

スロットとIC雷管を併用する低振動発破工法の開発

須田博幸* 栗田猛志** 塚本耕治***
 稲葉金正*** 古賀成樹**** 萩森健治****

1. まえがき

市街地や重要構造物に近接したところでのトンネル工事では、発破作業に伴う振動や騒音が問題となる場合が多く、環境問題への配慮として低振動・低騒音工法、即ち低公害な発破工法や無発破工法に対するニーズが高くなっている。

また、昨今の公共工事における建設工事費縮減の動向を受け、トンネルの効率的な施工に対する要望も高くなっている。

筆者らは、市街地や既設構造物に近接した硬岩トンネルを低振動・低騒音で掘削する工法（Slot Drilling 工法、「SD工法」と略称）をすでに開発している。この工法は、スロット削孔機と称するドリルでトンネル切羽の外周部および中央部に溝（以下、「スロット」と称す）を形成し自由面を増やすことにより、少ない爆薬量または爆薬を用いなくて岩盤を掘削し、振動・騒音の低減を図る工法である。この工法では、振動規制値がきわめて厳しい条件下では切羽に多数のスロットを形成する必要があるため、切羽での作業に長時間を要し、作業性、経済性の改善が課題となっていた。

一方、火薬メーカーでも発破時の振動・騒音を低減するための対策として、新しい雷管の開発が進められた。その中に、爆薬のエネルギー放出タイミングを精度良くコントロールするために、半導体集積回路を組み込んだ電気的なタイマーにより起爆秒時を制御するIC雷管がある。

筆者らは、このIC雷管（以下、「EDD」と称す）に着目し、スロットとEDDを併用し、双方の特長を活かした発破による低振動・低騒音破砕技術（以下、「SD・EDD発破工法」と略称）を開発した。本工法は、従来の発破併用SD工法に比べ振動・騒音が大幅に低減できると共に、スロットが外周のみで済むためサイクルタイムの短縮も図れ、施工能率の向上とコストダウンが可能となる。

施工中のトンネル現場において本工法の実証実験を行った結果、通常の発破工法に比べて大幅な振動低減が認められ、その有効性を確認した。また、実験結果を踏まえたケーススタディーにより、従来のSD工法と比べ、

施工能率の向上とコストダウンが期待できることを確認した。

本報では、本工法の概要と実証実験の結果およびケーススタディーによる検討結果について報告する。

2. 開発の趣旨と工法の概要

スロットを用いる発破では、スロットが自由面として作用するため少ない爆薬量での発破が可能となり、振動・騒音の低減を図ることができる。また、EDDは起爆精度が良いため、振動波形の分離や干渉を精度良く行うことができる。そこで、両方の特徴を活用することにより、さらに低振動・低騒音でかつ効率的な発破工法の実現が可能であると考え開発を行った。

2.1 スロットを用いる低振動発破の振動波形の特徴

トンネル発破の爆破順序としては、はじめに心抜きを行い、2自由面としてから心抜き周りを順々に払っていくのが通常である。したがって、心抜き発破と払い発破とは自由面数や装薬量等の発破条件が異なる。

一方、スロットを用いる低振動発破工法では、トンネル切羽最外周にスロットを設けることにより、切羽最外周は2自由面となるため、最外周から発破することが可能となる。また、最外周から発破を行うと、各装薬孔における抵抗線一孔間隔を一定にできるため、かかる荷が一定となり、各装薬孔から発せられる振動波形がすべて同様な波形となる（再現性の向上）。

両発破工法における振動波形の違いを比較すると以下の通りである。

図-1は、スロットがある場合における3つの単孔発破波形を示したものである。スロットがある場合には、3波形とも非常に良く似た波形性状を示していることがわかる。一方、図-2はスロットが無い場合における3つの単孔発破波形を示したものである。スロットが無い場合には、ほぼ同じ場所での発破にも関わらず、振幅もばらつきが大きく、また位相の大きな違いも見られることが明らかである。

2.2 EDD (Electronic Delay Detonator)

起爆秒時の制御にICを応用した電気的なタイマーを組み込んだ段発電気雷管図-3であり、特長は以下の通り

*技術開発部 **東北支店土木部 ***技術研究所 ****本社土木部

である。

- i. 起爆秒時差を100ms~8,196msまで、1ms刻みで、任意に設定可能であり、200段階といった高段発が可能である
- ii. 起爆精度は、設定した起爆秒時に対して誤差0.2ms以内と極めて小さいため、確実な制御発破が可能である
- iii. 耐水性、耐静電気性、耐迷走電流性が向上し、高い安全性を実現している

2.3 SD・EDD工法の概要および特徴

前述のように、通常発破では心抜き発破と払い発破とは自由面数や装薬量等の発破条件が異なることから、その振動波形も異なり、波形をコントロールして適切な秒時間隔で重ね合わせて振動低減を図る方法では、期待する効果が得難いと考えられていた。

一方、スロットを用いる低振動発破によれば、トンネル切羽外周部に形成したスロットを自由面として利用し、振動波の再現性を向上させることにより、精度良く発破振動管理が行えるようになり、発破振動の予測精度が向上する。従って、これにEDDを併用すれば、起爆精度が向上するため、波の分離あるいは干渉を利用する以下の2種類の発破工法が確実に進め、超低振動発破が可能となる。

a. 波形のピークを分離する方法（以下、「A-MUP工法」と称す）

トンネル発破では通常、複数孔を同時に起爆するので、各孔から発生する単発波形が重なり合って大きな振幅になる。そこで、発破振動および低周波音の波形のピークを完全分離させるようにEDDの秒時を設定する手法がA-MUP工法である。図-4は以上のことを模式的に示したもので、各装薬孔からの単発波形が分離されていることがわかる。すなわち、本工法では単発波形を分離できる秒時差が軽減に最適な秒時差となる。

b. 波形の干渉による方法（以下、「A-BIOS工法」と称す）

発破振動および低周波音の波形が波動干渉するようにEDDの秒時を設定する手法がA-BIOS工法である。図-5は、波動の干渉原理を説明したものである。1は1孔目からの振動、2は、2孔目からの振動を示したものである。これらの2つの振動波は、お互いの振動の山と谷がうまく重なり合うように2孔目を爆発させている。これによって、4のように最初の山を残して、それ以降の山と谷は、打ち消しあって消滅する。

また、本工法は、適用場面に応じて波の分離と干渉を組み合わせることにより、効率的な発破設計が可能である。

2.4 実施手順

SD・EDD発破工法の実施手順を図-6に示す。

a. 試験発破

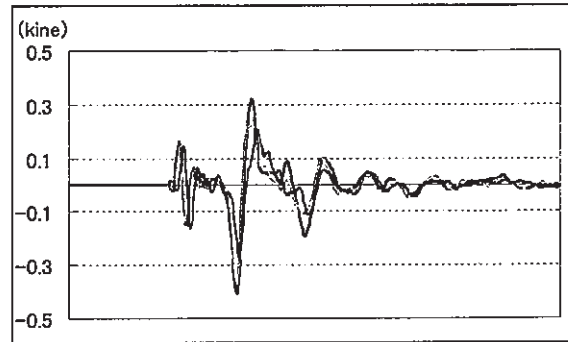


図-1 スロットがある場合の3つの単発波形

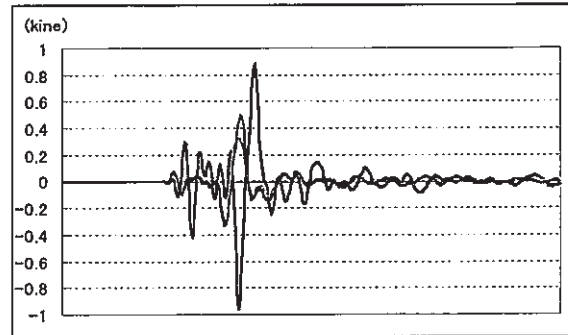


図-2 スロットが無い場合の3つの単発波形

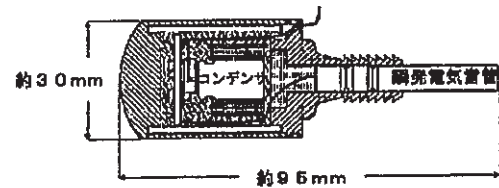


図-3 トンネル発破用EDD Type-G

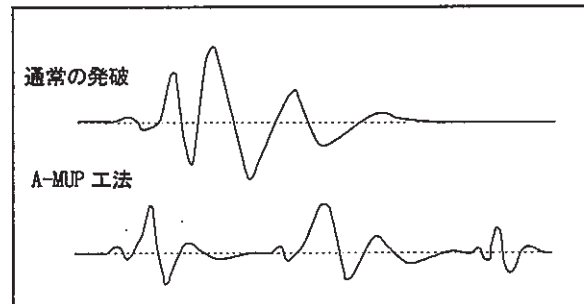


図-4 A-MUP工法の概念説明図

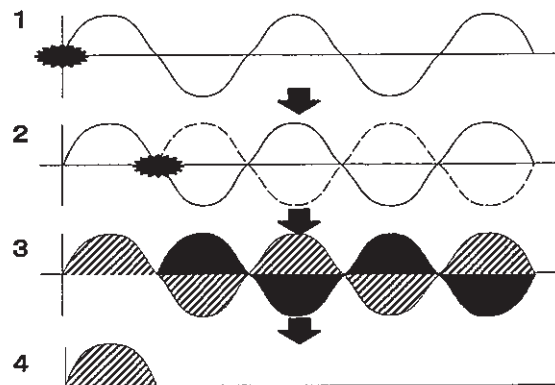


図-5 A-BIOS工法の概念説明

SD・EDD発破工法での基本である1孔の発破から発生する基本波形の性状を調べるために、試験発破を行い1孔発破から発生する単発波形を測定する。

b. 秒時解析、EDD製造

試験発破で測定された単発波形を用い、これをある時間差で複数の波をコンピュータ上で重ね合わせ、波の振幅が最少となるような時間差を求める。または、複数の波が重ならない時間差を求める。

このような解析結果に従って、トンネル断面等の施工条件を勘案して発破パターンを決定し、設定した時間差（「起爆秒時」と称す）のEDDを工場にて製造する。

c. 本施工

装薬孔の配置は、外周スロットを自由面として利用する外周スロット発破を採用する。

発破については、発破振動・低周波音の計測を随時行い、計測結果に従って発破設計をチェックし、見直しの要否を検討しながら同一フローで次発破を行う。

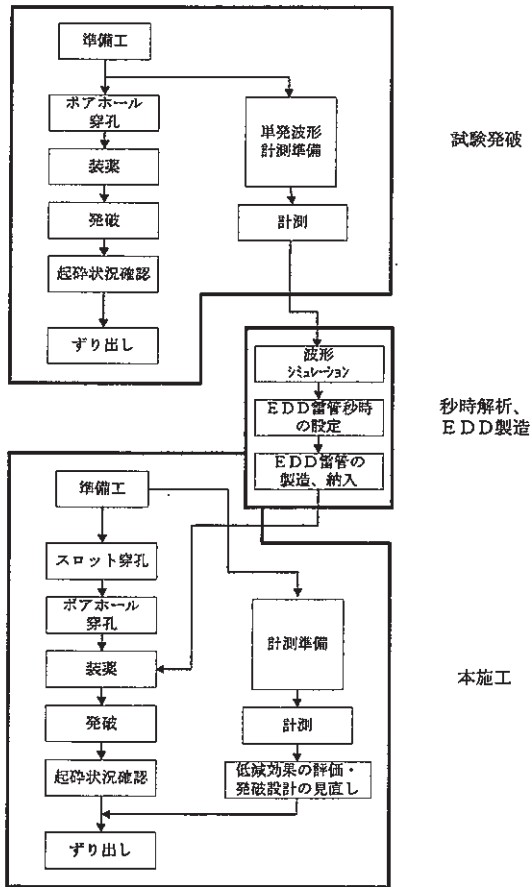


図-6 SD・EDD発破工法の作業フロー

3. 実証実験

3.1 実験概要

トンネル発破におけるスロットとEDDを併用した波の分離および干渉手法による振動低減方法の有効性確認

を目的とした試験施工を施工中のトンネル坑内で実施した。

実施区間の岩質は、いわゆる混在岩で、塩基性凝灰岩と泥岩基質混在岩が分布する中硬岩（C I級）である。

3.2 実験方法、実験ケース

実験は事前に単孔発破波形を計測し、振動波の鉛直方向成分の低減を目的とした波の重ね合わせシミュレーションを行った。その結果、振動低減最適起爆秒時間隔は2msと15msとなった。また、波形分離方式では、振動波形が完全に分離できる起爆秒時差で120msのEDDを使用することとした。

発破は振動低減効果を評価するため、通常のDS雷管による現行発破（以下、「通常発破」と称す）を2発破、スロットとDS雷管を併用した発破（以下、「SD発破」と称す）を1発破、スロットとEDDを併用した発破（以下、「SD+EDD発破」と称す）を6発破、合計6切羽で9発破を実施した。

なお、SD+EDD発破ではセンター部分のスロットと外周部のスロットで区切られた左右の切羽をそれぞれ一回分の発破と考え、半断面づつ発破を行った。実験ケースを表-1に示す。

表-1 実験ケース一覧

発破No.	発破種類	掘削断面	総孔数	スロット長さ (m)	装薬量 (kg/孔)	せん孔数 (孔/m ²)
1-1	通常発破	全断面	73	-	0.6~0.8	1.801
1-2	通常発破	全断面	75	-	0.6~0.8	1.850
2	SD発破	全断面	54	23.0	0.2~0.8	1.332
3-1	SD+EDD発破120msec	右半断面	23	23.0	0.4~0.6	1.135
3-2	SD+EDD発破120msec	左半断面	23	23.0	0.4~0.6	1.135
4-1	SD+EDD発破 2msec	右半断面	23	23.0	0.4~0.6	1.135
4-2	SD+EDD発破 2msec	左半断面	23	23.0	0.4~0.6	1.135
5-1	SD+EDD発破 15msec	右半断面	23	23.0	0.4~0.6	1.135
5-2	SD+EDD発破 15msec	左半断面	23	23.0	0.4~0.6	1.135

全発破共通の試験条件:
掘削長さ:120cm、掘削径:130cm、掘削深:45mm、SD孔径:65mm
スロット形成場所:壁面部を除く最外周のみ

3.3 発破パターン

図-7にSD+EDD発破パターンの実施例を示す。発破パターンの特徴は、波の重ね合わせは発破孔の列毎に行い、列と列の間は波が分離するよう十分な秒時間隔（120ms）をとるとともに、最外周列から内側へ順に払っていくことである。

3.4 実験結果

発破振動の計測結果を表-2に示す。振動低減効果については、通常発破の振動速度のピーク値を基準値とし、各実験ケースの振動速度のピーク値との比率で表している。

SD+EDD発破のうちEDD秒時が15msの波形干渉による発破では、振動速度のピーク値は通常発破に比べ、爆源からの距離25m地点で最大94%、40m地点で最大78%、70m地点で最大62%それぞれ低減することができた。このように実際のトンネル発破でもほぼシミュレーション通りの振動低減効果が得られ、トンネル発破

においてもスロットの効果を利用することで波の干渉による振動低減の可能性が明らかとなった。

つぎに、SD+EDD発破の振動波形、振動レベル、パワースペクトルを比較する。図-8はEDD秒時が120ms、2ms、15msの発破で爆源から40m離れた測点での振動波形、振動レベル、パワースペクトルである。

発破諸元			
①地山区分	: 中硬岩CI (凝灰岩) 判断面		
②断面積 m^2	: 20.268		
③掘削長 m	: 1.20		
④穿孔長 m	: 1.30		
⑤掘削量 m^3	: 24.322		
⑥ m^3 当り爆薬量 kg/m^3	: 0.411		
⑦ m^3 当り穿孔数孔/ m^3	: 1.135		
⑧使用爆薬	親ダイ: SUNVEX-エ/キ (30f×200g×270L) 増ダイ: SUNVEX-エ/キ (30f×200g×270L) 雷管: 電子遅延電気雷管 (EDD)		
全断面			
段数	孔数	装薬量	
		kg/孔	kg/段
#1-1~#3-5	19	0.40	7.60
#4-1~#4-4	4	0.60	2.40
合計	23		10.0

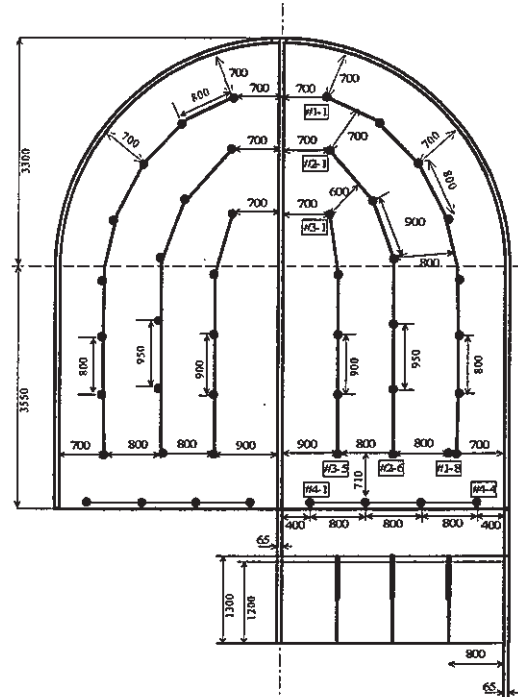


図-7 実施発破パターン例

表-2 振動測定結果 振動速度 ($\times 10^{-2}m/s$) のピーク値及び振動低減効果

発破種	爆源から25m		爆源から40m		爆源から70m	
	鉛直方向成分	低減効果	鉛直方向成分	低減効果	鉛直方向成分	低減効果
通常発破	4.729	評価基準	1.644	評価基準	0.541	評価基準
SD-EDD発破120ms (波形分離)	0.437	91%低減	0.415	75%低減	0.217	60%低減
SD-EDD発破 2ms (波形干渉)	0.388	92%低減	0.409	75%低減	0.250	54%低減
SD-EDD発破 15ms (波形干渉)	0.274	94%低減	0.359	78%低減	0.203	62%低減

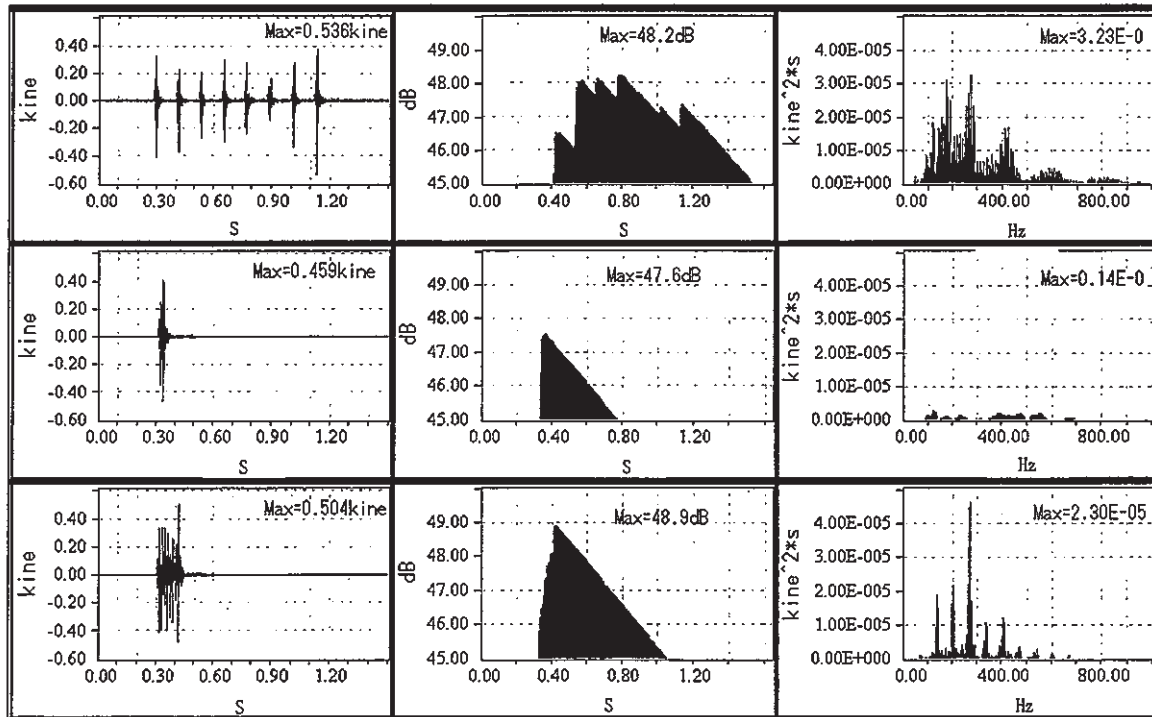


図-8 振動波形・振動レベル・パワースペクトルの比較 (上: EDD120ms、中: EDD 2ms、下: EDD15ms)

図-8から、EDD2msは振動速度ではEDD120ms、15msに対して5~10%軽減率が高いだけであるが、振動レベルで見るとEDD120msecに対しては極端に振動の継続時間が短く、最大パワースペクトルで見るとEDD120ms、15msに対して1/20以下となっている。

3.5 発破振動の予測精度

SD・EDD発破工法におけるシミュレーションによる予測波形と実測波形の比較の一例を図-9に示す。

図-9は、EDDの起爆秒時差2msで振動波を干渉させた場合のものである。

シミュレーション波形と実測波形は、よく一致しており、予測精度が高いレベルにあることが確認できる。

3.6 発破性能

SD・EDD発破工法による発破は、通常発破と同様に良好な破碎状況である。また、外周部のスロットの効果によりトンネル壁面は平滑に仕上がり、目視観察では周辺岩盤に与える影響は極めて少ないと評価できた。破碎前の切羽状況を写真-1に、破碎後の切羽状況を写真-2、3に示す。

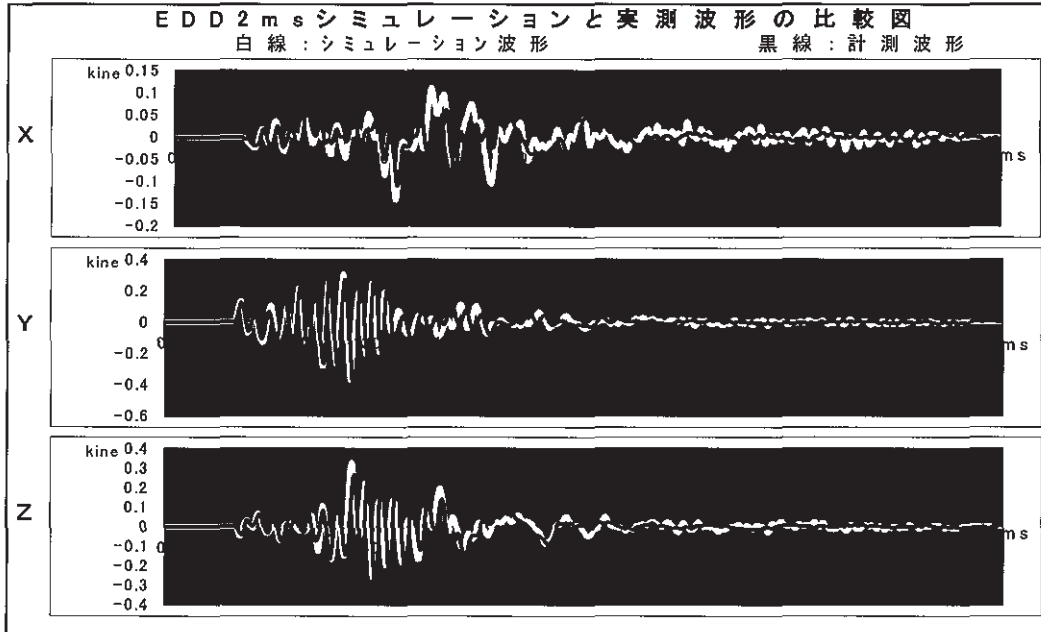


図-9 シミュレーション波形と実測波形の比較 (EDD2msで波動干渉)



写真-1 破碎前の切羽状況

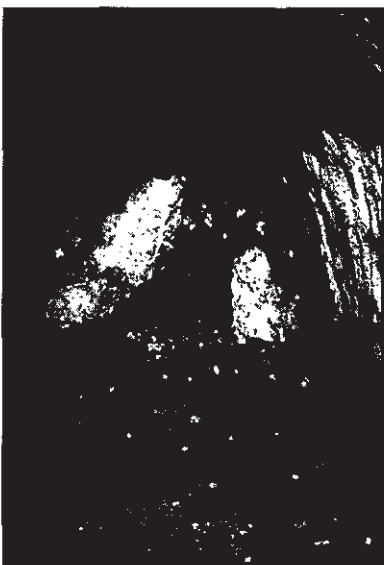


写真-2 破碎後の切羽状況

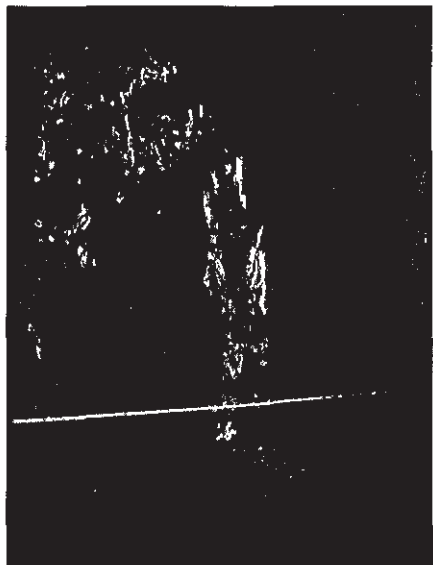


写真-3 破碎後の切羽・坑壁状況

4. ケーススタディー

ケーススタディーの対象としたTトンネルは、トンネル途中で稼働中の発電所の導水路トンネルと最短距離が27mで交差する。振動規制値は0.2cm/sと設定された。このため、振動規制対策として、振動規制区間(約200m)をSD併用発破工法およびSD無発破工法により施工された。

今回の実験結果を基にTトンネルの諸条件を考慮して検討した結果、全規制区間にSD・EDD発破工法が適用可能であると想定された。

そこで、Tトンネルで実際に採用された発破工法とここで想定したSD・EDD発破工法について、施工能率および経済性についてそれぞれの実績値と想定値とを比較検討した。

4.1 施工能率の検討

サイクルタイムについて、実績とSD・EDD発破工法想定時の試算との施工パターン区間別の比較を図-10に示す。

スロット削孔時間の大幅な減少により、トータルで約30%の工期短縮を見込めることがわかる。

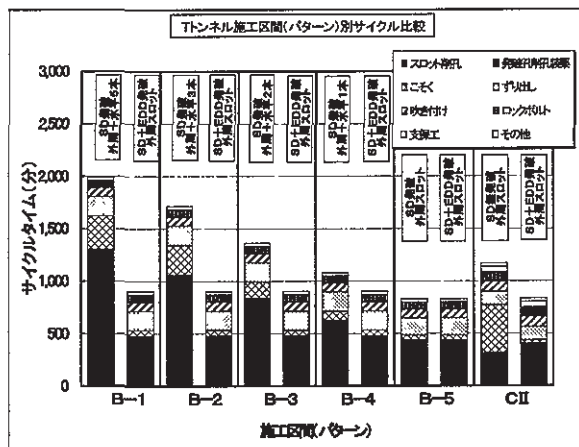


図-10 施工区間別サイクルタイム比較

4.2 経済性の検討

経済性の検討に際しては、比較基準を統一するため建設省土木工事積算基準及びSD工法協会積算基準に従ってそれぞれの掘削直接工事費を試算した。試算結果を表-3に、その比較結果を図-11に示す。図-11では、B-5パターンのSD+EDD発破の試算結果を基準として、その対比率で表している。

図-11によれば、B-5パターンではSD発破が有利であるが、その他のB-1、2、3、4パターンおよびCIIパターンではSD+EDD発破が有利となる。

各発破パターンの掘削単価に掘削数量を乗じて振動規制区間延長全体の掘削工事費を試算した結果、SD+EDD発破によれば直接工事費で約30%コスト低減でき

ることが推定された。

表-3 直接工事費の比較

施工区間	施工パターン	発破種	単価比較(%)	効果(%)
B-1	B-1	SD(外周+5本)発破	216%	116%
	SD+EDD	SD(外周のみ)+EDD発破	98%	-2%
B-2	B-2	SD(外周+3本)発破	175%	75%
	SD+EDD	SD(外周のみ)+EDD発破	98%	-2%
B-3	B-3	SD(外周+2本)発破	138%	38%
	SD+EDD	SD(外周のみ)+EDD発破	98%	-2%
B-4	B-4	SD(外周+1本)発破	109%	9%
	SD+EDD	SD(外周のみ)+EDD発破	98%	-2%
B-5	B-5	SD(外周のみ)発破	91%	-9%
	SD+EDD	SD(外周のみ)+EDD発破	100%(基準)	0%
CII	CII無発破	SD(外周のみ)+油圧ブレーカ掘削	148%	48%
	SD+EDD	SD(外周のみ)+EDD発破	134%	34%

(B-5区間のSD+EDD発破試算を基準)

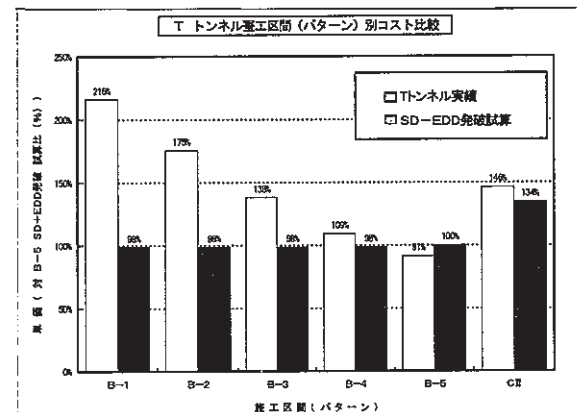


図-11 直接工事費の比較

(B-5区間のSD+EDD発破試算を基準)

5. あとがき

トンネル掘削において低振動・低騒音で効率のよい発破掘削を実現することを目的としてSD・EDD発破工法を開発した。

現場実証実験を行った結果、本工法の振動低減効果の有効性を確認することができた。また、ケーススタディーの結果、サイクルタイムおよび掘削費の低減も可能であることがわかった。

今後、振動規制の厳しい実際のトンネル工事に適用し振動低減効果、施工能率、掘削費に関する詳細なデータを蓄積し、本工法の普及を進めたい。

なお、本工法は、旭化成工業(株)との共同開発技術である。SD・EDD発破工法の開発にあたっては、関係者の方々から貴重なご意見とご協力を頂いた。この紙面を借りて感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) SD工法協会、「技術資料」
- 2) SD工法協会、「積算資料」
- 3) 栗田猛志、須田博幸ほか、「SDとEDDを用いたトンネル発破の振動・騒音軽減に関する研究」、火薬学会秋期研究発表会、1999.10、pp.77~8