

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21560494
 研究課題名（和文） 寒冷地道路とトンネルにおける断熱工法の合理的・経済的設計法の提案
 研究課題名（英文） A simplified design procedure of road tunnel with heat insulater
 研究代表者 三上 隆 (MIKAMI TAKASHI)
 北海道大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：00002303

研究成果の概要（和文）：寒冷地道路トンネルの断熱材の施工範囲を算定するために、トンネル坑内延長方向の温度分布算定式を誘導し、さらにそれを入力温度とする温度応力解析を円筒殻理論を用いて行い、トンネル坑内延長方向の応力分布特性を明らかにした。また、鋼アーチ支保工の役割について円筒殻理論を用いて理論的・解析的検討を行い、鋼アーチ支保工の効果を明確にした。

研究成果の概要（英文）：The principal results of this study are summarized as follows:

- (1) In order to determine the necessary length of anti-icicle treatment from tunnel entrance area, a theoretical equation for estimating the temperature in the tunnel has been proposed.
- (2) A computational procedure has been proposed for the analysis for analyzing temperature stress using cylindrical shell theory taking consideration into temperature distribution tunnel's lining.
- (3) In order understand of the characteristics of the stiffness of the support, a closed analytical equation for estimating the stiffness of the support of tunnel consisting of shotcrete and ribs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：トンネル工学、断熱材、寒地工学、温度応力、支保剛性、設計法

1. 研究開始当初の背景

トンネルは国土の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、トンネルを含む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(過去の施工事例等を参照にする)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、地山内に建設される等施工が複雑なため、将来の維持・管理・補修に必要な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。

寒冷地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等、いわゆる凍害を受ける危険性が大きく、冬期の交通量確保や安全性の確保は人力に頼っているのが現状である。そのため、矢板工法で施工されたトンネルの場合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、昭和50年代後半以降、NATMで施工されるトンネルでは、一次覆工(吹付けコンクリート)と二次覆工の間に断熱材を設置する内部断熱工法が採用されて今日に至っているが、断熱材の施工範囲を含めて断熱材設計は、各企業体独自に、これまでの施工例を参考にしながら行っているのが一般的である。

2. 研究の目的

断熱材の設計では、トンネル建設地点の気象条件(入力条件)、断熱材の厚さと材質、及びトンネル延長方向の施工範囲の3項目を決める必要がある。研究代表者はこれまでに、3項目に対してそれぞれ、土木学会論文集(No.616/VI-42,p.109,1999)、土木学会論文集(No.498/VI-24,p.87,1994)と構造工学論文集(Vol.42A,p.43,1996)、及びトンネル工学研究論文・報告集(Vol.11,p.9,2001)等に研究成果を公表してきたが、「断熱材を坑口から何m奥まで施工する必要があるか?」という問題に代表されるように、まだ問題点・改善点が残されている。そこで、本研究は研究代表者のこれまでの成果を基礎として、内容をさらに進化・発展させるとともに、さらにトンネル覆工内温度応力、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の役割分担の検討(トンネル支保剛性の検討)を行い、より合理的・経済的な設計法の開発・提案を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 検討に用いた仮定

- ①トンネルは円形断面とし、その半径方向はトンネル覆工と地山の2層からなり、両者の熱的性質は方向、温度及び水分によらず一定とする。
- ②トンネル覆工と地山内の温度変化のうち、トンネル延長方向と円周方向の温度変化は、半径方向の温度変化に比べて小さいので無視できる。

- ③トンネル坑口及びトンネル内の気温は周期的に変化するものとする。ただし、日変化の影響は小さいので年変化のみを考慮する。
- ④トンネル内では車両等の発熱はなく、トンネル坑口からは風が一定の風速で吹き込みこむ。
- ⑤地山は等方等質で、初期応力状態は静水圧状態である。
- ⑥鋼アーチ支保工には、H形鋼を採用し、その建て込み間隔は一定とする。

(2) トンネル延長方向の温度解析

- ①道内6トンネル(雄信内、旧豊浜、定山溪、小函、日勝及び野塚トンネル)の実測温度による延長方向温度分布特性の把握を行う。
- ②トンネル坑口から z の位置におけるトンネル壁面温度を算出する。そのために、トンネル覆工・地山の2層モデルを採用し、各層の熱伝導方程式、トンネル内空側と地山側で成立する境界条件及びトンネル覆工・地山間で成立する連続条件を用いて、壁面温度を誘導する。
- ③②で求めた壁面温度を用いて、トンネル延長方向の内空温度に関する支配方程式を導き温度算定式を求める。なお支配方程式は、トンネル坑口 z の位置にある微小区間 dz において、空気が保有する熱の移動により微小時間 dt 内に獲得する熱量とトンネル内空側壁面において dt の時間内に内空側に伝達される熱量の和が、 dt 時間内の温度変化を起こすのに必要な熱量に等しいとの仮定より得られ、時間 t と位置 z に関する1階の偏微分方程式で表される。

(3) トンネル延長方向の温度応力解析

トンネル覆工は、トンネル延長方向にはシェルとしての役割が期待できるので、トンネル覆工の挙動を薄肉円筒殻理論で記述し、(2)③で求めたトンネル内空温度を入力温度(荷重項に相当)として、トンネル延長方向の温度応力を求める。

(4) トンネル支保剛性の理論的検討

吹付けコンクリートによる支保は、トンネル延長(長手)方向には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アーチ支保工のそれぞれの剛性(曲げ剛性と伸び剛性)の影響を考慮するために、吹付けコンクリートについては薄肉円筒殻理論を、鋼アーチ支保工についてはリング理論を用いて、両者の剛性の影響を考慮した支保剛性算定式を導く。

4. 研究成果

(1) トンネル延長方向の温度解析の成果

- ①実測温度のトンネル延長方向の分布特性

- 1)年平均気温：坑口から遠ざかるにつれて温度は上昇する。温度上昇割合(温度変化率)は、坑口付近が最大で、坑口から遠ざかるにつれて変化率は減少し、一定値になる。
- 2)年振幅：坑口から遠ざかるにつれて年振幅は減衰する。その変化率は、坑口付近が最大で、坑口から遠ざかるにつれて変化率は減少し、一定値になる。
- 3)最高気温：坑口より 20~50(m)程離れば、ほぼ一定値となる。
- 4)最低気温：坑口から遠ざかるにつれて温度は上昇し、その変化率は坑口付近が最大で、坑口から遠ざかるにつれて変化率は小さくなる。

②トンネル延長方向温度の理論的算定式

- 1)提示した解は、年平均気温及び年振幅はそれぞれトンネル坑口から中心部に入るにつれて上昇すること示し、また実測値とも比較的良く一致することから妥当なものと同判断される。
- 2)提示した解を用いて断熱材の施工範囲を求めれば(0°C以下の範囲)、例えば雄信内及び日勝トンネルではほぼ全延長で必要、旧豊浜トンネルの場合は坑口から約 350m の範囲となる。
- 3)提示した解を使用して、断熱材の厚さをトンネル坑口より一定区間毎に段階的に変化させて施工する新たな断熱材設計法を提案した。これによれば、トンネル坑口より一定の厚さで施工する現行の設計法(施工法)に比べて、合理的・経済的な設計(施工)が可能となる。

(2)トンネル延長方向の温度応力解析の成果

- ①覆工表面の温度応力について、トンネル坑口付近とトンネル中央部の円周方向応力、軸(延長)方向応力に与える各種パラメータ(トンネル延長 L、覆工厚 h、地山の熱伝導率 λ、トンネル径 r、風速 v)の影響の検討を行った。その結果、トンネル中心部における両応力は、r の影響は無く、L が小さい程、また h、λ 及び v が大きい程、応力が大きくなること、一方トンネル坑口付近では、L と v の影響は無く、r が小さい程、また h 及び λ が大きい程、応力が大きくなること明らかにした。
- ②道内の既設トンネルの場合、覆工表面の円周方向及び軸方向の応力の取り得る値の範囲は、両応力に対して $0.1 \leq \sigma / (E\alpha\theta) \leq 0.3$ となる。ただし、E=覆工コンクリートの弾性係数、α=コンクリートの線膨張係数、および θ=トンネル建設地点の年振幅である。上述の関係は、道内の矢板工法により建設されたトンネル諸元に対して成立するもので、トンネルの健全度評価等に有効に利用できる。なお、矢板工法により建設されたトンネルの延長 L は

多くが 500m 以下であり、トンネル換算半径は 3m~4m の範囲に、覆工厚は 0.25m~0.75m の範囲にある。

③応力は、覆工内ではほぼ直線分布をする。

④トンネルを維持管理する技術者の利便性を考えて、トンネル坑口付近の円周方向応力(σθ)及び軸方向応力(σz)の最大値をトンネル径 r(m)と覆工厚 h(m)で表すと以下となる。

$$r=3m \text{ の場合: } \sigma\theta / (E\alpha\theta) = 0.2129h + 0.0399,$$

$$\sigma z / (E\alpha\theta) = 0.2031h + 0.0381.$$

$$r=4m \text{ の場合: } \sigma\theta / (E\alpha\theta) = 0.2068h + 0.0350,$$

$$\sigma z / (E\alpha\theta) = 0.1956h + 0.0345.$$

$$r=5m \text{ の場合: } \sigma\theta / (E\alpha\theta) = 0.2025h + 0.0320,$$

$$\sigma z / (E\alpha\theta) = 0.1865h + 0.0345.$$

(3)支保剛性算定式

①鋼アーチ支保工位置における支保剛性 K

1)K は次式で表される。

$$K = E_c h_c / R + E_s A_s / (R L^*)$$

ここで、Ec=吹付けコンクリートの弾性係数、hc=吹付けコンクリートの厚さ、R=トンネル半径、Es=鋼アーチ支保工の弾性係数であり、L*は次式となる。

$$L^* = \Phi L$$

ここで、L=鋼アーチ支保工の建て込み間隔であり、Φ は以下で与えられる。

$$\Phi = (\cosh^2 \alpha - \sinh^2 \alpha) \{ \alpha(1 + \delta)(\sinh \alpha \cosh \alpha + \cos \alpha \sin \alpha) \}$$

ただし、 $\alpha = \{3(1 - \nu c^2)\}^{1/4} L / \{2(R h c)\}^{1/2}$ 、

$\delta = A c^* E_c / (A_s E_s)$ 、 $A c^* = b h c - A_s$ 、

ここで、νc=吹付けコンクリートのポアソン比、b=H 形鋼のフランジ幅である。

2)支保剛性 K は、吹付けコンクリート部分の剛性と鋼アーチ支保工部分の和で表され、形式的には既に得られている従来式と同形である。ただし、L*=ΦL の関係から明らかのように、L*は吹付けコンクリート部分と鋼アーチ支保工の剛性を考慮した場合の鋼アーチ支保工の見かけの建て込み間隔と解釈できる。

3)従来の算定式は、Φ=1 の場合に相当する。トンネル支保では常に L* < L であることから、従来式による結果は、提示した算定式より過小の評価をすることになる。その相違は最大で 10%である。

②支保剛性 K の数値的傾向

1)鋼アーチ支保工の剛性分担比 Ks/K(Ks=鋼アーチ支保工のみの剛性)は、吹付けコンクリートの弾性係数 Ec の増加とともに単調に減少している。特に鋼アーチ支保工の剛性への寄与は、Ec が小さいときに顕著であり、吹付けコンクリートが硬化するにつれて、コンクリート部分の剛性の寄与が 大きくなり最大で 60~70%程度となる。

2)換算建て込み間隔 L*は、パラメータ δ の影響を受け、δ=0 の場合は Ec によらず一定値を取り、δ≠0 の場合では Ec の増加とともに

単調に減少する。

③吹付けコンクリートのせん断変形の影響
1)吹付けコンクリート厚さ h_c とトンネル半径 R の比 h_c/R が 0.1 になる場合もあることから、吹付けコンクリート部分にはせん断変形を考慮した修正円筒殻理論を用いて支保剛性評価式を求めた。

2)支保剛性に与えるせん断変形の影響は、 Ech_c/L ($EsAs$) が小さいとき(すなわち、鋼アーチ支保工の規模が大きい場合)にも現れる。

3)修正円筒殻理論を用いた場合の支保剛性の算定値は、薄肉円筒殻理論を用いた結果より大きい、その差の最大は吹付けコンクリートの弾性係数が小さいとき(若材齢時)で 2%であり、(3)①の 1) で記述した薄肉円筒殻理論に基づく算定式の有効性・妥当性が確認された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

①松尾優子、三上隆、矢板工法により建設された寒冷地トンネルの覆工内温度応力の理論的検討、構造工学論文集、56A、32-39、2010、査読有

②大野孝、三上隆、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保法の剛性を考慮したトンネル支保剛性の理論的検討、構造工学論文集、56A、40-48、2010、査読有

[学会発表] (計 6 件)

①T. MIKAMI、Anti-frost design method for tunnels in cold region, 1st Collaborative and Cooperative Symposium between Harbin Engineering University and Hokkaido University, 2009. 8.10、札幌

②松尾優子、河村巧、三上隆、在来工法により建設された寒冷地道路トンネルの覆工内温度、第 64 回土木学会年次学術講演会、2009. 9. 4、福岡

③岩城恭子、三上隆、トンネル支保構造物の剛性算定式の提案、平成 22 年度土木学会北海道支部年次技術発表会、2011. 2. 5、苫小牧

④三上隆、日本における山岳トンネルの設計法について、韓国土木学会(招待講演)、2010. 10. 21、仁川(韓国)

⑤三上隆、寒冷地道路トンネルの断熱設計について、北大-韓国忠北大学ジョイントシンポジウム、2011. 1. 28、札幌

⑥三上隆、トンネルを造る、平成 23 年遠友学舎炉辺談話第 3 回、2012. 3. 1、札幌

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

[その他] (計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

三上 隆 (MIKAMI TAKASHI)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：00002303