

外 92-39

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

シールドトンネルの擬似三次元  
構造解析手法に関する研究

申 請 者

堀 地 紀 行

Noriyuki Horichi

平成 4 年 // 月

シールドトンネルは、鉄道、上下水道、情報、エネルギー等の都市機能を支える極めて重要度の高い構造物である。また、昨今の大都市圏における高度地下利用を背景として、都心部ではシールドトンネルが輻輳し、地下空間も過密化の時代を迎えている。こうした状況にあって、シールドトンネルの設計・施工面における今後解決すべき重要な課題の一つとして、併設・交差等において後続シールド機の掘削等の影響を受ける既設シールドトンネルの覆工体の力学的な評価といった問題が提起されており、その解決策としてシールドトンネルの三次元力学挙動を明確に把握でき、しかもその適用についても比較的簡便なシールドトンネルの構造解析手法の確立が望まれている。従来よりシールドトンネルの構造解析に関する研究については、トンネル周方向の断面力の解析手法に関する内容のものが多くを占め、その成果として、セグメントをはり部材とし、セグメント継手、リング継手についてはそれぞれ回転ばね、せん断ばね等と評価した離散化されたリング解析モデルが提案され、実設計にも適用されるに至り、現在ではトンネル周方向の力学特性については、ほぼ明確になっている。また最近では、シールドトンネルの耐震性や、併設・交差等の力学的な評価に際し、トンネル軸方向の断面力の検討も必要とされる状況となり、解析モデルとしてシールドトンネルをリング継手の剛性低下を考慮した一様なはりとして評価し、地盤による支持を弾性ばねとした弾性床上的はりモデルや、この改良モデルとしてリング継手の挙動をばね機構で表現した離散化モデルが提案されており、トンネル軸方向の挙動の把握に際し実効を挙げている。

しかしながら、地下空間の過密化などから、例えば併設シールドトンネルにおける後続シールド機の切羽前面圧等の影響といった、局所偏荷重がシールドトンネルに作用する場合、従来の二次元的なトンネル周方向の断面力解析手法では、構造力学的に不安定な状態を来すことにもなり、この場合の解析上の措置として、新たに仮定を設けるなどの必要がある。また、トンネル軸方向の構造モデルである弾性床上的はりモデル等は、一次元構造のため、局所偏荷重が作用する場合、トンネル周方向の解析は当然不可能である。一方、セグメントと継手から構成されているシールドトンネルを三次元構造物として忠実にモデル化するとすれば、膨大な自由度数と成り、現状における計算機の容量やコスト面などの制約から、実務的には解析が不可能な状況である。このため、シールドトンネルの三次元的な力学評価に際しては、トンネル周方向と軸方向について個々に解析を行い、その結果を設計に反映させる方法をとっている。

本研究は、こうしたシールドトンネルの構造解析モデルの現況等を踏まえ、トンネル軸方向に応力と変位が生じた際の任意の位置のトンネル周方向の断面力を算定する手法として、セグメントをはり、セグメント継手を回転ばね、リング継手をせん断ばねとした既往の二次元リング解析モデルに、新たに考案したトンネル軸方向の荷重・変位の関係から求められるばねを導入することによって与えられるシールドトンネルの擬似三次元構造解析モデルによる解析手法の提示を目的としている。ここで、ばね定数算定のためのトンネル軸方向の構造モデルは、シ

ールドトンネル全体を弾性床上的はりモデルとした上で、さらに局所偏荷重区間におけるトンネルの断面変形を考慮するため、円筒シェルモデルを組み入れた形としており、トンネル軸方向を連続体モデルとしたことによる、構造モデルの簡便さにも配慮している。

本論文は五章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

## 第一章 序 論

本章では、本研究に関連する既往の研究について概観し、本研究の位置付けを明らかにするとともに研究の目的、およびその内容の概略について述べている。

## 第二章 擬似三次元構造解析モデル

本章では、三次元構造物であるシールドトンネルの軸方向の力学特性を表すばねを、二次元周方向の既往のリング解析モデルに取り込むことによって、擬似三次元構造解析が可能であることを述べている。ここでは、シールドトンネルの軸方向をリング継手の剛性低下を考慮した剛性一様なはりとして評価し、はり理論による荷重と変位との関係から、はりの曲げ剛性および荷重・境界条件より定まるばねを、はり理論による等価弾性ばねとして定義している。

次に、シールドトンネルの局所偏荷重作用区間をセグメント厚と同じ板厚を有する均一な円筒シェルと仮定することにより、シェル理論を用いて、荷重強度と半径方向の変位との関係から、はり理論による等価弾性ばねと同様に、シェル理論による等価弾性ばねが定義されることを示している。さらにこれらを用いて、はり理論による変位量と、シェル理論による断面変形量（半径方向の変位量）とを重ね合せ、変位と荷重強度との関係から、はり理論を拡張した断面変形を考慮した等価弾性ばねを導いている。

擬似三次元構造解析モデルは、上記のトンネル軸方向の荷重と変位との関係から求められるばねを、既往のリング解析モデルに挿入することによって与えられ、リング内の局所偏荷重作用範囲については、断面変形を考慮した等価弾性ばねを、その他の範囲については、はり理論による等価弾性ばねを適用しており、擬似三次元構造解析モデルの具体的な機構について説明している。また提案したシールドトンネルの擬似三次元構造解析モデルによれば、併設・交差などの相互近接施工時や、局所的な地盤沈下並びに地震時におけるシールドトンネルの力学的な挙動を、トンネル軸方向のみならず周方向についても三次元構造として概ね説明することが可能であり、こうした問題に対処するため、上記の各事例に対する解析手順などを説明している。

## 第三章 併設シールドトンネルの現場計測における先行シールドトンネルに

### およぼす局所偏荷重の評価

本章では、軟弱粘性土地盤中において土圧式シールド機を用いて実際に施工したトンネル純間隔  $0.5D$  ( $D$ : トンネル外径,  $7.2\text{ m}$ ) の鉄道併設シールド

トンネルの現場計測の結果から、後続シールド機掘進にともなう地中応力の変化と、先行トンネルの覆工に作用する負荷応力、並びにそれに起因する先行トンネル周方向の曲げモーメントの変化について述べている。この中で負荷応力は、先行トンネルのセグメント外周面に設置された土圧計及びセグメント内に埋め込まれた鉄筋計などから構成される計測断面の手前1.5D（約10m）付近に、後続シールド機の切羽（先端の地山掘削面）が到達した時点からその値が変動し始め、以後シールド機の進行にともない直線的に増加し、切羽が計測断面を1m程度通過した時点で負荷応力は最大値を示すことを把握している。その後切羽の通過とともに負荷応力は直線的に減少し、シールド機最後尾通過にともなうテールボイドの応力解放現象と裏込注入による再度の応力上昇などシールド機掘進時の諸現象を確認している。さらに、こうした負荷応力の変化に呼応した先行トンネルセグメントリングの曲げモーメントの変化も計測され、後続シールド機の切羽到達（1m程度貫入）時とその前後の状態に対して、その挙動を正反逆転する曲げモーメントの値とその分布モードとして把握している。また、得られた現場計測の結果では、先行トンネルの周方向断面力の変化に大きく影響を与えた局所偏荷重は、後続シールド機切羽前面圧や貫入抵抗等に起因するものと評価され、トンネル寸法及び施工状況等の諸定数を用いて、局所偏荷重のモデル化を図っている。

#### 第四章 現場計測結果と解析結果との比較と考察

本章では、現場計測結果と解析結果との比較と考察について述べる。まず、後続シールド機切羽が到達した時点における先行トンネル周方向曲げモーメントの値から、同トンネルの単線状態における曲げモーメントの値を差し引き、この値を局所偏荷重による先行トンネル曲げモーメントの増分としている。次に、この曲げモーメントの増分と、擬似三次元構造解析モデルに、現場計測による局所偏荷重を用いて算定された曲げモーメントの値との比較を行っている。これによると両者は、その値の大きさにおいて概ね良好な一致を見るものの、分布モードにおいて若干の位相の差が生じている。このため、併設トンネルにおける先行トンネル肩部（天端より後続トンネル側へ45°振った付近）への地山応力の集中を考慮して、載荷方向を当初の水平方向に対して15°上向きから与えることによって、その大きさ並びに分布モードとも概ね良好な結果を得ている。

これにより、併設シールドトンネルで考えられる局所偏荷重状態にある先行トンネルの周方向断面力は、上下土圧及び左右側方土圧のバランスした状態の断面力に、提案したシールドトンネルの擬似三次元構造解析モデルによって算定された断面力の増分を重ね合わせることによって概ね説明できることを確認している。

#### 第五章 結 論

本章では、本研究で得られた成果をとりまとめている。