

スロットスター（2連式スロット削孔機）の開発

古賀成樹* 萩森健治* 稲葉金正**

1. まえがき

低公害岩盤掘削工法であるスロット工法（以下SD工法¹⁾と称す）は、主に、市街地や既設構造物に近接した山岳トンネル工事等において、振動軽減のため発破の使用が制限される場面で多く採用されている。本工法は、スロット削孔機と称する油圧ドリルを用いて、岩盤やコンクリートにスロット（溝）を掘り、それを自由面として利用することで、比較的小さいエネルギーで岩盤を掘削し、振動・騒音の低減を図る工法である。

スロット削孔機は、古河機械金属株式会社との共同開発であり、1983年に開発して以来、削孔速度の向上を目的として改良を重ね、現在は「SDⅢ型機」と称する4連式のスロット削孔機を使用している。本機は、一度に幅広いスロットを効率的に削孔することができる反面、通常の油圧ドリルとくらべて機械重量が重いため、大型の専用ベースマシンが必要であるという問題もある。そのため、機械経費が増加するとともに、SD工法の適用場面が制約される場合も生じる。また、昨今の公共工事における建設工事費削減の動向を受け、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。

これらの背景を受け、筆者らはSD工法の適用場面の

拡大とコストダウンに着目し、スロット削孔機の汎用化を目的とした開発に着手した。以後、工場内での実験を重ね、このほど「スロットスター」と称する2連式のスロット削孔機を開発した。本機は、従来機とくらべて軽量化しているため、従来機ではSD工法の適用が困難であった小断面トンネルや、コスト面で適用が困難であった工事にも、SD工法が採用できるようになり、開発して以来、3件の工事に採用できた。採用した3件の現場において、スロットスターの性能確認調査を行い、本機の機械性能は実施工に対応できることが確認できた。

表-1 スロットスターとSDⅢ型機の比較

機種名称		スロットスター	SDⅢ型機
質量	(kg)	220	420
全長	(mm)	1,470	
全幅	(mm)	250	400
全高	(mm)	330	
フィード長	(mm)	1,800	2,200
打撃数	(bpm)	2,600~2,700	
回転数	(rpm)	0~180	
作動油圧	打撃圧 MAX.	(MPa) 15.7	
	回転圧 MAX.	(MPa) 7.8	
ロッド		特φ32（専用）	
ビット		φ65ネジビット（専用）	
水消費量	(ℓ/min)	60	120

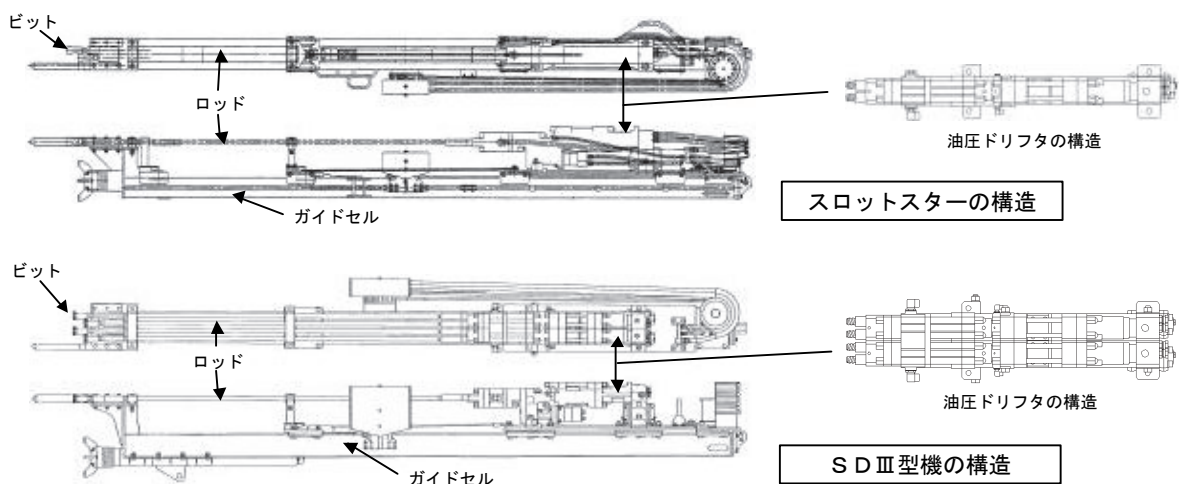


図-1 スロットスターとSDⅢ型機の構造

*本社土木部 **機電研究室

本報では、スロットスターの概要と現場適用で得られた機械性能の結果について述べる。

2. スロットスターの概要

スロットスターの開発に際しては、SDⅢ型機をベースに改造することが適切であると判断し、特に以下に示す点について留意した。

- i. 機械重量を軽減し、汎用性・可搬性の向上を図る
- ii. SDⅢ型機の削孔能力、削孔精度を損なわない
- iii. 改造コストを最小限に抑制するため、構成する部品はSDⅢ型機の部品と互換性を確保する

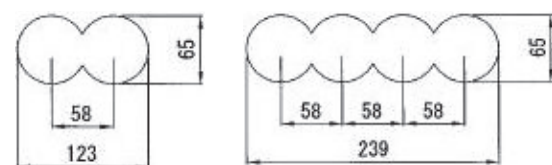
SDⅢ型機をベースとすることにより発生しうる問題点については、後述する工場内実験で検証し、問題点は解消できた。

2.1 機械構造

スロットスターとSDⅢ型機の構造を図-1に、両機の仕様を表-1に比較示す。図-1に示すとおり、スロットスターの油圧ドリフタはSDⅢ型機を半分に分割した構造であるため、構成する部品もフロントカバー以外はSDⅢ型機と同一仕様であり、互換性を保っている。通常は本機に2組のロッド、ビット等を取り付け、専用のガイドセルに組み込んだ状態を一式として使用する。

2.2 スロット形状

1回の削孔によるスロット形状を図-2に示す。図中



(a) スロットスター

(b) SDⅢ型機

図-2 スロット形状



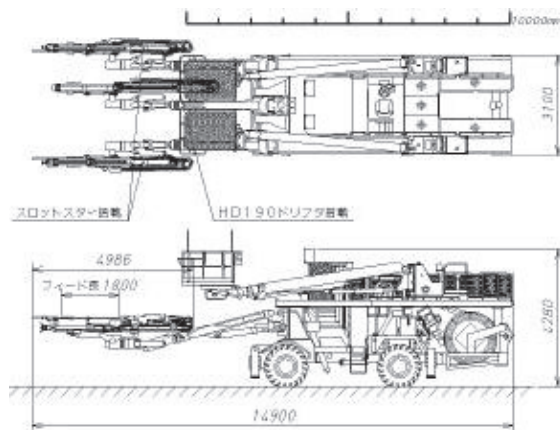
写真-1 工場内における2連孔スロット削孔実験

の(a)はスロットスターによる場合、(b)はSDⅢ型機による場合を表している。重なり合って隣接するφ65mmビットによって、図-2に示すスロット孔を形成する。

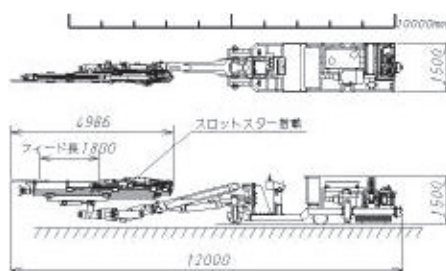
2.3 工場内での予備実験

従来機であるSDⅢ型機は、2組の油圧ドリフタで構成されており、独立して打撃力、回転力を供給する。ロッドの回転方向は、孔曲がり（スロットがねじれて削孔されること）防止のために左右のドリフタの回転方向は対抗する偶力にて打消し合い、スロットの直進性を確保している。一方、スロットスターは、同一回転方向のロッドで削孔する機構であり、孔曲がり懸念された。

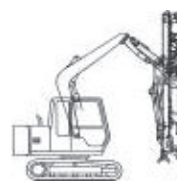
そこで、スロットスターの製作に先立ち、工場内にてSDⅢ型機を利用した2連孔スロット削孔試験を実施した。



(a) 3ノームトリルンヤンへの搭載
左右のブームにスロットスターを、中央のブームに単孔用ドリルを搭載



(b) 小型レール式ジャンボへの搭載



(c) 0.25m³級油圧ショベルへの搭載

図-3 スロットスターのベースマシンへの搭載例

試験はSDⅢ型機のロッド（4本）のうち2本を外し、花崗岩ブロックに対して削孔を行い、孔曲がりやスロットの連続性について検証した。削孔試験結果をまとめて以下に示す。

- i. 深さ1.5mの2連孔スロット削孔を行ったが、回転反力に起因する孔曲がりは認められず、スロットどおし連続して削孔された（写真-1参照）
- ii. 座繰り時にロッドねじれが認められたが、フィード圧を制御することで解消できた

以上の結果から、SDⅢ型機をベースとする改造についての問題点は解消できたと判断でき、スロットスターの設計・製作を進めた。

2.4 ベースマシン

ベースマシンへの搭載例を図-3の(a)～(c)に示す。図中の(a)に示すように、ドリルジャンボの複数のブームに、スロットスターと通常の油圧ドリルを搭載することにより、ベースマシンが1台ですみ、機械経費が削減できるとともに、スロット削孔作業と発破孔穿孔作業が並行して作業でき、サイクルタイムの短縮にもつながる。また、図中の(b)～(c)に示すように、従来のSDⅢ型機では搭載が困難であった小型のベースマシンにも搭載が可能となり、小断面トンネルや狭い空間での工事にも適用でき、SD工法の適用場面が拡大できるようになった。

3. スロットスターの現場適用と性能調査結果

スロットスターは1999年11月に完成し、以来、表-2に示す3件の工事に採用できた。

3.1 適用現場の概要

Aトンネルは、供用中のI期線トンネルと近接している上、坑口付近に多くの民家があることから、坑口から149m区間は機械掘削工法で、それ以降は発破掘削工法で計画された。ところがブレーカで110mまで掘進した地点で硬質の玄武岩が出現し、2t級ブレーカでも掘削が困難となった。そこで設計変更に伴ってSD発破掘削工法を採用した。また、発破掘削工法で計画された地点までの残り区間も短いため、現場のドリルジャンボに容易に搭載できるスロットスターを採用した。I期線トンネルは、Aトンネルの右側約20mに近接している。そこで施工能率も考慮し、切羽上半の右側外周部にのみスロ

ットを設け、それを自由面として利用しながら外周部から順に発破するパターン（図-4参照）とした。写真-2に示すように3ブームドリルジャンボの右側ブームにのみスロットスターを搭載した。これにより専用のベースマシンを増設することなく経済的に掘削できた。

Bトンネルは、近隣に民家等があることから、自由断面掘削機による機械掘削工法で計画されていた。坑口掘削開始から、硬質の花崗岩が部分的に出現し、静的破砕剤や油圧くさびを併用した機械掘削が行われたが、掘進に伴い、切羽に占める硬岩部の出現する範囲も広くなり、掘削が困難となった。小断面トンネルであるため、大型の掘削機械の使用は不可能であった。そこで自由断面掘削機の掘削能率を向上させるため、SD機械掘削工法を

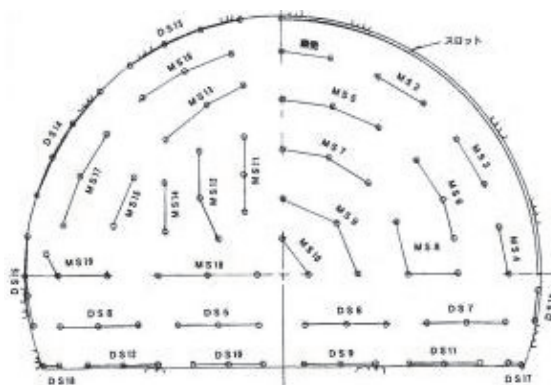


図-4 スロット発破パターン



写真-2 スロットスター搭載ドリルジャンボ

表-2 採用実績

トンネル名	掘削断面	掘削工法	スロットスター採用時期	スロットスター採用延長	SD工法採用理由
Aトンネル (2車線道路トンネル)	61m ²	機械、発破掘削 NATM工法	H12.2	10.5m	機械掘削能率向上 振動・騒音低減
Bトンネル (水路トンネル)	7.7m ²	機械、発破掘削 矢板工法	H12.4～	採用中	機械掘削能率向上 振動・騒音低減
Cトンネル (放水路トンネル)	12m ²	発破掘削 矢板工法	H12.9～10	79.2m	振動・騒音低減



写真-3 スロット削孔状況

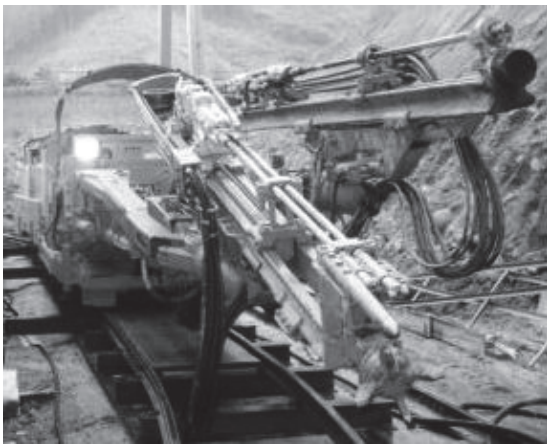


写真-4 スロットスター搭載小型レール式ジャンボ

採用した。スロットスターを搭載するベースマシンは小型レールジャンボを採用した。スロット削孔状況を写真-3に示す。その後、民家からやや離れ、SD発破掘削工法を採用した。

Cトンネルは硬質岩盤の出現が予想されたため、発破掘削で計画されていた。トンネル直上(被り約40m)には民家があり、民家への発破による影響を低減させるために、SD発破掘削工法を採用した。写真-4に示すように2ブーム小型レールジャンボの一方のブームにスロットスターを、他方のブームに通常の油圧ドリルを搭載したことにより、レールジャンボを増設することなく経済的に施工できた。

以上の3件の工事では、掘削断面の制約やコスト面において、従来のSDⅢ型機ではSD工法の適用が困難であったが、スロットスターを用いることにより、SD工法の採用が可能となった。

3.2 性能評価

スロットスターの性能を確認し、SDⅢ型機の性能と比較するため、表-2に示す3件の現場において削孔性能調査を実施した。調査現場と調査内容を表-3に示す。なお、表には、調査した現場のうち、安定した性能評価ができるよう比較的多くのデータを採取することができた調査現場を抜粋している。また、表中の岩盤の一軸圧縮強度は、シュミットハンマーの反発度より換算した値を示す。

a. 削孔速度と操作性

スロットスターの削孔性能調査結果を図-5に示す。この図は、SDⅢ型機との削孔速度の比較を示したもので、AトンネルおよびBトンネルでの調査結果の他に、SDⅢ型機を用いて実験を行った採石場での結果²⁾を併記した。ただし、表-3に示すように、削孔条件が各々異なるため、岩盤の一軸圧縮強度を100MPa、削孔深さを1.5mという条件に揃えて換算した。

図-5に示すように、スロットスターの純削孔速度(いわゆるノミ下がり)は、60cm/min以上であり、SDⅢ型機とくらべて約15%向上している。また、実削孔速度(ブーム移動やロッド引き抜き等も含めた単位時間あたりの削孔速度)は約50cm/minであり、40~60%向上している。これらが向上した理由として以下のことが考えられる。

- i. スロット削孔幅を半減したことにより、打撃ロス(いわゆる空打ち)が減少した
- ii. 機械重量を半減したことにより、ブームの操作性が向上した

b. 施工能率

スロット作業の施工能率の比較として、図-5の結果をもとにSDⅢ型機との面積速度の比較を行った。面積速度とは、スロット幅に削孔速度を掛けて表したものである。面積速度の比較結果を図-6に示す。図より、スロットスターの実面積速度はSDⅢ型機の70~80%であることが分かる。これは、1スロット当りに換算した場合、SDⅢ型機にくらべて140~160%向上していること

表-3 調査現場と調査内容

現場名	Aトンネル：掘削断面61㎡ (2車線道路トンネル)	Bトンネル：掘削断面7.7㎡ (水路トンネル)	Dトンネル：掘削断面77㎡ (2車線道路トンネル)	採石場 (実験現場)
岩質	玄武岩	花崗岩	花崗岩	花崗閃緑岩
岩盤の一軸圧縮強度	75MPa	100MPa	100MPa	120MPa
用いたSD機と搭載ベースマシン	スロットスターを搭載した 190kg級3ブームドリルジャンボ	スロットスターを搭載した 小型レールジャンボ	SDⅢ型機を搭載した 150kg級3ブームドリルジャンボ	
平均スロット深さ	166cm	110cm	160cm	185cm
計測スロット本数	121本	47本	93本	23本
計測項目	● 削孔速度 ● 削孔時間 ● 削孔長 ● 機械特性 ● 岩盤特性			

になる。

c. 機械特性

スロットスターの機械的性能を確認するために、機械特性調査を実施した。削孔中の機械データは、油圧回路

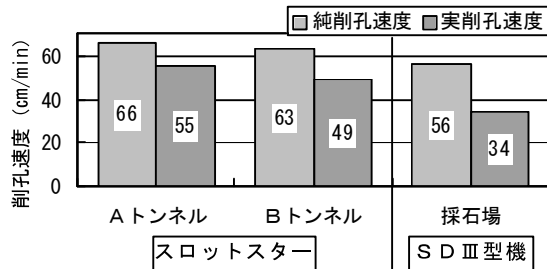


図-5 削孔速度の比較

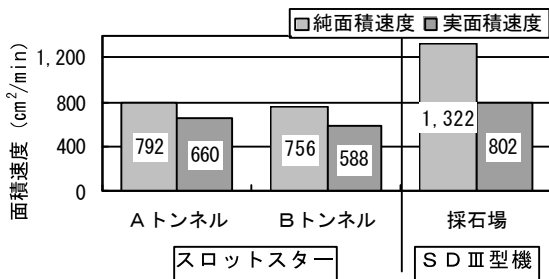


図-6 面積速度の比較

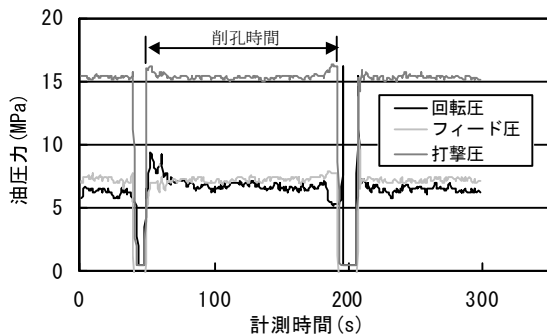


図-7 スロットスターの機械特性

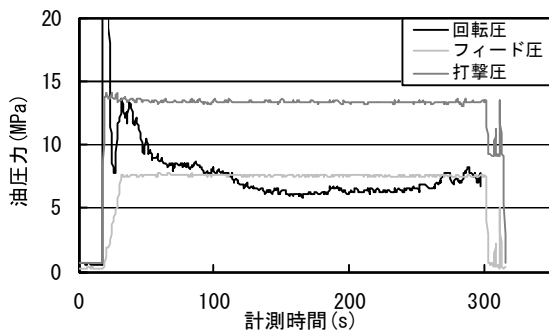


図-8 SD III型機の機械特性

上に設置した圧力センサーとストローク（ロータリ型）センサーによって測定した。

調査結果の一例として、表-3に示すAトンネルでの施工におけるスロットスターの回転圧、フィード圧、打撃圧に関する時刻歴データを図-7に併記し示す。また参考データとして、Dトンネルでの施工におけるSD III型機の場合を図-8に示す。

図-7より、フィード圧と打撃圧に関してはSD III型機との差異がなく、双方共に安定した値を示している。しかし、回転圧に関しては、SD III型機の初期削孔時（座繰り時）に異常な圧力上昇が伴っていることが確かめられる。その点、スロットスターはSD III型機のような初期削孔時の顕著な圧力上昇はなく、安定的に推移していることが分かる。

削孔メカニズムにおける回転圧の変化は、削孔中の負荷変動を表している。SD III型機の回転圧の上昇原因には、削孔される岩盤の性状の違いや操作方法の違いも考えられるが、この場合は機械的な要因が大きく、高負荷に伴う隣接ロッドの干渉に起因し、抵抗力が増加すると推定される。スロットスターの回転圧の変動が少なかった理由は、機械的な干渉が軽減できたことによると考えられる。この特性も削孔速度の向上に寄与していると判断できる。また、機械的に無理のない削孔が行われていることにより、削孔機を構成する部品の耐久性も向上すると考えられる。

また、フィード圧や打撃圧の計測データを分析することで削孔サイクルタイムが算出できる。サイクルタイム算出の一例として、図-9にはスロットスターの打撃圧の時刻歴データを、図-10にはSD III型機の打撃圧の時刻歴データを示す。両図において、油圧力の増減で区切られた各ブロックの横幅が1削孔に要したサイクルタイムを示しており、各ブロック間の油圧力が0MPaとなっている区間がブームの移動時間を示している。図-

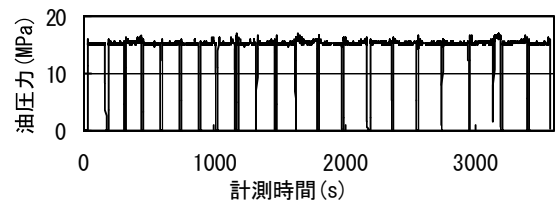


図-9 スロットスターの打撃圧データ

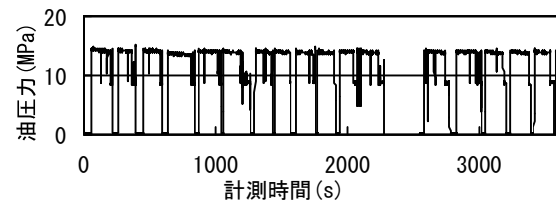


図-10 SD III型機の打撃圧データ

表－４ 機種別削孔効率と算定条件

機種	190kg級単孔ドリル	スロットスター	SDⅢ型機
調査現場	Aトンネル	Aトンネル	Dトンネル
ビット径	65mm	65mm	65mm
削孔深さ	120cm	166cm	160cm
純削孔速度	65cm/min	64cm/min	38cm/min
想定スロット幅	65mm*4(列)	123mm*2(列)	239mm*1(列)
想定面積速度	1,690cm ² /min	1,574cm ² /min	908cm ² /min
削孔効率	100%	93%	54%

9はAトンネル施工時のデータであり、図より、計測時間約3600秒中、削孔回数は21回読み取れ、平均サイクルタイムは約170sであることが確かめられる。図－10はDトンネル施工時のデータであり、削孔回数は16回で平均サイクルタイムは約225sとなっている。

両図より、スロットスターのサイクルタイムはSDⅢ型機とくらべて比較的安定しており、ブーム移動時間も短く、トラブルもなくコンスタントに推移していることが分かる。

d. 削孔効率

単孔ドリル、スロットスター、SDⅢ型機のそれぞれの純削孔速度を計測し、4連孔のスロットを削孔すると仮定した場合の面積速度を試算し、削孔効率について検証した。表－4に、機種別削孔効率と算定条件を示す。

試算の結果、単孔ドリルを4台使用し4連孔のスロットを削孔すると想定した場合の面積速度を100%とすると、スロットスターを2台使用した場合が93%、SDⅢ型機を1台使用した場合が54%であることが確かめられた。

効率的なスロット削孔では、単孔を連ねることが効果的であると考えられるが、単孔削孔はロッドの細長比(L/d)が大きく、曲げ剛性が弱い。そのために孔曲がりが生じやすく、隣接し連続した削孔が困難であり、スロットの精度において問題が生じる。一方、2連孔式では曲げ剛性、回転剛性、共に単孔より向上するので、孔曲がり現象が抑制され、連孔し易さが確保される。この解釈によれば、4連孔は更に効果的であるが、反して打撃ロスが増加し、削孔速度が低下する。

以上のことから、スロット削孔においては、削孔効率および削孔精度の両面から、2連式のスロットスターによる削孔が有利であると判断できる。また、削孔効率が優れている点は、ビットやロッド等の消耗部材の耐久性向上にも寄与すると考えられる。

4. まとめ

2連式のスロットスターを開発し、以下のことが達成できた。

i. 通常のドリルジャンボに容易に搭載でき、専用のベースマシンが不要となったため、機械経費が削減できた

ii. 小型ベースマシンに搭載可能となり、SD工法の適用場面を拡大できた

本機を実工事に適用し、削孔性能等を調査した結果、以下のことが確認できた。

(i) 打撃ロスを減少できたことにより、削孔速度が向上した

(ii) 機械重量を半減できたことにより、ブームの操作性が向上し、施工能率が向上した

(iii) 安定した機械特性を有することにより、削孔効率が向上した

(iv) スロットの削孔精度はSDⅢ型機と同等で、連続性に優れている

(v) 効率的な削孔性能および安定した機械特性を有することにより、本機を構成する部品の耐久性向上が期待できる

5. あとがき

今後は、小断面の立坑や狭い空間の明かり工事にも適用し、SD工法の適用場面をさらに拡大していきたい。

現場適用に際しては、発注者、企業体の方々からご協力を頂いた。この紙面を借りて感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 萩森健治ほか、「無発破トンネル掘削工法（SD工法）」、建設機械、Vol.33、No.11、1997.11、pp52～58
- 2) 萩森健治ほか、「スロット削孔機高速削孔技術の開発」、土木学会第53回年次学術講演会概要集第6部、1998.10、pp276～277