

偏心多軸シールド工法

－技術資料－

令和 2 年 8 月

シールド工法技術協会

はじめに

シールド工法技術協会では取り扱っている工法はいずれも多くの実績があり、信頼できる最先端技術及び工法であります。現在の社会的要求である地上や地下施設への影響が少なく地球環境にもやさしい技術として、さまざまな地盤やトンネル形状にも対応できるものであります。

これらの工法による工事におきましては、当該工事の目的や構造物の内容、施工期間や施工条件、施工環境などを十分に考慮した上で、設計および施工方法を検討しなければなりません。

前回の改定では、「下水道用設計積算要領 管路施設（シールド工法）編（社会法人）日本下水道協会（2010 年版）」の改訂を受けて、その改訂内容との整合性を図るとともに、最新技術の知見を反映して各工法の計画、設計および施工に携わる方々が分かりやすくまた活用しやすい内容としました。

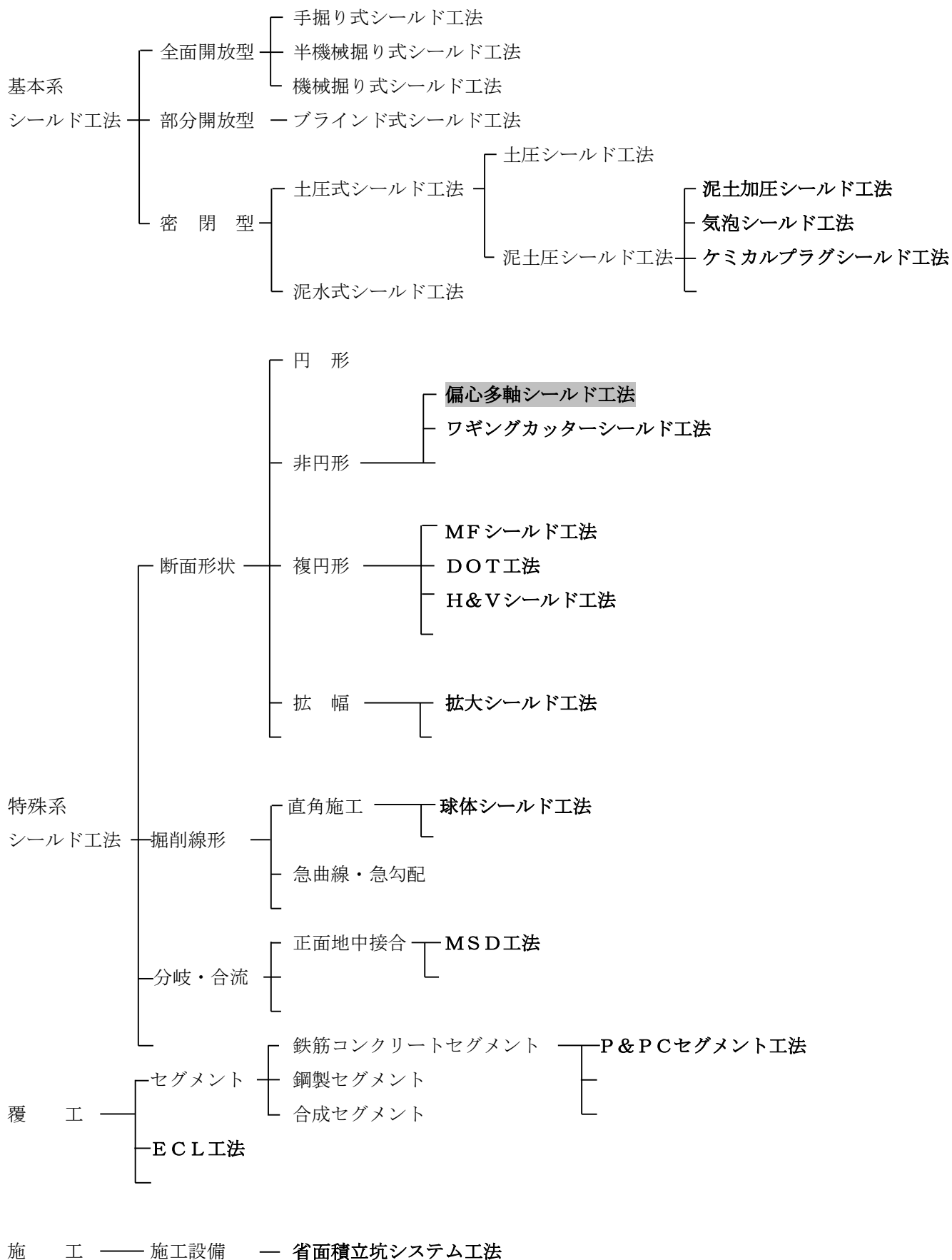
今回の改訂では、協会登録工法の位置付けを更新致しました。（「省面積立坑システム工法」追加）

皆様がシールド工法技術協会に登録しているシールド工法の採用にあたり、適正かつ合理的な計画、設計および施工を行うための資料として本書を大いに活用していただければ幸いに存じます。

令和2年8月

〔偏心多軸シールド工法の位置付け〕

シールド工法における**偏心多軸シールド工法**の位置づけを下記に示す。



1. 概要	1
1. 1 工法の概要	1
1. 2 工法の特長	3
1. 3 工法の適用範囲	4
2. シールド	6
2. 1 シールドの構成	6
2. 2 シールドの寸法	6
2. 3 カッター	7
2. 4 シールドジャッキ	10
2. 5 セグメント組立機構	11
2. 6 その他	13
3. セグメント	21
3. 1 覆工構造および形式の選定	21
3. 2 セグメントの設計	21
4. 二次覆工	23
4. 1 二次覆工の構造	23
4. 2 二次覆工の設計	23
5. 施工および施工管理	25
5. 1 施工計画	25
5. 2 立坑	28
5. 3 発進・到達設備	33
5. 4 掘進	35
5. 5 作泥土材	36
5. 6 セグメントの組立	38
5. 7 曲線施工	39
5. 8 長距離施工	39
5. 9 地中障害物撤去	40
5. 10 裏込め注入工	41
5. 11 発生土処理	41
6. 参考資料	44
6. 1 地中障害物（鋼矢板Ⅲ型）の撤去例	44
6. 2 繊維補強仮壁切削例	45
6. 3 ビット摩耗量の検討例	47

1. 概要

1. 1 工法の概要

偏心多軸（D P L E X）シールドとは、複数の回転軸に設けた平行リンク機構によってカッターを回転させ、カッターの形状とほぼ相似形の断面を得るシールドであり、カッター形状を任意に選定することで円形、矩形、楕円形、馬蹄形など任意な断面を掘削できる工法である。

掘削機構、切羽の安定、工法の特長などは、以下のとおりである。

(1) 掘削機構

この工法の掘削機構の原理は、「蒸気機関車の動輪と連結ロッド」の動きを応用したものである。図-1.1.1に示すように蒸気機関車の2つの動輪はロッドで連結されており、動輪が回転するとロッドは図-1.1.2に示す長円形断面の範囲を動くことになる。

これと同様に、図-1.1.3に示すように4つの回転軸に直角に回転子が固定されており、この回転子の端部には、蒸気機関車のロッドにあたる矩形フレーム状のカッターが設けられている。

この4つの回転軸が同一方向に回転すると、カッターは平行リンク運動を行い、一点鎖線で囲まれた部分を移動する。つまり、矩形のカッターによってカッター形状とほぼ相似形の矩形断面を掘削することができる。(図-1.1.4 参照)

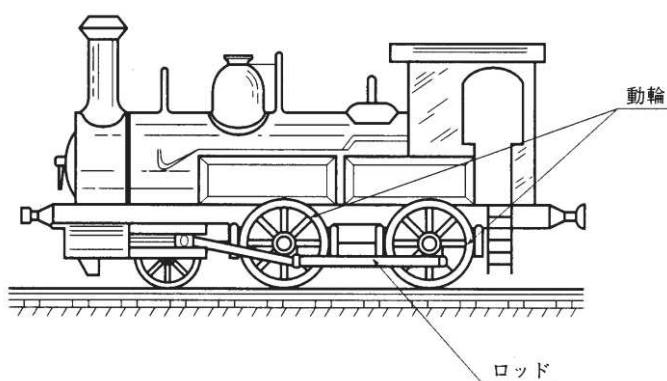


図-1. 1. 1 動輪とロッド図

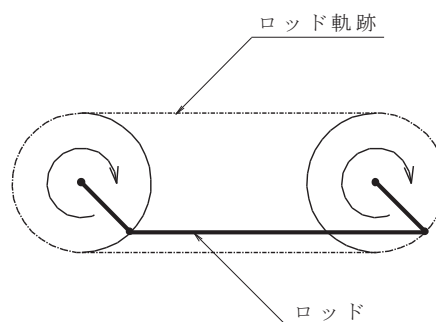


図-1. 1. 2 ロッド軌跡図

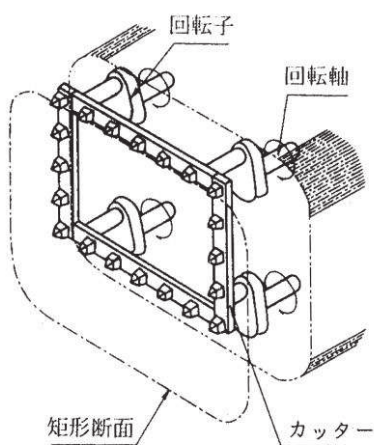


図-1. 1. 3 掘削機構模式図

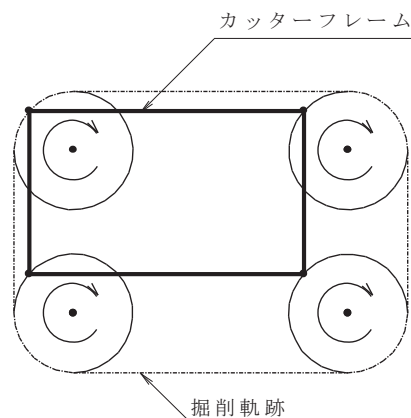


図-1. 1. 4 掘削軌跡図

このような平行リンク掘削機構を用いることで、図-1.1.5～6 に示す円形および矩形断面を回転運動によって掘削することができる。写真-1.1.1 に円形断面シールド、写真-1.1.2 に矩形断面シールドの実機を示す。

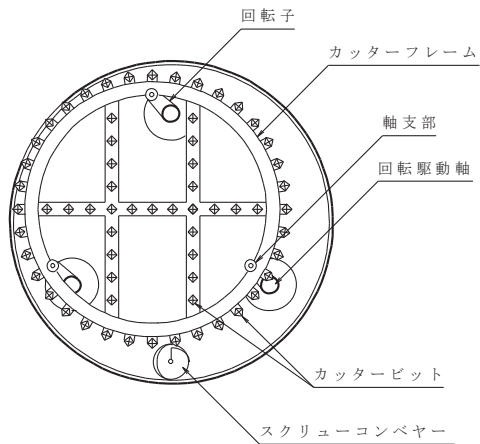


図-1. 1. 5 円形断面参考図



写真-1. 1. 1 円形断面偏心多軸シールド

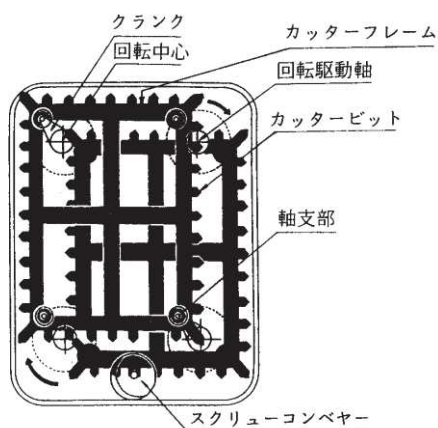


図-1. 1. 6 矩形断面参考図

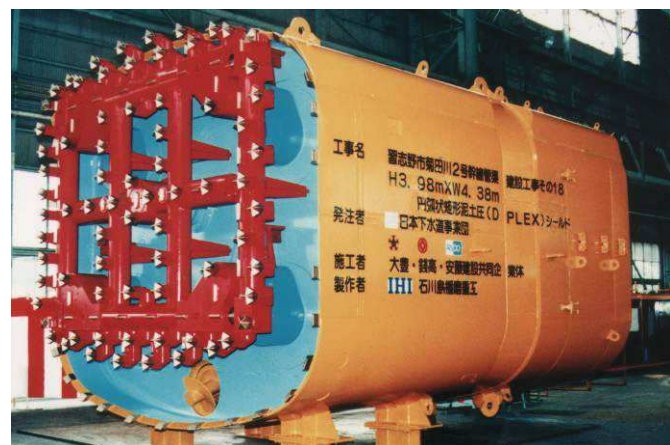
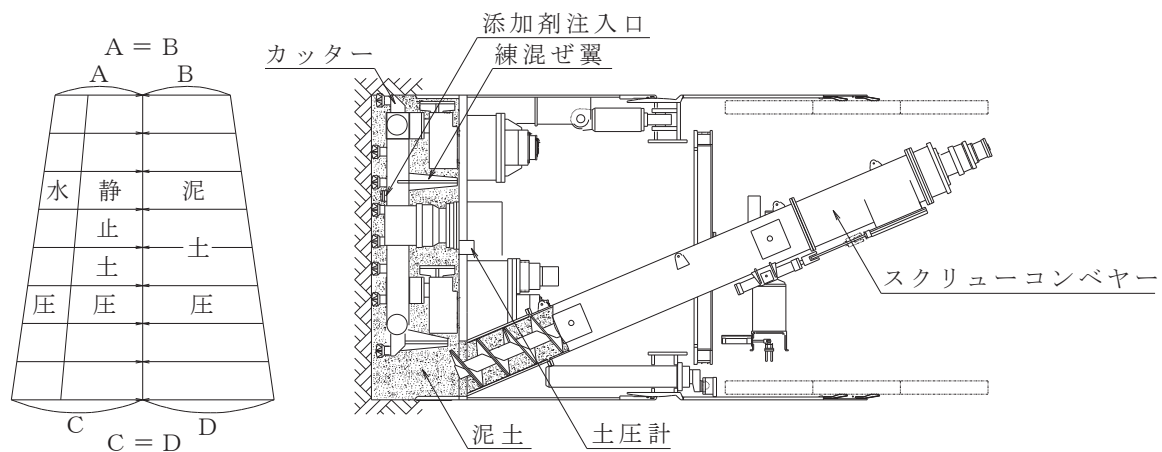


写真-1. 1. 2 矩形断面偏心多軸シールド

(2) 切羽の安定

カッターで掘削した土砂に作泥土材を注入して練混ぜ翼で練り混ぜ、塑性流動性と不透水性を持つ泥土に変換し、チャンバー内およびスクリューコンベヤー内に充満させる。この状態を維持してシールドジャッキの推力により、チャンバー内に泥土圧を発生させ、切羽の土圧および地下水圧に対抗させるとともに、この泥土圧をほぼ一定に保持することで掘進量と排土量をバランスさせながら掘進することにより、切羽の安定を図るものである。



図－１．１．７ 切羽安定模式図

１．２ 工法の特長

① 任意断面の掘削が可能

回転軸の位置、回転半径およびカッターの形状を適宜変えることにより、任意の断面形状を掘削することができる。

② 地下の制約条件に対する適用範囲が広い。

目的に合った任意の断面形状が選定できるため、地下の制約条件に対する適用範囲が広く、地下の有効利用が可能である。

③ 様々な土質に適用できる

切羽面が平面状であり、切羽の安定に泥土圧方式を採用しているため、軟弱土から固結土、砂、砂礫など様々な土質に適用できる。

④ 掘削機構がシンプルである

円形シールドと同様な平面的な回転運動を基本としているため、掘削機構がシンプルである。

⑤ カッタートルクが小さい

カッターの回転半径が小さいため、カッタートルクが小さくなり、カッター駆動装置や出力を小さくできる。

⑥ カッタービットの摩耗が少ない

カッター回転半径が小さいため、カッタービットの摺動距離が短く、全てのビットの摩耗量が均等で少なくなるため、長距離施工に適している。

⑦ 機内注入が可能

駆動部を分散化することにより各駆動部が小さくなり、広い機内スペースが確保できるため、機内からの地盤改良が容易であり、障害物の撤去の際のマンホール等が確保できる。

⑧ 組立解体が容易である

複数のカッター駆動部をユニットとして、シールドに組み込んでいるために各部が小さく、組立や解体作業が容易である。

1. 3 工法の適用範囲

(1) 適用土質

本工法の適用にあたっては、土質条件を十分調査し、土質に適した構造のシールドを採用するものとする。

本工法における切羽の安定および掘進管理方法は、泥土加圧シールド工法と同様であり、適用土質は基本的には表-1.1.1に準拠する。ただし、玉石混じり砂礫土、玉石層では、強度、最大礫径、礫率などにより、掘進効率が低下したり、礫径、シールド外径によっては取込み不能な場合があり、適用にあたっては、十分な検討を必要とする。

大礫層に対しては、スクリーコンベヤーを軸付きスクリー、リボンスクリューおよびこれらの組み合わせにより対処する。装備可能なスクリー径はシールドの大きさによって限定されるため、排出可能な礫径もそれに伴い制約を受ける。

表-1. 1. 1 適用土質

分類	土 質	N 値	適合性	留意点
沖 積 粘性土	腐 植 土	0	△	地盤変状
	シルト・粘土	0～2	○	
	砂質シルト・粘土	0～5	○	
	砂質シルト・粘土	5～10	○	
洪 積 粘性土	ローム・粘土	10～20	○	
	砂質ローム・粘土	15～25	○	
	砂質ローム・粘土	20以上	○	
土丹（泥岩）＊		50以上	△	ビット磨耗
砂質土	シルト粘土混じり砂	10～15	○	
	ルーズな砂	10～30	○	
	締まった砂	30以上	○	
砂礫・玉石	緩い砂礫	10～40	○	
	固結砂礫	40以上	○	
	玉石混じり砂礫		○	
	玉石層		△	ビット仕様**
特殊土	火山灰質土など		△	現場試験練り必要

注)○：原則として条件に適合する。

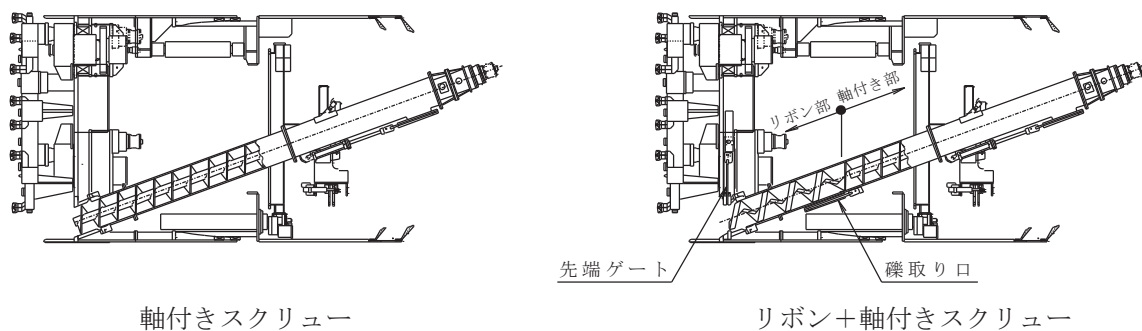
△：適用にあたっては補助工法、補助機構等の検討を要する。

＊：泥岩については土丹のような強度の低いものを対象にしている。

**：カッターおよびスクリーコンベヤー仕様の検討

スクリーコンベヤーは止水性を考慮すると、軸付きスクリーが望ましい。また、スクリーコンベヤー先端から後端までリボンスクリューにすると、大礫の排出は可能であるが止水性に乏しい。したがって、適用にあたっては十分な検討が必要である。

スクリーコンベヤーの形状図を図-1.1.8に示す。また、搬出可能礫径の参考値として、シールド寸法とスクリーコンベヤー寸法と最大搬出礫径の関係を表-1.1.2に示す。



図－１． １． ８ スクリューコンベヤー形状図

表－１． １． ２ シールド寸法とスクリューコンベヤー寸法と最大排出礫径（参考）

単位：(mm)

セグメント 外 径	シールド 外 径	羽根径	羽根ピッチ	軸 径	礫 径				備 考
					軸付きスクリュー		リボンスクリュー		
					長 径	短 径	長 径	短 径	
2,750	2,880	420	280	125	260	140	350	270	
3,800	3,940	470	330	160	300	170	420	320	
4,800	4,940	620	400	170	370	205	480	390	
6,000	6,150	650	430	190	400	210	500	420	

（２） 最小断面

本工法の最小断面は、基本的にはシールドテールプレートでセグメントが組立てられ、掘削土砂を坑外へ搬出できる寸法をいい、円形断面の場合セグメント外径が2 m程度、矩形断面の場合セグメントの短径（縦径と横径の短い方の外径）が2.5m程度である。

ただし、土質条件、礫径などによって、必要とされるスクリューコンベヤーの径、セグメントの組立空間などから、これ以上の断面が必要な場合があるので、これらの条件を考慮して決定するものとする。

また、その他の断面形状では、その形状特性を考慮してその都度検討するものとする。

2. シールド

2. 1 シールドの構成

本シールドは、その機能が十分発揮できるようシールド各部を構成するものとする。

本シールドはカッター部、フード部、ガーダー部、テール部の4つの部分から構成される。(図-1. 2. 1 参照)

カッター部は、トンネル断面とほぼ相似形のカッターフレームを装備し、このカッターは平行リンク機構を介して、回転運動することでカッター形状に応じた断面を掘削することができる。

フード部とガーダー部は、隔壁で仕切られ、フード部は、掘削土砂を充填させるチャンバーとなる。

ガーダー部は、カッター駆動装置、スクリーコンベヤー、シールドジャッキ、中折れジャッキなどの機器を格納する空間として用いられる。

テール部は、エレクターやテールシールを備え、セグメントの組立空間として用いられる。

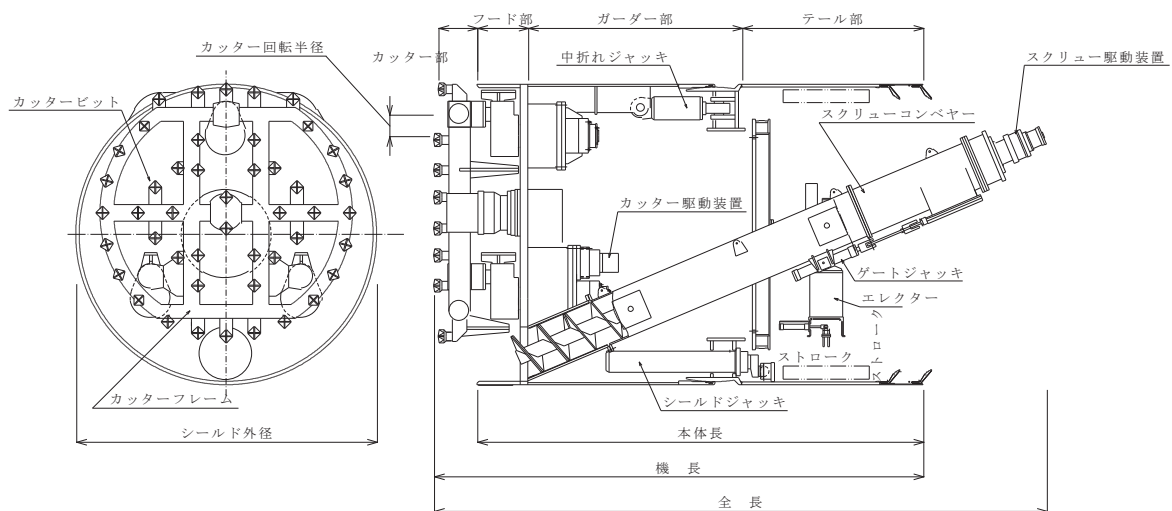


図-1. 2. 1 偏心多軸シールドの構成

2. 2 シールドの寸法

(1) 外径

シールドの外径は、セグメント外径、テールクリアランスおよびテールスキンプレート厚を考慮して決めるものとする。

円形断面シールドの寸法の呼称、表示は図-1. 2. 1 に示すとおりである。

シールドの外径とは、スキンプレートの外径をいい、セグメントの外径、テールクリアランスおよびスキンプレートの板厚によって決まり、フリクションカットプレート、固定そり、同時裏込め注入管などの突出部の寸法は外径に含まない。

テールクリアランスは、次の要素を考慮して決定するものとする。

- ① セグメントの組立公差
- ② セグメントの変形
- ③ テールプレートの変形
- ④ セグメント組立時の余裕
- ⑤ 曲線施工時の余裕

スキンプレートの厚さは、土被り、土質、地下水位などの条件から、プレートの応力、変形量を考慮して決定する。

シールドの断面形状が非円形の場合には変形量が大きくなる可能性があるため、シールドの断面形状も含めて十分な検討を要する。

(2) シールドの長さ

シールドの長さは、地山の条件、トンネルの線形、覆工の形式などを考慮して決めるものとする。

シールドの長さの呼称は、図-1.2.1 に示すとおり全長、機長および本体長があり、次に示す要素から構成されている。

- ① カッター部
- ② フード部
- ③ ガーダー部
- ④ テール部
- ⑤ スクリューコンベヤー

ここで、全長とはカッタービット先端からスクリューコンベヤー後端までの長さ、機長とはカッタービット先端からテール部後端までの長さ、本体長とはフード部先端からテール部後端までの長さをいう。

全 長＝カッター部＋フード部＋ガーダー部＋テール部＋スクリューコンベヤー

機 長＝カッター部＋フード部＋ガーダー部＋テール部

本体長＝フード部＋ガーダー部＋テール部

シールドの長さを決定するにあたり、注意しなければならないことは、その外径とのバランスであり、運転操作、立坑からの発進などを考慮し、できるだけ短いことが望ましい。

2.3 カッター

(1) カッター支持機構および駆動方式

カッターの支持機構および駆動方式は、シールド外径、土質条件に適合するように選定するものとする。

従来から用いられているカッターの支持方式として単軸支持方式（センターシャフト方式または中間支持方式等）があるが、本シールドのカッターの支持機構は複数の軸受けによる偏心多軸方式であり、駆動方式は、油圧または電動駆動方式とする。

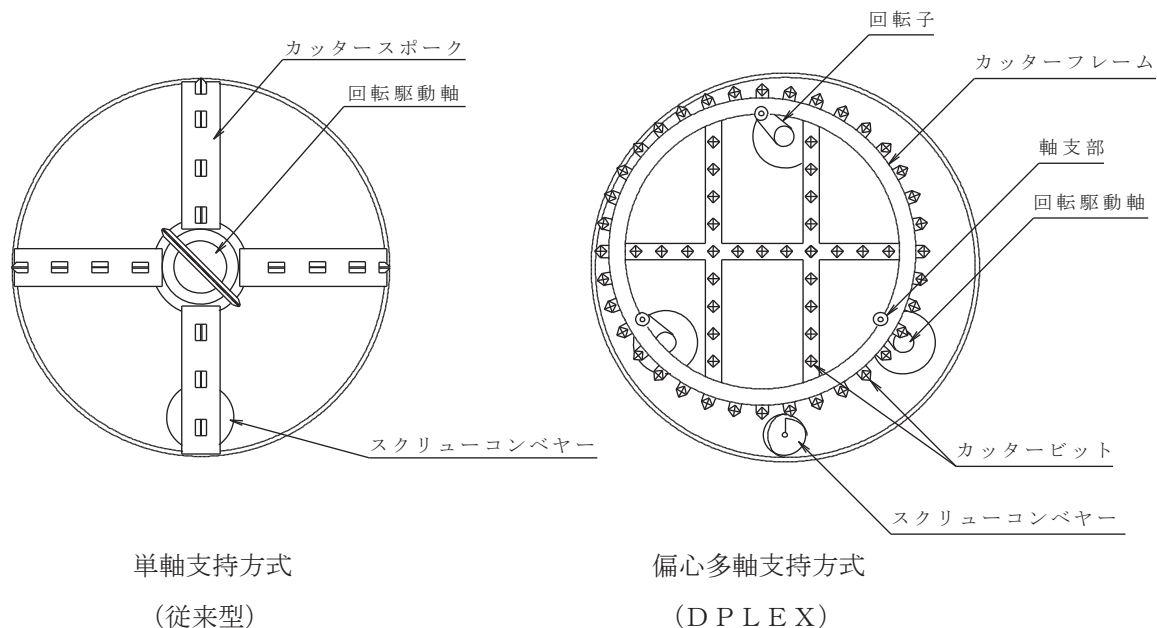
カッターを回転させる回転軸は、3 または 4 軸を基本とし、それぞれ同速度で同一方向に回転して掘削を行う。シールド外径 10m 以上の大断面のシールドでは回転軸を 4 軸以上にするのが一般的で

ある。

カッターの駆動部は、シールドの組立や解体を考慮してその構造、大きさ、数などを決めるものとする。

カッター駆動部のシールド本体への取り付けは、解体を考慮して、ボルトによる取り付けが望ましい。ただし、水密性の確保、強度の安全性向上などより、溶接の併用も考慮する。

スクリーコンベヤーの先端にゲートを取付ける場合は、スクリーウの径、取付け位置なども配慮して、カッターの支持機構、駆動方式を決定する。



図－1. 2. 2 カッター支持機構図

(2) カッタートルクおよび回転数

カッタートルクおよび回転数は、土質条件、シールド断面形状、施工条件などを考慮して決定するものとする。

カッタートルクは、地山の土質条件、すなわち、砂、礫、シルトなどの土質分類とN値、一軸圧縮強度、粘着力などを考慮し、シールド外径、掘削断面積に応じて決定するものとする。

カッタートルクは、土質条件、断面形状および施工条件により、決定するが、一般に次式で計算されている。

$$T = \alpha \cdot D^3$$

ここで、T：カッタートルク (kN・m)

α ：トルク係数

D：円形換算直径(m) (円形断面の場合D＝シールド外径)

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad A: \text{掘削断面積}$$

偏心多軸シールドは、カッターの回転範囲が小さいことから、カッタートルクを従来のシールド

ドより小さく設定できる。トルク係数 α は、一般的なシールド、砂質土の実績では6～7程度、砂礫土で8～9程度となる。

一方、偏心多軸シールド機のカッタートルクは、その駆動機構の特性から次式で表すことができる。

$$T = \beta \cdot r \cdot D^2$$

ここに、 β ：偏心多軸シールド工法のトルク係数

T ：カッタートルク (kN・m)

r ：カッター回転半径 (m)

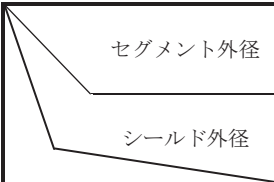
D ：円形換算直径(m) (円形断面の場合 D ＝シールド外径)

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad A: \text{掘削断面積}$$

カッターの回転数および回転半径は、土質や掘削土砂の練り混ぜなどを考慮し、シールド外径、施工条件などに応じて決めるものとする。

円形断面および矩形断面のカッタートルク等の参考値を表-1.2.1、表-1.2.2に示す。

表－１．２．１ 円形断面偏心多軸シールドのカッタートルク（参考値）

			セグメント外径	φ 3, 350mm	φ 3, 350mm	φ 7, 000mm	φ 7, 500mm	φ 9, 400mm	備 考
			シールド外径	3, 480mm	3, 490mm	φ 7, 150mm	φ 7, 670mm	φ 9, 600mm	
カッター トルク	常 時		178 kN・m	237 kN・m	1, 475 kN・m	2, 156 kN・m	2, 189 kN・m		
	最 大		267 kN・m	356 kN・m	2, 213 kN・m	3, 234 kN・m	3, 283 kN・m		
トルク 係数	α	常 時	4. 2	5. 6	4. 0	4. 8	2. 5		
		最 大	6. 3	8. 4	6. 1	7. 2	3. 7		
	β	常 時	58. 8	77. 8	72. 1	91. 6	47. 5		
		最 大	88. 2	116. 9	108. 2	137. 4	71. 2		
カッター回転数 (r. p. m)			0～3. 8	0～3. 8	0～2. 0	0～2. 0	0～1. 6		
カッター回転半径			0. 25m	0. 25m	0. 4m	0. 4m	0. 5m		
土質条件 その他			シルト・ 繊維補強 コンクリート	砂 礫	砂・粘性土	礫	軟弱シルト・ 繊維補強 コンクリート		
最 小 曲 線 半 径			R=30m	R=15m	R=1000m	R=110m	R=150m		

表－１． ２． ２ 矩形断面シールドのカッタートルク（参考値）

セグメント外径 (B×H)			2,800 ×2,200 mm	4,200 ×3,800 mm	備 考
			2,950 ×2,350 mm	4,380 ×3,980 mm	
シールド外径					
カッター トルク	常 時		123 kN・m×1組	144 kN・m×4組	
	最 大		183 kN・m×1組	217 kN・m×4組	
トルク係数	α	常 時	5.0	6.4	
		最 大	7.4	9.7	
	β	常 時	57.9	95.7	
		最 大	86.2	144.2	
カッター回転数 (r.p.m)			0～3.8	0～4	
カッター回転半径			0.25m	0.30m	
土質条件			砂質土、シラス	細砂、ローム	

２． ４ シールドジャッキ

（１） 総推進力

シールドの総推進力は、推進抵抗の総和に余裕を考慮して決めるものとする。

シールドの推進力の決定は、土被り、土質条件、断面形状、曲線施工など施工条件により検討が必要である。

シールドの推進抵抗は次の要素からなる。

- 1) シールド外周と土との摩擦抵抗、あるいは粘着抵抗 (F_1)
- 2) 推進に伴う、フード先端の貫入抵抗 (F_2)
- 3) 切羽前面抵抗 (F_3)
 - ① カッターヘッドにかかる推進抵抗
 - ② チャンバー内圧力
- 4) 変向抵抗（曲線施工、蛇行修正、変向のためのスタビライザー、フラップ抵抗等）(F_4)
- 5) テール内でのセグメントとスキンプレートとの摩擦抵抗 (F_5)
- 6) 後方台車の牽引抵抗 (F_6)

以上の推進諸抵抗の総和は、次式のようにになるが、適用にあたっては各要素を吟味し、必要な余裕を考慮して決めるものとする。

$$\Sigma F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6$$

こ こ で、 ΣF : 推 進 諸 抵 抗 の 総 和 (kN)

実際の計画ではシールドの総推進力は、基本的には従来の円形シールドと同様、一般に掘削断面 1 m²当たり 1, 100kN～1, 300kN 程度以上となるようなシールドジャッキの装備を標準とする。

急曲線施工では、曲線の外側のシールドジャッキを主に使用して、掘進する場合があります、これらを考慮してシールドジャッキを装備する必要がある。

(2) シールドジャッキの選定と配置

円形断面の場合シールドジャッキの選定と配置は、総推力、シールドの操向性、セグメントの構造、セグメントの組立ての施工性を考慮して決めるものとする。

シールドジャッキは、円周方向にほぼ均等になるように配置する。曲線施工のある場合は、これらのシールドジャッキの間に中折れジャッキを配置する。また、非円形断面の場合にはローリング修正機能を備えたローリング修正ジャッキを配置するものとする。シールドジャッキ配置の例を図-1.2.3に示す。

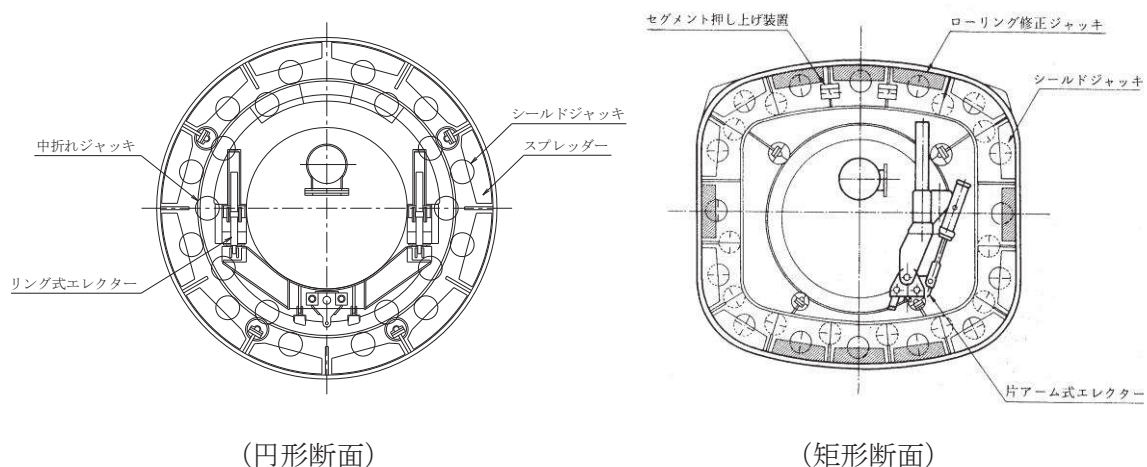


図-1.2.3 シールドジャッキ配置図

2.5 セグメント組立機構

(1) セグメント組立機構

エレクターは、シールドの形式、セグメントの形式、スクリュコンベヤーの径、掘削方法などを考慮し、セグメントの組立てが正確、かつ能率的にできるものを選定するものとする。

シールドに用いられるセグメントの種類は、スチール、鉄筋コンクリート、ダクタイトルなどがあり、セグメント継手の種類は鋼板、ダクタイトル、通しボルト、ほぞなどがある。また、矩形断面シールドに用いられるセグメントの形状は、直線型、円弧型、コーナー型などがあり、これらのセグメントの組立ができるエレクターを装備する。エレクターの種類は、円形断面はリンク式の両アーム型を矩形断面ではコーナーセグメントの組立性能を考慮し、リング式の片アーム型を基本とする。

エレクターは、エレクターグリップ、アームの伸縮、アームまたはグリップの前後摺動、グリップおよびアームの回転の機能を備えるものとし、動力源は油圧または電動式とする。エレクターの能力は、セグメントの最大重量、最大寸法等を考慮して決定する。

片アーム型エレクターの作動状況を図-1.2.3に示す。

(2) セグメント組立補助機構

セグメントを正しく組立て、かつ形状を保持するためにセグメント組立補助機構を設けるものとする。

セグメント組立補助機構には、セグメント押し上げ装置や形状保持装置などがある。セグメント押し上げ装置は、上部のK型セグメントの挿入、組立てを容易に行うために設けるもので、シールドの頂部付近に設けるものとする。(図-1.2.4、図-1.2.5 参照)

形状保持装置は、裏込め注入が硬化するまでにセグメントの自重や裏込め圧などの偏荷重による変形を防止し、セグメントの組立形状を保つもので、セグメント外径が比較的大きい場合や、継手の剛性が小さいほぞ付きセグメントなどを用いる場合に設置を考慮する必要がある。

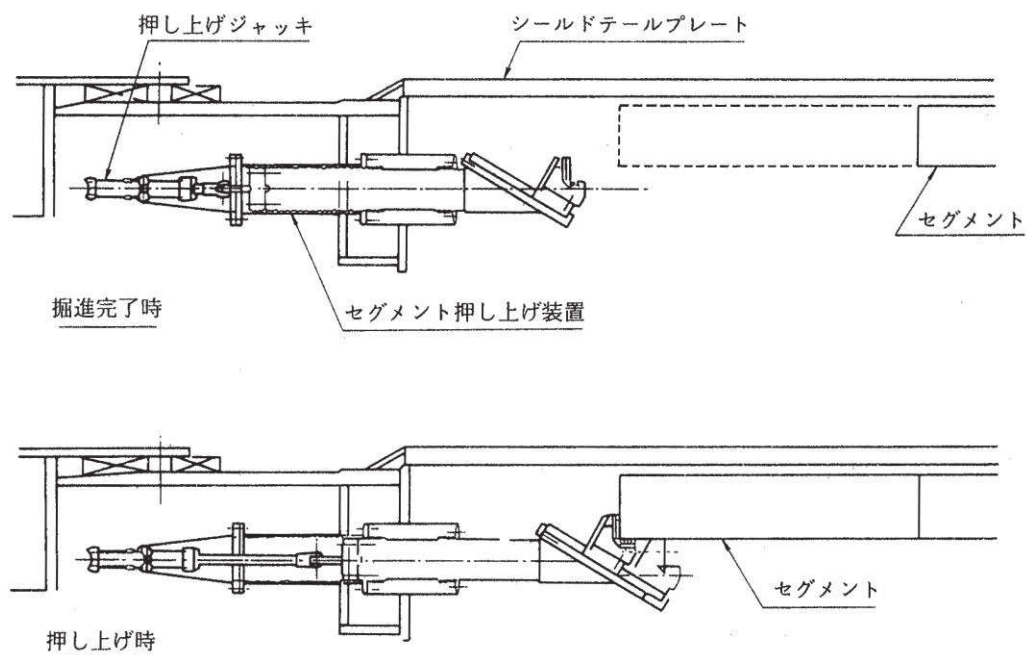


図-1. 2. 4 セグメント押し上げ装置図

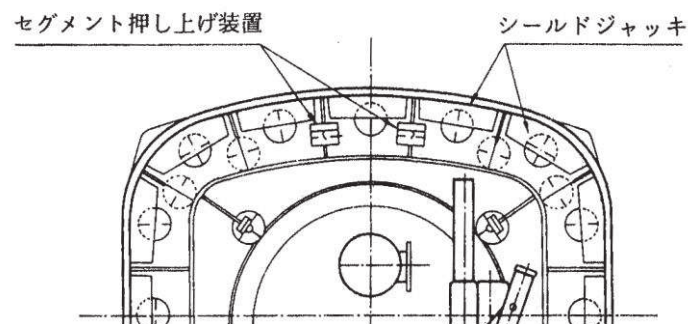


図-1. 2. 5 セグメント押し上げ装置位置図

2. 6 その他

(1) ローリング修正機構

ローリング修正機構は、地山の条件、シールドの形状などを考慮し、確実にローリングが修正できるものを選定するものとする。

非円形断面シールドでは、シールドがローリングすることによりテールクリアランスの余裕がなくなり、セグメントの組立てに支障をきたしたり、所定の設計断面が確保できなくなることも考えられるため、ローリング修正機構を設ける必要がある。

修正機構としては、ローリング修正ジャッキ、可動ソリ、スタビライザーなどがあり、基本的にはローリング修正ジャッキを装備する。

ローリング修正ジャッキは、シールドジャッキのセグメント側の端部をスライド調整ボルトやスライドジャッキによって移動させ、ジャッキ推力の分力をローリング修正力として利用し、ローリングを修正する装置である。(図-1.2.6、図-1.2.7 参照)

修正ジャッキの端部の移動は、狭溢な機内での作業となるためスライドジャッキによる方法が効率的であり、望ましい。

ローリング修正ジャッキはシールドジャッキ全数のうち、1/2 程度装備する。(図-1.2.3 参照)

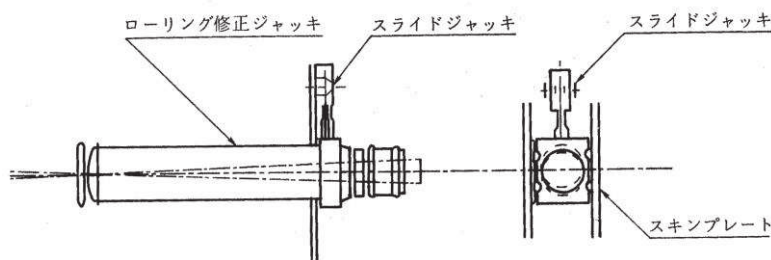


図-1. 2. 6 ローリング修正ジャッキ

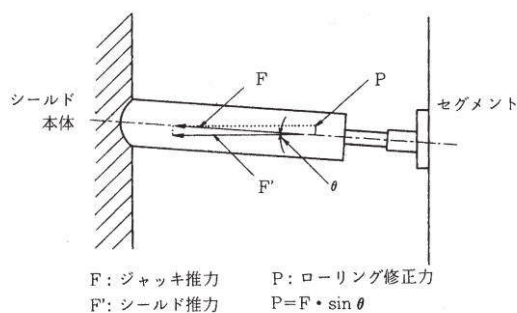


図-1. 2. 7 ローリング修正原理図

(2) 作泥土材注入機構

作泥土材注入機構は、掘削土砂の塑性流動化を促進するために、必要な量の作泥土材を適切な位置に注入できるものとする。

掘削土砂を塑性流動化する作泥土材は、カッター部前方への注入が効果的なことから偏心多軸シールドでは、図-1.2.8 に示すようにカッター駆動軸あるいは、駆動部とは別に設けられた回転体を介してカッター部前方へ注入する機構を装備する。

注入配管の系統、注入口の数および配置は、シールドの外径や土質、掘進延長に応じて決めるものとする。

注入口の位置は、カッターの中心よりやや上部で、注入箇所は2カ所以上が望ましい。

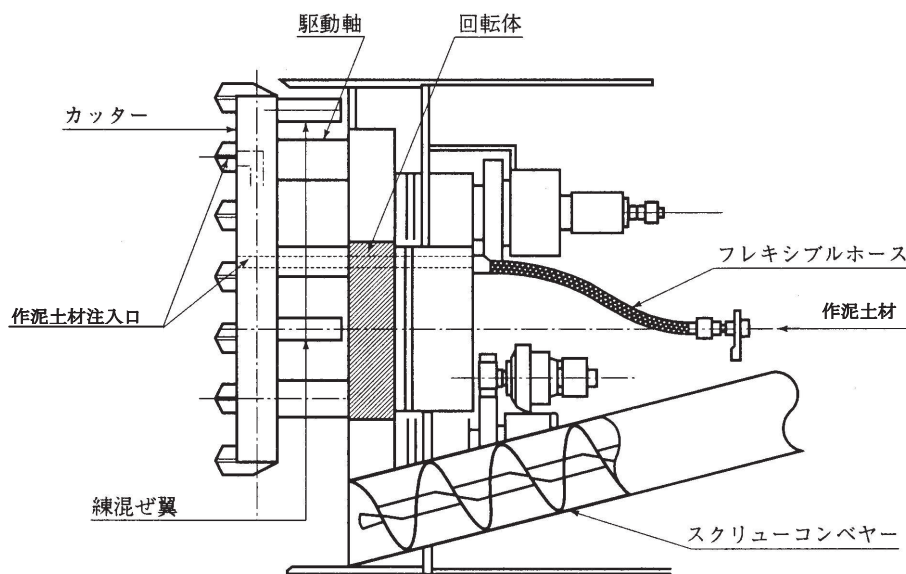


図-1.2.8 作泥土材注入機構

(3) 練混ぜ機構

練混ぜ機構は、掘削土砂と作泥土材とを練り混ぜて、均一な塑性流動化を図ることのできるものとする。

練混ぜ機構は、カッターで切削した土砂と、チャンバー内に注入した作泥土材とを効果的に練り混ぜることのできるようカッター背面および回転子に練混ぜ翼を設ける。

カッター背面と回転子に設けた練混ぜ翼は、練混ぜ半径が異なることや、軌跡のラップする部分では、互いに逆方向の運動となるため、効果的な練混ぜが可能である。

練混ぜ翼の形状や配置は、土質およびシールドの断面形状などに配慮して決定するものとする。

練混ぜ翼の配置の参考を図-1.2.9 に示す。

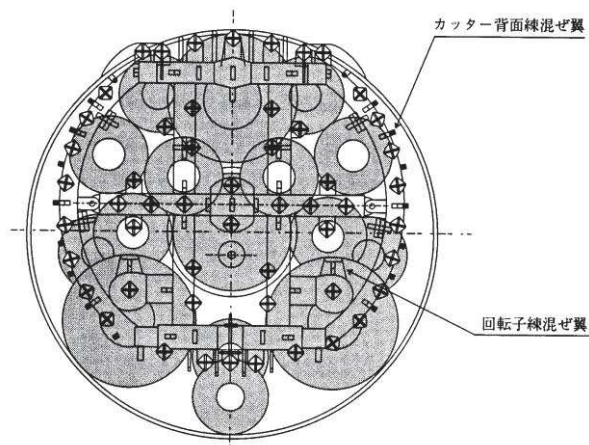


図-1. 2. 9 練混ぜ翼配置軌跡図

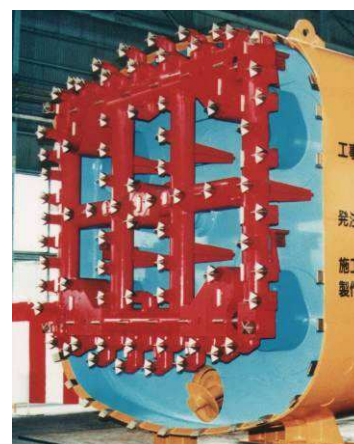


写真-1. 2. 1 矩形断面のカッターおよび練り混ぜ翼

(4) 排土機構

排土機構は、土質、土被り、地下水位などの施工条件を考慮して直径や構造を決めるものとする。

排土機構は、切羽の土圧および地下水压に抵抗する泥土圧を保持しながら、推進量に合わせた排土量の制御ができるスクリーコンベヤーを装備する。

スクリーコンベヤーは、土質、礫径、地下水位などの条件を考慮し、シールド径に適した構造を設定する。

スクリーコンベヤーの種類は、軸付きスクリーとリボンスクリーがあり、礫径などに応じて、これらを組み合わせて使用する。(図-1.1.8 参照)

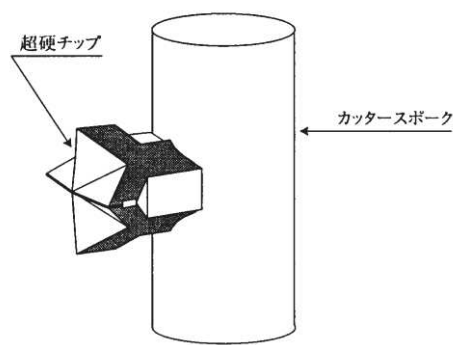
(5) カッタービット

カッタービットは、土質条件に適合するようその形状、材質、配置を決定するものとする。

偏心多軸シールドでは、カッター部は平行リンク状に回転するため、カッターは、全方向の掘削が要求される。これに対応するカッタービットとして十文字の形状のクロスルフビットや、一文字形状のルフビットなどを用いる。ビットの形状は掘削土質や、発進、到達の地盤改良や繊維補強コンクリート壁体の強度などを考慮して選定する。(図-1.2.10、写真-1.2.2 参照)

高強度の繊維補強コンクリート壁の切削については、切削実験や実工事の実績を考慮しクロスルフビットの先端幅やすくい角を決めるものとする。

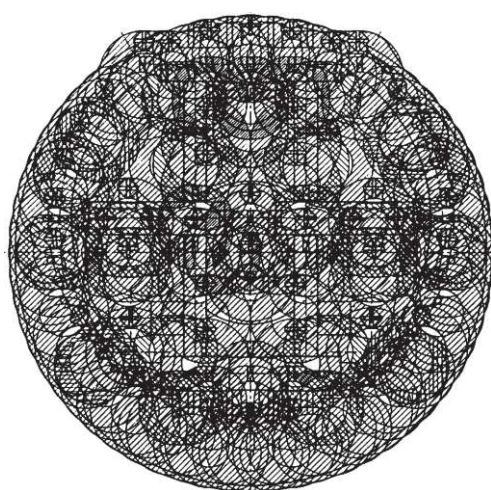
カッタービットの配置は、土質や同時裏込め注入管の突起や曲線施工の余掘りなどを考慮して、未掘削部分が少なくなるように、最適な配置を考慮する。また最外周部に設けるカッタービットは、側方の摩耗対策を施すことが望ましい。



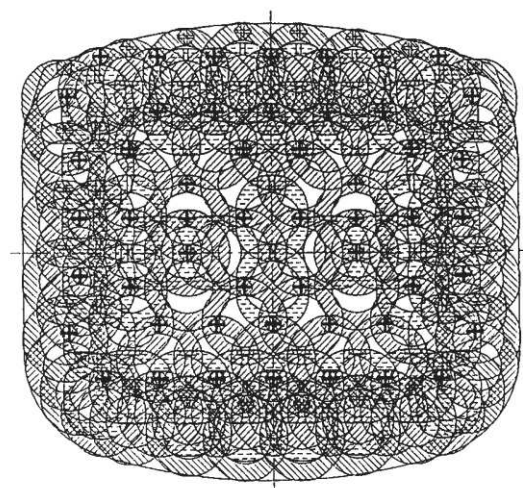
図－1. 2. 10 クロススcrewビット図

写真－1. 2. 2 クロススcrewビット

カッタービットの母材の材質は、機械構造用炭素鋼、鋳鋼などを用い、超硬チップの材質は、タングステンカーバイトを主材とする超硬焼結合金などを用いる。



円形断面



矩形断面

図－1. 2. 11 カッタービット軌跡図

(6) 余掘装置

余掘装置は、シールドの方向制御や曲線施工に必要な余掘りを行うために装備し、土質条件、施工条件に適した余掘機能が十分発揮できるものとする。

余掘装置の設計にあたっては、土質条件、施工条件（特に曲線半径）およびシールドの横径とシールド本体の長さ、中折れ装置のある場合は、中折れ角度との相関関係を考慮して、形式の選定や仕様の決定を行うものとする。

余掘装置は、カッターフレームに組み込むため、簡潔な構造と確実な作動が得られるよう配慮する必要がある。

余掘装置の一例を図-1. 2. 12 に示す。

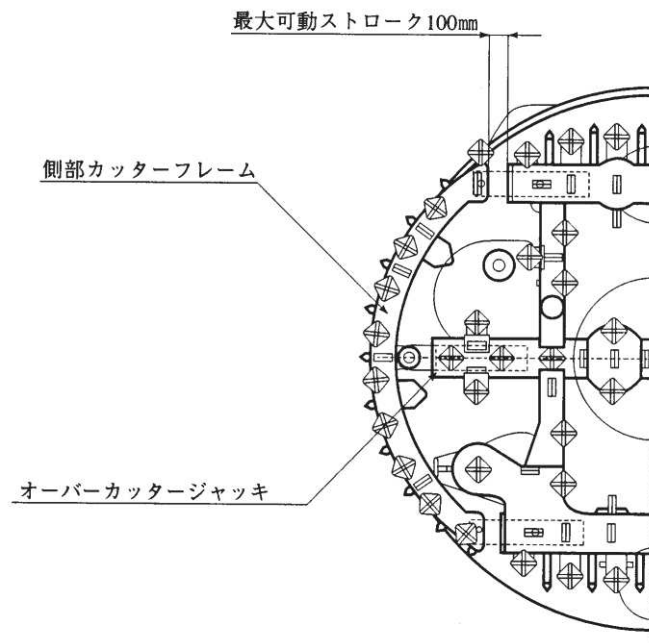


図- 1. 2. 12 余掘装置図

(7) 中折れ機構

中折れ機構は、シールドの曲線施工を行う場合に、必要に応じて装備し土質条件、施工条件に適した中折れ機能を発揮できるものとする。

中折れ機構は、円形シールドと同様に曲線半径が 80～120m より小さい曲線施工を行う場合に、シールドに装備し、前胴と後胴の折れ角（中折れ角）は、曲線半径に応じて決定する。

これより大きい曲線半径の場合でも、施工精度の向上、余掘量低減による沈下防止を目的として中折れ機構を設けることが望ましい。（図-1. 2. 13 参照）

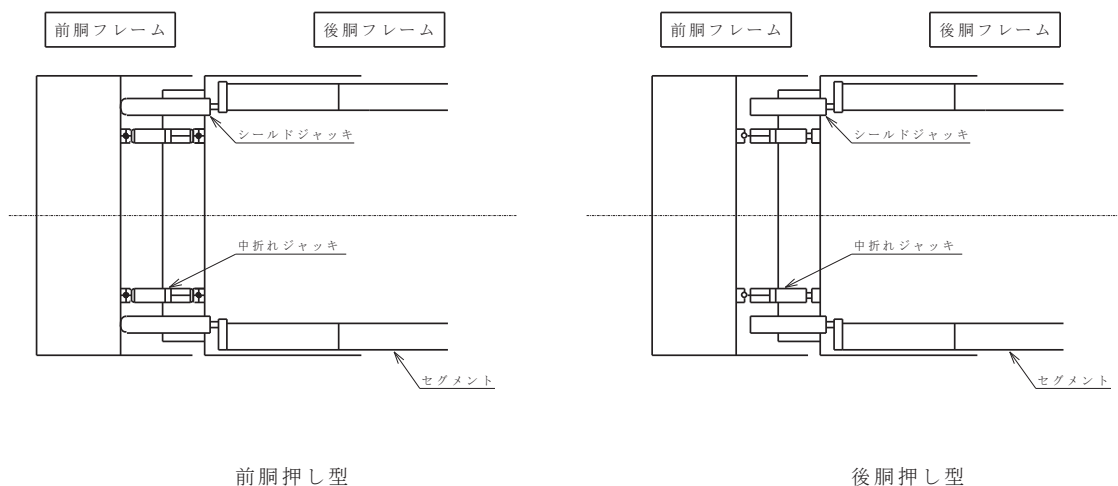


図- 1. 2. 13 中折れ機構模式図

中折れ機構には、図-1.2.13に示す前胴押し型と後胴押し型がある。前胴押し型は、シールドジャッキが前胴を押しており、中折れ時には、ジャッキとセグメントの偏心量が大きくなる。後胴押し型はシールドジャッキが後胴に固定され、中折れ時にも後胴と平行に押すことができ偏心量は小さい。

急曲線施工では、偏心量が大きくなることから、偏心量の小さい後胴押し型が適している。

(8) 裏込め注入機構

裏込め注入機構は、注入材料、注入方法、注入量などを考慮し、確実に充填できる機構を選定するものとする。

偏心多軸シールドは、土被りが比較的小さい場所で用いられることも多く、沈下を最小限に抑えるために裏込め注入は、同時注入方式を基本とする。

注入管の位置は、左右の上部に設けることを基本とし、予備も含めて2ヵ所は設けるものとする。(図-1.2.14、図-1.2.15 参照)

同時裏込め注入管の形状および配置箇所等については、土質条件、断面形状および施工条件により、検討が必要である。注入材料の固結やテールボイドからの逆流を防止して注入ができるように、また万一の固結に対して洗浄によって容易に機能回復が図れるよう配置する。

注入圧の管理は、裏込め材の吐出口の付近に裏込め圧力計を設けることが望ましい。

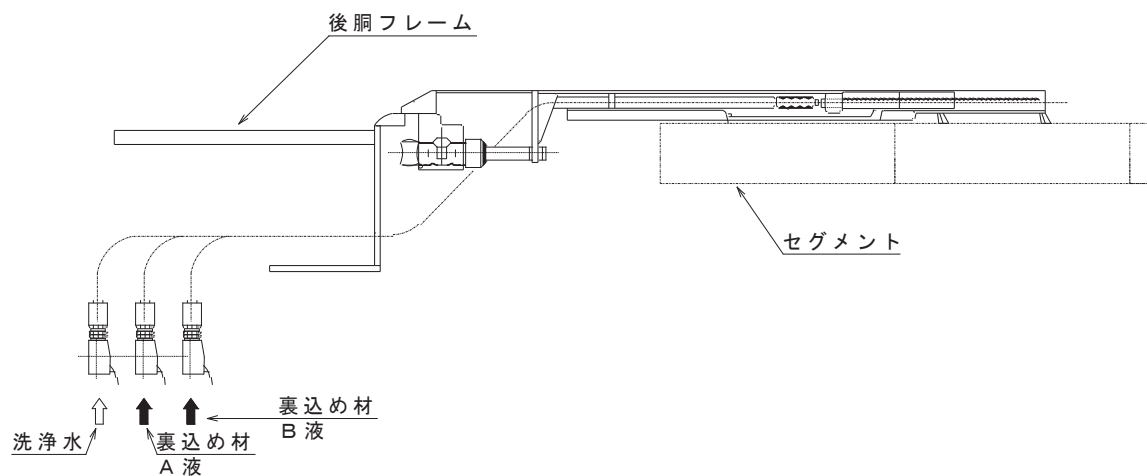


図-1.2.14 同時裏込め注入機構図

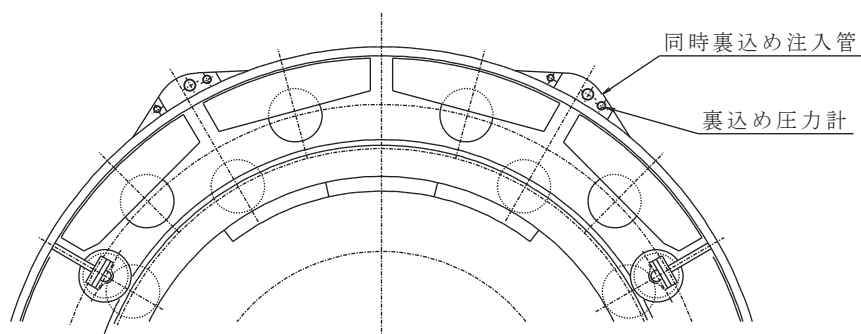


図-1.2.15 同時裏込め注入管位置図

(9) 機内注入機構

機内注入機構は、シールド機内から、切羽前方やマシン周辺の必要とされる箇所に適切に地盤改良のできるものとする。

機内注入機構は、シールド機内より地盤改良の薬液注入が必要な場合、機内より、安全、確実に全断面の地盤改良が可能な機構を設けるものとする。

機内注入が必要とされるケースは、急曲線の防護や重要構造物の近接施工の防護、掘進部の障害物撤去の防護などの地盤改良を地上から施工できない場合であり、改良範囲、注入工法、注入量などを考慮して、シールド機内スペース、注入口の位置、数を決めるものとする。

注入口には、注入角度を可変にするボールバルブを設けるものとする。

機内注入装置の参考図を図-1.2.16、図-1.2.17に、機内注入施工状況を図-1.2.18に示す。

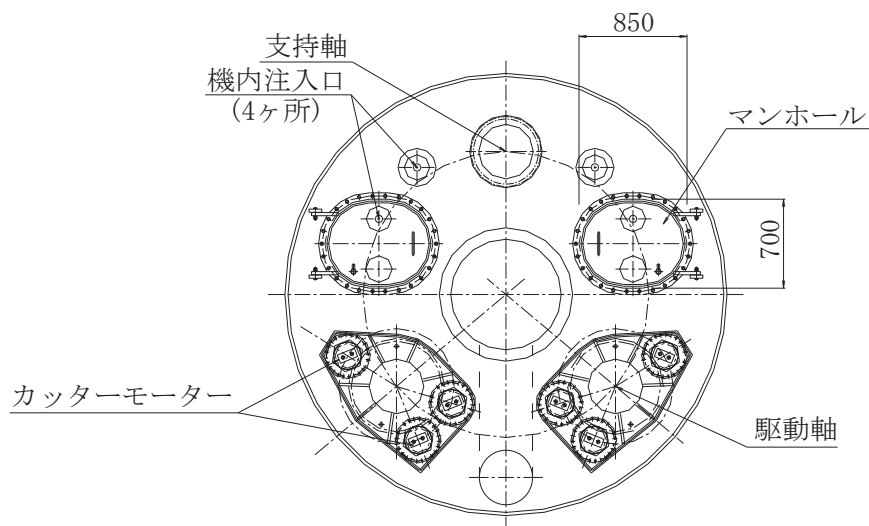


図-1.2.16 機内注入装置配置図

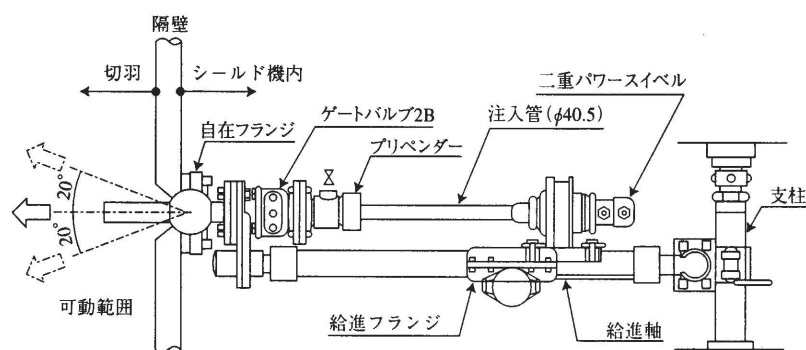
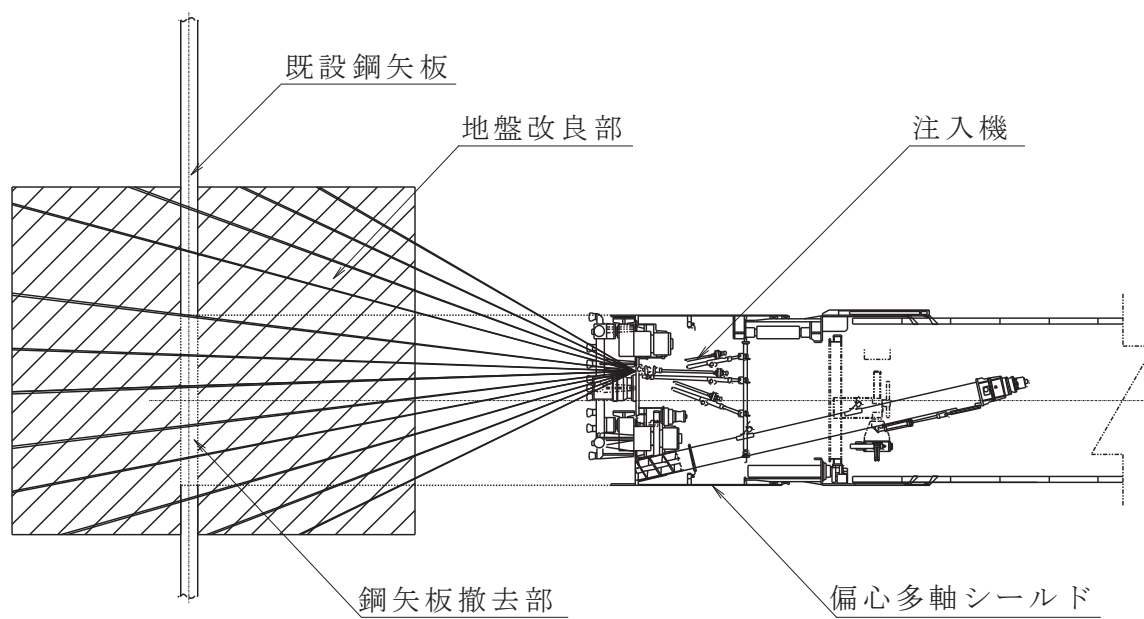


図-1.2.17 機内注入装置



図－１． ２． １ ８ 機内注入状況図

3. セグメント

3. 1 覆工構造および形式の選定

一次覆工に用いるセグメントは、トンネルの使用目的、地山の条件および施工法などに適合するように強度、構造、形式、種類などを選定するものとする。円形断面の場合、一次覆工に用いるセグメントの基本構造は、図-1.3.1に示すとおりであり、標準的にはAセグメント、Bセグメントと、Kセグメントより構成される。

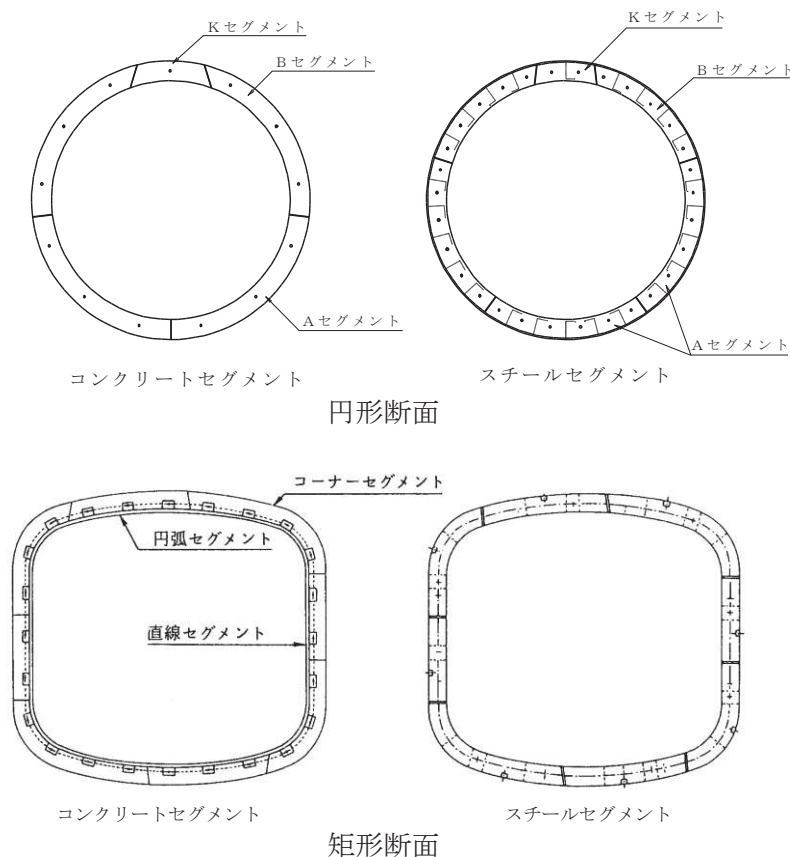


図-1. 3. 1 セグメント図

Kセグメントはトンネル内側から挿入するもの（半径方向挿入型）とトンネル軸方向から挿入するもの（軸方向挿入型）があり、土圧や地下水圧が大きく働く場合や比較的大口径で二次覆工のない場合などでは、軸方向挿入型が用いられることが多い。

セグメントの種類は、材質からコンクリート、鋼、鋳鉄およびこれらを合成した製品などに分けられる。いずれの材質もそれぞれ特徴がありトンネルの使用目的、地山の条件、外径などに応じて条件に適した形式および種類の選定を行うものとする。

曲線半径が比較的小さい場合には、鋼製セグメントの適用を検討し、土被りが大きく、重荷重が働く場合には鋳鉄製（ダクタイル）セグメントを検討する。

3. 2 セグメントの設計

セグメントの設計は、その使用目的や施工条件に適合する断面形状を選定するとともに、条件に応じた適切で、安全な設計を行うものとする。

本工法に用いるセグメントの設計の考え方は、基本的にはトンネル標準示方書（シールド工法編・同解説）に準拠する。

（１） 断面形状の選定

セグメントの断面形状の選定にあたっては、トンネルの使用目的、地山条件の他、道路幅員や周辺構造物との近接度合などの施工条件を考慮する。矩形断面は円形に比べ、隅角部やスパン中央部の曲げモーメントが卓越し、部材厚が大きくなるため、構造上有利な断面形状を選定するものとする。

特に横長や縦長の断面が必要な場合は、曲げモーメントや変形量などを十分考慮する必要がある。また頂部が直線の形状を選定する場合には、二次覆工の工程が、円形より長くなることを考慮する必要がある。

土かぶりの深い場合などでは、特に断面力が大きくなることから、縦横の形状寸法の比率を大きくしないことが望ましい。

（２） 種類・材質の選定

セグメントの種類・材質は、トンネルの使用目的、土質、土被り、地下水位などの地山の条件の他、周辺構造物との近接度合など施工条件を考慮して決定する。

（３） セグメントの設計荷重

セグメントを設計するにあたり常に考慮しなければならない主荷重は、土水圧、自重、上載荷重、地盤反力であり、この他に従荷重として内部荷重、施工時荷重、地震の影響があり、さらに特殊荷重として、併設トンネルの影響、地盤沈下の影響などがある。

内部荷重としては、満水時の内水圧などがあり、施工時荷重としてはジャッキ推力、裏込め注入圧、エレクター操作荷重などがある。

地震の影響については、主に地盤の変位、変形によって生ずる土圧や側圧を考慮し、必要により液状化、浮上りなどについても検討を行う。

併設トンネルの影響については、近接度合、外径などから相互に影響が予測される場合は、それぞれのトンネル施工時の裏込め注入圧や掘進土圧などを先行トンネルへの偏荷重として考慮する必要がある。

基本的な荷重図を図-1.3.2に示す。ここで地盤反力はセグメントが外側に変形する部分についてのみ考慮し、地盤反力係数に地盤変位を乗じて求める。

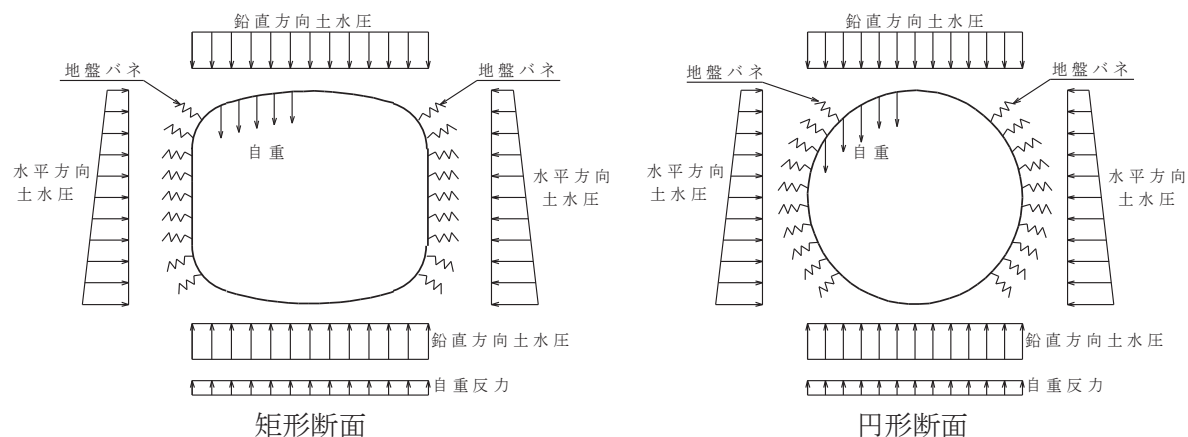


図-1.3.2 荷重図

(4) セグメントの設計法

セグメントの設計法には、一般的な修正慣用設計法やはりーばねモデル設計法などが用いられる。

① 修正慣用設計法

修正慣用設計法は、セグメントを曲げ剛性一様なリングとして考えるとともに、セグメント継手による剛性の低下を曲げ剛性有効率(η)で考慮し、さらに断面力のうち、曲げモーメントのみ曲げモーメント割増し率(ξ)を考慮して設計するものである。設計に用いる曲げ剛性有効率や曲げモーメント割増し率は、これまでの実績やリング載荷試験等によって決めるものとする。

② はりーばねモデル設計法

はりーばねモデル設計法は、セグメント継手を回転ばね、リング継手をせん断ばねとして考慮し、千鳥組した2リングモデルとして設計を行うものである。設計に用いる回転ばね定数は、計算や継手曲げ試験などで求めるものとする。

4. 二次覆工

4. 1 二次覆工の構造

二次覆工は、一次覆工の形状と特性、一次覆工と二次覆工の接合状況、地山の状態、環境条件、施工法などを考慮して、その使用目的に適合する構造を選定するものとする。

円形断面の二次覆工は無筋コンクリートの場合が多いが、矩形断面では直線部分、または曲率の大きい部分の組み合わせとなり、特に頂部が直線の矩形断面では二次覆工の剥離防止に対応するために、頂部や側壁には鉄筋やアンカーボルトを入れることを考慮する必要がある。

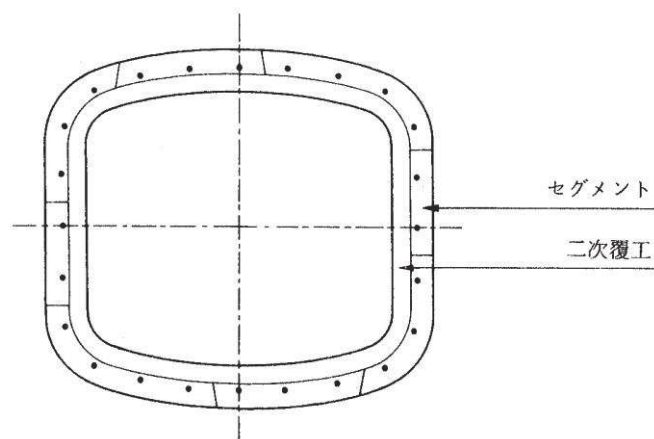


図-1. 4. 1 二次覆工図

4. 2 二次覆工の設計

二次覆工は、目的および施工を考慮するとともに、自重による剥離などを考慮して設計するものとする。

矩形断面の二次覆工は円形断面と異なり、セグメントを主体構造として考える場合であっても、自重などによる断面力によって、剥離やひび割れが発生する恐れがあり、特に頂部が直線状の場合は、これらを十分に考慮して設計する必要がある。二次覆工の厚さや配筋の有無、鉄筋量などの決定にあた

っては、目的や施工性の他に、断面力や応力度の検討を行うことを基本とする。

二次覆工の設計における荷重図を図-1.4.2に、曲げモーメント図を図-1.4.3に示す。

また、二次覆工をセグメントと合成してトンネルの主体構造とする場合には、セグメントと二次覆工の接合状況やそれぞれの剛性などを考慮し、二次覆工の設計を行う必要がある。この場合、セグメント本体の設計には施工時の許容応力度を用いて設計できることからセグメントの桁高や厚さを小さくしたり、外径を縮小することも可能であり、二次覆工厚さとセグメント高さについて慎重な検討が必要である。

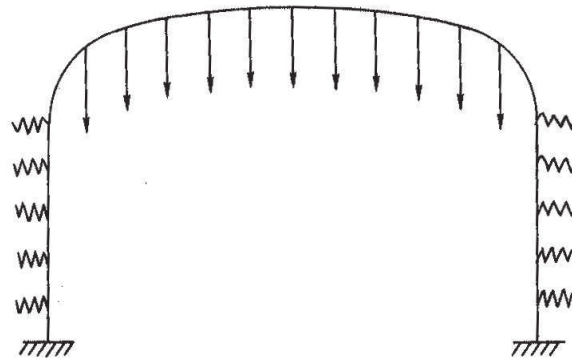


図-1.4.2 荷重図

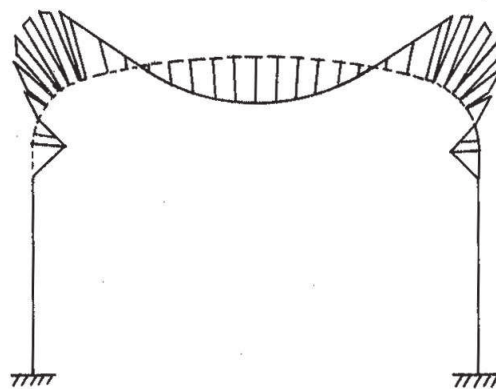


図-1.4.3 曲げモーメント

5. 施工および施工管理

5. 1 施工計画

施工に先立ち、工事の目的、規模、工期を十分認識し、設計図書、特記仕様書に従い、地山の条件、環境等を精査し、安全で経済的な施工計画を立案するものとする。

偏心多軸シールド工法における施工計画を立案するにあたり、標準的な掘削管理、掘削土砂搬出は次のとおりである。

なお、特に施工条件が変わる場合には別途考慮する。

(1) 掘 進

カッターで掘削した土砂は、作泥土材と練り混ぜられ泥土に変換されるとともにチャンバー内に充満され、シールドジャッキの掘進速度とスクリーコンベヤーの回転速度を調節することで、常に泥土圧を一定に保持したまま、スクリーコンベヤーから排出される。

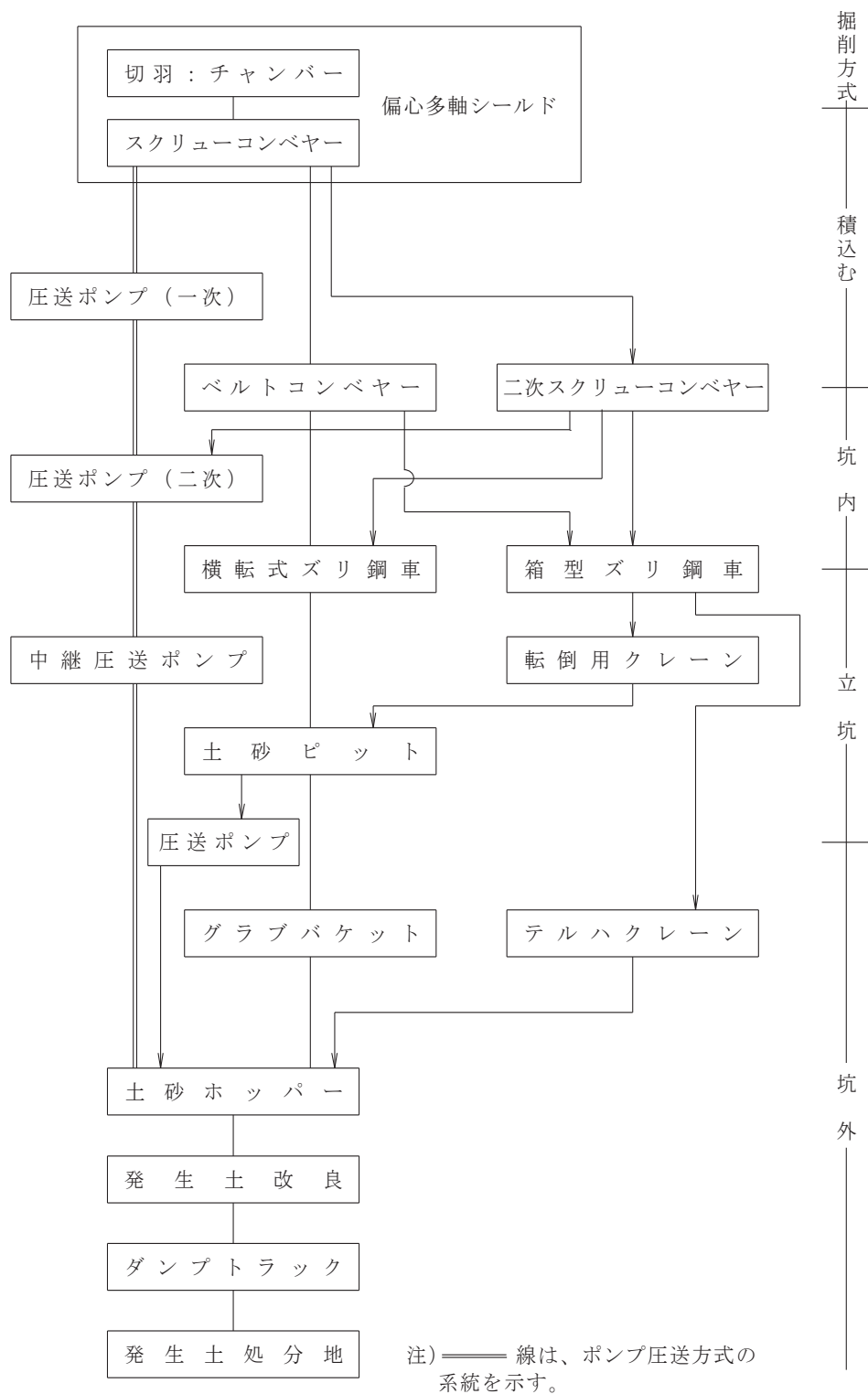
(2) 掘削土砂搬出

スクリーコンベヤーから排出された掘削土砂（泥土）は、圧送ポンプによって、地上の土砂ホッパーまで搬出する。中継ポンプの台数、圧送管径は施工延長、土質条件に応じて決定する。土砂ホッパーに貯留された掘削土砂は、ダンプトラックにより処分地に搬出する。なお、掘削土砂は基本的には固化処理などの発生土改良を行うものとする。ただし、掘削土が砂礫の場合や立坑の条件によっては、ベルトコンベヤー、ズリ鋼車などによる排土方法を考慮する必要がある。図-1.5.1 に一般的な「掘削土砂搬出系統図」を示す。

(3) 資機材の搬入

セグメントなどの資機材の搬入は、立坑上部に設置した天井走行クレーン、橋型クレーンなどにより材料台車へ積み込み、切羽へはバッテリーロコにより牽引して運搬する。立坑の条件により、直接資機材を材料台車に積み込めない場合は、中段天井走行クレーンなどを設置して積み込みを行う。

図-1.5.2 に偏心多軸シールド工法の圧送ポンプ方式の「施工概要図」を示す。



図－１．５．１ 掘削土砂搬出系統図

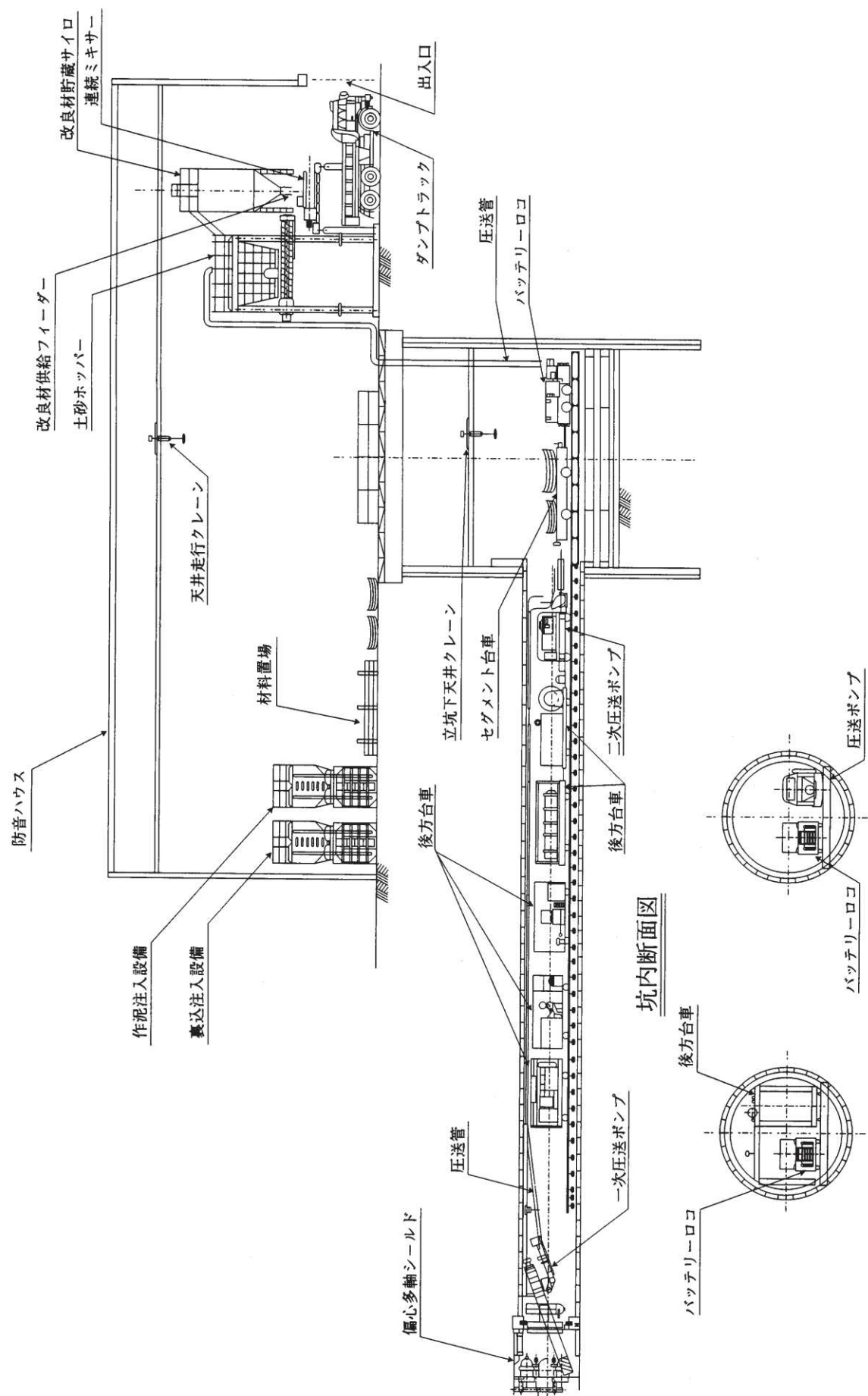


図-1. 5. 2 施工概要図

5. 2 立坑

立坑は、次の各項を考慮して決めるものとする。

- ① 立坑は、本構築としての機能の他、シールド掘進に伴うズリ出し、覆工材の搬入などの作業が所定の工程に従って進められるように設置するものとする。
- ② 立坑の構造は、シールドの大きさ、投入、組立、発進方法、発進時の反力の処理、発進部付近の地山の安定処理、本構築との関連などを考慮して設計するものとする。
- ③ 立坑の施工は、その地点の土質、路面条件、交通量、工事中の騒音振動などの周辺への影響を考慮し、安全かつ経済的に施工できる工法を採用するものとする。

立坑は、その使用目的から発進立坑、到達立坑、回転立坑、中間立坑などに分類できる。

(1) 発進立坑

発進立坑は、発進基地に設けられるもので、シールドの組立、覆工などの材料および諸機械器具の搬入、掘削土砂の搬出、作業員の出入のために設ける。発進立坑の形状寸法は、工事施工上次のよう要素から決定する。

- ① シールドの搬入、組立、点検、および発進
- ② 立坑用地の大きさ，形状などの立地条件
- ③ 夜間時の交通規制，道路幅員および埋設物の状態
- ④ 材料台車，ズリ鋼車の編成および軌道配置
- ⑤ セグメントなどの資材搬出入
- ⑥ 立坑土砂ピット，土砂搬出装置および排出口の位置
- ⑦ 仮設階段など作業員の昇降施設
- ⑧ 立坑周辺の環境保全（工事公害の防止）

立坑上の基地面積は、受電設備，掘削土砂搬出設備，裏込め材・作泥土材プラント設備などを設置するほか，セグメントなどの材料置場，運転管理室、現場事務所，作業員の休憩所を設置できる広さとする。

シールド据え付け時の発進立坑標準図を図-1.5.3，最小立坑寸法の参考値を表-1.5.1 に示す。

表－１．５．１ 発進時最小立坑寸法（参考）

単位：(mm)

セグメント 外 径	長 さ (L)								幅 (W)			
	支圧壁	仮 支 保 工	余 裕	スクリュー コンベヤー	シールド 機 長	余 裕	発 進 坑 口	最 小 寸 法	シールド 外 径	支 保 工材幅	余 裕	最 小 寸 法
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)		(D)	(h)	(i)	
2,750	500	1,800	50	1,300	6,020	200	300	10,200	2,880	400	600	4,900
3,800	600	2,000	50	1,700	6,350	200	400	11,300	3,930	400	700	6,200
4,800	600	2,000	50	2,400	6,560	200	500	12,300	4,930	400	700	7,200
6,000	700	2,000	50	3,000	7,260	200	600	13,800	6,130	400	700	8,400
4,200× 3,800 (矩形 B×H)	600	2,000	50	2,100	6,500	1,000	650	12,900	4,380 × 3,980	400	600	6,400

注)・シールドおよびセグメントの形状、中折れ装置の有無、使用目的、施工条件などに応じて異なるため参考値を示す。

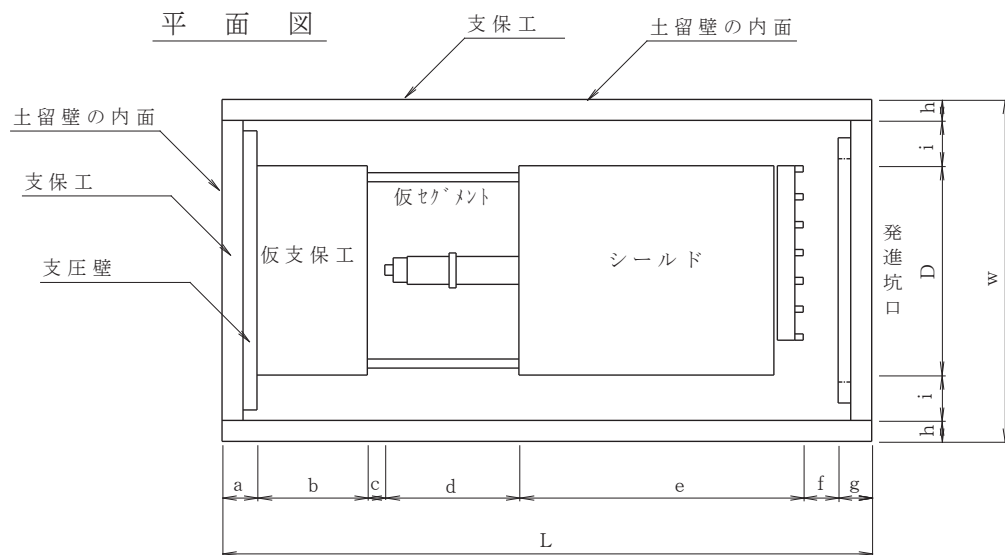
・掘削土砂搬出にブリ鋼車を用いる場合や立坑の一部を路面履工する場合などでは、上記の最小寸法より大きな立坑が必要となるため、施工条件により立坑寸法を別途考慮する。

表－１．５．２ 偏心多軸シールド仕様（参考）

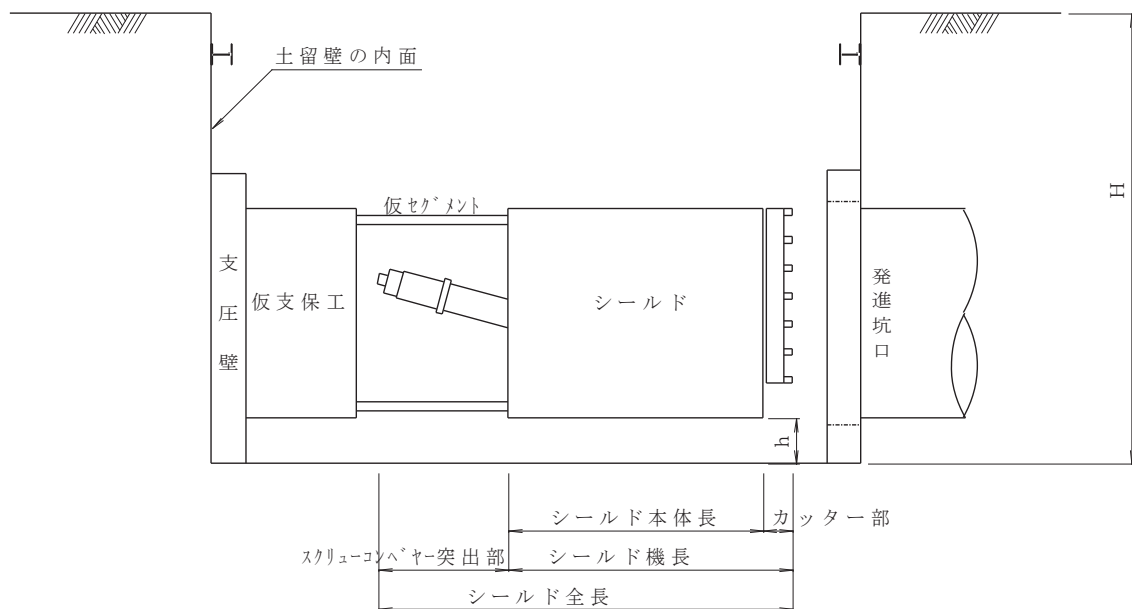
単位：(mm)

セグメント 外 径	シールド 外 径	本体長	機 長	スクリューコン ベヤー突出部	全 長	備 考
2,750	2,880	5,520	6,020	1,300	7,320	
3,800	3,930	5,850	6,350	1,700	8,050	
4,800	4,930	6,060	6,560	2,400	8,960	
6,000	6,130	6,660	7,260	3,000	10,260	

注)・シールド仕様は、中折れ装置の有無、セグメントの形状、施工条件などに応じて異なるため参考値を示す。



縦断図



図－１．５．３ 発進立坑標準図（発進時）

(2) 到達立坑

到達立坑は、シールドの終点に設け、シールドの解体搬出のために設ける。

到達立坑の形状は、シールドの残置を原則とし、通常は人孔築造に必要な最小寸法とする。

ただし、シールドを引き上げ、再掘進する必要がある場合は、シールドの最大分割寸法、最大重量、土質、路面条件、交通量、工事騒音、振動の周辺への影響などを考慮し別途検討する。(表-1.5.3、図-1.5.4 参照)

表-1.5.3 到達立坑最小寸法(参考)

単位: (mm)

シールド 外径 (D)	シールド 機長 (l)	支保 工材幅 (a)	余 裕 (b)	立 坑 長 $L=l+2a+2b$	立 坑 幅 (W)
2,880	6,020	400	400	7,120	4,900
3,930	6,350	400	600	7,850	6,200
4,930	6,560	400	800	8,460	7,200
6,130	7,260	400	800	9,060	8,400
4,380×3,980 (矩形 B×H)	6,500	400	610	8,520	6,400

- 注)・シールドは、シールドジャッキ、カッターモーターなど転用品以外の本体部分は残置を標準とする。
- ・立坑幅は発進立坑幅に準ずる。
 - ・立坑長さおよび深さは人孔の形状寸法によって決定する。
 - ・引き上げ、再掘進が必要な場合は分割寸法などを考慮し別途検討する。
 - ・表の数値はシールドおよびセグメントの断面形状が使用目的、施工条件によって異なるため参考値である。

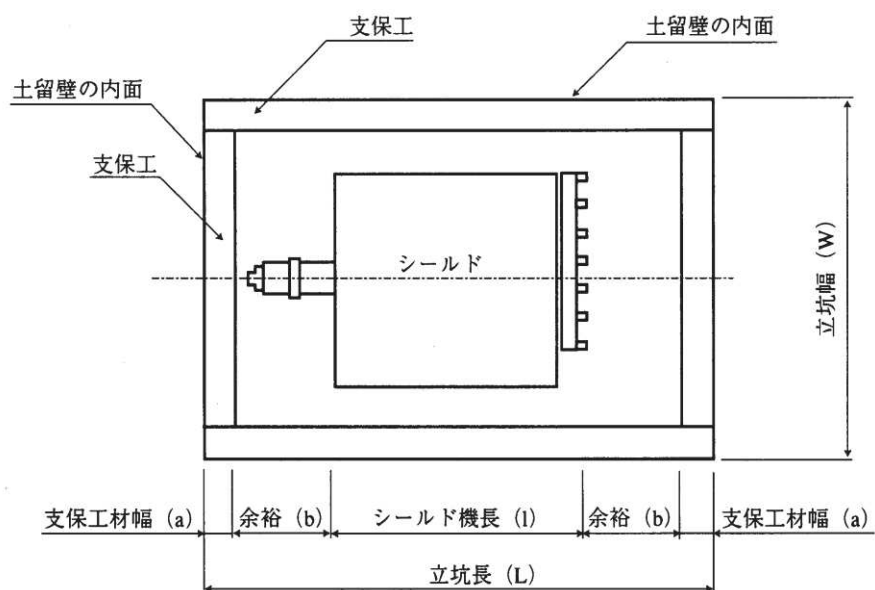


図-1.5.4 到達立坑標準図

(3) 回転立坑

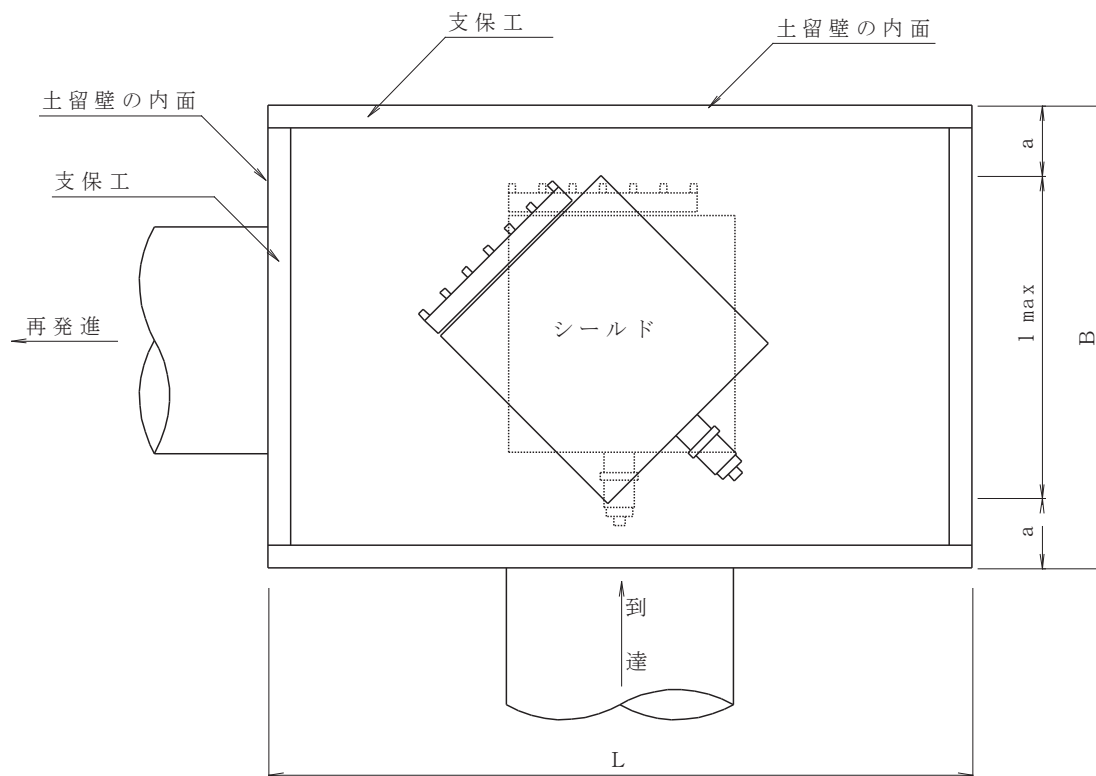
回転立坑は、急曲線シールドにおいて方向変換が不可能な場合、1 台のシールドで 2 本のトンネルを施工する場合、シールドを所定の方法に転換するために設ける。

回転立坑の形状は、シールドが立坑内で所定の角度に回転し、再発進できるための寸法、人孔築造に必要な大きさ、土質、路面条件、交通量、工事騒音、振動の周辺への影響などを考慮して決定する。(表-1.5.4、図-1.5.5 参照)

表-1.5.4 回転立坑最小寸法 (参考)

単位: (mm)

シールド外径	シールド最長部 $l_{\max}$	余 裕 a	立 坑 長 $B = l_{\max} + 2 \cdot a$	備 考
2,880	6,300	500	7,300	
3,930	7,100	500	8,100	
4,930	7,900	500	8,900	
6,130	9,100	500	10,100	
4,380 (矩形 Dh)	8,900	1,070	10,900	



L : 発進立坑長

図-1.5.5 回転立坑標準図

5. 3 発進・到達設備

発進・到達設備は、次の各項を考慮して決めるものとする。

(1) 発進

発進にあたっては、シールドを所定の位置に正しく据え付けた後、地山へ貫入し、定められたルートに沿い、立坑の土留め、周辺の路面、埋設物などに影響を与えないよう十分配慮して掘進するものとする。

(2) 到達

到達にあたっては、シールドの位置を正しく測定しながら、所定のルートに沿い、立坑の土留め、周辺の路面、埋設物などに影響を与えないよう十分配慮して定められた位置まで掘進するものとする。

1) 発進設備

シールドの発進は、次の点に配慮して行う。

① シールドの運搬・組立・据え付け

シールドの運搬にあたっては、経路、時間、道路規制などに配慮して計画する必要がある。

シールドは、受け台上の適正な位置に組立て、据え付ける必要がある。

受け台はシールドの自重、移動に耐えるとともに、ガイドを設け掘進方向に狂いの無い構造とする。また、シールドの組立時、溶接が必要な場合は溶接方法、溶接設備を考慮しておく必要がある。

図-1.5.6 に鋼材で受け台を設置した例を示す。

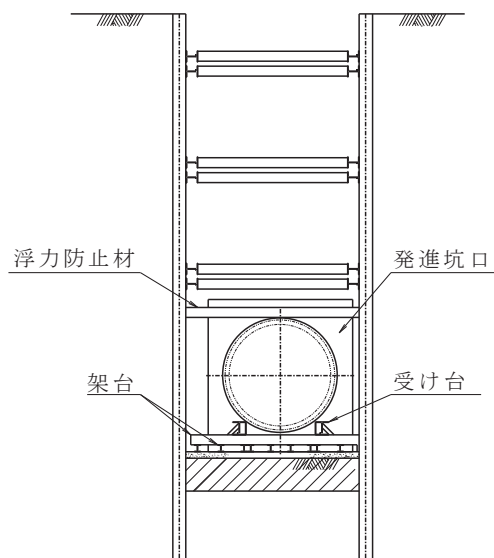


図-1. 5. 6 発進架台図

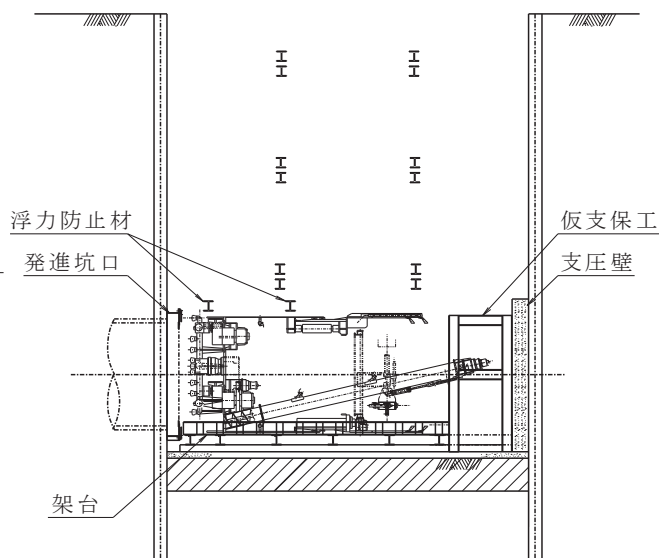


図-1. 5. 7 反力受け仮支保工図

② 反力受け

反力受けは、仮セグメント、反力受け支保工、支圧壁などをいい、シールド推進反力を立坑壁、地山に広範囲に伝達させるもので、必要な反力に対し十分な強度と剛性を有するものとする。

反力受けの参考図を図-1.5.7に示す。

仮セグメントは、本セグメントの精度に悪影響を与えないように注意して施工する必要がある、偏圧などによりセグメントにひずみや座屈が生ずる恐れのある場合は、補強が必要な場合もある。

③ 発進口

シールド発進口の開口に当たっては、地山の崩壊、路面の陥没などの無いよう検討を行い、必要に応じて地盤強化および湧水対策を施さねばならない。その方法としては、薬液注入工法、凍結工法、仮壁掘削工法、置換工法などがあるが、安全性、経済性、工程等を検討して決定する。

発進口には、坑口コンクリートを打設し、プレートリングおよびエントランスパッキンを設置する。エントランスパッキンの材質、形状、寸法は、地山の状態、シールドの形状、同時裏込め装置などを考慮して決定する必要がある。発進口坑口の参考図を図-1.5.8に示す。

④ ローリング防止装置

掘進開始時は、地山反力によりシールドに回転力が作用するため、ローリング防止装置を設置する。

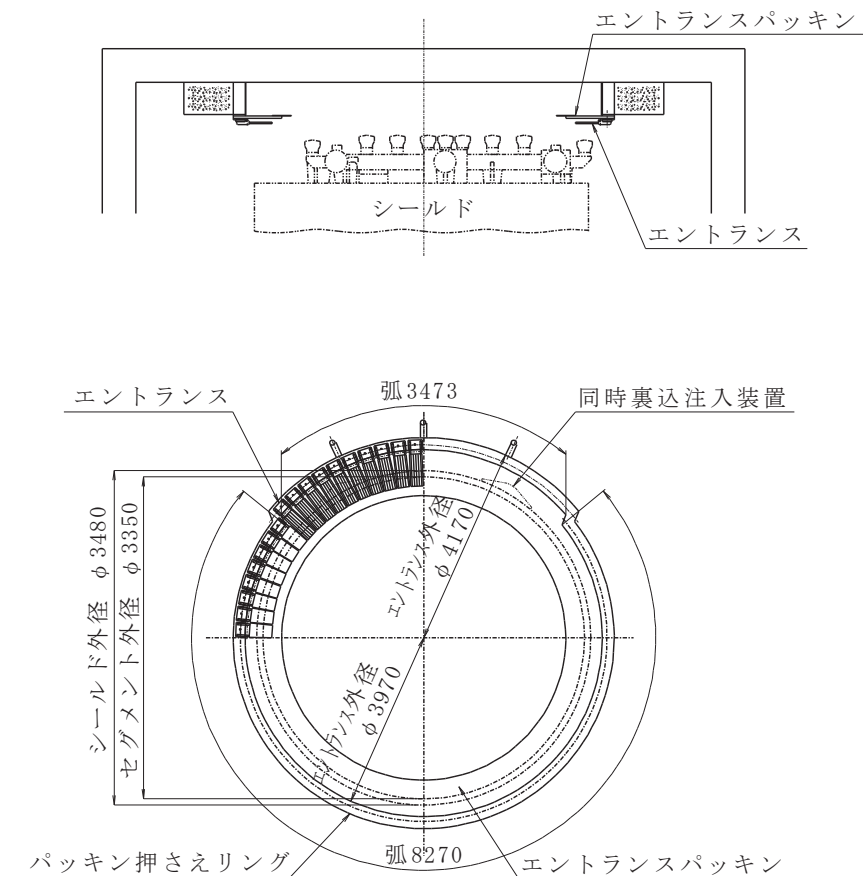


図-1.5.8 発進口図

2) 到達設備

シールドの到達にあたっては、平面線形と横断線形のチェックを行い、定められた位置まで慎重に掘進するものとする。

① 到達口

シールドの到達の開口に当たっては、地山の崩壊、路面の陥没などの無いよう検討を行い、必要に応じて地盤強化および湧水対策を施さねばならない。

また、シールドと到達壁の間隙から土砂流出または出水を防止するため、到達口エントランスパッキンを設けるとともに、必要により補足注入などを検討する。

その方法としては、薬液注入工法、凍結工法、仮壁掘削工法、置換工法などがあるが、安全性、経済性、工程等を検討して決定する。仮壁掘削工法の一例を6.2に示す。

② 到達位置

シールドの停止位置は、地山の条件、二次覆工の有無、人孔構造などを考慮して決定する。

シールドを残置としない場合は、受け台を設ける。

③ シールドの解体

シールドは、シールドジャッキ、カッターモーターなど転用部品以外の本体部分は残置が標準となっている。

シールド解体作業は、狭い空間での作業になり、ベアリングやシールをガス切断するため、有害ガスを発生する。計画にあたっては、作業足場、換気設備、消火・防火設備、有害ガスが発生するガス切断作業が最小になるような作業手順を計画する必要がある。

5.4 掘 進

シールドは、地山の状態に応じて添加材の注入、シールドジャッキ、スクリーコンベヤーの操作によりチャンバー内を適正圧力に保持し、地山の安定を図りながら所定のルートを正確に掘進するものとする。

偏心多軸シールド工法における切羽の安定は、チャンバー内泥土圧を、切羽土圧および地下水圧に対抗させることで行うため、チャンバー内泥土圧を適正な圧力に保つ必要がある。

チャンバー内泥土圧は、スクリーコンベヤーの圧力保持効果と排土口に設けられる排土機構により維持される。したがって、掘進は、チャンバー内泥土圧、排土の状態、ジャッキ推力、カッタートルクなどを総合的に判断し、掘進量と排土量のバランスを図りながら行うものとする。また、チャンバー内の掘削土に適正な流動性、止水性を保たせるためには、地山の状態に適した添加材を注入して練り混ぜる必要がある。

偏心多軸シールド工法における掘進管理は、施工上最も重要なものである。

掘進管理には、土圧管理と排土管理の2種類の方法があるが、一般的には地山の応力状態をできるだけ変化させない土圧管理を基本とし、チャンバー内の泥土圧、排土状態、ジャッキ推力、カッタートルクなどを総合的に判断して行う。

1) 土圧管理

土圧管理は、チャンバー内に取り付けた土圧計により泥土圧を測定し、泥土圧が常に管理土圧（静止

土圧＋水圧、または主働土圧＋水圧＋20～50kPa) となるように、シールドジャッキの速度とスクリーコンベヤーの回転数を調整して行う。土圧計は、故障などを考慮して複数設置しておく。

2) 排土管理

排土管理は、掘削土量と排土量を対比させることにより行う。排土量の計測としては次の方法がある。

- ① スクリューコンベヤーの回転数より算出する。
- ② 排土口付近に計量器を設置して計測する。
- ③ 圧送ポンプのポンピング数より算出する。
- ④ ブリトロの搬出台数とその容量から算出する。
- ⑤ ブリ揚げ設備に計量器を設置して計測する。

5. 5 作泥土材

作泥土材は、地山の状況に応じ適切に使用するものとする。

作泥土材は、以下の目的のために添加するものであり、その使用にあたっては地山の状態、作泥土材の種類、濃度、使用量、効果などを考慮し、検討する必要がある。

- ① 切羽地山中の自由水を排除し、土粒子間を目詰まりさせて止水性を保つ。
- ② 掘削土砂に塑性流動性を持たせる。
- ③ 掘削土のシールドへの付着を防止する。

一般的に使用されている添加材を以下に示す。

鉱物	——	粘土、ベントナイト
繊維	——	CMC
界面活性剤	——	気泡材
樹脂系	└──	高分子吸水剤
		液体合成高分子

作泥土材使用量は、その種類により算定式が提案されており、それぞれの算定式により算定する。

以下に一例として、粘土・ベントナイトを主体とした作泥土材使用量の算定式（泥土加圧シールド工法）を示す。

1) 濃度の算定式

$$\text{濃度 (D)} = a \left((30 - P_{0.075}) \alpha + (40 - P_{0.25}) \beta + (60 - P_{2.0}) \gamma \right)$$

a : 均等係数による係数

$$\text{均等係数 } U \geq 4 \quad a = 1.0$$

$$U > 4 \geq 3 \quad a = 1.1$$

$$U > 4 > 1 \quad a = 1.2$$

$P_{0.075}$: 0.075 mm 粒径通過百分率 30%以上は 30

$P_{0.25}$: 0.25mm 粒径通過百分率 40%以上は 40

$P_{2.0}$: 2.0mm 粒径通過百分率 60%以上は 60

α : 2.0 とする

β : 0.5 とする

γ : 0.2 とする

$$\text{濃度 (D)} = \frac{\text{作泥土材の材料重量}}{\text{水の重量}} \times 100 (\%)$$

2) 使用量の算定式

$$\text{使用量 [Q]} = 6 \cdot D \text{ (}\ell / \text{m}^3\text{)}$$

D : 1) で求めた作泥土材の濃度を示す。

ここで使用量は地山土量 1m^3 当たりの作泥土材の量を表す。

3) 作泥土材の働きと算定式の利用方法

作泥土材濃度と使用量および効果を表-1.5.5 に示す。

なお、濃度 0% の場合でも液性限界より低い含水比で、流動性が小さく粘性が高い場合には、粘性低下や付着防止のために水や高分子系添加材の注入が必要になる。

また、特殊土（マサ土、シラスなど）や、砂岩、頁岩などについても、土性に合った作泥土材が必要である。

作泥土材の注入設備は、発進到達の地盤改良部で注入が必要になることから、いずれの土質でも必要となる。

表－ 1. 5. 5 作泥土材濃度と使用量および効果

濃 度	0%		15%未満	15%以上
作泥土材 の材料	水	粘性低下材		ベントナイト 又は高分子系
使 用 量	$\omega>1.2\omega L$ の場合 $0\text{ }\ell/\text{m}^3$	$\omega<1.2\omega L$ の場合		$90\text{ }\ell/\text{m}^3$
		粘土・シルト含有率: X (%)		
		$X<60$ の場合 $150\text{ }\ell/\text{m}^3$	$X\geq 60$ の場合 $150+6(X-60)\text{ }\ell/\text{m}^3$	
効 果	粘 性 低 下		若干、内部摩擦角 を低下	内部摩擦角 の低下

ω : 含水比

ω_L : 液性限界

4) 添加材の標準配合

ベントナイト・粘土を使用した場合の、添加材の標準配合例を表-1.5.6に示す。

表－1. 5. 6 作泥土材標準配合例

濃度 (%)	ベントナイト B (%)	粘 土 C (%)	使用量100ℓ当たりの配合		
			B (Kg)	C (Kg)	W (Kg)
10	10		9.6		96.2
15	15		14.2		94.3
20	20		18.5		92.6
25	25		22.7		90.9
30	30		26.8		89.3
35	25	10	21.9	8.8	87.7
40	25	15	21.6	12.9	86.2
45	25	20	21.2	16.9	84.7
50	25	25	20.8	20.8	83.3
55	25	30	20.5	24.6	82.0
60	20	40	16.1	32.3	80.6

注) ベントナイト : 250 メッシュ 真比重 2.5

粘 土 : 200 メッシュ

5. 6 セグメントの組立

セグメントは、1リング推進完了後、迅速・正確・堅固に組み立てるものとする。

1) 保管・運搬

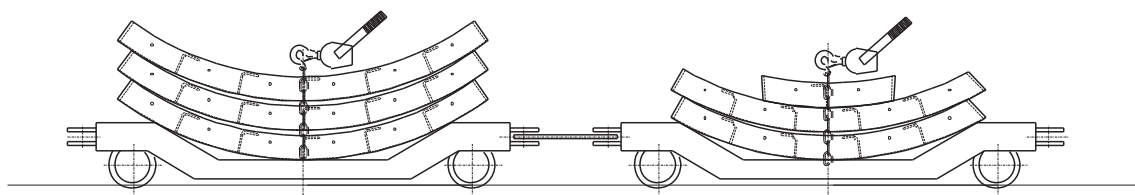
セグメントの仮置きについては、変形やひび割れおよび損傷などの無いように、セグメントの分割・形状に留意して、適当なセグメントストックヤードおよび台車などを検討する必要がある。

また、運搬についても同様のことを配慮して、適当なセグメント台車および固定装置を装備する必要がある。図-1.5.9に台車で運搬時の荷姿の参考図を示す。

2) セグメントの組立

セグメントの組立は、エレクターを用いて行い、組立精度を確保するとともに、テール離脱、および裏込め注入時の検討を行い、変形が予測される場合は、形状を確保し、正しい組立ができるように、必要に応じた形状保持装置を検討する。

曲線部はテーパセグメントを用い、テーパの向きおよび配列に注意し、千鳥配列になるようにあらかじめ検討しておく必要がある。



図－1. 5. 9 セグメント運搬図

5. 7 曲線施工

曲線施工を行う場合、線形、土質、シールド形状などに留意し、確実に推進できるよう十分検討するものとする。また、推進時の推力によるセグメントの変形、地山の安定にも留意するものとする。

本工法において曲線施工を行う場合は、地山の条件、シールド、セグメント、余掘り、補助工法などを総合的に判断して、確実な施工が行えるよう十分な余裕をもって対策をたてる。有効な対策としては以下のようなものがある。

- ① シールド : 中折れ機構の装備
余掘装置の装備
シールドジャッキ推力の余裕
- ② セグメント : テーパーセグメントの使用
補強型セグメントの使用
セグメント幅の縮小
継手ボルトの補強
- ③ 補助工法 : 曲線部分の地山ゆるみ防止のための地盤改良
地山反力増強のための地盤改良

補助工法を必要としないで施工可能な最小曲線半径の目安は、シールドの外径、施工条件によって異なるが、従来の単心円型シールドと同程度を基本とする。

曲線半径がある程度大きくても、土質条件や施工条件によっては側方地盤反力が期待できない場合があるため、地盤改良などを考慮する必要がある。

5. 8 長距離施工

長距離施工を行う場合は、地山の条件を考慮してシールドおよび施工設備の耐久性向上、効率化などについて検討し、確実な施工が行えるよう十分な対策を立てるものとする。

長距離施工を計画するにあたっては、施工設備の耐久性向上だけでなく、効率化、省力化、安全などの施工全体のシステムとしての検討が必要である。

施工設備の耐久性の向上は、土質、施工条件等を考慮し、カッターヘッド、カッタービット、軸受けシール、テールシール、排土ポンプなどについて検討する。

このうち、カッタービットの摩耗は、「トンネル標準示方書（シールド工法編）・同解説」に準拠し、次式により予測する。

$$\delta = K \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot N \cdot L / V$$

δ : 摩耗量 (mm)

K : 摩耗係数 (mm/km) ・ ・ 土質、施工方法、類似の実績などを考慮して決める。

r : カッター回転半径 (m)

N : カッター回転数 (rpm)

L : 掘進距離 (m)

V : 掘進速度 (mm/min)

偏心多軸シールドの摩耗係数は、矩形断面の掘進実績から、従来の円形泥土圧シールドと同等であ

ることが確認されている。本シールドのビット摩耗は、カッター回転半径が小さいため、カッタービットの摺動距離が短く、従来の泥土圧シールドの最外周ビットの摩耗と比較して、約 1/3 程度である。このため、従来の泥土圧シールドの 3 倍程度の掘進が可能である。（6. 3 参照）

カッタービットの交換は、カッター摺動距離・土質条件などを考慮し、摩耗、耐久性および交換方法を検討しなければならない。カッタービットは、摩耗によるほか、超硬チップの脱落・欠損により交換を必要とする場合がある。摩耗は、土質、ビット形状、超硬チップ材質などの要因により左右されるので、ビットの耐久性を十分検討し、交換が必要な地点を決定し確実な施工が行えるよう十分な対策を立てる。カッタービットの交換は、5. 9 地中障害物撤去と同様な方法で行うこともできる。

5. 9 地中障害物撤去

地中障害物撤去を行うには、支障物件調査に基づいて確実に施工できる十分な対策を立てるものとする。

地中障害物の撤去は、地上より行うのを原則とするが、やむを得ず坑内より撤去作業を行う場合には、障害物撤去作業が可能な機能をあらかじめシールドに装備する必要がある。

坑内からの撤去作業を行う場合は、補助工法として薬液注入、または薬液注入と圧気工法の併用が多い。

障害物撤去作業は、切羽の狭い作業空間で安全、確実に障害物の切断撤去作業を行うことになる。このため、シールド計画にあたって、機内作業空間の確保を考慮し、複数のマンホール、機内注入口、圧気設備、空気清浄機などの装備を計画する。図-1.5.10 にマンホールの例を、6. 1 に実施例を示す。

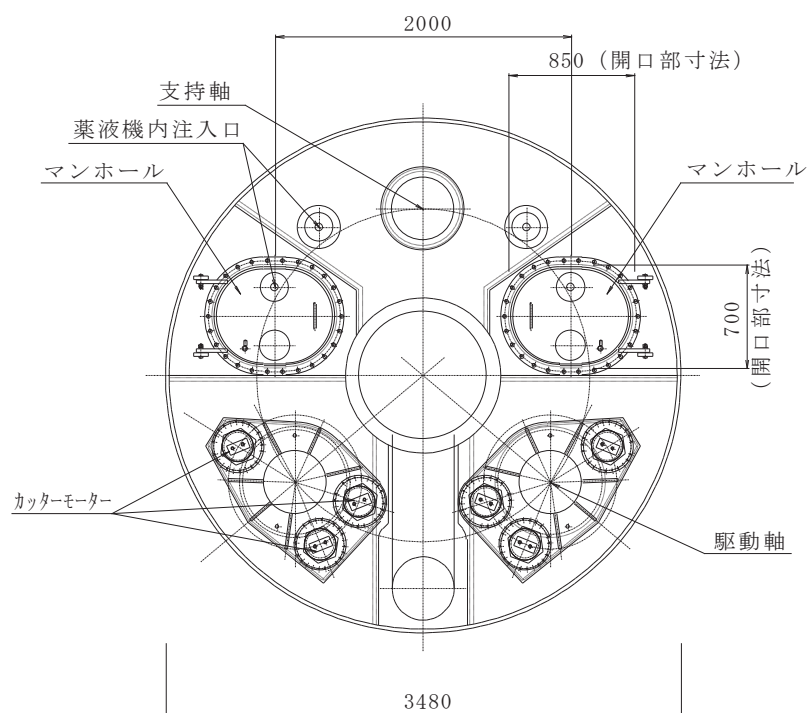


図-1. 5. 10 マンホール（参考）

5. 10 裏込め注入工

シールド掘進直後に発生したテールボイドは、速やかに充填して地山の緩みを極力押さえ、地盤の沈下や既設構造物への影響を防止するものとする。

裏込め注入工は、シールド掘進に伴う地山の緩みと沈下を防ぐとともに、セグメントからの漏水、漏気の防止、セグメントの早期安定をはかるものである。したがって、裏込め注入工は速やかに、かつ完全に行わねばならない。

1) 注入材料

注入材料は地山の土質および施工条件に適したものを選定する。

注入材としては、モルタル、エアモルタル、急結モルタル、可塑状注入材などがあるが、一般には、充填性、止水性、地山への浸透性、施工性の良い可塑状注入材を使用する。

2) 注入時期および方法

裏込め注入時期は、同時注入を原則とし、条件により即時注入を検討する。また、必要に応じて補足注入、または二次注入を検討する。

注入による偏圧は、セグメントに大きな反力を発生させる恐れがあるため、注入に当たっては、シールド形状を考慮してセグメントリングに偏圧が極力作用しないように、注入位置の検討が必要である。

3) 注入圧および注入量

注入圧は、セグメントの強度、土圧および水圧、地下埋設物および近接構造物、土被りなどを考慮して設定する。

注入量はテールボイドを十分充填できるものでなければならない。

5. 11 発生土処理

掘削土は、原則として改良して処理するものとする。

本工法における掘削発生土は、一般には流動性を呈した状態であり、原則として発生土の改良を行う必要がある。

発生土の改良には以下のような方法があり、土質条件、坑内運搬方法、立坑用地の広さ、運搬方法、処分地の条件などを考慮して選択する必要がある。

① 仮置場による天日乾燥

② 仮置場における土砂改良材との混合処理

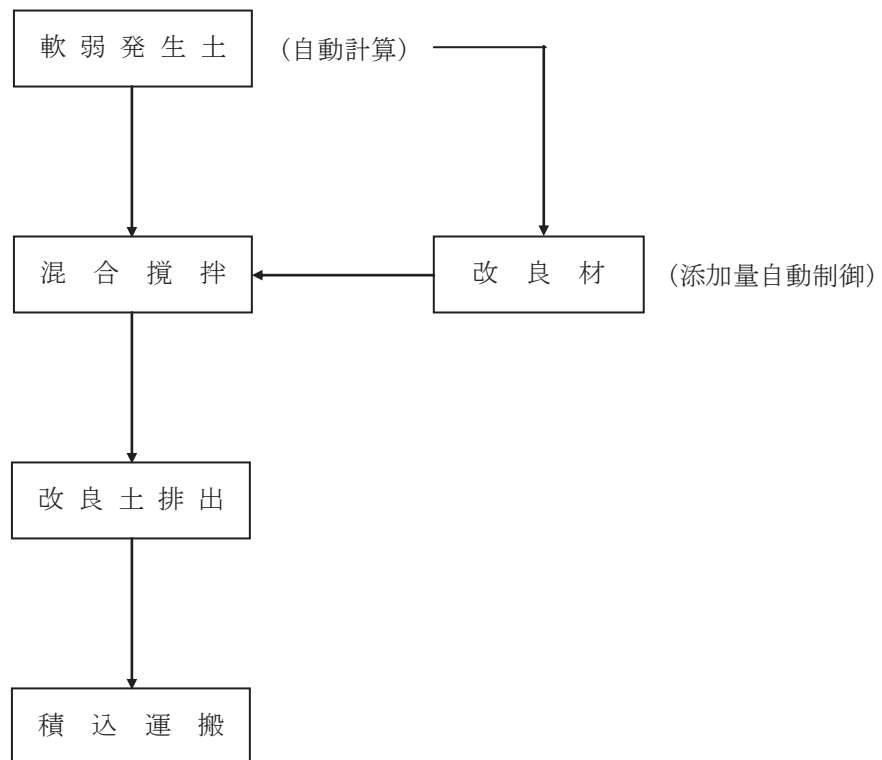
③ 発進基地における土砂改良材との攪拌混合処理

土砂改良材には、石灰系、セメント系、高分子系があり、単独または併用で使用する。

次に小規模で連続的改良ができる発生土改良システムの一例を示す。

〈発生土改良システム〉

このシステムは、発生土に土質改良材を添加して、攪拌・排土する自動処理プラントで、排出土砂量を測定する流量計と、土質に応じて土質改良材を自動的に添加する装置、および攪拌と搬送を同時に行う連続ミキサーから構成されている。発生土改良システムのフローを図-1.5.11に示す。

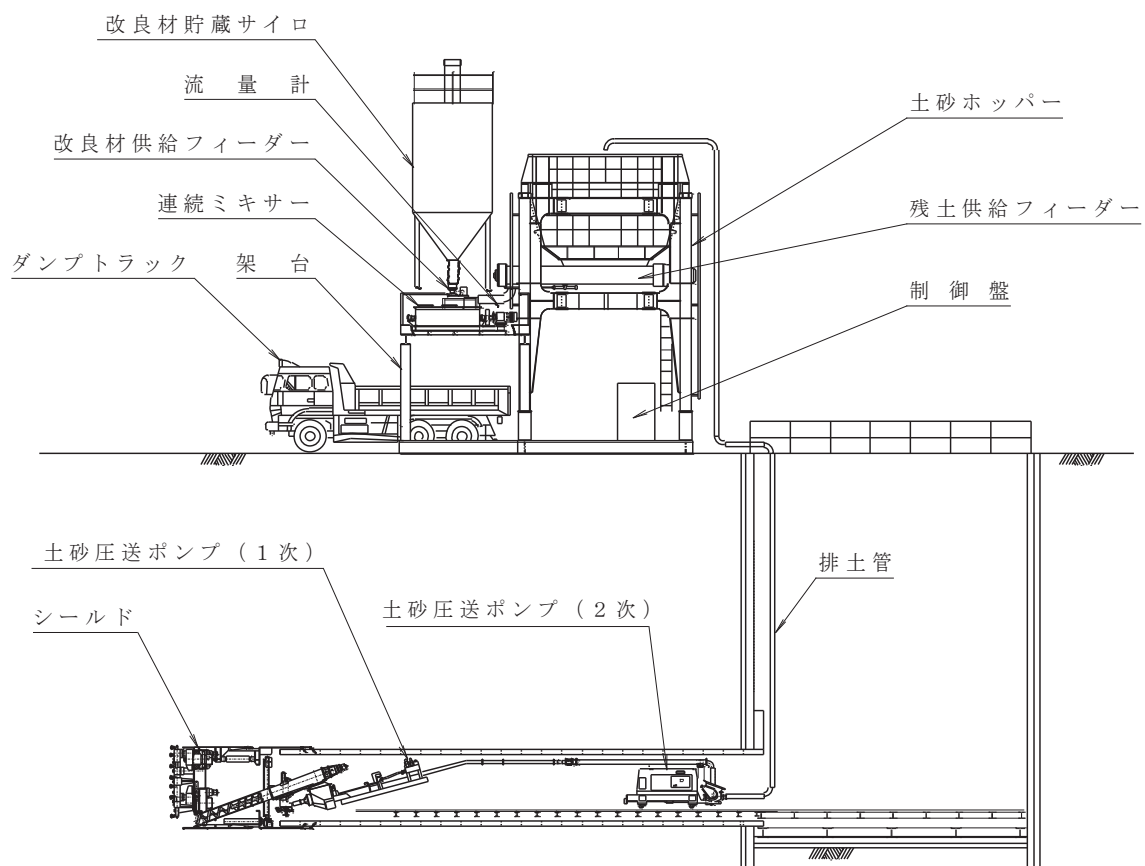


図－１．５．１１ 発生土改良システムフロー図

図-1.5.12に基づいて本システムを説明する。

ズリトロ、あるいは圧送ポンプによって立坑上のホッパー内に搬送された掘削土砂は、ホッパー下部に設けたスクリーコンベヤーにより電磁流量計を通過して連続ミキサーに導入される。オートフィーダーは、流量計で感知した土砂量に連動して改良材の自動添加を行い、掘削土砂と改良材は連続ミキサー内で混合されて排出される。

連続ミキサーは、ケーシング内に攪拌羽根を設けた回転攪拌軸が複数設けられており、改良材の添加量が少量の場合でも均等に攪拌して高い混合効果が得られる。



図ー１．５．１２ 発生土改良システム

6. 参考資料

6. 1 地中障害物（鋼矢板Ⅲ型）の撤去例

地中障害物は、図-1.6.1 に示すようにシールド機内より地盤改良を行い、人力により切断撤去した。補助工法として、切羽の自立確保、メタンガスの湧出防止の目的で、坑内に圧気扉を設置し、切羽、およびシールド坑内の一部を限定圧気した。

鋼矢板の切断は、マンホールからの取り出しになるため、1 個当たりの重量を 30kg 以下になるように切断した。作業は、地山の安定を考慮し露出時間を極力短くするため、3 交代で行い、24 時間で終了した。

写真-1.6.1 は、広い機内空間を利用しての地盤改良の状況である。写真-1.6.2 は、換気用、および作業用マンホールを使用しての鋼矢板撤去状況である。

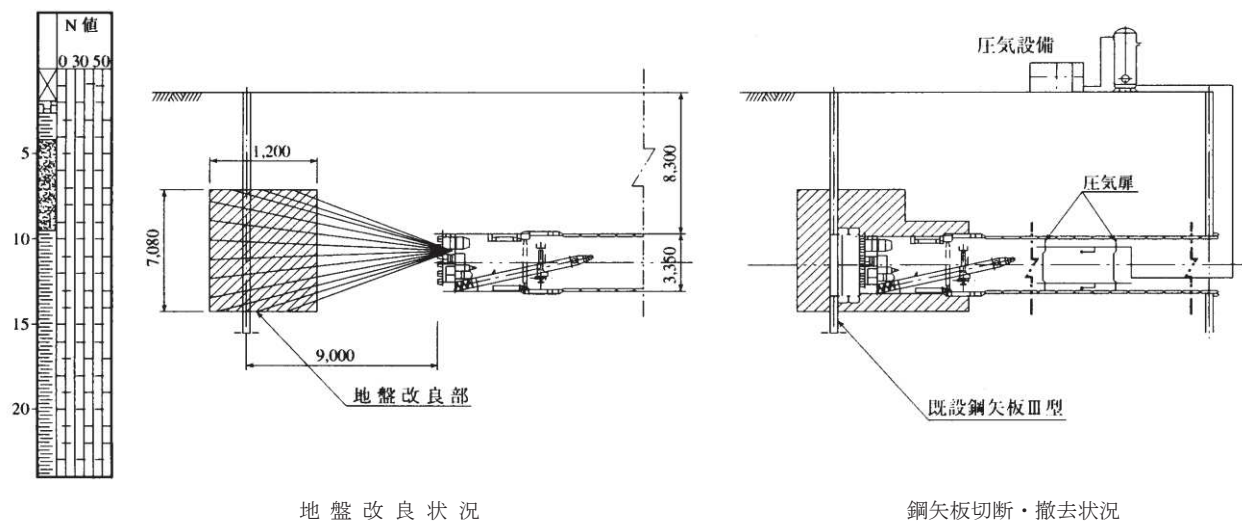


図-1.6.1 地中障害物撤去図



写真-1.6.1 地盤改良状況



写真-1.6.2 鋼矢板撤去状況

6. 2 繊維補強仮壁切削例

偏心多軸シールド工法により、到達仮壁を切削した事例であり、切削した仮壁の形状寸法を図-1.6.2 に示す。この例では、シールド外径 $\phi 3.48\text{m}$ で、仮壁の実切削厚さはSMWのモルタル部を含めて 580mm であった。高強度コンクリートは、圧縮強度 $81\text{N}/\text{mm}^2$ の石灰石コンクリートであった。主筋およびスターラップは炭素繊維であり、主筋の呼び径は $\phi 30\text{mm}$ 、スターラップは $\phi 10\text{mm}$ が用いられていた。

このような繊維補強仮壁を図-1.6.3、図-1.6.4 に示すカッタービットにより切削して到達した。仮壁の切削はほぼ連続して行うことができ、実切削時間は仮壁部のみで17時間であり、平均切削速度は $0.6\text{mm}/\text{分}$ であった。

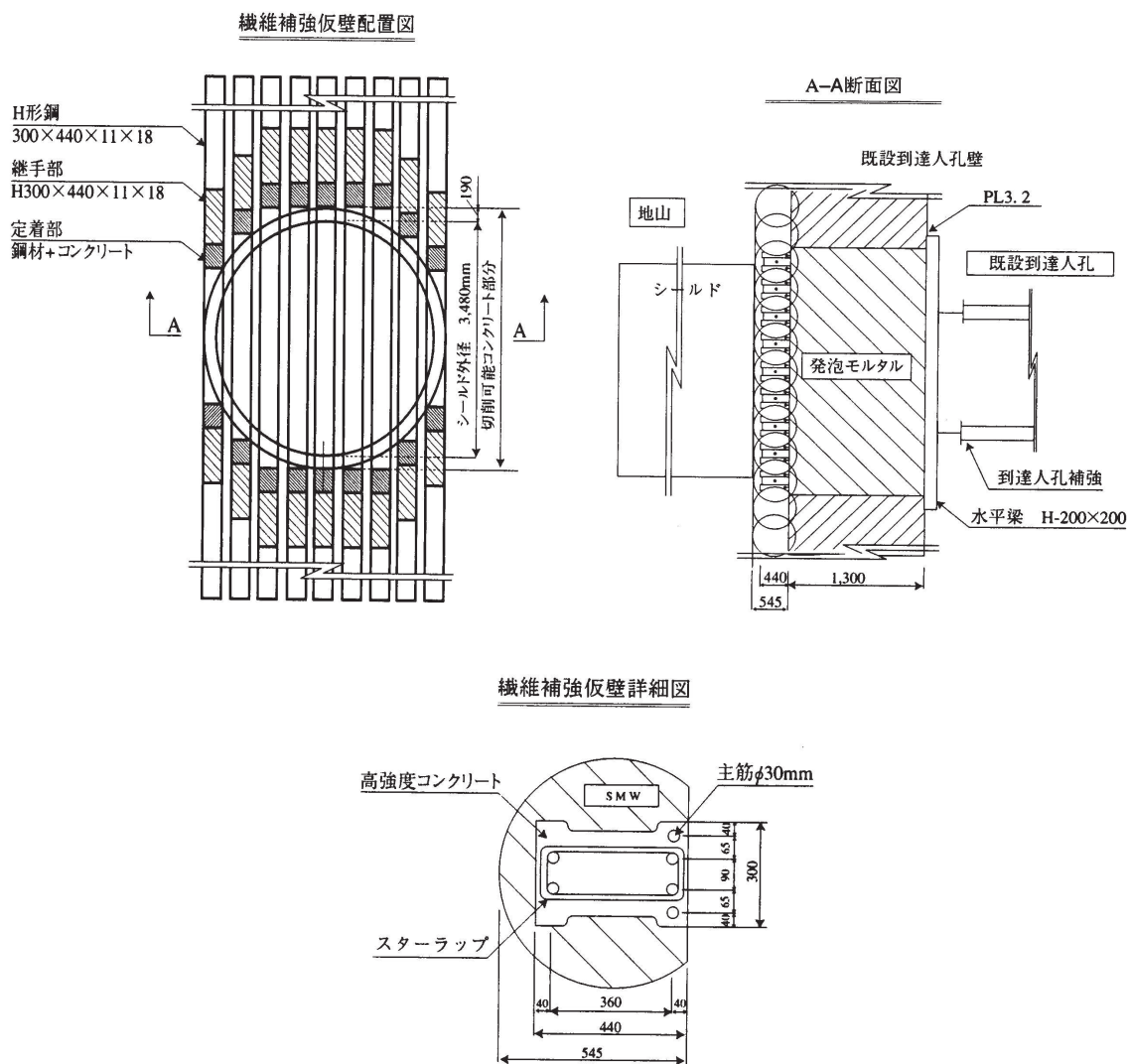
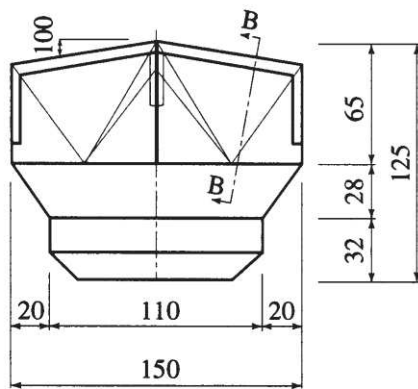
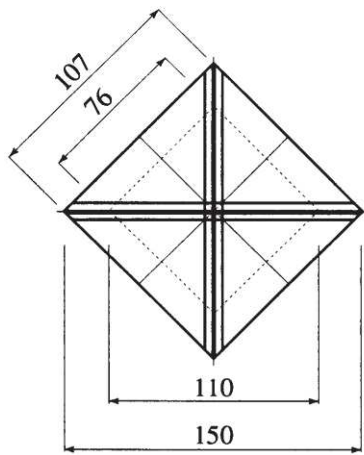


図-1.6.2 仮壁形状寸法図



B-B $S=1/2.5$

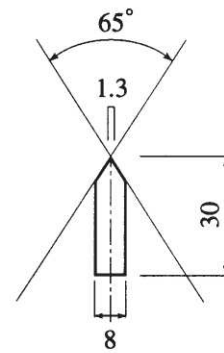


図-1. 6. 3 クロスループビット形状図

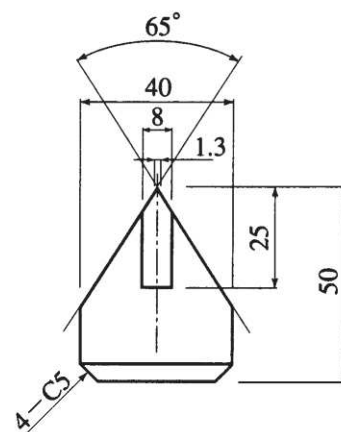
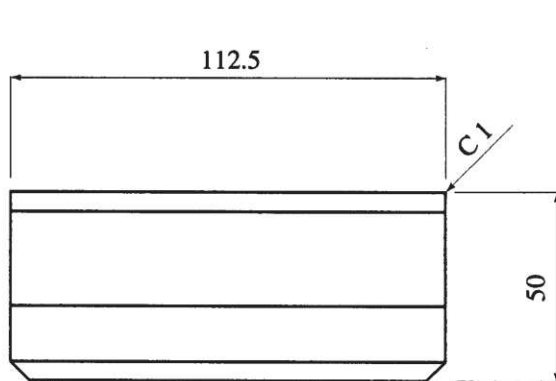
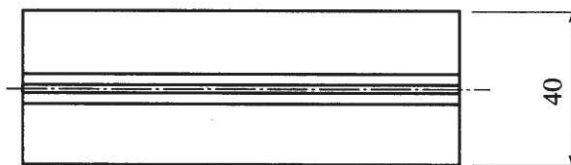


図-1. 6. 4 ループビット形状図

6. 3 ビット摩耗量の検討例

従来から用いられている単軸型泥土圧シールドと偏心多軸シールドのカッタービットの摩耗量について、比較検討した例を参考として示す。

① 検討条件

- 1) セグメント外径 : $\phi 3.35\text{m}$
- 2) シールド外径 : $\phi 3.48\text{m}$
- 3) 土 質 : 砂質土 (N=30~50 程度)
- 4) 掘進延長 : 3.5km
- 5) カッター回転半径 : 単軸型泥土圧シールド 1.74m
偏心多軸シールド 0.25m
- 6) カッター回転数 : 単軸型泥土圧シールド 1.80r. p. m
偏心多軸シールド 3.00r. p. m
- 7) 平均掘進速度 : $V=30\text{mm/min}$
- 8) 摩耗係数 : $K=0.015\text{mm/km}$

掘進土質が砂質土であるため、摩耗係数は表-1.6.1より0.01~0.02mm/kmの平均値とした。

表-1. 6. 1 円形シールド摩耗係数実績表 (参考)

土 質 区 分	摩耗係数 (mm/km)	適 用 例
軟弱粘性土 (N値 0~5)	0.005	
砂・礫混じり砂・土丹	0.01~0.02	矩形断面実績 砂層 0.01mm/km
砂 礫	0.02~0.03	円形断面実績 礫層 0.03mm/km

注) 摩耗係数は、J I S・E 5相当の超硬チップを用いた場合

② 摩耗量の検討

- 1) 単軸型泥土圧シールド

$$\delta_1 = K \times 2 \times \pi \times r_1 \times N_1 \times L_1 / V$$

ここに、K : 摩耗係数 (0.015mm/km)

r_1 : カッター回転半径 (1.74m)

N_1 : カッター回転数 (1.80r. p. m)

L_1 : 掘進延長 (3500m)

V : 平均掘進速度 (30mm/min)

$$= 0.015 \times 2 \times \pi \times 1.74 \times 1.80 \times 3,500 / 30$$

$$= 34\text{mm} > \text{許容摩耗量 } 20\text{mm}$$

よって、トンネル掘進期間中に1回のビット交換が必要と考えられる。

2) 偏心多軸シールド

$$\delta_2 = K \times 2 \times \pi \times r_2 \times N_2 \times L_2 / V$$

ここに、K : 摩耗係数 (0.015mm/km)

r_2 : カッター回転半径 (0.25m)

N_2 : カッター回転数 (3.00r. p. m)

L_2 : 掘進延長 (3,500m)

V : 平均掘進速度 (30mm/min)

$$= 0.015 \times 2 \times \pi \times 0.25 \times 3.00 \times 3,500 / 30$$

$$= 8\text{mm} < \text{許容摩耗量 } 20\text{mm}$$

よって、トンネル掘進期間中にビット交換の必要はないと考えられる。

③ 検討結果

	ビット 摩耗量	ビット交換の 必 要 性
単軸型泥土圧シールド	34mm	1 回必要
偏 心 多 軸 シ ー ル ド	8mm	な し

偏心多軸シールド工法技術資料

平成13年	3月	発行第1版
平成13年	7月	発行第2版
平成15年	3月	発行第3版
平成18年	4月	発行第4版
平成19年	6月	発行第5版
平成23年	8月	発行第6版
令和 2年	8月	発行第7版

シールド工法技術協会

URL : <http://www.shield-method.gr.jp>