

## 論文の内容の要旨

論文題目 「圧砕方式を採用した硬岩自由断面掘削機の  
開発に関する研究」

氏 名 領 家 邦 泰

近年、トンネル施工が都市部近郊において行われる場合や、既設構造物に近接あるいは隣接・交差するなどの施工条件が増加してきている。また、エネルギー資源や放射性廃棄物などを岩盤を利用して地下貯蔵する施設などの検討が行われ、掘削工法として空洞周辺地山のゆるみ・損傷を最小限に抑えることが要求されるようになってきている。

硬岩トンネルの掘削は通常、発破工法により施工されている。上記のような条件下では、発破により生じる振動、騒音、低周波の影響が環境問題上あるいは構造物の損傷、供用施設の運用妨害等として問題となることがあり、発破の使用が厳しく制限を受ける。こうした場合の対策工法には、制限・制御発破や無発破工法として割岩工法、機械掘削が用いられてきた。各工法には、施工条件に対する適応性と硬岩対応性において次のような課題がある。

制限・制御発破による振動低減度合は20～50%程度、騒音・低周波低減は30dB程度であり制約条件をクリアできない場合がある。また発破工法そのものが採

用できないこともある。割岩工法は、岩盤の一次破碎に用いられる。硬岩対応性はあるが自由断面形成に多大な時間を要し、掘進速度が遅く掘削コストが高い。ブーム式掘削機は、実用的適用範囲が岩盤一軸圧縮強度 100MPa 程度であり、100MPa 以上の亀裂の少ない岩盤では掘削能率が低下し、ピック消費量、掘削コストが増大する。TBMは、硬岩対応性は十分であるが掘削断面形状が円形に限定され、かつ機械費が高く、運搬・組立・解体コストが高いため延長の短いトンネルでは掘削コストが高くなり経済的に適用が困難となる。また掘削径変更の自由度が小さい。油圧ブレーカは、単独掘削における地質適用範囲が狭く、亀裂の少ない岩盤では一軸圧縮強度 50~60MPa が限界である。モービルマイナーは、硬岩対応能力は高いが掘削断面は天端と底盤がフラットで角の丸い長方形のみであり、カッターホイールのスウィングブームジャッキの制御技術や振動吸収技術が確立していない。Bouygues 式TBMは、中硬岩~硬岩の掘削能力はブーム式掘削機程度であり、掘削断面は円形断面のみで大断面掘削に適さない。Undercutting Method は、結晶質の硬岩での掘削効率が課題であり、非円形断面を掘削できるが限定された断面形状のみであり大断面トンネルへの適用は困難である。以上から、次の結論が得られた。

「中硬岩~硬岩（一軸圧縮強度=50~250MPa 程度）からなる地山に高速道路トンネルクラス（約 50~80m<sup>2</sup>程度）の断面を、経済的かつ効率的に自由な断面形状で掘削できるトンネル掘削機が存在しない」。

また、トンネル施工は特殊な労働条件であり、危険を多く伴う作業であるとの認識があり、今後の技術者不足への対応上から、作業の安全性、坑内作業環境良化、省力化、危険・苦渋作業の根絶のため、トンネル施工は高度な機械化と自動化が要求されている。

所定の掘削能力と掘削精度を確保できる硬岩自由断面掘削機を実現するためには、硬岩対応性の高い掘削機構、掘削時の掘削反力の取り方、マシンの剛性・強度、カッター部の移動制御と振動吸収等の問題点を克服する必要があった。

今回の研究により、以下の特徴と性能を持つ硬岩自由断面掘削機を完成させた。

①クローラ式レンジングヘッド型式でディスクカッタによる圧碎方式を採用し、

一軸圧縮強度 50～250MPa 程度の岩盤を掘削断面積約 50～80m<sup>2</sup> の自由な断面形状で全断面掘削が可能である。純掘削能力は、一軸圧縮強度 150MPa の花崗岩の場合で 24.3m<sup>3</sup>/hr (最大掘削能力試験結果では 31.35m<sup>3</sup>/hr) である。従来のブーム式掘削機の実用的適用範囲が一軸圧縮強度 100MPa 程度であるのに対し、開発機ではその掘削機構から考えて範囲を 250MPa 程度まで拡大し、さらに 300MPa 程度でもカッタ貫入量とカーフ間隔を調節することで対応可能である。掘進速度は、一軸圧縮強度 100～150MPa の範囲では割岩工法やブーム式掘削機に比べ 3 倍以上となる。

- ②PLC (Programmable Logic Controllers) による自動掘削制御により、掘削時のカッタホイール移動制御と振動吸収システムにより所定の掘削精度と掘削能力を保ちながら、一掘進中のグリッパの盛替えを含むマシンの移動・セットの繰り返し、カッタホイールの移動・停止、方向・姿勢制御、ずり積込み等、一連の掘削運転操作を無人運転可能とした。
- ③カッタホイールによる掘削で円滑な掘削断面が得られ、かつ形成される球形形状切羽の地山安定効果により、地山のゆるみと損傷を最小限に抑えることができ、一次支保の低減化が可能となる。
- ④掘削時の粉じん対策にダストシールドと集じん機の組合せが用いられ坑内環境が良化し、さらに自動掘削と支保低減化により切羽作業が減少し、安全性が大幅に向上するなど、施工環境が改善される。

次に、完成した開発機の特性を基に、掘削効率をより向上させる研究を行った。第一は、岩盤物性評価と掘削効率向上化である。開発機の掘削データから求めた掘削体積比エネルギー分布が切羽で調査した岩盤物性分布と一致し、岩盤の硬軟特性変化を良く反映することを示した。掘削体積比エネルギーを指標とする岩盤物性評価をリアルタイムに行い切羽岩盤の硬軟分布を求め、その分布に合わせた切り込み深さとカーフ間隔を最適な組合せに自動設定することで掘削効率向上化を可能とする方策を確立した。また、掘削体積比エネルギーのトンネル進行方向分布を求めることで機械的方法による地質構造の可視化が可能となり、外挿的に切羽前方岩盤の変化を予知し、事前に軟弱部に対する補助工法や一掘進長の短縮化などの対処により、地質的トラブルによる掘削効率低

下の最小限化も可能となることを示した。こうした手法は、TBM では困難であり、ブーム式掘削機においては実施されていない当開発機特有のものであり、今後の機械掘削工法の方向性を示すものである。

第二に、通常のトンネル掘削機ではごく稀にしか実施されていない振動測定を開発機において実施した。設計段階より使用してきたマシン性能と掘削時挙動を分析するシミュレーションプログラムについて、測定結果により得たマシンパラメータを用いて、開発機の特性に合わせたコードの変更を行い、今後のマシンに新たに構造的設計変更を検討する場合や異なる岩盤の掘削を行う場合の予測ツールとした。同プログラムを用いて、トンネル形状、岩盤強度と岩質、最大カッタ貫入力等を入力して、最適運転ポイントとなる貫入量とカーフ間隔の組合せを求める方法を提案し、岩盤強度別に最適な組合せを求めた。岩盤強度と掘削効率最適化との関係では、貫入量の影響は小さく、カーフ間隔を岩盤強度に合わせて変化させることが効果的であることを指摘した。

最後に、開発機のカッタホイールによる掘削では、切羽形状が球面の一部を組合せたこれまでにない形であることから、球面切羽の切羽安定効果と機械掘削では発破工法に比べ地山のゆるみ、損傷が少ないことの検証を試みた。軸対象モデルによる逐次掘削弾塑性有限要素法解析結果からは、球面切羽形状は通常の平面形に対し切羽の押し出し変形量で約 18%、Druker-Prager の破壊基準から想定した地山のゆるみ範囲は約 59% 各々減少する結果が得られた。掘削時に行った切羽前方弾性波速度検層の結果からは、地山ゆるみ領域判定深度は約 1.5m であり、発破工法に比べ半分以下であることが検証された。この結果に基づき一次支保低減化を試み、計測によりその妥当性を確認した。トンネル掘削後の地山と支保の変形、支保部材断面力ともに許容範囲内に収まり、支保構造として適切であることが確認された。

以上、開発した掘削機の硬岩対応性と自動運転制御、岩盤物性評価手法などの技術は、一般のトンネル施工においても応用可能なものである。