

京都大学	博士（工学）	氏名	Khalid Muhammad Shehzad
論文題目	Numerical study on ground reaction curves for shallow overburden tunnels (小土被りトンネルでの地山特性曲線に関する数値解析的研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>地形的・線形的な制約により、近年、小土被り（トンネル直径をDとすると土被りが$2D$以下）トンネルが多数建設されている。小土被りトンネルの建設は、開削工法により進められるのが一般的であったが、近年では、補助工法の発達により工事中への周辺環境への影響や経済性の観点からNATM工法による建設が主流となっている。一方で、陥没・崩落事故が発生しており、安全性の向上が社会的ニーズとなっている。本研究は、砂質地山と粘性土地山を想定して2種類の力学モデルを用いた小土被りトンネル掘削の弾塑性有限差分法による数値解析を行い、トンネル地山特性曲線を描くことを試みた。さらに、描かれたトンネル地山特性曲線により、小土被りトンネルの力学挙動を考察し、掘削に伴う小土被りトンネルの安定性を論じた。本論文は、7章から構成されている。</p> <p>第1章では、小土被りトンネルのNATM工法での掘削に関する動向を述べるとともに、トンネル掘削に対する数値解析の適用問題に言及している。実際のトンネル掘削は、3次元空間でなされるが、施工中に評価を行うのは2次元断面においてである。施工中は、内空変形量を計測し、2次元的な評価で3次元的现象を判断することになる。内空変形量の評価は、トンネル支保特性曲線やトンネル地山特性曲線の概念で行われ、2次元的な評価でトンネル掘削挙動を評価することになる。これは、切羽前方の地山の挙動は、不明確な部分があり、トンネル施工特有の問題である。さらに、トンネル支保特性曲線やトンネル地山特性曲線は、施工中の計測から容易に作成できるものではなく、多くは数値解析によって描かれることになる。これらトンネル施工特有の問題を述べるとともに、本研究の目的となる小土被りトンネルでの数値解析によるトンネル地山特性曲線を描くことと、それにより小土被りトンネルの安定性を論じることの必要性について記述を行っている。</p> <p>第2章では、文献調査を行い、本研究の位置付を明確にしている。まず、一般的なトンネル掘削の数値解析的な検討に関して、3次元数値解析と2次元数値解析のそれぞれの長所・短所を説明し、内空変形量の評価、すなわち、トンネル地山特性曲線を用いることで、トンネル掘削の3次元的现象を2次元数値解析で説明できることを示している。さらに、小土被りトンネルの数値解析的な検討が少なく、本研究で実施する小土被りトンネルのトンネル地山特性曲線を描くことの新規性・工学的意義を述べている。また、トンネル掘削に関する数値解析では、モール・クーロンの破壊規準を用いた弾塑性解析(MC)を適用することが主流であることを示し、修正Cam Clayモデルを用いた弾塑性解析(MCC)の小土被りトンネル掘削問題への適用の新規性を述べている。</p> <p>第3章では、静止土圧係数K_0を0.5と固定し、様々な土被りに対する小土被りトンネルの数値解析をMCおよびMCCを用いて実施している。まず、MCを用いた弾塑性解析を実施し、トンネル地山特性曲線を描くとともにすべり面がトンネルのスプリングラインから発生し、地表面に進展していく現象を確認している。また、このすべり面を境界として、ゆるみ域が発生することも確認している。つぎに、MCCを用いた弾塑性解析を実施し、得られた結果を基に、トンネル地山特性曲線や複数の点での応力履歴により、MCとMCCの比較を行った。MCCでのゆるみ域の進展は、MCのゆるみ域の進展と同じで、すべり面の発生、ゆるみ域の進展は、スプリングラインから発生し、地表面に進展していく。しかしながら、MCCは、トンネル崩壊に至る掘削解</p>			

放応力は、MCでのそれより大きくなることを示している。支保効果を導入することによるゆるみ域の抑制効果は、いずれにおいても確認されている。

第4章では、砂質土地山を対象とし、MCを用いた弾塑性解析により小土被りトンネルの掘削解析を行い、ダイレイタンシー係数 (ψ/ϕ) を0, 1/3, 1/2, 1としてパラメトリックスタディーを行っている。解析の結果より、ダイレイタンシー係数が大きくなれば、トンネル周辺の接線応力が増加し、トンネル天端の沈下量や地表面の沈下量が減少することを確認している。すなわち、トンネルが周方向にせり持つような現象を表現している。さらに、ダイレイタンシー係数が増加すると、トンネル周辺のゆるみ域が地表面の変形挙動に干渉することを抑制することを確認している。

第5章では、粘性土地山を対象とし、MCCを用いた弾塑性解析により小土被りトンネルの掘削解析を行い、過圧密比 (OCR) 1.0, 2.0, 8.0と変化させOCRの違いが小土被りトンネルの掘削挙動に及ぼす影響をMCCにより検討を行っている。また、 K_0 については、0.5, 1.0, 1.5として検討を行っている。数値解析の結果より、正規圧密粘土 (OCR = 1.0) で K_0 が0.5では、トンネル天端でひずみ硬化-軟化型の挙動を示すが、トンネルスプリングラインではいずれの土被りでもひずみ軟化挙動を示す。 K_0 が1.0では、トンネル天端部とスプリングラインのいずれにおいてもひずみ軟化挙動を示す。 K_0 が1.5では、 K_0 が0.5と逆の傾向を示すことになる。これに対し、過圧密粘土 (OCR = 2.0) で K_0 が0.5では、トンネル天端は弾性挙動を示し、トンネルスプリングラインはひずみ軟化挙動を示す。このひずみ軟化挙動は、掘削解放率が正規圧密粘土に比べ小さい段階で現れる。一般に、過圧密粘土地盤では、静止土圧係数 K_0 が比較的大きな値を示すことが想定されている。したがって、過圧密粘土地盤での水平力が卓越するような地盤では、トンネル天端部から比較的小さな掘削解放率でゆるみ域が進展していくことを示している。

第6章では、実際の小土被りトンネルの崩落が発生した地点を対象にMCとMCCによるトンネル掘削解析を実施している。MCを用いた数値解析では、ゆるみ域はトンネルスプリングラインから発生し、掘削解放率を増加させることでゆるみ域は地表面方向に進展し、トンネル崩壊に至る過程を示した。ここでの崩壊時に求められた天端の変位量は、実際の崩壊時に計測された天端の変位量と異なる結果となった。すなわち、MCを用いた数値解析では、実際に崩壊が生じた直前の変位量では、崩壊には至らないことになることを示している。一方、MCCを用いた数値解析では、OCRを2として解析を行い、MCと同様のゆるみ域の進展挙動を示している。さらに、解析により求められた崩壊時の天端の変形量は、実際に崩壊時に計測された天端の変位量と同等であることを示している。実際、トンネル崩壊に至った現場は、粘性土が優勢であり、また、過去に地表面形状が改変されており、結果として地盤材料が過圧密性を示すこととなっている。それらを考慮することで、MCCによる解析でトンネル崩落現象を適切に表現できることを示している。トンネル崩落時には、掘削解放率は非常に大きいものとなっていたことを示しており、適切な支保が導入されていない可能性を示唆している。

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。

氏名	Khalid Muhammad Shehzad
----	-------------------------

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、陥没・崩落事故の発生により、その安全性向上が強く求められている小土被りトンネルの掘削時の力学挙動の解明を目的とした研究である。砂質地山と粘性土地山を想定して2種類の力学モデルを用いた有限差分法によるトンネル掘削解析を行うことで、トンネル地山特性曲線を描き、小土被りトンネルの掘削挙動の解明とトンネルの安定性を論じ、その手法を用いて実際に発生したトンネル崩落事故に関する検討を行った。本研究において得られた主な結論を以下に示す。

1. 静止土圧係数 K_0 を 0.5 と固定して、モール・クーロンの破壊規準 (MC) と修正 Cam Clay モデル (MCC) を用いた弾塑性解析を行った。いずれもすべり面がスプリングラインから発生し、地表面に進展し、トンネルが崩壊することを示している。MCC モデルでの崩壊は、MC に比べて掘削解放応力が大きくなることを示している。
2. 砂質地山を対象として、ダイレイタンス係数をパラメータとして解析を行った。ダイレイタンス係数が大きくなることにより、トンネル周辺の接線応力が増加し、トンネル天端の沈下量や地表面の沈下量が減少することを確認している。
3. 粘性土を対象として、過圧密係数と静止土圧係数をパラメータとして解析を行った。過圧密粘土では、トンネル天端は弾性挙動を示すが、トンネルスプリングラインではひずみ軟化挙動を示し、その軟化挙動が発生するのは正規圧密粘土に比べて小さな掘削解放率で表れることを確認している。過圧密粘土地盤での水平応力が卓越するような地盤では、トンネル天端部から比較的小さな掘削解放率でゆるみ域が進展していくことを確認している。
4. 粘性土優勢の地盤での実際に発生した小土被りトンネル崩落事故の解析を行い、MCC による解析でトンネル崩落現象を適切に表現できることを示した。当該地点では、過去に地表面の掘削がなされており、過圧密状態であること、それを解析に反映することで、適切に崩壊現象を表現できることを確認している。さらに、解析結果より、崩壊時は非常に掘削解放率の大きな状況となっていることが想定されることを示し、適切な支保が導入されていない可能性を示唆している。

以上、本論文は、小土被りトンネルの力学挙動の解明を行うとともに実際のトンネル崩落現象を検討しており、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、平成 30 年 8 月 9 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。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。