

III—4 崩壊性帯水砂礫層の泥漿シールドによる掘進

— 石狩川流域下水道 砂川地区 幹線工事について

北海道 武智 弘明
大成建設 矢野 孝一
大成建設 野崎 正幸

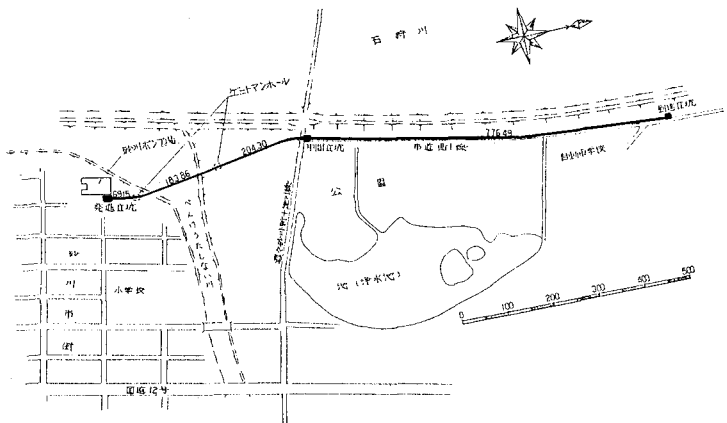
1. はじめに

石狩川流域下水道中部1号幹線の通過する砂川市北光地区はN値20~40の崩壊性砂礫地盤であり、シールドトンネルの通過する深度は地下水位以下5~7mという厳しい条件である。工事概要は右のとおりである。また右図の様に路線上には準用河川ペンケ歌志内川、道々砂川新十津川線横断箇所もあり、周辺には砂川市の水ガメ北光沼がある。

本工事の施工方法はその土質からみて多くの困難性を有すると想定され、最終的に本章の検討を経て泥漿式シールドとした。泥漿式シールドは砂礫層に対する適応性が高く、残土処理も容易という特徴があるが、本工区の様は大径の礫が連続して存在する土質に対して実際に施工した例はなかった。

本報告は、施工に当たって検討した加泥材を中心とした本工法の適応性について述べるものである。

工事延長	1233.8 m
セグメント外径	2,950 mm (仕上り内径 $\phi = 2,200 \text{ mm}$)
使用セグメント	スチール, 主桁高さ100 mm 及び150 mm (河川横断部)
土被り	GL-7.0 m ~ 10.0 m
最小カーブ半径	150 m
立坑数	3ヶ所 (他にゲートマンホール2ヶ所を後に施工)
土質	砂礫層 2 mm フルイ 非通過率 80 %
	最大礫径 450 mm 透水係数 $1.1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$
周辺の状況	発達立坑附近に泥炭層有り、井戸使用家庭・工場有
施工企業体名	大成建設・地崎工業・三菱建設
施工工期	昭和57年9月14日 ~ 昭和59年3月20日



2. シールド機の選定

前章で述べた様に本工区の土質は非自立性帯水砂礫層地盤であり、工法選定の候補としては次頁表の7種類を比較検討した。その結果からセミシールド工法・泥水加圧シールド工法・泥漿シールド工法の3工法について考察を加えた。いずれも基本的には密閉機械型シールド機を使用するものであるが、本工区程度の礫には最大通過可能径が大きいという点で泥漿シールドが優れている。また掘進可能速度、立坑の数が少ないこと、後方設備が簡易なことという点で優れたものがあり、総合的に検討した結果泥漿シールドを採用することとした。しかし泥水シールドに比べて施工実績が少なく、シールド機の設計や施工管理については不明な点が多い。特に次の4項

目については十分な情報がなかった。

- (1) 加泥枝の質・量・濃度
圧力・注入場所
- (2) 排土の性状
- (3) 曲線部施工の可能性(オーバーカッター等)
- (4) シールド機の各部形状

工 法	特 徴	概算工事費
開 削	鋼矢板打ち込みは困難。水管も困難	2,310 49/m
普通推進	地下水位低下・薬注・圧気等補助工法必要	1,487 49/m
セミシールド	立坑数増える。	1,192 49/m
開板シールド	普通推進と同じ	1,832 49/m
泥水シールド	礫処理・泥水処理に不安。逆泥防止対策必要	1,177 49/m
土圧シールド	シルト分少なく、自立性ないので適用できない	
泥漿シールド	実績がほとんどない。	1,003 49/m

(1)については地盤崩壊にも懸かる重要な因子であるが、施工実績も少なく理論的にも不明であった。(2)についてはメーカーサイドの情報から残土が生じやすくなるスランプが大きくなること予想されたが、泥水シールドと同程度の固液分離設備を設置する必要があるの不明であった。(3)については本来土圧系シールドの場合ジャッキ能力を大きくして対応する必要があるが、セグメントの許容耐力との関係もあり、オーバーカッターなどの補助機構を設置することの必要性を検討する必要があると思われた。(4)についてはスクリーコンベアのサンドプラグゾーン長さやチャンバー内攪拌機構など細かいノウハウに属するが重要な点について不明なことが多かった。

3 加泥枝の注入量決定因子について

(1) 注入の目的

加泥枝を注入する目的は各部位ごとに次のとおり整理される。

① 切羽の保持

切羽のゆるみに対して加泥枝を注入することにより泥膜を形成し、切羽崩壊を防ぎつつ礫間の摩擦を少なくし排土するという本工法の本質である。

② チャンバー内の流動化

チャンバー内に加泥枝を注入し礫塊の塑性流動化を計り、かつ静止土圧に対抗する。

③ スクリーコンベアによる止水性の保持

掘削土砂をチャンバーから円滑に排土すると共に、止水性を持たせるために可能な限り圧密する。

(2) 各部位ごとの注入量決定因子について

① 切羽部

切羽部において良好な泥膜を形成するためには厚さが薄くて圧密性に優れ、脱水量が少なく逆泥量が少ないよう加泥枝を管理しなくてはならない。泥膜の厚さ F_d は下式(1)で算定され、一方逆泥量を直接示す式はないが、脱水量に比例すると想定すると脱水量 Q は下式(2)で示される¹⁾。

$$F_d = \frac{W_L}{A(C_s/M_s - 1)} \quad \text{----- (1)}$$

F_d : 膜厚 W_L : 脱水量 C_s : 泥壁中固型物濃度
 M_s : 泥水中固型物濃度 A : 通過面積

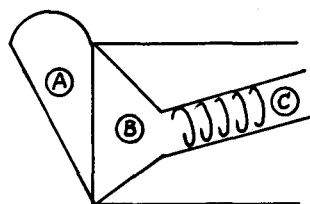
$$Q = \{2K(C_s/M_s - 1)PT\}^{1/2} A \quad \text{--- (2)} \quad Q: \text{脱水量} \quad K: \text{浸透率} \quad P: \text{差圧} \quad T: \text{時間}$$

μ : 液相部の粘性

これらの式からは次のことが知れる。

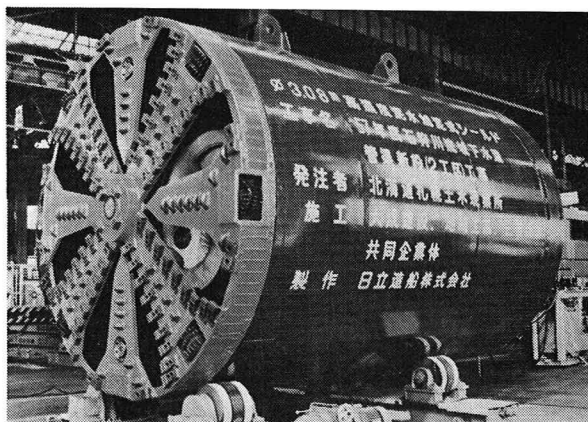
・泥膜厚を薄くするには、脱水量を少なくすること、泥水中固型物濃度に比べて泥壁中濃度を高くすることが必要となる。

・脱水量を少なくするには、浸透率を小さくすること、泥水と泥壁の固型物濃度差や圧力差を小さくすること



暴露時間を短くすること、泥水の粘性を大きくすることが必要となる。

脱水量を少なくすることと泥膜厚を薄くすることは泥水中固型物濃度の点で矛盾することとなるが、泥泥することは致命的な事故に繋がる恐れがあるので泥水は可能なかぎり高濃度とすることが望ましい。差圧を小さくするためには切羽へ送り込む泥土圧が間ゲキ水圧より過大にならないよう管理することが必要である。暴露時間を管理することは困難である。浸透率は圧密性と温度・圧力の複合した関数であると思われる、制御する因子が明確ではないが、粘性を高く管理することにより浸透率を低くしようと思われる。



ミールド機 外観図

さらに奥運搬時には静止状態が存在せず、土質・水圧も変動する非定常性に対応するには、輸送可能である高い比重の加泥材を低圧力、かつ小過大に切羽へ送り込みことが重要となる。

⑤ チャンバー部

チャンバー部においては流動性を保持しつつ、静止土圧に対抗できる様加泥材を注入することとなる。土砂の塑性流動化を計るためには YV 、 PV を小さくする必要があるが、 YV の極小化は礫のブリーディングを招く恐れがありスリップベロシティを下げる必要がある。スリップベロシティは式(3)で表わされるが、泥水の固型

$$V_s = \frac{175 d (W_1 - W_2)^{3/2}}{(W_2 \cdot \mu_m)^{1/2}} \quad \text{--- (3)}$$

d : 平均粒径 W_1 : 排土の密度 W_2 : 泥水の密度
 μ_m : アニュラス粘性

物濃度を高く管理することにより小さくできる。もしもブリーディングした結果礫分が泥降分離しても、機械的攪拌によりスクリーに流入させられるのならば、固型物濃度は制約とならない。

⑥ スクリューコンベア部

止水性を保つためには、透水係数を 10^{-4} オーダー以下となるよう改良するか、または地表への若干の影響を前提としゲートやコーンに一部の水圧を受けもたせることが必要である。例えば Hazen の実験式で透水係数を算出すると、比重 1.4 の加泥材を体積比で 22% 以上注入することにより原地盤は不透水化される。

砂質土の場合、粘性土に比べてサンドプラグゾーンを長くすることにより圧密の進行がみられたという報告がある²⁾。しかし本工区のように礫が多い場合、この方法はスラック現象を誘発すること、礫を含めて圧密するにはかなり多量の加泥材注入が必要であり非経済的であることが考えられる。

また実際に圧密が進行したとしても、自由水又は過剰間ゲキ水は排土と共に噴出してくると考えられる。

4 テスト掘進

本掘進に先立ち注入する加泥材の選定を試みた。バントサイトは高価であり、また処分も容易ではないことから、主成分も粘土として検討した。主たる配合は右表の6種類である。この配合の中から事前に大成建設技研での実験結果、及び予備的に行なったミールド機前面からの

記号	計画比重	粘土(kg)	砂 ₂ (kg)	砂 ₁ (kg)	水(l)	比重	粘性(cp)
A	1.35	287	330		733	1.35	1200
B	1.40	270	440		690	1.40	1900
C	1.45	254	550		646	1.44	3100
D	1.35	282		350	718	1.34	1700
E	1.40	263		467	670	1.39	2800
F	1.45	244		584	622	1.43	5000

送泥噴射実験による目詰まりチェックからフライアッシュを主体とすることとし、A・B・Cの3配合について初掘掘進時にテスト掘進その1を実施した。

テスト掘進その1は各配合ごとに順次加泥率を下げて必要最小量を知るために実施した。その結果は右表のとおりであり、加泥率25%を安定して掘進できるC配合が良好となった。

さらにこの配合を用い、加泥材注入率を20%に設定したまま、カッター回転数・スクリー回転数を変化させて最適な運転状況（低ジャック推力、速い掘進、小さいスラップ、少排土量）を探ろうとしたものが、テスト掘進その2である。その結果は次表のとおりであり、カッター回転数とスクリー回転数と運転状況の間に有意な関係が存在していなかった。また運転方法により低注入率を支えることは困難であるとも言えよう。

以上からは、比重1.4の加泥材を25%以上の注入率で管理することが最低限必要な条件であると考えられる。

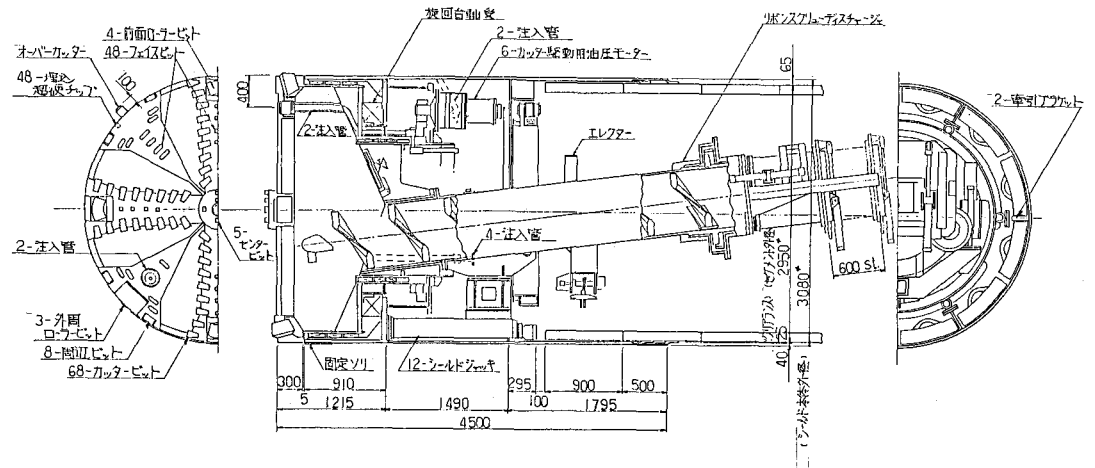
配合	加泥率%	比重	粘度cP	排土スラップ	排土量	備考
A	30	1.35	1500	24.5	9.1	小噴発
A	25	1.34	1400	23	9.1	小噴発
A	20	1.35	1300	26	11.2	大量出水
B	30	1.39	1700	23	9.1	
B	25	1.41	2100	22	8.4	小噴発
B	20	1.40	1800	22.5	8.4	小噴発
B	15	1.39	1700	25	9.1	噴発
C	30	1.45	3200	23	7.7	
C	25	1.46	3500	24	9.1	
C	20	1.45	3000	23	9.1	小噴発
C	15	1.44	2900	25	9.8	噴発

カッター		スクリー		ジャック出力	掘進時間	排土スラップ	排土量	備考
回転数	トルク	回転数	トルク	出力	時間	スラップ	排土量	
1.1 rpm	54 t・m	3 rpm	1.2~1.7 t・m	204 t	83 min	20.8 cm	9.0 m³	
1.5 rpm	69 t・m	5 rpm	1.2~1.7 t・m	222 t	83 min	19.7 cm	9.8 m³	

5 施工一本掘進

本工区で用いたラールド機は右の設計諸元によった。特に留意した点は、大径機を通過させるためリボンスクリーを用いたこと、カッターもこのため外周駆動としたこと、マラン長はR=150mに台ねせて短くしたこと、ラールドジャッキは砂礫層なので80 t/12本としたこと等である。

項目	仕様	機
マシン 外寸	φ3.08 m × 4.5 m	
ラールドジャッキ	80 t/12本 × 300 kg/cm²	11 kW
カッター	54~81 t/m at 140~210 kg/cm²	} 45 kW 3台
オーバーカッター	10.6 t/1 × 210 kg/cm² × 1本	
スクリーゴバヤ	5.2 t/1 × 175 kg/cm²	} 37 kW
排土ゲート	4.4 t/1 × 140 kg/cm² × 2本	



ある。後続台車は運転台車，パワーユニット，受変電，加泥台車等合わせて7台となった。

掘進は次の管理値を設定して実施した。

- ・カッター : 1.5 rpm
- ・スクリー : 5 rpm
- ・シールドジャッキ : 35 mm/min
- ・加泥枚 : 比重1.4 30%
- ・ゲート開閉 : チャンバー土圧 $1.2 \sim 1.5 \text{ kgf/cm}^2$ で開, 0.2 kgf/cm^2 まで低下時に閉
- ・排土量 : $8.1 \text{ m}^3/\text{Ring}$

掘進は次の日程を完了し、現在は二次覆工コンクリート打設中である。

- ・発進 : 2月19日
- 初期掘進 : 2~3 Ring/day
- 本掘進 : 5.2 Ring/day ($1 \sim 12 \text{ Ring/day}$) ; $R = 150 \text{ m}$, 200 m 区間有り
- ・中間立坑到達 : 6月11日
- ・同発進 : 6月22日
- 本掘進 : 7.5 Ring/day ($3 \sim 14 \text{ Ring/day}$) ; $R = 300 \text{ m}$ 区間有り
- ・到達 : 11月8日

本掘進中カッタートルクやスクリートルクの不足は起こらなかったが、チャンバー部・サンドプラグゾーン部でのスティックが起こった。ジャッキ能力は直線部において十分であったが、曲線部では能力以外の条件も加わって能力不足となることがあった。加泥枚はジャッキストローク比例注入方式としたが概ね自動運転ができた。排土ゲートは開閉をくり返す非定常運転になった。排土量の測定はズリ口土砂量から推定する方法しかなかったため、フェイタルな事故発生検知のタイミングは遅れることになった。

掘進時の課題は次の4点に集約される。

- ① 排土スラップが 25 cm 位と大きく、残土処理に難行した。(次章 参照)
- ② 泥埋木や礫の取り込みは曲線部において難行した。(後章 参照)
- ③ チャンバーやスクリーコンベア内でスティックすることがある。
- ④ ゲートによる排土は、地山に与える圧力変動が大きすぎる。

6 排土の性状と運搬

排土の性状はメーカーサイドの情報では生コン状ということであり、また施工実績ではスラップ数 cm とされていた。しかし本工区においては初期掘進時スラップは前述のとおり運転方法を変化させても 20 cm 以上であったため、運搬時土砂こぼれに注意する必要が大きかった。そこで少しでも圧密を促進する方法がないかというところを検討した。

圧密を促進させるには土質を改良すること、サンドプラグゾーンの長さを変えること等が考えられたが、前者については加泥枚又は添加材枚に高価なため経済性からは困難と思われた。ゾーン長さの調整はシールド機の構造制約とスティック発生の問題から実施ができなかったため検討を加えることができなかった。従って排土はベチャベチャの状態で輸送せざるを得なかった。

次に輸送方法については、ダンプ・バキュームカー・セメント固化・振動フルイ等も検討したが、積載量を少なくして土砂こぼれないようにする方法が最も経済的であった。実際には加泥枚を注入した結果、排土の比重が原地盤より増加するためダンプへの積載量を少なくする必要があったため、両者は合致した。現場的にはさらにゴムパッキン設置等工夫を要したこともあり、今後はスクリープレス排水機の装備など装置的に改良される

ことが望ましい。

7 泥埋木対策

本工事に先立つ砂川ポンプ場築造工事時に泥埋木が発見されていたため、工法検討時に対応策を考慮したが、シールド機チャンバー内に点検用入孔を設置するにとどめ、掘進速度が若干低下することを見込んだ工程とした。

本掘進時には泥埋木による掘進速度低下がしばしば見られたが、特に曲線部においては難行した。まづ初期掘進終了直後の $R=150^m$ 部ではカッターの回転抵抗と推進抵抗が著しく増大し、甚だしいときは 30^cm 掘進するのに69分を要した。またこの際地盤流下が生じてしまったが、幸いポンプ場用地内であったので第三者被害はなかった。しかし地表面より地山は緩んでいることが懸念されたので、掘進に先行してCB液・LWを注入した。

SP400 からの $R=200^m$ 右カーブでは掘進速度が低下すると同時に所定の曲線形にまど曲げることができなくなり抵抗が大きくなった。このためシールド機とセグメントを密着緊結し反力受けとしたり、 45^cm の異型セグメントを使うなどの対策をとった。幸い地表面への影響は見られなかったが、道々砂川新十津川線橋断のために防護築注を実施することとした。断面は門型とし、防護と同時にシールド機の回転も意識した。掘進は 5^cm きざみに鉄筋を溶接、前進する作業の繰り返しであり、 $2Rings/day$ の日進量しか得られなかったため、最終的に 40^m 進むのに30日間を要し、かつ $R=200^m$ と設計したルートは最小 $R=107^m$ という変形したものとなった。

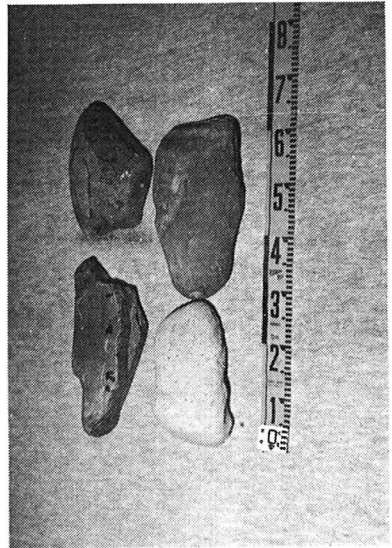
8 終わりに

地下水位の高い崩壊性砂礫層という極めて困難な土質に対して、泥漿シールドを用いた掘進により 1233.8^m のシールドトンネルを完成させた。

本工法は未確定の要素が多く、今後同種の土質に対して適用される場合には特に次の5項目を検討する必要があると思われる。

- ① 排土の運搬性が悪いこと
- ② 泥埋木への対応
- ③ 切羽部の加泥とチャンバー部の加泥との差異
- ④ ゲートを用いない排土装置、排土量測定装置
- ⑤ 曲線通過時への対応

以上多くの課題は残ったが、右写真の様な大径礫も容易に処理することができるとは能力的には十分なものがあつた、今後の開発が期待されるものである。



引用文献

- 1) ボーリング用泥水〈新版〉 井野文吉 著 技報堂
- 2) "リボンスクリュー式 泥漿シールドのきびしい土質条件下の適用実績と施工管理" 第21回シールドトンネル工法施工技術講演会