

# 31. 土圧式シールド用スクリーコンベヤの土圧保持性能

日立造船(株)：吉川 忠男

## 1. 緒言

土圧式シールドのスクリー式排土装置は、スクリーコンベヤに充満した土砂を利用して、カッタチャンバ内土圧を維持しながらその土圧をスクリーコンベヤで圧力降下させ、排出口では土圧をゼロにしてトンネル内に排出するものである。

スクリーコンベヤがカッタチャンバ内土圧を圧力降下させる作用をスクリーコンベヤの圧力保持作用と表現する。

スクリーコンベヤがどれほどの土圧を保持できるかについては、実験や施工実績をもとに検討されているが、数値的に扱ったものはないように思われる。そこで、スクリーコンベヤの圧力保持の計算式を導き、実施工のデータを分析したところ計算値と施工値がかなりよく一致することが確認できた。

本報は、スクリーコンベヤ内に充満した土砂を利用して、カッタチャンバ内土圧を圧力降下させる計算式、圧力降下を大きくする対策、および施工例の数値的検討結果について述べる。

## 2. 土圧式シールド

土圧式シールドは、密閉型に分類され、さらに土圧シールドと泥土圧シールドに区分される。

土圧式シールドは、掘削した土砂を塑性流動化してスクリーコンベヤで排出するシールドである。

スクリーコンベヤは、従来からコンベヤ長さが長いものほど高い土圧を保持し、図1に示すようにコンベヤ入口土圧  $P_0$  が出口で  $P_0=0$  で排土されている。

高い土圧が作用する土圧式シールドでは、スクリーコンベヤを二連式にした例が多い。

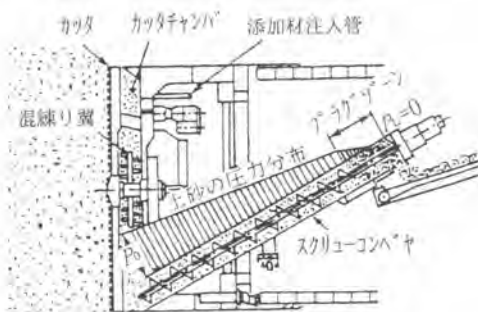


図1 スクリューコンベヤの圧力保持(推定)

## 3. スクリューコンベヤの圧力降下の計算式

記号の説明

$\Delta P$ : 圧力降下値	$e$ : 羽根厚	$\tau$ : コンベヤと土砂のせん断応力
$L$ : コンベヤ内の当該長さ	$i$ : スクリューピッチ	$C_1$ : 係数 $= D_0 / (D_0 - H)$
$D_0$ : スクリュー外径	$\theta$ : 排出角	$C_2$ : 係数 $= D_0 - 2H / (D_0 - H)$
$D_1$ : スクリュー軸径、穴径	$\phi$ : コンベヤ傾斜角	$\alpha_0$ : スクリュー外径ねじれ角
$H$ : 羽根高さ	$\gamma$ : 土砂の密度	$\alpha_m$ : スクリュー平均径ねじれ角
$U$ : 圧力降下数	$\eta$ : 排出効率	$\alpha_r$ : スクリュー根元径ねじれ角

スクリーコンベヤのスクリー溝部に充満した塑性流動化土砂がプラグ流として移動する場合の圧力降下の式を導き、軸付きスクリー、およびリボンスクリーの圧力降下値の計算式を求める。

### 3.1 スクリー部の圧力降下値

スクリーコンベヤが水平配置( $\phi=0$ )のスクリー部の圧力降下値  $\Delta P$ を式(1)で表す。ただし  $l$ を圧力降下数と呼び、式(2)、(3)で表す。コンベヤが傾斜配置の場合は、コンベヤ内土砂の密度圧による圧力降下値  $\Delta P_s = \gamma l \sin \phi$ は別途計算するとよい。

$$\Delta P = (L\tau/D_s)l \quad \dots(1)$$

#### (1) 軸付きスクリーの圧力降下数 $l_1$

$$l_1 = \frac{D_s}{H} \left[ C_1 \left( \frac{\cos \alpha_b}{\cos \alpha_m} \sin \theta - C_1 \frac{\cos \alpha_b}{\sin \alpha_m} \cos \theta \right) + C_2 \left( \frac{\sin \alpha_s \cos \alpha_s}{\cos \alpha_m} + C_3 \frac{\cos^2 \alpha_s}{\sin \alpha_m} \right) + \frac{2H}{(r-e) \sin \alpha_m \cos \alpha_m} \right] \quad \dots(2)$$

#### (2) リボンスクリーの圧力降下数 $l_2$

リボンスクリーは中心部に上砂の軸があるものとする。リボンスクリーが圧力保持するためには、中心部の上砂が上砂同士のせん断応力により保持土圧に耐える長さであることが必要である。

リボンスクリーの圧力降下数  $l_2$ を式(3)に示す。

$$l_2 = \frac{D_s}{H} \left[ C_1 \left( \frac{\cos \alpha_b}{\cos \alpha_m} \sin \theta - C_1 \frac{\cos \alpha_b}{\sin \alpha_m} \cos \theta \right) + \frac{2H}{(r-e) \sin \alpha_m \cos \alpha_m} \right] \quad \dots(3)$$

図2に軸付きスクリーの圧力降下数  $l_1$ を、図3にリボンスクリーの圧力降下数  $l_2$ を示す。圧力降下数  $l$ は、スクリーのピッチ  $t$ と排出効率( $\eta =$ 掘削土量/コンベヤ理論排土量)より求められる。

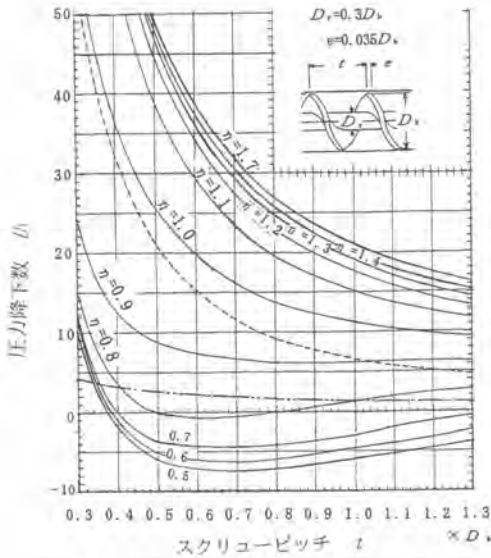


図2 軸付きスクリーの圧力降下数  $l_1$

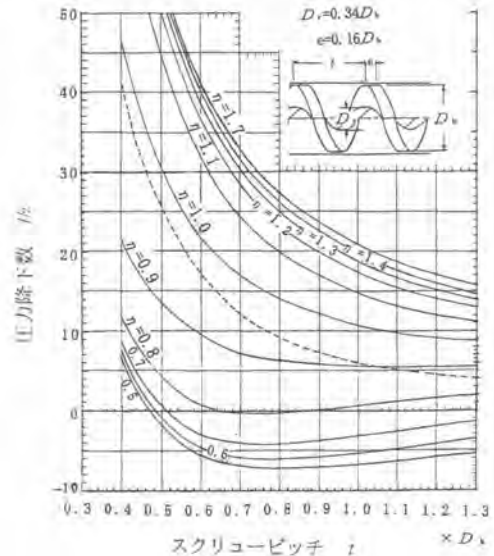


図3 リボンスクリーの圧力降下数  $l_2$

### 3.2 回転環の圧力降下数

回転環の圧力降下数  $U_3$ 、 $U_4$  は式(4)、(5)で示す。図4、5にそれぞれの値を図示する。

(1) 軸付きスクリーユの回転環圧力降下数  $U_3$

$$U_3 = \frac{D_b}{H} \left[ C_1^2 \frac{\cos \alpha_v}{\sin \alpha_m} + C_2 \left( \frac{\sin \alpha_r \cos \alpha_r}{\cos \alpha_m} + C_3 \frac{\cos^2 \alpha_r}{\sin \alpha_m} \right) + \frac{2H}{(t-e) \sin \alpha_m \cos \alpha_m} \right] \dots (4)$$

(2) リボンスクリーユの回転環圧力降下数  $U_4$

$$U_4 = \frac{D_b}{H} \left[ C_1^2 \frac{\cos \alpha_v}{\sin \alpha_m} + \frac{2H}{(t-e) \sin \alpha_m \cos \alpha_m} \right] \dots (5)$$

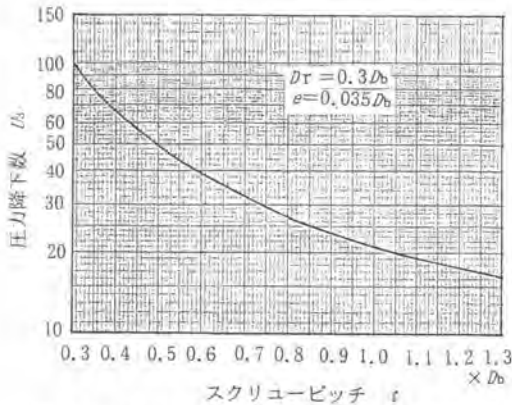


図4 軸付きスクリーユの回転環圧力降下数  $U_3$

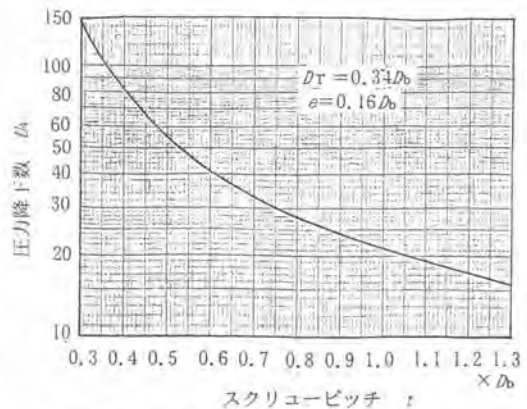


図5 リボンスクリーユの回転環圧力降下数  $U_4$

### 3.3 プラグゾーンの圧力降下値

$$\Delta P = (4/D) L \cdot \tau \dots (6)$$

ここで、 $D$ はプラグゾーンのケーシング内径である。

### 4. 土砂のせん断応力

土砂同士の内部せん断応力に対して、土砂とコンベヤ材料とは異種材料のせん断応力で、外部せん断応力と表現できる。一般に土砂の内部せん断応力は外部せん断応力より大きい。

外部せん断応力  $\tau = (4/3) \tau_v + (8V/D) \mu_a$  を土砂のスランプをもとに、ずり速度から求められるように一例を図6に示す。 $\tau_v$ は降伏値である。図6では粘度  $\mu_a = 200P$  (ポアズ) とした。せん断応力  $\tau$  は細粒分の含有率、含水率および塑性化改良材の性状などにより変化するので、実際には当該土砂を計測するのが望ましい。ずり速度はスクリーユ溝部の断面を平均管径に換算しその管内速度で表す。

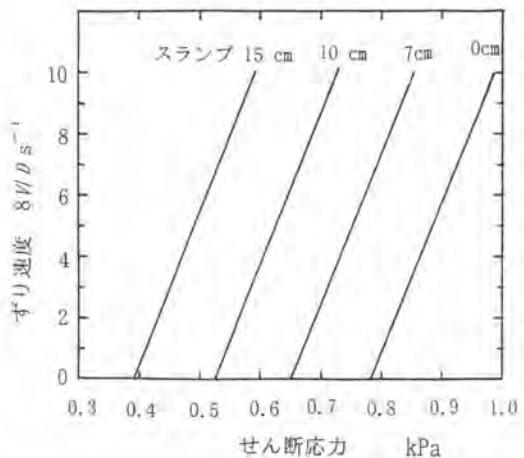


図6 土砂のせん断応力の例

## 5. スクリューコンベヤの圧力降下値を大きくする方策

計算式から明らかなように、圧力降下値 $\Delta P$ を大きくするには、コンベヤ内のスクリュー長さ $L$ 、土砂のせん断応力 $\tau$ 、圧力降下数 $l$ 等を大きくするとよい。

### 5.1 スクリューの構造と寸法

シールドの設計には、土質や所要の保持土圧に適合するスクリューコンベヤを選定・設計することが重要である。スクリューコンベヤの圧力降下数 $l$ を大きくするために、寸法的には式(2)、(3)、(4)、(5)の $(t-e)$ および $h$ を小さくすることである。

### 5.2 スクリューの運転

スクリューコンベヤが設計・製作された後は、スクリューの運転により保持圧力に対応するのが実際的である。スクリューの運転では、コンベヤの排出効率 $\eta$ を変化させること、すなわちスクリュー回転数を変化させるとよい。 $\eta$ を大きくすると圧力降下値が大きくなり、逆では圧力降下値が小さくなる。

### 5.3 施工

施工面では、スクリューコンベヤ内土砂のせん断応力 $\tau$ を大きくすることである。

掘削してカッターチャンバ内に取り込んだ土砂は、せん断応力を小さくするために塑性流動化添加材を注入・混練りするが、スクリューコンベヤ内では土砂のせん断応力 $\tau$ が小さいと圧力降下値 $\Delta P$ は小さくなる。スクリューコンベヤの圧力降下値を大きくするにはコンベヤ内の土砂のせん断応力を大きくする改良方法を採用するとよい。

## 6. 施工例の分析

上述の計算式で演算した圧力降下値と施工値を比較するため、二施工例を数値的に検討する。ただし塑性化土砂は土・水一体と考え、さらにコンベヤ出口の絞り抵抗は無視する。

### 6.1 第一例[軸付きスクリューコンベヤ]

第一例のシールドの概略を図7に示し、要目と施工運転データを表1に示す。

スクリューコンベヤは単一の軸付きスクリューである。

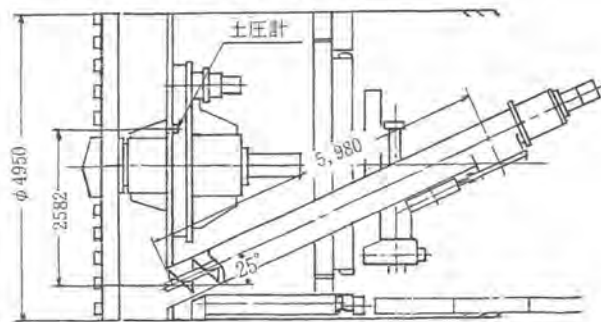


図7 第一例のシールド概略図

表1 シールドの要目とその運転データ

シールドの要目	運転データ	ケース1	ケース2
シールド外径 $\phi 4.95\text{m}$	掘進速度 $\text{m}/\text{min}$	0.0453	0.0364
コンベヤ寸法	土圧計指示値 $P_s$ $\text{MPa}$	0.157	0.152
ケーシング内径 $D=0.5716\text{m}$	スクリュー回転数 $\text{min}^{-1}$	8.7	7.2

スクリー外径 $D_0=0.565\text{m}$ 軸径 $d_0=0.1398\text{m}$	排出土砂のスランプ 8 cm	
羽根ピッチ $t=0.46\text{m}$ ( $0.814D_0$ )	チャンバ内土砂密度圧 $P_0$ 土圧計がコンベヤ入口より2582mm高く 土砂密度圧は +0.0506MPaとなる	
羽根厚 $e=0.019\text{m}$ コンベヤ内スクリー長さ $L=5.98\text{m}$	コンベヤ入口土圧 $P_1$ MPa (必要圧力降下値)	0.2076      0.2026

[計算]

	ケース1	ケース2
(1) 排土量	$Q_1 = \pi/4 \times 4.95^2 \times 0.0453 \times 1.3 = 1.1327\text{m}^3/\text{min}$	$Q_2 = 0.9102\text{m}^3/\text{min}$
(2) コンベヤ理論排土量	$q_1 = \pi/4 \times (0.5716^2 - 0.1398^2) \times (0.46 - 0.019) \times 8.7 = 0.9252\text{m}^3/\text{min}$	$q_2 = 0.7657\text{m}^3/\text{min}$
(3) 排出効率	$\eta_1 = Q_1/q_1 = 1.2243$	$\eta_2 = 1.1888$
(4) 圧力降下数	軸径 $d_1=0.244D_0$ , $e=0.0336D_0$ で、図2の条件と少々異なるが、 $h$ への影響は小さいので図2より $h$ を求めることにする。 $h_1=22.5$	$h_2=22$
(5) コンベヤの計算圧力降下値	スクリー溝部の上砂通過断面を平均管直径 $d$ に換算すると $d=0.3314\text{m}$ となる。 ざり速度 $8\text{mm}/d=5.286\text{ s}^{-1}$ $\tau_1=0.70\text{ kPa}$ 圧力降下値 $\Delta P_1 = (L\tau/d_0)h_1$ $= (5.98 \times 0.70 / 0.565) \times 22.5 = 166.70\text{ kPa}$ コンベヤ内土砂の降下密度圧 $\Delta P_{s1}=49.53\text{ kPa}$ コンベヤの圧力降下値の合計 $\Sigma\Delta P_1=216.23\text{ kPa}$ 計算値と必要圧力降下値の比 $\lambda_1 = \Sigma\Delta P_1/P_0 = 216.23/207.6 = 1.042$ 上記計算のように、コンベヤの圧力降下の計算値と施工値はよく一致しているといえる。	$8\text{mm}/d=4.248\text{ s}^{-1}$ $\tau_2=0.69\text{ kPa}$ $\Delta P_2=160.67\text{ kPa}$ $\Delta P_{s2}=49.53\text{ kPa}$ $\Delta P_2=210.2\text{ kPa}$ $\lambda_2=1.038$

## 6.2 第二例[リボンスクリューと軸付きスクリーウの二連式]

第二例のシールドの概略を図8に、要目と運転データを表2に示す。No.1コンベヤは回転環で駆動されるリボンスクリューで、プラグゾーンを介して軸付きスクリーウのNo.2コンベヤに連なっている。

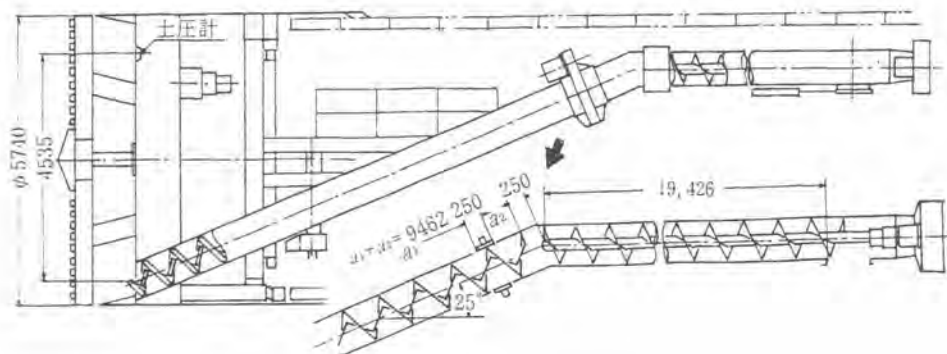


図8 第二例のシールド概略図

表2 シールド要目とその運転データ

シールドの要目			運転データ		ケース1	ケース2	ケース3
シールド外径 $\phi 5.74\text{m}$			シールド掘進速度 $\text{m}/\text{min}$		0.0409	0.0515	0.0452
コンベヤ寸法	No. 1	No. 2	土圧計指示値 $P_s$ MPa		0.225	0.183	0.234
ケーシング内径 $D$ (m)	0.6224	0.6224	コンベヤ No.	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
スクリー外径 $d$ (m)	0.618	0.613	コンベヤ回転数 $\text{min}^{-1}$	8.7	12.9	10.6	15.7
軸径 $d_s$ (m)	0.294	0.1907	排出土砂のステップ 10 cm				
スクリーピッチ $t$ (m)	0.580	0.510					
羽根厚 $e$ (m)	0.100	0.025	チャンパ内土砂密度圧 $P_s$		土圧計がコンベヤ入口より4535mm高く、土砂の密度圧は+0.0889MPaとなる		
スクリー長さ $L$ (m)	9.462	19.426	コンベヤ入口土圧 $P_s$ MPa		0.3139	0.2719	0.3229
回転環長さ (m)	0.25	-					
プラグ長さ (m)	0.25	-					

表3 第二例の計算手順にそった各数値と計算値のまとめ

		ケース1		ケース2		ケース3	
掘削土量 $\text{m}^3/\text{min}$		1.3752		1.7316		1.5198	
コンベヤNo.		No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
コンベヤ理論排土量 $\text{m}^3/\text{min}$		1.2699	1.7240	1.5472	2.0982	2.0435	1.4968
コンベヤ排出効率 $\eta$		1.0829	0.8230	1.1192	0.8253	0.7437	1.0154
スクリー	圧力降下数 $U$ (図2, 3)	15	2	16.5	2	-2	13.5
	平均管径 $d$ m	0.4204	0.3471	0.4204	0.3471	0.4204	0.3471
	すり速度 $s^{-1}$	3.14	5.59	3.96	7.03	3.47	6.17
	せん断応力 $\tau$ kPa	0.585	0.637	0.600	0.665	0.595	0.650
圧力降下値 $\Delta P$ kPa		134.35	40.37	151.57	42.15	-18.22	278.08
回転環	圧力降下数 $U$ (図5)	23	-	23	-	23	-
	圧力降下値 $\Delta P$ kPa	5.44	-	5.58	-	5.54	-
プラグ ゾーン	すり速度 $s^{-1}$	0.97	-	1.22	-	1.07	-
	せん断応力 $\tau$ kPa	0.41	-	0.55	-	0.545	-
	圧力降下値 $\Delta P$ kPa	0.66	-	0.88	-	0.88	-
コンベヤ内土砂降下密度圧 $\Delta P_s$ kPa		82.55		82.55		82.55	
圧力降下値の合計 $\Sigma \Delta P$ kPa		263.37		282.73		348.83	
圧力比 $i = \Sigma \Delta P / P_s$		263.37/313.9=0.84		282.73/271.9=1.04		348.83/322.9=1.08	

第二例の計算値は施工値の約-16~+8%の範囲にあり、計算値が活用できることがわかる。

## 7. 結 言

塑性化土砂を充滿したスクリーコンベヤの圧力降下の計算式を導き、施工データを数値的に検討した結果、計算値と施工値がかなりよく一致することが確認できた。

スクリーコンベヤの圧力保持性能の数値化により、土圧式シールド用スクリーコンベヤの設計から運転・施工までの検討、および土圧式シールドの大深度化への展開に役立つものと思う。

[文献] 吉川忠男, シールド掘進機用スクリーコンベヤ内土砂の圧力降下, 他, 日本機械学会論文集, 62巻, C編, 595号, 599号