

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

CONSIDERATION OF THE LONG-TERM CROSS-SECTION DEFORMATION OBSERVED AT SUBWAY SHIELD TUNNELS

古田 勝¹・野邑 敏行²
Masaru FURUTA・Tosiyuki NOMURA

To maintain subway shield tunnels, the cross-section deformation has been measured at 106 locations of 27 shield tunnels by means of steel tapes for 28 years after the construction. The maximum lateral displacement caused by the deformation is 9 mm and this measurement result does not necessitate countermeasures. This paper also describes the results of investigation for the load acting on the secondary lining.

Key Words: shield tunneling, secondary lining, cross-sectional deformation times,

1. はじめに

近年の地下鉄建設では、駅部を開削工法、駅間をシールド工法が一般的となり、シールドトンネルの占める割合が約60%となっている。地下鉄施設の維持管理においては、輸送の安全確保のため、線路施設とともにトンネル施設の検査・点検も重要な業務となり、シールドトンネルの保守管理では、検査項目としてコンクリートのひび割れ、鋼材の腐食、漏水の状態、断面変形の状態、不等沈下の状態などを対象に定期的に行っている。このうち、断面変形の状態の検査は、トンネルの横断面の空間寸法を測定するものであり、寸法の変形量からトンネルの変形の有無を判断している。

本報告では、表-1 に示す開通後17年から28年を経過した都営新宿線のシールドトンネルの断面変形について、第一期開業の昭和53年12月以降のデータを整理し、変形量の全体傾向を述べるとともに、特に変形量が大きい箇所の時系列変化を示すこととした。さらに、沖積地盤に敷設された区間において変形が生じたトンネル覆工部材（セグメントおよび二次覆工）が受けた負荷荷重について、過去に解析した

表-1 地下鉄開通後の経過年数とトンネル数

開業後経過年数	17年	19年	26年	28年	計
単線シールドトンネル	2	6	6	10	24
複線シールドトンネル	1	0	1	1	3
計	3	6	7	11	27

表-2 都営新宿線シールドトンネルの概要

	シールド外径寸法(m)	セグメント桁高(mm)	二次覆工厚さ(mm)
単線シールドトンネル	7.3	RC 平板 300	250
複線シールドトンネル	10.4~10.6	RC 箱形 550	250

キーワード：シールドトンネル，トンネル検査，断面変形，二次覆工

¹正会員 東京都交通局建設工務部保線課 課長補佐

²正会員 東京都交通局建設工務部保線課長

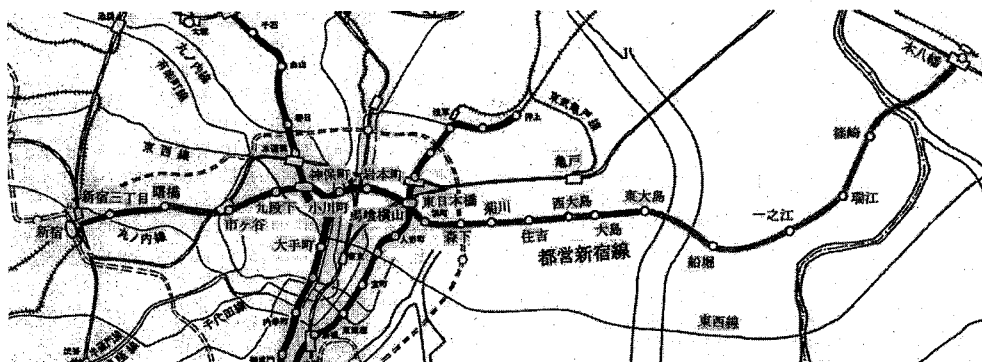


図-1 都営地下鉄新宿線路線図

事例^{1,2)}があるので紹介する。

なお、都営新宿線は、図-1に示す東京都新宿区の新宿駅を起点にし、千代田区、江東区、江戸川区を経て千葉県市川市の本八幡駅に至る都心部を東西方向に通過する延長23.5kmの路線である。この地下鉄の建設は、昭和46年5月に新宿駅～東大島駅14.1kmの工事に着手、昭和53年12月に岩本駅～東大島駅間6.8kmの第一期開業、

昭和55年3月に新宿駅～岩本駅間7.3km延伸、以降順次開業して、平成元年3月に篠崎駅～本八幡駅間2.8kmの開業により全線開通している。都営新宿線には、表-1に示したとおり、単線シールドトンネル24本、複線シールドトンネル3本が土被り11～27mで敷設され、開業後17～28年を経過している。

表-3 地盤で区分したトンネル及び測定箇所数

地盤の区分	トンネル数		測定箇所数	
	沖積地盤	洪積地盤	沖積地盤	洪積地盤
単線シールド ^{a)}	12	12	40	52
複線シールド ^{a)}	0	3	0	14
小 計	12	15	40	66
合 計	27		106	

表-2に外径寸法等のシールドトンネルの概要³⁾を、表-3にトンネル敷設位置の地質について、地質柱状図から判定し、沖積および洪積地盤に分類した結果を示す。

沖積地盤に敷設されたトンネルのうち、江東区および江戸川区内のトンネル敷設位置の地質は、N値が0から10程度の沖積シルト層である。

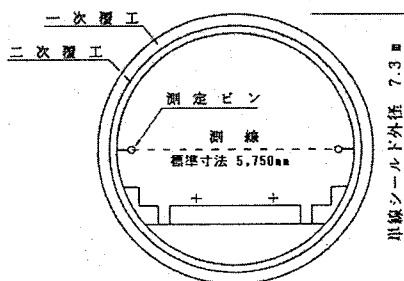


図-2 トンネル横断面測定方法

2. 断面の変形調査

(1) 測定の方法

シールドトンネルが鉛直荷重を受けた場合、トンネル断面水平方向の直径寸法が増大、水平方向の荷重を受けた場合には減少する変形が予測される。シールドトンネルの断面変形の計測では、架空線等が支障となり、鉛直方向の直径の測定が困難であるため、図-2の水平方向の直径（以下、横断面と言う。）を対象に測定を行っている。

測定箇所には、図-2に示すとおり、トンネルスプリングに横断面変形測定用の測定ピンを該当区間の開業後に設けている。測定ピンは測定の基準となるもので、二次覆工にホールインアンカーを用い強固に固定している。

測定対象のシールドトンネルの数および測定点数を表-3

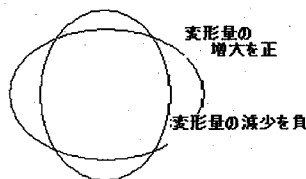


図-3 断面変形量の符号の表示方法

に示す。トンネル延長200～250m間隔を原則に、単線および複線シールドトンネル27本に断面測定点として沖積地盤に40箇所、洪積地盤に66箇所、合計106箇所に設けている。トンネルの断面寸法の測定器具は、測定ピン間の測線の距離を精密なスチールテープに錘により49Nの張力を与えて測定間の距離を読み取る装置であり、温度補正を行うことにより、±0.5mm程度の精度を確保し、2年に1度測定を実施している。

なお、トンネル断面の変形量として、本報告ではトンネル周辺地盤等に起因する事項を対象とし、トンネルに近接して行われる工事、建物等による荷重条件の変化等は、分析対象に含めていない。

(2) 断面変形の現況

シールドトンネルの断面変形量の表示は、図-3に示すとおり、横断面の変形量の増大を正、減少を負に示すこととし、開業後から測定開始して17～28年経過したのシールドトンネルの断面変形量の測定結果を、沖積地盤に敷設したシールドトンネルを図-4に、洪積地盤を図-5に示す。

図-4から、沖積地盤のシールドトンネルの変形量は、-6から9mmまで広く分布し、2から4mm変形した箇所が多い。また、図-5の洪積地盤に関しては1点を除き、-5から3mmの間に凸形に分布し、-1mmの箇所が1/3を占めている。図-4および5から、洪積地盤のシールドトンネルは、沖積地盤に比較して変形量が少なく、地盤の差異が認められる。

(3) 断面変形の経年変化

シールドトンネルの断面変形量の経年変化を確認するため、開通後10年経過した時点と現況（17～28年経過）との比較結果を図-6、7に示す。図-6の沖積地盤のシールドトンネルは、10年経過した時点よりも現況は分布の範囲が-6～9mmとなり、変形量も正負とも大きくなっている。図-7の洪積地盤については、10年経過および現況とも負の変形箇所が多く、-4～-1mmに集中している。

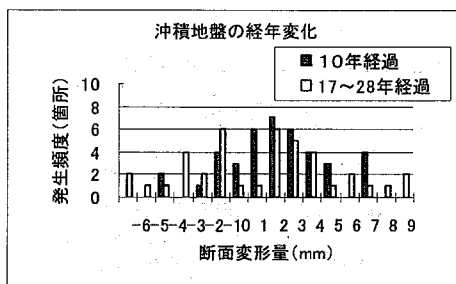


図-6 沖積地盤の経年変化

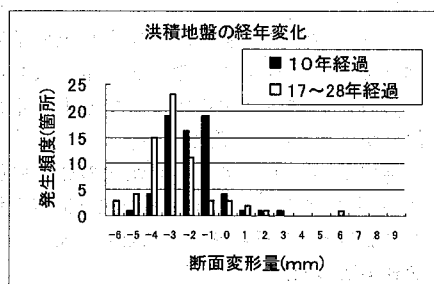


図-7 洪積地盤の経年変化

断面変形の進行を詳しく確認するため、その一例として開通後28年間経過した変形量の推移を図-8に示す。洪積地盤の例では150ヶ月を経過した時点から-2mmの変形、沖積地盤の例では40ヶ月から正の

変形が進行して120ヶ月で最大4mmの断面変形が生じ、以降は変形量が減少して2mmの変形となっている。

さらに、沖積地盤でトンネル内径の水平方向の変形が増大して最大9mmとなった測点の推移を図-9に示す。140ヶ月までは変形が進行しているが、以降は横ばいとなっている。

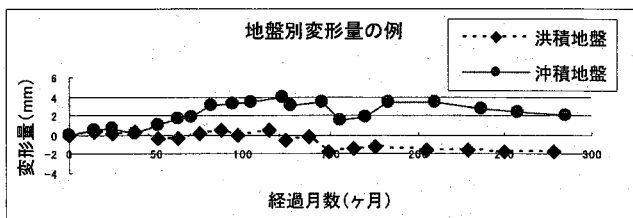


図-8 地盤別の断面変形の経年変化

3. 断面変形の原因に対する検討

シールドトンネル断面の変形について、増加量として最大9mmの変形（沖積地盤）、減少量として最大-6mm（沖積および洪積地盤）が観測されたことから、これらに関して検討を加える。

なお、沖積地盤に敷設された最大9mmの増大に関する内容は、過去の解析事例^{1,2)}を紹介する。

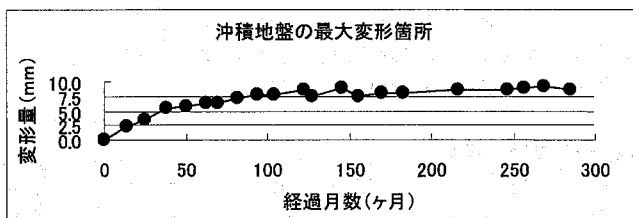


図-9 断面変形が最大箇所の経年変化

(1) 変形量増大に対する検討

a) 変形が生じた原因

沖積シルト層地盤中のトンネル断面の変形のうち、図-9に示した例では、変形が当初の140ヶ月にわたり継続的に進行し現在では横ばいの状況となっている特徴から、その原因を推定すると、トンネル周辺の圧密沈下、地下水圧の経時的な変化、クリープ変形などが考えられる。これらのうち、地下水圧の経時的な変化の影響に関しては荷重の作用方向等から負の断面変形が生じると考えられ、また、クリープ変形による経時的な変化は定量的な評価が難しいなどの理由から、トンネル周辺地盤の圧密沈下によって生じる断面変形と仮定する。

トンネル周辺地盤の影響は、トンネル上の地盤の変形に比べてトンネル側方地盤の沈下量が大きな場合と考えられ、わずかな沈下によってもトンネル断面に影響を与えることが予想される。

これら理由から、トンネル断面変状の発生原因を図-10に示すトンネル周辺地盤の圧密沈下に伴う鉛直負荷荷重の増加として検討を行うこととした。

b) 鉛直負荷荷重の推定

沖積地盤に敷設したトンネルの断面変状の発生原因を図-10に示した鉛直負荷荷重と仮定した場合、その算定方法として、幾つかの方法が挙げられる。

Marstonらの方法⁴⁾は、掘削溝に埋設された暗渠に作用する鉛直荷重を求めたものであり、鉛直負荷

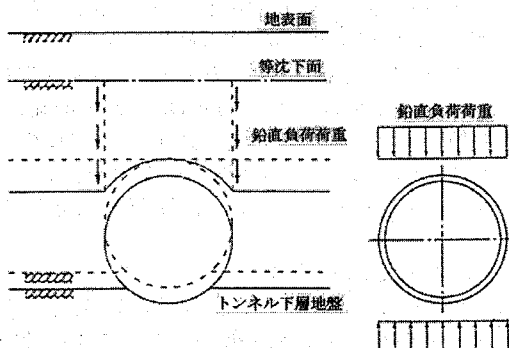


図-10 トンネル周辺の圧密沈下と鉛直負荷荷重

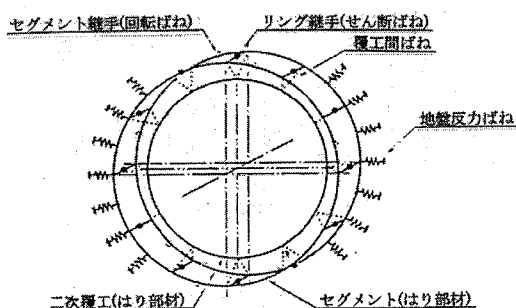


図-11 シールドトンネルの解析モデル

荷重も非常に大きな値となる。

また、宇都の方法⁵⁾は、粘着力をもつ地盤について解を求めたものである。これらの方法によるトンネル周辺地盤の影響評価は、図-9に示した長期間の断面変形に適用するには不十分である。このため、文献1,2)では、図-10に示す概念図でトンネル周辺地盤の圧密沈下に伴う鉛直負荷荷重の推定を次の仮定に基づいて行っている。

- 1) 圧密沈下に伴いトンネル覆工に作用する荷重は、図-10のトンネル上部に均等に分布する鉛直荷重と仮定する。
- 2) 開業後に行った初回のトンネルの断面変形量の調査時は、真円状態と仮定する。
- 3) セグメントの設計条件では、二次覆工を構造部材と見なしていないが、実際には一定の強度を有することから、解析では構造部材とする。
- 4) 鉛直負荷荷重を推定する場合のトンネルの構造解析モデルは、図-11に示す「はりばねモデル」⁶⁾による。
- 5) セグメントと二次覆工の一体化は期待できないものとし、重ね構造とする。

解析に用いた諸係数を表-4に、解析結果を図-12に示す。解析から得られた図-12は、鉛直負荷荷重と水平方向横断面変形量の関係を示し、図中に二次覆工が無い場合の変形量も示している。この結果から、沖積シルト層地盤において約9mmの変形を受けたシールドトンネルの鉛直負荷荷重は、30.4kN/m²と推定される。

前述のMarstonらの方法⁴⁾、宇都の方法⁵⁾と図-12の結果を比較して表-5に示す。推定した圧密沈下に伴いトンネル覆工に作用する鉛直負荷荷重は、他の算定方法と比較して荷重は小さく、変形量も測定結果に対応したものとなっている。

なお、断面変状調査を行ったシールドトンネルは、いずれも二次覆工が施工されているが、施工されなかった場合は図-12のとおり約18mmとなり、二次覆工を施工した場合の約2倍と推定される。

また、このとき覆工部材に生じる最大曲げモーメントと軸力を表-6に示す。トンネル断面の変形と同様に最大曲げモーメントも2倍近い結果が予測されている。

(2) 変形量の減少に対する検討

現況のシールドトンネルの横断面の変形量は、図-6、7に示した10年経過した時点と現況(17~28年経過した変形量)の比較結果では沖積および洪積地盤のトンネルとも、変形量が減少した例が多く見られ、最大-6mmの測点も確認されている。

変形量の減少の原因については、

表-4 解析に用いた諸係数

セグメント	シールドトンネル外径	7,300mm
	セグメント厚さ	300mm
	セグメント幅	900mm
	回転ばね定数	98,067kN・m/rad
	せん断ばね定数	∞
二次覆工	弾性係数	34,323MN/m ²
	二次覆工内径	6,200mm
	二次覆工厚さ	250mm
	弾性係数	21,575MN/m ²
周辺地盤	覆工間ばね定数	∞
	地盤反力係数	0kN/m ³
	N値	0
	土被り	17m
地下水位	地下水位	GL-1m

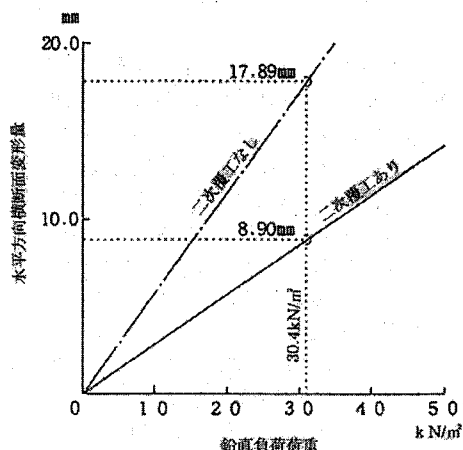


図-12 鉛直負荷荷重と水平直径変位の関係

表-5 鉛直負荷荷重の算定結果

算定方法	鉛直負荷荷重
Marston, Spangler の方法 ⁴⁾	298.1 kN/m ²
宇都の方法 ⁵⁾	169.7 kN/m ²
シールドトンネルの設計施工指針(案) ⁷⁾	82.4 kN/m ²
参考文献1, 2)の方法	30.4 kN/m ²

表-6 シールドトンネルの発生断面力

		最大曲げモーメント	軸力
二次覆工有り	セグメント	-83.9 kN・m	116.3 kN
	二次覆工	40.4 kN・m	83.7 kN
二次覆工無し	セグメント	-147.2 kN・m	259.4 kN

二次覆工コンクリートの乾燥収縮、水圧の経時的な変化などがその原因として推定される。

このうち、二次覆工コンクリートの乾燥収縮に関しては、長期間の経時的な変化として考え難いことから、水圧の変動が考えられる。図-13は、東京都の地盤沈下調査報告書⁸⁾に報告されている都営新宿線の沿線に比較的近い箇所の地価水位の変動を昭和55年から平成17年までの間を図示したものである。いずれの地点も地下水位の上昇が10から20m程度認められ、地下鉄のシールドトンネル周辺盤の地下水位も上昇したものと容易に推測される。

なお、これらの地下水位の変動による影響に関してはシールドトンネル近傍における有効地下水頭の実測データ等が無いので、その影響を解析するまでには至っていない。

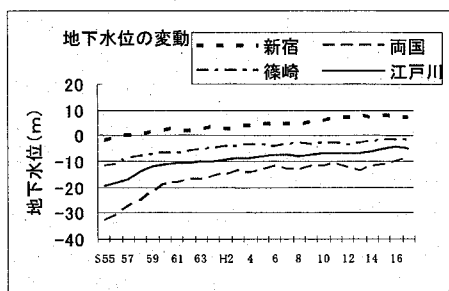


図-13 地下鉄沿線の地価水位の変動

4. おわりに

開通後17年から28年を経過した地下鉄単線および複線シールドトンネル27本に設けたトンネル横断面測定点の沖積地盤40箇所、洪積地盤66箇所の変形量のデータを整理し、変形の傾向を述べるとともに、特に変形量が大きい箇所の時系列変化を示した。

さらに、変形量が大きい沖積地盤に敷設したトンネル覆工部材（セグメントおよび二次覆工）が受けた鉛直負荷荷重の過去の解析事例^{1,2)}を紹介した。本報告の概要は、次のとおりである。

- 1) シールドトンネルの現況（開通後17～28年経過）の横断面の変形量は、沖積地盤では-6から9mmまで分布し、2から4mmの変形した測点が多く、洪積地盤では-5から3mmの変形がほとんどであり、-1mmの箇所が1/3を占めていた。
- 2) 沖積地盤に敷設されたシールドトンネルの変形量の増大箇所は、最大9mmであり、測定開始から約12年間変形が進行していたが、以降は横ばいとなり、変形は進行していない。
- 3) 沖積シルト層地盤に敷設したシールドトンネルの約9mmの変形量について、その原因をトンネル周辺地盤の圧密沈下と仮定し、解析モデルで鉛直負荷荷重を推定した結果は30.4 kN/m²であった。
- 4) 沖積および洪積地盤のシールドトンネルで数mm程度の変形量が減少した箇所が認められた。その原因として沿線の長期的な地下水位上昇傾向が実測データで確認されていることから、地下水位の上昇による影響の可能性が考えられる。

参考文献

- 1) 古田勝, 斉藤正幸, 山本稔: シールドトンネルの変形と二次覆工の変形抑止効果, 土木学会第49回年次学術講演会概要集Ⅲ, 土木学会, 1994.9
- 2) 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, 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集第4巻 pp.55-62, 土木学会, 1994.11
- 3) 三好迪男, 伊藤良行: 都営地下鉄10号線におけるシールド工事, 施工技术, 第9巻第3号, pp.49-52, 1976.3
- 4) Marston, A. and Anderson, A.O.: The Theory of Loads on Pipe in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe, Bulletin 31, Iowa Eng. Experiment Station, 1913.
- 5) 宇都一馬: Untrench Type Culvert の鉛直土圧の計算図表, 日本鋼管技術資料, 1963.
- 6) 村上博智, 小泉淳: シールドセグメントリングの耐荷機構について, 土木学会論文報告集第272号, 土木学会, 1978.4
- 7) 財団法人日本鉄道施設協会: シールドトンネルの設計施工指針(案), pp.97-99, 1977.12
- 8) 東京都土木技術センター: 平成17年地盤沈下調査報告書, pp.13-14, 2006.