

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

STUDY ON DEFORMATION OF SHIELD TUNNELS CONSTRUCTED IN ALLUVIAL GROUND

齊藤 正幸*・古田 勝**・山本 稔***

Masayuki SAITOH, Masaru FURUTA and Minoru YAMAMOTO

A qualitative evaluation was made on the safety of tunnel lining, based on the results of measurements made on cross sectional deformation of shield tunnels 10 years or more after their construction. In addition, the study investigated the effects of deformation control of secondary lining on the loads acting on tunnels.

As a result of these studies, the safety of tunnels has been evaluated from estimated stresses based on the assumption that cross sectional deformation of tunnels was caused by vertical loads produced as a consequence of the ground in areas adjacent to the tunnels. It has also been verified that the effects of deformation control of secondary lining vary greatly, depending on the response coefficient of ground in areas adjacent to tunnels.

Key Words : shield tunneling, secondary lining, soft ground, cross sectional deformation

1. はじめに

1920年代から、大都市における公共交通機関整備の一環として、地下鉄の建設が進められている。従来の地下鉄建設は主として開削工法によって行われてきたが、近年、道路交通および周辺環境への影響などを配慮し、駅部を開削工法、駅間をシールド工法によって地下鉄を建設する例が増加している。東京都では、昭和33年8月に都営浅草線の建設に着手して以来、浅草線、三田線、新宿線、12号線の4路線を開業し、現在68.1kmを営業している。このうち、近年施工された新宿線および12号線は、シールドトンネルの占める割合が延長27.8kmの約60%と大きくなっている。

これらのシールドトンネルの保守管理では、トンネルの変形、コンクリートのひびわれおよび劣化、金属の腐食、漏水などを対象として、定期的に検査を行っている。このうち、シールドトンネルの変形に関する検査は、目視によって確認することが困難なため、一定距離毎に定めた箇所ではトンネル横断面の内空を定期的に測定する断面変状調査を行い、内空寸法の変化量からトンネル変形の有無を判断している。

本論文は、沖積地盤中の建設後約10年を経過したシールドトンネルにおける断面変状調査結果に数mmの断面変状が生じている例が見られることから、調査結果のうち特に変形量が大きい箇所を選び、トンネル覆工部材(セグメントおよび二次覆工)が受けた負荷荷重の推定を行った。この結果から、トンネル覆工体の定

* 正会員 日本シールドエンジニアリング第二事業部企画調査室

** 正会員 東京都交通局建設工務部

*** 正会員 東京都立大学名誉教授

量的な安全性の評価を試みるとともに、負荷荷重に対して二次覆工を施工しない場合の変形量と発生断面力を試算することによって、二次覆工の変形に対する抑止効果を検討したものである¹⁾。

なお、シールドトンネルの経時的な変形、覆工部材の応力測定および解析に関する報告は、近年、建設後から2年程度までの計測結果^{2), 3)}が多く公表されているものの長期間に渡る調査・解析を行った例は少なく、山岳トンネルの変状調査報告⁴⁾のように、多くの調査結果に基づく情報の蓄積が望まれる。

また、シールドトンネル二次覆工の変形抑止効果に関する調査・研究は、旧国鉄の東北新幹線上野トンネル⁵⁾、中部電力⁶⁾および村上・小泉^{7), 8)}の例が見られるものの、二次覆工が一般的に構造部材として評価されていないことから、定量的な評価が行われていないのが現状である。

2. 変状調査の方法

一般に、シールドトンネルの断面変形量は鉛直および水平方向の直径が最大値を示すことが多い。シールドトンネルの断面変状調査の方法は、鉛直方向の直径を測定する場合、電力施設の架空線が支障となる場合が多く、足場などの仮設設備を必要とする。このため、水平方向の直径を対象に200mm間隔に設定した測点において、図-1に示すようにトンネル断面スプリング部付近に設置した測定ピン間の距離を精密な測定器で定期的に測定することによって、トンネル断面の変形量を定量的に把握する方法を採用している。断面変状測定に用いる測定器は、精密なスチールテープに一定の張力を与えて測定ピン間の距離を読みとる装置（コンバージェンスメーター）であり、温度補正を行うことにより±0.5mm程度の測定精度を確保することができる。測定ピンは、断面変形測定の基準となるものであり、二次覆工施工完了後にホールアンカーを用いてトンネル覆工体に固定している。なお、調査の結果得られた変形量は測定ピンの設置が二次覆工施工完了後であることから、二次覆工施工後のトンネルの変形状況を示すものである。

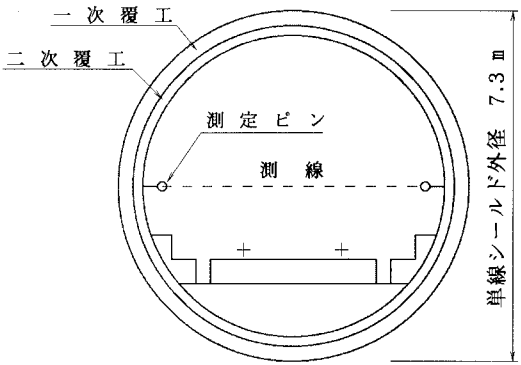


図-1 測定概要図

3. トンネル断面変状調査結果とその原因

図-2に建設後約10年を経過したシールドトンネル断面変状調査結果の中から都営地下鉄新宿線のシールドトンネルの変形量を洪積地盤（74箇所）と沖積地盤（38箇所）に分類して示す。図-2の中から経年変化の代表例として、洪積砂層地盤の平均的な例を図-3に、沖積シルト層地盤の平均的な例および特に変形量の大きい箇所の例を、それぞれ図-4および図-5に示す。図-2から新宿線において変状調査を実施した全ての断面のうち洪積砂層地盤に建設したシールドトンネルの変形量は2mmに達しておらず、変状調査における測定精度を考慮すると実質的な変状は生じていないと判断される。これに対して、沖積シルト層地盤に

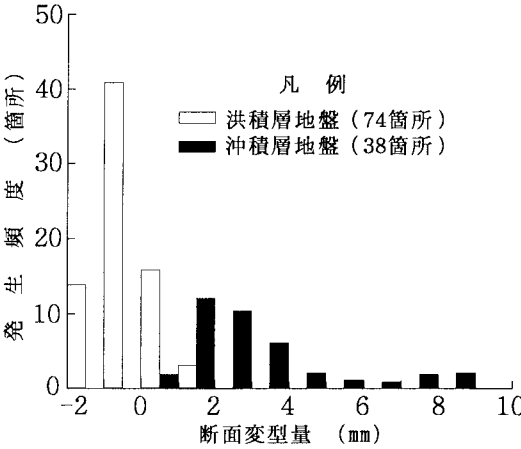


図-2 断面変状調査結果

建設されたシールドトンネルの変形量は経時的に変形が進み、建設後10年が経過した時点で2～4mm程度の断面変形が生じている箇所が多い。特に、図-5に示す例ではトンネルの変形量が約9mmに達しており、明らかにシールドトンネルに変形が生じていることが確認でき、洪積地盤には見られない変形の進行も見られる。

沖積シルト層地盤中のトンネル断面に断面変形が発生する原因として、図-4、5に示した箇所も含め、トンネル直上またはトンネルに近接して大規模な建設工事が行われていないことから、上載荷重の増加等による変形とは考えられない。

沖積層地盤中のトンネル断面変形が10年間にわたって継続的に進行している特徴から、その原因を推定すると、二次覆工施工後に生じたトンネル周辺地盤の圧密沈下、クリープ変形、土水圧の経時的な変化などを挙げることができる。

これらのうち、粘性土地盤のクリープ変形による変形は、トンネル周辺の地盤がクリープ変形を起こすことによってトンネル覆工体の変形が進行すると考えられるが、トンネル周辺地盤のクリープ変形の経時的な変化を定量的に評価することは難しい。また、粘性土地盤中におけるトンネル覆工体に作用する土水圧の経時的な変化は、トンネル掘削時に地盤を乱すことにより、トンネル周辺地盤に過剰間隙水圧が発生して覆工体に作用する荷重が一時的に等方圧に近くなり、その後、時間の経過とともに過剰間隙水圧が低下して圧密沈下を伴い設計荷重に近い荷重状態に移行していくことと考えられるが、

軟弱地盤ではその期間が2～3ヶ月程度であるとの報告^{9), 10)}もあることから、10年間にわたるトンネル断面変形の直接原因とは考えにくい。これらに対し、トンネル周辺地盤の圧密沈下によって生じるシールドトンネル断面変形は、Marstonらの理論によるとトンネル上の地盤に比べてトンネル側方地盤の沈下量が大きくなった場合と考えられ¹¹⁾、わずかな沈下量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。

なお、シールドトンネルの断面変形が生じた沖積層地盤については、昭和30年～40年の地下水汲み上げに伴い、地盤沈下が急激に進んだ地域であるが、地下水汲み上げの中止によって地盤沈下はほとんど進んでいない状況である。しかし、参考資料-12)によるとトンネル建設後の昭和50年以降にも異常湧水などの影響を受け地盤沈下が増加している地域もある。このため、広域的な地盤沈下は進んでいないが局部的な地盤沈下の発生が想定されることから、以下においては、トンネル断面変形の発生原因を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することとした。

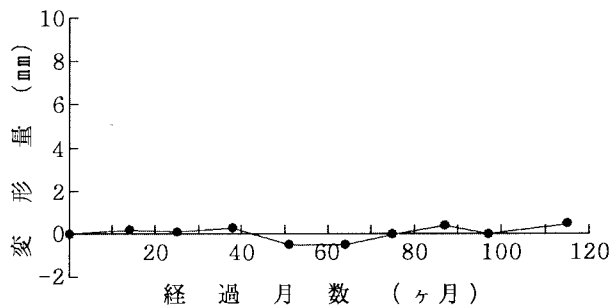


図-3 トンネル断面変形量の経時変化
(洪積地盤)

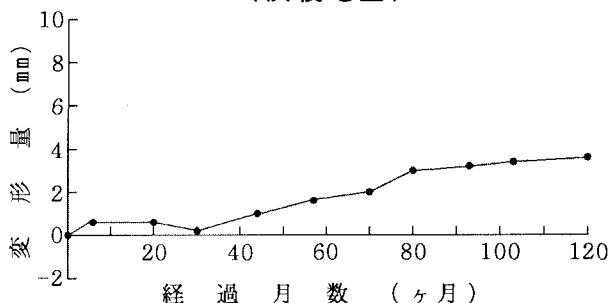


図-4 トンネル断面変形量の経時変化
(沖積地盤：一般例)

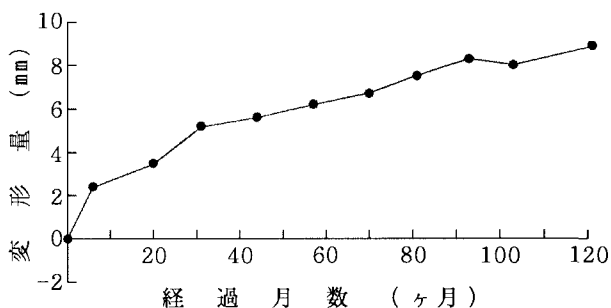


図-5 トンネル断面変形量の経時変化
(沖積地盤：最大変形箇所)

4. 数値解析による検討方法とその結果

4. 1 軟弱地盤における負荷荷重と覆工部材の発生断面力の推定

沖積層地盤におけるトンネルの断面変状の発生原因を、トンネル周辺地盤の圧密沈下であると仮定すると、図-6に示すような鉛直負荷荷重がトンネル覆工体に作用しているものと推定される。この鉛直負荷荷重の算定方法として、Marston¹³⁾およびSpangler¹⁴⁾の方法や、宇都¹⁵⁾の方法などが挙げられる。

Marston, Spanglerの方法は、掘削溝に埋設される暗渠に作用する鉛直荷重を求めたものであるが、鉄道施設協会「シールドトンネル設計施工指針(案)」におけるトンネル周辺地盤の圧密沈下に伴う鉛直負荷荷重の算定方法はこれらの方法に基づいて定めたものである。また、宇都の方法は、粘着力をもつ地盤について解を求めたものである。しかしながら、これらの方法によるトンネル周辺の地盤沈下の影響評価は、地盤の沈下量および各種の地盤定数の設定によってその結果が異なり、シールドトンネルの長期的な保守管理に適用するには不十分である。

これに対して、著者らはトンネル断面の変形原因をトンネル周辺地盤の圧密沈下に伴う負荷荷重によるものと仮定し、図-5に示した箇所を対象に鉛直負荷荷重の推定を行うこととした。荷重の算定は、以下の仮定に基づいて行った。

- ① 圧密沈下に伴ってトンネル覆工体に作用する負荷荷重は、図-6に示すトンネル上部に均等に分布する鉛直荷重であると仮定した。
- ② トンネル断面変状調査が二次覆工施工完了後に実施され、二次覆工施工以前のトンネルの変形量が不明であることから、調査開始時(初期値測定時)を真円状態と仮定した。
- ③ シールドトンネルの設計では、一般に二次覆工を構造部材と見なしていないが、負荷荷重の算定においては二次覆工を構造部材とした。
- ④ セグメントリング(一次覆工)は、セグメントをはり部材、セグメント継手を回転ばね、リング継手をせん断ばねでモデル化した。二次覆工は全断面有効なコンクリート製のはり部材とした。
- ⑤ 一次覆工と二次覆工の境界条件は、セグメントが平板形RC系セグメントでセグメントリング内面が平滑であり材令および材質が異なりセグメントと二次覆工の付着性能の信頼性が低いこと、既往の研究に直径変化量がセグメント外径の0.2%程度で一体構造から重ね構造に移行するとの報告¹⁶⁾があることから、一次覆工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仮定した。

鉛直負荷荷重は、二次覆工を考慮したトンネル覆工体に、仮定した鉛直等分布荷重を作用させ、断面変状

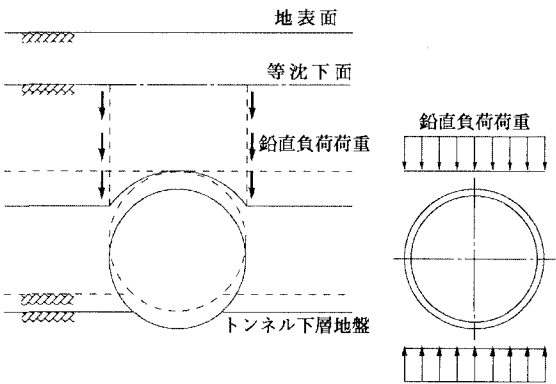
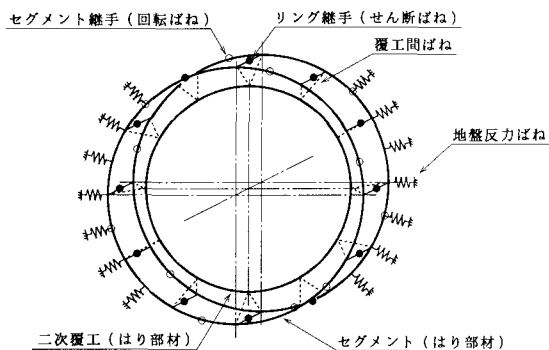


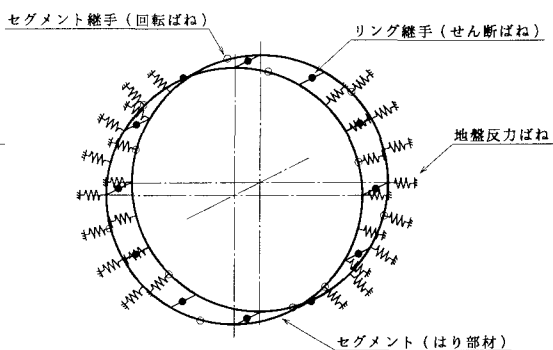
図-6 鉛直負荷荷重の考え方¹¹⁾

表-1 解析条件

セグメント	セグメント外径	7300mm
	セグメント厚さ	300mm
	セグメント幅	900mm
	回転ばね定数	1000tf・m/rad
	せん断ばね定数	∞
	弾性係数	3500000tf/m ²
二次覆工	二次覆工内径	6200mm
	二次覆工厚さ	250mm
	弾性係数	2200000tf/m ²
	覆工間ばね定数	∞
周辺地盤	地盤反力係数	0tf/m ³
	N 値	0
	土被り	17m
	地下水位	GL-1m



図－７ 構造解析モデル（二次覆工有）



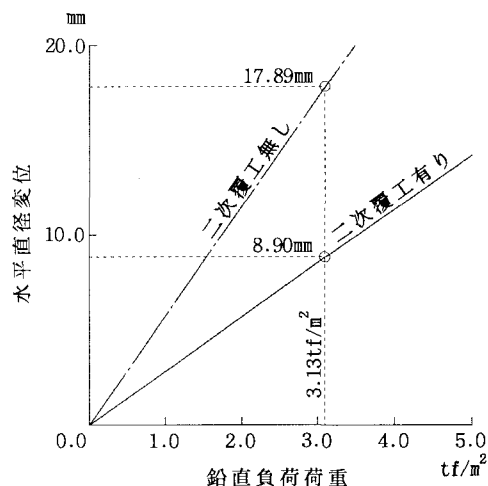
図－８ 構造解析モデル（二次覆工無）

調査結果と一致する変形が覆工体に生じる荷重を荷重と変形の関係から求めたものである。このときの構造解析方法は、図－７に示す構造解析モデル（はり－ばねモデル^{7)・8)・17)・18)}を用いることとした。また、二次覆工を施工しない場合を想定した構造解析モデルは図－８に示すとおりである。鉛直負荷荷重の算定に用いた覆工ならびに周辺地盤の解析条件は参考文献^{15)～18)}およびセグメントの設計条件を参考として表－１に示す値を用いることとした。

解析から得られたトンネル断面の水平直径変化量と鉛直負荷荷重の関係を図－９（図中の二次覆工有り）に示す。この結果から、沖積シルト層地盤に建設後、10年を経過したトンネルに作用する周辺地盤の沈下に伴う鉛直負荷荷重は、 3.13tf/m^2 と推定される。この解析結果と、Marstonらによって提案され、従来から設計で用いられている鉛直負荷荷重の算定方法によって、有楽町上部粘性土層を想定した試算結果の比較を表－２に示す。この表より、今回推定した鉛直負荷荷重は、Marstonらの提案した方法による鉛直負荷荷重に比べて非常に小さいものである。

表－２ 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	30.4tf/m^2
宇都の方法	17.3tf/m^2
シールドトンネルの設計施工指針(案)	8.4tf/m^2
著者らの方法	3.1tf/m^2



図－９ 圧密沈下に伴う鉛直負荷荷重と水平直径変位の関係

4. 2 二次覆工の補強効果

一般に、鉛直負荷荷重はトンネルの変形に伴って変化すると考えられるが、ここでは、トンネルの変形による鉛直負荷荷重の変化はないものと仮定し、推定された鉛直負荷荷重を用いて二次覆工が施工されていない場合の変形量を解析した結果を図－９中に示す。解析の結果から、二次覆工が施工されたトンネル断面の完成後の変形量約9mmに対して、二次覆工を施工しない場合の変形量は約18mmとなり、二次覆工を施工した場合の約2倍となる。また、このとき覆工部材に発生する最大曲げモーメントと軸力を表－３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約2倍となっている。

なお、これに関連し、二次覆工の補強効果を定量的に検討するために前出の、図－７および図－８に示す構造解析モデルを用いて地盤反力係数をパラメータとする数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションの解析条件は、表－４に示すとおりである。

5. 長期的なシールドトンネルの断面変形量の予測

図-12に沖積層地盤において特に大きな変形量が観測された箇所(図-5)について、双曲線法に基づいた最終変形量の予測結果を示す。この結果、この断面におけるトンネル断面の最終変形量は12.1mm程度と推定された。このとき、トンネル覆工体に作用する鉛直負荷荷重は、図-13から 4.25tf/m^2 と推定される。

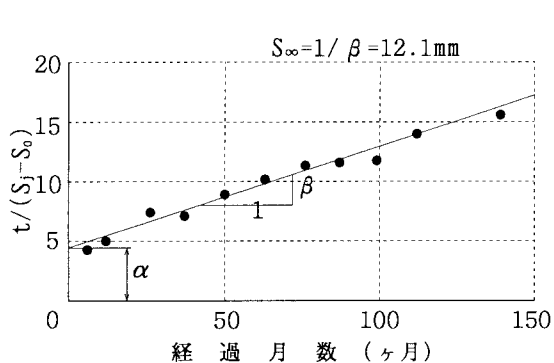


図-12 最終変形量の推定

表-3 発生断面力

			最大負荷モーメント (t・m)	軸 力 (t)
解析値	二次覆工有り	セグメント	-8.56	11.86
		二次覆工	4.12	8.83
	二次覆工無し	セグメント	-15.01	26.45

表-4 数値シュミレーション解析条件

CASE	トンネル外径	厚さ	幅	二次覆工厚	地盤反力係数
CASE-1	7300mm	300mm	900mm	250mm	0.0kgf/cm ³
CASE-2					0.5kgf/cm ³
CASE-3					1.0kgf/cm ³
CASE-4					2.0kgf/cm ³
CASE-5					3.0kgf/cm ³
CASE-6					4.0kgf/cm ³
CASE-7					5.0kgf/cm ³

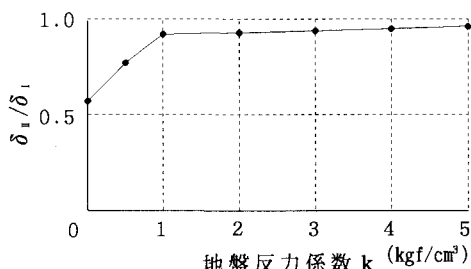


図-10 直径変化量の低減効果

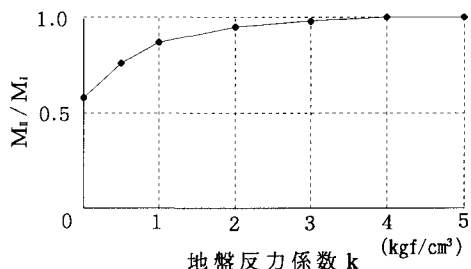


図-11 曲げモーメントの低減効果

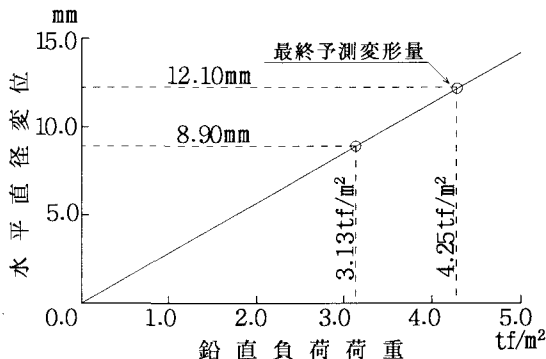


図-13 最終変形時の負荷荷重

6. おわりに

地下鉄シールドトンネルの保守管理で実施しているトンネル断面変状調査結果を用いて、トンネル覆工体に作用する鉛直負荷荷重の推定を行い、沖積地盤におけるトンネル覆工体の安全性を確認する手法を検討するとともに、二次覆工の変形に対する補強効果の試算を行った。その結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 検討では沖積層地盤に建設されたシールドトンネルに断面変状が生じている箇所が集中していることから、トンネル断面変形の発生原因が周辺地盤の沈下に伴う鉛直負荷荷重によって生じるものと仮定して、その値を定量的に評価することができた。その結果、断面変形量の実測結果に基づいて算定した鉛直負荷荷重は最大の変状が認められた箇所でも $3\text{tf}/\text{m}^2$ 程度であり、通常、設計で考慮される鉛直荷重に比べて十分小さいものであった。
- (2) 沖積層地盤における検討結果のトンネル断面の変形およびセグメントの発生断面力から判断すると、二次覆工を施工した場合には、トンネル完成後に生じる負荷荷重に対する変形量およびセグメントに生ずる曲げモーメントは約 $1/2$ となることから、二次覆工の変形抑止効果およびトンネル覆工体の耐荷力の向上効果は大きいといえる。
- (3) シールドトンネルに鉛直負荷荷重が作用する場合には、地盤反力係数が $1\text{kgf}/\text{cm}^3$ 以下の軟弱地盤では二次覆工の補強効果は高い。ただし、地盤反力係数が $2\text{kgf}/\text{cm}^3$ 以上期待できる地盤では、その効果は小さくなる。
- (4) トンネル断面変状が圧密沈下と同様の増加傾向を示すものと仮定して最終変形量を推定した結果、最大 9mm の変状が生じた箇所でも将来的にトンネル断面に問題が生じることはないと考えられるが、二次覆工施工前に作用している荷重等不明確な点もあることから、今後もトンネルの観測を継続し安全性の確認を行っていく必要がある。

以上の結果から、トンネル断面変形量の観測結果に基づいてトンネル覆工体に作用する鉛直負荷荷重を簡便に推定することができ、定量的にトンネル覆工体の力学的挙動を評価することができた。また、沖積層地盤に建設されたシールドトンネルの保守管理を行うにあたって、トンネル断面の変状調査を定期的に行うことで、トンネル覆工部材の安全性を評価する一つの方法を示すことができた。

なお、今回の検討では、断面変形の原因を周辺地盤の圧密沈下と仮定したが、沖積層地盤におけるトンネル断面変状の原因としては、周辺地盤のクリープ変形や作用荷重の経時的な変化なども挙げられることから、トンネル断面変状の定量的な評価を行うためには、トンネル断面の変形、発生応力度、作用荷重および周辺地盤の圧密沈下、変形挙動、地盤内応力分布などを総合的に計測し検討する必要があると考えられる。さらに、トンネル覆工体の安全性をより正確に評価するためには、一次、二次覆工間の境界条件の設定方法等、二次覆工を含めたトンネル覆工体の力学的な特性を実験、計測による情報に基づき適切に評価することが重要であると考えられる。

7. 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，1994年9月。
- 2) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道に係わる技術基準の整備に関する研究調査，平成5年度受託研究報告書，pp.353～420，1994年3月
- 3) Glossop,N.H.,M.P.O'Reilly：Settlement Caused by Tunnelling through Soft Marine Silty Clay,Tunnels & Tuunelling, Vol.14,No.9, pp.13～16, October.1982
- 4) 高橋彦治・池田和彦・白井慶治・飯塚 全：トンネルの変状と保守，土木工学社，pp.143～194，1976年4月
- 5) 藤森伸一：東北新幹線第一上野トンネルにおける二次覆工の本体利用について，東工35-2，pp.105～116，1985年3月
- 6) 斉藤正幸・奥田康三・依田 真・他：シールド洞道二次覆工の評価手法に関する実験について（その1～3），土木学会第45回年次学術講演会概要集，Ⅲ，pp.46～51，1990年9月
- 7) 村上博智・小泉 淳：二次覆工で補強されたシールドセグメントリングの挙動について，土木学会論文集，第388号，Ⅲ-8，pp.85～94，1987年12月。
- 8) 村上博智・小泉 淳：二次覆工された千鳥組セグメントリングの挙動について，土木学会論文集，No.430，Ⅲ-15，pp.135～142，1991年6月
- 9) 深草守人・吉村和彦：土圧式シールドの掘進に伴う軟弱地盤の挙動，間組研究年報，UDC624,19:539.3，pp.25～40，1983年。
- 10) 平田武弘・有留靖朗・市川裕一：土圧系シールドにおける軟弱地盤の挙動と施工管理（大阪市地下鉄4号線延伸工事），トンネルと地下，第14巻7号，pp.22～31，1983年7月。
- 11) 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年12月。
- 12) 川島真一・富田 実・寶田 淳・他：平成4年の地盤沈下，平成5年都土木技研年報，pp.177～208，1993年
- 13) 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.
- 14) Spangler, M.G.：Underground Conduits, Trans. A.S.C.E., 1948.
- 15) 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年。
- 16) 半谷哲夫：二次覆工を有するシールドトンネル覆工の力学的特性に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1303，1985年 10月
- 17) 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，1978年4月。
- 18) 村上博智・小泉 淳：シールド工事用セグメントのセグメント継手の挙動について，土木学会論文報告集，第296号，1980年4月。