

二次覆工を有するシールドトンネルのひび割れのモデル化に関する実験および数値的考察

日本電信電話株式会社 正会員 松本安弘
 日本電信電話株式会社 非会員 出口大志
 日本電信電話株式会社 正会員 川端一嘉

1. はじめに

一般的に、シールドトンネルの設計時には、初期の土圧・水圧に関してはすべて一次覆工が受け持つと仮定し、二次覆工には構造的な性能を期待しない。この方法は、建設時の構造計算としては合理的だと考えられるが、その後の維持管理における構造的な性能評価を鑑みると、二次覆工完成後にトンネルに作用する近接施工による荷重や、地下水位の上昇などによる経年的な外力の変化に対しては、二次覆工も一次覆工と共同で荷重に抵抗すると考える方が自然である。このような考え方に基づいた研究が村上、小泉¹⁾や高松²⁾などにより行われた結果、鉄筋コンクリート製のセグメントリングに二次覆工を施した場合に関して、その挙動が明らかになりつつある。しかし、鋼製セグメントに無筋コンクリートによる二次覆工を施した場合の耐力評価法については、まだ検討の余地がある。この構造形式では、ひび割れ前は一次覆工と二次覆工とが合成構造として挙動することがわかっているが³⁾、コンクリート部にひび割れが発生すると、その構造的な耐力が低下することが指摘されている³⁾。これは、主桁や縦リブの存在による両覆工同士の強固な結合が、ひび割れにより失われるためと考えられる。そこで本報告では、鋼製セグメントに無筋コンクリートの二次覆工を施した場合に、コンクリートにひび割れが生じた後の耐力低下の定量化を目的とし、我々の研究グループが過去に実施した模型実験⁴⁾の結果を用いて、ひび割れ後のシールドトンネルの適切な構造力学モデルについて、数値的な検証を行った。

2. 模型実験概要

まず実施した実験⁴⁾の概要を示す。図-1のような装置を用いて供試体に油圧アムスラーで載荷し、その各点での変位およびひずみを計測した。ひび割れ前後の挙動を計測するため、実験では荷重をいくつか区切り、載荷と除荷を1セットとしたサイクルを繰り返しながら最大1000kNまで載荷した。

実験に用いた供試体を図-2に示す。この直径1.4mの供試体は、幅450mmのリングを中央に、幅234mmのリングをその両側に千鳥に接続した3つの鋼製のセグメントリングから成り、覆工高さが合計で150mmとなるように打設された無筋コンクリートの二次覆工を有する。また、セグメントの主桁は厚さ6mm、高さ75mmの鋼板で構成され、スキンプレートは厚さ2.3mmの鋼板であり、使用鋼材はいずれもSS400である。

実験の結果、得られた載下方向の直径変化量と荷重との関係を図-3に示す。図-3から、ひび割れ前に比較して、ひび割れ後は荷重変位曲線の傾きが減少していることがわかる。

3. 適切な構造力学モデルの数値的検証

二次覆工に発生したひび割れをモデル化して構造解析を行い、その数値解と実験結果との比較を行った。数値計算には、設計実務との親和性を考慮し、はり-ばね構造解析法を用い、ソルバーとしては市販の汎用ソフトウェアのMoleman-iを使用した。用いたはり-ばねモデルの概要を図-4に示す。本報告では、次の3つのモ

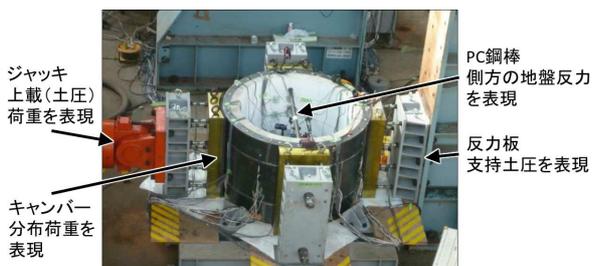


図-1 実験装置の概要

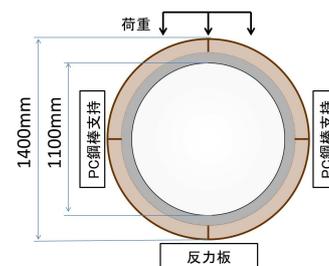


図-2 実験供試体

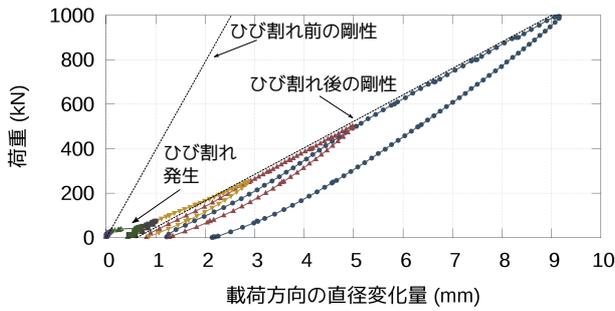


図-3 模型実験結果

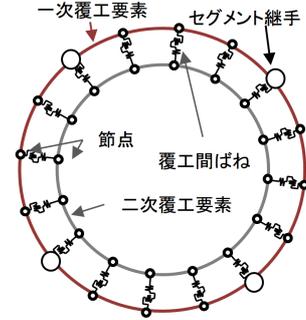


図-4 はり-ばねモデル概要

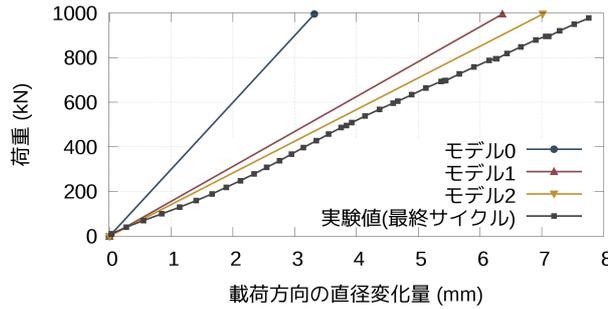


図-5 実験結果と数値計算結果との比較

デルについて、検証を行った。

モデル0：基本モデル．一次覆工と二次覆工との覆工間ばねを剛結としたモデル．

モデル1：モデル0において、実験での二次覆工にひび割れが発生箇所断面性能を極端に減少させたモデル．

モデル2：モデル1において、ひび割れ周辺について縦リブ間隔分（ひび割れを中心とする15度）だけ覆工間ばねが離間する方向のばね定数を0としたモデル．

ここに、モデル0は二次覆工コンクリート部にひび割れがない状態を想定しており、モデル1はモデル0の条件に追加して、ひび割れ箇所を曲げモーメントに関するヒンジおよび引張方向へ抵抗しないものの近似としてモデル化したものであり、モデル2はモデル1においてさらに、ひび割れ周辺部の一次覆工と二次覆工との機械的付着が低下すると考えたモデルである。

図-5に、実験の最終サイクルの実験結果と上記のモデルの数値計算結果との比較を示す．なお実験結果には、抜荷時のデータを省き、荷重変位曲線が(0, 0)から始まるような処理を施した、図-5より、モデル2が最も実験結果と一致することがわかる．従って、二次覆工にひび割れが生じた後のシールドトンネルの構造力学モデルとしては、モデル2を用いることが妥当であると考えられる．

4. おわりに

本報告では、鋼製のセグメントリングに二次覆工を施したシールドトンネルに関して、二次覆工ひび割れ後の適切なはり-ばね構造力学モデルについて数値的検証を行った．その結果、ひび割れ部に断面性能を極端に減少させ、またひび割れ周辺の覆工間ばね定数を覆工同士が離れる方向に関して0とすることで、模型実験結果を精度良く再現できるとわかった．今後は、ひび割れの構造力学モデルのさらなる高精度化や、鋼製のセグメントリングに二次覆工を施したシールドトンネルの、経年劣化時の補強に関する検討を行う予定である．

参考文献

- 1) 村上博智, 小泉淳．二次覆工で補強されたシールドセグメントリングの挙動について．土木学会論文集, 1987.
- 2) 高松伸行．二次覆工されたシールドトンネルの軸方向解析モデルに関する研究．早稲田大学博士学位論文, 1994.
- 3) 柳瀬辰彦, 児玉守広, 齊藤正幸, 加藤教吉．シールド洞道二次覆工の評価手法に関する実験について(その3)．土木学会第45回年次学術講演会論文集, 1990.
- 4) T.Sudo, T.Ishikawa, R.Hirasawa, H.Hoshino and A.Koizumi. An Experimental Study on the Maintenance and Repair of Communication Cable Tunnels Constructed by Shield Tunneling Method. Proceedings of the 2014 IALCCE Conference, Japan, 2014.