

	い さ ご のぶはる
氏 名	砂 金 伸 治
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成18年12月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最 終 学 歴	平成8年3月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了
学位論文題目	トンネル覆工コンクリートの力学的挙動と設計法に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 鈴木基行 東北大学教授 岸野佑次 東北大学教授 風間基樹 東北大学助教授 京谷孝史

論 文 内 容 要 旨

我が国では国土の7割以上が山地であり、また、都市空間利用の高度化といった点からトンネルの建設が不可欠である。その用途は道路や鉄道、上下水道など多岐にわたっており、トンネルそのものの断面形状や施工法、維持管理の方法も様々である。我が国の道路トンネルの建設技術は、自動車の登場や高速自動車国道の整備開始に伴い飛躍的に進歩した。その結果、現在のトンネル本数や総延長は図-1 に示すようにそれぞれ約9,000本、約3,000kmと国際的に見ても道路トンネルへの依存が高い状態となった。

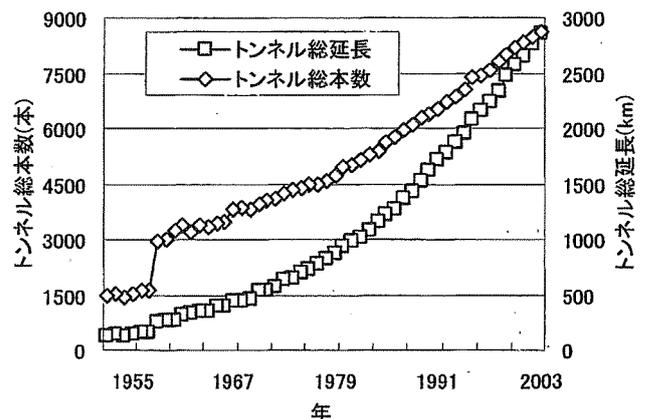


図-1 道路トンネルの本数と延長の推移

一般の土木構造物の構築は計画、調査、設計、施工等といった段階に分けられる。そのうち、トンネルの建設で他の構造物の建設と異なる考え方を取るのには、設計や施工である。トンネルの設計の大きな特徴は、作用する外力が明らかな他の構造物と異なり、弾性波探査等の事前調査結果に基づいて当初設計で定められた支保工の規模を、施工時のトンネル内の観察や計測結果に基づき、地山の条件に適合した規模となるよう必要に応じて随時変更していくことにある。この理由として、計画段階で、当初設計を行う場合に必要となる地形や地質の状況について、トンネルの全延長にわたって設計を確定できるほどの高精度の地質調査法が、完全に確立されているとは言い難いことにある。また、地山分類の方法が理論に基づいたものではなく、過去の実績や経験に基づいていることもある。さらに、掘削に伴いトンネルに作用する荷重は、地山条件に応じて変化し、概念的にしか説明できないことも挙げられる。これらの点により、トンネルの設計や施工は過去の経験や実績に負うところが大きいと言われるところである。

しかしながら、近年、道路トンネルの建設箇所が増加していること、サービスの向上を目的としたトンネルの大断面化が進んでいること、さらに、特殊な条件下でトンネルを構築することが多くなり

つつあるといった状況にある。加えて、覆工コンクリートからコンクリート片の剥離・剥落が発生し、長期の耐久性に関して課題が生じており、これまでの知見では合理的な設計や施工が行えない可能性が生じてきた。また、種々の構造物では、国際的にも性能照査型の設計法の導入が進んでいる潮流にあり、我が国の土木分野においても取り入れられつつある。トンネルにおいては、これまで実績や経験に依存してきた設計法を用いてきたことから、性能照査型の設計法の即座の導入は困難であるが、将来の導入を考える場合に当たっての課題や方向性を明らかにする必要がある。

以上より、本研究では、道路トンネルにおける覆工コンクリートの力学的挙動に関して、特に、耐荷性、耐久性、および耐火性について、実験的および解析的研究、並びに、実際の支保工に作用する荷重に関する研究を行い、これらの知見を基に、覆工コンクリートの設計法への反映と今後の設計法のあり方を論じた。

第1章では、序論として本研究の背景と目的を述べるとともに、本研究のフローを示した。

第2章では、我が国における道路トンネルの歴史や技術基準と施工技术の変遷を述べ、トンネルに関する研究の重要性を述べた。引き続き、トンネルを構成する部材である支保構造の内容や我が国のトンネルの設計法の現状について概説するとともに、道路トンネルの建設における課題を述べた。さらに、本研究で取り扱う覆工コンクリートに関して、既往の基準類、期待される性能に関して述べ、また、他分野の性能照査型の設計法の取り組みについて記述した。これらを踏まえ、トンネル覆工コンクリートが抱える問題点を概説し、耐荷性、耐久性、耐火性に関する研究の必要性を述べる。併せて、山岳トンネルの支保工に作用する荷重に関して記述し、これらの検討が覆工コンクリートの設計法の提案に資することを述べ、本研究の意義を示した。また、これらの各分野における既往の研究とその問題点を概観した。

第3章では、覆工コンクリートの力学的挙動を検討するためには、山岳トンネルの支保工に作用する荷重の研究が必要であることから、既往のトンネル施工時に得られた支保工の変位計測結果を収集し、岩種毎にその傾向を分析し、同様の傾向を示すグループ毎に分類することで、トンネルの支保工の変形に関する基礎的なデータをとりまとめた。また、その結果に基づき2次元有限要素解析を実施し、地山特性曲線の概念に基づいて支保に作用する荷重の算定を行い、地山の分類毎の傾向を把握した。

得られた主な結果は、①土被りが $2D$ (D :トンネルの掘削径)以上を持つ地山では、土被りに無関係で最大変位が小さい岩種から成るグループ、土被りが増加するに従って最大変位が増加する岩種から成るグループ、および土被りに無関係で最大変位が大きい岩種から成るグループといった3つのグループに地山を大別できること、②①で得られたデータをもとに有限要素解析によって算定した鉛直方向の荷重は、最大変位が大きい岩種グループでは最大で $5D$ 程度、最大変位が増加する岩種グループでは最大で $3D$ 程度、最大変位が小さい岩種グループでは最大で $1D$ 程度であること、③土被りが $2D$ 未満の小さい地山では、基盤となる岩種に依存せずに、土被りとは無関係に変位は概ね一定の幅で変化し、土被りと支保に作用する荷重が概ね比例関係にあり、最大で $0.5D$ 程度であることなどである。

第4章では、覆工コンクリートの耐荷性に関する研究として、覆工コンクリートに使用する材料条件、および覆工に作用する荷重条件が覆工の力学的な挙動に与える影響を検討する目的で写真-1に示すような実大規模の覆工載荷実験を行い、特に、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)を覆工コンクリートに使用した場合の補強効果や耐力向上の効果について明らかにした。また、実験結果を踏まえた数値解析により、部材断面耐力や構造耐力の再現に適した解析手法の検討を行い、耐荷性の評価法

に関する留意点を明らかにした。

得られた主な結果は、①覆工コンクリートに初めてひび割れが発生した後、実際にトンネルが構造耐力に達するまでの荷重の差は大きく、その差の度合いは荷重条件によって異なること、②構造耐力に達すると考えられる条件は、ある断面で圧縮による破壊が生じる場合と、ひび割れが多断面で発生することによる構造体の不安定があり、いずれの状態かは荷重条件によって異なること、③曲げモーメントが卓越する載荷条件では鋼繊維による補強の効果が見られ、構造耐力が改善され大きくなるが、軸力が卓越する載荷条件では鋼繊維による耐力の改善効果は乏しいことから、鋼繊維を混入した効果が発揮できる荷重条件を念頭において設計を行うことが、耐荷性の向上に資すること、④トンネルがある断面で圧縮による破壊を生じる場合、プレーンコンクリートを用いた覆工からはコンクリートの剥落が見られるが、SFRCを用いた覆工では、それを防止できる可能性が高く、圧縮による破壊を生じる場合は、鋼繊維は構造耐力の改善効果は乏しいが、補強効果はあること、⑤ひび割れを回転ばねに模擬したフレーム解析では、解析によって得られた断面力と耐力曲線の関係より、種々の載荷条件下での部材断面耐力に至るまでの状態を容易に再現できること、⑥ひび割れの進展を考慮した有限要素解析では、ひび割れが発生した後の非線形性を考慮できることにより、構造耐力に至る状態を再現できること、⑦⑤と⑥の知見より解析手法の選択や部材断面耐力と構造耐力のどちらを設計値とするかについては、トンネルの耐荷性能の考え方に基づいて管理者や設計者により行われるべきものであり、十分な議論が必要であることなどである。

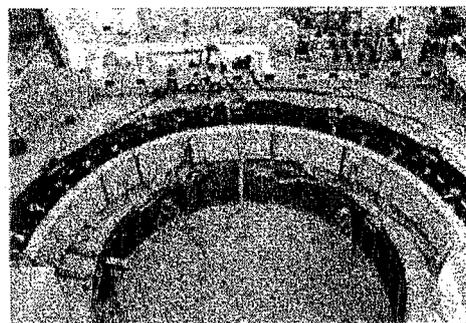


写真-1 トンネル覆工載荷実験

第5章では、覆工コンクリートの耐久性に関する研究として、材料条件や環境条件がトンネル覆工コンクリートに発生する温度・乾燥収縮によるひび割れの発生に与える影響を検討する目的で写真-2に示すような室内要素実験を行い、特にSFRCを覆工コンクリートに用いた場合の耐久性の向上の効果について明らかにした。また、実際のトンネルにおいて覆工コンクリートにSFRCを用いた場合の試験施工を実施し、その結果を分析することで、実際のトンネル覆工におけるSFRCの温度・乾燥収縮によるひび割れ抑制に対する効果を把握し、覆工コンクリートの耐久性に与える影響を把握した。



写真-2 ひび割れ発生に関する要素実験

得られた主な結果は、①ひび割れ発生に関する室内要素実験より、ひび割れの発生を完全に抑止する効果は鋼繊維には期待できないが、同一の配合のコンクリートに鋼繊維を混入した場合は、ひび割れの発生を遅延させる効果はあること、②ひび割れの発生に対して、湿度による影響が認められること、③実際のトンネルにおける試験施工より、覆工コンクリートにSFRCを採用した場合、ひび割れの分散効果やひび割れ幅の開口の抑制効果があることなどである。

第6章では、覆工コンクリートの耐火性に関する研究として、材料条件、養生条件、荷重条件、温度条件が、覆工コンクリートが高熱を受ける場合の挙動に与える影響を検討する目的で試験を行い、覆工コンクリートにおける爆裂現象の発生や強度低下に対する影響を明らかにし、新たな材料や構造を考える場合の覆工コンクリートの耐火性に与える影響を把握した。

写真-3に試験結果の一例を示す。得られた主な結果は、①山岳トンネルにより施工される標準的な覆工コンクリートについては、RABT 曲線に基づく高熱を受けた場合は、覆工の表面で爆裂が生じることは少なく、生じた場合でも非常に小規模にとどまること、②覆工の厚さとして20～30cmを確保すれば、地山側は高温に達しないが、覆工に比較的大きい軸圧縮応力が発生している場合や、設計基準強度が48N/mm²程度の従来の覆工コンクリー

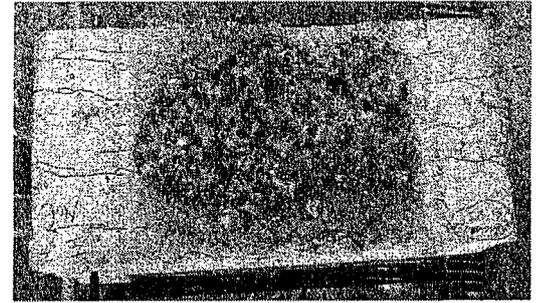


写真-3 耐火試験結果の一例

トよりも強度が高いコンクリートを採用した場合の高熱時の挙動は、爆裂が発生し、場合によっては覆工の背面側に影響を及ぼす場合があること、③現在の仕様に基づく配合をもつ覆工コンクリートへの鋼繊維の混入や鉄筋の有無による挙動に対する影響は小さいこと、④鉄筋のかぶり分相当の深さまでひび割れが生じても、加熱による鉄筋の損傷や、覆工構造自体の不安定といった現象は見られないことなどである。

第7章では、第3章～第6章で得られた結果をもとに、トンネル覆工コンクリートの力学的挙動に関して得られた知見を総合し、支保工に作用する荷重、耐荷性、耐久性および耐火性の観点から結論をまとめた。また、その結論をもとに、現在の道路トンネルの覆工コンクリートの設計法への反映について考察するとともに、今後の設計法の確立に向けた課題について考察した。

現在の設計法への反映に関しては、構造耐力に対する考え方、耐久性向上のための鋼繊維の効果、および耐火性の考え方について記述し、耐荷性、耐久性および耐火性を満足するトンネル構造として、覆工コンクリートの薄肉化の可能性のあることを論じた。また、今後の設計法の考え方は、性能照査型の設計法の確立のために、種々の計測データの蓄積といった現状で取り組むべき内容と今後の設計法のあり方について提言を行った。

第8章では、結論として本研究のまとめと今後の展望を示した。

論文審査結果の要旨

我が国では国土の7割以上が山地であり、また、都市空間利用の高度化の観点からトンネルの建設は不可欠であるが、近年、建設コストの縮減、および長期の耐久性や安全性の確保が課題となっている。本研究では、道路トンネルにおける覆工コンクリートの力学的挙動に関して、耐荷性、耐久性および耐火性の観点からの実験的および解析的研究を行い、それらの成果の覆工コンクリートの設計法への反映と今後の設計法の在り方を論じたもので、全8章で構成されている。

第1章では、序論として本研究の背景と目的および研究のフローを示した。

第2章では、我が国における道路トンネルの歴史や設計法の現状を概説し、覆工コンクリートに関する研究の必要性や意義を述べるとともに、既往の研究とその問題点を調査し分析した。

第3章では、既往のトンネル施工時に得られた変形等の計測結果をとりまとめ、トンネルの支保工の変形の傾向や支保に作用する荷重値の傾向を把握した。これらは覆工コンクリートの設計法を提案する上で極めて重要な知見である。

第4章では、覆工コンクリートの耐荷性に関する研究として、載荷実験を通じて、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)を覆工コンクリートに使用した場合の補強効果や耐力向上の効果について明らかにした。また、数値解析を通じて、耐荷性の評価法に関する留意点について明らかにした。これらは新しい知見である。

第5章では、覆工コンクリートの耐久性に関する研究として、室内要素実験および実際のトンネルの覆工コンクリートにおいて、SFRCを用いた場合の試験施工を通じて、温度・乾燥収縮によるひび割れ抑制に対するSFRCの効果を把握した。これらは現場への適用の観点から有用な知見である。

第6章では、覆工コンクリートの耐火性に関する研究として、従来の覆工コンクリートの高熱時の挙動および新たな材料や構造を考える場合の覆工コンクリートの耐火性に与える影響を把握した。これらも新しい知見である。

第7章では、上記までに得られた結果をもとに、現在の道路トンネルの覆工コンクリートの設計法への適用、さらに、今後の設計法の確立に向けた課題について考察した。実際の覆工コンクリートの設計法への適用性を検討しており、極めて有用な成果である。

第8章は、結論である。

以上、要するに本論文は、道路トンネルにおける覆工コンクリートの耐荷性、耐久性および耐火性の観点から力学的挙動を明らかにし、得られた知見をもとに、覆工コンクリートの設計法の提言および将来の設計法の在り方を論じたものであり、トンネル工学並びにコンクリート工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。