

# 変位境界を用いた有限要素法によるシールドトンネル近接施工影響評価

地盤工学研究室 前田和也  
指導教官 杉本光隆

## 1.はじめに

これまで、FEM 解析によってシールドトンネルの通過による周辺地盤の変位挙動を評価する場合には、掘削面に応力境界を導入して地盤の変位を求めるのが一般的であった。

本研究では、シールド掘進中に生ずる掘削面の変位を基にした地盤変位予測手法を提案するとともに、同手法による二次元・三次元 FEM 解析結果と現場計測データとを比較することにより、その妥当性および有効性を検討することを目的とする。

## 2.現場計測

解析には、泥水式シールド工法(マシン外径  $\phi$  12.64m、マシン長 10.25m)にて施工された「大津放水路トンネル」の現場計測データを使用した。解析区間は、シルト分を含む砂礫優位で、自立性が高い良好な地盤であり、土被り約 20.5m、曲線半径 400m のシールドトンネルである。図 1 に地質縦断面図を、表 1 に地盤物性値を、図 2 にトンネル平面線形と地盤変位計測断面の位置を示す。

シールドマシン通過中の地盤鉛直変位・水平変位については、それぞれ 5 分間隔で計測した。なお、計測値の計測精度は 0.3mm 程度である。

## 3.二次元有限要素解析

### 3.1 解析方法

シールドマシン通過によるトンネル周辺地盤への影響を有限要素解析するにあたり、以下の仮定を用いた。

- ①地盤は線形弾性体である。
- ②トンネル周辺地盤変位は、トンネル掘進中に生ずるトンネル掘削面変位が伝播することにより生ずる。よって、本解析では重力による初期応力解析は行わず、シールド機動力学モデル<sup>1)</sup>によって求められる

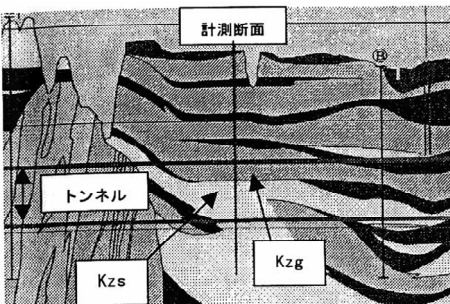


図 1 地質縦断面図

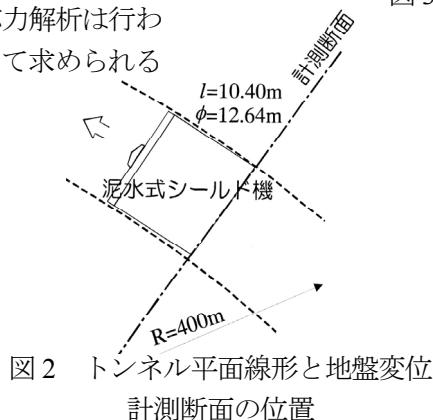


図 2 トンネル平面線形と地盤変位計測断面の位置

シールド機スキンプレート周りの掘削面変位を変位境界とする線形弾性解析のみを行った。

### 3.2 解析モデル

解析に用いたモデルを図 3 に示す。

また、図 2 に示すようにトンネル平面線形が曲線である場合には、シールド機テール部が曲線外側の地盤を最も押し込み、近接構造物・周辺地盤への影響が最も大きくなるので、シールド機テール部が計測断面を通過する時点を解析対象とした。

### 3.3 掘削面変位

変位境界を用いた解析で入力した掘削面変位を図 4 に●印で示す。掘削面変位は、法線方向の強制変位としてトンネル掘削面の 40 節点に作用させた。

また、比較のため、事前に行った応力境界を用いた解析で得られた掘削面変位も図 4 に○印で示す。この解析では、表 1 に示す土の単位体積重量を用いて地盤に初期地圧を作用させた後、掘削に伴う応力解放として、初期地圧の 15%を解放している。

表 1 地盤物性値

	N値	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$c$ kN/m <sup>2</sup>	$\phi$ deg	$E$ kN/m <sup>2</sup>	$\nu$
Tr	33	18	0	30	16000	0.4
Kzc	11	14	66	—	13800	0.45
Kzg	50	20	50	35	35000	0.4
Kzc	13	14	78	—	16300	0.45
Kzg	50	20	50	35	52000	0.4
Kzs	48	19	30	40	35000	0.3
Kzs	48	19	30	40	83000	0.3

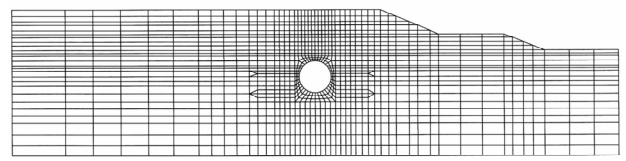


図 3 二次元解析モデル

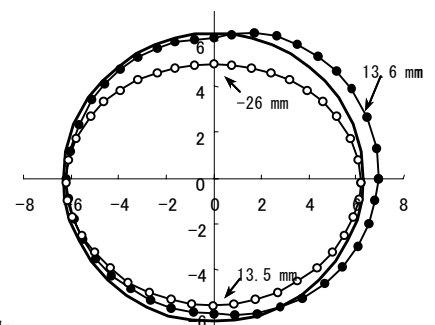


図 4 掘削面変位

### 3.4 解析結果と考察

#### (1) 水平変位

図5に計測値と解析値の水平変位を比較した図を示す。この図より以下のことがわかる。

- ①応力境界を用いた解析では、トンネル両側でトンネル内側に向かって変位が生じており、トンネル中心軸に対して左右対称の変形モードになっている。
- ②変位境界を用いた解析では、計測値の非対称性を示す変形モードをよく表現している。
- ③トンネル右側のトンネル外側に向かう変位の最大値は、計測値の2.7mmに対して8.1mmで、計測値の約3倍である。

これらは以下のように考えられる。

- ①トンネル全周にわたって応力解放率 15%を作用させているためである。
- ②シールド機動力学モデルで得られた掘削面変位を用いているためである。
- ③シールド機動力学モデルは、シールド機に作用する力を三次元的に考えているため、ある断面で切るとトンネル軸方向の力を考慮できないからである。また、マシンスキンプレートのたわみによる影響があることも考えられる。

#### (2) 鉛直変位

図6に計測値と解析値の鉛直変位を比較した図を示す。この図より以下のことがわかる。

- ①応力境界を用いた解析では、トンネル直上部の変位は -24mm であり、計測値の約 30 倍である。
- ②変位境界を用いた解析では、トンネル左側から直上部にかけて沈下傾向を示しており、解析値は計測値とよく一致している。

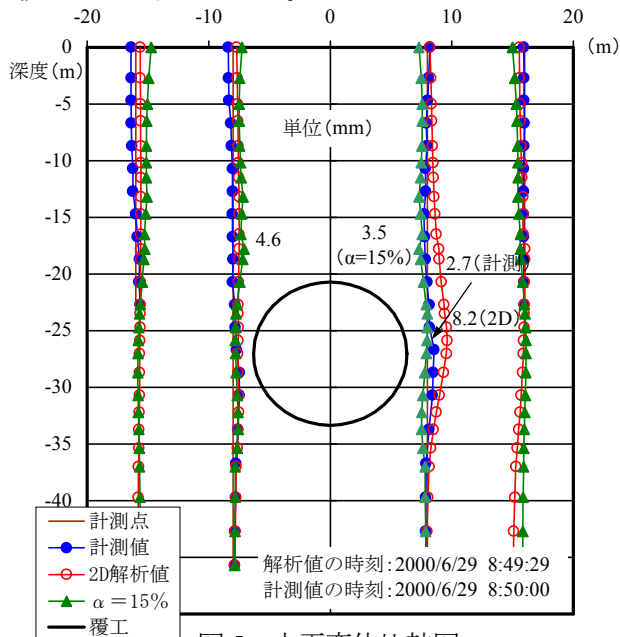


図5 水平変位比較図

- ③トンネル右側では、計測では認められなかった地盤隆起が発生している。

これらは以下のように考えられる。

- ①弾性係数と応力解放率の大きさに依存するからである。
- ②トンネル左側でコピーカッタを使用しているからである。
- ③トンネルが左カーブの線形を有しているため、マシンテール部が地盤を押し込んでいるからである。

### 4. 三次元有限要素解析

#### 4.1 解析方法

線上に構築されていくシールドトンネルでは、縦断方向の三次元効果を見無視することは出来ない。ここでは、二次元平面ひずみ解析で用いたシールド機外周の掘削面変位に加えて、以下に示す影響を考慮した変位を掘削面に導入した。

- ① 切羽土圧のバランスによる変位
- ② 裏込注入材のブリージングによる変位

#### 4.2 解析モデル

三次元解析に用いた解析モデルを図7に示す。このモデルは二次元平面ひずみ解析モデル(図3)をシールド機軸方向に引き伸ばしたものである。すなわち、シールド機軸方向の領域を切羽前方とテール後方にシールド機長の2倍ずつとり、全体の奥行きをシールド機長の7倍とした。

地盤に初期応力を与えていないため、切羽やシールド機後端以降の既掘削面がトンネル内側に変位することはなく、これらの面ではシールド機周りに与える掘削面変位の影響のみを受けることになる。そこで、この影響を拘束しないよう、地表面と切羽・

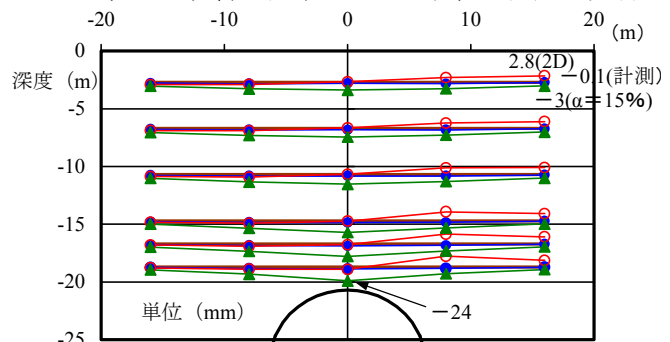


図6 鉛直変位比較図

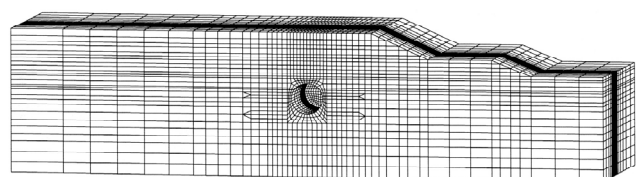


図7 三次元解析モデル

シールド機後端以降は拘束せず自由とし、地表以外のモデル外側の境界面は面内の変位のみを自由とした。また、地盤各層はトンネル軸方向に水平に分布すると仮定し、地盤各層の物性値は表1の値を用いた。

### 4.3 掘削面変位

#### a) シールド機スキンプレート周りの変位

シールド機スキンプレート周りの掘削面変位は二次元平面ひずみ解析と同様に、シールド機掘進管理データを基にシールド機動力学モデルで求めた。二次元平面ひずみ解析ではシールド機後端の掘削面変位のみを用いたが、ここでは、シールド機軸方向に16分割された断面で求められる変位を掘削面に導入した。

#### b) 切羽土圧バランスによる変位

シールド工事において、切羽の泥水土圧の圧力管理は先行隆起や先行沈下に大きく影響を与えるため、施工上きわめて重要である。ここでは、シールド機動力学モデルで得られるCFの法線方向土圧から水平土圧係数を求め、CFに発生する変位を掘削面に導入した。

#### c) 裏込注入材のブリージングによる変位

シールド掘進に伴い、シールド外径とセグメント外径との差には空隙(テールボイド)が発生する。テールボイド発生後速やかに裏込注入材を充填し、地盤沈下防止や、地盤とセグメントの一体化を図っている。しかし、裏込注入材のブリージングによってテールボイドの体積変化が生じ、地盤がトンネル

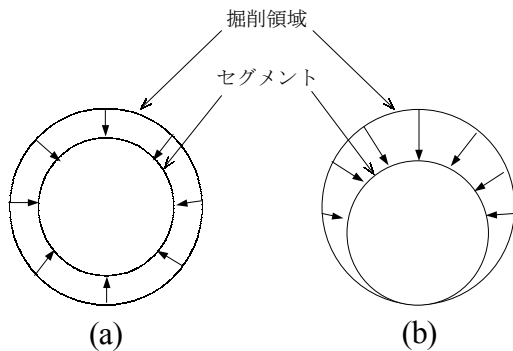


図8 裏込注入の注入パターン

表2 裏込注入材のブリージング率

	Case1	Case2	Case3-1	Case3-2
ブリージング率 (%)	5.0	3.5	1.75	1.75
セグメント位置	トンネル中心	トンネル中心	トンネル中心	トンネル下方

内側へ変位することが考えられる。ここでは、ブリージングによるトンネル内側への変位を掘削面に導入した。設定するブリージング率を表2に示す。裏込注入材はトンネル全周にわたって一定に充填されると仮定したもの(図8.(a))と、裏込材がトンネルインバート部まで充填されないと仮定したもの(図8.(b))について行った。なお、現場での裏込材料試験結果ではブリージング率は5%以下である。

### 4.4 解析結果と考察

#### (1) 水平変位(Case3-1 (1.75% : トンネル中心))

表3に全Caseの解析値と計測値を、図9に計測値と解析値の水平変位を比較した図を示す。この図より以下のことがわかる。

- ①トンネル両側のインバート付近の変位がトンネル側に引き込まれている。
- ②二次元解析と比較すると小さくなっている。
- ③トンネル右側のトンネル外側に向かう変位の最大値は2.0mmで、計測値の2.7mmと比較的合っているが、計測値より小さくなっている。

これらは以下のように考えられる。

- ①裏込注入材のブリージングによって地盤がトンネル内側に変位しているからである。
- ②シールド機テール部で発生している受働側への掘削面変位が、シールド機軸方向に分配されているからである。
- ③ブリージングによる変位がトンネル内側に作用するので、トンネル外側に向かう変位がトンネル側に引き込まれるからである。

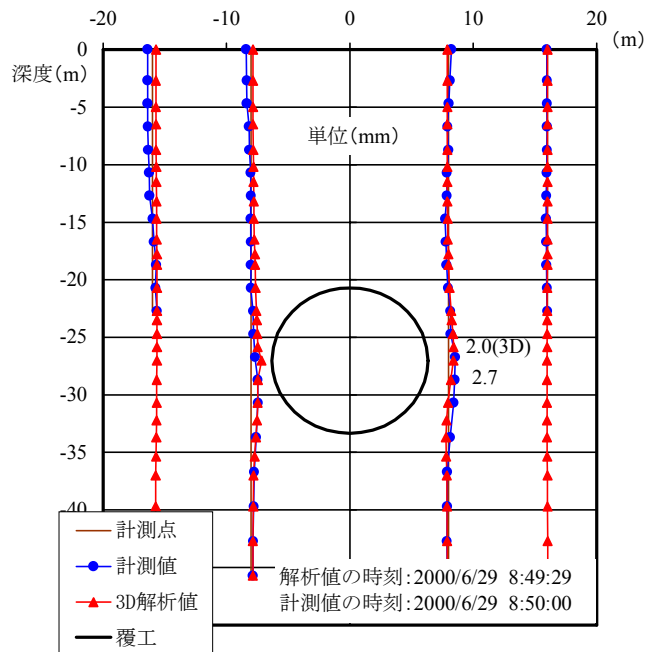


図9 水平変位比較図

(2) 鉛直変位(Case1 (1.75% : トンネル中心))

図 10 に計測値と解析値の鉛直変位を比較した図を示す。この図より以下のことがわかる。

- ①二次元解析で発生していたトンネル右側での地盤隆起が見られない。
- ②解析値は沈下傾向を示しており、計測値と非常によく一致している。

これらは以下のように考えられる。

- ①前項(1)の②と同様に説明できる。

(3) トンネル縦断方向鉛直変位

図 11 に計測値と解析値のトンネル縦断方向鉛直変位を比較した図を示す。この図より以下のことがわかる。

- ①CF 前方では、計測値は約 0.5mm 隆起しているのに対し、解析値はほとんど変位していない。
- ②CF 後方では、解析値は計測値より沈下時期が早い。

これらは以下のように考えられる。

- ①切羽土圧バランスによる掘削面変位の評価が適切でないと考えられる。また、マシンスキンプレートと地盤の摩擦によるせん断力を考慮していないためと考えられる。
- ②ブリージングが、施工後すぐに発現すると仮定しているからである。

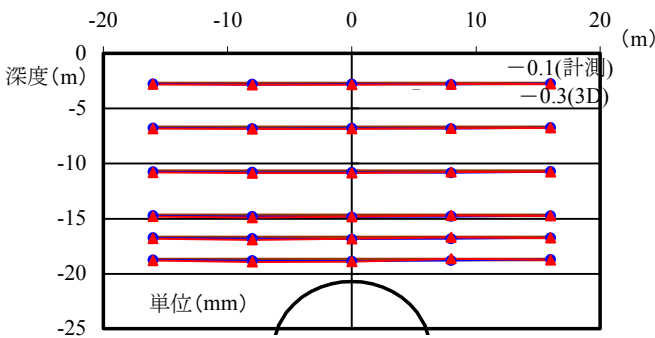


図 10 鉛直変位比較図

5.まとめ

本研究では、シールド機動力学モデルで得られるシールド掘進中に生ずる掘削面の変位を強制変位として変位境界を与える地盤変位予測手法を提案した。同手法を現場計測データに適用し、同手法による二次元・三次元解析結果を従来の応力境界を用いた解析結果・計測値と比較し、同手法の妥当性および有効性を確認した。

6.今後の課題

- ①切羽土圧・裏込注入の評価方法を検討する。
- ②軟弱地盤で地盤変位の大きく出ている現場データを用いて本手法の妥当性を検証する。

7.参考文献

- 1)杉本光隆,Aphichat SRAMOON 施工実績に基づくシールド機動力学モデルの開発 土木学会論文集 No.673/III-54,2001.03

表 3 水平変位・鉛直変位比較

	水平変位 (mm) (トンネル右側)	鉛直変位 (mm) (トンネル右側地表部)
計測値	2.7	-0.1
Case1	1.3	-0.8
Case2	1.6	-0.6
Case3-1	2.0	-0.3
Case3-2	1.9	-0.6

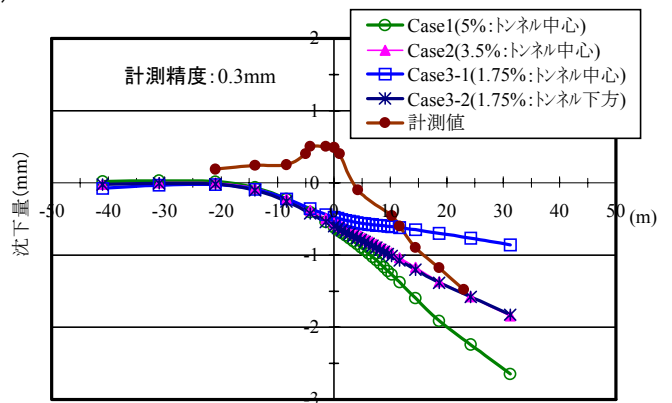


図 11 トンネル縦断方向鉛直変位図