

京都大学	博士 (工学)	氏名	中廣 俊幸
論文題目	シールドトンネル施工時荷重を受ける沖積粘土地盤の時間依存性挙動がセグメントに及ぼす影響に関する研究		
<p>シールド工法は地表面からの開削を伴わない地下空洞構築という利点を有しており、地上の既設市街地や構造物に影響を与えずにトンネルを構築できることから、都市土木にとって非常に有用な工法として広く活用されている。一方で、都市域が展開する平野部には軟弱粘土が堆積しており、こうした地盤ではシールド掘進後に地盤沈下等の変状が問題となるケースも散見される。本論文は、軟弱な沖積粘土内におけるシールド工事において、シールド掘削による軟弱粘土の時間依存性挙動と、長期的地盤変状がトンネル躯体であるセグメントに及ぼす影響について室内実験と数値解析によって検討したものであり、8章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究の背景と目的とともに、軟弱な沖積粘土地盤が展開する大阪平野における既設トンネルにおけるセグメントの劣化やひび割れの発生が、粘土の長期的な変形に起因する可能性があること、またトンネル掘削時の応力履歴がその後の後続地盤沈下の要因となっていることを示し、軟弱粘土地盤におけるシールド工事が抱える問題点を指摘している。その上で、対象とする沖積粘土に対してシールド施工荷重を与えた室内土質試験によって圧密せん断挙動を明らかにするとともに、この地盤挙動がセグメントに及ぼす影響について数値解析に基づいて検討し、トンネルの長期健全性について評価することを述べている。</p> <p>第2章では、本研究で対象としている大阪平野の沖積粘性土層の地形・地質的特性について既往の研究資料に基づいてその土質工学的特性を整理している。また、当該沖積粘性土層を対象に敷設されたシールドトンネル施工時の実測結果について、施工時荷重載荷時および施工時荷重除荷後の当該粘性土の挙動について整理、考察を行っている。特に、施工時荷重除荷後の長期挙動については当該粘性土層のひずみ速度に着目して考察している。さらに、セグメント設計の考え方やセグメントの劣化要因について整理し、粘性土の圧密現象がセグメントに与える影響について考察を行っている。</p> <p>第3章では、シールドトンネル施工時の地盤変形要因について整理し、2章で示した実測結果を参考にトンネル掘削時の応力解放とテールボイドを充填する裏込め材注入時の圧力に着目し、応力解放力および注入圧を三軸試験におけるせん断力とするための考え方について考察を行っている。また、三軸試験で当該粘性土に与えるせん断力の大きさに影響を与えるパラメータ（応力解放率）について、これまでの研究結果に基づいて整理、考察している。</p> <p>第4章では、西大阪で採取した沖積粘性土を用いて、三軸試験によりシールドトンネルの施工時荷重を想定したせん断力の載荷、除荷を行い、除荷後の粘性土の長期挙動について考察を行っている。試験ではトンネル掘削時の応力解放を想定した伸張せん断力と、裏込め注入圧載荷を想定した圧縮せん断力を単独または組み合わせ、実施工の施工間合いを想定したせん断力の保持時間を設けて載荷、除荷を行い、応力解放による影響、裏込め圧による影響、およびその両者の影響を受けた粘性土の長期挙動を二次圧密速度(α)に着目して評価し、対象とする沖積粘性土の挙動特性を確認している。その結果、本来の定義である単調に圧縮応力を載荷させた場合の二次圧密速度(α)に比べて、トンネル掘削相当の除荷の後に裏込め注入圧相当の載荷応力を与えた場合</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	中廣 俊幸
<p>の二次圧密速度(α)はかなり大きく発現し、初期の掘削による伸張応力载荷の影響が後続変形に大きく影響を与えることを確認している。</p> <p>第5章では、三軸試験で得られた対象粘性土の挙動(施工時荷重を与えた時および除荷後の長期挙動)を再現し、それぞれの载荷状態における粘性土の材料パラメータを求め、三軸試験で用いた粘性土の供試体をモデル化した軸対称条件下における弾粘塑性解析による再現解析を行っている。解析に用いる初期の材料パラメータである弾粘塑性パラメータを4章で用いた粘性土と同一層、もしくは近傍深度から採取した試料を用いた圧密試験や三軸試験に基づいて設定した。三軸試験で得られている軸ひずみ、体積ひずみの絶対量および経時的挙動を表現できるパラメータセットを求め、有効応力経路に基づいた応力状態の再現性についても確認した。本章で得られた室内試験を再現できる土質定数を次章のトンネル掘削解析に適用した。</p> <p>第6章では5章で得られた対象粘性土の材料パラメータを用いた弾粘塑性有限要素法によるトンネル掘削解析を行い、掘削時の応力解放および裏込め圧の圧縮载荷というシールドトンネル施工時荷重を受けた粘性土が示す長期変形挙動を検討するとともに、長期的にトンネル支保工であるセグメントにどのような影響を与えるかについて考察している。一連の弾粘塑性有限要素解析により、トンネル天端付近の粘性土は、掘削時には応力解放による伸張せん断挙動を、裏込め圧作用時には圧縮せん断挙動を示すこと、その後長期的には、過剰間隙水圧の上昇による有効応力の低下に伴ってひずみ量が急激に増加し、その消散に伴う有効応力回復過程ではひずみの増加量が徐々に低下することが確認された。またトンネル天端から側壁間では水平方向のひずみの増加に伴ってセグメントに沿って粘性土が下方に変形し、インバートから側壁間ではリバウンドの影響が卓越してセグメントに沿って上方へ移動するため、側壁付近において作用土圧の増大が起こることを示した。粘性土の長期挙動に伴って、セグメントに作用する荷重はセグメント全周において経時的に増加し、特に天端と側壁間および側壁とインバート間で顕著な増加傾向があることを明らかにした。</p> <p>第7章では6章で得られたシールドトンネル施工荷重を受けた粘土地盤の変形によって生じるセグメントへの付加荷重を用いた構造解析を行い、トンネルセグメント部材への長期的な影響について考察した。その結果、粘土の長期変形に起因する付加荷重を受けても、セグメントのコンクリート、鉄筋ともに現在の設計応力度を超過することはなく、発生が予測されるコンクリートのひび割れ幅も許容値以内に収まることが確認された。ただし、トンネルが対象粘性土層と堅固な層の境界に位置する場合、付加荷重の影響で偏圧状態になる可能性があることを確認した。</p> <p>第8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	中 廣 俊 幸
----	---------

本論文は、軟弱粘土地盤内におけるシールド工事施工荷重による応力解放と裏込め注入による荷重によって、粘土地盤が時間依存性長期変形を起こすメカニズムを実験と弾粘塑性有限要素法による数値解析によって検討するとともに、その地盤変位がトンネルセグメントに及ぼす影響について研究を行った成果を取り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. 西大阪に分布する沖積粘土に対し、トンネル掘削時の応力解放と後続する裏込め注入を想定して、三軸試験において伸張・圧縮交番荷重を与えると、単純な圧縮荷重試験に比べて長期圧縮量が増大し、応力解放による伸張荷重が長期沈下の要因となることを明らかにした。
2. トンネル掘削時の応力状態を再現した沖積粘土に対する室内三軸試験の挙動を、弾粘塑性構成モデルによって解析し、対象とする沖積粘土の強度特性と時間依存性挙動特性を数値解析で再現できることを確認した。また、この数値シミュレーションに基づいてトンネル断面解析に用いる土質定数を設定した。
3. トンネル断面二次元モデルに対する弾粘塑性有限要素法による数値解析を行い、シールドトンネル施工荷重によるトンネル周辺粘土地盤の挙動を解析した。その結果、トンネル天端付近では掘削と裏込め荷重によって施工中には伸張、圧縮挙動を起こすが、セグメント打設後は長期にわたって鉛直方向に圧縮、水平方向には膨潤することによってトンネル周辺地盤の変形が継続することを示した。
4. トンネル断面二次元弾粘塑性有限要素解析により、セグメント周囲の地盤の長期的な変形に伴う応力変化を計算し、これに基づいてトンネルセグメントに作用する支点反力を算定した。セグメント周囲の地盤の変状によりセグメントに作用する荷重が時間とともに増加する現象を確認した。
5. トンネル構築に伴う地盤変形によるセグメントへの作用荷重により、セグメントに発生する応力は時間の経過とともに増加するが、構造的安定性が問題となるような現象は起こらないことを示した。

以上より、本論文は、軟弱粘土地盤におけるシールド工事による地盤の変状とそれに起因するトンネルへの影響を、実験及び数値解析によって検討したものであり、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4年2月16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。