

電子遅延式雷管を用いた制御発破における振動抑制効果

THE EFFECT OF CONTROLLED BLASTING WITH ELECTRONIC DELAY DETONATORS

大窪正秋¹⁾・岩崎日出夫²⁾・岡村光政³⁾・多々納浩二⁴⁾

Masaaki OOKUBO, Hideo IWASAKI, Mitumasa OKAMURA and Kouji TATANO

Controlled blasting is necessary to restraining ground shake. To reduce the quantity of explosive or to use the one that has slow explosive speed is the effective measure for controlled blasting. We need select the most effective one to consider around conditions.

This time we constructed the road tunnel close by other water-tunnel about 17 meters apart, that was constructed 50 years ago. As controlled blasting we adopted the effective measures, a pilot tunnel by TBM and blasting with electronic delay detonator. The pilot tunnel is effective to reduce explosive shaking energy and the detonator is valid to disperse vibration waves with blasting.

In this report we describe about the result of these measures as controlled blasting.

Key Words: controlled blasting, cut drive, electronic detonator

1. はじめに

中硬岩地山を発破掘削により建設した一般国道312号線城山トンネル(内空断面積 63m^2 , 延長 623m)は、図-1に示すように、起点坑口付近に民家が近接する(離隔約 50m)、既設水路トンネルと地中交差する(最小離隔約 17m)等の環境条件下にあり、建設工事に伴う振動、騒音規制が必要であった。特に、近接施工となる水路トンネルについては、管理者との協議により振動速度 1cm/sec (kine) 以下という厳しい制約条件が設けられていた。

そこで、掘削効率を確保しつつ確実な振動制御を実現するため、心抜きとしてTBM導坑を先行施工し、爆破秒時をICにより精密制御可能な電子遅延式雷管を用いた一括制御発破を採用し、所定の成果が得られたものである。本稿では、主に近接水路トンネルに対する振動制御の実績とその分析結果について述べることにする。

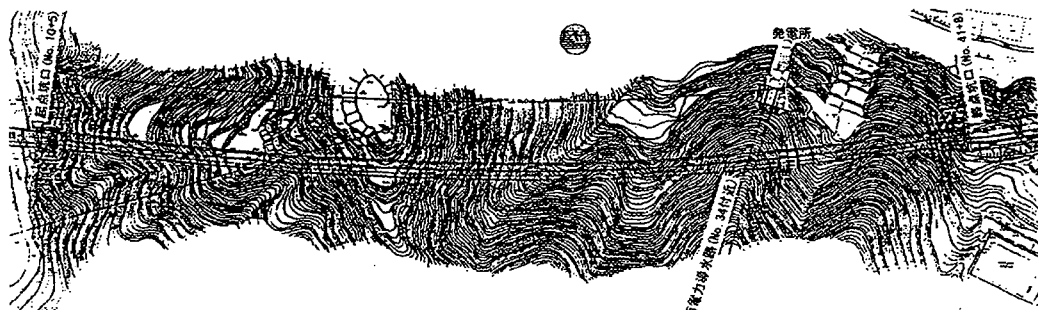


図-1 施工平面図

- 1), 2) 兵庫県土木部
- 3) フェロー 戸田建設(株) 土木技術開発室
- 4) 戸田建設(株) 北陸支店土木工事部

2. 地質条件と振動制御手法

地質は、凝灰岩類を主体とし、圧縮強度が概ね60MPa 程度の中硬岩である。また、起点坑口側では、圧縮強度が100MPaを越える安山岩が貫入している。(図-2)

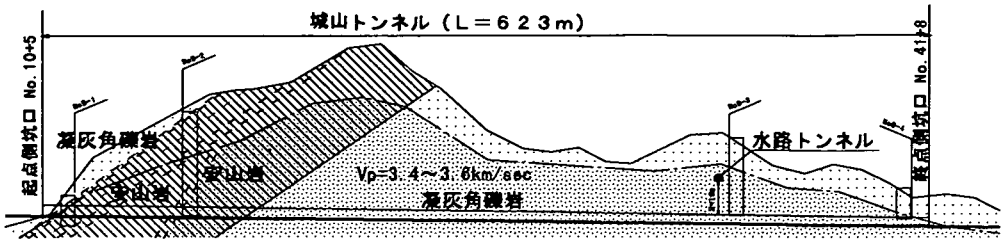


図-2 地質縦断面図

当トンネルでは、水路との近接施工の他、トンネル周辺に民家が近接するため、振動制限区間が全延長の50%以上となり、当該区間での機械掘削方式や分割発破方式の採用は、工期的に不利であると判定された。そこで、発破工法を主体とした効率的な掘削と振動制限を両立するため、TBM(外径2.3m)による心抜き導坑の先行施工、電子雷管を用いた実質単孔発破による一括発破の実施を、振動制御の基本とした。

3. 振動規制値の検討

既設水路トンネルに対する発破振動の規制値は、管理者との協議に基づき、変位速度 1cm/s と定めたが、コンクリート構造物の場合、その強度から理論的に許容値を求めることができる。

一般的に、三次元の材料内に発生する変位速度と応力の間には、次式が成立する。

$$\sigma = \rho \cdot C \cdot V \cdot (1-2\nu)(1+\nu) / \{g \cdot (1-\nu)\} \quad (1)$$

ここで、 σ ; 発生応力(gf/cm²), ρ ; 材料の密度(g/cm³), C ; 材料の弾性波速度(cm/sec)
 V ; 発生変位速度(cm/sec), ν ; 材料のポアソン比, g ; 重力加速度(980 cm/s²)

従って、発生応力を覆工コンクリートの引張強度とすれば、(1)式より、覆工にひび割れを発生させる変位速度を求めることができる。

$$V = \sigma \cdot g \cdot (1-\nu) / \{\rho \cdot C \cdot (1-2\nu)(1+\nu)\} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma=1.8$ MPa, $\rho=2.4$ g/cm³, $C=250,000$ cm/s, $\nu=0.25$ とすれば、
 $V=18,000 \times 980 \times (1-0.25) / \{2.4 \times 250,000 \times (1-2 \times 0.25) \times (1+0.25)\} = 36.75$ cm/s
 となる。

従って、規制値の 1cm/sは、理論上36.75の安全率を持つことになる。

4. 振動制御の実施計画

水路トンネルに対する振動制限区間の発破掘削においては、発破毎の振動計測を通じ、通常の電気雷管では分割発破が必要と判定される区間で、電子遅延式雷管を採用し、実質単孔発破による一括払い発破を実施することとした。

4. 1 電子遅延式雷管

従来の段発用電気雷管は、延時薬によって段発秒時差の設定を行っているため、同段においても起爆時間にばらつき(設定秒時の1割程度)を生じていた。これに対して、電子遅延式雷管(以下電子雷管と記す)

は、ICを利用することで 1ms きざみの高精度で秒時差を設定でき、200段発という従来にない段数を実現できるものである。

電子雷管の基本構成は図－3 のようであり、その作動原理は、専用発破器からの電気エネルギーをコンデンサに蓄え、それを電気遅延素子により予め設定された時間後にスイッチ素子を通して点火装置に供給し、その発火によって雷管を爆発させるものである。

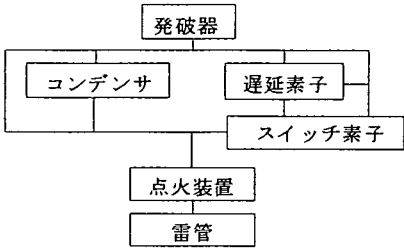
電子雷管による振動抑制原理は、基本的には高精度の秒時設定による各段（各孔）の振動波形の分離と、相互干渉による効果的な打ち消し作用にあると言える。

4. 2 心抜き導坑と発破パターン

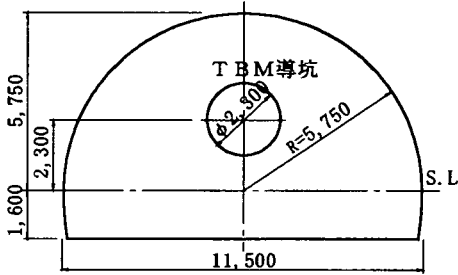
今回のTBM導坑の施工目的は、「発破振動制御と掘削効率の向上」であることから、導坑の位置としては、発破における心抜き効果を重視し、本坑断面のほぼ中央部に設定した。また、心抜き効果は、導坑断面が大きいほど有利であるが、TBMの機械費とのバランスを考え、外径 2.3 m（市場転用機）としている。（図－4）

発破パターンについては、水路トンネルとの近接度に応じて、通常のDS発破と電子雷管発破を使い分けることとし、図－5 と図－6 の基本パターンを設定した。これらは、計測とそれに基づく発破振動の予測を通じて適宜、進行長、孔数、装薬量の調整等を行い、その見直しを図るものである。

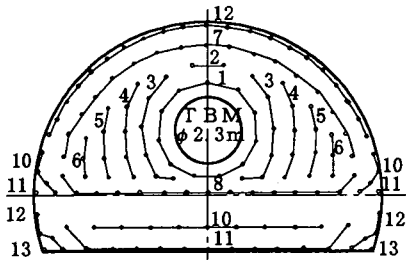
また、表－1 と表－2 には、電子雷管とDS雷管の秒時設定を、表－3 に使用爆薬の種類とサイズを示す。



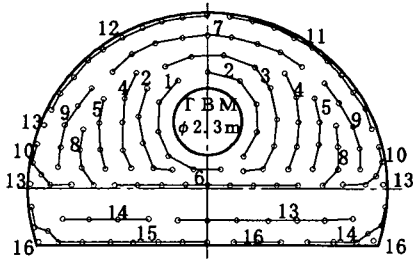
図－3 電子遅延式雷管の基本構成



図－4 TBM導坑の位置図



図－5 DS雷管基本発破パターン



図－6 電子雷管基本発破パターン

表－1 電子雷管の秒時設定

主段	副 段 (m s)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100	130	160	190	220	250				
2	300	330	360	390	420	450	480	510	540	570
3	600	630	660	690	720	750	780	810	840	870
4	900	930	960	990	1020	1050	1080	1110	1140	1170
5	1200	1230	1260	1290	1320	1350	1380	1410	1440	1470
6	1500	1530	1560	1590	1620	1650	1680	1710	1740	1770
7	1800	1823	1860	1890	1920	1950	1980	2010	2040	2070
8	2100	2130	2160	2190	2220	2250	2280	2310	2340	2370
9	2400	2430	2460	2490	2520	2550	2580	2610	2640	2670
10	2700	2730	2760	2790	2820	2850	2880	2910	2940	2970
11	3000	3030	3060	3090	3120	3150	3180	3210	3240	3270
12	3300	3330	3360	3390	3420	3450	3480	2510	2540	2570
13	3600	3630	3660	3690	3720	3750	3780	3810	3840	3870
14	3900	3930	3960	3990	4020	4050	4080	4110	4140	4270
15	4200	4230	4260	4290	4320	4350	4380	4410	4440	4470
16	4500	4530	4560	4590	4620	4650	4680	4710	4740	4770

表-2 DS雷管の秒時設定

段	1	2	3	4	5
秒時	0	250	500	750	1000
段	6	7	8	9	10
秒時	1250	1500	1750	2000	2300
段	11	12	13	14	15
秒時	2700	3100	3500	4000	4500

表-3 爆薬の仕様

種類	サイズ
サンパックスえのき	30×100(直径100mm×重量g)
サンパックスえのき	30×200(直径100mm×重量g)

4. 3 発破振動測定

今回は、施工管理のために振動制御の効果を確認するだけでなく、心抜き導坑の存在や雷管の相違による発破振動特性の分析を行う目的で、制限区間を含む約150m区間の全発破について振動計測を行っている。

主な測定地点は、水路トンネル本体、水路直上を含むトンネル路線に沿った地表および坑内である。

図-7に各計器の設置位置を示す。

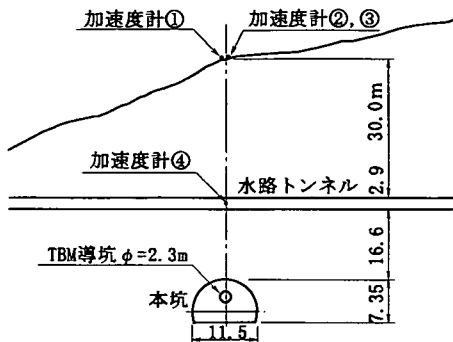


図-7 発破振動計測位置図

5. 振動制御の実績と分析

5. 1 実績諸データ

水路トンネルに対する発破制御は、坑内水平距離約40m手前よりDS発破による準制御区間に入り、約35m手前から導水路直下の施工も含めた計70m間を、電子雷管による制御区間としている。その後、さらに5mの進行に対し、DSによる準制御を実施した。図-8に切羽の進行に応じた各測点での変位速度（三方向合成値）の推移を示す。これらは同一発破に対する応答値で、爆源からの距離がそれぞれ異なるものである。また各区間における平均的な発破データを、表-4にまとめた。

準制御区間に至る前は、TBM導坑の心抜き効果を最大限に活用し、一進行長3mを越える施工を実現している。準制御区間に至って、一進行長の低減と段数の増加により斉発薬量を抑制し、振動制限の効果を上げている。

電子雷管による完全制御区間では、一進行長1m程度を確保し、実質段数および孔数を増加させて、DSと同程度の単位装薬量を確保しつつ、所要の振動制限を実現していることが分かる。

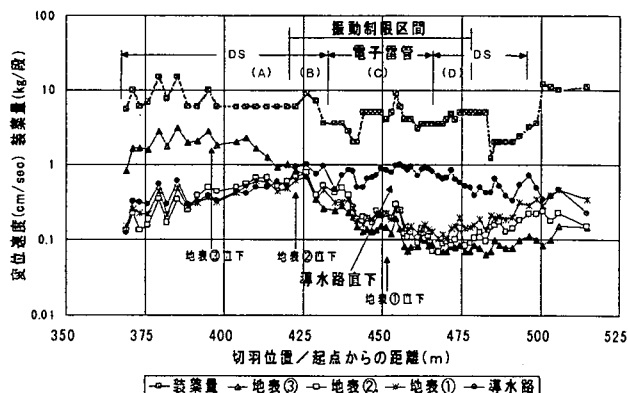


図-8 切羽の進行に応じた各測点の変位速度

表-4 各区間における平均的な発破データ

区間	区間長 m	進行長 m	主段数	孔数 平均	総装薬量 平均 kg	単位装薬量 平均 kg/m ³	段装薬量 最大kg/段	孔装薬量 最大kg/孔
(A)DS通常	—	3.5 - 2.5	13 - 15	114	171.0	0.91	15 - 6	2.0 - 1.5
(B)DS準制御	5	2.0 - 1.5	15 - 20	114	85.7	0.73	7 - 2	0.9 - 0.4
(C)電子制御	70	1.5 - 1.0	13 - 16	140	64.1	0.73	9 - 3	0.6 - 0.3
(D)DS準制御	5	1.5 - 2.0	16 - 20	147	73.3	0.63	2	0.3 - 0.5

5. 2 電子雷管による発破振動特性

図-9、図-10にDS発破と電子雷管発破の代表的な振動波形を示す。段ごとの斉発となるDSでは、段数のタイミングと整合した波形のピークが出るのに対し、電子雷管では細分化された波形となり、一孔ごとの連続発破となる特徴が明瞭である。

また、変位速度の最大値は、DSでは最大斉発薬量に対応した段数の秒時で出る傾向があるのに対し、実質単孔発破となる電子雷管では、負荷が軽減される後半にずれこむ傾向が見受けられる。(図-11)

これより、電子雷管の発破では振動波形が細分化されるため、秒時が進むにつれて波形の干渉、増幅する可能性もあるものと思われる。

5. 3 電子雷管発破の振動抑制効果

ここでは、DS発破と電子雷管発破の振動特性を比較するため、一般的な振動予測式

$$V = K \cdot W^m \cdot D^n \quad (3)$$

ここで、V；変位速度(cm/s) K；発破係数

W；薬量(kg) D；爆源からの距離(m)

m；薬量に関する係数(通常2/3~3/4)

n；距離減衰に関する係数(通常-1.5~-2)

を用い、おもにK値の分析を行った。薬量と距離減衰に関する係数は、それぞれ、 $m=2/3$ 、 $n=-2$ と仮定した。また、電子雷管の場合の薬量は、細分化された波形の相互干渉を正確には把握できないため、変位速度の最大値を生ずる主段での薬量(副段の合計)としている。これによって、DSの主段における斉発と電子雷管による単孔・多段発の差異を、明確にできるものと考えた。

図-12、13に、検討結果を示す。図中の前方とは、測点が発破切羽の前方にある場合で、後方はその反対である。なお、標本には、導水路を初めとする各地点の測定データを含めている。

薬量と距離の条件を同じにすると、DS発破に比べて電子雷管発破では、6、7割程度振動値(K値)が低減されており、発破の細分化による振動抑制効果が明らかである。また、切羽後方では、前方に対して7割程度のK値となっている。

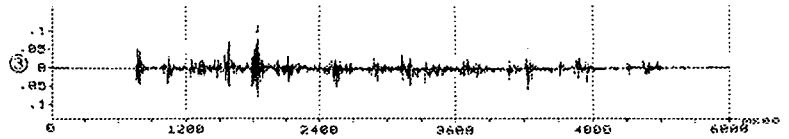


図-9 DS発破における振動波形の例(鉛直成分)

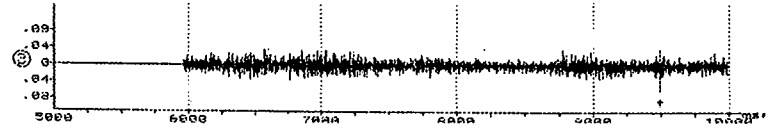


図-10 電子雷管発破における振動波形の例(鉛直成分)

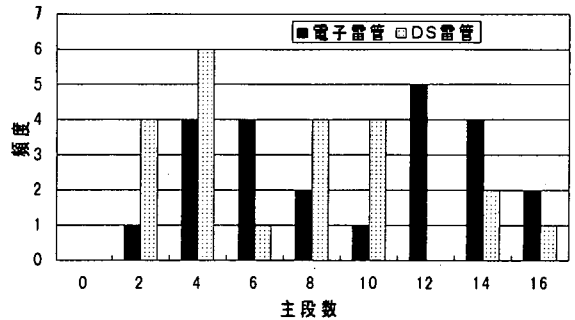


図-11 最大変位速度の発生主段数の頻度

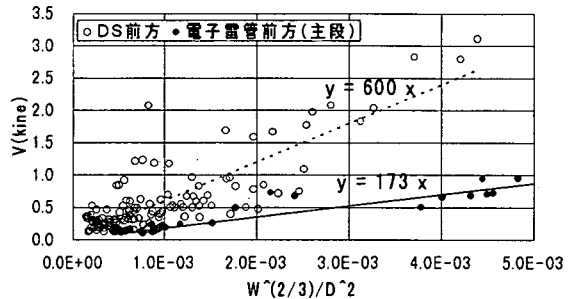


図-12 発破係数の比較(切羽前方)

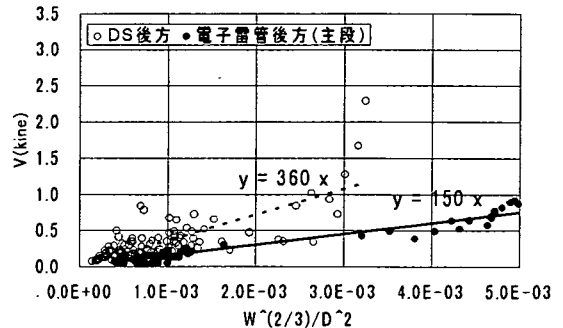


図-13 発破係数の比較(切羽後方)

5. 4 心抜き導坑の効果

今回は、予め自由面を確保し、心抜き時の負荷を低減して発破振動の影響を抑制するために、TBMによる先進導坑を施工している。その心抜き効果を定量的に評価する目的で、導坑から離れた断面位置において、電子雷管を用いた心抜き発破の試験計測を行っている。

前節同様、K値による比較を行うと、表-5のようである。心抜き時に得られたK値の平均値は551であり、拡幅時に得られている173に比べて約3倍となっていることから、心抜き導坑の効果が裏付けられた。

表-5 心抜き発破試験結果(0.5kg/孔×6孔)

	地表①	②	③	導水路	平均
心抜きK値	649	298	552	505	551
進行時K値					173

5. 5 発破振動予測式の検討

ここでは、データ標本数が多いことから、振動予測式を次式のように変形し、変位速度に関する項を目的変数とする、線形重回帰モデルによって解析を行った。

$$LV=C + m \cdot LW + n \cdot LD \qquad (4)$$

ここで； LV=log(V) V；変位速度

LW=log(W) W；薬量

LD=log(D) D；離隔距離

C=log(K) K；発破係数

表-6 振動予測式における各係数の分析

	K	m	n	重相関係数
DS雷管	329	0.654	-1.92	0.857
電子雷管	1,218	0.989	-2.09	0.912

解析結果を、表-6に示す。総括的な比較を行う目的で、DSおよび電子雷管発破とも、それぞれ全データをを用いた解析を行っている。なお、薬量の取り扱いは、DSでは同段の斉発薬量を用い、電子雷管では単孔発破の特徴から、最大変位速度を生ずる主段部に含まれる孔当たりの最大薬量を用いている。

雷管の種別に伴う発破方法の差異は、振動の距離減衰に関してはあまり影響を及ぼさないが、電子雷管による細分化発破が薬量に対する振動感度を敏感にしていることが分かる。これは、DS発破では同段でもバラツキがあり、実際の斉発薬量が少ないことに起因するものと考えられる。今後、両者を包含する取り扱いが必要であるが、電子雷管の場合も、当面、5.3節で示した主段部薬量を対象にした発破係数を用いる方式が、その振動低減効果を明瞭にする設計として有効な手段の一つになると思われる。

6. まとめ

今回の既設導水路トンネルを対象として実施した、TBM心抜き導坑を活用した電子雷管による制御発破工法は、離隔17mの近接度においても、一括発破を可能とするなど、その振動抑制効果を十分に発揮するものであった。本検討で得られた主な知見をまとめると、以下の通りである。

- ① 心抜き導坑は、発破振動抑制対策として大きな効果をもつ。
- ② 電子雷管を用いた発破振動の細分化は、同程度の爆薬原単位の条件において、従来の段発用電気雷管(DS)による発破振動を、3割～4割程度にする効果があった。
- ③ 振動予測式の分析から、発破方法の差異によらず振動の距離減衰はほぼ同等であるが、電子雷管発破では薬量の振動に対する感度が敏感であるため、主段部薬量を対象とした取り扱いが有効である。

なお、TBM導坑を活用する今回の方式は、振動規制値や制限区間の延長割合によっては、必ずしも経済性が伴わない場合もあり、今後、制約条件下に置かれた機械掘削の不向きな硬岩地山において、その効果が最も発揮されるものと思われる。しかし今後とも、周辺環境対策として、発破振動・騒音に対する制約が高まる状況が考えられる中、工事の効率化という観点からの取り組みも重要であり、今回は、ひとつの有効な方策を示せたものと考えている。さらに、発破振動抑制の効果的な手法の開発と、今回は割愛したが、発破騒音の問題にも積極的に取り組む必要があると考えている。