

長距離海底下シールドトンネルの地中接合のための 位置計測システムの開発

DEVELOPMENT OF THE RELATIVE POSITION MEASURING SYSTEM
FOR THE UNDERGROUND DOCKING OF TWO SHIELD MACHINES

白井伸一*・赤村重紀*・今川 勉**・川端僚二**

Shinichi SHIRAI, Shigeki AKAMURA, Tsutomu IMAGAWA, Ryoji KAWABATA

Two shield machines were used for tunnel excavation to construct about 4km-long submarine tunnel, and they were connected each other at the approximate middle point of the tunnel. A newly developed relative position measuring system is applied to that project. This system is able to pick up the accurate location of two shield machines, using the sensor which are attached on the tip of horizontal pilot-boring rod. Applying this system, the docking of two shield machines was performed accurately within a few millimeters relative distance deviation.

Keywords: underground docking of two shield machines, relative position measuring system, horizontal pilot-boring, submarine tunnel

1. はじめに

東京電力(株)は、富津火力発電所と袖ヶ浦火力発電所の両LNG基地間25kmを直径60cmの高圧ガス導管2条で結ぶ工事を実施中である。この内、本論文における対象工事は、図-1に示す木更津港横断部の海底下約16mに延長約4km 長距離シールドトンネルを構築するものである。シールド工事の諸元を表-1に示す。

このトンネルは、長距離シールドトンネルであるため、両岸の立坑から2機のシールド機で2kmずつ掘進し、中央部で凍結工法により地中接合させる。なお地質概要については、図-2に示すとおりであり、地中接合地点の地質は、N値50以上、礫分・砂分95%以上、均等係数3.75の比較的良好な洪積砂質土(D_{sa}層)となっている。

本工事は、海域で行われる工事であり、地上からのチェックボーリングによる位置検知が行えない。したがって、このような条件下で2台のシールド機を精度良く地中接合させるシステム、すなわち接合前に双方のシールド機の相対位置を計測するための磁気センサーとR I (ラジオアイソトープ) センサーを組み合わせた間接位置検知システムと高水圧下での高精度長尺水平ボーリングシステムを新たに開発し、要素実験や実証実験等を行い、精度ならびに施工性を確認した後に、本工事の地中接合に適用して所期の成果を得た。

以下にその概要を示す。

* 正会員 東京電力(株) 建設部(前所属 富津ガス導管建設所 導管第2土木課)

**正会員 鹿島建設(株) 東京支店 千葉営業所 東電富津ガス導管工事事務局

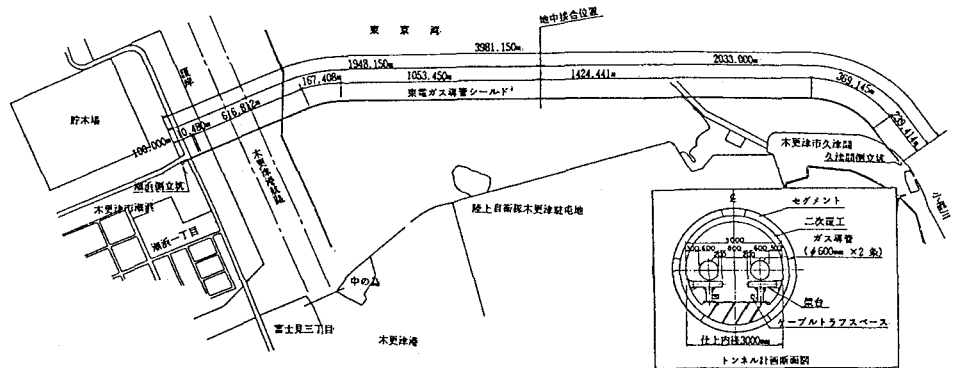


図-1 平面図

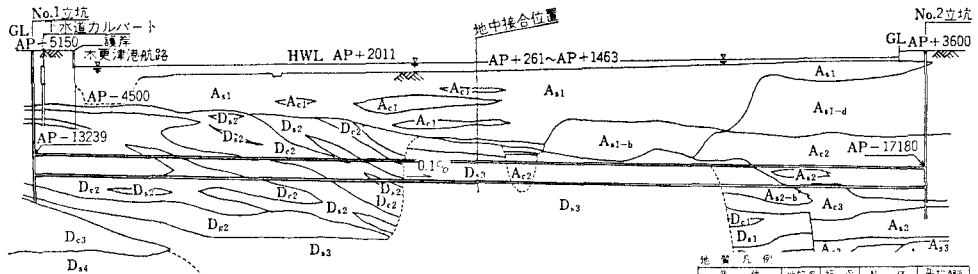


図-2 地質概要

表-1 シールド工事諸元

	No. 1 立坑側	No. 2 立坑側
工 法	泥水加圧式シールド工法	
施 工 延 長	1,942.15 m	2,027.00 m
セグメント外径	3,850 mm	3,900 mm
セグメント内径	3,400 mm	3,400 mm
仕 上 り 内 径	3,000 mm	
二 次 覆 工 厚	200 mm	
地 中 接 合	凍結工法	

地 質 凡 相	地 質 名	近 近	N 値	平均M値
沖 積 土	砂質土	A ₁	2-25	10
	粘土質土	A ₂	1-5	3
	砂質土	A ₃	17-50	28
	砂質土	A ₄	22-50	41
	砂質土	A ₅	5-17	9
	砂質土	A ₆	33-50	50
	粘土質土	A ₇	2-7	3
	砂質土	A ₈	5-27	13
	粘土質土	A ₉	4-14	6
	砂質土	A ₁₀	6-24	37
沖 積 土	砂質土	D ₁	34-50	50以上
	砂質土	D ₂	9-32	16
	砂質土	D ₃	28-50	50以上
	砂質土	D ₄	17-50	46
	砂質土	D ₅	50	50以上
	砂質土	D ₆	13-50	50以上
	砂質土	D ₇	50	50以上
	砂質土	D ₈	50	50以上
	砂質土	D ₉	50	50以上
	砂質土	D ₁₀	50	50以上

2. 位置計測システムの開発

2-1. 地中接合工の施工フロー

本工事における地中接合工の接合フローを図-3に示す。

地中接合にあたっては、まず、先行到達したN0.1立坑側シールド機（以下1号機とする）内から凍結管を斜打ボーリングによって施工し、凍土の造成をする。その後、両シールド機のバルクヘッド、カッターディスク等を解体し、止水鉄板溶接およびスチールセグメント組立によりトンネルを貫通させる。

シールド機の相対位置確認工は、1号機から水平ボーリングを施工し、先端にセンサーを設置後、後着のN0.2立坑側シールド機（以下2号機とする）が地中接合地点手前30mに接近した時に間接検知により相対位置を確認し、その結果をもとに地中接合地点手前15mまで軌道修正掘進を行う。軌道修正掘進終了後、水平ボーリングマシンを用いて2号機のバルクヘッドを削

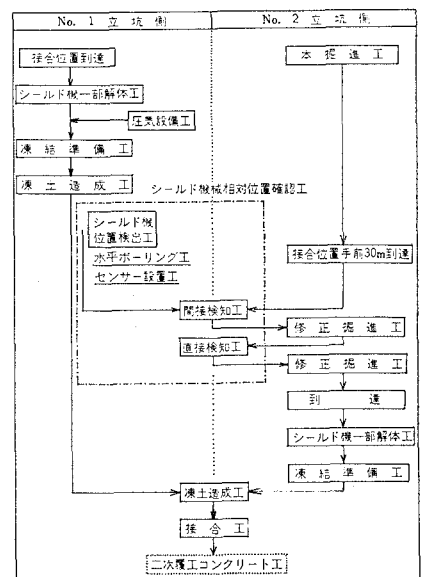


図-3 地中接合工の施工フロー

孔貫通させ、直接測量を実施（直接検知）し、その結果をもとに残り15mの軌道修正掘進を行い、地中接合させるものである。

本工事においては、チェックボーリングの施工が不可能であるため、トンネル掘進線形の精度は、片押し約2kmの坑内開放トラバース測量に頼らざるを得ない。しかしながら、測量の対象が、曲線区間を含む長距離トンネルであるため、一定の測量誤差は避けられない。この坑内測量の精度を補い、シールド機の相対位置をチェックするには、新たな位置計測システムが必要となる。このため、今回、地中接合の重要なポイントとなり高精度接合の成否を握る位置計測システムを新たに開発したものである。

2-2. 間接検知システム

1) 概要

間接検知システムは、i) センサーを送りだすための水平孔を設ける水平ボーリングマシン、ii) 2号機のカッターディスクスリットを検出するための磁気センサー、iii) 2号機の位置を正確に計測するためのRIセンサー、iv) それぞれの機器類をアシストするコンピュータから構成されている。これらの全体システム図を図-4に示す。

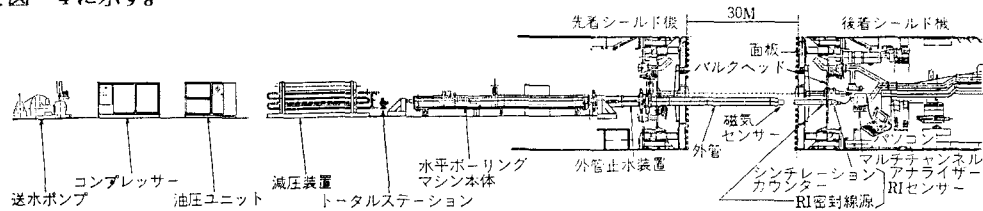


図-4 全体システム

2) 検知システム

本工事では、1号機から2号機に向け、30mの水平ボーリングを行った後、以下の手順で位置検知を行う。

- ① 磁気センサーを水平ボーリング孔に挿入し2号機に接近させ、カッターディスクスリットの位置を磁気感知波形により確認する。
- ② 磁気センサーを回収後、2号機のカッターディスクスリットを通過して、水平ボーリング孔を延長し γ 線密封線源を挿入して、2号機バルクヘッドに押しつける。
- ③ 2号機のバルクヘッド内側より計測器（シンチレーションカウンタ）を用いて、 γ 線密封線源の位置を γ 線感知波形により検知する。
- ④ γ 線密封線源後部のターゲットの位置をトータルステーションで計測する。
- ⑤ 上記③、④の組み合わせにより、シールド機相互の位置を検知する。

各センサーによる位置計測説明図を図-5に示す。

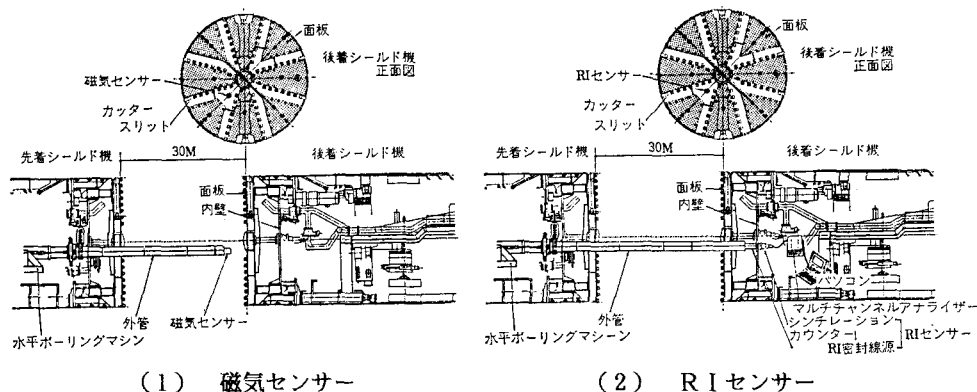


図-5 各センサーの位置計測説明図

3) システムの特徴

本間接検知システムの特徴は次のとおりである。

- ① 30m程度の離隔距離を有する2台のシールド機の相対位置を、双方からの精度の高い計測（トータルステーション及びR Iセンサー各々±5mmの測定精度）により確認できる。
- ② 水平ボーリングマシンを用いることにより、コンパクトな計測機械で相対位置を確認できる。
- ③ 非破壊方式で安全に計測できる。
- ④ 各種センサーは耐水圧5kg/cm²で設計されている。

2-3 水平ボーリングマシン

位置計測システムに用いる水平ボーリングマシンは、施工上及び技術上の種々の条件が要求されるため、以下に示す開発目標のもとに、新たに高精度マシンとして開発した。

- ① 粘性土から砂質土（N値50以上の洪積層）までの各種地盤内での水平ボーリングが可能であること。
- ② 直接検知のため、シールド機のバルクヘッドを削孔貫通できること。
- ③ ±20mmの精度での水平ボーリングが可能であること。〔油圧シリンダーによる先端シュウ方向制御方式を採用〕
- ④ 地下水压3kgf/cm²下にて施工可能であること。〔内外管および到達部止水装置、緊急バルブ等を装備〕
- ⑤ 循環水及び排出泥水の圧力調整ができること。〔坑口減圧装置を装備〕
- ⑥ 掘進時及び外管引抜き時の周囲摩擦力を減少させること。〔拡縮ビットを採用〕
- ⑦ センサーの挿入、撤収が自由にできること。〔二重管方式を採用〕
- ⑧ 掘進中の方向管理が容易で、かつ高精度であること。〔トータルステーションとの組合せ方式を採用〕

本水平ボーリングマシンは、二重管方式となっており、構造は図-6に示すとおりである。また、機械仕様を表-2に示す。

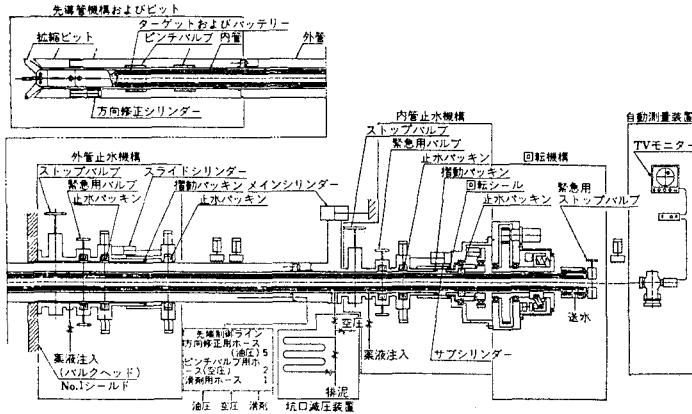


図-6 水平ボーリングマシン構造図

表-2 水平ボーリングマシン仕様

	スイベルヘッド (油圧モーター) (駆動)	トルク 0~900 kg・m	回転数 20 rpm
駆動方式 および推力、トルク	メインフィード シリンダー	前進 最大 94 t 後退 60 t	掘進速度 0.37 m/min 0.57 m/min
	サブフィード (2連油圧シリンダー)	前進 5.66 t 後退 8.25 t	掘進速度 5.97 m/min 4.10 m/min
管 径	ビット	先導管 外 管 内 管 センサー	
	外径 φ294.0 内径 (拡縮時) φ165.8	φ290.0 φ284.0 φ152.4 φ158.0 φ165.8 φ165.8 φ90.0	
止水機構 (耐水圧試験 5 kgf/cm ² 実施済み)			
耐水圧	先導管	二重管ロッド接続時に内外管間隙からの出水を防止する。	
	ピンチバルブ	3 kgf/cm ² 以上	
測定機器	外管止水装置	—	
	内管止水装置	—	
測定機器		CCD カメラ付き トータルステーション	最小角度表示 5°(H.V.) (30 m 先で 0.73 mm)

○ その他使用機器

- ① 油圧ユニット 30 kW
- ② 外管止水装置 1 式
- ③ バルブスタンド 1 式
- ④ 送水ポンプ 400 ℓ/min

3 施工実績

1号機は1990年4月、2号機は同9月に発進した。約2kmずつの掘進はほぼ順調に進み、1号機は予定よりも早く1991年2月末に地中接合地点に到達した。

その後、シールド機の一次解体（後続台車、ジャッキ等の解体）および凍結管の斜打ボーリング工を含む凍結準備工を終了した。5月下旬からは、水平ボーリングマシンの設置工を開始し、シールド機相対位置確認工を実施し、6月下旬、2号機を1号機に接合させ、10月上旬、無事貫通した。

以下に水平ボーリングおよび各センサーによる位置検知の実績の詳細を示す。

3-1. 水平ボーリング

水平ボーリングマシンによる掘進は、表-3に示す管理基準で行った。また、1号機から掘進30m間の掘進結果を図-7に示す。掘進実績は次の通りである。

① 水平ボーリングのずれ量は、上下方向については下方向に進みやすい傾向が見られ、上下方向の軌道修正を行った結果、最大10mmのずれが生じ、30m先の到達地点（2号機位置）でのずれ量は2.5mmとなった。

② 左右方向については、右方向に進行しやすい傾向があり、左方向の軌道修正を中心に行ったところ、最大12.5mmのずれが生じ、最終的に30m先の到達地点（2号機位置）でのずれは、8mmとなった。

以上の結果、水平ボーリングマシンによる掘進は、油圧シリンダーによる先端シュー方向制御方式が効果的に作用し、管理基準値±10mmをほぼ満足することができ、検知時点での到達精度は8mm以内という高い精度を得ることができた。また、掘進時および引抜き時に施工上のトラブルもなく、予定の工期内でスムーズに施工することができた。

3-2. 各センサーの測定結果

磁気センサーによる測定は、接合前、マシン間30mの位置で行った。なお、水平ボーリング内管の先端に取り付けた磁気センサーと2号機のカッターディスクとの距離は10cmとして測定した。

測定では、1号機で採取した測定データを、2号機側に配置した解析装置に転送し、波形の出力状況を見ながら2号機のカッターディスクを回転させ、2号機のスリット位置を検出した。この結果により水平ボーリングマシン外管を、カッターディスクスリットに挿入することができ、RIによる測定が可能となった。

RIセンサーによる測定は、接合前のマシン間30m、15mの2段階において実施した。

測定では、1号機から掘進した水平ボーリングマシン内管先端に装着したRIセンサーを、2号機バルクヘッドに押しつけ、その内側からシンチレーションカウンターを水平方向と上下方向に移動させて波形のピーク点を求めた。波形のピーク点は15cmピッチに移動させる概査の後、5cmおよび1cmピッチに移動させる詳査を実施して決定した。

3-3. 水平ボーリングマシンによるバルクヘッドの削孔

接合前15mの位置でシールド機の相対位置を直接測量によっても確認するために、2号機バルクヘッドを貫通削孔して、1、2号機間を連通させた。また、削孔開始（口切）時には、内管のぶれを少なくするために、外管を2号機バルクヘッドに押し当てた。その結果、厚さ50mmのバルクヘッドの口切および削孔時間はほぼ1時間程度と良好であった。

3-4. 間接、直接検知結果

表-4に間接、直接検知によって得られた両シールド機の相対ずれ量を示す。

表-3 水平ボーリング掘進管理基準

掘進管理基準	推 力	0~10m 15t 10~20m 25t 20~30m 35t
	トルク	200 kg・m
	送水量	140 ℓ/min
	掘進速度	20~25 cm/min
	ビット出長	120 mm
線形管理	制御誤差	±10 mm

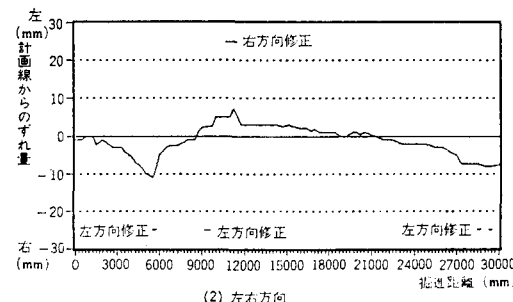
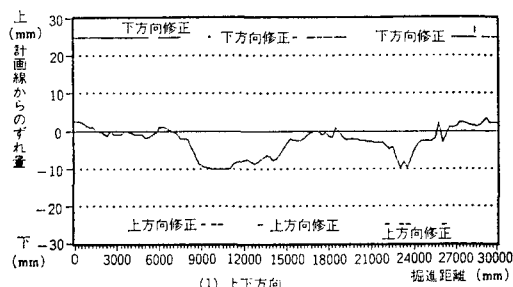


図-7 水平ボーリング掘進結果

表－4 シールド機の相対ずれ量の評価と間接検知誤差

両機の 間 隔	項 目	両シールド機のずれ量 ¹⁾		直接検知結果との差			
		水 平	鉛 直	水 平	鉛 直	合 成	備 考
30 m	坑内測量による想定値	右 7	0	122.7	3	123	トンネル測量誤差
	30 m 時点 RI センサー 検知による想定値	左 118.5	上 10	2.8	7	8	30 m 時の間接検知誤差
	15 m 時に実施した直接検知結果より逆算した値	左 115.7	上 3	—			
15 m	15 m 時点 RI センサー 検知による想定値	左 13	下 10	1	1	1 ³⁾	15 m 時の間接検知誤差
	直接検知結果 ²⁾	左 14	下 11	—			
接 合 時		左 1	上 1	—			地中接合精度

¹⁾ 1号機側から2号機を見た場合の、2号機の相対位置

²⁾ 直接検知結果の値の中には、機関 30m～15m の坑内測量誤差（15m の通常測量）および1号機～2号機間を視準した際の測量誤差（15m の通常測量）等の微小な誤差が含まれる。

³⁾ 30m 時の 8mm との差は、ターゲットを読む水平ボーリングの孔内距離の差（15m と 30m）が、一因として考えられる。

直接検知は、15m という短距離を、連通管を通して直接測量していることから、他の測量方法よりも当然精度は良い。そこで、マシン間30mになるまでの坑内開放トラバースによる通常測量結果および30m時、15m時の間接検知結果の値の他に、直接検知結果の値から座標計算したものを併記した。これらを比較することによって、各測量の持つ精度が推算できる。

この結果から以下の事が判明した。

- ① 2km同士の片押し開放トラバース測量である坑内測量結果を、直接検知結果と比較すると、水平方向で120mm 程度（計算上122.7mm）の出会い誤差を持っていたことになり、誤差伝播の法則により計算した測量機械誤差の累積値の予測とほぼ同等である。
- ② 30m時で実施した間接検知の誤差は、直接検知結果と比較すると8mm程度であった。それに対し、15m時で実施した間接検知の誤差は、1mm程度であった。これら間接検知の誤差の中には、水平ボーリングの発光ダイオードターゲットの読み誤差、RIセンサーによる測定誤差、測量誤差等が含まれる。

なお、30m時の間接検知結果からシールド機の軌道修正掘進計画をたてたが、この計画線形は、15m時での検知結果によると、水平、鉛直方向ともに10mm以内の誤差であり、妥当であったことがわかっている。また、通常掘進時より頻度の高い測量の実施により、計画線形と実際の掘進線形は10mm以内のずれ量に抑えることができ、高い精度のシールド機方向制御を行うことができた。特に、2号機到達前数mでは、20cm～30cm掘進毎に測量を実施し、水平、鉛直方向ともに約1mm程度という地中接合精度を得ることができた。

4. おわりに

本工事におけるシールドトンネル地中接合に、磁気センサーとRIセンサーを組合わせた間接位置検知システムと高水圧下での高精度長尺水平ボーリングマシンを新たに開発して適用した結果、以下の結果を得ることができた。

- ① 水平ボーリングマシンによる掘進は、±12mmで制御することができた。
- ② 磁気センサーによってカッターディスクスリットの位置を正確に検出することができ、水平ボーリングマシンの外管を通過させることができた。
- ③ RIセンサーにより、精度±8mm程度で相対位置計測が行えた。その結果、±10mm以内のシールド機の軌道修正制御結果が得られた。

今後の課題としては、内外管の接続時間の短縮、さらに高水圧になった場合の止水性の向上、坑内測量の誤差が予想以上に大きかった場合の対応、地盤中に巨礫があった場合の対応等がある。

最後に本紙面を借りて、本システムの開発にあたりご指導いただいた方々、ならびに工事に携わった多くの関係者の皆様に深く感謝の意を表す次第である。