

23. 自在接合型親子シールド機の開発

大成建設株：金子 研一

石川島播磨重工業株：山田 茂弘，*伊藤 広幸

1. はじめに

近年、都市部におけるシールド工法の傾向は、大深度化および長距離化の傾向にある。それに伴い経済面をさらに考慮する必要があり、トンネル途中でトンネル断面を機能上必要な形状に変化させる施工方法およびシールド機の開発が要求されている。

これまで、トンネル断面を路線の途中で変えたい場合は中間に立坑を設け、そこから断面形状を変えたシールド機を新たに発進させていたが、都市部においては希望する位置に中間立坑を設けることが困難な状況が多くなっている。このため、掘進途中で断面を小さくすることが可能なシールド機として親機の内部から子機が発進可能な親子シールド機が開発され、表-1に示す工事で実績がある。表に示すように下水、電力、鉄道など広い分野で需要があり、今後、増える傾向

にある。ここに示す実績のうち営団地下鉄の例を除いては土中で子機を分岐発進させたもので、いずれも親機と子機が同芯となる管芯接合式であった。

しかし、トンネルの用途によっては、管芯接合式ではなく大断面トンネルの任意位置で小断面トンネルを接合できれば、さらに合理的な計画が可能となる。このようなトンネルを掘削できる親子シールド機が求められ、それに応えて自在接合型親子シールド機が開発された。図-1に本機のイメージを示す。

本文では、自在接合型親子シールド機の概要と実証実験の結果を報告する。

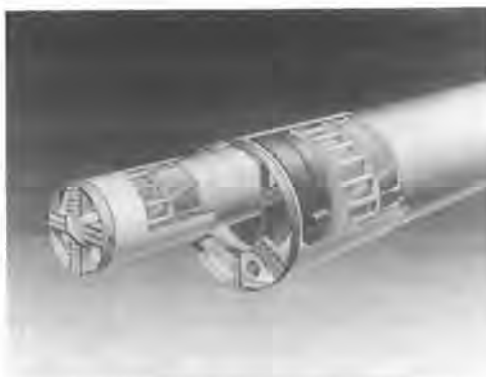
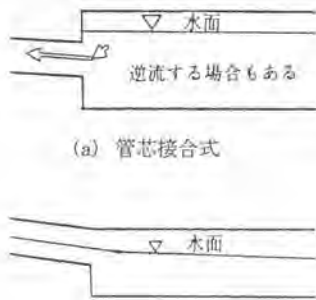


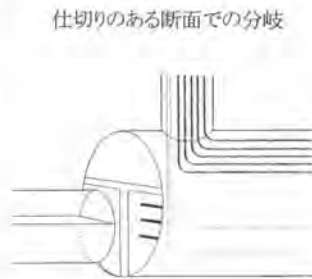
図-1 自在接合型親子シールド機のイメージ図

表-1 親子シールド機の実績表

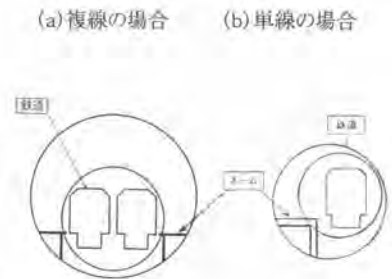
	工事名	発注者	工期	口径(距離)
1	観音川雨水滞水池建設 工事その8	日本下水道事業団 (川崎市下水道局)	1992. 7～ 1994. 3	φ 5. 53m→φ 3. 68m (260 m) (65m)
2	7号線南麻布工区 (麻布留置場) 土木工事	帝都高速交通営団	1995. 1～ 1998. 2	φ 14. 18m→φ 9. 7m (364m) (777m)
3	環七東海松原橋管路 新設工事	東京電力	1995. 3～ 2000. 3	φ 6. 4m→φ 4. 3m (1736m) (958m)
4	南部処理区八幡幹線 下水道整備工事	横浜市下水道局	1995. 11 ～1999	φ 4. 93m→φ 3. 93m (990m) (1136m)
5	高槻島本雨水幹線(第4 工区) 下水管渠築造工事	大阪府北部流域 下水道事務所	1996. 1～ 1999. 3	φ 4. 93m→φ 3. 93m (87m) (1464m)



(a) 管芯接合式
(b) 管頂接合式
図-2 下水道の接合方式



仕切りのある断面での分岐
図-3 共同溝・電力の接合方式



(a) 複線の場合 (b) 単線の場合
図-4 鉄道トンネルの接合方式

2. 自在接合型親子シールド機の概要

2-1. 開発の背景

各分野の需要として、管芯接合式に代わる下記に示す形状のトンネルの接合形式が要求されている。

図-2には下水道の例を示す。(a)図の管芯接合式では水面位置が小断面側の位置で制約され、大断面側の断面が有効に使用できない。また、大断面側の水面位置が上がり過ぎた場合は小断面側へ逆流するなどの問題があった。それに代わり(b)図に示す大断面側の頂部で小断面側が接合する管頂接合式とし、水面位置が同一レベルでの接合が可能なトンネルが求められている。

図-3には共同溝、電力の例を示す。トンネル内に仕切りを設けた大断面側に小断面トンネルを分岐の必要位置に接合が可能なトンネルが求められている。

図-4には駅部分と鉄道トンネルが接合する例を示す。単線の鉄道トンネルで駅舎を設ける際、大断面側の駅舎スペースを最低必要限度に抑えたい場合に大断面側と偏芯させて小断面側を接合できるトンネルが求められている。

これらのトンネルを1台のシールド機で施工するという課題に応じて、自在接合型親子シールド機は開発された。これにより、大断面トンネルの管頂あるいは管底など自在な位置に小断面トンネルを接合させることが可能となった。

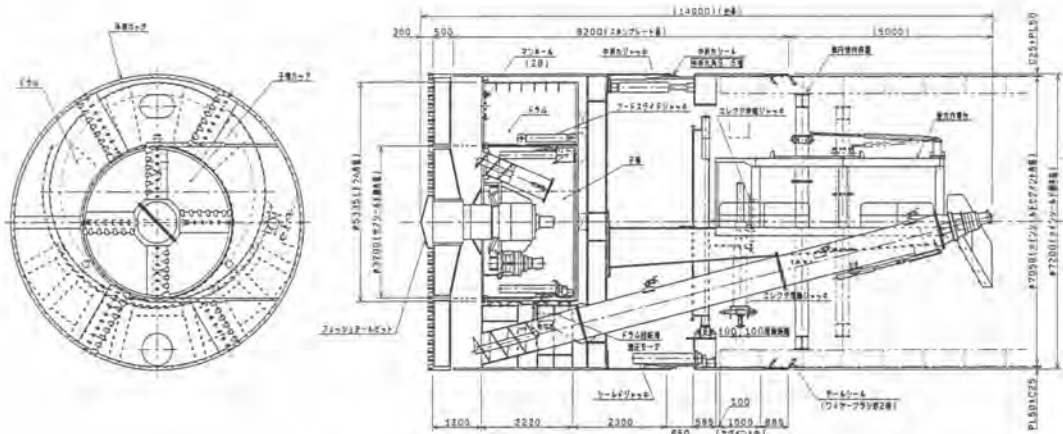


図-5 自在接合型親子シールド機全体図

2-2. 構造

自在接合型親子シールド機の土圧タイプを図-5の全体図に示す。自在接合型親子シールド機は親機の内部に親機の中心と偏芯させた位置に回転可能なドラムを設け、ドラムの中に子機を収納していることを特徴とする。以下に本機の特徴的な要素であるドラムと外周カッタについて説明する。

(1) ドラム

子機を位置を移動させるためにドラムを利用する。ドラムは外部に設置した駆動モータで回転される。ドラムの内部にはドラムの中心と偏芯した位置に子機が収納されていて、ドラムが回転すると子機の位置が親機断面内で移動する。

ドラムの形状は、親機の中心に子機を設置した位置と子機を移動させた後、分岐発進する位置を包括する円形とする。図-6は管頂接合式のドラムの配置および寸法の決め方を示したものである。

子機を移動する手段として直線的にジャッキなどを利用してスライドする方法があるが、隔壁のスライド部を止水するシール機構と親機の端部まで子機を移動させることが構造上難しい。これらの課題を解決する手段としてドラムを採用することで子機の移動が可能となった。

(2) 外周カッタ

土圧式の場合は子機のカッタの外周にU字形の切り欠きを設けた外周カッタをはめ込む形で装備する。図-5の全体図に示すようにカッタはスポークおよび外周リングと内周の子機カッタスライド部支持材により構成される。親機の掘進時には、子機カッタと外周カッタを伸縮可能なピンで接合し前後方向の固定を行い、カッタトルクの伝達はキー構造で伝達する。

泥水式の場合はカッタ部に面板が必要になり、U字形の溝が設けられないため、図-7に示すように、外周カッタ部をドラムと同じ形状および位置で切り離し、子機カッタを含めて3重構造とし、それぞれを回転自在の構造とする。それぞれのカッタの固定方法は土圧式と同様とする。

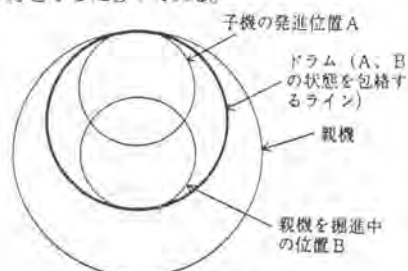


図-6 ドラムの形状

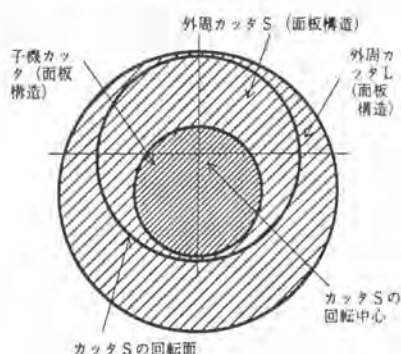


図-7 泥水式シールドのカッタ構造

2-3 子機の移動および分岐手順

管頂接合で土圧式の場合における、子機の発進位置に移動するまでの外周カッタと子機カッタおよびドラムの位置関係を図-8に示す。

- ① 外周カッタのU字形切り欠き部が横に寝かせた位置でカッタを停止させる。
- ② 子機カッタと外周カッタの接合ピンを解除し、ドラムを回転させる。
- ③ ドラムの回転に伴い子機は中央から端部に移動する。子機の移動に伴い外周カッタも回転する。
- ④ 子機が親機の頂部に達した時点でドラムの回転を停止する。このときの外周カッタのU字形切り欠き部は上向きになり、ドラムの回転が180度回転する間に、カッタは90度回転することになる。
- ⑤ ドラムと子機の固定を解除し、子機を発進させ、後方のスペースを確保したうえでテール部などの後方部分を設置する。

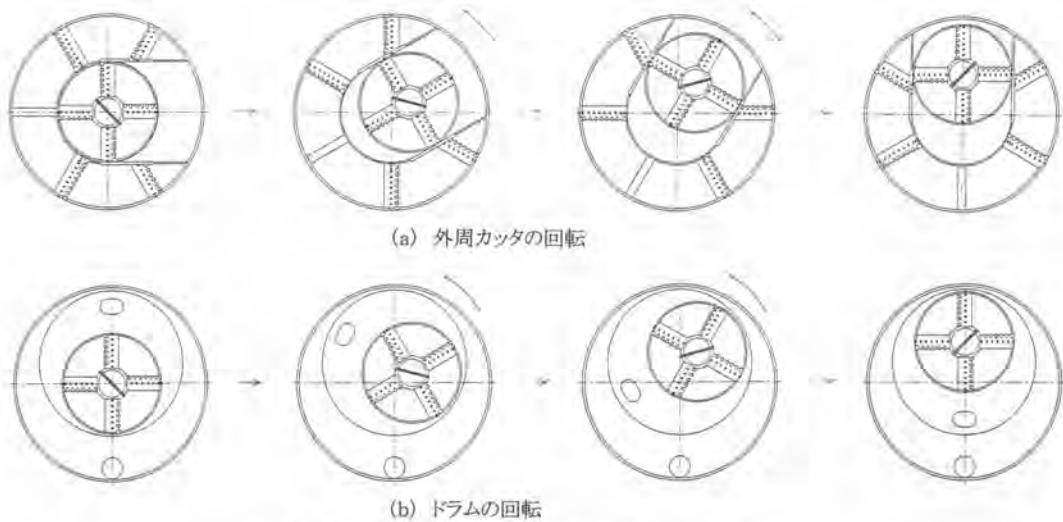


図-8 外周カッタ回転とドラム回転の位置関係

2-4 適用範囲

親子シールド機の適用範囲は、子機の装備カッタトルクと親機の必要カッタトルクの関係で決定される。ここでは、子機に装備可能な最大カッタトルクを設定し、親機の機種別に一般的な必要トルクから、上限の親子外径比率(親機外径/子機外径)を機種別に算出するからで適用範囲を示した。検討条件として、子機の装備可能な最大カッタトルク係数は $\alpha=4.0$ とした。これは、一般的なシールドとしては高い装備トルクであり、カッタ駆動モータに特殊な高トルク出力モータを装備し可能となる。また、機種別の必要カッタトルク係数は下記とした。

- ① オープンメカニカルシールド $\alpha=0.5$
- ② 泥水シールド(砂礫以外の地盤) $\alpha=1.0$
- ③ 砂礫対応泥水シールド $\alpha=1.4$
- ④ 土圧シールド(砂礫以外の地盤) $\alpha=1.4$

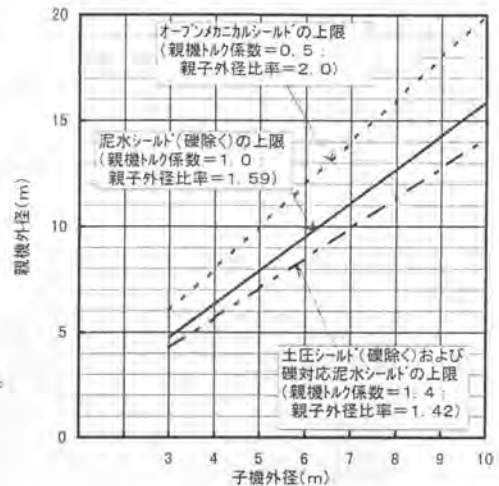


図-9 自在接合型親子シールド機の適用範囲

適用範囲の検討結果を図-9に示す。

この結果は、適用範囲の目安であり、詳細についてはドラムと排土装置の取り合いなど機内のスペースを条件にあった形で検討する必要がある。特に小中口径の土圧シールドの場合、親機のスクリーコンベアをドラム外に設けることが困難であるため、子機のスクリーコンベアと兼用する方法など検討が必要となる。

土圧シールドの砂礫地盤対応では、親機に必要なカッタトルクが $\alpha=2.0$ 以上必要となり、親子外径比率が1.26倍以下となる。この場合、ドラムを装備して子機を移動するメリットがなく、構造上でも成立しないため適用外とした。また、子機の外径3mクラス以下は子機への高カッタトルク装備の面でも対応が難しく適用外としたが、工事の条件ごとに検討し適用を決定する。

3. 子機位置移動実証実験

3-1 実験の目的

実証実験の目的は、自在接合型親子シールド機の子機移動機構について、子機カッタに外周カッタがはめ合った状態でドラムの回転にともない、子機の位置を親機の任意位置に移動できるか確認することである。

この機構を検討するなかで、ドラムの回転力のみで外周カッタを回転させることは、回転開始時において外周カッタに回転力が有効に伝わらず難しいことが判明した。この対策として、子機のカッタの回転を利用して外周カッタを回転させることにした。また、この時のドラムの回転速度と外周カッタの回転速度の比率が2:1であることに着目し、お互いの回転速度を制御することにより子機の移動をスムーズに行うことを検討した。これらの機構および制御方法が意図どおり機能し、子機の移動が実際に行えることを確認するため、図-5に示す計画機を1/6に縮小した実験機を製作した。

3-2 実験機の概要

実験機の写真を写真-1に示す。実験機の全体図を図-10に、仕様を表-2に示す。外周カッタは子機がスライドするU字形切欠き部を設けたうえで5本のスポーク構造とし、外周部はフード部スキンプレート内でガイドし、外周カッタの位置が軸方向および径方向にずれない構造とする。子機カッタは4本のスポーク構造とした。U字切欠きを右横にした場合、左側を伸縮スポークとし外周カッタ内側に設けられたガイド部を摺動する。上下のスポークは親機掘進時に外周カッタと連結する油圧ジャッキによる可動ピン内蔵とする。右側のスポークは固定スポークである。

子機の本体は移動を確認するための実験機であることから、ドラムに固定した。子機本体はカッタと一体のセンターシャフトを支持する。センターシャフトの後端にはカッタ回転モータを連結する。

ドラムは親機内部で回転可能な形で支持される。ドラム回転モータは縮小実験機のため機内に設けるスペースがなく、親機の上部に設置し、ローラーチェーンにより横引きして回転できる構造とする。

ドラムおよびカッタの回転モータはインバータモータを採用し、各々の回転角度をロータリーエンコーダで検出し、その信号により2:1の回転角の位置関係を確保しながら、お互いの角度差を必要以上に発生させない形で速度制御する。また、子機の移動に伴う一連の作動は自動運転で行う。

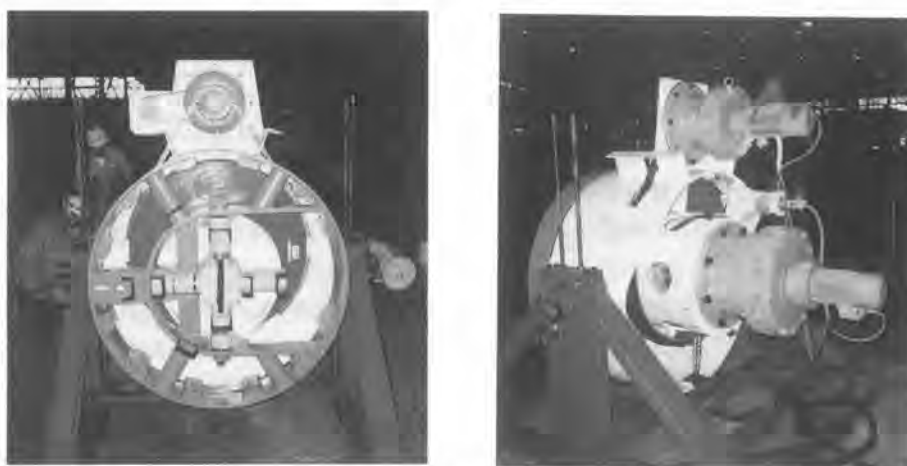
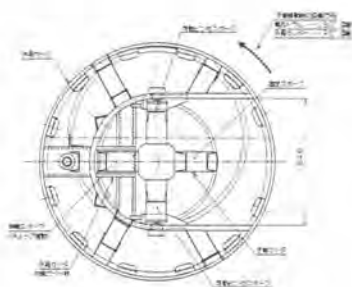
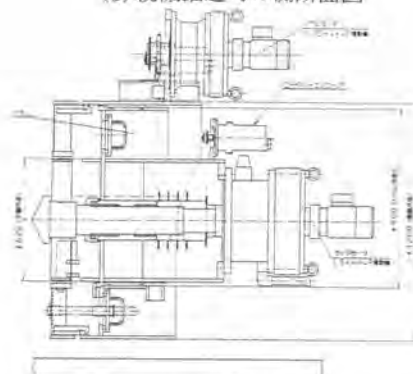


写真-1 縮小実験機

(a) 親機掘進時のカッタ状態



(b) 親機掘進時の側断面図



(c) 子機移動後のカッタ状態



表-2 実験機の仕様

親機外径	φ 1200 mm	
子機外径	φ 620 mm	
接合方式	管頂接合式	
ドラム外径	φ 900 mm	
子機移動量	240 mm	
カッタ モータ	容量	1.5kw×4P(インバータモータ)
	トルク	1450 kgf-m
ドラム モータ	容量	0.75kw×4P(インバータモータ)
	トルク	415 kgf-m
ドラム駆動トルク	2100 kgf-m	

図-10 実証実験機の全体図

3-3 実験の結果

外周カッタをドラムより先行させて回転させて、子機カッタと外周カッタの摺動部における隙間を確保できない状況では、外周カッタ内側ガイド部と子機伸縮スポークの摺動部および外周カッタ外側のガイド部に大きな荷重(クサビ現象による荷重)が作用し、移動が停止する現象が発生した。実験では試行錯誤を繰り返し、スムーズに子機が移動できるカッタの先行角度を探究し、移動開始前にカッタの先行角度を設定することにより、スムーズな移動動作を検証することができた。このような試行錯誤できたのは、先に述べた制御システムを採用していたことによるもので、実機でもこの制御システムが必要であるといえる。

この実験結果より、実験機で採用した機構および制御システムが実機でも採用できることを確認した。ただし実機での子機移動は土砂の中での作動になるため、実機への採用にあたり、さらに土砂対策を検討しているところである。

4. おわりに

ここへきて、特に発注者の間では公共工事のコスト削減対策が検討されている。それを受けて業界では様々な施工方法の開発がされているわけだが、自在接合型親子シールド機もその一役を担う工法として、実用化を目指して、さらに技術を磨いていく所存である。この結果を実機で試し、効果が示されることを期待する。その意味で、この本文を読んで頂いて、この工法に興味を持たれた方々から採用についての検討の声がかかれば幸いである。最後に、この開発に協力していただいた関係者の方々に謝意を表する。