

# 岩盤用泥水セミシールドによる軟泥岩層推進時の閉塞防止に関する実験的研究

五味 信治<sup>1</sup>・袁 大軍<sup>2</sup>・岡本 將昭<sup>2</sup>・森 麟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 日産建設株式会社 技術研究所 第1研究室（〒350-1205 埼玉県日高市原宿746）

<sup>2</sup>正会員 工修 日産建設株式会社 技術研究所 第1研究室（〒350-1205 埼玉県日高市原宿746）

<sup>3</sup>名誉会員 工博 早稲田大学理工学総合研究センター（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

岩盤用泥水セミシールドは、岩盤を対象にした推進工法である。この工法で軟泥岩を掘進する際にはカッタヘッドが閉塞し、掘進が困難となる場合が少なくない。本研究では、閉塞の原因解明と予測および閉塞防止対策の確立を目的とした。実験においては、人工軟岩により実験条件の統一性を計り、閉塞の要因となる掘削排土機構と閉塞予測法を調査した。また、閉塞対策として、カッタヘッドから切羽への直接注水の付加やディスクカッタ突出長の縮小化等の閉塞防止効果に対する検討を行いその有効性を確かめ、さらにチャンバーと切羽空間での泥水の流状も解明して閉塞対策の実機への適用性を高めた。

**Key Words :** rock type slurry shield, excavation of soft rock, blocking prediction, artificial soft rock, blocking prevention, liquid flow into cutting space

## 1. はじめに

都市部における上下水道、ガス、電力、通信ケーブル等ライフラインを設置する非開削工法として、推進工法は多用されている。都市内の基盤整備が進むにつれ、従来は殆ど実施されなかった浅い地下の岩盤地帯も整備計画の対象となり、推進工法の適用範囲が拡大して対応条件は年々厳しいものとなっている。これらの状況に対して、合理的で経済的な施工法を目指して、岩盤を圧碎する掘削方式を持ちTBM (Tunnel Boring Machine)の掘削機構を推進工法へ適用した岩盤用泥水セミシールド工法(以下、岩盤用セミシールドと記す)を開発した。岩盤用セミシールドは都市部で施工する場合が多く、道路直下や重要な施設に近接して施工する可能性が高い。掘削する位置に軟泥岩がある場合、切羽で閉塞現象が発生し、掘進が停止して、道路直下にある掘進機を道路を掘り下げて取り出すといったトラブルが実際に発生している。これらのトラブルを防止し、計画通りに軟泥岩を岩盤用セミシールドで掘進するためには、岩盤層中の軟泥岩による切羽の閉塞現象の解明と対策が必要である。

閉塞現象の解明には、基礎研究が必要であり、実機で基礎研究を行うことは時間的、経済的にも不可能なため、小型の模型機を使用した実験を行った。実施した模型実験では、掘削の機械条件であるカッタ形

状、施工条件である掘進速度および軟泥岩の岩質性状の相違等が閉塞におよぼす影響について検討した。次に、閉塞現象を防止する対策としては、閉塞状況の進行に伴い地山とカッタヘッドの間の空間(以下、切羽空間と記す)にチャンバーから送泥水を十分供給できなくなるので、それを補うため切羽空間へ直接注水する方法やチャンバーと送泥水の切羽空間内への流状を支配する要因を把握することが閉塞対策につながると考えられる。

これらについて模型実験を行い、閉塞現象発生のメカニズムと閉塞防止対策の考え方について明らかにすることができた。また、実機と模型機の相似性は現状では明らかでないが、この研究結果の一部はすでに実機や施工に適用し、その有効性を確認した。

## 2. 模型セミシールドによる閉塞現象の調査

### (1) 模型実験装置

実機の形状および掘削機構<sup>1)~3)</sup>を図-1に示す。模型セミシールド<sup>2),4)</sup>は実機に対する縮尺を約1/5としたもので、性能は実機と同様に岩盤対応型の泥水シールド式とした。実機ではカッタヘッドが回転し掘進するが、模型実験では装置を簡略化するためにセミシールド機は回転せず推進のみとし、地山にあたるモールド部を回転する方式とした。また、模型セミシールドには実機と同様に泥水チャンバーを設け、

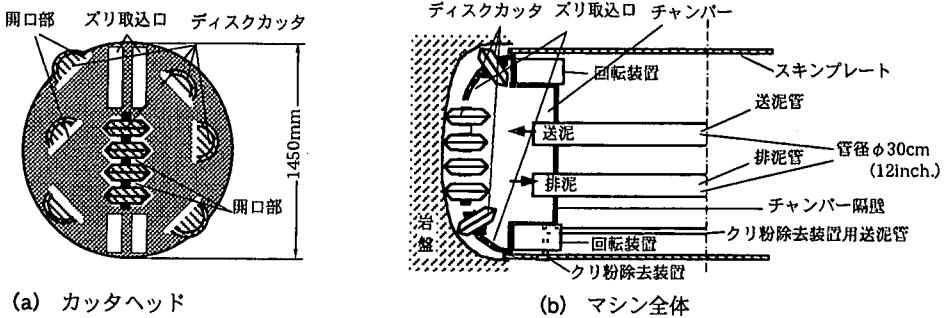


図-1 岩盤セミシールドの実機の概念図

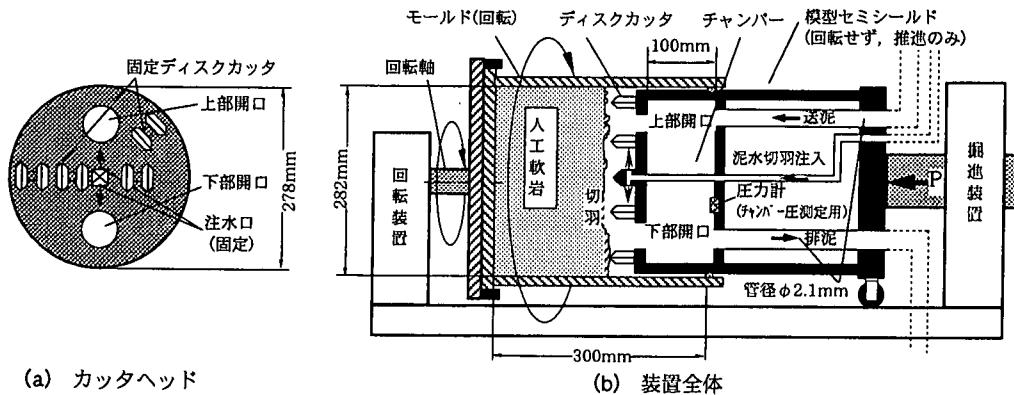


図-2 模型実験装置の概念図

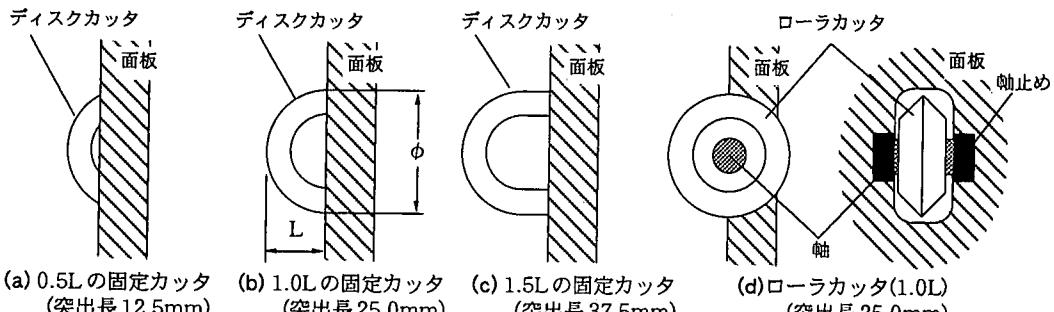


図-3 ディスクカッタおよびローラーカッタの概念図

送排泥管により泥水を循環できる。泥水の管内流速は、実機と同様な  $50 \sim 70\text{cm/s}$  とした。カッタヘッドの開口部は実機とは異なり上下に円形のものを設けた。実機の開口部はズリ取込口とディスクカッタ周辺部で合計した開口率は約7%であるが、実験装置では5%および10%に変更できるようにした。掘進速度は、 $0 \sim 15\text{ mm/min}$  の範囲で設定が可能である。実験装置の概念図を図-2に示す。

実機は、回転が可能なディスクカッタを装着しているが、模型セミシールドでは使用上難点があるため、実機の約1/5の  $\phi 50\text{mm}$ 、突出長  $L=25\text{mm}$  の半円状の固定式ディスクカッタを取り付けた。ディスクカッタの突出長の影響を比較するため、突出長を12.5mm (0.5L) と37.5mm (1.5L) とした。また、

固定式ディスクカッタとローラーカッタの比較実験も行った。模型機に装着したディスクカッタとローラーカッタの概要を図-3に示す。

## (2) 実験用供試体

実際の軟岩地山から採取した供試体を用いるには、均質で数種類の性質のものが多数必要であり、さらに大きなブロック状のものでなければならない。これらの条件を満たすことは事実上不可能なので、ここでは実軟岩の性状を代表する一軸圧縮強度および塑性指数に近づけた人工軟岩を用いて実験し、実際の岩盤も少数であるが実験を行って比較する方法とした。人工軟岩は、試行錯誤の結果、粘土、けい砂、セメントおよび水を材料として作製<sup>5)~7)</sup>した。人工軟

表-1 人工軟岩の配合 (重量 %)

配合	ペトナイト	カオリン	けい砂	セメント	水
A	25	33	10	8	24
B	15	43	10	8	24
C	5	53	10	8	24
D	0	58	10	8	24

表-3 泥岩と人工軟岩の掘進実験結果

掘進速度 mm/min	人工軟岩				泥岩 (土丹)
	A	B	C	D	
4.0	○	---	---	---	○
6.0	○	○	○	○	○
8.0	○	○	○	○	○
10.0	○	×	×	×	×
12.0	×	×	×	×	×

ただし、×:閉塞、○:閉塞しない

岩の配合および作製方法は、粘土、けい砂、セメントおよび水を使用し、粘土の種類を変化させた4配合で静的な締固めを行い作製した。人工軟岩の配合を表-1に示す。締固めの条件は、載荷による加圧を5MPaとし、加圧時間を60minとした。5MPaまでの昇圧は10min、0MPaまでの降圧は20minである。作製した人工軟岩は、3日間の温潤養生後実験に供した。人工軟岩および実軟岩の物性値を表-2に示す。

### (3) 掘進実験

本研究で用いた固定式ディスクカッタを装備した模型セミシールドと人工軟岩による掘進実験は、ローラカッタと実軟泥岩(土丹)を用いた掘進実験結果と同様な傾向を示すという結果をすでに得ている<sup>2),8)</sup>。したがって本実験結果は閉塞メカニズムの解明などには有効であると考えられる。模型機にローラカッタを装備した場合、多数の実験回数には耐えないので、固定式ディスクカッタを採用した。また、開口率の影響は、開口率10%では閉塞は発生せず、開口率が5%になると閉塞するという結果を得ている<sup>1),8)</sup>。実験は以下の2CASEについて行った。

CASE1は岩質条件と掘進速度の影響を調べるために、4種類の人工軟岩を対象に、開口率は5%、突出長はL=25mm、掘進速度を4, 6, 8, 10, 12mm/minの5種とした場合である。チャンバーへの送排泥水量は、次のCASEも含め10 l/minとした。この流量は、模型機と実機の排泥管内流速により決めたものである。

CASE2はカッタの突出長が異なる場合の掘削特性を調べるために、開口率は5%、突出長L=25mmのカッタを基準に、突出長を0.5L=12.5mm, 1.5L=37.5mm

表-2 人工軟岩および実軟岩の物性値

物性	人工軟岩				実軟岩 (土丹等)
	A	B	C	D	
塑性指数(%)	29.1	26.5	22.4	22.9	20.0~50.0
一軸圧縮強度(MPa)	2.20	3.31	6.30	6.05	1.50~6.00

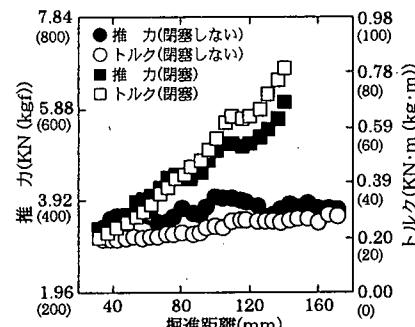


図-4 推力、トルクと掘進距離

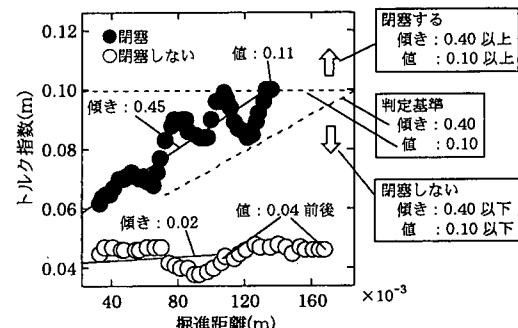


図-5 トルク指数と掘進距離

に変化させた場合である。岩質条件は配合Aの人工軟岩とした。また、掘進速度は、4, 6, 8, 10, 12 mm/minの5種である。

計測項目は、掘進中の推力、トルク、チャンバー圧および掘進距離とした。掘進全長は150mmである。

### (4) 閉塞発生の判定標準

実験装置は掘進不能となった場合停止するが、その原因は閉塞によるものかトルク不足等によるものか判定する必要がある。多くの実験結果<sup>1)</sup>から閉塞の判定基準を導き、掘進実験に適用した。

推力、トルクと掘進距離の関係の一例を図-4に示し、実験結果の一覧を表-3に示す。配合の異なる4種類の人工軟岩による実験結果を比較した結果、カッタヘッドに閉塞現象が発生する場合には、人工軟岩の種類に関係なくほぼ同様な閉塞状況が生じた。閉塞する場合と閉塞しない場合を定量化して比較するため、図-4に示した掘進中のトルクと推力の状況から、トルク / 推力(以下、トルク指数と呼ぶ)と掘進

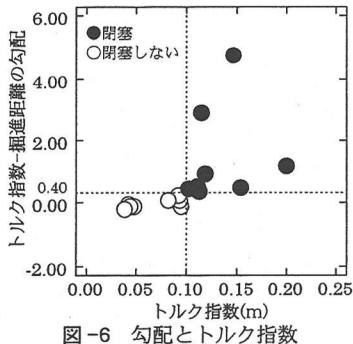


図-6 勾配とトルク指数

距離の関係に着目した。図-4をトルク指数と掘進距離の関係に直したもののが図-5である。この曲線の1次近似の直線勾配と機械の閉塞停止近傍での推力、トルクおよび時間の関係から式(1)に示す値を設定した。以下に式(1)を示す。

$$Ts(t) = T(t)/F(t) \quad (1)$$

$Ts$  : トルク指標数 (m)  
 $T$  : トルク (N·m)  
 $F$  : 推力 (N)  
 $t$  : 時間

トルク指標と掘進距離の1次近似の勾配とトルク指標の値について整理したものを図-6に示す。図より、実験上の閉塞判定基準<sup>1),2),8)</sup>は、機械の閉塞停止近傍でのトルク指標が0.10以上、機械停止近傍での接線勾配が0.40以上であることの2点とし、さらにカッタヘッドへのズリの付着による閉塞を目視確認した。掘進全長は150mmであるが、閉塞判定基準を使用すればこの掘進長で閉塞の判定は可能であることがわかった。実験後のカッタヘッドの外観の一例を写真-1および写真-2に示す。

### (5) 掘進による閉塞発生に影響する諸条件

#### a) カッタ突出長および掘進速度と閉塞現象

カッタの突出長と掘進速度の変化が、カッタヘッドの閉塞にどの程度影響するのか調べた。模型機の場合掘進速度一定であり、実機の場合もほぼ一定としているので切込み深さと回転数(7.2rpm)の関係は一定であると考えた。実験結果を表-4に示す。カッタヘッドの回転数は、7.2rpmに固定して掘進速度が10mm/min(切込み深さ1.4mm)の場合で比較すると、カッタの突出長が0.5L、1.0Lの場合はカッタヘッドの閉塞がなく、突出長が1.5Lの場合は閉塞が発生した。掘進速度が12mm/min(切込み深さ1.7mm)の場合で比較すると突出長が0.5Lは閉塞がなく、1.0Lは閉塞が発生し、1.5Lは10mm/minですでに閉塞している。これらの結果から、カッタの突出長を短くする

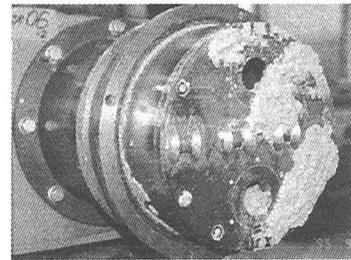


写真-1 カッタヘッドが閉塞しない場合

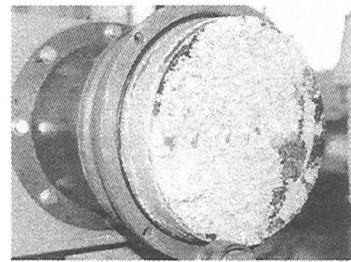


写真-2 カッタヘッドが閉塞した場合

表-4 カッタ突出長およびローラカッタによる実験結果

掘進速度 mm/min	カッタ突出長 (L=25mm)			ローラカッタ 1.0L
	0.5L	1.0L	1.5L	
4.0	----	○	----	----
6.0	----	○	----	○
8.0	----	○	○	○
10.0	○	○	×	○
12.0	○	×	----	×

×:閉塞, ○:閉塞しない, カッタ(ローラ含む)の径: 50mm

ことは、カッタヘッドの閉塞発生防止の効果があると考えられる。カッタ突出長1.0Lでは、速度が小さいときは閉塞が発生せず、掘進速度が10mm/min以上になると閉塞が生じており、掘進速度が大きくなるほど閉塞が生じやすいことを示している。

また表-3から、実験で使用した人工軟岩の範囲では岩質条件は閉塞発生の有無にほとんど影響しないことが分かった。

#### b) 閉塞現象の原因について

掘進速度が速くなると掘削ズリが増加し、切羽のズリをチャンバー内に排土するために必要な切羽への泥水流量は増加する。掘削ズリの増加に伴って泥水流量が増加しないと排土に必要な切羽流量が不足して、しだいにズリが切羽内に充満しカッタヘッドに付着してくる。したがって、閉塞現象は、掘進速度、開口率、ディスクカッタ突出長等に応じた必要切羽流量が確保できないことに支配的原因があると考えられる。

表-5 泥水の配合

配合	粘土 kg	CMC kg	水 ℓ	比重 g/cm³	ファンネル粘性 s
泥水I	10	0.32	160	1.04	30
泥水II	20	0.32*	160	1.08	40

\* : 低粘度型のCMCを使用し、他は高粘度型のCMCを使用。

表-6 切羽への直接注水(泥水)の実験結果

注入量 ℓ/min	注水の種類			
	なし	清水	泥水I	泥水II
0.0	×	-----	-----	-----
0.2	-----	×	×	×
0.3	-----	○	○	×
0.5	-----	○	○	○
1.0	-----	○	○	○
2.0	-----	○	○	○

ただし、×:閉塞、○:閉塞しない

### 3. 切羽直接注水した場合の閉塞防止条件

掘進実験の結果より、軟泥岩を掘進する際にカッタヘッドの閉塞を防止するには、掘進速度、開口率、ディスクカッタの突出長を制御することで閉塞現象がある程度防止できることがわかった。閉塞現象はチャンバーから切羽空間へ供給される泥水流量の不足によると考えられることから、さらに閉塞防止に効果的な方法は切羽への直接注水と考え、この方法で実験を行った。

#### (1) 切羽への直接注水装置

切羽へ直接清水および泥水を注入できる装置<sup>2),9)</sup>は、チャンバーへの送排泥水系とは別の系統にした。形状は、これまで用いてきた面板中央の切削ピットに小径の注入管を直結し、注入口を掘進方向に対して直角方向に2箇所設けた。この注入口より直接切羽空間へ注水した水は、すべてチャンバーへもどる。注入装置および注入口の概略は図-2に示してある。

#### (2) 切羽への直接注水掘進実験

軟泥岩の掘進に伴うカッタヘッドの閉塞現象を防止する対策として、3.(1)で述べた直接注水装置を実験装置に取り付けた。切羽への直接注水による閉塞防止効果は、清水と泥水でどの程度の違いがあるかを比較するため、注水装置から清水および泥水の注入をする掘進実験を実施した。岩質条件は、人工軟岩(配合A)とした。機械・施工条件は、開口率は5.0%，掘進速度は切羽直接注水をしない場合に閉塞する12mm/min、チャンバーへの送泥水量は10 ℓ/minである。また、別途切羽へ注水装置から清水および泥

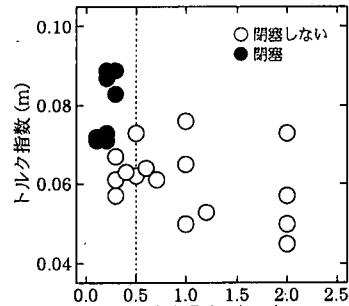


図-7 注入量とトルク指數  
(開口率5%, 掘進速度12mm/min)

水を直接注水した。切羽への清水および泥水の注入量は、0.2, 0.3, 0.5, 1.0 および 2.0 ℓ/min の5種類とした。計測項目は、2.の実験と同一である。泥水の配合を表-5に示す。

#### (3) 閉塞防止上で見た切羽注水量とトルク指數

上記の実験に用いた機械・施工条件では、切羽への直接注水(泥水)がないとカッタヘッドが閉塞してしまうが、切羽注水を行えば清水、泥水のいずれの場合も注入量が0.3 ℓ/min以上であれば閉塞防止を可能にすることが表-6からわかる。この結果から、泥水、清水にかかわらず切羽へ直接注水を行うことの効果が確かめられた。

清水と泥水の場合で、閉塞状況を比較すると、泥水の比重が水に近い 1.04g/cm³ の泥水Iの場合では清水との差がない。ファンネル粘性30sと40sの比較は、注水量が少ない 0.3 ℓ/min と 0.5 ℓ/min で差が生じているが、注水量が多くなると両者は同様の傾向となった。

また、前章2.で用いた閉塞判定規準は、直接注水の効果を考慮したものではなく、工事現場等での閉塞管理には計算等が複雑であるため使用が難しい。調査した結果、直接注水の場合はトルク指數のみで閉塞判定が可能となった。

切羽直接注水量と式(1)で求めたトルク指數の関係を図-7に示す。図-7より、カッタヘッドが閉塞するかしないかの基準は、注水量が 0.5 ℓ/min で、トルク指數が 0.07 程度であることがわかる。しかし、人工軟岩の種類と供試体数が十分とはいえないもので、必要な切羽直接注水量としては安全側をとって 1.0 ℓ/min を確保すべきものとした。この時のトルク指數は約 0.06 である。図-7から得た前述の結果は、開口率 5.0%，掘進速度 12mm/min，カッタ突出長 25mm の場合であり、これらの要因を変更すると閉塞の判定規準も変化する。

切羽注水量とカッタヘッド付着土量の関係および

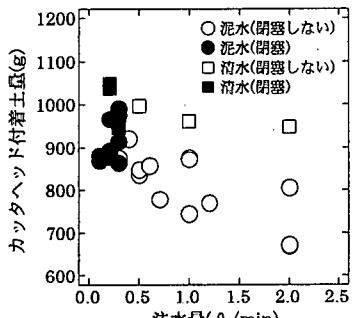


図-8 カッタヘッド付着土量と注水量

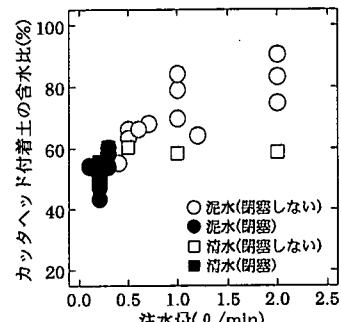
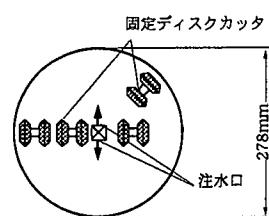


図-9 カッタヘッド付着土の含水比と注水量



注) 閉口部は、(b)図のカッタヘッドの左側にある。

(a)カッタヘッド

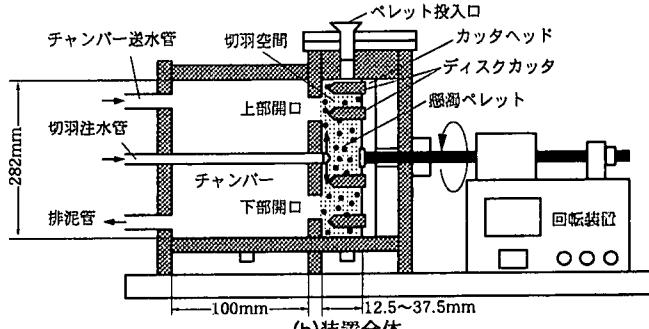


図-10 実験装置の概念図

注水量とカッタヘッド付着土の含水比の関係を図-8および図-9に示す。閉塞現象に直接影響すると思われるカッタヘッド付着土は、カッタヘッドが閉塞する場合に多くなり、切羽注水量が多くなるとカッタヘッド付着土は少なく閉塞は発生し難くなる。清水と泥水を注入した場合を比較すると泥水の方がカッタヘッド付着土が少なく、掘削ズリの排出については清水より有効であると考えられる。カッタヘッド付着土の含水比は、閉塞する場合は圧密されて小さくなることが示されている。これらの結果から、閉塞する場合には、掘削ズリが切羽空間でしだいに増加し、カッタヘッド付着土が推力によって切羽空間内で圧密されて水分が脱水し、カッタヘッドに固着した結果閉塞現象が発生するものと考えられる。

#### 4. 切羽流量の調査と閉塞防止に必要な切羽流量

閉塞防止には、切羽空間への直接注水が有効であり、必要注水量は3.(3)で述べた模型掘進実験では1.0 l/minである。すなわち、閉塞現象はトルク指標が0.06以上にならないような流量が切羽空間にあるかどうかに左右される。閉塞現象は図-7からわかるように切羽流量が多いほど発生しにくいので、ここではこの流量に着目する。チャンバー送水による流量は、切羽空間に入る流量と切羽に入らずチャンバー内を回遊して排泥管に向かう流量<sup>10)</sup>に分かれる。

表-7 CMC溶液とペレットの物性

CMC溶液		ペレット	
ファンネル粘性 (s)	比重 (g/cm <sup>3</sup> )	円柱形 (mm)	比重 (g/cm <sup>3</sup> )
30	1.03	3.0×1.0	1.03

この場合は、前者が切羽流量に相当する。さらに、直接注水を行えば、これらの切羽流量と泥水の流れる状態(以下、流状と記す)が切羽空間のズリの排土に効果を与える結果となっている。ここでは、チャンバー送水と切羽直接注水により切羽空間の流状がどのような要素に支配されるかを調査した。

#### (1) 模型実験装置

実験装置<sup>2),11),12)</sup>は、透明なアクリル樹脂を用いて製作し、流状を観察できるようにした。実験装置の縮尺は掘進実験装置と同様に実機の約1/5とした。実験装置の概念図を図-10に示す。装置は実験を簡素化するためカッタヘッドの開口部を固定し、ディスクカッタはカッタヘッドには着けずに切り放して回転させる方式とした。切羽空間には流状を可視化するために筒状のプラスチックペレットを入れた。送泥水は、現場の泥水と同様な粘性を持たせた透明なカルボキシルメチルセルロース(CMC)溶液を用いた。切羽空間の泥水の流れを可視化し観察するため、泥水(CMC溶液)と同一比重の着色したペレット(直径1mm、長さ3mm)を用いた。実験に先立ち切羽空間

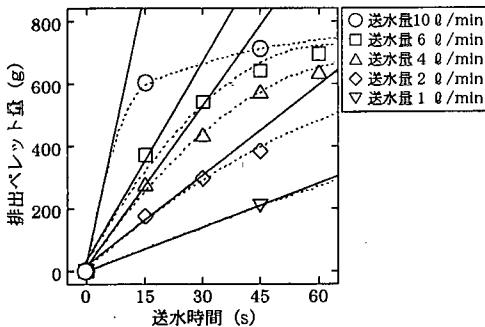


図-11 排出ペレット量と送水時間  
(切羽送水、開口率5.0%)

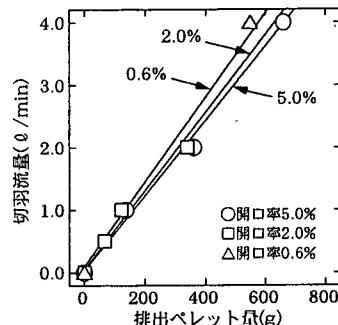


図-12 チャンバー送水による排出ペレット量と  
切羽流量の基準直線(送水時間30s)

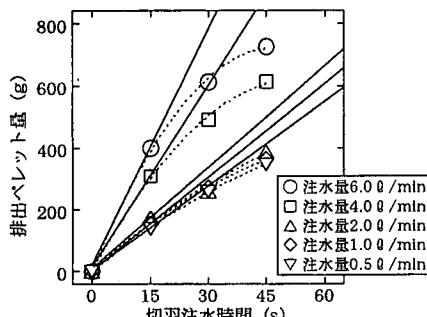


図-13 排出ペレット量と切羽注水時間

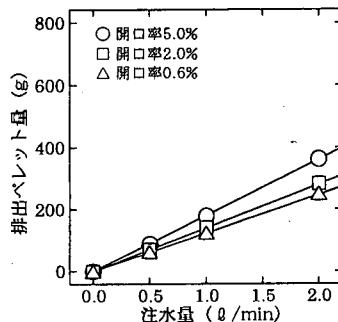


図-14 排出ペレット量と切羽直接注水量の基準直線  
(注水時間30s)

入れるペレットの量は800gとした。この量は切羽空間に非常に高い濃度で懸濁させた状態で、このペレットの動きが切羽空間の流量と流状を示すものとした。使用したCMC溶液およびペレットの物性を表-7に示す。カッタヘッドの開口率は、0.6, 2.0, 5.0%の3種類を用いた。

## (2) チャンバー送水および切羽直接注水時の切羽流量を求める方法

### a) チャンバー送水のみの場合

ここでは、模型実験装置において、チャンバー送水の場合の切羽流量を排出ペレット量から調査する方法について述べる。また、一般的なチャンバー送水の流状を実験装置で観察すると一部がカッタヘッド上部開口部から切羽空間に入り切羽流量が生じ、ペレットは下部開口からだけ排出される。したがって、チャンバー送水は、切羽空間において上部開口より下部開口に向かう流れである。これを踏まえてチャンバー送水の切羽流量を求めるために、実験では上部の開口に強制送水パイプを直結して切羽空間へ既知量の送水を行い、一定経過時間後に切羽空間の下部開口よりチャンバーに排出されたペレットを計量した。送水時間と切羽空間から排出するペレット量の関係の一例(開口率5.0%)を図-11に示す。また、常に初期濃度のペレット量が切羽空間に存在すると

仮定すれば、図-11の送水時間と排出ペレット量の関係はそれぞれ原点での接線にあたる直線となる。これらの直線から一定送水時間における排出ペレット量と切羽流量の関係を示す基準直線図-12が得られる。送水時間は任意であるが、図-12は送水時間30sにおけるものである。図には開口率5.0%以外の場合も同様にして作った基準直線を示してある。切羽流量は同一であっても開口率が小さくなるほど排出ペレット量が僅かに減少する傾向がある。この基準直線を用いて、切羽に強制送水をしない一般的なチャンバー送水における各開口率の切羽流量は、各経過時間と切羽からの排出ペレット量の曲線の接線を引き、その30sのペレット量を求めれば図-12の基準直線から切羽流量が得られる。

### b) 切羽直接注水のみの場合

切羽直接注水のみの実験において切羽空間の流れを観察するとペレットは上部および下部開口のいずれからも排出される。したがって、a)の場合とは切羽空間の流状が異なるので、図-12の基準直線は適用できないため別途実験を行って求めた。直接注水量はそのまま切羽流量になるので、切羽への直接注水時間と排出ペレット量の関係を調査した。その一例を図-13に示す。常に初期濃度のペレット量が切羽空間に存在すると仮定すれば、a)で述べたように、図-13の直線はそれぞれ原点での接線である。この接線か

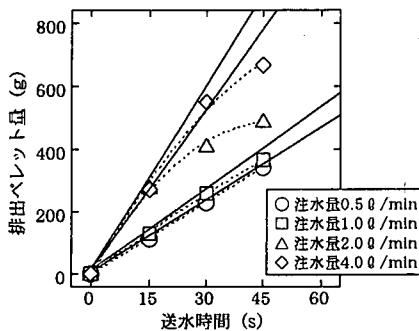


図-15 併用時の排出ペレット量と送水時間  
(チャンバー送水量 4.0 l/min, 開口率 5.0%)

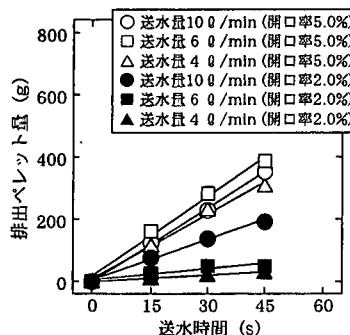


図-16 排出ペレット量と送水時間  
(チャンバー送水量 10 l/min, 開口率 5.0%)

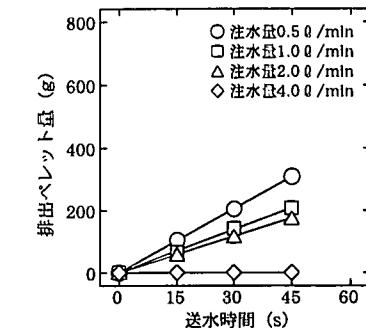


図-17 排出ペレット量と送水時間

表-8 実験ケース(チャンバー送水のみ)

NO.	開口率 (%)	チャンバー送水量 (l/min)
Case1	5.0%	4,6,10
Case2	2.0%	4,6,10
Case3	0.6%	4,6,10

である。図-16にチャンバー送水分の切羽からの排出ペレット量と送水時間の関係を示す。図-16の送水時間30sにおける排出ペレット量を図-14に当てはめ、チャンバー送水分の切羽空間への分流量が求まる。

### (3) チャンバー送水のみの場合および切羽直接注水を併用した場合の切羽流量

#### a) チャンバー送水のみの場合

チャンバー送水のみの場合においてチャンバー送水のうちどの程度が切羽流量になるかを調査するため、チャンバー送水量と開口率を変えて実験を行い上記の方法によって切羽流量を求めた。実施した実験ケースを表-8に示す。

送水時間と排出ペレット量の関係は、切羽のペレット濃度が時間と共に低下するが排出量が多くないので、図-17のようにほぼ直線上にのる。直線は、原点での接線とした。これは切羽空間のペレット濃度が初期濃度に維持された場合に当たる。これらの線上の任意点の値(30s)を図-12の基準直線の図上にプロットすれば切羽流量が求められる。この結果を図-18に示す。

チャンバー送水量のみの場合の切羽流量は、開口率が小さいと少くなり、特に開口率2.0%以下では急激に低下し、開口率0.6%ではほとんどゼロとなっている。実機の場合、開口部の数が多く1孔分の面積は小さいので、この図-17の結果から、開口率5%より切羽流量は減少すると考えられる。また、開口部にズリが付着して開口率が下がると、切羽流量が減少する。切羽流量の減少につれて、切羽空間にあるズリの排出作用も低減し、次第に切羽空間に多量のズリ

ら切羽流量と排出ペレット量の基準直線が作れる。これを図-14に示す。

#### c) チャンバー送水と切羽直接注水併用時の

##### チャンバー送水分の切羽への分流量の求め方

チャンバー送水と切羽直接注水を併用した時の切羽直接注水によるペレットは、上部および下部開口から排出されるので切羽直接注水単独の場合の切羽空間の流れとほぼ同様とみられるため、図-14の基準直線が適用できるものとした。チャンバー送水と切羽直接注水を併用するときの切羽流量を求めるために、チャンバー送水と切羽直接注水を併用して実験を行い、送水時間と排出ペレット量の関係を求める。この場合の送水時間と排出ペレット量の関係の一例を図-15に示す。また、直線は原点での各曲線の接線である。

チャンバー送水と切羽直接注水を併用する場合のチャンバー送水分の切羽への分流量を求めるためには、切羽直接注水による排出ペレット量を求める必要がある。これは、切羽直接注水単独の場合の切羽流量と同一なので図-14が適用できる。切羽直接注水のみによる送水時間  $t$  (30s) の排出ペレット量を  $M_1$  (図-14)、またチャンバー送水と切羽直接注水を併用する場合の送水時間  $t$  (30s) の排出ペレット量を  $M_2$  (図-15の接線上の点)とする。チャンバー送水分の切羽への分流量を示す排出ペレット量は、 $|M_2 - M_1|$

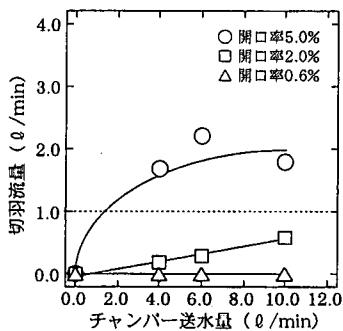


図-18 切羽流量とチャンバー送水量

表-9 実験ケース(チャンバー送水と切羽直接注水の併用)

NO.	開口率 (%)	チャンバー送水量 (l/min)	切羽注水量 (l/min)
Case4	5.0%	4,6,8,10	0.5,1.0,2.0,4.0
Case5	2.0%	4,6,8,10	0.5,1.0,2.0,4.0
Case6	0.6%	4,6,8,10	0.5,1.0,2.0,4.0

が累積充満し、閉塞現象につながると考えられる。

一方、2.(4)によるとディスクカッタの突出長を小さくして、切羽空間奥行長を短くすると閉塞しにくい結果となった。実機では、切羽空間の奥行長はディスクカッタ突出長と等しくなるが、チャンバー送水のみの場合にこの奥行長が切羽流量におよぼす影響について調査した。実験では、図-10のカッタヘッドを前後に移動して切羽空間の奥行長を変化させた。調査した奥行長は、今まで使用した標準の25mmの他に12.5と37.5mmの3種類で、チャンバー送水量は10 l/minとした。それぞれの場合の切羽流量は2.0 l/min程度でほぼ同じであった。この原因は、切羽空間への分流量が同じであっても切羽空間が狭いので切羽での流速が速くなる。このため、切羽空間に存在するズリに対する排出力が大きくなり、閉塞防止に有利に作用するものと考えられる。

#### b) 切羽直接注水を併用した場合のチャンバー送水の切羽分流量

チャンバー送水と切羽直接注水を併用した場合は、チャンバー送水のみの場合と流状が異なるので、別途実験を行い、チャンバー送水の切羽分流量がどのようになるかも調査した。実験ケースを表-9に示す。チャンバー送水に切羽直接注水量1.0 l/minを併用した場合、チャンバー送水の切羽分流量の関係を図-19に示す。

図から分かるように、この条件では、チャンバー送水の切羽分流量は、いずれも1.0 l/min以下と少なく、開口率や送水量に余り関係がないといえる。

チャンバー送水量10 l/minの場合についてみると、切羽直接注水量を0.5~4.0 l/minまで変えた

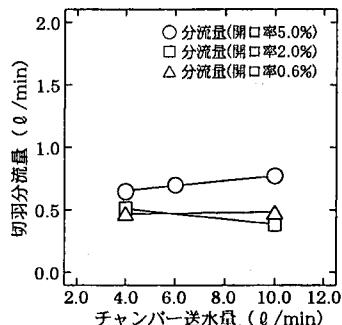


図-19 切羽分流量とチャンバー送水量  
(切羽注水量 1.0 l/min)

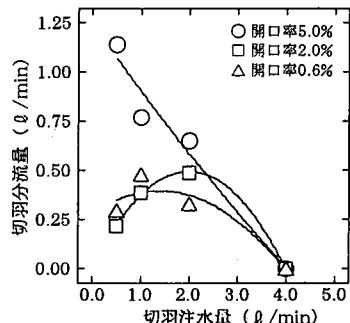


図-20 切羽分流量と切羽注水量  
(チャンバー送水量 10 l/min)

場合、チャンバー送水の切羽分流量は図-20のようになっている。チャンバー送水の切羽分流量は切羽直接注水量が大きくなると減少する傾向がみられる。注水量4.0 l/minになるといずれの開口率でもチャンバー送水の切羽分流量はゼロとなっている。これらのことから切羽直接注水する場合には、チャンバー送水は切羽に分流し難いことが分かる。

#### (4) 閉塞防止に必要な切羽流量

##### a) チャンバー送水と切羽直接注水を併用した場合

閉塞防止に必要な切羽流量は、チャンバー送水の切羽分流量と切羽直接注水量の合計となる。さらに、その必要切羽流量を与える条件は、切羽よりチャンバー内に排出されたズリを排土するために必要な排泥管の流量である8~12 l/minを確保しなければならない。この条件を満足する場合について行った実験結果を表-10に示す。実験条件は、開口率が5.0%，切羽空間の奥行長25mmで標準的なものとし、チャンバー送水量と切羽直接注水量の合計が8~12 l/minである。表-10から切羽直接注水量とチャンバー送水の切羽分流量の関係を求めるところである。

軟泥岩掘進において閉塞を防止するには、3.(3)で

表-10 開口率5%場合の分流量および切羽流量

チャンバー送水量 (ℓ/min)	注水量 (ℓ/min)	分流量 (ℓ/min)	切羽流量 (ℓ/min)
10.00	0.00	1.60	1.60
10.00	0.50	1.14	1.64
10.00	1.00	0.77	1.77
10.00	2.00	0.65	2.65
8.00	2.00	0.47	2.47
6.00	2.00	0.70	2.70
6.00	4.00	0.00	4.00
4.00	4.00	0.00	4.00

述べたように開口率5.0%，奥行長25mm，掘進速度12mm/min，チャンバー送水量は10 ℓ/minの場合，切羽直接注水量は1.0 ℓ/min必要である。この場合，チャンバー送水の切羽分流量は0.8 ℓ/minであり，切羽直接注水量1.0 ℓ/minと合わせると切羽流量は1.8 ℓ/minとなり，切羽注水量の1.8倍となる。この標準型の実験条件以外の場合は，閉塞防止に必要な切羽流量は当然変化する。

閉塞防止に有効な切羽直接注水量を多くすると設備費などの経費が増加するので，できるだけチャンバー送水による切羽分流量を利用して閉塞しない切羽流量を確保することが有利である。注水量を1.0 ℓ/minと考えると，セミシールドの機械条件と施工条件を標準型から多少変更しても閉塞現象は発生し難いと考えられる。したがって，切羽直接注水量は1.0 ℓ/min程度が適切であると考えられる。

#### b) チャンバー送水のみの場合

チャンバー送水のみの場合，閉塞防止に必要な切羽流量は，切羽の掘削ズリ残留量や付着のない場合図-18から見て開口率5.0%の場合には2 ℓ/min程度であり，このままの流量が確保できれば閉塞現象は発生せず掘進が可能である。しかし，掘進距離が長くなると掘削ズリが切羽空間に堆積し，さらに開口部にも付着するため，開口率が小さくなり切羽流量が急激に減少する。図-18で開口率2.0%の場合，切羽流量は0.6 ℓ/minにまで低下しており，閉塞現象に向かうことがわかる。そのため，チャンバー送水のみの場合の閉塞しない切羽流量としては，a)で述べた1.8 ℓ/minと同程度と考えられる。

## 5. 実機に対する実験結果の適用

これまで，模型セミシールドによる掘進実験や切羽流量実験を実施し，閉塞発生の傾向を実験で得られた結果と実機の場合で比較し調査した。また，実験より得られたディスクカッタの突出長を短くするこ

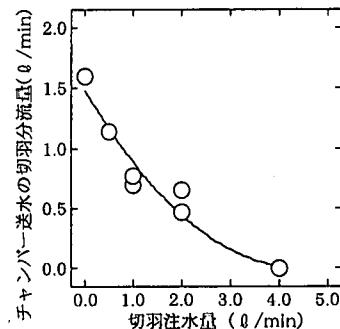


図-21 チャンバー送水の切羽分流量と切羽注水量

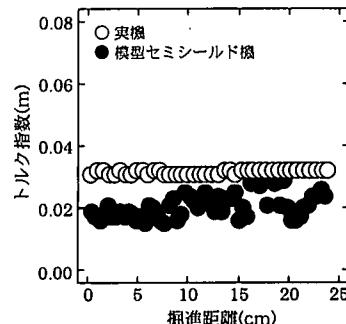


図-22 掘進距離とトルク指數

と，切羽へ直接注水するという2つの閉塞防止対策を実機に適用し，実機の挙動によりそれらの対策の有効性について検討した。

#### (1) 模型セミシールドと実機との正常掘進時のトルク指數の比較検討

模型セミシールドと実機の掘進挙動と閉塞発生との関係を比較調査する必要があるため，トルク指數により検討した。模型セミシールドおよび実機の計測で得られた正常掘進状態の掘進距離とトルク指數の関係の一例を図-22に示す。この図より，両者の挙動はほぼ相似していると考えられる。模型セミシールドと実機では，開口部の形状，ディスクカッタの形式が異なっているが掘進時の挙動は同様な傾向を示している。したがって，模型セミシールドを使用した実験で得られたデータや閉塞発生に影響する諸条件を実機へ対応展開できると考えられる。図-22のデータを採った模型セミシールドは2.(1)で述べた人工軟岩を掘進したもので，実機は兵庫県西部の泥岩を掘進した時のものである。

#### (2) ディスクカッタの突出長

実機では，カッタヘッドからのディスクカッタの突出長が大きく，ほぼディスクカッタの直径約30cm(12インチ)の1/2にあたる約15cmであった。これ

が一般的に使用されている。2.(4)で述べたように模型セミシールドによる実験でディスクカッタの突出長が短い場合、閉塞が発生しにくいという結果を得ている。これを実機に適用し、突出長を通常(15cm)の1/3の約5cmとして施工した。閉塞の可能性のある粘性の高い泥岩層を掘進した際、閉塞は発生せず短い突出長の効果を確認できた。ディスクカッタの突出長を短くすることで、4.(3).a)で述べたように切羽空間が狭くなるので泥水の流速が大きいことおよびズリの面板開口部への到達時間が短く、ズリの攪拌による粘着力の発生が少ないため、カッタヘッドの閉塞をある程度防止できると考えられる。

### (3) 現場での切羽直接注水の必要量と注入法

切羽への直接注水は閉塞防止効果として確実であるが、実機の大規模改造か新規製造を必要とする。そこで今回は、実機に装備しているクリ粉除去装置(チャンバー隔壁付近のスキンプレート下部の2ヶ所から前方に送泥水の一部を噴出する装置)を用いて、必要切羽流量が確保できるようにした。3.で述べたが閉塞防止に必要な模型セミシールドの切羽注水量は1.0 l/minである。実機では、送泥水流量と注水流量の比率が模型機とほぼ同一の0.3m<sup>3</sup>/minになるように設定した。

## 6.まとめ

本研究では、軟泥岩掘進工事における岩盤用泥水セミシールドの閉塞現象を解明し対策を講ずるために、小型の模型機を使用し、人工軟岩を用いた掘進実験および可視化した実験装置を用いて切羽空間の流状調査を行った。さらに、ここで得られた結果の一部を実機にフィードバックし施工現場でその有効性を確認した。これらより得られた新しい知見を要約して以下に示す。

- (1) 室内掘進実験から得られた結果より、閉塞は泥水の切羽流量が減少して、切羽空間の掘削ズリの滞留量が増加し、切羽残土が推力で圧密され脱水してカッタヘッドに固着した結果、閉塞現象が発生することがわかった。
- (2) 室内掘進実験から得られた結果より、閉塞発生防止には切羽直接注水とディスクカッタの突出長を短くすることが有効である。ディスクカッタの最適突出長については、さらに検討が必要である。
- (3) 切羽直接注水を併用する室内掘進実験では、閉塞の判定基準としてトルク指数を設定した。標準型の条件の場合、切羽直接注水量を1.0 l/min以上にすればトルク指数は許容値以上になりにくく、

閉塞は発生しない。清水と泥水では、閉塞防止についてほとんど差がないが、泥水の方が掘削ズリの排出については有効である。

- (4) 可視化した切羽空間の流状実験から得られた結果より、切羽空間の奥行長を短くした場合は、切羽流量はほぼ同一で、流速が速いことがわかり、(2)の閉塞防止に有効な一因となる。切羽直接注水する場合の切羽流量は、切羽直接注水量とチャンバー送水の切羽分流量との合計となるので、標準型条件の場合、閉塞防止に必要な切羽直接注水量が1.0 l/minの時、切羽流量は1.8 l/minとなる。チャンバー送水の切羽分流量は切羽直接注水量が大きいほど減少する。
- (5) 実機への適用結果から、室内実験と実機のトルク指数はほぼ相似した関係にあるため、室内実験の結果を実機へ対応させることは可能である。実機のディスクカッタの突出長も1/3に縮めて施工したが閉塞もなく順調に掘進できた。切羽直接注水は、実機の場合カッタヘッド中心から注水することが難しいため、側面からの注水とした。必要注水量については、さらに検討する必要があると考えられる。

**謝辞:**本研究の実験装置の送水関係は、日本ソイル工業(株)の協力を得たことを記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 五味信治、袁 大軍、岡本將昭:岩盤セミシールドの軟岩における掘削特性(その1), 日産建設技術研究開発報告集, Vol.1, pp.49-56, 1996.
- 2) 五味信治、袁 大軍、岡本將昭:岩盤セミシールドの軟岩における掘削特性(その2), 日産建設技術研究開発報告集, Vol.2, pp.49-56, 1997.
- 3) 三島和男、村上恵一、橋本 正、有本弘孝:硬質粘土地盤における泥水シールドの掘進性について, 土質工学会第28回土質工学研究発表会発表講演集, pp.2351-2352, 1993.
- 4) 五味信治、袁 大軍、岡本將昭、森 麟:軟岩掘進における岩盤セミシールドの閉塞予測に関する研究(その2), 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集3, pp.1298-1299, 1995.
- 5) 岸 清、野尻陽一:人工軟岩材料の開発,セメント・コンクリート, NO.511, pp.78-86, 1989.
- 6) 五味信治、岡本將昭:粘土材料を用いた人工軟岩の強度、土と基礎, Vol.44, No.5, Ser.No.460, pp.21-23, 1996.
- 7) 五味信治、岡本將昭:粘土鉱物を用いた人工軟岩の強度に関する実験的研究(その1), 日産建設技術研究開発報告集, Vol.1, pp.57-62, 1996.

- 8) 袁 大軍, 五味信治, 岡本將昭, 森 麟: 軟岩掘進における岩盤セミシールドの閉塞予測に関する研究(その3), 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集3-B, pp.296-297, 1996.
- 9) 五味信治, 袁 大軍, 岡本將昭, 森 麟: 軟岩掘進における岩盤セミシールドの閉塞予測に関する研究(その4), 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集3-B, pp.298-299, 1996.
- 10) 鎌川裕次, 中川雅弘, 渡辺太郎, 土居好明: チャンバー内の土砂滞留に関する一考察, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集6, pp.192-193, 1991.
- 11) 袁 大軍, 五味信治, 岡本將昭, 森 麟: 軟岩掘進における岩盤セミシールドの閉塞予測に関する研究(その6), 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集3-B, pp.188-189, 1997.
- 12) 袁 大軍, 五味信治, 岡本將昭, 森 麟: 軟岩掘進における岩盤セミシールドの閉塞予測に関する研究(その7), 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集3-B, pp.412-413, 1998.

(1999. 4. 20受付)

## STUDY ON PREVENTIVE METHODS FOR BLOCKING PHENOMENA OF ROCK TYPE SLURRY SHIELD IN EXCAVATING SOFT ROCK

Shinji GOMI, Dajun YUAN, Masaaki OKAMOTO and Akira MORI

Rock type slurry shield method is used for pipe jacking in various rocks. In excavating soft rock, faceplates of this type are often blocked by sticky rock chips leading to the difficulties in excavation. The purpose of this study is to research the cause of the blockage phenomenon and the method for preventing the blockage phenomenon. The artificial soft rock was used for the specimen in order to standardize the experimental condition. Flow to the cutting face and reducing of the length of disk cutter were effective for the defensive measure of the blockage phenomenon from the investigation of the mechanism which discharge sticky rock chips. Flow of slurry in chamber and the cutting face were investigated in order to apply these results to the real machine, and the situation was grasped.