

軟弱粘性土中シールド施工時における裏込め注入の有無によるトンネル直上地盤変位の差異

大塚正博¹・山崎 剛²・日下部 治³

¹正会員 東京電力(株)地中送電建設所 副所長(〒108-0023 東京都港区芝浦4-19-1)

²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)

³正会員 Ph.D. 東京工業大学教授 工学部土木工学科(〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1)

有楽町下部粘性土中の泥土圧式シールド工事の3断面において周辺地盤とセグメントの変位を長期に亘り計測し、シールド通過時、テールボイド発生時およびそれ以後について、トンネル中心線上の鉛直変位を対象に、特に裏込め注入有無による影響を定量的に検討した。その結果、適切なチャンバー内圧管理によって切羽部での地盤変位は軽減させられること、セグメント鉛直変位は周辺地盤の鉛直変位に比べ小さいこと、および裏込め注入の有無によってテールボイド沈下量と沈下速度は影響を受けるが、後続沈下速度には大きな影響を与えないことが明らかとなった。

Key Words : tunneling, shield, ground deformation, backfill grouting, tail void, field measurement

1. はじめに

近年、世界各都市で都市機能の向上を目指し、地下空間の高度利用を伴う再開発が行われておらず、既設の都市機能を保持しつつ新たな地下建設を行うためにシールド工法がしばしば選択される。そうした中、既設構造物のストック量の増大、さらには地下空間利用の需要増大を背景として、シールドと既設構造物との近接施工の頻度は増加している。

既設構造物に悪影響を与えないように新設シールドトンネルを建設するための必要な技術は、設計時における周辺地盤への影響予測技術と施工時における掘進管理技術の2点に集約されよう。前者についてはFEMを用いた地盤変形解析が、後者については情報化施工が、現在の技術を支える中心的な手法になっている。筆者らの一人山崎¹⁾はこれらの最近の知見を解説的にとりまとめている。両手法の予測精度を向上させるためには、シールド掘進に伴う地盤変形メカニズムの的確な把握と理解、および解析精度の検証が可能となるデータの蓄積が極めて重要である。

地盤変形メカニズムの解明は、従来から現場計測、模型実験および数値解析を駆使して検討が行われてきており、山田ら²⁾は森の初期的研究から1985年までの国内の研究を総括し、藤田³⁾は軟弱地盤中の掘削およびトンネル建設時の地盤変形について現況報告を行っている。既往研究の中で注目すべきは、小林⁴⁾、平田⁵⁾および吉田⁶⁾が、それぞれ現場計測、模

型実験およびFEM解析等を用いて行った研究であろう。他にFEM解析では、施工過程を取り込む努力も行われている⁷⁾。

海外においてもシールド建設に伴う地盤変形のメカニズムの解明と地盤変形が与える既設構造物への影響についての検討が継続的に行われ、それらの最近の成果は、2つの国際シンポジウムに集約されている^{8), 9)}。国際シンポジウムの文献によれば、沈下の要因として現場計測から①シールドの接近、②シールドの通過、③テールの通過と裏込め注入、④圧密の4項目が挙げられている^{10), 11)}。この様にシールドとの相対位置関係で沈下要因を整理していることから、シールド建設による地盤変形に関する認識は、海外においても我が国のそれとほぼ同様であることが伺える。

これら既往研究では、裏込め注入の影響を含む現場計測結果が用いられているが、本来地盤変形メカニズムを評価するためには、先ず裏込め注入の影響を含まない地盤変形を理解し、次に裏込め注入による地盤変形の抑制効果を理解することが望ましいと考えられる。

しかしながら、裏込め注入効果を含まない現場計測を行うことは、周辺地盤の変形を抑制する目的でも採用されるシールド工法の本来の目的からして、通常の実施工においては極めて難しい。然るに既往研究の中では、現場計測において地盤変形の裏込め注入の有無による影響に着目した研究は少なく、裏込め注入量を変化させ、それに対応する沈下量の変

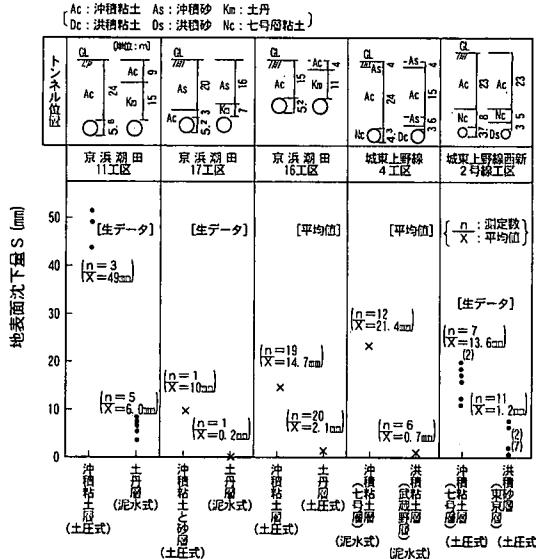


図-1 地盤条件による地表面沈下量の違い

化を観察することで注入効果が評価されている。

これら既往の研究に対して筆者らが今回行った新しい取組み事項は、シールド掘進に伴う地盤変形メカニズムの解明を目的に、裏込め注入の有無が地盤変形に与える影響を、現場計測結果の直接比較を通して評価したことである。加えて、掘進中の計測データから得られた知見についても記述する。

2. 既往計測事例における地表面沈下の検討

地盤変形メカニズムの把握において重要な研究対象は、地盤条件としては軟弱粘性土、沈下発生時期としてはテールボイド発生以後であると考えられる。これを既往の計測事例から検討してみる。

(1) 地盤条件の違いによる地表面沈下量の差異

東京電力㈱が1980年～1995年の15年間に、詳細な地表面沈下計測を実施したブラインド型および密閉型シールド工事15件の計測データを再検討し、地盤条件が著しく異なる隣合う工事5件を抽出して地表面沈下量の発生傾向を比較した。その結果は図-1に示すとおりで、いずれにおいても相対的に軟弱な沖積粘性土中のシールド工事における地表面沈下量の方が他の地層と比べ平均値で7～50倍大きくなっていることが確認される。

さらに、地盤条件の変化の違いが地表面沈下量の違いとして顕著に現れている現場（城東上野線管路3, 4, 5工区）の沈下分布を詳細に見てみると図-2に示す状況となり次の2点が明らかである。

① 地表面沈下量は、掘削対象地盤が下部有楽町層

の沖積粘性土(N=0)、七号層の粘性土(N=4)および上部東京層の砂質土(N=20)の順に大きい。

② 沈下量は、下部有楽町層を通過する場合でもトンネル底面から固い武蔵野層までの距離が深い程大きい。すなわち軟弱粘性土中に包み込まれる状態でトンネル断面が位置する場合が大きくなる。

上記に見られる計測事実から、シールド工事において地盤変形が実務的課題となる可能性の高いのは、軟弱な粘性土地盤かつ、トンネルが軟弱粘性土に包み込まれて位置している状態であるということが確認される。このことは、地表面沈下量はトンネル側方と下方の地盤構成の影響を強く受けることを示している。

(2) 沈下発生時期

掘進に伴い発生する沈下は、土木学会トンネル標準示方書（シールド編）¹²⁾によればシールドとの相対位置で区分されている。軟弱粘性土における沈下は、国際土質基礎工学会の軟弱地盤中の地下建設に関する研究委員会(TC-28)が実施した既往文献に基づく事例調査¹³⁾によれば示方書で区分された中で、テールボイド発生以後に生じる「テールボイド沈下」と「後続沈下」の合計が全体沈下の約80%を占める結果となっている。この文献を加えた、軟弱粘性土でのシールド工事に関する既往文献(ブラインド式5件、土圧式8件、泥水式2件)^{14), 15), 16)}に報告されている15工事の沈下データから「テールボイド沈下」と「後続沈下」の全沈下量に占める割合を調査したところ、結果は図-3に示すように、テールボイド発生以後に生じる沈下量が全体の約90%を占める結果となった。

この事から、地盤変位の予測精度向上のためには、先ずテールボイド発生以後の地盤変形メカニズムを把握する事が重要であると判断される。

3. 軟弱粘性土における地盤変形メカニズムの現行の考え方と課題

軟弱粘性土における地盤変形メカニズムは、圧密沈下解析と層別沈下計を用いて開放型およびブラインド型シールド現場の実測結果を比較した森・赤木の研究¹⁷⁾によりしばしば実務では解釈されている。すなわち、①「テールボイド沈下」は、応力解放に基づく弾塑性沈下であるとし、②「後続沈下」は、応力解放に起因する地盤のせん断変形のために発生する正の過剰間隙水圧上昇と消散による再圧密沈下現象として捉えることである。しかし、深さ方向の鉛直変位の発生速度や分布形は必ずしも、圧密過程では解釈できない事例も報告されている（桑原・小林）¹⁸⁾。さらに、再圧密後に地盤内応力が、掘削以

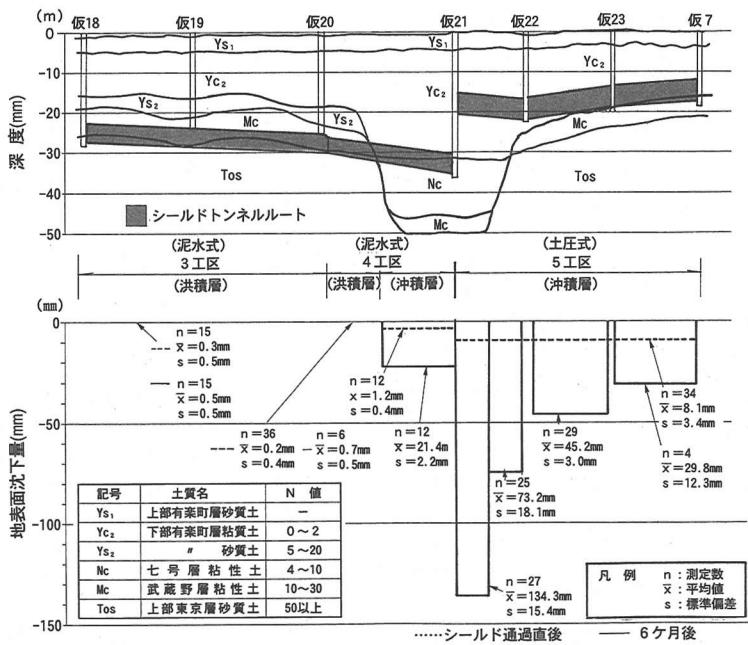


図-2 地盤条件の変化に伴う地表面沈下量の差異

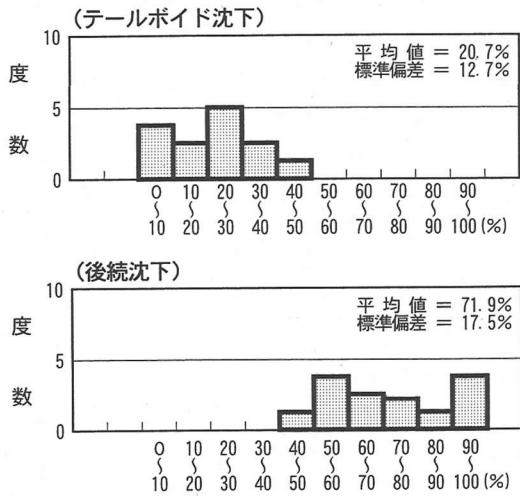


図-3 テールポイド沈下と後続沈下の沈下比率

前の応力状態に回復するか否かは、ライニングの排水条件によっても左右されると考えられる。このことは、非排水状態における側圧比と排水状態における側圧比が異なることからも、排水条件の違いが応力状態に影響を及ぼすことが予想される。

筆者らが軟弱粘性土地盤での現場計測で得た、層別沈下、地中内土圧および間隙水圧の各種データか

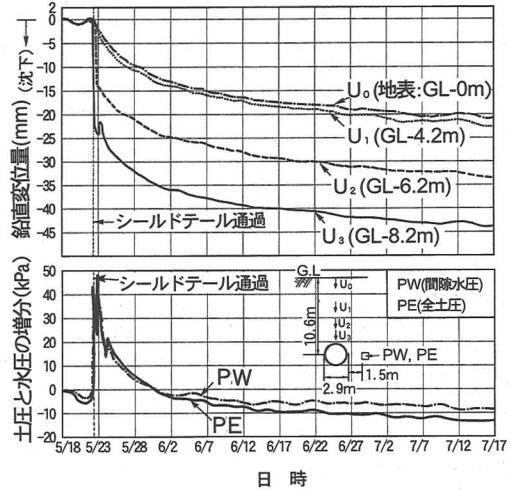


図-4 沖積粘性土での層別沈下と土水圧の計測例

らは、後続沈下区間において全応力が初期状態に回復する結果は得られていない。図-4は、下部有楽町層の沖積粘性土をブラインド型シールドで施工した現場（墨東本所連系管路）において、シールド到達前の変化が見られない5/18を初期値とした場合の、トンネル直上部における地盤の鉛直変位、トンネル側方部における土圧増分および間隙水圧増分の経時

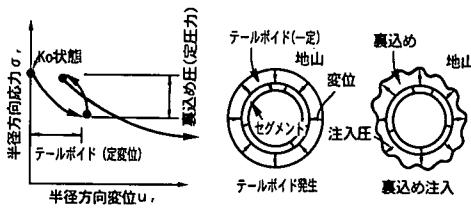


図-5 テールボイド発生と裏込め時の地盤挙動概念図

変化を示している。これによれば、概ね6月以後の後続沈下領域においては、沈下と共に間隙水圧が低下しているものの、同時に土圧計で計測された全応力も初期値以下に低下しており、その差である有効応力の変化は全応力の変化に比べ小さいことがわかる。すなわち、後続沈下過程を過剰間隙水圧の消散過程における圧密現象としてのみ捉えることには困難があることが予測できる。さらに、これと同様な現象は平田¹⁹⁾が実施した沖積粘土層に位置する、大阪市地下鉄4号線高井田シールドにおける土圧と間隙水圧の計測結果にも現れている。

また実用面では、「テールボイド沈下」と「後続沈下」の境界の定義が明瞭になっておらず、両沈下の地盤変形メカニズムと整合性をとった境界の決定方法が必要である。実際の予測解析^{20), 21)}においては、「テールボイド沈下」と「後続沈下」を個別に求めて合計することで総沈下量を評価する設計事例が見られる。この場合、両沈下区間の境界を決定した後、テールボイド沈下量を二次元FEM解析によりシミュレートし、次工程の影響予測に必要な掘削解放率を決定している。したがって、両沈下区間の境界決定のあいまいさが予測精度に影響することになる。このことから、影響予測解析において両沈下の地盤変形メカニズムと整合性をとった境界の決定方法の確立が期待される。

このように沈下現象の現行解釈に用いられている、「テールボイド沈下」と「後続沈下」を区分して別々のメカニズムで解明・評価しようとする考え方の有用性は認めつつも、依然として地盤変形メカニズムには、より詳細に解明すべき課題が残されていると考えられる。

4. テールボイド発生以後における地盤挙動の推定と裏込め注入効果の分離評価

筆者らは、沈下の大半を占めるテールボイド発生以後に着目し、トンネル周辺の地盤挙動と裏込め注入の関係を図-5に示す概念図を基に考察した。

テールボイド発生は、ある一定のトンネル内空変位を与える定変位の除荷過程としてモデル化されよう。裏込め注入は、軟弱地盤においては多くの場合、

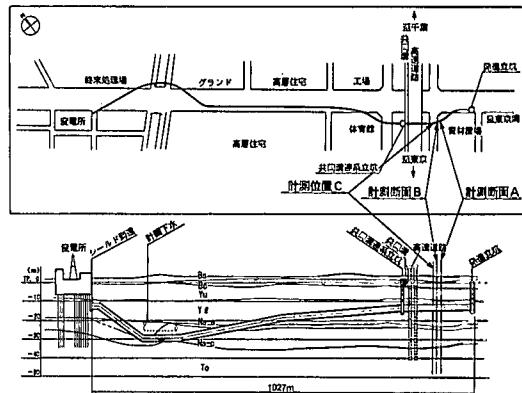


図-6 ルート平縦断面と計測位置

注入中の定量管理の結果得られる注入圧力の載荷過程と理解される。裏込め注入後に計測された地盤変位は、その2つが合成された現象として現れていると考えられる。したがって、メカニズムを正確に理解するためには、裏込め注入による効果を分離し、評価することが必要となる。そこで、現場計測において、裏込め注入実施の有無による、地盤変位速度を比較してみることで、裏込め注入の影響を見るとした。

5. 現場計測による地盤とセグメントの挙動

(1) 工事概要

現場計測の対象としたシールド工事は、電力地中洞道として掘削外径(D) $\phi 3.63\text{m}$ の泥土圧型シールド(テールボイド厚65mm)で施工したものである。掘削地盤は、主に有楽町下部層の沖積粘性土(Y₁層: N値=0~2, w_n=66%, w_L=65%, I_p=30, q_v=98kPa)である。

(2) 計測計画

計測は、2-(1)に記述した理由から、シールドトンネルが軟弱であるY₁層に包み込まれた位置について3断面(A, B, C)を行うこととした。各計測断面間の離隔は、トンネル軸方向に関する相互干渉を考慮すると、概ねトンネル下端深さ以上は確保すべきであると考えるが、今回は地上からの計測器が設置可能な中で極力離隔をとって決定した。計測断面における土被り(C)は約15mであることからC/D=4.1となる。

工事の平縦断面における計測位置および計測器配置は、それぞれ図-6, 7に示すとおりである。図-7には、その地点での土質試験結果も併せて示してある。現場計測にあたり工夫した箇所は、地盤変位とセグメントの相対的な変形挙動を計測するために、層別沈下計による地盤の絶対変位測定に併せてセグメントの絶対変位を計測したことである。

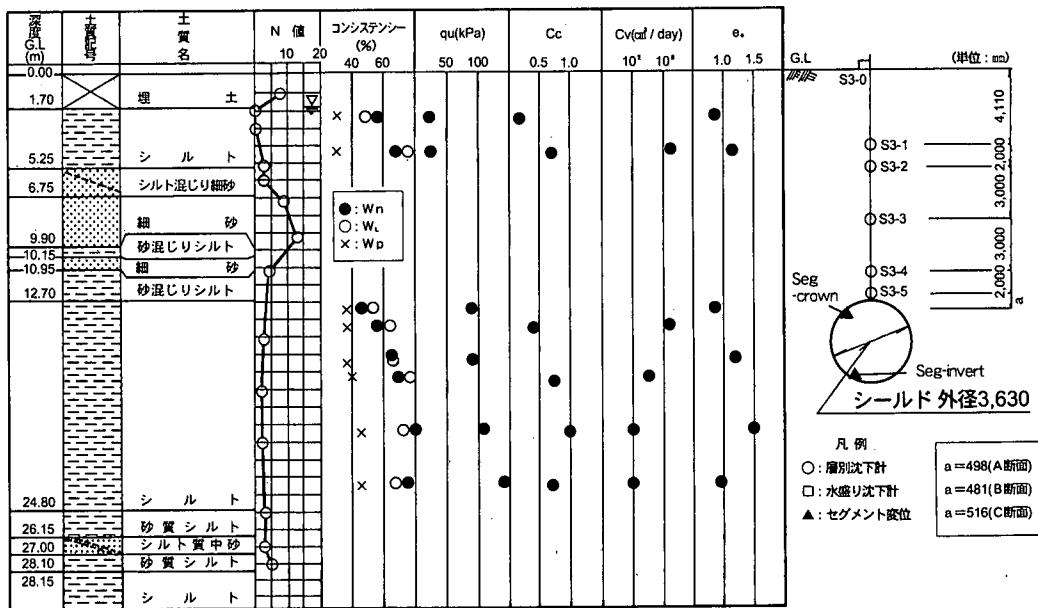


図-7 計測器配置図(断面A, B, C共)

表-1 掘進条件および裏込め注入条件

計測断面	A	B	C	単位
平均切羽圧	223	229	239	(kPa)
平均掘進速度	28	21	40	(mm/min)
テールボイド平均発生速度 (q)	20	15	29	(1/min)
裏込め注入平均速度 (v)	37	0	53	(1/min)
平均裏込め注入率(v/q)	182	0	183	(%)

3断面のそれぞれにおける、掘進条件および裏込め注入条件は、表-1に示すとおりであり、特徴を次に示す。

- ① 計測断面をシールドが通過している時の平均的な切羽圧は、A, B, C断面の順で大きくなっている、それぞれ223, 229, 239kPaであった。
- ② 計測断面A, Cにおいては、テールボイドが発生する時に同時に裏込め注入を実施している。A断面の平均掘進速度は28mm/minであり、C断面の40mm/minに比べ遅いものの、掘進速度に比例するテールボイド発生速度に対応して裏込め注入速度を調節しているため、裏込め注入率は概ね180%で同様な値となっている。
- ③ 計測断面Bについては図-8に示すように、裏込め注入未実施区間としてセグメント2リング分(1リング1.2m)を設けた。

裏込め未実施区間の具体的施工は、次に示す手順で実施した。

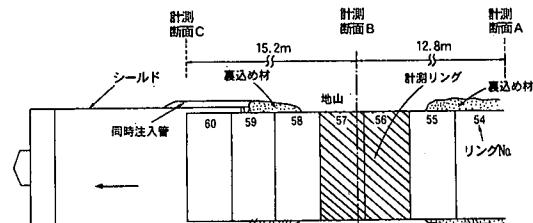


図-8 裏込め未実施区間の施工方法

- ① 56リング掘進中までは通常の同時に裏込め注入を実施した。
- ② 次に、57～59リング掘進中において裏込め注入を実施しなかった。すなわち計測断面Bの位置に該当する56と57リングのセグメント区間が裏込め未実施範囲となるように設定した。
- ③ その後、60リング掘進中において同時に裏込め注入を再開し、61リングを280mm掘進した時点の9月22日0:00に掘進を停止し本掘進に備えての段取り替えに入った。
- ④ 10月5日の掘進停止中に、近傍に埋設されているガス管への影響が懸念されたため56, 57リングのセグメントグラウトホールから2m³の裏込め注入を実施した。注入率を注入量/理論テールボイド量で定義

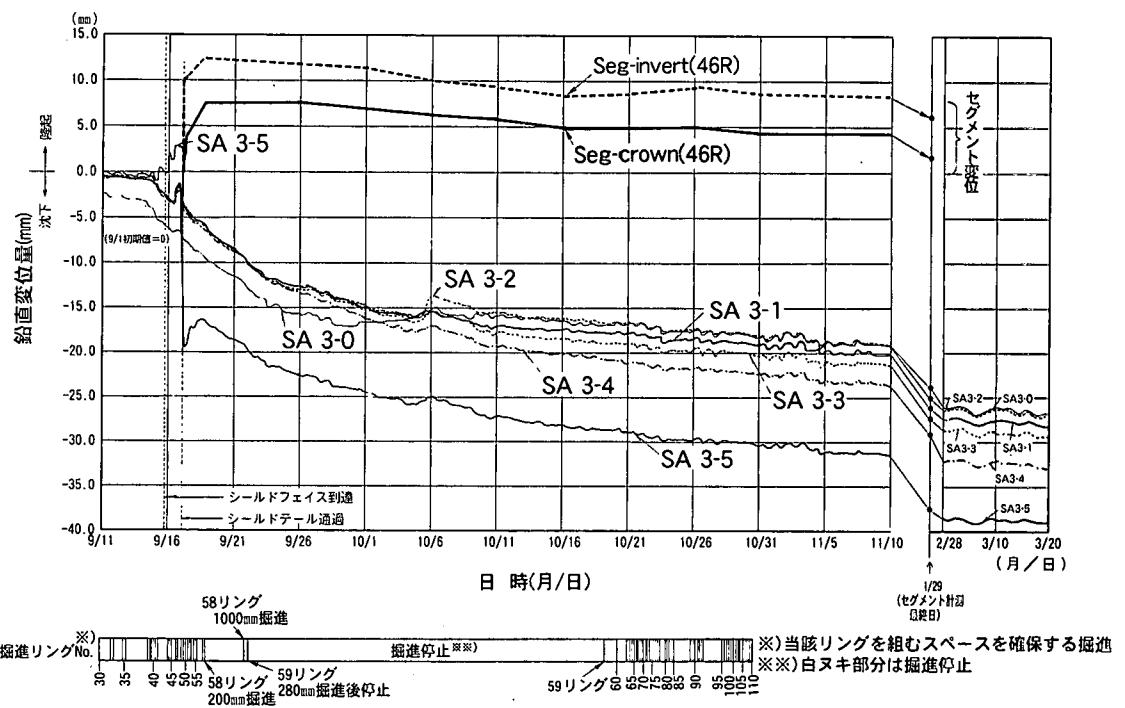


図-9 トンネル中心線上の地盤変位とセグメント変位（計測断面A）

すると、シールド外径 $\phi 3.63m$ 、セグメント外径 $\phi 3.50m$ 、セグメント2リング分(56・57リング)の2.4mに対する理論テールボイドは $1.746 m^3$ となる。したがって注入率(λ)は、 $\lambda = \text{注入量} / \text{理論テールボイド量} = 2 / 1.746 = 115\%$ となる。また、この時の注入圧(p)は、 $p = 245kPa$ であった。

(5) 10月20日に本掘進への段取り替えが終了して、同時に裏込め注入をしながら掘進を再開した。

(3) 計測結果

a) 裏込め注入区間（計測断面A, C）

同時に裏込め注入区間に於ける、トンネル中心線上の直上部の鉛直地中変位とセグメントの変位は、断面Aについて図-9、断面Cについては図-10に示すところである。なおSA3-0は、断面Aにおける鉛直変位測定点S3-0を示す。

(地盤挙動)

シールドフェイスが計測断面に到達してからテールを通過するまでの鉛直地中変位は、A, C断面共にトンネルに最も近いS3-5測点のみ顕著な隆起が見られ、それより浅いS3-0～S3-4測点は沈下傾向にある。S3-5測点の最大隆起量は、フェイス到達付近を基準値とすると相対的に、A断面で3mm、C断面で21mmとなっており、C断面の方が大きくなっている。

シールドテールが計測断面を通過した後の鉛直地中変位は、A, C断面共、テール通過直後に急激に沈下

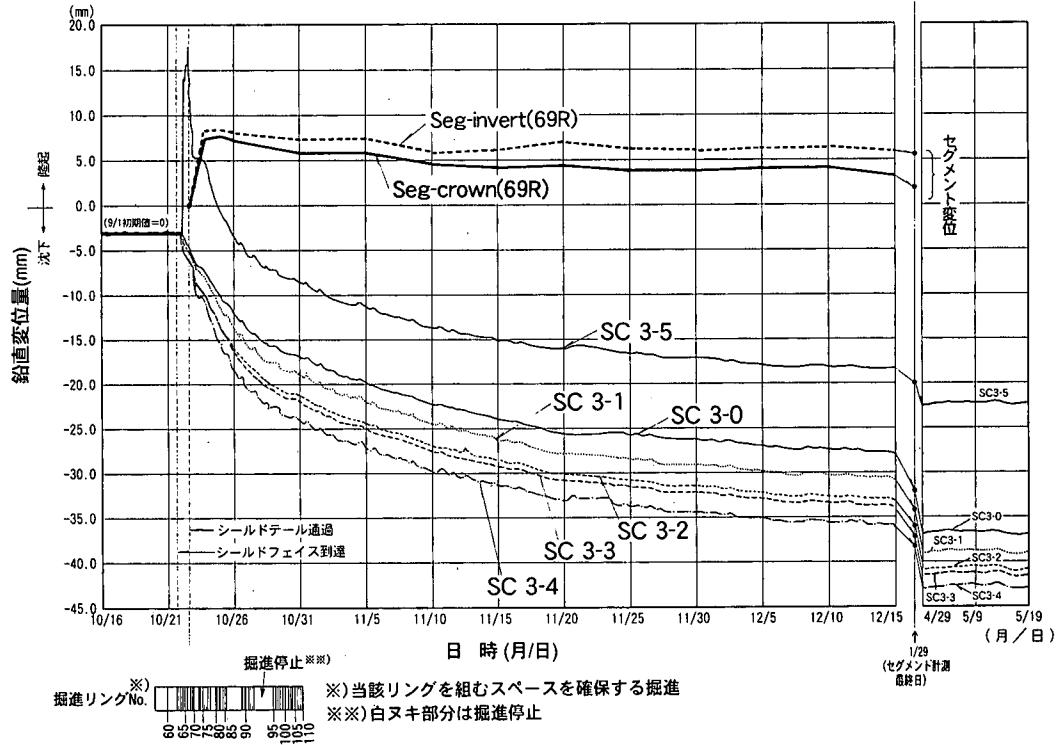
し、その後は時間と共にゆっくりと沈下している。なお、図-9に示した計測断面Aにおいて10/5～10/6附近で1～2mm程度の隆起が見られる。この現象は、図-9の沈下傾向からもわかるように一時的なもので地盤変形モードを変えるものではないが、10/5にB断面において実施したセグメントからの裏込め注入が影響しているものと考えられる。B断面で実施した裏込め注入率は、 $\lambda = 115\%$ であり、既往実績²²⁾の平均注入率 $\lambda = 143\%$ に比べ決して過大な値ではない。さらに裏込め注入圧も、 $p = 245kPa$ であり、森らが提案²³⁾している割裂圧 $p_r = 500kPa$ よりも1/2程度小さい値である。なお、割裂圧は以下のように求めた。計算式を選定する条件として径比(R)が

$$R = (2H + D) / D = (2 \times 15 + 3.63) / 3.63 = 9.3 \leq 10$$

となることから、割裂圧は次式により算出した。

$$\begin{aligned} p_r &= \sigma_3 + (0.90 \cdot \ln R + 0.73) q_u \\ &= \gamma_t \cdot H + (0.90 \cdot \ln R + 0.73) q_u \\ &= 15.68 kN/m^3 \times 15m \\ &\quad + (0.90 \times \ln 9.3 + 0.73) \times 98 kN/m^2 \\ &= 235 + 268 = 503 kN/m^2 \approx 500 kPa \end{aligned}$$

ここに、 H ：土被り(15m)
 D ：掘削径(3.63m)
 σ_3 ：拘束圧(森らは土被り圧で評価)
 q_u ：一軸圧縮強度
 γ_t ：単位体積重量



この様に裏込め注入率および注入圧とともに通常の範囲にあることから、A断面の一時隆起は、B断面において透水係数が極めて小さい軟弱粘性土である周辺地盤が変形し、テールボイドが埋まった後での裏込め注入であったことが要因ではないかと考える。すなわち、比較的逸走し易いと考えられる、セグメントと地盤の境界を裏込め材料が伝わることによって影響したものと予測する。

テール通過直後に急激に沈下し、その後は時間と共にゆっくりと沈下する傾向は、従来から軟弱な粘性土の現場計測で得られる結果を追認する形となっており、一般的に前者を「テールボイド沈下」、後者を「後続沈下」と呼んでいる。

テールボイド沈下の特徴は、テール通過時点の隆起量もしくは沈下量を基準値としてそれからの相対沈下量で評価すると、特にC断面が明瞭であるがA,C断面共、トンネルに近い計測点の順なわちS3-5～S3-0の順で沈下量が大きくなっていることである。そこで、図-11に示す様に沈下量とトンネル中心からの距離の関係を両対数で見ると概ね負の傾きを有する直線で近似できることから、弾性論による二次元円孔周りの変位分布、すなわち変位量が円孔中心からの距離に反比例することが確認された。

これに比べ後続沈下の特徴は、S3-0～S3-5の地中各点における変位経時変化が概ね平行状態で推移し

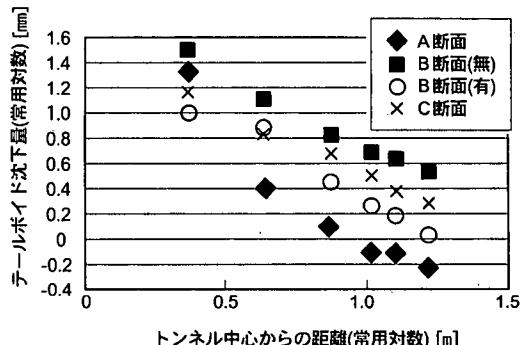


図-11 トンネル周囲のテールボイド沈下分布

ていることである。すなわち、S3-0～S3-5の各々の区間で地盤が顕著な変形を生じることなく経時変化しており、先のテールボイド沈下の様な弾性論では説明が付き難いことである。

さらに、テールボイド沈下と後続沈下の境界は、A断面についてはSA3-5のシールドテール通過後に沈下速度の急激な変化点が明瞭な形で現れているが、C断面についてはSC3-5のシールドテール通過後に沈下速度の明瞭な変化点が現れていない。この様なことからも統一的なメカニズムの評価を行うためには、境界の客観的決定方法が必要とされる。

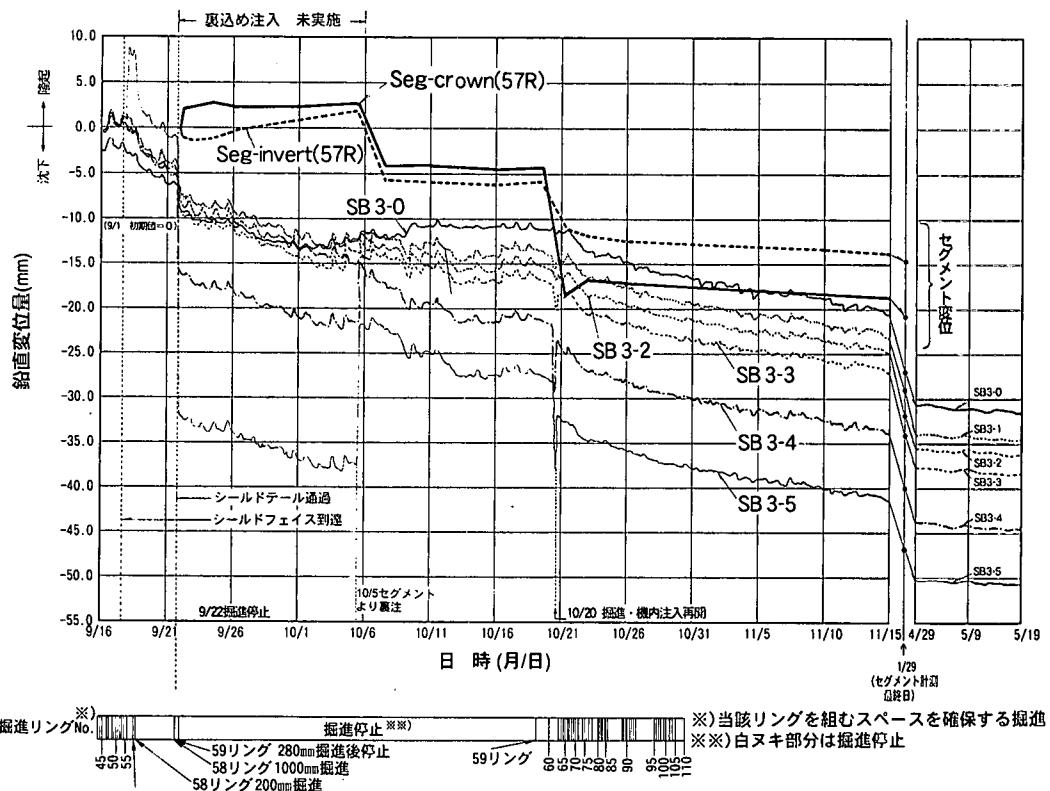


図-12 トンネル中心線上の地盤変位とセグメント変位（計測断面B）

(セグメント挙動)

セグメント変位は、A,C断面とも同様な挙動を示しており、テール通過直後にクラウンとインバートは共に急激に隆起した後、定性的には地盤変位と同様に時間と共にゆっくりと沈下した。しかしながらセグメントの沈下量は、A断面においては9/18～1/29の間でセグメント変位6mmに対しSA3-5地盤変位で21mm、C断面においては10/23～1/29の間でセグメント変位5mmに対しSC3-5地盤変位で25mmとなり、最も近傍にある測定点の地盤変位に比べ小さいことがわかった。

b) 裏込め注入未実施区間（計測断面B）

裏込め注入未実施区間における、トンネル中心線上の直上部の鉛直地中変位とセグメントの変位は、図-12に示すとおりである。

(地盤挙動)

シールドフェイスが計測断面に到達してからテールを通過するまでの鉛直地中変位は、トンネルに最も近いSB3-5測点のみ顕著な隆起が見られ、それより浅いSB3-0～SB3-4測点は沈下傾向にある。SB3-5測点の最大隆起量は、フェイス到達付近を基準値とする相対的に8mmで計測断面A(3mm)と計測断面C(21mm)の中間の値となっている。

シールドテールが計測断面を通過した後の鉛直地

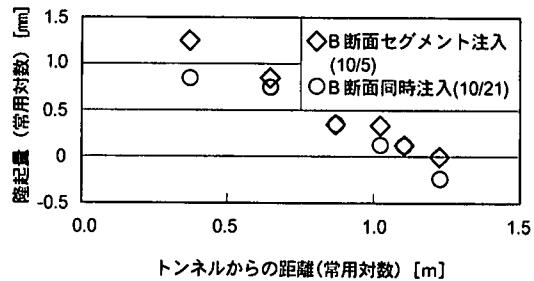


図-13 トンネル周りの隆起量分布

中変位は、テール通過直後に急激に沈下し、その後10/5のセグメントからの裏込め注入時点まで、時間と共にゆっくりと沈下している。これらシールド掘進に伴うテールボイド沈下および後続沈下の挙動は、裏込め注入区間であるA,C断面と定性的には同様な傾向となっている。

10/5のセグメントからの裏込め注入によって、直上の地盤は一旦急激に隆起をするものの引き続き時間と共に沈下する。隆起量はトンネル近傍ほど大きくなっている、図-13に示す様に隆起量とトンネル中心からの距離の関係を両対数で見ると、沈下の場合と同様、負の傾きを有する直線で近似でき、円孔中心

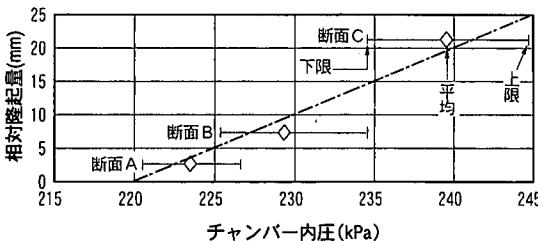


図-14 相対隆起量とチャンバー内圧の関係

からの距離に反比例する傾向となる。

10/20の掘進再開直後に再度急激に沈下した後、同時裏込め注入の影響を受けて一旦急激に隆起し、その後A,C断面と同様な後続沈下を継続する。

(セグメント挙動)

セグメント変位は、テール通過直後においては裏込め注入を実施していないせいか急激な隆起は見られず、クラウンが2mm程度隆起しインバートは1mm沈下しているがいずれも量は極めて小さい。その後10/5のセグメントからの裏込め注入時において急激に沈下し、10/20の掘進再開直後に再度急激に沈下した後、地盤変位と同様に時間と共に、ゆっくりと沈下する。セグメントの変位量は、裏込め注入区間のA,C断面と同様、最も近傍にある測定点SB3-5の地盤変位に比べ小さいことがわかった。

6. 現場計測結果の分析

(1) シールド通過中に発生する隆起現象

トンネル直上の地盤変位は、計測断面にシールドフェイスが到達してからテールボイド発生による沈下に移行するまでの間、A,B,C断面ともトンネル近傍が局所的に顕著な隆起現象を示す。

この現象は、シールド通過中において掘削土量に比べ取り込み土量を少なくすると、シールドフェイス前面の土が受働状態となることに起因するものと考えられる。隆起量とチャンバー内圧の関係は図-14に示すとおりであり概ね比例関係にある。このことは吉田²⁰および岸尾²⁵も既に現場実測データに基づき指摘していることであり、現状の知見を追認する結果となった。

図-14より隆起量が0mmになる時のチャンバー内圧は、外挿により概ね220kPaとなることが予測される。一方、初期静止土圧係数 K_0 は、太田・飯塚による提案²⁶を筆者らが実験により確認した²⁷、塑性指数($PI=30$)を基に算定する式(1)(2)により、0.59($OCR=1.1$)と予測できる。

$$K_i = K_0 (OCR)^{0.54} \exp(-PI/122) \quad (1)$$

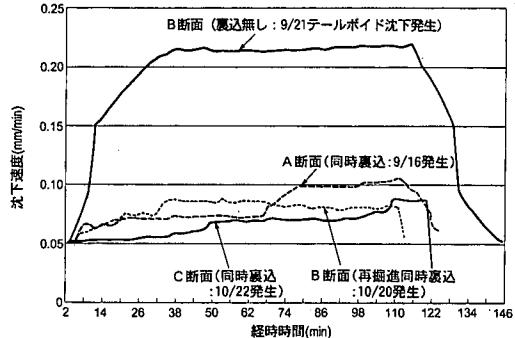


図-15 テールボイド沈下速度の比較

$$K_0 = 0.44 + (0.42 \cdot PI) / 100 \quad (2)$$

のことから、チャンバー内圧測定位置における地盤の側方全応力は、側方有効土圧74kPaと水圧141kPaを加えた215kPaと想定され、先の外挿値と概ね同様となる。

したがって、シールド通過中の地盤変位を抑制するためのチャンバー内圧は、概ね初期状態の側方全応力が適当であることが理解される。

(2) テールボイド発生以後の沈下現象

裏込め注入の有無に係らず、いずれの計測断面においても、テールボイド発生直後に生じる「テールボイド沈下」と呼ばれる沈下速度が早い区間に続き、「後続沈下」と呼ばれる沈下速度の遅い区間が長期的に継続することが判明した。両者の物理的意味と境界を定義する方法は今後の課題とするが、テールボイド沈下区間で発生している明らかに早い沈下速度と後続沈下区間で発生している遅い沈下速度に着目し、トンネルに最も近く影響の大きいS3-5測点を対象に、裏込め注入の有無が与える影響を分析した結果を以下に記述する。

a) テールボイド沈下区間

2分毎の沈下速度の時間変動を図-15に示す。これによれば、裏込め注入率約180%の同時注入を施したA,Cおよび本掘進開始後のB断面における沈下速度は、概ね0.05~0.10mm/minの範囲にある反面、裏込め注入未実施区間のB断面では概ね0.22mm/minとなっており、裏込め注入を実施した場合に比べ約2~4倍沈下速度が大きくなっていることがわかる。

b) 後続沈下区間

沈下の経時変化が概ね指数分布形状を呈することから時間軸を常用対数で評価したところ、図-16に示すように沈下-時間関係が直線近似することができた。その直線勾配すなわち後続沈下速度(V_r)を調査したところ A,Cおよび同時裏込め注入を実施した以後のB断面で、それぞれ12.2, 13.8および14.8となり、

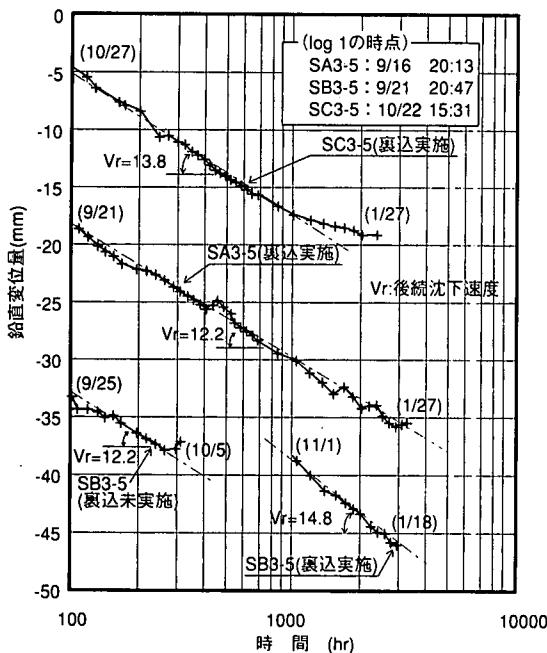


図-16 後続沈下速度の比較

有意な差異が認められなかった。さらに、B断面で裏込め注入未実施区間での後続沈下速度は12.2となり、裏込め注入を実施した場合の沈下速度と顕著な差異が認められないことも判明した。

のことから後続沈下速度は、シールド通過時やテールボイド沈下区間において発生する、掘削や裏込めを起因とする地盤変形履歴の影響を大きく受けないことが伺える。この点については、地盤変形メカニズムの解明によっても説明できなければならぬと考える。

(3) 各計測断面における地盤変位の総括比較と総合考察

裏込め注入の有無によるトンネル直上地盤変位の差異について総括比較を行った。具体的には、裏込め注入を実施したA,C断面とB断面における裏込め注入未実施区間の地盤変位について、裏込めの影響が大きいS3-5測点に着目し、シールドフェイス通過時点の沈下量を0とした時の沈下量増分の経時変化を、図-17に示す様に比較した。さらに図-5に示した応力変位の概念図にシールド通過時の状況を加筆して対比できる形とした。

シールド通過時の隆起区間(T_1)、テールボイド沈下区間(T_2)および後続沈下区間(T_3)における各計測断面の値を比較できる形で表-2に示す。

以上の知見を基に、シールド通過に伴って発生するトンネル直上の鉛直方向地盤変位を、応力変位概念図(図-17)に照らし合せて考察する。

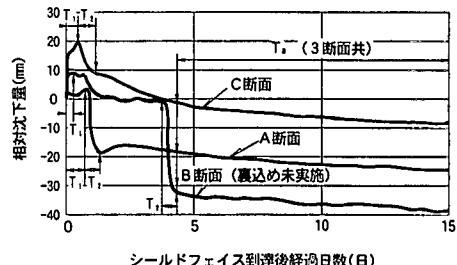
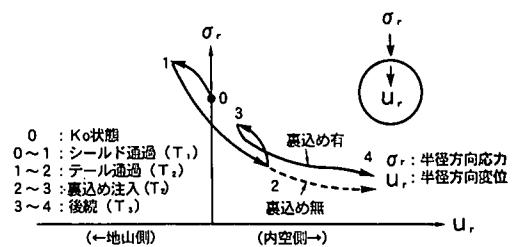


図-17 計測断面毎の沈下量比較

表-2 各計測断面における沈下量と沈下速度の総括

区間	項目	断面A	断面B	断面C	単位
T_1	隆起量	3	8	21	mm
T_2	沈下量	22	31	12	mm
	沈下速度	0.05 ~0.10	0.22	0.05 ~0.10	mm/min
T_3	沈下量	7	7	7	mm
	沈下速度	12.2	12.2	13.8	図-16のVr

a) シールド通過区間(T_1)

シールド通過区間(T_1)においては、図-17に示すように、トンネル半径方向応力 σ_r が K_0 状態から増大し、トンネル上部の地盤を押し上げることで、トンネル半径方向の地盤変位 u_r が隆起現象を示す。地盤を押し上げる要因としては次の3項目が挙げられる。

① シールドが周辺地盤を押し分けながら進むことに起因する隆起現象で、シールド前面部の土圧とシールド鋼殻部スキンプレートの摩擦状態が隆起現象を左右すると考えるもの。この現象は先端閉塞された杭が打設される際に周辺地盤を押し分ける現象に類似しているものと考えることができる。

② ①の内、シールド鋼殻部スキンプレートと周辺地盤の摩擦によるものが隆起現象の要因として卓越すると考えるもの。

③ シールドが掘進の際、計画線形やテールクリアランスを確保するために操作する姿勢制御の内、縦断方向の施工管理指標であるピッチングが隆起現象

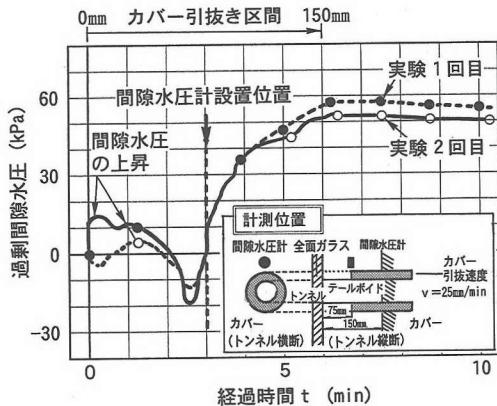


図-18 テールボイド発生を模擬した遠心模型実験での過剰間隙水圧の経時変化

の要因であると考えるもの。

既往の研究によれば、吉田が①と②について要因として取上げている²⁸⁾ものの、②がシールド通過中に発生する隆起現象の主要因と想定して、引き続き武田らと数値解析的検討²⁹⁾を実施している。その数値解析により、シールド通過中に発生する沈下・隆起現象は、シールド鋼殻部スキンプレートと周辺地盤の摩擦係数、切羽面の泥水圧およびテールボイド量の見積りに大きく左右される結果を得ている。さらに、②については森らが重力場における縮尺模型実験³⁰⁾を用いて影響を評価しており、シールド鋼殻部スキンプレートが粗い境界面を有するとした場合において隆起現象の発生を確認している。但し実験での隆起発生位置が実験土槽端面近傍であることから、隆起量には、土槽端面においてトンネル軸方向の土の動きを拘束することによる隆起量増加の影響も含まれていそうなことが観察される。筆者らはシールドテールボイド発生過程を模擬した遠心模型実験³¹⁾から、森らと同様な視点で、シールド鋼殻部スキンプレート通過に伴う間隙水圧の変化について評価を行った。図-18に示す結果から、土槽中央に設置した間隙水圧は、スキンプレート引き抜きに伴い上昇しており、森らが行った実験の地盤隆起傾向により、間隙水圧の上昇も説明できる。したがって①および②は、シールド通過に伴う隆起現象に影響する要因であると考えることができる。要因の一つである切羽土圧と隆起量との間には、図-14に示した様にある程度の相関を得ている。

一方、③については、軟弱粘性土地盤において、大倉ら³²⁾は現場計測結果を用いて、赤木⁷⁾らは現場計測とFEMによる数値解析結果を比較しながら、ピッ

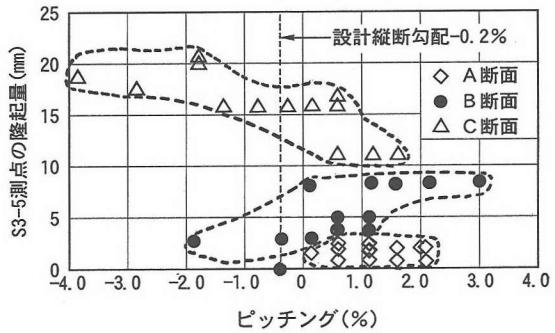


図-19 ピッティングと隆起量の関係

ングと沈下・隆起現象の関係について考察している。大倉らは、トンネル直上1mの位置での地盤変形量を、計画線形勾配とピッティングの差に対してプロットし、シールドの姿勢が計画線形に対して下向きの場合に地盤が隆起しやすいと考察している。赤木らは、安田らが報告したマサ土の泥水式シールド工事における考察³³⁾を参考にして、軟弱粘性土地盤でシールドが上向きに掘進しピッティング角度が増加する状況における、クラウンとインバートの地盤応力の増減について予想している。筆者らもこれら既往論文の様にシールドの姿勢制御により周辺地盤が影響を受けることについては定性的には同様な認識に立っている。しかしながら、今回の計測断面におけるピッティングと隆起量の関係を図-19に示すが、計測断面BとCでは相反する傾向にあり、総じて両者に顕著な相関は見られなかった。加えて、次に示す三つの理由から、③をシールド通過中に発生する隆起量の単調増加現象の主要因とすることについては慎重な検討が必要であると考えている。

第一に、密閉型シールドは、重量物である面板とその駆動機器類が先頭にある。然るに、シールドの重心はガーダー部の前方にあり、トップヘビーな構造であることは明らかである。加えて後胴式の場合の掘進力は、重心位置より後方にあるジャッキが固定されたリングガーターに伝達される。このため、シールド掘進中はトップヘビーな機械を後方から押して計画線形となる様に、ジャッキパターンを選択しながら操作することになる。したがって掘進過程においては、シールド静止中に先頭がノーズダウンした機械を、掘進開始時に立て直すためピッティングが増大し、掘進中においても掘進速度等に応じてピッティングが変化し、掘進終了後は再びノーズダウンしてピッティングが減少する傾向が一般的である。このように1リング掘進中においても変化を繰り返すピッティングで、単調増加傾向にある隆起現象を説明するためには、制御の背景となつた理由も明確にして、より細部に亘る分析が必要となる。

第二に、シールド掘進中においては、セグメント端面(スプレッダー部分)が回転軸となり、姿勢制御の結果ピッチングが生ずるわけである。然るに同じピッチングであっても、カッター部、ガータ部およびテール部でそれぞれ上下方向への変位量は異なることになる。このことから隆起量は、同じピッチングであっても、計測断面とシールドの相対位置関係によって異なることが予想される。したがって、ピッチングが及ぼす周辺地盤への影響を評価する上では、ピッチングに計測断面とシールドの相対位置関係を取り込んだ分析が必要となる。加えて、中折れ角度を変化させて掘進させた場合はこの評価も必要となろう。

第三に、シールド掘進中においては鉛直面内での姿勢制御(ピッチング)を行うと同時に、水平面内での姿勢制御(ヨーイング)も併せて行うので、周辺地盤はピッチングのみでなく、ヨーイングによっても影響を受けることになる。したがって、ピッチングで成立した鉛直変位(沈下・隆起)との因果関係が、同時にヨーイングと水平変位についても成立することを確認しなければならない。

以上のことから筆者らは、シールド通過区間(T_1)における隆起の要因は、現段階においてはシールドの押し抜けに影響する「切羽面での圧力」と「シールド鋼殻部スキンプレートと周辺地盤の摩擦係数」が主要因であると考えている。なお「シールド姿勢制御」の影響は、否定しないものの、主要因の一つとしての判断は、上述した三つの視点での詳細分析を経て評価したいと考えている。

なお筆者らは、既往の計測実績でテールボイド発生以後の変位が大きいことから、テールボイド発生以後の地盤変形メカニズムを先行して解明することが重要であると判断している。その前段に発生するシールド通過による影響は、テールボイド解放前のトンネル周辺地盤における応力の初期状態を規定するもので、テールボイド発生以後の地盤変形メカニズムを左右するものでないと考えている。

b) テール通過区間および裏込め注入区間(T_2)

テール通過区間と裏込め注入区間は、テールボイド発生と裏込め注入が概ね同時に行われることから明瞭に分離できないが、地盤変形の現象をわかりやすくするために、概略分けて説明する。

テール通過区間(T_2)においては、図-17に示すように、トンネル半径方向応力 σ_r がテールボイドの発生で減少することにより、トンネル半径方向の地盤変位 u_r が沈下現象を示す。テールボイド発生による沈下の影響は、計測断面とテール通過位置の相対関係を詳細に観察すると、シールドのテールエンドが計測断面を通過する位置よりも少し前から生じている。これはテールボイド発生の影響がトンネル軸方向に

も作用しているためと思われる。

裏込め注入区間(T_2)においては、図-17に示すように、テールボイド発生によるトンネル半径方向応力 σ_r の減少が裏込め注入により抑制され、表-2に示すように、裏込め未実施時に比べ沈下量および沈下速度とも低減される。この沈下抑制効果は、応力解放の早い段階で裏込め注入するほど大きいことが予想される。さらに裏込め注入量を増加させると、地盤と裏込め注入層の境界での σ_r が増大し、地盤変位 u_r がトンネル近傍ほど顕著に、かつ一時的に隆起傾向になるが、掘進に伴い再びゆっくりと沈下する傾向となる。

c) 後続沈下区間(T_3)

後続沈下区間(T_3)においては、トンネル半径方向の地盤変位 u_r が長期的に沈下している。この原因究明については、トンネル周辺地盤全体の変形メカニズムから総合的に考察すべきであり、今後の課題としたい。

後続沈下速度(V_r)は、表-2に示す計測結果から、掘進方法や裏込め注入の有無などの施工方法に左右されず概ね一定となった。なお、一般に後続沈下には、テール通過以後も継続する掘進によって生じる応力解放のトンネル軸後方への影響による沈下と、トンネル軸方向に応力解放の影響を受けない領域での長期的沈下の両方が含まれていると考えられる。本論文の図-16に示した後続沈下速度(V_r)は、後者の掘進によって生じる応力解放の影響を受けないと思われる領域のもので評価している。

7. まとめ

今回筆者らが収集解析した既往の現場データおよび既往文献から、次の2点が指摘できる。

- ① シールド掘進時に発生する沈下量は、トンネルが軟弱粘性土中に包み込まれて位置している状況で大きい。密閉型シールドの場合、沈下の大部分がテールボイド発生後に生じていることが判明した。
- ② 軟弱粘性土における地盤変形メカニズムについては、「テールボイド沈下」と「後続沈下」を区分して別々のメカニズムで評価・解釈しようとしている現行の考え方の有用性は認めつつも、後続沈下過程における圧密現象の論拠となる間隙水圧の低下に対し、全応力も共に低下している事例の存在や、「テールボイド沈下」と「後続沈下」の境界と物理的な意味など解明すべき課題が残されている。

さらに、今回実施した現場計測の内、トンネル中心線上の直上部の地盤変位およびセグメント変位から得られた知見をまとめると次に示すとおりとなる。

- ① シールド通過中に発生する隆起量は、概ねチャンバー内圧に比例する。この関係から隆起量を無く

すためのチャンバー内圧を外挿すると概ね初期状態における側方全応力に相当する。

② テールボイド発生以後に生じる沈下モードは、裏込め注入の有無に係わらず同様で、ボイド発生直後に生じる「テールボイド沈下」と呼ばれる沈下速度が速い区間に続き、「後続沈下」と呼ばれる沈下速度の遅い区間が長期的に発生する。

③ テールボイド沈下量は、裏込め注入を実施しない場合、実施した場合に比べ約1.5~2.5倍大きくなる。

④ テールボイド発生以後に生じる沈下速度は、テールボイド沈下については裏込め注入を実施しない場合、実施した場合に比べ約2~4倍速くなる反面、後続沈下速度については注入の実施有無に係わらず概ね同様である。

⑤ セグメント変位量は、長期的には地盤と同様に沈下傾向を示すが、裏込め注入の有無に係わらずセグメント近傍の地盤変位量(S3-5)に比べ小さく20~30%程度である。

8. 今後の課題

シールド掘進に伴う地盤変形メカニズムの解明を最終目的として、今回既往計測および文献を基にメカニズム解明の対象について絞り込みを行うと共に現場計測を実施し、トンネル中心線上の直上の地盤変位に着目して裏込め注入の有無を視点に考察した。

その結果、目的達成のために残った課題は次に示すとおりである。

① 「テールボイド沈下」と「後続沈下」の境界の決定方法について物理的にも明瞭な定義を確立する。

② 両者の沈下に対する各々の地盤変形メカニズムを理解する。

これらの課題は、お互いに表裏の関係にあるものと考えるが課題を解決するためには、現場計測の全体評価、すなわち今回のトンネル中心線上の直上沈下に加えて側方部の地盤挙動について分析し総合評価を行う必要がある。

参考文献

- 1) 山崎剛:シールド工法の調査・設計から施工まで「9.2.1, 地盤変状の予測解析」地盤工学・実務シリーズ3, pp. 424-434, 1997.
- 2) 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.
- 3) 藤田圭一:基礎工からみたシールド工法, 基礎工, pp. 2-14, 1983. 10
- 4) 小林健郎:シールド掘削に伴う地盤変位に関する研究,

東京大学学位論文, 1982.

- 5) 平田武弘:密閉式シールド掘削に伴う軟弱粘土地盤の挙動と施工技術に関する研究, 京都大学学位論文, 1989.
- 6) 吉田保:シールド掘進に伴う地盤及び構造物挙動と近接施工に関する研究, 法政大学学位論文, 1994.
- 7) 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, pp. 59-68, 1993.
- 8) Proc. of Underground construction in soft ground, Fujita & Kusakabe ed., Balkema, 1995.
- 9) Proc. of Geotechnical aspects of underground construction in soft ground, Mair & Taylor ed., Balkema, 1996.
- 10) Kastner, R., Ollier, C., and Guibert, G.: In situ monitoring of the Lyons Metro D line extention, Proc. of Geotechnical aspects of underground construction in soft ground, pp. 701-706, 1996.
- 11) Moh, Z-C, Ju, D. H. and Hwang, R. N.: Ground movements around tunnels in soft ground, Proc. of Geotechnical aspects of underground construction in soft ground, pp. 725-730, 1996.
- 12) 土木学会:トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説, pp. 198-200, 1977.
- 13) 野本寿, 高橋良文, 藤本明生, 森仁司:シールド工法における地盤変状, 山留めとシールド工事における土圧・水圧と地盤の挙動に関するシンポジウム, 土質工学会, pp. 87-98, 1992.
- 14) 峯尾正臣:軟弱地盤における地盤沈下防止の試験工事, トンネルと地下, 第14巻4号, pp. 31-40, 1983.
- 15) 中村和弘, 阿部進, 野村宜彦:大口径ガス管下でのシールド工事, トンネルと地下, 第14巻, 11号, pp. 45-53, 1983.
- 16) 成廣明雄, 岡田仁, 後藤和生:沖積地盤におけるシールド掘進時の地盤変状の計測結果について, 土木学会第42回年次学術講演会, pp. 570-571, 1987.
- 17) 森鱗, 赤木寛一:シールド工事に伴う軟弱粘性土の乱れに基づく圧密沈下, トンネルと地下, 第11巻, 8号, pp. 15-19, 1980.
- 18) 桑原力, 小林健郎:トンネル周辺地盤変位計測結果と一考察, 土と基礎, 28-12, pp. 49-56, 1980.
- 19) 平田武弘:土圧式シールド掘削に伴う軟弱粘性土地盤の挙動と施工管理, 土木学会論文集, No. 355/VI-2, pp. 114-123, 1985.
- 20) 中村信義, 中島信, 藤木育雄, 村田基代彦:泥水式シールド掘進に伴う軟弱地盤の変形解析手法について, 土木学会第45回年次学術講演会, pp. 154-155, 1990.
- 21) 石嶋嶌, 島村誠, 岡留孝一:軟弱粘性土地盤におけるシールド工事の施工, 電力土木, No. 245, pp. 59-66, 1993. 5.

- 22) JTA都市トンネル小委員会 裏込め注入幹事会：「裏込め注入」に関する実態調査報告書(1), トンネルと地下, 第26巻6号, pp. 29-39, 1995.
- 23) 森麟, 江本佑樹, 田村昌仁, 福井義弘 : シールドトンネルの裏込め注入圧および切羽泥水圧による粘性土地盤の割裂現象, トンネルと地下, 第22巻, 1号, pp. 41-46, 1991.
- 24) 吉田保, 山田孝治 : 泥土圧シールド掘進時の切羽土圧と周面摩擦力について, 土木学会論文集, No. 445/III-18, pp. 75-82, 1992.
- 25) 岸尾俊茂, 太田擴, 仲井信雄 : 土圧式シールドトンネルにおける地盤挙動と沈下抑制工法, 山留めとシールド工事における土圧・水圧と地盤の挙動に関するシンポジウム, 土質工学会, pp. 245-252, 1992.
- 26) Iizuka, A. and Ohta, H. : A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol. 27, No3, pp. 71-87, 1987.
- 27) 太田秀樹, 成廣明雄, 山崎剛, 後藤政昭 : 軟弱粘性土の弾粘塑性パラメタの実験による同定, 第23回土質工学研究発表会, pp. 545-548, 1988.
- 28) 吉田保, 田中弘, 草深守人, 武田洋 : 接触問題として扱ったシールド掘進時の地盤変状解析, トンネル工学研究発表会論文・報告集第4巻, 土木学会, pp. 71-78, 1994.
- 29) 武田洋, 草深守人, 吉田保, 田中弘, 黒川信子 : 有限要素法による接触問題の数値解法とシールドトンネルへの適用, 土木学会論文集, No. 603/III-44, pp. 1-10, 1998.
- 30) 森麟, 赤木寛一, 栗原和夫 : 粘土地盤中のシールド機の周面摩擦力に基づく土の動きに関する基礎的研究, 土木学会第41回年次学術講演会, pp. 827-828, 1986.
- 31) Kuwahara, H., Yamazaki, T. and Kusakabe, O. : Ground deformation mechanism of shield tunneling due to tail void formation in soft clay, ISSMGE, 1997. 9
- 32) 大倉利武, 深沢成年, 橋本正, 水原勝由 : 片福連絡線シールド工事における地盤の変形挙動, 第31回地盤工学研究発表会, pp. 2231-2232, 1996.
- 33) 安田秀幸, 岡本嘉彦, 今西聰, 喜川康一, 倉岡豊 : 大断面シールドの地盤沈下に及ぼす施工要因(その2), 第26回土質工学研究発表会, pp. 1833-1834, 1991.

(1997. 11. 6受付)

INFLUENCE OF BACKFILL GROUTING ON SETTLEMENTS ABOVE SHIELD TUNNEL IN SOFT CLAY

Masahiro OHTSUKA, Takeshi YAMAZAKI and Osamu KUSAKABE

Long term measurements of ground movements were made at three different sections above an earth pressure balance shield tunnel driven through the Yurakucho lower clay, with special reference to influence of grouting for filling the tail void on settlements above the shield. The settlement data were separated into three periods, passage of the shield, tail void formation, and subsequent settlement. The results showed that the grouting significantly reduced the magnitude and rate of settlement during tail void formation, but had little influence on the rate of settlement during the subsequent settlement.