

小竹向原・千川間連絡線設置工事における シールドトンネルの施工に関する報告

坂田聡¹・中村守男²・大槻あや³・山上亨⁴・根岸秀男⁵

¹正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 第二工事事務所（〒160-0004 東京都新宿区四谷 3-12-5）

E-mail : s.sakata@tokyometro.jp

²東京地下鉄株式会社 改良建設部 第二工事事務所（〒160-0004 東京都新宿区四谷 3-12-5）

E-mail : mo.nakamura@tokyometro.jp

³正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 第二工事事務所（〒160-0004 東京都新宿区四谷 3-12-5）

E-mail : a.otuki.y3k@tokyometro.jp

⁴株式会社熊谷組 有楽町線向原シールド作業所（〒173-0036 東京都板橋区向原二丁目 8-5）

E-mail : tyamagam@ku.kumagaigumi.co.jp

⁵株式会社熊谷組 有楽町線向原シールド作業所（〒173-0036 東京都板橋区向原二丁目 8-5）

E-mail : hnegishi @ku.kumagaigumi.co.jp

東京地下鉄株式会社では、有楽町線、副都心線における安定輸送確保を目的として、小竹向原と千川の駅間にて平面交差を解消する新たな運行経路を2本配線する連絡線設置工事を実施している。トンネル部では複合円形断面の単線シールドトンネルを採用したが、その断面形状特性よりスプリング部のセグメントに曲げモーメントの影響が大きく表れ、上り線施工時にはヘアクラックの発生が見られた。本稿は、上り線の実績を踏まえた下り線施工時の対策とその実績について比較検討結果を報告するものである。

Key Words : subway, shield tunnel, oval section, hairline cracks, load at the time of construction

1. はじめに

東京地下鉄株式会社では、平成25年に副都心線と東急東横線、横浜高速みなとみらい線の相互直通運転を開始し、これにより西武池袋線、西武有楽町線、東武東上線を合わせて5社7線の相互直通運転を実施することとなった。小竹向原と千川の駅間は、有楽町線、副都心線における平面交差が発生する箇所であるため、ここに新たな運行経路（以下「連絡線」）を配線することで平面交差を解消し、列車遅延の防止および相互直通先への影響の低減による安定輸送確保を目的とする連絡線設置工事を計画した。図-1に工事区間概要を示す。連絡線は単線シールドであり、平成24年4月に新木場方へと向かう路線（以下「A線」）175m、平成26年9月に和光市方へ向かう路線（以下「B線」）145mを泥土圧シールド工法にて施工した。この連絡線は都道の下において、有楽町線、副都心線の既設構造物と民地に挟まれた狭隘な空間に施工するため、東京地下鉄では初となる縦長複合円形断面を採用した。

連絡線A線施工時には、複合円形断面では円形断面と

異なり、軸力よりも曲げモーメントが卓越するため、施工時荷重の考慮が必要であることが認識された¹⁾。また、ヘアクラックがセグメントスプリングライン部に集中して発生したことから、A線の施工実績を踏まえてB線施工時に対策を行った。本稿は、対策を行ったB線の施工実績および設計に関する考察を行うものである。

2. 工事概要

(1) トンネル線形

本工事における2本の連絡線は、どちらも小竹向原方に発進部を有し、千川方に到達部を設けた。平面線形については、A線175mのうち、曲率半径R=500mを千川方にて36%（63m）有し、B線145mは直線のみを有する。

縦断線形については、A線175mにおいては、+2‰の勾配を35%（小竹向原方50m、千川方11m）および+24‰の勾配を65%（中間部114m）有している。B線145mにおい

では、A線とほぼ同様の線形ではあるが、+2‰の勾配を23%(小竹向原方 33m)および+24‰の勾配を77%(中間部～千川方 112m)有している。

(2) 土質概要

土質概要を図-2に示す。発進部は全断面が段丘礫層(N値40以上)、到達部は段丘礫層と東京層砂層(N値50以上)となっている。土被りは、発進部約12m、到達部約10mであり、地下水位はGL-3.5m付近に存在する。

(3) セグメント概要

都道下を地下鉄既設構造物が占用しているため、既設構造物と官民境界との離隔がない狭隘な空間の中で、既設構造物への影響を最小限に抑えること、民地部に支障しないよう道路下に新設構造物を収めることを目的に、縦長複合円形断面を採用した。この縦長複合円形断面は、三つの異なる曲率半径(R=2000, 5500, 7800)から形成されている。セグメント形状を下記および図-3に示す。

種類：RC平板(300)型

外径：W5500×H6600mm

厚さ：300mm

幅：1500mm

分割：6分割

リング数：A線113リング、B線93リング

3. A線施工時の課題

A線施工時には、施工中にヘアクラックがセグメントのスプリングライン部に集中して発生した。ヘアクラック発生状況を図-4に示す。幅については0.05mm～最大0.25mmのクラックがスプリングライン部に位置するC型セグメント中央部に集中していることがわかる。ヘアクラックの中には、リング間継手部のボルトボックスから発生しているものも見受けられる。本工事におけるセグメントは、複合円形断面という形状特性より、円形断面とは異なり軸力が卓越せず、スプリングライン部において曲げモーメントの影響が大きく表れること、裏込め注入による施工時荷重が曲げモーメントを大きくする方向

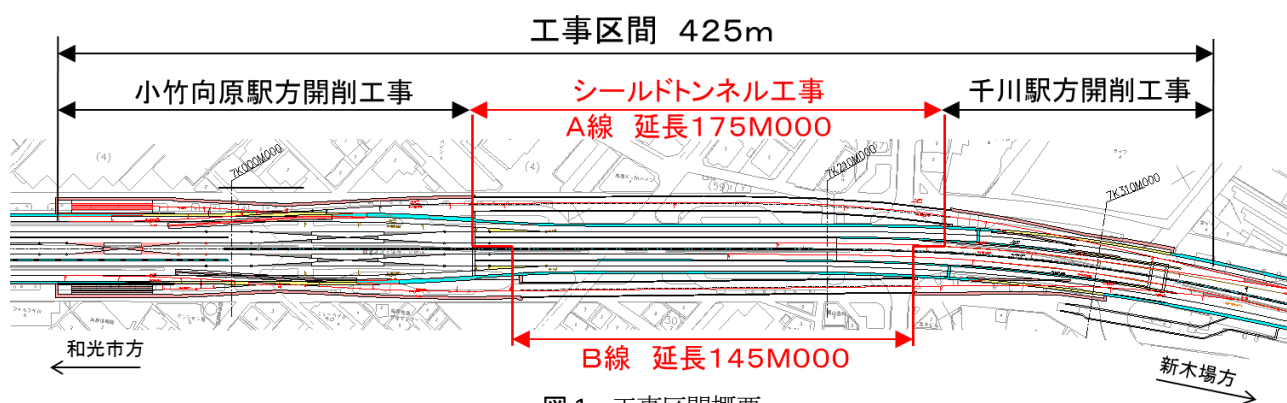


図-1 工事区間概要

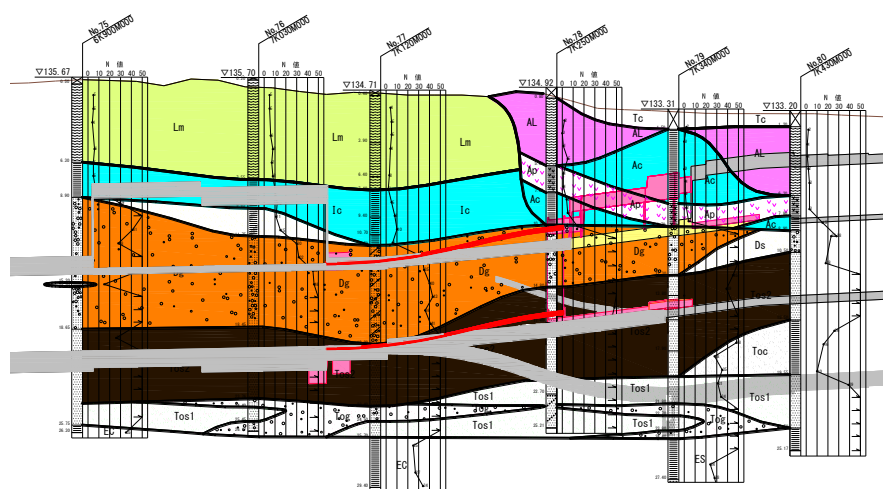


図-2 土質概要

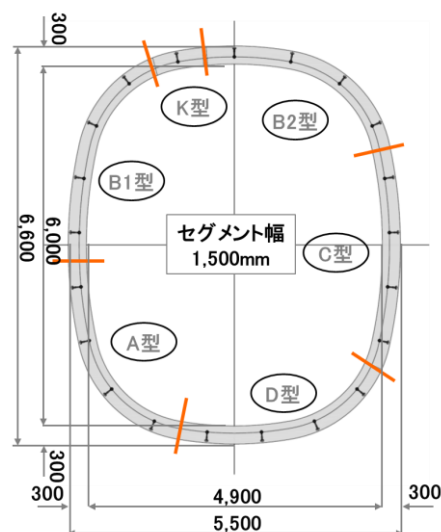


図-3 セグメント形状

に作用することが、解析結果と計測結果の比較により確認されている⁹⁾。したがって、ヘアクラックがC型セグメント中央部に集中する要因として裏込め注入による施工時荷重が考えられ、さらにボルトボックスを有する分、断面変化点が増え、そこに応力が集中したと推測される。

これらA線における実績を踏まえ、B線施工時には、ヘアクラック抑制のために施工時荷重の低減およびセグメントの品質を向上させた。

4. B線施工時の対策

(1) 施工時荷重の低減

先に述べた通り、裏込め注入による施工時荷重がセグメントの変形に大きく影響するため、施工時荷重の低減として、B線掘進全体を通しての裏込め注入圧および瞬

間的な裏込め注入圧に着目し、管理を行った。

A線施工時には、テールボイド（余堀り分考慮）に対する計画注入率を130%に設定し、実績としては120%の注入率であった。路面の変状については、20mおきに計測を行っていた。B線施工時には、掘進開始直後の30m区間をトライアル施工区間とし、その区間については5mおきに路面変状を計測し、トライアル施工区間の終わりで適正な注入率を求める管理を行ったことにより、実績としては120%の注入率となった。注入圧を優先とし、管理上限注入圧は切羽土圧+0.1MPaとした。また、A線時に採用したスクイーズポンプは、裏込め注入材圧送時の圧力に脈動が見られ、瞬間的に注入圧が圧高となる傾向がみられた。B線施工では、注入圧によるセグメントへの負荷軽減を図るため、定圧注入が可能なモノポンプに変更した。

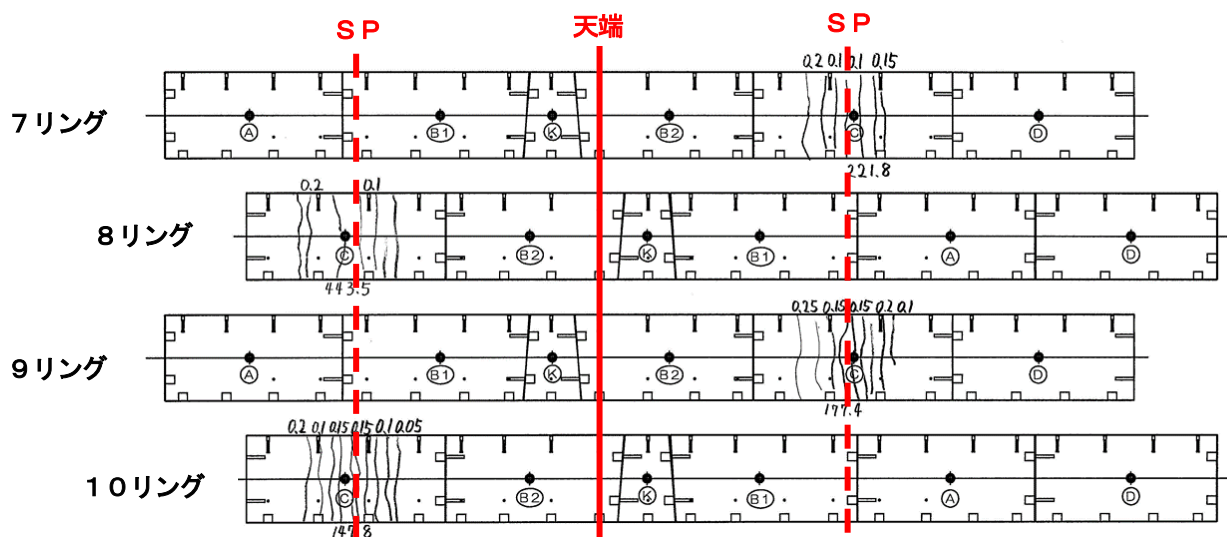


図-4 A線セグメント内面展開図

トンネル横断方向断面配筋図



展開配筋図

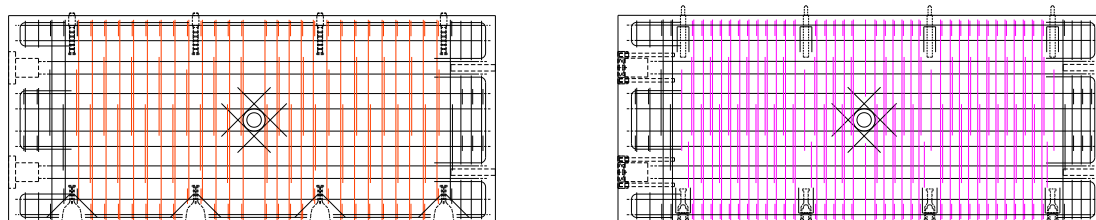


図-5 A線C型セグメント配筋図（左） B線C型セグメント配筋図（右）

(2) セグメントの品質向上

セグメントそのものの品質向上としては、応力の分散及び断面欠損の抑制について考慮した。C型セグメント図を図-5に示す。セグメントのひび割れがスプリングライン部にて集中して発生したことを受け、C型セグメントの配筋間隔を狭くし、鉄筋比を増加させることで、応力の分散を図った。

また、リング間継手に関しても変更を行った。A線時に採用したDUET継手は、従来品よりも小型化されたボルトボックスを使用しているものの、ボルトボックスによる断面欠損が生じ、応力が集中する弱点となっていた。そこでB線施工時にはボルトボックスを有さないSB継手を採用し、セグメントのひび割れ抵抗性向上を図った。

5. B線施工の結果

(1) ヘアクラック発生状況

B線施工時におけるヘアクラック発生状況を図-6に示す。A線施工時に最大幅0.25mmのクラックが全C型セグメントに発生していたのに対し、B線施工時には最大幅0.1mm以下に収まり、本数・長さともに減少する結果と

なった。

(2) 計測結果

本工事では、A線113リングのうち4リングおよびB線93リング中10リングに計測機器を設置し、掘進中の挙動計測を行った。図-7に計測機器を設置した計測セグメント位置図を示す。計測機器として土圧計、水圧計、ひずみゲージ、および熱電対（温度計）を使用した。本稿では、縦断的にも既設構築との平面的位置もA線とB線でほぼ同位置となるA線47リングおよびB線37リングを比較する。A線47リングの挙動計測結果による断面力図を図-8に、曲げモーメントの経時変化を図-9に示す。また、設計計算値を図-10に示す。B線37リングについても同様に、挙動計測結果による断面力図を図-11に、曲げモーメントの経時変化を図-12に、設計計算値を図-13に示す。設計計算値については、A線B線ともに外荷重として土水圧を考慮しているが、テールブラシ圧、裏込め注入圧等の施工時荷重は考慮していない。まず、収束時の曲げモーメントについて比較すると、A線47リングのC型セグメントでは約150kNmに対し、B線37リングでは約120kNmと低く抑えることができた。次に、施工時荷重が大きくかかり始めるテールブラシ進入時から裏込め完了時までの曲げモーメントの増加分について、A線47リ

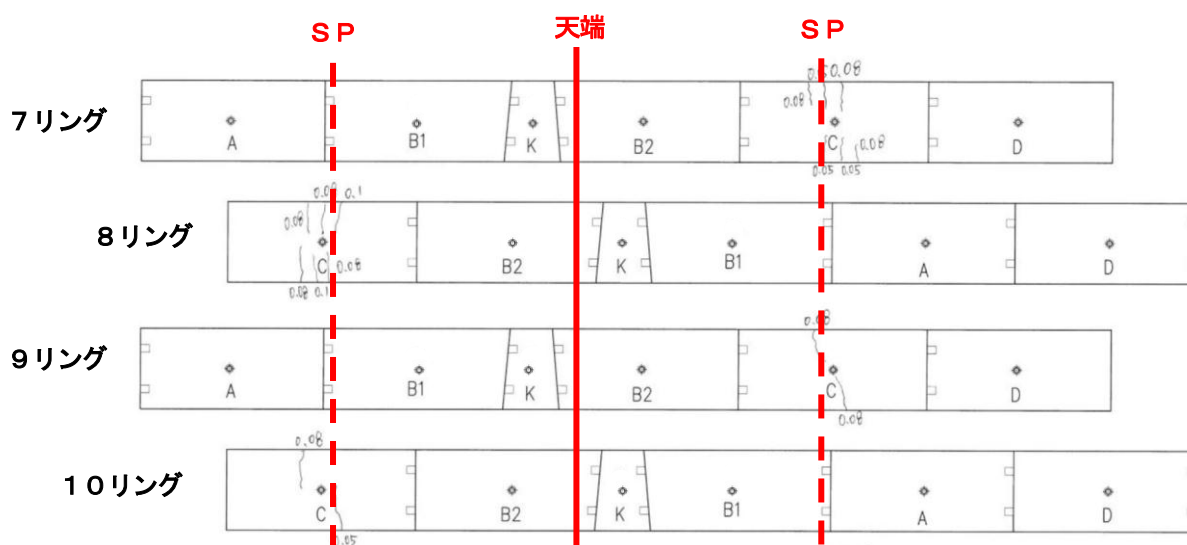


図-6 B線セグメント内面展開図

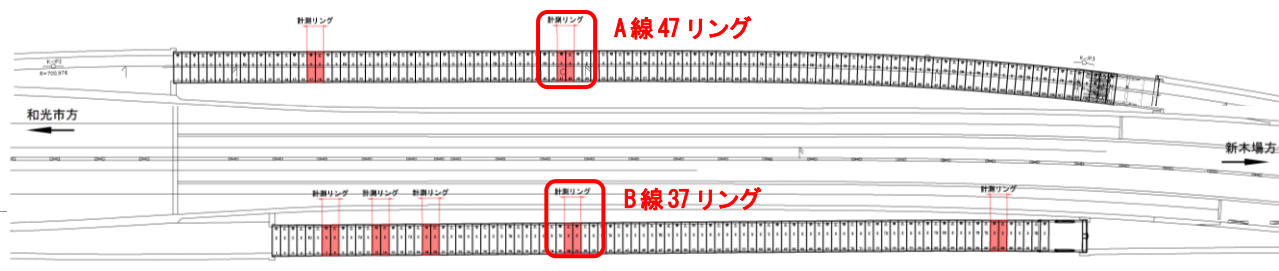


図-7 掘進管理用計測セグメント位置図

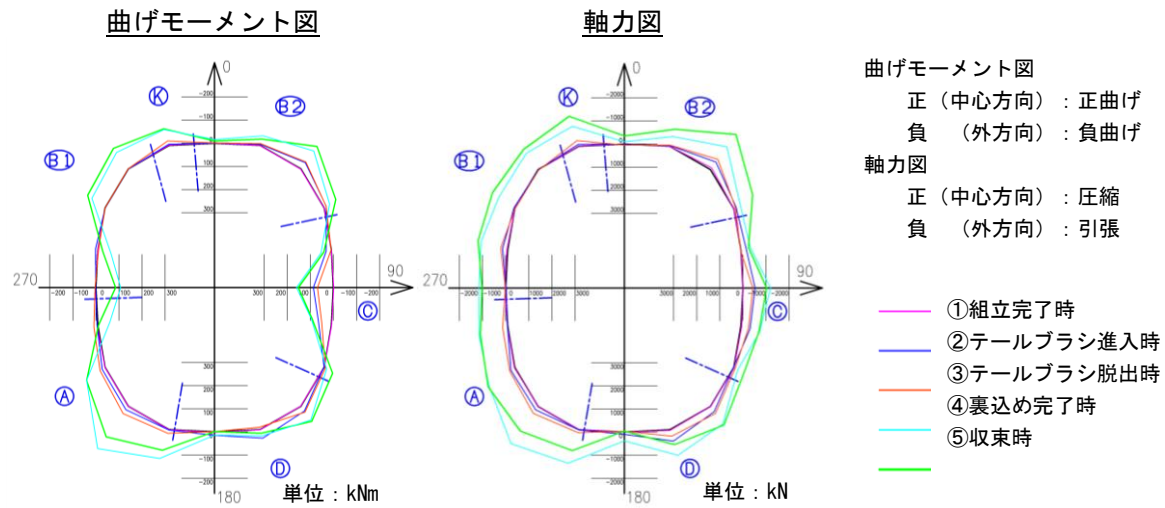


図-8 A線47リング断面力図

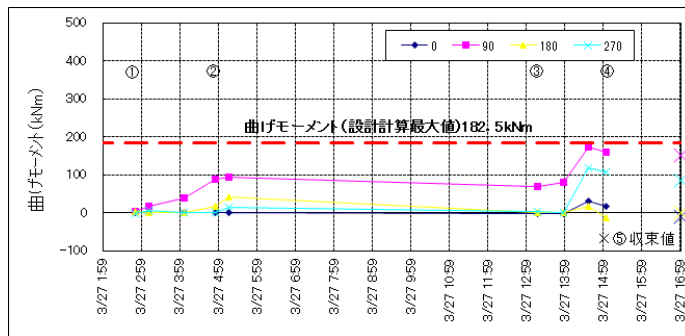


図-9 A線47リング曲げモーメント経時変化

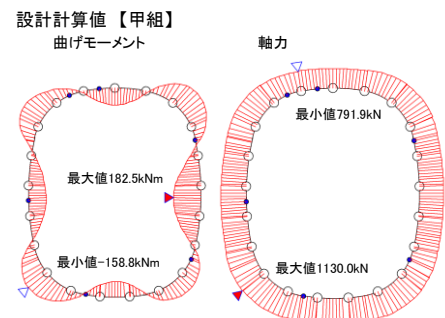


図-10 A線47リング設計計算値

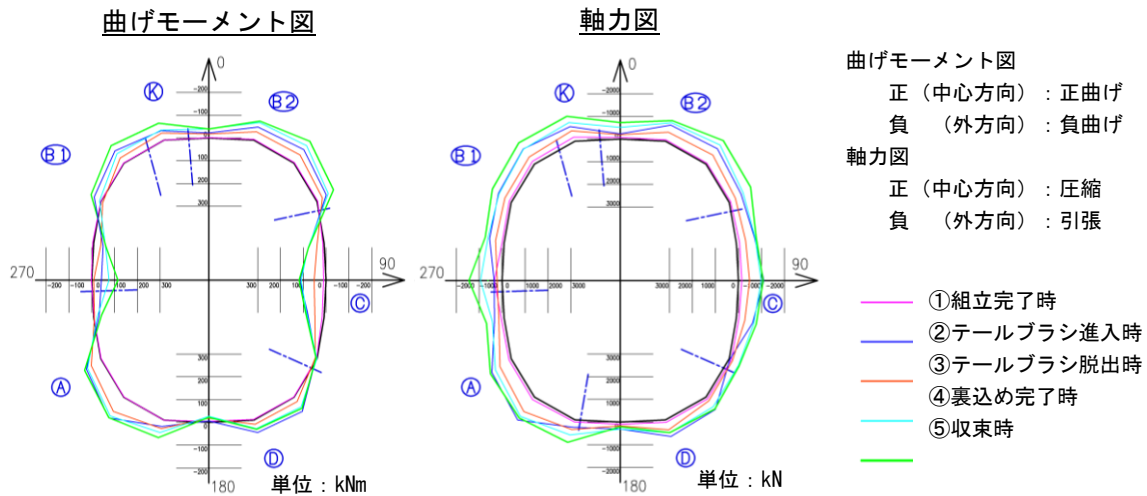


図-11 B線37リング断面力図

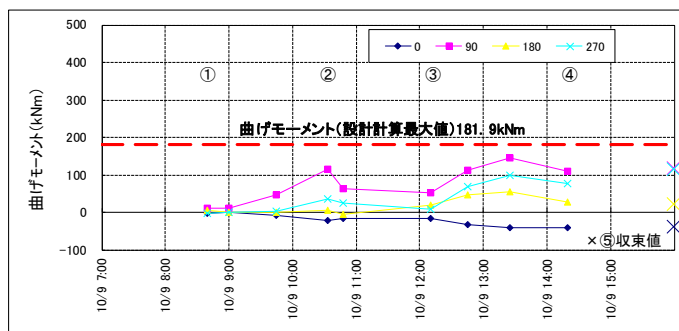


図-12 B線37リング曲げモーメント経時変化

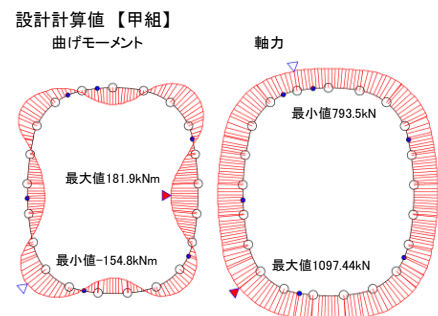


図-13 A線47リング設計計算値

ングが約85kNmであるのに比べ、B線37リングでは約30kNmと半分以下となった。A線における設計計算値での曲げモーメントの最大値は182.5kNmであるが、裏込め注入が完了し、曲げモーメントが収束するまでに設計最大値に近い値を示していることがわかる。なお、A線での計測セグメント4リングのうち、47リング以外は設計最大値を超える曲げモーメントの値を計測している。これに対してB線では、設計計算値における曲げモーメントの最大値は181.9kNmであるが、A線と比較して低い値で推移しているのがわかる。また、B線施工時の路面沈下量としては、A線施工時と同等で最大4mmの沈下が見られたが、過度な変状は発生しなかった。

6. まとめ

A線施工時には、C型セグメントの曲げモーメントの値が、設計最大値に近い値、あるいは最大値を超える値となったことで、ヘアクラックが集中して発生したと考えられる。それに対し、B線では裏込め注入圧の管理を中心とした施工時荷重の低減、および応力分散とひび割れ抵抗性の向上を目的としたセグメントの改良を行うことで、曲げモーメントの設計最大値を超えること

なく、ヘアクラックの発生も抑えられたと言える。

本工事では、縦長複合円形断面のスプリングライン部にて、曲げモーメントの影響を小さくすることが目的であった。そこで外的要因となる裏込め注入圧の低減およびセグメント自体の改良を行うことで解決を図り、成果を得た。ただし、計測結果からもわかる通り、施工時荷重として裏込め注入圧のほかにもテールブラシ圧を考慮する必要がある。また、今回行ったリング間継手の変更は、リングごとに見る設計計算値にはほとんど反映されず、断面力低減に寄与したかの判断が難しい。今後は、設計段階から裏込め注入圧、テールブラシ圧といった施工時荷重を考慮すること、セグメント間継手についても改良を行うこと、また施工時の管理により荷重の影響を最小限に抑える対策をとることで、益々必要となるであろう複合円形断面を有するシールドトンネルの施工を確実なものにしていきたい。

参考文献

- 1) 伊藤聡, 嶋田司, 長谷篤, 齋藤進, 山上亨: 有楽町線小竹向原～千川間改良工事における報告, 第22回トンネル工学研究発表会論文・報告集, Vol.22, pp.361-371, 2012

(2015.8.7 受付)

A REPORT OF THE SHIELD TUNNEL CONSTRUCTION IN THE NEW BYPASS LINE BETWEEN KOTAKEMUKAIHARA AND SENKAWA ON THE YURAKUCHO LINE

Satoshi SAKATA, Morio NAKAMURA, Aya OTSUKI,
Toru YAMAGAMI and Hideo NEGISHI

Tokyo Metro has constructed the new two bypass lines between Kotakemukaihara and Senkawa to eliminate the cross plane for reliable transportation in Yurakucho Line and Fukutoshin Line. We adopted a single-track tunnel of an oval section, therefore the segments of each spring portion generated a large bending moment. Under construction on the upbound line, hairline cracks appeared on the segments.

In this report, we have shown the impact of measures for the construction on the downbound line, from experience of the construction on the upbound line.