

# シールド掘進による地盤変位の実用予測手法の提案

宮川房夫<sup>1</sup>・久保泰文<sup>2</sup>・町田茂一<sup>3</sup>・水谷進<sup>4</sup>・坪井康之<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 元日本鉄道建設公団 東京支社 (〒108 東京都港区芝5-33-8)

<sup>2</sup>正会員 日本鉄道建設公団 東京支社 (〒108 東京都港区芝5-33-8)

<sup>3</sup>正会員 日本鉄道建設公団 東京支社 (〒108 東京都港区芝5-33-8)

<sup>4</sup>正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ(株) 鉄道部 (〒163-07 東京都新宿区西新宿2-7-1)

<sup>5</sup>正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ(株) 地質部 (〒163-07 東京都新宿区西新宿2-7-1)

最近の密閉型シールド工法では、テールボイド部の応力解放による地盤の緩みに加え、ジャッキ推力による地盤の押し広げが問題となることが多い。本研究は、シールド掘進による地盤変位の予測手法として、従来のテールボイド部の応力解放に加え、ジャッキ推力による地盤の押し広げも考慮できる二次元有限要素による実用的な新手法を提案し、硬質地盤における泥水式シールド工法を対象として、その適用性を検証したものである。

**Key Words :** shield driving tunnel, ground displacement, 2-Dimensional FEM, 3-Dimensional FEM, thrust by shield jacking, tail boid

## 1. まえがき

密集度が高い都市の地下で、新たに施設を設ける場合には、既存の施設に近接して工事をおこなうことが避けられない状況にある。このような場合、工事によって、既存の施設に対し荷重増加や不等沈下などの悪影響を生じさせ、その機能や安全性に問題を及ぼす場合がある。近接施工が計画されると、類似の施工事例を参考にするとともに、種々の手法を用いて数値解析をおこない、工事による影響と既存施設の安全性を検討し、その結果に基づいて必要な対策工が計画される。しかし数値解析による予測は、有限要素法などの高度な手法を用いているにも関わらず、モデル化および入力する地盤定数の設定の難しさなどから、定量的に高い評価が得られているとは言えないのが現状である。

本論文は、これまでに携わったシールド工事における地盤やトンネルの挙動を基に、その発生メカニズムを分析し、テールボイド部における地盤の緩みに加え、シールド掘進時のジャッキ推力による切羽面押さえ圧を考慮した新しい予測手法を提案するものである。実用面を考慮して三次元的に発生する地盤変位を、有効率の概念を用いた二次元モデルで評価しており、シールド機の掘進に伴う施工過程を考慮した地盤変位を想定することが可能である。この

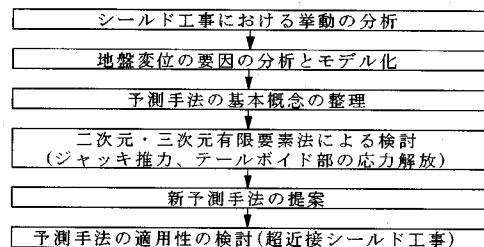


図-1 新予測手法の検討手順

新しい手法を検討するための手順を図-1に示す。

## 2. シールド掘進による地盤変位の特徴と従来の予測手法

シールド掘進による地盤変位の特徴は、シールド機の回りでの地盤変位の発生源が、切羽面での土圧のアンバランス、テールボイド部での緩み、シールド機掘進時の鋼殻やカッタービットからの作用荷重など多様であるとともに、地盤変位がシールド機を中心に三次元的に広がり、しかもその分布がシールド機の進行とともに移動・累積していくことにある。したがって、シールド掘進による地盤変位を数値解析により予測する場合、このような複雑な挙動を解析にいかに取り込んでいくかが問題となる。

シールド掘進による地盤変位の予測手法としては、現場計測結果に基づく経験式や弾性理論等に基づく理論式などの研究もあるが、実際の地盤における複雑な土層構成や境界条件を考慮できる手法として、有限要素法に代表される数値解析が実用上広く用いられている。また、前述のような地盤変位の三次元的な挙動を直接に解析するため、三次元有限要素法を用いた研究<sup>1) 2)</sup>もいくつかなされているが、電算が発達した現在でもなお、計算コストが問題であるため、実用上は二次元解析が主流となっている。

シールド掘進による地盤変位を二次元有限要素法を用いて予測する手法として、代表的なものは山田ら(1986)<sup>3)</sup>および中山ら(1988)<sup>4)</sup>の研究がある。主に沖積地盤を対象とした山田らの方法では、テールボイド部において素掘り状態で変位が生じ、テールボイド厚を上回る変位はセグメントで拘束されると仮定している。また、シールド上部にゆるみ領域を設定し、最終沈下量を予測する場合には、この部分の地盤の変形係数を自然状態の1/2に低減することを提案している。さらに、シールド掘進時のジャッキ推力による地盤の隆起を二次元および三次元の有限要素法解析により検討し、二次元解析において、ジャッキ推力の6~8%程度の仮想圧力をシールド外周面に与えることで、地盤の隆起が予測できるとしている。一方、中山らの方法は、硬質地盤における泥水式シールド工法を対象としている。地盤変位の要因として、テールボイド部での応力解放が主体であると考え、応力解放による地盤変位の累積を軸対称有限要素法を用いて解析し、その結果として、原地盤の応力から切羽面の泥水圧を差し引いた圧力に補正係数を乗じた圧力を解放応力として与えることにより、現場計測結果と良い一致を示したと報告している。

二次元有限要素法を用いたこれらの予測手法は、軟弱地盤と硬質地盤で地盤種別は異なるものの、いずれも最近の密閉型シールド工法を対象とするもので、ともにシールド掘進による地盤変位の要因については、テールボイド部での内圧と原地盤応力の差による地盤の緩みに主眼が置かれている。これは施工技術の進歩により土圧式シールド、泥水式シールドとともに切羽地盤を緩めないように切羽圧の制御が入念に行われるため、切羽面での地盤の変位が生じないようになってきていることの現れと推察できる。そして、逆に山田らの研究に見られるように、シールド機の推進力が原地盤の土圧より大きく、シールド機の前方で地盤を押し広げる場合が新たな問題として生じてきているように見える。したがって、

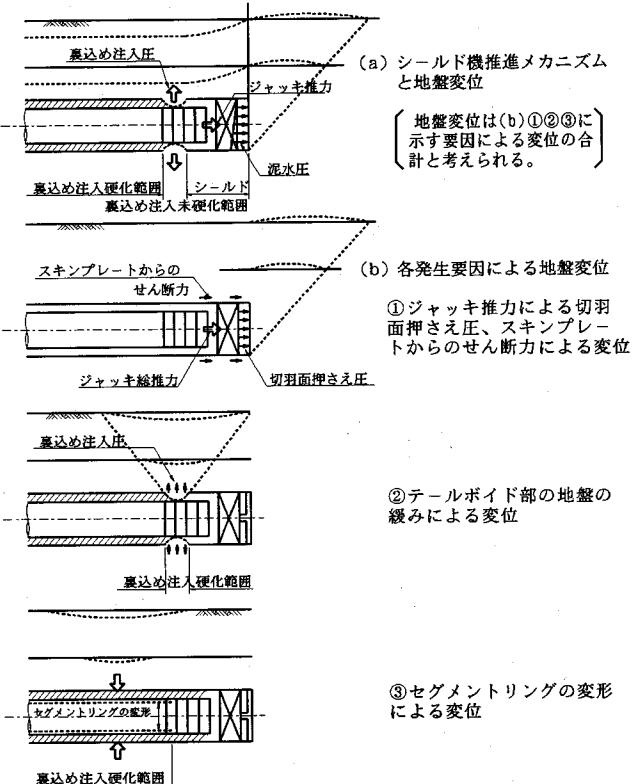


図-2 シールド周辺の地盤変位のメカニズム

ジャッキ推力による地盤の押し広げとテールボイド部の地盤の緩みの両方を合理的に考慮できる実用的な予測手法の確立が今後の大きな課題と考えられる。

### 3. 二次元有限要素法による新しい実用予測手法の概念

#### (1) 概要

泥水式シールド、土圧式シールドなどの密閉型シールドを対象とすると、地盤変位の発生要因は図-2および次の3項目に集約できる。

- ①ジャッキ推力による切羽面の押さえ圧、スキンプレートからのせん断力による地盤変位
- ②テールボイドの裏込め注入材未硬化部の地盤変位
- ③セグメントリングの変形による地盤変位

#### a) ジャッキ推力による切羽面押さえ圧、スキンプレートからのせん断力

泥水式シールドなどの密閉型シールドにおいて、ジャッキ総推力に対する抵抗要素は、シールド外周（スキンプレート）と土との摩擦抵抗あるいは粘着抵抗／掘進に伴う刃先の貫入抵抗（カッタビットの押え圧）、切羽前面抵抗（チャンバ内圧力）、変向抵抗（曲線施工、蛇行修正、変向のための抵抗等）、

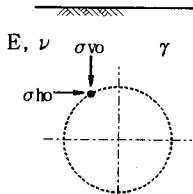
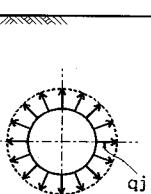
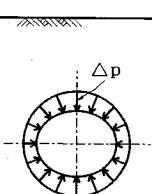
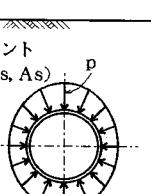
STEP-1	STEP-2	STEP-3	STEP-4
地盤初期応力状態 	シールド掘進(その1) [ジャッキ推力による影響の計算] 	シールド掘進(その2) [テールボイド部の応力解放による影響の計算] 	セグメント設置・トンネル完成 
<p>• 解析モデルに土の単位重量<math>\gamma</math>を与えシールド掘進における地盤内の初期応力<math>\sigma_0</math>を計算する。 なお、水平方向の応力は、</p> $\sigma_{ho} = Ko \cdot \sigma_0$ <p>ここに、<math>\sigma_{ho}</math>：水平方向の応力 <math>\sigma_{vo}</math>：鉛直方向の応力 <math>Ko</math>：静止土圧係数</p>	<p>• トンネル切羽外周線の外向きの押し広げ圧<math>q_j</math>を与える。</p> $q_j = \beta_j (P_j - P_o) / A_s$ <p>ここに、<math>q_j</math>：作用荷重 <math>P_j</math>：ジャッキ総推力 <math>P_o</math>：切羽内の静止土圧と水圧の合力 <math>A_s</math>：切羽の断面積 <math>\beta_j</math>：押し広げ圧に関する有効率</p>	<p>• トンネル切羽外周線に解放応力<math>\Delta p</math>を与える。</p> $\Delta p = \beta_t (\sigma - p_t)$ <p>ここに、<math>\Delta p</math>：解放応力 <math>\sigma</math>：ステップ2における地盤内の応力 <math>p_t</math>：テールボイド部の有効圧 <math>\beta_t</math>：解放応力に関する有効率</p>	<p>• セグメントを線部材として組込むとともに、セグメント設置後の作用土圧<math>p</math>をセグメントに内向きに与える。</p> $p = \beta_s \cdot \sigma_0 - \Delta p$ <p>ここに、<math>\sigma_0</math>：初期応力 <math>p</math>：セグメント設置後の作用土圧 <math>\beta_s</math>：セグメントの作用土圧に関する有効率</p>

図-3 新手法における解析手順

テール内のセグメントとスキンプレートとの摩擦抵抗、後方台車のけん引抵抗などがある<sup>5)</sup>。最近のシールド施工では、チャンバ内圧力を切羽地盤の静止土圧、水圧に近い値として設定する傾向にある。また、シールド機掘進におけるジャッキの総推力は、切羽地盤の土圧、水圧の合力より相当大きな値となっている。このような場合には、シールド外周と土との摩擦抵抗あるいは粘着抵抗およびカッタビットの押さえ圧による力がシールド機外周の地盤に余分な荷重として作用することになる。シールド機前方の地盤が隆起する現象は、切羽地盤の土圧、水圧より大きな総推力で施工するために生ずるものと考えられる。

#### b) テールボイド部の裏込め注入材未硬化部

シールド機後方のテールボイド部では、シールド機の掘進に合せて速やかにセグメントあるいはシールド機に装備した注入口より裏込め注入が行われるが、裏込め注入のタイミングにより注入材が入っていない空洞部分が生じたり、また、注入材が硬化するにある程度の時間が必要なため、テールボイド外周の地盤に緩みが生じる。一方、注入圧力が大きいと周囲の地盤を外方へ押すような場合もある。

#### c) セグメントリングの変形

シールド機のテールを出たセグメントリングには、テールボイド部で裏込め注入圧による荷重が作用し、その後に裏込め材が硬化した後、その裏込め材を介して土圧、水圧が作用することになる。ただし、

テールボイド部では外周地盤とセグメントとがまだ密着していないため、地盤変位に結びつくセグメントリングの変形は、裏込め材硬化後に作用する土圧、水圧によるものと考えられる。

#### (2) 予測手法の基本手順

シールド掘進による地盤変位の予測解析の手順を図-3に示す。STEP-1で、シールド掘進前の地盤内の応力状態を計算する。STEP-2とSTEP-3は、それぞれ、ジャッキ推力による地盤の押広げ圧とテールボイド部の応力解放による地盤変位を計算する過程である。その後に、STEP-4でセグメント設置後の硬化した裏込め材を介して作用する土圧、水圧によるセグメントの変形およびそれに伴って発生する地盤変位を算出する。解析は二次元有限要素法弹性解析によりおこない、地盤変位はSTEP-1の値を基準として、各STEPごとに累積していくことによって求める。

#### (3) ジャッキ推力による押し広げ圧

シールド掘進による切羽面の押さえ圧および鋼殻からのせん断力による影響は、切羽面周辺地盤を押し広げる圧力として設定する必要がある。可能な限り簡易な形で取り扱うために、二次元解析においてシールド機外周面に作用する等分布圧力として仮定する。切羽前面の土圧、水圧に対し、ジャッキ推力が大きいほど、周辺地盤を押し広げる圧力は大きくなると考え、押し広げ圧は次式で与えることにした。

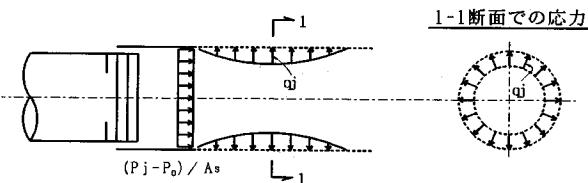


図-4 ジャッキ推力による押し広げ圧の概念

$$q_j = \beta_j \frac{(P_j - P_o)}{A_s} \quad (1)$$

ここに,  $q_j$  : ジャッキ推力による押し広げ圧( $\text{tf}/\text{m}^2$ )  
 $\beta_j$  : 押し広げ圧に関する有効率  
 $P_j$  : シールド推進時ジャッキ総推力( $\text{tf}$ )  
 $P_o$  : 切羽面の静止土圧と水圧の合力( $\text{tf}$ )  
 $A_s$  : 切羽の断面積( $\text{m}^2$ )

図-4にトンネル横断面の解析で与える押し広げ圧 $q_j$ と, トンネル縦断方向の切羽面押さえ圧 $(P_j - P_o)/A_s$ との関係を模式的に示す。

$\beta_j$ は, トンネル方向の圧力から法線方向の圧力への変換, および鋼殻のせん断力も含めて切羽面圧だけに荷重を置換えたことによる誤差など, 諸々の要素を総括的に補正した工学的な係数である。

なお, 地盤を完全弾性体と仮定すると, 押し広げ圧はポアソン比によって変化するため,  $\beta_j$ は地盤により値が変わるものと考えられる。

#### (4) テールボイド部の応力解放

STEP-3は, テールボイド部における地盤の緩みによる地盤変位を解析するものであり, 解放応力は, 次に示す算定式により設定する。

$$\Delta p = \beta_t (\sigma - p_t) \quad (2)$$

ここに,  $\Delta p$  : 解放応力 ( $\text{tf}/\text{m}^2$ )  
 $\beta_t$  : 解放応力に関する有効率  
 $\sigma$  : STEP-2における地盤の応力 ( $\text{tf}/\text{m}^2$ )  
 $p_t$  : テールボイド部における有効圧 ( $\text{tf}/\text{m}^2$ )

この式は, 中山らの提案と基本的に同じである。ただし, 地盤応力に対抗するテールボイド内の圧力は, 切羽面の泥水圧と同一になるとは限らないと考え, 裏込注入圧も考慮してテールボイド部の有効圧として定義する。なお, 有効率 $\beta_t$  (中山らの補正係数 $\alpha$ に相当)について, 中山らは硬質地盤に対して30~40%を提案している。

テールボイド部の有効圧 $p_t$ は, 裏込め注入圧, 注入材の種類・特性 (硬化所要時間など) などの施工条件を考慮して設定する。

#### (5) セグメントに作用する土圧

STEP-4は, 裏込め注入材硬化後におけるセグメントリングの変形による地盤変位を解析するものである。STEP-3における解放応力と最終的なセグメントへの作用土圧との差をセグメントリングに作用させる。長期的に地盤内のアーチング効果が期待できる場合には, 緩み土圧との差を作用させることなどが考えられるため, セグメントへの作用土圧は, STEP-1の地盤の初期応力に有効率 $\beta_s$ を乗じることによって設定することにした。STEP-4においてセグメントに作用させる荷重を次式に示す。

$$p = \beta_s \cdot \sigma_0 - \Delta p \quad (3)$$

ここに,  $p$  : セグメント設置後の作用荷重 ( $\text{tf}/\text{m}^2$ )  
 $\sigma_0$  : STEP-1の地盤の初期応力 ( $\text{tf}/\text{m}^2$ )  
 $\beta_s$  : セグメントの作用土圧に関する有効率  
 $\Delta p$  : STEP-3の解放応力 ( $\text{tf}/\text{m}^2$ )

#### 4. 実用予測手法における有効率の検討

##### (1) 概要

ジャッキ推力による押し広げ圧およびテールボイド部の解放応力を要因として生じる地盤変位を二次元モデルで評価するため, 本予測手法では, 有効率 $\beta_j$ ,  $\beta_t$ の概念を導入している。シールド機付近を中心とした三次元的な広がりやシールド機の前進とともに累積移動するという実際の地盤変位の挙動を可能な限り表現するため, 三次元有限要素法を用いて試算し, その結果と二次元有限要素法との対比により有効率の定量的評価をおこなう。

テールボイド部の解放応力に関しては, 軸対称モデルによる解析例<sup>4)</sup>はあるが, このモデルでは地盤変位の着目点は地表面の鉛直変位のみで, 地盤が一様な場合に適用範囲が限定されるものと考えられる。一方, 三次元モデルを用いることにより, 地表面の影響を考慮するとともに, 地盤内の鉛直, 水平変位を対象として, 有効率を評価できる。なお三次元有限要素法解析は文献<sup>6)</sup>に示される考え方を基本とした。また, 今回の解析で対象とするのは, シールド形式: 泥水式シールド, 地盤: 洪積砂質土の場合である。

##### (2) 解析方法

###### a) 三次元有限要素法解析

図-5に示すように単円シールドの1/2断面を想定した三次元解析モデルを作成し, 表-1に示すケースについて検討した。

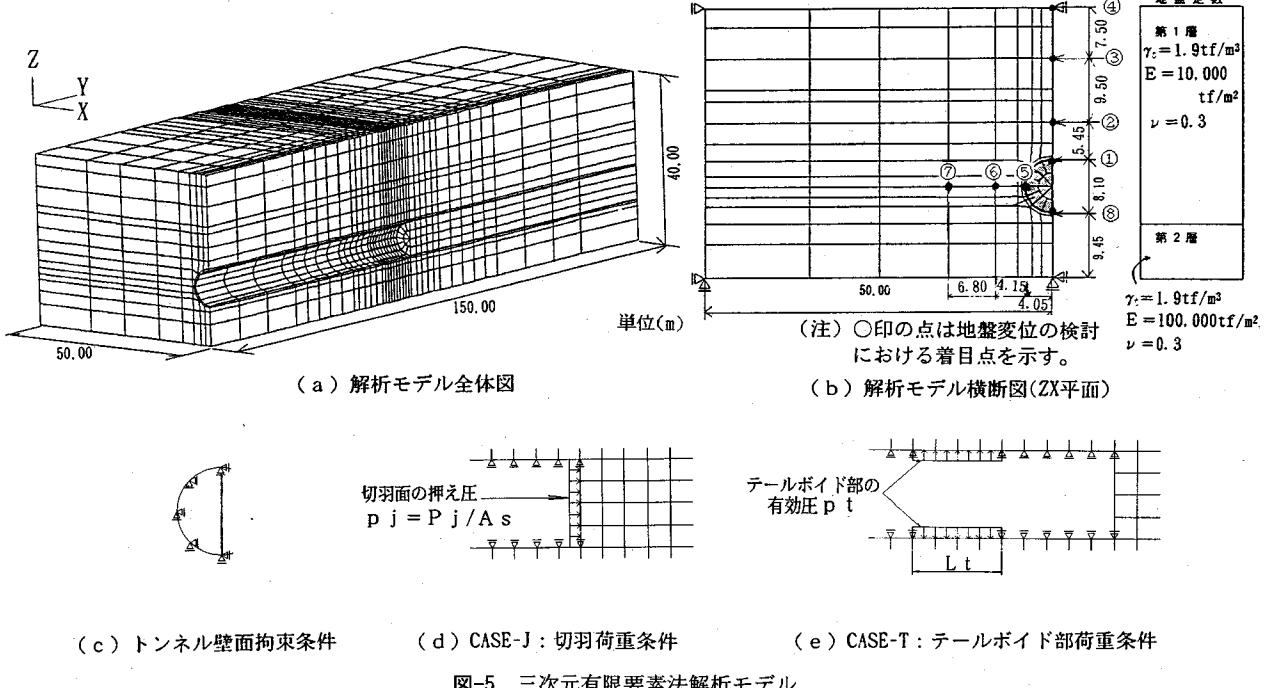


図-5 三次元有限要素法解析モデル

表-1 三次元有限要素法の解析ケース

検討項目	解析 ケース	ジャッキ推力 Pj(tf/m²)	テールボイド	
			有効圧pt(tf/m²)	Lt(m)
ジャッキ推力による作用荷重 のみによって生じる地盤変位	J-1	3,000 [58.2]	—	—
	J-2	2,000 [38.8]	—	—
テールボイド部の応力解放 のみによって生じる地盤変位	T-1	—	20	2.0
	T-2	—	0	2.0
	T-3	—	20	4.0

注) [ ] は  $p_j = P_j / A_s$ ,  $A_s = 61.5 \text{ m}^2$

ここで、CASE-Jはジャッキ推力による作用荷重のみによって生じる地盤変位を計算するものであり、初期応力解析後、モデル長手方向の中央付近までに一度に掘削した後、シールド機を1mづつ前進させる方法で計算した。作用荷重は切羽前面に等分布荷重 ( $p_j = P_j / A_s$ ,  $P_j$ :ジャッキ推力  $A_s$ :切羽断面積)として与えている。ジャッキ推力による作用荷重は、シールド機のスキンプレートからのせん断力と切羽面の押さえ圧として地盤に作用するものであるが、泥水式シールドの場合、シールド機の外周へ泥水がまわり込むためスキンプレートからのせん断力は比較的小さいと推定される<sup>4)</sup>。このような場合には、シールド機外周地盤の変位に大差が生じないと判断されるため、全作用荷重を切羽面だけに作用させることにした。

一方、CASE-Tは、テールボイド部の応力解放のみ

表-2 二次元有限要素法の解析ケース

検討項目	解析 ケース	ジャッキ推力による 押し広げ圧 qj(tf/m²)	テールボイド	
			有効圧 Pt(tf/m²)	有効率 βt(%)
ジャッキ推力による 作用荷重によって 生じる地盤変位	j	10	—	—
テールボイド部 応力解放によって 生じる地盤変位	t-1	—	20	100
	t-2	—	0	100

によって生じる地盤変位をシールド掘進過程を考慮して計算するものであり、シールドの掘進に伴ってその変位を累積させた。解析ケースは、有効率  $\beta t$  に影響が予想される要因として、有効圧  $p_t$  の大きさおよびテールボイド長  $L_t$  を考え、表-1に示す3ケースとした。ここで、有効圧  $p_t$  は、実際の施工ではあり得ないと考えられるが、極端なケースとして、 $p_t = 0 \text{ tf/m}^2$ 、また、地表面付近に地下水が存在する場合に、最低でも地下水圧程度の有効圧が作用するような裏込め注入がおこなわれるものと考えた  $p_t = 20 \text{ tf/m}^2$  の2ケースを想定した。

#### b) 二次元有限要素法解析

三次元と同様に単円シールドの1/2断面を想定した二次元平面ひずみモデル(図-5のzx面)とする。解析ケースは表-2に示すとおりである。CASE-jは、ジャッキ推力による作用荷重によって生じる地盤変位を計算するものであり、弾性解析で行っているた

表-3 有効率  $\beta_j$  の計算結果

変位の方向	着目点	押し広げ圧に関する有効率 $\beta_j$ (%)	
		ジャッキ推力 $P_j$ (tf)	
		3,000 [37.1tf/m <sup>2</sup> ]	2,000 [17.7tf/m <sup>2</sup> ]
鉛直方向変位	①	16	16
	②	17	17
	③	20	20
	④	23	24
	⑧	43	41
水平方向変位	⑤	29	28
	⑥	29	29
	⑦	35	34

注 [ ] は  $(P_j - P_0) / As$ ,  $As = 51.5\text{m}^2$ ,  $P_0 = 1090\text{tf}$  (切削面の静止土圧)

め、トンネル外周線の位置に単位荷重として  $q_j = 10\text{tf/m}^2$  を一様に作用させた。一方、CASE-tは、テールボイド部の応力解放によって生じる地盤変位を計算するものであるが、有効率  $\beta_t$  は100%として計算した。

### (3) ジャッキ推力による押し広げ圧に関する有効率 $\beta_j$

三次元解析で得られた地盤変位  $\delta_3$  と二次元解析の地盤変位  $\delta_2$  を関連づけることにより、 $\beta_j$  は次のように求められる。

$$\beta_j = \frac{10}{\frac{P_j - P_0}{As}} \cdot \frac{\delta_3}{\delta_2} \quad (4)$$

この式により、図-5に示す地盤内の各着目点ごとに  $\beta_j$  を求めた結果を表-3に示す。

これより、着目する地盤内の位置により、 $\beta_j$  の値は多少変動するが、シールド掘進による地盤変位として特に問題となるシールド上部の鉛直変位およびシールド側部の水平変位に着目すれば、 $\beta_j = 0.2 \sim 0.3$  程度とすればよいことが分かった。

### (4) テールボイド部の解放応力に関する有効率 $\beta_t$

テールボイド部の応力解放による地盤変位は、二段階解析の場合、有効率  $\beta_t$  に比例して変化する。ここで三次元解析による地盤変位を  $\delta_3$ 、二次元解析 ( $\beta_t = 100\%$ ) による値を  $\delta_2$  とすると、 $\beta_t$  は次式により求められる。

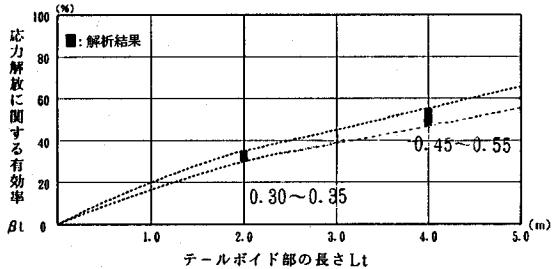
$$\beta_t = \frac{\delta_3}{\delta_2} \times 100\% \quad (5)$$

地盤内の各着目点ごと  $\beta_t$  を算出した結果を表-4に示す。これより、シールド側部地盤の水平変位に着目して求めた  $\beta_t$  の値は、着目点の位置および有効圧  $p_t$  により 15% ~ 186% と大きなバラツキを示す。

また、シールド底部の鉛直変位に対する  $\beta_t$  の値も 93% ~ 96% と非常に大きな値となっている。この

表-4 有効率  $\beta_t$  の計算結果

変位の方向	着目点	解放応力に関する有効率 $\beta_t$ (%)	
		長さ $L_t$ (m)	
		2.0	4.0
鉛直方向変位	①	31	31
	②	31	31
	③	32	31
	④	32	32
	⑧	93	96
水平方向変位	⑤	15	57
	⑥	33	72
	⑦	21	186

図-6 解放応力に関する有効率  $\beta_t$  とテールボイド部の長さ  $L_t$  の関係 (シールド径 7~10m程度)

ように、各ケースごとに地盤内の各点の変位を特定の範囲の  $\beta_t$  で説明づけることは困難である。しかし、最近では、同時裏込め注入などによりテールボイドに空洞が生じないような施工が一般的になっているため  $p_t = 0\text{tf/m}^2$  は特異なケースと考えられる。

またシールド底部の地盤変位が問題となるケースは少ないとから、 $\beta_t$  の値は次の程度とすることで実用上差しつかえないと考えられる。すなわち、テールボイド部の長さ  $L_t = 2.0\text{m}$  に対し  $\beta_t = 0.30 \sim 0.35$ 、 $L_t = 4.0\text{m}$  に対し  $\beta_t = 0.45 \sim 0.55$  程度となる。この  $\beta_t$  と  $L_t$  の関係を図-6に示す。

なお、 $L_t$  は裏込め注入材の硬化時間とシールド掘進速度により設定する。

また、 $\beta_t$  と  $L_t$  の関係は、シールド径によって変化すると考えられるので、この関係図の適用は、中山らの研究も踏まえて判断するとシールド径が 7~10m程度の場合に限定されるものと考えられる。

## 5. トンネル縦断方向の地盤変位形状の検討

シールド掘進による近接構造物への影響を予測および計測する場合に、トンネル縦断方向の地盤変位の分布が問題になることが多い。本予測手法は、シールド掘進の各段階ごとに地盤変位を計算しているが、あくまでもシールド掘進方向に垂直な横断面

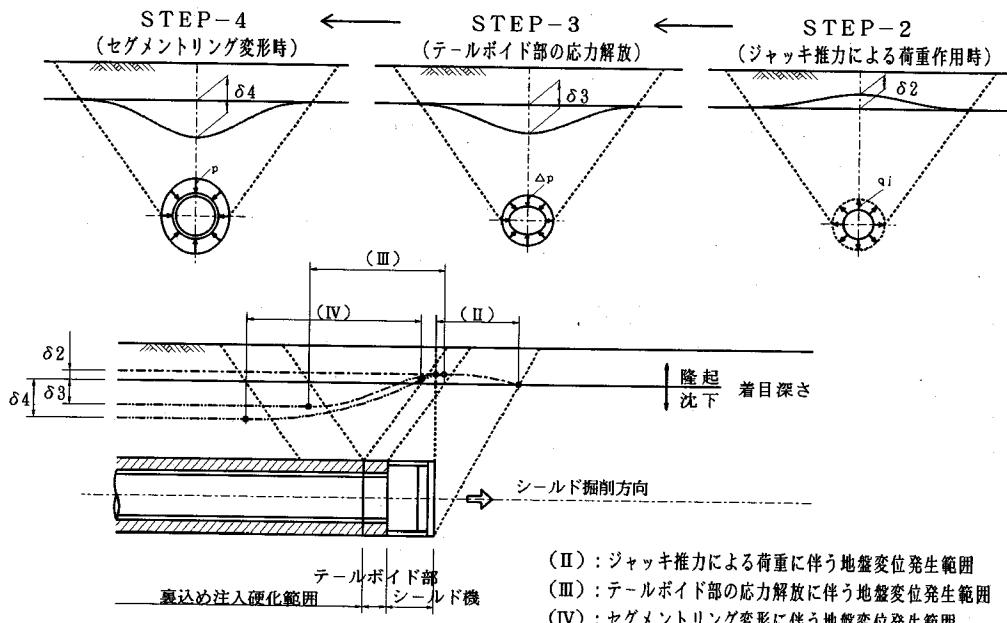


図-7 各STEPの地盤変位と縦断方向変位形状

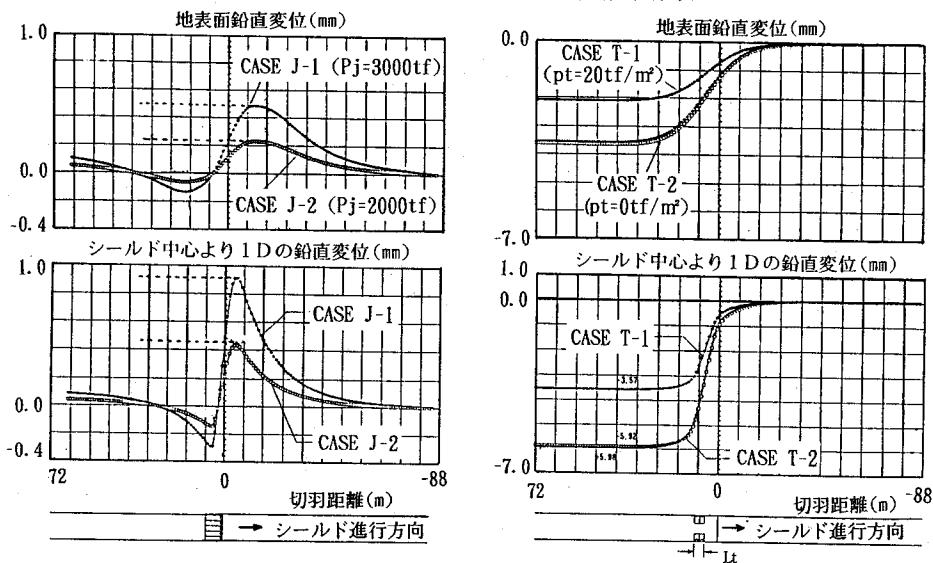


図-8 三次元有限要素法解析による地盤変位形状

を対象とした二次元解析であるため、トンネル縦断方向の地盤変位分布を直接求めることはできない。しかし、二次元解析の各段階で計算される地盤変位とシールド機との位置関係を関連付けることができれば、間接的であるがトンネル縦断方向の地盤変位分布が予測できる。

図-7は、二次元解析における各STEPの地盤変位とトンネル縦断方向の地盤変位の分布との関係を概念的に示したものである。地盤変位の発生要因としてジャッキ推力による作用荷重、テールボイド部の応

力解放、およびセグメントリングの変形を考え、二次元解析によって計算された各要因ごとの地盤変位を累積した結果を示している。ここで、[II]、[III]、[IV]の範囲をシールド機との位置関係で特定し、またその範囲における地盤変位モードを定式化することにより、トンネル縦断方向の地盤変位形状を求めることが可能となる。

三次元有限要素法によって計算されたトンネル縦断方向の地盤変位形状の一例を図-8に示す。同図(a)は、ジャッキ推力による作用荷重に対するもの

ジャッキ推力の作用荷重による地盤変位	テールボイド部の応力解放による地盤変位
<p> <math>x &lt; 0 : v_j = v_{j \max}</math>  <math>0 \leq x \leq a_j : v_j = v_{j \max} \{1 - \sin(\frac{x}{a_j} \cdot \frac{\pi}{2})\}</math>  <math>x &gt; a_j : v_j = 0</math>          ただし <math>a_j = (z + \frac{D}{2}) \tan(\frac{\pi}{2} - \alpha_j)</math> </p>	<p> <math>x &lt; -a_t - (L + \frac{Lt}{2}) : v_t = v_{t \max}</math>  <math>-a_t - (L + \frac{Lt}{2}) \leq x \leq a_t - (L + \frac{Lt}{2}) : v_t = v_{t \max} \{1 - \sin(\frac{x + L + \frac{Lt}{2} + a_t}{a_t} \cdot \frac{\pi}{4})\}</math>  <math>x &gt; a_t - (L + \frac{Lt}{2}) : v_t = 0</math>          ただし <math>a_t = (z - \frac{D}{2}) \tan(\frac{\pi}{2} - \alpha_t) + \frac{Lt}{2}</math> </p>
<p>ここに、 <math>v_j</math> : I点におけるジャッキ推力による変位量  <math>z</math> : I点のシールド中心からの高さ  <math>x</math> : I点のシールド切羽面からの水平距離  <math>v_{j \max}</math> : ジャッキ推力による変位量の最大値（二次元有限要素解析値）  <math>a_j</math> : ジャッキ推力による地盤変位の影響範囲  <math>\alpha_j</math> : 上図に示す角度 (<math>\pi/4 - \phi/2</math>)  <math>\phi</math> : 土の内部摩擦角  <math>D</math> : シールド直径</p>	<p>ここに、 <math>v_t</math> : I点におけるテールボイドによる変位量  <math>v_{t \max}</math> : テールボイドによる変位量の最大値（二次元有限要素解析値）  <math>a_t</math> : テールボイドによる地盤変位の影響範囲  <math>\alpha_t</math> : 上図に示す角度 (<math>\alpha_t = \pi/4</math>又は <math>\pi/4 - \phi/2</math>)  <math>L</math> : シールド機長  <math>Lt</math> : テールボイド部の長さ</p>

図-9 トンネル縦断方向の地盤変位形状の推定

であるが、シールド機切羽面を基準として前方で地盤が隆起しているが後方では逆に沈下する形状となっている。実際の地盤においてシールド機が連続して掘進していく場合には、前方での地盤の隆起がピーク値に近い状態で残留するものと考えられる。よって、シールド機の後方では図中に点線で示したような形状になるものと解釈することにした。つぎに、(b)は、テールボイド部の応力解放による地盤変位形状を示したものである。テールボイド部を中心としてその前後で地盤変位が変化し、その後方で一定値に収束している。このような地盤変位形状を定式化するにあたり、地盤変位の変化区間の形状をどのような関数式で近似させるか、またはその変化区

間をどのように設定するかが問題となる。前者に対しては、既往の研究例<sup>7)</sup>なども参考として、変化区間の形状を両ケースともに正弦曲線で近似させた。また後者はジャッキ推力による地盤隆起に対し、シールド機切羽下端から受働すべり面  $\alpha_j = \pi/4 - \phi/2$  を、テールボイド部の応力解放による地盤沈下に対し、テールボイドの両端から  $\alpha_t = \pi/4$  勾配線を基準に設定することにした。以上により、定式化した結果を図-9に示す。ここで、各ケースの最大変位  $v_{j \max}$ ,  $v_{t \max}$  は、二次元有限要素法による各ステップの地盤変位に基づいて設定する。すなわち  $v_{j \max}$  は(STEP-2)における値を、また  $v_{t \max}$  は[(STEP-3)-(STEP-2)]による値を用いる。なおセグメントリン

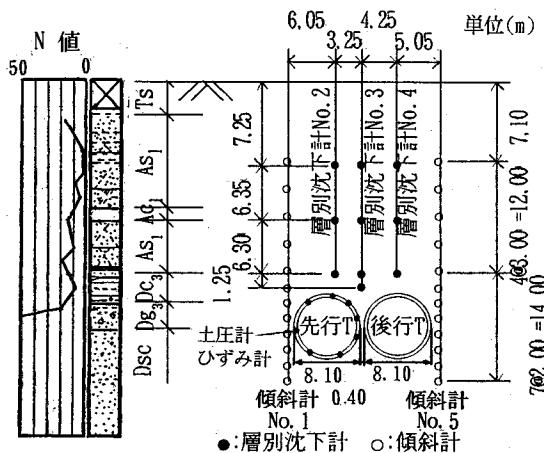


図-10 西八丁堀トンネル概要および計測器配置

表-5 解析に用いた地盤定数

土質記号	層厚 (m)	変形係数 $E$ (tf/m <sup>2</sup> )	ボアン比 $\nu$	単位体積重量 $\gamma_t$ (tf/m <sup>3</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (°)	粘着力 $c$ (tf/m <sup>2</sup> )
Ts	2.8	400	0.30	1.8	30	0
As	9.3	400	0.30	1.8	30	0
Ac	1.7	400	0.45	1.6	0	2
As	6.3	1500	0.30	1.8	32	0
Dc3	2.5	2000	0.45	1.8	0	20
Dg3	3.9	10000	0.30	2.0	34	0
Dsc(1)	5.5	15000	0.30	2.0	34	0
Dsc(2)	7.0以上	150000	0.30	2.0	34	0
地盤改良部	-	10000	0.45	2.0	38	15

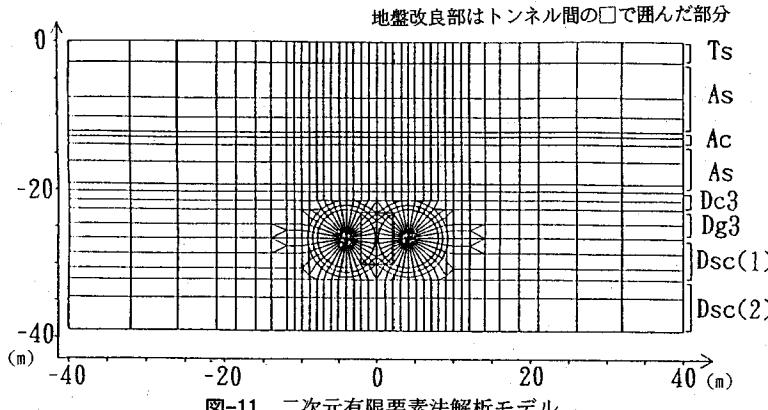


図-11 二次元有限要素法解析モデル

グの変形に伴う地盤変位については、その形状範囲を特定することが困難と判断し、定式化しないことにした。

## 6. 実用予測手法の適用性の検討

### (1) 概要

実用予測手法による結果を実際の現場の計測結果を比較し、予測手法の適用性を検討した。検討対象は京葉都心線西八丁堀トンネルで、延長約120m、トンネル外径8.1m、離隔距離が0.4~0.8mの超近接の併設泥水式シールドトンネルである<sup>8)</sup>。地質は上部有楽町層(Ac, As1)、上部東京層(Dc3)、東京礫層(Dg3)、江戸川層(Dsc)からなる。図-10に示すように、地盤変位を測定するため計測器が配置され、また先行トンネルのセグメントにひずみ計、土圧計が配置され、応力、変形が計測されている。

### (2) 解析条件と解析ケース

#### a) 解析モデルと地盤条件

解析モデルおよび層区分は図-11に示すとおりであり、節点数881、要素数884の二次元平面ひずみモデルである。境界条件はモデル鉛直面は水平固定、底面は鉛直固定とした。解析に用いる地盤定数は表-5のとおりであり、変形係数は、砂質土で $E=7N(N$ :標準貫入試験のN値)、粘性土で $E=E_{50}$  ( $E_{50}$ :一軸圧縮試験による変形係数)として設定した。なお、底面から2要素はDsc層の変形係数の10倍のものを入力している。セグメントは、「はり要素」とし、 $E=1.7 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$ 、 $A=2761 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 、 $I=3.5971 \times 0.6=2.158 \times 10^{-4} \text{ m}^4$ 、重量は $0.617 \text{ tf/m}$ とした(ダクタイルセグメント、曲げ剛性有効率 $\eta=0.6$ )。

#### b) 荷重条件

施工時の掘進記録によると、計測地点付近でのジャッキ総推力 $P_j$ は、先行シールドで約2,600tf、また後行シールドで約2,500tfであった。以上よりジャッキ総推力は、先行、後行とも計測地点付近の平均的な値として $P_j=2,500 \text{ tf}$ とし、また、押し広げ圧に関する有効率は $\beta_j=0.3$ とした。

テールボイド部に作用する圧力は、裏込め注入圧

によるものと考えた。施工記録によれば、裏込め注入材の吐出口における圧力の管理上限値は $6.0\text{kgf/cm}^2$ であったが、注入損失を考慮して50%の有効率を乗じ、 $\text{pt}=3.0\text{kgf/cm}^2$ とし、トンネル周面に等分布圧として作用させた<sup>9)</sup>。

裏込め注入材は早期に強度発現ができる材料を用いており、シールド掘進速度は4リング/日であったため、裏込め注入材の未固結による地盤の緩み範囲は2リング分( $L_t=2\text{m}$ )とした。よってテールボイド部の応力解放に関する有効率は $\beta_t=35\%$ を用いたこととした。

シールドトンネルが通過する地盤は、比較的硬質の洪積地盤であるため、完成後にトンネルに作用する土圧として緩み土圧を用いることが可能と判断できる。よって、裏込め注入材が固結したのちに裏込め材を介してセグメントに作用する荷重として、緩み土圧を用いる。先行トンネル、後行トンネルともに単一トンネルでのTerzaghiの緩み土圧を用い、作用土圧に関する有効率は $\beta_s=0.68$ とした。なお解析ステップは初期応力解析をSTEP-1、先行シールドジャッキ推力をSTEP-2、テールボイドをSTEP-3、セグメント設置をSTEP-4とし、同様に後行シールドはSTEP-5～STEP-7とした。

### (3) 解析結果と考察

#### a) 地盤変位

シールド施工による地盤変位を図-12、図-13に示す。地盤変位は、先行、後行シールドとともに計測地点より3D(D:トンネル直径)手前にシールド機の切羽面が到達したときの変位をゼロとして、それからの変化量で整理している。解析値と計測値の比較は、計測地点とシールド機の切羽面との位置関係で次の三段階についておこなっている。「ジャッキ推力」と記した変位は、解析値はジャッキ推力による押し広げ圧を作成させたときの変位(STEP-2, 5)を、計測値はシールド機の切羽面が計測点に到着したときの変位を示している。同様に「テールボイド」は、解析値はテールボイド部の応力解放を生じさせたときの変位(STEP-3, 6)を、計測値はテールボイドが計測点に到達したときの変位を、「セグメント変形」は、解析値はセグメント設置・トンネル完成時の変位(STEP-4, 7)を、計測値は切羽面が計測点より3D先に到達したときの変位を示している。

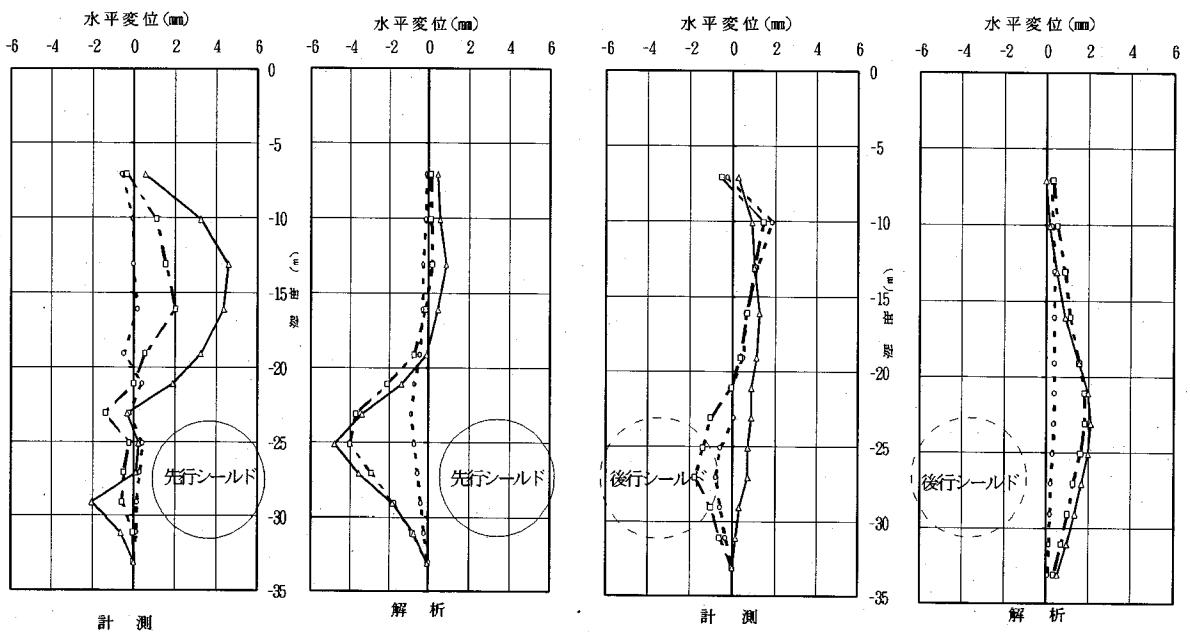
図-10に示した傾斜計NO.1とNO.5における地盤の水平変位について、計測値と解析値の比較をおこなった結果を図-12示す。解析結果によると、先行シールド施工時の傾斜計NO.1および後行シールド施

工時の傾斜計NO.5のシールドトンネル直近の鉛直面では、ジャッキ推力により、わずかではあるが、全体にシールドと反対側へ変位し、その後、テールボイド部の応力解放により、シールド付近では反対側への変位がさらに増大するのに対し、上部ではシールド側へ変位する。さらに、セグメントの変形により、変位が若干増大する傾向となる。また、先行シールド施工時の傾斜計NO.5および後行シールド施工時の傾斜計NO.1のシールドより1D程度離れた地点では、変位量は小さいが、シールドとは反対側へ変位し、シールド機の進行にともなって、増大する傾向となる。これに対し計測結果は、先行シールド施工時と後行シールド施工時では様相の異なった挙動がいくつか見られる。したがって、図示した全ての計測位置および施工段階で、解析値が計測値に一致しているとはい難い。しかし、計測の精度、シールド施工上のジャッキ推力や裏込め注入圧の変動などを考慮すれば、解析値は、変位のオーダー、分布形状、シールド機の進行に伴う地盤挙動の変化について、かなりよく計測値を説明できると判断される。

図-13は、シールド上部における地盤の鉛直変位を、水平変位と同様に示したもので、沈下計NO.2、NO.3、NO.4の計測位置は図-10に示したとおりである。先行シールド施工時の解析値は、分布形状およびその値も計測値とよく一致している。ただし、1mm程度の非常に小さい量ではあるが、ジャッキ推力により、解析値では隆起した結果となっているが、計測値では明確な隆起は見られない。一方、後行シールド施工時では、GL-19.9mにおいて、沈下計NO.3の計測値が、テールボイド通過後に、8～12mmと極端に大きくなっている。解析値とは異なる結果となっている。この原因を特定することは困難であるが、併設シールドに挟まれた部分であるため、シールド施工による地盤の乱れが重複し、大幅な強度低下が生じたのではないかと推察される。このように一部で異なるものの、鉛直変位に関して、解析値は計測値とよく一致していると判断できる。

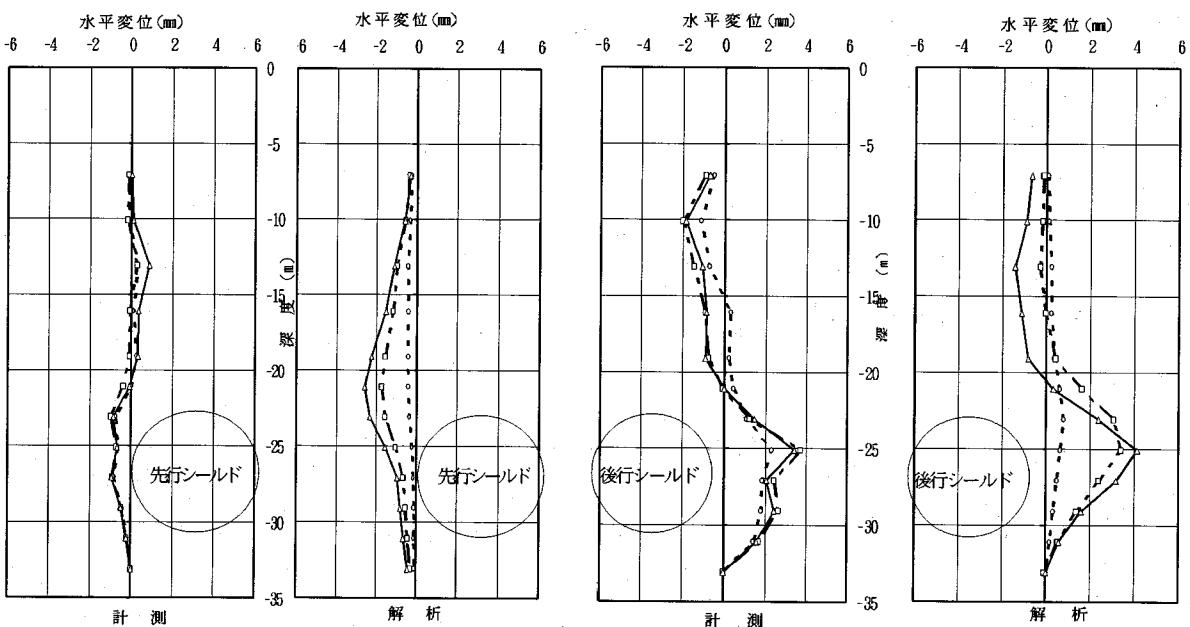
#### b) 先行トンネルの応力・変形・作用土圧

後行シールド掘進によって発生した先行シールドトンネルの曲げモーメント、軸力、トンネル内空変位、外周面土圧の変化量を、解析値と計測値を対比させて図-14に示す。なお、解析値は地盤変位と同様に施工に合せて、3段階の結果を表示したが、計測値は段階ごとに特定することが困難であったため、シールド機が完全に通過し終わった段階の数値のみ示している。



(a) 傾斜計 N.1 先行シールド施工時

(b) 傾斜計 N.5 先行シールド施工時

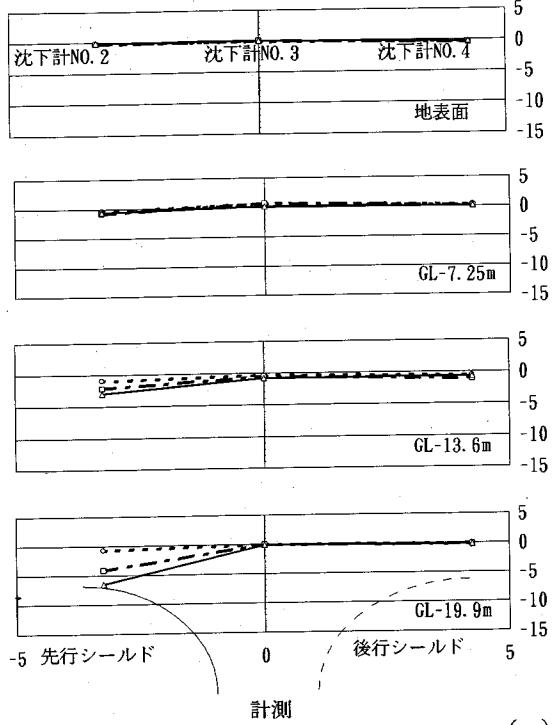


(c) 傾斜計 N.1 後行シールド施工時

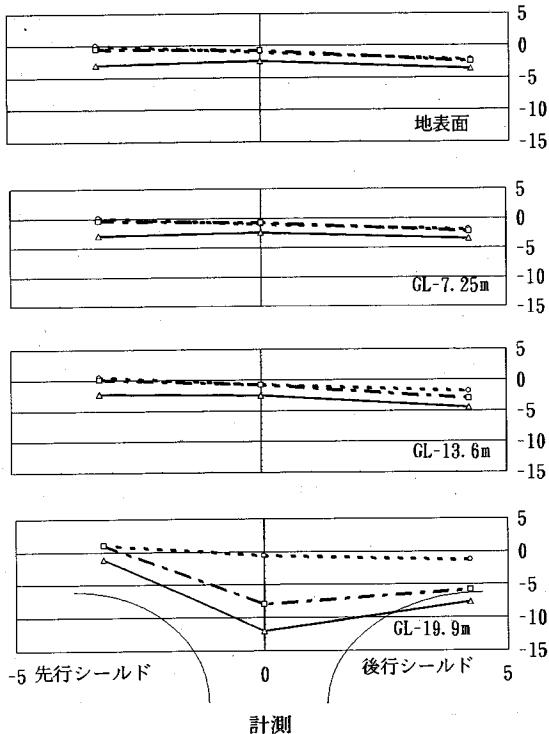
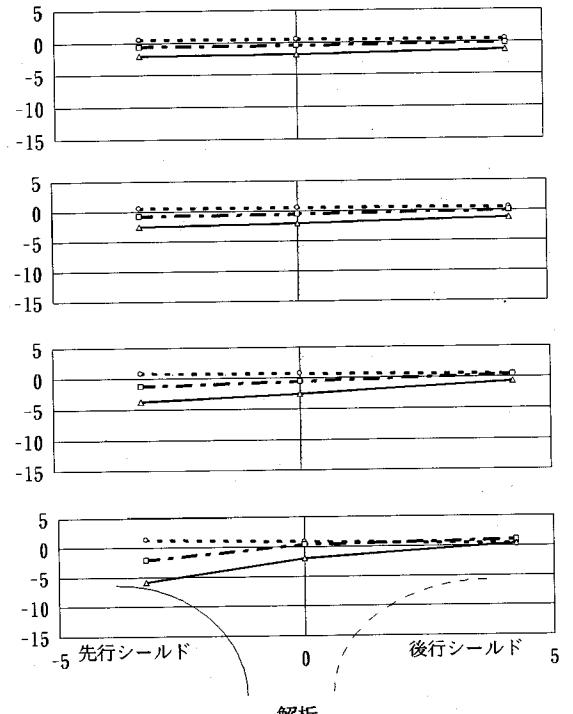
(d) 傾斜計 N.5 後行シールド施工時

-○- ジャッキ推力 [STEP-2, 5]  
 -■- テールボイド [STEP-3, 6]  
 -▲- セグメント変形 [STEP-4, 7]

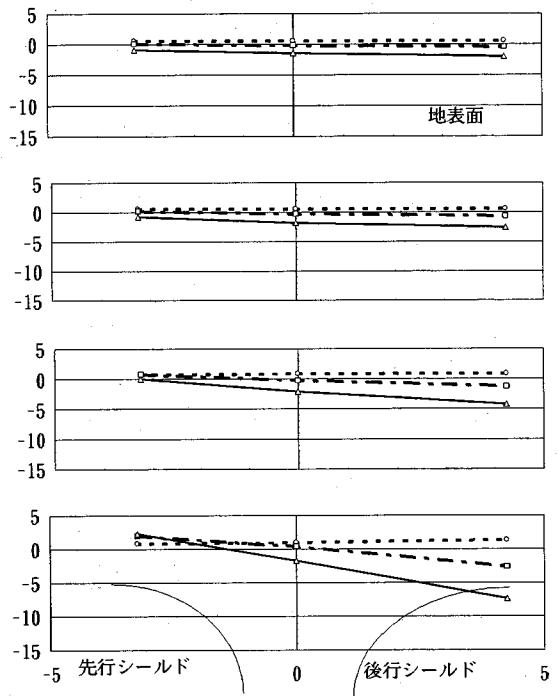
図-12 地盤の水平変位の比較



(a) 先行シールド施工時



(b) 後行シールド施工時



○ ジャッキ推力 [STEP-2.5]  
■ テールボイド [STEP-3.6]  
△ セグメント変形 [STEP-4.7]

図-13 鉛直変位の比較

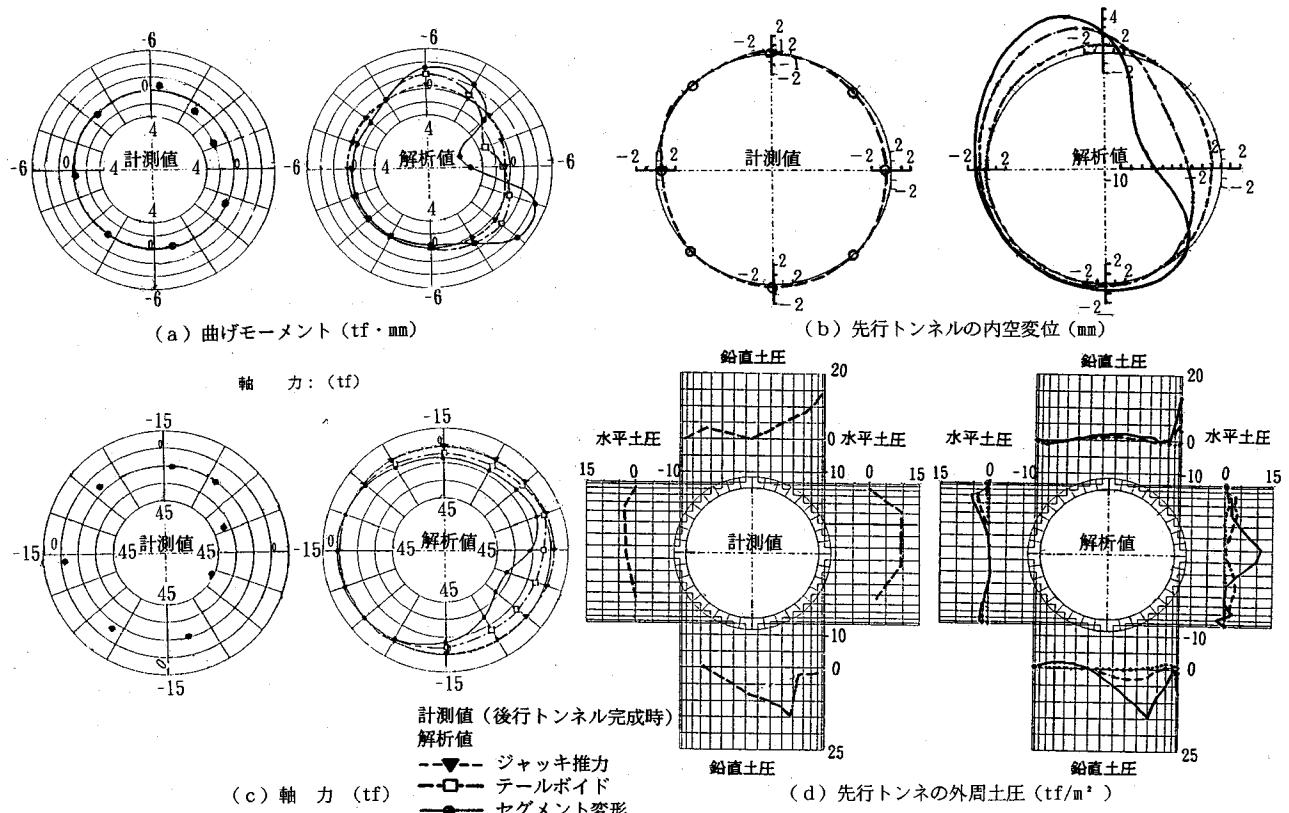


図-14 後行シールド掘進による先行トンネルの応力・変形の変化とトンネル外周面土圧の変化

これより、曲げモーメントほか図示した項目について、後行シールドの施工による先行トンネルへの影響は、後行シールド側に集中して発生しており、その反対側での変化は極めて少ないことがわかる。変化量の分布形状の詳細な比較は困難であるが、解析値は計測値の全体的な挙動をうまく説明できていると考えられる。

軸力、外周土圧の解析値は概ね計測値に一致しているが、曲げモーメント、内空変位の解析値は計測値より大きくなっているようである。

今回のような施工条件からは、後行シールド施工段階で、先行トンネルの応力および変形がかなり変化し、とくにテールボイド部の応力解放やセグメント変形による影響が大きいことが推測される。

### c) トンネル縦断方向の地盤変位

二次元有限要素法による地盤変位(ジャッキ推力、テールボイド、セグメント変形による変位)の解析値をもとに、図-9に示した推定式から得られる変位形状を重ね合わせてトンネル縦断方向の地盤変位形状を求めた。なお、セグメント変形による地盤変位形状はテールボイドによるものと同一とした。図-15に計測値との比較図を示す。推定式から求めた

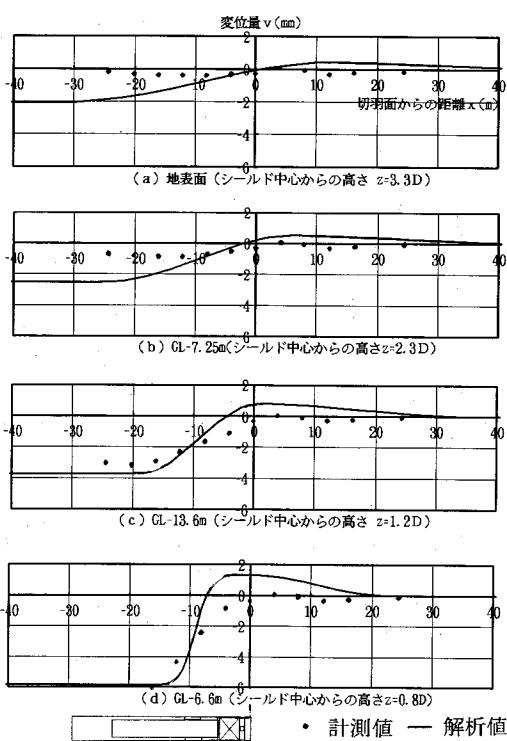


図-15 縦断方向の鉛直変位形状

ジャッキ推力による地盤の隆起量は最大1mm程度となつたが、計測では大きな隆起は測定されなかつた。これは、変位量が1mm程度と小さいため計測上の誤差範囲とも考えられる。しかし、全体として計測値の最大沈下量およびその沈下形状とも概ね一致させることができたと判断される。

## 7.まとめ

本研究では、シールド施工に伴う地盤変位の実用的な予測手法を導く目的で、地盤変位の実態を分析し、その結果にもとづいて新しい予測手法の概念を示した。そこに含まれるパラメータについては、硬質砂質地盤における泥水シールド工法を対象とし、三次元有限要素法等を用いて検討した。さらに、本予測手法の適用性を検証するため、超近接の併設シールドトンネルを対象として地盤の変位およびトンネルの応力・変形を試算し、現場計測結果との比較検討をおこなつた。

これにより、シールド施工に伴う地盤変位の発生要因として、ジャッキ推力による地盤の押し広げ、テールボイド部の応力解放および裏込め材硬化後の作用土圧によるセグメントの変形を考え、これによる地盤変位を二次元有限要素法で算出、加算していくことにより、最終的な地盤変位を求めるという実用的な手法を提案した。この中で用いている3つの有効率は、三次元的な挙動を示す地盤変位を二次元解析で評価すること、および実際の複雑な施工条件を簡易な形でモデル化することに伴う諸々の要素を補正するための工学的な係数である。今回の解析および比較対象とした現場条件の範囲では、ジャッキ推力による押し広げ圧に関する有効率 $\beta_j$ は0.2~0.3、テールボイド部の解放応力に関する有効率 $\beta_t$ は0.3~0.35（テールボイド部緩み範囲2mの場合）程度と考えられる。また、地盤変位の縦断方向の分布形状は、各要因ごとの地盤変位形状を定式化し、その地盤変位を重ね合わせることによって近似できることがわかつた。

ここに提案した予測手法は、最近の密閉型シールド工法による地盤変位の主要な発生要因をすべて考慮できる有用な手法と考えている。また適用範囲については、今回おこなつた有効率の検討および現場計測結果との比較検証における条件から、現時点では次のように考えられる。

- ・ジャッキ総推力が切羽面における静止土圧+水圧の合力に等しいか、多少大きい状態で施工される場合
- ・比較的良質な地盤における泥水式シールド工法の場合
- ・シールド直徑が7~10m程度の場合

本予測手法については、現時点では検証例が1件のみであるため、今後、土圧式シールド工法や軟弱な地盤も対象として、さらに多くの現場計測結果との比較検証をおこなうことにより、一般的な手法として、発展させていく考えである。

## 参考文献

- 1) 久武勝保、竹山橋、伊藤富雄：双設シールドトンネルによる地表面沈下の算定法とその現場への適用、土木学会論文集第332号、pp. 75-83、1983.
- 2) 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、NO481, III-25, pp. 59-68, 1993. 12.
- 3) 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、第373号／VI-5, pp. 103-112, 1986.
- 4) 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、第397号／VI-9, pp. 133-141, 1988.
- 5) 森仁司、森麟、栗原和夫、小川雄二：泥水シールドにおける切羽安定機構について、トンネルと地下、pp. 29-35, 1993. 5.
- 6) 宮川房夫、久保泰文、水谷進、吉村和彦、粥川幸司：泥水式シールド超近接施工の掘進過程を考慮した3次元FEM解析、土木学会トンネル工学研究発表会論文報告集第4巻、pp. 63-70, 1994. 11.
- 7) たとえば、久武勝保、伊藤富雄：トンネル掘削によって生じる地表面沈下の境界要素法による三次元解析、土木学会論文報告集、第327号、pp. 107-114, 1982. 11.
- 8) 川口廣、久保泰文、町田茂一、水谷進：超近接単純線並列シールドトンネルの設計・施工、土と基礎、41-5, pp. 13~18, 1993. 5.
- 9) 草深守人、吉村和彦：土圧式シールド掘進に伴う軟弱地盤の挙動、間組研究年報、pp. 25-40, 1983.

(1994. 12. 8 受付)

**NEW PRACTICAL METHOD TO ESTIMATE THE GROUND DISPLACEMENT  
CAUSED BY SHIELD DRIVING TUNNEL**

Fusao MIYAKAWA, Yasufumi KUBO, Moichi MACHIDA, Susumu MIZUTANI  
and Yasuyuki TSUBOI

This report proposes the new practical method to estimate the ground displacement caused by a shield driving tunnel. This method is based on 2-dimensional FEM analysis, and not only stress release around the tail boid but also thrust by shield jacking are considered into the calculation. Then, the authors showed that it was available for the slurry shield tunnel in the stiff sandy ground.