

[別紙2]

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 領家 邦泰

領家邦泰氏により提出された論文には、比較的強度の高い岩石を対象として、任意形状の岩盤内構造物に適用できる、圧砕方式を採用した硬岩自由断面掘削機の開発経緯と同機の使用実績、さらに将来展望がまとめられている。

本論文の序論では、無発破工法技術が必要とされる背景、および従来技術の現状と課題を踏まえて、硬岩自由断面掘削機の開発に取り組む目的が述べられている。

第2章では、まず発破工法の周辺に及ぼす影響と規制の実態をまとめ、次に従来工法を分類し、各工法の開発の歴史や機構、施工方法、特徴、硬岩対応に関する掘削能力の実績を調べ各々の問題点と課題を整理している。そして従来工法の硬岩掘削に対する適用性と問題点を、岩盤一軸圧縮強度を尺度とした比較表にまとめ、この結果、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80m<sup>2</sup>）の断面を、経済的かつ効率的に自由な形状で掘削できるトンネル掘削機が存在しないことを示している。

第3章では、掘削機構としてディスクカッタによる圧砕方式を採用することにした理由、硬岩に自由断面形状を掘削できる掘削機の開発には基本構造が最重要課題であることが述べられている。さらに開発目標の設定、開発方法と実施内容が述べられている。

第4章では、開発機の掘削性能試験と実施工を行った高取山（北行）トンネルの工事概要、地質概要、施工概要が述べられている。性能確認試験の結果をまとめるに当たり、まず実施工程と岩盤状況が示され、次に初期掘進段階で発生したトラブルと改造内容が述べられている。掘削性能のまとめから、純掘削能力は、平均一軸圧縮強度150MPaの花崗岩において24.2m<sup>3</sup>/hrと設計時想定値を上回る能力が確認で

き、その他の機能も目標をクリアし従来のブーム式掘削機との比較において優れた結果を得たことが示されている。

第5章では、掘削体積比エネルギーが、岩盤物性評価の指標となり得る可能性が示されている。次にこれを用いて開発機の掘削効率を向上させる方策の提案と、開発機の振動測定結果とコンピュータシミュレーションプログラムのキャリブレーション経過がまとめられている。さらに、球面形状切羽安定化効果と地山のゆるみ領域について、数値解析結果と切羽前方弾性波速度検層による検証結果が示されている。

硬岩トンネルの掘削は通常、発破工法により施工されてきた。近年、発破により生じる振動・騒音・低周波が周辺環境や近接構造物、周辺地山への影響が問題とされ、発破工法の使用が厳しく制限される場合が多くなっている。従来用いられてきた対策工法では、こうした条件のトンネルを効率的かつ経済的に掘削するには課題が多く残されていた。特に、機械掘削では硬岩を自由な断面形状で効率よく掘削できる技術が確立されていなかった。本論文は、この技術の空白部分を埋めるべく、硬岩自由断面掘削機の開発とその性能を確認することを目的としており、今回の研究成果として、以下の特徴を持つ硬岩自由断面掘削機を開発した。

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砕方式を採用し、一軸圧縮強度50～250MPa程度の岩盤を掘削断面約50～80m<sup>2</sup>の自由な断面形状で全断面掘削できる。純掘削能力は、一軸圧縮強度150MPaの花崗岩の場合で24.2m<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ブ間隔を調節することで対応可能と考えられる。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。

2) PLC (Programmable Logic Controllers) による自動掘削制御により、所定の掘削能力と精度を保ちながら自動（無人）運転が可能である。従来のブーム式掘削機の自動制御機能は、切削ドラムの移動制御のみであるが、開発機ではこれに加えて掘削時の振動を吸収し掘削精度を向上させる機能と、一掘進長掘削中のグリッ

パの盛替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) 円滑な掘削断面が得られ，かつカッタホイールによって形成される球面形状切羽の地山安定効果により，他工法に比べ地山のゆるみと損傷を小さくする。この結果，一次支保低減化が可能となる。切羽前方弾性波速度検層の結果，切羽鏡面の地山ゆるみ領域は深度約1.5m程度であり，発破工法の半分以下である。トンネル変位量，支保部材力測定結果から，一次支保低減の妥当性が確認された。

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，施工環境が良化する。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。クローラ走行により坑内移動が容易で機動性があり，地質変化に対応しやすい。

本研究では，開発機の特性を活かしてさらなる掘削効率向上化のための研究として，掘削体積比エネルギーが岩盤物性評価の指標となり得ることを示し，この手法を用いた開発機の掘削効率向上化の方策を提案している。以上，開発した掘削機の硬岩対応性と自動運転制御，岩盤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できると考えられる。なお，今回の性能確認試験により得られた成果は，六甲花崗岩の平均一軸圧縮強度150MPa（最大で175MPa）までの地山によるものである。このように，本研究で開発された掘削機の硬岩対応性や自動掘削運転技術，岩盤評価手法，等の研究成果は優れたものであり，今後のトンネル機械掘削工法発展に寄与するものとする。

領家邦泰氏は，岩盤掘削の効率化を目指してこれまでと一線を画する掘削機械を開発するとともに，原位置での試験と施工を通じて，圧砕方式を採用した硬岩掘削に関する新しい知見を得たといえる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。