

二段式シールド工法の適用について

APPLICATION OF TWO STAGE SHIELD TUNNELLING SYSTEM

松尾 和俊*・綿引 秀夫**・名倉 浩***

Kazutoshi MATUO, Hideo WATAHIKI, Hiroshi NAGURA

In construction of an underground transmission line tunnel, a new method has been studied. A single novel slurry shield machine has been used for the tunnel which requires two shield machines by the conventional method. Moreover, the two sections of the shield tunnels are different in segment diameter: one is $\phi 7.10\text{m}$ and the other is $\phi 4.85\text{m}$. This new method has resulted in the development of a double shell type shield machine characterized by a small shield machine (S.S.M.) with an outside diameter of $\phi 5.00\text{m}$ incorporated into a big shield machine (B.S.M.) with a diameter of $\phi 7.27\text{m}$ - both having the common cutter face in concentric circles. The two stage shield tunnelling system was developed to be applied to situations where driving is done with the B.S.M. - the S.S.M. being separated at the middle shaft for further driving.

Keywords: Slurry shield machine, Two stage shield tunnelling system, two sections, be separated

1. まえがき

東京電力(株)では大田区大井埠頭内に建設予定の変電所予定用地から都道環状7号線の道路下を占用し、国道1号線までの約7km間に地中送電線用トンネルを泥水式シールド工法で3工区に分けて建設中である。このうち1工区はNo.1～No.2立坑間約1.7kmがセグメント外径7.10m、No.2～No.3立坑間約1kmがセグメント外径4.85mの2断面の施工となる。一般にはそれぞれの断面に合った2台のシールド機で施工することとなり、No.1～No.2立坑間の掘進後、交通量の多い環状7号線車道部に位置するNo.2立坑においてセグメント外径 $\phi 4.85\text{m}$ に合ったシールド機を投入・組立することとなる。一方、当社のシールド掘進の実績等から、シールド機1台でカッタービット等の交換をせず2.5km程度の施工は十分可能である。

そこで、異なった2断面をシールド機1台で施工することとし、二段式シールド工法と名付けた。

本報告はこの二段式シールド工法の検討内容について報告するものである。

2. 工事概要

本工事の工事概要は表-1に示すとおり、泥水式シールド工法により約2.7kmを施工するものである。

* 正会員 東京電力(株) 地中線建設所 大森工事事務所
** 東京電力(株) 地中線建設所 大森工事事務所
*** 正会員 (株)間組 東京支店 環7東海作業所

なお、No.1立坑は広いヤードが確保でき、発進基地として最適であるが、No.2立坑は環状7号線の道路下に設置することとなり、発進基地ヤードの確保が困難なため、No.2～No.3立坑間の掘進時の泥水処理もNo.1立坑のプラントで行うこととした。

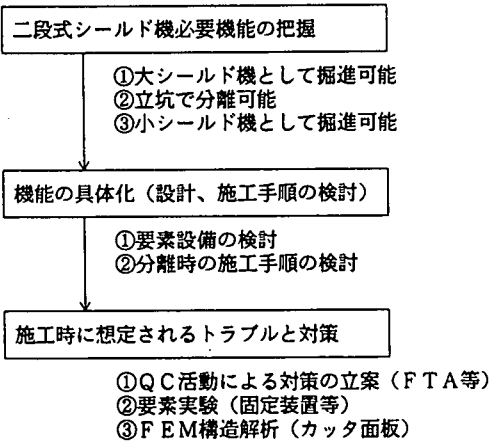
3. 二段式シールド工法概要

3. 1 概要

二段式シールド工法は外径φ7.27mの大シールド機の中に、あらかじめカッタ面板を同心円状に共用した外径φ5.00mの小シールド機を内蔵した二重殻のシールド機（二段式シールド機）で、No.1～No.2立坑間を掘進する。No.2立坑到達後、大シールド機から小シールド機を分離し、テールプレート等の一部の部品を組立てた後、No.2～No.3立坑間を掘進する工法である（図－1参照）。

3. 2 検討手順

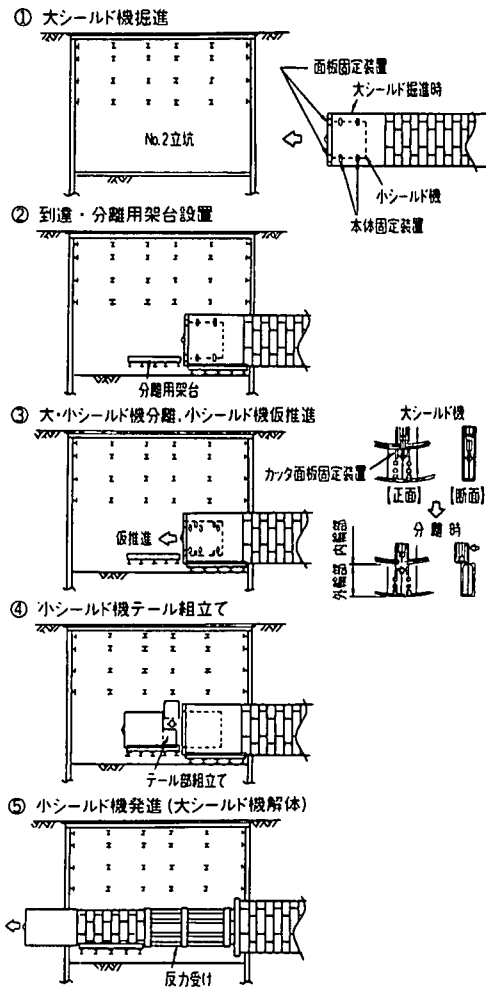
二段式シールド工法の基本となる二段式シールド機の検討手順は図－2に示すとおりである。二段式シールド機としての必要機能としては、「大シールド機で掘進可能」、「No.2立坑で分離可能」および「小シールド機で掘進可能」であり、それぞれの具体的な設計および分離手順の検討を行った。検討は将来における地中での分離も視野に入れて考えることとした。



図－2 二段式シールド機検討フロー

表－1 シールドトンネル工事概要

項 目		No.1～No.2立坑間	No.2～No.3立坑間
施工条件	掘削距離	1, 736m	958m
	曲線半径	100, 150, 200, 1000m	150, 200 m
	縦断勾配	i=-1.93～5.0%	i=-5.0～3.0%
地質条件	掘削地盤	浚渫土、沖積粘性土 洪積砂質土・粘性土	洪積砂質土 洪積粘性土
	土被り	6.3～20.5m	13.6～22.3m
	地下水位	GL-1m	GL-1m
セグメント	材質	R C平板セグメント	
	外径	φ7,100mm	φ4,850mm
	厚さ	350mm	275mm
	幅	1,200mm(100R:900mm)	1,200mm



図－1 二段式シールド工法概要図

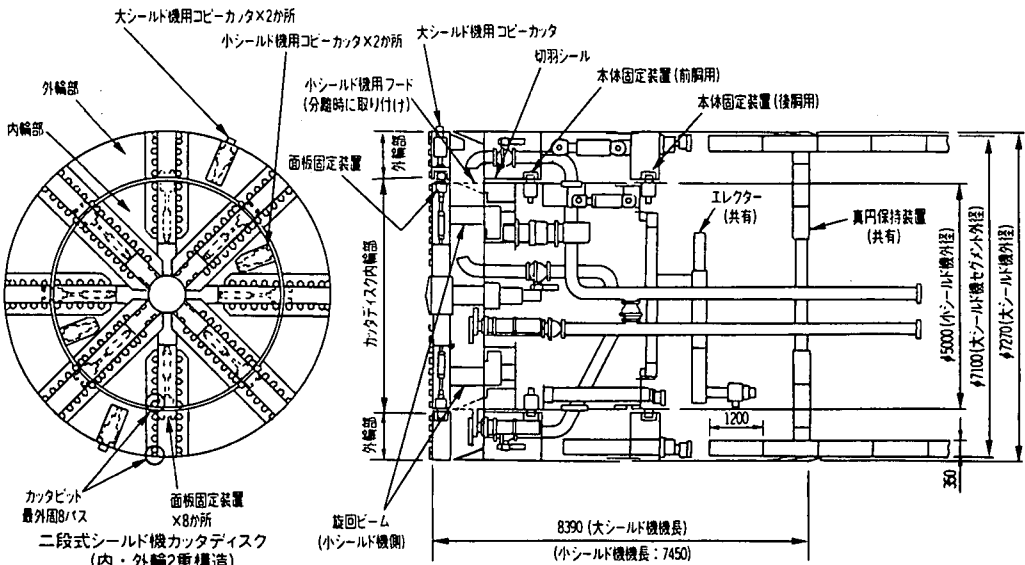
4. 二段式シールド機

二段式シールド機は表－2、図－3に示すとおり、基本的には小シールド機が大シールド機から抜けやすい構造とし、カット面板および本体を分離可能な固定装置により連結することとした。また、分離のための装置が大シールド機および小シールド機として掘進の妨げとならず、それぞれの施工条件に適したものとした。とくに大シールド機掘進時の推力およびトルクに対して、大シールド機と小シールド機が固定装置により、一体となって対抗できる機構とした。

大シールド機掘進時、分離時および小シールド機掘進時の要求品質に対する二段式シールド機の必要機構を検討した。最も重要な機構としては「シールド機の本体固定装置」および「カット面板固定装置」であり、以下にその概要を示す。

表－2 主な二段式シールド機仕様

項 目	大シールド機 (No.1～No.2)	小シールド機 (No.2～No.3)
シールド外径	φ 7, 2 7 0 mm	φ 5, 0 0 0 mm
シールド機長	8, 3 9 0 mm	7, 4 5 0 mm
テールシール	ワイヤーブラシ3段	ワイヤーブラシ2段
推力	200tf × 24本=4,800tf (115.6tf/㎡)	150tf × 16本=2,400tf (122.2tf/㎡)
ジャッキ速度	4 0 mm/min (全数作動時)	4 0 mm/min (全数作動時)
中折れ装置	左右 2°、上下 1° (球面)	左右 2°、上下 1° (平板)
中折れジャッキ	200tf × 24本 (後胴押しタイプ)	150tf × 8本 (前胴押しタイプ)
カット支持方式	中間ビーム方式	外周ビーム方式
面板開口率	3 0 % (φ 7 m級通常: 25～30%)	3 5 % (φ 5 m級通常: 20～35%)
チャンバー長さ	8 1 5 mm (共通) (φ 7 m級平均: 8 1 0 mm/φ 5 m級平均: 6 0 0 mm)	
カット回転数	0～1. 2 2 r p m (共通) (φ 7 m級通常: 0.7～0.9rpm/φ 5 m級通常: 1.0～1.3rpm)	
カット回転トルク	常用最大429.9tf・m (α=1.12) 瞬時最大515.9tf・m	常用最大143.3tf・m (α=1.15) 瞬時最大172.0tf・m
カットビット	超硬チップ 付きカッタービット: E 5 種 (共通)	
コピーカット	1 2 0 mmST×2本	7 0 mmST×2本



図－3 二段式シールド機概要図

4・1 シールド機の本体固定装置

(a) 概要 (構造の特徴)

大シールド機の掘進中はドーナツ状の外筒内面 (大シールド機本体) と内筒外面 (小シールド機本体) 間のクリアランスを保持すると同時に、小シールド機面板、バルクヘッドに作用する土・水圧およびカッタトルクを大シールド機に伝達する必要がある。また、大シールド機の中折れ時における小シールド機の追従機構や、内・外筒間の止水への対応も必要である。

本体固定装置は表-3に示すとおり、荷重を伝達する固定キーからなる推力、トルク固定装置や、位置やクリアランスを保持するグリッパー装置、ピッチング・ヨーイング固定装置などから構成される。これらの装置は荷重の増減、変形への追従および分離時における解除の容易さを考え、油圧ジャッキで動作するようにした。

表-3 本体固定装置一覧表

名 称	取付け場所と機能	仕 様	能 力	主な本体固定装置図
推力固定装置	前胴軸受部後方の円周上に等間隔16カ所に設置し、小シールド機面板とバルクヘッドに作用する土・水圧を小シールド機が後退しないよう大シールド機に伝える。	前胴: 6.9tf ジャッキ×16本 (ストローク:160mm) 固定キー: φ300mm	1本当たり300tf 支持 (総推力4800tf/16本)	(大シールド機掘進時) (分離時) 推力固定装置 トルク固定装置 切羽シール
トルク固定装置	前胴軸受部後方の上下と後胴リングガード部の上下に設置し、小シールド機駆動部発生トルクを大シールド機に伝える。	前胴: 6.9tf ジャッキ×2本 後胴: 6.9tf ジャッキ×2本 (ストローク:160mm) 固定キー: φ200mm	最大トルク 515.9tf・m 2本で支持	
グリッパー装置	前胴20カ所と後胴12カ所に設置し、内筒外面と外筒内面のクリアランスを保持する。また、外筒が撓んだ時に内筒に荷重が加って締めつけられないようにする。	前胴: 6.9tf ジャッキ×20本 (動、トルク固定装置と同) 後胴: 6.9tf ジャッキ×12本 (トルク、ピッチング・ヨーイング装置と同) 固定キー: φ200mm	・シールド機の70%以上荷重より決定 ・ジャッキ能力の範囲内で本体変形を防止	
ピッチング・ヨーイング固定装置	後胴リングガード部の円周上に等間隔8カ所に設置し、中折れ角を大シールド機から小シールド機に伝える。	後胴: 6.9tf ジャッキ×8本 (ストローク:160mm) 固定キー: φ200mm	・小シールド機後退時の荷重 ・ジャッキ、エレベーター等の支持力により決定	
スライドレール	外筒円周下部の軸方向に2条設置し、小シールド機の自重を支持し、小シールド機発進時のガイドとする。	前: B120×L1270×t14mm×2本 後: B120×L 630×t20mm×2本	前胴レールで自重(200tf)を支持	
切羽シール	バルクヘッド面の外筒内側と内筒外側との隙間に設置し、地下水の進入を防止する。	3段クワッドリップ・シール×1列 1段クワッドリップ・シール×1列 (バックアップ用) 自動給脂	耐圧 (水圧) 5kgf/cm ² ±10mm変形に追従	

(b) 圧力保持機構

本体固定装置は常に土・水圧等の荷重が作用するため、掘進期間中どのような状況下においてもその機構を保持する必要がある。そこで、本体固定装置の油圧回路は図-4に示すとおり、固定装置のジャッキに設定値以上の油圧が作用し、チェック弁などにより作動油の漏れが生じにくいものとした。停電など緊急時の対応としてはアキュムレータとパイロットチェック弁により、

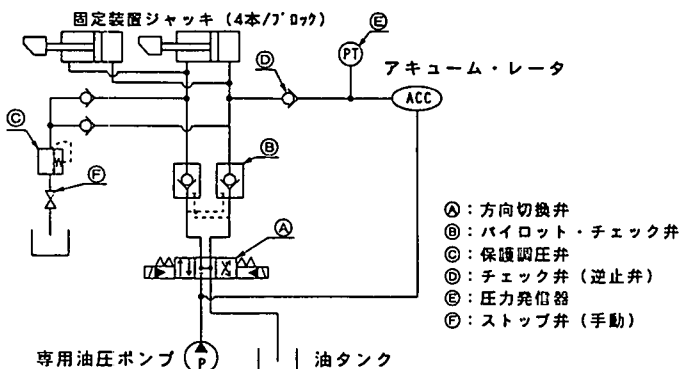


図-4 本体固定装置の基本油圧回路

一定時間は設定した油圧が保持出来るようにした。また、一部のジャッキの破損が全体に波及しないように推力固定装置の場合は4本で1ブロックとした。

4・2 カッタ面板固定装置

(a) 概要（構造の特徴）

カッタ面板は掘進時には内・外輪を固定装置で一体化し、カッタ面板に作用する土・水圧やカッタトルクに対抗する必要がある。また、分離時には大シールド機と小シールド機の相対変位があっても抜けるクリアランスを確保し、容易に解除できる内・外輪間の固定装置を必要とする。

面板固定装置は表－4に示すとおり、カッタ面板に作用する土・水圧（軸方向の荷重）およびカッタトルク（円周方向の荷重）を固定キー部の超耐圧部材と柔軟部材の配置により分担する。これらの面板固定装置は本体固定装置と同様に荷重の増加、変形への追従、分離時における解除の容易さから油圧ジャッキで動作する。

表－4 面板固定装置一覧表

名 称	取付位置と機能	仕 様	能 力	面 板 固 定 装 置 概 要 図	
土圧固定装置	内輪外周8カ所等間隔に設置し内・外輪を固定して外輪面板部前面に作用する土・水圧を受ける。	10.9tfジャッキ×8本（ストローク:160mm） 固定キー：φ250mm	固定キーに加わる曲げモーメントを支持	大シールド機掘進時	分離時
トルク固定装置	内輪外周2カ所対面に設置し、内・外輪を固定して円周方向に作用するカッタトルクを外輪に伝える	10.9tfジャッキ×2本×2組（土圧固定装置と兼用）（ストローク:160mm） 固定キー：φ250mm	最大147515.9tf・mを2本で支持		

超耐圧部材（エポキシ樹脂）

柔軟部材（ゴム）

ライナー

シールド前方

土圧固定キー

超耐圧部材（エポキシ樹脂）

ライナー

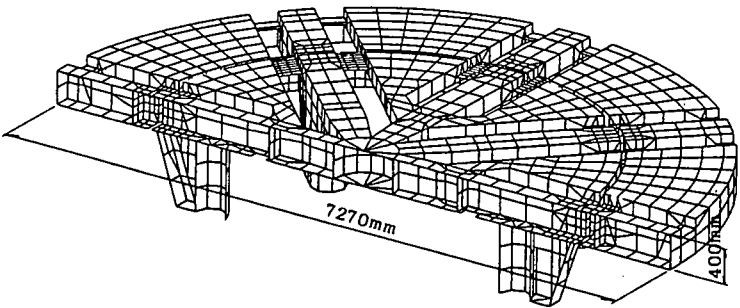
土圧・トルク固定キー

(b) 圧力保持機構

面板固定装置は本体固定装置と同様に、土・水圧およびカッタトルクによる荷重を常に受けるため、様々な状況に対応した保持機構とする。さらに、面板は土中に位置し修理が非常に困難であるため、より信頼性の高い保持機構とする。そこで、油圧でロック機構を解除しない限り固定用ジャッキが抜け落ちないメカニカルロック機構を有した油圧ジャッキを面板固定装置に使用する。

(c) カッタ面板構造解析

大シールド機掘進時におけるカッタ面板は駆動用ビームで支持された内輪部と8本の面板固定装置で支持された外輪部で構成される。カッタ面板の外輪荷重を8本の固定キー（テーパーピン）で受ける構造であり、固定キーに加わる荷重は曲げ荷重とせん断荷重が考えられる。固定キー

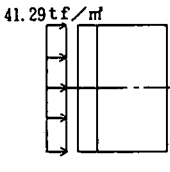
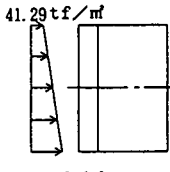
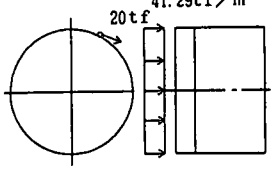


図－5 FEM解析モデル図

の曲げ荷重に対しては外輪の剛性を上げて荷重を分散させ、曲げ荷重を小さくした。

施工時に作用する土・水圧を荷重として3次元FEMにより、カット面板や固定キーに発生する断面力および変形量を計算し、カット面板の強度を確認した。この解析モデルおよび解析結果は図-5、表-5に示すとおりである。

表-5 FEM解析結果

ケース	1. 長期荷重	2. 短期荷重 (曲線区間施工時)	3. コピーカット使用時
荷重モデル	 41.29 tf/m²	 41.29 tf/m²	 20 tf/m², 41.29 tf/m²
最大主応力	$\sigma_{max} = -9.09 \text{ kgf/mm}^2$ $< \sigma_a = -14.0 \text{ kgf/mm}^2$ (SS400許容応力度)	$\sigma_{max} = -14.4 \text{ kgf/mm}^2$ $< \sigma'_a = -21.0 \text{ kgf/mm}^2$ (SS400短期許容応力度)	$\sigma_{max} = -9.67 \text{ kgf/mm}^2$ $< \sigma_a = -14.0 \text{ kgf/mm}^2$ (SS400許容応力度)
最大たわみ	$\delta_{max} = 4.9 \text{ mm} < \delta_a = 10 \text{ mm}$ (目標特性値)	$\delta_{max} = 7.9 \text{ mm} < \delta_a = 10 \text{ mm}$ (目標特性値)	$\delta_{max} = 5.4 \text{ mm} < \delta_a = 10 \text{ mm}$ (目標特性値)

4. 3 要素試験

面板固定装置の固定キーは内・外輪のクリアランス部分で直接地山に接する。また、固定キーのメス穴は周囲に超耐圧部材（エポキシ樹脂）等を充填し、必要な面圧を受ける構造とするため、固定時に隙間およびガタがない状態とする必要がある。このため、要素試験としては①固定キーのモデルを製作してエポキシ樹脂を充填し、ガタのないことを確認する。②固定キーの押し込みに対する引き抜き力を計測する。③固定キーに土圧が作用した場合の引き抜きを想定し、固定キー側部から荷重を作用させた状態で固定キーの引き抜き力を計測する。④固定キーの錆付き時の条件変化について実験装置を海水に付けて確認する。⑤充填樹脂の圧縮試験を行うこととした。

5. まとめ

二段式シールド工法の設計・施工に取り組み、実施工に適用した。以下に二段式シールド工法検討による成果をまとめる。

- ・ 2台のシールド機を1台の二段式シールド機とすることができ、同程度の掘進機能確保し、分離可能な構造として適用できることを確認した。
 - ・ 実施工可能な二段式シールド工法の基本的な施工手順を確立した。
 - ・ 部品を共用・転用することで2台のシールド機より経済的なものとなることを確認した。
- 現在の工程は、シールド機を製作中で平成8年2月より初期掘進を開始する予定である。
最後に、二段式シールド工法の検討にあたり、ご指導、ご協力いただいた関係各位に感謝申し上げます。

6. 参考文献

1) 綿引 秀夫・松尾 和俊：V E提案方式による送電用シールド工事，トンネルと地下，PP. 27 ～35
1995. 7