

高水圧下における土圧式シールドの止水機構に関する理論式と実施工への適用

和久昭正¹・吉野広司²・櫻井春輔³

¹正会員 株フジタ技術本部 (〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-6-15)

²正会員 修士 株フジタ技術本部技術研究所 (〒224-0027 横浜市都筑区大棚町74)

³正会員 工学博士 Ph.D. 神戸大学工学部教授 (〒657-0013 神戸市灘区六甲台1-1)

シールドの切羽安定問題の内、高水圧下における土圧式シールドの止水機構に関しては様々な研究が行われている^{1)~4)}、しかし、止水機構に関する理論構築については、未解決の課題として残されているのが現状である。筆者らはこの課題を解決するために、スクリューコンベヤーの止水機構に関する理論構築ならびに模型実験を行い、研究を進めている^{5), 6)}。本論文では、筆者らが構築した理論式⁵⁾に関し、実施工への適用を図った結果について報告する。実施工への適用内容としては、施工中に発生する現象と理論式との相関関係についての考察、実機の土質データ・機械諸元を入力物性値とした理論式による試算に基づくΦ値の分布に関する実績調査、実施工時の土水圧実測データによる理論値の精度検証等である。

Key Words : earth pressure balanced shield, high water pressure, theoretical formula, practical tunneling.

1. 緒論

土圧式シールドの止水機構の基本原理は、チャンバーおよびスクリューコンベヤー内に貯められた掘削土砂の土圧を利用して切羽水圧に対抗させ、掘削しながら排土を行うというものである。したがって、止水機構を解明するためには、排土に関する定量的な評価方法の確立が重要となる。

本論文では、筆者らの提案する安定排土に関する理論式⁵⁾を実施工へ適用した結果について報告する。その概要は、下記の通りである。

掘進中に発生する現象と理論式との相関関係については、スクリューコンベヤー内の土砂の透水係数と切羽水圧の保持との関連について考察を加えた。具体的にはスクリュー回転数と土砂の透水係数との関係、スクリュー内土砂および図-2に示す様なプラグゾーン内土砂のそれぞれの透水係数と安定排土との関係等である。

施工実績の土質データおよび機械諸元を用いた理論式による試算については、前報告⁵⁾のプラグゾーンを有するスクリューの止水性能の評価に加えて、プラグゾーンの無いスクリューに関する評価方法の提案等を行った。このプラグゾーンが無いスクリューについては、仮想プラグゾーンの概念を導入し、

理論式の構築を行った。これらの評価方法に従い、合計56件の施工実績について、安定排土を維持するための判定式Φ値（以下、Φ値という）を試算し、Φ値の正負に関する分布調査を行った。

実施工時の土水圧実測データを用いた理論値の精度検証については、プラグゾーンを有する場合と無い場合の2件の工事における実測データにより検証を行った。

以上の結果、理論式は掘進中に発生する現象をよく表現し得ること、Φ値分布調査では、Φ ≥ 0となる実績件数が約82%を占めること、また実測データによる理論式の精度検証では、土質データ・機械諸元から理論式を用いて算定されるΦ値と、実測値から算定されるΦ値の整合性がよいことが確認できた。

2. 止水機構に関する理論式⁵⁾

(1) 安定排土に関する基本的考え方

土圧式シールドの概要を図-1に示す。

スクリューコンベヤーの排土口付近には、プラグゾーンが設けられている。プラグゾーンに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有しない。プラグゾーンにおける圧力作用図を図-2に示す。切羽からの切羽水圧は流体力F_P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 F_s 、掘削土砂とケーシングの摩擦力 F_f 、および掘削土砂の主働土圧等の合力である。これらをプラグ効果による抵抗力という。

Δx 部分の圧力の釣合状態より P を求め式(1)を得る。
ただし理論式構築上の仮定は次の通りである。

①スクリュー羽根自体が有する切羽水圧低減機能は、プラグ抵抗力として計上しない。

②排土口におけるゲートの開閉による抵抗力は、
プラグ抵抗力として計上しない。

③スクリュー羽根とケーシングの隙間は考慮しない。
すなわち掘削土砂の透水係数の評価に含まれるものとする。

$$P = \frac{\gamma_w (\mu \cos \theta + \sin \theta) - \Delta P_{wp}/L_p}{4\mu K_a / (d_2 - d_1)} \quad (1)$$

ここに、

μ ; 鉄と砂の摩擦係数

K_a ; 土砂の主働土圧係数

γ_w ; 土砂の見掛けの単位体積重量

d_1 ; スクリュー軸径

d_2 ; スクリューケーシング径 = スクリュー羽根外径

L_p ; プラグゾーン長

L_s ; スクリュー部長

P_{wp} ; プラグゾーン始端部における水圧

ΔP_{wp} ; プラグゾーン内の水圧降下量

θ ; スクリューコンベヤの傾斜角度

x ; 排土口からの距離

Δx ; プラグゾーン内の微小部分

P ; プラグゾーン内の土圧

P の正負は第1項分子の正負に依存する。
これを Φ とおいて判定式とする。

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

ΔP_{wp} は式(3)および式(4)により導かれる。

$$Q = \frac{\Delta P_{wp}}{\gamma_w \left\{ (L_s / k_s A_s) + (L_p / k_p A_p) \right\}}$$

$$\Delta P_{wp} = \frac{\gamma_w L_p Q}{k_p A_p}$$

ここに

k_p ; プラグゾーンにおける透水係数

k_s ; スクリュー部における透水係数

A_s ; スクリュー断面積

$$A_s = t (d_2 - d_1)/2$$

A_p ; プラグゾーン断面積

$$A_p = \pi (d_2^2 - d_1^2)/4$$

L_s' ; スクリュー部内の土砂通過部分長

$$L_s' = \pi L_s (d_1 + d_2) / 2t$$

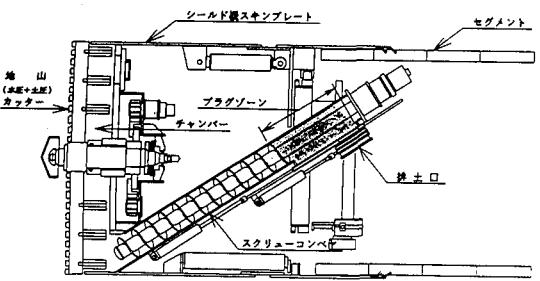


図-1 土圧式シールド概要図

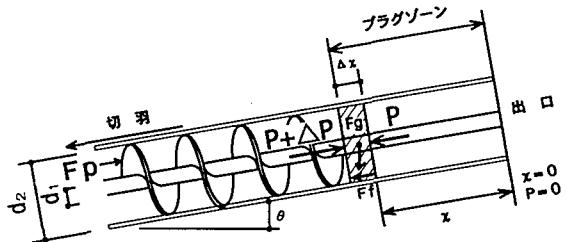


図-2 プラグゾーンの圧力作用図

t ; スクリュー羽根ピッチ

Q ; 排土口における湧水量

P_{wi} ; 切羽水圧

3. 施工時発生する現象と理論式の関係

(1) 安定排土の要因

土圧式シールドにおいて排土の安定条件を確保するには、 $P \geq 0$ すなわち $\Phi \geq 0$ でなければならない。 $\Phi \geq 0$ となるためには、 d_1 , d_2 , L_p , L_s , θ 等の機械的諸元が固定値であるとき、

(3) ① プラグゾーン内の土砂を締固め、 γ_w および μ の増大を図る。

(4) ② ΔP_{wp} の低減を図る。

③ 透水係数を下げる。

のいずれかが成立することが必要である。

図-3にこれらの基本的な考え方に基づき、掘進時に発生する現象と理論式の相関関係をまとめた結果を示す。本図の左列は、安定排土状態を得るために必要な理論式の各項の機能をフローチャート化したものとし、また右列は、実施工時において安定排土を図る際に発生する現象を示す。図全体としては、これら左右の項目が対比できるように整理されている。

安定排土の要因としては、切羽水圧や掘削土砂の

透水性等の地山条件、および排土管理方法、添加材の作用、スクリュー回転数等の運転条件をとりあげている。

各項目の詳細について考察した結果を以下に記す。

(2) γ_t と μ の増大対策

実施工において、プラグゾーン内土砂の γ_t と μ の増大を図る有力な運転管理の方法の1つに、掘削土量に対し排土量を調整して締固めを行うという方法がある。締固め条件を変えることによる γ_t および μ の増大に関する効果を定量的に把握するために試料を用いて試験を行った。その結果を以下に示す。

試験に使用した試料は富士川砂（粗砂）と浜岡砂（細砂）の2種類である。対象にした性状は、 γ_t が1.5~2.1gf/cm³程度の一般的な砂の範囲とした。突固め回数の違いによる γ_t および透水係数 k の関係を表-1に示す。

また、載荷圧を0.5~1.0kgf/cm²に変化させ、それぞれの載荷圧に対応する砂と鉄の摩擦係数の値を表-2に示す。

(3) 切羽水圧の低減対策の基本的な考え方

$P \geq 0$ すなわち $\Phi \geq 0$ とするためには、 d_1 , d_2 , L_s , L_p , θ 等の機械的諸元を固定値とすると、運転管理によって $\Delta P_{WP}/L_p$ を小さくすることが有効である。

理論式から導かれる $\Delta P_{WP}/L_p$ の低減対策と、掘進時における切羽からの湧水の水圧降下に関する現象について以下に記す。

ΔP_{WP} は式(8), 式(9)より式(10)の通り表わせる。

$$\Delta P_{WP} = \frac{\gamma_w L_p \Delta P_{WI}}{k_p A_p \gamma_w \{(L_s' / k_s A_s) + (L_p / k_p A_p)\}} \quad (8)$$

ここで

$$a = \frac{L_p}{L_s}, \quad b = \frac{A_p}{A_s}, \quad c = \frac{k_p}{k_s}, \quad \zeta = \frac{\Delta P_{WP}}{\Delta P_{WI}} \quad (9)$$

とおいて式(8)を変形して、式(10)を得る。

$$\zeta = \frac{a}{a+bc} \quad (10)$$

この ζ は、切羽水圧の降下量とプラグゾーン内の水圧降下量の比を表すものである。すなわち切羽からの湧水は、スクリューコンベヤー内の土砂の中を通過するに従ってその水圧が低減していくが、その低減率を表す。

また a , b は機械的諸元であるため施工の段階では一定であると考えると、 ζ は c に依存することになる。例えば表-3における実験装置の諸元における $L_s = 4.8m$ の場合の ζ と c の関係を図-4に示す。

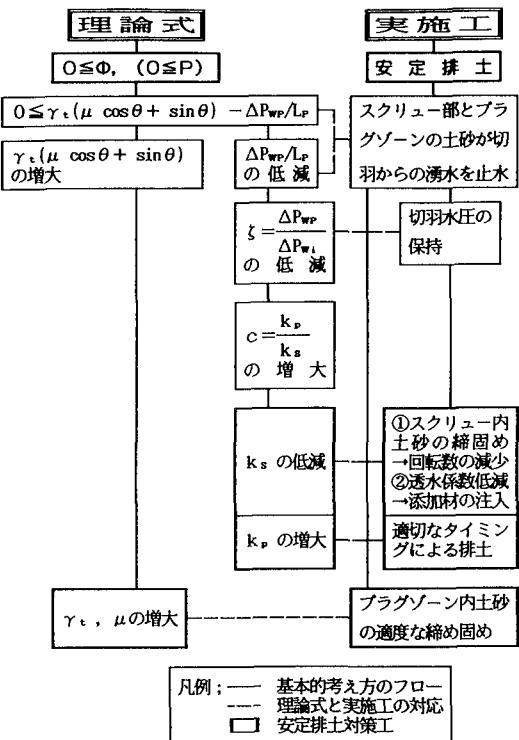


図-3 理論式と実施工の相関関係

表-1 突固め条件と γ_t , k との関係

	ラメ-重量	突固め回数	土粒子の密度	見掛け単位体積重量	透水係数
単位	kgf	回	gf/cm ³	gf/cm ³	cm/sec
記号			G_s	γ_t	k
富士川砂	2.5	10	2.700	1.793	8.89×10^{-3}
		25		1.831	5.62×10^{-3}
		55		1.869	4.48×10^{-3}
浜岡砂	4.5	55		1.907	3.37×10^{-3}
		10	2.662	1.737	2.80×10^{-3}
		25		1.780	1.50×10^{-3}
		55		1.824	0.86×10^{-3}
		55		1.821	0.78×10^{-3}

表-2 砂と鉄の摩擦係数

項目	摩擦係数 ($\mu = \tau_n / \sigma_v$)	
	富士川砂	浜岡砂
最小値	0.41	0.44
最大値	0.51	0.49

備考：試料は湿潤状態。

含水比：富士川砂24.2%，浜岡砂28.9%。

表-3 実験装置の諸元

記号	単位	物性値
d_1	m	0.140
d_2	m	0.300
θ	度	0.0 °
L_p	m	1.20
L_s	m	4.80
L_s'	m	11.05
スクリューピッチ t	m	0.278
ノ羽根厚 s	m	0.012

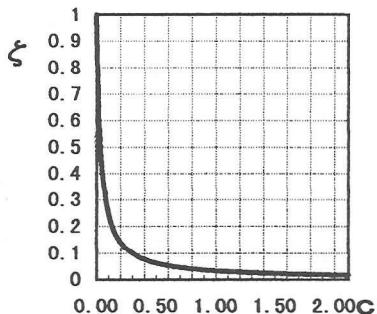
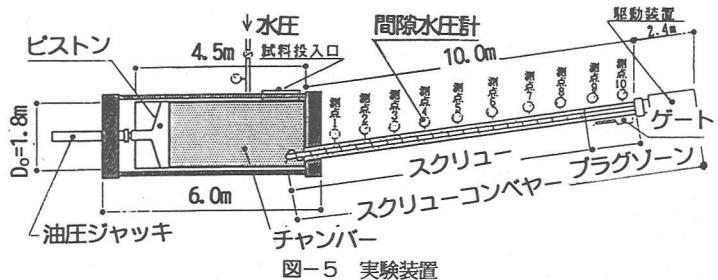
図-4 ζ -C関係図

図-5 実験装置

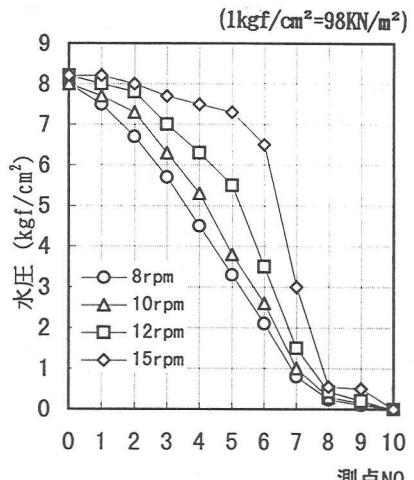


図-6 スクリュー回転数と水圧低減状況

表-4 実験結果一覧表

項目	スクリュー回転数	チャンバーの押出量	コンベヤーの理論排出量	$\frac{Q_1}{Q_2}$	切羽水圧	プラグゾーン始端水圧	$\frac{P_{wp}}{P_{wi}}$	$\frac{L_p}{L_s}$	$\frac{A_p}{A_s}$	$\frac{k_p}{k_s}$	k_s	判定式 Φ 値
デ — タ	8	0.348	0.118	2.96	8.0	0.24	0.030	0.134	3.38	1.28	4.4×10^{-3}	211.9
	10	0.348	0.147	2.37	8.0	0.29	0.036	0.134	3.38	0.98	5.7×10^{-3}	11.9
	12	0.348	0.176	1.98	8.0	0.43	0.054	0.134	3.38	0.69	8.3×10^{-3}	-548.1
	15	0.348	0.220	1.58	8.0	0.55	0.069	0.134	3.38	0.53	10.7×10^{-3}	-1028.1

[備考] ① $v = 0.137 m/min$. ② k_s は、 $n=10$ の k_p を $5.62 \times 10^{-3} cm/sec$ として算定. ③ P_{wp} は測点 NO. 8 の値を採用.

このグラフから明らかな様に c が大きくなることは小さくなり、 c が小さくなることは 1 に近づく。特徴的なことは、双曲線であるため c が小さな値の範囲にある場合には、 c の微妙な変化に対しても c の変化は大きいという点である。

実施工において安定排土を図るために、切羽水圧が漸次低減し、プラグゾーン始端部の P_{wp} をできるだけ小さくすることが必要条件となる。換言すれば、 c を 0 に近づけることが、安定排土状況となる可能性を高める。この場合、掘削土砂の透水係数に着目すると、 c を大きくすることであるから、 k_s が k_p に対して相対的に小さくなればよい。

a) k_s の低減を図る方法

k_s の低減を図るために

①スクリューの回転を少なくし、掘削土砂を充分に締固め、透水係数の低減を図る、

②スクリュー部の掘削土砂に添加材等を混入して透水係数の低減を図る、

の 2 つの有力な管理方法がある。

①についての検討は下記の通りである。図-5において $L_s = 7.5 m$, $L_p = 2.5 m$ とし、切羽水圧 $P_{wi} = 8 kgf/cm^2$ を作用させた場合のスクリュー回転数 n とスクリューコンベヤー内の水圧変動の様子を図-6 に示す。実験結果一覧を表-4 に示す。

表中、 P_{WP} およびチャンバー内土砂の押し出し量 Q_1 は、計測値であり、また、 Q_2 はスクリュー回転数より排土効率100%とした場合の理論排出量を示す。

Q_1 、 Q_2 はそれぞれ次式にて表される。

$$Q_1 = \pi (D_o^2 / 4) \times v \quad (11)$$

$$Q_2 = \pi \{(d_s^2 - d_i^2) / 4\} \times (t-s) \times n \quad (12)$$

ただし、 v ；ピストン速度

n ；スクリュー回転数

s ；スクリュー羽根厚さ

D_o ；チャンバー直徑

α はスクリュー内土砂がピストンから受ける締固め度を示す指標である。

a 、 b を機械諸元であるため固定値とする。また、 k_p は n の影響を受けないと仮定し、一定値とする。この k_p の値は、表-1の富士川砂25回突き固めの透水係数 $k = 5.62 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ を $n = 10$ の k_p に採用した。

以上のような条件の下に式(2)および式(10)により算定した Φ 値および k_s の推定値を表-4に示す。

実験状況は下記の通りである。

現象的には、スクリュー回転数が8 rpmから15 rpmとなるに従って P_{WP} が上昇し、安定排土から不安定排土へ移行した。 n と α に着目すると、 n の増加に伴い α が低減し、 k_s が増大した。すなわち n の増大に伴い土砂のゆるみが進行し、透水性がよくなる傾向が明らかになっている。この実験の例では、安定排土状態を保持するためには、図-6の水圧分布および Φ 値から $n = 12$ 以下が望ましく $\alpha \geq 2$ 程度の締固めが必要であると考察される。

実際の施工においても n が小さいときには安定排土状態であっても、 n を大きくするにしたがい不安定排土へと移行し、最終的には噴発に至る場合があることは、一般的な現象としてよく知られている。これは、 n が小さい場合には、 k_s が減少し、 α の低下が図れ、安定排土状態となる。一方、逆に n を大きくした場合には k_s が増大し、 α が1に近づいた状態となり、不安定排土になるものと考察できる。

②についても添加材によって掘削土砂の透水係数の低減が進むことは、実験その他によても明らかにされている。その一例として筆者らが行った無公害型添加材の実験のデータを表-5および図-7に示す²⁾。試料土は前述の実験と同じ富士川砂である。この例ではベントナイト型添加材またはセルロース型添加材を掘削土砂に注入することによって 10^{-2} cm/sec 程度の透水性の低下が認められている。添加材による掘削土砂の透水係数 k_s の低減は、 c を大き

表-5 添加材配合表 (1 m³ 当たり)

項目	単位	ベントナイト型	セルロース型
粘 土	kgf	516.0	550.0
ベントナイト	kgf	60.0	—
セルロース	kgf	—	1.0
水	kgf	744.0	757.0
比 重	—	1.32	1.31
粘 性 度	c.p.	7500	8300

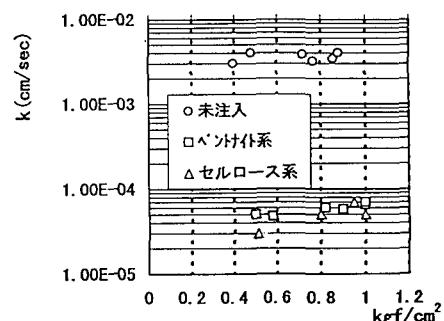


図-7 添加材による透水係数の低下効果

くし、 α を小さくすることにつながり、安定排土を確保する上で有効な方法である。

b) k_p の増大を図る方法

① k_p の上限管理値について

k_s を変化させない場合、式(9)、式(10)より k_p を大きくすると α を小とすることが可能である。ただし、プラグ効果を失わない範囲、すなわちプラグが崩れない程度に k_p を大きくすることが必要である。

実施工においては、掘削土砂の排出および切羽からの湧水の排出を適切なタイミングで行うのが効果的である。

この場合適切なタイミングによる湧水の排水という点が重要であり、過剰な排土を行うと、プラグゾーン内の γ 、 μ の減少をまねく。その結果先述したようにプラグ効果が低下し、 $\Phi < 0$ となり不安定排土へと移行する。

まず、プラグ効果を発揮することができる必要条件としては、スクリュー部の土砂と同等以上の単位体積重量 γ_s を確保しなければならない。

一般的に、 γ_s と間隙比 e_p と透水係数 k_p の間に、下記の関係がある³⁾。

$$\gamma_{s,p} = \frac{G_s \cdot (1 + w)}{1 + e_p} \quad (13)$$

ここに

w : 含水比

G_s : 土砂の粒子の比重

$\gamma_{t,p}$: プラグゾーン内土砂の見掛け単位体積重量

w を一定とすると e_p の増大に伴い $\gamma_{t,p}$ は減少する。したがって、 e_s より e_p を小さくすることがプラグ効果を発揮する上で必要な条件となり、その関係は、次式で表される。

$$e_p \leq e_s \quad (14)$$

一方、 k_p 、 k_s および e_p 、 e_s の関係は一般的に次式で表される。

$$e_p^2 : e_s^2 = k_p : k_s \quad (15)$$

以上より $e_p = e_s$ 、すなわち $k_p = k_s$ がもっとも有利な状態といえる。ただし、排土の瞬間には、プラグゾーン内の土砂の一部が排出されるため、一時的にプラグ抵抗力が緩んだ状態になることがある。この緩みがスクリュー部内土砂に及ばないようにするために、常時は

$$e_p \leq e_s, \text{ すなわち } k_p \leq k_s \quad (16)$$

の状態を保持しながら運転を継続するのが一般的である。

ただし、表-4の実験結果からは、 $n = 8 \text{ rpm}$ において $k_p = 1.28 k_s$ となっているが、安定排土状態が得られている。この理由は、 $n = 8$ では、 $\alpha \approx 3$ となるようによく締固められている。その結果、止水するうえで必要な k_s が保持できるため、プラグ効果が崩れずに安定排土状態が確保できたものと考察される。

② k_p の下限管理値について

実施工においてプラグゾーン内の土砂を過度に締固め、 k_p すなわち e_p の減少を図りすぎると止水効果が高まるが、切羽からの湧水による水圧がスクリュー内で過剰圧力状態となる。その結果、 ΔP_{wp} がプラグ抵抗力より大きくなり始めると、湧水を含んだ掘削土砂が間欠的に噴出するようになる場合がある。このような運転状況が続くと、プラグ抵抗力が弱くなり、安定排土状態が崩れ、最終的には噴発に至ることは実施工においてよく知られている現象である。

この現象を理論式により事例検証した結果を以下に記す。表-6に示すシールド機および施工条件下において、スクリュー長 L_s および k_s を一定値とし、 c を $0.1 \sim 1.0$ まで変化させた場合の ΔP_{wp} および Φ 値の試算結果を図-8に示す。この図から k_p が低減するにしたがって、換言すれば、 c が減少するにしたがって ΔP_{wp} が増大することが分かる。

表-6 c , k_p , P_{wp} の関係検討入力物性値

記号	単位	物性値
シールド外径	m	3.690
γ_t	kgf/m ³	1,800
k_s	cm/sec	1.0×10^{-2}
k_p	cm/sec	$(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-2}$
μ	—	0.5
K_a	—	0.33
d_1	m	0.1652
d_2	m	0.6000
θ	度	7.5°
L_p	m	0.54
L_s	m	9.000
t	m	0.500
s	m	0.070
γ_w	kgf/m ³	1,000
P_{wi}	kgf/cm ²	3.30

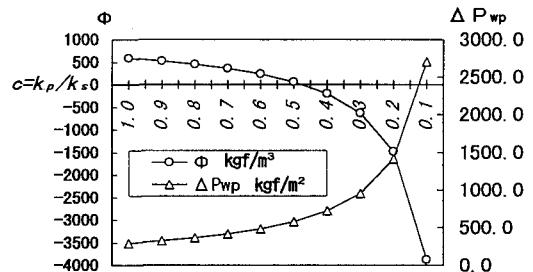


図-8 c , Φ , ΔP_{wp} の関係

この事例では、 $0.5 \leq c \leq 1.0$ の範囲では $\Phi > 0$ であるが、 $0.1 \leq c < 0.5$ では $\Phi < 0$ となる。すなわち理論式上は、安定排土状態を保持するには前述の式(16)と併せて、 $0.5 k_s \leq k_p \leq k_s$ の範囲で運転する必要があることを示す。

4. 実績に基づく Φ 値の正負分布調査

(1) Φ 値の正負分布調査に関する基本的な考え方

a) 対象とした施工実績の選定条件

施工実績から得た土質データおよび機械諸元を理論式に適用し、 Φ 値の正負分布調査を行った。扱った施工実績はゼネコンおよびメーカーから得た56件である。施工実績の選定条件は次の通りである。

- ① 土圧式シールドで施工した。
- ② 2.0 kgf/cm^2 以上の切羽水圧が作用した。
- ③ 機械仕様を変更することなく施工を完了した。
- ④ ただし、リボンスクリューや排土口にロータリーパルプ等の特殊装置を搭載したものは除外した。

b) 土質条件

土質データのうち見掛けの単位体積重量 γ_s と透水係数 k_s に関しては、試験値のあるものはそれを採用した。試験値のないものについては、土質の種類、N値、土被り等から定性的分類によって得られる値を採用した。例えば、単位体積重量や内部摩擦角に関しては表-7に示す旧国鉄の基準値を採用した⁹⁾。また透水係数については土質工学会の提唱する土質と透水性の関係表¹⁰⁾から入力物性値を設定した。

c) スクリュー型式

プラグゾーンの有無によってスクリュー型式を分類し、理論式の適用を図った。ただし、プラグゾーンの有無に関する定義は下記の通りである。

①スクリュー入り口部から排土口終端部迄の間にスクリュー羽根の無い部分がある型式をプラグゾーンを有する（以下、L_p有りという）とする。

②スクリュー入り口部から排土口終端部迄の間に全てにスクリュー羽根を有する型式をプラグゾーンを有しない（以下、L_p無しという）とする。

①の機械に関する諸元は、設計図から得た値を採用してΦ値を算定した。

②については、次項(2)に記す。

(2) L_p無しの場合のΦ値算定法

a) 仮想プラグゾーンの概念導入

L_p無しについては、排土口付近のスクリューコンベヤーの羽根の1ピッチ分の長さを仮にプラグゾーン長とし、これを仮想プラグゾーンとした。換言すれば仮想プラグゾーンとは、理論式を適用するために便宜的に設定したプラグゾーンである。仮想プラグゾーンの長さをtと設定したことについての根拠は次の通りである。

図-9においてスクリューコンベヤーの任意の位置における微小部分(Δx)の圧力の釣り合いは、式(1)、式(2)、式(3)においてL_{s1'}をL_{s1'}、L_pをL_{s2'}、 ΔP_{w2} を $\Delta P_{w2}'$ と置換して次式で表される。

$$P = \frac{\gamma_s (\mu \cos \theta + \sin \theta) - \Delta P_{w2}/L_{s2}'}{4\mu K_a / (d_2 - d_1)} \cdot [\exp \{ 4\mu K_a x / (d_2 - d_1) \} - 1] \quad (17)$$

また湧水量Qおよび仮想プラグゾーン内の水圧降下量 ΔP_{w2} は、次式となる。

$$Q = \frac{\Delta P_{w1}}{\gamma_w \{ (L_{s1}' + L_{s2}') / k_s A_s \}} \quad (18)$$

$$\Delta P_{w2} = \frac{\gamma_w L_{s2}'}{k_s A_s} Q \quad (19)$$

表-7 旧国鉄で定める土の諸性質

種別	状態	単位体積重量 (t/m ³)	内部摩擦角 度
碎石 砂利 すみがら		1.6 ⁽¹⁾ ~ 1.9	35~45
		1.6 ~ 2.0 ⁽²⁾	30~40
		0.9 ~ 1.2 ⁽³⁾	30~40
砂 ⁽⁴⁾	しまったもの	1.7 ~ 2.0	35~40
	ややゆるいもの	1.6 ~ 1.9	30~35
	ゆるいもの	1.5 ~ 1.8	25~30
普通土 ⁽⁵⁾	かたいものの やややわらかいもの	1.7 ~ 1.9	25~35
	やわらかいもの	1.6 ~ 1.8	20~30
	やわらかいもの	1.5 ⁽⁶⁾ ~ 1.7	15~25
粘土 ⁽⁷⁾	かたいものの やややわらかいもの	1.6 ~ 1.9	20~30
	やわらかいもの	1.5 ~ 1.8	10~20
	やわらかいもの	1.4 ⁽⁸⁾ ~ 1.7	0~10
シルト ⁽⁹⁾	かたいものの やわらかいもの		10~20
			0

[注]

- (1), (5) は、石灰岩または砂岩系の単位重量の少ないもの。
- (2) の2.0は切込砂利で密実なもの。
- (3) の1.2は、戴荷履歴があるよく締め固られたもの。
- (4) の砂はゆるい細砂、シルト質細砂等の不安定なもの以外。
- (6) の普通土には砂質ローム、砂質粘土ロームを含む。
- (7) の1.5は関東ロームその他の重量の少ないもの。
- (8) の粘土にはシルトローム、シルト質粘土を含む。
- (9) のシルトにはシルトローム、シルトを含む。
- (9) の1.4は、シルトのヘドロ状のもの。

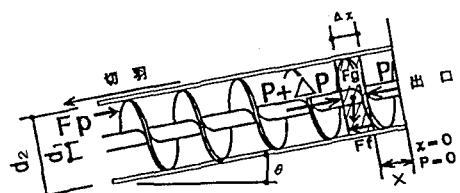


図-9 仮想プラグゾーンの圧力作用図

ここに

P_{w2}' : 仮想プラグゾーン始端部の水圧

L_{s1} : スクリュー部長

L_{s2} : 仮想プラグゾーン部長

L_{s1'} : L_{s1}の土砂通過部分長

L_{s2'} : L_{s2}の土砂通過部分長

$$L_{s2}' = \pi L_{s2} (d_2 + d_1) / 2 t \quad (20)$$

式(17)より判定式Φ値は次式にて表される。

$$\Phi = \gamma_s (\mu \cos \theta + \sin \theta) - \Delta P_{w2}/L_{s2}' \quad (21)$$

理論的には、仮想プラグゾーンは任意の位置に設定できる。しかし、経験的にゲートの絞り効果の影響を受けると考えられるスクリュー排土口付近の1ピッチの土砂がプラグ効果を発揮していると想定できるので、この部分を仮想プラグゾーンと設定してΦ値の算定を行った。ただしP値についてはx=tが仮定であるため参考値として扱った。

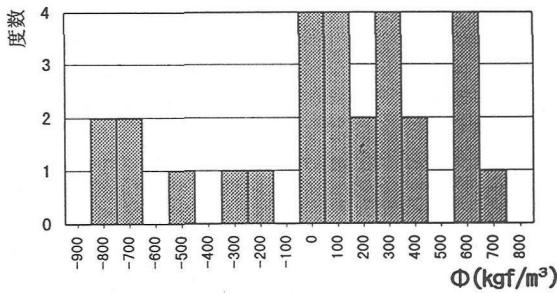


図-10 L_p 無しの Φ 値分布図

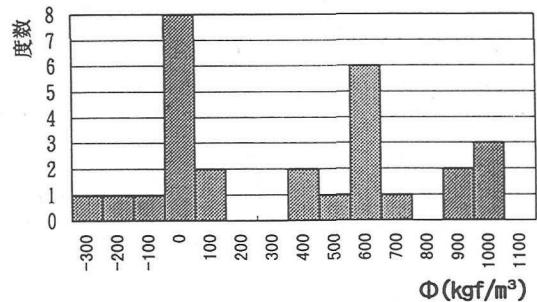


図-11 L_p 有りの Φ 値分布図

b) 仮想プラグゾーン内土砂の物性値

仮想プラグゾーン内土砂の物性値は、スクリュー羽根の回転力を受け、移動している状態の土砂であるため一般スクリュー部と同じである。前報告⁵⁾における実験ではプラグゾーンの土砂の物性値を最も締固めた状態の値を採用したが、仮想プラグゾーンの場合は、土砂が移動状態にあることを考慮して、 γ_s 、 μ は突固め回数25回で得られる値を採用した。透水係数については、スクリュー部とプラグゾーン部の土砂は同じ状態にあるため $k_p = k_s$ とした。

(3) 試算結果

プラグゾーンの有無によって分類し、それぞれの Φ 値を試算した結果を図-10、図-11に示す。プラグゾーン無しの場合、28件のうち21件が $\Phi \geq 0$ 、7件が $\Phi < 0$ 、プラグゾーン有りの場合、28件のうち25件が $\Phi \geq 0$ 、3件が $\Phi < 0$ であった。

全体的には56件の実績のうち46件、すなわち82.1%が $\Phi \geq 0$ であり、10件すなわち17.9%が $\Phi < 0$ である。このことは試算対象とした土圧式シールドの約82%がスクリュー部とプラグゾーン内の土砂のみで切羽水圧の低減を図ることができるよう設計されていることを示す。ただし、留意すべきは、これら全てが添加材を必要とせず掘進可能ということに短絡するものではないことである。例えば、地層が変化する地盤では、安定排土状態を維持するうえで地盤性状に合わせて濃度や量を調整した添加材を注入することが必要であるし、巨礫層の地盤ではスムーズな排土を確保するために添加材の潤滑材としての機能が必要となる。

一方残り約18%の実績については、 $\Phi < 0$ となり、スクリュー部およびプラグゾーン内の土砂のみでは切羽水圧を低減させることができず、流動化する可能性があることを示す。ただし、 $\Phi < 0$ の実績においても実際の工事では、次のような理由により支障なく施工できているものと考えられる。

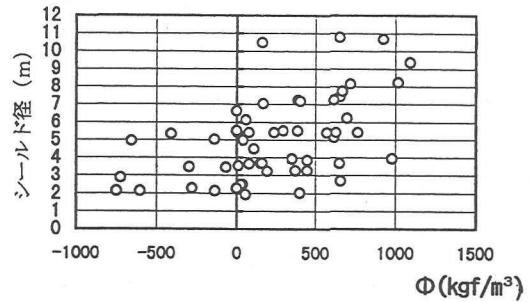


図-12 Φ -D相関図

①理論式はそのモデル化においてスクリューの羽根自体が有する切羽水圧低減機能やゲートの開閉による抵抗力をプラグ効果として評価していないが、実際の工事ではこれらがプラグ効果としての抵抗力を発揮すると考えられる¹¹⁾。

②掘削土砂に添加材を加えて透水係数を下げ、切羽水圧の低減効果を高めたり、運転時にスクリューの回転数を適切に調整し、切羽およびスクリュー内の水圧を管理しながら排土を行なっている。その結果、切羽の水圧低減が図られ、安定排土状態が保持できている。

(4) シールド機径との関係

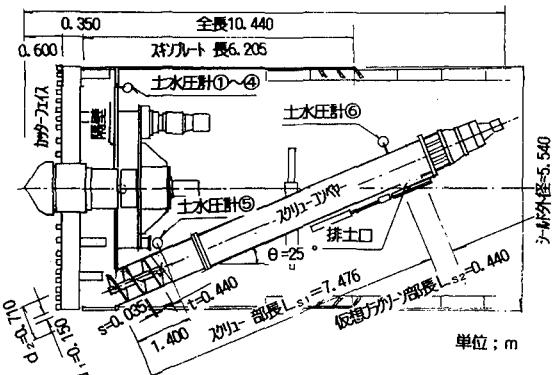
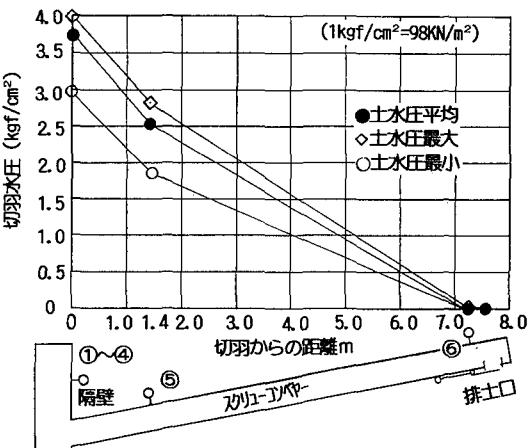
Φ 値とシールド外径との関係を図-12に示す。 Φ 値が負となった実績の特徴は、10件中7件がシールド外径3.5m以下の比較的小さな径のシールドであることである。この理由は、シールド機の内空が小さいため、中に納めるスクリューコンベヤーの取り付け角度が充分に確保できないことが主な原因であると考察できる。

表-8 L_p 無し事例の工事概要

工種	地下鉄建設工事
工事内容	
工法	土圧式シールド工法
	シールド外径: 5,540mm
1次覆工	全長1,807m(上り線902m, 下り線905m)
	セグメント外径: 5,400mm
切羽地質	江戸川層(砂, 砂黄土)
土被り	21.0~38.0m
	地下水位 GL. -3.0m

表-9 L_p 無し事例の入力物性値

記号	単位	物性値
シールド外径	m	5,540
γ_e	kgf/m ³	1,850
k_s	cm/sec	1.0×10^{-4}
k_p	cm/sec	1.0×10^{-4}
μ	—	0.45
K_a	—	0.33
d_1	m	0.150
d_2	m	0.710
θ	度	25.0°
L_{s2}	m	0.44
L_{s1}	m	7.476
t	m	0.440
s	m	0.035
γ_w	kgf/m ³	1,000
P_{w1}	kgf/cm ²	3.73

図-13 L_p 無し事例のシールド図-14 L_p 無し事例の水圧低減状況

b) 実測データによる検証結果

施工時の実測データとしてスクリューコンベヤ内の土水圧低減状況を図-14に示す。

仮想プラグゾーンの土砂の入力物性値は、スクリュー回転により移動力を受けている状態であるため、 $k_s = k_p = 10^{-4} \text{ cm/sec}$, $\mu = 0.45$, $\gamma = 1,850 \text{ kgf/m}^3$ とした。

また、土水圧計は、切羽の隔壁に4カ所（上下左右の90度間隔に配置）、スクリューコンベヤの切羽側1.4mの位置に1カ所、排土口側に1カ所設置した。とくに排土口付近の土圧計は、排土口からスクリュー1ピッチ切羽側の位置に設置されているため、その計測値はプラグゾーン始端部の土水圧値として扱った。また切羽の隔壁部の測定値については4測点のうちの最大値を採用した。

水圧の計測は、間隙水圧計用いるべきであるが、泥土圧シールドでは泥土が間隙水圧計のメッシュを目詰まりさせることが多く、その場合計測不可能となる。そこで土圧計にて得られた土水圧値を理論式

5. 実測データによる理論式の検証

プラグゾーンを有する場合と、無い場合の2件の工事について、それぞれの実施工時の土水圧実測データを用いて、理論値の精度検証を行った。その結果を以下に示す。

(1) プラグゾーン無しの場合の検証

a) 施工条件からの安定排土に関する推定

施工概要を表-8および入力物性値を表-9に示す。また機械の組立図を図-13に示す。

このケースは、プラグゾーン無しの場合である。したがって仮想プラグゾーンを排土口から1ピッチの範囲に設定して検証を行った。

これらの条件に基づき理論式により Φ 値を算定した結果、理論値として、

$$P_{wp} = 2,073.3 \text{ kgf/m}^2, \quad \Phi = 1.6 \text{ kgf/m}^3,$$

$P = 0.9 \text{ kgf/m}^2$ (参考値) が得られた。

Φ 値は0に近いが正を示しており、計測等に基づく綿密な掘進管理を行えば安定排土となることが推定された。

表-10 L_p 無し事例のΦ値解析結果

項目	記号	単位	理論値	実測値
フランジ始端部の土水圧	P_{wp}	kgf/cm ²	2,073.3	1,880.0
判定式の正負	Φ	kgf/m ³	1.6	144.7
備考	①仮想フランジ長 L_p' = 1.35m ②計算値 $\Phi \neq 0$, 実測値 $0 < \Phi$, 施工は安定排土			

に代入して検証を行った。これは常に水圧 \leq 土水圧の関係が成立するため、その値を理論式に適用しても安全側の評価となると判断したためである。

以上の考え方に基づく解析結果を表-10に示す。実測値 P_{wp} は切羽水圧の最大値 $P_{w1} = 3.73 \text{ kgf/cm}^2$ を示した上り線工区のN0.440リングからN0.539リングの100リング間の実測データの平均を採用した。その結果、 $P_{wp} = 1,880 \text{ kgf/m}^2$ が得られ、これより Φ 値は $\Phi = 144.7 \text{ kgf/m}^3$ となった。実際の施工における排土状態も安定しており、この現象は実測値から得た $\Phi = 144.7 \text{ kgf/m}^3$ (> 0) と整合している。推定値は $\Phi = 1.6 \text{ kgf/m}^3$ で 0 に近い値であったが実施工では $\Phi > 0$ となった理由は、4.(3)で示したゲートの絞り効果により γ_s の増大および k_s の低減が図れた結果であろうと考察できる。

(2) プラグゾーン有りの場合の検証

a) 施工条件からの安定排土に関する推定

工事概要を表-11および入力物性値を表-12に示す^{1,2)}。このケースは、プラグゾーン有りの場合である。機械諸元は設計図から得られた値を用いて検証を行った。その結果、 $P_{wp} = 210.7 \text{ kgf/m}^2$, $\Phi = 719.1 \text{ kgf/m}^3$, $P = 817.8 \text{ kgf/m}^2$ が得られ、理論値からは安定排土が得られることが推定された。

b) 実測データによる検証結果

掘削土砂は、洪積層の綿まつ砂である。添加材として気泡材と泥漿材を掘削土砂に対し20%程度注入して、止水性を向上させるように改良が加えられた状態の土砂であった。入力物性値としては、 $k_s = 10^{-3} \text{ cm/sec}$, $k_p = 0.5 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$, $\mu = 0.5$, $\gamma_s = 2,000 \text{ kgf/m}^3$ とした。

また、土圧計は、切羽の隔壁に3カ所、スクリューコンベヤーの切羽側から排土口までの14カ所、合計17カ所に設置した。とくに排土口付近の土圧計の計測値はプラグゾーン始端部の土水圧値として扱った。以上の基本的な考え方に基づく解析結果を表-13に示す。

セグメントN0.1001～1100間の100リングの実測値では、 P_{wp} は $0 \sim 0.05 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲を挙動した

表-11 L_p 有り事例の工事概要

工種	下水幹線管渠築造工事
工事内容	
工法	土圧式シールド工法 シールド外径：7,750mm
1次覆工	全長1,915 m セグメント外径：7,600 mm
切羽地質	洪積砂疊層
土被り	22.7～26.8 m 被圧地下水圧 3.00kgf/cm ²

表-12 L_p 有り事例の入力物性値

記号	単位	物性値
シールド外径	m	7.750
γ_t	kgf/m ³	2,000
k_s	cm/sec	1.0×10^{-3}
k_p	cm/sec	0.5×10^{-3}
μ	—	0.5
K_a	—	0.33
d_1	m	0.232
d_2	m	0.865
θ	度	0.0 °
L_p	m	0.75
L_s	m	33.000
t	m	0.700
s	m	0.040
γ_w	kgf/m ³	1,000
P_{w1}	kgf/cm ²	3.00

表-13 L_p 有り事例のΦ値解析結果

項目	記号	単位	理論値	実測値
フランジ始端部の土水圧	P_{wp}	kgf/cm ²	210.7	100.0
判定式の正負	Φ	kgf/m ³	719.1	866.7
備考	①プラグゾーン長 $L_p' = 0.75 \text{ m}$ ②実測値、計算値共に $0 < \Phi$ となり、安定排土			

が、平均値は 0.01 kgf/cm^2 であった。この実測データから Φ 値 = 866.7 kgf/m^3 が得られ、理論式からの推定値 $\Phi = 719.1 \text{ kgf/m}^3$ にほぼ近い値となり、安定した施工が行われた。これは、十分に長いスクリューコンベヤー長を搭載したことや、掘削土砂に気泡材やペントナイトおよび粘土を混合して練り上げられた添加材を注入し粘性土化を図り、 k_s を低下させたこと等が、 P_{wp} の低減に寄与した結果であると考察できる。

6. 結論

本研究により得られた成果は下記の通りである。

(1) 理論式と実施工の現象との関連性

下記の点において理論式が実施工の現象をよく表現していることが確認できた。

①スクリュー回転数の低速化は、スクリュー内の土砂の締固めを促進し、その結果 k_s を減少させるため、切羽水圧の低減に寄与する。

②スクリューポートの掘削土砂への添加材等の注入は、 k_s を低下させ、切羽水圧の低減に有効である。

③プラグ効果を崩さないという制約条件下で k_p の増大を図ることは、切羽水圧の低減に有効である。また k_p を極度に低下させることは切羽水圧低減に不利となる。

(2) 実績に基づく ϕ 値の正負分布調査

理論式に施工実績から得られた土質データ・機械諸元を適用し、 ϕ 値の試算を行った。ただし、プラグゾーンを有する場合は設計図に示すデータを用い、またプラグゾーン無しの場合は、仮想プラグゾーンを設定することにより ϕ 値を試算した。その結果次の点が明らかになった。

①理論式による試算結果は、全体件数の約82%が $\phi \geq 0$ であった。すなわち高水圧下で採用された土圧式シールドの約82%がスクリューポートとプラグゾーン内の土砂のみで切羽水圧の低減を図ることができるように設計されていることを示す。

このことから、 $\phi \geq 0$ となるようにシールドの設計を行えば、安定排土ができるシールドとなる可能性が高いといえる。

② $\phi < 0$ となった実績の特徴は、シールド径が3.50m以下の比較的小さな径である。この理由は、内空が狭いためスクリューコンベヤーの取り付け角度が充分に確保できないためと考えられる。

(3) 実測データによる理論値の精度検証

プラグゾーンを「有する場合」と「無しの場合」についてそれぞれ1件ずつの実測データを用いて、

理論値の精度検証を行った。その結果いずれも施工条件から理論式により算定した ϕ 値と、実測データにより求めた ϕ 値は、ほぼ同一の傾向を示した。

以上の結果、提案した理論式が充分実施工の現象を表現し得ること、また実際のシールドを設計する上で充分有効な算定式となることが明らかになった。

参考文献

- 1) 吉川忠男: 土圧式シールド用スクリュ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.
- 2) 吉田保、山田孝治: 泥土圧シールド掘進時の切羽土圧と周辺摩擦力について、土木学会論文集、No. 445/Ⅲ-18, pp. 75~82, 1992.
- 3) 馬場和徳: 超高水圧対抗加泥シールド機、建設機械、pp. 36~40, 1989.
- 4) 近藤紀夫、宮沢勉、宮本克彦、岸剛毅: 泥土加泥シールド工法の耐水圧実験、土木学会第45回年次学術講演会、III-31, pp. 98~99, 1990.
- 5) 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/VI-32, pp. 189~198, 1996.
- 6) 和久昭正、宮澤秀治、和氣輝幸: 泥土圧シールドにおける高水圧下でのスクリューコンベヤの山留め・止水効果、トンネルと地下、第24巻7号, pp. 31~35, 1993.
- 7) 村山秀幸、和久昭正、門田俊一、野間達也: 泥しようシールドにおける添加材の止水効果に関する実験、第43回土木学会年次講演会、III-436, pp. 914~915, 1988.
- 8) 地盤工学会: 土質工学ハンドブック、1995.
- 9) 日本国鉄道: 建築物設計標準解説、1974.
- 10) 土質工学会: 土質試験の方法と解説、pp. 273, 1990.
- 11) 森鱗、秋葉芳明: 密閉式シールドにおける粘性土切羽地盤の破壊条件と取り込み土量の支配条件、トンネルと地下、第15巻8号, pp. 613~617, 1984.
- 12) 中島輝長、古賀則男、大串昇、酒本博: 高水圧下での大口径気泡シールドの成果と噴発防止装置の開発、熊谷組技術研究所報、No. 45, pp. 135~142, 1989.
- 13) 岸田隆夫、吉見吉昭、植木一志: 砂と金属材料との間の摩擦抵抗(その2)、第13回土質工学研究発表会講演集、pp. 437~439, 1978.
- 14) 建設省土木研究所ほか: 地下空間の建設技術に関する研究、大深度・大断面シールドの設計施工技術に関する研究、平成3年度共同研究報告書、pp. 420~472, 1992.

(1997. 7. 25受付)

PRACTICAL APPLICATION OF A THEORETICAL EQUATION DERIVED FOR REPRESENTING WATER STOPPING MECHANISM OF EARTH PRESSURE BALANCED SHIELDS SUBJECT TO HIGH WATER PRESSURE

Akimasa WAKU, Hiroshi YOSHINO and Shunsuke SAKURAI

This paper presents the verification of a theoretical equation proposed by the authors on water stopping mechanism of earth pressure balanced shields subject to high water pressure.

Comparison of theoretically predicted phenomenon with practical one obtained from shield excavations, and the investigation from trial result of theoretical equation using the data of shield machine has been conducted. The results revealed that the proposed theoretical equation well represents a practical applicability. And it has become clear that the equation has a sufficient validity in designing shield machine for practical purpose.