

シールドトンネルのメカニカル発進・到達工法

MECHANICAL DEPARTURE AND ARRIVAL METHODS FOR SHIELD TUNNELING

阿曾 康夫*・四家 隆**・牧本 有功***・西田 義則****

Yasuo ASO, Takasi YOTSUYA, Ariyosi MAKIMOTO, Yosinori NISHIDA

This paper reports the execution results of newly developed methods, which enable shield tunneling machine to depart from or arrive at the shaft without large scale soil improvement and breaking work of the entrance wall as usual. In this project, both of departure and arrival shaft were constructed using Pneumatic Caisson Method. In the departure method, the entrance part of the shaft wall was constructed of limestone concrete and was reinforced with PC cable so as to cut the wall with the rotating cutter of tunneling machine after removing the PC cable. In the arrival method, metal sliding block, set in the dock part of the shaft wall before sinking, was drawn into the shaft with oil pressure jack synchronizing with the advance of tunneling machine.

Keywords: shield tunneling, departure method, arrival method, shaft, without soil improvement work

1. はじめに

北海道電力(株) 苫東厚真火力発電所の増設のための取水管海底トンネル工事において、陸上を発進立坑とし、海上を到達立坑とするシールドトンネルの機械的な発進及び到達工法を新しく開発し実施した。

従来、発進及び到達方法としては、凍結工法や広範囲にわたる地盤改良を行い固化し、仮壁を人力等により取り壊しを行った後、発進及び到達を行っていた。技術の進歩がめざましいシールド工法においては、遅れが目立つ分野であり技術開発が望まれていた。

当工事では、到達部は海底で高水圧(3 kgf/cm²)であるため、実績のある凍結工法を計画したが、工程短縮、経済性、環境及び安全性を考慮して、従来行っていた補助工法にたよらない新工法を開発し採用することとした。本稿は、この新工法である、コンクリートを直接切削する発進工法と、鋼製スライドブロックの引き込みによる到達工法を実施した結果と得られた知見について報告するものである。

2. 工事概要

本工事は、写真-1および図-1のように、火力発電所の取水路を泥水式シールド(φ5.56m)により行

-
- * 正会員 北海道電力(株)
 - ** 正会員 北海道電力(株)
 - *** 正会員 大成建設(株)
 - **** 正会員 大成建設(株)

う工事で、発進立坑は陸上でニューマチックケーソン工法により築造し、到達立坑は同じくニューマチックケーソン工法により海上作業で築造したものである。

シールドトンネルのルートは、全断面が洪積砂礫層であり、細砂と粗砂及び礫（ $\phi 2 \sim 30\text{mm}$ ）を主体とした最大径150mmの礫が点在するN値50以上の土層である。

また、透水係数は、 $1.8 \sim 3.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ と大きく、海底ということで高水圧（ 3kgf/cm^2 ）となっている。

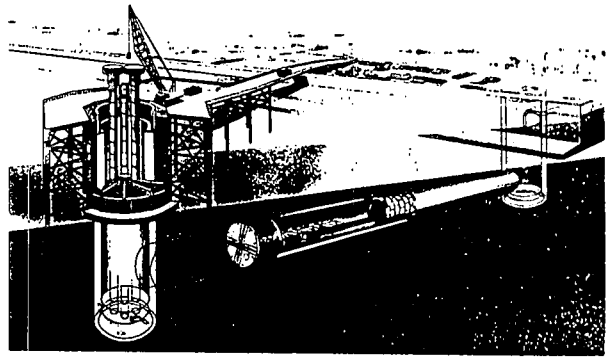


写真-1 全体施工状況

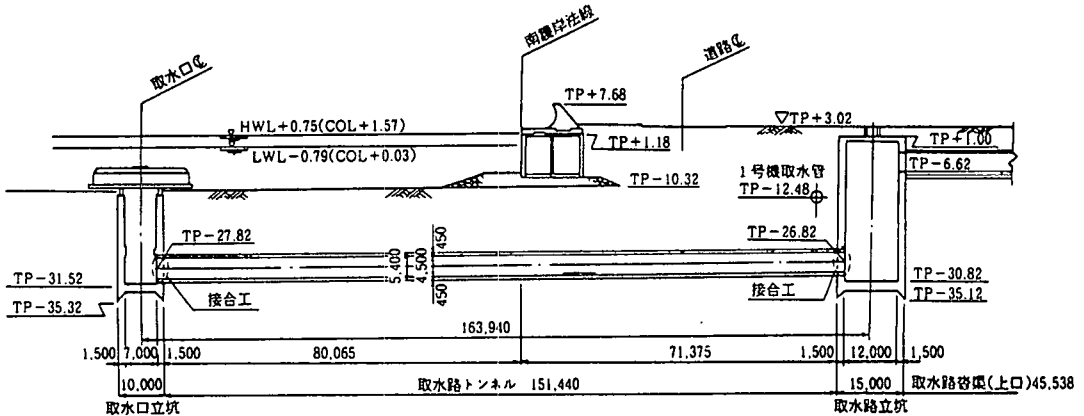


図-1 全体縦断面図

3. コンクリート直接切削による発進工法

発進工法は、図-2のような手順で、ニューマチックケーソン工法による発進立坑の構築時に、無筋の石灰石コンクリート壁をP C鋼線で補強しておき、発進時にはシールドマシンにより直接切削（P C鋼線引抜き後）を行った。

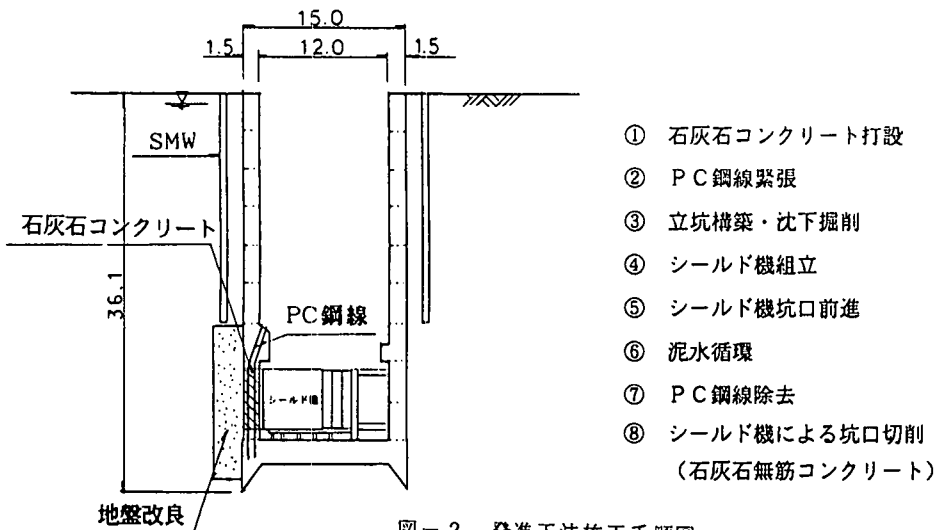


図-2 発進工法施工手順図

3・1 発進立坑

発進立坑コンクリート部をシールド機により直接切削することによる、カッタビットの摩耗及び欠損を極力抑えるために、無筋石灰石コンクリート（設計基準強度 $240\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）とした。

また、ニューマチックケーソン沈設時には、外圧に対抗して無筋部にPC鋼線を配置し、プレストレスを導入して補強することとした。プレストレスの設計に当っては、表-1、図-3のように無筋部の全断面上に圧縮力のみが働くように三次元FEM解析によりPC鋼線を配置した。また、無筋部にはひずみ計を設置し、プレストレスの導入時から解放時までの実際の応力状態（円周方向 $9.8\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、鉛直方向 $15.8\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）を把握し施工管理を行なった。図-4は、無筋部中央の円周方向力の経時変化である。掘削終了付近で外面に引張力が発生しているが、 $5\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度と小さく、設計の妥当性が確認できたものと思われる。

なお、シールド機の発進の際には、チャンバー内で泥水圧高め外圧とバランスさせPC鋼線を除去し、シース内をセメントミルクで充填した。その後、無筋状態となった石灰石コンクリートを切削し発進を行った。また、発進坑口には、二重のフラップ式のエントランスパッキンを取り付け止水を行った。

表-1 PC鋼線諸元表

PC鋼線より線	SWPR-7B $12 \times \phi 12.7$
鉛直方向	11本
円周方向	13本
PC緊張力	170 tf

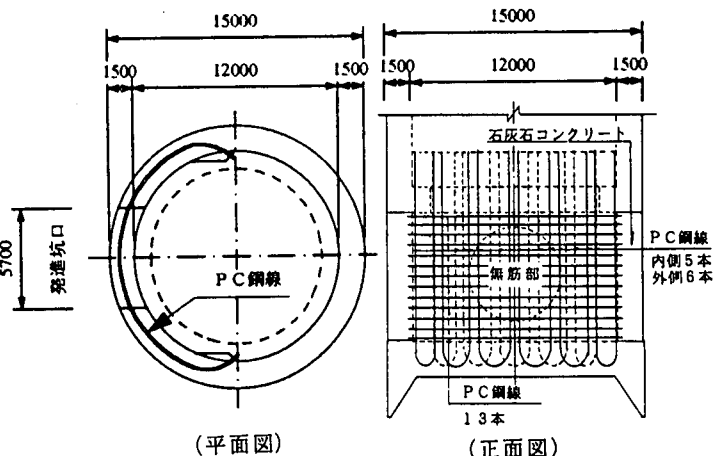


図-3 PC鋼線配置図

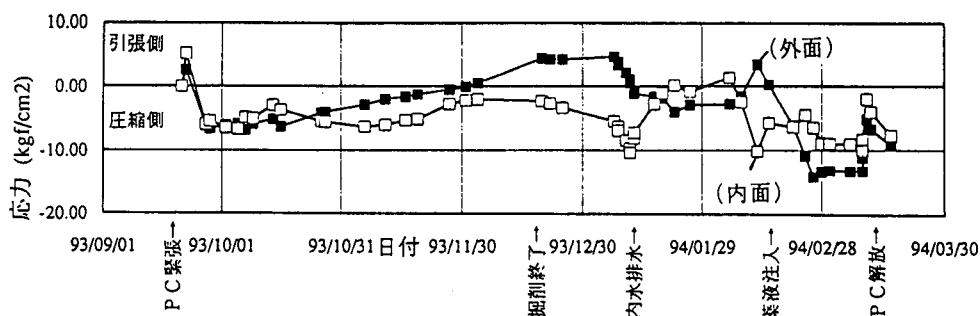


図-4 プレストレス経時変化（無筋部中央円周方向力）

3・2 石灰石コンクリート切削実験

シールドマシンにより直接石灰石コンクリートの切削を行うことによる、カッタビットの摩耗量及び配、カッタトルク等の検討のために、コンクリート供試体（ $600 \times 600 \times 350\text{mm}$ ）の切削実験を行った。

以下にその結果を列記する。

(a) カッタビットの中心軌跡上に先行ビットを配置することにより、石灰石コンクリートの切削（掘進速度 $3\text{mm}/\text{min}$ ）及び、その後の洪積砂礫層の掘進（ 150m ）では、カッタビットの摩耗量は、 3mm 程度となり掘進可能となることがわかった。

(b) カッタトルクは、掘進速度 $3\text{mm}/\text{min}$ で $140\text{tf} \cdot \text{m}$ と推定され、装備トルク（ $224\text{tf} \cdot \text{m}$ ）以下となった。

3・3 施工実績

施工実績は、表－２、表－３のように、カッタービットの異常欠落が無く摩耗量は1mm程度であり、実験値3mmとはほぼ同じ値であった。切削速度は実験と同じく2～3mm／分が可能であり、カッタートルクも最大134tfmで実験値の144tfmとはほぼ同じ結果で、厚さ1.5mの石灰石コンクリートを3日間で切削完了した。

切削中、発進坑口からの出水は無かったが、P C鋼線用のシース管が排泥ポンプの閉塞を招いた。

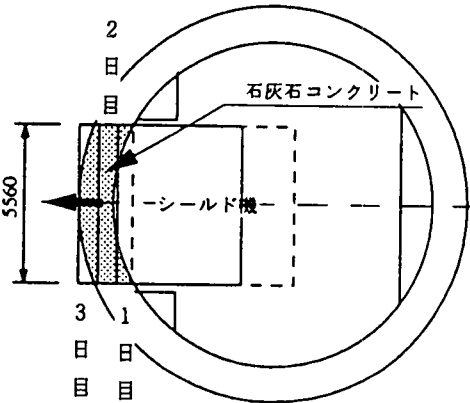
また、図－５のように、立坑が円形であるため、当初懸念した切削後半（３日目）に残ってくる三日月状のコンクリートも容易に切削でき、最大2cm程度の大きさで排出された。

表－２ ビット摩耗量結果表

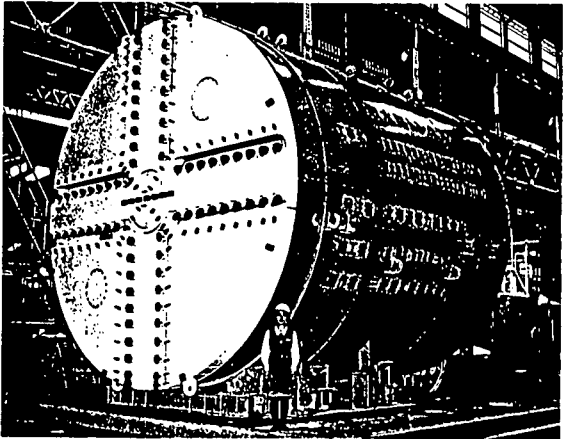
ビット種別	種別	高さ	幅	数	欠落率	摩耗量	実験値
メインビット	E 5	65 mm	120mm	76個	3%	1mm	3mm
先行ビット	E 5	85 mm	20mm	90個	12%	—	—

表－３ コンクリート切削結果表

項 目	シールド装備	実験値	施工実績値
切 削 速 度	51 mm/min	3 mm/min	2 ～ 3 mm/min
切 羽 水 圧	—	—	1.5～2.1 kgf／cm ²
カッタートルク	224 tfm	144 tf/m	最大134tfm平均121 tfm
カッタートルク係数	1.32	0.84	最大0.79、平均0.72
推 力	2700 tf	—	480 ～ 725 t



図－５ コンクリート切削平面図



写真－２ シールドマシン（φ5560mm）

4．スライドブロック工法による到達工法

到達工法は、図－６のような手順で、ニューマチックケーソン工法による到達立坑の構築時に、シールドの到達部に、あらかじめ設置した鋼製スライドブロックを立坑内へ後退させ、その空間にシールド機を前進させ到達立坑との接合を行った。

4・1 鋼製スライドブロック

鋼製スライドブロックは、到達部の立坑壁となる鋼製スライドブロック本体（外径5.63m×長さ2.2m、重量26.0t）と、それを包みスライドガイドとなる立坑側に固定した円筒形状の鋼製エントランスメンブレン（内径5.74m×長さ4.6m、重量18.5t）とで構成したものである。

スライドブロックとエントランスメンブレンのスライド部には、シールド機と同様のワイヤブラシールを2列に配置し止水を行った。ニューマチックケーソンの沈設中、スライドブロックに作用する外圧等を切梁

により支え、着底後は、切梁を油圧ジャッキ（200t×8本）システムに盛替えた。

切梁にはひずみ計を取付け、ニューマチックケーソンの沈設からシールドの到達までの施工管理を行った。図-7はニューマチックケーソン沈設後の切梁荷重が、設計荷重内で変化している様子を示している。特に、D部ではシールドが到達立坑に接近し、主働崩壊線（立坑より約2m）以内に進入したことによる荷重の低減がよくわかる。また、側圧は土圧と水圧を一体に評価し、側圧係数として $K=0.6$ （0.7で設計）が妥当であったことがわかった。

なお、接合は図-8のように、油圧ジャッキの遠隔操作により、スライドブロックとシールド機の離隔を保ちながら、それぞれ交互に後退と前進を所定の位置まで繰り返し行った。

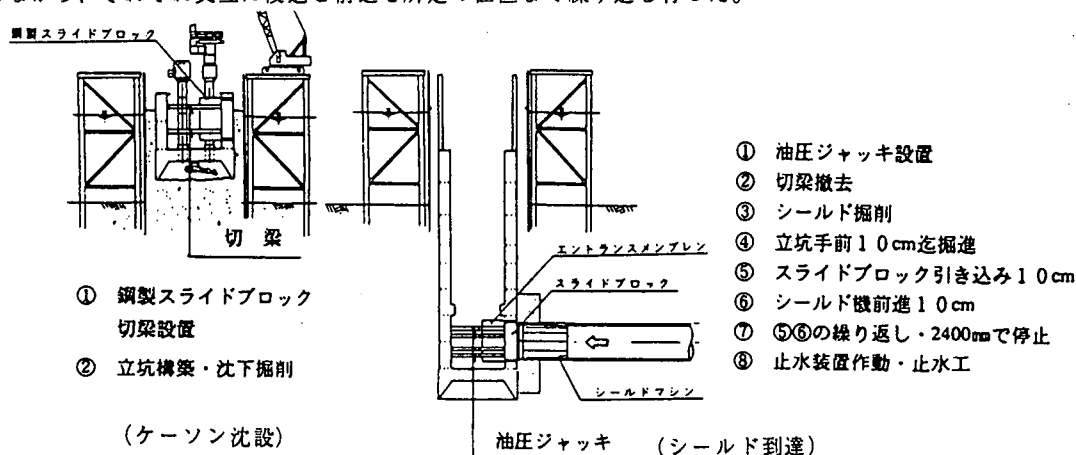


図-6 到達施工手順図

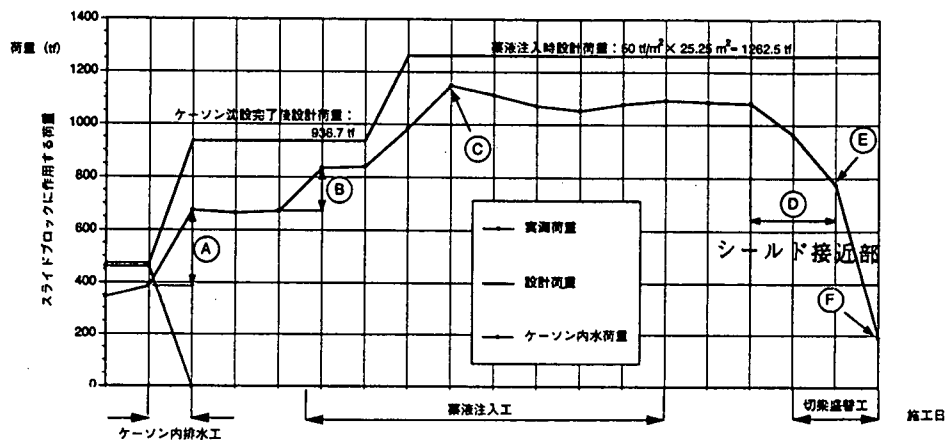


図-7 スライドブロック切梁荷重経時変化

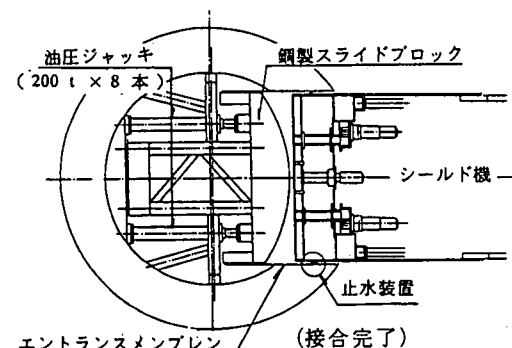


図-8 到達接合平面図

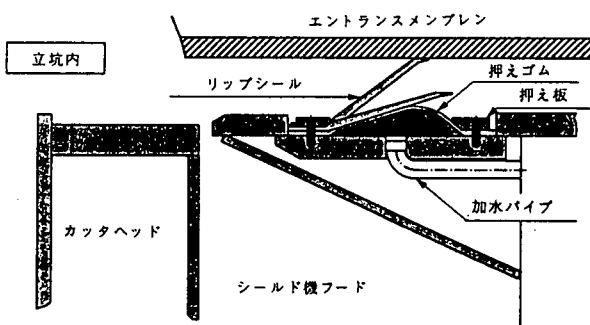


図-9 止水装置図

4・2 止水工

接合完了時には、シールド機に予め装備しておいた止水装置（図－9）を作動させて止水し、さらにウレタン系及び薬液の注入等で止水を行った。

4・3 施工実績

到達接合は、スライドブロックとシールド機との間隔（100mm～200mm）を保ちながら、交互に100mmずつ引き込みと掘進を繰返しながら合計2400mmの移動を行い、止水工も含めて4日間で完了した。

また、スライドブロックに作用する水圧は約800t fであり、この力を油圧回路の戻り側リリーフバルブによりバランスさせながら、引込み力約200～300t fで速度10～20mm/分によりスライドブロックの引き込みを行った。この引込み力約200～300t fは、スライドブロックとエントランスメンブレンとの摩擦力等と考えられる。

到達掘進完了後、シールド機とエントランスメンブレンとの間に挟まれた掘削土砂を、マシンの注入孔より注水し清掃を行った。

次に、シールド機に装備していた止水装置の加水パイプに、5 kgf/cm²の圧力で送水して止水装置を膨らませることで止水を行った。復水状況は、チャンパー内の泥水を抜き、切羽水圧計により確認した。

完全に止水を行うために、機内の注入孔からセットフォーム注入や、薬液注入を行った。

5. まとめ

今回のシールド機による石灰石コンクリートの直接切削による発進工法の施工の結果、先行ビットとカットビットの配置により、掘進速度3mm/分（壁厚1.5mを3日間）で、通常装備のカットトルクと推力以内で切削が可能であることが確認された。また、工程短縮が可能となり経済的な工法であることも確認された。ただし、今後の課題としては、今回は見られなかったがニューマチックケーソン工法における立坑のローリング管理と、排泥ポンプの閉塞の原因となったP C鋼線用のシース管の材質改良、石灰石コンクリートに替えて普通コンクリートを用いても切削が可能なカットの開発があげられる。

鋼製スライドブロックの引き込みによる到達工法は、省力化が図られ、従来のようなコンクリートのはつりに伴う粉塵が無く良好な環境で行うことができた。また、出水事故も無く計2400mmを4日間で施工した。今回は見られなかったがニューマチックケーソン工法における立坑のローリング管理が重要であり、今後の課題としては、シールド到達掘進時にシールド機下部とエントランスメンブレン間に挟まれる掘削沈降土砂が止水装置の作動を阻害し止水効果を半減させないための土砂の排除が必要である。

6. おわりに

シールドトンネルのメカニカル発進・到達工法は、今後益々増えるであろう大深度の地下空間利用におけるシールド工事においても、安全性と経済性と工程短縮に寄与できるものと思われる。また、補助工法を必要としないシールドの発進・到達工法の新領域への突破口となれば幸いである。

7. 参考文献

- 1) 川村昌臣・阿曾康夫・佐藤賢次：苦東厚真火力発電所3号機増設工事

取・放水路の設計と施工、電力土木、1994.

- 2) 菊地秀明・阿曾康夫・四谷 隆・牧本有功：新工法によるシールド機の発進・到達について、

土木学会第50回年次学術講演会概要集VI-268、1995.9.