

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	油圧式削岩機を利用したトンネル切羽前方地山の圧縮強さと弾性波速度分布の推定に関する研究
氏 名	塚本 耕治
<p>山岳トンネル工事において、切羽前方地山の状態を迅速かつ精度よく予測することは、安全で経済的な施工に必要不可欠である。本論文では、油圧削岩機を用いてトンネル周辺の多様な地山の物性情報を合理的かつ精度よく評価できる調査法の開発に取り組んだ研究成果を取りまとめたものである。</p> <p>第1章では、トンネル周辺地山における調査法の現況と問題点についてまとめ、施工者の立場で実施する調査において、施工への影響が少なくトンネル周辺の地山状態、および圧縮強度や弾性波速度などの地山物性値を定量的かつ精度よく予測できる実用的な調査法に関する研究・開発の必要性和研究の目的を明らかにした。</p> <p>第2章では、削岩機を用いたトンネル地質調査に関する既往の研究についてまとめた。このうち、トンネル切羽から行う調査のうち削孔検層法は、探査時間が数時間で施工への影響が少なく探査結果の信頼度が比較的高い調査法である。同じ地山を削孔する場合でも設定する打撃圧や回転圧によって削孔速度が変化し、地山状態を定量的に評価することが難しいなどの問題点を述べるとともに、支保設計に反映できる圧縮強度や弾性波速度などの地山物性に関連づけた調査法への展開について述べた。</p> <p>第3章では、削孔検層法で使用する油圧式削岩機の作動原理、削孔機構とダンパ機構の概要、削孔速度と地山性状の関係、従来の地山評価指標である掘削体積比エネルギーの概要についてまとめた。まず、油圧式ドリフタの作動原理では、油圧ポンプから油圧ドリフタに作動油が流れることにより、ピストンと作動油の流れ制御するバルブが連動することによって、油圧ドリフタの打撃が生成されること、このバルブの制御によってサージ圧が発生して打撃圧の脈動や衝撃的な振動を発生することを示した。次に、油圧式削岩機の地山評価指標の一つである掘削体積比エネルギーを切羽前方地山に適用した結果では、掘削体積比エネルギーと切羽観察による切羽評価点との間に相関があること、支保パターンと対応がよいことを確認した。一方で、同じ地山を削孔した場合でも削孔速度や掘削体積比エネルギーの値が異なり、削孔速度や掘削体積比エネルギーを用いて地山の圧縮強度などの物性値を推定することが難しいことがわかった。</p> <p>第4章では、油圧式削岩機の打撃により生じるダンピング圧の脈動振幅を用いて地山の圧縮強度を予測する調査法の開発についてまとめた。まず、圧縮強度が既知である試験体の削孔実験を行い、地山の反発力を油圧ドリフタ内のダンパ装置の油圧で吸収することに着目し、ダンピング圧の脈動振幅の大きさと圧縮強度の間に相関関係があることを明らかにした。また、油圧削岩機の打撃圧を大きくして削孔する場合には、ビットから地山に与える打撃エネルギーが打撃圧に比例して増大するため、地山からビットの伝わる反発エネルギーも相対的に増大してダンピング圧の脈動振幅が大きくなる。このことからダンピング圧の脈動振幅を打撃圧で除した「正規化したダンピング圧の脈動振幅」を地山評価指標として提案した。この正規化したダンピング圧の脈動振幅は、従来の地山評価指標である掘削体積比エネルギーによる結果と比較して、圧縮強度との相関が強いこと、打撃圧やフィード圧による影響を受け難いことなどの点を確認し、地山の圧縮強度の予測に有効であることを示した。</p>	

第 5 章では、油圧削岩機が地山を削孔する際のビットの打撃振動を利用して、切羽前方地山の弾性波速度および速度層構造を求める調査法の開発についてまとめた。まず、事前の打撃実験により油圧ドリフタに取り付けたパイロットセンサー（加速度計）の振動からビットが地山を打撃する時刻を求められることを示した。次に、パイロットセンサーの振動波形には、バルブの切換えで生じるサージ圧による 2 つの振動波形が発生すること、ピストンがシャンクロッドを打撃した波形は、油圧ドリフタの打撃工程との対比から最初の振動波形より前にあり、サージ圧による波形の振幅に比べて相対的に小さくことを確認した。トンネル現場の切羽に設置した受振器で計測した受振波形の相互相関によるタイムラグを求め、整列した波形をスタッキングすることで受振波形の S/N 比を向上し、初動走時の読み取り精度を向上させた。削孔位置に近い受振点の初動走時を削孔深度方向の走時曲線を用いてトモグラフィ解析を行うことにより切羽前方の弾性波速度分布を求めた。この手順により求めた切羽前方地山の弾性波速度分布は、削孔検層による掘削体積比エネルギー分布や坑内弾性波探査から求めた側壁の弾性波速度分布の結果と整合していることを確認し、地山の弾性波速度分布の予測に有効であることを示した。

第 6 章は、本論文の結論であり、各章で得られた成果をまとめるとともに、各推定法の適用範囲、今後の課題についてまとめた。

本研究の成果は、トンネル切羽前方の地山性状を把握する削孔検層法による調査において、油圧式削岩機のダンピング圧の脈動振幅を用いて地山の圧縮強度を調査する方法と削孔振動を利用して地山の弾性波速度分布を調査する方法を開発したことである。すなわち、油圧式削岩機を用いて削孔速度のみで地山の硬軟の程度を識別する従来削孔検層法を地山物性である圧縮強度や弾性波速度分布を把握できる調査技術に拡張し、その実用性を確認したことである。

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 0764 号	氏名	塚本 耕治
最終試験担当者	主査 審査委員 審査委員 審査委員 審査委員	進士 正人 清水 則一 鈴木 素之 太田 岳洋 林 久資	
【論文題目】			
油圧式削岩機を利用したトンネル切羽前方地山の圧縮強さと弾性波速度分布の推定に関する研究 Study on estimation of compressive strength and elastic wave velocity distribution in the ground ahead of tunnel face using hydraulic rock drill			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】			
<p>山岳トンネル建設工事において、トンネル切羽前方の地山状態を迅速かつ精度よく予測することは、安全で経済的な施工にとって必要不可欠である。本論文は、トンネル建設工事においては欠かすことができない施工機械である油圧削岩機が、切羽前方地山を削孔するときの発生振動の中で特にダンピング圧の振動によるトンネル前方の地山の圧縮強さの推定や振動の受信記録による前方地山の弾性波速度分布の推定を合理的かつ精度よく行うための調査法の開発成果をとりまとめた。</p> <p>第1章では、トンネル前方切羽調査法の現状と問題点について取りまとめた。特に、施工会社のエンジニアとして、施工プロセスへの影響が少ない上にトンネル周辺の地山状態および圧縮強度や弾性波速度などの地山物性値を定量的にかつ精度よく予測できる実用的な調査法に関する既往研究を整理した。</p> <p>第2章では、トンネル建設に利用する油圧式削岩機を活用したトンネル前方地質調査に関する既往研究をとりまとめた。既往研究を調べる中で、トンネル切羽から実施する削孔検層法は探査時間が数時間で施工への影響が少なく探査結果の信頼度が比較的高い調査法であることがわかった。しかし、この調査法では、同じ地山を削孔する場合においても、設定する打撃圧や回転圧により削孔速度が変化し、地山状態を定量的に評価することが難しい問題点を有することがわかった。そこで、圧縮強度や弾性波速度などより定量的な地山物性に関連付けるための調査法の展開について述べた。</p> <p>第3章では、削孔検層法で使用する油圧式削岩機の作動原理、削孔機構とダンパー機構の概要、削孔速度と地山性状の関係、既往研究で提案されている地山評価指標である掘削体積比エネルギーの概要について取りまとめた。そして、トンネル建設現場で削孔検層法を適用した際の掘削体積比エネルギーと切羽評価点、支保パターンとの間に相関性があるものの掘削体積比エネルギーから地山の圧縮強度などの物性値を推定することが難しいことを示した。そのうえで、削岩ピストンの打撃の挙動に連動して油圧ポンプから削岩機に作動油が流れる時、バルブの制御によりサージ圧が発生し打撃圧の脈動や衝撃的な振動が発生することを示した。</p> <p>第4章では、圧縮強度が既知である試験供試体に対する油圧式削岩機による打撃削孔実験を行い、打撃により生じるダンピング圧の脈動振幅の大きさと圧縮強度の間に相関関係があることを明らかにした。そして、ダンピング圧の脈動振幅を打撃圧で除した「正規化ダンピング圧脈動振幅」を地山評価指標として提案した。そのうえで、この指標が掘削体積比エネルギーによる結果と比較して、圧縮強度との相関がより高いだけでなく、打撃圧やフィード圧による影響を受けにくいことを確認し、地山の圧縮強度の予測に有効であることを示した。</p>			

第5章では、油圧式削岩機が地山を削孔する際のビットの打撃振動を利用して、切羽前方地山の弾性波速度および弾性波速度構造を求める調査法の開発について取りまとめた。まず、事前の打撃実験により油圧式削岩機に取り付けた加速度計振動からビットが地山を打撃する時刻が決定できることを示した。次に、加速度計の振動波形には、油圧バルブの切り替えで生じる2種類の振動波形が発生すること、打撃による振動波形はサージ圧による振動波形より大きいことを確認したうえで、トンネル切羽面に設置した受信機で計測された受信波形の相互相関により時間のずれを修正し、受信波形のS/N比を向上し初動走時に読取り精度を向上させた。削孔検層による掘削体積比エネルギー、圧縮強度分布や坑内弾性波探査から求めた側壁の弾性波分布結果との整合性を確認し、調査法による地山弾性波速度分布の予測に有効であることを示した。

公聴会では、学内外から40名を超える参加者があり、①油圧式削岩機の機種が異なる場合のフィード圧の影響をどのように考えているか？②弾性波トモグラフィーの解析精度を確保するための探査深度はどの程度と想定しているか？また、探査結果を得るまでの時間はどの程度かかるか？③現場適用において得られた削孔検層結果から推定される地山強度と切羽評価点との関係はどれくらいと考えているか？④実際の地山においてCIとCIIとの違いを削孔検層から求めることが可能か？⑤フィード圧と打撃圧を正規化する方法についての見解を聞きたいなどの研究全般に関する実務的な質問が多数あり、いずれの質問に対しても発表者から適切に回答がなされた。

以上より、本論文は、トンネル前方の地山性状を把握する新しい削孔検層法のひとつとして、油圧式削岩機のダンピング圧脈動振幅を用いた地山圧縮強度の推定法と削孔振動を用いた前方地山の弾性波速度分布を推定する方法を提案しており、多くの知見を与えると共に学術上きわめて重要な研究であり、独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分に値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応対などを総合的に判断して、最終審査は合格とした。

なお、関連論文の発表状況は以下のとおりである(関連論文2編)。

【関連論文】

- (1) 塚本耕治, 進士正人: 油圧式削岩機の削孔振動を利用したトンネル切羽前方地山の速度分布予測, 土木学会論文集F1(トンネル工学)特別号, 第73巻, 第3号, pp.I_46~I_60, 2017.
- (2) 塚本耕治, 小泉匡弘, 進士正人: 油圧式削岩機のダンピング圧変動を利用した地山の圧縮強度予測, 材料, 第68巻, 第4号, 平成31年4月印刷予定.