

学 位 論 文 題 名

トンネル支保剛性の評価に関する解析的研究

学位論文内容の要旨

トンネルの建設技術はいくたびの技術革新によって、現在では軟弱な地山から硬岩の地山まで幅広い地質条件において、それぞれ適切なトンネル工法が確立されるに至っている。さて、国土の3分の2が山岳地帯である我が国においては、山岳トンネルは隔離された地域間の交流を可能とする有効な手段であり、今後も益々需要が高まるものと予想される。一方、少子高齢化、生産年齢人口の減少等による経済活力・投資余力の減少が予想される我が国では、既存あるいは新設トンネルは社会基盤施設としての安全と安心を確保するには、設計から維持管理に至る各段階において未だ多くの検討を要する課題を抱えているのが現状である。本論文で取り上げるトンネル支保剛性の評価もその一つである。

支保工の設計法としては、経験的な判断に基づく設計及び力学的・定量的評価に基づく設計に概略大別され、前者の代表的なものには「地山分類に基づく設計」が、後者のそれとしては「特性曲線法に基づく設計」が挙げられる。

地山分類に基づく設計では、これまでの実績に基づき地山を幾つかの等級に区分して、あらかじめ設定した標準支保パターンを当てはめる方法が一般に用いられているが、これは過去の豊富な施工データ・実績が蓄積されて初めて有効なものであり、この方法を用いる限りにおいて過去のデータ以上の合理化を図ることは出来ない。一方、最近では定量的データに基づく概略設計として、よく用いられる特性曲線法に基づく場合は、トンネル壁面変位とトンネル壁面に作用する内圧との関係を表す「地山特性曲線」及び支保工変位と支保圧(支保工に作用する荷重)の関係を表す「支保工特性曲線」を用いて支保打設の効果を評価することになる。しかし、「地山特性曲線」に関する研究・報告は数多くなされているものの、「支保工特性曲線」、すなわち支保剛性の評価については、これまでは慣例的な算定法が用いられていたが、十分にその妥当性等の検討がなされておらず、そのため、支保工の効果・役割の定量的な検討が行えないのが現状と思われる。

そこで本研究は、トンネル形状を円形とし、支保工(1次支保工)を構成する吹付けコンクリート、鋼製支保工(鋼アーチ支保工)及びロックボルトのうち、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工を対象にし、吹付けコンクリートによる支保には、トンネル軸(長手)方向には殻(シェル)構造としての機能が期待できることから、吹付けコンクリートと鋼製アーチ支保工の相互の影響を同時に考慮するために、前者については円筒殻理論及び後者についてはリング理論を用いて定式化を行い、合理的な支保剛性の評価法の確立を目指して、以下に示す項目に焦点をあてて行ったものである。

- 1) 各支保の持つ特徴を反映した解析モデルに基づく新たな支保剛性算定式の提案。
- 2) 支保部材の設計諸元(吹付けコンクリートの厚さと弾性係数、鋼アーチ支保工の規模と建て込み間隔等)の支保剛性特性に与える影響の検討。
- 3) 新たな指標(鋼アーチ支保工の換算建て込み間隔、有効幅等)に基づく吹付けコンクリート及び

鋼アーチ支保工の役割分担の明確化。

4) 既往の支保剛性算定式の有効性・妥当性の検討。

本論文は全 5 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本論文の序論として、研究の背景や目的を述べ、本研究に関連する既往の研究の整理を行った。

第 2 章では、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工から成る既存のトンネル支保剛性の導出過程について、その詳細な報告が少ないことから、ばねモデルに基づいて記述した。特に、吹付けコンクリートの寄与による剛性については、軸対称・平面ひずみ問題として、厚肉及び薄肉円筒理論に基づいて剛性評価式を導き、既存の評価式による結果との差異を明らかにした。

第 3 章では、従来しばしば用いられている支保剛性評価式の導出の根拠等が明確でないことや、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の役割・分担を適切に説明が出来ない等、既存の剛性評価式の有する問題点を解消するために、吹付けコンクリートについては薄肉円筒殻理論及び鋼アーチ支保工については薄肉リング理論を用いてトンネル支保構造をモデル化し、両者の影響を反映した新たな理論的・解析的な支保剛性評価式を導き提示した。特に、鋼アーチ支保工位置における剛性評価については、「鋼アーチ支保工の換算建て込み間隔」、「吹付けコンクリートの仮想厚さ」及び「有効幅」という新たな指標を導入して、支保剛性の特性の把握に努めた。また、支保剛性に与える支保部材の設計パラメータの影響を検討し、例えば、吹付けコンクリートは初期材齢においては変形しやすく、また強度も小さいため、鋼アーチ支保工を用いて吹付けコンクリートと一体化することは、支保工の剛性、強度を増加させるには有効であることを定量的に明らかにした。さらには、既往の剛性評価式の妥当性と有効性の検討を行った。

第 4 章では、前章で導いた剛性評価式の適用可能性・有効性をより一層明確にするために、吹付けコンクリート部分に対しては前章と異なる理論を用いて定式化を行い、支保剛性評価式の導出を試みている。すなわち、第 3 章の数値検討例で取り扱ったトンネル諸元(コンクリート厚さ h 、平均半径 R 、鋼アーチ支保工間隔 L 等)、特に、厚さと半径の比 (h/R) と支保間隔と半径の比 (L/R) から判断すれば、一般的に言われている薄肉円筒殻理論の適用範囲外も含まれることから、ここでは Mirsky-Hermann の 1 次せん断変形理論(修正円筒殻理論)を用いて、吹付けコンクリート部分の定式化を行い、薄肉及び修正円筒殻理論に基づく支保剛性の数値的検討を通して、第 3 章で述べた剛性算定式の有効性・妥当性を明確にした。

第 5 章は総括であり、本研究で得られた成果を要約するとともに、今後の検討課題について述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 上 隆

副 査 教 授 林 川 俊 郎

副 査 教 授 名 和 豊 春

学 位 論 文 題 名

トンネル支保剛性の評価に関する解析的研究

トンネル構造は陸上の構造物と異なり、地中に位置する線状構造物であるため、トンネル周りの地山等の性質を十分に把握して、それを設計・施工に生かすのが困難な場合が多く、過去の設計・施工例を参考にする「経験的な手法」がしばしば採用される、そのため設計は一般的には保守的、過大な傾向にあり、高コストの構造になりがちである。さて、トンネル支保設計法の一つに最近、概略設計としてしばしば用いられる特性曲線法がある。この方法は、地山特性曲線に支保特性曲線を重ねて、その交点(平衡点)で支保打設の効果を評価する方法である。しかし、前者の曲線については地山の性質を反映させた数多くの研究がなされているものの、後者については非常に少なく、そのためトンネル支保を構成する吹付けコンクリート、鋼製支保工の役割・効果の検討も含めて合理的・定量的な設計が行えないのが現状である。

以上を背景に、本論文は、円形断面のトンネルを対象として、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工から成る支保特性曲線を取り上げ、その合理的な支保剛性算定式の提示と支保剛性特性の解明を目的としている。

第1章では、序論として、既往の算定式の問題点を明らかにしつつ、研究の背景や目的を述べ、関連する既往の研究の整理を行っている。

第2章では、いままで導出過程が曖昧であった既往の支保剛性算定式をばねモデルに基づいて導いている。特に、吹付けコンクリートの寄与する剛性は本来、地山とトンネル背面の接触点位置で表すのが望ましいが、厚肉円筒理論による結果及び従来算定式の結果の数値的比較より、剛性は位置によらない一定値としての取り扱いが可能であることを明らかにした。

第3章では、既存の支保剛性算定式の有する問題点を克服するために、吹付けコンクリートによる支保の役割としてトンネル延長方向には殻(シェル)としての機能が期待できることから、考察している問題を円筒殻の両端において鋼アーチ支保工で補強された構造にモデル化し、吹付けコンクリート部分は薄肉円筒殻理論でその挙動を記述し、鋼アーチ支保工をリング(円環)として取り扱い、両者の影響を反映した新たな支保剛性算定式の導出に成功している。特に、設計に用いられる鋼アーチ支保工設置位置における支保剛性算定式は、実際の鋼アーチ支保工の建て込み間隔を換算建て込み間隔(換算建て込み係数)という新たな指標に置き換えれば、従来の剛性算定式と同じ表現形式で提示でき、しかも従来の持つ簡便性という利点を失うことなく支保剛性特性を合理的に把握できることを明らかにした。さらに、支保剛性特性を理解する上に有用な指標として、構造工

学の分野でしばしば用いられる有効幅という概念を剛性に関する有効幅としてトンネル工学分野において初めて導入、提案している。また、既存のトンネル構造諸元に基づいた数値的検討を行い、鋼アーチ支保工位置の剛性の特性として、1) 従来の支保剛性算定式の結果は、本算定法より小さめの結果を与え、その差は鋼アーチ支保工の規模によらず、吹付けコンクリートの弾性係数が小さい場合で最大3割程度、弾性係数の大きい場合で最大で1割程度であること、2) 鋼アーチ支保工の換算建て込み間隔は吹付けコンクリートの硬化とともに単調に増加すること、3) 鋼アーチ支保工の有効幅は、吹付けコンクリートの硬化とともに単調に増加するが、その変化率は弾性係数の小さいときに大きく、弾性係数の増加とともに一定値をとること、及び4) 鋼アーチ支保工の剛性分担比(鋼アーチ支保工の寄与による剛性/全剛性)は、吹付けコンクリートの硬化とともに単調に減少し、十分に硬化したときには吹付けコンクリート部分の寄与する剛性が支配的となり6~7割を占めること等、設計上極めて有用な支保剛性特性を明らかにしている。

第4章では、前章で導いた支保剛性算定式の適用可能性・有効性を一層明確にしている。すなわち、第3章の数値検討例で取り扱ったトンネル構造諸元には、吹付けコンクリート厚さと半径の比が最大で0.1となる場合もあり、一般的にいわれている薄肉円筒殻の適用範囲(0.01~0.05以下)外も含まれることから、第4章ではせん断変形の影響を考慮した修正円筒殻理論を用いた支保剛性算定式の導出とそれに基づく数値的検討を行っている。その結果、鋼アーチ支保工位置の剛性は、第3章で提示した算定式の結果は、2パーセント程度小さめの結果を与えるだけであり、その妥当性・有効性を明確に示した。

第5章は、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題について言及している。

これを要するに、著者は、トンネル支保設計に用いられる支保剛性について、既存の支保剛性算定式の問題点を解消した新たな支保剛性算定式を提示するとともに、鋼アーチ支保工の換算建て込み間隔(換算建て込み係数)、有効幅という支保剛性特性を理解する上に有用な指標を導入・提案したものであり、今後のトンネル工学、特にトンネル構造工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、博士(工学)の学位を授与するのに値するものと認める。