

学位論文題名

矢板工法で建設された寒冷地トンネル覆工の  
温度応力に関する研究

学位論文内容の要旨

トンネルは道路だけでなく、鉄道、水道、電力、通信等と、最近では、その用途は多様化し、特に人口が多く、また国土の3分の2が山岳地帯で可住面積が狭隘である我が国のような場合には、トンネルは今後の社会開発とアメニティの確保のためにも重要な社会基盤施設の一つに位置付けられている。同時に、これからの中長年等の社会資本の維持・整備に当たっては、我が国が置かれている少子高齢化社会、経済活力の低下等、今後の社会情勢の変化にも十分に対応がとれるような配慮が必要とされる。そのため、トンネルの計画、設計、施工、維持管理等の各段階における技術の開発、向上は益々重要なものと思われる。

しかし、トンネル構造物は地上の構造物と異なり、地中に位置する線状の構造物であることから、トンネル周りの地山等の性質を十分に把握し、それを設計・施工等に生かすのが困難な場合が多く、過去の設計・施工事例を参考にする「経験的な手法」により建設される場合が多い。そのため、供用後の変状についても、その対策は建設時と同様に経験的な対策工による場合が多いのが現状である。このように、トンネルの計画から維持管理に至る各段階における検討は、解析的、定量的評価に基づいて行うことが望まれ、今日多くの努力が払われているが、まだ更に時間を要するものと考えられる。

さて、北海道のように、厳しい気象条件下に建設されるトンネルは、冬季間の氷柱や側氷の発達、地山凍結による覆工変形、及び覆工コンクリート表面のひび割れ等、何らかの凍害を受ける危険性が高く、道内において供用中のトンネルの約半数に変状が認められ、その8割程の変状に寒さが大きな影響を与えていていると言われている。特に変状は、NATM(New Austrian Tunneling Method、ナトム)が現在の標準工法となる昭和50年代後半以前において、矢板工法(在来工法)により建設されたトンネルにおいて著しく、その変状対策としては、最近ではトンネル内空側に断熱材を設置する外部断熱工法が採用される場合が多い。

しかしながら、トンネル構造物についてもライフサイクルコストを意識した取組みの必要性が再認識されつつある今日、維持管理段階におけるトンネル覆工の適切な健全度評価を実施する上にも、厳しい気象条件がトンネル覆工の力学的挙動に与える影響の解明は重要と考えられる。

以上のような背景から、本論文では矢板工法で建設されたトンネルを対象に、気象条件がトンネルの力学的挙動に与える影響を明らかにし、及び今後の維持管理及び変状対策工の検討のための基礎資料の整理を目的として、トンネル内気温変化は年変化の周期的現象及びトンネル断面は円形との仮定の下に、トンネル覆工の温度応力解析を試みたものである。

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、第3章、第4章において必要となるトンネルの構造特性（トンネル延長、トンネル径、覆工厚）を道内255本のトンネルデータに基づき明らかにし、また気温特性（年平均気温、年振幅）については、道内13都市の過去10年間の気象データに基づいて整理を行っている。

第3章では、温度応力の算定に必要となるトンネル延長方向の任意の位置における覆工内の冬季間温度分布について、理論的な検討を行っている。すなわち、地山とトンネルから成る2層系モデルを用いて、外部断熱工法における断熱材のトンネル延長方向の施工範囲を決定するために提示され、かつ道内6箇所のトンネルの実測気温との比較検討からその有効性・妥当性が確認されたトンネル延長方向の坑内気温算定式から算出されたトンネル坑内温度を入力温度として、トンネル覆工の温度分布特性を検討した。その結果、トンネル覆工の地山方向温度分布は、覆工厚さ方向には、覆工外側温度（地山側覆工表面温度）と覆工内側温度（トンネル坑内側覆工表面温度）の平均値 $\tau_0$ 及び覆工外側温度と覆工内側温度の差 $\Delta\tau$ でもってほぼ直線的に表されること、一方トンネル延長方向には、 $\tau_0$ はトンネル坑口から遠ざかるにつれて穏やかに減少し、 $\Delta\tau$ はトンネル坑口から遠ざかるにつれて穏やかに増加することが分かった。さらに、トンネル延長、トンネル径、覆工厚、地山の熱伝導率等の温度分布に与える影響の検討を行い、温度応力に大きな影響を与える $\Delta\tau$ は、道内トンネルでは、 $0.15 \leq \Delta\tau / \Theta$  ( $\Theta$ =年振幅)  $\leq 0.45$ であることを示した。

第4章では、前章のトンネル覆工内の温度分布を下にして、覆工の応力特性（トンネル円周方向応力 $\sigma_\theta$ とトンネル延長（軸）方向応力 $\sigma_z$ ）の検討を行った。すなわち、覆工の挙動を薄肉円筒殻理論で記述し、地山側覆工背面は空隙があり、またトンネル延長方向の境界条件を自由とする、いわゆる内部拘束的な温度応力の理論的・解析的な検討を試みた。その結果、 $\sigma_\theta$ と $\sigma_z$ ともその値はトンネル坑口近傍でピーク値を示し、トンネル中央に向かって減少する分布特性を示すこと、また $\sigma_\theta$ に関する既往の簡易な算定式の結果は、トンネル中央部では本算定結果と良く一致するが、坑口近傍では4割程度大きめの結果を与えることが分かった。さらに、道内トンネルにおいては、例えば $\sigma_\theta$ のピーク値の範囲は、 $\alpha$ =線膨張係数、 $E$ =弾性係数と記せば、 $0.1 \leq \sigma_\theta / (\alpha E \Theta) \leq 0.35$ であることを示した。

第5章は総括であり、本研究で得られた成果の要約を述べた。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 三上 隆  
副査 教授 名和 豊春  
副査 教授 蟹江 俊仁

## 学位論文題名

### 矢板工法で建設された寒冷地トンネル覆工の 温度応力に関する研究

トンネルは、人口が多く、また国土の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にする有効な手段であり、今日まで数多く建設されている。しかし、トンネル構造物は地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、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」により建設される場合が多い。そのため、供用後の維持・管理においても、建設時同様に経験的な手法が用いられているのが現状であり、トンネルの計画、設計、施工、維持・管理の各段階における技術の開発、向上は益々重要なものと思われる。

さて、北海道のような寒冷地に建設されたトンネルの変状では、その原因の一つに寒さが指摘される場合が多く、特に NATM が現在の標準工法となる昭和 50 年代後半以前に矢板工法により建設されたトンネルにおいて著しい。しかしながら、寒さが線状構造物であるトンネルに与える影響の把握は、これまで横断面における力学的検討が行われているものの、トンネル延長方向についての検討は、これまでに十分なされていないようである。

以上のような背景から、本論文では矢板工法で建設されたトンネルを対象にし、寒さがトンネル延長方向の力学的挙動に与える影響を明らかにするために、トンネル覆工の温度応力解析を試み、その検討結果を維持管理に携わるトンネル技術者に資する情報として取りまとめを行っている。本論文は全 5 章から構成され、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、本研究の背景及び目的を述べている。

第 2 章では、矢板工法により建設された道内のトンネルの構造諸元の特性について主な検討を行っている。すなわちトンネル 255 本のデータに基づき、例えばトンネル延長 ( $L$ ) については、平均が 250m、全トンネルの 80% 以上のトンネルが  $L \leq 500m$  であること、またトンネルの換算半径 ( $r$ ) については、全体の 70% が  $3m \leq r \leq 4m$  であり、平均が約 3.5m であること等を明らかにしている。

第 3 章では、次章において必要となるトンネル延長方向に関するトンネル覆工内温度分布特性について理論的検討を行っている。すなわち、ここでは、解析モデルには、矢板工法の施工上の問題から生じるトンネル覆工と地山間の空隙の熱伝達率を無限大として取り扱った 2 層系モデル（地山-トンネル覆工）及び、入力温度となるトンネル坑内延長方向の温度には、トンネル延長方向の外部

断熱材の施工範囲を求めるために提示され、雄信内、定山渓トンネル等道内6トンネルの実測データとの比較検討から妥当性・有効性が検証されている既往の坑内温度算定式を用いて検討を行っている。その結果、トンネル覆工内の温度分布は、覆工外側表面温度(地山側)と覆工内側表面温度(トンネル坑内側)の平均値 $\tau_0$ 及び覆工内外表面温度の差 $\Delta\tau$ でもって直線的に表されること、一方トンネル延長方向に対する $\tau_0$ 及び $\Delta\tau$ の冬季間温度分布は、それぞれトンネル坑口から遠ざかるにつれて穏やかに指数関数状に減少及び増加することを明らかにしている。さらに、トンネル諸元等の温度分布特性に与える影響の検討を行い、温度応力に大きな影響を与える $\Delta\tau$ は、道内トンネルでは $\Delta\tau/\Theta$ ( $\Theta$ =年振幅)=0.15~0.45であることを示し、トンネル技術者が維持・管理を行う上での有益な情報を提供している。

第4章では、前章のトンネル覆工内温度下におけるトンネル覆工内側表面の円周方向応力 $\sigma_\theta$ 及び延長方向応力 $\sigma_z$ の基礎的な検討を行っている。すなわち、ここでは、覆工の力学的挙動を薄肉円筒殻理論を用いて表し、またトンネル覆工と地山間には空隙があり、両坑口の境界条件を自由とする、いわゆる内部拘束的な温度応力の理論的・解析的な検討を行っている。その結果、 $\sigma_\theta$ と $\sigma_z$ とともに、その引張応力は、トンネル坑口近傍でピーク値を示し、そこから遠ざかるにつれて単調に減少するという特性を明らかにした。また、トンネル断面諸元等をパラメータとする数値計算から、 $\sigma_\theta$ と $\sigma_z$ のピーク応力値の範囲としては、 $\alpha$ =線膨張係数、 $E$ =弾性係数と記せば、 $0.1 \leq \sigma_\theta/(\alpha E \Theta)$ 及び $\sigma_z/(\alpha E \Theta) \leq 0.35$ となることを明らかにするとともに、トンネル技術者が覆工表面の温度応力状態を容易に推定できる算定式として、覆工厚を関数とする一次の簡易なそれを提案している。さらに、円周方向応力については既存の適用可能と思われる評価式に検討を加え、両坑口から遠く離れたトンネル中央部の評価式の結果は本算定結果と良く一致するが、坑口の影響を考慮したピーク応力の評価式は本算定結果より3割程度大きめの結果を与えることを指摘している。

第5章では、本研究で得られた成果を総括している。

これを要するに、著者は、矢板工法により建設され、数十年経過した寒冷地トンネルの維持・管理の在り方を検討する際の基礎的資料の入手を目的に、寒さのトンネル延長方向の温度応力特性に与える影響を円筒殻理論に基づき明らかにしたもので、今後のトンネル工学、寒冷地工学及び構造力学の発展に貢献するもの大なるものがある。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。