

学位論文の要旨

氏名

多寶 徹

学位論文題目

山岳
しらす地山におけるトンネルの設計・施工法に関する研究

本研究は、しらす地山におけるトンネルの設計・施工を合理的に進めるための根拠を得ることを主目的としている。

本研究では、まず、しらすの定義を明確にした上で、トンネル掘削において重視すべきしらすの判別分類を示した。その上で、しらすの工学的特性を把握し、解析的手法で、しらすトンネルの力学的挙動を解明した。さらに、過去の事例や実施工を通じて、経験的設計手法の面からもその妥当性を確認し、しらすトンネルの合理的な設計・施工法を提案した。

以下に、本研究から得られた結論を各章ごとに示す。

第1章（緒論）では、本論文の主題であるしらす地山における山岳工法トンネルについて、研究実績、設計・施工の現状について述べたうえで、本研究の目的と必要性、および本論文の内容構成を示した。

第2章（しらすの定義と分類）では、これまでさまざまな意味で用いられてきた“しらす”の定義を再確認し、本論文で用いる“しらす”の定義を入戸火砕流堆積物の非溶結部（狭義のしらす）とした。

その上で、広義のしらすに対して機械的に硬度のみで分類している既往の“しらすの硬さによる判別分類”の問題点を整理し、しらす地山にトンネルを掘削する際に有効と考えられる狭義のしらすの判別分類を、目視による風化度の観察と、指標硬度による固結度の2つの指標によって行うことを提案した。

第3章（既往のしらす地山トンネルの事例整理）では、しらす地山のトンネルについて、文献より、1960年代の矢板工法から近年のNATMまで実績を整理した。

第4章（しらす地山トンネルの掘削時の挙動）では、実際に掘削した新武岡トンネルにおける2車線断面～3車線断面のトンネルの掘削時の挙動についてまとめた。

これまでしらす地山のトンネルは、比較的安定性が高いといわれてきた。実施工でも、ふつうしらすの一般的な断面のトンネルにおいては、支保工の変位も小さく、切羽の安定性、トンネルの安定性が比較的高いことを確認した。一方で、切羽面においては、土被りが小さい場合は安定しやすいが、土被りが大きい場合（概ね50m程度以上）では、切羽の安定性が低下することを確認した。特に土被りが70～80mとなると、切羽前方に曲面状の崩落が発生することを確認した。

第5章（しらす地山のトンネル工学的特性）では、実際のしらす地山におけるトンネルの施工情報、しらす地盤における原位置試験、室内試験の結果から、トンネル工学において重要である地山深部のしらすの工学的特性に着目した整理を行い、以下の成果を得た。

- (1) 地山深部のしらす地山の初期応力は、しらすの一軸圧縮強度に比べ、極めて大きく、しらすの物性試験を行う際には、応力解放の影響を考慮することが重要である。
- (2) 露頭、のり面、トンネル切羽など、目視により観察できるしらすは、応力解放後のものである。
- (3) しらすの応力～ひずみ曲線の初期段階の弾性変形を示す部分の変形係数は、拘束圧依存性が顕著であり、拘束圧の低下に伴い変形係数が低下する。
- (4) しらすトンネルの力学的挙動の解明においては、拘束圧の変化による変形係数の非線形性を考慮することが重要である。

第6章（しらす地山トンネルに対する数値解析モデルの構築）では、しらすの拘束圧に依存した変形係数の変化に着目した新しい数値解析モデルである、応力依存剛性変化モデルを構築した。これにより、従来の弾性解析や非線形解析では表現できなかったしらすトンネルの切羽面の力学特性について表現できることを確認した。

第7章（数値解析によるしらす地山トンネルの力学的挙動の解明）では、応力依存剛性変化モデルを、しらす地山のトンネルに適用し、次のような力学特性を明らかにした。

- (1) トンネル掘削時に生じるひずみから判断すると、しらす地山は三軸状態では破壊を起こしにくく、トンネル切羽近傍の一軸状態に近い位置での破壊を起こす。
- (2) 一般に、トンネル切羽面は一軸応力状態に近づくことから、地山の初期応力が大きい（すなわち土被りが大きい）ほど、不安定化しやすい。しらす地山は、一軸圧縮強度が著しく小さいことから、従来の理論では切羽面の安定性を説明できなかった。しかし、応力依存剛性変化モデルによる解析を用いることで、拘束圧の低下に伴う切羽面の剛性の低下と、その部分剛性の低下に伴い地山の応力の負担が低減することを確認した。これにより、切羽面のしらすが低強度であっても、比較的切羽が自立しやすいという機構を確認した。
- (3) トンネル支保工により適切な内圧を与えられた支保工背面のトンネル周辺地山は、三軸状態となり、安定した状態を保ち易い。

第8章（しらす地山における超大断面トンネルの力学的挙動の解明）では、側壁導坑先進工法で掘削した超大断面トンネルの力学的挙動について、応力依存剛性変化モデルを用いた解析により解明した。さらに、超大断面トンネルの掘削方法について異なる施工方法を適用した場合の解析シミュレーションを実施し、施工方法の違いによるトンネルおよび周辺地盤の挙動を述べた。

第9章（しらす地山におけるトンネルの設計・施工法の提案）では、前章までの研究結果から、しらすトンネルの合理的な設計・施工法を提案した。また、特殊条件下等におけるしらすトンネルの設計・施工における留意点についても言及した。

第10章（結論）は、本論文の総括として、各章の研究成果を要約した。さらに、今後のしらす地盤におけるトンネル掘削における課題についても言及した。

論文審査の要旨

報告番号	理工研 第 381 号	氏 名	多實 徹
審査委員	主 査	北村 良介	
	副 査	武若 耕司	山口 明伸
<p>学位論文題目 しらす地山における山岳トンネルの設計・施工法に関する研究 (Studies on Design and Performance of Tunnel in Shirasu Ground)</p> <p>審査要旨</p> <p>提出された学位論文及び論文目録等を基に学位論文審査を実施した。本論文は、しらす地山におけるトンネルの設計・施工を合理的に行うことを目指しており、全文10章より構成されている。</p> <p>第1章では、本論文の主題であるしらす地山における山岳工法トンネルについての既往研究をレビューし、本研究の目的と本研究の必要性および本論文の内容構成を示した。</p> <p>第2章では、これまで用いられてきた“しらす”の定義を再確認し、本論文で用いる“しらす”の定義を入戸火砕流堆積物の非溶結部（狭義のしらす）とした。そして、しらす地山にトンネルを掘削する際に有効と考えられる目視による風化度の観察と指標硬度による固結度の2つの指標を用いた狭義のしらすの判別分類を提案した。</p> <p>第3章では、1960年代の矢板工法から近年のNATMまでのしらす地山のトンネル施工における実績を整理した。</p> <p>第4章では、しらす地山を掘削した新武岡トンネルにおける一般的な大きさの2車線断面等のトンネル掘削時の挙動についてまとめた。</p> <p>第5章では、しらす地山におけるトンネルの施工情報、しらす地盤における原位置試験、室内試験の結果から、トンネル工学において重要である地山深部のしらすの特性に着目した整理を行った。</p> <p>第6章（しらす地山トンネルに対する数値解析モデルの構築）では、しらすの拘束圧に依存した変形係数の変化に着目した新しい数値解析モデルである応力依存剛性変化モデルを構築した。これにより、従来の弾性解析や非線形解析では表現できなかったしらすトンネルの切羽面の力学特性について表現できることを確認した。</p> <p>第7章では、応力依存剛性変化モデルを、しらす地山の一般断面のトンネルに適用し、しらす地山の力学特性を明らかにした。</p> <p>第8章では、側壁導坑先進工法で掘削した超大断面トンネルの力学的挙動について、応力依存剛性変化モデルを用いた解析により解明した。さらに、超大断面トンネルに異なる施工方法を適用した場合の解析シミュレーションを実施し、施工方法によるトンネルおよび周辺地盤の挙動の違いを明らかにした。</p> <p>第9章では、前章までの研究結果から、しらすトンネルの合理的な設計・施工法を提案した。</p> <p>第10章は、本論文の総括として、各章の研究成果を要約した。さらに、今後のしらす地盤におけるトンネル掘削における課題についても言及した。</p> <p>本論文ではしらす地山におけるトンネル施工の事例研究を通して多くの貴重な成果が得られており、今後のトンネルの合理的な設計・施工に貢献することが期待される。</p> <p>よって、審査委員会は博士（工学）の学位論文として合格と判定する。</p>			

最終試験結果の要旨

報告番号	理工研 第 381 号	氏 名	多寶 徹
審査委員	主 査	北村 良介	
	副 査	武若 耕司	山口 明伸

平成25年2月5日（火）に論文発表会が開催され、約50分の説明と60分の活発な質疑応答が発表者と審査委員を含む参加者との間でなされ、発表者からの確かな回答が得られた。

主な質疑応答内容を以下に記す。

【質問】しらすの従来の工学的分類と本論文で提案されている工学的分類の関連について説明を追加して下さい。

【回答】従来のしらすの定義は広義のしらすと狭義のしらすの区別が明確になされないままになされていたので、本論文では広義と狭義の意味を明確にした。すなわち、広義のしらすとは、火山活動に伴う火砕流堆積物の非溶結部とし、主に第四紀（約160万年前～現在）の火砕流堆積物（加久藤火砕流、阿多鳥浜火砕流、阿多火砕流等）の非溶結部とする。狭義のしらすとは2.5万年前に始良火山の噴火によって生じた入戸火砕流の非溶結部とする。本論文での工学的分類は狭義のしらすを対象としている。また、従来の工学的分類では指標硬度のみを指標としていたが、本論文では目視（色調）による風化度の観察と指標硬度による固結度の2つの指標を用いて工学的分類を行っている。用語についても、従来の工学的分類では「極軟質」、「軟質」、「中硬質」、「硬質」という語が用いられているが、本論文では「強風下」、「風化」、「ふつう」、「硬質」という語を用いて分類を行った。

【質問】地山強度比からみたしらす地山の特性について追加説明をして下さい。

【回答】地山強度比とは（一軸圧縮強度）／（土被り圧）で定義され、通常 mountain tunnel では地山強度比が1以上であれば問題がないとされている。一方、今回の新武岡トンネルでの土被り高さが80mでの一軸圧縮強度は20～100kN/m²、土被り圧は1280100kN/m²となり、地山強度比の観点からは問題があることになる。しかし、50m程度の土被り高さまでは切羽は安定しており、試料採取時、試験時の応力開放による強度低下が原因と考えられ、これらの定量的な評価が必要になる。

【質問】トンネル掘削の過程で地山の応力は解放され、そのに伴う変形係数の変化がある。このことを考慮するため、変形係数の新たな評価式を提案しているが、このことに関して追加説明をして下さい。

【回答】従来のトンネルの変形・強度解析では材料を弾性体と見なした線形弾性解析、ひずみに依存して変形係数を変えていく非線形弾性解析が行われてきたが、本論文では土被り圧と応力解放を考慮し、応力依存剛性変化モデルを用いた数値解析を行い、標準断面での実測結果を良好に表現できることが明らかになった。この実績を踏まえ、超大断面（掘削断面積：378m²、道路トンネルでは日本一）でのいくつかの掘削施工フロー案に対して事前に数値解析を行い、最適な工法（側壁導坑先進工法）を選択し、安全に施工が完了した。

【質問】一次覆工にトンネルずりを骨材としたしらすコンクリートを用いたことについてコメントをして下さい。

【回答】しらすコンクリートを一次覆工に用いたのは日本で初めてである。まさに、地消地産である。コストの問題があるが、今後のしらす地山トンネルの施工でもずりの有効利用を考えていただければありがたい。

以上の結果、3名の審査委員は申請者が大学院博士後期課程修了者として十分な学力と見識を有するものと認め、博士（工学）の学位を与えるに足りる資格を有するものと判定した。