

開削工事による地下鉄シールドトンネルへの影響予測解析手法に関する一考察

坂田 聡¹・内藤 宏文²・佐々木 龍丸³・岩波 基⁴・小西 真治⁵

¹正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒160-0004 東京都台東区)
E-mail: s.sakata@tokyometro.jp

²正会員 東京地下鉄株式会社 工務部 (〒160-0004 東京都台東区)
E-mail: h.naitou@tokyometro.jp

³学生会員 早稲田大学 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区 3-4-1)
E-mail: tatsumaru@asagi.waseda.jp

⁴正会員 早稲田大学 社会環境工学科教授 (〒169-8555 東京都新宿区 3-4-1)
E-mail: miwanami@waseda.jp

⁵正会員 早稲田大学 社会環境工学科 非常勤講師 (〒169-8555 東京都新宿区 3-4-1)
E-mail: shinjikonishi@aoni.waseda.jp

近年、都心部の大規模再開発が増え、超高層ビルの建設が盛んになった。これに伴って掘削深度が 30m に達するような開削による根切工事が多く行われ、地下鉄トンネルとの離隔が 1m 程度といった場合も生じている。地下鉄トンネルを安全に長期間使用していくためには、既設トンネルへの開削近接工事の影響予測・評価方法が重要となっている。近接開削工事によって地下鉄シールドトンネルに生じる変位を予測する手法のうち、一般に実務で使われている 2 次元 FEM 解析について、解析領域や地盤弾性係数の設定方法について、実測値と解析値を比較して検討したので報告する。

Key Words: neighboring construction, subway shield tunnel, impact prediction, 2DFEM, analysis areas, elastic modulus of ground

1. はじめに

東京では、昭和初期の銀座線から副都心線まで積極的に地下鉄路線が建設され、23 区地域には高密度なネットワークが構築されている。また、地下空間利用は一般的に公道の地下に建設されるため、地下鉄トンネルは、これらの既存の地下インフラネットワーク管路を避けるため、1980 年代以降シールド工法を用いてそれらの管路よりも深い位置に建設されてきた。そのため、安定した地盤である洪積層内に設置されることが多く、地下構造物を新設する場合、地下鉄シールドトンネルに対して近接した施工となることが比較的少なかった。しかし、近年、都心部の大規模開発が増え、超高層ビルの建設が盛んになった。これに伴って掘削深度が 30m に達するような開削による根切工事が多く行われ、地下鉄トンネルとの離隔が 1m 程度といった場合も生じており、地下鉄トンネルの変形や浮上がりといった変状傾向が見られる場合も

生じている。車両の安全な走行や既存構造物の維持管理上の問題から、既存の地下鉄トンネルへの開削近接工事の適切な影響予測・評価によって、事前に対応を準備しておくことが重要となっている。

この近接施工による地下鉄トンネルへの影響予測・評価手法は、実務においては一般に図-1 に示すような土留め壁をはりばねモデルで表現した弾塑性法¹⁾以後、

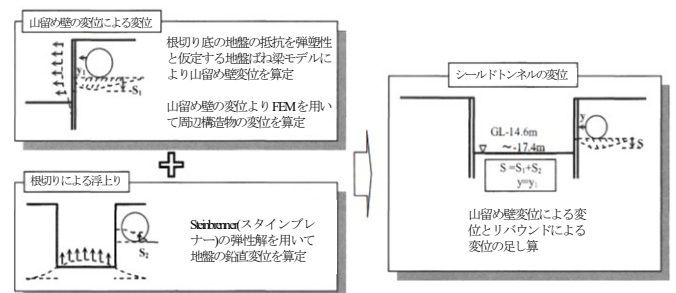


図-1 影響検討方法概要¹⁾

山留め弾塑性法と称す。」と 2次元 FEM 解析を用いて行う¹⁾²⁾。

この解析に用いる地盤の地質調査は、建築の開削工事において詳細な物性値を必要としない。したがって、一般的にボーリングを行ってサンプリングして地質を特定し、そのボーリングと並行して標準貫入試験でN値を求めるのが一般的である。このため、山留め壁の弾塑性解析に用いる地盤強度定数と地盤反力係数を道路橋示方書IV下部構造編³⁾等の基準に準じてN値から設定し、FEM弾塑性解析の地盤の弾性係数もN値から設定するのが一般的である。また、リバウンドによるトンネルの鉛直方向変位を推定する場合、トンネル下方の地盤を3倍程度にすると予測解析値が計測値近くなると一般的に言われている。しかし、その倍率は土層の違いによって異なると言われており、適切な地盤の弾性係数評価方法を確立することが重要となっている。したがって、実測値と予測解析値との比較を行い、適切な解析方法と予測値の評価方法を確立することが重要である。

今回、近接施工の影響による地下鉄トンネルの変位予測結果に影響を及ぼす2次元FEM解析の水平方向領域と鉛直方向領域、およびトンネル周辺地盤の弾性係数を実計測データと解析実験によって検討し、適切な解析領域(水平、鉛直)、地盤の弾性係数の設定方法を検討したので報告する。

2. 検討対象

洪積層内にあるシールド工法で建設された地下鉄トンネルに近接して開削工事が行われた5現場の事例を検討対象とした。選定にあたっては、①トンネルと土留め壁の離隔がトンネル直径以下の工事事例、②トンネル土被りが10m~30m程度、床付け深さがトンネル土被りと同程度以上の工事事例、とした。

この5事例の影響予測に必要な検討条件を表-1~5に示す。地層構成は上から沖積層と洪積層で構成されており、No.3トンネルではその下に江戸川層が堆積している。江戸川層は、東京の地下の洪積層に比べてさらに弾性係数が大きいことが一般的である。

3. 解析

2次元FEM解析について水平方向領域と鉛直領域、そして、地盤条件を数種類変化させて設定した影響解析結果と実計測結果を比較した。

表-1 検討対象の諸条件 (現場 1)

トンネルと土留め壁の離隔 (m)	1.7		
トンネル土被り (m)	13.0		
トンネル直径 (m)	9.8		
掘削深さ (m)	12.4		
地盤条件	沖積層	洪積層	江戸川層
層厚 (m)	21.1	68.9	—
単位体積重量 (kN/m ³)	18	20	—
弾性係数 (kN/m ²)	22400	140000	—
ポアソン比	0.35	0.3	—

表-2 検討対象の諸条件 (現場 2)

トンネルと土留め壁の離隔 (m)	1.8		
トンネル土被り (m)	23.8		
トンネル直径 (m)	6.6		
掘削深さ (m)	34.2		
地盤条件	沖積層	洪積層	江戸川層
層厚 (m)	17.2	82.8	—
単位体積重量 (kN/m ³)	15	19	—
弾性係数 (kN/m ²)	27000	400000	—
ポアソン比	0.4	0.35	—

表-3 検討対象の諸条件 (現場 3)

トンネルと土留め壁の離隔 (m)	20.0		
トンネル土被り (m)	26.6		
トンネル直径 (m)	6.5		
掘削深さ (m)	26.5		
地盤条件	沖積層	洪積層	江戸川層
層厚 (m)	6.1	18.5	74.2
単位体積重量 (kN/m ³)	17	19	19
弾性係数 (kN/m ²)	10000	160000	300000
ポアソン比	0.4	0.3	0.3

表-4 検討対象の諸条件 (現場 4)

トンネルと土留め壁の離隔 (m)	5.4		
トンネル土被り (m)	24.6		
トンネル直径 (m)	6.5		
掘削深さ (m)	31.8		
地盤条件	沖積層	洪積層	江戸川層
層厚 (m)	4.1	92.1	—
単位体積重量 (kN/m ³)	15	18	—
弾性係数 (kN/m ²)	102000	400000	—
ポアソン比	0.35	0.3	—

表-5 検討対象の諸条件 (現場 5)

トンネルと土留め壁の離隔 (m)	7.7		
トンネル土被り (m)	19.8		
トンネル直径 (m)	9.8		
掘削深さ (m)	21.7		
地盤条件	沖積層	洪積層	江戸川層
層厚 (m)	13.6	86.2	—
単位体積重量 (kN/m ³)	17	20	—
弾性係数 (kN/m ²)	40000	160000	—
ポアソン比	0.35	0.3	—

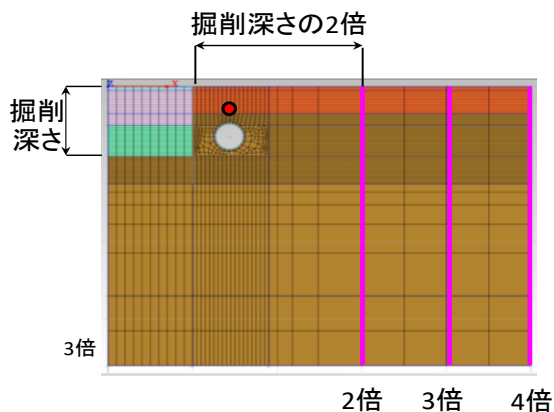


図-2 水平方向の解析領域

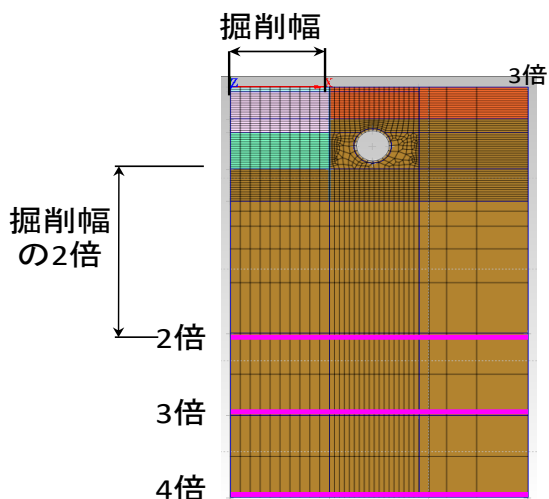


図-3 鉛直方向の解析領域

(1) 水平方向領域

弾性 FEM 解析を用いて開削工事による既設の近接構造物の水平変位を推測する場合には、開削工事の掘削幅の3倍程度を土留め壁から確保した領域の広さで解析することが一般的となっている。しかし、表-1～5 に示した5現場では離隔が極端に小さく、シールドトンネルが硬い洪積地盤内に設置されている場合に、一般的な水平方向の領域が影響するかどうかを確認するため、FEM 解析モデルの水平方向の幅を図-2のように掘削深さの2倍、3倍、4倍の3種類として地下鉄トンネルの水平変位を算出し、その影響を調査した。

(2) 鉛直方向領域

鉛直変位を推測する場合についても、開削工事の掘削深さの3倍程度を掘削床付けから確保した領域の広さで解析することが一般的になっている。しかし、上記「(1) 水平方向領域」と同様に極端な近接施工条件下で一般的な鉛直方向の領域が影響するかどうかを確認するため、FEM 解析モデルの鉛直方向の高さを図-3のよ

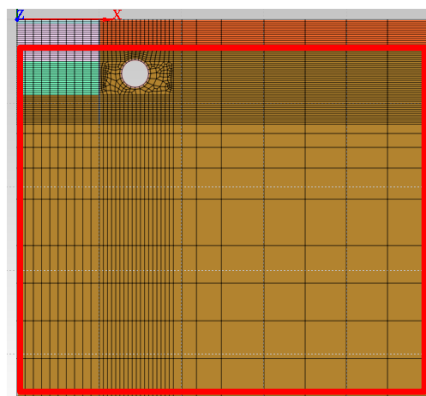


図-4 地盤条件を変更した領域の例

表-6 洪積地盤の変更ケース

case	弾性係数の倍率	
	洪積層	江戸川層
1	1	1
2	4	4
3	4	10

うに掘削幅の2倍、3倍、4倍の3種類として地下鉄トンネルの鉛直変位を算出し、その影響を調査した。

(3) 地盤条件

地盤条件は、まず、5現場の地質調査から得られた結果から、単位体積重量やポアソン比と定め、N 値から弾性係数 (2800N (kN/m²)) や強度定数 (c, φ) を設定した。

次に、上記の解析モデルのうち、解析領域を掘削深さの3倍、掘削幅の3倍にしたモデル (図-4) を用いて、図中赤枠で示している洪積層および江戸川層の範囲を表-6のように弾性係数をN値から求めた値をそのまま使う場合と、4倍にした場合、そして、洪積層を4倍で江戸川層を10倍⁴⁾にした3ケースについて地下鉄トンネルの鉛直変位を算出した。

なお、2次元 FEM の解析モデルは図-2, 3, 4 のようなものとし、境界条件は側面を鉛直ローラーで、底面を完全固定とした。

4. 解析結果および考察

(1) 水平方向領域

FEM 解析モデルにおける水平領域を変化させたケースによる水平方向変位解析結果を図-5, 表-7に示す。なお、最も変位が小さくなる地盤条件で解析を行った。こ

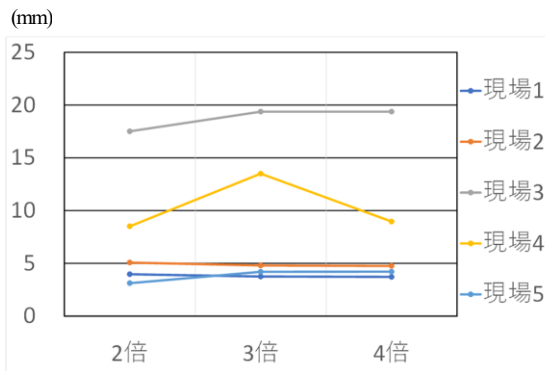


図-5 水平方向解析領域の影響

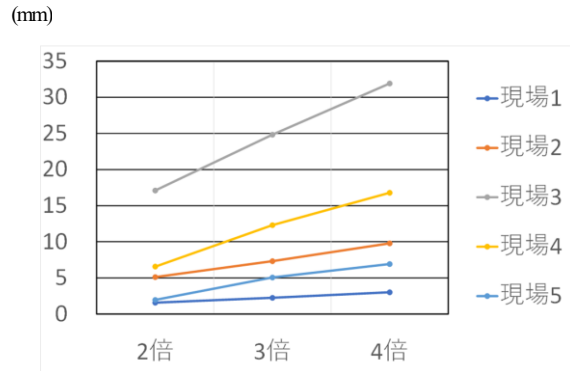


図-6 鉛直方向解析領域の影響

表-7 水平方向解析領域の影響

現場	計測値	解析結果(mm) 領域の倍率ごと		
	(mm)	2倍	3倍	4倍
1	1.5	3.97	3.75	3.72
2	2.0	5.08	4.80	4.76
3	10.2	17.52	19.38	19.38
4	5.4	8.51	13.50	8.96
5	2.8	3.12	4.20	4.21

表-8 鉛直方向解析領域の影響

現場	計測値	解析結果(mm) 領域の倍率ごと		
	(mm)	2倍	3倍	4倍
1	0.9	1.57	2.25	3.01
2	6.1	5.11	7.32	9.79
3	19.1	17.10	24.83	31.91
4	4.1	6.57	12.30	16.78
5	2.3	1.95	5.06	6.92

これらの結果から開削工事による洪積層内のシールドトンネルは、トンネル直径より山留壁までの距離が小さい場合には、水平変位の解析値が水平方向の解析領域の影響を強く受けないと考えられる。今回の解析で、着目した解析値が実計測値の1.5倍から2.5倍になっているのは、山留め壁の弾塑性解析結果が計測値の2倍程度となることが多いことに起因していると考えられる。なお、今回の結果からは、土留め壁と解析モデル右端の距離を掘削深度の3倍程度にすると安全側の結果が得られると考えられる。

(2) 鉛直方向領域

FEM 解析モデルにおける鉛直領域を変化させたケースによる鉛直方向変位解析結果を図-6、表-8、図-7に示す。図-7の縦軸は解析結果を計測結果で割った値を示している。ここでは、リバウンドによる鉛直変位を議論する。また、最も変位が小さくなる地盤条件で解析を行った。

この結果から、解析領域の増加とともに鉛直変位の解析値が線形的に増加するのが分かる。これらから分かるように、開削工事による洪積層内のシールドトンネルは、鉛直変位の解析値が解析領域の増加に強く影響を受けると考えられる。特に、土被りが20m以上と大きい場合(No. 2, 3, 4) 解析領域が大きくなるとそれに比例して解析値が増加する。一方、土被りが小さい場合(No. 1, 5)

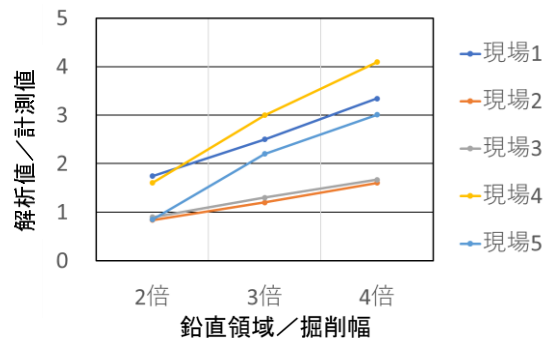


図-7 解析値/計測値の変化

には、解析値の増加量が比較的小さい。また、掘削底面から解析領域の下端までの距離が掘削幅の2倍の場合に

は、No. 2, No. 3 と No. 5 の解析結果では解析値が計測値よりも小さくなった。解析領域が下方に4倍ある場合には、解析値が計測値の3~4倍になる場合がある。以上の結果からは、掘削底面と解析モデル下端の距離は掘削幅の3倍程度にすると妥当な解析結果が得られると考えられる。

(3) 地盤条件

地盤条件を変化させたケースによる鉛直方向変位の解析結果を図-8、表-9、図-9に示す。図-9の縦軸は解析結果を計測結果で割った値を示している。なお、最も変

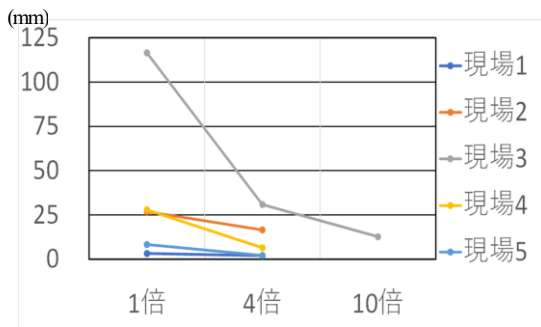


図-8 地盤条件の影響

表-9 地盤条件の影響

現場	計測値	解析結果(mm) 地盤条件ごと		
	(mm)	1倍	4倍	江戸川層10倍
1	0.9	3.2	2.0	—
2	6.1	26.8	16.6	—
3	19.1	116.5	30.9	12.7
4	4.1	27.9	6.5	—
5	2.3	8.3	2.1	—

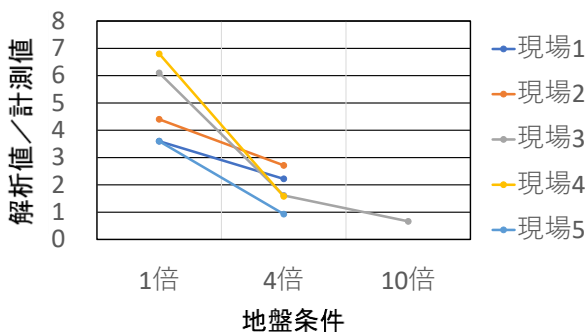


図-9 解析値/計測値の変化

位が小さくなる地盤条件で解析を行った。この結果から、N値から求めた値をそのまま使うと、3倍から9倍と過大な値になった。洪積層と江戸川層の弾性係数をN値から求めた値の4倍にした場合は、解析値が計測値の1倍から3倍になった。さらに、江戸川層のみ10倍にすると解析値が計測値より小さい値となり解析結果が最も適切な値となった。したがって、開削工事によるリバウンドで東京都の洪積地盤内の地下鉄シールドトンネルに生じる鉛直変位を予測する解析では、下方地盤の弾性係数を4倍にする評価方法が妥当であると考えられる。

5. おわりに

首都圏の都市再生に伴う開削工事が増加していることから、近接施工の影響による地下鉄トンネルの変位予測結果に影響を及ぼす2次元FEM解析の水平方向領域と鉛直方向領域、およびトンネル周辺地盤の弾性係数を実計測データと解析実験によって検討し、適切な解析領域(水平、鉛直)、地盤の弾性係数の設定方法を検討した。

今回検討に用いた東京の山手線内洪積地盤内に建設された地下鉄トンネルについてまとめると以下のようになる。

1. 洪積地盤内の地下鉄トンネル変位は水平方向の解析領域による影響が小さい。
2. 地下鉄トンネル鉛直方向変位は解析領域と線形比例して増加する。
3. 掘削底面と解析モデル下端の距離は掘削幅の3倍程度にすると実務上妥当な解析結果が得られると考えられる。
4. N値50以上の洪積地盤内の地下鉄トンネルについてリバウンドが卓越する鉛直変位を予測する場合には、11200Nで弾性係数を評価すると良い。

今後、各地域の多くのトンネルの計測データを収集して、その地域の地盤特性に応じた予測解析方法を確立することが急務である。

参考文献

- 1) 地盤工学会：近接施工，地盤工学・実務シリーズ 28，丸善，2011。
- 2) 鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル，鉄道総合技術研究所，2007。
- 3) 田嶋仁志，川田成彦，深山大介，山地齊，黒川敏広：大規模開削に伴うリバウンドによる地下鉄シールドの挙動，トンネル工学研究論文・報告集，第10巻，pp.331-334，土木学会，2000。

(2022. 8. 26 受付)

STUDY ON PREDICTION ANALYSIS METHOD OF IMPACT ON SUBWAY SHIELD TUNNEL DUE TO OPEN CUT METHOD

Satoshi SAKATA, Hirobumi NAITO, Tatsumaru SASAKI,
Motoi IWANAMI and Shinji KONISHI

In recent years, large-scale redevelopment of urban centers has increased, and the construction of skyscrapers has become popular. As a result, many open-cut excavations have been carried out to a depth of 30 m, sometimes with a separation of only 1 m from the subway tunnel. In order to ensure the safe long-term use of subway tunnels, it is important to predict and evaluate the impact of open-cut tunneling on the existing tunnels. Among the methods for predicting the displacement caused by the tunnel excavation work, this paper reports on a 2-dimensional FEM analysis method, which is generally used in practice, and on the setting method for the analysis area and ground elasticity modulus, by comparing the measured results and analyzed values.