

側部先行中央部揺動型三連式泥水シールド機の設計と施工

— 営団地下鉄11号線延伸工事 —

末 富 裕 二 ・ 宮 川 克 己 ・ 内 山 進

国内において三連式の泥水シールドの施工実績は既に3例あるが、今回営団地下鉄11号線の延伸工事で新たに採用された、シールド本体形状が側部先行中央部後行型の三連式泥水シールド機の設計プロセスから実施工に至るまでを紹介する。シールド機は、単円で直径7,440 mmの3心円の三連式のシールド機で特徴は、カッターディスクが両側部は回転面板、中央部が揺動面板である。また、過去の三連シールドの実績では例の無い軟弱な沖積粘性土層での施工となる。

キーワード：三連式泥水シールド、側部先行中央部後行型、揺動面板、軟弱な沖積粘性土層の掘削

1. はじめに

営団地下鉄11号線（半蔵門線）は、現在営業中の渋谷～水天宮前の路線をさらに北東部へ延伸工事を進めている。

路線は、水天宮前から江東区の清澄駅（仮称）、住吉駅（仮称）、墨田区の錦糸町駅（仮称）、を経て押上駅（仮称）に至る延長約6 kmである。当工区は、付近に清澄庭園のある深川の一角で、既に開業を始めている都営大江戸線清澄白河駅と直交する清澄駅（仮称）の停車場（島式のホーム構造）及び3線分の折返し留置線を泥水式三連シールドで構築するものである（図-1参照）。

今回の施工にあたっては、初めての試みとなるRCセグメント、側部先行中央揺動型三連シールド機を採用した。本報文は、主にシールド機の設計プロセスから実施工について報告するものである。

2. 工事概要

(1) 土質

トンネル対象土質は、ほぼ全断面、全延長軟弱な沖積粘性土の下部有楽町層（Y1c2）でN値は平均4、土被り16.2～16.7 m、トンネル中心部の地下水圧は184.2 kN/m²、土の単位体積重量

16.17 kN/m³、粘着力39.2 kN/m²、内部摩擦角0°である。

(2) セグメント

セグメントは、RC製縦径φ7,200 mm、全幅16,200 mm、リング幅1,200 mm、桁高350 mmであり、1リング当たりRCセグメント部が14ピースと中柱が2本で構成される。

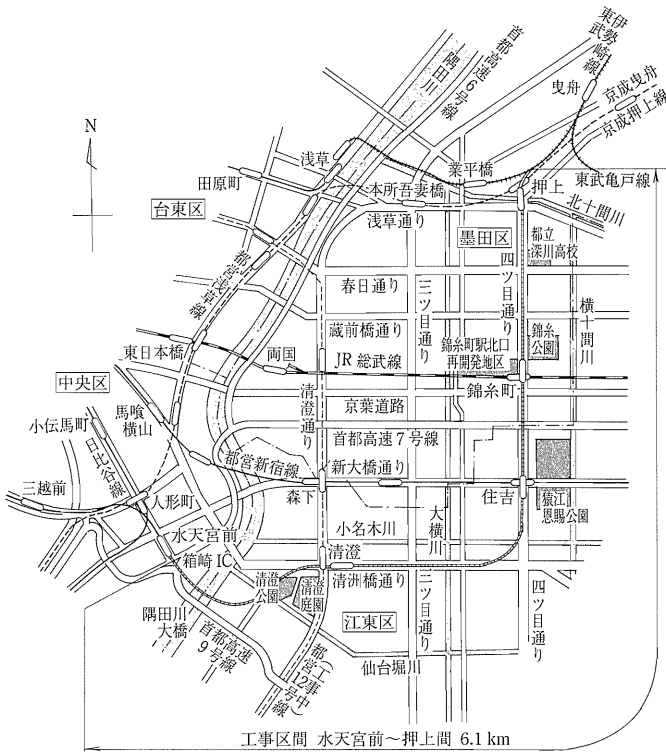
中柱に関しては、停車場はφ609.6 mmの特殊合成鋼管柱、留置線は□350 mmの合成鋼角柱の2種でいずれもコンクリートを中埋めしたものである。

(3) 施工条件

まず、既設発進立坑より停車場部121 R 143.6 mの掘削を行う。次に既設の中間立坑にシールド機を引出し、シールド本体を、立坑間約75 m移動させた後、留置線部192 R 229.1 mの掘削を行う。最終的には既設の到達立坑にシールド機を再度引出し解体する（図-2参照）。

3. 三連の基本形状

過去の実績においては、カッターディスク中央部が両側部より前方にある形状であった。今回採用された側部先行中央部後行タイプのシールドは、ディスク両側部が中央部より600 mmの位相差



図一 予定路線概要図

4. 基本設計のプロセス

(1) 1系統排泥

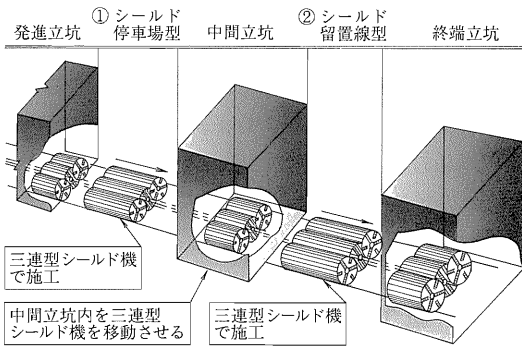
三連シールドの排泥系統はどちらも過去に実績のある、

- ① チャンバ（泥水室）を3円各々独立させ、排泥系統も独立させた3系統、
- ② 3円を一体化させ、排泥系統も1系統、

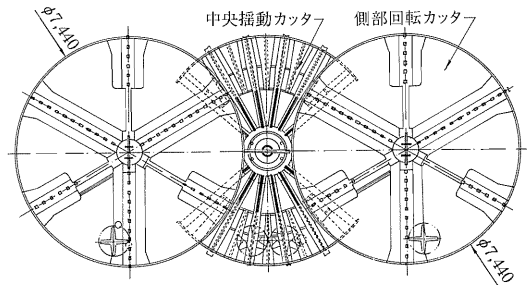
の2通りがある。

軟弱な粘性土層の掘削を、切羽水圧の変動により地表に影響を極力与えないことに主眼をおき選定をおこなった結果、流体輸送制御が従来の単円シールドと同様に見せる②のチャンバ一体型1系統排泥を選定した。

1系統排泥は制御操作もシンプルであり、不測の圧力変動時の収束制御時



図二 施工概要図



図三 シールド機正面図

をもって前方にある全く逆の形状である。

側部先行中央部後行は形状的に、三連の左右両側部を分割すると単円シールド機2基にもなり得る。したがって、側部先行中央部後行形状で何ら不都合無く掘削できれば、将来的に三連で掘削を行った後、側部を分割して単円シールド2基に改造し、更に単線シールドを2本掘削することが可能となる（図-3参照）。

このような将来的な見地から採用されたのが経緯である。また、先行している両側部は回転面板とし、中央部は左右に動く揺動面板とした。

間が短く、したがって切羽の圧力変動に対する収束も優れる。しかし、掘削土砂の回収効率は逆に3系統排泥に比べて悪いことが難点である。そこで、シールド構造上の効果的な掘削土砂の回収方法の検討対策を行った（5章後述）。

(2) 中央揺動式カッタ

両側部の回転面板部を除いた部分が中央部の掘削エリアとなる。したがって、掘削効率を考慮して揺動式カッタを採用した。まず、揺動式カッタの回転カッタと比較した長短所について考察し、その後に検討点を記す。

(a) 揺動カッタの長短所

(i) 長 所

揺動カッタの長所は下記のとおりである。

- ① 隣接するカッタとの干渉を角度設定等により容易に制限できる。
- ② 種々の掘削断面に対応が容易である。
- ③ 揺動式カッタフェイスの断面は角度設定により限走可能なため、左右両側の回転式カッタの掘削土砂の取込みに影響を与えない。

(ii) 短 所

揺動カッタの短所を列挙する。

- ① 揺動の中心に近づくに従って摺動距離が減少し、掘削に困難が生じる。
- ② 揺動角が小さくなる程、同一パス数に対し、取付けビット数が増大する傾向がある。
- ③ 揺動反転時、瞬間的にカッタ回転が停止する。その間もマシンは推進しているため、カッタビットが切羽に喰込む。

(b) 揺動角度

中央部カッタの揺動角度は中央部カッタディスクが両側部カッタの中間支持脚と干渉しない範囲で最大値を採用する。本三連シールド機では、掘削のために必要な中央部カッタの揺動角度は約 $\pm 10^\circ$ である。実際の揺動角は少し余裕をみて $\pm 12^\circ$ (揺動角度 24°)とした。

(c) カッタディスク外周リングの山留め効果

中央部における両側部円と中央円との交点角度は約 75° である。中央部揺動カッタが左右に最大 12° 摺動した場合でも、上部地山の山留め効果を考慮してカッタディスクの外周リングが天端をカバーするように外周リングの周長を配慮した。結果として扇形の角度を 106° とした。

(d) 端部スポークの R 加工

揺動カッタの両端部は両側部カッタのチャンバ内掘削土砂を押付けたり、開放したりする箇所となり、掘削土砂、特に粘土分が最も付着しやすい場所の一つである。その対策として両端スポーク部は R 加工を施し、付着防止に配慮した。

(e) ビット配列

掘削土砂の取込みを考慮しながら、揺動角度 $\pm 12^\circ$ における全面掘削を目標としてビット配列を計画した。

外周部は前方への山留めのため、面板を設け、

ビットはスポーク部と面板部に千鳥に設けた。また、土砂取込み性を考慮して面板を設けないスポークのみの内周部は先行ビットと後行ビットの高低さを十分に取り装着した。ただし、カッタディスクの両端部は山留めが目的であるため、ビットを設けていない。

(3) 中心カッタ

中央部揺動カッタはカッタの中心に近づくにつれ、揺動量が減少するため、揺動量がビット幅以下になるところでは、通常の切削が不可能となる。この対策として、中心部のみを揺動とは独立した回転型とすることにした。このため、ディスクを揺動させながら中止部だけは、回転掘削することとなり、通常の回転面板タイプと同様となり、中心部の掘削を確実にした。

(4) 中央カッタディスクスリット幅

カッタディスクスリット幅については、カッタディスク上半部では軟弱な粘性土の切羽安定に配慮し、スリット幅を 200 mm 以下と狭くし、一方、カッタディスク下半部では切削土の取込み性、特に初期の改良地盤掘削等を考慮し、最外周部では最大 300 mm となる上下非対称の面板構造とした。

このように種々の条件により回転面板では不可能である上下(左右)の開口率の異なる面板構造が採れるのも揺動式の長所の一つと思われる。

(5) エレクタ

セグメント組立てにおける中柱は円形の鋼管柱、角形の鋼角柱、更には仮柱で使用される H 型鋼と多岐にわたる。このため、安全かつ、短時間でセグメントの組立てを可能とするため、特に支柱組立てにはスイング機能付き支柱組立て装置を考案して、採用した。支柱組立てスイング機構は、次の構造と特長を有する(図-4 参照)。

(a) 構造

支柱用エレクタは、2本の主ロッドの半径方向伸縮、把持部の法線方向スライド機構に2本の主伸縮ロッドのスイング機構を加えた新構造とした。

(b) 特長

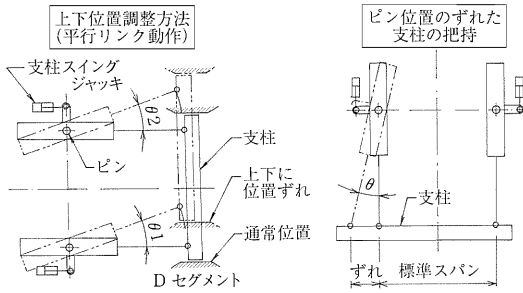


図-4 支柱組立て装置の原理

支柱を把持する伸縮ロッドをスイング可能な構造とすることにより、下記の特長を有するものとなった。

- ① 支柱挿入の際、上下位置調整を微速で行える（油圧モータによる旋回動作に比べ、ジャッキによるスイング動作は動作速度が小さく、微調整が容易である）。
- ② 支柱スイング時は、平行リンク動作となるため、上下位置調整時の支柱の倒れが生じない。
- ③ 左右伸縮ロッドを独立してスイングできるため、支柱の把持が容易。

5. マシン製作の上での実証実験

排泥系統が1系統であることと、チャンバの奥行き長さが排泥口のある中央部が640 mm、両側部が1,240 mmの構造ということより、掘削土砂、特に両側部より取込まれた土砂が堆積すること無く中央の排泥口に移動できるかが懸念された。そこで、初めに机上レベルでの流動解析を行い、その結果を踏まえて実機の1/6サイズの模型により実施工を想定した土砂回収実験を行った。

(1) 流動解析

各種パラメータを与えることにより、チャンバ内断面の流体の速度ベクトルを表し、流速と方向の比較を行った。解析条件は、

- ① アジテータは各側部1基、中央部2基、
 - ② 環流噴射は各側部1箇所、
- の2項を設定した。

ここで環流噴射（以下環流と呼ぶ）とは、過去の三連シールドでも実績があるチャンバ内の泥水

をスラリーポンプで引抜き、再度チャンバに噴射するものである。この目的は、環流を用いることで、側部からの掘削土砂を中央部へ運搬させるものである。

この解析で最適な流れを発生させるパラメータを絞込んだ結果、

- ① 排泥管の系統数を左右と中央の3系統、
 - ② 環流吐出管の取付け位置及び方向、
- が決定された。

(2) 土砂回収実験（写真-1 参照）

模型は、前面（実機ではカット面板）を透明のアクリル板にしてチャンバ内の堆積状況が定量的に観察できるようにした。掘削土砂は土砂を模擬した粒状体（ビーズ）を使用した。

粒状体は、見掛けの土砂として、

- ① 粘性土分：比重2.5、粒径4 mm（比重が大きいのは沖積粘土の粘着の抵抗を加味）、
 - ② 砂分：比重2.5、粒径1 mm、
- の2種類とした。

実験パラメータは、送泥吐出流量、送泥管吐出角度、環流吐出流量、環流管吐出角度、液体粘性として、掘削と同条件下での粒状体の回収量を各々測定した。

評価方法は、一定時間内における粒状体の回収量と、噴流による側部円から中央円への粒状体の移動量とした。この実験結果で、最適な流れを発生させる送泥流量、送泥管角度、環流吐出流量、環流管吐出角度等を決定した。更に、実験より、

- ① 環流系統を2分岐させ、補助の環流を設ける、
- ② 環流吐出口の形状を扁平にする（噴射速度の増大効果）、

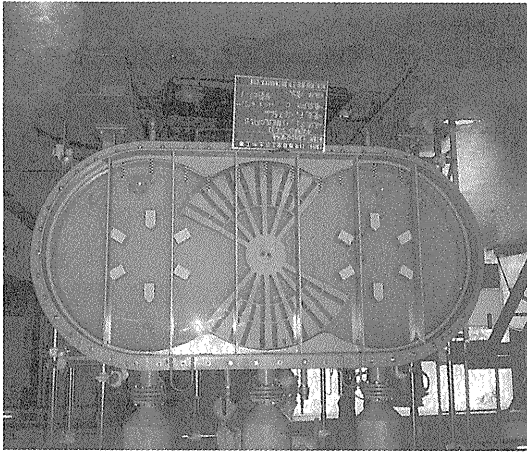
ことで格段の土砂回収効率の向上が判明した。

6. 実証実験の実機への反映

実験の結果に基づき、

- ① 送泥管吐出口角度、
 - ② 環流管吐出口角度、吐出口形状及び環流吐出管の増設、
- を実機に反映させた。

この中で特に環流の増設は、当初設計には無



写真—1 土砂回収実験装置

かったために機内配管の見直し，変更を行ったが，限られたスペースでの配管ラインの増設に苦心した。

7. シールド機仕様

主な仕様を表—1 に示す。

8. 実 施 工

(1) 発 進 工

発進部，到達部の補助工法としては，各2箇所とも CJG 改良層で改良範囲は発進部が約 5.5 m，到達部が約 2 m である。シールド断面が約 106 m²，地山が軟弱な粘性土層であることから発進時における鏡切りの全段面開放については細心の注意を払っての施工であった。

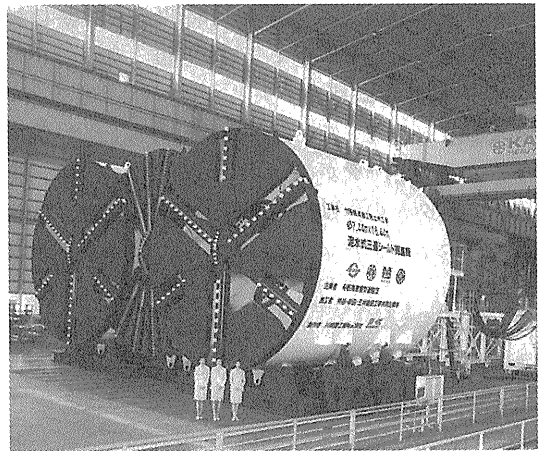
掘進開始時では，カッタ面板の前後の位相差があるため側部面板が鏡面に接した段階で，まだ中央部カッタディスクはエントランスパッキン上であり，側部面板のみ回転させ，中央揺動面板は停止して掘進した。

また，エントランス貫入時における逆 R となる各円の交点部（我々はこれをかもめ部と呼ぶ）の泥水の漏れを懸念したが，2重構造のパッキン及び逆 R にパッキンを加圧追従させることでほとんど漏れは無かった。

(2) 中央揺動カッタ

表—1 シールド機諸元

シールド本体関係			
シールド外径	φ7,440 mm		
シールド全幅	16,440 mm		
シールド全長	7,525 mm		
シールドジャッキ推力	上部：2,205 kN×1,400 st×31.2 MPa×22 本 下部：2,695 kN×1,400 st×31.2 MPa×22 本		
装 備 総 推 力	107.8 MN		
単位面積当たり推力	1,016 kN/m ²		
カッタディスク関係			
	側部カッタ	中央揺動カッタ	中心カッタ
基 数	2 基	1 基	1 基
カッタトルク	3,172 kN・m	1,438 kN・m	35 kN・m
回 転 数	0.72 rpm		4.94 rpm
揺動角度		24°	
揺動速度（外周速度）		16.8 m/min	
エレクトラ関係			
基 数	3 基		
形 式	リングドラム方式（支柱組立て機構付き）		
形状保持装置関係			
基 数	2 基（左右側部）		
拡張力	294 kN		



写真—2 側部先行中央揺動型三連シールド機

CJG 改良層では掘削速度 2~3 mm/min で掘進した。中央揺動カッタトルクは定格能力の約 30%程度であった。また，排泥ラインの閉塞は一度もなくローヘッドスクリーン上の掘削土砂も均一であり，回転面板と相違なく改良体を切削したと言える。しかし，留置線到達完了後にカッタディスクのスポークを確認したところ，ビットの無い箇所の部材に摩耗が見られた。これはスポーク形状が角型だったために，おそらく切削土砂の流れが悪く部材面が地山中を摺動したためと思われる。揺動では角スポークを用いない方が良いと思われる。

(3) 掘削土砂の回収

掘削に関しては、掘削量、乾砂量とも問題なく、特に排泥流量、密度が脈動等の現象を生ずることも無かった。これは、側部の掘削土砂が堆積することなく連続的に排泥されたと言える。停車場掘削完了後の中間立坑引出し時に確認したところ、環流口から放射状にチャンバ隔壁の塗装が落ちていた。このことから実験結果とほぼ同様に環流の効果が大きく土砂の移送に影響を与えたと想像できた。

ただ、吸込み箇所もチャンバからなので、下向きにエルボを取付けてあったにもかかわらず数回環流ラインが閉塞した。閉塞解除は、環流ポンプ前後で都度配管を入替え逆送りを行って解除を行ったが、今後の課題点である。

(4) セグメント組立て

セグメント組立ては当初4時間くらい要したが、慣れるにしたがって2時間程度となった。エレクタは、両側部、中央にそれぞれ3基あり、各々独立して組立て可能である。これを2名のエレクタオペレータが操作して組立てた。また、3基のエレクタの作動は相互に干渉するので、角度設定によるパターン化されたインターロックを取入れた。

このインターロックで組立ては安全に作業ができたが、パターン数が多く、数度の角度設定違いでセグメントが組立てられない現象が当初生じた。支柱組立ては、シールド円周方向から挿入するのであるが、把持装置にスイング機構を設けたおかげで挿入時の3次元の微調整が可能となり、支柱組立てにおける支障は全くといって良いくらいなかった。

9. おわりに

平成12年12月8日から停車場区間の泥水掘進

が開始され、平成13年2月26日に到達した。中間立坑約75mの本体移動は1週間程度で行い、5月17日に留置線区間の泥水掘進を再開し、8月9日に無事到達した。平均で稼働日当たり日進3.5リング、4.2mであった。現在、シールド坑内では、役目を終えたシールド機の解体の真最中である。

心配された軟弱な粘性土層の掘削も環流噴射を用いることで不都合無く掘削でき、掘進管理も既存の単円シールドと同様な管理を行うことができた。これより、幾多の検討を重ねて設計・施工された側部先行中央揺動という新たな手法が三連シールドの一つの実績として加えられたと思う。

最後に、これまでご指導、ご支援をいただいた多くの方々に誌面を借りて深く謝意を表し、本稿の結びとする。

J C M A

[筆者紹介]

末富 裕二(すえとみ ゆうじ)
帝都高速度交通営団
建設本部
工事部
押上工事事務所
技術課長



宮川 克己(みやがわ かつみ)
株式会社熊谷組
JV11号線清澄工事所
機電課長



内山 進(うちやま すずむ)
川崎重工株式会社
土木機械技術部
シールドグループ
担当課長

