

論文の内容の要旨

論文題目 長尺さく孔による切羽前方探査に関する研究

氏 名 山 下 雅 之

我が国の山岳トンネル特有の立地環境下において、地表面からの事前地質調査のみではトンネル建設プロジェクトに係る地山リスクを十分に低減するだけの地質情報が得られていないのが現状である。こうした背景から、地山リスクがトンネル掘削時に集約される傾向にあり、そのリスクを低減する手段として掘削段階における調査（切羽前方探査）が広く適用されてきた。掘削段階で実施する切羽前方探査には、施工サイクルへの影響を最小限に抑え、かつ、事前調査以上の探査精度の確保が要求されており、その有力な手法として定量的な岩盤特性を直接得ることが可能なさく孔探査が知られている。しかし従来の手法では、長尺さく孔データを効率的に取得するための計測装置、計測方法およびデータ処理といった一連の探査システムの整備が不十分であるとともに、さく孔の長尺化に伴うさく孔深さの影響がさく孔データによる地山評価に十分考慮されていない等、多くの課題が残されていた。

本研究は、本探査手法が抱えるこれら諸問題を解決すべく、効率的な探査システムの構築および長尺さく孔時におけるさく孔深さの影響を定量的に明らかにし、長尺さく孔データによる岩盤特性評価の信頼性を向上させることを目的とした。

第2章では、山岳トンネルの建設プロジェクトにおいて切羽前方探査が必要とされる背景について詳述し、従来の探査手法についての技術の内容・原理や実施事例、技術の現状等を整理し、切羽前方探査の現状と問題点についてまとめた。

さく孔データから岩盤特性を精度良く評価するためには、いかに質の高いさく孔データを収集するかが重要となる。第3章では、さく孔探査のハード・ソフトのシステム整備を目的に探査装置、さく孔部材およびさく孔データ整理・評価ソフトから構成される一連の探査システムを構築した。

データ収録装置や計測装置からなる探査装置については、さく岩機を搭載したドリルジャンボや TBM 等の掘削機械に常設することにより、計測準備作業の簡便化・迅速化を確保した。また、探査装置の坑内常設にあたり、粉塵、湧水、振動等の過酷な環境に耐え得る処置も施した。これについては、鈴鹿トンネルにおける約 3,600 m 区間の連続探査実績により、その耐久性を確認することができた。さく孔部材については、ロッドとスリーブ継ぎ手を一体化させたロッドを採用することによりロッドの脱着作業の効率化を図るとともに、先頭ロッドに従来のものと比して径が大きく剛性の高い部材を使用することにより長尺さく孔時の直進性を向上させた。さく孔データの処理・整理については、作業の簡便化・迅速化を目指してさく孔データ処理ソフトを開発した。これを使用することにより、計測データの処理過程で最も時間・経験を要するさく孔データの抽出作業を半自動化して、データ処理時間を大幅に短縮させることができた。また、処理データのファイルフォーマットを CSV 形式に変換する機能を付加し、市販の表計算ソフト上での複数の処理データの整理・解析作業を可能とする等、データとその処理の汎用化を実現した。

第 4 章では、開発したさく孔探査システムを鈴鹿トンネル（TBM 先進導坑）に導入し、打撃圧、スラスト、さく孔部材等の条件を一定にしたとき、さく孔深さが長尺さく孔データに与える影響の評価を行った。評価手法としては、同じさく孔深さでのさく孔速度データを平均化することにより岩盤特性の影響を除去したさく孔速度の変動曲線を求め、その変動傾向からさく孔深さによるさく孔データの影響を定量的に評価した。鈴鹿トンネルでは鈴鹿花崗岩および鮎川層群（砂岩、泥岩層）を対象としたさく孔速度の変動曲線を得た。検討したところ、以下に示す 2 つの現象（ロッドでの弾性波の反射・減衰現象、ビットからの反射波の干渉現象）が関与して、さく孔深さによってさく孔速度が変化することが認められた。

- ・ロッド継ぎ手（連結部）での弾性波の反射・減衰：スリーブ一体型のロッドを使用した場合、ロッド継ぎ手 1 個あたりの弾性波は約 1.5 % 減衰する
- ・反射波との干渉：弾性波のビットからの反射波の往復走時（特に弾性

波の1往復および2往復に相当する時間)が打撃間隔とほぼ一致する
区間においてさく孔速度の増加傾向が認められる

さらに、さく岩機の機種や打撃圧(打撃数)を変えた三坂トンネル、タニ
イソトンネルの事例においてもこれらが現れることを確認した。ロッドで
の弾性波の反射減衰現象は、室内試験や原位置計測で指摘されていた事項
であるが、原位置のさく孔で定量的に評価したのは本研究の成果の一つと
考える。また、従来指摘されていなかった弾性波の干渉の影響も本研究で
新たに指摘した。

鈴鹿トンネルにおけるさく孔探査で得られたさく孔速度を統計的に検
討した結果、以下の知見が得られた。同じさく孔深さのさく孔速度の平均
値で除して求められたさく孔速度 V^* の各さく孔深さにおける累積確率分
布はほぼ一致し、その変動係数は0.25であった。これは、さく孔速度に及
ぼす岩盤特性の影響とさく孔深さの影響を分離できることを示唆している。

第5章では、同じさく孔深さのさく孔速度の平均値からなる変動曲線(マ
スターカーブ)でさく孔速度を正規化することにより、実測データからさ
く孔深さの影響を除去することにした。また、正規化して得られた V^* の逆
数($1/V^*$)が機械掘削時の岩盤評価の指標として広く用いられている掘
削体積比エネルギー(単位掘削体積あたりの消費エネルギー)に比例する
ことを示し、長尺さく孔データから岩盤特性を評価する指標として $1/V^*$
を提案した。 $1/V^*$ と、トンネル掘削時の岩盤調査結果やTBMの掘削抵抗
で得られた岩盤強度との比較検討から、 $1/V^*$ が岩盤特性を比較的よく表
していることを示し、 $1/V^*$ による岩盤特性の評価手法の有効性を確認し
た。さらに、 $1/V^*$ を求めることにより、断層や弱面等の不連続面の性状
およびその出現位置の推定も可能であることを、本トンネルに出現した幾
つかの断層出現区間における探査結果から明らかにした。

さく孔探査システムで使用するさく孔部材については、スリーブ体型
のロッドを使用することによる作業性の向上およびさく岩機からビットに
伝達される弾性波の反射・減衰の低減をはかった。しかし、さく孔時に形
成された孔壁が不安定となるようなぜい弱地山においては、ビット後方
における孔壁崩壊の頻発により長尺さく孔が困難となる場合がある。この問

題を克服するために，第6章では，通常のさく孔が困難な湧水の多いぜい弱地山におけるさく孔探査の適用に際し，孔壁を保持しながら安定して長尺さく孔を行う手法として，さく孔ロッドとケーシング鋼管を組み合わせた2重管さく孔を提案した．実施結果をまとめると次のようになる。

- ・2重管さく孔の採用により，通常のさく孔が困難なぜい弱地山においても約30 mの長尺さく孔が可能
- ・今回使用したインピーダンスの変化が大きいロッド継ぎ手を用いた場合，ロッド継ぎ手1個あたりのさく孔速度減衰率はスリーブ体型ロッドの4倍の6.0%を示す
- ・さく孔速度の減衰率が大きいロッド継ぎ手を用いた場合，スリーブ体型ロッドの使用時に特徴的に認められた弾性波の反射波と打撃の干渉は認められない
- ・通常のさく孔部材を使用した場合と同様に，掘削体積比エネルギーに比例する $1/V^*$ による岩盤特性の評価が可能である
- ・ $1/V^*$ に探査区間の平均的な掘削体積比エネルギーを乗じて求めた掘削体積エネルギー(E_d)による定量評価が可能である

このように，通常のさく孔が困難なぜい弱な地山においても，さく孔部材を工夫することにより約30 mの長尺さく孔が可能であることを示すとともに，本研究で示したさく孔深さの影響除去および岩盤特性の評価手法が2重管を使用した場合にも適用可能であることを示した。

本研究で確立した，長尺さく孔による切羽前方探査手法は，今後トンネル建設プロジェクトに広く用いられ，事前地質調査における調査不足に係る地山リスクを低減していくものと考えられる。