

# 長距離小口径泥濃式シールド工事の 課題対応と歩掛見直し

廣田 基樹<sup>1</sup>・市川 敬一郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>農林水産省 近畿農政局 東播用水二期農業水利事業所 (〒651-2304兵庫県神戸市西区小東野30-19)

<sup>2</sup>一般社団法人 日本水土総合研究所 企画研究部 (〒105-0001東京都港区虎ノ門1-21-17)

淡河川・山田川疏水事業において築造された淡河幹線水路と山田幹線水路（以下、「淡山疎水」という）が築後100年以上が経過しており、特に三木市緑が丘団地においては水路トンネル地上部が宅地化されるなど、施設の老朽化による陥没事故等の社会的リスクが増大していた。このため、国営土地改良事業「東播用水二期地区」（以下「本地区」という）では、新たな水路として全長約2.5kmの緑が丘サイホンを建設した。本報文では、国内でこれまで約1.5kmの距離しか施工実績のなかった長距離小口径泥濃式シールド工事について、施工方法の選定、掘削中に生じた課題への対応、並びに掘進距離に応じて歩掛の補正を行った事例を報告する。

キーワード シールド工法、泥濃式、ESS工法、直接吸泥排土、距離補正

## 1. はじめに

本地区は兵庫県南東部に位置し、神戸市他3市1町にまたがる7,313haの農業地帯である。本地区の基幹的な水利施設は、淡河川・山田川疏水事業（1888～1919）、及び国営東播用水事業（1970～1992）において整備され、川代ダム、大川瀬ダム、呑吐ダムと110kmに及ぶ用水路ネットワークが完成した。しかし近年、施設の老朽化による補修・維持管理の増大や水利施設の機能低下、及び地域の営農形態の変化に伴う用水不足等の課題が生じてきたため、2013（H25）年度から本地区事業に着手し水利施設の改修、及び用水系統の再編等を行っている。

今般、淡山疎水の中で、昭和後期に急速に宅地化された三木市緑が丘団地において、老朽化した水路の更新・統廃合が急務であったため、新たに図-1に示す全長約2.5kmの緑が丘サイホンを足掛4年の工期を経て新設した。

本報文では、国内でこれまで約1.5kmの距離しか施工実績（内径1,500mm以下、直接吸泥排土）のなかった長距離小口径泥濃式シールド工事について、地理的条件による施工方法の選定、掘削中に生じた吸泥排土等の課題への対応、並びに延長約2.5kmに及ぶシールド工事の実績を基に掘進距離に応じて歩掛（日進量）を補正した事例を報告する。

## 2. 長距離小口径泥濃式シールド工事の概要

今回新設した緑が丘サイホンは、三木市緑が丘団地下を通過する2,447mの水路トンネルである。本施工における特徴として、団地内の公道に沿った施工となるために曲線半径が15mの急曲線区間があること、長距離掘進となるが住宅地に中間立坑を設置できる適地がないこと等が挙げられる。このため、本工事では急曲線及び長距離施工が可能であるエコスピードシールド工法（以下、「ESS工法」と呼ぶ）を採用した。

### (1) シールド形式の検討

シールド工法を大まかに分類すると、泥水式と土圧式があり、さらに推進工法の一形式として泥濃式があるが、本工事では、シールド工法に泥濃式を取り入れた工法を含め、現場条件や経済性にに基づき、工法の比較検討を行った。泥水式については、現場条件として地下水位が本線水路の深度より低く逸泥の可能性があるため不適とした。次に、土圧式と泥濃式を比較検討した。いずれも地下水位が低い無水層での掘削が可能だが、土圧式の場合、内径1,500mmではセグメント搬入台車と掘削土砂運搬車両が通過できる作業内径（最小で1,650mm程度が必要）を確保することが難しいため、土圧式は不適とした。



図-1 緑が丘サイホンの路線図

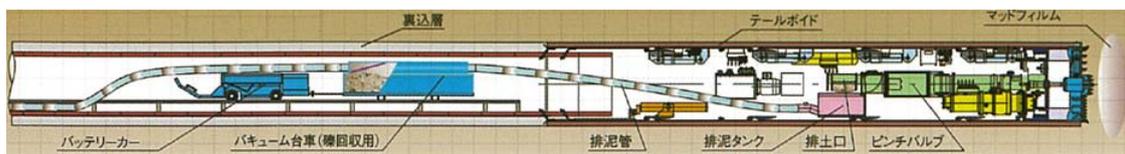


図-2 泥濃式シールド工法の施工イメージ

一方、泥濃式の場合はバキュームにより排泥吸引管を通じて掘削土砂を直接吸引排土するため内径1,500mmでも施工可能である。坑内排泥吸引管の設置状況を写真-1に示す。このため、近年、内径2,000mm以下の小口径シールド工事においては泥濃式の採用が増えており、本工事においても泥濃式を採用することとした。泥濃式シールド工法の施工イメージを図-2に示す。切羽安定方法（高濃度泥水による切羽保持）と掘削土砂運搬方法（バキュームによる直接吸引排土）に特徴がある。



写真-1 坑内全景

(2) 長距離小口径泥濃式シールド工事の留意点

これまで泥濃式の小口径シールド工事の施工延長の最長実績は、約1.5kmであるものの、ほとんどが1.0km以下の工事であり、約2.5kmもの長距離施工の場合、バキュームにより直接吸引排土できるかが大きな課題であった。掘削土砂は、当初、地上部にある100kWと75kWの2つの排泥ユニットによる真空吸引により排泥吸引管を通じて排土する計画であったが、掘進延長が長くなると排泥輸送距離が長くなるため、真空吸引力の低下や配管閉塞に注意する必要があった。

3. シールド掘削中に生じた課題と対応

(1) 排泥吸引管の閉塞頻度の増加と原因

掘進を開始して3ヶ月が経過した2017年7月以降（掘進距離500m付近）、排泥を輸送する排泥吸引管内において礫が一部分に集中し、排泥管の解体を必要とする閉塞が発生するようになり、排泥距離が長くなるほど日進量が低下した。閉塞状況を写真-2に示す。

閉塞の発生原因を検討した結果、水分や細粒分が先にバキューム吸引され排泥管内を交互に流れる排泥と空気のバランスが崩れること、排泥管内面の劣化により排泥が内面に付着することで流れが低下して、泥が礫と分離すること、また、排泥管内の乾燥によっても分離を誘因することにより閉塞を引き起こすことが分かってきた。

（詳細は2018年度の報文<sup>2</sup>により既報）



写真-2 排泥吸引管の閉塞状況

(2) 講じた対策

このまま対策せずに掘進すると、閉塞頻度と復旧時間が増加し、日進量がさらに低下するため、事業工期に影響することも予想された。そこで、①排泥ユニット出力の大型化、②排泥管への事前の泥水注入、③定期的な排泥管内清掃、④掘進速度の調整（低速化）を行い、長時間閉塞の抑制に取り組んだ。対応策を講じた時期と対応後の掘進時間及び掘進停止回数の状況を図-3に示す。

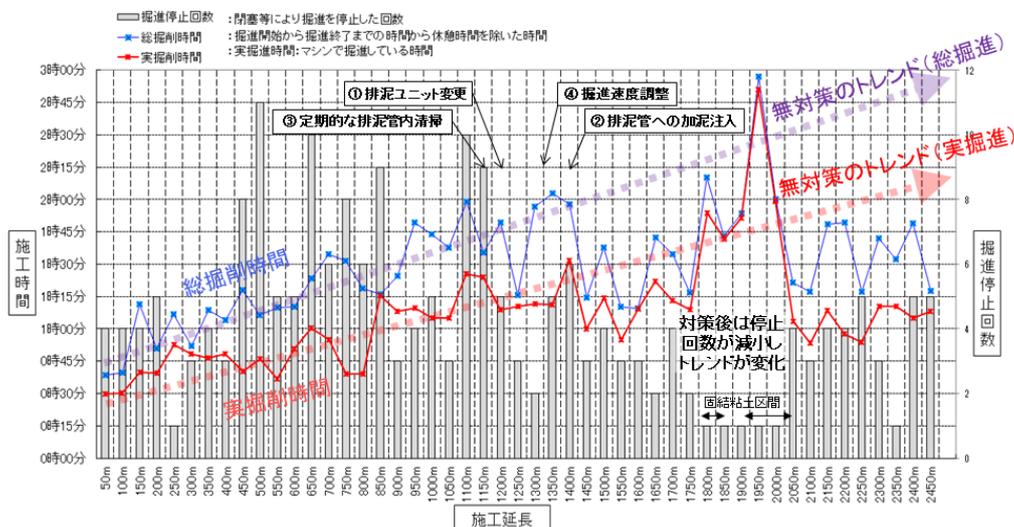


図-3 掘進時間推移

図-3で示した総掘進時間（青の折れ線）と実掘進時間（赤の折れ線）の差が小さい程順調に掘進できていることを意味しており、順次対策を講じて以降この差が大きく開いていないことから、閉塞の発生を抑制できたことが分かる。以下、対応策の詳細を補足する。

**a) 排泥ユニットの大型規格への変更**

当初は全期間において、2つの排泥ユニット(A:出力100kW(54m<sup>3</sup>/分), B:出力75kW(44m<sup>3</sup>/分))にて排泥する計画であったが、掘進距離が500m近くになった頃から閉塞が多発したため機械能力が不十分であると判断した。そこで、排泥ユニットBについて、出力を650m付近から100 kW(54m<sup>3</sup>/分)に変更し、さらに、1,150m付近から132kw(108m<sup>3</sup>/分)に変更した。

**b) 排泥管への事前の泥水注入**

掘進距離1,400m付近から、排泥吸引管内の乾燥を防ぐため、1スパン（約1m）掘削毎に管内に泥水を注入（80L/分×5分=400L）し、排泥吸引管内を潤滑化した。

**c) 定期的な排泥吸引管内清掃**

排泥吸引管内における排泥沈降が閉塞の要因の1つであることから、礫詰まり対策として管内清掃を定期化した。1スパン掘進毎に丸めた新聞紙（Φ10cm大）を4～5回程度管内に投入することに加え、週末の掘進終了後に泥水を2m<sup>3</sup>程度流し、最後に新聞紙を投入することにより、排泥沈降、管内劣化の抑制を図った。

**d) 掘進速度の調整（低速化）**

掘進距離が長くなっても排泥の吸引負荷を増加させない方法として排泥吸引管内の土量を少なくする方法に取り組んだ。掘進速度を通常の60%程度（掘進速度約20mm/分→約12mm/分）に制限する速度調整掘進により、管内土量をコントロールし、吸引負荷の増加を防いで管内閉塞の回避に努めた。

**4. 設計日進量と実績日進量**

今回、排泥ユニット出力の増強や泥水注入等により、排泥吸引管の閉塞頻度を減らすことができたため、結果的に事業工期に影響しない程度の工期延伸（掘進期間：当初15ヶ月、実績23ヶ月）で工事を完了させることができた。しかしながら、当初設計においては、これまでの小口径泥濃式シールド工事の施工実績（大半が1.0km未満）に基づき、掘進延長に関係なく直線区間の標準日進量を8.3m/日としていたところ、実工程では長距離掘進の場合、設計値と大きな乖離が生じ、工程管理上、無視出来ないレベルとなることが明らかとなった。従来の設計日進量と実績の乖離は、図-4に示すとおりであるが、掘進距離が1kmを超えてから更に乖離が拡大していることが分かる。従って、掘進距離による日進量の低下は、前述した閉塞のメカニズムからも不可避であるため、設計日進量の設定においては、掘進距離に応じて補正すること、即ち標準歩掛の見直しが適当と判断した。

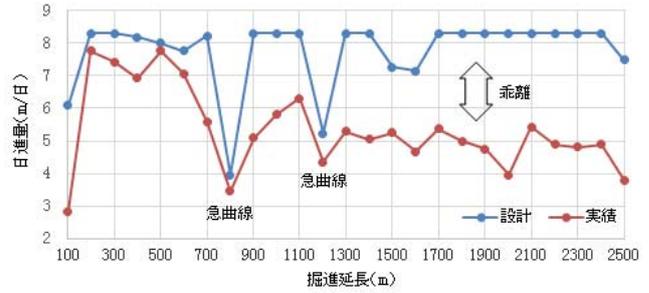


図-4 設計日進量と実績日進量

**5. 標準歩掛の見直しによる日進量補正**

エコ・スピード・シールド工法協会（以下、ESS工法協会という）が定める標準歩掛について、長距離の場合でも実態に合った設計日進量に補正できるように、以下の算定式について検討した。

$$\text{補正日進量} = \text{標準日進量 (8.3m/日)} \times \text{長距離補正係数}$$

$$\text{長距離補正係数} = 1.0 - \alpha \times (L/1000 - 1)$$

$\alpha$  : 排泥吸引速度係数

L : 掘削延長

（ただし、1,000m以下は、長距離による補正係数は1.00）

算定式では、排泥吸引速度係数 $\alpha$ を決定し、標準日進量に長距離補正係数を乗じることにより、排泥管理を考慮した補正日進量を求めることを試みた。そこで、本工事における日進量低下の主な要因である排泥管理にかかる歩掛かりを距離に応じて見直した上で、排土管理工改訂後の標準日進量と補正日進量が近似するような $\alpha$ の値を求めることとした。標準日進量の内訳を表-1に示す。排土管理工の歩掛かり改訂は、実際に計測した排泥吸引速度に基づき行った。

表-1 標準日進量の内訳

セグメント据付け工 セグメント小運搬および準備工 電線、注入管外し、取付工 接続ボルト増し締め	0.70
掘進推進工 掘進および推進工	0.69
排土管理工	0.29
高濃度泥水注入工 測量工	0.15
裏込注入工 裏込注入管清掃工	0.10
計1リング当たり所要時間 (h)	1.93
標準日進量 (m/16h) *	8.3

\* トンネル工事は2交代制16h/日であるため、

16h÷1.93h/m ≒ 8.3m/日となる

(1) 標準日進量（排土管理工改訂）の算出

a) 排泥吸引速度の測定と区間毎の排泥平均速度の算出

ドブラー流量計と水系による複数の測定結果から、各計測地点における排泥吸引速度の平均を求めた。ドブラー流量計の値は、配管内が充填されている環境下で計測しているため、実際は配管内が充填されない状態で排泥していることを考慮して、水系先端に錘を付けて270m（水系長）の移動に必要な時間を測定し補正した。補正後の排泥吸引速度を表-2に示す。

表-2 補正後の排泥吸引速度

	45.8m	800.9m	1,201.2m	1,350m	1,773m	2,202m
ドブラー流量計 (m/s) …A	2.151	1.213	0.322	—	0.229	0.183
水系 (m/s) …B	—	—	0.279	0.268	0.2	0.158
補正係数(B/A)	0.867 {=(1+2+3)/3}		0.866 <sup>1</sup>	—	0.873 <sup>2</sup>	0.863 <sup>3</sup>
補正後の速度 (m/s)	1.865	1.052	0.279	0.268	0.2	0.158
〃 (m/h)	6,714	3,787	1,004	965	720	569

次に、補正後の排泥吸引速度 (m/h) から求めた各計測地点の排泥吸引速度を図-5に示す。図-5のグラフから求めた区間毎の排泥吸引平均速度を表-3に示す。

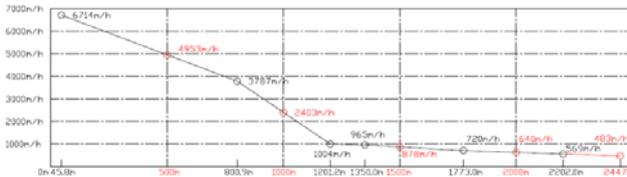


図-5 排泥吸引速度

表-3 区間毎の排泥平均速度

区間 (m)	0-500	500-800	800-1000	1000-1200	1200-1500	1500-2000	2000-
排泥平均速度 (m/h)	5,834	4,370	3,095	1,704	949	746	564

b) 排土管理工の改訂と標準日進量の算出

区間毎の排泥平均速度から距離に応じて排土管理工の歩掛かりを見直した。改訂後の排土管理工と標準日進量の値を表-4に示す。

表-4 距離区分に応じた標準日進量と排土管理工

	1000m	1200m	1400m	1600m	1800m	2000m	2200m	2400m
セグメント据付工	0.70							
掘進推進工	0.69							
排土管理工	0.29	0.34	0.55	0.79	1.05	1.32	1.68	2.03
高濃度泥水注入工、測量工	0.15							
裏込注入工、裏込注入管清掃工	0.10							
計1リング当たり所要時間 (h)	1.93	1.98	2.19	2.43	2.69	2.96	3.32	3.67
標準日進量(m/日)	8.30	8.10	7.32	6.59	5.94	5.40	4.82	4.36

\*計算例・・・2,000mの場合、  
 排土管理工 1.32=(500/5,834)+(300/4,370)+(200/3,095)+  
 +(200/1,704)+(300/949)+(500/746)  
 標準日進量 5.40=162.96

(2) 排泥吸引速度係数αの算出と標準日進量の見直し

表-4で示した標準日進量（排土管理工改訂後）と補正日進量が近似するαを試行錯誤法により求めた。αの値に応じた各補正日進量を表-5に示す。この結果、標準日進量（排土管理工改訂）と補正日進量が近似するαは0.35となった。

今後、本工事のような長距離小口径泥濃式シールド工事を行う場合、標準日進量（8.3m/日）にαを0.35とした長距離補正係数を乗じて補正日進量を求めることが妥当であると考え。 (ESS工法協会では本工事の実績を基に設計標準日進量を見直す予定)

表-5 排土管理工改訂後の標準日進量とα値に応じた補正日進量の比較

	1,000m	1,200m	1,400m	1,600m	1,800m	2,000m	2,200m	2,400m	2,447m	平均日進量
標準日進量 (排土管理工改訂後)	8.30	8.10	7.32	6.59	5.94	5.40	4.82	4.36	4.26	6.58
補正日進量 (α=0.20)	8.30	7.97	7.64	7.30	6.97	6.64	6.31	5.98	5.90	7.39
〃 (α=0.25)	8.30	7.89	7.47	7.06	6.64	6.23	5.81	5.40	5.30	7.11
〃 (α=0.30)	8.30	7.80	7.30	6.81	6.31	5.81	5.31	4.81	4.70	6.84
〃 (α=0.35)	8.30	7.72	7.14	6.56	5.98	5.40	4.81	4.23	4.10	6.51
〃 (α=0.40)	8.30	7.64	6.97	6.31	5.64	4.98	4.32	3.65	3.50	6.16
〃 (α=0.45)	8.30	7.55	6.81	6.06	5.31	4.57	3.82	3.07	2.90	5.76

6. おわりに

今回、長距離小口径泥濃式シールド工事として、国内最長となる約2.5kmもの施工を完了させることができた。閉塞トラブルが頻発する中、各種対応策を講じてきたが、特に、排泥ユニット出力を132kwへタイミング良く増強できたことが、工期を延伸しつつも直接吸引排土により最後まで掘進できた要因として挙げられる。今回の施工実績から、今後、長距離掘進の工事を行う際は、大型の排泥ユニット（出力132kw）の確保を考える必要があるが、国内に数台しか無いことを当初設計段階で考慮すべきことが示された。また、当初設計では排泥管理にかかる歩掛かりを掘進距離に関わらず一定なものとしていたが、約2.5kmの施工実績を踏まえ、掘進距離に応じて標準日進量を補正する必要があることが示唆された。今回の日進量補正が、他の現場における設計に役立てば幸いである。

一方、今後の教訓として、排泥ユニット出力132kwの設備が2018年当時国内に3台しかなく、タイミング良く切替できなかった場合、工期がさらに延伸し、ひいては事業工期を修正せざるを得なかった可能性を考慮すると、当初のシールド形式の選定を振り返るなら、例えば費用がかさむとしても、土圧式が適用できるような内径を大きく確保し、確実に施工できる工法を選択する判断もあったかもしれない。特に土地改良事業の場合、出先機関である事業所は完工と共に閉所するのが一般的であるた

め、事業工期の延伸による事業所固定経費・人件費の増は無視できないものがある。よって今回の工事に限らず、対象工事における経済比較の優位性が多少劣っていても、工期の確実性や省力化に資する工法が適する場合もあるため、大規模かつ長工期を要する工事においては特に、わずかな工事コストの差にとらわれず、工事期間中拘束される技術者の人的コスト増のリスクも考慮した冷静な工法選定が求められると考える。

最後に、今回泥濃式シールド工事において前例のない施工延長を掘進し、国内最長記録を達成できたことは農業土木技術者として大変貴重な経験となった。関係者の

皆様には改めて謝意を表するとともに、今後、本工事の実施成果が関係者の皆様の仕事の参考となれば幸いです。

#### 参考文献

- 1) ESS協会：設計積算資料（平成29年度版）
- 2) 坂井睦規：「長距離シールド工事における直接吸泥排土の課題と対応」2018（平成30）年度近畿地方整備局研究発表会発表論文
- 3) 芳崎貴彦（株）フジタ，廣田基樹，坂井睦規（近畿農政局東播用水二期農業水利事業所）：泥濃式シールド工法による小口径・長距離シールドの施工実績，土木学会第74回年次学術講演会，VI-164，2019