



スムーズブラスティングに電子遅延式雷管を用いた場合の 損傷領域に関する実験的研究

田中義晴*, 平田篤夫*, 山本雅昭**, 松永博文**

近年、トンネル発破掘削工事において、なめらかな掘削面を形成し、かつ、岩盤の損傷が小さいスムーズブラスティング（以下SBと略す）が多く行われている。しかし、現状は必ずしもSBが効率よく実施されているとは言い難い。SBの成否を支配する要素の一つとして雷管の起爆秒時精度が考えられる。SBに用いる雷管は起爆秒時精度が高いものが望ましいが、従来の延時薬雷管は起爆秒時精度が低いいため、SBを所期の目的どおりに達成することが困難である。

我々は、起爆秒時精度の高い電子遅延式雷管（Electronic Delay Detonater:EDD）とDS電気雷管をそれぞれSBに適用したトンネル掘削実験を行った。周囲岩盤の損傷状態は、トンネル掘削壁面の平滑度の観察、および、屈折法による坑内弾性波探査と壁面からのボーリングによって調査した。

その結果、起爆秒時精度の高い雷管をSBに用いると掘削壁面が平滑に形成され、さらに、岩盤内部の損傷領域が従来より大幅に低減できることが明らかになった。

1. 緒 言

近年、トンネルの構築法としてNATMが採用されるようになってから、なめらかな掘削面を形成し、かつ、岩盤の損傷をできるだけ小さくすることがトンネルの力学的な安定性を高めるために有効であるとして、スムーズブラスティング（以下SBと略す）が多用されてきている。SBは、トンネルの構造物としての安定性を向上させ、ロックボルト、吹付コンクリートなどの支保を軽減し、さらに、余堀り、当たりを低減するために施工の経済性を向上させる。しかし、従来のSBは、個々の現場において試行錯誤的に行われており、本来SBを行うことにより望まれる効果が十分に得られていないのが現状である。

SBとは、装薬孔内に爆薬を低密度で充填し、爆薬

1994年11月30日受理

*西松建設(株)技術研究所

〒242 神奈川県大和市下鶴間2570-4

TEL 0462-75-1135

FAX 0462-75-6796

**旭化成工業(株)化薬販売第一部

〒100 千代田区内幸町1-1-1

インベリアルタワー16階

TEL 03-3507-7812

FAX 03-3507-2670

の爆轟衝撃力、爆発ガスの膨張力の相互作用により特定の方向の岩盤のみを破砕する発破法である。衝撃力によって発生させる亀裂はできるだけ予定の破砕方向に分布させることが必要である。もし、この亀裂が任意の方向に発生すれば、流体圧力であるガス圧の作用方向は制御することが困難であるので、予定の掘削面が正確に形成できなくなる。特に、必要以上の爆薬を使用して過度の爆轟衝撃力が岩盤に作用した場合には、壁面から岩盤内の相当に深い部分まで損傷を受けた領域が生じ、岩盤の力学的性質が低下するので、構造物の長・短期安定性の低下をまねく。

地山の損傷や円滑壁面の形成に対して影響を与える要因は、爆薬の種類と使用量、雷管の起爆秒時精度、装薬孔間長、最小抵抗線長、デカップリング係数、削孔精度などが多い。雷管の起爆秒時精度については、出来る限り起爆秒時のばらつきが少ないものが爆轟衝撃波の干渉効果を高めるうえで好ましいとされていたが、これを実現できる雷管を延時薬燃焼方式で達成することは困難であった。特に、従来SBに用いられてきたものは、延時薬雷管の中でも後段(8~15段)であり、起爆秒時のばらつきが大きいと報告されている¹⁾。そこで、筆者らは、SBに起爆秒時精度の高い電子

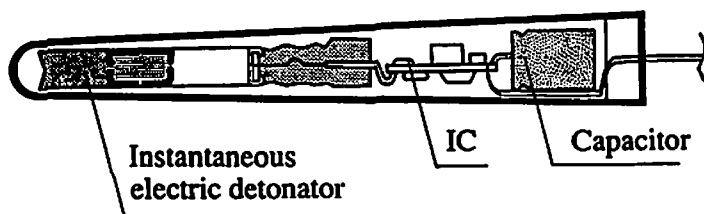


Fig. 1 The cross-sectional view of Electronic Delay Detonator.

Table 1 Result of measuring blasting time after Miyaji et al.¹⁾

Stage	Nominal time (msec)	Average time (msec)	Standard Deviation (msec)	Number of data
2	250	251	21	78
3	500	539	41	82
4	750	803	41	83
5	1000	1055	47	81
6	1250	1340	54	80
7	1500	1615	80	73
8	1750	1882	68	75
9	2000	2219	78	79
10	2300	2503	116	70
11	2700	2892	114	76
12	3100	3349	117	78
13	3500	3735	122	68
14	4000	4164	153	60
15	4500	4717	162	65

遅延式雷管 (Electronic Delay Detonator: EDD)²⁾ と、DS電気雷管 (Deci Second Detonator: DSD) を使用したトンネル掘削実験を行って、起爆秒時精度の違いによるSBの効果を調査した。調査の方法は、トンネル壁面の観察、周囲岩盤における屈折法弾性波探査およびボーリングコアによる損傷領域の調査である。

2. 電子遅延式雷管とDS電気雷管の起爆秒時精度

電子遅延式雷管は、Fig. 1に示すように電気エネルギー蓄積コンデンサー、ICタイマーと瞬発電気雷管から構成され、1ms刻みで起爆秒時を設定でき、設定した起爆秒時に対して標準偏差0.2ms以内の誤差で起爆する従来の電気雷管に比べて精度の高いものである。従来用いられているDS電気雷管の起爆秒時測定結果はTable 1に示すようである¹⁾。トンネル発破で一般に使用されている10段目程度の電気雷管では100msほどの起爆秒時のばらつきがあり、このばらつきの大きさはSBを行う場合無視できない。

3. 原位置状況および実験概要

実験現場は、Fig. 2に示すような岩手県釜石鉱山の標高550mの坑口より約2.0km地点の蟹岳花崗閃緑岩

帯にあり、土被りは約430mである。岩盤は、細粒花崗岩の硬質岩盤から構成され、亀裂は存在しているが、亀裂観察を行った測線の1mの間に2本程度である。トンネル掘削を開始する前に、A坑道壁面上の12の○印地点をハンマーで打撃し、その振動をB坑道壁面上の5つの□印地点に設置した振動計で受振した。その初動の到達時間から求まる弾性波速度は、いずれの測線においても約 $V_p = 6.0 \text{ km/s}$ となった。よって、現場を構成する岩盤は、比較的均一で異方性のない岩盤であると考えられる。また、現場から採取したボーリングコアより岩石供試体を作成し岩石試験を行った結果、Table 2に示すような物性値が得られた。トンネル掘削後の岩盤表面からは湧水は認められなかった。現場周辺は水が豊富にあるので掘削領域に水の供給源があって、潜在亀裂が開いていれば当然に湧水があるはずであるから、潜在亀裂は閉じている可能性が高い。以上のことから、実験現場は硬質な岩盤から構成され、亀裂は存在するものの密着していると思われる。

トンネルは、Fig. 2中に示す発破パターンおよびTable 3に示す発破設計で、A坑道壁面からB坑道に

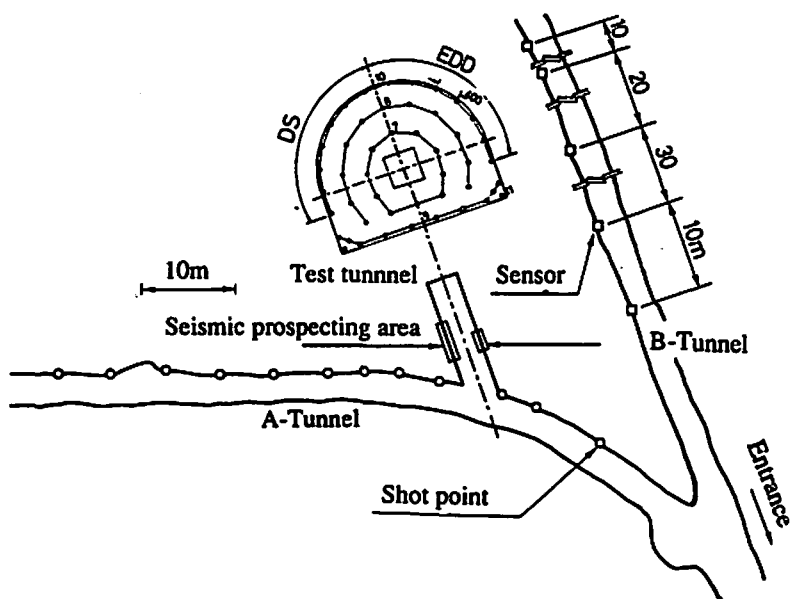


Fig. 2 The layout of test site in Kamaishi mine and drillhole pattern.

Table 2 Rock sample analysis

Density (g / cm ³)	2.66
Uniaxial compressive strength (MPa)	300
Tensile strength by radial compression test (MPa)	12
Young's modulus (GPa)	73
Poisson's ratio	0.24
P wave velocity (m/s)	5800 ± 100

Table 3 Blasting characteristic

Tunnel cross-section (m ²)	8.0
Borehole spacing (mm)	450
Borehole burden (mm)	450
Borehole diameter (mm)	42
Number of borehole	59
Explosive	SUNVEX-Enoki
Detonation velocity (m / s)	5800
Ratio of explosive (kg / m ³)	5.23
Advance per round (m)	2 or 2.5

Table 4 SB characteristic

SB explosive	SUNVEX-400
Detonation velocity (m / s)	3000
Explosive diameter (mm)	20
Borehole diameter (mm)	42
Decoupling coefficient	2.1

対してほぼ平行に掘削された。計5回の発破で延長12mが掘削された。1回の発破で掘削した長さは2.0~2.5mである。なお、心抜きにはパーンカット工法を採用し、最外周孔にはSB爆薬を使用した。SBの仕様は

Table 4のとおりである。発破掘削のうち、最外周孔のSB発破は孔径、孔間隔、孔長、爆薬量および爆薬種類などの発破条件を同一にして、雷管のみを従来のDS電気雷管および電子遅延式雷管をそれぞれ使用した。Fig. 3に示すように、切羽に向かって右側の最外周孔には遅延時間を2300msに設定した電子遅延式雷管を、左側には標準遅延時間2300msを有するDS電気雷管をそれぞれ使用した。また、いずれも孔尻に親ダイを挿入する逆起爆法を採用した。

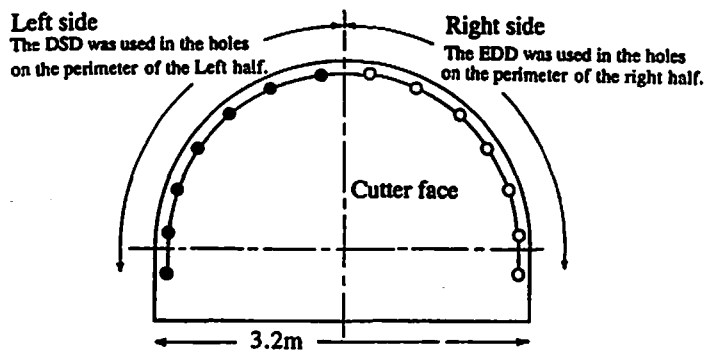


Fig. 3 The arrangement of detonator used on the perimeter holes.

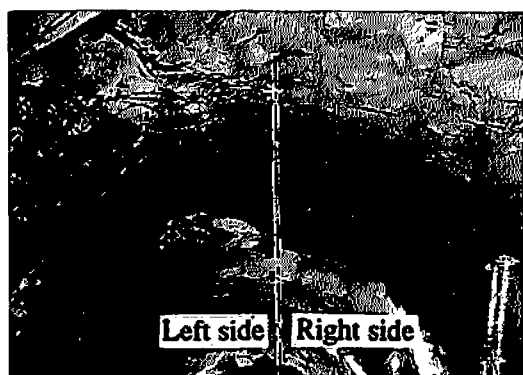


Photo 1 The borehole tracks on the remaining rock surface after the excavation.

4. トンネル壁面の平滑度の観察

発破掘削が終了したトンネル壁面をPhoto. 1に示す。写真中に示すように、SBを行ったトンネル壁面を見ると、右側の方が左側よりのみ跡が明瞭に確認できる。そこで、計5回の発破区間における各最外周孔のみ跡長を計測した。次に、トンネル壁面の平滑度を評価する指標としてのみ跡率を考えた。のみ跡率は次式のように定義し、Table 5に示す判定基準に従って、トンネルの右側と左側に

$$\text{のみ跡率 (\%)} = \frac{\text{発破後に観察できるのみ跡長}}{\text{穿孔長}} \times 100$$

ついてそれぞれランク分けをした結果がFig. 4である。トンネルの右側と左側の平滑度の状況は、のみ跡率とTable 5の判定基準に従って、右側と左側のそれぞれの全最外周孔数に対する各のみ跡ランクに相当する孔数の百分率で表わされている。これより、右側はランクA, Bの比率が高く、左側はランクC, Dの比率が高くなっている。すなわち、右側の電子遅延式雷管を使用した方が、のみ跡が明瞭に残り、SBによる

Table 5 Criterion of borehole track ratio

Rank	Criterion
Rank-A	Borehole track ratio is 75~100%
Rank-B	Borehole track ratio is 50~75%
Rank-C	Borehole track ratio is 25~50%
Rank-D	Borehole track ratio is 0~25%

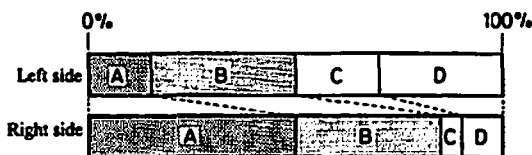


Fig. 4 The estimation of Smoothness on the excavated rock surface by the borehole track ratio.

効果の一つである平滑度の高い掘削面の形成が可能になったものと思われる。この結果、実施工においては、掘削予定線に対する余堀りおよび当たりといった掘削精度の改善が期待できる。

5. 損傷領域の調査

5.1 坑内弾性波探査

トンネル掘削後、左側・右側の岩壁内部の発破による損傷領域の広がりを調査した。掘削全長のほぼ中間付近の側壁において、右側と左側の2ヶ所にトンネル軸方向に沿って測線を設け、屈折法による弾性波探査(P波)を行った。両測線上の受振点とショットポイントはFig. 5のように配置した。受振点の間隔は最小で約10cmであり、サンプリング周波数が20MHzのデジタルストレージスコープに波形を記録して、表層の損傷領域が精度よく探査できるように配慮した。その波形より各受振点における初動の到達時間を読みとった。

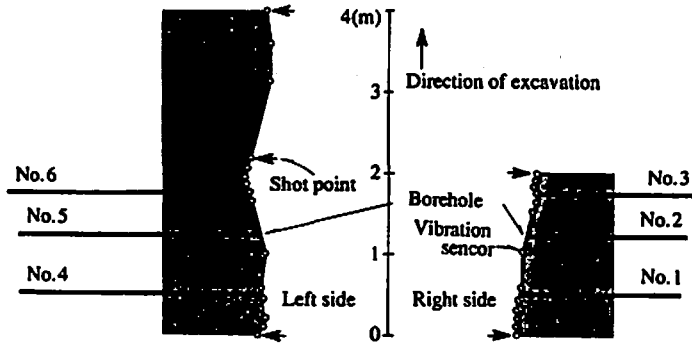


Fig. 5 The location of boreholes, vibration sensors and shot points for in-situ seismic prospecting.

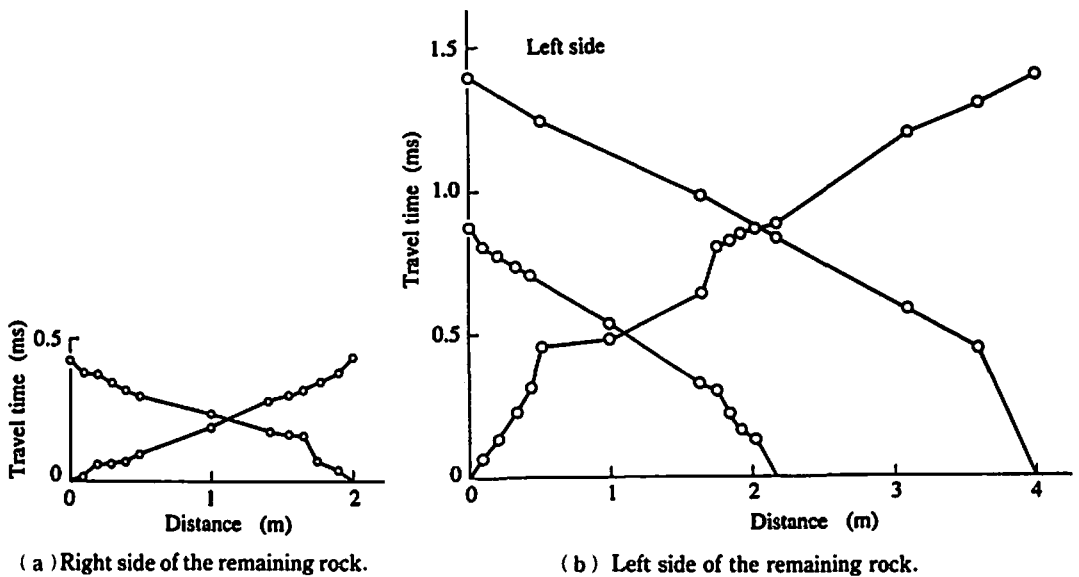


Fig. 6 The travel time curve in the seismic prospecting

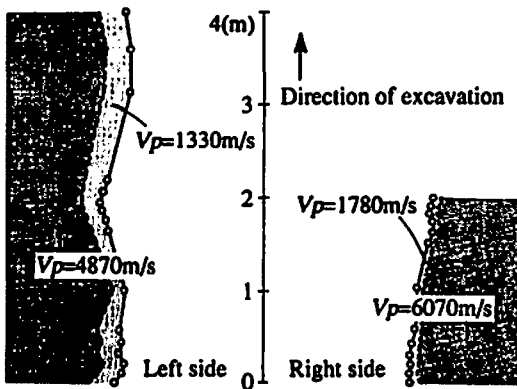


Fig. 7 The wave velocity distributions obtained by method of difference used P-wave velocity.

Fig. 6 (a) および (b) は受振点の測線方向の距離と初動の走時との関係である。両図より、打撃点

から 2 m 地点の走時が右側では約 $400\mu\text{s}$ 、左側では約 $800\mu\text{s}$ である。左側の方が右側に比べて波動が同一距離を伝搬するのに約 2 倍の時間がかかっている。3. で述べたように対象岩盤は均質であり、左側の方が右側に比べて掘削前から劣化していたとは考え難い。したがって、左側の方が右側より発破掘削によって、損傷を受けた度合いが大きいものと思われる。

損傷領域が掘削壁面に対して層構造をなし、かつ、岩盤表面から奥になるにしたがい、P 波伝播速度 (V_p) が大きくなると仮定すると、表層除去法 (はぎとり法)²⁾ が適用できる。その結果は、Fig. 7 に示すようである。なお、左右両側とも岩盤は 2 層構造であると仮定して計算した。Fig. 7 から、右側、左側ともに表層 (第 1 層) は $V_p=1.0\sim 2.0\text{km/s}$ の大きな損傷を受けた層が存在し、右側が約 10cm であるのに対し、左側が約 30cm と損傷幅が厚い。そして、第 2 層は左右

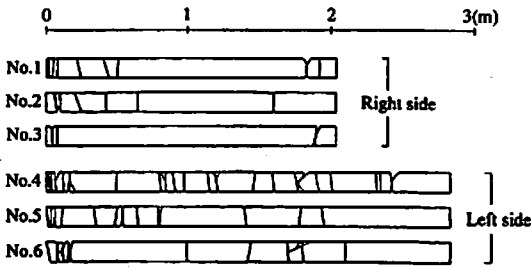


Fig. 8 Location of breaking face in boring cores.

それぞれ $V_p=4.9\text{km/s}$ および 6.0km/s である。第2層については左側が右側に比べて V_p が小さい。発破前の状態では第2層の領域は左側も $V_p=6.0\text{km/s}$ であったと考えられるが、第1層ほどには発破による損傷の程度が大きくないものの、ある程度は損傷を受けていると言える。よって、表層除去法からは、起爆秒時精度の高い電子遅延式雷管を使用した方がDS電気雷管を使用した場合より岩盤の損傷領域が低減されていると判断できる。

5.2 ボーリングコアの観察

Fig. 5に示すように、坑内弾性波探査を行った範囲においてトンネル壁面から水平に、右側には2m、左側には3mの深さのコアボーリングをそれぞれ3本ずつ実施した。Fig. 8にそれぞれのコアのスケッチを示す。破断面を1つずつ観察した結果、発破により破断したものとボーリングの際に破断したものの判別や、潜在的に存在した亀裂が掘削前から開口していたのか掘削後に開口したのかの判別が非常に困難であった。よって、Fig. 8にはボーリングの作業上人為的に破断させたものを除く全ての要因によるものを表示した。トンネル壁面から左側および右側ではいずれも壁面から10~20cmの範囲に発破の衝撃作用によると考えられる破断面が集中する領域が認められる。また、左側では右側と比較してそれより奥の位置にも破断面が多数存在している。掘削前から、左側の岩盤の方が右側に比べて劣化していたとは考え難く、発破掘削をしたことにより左側の岩盤の方が大きな損傷を受けたものと考えられる。以上のことから、ボーリングコアの観察によっても、起爆秒時の精度の高い電子遅延式雷管をSBに適用することで、岩盤の損傷が低減できると考えられる。

コアの破断面の分布状況は、5.1で述べた坑内弾性波試験の結果と調和的である。また、3.で述べた実験現場の状況から判断して、潜在亀裂は密着しており、

掘削前から開口していたとは考え難い。よって、コアの破断面の存在の原因は、発破掘削により破断した、発破掘削により強度が低下した弱面が形成されボーリングの際に破断した、または、潜在的に存在していた閉合亀裂が発破掘削あるいはボーリングの際に破断したと分類できる。このうち発破に関係した破断面(損傷)の存在が、坑内弾性波探査により求められた V_p の低下領域の存在の原因であると思われる。

6. 結 言

本研究では、SBの成否を左右する要因の一つである雷管の起爆秒時精度に着目して、発破掘削実験を行った結果をまとめた。DS電気雷管とこれに比べて起爆秒時精度の高い電子遅延式雷管をトンネル掘削のSBに同時に適用して、掘削後のトンネル壁面および壁面近傍の岩盤の損傷領域を、のみ跡率、坑内弾性波探査およびボーリングコアから測定し、考察を行った。以下にその結果を示す。

- (1) のみ跡率による評価から電子遅延式雷管を使用した方がDS電気雷管よりものみ跡率が高い値を示した。すなわち、最終段のSB孔は高い時間精度で起爆するほど破断予定面に沿った亀裂を発生させ、平滑な岩盤表面を形成できることが明らかになった。
- (2) 坑内弾性波探査を行い、表層除去法を適用して発破による岩盤内部の損傷領域を調査した。電子遅延式雷管を使用することにより損傷領域の広がりが大幅に低減できることがわかった。
- (3) トンネル壁面からコアボーリングを行い、コアの破断面調査を行った。これからも(2)と同様に電子遅延式雷管を使用した方が破断面の発生が抑制されて、起爆秒時精度の向上が損傷の低減に有効であることがわかった。また、コアの破断面のトンネル壁面から岩盤内部へ向かう空間的な分布状況と坑内弾性波探査に基づく損傷領域の広がりはほぼ一致した。

文 献

- 1) 宮地明彦, 横田茂昭, 古川浩平, 中川浩二: 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol. 24, p400, 1992
- 2) 山本雅昭, 市川 清: 工業火薬, Vol. 49, No. 6, p 367, 1988
- 3) 田治米鏡二: 弾性波探査による地盤調査法, 慎書店, p66, 1977

A experimental study on the damage area of smooth blasting by the electronic delay detonator

by Yoshiharu TANAKA*, Atsuo HIRATA*, Masayuki YAMAMOTO**
Hirohumi MATSUNAGA**

Smooth blasting (SB) is the standard method for underground rock excavation, to reduce overbreak and remaining rock damage and to obtain a smooth remaining rock surface, all of which are important for the structural stability of the excavated tunnel and for economy in the use of rockbolts, shotcretes, and other structural support. In the technique, detonator delay accuracy is one of factors which effect on control blasting. Conventional Deci Second Detonator (DSD) isn't good on delay accuracy. In the present study, we utilized the high accuracy of the electronic delay detonator (EDD) to investigate its effect on overbrake, remaining rock damage, and surface smoothness, in comparison with Deci Second Detonator (DSD). The experiments were conducted in a deep mine, in a test site region composed of very hard granodiorite. The test tunnel was 8 m² in cross section, and the advance per round was 2.0–2.5 m. The EDD was used in the holes on the perimeter of the right half, and the DSD was used in all other holes.

After excavation of the test tunnel, we surveyed the smoothness of the rock surface and damaged area of the remaining rock by observation of tunnel wall and in-situ seismic prospecting. We concluded that using EDD for SB could be decreased the damaged area in remaining rock and created the smooth surface.

(*Nishimatsu Construction Co., LTD. Technical Research Institute 2570—4, Shimotsuruma, Yamato, Kanagawa 〒242

**Asahi Chemical Industry Co., LTD. Explosives Sales Department. The Imperial Tower 16F. 1—1, Uchisaiwaicho, 1-chome, Chiyodaku, Tokyo 〒100)