

内空断面測定および変状展開図より把握した シールドトンネルの変形傾向

Investigation of shield tunnel deformation
based on cross-section measurement and inspection data

津野究¹・三浦孝智²・石川幸宏³・山本努⁴・河畑充弘⁵

Kiwamu Tsuno, Takatomo Miura, Yukihiro Ishikawa, Tsutomu Yamamoto and
Mitsuhiro Kawabata

^{1, 2, 3, 4, 5}正会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部構築物構造改善プロジェクトチーム

(〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

E-mail: k.tsuno@tokyometro.jp

This paper describes the investigation of shield tunnel deformation in the Tokyo area based on the measurement data of tunnel cross-section and the development views including the locations and shapes of cracks and other faults, which were obtained by regular inspections for tunnel maintenance. It was found that the tunnels in the alluvial clayey ground tend to deform as compared with those in the diluvial ground. The deformation rate is about 1mm/year for 6 to 8 years after the construction and becomes very small after that. Among such locations, there are some cases where a number of thin bending cracks which are less than 0.35mm in width were observed in the crown of tunnels.

Key Words : shield tunnel, tunnel maintenance, cross-sectional deformation, alluvial ground

1. はじめに

都市部では、これまで大量輸送を担う公共交通機関として地下鉄路線が整備されてきたが、1970年代以降、周辺環境や道路交通に与える影響を考慮してシールド工法によって地下鉄を建設する例が増えてきている。東京地下鉄では、約160kmのトンネルを有しているが、このうち約27%がシールドトンネルである。

シールドトンネルの維持管理では、目視や打音調査をもとにした検査を定期的実施して構造物の安全性を確保しているが、これを補完することを目的に内空断面測定も実施している。シールドトンネルに関しては、山岳トンネルのような地圧等の外力による変状や対策の例^{1)・2)}がほとんどないことから、長期的な変形やこれに伴う変状に関する報告例^{3)~8)}が少なく、十分に知見が蓄積されていない。そこで、本報では、内空断面測定データのデータや検査の記録として保存している変状展開図を分析し、シールドトンネルの変状傾向を把握したので報告する。

2. シールドトンネルの変形傾向

(1) 内空断面測定の概要

a) 測定地点および測定時期

シールドトンネルの区間では、4年ごと(時期や地点によっては1~2年ごと)に、30~60m間隔で内空断面を測定している。内空断面測定は、平成8年頃以降、それまで実施していた内空変位測定(水平および鉛直の2方向、概ね100m間隔)に代わり実施している。

ここでは、表-1に示す千代田線、有楽町線、半蔵門線の53本のシールドトンネルを対象に、739地点の内空断面測定データを分析した。トンネルの竣工年次は1969~2003年で、53本のトンネルのうち14本が密閉型シールド(うち、10本が泥水式シールド、4本が泥土圧シールド)で掘削されている。また、分析対象とした測定地点のうち、沖積地盤にトンネルが位置する地点(上半が沖積地盤の場合含む)が39.0%、洪積地盤に位置する地点が61.0%であった。

表-1 内空断面測定データの分析対象

線 区	トンネル 本数*1	内空断面測定		
		基準の測定*2	最新の測定	地点数
千代田線	12 本	平成10年3月	平成18年1月	112
有楽町線	18 本	平成8年3月	平成18年1月	330
半蔵門線	23 本	平成9年3月	平成19年3月	297
合 計	53 本	-----	-----	739

注) *1: 単線並列シールドトンネルの場合は, 2本と数える。

*2: 有楽町線 新富町-新木場間は平成8年11月に, 半蔵門線 水天宮前-押上間は, 平成15年1月に実施。

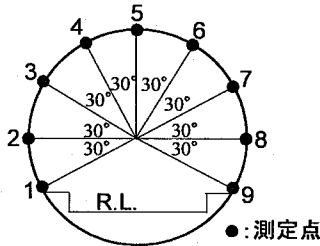


図-1 内空断面測定における計測点

パターン I	パターン II
鉛直内空縮小 水平内空拡大 内空変位量 (8~10年) 水平1.5mm 以上拡大 あるいは 鉛直0.75mm 以上縮小	鉛直内空拡大 水平内空縮小 内空変位量 (8~10年) 水平1.5mm 以上縮小 あるいは 鉛直0.75mm 以上拡大

図-2 内空断面の変形パターン

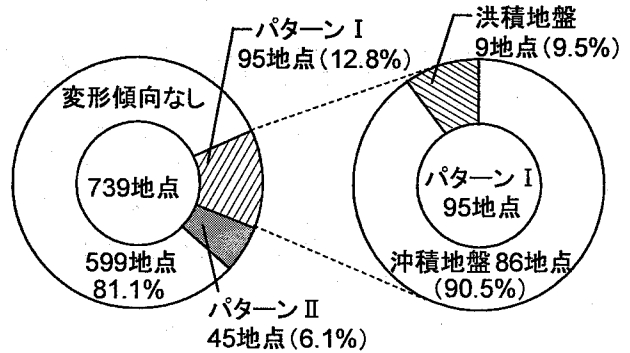
b) 測定方法

内空断面測定では, 図-1のように測定断面内に30°ごとに9つの測定点を設け, デジタルセオドライト等を用いて測量した。そして, パソコンを用いて9つの測定点の三次元座標を算出し, 基準の測定で得られた座標との比較により内空断面の変形傾向を把握した。

(2) シールドトンネル内空断面の変形傾向

a) 全線における傾向

内空断面の変形傾向を把握するため, 基準(第1回目)の測定と最新の測定より得られた測定点の三次元座標を比較して, 8~10年間の水平および鉛直方向の内空変位量を求めた。そして, 水平方向内空変位量が1.5mm以上, 鉛直方向内空変位量が0.75mm以上確認された地点を抽出し, 図-2に示すパターン I (横潰れ傾向) とパターン II (縦潰れ傾向) に分類した。



【変形パターンの割合】

【パターン I に該当する箇所の地盤条件】

図-3 内空断面の変形パターンの割合

表-2 パターン I に該当する区間

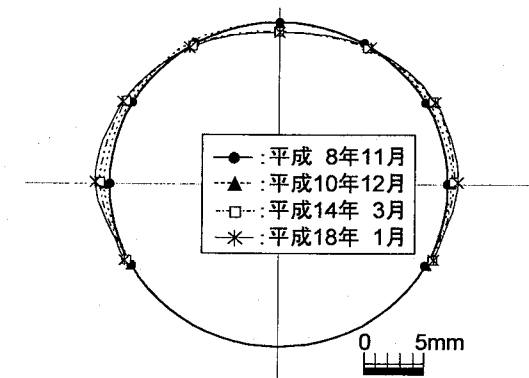
区 間 (シールド名)	該当する 地点数	該当する地点の 地質条件
有楽町線 桜田門-有楽町 (日比谷濠A線・B線)	6 地点	有楽町層シルト
有楽町線 新富町-新木場 (隅田川, 晴海A線, 東雲A線・B線, 辰巳)	31 地点	有楽町層シルト
半蔵門線 永田町-半蔵門 (隼町)	4 地点	有楽町層粘土・ シルト, 腐食土
半蔵門線 水天宮前-押上 (隅田川, 扇橋A・B線, 住吉A・B線, 本所)	45 地点	有楽町層粘性土
その他	9 地点	洪積地盤

図-3に, パターン I および II に該当する地点の割合を示す。これより, パターン I に該当する地点は全体の12.8%, パターン II に該当する地点は6.1%であった。

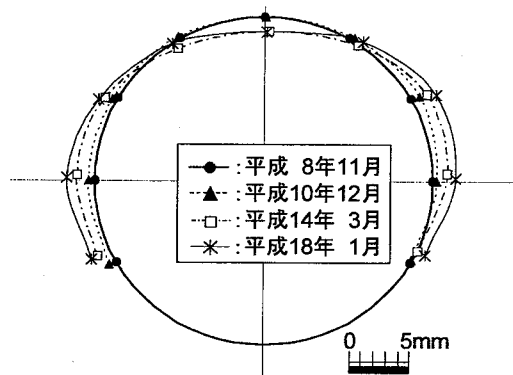
パターン I (横潰れ傾向) に該当する地点は, 図-3および表-2のように, 上半が沖積粘土地盤(有楽町層のシルト, 粘土)の区間に集中している。ただし, 内空変位量そのものは, 8~10年間の累積値が最大でも4mm程度であり, 山岳トンネルで見られる外力による変状^{1), 2)}と比べて, 変形の進行速度はきわめて小さい。

パターン II (縦潰れ傾向) に該当する地点については, 9割近くが千代田線隅田川シールド(北千住-町屋間)で見られたが, 8年間の累積値が最大1.2mmの微少な鉛直方向拡大傾向であった。この区間では, トンネルが横方向に潰れる傾向が見られ, 二次巻きによる対策を実施している⁹⁾。

一方, 洪積地盤にトンネルが位置する地点については, 沖積地盤と比較してパターン I や II に該当する地点がほとんどなく, 変形傾向が確認されなかった。



(a) 地点A (東雲A線シールド)



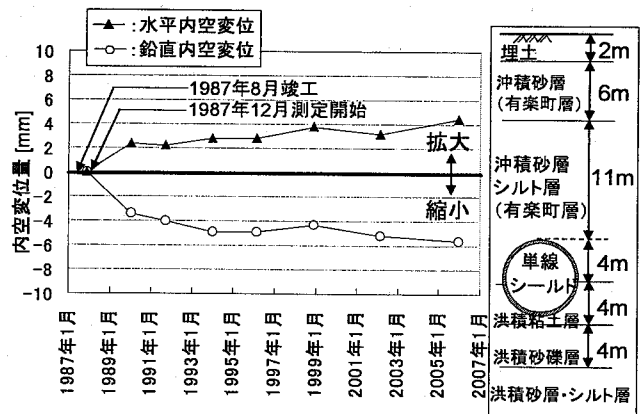
(b) 地点B (辰巳シールド)

図-4 沖積地盤における内空断面の経時変化

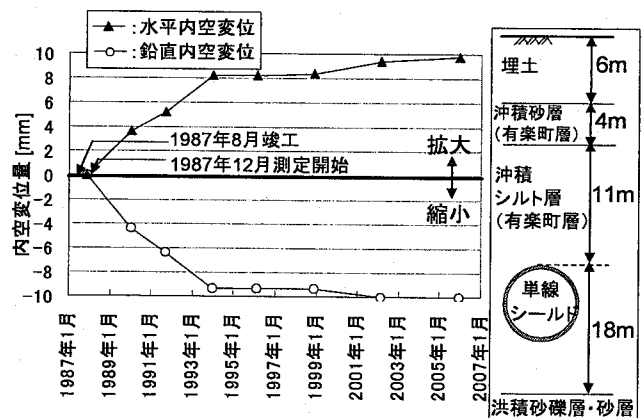
b) 沖積粘性土地盤におけるシールドの変形傾向

パターンI (横潰れ傾向) の変形傾向が確認された地点のうち代表点について、内空断面の経時変化を図-4に示す。これより、内空断面が縦方向に縮小し横方向に拡大するような変形が1mm/年以下の微小な速度で進展している状況が確認できた。この変形傾向は、トンネルに鉛直荷重が作用しているモードであり、既往の報告例^{3), 7)}と同様に沖積粘性土地盤の圧密によるものと考えられる。

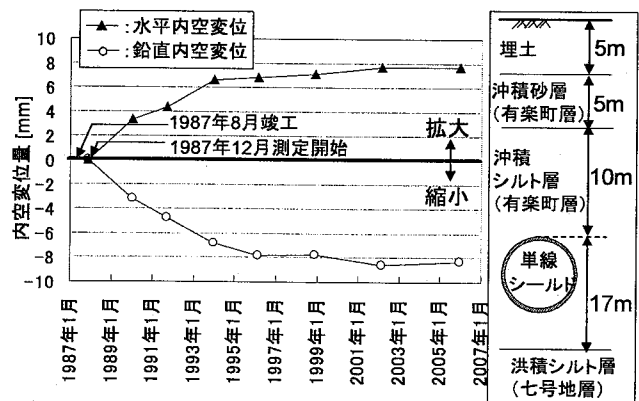
つぎに、平成8年以前に実施していた内空変位測定データのデータも合わせて、長期的な内空変位の経時変化を図-5に示す。ここでは、隅田川、東雲A線および東雲B線シールドのうち、水平方向内空変位の累積量が最大であった地点について、竣工後4ヶ月からの経時変化を示している。これより、竣工直後から水平方向の内空変位が拡大し、鉛直方向が縮小するような傾向がみられ、竣工直後から6年程度は年間1mm程度の内空変位の進行が確認できる。一方、竣工後6～8年後以降は、内空変位の進行性が緩慢になっており、トンネル周辺の地盤が安定したことにより内空断面の変形傾向も収束したものと考えられる。



(a) 地点C (隅田川シールド)



(b) 地点D (東雲A線シールド)



(c) 地点E (東雲B線シールド)

図-5 沖積地盤における内空変位の長期経時変化

3. シールドトンネルに関する変状分析

(1) 分析方法

有楽町線のシールドトンネルの区間を対象に、検査の記録として保存している変状展開図 (平成16年3月) に記録されている変状について分析した。変状展開図の例を図-6に示す。対象としたシールドトンネルは18本 (但し、単線並列シールドトンネルの場合は2本のトンネルと数える)、総延長は12.603kmである (表-3)。

セグメント形式については、中子形セグメントの区間が多く、河川や運河の直下、民地下等の特殊な区間では、平板形セグメントに二次覆工が施工されている。

分析にあたっては、延長10mを1ブロックとして、ブロックごとに漏水、鉄筋露出、ひび割れといった変状の有無を整理した。そして、シールドトンネルごとに変状があるブロックの割合を求めた。

(2) 有楽町線シールドトンネルにおける変状傾向

変状展開図に記録されていた変状として、漏水、鉄筋露出、セグメントのひび割れ、二次覆工の網目状のひび割れがあった。ここでは、セグメントのひび割れについて、変状の傾向を以下に記述する。

二次覆工が施工されていない区間のうち、セグメントのひび割れが記録されているブロック（1ブロック＝延長10m）の割合を図-7に示す。ここでは、側壁・アーチ部とクラウン部に分けて結果を示している。

これより、沖積地盤に位置するシールドトンネルにおいて、クラウン部にひび割れが見られるブロックの割合が高い傾向が見られた。また、側壁やアーチ部と比べてクラウン部のひび割れが卓越しており、1ブロックのうち半分以上のリングに見られる割合も高い。なお、クラウン部にひび割れが見られる箇所の変状展開図を確認すると、複数のトンネル軸方向のひび割れが連続して記録されている。

クラウン部にひび割れが見られる区間については、内空断面が縦方向に縮小し横方向に拡大するような変形が確認された箇所と一致している。これより、クラウン部のひび割れは、沖積粘性土地盤の圧密によりトンネルに鉛直方向の荷重が作用し、クラウン部の内縁が引張領域となって曲げひび割れが発生したものと考えられる。

(3) クラウン部のひび割れの状況

東雲A線、東雲B線および辰巳シールドのクラウン部にひび割れが記録されている箇所を対象に現地調査を行い、至近距離からの目視により状況を確認した。ひび割れが最も顕著に見られた箇所の状況を図-8に示すが、クラウン部付近にトンネル軸方向のひび割れが複数発生しているのが連続したリングで見られた。ただし、ひび割れ幅は最大でも0.35mm程度で、打音しても清音であり、ひび割れの開口は見られなかった。この傾向は、鉄筋を有するトンネル覆工が外力により曲げの作用を受けた場合、山岳トンネルの無筋覆工における変状事例^{1), 2)}のように1つの曲げひび割れが進展するのではなく、断面力が一箇所に集中せずに複数の曲げひ

表-3 対象としたシールドトンネルの概要

シールド名*1	竣工年次	シールドの掘削形式
護国寺下, 番町, 平河町 (複線シールド区間), 平河町A線, 平河町B線, 永田町A線, 永田町B線, 日比谷濠A線, 日比谷濠B線	1974年	手堀り式 半機械掘り式 機械掘り式 (圧気工法等の併用)
銀座	1980年	
平和台	1983年	
羽沢	1983年	泥水式
隅田川, 晴海A線, 晴海B線, 東雲A線, 東雲B線, 辰巳	1987年	

注) *1: 単線シールドは、A線、B線と表記。

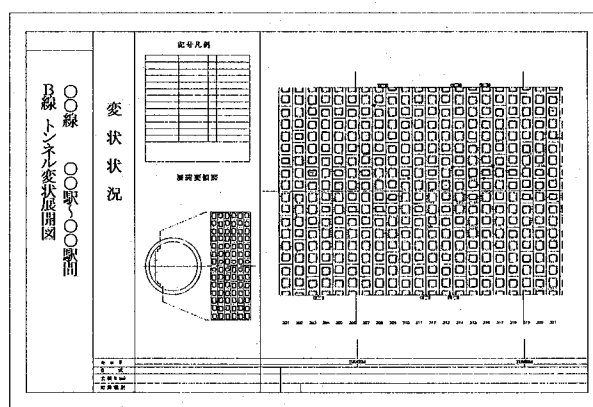


図-6 変状展開図の例

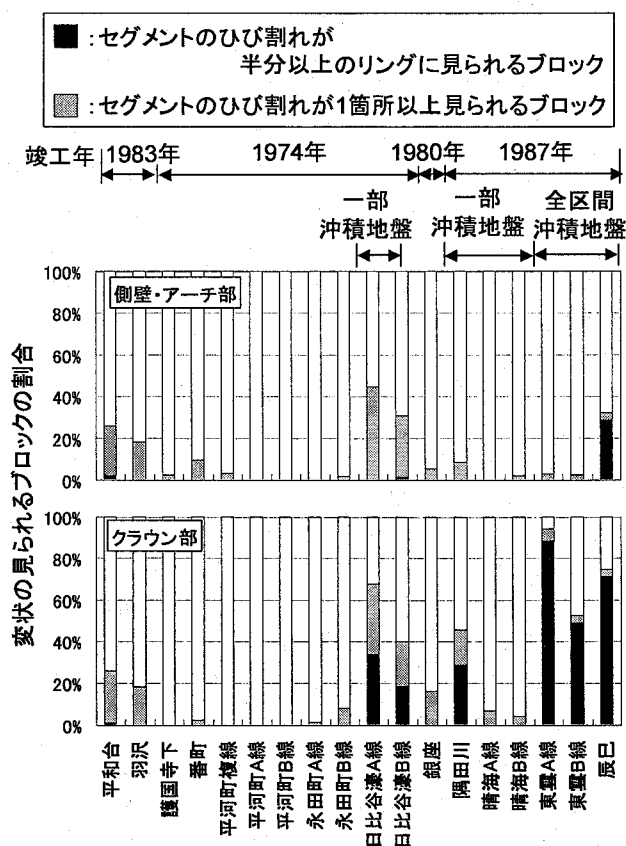


図-7 セグメントのひび割れが見られるブロックの割合

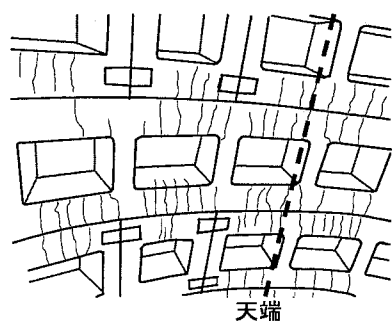


図-8 沖積地盤におけるセグメントのひび割れ発生状況
(辰巳シールド、地点B付近)

び割れが分散して入るという既往の縮尺模型実験をもとにした研究結果¹⁰⁾と一致している。

4. まとめ

本報では、内空断面測定データのデータや検査の記録として保存している変状展開図を分析し、シールドトンネルの変状傾向を把握した。これより、以下のような知見が得られた。

- ①千代田線、有楽町線、半蔵門線の739地点の内空断面測定データのデータより、沖積粘性土地盤の区間において、地盤の圧密に起因すると考えられるシールドトンネルの横潰れ方向の変形(8～10年間の累積変位量が最大4mm程度)が確認した。変形傾向が顕著な地点の長期的な挙動をみると、竣工直後から6年程度は年間1mm程度の内空変位の進行が確認されたが、竣工後6～8年後以降は、内空変位の進行性が緩慢になっており、概ね収束していることを確認した。
- ②有楽町線のシールドトンネルの区間(延長12.603km)の変状展開図をもとに変状傾向を分析したところ、沖積地盤に位置するシールドトンネルにおいて、クラウン部のひび割れが見られる割合が高いことを把握した。また、クラウン部にひび割れが見られる区

間と、内空断面が縦方向に縮小し横方向に拡大するような変形が確認された箇所とが概ね一致していることを確認した。

- ③シールドトンネルが鉛直荷重を受けた時のセグメントに発生するひび割れは、クラウン部付近にトンネル軸方向のひび割れが分散して複数発生することを確認した。

今回得られた成果は、長期的なシールドトンネルの維持管理に反映させていきたいと考えている。今後も、同様の検査や測定を継続して構造物の安全性を確保していくとともに、長期的なシールドトンネルの挙動のデータを蓄積していきたい。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル，1998。
- 2) 鉄道総合技術研究所：トンネル補修・補強マニュアル，2007。
- 3) 斉藤正幸，古田勝，山本稔：沖積層地盤に構築したシールドトンネルの変形に関する考察，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第4巻，pp.55-62，1994。
- 4) 清水満，中根理，新堀敏彦，加藤教吉：供用開始後の鉄道用シールドトンネルにおけるセグメント測定(2)：第32回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.2039-2040，1997。
- 5) 小山幸則，岡野法之，清水満：シールドトンネルにおける現地計測結果とその考察，鉄道総研報告，Vol.11，No.7，pp.37-42，1997。
- 6) 加藤精亮，清水満，桑原清，新井孝弘，団昭博：MFシールドセグメントの長期現場計測，土木学会年次学術講演会講演概要集 第VI部，Vol.56，pp.230-231，2001。
- 7) 有泉毅，五十嵐寛昌，金子俊輔，永谷英基，山崎剛，日下部治：周辺地盤の圧密沈下に伴う既設シールドトンネル作用荷重の変化メカニズム，土木学会論文集，No.750/III-65，pp.115-134，2003。
- 8) 古田勝，野呂敏行：地下鉄シールドトンネルの長期間における断面変形に関する考察，地下空間シンポジウム論文・報告集，Vol.12，pp.207～212，2007。
- 9) 大塚努，堀健三，山中耕太郎：千代田線隅田川シールドトンネル二次巻き工事の施工，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.61，第6部門，No.6-006，2006。
- 10) 新井泰，津野究，杜世開，川上義輝：鉄筋コンクリート構造を有するトンネル覆工の力学的挙動に関する研究，トンネル工学論文集，Vol.14，pp.115～122，2004。