

学位論文題名

シールドトンネル近接施工における地盤変位の
実用予測手法に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、鉄道、道路などの交通施設、上下水道、ガス、電力、通信などのライフライン、さらに建物の基礎などを密集度が高い都市部において、新たに地下施設として設ける場合には、既存の施設に近接して工事を行うことが避けられない状況にある。このような場合、その工事によって、既存の施設に対し荷重増加や不等沈下などの悪影響を生じさせ、その機能や安全性に問題を及ぼすことがある。一般に、近接施工が計画されると、類似の施工事例を参考に、種々の手法を用いて数値解析を行い、工事による影響と既存施設の安全性を検討し、その結果に基づいて必要な対策工が計画される。しかし、数値解析による予測は、有限要素法などの高度な手法を用いているにもかかわらず、モデル化および入力する地盤定数の設定の難しさから、定量的な精度について高い評価が得られているとは言えないのが現状である。

本研究は、シールドトンネルが関係する近接施工を対象として、シールド施工による他の構造物への影響とその予測手法に関する解析を行ったものである。近接施工には、既存施設の用途や形式、および近接して行う工事の種類や現地の地盤条件により様々なケースがある。本研究では、シールドトンネル同士の近接工事やシールドトンネル上部の開削、土留め工直下でのシールド施工などを対象とし、シールド施工に伴う地盤の挙動と予測解析手法の適用性について検討を行い、その結果を踏まえ、シールド施工に伴う地盤変位の新しい実用予測手法を提案するものである。

本論文の概要は次のとおりである。まず最初に、シールド工法の歴史を略述し、工法の変遷と新技術の動向を示した。また都市部地下空間の利用状況と鉄道のルート選定上の制約によって生じた、シールドトンネルに関する近接施工の実例、および近接施工に関する各事業者の技術基準を紹介し、これまでの近接施工対策の進め方や影響予測手法についてその種類と適用上の問題点を指摘した。さらに、筆者がこれまでに携わったシールドトンネルに関する近接施工の事例を紹介し、影響予測手法、対策工、現場計測結果などを検討し、それらの現状と課題および今後のあるべき方向を示した。

現在、シールド施工による地盤変位の予測手法については、二次元有限要素法を利用し、テールボイド部の地盤の緩みに着目した方法が提案されている。この手法は密閉型シールドによる地盤変位予測に広く用いられているが、シールド機の前方で地盤を押し抜ける効果については考慮されていない。筆者は、シールド施工による地盤変位の実用的な予測手法として、これまでに携わったシールド工事における地盤やトンネルの挙動を基に、その発生メカニズムを分析して、従来の解析手法に改良を加え、シールド推進力による地盤の押し抜け圧を考慮した二次元有限要素法を用いた新しい予測手法を開発した。本手法では計算時間や費用などの実用面を考慮して、三次元的に発生する地盤変位を二次元モデルで算定しており、容易にシールド機の掘進に伴う施工過程を考慮した地盤変位を予測することが可能である。

シールド掘進による地盤変位の特徴は、シールド機の周りでの地盤変位の発生源が、切羽面での土圧のアンバランス、テールボイド部での緩み、シールド機掘進時の鋼殻やカッタービットからの作用荷重など多様であるとともに、地盤変位がシールド機を中心に三次元的に拡がり、しかもその分布がシールド機の進行とともに移動・累積して行くことなどにある。

いま、泥水式シールド、土圧式シールドなどの密閉型シールドを対象とすると、地盤変位の発生要因は、次の3点に集約できる。

- ① ジャッキ推力による切羽面の押さえ圧による地盤変位
- ② テールボイドの裏込め注入材未硬化部の地盤変位
- ③ セグメントリングの変形による地盤変位

シールド掘進による地盤変位を数値解析により予測する場合、三次元的な拡がりおよび逐次的に発生する地盤変位の挙動を解析にいかに取り込んでいくかが問題となる。これら地盤変位の要因を二次元モデルで評価するため、本予測手法では、ジャッキ推力による押し広げ圧およびテールボイド部の解放応力による地盤変位について、次に示す有効率を用いることにした。

$$q_j = \beta_j \frac{P_j - P_0}{A_s}, \quad \Delta p = \beta_t (\sigma - p_t)$$

ここに、 q_j ：ジャッキ推力による押し広げ圧 (tf/m^2)、 Δp ：解放応力 (tf/m^2)、 β_j ：押し広げ圧に関する有効率、 β_t ：解放応力に関する有効率、 P_j ：シールド推進時のジャッキ総推力 (tf)、 σ ：地盤の応力 (tf/m^2)、 P_0 ：切羽面の静止土圧と水圧の合力 (tf)、 p_t ：テールボイド部における有効圧 (tf/m^2)、 A_s ：切羽の断面積 (m^2)。

これらの係数については、実際の地盤の挙動を可能な限り忠実に表現するため、三次元有限要素法を用いて地盤変位を算出し、その結果に基づいて定量的評価を行った。シールド掘進問題に関する三次元有限要素法解析については、これまでに数例の研究が知られているが、いずれも十分に確立されたものではない。本研究では、シールドの一連の掘進過程を、シールド推進力、切羽掘削、テールボイドの発生、裏込め注入、セグメント組立について忠実に再現し、三次元有限要素法解析を行った。

この三次元有限要素法を用いて試算した結果と二次元有限要素法との対比により有効率を評価した。すなわち、実用的な二次元解析により三次元解析と同様な地盤変位を算出できる値を設定した。その値は、ジャッキ推力による押し広げ圧の有効率 $\beta_j = 0.2 \sim 0.3$ 、テールボイド部の解放応力の有効率 $\beta_t = 0.30 \sim 0.35$ となることを明らかにした。

さらに、トンネル縦断方向の地盤変位の分布を、上述の3つの発生要因と関連させて地盤変位モードの定式化を行った。これにより二次元解析によって計算された各要因ごとの地盤変位を累積し、その結果からトンネル縦断方向の地盤変位形状を推定することが可能となった。

以上のように本手法によれば、最近の密閉型シールド工法による地盤変位の主要な発生要因をすべて考慮した地盤変位を推定することができる。これにより、とくに近接施工の影響を容易に把握することが可能となった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 土 岐 祥 介
副 査 教 授 板 倉 忠 興
副 査 教 授 三 田 地 利 之
副 査 教 授 三 上 隆
副 査 教 授 中 島 巖

学 位 論 文 題 名

シールドトンネル近接施工における地盤変位の 実用予測手法に関する研究

本論文は、シールドトンネルの近接施工による既設構造物への影響とその予測手法について、実際の掘進過程における地盤の変位やトンネルの変形挙動を検討し、従来の解析手法に改良を加えた上で、新しい地盤変位の実用的な予測手法を構築したものである。

第1章結論に続き、第2章では、シールド工法の歴史を略述し、その変遷と新技術の動向を示し、都市部の地下空間の利用状況と鉄道のルートを選定する上で建設基準の制約によって生じたシールドトンネルの近接施工の実例を紹介し、その現状と課題を論じている。

第3章では、シールドトンネルの近接施工の進め方について、各事業者の定めている設計・施工指針等を分析することにより、近接程度の判定法や近接程度に対応した適切な対策法の内容を明かにし、さらに近接施工による影響予測手法の実際と問題点、および計測管理の現状について述べている。このうち影響予測手法については、最近の密閉型シールド工法にあっては、従来のテールボイド部の地盤の緩みを主な地盤変形要因として解析していた手法に加えて、新たにシールド推進力による地盤の押し抜けによる影響も考慮した合理的な解析が必要であることを提起している。

第4章では、シールドトンネルが関係する近接施工について、①シールドトンネル同士の近接工事(4例)、②開削工とシールドトンネル(2例)、および③シールドトンネル通過に伴う河川堤防の耐震安全性の検討(1例)の計7例について、影響予測解析、対策工、現場計測などの計画と実施について詳述し、近接施工において安全性と経済性のバランスのとれた対策を行うためには、定量的な地盤変位および近接している構造物の挙動を精度よく予測できる手法が必要であること、およびこの予測の過程で従来考慮されていなかったシールドの推進力による地盤の押し抜け力を合理的に表現できる実用的な予測手法の開発が必要なことを明かにしている。

第5章では、シールド施工による地盤変位の実態について分析している。

シールド推進による地盤変位の特徴は、シールド機の周りでの地盤変位の発生原因が、切羽面におけるチャンパー内泥水圧と地盤の土圧・水圧との不均衡、テールボイド部での地盤の緩み、およびシールド機推進時に鋼殻やカッタービットから伝達される応力など多様であるとともに、地盤変位がシールド機を中心に三次元的に拡がり、しかもその分布や変位量がシールドの進行とともに移動、累積して行くことにある。最近の密閉型シールド工法の場合、シールド推進力による地盤の押し抜け、テールボイド部の地盤の緩み、および硬化した裏込め注入材を介して作用する土圧によるセグメントの変形が地盤変位の主要

な要因となることを明かにしている。次にこれら三つの要因を対象として、三次元的な挙動を示す地盤変位を実用的な二次元解析で評価するために、二次元有限要素法解析値と三次元有限要素法解析値との関係から求められる有効率を導入して、二次元有限要素法により逐次解析を行い、最終的な地盤変位を求める実用的な手法を構築している。そして、泥水式シールド工法による近接した併設シールド工事の現場計測結果との比較によりこの実用予測手法の妥当性を検証している。

第6章では、シールド施工に伴う地盤変位の実用予測法を導くにあたって用いた三次元有限要素法についてモデル化および適用性について検証している。モデル化にあたっては、シールド機、セグメントおよび硬化後の裏込め注入材を構造要素とし、これにジャッキ総推力に相応した切羽面圧力とテールボイド部の裏込め注入圧を荷重として作用させ、掘進に合わせて切羽地盤を削除することで前進した掘進状態を、またセグメント等の構造要素を加えることで覆工の完成状態を表現し、これを繰り返すことによってシールドの1リングずつ前進する施工過程を表現している。さらに、このモデルの適用性について、現場計測結果と比較検証し、精密解析を必要とする場合に有用な三次元有限要素法による新しい提案手法の妥当性を確認している。

最後に第7章では、本研究によって得られた成果を総括して結論としている。

これを要するに、著者は、シールドトンネル近接施工における地盤変位の新しい実用予測法を確立し、その有用性を明かにしたものであり、地盤工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。