

4心円駅シールド工法における覆工構造の現場計測結果 FIELD MEASUREMENT OF THE LINING WITH 4-CENTERD SHIELD METHOD

大野宏紀¹⁾・小山幸則²⁾・西尾誠高³⁾・粥川幸司⁴⁾

Hiroki ONO, Yukinori KOYAMA, Masataka NISHIO and Koji KAYUKAWA

Roppongi station in Metropolitan Subway Route No.12 was constructed as vertical twin tunnels. The lining structure used this shield method is formed out of specific segments. We executed the field measurement concerning the lining structure. In this measurement, we chiefly paid attention to grasp the following, 1, earth pressure for the lining structure. 2, influence of the lower tunnel on the upper shield excavation. 3, influence on lining structure when the temporary pillars were removed. As a result of the measurement, it was confirmed that this lining structure was safe concerning the behavior. In this paper, the result of the field measurement was described.

Key Words: 4-centerd shield method, vertical twin tunnels, field measurement, lining structure, earth pressure

1. はじめに

都営地下鉄12号線六本木駅工区では、道路幅員が狭い、昼夜を問わず地上交通の往来が激しい、重要地下構造物が存在する、等の制約条件により、4心円駅シールド工法による上下二段での施工が計画、採用された(図-1, 2)¹⁾。ところで、本トンネルを実現するために、これまでに特に覆工構造に関し、各種の要素試験ならびに解析を実施し、覆工構造の具体化を図る²⁾とともに、最終的な覆工形状で実物大の覆工構造リング載荷試験を行い、その構造特性ならびに安全性の確認を行ってきた³⁾。

しかしながら、今回の設計、施工条件は特殊であり、本覆工構造が実際に地盤中に構築された時の作用荷重、応力状態については不明である。また、今回のような特殊な断面形状のトンネルを上下2段で近接して施工した例はなく、上段(後行)シールドの施工にともなう下段(先行)トンネルへの影響も確認しておく必要がある。

このような背景のもと、ここでは、覆工に関する現場計測を行うこととした。本報では、その計測結果とともに、本覆工構造において特に重要と考えられる、覆工への作用荷重の状態、上下二段の施工の影響、仮柱撤去時の覆工の挙動について報告するものである。

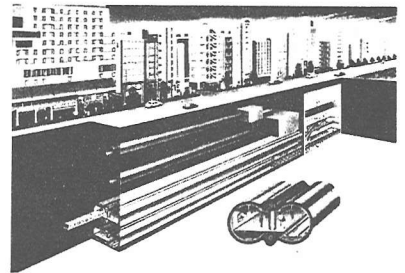


図-1 12号線六本木駅工区概要

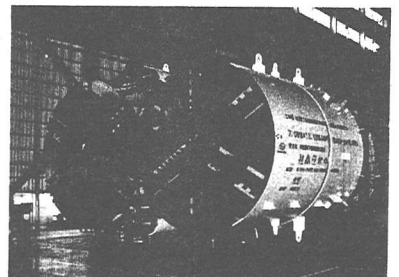


図-2 4心円駅シールドマシン

- 1) 東京都地下鉄建設(株) 工事本部 工事調整部
- 2) 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部
- 3) 正会員 ハザマ 技術研究所 研究開発推進部
- 4) 正会員 工学修士 ハザマ 土木本部 都市土木統括部

2. 工事の概要

(1) 工事概要⁴⁾

本工事は、駅両端部 97m 区間を開削工法で施工し、中央の駅ホーム部 118m を上下二段の 4 心円駅シールド工法で施工するものである。トンネル中心深さは電力マンホールが存在するため、上段トンネルで地下約 30m、下段トンネルで約 40m である(図-3)。シールド機は、覆工構造に適合させるため、左右メインカッターと中央上下の補助カッターを有する 4 心円泥水式シールド機である。本機では、覆工構造で最も重要となる本設の柱(本柱)の鉛直性を高精度で確保するよう、シールド機のローリング制御用に左右胴体部が単独で上下中折れする H & V シールド機構を採用している。

工事箇所付近の地質は、上部より表土(Ts)、関東ローム層(LmLc)、東京砂層(Tos)、東京粘性層(Toc)、東京礫層(Tog)、上総層泥岩(Kam)、上総層砂質土(Kas)と続いている。これらの層は連続性が良く N 値は 50 以上であるが、特に上総層については、南東に傾斜していることが特徴となっている。一方、地下水位は、常時は GL-10m 付近であるが、東京電力 3 号マンホールの残置杭の撤去に際しての導坑掘削を行うため、地下水位を上段トンネル天端付近まで低下させるとともに、マンホール直下の地盤改良(MJS 工法、薬液注入工法)を行っている。

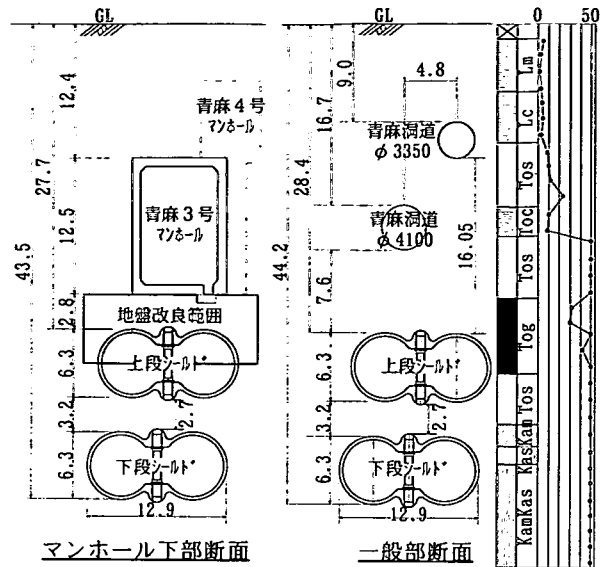


図-3 トンネル断面図および地質状況(単位:m)

(2) 覆工構造概要³⁾

図-4 に覆工構造の概要を示す。断面形状は 2 円が横に接するような形となっており、円が接する部分の上下に特殊形状のセグメント(中央部セグメント)を配置し、この間に柱を組み込む構造となっている。中央部セグメントは、トンネル軸方向に箱桁状の梁を構成する部材(箱桁部材)を組み込み一体化している。外形寸法は 12.92m × 6.80m である。なお、本覆工の側円部セグメントは鋼・コンクリート合成構造、中央部セグメントおよび本柱はスチール構造である。また、継手構造は、周方向、軸方向ともボルトを用いない嵌合方式である。

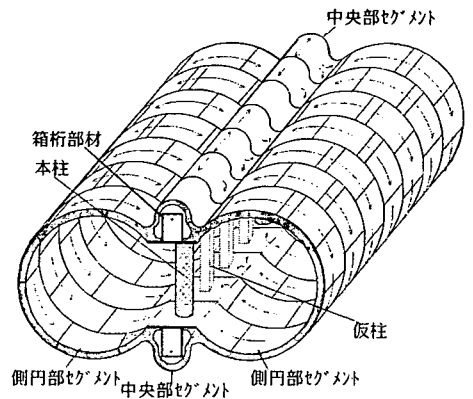


図-4 覆工構造の概要と荷重の流れ

3. 覆工構造計測の概要

(1) 計測の目的

本トンネルは特殊な断面形状、またそれにもともなう特殊な構造形式を有している。さらに離隔が 2.7m と近接した上下二段でのシールド施工である。このような特殊な施工条件において、実際に地中に構築された覆工構造の安全性を確認するために、現場計測を実施することとした。以下に計測の具体的な目的を示す。

- ・覆工へ作用する土圧、水圧の確認と設計荷重との比較
- ・上段シールド掘進時の下段トンネルへの影響の把握
- ・仮柱撤去時の本柱への荷重移行と安全性の確認

(2) 計測箇所と計測方法

図-5に計測リングと周辺構造物の位置関係を示す。計測は上段シールド直上に東京電力3号マンホールを抱えるマンホール下部(13~17リング)と、マンホールの影響がほとんどないと考えられる一般部(63~65リング)で行うこととした。これは、覆工設計での荷重の取り扱いにおいて、マンホール下部では、マンホールが開削工法で構築されているので全土被り圧を、一般部では上段シールドを含めた緩み土圧(緩み高さ28.9m)を採用したことを考慮したものである。

各計測リングの計器配置を図-6に示す。まず、覆工へ作用する土水圧については、一般部63, 64リングで行った。設計では、マンホール下部(13~17リング)で全土被り圧を想定しており、設計荷重としては大きいですが、マンホール下部残置杭撤去に際して地盤改良を行っており、明確な作用荷重が計測されない可能性がある。そのため、原地盤での明確な作用荷重を把握するため、一般部である63, 64リングで計測を行った。

次に、側円部の鋼・コンクリート合成セグメントについては、柱間の中央となる15, 63リングで鋼枠の周方向の応力を計測することとした。これは、仮柱の撤去の後、箱桁の梁がたわむことによって側円部セグメントに曲げが発生することを想定したものである。柱については、13, 17リングの本柱およびこの間の仮柱3本と、63, 65リングの仮柱、本柱の柱軸方向応力を計測している。これは、施工時において本柱、仮柱の発生断面力がどのようになるか、仮柱撤去時において仮柱の負担していた鉛直荷重が本柱に移行されるかを確認するものである。箱桁部については、トンネル完成時に本柱上となる13, 17および65リングと、柱間のスパン中央となる15, 63リングでトンネル軸方向の応力を計測し、仮柱撤去時にトンネル軸方向の桁としての役割を果たしているかどうかを確認することとした。

4. 計測結果と考察

(1) 掘進状況

掘進は、下段シールドが平成10年11月~平成11年2月(上段シールド機組立による中断を含む)、上段シールドが平成11年4月~7月で行った。総推力実績

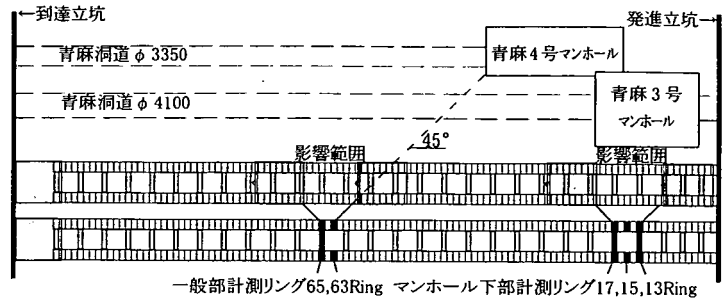
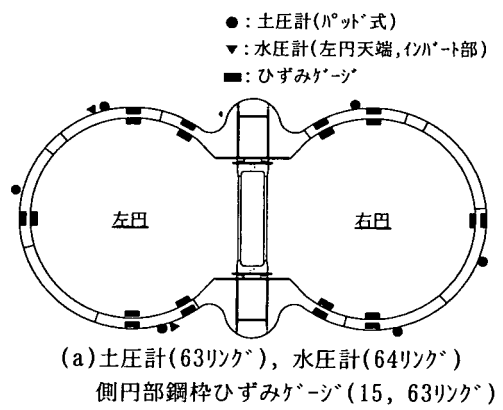
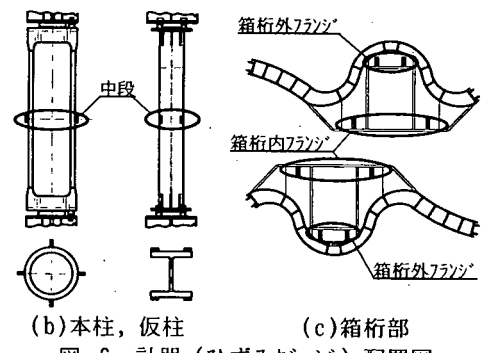


図-5 計測リングと周辺構造物の位置関係



(a)土圧計(63リング), 水圧計(64リング)
側円部鋼枠ひずみゲージ(15, 63リング)



(b)本柱, 仮柱 (c)箱桁部
図-6 計器(ひずみゲージ)配置図

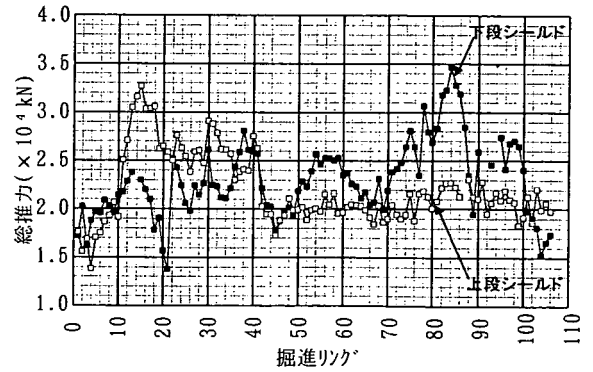


図-7 総推力掘進実績

を 図-7 に示す。実績では下段シールドで前半は $1.5 \sim 2.5 \times 10^4 \text{ kN}$ 、後半で $2.0 \sim 3.0 \times 10^4 \text{ kN}$ であった。また、上段シールドでは前半で $2.5 \sim 3.0 \times 10^4 \text{ kN}$ 、後半で $2.0 \times 10^4 \text{ kN}$ 前後であった。特に、上段シールド前半で総推力が大きいのはマンホール直下の地盤改良範囲を掘進した影響と考えられる。

(2) 覆工に作用する土圧、水圧

図-8 に、先ず下段シールド掘進時の覆工への計測土圧(63リング)の経時変化を示す。64～66リング掘進時においていずれの計測箇所も一時的に計測値が

上昇しているが、64リング掘進時にはテールブラシの抑え圧、またはテールグリス圧(実績 $0.2 \sim 0.37 \text{ MPa}$)、65、66リング掘進時には裏込め注入圧(実績 $0.25 \sim 0.44 \text{ MPa}$)の影響によると考えられる。しかし、それ以降については一時的な計測値の上昇は認められず、覆工と地山が一体化したものとされる。

次に、図-9 に上段シールド掘進後、計測値がほぼ一定となった段階での63、64リングの土圧、水圧結果を、低水位時の設計荷重とあわせて示した。計測された土水圧は、左円で $0.10 \sim 0.15 \text{ MPa}$ 、水圧は 0.13 MPa であり、ほぼ左円全周にわたって均等に近い土水圧分布であると予想される。なお、水圧については復水中であり、将来さらに大きくなると考えられる。一方、右円については、天端付近でほぼ 0 MPa 、インバートで 0.37 MPa とアンバランスな結果となった。天端部については、図-8 で示したように計測開始時より計測値が小さく、以降、時間の経過とともに徐々に値が小さくなった。左円で水圧が計測されているにもかかわらず、このような状況になったのは、予測ではあるが、トンネル断面内で地層が傾斜しており、右円の天端付近が実質的に不透水層である上総層粘土(Kam)内で水圧が小さく計測されたものと思われる。一方、右円インバート部で他より大きめの土水圧が計測されているのは、下段シールド掘進時の裏込め注入圧が他と比較して残留しており(図-8)、地下水の復水とともに上昇してきたものと考えられる。なお、計測された土水圧の覆工全周での平均は 0.18 MPa であり、図-9(b)で示した低水位時の設計荷重の約40%であった。

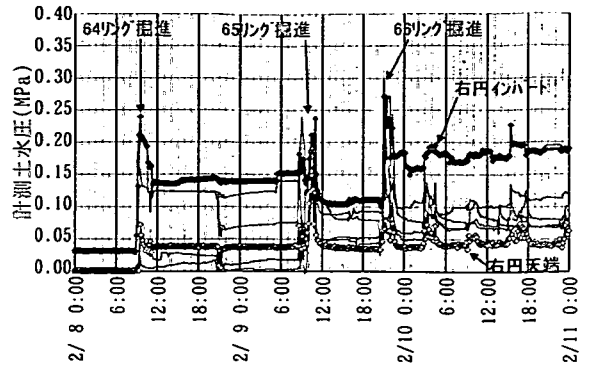


図-8 下段シールド掘進時の作用土水圧(63リング)

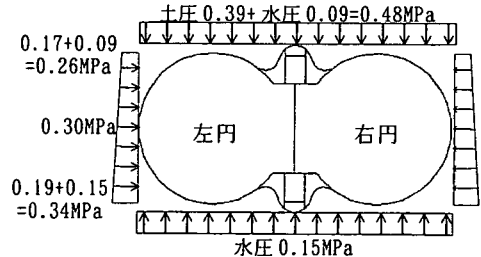
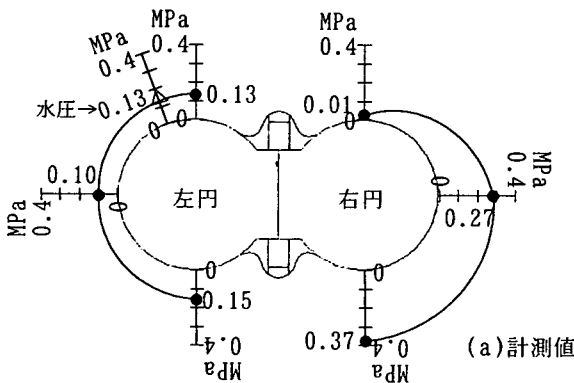
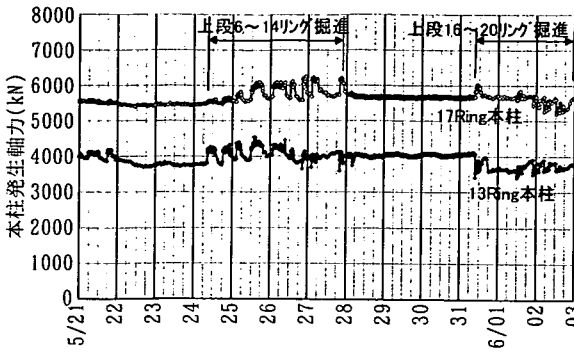


図-9 土水圧分布

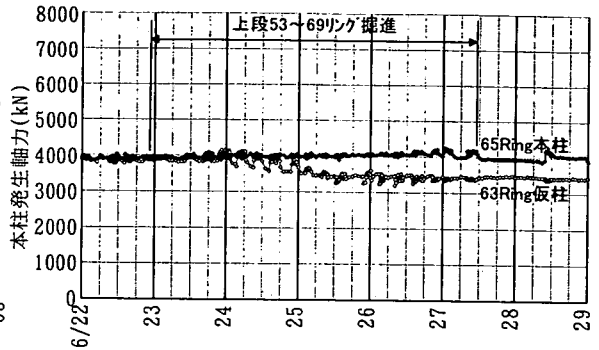
(3) 上段シールド掘進時の下段トンネルへの影響把握

上段シールドの通過にともなう下段トンネルへの影響について、ここではその代表的な結果として、マンホール下部13、17リングの本柱、一般部63リング仮柱、65リング本柱のひずみより算出した柱軸力の経時変化を 図-10 に、63リングでの土水圧経時変化を 図-11 に示した。

上段シールドの通過に際しては、特にマンホール下部13、17リングの本柱について、約 500 kN 程度の軸力



(a)マンホール下部13, 17リング本柱



(b)一般部63リング仮柱, 65リング本柱

図-10 上段シールド掘進時の柱軸力変化

増加が認められたが、これらは掘進終了とともに戻る傾向にあった(a)。一方、一般部63, 65リングの仮柱, 本柱については、柱軸力の変化はあまり認められなかった(b)。これらは図-7に示したように、マンホール下部13, 17リングでは、上段シールドがマンホール下部の地盤改良範囲の掘進しており、総推力が $2.5 \sim 3.0 \times 10^4$ kNであったが、一般部63, 65リング近傍では、総推力が概ね 2.0×10^4 kN前後であり、上段シールドの総推力の相違によると考えられる。なお、その他の覆工部材(箱桁部材, 側円部セグメント)も柱の場合と同様に、マンホール下部では数MPa程度の応力変動が認められたが、一般部ではほとんど変化がなかった。また、63リングで計測した覆工への土水圧もほとんど変化は認められなかった(図-11)。

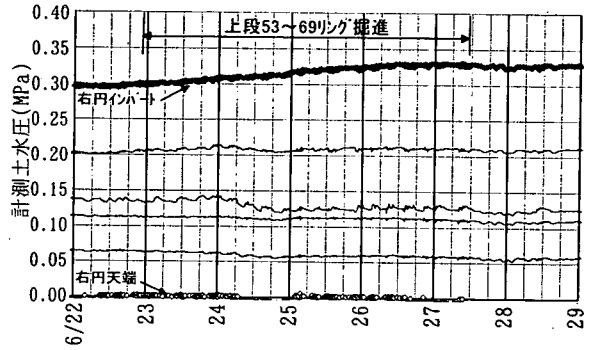


図-11 上段シールド掘進時の土水圧変化(63リング)

以上のことから、今回の施工条件、すなわち、硬質な洪積地盤中で離隔2.7mの上下二段での4心円シールドにおいては、上段(後行)シールドが掘進する際に、その推力の影響が下段トンネルへ若干伝達されるものの、その影響は小さく、またそれが残留する傾向も認められないものと判断された。

(4) 仮柱撤去時の本柱への荷重移行と安全性の確認

上段シールド掘進終了後、マンホール下部の計測リング(13～17リング)において、仮柱の撤去にともなう本柱への荷重移行について検討した。仮柱撤去では、これまで仮柱が負担していた各リングの鉛直荷重をスムーズに本柱へ伝達させ、かつ、本柱に撤去にともなうトンネル軸方向、横断面方向の曲げモーメントを発生させないことが重要でなる。そこで、仮柱撤去の基本手順として、図-12に示す手順を考えた。ここでは、特に柱間のスパンを徐々に広げていくことを考慮した。このような手順で仮柱を撤去した際の13, 17リング本柱の軸力変化を図-13に示した。

仮柱撤去前で13, 17リング本柱の軸力は約4000～4400kNで

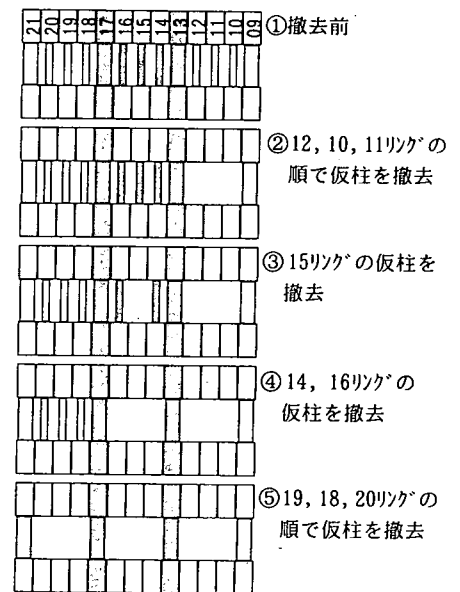


図-12 仮柱の撤去手順

あり、14～16リング仮柱軸力は、各々120、2160、740kNでばらつきはあるものの、約3000kN/3本であった。その後、順次仮柱を撤去し、最終的に13、17リング本柱の軸力は約6500kN前後となり、約2100～2500kN程度の軸力増加となった。この増加分は、概ね仮柱3本分の負担していた軸力に相当する。また、軸力増加の経過を見ると、13リング本柱の場合、その前後の10～12、14～16リングの仮柱撤去時に軸力が増加しており、17リング本柱では、14～16、18～20リングの仮柱撤去時に増加している。すなわち、対象となる本柱の前後の仮柱を撤去する際に軸力が増加し、それ以外の時はほとんど変化がないものと判断される。

一方、13、15、17リングで計測した箱桁部材のトンネル軸方向応力は、ほとんど変化が認められなかった。このことから、箱桁部材は中央部セグメントと一体化して非常に剛な桁となっており、そのため、本柱への荷重伝達が非常にスムーズに行われたものと考えられる。

なお、仮柱撤去に際して、本柱にはトンネル軸方向、横断方向の有意な曲げモーメントの発生は認められなかった。また、本柱の設計軸力(高水位)は 1.6×10^4 kNであるが、仮柱撤去後の最終的な軸力は約6500kNで、設計軸力の約40%であった。

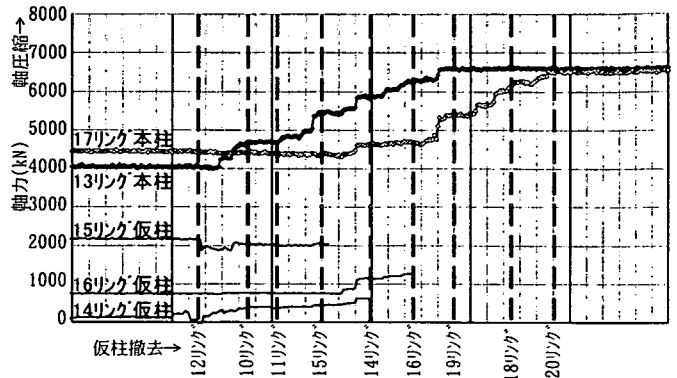


図-13 仮柱撤去にともなう柱の軸力変化

5. おわりに

本工事は、4心円駅シールド工法という特殊な断面形状のシールドトンネルを、上下二段で施工するというこれまでにない特殊な工事であった。また、覆工構造に関しては、これまでに各種の構造載荷試験や3次元FEMを含めた各種の設計解析を行い、覆工構造の具体化を図った。そして、その検討結果を踏まえて、今回、本覆工構造がトンネルの施工にともなって最終的にどのような挙動を示し、どのような応力状態になるかを、現場計測により検討した。

シールド掘進を終了し、仮柱を撤去した現時点においては、本覆工構造に作用している土水圧荷重は設計荷重と比較して約40%程度であり、これにともなって各部材に発生している応力、断面力ともに設計値の範囲内で、構造全体としては十分安全であると考えている。しかしながら、特に覆工に作用している土水圧荷重に関し、想定と異なった傾向が見られることや、トンネル周辺の地下水位が徐々に復水しており、これにより最終的に覆工構造がどのような状態になるか、等について、今後詳細に計測データの分析を行うとともに、掘進に関わるデータとの相関関係を含めて、さらに検討を進めていきたいと考えている。

なお、本工事では、12号線環状部特別委員会の御指導をいただいた。ここに感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 福島：21世紀の交通ネットワーク拡大を目指す新技術(2) 都営地下鉄12号線環状部，日本トンネル技術協会，トンネルと地下，1994.1
- 2) 井上，新治，西尾，粥川：4心円駅シールド工法の開発，日本トンネル技術協会，トンネルと地下，1996.6
- 3) 窪田，新治，小山，西尾，粥川：4心円駅シールド工法に用いる覆工構造のリング載荷試験，土木学会，トンネル工学研究発表会論文・報告集第7巻，1997.11
- 4) YAMADA, SUGIMOTO, NISHIO and KAYUKAWA: Study on Ground Behavior by 4-Centered Slurry Shield Driving Method, Preprint Volume by Proceedings, GEOTECHNICAL ASPECTS OF UNDERGROUND CONSTRUCTION IN SOFT GROUND. IS-TOKYO' 99