

硬岩トンネル掘削機の開発

TM-100

ディスクカッタにより硬岩を自由断面に掘削

内田正孝・足達康軌・松尾陽介

近年、国内のトンネル工事においては、自然環境の保全や近隣住民の生活環境意識への配慮などから、より環境への負荷を少なくすることが求められている。一方、国内の現状の無発破工法技術は、大型ブレイカや自由断面トンネル掘削機による機械掘削、或いは割岩機や薬剤による割岩工法のみを選択肢しかない。そこで、国内のトンネル掘削機メーカーと共同で、新たな硬岩トンネル掘削機 TM-100（以下「本機」という）を開発、製作した。

本機は、ディスクカッタによる圧砕により、従来困難であった一軸圧縮強度 100 MPa 超の硬岩を、自由断面に効率的に掘削するトンネル掘削機である。

キーワード：トンネル、硬岩、自由断面トンネル掘削機、ディスクカッタ、圧砕、自動運転

1. はじめに

近年、都市部や住宅地に近接した地域でのトンネル工事が多くなり、周辺的生活環境への配慮が必要になっている。また重要構造物など施設の保全、安全の要求から発破掘削が制限され、騒音、振動を抑えた施工が求められている。

そこで、国内のトンネル掘削機メーカーと共同で、ディスクカッタによる新たな硬岩トンネル掘削機本機を開発、製作、工事に適用したので紹介する（写真—1）。

2. 開発の背景

写真—2 に示すロードヘッド（三井三池製作所製）に代表される自由断面トンネル掘削機は、ピックと呼

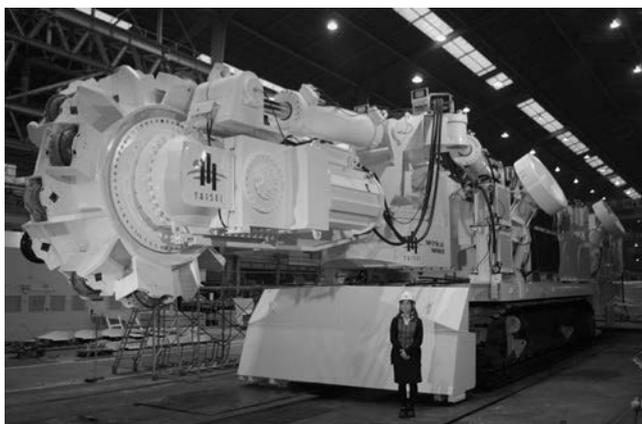


写真—2 国内最大級の自由断面トンネル掘削機
(ロードヘッド SLB-350S)¹⁾

ばれるビットをらせん状に配置したドラムを回転させながら岩盤に押し付け、切削（図—1）により掘削するものであり硬岩には適さない。大型ブレイカによる打撃破碎掘削も、硬岩になればチゼル（のみ）の摩耗、機械の損傷が激しく使えない。なお、打撃破碎による発生衝撃音・振動は発破とは異なり、連続的な騒音や振動を与えるため、近隣住民に発破以上に不快感を与えるケースが多くなっている。

一方、海外では、鉱山を中心にディスクカッタを使用した圧砕（図—2）による掘削機が各種実用化されている。一例を写真—3 に示す。

また、20 年以上以前であるが日本においても、オーストラリアの鉱山で使用されていたモービルマイナーを基に、自由断面を掘削できるようにした硬岩自由断面掘削機 MM130R を海外のトンネル掘削機メーカーが



写真—1 工場で作成した本機

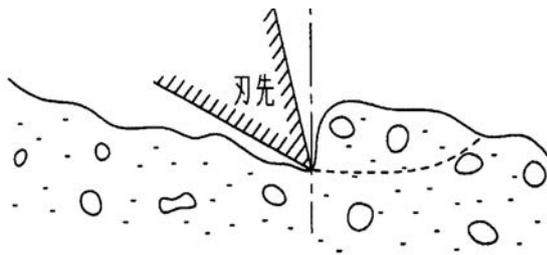


図-1 切削原理⁴⁾

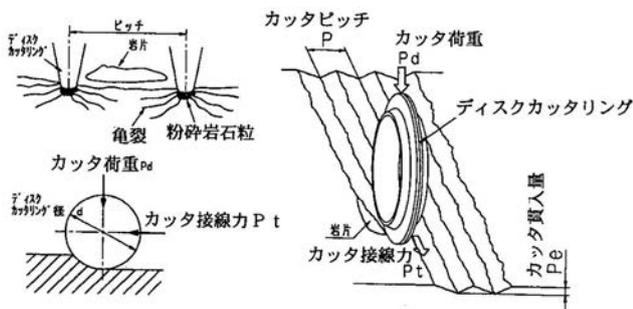


図-2 圧砕原理⁴⁾



写真-3 海外メーカーが製作したディスクカッターによる掘削機²⁾

製作し、導入した。しかしながら掘削自体は想定通りの性能を発揮したが、組立・解体や施工時の機動性に問題があり、結局一工事での適用で終わった。

3. 機械概要

(1) 特徴

本機の特徴を以下に示す。

- (a) ディスクカッターによる圧砕で、一軸圧縮強度 $\sigma = 100 \text{ MPa}$ 超の硬岩を自由な断面形状で掘削できる。
- (b) 常に切羽形状を球面状に維持し、切羽の安定化が図れる。
- (c) 位置・姿勢計測システムと自動運転システムを

連動し、設計断面プロファイルを自動運転により掘削できる。

- (d) 余掘りを最小限に抑えられる。
- (e) 自動運転により、掘削中の省力化、効率化が図れる。
- (f) カッターをディスクからピックに変えることにより、軟岩域の掘削も可能である。

(2) 構造

掘削原理は、8個の15.5 in ディスクカッターを取り付けた直径2.7 mのカッターホイールを縦回転させながら、横移動（スイング）することにより、切羽岩盤をTBMと同様に圧砕する。図-3に掘削の原理を示す。カッターホイールは上下動するピッチングブームに支持され、ピッチングブームは左右動するスイングブームに支持されている。スイングブームはメインビームの先端に取り付けられており、メインビームはスラストシリンダで前進することができる。つまり、カッターホイールは回転しながらピッチングブームで上下動、スイングブームで左右動、メインビームで前進することができる。

一見、オープン型TBMのカッターホイールを縦方向に配置したものとも言える。

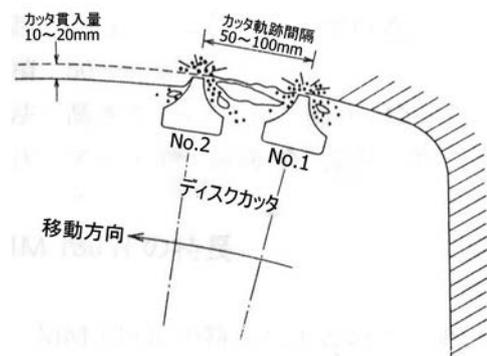


図-3 本機の掘削原理³⁾

なお、カッターホイールには8個のフェイスカッター以外に、左右斜め方向に各4個のゲージカッターを配置して側壁面を掘削できるようにし、更に仕切り状のパドルを配置し、掘削ずりを手前に掻き上げるようにしている（写真-4）。

掘削中、本体前方のドーザと後方のアウトリガ2基が下方の地盤に機体質量の80%の力で張出し、上方には前後左右4本のグリッパがトンネル天端面に張出すことで、硬岩掘削による反力に抵抗できるように確実に本体を固定する。

所定の掘進長（例えば1.0 m）或いはずりの処理が

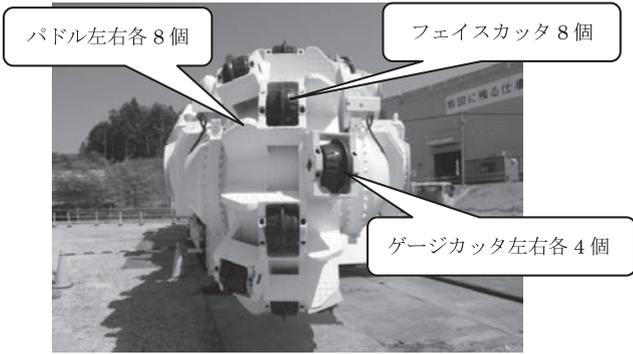


写真-4 カッタホイール

必要な場合は、前記のグリッパ、ドーザ、アウトリガを収納し、クローラで後方に移動、退避する。ずり処理等を行ったあと再度移動、セットして掘削を再開する。

(3) 全体組立図

本機の全体組立図を図-4 に示す。

(4) 仕様

本機の主な仕様を表-1 に示す。

(5) 想定能力

掘削能力については、製作工場内で掘削の要素試験を実施したので、その結果を説明する。

試験は、掘削反力に耐える質量のベースコンクリートとブームを支持する仮設架台を製作し、それに先行

表-1 本機主要仕様

項目	TM-100 仕様
寸法(全長×全幅×全高)	28.5 m × 3.8 m × 4.8 m
カッタホイール径	2.7 m
全総質量	約 280 t
スラスト量	1.2 m
カッタホイール電動機	225/150 kW 4/6P 2台 (水冷) 1000/1100 V-50/60 Hz
カッタホイール形状	ディスクカッタ型と ピック型を交換可能
カッタホイール回転数	22.3/14.9 min ⁻¹ 4/6P
カッタ周速	3.2/2.1 m/s 4/6P
カッタ数量	15.5 in ディスクカッタ 8個 +ゲージカッタ 左右各 4 個
	または 丸ピック 174 個
クローラ (幅×長さ)	1.12 m × 7.86 m (片側)
接地圧	0.17 MPa (1.7 kg/cm ²)
走行速度 低速	2.7/3.2 m/min-50/60 Hz
	高速
油圧用電動機	225 kW 4P 2台 (空冷) 1000/1100 V-50/60 Hz

して製作したカッタホイール、ブームを取り付け、掘削対象は一軸圧縮強度 110 MPa の中国産の花崗岩を、コンクリート内に埋め込み模擬岩盤とし、カッタの貫入量、カッタホイールの移動速度をそれぞれ変化させ掘削を実施した (写真-5)。

試験の結果、カッタ貫入量 13 mm、軌跡間隔 83.9 mm の設定で、一軸圧縮強度 110 MPa の硬岩を、最

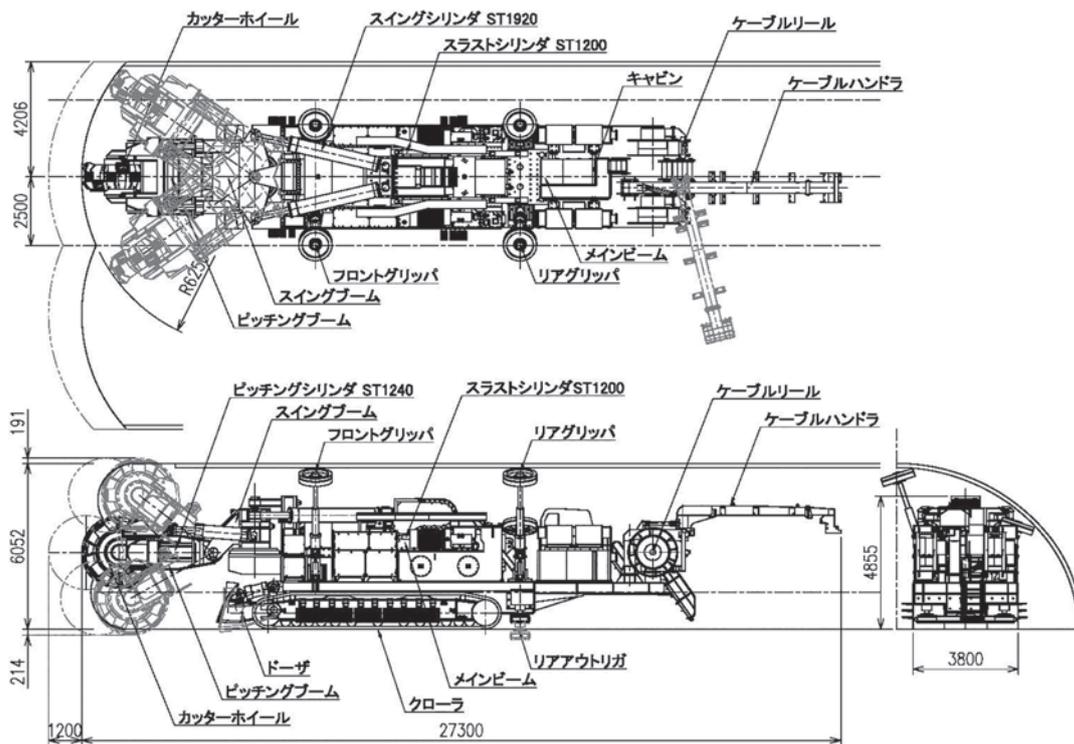


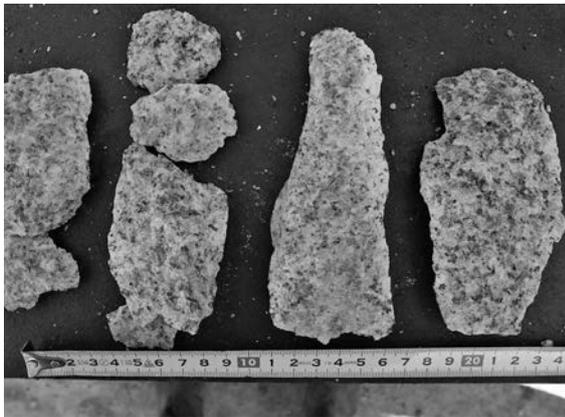
図-4 本機全体組立図

大 22 m³/h の能力で掘削することを確認した。

写真一六に、掘削で発生した花崗岩のずりの岩片を示すが、圧砕の掘削原理にあって、細長い平板状になっている。



写真一五 掘削要素試験状況



写真一六 掘削要素試験で発生したずりの岩片

(6) 位置・姿勢計測システム

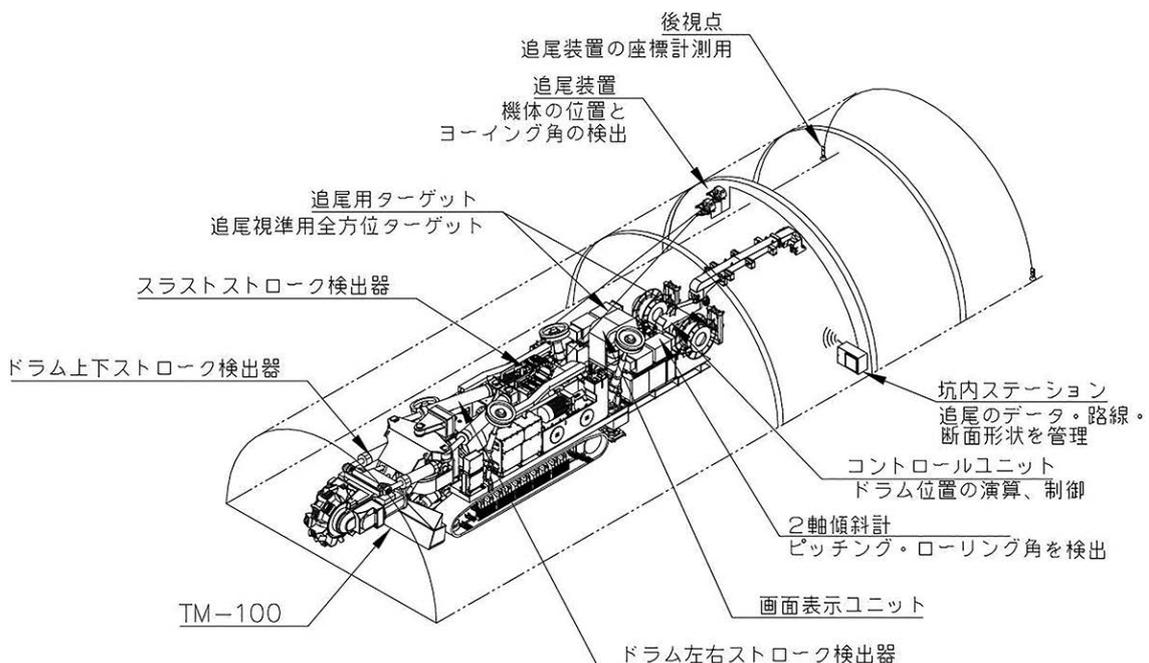
掘削に際し、まずは本機本体を掘削開始位置に移動する必要がある。目視による誘導には限界があるため、ここでは自動追尾型のトータルステーションにより、機械の位置を把握し、オペレータの操作で目標点に移動するようにした。

具体的には、トンネル内の任意の位置にトータルステーション2台を設置し、既知の2点から測量機の位置、方位を自覚し、機械本体に搭載された2台のターゲットを自動追尾することにより、本機本体位置と方位を把握し、本体に搭載された傾斜計とスラストシリンダのストロークから姿勢を演算、ブーム旋回中心を求めるようにした(図一五)。

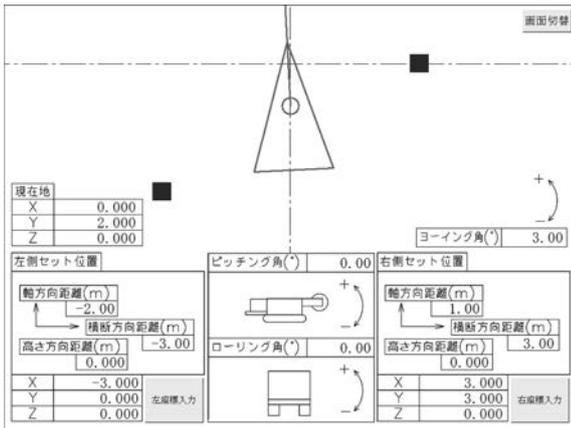
オペレータは、運転席のディスプレイに表示されるブーム旋回中心と掘削開始目標位置、方向、離れの情報から、ジョイスティックで左右のクローラを操作して、機械本体のブーム旋回中心を目標点近く(±200 mm 以内)に移動する(図一六)。機械側では、前回掘削を終了した時点で、切羽の位置情報を保持し、それに合わせて最終的な微調整をスラストシリンダの伸縮により行う。その結果、掘削開始時に、カッタの過度な貫入もなく、空振りも無くすることができる。

(7) 自動運転システム

本機は、位置・姿勢計測システムで掘削開始位置にセットできた段階で、自動運転開始ボタンを押すだけで掘削を開始する。機械本体の位置、姿勢、カッタ位置は常に位置・姿勢計測システムと各シリンダに内蔵



図一五 位置・姿勢計測システム概要



図一六 位置・姿勢計測システム表示例

したストローク計により計測・演算し、予め設定された断面形状に沿ってブームを移動コントロールする。所定のブーム運動により1貫入量分（通常は10～20mm程度）の掘削を完了し、スラストシリンダで次の貫入を行い、同じブーム運動を繰り返す。所定の掘進長或いはずりがドーザの前に堆積し、掘削の継続が困難になった時点で（0.5～1.0mを想定）、掘進を停止し、機械本体を後退させる。

ディスクカッタによる圧砕掘削においては、カッタの貫入量と軌跡間隔を決定するスイングブームの移動速度の制御が重要になる。つまり貫入量が大きすぎるとカッタの許容荷重を超え、ディスクカッタの破損、最悪ブーム等の本体側にも損傷を与えることになる。また、軌跡間隔が大きすぎると軌跡間に未掘削部分が発生してしまう。逆に貫入量や軌跡間隔が小さすぎると無駄な動きのため、掘削能力の低下、エネルギーロス、カッタの過剰な消耗が発生することになる。

現時点では、オペレータが掘削中のカッタモータの電流値をみて、適切な貫入量とカッタ軌跡間隔（ブーム移動速度）を設定しながら運用する。将来的には、これも自動的に適切な値を設定できるようにする予定である。

4. 工事实績

本機は工場完成後、基本的な検査を終え、兵庫県内の新名神高速道路川西トンネル工事（2車線）に導入した。

現在、トンネルの一部の適用場所（硬岩で、発破掘削が許されない区間）で掘削を実施後、貫通側の掘削に備え休止中であり、ここでは実績の途中経過について述べる。

(1) 現場搬入

本機の分解部材は、通常にトレーラ運搬が可能で、幅寸法を3.0m以下、質量を30t未満に抑えている。運搬に要した車両を表一2に示す。

トレーラ運搬に関しては、特車の許可を得て運搬した。

表一2 本機部材運搬車両

車種	台数
30t積重トレーラ	4
20t積セミトレーラ	6
10t積トラック	12
計	22

(2) 現場組立、移動

本機の現場組立は、屋外で120t吊オールテレーンクレーンにより実施した（写真一7）。

表一3に組立歩掛を示す。今回のケースでは、民家に近接した場所であり、昼間の8:30～17:00の時間帯での作業となった。仮に、残業が可能で昼夜作業を実施すれば約1週間で完了できる（写真一8）。

なお、本機は現状エンジンを搭載しておらず、走行もすべて電力によるため、組立後の坑内への移動ではトラックに搭載した500kVAの発電機の電力により

表一3 本機組立歩掛

組立日数	作業内容		
	方数1 ^{*1}	方数2 ^{*2}	
	クレーン組立	1.0	1.0
	部材組立	11.5	11.5
	油圧配管、電気配線	5.5	1.0
	試運転、調整、クレーン解体	6.5	0.5
	計		14.0

基本、1方8時間作業

^{*1}方数1：実質方数（他の作業と同時作業を含む）

^{*2}方数2：拘束方数（部材組立と同時作業方数を除く）

作業員数

職種	延人工
作業指揮者・設計者	28
機械・油圧工	78
電気・制御工	39
クレーン運転者	15
計	160

機械工具数

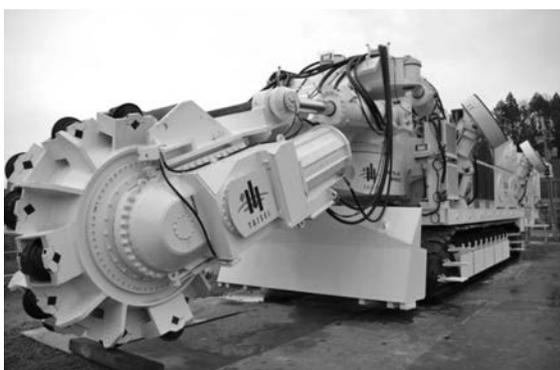
機械名	延台数
120t吊オールテレーンクレーン	14
25t吊ラフテレーンクレーン	1
トルクレンチ	10
チェーン（レバー）ブロック各種	10
その他一般工具	14



写真一七 組立中の本機



写真一九 掘削状況（切羽面）



写真一八 組立を完了した本機



写真一〇 掘削状況（掘削機と集塵機をセット）

実施した。

(3) 掘削

本機による掘削は、開始当初一部の不具合やトラブルが発生し、その対応を余儀なくされた。各種改善の結果、トラブルは収まり、本格的掘削に耐えることを確認したが、その後発破可能区間に入り、現在貫通側の国道近接箇所での掘削に備えている（写真一9、10）。

現地での、掘削能力、精度、環境影響については、後日の報告とさせて頂く。

5. おわりに

本開発機械 TM-100 は、従来困難であった 100 MPa 超の硬岩を、ディスクカッタによる圧砕で掘削可能にしたものである。自由断面で掘削できるディスクカッタ型硬岩掘削機としては世界で初めての実用機と言える。今後、硬岩で発破掘削方式が採用できない場合に大きなツールとなることが期待される。



《参考文献》

- 1) 株式会社三井三池製作所、ロードヘッジ SLB-350S カタログ、<http://www.mitsumiike.co.jp/product/excavator/rh/index.html>

- 2) Aker Wirth GmbH, Wirth Mobile Tunnel Miner カタログ、http://www.infomine.com/suppliers/PublicDoc/AkerWirth/Mobile_Tunnel_Miner_en.pdf
- 3) 社団法人日本建設機械化協会・建設機械化研究所（現、一般社団法人日本建設機械施工協会・施工技術総合研究所）、硬岩トンネル自由断面掘削機（MM130R）性能確認試験報告書、1996.12
- 4) 一般社団法人日本トンネル技術協会、TBM ハンドブック、2000.2.

【筆者紹介】

内田 正孝（うちだ まさたか）
大成建設株式会社
土木本部 機械部 機械技術室
主事



足達 康軌（あだち やすき）
大成建設株式会社
関西支店 新名神高速道路川西トンネル工事作業所
作業所長



松尾 陽介（まつお ようすけ）
株式会社三井三池製作所
産業機械事業本部 技術部 産機流体設計グループ

