

# 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

坂井 睦規<sup>1</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 調査設計課

(〒651-2304兵庫県神戸市西区神出町小東野30-19)

東播用水二期農業水利事業では、真空吸引を用いた直接吸泥を行う泥濃式シールド工法により、平成27年度からサイホンの建設を進めている。ところが、工事を実施していく中で排泥管内において礫の閉塞が多発し、工事の進捗が悪化、工期内に工事を完了できるかが不明となった。そこで閉塞発生に係るメカニズムについて調査し、実際の掘進データから閉塞に影響を及ぼす要因について考察を行うと共に、排泥吸引機器の変更や、吸引台車の利用の検証等、対応策を模索し、パターンごとの工期シナリオを作成した。本発表は、現場で問題があった際に事象を説明可能な段階まで定量化し、工程管理の対応へと繋げた事例を報告するものである。

キーワード 工程管理, シールド工法, 泥濃式, 直接吸泥排土

## 1. はじめに

東播用水二期地区は兵庫県南東部に位置し、神戸市外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（M21～T8）、国営東播用水事業（S45～H4）において整備されてきたが、近年、施設の老朽化による補修・維持管理費用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。そのため、平成25年度から東播用水二期農業水利事業として、水利施設の改修、及び用水系統の再編を行うことを目的として事業着手に至った。

地区内の既設水路のうち、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、山田幹線水路（以降、「淡山水路」と呼ぶ）は造成から100年以上が経過しており、老朽化の進行が著しい。特に三木市緑が丘団地に

おいては水路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る。そこで、宅地下を通る淡山水路を閉塞し、新たな水路としてシールドトンネル工事により緑が丘サイホンを新設することとした。本工事は事業計画上の工期の観点から遅くとも平成31年7月までに完了しなければならない。緑が丘サイホンの建設予定路線を図-1に示す。

本報文では、長距離シールドトンネル工事の施工中に発生した、真空吸引を用いた直接吸泥排土における排泥管閉塞の要因分析と共に、工程管理に係る対応について報告する。

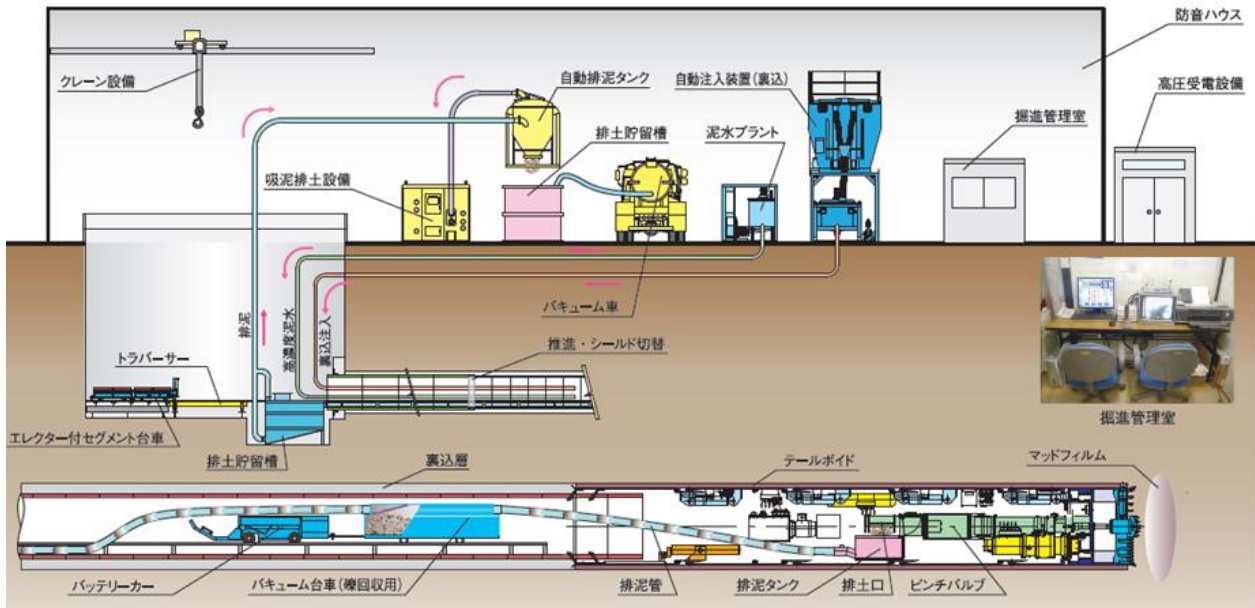
## 2. 緑が丘サイホンの新設について

緑が丘サイホンは三木市緑が丘団地下に建設中の2,447mのトンネルである。本施工における特徴としては、



図-1 緑が丘サイホン建設予定路線（兵庫県三木市）

◆ システム図



- 過密化した都市において生活環境に与える負荷を最小限にするコンパクトなシステムである。
- 推進工法で長距離・急曲線を得意とする泥濃式をシールド工法に応用した。
- 泥濃式新排泥システムにより、超長距離施工での排泥管閉塞トラブルを克服した。

図-2 ESS 工法の一般的なシステム<sup>1)</sup>

道路に沿った施工となるために曲線半径が15mとなる急曲線区間があること、宅地の近傍や道路、ため池、鉄道の直下を通過するため、地盤へ与える影響を抑える必要があること、中間立坑を設置する適地が無く、長距離掘進となること等が挙げられる。これらに対応するため、本工事ではエコスピードシールド工法（以降、「ESS工法」と呼ぶ）を採用している。工法の概略図を図-2に示す。なお、本工事においてはシールドトンネルを構成する全2,654のリングを施工単位とし、リングの本数によって施工の進捗状況を確認している。リングの長さは300、750、1,000mmとあるが、急曲線区間等の一部区間を除くほとんどの場所（2,352リング）で1,000mmの長さのリングを使用している。

ESS工法では掘削対象地盤が崩壊しないようにシールドマシンを地山に押し付けて必要な土圧を保持しながら掘削を行うが、主な特徴として「バキュームにより坑内土砂を直接排出する」という点がある。掘削された土砂は排土口からマシン内に入り、地上部にある100kWと75kWの2つの吸泥排土設備による真空吸引により排泥管内を輸送するため、坑内土砂の排出にかかる作業・輸送時間の省略が可能となる。また、掘削時に注入する高濃度泥水によって土質条件によらず安定的な掘進が可能であり、掘削土砂は止水性の高いマッドフィルム層によってコーティングされることで管への粘着力が低下し、流動性が高くなることで閉塞の発生を低減させ、安定的な排土を可能としている<sup>2),3)</sup>。



図-3 送泥管の閉塞状況

### 3. 閉塞の発生と傾向の分析

#### (1) 閉塞の発生とそのメカニズム

シールドの総リング数が600に到達し、掘削を開始して3ヶ月が経過した平成29年7月以降、排泥を輸送する排泥管内において礫が一部分に集中し、対応に排泥管の解体を必要とする突発的な閉塞が発生するようになった。その閉塞状況を図-3に示す。施工距離が延びるにしたがってこのような閉塞が頻発するようになり、作業に支障が生じるようになった。これを受けて受注者及びESS工法協会と打合せを行った結果、図-4のメカニズムにより閉塞が発生していることがわかった。また、真空状態にある排泥管内においては、乾燥により排泥と礫が分離しやすくなる、排泥管の延長に比例して閉塞が発生する可

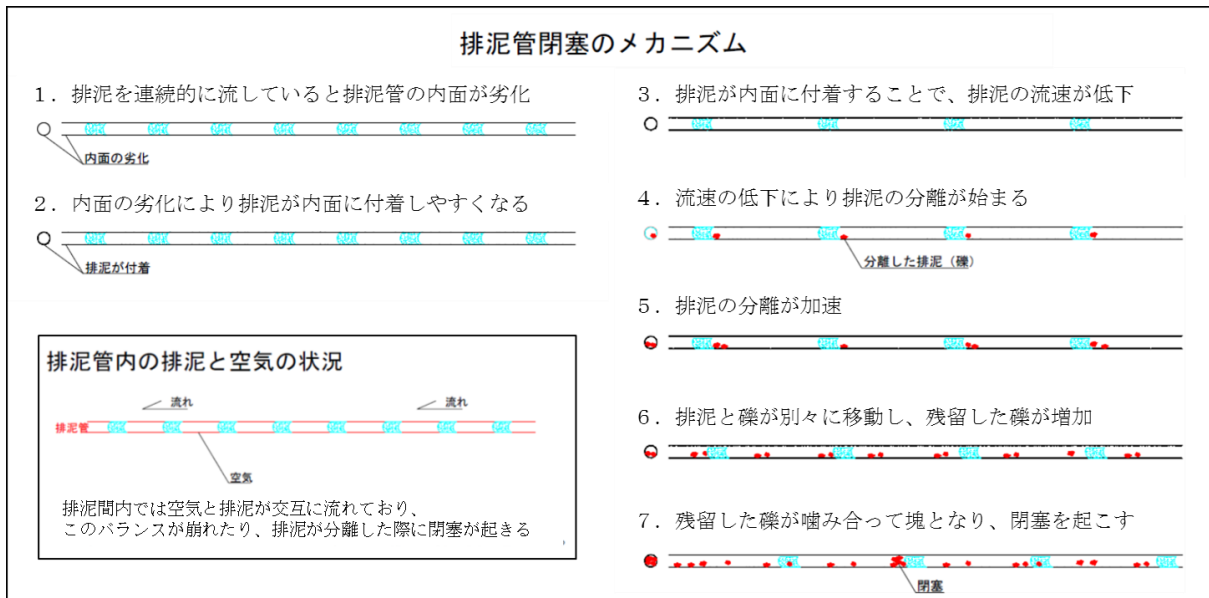


図4 排泥管閉塞のメカニズム (ESS工法協会より提供)

能性のある箇所が増える等の影響があるため、閉塞の発生自体を無くすことは原理的には難しいと判明した。

現場の作業員の実感として施工延長が長くなるにつれ、①礫が詰まる回数が増え、②礫を取り除く時間も増加しているという報告を受けていた。閉塞が多発すると、閉塞箇所の特長、排泥管の解体と内部の清掃、礫の除去にかかる時間が増大する。また、吸泥排土の効率が悪くなることで掘進が排泥速度の影響を受けるようになり、リングあたりの掘進時間が増加して工事の進捗が遅れが生じ始めていた。受注者やESS工法協会との打合せを通じて、今回の長距離の施工等の条件により閉塞の発生が多くなって顕在化した問題であると考えられることがわかったが、工程の管理をする上で、メカニズムを元にした論理式を作成して作業時間の推定を行うことは不可能であるとの結論に達した。

**(2) 閉塞の発生傾向の把握**

工程を管理する上では閉塞の影響も考慮に入れた掘進時間の推定が必要となる。しかし、閉塞の発生自体は現場で確認されているものの、比較可能なデータとして発生件数が正確に記録されていなかった。そこで、シールドマシンの稼働記録を用いて11月30日時点までの掘進時間と閉塞の関係性を調査した。

掘進作業に係る時間のうち、実際にシールドマシンが掘進を行っている時間を実掘進時間と定義する。また、休憩時間を除いた、掘進作業中にマシンを稼働させていない時間を停止時間と定義し、実掘進時間と停止時間の合計を総掘進時間と定義した。

施工延長に対する1リングあたりの各時間の推移を図5に示す。なお、初期掘進区間である施工延長22mまでのリングと、リング長が1000mm以外の区間においては、施工延長に対する各時間の推移を比較する上で障害とな

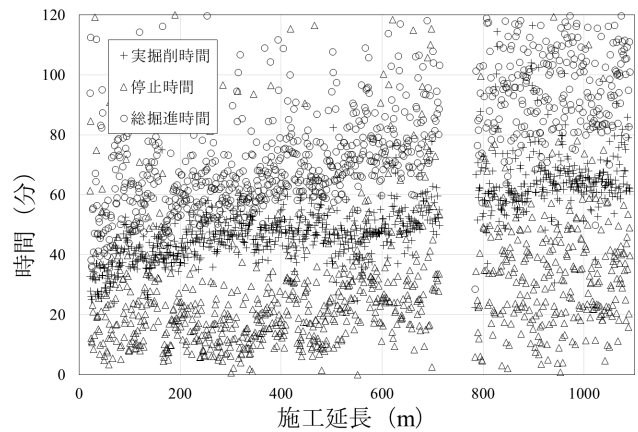


図5 施工延長に対する各時間の推移

るため、データより省いた。また、データが大きくばらついているため、掲載の都合上、縦軸の最大値を120としている。データのばらつきは非常に大きいものの、図5により、掘進を進めて施工延長が増加していく中で1リングあたりの実掘進時間、停止時間、総掘進時間が漸次的に増加しており、その結果、進捗の遅れが生じていることが確認できた。

次に、閉塞の増加を確認するため、実掘進時間においてマシンの推進力が0になった回数 (=掘進を止めた回数) を停止回数と定義した。しかし、停止回数そのまま閉塞の発生数となるとは言えない。そこで、停止時間を停止回数で割ることで、マシンが1度止まった際の停止時間の平均時間を算出した。閉塞が起きた場合、礫の撤去のために排泥管を外す等の対処をする必要がある。現場の実感として、1回の閉塞に対してこの作業は最低でも10分以上かかっていたことから、この値が10分を超えた場合は閉塞が起きていたとして整理した。最後に全987データを5区間に分け、停止時間/停止回数が10分/回を超えたリング数を比較した。表-1にその結果を示す。

表-1 より、施工始点より距離が離れた区間ほど、閉塞が発生したリング数が増加する傾向があることがわかり、掘進を進めるにつれて閉塞の発生数が増加するという現場の実感を、定量的に示すことが出来た。

**(3) 各要因の整理と掘進時間の推定**

作業時間を閉塞のメカニズムに基づいた論理式で示すことは出来なかったものの、施工距離が長くなるほど閉塞の発生が増加することが確認できたため、その要因を探るべく、前節までに確認した項目と共に、総掘進時間に影響する可能性がある礫率、N値の関係性を調査した。各項目の値はリング毎のばらつきが非常に大きいため、外れ値の影響を大きく出してしまう。外れ値の影響を抑えるために100リング毎に平均値を取り、全987データから各10区間における平均データを作成した。各データの施工延長に対するデータを図-6に示す。また、それぞれの関係性を確認するため、項目間の相関係数を調べた。結果を表-2に示す。

相関係数の捉え方には諸説あるが、本報文においては相関係数の絶対値が0.6以上となれば他の箇所比して強い相関があると捉え、当該箇所を網掛けで示した。

表-2にて網掛けされている箇所のうち、原理的に施工距離と実掘削時間、実掘削時間と停止時間は相互に影響すると考え難いため、それらの相関係数が高い理由は他の同一の項目との相関が高いためであると考えられる。また、前節において定義した停止時間/停止回数の増加は閉塞の発生回数の増加と関係があると考えられるが、その値は施工距離、実掘削時間、停止時間と強い相関を持っていることがわかった。

以上より、実掘削時間と停止時間の増加は停止時間/停止回数、すなわち閉塞の発生の増加に大きな相関があり、また、閉塞の増加要因として礫率やN値の値も相関が無いとは言えないものの、最も大きな要素は施工距離であると確認することが出来た。閉塞の発生が実掘削時間に影響を及ぼす理由としては、このデータを踏まえた

現場からの聞き取りにより、土砂の吸引力が下がった際にオペレーターが掘削速度を落とすなどの対応をするためであると判明した。

本節の結論として、掘進の時間を構成する要素を実掘削時間と掘削停止時間に分けた際、他の要因も関係はするものの、最も大きな影響を与える要素は閉塞であること、閉塞の発生は施工距離に応じて単調的に増加することがわかった。すなわち、総掘進時間の増加係数は施工延長との比で示すことができ、工程管理においては現況までのデータを元に一次的な直線を引くことで将来的な予測を立てることが可能となる。

**4. 対応策の考案**

前章において、真空吸引による直接吸泥排土では礫の集中による閉塞の発生は構造的に起こりうることであり、根本的な解決は難しいと判明した。そこで、今まで得られたデータを元に帰納的に今後の掘進時間を推定し、工程管理に用いた。

2018年1月より、現場においては閉塞の発生要因を可能な限り取り除くため、定期的に排泥管内に礫や土砂を

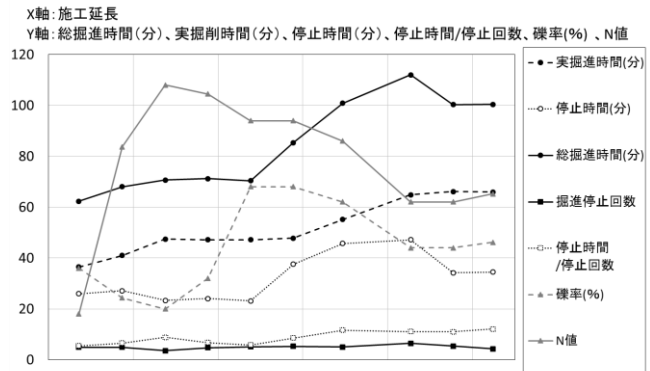


図-6 施工延長に対する各項目の推移

表-1 各区間において平均10分を超える掘進停止が起こったリング数

区間	22m~225m (データ数 200: No.1 ~200)	226m~426m (データ数 200: No.201 ~400)	427m~628m (データ数 200: No.401 ~600)	629m~904m (データ数 200: No.601 ~800)	905m~1091m (データ数 187: No.800 ~987)
リング数	26	57	54	80	77

表-2 各項目間の相関係数

	施工距離	実掘削時間(分)	停止時間	掘進停止回数	停止時間/停止回数	礫率(%)	N値
施工距離	1.00						
実掘削時間(分)	0.97	1.00					
停止時間	0.66	0.64	1.00				
掘進停止回数	0.32	0.29	0.66	1.00			
停止時間/停止回数	0.86	0.89	0.77	0.16	1.00		
礫率(%)	0.43	0.23	0.44	0.47	0.20	1.00	
N値	-0.04	-0.05	-0.18	-0.35	-0.02	0.05	1.00

巻き込みやすい新聞紙等流し、排泥管内の残留礫や壁面土砂の清掃を実施した。また、バキュームユニットも出力の高い装置に変更することで吸引能力を上げ、かつ掘進速度を調整することで一度の送泥量を減らし、閉塞の発生を抑える為の対応を行っている。これらの対応を取ることで、従来よりも現場においては閉塞発生数を抑制することが出来ている。

一方で、閉塞の発生数が著しく増加する等の直接吸引に係る障害が発生しない保障は無く、他の障害が発生した際の対応も必要となる。そこで2017年12月に、坑内で排泥を積載して移動できる吸引台車(図-7に示す。)による土砂運搬のサイクルタイム実証試験を実施し、直接吸引の代替法としての利用を検証した。小口径シールドの中を通行するため、台車の大きさに制限がある点、排泥作業と平行して他の作業を行うことが出来ない点から、結果としては2.4km地点のリングの総掘進時間が460分と、直接吸引による施工の2倍以上がかかることがわかり、吸引台車を用いて施工効率を向上させることは難しいと確認できた。一方で直接吸引と比べて不確定な要素が少なく、どのような状態でも排泥作業を行うことが出来るという利点も把握できた。

本工事においては平成31年7月までに施工完了するか否かが他の関連工事に大きく影響を与えるため、不測の事態が起きた際の対応策、及びその対応策に間に合うかどうかを判定する必要がある。そこで、延長に応じた総掘進時間の低下を考慮した工程を基とし、シナリオ1:



図-7 坑内へ搬入する吸引台車

そのまま掘進を続けた工程、シナリオ2:バキュームユニットを変更し、排泥能力を上げた場合の工程、シナリオ3:シナリオ2の途中で吸引台車に切り替え、かつ平成31年7月までに施工完了が出来る工程の3つのシナリオを作成した。それぞれを図-8に示す。この結果、シナリオ1では当該時期までに施工を完了することが出来ないこと、特に問題が起らなかった場合はシナリオ2では当該時期までに施工を完了することが出来ることがわかった。また、万が一シナリオ2の途中で直接吸引を用いた施工が不可能になった場合、その発生が平成30年11月以降であれば、その時点で吸引台車に変更することで遅くとも平成31年7月までに施工が完了し、事業工期全体への影響が無いことを示すことが出来た。

### 5. あとがき

小口径シールドにおける真空吸引を用いた直接吸引排土はスペースと作業の省力化による低コスト化を実現した反面、本工事のような長距離の実績はなく、不測の事態が起きた際の対応を模索する必要があります。本報文ではデータ分析を通じた遅延要因の分析と進捗の推定、吸引台車によるサイクルタイム実証試験を活用した工程管理に係るシナリオ作成の結果を中心に掲載しました。発表内容をまとめる過程で、現場で起きている状況や作業員の実感を定量的なデータを用いた説明資料として整理する難しさを感じると共に、その重要性も学ぶことが出来ました。本報文では画期的な技術打開策の発案に至るまでは行きませんが、皆様の工法選定等の判断の一助となれば幸いです。

### 参考文献

- 1) 檜皮安弘:第41回「最新の推進工法施工技術」,日本プロジェクト・リサーチ,p.70-83,2016
- 2) ESS 工法協会:ESS 工法設計積算資料,2017
- 3) ESS 工法協会:ESS 工法カタログ 29年度,2017

工期シナリオ	H30												H31						
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月
工程① (以前からの掘進時間の推移より算出)																			
日掘進量	5.0R		4.5R					4.0R									3.5R		
シールド工	シールド工															到達後作業 (間に合わない)			
工程② (バキュームユニットの変更)																			
日掘進量	6.0R		5.5R			5R						4.5R							
シールド工	シールド工												到達後作業						
工程③ (バキュームユニット変更後、吸引台車を用いて7月中に完了する場合)																			
日掘進量	6.0R		5.5R			5R						4.5R	2R						
シールド工	シールド工												吸引台車		到達後作業				

図-8 工期シナリオの比較