

# F-NAVI シールド工法による高速施工

田代 和登<sup>1</sup>・郡司 靖丈<sup>2</sup>・後藤 徹<sup>3</sup>・杉元 裕紀<sup>4</sup>

<sup>1</sup>九州電力株式会社 中央送変電建設所（〒812-0018 福岡市博多区住吉3丁目1-8 オヌキ新博多ビル）

<sup>2</sup>正会員 株式会社 九建 地中線工事部（〒810-0005 福岡市中央区清川2丁目13-6）

<sup>3</sup>正会員 清水建設（株） 土木本部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3 シーバンスS館）

<sup>4</sup>正会員 清水建設（株） 九州支店（〒810-8607 福岡市中央区渡辺通三丁目6-11 福岡フコク生命ビル）

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。シールド工事は、用地確保難やコスト縮減の取り組みから長距離化の傾向が著しく、これに対応する施工法が待たれていた状況にある。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、高速施工に不利なズリ鋼車による排土方式ながら最大月進 500m 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：シールド，長距離，首振り，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の同時施工による方法などが検討され、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時の掘進停止時間をなくすため、組立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必要があるため、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ターが付いた前胴部（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年度の土木学会技術開発賞を受賞している。

本文では、「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。

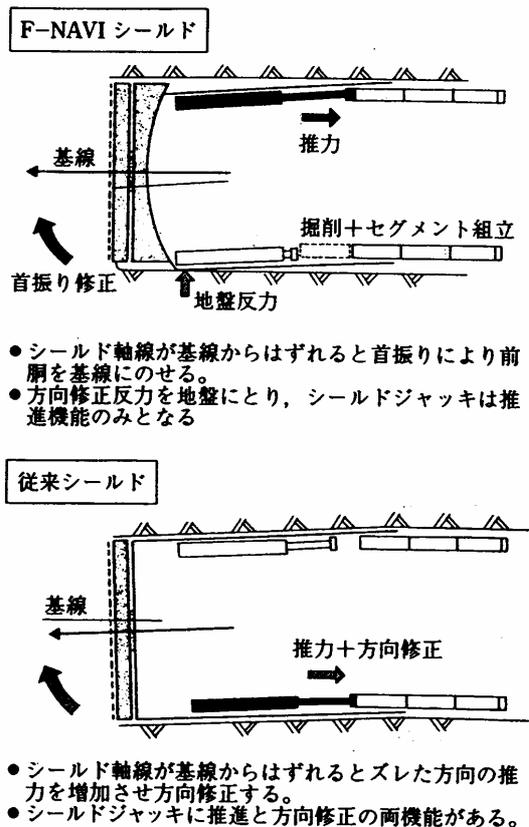


図-1 方向制御方法の違い

### (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

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基準からのずれ

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（基準線）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ち消しながら前進することができる。

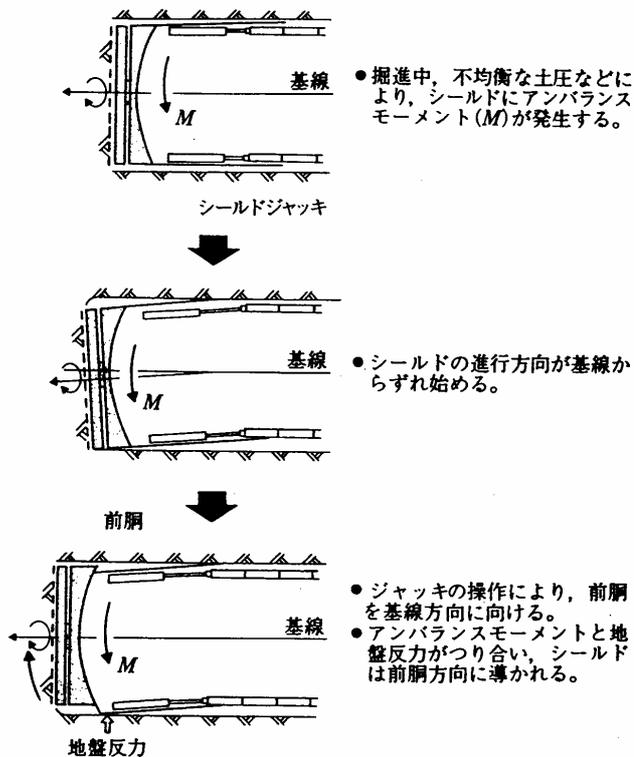


図-2 F-NAVI シールドの制御概念

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ため、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、セグメント組立時でも常に方向制御しながら掘進ができるため、掘削とセグメント組立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とが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も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、シールドジャック

キの数や掘削スピードをあげる必要がなく、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なっている。F-NAVI シールド機の機器構成を図-3に示す。

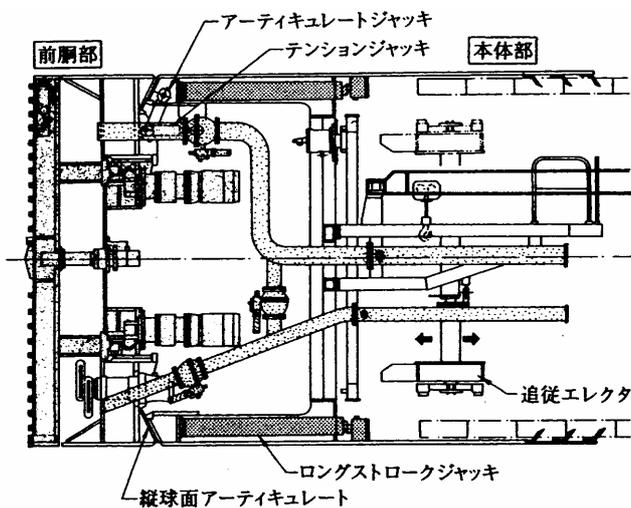


図-3 F-NAVI シールド機の構造

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 自動追従エレクタ

シールド機の掘進に同調させながらエレクタを組立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。

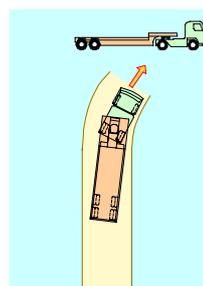
3. 開発の経緯

(1) 開発のアイデア

F-NAVI シールド工法は、シールド機の新しい方向制御方法として平成 2 年初頭に特許出願している。開発当時は、長い筒状のシールド機を最後部のシールドジャッキの選択のみで方向制御する従来方法に疑問を持ち、新規の発想を検討していた。ここでヒントになったのは、道路を走るトレーラーである。トレーラーは頭部を曲線方向に向けて長い本体を誘導してカーブを切っていく。この方法がカーブを切る理にかなった方法と考え、シールド機に応用しようとしたのが出発点である。

トレーラー

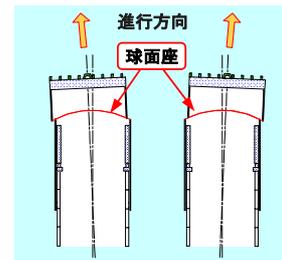
頭部を向けてカーブ



平面での方向制御

F-NAVIシールド

前胴部を上下左右に向けて方向



球面座により上下左右どの方向へも対応

図-4 F-NAVI シールドのアイデア

しかし、トレーラーは左右方向（平面）での方向制御であるのに対し、シールド工法では上下左右のあらゆる方向（立体）に制御できなければ方向制御として失格である。開発では、これを実現する機構を考え出すのが最大のポイントであった。幸い、お椀を 2 つ重ねればどんな方向へも首を振れることに気づき、球面座という機構とこれを作動するジャッキの組み合わせに行き着いている。その後、シールドジャッキによらずに方向制御できるこの機構が、同時施工での有効な方向制御方法と考え、同時施工法への適用に主眼を置いて実証工事から実施工へ結び付けた。

(2) 開発の経過

アイデア創出の後、船橋市が平成 2 年 6 月に発

注した城門放流幹線管渠築造工事（φ3.35m, 泥水式, STセグメント）において、シールド機の各機構の作動・性能を確認すべく実証施工を計画した。平成3年にF-NAVIシールド実機を開発製作し（写真-1参照）、4月から12月にかけて現場施工を行い、構造や姿勢制御の性能を確認し、首振り機構によるシールド機の方向制御が実現できることを確認した。

実証施工後、平成4年～8年にかけて、同時施工に必要なシールドジャッキの自動盛り換えシステム、自動追従型セグメント組立装置、自動方向制御システム、首振り機構の油圧回路、伸縮量の自動制御システムを順次開発している。

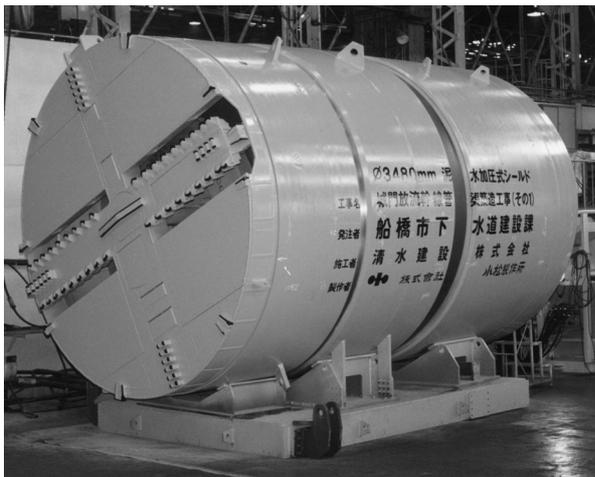


写真-1 F-NAVI シールド1号機

続いて、平成9年に埼北幹線Ⅱ期浦和大門工区（φ3.24m, 泥土圧式, STセグメント, 図-5参照）で工期短縮の目的から同工法を採用し、掘削とセグメント組立の同時施工を実施した。その結果、最大日進量24m/日、25日稼働で月進量504mを記録して大幅な工期短縮の成果をあげ、平成11年5月に掘進を完了している。

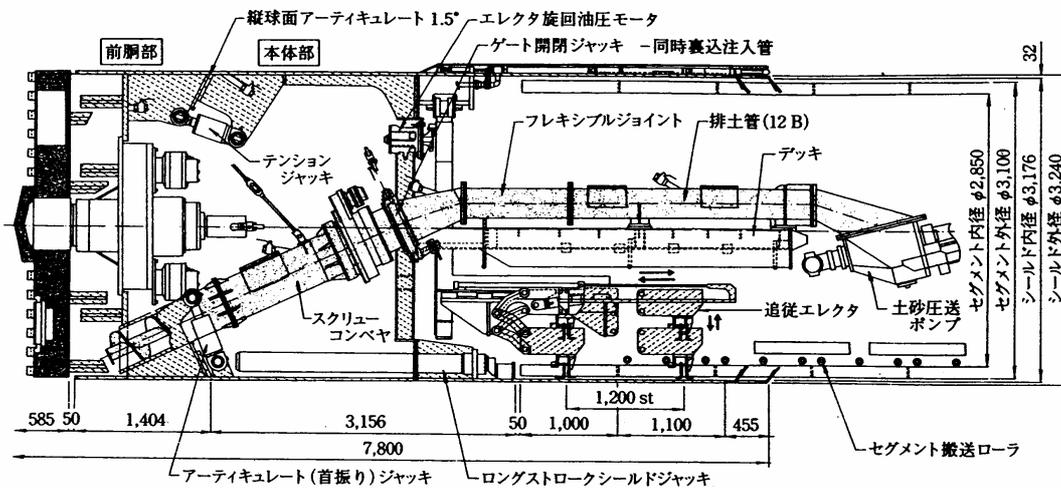


図-5 浦和のF-NAVIシールド

ただ、この工事は泥土圧式ではあるが、土砂圧送パイプによるズリ出しのため坑内状況は泥水式と同様である。また、坑内ハンドリングに有利なスチールセグメント採用のため、工法の汎用性を証明するにはまだ至ってなかった。

このため、シールド工事で採用例の多い〔土砂を鋼車により搬出しRCセグメントを採用した〕今回の工事で、F-NAVIシールド工法の汎用性を証明する取り組みを行った。

#### 4. 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、工期短縮とコスト削減の観点からシールド施工における高速施工への取り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、所定の成果をあげることができた。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

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：φ3.61m, 洞道延長：シールド区間1934m

排土方式：レール工法（ズリ鋼車）

セグメント：STセグメント（急曲線40R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）＝φ2.80m

RCセグメント部φ3.00m

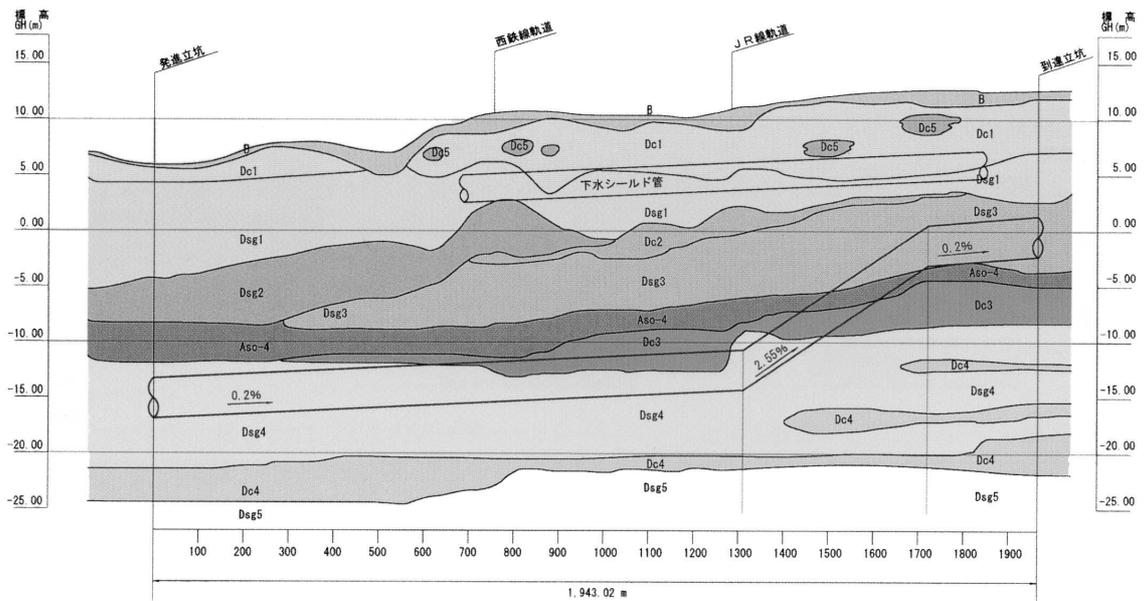


図-6 久留米分岐線の土質縦断面図（更新世砂礫層，阿蘇火砕流堆積物を掘進）

## (2) 高速施工への取り組み

### 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，ズリ鋼車およびRCセグメントへの適応が課題となった．



写真-2 久留米分岐線での採用機

### 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

『コッター継手』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，リング間にアンカー用異型鉄筋にピンを建込んだ凸側と，スリット付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し込むことができる．

#### ② コッター継手（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型締結材を打ちこみ，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．

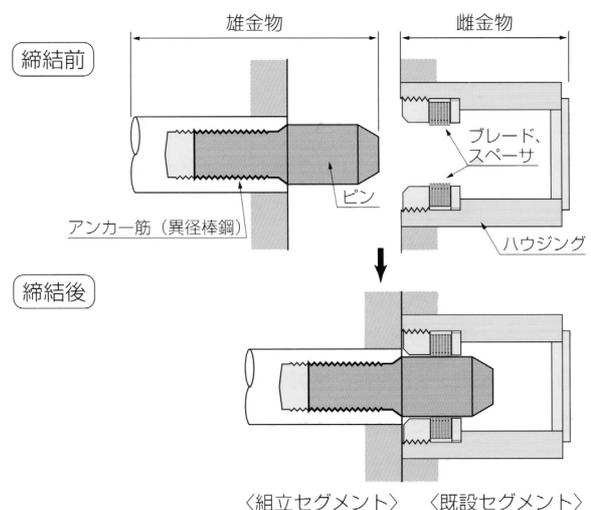


図-7 マルチブレード継手

### ③ワンタッチ式継手の効果

両者を組み合わ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、堅固なコッター継手とフレキ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。組立真円度も上下左右±1mm程度に納まり、非常に良好であった。

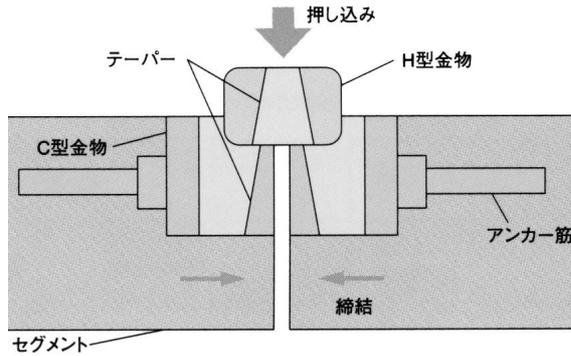


図-8 コッター継手

### (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(10000kN【予想推力:4500kN】)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なったが、コピーカッター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

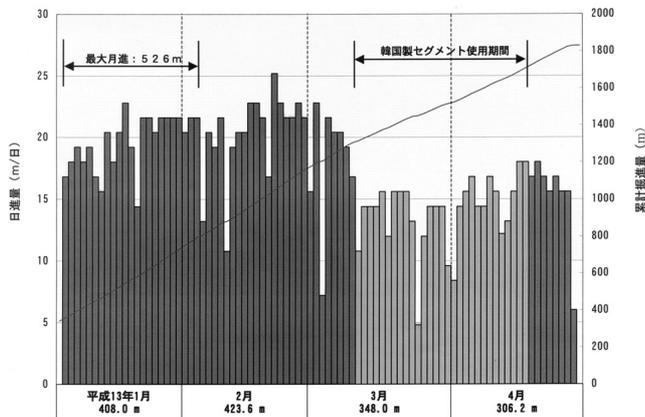


図-9 掘進実績

ても、コピーカッターの余掘増及びF-NAVI シールド機の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ヶ月(実稼動日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。

#### 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、段取り替えを含めて約8ヶ月を要した。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、

$$N = (1934\text{m} - 174\text{m}) \div 200 \sim 250\text{m} \times 30 \text{日} + 100 \text{日} \\ = 311 \sim 364 \text{日} \approx 10.3 \sim 12.1 \text{ヶ月}$$

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

#### 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、ズリ鋼車による土砂搬出のため、分岐線からの距離に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、ズリ鋼車の運行時間(切羽の待ち時間)は、 $0.5\text{km} \times 2 \div 4 \sim 6\text{km/h} \times 60 \text{分} = 10 \sim 15 \text{分}$ となる。

表-1 月別進捗表

年月	今月出来高(m)	実稼働日数	平均日進量(m)	備考
H12.10	43.200	18.0	2.400	初期掘進
H12.11	73.800	15.0	4.900	初期掘進
H12.12	225.600	19.0	11.900	本掘進開始 高推力低減施策
H13.1	408.000	20.0	20.400	F-NAVI本格化
H13.2	423.600	21.0	20.200	手動F-NAVI開始
H13.3	348.000	24.0	14.500	自動F-NAVI開始 韓国製セグメント(※1式)
H13.4	306.200	20.0	15.300	自動F-NAVI開始 韓国製セグメント(※1式)
H13.5	105.600	18.0	5.900	急曲線 到達掘進

#### d) 同時掘進への対応

今回のシールド施工は、約2kmの延長をカッタービット無交換で計画した。よって、掘進速度が設計値(25mm/分)を下回った場合カッタービットの転送距離が長くなり、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/分)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-10に示す。

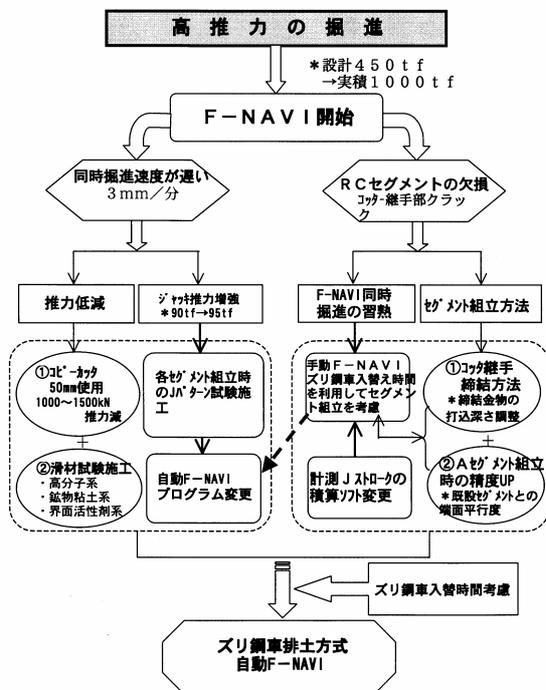


図-10 同時掘進への対応フロー

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。ズリ鋼車、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。

自動プログラムの変更と合わせて実施した手動F-NAVIによる掘進施工は、汎用性のあるズリ鋼車式の同時掘進プログラムの構築に大きく貢献したと言える。

#### (4) F-NAVI 高速施工の要因

本掘進開始当初は、高推力のためF-NAVIシールド工法の一つの特徴である同時掘進は使用せず、首振り機構の活用を行っている。シールド高速施工を成功させるためには、シールド機単体の性能だけに着目しても限度があり、後続設備を含めた総合的な施工管理が要求される。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/分を確保可能とし、掘進時間を25分/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ー継手の組合せは、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リングの組立時間30分に対して、約半分の15分で組立可能であった。

#### 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ー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、セグメント搬入やズリ処理用の揚重設備・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。

上記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ったと言える。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・ズリ出し設備・ズリ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。

## 5. 今後の展開

実施工が今回で2件目の新工法であるF-NAVI工法ではあるが、F-NAVI工法の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。F-NAVI工法のもう一つの特徴である同時掘進は、高推力対応のプログラム変更にかかり、全ての区間への適用とはならなかったが、ズリ鋼車、RCセグメントでの高速施工が可能であることは実証できた。

今後は、今回工事での取り組みであった種々の土質に適応可能な首降り機構の確立・高推力下での柔軟な対応を活かして、増加する長距離シールドトンネル工事での高速施工へ更なる展開を図る予定である。「F-NAVI シールド工法」は既に第3号機の製作が完了し、2002.2月現在、本掘進を行っている。この工事は、セグメント内径が2.2mと小さく、また、泥水式による砂礫層の掘進であり掘進効率が影響を受ける懸念があったが、24mの日進量を達成している。今後の成果に期待していただきたい。

## 6. おわりに

新しいコンセプトの同時施工法「F-NAVI シールド工法」は、シンプルな機構で高速施工を実現し、

実工事においてその有効性・汎用性が実証された。その月進量は従来工法のおよそ2倍～3倍の実績を記録し、十分に満足できる成果をあげてきている。

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り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)、(株)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。

### 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，1991.10，pp.98～103
- 2) 後藤 徹，宮沢 和夫，花本 忠幸，三谷 典夫：F-NAVI シールド工法の開発と現場適用状況：土木学会第47回年次学術講演会，1992.9，pp.162～163
- 3) 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，2000.4，pp.24～30
- 4) 九州電力：高速施工仕様シールド機の採用：電気評論，2002.1，pp.8～11