

リボンスクリュー式泥土圧シールドの 排土機構解明に関する研究

和久昭正¹・大井隆資²・櫻井春輔³

¹ 正会員 榑フジタ 技術本部 (〒151東京都渋谷区千駄ヶ谷4-6-15)

² 正会員 榑フジタ 土木本部 (〒151東京都渋谷区千駄ヶ谷4-6-15)

³ 正会員 工博 Ph. D. 神戸大学工学部建設学科 教授 (〒657神戸市灘区六甲台町)

土圧式シールドにおいて、排土量の管理は、切羽の安定管理や地表面沈下を予測するうえで最も重要な管理項目の一つである。これらの切羽安定管理や地表面沈下予測に関する研究としては、シールド掘進における切羽やテールボイドの応力開放に着目したいくつかの報告がなされている^{1)~5)}。しかし、シールドの排土機構については、未だ理論的解明はなされておらず、機械の設計および施工管理は、実績に基づく経験的知見によって行われているのが現状である。本研究は、土圧式シールドのうち、リボンスクリュー式シールドの排土機構の解明を行ったものである。研究はまず理論構築を行い、次にこの理論を模型実験および、実施施工のデータにより検証した。その結果、理論解と実験および実施施工における現象との整合性が認められた。

Key Words : earth pressure balanced shield, ribbon screw, theoretical formula, model experiment, boulder gravel

1. はじめに

土圧式シールドでは、掘削した土砂をカッターチャンパー内に貯め、切羽水圧と土圧に対抗させながらスクリーコンベヤーで排土して掘進するので、特にスクリーコンベヤーの止水機構と排土機構の解明が重要な要素となる。このうち、スクリーコンベヤーの止水機構の解明については前報⁶⁾で報告した。本報告ではスクリーコンベヤーの排土機構の解明についての研究成果を報告する。

土圧式シールドの排土装置に用いるスクリーコンベヤーは、軸付きスクリーが一般的である。しかし軸付きスクリーではそのケーシング径の1/3以下の径の礫の排出が限度である。したがって、掘削地盤にこれ以上の径の巨礫が混在する場合には、円滑な排土作業に支障をきたすことになる。そしてこれが原因となり切羽の安定を崩し、ついには地表面沈下をひきおこすこともある。

この対策として、より大きな径の礫を排出するために、リボンスクリューの開発が進められた。リボンスクリューコンベヤーは、中心部に穴のあるコイル状で、そのケーシング径の2/3までの巨礫が排出できる機能を有する^{7)~9)} (写真-1参照)。

この特長を応用したシールド方式としてリボンスクリュー式泥土圧シールドがある(図-1参照)。

この方式は、地下水の豊富な滞水層に対し、切羽の安定を図りながら巨礫層も掘進する機能を持ち合わせており、扇状地等の滞水巨礫層において、多くの実績を上げている。

本方式は、著者のうちの一人が川崎市の多摩水管線工事において開発に参画し、成功したのが最初である⁹⁾。その後各種の改良が加えられ掘進性能は向上している。しかしその掘削土砂の排出機構に関する解明については、未だなされていない。

スクリーコンベヤーの運動方程式に関する研究のうち、軸付きスクリーについては植松ら^{10)~16)}の報告があるが、軸のないリボンスクリューについては皆無であり、今後の課題として残されている。

そこで本研究では、この課題を解決するためにリボンスクリューの排出機能について、理論式の誘導、ケーシング内における掘削土砂の充満に至る挙動確認、巨礫の排出等についての解明、およびそれらの模型実験による確認を行い、さらに実施施工で検証した。

2. リボンスクリューの排出理論の構築

(1) リボンスクリューの運動方程式

a) 運動方程式構築における前提条件

シールドを対象としているが、運動方程式の構築にあたっての前提条件は下記の通りである。

① スクリュー入口の圧力は、チャンバー内の土砂（実験時には試料）から発生する土圧のみとし、切羽水圧および地山からの土圧は考慮しない。またゲート開閉に伴い発生する排土抵抗力は考慮しない。

② スクリュー内の土砂（実験では試料）により発生する土圧はランキンの土圧論により算定する。

③ 排土効率はスクリュー形状から得られる値を採用し、回転数によって変わらないものとする。

b) スクリューのモデル化における仮定条件

a) の前提条件のもと、次の仮定条件にしたがって運動方程式を構築する（図-2 (a), 図-2 (b)）。

① 排出する粒体全体を重心に集まった1個の質点に置き換える。

② 質点の重さ W をスクリュー外半径 r 上の1点 G に作用するものとする。

③ スクリューのねじれ角（スクリューのリード角）はスクリュー外周におけるものを用いる。

本論文で用いる主要記号を下記に示す。

- D : スクリュー外径
- r : スクリュー外半径
- d_1 : 中心穴径
- α : スクリューのリード角
- β : 排出角
- δ : スクリュー排出面の偏角
- t : スクリューのピッチ
- w : 質点の重さ
- e : スクリュー羽根の厚さ
- θ : スクリューの傾斜角
- P_z : スクリューから発生する軸方向排出圧力
- P_p : プラグゾーンにおけるプラグ圧力
- μ : スクリューと排出物との摩擦係数
- ρ : 排出物の摩擦角
- η : 排出効率
- λ : 安息角（内部摩擦角）
- P_s : スクリューから発生する力
- γ : 試料の単位体積重量

c) スクリュー羽根の回転による排出力

スクリュー羽根に作用する力の成分としては、下記のものがある。

(a) スクリューの半径方向力

$$f_r = w \cos \theta \cos \delta \quad (1)$$

(b) スクリューの周方向力

$$f_s = -w \cos \theta \sin \delta + P_s \sin \alpha + \mu P_s \cos \alpha \quad (2)$$

(c) スクリュー軸方向力

$$f_z = P_s \cos \alpha - \mu P_s \sin \alpha - w \sin \theta \quad (3)$$

スクリューが回転して質点が軸方向に進むためには $f_s = 0$ でなければならない。式(2)より

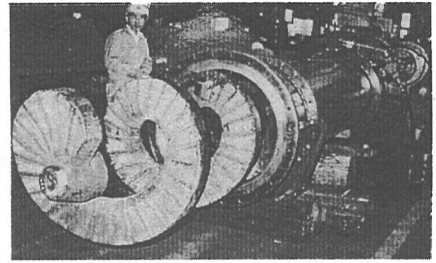


写真-1 リボンスクリュー単体

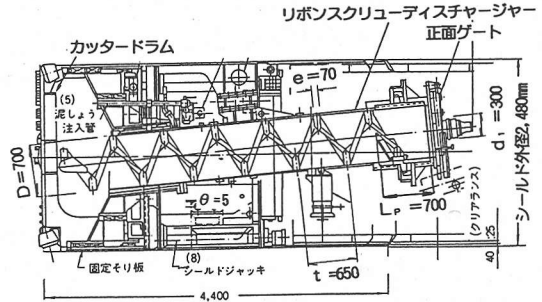


図-1 リボンスクリュー式泥土圧シールド

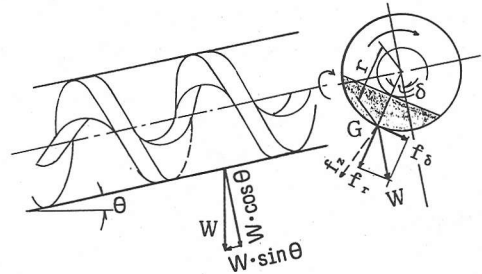


図-2 (a) リボンスクリュー検討断面

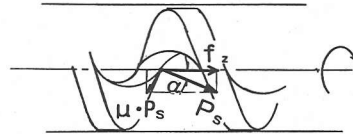


図-2 (b) ケーシング底面上のスクリュー

$$P_s = (w \cos \theta \sin \delta) / (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) \quad (4)$$

式(3)に式(4)を代入して整理すると1ピッチ当たりの f_z は、式(5)で表される。

$$f_z = w \left[\cos \theta \sin \delta \times \frac{1 - \mu \tan \alpha}{\tan \alpha + \mu} - \sin \theta \right] \quad (5)$$

式(5)に $\mu = \tan \rho$ を代入して整理する。

$$f_z = w \left[\frac{\cos \theta \sin \delta}{\tan (\alpha + \rho)} - \sin \theta \right] \quad (6)$$

土圧式シールドのスクリューコンベヤーは、排出土砂がコンベヤー内に充填しているため、スクリューが N ピッチの場合、全排出力 F_z は次式となる。

$$F_z = Nw \left[\frac{\cos \theta \sin \delta}{\tan (\alpha + \rho)} - \sin \theta \right] \quad (7)$$

故にスクリュー排出圧力 P_z は次式で与えられる。

$$P_z = F_z / (\pi D^2 / 4) \quad (8)$$

d) スクリュー排出面の偏角 δ の算定

質点とコンベヤーケーシングの摩擦係数を μ とすると軸方向の力は次式で表される。

$$f_z = f_r \times \mu = \mu w \cos \theta \sin \delta \quad (9)$$

式(6)と式(9)を等置し、整理して式(10)を得る。式(10)より δ を未知数として解くことにより、偏角 δ が求まる。

$$\frac{\sin \delta}{\tan(\alpha + \rho)} - \tan \theta = \mu \cos \delta \quad (10)$$

e) 排出効率 η の算定

図-3は、コンベヤーケーシングの底面における質点Aの移動状態を示す。図-3(a)は、スクリーウの展開、図-3(b)は、スクリーウがスクリーウケーシング上に存在する状態を示す。スクリーウ下部の質点Aが、スクリーウの1回転で1ピッチ進むとA'となり、排出効率 η は、 $\eta = 1.0$ となる。スクリーウの回転により質点Aが、移動角 β で、B点に達すると、質点Aは、 $\eta \times t$ の距離を移動する。この時 $\eta < 1.0$ となる。図-3(a)においてスクリーウ1回転の外周長は $AC = \pi D$ である。また、 $AB = R$ とし、質点Aの移動角を $\beta = \alpha + \rho$ とすると、次式を得る。

$$\frac{R}{\sin \alpha} = \frac{\pi D}{\sin(\alpha + \rho + 90 - \alpha)} \quad (11)$$

$\eta \times t = R \cos(\alpha + \rho)$ に式(11) および $\mu = \tan \rho$ を代入して整理すると、

$$\eta \cdot t = \pi D \sin \alpha (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) \quad (12)$$

を得る。この両辺を $t = \pi D \tan \alpha$ で除して

$$\eta = \cos \alpha (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) \quad (13)$$

となり、 η はスクリーウリード角 α 、被排出物とスクリーウとの摩擦係 μ により決まる。また、スクリーウ傾斜角 θ を考慮した場合には次式となる。

$$\eta' = \cos \theta \cos \alpha (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) \quad (14)$$

f) 排出重量 w の算定

リボンスクリューの排出に寄与する部分の断面積をAとし、図-4(a)に斜線部分で示す。Aは、スクリーウ傾斜角が 0° の場合、中心穴までと仮定する。排出断面積Aは、式(15)によって求められる。スクリーウが傾斜している場合には、羽根ピッチの中間位置における面積を算定する(図-4(b))。

$$A = 2 \int_0^a (a^2 - y^2)^{1/2} dy \quad (15)$$

ここに $a = D/2$

$$y = d_1/2 + t/2 \cdot \tan \theta$$

スクリーウ1ピッチ当たりの排出重量 w は式(16)より算定される。

$$w = A \cdot (t - e) \cdot \gamma \quad (16)$$

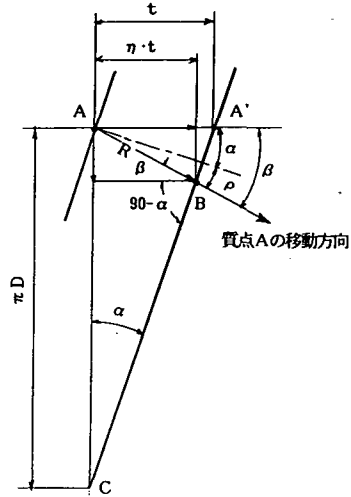


図-3(a) スクリュー展開図

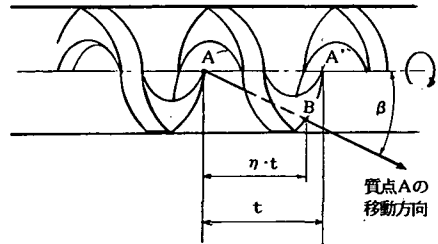


図-3(b) ケーシング上の質点Aの移動方向

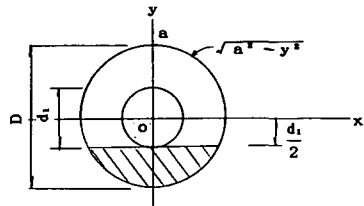


図-4(a) 排出に寄与する標準断面積(横断面)

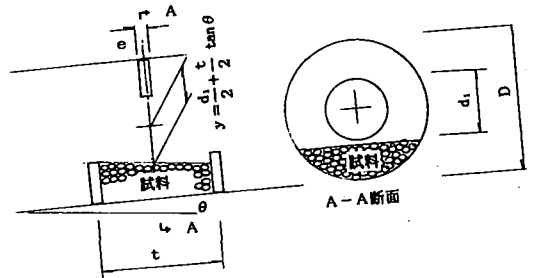


図-4(b) 傾斜時の排出断面検討位置(縦断面)

(2) プラグ抵抗圧力の算定

図-5におけるプラグゾーン付近の圧力の釣り合い状態から、試料により発生する圧力 P_p の算定式を構築する。 P_p をプラグ抵抗圧力という。

F_f : 試料の摩擦力

$$F_f = \mu \{ K_a P_p \pi D + (\pi/4) \gamma D^2 \cos \theta \} \cdot \Delta x \quad (17)$$

F_g : 試料の重量

$$F_g = (\pi/4) \gamma D^2 \sin \theta \cdot \Delta x \quad (18)$$

これらの力の釣り合いは、次式で表される。ただし、検討位置はプラグゾーン付近の微小部分(Δx)とする。

$$(\pi/4) (P_p + \Delta P_p) D^2 - F_f - F_g - (\pi/4) P_p D^2 = 0 \quad (19)$$

式(19)を整理して式(20)を得る。

$$\frac{\Delta P_p}{\Delta x} = \frac{4 \mu K_a P_p}{D} + \gamma (\mu \cos \theta + \sin \theta) \quad (20)$$

ここで、 $U = 4 \mu K_a / D \neq 0$

$V = \gamma (\mu \cos \theta + \sin \theta)$ とおいて

$$\frac{dP_p}{dx} = U P_p + V \quad (21)$$

これを解いて

$$P_p = \frac{V}{U} e^{Ux} + C \quad (22)$$

$x = 0$ の時 $P_p = 0$ であるから、 $C = -V/U$ となる。これを式(22)に代入して整理すると式(23)を得る。

$$P_p = \frac{D \gamma (\mu \cos \theta + \sin \theta)}{4 \mu K_a} (e^{\mu K_a (4/D) x} - 1) \quad (23)$$

3. リボンスクリューの粒体排出実験

(1) 実験概要

a) 実験項目

実験目的は、第2章で構築したリボンスクリューにおける質点の運動特性に関する理論の確認である。

実験は、シールド外径2,480mmのリボンスクリュー式泥土圧シールドの実機に適用することを前提に、実機の1/10模型を製作して、粒体の排出実験を行った。実験方法は、直径450mm級の巨礫が出土する地盤を掘削して排土することを想定した。また、リボンスクリューの排出量、排出圧力、圧力保持機能に関する確認を行った。

b) 実験装置

図-6にリボンスクリュー式排土装置の模型実験装置を示す。外から目視できるように、アクリル材を使用した。写真-2に模型実験装置全景を示す。

c) 試料

排出実験に用いた粒体は、土砂で行うのが理想的であるが、排土状況を確認することが難しいことから、豆類およびゴルフボール(直径43mm)を試料として用いた。試料から発生する圧力については、

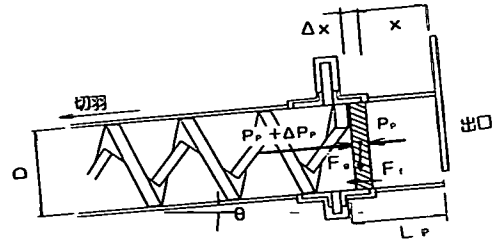


図-5 試料のプラグ効果による抵抗力

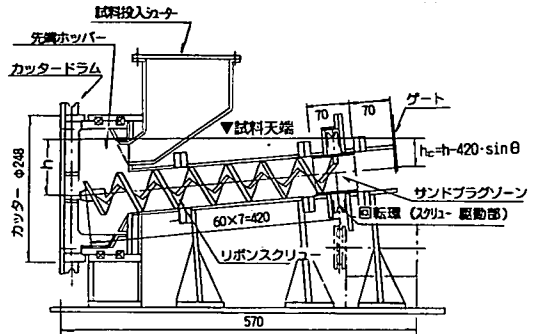


図-6 リボンスクリュー式排土装置模型

表-1 実験試料の諸元

試料名	項目	単位重量	摩擦角	摩擦係数	安息角	側圧係数
	単位 記号	gf/cm ³	°	μ	°	-
小	豆	0.88	16.7	0.30	30.0	0.33
大	豆	0.70	19.3	0.35	32.0	0.31
大豆小豆混合		0.80	18.0	0.32	30.0	0.33

2. (1)a)②に示すようにランキンの土圧論を適用した。ランキンの土圧論は、元来、土砂の土圧の算定時に適用されるが、試料の単位体積重量および内部摩擦角を入力物性値として扱うことにより、試料から発生する圧力の算定が可能と考えた。入力物性値のうち内部摩擦角については、低拘束圧下では安息角に一致するためこれを採用した。

試料の諸元を表-1に示す。

d) 実験要領

リボンスクリューの寸法は、外径×中心穴径×ピッチを70mm×30mm×60mmとした。スクリュー駆動部はリボンスクリューと回転環を溶接し、ここからスクリュー全体に回転力を与える構造とした。したがって、回転環はスクリューと一緒に共回りする。

主な観察項目は、スクリュー先端部での取り込みや混練状況の確認、スクリューコンベヤー内の蓄積および排出状況を確認した。とくに排出量については理論値との比較を行った。

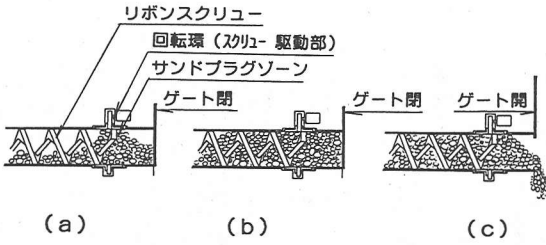


図-7 試料の充満および排出状況

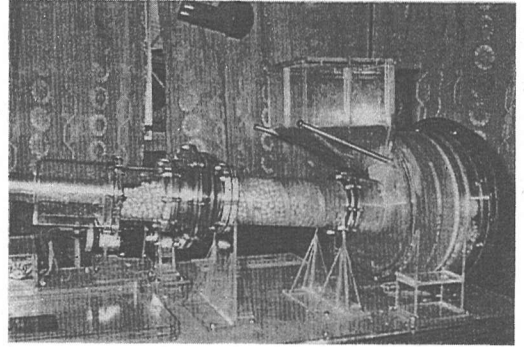


写真-2 実験装置全景

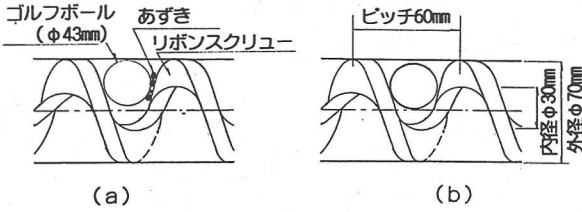


図-8 ゴルフボールの噛み込み状況

(2) 排出量に関する理論値と実測値との比較

a) 目視による排出状況

図-7 (a)~(c)に小豆のみの排出状況を示す。スクリュー内における充満順序は、下記の通りである。

(a)ゲート閉の状態では運転を開始すると、まず回転環の部分に小豆が貯まり始める。この部分は、試料が羽根と共に共回りし、蓄積が進む。

(b)次にその小豆の蓄積はプラグゾーン全体に及び、最初に排土口付近が満杯状態となり、プラグ効果を発揮し始める。続いて、排土口側から切羽方向に向かって順次小豆の蓄積が進行し、遂には、スクリューコンベヤ全体に小豆が充満する。

(c)ゲート開の状態にすると、排土口と回転環の間の試料は、排出される。しかし、図-7 (c)のように、回転環とスクリュー入口部の間は、充満状態が保持される。これらより回転環(スクリュー駆動部)部分をサンドプラグゾーンとするのが妥当と思われる。

写真-3~4は、小豆の中に投入したゴルフボールの排出状況を示す。巨礫を想定したゴルフボールは、小豆とともに排出されることが確認された。写真-3ではリボンスクリューの中心穴部が排出空間となりゴルフボールを取り込んでいる様子が示されている。

また運転状況によっては、図-8 (a)~(b)に示すようにリボンスクリューの羽根における噛み込みが発生することも確認された。図-8 (a)は、スクリューの正逆回転により噛み込みは解除できる。

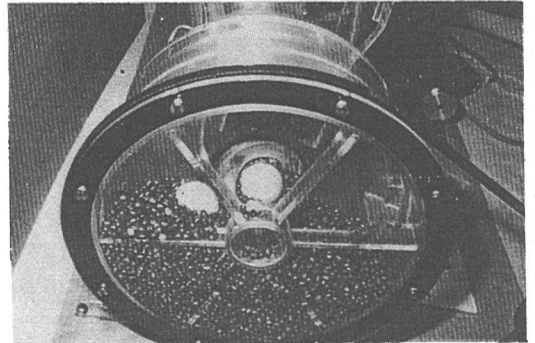


写真-3 チャンバー内の試料投入状況

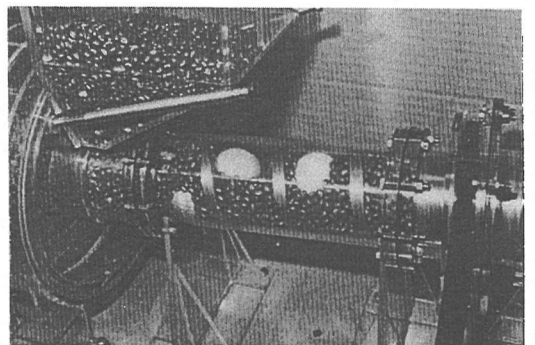


写真-4 スクリュー内の試料移動状況

しかし図-8 (b)は正逆回転により解除できない状態の噛み込み状況である。スクリュー羽根とゴルフボールの噛み込みをなくすためには、スクリュー羽根の内径角面には面取り加工を施したり、潤滑剤を注入する等の対策が必要であることが判明した。

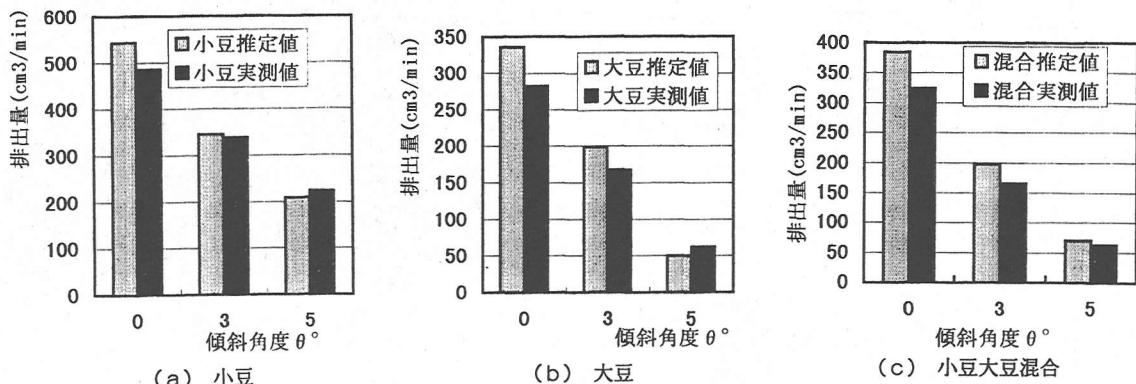


図-9 スクリュー傾斜角度と排出量

b) 排出量の測定結果概略傾向

図-9にリボンスクリューの傾斜角度θと試料毎の排出量の実測データを示す。ただし、スクリーウの回転数は、7rpmとし、また、ゲートは開閉操作を行わずに常時解放状態とした。

θを1°上がり勾配に設定すると、約7~9%の排出量の低下となった。またθを5°以上に設定すると、切羽側にも転落する試料が多くなり、排出量が急激に低下した。

c) 排出量の算定

試料の排出に寄与する圧力としては、下記3項目がある。

- ①試料の切羽位置と排出口とのヘッド差による圧力。
- ②スクリーウの回転により発生する軸方向圧力。
- ③プラグ抵抗圧力。

①による排出圧

試料のヘッド差 h_c は、図-6から幾何学的に算定される。この h_c を用いてヘッド圧 P_h は、次式により算定される。

$$P_h = h_c \cdot \gamma \cdot K_a \quad (25)$$

②による排出圧

スクリーウコンベヤの諸元を表-2に示す。式(7)および式(8)より P_z を算定する。

③プラグ抵抗圧力 P_F は式(23)より求まる。

故に試料の排出に寄与する圧力の合計 P_F は、次式となる。

$$P_F = P_h + P_z - P_F \quad (26)$$

P_F から見掛けのスクリーウコンベヤ排出面積 A' が算定される。

$$A' = A \cdot (P_F / P_z) \quad (27)$$

ただし、 A は、式(15)により与えられる。

表-2 リボンスクリュー実験装置諸元

名称	記号	単位	諸元
ケーシング径	D	cm	7.0
中心穴径	d_1	cm	3.0
プラグゾーン長	L_p	cm	7.0
スクリーウ傾斜角度	θ	°	0~5
スクリーウ長	L	cm	42
スクリーウ羽根厚さ	e	cm	0.5
羽根間隔	t	cm	6.0
ピッチ数	N	個	5.5
スクリーウ羽根リード角	α	°	15.26
回転数	n	rpm	7

この A' を用いて、スクリーウn回転当たりの排出量の推定値 Q_0 は、次式により算定される。

$$Q_0 = A' \cdot (t - e) \cdot n \cdot \eta \quad (28)$$

理論推定値と実測値との算定結果一覧表を表-3に示す。

全ての試料において理論推定値と実測値の誤差精度は、±20%程度の範囲内に収まることが明らかになった。

表-3 実験における排出量に関する理論値と実験値

(1kgf/cm²=98KN/m²)

列番号	項目	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨=	⑩=④×⑨	⑪=	⑫	⑬=⑪
		傾斜 角度	ヘッド 差	ヘッド 圧力	排出面積	傾角	排出効 率	スクリュー 圧力	プラグ 圧力	排出圧力 合計	見掛けの排 出面積	排出量推 定値	排出量実 測値	排出量推定 値の精度
		単位	°	cm	gf/cm ²	cm ²	°	-	gf/cm ²	gf/cm ²	gf/cm ²	-	cm ³ /min	cm ³ /min
記号	θ	h_c	P_h	A	δ	η	P_z	P_p	P_r	A'	Q_o	Q_p	ξ	
小	豆	0	13.0	3.78	9.08	10.6	0.855	1.85	2.27	3.36	16.5	543	485	1.12
	3	10.8	3.14	8.08	12.4	0.853	1.63	2.66	2.11	10.5	345	338	1.02	
	5	9.3	2.70	7.47	13.6	0.851	1.49	2.92	1.27	6.4	209	223	0.94	
大	豆	0	11.0	2.39	9.08	13.5	0.842	1.69	2.15	1.93	10.4	336	282	1.19
	3	8.8	1.90	8.08	15.4	0.840	1.48	2.25	1.13	6.2	199	168	1.18	
	5	7.3	1.58	7.47	16.9	0.838	1.37	2.67	0.28	1.5	50	62	0.81	
大豆小豆混合	豆	0	10.5	2.27	9.08	11.3	0.849	1.79	2.23	2.33	11.8	385	324	1.19
	3	8.3	2.19	8.08	13.8	0.848	1.58	2.59	1.18	6.0	197	165	1.19	
	5	6.8	1.80	7.47	15.1	0.846	1.45	2.83	0.42	2.2	70	63	1.11	

表-4 対象工事の概要

工事件名	多摩下水幹線その13工事
工事場所	川崎市多摩区生田及び菅地区
工事内容	工 法：泥土圧シールド工法 排土機構：リボンスクリュー方式 シールド外径：2,480mm 1次覆工：延長 600m, セグメント 外径 2,350mm 2次覆工：延長 604m, 仕上り内径 1,650mm 切羽地質：滞水巨礫層, N値=29~50 ヘッド：10.50 m (GL~シールドセンター) 地下水位 GL. -5.50m 地盤改良工：仮掘進区間26.5m 薬液注入工等

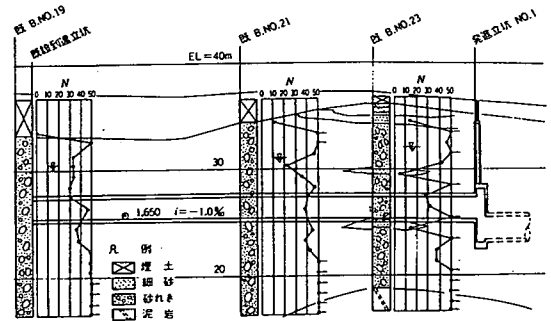


図-10 対象工事の地盤条件

4. 実施工による検証

(1) 対象となった工事の概要

工事概要を表-4に一覧表にして示す。

本工区は、多摩川右岸沿いを走る県道川崎府中線に位置する。地質は、多摩川の埋没谷に堆積した扇状地堆積物で、切羽地質は、砂礫層である。出土する巨礫は直径450mm級が予想された。

地盤条件を図-10に示す。

築造する地下構造物は、掘削外径2,480mmのシールドトンネルである。この工事では、450mm級の巨礫を排出することが予想されたためにリボンスクリュー式シールドが採用された。

シールドの概要を図-1に示す。

リボンスクリューコンベヤーの諸元を表-5に示す。

施工に当たっては、添加材として、粘土とベントナイトと水により練り上げられた泥土を注入しながら施工された。

掘削土砂の物性値を表-6に示す。

表-5 実機におけるリボンスクリューの諸元

名称	記号	単位	諸元
ケーシング径	D	cm	70
中心穴径	d _i	cm	30
プラグゾーン長	L _p	cm	70
ピッチ数	N		5.5
羽根間隔	t	cm	65
スクリュー羽根厚さ	e	cm	7
傾斜角度	θ	度	5
リード角	α	度	16.5
回転数	n	rpm	1~2.0
スクリュー長	L	cm	400

表-6. 掘削土砂の物性値

名称	記号	単位	諸元
内部摩擦角(安息角)	λ	度	30
単位体積重量	γ	gf/cm ³	2.0
土砂と鉄の摩擦係数	μ	-	0.5

表-7 実工事における排出量に関する理論値と実験値

(1kgf/cm²=98KN/m²)

列番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦= ①+⑤-⑥	⑧=②× ⑦ ⑤	⑨= ⑧×④× (t-e)n	⑩	⑪=⑨/⑩
項目	切羽圧力	排出面積	偏角	排出 効率	スクリュ ー圧力	プラグ 圧力	排出圧力 合計	見掛けの 排出面積	排出量 推定値	排出量 実測値	排出量推定 値の精度
単位	kgf/cm ²	cm ²	°	-	kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²	cm ²	m ³ /min	m ³ /min	-
記号	P _h	A	δ	η	P _s	P _p	P _r	A'	Q ₀	Q _r	ξ
仮掘進時	0.20	734	29.2	0.783	0.053	0.120	0.133	1842	0.083	0.070	1.19
本掘進時	0.50	734	29.2	0.783	0.053	0.120	0.433	5996	0.272 0.545	0.190 0.380	1.42 1.42

〔備考〕表中nはスクリュ-回転数rpm, 仮掘進時; 1rpm, 本掘進時; 1~2rpm.

(2) 排土量の検証

仮掘進および本掘進時の排土量を3. (2)の方法により推定し、実測値との比較を行って、その精度を検証した。

仮掘進区間の発進口から26.5m区間は薬液注入による地盤改良が施工されており、内部摩擦角(=安息角)と粘着力が向上し、湧水もないという条件でシールド掘進が行われた。

また、切羽における土圧P_hおよびスクリュ-の回転により排出圧力P_rが発生し、掘削土砂および巨礫の排出はスムーズに行われた。排土口付近では、掘削した土砂が回転環(スクリュ-駆動部)に貯められ、プラグを形成し、プラグ圧力P_pが発生した。

本掘進区間は、地盤改良は施工されておらず、自然地山の中を掘進するため、切羽では土水圧が作用した。巨礫を含んだ掘削土砂をスクリュ-コンベ-ー内に充満させ、水圧と対抗させながらゲートの開閉により排出を行った。

表-5に示すスクリュ-コンベ-ーの諸元を用いて算定した仮掘進および本掘進時の理論推定値と実測値との比較を表-7に示す。

ただし、切羽圧力P_hはチャンパー内の隔壁に取り付けられた土圧計より得られた実測値を採用した。本表より、仮掘進時では、理論推定値は実測値に対し、+20%の範囲に収まることが明らかになった。

一方、本掘進時は、掘進速度が3cm/min~6cm/minの範囲で変化しており、これに伴いスクリュ-回転数も1rpm~2rpmに対応している。実測値は理論推定値に対し70%(1/1.42)程度にとどまっている。このように実排土量が理論推定値より少なくなった理由は、2. (1)a)に示した前提条件のうち主に①のスクリュ-入口圧力が実施工時の条件と異なることによるものと思われる。とくに本掘進時には切羽からの土圧や水圧が作用している。この場合の排土方法は、

ゲートの開閉により発生する抵抗力を利用してプラグ抵抗力を確保する運転管理が一般的である。このゲート開閉操作により排土量が制御され、その結果実測値が理論推定値の約70%にとどまったものと考察できる。

(3) 巨礫の排出

a) リボンスクリューの巨礫排出機能

長径a, 短径b, の巨礫がリボンスクリューの中を通過するためには、図-11(a)において短径bが式(29)を満足しなければならない。

$$\{(t-e) > b\} \text{かつ} \{(D-H) > b\} \text{かつ} \{x > b\} \quad (29)$$

ただし、

$$x = [(D-2H)^2 + \{(t-e)/2\}^2]^{1/2} \quad (30)$$

また、長径a, 短径bの楕円体がリボンスクリューを通過するためには、図-11(b)において長径aが空間的余裕を考慮してLの約80%以下でなければならないとすると、次式の成立が必要条件となる。

$$a < 0.80L = 0.80 \{ (1.5t-e)^2 + D^2 \}^{1/2} \quad (31)$$

表-5に示すリボンスクリューの諸元において、排出可能な巨礫の寸法は、短径b=400mmの場合、長径a=740mmとなる。

b) 実施工における巨礫排出状況

写真-5に排出した巨礫を示す。

300mm級の巨礫は掘進距離6mに1個の割合で出土した。450mm級の巨礫は、同じく10mに1個の割合で出土し、最大長径500mm級の巨礫も数個出土したが、いずれもスムーズに排出できた。また流木(長さ600mm)の排出もスムーズであった。

実験時確認された巨礫の噛み込みは実施工においても発生したが、添加材の潤滑効果により比較的容易に解除できた。

これらより、リボンスクリューは、巨礫排出機能に優れていることが実施工を通じて立証された。

5. 結論

本研究により得られた主な成果と課題は、下記の通りである。

(1) 主な成果

①リボンスクリューは軸が無く中心部は穴があいている状態であるが、排出力を発揮することが確認できた。すなわち排出土砂をスクリー内に充填させることができ、プラグ効果を発揮することができる。

②排出圧力は、リード角 α 、スクリー排出面の偏角 δ および、排出効率 η 等を算定することにより、式(6)～式(8)で求めることができる。

③排出量は、切羽チャンパー内の圧力とスクリーによる排出圧力の和、および排出口付近のプラグによる抵抗圧力との差から見掛けのスクリー排出面積を算定し、理論推定値を算定することができる。実験および実施工の仮掘進では、この推定値と実測値との精度は、 $\pm 20\%$ 以内に収まった。

④巨礫の排出については、実験および幾何学的検討からリボンスクリュー中心部の穴も排出空間として機能することが確認できた。すなわち、短径、長径は、それぞれ式(29)～(31)で示される楕円体の巨礫の排出が可能である。

(2) 今後の課題

本理論を実施工に適用し、推定精度のさらなる向上を図っていくことが重要であると考えられる。とくに実施工の本掘進における排土量の理論的推定に関し、

①切羽から高い水圧や土圧が作用する場合におけるリボンスクリューの排土機構。

②ゲートの開口率と、排土抵抗力や排土量との相関関係。

③スクリーの回転数と排土効率の相関関係。等を検討することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 平田武弘：土圧式シールド掘削に伴う軟弱粘性土地盤の挙動と施工管理，土木学会論文集，NO. 355，pp. 114～123，1985。
- 2) 小林健郎，西松裕一：シールド掘進に伴う地盤変位に関する研究，土木学会論文集，NO. 328，pp. 77～88，1982。
- 3) 森麟，秋葉芳明：密閉式シールドにおける粘土性切羽地盤の破壊条件と取り込み量の支配条件，トンネルと地下，第15巻，8号，pp. 613～617，1984。

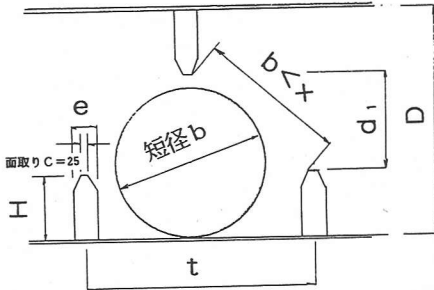


図-11 (a) 巨礫の排出条件検討図

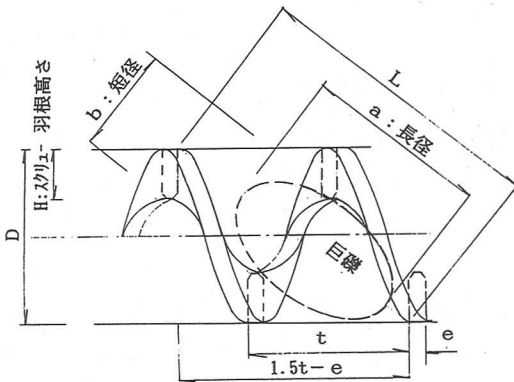


図-11 (b) 楕円体状の巨礫の排出条件検討図

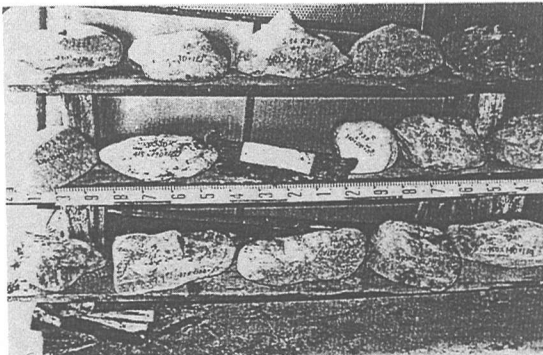


写真-5 排出した巨礫及び木片の状況

- 4) 山田孝治, 吉田保, 間片博之, 橋本定雄: 沖積地盤におけるシールド掘進に伴う地盤変状とその予測解析について, 土木学会論文集, NO. 373. pp. 103~112, 1986.
- 5) 門田俊一: 掘削に伴う地盤の応力・変形解析とその適用に関する研究, 名古屋大学学位論文, 1990.
- 6) 和久昭正, 宮澤秀治, 吉野広司, 櫻井春輔: 高水圧下における土圧式シールドの止水機構に関する研究, 土木学会論文集, NO. 546, pp. 189~198, 1996.
- 7) 吉川忠男: 土圧式シールド用スクリーコンベヤの圧力保持に関する研究, 姫路工業大学学位論文, 1996.
- 8) 岡部三郎, 高杉武司, 鶴谷武憲: リボンスクリー式泥漿シールドによる玉石混じりれき層の掘進, トンネルと地下, Vol. 13, NO. 9, pp. 27~27, 1982.
- 9) 和久昭正: リボンスクリー式泥漿シールド工法の開発, トンネル技術協会施工体験発表会, 1982.
- 10) 植松時雄, 中村貞男, 日野保夫, 陶山英雄: ねじコンベヤの研究, 日本機械学会論文集, 第26巻162号, pp. 180~186, 1960.
- 11) 植松時雄, 粉体および粒体の運動解析, 化学機械技術, 5, pp. 187~199, 1953.
- 12) Veβverlagstechnik BERIN: l. Mechanische Steig-förderer, pp. 191~199.
- 13) Chang I. Chung: Conveying in Screw Extruders, Society Plastics Engineers, Journal, Vol. 26, pp. 33~44, 1970.
- 14) Darnell, W. H. and Mol, E. A. J.: Solid Conveying in Extruders, Society Plastics Engineers, Journal, pp. 20~29, April 1956.
- 15) 松本勝周, 吉川真介, 中村正昭: Extruder における粉粒体の送り機械, 化学工学, 第23巻, 第6号, pp. 385~392, 1956.
- 16) Owen, J. H.: Power absorption in screw conveyors, *Engineering*, vol. 142, pp. 291~292, 1936.

(1997. 2. 25受付)

STUDY ON DISCHARGING MECHANISM OF EARTH PRESSURE BALANCED SHIELD WITH A RIBBON SCREW

Akimasa WAKU, Takatsugu OI and Shunsuke SAKURAI

The stability control of discharging is an important factor in order to control the stability of cutting face by an earth pressure balanced shield. Due to the lack of theoretical background, this study is carried out to clarify the discharging mechanism of a ribbon screw type earth pressure balanced shield. First the theoretical background is developed, and then the theory is verified by using the both experimental study on a model and the data obtained from the practical operations. Good agreement between the analytical results and the both test and practical operation data are obtained.