

# 崩壊性地盤を高速施工する 泥水泥土複合式シールド工法の掘進

出雲 力斗<sup>1</sup>・前原 健治<sup>2</sup>・長光 憲一郎<sup>3</sup>・橋本 聡<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京電力パワーグリッド株式会社 工務部 送変電建設センター 千葉印西管路新設グループ  
(〒270-1350 千葉県印西市中央北1丁目4番)

E-mail: izumo.rikito@tepcoco.jp

<sup>2</sup>東京電力パワーグリッド株式会社 工務部 送変電建設センター 千葉印西管路新設グループ

E-mail: maehara.kenji@tepcoco.jp

<sup>3</sup>正会員 大成建設株式会社 千葉支店 東電印西シールド作業所  
(〒270-1350 千葉県印西市中央北1丁目3番3号)

E-mail: ken-1@ce.taisei.co.jp

<sup>4</sup>正会員 大成建設株式会社 千葉支店 東電印西シールド作業所

E-mail: sat-h@ce.taisei.co.jp

崩壊性のある砂質地盤に直径 5.45mの泥水泥土複合式シールドで電力洞道を構築した。当初、地域から早期の電力供給を要望されたことからトンネルは高速施工に対応できる泥水式シールドで計画した。しかし、泥水式シールドでは崩壊性地山に対し逸水や切羽崩壊の恐れがあるため、その兆候が見られた時には泥土圧シールドに切り替えることが可能な泥水泥土複合式シールドを採用することにした。カッターヘッドがスポーク形状、スクリュコンベアを排泥管の一部として使用するなど泥土圧シールドを基本に設計したマシンで泥水式シールドの掘進が可能かの検証と、地山の崩壊を検知するために装備した貫入式および超音波式の2種類の探査装置の有効性を検証したのでここに報告する。

**Key Words:** slurry shield, earth pressure shield, compound shield, ground settlement, screwconveyor

## 1. はじめに

東京電力パワーグリッド株式会社では、千葉県印西市を中心とした千葉ニュータウンエリアで急増する電力需要に対し、供給力を増強する工事を実施中である。そのうち、「千葉印西エリア洞道新設工事」は、既設の変電所から新設変電所までの約 10.1kmの区間に地中送電線敷設用トンネル（以下、「洞道」という）を構築する工事である（図-1）。工事は、西側のセグメント外径 4.45m、内径 4.0m、延長約 6.3kmを構築するその1工事と、東側のセグメント外径 5.3m、内径 4.8m、延長約 3.8kmを構築するその2工事に分けて実施する。

電力の必要時期から算定し、2020年4月の用地整備工事着手後、2022年3月末までにその1工事の区間を、2022年6月末までにその2工事の区間のトンネル掘削工事を終える必要がある。そのため、各工事が2台のシールドを用い、計4台のシールドにより同時施工を行う。

1号機および2号機は最大掘進速度 100mm/min、3号機お

よび4号機は最大掘進速度 72mm/min で計画した。<sup>1)</sup>

本報告は表題のように泥水泥土複合式シールドに関するものであり、その2工事のうち泥水式シールドで施工した3号機、および性能を確認するために一部区間を泥土圧シールドで施工した4号機の施工データについて述べる。また、1号機および2号機の泥水式と泥土圧の切替え方法・理由について述べる。

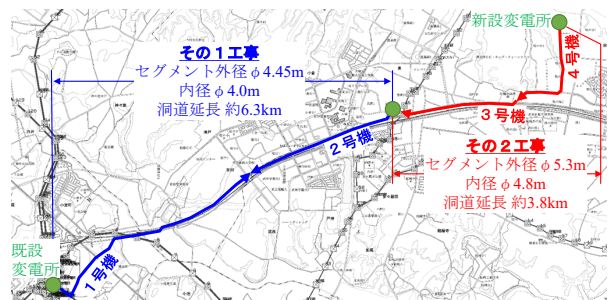


図-1 工事の概要図



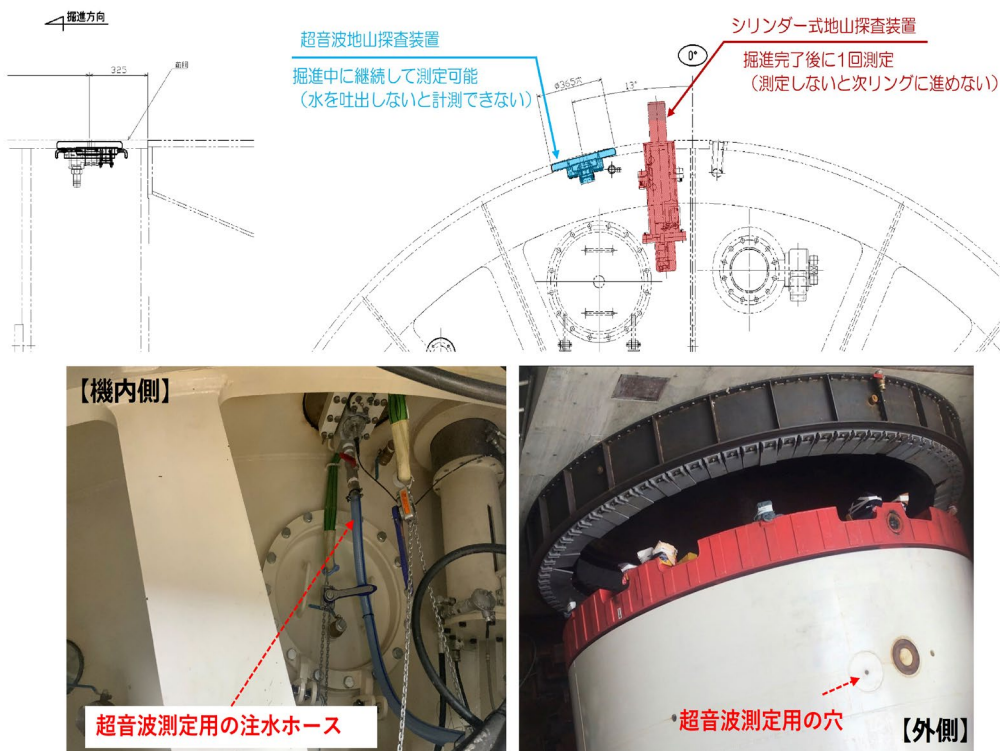
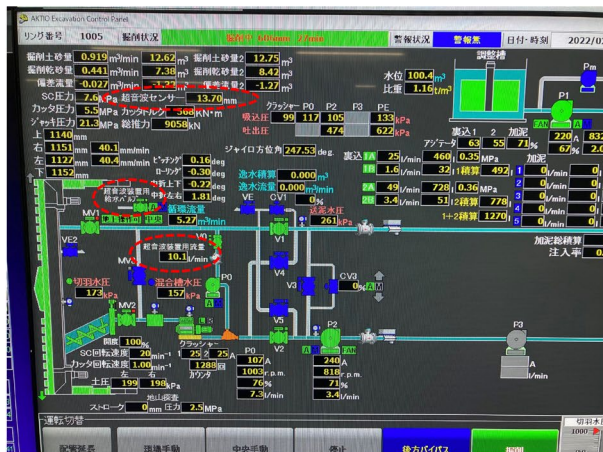


図4 地山崩壊探査装置（シリンダー式・超音波式）の構造図

【流体管理画面での表示：Aktio】



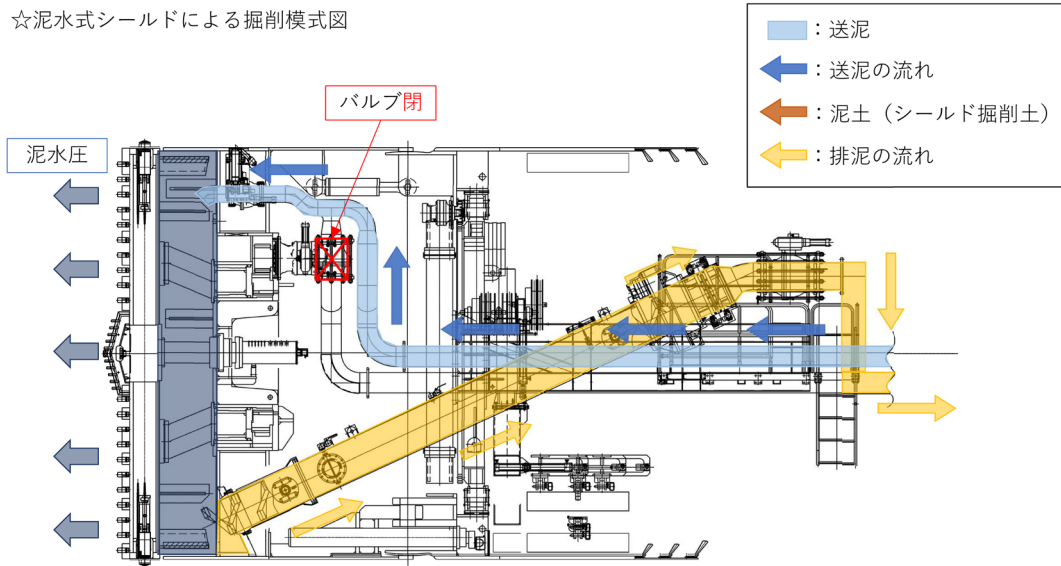
【掘進管理画面での表示：ENZAN】



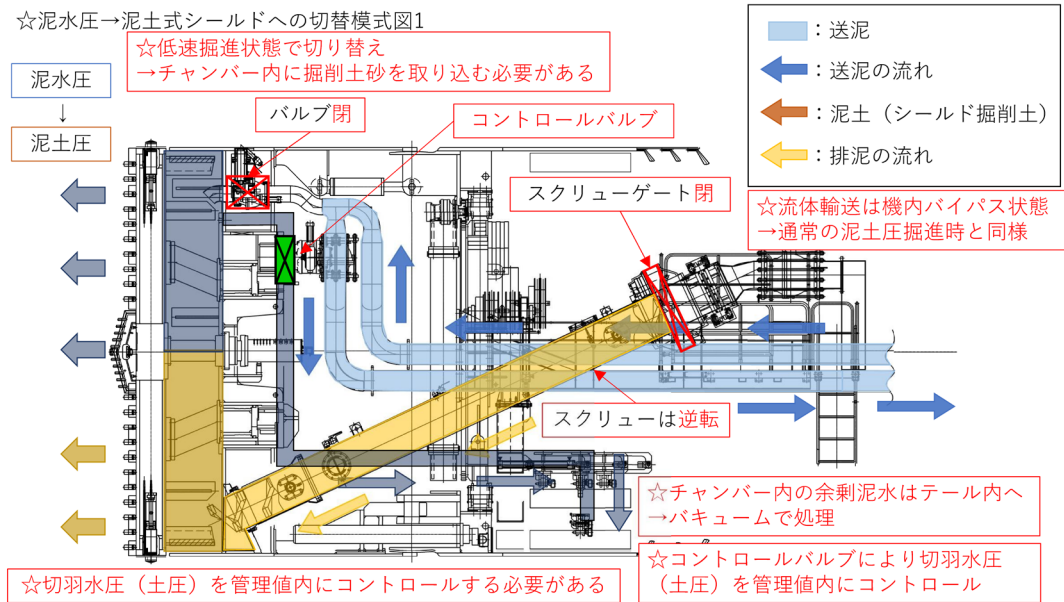
図5 地山崩壊探査装置（超音波式）の管理画面

- ② 面板：スポークの間に、扇形的面板を6枚装備した。開口率は40.6%である。過去の実績において、直径5m程度の開口率は、泥水式で20～30%程度、泥土圧で50～60%程度であり、本機はおおよそ中間値である。
- ③ 流体輸送設備：泥水式として活用するために送泥管およびバイパス管を設け、スクリーコンベアを排泥管として利用する。スクリーコンベアの直径は550mmと送泥管径250A (267.4mm)と比較して大きいため、シールド掘進時はゲートで排泥量をコントロールする。
- ④ 地山崩壊探査装置：前胴先端から1,075mmの位置に、シリンダー式（マシン直上から左方向へ5°傾斜）と超音波式（同13°傾斜）の2種類の地山探査装置を取り付け、掘削中に計測する。超音波地山探査装置は水を出さないと計測ができないため、1)掘進を開始すると、自動で超音波装置用給水バルブが開く設備とした。2)中央監視室でもバルブを手動操作できるようにした。3)超音波用に水を出すと偏差流量に影響するため、流量計を設置して偏差流量の補正をできるようにした。上記3点を追加装備した。

☆泥水式シールドによる掘削模式図



☆泥水圧→泥土式シールドへの切替模式図1



☆泥土式シールドによる掘削模式図

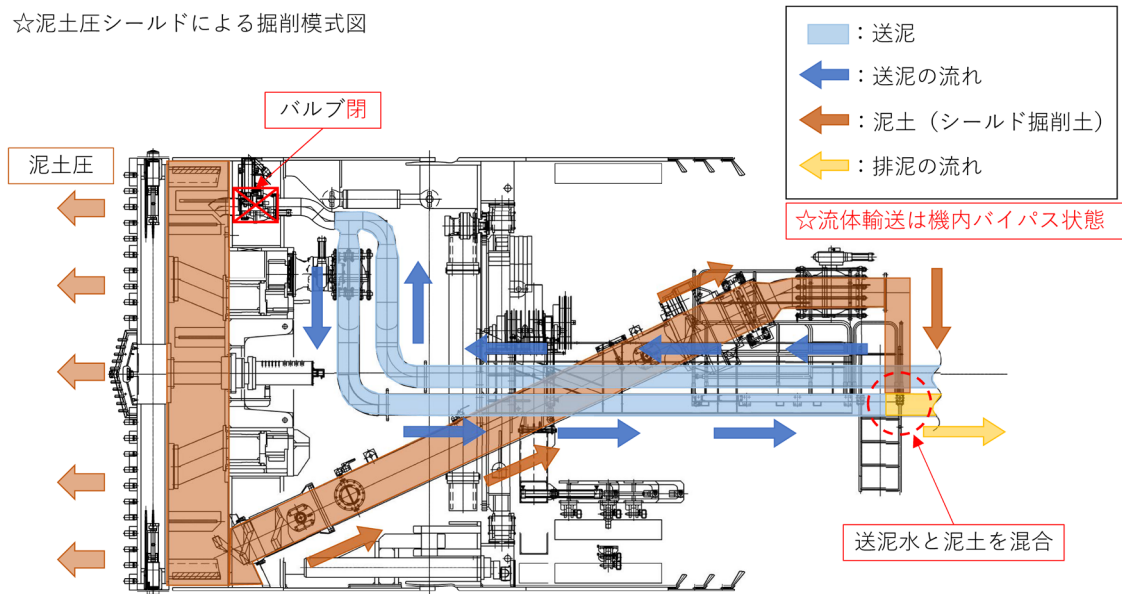


図-6 泥水泥土複合式シールド切替え手順 (泥水式→泥土圧)

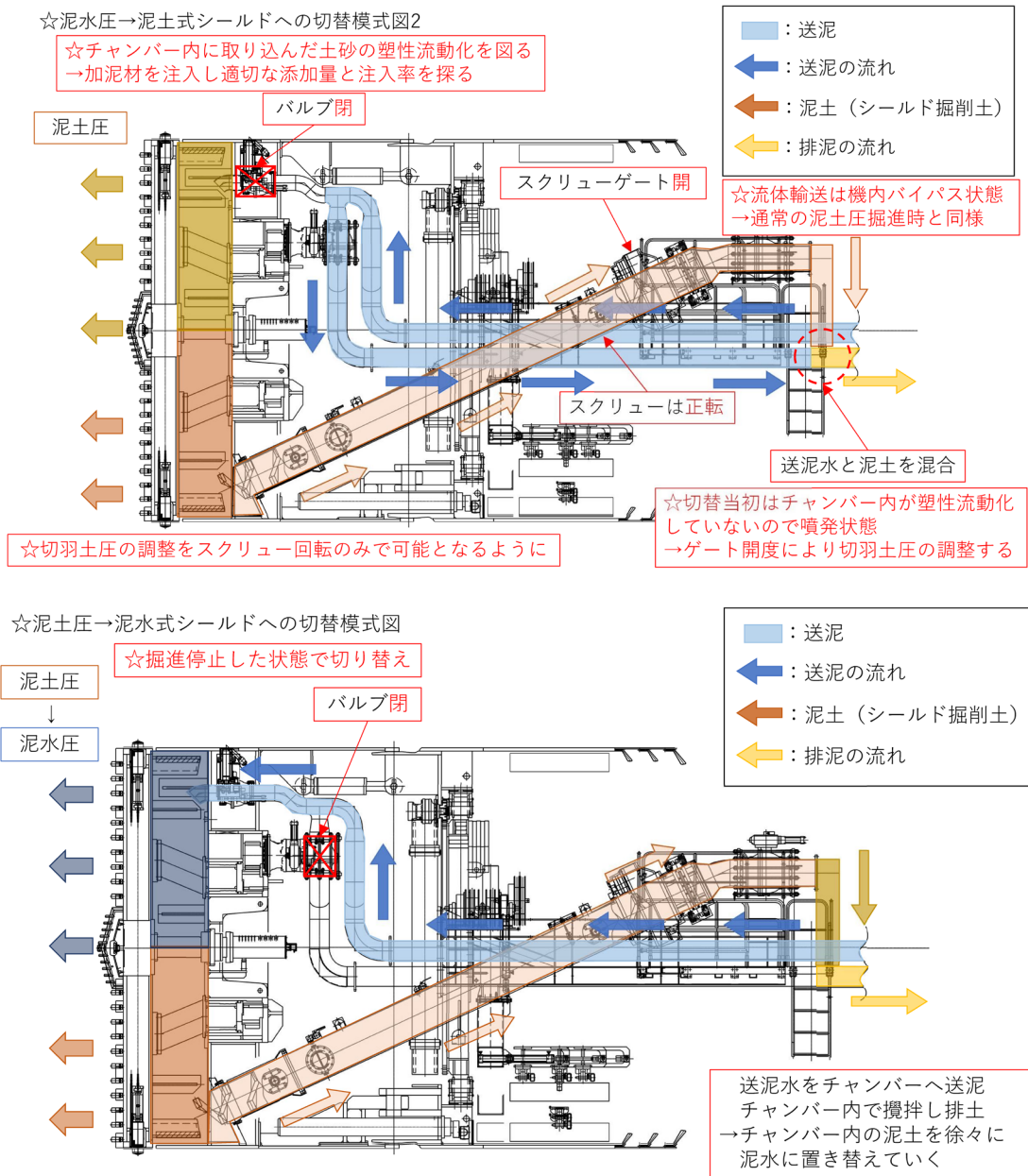


図-7 泥水泥土複合式シールド切替え手順（泥土圧→泥水式）

- ⑤ その他：泥土圧シールドを基本構造にしているためフィッシュテール、攪拌翼を備えている。
- ⑥ 泥水泥土の切替方式：泥水式から泥土圧へ切替を行うポイントは、1)低速掘進状態でチャンパー内に掘削土砂を取り込む。2)スクリュージェートを閉めスクリュューを逆回転させる。3)チャンパー内の余剰泥水はコントロールバルブよりテール内へ排出する。4)コントロールバルブにて切羽水圧をコントロールする。5)チャンパー内に取り込んだ土砂の塑性流動化を図る。6)切替え直後はチャンパー内が塑性流動化しておらず噴発状態のためゲート開度により切羽土圧を調整することが挙げられる。

泥土圧から泥水式へ切替を行うポイントは、1)掘進停止した状態で切り替えを行う。2)送泥水をチャンパーへ送りチャンパー内の泥土を徐々に泥水に置き替えることが挙げられる。

### 3. 機械の能力

3号機は初期掘進を除いて泥水式シールドとして掘進し、4号機も主に泥水式シールドで掘進したが、泥土圧シールドとしての性能を評価するために、途中446Rから485Rまでの40リングを泥土圧シールドで掘進した。施工データを表-2に示す。

なお、一般区間で使用したセグメントは幅1.35mのRCセグメントであり、曲線区間は幅0.8mのHBセグメントを用いている。

### (1) 総推力

3号機の総推力は8000～13000kNであり、シールドの装備総推力は21000kN(=1000kN×21本)であり安全率は1.6と十分余力のあることが確認された。4号機の泥土圧シールド区間においても9000～12000kNであり、シールド外周面と砂との摩擦抵抗も泥水式か泥土圧かによる違いを考慮する必要はなさそうである。

### (2) 掘進速度

3号機のストローク速度は72mm/minで設計しており、実績も55～70mm/minと高速掘進を行っていたことがわかる。4号機のデータを見ると泥土圧区間は22～45mm/minと遅く、その直前の泥水式区間は50～68mm/minと速かったことがわかる。

図-8は4号機が泥水式から泥土圧に機種を替えた前後の掘進データであり、上からストローク速度、切羽の土圧計、シールドジャッキ圧力、スクリーコンベアの回転速度を示している。

ストローク速度から、泥土圧に機種を変更するために送泥管のバルブを閉じ、チャンバ内に十分混練された泥土を満たすために時間を要していたのがわかる。

管理目標として「変更前後で切羽土圧を一定に保つ」ためにシールドジャッキ圧を上げることで対応したが、ストローク速度を回復することはできていない。シールドジャッキ圧を高くしてストローク速度を上げると切羽土圧は高くなり切羽の安定が崩れることがわかる。

通常、スクリーコンベアは泥水式シールドには用いないが、図-8に示すように4号機では20回/minで運転した。泥水に混ざった掘削土砂をスクリーコンベア本来の機能による運搬はできないが、アジテータとしての機能がなかったことを示唆している。泥土圧シールド区間

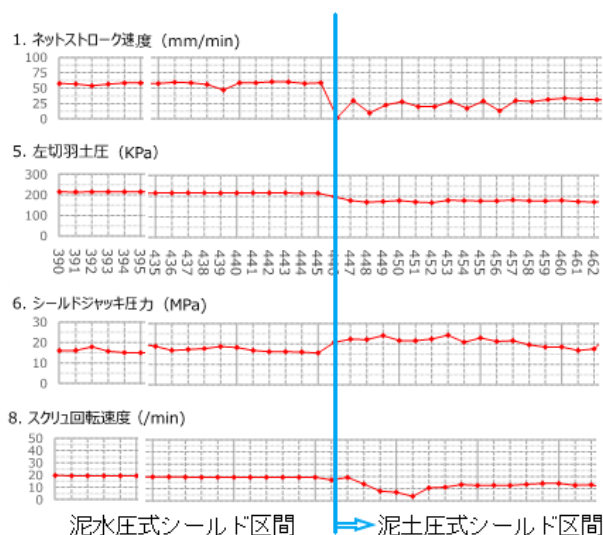


図-8 4号機の泥水式から泥土圧式に替わる前後のデータ

では切羽の安定のためにスクリーコンベアの回転速度を上げ、掘削土砂の取り込み量を多くすることで切羽土圧を下げる事が可能であったが、排泥の輸送能力から取り込み量を増やすことはしなかった。

これらのことから、泥土圧シールドを高速掘進に適応させるのは難しいと考える。

### (3) カッタトルク

カッタトルクの大きさについて、以下の経験式がある。

$$T = \alpha D^3 \quad (1)$$

ここに  $T$ : カッタトルク [kN-m]     $\alpha$ : カッタトルク係数     $D$ : シールド外径 [m]

$\alpha$  値を測定したカッタ駆動トルクから逆算して求めると表-2に示すように、泥水式シールド区間では9～12、泥土圧シールド区間では7～9であった。これは装備ト

表-2 3号機および4号機泥土圧区間前後における一部の施工実績

計測区間	3号機	4号機	
	泥水式シールド区間	泥水式シールド区間	泥土圧シールド区間
	200R～1299R	390R～445R(泥土圧の直前)	446R～485R
総推力 [kN]	8000～13000	8000～10000	9000～12000
シールドジャッキ圧 [MPa]	16～26	15～20	18～22
ストローク速度 [mm/min]	55～70	50～68	22～45
スクリー回転速度 [回/min]	15～40	19～20	10～16
駆動トルク [kN-m]	1500～1800	950～1000	1200～1500
$\alpha$ 値	9～12	6～7	7～9

ルクの  $\alpha$  値 18.2~21.9 の 50%程度である。トンネル標準  
 示方書によれば装備トルクは泥土圧シールドの方が泥水  
 式シールドより高い。表-2 に示す 4 号機の 390R~485R  
 区間ではこのことは成り立っているが、3 号機の実測値  
 と比較すると逆転している。これは 3 号機のカッタ回転  
 数が 0.8~1 回/min と 4 号機のカッタ回転数 1 回/min より  
 遅いことに起因していると推察される。

#### 4. 排土量の管理

この章では泥水式シールドとして掘進した 3 号機のデ  
 ータを報告する。

##### (1) 切羽水圧

切羽水圧は 下限値=主働土圧+地下水圧+余裕圧  
 上限値=静止土圧+地下水圧+余裕圧  
 余裕圧は 20kPa で設定した。

図-9は3号機600R~635Rの排土量に関するデータで  
 あるが、上からシールドジャッキ圧、切羽水圧、逸水量  
 を示す。水圧は180~200kPaと安定した管理ができてい  
 る。水圧が上がるとジャッキ圧が上がることもあり、こ  
 れにより逸水量が増える傾向にある。ジャッキ圧の上昇  
 は切羽に形成された泥膜を壊し、逸水すると推察する。

##### (2) 掘削土砂量と掘削乾砂量

RC セグメント (幅 1.35m) 1 リング当たりの掘削土砂  
 量は  $3.14/4 \times 5.47^2 \times 1.35 = 31.7\text{m}^3$  である。図-9 の 5 列  
 目に示す掘削土砂量とは排泥体積と送泥体積の差のこ  
 とであり、理論土砂量  $31.7\text{m}^3$  を下回るが  $30\text{m}^3$  程度  
 の値を安定して示している。

掘削乾砂量とは掘削土砂内の土粒子の体積のこ  
 とである。送排泥管に設置した流量計と密度計の測定値を  
 もとに掘削乾砂量を計算している。

$$\text{計算乾砂量 } V = 100Q / (GsW + 100)$$

$$\text{掘削乾砂量 } V_3 = V_2 - V_1$$

ここに  $V_1$ : 送泥乾砂量,  $V_2$ : 排泥乾砂量,  $Q$ : 掘削土  
 量,  $G_s$ : 土粒子の比重,  $W$ : 含水比 (%)

$V$  と  $V_3$  を比較して逸泥状態 ( $V > V_3$ ) か余掘り状態  
 ( $V < V_3$ ) かの判定を行ない管理した。

図-9 から、乾砂量の計測値は  $14\text{m}^3$  前後であり、掘削  
 土砂量と比較して半分程度である。624R において掘削  
 土砂量が下がると乾砂量も減っている。

##### (3) 掘削偏差流量

掘削偏差流量は以下の式で表される。

$$\text{掘削偏差流量} = \text{排泥流量} - (\text{送泥流量} + \text{理論掘削量})$$

管理値はゼロ以下であることであり、ゼロ以下とは  
 過剰な取り込みが無いことを意味する。

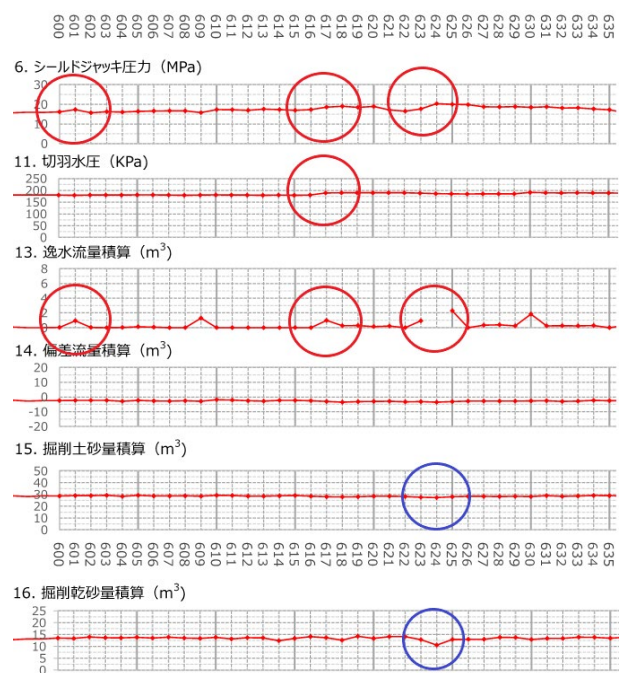


図-9 シールドジャッキ圧力、水圧、逸水量、偏差流量、  
 掘削土砂量、掘削乾砂量の関係 (3 号機 600R~635R)

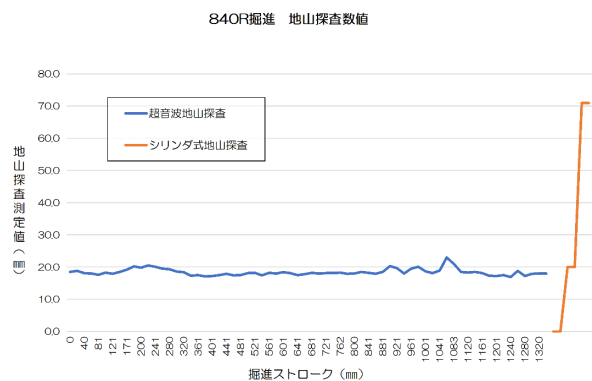


図-10 地山探査装置計測結果 (840R)

図-9の偏差流量と掘削土砂量を比較すると、ほとんど  
 同じような波形であり、掘削土砂の管理を偏差流量で行  
 えることを示唆している。本工事では正の値を示すこと  
 は無かった。

#### 5. 裏込め注入の管理

##### (1) 崩壊探査

シールドの鋼殻外径が 5450mm に対し、掘削径は  
 5470mm のため、初めから鋼殻の外周には 10mm のすき間  
 がある。シールドの機内より 2 種類の地山探査装置によ  
 り地山の崩壊量を測定し、裏込め注入の注入量に反映さ  
 せた。

計測結果の代表例として、840R 掘進時の記録を図-10に示す。掘進中の連続計測が可能な超音波式は掘進ストローク0mm～1,350mmまで連続データが記録され、1R 掘進完了後のみに計測するシリンダー式は掘進ストローク1,350mm以後にデータをプロットした。

超音波式による測定値は20mmの近傍を推移し、連続的に安定したデータが計測できた。一方、シリンダー式は、計測開始後に超音波式のデータと合致する20mmで一時的に停止したのち、再度約50mm伸長し最終的に70mmを測定した。

3号機の全区間データを示したのが図-11である。

図中、地山探査装置と書かれているのがシリンダー式の測定値であり、超音波探査装置の測定値はリング毎最大値を記録している。想定空隙量というのは裏込め注入量より逆算した計算値である。掘進初期において超音波式の測定値がシリンダー式を上回ることがあったが、300Rを過ぎたあたりからシリンダー式の測定値が超音波式の測定値を上回っている。シリンダー式の場合、最大で180mmを超えることもあった。

想定空隙量は初期掘進時には超音波式探査装置の値に追従していたが、300Rを過ぎるとシリンダー式の値に追従するようになった、ただシリンダー式で120mmを超える値に対しては60～90%と低いものもある。裏込め注入圧が高くなり計画した注入量を注入できなかったためである。

図-12は4号機の泥水式シールド区間における計測値であり、地山距離というのが超音波、貫入量というのがシリンダー式の探査結果である。Aのように地山距離が大きくなると貫入量も増えているものもあれば、B、Cのように地山距離が増加していないのに貫入量が大きくなることもある。

図-13は4号機の泥土圧シールド区間の記録である。452Rのように地山距離が大きくなると貫入量も大きくなっている例もあるが地山距離が安定しているのに貫入量はいくつかのピークが現れている。

454Rの貫入量の山に対し、5リング後方の459Rの裏込め注入量を増加させた。

図-12と図-13を比較すると、地山距離について泥水式シールドと泥土圧シールドでは差が無いが、貫入量について、泥土圧シールドはいくつかの山があることがわかる。これは図-8より、泥土圧シールドの掘進速度が遅いためミクロ的な揺れを引き起こしていると考えられる。

## (2) 裏込め注入

裏込め注入は即時注入で行った。崩壊探査測定位置より5リング後方のセグメントのグラウトホールから行い時計の針1時方向および10時方向の2箇所、状況によっては片側1箇所から注入した。

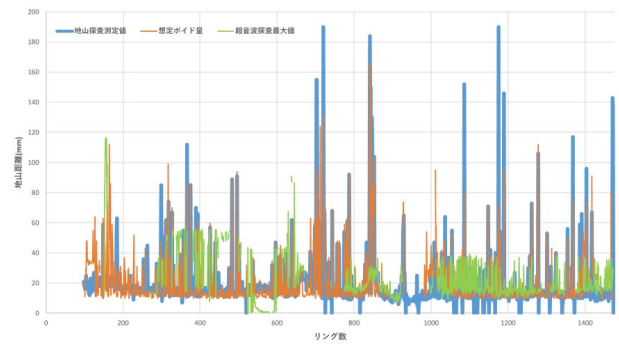


図-11 地山探査測定値と想定ボイド量

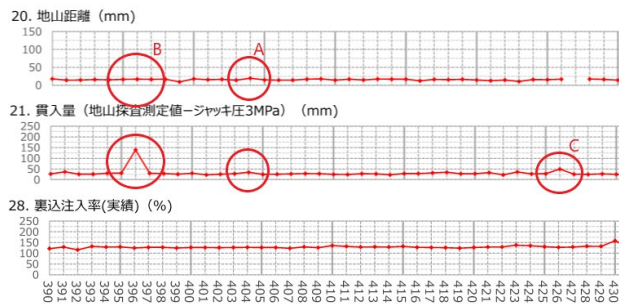


図-12 地山探査装置の計測結果4号機（泥水式区間）

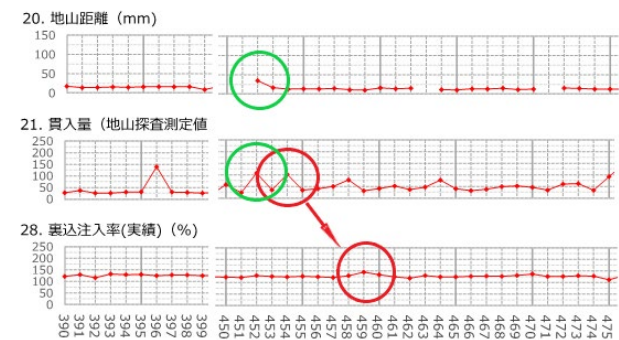


図-13 地山探査装置の計測結果4号機（泥土圧区間）

裏込めの材料は2液性でセメント粘土系モルタルと特殊水ガラスの2液をグラウトホール直前で混合し、注入した。施工管理は注入圧と注入量の両方で行った。どちらか一方で行うことは難しく、両方併用することで総合的に管理し、施工が完了した。基本的に注入は設計注入量の120%とした。

## 6. 計測断面の通過

泥水泥土複合式シールドの特性を調べるために、4号機を途中で泥土圧シールドに改造し、No.5換気孔の手前35mを計測区間として掘進した。

計測区間にはAとBの2か所の横断面を設け、層別沈下計や傾斜計などを設けた。

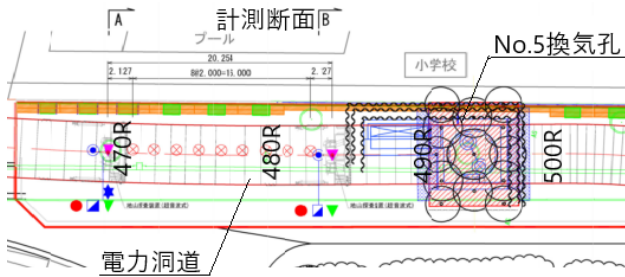


図-14 計測区間～No.5換気孔周辺の平面図

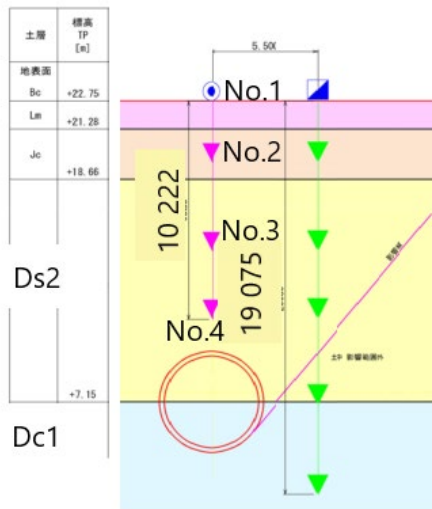


図-15 B-B断面 層別沈下計設置状況

計測区間の平面図を図-14、横断面 B における層別沈下計の配置状況を図-15に示す。

### (1) 改良体の掘進

No.5 換気孔の周囲は事前防護のため高圧噴射攪拌杭 (V-JET 工法) により直径 3.2m～4.5mの円柱 13 本によって造成され、チェックボーリングにより 5.4N/mm<sup>2</sup>の強度が確認されている。

図-16 の掘進データに示すように、計測区間の掘進速度を毎分 40mm と落としたが、地盤改良区間 (485R～492R) は毎分 10mm 以下とさらに遅くなっている。掘進速度が遅くなることで掘削土量が増加している。ゆっくり掘ることで多量の水分を含む掘削土砂の量が増えたが乾砂量は減っていることから地盤改良体は砂分が少なく、水に溶ける材料から成りたっていると推察する。

### (2) 層別沈下

B 断面における層別沈下計の測定データを図-17 に示す。横軸はシールドが掘進中の位置であり縦軸は地表および地中に設けた 3 点の沈下量を示す。

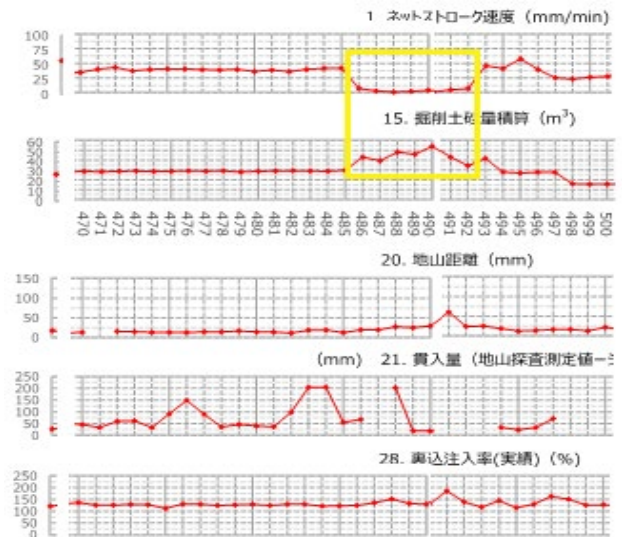


図-16 計測区間 (No.470R～No.500 付近) の掘進データ

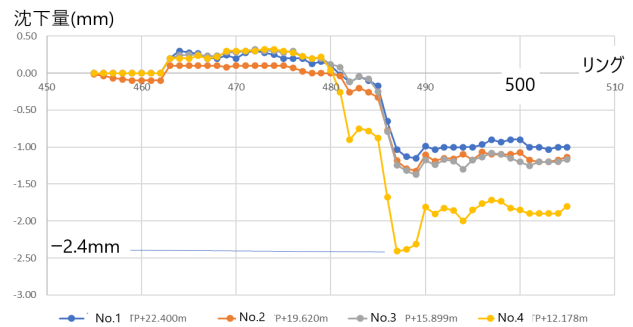


図-17 B-B断面 (シールド中央部) 層別沈下測定値

シールドの接近に伴いいずれも 1mm～3mm の隆起があり、シールドの通過により土砂が取り込まれ 1.4mm～2.4mm 沈下する。その後、セグメントが組み立てられ、裏込め注入を行うことで 2.0mm～6.0mm リバウンドする。No.4 のデータが示すように沈下量はシールドに近づく (深くなる) ほど大きな値を示す。

### (3) 計測区間における崩壊探査

図-16 の崩壊探査のデータ (470R～485R) をみると超音波による空隙の測定結果は 20mm 弱であり、地山のゆるみ等の傾向はみられない。ところがシリンダーの貫入量を見ると 50mm を示し、続いて 100mm～150mm、200mm といった大きな貫入量を示している。

改良体内に入ると超音波による測定結果は 20mm より若干大きな値を示す。これは掘進速度が落ちたことからシールドの掘削外径が大きくなったためである。

この区間における裏込め注入率のグラフを見ると 120～130%と安定している。これは貫入式による測定データを基本に注入した結果である。ところが 491R に超音波で 60mm の空隙を測定したのに裏込め注入量に反映で

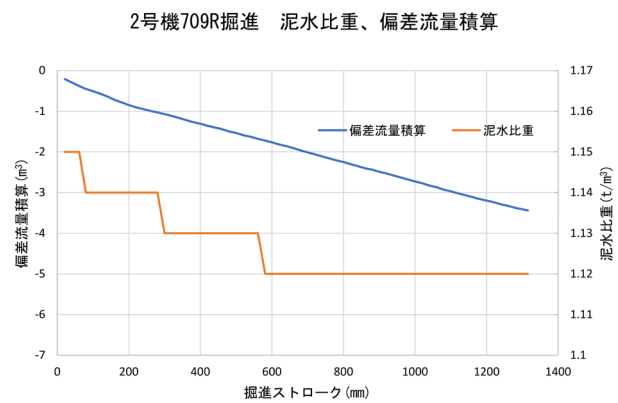
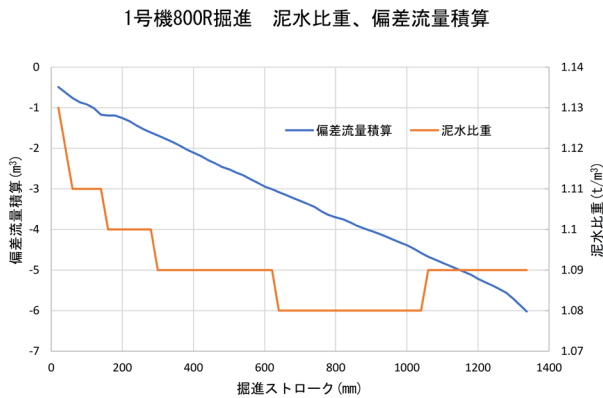


図-18 1号機・2号機 泥水泥土圧切替前の掘進データ

きなかったため注入率が 200%を超える結果になった。これらから、空隙の測定には貫入式だけでも管理できるが、地山の崩壊を見落とす可能性があるため、超音波式と貫入式の両方で管理するのが望ましい。

## 7. 泥水泥土複合式シールドの切替え

1号機および2号機は、発進立坑に設けた直接切削壁 (FFU) を切削するために泥土圧シールドで掘進したのち、泥水式シールドで掘進を行った。途中、1号機は822Rで、2号機は778Rで、それぞれ泥土圧シールドに切替を行い、到達した。

図-18は、泥水式シールドで掘進していた1、2号機を泥土圧シールドへ切替える直前の1リングの掘進データである。1、2号機ともに掘進ストロークが伸びると偏差流量積算および泥水比重が右肩下がりであることが確認できる。比重1.15程度の泥水を作液しても1リングで比重1.08程度に下がっていることから、泥水の地山への逸泥と掘削土質に細粒分を含まない砂層であることが原因と考えられる。

このような逸泥により、泥水性状の管理が困難となることで切羽崩壊の危険性が高まったことから、1、2号機ともに泥土圧シールドに切替えたうえで、切羽崩壊を防止しながら、掘進を行った。

なお、泥土圧シールドに切替後、1、2号機も4号機の計測区間と同様に、ストローク速度が泥水式シールドの掘進時に比べて低下した。そこで、後方流体設備を備える本工事シールド機の特徴を活かし、加泥材の注入量を増やしたことでストローク速度が回復し、泥土圧掘進においても泥水掘進時とほぼ同一のストローク速度を確保して掘進することができた。

## 8. まとめ

崩壊性の恐れのある砂質地盤において泥水式および泥土圧に切り替えが可能である、泥水泥土複合式シールドを採用して工事を実施した。

その1工事区間を2022年2月5日に、その2工事区間を2022年6月12日に、それぞれ貫通することができた。1号機における最大月進は663mであった。

1、2号機において、泥水性状の管理が困難となった。従来的高速施工仕様とした泥水式シールド機では、掘削速度を低下せざるを得ない状況であったが、複合式シールドの機構を活用し、泥土圧式シールドに切り替えたことで速度の低下を最小限に留め、崩壊性砂地盤の切羽安定と高速施工を両立した施工を実現した。

以下、その他得られた知見をまとめる。

- ・泥水式シールドを基本に設計したシールド機で泥土圧シールドとしての掘進が可能であった。
- ・フィッシュテールおよびスクリーコンベアなど泥土圧シールドの基本装備も有効に機能していたと考えられる。
- ・カッタの装備トルクは泥土圧シールドに合わせている。このため通常の泥水式シールドと比べて大きく、これがスムーズな掘進に繋がったと推察される。
- ・泥水式シールドにスクリーコンベアを排泥管の一部として使用することで、スクリーコンベアにアジテータの役割をさせることになり順調な掘進ができた。
- ・装備推力の算出において40%近くを占めるのはシールド外周面と地山の摩擦抵抗であるが、主として泥水式で掘進したため、シールド外周面と地山とのすき間に加圧した泥水が満たされ、地山(砂質土)が崩壊しシールドを締め付けるといったことは無かった。
- ・崩壊探査装置によりシールド外周部の空洞の大きさを測定し、裏込め剤の注入管理に反映することができた。
- ・超音波式探査装置はシールドと地山間のすき間の距

離を測定できるが、地山のゆるみや空洞を測定することはできない。これに対し、シリンダー式の探査装置はジャッキ圧が 3MPa になるまで貫入することができ、地山のゆるみを察知できる。

・想定空隙量は初期掘進時には超音波式探査装置の値に追従していたが、本掘進になると貫入式の値に追従する傾向にあった。

・計測区間で、貫入式では見逃した空隙に対し、超音波式で察知できた事例が有り、掘進時であっても連続的に空隙を計測可能である超音波式の計測方法が効果的であると確認された。

・空隙の測定には貫入式だけでは地山の崩壊を見落とす可能性があるため、超音波式と貫入式の両方で管理するのが望ましい。

#### 参考文献

- 1) 出雲力斗, 竹中聡, 長光憲一郎, 橋本聡: 需要が激増するエリアへ電力を供給するシールドの工程短縮計画と設計, トンネルと地下, vol.52, No.3, pp47-56, 2021.3

(2022.8.26 受付)

## HIGH SPEED EXCAVATION IN COLLAPSIBLE SAND GROUND BY COMBINED SHIELD TBM OF SLURRY FACE AND EARTH-PRESSURE BALANCE FACE

Rikito IZUMO, Kenji MAEHARA, Kenichiro NAGAMITSU and Satoshi HASHIMOTO

An electrical power cable tunnel 5.45 m diameter has been constructed in collapsible sandy soil using the slurry earth pressure compound shield method. Initially it was planned to use a slurry shield to enable high-speed construction, because there was a demand for supply of electrical power to the area as early as possible. However, there was a possibility of leakage of mud and collapse of the cutting face with the slurry shield method, so a slurry earth pressure compound shield method was adopted so that the slurry shield could be switched to an earth pressure shield whenever signs of collapse were observed. It was verified that the slurry shield could advance with a machine designed based on an earth pressure shield, with a spoke-shaped cutter head, the screw conveyor used as a part of the mud discharge pipe, etc. Two types of instrument were provided for detection of collapse of the natural ground, a penetration type and an ultrasonic type, and the paper reports on their effectiveness.