

氏 名	木 村 哲
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2497 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 土 木 シ ス テ ム 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	トンネルの情報化施工における切羽前方地質評価システムの構築に関する研究

(主 査)
論文調査委員 教 授 大 西 有 三 教 授 松 岡 俊 文 教 授 大 津 宏 康

論 文 内 容 の 要 旨

近年山岳トンネルの施工においては、コスト縮減や施工の合理化を目的として TBM 工法の導入や NATM 工法での長孔発破採用などに代表される高速施工技術を適用する事例が増えている。地山状況を確認しながら行う掘削では、予期せぬ不良地山に遭遇した場合にも適切な対策を行うことができたが、高速施工では地質不良箇所の予見が不十分なことによる地山崩壊事故が増加し、その対策工に工費や工程を割かれるなどの問題点が生じている。すなわち高速施工において切羽前方の地質を的確に把握することは、工事の安全ばかりでなく、効率的な支保の選定や工程の確保にとって重要な課題となっている。そのため、施工中のトンネル切羽から未掘削区間の地質情報を把握するための前方探査手法として、これまで弾性波探査や電気・電磁波探査といった技術が適用されているが、いずれも間接的に地質情報を得るためにデータの考察が難しく、また地質条件によって探査精度が大きく左右されるという問題を生じている。このような背景を鑑み、本研究は油圧削岩機を用いて直接的に切羽前方の地質情報を把握し、合理的なトンネル施工を実現するための研究をまとめたものである。具体的には、パーカッションドリルによって切羽前方の地山を削孔し、それによって得られる各種データと地山情報の関連を考察し、情報化施工技術として活用するためのデータ解析法を組み込んだ切羽前方の地質評価システムを構築するもので、本論文の構成は、序章および結論を含め7章から成っている。

第1章は序論であり、本論文の研究の背景と目的について論じるもので、トンネル施工における各種事前調査法を考察し、当該事前調査による地山情報取得の困難さを指摘すると共に、施工中のトンネルの工期遅れの原因として、切羽の崩壊に伴う事故の占める割合が圧倒的に多いことを事例に挙げ、切羽前方地質調査の必要性を論じている。

第2章は、前章に記述した切羽の崩壊原因を分析した結果、地質構造の急変に対して選択された施工法が不適切であったことが原因であると考察する。次にその考察を考慮した上で、現在実施されている切羽前方の地山の探査法の事例を挙げ、各探査法の概要と特徴をまとめるとともに、間接的に地山情報を得る手法の探査精度から見た適用範囲や限界などの問題点を整理し、本研究による直接切羽前方の地山情報を得る穿孔探査法の必要性を論じている。

第3章は、トンネル切羽の地山構造を考察するための穿孔データの分析法について研究した成果を述べる。従来より、切羽前方の地山に関しては、さぐり削孔と称される穿孔法が用いられてきた。これは、削孔速度を地山構造と結びつけたものであるが、本研究は削孔速度だけではなく、穿孔に伴うパーカッションドリルの給進力、トルク、打撃圧力および送水圧力などのデータを収集し、それから求められる穿孔エネルギー、ダンピング圧および回転圧といったパラメータを用いることで正確に切羽前方の地質状況を判断することを考案する。本章では、この穿孔探査で得られる各パラメータと地質性状との関係を物理的な意味を加味して考察し、現場での適用事例より当パラメータがこれまでにない高精度で地山構造を反映していることを示す。具体的には、コアボーリング調査結果との比較により、岩盤分類、支保パターン、RQD および変形係数に対する穿孔パラメータとの相関を考察し、穿孔エネルギーが大きくなる区間が存在するか否かで岩盤分類が可能であること、また、穿孔エネルギーと RQD とは無相関ながら変形係数と相関を有していることを示す。さらに、それらパラメータを活用

した地山判定と支保パターン選択を適用したいくつかの現場の事例より、穿孔データを利用した切羽前方地質評価システム構築の具現化が可能であることを実証している。

第4章は、前章で考察した穿孔探査法の適用例として混在岩からなる中硬岩地山あるいは脆弱地山における穿孔データと地山構造の関係から、特殊な地質構造の地山に適した穿孔探査手法の開発について論じる。まず混在岩から成る地山への適用においては、中硬岩地層では穿孔データがバラツク傾向にあるが、いくつかのデータの処理方法の検討結果から、穿孔パラメータを1mごとの平均値として評価していくことで支保パターンを判定できることを考案する。さらに、10m区間の連続的なデータの平均値を考慮することで、部分的な地質ぜい弱部の出現によるバラツキの影響を取り除くことが可能であることも実証する。湧水量の多いぜい弱地山への適用では、孔壁の崩壊に対処する長孔削孔技術の開発に取組み、ケーシング鋼管を使用する30mに及ぶ長削孔技術を考案している。この場合、ケーシング鋼管使用に伴う地山との摩擦の影響が生じるが、その補正法を構築することによって、これまで考察してきた穿孔データを使用することが可能であることを実証し、各種地山に対する穿孔探査手法の構築を検討することで本研究の実現を図り、その有用性を実証している。また、鉛直方向の穿孔探査手法を開発し、地表面の地山構造の探査法として、トンネル土被りの浅い区間におけるボーリング調査を補完する手法への拡大を図る。当手法を、トンネルの近傍に存在する空洞調査へ適用した結果、トンネル近傍の坑道の位置推定をコアボーリングに比較して工期およびコスト共に効率的に推定できることを実証し、本手法が補助工法の適否の判断に利用できることも実証している。

第5章は、穿孔探査手法の高度化技術に対する研究を論じる。まず弾性波あるいは電気・電磁探査法と本研究による穿孔探査法を組み合わせる手法について考察し、各種前方探査法の特徴を活かし、各手法の欠点を補完しあう経済的で効率的な探査法の開発に取組む。具体的には、TDEM法およびTSP法と穿孔探査法の組合せ探査を現場に適用し、工区全体の地山状況をTDEM法で把握し、工区が施工上問題となりそうな位置に近づいた際に、切羽からTSP法を実施して不良地山区間の見当をつけ、さらに掘削が当該箇所近づいた時点で穿孔探査法を実施する。また、地表から実施するTDEM法は鉛直方向の探査であり、トンネル切羽から実施するTSP法および穿孔探査法は水平方向の探査であるため、これら手法の組み合わせにより、水平成層と鉛直地質構造の立体的な構造を捉えることが可能となる。このように、各種探査法の能力を最大限に発揮する方法で実施し、各種探査結果で求められる様々な物性値を総合的に解析することにより、地山性状を正確に把握し施工に反映させることが可能であることをいくつかの現場において実証する。次にTBMトンネルでの取組みにおいて、地山性状を迅速に把握するため、TBM掘削時の機械データと穿孔探査法の組合せ手法を開発し、現場適用して技術の有用性を検証する。その結果、TBM掘削時の機械データであるスラスト推力やカッタートルクあるいはカッター貫入量から求まる推定岩盤強度と穿孔エネルギーの挙動が一致することを明らかにし、設定した管理基準値を基に穿孔探査を実施して地質を評価する手法の有効性を確認する。

第6章は切羽前方の地質評価を行うためのニューラルネットワークの適用について論じる。穿孔探査法を実際の現場に適用するためには、データ解析法を現場技術者に習得させる必要があるが、その一方で、経験が重要な要素となる施工管理に対する技術者の不足や、トンネル切羽状況を的確に把握できる坑夫の不足が問題になりはじめている。また、穿孔エネルギー以外の穿孔速度、ダンピング圧といったパラメータを加味することによる穿孔探査法の高度化を図る中で、それらの大量のデータをどのように客観的に判断すればよいかといった課題がある。そこで、探査データについて経験者が行った地山評価を学習パターンとして認識し、パターンマッチングすることで、迅速、かつ客観的・自動的に判定するための手法としてニューラルネットワーク法に着目し、これを評価手法に組み込む手法を開発する。現場での適用結果より、ニューラルネットワーク法は、適切な支保の選択も可能になることも実証し、ニューラルネットワークを適用した地質評価システムの実用化を可能にしている。

第7章は本論文における結論と展望をまとめたものである。将来展望においては、現在使用され始めているコンピュータ制御全自動ジャンボなどの新技術が普及することを前提に、本研究で構築した切羽前方評価システムを日常の施工管理に適用する際の拡張性とその方法について述べている。

論文審査の結果の要旨

わが国の複雑な構造を成す地形・地質の条件下にあって、トンネル計画時の事前調査の結果に基づいた設計と実際の施工には乖離が生じやすい。このため、施工段階でのトンネル切羽前方前方の地山構造を弾性波探査や電気・電磁波探査によって把握する試みが増えているが、いずれも間接的に地質情報を得るためにデータの考察が難しく、また地質条件によって探査精度が大きく左右されるという問題を生じている。このような背景を鑑み、本研究は油圧削岩機を用いて直接的に切羽前方の地質情報を把握し、合理的なトンネル施工を実現するための研究をまとめたものである。具体的には、パーカッションドリルによって切羽前方の地山を削孔して得られる各種データと地山情報の関連を考察し、情報化施工技術として活用するためのデータ解析法を組み込んだ切羽前方の地質評価システムを構築するものであり、本論文の主な内容は以下のとおりである。

- (1) 地山構造を考察するための穿孔データの分析法について研究し、穿孔に伴うパーカッションドリルの速度、給進力、トルク、打撃圧力および送水圧力などのデータを収集し、それから求められる穿孔速度、穿孔エネルギー、ダンピング圧および回転圧といったパラメータを用いることで正確に切羽前方の地質状況を判断することを考案する。また、穿孔探査データとして得られる各種パラメータと地質性状との関係より、正確な地山判定と支保パターン選択の手法を開発した。
- (2) 混在岩からなる中硬岩地山あるいは脆弱地山など穿孔探査法の実施が困難な構造の地山への適用法および各種地山のデータ分析法を開発した。具体的には、中硬岩地層では穿孔データの区間ごとの平均値化を図り、部分的なぜい弱部の出現によるバラツキの影響を取り除くことを可能にする。また湧水量の多いぜい弱地山への適用では、孔壁の崩壊に対処する長孔削孔技術の開発に取組み、ケーシング鋼管を使用する30mに及ぶ長削孔技術を考案すると同時に、ケーシング鋼管使用に伴う地山との摩擦の影響の補正法を構築することによって、これまで考察してきた穿孔データを使用することを可能にした。
- (3) 穿孔探査法の高度化技術への対応として、工区全体の地山状況を TDEM 法で把握し、施工上問題となりそうな位置に施工が近づいた際に、切羽から TSP 法を実施して不良地山区間の見当をつけ、さらに掘削が当該箇所近づいた時点で穿孔探査法を実施する手法を開発した。また、TBM 掘削時の機械データから求まる岩盤強度と穿孔エネルギーの挙動が一致することを明らかにし、設定した管理基準値をもとに穿孔探査によって地質を評価する手法の有効性を示した。このように各種探査法の特徴を活かし、お互いの欠点を補完しあう経済的かつ効率的な探査法を開発した。
- (4) 穿孔探査法を実際の現場に適用するためには、穿孔エネルギー、穿孔速度あるいはダンピング圧といった大量のデータをどのように客観的に判断すればよいかといった課題がある。そこで、探査データについて経験者が行った地山評価を学習し、客観的かつ自動的に判定するためのニューラルネットワークを評価手法に組み込む手法を開発した。現場での適用結果より、本手法の有用性を実証し、今後の技術者不足への対応も可能にした。

以上、要するに本論文は、情報化施工技術としてのトンネル切羽前方探査技術の開発に取り組み、定量的な判断が可能な、切羽前方地質評価システムを構築し、トンネル現場において実証したもので学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年2月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。