

有楽町線小竹向原～千川間改良工事における シールドトンネル施工に関する報告

伊藤聡¹・嶋田司²・長谷篤³・斉藤進⁴・山上享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 (〒164-0013 東京都中野区弥生町五丁目 23-17)

E-mail : sato.itou@tokyometro.jp

²東京地下鉄株式会社 改良建設部 第二工事事務所 (〒164-0013 東京都中野区弥生町五丁目 23-17)

E-mail : t.shimada@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 (〒164-0013 東京都中野区弥生町五丁目 23-17)

E-mail : a.hase@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 : susaitou@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 : tyamagam@ku.kumagaigumi.co.jp

東京メトロでは、有楽町線・副都心線において、安定輸送確保を目的とした平面交差を解消する立体交差の連絡線設置を計画した。このうち、320m 区間では、複合円形断面の単線シールドトンネルを採用し、泥土圧シールド工法にて施工した。本工事では、設計段階において、スプリング部のセグメントに大きな曲げモーメントの発生が予測されたため、施工時荷重を考慮した断面力解析を行い、安全性を確認した。本稿は、この解析と計測施工の比較結果を報告するものである。

Key Words : Subway, Shield tunnel, Oval section, Load at the time of construction

1. はじめに

全性および施工結果について報告するものである。

東京メトロでは、東京メトロ有楽町線・副都心線において、安定輸送確保を目的とした平面交差を解消する立体交差の連絡線設置を計画した。図-1 に工事概要を示す。このうち、320m (A 線 175m, B 線 145m) の区間で複合円形断面の単線シールドトンネルを採用し、平成 24 年 4 月に A 線 175m において、泥土圧シールド工法にて施工した。

本工事では、トンネル断面が複合円形であることから、裏込め注入圧力が液圧分布状態で作用した際に、曲率半径が大きな部分 (スプリング部のセグメント) に、大きな曲げモーメントが発生することが懸念されたため、設計段階で裏込め注入圧力を作用させた多リングモデルで解析を行った。本稿は、この解析結果と計測で得られたセグメントに発生した断面力の比較検討を行い、設計の妥当性と構造の安

2. 施工条件

平面線形は曲率半径 $R=500\text{m}$ を 36% (63m) 有し、縦断線形は+2%の勾配を 35%(始端部 50m, 終端部 11m)および+24%の勾配を 65%(中間部 114m)有している。

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。

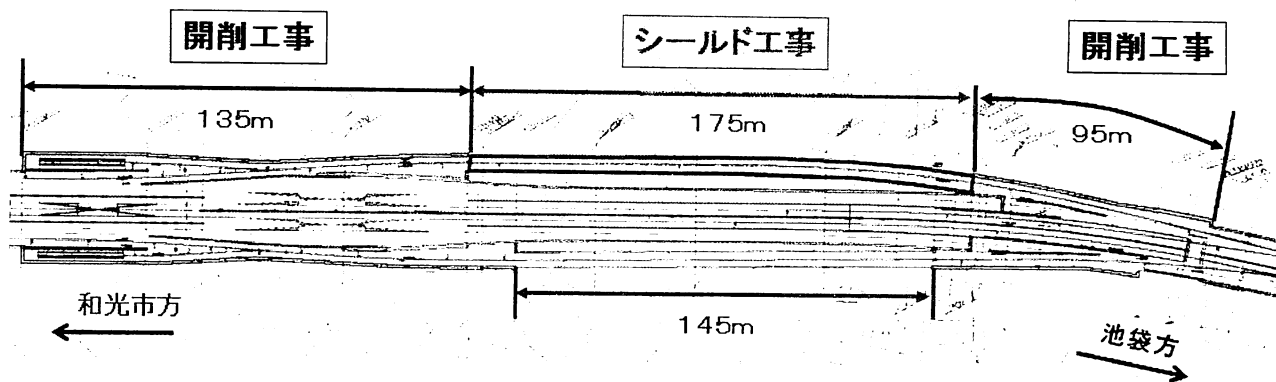


図-1 工事概要

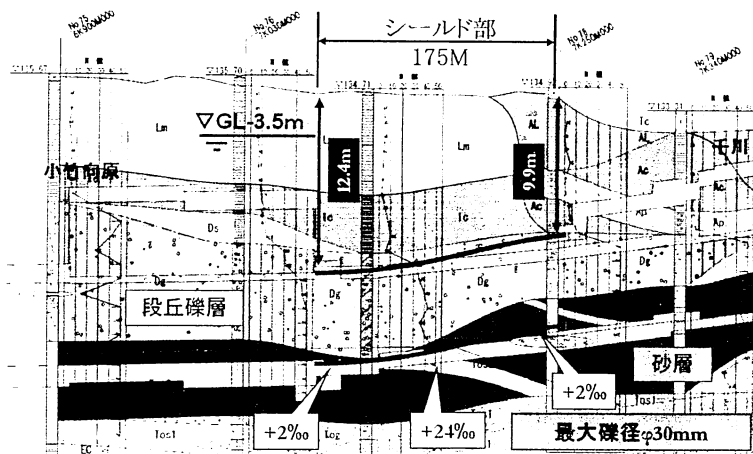


図-2 地質概要

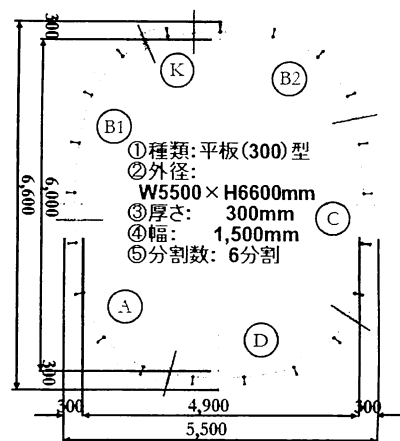


図-3 セグメント形状

3. セグメント

セグメントの特徴を図-3に示す。形状は、三つの曲率半径 ($R=2000, 5500, 7800$) からなる複合円形断面であり、外径 $W5500 \times H6600\text{mm}$ 、厚さ 300mm 、幅 1500mm である。また、種類はRC 平板型である。

4. 施工時荷重

施工時荷重については、計測断面がほぼ直線区間であることから、シールドジャッキの片押しによる偏荷重などは対象外とし、テールブラシ圧力と裏込注入圧力に着目した。

解析モデルは前後のセグメントの連続性を考慮し、7リングで解析を行い、前方にはマシンテール内のセグメント、後方には裏込注入が固化したセグメントを配置した。荷重については、1R は自重のみ、2R は自重+裏込注入圧+テールブラシ圧の合計、3～7

R は自重+土水圧+地盤反力の合計とした。なお、裏込注入圧力は設計土水圧 177kPa に 100kPa を加えた施工時の上限注入圧力 277kPa 、テールブラシ圧はマシンサイズとテールクリアが同一の過去の実績から $30,000\text{kN/m}^3$ ¹⁾、地盤反力は裏込注入材の固化状態を考慮しテールブラシ圧（相当）の $30,000\text{kN/m}^3$ から地盤反力 $50,000\text{kN/m}^3$ までの圧力を段階的に設定することとし、3R ではテールブラシ圧相当の $30,000\text{kN/m}^3$ 、4R はテールブラシ圧相当と地盤反力相当の中間値 $40,000\text{kN/m}^3$ 、5～7R は地盤反力相当の $50,000\text{kN/m}^3$ と設定した。

テールブラシのばね係数や裏込注入の初期強度はモデル図-4に示すとおりである。また、セグメントの構造条件を表-1、断面力計算に用いる定数を表-2、断面力計算に用いる外荷重を表-3、図-5に示す。

		液状		固結状態(1h強度 0.1N/mm ²)				
【セグメント】		1R	2R	3R	4R	5R	6R	7R
【荷重】	自重のみ		自重 裏注(液圧) ブラシばね 30,000kN/m ³	自重 土圧 水圧 地盤ばね 30,000kN/m ³	自重 土圧 水圧 地盤ばね 40,000kN/m ³	自重 土圧 水圧 地盤ばね 50,000kN/m ³	自重 土圧 水圧 地盤ばね 50,000kN/m ³	自重 土圧 水圧 地盤ばね 50,000kN/m ³

図-4 7リング解析モデル

表-1 セグメントの構造条件

構造条件		単位	セグメント
幅	B	m	1.50
厚さ	H	m	0.30
面積	A	m ²	0.45
断面2次モーメント	I	m ⁴	3.38×10 ⁻³
単位体積重量		kN/m ³	26.50
単位長重量		kN/m	11.93
コンクリートヤング率	E _c	kN/mm ²	3.90×10 ⁷
鉄筋ヤング率	E _s	kN/mm ²	2.10×10 ⁵
許容応力度(※仮設は常時の1.5倍とする)			コンクリート
設計基準強度	f _{ck}	N/mm ²	48
曲げ圧縮応力度(常時)	σ _{ca}	N/mm ²	18
せん断応力度(常時)	τ _{ca}	N/mm ²	0.74
許容応力度(※仮設は常時の1.5倍とする)			鉄筋
種類			SD345
引張応力度(常時)		N/mm ²	200
圧縮応力度(常時)		N/mm ²	200
許容応力度(※仮設は常時の1.5倍とする)			ボルト
鋼材の種類			8.8
引張応力度(常時)		N/mm ²	290
せん断応力度(常時)		N/mm ²	200

表-2 断面力計算に使用する定数

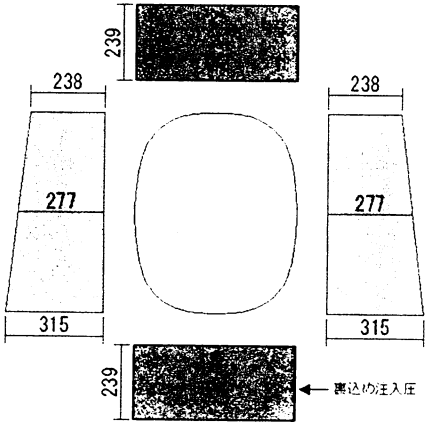
セグメント回転ばね定数		正曲げ	Kθ(+) = 123,000 (kN・m/rad)
		負曲げ	Kθ(-) = 77,700 (kN・m/rad)
リング継手せん断ばね定数		Ks =	1,000,000 (kN/m)
地盤反力	自重時	法線方向	k = 2,000 (kN/m ³)
		接線方向	k = 100 (kN/m ³)
	2R	法線方向	k = 30,000 (kN/m ³)
		接線方向	k = 100 (kN/m ³)
	3R	法線方向	k = 30,000 (kN/m ³)
		接線方向	k = 100 (kN/m ³)
	4R	法線方向	k = 40,000 (kN/m ³)
		接線方向	k = 100 (kN/m ³)
	5R～7R	法線方向	k = 50,000 (kN/m ³)
		接線方向	k = 100 (kN/m ³)

表-3 断面力計算に使用する外荷重

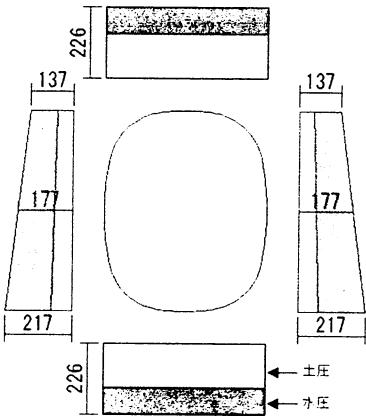
2 R荷重 (設計裏込め注入圧力)		土圧	水圧	総荷重	
				m当たり	1R当たり
鉛直荷重	上部	0.00	236.33	236.33	354.50
	下部	0.00	236.33	236.33	354.50
水平荷重	頂部	0.00	238.16	238.16	357.24
	底部	0.00	315.02	315.02	472.53

3 R～7 R荷重 (土圧＋水圧)		土圧	水圧	総荷重	
				m当たり	1R当たり
鉛直荷重	上部	141.00	85.00	226.00	339.00
	下部	141.00	85.00	226.00	339.00
水平荷重	頂部	49.77	86.50	136.27	204.41
	底部	67.41	149.50	216.91	325.37

2R荷重図(設計裏込め注入圧力)



3R～7R荷重図(土圧＋水圧)



※図中の数値は小数点未満四捨五入(単位:kPa)

図-5 断面力計算に使用する外荷重

5. 解析結果

施工時荷重を考慮した断面力の解析結果および許容値を表-4に示す。

1Rにおいては、施工時荷重が自重のみのため、曲げモーメントの最大値は+40kN・m、軸力の最大値は568 kNであり、いずれの値も小さく、コンクリートおよび鉄筋の許容値以下であった。

ブラシばね圧が作用する 2R の解析結果を図-6-1に示す。2R の曲げモーメントの最大値は+198kN・m、軸力の最大値は990 kNであり、鉄筋引張応力度が193N/mm2 とかなりおおきいものの、鉄筋引張許容応力 200 N/mm2 以下であった。

地盤反力が作用する 3～7R の内、最大値を示した 6R の解析結果を図-6-2に示す。6R の曲げモーメントの最大値は+208kN・m、軸力の最大値は1,028 kNであり、鉄筋引張応力度が194N/mm2 とかなり大きいものの、2R と同様に、常時の許容応力度 200 N/mm2 以下であった。

いずれのリングにおいても、コンクリートの許容応力度および鉄筋応力度を下回っていることが確認でき、施工時荷重を考慮した場合であっても、設計上のセグメント構造は安全であることが確認できた。よって、シールドトンネルの施工を行い、セグメント計測を実施することとした。

表-4 7リングモデルによる解析結果

			単位	1R		2R		3R～7R	
				正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ
部材条件	部 材 幅	B	m	1.50					
	部 材 厚 さ	H	m	0.30					
	設計基準強度		N/mm ²	48					
引張鉄筋	引張鉄筋径	D	mm	19					
	本 数			10					
	引張鉄筋量	A _S	cm ²	28.65					
	かぶり	d	cm	6.50					
圧縮鉄筋	圧縮鉄筋径	D	mm	19					
	本 数			10					
	圧縮鉄筋量	A _S '	cm ²	28.65					
	かぶり	d'	cm	6.50					
鉄筋量				57.30					
ヤング率比				15					
断面力	曲げモーメント	M	kN・m/R	40.321	-25.070	197.630	-157.490	208.360	-173.860
	軸 力	N	kN/R	555.390	567.630	867.480	989.910	975.520	1,027.700
コンクリート応力	応力度	σ _c	N/mm ²	2.6	2.0	13.1	10.3	13.8	11.4
	許容応力度	σ _{ca}	N/mm ²	27				18	
	評 価			OK	OK	OK	OK	OK	OK
鉄筋応力	引張応力度	σ _s	N/mm ²	0.4	7.9	193.3	108.9	194.2	129.6
	圧縮応力度	σ _s '	N/mm ²	28.8	23.9	88.9	81.8	96.1	88.1
	許容引張応力度	σ _{sa}	N/mm ²	300				200	
	許容圧縮応力度	σ _{sa} '	N/mm ²	300				200	
	評 価			OK	OK	OK	OK	OK	OK
中立軸		X	m	0.238	0.319	0.119	0.138	0.121	0.134
引張鉄筋比		p	%	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64

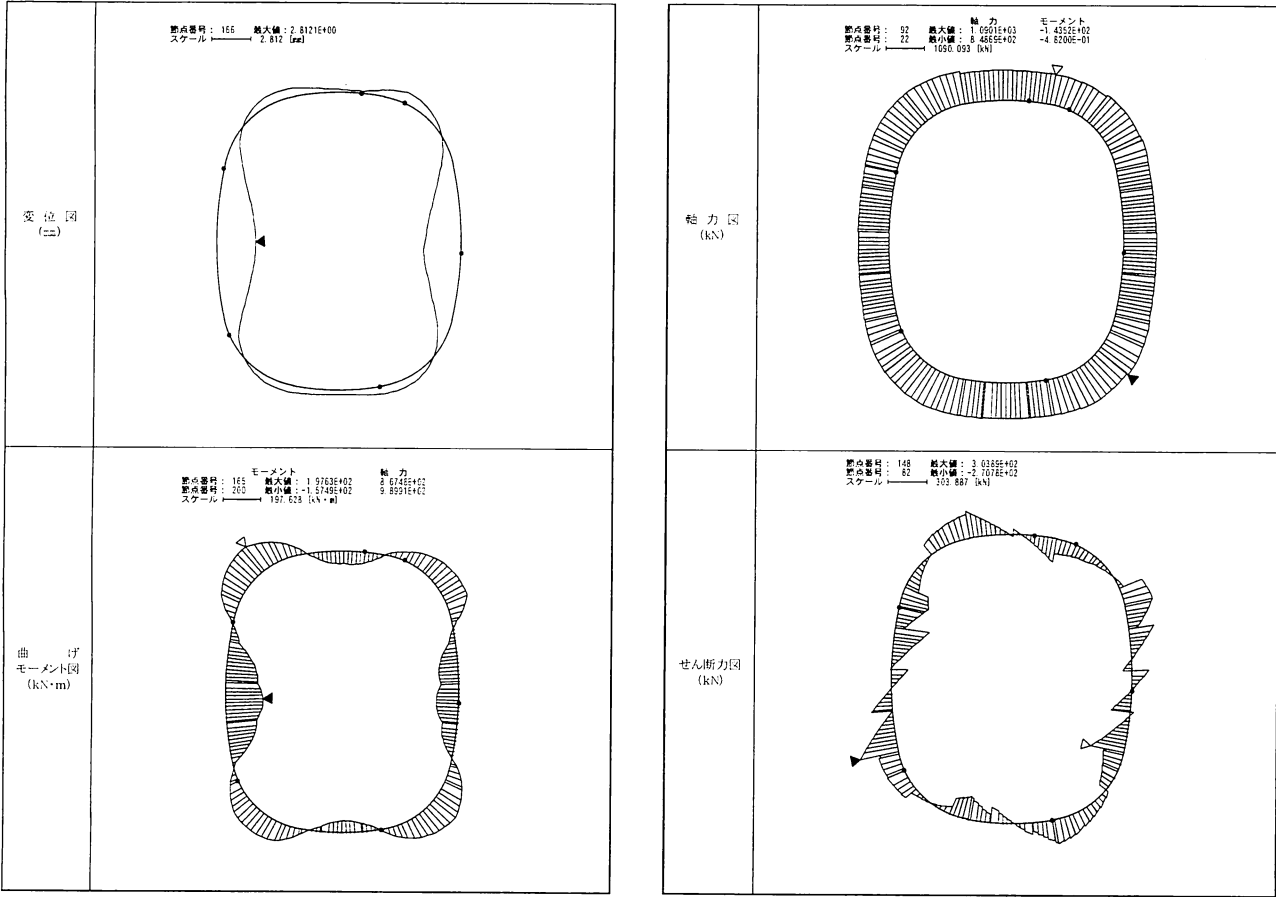


図-6-1 2R(自重+注入圧)の断面力

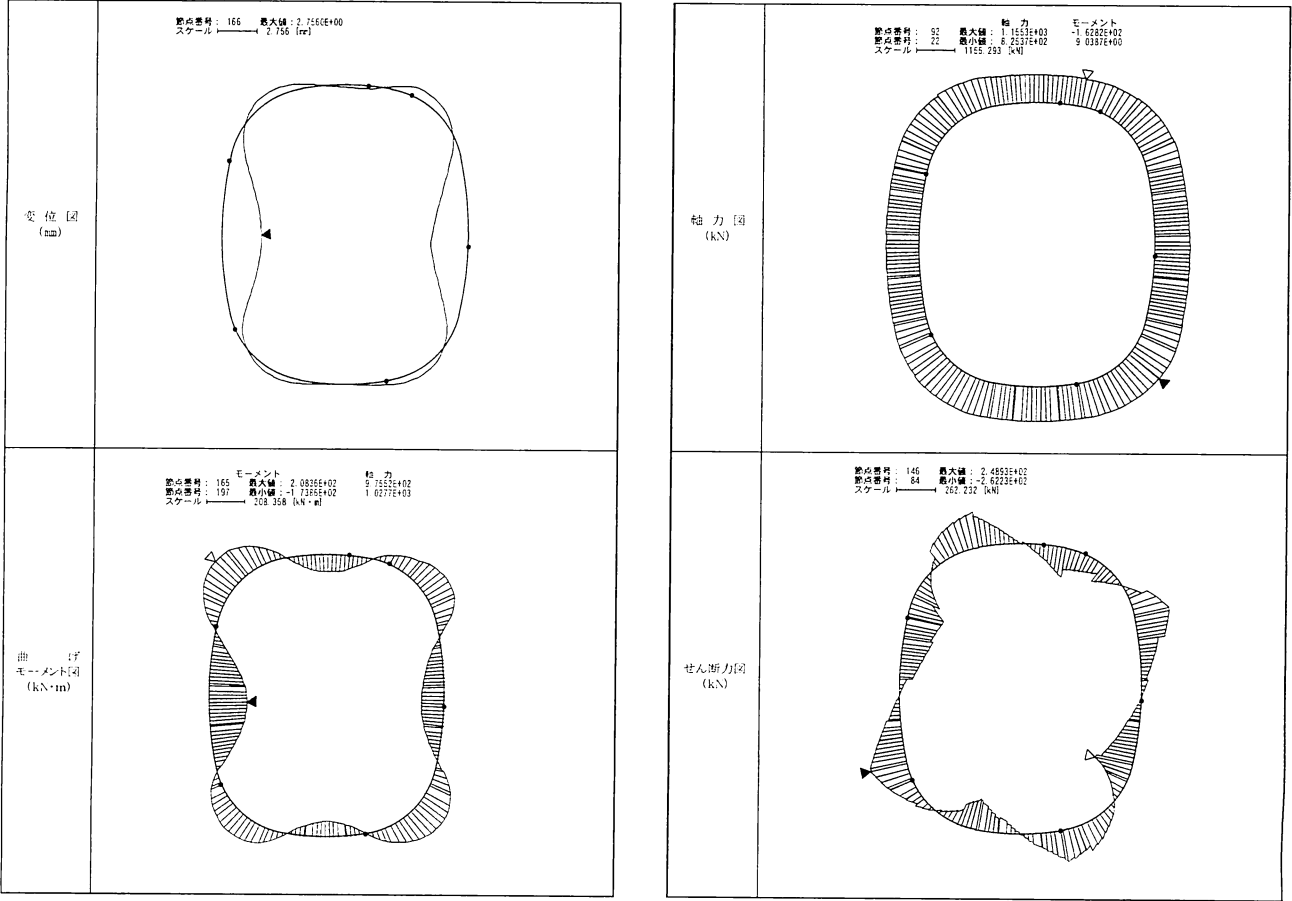


図-6-2 6R(自重+土圧+水压)の断面力

6. 計測方法

計測位置について図-7に示す。計測位置は、セグメント108リングの内、ほぼ直線区間にある初期掘進区間の17-18R、本掘進区間の47-48Rの連続する2リングを選定し各区間において計測を実施した。なお、本稿は、48Rの計測結果について報告する。

計測の目的は、掘進時およびテール脱出時の施工時荷重（テールブラシ圧および裏込め注入圧）の作用や通過後の荷重状態の変化による、セグメント本体の周方向・軸方向鉄筋応力、土水圧および水圧を把握することとした。セグメントに設置する計測機器数を表-5、計測機器設置位置を図-8、計測機器詳細位置を図-9に示す。

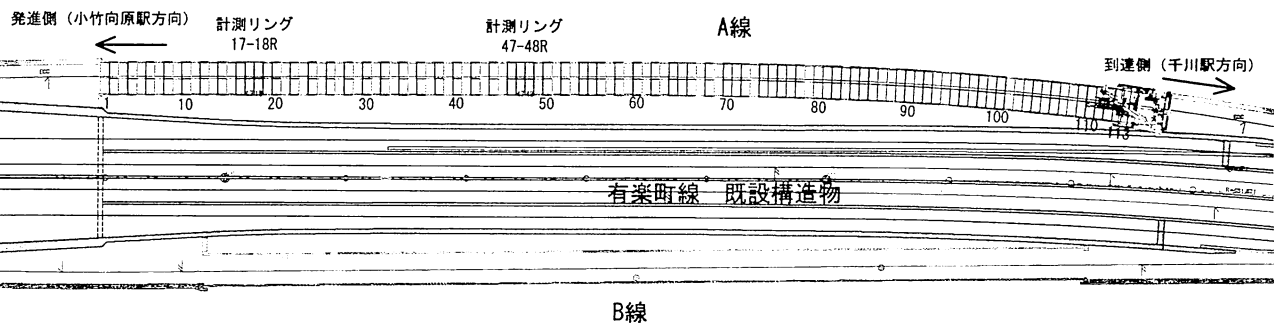


図-7 計測位置平面図

表-5 計測機器数量

計測機器凡例・数量等			甲組	乙組
◆	周方向応力測定	ひずみゲージ	40 箇所	20 箇所
●	軸方向応力測定	ひずみゲージ	11 箇所	11 箇所
・	土圧測定	土圧計	8 箇所	4 箇所
▼	水圧測定	水圧計	0 箇所	3 箇所
★	温度測定	熱電対	6 箇所 (セグメント内部) 1 箇所 (トンネル坑内気温)	0 箇所

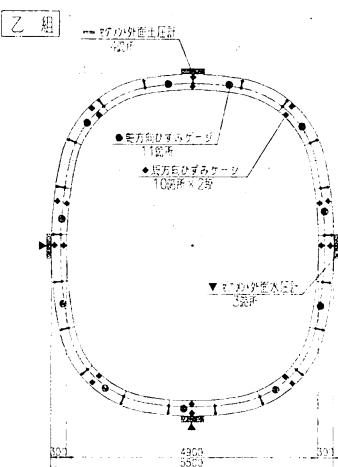
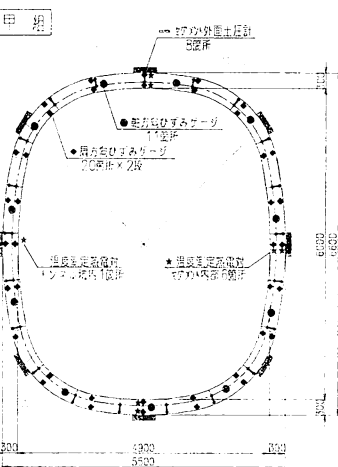


図-8 計測機器設置位置

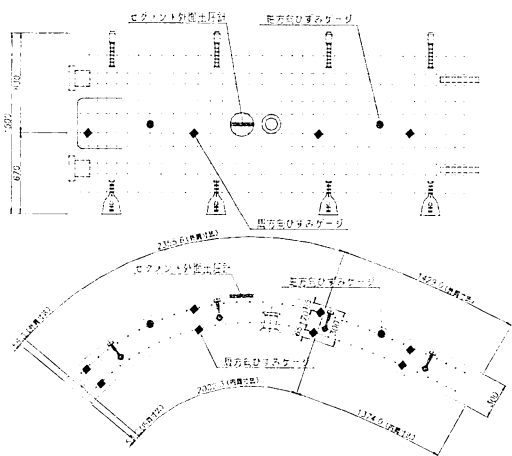


図-9 計測機器詳細設置位置(A型セグメント)

7. 計測結果

計測における施工段階を図-10に示す。施工段階は、①組立完了 N+1 リング掘進開始、②テールシール接触 N+1 リング (JST=2,144mm) 掘進時、③テールシール脱出 N+2 リング (JST=1,040mm) 掘進時、④N+2 リング掘進完了時 (裏込め注入完了) および⑤収束時である。

48R のセグメント外面の土圧計の経時変化を図-11に示す。セグメントの外面には裏込め注入圧力 (切羽土圧+100kPa で管理) とほぼ同等の圧力が作用しており、裏込め注入完了後は切羽泥土圧に近い値で収束している。

48R の引張鉄筋応力度の経時変化を図-12に示す。スプリングラインにあるC型セグメントに配置した鉄筋計は一時的に許容応力度 200N/mm2 を超過したものの、その後約 150N/mm2 に収束した。施工時荷重を考慮した解析結果においても鉄筋引張応力度 194N/mm2 であることから、解析とはほぼ同じ傾向を示したことがわかる。鉄筋引張応力度もセグメント外面土圧に連動する傾向を示しており、裏込め注入の圧力によりセグメントのスプリングライン部に曲げモーメントが増加したものと考えられる。

48R の曲げモーメントおよび軸力の計測結果および発生状況を表-6、図-13に示す。また、0°、90°、180°、270° 位置においてセグメントに生じる曲げモーメントと軸力の経時変化を図-14に示す。曲げモーメントと軸力測定値は、施工段階②1 段目テールブラシがひずみゲージ位置へ進入時に増加後、一旦減少する。その後、施工段階③2 段目のテールブラシがひずみゲージ位置を通過し、計測リングが地山に出た後で除々に増加し、施工段階⑤計測リングより2リング先の掘進終了時にかけて大きくなっている。施工段階④裏込め完了時では、270° 位置 (Cセグメント) の測定値が、曲げモーメント 378.5 kN・m、軸力-2213kN となり、それぞれ最大値を示す結果となった。設計計算最大値は、曲げモーメント 181.6kN・m、軸力-1000kN であるため、いずれの計測値も設計計算値を超えた結果となった。しかし、施工時荷重を考慮した設計計算値は、曲げモーメント 208.3kN・m、軸力+1027kN であるため、ほぼ一致する結果となった。一方、90° 位置 (B1セグメント) の測定値は、セグメントの継手が近いため、曲げモーメントは 20.6 kN・m であった。

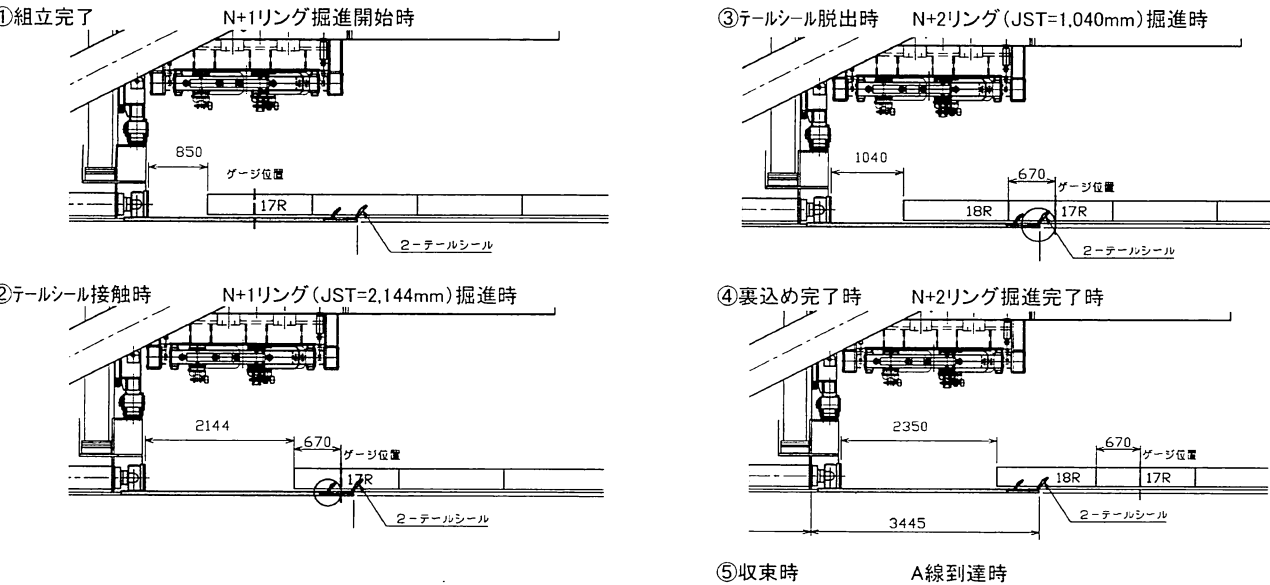


図-10 施工段階

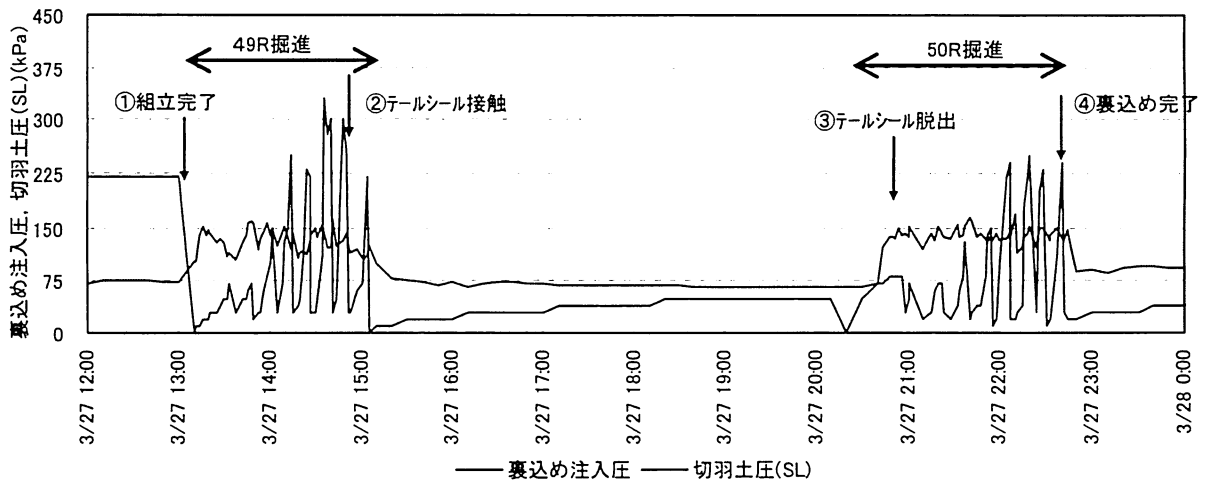
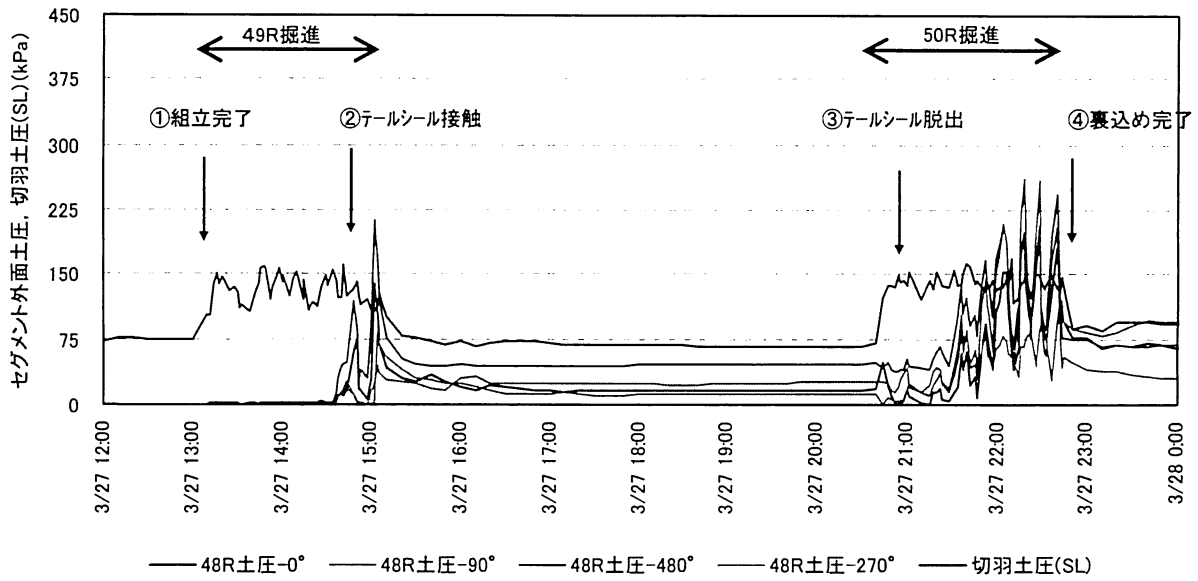


図-1 1 セグメント外面の土圧計の経時変化(48R)

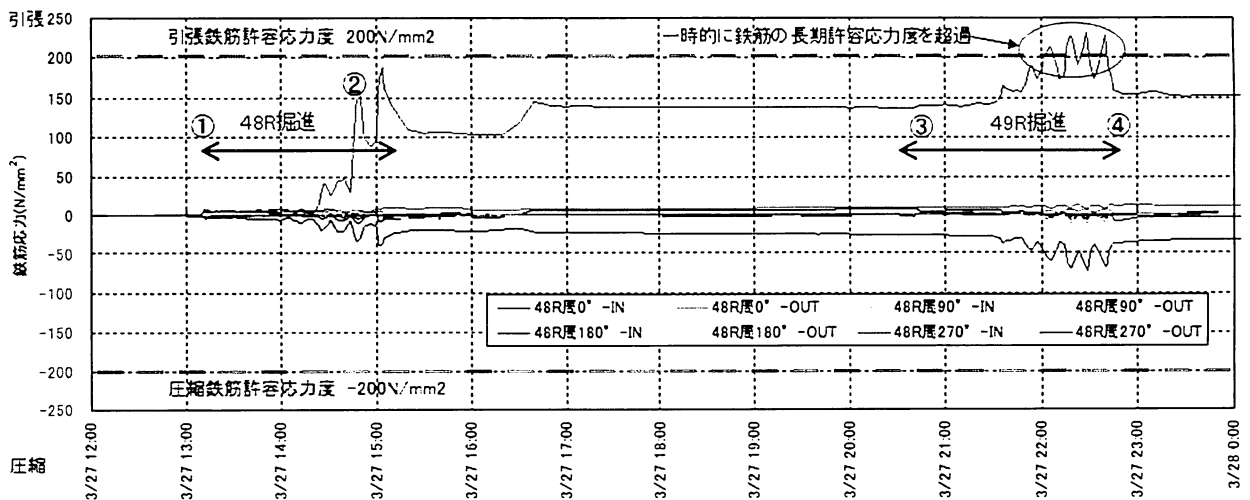


図-1 2 鉄筋応力経時変化(48R)

表-6 断面力計測結果 (48R)

イベント	時刻	0		36		72		90		144	
		曲げ モーメント	軸力	曲げ モーメント	軸力	曲げ モーメント	軸力	曲げ モーメント	軸力	曲げ モーメント	軸力
		kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN
①組立完了	2012/3/27 13:10	-0.2	7.2	-0.1	4.2	0.0	-37.5	0.3	-0.3	-0.1	3.0
②テールシル接触時	2012/3/27 14:48	37.7	-461.9	76.9	-849.4	34.6	-578.4	18.8	-145.5	133.6	-1480.5
③テールシル脱出時	2012/3/27 20:52	-1.0	45.7	-1.0	37.9	3.3	-375.1	3.0	1.8	25.6	-183.5
④裏込め完了時	2012/3/27 22:44	13.5	-53.1	27.7	-197.1	31.4	-637.6	7.5	-58.5	54.7	-476.8
⑤収束時	2012/4/20 0:10	1.1	10.2	77.9	-707.5	5.0	-1575.3	20.6	-515.7	63.9	-520.3
イベント	時刻	180		216		270		288		324	
		曲げ モーメント	軸力	曲げ モーメント	軸力	曲げ モーメント	軸力	曲げ モーメント	軸力	曲げ モーメント	軸力
		kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN
①組立完了	2012/3/27 13:10	0.4	-0.4	-1.7	-56.3	1.7	-56.3	0.0	1.2	-0.8	-46.9
②テールシル接触時	2012/3/27 14:48	52.7	-994.9	73.8	-907.3	209.6	-1084.0	51.6	-494.7	140.2	-1411.3
③テールシル脱出時	2012/3/27 20:52	-0.7	25.9	47.1	-548.4	175.1	-796.8	24.5	-235.1	84.8	-677.9
④裏込め完了時	2012/3/27 22:44	6.6	-50.8	82.3	-986.5	238.9	-1207.8	55.2	-442.7	138.9	-1028.2
⑤収束時	2012/4/20 0:10	-1.0	66.2	103.7	-1439.6	257.2	-1493.7	60.4	-633.9	172.5	-1544.5

48R 曲げモーメント
(正：正曲げ，負：負曲げ)

48R 軸力
(正：引張，負：圧縮)

設計計算結果

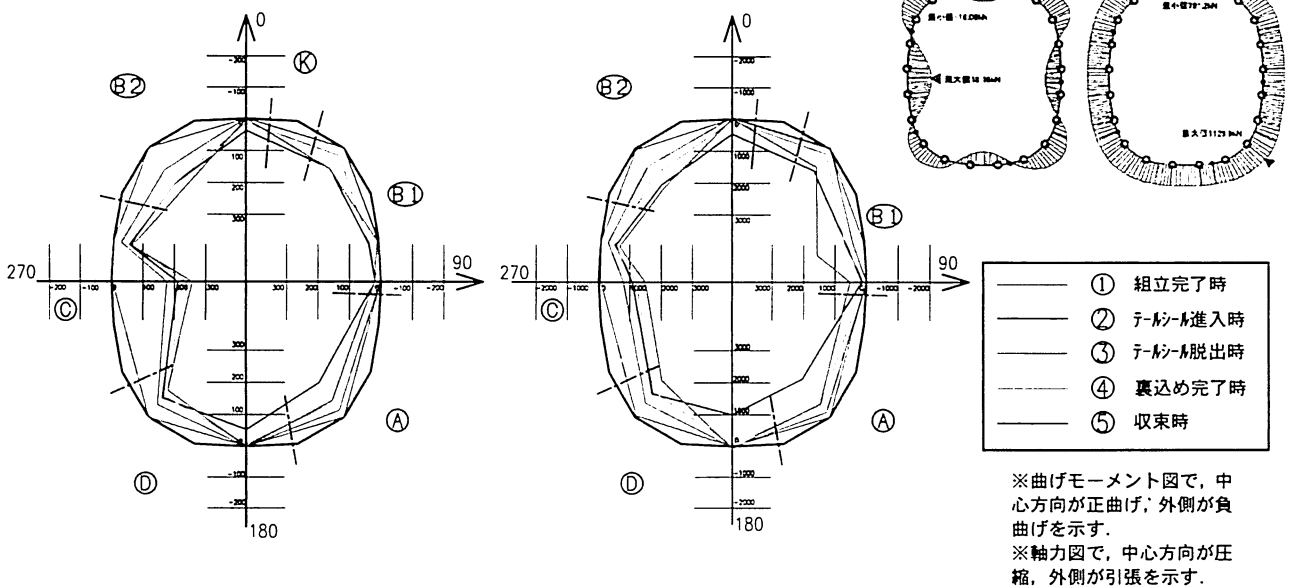


図-1 3 断面力の発生状況 (48R)

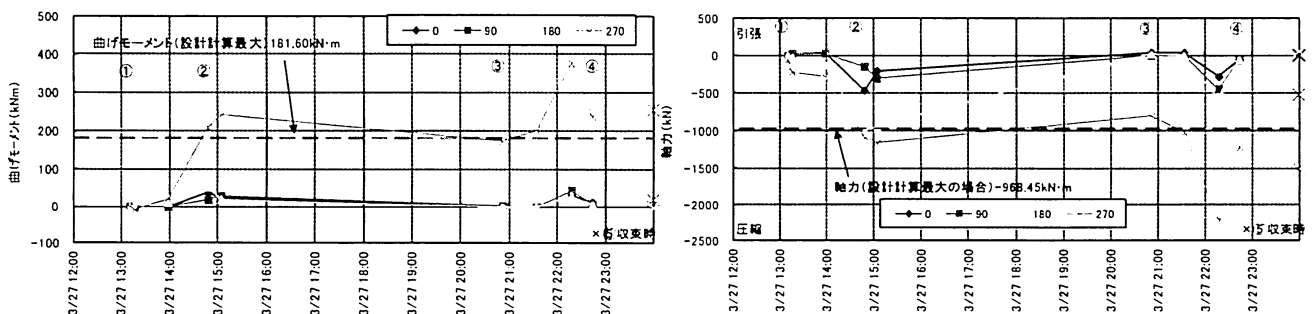


図-1 4 断面力の経時変化 (48R)

8. 円形断面との比較

発生断面力において、円形断面と複合円形断面の解析結果を表-7に示す。円形断面は、13 号線高田 A 線建設時の断面を採用し、裏込め注入圧力を作用させた。解析の結果、円形断面においては、液圧として荷重が作用した場合は、軸力が卓越し曲げモーメントはほとんど発生せず、全断面圧縮となっていることがわかった。また、図-15に示すように土圧計の時系列において、テールブラシ接触時に土圧は最大値を示していることがわかる。一方、複合円形断面においては、裏込め注入圧力によって、セグメントの曲率半径の大きな部分の曲げモーメントが増加することが確認された。

施工における最大の相違は、ローリング対策が必要な点である。円形の場合、ローリングしても有効断面に変化はない。しかし、複合円形断面の場合、使用目的によって限界ローリング値が定められる。本工事においては、鉄道施設の連絡線であるため、車両限界および建築限界から、限界ローリング値が回転角 9.503 度と定められた。そのため、シールドの姿勢を正確に把握するとともに、対策措置として、上下揺動が可能なローリング修正用ジャッキをシールド機に装備したが、結果として、修正用ジャッキを使用することなく竣工した。

表-7 複合円形モデルと円形モデルの発生断面力

荷重条件	項目	複合円形断面モデル B:5,500×H:6,600	円形断面モデル φ 6,600
【完成時】 設計土水圧(SL)177kPa	最大曲げモーメント(kN・m/R)	182.5	116.9
	軸力(kN/R)	967.0	890.1
	引張鉄筋応力度(N/mm2)	152.7	60.7
【施工時】 設計土水圧(SL)177kPa+100kPa =277kPaの液圧	最大曲げモーメント(kN・m/R)	197.6	31.2
	軸力(kN/R)	867.5	1,270.0
	引張鉄筋応力度(N/mm2)	193.3	引張領域無し

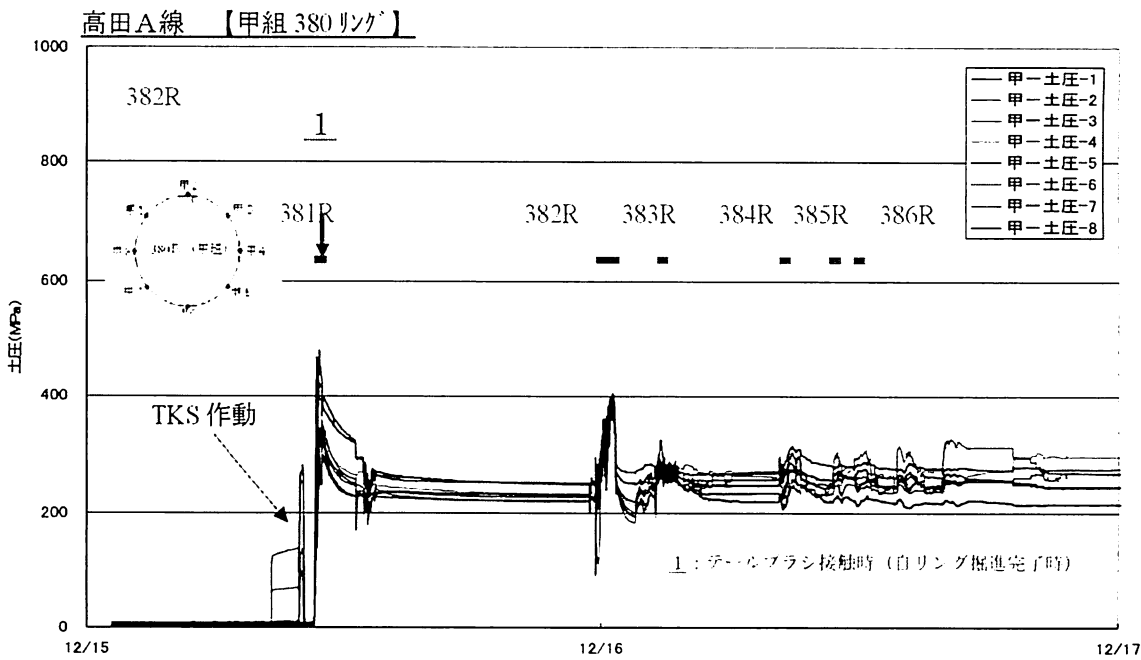


図-15 マシンテール脱出時の土圧計時系列変化(13 号線高田 A 線)

9. まとめ

一般的な円形断面の場合、液圧分布荷重は曲げモーメントを抑える方向である。しかし、複合円形断面の場合は、液圧分布の荷重（未固結の裏込め注入）が曲げモーメントを大きくする方向に作用するため、施工時荷重に留意する必要がある。

本工事においては、C セグメントの曲げモーメントおよび鉄筋の引張り応力度は、計測結果から施工時荷重を見込まない設計値を一時的に上回ったが、施工時荷重を考慮した設計計算値とはほぼ一致した。このような複合円形におけるセグメント設計時には、弱点となるスプリング部の曲率設定が大きく影響するため、特に裏込め注入等の施工時荷重を考慮した設計が重要となる。また、曲率の大小で掘削断面の変化により直接経済性に影響を与えるため、セグメントの型別に補強で対応する等、各種の検討が必要となる。

さらに、施工面においては、裏込め注入圧力を注入率および注入圧力による測定を行い、必要以上の圧力がかからないよう適切な管理をすることが重要となる。

今後、裏込め注入圧力の影響を検討する場合、前後のセグメントの影響をどのように評価するかが重要であり、テールブラシのばね定数や、半固結の裏込め注入の強度を把握することが今後の課題である。

参考文献

- 1)高橋正郎，大塚努，藤沼愛，小泉淳：シールドのテールシールがセグメントに与える影響に関する研究，土木学会論文集 F1 特集号，vol.66，pp109-120，2010

(2012. 9. 3 受付)

A report of the shield tunnel construction in Yurakucho Line belong Kotakemukaihara to Senkawa improvement work

Satoshi Ito,Tsukasa Shimada,Atsushi Hase,Susumu Saitou andTouru Yamagami

Tokyo Metro planned the installation of the contact line crossings to eliminate the cross plane. This is intended to ensure reliable transportation in Fukutoshin Line and Yurakucho Line. We adopted a single-track tunnel of an oval section of 320m and constructed it by the mud pressure shield method. At the time of desing, we predicted that the segments of each spring portion will generate a large bending period, because each section of the tunnel is an oblong an oval section. There we analyzed the sectional force that will happen into load at the time of construction. Also, we checked the safety of the tunnel.

In this report we have shown the comparative results of this analysis and measurement of construction.