

氏名	やまもとたくし 山本拓治
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	論工博第3749号
学位授与の日付	平成15年7月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	トンネルの情報化施工における統合地質評価システムの構築に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 青木謙治 教授 齋藤敏明 教授 松岡俊文

論 文 内 容 の 要 旨

トンネル工事に共通する課題は、いかに迅速かつ精度よく切羽前方の地質を予測・評価し、現場での観察・計測に基づき適切な設計、施工を行うかということである。すなわち、より複雑な地質条件や施工環境の中で、合理的な施工を進めるためには高精度な地質予測に基づく情報化設計・施工システムを確立する必要がある。

本論文は、トンネルの情報化施工における重要な要素である切羽前方の高精度な地質予測と共に、地山の力学的・水理学的特性の評価を可能とする統合地質評価システムの構築を目的とした研究成果をとりまとめたものであり、序論、結論を含め8章から構成されている。

第1章は序論であり、山岳トンネルの情報化施工における統合地質評価技術の構築に関する研究の必要性と本研究の目的を明らかにすると共に、論文内容の概要を記述している。

第2章では、トンネルの切羽前方の地質評価技術の現状について調査し、山岳トンネルの各種前方探査技術やTBMにおける地質評価技術、TBMの計測技術や支保設計技術に関する技術課題を分析し、統合地質評価システムの構築に対するアプローチの方法を明らかにすることで本研究の独創性と位置付けを示している。

第3章では、弾性波反射法を利用した切羽前方探査技術及び孔間弾性波トモグラフィを用いたトンネルの地質評価技術に関する研究成果について論述している。現状の2次元トンネル反射法弾性波探査(TSP)に代わって、3次元トンネル反射法弾性波探査システムを新たに構築し、入射波と反射波の振幅の比である反射係数と等走時面によるイメージング技術を解析に導入し、3次元トンネル反射法弾性波探査手法としてのシステムを確立している。探査精度に関しては、従来の2次元探査法では、検出が困難であった空洞や小規模の破碎帯も把握可能で、3次元的な複雑な地質構造の分析を精度よく把握できることを明らかにしている。さらに、より詳細な地質構造の把握を目的として、3次元孔間弾性波トモグラフィに注目し、解析システムとして、波動方程式の有限差分近似により、各波線のスローネスの修正量に重みをつけて平均する修正SIRT(反復的再構成法)を利用したアルゴリズムを導入し、新たな3次元孔間弾性波トモグラフィ技術を構築している。このシステムを立坑掘削のための地質評価手法として適用した結果、複雑に分布する低速度層の位置を精度よく3次元的に把握できたことからボーリング調査では検知が難しい地質構造を把握できることを明らかにしている。

第4章では、切羽前方探査に際して地山の力学的物性値をより定量的に把握するため、ボーリング孔を利用した3つの新しい検層システム(削孔検層システム、貫入検層システム、速度検層システム)を提案し、実際の掘削観察結果と比較することによって、それぞれの探査方法の有効性と適用性を検証している。まず、地山状況を定量的に評価できる削孔検層システムを構築し、多くのトンネル・地下空洞に適用し、破壊エネルギー係数として定義した指標を用いることによって、地山の力学特性を合理的かつ精度よく評価できること、破壊エネルギー係数と地質状況との対応は良好であり、支保パターンの選定に対しても高い判別確率で適用が可能であることを確認している。さらに、削孔検層に用いるボーリング孔を利用して地山の弾性波速度を簡便に測定する速度検層システムを構築し、坑壁に受振点を圧着しないこのシステムを併用することで

精度よく前方地質の探査が可能となることを確かめている。

第5章では、TBMによるトンネル掘削を安全かつ合理的に進めるための地山情報を重視した新しいTBM情報化施工システムを構築し、地質条件や施工条件の異なるサイトに適用し、その実用性を確認している。まず、TBM機械データによる地質評価に関しては、様々な機械データの中でも、トルクと推力が、地質評価に最も重要な指標であることを見出すとともに、トルクデータや推力データから推定した岩盤強度や掘削体積比エネルギーを使用し、機械データによって岩盤等級の判定が可能となることを明らかにしている。さらに掘削ずりの形状変化に着目した地山評価システムとして、掘削されたずり形状をCCDカメラにより連続的に撮影し、大きさや形状のばらつきを統計処理することによって、地質評価が可能であること、さらに、ベルトコンベア上を移動するずりの重量変化を、ベルトスケールにより計測し、ずり重量の変化が地質、岩盤等級とほぼ対応することを確認している。またラインセンサーカメラのデジタル画像による壁面地質観察システムやデジタルカメラを利用した変位計測システムなど光学的な計測システムについても原位置における適用試験を行うことでTBMによる情報化施工に対する有効性を明らかにしている。

第6章では、山岳トンネルの情報化施工における合理的かつ高精度な地質評価システムとして3次元弾性波反射法による方法、検層による方法、TBM機械データによる地質評価技術の3者を体系化し、地球統計学的手法を利用し、精度の高い地質評価を可能にする統合地質評価システムの構築を試みている。切羽前方探査技術である削孔検層データとTBM機械データを地球統計学的手法を用い分析し、TBM切羽前方の高精度な地質予測を行うと共に、掘削の進行に応じて削孔検層データやTBM機械データについて坑壁地質評価点を含めた多変量解析を行い、TBM機械データ及び削孔検層データの関係を分析することで、直接的に支保パターンを決定することが可能な統計分析システムの構築に成功している。

第7章では、上記の統合地質評価システムの有効性と実用性を検証する目的で、比較的軟質な地山を掘削したシールドタイプTBMの現場と、硬岩地山を掘削したオープンタイプTBMの現場でそれぞれ適用試験を行い、実際の地質観察結果や支保パターンと対比することによって、システムの実用性と精度を検証している。亀裂性の硬質な花崗岩地山を掘削したオープンタイプTBMの現場における断層部での適用結果を詳細に分析した結果、削孔検層結果にTBM機械データを逐次加えていくことで、掘削ステップ毎に詳細かつ高精度な地質予測を行えることを確認している。また、Sequential Indicator Simulationの手法を用いることにより、TBM切羽前方の地質状態の分析精度を飛躍的に向上できることを明らかにしている。さらに、定量的に支保パターンの判定を行うため多変量解析を利用した地質評価システムの現場への適用結果に基づき、前方探査データやTBM機械データ、及び実際の坑壁地質観察結果や支保パターンを多変量解析により分析を行うこのような地質評価システムを用いることにより、高い判別率で支保パターンを合理的に選定することが可能であることを検証している。

第8章は本論文の結論であり、弾性波や検層などの切羽前方探査結果、TBMによる地質情報を地球統計学を利用した多変量解析システムにより分析する統合地質評価システムにより、精度の高い地質評価及び合理的支保パターンの選定が可能となることを示し、本研究により得られた知見と成果を要約すると共に、今後の安全かつ合理的な山岳トンネルの情報化施工への活用に対する方向性を示している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、トンネルの情報化施工における重要な要素である切羽前方地質の高精度な予測と共に、支保設計や合理的な補助工法の選定に必要な地山の力学的・水理学的特性の評価を可能とする、統合地質評価システムの構築を目的とした研究成果をとりまとめたもので、得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) 弾性波を用いた切羽前方地質探査法として従来から用いられているTSP、HSP、VSP法などの探査手法の問題点を同一地点での比較試験を行うことで明らかにすると共に、反射波の音響インピーダンスの変化を解析することによって、地盤の強度特性の評価を可能とする3次元反射法探査システムを新たに開発しその有用性を検証した。さらに、3次元弾性波トモグラフィー測定結果の解析に修正SIRT(反復再構成)法を適用することで、複雑な形状を有するトンネル交差部や立坑との接合部などの高精度な地質評価を可能とする探査システムを開発した。
- (2) トンネル切羽前方地山の力学的・水理学的特性を評価するため、ブルードリリングを利用した削孔検層システムを

新たに開発し、地質評価の指標として地山の破壊エネルギー係数を用いることの有効性を検証すると共に、速度検層を併用することで切羽前方の高精度な地質予測が可能となることを明らかにした。

- (3) 地質状態の複雑な我が国におけるTBM（トンネルボーリングマシン）工法の実用化のため、TBM稼動データ、スラスト推力、カッタートルクなど多くの施工時データを時空間統計手法により分析し、切羽前方地質及び地山の強度・変形特性を適確に予測するシステムを提案した。さらに、掘削ずりの形状・色調や掘削壁面などの画像撮影による光学的手法を駆使した計測システムを構築し、これらを実際のトンネル施工に適用することでTBMによる合理的な情報化施工システムとしての実用性を確認した。
- (4) これらのサブシステムを統合して各種の地質条件下でのトンネル掘削に適用し、得られた多くの施工データを地球統計解析によって処理することで、精度の高い3次元地質構造を推定し、実際の観察・計測結果によりその妥当性を検証すると共に、統合地質評価システムとしての有用性を明らかにした。

以上、要するに本論文は、トンネルの情報化設計施工のための新たな調査手法を開発し、得られた地質情報を用い、空間統計手法や多変量解析による精度の高い地質評価を行うと共に、地山の力学的・水理学的特性の判定を可能とする合理的なトンネルの統合地質評価システムを構築したもので、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15年6月20日、論文内容とそれに関連した事項についての試問を行った結果、合格と認めた。