

## 三次元有限要素法を用いたシールドトンネルの施工解析検討

千葉工業大学 学生会員 ○初谷樹弥  
 千葉工業大学 フェロー会員 鈴木 誠  
 清水建設 正会員 杉山博一  
 地域地盤環境研究所 正会員 中井照夫

## 1. 目的

シールドトンネル掘削に伴う地表面への影響予測を行う際、応力解放率や内空変位(強制変位)を用いてトンネル掘削を再現する二次元有限要素法を用いた検討が多く行われている<sup>1)</sup>。しかし、実際の施工ではシールド機やテールボイド、セグメント覆工等の施工過程に応じた掘進方向の影響は本来3次元問題であり、地盤の変形挙動を予測するうえで二次元解析では無理があると言わざるを得ない<sup>2)</sup>。本研究ではシンガポール地下鉄ダウンタウン線 C929A 工区のシールドトンネル施工<sup>3)</sup>を対象とし、地表面沈下による実測値との比較から、掘削過程を考慮した三次元有限要素法解析手法の検討を行う。

## 2. 数値解析概要

本研究ではシンガポール地下鉄ダウンタウン線 C929A 工区のタイセン駅立坑からやや傾斜角度をもってシールド掘削する区間を対象とする。図-1 に解析対象とする区間の概要を示す。シールド機は  $1.604^\circ$  の傾斜角度をもって掘進する。地表面沈下計は発進立坑からそれぞれ 5m, 20m, 38m 離れて設置、横断方向にトンネル中心位置から 10.22m 毎に設置される。

## 2.1 土質概要

図-2 に数値解析で用いる三次元モデル及び、ボーリングデータの概要図を示す。本工区の地層区分では大きく、埋め立て層、沖積層、洪積層に区分される。解析に用いる区間は、埋め立て層と沖積層が浅く、実施された土質試験が少ないため土質パラメータが設定できないことから、洪積層のみで設定する。また、現場では洪積層の地層は N 値により区分されており、解析に用いるボーリングデータは区間の周囲 3 か所を用いる。数値解析で用いる地盤材料は構成式に Subloading tij model<sup>4)</sup>を用い、表-1 にその土質パラメータを示す。

## 2.2 対象シールドトンネル数値解析モデル概要及び検討ケース

図-3 に対象区間で用いられたシールド機及び、セグメントの概要図と、数値解析に用いるモデルの概要図を示す。本工区で用いられたシールド機はカッターヘッドからテール部にかけてやや円錐状に設計され、半径にして 0.018m

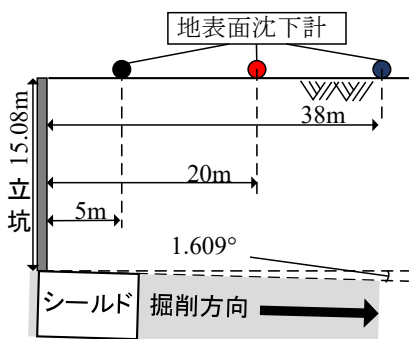


図-1 対象区間断面概要図

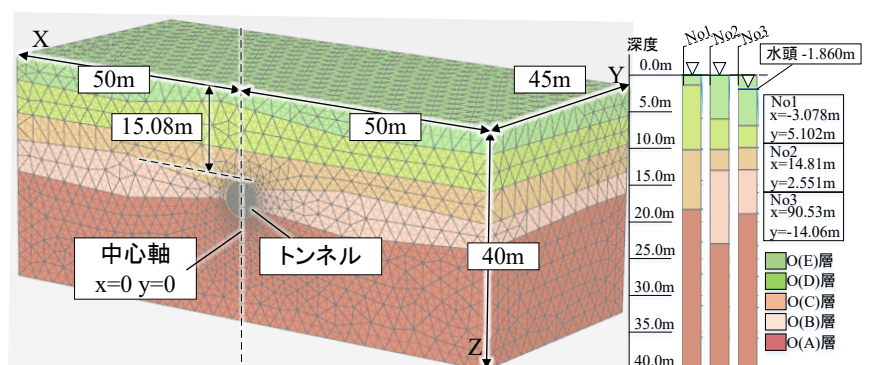


図-2 解析モデル及びボーリングデータ

シールドトンネル, 有限要素法解析, 地表面沈下

〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2丁目17-1 TEL 047-478-0442

のギャップが存在する。今回はこのギャップを余掘りと判断した。数値解析ではシールド機は板要素でモデル化し、インターフェース要素を設け地盤との摩擦を考慮する。各断面をセグメント長 1.574m に分けて断面を定義し、テールボイド(余掘り+テールクリアランス)による地盤挙動は板要素に所定量の収縮量を与える。収縮断面からセグメント直径までのギャップに裏込め材要素を生成し、裏込め注入を再現する。なお、本解析では裏込め注入によるセグメント、地盤等への注入圧は考慮しない。切羽全面圧は設計値である 200kN/m<sup>2</sup> を面荷重で与える。実測値から、カッターヘッド上部と下部に設けられた土圧計の値に 80kN/m<sup>2</sup> 程度の差があるため、土圧計の離隔距離 5m で除した 16kN/m<sup>2</sup>/m で増分するように設定する。表-2 にトンネル物性値を示す。シールド機はテールスキムプレートの厚さ 0.03m を、板要素の厚さとして設定し、シールド機全体の重量 4660kN とする。本検討ではテールボイドによる地盤の変位に着目し、シールド機先端の断面積から 0.5%、0.8%、1.0%のボリュームロスの違いを設定して比較する。

表-1 土質パラメータ

	OE	OD	OC	OB	OA
N値	N<10	10≤N<30	30≤N<50	50≤N<100	N≥100
λ	0.1225	0.1273	0.1916	0.1345	0.1153
κ	0.01225	0.01273	0.01916	0.01345	0.01153
Rcs	3.7	3.9	3.636	3.8	4
N	0.83	0.985	1.145	1.03	0.885
v	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
e0	0.5681	0.6774	0.6061	0.6563	0.5294

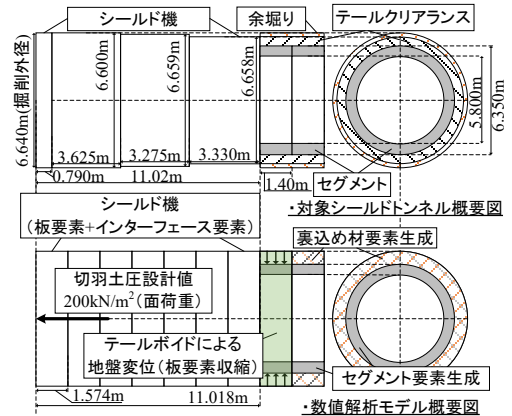


図-3 シールドトンネル概要図

表-2 シールドトンネル物性値

	シールド機	セグメント	裏込め材	テールボイド断面
γ(kN/m <sup>3</sup> )	678.8	26	21	26
E(kN/m <sup>2</sup> )	2.06E+08	3.90E+07	2.65E+07	3.90E+07
v	0.3	0.17	0.3	0.3

### 3. 解析結果

図-4 に掘進方向の地表面沈下量の分布を示す。11.018m 掘進時(シールド機全体を定義)の結果から、実測値は解析値を大きく上回り、掘進方向 38m の測定値も大きく沈下し、切羽前の先行沈下が確認できる。また、掘進後の沈下量に大きな変化は見られず、ボリュームロスは大きく影響していないことがわかる。図-5 に横断方向の沈下量を立坑から 5m の計測値を示す。最大の沈下量は 1.0%のケースで概ね表現できるが、横断方向の影響範囲は実測値が大きく沈下している。

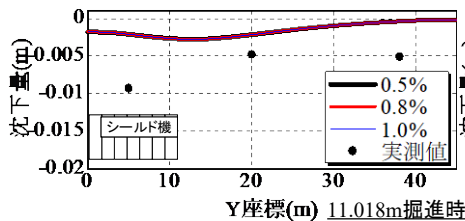


図-4 縦断方向 地表面沈下量分布

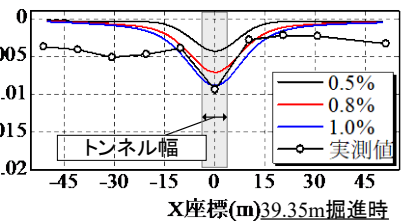
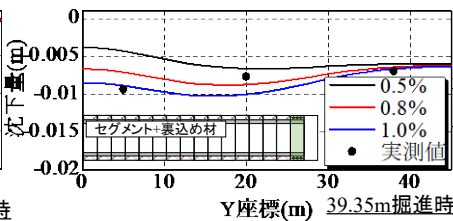


図-5 横断方向地表面沈下分布

### 4. まとめ

掘進過程を考慮する一手法として数値解析モデルの検討を行った。現地盤の材料の要素試験が十分でないため定量的な評価には問題が残るが、シールド機のテールボイドに着目した結果、地盤変位により最大の沈下量はある程度表現できた。なお、掘進過程による沈下でも切羽前の先行沈下が大きく、シールド機発進時の影響は今後の検討課題としたい。本研究に当たっては、データを提供していただいた西松建設の吉田吉孝氏らに謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 中井ら： NATM とシールドトンネルの設計と実際, 6 章トンネルの設計における数値解析の役割, 地盤工学会誌, 63-2, pp.65-76, 2015.
- 2) 赤木・小宮：有限要素法によるシールド工場の掘進過程を考慮した地盤挙動解析, 土木学会論文集 No.481/III-25, pp.59-68, 1993,12
- 3) 吉田・星光・中野：泥土圧シールドによる道路函体近接直下と 3 本近併設掘進などの施工, トンネルと地下, 48-7, pp.47-56, 2017.
- 4) Nakai, T. and Hinokio, M. : A simple elastoplastic normally and over consolidated soils with unified material parameters, Soils and Foundations, 44-2, pp. 53-70, 2004.