

17. 長距離・高速施工シールド工事の施工設備について

－東西連係ガス導管工事（第1工区）施工実績（その1）－

鹿島建設 東京土木支店 ○米沢 実
 鹿島建設 東京土木支店 隈部 毅彦
 鹿島建設 東京土木支店 亀井 良至

1. 工事概要

本工事は、東京電力㈱富津火力発電所（千葉県）と東扇島火力発電所（神奈川県）を結ぶ延長20kmのLNG専用パイプラインを構築するものである。そのうち東京湾横断部約18kmの海底トンネルについては、富津側、扇島側から2台の泥水式シールドマシンで施工し、東京湾中央部で地中接合により貫通させる。シールド工法としては世界最長となる延長約9kmを平均月進量530m/月で掘進する計画であった。これを達成するため、長距離・高速掘進対応シールドマシンやセグメント複数リング一括搬送システムなどの高速施工設備、また、組立時間の大幅短縮が可能なQB（Quick Block）Ⅱセグメントの採用やプレキャストRC床版による完全二次覆工の省略等の高速施工対策を行なった。その結果、本掘進平均月進量665m/月、最大月進量1,168m/月と計画を上回る結果を得られたので、その計画と実績を報告する。



写真-1 掘進中のトンネル坑内

工事諸元

工事名：東西連係ガス導管新設工事（富津工区）
 企業者：東京電力株式会社
 施工者：鹿島・西松・大林 建設共同企業体
 掘進延長：L=9,030m
 トンネル線形：平面線形：R=4,000m（1カ所）
 縦断線形：最大i=3.0%（下り）
 最小i=0.2%（下り）
 土被り：13m～35m、最深部 海底下57m
 （土被り26m）
 セグメント：RCセグメント（QBⅡセグメント）
 内径：φ3.0m、桁高：220mm。
 幅：1.35m、軸挿入6等分割
 シールドマシン：泥水式シールド（中折れ）
 外径：φ3.62m
 内胴スライド式同時掘進機構
 機械式地中接合（A-DKT工法）装備



図-1 工事場所位置図

2. 計画と実績

長距離・高速掘進に対応するために立案した計画の概要と得られた実績は以下のとおりである。

2.1 セグメント

セグメントは、高速施工と坑内の取りまわし等を両立させることを考慮して、同規模内径では、過去最大の1,350mm幅を採用し、分割数は、軸方向挿入型の6等分割とした。

セグメント構造は、鹿島が開発したQB II (Quick Block) セグメントを採用した。QB IIセグメントは、セグメント間継ぎ手を調芯機能付突合せ継手、リング間継ぎ手をピン式のDS (Locked Disc Spring) 継手とした、ワンパス組立が可能な高速施工対応のセグメントである。セグメント間継ぎ手は、組立時の簡単なガイド機能を有するのみで、ボルト等での接続はない。継手面に作用する軸力により継手部を保持する構造である。

施工結果は、組立精度、漏水等の品質も非常に良好であり、継ぎ手機構の合理化による組立時間の短縮、幅広化による進捗の向上に大きく寄与した。

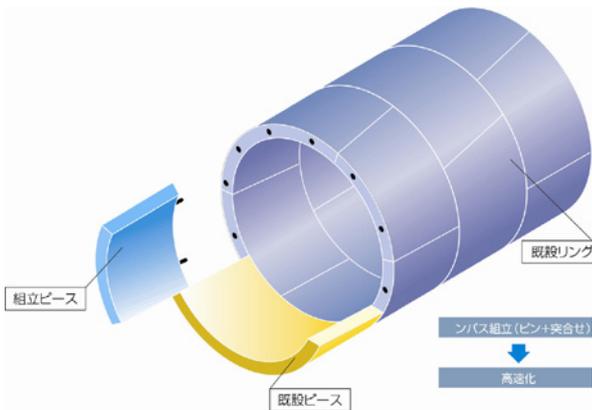


図-2 QB II セグメント概要



写真-2 QB II セグメント

2.2 シールドマシン

(1) 高速施工への対応

シールドマシンは、通常掘進、組立同時掘進を任意に選択可能なダブルジャッキ式同時掘進機構を採用した。ジャッキ速度は、最大掘進速度90mm/min

が可能な仕様とした。(4)で述べる固結シルト層に対応したカッター形状の工夫等も効果を発揮し、一部の礫層区間を除いて、ほぼ全線に亘り計画速度で掘進することができた。同時掘進を行わなくても十分な進捗を得ることができたため、内胴スライド式の同時掘進は8,000m付近の10リング区間のみ行なった。この区間では、セグメント応力等も含め各種のデータ計測を行い、同時掘進機構の妥当性を検証した。



写真-3 シールドマシン

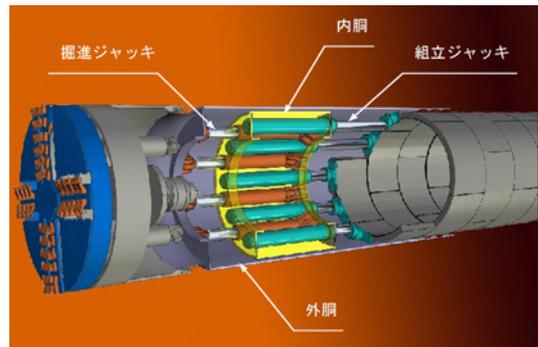


図-3 ダブルジャッキ式同時掘進機構

また、セグメント組立時間短縮を図るため、エレクター及びセグメント供給装置においては徹底したシミュレーションを行い、ジャッキ引き速度の向上や供給テーブルの採用によりアイドルタイムを最小限とした。

シミュレーションタイムは1リングの組立時間が20分であった。当初は、ほぼ20分を要していたが、作業員が慣れてきてからは、10分を切るようになり、以降はコンスタントに10分以内で組立を行ない進捗の向上に大きく寄与した。

(2) 長距離施工への対応

カッタービットは9kmを交換なしで掘削できる仕様とした。ビット材質は、耐摩耗性と対衝撃性に優れたE3種シンターヒップ処理とし、チップの大型

化を図り、許容磨耗量を 25mm とした。また、特殊先行ビットを段差 50mm で配置し、ティースビットの磨耗低減を図った。さらに、機械式地中接合のため、最外周部の掘削は伸縮スポークで行うが、全6本の伸縮スポークのうち、常時使用するのは2本のみとし、残りの4本はバックアップとした。そのうちの2本については、掘進終盤で出現すると予想される固結粘土用に切削性を考慮したビットを装備し、スポーク全体をチャンバー内に格納する構造とした。

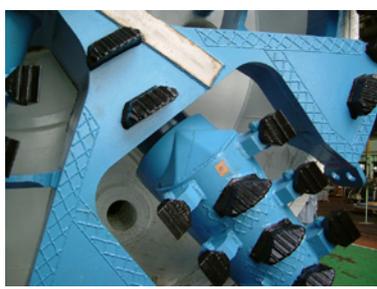


写真-4 伸縮スポーク式予備ビット

写真-5 特殊伸縮スポーク

途中で約 1.5km の礫層区間を掘削したが、異常磨耗やビットの損傷等の発生もなく、当初の2本のスポークで9kmの掘進を完了した。掘進終了後、カッターフェイスを地上で復元し、詳細な磨耗調査を行なったが、先行ビットの磨耗係数は計画値の約 1/2、ティースビットは約 1/4 であり、特に先行ビットの軌跡内にある部分の磨耗量はゼロであった。

これは、先行ビットの軌跡内であれば、ティースビットは全く磨耗しないということであり、今後の長距離シールドにとって有益な知見が得られた。



写真-6 復元されたカッターフェイス

(3) 高水圧への対応 (最大0.6MPa)

高水圧 (最大 0.6MPa) への対応として、カッター軸受土砂シールは4段装備し、うち3段は長距離連続運転時の温度上昇によるシールの劣化を懸念して、耐磨耗性・耐熱性に優れたフッ素ゴムを採用した。温度センサーを設置し、インターロック温度を 60°C に設定したが、計測値は 30°C 前後で推移した。これは、泥水式シールドであるため、泥水による冷却効果が大きかったと、推察される。また、土砂シール部分についても、解体後詳細な調査を行なったが、異常な磨耗等は認められず、健全な状態が保たれていた。

テールシールは、止水性、耐久性に優れた、実績も多いウレコンシールを採用し、4段配置することで確実に止水できる仕様とした。掘進中はテールグリースの注入管理を適切に行なった結果、漏水や裏込材の漏えい等は全く発生していない。

本工事では、ピース間に継手のないセグメントを使用するため、テール内で継手部の目開きをなくし、シールを封入することが重要である。そのため、エアジャッキによる「セグメントリングサポート」を開発し、マシンのテール内に装備することで、セグメントのシールを確実に封入できる機構とした。シール材を確実に封入することで、テール内のセグメントの真円度が向上し、それが、次に組み立てるセグメントの位置合わせを容易にすることで、セグメント組立時間の短縮に大きく寄与した。



写真-7 セグメントリングサポート

(4) 多様地盤への対応

本工事では、ボーリングデータがなく、音波探査により設定した土層の掘進であり、想定外の地盤が出現するリスクが高いため、シールドマシンは多様な地盤に幅広く対応できる仕様とした。

カッターフェイスは、泥水式シールドとしては非

常に大きい42%の開口率をとり、面板やスポーク間を繋ぐフレームを強度の許す限り簡素化し、チャンバー内の泥水循環を良くすることで固結シルト等のカッターフェイスへの付着、チャンバー内の閉塞を防止することとした。また、ビットを大きくして、数を減らすことでビット周りの土の付着を低減し、さらに、トルク計算による必要トルク(315kN・m)に対して装備常用トルク645kN・m(Fs=2.1)、装備最大トルク1013kN・m(Fs=3.2)と大きな安全率をみることで、想定外地盤に対応できる仕様とした。これらの効果が発揮され、通常掘進速度の低下が懸念される固結シルト層においても、カッタートルクの上昇や掘進速度の低下を起こすことなく、順調に掘進を終了した。

2.3 資材搬送設備

(1) 立坑搬送設備

立坑上には荷降ろしを行う10 t 橋型クレーンの他に主資材(セグメント、インバート床版)をセグメントドーリーへ供給する4.8 t 橋型クレーンを設置した。セグメントは、立坑上のドーリーの最後尾に載せられると、ドーリー→リフト→セッターの順で自動搬送される。設備は全く問題なく順調に稼働し、ドーリー、立坑下セッター部に2リング分ストックできることから、リフトのトラブルが坑内搬送に直結するのを防止するバッファー機能を果し、稼働率の向上に大きく寄与した。

(2) 坑内搬送設備

坑内搬送を行うバッテリーカーの編成は、2台の6 tバッテリーロコ(重連)と5台の資材台車及び1台の人車とし、2リング分を一括搬送した。立坑下のセッター及び切羽のリフトアップ台車で2リング分のセグメントを一括して荷降ろしし、荷扱い時間を大幅に減少させ、3編成で運行可能とした。

また、坑内は実荷のバッテリーカー編成(切羽行)と空荷のバッテリーカー編成(坑口行)がすれ違えるように2 km、4 km、6 kmに離合箇所を設置し、分岐器はスプリング方式とし、切り替え操作を行なうことなく、離合することとした。運転方法は、長距離運転時のヒューマンエラーの排除を目的として、軌道上に設置されたIDタグと坑内300mごとに設置されたSS無線アンテナによる無人自動運転方式とした。自動運転システムは、中央管理室で現在の走行位置、走行速度等を把握することができ、後述する坑内情報幹線の冗長化等の対策とあいまって、全くトラブル、誤動作を起こすことなく、効率的な坑内搬送に有効であった。

また、緊急時対応として自走式の避難専用台車を後続台車内に格納しておき、緊急時には15km/hの高速で走行し、坑口まで避難できるようにした。

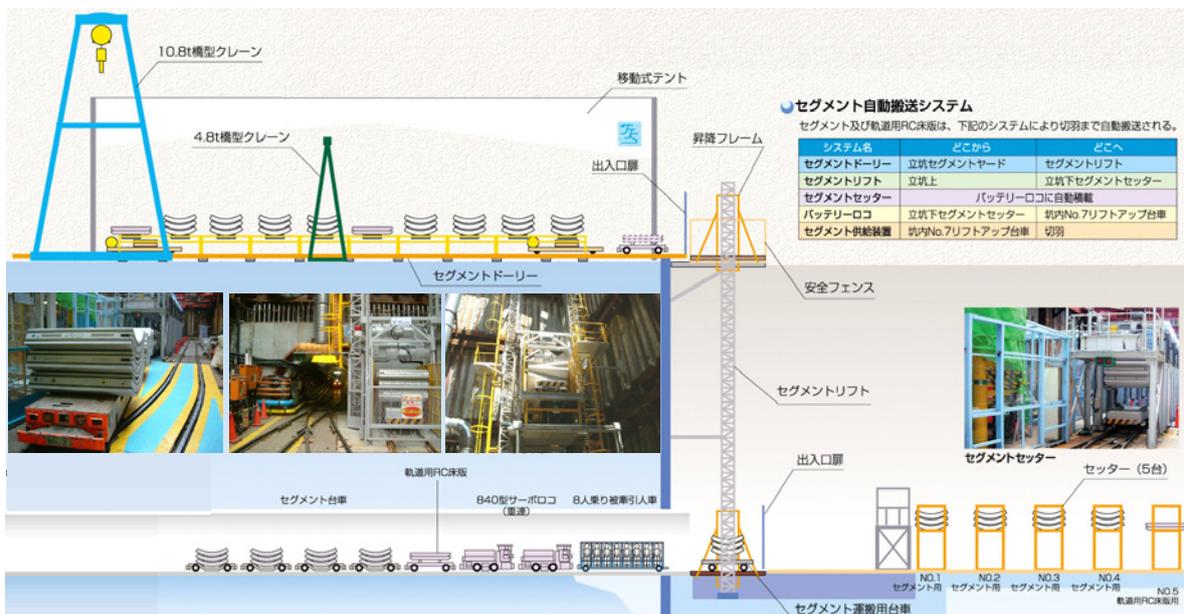


図-4 立坑搬送設備概要図



写真-8 セグメント搬送状況 写真-9 自走式緊急避難人車
(3) 切羽搬送設備

バッテリーカーにて搬送されたセグメントは、リフトアップ台車で荷受けした後、切羽搬送装置内に投入する。切羽搬送装置は、No. 1～No. 4台車下に設置されており、3リング分がストックされた状態でセグメントを切羽に順次前送りする。搬送装置上及びリフトアップ台車、仮置き台車にセグメントをストックできるため、搬送設備にトラブルが発生した場合もストック分を使用しながら、掘進作業が続けられるようにした。施工中も搬送設備の遅延や故障による掘進への影響を最小限に留めることができた。



写真-10 リフトアップ台車 写真-11 セグメント搬送装置

2.4 泥水輸送設備

本工事は、海底トンネルであり、通過土層に不確定要素があったため、泥水輸送設備は、全断面砂層、全断面粘性土層の両方において最大掘進速度に対応できる仕様とした。ポンプ仕様は、メンテナンス頻度の軽減を狙って、高揚程ポンプ（57.5m）を採用し、設置台数を軽減し、可変速ポンプはインバーター方式を採用した。（送泥ポンプ3台、排泥ポンプ13台）。ポンプの軸受けシールは高耐久性メカニカルシールを採用し、軸封水と併用することにより長超寿命化を図った。また、配管延長作業の頻度を低減するためにホースリール（伸縮ホース）は7mストロークのものを2連にして、1回の配管延長作

業で配管2本分（12m）の掘進が可能な仕様とした。配管延長作業中でもバイパス運転が可能なように中間バイパスを2kmごと（計3ヶ所）に配置した。

2.5 泥水処理設備

泥水処理設備は、全断面砂層、全断面粘性土層の両方に対応できる仕様とした。

高速施工に対応するため、調整槽は、3基設置した。1基目（調整槽③）で泥水を受け、2基目（調整槽②）で比重、粘度調整を行い、3基目（調整槽①）を調整済み泥水の送泥用とした。

ローヘッドスクリーンは、2基設置し、1基は予備とし、メンテナンスを行いながら交互に使用する。

フィルタープレスは、全断面粘土層にも対応できるように4台設置した。

2.6 裏込め輸送設備

裏込め材は、A液に超遅延型安定剤（可使時間7日）を配合することにより長距離圧送を可能にするとともに、配管内の清掃頻度を低減した。さらに、長距離圧送を可能にするためにA液圧送管は3Bとし、坑内に中継設備を設置し、地上から遠隔操作が可能な設備とした。

2.7 総合施工管理システム

坑内に光ケーブルによる通信幹線を設置し、立坑上の中央管理室にて種々の管理を集中的に実施できる長距離トンネル用施工管理システムを導入した。光ファイバーは、切断等のトラブルを考慮してループ化を図り、冗長化した。



写真-12 中央管理室

(1) 総合掘進管理システム

坑内の各種システムを光ファイバーに集約して冗長化を図り、掘進管理は、鹿島が開発したKSGSシステムを用い、マシン、泥水輸送、泥水処理、裏込め輸送を中央管理室にて総合的に操作及び管理を行なった。情報の集中化とそれによる的確な判断に寄与した。

(2) 坑内環境管理システム

坑内には、300mごとに、酸素濃度、可燃性ガス、一酸化炭素、硫化水素検知器を設置し、各所の計測値を中央管理室に一括表示し、基準値を下回ると自動的に警報が鳴るシステムとした。

(3) PHSによる通信及び所在管理システム

入坑者は全員PHSを所持し、坑内及び坑外との通信が可能。PHSは入坑時に登録を行うことで、各自の所在が中央管理室にリアルタイムで表示される。また、全てのPHSから現場内一斉放送（坑内、地上、現場事務所）が可能なシステムとした。これにより、坑内の人員が人目で把握することができるとともに、全員がPHSを携帯したことにより、確実に連絡を取ることができ、施工管理上非常に有効であった。

(4) バッテリーロコ運行管理システム

バッテリーロコの運転状況は中央管理室、JV事務所等で確認可能とし、緊急時には、中央管理室からの一斉停止や遠隔運転も可能なシステムとした。

遠隔操作を行なうことは、場合によってはトラブルの原因となることも考えられるが、的確な運用ルールを定めることで、本工事では有効に機能した。



写真-13 所在管理システム

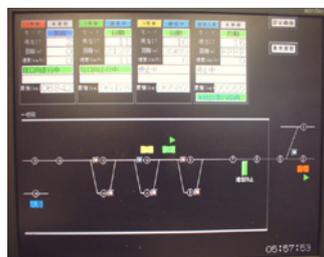


写真-14 ロコ運行管理システム

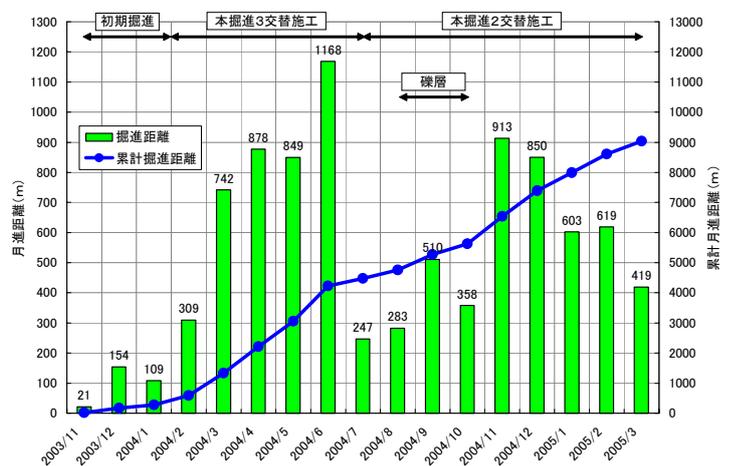
3. 施工実績

初期掘進（延長280m）は、平成15年11月末日に

開始し、後続台車投入作業を繰り返しながら、約2ヵ月で終了した。

平成16年2月初旬から、3交替施工による本掘進を開始し、同年6月には、シールド工事では世界記録となる月進1,168mを達成した。同年8月からは、2交替施工に変更して、平成17年3月中旬に本掘進を終了した。本掘進での平均月進量は665m/月を記録した。これは、シールドマシン、資材搬送設備等に致命的なトラブル等がなく、計画どおり稼働した結果によるものであり、設備のトラブルで掘進を止めた時間を作業時間から控除した稼働率は95%を超えている。また、突発的なトラブルにより掘進ができなかった日は、わずか1日のみであった。

表-1 月進量実績



4. おわりに

本工事では、シールドマシン、搬送・流体設備、セグメント等、各々の設計、設備が、計画どおりの機能を果たし、無事掘進を終了することができた。

このようなプロジェクトでは、計画時のリスクの抽出とそれに対して徹底した検討を行い、実施計画に十分反映させることが重要である。計画の立案、施工に際し、一体となって、検討、ご指導頂いた東京電力株式会社殿、また、多大なご支援を頂いた関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 米沢実・隈部毅彦・斉藤裕輔。黒崎秀：長距離シールドにおける高速施工（富津工区）、トンネルと地下、Vol. 37、No. 7