

氏名	安井 克豊
授与した学位	博士
専攻分野の名称	工学
学位授与番号	博甲第 7060 号
学位授与の日付	2024年 3月 25日
学位授与の要件	環境生命科学研究科 環境科学専攻 (学位規則第4条第1項該当)
学位論文の題目	シールド工法の掘進管理技術の高度化によるトンネル施工の合理化に関する研究
論文審査委員	教授 諸泉利嗣 教授 竹下祐二 教授 小松 満
学位論文内容の要旨	
軟弱な沖積地盤など都市部における施工条件の厳しいトンネル工事においては、非開削であり、切羽の土圧と水圧に対抗して切羽の安定を図りながらトンネルを構築するシールド工法が多用されている。シールド工法においては最先端技術の導入と定量化した熟練工の経験値の融合による安全性と生産性の向上が強く求められている。本研究では、シールド工法の掘進管理技術の高度化に対する技術開発により、シールドトンネル施工の合理化に関する研究を行い、以下に示す成果が得られた。 (1)気泡シールド工法における掘削土の水生環境負荷を低減する特殊発泡剤 水生環境負荷が小さく、施工性・経済性に優れた特殊起泡剤を選別し、陰イオン系界面活性剤に適量の非イオン系界面活性剤を添加した特殊起泡剤を開発した。シールド工事に適用した結果、水生環境負荷が 1/25 に低減できることを確認した。 (2)泥土圧シールド工法におけるカッターチャンバー内泥土の塑性流動性評価手法 泥土圧シールド工法におけるカッターチャンバー内泥土の塑性流動性の管理方法において、シールド隔壁部で計測される土圧データを用いた塑性流動性管理手法を開発し、塑性流動性を可視化した。さらに、Moving Particle Simulation 法による流動解析技術法を用いたカッターチャンバー内泥土攪拌シミュレーションの適用性を示した。 (3)泥水式シールド工法における特殊条件下での切羽圧力管理手法 特殊な施工条件下（大断面、小土被り、不均質地盤等）における泥水式シールド工法の掘進管理値の設定方法として、シールド掘進の初期段階において、トライアル施工を実施してシールド通過に伴う地盤変状を計測し、2次元弾性 FEM 解析を援用することで、掘進管理値の設定を行う方法を提案した。 (4)人工知能（AI）を活用したシールド機掘進管理システム シールド工事における掘進計画の立案およびシールドの操作指示を支援するツールとして AI 技術に着目し、掘進計画を支援する「施工計画支援 AI システム」およびシールドの操作を支援する「掘進操作支援 AI システム」を開発した。これらの AI システムによるシールド線形管理方法を実際のシールドトンネル施工に実装し、その有効性を検証した。 (5)地上設置型合成開口レーダー（GB-SAR）を用いたシールド掘進時の地盤変状の遠隔計測方法 地盤変状の計測において制約条件の多い施工用地内でのシールド工事において、GB-SAR による地盤変状の遠隔計測方法を提案し、空港施設の直下を通過するシールド工事に適用した際に得られた知見を示した。 (6)埋め立て地盤における泥水式シールド工法による掘進時の地盤変状リスクの低減対策 埋め立て地盤特有の不均質性や人工物の存在によって、泥水式シールド工法による掘進時の切羽に作用する土水圧の急激な変化に起因する地盤変状の発生リスクを低減するための対策工法について論述した。	

論文審査結果の要旨

近年、都市部などの軟弱な沖積地盤でのトンネル工事においては、シールド工法が多用されており、シールドトンネル施工に対する安全性と生産性の向上のための技術開発は喫緊の研究課題である。本研究は、シールド工法における掘進管理技術の高度化によって、安全かつ合理的なシールドトンネル施工方法の実用化に関する研究を行ったものであり、以下に示す意義深い成果を得ている。

(1) 泥土圧シールド工法において、MPS (Moving Particle Simulation method) 法を援用したカッターチャンバー内泥土の性状評価手法を提案し、泥土攪拌シミュレーションおよび汎用的な土圧計測値を用いて掘削泥土の塑性流動性のリアルタイム評価を行った。これらにより、シールド掘削土の泥土性状が可視化され、客観的な性状管理が可能になる。さらに、気泡シールド工法による掘削土の環境負荷低減のために、陰イオン系界面活性剤に適量の非イオン系界面活性剤を添加することで気泡の安定性を向上させ、水生環境負荷を低減した特殊起泡剤を開発した。開発した特殊起泡剤を用いた場合には、掘削土の水生環境負荷が従来の特殊起泡剤に比較して 1/25 に低減することを確認した。

(2) 特殊な施工条件下におけるシールドトンネル施工における掘進管理および地盤変状の計測管理方法について検討した。土被り圧の小さい大断面トンネル施工において、切羽水圧および裏込め注入方法を変化させたトライアル施工を実施し、シールド通過に伴う地盤変状を計測し、計測された地盤変状に対して 2 次元弾性 FEM 解析を援用することで、掘進管理値の設定を行う方法を提案した。また、不均質な埋立地盤上に位置する空港敷地内でのトンネル施工において、地上設置型合成開口レーダーを用いた地盤変状の遠隔計測方法を提案し、地盤変状発生の回避と低減のためのシールド掘進管理方法を示した。これらは、従来の掘進管理方法によるトンネル施工が困難な場合における新たな施工管理方法の提案である。

(3) 人工知能を活用したシールド線形管理方法として、掘進計画および掘進操作を支援する AI システムを開発し、実際のシールドトンネル施工に実装することで、その有効性を検証した。これらには、定量化された熟練工の経験値が融合され、シールド工事の安全性と生産性の向上に貢献する施工支援システムとして期待される。

本論文は、シールド工法における掘進管理技術の高度化の方法を提示し、それらの課題および改善可能性も含めて示した。これらは、今までに実用化されていない掘進管理方法の要素技術に関する研究開発である。開発された掘進管理技術を実装したトンネル施工事例をも記載しており、貴重な施工データとしてトンネル工学上の価値も高い。

以上より、学位審査委員会は本論文が博士(工学)を授与するに値するものと認める。