

2. 工事概要

本工事はセグメント外径 $\phi 5,000\text{mm}$ （シールド外径 $\phi 5,150\text{mm}$ ）、掘進延長 $3,949\text{m}$ を1機の泥土圧シールドで掘削するものである。シールドの通過地域は、桑名市北西部に発達する標高 50m 程度の桑名丘陵から中間部の嘉例川沿いの開析谷を通過し、終点付近の段丘に至る標高差の大きい地形である。

シールドの平面線形は $R=80\text{m}$ の区間が11ヶ所、 $R=130\sim 2,000\text{m}$ の区間が9ヶ所と曲線が多い線形となっている。また、縦断勾配は発進立坑から $3,380\text{m}$ の最深部までが $0.30\sim 2.49\%$ の下り勾配、その後 3.0% の上り勾配となり、到達立坑直前で 20% の急勾配区間がある。

掘削対象地盤は全線が第三紀の東海層群で図-2に示すように固結シルト層、砂質土層、砂礫層の互層であるが、その約 70% が固結シルト層となっている。また、発進直後の約 300m 間は $\phi 450\text{mm}$ の大礫混りの砂礫層が存在する。さらに、掘削対象地盤の大半が N 値 50 以上の硬質地盤である。なお、シールドの土被りは $15\sim 45\text{m}$ 、最大地下水压は 25kN/m^2 である。

洞道の断面は発進立坑から嘉例川横断部手前の $1,290\text{m}$ 区間が二次覆工省略でセグメント内径が $\phi 4,440\text{mm}$ （セグメント厚： 280mm ）、それ以後到達までが二次覆工施工でセグメント内径が $\phi 4,600\text{mm}$ （セグメント厚： 200mm ）となっている。使用セグメントは $R=80\text{m}$ 区間が幅 750mm のコンクリート平板形セグメント、換気孔区間が幅 $1,000\text{mm}$ のスチールセグメントを使用する以外は全て幅 $1,200\text{mm}$ のほぞ付きセグメントを使用している。なお、ほぞ付きセグメントの内、厚さ 280mm のものは振動締固めによる従来製法の製品であるが、厚さ 200mm のものは遠心成形製法による製品を採用した。また、平板形セグメントは全て韓国製を採用した。

3. 問題点と課題

本工事のシールド施工は、掘進延長が約 4km の長距離、硬質地盤を所定の期間（当初予定で 18 ヶ月）で掘進するための高速施工対策に加え、シールドの耐久性を向上させるための対策が必要になる。以下に本シールドの技術検討課題の概要を示す。

- 1) 長距離施工に対してのカッタービット、テールシール、スクリーコンベヤー、シールド本体の摩耗対策および軸受部、ギヤ・ピニオン、カッター土砂シール、カッターモータ等の各機器の寿命対策。

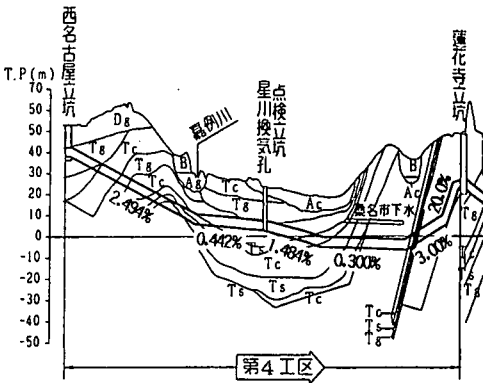


図-2 地質縦断面図

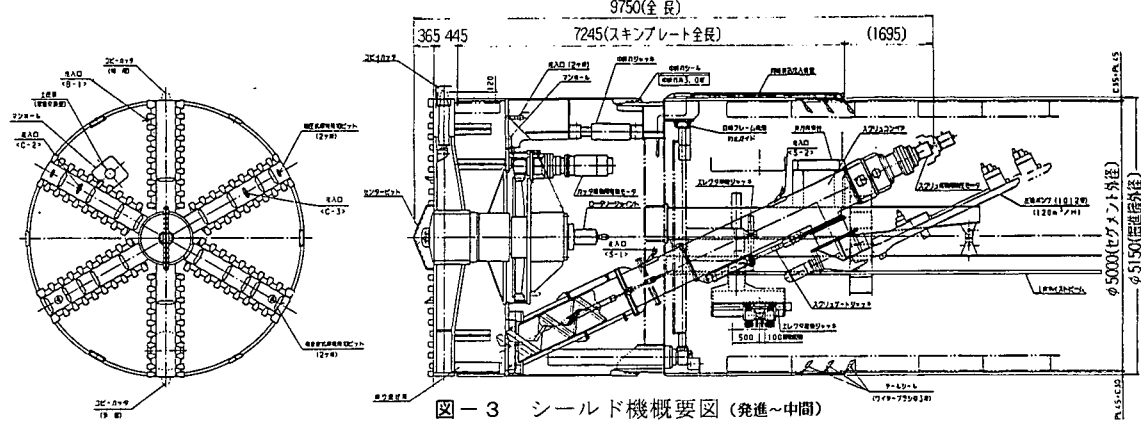


図-3 シールド機概要図（発進～中間）

- 2) 高速施工を実現するため掘進速度 60mm/minを可能とする設備およびカッター回転の制御方法、セグメント組立時間の短縮化。
- 3) 最大礫径 $\phi 450\text{mm}$ の砂礫層と固結シルト層という相反する地盤に対応するスクリーコンベヤーとビットの選定と配置。
- 4) 硬質シルト地盤 ($qu=500\sim 600\text{N/cm}^2$) を長距離掘進するシールドの耐久性管理方法。
- 5) 長距離の坑内を効率良く、安全に掘削土や資材を搬送する方法。

4. 長距離、高速、硬質地盤施工対策

表－1 シールド主要諸元

4.1 シールド仕様 (図－3、表－1 参照)

発進直後に存在する大礫混り砂礫とその後の固結シルトに対処するため、発進立坑～中間点検坑 (以下「中間前」と略す) と点検坑～到達立坑 (以下「中間後」と略す) に分けて各種対策を施した。

(1) 長距離掘進対策

a) 磨耗対策

メインビットは高低差30mmの高低差配置ビットを採用し、ビットの長寿命化を図った。(一次 (高) ビットは各軌跡3条配置の内、2条に配置) また、中間点検坑でのビット交換の作業性を考慮してメインビットはボルト脱着式とした。

テールシールは3段装備とすることにより機内側2段は交換可能な構造とした。さらに、自動給脂システムを採用することによりテールシールの長寿命化を図った。

スクリーコンベヤーは先端ゲートとスクリースライド機構を採用してメンテナンスが可能な構造とした。カッター外周部、フード先端部、スクリーフライト部等は硬化肉盛を増加し、耐磨耗性を強化した。

b) 機器寿命対策

機器の寿命検討は、本工事の稼働時間が1,650～2,200時間になることからこれを条件に行った。

カッター支持方式は、土砂シールの摺動距離が少ないセンターシャフト支持方式とし、軸受部およびギヤ・ピニオンは、設定した稼働時間に応じたベアリング容量の確保と歯幅の選定を行った。また、カッターモーターは坑内での途中交換が困難なため、稼働時間を3,000時間として寿命検討を行い装備を決定した。ジャッキはシールドの寿命が掘進距離で3,000m程度、油圧ポンプ、油圧モーターは寿命設計が1,000～2,000時間であることから、必要に応じてオーバーホールまたは交換を行うことにした。

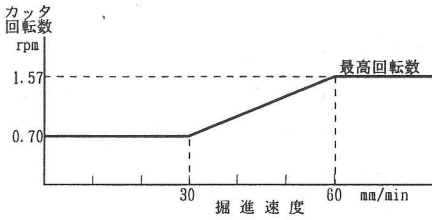
(2) 高速掘進対策

パワーユニットは掘進速度60mm/minに対応するように掘進系を30→45kWに大容量化するとともに、15kWのセグメント組立用のパワーユニットを追加することにより、セグメント組立時のジャッキの伸縮を高速で行える仕様としている。その結果、掘進とセグメント組立に要する時間は、掘進速度が45mm/minの一般シールドに比べて1リング当たり約18分短縮した。また、掘進速度の高速化に伴い自動的にビットの切り込み深さを一定に保つため、掘進速度が30mm/min以上で図－4のようにカッター回転数をインバータ制御により可変速になるシステムを採用している。

(3) 大礫掘削対策

中間前は $\phi 450\text{mm}$ の大礫掘削対策として、リボン式スクリーコンベヤーを採用した。また、メインビッ

シールド			
シールド外径	$\phi 5,150\text{mm}$		
全長	9,750mm		
スキムプレート全長	7,245mm		
シールドジャッキ	150t × 350kg/cnf × 1750mm × 20本		
中折れジャッキ	150t × 350kg/cnf × 305mm × 16本		
シールドジャッキ伸縮速度	掘進時	71mm/min (全数作動時)	
	高速引	1564mm/min (5本3時)	
パワーユニット	油圧ポンプ	62.4L/min × 350kg/cnf	33.0L/min × 240kg/cnf
	電動機	45kW × 4P × 440V	15kW × 4P × 440V
	台数	1台	1台
カッター			
カッター	駆動方式	電動駆動 (インバータ制御)	
	常用	271.7t・m (トルク係数1.98)	203.9t・m (トルク係数1.49)
	最大	407.5t・m (トルク係数2.98)	305.8t・m (トルク係数2.23)
カッター回転数	掘進時	1.1 rpm	1.5 rpm
	トルク×回転数	2.93t・m × 10.0rpm	2.2t・m × 13.3rpm
カッター駆動装置	電動機	30kW × 4P × 440V	
	台数	11台	

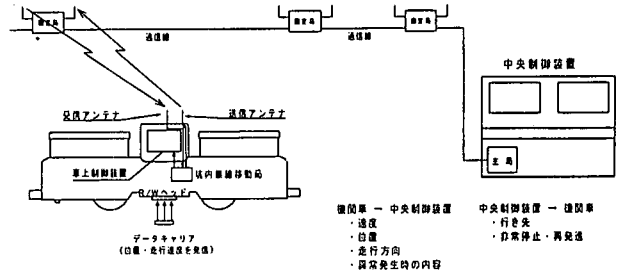


図－4 カッターモーターインバータ制御

トの超硬チップは耐衝撃性の高いE 5チップ（インサートタイプ）を採用するとともに、保護ビットとしてシェルビットをメインビットの軌跡に対して1個の割合でメインビットよりも70mm先行させてカッタースパークに取り付けた。

（4）硬質地盤掘進対策

シールドの主要構造であるシールドフレーム、カッター軸受支持部にかかる負荷を把握するため、軸受支持部に歪み計と変位計を取付け、掘進時にこの部分の応力管理を行うことにした。



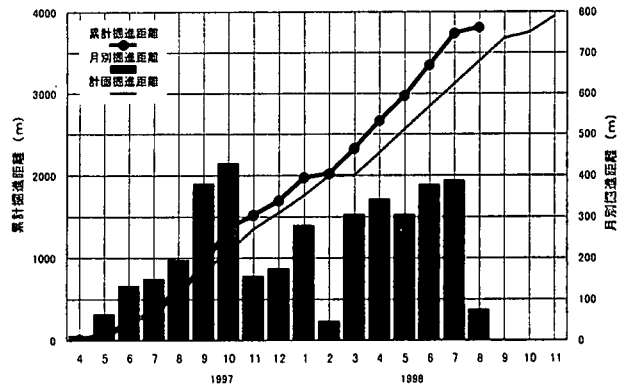
図－5 トンネル自動搬送システム概念図

4.2 坑内搬送システム（図－5 参照）

掘削ズリや資機材等の坑内運搬は最大4編成の搬送列車を稼働させるため、長距離坑内運行の安全確保および作業員の作業環境改善を目的としてトンネル自動搬送システム^{1) 2)}を導入した。本システムは坑内に約200m間隔で設置した無線固定局と機関車に設置した移動局間でデータの交換を行う無線中継方式を採用し、無人機関車が中央制御室からの指令により自動で発進・停止を行い、各列車が適切な車間距離を保ちながら単線軌条を走行し、約800m間隔に設けた離合区間ですれ違うように運転するものである。

4.3 セグメント仕様

本工事の直線部および曲線半径が130m以上の区間のセグメントは、一次覆工の高速施工を目的にほぞ付きセグメントを採用している。ほぞ付きセグメントは一般的な平板形セグメントに比べてボルト本数が少ないため、組立時間の短縮が可能である。



図－6 一次覆工進捗図

5. 施工実績

5.1 工事進捗

シールド掘進開始以降の進捗を図－6に示す。平成10年8月末までの掘進延長は3,811m（3,467リング）であり、実稼働（302日）1日当たりの掘進延長は約12.6mとなっている。

発進後約300m区間の大礫混り砂礫層の掘進は月進130～150m、掘進速度は35～65mm/minであった。その後は砂質土と固結シルトの互層地盤となり、平成9年10月には主として砂質土層の掘進で月進428mを記録した。また、11～12月は固結シルト層の掘進で月進が160～180mであった。

中間点検坑には平成10年2月始めに到達し、シールドの点検整備を実施後、3月始めに再発進した。再発進後は主に固結シルト層の掘進で、3～7月は月進が305～390mと順調な進行であった。8～9月は上り20%の急勾配施工の設備変更と掘進（6～8リング/日）のため、月進距離が少なくなっている。8月末現在、残りの掘進距離は約130mとなっており、当初計画より約2ヶ月早く9月末には到達の見込みである。

5.2 掘進速度（表－2 参照）

掘進速度の実績は砂質地盤が平均60mm/min、固結シルトが20～40mm/min程度と掘削地盤により大きな差があった。特に固結シルトでは、硬質地盤掘進対策として計測を行ったカッター支持軸受部の応力度が管理値

まで上昇するため、掘進速度を10～20mm/minに低下させることがあった。

5.3 セグメント組立時間

ほぞ付きセグメントの所要組立時間は図-7に示すように概ね15～20分であった。ただし、掘進開始当初はほぞ付きセグメントの組立てに不慣れであったため、30～60分を要していた。幅750mmの平板形セグメントの組立時間も15～25分で殆ど差が無かったが、ほぞ付きセグメントは掘進後のボルト増し締めが不要なため、作業効率は平板形セグメントよりも良好といえる。

表-2 地盤別主要掘進データ

土 層	記 号	変形係数 E (NN/m^2)	湿潤密度 ρ_t (kN/m^3)	一軸圧縮強度 qu (N/cm^2)	せん断抵抗角 ϕ ($^\circ$)	総推力 F (kN)	掘進力 T (kN-m)	掘進速度 v (mm/min)
砂 礫 層	To-g	30～300	2.0		34～39	17～23	910～2090	35～65
砂 質 土 層	To-s, Tg-s	30～300	1.9～2.0		29～40	12～18	910～1970	50～65
固結シルト層	To-c, Tg-c	30～300	1.9～2.1	40～600		13～17	1970～2530	20～40

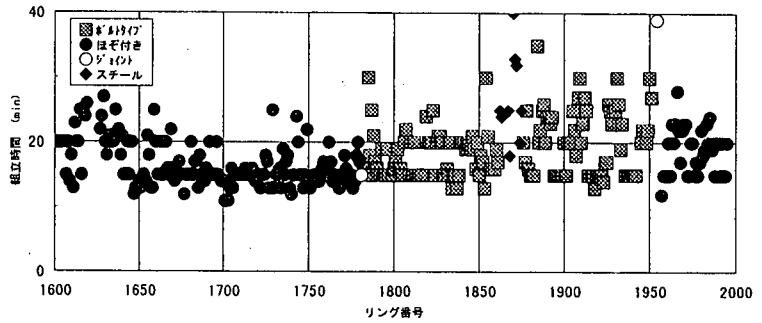


図-7 セグメント組立時間実績図

6. シールドの点検整備

中間点検坑でシールドの各部の点検、摩耗測定および装備品交換を行った。主要装備品(図-8)の点検整備内容および摩耗測定結果は以下の通りである。

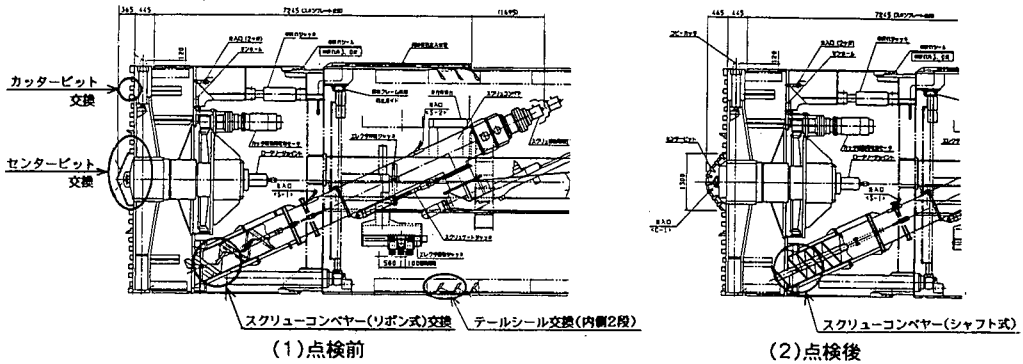


図-8 シールドの点検整備

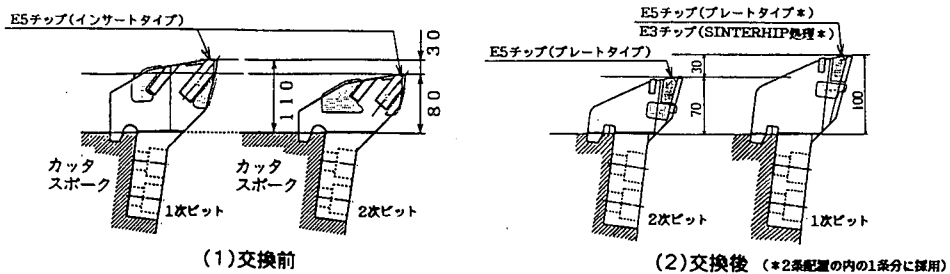


図-9 カッタービットの交換

6.1 テールシール

3段装備のテールシールの内、機内側の2段を交換した。交換したシールの摩耗は少なく、自動給脂装置の効果があったと考えられる。

6.2 カッタービット

メインビットチップの最大摩耗量は1次ビットの高さが4.2mm、幅が3.6mm、2次ビットの高さが2.6mm、幅が1.7mmであり、予測の40mmに比べて少い摩耗量であった。これはシェルビットの保護効果があったためと考えられる。また、シェルビットの最大摩耗量は高さが50mm、厚さが40mmであった。この測定結果からメインビットの余寿命は十分あると判断されたが、中間前のビットは大礫対応仕様であったため、固結シルト層での切削に優れる新規ビットに全て交換した。(図-9参照) ビット交換後は交換前に比べてカッタートルクと推力が低下したことから、掘削地盤に適したビット形状選定の重要性を確認した。

6.3 スクリューコンベヤー

スクリューコンベヤーは大礫対策としてリボン式を装備していたため、砂質土層および固結シルト層での排土効率を向上させるためシャフト付きスクリューコンベヤーに交換した。取り外したリボンフライトの最先端部最大摩耗量は予測摩耗量(22mm)の2倍以上の52mmであった。このように予測より大きな摩耗が生じた原因は、フライトの回転数が予測では約396,000回転であったのに対し、実績では約893,000回転であったためと考えられ、長距離施工においては計画時の機器使用条件設定が重要であることを確認した。

6.4 シールド本体摩耗測定結果

カッターフードスキンプレート(板厚=45mm)の摩耗量は3.8~1.4mm、隔壁(板厚=60mm)の摩耗量は5.0~0.7mmであった。フードスキンプレート、隔壁とも許容摩耗量(=20mm)以下であり、中間前の約2kmの掘進に対して異常な摩耗は見られないことから、中間後の約2kmの掘進に十分耐えられると判断した。

一方、カッター外周リングは図-10に示すような摩耗が確認された。フードスキンプレート先端とカッター外周リングの間は50mmの隙間があり、カッター外周に存在する掘削土はこの隙間からカッターチャンパー内に流れ込むため、このような形態の摩耗になったと考えられる。摩耗が大きかった部分は、硬化肉盛りを全周にわたり約300mm間隔で施した。

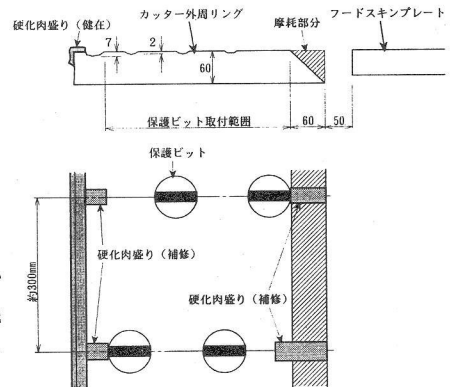


図-10 カッター外周リング摩耗状況

7. おわりに

掘進延長が約4kmでその全線がN値50以上の硬質地盤を高速施工(約18ヶ月)するという条件の超長距離シールドの掘進は順調に行われており、当初工程より2ヶ月早く到達できる見込みである。この結果から、施工計画時の長距離、高速、硬質地盤掘進対策が妥当なものであったと評価できる。本シールドの施工実績が今後増加するであろう同種のシールド工事の計画および施工の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 高橋、村上：中継式無線通信によるトンネル自動搬送システム，トンネル技術協会「第41回施工体験発表会」
- 2) 大坂、長谷川、村上：トンネル自動搬送システム(ジオ・シャトル)，土木学会「最新の施工技術-1998.11」