

不安定岩塊に近接するトンネルの低振動発破掘削

Control Tunnel Blasting to Prevent Rock Fall from Overhanging Cliff Close to the Portal

喜田雅紀¹・森 良弘²・萩森健治³・西村修平⁴
Masaki Kida, Yoshihiro Mori, Kenji Hagimori and Shuhei Nishimura

¹正会員 工修 奥村・白石共同企業体 横山トンネル工事所

(〒791-1706 愛媛県上浮穴郡久万高原町本組1657)

²奥村・白石共同企業体 横山トンネル工事所 (同上)

³正会員 工博 (株)奥村組 技術本部 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

⁴愛媛県久万高原土木事務所 (〒791-1706 愛媛県上浮穴郡久万高原町)

Yokoyama tunnel having the length of 700m is located in mountain area of Ehime prefecture. Close to the north portal of this tunnel there are unstable overhanging cliffs over the existing road.

In this tunnel section over a total length of 130m, some control blasting methods using slot drilling and electronic delay detonators are adopted to prevent rock fall from the overhanging cliffs. In each blasting, suitable blasting pattern is applied according to the results of vibration measured from previous blasting.

In this paper we describe some control blasting methods and the results of vibration measurement.

Key Words : control blasting, rock falling, low vibration, slot drilling, electronic delay detonators

1. はじめに

横山トンネルは、愛媛県上浮穴郡の面河溪谷に至る国道 494 号の狭隘区間の解消、線形改良および道路直上の不安定岩塊崩落箇所の危険回避などを目的として建設される延長約 700m のトンネルである。

本トンネルの起点側坑口付近の現道直上には、オーバーハングした不安定岩塊があり、トンネル発破に伴う振動によりこれらの不安定岩塊が緩み、現道に落下する恐れがあった。そこで、岩塊に近接する約 130m 区間（最短距離 17m）では、発破振動を抑制するため、切羽にスロットを形成し IC 雷管（以下、EDD 雷管と称す）を併用する低振動発破工法をはじめ種々の制御発破工法を採用した。岩塊からの離隔距離と発破振動計測結果に応じて、制御発破の施工管理を行った結果、不安定岩塊に影響を及ぼすことなく掘削を終了したので施工概要を報告する。

2. 工事概要

- ・工事名称：(国) 494 号横山トンネル建設工事
- ・工事場所：愛媛県上浮穴郡久万高原町東川
- ・発注者：愛媛県

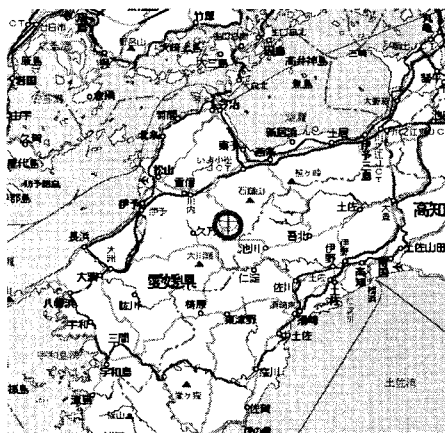


図-1 トンネル位置

- ・施工者：奥村・白石 共同企業体
- ・工期：平成 15 年 10 月 9 日～平成 17 年 12 月 25 日
- ・工事内容：
 - 工事延長 総延長 883.5m
 - トンネル工 延長 700m
 - 内空断面積 54.6m²
 - 掘削断面積 65.0～81.3m²
 - 掘削方式 発破 NATM

3. 地形、地質概要

本トンネルは、石鎚山の南西約 15km の急峻な山間地に位置し、ルートの西側には面河川が流路を蛇行させながら南方へ流下している。面河川は標高 1000m 程度の山地を開析している。

計画ルート付近の地質は古生代から中生代の三波川結晶片岩類から構成される。地質構造としては、三光辻山からトンネル計画地点の南隣部を結ぶ東西方向の軸を持つ向斜構造であり、計画区間はその北翼となることから、片理面としては南側に傾斜したものが主体となっている。

トンネルの地質縦断を図-2 に示す。最大土かぶりは 141m で、最小土かぶりは起点側から 160m 付近の寝覚川が交差する付近である。なお、起点側の現道直上には、オーバーハングした不安定岩塊がある。

岩質は、黒色片岩、緑色片岩が主体であり珪質片岩を一部に挟んでいる。弾性波速度は 4.0km/s 前後で一軸圧縮強度は 50~110MN/m² で、黒色片岩は片理面が発達し剥離性の著しい岩石であり、それに対して緑色片岩はやや塊状の様相を呈している。岩質

としても黒色片岩がやや脆弱であるのに対し、緑色片岩はやや硬質である。

片理の走向はほぼ東西方向で傾斜は 45° 南落ちとなっており、切羽の掘進方向に対しては流れ盤となる。全体に湧水は少なく、明瞭な断層は認められなかった。

4. 施工概要

全線発破 NATM による掘削を基本とし、D 区間では上下半掘削、C 区間では補助ベンチ付き全断面掘削で終点側から掘削を行った。施工機械配置を図-3 に示す。

施工に際しての留意点と対策は以下の通りである。現場に近接する面河川は清流で上流は面河溪谷と称する観光地となっており、工事用排水の処理対策が重要となったため、濁水処理設備の管理を徹底するとともに、濁水の原因となる吹付けプラントを設置しないで生コン工場から調達した。

コンクリート吹付けや掘削時に発生する粉じんを処理し、坑内の作業環境の改善と坑外への粉じんの

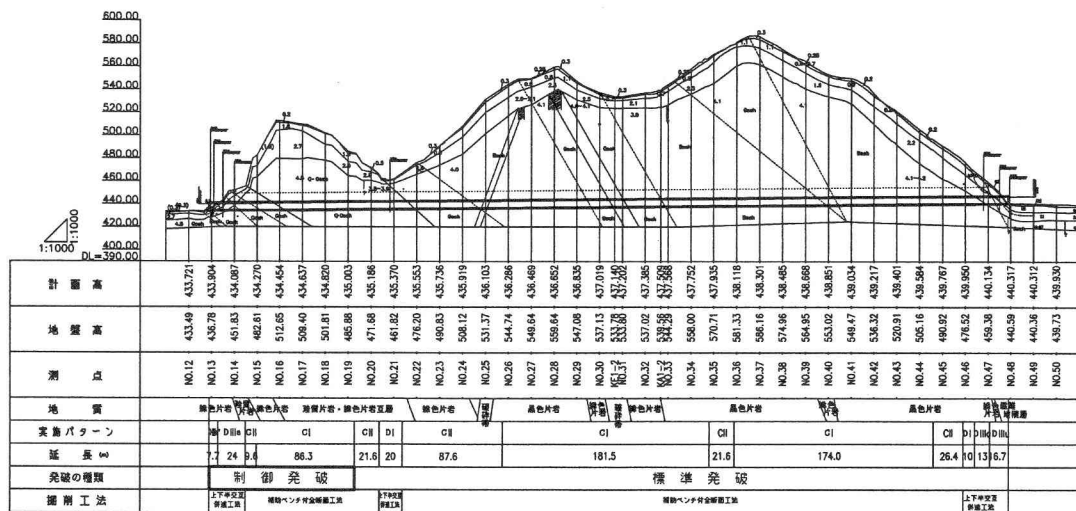


図-2 トンネル地質縦断図

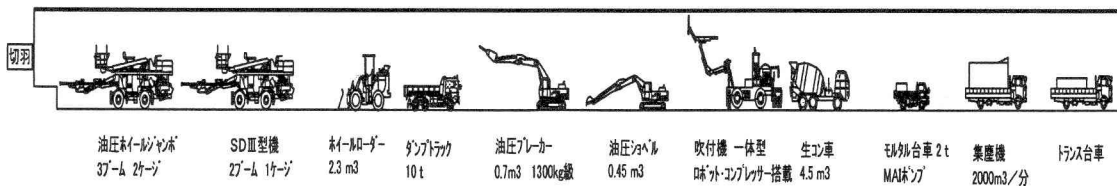


図-3 施工機械配置

排出を防止するため、処理風量が 2000m³/min の電気集じん機を切羽付近に設置した。

また、起点側の岩塊に近接する約 130m 区間では、トンネルの発破振動による不安定岩塊の落下を防止するため、以下に述べる各種の制御発破方法を採用した。

5. 制御発破計画

起点側坑口付近の現道直上には写真-1 に示すようにオーバーハングした不安定岩塊があり、トンネル発破に伴う発破振動によりこれらの不安定岩塊が緩み、現道に落下する恐れがあった。このため、岩塊に近接する約 130m 区間（最短距離 17m）を制御発破区間として設定し、発破振動を抑制するための各種の制御発破工法を採用した。

発破設計に際しては、設定された発破振動管理値に対して、以下に示す発破振動予測式を用いて切羽と岩塊との離隔距離に応じて適切な発破パターンを計画した。

不安定岩塊に対する発破振動規制値は、当該地域で過去に生じた地震データや火薬学会・発破専門部会による発破振動管理値の提言を参考に、0.5kine に設定した。

一般に発破振動の予測には次式が用いられる。

$$PPV = K \cdot W^n \cdot D^{-m} \quad (1)$$

ここで、

PPV：振動速度振幅(kine または cm/s)

K：発破係数

W：斉発火薬量(kg)

D：対象物と切羽との離隔距離 (m)

n, m：定数であるがここでは $n=2/3$ 、 $m=2$ とする。

なお、発破係数の K 値は、ベンチカット発破やトンネル掘進発破などの発破の種類、発破の掛かり方（発破効果）、使用する爆薬の種類、振動を受振する地盤の状況や振動の伝搬経路状況などの要因により変化するとされている。一般に発破係数の K 値は、心抜き発破の場合通常 500～1000 であるのに対して、払い発破やベンチカットの場合 200～500 とされている。ここでは、心抜き発破の K 値を 500、払い発破の K 値を 250 に設定した。

また、通常発破においては必要な斉発火薬量は 5.4kg として、(1)式より切羽から不安定岩塊までの離隔距離が 56m になる時点までは通常の標準発破で計画し、それ以下の離隔距離で制御発破に移行することとした。

このようにして計画した制御発破の方法は次の



写真-1 不安定岩塊の状況

通りである。

(1) STEP 1:MS・DS 発破(CI：進行長 1.5m)

K 値の大きい心抜きに MS 雷管を使用することにより段数を増やし斉発火薬量を低減するとともに、発破振動波形の相互干渉による打ち消し効果により振動を抑制する方法である。

(2) STEP 2:進行長を短くする(進行長：1.2m)

MS・DS 発破を用いたうえ 1 発破進行長を短くして火薬量を減らし振動を抑制する方法である。

(3) STEP 3:EDD 発破(CI：進行長 1.2m)

EDD 雷管を用いてさらに段数を増やし、1 段あたり 1 孔の発破を行うことにより斉発火薬量を大幅に低減し、発破振動波形の相互干渉による打ち消し効果により振動を抑制する方法である。

(4) STEP 4:SD・EDD 発破

SD・EDD 発破は、切羽にスロットを形成し、その自由面効果を利用するとともに EDD 雷管を併用して斉発火薬量を大幅に低減する方法である。

制御発破工法区間に移行して離隔距離が 31m までは EDD 発破を適用することで振動を規制値以下に抑制することができる。しかし、31m 以内ではこれらの制御発破工法を適用しても振動規制値以下に抑制することが困難であるため、スロットと EDD 雷管を併用する発破方法を採用した。

スロットを利用する制御発破工法は、切羽にスロットを削孔し、このスロットを通常のトンネル発破

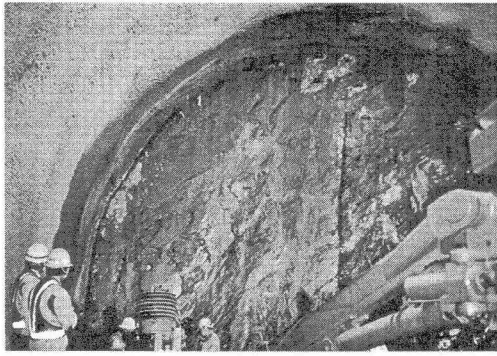


写真-2 SD・EDD 発破におけるスロット削孔施工状況

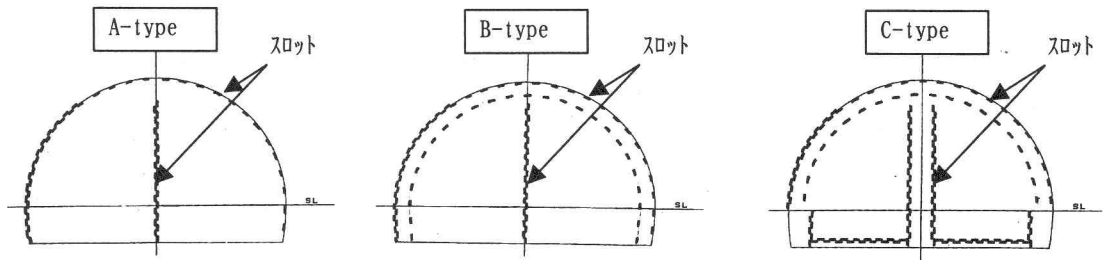


図-4 スロット形成パターン

における心抜きと見なし、その自由面効果を利用して発破全体をベンチカットあるいは払い発破と同様の状態とすることにより、K 値と火薬量 W の両方を低減して振動の抑制を図る工法で、これまでに十数件の施工実績がある。

これまでの実工事における振動計測結果によれば、K 値は 200～500 であり払い発破やベンチカットと同程度の値となっている。また火薬量についても通常のトンネル発破の $2/3 \sim 1/2$ の火薬量で発破が可能であることを確認している。そこで、スロットと EDD 雷管を併用して 1 段当たり 1 孔で 0.4～0.5kg 程度の斉発火薬量で発破を行う方法によれば振動を大幅に低減でき、かなり厳しい振動規制条件下でも発破が可能となる。

スロットを利用する制御発破の過去の事例では、切羽の外周部に連続したスロットを形成する場合が多い。しかし、本トンネルの切羽は片理に富む結晶片岩類（緑色片岩、黒色片岩）で、しかも片理が流れ目の方向に発達している区間が多いため、外周部をスロットで縁切りすることは切羽の崩落につながる恐れがある。このため、写真-2 に示すように外周部のスロットは断続的に形成し、中央部に連続スロットを追加し、EDD 雷管を用いて発破を行った。スロットは発破振動に応じて図-4 に示す各パターンへ段階的に増やし段当たり火薬量を減少させ発破

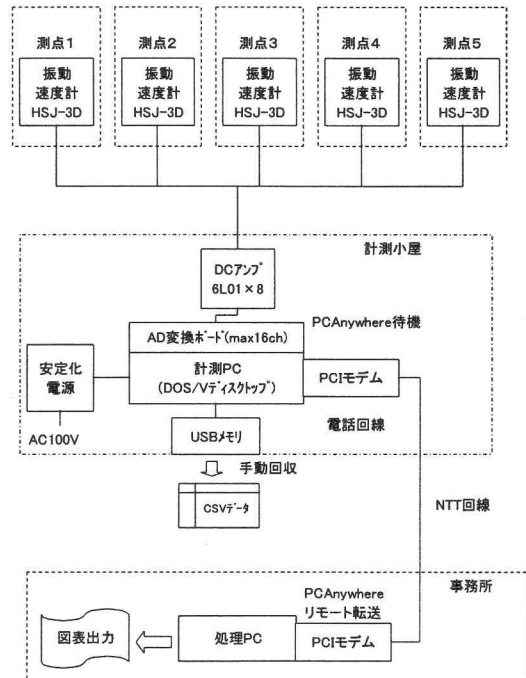


図-5 発破振動計測システム

を行った。最終的には 1 段当たり 0.3kg の少ない火薬量で発破を行った。

6. 不安定岩塊に対する制御発破の施工管理

不安定岩塊の崩落を防止するとともに現道の通行車両に対する安全を確保するために、発破振動対策と不安定岩塊の挙動監視が重要となった。

トンネル掘削に先立って不安定岩塊には、変位計、傾斜計等の計測器を設置し、常時計測管理を行っている。また、制御発破区間に近づいた時点から不安定岩塊の頂部および現道付近の岩盤壁面の合計 5 カ所に 3 成分の速度型振動計を設置し、発破後に振動計測結果をチェックした。

計測した発破振動データは、ケーブルにて現地に設置した計測小屋のパソコンに集め、NTT回線にて事務所のパソコンに転送した。図-5 に計測システムを示す。測定はプリトリガー方式にて行い、基準値 (0.004kine) 以上の振動が発生した場合に、2 秒前から 10 秒間、高速サンプリング (1kHz) 計測を実施した。

計測値が管理値以内であれば次回も同様の発破を行い、管理値を越えるようであれば、K 値、斉発火薬量、発破種別の見直しを行って、管理値以内に抑制できる発破パターンを決定し、次の発破を行った。制御発破区間での発破の施工管理フローを図-6 に示す。

発破に際しては、発破の前後 3 分間現道の通行止めを行った。発破後に岩塊付近の現道の落石の有無の観察結果や不安定岩塊に設置したポテンショ変位計、亀裂変位計、傾斜計の計測値をチェックし異常がないことを確認した後に通行止めを解除する対策を行った。

振動計測結果を図-7 に示す。5 カ所に設置した測点のうち、現道沿いの岩盤壁面に設置した測点 3 の振動値がもっとも大きい値を示したため、安全側に測点 3 の振動値で管理することとし、振動規制値の 1/2 の 0.25kine に管理値を設定して管理を行った。測点 3 では切羽との距離が近づくに伴って振動値が徐々に大きくなり、0.25kine に達する前に次の STEP の発破パターンに変更している状況を示している。一部で管理値を超える振動値が記録されているが、規制値である 0.5kine 以下に抑制できていることや、不安定岩塊頂部の測点 5 の振動値が 0.25kine 以下であることから、不安定岩塊に対する影響は少ないものと判断した。

また、不安定岩塊頂部の測点 5 の振動値は測点 3 の値と比べて小さい。これは、切羽と不安定岩塊との間に不連続面があったためと推定される。

発破振動波形の一例を図-8 に示す。EDD 発破の振動波形は、DS 発破や MS・DS 発破の波形と比べて特

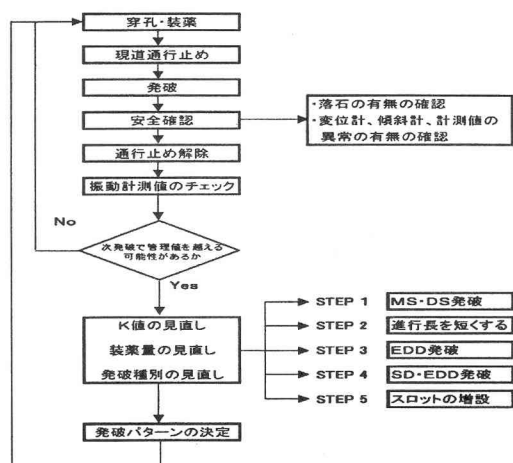


図-6 発破管理フロー

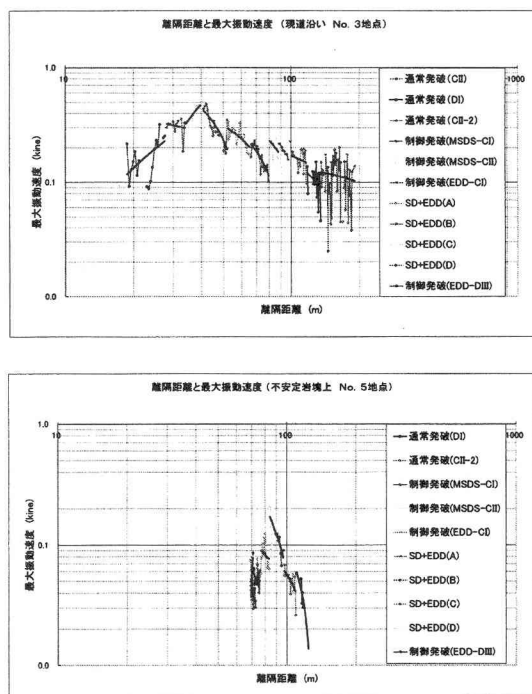


図-7 発破振動計測結果 (上図: 現道沿いの測点 3、
下図: 不安定岩塊頂部の測点 5)

に大きな振動のピークは見られず、波形が平均化されている様子がうかがえる。

これらの発破管理によって実施した掘削区分を図-9 に示す。

このような管理を行った結果、不安定岩塊部での振動値は 0.25kine 以下に抑制することができた。また変位計についても気温の変化による微小な変化が観測されたのみで、岩塊に対す影響もなく無事掘

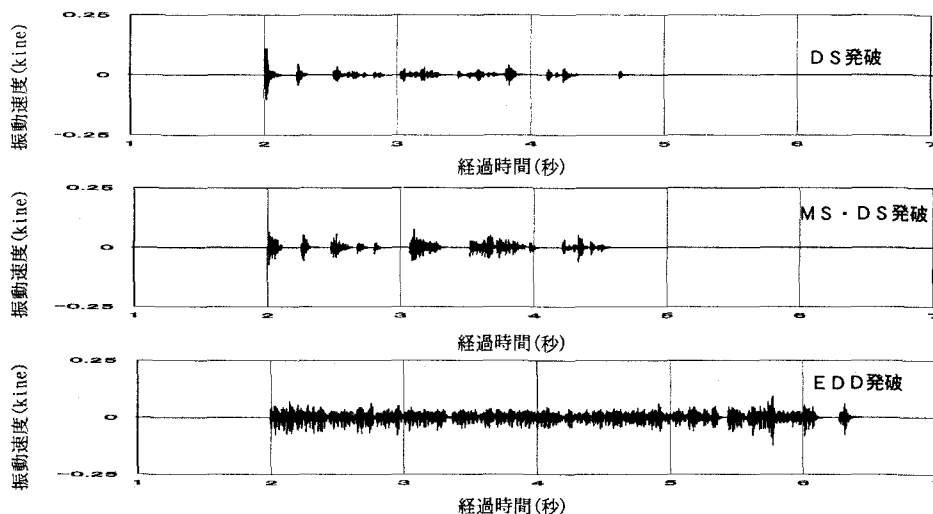


図-8 発破振動波形の一例

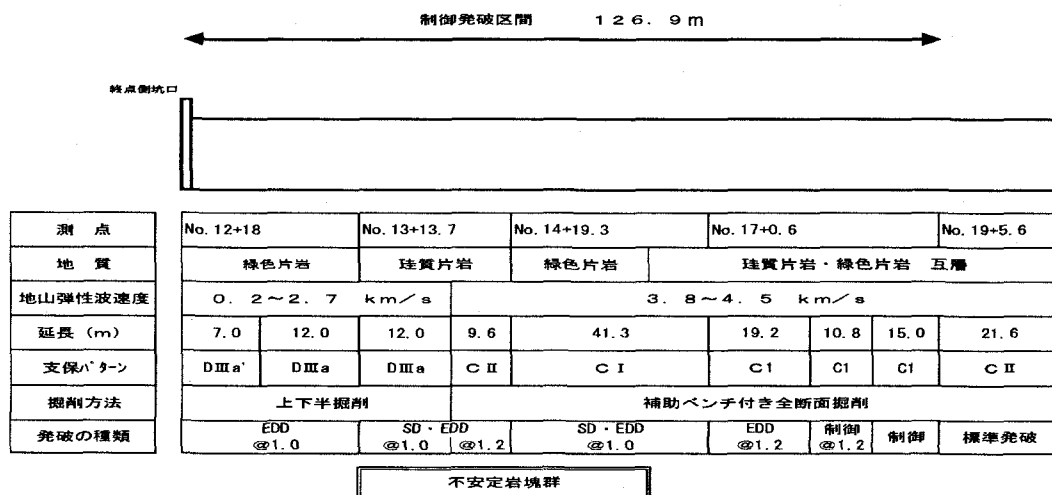


図-9 制御発破区間の掘削区分

削を終えることができた。

7. おわりに

トンネルに近接する現道直上の不安定岩塊に対する発破振動の影響を防止するため、切羽にスロットを形成し EDD 雷管を併用する低振動発破工法を始め種々の制御発破工法を採用した結果、不安定岩塊に影響を及ぼすことなく掘削を終了した。

今回採用した制御発破方法の一つであるスロットと EDD 雷管を併用する発破方法は、通常の発破と比べて振動を 1/2~1/10 程度に低減でき振動規制がきわめて厳しい条件下でも効果的な発破が可能であることがわかった。本発破工法の施工能率とコストは

無発破工法と比べて優れているが、通常の発破工法よりは不利であることが課題であり、今後施工能率の向上とコストダウンを図って普及に努めたい。最後に本工法の採用にご協力いただいた関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 萩森健治ほか：スロット工法を用いた低振動発破工法に関する研究、土木学会論文集 391 号／VI、1988.3
- 2) SD工法協会編：SD工法技術資料、2000.12
- 3) 山本雅昭ほか：スロットと EDD を併用した低振動掘削工法、火薬学会 2002 年度年会、2002.5