

急曲線シールド掘進に伴うトンネル覆工挙動の 現場計測

In-situ Measurement on Segment Behavior due to Shield Tunnelling at Sharp Curve

譽田孝宏¹・粥川幸司²・杉本光隆³・中村益美⁴・岡田章⁵

Takahiro Konda, Koji Kayukawa, Mitsutaka Sugimoto
Masumi Nakamura and Akira Okada

¹正会員 工修 (財)地域 地盤 環境 研究所 地盤解析グループ (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

E-mail:konda@geor.or.jp

²正会員 工修 (財)地域 地盤 環境 研究所 東京事務所 (〒160-0004 東京都文京区湯島1-8-4)

³正会員 工博 長岡技術科学大学 環境・建設系 (〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1)

⁴東京都下水道局 建設部 (〒163-8001 東京都新宿区新宿2-8-1)

⁵正会員 工修 (株)奥村組 東京支社 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

Cracking and chipping in concrete tunnel lining give heavy influence to tunnel durability. These damages during sharp curved excavation are caused by the execution loads due to contact between shield tail and tunnel lining, hardening of backfill grout at shield tail, and concentration of jack thrust, and so on. But there are few measured data on tunnel lining behavior and acting pressure on the tunnel lining during sharp curved excavation.

Therefore, the monitoring on the tunnel lining deformation and displacement during the sharp curved shield tunnelling was carried out. This paper reports the in-situ measurement results and discusses the mechanism of the phenomena with the shield operation data.

Key Words : shield tunnelling, segment behavior, in-situ measurement, sharp curve, soft silty ground

1. はじめに

最近のシールド工事では、建設コストの縮減や省力化を目指して、セグメントの拡幅化や薄肉化、二次覆工の省略化に向けた努力がなされている。また、昨今の地下空間開発の一環として、急曲線施工や大深度でのシールド施工が求められているのも大きな特徴である。

このような要求に対応すべく、日々技術革新が進められている一方で、シールド施工時の荷重によるセグメントへの影響が顕在化してきている。例えば、急曲線掘進前後のトンネル覆工において、コンクリートセグメントの欠け、ひび割れや、セグメントリングが変形するといった現象が顕著になってきている。このようなトンネル覆工の損傷や不具合は、施工中～供用前までは問題がなかったとしても、トンネル構造物の長期的な耐久性の見地からみると重要

な課題であると言える。

シールドトンネルの急曲線施工に着目した場合、このようなトンネル覆工の不具合は、①セグメントとシールドテール部が競ること、②裏込め注入材がテールシールド内に回り込んで固結し、テールクリアランスが減少すること、③ジャッキの片押しによりジャッキ1本あたりの推力が増加すること、等のシールド施工時の影響が主な要因として考えられる。

そこで本研究では、急曲線シールドトンネル掘進時において、トンネル覆工がどのような挙動を示すのか、またその原因としてトンネル覆工にどのような荷重が作用しているのか、といった課題を解明することを目的として、急曲線シールドトンネル(R17m, 90°急曲線)におけるトンネル覆工の変形、変位計測を実施するとともに¹⁾、得られた計測結果をシールド掘進データとともに検討した。

2. 計測対象工事の概要

今回実施した計測断面の位置図を図-1 に、シールドの概要を図-2 に示す。

本工事は、延長は 2840m、セグメント内径φ4000mm の下水管築造工事である。路線上には急曲線が 5 箇所あり、その内、到達間近の R17m, 90°急曲線部近傍において、トンネル覆工の変形、変位の計測を実施することにした。

シールドは、外径φ4700mm の泥土圧式であり、急曲線施工に対応して中折れ機構を装備している。また、トンネル覆工については、直線部では二次覆工一体型の RC セグメント(セグメント外径φ4550mm)が、今回の計測断面がある急曲線部では鋼製セグメント(セグメント幅 0.3m, 桁高 0.175m)が採用された。

土質縦断面を図-3 に示す。本工事区間の地層構成は、砂層、砂礫層を中心とする上総層群(洪積層)を基盤として、下位より東京層、東京レキ層などが

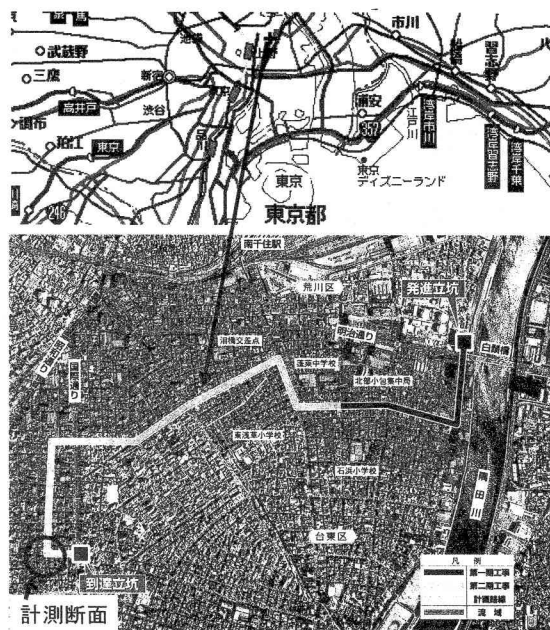


図-1 路線図と計測位置

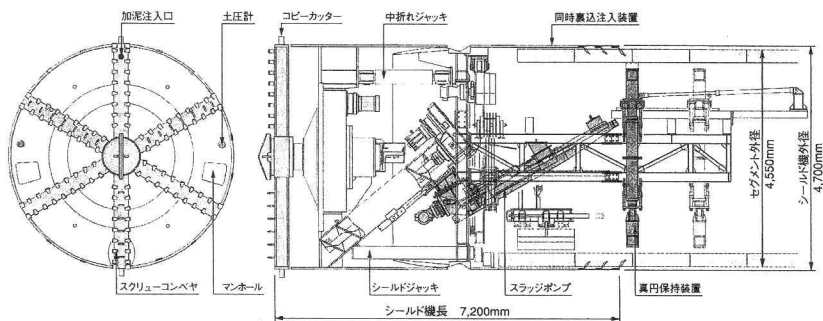


図-2 シールド概要図

計測断面

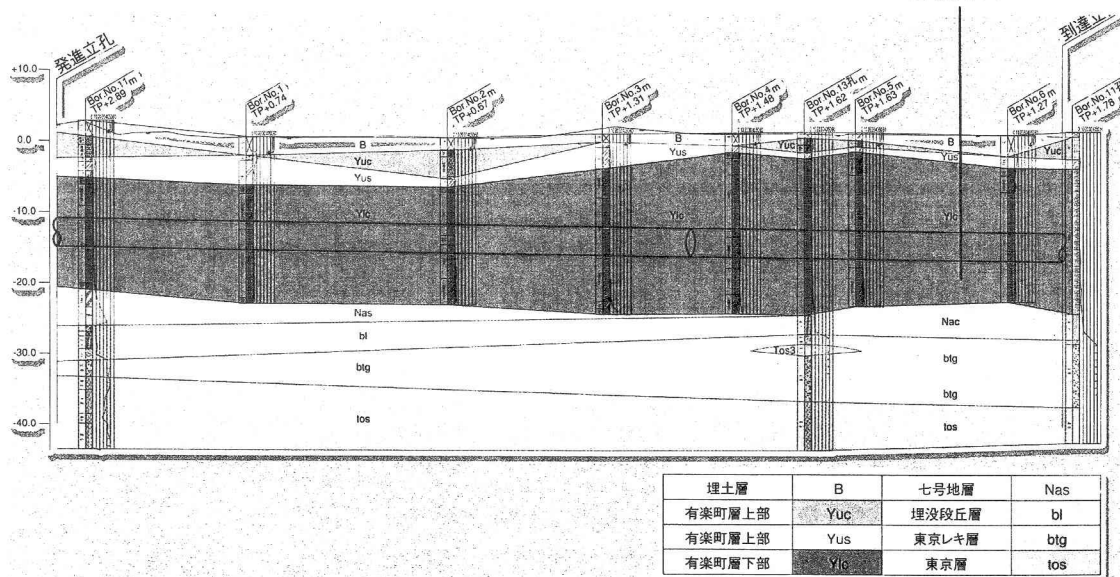


図-3 土質縦断面図

分布し、厚い層厚を有する沖積層に被覆されている。掘進対象地盤は、この沖積層のうち下部有楽町層（軟弱シルト層、N値=0~2、粘着力 $c \approx 88 \text{ kN/m}^2$ ）であり、土被り厚約 13.5m、地下水位約 GL-2m である。掘進土層が軟弱地盤であり、急曲線部においては十分な地盤反力が確保できない可能性があったことから、急曲線施工対策として 2667 リングから 5 リング毎に袋付きセグメントを用いている。

3. 計測位置および計測方法

図-4 に示すように、計測断面を R17m 左急曲線に入る 2 リング手前のリング継手面に設定した。この位置は、計画線形に沿って中折れ機構を用いてシールドの姿勢が既に決まった後であり、かつ、シールドジャッキパターンに依存してトンネル覆工がシールドからモーメント等の反力を受けるなど、変形、変位が最も発生すると想定される箇所である。

計測は、急曲線施工が開始される直前の 2666 リング掘進終了後から急曲線施工が終了する 2762 リングの掘進完了まで、概ね 1 分毎に実施した。計測期間は、急曲線施工が実施された約 2 週間である。

本計測断面において、図-5 に示すユニバーサル内空変位計^{2),3)}によるトンネル覆工内空変形自動計測と、図-6 に示すトータルステーション（以下、TS と

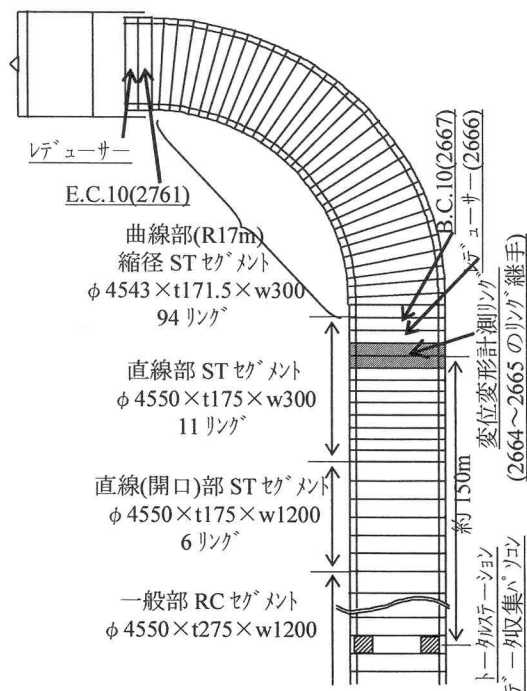


図-4 トンネル覆工計測位置

称す)によるトンネル覆工相対変位自動計測⁴⁾を実施した。これら 2 種類の計測を組合せることによって、トンネル覆工挙動の経時変化をリアルタイムに捉えることができる。

ユニバーサル変位計は、伸縮ロッドに取り付けられた変位計と傾斜計で構成された差動トランス変位計である。具体的には、図-7 において P_0 が P に移動した場合の変位量は、連結ロッド伸縮量 ΔL と傾斜角度 $\Delta \theta$ を測定することによって求まり、これらをトンネル内面に沿って連結閉合させることによって（写真-1 参照）、相対的なトンネル覆工内空変形量を計測することが可能となる。

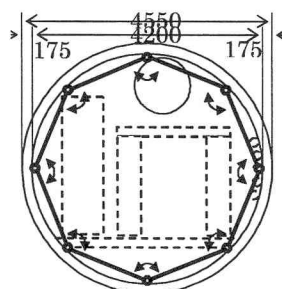


図-5 トンネル覆工内空変形計測

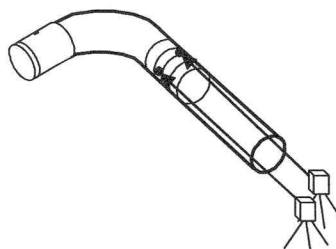


図-6 トンネル覆工相対変位計測

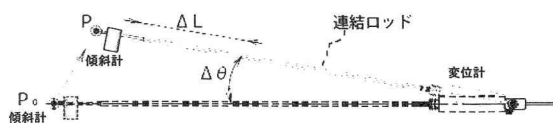


図-7 ユニバーサル内空変位計の測定原理

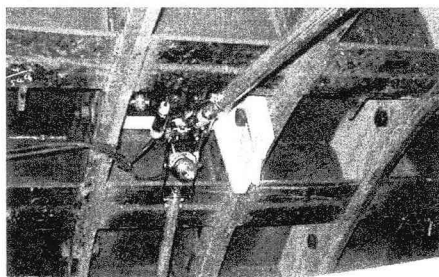
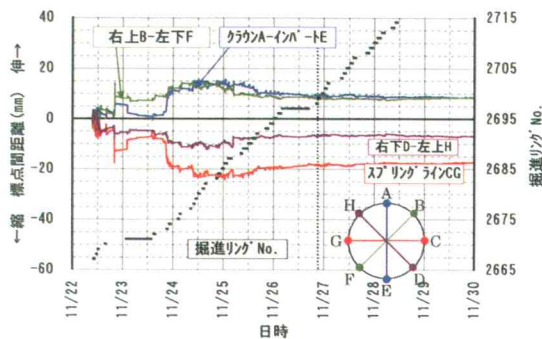
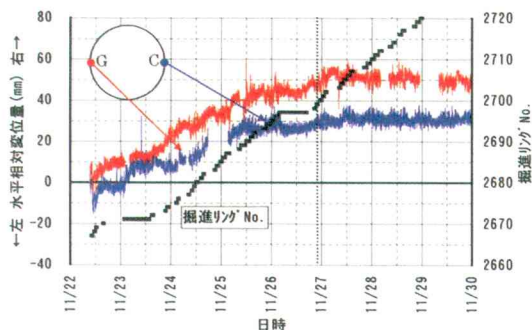


写真-1 ユニバーサル内空変位計設置状況

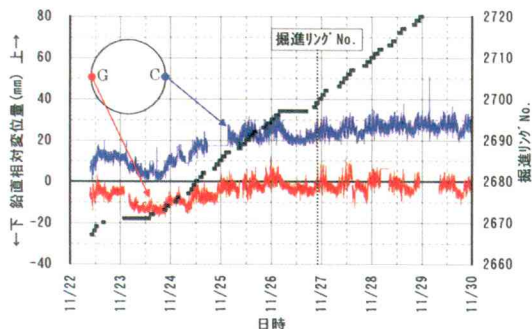
（シールド掘進直後のトンネル内に設置することから、内空側への突出を避けるため、箱部空間を利用した。）



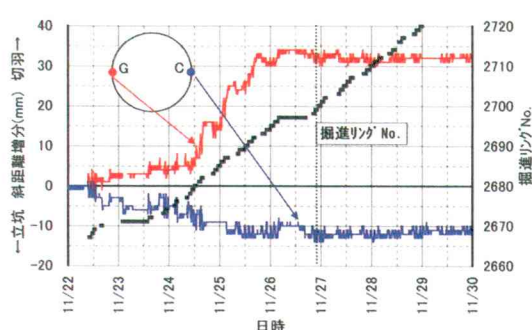
(a) トンネル内空変形量経時変化



(b) トンネル相対変位量経時変化(水平方向)



(c) トンネル相対変位量経時変化(鉛直方向)



(d) トンネル相対変位量経時変化(斜距離)

図-8 各種データの経時変化(全データ)

4. 計測結果

ユニバーサル内空変位計測点 8 点(約 45° おきの測点 A～測点 H)と TS 計測点 2 点(切羽側に向かってスプリングライン左側(曲線内側)の測点 C と右側(曲線外側)の測点 G)の位置を計測した。計測結果については、各計測点を座標化し、切羽に向かってスプリングライン右側(曲線外側)の測点 C で供用した。なお、以下に示す計測結果および考察は、本計測開始時からの相対的な変形、変位量について取り扱っていることに注意を要する。

(1) トンネル覆工挙動の経時変化

a) 全データ

トンネル覆工内空変形量(計測点8点の内、向かい合った計測点間距離の変化)、および、トンネル覆工相対変位量(TS計測点2点の水平変位、鉛直変位、および斜距離の変化)の経時変化を図-8(a)～(d)に示す。なお、掘進リングについては、対象となるリングの掘進中を黒太横線で、セグメントの組立期間や掘進準備期間を空白で図中に示す。

これらの図から、計測を開始してから2698リング掘進終了直後(曲線約30°掘進終了)付近までは、急曲線施工による影響と考えられる計測値の変動が発生していること、それ以降(図-9に示すシールド位置以降)では、計測値が表-1に示す一定値にほぼ収束していることがわかる。後者は、シールド挙動やジャッキ操作の影響が計測断面に到達していないことを意味しており、5リング毎に設置した袋付きセ

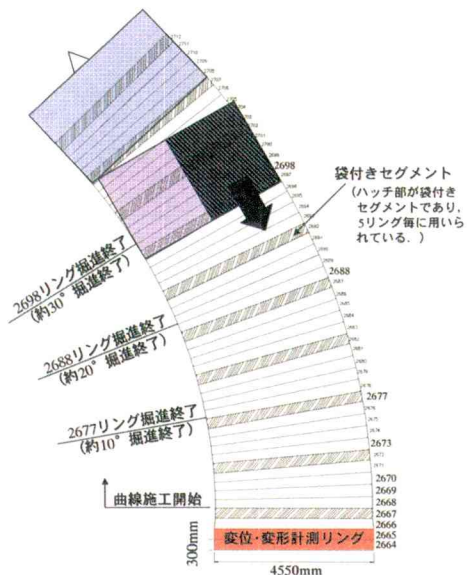


図-9 曲線約30°掘進終了時におけるシールドと計測断面の位置関係

表-1 トンネル覆工の内空変形量と相対変位量の収束値

計測項目	方向	収束 リング	計測位置	収束値
トンネル 覆工 内空変形	鉛直方向	2695	測点A-E間	伸張 約10mm
	水平方向	2695	測点C-G間	収縮 約20mm
トンネル 覆工 相対変位	鉛直方向	2695	曲線外側測点C	上向き 20～30mm
			曲線内側測点G	上向き -10～5mm
	水平方向	2698	曲線外側測点C	曲線外側 約30mm
			曲線内側測点G	曲線外側 約50mm
	トンネル 軸方向	2695	曲線外側測点C	立坑側 約12mm
			曲線内側測点G	切羽側 約32mm

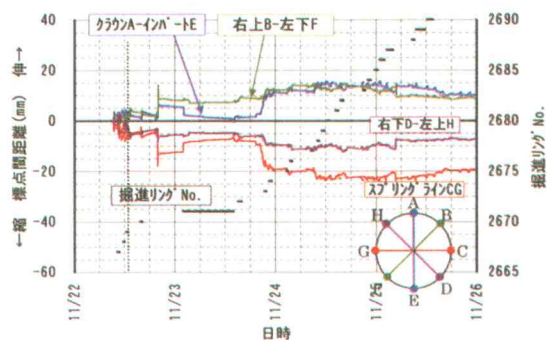
グメントの効果により、ジャッキ推力が、計測断面より切羽側で周辺地山へ伝達されたことが考えられる。また、トンネル覆工に残留変形、残留変位が生じたのは、トンネル覆工が急曲線施工影響範囲内にある間に裏込め注入材が固結すること、本現場のように掘削対象地盤が軟弱冲積粘性土地盤である場合には、トンネル覆工が一度変形、変位すると、作用荷重が消失してもトンネル覆工は元に戻りにくいこと、等が原因として考えられる。

b) 急曲線施工影響範囲

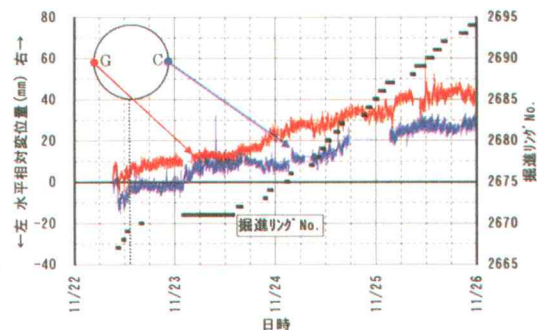
急曲線施工による影響が発生していると考えられる急曲線開始から曲線約30°掘進までのトンネル覆工内空変形とトンネル覆工相対変位の経時変化を図-10(a)～(d)に、シールド水平、鉛直モーメントを図-11に示す。

計測断面は、急曲線開始後の最初の2リング(2668リング掘進終了後)まではシールドテール内に位置しているが、2669リング掘進中にシールドテールを通過し、掘進終了時にはシールドテールを離脱した。そこで、図-10(a)を拡大し、計測断面がシールドテールを離脱するまで(2667～2669リング)と、計測断面がシールドテールを離脱した以降(2670リング以降)のトンネル覆工内空変形の経時変化を図-12と図-13に示す。

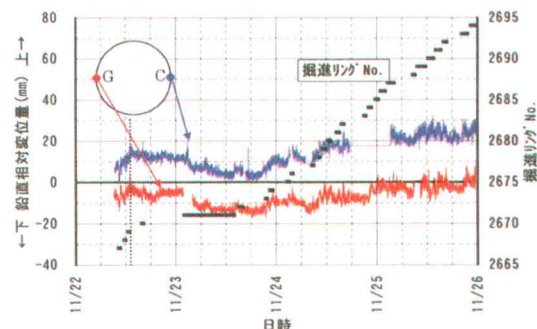
トンネル覆工内空変形については、図-12より、計測断面がシールドテールを離脱するまで(2667～2669リング)は、掘進中もセグメント組立中もトンネル覆工形状が変化していること、2667リングと2668リングでは、掘進開始直後に、鉛直方向であるA-E間と右肩～左下方方向のB-F間が収縮し、水平方向のC-G間と右下～左肩方向のD-H間は伸長するが、掘進中に前者は伸長に、後者は収縮に転ずる(縦長変形で、上部が少し曲線外側に傾いた形)ことがわかる。これらは、計測断面がシールド内にあるため動きやすいこと、テールクリアランスの変化やジャッキ操作によって、絶えず複雑な偏荷重が計測断面



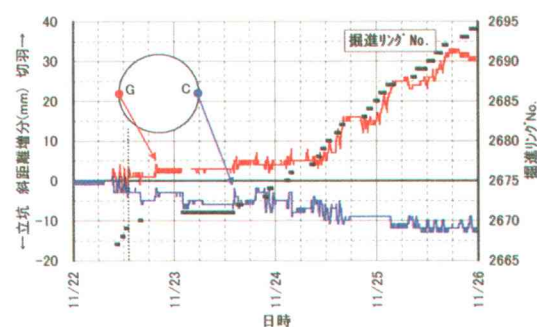
(a) トンネル内空変形量経時変化



(b) トンネル覆工相対変位量経時変化(水平方向)



(c) トンネル覆工相対変位量経時変化(鉛直方向)



(d) トンネル覆工相対変位量経時変化(斜距離)

図-10 各種データの経時変化(曲線約30°掘進終了までのデータ)

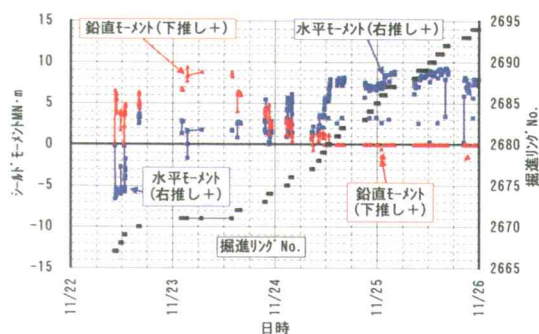


図-11 シールド水平、鉛直モーメント経時変化

付近のトンネル覆工に作用していること、トンネル平面線形が急曲線なので、幾何学的に上下よりもスプリングライン付近の方がテールクリアランスが小さくなること、図-11に示す掘進中のジャッキモーメントによりテールクリアランスが変化すること、等が原因として考えられる。一方、図-13より、計測断面がシールドテール離脱した以降の2670リングからは、主にシールドトンネル掘進中にのみトンネル覆工形状が変化していること、2673リング付近から、A-E間とB-F間は3～7mm伸長方向に、C-G間とD-H間は4～12mm収縮方向に変化する(縦長変形で、上部が少し曲線外側に傾いた形)こと、図-10(a)より2670リング掘進終了～2671リング掘進開始までの11/22 19:00頃と2671リング掘進中にトンネル覆工形状の変化が発生していることがわかる。これらは、計測断面がシールドテールを離脱し、裏込め注入によりトンネル覆工が動きにくくなったこと、上記で述べたシールド内のトンネル覆工挙動の影響を受けること、等が原因として考えられる。

スプリングライン近傍の測点C、測点Gでの水平方向に関するトンネル覆工相対変位については、図-10(b)より、計測断面がシールドテールを離脱するまでの2667～2669リングでは変動が大きいこと、その後2672リングまで緩やかに曲線外側に移動していること、2672リング以降はさらに曲線外側に移動するとともに、C-G間の距離が約20mm減少していることがわかる。これらは、前述したように計測断面がシールドテールを離脱するまでは、テールクリアランスの変化やジャッキ操作の影響を受けやすいこと、シールドテール離脱後2670～2679リングでは、図-11に示すように2672リングから急増する左向きジャッキ水平モーメントによって計測断面に曲線外向き(右向き)の水平モーメントが発生すること、2680リング以降は、図-11に示すようにジャッキ水平モーメントはほぼ一定となるが、シールドが進行するとともに、ジャッキ推力によって計測断面に発

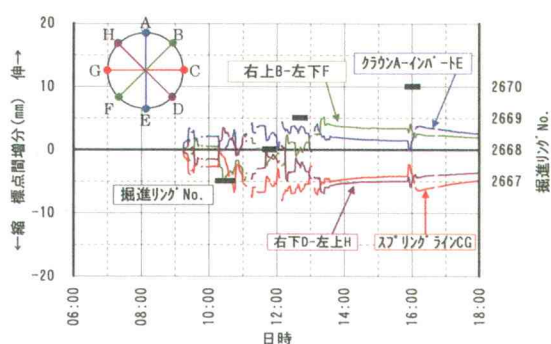


図-12 トンネル内空変形経時変化(2667～2670リング)

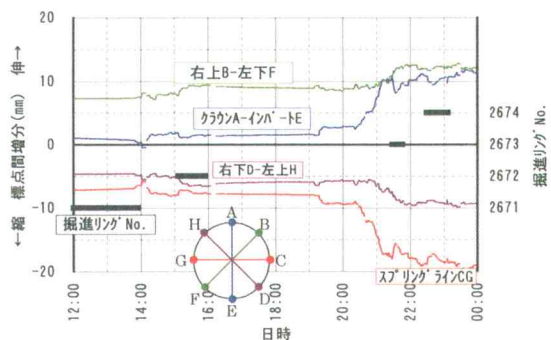


図-13 トンネル内空変形経時変化(2671～2674リング)

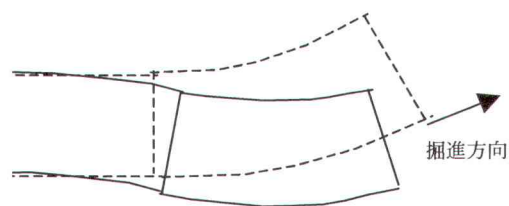


図-14 平面内におけるトンネル覆工相対変位の概念図

生する曲線外向き(右向き)せん断力、水平モーメントが増加すること、本現場のような軟弱地盤では、トンネル覆工が一度変位すると、ジャッキ水平モーメントが消失してもトンネル覆工は元に戻りにくいこと、等が原因として考えられる。したがって、図-14に示すような平面内におけるトンネル覆工の相対変位が発生したと考えられる。

スプリングライン近傍の測点C、測点Gでの鉛直方向に関するトンネル覆工相対変位については、図-10(c)より、計測断面がシールドテールを離脱するまでの2667～2669リングでは変動が大きく、上方に移動していること、その後2672リングまで下方に移動した後、2680リングまで上方に移動していることがわかる。これらは、前述したように計測断面がシールドテールを離脱するまではテールクリアランスの変化やジャッキ操作の影響を受けやすい

こと、シールドテール離脱後 2670～2679 リングでは、図-11 に示すように 2672 リングをピークとする上向きジャッキ鉛直モーメントにより、計測断面に下向き鉛直モーメントが発生すること、2680 リング以降は、図-11 に示すようにジャッキ鉛直モーメントがほぼ 0 になっていること、本現場のような軟弱地盤ではトンネル覆工が一度変位すると、ジャッキ鉛直モーメントが消失してもトンネル覆工は元に戻りにくいこと、等が原因として考えられる。

スプリングライン近傍の測点C、測点Gでのトンネル軸方向に関するトンネル覆工相対変位については、図-10(d) より、計測断面がシールドテールを離脱後すぐに、曲線外側測点Cが立坑側へ、曲線内側測点Gが切羽側へ変位した後、2677リング(曲線約 10° 掘進)まではほぼ一定の変位となっていること、2677リング以降、曲線内側測点Gの立坑側への変位が急増していることがわかる。これらは、水平方向のトンネル覆工相対変位で考察したのと同様に説明ができる。

(2) トンネル覆工変位分布

a) トンネル覆工内空変形分布

測点 C のトンネル覆工相対変位計測結果に、測点 C を原点としたトンネル覆工内空変形計測結果を加えて得られるトンネル覆工内空変形分布を図-15 に示す。

この図より、トンネル覆工は、曲線部に突入した時点から曲線約 30° 掘進(2698 リング)まで、曲線外側、斜め上向きに変位し続け、トンネル覆工形状は縦長に変形し、横つぶれ量については、曲線内側の方が曲線外側よりも若干大きいことがわかる。なお、曲線約 30° 掘進終了以降については、トンネル覆工の位置および形状は、あまり変化しなかった。これらは、前述の「トンネル覆工内空変形」、「鉛直方向トンネル覆工相対変位(水平方向、鉛直方向)」と同様に説明できる。

b) トンネル断面の軸方向変位分布

トンネル覆工相対変位計測結果を水平面に投影して得られるトンネル断面の軸方向変位分布を図-16 に示す。

この図より、計測直後からではなく 2677 リング(曲線約 10° 掘進終了)から、曲線外側測点 C が立坑側に、曲線内側測点 G は切羽側に変位し始めること、2698 リング(曲線約 30° 掘進終了)で変位はほぼ一定値に収束していることがわかる。これらは、前述の「トンネル覆工相対変位(トンネル軸方向)」と同様に説明できる。

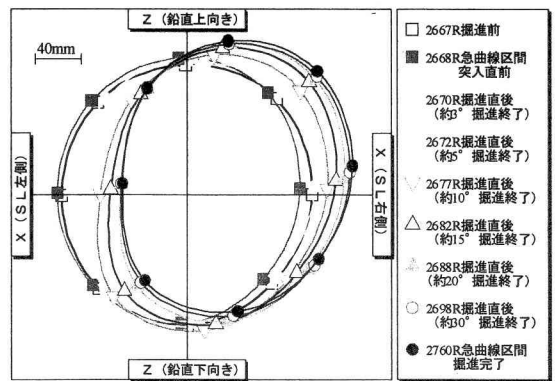


図-15 トンネル覆工内空変形分布

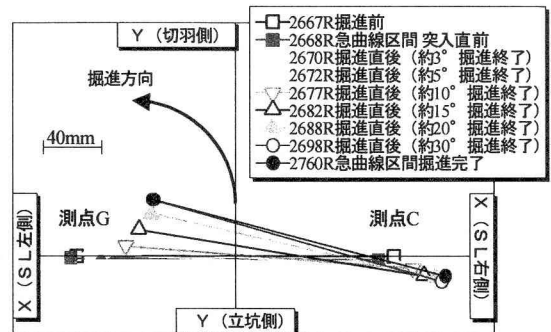


図-16 トンネル断面の軸方向変位分布

5. おわりに

本研究では、急曲線シールドトンネル掘進に伴うトンネル覆工の挙動について、トンネル覆工内空変形計測とトンネル覆工相対変位計測を実施するとともに、得られた計測結果をシールド掘進データと照らし合わせて検討した。得られた知見を以下に列記する。

- ① トンネル覆工の挙動は、トンネル覆工が「シールドテールを離脱するまで」、「シールドテール離脱後、急曲線施工影響範囲を離脱するまで」、「急曲線施工影響範囲離脱後」の3区間に分けて考えることができる。本現場では、急曲線施工の影響範囲は曲線約30°掘進終了までであった。
- ② トンネル覆工がシールドテールを離脱するまで：掘進中もセグメント組立中も、トンネル覆工の位置、形状は変化した。これは、トンネル覆工がシールド内にあるため動きやすいこと、シールドの挙動によるテールクリアランスの変化やジャッキ操作によって、絶えず複雑な偏荷重が計測断面付近のトンネル覆工に作用していること、等が要因として考えられる。また、トンネル覆工形状は縦

長で、上部が少し曲線外側に傾いた形となった。これは、トンネル平面線形が急曲線であることから、幾何学的に上下よりスプリングライン付近のテールクリアランスが小さくなること、掘進中に発生するジャッキモーメントにより、テールクリアランスが変化すること、等が考えられる。

③トンネル覆工がシールドテールを離脱した後、急曲線施工影響範囲を離脱するまで：主に掘進中のみトンネル覆工の位置、形状が変化した。これは、トンネル覆工周辺の裏込め注入材により、トンネル覆工が動きにくくなったこと、本現場のように掘削対象地盤が軟弱沖積粘性土地盤である場合には、トンネル覆工は一度変形、変位すると、作用荷重が消失しても元に戻りにくいこと、等が原因として考えられる。また、トンネル覆工形状は縦長で、上部が少し曲線外側に傾いた形となり、横つぶれ量は曲線内側の方が曲線外側よりも若干大きくなった。これは、②で述べたシールド内のトンネル覆工挙動の影響を受けたためであると考えられる。さらに、トンネル覆工は、トンネル横断面内で曲線外側、斜め上向きに相対変位するとともに、曲線約10°掘進終了(2677リング)後から、曲線内側は切羽側に、曲線外側は立坑側に、相対変位し始めた。これらは、ジャッキモーメントにより計測断面に逆向きのモーメントが発生すること、さらに、シールド掘進に伴って発生する、ジャッキ推力による曲線外向き(右向き)のせん断力、水平モーメントの増加等が原因として考えられる。

④トンネル覆工が急曲線施工影響範囲を離脱した後：トンネル覆工の位置、形状は、最終的に一定値に収束した。これは、シールド挙動やジャッキ操作の影響による力が、計測断面より切羽側で、周辺地山へ伝達されたためであると考えられる。また、トンネル覆工の位置、形状には、残留変形、残留変位が生じた。これは、③で示した裏込め注入材の固結による影響、周辺地山特性等に起因しているものと考えられる。

⑤トンネル覆工内空変形メカニズム：シールドに発生した蛇行は、中折れ角度やジャッキモーメントを調整することによって修正される。こうした掘進中に発生するジャッキモーメントにより、テールクリアランスが変化すること、さらに、急曲線の場合には、幾何学的に上下よりスプリングライン付近のテールクリアランスが小さくなることから、トンネル覆工に内空変形が発生し、この変形は後続のトンネル覆工の変形に影響を与える。

⑥トンネル覆工相対変位メカニズム：ジャッキモー

メントによりトンネル覆工に逆向きのモーメントが発生すること、さらに、急曲線の場合には、シールドが進行するとともに、ジャッキ推力によって計測断面に発生する曲線外向き(右向き)のせん断力、水平モーメントが増加することから、トンネル覆工に相対変位が発生する。

今後は、地盤条件や施工条件(シールド、トンネル覆工)を入力として、シールド挙動のシミュレーション解析をおこなうことにより、シールドとセグメントの幾何学的な位置関係で規定されるテールクリアランスを求め、トンネル覆工に作用する施工時荷重や、トンネル覆工の挙動を定量的に検討する予定である。

参考文献

- 1) 譽田孝宏, 粥川幸司, 杉本光隆, 中村益美, 大林正明, 岡田章, 津坂治: 急曲線シールド掘進に伴うトンネル覆工の変形, 変位計測, 土木学会第60回年次学術講習会講演概要集Ⅲ, pp.413-414, 2005.
- 2) 橋本正, 藤原正明, 中山淳, 坂田啓二, 岩切琢哉, 西田修: 連結ユニバーサル変位計の開発, 第2回最近の地盤計測技術に関するシンポジウム発表論文集, pp.11-14, 2000.
- 3) 小野顕司, 清水一郎, 西田義則, 新井昌一, 小山幸則, 水原勝由: 連結ユニバーサル変位計を用いたトンネル断面の変形挙動計測, 第39回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1681-1682, 2004.
- 4) 小西真治, 新井泰, 粥川幸司, 津坂治, 杉本光隆: 新しい計測システムを用いたシールド機の挙動計測結果と考察, トンネル工学研究発表会報告集, Vol.9, pp.289-294, 1999.