

推進と地盤の挙動

キーワード

沈下, 隆起, テールボイド, 地山の応力解放, 土被り比

島田 英樹

SHIMADA Hideki

九州大学大学院工学研究院
地球資源システム工学部門准教授



千田 尚

SENDA Takashi

九州大学大学院
工学院



1. はじめに

一般に推進工事は、シールド工法と同様に、既設の他のトンネル、ガス管や水道管等の地下埋設物、ビルや鉄道・橋梁等の各種重要施設物の基礎等と、近接・交差して施工されることが多い。さらに地上には各種施設・道路等が密集している。したがって、掘進に際してはこれらの近接構造物に変状を与えないことが厳しく要求されている。

また、特にトンネル前面および上部における変状には、注視すべき課題が多く残されている。すなわち、推進工事およびシールド工事の増加とともに技術も向上し、年々難しくなる地質条件、施工条件を克服できるようになってきたが、沈下問題の解決は未だ十分とは言えず、古くて新しい課題として残されている¹⁾。

2. 地盤変状の実態

一般に自然な状態の地山の土は力学的に釣り合って安定しているが、ここにトンネルを掘ると、土が乱れたり緩んだりして釣り合いが乱れて不安定な状態になり、土はある方向の力を受けて動くことになる。これに伴って発生する変位が地盤変位と呼ばれる²⁾。トンネル掘削によって生じる内空変位および地盤変位の特徴は、変位の分布形状、一点の変位の経時変化や地盤の乱れ等に現れる。あるいは、切羽からの距離に依存するとされる場合もある。内空変位および地盤変位の

メカニズムには、掘削が進み変位計測点から切羽が離れるに従って初期地圧の解放率が高くなり、それに伴う弾性変位と地山のクリープ特性による非弾性変位の2つがあると考えられている³⁾。

2-1 発生機構

掘進に伴う地盤変位の経時変化は、一般に図-1に示すような曲線で表され、沈下経時曲線と呼ばれる。経時沈下曲線は、地盤の種類、掘進の良否に大きく影響し、それを分析することにより沈下に影響する要因が抽出される。

この図に見られるように、地盤沈下の種類や原因等は5段階に分類される。

- ①先行沈下
切羽がかなり手前（約10m程度）にある時期から、切羽直前に至る間に生じるもの。
- ②切羽前沈下および隆起
切羽が地表のごく手前（数m程度）に達した時期から、切羽に達する間に生じる沈下、または隆起現象。
- ③テール沈下
切羽が達してから、掘進機のテール部が通過するまでの間に生じる沈下現象。
- ④テールボイド沈下
掘進機のテール部（後方部）が通過した後に生じる沈下現象。

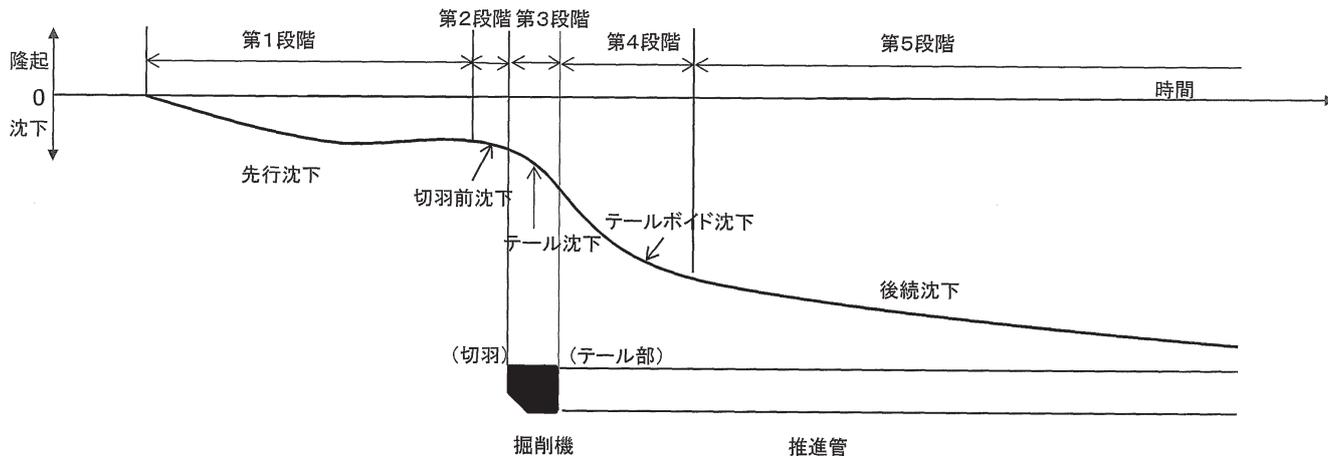


図-1 沈下経時曲線模式図

⑤後続沈下

主に、地盤の乱れに起因する圧密およびクリープ的残留沈下現象。

これらをまとめて表-1に示す。

2-2 影響領域

地盤変位が周辺地盤のどの範囲まで影響が及ぶのか

という影響領域を把握することは重要である。図-2 および図-3に、掘進に伴う周辺地盤の影響範囲を土質の種類毎に模式的に示す⁵⁾。

まず、沖積粘性土地盤についての特徴を述べると以下のようなのである。

①切羽正面に土砂の取り込み域が発生し、この部分の土は推進機方向に動いている。

表-1 地盤変位のメカニズム

沈下の種類	原因	地盤状況の変化	変位メカニズム
①先行沈下	地下水位低下	有効土被りの増加	圧縮・圧密沈下
②切羽前沈下、隆起	切羽崩壊、過大な取込み、切羽押込み	地山の応力解放、乱れ、負荷土圧	弾・塑性変形
③テール沈下	掘進機通過時の攪拌	乱れ	圧縮
④テールボイド沈下	テールボイドの発生	地山の応力解放	弾・塑性変形
⑤後続沈下	以上全要因 (残留分)		圧密およびクリープ沈下

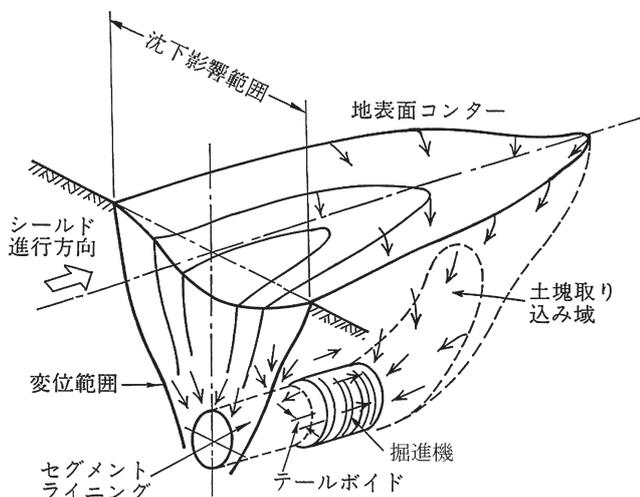


図-2 地盤変位模式図 (沖積粘性土地盤)

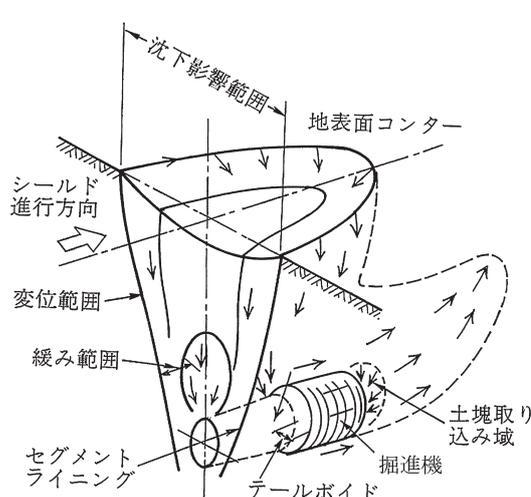


図-3 地盤変位模式図 (沖積砂地盤)

- ②取り込み域の外の地盤は、掘進機本体外周の摩擦によって推進機方向に押される。
- ③切羽前面の地盤は沈下している（掘進機の操作によっては隆起する場合がある）。
- ④テール（掘進機後部付近）より排土の地盤は、テールボイド発生による応力解放によって周辺の土塊がテールボイドに向かって落ち込み沈下する。
- ⑤トンネル周辺のアーチ作用は認められない。

次に、沖積砂地盤の場合は地盤の動き自体は粘性土地盤の場合と変わらないが、地中ではトンネルすぐ上の部分が大きく沈下し、それをよりも上方の沈下は小さくなる。土のアーチ作用が発揮され、アーチの内側にゆるみ領域が発生することになる。

洪積地盤の場合も同様の分布となるが、自立性が高いので、テールボイドが発生するなどの応力解放による地盤変位の領域は沖積地盤よりも狭く、ほぼ掘削断面幅内に収まることが多い。

一般に、洪積地盤や沖積砂地盤の場合には、地中変位が地表面に伝播される過程で低減されるのに対して、沖積粘性土地盤の場合には、掘進機通過後の沈下が長期間にわたり継続し、土被り比（ H/D 、ここで H ：土被り（m）、 D ：掘削径（m））が大きくなるほど地表面沈下が大きくなることがある。また、土被り比と地盤変状についても、ある程度の相関関係が見出されている。すなわち、沖積地盤の場合、 H/D が2以上になると沈下量が増大する傾向が見られ、また、洪積地盤では H/D の値に関わらず、沈下量に大差がないとされている⁵⁾。

3. 地盤変状解析

解析を行う入力設定では、入力特性値、解析領域や初期応力等種々の因子があるが、掘削相当外力もしくは応力解放率も大きい影響を与えるとされている⁶⁾。推進工法等による地盤変状は、掘進機（作用側）により周辺地盤（応答側）に釣合い状態が一旦崩れ、地盤内の応力が再配分され安定側に移行する過程で発生する現象としてとらえることができる。地盤変形量を予測解析するには、下記の条件が必要となる⁵⁾。

- ①作用側である推進施工段階の各要素（掘削、推進、テールボイドの発生、滑材（裏込め材）注入等）が解析に組込まれること。

- ②掘削機と地盤との境界面（掘削面、接触面）での地盤の動きが再現できること。

- ③応答側の地盤変形の基本方程式、土の構成則およびそれらの入力物性値が正確に決定されていること。

これらの条件にて予測解析を行うと、テールボイドの沈下以外はほとんど問題とならないので解析は簡略化でき、また、入力定数や解析モデルを工夫することにより、二次元解析でも実用上十分な精度で地盤変位を予測することができる。しかし、予測解析手法についてはかなり研究が進んでいるものの、地盤条件等が複雑な場合には、すべてを適切に考慮できる計算法は確立されていないのが現状である⁴⁾。

4. 解析事例

今回、推進工法を想定した施工条件にて、比較的安定した土質条件の掘削断面における変位について解析を行った。解析には二次元と三次元があるが、実際の地盤変状は三次元的に生じるため、解析も三次元有限要素法を用いるのが理想であるが、入力データが膨大となるため、一般には横断方向および縦断方向に分けて行われる。本節では、前節で述べた工夫を加えて、縦断方向よりの二次元解析を行った解析事例を述べる。

4-1 解析方法

今回、呼び径3000における推進工法を想定し、土被り40mを表-2に示す条件にて行い、掘進速度は、1m/日とし掘進後速やかに注入される滑材を裏込め効果の期待されるものを使用し注入直後から強度が発現する充填材（表-3）を注入するものとした。

また、掘削方法は密閉式とし推進工法で市場性の大きい泥濃式と泥水式とし比較を行った。切羽圧は、土圧と若干の予備圧を加え、二方式では添加材の物性値と掘削領域が異なるのでテールボイドへの加圧値と領域を各々設定した。

地山の解析には弾性体モデルを用い、荷重条件は地山荷重のみとした。

境界条件は、上端面（地表面）は自由面、下端面の内水平方向は可動、鉛直方向は固定、側面の内鉛直方向は固定、水平方向は可動とした。図-4、5に解析モデル図、掘削断面詳細図を示す。

表-2 解析用入力値

	泥岩	粘性土	砂質土	推進管
ヤング率 (MPa)	74	50	55	2.2×10^3
ポアソン比 (-)	0.30	0.33	0.35	0.20
単位体積重量 (MN/m ³)	0.021	0.024	0.21	0.080

表-3 充填材の入力値

	注入直後	14日後	30日後	84日後
ヤング率 (MPa)	9.8×10^{-4}	0.33	0.43	0.56
ポアソン比 (-)	0.45	0.40	0.39	0.37
単位体積重量 (MN/m ³)	0.021	0.021	0.021	0.021

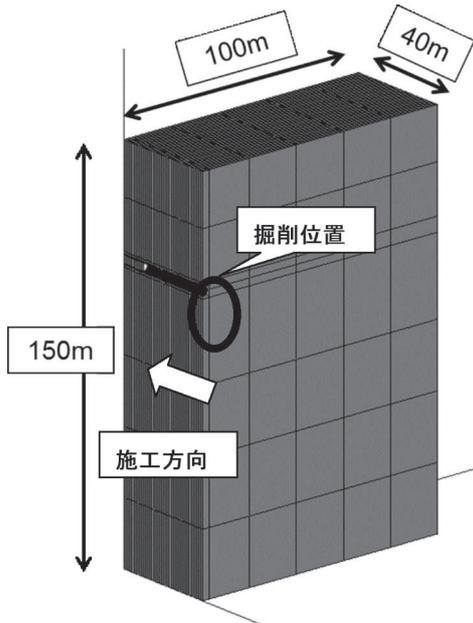


図-4 解析モデル図

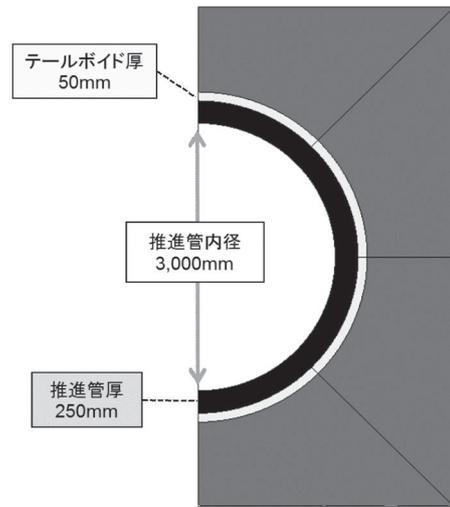


図-5 掘削断面詳細図

4-2 解析結果・検討

図-6, 7に, 推進延長30m施工時において土質を変更しての解析を行った結果を示す。掘進機前面には, 切羽面隆起が発生し, テール沈下, テールボイド沈下そして後続沈下へ移行する経時曲線が読取れる。トンネル内面, 天端部・下端部ともにテールボイド部の機能として必要領域として想定した50mm以上の

変形をした砂質土および粘性土と比較的変形量の小さい泥岩について示した。特に変化量の大きく表れた砂質土および粘性土については, 推進管と地山が接触している状態となり, 滑材の機能が効果的に作用せず, 管周面抵抗は急増し推進力が過剰となり, 推進不能とか管割れを発生することとなる。また, 推進工法は推進完了後, 管と地山の周面に裏込注入を施さねばなら

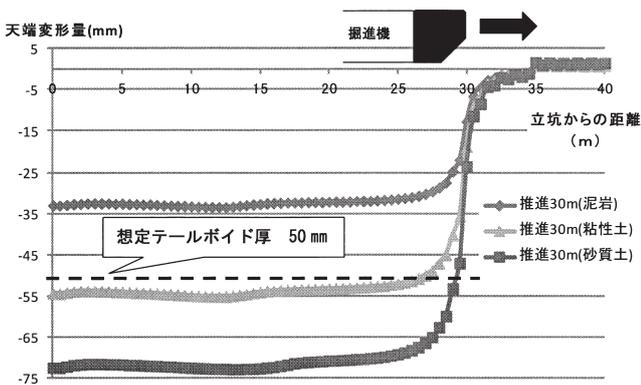


図-6 土質相違によるテールボイドの変形量 (天端)

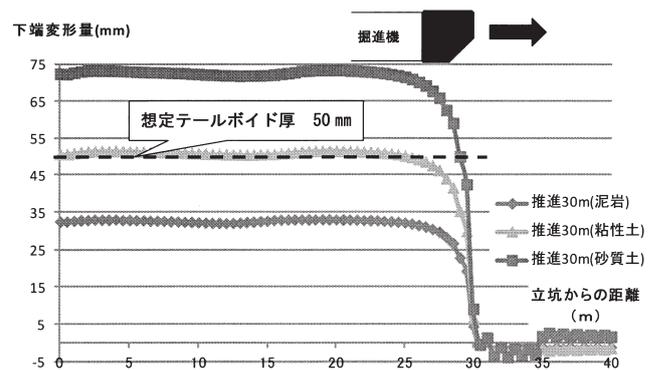


図-7 土質相違によるテールボイドの変形量 (下端)

ないが充填材を注入する領域が無くなれば土被り圧等に対応して適切に周辺地山を維持することができなくなり沈下または地中に空隙が発生すると推察される。

図-8、9は、土質：泥岩における工法別によるテールボイド変形量を解析したデータである。密閉式の内、泥水式の場合、テールボイドへの圧力が切羽面圧の1/4程度を切羽前面より5m程度保持できると言われており、今回、掘削機構を考慮した。テールボイドの発生と同時期に掘削面直後から掘進機側面に地山は乱れ応力解放状態となるそこに一時的に地中応力以上の泥水圧が掛かり、トンネル坑壁部の地山を天端部は隆起、下端部は沈下させ、その後泥水圧の低下とともに後続沈下に移行し終息する。これは、テールボイド部形成される初期段階における応力解放に基づく地盤のひずみが要因と考えられる。

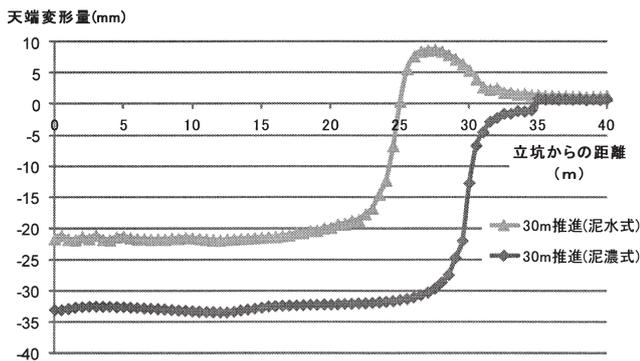


図-8 工法相違によるテールボイド変形量（天端）

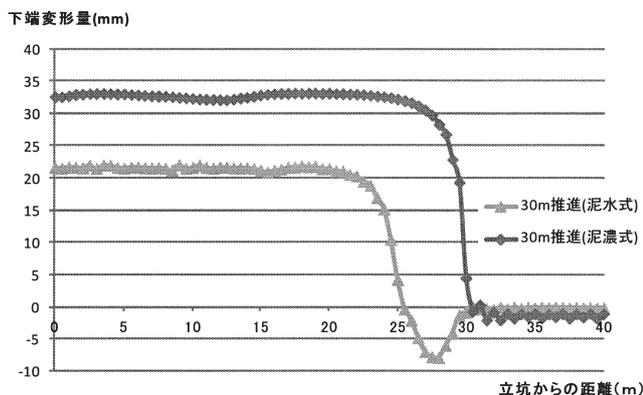


図-9 工法相違によるテールボイド変形量（下端）

5. おわりに

推進工法は、トンネル内空位において地盤状況の変化を受けながら掘進機のテール部テールボイドを形成して施工を行うため、地山の応力解放が継続することになり、周辺地山の安定性を向上させることは容易ではない。今回、40m程度の土被りにおけるトンネル掘削の変形特性についての検討を数値解析によって行った。その結果、安定した地盤であれば地盤変形があってもテールボイドを効果的に維持することができることが判明したが、どのような形で安定かつ効果的に保持することができるかは、施工方法および滑材、裏込め材等の材料が今後の課題である。

地盤沈下または変形が問題となる地質は、一般的に切羽の状態が非自立性の軟弱な地山であり、粘性土においては流動性粘土およびシルトである。砂質土においては地下水面上でシルト、粘土の含有率が少なく均等係数が小さい崩壊性砂および地下水面化にある崩壊性または剥落性に砂、砂礫である¹⁾。推進工法における地盤変位現象は、地質、掘削径、土被り、時間、地下水位等の条件のほかに、施工法、施工実績等による影響の条件が加わり、各々の条件は互いに関連し複雑な様相を呈している。このような多様で変化に富む現象を単独な手法で究明することは難しく、複数の方法を組み合わせ、これらを互いに補いながら解明して行くことが現状の解決策と言える。

【参考文献】

- 1) 小林健郎・西松裕一：シールド掘削に伴う地盤変位に関する研究，土木学会論文報告集，pp.77，1982
- 2) 社地盤工学会：シールド工法入門，1992
- 3) 伊東孝・赤城知之・土山茂希：トンネルの切羽進行に伴う内空変位と地山のクリープによる変位の分離，土木学会論文集，pp.279，1990
- 4) 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削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，pp.103～108，1986
- 5) 社地盤工学会：シールド工法の調査・設計から施工まで，1997
- 6) 猪熊明・田子島充：シールドトンネル弾性有限要素解析の入力設定に関する研究，トンネル工学研究論文報告集第9巻，pp.249，1999