

# 変位境界を用いた有限要素法による シールド通過時における硬質地盤の挙動評価

佐藤 豊<sup>1</sup>・小西真治<sup>2</sup>・杉本光隆<sup>3</sup>・Aphichat SRAMOON<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

<sup>2</sup>正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

<sup>3</sup>正会員 工博 長岡技術科学大学 教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 長岡技術科学大学 助手 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

これまで、二次元の平面ひずみ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、トンネル掘削の影響として、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、硬質地盤におけるシールドトンネルの近接施工問題に対して、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、その妥当性を検討した。この結果、提案する手法は曲線部における非対称な地盤変位挙動をシミュレートできること、既存の解析手法より提案する解析手法の方が実際の地盤変位挙動をより高い精度でシミュレートできることが明らかとなった。

**Key Words:** shield tunneling, ground displacement prediction, FEA, adjacent excavation

## 1. はじめに

東京をはじめとするわが国の三大都市圏では、都市の地下が高度に開発され、様々なインフラストラクチャーが輻輳している。さらに、洪水対策のための地下河川の建設、交通網の地下化などが現在も積極的に進められている。したがって、このような新たな地下空間開発による既設構造物への近接施工の問題が今後さらに増加すると予想される。

特に、鉄道においては、軌道をミリメートルオーダーの精度で維持・管理することが、脱線事故の防止や、列車の運行を滞りなく継続するための必要条件となっている。このため、新幹線をはじめとする鉄道構造物の近傍で行なわれるシールド掘進などの建設工事に対しては、輸送の安全性の確保、構造物の保守管理上の観点から、精度の高い近接施工の影響評価が求められている。

シールドトンネル通過に伴う周辺地盤への影響予測手法として、これまで、二次元平面ひずみ状態を仮定した有限要素解析が提案され、実問題に適用されてきた<sup>1),2),3),4)</sup>。しかし、これらの手法の中には掘削面における変位に制限を設けた解析手法も一部提案されてはいる<sup>5)</sup>ものの、この手法も含め多くは解析対象とする地盤に初期応力解析として自重を作用さ

せた後、掘削による応力解放を応力境界として掘削面に導入して解析するという手法である。(以後、応力境界を用いた解析と呼ぶ)。

これらの手法では、変位を求めようとした場合、解析領域下方の範囲設定や、地盤の弾性係数や応力解放率に、解析結果が大きく依存するという問題があった。

さらに、計画平面線形が曲線の場合や、シールドの蛇行が著しい場合には、トンネル通過によって発生する地盤変位は非対称になるが、トンネル全周にわたって初期応力の一定の割合を解放する一様な応力解放率を適用すると、解析結果はトンネル中心を軸として左右対称となり、このような非対称な地盤変位を適切に表現することは難しかった。

一方、シールド工法を用いた場合には、切羽掘削以降の掘削面の変位を時系列的に求める手段がこれまでなかった。このため、実際に掘削面に発生する変位と解析結果を比較検証することは不可能であった。

こうした状況を踏まえ、本論文では硬質地盤を対象として、まず、シールド機動力学モデル<sup>6)</sup>によって得られるシールド掘進中に生ずる掘削面の変位を用いた、新たなシールド機周辺の地盤変位予測手法について述べる(以後、変位境界を用いた解析と呼ぶ)。

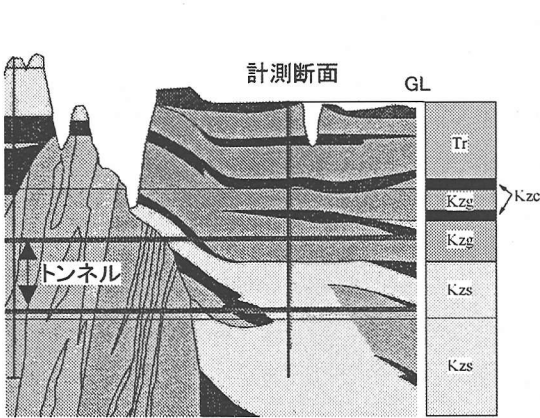


図-1 地質縦断面図

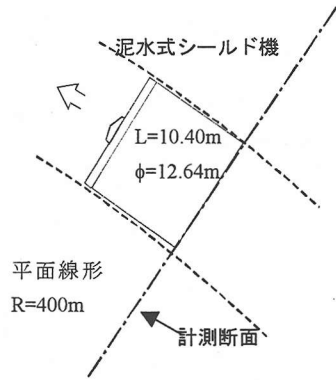


図-2 トンネル平面線形と地盤変位計測断面の位置

表-1 土質試験の結果と解析に用いた地盤の物性値

	深度 m	N 値	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	c kN/m <sup>2</sup>	$\phi$	E kN/m <sup>2</sup>	$\nu$
Tr	-11.5	33	18	0	30°	16,000	0.4
Kzc	-13.2	11	14	66	-	13,800	0.45
Kzg	-16.5	50	20	50	35°	35,000	0.4
Kzc	-17.8	13	14	78	-	16,300	0.45
Kzg	-23.5	50	20	50	35°	52,000	0.4
Kzs	-37.0	48	19	30	40°	35,000	0.3
Kzs	-58.6	48	19	30	40°	83,000	0.3

次に、応力解放率により応力境界を設定した従来の二次元平面ひずみ解析結果、本手法により変位境界を設定した二次元平面ひずみ解析結果、現場計測結果を比較検討することにより、本手法の妥当性を検証する。さらに、本手法による二次元平面ひずみ解析結果、三次元解析結果、現場計測結果を比較することにより、二次元平面ひずみ解析の限界を明らかにする。

## 2. 現場計測と有限要素解析の概要

### (1) 現場計測

本研究で提案する地盤変位予測手法を検証するためには、詳細なシールド機掘進管理データと、シールド機周辺の地盤変位計測データが必要となる。そこで、この条件を満たす現場を選定した。

解析対象は、マトリックスにシルト分を含む砂礫優位で自立性が高い良好な地盤で、外径12.64mの泥水式シールド機を用いて土被り20.5m、上り勾配2.49‰、半径400mで掘進した場所である。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。なお、各地盤の弾性係数は孔内水平載荷試験から求めた。

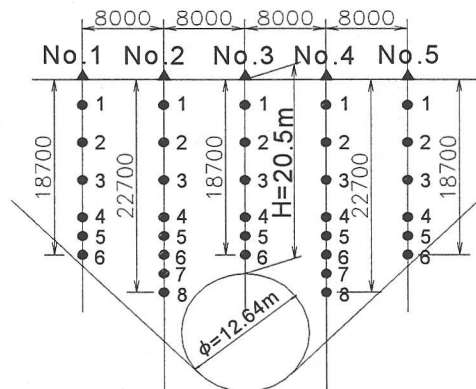


図-3 地表・層別沈下計の配置

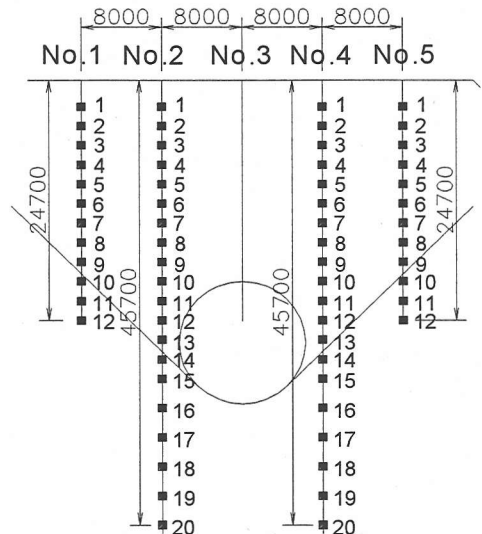


図-4 傾斜計の配置

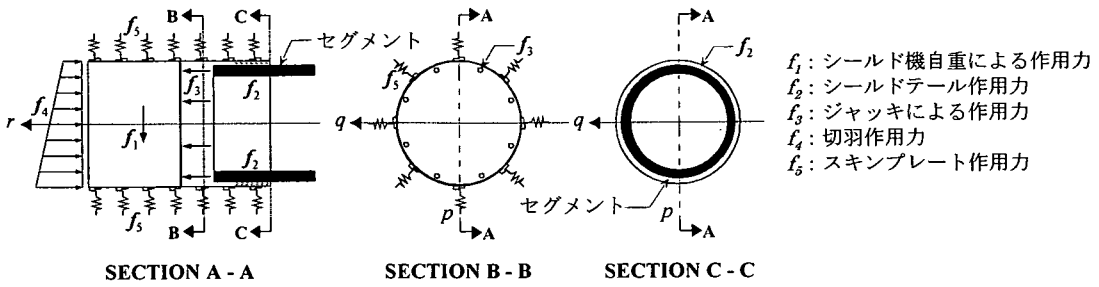


図-5 シールド機動力学モデル

地盤鉛直変位は地表面沈下計5点と層別沈下計34点を用いて、地盤水平変位は固定式傾斜計64点を用いて、シールド機通過中5分間隔で計測した。計測計器の配置を図-3および図-4に示す。なお、計測値の誤差は0.3mm程度である。

## (2) シールド機通過時の掘削面変位

シールド機通過時の掘削面変位は、シールド機動力学モデル<sup>9)</sup>により求めた。シールド機動力学モデルでは、過去にカッターフェイスが掘削した空間(以後、掘削領域と呼ぶ)、テールクリアランス、動的な力の釣り合い、カッターフェイス回転方向、シールド機のスライド、シールド機天端部での緩み等を考慮できるモデルで、図-5に示すように、シールド機に作用する主要な外力(以後作用力と呼ぶ) $f_1 \sim f_5$ で構成されている。

シールド機挙動は時系列のシールド機位置と回転角で表される。ここでは、ローリング角の変化が小さいことを考慮し、ローリング角の代わりにローリングしないために発揮される周方向動摩擦力の度合い(以後、カッタートルク抵抗係数と呼ぶ)をパラメータとした。したがって、以下の6つのパラメータを未知数として、

- $\Delta_x$  :  $x$ 方向の移動距離の増分
- $\Delta_y$  :  $y$ 方向の移動距離の増分
- $\Delta_z$  :  $z$ 方向の移動距離の増分
- $\phi_y$  : ヨーイング角(方位角)
- $\phi_p$  : ピッチング角(下向き:正)
- $\alpha$  : カッタートルク抵抗係数

式(1)に示す力の釣り合い式を解くことにより、掘削中のシールド機挙動を求めることができる<sup>7),8),9),10)</sup>。入力データは、シールド機の制御・挙動に関する計測データ、トンネル諸元、地質縦断面図、地盤物性値、シールド機の諸元である。

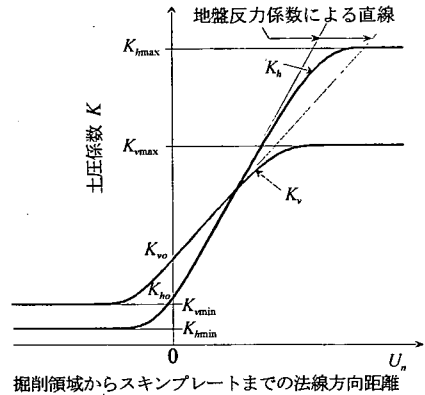


図-6 掘削領域からスキンプレートまでの法線方向距離と土圧係数の関係

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 F_i^M \\ \sum_{i=1}^5 M_i^M \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

図-5に示す作用力のうち、スキンプレート作用力 $f_5$ は、スキンプレートに作用する地盤反力と、それによる摩擦力である。この地盤反力は、掘削領域からシールド機スキンプレートまでの法線方向距離 $U_n$ に、図-6に示す $U_n$ と土圧係数 $K$ の関係を適用して求められる。ここで、静止土圧係数は $U_n=0$ における土圧係数 $K$ 、地盤反力係数は $U_n=0$ における曲線の傾きとなる。また、参考までに、シールドセグメントの設計に用いられる地盤反力係数<sup>11)</sup>の考え方を基に得られる $U_n$ と土圧係数 $K$ との関係も併せて図-6に示す。

一方、掘削面変位は、図-7に示す矢印で表される。ここで、過去にカッターフェイスが掘削した掘削領域とスキンプレートの位置は、現場計測データを用

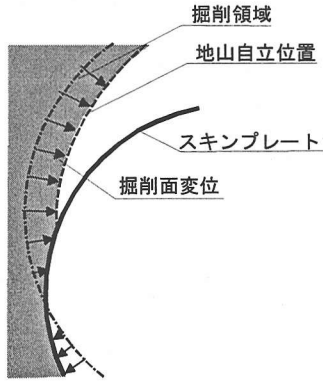


図-7 掘削面変位の定義

いて上記の方法で求めた。また、地山自立位置は、本解析対象地盤が自立性の高い良好な地盤であることを考慮して、図-6に示す地盤反力係数と変位との関係から、トンネルクラウンとインバートにおいては  $K_{min}$  に到る変位から、スプリングライン部では  $K_{hmin}$  に到る変位から、他の周面ではこれらを線形補完して得られる変位から求めた。したがって、図-7の掘削領域からスキンプレートまでの距離は図-6横軸の掘削領域からスキンプレートまでの法線方向距離となる。

また、スキンプレートが掘削領域よりトンネル外側にある場合には、地盤は受働状態となっていて、掘削領域からスキンプレートまでの距離が掘削面変位となり、スキンプレートが掘削領域と地山自立位置の間にある場合には、地盤は主動状態となっていて、掘削面はスキンプレートに接しているので、掘削領域からスキンプレートまでの距離が掘削面変位となり、スキンプレートが地山自立位置よりトンネル内側にある場合には、地盤は主動状態となっていて、掘削面は自立しているので、掘削領域から地山自立位置までの距離が掘削面変位となる。また、シールド機動力学モデルでは、地質縦断、地下水圧、泥水圧等を考慮しているので、ここで得られる掘削面変位は、これらの影響を含んでいることになる。

### (3) 変位境界を用いた有限要素解析

シールド機通過によるトンネル周辺地盤変位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切羽には静止土圧が作用し<sup>12)</sup>、切羽面での地盤変位は0である。
- ②トンネル周辺地盤の変位は、シールド掘進中に生ずるシールド機周面のトンネル掘削面変位が伝播することによりのみ生ずる。

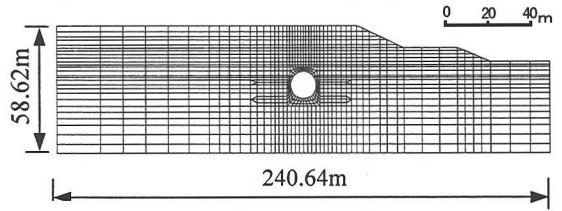


図-8 二次元解析モデル

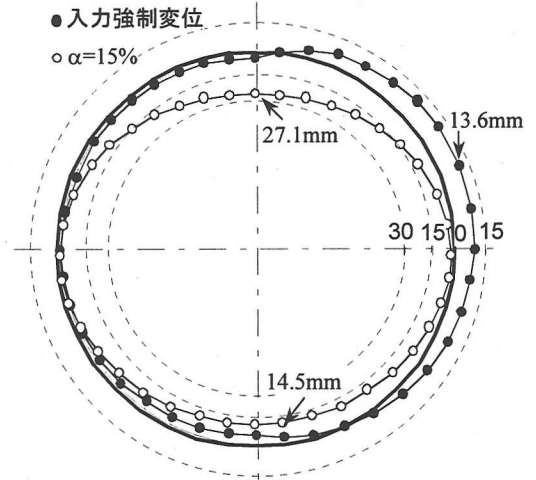


図-9 掘削面変位 (テール部)

まず、従来と同様に初期応力解放後、2(2)で求められる掘削面変位を強制変位として掘削面に導入し、表-1に示した $c, \phi, \gamma$ を用いてモール・クーロンの降伏基準を適用した弾塑性解析を行ったが、塑性域は発生しなかった。地盤の応力状態が弾性域内に留まれば、初期応力解析の有無によらず得られる地盤の変位やひずみは同じとなる。したがって、本解析では、工学的に重要な変位やひずみに着目し、初期応力解析は行わず、シールド機動力学モデルを用いて求められる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を行った。このため、表-1に示す地盤物性値のうち、解析に使用したのは、弾性係数 $E$ とポアソン比 $\nu$ のみである。

なお、塑性領域が大きく発生する場合には、初期応力解析が必要となる。また、上記の仮定が成立しない場合、すなわち切羽土圧が静止土圧より大きい場合、シールド機周面摩擦力によりシールド機軸方向に発生する地盤変位が大きい場合、掘進中に生ずる地盤の圧密が大きい場合などについては、別途検討が必要と考えられる。

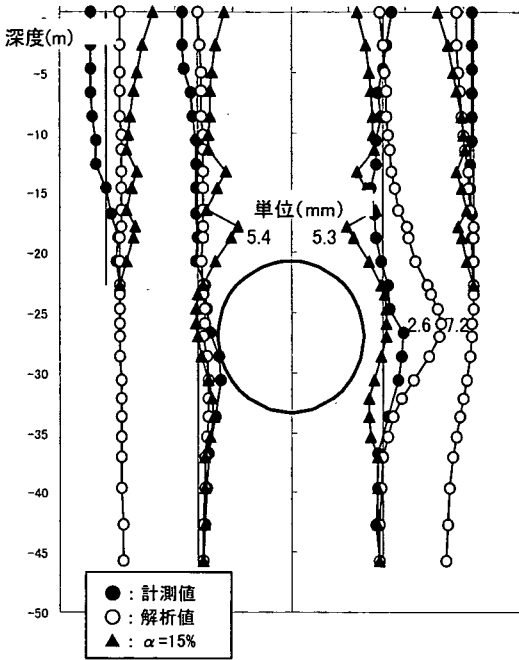


図-10 水平変位の比較

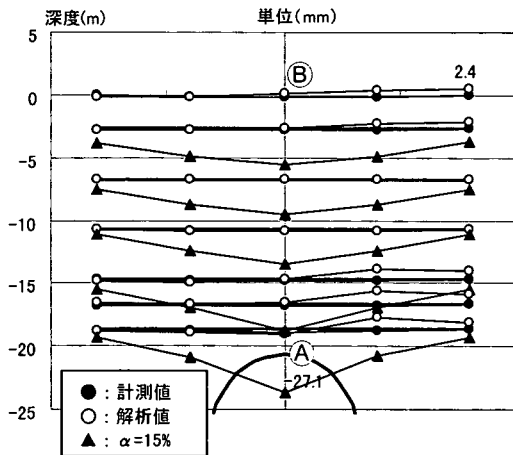


図-11 鉛直変位の比較

### 3. 二次元解析の結果と考察

#### (1) 解析モデル

解析に用いたモデルは図-8に示すように、側部と底部の解析領域の境界をそれぞれ鉛直・水平ローラーとする二次元平面ひずみモデルである。

表-2 トンネル中心部の鉛直変位比較

	トンネル直上 A点 (mm)	地表部 B点 (mm)
計測値	-0.8	-0.5
解析値	-2.7	0.3
$\alpha=15\%$	-27.1	-13.1

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むことになるので、近接構造物、周辺地盤への影響が最も大きくなる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。なお、シールド機テール部通過直後から受働側に押し込まれた地盤が元に戻る現象が計測結果より確認されている。

#### (2) 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-9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、応力境界を用いた解析で得られた掘削面変位も図-9に重ねて○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、既往の実績<sup>13)</sup>を考慮し、この初期地圧の15%を解放した。

図-9より、応力境界を用いた解析では、掘削面変位は左右対称となり、掘削面がトンネル全周にわたってトンネル内側へ変位すること、一方、シールド機動力学モデルを用いて求めた掘削面変位は、トンネル右側では地盤を押し込む受働状態になり、トンネル左側では地盤がシールド機側に変位する主働状態になっていることがわかる。

#### (3) 解析結果

##### a) 水平変位

提案する変位境界を用いた解析結果、および従来の応力境界を用いた解析結果と計測値を図-10にまとめて示す。計測値はシールド掘進に伴って時間的に変化しているため、シールド機動力学モデルにより掘削面変位が得られた時刻に対応する計測値を比較対象とした。

図-10より、従来の応力境界を用いた解析では、トンネル近傍の水平変位は、トンネルの両側でトンネル内側に向かっていて、計測値と異なるモードとなっていること、特に、弾性係数が相対的に小さいトンネル上部の2カ所の粘性土層で、地盤は内側へ大きく変位し、計測値と大きく異なることがわかる。

これに対して、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良く表現できていること、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2.6mmに対して7.2mmで、計測値の約2.8倍であることがわかる。

#### b) 鉛直変位

前項と同様に鉛直変位の解析値と計測値を図-11に示す。また、トンネル中心位置でのトンネル直上部と地表部での鉛直変位を表-2に示す。

応力解放率15%を用いた従来の応力境界を用いた解析では、トンネル直上部の鉛直変位は-27.1mmであり、計測値の約34倍である。これに対して変位境界を用いた解析では、この値が-2.7mmであり、計測値に近い。ただし、実際には認められなかったトンネル右16mの地表で地盤隆起が2.4mm発生している。

上記から、変位境界を用いた解析は全体の地盤の変形モードを表現できること、しかし、変位の計測値と解析値で差があること、実際には計測されなかったトンネル右側の隆起が発生することがわかる。

#### (4) 入力物性値の影響

本研究で行った解析では、地盤を線形弾性体としていること、特に、変位境界を用いた解析では、自重解析も行っていないことから、解析に必要な物性値は弾性係数とポアソン比だけである。そこで、二次元平面ひずみ線形弾性解析を用いて、この2つの物性値が変位境界を用いた解析結果に与える影響を検討した。

##### a) 弾性係数の影響

一般に実務レベルで地盤の弾性係数を決定する際には、①三軸圧縮試験や孔内水平載荷試験から求めた値をそのまま用いるか、これにある一定の定数を乗じて各層の弾性係数を決定する、②N値や土の粘着力cにある一定の定数を乗じて各層の弾性係数を決定する、といった方法がとられることが多く、この定数の値にはかなりの幅があるのが現状である。応力境界を用いた解析ではこの定数に反比例した地盤変位が得られることになる。これに対して、変位境界を用いた解析では、各層の弾性係数に同じ定数を乗ずる限り、この定数の大きさに地盤変位は全く依存しないと考えられる。表-1に示した各層の弾性係数を全て一律に3倍、1/3倍に設定した解析を行い、地盤変位のモード、地盤変位ともに全ての解析ケースで同じ値となることを確認した。

したがって、変位境界を用いた解析では、例えば、弾性係数の設定に標準貫入試験のN値を用いる場合には、 $E=7N$ としても、 $E=25N$ としても、各層の相

表-3 ポアソン比の影響

ポアソン比	水平変位最大値 (mm)	鉛直変位最大値 (mm)
全て0.3の場合	7.2799 (99.9)	-2.6853 (98.9)
表-1に示す値	7.2901 (100)	-2.7152 (100)
全て0.45の場合	7.5015 (102.9)	-2.7695 (102.0)

注：( )内は元の値を100とした時の指数

対的な剛性が同じならば、解析領域内の地盤変位モードおよび地盤変位はどの場合にも同一となる。なお、このように弾性地盤で変位やひずみが既知の場合には地盤各層の相対的な剛性のみが重要であるという知見は、山岳トンネルの分野においては既に桜井<sup>19)</sup>によって示されている。

##### b) ポアソン比の影響

弾性解析の実務においてはポアソン比を砂地盤で概ね0.3~0.4程度、粘性土地盤で概ね0.35~0.45程度とすることが多い。また、線形弾性体の二次元平面ひずみ問題の弾性マトリックスDは以下の式で与えられる。

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)の右辺には $(1-2\nu)$ の逆数が係数として存在するため、弾性解析の実務においてはほとんどの場合に、 $\nu$ の上限として0.45程度の値<sup>19)</sup>を用いている。また、地盤の有限要素解析を行う場合のポアソン比の下限値は一般的に0.3程度である。

そこで、本研究では全ての地層のポアソン比を0.3および0.45とした解析を行い、ポアソン比が解析結果に与える影響を検討した。

表-3に水平変位と鉛直変位の最大値の比較結果を示す。着目した節点は全て同一である。表-3より、ポアソン比が通常用いられる範囲内では、ポアソン比の値が結果に与える影響は小さいこと、今回用いた解析モデルではいずれの場合も元の解析ケースの地盤変位量との差が3%以内であることがわかる。

したがって、従来の応力境界を用いた解析では、地盤各層の弾性係数、応力解放率、解析領域の大きさが地盤変位に影響を与えるのに対して、本論文で提案する変位境界を用いた解析では、地盤各層の相対剛性のみが地盤変位に影響を与えることになる。

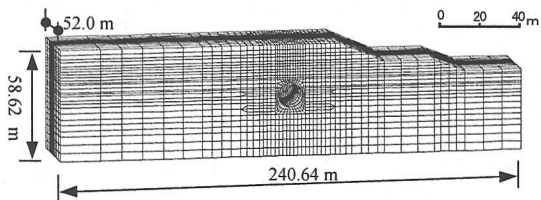


図-12 三次元解析モデル

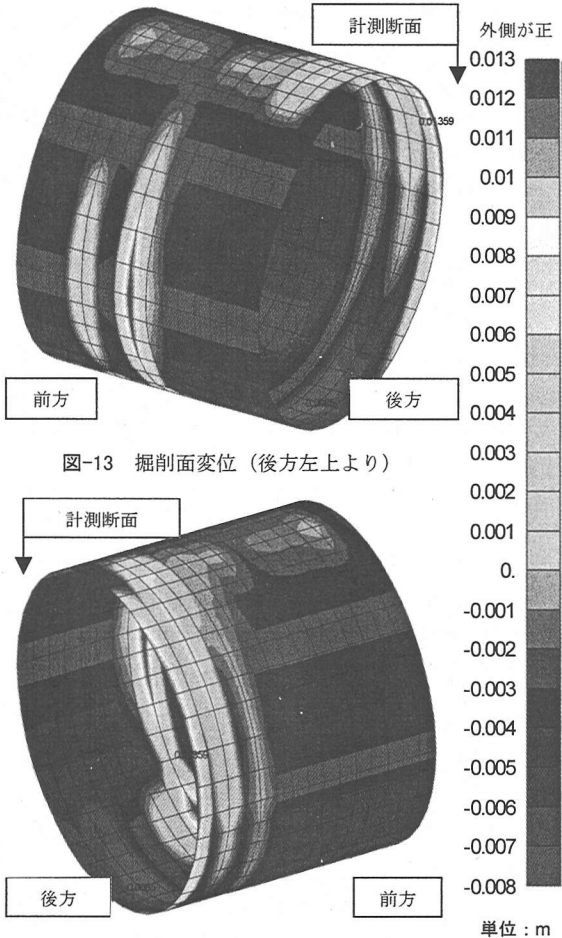


図-13 掘削面変位（後方左上より）

図-14 掘削面変位（後方右上より）

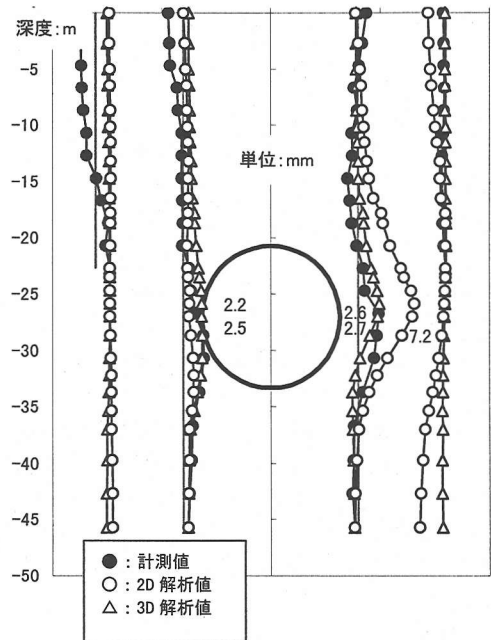


図-15 水平変位の比較

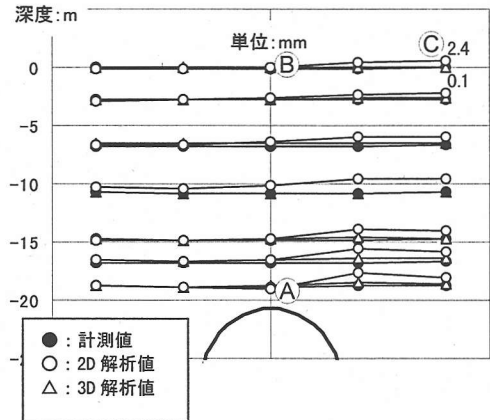


図-16 鉛直変位の比較

表-4 トンネル中心部の鉛直変位比較 (mm)

	トンネル 直上 A点	地表部 B点	地表部 C点
計測値	-0.8	-0.5	-0.1
解析値(2D)	-2.7	0.3	2.4
解析値(3D)	-0.5	-0.1	0.1
$\alpha=15\%$	-27.1	-13.1	-5.4

#### 4. 三次元解析の結果と考察

3章で述べたように、本論文で提案する変位境界を用いた解析手法を用いることによって、計測値に近い地盤の変形モードを表現できることがわかった。しかし、解析では、水平変位の最大値は計測値の2.8倍となり、トンネル右側の隆起が発生した。これらは、二次元平面ひずみ状態が成立していないためと

考えられるので、シールド機の外周全体の掘削面変位を変位境界とする三次元弾性解析を実施した。

## (1) 解析モデル

三次元解析に用いた解析モデルを図-12に示す。このモデルは二次元平面ひずみ解析モデル(図-8)をシールド機の軸方向に引き延ばしたものである。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倍ずつ取り、全体の奥行きをシールド機長の5倍とした。

地盤への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、シールド機後端以降のトンネル既掘削面の変位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、地盤各層の弾性係数とポアソン比は表-1の値を用いた。

## (2) 掘削面変位

シールド機後方(テール側)上部から鳥瞰したシールド機全体にわたる掘削面変位のコンター図を図-13と図-14に示す。ここで、掘削面変位は3章と同様に、シールド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。図中、淡色で示されている部分は、シールド機が地盤を押し込んでいて、地盤が受働状態であることを示し、これは、テール部右斜め上側とシールド機中央付近の左側部である。他の多くの濃色部分では地盤がシールド機側に変位し、地盤が主働状態であることを示している。

なお、図中のテール部(後端)が計測断面位置で、3章で述べた二次元平面ひずみ解析ではこの後端の掘削面変位を用いている。

## (3) 解析結果

### a) 水平変位

変位境界を用いた三次元解析結果、二次元平面ひずみ解析結果と計測値を図-15に示す。トンネル直近右側の水平変位は、計測値2.6mmに対して、二次元平面ひずみ解析で7.2mm、三次元解析で2.7mmとなった。また、トンネル直近左側のトンネル内側へ向かう水平変位の最大値は、計測値2.2mmに対して、三次元解析で2.5mmとなった。これらより、地盤変位の計測精度0.3mmを考慮すると、三次元解析結果はトンネル近傍で左右両側ともに計測値との差が計測精度程度であること、二次元平面ひずみ解析結果はシールド機が地盤を押し込んで地盤が受働状態になっているトンネル右側で過大となることがわかる。

これらは、二次元平面ひずみ解析では、テール部の掘削面変位がシールド機軸方向に一樣に作用することになるのに対して、三次元解析では、三次元的に分布する掘削面変位を強制変位として入力していること、地盤が受働状態になっているのはシールド機周りの地盤の一部であることのためであると考えられる。

### b) 鉛直変位

前項と同様に、鉛直変位の解析結果と計測値を図-16に示す。また、トンネル中心位置でのトンネル直上部と地表部での鉛直変位を表-4に示す。

これらの図表より、二次元解析に比べ、三次元解析のほうが計測値に近いことがわかる。この理由は前項の水平変位と同様に説明できる。

## 5. 結論

本論文では、硬質地盤を対象として、シールド機動力学モデルによって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シールド機周辺の地盤変位予測手法を提案するとともに、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、同手法の妥当性を検討した。得られた結論を以下に列挙する。

(1) 従来の応力境界を用いた解析手法と比較して、本論文で提案した変位境界を用いた解析手法は、非対称な地盤変形モードを表現できるとともに、トンネル周辺地盤変位をより高い精度で求めることが出来る。これは、シールド機と掘削面の相対的位置関係によって規定される掘削面の変位がシールド機掘進中に生ずるシールド機周辺地盤変位に大きく影響を与えるためであると考えられる。

(2) 変位境界を用いた解析手法による、二次元平面ひずみ解析では、シールド機が地盤を押し込んで地盤が受働状態になっているシールド機テール部近傍の水平変位、および、トンネル直上部での鉛直変位が過大評価され、また、地表面端部で地盤隆起が発生したのに対し、同手法による三次元解析では、水平変位、鉛直変位ともに、解析値と計測値は良く一致した。これは、二次元平面ひずみ解析では、シールド機軸方向に一樣な掘削面変位を想定しているのに対し、三次元解析では、シールド機周りに三次元的に分布する掘削面変位を考慮できること、シールド機動力学モデルによって得られたシールド掘進中に生ずる掘削面変位が妥当な値であったことのためである。



あると考えられる。なお、本研究の検討例では、二次元平面ひずみ解析から得られる最大水平変位は、三次元解析の解析値、および計測値の約2.8倍であった。

(3) 変位境界を用いた解析手法による二次元平面ひずみ解析では、地盤各層の相対的な剛性が同じであれば、得られる地盤変位は同一となる。また、ポアソン比が通常用いられる範囲内であれば、ポアソン比が地盤変位に与える影響は小さい。本研究の検討例では、ポアソン比の変化による地盤変位の差は3%以内となった。したがって、変位境界を用いた解析では、掘削面変位が同一であれば、地盤各層の相対的な剛性のみが地盤変位に大きな影響を与える。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、掘進管理データを基にシールド機シミュレーションを行った長岡技術科学大学院生の前田和也君と卒業生の長田竜治君、貴重な現場データを提供していただいた技術者の方々、計測データの利用を認めていただいた関係者各位に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 半谷哲夫, 中井善人, 山口良雄, 福地善明: シールド掘削に伴う沈下解析, 土木学会誌, 第54巻, 9号, pp. 30-35, 1969.9.
- 2) 猪熊明, 角湯克典, 波田光敬, 藤本明生: 地表面変位の予測に用いるFEMの改善(試案), トンネルと地下, pp. 39-43, 1994.12.
- 3) 中山隆, 中村信義, 中島信: 泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について, 土木学会論文集, No.397/VI-9, pp. 133-141, 1989.9.
- 4) 野口俊雄, 垂水尚志: 非関連流れ則を用いた有限要素解によるシールドトンネル掘削時の変形解析, 土木学会論文集, No.672/VI-50, pp. 133-144, 2001.3.
- 5) 山田孝治, 吉田保, 間片博之, 橋本定雄: 沖積地盤におけるシールド掘進に伴う地盤変状とその予測解析に

ついて, 土木学会論文集, No.373/VI-5, pp. 103-112, 1986.9.

- 6) 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-53, pp. 163-182, 2001.03.3.
- 7) 小柴暢, 杉本光隆, Aphichat SRAMOON, 小西真治, 津坂治: 現場実測データによるシールド機挙動のシミュレーション(1) 洪積層, 第55回土木学会年次学術講演会講演概要集III-B152, 2000.9.
- 8) 有賀裕彦, 杉本光隆, Aphichat SRAMOON, 小西真治, 粥川幸司: 現場実測データによるシールド機挙動のシミュレーション(2) 沖積層, 第55回土木学会年次学術講演会講演概要集III-B153, 2000.9.
- 9) Aphichat SRAMOON, 杉本光隆, 向直樹, 静野智久: 東京層(粘性土)における急曲線を含む現場実測データに基づくシールド機動力学モデルの検証, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集III-B079, 2001.10.
- 10) 前田和也, 杉本光隆, Aphichat SRAMOON, 佐藤豊, 安井充: シールド機動力学モデルによる古琵琶湖層(砂礫土)における現場実測データのシミュレーション, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集III-B078, 2001.10.
- 11) 土木学会: トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説, 土木学会, pp.42-47, 1996.
- 12) 吉田保, 山田孝治: 泥水シールド掘進時の切羽土圧と周面摩擦について, 土木学会論文集, No.445/III-18, pp. 75-82, 1992.
- 13) たとえば, 木佐人典, 川崎清, 古川有一, 松井茂: 霞ヶ関~東銀座シールド工事における予測と計測, 基礎工, 17/12, pp. 100-105, 1989.12.
- 14) 桜井春輔: NATMにおける現場計測と管理基準値, 土と基礎, No.34-2, pp. 5-10, 1986.2.
- 15) たとえば, 亀村勝美, 桑田尚史: 泥土圧シールド掘進時の地盤挙動とその3次元数値解析, 土質工学会, 山留めとシールド工事における土圧・水圧に関するシンポジウム pp. 281-284, 1992.5.

(2001.6.11 受付)

## EVALUATION OF SHIELD TUNNELLING EFFECT ON STIFF GROUND BY FEA WITH DISPLACEMENT BOUNDARY INPUT

Yutaka SATO, Shinji KONISHI, Mitsutaka SUGIMOTO and Aphichat SRAMOON

Stress boundary has conventionally been used for the prediction of ground movement during shield tunneling in plain strain two-dimensional finite element analysis. In this study, based on excavated surface displacement boundary input, a ground displacement prediction method was proposed for shield tunneling. The results of the proposed method of 2D and 3D analysis were compared and evaluated with the field measurement. As a result, it was made clear that asymmetrical surrounding ground displacement during curve excavation was able to be simulated with the proposed method and it achieved more precise simulation than the conventional method by stress boundary input.