

軟弱地盤におけるRCセグメントの計測結果と考察

MEASUREMENT RESULTS AND CONSIDERATION RC-SEGMENT IN SOFT GROUND

矢萩秀一¹⁾・藤木育雄¹⁾・村松 泰²⁾・鈴木久尚³⁾

Shuichi YAHAGI, Ikuo FUJIKI, Yasushi MURAMATSU and Hisanao SUZUKI

The Teito Rapid Transit Authority makes field measurement for the purpose of collecting data to rationalize design method and confirming safety.

This report is the result of field measurements in Honjo shield tunnel on extension Hanzomon line.

The earth pressure of shield tunnel was the maximum when backing was grouted. After the grouting hardened, the pressure decreased a little by stress release in the tail void.

The axial force was outstanding at the sectional force generated in shield segment. The force was compression in the whole section. The bending moment was increased after the grouting hardened. The moment was similar to the value and the mode of design.

Key Word : tunnel-lining, shield-tunnel, measurement , the sectional force

1. はじめに

交通営団では、シールドトンネル覆工に作用する外荷重および覆工に発生する断面力を把握し、セグメントの設計法を検証するために、各種地盤を対象に複数の単円並びに三連形等特殊形状断面シールドトンネルにおいて現場計測を行ってきた。本報告は、軟弱地盤における単円形シールドトンネル(φ9,400mm)の現場計測から、トンネル覆工の応力及び変形の発生機構を検証すると共に、セグメント設計手法による断面力と覆工に作用する外荷重及び発生断面力の経時変化に着目し、計測結果の妥当性について考察したものである。

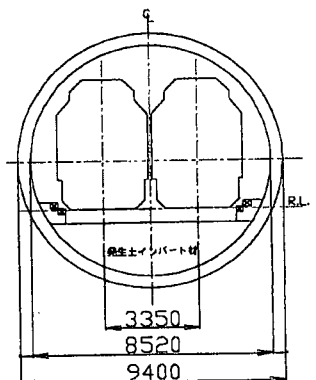
2. 計測概要

1) 工事概要

計測場所は、地下鉄半蔵門線(11号線)の水天宮前～押上間延伸工事のうち、錦糸町～押上間の複線シールドトンネル(本所工区)で偏心多軸式による泥土圧シールド工法で施工したものである。概要を表-1に示す。

表-1 工事概要

トンネル施工延長	907m
シールド外径	φ 9,600mm
セグメント種類	RC 平板型セグメント
セグメント外径	φ 9,400mm
セグメント内径	φ 8,520mm
セグメント幅	1,500mm
セグメント厚	440mm
縦断勾配	-4.0‰～+5.0‰
構築平均土かぶり	13.7m～15.4m



- 1) フェロー 帝都高速度交通営団 建設本部
2) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部 13号線渋谷工事事務所
3) フェロー パシフィックコンサルタンツ(株) トンネル部

地質概要は図-1に示すとおり、地表より埋土層、上部有楽町粘性土層がトンネル上部を占め、トンネル掘削断面部は沖積層の下部有楽町粘性土層が占めており、N値は0~4程度と軟弱な地盤である。

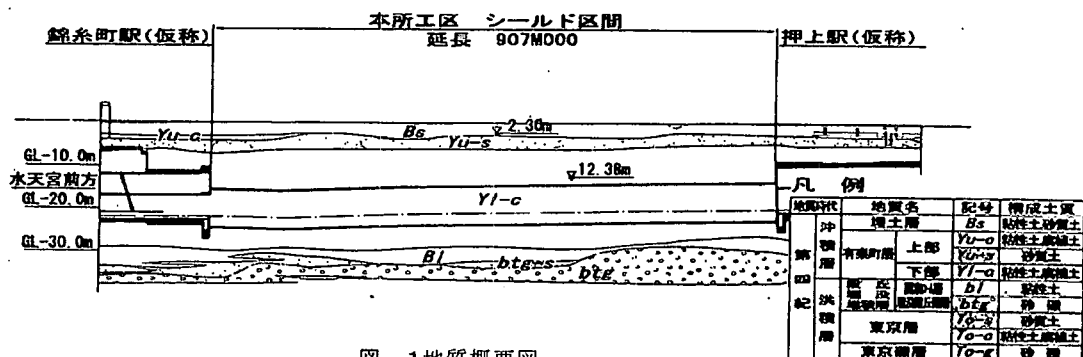


図-1 地質概要図

2) 計測計画の概要

計測は施工時から施工後長期にわたるセグメントリングの挙動(作用土圧、曲げモーメント、軸力)を計測して、現行のセグメント設計手法をより合理的にするとともに、長期間のトンネル挙動を把握することを目的として実施した。

主計測横断面図(No.40 リング)

主要計測は立坑発進後約 60m 掘進した地点において隣接する 2 リングで行った。また、トンネル内空変位は立坑発進後約 405m 掘進した地点において 1 断面計測を行った。図-2 に計器配置状況を示す。

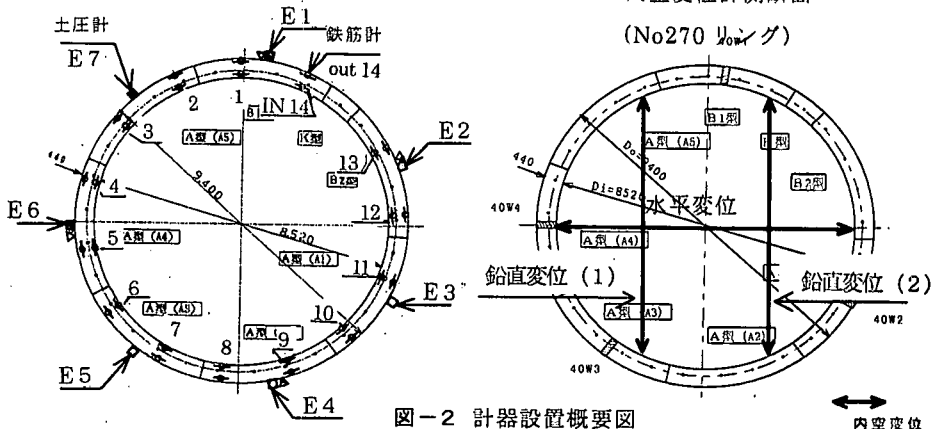


図-2 計器設置概要図

3 計測結果と考察

(1) 計測値に対する施工時荷重としての裏込め注入圧の影響

1) セグメントに作用する外荷重の経時変化

施工時荷重としてセグメントに作用する土圧の経時変化を図-3に示す。

計測リングは掘進・セグメント組立てを繰り返す毎に大きな圧力変化を受けている。最初の圧力変化はテール内において、テールシールとの接触による圧力を計測した。その後テールシールの圧力として約 $170\text{ kN/m}^2 \sim 280\text{ kN/m}^2$ を受けながらテール内を通過する。第2の圧力変化は 42 リングの掘進に伴いテール外に出た時点に発生し、裏込め注入圧 (358 kN/m^2 の圧力管理) の影響を受け、土圧計は最大約 320 kN/m^2 を計測し、その後、裏込め注入圧の影響は $200 \sim 250\text{ kN/m}^2$ の範囲に安定する。裏込め材は約 4 リング掘進した時点(1 日経過後)で一軸圧縮強度 100 kN/m^2 程度に固化するが、この時点で土圧はやや増大し、 $200 \sim 290\text{ kN/m}^2$ と安定した状態となり、裏込め注入圧はセグメント覆工の初期荷重として、そのまま残留する傾向にある。このことは従来の計測から考察されてきた、裏込め材の固化に伴う、テールボイドの応力解放の影響を受けている現象¹⁾と思われる。

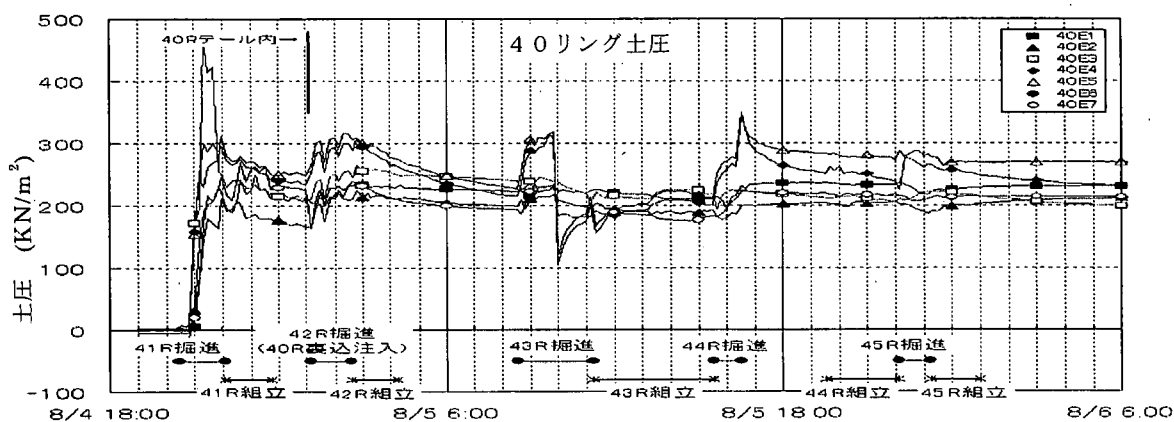


図-3 施工時過程の土圧の経時変化

2) セグメント断面力の経時変化

計測リング (No.40) において、施工時過程の主鉄筋応力の経時変化を図-4に示す。

主鉄筋応力は、41リングの掘進開始直後引張側に大きな変化が生じているが、この要因は土圧の変化時間と合致するため、テールブラシの接触とその後テールシールの圧力を受けているものと思われる。

その後、42～45リング掘進中の主鉄筋応力は圧縮側に变化しており、裏込め注入圧の作用時期と鉄筋応力変化が一致している。この施工時荷重の影響を受けている期間に着目すると、主鉄筋応力の最大値は、圧縮側では -25.6N/mm^2 であるが引張り応力は発生していない。鉄筋の許容応力度 (200N/mm^2) と比較すると極小値である。施工時荷重の応力は、テール内では一時的に引張り応力を計測しているが、テール脱出後は全面的に圧縮側に移行して安定する傾向にある。このことは裏込め注入がトンネル半径方向に均等に作用するためと考えられる。

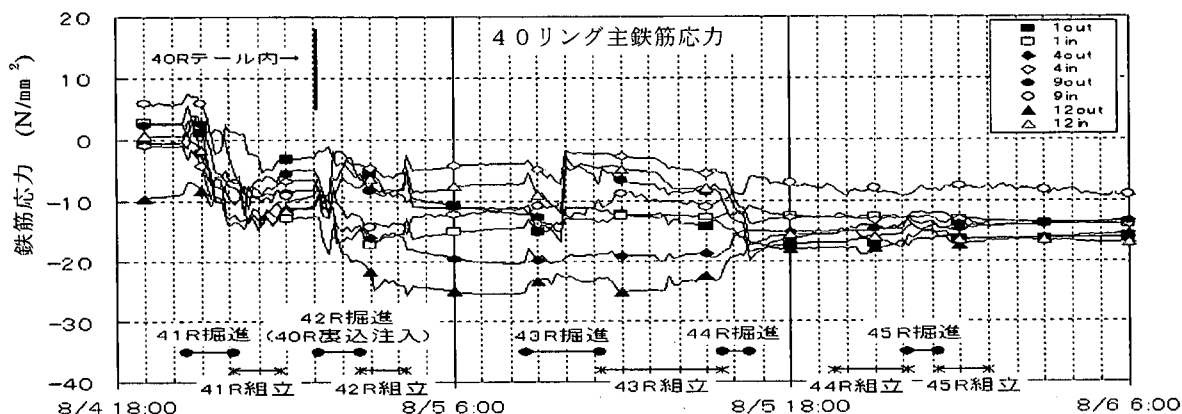
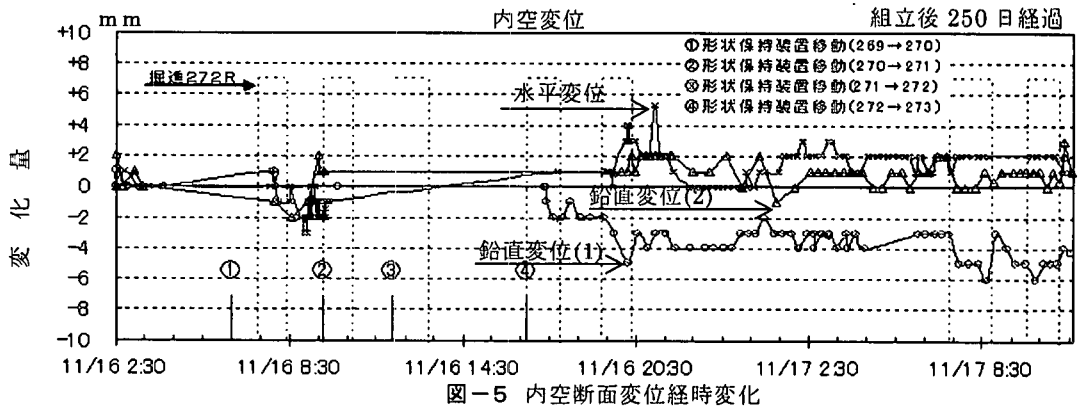


図-4 施工時過程の主鉄筋応力経時変化

3) トンネル内空変位経時変化

内空変位計測は No270 リングで実施し、その内空断面変位の経時変化を図-5に示す。内空変位は、計測開始から7リング (No272～278) 掘進までの期間に鉛直方向内空は $+2\text{mm}$ から -6mm に変位し、水平方向内空は -2mm から $+3\text{mm}$ に変位している。

トンネル断面はセグメント組立てからテール通過まで縦長に変形している。テール通過後、トンネルは緩やかに水平方向に変位している。この期間のトンネルは、掘進に伴い形状保持装置が取除かれ、裏込め注入圧と土・水圧を受けた影響による内空変位と思われる。

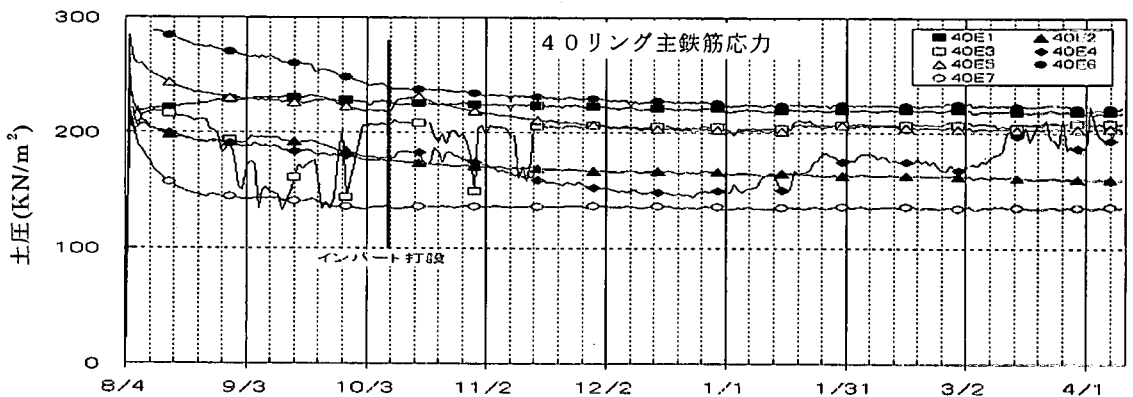


(2) 計測値の長期的な動向および設計値との比較

セグメントに作用する外荷重の長期的な動向について述べるとともに、計測データが安定した状態と思われる、計測開始から 8 ヶ月後の計測結果に基づいた土圧分布や発生断面力等を設計値と比較した。

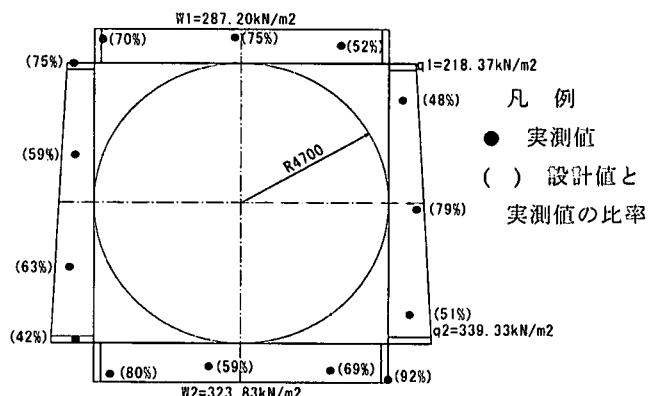
1) 土圧分布

セグメントに作用する外荷重の長期経時変化を図-6 に示す。セグメントに作用する外荷重は計測リングがシールド機のテールを通過してから時間経過とともに減少するが、3 ヶ月経過以降その変化は小さく、6 ヶ月程度経過するとほぼ一定値を示した。テール通過時からの外荷重の変化はトンネル底部 (40E5) の減少量をもっとも大きく 90kN/m^2 程度である。これに対して、頂部および側部の変化量は小さい。



計測値が落ち着いた 8 ヶ月経過後の鉛直・水平成分に分けた値と設計荷重の比較を図-7 に示す。各測点においてバラツキはあるが、全体的には設計時の設計荷重を大きく下回り、設計値に対する実測値は、鉛直方向で平均 65~75%，水平方向では平均 60% となっている。

土圧の作用状態について考察すると、裏込め材固化後は裏込め注入圧および地盤応力解放により作用した荷重がその後、周辺地盤およびセグメント覆工の相互作用により再配分が行われ、結果として土圧は減少する傾向にある。



2) セグメント断面力

主鉄筋応力の長期的な動向について計測開始から8ヶ月間の経時変化を図-8に示す。主鉄筋応力は概ね組立後5ヶ月程度経過した時点から大きな変動はなく安定している。トンネルは施工段階では全周にわたって圧縮応力が発生していたが、時間の経過とともにトンネル上半部の内面側主鉄筋の一部は引張応力が発生している。一方、スプリングライン部においては外側に引張り応力が発生している。応力の大きさとしては引張・圧縮とも鉄筋の許容応力度 200N/mm^2 (SD345) と比較すると小さい値である。

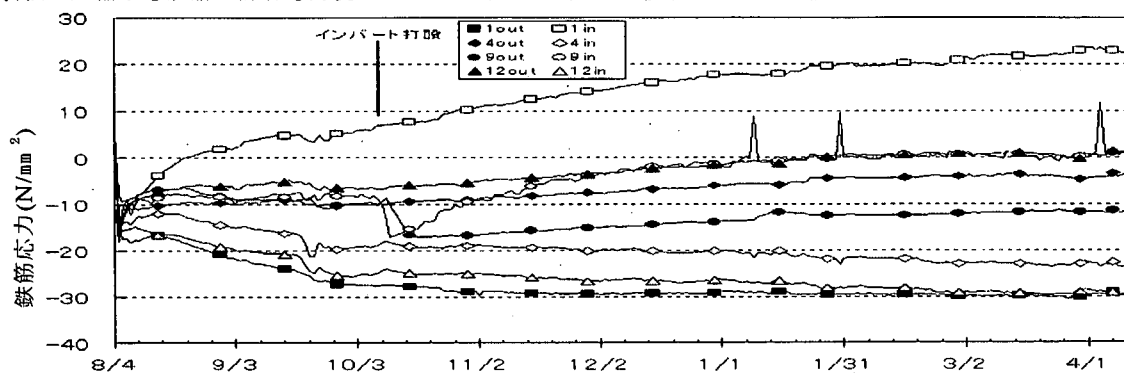


図-8 主鉄筋応力の長期経時変化

裏込め材固化時とその後8ヶ月経過した時点の曲げモーメントと軸力について分布比較を図-9に示す。

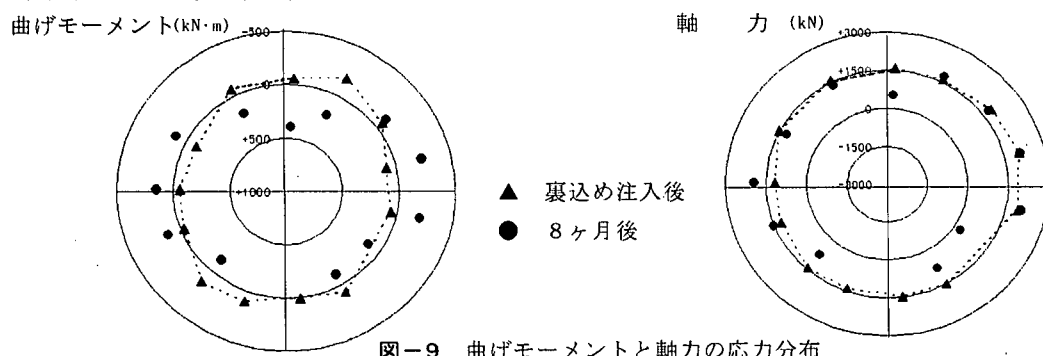


図-9 曲げモーメントと軸力の応力分布

組立て後8ヶ月経過した時点の計測値と設計値の断面力分布の比較を表-2および図-10に示す。

表-2 セグメントの断面力比較 (8ヶ月後)

計測点	角度 (deg)	曲げモーメント(kN・m)			軸力(kN) + : 圧縮		
		a : 実測値	b : 設計値	a / b	a : 実測値	b : 設計値	a / b
1out(1in)	4.5	396.9	199.1	199%	503	1780	28%
14out(14in)	27.0	205.7	96.9	212%	1772	1943	91%
13out(13in)	54.0	-103.9	-137.1	76%	1744	2080	84%
12out(12in)	76.5	-237.5	-107.1	222%	2106	2027	104%
11out(11in)	103.5	-201.7	-136.8	147%	2079	2133	97%
10out(10in)	126.0	130.7	34.0	384%	270	2076	13%
9out(9in)	153.0	108.8	116.5	93%	812	2065	39%
8out(8in)	175.5	—	55.7	—	—	2158	—
7out(7in)	202.5	—	117.9	—	—	2081	—
6out(6in)	225.0	141.0	36.8	383%	760	2114	36%
5out(5in)	252.0	-119.7	-56.4	212%	1520	2116	72%
4out(4in)	274.5	-150.5	-97.5	154%	1955	2050	95%
3out(3in)	301.5	-99.7	-207.6	48%	1226	2136	57%
2out(2in)	337.5	183.3	—	90%	1373	1893	73%

セグメント覆工に発生する断面力について考察すると以下のとおりである。

・断面力の経時変化

- ① 曲げモーメントは、正曲げ、負曲げ共に 裏込め材の固化以降時間経過と共に増加する傾向にあり、最終時はトンネル上端・下端では正曲げ、スプリングラインでは負曲げとなっている。軟

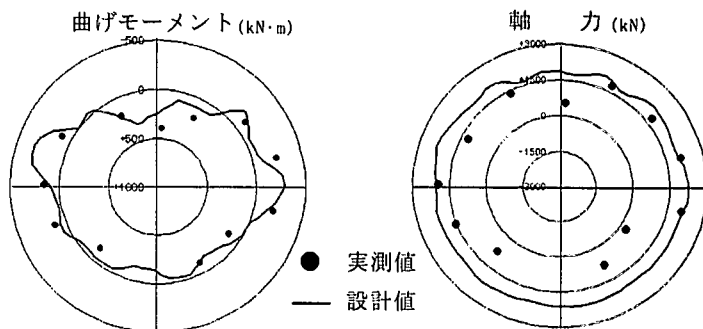


図-10 計測値と設計値の断面力分布比較

弱地盤であることからこの傾向が顕著であり、曲げモーメントの分布も大きな変化が計測された。

- ② 軸力は、モーメント同様に時間経過に伴い増加する傾向にあり、裏込め注入圧による初期の軸力が持続されているものと考えられる。

・収束時の計測断面力と設計断面力との比較

正曲げは設計値に比較的近い値（概ね 110%）であり、負曲げは、設計値に比較的小さい値（概ね 70%）軸力は、設計値に比較的近い値（概ね 90%）となっている。最大曲げモーメントの発生モードは設計値に近似している。

3) トンネル内空変位

トンネル内空変位は、概ね 5 ヶ月程度経過した時点で、大きな変動もなく収束に向かう傾向が見られ、鉛直方向の変位は 10 mm 程度減少し、水平方向変位は、10 mm 程度増加している。トンネル内空変位は、セグメントに作用する外荷重の安定とともに収束する傾向にあり、トンネル内空の変化量は、真円寸法の 1/600 程度の小さい値であった。

4) 軟弱地盤における圧密現象の影響

- ① 裏込め材固化後土圧の変化は小さく、ほとんど変動していない。
- ② 鉄筋応力は、緩やかに増大しており、これに伴って曲げモーメントは、トンネル上端部および下端部は正曲げ、スプリングラインは負曲げが著しく増大した。
- ③ トンネル変形は鉛直方向が 10 mm 程度減少し、水平方向は 10 mm 程度増大した。この現象に着目して周辺地盤の挙動計測データ分析²⁾の結果、地表面沈下量は 20 mm～35 mm であり、この圧密現象が覆工に影響を及ぼしたものと考察される。

4. おわりに

軟弱地盤における偏心多軸式泥土圧シールド工法により、施工されたセグメントリングの計測から、覆工に作用する外荷重と発生する断面力を推定した。その結果、外荷重並びに発生断面力について考察すると、計測値と実測値は乖離していることが分かった。

このため、過去の単円シールド並びに三連型シールドなど特殊形状断面を含む各種シールドトンネルの計測結果を整理し、本計測データの詳細な分析を行うことにより設計荷重の設定手法をはじめとするシールドトンネル覆工の合理的な設計手法確立に向けて検討を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 中山隆, 中村信義, 中島信: 泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について, 土木学会論文報告集第 397 号, VI-9, 1988. 9
- 2) 大門信之, 藤木育雄, 大塚努: 軟弱地盤における偏心多軸式大断面泥土式シールドの施工と地盤変状計測, トンネル工学研究発表会論文報告集代 11 巻, 2001, 11