

シールドトンネル施工における3次元FEMを用いた影響評価手法

早稲田大学 学生会員 ◦折原佳帆  
 早稲田大学 フェロー会員 赤木寛一  
 早稲田大学 学生会員 Alireza Afshani

首都高速道路株式会社 フェロー会員 土橋浩  
 千葉工業大学 正会員 小宮一仁  
 東京メトロ(株) 正会員 小西真治

1. 目的

わが国における都市部の地下空間には、インフラ管路や地下鉄、道路など種々の設備が存在している。このなかで地下開発を行う場合にはシールド工法を用いた近接施工が避けられない。近接施工においては事前および施工中のマネジメントが非常に重要となる。こうしたマネジメントは事前解析に依存する部分が大きく、事前解析の精度の向上が求められている。現状マネジメントにおいて主流となっているのは2次元有限要素法を用いた解析だが、本研究ではシールドマシンの掘進を考慮した3次元解析を行うことでより正確に地盤の挙動を捉える事を目的とする。3次元有限要素法は計算に多大な時間を要するため、実用的な解析ではあまり用いられてこなかった。そこで、本研究では3次元有限要素法を用いて、より精度が高く実用的、かつ簡便な解析手法の検討を行った。

2. 解析の概要

本研究では、首都高速横浜環状北線のトンネル部を適用事例として研究を行っている。トンネル部の施工は、掘削外径φ12.49mの泥土圧シールドマシンによって行われ、生麦方面行き(外回り)と港北方面行き(内回り)の2本のトンネルがシールドマシンによって掘削されている。本研究では掘進初期について取り上げ、解析を行った。掘進初期ではシールドマシンは約2°下向きに掘進しており、外回りシールドマシンが30mほど先行して掘進を行っている。

対象となるのは図1に示すように、横断面方向に127m、縦断面方向に120m、鉛直方向に54m

の範囲であり、この範囲を約17000の六面体要素に分割して扱うこととした。本トンネルを構成するセグメントの幅は2mであるため、縦断面方向のメッシュの幅を2mとし、節点座標をセグメント連結部に合わせることにした。これは、切羽圧および裏込注入圧の実績値がセグメントごとに与えられていることに起因する。このメッシュ化による節点の数は20026である。対象範囲に設置されている層別沈下計に対応する地点に節点を配し、その節点における鉛直変位の解析値と測定値を比較検討していく。本解析における外力は、シールドトンネル施工時の切羽圧と裏込注入圧の実績値である。また、表1に地盤物性に関する入力データを示す。

本研究では、既往の研究<sup>1)</sup>を応用した手法を用いて解析を行っている。この手法の特徴として1)地盤の鉛直変位を求めるにあたって力の重ね合わせを用いていること、2)外力作用に基づく地盤変位を支配する地盤の排水条件の設定に圧密理論を用いていること、が挙げられる。力の重ね合わせとは、切羽圧(または裏込注入圧)と側方土圧との差に、前ステップより計算される要素内圧を加えて力に変換したものを外力として地盤の鉛直変位を求める方法をさす。解析ステップはセグメントごととし、ステップごとのメッシュ再分割は行わない。メッシュの幅をセグメント幅に合わせたのはこのためである。

**表1 地盤データ**

|       |     | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $c$ (kN/m <sup>2</sup> ) | $\phi$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $E$ (Mpa) | $\nu$ | K0                 |
|-------|-----|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------|-------|--------------------|
| 粘性土   | Ac  | 14                            | 30                       | 0                           | 1.2       | 0.45  | 0.80 <sup>1)</sup> |
| 砂・砂岩  | Ks  | 15.5                          | 35                       | 3                           | 3.3       | 0.45  | 0.80 <sup>1)</sup> |
| 砂質泥岩  | Kms | 19.5                          | 60                       | 42                          | 289       | 0.3   | 0.33               |
| 泥岩    | Km  | 19                            | 1840                     | 10                          | 492       | 0.35  | 0.16 <sup>2)</sup> |
| 盛土・埋土 | B   | 18.5                          | 2020                     | 7                           | 430       | 0.35  | 0.16 <sup>2)</sup> |

1)2006年制定トンネル標準示方書[シールド工法・同解説] トンネル工学委員会(2007)  
 2)経験値

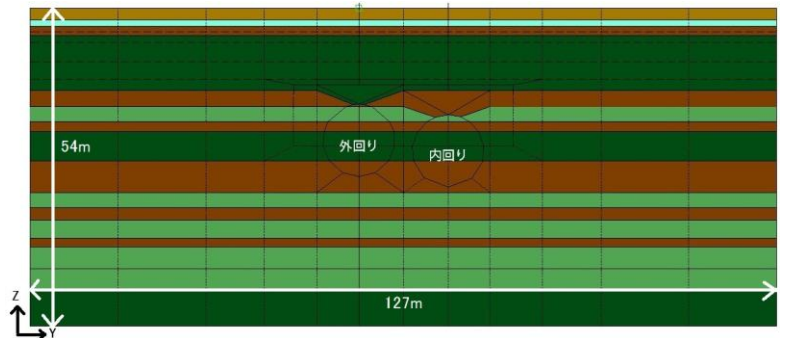


図1 解析メッシュ横断面図

キーワード 有限要素法, シールドトンネル, 近接施工

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学術院赤木研究室 TEL 03-5286-3405

また、外力作用に基づく地盤変位を支配する地盤の排水条件の決定には図2に示すように地盤変位を求める層別沈下計の前後に設定した排水長Dを用いた。シールドマシンがDの範囲内を掘進するときは排水条件とし、地盤の側方土圧に有効応力を用いた。Dの範囲外を掘進するときは非排水条件として地盤の側方土圧に全応力を用いた。なお、本研究ではシールドマシンが一日に掘進する距離が平均3セグメントであることを考慮し、D=6mとした。

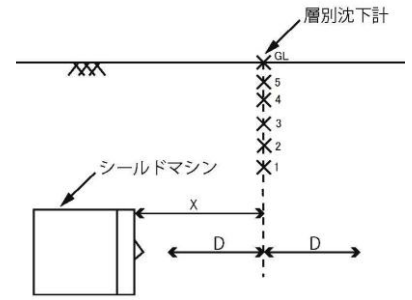


図2 排水条件の設定

### 3. 結果と考察

層別沈下計は、外回りトンネルと内回りトンネルそれぞれの直上に2箇所ずつ設置されており、計4箇所存在する。層別沈下計①は掘進開始断面から12m、層別沈下計②は掘進開始断面から49mに設置されている。それぞれの層別沈下計では、層の異なる4~6地点において1時間毎の変位を計測している。解析結果の例として、外回りトンネル

直上の層別沈下計②における計測値と測定値の比較を図3に示す。シールドマシンが層別沈下計の直下を通過する際と、層別沈下計の直下で裏込注入が行われる際に鉛直変位が上昇することが、解析値と測定値ともに認められ、最終

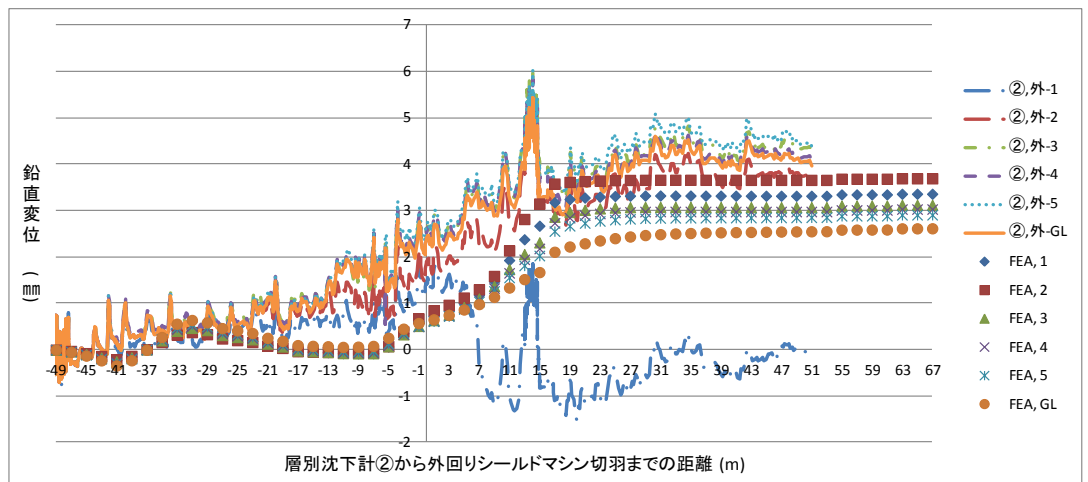


図3 解析結果と実測値との比較

的な変位の値は概ね適合している。また解析値では、シールドマシンが層別沈下計に接近するにともない、沈下が見られる。これは、層別沈下計手前6mの地点において排水条件の変更があるために発生するものだと考えられ、実測値でも絶対値は小さいが同様の傾向が認められる。その他の層別沈下計においても、同様の結果が得られたため、本研究で採用した簡便解析法により妥当な地盤変位予測が可能なものと考えられる。

### 4. まとめ

本解析で得られた地盤変位は、シールドマシンの接近、通過後を通し解析値と測定値で概ね一致したことから、本研究において新たに採用した、外力による地盤変位を支配する圧密現象における排水条件の設定にシールドマシンの排水長Dを用いる解析手法は、有用な手法であると考えられる。また、全ての解析ステップにおいて同一のメッシュを用い、解析をセグメントごとに行うことで、従来よりも計算時間を短縮することができ、広範囲の解析区間においても実用的な解析を可能にした。本研究における解析手法は、計測器周辺に排水長Dを設置するため、地盤全体ではなく、対象箇所ここでは層別沈下計設置箇所の変位挙動にのみ焦点を当てたものである。よって今後は本解析手法を近接施工区間に適応し検証するとともに、さまざまな地盤条件や施工条件においても検討を行い、近接施工の事前マネジメントにおける実用化を目指して精度を向上していくことが必要となる。

### 参考文献

1)赤木寛一, 小宮一仁: 有限要素法によるシールド工事の施工過程を考慮した地盤挙動解析, 土木学会論文集 No.481/Ⅲ-25, 59-68, 1993.12  
 2)川田成彦, 松原健太他: 併設大断面泥土圧シールドと地下鉄トンネルとの近接施工, 土木学会年次学術講演会, IV-015, 2011