

3次元FEM解析による営業線シールドトンネルのリバウンド挙動評価

大成建設株式会社 正会員 ○中村 南
 大成建設株式会社 正会員 尾関 孝人
 大成建設株式会社 正会員 村上 達也
 小田急電鉄株式会社 正会員 伊藤 正樹

1. はじめに

小田急小田原線連続立体交差事業および複々線化事業は、首都圏の重要路線である小田急電鉄小田原線において、代々木上原駅付近から梅ヶ丘駅付近までの約2.2kmにおける、踏切での慢性的な交通渋滞の解消などを目的とした道路と鉄道の連続立体交差化、および輸送サービスの改善を目的とした線路の複々線化を行うものであった。このうち約2kmは5工区に分割した地下トンネル構造となるが、2013年3月に在来線の地下化を行い1期工事を完了し、2018年3月に複々線化および駅施設の完成に向けた2期工事を完了した。2019年3月には事業完了し、鉄道による地域分断や交通渋滞の解消に加え、列車の増発による混雑緩和や速達性の向上といった輸送サービスの改善が図られた。2期工事では下北沢駅部付近は、1期工事において構築したシールドトンネル直上部を掘削しボックスカルバートを構築(図-1参照)したが、シールドトンネルには上部掘削により土圧が除荷されてリバウンド・変形が生じる。本稿では、上部掘削時のシールドトンネル・営業線軌道の計測結果および3次元FEM解析によるリバウンド挙動の評価について述べる。

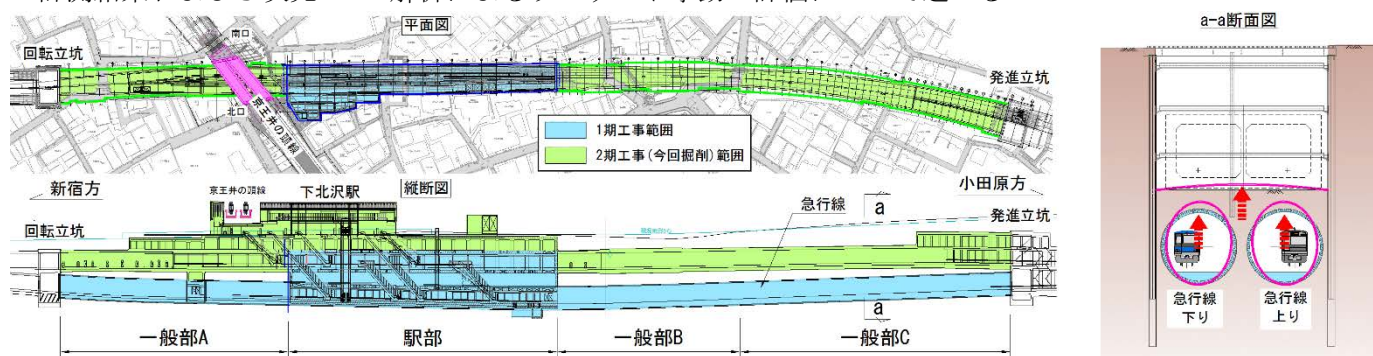


図1 工事概要

2. 2次元FEM解析によるリバウンド挙動の事前解析

シールドトンネル上部掘削時のリバウンド変位量は、横断方向と縦断方向の2次元弾性FEM解析を重ね合わせ三次元効果を評価し算出した。シールドトンネルのスプリングラインにおける縦断方向リバウンド変位分布図、一般部C区間の最大変位発生位置におけるシールドトンネルの横断方向変位図を図-3に示す。縦断方向変位については、各掘削区間の中央部付近で最大値となる分布となり、一般部C区間で最大値19mmを示した。また、一般部C区間でシールドトンネル横断方向変位は、水平方向に縮み、鉛直方向に延びるような卵型の変形モードとなり、

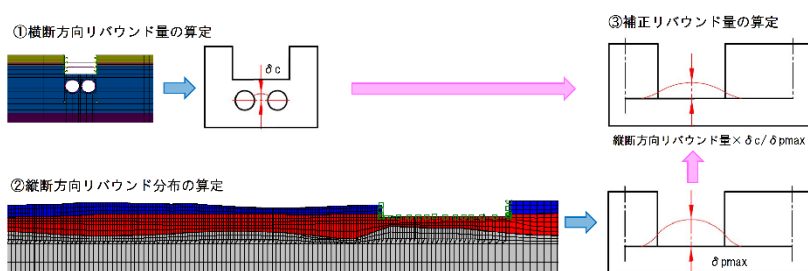


図2 2次元FEM解析によるリバウンド量算定方法概念図

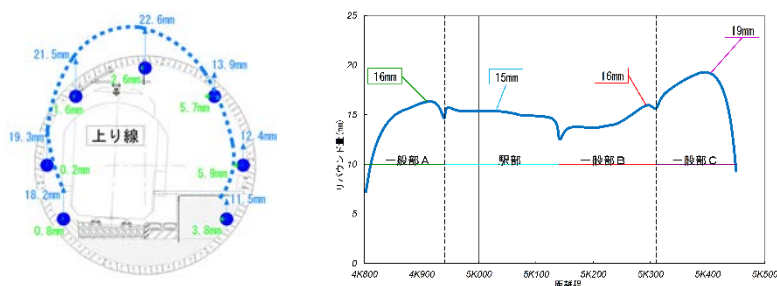


図3 2次元FEM解析による解析結果(左:横断、右:縦断)

キーワード 鉄道トンネル, シールドトンネル, リバウンド, 3次元FEM解析
 連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 TEL03-5381-5417

クラウン部で最大値 22.6mm を示した。上部掘削により、シールドトンネル上方の土圧が減少し側方からの土圧が卓越するため、このような変形モードとなったものと考えられる。

3. 実施工における計測結果

シールドトンネルの変位量の事前解析結果と計測結果について、先行して掘削が完了し、かつ最もリバウンド量が大きくなった一般部C区間に着目して述べる。一般部 C 区間における上部掘削時のシールドトンネル横断方向変位の計測結果を図-4 に示す。クラウン部で最大 8.4mm となり、事前解析の 40%程度の変位量であった。ただし、変形モードについては、事前解析と同様の卵型の変形モードとなり、想定通りの挙動を示した。一般部 C 区間掘削時の軌道レベルでの定点レベル測量より得られたシールドトンネル縦断方向変位図を図-6 に示す。計測値は掘削範囲の中央部付近で最大 4mm の隆起が確認された。2次元 FEM による事前解析時の 19mm に対して約 20%程度の変位量であったが、掘削エリアの両端部に向かうにつれて変位量は小さくなるような変形モードは同様の傾向を示した。

4. 3次元 FEM 解析によるリバウンド挙動の評価

前章で示したように、事前解析よりも計測値は相当小さい値を示した。この主たる要因は、本工事のシールドトンネルは非常に堅固な上総層(N 値=50 以上)に位置しており、そのために事前解析よりも上部掘削によるリバウンド量が小さかったと想定される。ここで、上総層の変形係数について、事前解析では N 値より算定した $E=200\text{MN/m}^2$ ($E=25\text{N}$ 、N 値=80) を用いていた。一方で、「鉄道構造物等設計標準・同解説ー開削トンネル：鉄道総合技術研究所（平成 13 年 3 月）」では、既往の実績よりリバウンド量を算定する際の地盤変形係数の補正として、N 値から $E=25\text{N}$ として求めた場合は 2~4 倍することと記述がある。しかし、事前解析においては、安全側にシールド変位量を大きく評価するため、上記の補正は行わない変形係数を用いていた。そこで、上総層の変形係数を見直した再解析を実施した。さらに、事前解析のような 2次元 FEM 解析ではなく、図-5 に示すような 3次元 FEM 解析により評価した。図-6 に示すように、変形係数を 800MN/m^2 に補正した場合に 3次元 FEM による解析値と計測値がほぼ同程度の変位量となり、縦断変位分布も同様となった。

5. おわりに

事後解析の結果、シールドトンネル周囲の上総層の変形係数を補正し 3次元 FEM 解析を行うことで、計測値と解析値のリバウンド量が同程度となり、精度良く評価できることを確認した。今後、同様の施工条件・地盤条件の場合はこの解析手法を適用できると考えられる。

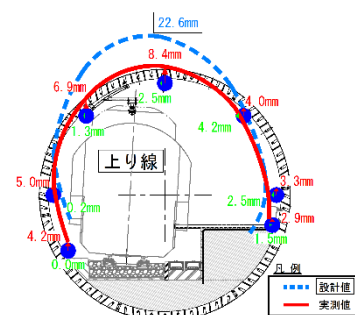


図4 計測結果-解析結果（横断）

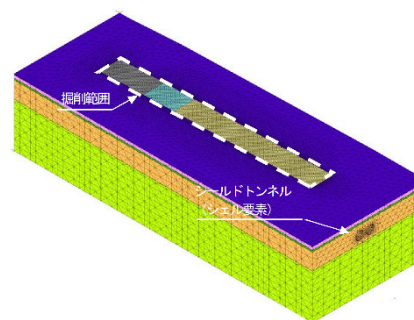


図5 3次元 FEM 解析モデル概要

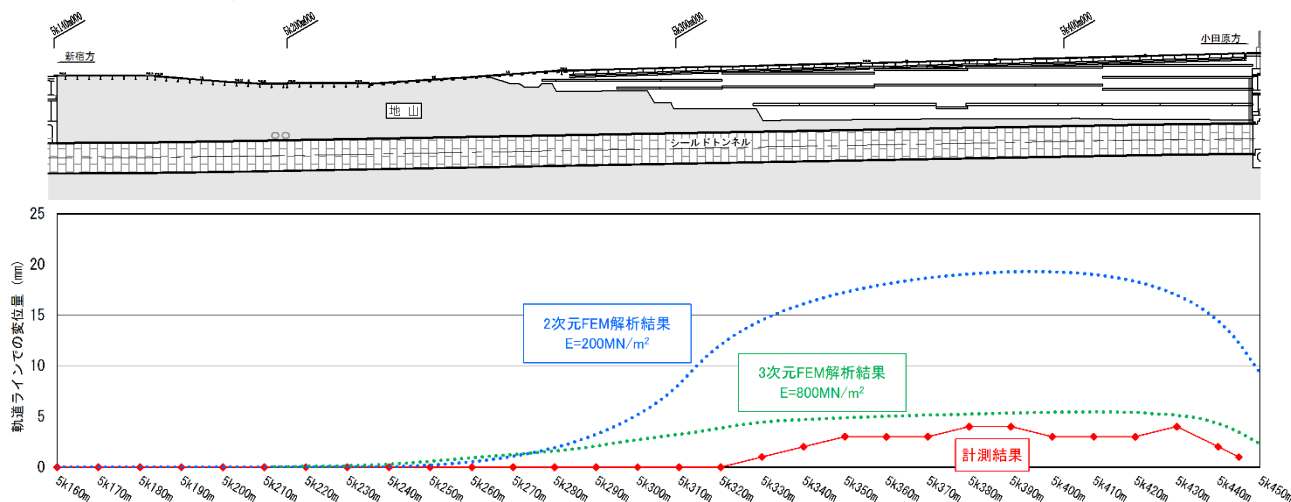


図6 2次元 FEM 解析-3次元 FEM 解析-計測値比較 縦断方向リバウンド変位図