，この 2 箇

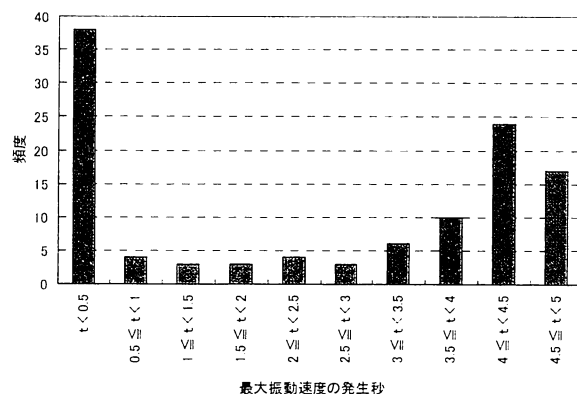


図-8 振動到達後の最大振動速度発生秒時の頻度

所に対してピーク値を抑制する対策を施工途中に見出すことが難しかったため，今後に向けた課題とした。

(4) 振動速度の管理

次切羽の発破振動速度の推定に用いる K 値は一定とせず，それまでの発破振動計測値（振動速度）とそのときの薬量および離隔距離を式 (1) に当てはめて K 値を算出し，これを用いて推定する方法とした。したがって， K 値の推定精度は，管理値を守り効率的な掘削を行う上で最も重要な課題であった。

制御発破を始めた初期の段階では，既掘削区間で測定した振動速度，離隔距離，薬量から逆算した K 値の最大値を用いた。データを累積することで地形，地質等の現地条件の特性が顕在化し K 値の予測精度が向上すると考えた。しかし，発破を重ねるごとに，実測値が管理値内に収まった状態でありながら，予測値が実測値を大きく上回る傾向が続き，過度な振動低減対策を行う状況

が見込まれたため、予測方法の見直しを行った。すなわち、図-9 のフローに示すように、次発破の地質条件等が近似する直前の計測値に着目し、直前 10 回の発破の K 値から、「A : 10 回分内の最大値、B : 10 回分の平均値 + 標準偏差」の大きい方の値を用いる予測法に変更した。その結果、離隔距離が小さく予測の精度が求められる観測点 No.7、No.8 について見ると、見直し後の振動速度予測精度は図-10 に示すようになり、精度を向上させることができた。

(5) 最大振動速度、 K 値の測定値

観測点 No.7、No.8 で測定した最大振動速度と離隔距離の関係を図-11 に示す。また、振動測定値から逆算した K 値と離隔距離の関係を図-12 に示す。両図ともに、プラスの離隔距離は観測点に対して切羽が接近する場合、マイナスの離隔距離は観測点に対して切羽が離れる場合である。

図-11 から、観測点 No.7 では切羽の接近に伴って振動抑制効果の大きな工法を順次適用し、一定の余裕を持って機械掘削に移行できたことがわかる。その後、切羽が離れるに従い、設計では機械掘削であった区間に対して再び制御発破に変更し、最大振動速度を管理値内に抑えて無事に施工できた。

図-12 に示した計測値から逆算した K 値は、離隔距離に係わらず、最小値を基準にすると 4～5 倍の範囲の

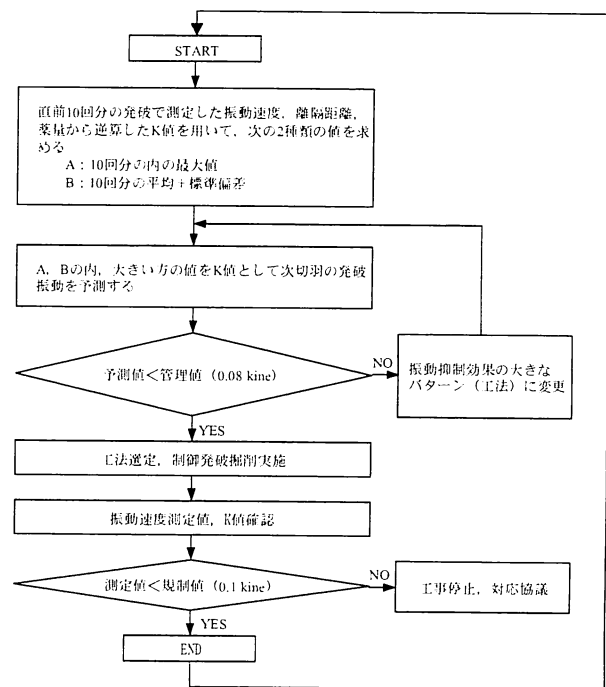
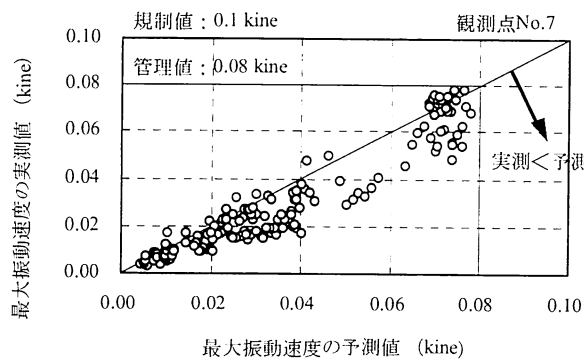
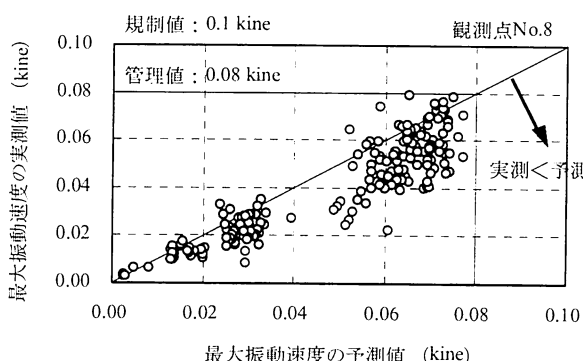


図-9 振動管理のフロー

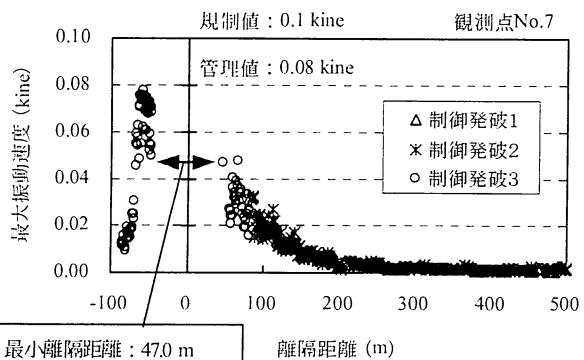


(a) 観測点 No.7

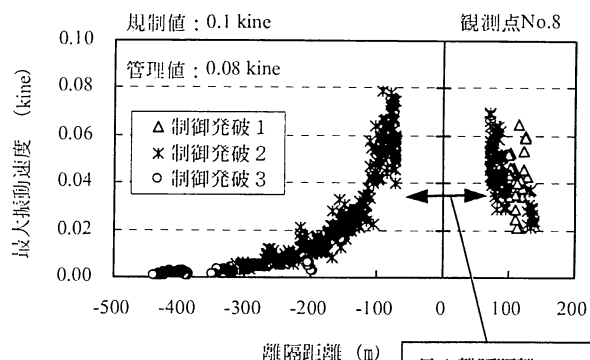


(b) 観測点 No.8

図-10 見直し後の振動速度予測精度

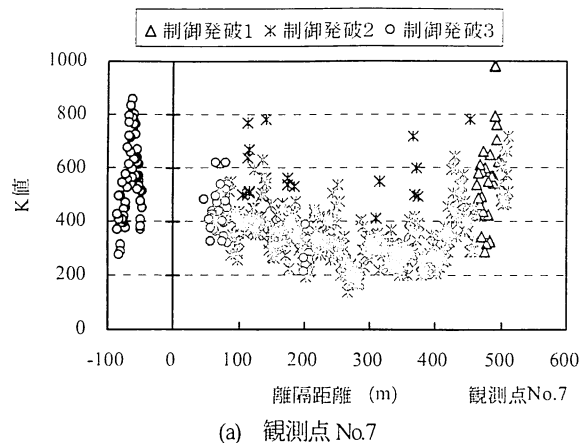


(a) 観測点 No.7

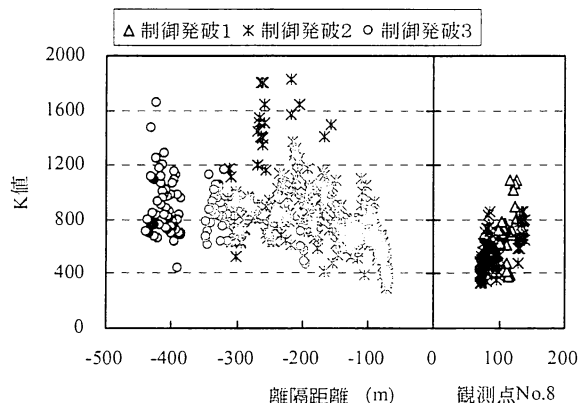


(b) 観測点 No.8

図-11 最大振動速度と離隔距離の関係



(a) 観測点 No.7



(b) 観測点 No.8

図-12 K 値と離隔距離の関係

バラツキを持つものであった。これは、今回計測された発破振動値が非常に小さいレベルを扱い、その計測値のわずかな差によるバラツキが生じた結果と考えられ、推定の困難さを再確認した。また、観測位置が離れており岩盤性状が多少異なる可能性の高い観測点 No.7 と No.8 の K 値が 2 倍程度の大きな差異を示した。 K 値は発破振動発生位置（切羽）と観測地点との間の岩盤特性に影響される。今回は、直近 10 切羽の計測値を用いて推定する方法を採用したことで、そのローカルな岩盤特性が

精度良く適宜に推定に反映でき、 K 値の差が生じたと考えられる。

5. おわりに

発破振動の予測に実績のある式（1）を用いて、中硬岩（花崗斑岩）における制御発破の振動速度の観測と次切羽の発破仕様へのフィードバック管理を行うことにより厳しい管理値をクリアできた。しかし、測定値から逆算した K 値は、同一岩種、同一岩級の一箇所の計測点においても大きなバラツキが生じる結果となった。弾性波速度などの岩盤物性をはじめ、切羽ごとの切羽評価点や装薬孔の穿孔速度などの情報から、式（1）に考慮可能となる要素があるのか、扱うデータの統計処理方法により K 値のばらつきを減らせるのか、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 萩森健治, 大野浩平: スロットを利用した硬岩トンネルの掘削工法, 日本建設機械化協会 建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp.222-225, 1990.
- 2) 綾木修, 前田元三, 萩森健治: スロット削孔機を用いた制御発破工法の開発, 建設技術報告会 in 北陸 '97 報文集, pp.151-154
- 3) 萩森健治, 古賀洋治, 安井啓祐: 無発破トンネル掘削工法(SD 工法)ー市街地での山岳トンネルに適用する低公害掘削工法ー, 建設機械 1997 年 11 月号, pp.52-58
- 4) ジェオフロンテ研究会: 割岩工法便覧ー割岩工法に関する技術資料(総集編), p.164, 2006.

THE VIBRATION DECREASING OF CONTROLLED BLASTING METHOD COMBINED SLOT DRILLING AND ELECTRONIC DELAY DETONATOR

Masayoshi SHIBATA, Naonori HOSHINO,
Hajime HAMADA, Seiji EBISU and Shigetoyo YASUI

In the Kiho tunnel where the medium hard rock masse was distributed along the almost whole length, a severe vibration management of the construction was imposed, and the mechanical excavation section and the controlled blasting section were set according to the distance of tunnel face and the private house. Though it was a difficult problem to observe a severe vibration management value in the controlled blasting section, the improvement of the excavation efficiency also became possible by solving this problem. In this tunnel, the observational construction of the vibration velocity was done in each blasting by using the controlled blasting method that combined the slot drilling and the electronic delay detonator. As a result, a severe vibration management value has been observed in the whole tunnel line. Moreover, the controlled blasting section was lengthened compared with the original design, and the construction period was shortened.