

2. 工事概要

本工事では、駅部の施工延長 119.5m を泥水式の三連型シールドで施工した³⁾。平面線形は直線、縦断勾配は 2‰である。トンネルの断面形状は、図-1 に示すように楕円形に近い三連型である。

覆工構造は、幅 1200mm のダクティルセグメントで、中央円が桁高 350mm、側円が桁高 280mm となっており、円が接する部分にはカモメ形のセグメントを配置し、この間に鉄骨柱（中柱）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、ホームドア開口に支障する中柱を切断撤去する。

計測箇所の土被りは約 21m であり、地質は図-2 に示すように、洪積層でトンネル断面の上部約 80%が東京層粘性土、その下部が東京層砂層で、最下部に東京礫層が現れる。N 値は粘性土で 5~12、砂層で 30 程度、礫層で 50 以上となっている。下部砂層の被圧地下水位は、トンネル天端上約 4.6m の位置にある。

3. 計測概要

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。計測項目および計測機器を表-1 に示す。

主計測断面の 18 リングでは、図-3 および図-4 に示すように、土水圧の計測とセグメント周方向および軸方向の発生応力、中柱の発生応力を測定した。また、副

表-1 計測項目および計測機器

計測リング No.	計測項目	測定箇所	計測機器
18R (主計測)	セグメント発生応力	中桁、主桁のひずみ	箔ひずみゲージ
	ジャッキ推力によるセグメント発生応力	縦リブのひずみ	箔ひずみゲージ
	中柱発生応力	裏フランジのひずみ	箔ひずみゲージ
	地山荷重	土圧	土圧計
	裏込め注入圧	水圧	間隙水圧計
	トンネル内空変位	トンネルの鉛直・水平変位 中柱の水平変位	レーザー変位計 ベイトスケール
16R (副計測)	セグメント発生応力	中桁、主桁のひずみ	箔ひずみゲージ
17R	中柱発生応力	ウェブのひずみ	箔ひずみゲージ
14~17R 間	縦桁発生応力	縦桁のひずみ	箔ひずみゲージ
		温度	温度計

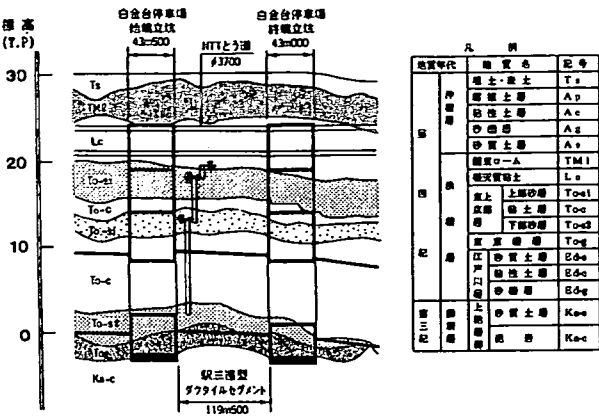
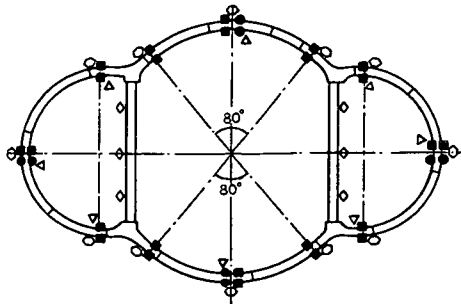
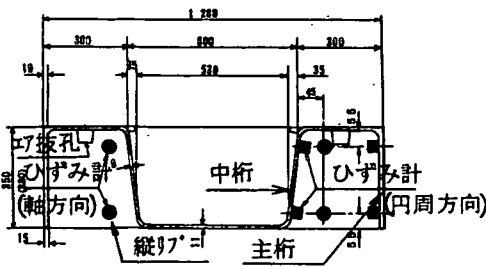


図-2 地質縦断面図

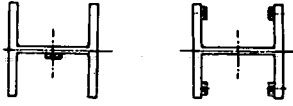


- 円周方向ひずみ計 ▲ 水圧計
- 軸方向ひずみ計 ◆ 中柱ひずみ計
- 土圧計

図-3 計器配置図



(a)セグメント



(b)中柱

図-4 ひずみ計取り付け位置図

計測断面の 16 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、仮設柱撤去に伴う隣接中柱への影響を 17 リングで測定した。さらに、仮設柱撤去に伴う縦桁への応力増加を測定した。計器の総設置数量は 164 箇所である。

4. 計測結果と考察

(1) 施工時荷重の影響

ここでは、組立後のセグメントリングに作用する施工時荷重として、主にシールドマシンのテール通過時の裏込め注入圧力に着目し、施工時荷重を受ける半径の異なる三連型シールドトンネルの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-5 に計測リング (18 リング) に作用する土圧経時変化を示す。

組立後のセグメントリングは、テールシールド内で 0~120kN/m² の圧力を受けている (19 リング掘進、組立)。また、テール通過時 (20 リング掘進) に裏込め注入圧力の影響で最大値で 120kN/m² の圧力が発生した後、20 リング組立時急激に低下するものの約 120~200 kN/m² の応力が残留する、そして、21 リング掘進時に裏込め注入圧力の影響により再度圧力が上昇するが、21 リング組立時において 20 リング組立時にみられたような急激な低下はなく、概ね 120~300 kN/m² の圧力となっている。その後 23 リング以降の掘進および組立を繰り返して、26 リング以降若干応力が増加するものの約 120~400 kN/m² の値となっている。

セグメントリングに作用する荷重が 27 リング以降において約 120~400 kN/m² であり、21~22 リング以前に発生した裏込め注入圧力による荷重が 120~300 kN/m² を呈している。これは、10m 程度 (8 リング) 掘進した箇所、裏込め材が硬化し、裏込め圧力が消散するものの、セグメントが荷重作用を受ける初期段階の裏込め注入圧力による影響が残存していると考えられる。

b) セグメント断面力の経時変化

ダクトイルセグメントの中桁へ設置したひずみ計の計測値から発生モーメントと発生軸力を把握した。

図-6 および図-7 に中桁に発生するのが軸力曲げモーメントの経時変化をそれぞれ示す。

中桁に発生する軸力は、セグメントリングに作

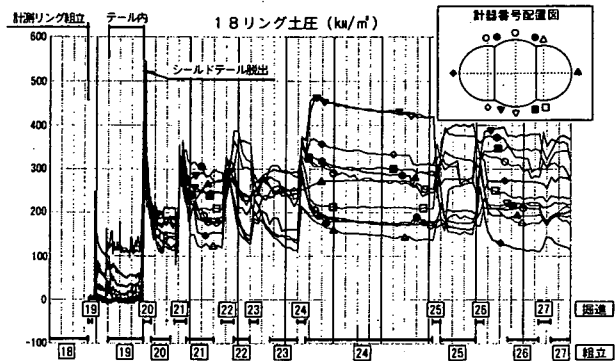


図-5 土圧経時変化図

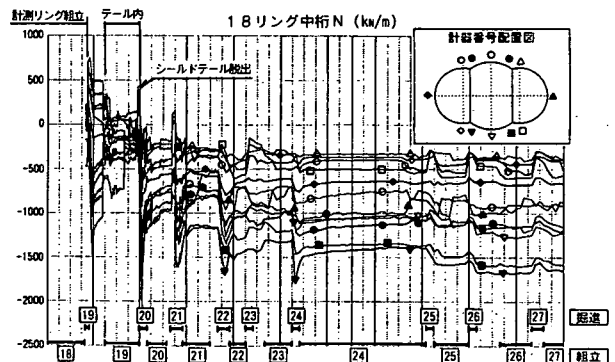


図-6 中桁軸力経時変化図

用する土圧と同様な応力発生モードを示す。テールシール圧により中桁に軸力が発生し、テール脱出時において裏込め注入圧の影響を受けて徐々に軸力が上昇し、概ね 23 リング組立以降一定の軸力となる。

一方、中桁に発生する曲げモーメントは、19 リング掘進時に大きくばらつくものの、19 リング組立時にほぼ落ち着き、テール脱出時に裏込め注入圧の影響を受け、その後 21 リング掘進・組立時において再度裏込め注入圧によりの若干曲げモーメントが増加するが、その発生曲げモーメントの大きさおよび発生モードは、ほぼ最終形となっている。

その後 25 リングで負の曲げモーメントが増加するが、正負の曲げモーメントの大きさは、それぞれ 100 kNm/m および -60 kNm/m となり、小さい値である。

これは形状効果のあらわれであり、楕円形に剛な中柱があるため中柱が裏込め注入圧影響を吸収して、セグメントへの影響が少なかったと考えられる。

c) 中柱断面力の経時変化

図-8 にホーム中柱に発生する軸力の経時変化を示す。

ホーム中柱は、裏込め注入の影響を敏感に反応している。組立後のセグメントリングは、テールシール内で 30~40kN/m の軸力を発生しており、テール通過時 (20 リング掘進) に裏込め注入圧力の影響で最大値で 2,500kN/m の軸力が発生した後、20 リング組立時急激に低下し、約 1,000 kN/m で落ち着く。その後、掘進および組立を繰り返して、25 リング以降約 17,000kN/m で一定となる。

(2) 設計値との比較

各種計測データが安定している 6 ヶ月後の値を用い、土圧分布や発生断面力等を設計値と比較した。設計値の諸条件を表-2 に示す。

a) 土圧分布

覆工にかかる土圧 (土水圧) の設計値と実測から得られた土圧を鉛直・水平成分に分けた値との比較を図-9 に示す。各測点においてバラツキが見られるが、全体的には設計時の設定荷重より小さな値となっている。このことについて、以下に考察を述べる。

① 設計では、トンネルの幅 15.6m に対し、土被りが 21.5m であることから全土被り荷重を採用したが、全体的な実測値から判断すると、施工区間が洪積地盤であることから緩み荷重が作用しているものと推測される。

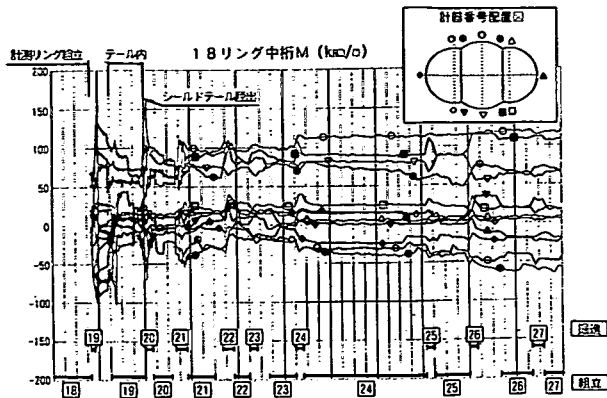


図-7 中桁曲げモーメント経時変化図

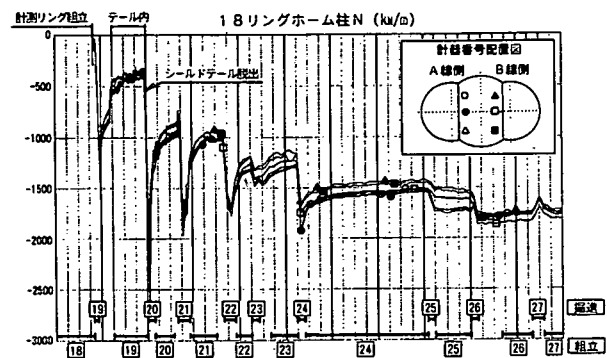


図-8 ホーム柱軸力経時変化図

表-2 設計値一覧

項目	設計値
土質条件	土水一体 ($\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$)
荷重条件	上載荷重 ($p = 9.5 \text{ kN/m}$) 全土被り荷重
土被り	中央円部: 21.5m 側円部: 23.3m
側方土圧係数	0.5
地盤反力係数	上部・側方: $30,000 \text{ kN/m}^3$ 下方: $70,000 \text{ kN/m}^3$
中柱の境界条件	ピン
解析モデル	梁ばねモデル

- ② カモメ部分の土圧の実測値は、設計値よりもかなり小さくなっている。これは、カモメ部分に裏込め注入が多く充填されやすく、断面形状が楕円形に近いことから外荷重が中央円や側円の天端方向に分散した一つの要因と考えられる。
- ③ 設計時に設定した洪積層の互層地盤である土の単位体積重量 ($\gamma = 18\text{kN/m}^3$) と洪積粘性土層の側方土圧係数 ($\lambda = 0.5$) が、実際は小さな値となっていたことが原因の一つと考えられる。
- ④ セグメント外周面の水圧の実測値を近傍に設置した観測井の計測値と比較すると、多少のバラツキは見られるが、トンネル天端から 4.6m 上の位置での静水圧分布とほぼ一致している。これより、設計では土水一体として計算しているが、地下水位はトンネル天端より高い位置にあり、土の湿潤重量全てに側方土圧係数を掛けた圧力よりも小さな圧力が実際には作用していることがわかる。

b) セグメントの断面力

トンネル周方向の曲げモーメントと軸力について、実測値と設計値を比較したものを図-10 および表-3 に示す。ここで用いたセグメントの実測値は、断面力が大きく発生する中桁に設置したひずみ計によるものである。以下に考察を述べる。

- ① 曲げモーメントの全体的な分布形状は、設計値に対して正・負が逆になっている計測点もあるが、同じ分布傾向を示していると言える。これは、剛な中柱部分で変形が抑止され、全体の挙動が拘束されたことによるものと考えられる。
- ② 周方向のセグメント発生軸力は、設計値と同様な分布傾向を示しており、中央円下部のカモメ部（計測点 6、8）の値が大きく、設計最大軸力に近い値となっている。設計値より小さい作用荷重でも部分的に軸力が大きく発生した理由は、施工時の裏込め注入による応力が残留しているものと考えられる。
- ③ 主計測断面、副計測断面とも側円部の曲げモーメントがあまり発生していない。これは、作用荷重が小さかった割には側円部の軸力が大きめに発生しているため、軸力が卓越する傾向になって曲げモーメントが小さくなったものと推測される。

c) 中柱の断面力

主計測断面の中柱の発生断面力について、設計値と比較したものを表-4 に示す。設計時の梁ばねモデルによる解析で得られる柱の断面力には仮設柱切断による影響が考慮されていないため、仮設柱切断後における設計値は、仮設柱負担分を本設柱に振り分け（5/3 倍）して求めた値である。

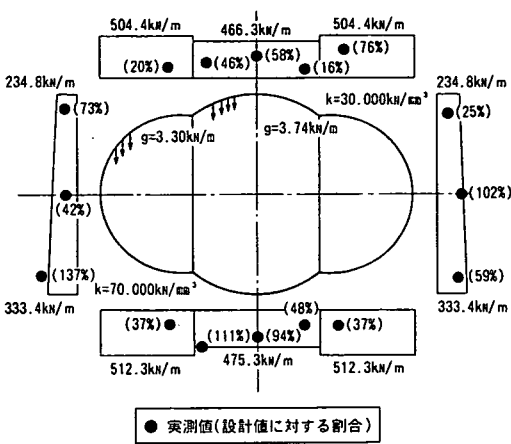


図-9 土圧の設計値と実測値の比較

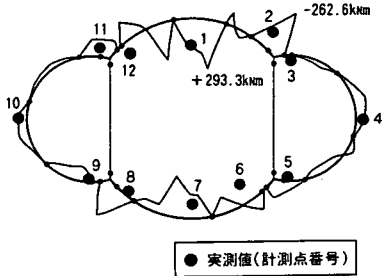


図-10 設計曲げモーメントの分布形状と実測値

表-3 セグメントの断面力比較

計測点	曲げモーメント (kN・m)			軸 力 (kN)		
	a:実測値	b:設計値	a / b	a:実測値	b:設計値	a / b
1	125.0	170.4	73%	-845	-1,837	46%
2	-61.0	-174.3	35%	-1,220	-2,099	58%
3	12.0	2.2	545%	-295	-1,223	24%
4	-24.0	-25.3	95%	-888	-1,332	67%
5	-1.0	-32.9	3%	-446	-1,178	38%
6	129.0	15.2	849%	-1,760	-2,090	84%
7	62.0	151.0	41%	-1,277	-1,939	66%
8	15.0	-167.9	-9%	-1,646	-2,286	72%
9	8.0	13.2	61%	-411	-1,141	36%
10	-32.0	-27.2	118%	-632	-1,324	48%
11	-32.0	-46.9	68%	-510	-1,238	41%
12	62.0	22.3	278%	-1,269	-2,070	61%

この結果より、仮設柱の切断によって軸力が各測点において約3割程度増加するが、設計値に対しては増加分が小さいことがわかる。また、仮設柱の切断に伴い発生する縦桁のトンネル軸方向応力の増加は、設計値の2割以下と非常に小さく、セグメントの周方向断面力への影響も認められなかった。これより、中柱と周方向のセグメントが剛な縦桁によって一体化し、軸方向で仮設柱切断による増加応力を負担したものと考えられる。

また、中柱に発生している軸力が、外荷重の設計値に対して実際に作用している割合より大きくなっているが、これは前述したように施工時の裏込め注入圧力の影響と剛性の高い中柱によるものと考えられる。

なお、中柱には表-4に示すように、曲げモーメントの発生が認められ、軸力の大きさから判断すると構造上の問題はないが、設計上は考慮することが必要と考えられる。

d) トンネルの変位

トンネルの内空変位測定結果は、鉛直変位が中央円で1mm程度、側円で2mm程度の縮み、水平変位が中央円と側円の全体で2mm程度の伸びとなり、縦つぶれの傾向は認められたが、変位量としてはかなり小さい結果となった。この理由としては、外荷重が小さいこともあるが、通常の複線断面より内側に剛な中柱と縦桁があり、側円部も単線断面程度の半円形であることから、断面形状効果に起因して変形が小さいものと考えられる。

5. おわりに

三連型シールドトンネルの施工に際して計測を実施し、トンネル覆工の各部材に発生する応力を測定した。その結果、本計測により、覆工各部材に発生する応力は想定した設計上の応力度を下回り、今後とも大きな応力の変動が認められないことから、トンネル構造の安全性を確認することができた。また、今後の三連型シールドトンネルの覆工設計に関して、作用する施工時荷重などの外荷重の影響を経時変化により把握し、設計に供する基礎資料を得ることができた。

しかしながら、覆工に作用する外荷重の大きさや載荷形態、および発生断面力の大きさなどが設計上想定したものと異なった傾向を示しており、このことは断面形状の特殊性および施工時荷重の影響に起因すると考えられる。今後はさらに計測結果の分析を行い、また他現場での計測結果を踏まえ、三連型シールドトンネル覆工の設計手法確立に向けた検討を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 助川 禎：駅間シールド機を使用した着脱式泥水三連型駅シールド工法の開発、土木学会論文集 No.498/VI-24、1994.9
- 2) 助川 禎・中島 信・藤木 育雄・荻野 竹敏・小泉 淳：3心円形駅シールドトンネルの設計法に関する研究、トンネル工学研究発表会論文・報告集 第3巻、1993.11
- 3) 河越 勝・松田 輝雄・氏家 進・辻 雅行・森 章：世界初の着脱式泥水三連型駅シールドの施工、トンネル工学研究発表会論文・報告集 第8巻、1998.11

表-4 中柱の断面力比較

		a:実測値	b:設計値	a/b
軸 力 (kN)	仮設柱切断前	1,682	2,333	72%
	仮設柱切断後	2,435	3,888	63%
曲げモーメント (kN・m)	上部	140.9	0	—
	下部	97.4	0	—