

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

山崎 剛¹・大塚正博²・日下部 治³

¹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)

²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)

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、沈下の大半を占めるテールボイド沈下と後続沈下に着目して、地盤変形挙動を分析した。その結果、テールボイド沈下から後続沈下へ移行する際の変化点はトンネル直上の鉛直歪みに着目すると判別し易いこと、テールボイド沈下区間における地盤変位はトンネル周辺においてトンネル中心に向う二次元弾性論による無限地盤中円孔周りの変位分布に類似した挙動を示すこと、後続沈下区間における地盤変位はテールボイド沈下区間の変位方向に比べトンネル下方に向って変位しておりトンネル肩部における圧縮歪みの増加が要因と考えられることが理解できた。

Key Words : shield, soft clay, ground movements, field measurement, tail void settlement, subsequent settlement, vertical strain

1. はじめに

筆者らは、地中送電用管路建設に伴うシールド工事の計測事例に基づき、テールボイド発生による地盤変形メカニズムの解明に向けた検討を実施し、現在までに得られた知見の一部を報告している¹⁾。すなわち、有楽町下部粘性土中の泥土圧シールド工事の3断面において周辺地盤とセグメントの変位を長期計測し、シールド通過時、テールボイド発生時および後続沈下時のトンネル中心線上の鉛直変位に着目して、特に裏込め注入の有無による地盤変形挙動への影響について定量的に検討を行った。その結果、適切なチャンバー内圧管理を行えば切羽部での地盤変位は軽減させられること、セグメントクラウン部の鉛直変位は直上地盤の鉛直変位に比べ小さいことおよび裏込め注入によってテールボイド沈下速度は低減されるが、後続沈下速度には大きな影響を与えないこと等が明らかになった。さらに、地盤変形メカニズムの解明には、次の2点について詳細な検討が必要であることを指摘した。

① 「テールボイド沈下」から「後続沈下」へ移行する際の変化点の決定方法について、物理的背景が明瞭な定義を確立する。

② 「テールボイド沈下」と「後続沈下」における周辺地盤全体の変形メカニズムを解明する。

ここで、テールボイド沈下とはシールドテールが通過した直後に生じる沈下、後続沈下とはシールド通過後に時系列的に継続する沈下を言う²⁾。

本論文では、表裏一体の関係にある上記二つの課題を検討するために、現場計測におけるトンネル中心線上の直上沈下情報¹⁾に加えて側方部の変位情報を追加して分析し、テールボイド発生による地盤変形挙動についてさらに検討を加えたものを報告する。

2. トンネル直上地盤変位計測に基づくテールボイド沈下と後続沈下の特徴

トンネル中心線上の直上地盤変位計測結果¹⁾から得られた、テールボイド沈下と後続沈下の特徴は以下の様にまとめられる。

① テールボイド沈下についてはトンネルからの距離が近い計測点の順に鉛直変位量が大きくなり、トンネル中心からの距離と鉛直変位量が両対数で概ね直線関係にあることから、無限弾性体中の円孔周りの変位分布と定性的に類似している。

② 後続沈下については、地盤中各深度における鉛

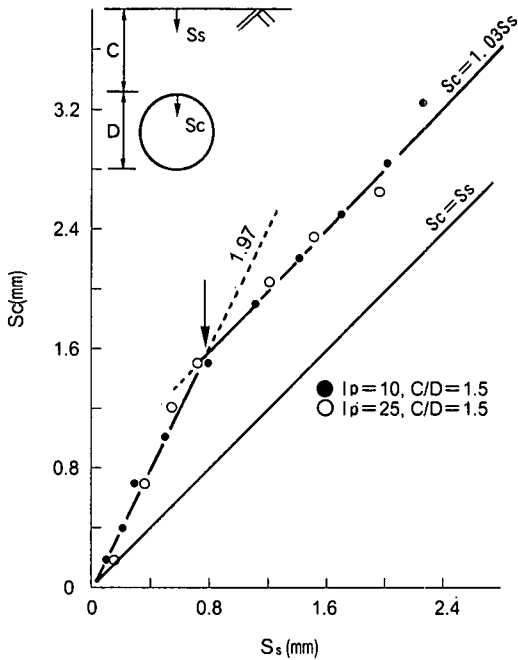


図-1 トンネルクラウン変位と地表面変位の関係 (ワソおよび竹村らによる)^{3), 4)}

直変位量-時間曲線が、概ね平行状態で推移していることから、トンネル上方部の地盤変位測定点間では顕著な区間変形を生じることなく沈下している。

3. 既往のトンネル遠心模型実験と現場計測からの知見

ワソ³⁾らが実施した遠心模型実験結果を、竹村⁴⁾らが総括的に整理している。ワソおよび竹村らはトンネル中心線上の直上鉛直変位に着目して、筆者らが把握したテールボイド沈下と後続沈下の特徴と同様な沈下傾向を検討しており、地盤変形メカニズムを解明する上でヒントを与えている。彼らはトンネル中心線上におけるトンネルクラウン沈下量(S_c)を地表面沈下量(S_s)に対してプロットし、図-1を与えている。これによれば、粘性土地盤の塑性指数(I_p)によらず両者の関係が2本の直線で近似でき、沈下の初期段階では地表面沈下に比べクラウン沈下の方が大きくなるものの、その後の沈下段階では両方の増分がほぼ等しくなる結果を得ている。これらの沈下傾向は、筆者らが先に報告した現場計測で得たトンネル直上の鉛直変位の傾向¹⁾と同様の結果になっている。筆者らは図-1中に矢印で示した変位傾向の変

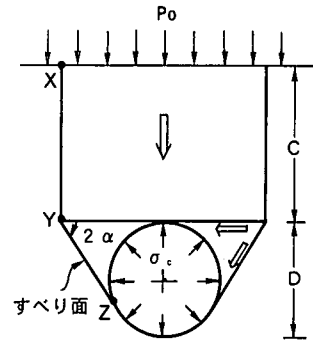


図-2 既往の遠心模型実験の観察に基づく速度場³⁾

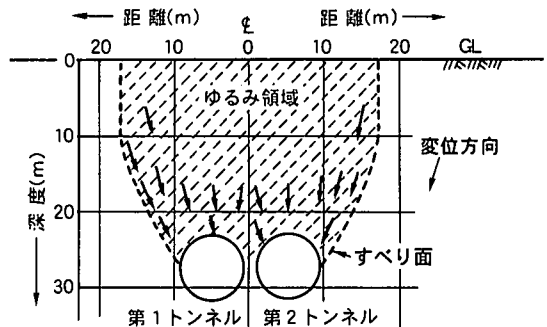


図-3 藤田が紹介したゆりみ領域と地山の変位方向 (半谷の図から作成)^{6), 7)}

化点が、テールボイド沈下から後続沈下へ移行する際の変化点を区別する上で有効な情報を示唆しているものと判断している。ワソおよび竹村らはこの観察事実から、先ずトンネル上部の土に引張力が働き、その後この部分が一つのブロックになってすべり落ちる地盤変形メカニズムと解釈しており、図-2に示す上界値計算で仮定されたすべり面(YZ)の発生時期がテールボイド沈下と後続沈下の変化点に関係しているものと考えた。粘性土中の二次元断面トンネルのすべり面発生に関する遠心模型実験による研究はMairが実施⁵⁾しており、この成果によれば、すべり面はトンネル側方部から側方上部に亘って発生することが観察されている。

一方、藤田は、半谷の現場計測報告⁶⁾における土被り24mのシールドトンネル工事($\phi=7060\text{mm}$, 機械式, 軟弱粘性土)での地盤変位データを分析し、図-3に示す、すべり面に該当すると思われる範囲に関して次の考察⁷⁾を行っている。

- ① トンネル中心線上の深さの異なる3点の沈下量が約半年後に概ね一致しているものの、それに至るまでは深い方の沈下が先行していること。
- ② 第1トンネルの中心線から、水平方向左側に、離れた鉛直線上では、地表面沈下量の方が大きく、

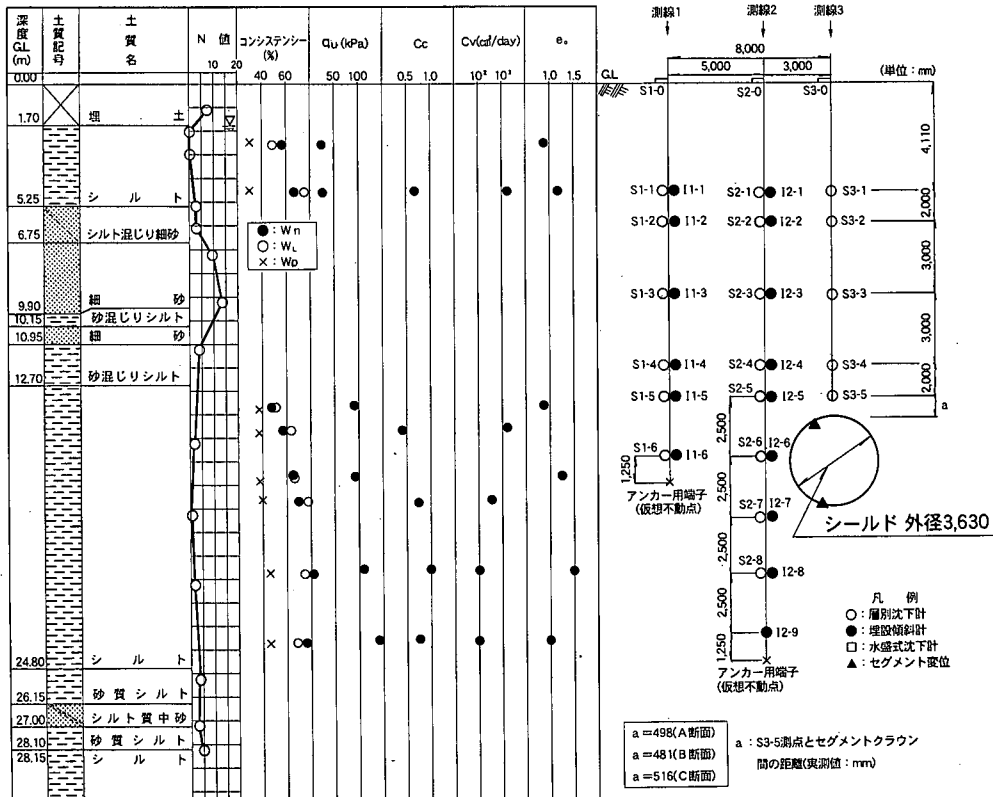


図-5 計測器配置図 (断面A, B, C共)

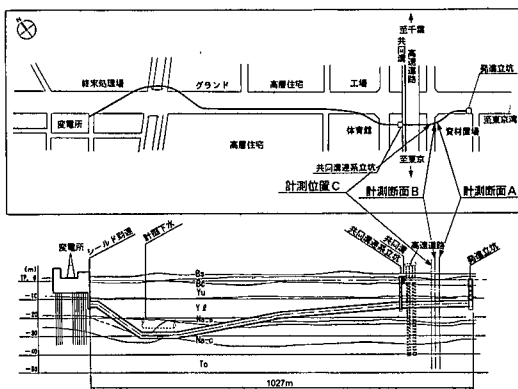


図-4 ルート平縦断面と計測位置

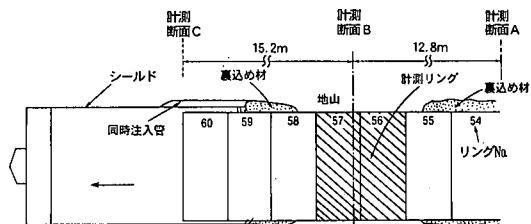


図-6 裏込め未実施区間の施工方法

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)
テルパド平均発生速度(q)	20	15	29	(l/min)
裏込め注入平均速度(v)	37	0	53	(l/min)
平均裏込め注入率(v/q)	182	0	183	(%)

地表面からすべり面に至る深さは浅くなっていることから、すべり面の内側部分における地山に圧縮が発生したか、すべり面より上位の部分が横方向に移動したためであること。

桑原・小林も粘性土地盤の計測結果⁸⁾(菊川町シールド、 $\phi=7300\text{mm}$ 、圧気併用手掘り式、沖積シルトおよび砂質シルト)から、トンネル中心位置における土被り部分がそのままの形で自沈すること及び

側方部の圧縮範囲が上方に発達することを指摘しており、藤田が指摘した地盤変形メカニズムと本質的に同様と考えられ興味深い。

ウソおよび竹村らの実験は二次元平面ひずみ状態でかつ地山の応力解放が空気圧の減少でモデル化した等方応力状態で行われており、実際のシールドのテールボイド発生過程とは異なっている。しかしながら、藤田や桑原・小林の報告と照らし合せて考えると、定性的に同様な挙動であると判断できる。したがって、「テールボイド沈下」と「後続沈下」の変化点と両者の区間での地盤変形メカニズムを理解するためには、側方部における地盤変形挙動の把握が重要であり、現場計測におけるトンネル中心線上の鉛直変位挙動に併せて側方部の地盤挙動についても分析する必要がある。

4. トンネル側方部の地盤変位

(1) 計測計画

現場計測は、シールド($\phi=3630\text{mm}$, 泥土圧式)が軟弱粘性土である有楽町下部粘性土層(Y₁層)中を通過する位置について、3断面(A, B, C)行った。ルート上の平縦断における計測位置および計測器配置図は、それぞれ図-4, 5に示すとおりである。各計測断面間の離隔は、図-6に示すとおりであり、AとBの離隔は12.8m, BとCの離隔は15.2mである。計測断面が位置するセグメントリングNoは、断面A, B, Cに対してそれぞれ、No46, No57, No69が該当する。一方、掘進リングNoは、当該リングを組立てる掘進を呼称する。このことから、例えば図-7においては、計測断面Aをシールドテールが通過する状況は、No46に約1~2リング加えた、掘進リングNo47~No48が該当することになる。

計測断面A, B, C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土圧は、A, B, C断面の順で大きくなっており、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-6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。

計測断面Bにおける、裏込め未実施区間の具体的な施工は、次に示す手順で実施した。

- ① 56リング掘進中までは通常の同時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すると、シールド外径 $\phi 3.63\text{m}$, セグメント外径 $\phi 3.50\text{m}$, 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 m³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、 $p = 245\text{kPa}$ 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、同時裏込め注入をしながら掘進を再開した。
- 計測横断面における計測器の配置図は、図-5に示すとおりであり、側方部の地盤変位計測にあたり、地盤変位ベクトルが描けるように、鉛直および水平変位を同一深度で測定した。変位計測は、地中内鉛直変位についてはワイヤー式の層別沈下計、地中内水平変位については固定式の埋設傾斜計、地表面沈下については水盛り式沈下計により行った。
- 今回トンネル側方部の地盤変位は、シールド掘進に伴う影響が大きく現れる、トンネル中心線より3m側方に位置する計測線2について報告する。

(2) 側方部鉛直変位計測結果

a) 裏込め注入実施区間(計測断面A, C)

同時裏込め注入区間における側方部計測線2の鉛直変位を、断面Aについて図-7, 断面Cについて図-8に示す。なおSA2-5は、断面Aにおける鉛直変位測定点S2-5を示す。

側方部における鉛直変位挙動は、断面A, C共に次に示す同様の傾向を示している。

トンネル中心線上の鉛直変位で見られたシールドフェイス到達からシールドテール通過間の隆起や、

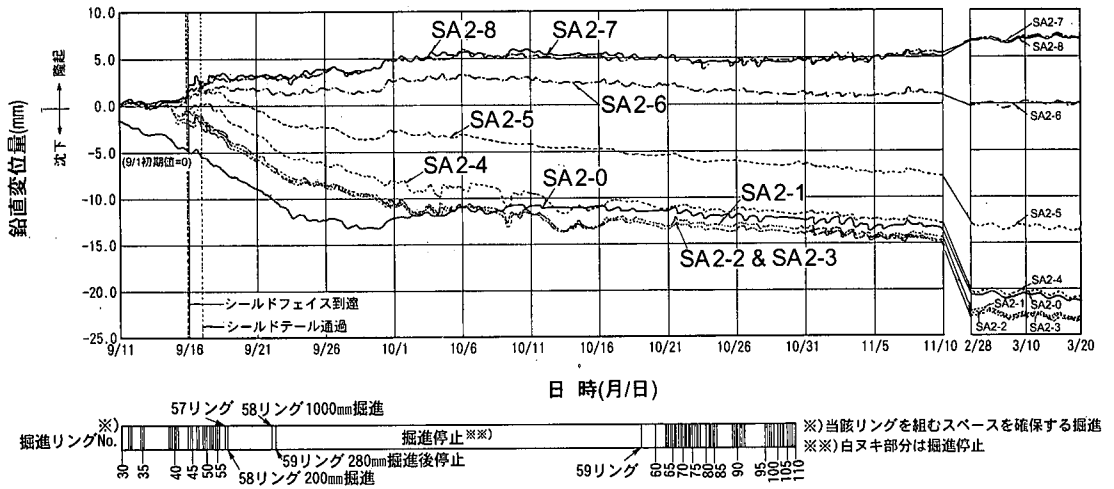


図-7 トンネル側部測線2の鉛直方向地盤変位 (計測断面A)

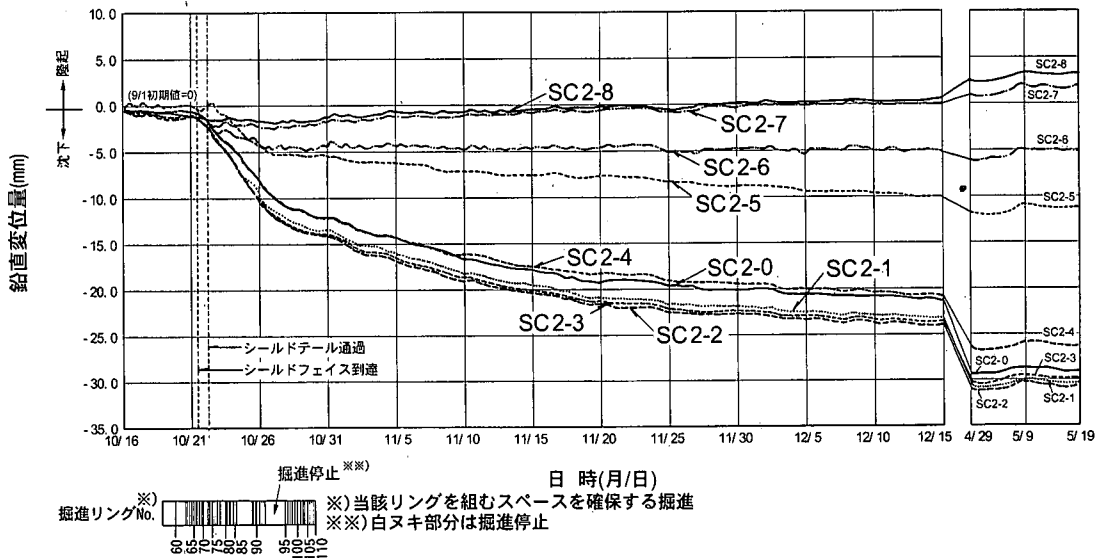


図-8 トンネル側部測線2の鉛直方向地盤変位 (計測断面C)

テールボイド発生による急激な沈下現象¹⁾は見られない。シールドテール通過以後はS2-0～S2-4の5測点が、概ね同程度の鉛直変位速度で、当該領域の地盤が一体となって長期に亘り沈下している。この間、トンネル中心の真横に位置するS2-6測点ではほとんど鉛直方向変位が無い。さらにS2-6のすぐ上方にあるS2-5測点の鉛直変位量はS2-4より小さいが、S2-4と同様な沈下傾向を示し、S2-6より下方にあるS2-7、S2-8測点については極めて変位が小さく、長期的にはわずかな隆起傾向が確認される。

b) 裏込め注入未実施区間 (計測断面B)

計測断面Bにおける側方部計測線2の鉛直地中変位

を図-9に示す。図-9で、裏込め注入未実施区間である9/21～10/5までの側方部鉛直変位挙動は、次に示す特徴を有しており、裏込め実施断面A、Cと同様の傾向を示すことから、裏込め注入の有無による鉛直変位傾向に顕著な差異は見られない。

シールドテール通過時にSB2-0～SB2-5の範囲で2mm程度の小さい沈下が生じているが、トンネル中心線上で見られたシールドフェイス到達からシールドテール通過間の隆起や、シールドテール通過時のテールボイド発生による急激な沈下現象はここでも見られない。

シールド通過以後はSB2-0～SB2-5の6測点が、概

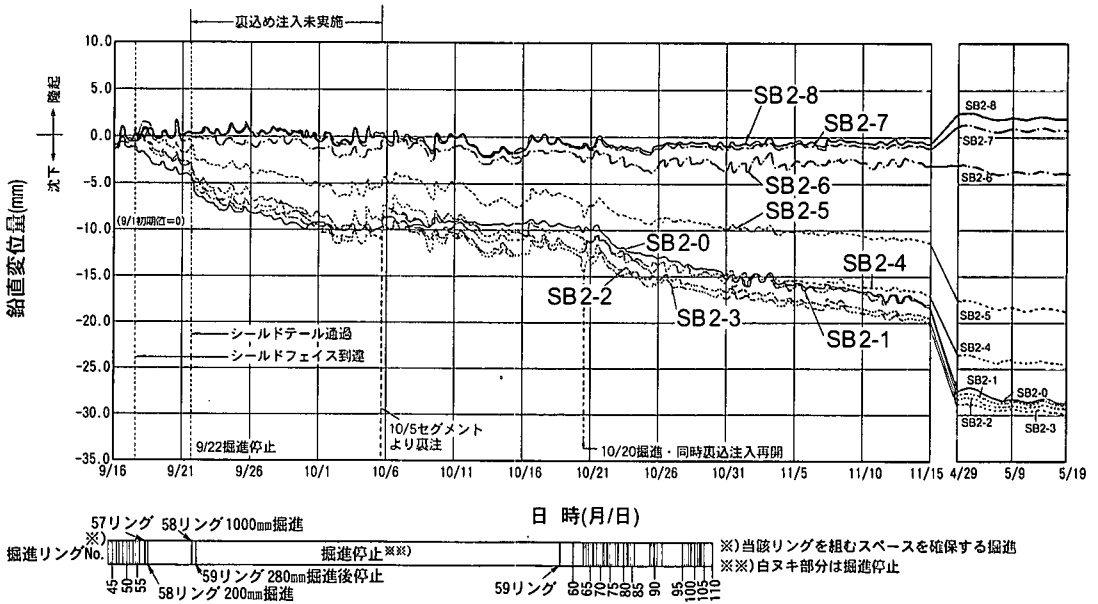


図-9 トンネル側部測線2の鉛直方向地盤変位(計測断面B)

ね同程度の変位速度を示している。この間、トンネル中心の真横に位置するSB2-6測点および下方に位置するSB2-7, SB2-8測点についてもほとんど変位は見られない。

同時裏込め注入を実施して、通常掘進に戻った10/20以後の鉛直変位挙動は、長期に亘りSB2-0～SB2-4がほぼ同一の変位速度で沈下が漸増する。この沈下が漸増する傾向は、裏込め注入実施断面A, Cにおける鉛直変位挙動と同様である。

(3) 側方部水平変位計測結果

a) 裏込め注入実施区間(計測断面A, C)

同時裏込め注入区間における側方部計測線2の水平地中変位は、断面Aについては図-10、断面Cについては図-11に示すとおりである。なおIA2-5は、断面Aにおける水平変位測定点I2-5を示す。

断面A, Cにおける側方部水平変位は、鉛直変位とは異なりシールド通過による局所的な影響を強く受け両断面の挙動が異なっているものの、長期的には両断面ともトンネル側へ漸増する。詳細な水平変位の挙動は、以下のように記述される。

まず、シールドフェイス到達からテール通過の間は、断面Aについてはトンネル側に変位する傾向にあるが、断面Cについては逆の地山側に変位している。この現象は、図-12に示すようにトンネル直上地盤(計測点S3-5)の隆起量についてはA断面よりC断

面が大きく、C断面でのシールド掘進における周辺地盤が外側に、より押広げられている受働状態にあることを考えれば理解できる。

次に、テール通過後、断面Aについては9/17～9/18間(10リング \times 12m)、断面Cについては10/22～10/23間(10リング \times 12m)に相当する約10リングの間に亘り、側方部の地盤は、シールド掘進および裏込め注入が繰返し行われることによる影響により数回左右に変位を繰り返した。その後、長期的に水平変位は、断面AについてはIA2-1～IA2-7間で、断面CについてはIC2-1～IC2-6間で、トンネル側に変位すると共に地表面に近いほど大きな値を示した。なお変位がトンネル側に増加する間に、断面Aにおいては10/5に断面Bでセグメントから行われた裏込め注入の影響により、一旦大きくトンネル側に変位するものの、裏込めの影響が減衰し概ね元の増分傾向の位置まで戻っている。

これらのことから、水平変位の傾向は、シールド通過付近においてはトンネル掘進や裏込め注入の施工方法の違いにより多少異なるものの、長期的には途中で発生する施工履歴の影響を大きく受けず断面A, C共トンネル側へ漸増することが理解できた。長期的な変位傾向が施工履歴の影響を大きく受けないことは、トンネル中心線上の鉛直変位計測から得られた後続沈下の特徴と同様である¹⁾。

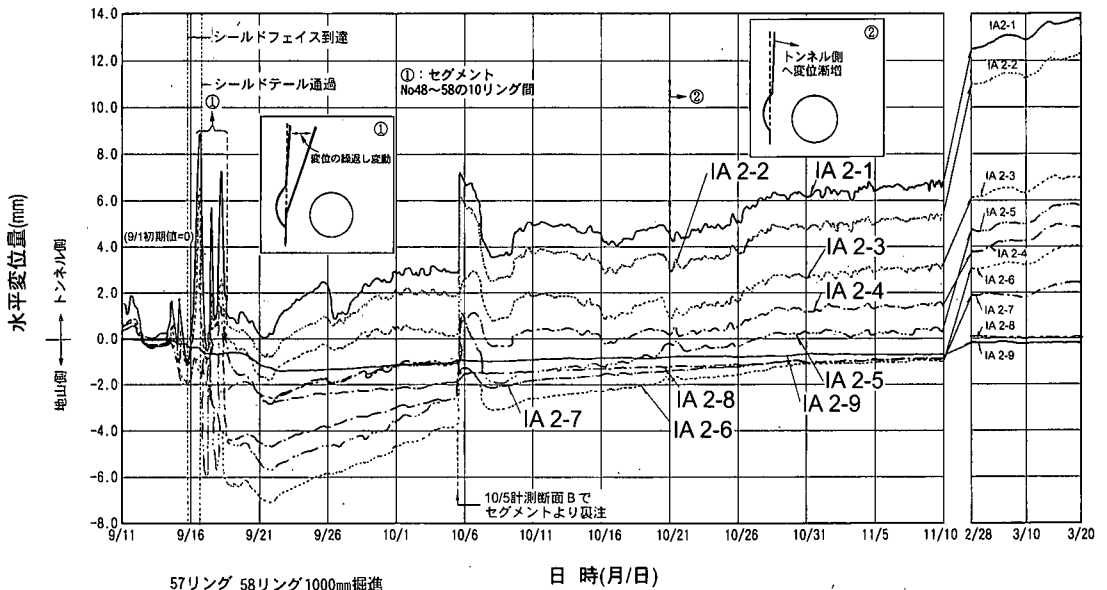


図-10 トンネル側部測線2の水平方向地盤変位(計測断面A)

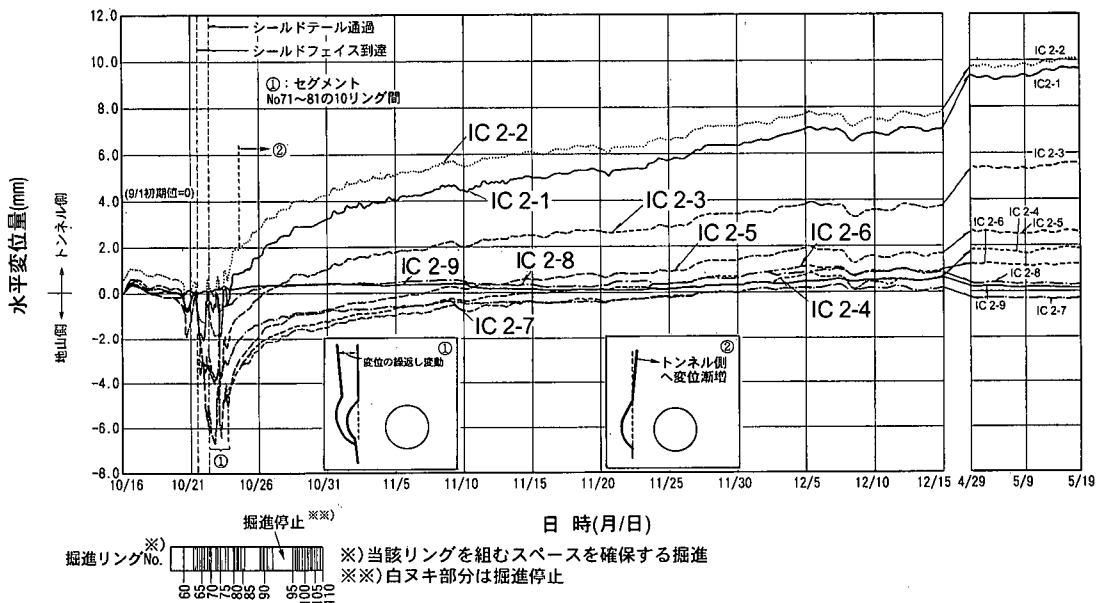


図-11 トンネル側部測線2の水平方向地盤変位(計測断面C)

b) 裏込め注入未実施区間(計測断面B)

計測断面Bにおける側方部計測線2の水平地中変位を図-13に示す。

図-13によれば、シールドテール通過から、セグメントより裏込め注入を実施する10/5までの側方部

水平変位は、裏込め注入の影響が無く、各測点の挙動が明瞭である。すなわち水平変位は、シールドフェイス到達からテール通過までの間、トンネル中心の真横に位置するIB2-6が最も大きく地山側に変位し、次いで上下に位置するIB2-5、IB2-7が同様に

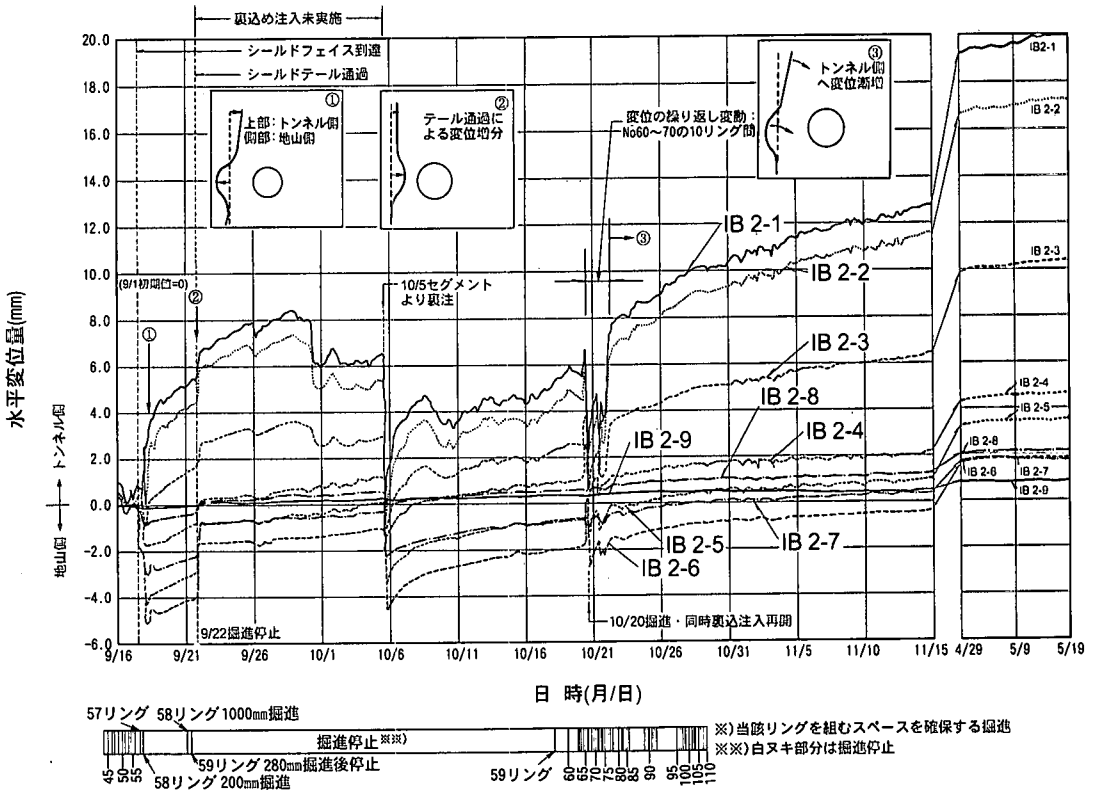


図-13 トンネル側部測線2の水平方向地盤変位(計測断面B)

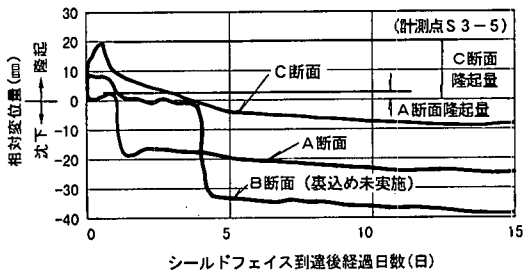


図-12 計測断面毎での鉛直変位量の比較

地山側に変位している。この変位傾向からはシールドによる周辺地盤の押上げ現象が確認される。一方、IB2-1、IB2-2およびIB2-3については、地表面に近い順で、トンネル側に大きく変位している。その後水平変位は、テール通過時に全測点が急速にトンネル側へ変位し(中でもIB2-6が最も大きい)、引続き10/5までトンネル側に漸増した。

さらに水平変位は、10/5のセグメントからの裏込め注入により、一旦は急速に地山側に変位するものの、注入後は再び全測点がトンネル側へ漸増した。

10/20の本掘進および同時注入再開で水平変位は、繰返し行われる裏込め注入の影響を受け、約10リングの間、左右に変位を繰り返した。10/22以後の長期的な水平変位は、断面A(9/22以後)および断面C(10/27以後)と同様、IB2-1~IB2-6間でトンネル側に漸増し、地表面に近い測点ほど大きな値を示す結果となった。このことから水平変位の長期的な挙動は、途中で発生する施工履歴の影響を大きく受けないことが予想される。

さらに、裏込め注入未実施区間(9/21~10/5)における水平変位も、トンネル側へ漸増する傾向を示しており、裏込め注入を実施した水平変位の長期的傾向と同様である。このことから、水平変位の長期的傾向には、裏込め注入の有無による差異が見られない結果となった。

5. トンネル中心線上変位と側方部変位の関係

トンネル中心線上の鉛直変位¹⁾と、本論文で前述してきた、トンネル側方部の鉛直および水平変位の

表-2 トンネル中心線上と側方部における地盤変位の特徴

変位-時間関係の模式図	トンネル中心線上 (測線3)	トンネル側方部 (測線2)	
	鉛直変位	鉛直変位	水平変位
テールポイド発生から時刻 t_1 まで、速く沈下する。 (参考文献1の図-9, 10, 12) ②沈下量はトンネル近傍ほど大きくトンネル中心からの距離に両対数で反比例する。(参考文献1の図-11) ③沈下量および沈下速度は裏込め注入の有無により影響を受けるものの、沈下挙動は同様である。 (参考文献1の表-2)	①トンネル直上で見られた速い沈下は顕著に現れていない。 (本文の図-7, 8, 9)	①掘進や裏込め注入の影響により、変位の繰り返し変動など複雑な挙動を示す。裏込め注入の影響の無い所では、テールポイド発生から時刻 t_1 間に沈下速度の速い区間が見られる。 (本文の図-10, 11, 13) ②裏込め注入の影響の無い所で変位は、トンネル周辺部においてはトンネルの真横が最大となり上下に減衰する傾向にある。 (本文の図-14)	
① t_1 以後、長期に亘りゆっくりと沈下する。この時のセグメントの後続沈下量は周辺地盤に比べて1桁小さい。 (参考文献1の図-9, 10, 12) ②測定点間の変位差が小さい状態で、沈下する。 ③沈下速度は、裏込め注入の有無による影響は大きく受けるが、同様な沈下挙動である。 (参考文献1の表-2)	①トンネル真横から下方部分は、長期に亘って顕著な鉛直変位は示さない、反面上方部分は長期に亘りゆっくりと沈下する。 (本文の図-7, 8, 9) ②沈下しない部分とする部分の境界に当る、トンネル肩部が圧縮変形し、境界より上方部分は各計測点が概ね一体になって変位差が無い状態で沈下する。 ③上記挙動は裏込め注入の有無に関わらず同様な挙動である。	①トンネル真横から下方部分は、長期に亘って顕著な変位は示さない反面、上方部分は長期に亘りゆっくりとトンネル側に変位する。 (本文の図-10, 11, 13) ②変位は地表面に近いほど大きい。 ③長期に亘り、トンネル側に変位する側方地盤変形挙動は、裏込め注入の有無に関わらず同様な挙動である。	

特徴を、表-2にまとめた。

(1) テールポイド沈下区間

トンネル中心線上の鉛直変位は、トンネル中心からの距離と変位量が両対数関係で概ね直線関係にあることから、弾性論による円孔周りの変位分布で近似できそうなことを確認している¹⁾。

トンネル側方部の水平変位は、断面Bの裏込め未実施区間におけるテールポイド発生による増分変位を対象として、FEMによる線形弾性解析結果と実測結果を比較することで分布形状の近似度を評価した。水平変位の最大値で正規化した変位分布形状を比較して図-14に示す。併せて図-14には、解析に用いた入力物性値、強度定数、解析領域および応力解放率を記述している。入力物性値の内、変形係数については孔内水平載荷試験によって決定した。

変位分布形状の比較結果によれば、トンネル周辺部においてはトンネル中心の真横が最大となり上下に減衰する形状で、線形弾性解析と実測の分布が類似していることが判明した。しかしながら、トンネ

ル上方部においては解析と実測の分布形状が類似しておらず、解析では地表に向かうほど水平変位が減少する傾向を示すが、実測では若干ではあるが増加する傾向となった。

以上のことから、トンネル近傍に当る周辺部に限り、概ね弾性論による円孔周りの変位分布で近似できるものと考えられる。但し、図-14を厳密に評価すると、解析値と実測値は、トンネル中心の真横に位置する水平変位の最大値を境にして、トンネル上半においては実測値>解析値となるのに対し、トンネル下半においては解析値>実測値となり、相反する傾向を示す。このことから、弾性論による近似だけではメカニズムが完全には解釈できない難しさも把握できた。

なお、図-14の様にトンネル真横が凸形状となる分布形状は、裏込め未実施区間ゆえに明瞭に現れるものと考えられ、実際の地盤挙動は、これにシールド掘進や裏込め注入の各種施工法の違いによる影響が加わり複雑な分布形状を示すものと考えられる。

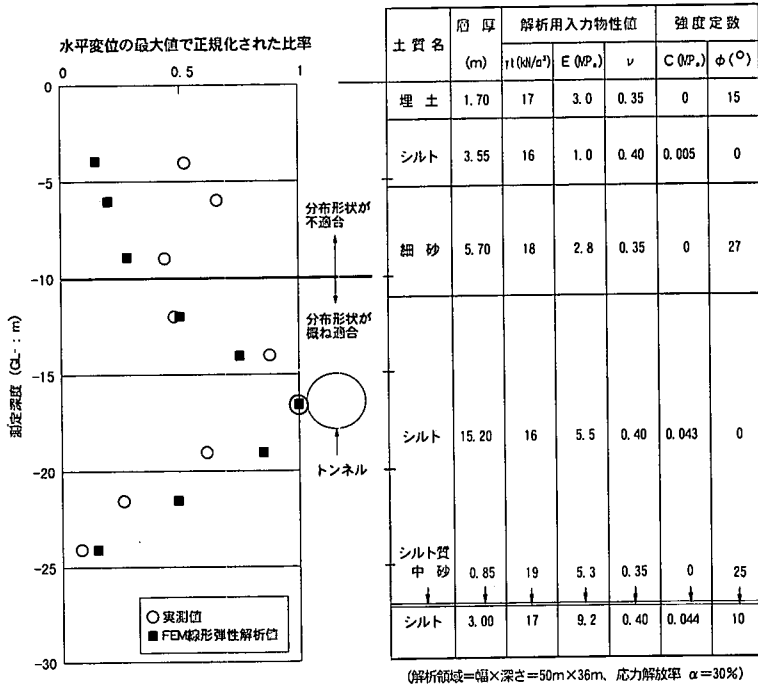


図-14 トンネル側方部水平変位における弾性解析値と実測値の分布形状比較 (計測断面B: 測線2)

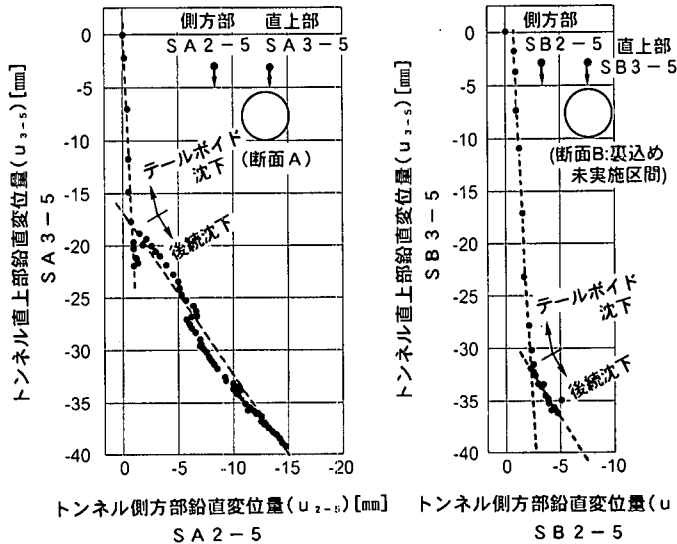


図-15 同一深度でのトンネル直上部と側方部における鉛直変位の関係

(2) 後続沈下区間

後続沈下区間におけるトンネル中心線上変位と側方部変位の関係において、特徴的な挙動を示す下記項目について考察する。

① セグメント上方部分における鉛直変位

② セグメントクラウン部背面における地盤挙動

③ セグメント上方の側方部分における水平変位

a) セグメント上方部鉛直変位

セグメント上方部の鉛直変位は、トンネル中心線上における各層の鉛直変位-時間関係が概ね平行な

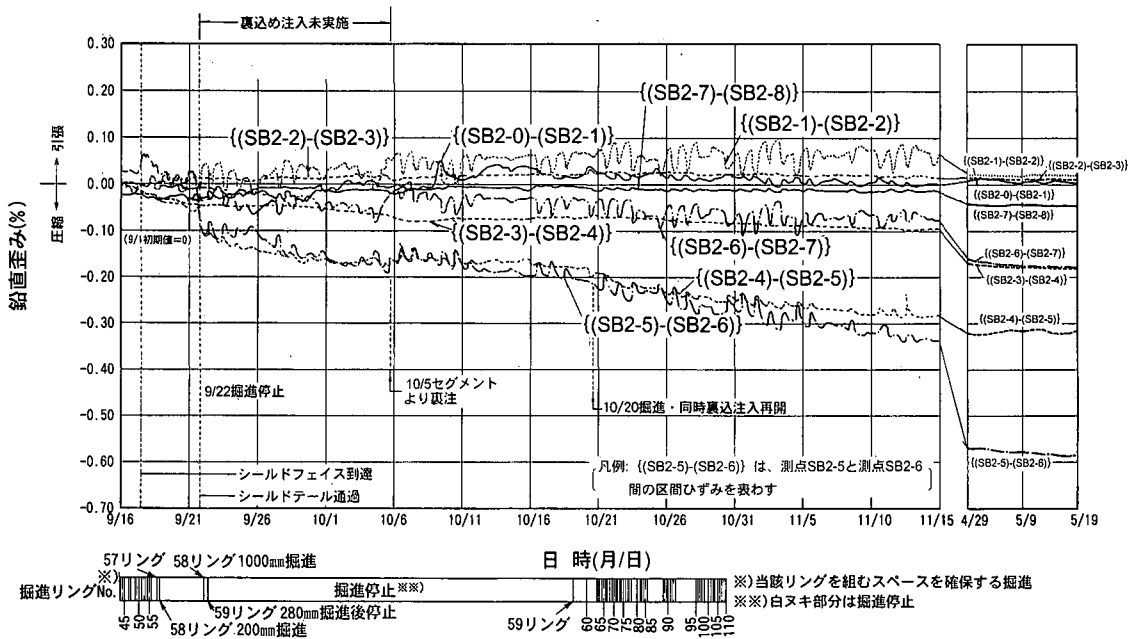


図-16 トンネル側部測線2の鉛直歪み(計測断面B)

状態、すなわち顕著な区間変形を生じること無く、地盤が長期に亘り沈下する。同様に、トンネル中心線上の測定点と同じ深さにおける側方部計測点においても、各層の測定点間で顕著な区間変形を生じること無く、長期に亘り沈下する挙動が現れている。

さらに、計測断面Aおよび断面Bの裏込め未実施区間における、トンネル近傍でかつ同一深度にある計測点S3-5の鉛直変位量 (u_{3-5}) とS2-5の鉛直変位量 (u_{2-5}) 関係を図-15に示すが、裏込め注入の実施の有無に関わらず、鉛直変位に関しては同様な挙動を示している。すなわち、テールポイド沈下区間においては $\Delta u_{3-5} > \Delta u_{2-5}$ の関係にあったものが、後続沈下区間へ移るにつれ $\Delta u_{3-5} \approx \Delta u_{2-5}$ の関係に近づいていく。これより後続沈下においては、セグメント上方部におけるトンネル中心線部と側方部が一体として挙動する傾向が伺える。

この要因について藤田の推論⁷⁾を援用して測線2での鉛直変位測定点間の区間歪みに注目してみる。代表として計測断面Bにおける鉛直方向の区間歪みの経時変化を図-16に示す。側方部で経時的に沈下するSB2-1～SB2-5間(図-9)の、底部に位置するSB2-5～SB2-6間においては、長期的に圧縮歪みが漸増していることが判る。この圧縮歪みの漸増現象が何らかの形で後続沈下に見られる区間変位が概ね一定の

状態で経時的に沈下する要因の一つになっているのではないかと考えられる。これら挙動の概要を図-17の挙動1に示す。

b) セグメントクラウン部背面における地盤挙動

トンネル中心線上におけるSB3-1～SB3-5間の地盤が、顕著な区間変形を生じること無く、経時的に後続沈下が進行する。一方で、セグメント変位は、周辺地盤の変位に比べ、一桁小さい値で経時的に沈下が進行する。これらのことから、測点SB3-5とセグメント間の地盤には大きな鉛直方向圧縮歪みの発生が予測される。

この圧縮歪みは、トンネル中心線位置(測線3)における後続沈下量、換言すれば後続沈下の要因と思われるトンネル側方部(測線2)に位置するSB2-5～SB2-6間における圧縮歪みの増加量が、セグメント変位量に比べ大きいことから生じているものと考えられる。これら挙動の概要を図-17の挙動2に示す。

しかしながら、測点SB3-5とセグメントクラウン間の土塊がどのような挙動をしているかは、今回の現場計測情報だけでは不明である。

c) セグメント上方の側方部水平変位

測線2における水平変位は、長期に亘りトンネル方向へ漸増する現象が見られる。この原因としては、次に示す二つの要因が影響しているのではないかと

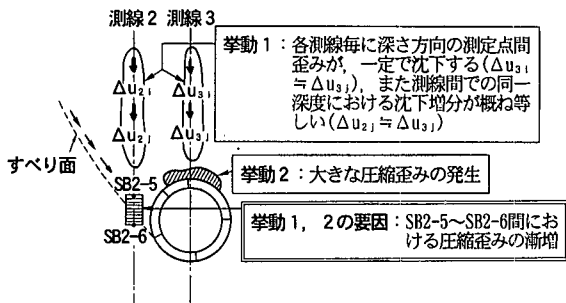


図-17 後続沈下区間における鉛直変位の特徴と想定される要因の概念図

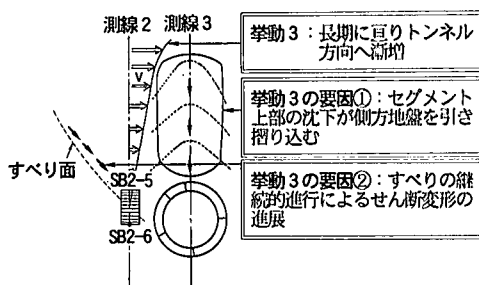


図-18 後続沈下区間における水平変位の特徴と想定される要因の概念図

考えられる。

要因の一つは、トンネル中心線上におけるテールボイド沈下量がセグメント近傍ほど大きいことから、この沈下の影響が長期的には地表面に向かって伝播し、その沈下が側方地盤を引き摺り込むことである。もう一つの要因は、SB2-5～SB2-6間で長期的に発生している鉛直方向圧縮歪み、若しくは、すべり面の上位において発生する後続沈下と沈下領域外側に存在する不動領域との相対的なせん断変形の経時的進展ではないかと考えられる。これら挙動の概要を図-18に示す。しかしながら、上述した二つの要因の影響度合いを定量的に判断するためには、今回の現場計測情報だけでは困難である。

以上、トンネル中心線上変位と側方部変位結果から、両者の相互関係について、特徴的な地盤挙動に着目して推論した。その結果、トンネル側方部における地盤の鉛直圧縮歪みの増加が、いずれの場合においても何らかの形で関係していることが把握できた。

さらに、周辺地盤の全体的挙動を理解するため、次項以降に示す様に、先ずテールボイド沈下と後続沈下の変化点を検討し、次に変化点によって区分したそれぞれの沈下区間における全体挙動について検討した。

6. テールボイド沈下から後続沈下への移行時における変化点の検討

(1) 変化点の検討

テールボイド沈下区間と後続沈下区間では、トンネル中心線上の変位挙動が異なることが明らかとなった。すなわち、テールボイド沈下区間においてはトンネル周辺部が弾性論による無限地盤中円孔周

りの変位分布に概ね類似した挙動を示し、後続沈下区間においては顕著な区間変形が無い状態で沈下する挙動を示すことである。

筆者らは、両沈下形態を区分する客観的目安として図-1に示したウソおよび竹村らが確認した^{3),4)}トンネル中心線上でのトンネルクラウン変位(S_c)と地表面沈下量(S_s)の変位増分の変化点を導入することとした。さらに両者の変位増分の変化点を評価する上での整理に当たっては、 $S_c \sim S_s$ 関係(パラメータ; 時間 t)を、沈下測定点間の区間歪みと時間の関係、すなわち $(S_c - S_s) / L \sim t$ 関係に変換して行うこととした(ここで L は沈下測定点間の距離)。ウソおよび竹村らが得た知見は、変換後においては、図-19中に示す傾向となる。

座標軸を変換した理由は、テールボイド沈下区間と後続沈下区間の地盤変形メカニズムを検討するためには、地盤のどの部分が変形しているかを把握する必要があり、地中変位の測定点間の区間歪みで整理する方法が適当と判断したことによる。

(2) 裏込め注入未実施区間における沈下区分の試み

図-19の整理方法で実測値を用いてテールボイド沈下と後続沈下に区分してみる。

分析対象とした実測値は、計測断面Bにおける裏込め注入未実施区間とした。これは、トンネル中心線上の鉛直変位挙動が裏込め注入の有無に関わらず同様であることに加え、テールボイド発生に伴う純粋な地盤変形挙動を示し、地盤変形のプロセスを解明する目的からも基本になると考えられるためである。

計測断面Bのトンネル中心線上における鉛直変位測定点間の区間歪み経時変化を図-20に示す。裏込め注入未実施区間(9/21～10/5)における結果は、

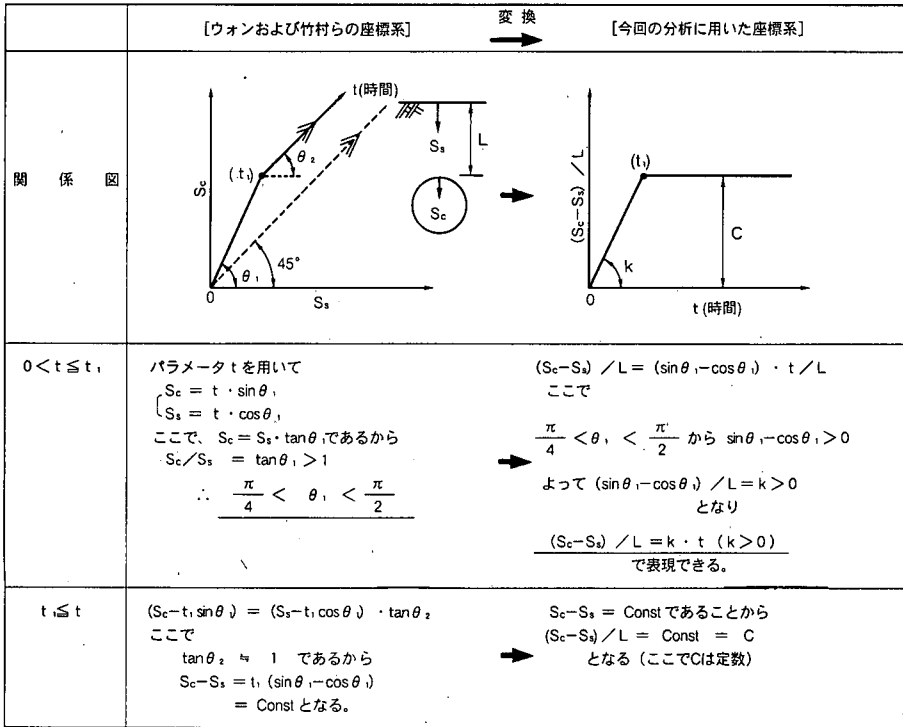


図-19 座標軸の変換

ウオンおよび竹村らが指摘したとおり、テールボイド発生直後においてはトンネル近傍の変位ほど沈下増分が大きい。言換えれば、トンネル近傍ほど引張り歪みが増加する。その後トンネル中心からの距離に関わらず沈下増分が同様な状態、すなわち区間歪みが概ね一定となる範囲の存在が理解できる。さらに、両者の境には明瞭な変化点が存在していることも判明した。この変化点を、テールボイド沈下と後続沈下の区分点として定義する。

なお、計測点SB3-4とSB3-5間の区間歪みは、長期的(10/20～5/19)には、図-20に示す様に鉛直歪みが時間とともに圧縮方向に増加する傾向にあり、このことはウオンおよび竹村らのライニングを有しない模型実験では確認されなかった現象である。これは地盤変位に比べセグメント変位が小さいことに起因しているものと考えられる。

7. テールボイド沈下区間と後続沈下区間における地盤変形挙動

計測断面Bを対象に、図-19で定義した変化点を境

として、テールボイド沈下区間(図-20中(a)の区間)と後続沈下区間(図-20中(b)の区間)について、それぞれの区間における変位と鉛直歪みの分布を分析することにより、地盤変形挙動を検討することとした。

(1) 地盤変位分布

裏込め注入未実施区間でのテールボイド沈下区間と後続沈下区間における地盤変位の分布を、それぞれ図-21、図-22に示す。

テールボイド沈下区間における地盤変位は、図-21に示すように、概ねトンネル近傍における周辺地盤全体がトンネル中心方向に向う傾向を示している。したがって、トンネル周辺部においては、弾性論による二次元円孔周りの変位分布で概ね近似できそうなのが改めて確認できた。しかしながら、詳細に挙動を分析すると、次に示す課題も発生しており、厳密には弾性論による近似だけでは、テールボイド沈下区間の変形メカニズムを完全に解釈できない難しさもある。

① トンネル中心の真横での水平変位量(2.3mm)の、トンネル中心線上の鉛直変位量(31mm)に対する比率

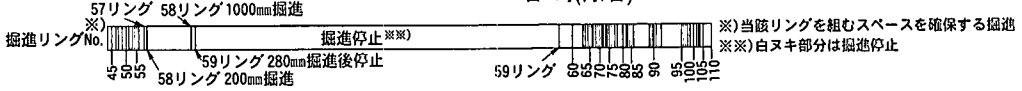
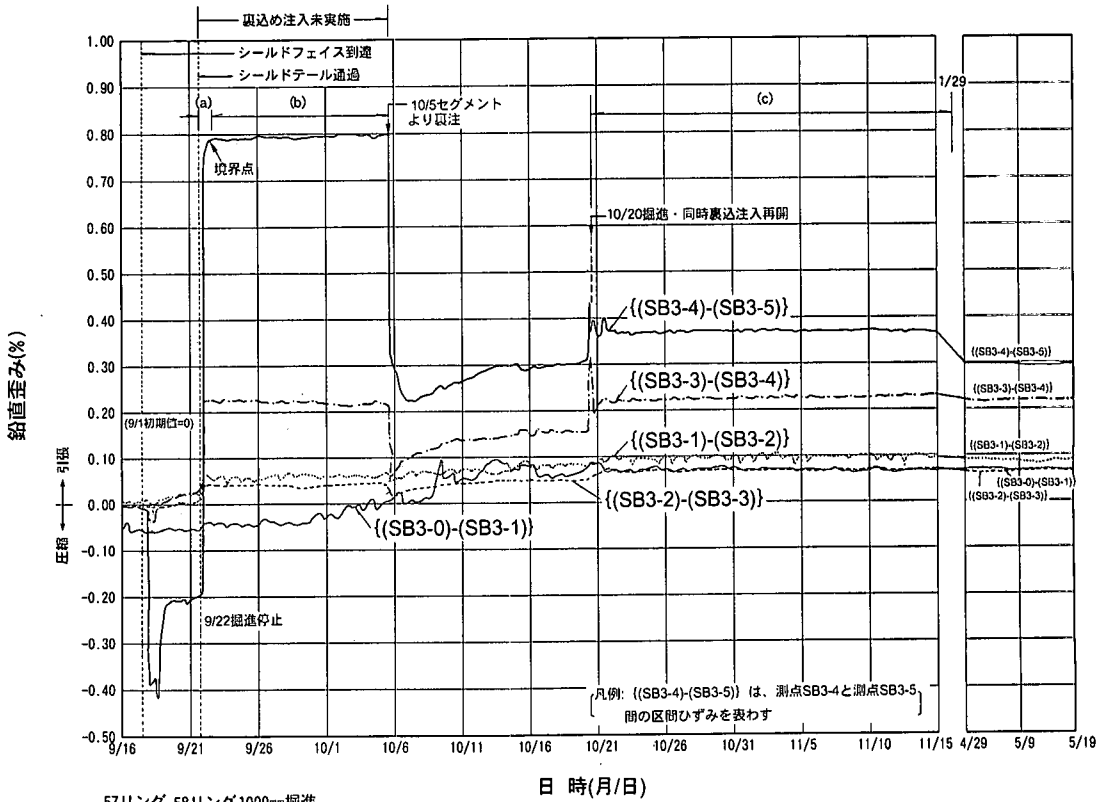


図-20 トンネル中心線上における鉛直歪み (計測断面 B)

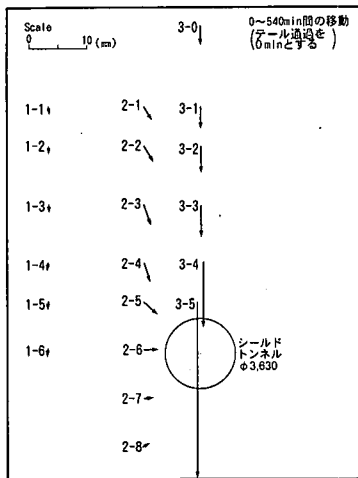


図-21 テールボイド沈下区間における地盤変位分布図 (計測断面 B 裏込め未実施区間)

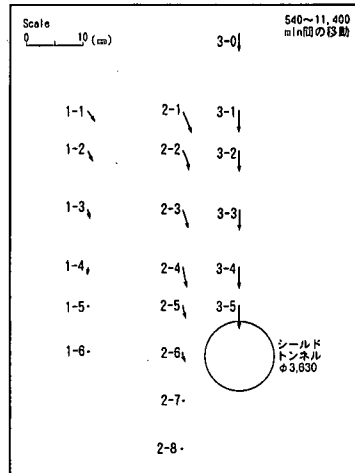


図-22 後続沈下区間における地盤変位分布図 (計測断面 B 裏込め未実施区間)

は、0.07と極めて小さい。これら鉛直変位量と水平変位量の比率を実設計で良く用いられる応力解放力の側圧比の範囲0.5~0.8で近似することは難しい。

② 側方部の水平変位は、図-14から得られた様に、トンネル中心の真横に位置する最大水平変位の発生位置を境にして、トンネル上半においては実測値>解析値となるのに対し、トンネル下半においては解析値>実測値となり、相反する傾向を示す。

以上のことから、テールボイド沈下区間の変形挙動について、弾性論を援用して近似する場合、トンネル周辺全体挙動を一様に対象とすることには難しさがああり、着目領域を限定して近似させる方策が重要であると考えられる。

後続沈下区間における地盤変位は、図-22に示すように、トンネル中心線上の直上部においては、地表面からの深さに関わらず概ね同じ沈下量が発生している。この時側方部測線2の変位方向は、テールボイド沈下時の変位方向に比べ、トンネル下方に向かっており、この動きが後続沈下形態の特徴ではないかと考えられる。

特にトンネル中心の真横に位置する測点2-6が、テールボイドの時にはトンネル中心に向かい水平変位しているのに比べ、後続沈下の時にはトンネル下方に変位しているのが特徴的である。この現象は今回計測を行ったシールド現場と類似の地盤において吉田らが実施した現場計測結果⁹⁾(竹の塚雨水幹線その2シールド、 $\phi=4550\text{mm}$ 、泥水式、沖積粘性土)にも現れており、軟弱粘性土地盤における挙動として理解できる。

(2) 鉛直歪み分布

上述した地盤変位分布が発生する時に地盤のどの箇所が変形しているのかを理解するため、古山¹⁰⁾や桑原・小林⁹⁾も注目した測点間の鉛直歪みに着目して検討した。裏込め注入未実施区間でのテールボイド沈下区間と後続沈下区間における測点間の鉛直歪み分布を、それぞれ図-23、図-24に示す。

テールボイド沈下区間における鉛直歪みは、図-23に示すように、トンネル中心線上の直上部においてはトンネル近傍ほど大きい引張が発生し、トンネル側方肩部においては圧縮が発生している。

後続沈下区間における鉛直歪みは、図-24に示すように、トンネル中心線上の直上部においては、歪みがほとんど発生しておらず、トンネル側方肩部においては圧縮が発生している。

さらに、長期的に見た後続沈下区間(掘進・裏込め注入を再開した10/20からセグメント変位計測終

了日の1/29に亘る間：図-20中(c)の区間)における鉛直歪みの増分は、図-25に示すとおりである。これより次に示す特徴が理解できる。

① トンネル中心線上の直上部(測点SB3-0~SB3-5間)においては、裏込め未実施区間での後続沈下挙動(9/22~10/5)と同様で、歪みがほとんど発生していない。その反面トンネルに直近している測点SB3-5とセグメント間にある地盤には、極めて大きい圧縮歪みが発生していることが理解される。

② この時、トンネル側方部においては、図-24に示す裏込め注入未実施区間においてトンネル肩部を中心に見られた圧縮歪みが、長期的には図-25に示す様に、さらに増加・進展し、測線2のみでなく測線1まで影響していることが確認できる。

①の様な、トンネル中心線上の直上部における、後続沈下区間での歪み分布は、図-26に示す様に、有楽町下部粘性土層をシールドで施工した現場(墨東本所連系管路、 $\phi=2800\text{mm}$ 、ブラインド式、沖積粘性土)において地上から直接測定したセグメントのクラウン部の変位と地中内の変位から求まる歪み分布にも同様に現れている。さらに、この現象と同様な実測結果が葛野らによっても報告¹¹⁾されている(鶴見シールド、 $\phi=5300\text{mm}$ 、土圧式、軟弱粘性土)。これらの結果から、今回実施した現場計測におけるトンネル直上部の鉛直歪み分布は、軟弱粘性土地盤における地盤挙動として理解される。

さらに、トンネル中心線上の直上部で上述した歪み分布が発生している時に、トンネル側方部においては、トンネル肩部にあたる測点SB2-5とSB2-6間で圧縮歪みが卓越し、増加しているのが特徴的な挙動である。これらのことから、トンネル側方部における圧縮歪みの増加が、トンネル中心線上の直上部における歪み分布や後続沈下に影響を与えている主要因ではないかと考える。

なお、この様な地盤変形は、今回の計測断面が位置する地層層序を考慮すると、トンネルが沖積粘性土地盤中に包み込まれて位置する場合に発生する挙動であると考えられる。このことから、今回の計測断面において、トンネル上位に位置する砂質土層の存在は、粘性土挙動に影響を与える可能性を有していることに留意する必要がある。ただし、筆者らが分析した沖積粘性土中における既往の現場計測データの再評価¹²⁾からは、トンネル上位において、砂質土層の介在のしかたが異なっても、変形メカニズムを大きく変えるもので無いことが理解されている。

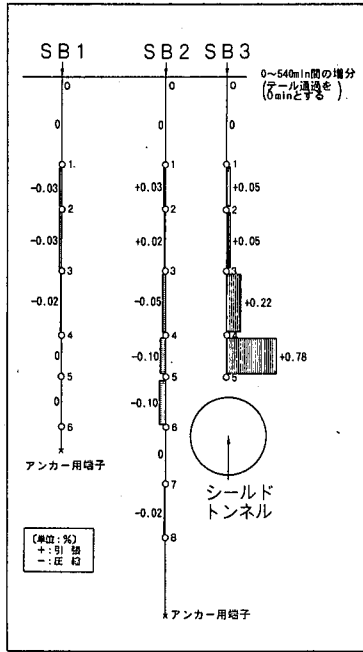


図-23 テールボイド沈下区間における地盤中の鉛直歪み分布図
(計測断面B 裏込め未実施区間)

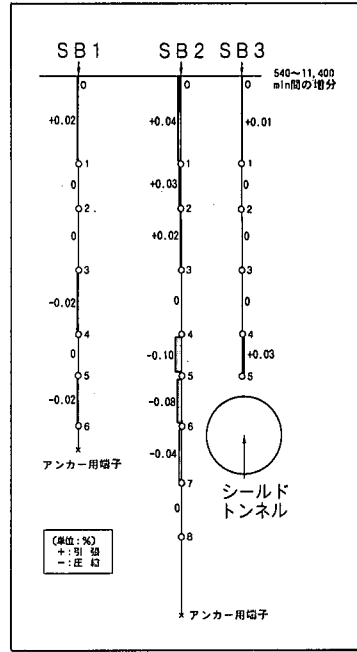


図-24 後続沈下区間における地盤中の鉛直歪み分布図
(計測断面B 裏込め未実施区間)

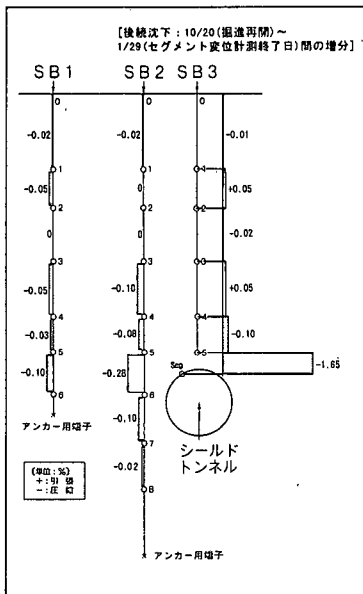


図-25 長期に亘る地盤中の鉛直歪み分布図
(計測断面B 裏込め実施区間)

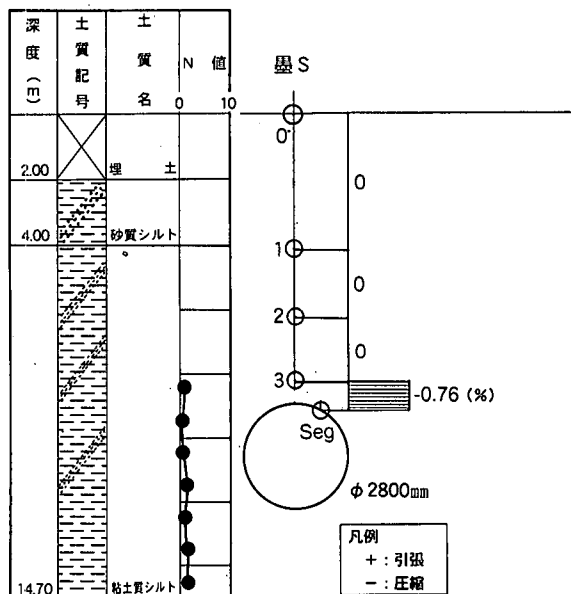


図-26 沖積粘性土での既往現場計測に見るトンネル直上部鉛直歪み分布図

8. まとめ

トンネル側方部(測線2)の変位挙動から得られた知見を次に示す。

① 側方部の鉛直変位は、裏込め注入の有無に関わらず同様な挙動を示しており、直上部で見られたシールド通過に伴う隆起やテールボイド発生による急激な沈下現象は見られず、後続沈下区間においてはトンネル肩部より上位にある土柱が概ね一体となって長期に亘り沈下する。

② 側方部の水平変位は、トンネル掘進や裏込め注入の施工方法の違いにより、シールド通過中やテールボイド発生後10リツグ程度の間においては、変位方向が計測断面毎に異なる傾向を示す。しかしながら水平変位の長期的挙動は、掘進や裏込め注入の施工方法による違いおよび裏込め注入の有無に関わらず同様な傾向、すなわちトンネル側に変位が漸増し、地表面に近いほど大きくなる傾向となる。これら施工履歴の影響を大きく受けない傾向は、トンネル中心線上の後続沈下にも見られた現象である。

トンネル中心線上の直上部変位とトンネル側方部の変位を総合的に評価して得られた知見をまとめて次に示す。

① テールボイド沈下から後続沈下への移行時における変化点を新たに定義する方法として、トンネル中心線上でかつトンネル近傍における地中変位測定点間の区間歪みの変化点に着目する方法を提案した。この方法によればトンネル直上における区間歪みは、テールボイド沈下区間については引張り歪みが増大し、後続沈下区間については歪み変化が、極めて小さくなり長期的には圧縮傾向になることが確認された。

② テールボイド沈下区間における地盤変位は、概ねトンネル近傍での周辺地盤全体が、トンネル中心方向に向かっていく。鉛直歪みは、トンネル中心線上の直上部で、トンネル近傍ほど大きい引張り歪みが発生し、トンネル側方部で圧縮歪みが発生する。これらのことから、テールボイド沈下区間におけるトンネル周辺部の地盤変形挙動は、概ね二次元弾性論による無限地盤中円孔周りの変位分布で近似できそうである。但し、厳密には弾性論を援用しただけでは、テールボイド沈下区間の変形メカニズムを完全に解釈できない箇所もあり、弾性論の適用には変位の着目点を限定するなどの留意が必要である。

③ 後続沈下区間における地盤変位は、トンネル中心線上の直上部で地表面からの深さに関わらず概ね同じ沈下量が発生し、側方部でテールボイド沈下時

の変位方向に比ベトン下方に向かって変位している。鉛直歪みは、トンネル中心線上の直上部では歪みがほとんど発生しない、反面トンネルに直近した鉛直変位測定点とセグメント間にある地盤には極めて大きな圧縮歪みが発生している。また鉛直歪みは、側方部ではトンネル肩部で圧縮歪みが卓越し、増加・進展している。これらのことから、トンネル側方部における圧縮歪みの増加が、トンネル中心線上の直上部における歪み分布や後続沈下に影響を与えている主要因ではないかと考える。

④ 上記①～③で得られたトンネル周辺での地盤変形の定性的挙動は、シールド通過付近で掘進や裏込め注入の施工方法の違いにより異なるものの、長期的には裏込め注入有無の影響を大きく受けず同様である。

今回の現場計測におけるテールボイド沈下区間と後続沈下区間の挙動から、地盤変形挙動を理解することができたものの、断片的に得られた特徴的な挙動を順序立ててメカニズムを構築するためには下記の更なる解明と理解が必要となる。

① セグメント背面で接触する地盤の詳細挙動について理解が必要。特に後続沈下区間における把握が重要。

② トンネル周辺部において現場計測点で把握できる地盤挙動より、詳細な土の動きについて更なる理解が必要。

③ 現場で計測することが極めて難しいトンネル下方部の地盤挙動の把握が必要。

上記挙動を把握するには、セグメントと地盤の境界における地盤挙動計測、緻密な計測点の配置およびトンネル下方部での計測の初期値把握が必要となるが、現場計測では物理的・経済的に限界がある。したがって、今後は現場における応力状態と強度・変形挙動が概ね再現可能な遠心模型実験を現場計測結果の解釈に援用することにより、上記の課題解決を目指す予定である。

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の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) 吉田保, 今西肇, 山崎剛: シールド工法の調査・設計から施工まで「9.1.2(1), 地盤変状の発生機構」地盤工学・実務シリーズ3, pp. 275-278, 1997.
- 3) ウィン・シンファン, 丸山隆, 斉藤邦夫, 木村孟: 正規圧密地盤内の2次元トンネルの変形破壊挙動, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp. 1551~1554, 1985.
- 4) Takemura, J., Kimura, T. and Wong, S. F. :

- Undrained stability of two-dimensional unlined tunnels in soft soil, Proc. of JSCE, No. 418, III-12, pp. 267~277, 1990.
- 5) Mair, R. J. : Centrifugal modelling of tunnel construction in soft clay, PhD. Thesis, Cambridge University, 1979.
- 6) Hanya, T. : Ground Movements due to Construction of Shields-Driven Tunnel, Vol. IV Case Histories, Proc. 9th ICSMFE (Tokyo), pp. 759~790, 1977.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 吉田保, 内田賢司, 高橋良文 : 軟弱粘性土地盤におけるシールド掘進に伴う地盤変状と家屋挙動の計測結果, 山留め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発表論文集, pp. 253~260, 1992.
- 10) 古山政勝, 新津強, 上野文裕, 中谷正男, 小山俊博 : シールド工事における地盤変状測定(その2), 第16回土質工学研究発表会講演集, pp. 1537~1540, 1981
- 11) 葛野恒男, 鈴木通正, 平田栄司, 橋本正, 早川清 : 鋭敏粘性土地盤における土圧シールドの掘進に伴う後続沈下について, 第25回土質工学研究発表会講演集, pp. 1765~1766, 1990.
- 12) Kuwahara, H., Yamazaki, T. and Kusakabe, O. : Ground deformation mechanism of shield tunneling due to tail void formation in soft clay, ISSMGE, 1997. 9.

(1998. 9. 18 受付)

BEHAVIOUR OF GROUND DEFORMATION AROUND SHIELD TUNNEL CONSTRUCTION IN SOFT CLAY

Takeshi YAMAZAKI, Masahiro OHTSUKA and Osamu KUSAKABE

Long term measurements of ground movements were made at three different sections around an earth pressure balance shield tunnel construction in Yurakucho lower clay. The data were examined in view of tail void settlement and subsequent settlement. The results revealed that (1) it is rational to distinguish the tail void settlement and subsequent settlement by the change in vertical strain immediately above tunnel crown, (2) ground deformation during tail void settlement could be approximately expressed by an elastic solution for a cavity in an infinite media, and (3) soils around the tunnel move predominantly downwards during subsequent settlement.