

高水圧下の巨礫互層地盤における泥水シールド工法及び方向制御の問題点

板垣 茂 男* 竹 迫 嘉 之**
平 野 文 雄*** 小 川 正 雄****

要 約

松江市に建設中の下水幹線管渠工事において、高被圧滞水下の巨礫層を含む互層地盤を泥水シールドで施工した。その実施中に巨礫、被圧水、方向制御等にかんむトラブルが多発した。特に方向制御については、シールド通過位置が沖積層と洪積層の境目付近にあたり、上半部分がシルト質粘土、下半部分が砂礫層と互いに物理的にも水理的にも相反する地質であった。

本稿では、これらの地質的要因により生じたと思われる泥水シールドにおける方向制御の問題を中心にする。

目 次

- § 1. 概 要
- § 2. 地質概要
- § 3. シールド機械、設備計画の実績及び今後の問題点
- § 4. 方向制御について
- § 5. あとがき

§ 1. 概 要

島根県では、流域別下水道整備総合計画の一環として松江市を中心とした地域に、矢道湖流域下水道工事が昭和49年より実行に移されている。現在、日本下水道事業団が島根県より下水処理場施設および幹線管渠の一部を受託事業として工事を実施中である。特に幹線管渠工事では、泥水シールド工法を採用し、高被圧滞水下の巨礫層を掘削し、その2工事では沈砂池到達前30mの位置にある止水鋼矢板前面で、前例のない泥水シールドを手掘シールドに改造し、沈砂池の止水鋼矢板、連続地中壁のアースアンカー等を切断する工法を採用した。

施工延長	947 m	{	その1工事	664 m
			その2工事	283 m

掘削径	3,500 mm
セグメント外径	3,350 mm
仕上り内径	2,600 mm
土被り	平均 16 m

* 中国(支)松江(出)所長
** 中国(支)松江(出)所長代理
*** 中国(支)松江(出)工事係長
**** 中国(支)松江(出)

線 形 R=300 m, R=250 m
縦断勾配 0.77‰
工 期 昭和51年 8 月～54年 8 月

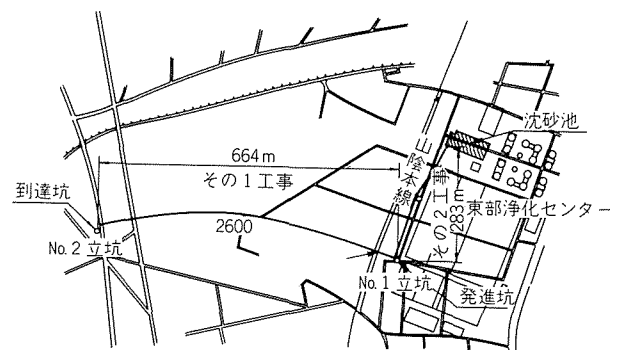


図-1 管渠平面図

§ 2. 地質概要

シールドの通過する地帯は、図-2のごとく地表面付近は薄い砂質の表土に覆われ沖積層の中央付近は、2～6 m程度の砂礫層が存在し10～60mm程度の礫が主で、N値は15～30程度であるが含水量が多く透水性、崩壊性に富む。シールド通過位置は、洪積層と沖積層のほぼ境目となる所に位置し非常に不安定である。発進側シールド断面の上半部は、暗灰色を呈するシルト質粘土でN値は3～5程度である。また、下半部は洪積層上部に位置し砂・粘土・砂礫が混在し、N値は10～50以上とばらつきが多く200 mm前後の礫が混入する。到達側では、全断面礫層になり300 mm前後の巨礫が存在しその量もかなり多い。また、ボーリングの個所によっては被圧水が自噴した場所もある。透水係数は 10^{-1} cm/secのオーダーでかなり大量の被圧水が存在する。

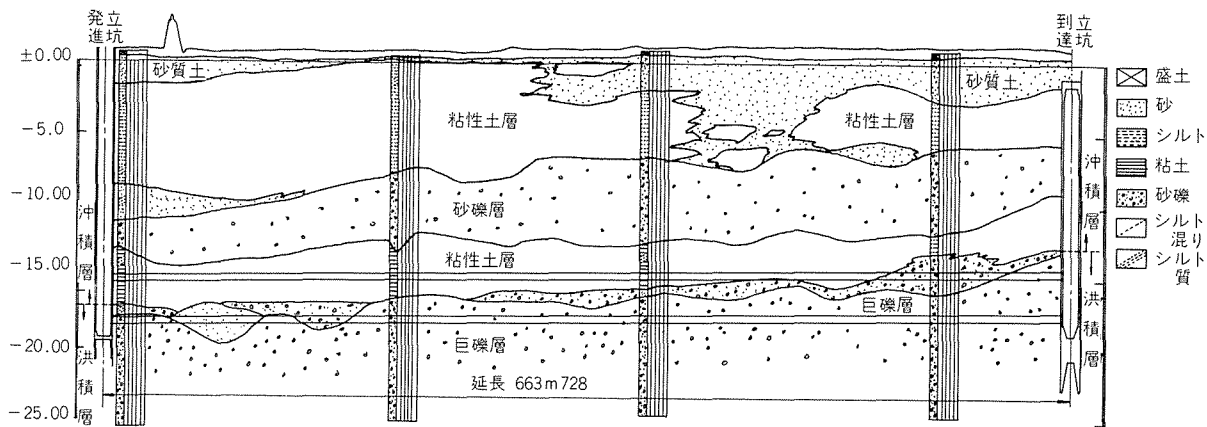


図-2 地質縦断面

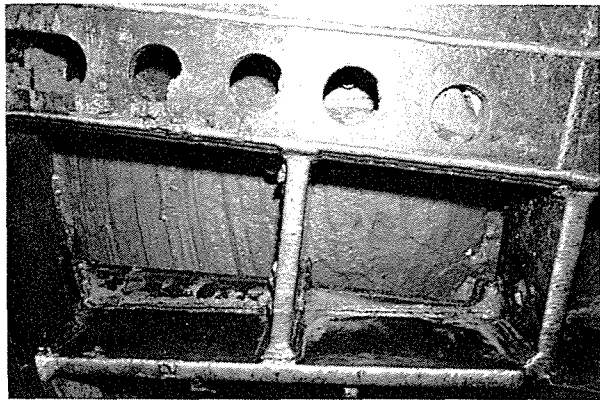


写真-1 切羽状況（上半粘性土）



写真-2 切羽状況（下半砂礫層）

§ 3. シールド機械，設備計画の実績及び今後の問題点

当初の地質調査では，シールド通過地点の礫の大きさは5～60mm程度で所々70～100mm位の礫が点在するとみなされていた。しかし，発進立坑と到達立坑でのベントによる試掘結果より径200～350mmの礫のあることが確認されたため，路線途中地点でもベント試掘を検討したが用地問題によって不可能であった。

これらの調査結果から，径250mm位の玉石が路線の大部分に存在すると想定し施工法を検討した。

- 主な検討事項と結果を列記すると次のとおりである。
- 1) カッターシステムは中心軸支持方式を採用。
 - 2) スリット巾は200～280mmとした。
 - 3) 排泥パイプは10"とした。従って，巨礫の管内輸送のための限界沈澱流速を保つために，送泥流量13m³/minにして4.5m/secの流速を確保した。
 - 4) カッターフェイスの補強及びカッタービット外周に補助ビットを取付けた。
 - 5) テールパッキンは3列にした。

6) アジテーターについて礫層の場合は不要と思われたがシルト質粘土及びシルトにより排泥管入口を閉塞するので，これを防止するためアジテーターで攪拌することにした。

表-1 シールド機械仕様表

名 称		仕 様
シールド	シールドジャッキ 切羽単位面積当り推力 推進速度	80t×1.50S×300kg/cm×12 99.7t/m ² 0～4.7cm（全数作動時）
	パワーユニット 電動機 油圧ポンプ	SF・E 11kW×4P×220V×60Hz×1 FGV15-18/15 18.6l/min×300kg/cm×1
カッター	回転数 回転トルク 旋回油圧モータ	0～1.95rpm～1.24rpm(210kg/cm ² 時) 21t・m at140kg/cm ² 32t・m at210kg/cm ² OHSG20-9N-20 1.9l/rev×368kg・m×140kg/cm ² ×7
	パワーユニット 電動機 油圧ポンプ	SF・E 55kW×6P×220V×60Hz×1 2V-SH2 140kg/cm ² 0～216l/min×1 210kg/cm ² 0～137l/min
	旋 回 比	8.3
アジテーター	回転数 回転トルク 旋回油圧モータ	0～69rpm 268kg・m (140kg/cm ²) OHSG20-7N-20 1.38l/rev×268kg・m×140kg/cm ² ×1
	パワーユニット 電動機 油圧ポンプ	SF・E 30kW×6P×220V×60Hz×1 1V-SH2 0～96l/min×140kg/cm ² ×1

送排泥パイプは、8"パイプと循環パイプ6"×2本で送泥し、排泥はバルクヘッド→10"パイプ→礫除去装置→6"パイプ→P₂ポンプ→6"パイプ→坑外という送排泥方式を採用した。

シールド機械、仕様及び作業工程略図は図-3、表-1、図-4のとおりである。

施工を終え、設備的に感じたことを一覧表にすると表-2のようになる。

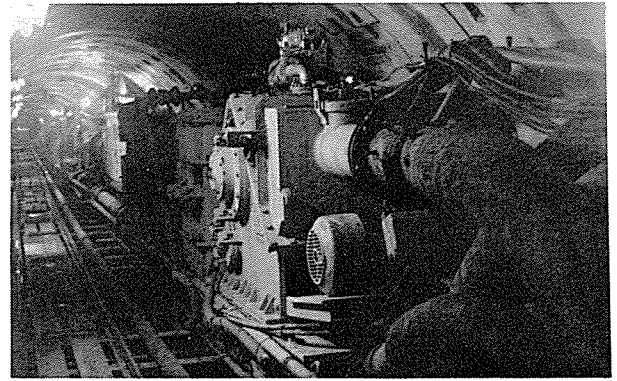


写真-3 坑内全景

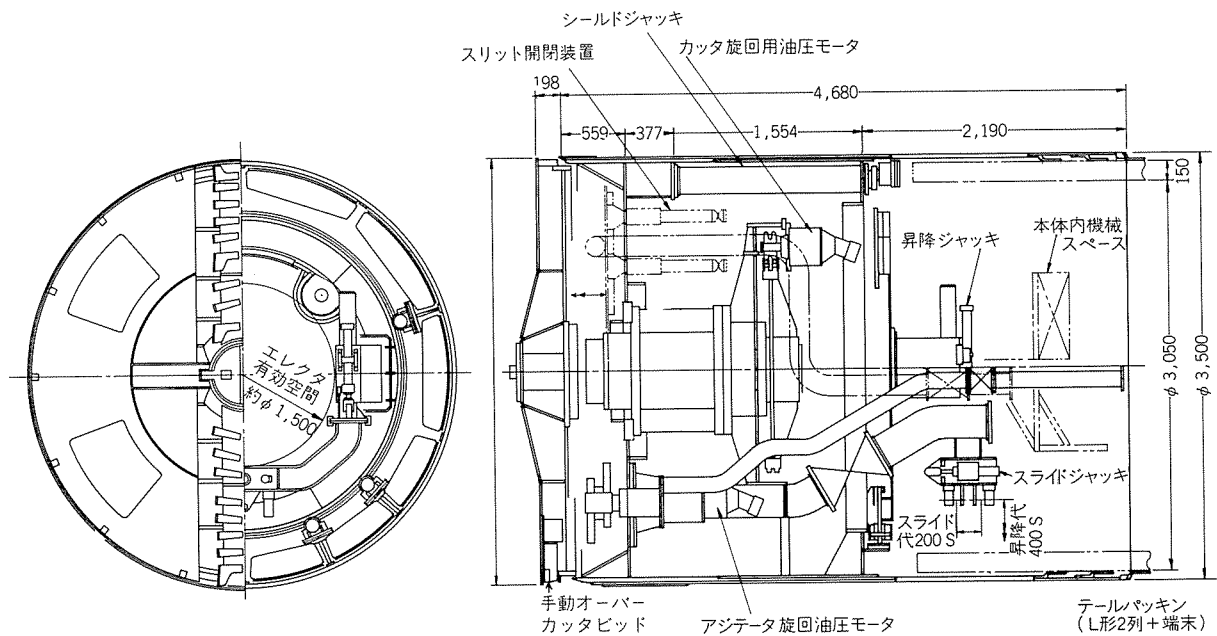


図-3 シールド機械断面図及び正面図

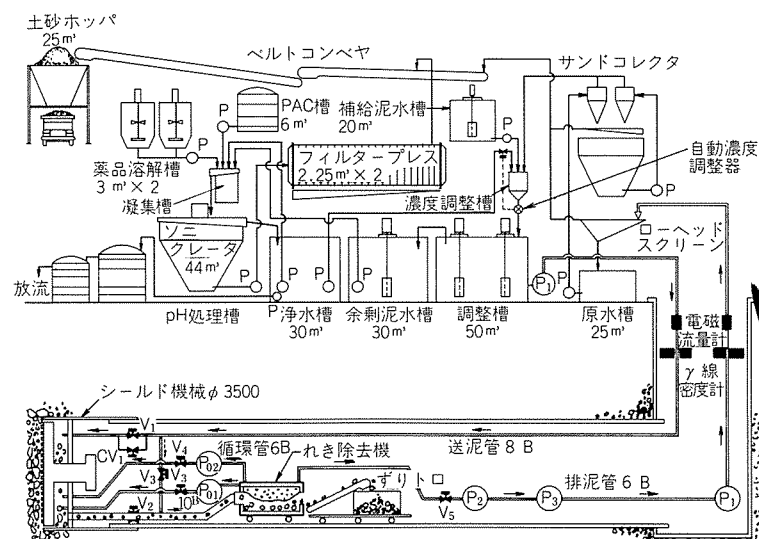


図-4 作業工程略図

表-2 設備検討一覧表

工種	名 称	計 画		施 工 状 況	今 後 の 問 題 点
		検 討 事 項	採 用		
シールド機械	カッターシステム	泥水シールドでの実績、礫泥シールドの実績、スリット開閉装置、シールド機構、最大礫径、礫量から機内スペース等を検討した。	中心軸支持方式	機能的に問題はなかったがトラブルの際機内スペースに問題あった。	シールド機φ3,500㎜で排管泥10'が限度で、これ以上は無理と思われる。一般的に粘性土であればセンターシャフト、礫層で周辺支持が適当と思われる。
	スリット巾	両立坑掘削中出た最大礫径 250 ㎜として検討した。	200～280 ㎜	280 ㎜以上の礫もあったと思われるが掘削断面中のものすべて取込むことができた。	切羽の崩壊を考慮して最大礫径以上に極端に大きくする必要はなく、どちらかと言えば最大礫径がそれ以下(10%程度)にすべきである。
	カッター回転トルク	巨礫泥りの砂礫層を掘削するのでパワーアップを図った。	32'・m at 210kg/cm ²	トラブルが無ければ、この程度のトルクで良いが、もっと大きい礫又は礫注する場合は、トルク不足となる。	カッタースリットより取込めない巨礫がある場合、あるいはシールド機を止めての礫注を必要とする場合には 5 割アップ程度必要と思われる。
	固定ソリ	下部礫層であることより従来の機械より厚めに計画	16 ㎜ 面積 0.8×2.5=2.0 m ²	全工区の 1/3 の粘性土が主体の区間は良好。下半礫層の場合は下降した。	固定ソリの効果を重視して、地質に適したソリ厚とし、全断面同一地質では固定ソリ、互層の場合可動ソリ等を考慮すべきである。
	ジャッキ推力	機械の頭下り傾向については考慮したが、ローリングは重視しなかった。	80'×12本 =960'	推力不足の状況はなかった。	当所では推力に問題なかったが、機械を止めて、周囲に礫注する場合は、もっと推力が必要と思われる。
	方向制御設備	両立坑掘削中、最大の 250 ㎜粒径で考慮した。	ジャッキ本数を下部に集中させた。	機械の下降対策として、ジャッキで、頭部を牽引したため、ローリングを起した。	機械の頭下りを修正するにはソリが効果的であったが、抵抗板はあまり効果がなかった。ローリングはスタビライザーで効果があった。
	排泥設備	両立坑掘削中、最大の 250 ㎜粒径で考慮した。	10' 排泥管 10' 排泥管	10 インチ配管不通過することがしばしばあり、1 リング掘削中 3 回も不通過のものもある。又配管内で閉塞することもしばしばあった。	当所の礫径、礫量であれば、簡易礫取りで有効と思われる。もっと大きく量も多くなると機内礫取りボックス等を考慮すべきである。
	アジテータ	全工区の 1/3 区間にある粘性土を考慮して 6 枚羽根とした。	6 枚羽根 268 ㎜×6'・m	全工区の 1/3 は良好であったが、礫量が多くなるにしたがって礫が咬込み、回転不能となることが、多くなり 4 枚羽根にした。	粘性土では 6 枚、砂礫層では 4 枚程度が適当と思われる。
	テールバックキン	R C セグメントを使用すると摩耗が大きいので取替可能にした。	3 列	R、C セグメントの破片、蛇行等より漏水が激しくなり、途中 1 回取替。シールド材のセグメント外側への、はみ出しにより逸水が多少あった。	セグメント及びシールドの構造、材質を検討して、取替可能にすべきである。
	カッターフェース補強	フェース外周部摩耗対策としてフェース外周にビットを取付けた。	外周埋込ビット 周辺ビット =15本	礫層を通過した際、かなり摩耗したと思われる、到達時には原形をとどめずフェース自体も、かなり摩耗していた。	地質、施工延長によっては、数を増し、形も大きめの方が有効である。
排泥設備	オーバーカッター	取扱いやすい構造で計画	有効長さ 約40 ㎜	途中摩耗が激しく、用をなさなくなり、2 度交換した。	使用回数が多く取換不可能な場合、材質的に一考の余地あり。また土砂の浸入で出入れ不能となるので、密封構造にすべきである。
	礫取り設備	3回/R (0.8 m ² /回) が考えられたので本格的なトロンメルを採用	トロンメル方式	トロンメルは礫量に長時間を要するが確実に故障が少ない。クラッシャーの場合は、連続運転が可能で切羽には良い。	切羽の安定、掘進時間等より現時点では問題もあるが、クラッシャーが有効と思われる。
	排泥管設備	シールド機φ3,500 ㎜程度であると 6'～4' が普通であるが、当所では、8'～10'～6' とした。	送泥=8' 排泥=10'～6'	トラブル発生時 8'～12'～6' も考慮したが補助工法を加えてなんとか掘削できた。	切羽流量(13 m ³ /min)をあまり大きくせず、巨礫を流すに必要な循環流量をバルクヘッドに入れないで、排泥管に入れる等考慮すべきである。
	ポンプ設備	排泥流速を増す為、循環ポンプ2台を設置、排泥ポンプ3台、送泥ポンプ1台とした。	4 枚羽根	クラッシャー使用時、偏平な礫によってポンプ閉塞多発。多少揚程は落ちるが、2 枚羽根に変更して効果的であった。	クラッシャーかトロンメルかによって羽根枚数、及び摩耗を考慮すべきである。
その他の設備	処理設備	泥水処理設備 3 次処理まで可能な設備とした。	余剰泥水 最大時 約12 m ³ /R	計画の倍以上の余剰泥水が出たり、砂分が多い時は、プレスが間に合わない事あり。また細砂が多い場合、サンドコレクターの処理能力が落ちた。	フィルタープレスの能力不足によりたびたび全体工程が左右されることがあった。経済性を考慮すべきであるが多少余裕があるほうがよい。
	排水設備	排水設備 100 R 毎に釜場を設けポンプにて坑外に排出しシクナーに入れた。	坑内4'×10M 6台 立坑4'×30M 2台 坑外4'×10M 1台	下降時、セグメントジョイントから激しく湧水し4'ポンプ2～3台を使用した。圧気により湧水を止めたこともある。	テールシールドおよびセグメントジョイントからの湧水を防止すれば2'ポンプで充分であった。
	裏込設備	掘削延長、作業サイクル経済性より持込方式採用	豆砂利ポンプ持込方式	シールド上半が粘性土で、崩壊性少ない所は有効であったが、砂質土の場合は崩壊を防止する為、LWを裏込注入に併用した。	崩壊性がなければ持込式が経済的であるが、全工区、崩壊性の所では、ゲルタイムのある T A C 工法等を使用すべきである。
	セグメント及びシールド材	テールバックキンの破損を考慮して外型枠でセグメント製作を検討	外 型 枠 ブチルゴム	セグメント及びシールド材は良好な結果を得られたが、セグメントメクラの破損が数回あり、激しく泥水が噴出した。	セグメント端部の破片が、テールシールド内に落ちないよう金網、鉄板を入れると有効。水圧大の所ではメクラの強度も考慮すべきである。
	シールド機外側検知	余掘状況を事前に検知する為、検知棒を設置。	検 知 棒	検知棒は有効であった。	トラブル発生可能性がある場合、検知棒、検知窓等、簡単に外周部を検知できるように考慮すべきである。
	エントランスバックキン	高水圧下での発達なので掘削時の安全を考慮してエントランスバックキンの強度、材質、寸法等を決定した。	エントランス バックキン 1 列	バックキンのメクレ 1 回、破損 1 回あり。あまりバックキンを過信しないこと。押込方法に注意を要する。	水圧1kg/cm ² 以上の場合には、バックキンを 2 重にする等の考慮が必要。また坑門コンクリートの水密性も十分検討すべきである。
初期発達	初期発達	当初、テールウェルにて地下水位を低下させ普通注入を実施の予定であったが、テールウェルでの水位低下不能	スリーブ 注入採用	2kg/cm ² の地下水圧で薬注のみの発達は非常に不安であったが、スリーブ注入工法の採用で発達が可能であった。	透水係数1～10 ⁻³ cm/secの地層では周囲を開けて内部に注入することが大切であり、瞬注も有効である。
	地質調査	φ66 ㎜調査孔、礫径確認が無理であり、ヘッドφ1000 ㎜で調査計画。	ベントノット1000 ㎜	結果的には追加調査し、大型貫入試験も実施した。	建設省発行の広域土質調査結果等を参考にし、巨視的に地質を判断することも重要である。

§ 4. 方向制御について

従来泥水シールドの方向制御は、他のシールド工法に比較して容易とされていたが、当所においては非常に困難であり、莫大な時間と費用を要した。計画路線に沿って正確にシールドを推進させることは、掘削が可能か否かということと同等に重要な検討事項である。

以上のことより当所で発生した蛇行について記述する。

4-1 蛇行状況

発進当初、図-22でも明らかなように20 R程度は下降気味であったが、異形セグメントを使用しジャッキ操作等で回復しえて、240 Rまで順調に掘進できた。しかし190 R付近より砂礫層が急激に上昇し、239 Rでバルクヘッド内に玉石が堆積し、掘進不能となった。

この対策としてアジテーターの改良、スリット開閉装置の改良、水中クラッシャーの導入等を実施し連続運転可能な状態にするのに2ヵ月を要した。掘進再開後3～4 Rは順調に施工できたが242 Rより急にシールドが下降すると共に左蛇行を始めた。また、下部ジャッキのみ使用するので上部より激しく地下水が噴出し、やむなく坑内に0.8～0.9kg/cm²の圧気をかけた。そして248 Rより方向制御ジャッキを使用してシールド機頭部を牽引しながら掘削した（写真-5）。内径3 mの中に10本のワイヤーが交錯し、その内部で常に危険な作業であった。そして掘進完了後、セグメント組立の間、下部ジャッキを抜き、上部ジャッキを張るとシールド機頭部が2 cm程度沈下する傾向があったので牽引状態のままセグメントを組立てた。

このような作業を根気よく繰返し260 R～275 Rまで、下り量を20cm以内に維持することができた。しかし275 R付近より再度下向が始まったので、検討の結果、泥水濃度・掘進速度の厳重管理、抵抗板の設置、シールド機頭部への薬液注入、カウンターウエイト載荷による浮力抑制を行なうとともに、カッターフェイス・機械本体へのモルタル等の付着物の調査を実施し、スリット巾縮小等を実施した。しかし、これらは一時的な下降防止に効果はあったが抜本的対策とはなり得ず、シールド機も27 cm下り、ピッチング角度-50分（機械頭部で5 cm下り）となり、このまま掘進していくと、ますます機械の頭が下降する懸念があった。

以上のような対策を実施したが、坑内からの対策には安全上からも限界があり、やむなく地上よりCCP工法による地盤改良を実施し、290 R～320 R間で一気にシールド機を下向きから上向きに転ずることができた。しかし、地盤改良を実施しても、牽引ジャッキを使用しなければ、下向き気味であった。しかも300 R付近より急激



写真-4 蛇行区間掘進状況

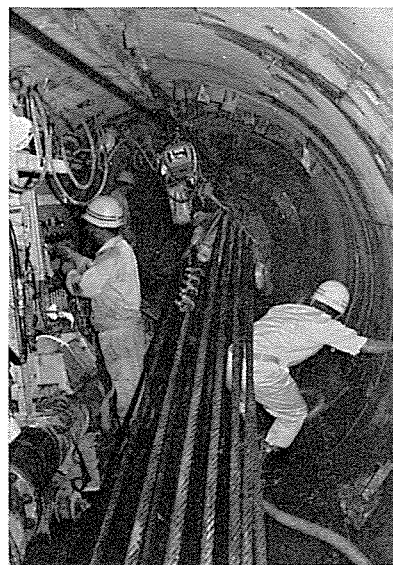


写真-5 シールド機牽引状況

にローリングし、テールバックインからの漏水も激しかったことと、以後曲線部にさしかかりさらに下向が予想されたため257 Rで大規模な機械の改造を実施した。

改造内容は、安全上特に問題のある牽引ワイヤーを撤去するために固定ソリを取付け、ローリングを修正するためにスタビライザーを取付け、テールからの漏水を防止するためテールバックインの交換を実施した。また下降原因の究明及び固定ソリ厚の検討資料を得るため、切羽調査、現地の地耐力試験（図-16）を行った。改造は前もって薬液注入した場所に機械を押し込み、坑内圧気を併用して作業を進めたが、圧気内の溶接は溶材に空気が入り止水が困難であったので薬注を併用して止水した。以後、曲線部におけるCCPによる地盤改良と固定ソリの効果で多少の蛇行はあったが巨礫に悩まされながら掘進することができた。

4-2 蛇行対策

蛇行対策の実施事項は表-3に示すとおりであるが主

表-3 下降区間施工記録

下向対策	地盤改良 制御ジャッキ	坑内圧気	曝取量 m ³	0.816 2.4	乾砂量 (t)	送泥密度 (g/cm ³)	循環流量 (m ³ /min)	切羽水圧 (kg/cm ²)	推力 (t)	ジャッキ本数	使用ジャッキ	カッター圧 (kg/cm ²)	ビットチンク (秒)	ストローク差 (mm)	セグメント番号	左右蛇行			
																400	200	200	400
																上下蛇行			
																-200	-100	+100	+200
239 ^R 環閉塞にてトラブル					12.5	1.25	11.5	1.71	264.6	9.4	2~11	25 38	+11	左14					
242 ^R オーバーカット20mm(上半部のみ)	240				11.7	1.26	11.5	1.65	283.8	9.4	2~10	38 50	+15	左11	240				
245 ^R 掘進スピードアップ					12.5	1.26	11.4	1.80	477.8	9.2	2~11	34 50	+9	左5					
247 ^R 後方設備を真上より牽引												36							
248 ^R 方向制御ジャッキ使用30t					13.0	1.34	11.5	1.80	345.6	6.2	5~10	46	-23.6	左30	250				
251 ^R 坑内圧気オーバーカット中止全速掘進	250											36							
254 ^R 牽引状態でセグメント組立					13.8	1.29	11.3	1.78	320.4	5.4	5~9	44	-35.8						
257 ^R 牽引力点をシールド重心に変更 切羽調査					13.5	1.31	11.0	1.70	322.6	5.0	5~9	48 58	-23.4	右1.8	260				
263 ^R 左蛇行対策	260				13.3	1.25	10.6	1.86	364.0	5.4	5~9	52 70	+11.4	右23.5					
270 ^R 方向制御ジャッキ60tに変更 (上半部のみ)	270				13.6	1.26	11.2	1.90	354.0	6.2	6~10	40 52	+32		270				
276 ^R シールド2重張、オーバーカット40mm					14.6	1.26	11.1	1.90	408.0	5.8	6~10	40 50	+17.6						
280 ^R 抵抗板及び注入コック取付	280				13.2	1.23	11.6	2.13	363.2	5.2	5~9	40 60	+3.4		280				
286 ^R カウンターウェイト実施					11.8	1.26	11.6	2.20	423.4	5.8	4~9	52 62	-11.2						
289 ^R スリット巾縮小、CCPにて地盤改良					13.0	1.26	11.9	2.16	399.4	5.4	4~9	46 64	-42.6		290				
292 ^R 地盤改良、牽引ジャッキ併用	290				11.5	1.24	11.7	2.20	475.0	6.0	4~9	46 68	-23						
300					12.7	1.26	11.7	2.19	457.2	6.0	3~8	46 70	+37.8		300				ローリング 角 50°
					11.8	1.30	10.9	2.26	455.0	6.4	3~8	48 58	+51.2						1°00'
310					11.9	1.32	11.4	2.26	399.4	7.0	3~9	54 72	+47.2		310				1°07'
					11.8	1.28	11.0	2.22	495.6	7.8	3~10	48 64	+37						
320					11.7	1.32	11.3	2.20	484.8	6.2	4~9	48 70	+29.2		320				
325 ^R ローリング防止対策実施 着力点変更	320				11.6	1.28	11.0	2.20	467.0	6.2	3~8	50 70	+15.8						
					11.0	1.23	10.2	2.20	460.0	6.0	3~8	48 62	-0.2		330				2°00'
					11.4	1.33	10.3	2.20	449.6	6.6	3~8	58 72	+18.2						2°50'
					15.2	1.32	11.3	2.20	440.6	7.4	2~8	52 86	+30.4		340				4°20'
					15.8	1.31	11.3	2.20	486.8	7.4	2~8	44 100	+10.0						6°30'
					14.6	1.27	11.0	2.20	518.6	7.0	2~8	46 72	-0.2		350				8°30'
357 ^R 固定ソリ、スタビライザー取付け テールパッキン交換	350				12.8	1.26	11.0	2.11	476.0	6.4	2~8	44 64	-14.6						11°00'
					11.1	1.25	11.0	2.12	518.0	7.0	3~8	44 70	-23.6		360				
					11.1	1.21	11.0	1.80	490.0	6.6	2~8	42 88	-40						
					12.7	1.17	11.0	1.87	450.0	6.2	3~8	50 78	-31		370				
					11.5	1.18	11.0	1.84	420.0	6.0	2~7	48 80	+0.6						
					11.1	1.17	11.0	1.87	433.6	6.8	3~8	54 64	+26.4		380				
					13.3	1.19	11.2	1.85	423.6	6.2	3 8	38 49	+18.4						

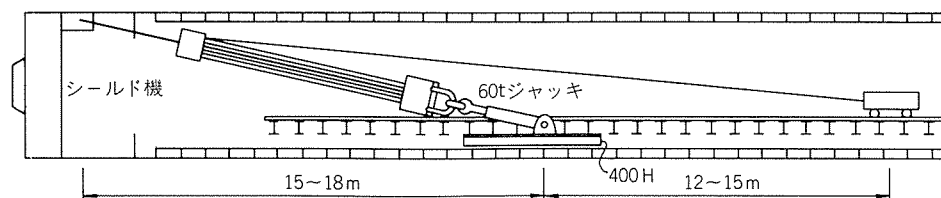


図-5 60tジャッキによる方向制御

要な事項について詳細に述べる。

(1)方向制御ジャッキ(図-5)

この方法は、作業性、安全面において問題があるが、かなりの効果があった。

(2)切羽調査及びシールド機への付着物調査

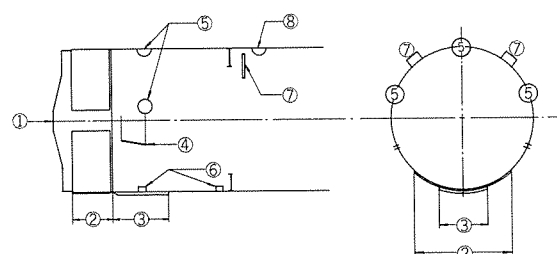
下向が始った当初より原因として考えられたシールド機外殻の固定ソリ、フリクションカット鋼板のめくれ及びシールド機への付着物(裏込注入あるいは薬液注入)等を調べるため、小薬注と圧気1.8kg/をかけて、バルクヘッドを開放し調査した。蛇行中に調査した結果は次のとおりであった。

イ)シールド機外殻のめくれ…切羽前面より円周方向に手を差し込んで調査したが、めくれはなかった。

ロ)機械外殻への付着物…図-6の①~⑧の個所を調査したが⑧付近のテール上部に薄く5~10mmの裏込材が付着し、その他に付着物はなく蛇行に関係するようなものはなかった。

ハ)カッターフェース前面の堆積物…スリットを通らない巨礫があると考えられたがなかった。

ニ)カッターフェース前面の余掘…上部のシルト質粘土の崩壊はなく、ビットの歯形が残るほど自立しているが、下部(砂及び砂礫層)は崩壊が激しく、シールド外殻に沿って手の掌が入るほど地山が乱されていた。



- | | |
|-----------|----------------------------|
| ①切羽全面 | 約=10m ² |
| ②旧固定ソリ部 | 0.3×1.8=0.54m ² |
| ③新固定ソリ部 | 1.0m ² |
| ④スタビライザー | 5cm×60cm×2ヶ所 |
| ⑤余掘検知部 | φ15cm×3ヶ所 |
| ⑥裏込注入用コック | φ5cm×2ヶ所 |
| ⑦抵抗板 | 5cm×50cm×2ヶ所 |
| ⑧テール検査窓 | φ15cm×2ヶ所 |

図-6 シールド機付着物調査箇所

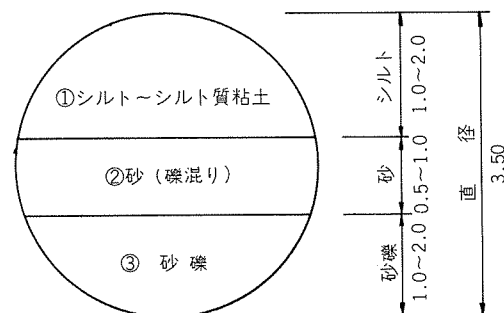


図-7 下降付近の土性

表-4 下降付近の土性

土質名		①シルト	②シルト質砂	③砂礫
粒度分布	礫分	0.1	1.4	68.3
	砂分	7.6	73.2	28.2
	シルト分	85.1	18.2	3.6
	粘土分	7.2	7.2	
均等係数		1.6	62.46	47.8
曲率係数		0.81	6.09	0.72
含水比		40.5		
一軸強度		0.99 kg/cm ²		
粘着力		0.55 kg/cm ²		
備考				試料採取に問題

(3)抵抗板及び注入コックの取付け

前面の切羽調査より上部シルト質粘土にかなりの支持力があると考えられたので抵抗板2枚を図-8の様に取付け、牽引ワイヤーを撤去するよう計画したが、実施の結果、さしたる効果はなかった。注入コックは機械下部に2ヶ所取付け、下部より注入したが、同様にさしたる効果はなかった。

(4)カウンターウエイト及びスリット巾縮少

カウンターウエイトは、セグメント組立時の上下ジャッキ入替により、機械頭部が1~2cm自沈する現象及び裏込注入をするとセグメントが10R程度浮

上する現象があり、インゴットを積載して浮上防止をはかった(図-9)。また、スリット巾縮少は図-10のように外周部を縮少して泥水流による地山の乱れを少なくするよう考慮した。

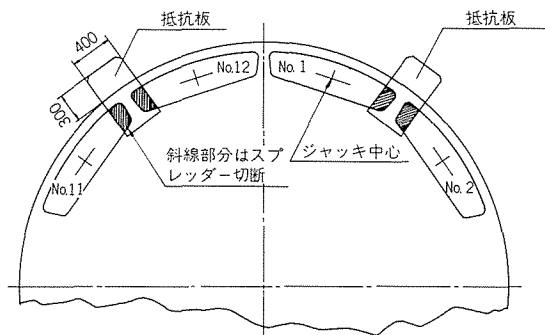


図-8 抵抗板取付け位置

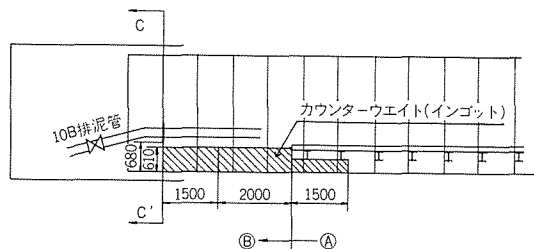


図-9 カウンターウエイト載荷位置

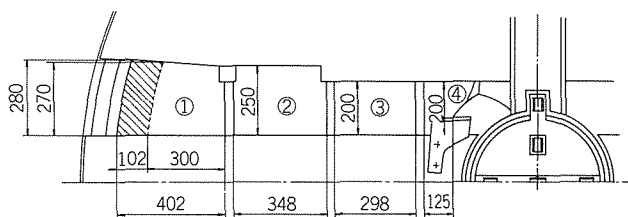


図-10 スリット巾縮少

(5) C C P 工法による地盤改良

前述の切羽調査の結果、シールド機下部の外周辺が乱されているため、CCP工法による地盤改良が有効と判断した。CCPの施工間隔はシールド機下部の固定ソリ(1.8m×1.0m)付近に図-11のように実施した。効果は当初推定した以上で図-12のようにシールド機を上向きに転ずることができた。

(6)固定ソリ、スタビライザー取付け

地盤改良後、シールド機上昇は可能になったが、いぜん機械頭部を牽引しなければ下向きになる傾向があった。牽引することによって機械のローリングが進み、ローリングを修正する方向に引張ったり、



写真-6 C C P 施工区間
地山とビットが密着している

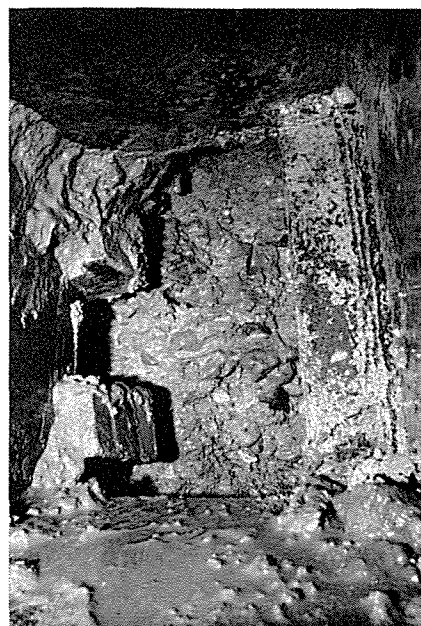


写真-7 無薬注区間
ビットと地山がかなり離れている

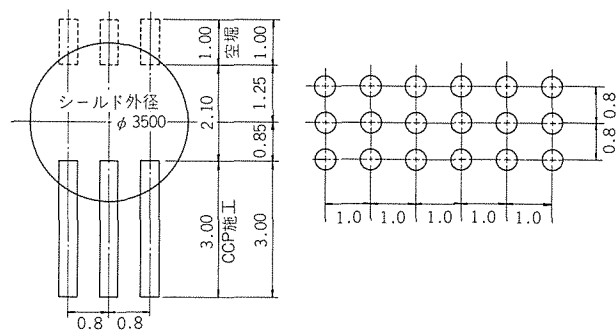


圖-11 CCP標準施工圖

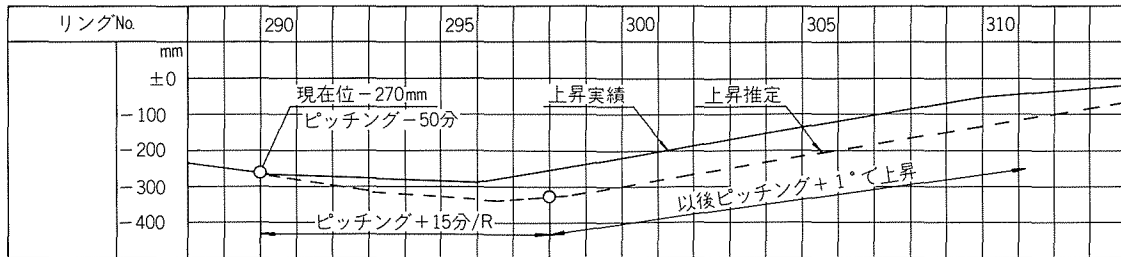


図-12 地盤改良によるシールド機上昇推定線と実績

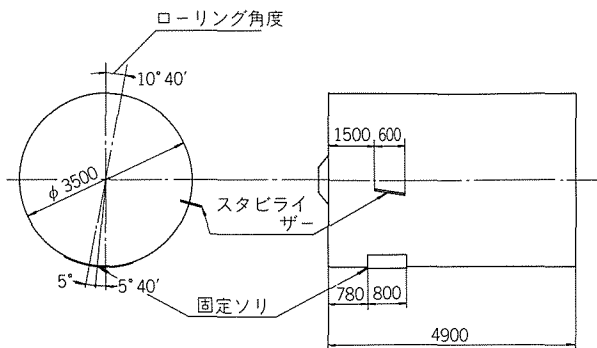


図-13 固定ソリ，スタビライザー取付位置

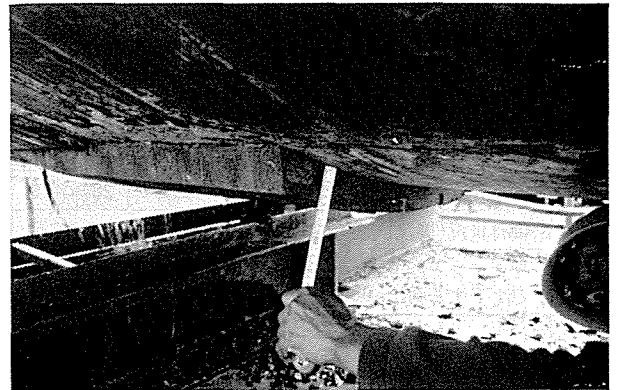


写真-8 固定ソリ

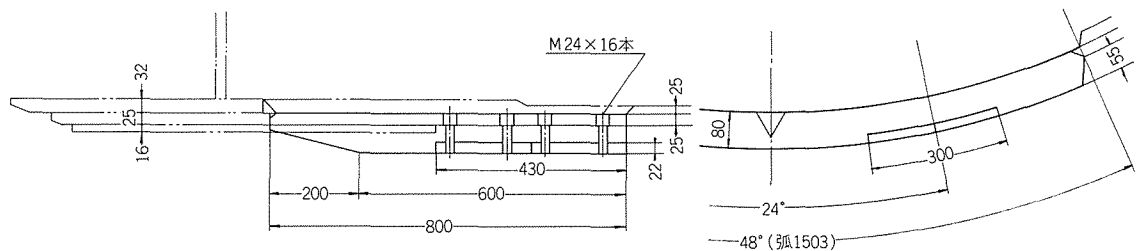


図-14 固定ソリ詳細図

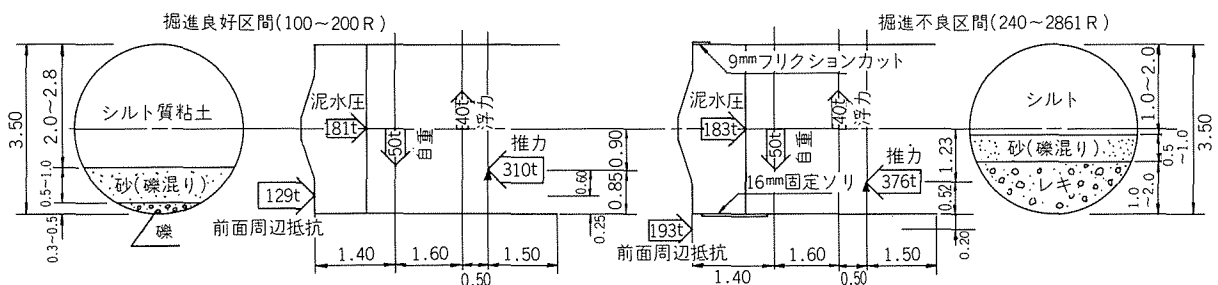


図-15 両区間荷重状況

スプレッダーに楔をかませたが効果はなく、テールバックシンからの漏水も激しくなったので、これらを全部同時に解決するように図-13のとおり機械を改造した。

掘進良好区間と不良区間の試料を比較すると図-15、表-5 のようになり不良区間の前面、周辺抵抗の合力193tonが、シールド機外径よりさらに下部に働いていることになる。

この原因は、上部フリクションカット(9×300mm)を貫入させる時発生する下向圧力に対し、シールド機下部の地盤が乱され、支持力が低下して、上からの圧力に抗しきれず図-15のような力関係になったと想像される。これらの対策にその圧力以上の反力を固定ソリによって作用させるべくいろいろの状況別に検討した(表-6)。その結果、旧ソリの上へ新ソリを39mm(約1㎡) 継ぎ足し万一の場合、薄くできる構造とした(図-14)。

表-5 荷重状況

項 目	掘進良好区間 100～200R平均	掘進不良区間 240～286R平均
推 力 (kg t)	310	376
切 羽 水 圧 (kg/cm ²)	1.88	1.91
ジャッキ本数 (本)	8.4	6.0
推力着点 (m)	0.85	0.52
前面、周辺抵抗力 (t)	129	193

表-6 ソリ厚検討結果(旧ソリ16mm, 新ソリ1.0m²として)

符号	検 討 事 項	結 果
a	シールド機を上昇させるに必要なソリ厚	22mm以上
b	ジャッキ操作にて下降させ得るソリ厚	44mm以下
c	掘削実績より	28mm程度
d	切羽状況(肉眼調査)より	39mm程度
e	セグメント組立時、ジャッキ入替によって沈下する量	20mm程度
結論	以上を総合すると 22<ソリ厚<44mm 安全側を採用して39mmとする	39mm

表-7 シールド下部細粒分比較

リングNo.	10R	80R	220R	280R	310R	330R	360R	400R
細 粒 分	18%	90%	20%	11%	10%	9%	10%	9%
透水係数	$k=10^{-1} \sim 10^{-3}$			$k=1 \sim 10^{-1}$				
区 間	正常区間			下降区間				

スタビライザーは、機械のローリングを修正する目的で取付けた。効果は大きく、約11°のロータングを15Rで回復したので、回復後、撤去した(図-13)。

ソリ板厚検討に際しては、薬注等で性質は変わっているが、シールド機底面で実施した図-16の地耐力試験結果を参考にした。

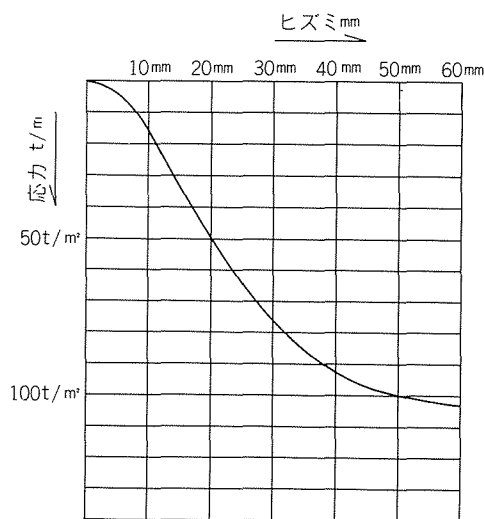


図-16 原地盤地耐力試験結果

4-3 蛇行原因

前述のように種々の対策を試行錯誤しながら120 R掘削するのに約6ヵ月を費した。その間、下降原因を究明するため、土質調査を2度にわたり計12本追加し、そのデーターを基にした学識経験者の見識及び現地調査した切羽の状態等をおりまぜて記述する。

(1)地盤生成過程からくる要因

当所のシールド通過位置は洪積層と沖積層の境にあり、沖積層の基底を形成する砂礫層と直上の砂質土～粘性土層の性質は生成過程の複雑さ故に一様性を欠くのが普通である。

洪積世最末期の氷河期の海面は現水面より100～120 m低下していたと言われ、したがって当時の地表面は現在の洪積層上面であり、繰返す洪水によ

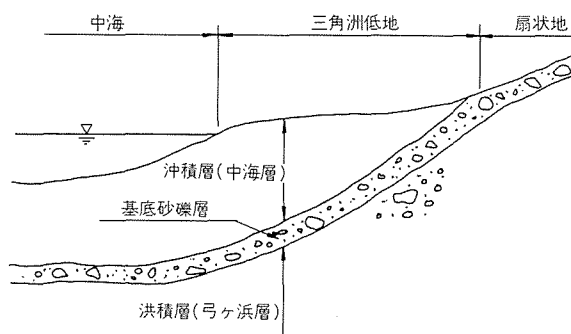


図-17 地盤生成過程

て絶えず河道を変えて洗掘と堆積が繰返され、広大な扇状地や氾濫原を形成していった。そして温暖期に入り海面が次第に上昇し、上流より搬送される土砂、海岸流によって運ばれた砂によって基底礫層を覆うと共に、静かな内海に粘土、シルトなどの細粒分が堆積して厚い沖積海成層を形成した。(図-17)

以上に砂礫層(基底礫層)生成過程を示した。表面の起伏は表-3の礫取量(320R～360R間)に示すように激しく、5～6Rで大きく変化している。それに伴って礫ばかりの所があったり、砂ばかりになった吹留まりがあり著しく一様性を欠いている。その2工事で実施した地下水検層では、この層境付近に、層厚1m～1.5m程度のガラガラの透水層があることが判明した。(透水係数 $k=10^{+2}$ cm/sec)

(2)切羽上下土質の力学的・水理的アンバランス

シールド機に働く外力は、図-18のようになり当所のような下部にN値の高い砂礫層が存在すると、ジャッキ操作で推力の合力を可能なかぎり下げても、抵抗合力がさらに下部に作用して、シールド機に下降モーメントMを発生させる。当所の下降区間ではこのような力関係になっていたと考えられる。また水

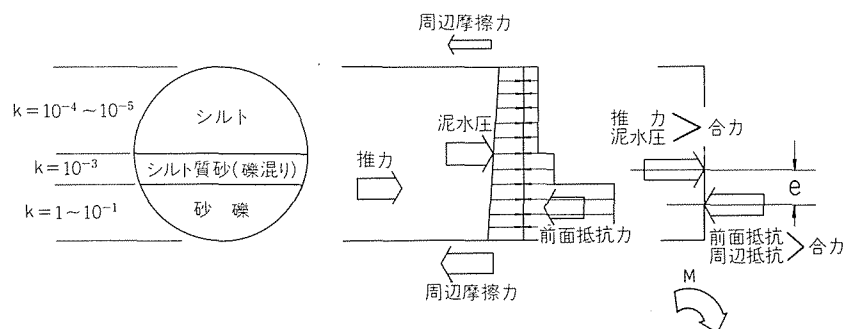


図-18 上下土質の力学的・水理的アンバランス

理的にも上下の透水係数が極端に異なり、微小の切羽水圧の変動によって下部はボイリング現象を起し支持力を低下させるが、上部シルトは水に対して強く、ほとんど崩壊しない。この2要因が競合して作用したと考えられる。

(3)切羽上下土質の撓乱性

数回実施した切羽調査より前面の状況は図-19のようになっている。開削部の連続地中壁の壁面仕上り状態からも明らかなように、砂礫層の掘削面は凹凸が多く20mm～50mmの余掘があり、これに比べて上部シルト層はカッタービットの歯形が残るほどで余掘はない。物理的に考えてもシルト～粘土は羊羹を切るように掘削し得るが、砂礫層は凹凸状態になる。そして、これに加えて巨礫を運搬するため、大量の泥水を循環させるので浮いた砂礫は泥水と共に流され、さらに支持力を低下させたと考えられる。

4-4 その後の問題点

曲線部におけるCCP杭による地盤改良と固定ソリの増設によって、わずかに上下蛇行はあるものの、なんとかジャッキ操作のみにて掘削できる状態になった。以後の問題点としては、巨礫によって10"排泥管の閉塞、及び裏込注入によるセグメントの浮上があったがこれについて略述する。

(1)礫による閉塞

礫による閉塞は、下降トラブル(350R)以降、急激に多くなり、小薬注・圧気併用でバルクヘッドを開放し撤去した礫だけでも表-8の通りであった。

巨礫の出現状況は50～60R間隔の周期で出現し始めると連続的に出現し、1R掘削するのに3回も出現したこともあった。その時に、圧気を入れたり抜いたりして地山を極端にいためるので、12"管で簡易礫溜ボックスも製作し、取付を計画したが取付けまでには至らなかった。

(2)裏込注入によるセグメントの浮上

固定ソリ取付後、裏込注入によるセグメントの浮

表-8 350R以降閉塞状況の一例

セグメントNo.	礫寸法 (mm)	重量(kg)
363	流木 270×280×700	
384	310×150×150	5.9
385	300×225×190	10.8
391	290×280×190	14.6
448	340×260×180	15.0
452	240×215×210	11.2
469	290×215×190	13.6
494	280×260×220	17.1
"	340×220×180	13.5
"	320×210×150	11.0
496	290×220×200	14.0
507	400×255×150	13.1
517	260×240×160	8.8
519	280×175×140	9.4
520	270×180×155	7.2
"	305×260×160	10.1
"	260×255×770	10.2
527	290×200×170	12.5
575	365×255×220	17.6
581	280×200×170	12.2
588	350×210×190	17.8
597	300×240×130	10.0
624	235×265×150	16.0
628	270×280×220	15.5
697	310×250×160	12.5
713	340×255×210	19.4
716	245×280×175	15.8
718	400×295×185	17.6
"	270×220×130	7.2
700	400×280×200	23.5

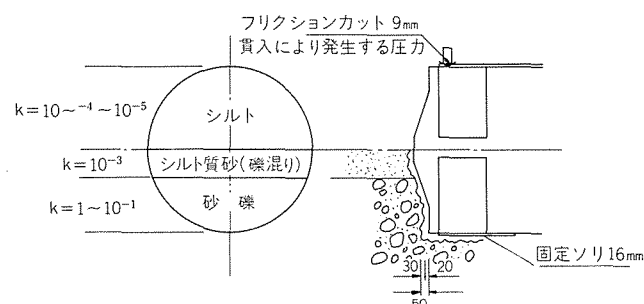


図-19 上下土質の撓乱性

上りが激しく、図-20の様に裏込注入をするたびに機械から10R後方まで影響して浮上した。このため、シールド機高さの管理目標を $-50\text{mm} \sim -100\text{mm}$ に下げて管理した。しかし、浮上り量も礫の高さ（土質）

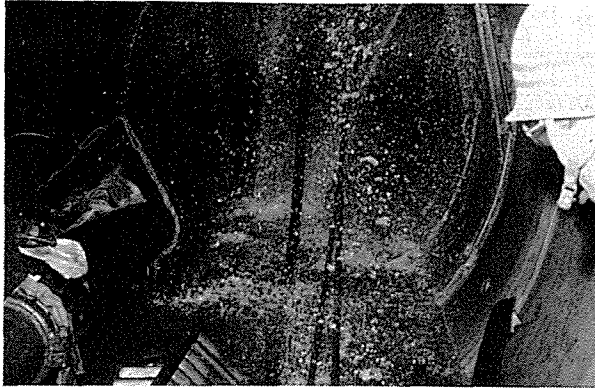


写真-9 礫状況

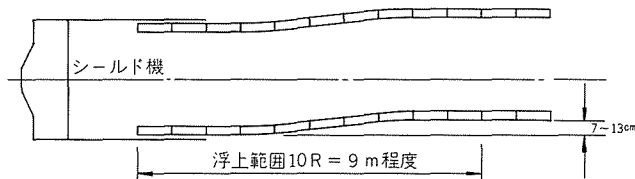


図-20 セグメント浮上り状況

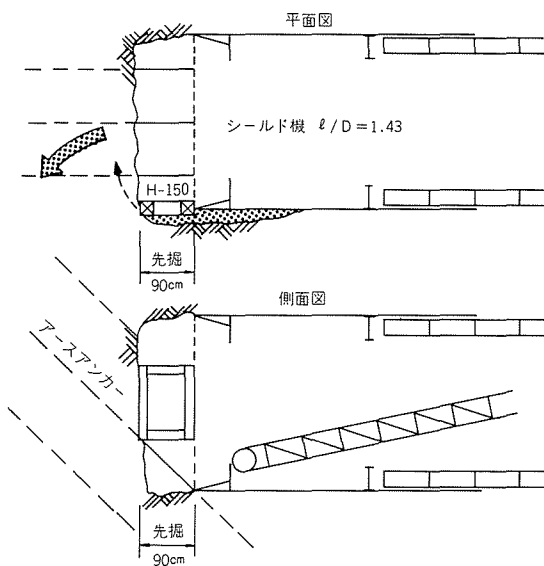


図-21 手掘り区間蛇行対策

や蛇行の変曲点等で様でなく、特に上昇から下降に移る変曲点では大きく、 $100\text{mm} \sim 130\text{mm}$ も浮上したこともあった（図-22）。この原因は、砂礫層のため機械上下をかなり余掘しているためと思われる。

4-5 その2工事への応用

その2工事では、再調査ボーリングを追加して、シールド蛇行について検討した。土質調査の結果は、その1

工事の300R付近までの地質に類似している。その1工事の実績より検討すると新ソリの厚さは旧ソリの上に 19mm 厚追加とした。

その2工事の掘削実績は、ほとんど管理限界の $\pm 50\text{mm}$ の範囲内に入れることができた。

到達前、30m地点で泥水シールドを手掘りシールドに改造し、止水鋼矢板（IV型）をシールド断面で切断して到達坑（沈砂池）に突入した。手掘り区間は、曲線（ $R=250\text{m}$ ）で泥水シールド機のため、 l/D （長径比： l =機械長、 D =直径） $=1.43$ と長いので曲りにくく、上り気味なので先掘りと咬せ物を併用し、アースアンカーを切断しながら無事到達することができた。

その1工事の施工実績は、図-22を参照されたい。

4-6 工事を終えて

シールド工事における方向制御には、種々の要素が含まれている。特に泥水シールドでは、浮力が働くので蛇行管理は容易であると言われていたが、土質の状態によりすべてに適用できず、密閉であるので切羽の把握及び方向修正の対策等が実施困難で、また、機械長が機械径に比して長く方向修正に非常な努力が必要である。また、当所のように地下水圧が高く、狭小の坑内から切羽への対策には限度があり、莫大な費用と時間を要し、常に危険がつきまとう状況であった。シールド本来の姿であるジャッキ操作によって方向制御を許容誤差内に入れ得るか否かは、工事の生命線であり、これにいかに対処すべきかについて当所での経験を基にして感じたことを記述する。

(1)調査時

イ) 工事区域付近広範囲の地盤形成過程を調査する。特に建設省計画局発刊の広域土質調査報告書等は参考になる。

ロ) シールド通過位置付近が、ほぼ均一な地質であれば良好であるが、性質の異なる地層が存在する場合には、注意を要する。（特に粘土と砂礫層が共存する場合）

ハ) 地層が均一でない区域については最低 100m に1本程度の再調査ボーリングが必要である。

ニ) 調査項目は、現場試験を重視してシールド通過位置付近の強度差、崩壊性（粘着力）、最大粒径、透水性等を十分に調査する。

(2)計画時（上記土質調査資料を基にして）

イ) 上下土質の違いや土被りによる土圧抵抗及び周辺摩擦抵抗の違いがないか。

ロ) 切羽前面の掘削機構からくる切羽抵抗及び切羽前面と周囲の土質の変状がないか。（例えば、液

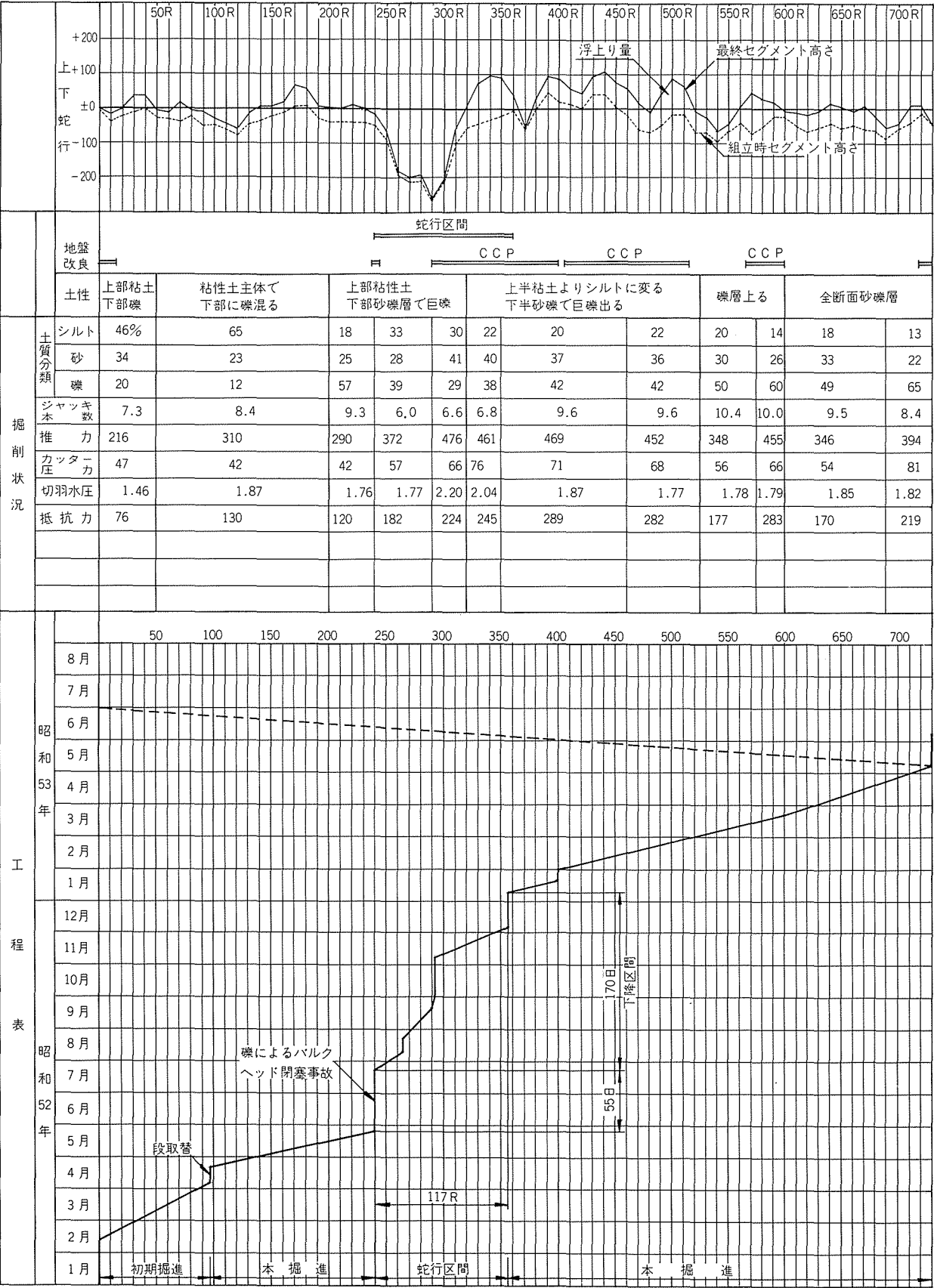


図-22 その1工事施工記録

状化，強度低下，洗掘，余掘，天端崩壊等がないか)

ハ) 機械的なものとして，カッターフェースの形状，機械重心位置，機械の長径比，外殻の真円度，直線度，カッタービットの同一面度等の狂いはないか。

ニ) 以上検討してシールド本来の姿であるジャッキ操作とオーバーカッターの併用及び異形セグメントの使用で方向制御できるかどうか判断し，できない場合は抵抗板，スタビライザー，固定ソリ，可動ソリ等の取付けを検討する。

(3)施工時

イ) 泥水シールドは機械が長いので方向転換にかなりの距離が必要で，方向位置を確実に測定し，入念な施工管理と迅速に対応ができる経験豊かな熟練者を配置する。

ロ) 泥水管理，切羽水压管理を厳重にし切羽に変化を与えないようにする。

ハ) 切羽の土質，機械のクセ，裏込注入によるセグメントの浮上り量等，計算で出てこない感にたよるものを早く把握して対処する。

ニ) 自動計測装置等を導入して早めに方向位置を把握すると共に毎リングごとの入念な状況チェックが必要である。

ホ) 上記検討しても予測し難い蛇行が発生しそうな場合は早めに補助工法を使用して対処すべきである。

§ 5. あとがき

初期発進以来，その1工事は1年5ヵ月にわたり途中幾多のトラブルに遭遇し，試行錯誤をくり返した結果，無事，延長 664 m の巨礫層の泥水シールド工事を完了した。また，その2工事では泥水シールドを手掘シールドに改造し，止水鋼矢板，アースアンカーの切断等，あまり例のない貴重な体験を積み一応，掘削工事を完了した。今迄，種々の地質，施工条件下で泥水シールドの施工領域の拡大に挑戦してきたが，本工事は多くの問題点，未解決点は残っているものの，一応高被圧滞水層下の巨礫層を泥水シールド本来の姿である流体輸送で掘進することができた。

当工事では，他にいろいろの問題点も多かったが，本稿では泥水シールドにおける方向制御の問題点を中心に記述した。本工事で得た貴重な経験と実績を足がかりにして，よりよき方向に前進させたいと思う。

最後に，当工事施工にあたりご指導ご協力いただいた関係各位に心から感謝申し上げます。