

# 26. 泥漿シールドとその施工例

日立造船(株) 吉川 忠 男

## 1. まえがき

泥漿シールドは、滞水砂礫層の掘削において、従来の泥水加圧シールド、土圧系シールドでは、施工困難な土質条件や施工条件にまで適用性を拡大し、掘削土砂に適合する泥漿を注入混合し、掘削土砂を塑性化土に改良して、塑性受圧力、泥漿加圧力で切羽の安定をはかり、地下水を保持しながら排土する形式のシールドである。

## 2. 泥漿シールドの位置づけ

泥水加圧シールドは、軟弱地盤から崩壊性の滞水砂礫層まで、広範囲の土質条件に適応実績を有し補助工法の併用が少ないシールドとして認識されているが、切羽安定に必要な泥水加圧力（液性加圧力）が発生しない透水性の土質や、土被りの小さい施工環境条件では、かならずしも満足すべき結果をえていないことが多い。表-1に示すように、切羽の安定に必要な泥水加圧力 $\Delta P$ が発生するためには、施工実績の分析により、土質条件として粘土・シルトの含有率が10%以上必要であり、透水係数が $k < 10^{-2} \text{ cm} / \text{ s}$ であることが必要と考えられる。

圧力保持シールド（一般的には、土圧系シールドという）は、切羽のゆるみ土圧をカッター圧力室に充満した掘削土砂の密度圧と塑性受

表-1 泥水加圧と圧力保持（土圧系）シールドの比較

項目	泥水加圧シールド	圧力保持シールド
自明な説明図		
切羽安定	粘性土: $\phi = 0$ $\gamma'_s(A_0+k) - 2C_u - \gamma'_s \cdot k + \Delta P$ 砂質土: $C_u = 0$ $K_0 \cdot \gamma'_s(A_0+k) = \gamma'_s \cdot k + \Delta P$ $K_0$ : 土壁土圧係数 $\gamma'_s$ : 土砂の水中密度 $\gamma'_s$ : 圧力室内土砂の水中密度 $k$ : 泥水の水平透率 $\Delta P$ : 泥水の加圧力(地下水圧より過剰圧)	粘性土: $\phi = 0$ $\gamma'_s(A_0+k) - 2C_u = \gamma'_s(A_0 + 2C_u + R)$ 砂質土: $C_u = 0$ $K_0 \cdot \gamma'_s(A_0+k) = \gamma'_s \cdot k + R$ $A_0$ : 地山のゆるみ高さ $k$ : 圧力室内の位置高さ $k_0$ : 地下水の高さ $C_u$ : 地山土砂の粘着力 $R$ : 圧力室内土砂の粘着力 $R$ : 保持体の塑性受圧力
切羽安定の必要条件	泥水加圧力 $\Delta P$ が発生すること	掘削土砂が塑性流動化していること
適用工法		
適用土質	泥水加圧シールドに適用する土質条件 (1) 細粒分(粒径0.075mm以下)の含有率が乾燥加積率で10%以上 (2) 礫分(粒径2mm以上)の含有率が乾燥加積率で60%以下 (3) 自然含水率が18%以上 (4) 最大礫200~300mmを混在しない (5) 透水係数 $k < 10^{-2} \text{ cm} / \text{ sec}$	圧力保持(土圧系)シールドに適用する土質条件 (1) 細粒分(粒径0.075mm以下)の含有率が乾燥加積率で7%以上 (2) 礫分(粒径2mm以上)の含有率が乾燥加積率で70%以下 (3) 粘性土(粘土・シルト)の含有率が40%以上では $k$ 値が0.15以下 (4) 自然含水率が砂質土では18%以上、粘性土では20%以上 (5) 透水係数 $k < 5 \times 10^{-2} \text{ cm} / \text{ sec}$

泥漿シールドは、上記の二機種でカバーできない土質領域への適応性を拡大するために開発されたシールドで、

切羽安定機能として、泥水加压シールドの液性加压 $\Delta P$ と圧力保持シールドの塑性受圧力 $B$ の両者を同時に作用させる複合機能を有するシールドである。粗大礫を混在する砂礫層には、泥漿を注入混練して塑性化土に改良し、掘削断面内で土質変化する場合、掘削土砂を迅速に塑性化する必要のある場合およびシールド径が大きい場合には、混練効果の大きい機械形式とし、掘削土砂を塑性化状態で排出できるようにしたことを基本とするシールドである。

### 3. 泥漿シールドに必要な機能

泥漿シールドは掘削土砂を改良し、塑性流動化をはかることを基本としているので、機械構造に必要な機能は、(i) 泥漿の注入(土質改良作用)、(ii) 混練作用(塑性化促進作用)、(iii) 止水作用(地下水保持作用)、(iv) 円滑な排土作用(安定掘削作用)などが考えられる。

#### 3.1 泥漿の注入

掘削土砂が塑性流動化するためには、掘削土砂に粘土・シルトが7~15%含有していることが必要となる。図-1に泥漿シールドの適応土質を示し、①曲線より右側と、②曲線より左側の土質について注意する必要がある。①曲線より右側の土質粒度分布には、泥漿を注入混練して、少なくとも①曲線より左側の粒度分布に改良する必要がある。②領域では特殊粘土ペーストの泥漿の注入が、③領域では単なる特殊粘土ペーストだけでなく、細粒材を混合した特殊粘土モルタル泥漿を注入することが必要である。④領域では軟弱な粘性土であることが必要である。

図-2は、泥漿の密度と粘土・シルトの添加率(縦軸)および掘削土砂当りの泥漿注入量(横軸)の関係を参考として示す。

#### 3.2 混練作用

泥漿シールドにおける掘削土砂の混練作用は、最も重要な要素となる。掘削土砂への泥漿の効果的な混練掘削土砂自体の混練を効果的に行なうために、カッター圧力室内の滞留土砂を広い範囲で混練し、排土装置に搬送する作用のある構造を採用することが必要である。カッターのかき上げ板による滞留土砂の移動と混練スクリュの組合せ作用が有効である。混練スクリュについては、図-4,6の構造が採用されている。

#### 3.3 止水作用

掘削土砂と泥漿を混練して塑性流動化をはかると、生コンクリートのような塑性を示し、透水係数 $k=2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 程度に改良されるものと考えられる。従って、塑性化した掘削土砂を静止空間(サンドプラグ形成ゾーン)に充満させると、生コンクリートの配管搬送のように、水と骨材が分離することなく充満状態で移動し、地下水圧や土圧に耐える抵抗が発生する。この抵抗の加減のために、ゲートの開度調整やサンドプラグ形成ゾーンの長さ調整を行なう。

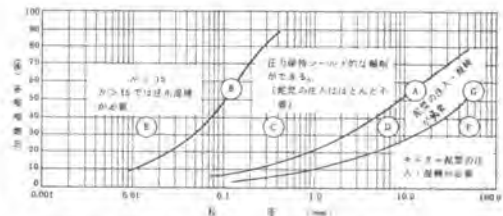


図-1 泥漿シールドの適応土質

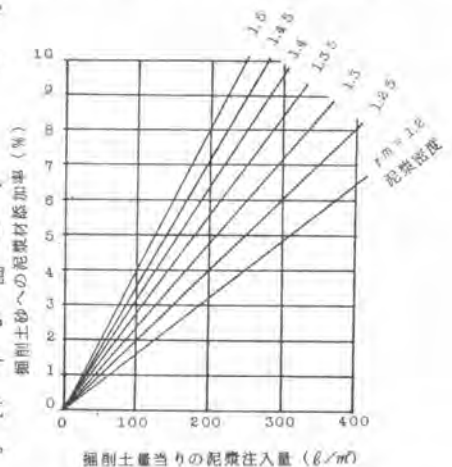


図-2 泥漿注入量(参考値)

### 3.4 円滑な排土作用

巨大礫など、地山に混在する固形物を円滑に排出することが、シールドの掘進停止が少なく安定掘削につながる要素と考えられる。リボンスクリュー式は、シールド外径の $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{6}$ の固形物まで連続的に排出できるので、安定した掘削で予定通りにトンネル施工が行なわれた。

## 4. 泥漿シールドの機械構造

### 4.1 ダブルスクリュ式泥漿シールド

図-4に示すように、カッター圧力室に独立駆動の混練スクリュを設け、カッターの回転の有無にかかわらず任意に回転させ、カッター圧力室に取込んだ掘削土砂を合理的に塑性化させる。搬送スクリュは混練スクリュと同心的に設備し、混練スクリュの搬送効果を利用して塑性化土を搬送スクリュに移送する。搬送だけを必要とする時は、混練スクリュと搬送スクリュは一体として回転させるとよい。ダブルスクリュ式は、粗大礫の混在が少ない複雑な土質条件、施工環境に最適である。

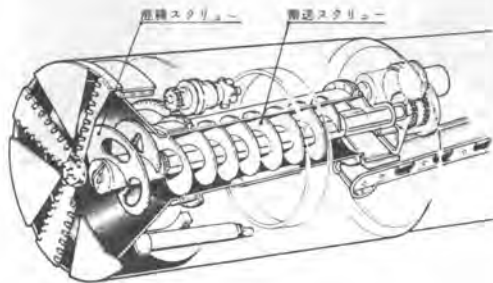


図-4 ダブルスクリュ式泥漿シールド

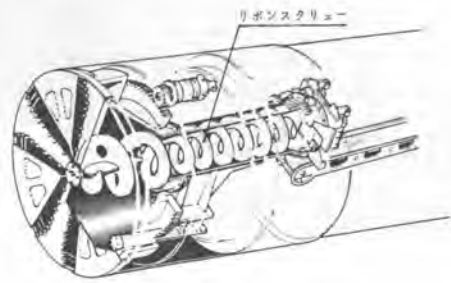


図-5 リボンスクリュー式泥漿シールド

### 4.2 リボンスクリュー式泥漿シールド

図-5に示すように、中心軸のないリボンスクリューを排土装置に採用し、巨礫の連続排出を可能にしたシールドである。リボンスクリューは、スクリュ外径の $\frac{2}{3}$ 程度の大きさの礫が排出でき、シールド外径の $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{6}$ 程度の巨礫が連続的に排出できる。リボンスクリューの回転は、リボンスクリューの外周に固定した外環により行なうため、排出土砂はスクリュの軸線に沿って排出されるので、ベルトコンベヤへの移送が円滑に行なえ、かつベルトコンベヤをスクリュ排土口に接近して配置できるので、セグメント組立てスペース上有利で、特に小口径で巨大礫が排出できるシールドとしてその特徴がある。

### 4.3 ダブルリボンスクリュー式泥漿シールド

図-6に示すように、大口径の泥漿シールドの場合、カッター圧力室の容積が大きく、圧力室に滞留する土砂の混練作用が重要となるので、排土スクリュの外側に独立回転のできる混練スクリュを設けたものである。

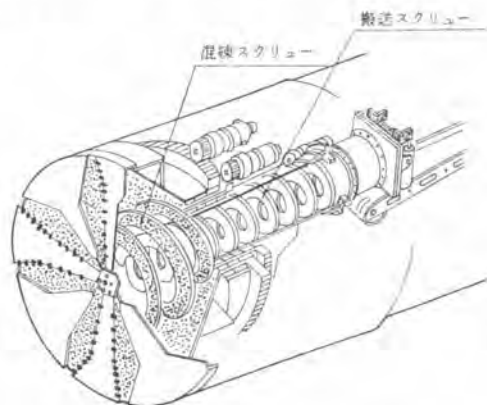


図-6 ダブルリボンスクリュー式泥漿シールド

### 5. 泥漿シールドの施工例

リボンスクリュー式泥漿シールドは、4台の施工実績があり、透水係数  $k=10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ cm/sec}$  程度の砂礫層の掘削において、掘削土砂に泥漿を注入混練し、塑性化土に改良して、止水しながら巨礫を連続的に排出した。地山の粘土・シルト含有率4%が、排出土砂では粘土・シルトの含有率が約10%になっていた。写真-1は巨大礫排出の状態を示す。一方軟弱粘性土地盤の掘削においては、泥漿を必要とせず、写真-2に示すように順調に掘削排土している。リボンスクリュー式は粘性土の付着も少なく軟弱粘性土から巨礫を混在する崩壊性地山までの広範囲の土質に対応できることが実証された。



写真-1 巨大礫の排出状況



写真-2 粘性土の排出状況

ダブルスクリュー式泥漿シールドは、3台の施工実績を有し、小土被りの粘性土を混練することにより均一な土砂に改良し、地盤の変状も少なく順調な掘削を行なっている。また土質変化のはげしい工区の密閉機械掘りシールドとして適応性を発揮し、写真-3は混練スクリューの混練作用と送り作用により、洪積粘性土を順調に掘削排土している状態を示す。

施工例のように、泥漿シールドは、従来の泥水加圧シールド及び圧力保持シールドでは、掘削困難な地山まで対応性があり、必要に応じて泥漿の注入混練を行なうことにより、広い範囲の土質に適用できるシールドであることが実証された。

表-2は、リボンスクリュー式泥漿シールドで連続排出可能な巨大礫と、セグメントおよびヒューム管の寸法との関係(標準値)を示す。

### 6. あとがき

泥漿シールドは、実用化されて1年あまりであるが、補助工法が少なく、地盤の変化も少なく、安定掘削ができることから工期的にも有利であるとの評価をえている。今後さらに改良開発を行ない、小口径から大口径のシールドへと適用拡大をはかっていると考えている。関係各位のご指導・ご助言をお願いします。



図-3 洪積粘性土の排出状況

表-2 連続排出可能な礫径の例

	仕上り内径 (mm)	シールド径 (Dmm)	リボンスクリュー (軸なし)φdmm
ヒューム管	1,000	1,220	200
	1,200	1,450	250
	1,350	1,650	300
	1,650	1,970	350
セグメント	1,400	2,130	350
	1,500	2,280	400
	1,650	2,480	450
	1,800	2,680	500
シールド径Dと礫径dの比			$\frac{D}{d} = \frac{1}{6} \sim \frac{1}{5.3}$