

矩形断面シールド工法の開発（その2） （スイングドラム型矩形断面シールド機の実機設計）

The Development of Rectangular Shield Method -Part 2-
(The Design of Swing-Drum Rectangular Shield Machine)

坪井 広美*
Hiromi Tsuboi

大橋 健司**
Kenji Ohashi

三戸 憲二***
Kenji Mito

椋木 淳二****
Junji Mukugi

要 約

スイングドラム型矩形断面（SDR）シールド工法は、小径のドラムカッタを上下にスイングさせて矩形断面を掘削し、矩形の覆工構造を築造するものである。

本報は、SDR シールドの工法概要、本工法の最も大きな特徴であるスイングアームによる掘削機構の開発要素実験、さらに実機設計にあたっての、姿勢制御・曲線施工機構、スイングドラムカッタ、エレクトラ装置、および切羽保持等の研究報告である。そして、これらの研究結果から、電力・ガスあるいは共同溝などの洞道の築造を目的としたシールド外寸法幅2.67m×高さ3.17mの実証機を完成させた。

目 次

- §1. はじめに
- §2. SDR シールドの工法概要
- §3. スイングアーム要素実験
- §4. SDR シールドの実機設計
- §5. おわりに

§1. はじめに

近年、都市機能の高度化に伴い、地上部はもちろん地下部においても構造物が輻輳しているのが現状であり、地下空間の有効利用がさまざまな形態で推し進められている。このようななかで、地下空間建設工法の一翼を担うシールド工法においても、構造物に応じた必要最小限の断面を掘削する技術への要求は大きく、特殊断面シールド工法の開発が急務とされてきている。また、その二次的効果としての建設残土発生量抑制の観点からも、開

発へのニーズは大きくなってきている。

このようなニーズに対して、1989年に矩形断面シールド工法の開発に着手した。開発経緯を Fig. 1 に示す。開発の方法は、施工機械およびセグメントからのアプローチがあるが、今回は施工機械からのアプローチの報告とし、セグメントに関しては次報に報告する。

開発した矩形断面シールドは、掘削対象断面積の大きさにより2種に分けられる。開発した2種の矩形シールドの主な相違点を Table 1 に示す。DR(Drum Rectangular)シールドについては、前報 vol.15で報告済みであるので、本報では SDR シールドについて、その工法概要・スイングアーム要素実験・実機設計について報告する。

§2. SDR シールドの工法概要

完成した実機を Photo 1 に示す。

2-1 掘削方法

SDR シールドの掘削方法は、Fig. 2 に示すように、ドラムカッタの回転および、揺動（スイング）により矩形断面を掘削するものである。掘削された土砂は、本体

*技術研究所土木技術課

**機材部機械課

***土木設計部設計課係長

****機材部機械課副課長

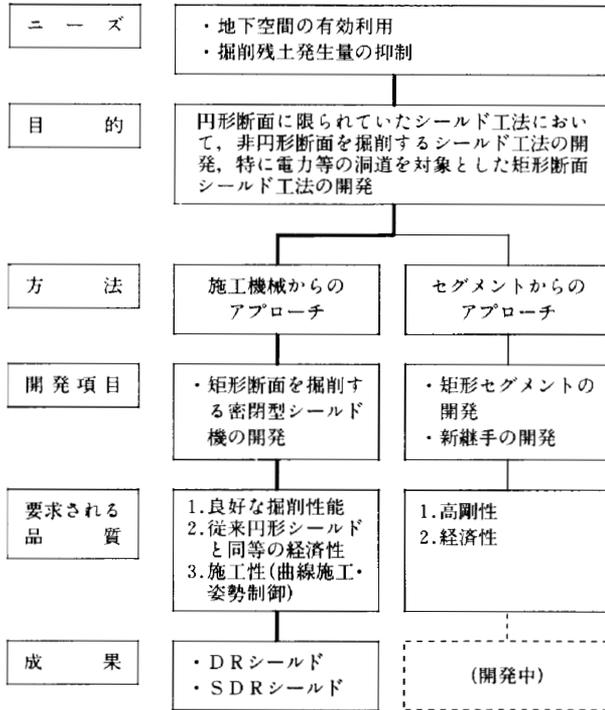
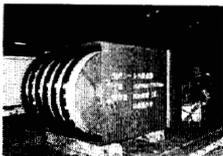


Fig.1 矩形シールド工法開発経緯

Table 1 矩形シールドの相違点

	DRシールド	SDRシールド
		
掘削機構	単軸固定のドラムカッタ	小径のドラムカッタを上下にスイング
切羽安定機構	泥水式	泥土圧式
適応構造物	<ul style="list-style-type: none"> ● 洞道 ● 地中梁 等 	<ul style="list-style-type: none"> ● 洞道, 共同溝 ● 地下鉄 ● 道路トンネル 等
一基での最大掘削断面積	10 m ²	50 m ²
一次覆工	● ボックスカルパート	● ボックスカルパート ● セグメント

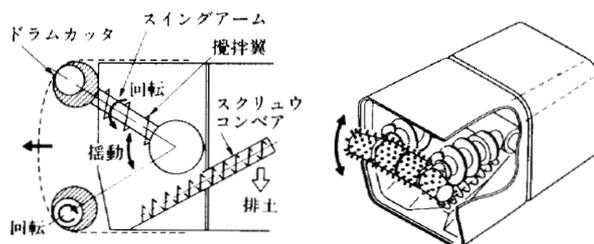


Fig.2 SDRシールド掘削概念

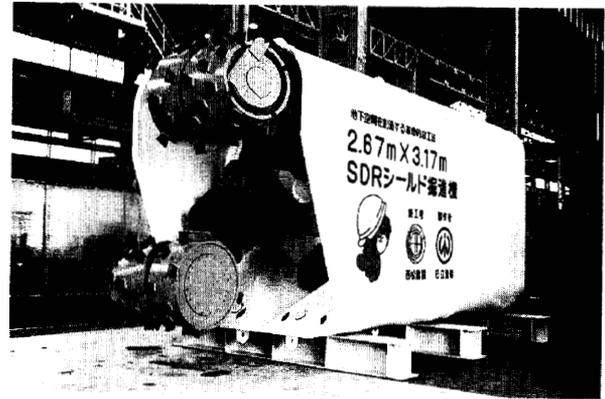


Photo 1 SDRシールド機

フードと隔壁で構成されるチャンバ内に充填され、所定の土圧をかけることにより切羽を保持しながら、下部のスクリュウコンベアにより排土される。また、チャンバ内での土砂の混練および排土を促進するために、ドラムカッタを支持するスイングアームには、スクリュウ状の攪拌羽根を取り付けている。また、ドラムカッタは中央にて左右に分かれ、2本のスイングアームにより独立し、別々に駆動させることもできる構造となっている。

ドラムカッタには、その軸受け部が未切削になるという欠点があったが、本機ではドラムカッタとスイングアームの取付部をスキューにし、かつ、カッタ端部をコーン状（コーンカッタと呼ぶ）にすることにより、未切削部をなくすと同時に、断面上下部を直線に掘削することができ、所定の矩形断面を掘削可能な構造となっている。また、コーンカッタのサイドにはコピーカッタを装備し、左右方向の余掘りが可能な構造とし、上下方向についてもスイング角度を大きくすることにより、余掘りが可能となっている。

そして、ドラムカッタの幅とスイングアームの長さ、およびスイング角度を変えることにより、使用目的に合わせた大きさ・形状の様々な矩形断面を掘削することができる。

2-2 姿勢制御・曲線施工

(1) ローリング制御

矩形シールドは、円形に対してローリングの許容が厳しいという欠点がある。つまり、Fig. 3 に示すように円形シールドでは、ローリングによる組立セグメントのクリアランスに変化は生じないが、矩形シールドでは、コーナー部でのクリアランス確保が難しくなる場合が生じる。

SDRシールドではローリングに対して以下の制御方法が可能である (Fig. 4)。

①左右のドラムカッタを交互にスイングさせることに

より、掘削反力として、トンネル軸に対する回転力を発生させる。

②トンネル軸に対称なコーナー部の余掘りと、地山反力により、回転力を発生させる。

③偏向ジャッキの操作により、回転力を発生させる。

(2) ピッチング・ヨーイング制御、曲線施工

SDRシールドは、掘削機構であるドラムカッタおよびスイングアームにより、重心が比較的切羽方向に位置するが、全方向に余掘り可能な構造であることと、中折れ構造を採用することにより、円形シールドと同様な姿勢制御および曲線施工が可能となる。

§ 3. スイングアーム要素実験

3-1 目的および実験方法

(1) 目的

スイングアームの揺動は、地山の土水圧に対抗する掘削土砂が充満したチャンバ内で行われるため、揺動に伴いアームに大きな負荷が加わることが予想される。また、スイングアームはドラムカッタの支持および駆動力を伝達するため、部材断面は制約を受け、小断面化することによる負荷の低減はできない。そこで、以下の目的でスイングアーム部の要素実験を行った。

①スイング負荷の小さい形状の開発

②スイングアームの揺動によるチャンバ内土圧の変動が小さい形状の開発

③土砂の排土を促進する形状の開発

④スイング負荷特性の把握

(2) 実験装置および実験方法

実験装置を Fig. 5 に示す。実験装置は実機の約 1/6 スケールで、スイングアーム等は実機と同じ構造とした。また、実験装置は土砂の搬入の関係から、シールドを立てた状態の装置とし、シールドの掘進の再現は、載荷盤を加圧し土砂を流動させることにより行う。

実験土砂は、砂・粘土・水を配合し、掘削後チャンバ内に取り込まれ塑性流動化した土砂を再現した。

また、スイングアームの形状は、Fig. 6 に示す 3 種類を考案し、実験結果を比較検討することにより、この中から最適な形状を選定する。

A型：丸棒……………攪拌翼を持たないもので投影断面積が最も小さい。

B型：パドル型……………攪拌翼として、パドル状の突起物を取り付けたもので、最も良好な土砂の攪拌効果を期待する。

C型：スクリュウ型……………攪拌翼がスクリュウ型で、土砂攪拌とともにスクリュウコンベアへの排土促進効果も期待する。

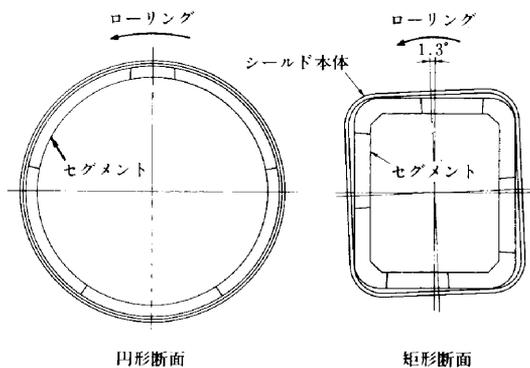


Fig.3 シールド本体のローリング

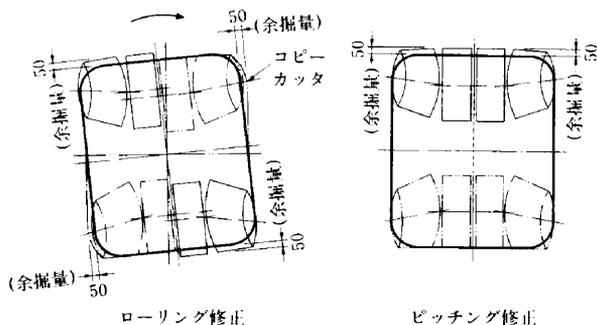


Fig.4 SDRシールドの姿勢制御

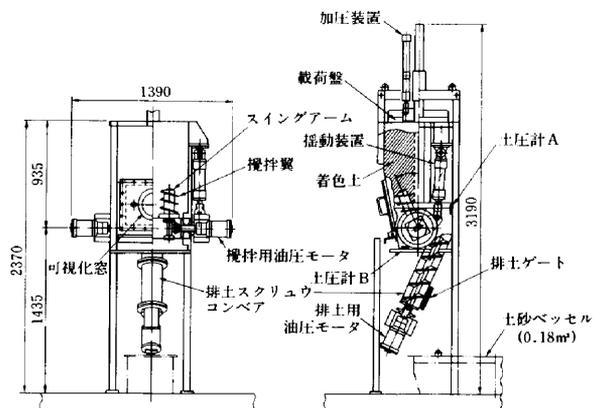


Fig.5 実験装置

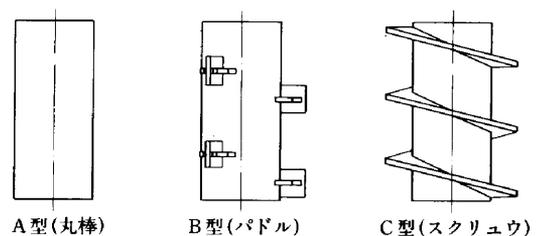


Fig.6 スイングアームの形状

実験フローを Fig. 7 に示す。実験はスクリュウゲートを閉じた状態で実験を行う無排土実験と、ゲートを開けて掘進（載荷盤）速度を40mm/minとした排土実験に分けられる。無排土実験の目的は、最も負荷が大きくなる条件で、それぞれのスイングアームのトルクを把握するために行う。一方、排土実験では、実験条件として、スイング速度および攪拌翼回転数を変化させた3条件で実験を行い、運転条件の違いによる負荷特性を把握する。

計測は、スイングトルク、攪拌トルクの機械的負荷および、チャンバ内土圧、排土量の測定を行った。計測項目を Table 2 に示す。さらに、土砂の流れを観察するために、着色土を実機の上半に相当する部分に配置し、その排土状況の観察を行った。

3-2 実験結果および考察

(1) スイングトルクの変動

Fig. 8 は、A、B、C型それぞれについて、無排土実験でのスイングトルクの変動を示したものである。スイングトルクは、攪拌翼を持たないA型が最も大きく、スクリュウ状の攪拌翼を持つC型が最も小さい。また、どの型でも、スイングアームがチャンバ壁面に近づくにつれて土砂が圧密されることから負荷が大きくなっている。しかし、B、C型はこの割合が小さく、攪拌翼により、土砂が十分に攪拌されていると考えられる。

(2) チャンバ内土圧の変動

Fig. 9 は排土実験において、チャンバ壁面の土圧計(A)の変動値($A_{max} - A_{min}$)をチャンバ底部の土圧計(B)の平均値(B_{mean})で正規化して示したものである。A型の変動は、回転の有無に関わらず0.8以上であるが、B型、C型については、攪拌翼を回転させることにより、変動が0.1以下となり、無回転の場合の1/5以下にすることができ、攪拌翼の効果を確認することができる。

また、今回の実験条件では、スイング速度を変化させても、土圧の変動にはあまり相違がないことがわかる。

Table 2 計測項目

測定項目		検出器
スイングアーム	スイングトルク	圧力変換器
	スイング速度	ポテンシオメータ
	スイングストローク	ポテンシオメータ
攪拌翼	回転数	近接センサ
	トルク	圧力変換器
排土	排土スクリュウ回転数	近接センサ
	排土量	ロードセル
載荷盤	載荷圧力	ロードセル
	ジャッキ速度	ポテンシオメータ
	ジャッキストローク	ポテンシオメータ
チャンバ	チャンバ内土圧	土圧計

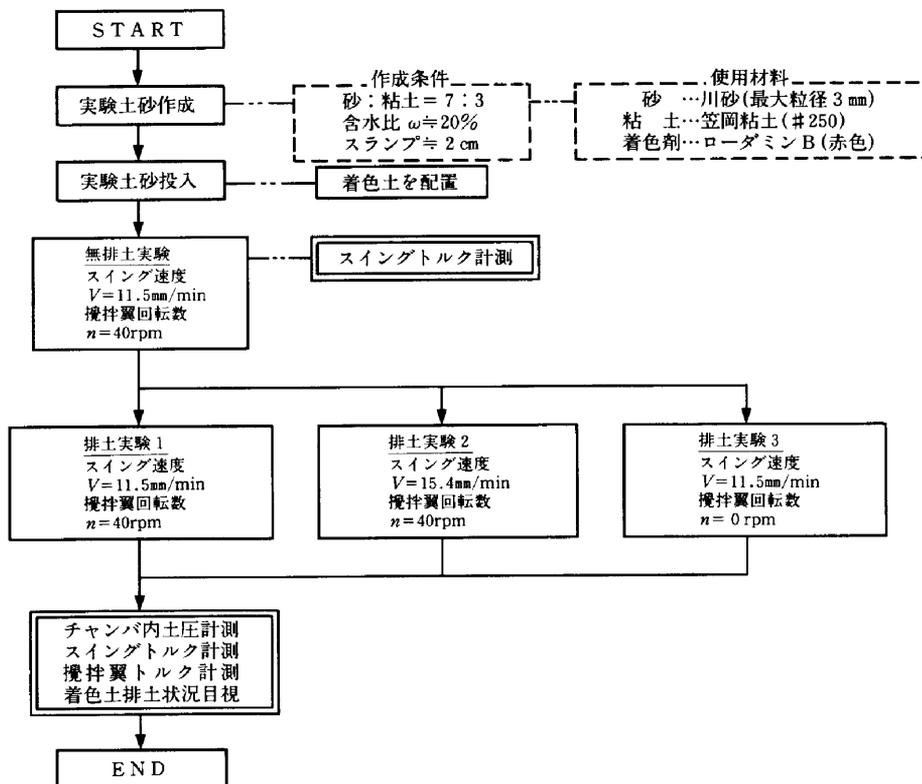


Fig.7 実験フロー

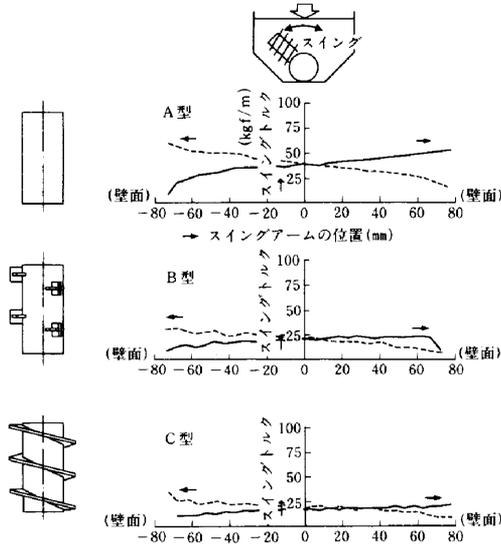


Fig.8 スイングトルクの変動(無排土実験)

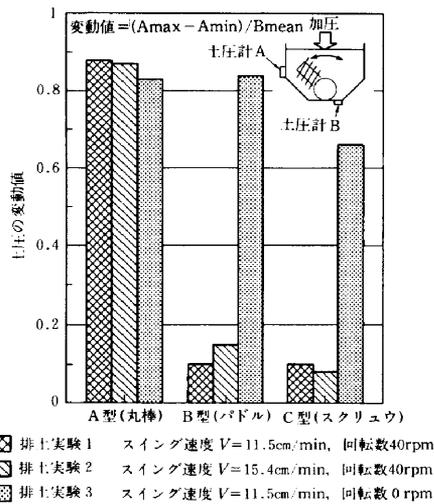


Fig.9 チャンバ内土圧の変動(排土実験)

(3) 考察

以上の結果から、スイングアームに攪拌翼を装備することは、スイングトルクおよびチャンバ内土圧の変動の低減に対して有効であることがわかった。さらに、その攪拌翼の形状は、スイングトルク、土圧の変動が最も小さく、着色土の排土状況から最も排土促進効果のあるC型(スクリュウ)を採用することとした。

さらに、スイング速度を変化させても、スイングトルクはほとんど変化しないことから、スイング抵抗は投影面積に比例すると考えられ、投影面積当りのトルク値(ω)を算出し、実機設計の基礎データとした。

§4. SDRシールドの実機設計

4-1 設計条件

(1) 土質条件

Table 3 土質条件

土質	砂質土
土被り	10.0 m
地下水位	GL-4.0 m
土の単位体積重量(γ)	1.8 tf/m ³
土の水中単位体積重量(γ')	0.8 tf/m ³
内部摩擦角(ϕ)	30°
粘着力(c)	0 tf/m ²
N値	10~20
側方土圧係数(λ)	0.333
地盤反力係数(k)	2.0 kgf/cm ²
最大礫径	100 mm
上載荷重	1.0 tf/m ²

Table 4 施工条件

工事延長	300 m	
最曲率半径(r)	100 m	
勾配(i)	0% (レベル)	
セグメント	種類	RCセグメント
	外形寸法	幅2500 mm × 高さ3000 mm
	桁高	250 mm
	幅	1000 mm
	分割数	8分割
最大重量	860 kgf/1ピース	

土質条件を Table 3 に示す。また、シールド本体に作用する荷重は全土被り土圧とし、砂質土であることから、土と水を分離して考えた。

(2) 施工条件

施工条件を Table 4 に示す。

4-2 主寸法および推進力

(1) 主寸法

SDRシールド全体構造図を Fig. 10 に示す。

内空寸法は、電力洞道でのニーズが高いRCセグメント内寸法幅2.0 m × 高さ2.5 m とした。また、RCセグメントの桁高250 mm、テールスキンプレート厚60 mm、テールクリアランス25 mmとして、シールド外寸法を幅2.67 m × 高さ3.17 m とした。

機長は、セグメント幅1000 mm、楔型Kセグメントを採用(シールドジャッキの引き代=500 mm)しているため、6150 mmとなった。また、曲線施工($R=100$ m)に対応するために上下ピンタイプの中折れ構造(中折れ角度1.3°)を採用している。

(2) 推力

所要推力は、シールド本体の摩擦や前面の抵抗等の総

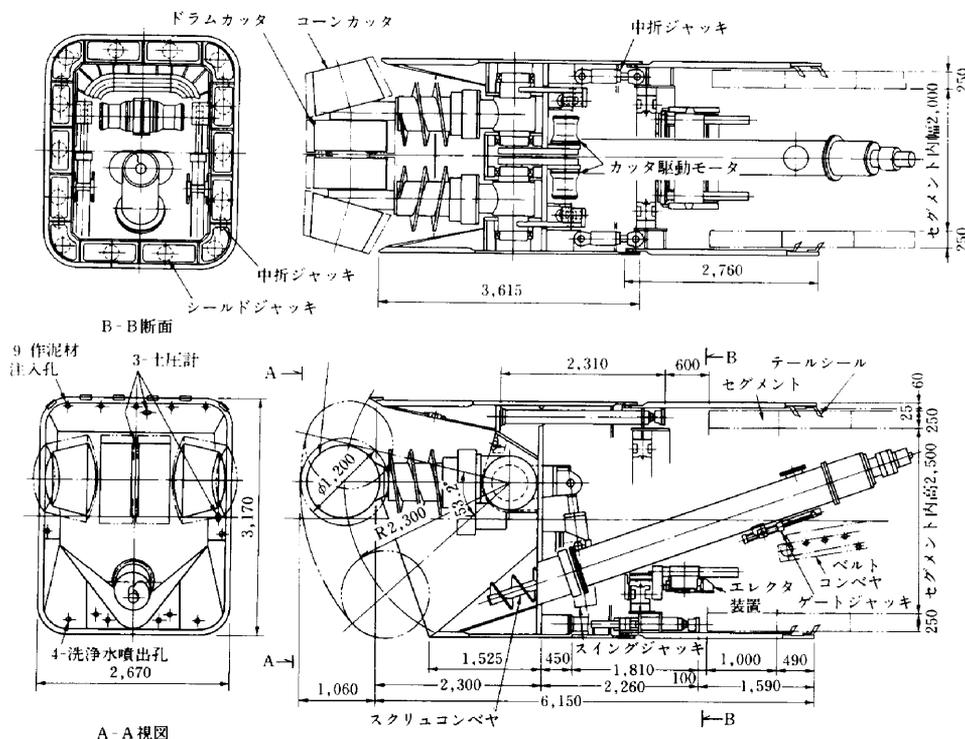


Fig.10 SDRシールド全体構造図

和と余裕率との積で求められる。装備するシールドジャッキは、80tf ジャッキをセグメントの分割を考慮して14本とし、総推力は1120tf (11.0MN) となり、単位面積当り推力は132tf/m² (1.29MPa) となる。

(3) スキンプレート

設計条件から、スキンプレートの強度解析を行い、テール板厚60mm、テールシール取付板を32mmとした。また、偏向荷重を作用させてテールクリアランスとのチェックも行った。

強度解析結果を Fig. 11 に示す。

4-3 スイングドラムカッタ

(1) ドラムカッタおよびビット

スイングドラムカッタの構造図を Fig. 12 に示す。ドラムカッタの外径は、掘削断面、掘進速度、スイング速度との関係から、ビット先端でφ1200mmとする。

ビットの配置は、土砂付着の低減を考慮して4条とし、スパイラル状に設置する。ビット高さは、切込み量の3倍の100mmとした (切込み量を実績から約30mmとした)。カッタの回転数は、Fig. 13 に示す切込み量と回転数との関係から、15rpmとした。

(2) コピーカッタ

曲線施工や姿勢制御を容易にするために左右の余掘りができるようにコーンカッタにコピーカッタを装備している。このコピーカッタは、油圧ジャッキの先端に超硬ビットを取り付けた一体構造とし、左右の余掘りは最大50

mmまで可能である。

(3) スイングアーム

スイングアームには、要素実験の結果をもとに、スクリュウ型の攪拌翼を取り付け、スイングトルクの低減・土砂の混練を促進する。また、駆動装置のスイングジャッキは、バルクヘッド (隔壁) の大気圧側に設け、その能力は要素実験で得られた投影面積当りトルク値(ω)から決定した。

4-4 エレクタ装置

(1) 構造

エレクタ装置の構造図を Fig. 14 に示す。

矩形シールドのエレクタは、その断面形状が正方形の場合においては、円形シールドで用いられている従来のリングギヤ旋回式を採用することができる。しかし、今回のように長方形断面の場合、円形のリングギヤ旋回式では、コーナー部のピースを所定の位置へ組み立てることができない。そのため、全く新しい機構のエレクタの開発が必要となった。

開発したエレクタは、ガイドレール上を自走するもので、あらゆる断面形状に適用できる構造となっている。ガイドレール上の走行 (旋回) は、2台の油圧モータで行い、エレクタ本体は、このモータに牽引される構造となっている。本体前後スライド量は、楔型 K セグメントの引き代500mmを考慮して550mmとし、コーナー部のセグメントのための左右スライド量は±300mmとした。ま

項目	長期荷重				短期荷重				
設計荷重	○全土被り：H ○上載荷重：P ₀ 				上部・偏向荷重				
	○全土被り て検討 				側部・偏向荷重				
スキンプレート強度	○最大撓み量： δmax ○最大応力： σmax 								
	一端固定のFEM解析 δmax = 12.5mm (テール端180°) σmax = 圧縮1714kgf/cm² 引張1522kgf/cm² (テール板, コーナ部)				δmax = 26.0mm (テール端90°) σmax = 圧縮2762kgf/cm² (テール板, コーナ部) 引張2474kgf/cm² (テール板, コーナ部)				
許容応力 (kgf/cm²)	材 料	引張応力	圧縮応力	せん断応力	材 料	引張応力	圧縮応力	せん断応力	同 左
	SM490A	1900	1900	1100	SM490A	2850	2850	1650	

Fig. 11 強度解析結果

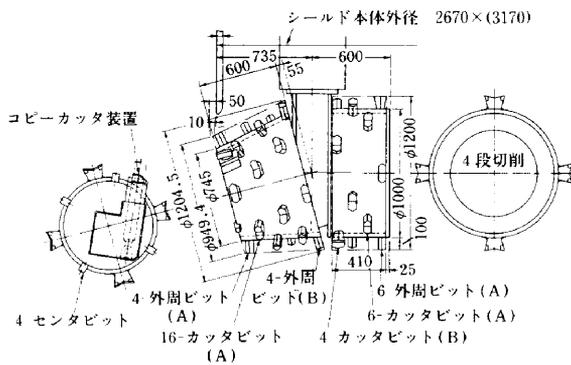


Fig.12 スイングドラムカッタ構造図

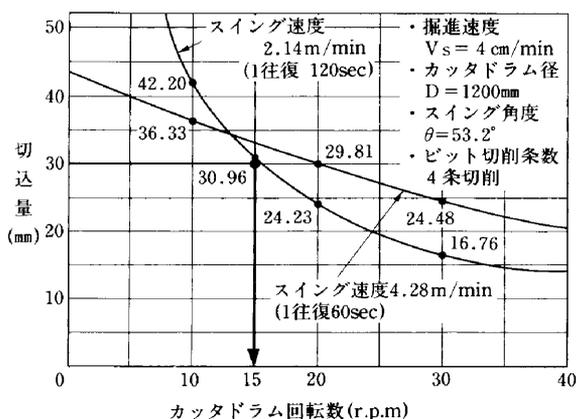


Fig.13 切込み量と回転数の関係

た、本体伸縮ストロークは、セグメントの桁高250mmに余裕145mmを加えて395mmとし、セグメントの傾きの微調整を行えるように、サポートジャッキを装備した。

(2) セグメント組立

矩形シールドでは、円形シールドに比べ、セグメントピースの形状・大きさが著しく異なる。つまり、フラットなピースとコーナー部のL型のピースがある。本断面では、これらのセグメントのハンドリング、およびエレクトラ本体とスクリュウコンベアとの取り付けから伸縮ストロークに制約を受け、Fig. 15 に示すような組立順序となる。

4-5 切羽保持

(1) 土圧管理

SDR シールドは、その掘削機構からチャンバが大きく、そこに充填させる掘削泥土量も多い。そのため、土圧管理のための土圧計は、バルクヘッド、チャンバ上部および側部の計3カ所に設置している。

(2) 作泥土材注入孔および先浄水噴出孔

泥土圧シールドでは、掘削土に作泥土材を添加・混練することにより、チャンバ内に止水性のある塑性流動化した泥土を作り、それを加圧することにより切羽の安定を図っている。SDR シールドにおいても同様であるが、そ

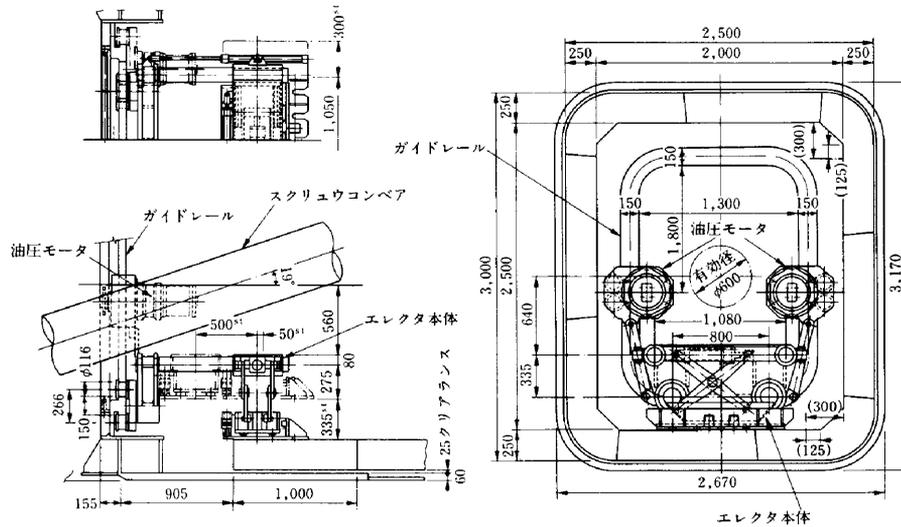


Fig.14 エレクタ装置構造図

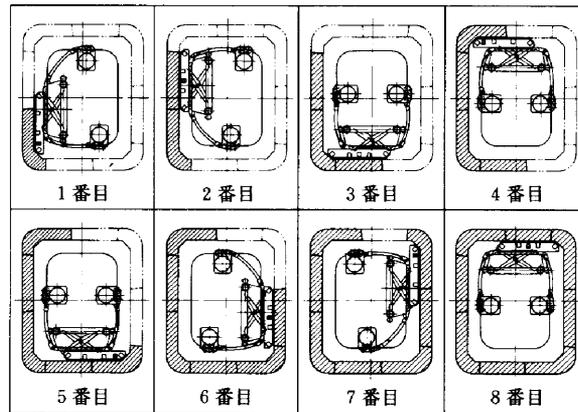


Fig.15 セグメント組立順序

のチャンバが円形に較べ大きいために、効率よく掘削土を改質することが重要となる。円形シールドでは、カッタスポークに作泥土材注入孔があり、切羽において直ちに混入される。これに対し、今回の断面では、ドラムカッタに注入用の配管が不可能なため、フード先端部から注入することとなる。しかし、注入孔を上部5カ所、左右各1カ所、下部2カ所の計9カ所設置するとともに、ドラムカッタの回転、攪拌翼により、掘削土を充分改質できる構造となっている。

また、粘性土等によるカッタへの土砂付着に対しては、チャンバ下部に4カ所設置した噴出管により、高圧水洗浄が可能な構造となっている。

§5. おわりに

開発した矩形シールド工法は、構造物に応じた必要最小限の断面を掘削する工法として、技術開発の著しいシールド工法における新しい方向性を持つものであると考えている。

本開発の施工機械からのアプローチは、平成5年度に予定されている実証施工を行うことにより終了し、以後はセグメントからのアプローチとして、より経済的な矩形セグメントの開発を推進する予定である。次報ではこれら SDR シールド実証施工と、セグメントからのアプローチに対する成果について報告する予定である。

なお、SDR シールドに関しては、日立造船と共同開発したものである。

参考文献

- 1) 坪井 他：スイングドラム型矩形断面 (SDR) シールドの開発(その1) -開発経緯と実機設計-, 土木学会第47回年次学術講演会, 第VI部, pp.178-179, 1992.
- 2) 大橋 他：スイングドラム型矩形断面 (SDR) シールドの開発(その2) -スイングアームによる混練・排土効果の確認 実験-, 土木学会第47回年次学術講演会, 第VI部, pp.180-181, 1992.
- 2) 椋木 他：スイングドラム型矩形シールド機の開発, トンネルと地下, vol.23, No.4, pp.53-58, 1992.