

篠原フジタ フェロー 和久昭正
 正会員 宮澤秀治
 正会員 吉野広司
 神戸大学 正会員 櫻井春輔

1.はじめに

本論文は、高水圧下における土圧式シールドの切羽安定機構のうち、排土時の止水機構に関する研究成果について報告するものである。研究は、掘削土砂排土時のスクリューコンベヤ内の水圧低減状況に着目し、理論及び実験の両面から取り組んだ。理論的検討では高水圧を考慮した理論式を導き、また実験的検討では実験データを用いて、理論式の検証を行った。詳細は以下の通りである。

2.掘削機構のモデル化と理論式の提案

1)モデル化についての基本的考え方

カッターで切削された掘削土砂は、チャンバーの中に取り込まれる。この土砂はチャンバーからスクリューコンベヤを通じて排土口に向かう。排土口にはプラグゾーンが設けられている。プラグゾーンはスクリューの軸のみで羽根がないため、土砂を移動する力はない。切羽からは切羽水圧が流体力となって掘削土砂に作用する。これに対抗する力は、プラグゾーン内の土砂重量、掘削土砂とケーシングの摩擦力、及び掘削土砂の主働土圧等の合力である。これをプラグ効果による抵抗力という。切羽からの湧水はこのような状態の掘削土砂の中を流れしていくが、その水圧は掘削土砂内で漸次低減が行われ、さらにプラグゾーン内で大気圧にまで低下し安定排土がなされる。

2)作用する力と入力物性値

(但し、式中の添字sはスクリュー部、
 pはプラグゾーン部を表す)

F_t : 掘削土砂摩擦力

$$F_t = \mu \{ K_a P \pi (d_1 + d_2) + \frac{\pi}{4} \gamma_t (d_2^2 - d_1^2) \cos \theta \} \Delta x \quad (1)$$

F_g : 掘削土砂の重量

$$F_g = \frac{\pi}{4} \gamma_t (d_2^2 - d_1^2) \sin \theta \cdot \Delta x \quad (2)$$

F_p : プラグゾーンの土砂に作用する流体力

$$F_p = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \Delta P_{wp} \frac{\Delta x}{L_p} \quad (3)$$

k:透水係数

μ : 鉄と砂の摩擦係数

K_a : 土砂の主働土圧係数

A:スクリューコンベヤの断面積

L:スクリューコンベヤ内の土砂通過部分長

P_{wi} : 切羽水圧

Q: 排土口における湧水量

$$Q = \frac{P_{wi}}{\gamma_w \{(L_s/k_a A_s) + (L_p/k_p A_p)\}} \quad (4)$$

ΔP_{wp} : プラグゾーン始端における水圧

$$\Delta P_{wp} = \frac{\gamma_w L_p Q}{k_p A_p} \quad (5)$$

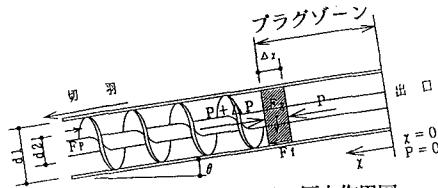


図-1 プラグゾーンにおける圧力作用図

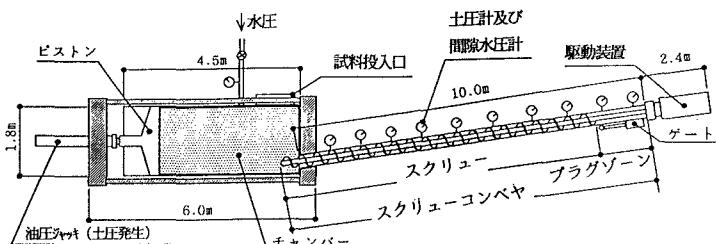


図-2 実験装置概要図

表-1 試料土の物性値

試料名	見掛け単位 体積重量	均等 係数	透水係数			砂と鉄の 摩擦係数 μ
			標準試験	スクリュー部	プラグゾーン部	
記号	γ_t	U_c	k	k_a	k_p	
単位	kgf/m ³	無次元	m/sec	m/sec	m/sec	無次元
細砂	1800	2.03	5.03×10^{-6}	2.80×10^{-6}	0.78×10^{-5}	0.45
粗砂	1900	8.53	6.20×10^{-6}	8.89×10^{-6}	3.37×10^{-5}	0.45
備考			2.5kgランマにて突固め25回	2.5kgランマにて突固め10回	4.5kgランマにて突固め55回	一面剪断試験値

3)理論式

図-1における圧力の釣り合い状態は次式で示される。検討位置はプラグゾーン内の微小部分とする。

$$\frac{\pi}{4} (P + \Delta P) (d_2^2 - d_1^2) - F_t - F_g + F_p - P \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) = 0 \quad (6)$$

これをPについて解いて次式を得る。

$$P = \frac{\gamma_t (\mu \cos \theta + \sin \theta) - \Delta P_{wp}/L_p}{4 \cdot \mu K_a / (d_2 - d_1)} \cdot [\exp\{4 \cdot \mu K_a x / (d_2 - d_1)\} - 1] \quad (7)$$

この式の物理的意義は、 $P \geq 0$ であればプラグ効果による抵抗力の方が流体力より大きいことを示しており、安定した排土ができる。逆に $P \leq 0$ であれば、プラグ効果による抵抗力より水圧による流体力の方が大きいことを示しており、基本的には掘削土砂だけでは切羽水圧をおさえることができない。Pの正負は(7)式の分母及び分子の[]が常に正であるため、 $\{\gamma_t (\mu \cos \theta + \sin \theta) - \Delta P_{wp}/L_p\}$ の正負に依存する。これらより

$$\Phi = \gamma_t (\mu \cos \theta + \sin \theta) - \Delta P_{wp}/L_p \quad (8)$$

を安定排土が可能か否かの判定式として提案することができる。

3. 実験による検証

1) 実験装置及び実験条件

実験装置の全体概要図を図-2に示す。試料土の

物性値を表-1、実験条件を表-2に示す。

2) 実験結果及び理論式の検証

実験時の水圧低減状況図を図-3～4に示す。

実験結果からの検証結果を表-3に示す。

① $L_p = 2.5m$ 、粗砂 $P_{wi} = 10kgf/cm^2$ の場合（図-3）

測点No.8の値を用いて判定式 Φ 及びプラグゾーン内土圧Pを算定する。 $\Delta P_{wp} = 0.2kgf/cm^2$ より $\Phi = 172kgf/m^3 > 0$ 、 $P = 7.8kgf/cm^2$ が得られる。 $\Phi = 172kgf/m^3 > 0$ は、プラグ効果による抵抗力より流体力の方が小さく、土砂の流動化が発生していないことを示し、理論的には安定排土となる。実際の運転においても安定排土状態が得られており現象と一致した。

② $L_p = 2.5m$ 、細砂 $P_{wi} = 10kgf/cm^2$ の場合（図-4）

測点No.8の値を用いて Φ 及びPを算定する。

$\Delta P_{wp} = 1.0kgf/cm^2$ より $\Phi = -3890kgf/m^3 < 0$ が得られる。 $\Phi = -3890kgf/m^3 < 0$ はプラグ効果による抵抗力より、切羽水圧による流体力の方が大きいことを示し、土砂の流動化が発生していることを示す。実際の運転においても不安定な排土状況であった。

4. 結論

土圧式シールドの止水機構解明に関し、理論及び実験の両面から取り組んだ。提案した理論式および判定式を模型実験により検証した結果、両者の間には良好な整合性が認められた。これらより理論式(7)及び判定式(8)は、高水圧下の土圧式シールドの止水性を定量的に評価できるものであることが確認できた。

表-2 実験条件一覧

パラメータ	単位	変数
プラグゾーンの長さ	m	0.80, 1.20, 2.50
チャンバ内の水圧	kgf/cm ²	5, 6, 7, 8, 9, 10
スクリューの回転数	rpm	8, 10, 12, 15
ゲート開口率	%	1～20

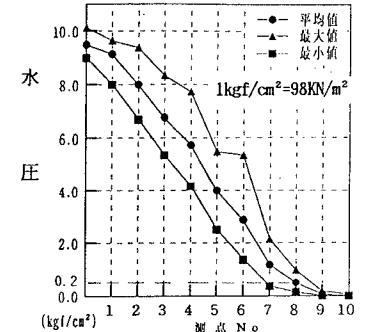


図-3 粗砂、 $L_p = 2.5m$ 水圧 $10kgf/cm^2$

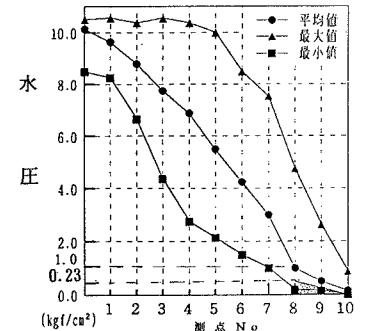


図-4 細砂、 $L_p = 2.5m$ 水圧 $10kgf/cm^2$

表-3 $L_p = 2.5 m$ の場合の検証結果（切羽水圧 $10kgf/cm^2$ ）

項目	単位	$L_p = 2.5 m$		備考
		粗砂	細砂	
ΔP_{wp}	kgf/m ²	0.2×10^4	1.0×10^4	No.8測点の計測値
Φ	kgf/m ³	$172 > 0$	$-3890 < 0$	$\Phi > 0$ は安定、 $\Phi < 0$ は不安定
P	kgf/m ²	7.8×10^4	$(P < 0)^{(1)}$	1) $P < 0$ は流動化
実験時の排土状況		安定	不安定	