

学 位 論 文 題 名

断熱材設計のための寒冷地道路トンネルにおける

坑内延長方向温度の予測

学位論文内容の要旨

トンネルは、道路や鉄道などの道路網として、またガス、電力、通信、上下水道などのインフラとして、様々な用途に用いられ、我が国が所有するトンネルストックの総延長は 2 万 km(2003 年)を優に超えている。特に、道路トンネルは国土の 3 分の 2 が山岳地帯である我が国においては、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、今後も益々その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などにより経済活力・投資余力の減少が予想される我が国では、トンネルも含め既存あるいは新設の社会基盤施設の安全と安心を確保し、どのように維持管理するかは緊急を要する課題である。さらに、我が国社会全体が有している高コスト構造の是正も大きな課題である。設計面に限れば、トンネルの設計は、標準化に伴う設計法(過去の施工事事例などを参考)の硬直化により、他の陸上構造物に比べて過大な設計になりがちである。特にトンネルの場合には、地山内に建設されるなどその施工が複雑なため、将来の維持・管理・補修に必要となるコストを念頭に置きつつ、設計の初期段階で十分な配慮が要求される。

さて、寒冷地など気象条件の厳しい地点や標高の高い地点に建設される道路トンネルは、氷柱や側氷の発達、地山凍結による覆工変形、凍結融解による覆工コンクリートの劣化など、凍害を受ける危険性が大きい。例えば、北海道内で供用中の道路トンネルのうち、矢板工法(在来工法)で施工されたトンネルは、約半数のトンネルで何らかの変状が認められている。そのため、冬期間の交通確保及び道路管理者の多大な維持労力の軽減を目的に、トンネル内空側に断熱材を設置する、いわゆる外部断熱工法が凍害防止の対策工法の一つとして採用されている。また、NATM(New Austrian Tunnelling Method)で施工される新設の道路トンネルでは、将来におけるメンテナンスフリーを目指し、一次覆工(覆工コンクリート)と二次覆工(化粧巻コンクリート)の間に断熱材を設置する、いわゆる内部断熱工法が採用されている。ただし、内部、外部断熱工法における断熱材の設計には、材料の選定(特に熱伝導率)、断熱材厚さ、及び断熱材の施工範囲(トンネル延長方向範囲)の算定が必要となるが、施工範囲については、過去の施工例を参考にして経験的に決められているのが現状である。

そこで本研究では、断熱材の合理的・経済的な設計を行う上で課題として残されている断熱材施工範囲に焦点をあて、まずトンネル延長方向の実測気温(温度)を下に温度変動特性の把握を行い、次に熱伝達・熱伝導理論に基づく理論的なトンネル延長方向の温度算定式を導き、その妥当性・有効性を実測気温との比較により明らかにしたものである。

本論文は全 5 章から構成されており、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、本研究に関係する既往の研究をレビューするとともに、本研

究の背景及び目的を述べた。

第2章では、トンネル用の断熱材について、その熱伝導率などの特性値の整理を行った。すなわち、発泡・保温(気泡形成)のためにフロンガスが使用されていた従来の断熱材、フロンガスの規制による特定フロン、代替フロンを用いた吹き付け断熱材の特徴を概観し、今後の断熱材の動向について述べた。

第3章では、矢板工法で施工された、延長(L)が1,000m以上を中心とした道内6箇所のトンネル(雄信内トンネル:L=750m、(旧)豊浜トンネル:L=1,085m、定山溪トンネル:L=1,124m、小函トンネル:L=1,234m、日勝トンネル:L=580m及び野塚トンネル:L=4,232m)の実測気温を用いて、トンネル坑口及びトンネル坑内の延長方向の温度分布特性の把握を実施した。すなわち、トンネル内の温度変化を年変化の周期的現象としてとらえ、温度変化を年平均気温(U_m)と年振幅を A_y とする正弦関数の和で表わし、トンネル延長方向実測位置における年平均気温 U_m と年振幅 A_y の値の評価を行った。その結果、いずれのトンネルにおいても、トンネル坑内の年平均気温 U_m はトンネル坑口から中心部の方向(延長距離)に入るにつれて指数関数的に上昇し、一方温度振幅 A_y は指数関数的に減少するという基本的な分布特性を見出した。

第4章では、第3章と同様にトンネル内温度は周期的に変化するという仮定の下、熱伝導・熱伝達理論を用いて、トンネル延長方向の温度算定式を導出するとともに、その妥当性・有効性を前章の実測結果との比較により明らかにした。すなわち、トンネルを円形断面、その半径方向はトンネル覆工と地山の2層から成る解析モデルに対して、トンネル坑口から風が一定の風速で吹き込むとの仮定で、トンネル延長方向温度に関する基礎微分方程式を導き、トンネル坑口からの距離を変数とする年平均気温と年振幅の解析的な理論解(算定式)を導いた。提示した解による年平均気温及び温度振幅は、それぞれ延長距離に対して上昇及び減少すること、また実測値とも比較的良好に一致することから、妥当なものと判断された。なお提示した解は、トンネル半径と覆工厚さ、地山の熱伝導率及び風速などのパラメータで表わされており、年平均気温及び温度振幅の変動特性を理解する上にも、また断熱材の施工範囲を算定する上にも有効であることが分かった。

第5章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題と展望についてまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 上 隆

副 査 教 授 大 沼 博 志

副 査 教 授 名 和 豊 春

学 位 論 文 題 名

断熱材設計のための寒冷地道路トンネルにおける 坑内延長方向温度の予測

トンネルは、道路や鉄道などの道路網として、またガス、電力、上下水道などのインフラとして、様々な用途に用いられ、特に国土の3分の2が山岳地帯である我が国では、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、今後も益々その需要が高まるものと予想される。

さて、北海道のように寒冷地に位置し、気象条件の厳しい地点に建設される道路トンネルでは、氷柱や側氷の発達のために交通障害が発生したり、地山凍結及び凍結融解による覆工コンクリートの劣化など凍害を受ける危険性が大きい。そのため、道内で供用中の道路トンネルで、矢板工法(在来工法)で施工されたトンネルについては、冬期間における交通の安全確保のための氷柱、側氷除去に要求される多大な労力の軽減を図り、覆工コンクリートの劣化の進行を阻止するために、トンネル覆工表面に断熱材を設置する、いわゆる外部断熱工法が凍害防止工法として採用されている。また NATM(New Austrian Tunnelling Method)で施工される新設トンネルでは、将来におけるメンテナンスフリーを目指し、一次覆工(吹付けコンクリート)と二次覆工(化粧巻きコンクリート)の間に断熱材を設置する、いわゆる内部断熱工法が凍害防止工法として採用されている。ただし、内部、外部断熱工法における設計には、1) トンネル建設地点の気象条件(年平均気温と年振幅)、2) 材料の選定と断熱材厚さ、及び 3) 断熱材のトンネル延長方向の施工範囲の決定が必要不可欠な条件となるが、3)の施工範囲については、過去の施工例を参考にして経験的に決められているのが現状である。

そこで著者は、トンネル断熱材設計における現時点での最大の課題である「断熱材を坑口から何m奥まで施工する必要があるか?」という実務者の疑問に答え、同時に断熱材の合理的・経済的設計法の開発を目的に、まずトンネル延長方向の気温分布特性の把握を道内トンネルにおける観測気温を用いて試み、次に熱伝達・熱伝導理論を基礎とする解析的なトンネル延長方向の気温算定式を提示し、その有効性・妥当性を既設トンネルの気温分布特性との比較により明らかにするとともに、最後に最低気温分布に基づいた施工範囲算定法を提示し、既設・新設トンネルに対する設計例を通して、合理的・経済的な設計が行えることを示している。本論文は全5章で構成されている。

第1章では、本論文の序論として、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、地球温暖化防止及びオゾン層の保護の観点から、トンネル用断熱材の今後の動向

について概説している。特定フロン、代替フロン及びノンフロンを用いた場合の断熱材厚さを試算し、気象条件の厳しい地域では断熱材厚さが今まで以上に厚くなることから、今後のノンフロン化に向けては、経済的・合理的な断熱材施工範囲の算定法の確立の重要性・緊急性を指摘している。

第3章では、道内において矢板工法で施工された雄信内トンネル(延長:750m)、(旧)豊浜トンネル(延長:1,085m)、定山溪トンネル(延長:1,124m)他3トンネルの計6トンネルの観測データを下に、トンネル延長方向の気温分布特性の把握を行い、各トンネル共通の特性として、1)年平均気温及び年振幅は、それぞれトンネル坑口より遠ざかるにつれて上昇及び減衰するが、それらの変化率は坑口付近が最も大きく、遠ざかるにつれて減少して一定値になる傾向があること、2)最高気温はトンネル坑口からの距離によらずほぼ一定値をとること、及び3)最低気温は負の温度を示す坑口より遠ざかるにつれて上昇するが、その変化率は坑口付近が最大で、遠ざかるにつれて減少することを明らかにしている。

第4章では、円形のトンネルと地山から成る2層系モデルを取り上げ、気温の年周期変化及びトンネル内には風が一定の風速で吹き込むとの仮定の下、熱伝達・熱伝導理論を用いてトンネル坑内延長方向の年平均気温と年振幅に関する解析的な算定式を導出し、算定式による結果は第3章で明らかにした6トンネルに共通な分布特性1)~3)の特徴を良く捉え、また実測値とも比較的良好な一致が得られることを明らかにした。なお、年平均気温と年振幅の算定式はそれぞれ、トンネル坑内の気温分布特性を支配するパラメータで表示されており、実務者が気温分布特性を理論的に理解するにも有益である。本章の最後では、坑内最低気温分布に着目した断熱材施工範囲の算定法を提案し、提案する手法によれば、施工に用いる断熱材の厚さと材質のランクを区間毎に変化させることができ、経済的・合理的な施工が行えることを外部・内部断熱設計の試算例を通して明らかにした。

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まとめている。

これを要するに、著者は、断熱材施工による道路トンネルの耐凍害設計において、現時点での最大の課題であるトンネル延長方向の施工範囲について、その解析的・理論的算定式を観測データを用いた検証を行いつつ提案したものであり、今後の寒冷地工学、トンネル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。