

6.1 はじめに

本章では、『シールド工事』を対象にトンネル掘削と 周辺地盤の変状について述べる。

シールド工法¹¹は、開削工法と比較して周辺の生活圏 や交通に対する影響が少ないという特長から、都市に適 したトンネル工法として注目され急速に発展してきた。 シールド工法発展の歴史を見ると、技術開発の流れは密 閉型シールドの開発など切羽安定を含む地盤変状対策に 集約されると言っても過言ではない。最近のシールドで は、切羽安定技術のみならず裏込め注入やシールド姿勢 制御面で技術の向上が進み、地盤変状でも変状量や発生 形態が開放型シールド時代と大きく異なってきている。 したがって、ここでは泥水式や土圧式の密閉型シールド の地盤変状を主に取扱うことにする。

6.2では、シールド工事における地盤変状の原因と影響要因、変状メカニズムと施工プロセスの関係、地盤変状の実態等の一般論を紹介する。特に変状のメカニズムについては、できるだけ 2~4 章との対比を行いながら 議論を進める。これは、シールドの場合、施工プロセス を考慮に入れて変状メカニズムを理解する必要があるか らである。

このように、一般論を紹介した後に、6.3で計測例に よる変状データの見方を紹介し、メカニズムについての 理解を深めることにする。また、近年注目を集めている 遠心模型実験と計測例の対比や設計・施工における計測 データの生かし方についても紹介することにする。

6.2 シールド掘進による地盤変状

掘削からテールボイド 発生までの施工プロセス は、地盤から見れば除荷 過程に相当する工事であ る。これにバランスさせ るための切羽拘束力や裏 込め注入圧を作用させて も、両者を完全に一致さ せることは難しく、その 結果トンネル周辺に地盤 変状が発生することにな る。

なお,ここで述べる地 盤変状は,過去の施工報 告で多く見られる地表面沈下だけでなく,隆起や側方変 形を含んだものを意味している。

6.2.1 地盤変状の原因と影響要因

シールド施工に伴う地盤変状は、シールド径、土被り、 トンネル線形、土質条件などの現場条件とシールド工法、 裏込め注入、施工管理、補助工法などの施工条件が大き く関係する。これらの条件は複雑に関連しあい、時とし て地下水位低下、切羽の崩壊、切羽の押込み、ボイド発 生などの地盤変状の原因を発生させる。

施工プロセスごとの具体的な変状原因への影響要因と して、切羽では泥水式シールドにおける泥水性能の不良 や泥水圧の変動、土圧式シールドにおける掘削土量と排 土量のアンバランスや排土口の止水不良をあげることが できる。また、シールド通過部ではシールド外周面と地 山の摩擦や蛇行修正を、テール部では裏込め注入の不良 による空洞発生や注入材の地山への貫入を、覆工部では 土・水圧の作用により生じるセグメントの変形や継手部 からの漏水をあげることができる。

地盤変状原因と影響要因についてまとめたものを表一 6.1に,地表面沈下の原因についての傾向概念を図-6.1 に示す。

また,3.5 シールドトンネル掘削で紹介されたように, 粘土および砂地盤におけるトンネル安定問題や地盤変形 に関する遠心模型実験も行われるようになっており,シ ールドの地盤変状問題を理解するうえで有益な研究とな っている。

6.2.2 地盤変状のメカニズム^{2)~4)}

シールド掘進に伴う地盤変状メカニズムは,以下の3 項目に整理することができる。

表―6.1 地盤変状原因と影響要因	2)
-------------------	----

原因	補助工法	シールド	裏込め注入	施工管理	
地下水位 低下	・地下水位低下工法 ・圧気工法 ・薬注の不完全性	・切羽における水圧バラ ンス性能の不良	・裏込め不良の場合のセ グメントからの漏水	・セグメント組立て不良 による漏水	
切羽の崩 壊,切羽 の押込み	・薬注の不完全性	・切羽における土圧,水 圧バランス性能の不良		 ジャッキ推力および排 土量の管理不良 	
シールド の通過		 ・スキンプレートと地山 との摩擦による乱れ 		・蛇行	
テールボ イドの発 生		・スキンプレート補強リ ブの厚さなど	・注入量の不足(注入時 期の遅れによる)	 ・余掘り,蛇行修正の不 良 	
地盤の乱 れ .	・過大な薬液注入 ・薬注時削孔による乱れ	・切羽掘削時の撹乱およ び地山の崩壊		 ・過大推力,過小推力に よる地山の変状 	

(1) 地中応力の変化による変状

切羽における掘削やテールボイド発生に伴って,地中 応力が変化(再配分)することによって生じる地盤の破 壊を伴わない変状で,変位量としては小さなものである。 地盤の力学的特性などにより弾性的変形,弾塑性的変形, 粘弾性的変形(以下,弾・塑性変形という)や緩み領域 の体積変化による圧縮変形に分類される。

(2) 水理条件の変化による変状

開放型シールドにおける切羽からの湧水やシールドテ ール部およびセグメントからの漏水による地下水位低下, すなわち地盤内有効応力の増加によって生じる変状であ る。

(3) 地盤の破壊を伴う変状

地盤の破壊につながる要因には、切羽の崩壊や裏込め 注入過剰による注入材の地山への貫入等がある。これら の原因は、3章で紹介された崩壊メカニズムと関連し、 周辺地盤の変状を助長する。

6.2.3 施工プロセスと変状メカニズム

シールド工事では、様々な地盤変状に影響を及ぼす 様々な要因が発生することが分かったが、ここでは図ー 6.2に示す縦断方向地表面沈下の経時変位曲線模式図に 示される施工プロセスにしたがって、そのメカニズムを 紹介することにする。

(1) 第1段階

この変状は先行沈下と呼ばれるもので、シールド切羽

図-6.2 経時変位曲線模式図

のかなり前方(数10m 程度) から観測されるものである。

この現象の原因は地下水位 の低下で、メカニズムとして は地盤内の有効応力の増加に よる沈下と解釈できる。この 変状が観測されるのは、開放 型シールドに限定されると考 えて良い。

(2) 第2段階

この変状は,切羽前変形と 呼ばれるもので,シールド切 羽の付近(数m程度)で観 測されるものである。

この現象の主要因は,切羽 作用圧と拘束圧のアンバラン

ス,掘削土量と排土量のアンバランスである。変状の程 度が大きい場合は,地盤の破壊を伴う変状が生じている と推定される。

(3) 第3段階

この変状は,通過時変形と呼ばれるもので,シールド 切羽が到達してからテールが通過するまでの間に観測さ れるものである。

この現象の主要因は、シールド通過時の周辺摩擦やシ ールド姿勢制御による周辺地山の乱れで、メカニズムと しては地中応力の変化による変状と解釈できる。

(4) 第4段階

この変状は、テールボイド変形と呼ばれるものでテー ルボイド発生から裏込め注入材の固化までの間に観測さ れるものである。密閉型シールドが主流となった現在で は、第2段階での変状が少なくなっているため、この段 階での変状が大きいと考えられている。

この現象の主要因は、テールボイド発生時の応力解放、 裏込め注入圧および注入量の過不足によるものである。 このため、沈下のみならず、隆起や側方への押広げが観 測されることもある。したがって、変状の程度が大きい 場合は、裏込め注入方法についての見直しが必要となる。 (5) 第5段階

この変形は,後続沈下と呼ばれるもので,シールド通 過後長期にわたって主に軟弱な粘性土地盤で観測される ものである。

> この現象は, 主に(1)~(4)の原因 により発生する変状の残留分(撹乱に よる圧密沈下を含む)と解釈できる。

> 以上述べた沈下の種類,原因,地盤 状況の変化およびメカニズムについて まとめたものを表一6.2に示す。

> 一方,シールド掘進に伴って発生す る横断方向の地表面沈下の形状は,図 ー6.3に示すようにトンネル中心線の 直上で最大沈下量となるような正規確 率曲線を逆にした曲線で近似させた形

土と基礎, 43-7 (450) NII-Electronic Library Service

58

表一6.2 地盤変状のメカニズム⁵⁾(一部修正)

沈下の種類	原因	地盤変状の変化	変状メカニズム
先行沈下	地下水位低下	有効土被り圧の増加	圧縮・圧密沈下
切羽前変形	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	 ・応力変化に伴う変形 ・破壊
通過時変形	シールド通過時の撹乱	乱れ	圧縮
テールボイド変形	テールボイドの発生 注入量注入圧の過不足	地山の応力解放,乱れ, 負荷土圧	 ・応力変化に伴う変形 ・破壊
後続沈下	上記全要因		主に上記の残留分

状になる。

また、沖積層(軟らかい粘土地盤と緩い砂地盤)にお ける実測例に基づく三次元的地盤変状分布の模式図を図 -6.4に示す。

ただし、シールド施工技術の進歩した今日では、図-6.4に示すような顕著な地表面沈下が観測されることは まれになっている。

図一6.3 横断方向地表面沈下の一般的傾向⁶⁾

6.2.4 地盤変状の実態

施工プロセスと地盤変状メカニズムの関係が理解でき たところで、地盤条件や施工法の違いによる変状の現れ 方の相違について見ることにする。

ここでは、大阪市交通局のシールド工事を例に解説す 3⁷⁾。

(1) 開放型シールドにおける地盤変状

地表面コンタ

土塊取り 认み域

> ルド構 シ

> > テールボイト

表一6.3 (測点1~12) および図一6.5に示す内容は、 1970年代中頃施工された開放型シールド6工区における 地表面沈下計測の記録である。なお、シールドは単線並

列で施工され、沈下計測の記録は各工区 において2点ずつ行われた。

- これらの資料から、経時沈下曲線につ いて以下の特徴が認められる。
 - 地盤条件Aの場合は、切羽前沈 下がシールド通過直前より始まるが, 沈下量は小さく,通過後の沈下勾配 も緩やかで、短期間で収束して、全 沈下量も小さい。

② 地盤条件 B の場合は、先行沈下 が早く始まり、シールド通過直後に急激に大きな沈 下量を示し、その後も緩やかな沈下が長期間生じて いる。

- 多イプCの場合は、タイプAとBの中間的な値 を示している。
- ④ タイプDの場合は、先行シールド通過前後に急 激な沈下を生じているが、通過数日後から後続シー ルド通過までの間隆起(二次注入の影響と推定され る)に転じている。そして後続シールド通過後は緩 やかな沈下を生じて、2か月程度で収束し、全沈下 量は13mm とタイプAに近い値となっている。

(2) 密閉型シールドにおける地盤変状

表-6.3 (測点13~16) および図-6.6に示す内容は、 1980年代前半に施工された密閉型シールド3工区におけ る地表面沈下計測の記録である。この年代になると裏込 め注入技術も改良され、地盤条件 B(測点13~16)では シールド機からの同時裏込め注入方式を,地盤条件 A (測点17,18)ではセグメントからの半同時裏込め注入 方式を採用している。なお、シールドは単線並列で施工 され, 沈下計測の記録は, (1)と同様各工区において2 点ずつ行われた。

これらの資料から、経時沈下曲線について以下の特徴 が認められる。

- 地盤条件Aの場合は、切羽前沈下(隆起)およ び後続沈下の変位が全く生じておらず、全沈下量も 1~2mm と少ない。
- ② 地盤条件 B の場合は、切羽前沈下または隆起を 生じている。しかし、13~16の地盤は軟弱粘性土で

図-6.4 地盤変位分布模式図5)

59

講 座

測 シールド径(m) 土被り比(H/D) 型 式 地盤条件 地盤条件の分類 点 1 開放型 半機械掘り式 6.904 1.59В 2 開放型 半機械掘り式 6.904 1.59В 3 開放型 半機械掘り式 6.926 2.02С А В 開放型 半機械掘り式 С 4 6.926 1.59 機械掘り式 沖積層 5 開放型 2.386.930 А 開放型 機械掘り式 6.930 沖積層 6 2.45Α \bigcirc () \bigcirc 7 開放型 手掘り式 6.950 1.44 D ()洪積層 8 開放型 手掘り式 6.950 1.73 Α 洪積層 9 部分開放型 セミブラインド式 6.920 1.59 В 部分開放型 セミブラインド式 10 6.920 1.73 В 開放型 手掘り式 6.930 11 1.92 в С D 12 開放型 手掘り式 6.930 В 2.31沖積層 13 密閉型 土圧式シールド в 6.930 1.50 密閉型 土圧式シールド 14 6.930 В 大部分が砂礫層 1.62 \bigcirc 15 密閉型 土圧式シールド 6.930 1.82 В 洪積層 16 密閉型 土圧式シールド 6.930 1.82 в 17 密閉型 泥水式シールド 6.940 2.22 Α 18 密閉型 泥水式シールド 6.940 1.43 А

あるにもかかわらず、全沈下量が7~12mmと、 開放型シールドの類似地盤条件での沈下量の1/5程 度となっている。

(3) 地盤変状の新旧対比

(1),(2)で述べたように,新旧のシールド工事での 地盤変状傾向には著しい違いがあることが分かったが, ここでは日本トンネル技術協会のアンケート調査に基づ く1980年代および1990年代のシールドの地表面沈下量を 対比したものを図-6.7に示し,その差を再確認するこ とにする。 このように、変状量を少なくすることがで きた主な理由を図ー6.2に示す各施工プロセ スでまとめると以下のとおりとなる。

- 第1段階……密閉型シールドの採用に より、地下水位を低下させることなく施 工することが可能となった。
- ② 第2段階……密閉型シールドの採用は もとより,掘削管理技術が向上したこと により、切羽での応力解放がほとんどな くなった。
- ③ 第3段階……施工経験が豊富になった ことやシールド方向制御技術の向上により、蛇行量等が少なくなった。

り、地行重寺が少なくなった。

④ 第4段階……同時裏込め注入工法の採 用や注入材の改良により、テールボイド発生部にお ける応力解放が少なくなった。

⑤ 第5段階……第1~4段階での施工法の改良により、後続沈下そのものを少なくできるようになった。

6.2.5 地盤変状の予測解析法

地盤変状メカニズムについて一通りの説明が終わった ところで,地盤変状の予測解析法についても触れておく ことにする。

前述のとおり,シールド分野では工法および施工技術 の改良を進め,地盤変状を最小限にする努力が積み重ね られてきた。

地盤変状の予測解析法も、シールド施工技術の向上に あわせた形で発展してきており、基本的には図一6.8に 示す①~④の順序で研究が進められてきた。

(1) 理論的な解析による予測

半無限弾性地山内の円形トンネル周辺の応力および変 位量などを Maxwell (マックスウェル)の定理を用い て予測する方法に, Jeffery (ジェファリー), Limanov (リマノフ)の研究^{®)}がある。Jeffery は弾性解としての 地表面沈下形状を示し, Limanov は, Jeffery の式から

> 土と基礎, 43—7 (450) NII-Electronic Library Service

図-6.8 地盤変状予測解析法の分類

トンネル直上の最大沈下量の予測式を導き出している。 この予測法は自立性の高い地盤における素掘りトンネル を対象としたものと考えて良い。

一方、日本では粘性地盤でのシールド工事における地 表面沈下量に着目して森の研究10)がある。この研究で は粘土地盤での全沈下量がテールボイドによる沈下量と 圧密による沈下量を合計したものであるとして、理論解 析と実験から予測計算法を求めている。

(2) 統計データによる予測¹¹⁾

統計データに基づく予測には、正規確率曲線を利用し 沈下形状を求める Peck (ペック)¹²⁾, Aversin (アバ ーシン)⁹⁾の方法,また最大沈下量を求めるAttewell $(\mathcal{P}_{\mathcal{P}} \not P \mathcal{P} \mathcal{P} \mathcal{P} \mathcal{P})^{13}$, O'Reilly-New $(\mathcal{I} \not P \mathcal{P} \mathcal{P})^{13}$, \mathcal{O} ー)¹⁴⁾,半谷¹⁵,藤田¹⁶⁾らの方法がある。

このうち、有名な Peck の方法 を図一6.9に示す。この方法は, 沈下トラフの形状を確率論におけ る正規分布曲線で近似し、更に沈 下トラフの幅を地山の種類別にト ンネル径と深さとの関係を無次元 量で与えている。

(3) 模型実験による予測 シールドおよび山岳トンネル分 野においては, 地表面沈下を対象 とした模型実験による研究が、村 山17, 島田18) らによって行われ た。これらの研究は、地盤材料と して乾燥砂やアルミ棒などを用い た二次元的な降下床実験(落し戸 模型)をベースとしたものである。

村山らは、降下床の降下量と沈下量の関係から、地表 面および地盤中の沈下量算定式を導いている。また、島 田は実験結果と実測データを対比し、地表面沈下形状と 沈下量を予測する式と沈下防止対策を提案している。

(4) 数値解析による予測^{19),20)}

シールド施工技術の向上と適用地盤の拡大に適合する ように、FEM(有限要素法)による解析技術も発展し、 現在では地盤変状予測解析法の主流となっている。この 手法によれば弾性解析はもとより、塑性や粘性を考慮し た解析、引張り応力に抗しえない地盤材料を考慮した No-Tention 解析, 圧密現象の解析などが可能である。

図-6.10にシールドにおける FEM 解析技術の変遷を 示すが、最近はコンピューターの発達に伴い、三次元解 析により複雑なシールド掘進に伴う地盤挙動を解析する 試みが行われてきている。

図-6.9 Peck (1969) が与えた沈下トラフ形状

座

61

講 座

参考文献

- 1) 土質工学会:シールド工法入門, 1992.
- 2) 山本 稔ほか:トンネル技術者のための土質工学(6), トンネルと地下,第18巻,9号, pp.61~69,1987.
- 3) 間片博之・山田孝治:シールドトンネルの新技術(7), トンネルと地下,第21巻,12号,pp.55~64,1990.
- 4) 日本トンネル技術協会:山岳トンネルの地表面沈下防止および不良地盤対策に関する調査研究(その2)報告書,1976.
- 5) 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,土木学会論文報告集,第373号,pp.103 ~112,1986.
- 6) 土木学会:トンネル標準示方書(シールド編)・同解説, 1986.
- 7) 平田武弘:京都大学学位論文,密閉型シールド掘削に 伴う軟弱粘土地盤の挙動と施工技術に関する研究, 1989.
- 8) 日本トンネル技術協会:「裏込め注入」に関する実態 調査報告書, p. 12, 1994.
- 9) Szecye, K. (島田隆夫訳):トンネル工学, 鹿島出版 会, pp. 650~660, 1971.
- 10) 森 麟・小林宗弘:粘土地盤でのシールド工事による圧密沈下について,第12回土質工学研究発表会, pp.1173~1176,1977.
- 11) 藤田圭一:基礎工からみたシールド工法,基礎工, pp.2~14,1983.

- Peck R. B.: Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, State-of-the-art reports, 7th ICOSMFE (Mexico), pp. 225~290, 1969.
- Attewell P. B. : Engineering Contract, Site investigation and Surface Movements in Tunnelling Works, Soft-Ground Tunneling-Failures Displacements, A. A. Balkema, pp. 5~12, 1981.
- 14) O'Reilly M. P., New B. M.: Settlements above Tunnels in the United Kingdom—Their Magnitude and Prediction, Tunnelling '82, The Institution of Mining and Metallurgy, pp. 173~181, 1982.
- 15) Hanya T.: Ground Movements due to Construction of Shields-Driven Tunnel, Vol. IV Case Histories, Proc. 9th ICOSMFE (Tokyo), pp. 759~790, 1977.
- 16) Fujita K.: On the Surface Settlements Caused by Various Methods of Shield Tunnelling, Vol. 4, Proc. 10th ICOSMFE (Stockholm), pp. 609~610, 1981.
- 17) 村山朔郎・松岡 元: 粒状土地盤の局部沈下現象について, 土木学会論文報告集, 第172号, pp. 31~41, 1969.
- 18) 島田隆夫:土被りの浅い山岳トンネルの地表面沈下, 土木学会論文報告集,第296号,pp.97~109,1980.
- 19) 土質工学会: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, pp. 67~106, 1992.
- 20) 土質工学会:地盤工学における数値解析の実務, 1987.