

トンネル 特集

電力工事におけるシールドの高速施工

— F-NAVI シールド工法 —

田代和登・郡司靖丈・後藤 徹・杉元裕紀

F-NAVI シールド工法は、従来の技術延長上にはないアイデア（前胴部の首振りによる方向制御）を駆使して、いままでの高速施工工法が有していた課題を解決したシールド掘進方法である。今回、同工法を電力洞道工事に適用し、高速施工の実績を上げることができた。シールド掘進当初、予想外の高推力を受けたが、首振りによる方向制御を使用して掘進速度と精度を確保し、高速施工に不利なずり鋼車による排土方式ながら最大月進 500 m を超える記録を残した。この施工実績は、今後のシールド工事長距離化に対応するひとつの方向性を示せたと考える。

キーワード：トンネル，シールド，長距離施工，方向制御，同時施工，高速施工

1. はじめに

近年、都市およびその周辺部での地下空間開発において、シールド工法の果たす役割はますます重要となってきた。しかし、過密化した市街地では発進・到達立坑などの用地の確保が以前にも増して困難となってきた。掘進延長の長大化や多くの曲線施工など高度な施工技術を必要とする工事が目立ってきている。このため、従来技術を超えたシールドの高速施工技術や曲線施工技術が求められ、積極的な技術開発が行われているのが現状である。

その中で高速施工技術に着目すると、従来からの方法として、

① シールド機の掘削（掘進）速度を大幅に上げる方法

② 掘削とセグメント組立ての同時施工による方法等が検討され、部分施工や実施工がなされてきている。

ただし、①の方法は従来技術の延長上にあって機械の仕様を上げてスピード化を図るものであるが、掘削能力の増大は機械仕様の高度化とともに掘削中の時間あたりの排土量が多くなり、後方の排土関係設備も能力アップしなければならずコスト面でメリットが少ない。また、②の従来方法はセグメント組立て時の掘進停止時間をなくすため、組立て中も推進ジャッキによりシールド機の方向制御を行う必要があるが、セグメントを組む部分の推進ジャッキは開放するため、推進ジャッキの本数を通常の 2 倍近く装備するか、または、推進ジャッキ個別の油圧制御でアンバラ

ンスな力を低減しなければならず、中小口径では適用が難しいなど解決すべき課題が多かった。

今回開発した「F-NAVI シールド工法」はこれらの課題を解決すべく、従来の技術延長上にはないカットが付いた前胴部（以下、前胴部と記す）の首振りによる方向制御方式を開発し、汎用性が高く、しかもシンプルな機構で同時施工による高速施工を実現したものである。本工法は、この開発により平成 11 年度の社団法人土木学会技術開発賞を受賞している。

本報文では、「F-NAVI シールド工法」の特徴、開発の経緯、および電力洞道にて好成果を上げた高速施工の実績などについて報告する。

2. 工法の概要

今回開発した F-NAVI シールド機による高速施工工法は、シールド機を本体部と前胴部に分けてそれらを半球状の球面座で接続させており、前胴部を上下左右全方向に向けることでシールドジャッキ（推進ジャッキ）の選択操作に一切関係なく、シールド機の掘進方向制御を実現している。このように、前胴部がシールド機を正しい位置に誘導するという意味で、Front-Navigate の略称として「F-NAVI シールド工法」と呼称している。従来のシールド機との方向制御の違いを図—1 に示す。

（1） F-NAVI シールド工法の制御方法

本工法の制御方法を図—2 に説明する。

① アンバランスモーメントの発生

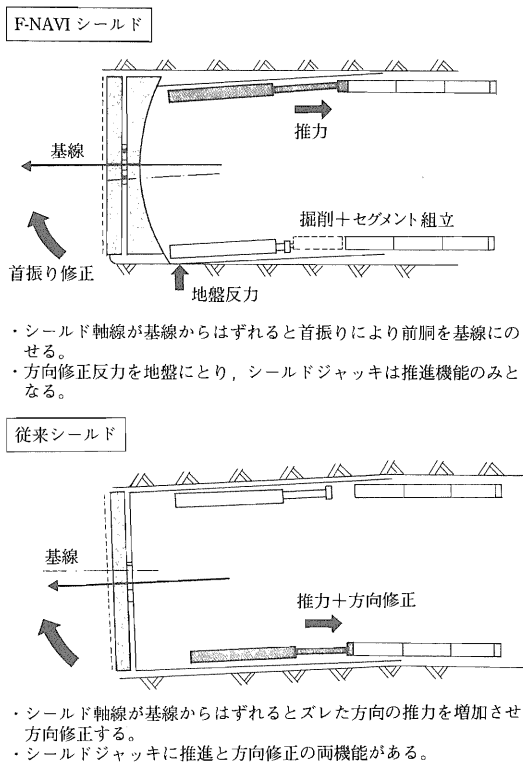


図-1 方向制御方法の違い

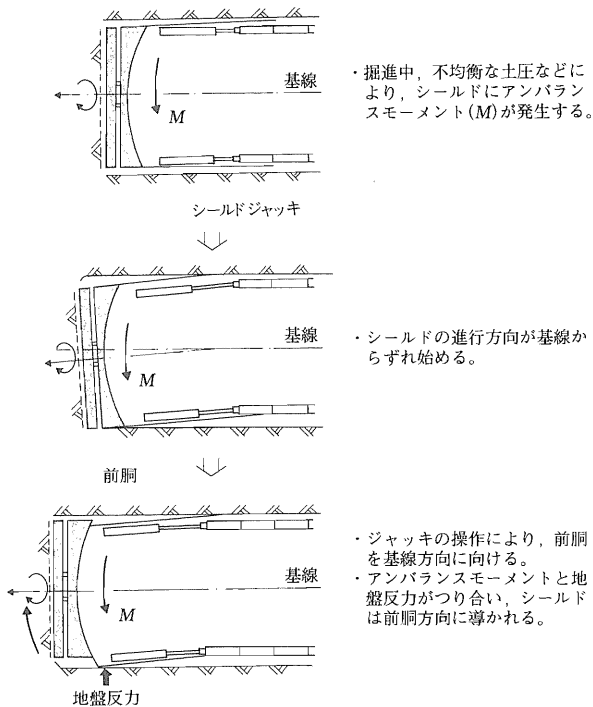


図-2 F-NAVI シールドの制御概念

通常、直線の掘進ではシールドジャッキの数やパターンをなるべく左右対称にし、推力を平均にかける。ところが、掘削とセグメント組立てを同時に行う同時施工の場合は、掘進中セグメント組立てのジャッキ選択によりシールドジャッキの左右バランスが崩れ、シールド機にアンバランスモーメントが発生する。

② 基線からのずれ

このまま同時施工を継続すると、アンバランスモーメントが生じたまま掘進を続けるためシールド機は徐々に計画線(基線)からずれ、許容限界に近づいてしまう。

③ 方向制御

そこで本工法では、計画線からのずれやシールド機の位置姿勢データを検出・処理し、最適な前胴部の首振り方向と角度を自動的に演算・指示して前胴が計画線に添うように制御する。その結果、シールド機本体は未掘削地山の地盤反力を受けて、アンバランスモーメントを打消しながら前進することができる。

F-NAVI シールド工法は、このようにして、シールド機前胴部の方向を常に計画線に向けることで、掘削とセグメント組立ての同時施工による高速施工を可能にしている。

(2) F-NAVI シールド工法の特徴

本工法の主な特徴は以下にまとめられる。

① 方向制御にシールドジャッキの選択が不要

シールド機の姿勢制御を前胴部の首振りで行う為、蛇行修正を含めた方向制御にシールドジャッキの数やパターンを変える必要がない。この首振り効果で、セグメント組立て時でも常に方向制御しながら掘進ができる為、掘削とセグメント組立ての同時施工を可能にした。

② 迅速で高精度な姿勢制御が可能

シールド機の前胴部と本体部は球面座で接続されており、アーティキュレートジャッキによる上下左右のどの方向にも迅速な首振りで高精度な姿勢制御ができる。

③ 中・小口径の同時施工も可能

同時施工を実施するために特に、シールドジャッキの数や掘削スピードを上げる必要がなく、従来のシールド機仕様をほとんど変えずに需要の多い中・小口径へも適用ができる。

④ 曲線施工での適用性

前胴部の首振り機構は曲線部での余掘り量を減少できる効果もあり、曲線施工の適用性に優れる。周辺地山への影響も少なくなり、品質面の向上も図れる。

(3) シールド機の構造

本シールド機はシールド機本体と前胴部からなり、この二つを繋ぐテンションジャッキと姿勢制御(前胴部首振り)を行うアーティキュレートジャッキ、そして追従エレクタとロングストロークジャッキから成って

いる。F-NAVI シールド機の機器構成を図-3 に示す。

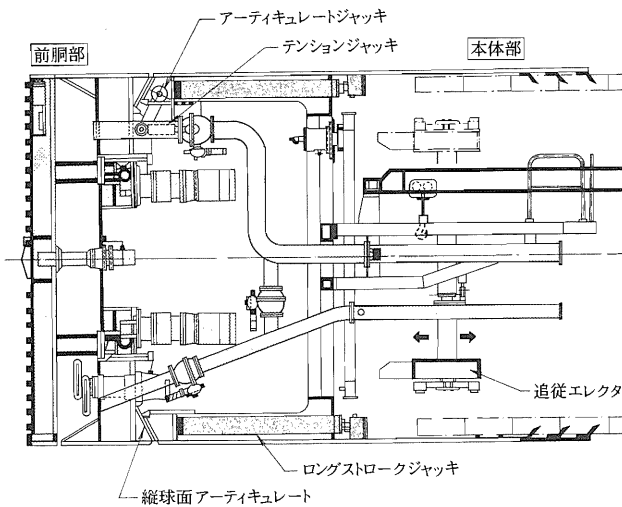


図-3 F-NAVI シールド機の構造

① テンション機構

掘進中に前胴部と本体部が分離しないように、また首振り動作が滑らかに動くように複数のジャッキにより常に一定の力で結合保持されている。

② アーティキュレート機構

前胴部と本体部の接合部にラチス状に配列された複数のジャッキと半球状の球面座からなっており、球面座には、上下左右あらゆる方向へ動けるように止水機構をもった摺動部が形成されている。

③ 自動追従エレクト

シールド機の掘進に同調させながらエレクトを組立て位置に留まるように移動させ、掘削中でもセグメント組立てを可能にしている。

④ 自動盛替えロングストロークジャッキ

セグメント 1.5 または 2 リング分のロングストロークをもった推進ジャッキで、セグメントの組立て位置に合わせて作動の自動選択、自動盛替えが行われる。

3. 高速施工シールド機の電力洞道への採用

近年、市街地でのシールド工法による送電線路建設はやはり立坑用地確保難から長距離化の傾向が強くなり、工期短縮とコスト縮減の観点からシールド施工における高速施工への取組みが課題となっていた。このような背景から今回、九州電力は F-NAVI シールド工法を久留米分岐線新設工事に適用し、所定の成果を上げることができた。工事における高速施工泥土圧シールド機およびボルトレス継手セグメントの採用、ならびに同時掘進への対応を以下に示す。

(1) 工事概要

高速施工に適用した F-NAVI シールド工事概要は以下のとおりである。

- ・工事件名：久留米分岐線新設並びに関連工事のうちトンネル工事（シールド工事）
- ・工 法：泥土圧（気泡式）F-NAVI シールド工法
- ・掘削外径：φ 3.61 m,
洞道延長：シールド区間 1,934 m
- ・排土方式：レール工法（ずり鋼車）
- ・セグメント：ST セグメント（急曲線 40 R 部）
RC セグメント（国産ボルトレス継手）
RC セグメント（韓国産ネジピン継手）300 リング
- ・仕上り内径：二次覆工部（ST）= φ 2.80 m
RC セグメント部 φ 3.00 m

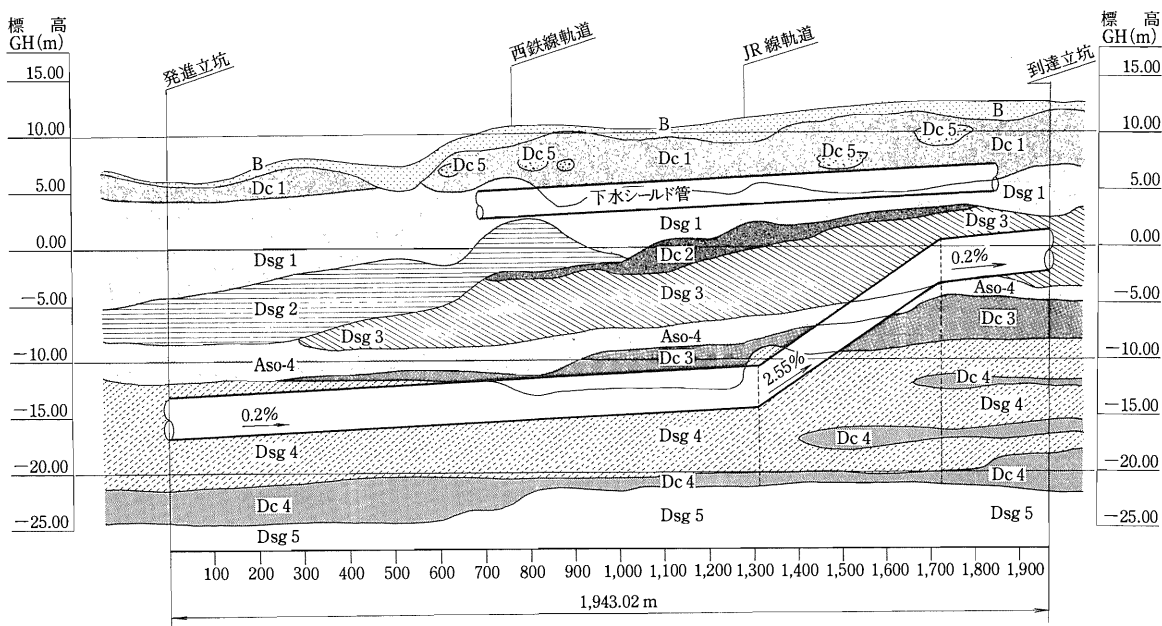


図-4 久留米分岐線の土質縦断面図（更新世砂礫層、阿蘇火砕流堆積物を掘進）

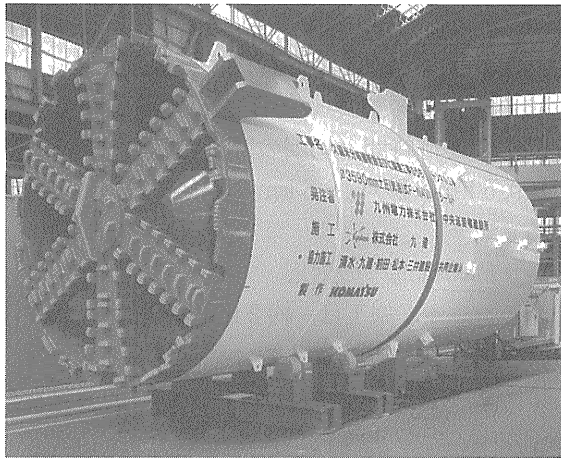


写真-1 久留米分岐線での採用機

(2) 高速施工への取組み

(a) F-NAVI シールド機の採用

F-NAVI シールド工法は、1号機の実績として砂質シルト層、STセグメントにおいて従来実績の2倍強に相当する月進504mを記録していた。工期短縮を要求された今回の工事でも、高速施工による工期短縮効果を期待して同工法の採用に至り、最大月進500m以上を計画した。2号機である当工事では、ずり鋼車およびRCセグメントへの適応が課題となった。

(b) ボルトレス継手RCセグメントの採用

F-NAVI シールド機と合わせて当シールド施工で採用したもう一つの技術は、セグメント組立て時間を大幅に短縮できるボルトレス継手RCセグメントである。ボルトレス継手は従来から研究開発が進められてきたが、今回採用した「マルチブレード継手」と「コッタ継手」の組合せによる施工は国内初の試みである。

① マルチブレード継手（リング間継手）

ピン継手の一種で、リング間にアンカ（再取付け）用異型鉄筋にピンを建込んだ凸側と、スリット付き薄鋼板とスペーサを重ねたインサート凹側で構成されている。組立て時は、FRP製位置決め調芯ピンのガイド効果により、推進ジャッキで容易に押込むことができる（図-5）。

② コッタ継手（セグメント間継手）

楔型継手の一種で、施工実績の豊富な形式である。セグメント端面に埋込まれた溝型金物にH型締結材を打込み、摩擦接合でセグメント同士を堅固に接合するものである（図-6）。

③ ワンタッチ式継手の効果

両者を組合せた今回のボルトレス継手は、RCセグメントのボルト継手による通常組立て所要時間30分程度に対して15分程度に短縮でき、サイクルタイムの大幅な改善となった。これは、堅固なコッタ継手とフレキ

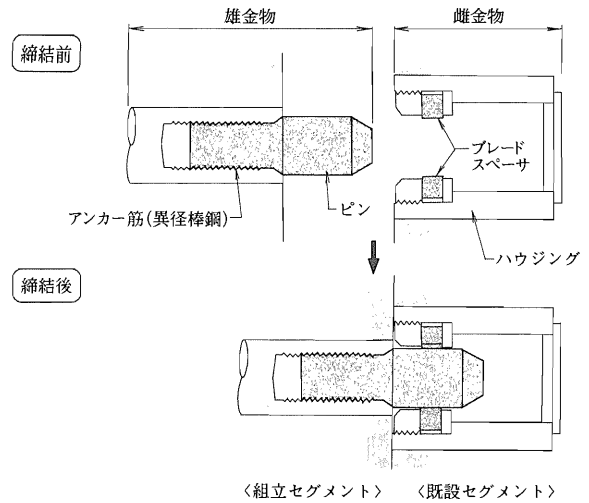


図-5 マルチブレード継手

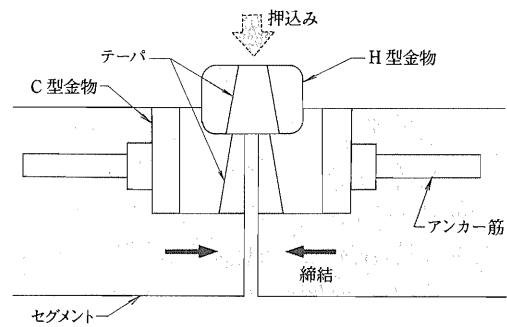


図-6 コッタ継手

シブルなマルチブレード継手の相性のよい組合せが施工性に大きく寄与したものと考える。組立て真円度も上下左右±1mm程度に納まり、非常に良好であった。

(3) 施工実績

平成12年9月末から開始したシールド初期掘進では、予想外の高推力(10,000kN(予想推力:4,500kN))に阻まれて、当初は予定進捗を得ることができなかった。推力低減の各種試験施工を行ったが、コピーカッタによる掘削外周面の余掘増以外に大きな改善は見込めなかった。また、当初予定していた本掘進移行後のRCセグメントにおける同時掘進も高推力に阻まれて、施工困難な状態であった。以下に、同時掘進への対応を記述する。

(a) F-NAVI シールド機による最大月進526m達成

施工時点まで予想できなかった高推力掘進においても、コピーカッタの余掘増及びF-NAVIシールド機を持つ大きな装備推力(予想推力に対する安全率3倍)と首振り機構により、毎分50mmの掘進速度を確保することができた。平成13年1月8日からの掘進においては、日平均20m、最大日進25m、2月7日までの1ヵ月(実稼働日27日)で最大月進526mを達

成した。その後も大きなトラブルも無く順調に掘進を継続し、平成13年5月31日に無事、掘進を完了した(図-7)。

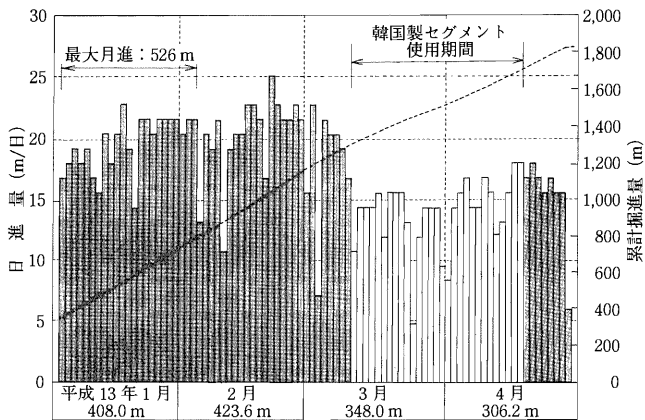


図-7 掘進実績

(b) 一般工法とF-NAVI工法の進捗比較

今回のF-NAVIシールド機による掘進には、初期発進、段取替えを含めて約8ヵ月を要した。その内、初期掘進、到達掘進、段取替えおよび坑内分岐軌条設置等に要した日数は約80日、長期休暇は約20日で、合わせて約100日が掘進休止日となる。これに対して、外径3m級の土圧式シールド機の一般的な月進は初期掘進及び到達掘進を除いて、平均200~250m程度であることから、該当する掘進延長(174m)を考慮して一般工法による所要掘進期間を推定してみると、

$$N = [(1,934 \text{ m} - 174 \text{ m}) / (200 \sim 250 \text{ m})] \times 30 \text{ 日} + 100 \text{ 日} = 311 \sim 364 \text{ 日} \approx 10.3 \sim 12.1 \text{ ヶ月}$$

となる。よって、F-NAVIシールド機により、約2~4ヵ月の工期短縮が図れたと予測できる。

(c) 月別進捗とサイクルタイム

F-NAVIシールド機による月別進捗を表-1に示す。1リング当りのサイクルタイムは、最大月進量を記録した時点では平均45~50分であった。しかし、ずり鋼車による土砂搬出のため、分岐線からの距離に

表-1 月別進捗表

年月	今月出来高(m)	実質稼働日数	平均日進量(m)	備考
平成12年10月	43.200	18.0	2.400	初期掘進
平成12年11月	73.800	15.0	4.900	初期掘進
平成12年12月	225.600	19.0	11.900	本掘進開始
平成13年1月	408.000	20.0	20.400	F-NAVI本格化
平成13年2月	423.600	21.0	20.200	手動F-NAVI開始
平成13年3月	348.000	24.0	14.500	自動F-NAVI開始 韓国製セグメント(ボルト式)
平成13年4月	306.200	20.0	15.300	自動F-NAVI開始 韓国製セグメント(ボルト式)
平成13年5月	105.600	18.0	5.900	急曲線到達掘進

応じて待ち時間が増大し、3月後半や5月は10~15分のタイムロスが生じて月進量に影響した。

ちなみに、分岐線からの距離が500mになると、ずり鋼車の運行時間(切羽の待ち時間)は、

$$[(0.5 \text{ km} \times 2) / (4 \sim 6 \text{ km/h})] \times 60 \text{ 分} = 10 \sim 15 \text{ 分}$$

となる。

(d) 同時掘進への対応

今回のシールド施工は、約2kmの延長をカットビット無交換で計画した。よって、掘進速度が設計値(25mm/min)を下回った場合カットビットの摺動距離が長くなり、ビット摩耗により掘進不能に陥る危険性があった。そこで、本掘進当初の高推力下での同時掘進導入時点(掘進速度3mm/min)では、一時その継続を断念した。同時掘進を再開するために、現場では以下の項目を実施した。

- ① 推力低減の試験施工
- ② ジャッキ能力、本数を増強した手動操作によるF-NAVI同時掘進施工の実施
- ③ 同時掘進時の推進ジャッキ使用本数増に伴う完全自動化ソフトへの変更

上記の同時掘進への対応フローを図-8に示す。結果として、手動操作によるF-NAVI同時掘進を平成13年2月から、完全自動化による同時掘進を平成13年3月から実施した。ずり鋼車、RCセグメント使用によるF-NAVI同時掘進を本施工で確認することができた。

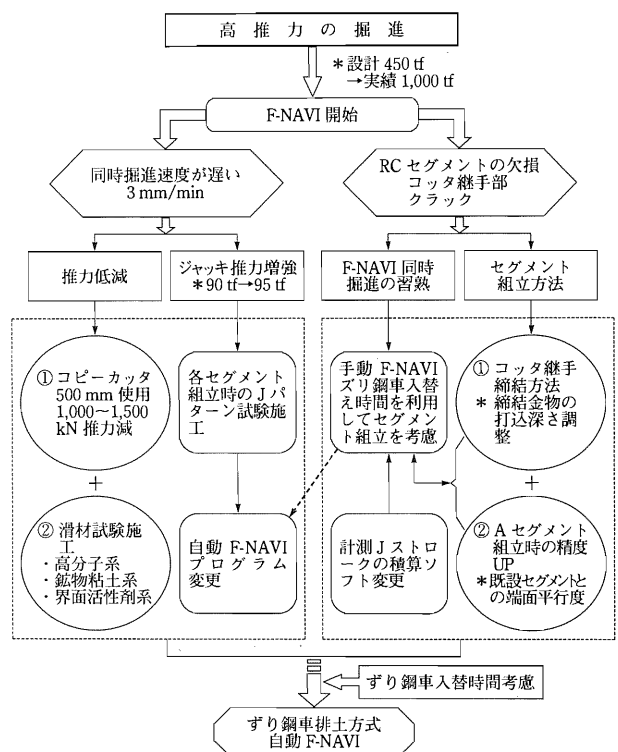


図-8 同時掘進への対応フロー

(4) F-NAVI 高速施工の要因

以下には、今回の高速施工を可能とした要因について記述する。

(a) F-NAVIシールド機の首振り機構と掘進速度

当現場では、掘進に入り推力が計算値の2倍以上に達する予期せぬ事態が発生したが、シールド推進機構の増強とF-NAVI首振り機構による全ジャッキ推進を行うことにより、掘進速度50mm/minを確保可能とし、掘進時間を25min/Rと大幅に短縮できた。また、首振りジャッキの使用による高速掘進での線形出来形も、最大20mm程度の蛇行量に納まり良好であった。

(b) ボルトレス継手RCセグメント

今回使用したRCセグメントは、前述のボルトレス継手を採用した。マルチブレード継手およびコッタ継手の組合せは、サイクルタイムの短縮に大きな効果があり、通常のボルト継手による1リングの組立て時間30分に対して、約半分の15分で組立て可能であった。

(c) シールド位置検出装置

手動測量による座標入力とシールド機に搭載したジャイロコンパスの方位角情報による位置検出装置により、シールド機オペレータは掘進中のシールド機の位置をリアルタイムで確認しながら、全ジャッキ推進時の首振りジャッキ操作を容易に行うことができた。位置検出装置は、あたかも自動車のハンドル操作による微妙な方向制御を実現して、ジャッキパターンを変更する時間も省略している。このことも掘進時間の大幅な短縮に繋がったと考える。

(d) 後続設備

今回の後続設備はF-NAVI適用のため、セグメント搬入やずり処理用の揚重設備、セグメント置場、土砂ピットなど、月進500mの施工量を確保する能力を保持していたため円滑な施工を行うことができた。

上述の(a)~(d)のどれが欠けても今回の掘進工期の短縮は実現できなかつたと言える。シールド施工の成否は、立坑から切羽まで各種作業の効率が鍵を握っている。シールド機掘削能力、ずり出し設備、ずり出しダンプの運行などが、すべてバランス良く稼働して初めて順調な進捗が見込める。今回の高速施工は、これらの要因を上手くバランスさせた現場マネジメントによるところも大きいと言える。

4. おわりに

新しい発想の同時施工法、「F-NAVIシールド工法」

は、実施工が今回で2件目の新工法ではあったが、首振り機構を使用して方向制御良好な高速施工を実証した。その月進量は従来工法の2~3倍の実績を記録し、十分に満足できる成果であったと考える。

この後、「F-NAVIシールド工法」は既に第3号機が本掘進を完了している。この工事は、小口径(内径 $\phi=2.2$ m)、泥水式、砂礫層掘進と悪条件ながら24mの日進量(520m/月)を達成している。

本工法はコスト縮減という社会のニーズにも合致した技術であり、今後増大が予想される地下空間開発の切札として更なる展開が図れるものと考えている。

謝辞：本発表を実施するにあたり、九州電力株式会社、株式会社九建ならびに工事関係者の方々より貴重なデータおよびご意見を頂きました。謹んで感謝いたします。

J C M A

《参考文献》

- 1) 後藤 徹：F-NAVIシールド工法(その工法概要と適用例)：土木技術，pp.98-103，1991.10.
- 2) 後藤和雄，後藤 徹，高橋郁夫，三谷典夫：掘進とセグメント組立ての同時施工法による高速施工：建設の機械化，pp.24-30，2000.4.
- 3) 九州電力：高速施工仕様シールド機の採用；電気評論，pp.8-11，2002.1.

[筆者紹介]



田代 和登(たしろ かずと)
九州電力株式会社
中央送変電建設所
送電建設課
課長



郡司 靖文(ぐんじ やすとも)
株式会社九建
ISO推進本部
グループマネージャー



後藤 徹(ごとう とおる)
清水建設株式会社
土木事業本部
技術第4部
担当部長



杉元 裕紀(すぎもと ゆうき)
清水建設株式会社
九州支店
西部ガス洞海湾シールド作業所
副所長