

1. 垂直リボンスクリューコンベヤの実用化

日立造船㈱：岡田 利幸、吉川 忠男

ジオテックマシナリー㈱：花岡 泰治

1. 緒言

大深度化の進む地下トンネル工事では、掘削残土の揚土方法が問題の一つとして挙げられている。効率的で、環境および安全性が確保され、さらに小面積配置が可能で経済性も満足する揚土装置が求められている。当社では、これら要求に応えるため、高揚程の垂直リボンスクリューコンベヤ（H iースクリーンコンベヤ）の開発を進めている（図1）。

スクリーンコンベヤは、連続、密閉搬送ができ、コンパクトであるという特徴を持つ。従来の垂直スクリーンコンベヤは、軸付のスクリーンを高速回転させることで遠心力を発生させ、流動性のあるかさ密度の小さい粉粒体を揚送するもので、港湾での穀物や鉱石などの粉粒体の荷役を行う連続式アンローダに利用されている。この種の垂直スクリーンコンベヤは、土砂のようにかさ密度が大きく性状の一定しない運搬物の揚送には適さない。これまで、土木施工現場等で発生する土砂を、垂直スクリーンコンベヤでコンパクトに揚土する試みは、何回となく行われてきたが、閉塞や強度不足などが原因で実用化に至っていないのが実状である。また、スクリーンコンベヤにおける垂直揚土の理論的検討は皆無に近く、実験の報告も少ない。

筆者らは、垂直スクリーンコンベヤに、かさ密度の大きな粉粒体を充填させて、スクリーンを低速回転で揚送する理論式を導いた上で、効率がよく、強度のあるリボンスクリュー式の垂直揚土装置を設計した。実証機による現場発生土砂を用いた実験では、ほぼ理論値通りの揚送性能を確認することができた。また、含水比が大きく塑性流動化した土砂の揚土実験もあわせて実施した。

以下に、理論解析、実験結果を中心に、開発した垂直リボンスクリューコンベヤを紹介する。

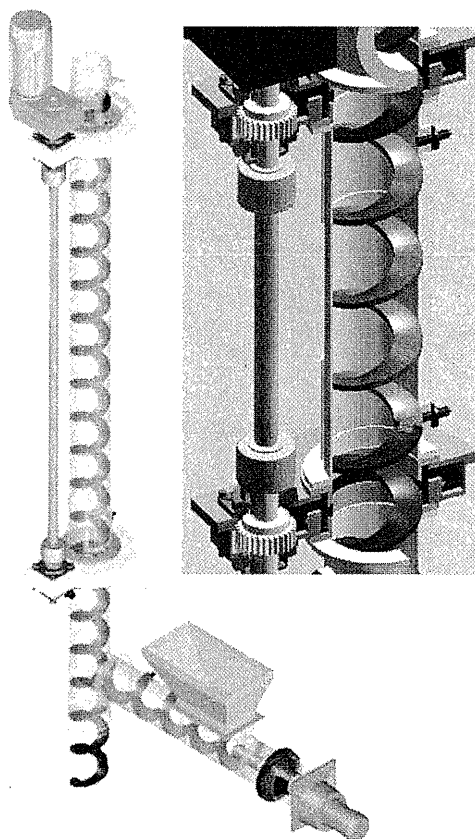


図1 垂直リボンスクリューコンベヤ
(H iースクリーンコンベヤ)

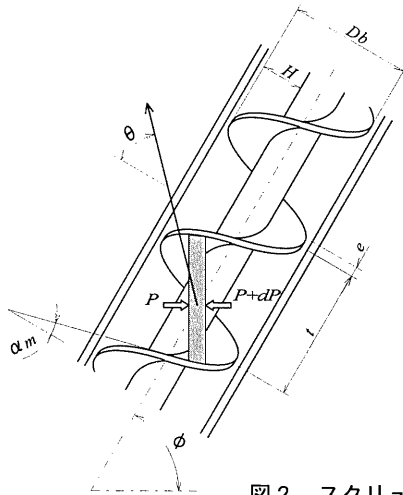
2. スクリューコンベヤの粉粒体運搬理論⁽²⁾

塑性流動化土砂をスクリューコンベヤに充満させて、圧力を保持することおよび加圧し運搬する理論式は既報である⁽¹⁾。その場合、塑性流動化土砂とスクリュー面間に作用するせん断力が大きく影響する。

一方、乾燥土砂、例えば砂、表土、改良土砂等、表面に水分が浮かない程度の土砂の場合は、摩擦力を考慮する必要がある。

図2にスクリューコンベヤの理論式で使用する記号を説明する。また、理論の展開については、次の仮定を設ける。

- (1) スクリュー溝部に充満した粉粒体はすべての面に接触している。
- (2) 加圧力はスクリュー溝長さの関数である。
- (3) 粉粒体とコンベヤとの摩擦係数は、圧力に無関係で、コンベヤ全長にわたって一定とする。
- (4) スクリューとケーシングの隙間は無視する。
- (5) 粉粒体はスクリュー溝内をプラグ流として移動する。



D_b : スクリュー外径
 H : スクリュー羽根高さ
 L : コンベヤ長さ
 e : スクリュー羽根厚
 t : スクリューピッチ
 C (定数) $= (D_b \cdot 2H) / D_b$
 E (定数) $= (D_b \cdot H) / D_b$
 K (側圧係数) $= (1 \cdot \sin^2 \phi) / (1 + \sin^2 \phi)$
 k (係数) $= E \tan(\alpha_m + \rho)$
 P_L : スクリューコンベヤの長さ L の圧力
 P_0 : 初期圧力
 μ_b : 運搬物とケーシング内面との摩擦係数
 μ_s : 運搬物とスクリューとの摩擦係数
 α_b : スクリュー外径のねじれ角
 α_m : スクリュー平均径のねじれ角
 α_r : スクリュー軸(穴)部のねじれ角
 ρ : 摩擦角 $= \tan^{-1} \mu$
 θ : 排出角 ($0 \leq \theta \leq 90^\circ$)
 ϕ : スクリュー傾斜角
 γ : 運搬物のかさ密度

図2 スクリューコンベヤの理論式で使用する記号の説明

このとき、運搬・加圧の一般式は、式(1)で表される。

$$P_L = \exp\left(\frac{KLM}{N}\right) \cdot (P_0 - A) \cdot A \quad \dots (1)$$

ここで、 A 、 N は、それぞれ次式で表される。

$$A = \frac{HE\gamma \cos \alpha_m (k \sin \phi - \mu_b \cos \phi)}{KM} \quad \dots (2)$$

$$N = H \sin \alpha_b \cos \alpha_m (k \sin \alpha_m + E \cos \alpha_m) \quad \dots (3)$$

M は、スクリュー形状によって変わる。図3に、従来方式の(a)軸付きスクリュー、今回開発・実用化した(b)リボンスクリューおよび(c)固定軸装入りボンスクリューの模式図を示す。リボンスクリューの場合の M の計算式を、式(4)に整理する。

$$M_1 = \mu_b (\cos \alpha_b \cos \theta - k \cos \alpha_b \sin \theta) \mu_s \cdot \frac{2HE}{(t-e)} \cdot (k \sin \alpha_m + E \cos \alpha_m) \dots (4)$$

式(1)の R_L は、垂直スクリーコンベヤの任意の高さ L 点における圧力を表している。揚送するには $0 \leq R_L$ となる必要があり、少なくとも $0 = R_L$ となる初期圧力 P_0 (必要加圧力とよぶ) を与える必要がある。H i -スクリーコンベヤでは、必要加圧力を水平リボンスクリーコンベヤで発生させる。

排出効率 η を式(5)のように表す⁽¹⁾。排出効率 η は、任意の排出角における排出量と、排出角を 90° としたときの理論最大排出量との比を表している。

$$\eta = \frac{\tan \theta}{\tan \theta + \tan \alpha_b} \dots (5)$$

3. 粉粒体の垂直揚送条件

垂直コンベヤの必要加圧力 P_0 と水平コンベヤの発生圧力 R_L の関係例を、表1のスクリー形状・寸法と表2の運搬物の性状から求めて図4に示す。図4から(a)軸付きの垂直スクリーコンベヤは、必要加圧力が大きく、排出角は小さくなり効率が悪いことがわかる。土砂等の揚送には不適であるといえる。

一方、(b)垂直リボンスクリーコンベヤおよび(c)固定軸装入の垂直リボンスクリーコンベヤではわずかの加圧力ですみ、排出角も大きく効率がよい。固定軸を装入すると排出効率 η が大きくなり、その傾向は排出効率 η の小さい範囲ほど顕著である。高揚程で、土砂のように、性状、粒径が不均一で、礫が混ざるような場合は、単に垂直リボンスクリーコンベヤの方が閉塞が少なく都合がよい。

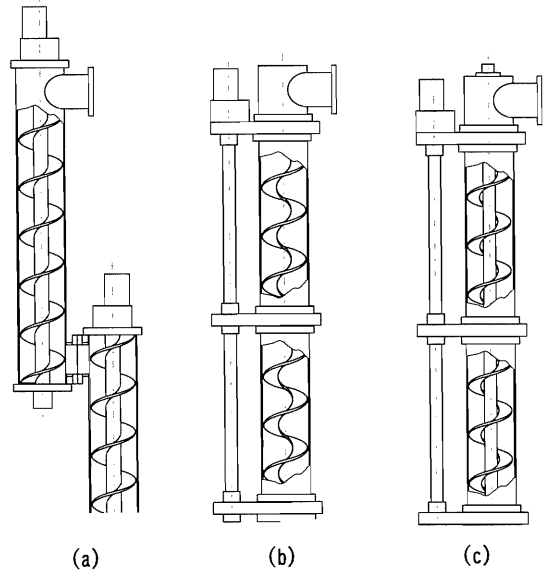


図3 スクリューコンベヤの形式

表1 垂直スクリーコンベヤの主な寸法

項目	水平	垂直
スクリーの形状	リボン	リボン 固定軸装入りボン 軸付スクリー (計算のみ)
コンベヤ長	$2.5D_b$	$17.5D_b$
スクリー外径	D_b	
穴・軸径	$D_r = 0.4D_b$	
ピッチ	$t = D_b$	
羽根厚さ	$e = 0.07D_b$	

表2 想定した運搬物(土砂)の性状

土砂	粘性土砂(含水比10%)
みかけの比重	1.4
コンベヤとの摩擦係数	$\mu = 0.7$
内部摩擦角	$\phi_i = 45^\circ$

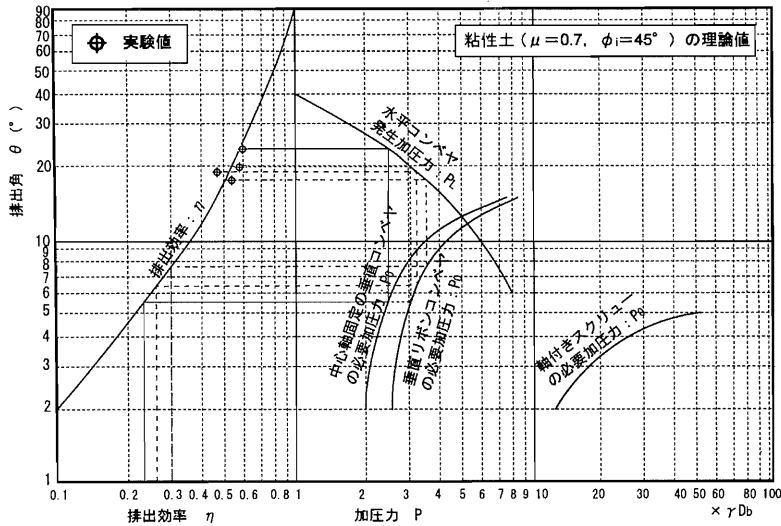


図4 垂直コンベヤの必要加圧力と水平コンベヤの発生圧力の関係

4. Hi-スクリーンコンベヤの構造⁽³⁾と特徴

従来の一箇所で支持と回転力の伝達を行うリボンスクリューでは、スクリーンの強度とコンベヤの継足しに問題があったので、新構造を開発し解決した(図1、図3参照)。Hi-スクリーンコンベヤの特徴は次の通りである。

- (1) リボンスクリューの採用により、運搬物と共回りする軸部分がなく、高効率を達成できる。
- (2) スクリュー外周の一部に回転環を設け支持と駆動を行う構造で、高強度、高揚程を達成。
- (3) 直列継足し構造で、運搬物の乗り移りがなく揚送が円滑で、長尺コンベヤが構成できる。
- (4) 低速回転のため騒音・振動、摩耗が少なく、密閉搬送で粉塵もなく、作業環境にやさしい。
- (5) リボンスクリューを基本形式として、中心に固定軸を装入すると、さらに効率が向上する。

5. 実証実験

5.1 実証装置と試料

図5に実証装置の写真と土砂排出の様子を示す。実証装置の寸法は、スクリーン外径φ300、揚程5.25mとした。

運搬物には、現場発生土砂を使用した。図6にその粒度分布を示す。その分類は礫混じりの砂質土であるが、水分を加えることで付着力が増し粘土状になる。土砂の搬送実験では、現場発生土砂に、若干の水分(自然含水比9.9%)を加え使用した。塑性流動化土砂の搬送実験では、さらに水を加え混練し、スランプが出る状態にして使用した。

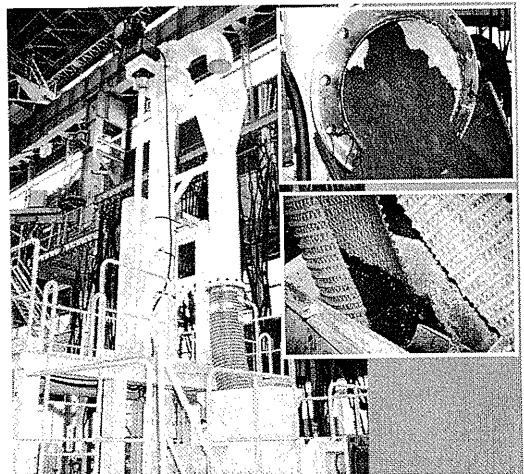


図5 実証装置

5.2 土砂の搬送

図7に、垂直スクリューの回転数を一定としたときの、水平スクリューの回転数と搬送量の関係を示す。リボンスクリューおよび固定軸装入りボンスクリューの結果ともにほぼ比例関係にある。このときの排出効率 η は、搬送量から計算して垂直スクリューで約0.3、水平スクリューで約0.5となる。図4を用いて、計測結果から得られた排出効率をもとに、垂直スクリューの必要加圧力、水平スクリューの発生加圧力を求めると概ね一致することがわかり、理論計算および摩擦係数など実証機設計に用いた数値が妥当であることが確認できた。

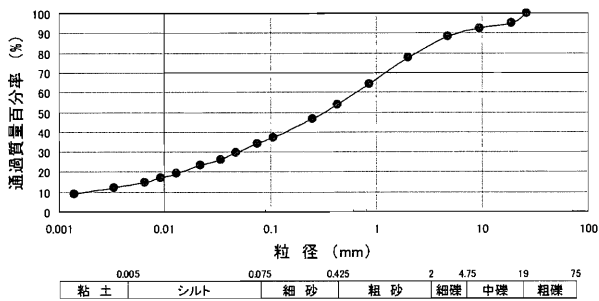


図6 土砂の粒度分布

5.3 塑性流動化土砂の搬送

図8に、塑性流動化した土砂のスランプと搬送量の関係を示す。各スクリューの回転数は一定とし、垂直スクリューは45rpm、水平スクリューは16rpmであった。土砂のスランプが大きくなる（より水分が多く柔らかい）ほど、反比例的に搬送量は少なくなる。リボンスクリューのみに比べ、固定軸装入りボンスクリューの方が搬送量が多く、搬送可能なスランプの限界も大きいことが確認できた。本実験ではスランプ20cm程度までの揚送を確認した。

6. 寸法・容量と用途例

表3に、Hi-スクリューコンベヤの寸法と容量を示す。

Hi-スクリューコンベヤの用途例は表4に示すものが挙げられる。適用例の一部として、図9にスクリュー形連続式アンローダを、図10に大深度揚土用垂直スクリューコンベヤを示す。

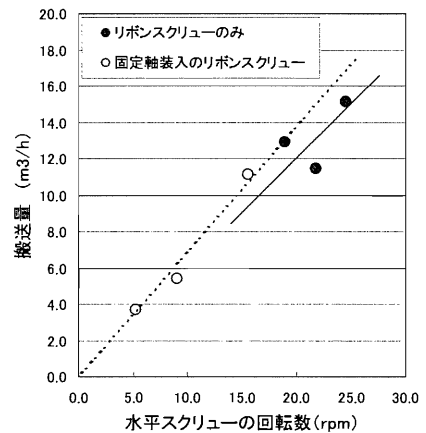


図7 水平スクリューの回転数と搬送量の関係

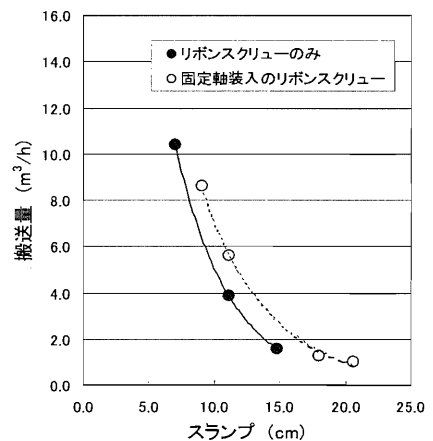


図8 塑性流動化した土砂のスランプと搬送量の関係

表3 Hi-スクリーコンベヤの寸法と容量

寸法・仕様	型番			
	HS-300	HS-400	HS-600	HS-800
ケーシング外径 (mm)	318.5	406.4	609.6	812.8
スクリー外径 D_0 (mm)	300	385	580	782
スクリー回転数 (min ⁻¹)	~69	~60	~50	~43
運搬量 (m ³ /h)	~27	~49	~141	~297
動力(kW) {L=20D ₀ }	15	30	75	150

- * 水平コンベヤと組み合わせて使用
- * 所用動力は、土砂の揚送で、コンベヤ長さをスクリー外径の17.5倍としたときの値
- * コンベヤの揚程は、直列継ぎ足しにより任意に設定可

表4 垂直リボンスクリューコンベヤの用途例

=対象運搬物=		
粉粒体：乾燥土砂、鉱石、穀物、廃棄物、ばら物		
塑性体：湿潤土砂、廃棄物、汚泥		
運搬揚送	急傾斜（垂直）スクリーコンベヤ	・掘削残土の揚送 ・原材料の運搬 ・汚泥・ゴミの運搬 ・ダム堆砂・汚染土壌の揚送 ・深礎基礎掘削・揚土
	スクリュー形連続式アンローダ	・鉱石・穀物の荷役
圧力	ケーソン用スクリー式連続排土	・ケーソンの残土排出
保持	土圧式シールドの排土装置	・スクリーコンベヤ

7. 結言

垂直リボンスクリューコンベヤの実用化において、次のことが明らかになった。

- (1) コンベヤに粉粒体を充満し、低速回転で運転するスクリーコンベヤの運搬理論式を導き、現場発生土を用いた実用化実験で実験値が理論値にほぼ一致することを確認した。
- (2) 実証実験で、垂直リボンスクリューコンベヤの高強度、高揚程を達成する構造を確認し、実用化に問題のないことがわかった。
- (3) スランプ 20cm 程度までの塑性流動化した土砂の揚送を確認した。

以上のように、密閉型で、高強度、高揚程、高効率の垂直リボンスクリューコンベヤが実用化されたことにより、新しい運搬設備として広い用途が期待される。

<参考文献>

1. 吉川忠男：土木機械用スクリーコンベヤの諸特性、日立造船技報、62巻、Vol.1(2001)
2. 吉川忠男：特願 2001-241474
3. 吉川忠男：特願 2000-191956

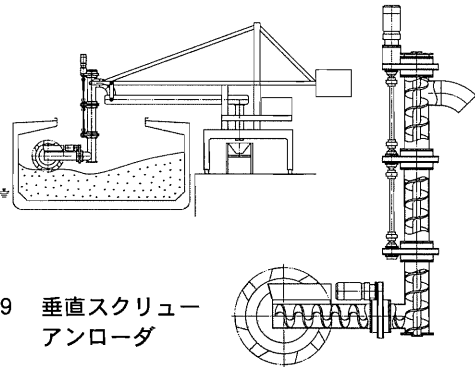


図9 垂直スクリーアンローダ

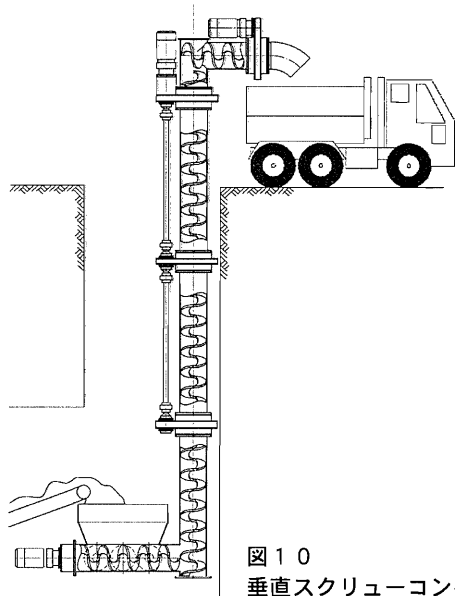


図10 垂直スクリーコンベヤ