

軟弱地盤における三連型RCセグメントの 計測結果と考察

Measurement Results and Consideration Three-Centered RC-segment in Soft Ground

矢萩秀一¹・藤木育雄¹・末富裕二²・沼田敦²・鈴木久尚³

Syuichi Yahagi, Ikuo Fujiki, Yuji Suetomi, Atsushi Numata, Hisanao Suzuki

¹フェロー 東京地下鉄(株) 建設部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-19-6)

²正会員 東京地下鉄(株) 建設部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-19-6)

³正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1)

Tokyo Metro Co.,Ltd 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 Kiyosumi station 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 Words : words shield-tunnel, measurement, the sectional force

1. はじめに

東京地下鉄(株)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型等の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、軟弱地盤における三連型シールドトンネルの現場計測から、トンネル覆工の応力および変形の発生機構を検証するとともに、覆工に作用する外荷重およ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

本工事は、地下鉄半蔵門線(11号線)の水天宮前～押上間延伸工事の内、清澄白河駅を泥水式の三連型シールドで築造するものであり、平面線形は直線、縦断勾配は3‰、施工延長143.6mの区間である。トンネル断面形状は、外径7,200mmの円を3つ

並べたような形状で、図-1に示すように長円形に近い三連型である。

覆工構造は、幅1,200mmの鉄筋コンクリートセグメントで、桁高は350mmとなっており、円が接する部分にはカモメ型(D型)のセグメントを配置し、この間に中柱となる特殊合成鋼管柱(本設柱)または鉄骨柱(仮設柱)を建て込む構造となっている。シールド掘進後は、中柱の上下にSRC構造の縦桁を施工し、鉄骨柱(仮設柱)を切断撤去する。

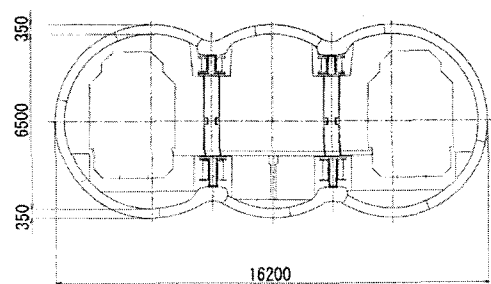


図-1 三連シールド停車場断面図

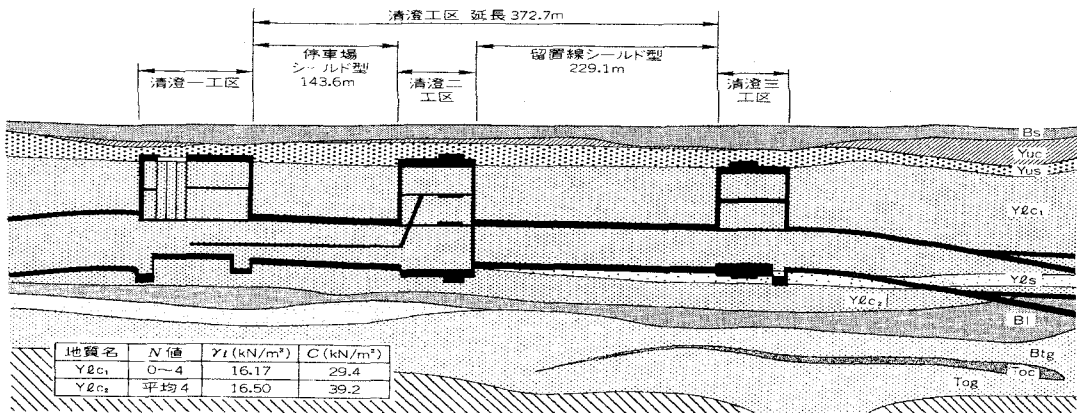


図-2 地質縦断面図

地質は図-2 に示すように、沖積層でトンネル全断面がN値0～4と極めて軟弱な下部有楽町層に位置しており、土被りは約16mである。

(2) 計測計画の概要

計測は掘進時に覆工へ作用する外荷重（土水圧、裏込め注入圧、ジャッキ推力）により発生する覆工部材の応力を把握し、施工時の安全性を確認するとともに、設計手法を評価するためのデータ収集を目的として実施した。計測の項目および計測に用いた機器を表-1に示す。

表-1 計測項目および計測機器

計測項目	計測箇所	計測器	計測器数量		備考
			31Ring 本柱	32Ring 仮柱	
覆工に作用する土圧	上下各1箇所 左右各1箇所	土圧計	▲ 8	▲ 8	
セグメントの応力度	セグメント主鉄筋	ひずみ計	● 48	● 12	軸方向 3箇所 (1R目)
中柱の応力度	中柱中央部	ひずみ計	■ 8	■ 8	
推力の伝達	セグメント配筋	ひずみ計	★ 8		

計測は、31～35 リングの5リングにおいて行った。主計測断面の31リングでは、図-3に示すように土圧の計測とセグメント周方向および軸方向の発生応力、中柱（本設柱）の発生応力を測定した。副計測断面の32～34リングでは、中柱が仮設柱であるため、仮設柱撤去に伴うセグメントへの応力増加を測定し、31および35リングで仮設柱撤去に伴う本柱への影響を測定した。今回のデータ解析の対象とした31および32リングの計器の総設置数量は100箇所である。

計測器配置図

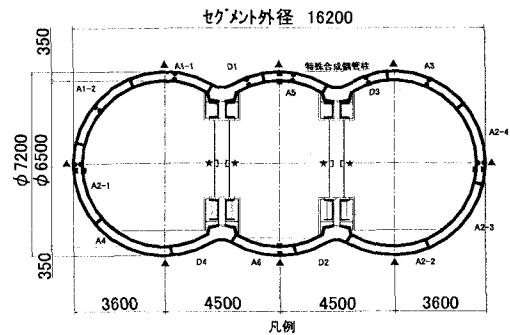


図-3 計器配置図

3. 計測結果と考察

(1) 計測値に対する施工時荷重の影響

組立後のセグメントリングがシールドテールを抜けて地山内で安定するまでは、ジャッキ推力、裏込め注入圧等のさまざまな施工時荷重を受けるが、ここでは施工時荷重としてシールドテール通過時の裏込め注入圧に着目して、施工時荷重（裏込め注入時）を受けるセグメントについて考察した。

a) セグメントに作用する外荷重の経時変化

図-4に計測リング（32リング）に作用する土圧の経時変化を示す。

組立後のセグメントリングは、テールシール部で100～250kN/m²の圧力を受けている。テール脱出時（34リング掘進）に裏込め注入圧（300kN/m²）の

影響で $200 \sim 330 \text{ kN/m}^2$ の圧力が発生した後、裏込め注入を完了（セグメント組立）すると圧力は $170 \sim 250 \text{ kN/m}^2$ に低下している。そして、35 リング掘進時に再び裏込め注入の影響を受けて圧力が $250 \sim 300 \text{ kN/m}^2$ に増加し、裏込め注入完了後は $200 \sim 280 \text{ kN/m}^2$ 程度の圧力に低下している。以後5～6 リング同様の傾向で推移している。35 リングの裏込め注入完了後の値は 34 リング組立時と比べて若干高い値となっており、計測点によって若干ばらつきが生じてきている。これは時間の経過とともに裏込め注入材が硬化し、硬化した裏込め注入材を介してシールド掘進に伴う応力の解放力の伝達が始まり、土圧の上昇と計測値のばらつきを生じていると推測される。

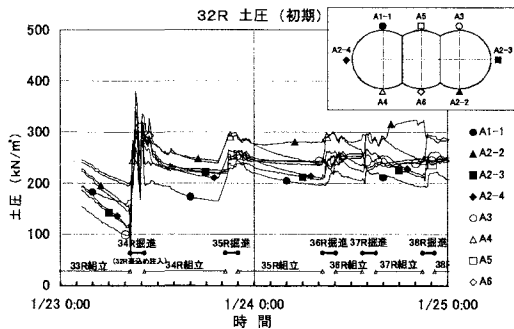


図-4 土圧経時変化（初期）

b) セグメント断面力の経時変化

計測リング（No. 31）の施工時過程の鉄筋応力、曲げモーメント、軸力の経時変化を図に示す。なお、図中の33リング掘進から組立にかけてのデータが欠落しているのは、電気系統のトラブルによりデータの収集が出来なかったためである。

鉄筋の応力は、側円上端部の内縁側、スプリング部の外縁側で引張応力が生じており、その値は $40 \sim 140 \text{ N/mm}^2$ である。中央円の上端部の発生応力は $30 \sim 20 \text{ N/mm}^2$ 程度と比較的小さい。また、掘進に伴い圧縮応力が増加し、その応力は残留する傾向にある。（図-5）

曲げモーメントは、33リング掘進時にテール部を脱出し、裏込め注入の影響を受けて変動し、33リング組立時には正曲げ $110 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、負曲げ $-130 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 程度が発生している。その後、シールドの掘進ごとに裏込め注入の影響を受けるがその変化量は小さく、分布形状および計測値の絶対値はほとんど変化が見られず、安定している。（図-6）

軸力は、中央円の上端部で 500 kN の引張力が発生

しているが、裏込め注入の影響による変動は小さく、 1000 kN 以下で安定している。（図-7）

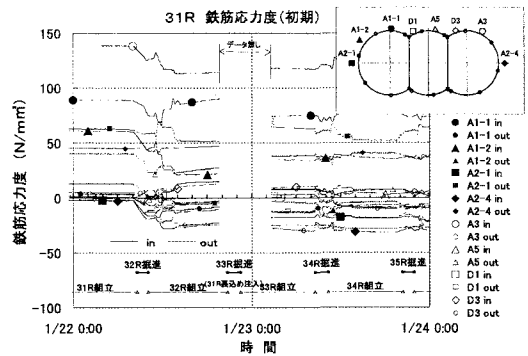


図-5 鉄筋応力経時変化（初期）

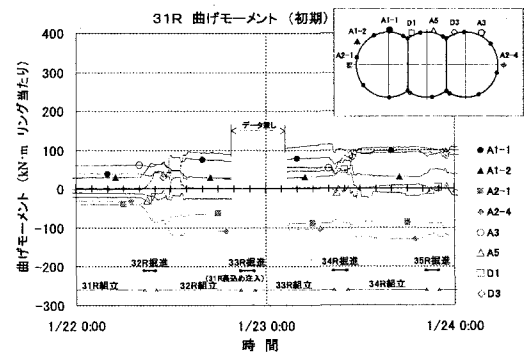


図-6 曲げモーメント経時変化（初期）

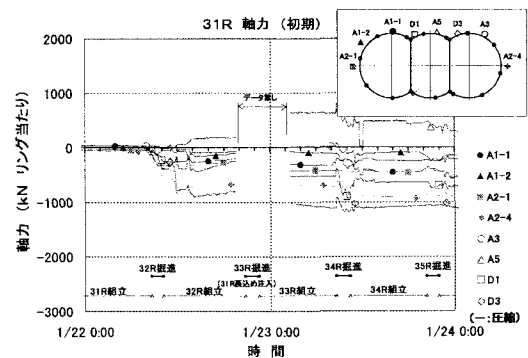


図-7 軸力経時変化（初期）

(2) 計測値の長期的な動向および設計値との比較

セグメント組立後長期間の計測値の動向について述べるとともに、セグメント組立7ヶ月後の値を用いて土圧分布および発生断面力を設計値と比較した。

a) 土圧分布

計測リング組立後長期間の土圧の経時変化を図-8に示す。シールド掘進時の裏込め注入圧の影響による圧力変化がなくなると土圧は一様に低下しているが、その後の変化にはトンネル鉛直方向と水平方向とでは大きな違いがある。鉛直土圧（上端部および下端部の計測値）は組立から約3週間程度でおおよそ $150 \sim 250 \text{ kN/m}^2$ に低下している。その後組立から2ヶ月程度経過するとこれまでとは逆に徐々に増加しており、最終的には $200 \sim 300 \text{ kN/m}^2$ まで達して、組立後約6ヶ月で安定している。この値は裏込め注入の際に受けた各計測点の最大値とほぼ同等の値である。これに対し水平土圧（側部の計測値）は組立後約2ヶ月間徐々に低下し、 130 kN/m^2 程度で安定しており、その後鉛直方向のような圧力の増加は見られなかった。このような鉛直土圧の増加は、シールド掘進に際して周辺地盤に生じた応力解放に伴う乱れが、後に地盤の圧密沈下を引き起こし、荷重増加につながったと考えられる。

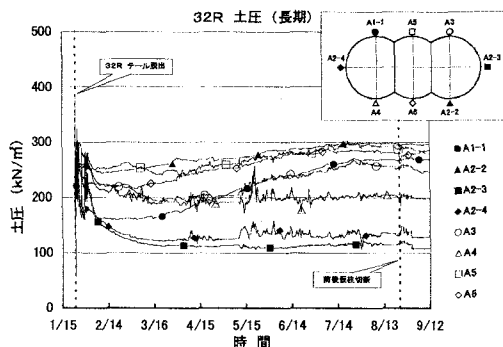


図-8 土圧経時変化（長期）

このような変動過程を土圧の分布図として表したものを、図-9に示す。裏込め注入完了後の土圧分布は、テールボイドに注入された裏込め注入材がまだ液体に近い状態であるため、鉛直・水平方向の計測値の差が少なく、等方等圧に近い分布となっている。一方、変動が落ち着いた組立から7ヶ月経過後の土圧分布は、裏込め注入時の分布と比較すると、中央円の鉛直方向はほとんど変化がないが、側円部は鉛直・水平方向とも小さい値となっている。設計値に対する計測値（7ヶ月経過後）の割合は、鉛直 $90 \sim 101\%$ 、側方 $44 \sim 50\%$ 、下端部反力 $61 \sim 91\%$ となっている。

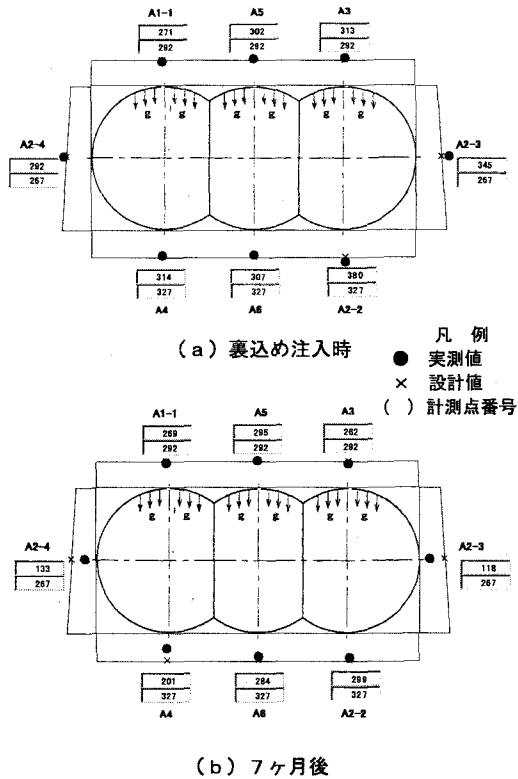


図-9 土圧の設計値と計測値の比較

b) セグメントの断面力

計測リングに発生している鉄筋応力および断面力の長時間の経時変化を図に示す。

鉄筋応力は、許容応力度の概ね60%以下の値で安定して推移しており大きな変化は見られないが、徐々に圧縮応力が増している。（図-10）

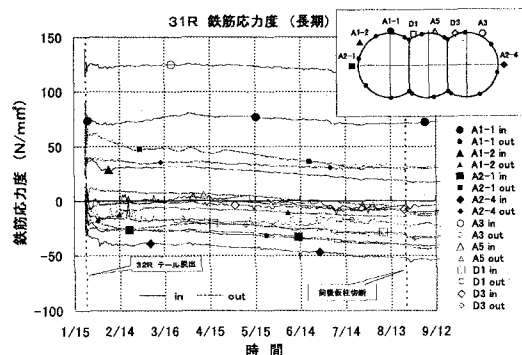


図-10 鉄筋応力経時変化（長期）

曲げモーメントは、側円の上端部が正曲げ、スプリング部が負曲げという発生状況はほとんど変わら

ない。しかし、その値は裏込め注入直後から緩やかに増加していく傾向にあり、テール脱出後約7ヶ月でその増加傾向はなくなる。組立7ヵ月後には、側円の上部部で100~200kN・m程度、スプリング部で-150~-200kN・mとなっている。(図-11)

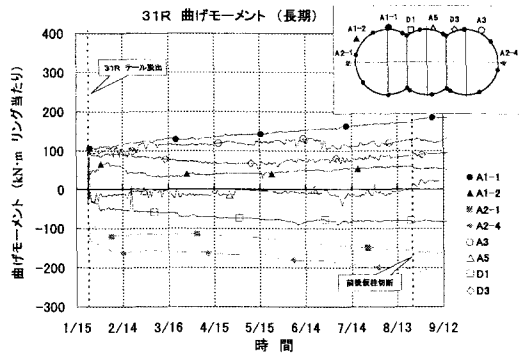


図-11 曲げモーメント経時変化(長期)

軸力は、作用土圧の経時変化と連動するように徐々に増加し、テール脱出後7ヵ月後には上端部で約300~1,700kN、側円のスプリング部で1,300~1,700kN程度に達している。(図-12)

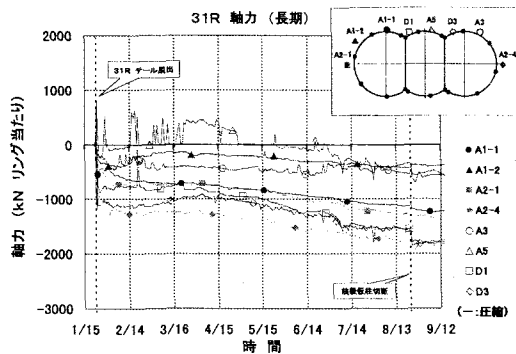
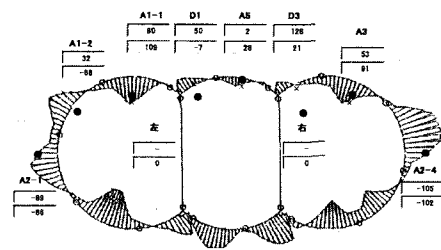


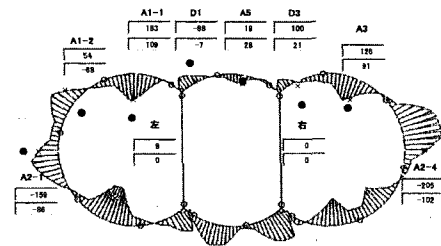
図-12 軸力経時変化(長期)

裏込め注入完了後および組立7ヵ月後の断面力の設計値に対する分布を図-13および図-14に示す。

曲げモーメントの分布状況は、裏込め注入完了時には設計値に対して正負が逆転している点もあるが、発生傾向は概ね設計値と一致している。その後、組立7ヵ月後には鉛直土圧の増加に伴い断面力が増加している様子が現れている。(図-13)



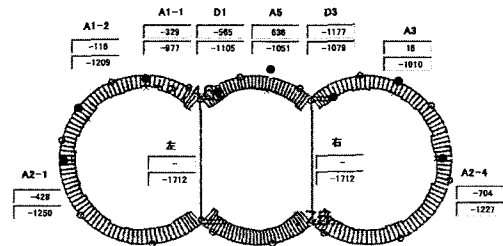
a) 裏込め注入完了後



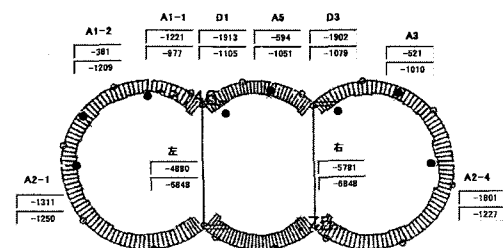
b) 組立7ヵ月後

図-13 曲げモーメントの計測値と設計値の比較

軸力の分布状況は、裏込め注入完了時には設計値の概ね20~60%と全体的に小さな値となっているが、組立7ヵ月後には土圧の増加に連動してほとんどの計測点でその値は増加している。(図-14)



a) 裏込め注入完了後



b) 組立7ヵ月後

図-14 軸力の計測値と設計値の比較

c) 中柱の断面力

中柱（本柱）の軸力の経時変化を図-15に示す。

中柱の軸力は、組立から仮柱切断まで大きな変化はなく、一定値を保っている。左右の柱で2～3程度のアンバランスが生じているが、概ね2,500kN程度の圧縮となっている。これは設計値（1,712kN）に対して4割程度大きい値であり、セグメントに作用する外力に対して中柱が形状保持効果を十分に発揮していると考えられる。

その後、仮柱を切断撤去すると、縦桁を介して仮柱の軸力が伝わり5,300kN程度の圧縮となっている。4リングごとに本柱を建て込みその間の仮柱3本を切断撤去するという構造から、本来であれば仮柱の撤去後は撤去前の4倍の軸力が発生すると考えられるが、計測値は2倍程度であった。この値は設計値の50%程度に相当する。これは仮柱の撤去前から各中柱ごとに軸力にばらつきがあることや、本柱と中柱の剛性の違いから剛性の高い本柱に軸力が集中していたために、仮柱撤去による軸力の増加が少なかったと考えられる。

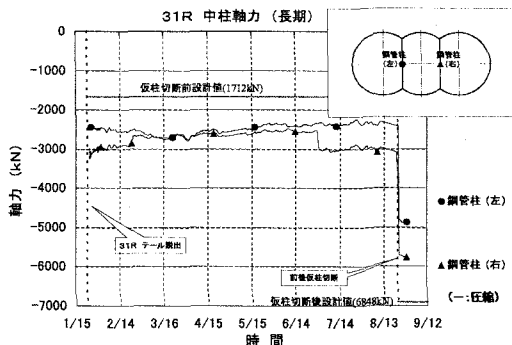


図-15 中柱軸力の経時変化

4. おわりに

以上の計測結果を整理すると、以下のような特徴がある。

- ①計測リングに作用する施工時荷重としては、裏込め注入の影響が非常に大きく、最終的に覆工に作用する土圧の最大値と同程度の値である。
- ②土圧、曲げモーメント、軸力ともに時間の増加に伴って徐々に増加し、組立後7ヶ月程度で安定している。これは、地盤の圧密沈下によって鉛直土圧の増加を招き、断面力の増加につながったと考えられる。
- ③発生断面力は設計値を上回る点もあるが、応力度

レベルでは許容応力度の60%程度であり、覆工の安全は十分に確保されていた。

今回は軟弱地盤における三連型シールドトンネルの覆工の計測結果について、シールドトンネルの施工過程に着目しながら整理した。東京地下鉄(株)では、これまで施工した単円シールド並びに三連型シールドなどの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の確立に向け、検討を進める考えである。

参考文献

- 1) 入江健二，末富裕二，河越勝：側部先行・中央揺動型三連シールドで駅部を築く－営団半蔵門線清澄工区一，トンネルと地下第32巻10号，2001.10，pp39-48