

京都大学	博士（工学）	氏名	小林 寛 明
論文題目	山岳トンネル完成後の盤ぶくれを防ぐインバート構造に関する研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>近年，完成後の山岳トンネルにおいて盤ぶくれが発生し，その抑止対策工事を行った事例報告がなされており，山岳トンネルにおいて供用後の盤ぶくれ防止は重要な課題となっている．本論文は，山岳トンネルにおける盤ぶくれの発生要因を分析し，模型実験や数値解析を通じてその発生メカニズムを解明し，設計施工時から完成後に至るまでの長期にわたって盤ぶくれを防ぐインバート構造の提案を行ったものであって，7章からなっている．</p> <p>第1章は序論であり，本論文の背景と現状における課題について触れ，研究の背景と目的を述べている．山岳トンネル完成後の盤ぶくれは，一般にトンネル掘削時の変位が大きい地山において発生のリスクが高いとされてきたが，トンネル掘削時に変位が小さく安定した地山においても，トンネル完成後に時間を経過してから発生するものがある．このような完成後の盤ぶくれを供用後に対策するのではなく，発生要因を分析，発生メカニズムを解明し，施工時に導入するインバート構造で対処することが本論文の目的であることを示している．</p> <p>第2章は山岳トンネルの盤ぶくれに関する現状について，盤ぶくれ事例，インバート構造の技術基準の変遷，既往の研究調査，を通じて示しており，併せて，本論文の必要性を示している．これらの分析から，スメクタイト含有地山で盤ぶくれが発生しやすい傾向にあること，インバート構造が盤ぶくれの抑止効果があることが考えられるが，インバート構造の盤ぶくれ抑止効果や完成後の抑止効果を体系的にまとめたものがないことを示している．</p> <p>第3章は，実際に盤ぶくれが発生した山岳トンネルにおいて実施した地質分析・物理試験の結果を示している．ここでは，盤ぶくれ発生個所近傍から試料を採取し，粉末X線回折，スレーキング試験，CEC試験・交換性陽イオン組成分析，一軸圧縮試験，粒度試験，塑性指数，吸水膨張圧試験を実施している．粉末X線回折からはスメクタイトを多く含む地山であること，スレーキング試験やその他物理的性質からも地山材料が膨張性を有することが結果として得られている．交換性陽イオン組成分析とスレーキング試験の判定が，既往の研究結果とは異なる劣化形態となったことを示している．また，吸水膨張圧試験では，スレーキング試験で中間型～膨潤型を示された試料では，膨張圧が大きくかつ膨張が収束するまでに長い時間を要することが示されている．結果として，吸水により地山材料が劣化・膨張する結果となった．また，掘削時に内空変位や天端沈下が小さく，順調な掘削を行っていた地点においても，掘削時には地山の膨張性は顕在化せず，トンネル完成後の地下水供給が地山の膨張性を顕在化し，盤ぶくれが発生したことを示している．</p> <p>第4章は，完成後に発生する盤ぶくれの要因について検討を行っている．従来の盤ぶくれ発生要因は，第3章で示すような地質的な特徴からの推定にとどまっており，地山の強度低下に起因する盤ぶくれに関して，十分な検討がなされていない．本章では，トンネル完成後の盤ぶくれの要因を抽出するため，盤ぶくれが発生した山岳トンネルのデ</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	小林 寛明
<p>ータを様々な観点から整理・分析を行っている．整理・分析の結果，第三紀泥岩，凝灰岩，凝灰角礫岩では，スレーキング指数が3または4で，地山強度比が4以下の地質で完成後に盤ぶくれが発生していることを示し，完成後の盤ぶくれには地山が吸水膨張することに伴う強度低下が大きく関与していることを示唆している．つづいて，実際のトンネル切羽で採取した岩石を使用し，強度低下によって盤ぶくれが発生する現象を再現する模型実験および模型実験の数値解析を実施し，盤ぶくれのメカニズムの確認を行っている．これらの模型実験およびその数値解析により，吸水により地山の強度が低下し，地山材料が膨潤することでインバートに作用する土圧が増加し，結果として底盤部が隆起する過程を示し，これが盤ぶくれ発生メカニズムの一つとして成り立つことを示唆している．</p> <p>第5章は，インバートによる盤ぶくれ抑止効果の検証を数値解析によって行っている．トンネル完成後の地山の劣化に伴う盤ぶくれを表現するには，トンネル掘削に伴うゆるみ域の進展挙動を表現する必要があるとの考えから，有限差分法による3次元逐次掘削解析を行っている．解析は，地山および覆工を Morh-Coulomb の破壊規準に従う弾完全塑性体としてモデル化している．完成後の地山の劣化のモデル化は，Morh-Coulomb の破壊規準への応力状態の接近度で定義されるパラメータ（破壊接近度）を用い，この破壊接近度に応じて地山の粘着力 c が時間の関数として低下するモデルを導入している．解析結果は，第3章で示された実施工時の計測結果や完成後の計測結果と比較を行い，掘削時の一次インバートによる早期併合，インバートの形状の変更等の対策が，施工時および完成後の変状の抑止にどのように寄与しているのか検討を行っている．その結果，早期併合により施工時の内空変位が抑止されること，インバート半径を小さくしインバート厚を増加することで長期的な盤ぶくれを大きく抑止できることを示している．実際の施工では，掘削時の地山のゆるみ領域の拡大を抑制し，インバートの形状など工夫することで，長期的に安定で経済的なトンネル構造を構築できる可能性を示している．</p> <p>第6章は完成後の盤ぶくれ構造を防ぐ新たなインバート構造の提案を行っている．前章までの検討においてインバートの導入が盤ぶくれ抑止効果を発揮することを確認している．また，実際の新幹線トンネルでは，2008年以降すべての山岳トンネルでインバート構造を導入しているが，I_{NiP} と言われる支保パターンとインバート構造では，トンネル完成後に盤ぶくれが発生しているいくつかの事例が報告されている．I_{NiP} では，インバート下部に中央集水管があり，地下水が集まりやすい構造となっている．すなわち，集まった地下水によりインバート下部の地山が劣化・膨潤し，盤ぶくれが生じたと考えられる．本論文では，I_{NAiP} というインバート構造を新たに提案し，数値解析において他のインバート形状や支保パターンと提案する I_{NAiP} を比較検討することで，I_{NAiP} の施工後の盤ぶくれ抑止効果に関する優位性の有無について検討を行っている．また，模型実験による I_{NAiP} の盤ぶくれ抑止効果の検証とその模型実験の数値解析を実施している．結果として，掘削時の内空変位や盤ぶくれ抑止には，一次インバートによる早期閉合が有効であること，トンネル完成後のインバート下部で生じる地山の劣化に伴う盤ぶくれには曲率の大きなインバート構造が有利であることを示している．また，提案する I_{NAiP}</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	小林 寛 明
<p>は、従来の I_{NiP} より掘削断面積は大きくなるが、掘削時の内空変位量に与える影響はなく、完成後の盤ぶくれ抑止効果があることを確認している。本論文で実施された解析条件では、提案する I_{NAiP} は I_{NiP} の盤ぶくれ量を 56% に抑止していることを示している。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。併せて、本論文で検討を行った I_{NAiP} の支保パターンを含めた盤ぶくれを考慮したインバートの設計・施工のフローを提案している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、山岳トンネルにおける盤ぶくれの発生要因を分析し、模型実験や数値解析を通じてその発生メカニズムを解明し、設計施工時から完成後に至るまでの長期にわたって盤ぶくれを防ぐインバート構造の提案を行ったものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. スメクタイト含有地山において盤ぶくれが発生しやすい傾向にあり、吸水により地山材料は劣化・膨張することが盤ぶくれ発生の要因であることを示した。
2. 掘削時には湧水もなく地山の膨張性が顕在化せず、あまり変位が出なかったトンネルにおいても、トンネル完成後に盤ぶくれが発生する原因は、インバート下部に地下水が徐々に集水・供給され、インバート下部の地山が劣化・膨張することであることを示した。
3. 破壊接近度というパラメータを用いて地山の粘着力が低下するモデルを導入した3次元有限差分法による掘削解析を行い、早期閉合による掘削時の内空変位の抑止効果、インバートによる長期的な盤ぶくれの抑止効果の明示した。
4. 新たなインバート構造の提案し、数値解析および模型実験によりその有効性の確認。本論文の条件では、従来用いたインバート構造で現れる盤ぶくれを57%抑止することが可能であることを示した。
5. 新たに提案するインバート構造を含めた、地山の劣化・膨張、盤ぶくれを考慮したインバートの設計・施工フローの提案した。

以上、本論文は、トンネル完成後の盤ぶくれ発生のメカニズムを解明しながら、実際の新幹線トンネルでの維持管理上の問題となる盤ぶくれに対して、設計時に盤ぶくれ予防となる新たなインバート構造の導入を目指したもので、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年4月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。