

京都大学	博士（工学）	氏名	坂井 一雄
論文題目	山岳トンネルの坑内傾斜計測による切羽前方地山予測に関する研究		
<p>山岳トンネルは、地下深部に構築される線状構造物であり、全線にわたって必要な地山情報を施工前の事前調査で明らかにすることは、調査法の限界と経済性の観点から不可能である。本論文は、山岳トンネルの施工時において、日常の計測管理として実施できる簡易かつ安価な手法により、トンネル掘削に伴って生じる切羽近傍の傾斜により、切羽前方の地山の状況（地山変化）を予測する手法の開発をまとめたものであって、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、山岳トンネル施工の安全性において切羽自立が必要最小限の条件であることを説明し、地質学的・力学的・水理学的情報の把握の重要性を説明している。その上で、本研究では、日常の計測管理として実施できる切羽近傍の傾斜計測に着目し、切羽前方地山の地山剛性変化・地質境界の予測手法の開発を目指すことを示している。</p> <p>第2章は既往の研究と本論文の展望を示している。切羽前方の地山状況を把握することを目的とした既往の研究事例として、先進ボーリングや弾性波による切羽前方探査、切羽先行変位計測および坑内変位計測を示している。切羽前方探査や切羽先行変位計測は、工費と施工サイクルに与える工程の影響が大きく、日常的に用いるには適さないことを示している。また、現状の坑内変位計測手法では、計測精度や感度などの問題を有していることを示している。これら既往研究のレビューにより、日常計測管理として実施でき、高密度・高精度に地山挙動を計測・評価できる計測手法とそのシステムの開発が急務であることを示し、本研究の意義を明確にしている。</p> <p>第3章は、切羽近傍の天端部において計測される傾斜の発生メカニズムの説明を行っている。併せて、3次元弾性有限差分法により切羽前方に地山条件が変化する模擬地盤に対する掘削解析を行っている。さらに、実計測における計測精度、間隔および頻度を考慮して、数値解析を行っている。結果として、切羽面が硬質層・軟質層の地層境界に近づくと、掘削に伴う応力再配分の影響で硬質層側に応力集中が生じることを示し、坑内変位だけでなく傾斜角度にも明らかな変化があることを示している。さらに、傾斜角度の変化量は、切羽前方地山の剛性変化を定積的に予測する可能性があることを確認している。また、数値解析を行った地山条件・施工条件では、坑内変位では、地層境界の影響は計測誤差として評価されてしまう程度の結果であっても、傾斜角度では明瞭に地層境界、地山剛性変化の影響を捉えており、傾斜角度が切羽前方地山予測感度に優位性を有することを示している。</p> <p>第4章は、切羽近傍の天端部で施工に大きな支障を与えずに簡易に傾斜角度を計測する無線式・回収型傾斜計の開発と実証実験について述べている。初号機の天端傾斜計をトンネル施工現場に導入し、そこでの問題点を元に開発・改良が取り組まれた。開発・改良が加えられた点は、小型化と無線仕様の検討であり、迅速な設置と容易なデータ回収を実現することを可能とした。さらに、傾斜計の計測分解能は $1.0 \times 10^{-3}^\circ$、計測精度は $\pm 1.0 \times 10^{-2}^\circ$ を満足しており、これらは、第3章で実施した数値解析から切羽前方での地山剛性変化を予測する上で必要とした精度を満足するものである。また、実際のトンネル施工現場に実証試験を行った結果、傾斜角度の分布形状が天端沈下の</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	坂井 一雄
<p>分布形状と整合している事、切羽通過直後に得られた傾斜角度から天端沈下量の収束地を早期に推定できること、等の知見を得ている。不良地山区間での実証実験では、大きく傾斜が切羽側に増加した地点において、地山剛性が低下し天端沈下量が増加することを予想した。その地点での天端沈下量は、140 mm 近くに増加し、本論文で提案する傾斜角度変化を利用した切羽前方地山予測手法の妥当性と有効性を確認している。</p> <p>第 5 章は、本論文で提案する切羽前方地山の剛性変化の予測手法の適用可能範囲に検討して、剛性変化を予測できるための適切な計測間隔を決めることが出来るノモグラムの作成を行っている。切羽近傍の計測される傾斜角度の大きさは、土被りに伴う初期地圧の大きさ、切羽位置での地山剛性と切羽前方の地山剛性のコントラストなどによって変化し、条件によっては計測精度以上の傾斜変化しか得られず感知できない状況が想定される。ここでは、初期地厚、切羽位置での地山剛性、切羽前方の地山剛性のコントラストをパラメータとして 3 次元有限差分法により掘削径が 10m の円形トンネルにおいて感度解析を実施している。傾斜計測による切羽前方地山予測手法の適用性の判定条件は、少なくとも切羽が地層境界到達前に天端傾斜計の精度以上の変化が生じることとし、感度解析の結果、道路トンネルの用いられる施工パターン C1 の場合、土被り 400m 以上で、CII の場合、土被り 150m、D1 地山よりも地山条件が劣る場合、土被りが 50m 以上で適用可能であることを示している。さらに、切羽前方の軟弱層が幅を有する場合（地層境界から一様に軟弱層が続かない場合）、C1、CII 地山では軟弱層の幅による予測可能距離の減少は確認されず、一方、D1、DII 地山では 1~2m の予測可能距離の減少は見られるものの、軟弱層の幅が掘削径の 1.5 倍となると、一様な軟弱層が存在するのと同様の結果であることを示している。これらの結果をまとめて、掘削径が 10m の円形トンネルにおける切羽前方の地山剛性変化・地質境界の予測するための予測可能距離と計測間隔を示すモノグラムの提示がなされている。</p> <p>第 6 章は傾斜角度から天端沈下量の収束値の推定について検討を行っている。第 5 章での検討により、掘削径 10m の円形トンネルでの切羽前方の地山剛性変化・地質境界の予測可能距離と計測間隔を示すノモグラムが提示されたが、掘削径が大きくなると周辺地山の変形量も大きくなることで傾斜角度も影響を受けることが考えられる。すなわち、感度解析の結果を実際のトンネル掘削径に合わせて補正する必要がある。一方、天端沈下量の収束値が想定出来れば、変形余裕量の設定や先受け工などの対策工を事前に準備することが可能となり、施工の安全性・効率性を高める上で優位な事である。ここでは、まず傾斜角度と天端沈下量との相関性を確認し、一定の比例関係が存在し、傾斜角度から天端沈下量の予測が可能であることを示している。さらに、この比例関係と既往の研究で提案されている掘削に伴う変位特性曲線を用いることで、切羽通過直後に計測された傾斜角度から天端沈下量収束値を推定する関係性を導出し、収束値の推定を可能とした。つぎに、切羽前方地山の天端沈下量の推定を試みている。計測された傾斜角度から相対変位量と第 5 章の感度解析結果を比較することで、切羽前方の地山剛性変化・地質境界を把握し、天端沈下量を推定することを示している。この手法を用いることで、切羽前方地山の剛性変化の予測可能距離を補正することが可能であることを示し、実際のトンネル施工現場へ援用し、その適用性を検証している。</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。</p>			

氏名	坂井一雄
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、トンネル施工現場で日常計測管理として、施工サイクルに影響を与えることなく簡易かつトンネル全線にわたって実施可能な天端の傾斜計測システムの開発と切羽前方の地山の硬軟変化および掘削による変形量の収束値の予測手法の提案を目標に研究を行った成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. トンネル天端部において掘削に伴い生じる傾斜角度の変化と地山挙動のメカニズムを説明し、切羽前方の地山剛性変化・地層境界を予測する手法を提案した。
2. 感度解析を通じて、切羽前方の地山剛性変化・地層境界を予測するための計測精度を示した。
3. 切羽直近部のトンネル天端部で用いる迅速な設置・回収が可能でリモートで計測データを取集できる天端傾斜計の開発を行い、現場実証実験で使用して実用可能であることを示した。この傾斜計は、数値解析で切羽前方の地山剛性変化・地層境界を予測に必要な計測精度を有していることを確認した。
4. 土被りと地山条件をパラメータとした感度解析により、開発した天端傾斜計を用いた傾斜計測による切羽前方の地山剛性変化・地層境界予測の適用範囲を明確にし、切羽前方の予測可能距離と適切な計測間隔に関するノモグラムを示した。
5. 切羽通過直後の傾斜角度から、計測断面の天端沈下量および最終沈下量の推定を可能とした。併せて、切羽前方の天端沈下量および最終沈下量の推定法の提案を行った。

以上より、本論文は、地質急変によるトンネルの変状や工期の遅れと言った現状トンネル施工現場で抱えている問題を实际的に解決する手法の提案とその検証を数値解析および実証実験で行ったものであり、学術上、實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3年1月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降