

# 岩盤対応型泥水シールド機の設計と施工

## —南熱海幹線管渠建設工事その3—

杉浦章夫・内藤正流・漆崎達也

国内においてTBMでの長距離推進の施工実績は既に多くの報告があるが、今回は南熱海幹線管渠建設工事で採用された岩盤対応型泥水シールド機の設計プロセスから実施工に至るまでを紹介する。

キーワード：シールド工法、泥水シールド、長距離推進、岩盤、高被圧水

### 1. はじめに

南熱海幹線管渠建設工事は熱海市下水道事業計画に基づき、熱海処理区のうち南熱海地区（多賀地区；260 ha）の汚水を上多賀の南熱海中継ポンプ場（建設中）から和田浜南町の浄水管理センター（熱海港脇；稼働中）へ送水するための下水道管渠を新設する工事である（全長3,800 m）。

本報文の「その3」工事はそのうち約3,000 mを岩盤対応型泥水式シールド工法で、熱海後樂園ホテル近接地から景德院近接道路まで片押し施工する工事である。

### 2. 計画概要

#### (1) 設計内容

約3,000 mの岩盤内を推進掘削し、トンネル内に内径φ450 mmの自然流下管2条を布設する。

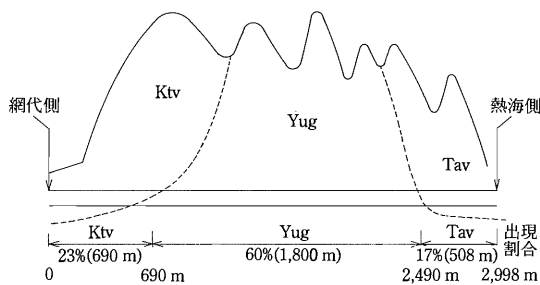
#### (2) 土質

トンネル対象土質は、主として多賀火山噴出物(Tav)、上多賀火山噴出物(Ktv)、湯ヶ島層群(Yug)の3つの層からなり、地質縦断模式図(図一1参照)に示す中央部に湯ヶ島層群、熱海側(発進側)に多賀火山噴出物、上多賀側(到達側)に上多賀火山噴出物が分布している。

それぞれの地質の特徴を以下に示す。

##### (a) 多賀火山噴出物(Tav)

トンネル延長に占める割合は、約17%、凝灰岩・安山岩からなり、強度のばらつき顕著、一軸圧縮強度60 MPaクラスの地山。



図一1 地質縦断模式図参照

##### (b) 上多賀火山噴出物(Ktv)

トンネル延長に占める割合約23%、凝灰岩・流紋岩からなり、一軸圧縮強度40 MPaクラスの地山。

##### (c) 湯ヶ島層群(Yug)

トンネル延長に占める割合約60%、凝灰岩・凝灰角礫岩からなり、部分的に固結、一軸圧縮強度30 MPaクラスの地山。

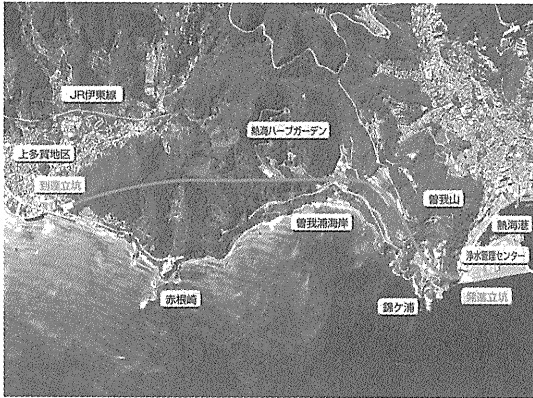
また、電気探査の結果、いくつかの破碎帯や透水層と不透水層の分布が想定され、トンネル掘削時に出水が、予想される。湧水圧試験の結果では、トンネル通過断面付近で0.7 MPaの高水圧が測定されている。

#### (3) 工法の選定

(2)節で述べた厳しい施工条件を克服するため、当工事では地山の保持や覆工を即時に実施でき、推進力が大きく確保できる岩盤対応型泥水シールド工法を採用した。

#### (4) 線形計画

平面線形設定にあたっては、温泉源や所有者不明の土地を避けた(写真一1参照)。



写真—1 平面図参照

### (5) シールド機の設計条件

今回の工事の特徴から、シールド機の設計条件を以下にまとめる。

- ・山岳掘進（土被り最大 210m）
  - 中間立孔が設けられないことにより片押し掘進
- ・3,000 m の長距離施工
  - 掘進機内からカッタビット交換が可能な構造
- ・大半が岩盤掘進
- ・高被圧水（0.7 MPa）区間の出現
- ・複数の破碎帯の出現
- ・半径 150 m の曲線施工

シールド機設計の詳細は 3 章に記述する。

### (6) セグメントの設計条件

- ・内径  $\phi 450$  mm, 自然流下管 2 条を布設
- ・将来管理（人が作業出来る）を考慮
- ・高被圧水（0.7 MPa）区間の出現を考慮
- ・コスト縮減の観点から二次覆工を省略する。

以上により内径  $\phi 2,200$  mm, 外径  $\phi 2,550$  mm (桁高 175 mm), 軸方向挿入型 RC セグメントとした。

また、二次覆工の省略により以下の設計を考慮した。

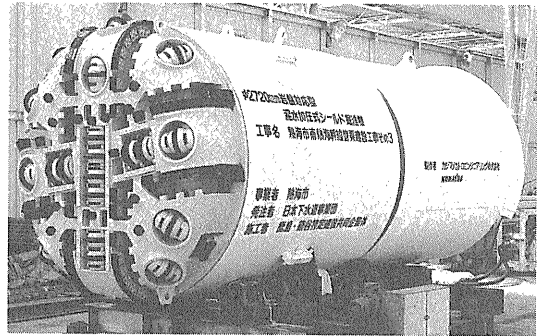
- ・セグメントの防食
  - 被りの確保, 露出鋼材には防食処理, ボルトボックスの無収縮モルタル（落下の防止）による穴埋め
- ・セグメントの防水・止水
  - セグメントシール（1 重）, コーキング

## 3. シールド機の設計

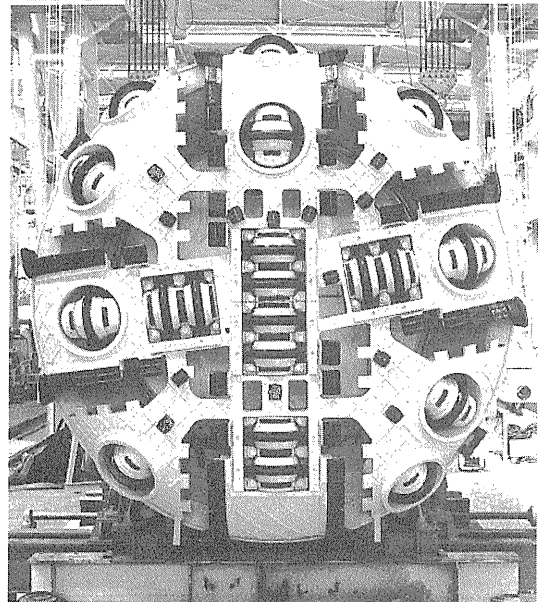
一般に長距離岩盤掘削といえば山岳トンネル用の TBM が代表格である。しかし本工事は、最大地下水圧 0.7 MPa が予想され、また破碎帯を通過する可能性があるなど、TBM では掘進困難となる要素が考えられた。そこで本機は TBM の設計思想を取入れた、長距離掘進対応の泥水加圧式シールドマシンとした。以下に、重点的に考慮した設計部分を説明する。

### (1) カッタビット配置

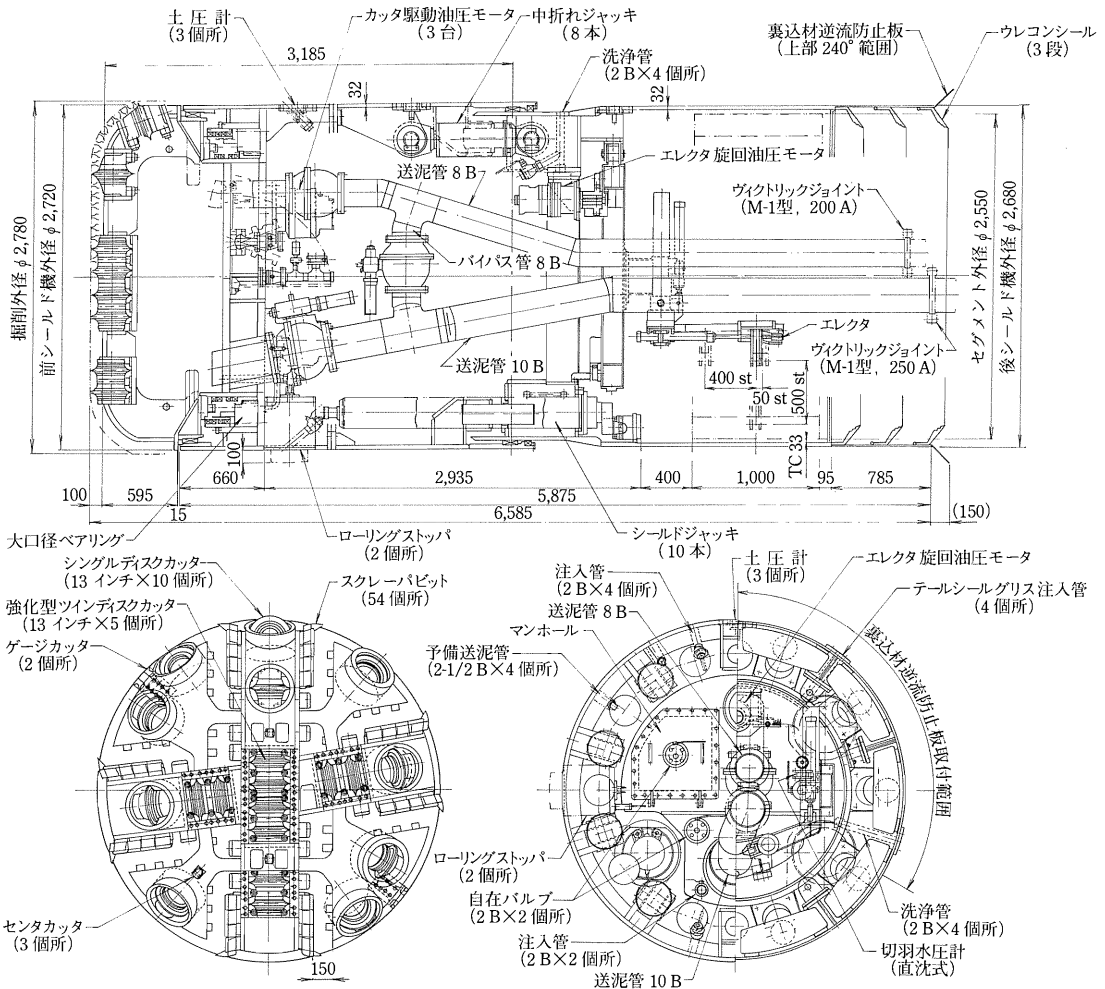
本シールド機はドーム型のカッタフェイスに、13 インチディスクカッタを全面配置した。



写真—2 泥水加圧式シールド掘進機



写真—3 岩盤対応型カッタフェイス



シールド本体		カッタ		
外 径	前側 φ 2,720 mm 後側 φ 2,680 mm	回 転 数	4.7, 5.9 rpm	
機 長	6,585 mm	トルク	常用 425 kN·m (α=21.1) (43.4 tf·m, α=2.1) 最大 540 kN·m (α=26.8) (55.1 tf·m, α=2.7)	
シールド本体長さ	5,875 mm	パワ ー 電 動 機	45 kW×4 P×400 V×50 Hz×7 台	
シールドジャッキ	980 kN(100 tf)×st 1,450 mm×34.3 MPa(350 kgf/cm <sup>2</sup> )×10 本	油圧ポンプ	78.99 l/min×29.4, 23.1 MPa(300, 236 kgf/cm <sup>2</sup> )×7 台	
総推力×推進速度	9,800 kN (1,000 tf) ×56 mm/min	油 圧 モ ー タ	18.4, 23.3 kN·m (1,876, 2,382 tf·m) ×23.1, 29.4 MPa(236, 300 kgf/cm <sup>2</sup> )×3 台	
切羽単位面積当り推力	1,685.6 kN/m <sup>2</sup> (172 tf/m <sup>2</sup> )	エ レ ク タ		
パワ ー 電 動 機	11 kW×4 P×400 V×50 Hz×1 台	回 転 数	2.0 rpm	
油圧ポンプ	16.1 l/min×34.3 MPa (350 kgf/cm <sup>2</sup> )×1 台	つり 荷 重	730 kg	
最大中折れ角度	左右各 2.0° 上下各 1.0°	昇 降 ジャッキ	26.46 kN(2.7 tf)×st 500 mm×13.7 MPa(140 kgf/cm <sup>2</sup> )×2 本	
中折れ装置	ジャッキ	1,176 kN(120 tf)×st 200 mm×34.3 MPa(350 kgf/cm <sup>2</sup> )×8 本	摺動ジャッキ	16.06 kN(1.7 tf)×st 450 mm×13.7 MPa(140 kgf/cm <sup>2</sup> )×2 本
	パワ ー 電 動 機	エレクタ用パワーユニットと共用	減速機付油圧モータ	2.6 kN·m(0.27 tf·m)×20.5 MPa(210 kgf/cm <sup>2</sup> )×1 台
油圧ポンプ	パワ ー 電 動 機		11 kW×4 P×400 V×50 Hz×1 台	
ロスリッパ	ジャッキ	595 kN(60.7 tf)×st 100 mm×13.7 MPa(140 kgf/cm <sup>2</sup> )×2 本	油圧ポンプ	16.1 l/min×34.3 MPa (350 kgf/cm <sup>2</sup> )×1 台
	パワ ー 電 動 機	エレクタ用パワーユニットと共用		
油圧ポンプ				

図-2 シールドマシン全体組立て図参照

外周部：シングルディスクカッタ 10個  
 内周部：強化型ツインディスクカッタ 5個  
 カッタは左右とも回転するので、スクレーパービットも両回転対応とした（写真-2、写真-3参照）。

(2) カッタ回転速度とトルク

カッタの回転は油圧モータ駆動によって、通常のシールド機よりも高い回転数の5.9 r.p.m.を発生させる。これにより本工事で予想される岩盤層を20~30 mm/minで掘削出来る計算となる。

トルクが不足した場合は、回転速度を落としてトルクを上げることが出来る機構とした。

表一 1 カッタ回転速度とトルク

トルク	回転数
常用 425 kN・m ( $\alpha=21.1$ )	5.9 r.p.m.
最大 540 kN・m ( $\alpha=26.8$ )	4.7 r.p.m.

### (3) カッタ土砂シール

本工事は最大地下水圧 0.7 MPa を想定しているが、この水圧でカッタを高速回転させた場合、駆動部土砂シールに負担がかかり過ぎるため、切羽水圧を管理して 0.3 MPa 以下に調整しながら掘削することとした。

高速回転するカッタ駆動部の土砂シールは発熱や異常摩耗が懸念される。この対策として、本機は 2 台のグリスポンプを搭載し、より負担の大きい外周カッタシールにはその内の 1 台を専用として連続給脂することとした。また発熱を感知するためにシール温度センサも装備した。

### (4) ローリングストッパジャッキ

自立した岩盤地層ではスキンプレートの外周摩擦が得られにくい。さらに本機はカッタ回転が速く、マシン本体がカッタ回転力によってローリングしやすい。これを抑えるために前胴左右に各 1 本ローリングストッパジャッキを装備した。このジャッキをスキンプレート半径方向に張出し、地山に押付けることでローリング抵抗が得られる。

またカッタが岩盤を切削するときは、マシン本体が揺動したり大きな振動が発生するため、この装置を張り出して抑制することが出来る。

### (5) スキンプレート外径

本機は後胴スキンプレート外径を、前胴に比べ小さくした。

前胴： $\phi 2,720$  mm

後胴： $\phi 2,680$  mm

これは断層破碎帯において、マシン本体と坑壁との間にずりを噛込みにくい構造とすることで、本体が地山に拘束されるのを防止するためである。

### (6) 中折機構

破碎帯では、スキンプレートが外部から締付けられ、推進抵抗が大きくなるのが懸念された。これを回避するため、カーブに使用する中折ジャッキを 200 mm 全数伸縮することが出来るように設計した。

シールドジャッキ推力のみではスキンプレート全長の摩擦に勝てないとき、まず中折ジャッキを縮めながら後胴をシールドジャッキ推力で前進させる。つまり尺取虫のように掘進することで、前胴の抵抗と後胴の抵抗を分けることが出来る。

また破碎帯をいち早く察知するために、マシン頂部 3 箇所に土圧計を取付け、上載荷重の変化を監視出来るようにした。

### (7) テール止水

3,000 m 中間立坑無しの長距離掘進ではテールシールの摩耗等により、止水能力の低下が起こり得る。本工事は最大地下水圧 0.7 MPa が予想され、テール部の長期止水が重要となる。

そこで本機ではワイヤブラシに発泡ウレタンを充填したウレコンシールを 3 段装備した。ウレコンシールは高水圧下でも十分能力を発揮し、対摩耗性能も従来のワイヤブラシに比べ格段に向上している。また、シール内に裏込め材が侵入固結せず、柔軟性が無くなる心配もないことから、長距離施工向きと言える。

更にこの補完としてテールグリス自動注入設備を搭載し、シール段間のグリス室に常に補給することで、シールの摩耗低減、止水補助、裏込め材侵入防止を計った。

### (8) シールド総合管理システム

岩盤掘削ではディスクカッタで破碎したずりをチャンバ内から、いかに早く排泥管に取込むかがカッタライフに大きく影響を与える。そのためには送排泥水の流速や比重を的確に管理する必要がある。

そこで本機は、シールドマシン掘進と流体輸送設備、泥水処理設備のモニタリング及び操作を、オペレータが中央制御室で同時に行うことのできるシステムを導入した。

## 4. 施工実績

### (1) 初期掘進

本工事の初期掘進は平成13年3月12日より6月1日まで次の4段階に分けて実施した（初期掘進長＝後続台車総延長＝150 m）。

第1段階：マシン買入～クラッシャ設備関連台車投入

第2段階：～流体設備関連台車投入

第3段階：～シールド設備関連台車投入

第4段階：～電気・計装・冷房設備関連台車投入

それぞれの段階における進捗実績を表-2にまとめて示す。

表-2 初期掘進施工実績

	掘進延長 (m)	所要方数 (方)	一方当り平均進捗 (m/方)
第1段階	20	34	0.6
第2段階	45	18	2.5
第3段階	32	12	2.7
第4段階	53	18	2.9
合計	150	82	1.8

ここで、第1段階の進捗が極端に落ちているのは、発進部の土被りが80 cmと極端に浅く、また亀裂の多い岩層であり掘削時に泥水の墳発が予想されたため、掘削土の搬出方法を流体輸送から、ずりトロ方式に変更したことによる。

第2段階以降は切羽が安定して泥水圧の保持が可能となったため、通常の流体輸送による掘削に切替えた。

初期掘進時の代表的な掘進データを表-3に示す。

表-3 初期掘進データ（代表値）

掘進速度 (mm/mim)	15
総推力 (kN)	2,000
カッタトルク (kN・m)	250
カッタ回転数 (r.p.m.)	1.6

### (2) 本掘進

平成13年6月2日より本掘進工を開始した。

平成14年3月末現在で、全長3,007 mのうち2,040 mの掘進を終えている。

本掘進時の代表的な掘進データを表-4に、サイクルタイムを表-5にそれぞれ示す。

表-4 本掘進データ（代表値）

掘進速度 (mm/mim)	25
総推力 (kN)	3,000
カッタトルク (kN・m)	200
カッタ回転数 (r.p.m.)	2.8

表-5 本掘進標準サイクルタイム  
(1 m 当り)

シールド掘進 (min)	40
セグメント組立 (min)	25
その他 (配管延長等) (min)	10
合計 (min)	75

本掘進工の現時点までの日進量の平均は8.0 m/日(4.0 m/方)、月進量の平均は189 m/月(最大223 m/月)である。

掘進速度は地山の性状に大きく左右される。一般に断層(破碎帯)境界付近は変成作用により粘土化層があることが多く、本工事もこれまでに2度遭遇した。粘土化層はディスクカッタによる切削ができず、面板が閉塞状態になってカッタトルク及び推力が増大するため、このときの掘進速度は2~3 mm/mimと極端に低下した。

また、岩盤掘削時の掘進速度はカッタ回転数と岩盤の強度に依存する。これまでの掘進実績よりカッタ回転数3 r.p.m.程度で20~30 mm/minの経済的な掘進速度が得られていることから岩盤の平均強度を推定すると $\sigma=30$  MPaとなる。これは、2章の「計画概要」で述べた本シールドの主要掘進層である湯ヶ島層群の強度とほぼ一致する。

地下水圧についてはこれまでのところ最大でも0.3 MPa程度であり、直接掘進に大きな影響は出ていない。

### (3) ディスクカッタ交換

岩盤層の掘削に伴いディスクカッタは摩耗する。本工事では、カッタの摩耗測定を定期的に実施し、必要と判断された段階でこれまでに計2回(外周部のみ1回、全周1回)のカッタ交換を行った。

カッタの摩耗測定及び交換作業は人がシールド機チャンバ内に入って行うため、地下水圧の低い箇所マシンを止め、ハッチを開けて安全を確認の後に行った。

ディスクカッタ交換の実績を表-6に示す。

表-6 ディスクカッタ交換実績

交換種類	交換カッタ数(個)	所要方数
全周交換	20*	8
外周部交換	10	5

※ 内周部はツインディスクカッター→シングルディスクカッタに換算した値

(4) その他設備の保守管理工

岩ずりの輸送に伴い排泥管内面の摩耗がはげしく、定期的に回転させたがそれでも穴明が頻発し、掘進中断を余儀なくされた。また一次処理機の振動篩の網への負担も大きく、定期的な交換作業が必要であった。

5. おわりに

平成13年3月より掘進を開始し、平成14年10月到達を目標として、この報文が掲載されるころには、最終段階に入っていると考えられる、平成14年3月現在まで大きなトラブルもなく掘進を進めてきたが、最後まで気を許すことなく、無事

に工事を終わらせたいと考えている。

J C M A

[筆者紹介]

杉浦 章夫(すぎうら あきお)  
日本下水道事業団  
静岡工事事務所  
専門役



内齒 正流(うちぞの まさる)  
鹿島・熊谷特定建設共同企業体  
所長



漆崎 達也(うるしざき たつや)  
鹿島・熊谷特定建設共同企業体  
工事課長



# 絵で見る安全マニュアル

## 〈建築工事編〉

本書は実際に発生した事故例を専門のマンガ家により、とても解いやすく表現している、新入社員の安全教育テキストとしてご活用下さい。

要因と正しい作業例

- ・物動式クレーン
- ・電動工具
- ・油圧ショベル
- ・基礎工事用機械
- ・高所作業車
- ・貨物自動車

A5版 70頁 定価650円(消費税込) 送料270円

### 社団法人 日本建設機械化協会

東京都港区芝公園3-5-8(機械振興会館) TEL03-3433-1501 FAX03-3432-0289