

高秒時精度電子雷管(EDD)による発破実験 Blasting Test by Electronic Delay Detonator

一條 俊之*
Toshiyuki Ichijo

佐藤 喬一**
Kyouichi Sato

田中 義晴***
Yoshiharu Tanaka

平田 篤夫****
Atsuo Hirata

要 約

トンネル掘削における発破工法に、新しく開発した高秒時精度電子雷管 EDD (Electronic Delay Detonator) を使用し、その適用性を把握した。EDD は、雷管の中に電子回路が組み込まれており、秒時間隔を任意に設定でき、秒時精度が高いことに特徴があり、発破の振動抑制やスムーズブラスティング効果が期待できる。そこで、実験現場として日鉄鉱業釜石鉱山内の既設導坑を選び、2年にわたって基礎実験と模擬トンネルを利用した実証実験を行った。

その結果、Vカット工法における EDD の振動抑制効果が認められ、今後発破振動抑制のための多段発による発破工法の可能性が示唆された。また、余掘りの低減や岩盤の損傷領域を抑えるスムーズブラスティング効果が認められ、経済的な発破設計や支保設計に有用な知見が得られた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. EDD について
- § 3. 原位置状況
- § 4. 基礎実験
- § 5. 実証実験
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

近年、トンネル施工に関わる技術進歩は著しいものがあり、周辺環境や施工能率およびコストダウンに直結した工法が期待されている。しかし、新工法の実験を工事中のトンネル現場で行うと、実験と施工が交錯するため詳細な基礎データを得ることが困難であり、得られるデータの評価も定性的な結論に終わることが多い。そのため、施工の制約を受けない実験場所を探し、定量的な基礎データを得ることに努めた。

実験場所は、岩手県釜石鉱山内の既設坑道を利用した。釜石鉱山は、長きにわたった資源採掘鉱山としての役目を終え、現在天然水の販売を中心とした新しい土木分野における学際的な実験を提供する場所となっている。例

* 技術部技術第1課係長

** 土木設計部設計課係長

*** 技術研究所土木技術課

**** 技術研究所土木技術課副課長

えば、大学、動燃事業団あるいは建設会社等からの依頼研究の場として、岩盤や地下空洞を利用した様々な実験場所を提供している。石灰岩の採掘は現在でも続けられているため、坑道内への進入や動力関係の保守は整備されており、実験のための諸設備は不要で、そのための人員も提供される仕組みとなっている。

今回、トンネル施工に関わるテーマとして、旭化成工業（株）と共同で発破設計に着目した実験を行った。実験では、新たに開発した雷管EDD（Electronic Delay Detonator）を発破掘削に適用した。EDDは、雷管の中に電子回路が組み込まれており、秒時間隔を任意に設定でき、秒時精度が高いことに特徴がある。従来の雷管が15～20段程度であったものが、多段発が可能となり、発破振動抑制を要求される施工では有効な雷管である。また、高秒時精度であるため、トンネル掘削時の払いに利用すれば、スムーズブラスティング効果が期待できる。そこで、本研究では、1年目に発破振動に関する基礎実験、2年目に模擬トンネルによるスムーズブラスティングの実証実験を行った。

§ 2. EDDについて

2-1 EDDの構成

EDDの基本構成は、図-1に示すように電気エネルギー蓄積コンデンサーと電気遅延素子及び電気スイッチング素子からなる電子式遅延回路が雷管点火装置と結合されている¹⁾。作動原理は、EDD用の発破器から供給された電気エネルギーを電気エネルギー蓄積コンデンサーに蓄え、電気遅延素子により予め設定した時間後に電気スイッチング素子を通して点火装置に供給し雷管を起爆させるものである。このため、EDDは従来の電気式雷管に比較して秒時精度が高く、多段発が可能である。

2-2 EDDの秒時精度

EDDと従来のMSあるいはDS雷管を比較した結果を表-1に示す²⁾。各基準秒時差における変動係数はEDDが1～4%であるのに対し、従来の雷管は8～24%とばらつきが大きく、EDDが10倍程度良い秒時精度をもつことが分かる。

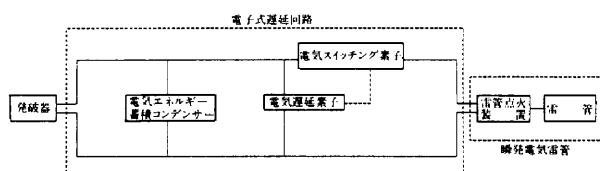


図-1 EDDの基本構成

§ 3. 原位置状況

実験位置は、岩手県釜石鉱山の標高550m坑道坑口より約2000m、土被り高さ340mの地点にある。実験位置までの進入および発破実験における資材運搬は、550m坑口より坑道内へ連絡する電車を利用した。また、実験に関わる作業については日鉄釜石鉱山の協力を得て鉱山保安法を遵守して行った。

図-2に坑道内における実験現場の平面位置関係を示す。発破の基礎実験は既設の坑道を利用して図のA坑道区間で行い、実証実験の模擬トンネルは坑道内からの進入および計測作業を考慮してA坑道から分岐した区間に設定した。

実験場所の地質は、蟹岳花崗閃緑帯の細粒花崗岩であり、亀裂は発達しているが大半は閉合亀裂であり非常に密で硬質な岩盤である。岩石試験結果を表-2に示す。周辺坑道壁面において弾性波探査を行なった結果は $V_p=6000\text{m/s}$ 前後の値を示し、岩石試験結果との差はほとんどなく、非常に亀裂の少ない岩盤であると考えられる。

§ 4. 基礎実験

4-1 実験概要

発破に関する基礎実験として、心抜き工法であるVカット工法とバーンカット工法にEDDを適用し、合計12回の発破を行った。

Vカット工法は、斉発発破によって心抜きを行うもので、一起爆当たりのエネルギーが大きいため発破振動が大きい。振動抑制を考慮する場合はトンネル進行長を短くし一起爆当たりの薬量を調整するのが一般的である。今回は、Vカットの心抜き孔に秒時差を与えて、どの程度振動速度が低減されるか従来の発破との比較を行った。また、Vカットに秒時差を与えることで心抜き効果が十分得られるか否か検証した。

表-1 遅延時間差

EDD				MS, DS (延時火薬電気雷管)			
秒時差 (ms)	平均値 $\bar{X}$ (ms)	標準偏差 σ (ms)	変動係数 $3\sigma/\bar{X}$ (%)	秒時差 (ms)	平均値 $\bar{X}$ (ms)	標準偏差 σ (ms)	変動係数 $3\sigma/\bar{X}$ (%)
20	19.74	0.23	3.49	20	19.63	1.54	23.47
40	39.88	0.44	3.31	40	40.64	3.07	22.69
100	99.67	0.84	2.53	100	100.82	3.09	17.52
200	199.02	1.04	1.57	200	205.84	7.63	11.12
500	503.82	1.33	0.79	500	457.25	11.59	7.61
1000	999.70	3.70	1.10	1000	1090.0	48.50	13.30

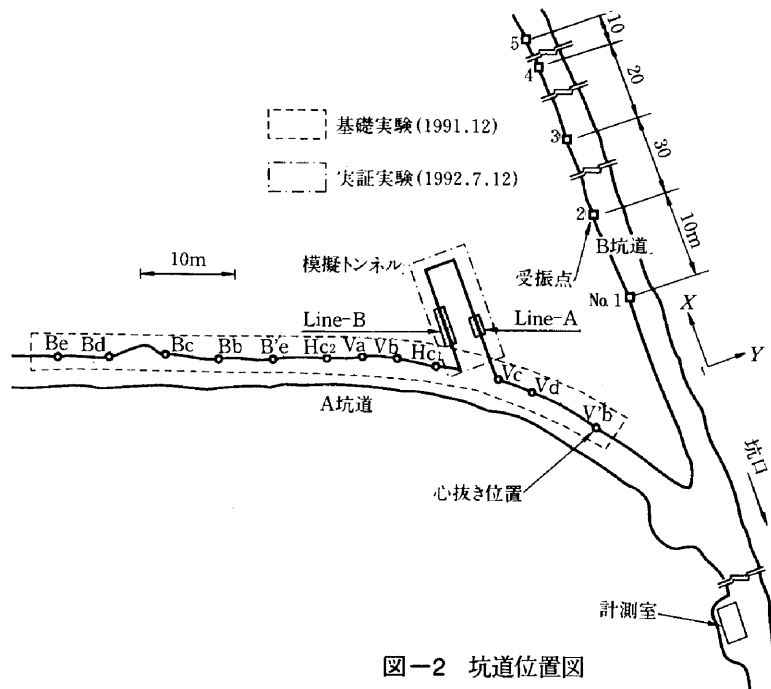


図-2 坑道位置図

表-2 岩石試験結果

・単位体積重量	(tf/m^3)	2.66
・一軸圧縮強度	(MPa)	300
・圧裂引張強度	(MPa)	12
・静弾性係数	(GPa)	73
・ポアソン比		0.24
・超音波速度 (V_p)	(m/s)	5800 ± 100

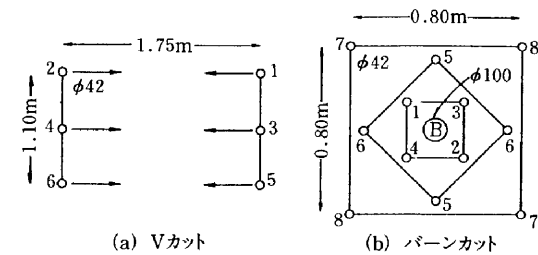


図-3 発破パターン

バーンカット工法は、心抜き孔の秒時差があるため一
起爆当たりのエネルギーは小さい。そのため、低振動発
破の実験というよりは、秒時差の違いによる心抜き効果
の違いと実証実験の最適心抜きパターンの確認を主目的
とした。

実験位置については図-2に示すようにEDDを使用
したVカット工法をVa~b、バーンカット工法をBa~e、
Vカット工法に瞬発雷管を使用した基準発破をHcとし
た。発破パターンを図-3に、各心抜き孔の起爆秒時と
薬量を表-3に示す。計測システムは、B坑道をx方向、
それと垂直な方向をy、z方向とした3成分の速度計をB
坑道壁面上に5ヶ所(No.1~5)設置した。また、計測
室は、A、B坑道の分岐部より20m坑口側に設置した。
振動速度は、増幅器からの出力をサンプリング周波数
10kHzでA/D変換後、パーソナルコンピュータのハー
ドディスクに記録した。

4-2 計測結果

(1) Vカット工法

①振動測定結果

図-4に発破前後の孔測量結果を、図-5に発破振動

表-3 各心抜き孔の起爆秒時と薬量

(a) EDD (Vカット)

試験内容		段 数					
		1	2	3	4	5	6
Va	起爆秒時 (ms)	0	5	10	15	20	25
	薬量 (kg/段)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Vb	起爆秒時 (ms)	0	10	20	30	40	50
	薬量 (kg/段)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Vc	起爆秒時 (ms)	0	15	30	45	60	75
	薬量 (kg/段)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Vd	起爆秒時 (ms)	0	20	40	60	80	100
	薬量 (kg/段)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Vb	起爆秒時 (ms)	0	10	20	30	40	50
	薬量 (kg/段)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

(b) EDD (バーンカット)

試験内容		段 数							
		1	2	3	4	5	6	7	8
B'e	起爆秒時 (ms)	0	100	200	300	400	500	600	700
	薬量 (kg/段)	1.4	1.4	1.4	1.4	2.8	2.8	2.8	2.8
Bb	起爆秒時 (ms)	0	25	50	75	100	125	150	175
	薬量 (kg/段)	1.4	1.4	1.4	1.4	2.8	2.8	2.8	2.8
Bc	起爆秒時 (ms)	0	50	100	150	200	250	300	350
	薬量 (kg/段)	1.4	1.4	1.4	1.4	2.8	2.8	2.8	2.8
Bd	起爆秒時 (ms)	0	75	150	225	300	375	450	525
	薬量 (kg/段)	1.4	1.4	1.4	1.4	2.8	2.8	2.8	2.8
Be	起爆秒時 (ms)	0	100	200	300	400	500	600	700
	薬量 (kg/段)	1.2	1.2	1.2	1.2	2.4	2.4	2.4	2.4

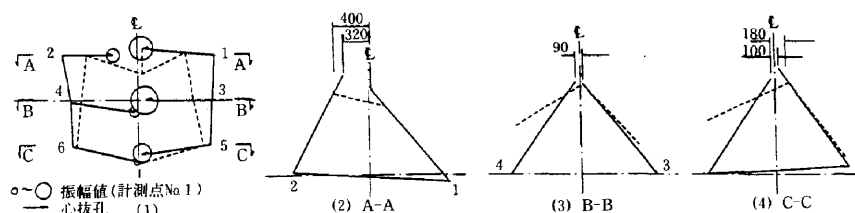


図-4 発破前後の孔測量結果

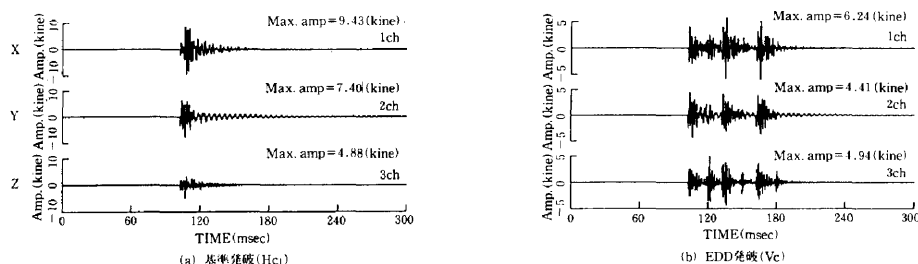


図-5 発破振動波例 (計測点 No.1)

波形の例を示す。図-5の(a)は瞬発雷管による基準発破、(b)は15msの秒時差をもつEDDによる発破の結果である。なお、発破振動波形は、計測点No.1で計測されたx,y,zの3成分波形であり、伝搬距離は(a)が23.0m、(b)が17.6mである。

図-4に示すように、穿孔精度にはばらつきがあるが、15msの秒時差でも十分な心抜きが行われていることが分かる。図-5の両発破を比較すると、基準発破は、EDD発破に比較して、伝搬距離が長いにもかかわらず、振幅値(振動速度)が大きいことがわかる。一方、EDD発破は、各段発毎に平均化された波形となっており、振幅値も小さく抑えられている。図-4(1)の孔別振幅値の大小に示すように、孔別毎に差が生じており、特に奇数段は大きい傾向が読み取れる。振幅値は、発破によるエネルギーの応力波に転化される割合を表わしており、その大きさは孔周辺の破碎過程が表現されていると考えられる。自由面が小さい初段は大きなエネルギーで、自由面が形成される次の段は小さなエネルギーで破碎され、自由面の形成状況に応じて発破によるエネルギーの転化の割合が異なるものと推察される。言い換えると、振幅値の大小の推移が自由面の形成過程を表わしていると考えられる。

図-6に最大振幅値と距離との関係を瞬発雷管とEDDに分けて示す。なお、図中の実線は基準発破、破線はEDD発破によるデータの回帰直線である。両発破とも、伝搬距離が長くなるに従って最大振幅値が小さくなり、EDD発破の方が基準発破に比較して振動が低減されていることが読み取れる。

②孔測量結果

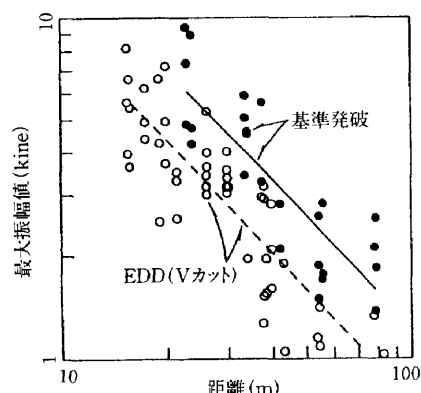


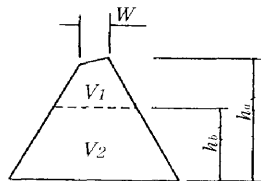
図-6 基準発破とEDD発破の最大振幅値と距離の関係

表-4に発破前後の孔測量結果のまとめを示す。それぞれの断面毎に孔奥穿孔間隔 W 、穿孔深さ h_a と掘進長 h_b の比 h_b/h_a 、および心抜き部の破碎残留率 $V1/V$ を示している。瞬発雷管による基準発破では、 h_b/h_a が0.93~1.0、 $V1/V$ が2%以下と心抜きが確実に実行されている。一方、EDDでは、 h_b/h_a が0.81~0.85、 $V1/V$ が4~18%と基準発破に比較してやや劣っている。しかし、実際の発破では、心助け(心抜き回りの穿孔)によって心抜き破碎も助けられるので、この程度の破碎効果が得られれば実用上は十分であると考えられる。

孔測量の結果、理想的な穿孔位置を大きく外れるものがあり、その誤差が h_b/h_a の結果にも大きく表われている。例えば、孔奥穿孔間隔が50cmを越えると h_b/h_a が0.6~0.7と低い値を示し、20cm以下であれば秒時間隔が大きいにもかかわらず h_b/h_a が0.8以上の値を示している。このことから、Vカットに多段発を適用した場合の心抜きの破碎効果の低下は、穿孔精度を上げることでカバーできるものと考えられる。

表一4 発破前後の孔測量結果のまとめ

	No.	3	4	6	1	5	8
		Vd 20ms	Vc 15ms	Vb 10ms	Vb 10ms	Hcl 瞬発	Hc2 瞬発
A—A断面	破砕残留率 $V1/V$ (%)	8.5	3.9	18.4	7.6	1.6	1.6
	穿孔深さ ha (m)	1.00	1.10	1.00	1.00	1.10	1.10
	掘進長 hb (m)	0.65	0.85	0.80	0.60	1.10	1.10
	hb/ha	0.65	0.77	0.80	0.60	1.00	1.00
	穿孔間隔 W (m)	0.65	0.41	0.52	0.53	0.19	0.38
B—B断面	評価	▲	△	○	▲	◎	◎
	穿孔深さ ha (m)	0.95	1.10	1.10	1.10	1.05	1.18
	掘進長 hb (m)	0.95	1.05	0.80	1.00	1.05	1.08
	hb/ha	1.00	0.95	0.73	0.91	1.00	0.92
	穿孔間隔 W (m)	0.19	0.19	0.71	0.36	0.15	0.36
C—C断面	評価	○	○	△	○	◎	○
	穿孔深さ ha (m)	1.00	1.10	1.15	1.10	1.10	1.10
	掘進長 hb (m)	0.80	0.90	1.00	1.00	1.10	0.98
	hb/ha	0.80	0.82	0.87	0.91	1.00	0.89
	穿孔間隔 W (m)	0.31	0.17	0.43	0.37	0.32	0.19
	評価	○	○	○	○	◎	○
	平均穿孔深さ (m) ①	0.98	1.10	1.08	1.06	1.08	1.13
	平均掘進長 (m) ②	0.80	0.93	0.87	0.87	1.08	1.05
② / ①		0.82	0.85	0.81	0.82	1.00	0.93



$$\text{破砕残留率} = \frac{V1}{V} \times 100 (\%)$$

$V1$: 心抜き部残留体積
 $V2$: 心抜き部体積
 V : 破砕体積 ($=V1+V2$)
 W : 孔奥穿孔間隔
 ha : 穿孔深さ
 hb : 掘進長

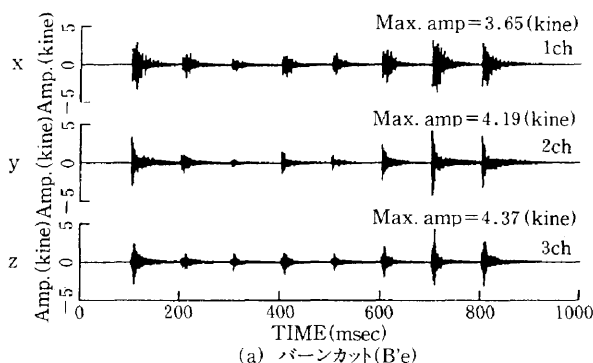
今回、秒時差の違いによる心抜きの破砕効果を検証しようとしたが、穿孔精度による影響が大きく、その差については確認できなかった。しかし、EDD発破による振動抑制の効果は確認されており、今後穿孔技術を向上させることで、より確実な振動抑制が可能と考えられる。

(2) バーンカット工法

①振動測定結果

図一7に秒時差が100msの発破振動波形を示す。発破振動波形は、Vカット工法と同様に計測点No.1で計測されたx,y,zの3成分波形であり、伝搬距離は(a)が40.1m, (b)が63.9mである。

図の(a)は心抜き破砕が確実であったもの、(b)は心抜きができなかったものを示している。すなわち、一孔当



(a) バーンカット(B'e)

りの薬量1.2kg/孔で心抜きができなかった結果が(b)、薬量を1.4kg/孔に変えて再度発破をした結果が(a)である。(a), (b)ともに、各段発の波形が明瞭に分離されており、最大振幅値は薬量や伝搬距離を考慮すると差は小さいが、(a)の減衰性が高いことに特徴がある。心抜きが確実であった(a)の振幅の推移を見ると、初段が大きく2~4段が小さいことが読み取れる。これらの振幅の大小の傾向は他の実験でも同様である。バーンカットは、バーンホールを自由面とした周辺孔が順次起爆し、発破断面に垂直な自由面を順次拡大していく工法である。そのため、Vカット工法の結果で述べたように、各段発での自由面の形成状況が次の段に影響を与え、その状況を振幅値が表わしているものと考えられる。

このように、EDDを使用すれば段数毎の振幅値の分離が良いため、振幅値を参考にした孔別の発破設計の可能性を示唆しているものと考えられる。

②孔測量結果

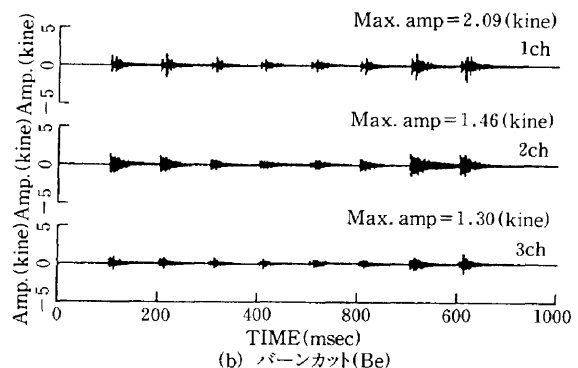
表一5に発破前後の孔測量結果のまとめを示す。それぞれの断面毎に孔奥穿孔間隔差 W 、穿孔深さ ha と掘進長 hb との比 hb/ha 、及び心抜き部の破砕残留率 $V1/V$ を示している。バーンカットは、水平穿孔であるため、Vカット工法ほど穿孔誤差が生じない。そのため、心抜きの破砕状況は、秒時間隔の違いによる差が現われている。秒時間隔が大きいほど、 hb/ha が1.0に近く、 $V1/V$ が小さくなり心抜きの破砕効果が認められる。

§ 5. 実証実験

5-1 実験概要

実証実験では、EDDとDS電気雷管を使用して模擬トンネル掘削を行い、発破後のトンネル周辺地山の余掘りや損傷領域に関するデータを収集し、スミーズプラスティング（以下SBと称する）効果について両者の比較検討を行った。

心抜きはバーンカット工法とし、基礎実験を基に発破

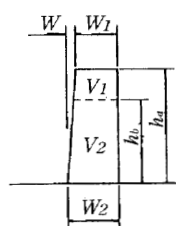


(b) バーンカット(Be)

図一7 発破振動波形例 (計測点No.1)

表-5 バーンカット破碎状況比較表

No.	9	12	11	10
パターン	Be'	Bd	Be	Bb
使用雷管	100ms	75ms	50ms	25ms
破碎残留率 $V1/V$ (%)	6.3	6.8	16.2	20.7
穿孔深さ ha (m)	2.23	2.20	2.26	2.30
掘進長 hb (m)	2.15	2.10	2.0	1.95
hb/ha	0.96	0.95	0.88	0.85
穿孔間隔差 W (m)	-0.04	-0.06	+0.04	+0.09
評価	◎	◎	○	△
穿孔深さ ha (m)	2.26	2.15	2.22	2.25
掘進長 hb (m)	2.18	1.95	1.85	1.65
hb/ha	0.96	0.91	0.83	0.73
穿孔間隔差 W (m)	-0.05	+0.09	+0.03	+0.15
評価	◎	○	△	▲
平均穿孔深さ (m) ①	2.25	2.18	2.24	2.28
平均掘進長 (m) ②	2.18	2.03	1.93	1.80
② / ①	0.97	0.93	0.86	0.79



$$\text{破碎残留率} = \frac{V1}{V} \times 100 (\%)$$

$V1$: 心抜き部残留体積
 $V2$: 心抜き部体積
 V : 破碎体積 ($=V1+V2$)
 W : 穿孔間隔差 ($=W2-W1$)
 $W1$: 孔奥穿孔間隔
 $W2$: 坑壁穿孔間隔
 ha : 穿孔深さ
 hb : 掘進長

パターンを設定した。模擬トンネルは既設A坑道から分岐してB坑道に平行して、計5回の発破によって約12m程掘削した。最外周孔には、SB爆薬を使用し、切羽面に向かってセンターラインより右側の雷管はEDD、左側はDS雷管を使用した。表-6に発破諸元、図-8に発破パターンをそれぞれ示す。

5-2 実証実験によるSB効果

(1) のみ跡率による評価

のみ跡の形状を観察した結果、トンネル横断方向では図-9のように、DS電気雷管は破断予定面に対して余掘り傾向を、EDDは当たり傾向が認められている。なお、当たりと言っても、穿孔間で多少盛り上った形状を示すだけで、SB効果の点では実用上は問題がない傾向である。

これらの傾向を評価するため、各発破掘削後の掘削壁面の写真からのみ跡長を求めた。また、のみ跡率を次式のように定義した。

$$\text{のみ跡率} (\%) = \frac{\text{発破後ののみ跡長}}{\text{穿孔長}} \times 100$$

図-10は測定壁面におけるのみ跡率をランクごとに示したものである。横軸の表示は、EDDと従来のDS電気雷管それぞれの最外周の全孔数を1とし、それに対する比で表わしたものである。EDDを使用した場合、ランクA,Bの比率が高く、DS電気雷管の場合、ランクC,Dの比率が高くなっている。すなわち、EDDはDS電気雷管よりののみ跡率が高く、地山の損傷を低く抑えていることが分かる。

表-6 発破諸元

・断面積	: 8m ²
・孔間隔	: 450mm
・最小抵抗線長	: 450mm
・孔径	: 42mm
・孔数	: 59
・爆薬	: 2号梗
・爆速	: 6000~7000m/s
・火薬原単位	: 5.23kg/m ³
・穿孔長	: 2, 2.5m

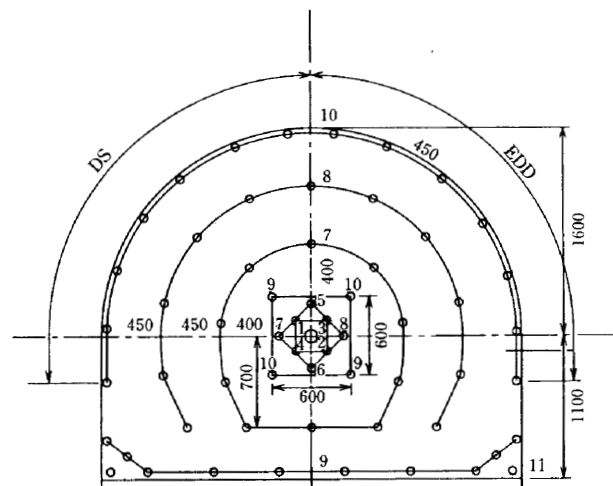


図-8 発破パターン

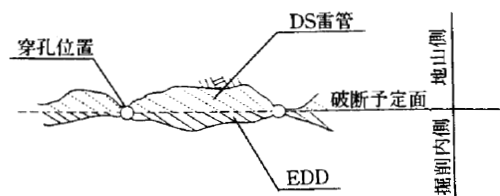
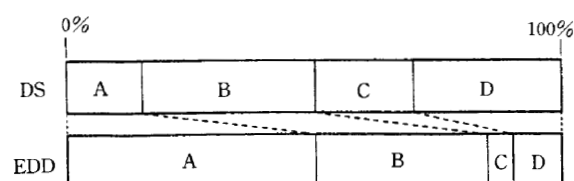


図-9 破断面概略図



A: のみ跡全長の75~100%が観察できる C: のみ跡全長の25~50%が観察できる
 B: のみ跡全長の50~75%が観察できる D: のみ跡全長の0~25%が観察できる

図-10 のみ跡率による比較

(2) 余掘り測定による評価

従来のトンネルの余掘り測定は、トンネル断面測定機などで発破後の掘削形状を把握して設計断面との比較を行なうのが一般的である。しかし、この方法では、設計位置に確実に穿孔されていることを前提にしているため、穿孔誤差を除いた実際の余掘り測定にはならなかった。そこで、穿孔後の最外周孔の三次元的な孔方向を把握するため、光波測量機を用いて測量を行なった。穿孔後、最外周孔に測量棒を挿入して、切羽面から突出した測量

棒の 2 点座標を計測することで穿孔位置を把握した。発破後、掘削進行方向 0.5m 間隔でトンネル断面形状測定を行なった。これによって、より正確な S B 効果の比較が可能となった。図一 11 に孔測量と断面形状測定の比較を示す。

孔方向，孔間隔にバラツキがあり設計断面とは異なった形状となっているが，EDDの方がDS電気雷管より穿孔位置により近い形状で掘削されている。以上の関係を定量的に把握するため，掘削進行距離と掘削量比との関係を図-12に，加重平均した結果を表-7に示す。ここでいう掘削量比とは，任意区間の孔測量と断面測定結果から得られる掘削量の比である。すなわち，1を境に余掘り，当りに分類される（ $1 < \text{掘削比} : \text{余掘り}$ ， $1 > \text{掘削比} : \text{当り}$ ）。図-12，表-7より，EDDを使用した方が掘削量比およびその変動が小さく，DS電気雷管に比較して余掘り改善効果が認められる。

(3) 弾性波探査による評価

トンネル掘削後、地山損傷領域を調査した。第3回および第4回発破区間の側壁に、Line-A（EDD側）とLine-B（DS電気雷管側）の2カ所に測線を設け、弾性波探査を行った。岩石試験結果およびトンネル壁面の観察から、損傷領域は非常に小さいと予想されたので、両測線上に設置するセンサー（受振点）と打撃点の間隔は2～4mに設定した。サンプリング周波数は、最小で20MHzのデジタルストレージスコープに波形を記録した。

図-13は、Line-A、Bの走時曲線と弾性波速度分布の結果である。打撃点から2m地点の走時はLine-Aで約400 μ s、Line-Bでは約800 μ sである。Line-Bの方がAに比べて約2倍の走時であり、岩盤の損傷の度合いはDS電気雷管でSBを行なった方が大きいと思われる。弾性波速度分布は、表層除去法により、Line-A側を2層構造、Line-B側を3層構造と仮定して求めた。その結果、

Line-A, Bとも表層（第1層）は $V_p=1000\sim 2000\text{m/s}$ であるが、Line-B側の方がAに比べて損傷幅が厚く、また、 $V_p=4500\text{m/s}$ の中間層が1m前後の厚さで存在しているという結果が得られた。これから、EDDを用いた方がDS電気雷管を用いた場合よりも損傷領域が少ないと判断された。

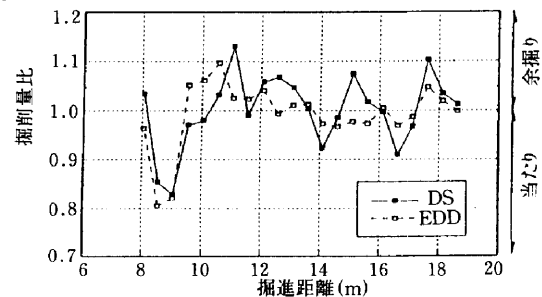
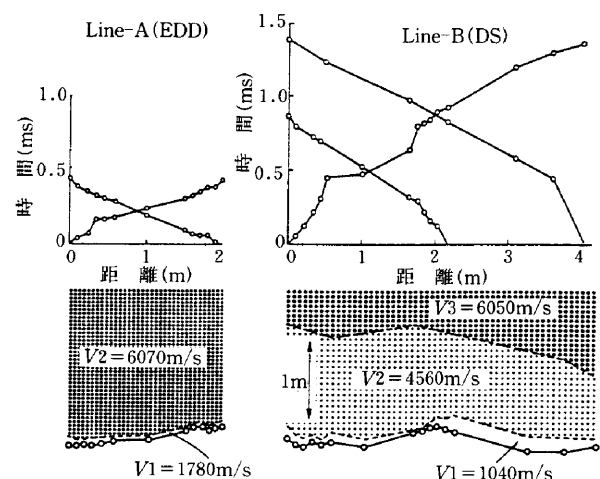


図-12 掘進距離と掘削量比との関係

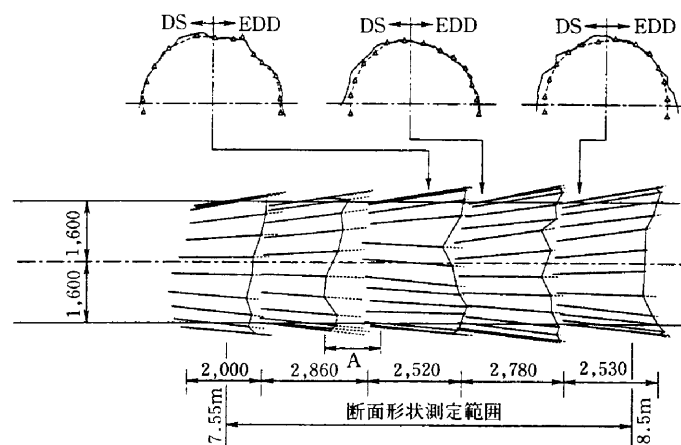
表一7 雷管別掘削量比

	掘削量比の範囲	加重平均値
DS雷管	0.908~1.075	1.010
EDD	0.972~1.048	0.992

※ 距離程12mまでは坑口部の自由面の影響があるので省略している



図一13 走時曲線と弾性波速度分布



図一11 孔測量と断面形状測定結果

(4) ボーリングコアによる評価

トンネルの壁面からLine-A側には2m, B側には3mの深さのボーリングをそれぞれ3本ずつ行った。図-14に示すように, Line-A側では壁面から10cm, Line-B側では壁面から20cmの範囲に発破の衝撃作用によると考えられる亀裂が多数ある領域が認められ, Line-B側ではそれよりも奥の位置に亀裂が存在していた。亀裂によって分離されたコア長の頻度分布を図-15に示す。Line-B側のコアはLine-Aに比べると短く, Line-B側が発破による損傷をより強く受けている可能性が高い。このボーリング調査によって, 深部の岩盤状態は, EDDがDS電気雷管を用いた場合よりも損傷を抑えていると考えられる。

§ 6. まとめ

トンネル掘削の発破工法に, 新しく開発した電子雷管EDD (Electronic Delay Detonator) を適用し, 発破振動抑制とスムーズプラスティング効果に着目した実験を行った。その結果, EDDは, 従来使用されているDS電気雷管に比べて, 振動抑制やスムーズプラスティング効果のあることが認められた。

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) Vカット工法にEDDを使用した多段発破を適用し, 斉発発破との比較を行った結果, 振動速度低減に効果があることが分かった。
- (2) Vカット工法では, 穿孔精度の影響が大きいため, 秒時差間隔による芯抜き効果は明瞭でなかったが, 最大秒時間隔20msまでは芯抜き破碎効果が得られた。
- (3) Vカット, バーンカット工法ともに孔別の振幅値(振動速度)に着目すれば, 孔の破碎状況が把握できることが分かり, 振幅値を参考にした孔別の発破設計の可能性が示唆された。
- (4) EDDを使用の方がDS電気雷管よりものみ跡率が高く, 掘削壁面の損傷を抑えていることが分かった。
- (5) 掘削後断面形状測定を行い, 破断予定面に対する余掘りの比較を行った結果, EDDを使用の方がDS電気雷管よりも余掘りが少なく, 余掘りの低減効果が認められた。
- (6) 坑内弾性波探査を行い表層除去法を適用して損傷領域を求めた結果, EDDを使用することにより損傷領域が小さくなることが分かった。
- (7) 坑道壁面からコアボーリング調査を行った結果, 岩盤

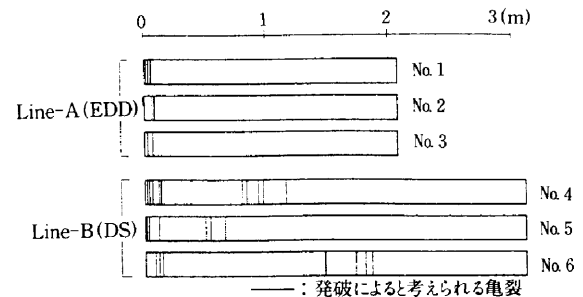


図-14 ボーリングコアの損傷結果

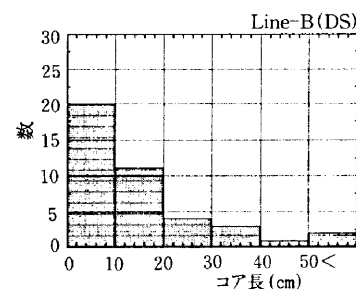
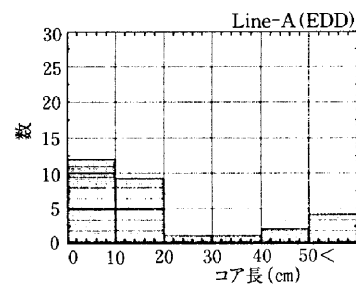


図-15 コア長の頻度分布

の損傷状態は弾性波探査と同様の傾向が得られた。

以上のように, 発破掘削にEDDを適用することの有効性が確認できたが, 今後, 施工単価も含めたコストダウンについて, 実際のトンネルに適用して検証する必要がある。また, この雷管を使用することで, 地山の損傷を抑えることが確認されており, 今後, トンネルの支保の低減にまで踏み込んだ検証を行い, 設計に反映させたいと考えている。

最後に, 本研究について御指導・御尽力を頂いた東北支店, 技術研究所, 土木設計部の関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 山本雅昭, 市川清: EDDによる発破振動・音の予測と軽減, 工業火薬, Vol.49, No.49, pp.367~374, 1988.
- 2) 伊藤一郎, 佐々宏一: 1自由面発破の場合の岩盤内の応力状態について, 日本鉱業会誌, Vol.79, No.898, pp.261~269, 1963.