

地下送電用トンネルへの二段式シールド工法の適用

Application Of The Two Stage Shield tunnelling System
To The Underground Transmission Line Tunnel

綿引 秀夫・松尾 和俊..

Hideo Watahiki, Kazutoshi Matuo

A new method for construction of an underground transmission line tunnel that employs a single novel slurry shield machine as opposed to the conventional two. The unique construction of the shield machine allows it to readily excavate shield tunnels of different diameters. In this particular case diameters of $\phi 7.10\text{m}$ and $\phi 4.85\text{m}$ were used. The shield machine itself is a novel dual shell type consisting of a Small Shield Machine (SSM) within a separate but larger, Big Shield Machine (BSM). The outside diameters are $\phi 5.00\text{m}$ and $\phi 7.27\text{m}$ respectively, with the SSM and BSM placed in concentric circles so that they share the cutter face.

To summarize, in tunneling, the two stage shield tunneling system are used in unison to excavate at the required large diameter. The SSM is then separated from the BSM at the middle shaft, and driving is then continued at the required smaller diameter.

Keywords: slurry shield machine, different diameters, two stage shield tunneling system,

1. はじめに

東京電力(株)では大田区大井埠頭内の変電所予定用地から都道環状7号線を占用し、国道1号線までの約7km間に地下送電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およびNo.2～No.3立坑間約1kmにそれぞれセグメント外径 $\phi 7.1\text{m}$ と $\phi 4.85\text{m}$ の異なった径のトンネルを施工する。一般に各断面に合った2台のシールド機で施工することとなり、No.1～No.2立坑間掘進後、交通量の激しい環状7号線車道部に設けるNo.2立坑において小さいシールド機を投入・組立することとなる。一方、当社の施工実績等から、シールド機1台でカッタビット等を交換せず2.5km程度の施工は十分可能である。

そこで、工事費の低減と路上作業の縮減を目的に、異なった2断面を1台のシールド機で施工する二段式シールド工法の開発し、適用した。

本報告はこの二段式シールド工法の検討内容と適用状況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、土被り6.3～22.2m、最小曲線半径 $R=100$ 、縦断勾配-5～5%の線形を泥水式シールド工法で約2.7kmを施工するものである。なお、泥水プラント設備は広いヤードが確保できるNo.1立坑に設けて共用することとした。

3. 二段式シールド工法概要

3-1 概要

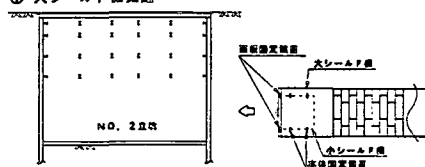
二段式シールド工法とは大シールド機の中にあらかじめカッタ面板を同心円状に共用した小さいシールド機を内蔵した二重構造のシールド機(二段式シールド機)で、異なった2断面を1台のシールド機で掘進する工法である。本工事では外径 $\phi 7.27\text{m}$ の

大シールド機でNo.1～No.2立坑間を掘進した後、No.2立坑で内蔵した外径 $\phi 5.00\text{m}$ の小シールド機を押し出し、テールプレート等の一部の部品を組み立てた後、No.2～No.3立坑間を掘進する（図-1）。

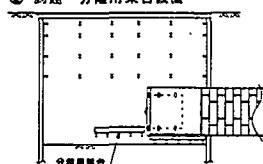
表-1 シールドトンネル工事概要

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	956m
曲線半径	100,200m他	150,200m
縦断勾配	-3.2～5.0%	-5.0～3.0%
地質条件	深層土、沖積粘土、洪積粘土、砂質土	洪積粘性土、洪積砂質土
土被り	6.3～20.5m	14.5～22.2m
地下水压	GL-1m	GL-1m
セグメント		
材質	RC平板セグメント	
外径	$\phi 7,100\text{mm}$	$\phi 4,850\text{mm}$
厚さ	350mm	275mm
幅	1,200mm (100R:900mm)	1,200mm

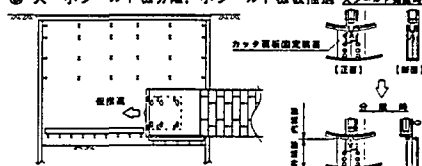
① 大シールド機掘進



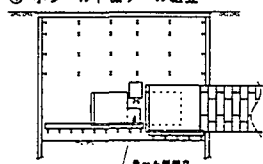
② 到達・分離用架台設置



③ 大・小シールド機分離、小シールド機掘進



④ 小シールド機テール組立



⑤ 小シールド機発進

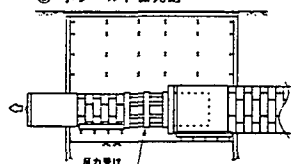


図-1 二段式シールド工法概要図

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①二段式シールド機必要機能の把握、②機能の具体化、③施工時に想定されるトラブルと対策の検討の順に行った。

二段式シールド機としての必要機能は、「大シールド機、小シールド機で掘進可能」、「No.2立坑で分離可能」、「部品の共用が可能」であり、それぞれ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分離も視野に入れて行った。

4. 二段式シールド機

二段式シールド機は表-2、図-2および写真-1に示すとおり、基本構造として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、カッタ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の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。特に大シールド機掘進時の推力およびトルクに対して、大・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。そこで、大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「面板固定装置」であり、その概要を以下に示す。

表-2 主な二段式シールド機仕様

項目	大シールド機	小シールド機
シールド機外径	$\phi 7,270\text{mm}$	$\phi 5,000\text{mm}$
シールド機長さ	8,390mm	7,450mm
テールシールド	ワイヤードラシ3段	ワイヤードラシ2段
推力 ttf	$200 \times 24 \times 4 = 4,800 \text{ ttf}$ (115.6 ttf/m ²)	$150 \times 16 \times 2 = 2,400 \text{ ttf}$ (122.2 ttf/m ²)
シヤッキ速度	50mm/min (全軌跡動作)	50mm/min (全軌跡動作)
中折れ装置	左右2'、上下1' (垂直)	左右2'、上下1' (平面)
中折れシヤッキ	$200 \text{ ttf} \times 24 \times 2$ (全軌跡)	$150 \text{ ttf} \times 8 \times 2$ (全軌跡)
カッタ支持方式	中間ヒーム方式	スライディング方式
面板開口率	30% ($\phi 7\text{m}$ 掘進時: 25～30%)	35% ($\phi 5\text{m}$ 掘進時: 20～35%)
チャンバー長さ	815mm (共通) ($\phi 7\text{m}$ 掘進時: 800mm / $\phi 5\text{m}$ 掘進時: 600mm)	
カッタ回転数	0～1.22r.p.m (共通) ($\phi 7\text{m}$ 掘進時: 0.7～0.9 / $\phi 5\text{m}$ 掘進時: 1.0～1.3)	
カッタ回転トルク	常時最大 429.9 ttf・m ($\phi = 1.12$)	常時最大 143.3 ttf・m ($\phi = 1.15$)
コピ-カッタ	120mmST $\times 2$ 本	70mmST $\times 2$ 本

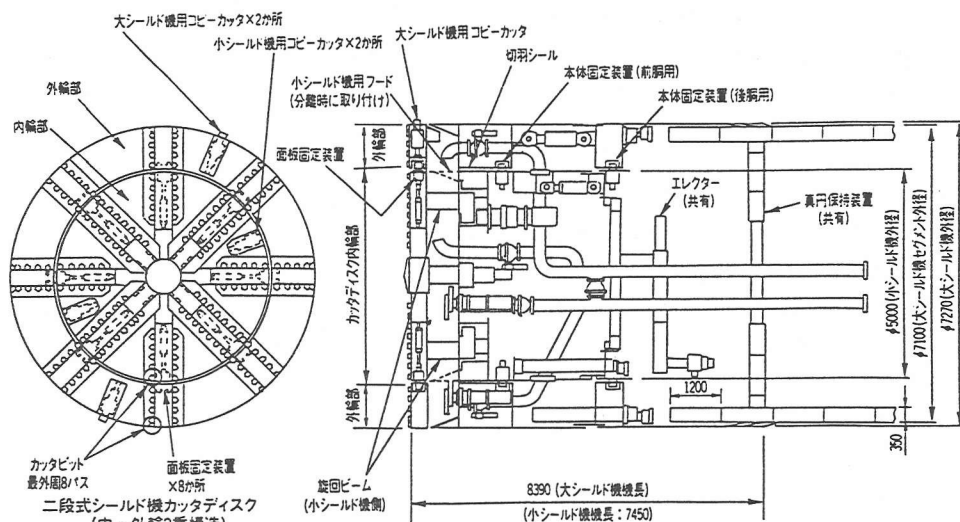


図-2 二段式シールド機概要図

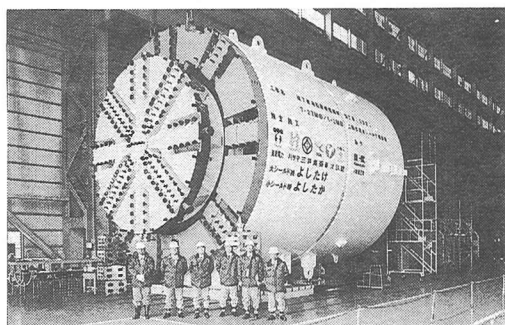


写真-1 二段式シールド機

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、小シールド機のカッタ面板および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が必要である。

本体固定装置は荷重を伝達する固定キーからなる推力固定装置およびトルク固定装置や、位置とクリアランスを保持するグリッパー装置およびピッチング・ヨーイング固定装置などから構成されている。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、油圧ジャッキで作動するようにした。

(b) 本体固定装置

① 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、小シールド機のカッタ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 (図-3)。

② 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ター部の上下に設置し、小シールド機の駆動部発生トルクを大シールド機に伝える (図-4)。

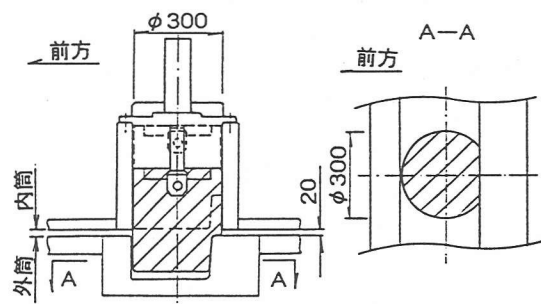


図-3 推力固定装置概要図

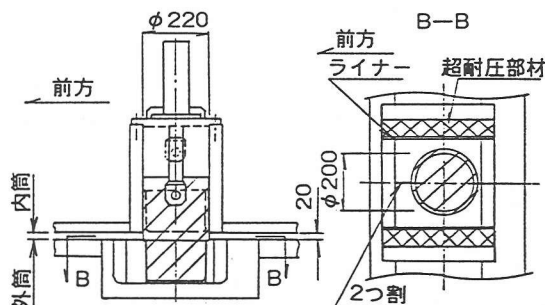


図-4 トルク固定装置概要図

③ ピッチング・ヨーイング固定装置：後胴リングガータ部の円周上に等間隔8カ所へ設置し、前胴に対する後胴の中折れ角を大シールド機から小シールド機に伝える。

④ 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、外筒が撓んだときに内筒に荷重が加わって締め付けられないようにする。

⑤ スライドレール：外筒内周下部の軸方向に2条設置し、小シールド機の自重を支持して小シールド機発進時のガイドとする。

⑥ 切羽シール：パルクヘッド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(図-5)。

なお、本体固定装置の仕様および能力は表-3に示すとおりである。

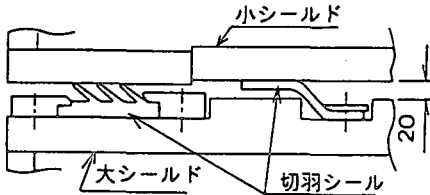


図-5 切羽シール概要図

表-3 本体固定装置の仕様・能力一覧表

名 称	仕 様	能 力
推力固定装置	前胴:6.9tfシ・ヤッキX16本 (ストローク:160mm) 固定キー:φ300mm、	1本あたり300tf支持 (総耐力4800tf /16本)
トルク固定装置	前胴:6.9tfシ・ヤッキX2本 後胴:6.9tfシ・ヤッキX2本 (ストローク:160mm) 固定キー:φ200mm、	最大トルク515.9tfと2 本で支持
ピッチング・ヨーイング固定装置	前胴:6.9tfシ・ヤッキX8本 (ストローク:160mm) 固定キー:φ200mm	・トシールド機後胴の過渡時の荷重
グリッパー装置	前胴:6.9tfシ・ヤッキX20本 (耐力、トルク固定装置と兼用) 後胴:6.9tfシ・ヤッキX12本 (トルク、ピッチング・ヨーイング固定装置と兼用)	・トシールド機のアンバランス荷重より決定 ・シールド機後胴のクリアランス確保
スライドレール	材質:B120XL1270Xt14mmX2本、材質:B120XL630Xt14mmX2本	・トシールド機の自重(200tf)を支える
切羽シール	・3段ウレタンリップ・シールX1列 ・1段ウレタンリップ・シールX1列	・圧5kgf/cm ² 以上 ・10mmの差に適合

(c) 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-6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る作動油の漏れが生じにくいものとした。停電などの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、一定時間は設定した油圧が保持できるようにした。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本を1ブロックとした。

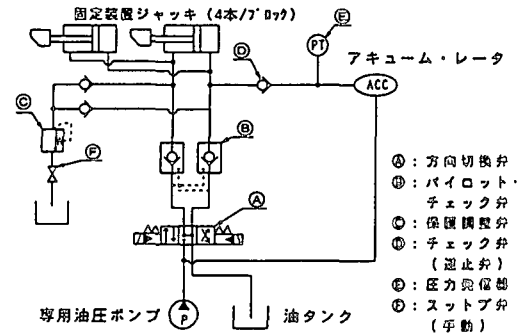


図-6 本体固定装置の基本油圧回路

4・2 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、カッタ面板に作用する土・水圧(トンネル軸方向の荷重)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、分離における解除の容易さから油圧ジャッキで動作するようにした。

(b) 面板固定装置

① 土圧固定装置：土圧固定装置を面板のスポーク部分の内輪外周8カ所に設置し、内・外輪を固定して外輪面板部に作用する土・水圧を受ける(図-7)。

② トルク固定装置：トルク固定装置を土圧固定装置と兼用することで面板のスポーク部分の内輪外周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(図-7)。

なお、面板固定装置の仕様および能力は表-4に示すとおりである。

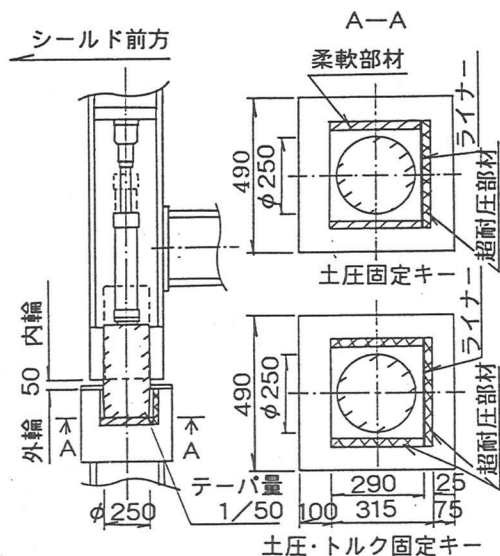


図-7 面板固定装置概要図

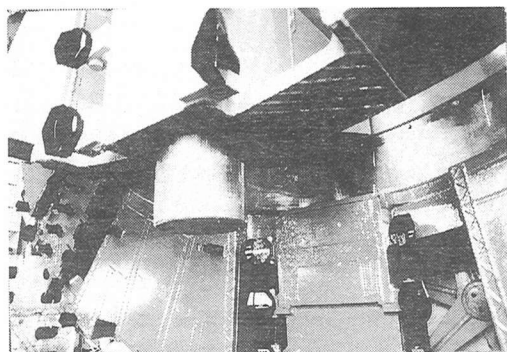


写真-2 面板固定装置

表-4 面板固定装置の仕様・能力一覧表

名 称	仕 様	能 力
土圧固定装置	6.9tfジャッキ×8台 (ストローク:160mm) 固定キー:φ250mm、	固定キーに作用する土圧モーメントを支持
トルク固定装置	6.9tfジャッキ×2台×2組 (土圧固定装置と連動)	最大カットトルク 515.9tfを2台で支持

(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・水圧およびカットトルクによる荷重を受けるため、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) カット面板構造解析

大シールド機掘進時におけるカット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。カット面板の外輪荷重を8本の固定キー（テーパピン）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・水圧を荷重として内・外輪のカット面板を解析モデルとした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。この解析結果は表-5に示すとおりである。

表-5 カット面板解析結果

ケース	長期荷重	短期荷重(掘進区間掘進時)
荷重モデル	41.3tf/m ² 41.3tf/m ²	41.3tf/m ² 68.7tf/m ²
最大主応力	$\sigma_{max} = -9.1 \text{ kgf/mm}^2$ $< \sigma_a = -14.0 \text{ kgf/mm}^2$	$\sigma_{max} = -14.4 \text{ kgf/mm}^2$ $< \sigma_a = -21.0 \text{ kgf/mm}^2$
最大たわみ	$\delta_{max} = 4.9 \text{ mm}$ $< \delta_a = 10 \text{ mm}$ (目標値)	$\delta_{max} = 7.9 \text{ mm}$ $< \delta_a = 10 \text{ mm}$ (目標値)

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、要素試験で次のことを確認した。

① エポキシ樹脂を充填するモデルを作成し、エポキシ樹脂が隙間なく充填されることを確認した。

② 固定キーの押し込みに対する引き抜き力は押し込み力の1.5倍程度になることを計測した。

③ 固定キーに土圧が作用した場合を想定し、固定キー側部から荷重を作用させた状態での固定キーの引き抜き力は、押し込み力の約5倍であることを確認し、装備引き抜き力を10tfとした。

④ 固定キーを1ヶ月間海水に付けてほとんど錆び付かないことを確認した。

⑤ 充填樹脂の圧縮試験を行い、900kgf/cm²(要求強度:270kgf/cm²)であることを確認した。

5. 施工状況

平成8年3月より大シールド機の掘進を開始し、現在も掘進中であり、現在の本掘進実績は図-8、表-6に示すとおり、シールド機の装備能力の1/3程度の負荷で施工ができている。特にシールド機が同一断面ものより100tf程度重いため、鉛直方向の方向制御性に影響してしまうと考えたが、マシン比重は1.44と4～6mクラスのシールド機と変わらないことと、上下方向の中折れ機構を使うことで、掘進の施工性にほとんど影響を与えていない。また、最小曲線半径R=100mの施工においても大・小シールド機が干渉することなく施工することができた。

これまでの施工で確認した二段式シールド機の短所は、油圧系統が複雑になり組立作業に通常の1.5倍程度の時間要したことと、小シールド機を内蔵することにより機内が狭くなったことである。また、発生したトラブルは、固定装置の油圧ホース継手から油の漏れがあり、アキュムレータの圧力が低下したことである（継手部の締め付け不足）。

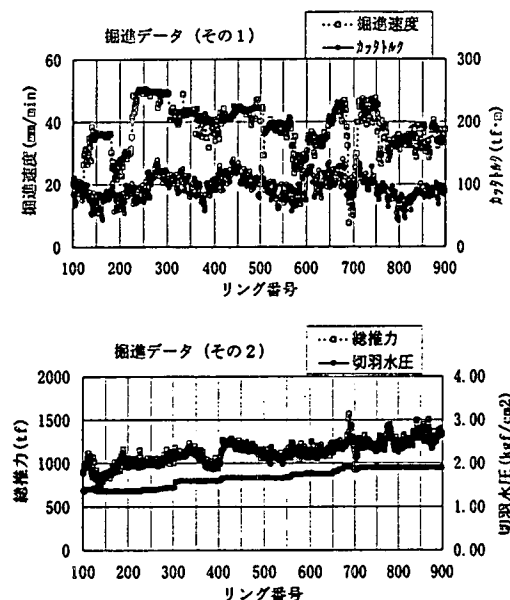


図-8 本掘進実績

表-6 本掘進実績 (100～900リング)

項目	掘進速度 mm/min	カットトルク tf・m	総推力 tf	切羽水圧 kgf/cm ²
設計最大値	50	430	4,800	3.0
実績平均値	38	94	1,125	1.7
実績最小値	8	42	694	1.4
実績最大値	50	140	1,565	1.9

6. 二段式シールド工法の適用範囲

今回の二段式シールド機の適用について、大シールド機の外径をφ5mとφ4mとしたときの小シールド機の適用径について検討した。その結果、表-5に示すとおり、大・小シールド機の直径差が1m～1.5m程度の間で適用可能である。小シールド機の最大径は大シールド機のシールドジャッキの収納スペースで決まり、その最小径は小シールド機内に設置するカッタ駆動装置のスペースで決まる。

表-5 大・小シールド機の組合せ

掘削形式	カットトルク	大シールド機外径	小シールド機径	備考
泥水式	147tf・m $\alpha=1.17$	5.0m	3.1～4.0m	・駆動部共通 ・大・小シールド機と も中折れ装置付き
土圧式	220tf・m $\alpha=1.76$	5.0m	3.6～4.0m	
泥水式	77tf・m $\alpha=1.20$	4.0m	2.5～3.1m	

7. まとめ

今回の施工による成果は次のとおりである。

- ① 2台のシールド機を1台のシールド機にすることができ、従来のシールド機と同程度の掘進機能を確認し、分離可能な構造として設計・製作できた。
- ② 大シールド機の施工は従来のシールド機と同程度の施工ができることが実績により確認できた。
- ③ 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。
- ④ 共用・転用できる部品としてはカッタ面板・駆動部、エレクター、パワーユニットおよび後継設備で、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。

今後の課題としては地中内での完全分離まで発展するために、土中で分離した外輪部の面板の固定や小シールド機のチャンバーの設置技術などの地中内分離への対応を検討する必要がある。

この二段式シールド工法はシールド機を合理的に使用するものであり、今後、同様の施工条件におけるトンネルへの適用が可能な工法であると考えられる。

8. 参考文献

- 1) 堀江 和郎 著、土中掘削にシールド機を用いて、トンネル工法解説、建設省・建設集録5号、PP. 255～260、1995. 11