

トンネル 特集

揺動型シールド工法の開発と実工事への展開

永森邦博・真鍋 智

揺動型シールド工法（Wagging Cutter Shield 工法）は、カッタを左右に揺動させる掘削機構をもつシールド掘進機を用いた工法である。カッタ揺動には、モータではなく油圧ジャッキ駆動を採用しており、掘削機構の簡素化とシールド機長の短縮、及び伸縮スポークとの併用による非円形断面掘削への対応が可能である。本工法は、2002年度までに6件（うち鹿島建設施工5件）の適用実績があり、新たな要素技術の開発により各工事の課題に対応した。本報文では、適用工事の実績に触れながら、開発した要素技術の内容について紹介する。

キーワード：トンネル、シールド工法、揺動型シールド工法、シールド掘進機、矩形シールド、急曲線施工

1. はじめに

近年、都市部のインフラ整備において、シールド工法は地上構造物や地下埋設構造物による線形計画上の制約が少ないことと、技術の進歩により、施工件数が増加している。また、種々のトンネル形状への適応、及び低コスト化への技術開発により、都市部のトンネル構築分野においてますます有利性が発揮されている。

揺動型シールド工法（Wagging Cutter Shield 工法）は、油圧ジャッキシリンダの伸縮によってカッタを揺動させる駆動方式を採用した。この結果、従来の回転型カッタを用いたシールド掘進機と比較すると、駆動部の構造が簡素化され、機長を短縮することができた。また、カッタスポークを伸縮させることにより、矩形断面掘削にも適用できる。

本工法は、1997年に実工事に導入した矩形揺動型シールド工法^{1),2)}の技術を展開して、2002年までに6件（うち鹿島建設施工5件）の工事適用実績を上げている。各種工事への適用の過程で、世界初の複線断面地下鉄工事への導入（写真-1）や、揺動型掘削機構の耐久性が要求される長距離掘進、矩形揺動カッタのスポーク伸縮に伴い発生する切羽土圧変動の抑止対策、そして、最小曲率の急曲線施工などの課題に対して、新たに開発した要素技術により克服した。

本報文では、各工事への適用実績について述べるとともに、導入した揺動型シールド工法の各種要素技術

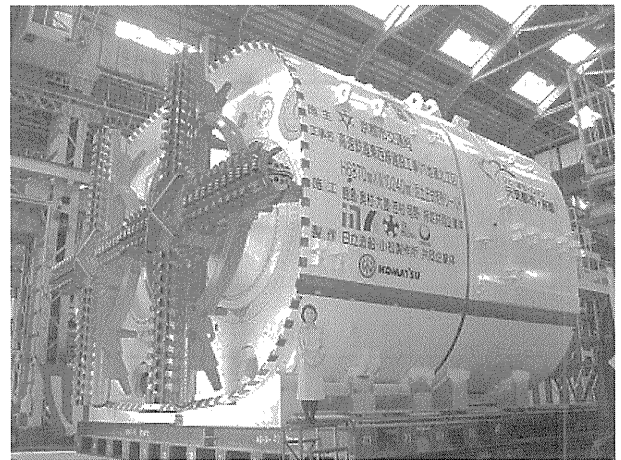


写真-1 京都地下鉄六地藏北工区シールド掘進機

を紹介する。

2. 揺動型シールド工法の概要

(1) 開発のねらい

揺動型シールド工法は、油圧ジャッキを用いたカッタ揺動機構とカッタスポークの伸縮機構の併用により、非円形断面掘削に対応することを目的として開発した。揺動型カッタによる矩形断面トンネル掘進機では、図-1に示すようなカッタ動作による掘削を行う。なお、矩形形状としたトンネル覆工体は別途構造検討を行い、実施工において有効性が既実証されている³⁾。

さらに、円形断面トンネルに対しても矩形揺動型シー

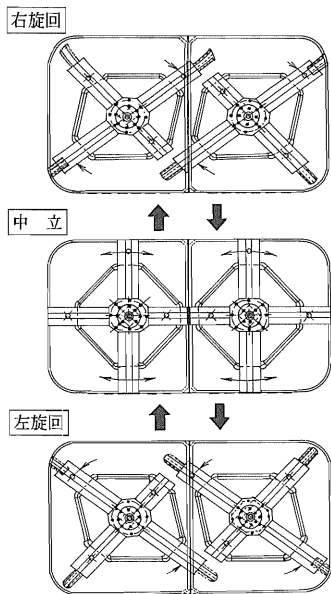
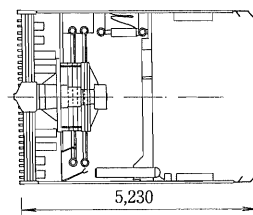


図-1 揺動型掘削機構模式図

構造説明図 Structural Diagram
ワギングカッタ Wagging Cutter



回転カッタ Rotating Cutter

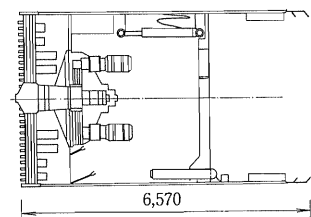


図-2 揺動型シールド掘削機の機長短縮効果

シールドで実績を上げた掘削機構を適用し、図-2に示すように外径φ4m相当の掘進機において、機長が約1.3m短縮されることに着目して、発進、到達時における作業範囲の省スペース化と急曲線施工に有効であることから実工事に適用した。

(2) 揺動型掘削機構

掘削機構は、図-3に示すように2本の油圧ジャッキの一方をシールド掘進機本体に、他方をカッタヘッドの支持センタシャフトから伸びる揺動アームに取付けた構造とした。

カッタ動作は、片方を伸ばし、他方は縮めることで、センタシャフトを介してカッタを一方向に動作させる

方式とした。油圧ジャッキは、95度(左右各47.5度)の揺動ストロークを有し、回転角度センサが±47.5度の位置で検知した時点で、伸縮運動を停止させ、瞬時に油圧制御弁を切替えて逆方向に伸縮させることでカッタに反転動作を加えている。これを繰り返すことにより、カッタの揺動運動を行う機構とした。さらに、揺動ジャッキのストロークエンド付近では、発生トルクが構造上小さくなることから、これを補うアシストジャッキ1本を追加した。

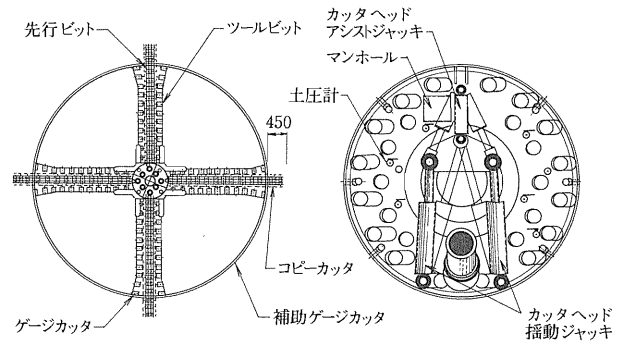


図-3 揺動型シールド掘進機の構造

3. 揺動型シールド工法の開発と工事適用の経緯

揺動型シールド工法の開発における技術課題は、従来の回転型カッタと揺動型カッタの相違点に起因するものを含めて以下の内容が挙げられ、図-4に示す内容で実工事適用において対応した。

- ① 揺動型掘削機構の耐久性確保
- ② 揺動型カッタ掘削トルクの確保
- ③ カッタ揺動中のカッタトルク変動の解消
- ④ 矩形シールドのカッタスポーク伸縮による切羽土圧変動の抑制
- ⑤ 矩形シールド隅角部掘削における伸縮スポークの切削性能評価

4. 適用実績

(1) 矩形トンネル掘削工事への適用⁴⁾

(a) 工事概要

当該工事は、繁華街路直下に連絡通路を非開削で建設したもので、矩形トンネルを低土被り4.8mで施工する内容であった。工事では、矩形揺動型シールド掘進機を採用したことにより、非開削、かつ埋設物をよけた必要最小限の断面形状で地下通路を構築した。工事概要を表-1に示す。

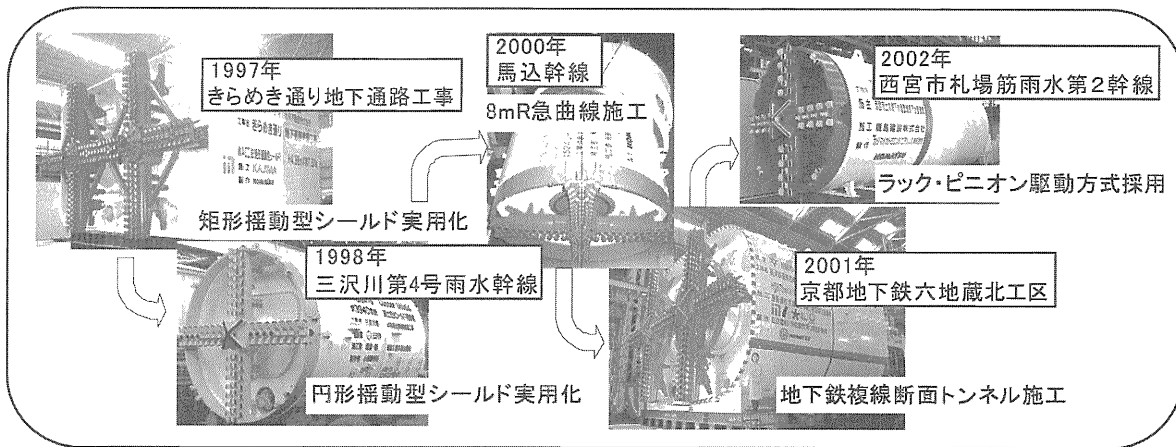


図-4 揺動型シールド工法の実工事に対する開発技術の適用状況

表-1 工事概要

工事名	きらめき通り地下通路建設工事
工事場所	福岡市中央区天神2丁目きらめき通り
工期	平成9年8月1日～平成11年4月30日
シールド機寸法	高4,980mm, 幅7,810mm
躯体内側寸法	高3,300mm, 幅6,200mm
掘進延長	113.86m
発注者	(株)岩田屋, エヌ・ティ・ティ九州不動産(株) (きらめき通り地下通路建設共同事業者)

(b) 施工上の課題

矩形断面隅角部を伸縮スポークにより揺動掘削することから、以下の技術課題が挙げられた。

- ① 装備カッタトルクの設定方法
- ② 伸縮スポークに設置するカッタビットの選定

(c) 適用結果

掘削に要するカッタトルクの算定は解析結果から、スポーク長が最長時の回転半径で評価することにし、適用時の計測結果と照合して性能が十分であることを確認した。また、伸縮部分のカッタビットを室内実験(図-5)で掘削に最適なビット形状と配置を決定し、開発したスパイクビットを採用した。工事は、計画どおりに完了した。

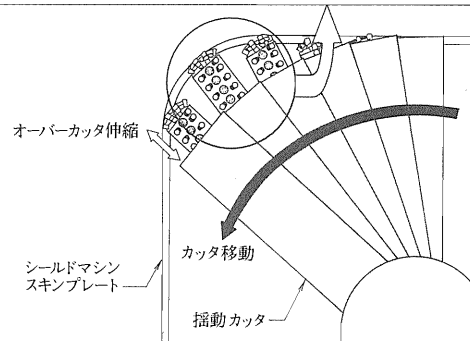
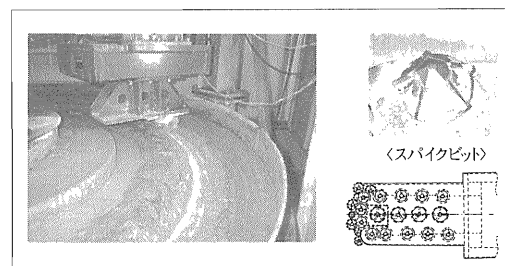


図-5 カッタスポーク伸縮部のビット選定実験

表-2 工事概要

工事名	三沢川第4号雨水幹線築造工事
工事場所	青森県三沢市東岡三沢1丁目他地内
工期	平成10年12月18日～平成13年3月20日
シールド機外径	φ3,940mm
仕上り内径	φ3,000mm
掘進延長	601.5m
発注者	三沢市

(2) 長距離掘進に向けた掘削機耐久性向上⁵⁾

(a) 工事概要

当該工事は、市街地における掘進延長約600mの下水道建設工事で、S字状の急曲線が存在することと発進立坑が狭隘であることから、円形揺動型シールド工法が採用された。工事概要を表-2に示す。

(b) 施工上の課題

揺動型シールド工法の適用実績内では、比較的長距離であったことから、次の課題が挙げられた。

- ① 揺動型掘削機構の耐久性の検証
 - ② 揺動角終端付近でのカッタトルク低下の問題
- (c) 適用結果

揺動型掘削機構の耐久性向上と、カッタ揺動時に油圧ジャッキを使用する構造上発生するカッタトルクの低下現象を解消する目的で、前述の図-3に示すようなアシストジャッキを導入した。工事では、急曲線施

工と延長約 600 m におよぶ掘進を工期内で完了した。

(3) 機長短縮を生かした急曲線施工

(a) 工事概要

当該工事は、市街地における掘進延長約 1,300 m の雨水幹線建設工事で、シールド工法として実績のなかった曲率 8 m R の急曲線が存在したことから、円形揺動型シールド工法が採用された。工事概要を表—3 に示す。

表—3 工事概要

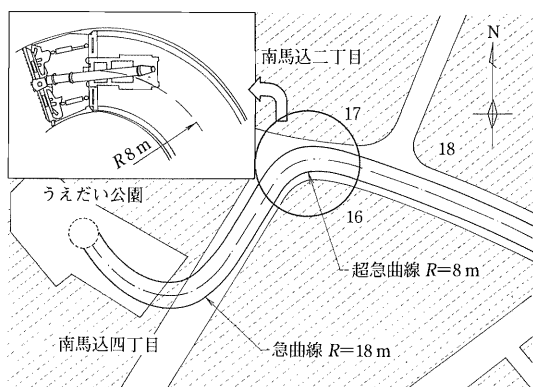
工事名	馬込幹線工事
工事場所	大田区中央1丁目21番地先 ～大田区南馬込4丁目1番地先
工期	平成12年3月30日～平成14年10月22日
シールド機外径	φ5,240 mm
管渠形状	仕上り内径14,400 mm～4,500 mm
掘進延長	1,309 m
発注者	東京都下水道局

(b) 施工上の課題

シールド掘進機は、先端のカッターヘッドで掘削した範囲内でしか機体の向きを変えることができず、施工可能な曲率半径は、主に機長によって制限される。そこで、機長短縮を図り、急曲線施工に対応することを課題とした。

(c) 適用結果

8 m R の急曲線施工では、揺動型シールド掘進機による機長短縮（従来長 7.57 m から 6.62 m に短縮）と、急曲線部手前における掘進機後胴の交換（機長 5.23 m に短縮）、そしてシールド機中折れ 17° で、図—6 に示すように対応し、無事完了した。



図—6 揺動型シールドによる 8 m R 急曲線施工

(4) 切羽土圧変動抑止対策技術の導入⁶⁾

(a) 工事概要

当該工事は、地下鉄工事において世界初となる複線

断面の矩形トンネルを建設したものである。矩形断面に対応できる揺動型シールド工法が採用され、よく締まった砂礫地盤中で 760 m の掘進を行った。工事概要を表—4 に示す。

表—4 工事概要

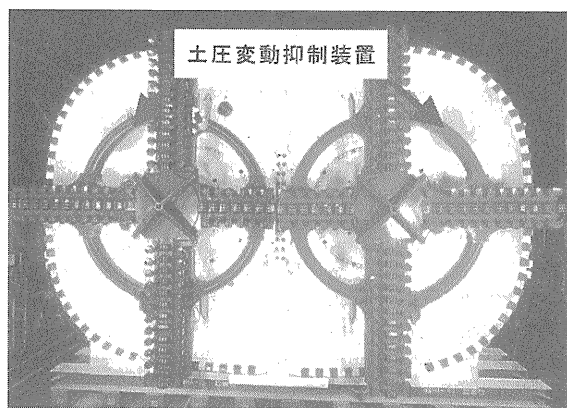
工事名	高速鉄道東西線建設工事（六地藏北工区）
工事場所	宇治市六地藏奈良町 23-1 番地先 ～京都市伏見区石田森東町 27-4 番地先
工期	平成11年10月1日～平成15年10月31日
シールド機寸法	高 6,870 mm 幅 10,240 mm
躯体寸法	高 6,500 mm 幅 9,900 mm
掘進延長	760.79 m
発注者	京都市交通局

(b) 施工上の課題

密閉状態にある掘削機チャンバ内で、大型のオーバカッターを伸縮させることから、切羽土圧変動の影響を受けることが予想され、土圧変動を抑止して切羽安定を図ることが課題であった。

(c) 適用結果

切羽土圧変動を抑制するために、写真—2 に示すように隔壁上部の左右に土圧変動抑制装置を装備した。オーバカッターの伸縮はカッター揺動角度に応じて制御されており、揺動角度に応じて抑制装置のピストンを前後させ、チャンバ容積変化分を相殺して切羽土圧変動を抑制した。切羽変動抑制装置を適用したことにより、切羽安定管理精度が向上し、施工管理値を満足して工事を完了した。



写真—2 土圧変動抑制装置の搭載状況

(5) 装備カッタートルク変動解消への対応

(a) 工事概要

当該工事は、超過降雨時の浸水対策として貯留機能を有する雨水管渠を建設したものである。延長約 1,100 m の区間を仕上り内径 φ 2,200 mm の揺動型シールド工法で築造した。概要を表—5 に示す。

表一5 工事概要

工 事 名	公共下水道新設（札幌筋雨水第2幹線）工事
工 事 場 所	西宮市江上町外
工 期	平成13年12月22日～平成15年3月31日
シールド機外径	φ2,640 mm
管 渠 形 状	仕上り内径φ2,200 mm
掘 進 延 長	1,109 m
発 注 者	西宮市下水道整備部

(b) 施工上の課題と適用結果

掘進機外径がφ2,640 mmの小口径シールドで、30 m Rの急曲線施工を行うことから、円形揺動型シールド工法を採用し、さらに掘削機構の簡素化を進めることを課題とした。

(c) 適用結果

揺動型シールド掘進機は、油圧ジャッキの揺動に伴い、カッタトルクのピーク値が変動する性質を有する。これにより、掘進機の装備トルクは、変動範囲の下限域に合わせて設定する必要があったが、油圧ジャッキからのカッタ動力伝達部に図一7に示すラック・ピニオンギヤを採用することで、カッタトルク変動を解消

し、装備動力を必要最小限に抑えて経済性を向上させた（図一8）。工事は地下重要埋設物近接施工を含む難易度の高いものであったが、無事掘進を完了した。

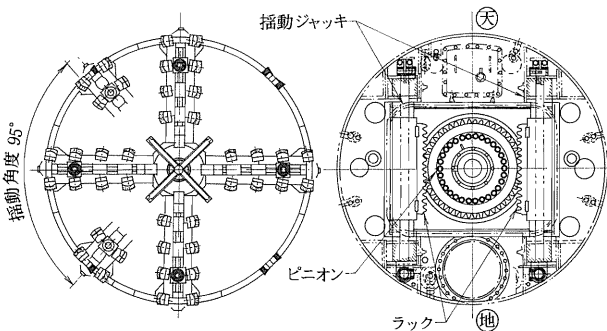
5. おわりに

揺動型シールド工法は、非円形断面掘削や急曲線施工への適応性から、工事への適用実績を着実に重ねており、都市部の狭隘な掘進条件に対する適応性を高く評価できる工法であるといえる。揺動型シールド工法の有利性を生かした工事への展開と同時に、切羽土圧変動などの揺動型掘削機構に特有の課題も既に克服しており、今後もより一層の技術向上と工法の普及に励みたいと考える。

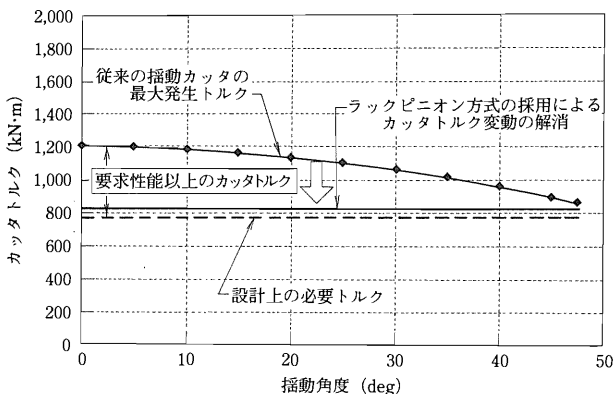


【参考文献】

- 1) 三井 隆, 吉川 正, 尾上順吉:新しい矩形シールドトンネルの開発と施工, トンネルと地下, vol.30, pp.37-46, 1999.6
- 2) 小坂琢郎, 吉川 正, 田中耕一, 今川 勉, 池添勝次:揺動型シールドマシンによる矩形トンネル構築方法の開発, 土木学会第53回年次学術講演会, VI-75, pp.150-151, 1998.10
- 3) 吉川 正, 三井 隆, 田中耕一, 柳井修司, 中川浩二:矩形シールドトンネル覆工としてのオープンサンドイッチ構造の開発と実施工による有効性の検証, 土木学会論文集, No.690/V-53, pp.133-146, 2001.11
- 4) 尾上順吉, 池添勝次, 福田昌弘:矩形・揺動シールドの開発, 平成10年度建設機械と施工法シンポジウム論文集, 日本建設機械化協会, pp.182-187, 1998.10
- 5) 遠藤哲朗, 平野明彦:S字状急曲線(R=12m)の施工実績, 土木学会第55回年次学術講演会, VI-60, pp.120-121, 2000.9
- 6) 中村 浩, 久保田敏和, 古川 衛, 中尾 努;大断面矩形シールドで渡り線部と一般線路部を施工・京都市高速鉄道東西線(六地藏～醍醐間)六地藏北工区, トンネルと地下, vol.33, pp.27-33, 巻頭グラビア「目で見るトンネル工事」, 2002.8



図一7 ラック・ピニオンギヤによる揺動掘削機構



図一8 カッタ揺動時のトルク低下の解消

【筆者紹介】

永森 邦博 (ながもり く にひろ)
 鹿島建設株式会社
 機械部
 技術グループ
 次長



真鍋 智 (まなべ さとし)
 鹿島建設株式会社
 機械部
 技術グループ
 課長代理

