

大深度、急曲線、急勾配シールドの施工

SHIELD TUNNEL OVERCOMING SHARP CURVES AND STEEP GRADIENT UNDER HIGH WATER PRESSURE

岡田久延[※]・岸 孝雄[※]・吉田良三^{※※}・藤塚豊裕^{※※}

Hisanobu OKADA, Takao KISHI, Ryoza YOSHIDA and Toyohiro FUJITSUKA

Urban shield tunnel tend to be excavated deeper and deeper recently, because of underground space utilities effectively. So it is expected large depth and steep gradient tunnel to increase in future.

This report describes the construction plan and results of overcoming sharp curves and steep gradient under high water pressure by slurry type shield driving method.

KEYWORDS: Shield tunnel, Large Depth, High water pressure, Sharp curve, Steep gradient

1. はじめに

大阪市内の電力需要は、情報化の進展、高層ビルの建設などに伴って拡大を続けており、関西電力(株)では、これらに対応するため電力供給量の確保と電圧階級の簡素化による送電ロスの低減を目的として、大阪府北部より50万ボルトの超高压送電線を洞道方式による市内への直接導入を進めている。

西梅田ルートは、淀川南部の豊崎地区から国道2号線出入橋の共同溝に至る延長約3.3kmのシールド工事であり、このうち、当工区の「西梅田付近管路新設工事第2工区」は、大淀発進立坑より出入橋到達立坑までのトンネルを築造するものである。(図-1参照)

本報告は、シールドを掘進するにあたり施工条件に即して検討した、施工の概要と結果について述べる。

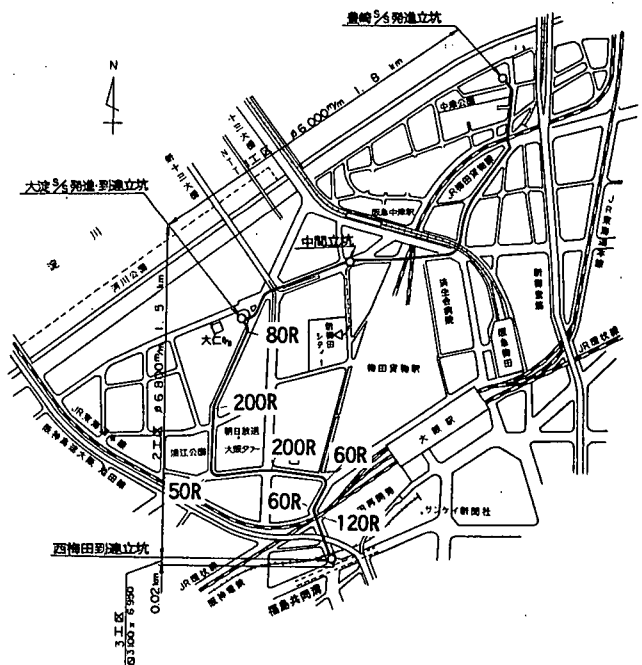


図-1 位置図

※ 正会員 関西電力(株)中央送変電建設事務所

※※ 正会員 佐藤・大成・三井・大豊共同企業体

2. 工事概要

本工事は、セグメント外径 $\phi 8,000\text{mm}$ （シールド外径 $\phi 8,180\text{mm}$ ）、延長約 1.5kmの泥水加圧式シールド工事で、掘進ルート付近には、大深度地下道路が計画されていることから、シールドの土被りは66mに及び、最大地下水圧は 7kgf/cm^2 を超える。平面線形は60m以上の土被りで $R=50$ 、60mの曲線があり、高地下水圧下での急曲線施工となっている。縦断線形は、発進直後に下り 7.2%と最深部より到達に向けて上り20%の急勾配があり、シールド通過位置の地盤条件も急勾配で高低差が大きいことより、掘進する土質が多岐にわたるという厳しい施工条件となっている。

土質は大略GL-25mを境として沖積層と洪積層に分かれ（図-2参照）、沖積層の上半はN値1～7のシルト質砂、下半はN値3以下の粘土層が厚く堆積しており軟弱である。洪積層はシルト分を比較的多く含む粘性土層と砂礫層の互層をなし、最深部付近の粘性土層でN値は18程度、砂礫層では60を超える。洪積砂礫層は、周辺構造物の支持層として「天満砂礫層」呼ばれ、礫径は $\phi 80\text{mm}$ 程度が主体であるが、立坑施工時に 400mmの玉石を確認している。

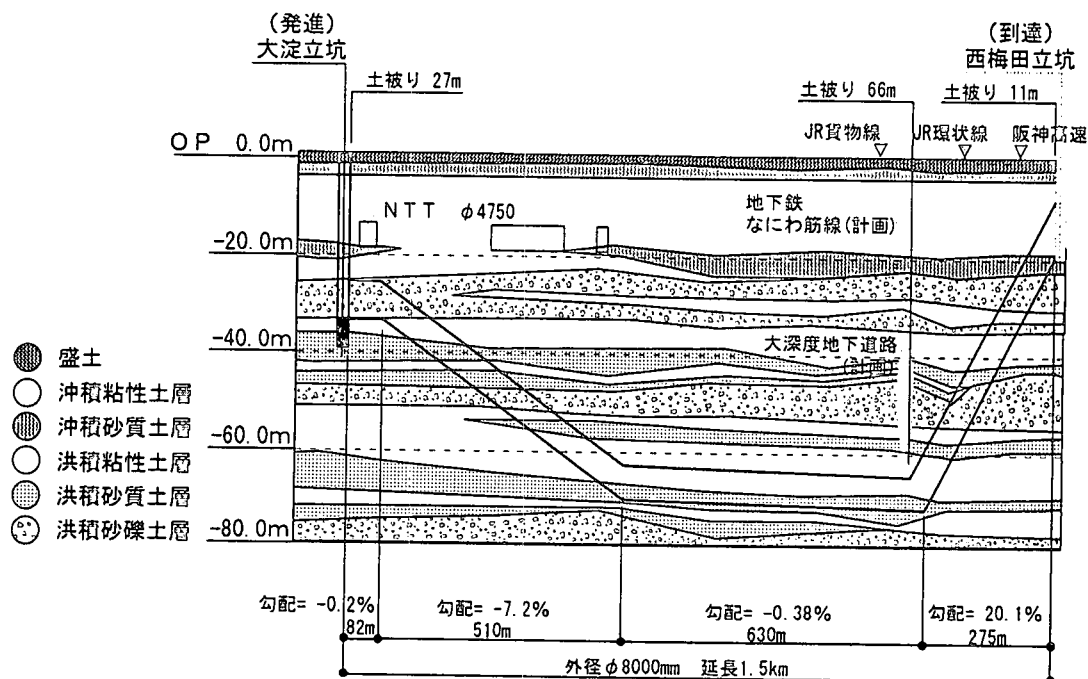


図-2 地質縦断面図

3. 問題点と検討課題

本工事のシールド施工は、高水圧下での急曲線、急勾配に加え、多様な土層を掘進するため、各種の施工条件に即した検討が必要になる。次に検討事項の概要を示す。

- ・ 7kgf/cm^2 を超える高水圧下に対応できるシールド機やセグメントの止水性や安全性の確保。
- ・ 最深部の土被り66mから11mまでの高低差55mを、20%の急勾配で上ることによる切羽の安定確保およびセグメントなどの資材の搬送方法。
- ・ 高水圧下での、曲線半径 $R=50\text{m}$ 、60mという、8m級のシールドにとって極めて厳しい急曲線での安全な施工。

4. 施工計画

4・1 シールド仕様 (図-3 参照)

a) 装備推力

7kgf/cm²をこえる水圧と、曲線施工時のジャッキ使用率を考慮し、装備推力を8,700tf (単位面積当たり166tf/m²)とした。

b) カッターヘッド

洪積粘性土層を通過するため、粘性土の付着防止を重視し、開口率は泥水式としては若干大きい23%とした。開口幅は同じく付着防止と礫の取込から33cmとした。

チャンバー内でも粘性土の付着が想定されるため、チャンバー内の泥水流を粘性流体解析によりシミュレートし、流速の遅い部分にはアジテーター、循環管および散水管を設置した。中間支持ビームは円形や楕円形状とし、付着の少ない構造とした。

カッター軸受けシールは、U型シール各4段と4条リップ型シール1段を配備し、最大耐圧15kgf/cm²対応出来る構造とした。

c) カッタービット

カッタービットには、従来から用いられているE5材に加え、耐磨耗性が高くすでに砂礫層掘進で耐久性を実証している長距離対応のE3材を併用し、更に、新素材のE2材を搭載し耐久性についての実証確認を行うこととした。母材(シャンク材)の保護にも新方式で実績を有している超硬分散硬化肉盛を用い、耐久性を高めている。

施工途中のカッタービットの摩耗量を管理するため、超音波式2点、光ファイバー式6点、計8点の摩耗検知ビットを設置した。

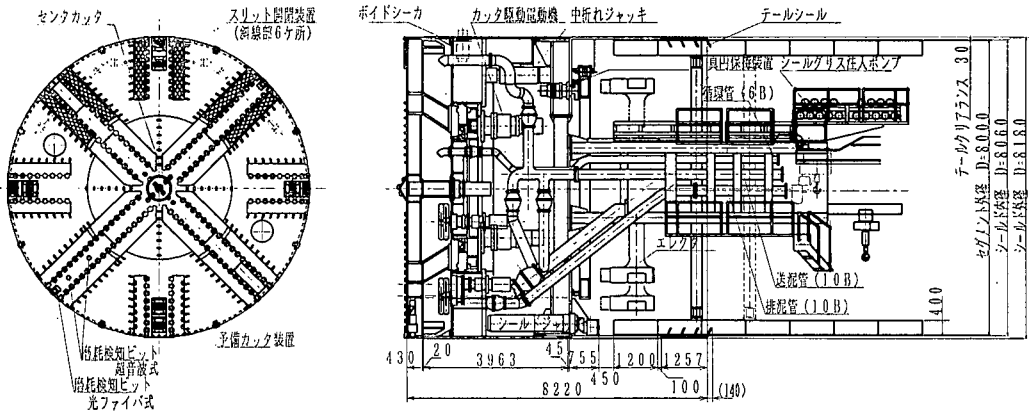


図-3 シールド機概要図

d) 中折れ機構

縦断曲線と平面曲線に対応するため、上下左右方向対応の中折れ機構を装備した。中折れ角度は左右方向に4.2°、上下方向に2.0°としている。高水圧対応として、中折れシールは2段とし、屈曲追従性能の高いゴム製中空山形シールを採用した。これは強い弾性反発力により、当たり面に高い接面応力を発生させ、高水圧の止水性を確保するものである。

e) テールシール

7kgf/cm²を超える高水圧と長距離掘進の条件より、テールシールは4段装備し、安全性を高めた。

テールシールを4段にすると、テール長が長くなり急曲線の施工には不利となる。そのため、急曲線R=50、60mでは後述のように、セグメントを縮小径にしている。縮小径セグメントを用いると、

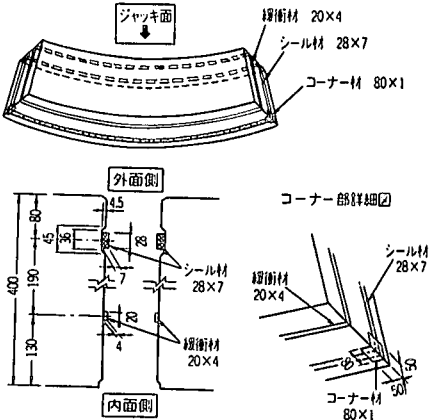
テールクリアランスが大きくなるため、止水性を保持するためには、テールシール長を伸ばす必要があるが、逆に、耐圧性能は低下する。そこで、テールシールの強度と耐久性を向上するため、ワイヤブラシの間に補強鉄板を挟み込み、内側保護鉄板を4枚の段付き構造とした。又、耐圧性、耐摩耗性を充分発揮させるため、テールシールグリスの自動給脂装置（各段間11箇所×3段、計33箇所）を装備した。

4・2 セグメント

セグメントは、 $R=120\text{m}$ 以下の曲線部でダクタイトルセグメントを、その他の区間でコンクリートセグメントを使用した。分割はどちらも8分割で、K型セグメントには、高水圧に対応可能な構造である軸方向挿入型を採用した。また、発進側と到達側には、管路の地震などの発生による曲げ、伸縮、せん断などの応力および変位の吸収に優れた伸縮可撓継手のセグメントを採用した。（表－1 参照）

表－1 使用セグメント種別一覧表

	外 径 内 径 (mm)	厚さ (mm)	幅 (mm)	テーパ ー量 (mm)	テーパ ー： ストレ ート比
直線・曲線 $R=200\text{m}$ コンクリート	8,000 7,200	400	1,200	74	$R=200\text{m}$ 2:1
曲線 $R=80、120\text{m}$ ダクタイトル	8,000 7,300	350	800	104	$R=80\text{m}$ 4:1 $R=120\text{m}$ 1:1
曲線 $R=50、60\text{m}$ ダクタイトル	7,960 7,300	330	600	123	$R=50\text{m}$ 4:1 $R=60\text{m}$ 2:1
発進部、到達部 可撓セグメント	8,000 7,200	400	1,000	—	—

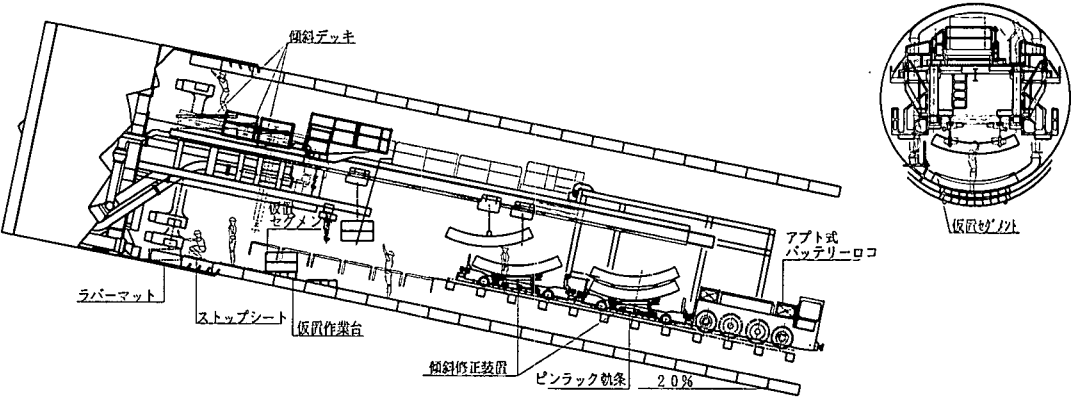


図－4 セグメントシール構造図

セグメントシール材は、所定の設計泥水圧に対し、条件を施工時（初期接面時）および供用時（水膨潤時）に分け、止水実験を 10kgf/cm^2 まで行い仕様を決定した。シール材には、3 倍型水膨張性弾性ゴムを使用した。（図－4 参照）

4・3 急勾配掘進

急勾配対応の軌条方式としてワイヤー牽引方式、トラック方式、アプト式軌道方式などの比較検討を行い、急勾配区間での安全性、平坦区間での施工効率、曲線区間への追従性を考慮した結果、ピンラック軌条で可変速かつ独立した安全装置を装備した13 t アプト式サーボロコを採用した。



図－5 急勾配区間施工図

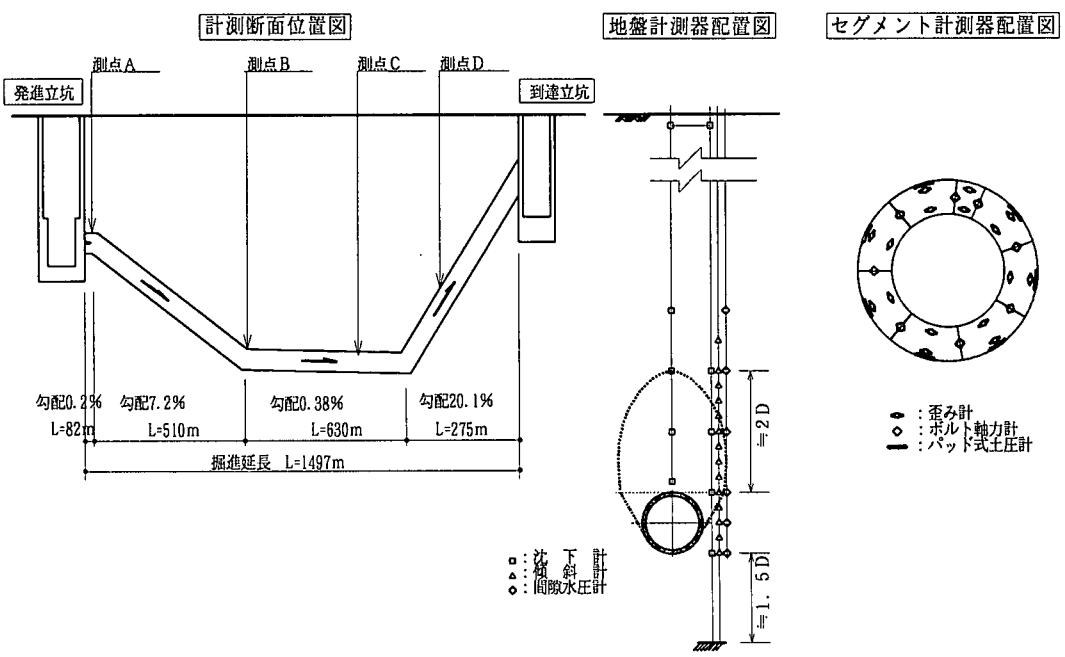
セグメント搬送台車には、8 t 積貫通制動器付セグメント台車を使用する。台車には、バッテリーロコと切り離された場合、自動的に制動が働く逆作動油圧ブレーキを装備している。

20%の急勾配部では、台車が切羽に到着後、台座を20%の傾斜にリフトアップして水平に修正する油圧式の傾斜修正装置を装備、セグメント吊り上げ時の振れによるセグメント損傷防止や作業者の安全性の向上を図っている。（図－5 参照）

4・4 計 測

前例のない大深度シールドであり、施工の品質と安全性を確保するため、計測可能な主要地点に計測断面を設け地中内計測とセグメント計測を実施した。計測データは掘進管理データと同時に収集して、掘進状況と地盤・トンネル挙動の相関性を分析する。

計測は、地盤計測とセグメント計測を行った。図－6 に計測断面位置、地盤計測器配置図、セグメント計測器配置図を示す。



図－6 計測器配置図

5. 施工実績

5・1 掘進実績

主要な掘進データを表－2 に示す。下り7.2%と上り20%を深度別に比較すると、掘進速度はあまり変化は見受けられないが、同深度での切羽水圧や総推力は若干ではあるが、下り勾配に比べ 5～10%程度上り勾配の方が高い数値を示しているのがわかる。

表－2 主要掘進データ一覧表

		切羽水圧(kgf/cm ²)		総推力(tf)		掘進速度(mm/分)	
		下り7.2%	上り20%	下り7.2%	上り20%	下り7.2%	上り20%
土被り	主要土質						
GL-20m	沖積砂質	—	2.8	—	2,920	—	24
-30m	洪積粘土	3.7	4.1	2,990	3,030	23	21
-40m	洪積砂質	4.7	4.9	3,640	3,520	26	27
-50m	洪積砂礫	5.8	6.3	4,240	4,500	24	25
-60m	洪積粘土	6.5	6.6	4,240	4,530	21	20
最深度	洪積粘土	—	7.1	—	4,550	—	24

次に、泥水品質および掘進速度を洪積層と沖積層の場合で比較を行うと、掘進土質によって値が変化しているのがわかる。（表－3参照）

シールドの日進量は、一般部（下り7.2%、平坦部）で平均 7～8m、急勾配部になると平均 6～7mであった。これは、急勾配部でのセグメントの運搬や各種設備の移動・設置等に時間を要したためである。月毎の掘進量は、初期掘進時で平均47m、本掘進時で平均156m、上り勾配部で平均120mという実績であった。（表－4参照）

表－3 泥水管理実績値

	土 質	目標値	実 績 値	
			洪積層	沖積層
泥水比重	粘性土	1.15以上	1.18～1.24	1.15～1.20
	砂質土	1.20以上	1.21～1.26	1.22～1.26
	砂 礫	1.25以上	1.25～1.32	—
泥水粘性	粘性土	25～30秒	22～28秒	22～28秒
	砂質土	30～35秒	27～33秒	27～35秒
	砂 礫	35～40秒	31～35秒	—
掘進速度	粘性土	22±3 mm	21～25mm	21～26mm
	砂質土	25±3 mm	23～27mm	23～27mm
	砂 礫	25±3 mm	23～30mm	—

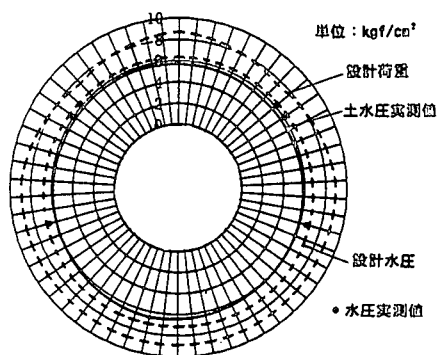
表－4 シールド日進量

	一 般 部		急勾配部	
	平 均	最 大	平 均	最 大
RCセグメント	8.2m	12.0m	7.1m	9.6m
B = 1200mm	(6.9R)	(10R)	(5.9R)	(8R)
DCセグメント	7.1m	7.2m	5.8m	7.2m
B = 600mm	(11.8R)	(12R)	(9.7R)	(12R)
DCセグメント	—	—	6.0m	6.4m
B = 800mm	—	—	(7.5R)	(8R)
※平均月進量：初期掘進時				47m／月
本掘進時（下り、平坦部）				156m／月
上り勾配部（20%）				120m／月

テールシールグリス消費量は、直線区間で平均1.8ℓ/㎡、急曲線区間(R = 50、60m)は平均3.5ℓ/㎡であった。これは、急曲線区間では縮小径のセグメントを使用していることより、テールシールの止水性向上の為、グリス供給量を増したことによる。

5・2 計測結果

セグメントに作用している土水圧の実測値は、セグメントがシールドテールから抜け出した時点では裏込め注入圧が主体であるが、次第に残留圧が地山になじみ（2～4週間後）、現在4ヶ月が経過しているが、概ね設計荷重を下回り間隙水圧実測値とほぼ同等の値を示している。これは、水圧が支配的な荷重要因として働いており、現在、土圧の作用はまだ認められないと想定できる。セグメントにかかる発生応力については、全て圧縮側に作用しており、「曲げ」よりも「軸圧縮力」が大きい状態であり、リングの真円性を保っていると考えられる。（図－7参照）



図－7 土水圧実測値

6. おわりに

7kgf/cm²を超える高水圧下での急曲線を含んだ掘進、さらに、20%の急勾配部での施工、これらどれをとっても厳しい条件である。施工計画では安全性の確保を主体に検討を行った結果、シールドの施工は平成7年8月に発進し、平成8年9月に無事到達した。このような大深度でも安全に施工できることが確認でき、今後、更に増加するであろう大深度、急勾配施工に寄与出来ることを願う次第である。