

# 軟弱粘性土中シールド建設時における 地盤変形現場計測データの再評価

山崎 剛<sup>1</sup>・大塚正博<sup>2</sup>・日下部 治<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京電力(株) 工務部 地中送電グループ (〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-3)

<sup>2</sup>正会員 東京電力(株) 送変電建設部 管路グループマネージャー (〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-3)

<sup>3</sup>正会員 Ph. D. 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 教授(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

軟弱粘性土中のシールド建設時における現場計測とそれに対応した遠心模型実験結果により導かれた地盤変形メカニズムの一般性を、同種地盤における既往5現場計測結果から得られた鉛直ひずみの空間分布形状により検討した。鉛直ひずみの空間分布形状は、テールボイド沈下区間と後続沈下区間のそれぞれについて、5現場共に同様な傾向が見られた。

その結果、提示した地盤変形メカニズムで、5現場で用いられたシールド工法、裏込め注入方式などの施工条件に関らず、現場計測より把握できた地盤変形形状の特徴について説明が可能であることを確認した。

**Key Words:** shield, soft clay, ground deformation mechanism, previous field data, reappraisal

## 1. はじめに

筆者らは、軟弱粘性土中をシールドが掘進する際に生じる、テールボイド発生以後の地盤変形メカニズムについて解明を試み、得られた知見を報告してきた<sup>1), 2), 3)</sup>。

具体的には、首都圏で代表的な軟弱粘性土地盤である有楽町下部層の粘性土中の泥土圧シールド工事で現場計測を行い、次に示す手順で地盤変形メカニズムを解明した。

① トンネル中心線上のトンネル直上部における、地盤の鉛直変位とセグメントの鉛直変位について、裏込め注入の有無による差異を分析した。その結果、裏込め注入の有無は地盤変形量に影響を及ぼすものの、地盤変形メカニズムには大きな違いを与えないことを確認した<sup>1)</sup>。

② トンネル中心線上の地盤の鉛直変位に加えて、トンネル側壁部における地盤の鉛直および水平変位を分析し、テールボイド発生以後のトンネル周辺地盤変形メカニズムを、テールボイド沈下と後続沈下に分けて理解した。この内、テールボイド沈下については主にテールボイド発生による沈下で、後続沈下においてはそれ以後の経時的沈下と解釈されているものであるが、それらの物理的な区分方法は明確

になっていない実情にあった。筆者らはこれに対し既往の研究<sup>2)</sup>において両者の沈下区分を明確化する方法を提案した。

③ さらに、現場計測に対応する遠心模型実験を実施し、その結果を基にシールドテールボイド発生以後の軟弱粘性土中の地盤変形メカニズムを示した<sup>3)</sup>。

本報告は、既往の軟弱粘性土中におけるシールド工事で詳細な地中内変位計測を実施した5件について再分析および再評価し、先に示した地盤変形メカニズム<sup>3)</sup>の一般性について検討したものである。

## 2. 地盤変形メカニズム

筆者らが実施した現場計測および遠心模型実験により得られた地盤変形メカニズム<sup>3)</sup>を表-1に示す。地盤変形メカニズムを構築する際に遠心模型実験において裏付けになった指標は、土層側壁から観察できる土の表面に埋め込んだ標点の変位挙動、地表面沈下、地中内間隙水圧および覆工作用圧である。

地盤変形メカニズムは、テールボイド沈下区間と後続沈下区間で大別される。さらに後続沈下区間は、トンネル軸方向に継続するテールボイド発生による、応力解放の影響の有無により2段階に分けられる。す

表-1 地盤変形メカニズム

| 沈下区分           |         | 地盤変形メカニズム  | 概要図   |
|----------------|---------|--|---|
| テールボイド<br>沈下区間 | (フェイズ1) | <p>周辺地盤は、テールボイド発生に伴う応力解放により、概ねトンネル中心に向かって変位し、テールボイドを埋める様に変形する。その挙動は、概ね二次元弾性論による無限地盤中円孔回りの地盤変形挙動を示す。</p> <p>間隙水圧は、全応力の応力解放で、周辺地盤が概ね非排水に近い状態で膨張することから、低下する傾向にある。</p>   | <p>変位 <math>u_1 &gt; u_2 &gt; u_3</math></p> <p>テールボイド</p> <p>間隙水圧低下</p> <p>掘削面</p>   |
|                | (フェイズ2) | <p>周辺地盤は、覆工(セグメント)に接触し半径方向変位が拘束された後、トンネル周りに集中した応力による弾塑性変形と、トンネル軸方向に継続し伝わるテールボイドの解放力により変形が進行する。</p> <p>その結果、側壁部においては、間隙水圧の急速な上昇による有効応力の減少、およびトンネル軸方向に伝わる付加荷重による全応力の増加により、すり鉢状にすべり面が発生する。</p> <p>すべり面より上位に位置する地盤部分は、一塊のブロックの様に、すべり面に沿って下側へ移動しようとするが、覆工に拘束されて、クラウン部の背面地盤については局所的に鉛直圧縮ひずみが卓越し、側壁部については覆工に沿った円周方向変位が発生する。</p> <p>すべり面より下位にあるインバート部の地盤は、すべり面より上位の土塊荷重により、下側に押されることにより、テールボイド沈下区間で見られたトンネル中心に向かう変位から反転して、トンネルから離れる下向き増分変位が発生する。</p> | <p>変位 <math>u_1 &gt; 0</math> (u, 掘削面変位)<br/>変位 <math>u_2 &gt; u_3</math></p> <p>すべり面</p> <p>圧縮歪</p> <p>セグメント</p> <p>周辺地盤の間隙水圧上昇<br/>正の過剰間隙水圧発生</p> |
|                | (フェイズ3) | <p>正規圧密粘土において、フェイズ2の段階でトンネル周辺地盤に発生した過剰間隙水圧が消散する過程で、地盤全体が圧密沈下すると共に、すり鉢状に発生しているすべり面に沿ったせん断変形も併せて進行する。</p> <p>特筆すべき点は、間隙水圧の低下に伴い覆工圧も低下し、覆工圧と釣り合う地盤中の全応力も低下していることである。</p>  | <p>すべり面</p> <p>間隙水圧の上昇部分</p> <p>セグメント</p> <p>周辺の隙水圧消散</p>   |

なわち、テールボイド発生以後の地盤変形メカニズムは3つのフェイズによって説明される。

### 3. 既往現場計測の再分析によるメカニズムの確認

#### (1) 分析方法

分析は、次に示す理由によりテールボイド沈下区間および後続沈下区間のそれぞれにおける、地中内変位測定点間の鉛直ひずみについての空間分布形状を用いて行うこととした。

① 鉛直ひずみが地盤変形メカニズムの特徴を良く表している指標であることは筆者らの既往研究<sup>2), 3)</sup>で明らか

にされていること。

② 既往の現場計測において共通して実施されていたのが地中内の鉛直変位計測であり、メカニズムを統一に解釈できる唯一の指標であったこと。

鉛直ひずみの空間分布は、筆者らが示したメカニズムに従えば、テールボイド沈下区間および後続沈下区間のそれぞれについて図-1に示す模式図の様に次の特徴を示す。

① テールボイド沈下区間では、裏込め注入のタイミングにより沈下速度や沈下量が左右されるが、定性的な地盤の変形形状については変わらないことが既往の研究<sup>1), 2)</sup>から判明している。定性的な地盤の変形形状は、トンネル直上においては引張ひずみが発生し、トンネル

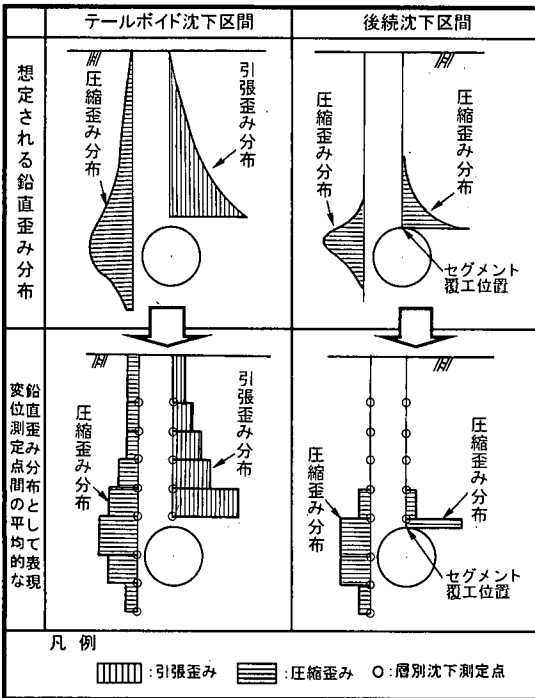


図-1 想定される鉛直ひずみ分布の模式図

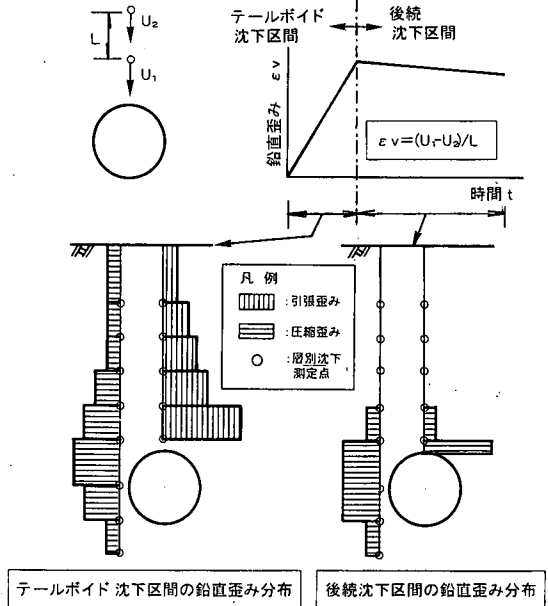


図-2 鉛直ひずみ分布図の作成手順

表-2 既往現場計測地点の概要

| 現場名称          | 施工年  | シールド工法 | 掘削径 (mm) | 土被り (m) | 掘削周辺部の土質 | N 値 | F <sub>c</sub> (%) | W <sub>p</sub> (%) | W <sub>l</sub> (%) |
|---------------|------|--------|----------|---------|----------|-----|--------------------|--------------------|--------------------|
| 城東日本橋12工区シールド | 1980 | ブラインド式 | 4,330    | 18.3    | シルト      | 2   | 81                 | 65                 | 55                 |
| 京浜潮田16工区シールド  | 1981 | 土圧式    | 5,214    | 12.4    | 砂質シルト    | 5   | 52                 | 51                 | 39                 |
| 西新2号シールド      | 1988 | 土圧式    | 3,747    | 31.3    | シルト      | 4   | 100                | 48                 | 61                 |
| 暗海シールド        | 1992 | 泥水式    | 5,710    | 42.2    | シルト      | 15  | 97                 | 58                 | 71                 |
| 浮島シールド        | 1997 | 泥水式    | 4,090    | 21.8    | シルト      | 3   | 90                 | 51                 | 63                 |

| 現場名称          | I <sub>p</sub> | OCR | q <sub>u</sub> (kPa) | ジャッキ速度 (mm/min) | 裏注箇所  | 裏注材料     | 裏注圧 (kPa) | 裏注量 (%) |
|---------------|----------------|-----|----------------------|-----------------|-------|----------|-----------|---------|
| 城東日本橋12工区シールド | 30             | 1.1 | 59                   | 25              | シールド  | セメントモルタル | 196       | 170     |
| 京浜潮田16工区シールド  | 14             | 1.9 | 98                   | 15              | シールド  | セメントモルタル | 196       | 200     |
| 西新2号シールド      | 25             | 1.5 | 132                  | 20              | シールド  | 可塑性      | 372       | 130     |
| 暗海シールド        | 32             | 1.9 | 254                  | 30              | シールド  | 可塑性      | 461       | 150     |
| 浮島シールド        | 34             | 1.4 | 127                  | 50              | セグメント | 可塑性      | 320       | 170     |

近傍が最も大きく、トンネルから離れるに従い減少する。トンネル側壁部においては圧縮ひずみが発生し、トンネル側壁が最も大きく、鉛直方向上下に離れるに従い減少する。

② 後続沈下区間では、トンネル直上においては地盤変形量が大きい場合、トンネル直近部で局所的に圧縮ひずみが発生するものの、概ね土被り部分全般にわたり、ほとんどひずみ増分を示さない。トンネル側壁部におい

ては側壁部に発生するすべり面の影響により圧縮ひずみが増加する。

なお、本来であれば、3段階のフェイズそれぞれに分けて鉛直ひずみの空間分布形状について評価すべきであるが、既往現場計測においては間隙水圧の計測を行っているものが極めて少なく、フェイズ2とフェイズ3の区分であるトンネル軸方向に伝わる、テールボイド発生による応力解放力の影響範囲が明確に把握できない。

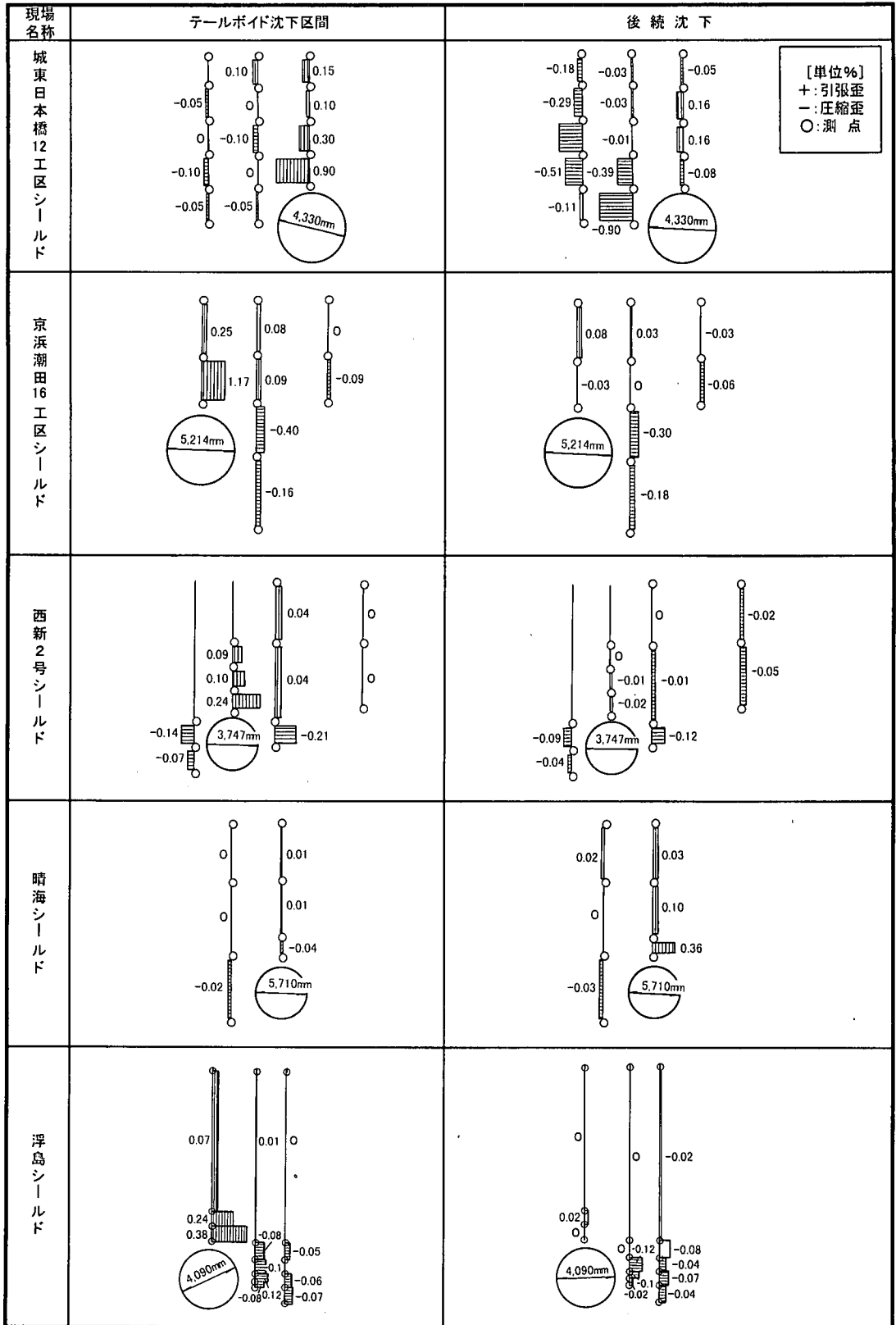


図-3 既往現場計測における鉛直ひずみ分布

この様な背景から今回の検討は、テールボイド沈下区間(フェイズ1)と後続沈下区間(フェイズ2+フェイズ3)について実施した。

分析手順は図-2に示す模式図の様に、次の手順で実施した。先ずトンネル直上かつ直近における鉛直変位 $U_1$ と $U_2$ の測定点間(距離 $L$ )の鉛直ひずみ $\epsilon_v$ に着目して、その変化点からテールボイド沈下区間と後続沈下区間の境界を定めた<sup>2)</sup>。次にそれぞれの沈下区間についてひずみ増分量を求め、最終的に鉛直ひずみの空間分布の形で整理した。

## (2) 分析対象とした現場概要

分析対象とした現場は、概要を表-2に示すように、東京電力(株)が1980年～1997年の17年間に、軟弱粘性土中におけるシールド工事でトンネル中心部と側壁部について、地中内変位計測を実施した5件である。表-2中の土質は、掘削による応力解放でトンネル周辺に集中する応力の影響を受ける、トンネル近傍の周辺地盤のものを表す。

## (3) 分析結果と評価

表-2に示した現場計測地点における、トンネル周辺部分の鉛直ひずみ分布を図-3に示す。5現場における鉛直ひずみは、テールボイド沈下区間および後続沈下区間それぞれにおいて、絶対量については異なるものの、分布形状については図-1に示す特徴が見られた。これらのことから、現場個々の条件すなわち土被り、掘削径、覆工の幾何学的諸寸法、シールド工法および裏込め注入方式の違いに関わらず、提示したメカニズムで評価することが可能であることを確認した。

したがって、表-1に示す提案したメカニズムは、現場計測における地盤中の土圧、間隙水圧および覆工土圧の実測例が無かった為にそれらを含む挙動を完全に説明できるとは言い難いものの、それらの挙動と密接に関

係する地盤変形の解釈を可能にし、複数現場の実証から一般性を持つ事が示されたものとする。

## 4. まとめ

筆者らが軟弱粘性土における現場計測と遠心模型実験により示した、地盤変形メカニズムの一般性の有無を、既往の同種地盤における5現場計測結果を再分析、再評価することで確認した。これらの再分析は、地盤変形メカニズムの特徴を良く現す鉛直ひずみの空間分布に着目して実施した。その結果、テールボイド沈下区間と後続沈下区間のそれぞれについて図-1に示す特徴が見られ、現場個々の条件に係らず提示したメカニズムで評価可能であることが確認できた。

今後は地盤変形メカニズムを追跡できる数値解析手法について既往の研究成果を取り入れながら引き続き研究を推進し開発することが課題となる。数値解析手法でのポイントは、すべり面、地盤と覆工の接触および覆工背面に沿った地盤変位の再現となる。

## 参考文献

- 1) 大塚正博, 山崎剛, 日下部治: 軟弱粘性土中シールド施工時における裏込め注入有無によるトンネル直上地盤変位の差異, 土木学会論文集, No. 624/III-47, pp. 51-64, 1999.
- 2) 山崎剛, 大塚正博, 日下部治: 軟弱粘性土でのシールドテールボイド発生による周辺地盤の変形挙動, 土木学会論文集, No. 631/III-48, pp. 311-328, 1999.
- 3) 山崎剛, 大塚正博, 日下部治, 栗原美津雄, 五十嵐寛昌: 遠心模型実験と現場計測の対比によるシールドテールボイド発生以後の軟弱粘性土地盤変形メカニズム, 土木学会論文集, No. 680/III-55, 29-48, 2001.

(2000. 3. 1 受付)

## REAPPRAISAL OF FIELD MEASUREMENT DATA OF GROUND DEFORMATION DURING SHIELD CONSTRUCTION IN SOFT CLAY

Takeshi YAMAZAKI, Masahiro OHTSUKA and Osamu KUSAKABE

The authors deduced the ground deformation mechanism during shield construction in soft clay from a set of field measurement data and corresponding centrifuge tests. Applicability of the ground deformation mechanism deduced was confirmed by the data of the spatial distribution of vertical strains around the tunnel, obtained from five different shield construction sites, where these shields were driven through the same soft clay, called the lower Yurakucho layer.