

# 三円形泥水式シールドの掘削土砂回収に関する実験的研究

猪瀬二郎<sup>1</sup>・西林聖武<sup>2</sup>・藤木育雄<sup>3</sup>・橋本美武<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー 帝都高速度交通営団 前建設本部長 (〒110 東京都台東区上野3-19-6)

<sup>2</sup>フェロー 帝都高速度交通営団 建設本部計画部長 (〒110 東京都台東区上野3-19-6)  
帝都高速度交通営団 建設本部積算基準設計変更担当課長 (〒110 東京都台東区上野3-19-6)

<sup>4</sup>正会員 帝都高速度交通営団 管財部測量課長 (〒110 東京都台東区上野3-19-6)

三円形泥水式シールド「着脱式泥水三連型駅シールド」は、駅間の複線トンネル用シールドをそのまま駅部トンネル用三円形シールドの中央シールドとして利用する工法であり、本工法の機械的・施工的な課題に対して研究開発を行っている。

本シールドにおいては掘削土砂を効率的に回収することが重要であるとの観点にたち、効率的な土砂回収が可能となる送排泥機構やアジテータ機構を決定するための模型実験を行い、その結果を実機に反映させることとした。

本報告では、模型実験とその結果について報告する。

**Key Words :** three-centered slurry shield, effective mucking, slurry transportation system, agitator system

## 1. はじめに

近年、地下構造物が輻輳する地下空間を有効利用するとともに、トンネルを合理的に構築する手段として、多円形シールドが注目されている。

この多円形シールドはこれまでに、鉄道、共同溝、下水道といった用途に複円形泥水式シールドおよび複円形土圧式シールドが採用されている<sup>1)・2)</sup>。また鉄道駅部の施工に三円形泥水式シールドが採用されており<sup>3)</sup>、今後とも、多円形シールドの採用は増大するものと考えられる。

帝都高速度交通営団においても駅間の複線トンネル用シールドをそのまま駅部トンネル用三円形シールドの一部(中央シールド)として利用する「着脱式泥水三連型駅シールド工法」を開発した<sup>4)・5)</sup>。

本工法に関する施工上の技術的課題としては、(1)シールド、(2)切羽安定、(3)トンネル覆工などがあり、これまで多岐にわたる機械・施工面の課題に対して研究開発を行っている。

(1)に関する三円形側部シールドの揺動掘削性能とシールド仕様、揺動機構等についてはすでに実験により確認している<sup>6)</sup>。(3)については、本トンネルのように複雑な形状を有するセグメントの解析には、「はりばねモデル」に加えて、3次元FEMを

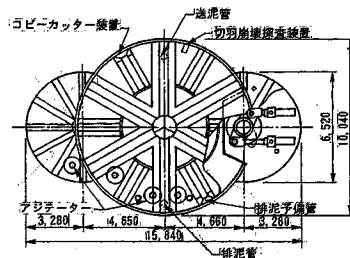


図-1 着脱式泥水三連型駅シールド機

併用した解析が合理的であることを確認している<sup>7)</sup>。

本報告は、(2)に関してその機能を保持し、かつ効率的な掘削土砂の回収ができるシールドの流体輸送機構やアジテータ機構を決定するために実施した模型実験とその結果について報告する。

## 2. 実験の目的

本シールドは、図-1に示すように、中央円とその左右の半円形からなる複雑なチャンバ形状である。

多円形シールドにおける掘削土の排泥機構とチャンバ形状には、(1)カッター数と同じ独立した円形チャンバとし、各チャンバから複数系統で排泥する方式、(2)全断面一体型チャンバとし、1ヶ所から排泥する1系統排泥方式、(3)全断面一体型チャンバ

とし、複数系統で排泥する方式が考えられる。

多円形泥水シールドで施工した複円形の京葉線京橋トンネルおよび三円形の大阪ビジネスパーク駅シールドはいずれも(1)の方式を採用している<sup>1)・3)</sup>。この方式では、各独立チャンバ間で圧力差が生じたときに、切羽前面で泥水がカット間を移動する回り込み現象が発生し、複数系統の排泥管理とあいまって切羽圧力管理を複雑にすることが懸念される。多円形の円の数が多くなるに従い、切羽圧力管理はより一層複雑さを増すことから、三円形の大阪ビジネスパーク駅シールドではチャンバ間に連通管を設け、圧力差の発生を防止する対策を実施した。

多円形泥水式シールドの切羽安定を考えると、(2)の一体型チャンバ・1系統排泥で、掘削した土砂がチャンバ内に堆積することなく排泥により回収できるならば、従来の円形シールドと同様に確実にシンプルな切羽圧力管理が可能となる。しかしながら、一体型チャンバ・1系統排泥の実績はなく、既往の研究では本シールドと形状の異なる三円形シールドでのチャンバ内泥水の流れに関する模型実験・流動解析が行われているのみである<sup>6)・9)</sup>。そこで今回、一体型チャンバ・1系統排泥における掘削土砂の効率的な回収の可能性について把握することとし、その結果を実機に反映することとした。

### (1) チャンバ内泥水還流実験

チャンバ内泥水の流れの状況を、目視、ビデオ・写真撮影により定性的に把握し、チャンバ内が安定した流れになる送泥位置を選定する。

定性的なチャンバ内の流れを把握する方法としては、(1)着色水を送泥する、(2)流体と同じ比重の粒状体を含む流体を送泥するといった方法があるが、粒状体を用いると流れが定常状態になったのちの判別も可能であることから(2)の方法を採用した。

### (2) 掘削土砂回収実験

1系統からの排泥において効率的な土砂回収が可能となる方策について把握する。この実験において最も重要な点は側円下部に堆積しようとする土砂を中央円に移動させることである。ここでは、予備実験において、使用する泥水流体の選定と粒状体投入および回収時間の決定を行い、その後本実験において、還流・噴流等の流体輸送機構やアジテータ回転数等のアジテータ機構の効果について把握する。

還流機構は、側円下部に堆積しようとする掘削土を吸い込み、中央円下部の排泥口付近に強制的に吐出させることを目的とする。

噴流機構は、側円下部に堆積しようとする掘削土

を噴流吐出口からの流れにより中央円に移動させることを目的とする。

また、効率的な土砂の回収を把握するため、掘削土砂を模擬した粒状体を用いる。粒状体回収状況の把握は、粒状体の回収重量およびチャンバ内に堆積した粒状体の重量を計測することにより行う。

## 3. 実験計画

### (1) 実験装置

実機におけるチャンバ内の泥水還流状況や土砂回収状況が最適となる方策を選定することから、実験装置は実機に対する再現性を重視し、(1)相似則、(2)流体輸送機構、(3)アジテータ機構、(4)粒状体形状および投入方法を検討して決定した。

なお、側円の Cutter 駆動は揺動方式であることから、今回の実験においては、Cutter ディスクの回転による影響については考慮しないこととした。

#### a) 相似則

実験装置を決めるにあたっては、実験の目的を考慮したうえで、幾何学的、運動学的、力学的な一定の規則(相似則)にしたがうことが望ましい。

今回の実験は、掘削によりチャンバ内に取り込まれた土砂が、チャンバ内を還流している泥水中を落下し、排泥口より回収される状況を模擬するものである。このことから、この実験においてはチャンバ内における流れの慣性力と重力が支配的であると考える。チャンバ部の摩擦、圧力については考慮しないこととした。また、泥水流体の粘性の相違については予備実験で把握することとした。

慣性力と重力に関する物理法則を以下に示す。

$$\text{慣性力} : F_i = \rho L^2 v^2 \quad (1)$$

$$\text{重力} : F_g = \rho g L^3 \quad (2)$$

$\rho$  : 液体の密度

$L$  : 長さ

$v$  : 速度

$g$  : 重力加速度

実験では、上記の式(1)と(2)の比を実機と実験装置で一致させる相似則を適用することとする。この関係を以下の式(3)に示すが、この式はフルード相似則である<sup>10)</sup>。

$$\begin{aligned} \pi = F_i / F_g &= (\rho L^2 v^2) / (\rho g L^3) \\ &= (\rho v^2) / (\rho g L) \end{aligned} \quad (3)$$

この式(3)を実機と実験装置で表すと式(4)となる。

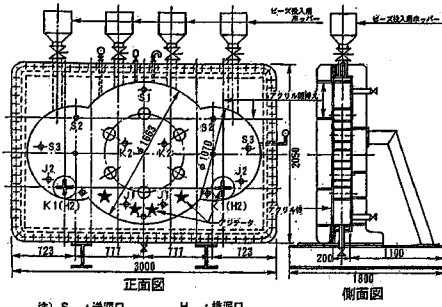


図-2 実験装置概要

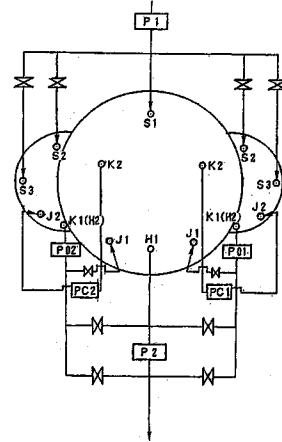


図-3 流体輸送機構概念図

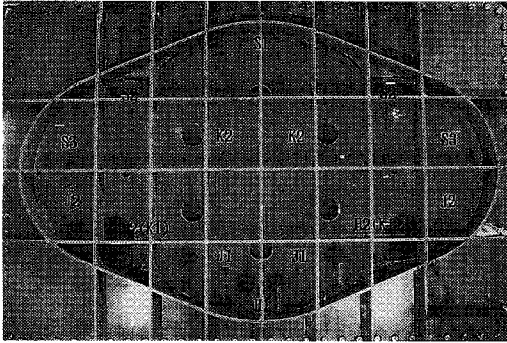


写真-1 実験装置

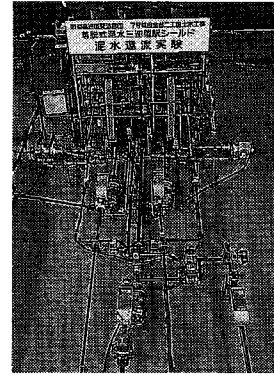


写真-2 流体輸送機構

$$\begin{aligned} & (\rho_p v_p^2) / (\rho_p g_p L_p) \\ & = (\rho_m v_m^2) / (\rho_m g_m L_m) \quad (4) \end{aligned}$$

p : 実機 (prototype)  
m : 実験装置 (model)

ここで、通常  $g_p = g_m$  であり、また  $\rho_p = \rho_m$  とすると、式(4)は以下の式(5)となる。

$$v_p / v_m = \sqrt{L_p / L_m} \quad (5)$$

実験装置の実機に対する長さの縮尺比を

$$L_p / L_m = \lambda$$

とすると、速度・時間・流量の縮尺比は式(6)～式(8)となる。

$$v_p / v_m = \sqrt{\lambda} \quad (6)$$

$$t_p / t_m = \sqrt{\lambda} \quad (7)$$

$$Q_p / Q_m = \lambda^{3/2} \quad (8)$$

実験装置の縮尺比を小さくする(原型に近づける)ことは、再現性を高めることになる反面、実験規模

が大きくなり実験回数や経済性に問題がある。逆に、縮尺比を大きくすることは、実験が行いやすくなる反面、再現性に問題が生ずることもあり、種々の条件を考慮して縮尺比を決定する必要がある。

今回の実験においては、(1)繰り返しを含め多くのケースの実験を実施すること、(2)実機の再現性を高めること、(3)後述する土砂を模擬した粒状体の選定において  $\lambda \leq 6$  であれば、地山の土粒子と同じ比重の粒状体を使用すれば良いことを考慮し、実験装置の縮尺比を  $\lambda = 6$  とした。

実験装置の概要を図-2、写真-1に示す。なお、本実験ではチャンバ内の状況が目視できるように模型前面を透明なアクリル板製の構造とした。

#### b) 流体輸送機構

図-3、写真-2に流体輸送機構を示す。

##### i) 送泥機構

通常の円形シールドでは送泥口は上部1ヶ所に設置されるが、本シールドは、扁平な断面形状となることから、1ヶ所からの送泥ではチャンバ内に泥水

表-1 実機と実験装置の諸元比較表

項目		実機	模型	
長さ 縮尺比 6	シールド	高さ	10,040mm	1,873mm
		幅	15,840mm	2,840mm
		チャンパ厚さ	1,200mm	200mm
	配管	送泥 S1	10B	1L2B
		送泥 S2・S3	6B	1B
		排泥 H1	12B	2B
		還流 K1・J1	6B	1B
		噴流 K2・J2	6B	1B
	アジテータ	中央円	1,000mm	167mm
		側円	1,300mm	217mm
断面積	→A1断面積	115 m <sup>2</sup>	3.2 m <sup>2</sup>	
流量 縮尺比 6 <sup>2</sup>	送泥	20 m <sup>3</sup> /min	230 l/min	
	排泥	20 m <sup>3</sup> /min	230 l/min	
	還流・噴流	3 m <sup>3</sup> /min	33 l/min	
		6 m <sup>3</sup> /min	66 l/min	
速度 縮尺比 6 <sup>1/2</sup>	中央円	回転数	96 rpm	240 rpm
		外周速度	300 m/min	125 m/min
	側円	回転数	96 rpm	240 rpm
		外周速度	390 m/min	160 m/min
	掘進速度		2 cm/min	0.8 cm/min

の滞留ゾーンが生ずることが懸念される。このことから、送泥口としては、中央円上部に1ヶ所（図中S1）、側円上部に各1ヶ所（図中S2）、側円側部に各1ヶ所（図中S3）の計5ヶ所設置する計画とした。なお、複数の送泥口への送泥は、送泥ポンプ1台（図中P1）を使用しバルブ開度により分配する方式とした。

ii) 排泥機構

本シールドは、切羽管理、切羽安定の観点より一体型チャンパでの1系統排泥で計画することから、排泥口は原則として中央円下部1ヶ所（図中H1）とする。ただし、施工上の予備排泥口として側円下部に各1ヶ所の排泥口を設置する計画として、後述する還流吸入口と併用することとした。

iii) 還流機構

吸入口としては側円下部に各1ヶ所（図中K1）、吐出口としては中央円下部に各1ヶ所（図中J1）とする。この還流機構は、送排泥機構と独立させ、専用のポンプ（図中P01、P02）を用いることとした。これにより切羽の安定において最も重要な送排泥機構と独立させ、任意な還流量の設定が可能となる。

iv) 噴流機構

吐出口としては側円下部に各1ヶ所（図中J2）とした。なお、この吐出口の吐出角度は任意に変えられる構造とした。また、吸入口は、過去に実施したチャンパ内泥水流動解析結果によると<sup>8)</sup>、中央円の面板を支持している中間ビーム内側の泥水の流れが若干低下する傾向を示しており、この結果から中央円中心部の流速改善を目的として中央円に2ヶ所（図中K2）設置した。この噴流機構も還流機構と

同様に専用のポンプ（図中PC1、PC2）を用いることとした。

v) 流量設定

実験における送・排泥や還流・噴流の流量は、実機における流量計算を行い、その流量から前述した相似則をもとに設定した。なお、還流・噴流については、計算上求まる流量の2倍まで設定できるように計画した。なお、各流量は配管中に設置した流量計で計測することとし、また、各配管に密度計を取り付けて流体の密度も計測することとした。

o) アジテータ機構

複線円形シールドに相当する中央円については、従来の掘削外径10mのシールドとほぼ同様に羽根径φ1,000mm（実験装置φ167mm）のアジテータを4基装備することとした。また、側部については、側円下部に堆積しようとする掘削土を中央円に移動させる必要があることから、羽根径φ1,300mm（実験装置φ217mm）と中央円より大きなアジテータを各1基装備することとした。

アジテータ回転数については、従来の掘削外径10mのシールドでは、概ね48~50rpmであるが、実験においては回転数の違いを明らかにするため装備回転数を従来の2倍程度とするとともに、回転数・回転方向（正転・逆転）を任意に設定できる可変速のアジテータとした。なお、正転は土粒子を中央円下部排泥口に向かって移動させる回転方向であり、逆転はその逆である。実験における回転数は、実機と実験装置におけるアジテータ外周速度の比を、相似則から求まる速度の縮尺比に合わせて設定した。

d) 粒状体投入口

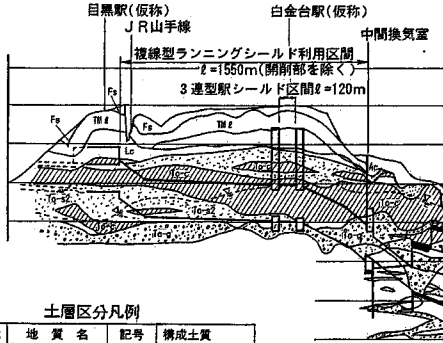
実機においては、カッタービットで切削された土砂が面板スリットよりチャンパ内に取り込まれるが、実験装置ではこれを模擬するため、装置の上部に開口部を4ヶ所設け、土砂投入用のホッパーを設置し、ここから土砂を模擬した粒状体をチャンパ内に投入することとした。なお、上部投入方法を定めるにあたっては、下部に粒状体を堆積させたのち回収する実験を行い、上部投入とほぼ同じ回収状況となったことから妥当であると判断した。

粒状体の投入量は、実機の掘進速度に応じた掘削土量に相似則を考慮して設定した。また、各ホッパーからの投入量は、中央円と側円の断面比率により設定した。

実機と実験装置の諸元の比較を表-1に示す。

(2) 泥水流体

実験に使用する流体については、清水と清水にCMCを添加した粘性流体とで予備実験を行い、本実



**土層区分凡例**

地質時代	地質名	記号	構成土質
第四紀	沖積層	埋土層	FS 粘性土、砂質土
		粘性土層	Ac 粘性土
		関東ローム層	TM $\delta$ ローム
洪積層		ローム層粘土層	Lc ローム
		東京層	To-s 砂質土
			To-c 粘性土
		To-g	砂礫

図-4 地質縦断面図

験で使用使用する流体を決定する。

### (3) 使用粒状体

#### a) チャンバ内泥水還流実験

この実験で使用使用する粒状体は、チャンバ内の泥水の流れの状態を把握するものであることから、水と同じ比重の粒状体(比重1.0,  $\phi$ 0.5mm)を送泥とともにチャンバ内に吐出させることとした。

#### b) 掘削土砂回収実験

実験に用いる粒状体は掘削土を模擬するものであることから、実施工における掘削地盤の特性を考慮する必要がある。実施工でシールドが掘進する地質は図-4に示すように東京層で、シールドの切羽土質は粘性土層が断面の大部分を占め、その下部に砂質土層、礫層が出現する。そこで、本実験において想定する土質と粒径としては、(1)礫層の主体となる礫径 $\phi$ 20~30mm(比重2.5)、(2)礫層の平均粒径 $\phi$ 6~8mm(比重2.5)、(3)粘性土層については同様な地盤を掘削した実績から $\phi$ 20~25mm(比重1.5)のチップ状の土塊の3種類とした。なお、今回の実験では堆積させずに回収できる方策を模索することから、土粒子の粘着力は考慮しないこととした。

実験で使用使用する粒状体を選定するにあたっては、実機と実験装置とで縮尺が異なることを考慮しなければならない。以下に粒状体の寸法と比重決定における考え方を示す。

#### i) 粒状体の寸法

実験で使用使用する粒状体の寸法は、実機と実験装置の長さの縮尺比( $\lambda=6$ )を適用して決定した。

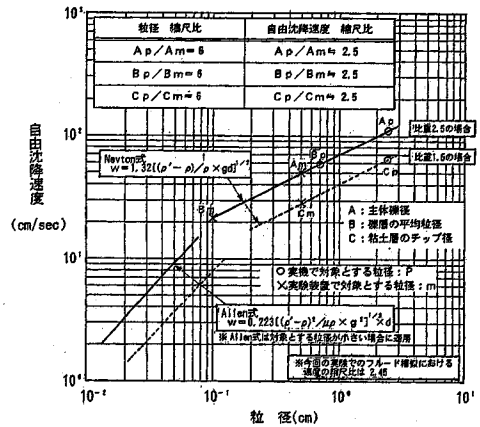


図-5 粒状体の単粒子自由沈降速度

#### ii) 粒状体の比重

粒状体の比重は、実機と実験装置で粒子の水中での動きが同じになるよう考慮することとし、粒子の水中での挙動を表現する指標として単粒子自由沈降速度を用いた。単粒子自由沈降速度を求める方法は、対象となる粒径により異なるが、今回想定している粒径(実機および実験装置)においてはNewton式が適用される<sup>11)</sup>。

$$w = 1.82 \left\{ \frac{(\rho' - \rho)}{\rho} \times g d \right\}^{1/2}$$

w : 単粒子自由沈降速度

$\rho'$  : 粒子の比重

$\rho$  : 水の比重

d : 粒子の粒径

上式を用いて、実機の土粒子と実験装置の粒状体の単粒子自由沈降速度の比が、前述した相似則の速度の縮尺比( $\lambda^{1/2}$ )とほぼ同じになる粒状体の比重を求めた。

今回想定している粒径においては、図-5に示すように、 $\lambda \leq 6$ であれば、実験装置の粒状体は実機の土粒子と同じ比重とすればよいことから、前述したように $\lambda=6$ とした。

以上の検討より、実験に使用する粒状体の径と比重は、(1)礫層の主体礫径を想定した $\phi$ 3.3~5mm、比重2.5、(2)礫層の平均粒径を想定した $\phi$ 1.0~1.4mm、比重2.5、(3)粘性土層のチップ状の土塊を想定した $\phi$ 3.0~4.0mm、比重1.5の3種類とした。

#### (4) 実験の要因と水準

各実験は、図-6に示す要因・水準を組み合わせて行った。

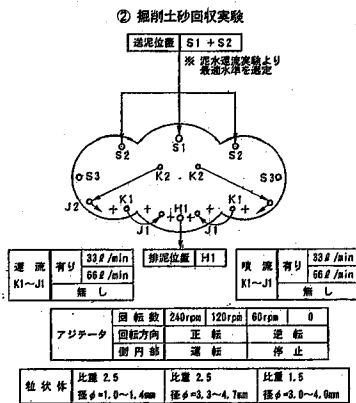
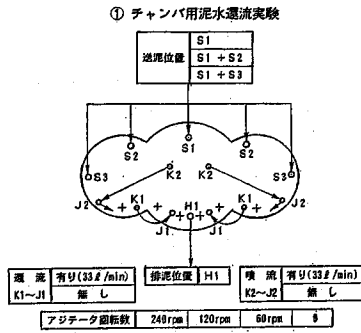


図-6 実験の要因と水準

(5) 計測項目

a) チャンバ内泥水還流実験

送泥とともに流出させた粒状体の動きをビデオ撮影、写真撮影および目視により可視化した。

b) 掘削土砂回収実験

粒状体の回収状況を、(1) 泥水処理設備の振動ふるいから分級された粒状体重量の計測、(2) チャンバ内に堆積した粒状体の高さの計測、(3) 配管に設置した流量計と密度計による計測により把握した。

4. 実験結果と考察

(1) チャンバ内泥水還流実験結果

図-7、表-2にチャンバ内泥水還流実験結果を示す。

送泥位置が中央円上部1ヶ所 (S1) のケースでは、側円上部の大きな範囲に泥水の移動がほとんどない滞留ゾーンが発生する。これは、S1から送泥された泥水は中央円の影響を受け、その円弧形状に沿って流線が形成されることによるものである。

送泥位置が中央円上部および側円側部の3ヶ所 (S1 + S3) のケースでは、S1のみからの送泥に比較すれば小さいが、側円上部に滞留ゾーンを形

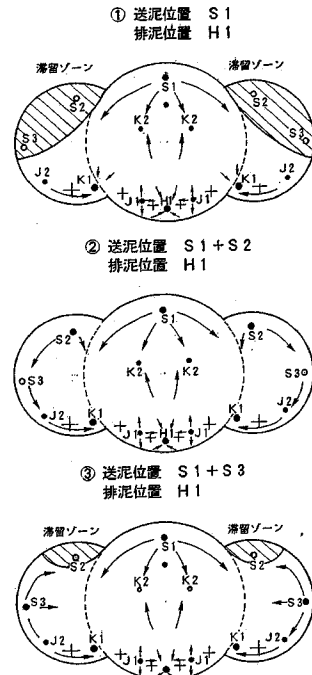


図-7 チャンバ内泥水還流実験結果

表-2 チャンバ内泥水還流実験結果一覧表

アジテータ回転数	240rpm	120rpm	60rpm	0 rpm
噴流量 (ℓ/min)	33	0	33	0
還流量 (ℓ/min)	33	0	33	0
送泥位置	排泥位置			
S1	H1	△	△	△
S1+S2	H1	◎	◎	◎
S1+S3	H1	○	△	△

◎: 良好 (滞留がなく安定)  
○: やや良 (側円頂部に滞留傾向あり)  
△: 悪い (側円上半部に滞留あり)

成する傾向が見られる。これは、S1とS3から送泥された泥水が側円上部付近で互いに干渉しあうことにより発生するものと考えられる。

送泥位置が中央円上部および側円上部の3ヶ所 (S1 + S2) のケースでは、アジテータ回転数の違いや還流・噴流の有無にかかわらずチャンバ内全体に泥水が還流し、安定した流れとなった。

泥水式シールドにおいては、送泥によりチャンバ内に送り出された泥水がチャンバ内全体をまんべんなく流れ、掘削土とともに排泥されることが、切羽の安定にとって重要であり、このことから送泥位置は、中央円上部と側円上部 (S1 + S2) の組み合わせが最適であると判断した。

これにより、以下の掘削土砂回収実験における送泥位置はS1 + S2に固定して行うこととした。

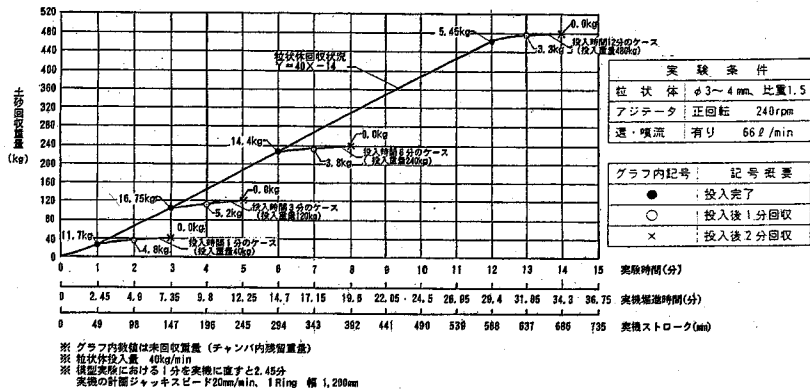


図-9 掘削土砂連続回収実験結果

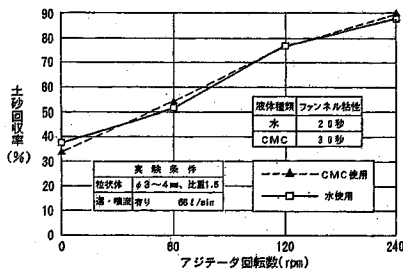


図-8 流体粘性の相違

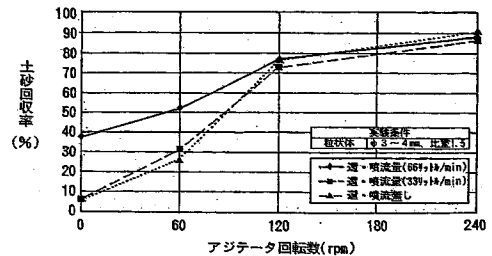


図-10 アジテータ回転数と還流・噴流量の比較

## (2) 掘削土砂回収実験

### a) 予備実験

#### i) 泥水流体の選定

図-8に2種類の泥水流体を使用したときの土砂回収率を示す。この結果によると、今回の実験で着目しているチャンバ内からの土砂回収率という点においては、清水と一般的な泥水と同様な粘性を持つ流体とではほぼ同じ結果となった。このことから本実験における使用流体は清水とした。

#### ii) 粒状体投入・回収時間の決定

実験における粒状体投入時間・投入終了後の回収時間を決定するため、予備実験を実施した。実験方法は、粒状体の投入時間を1分~1.2分までの8ケース、回収時間を粒状体投入終了直後、1分後、2分後の3ケースとし、各ケースでの粒状体の回収状況を把握することとした。

図-9に、投入時間1分、3分、6分、1.2分での実験結果を示す。実験の結果、粒状体投入時間にかかわらず、粒状体投入終了直後および投入終了1分後の未回収重量（チャンバ内残留粒状体重量）はほぼ同じ重量であった。これは、投入時間を長くしても時間とともにチャンバ内に粒状体が堆積し続けることはないことを示している。また、このケース

では粒状体投入後約2分でほぼ全ての粒状体が回収されている。以上のことより、本実験においては、粒状体投入時間1分、その後の回収時間1分として実験を行い、回収効果を判定することとした。

### b) 本実験

#### i) アジテータ・還流・噴流効果

実機での掘削においては粘性土層が断面の90%程度を占めることから、ここでは粘性土層を模擬した粒状体を使用した結果について示す。

図-10にアジテータ回転数や還流・噴流量を変化させたときの土砂回収率を示す。

これによると、アジテータ回転数が大きくなるにつれ回収率も増加する傾向を示し、アジテータ回転数240rpm（実機96rpm）では、還・噴流量にかかわらず90%程度の回収率を確保することが可能である。この90%という数字は投入完了1分後には、中央円下部に高さ1.5cm（実機9cm）程度しか粒状体が堆積していないことを示している。

また、掘削外径φ10mのシールドの一般的な装備アジテータ回転数である48rpmを模擬した回転数120rpmでは75%程度の回収率となっている。

アジテータ回転数が小さくなるにしたがい、還・噴流量の違いによる回収率の差が明確に表れている。還・噴流量33 l/min（実機3 m<sup>3</sup>/min）と還・噴流無

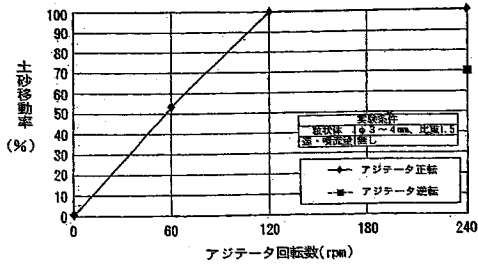


図-11 アジテータによる土砂移動効果

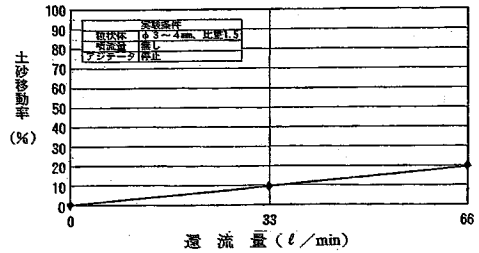


図-13 還流による土砂移動効果

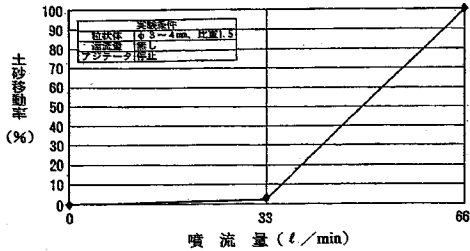


図-12 噴流による土砂移動効果

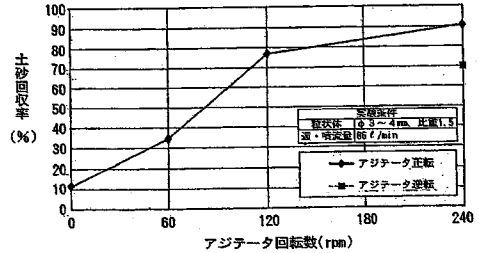


図-14 中央円アジテータによる土砂回収効果

しでは回収率もほぼ同じ傾向で減少しており、選・噴流量33 l/minでは、その効果がほとんどないことが判明した。選・噴流量66 l/min(実機6 m<sup>3</sup>/min)では、前述の2ケースに比べ回収率が大きくなる。

本シールドの土砂の回収は、その形状を考慮すると、(1)側円に堆積しようとする土砂を中央円に移動させる効果、(2)中央円に堆積しようとする土砂を効率的に排泥(回収)する効果が必要となる。

以下にこの2つの効果について示す。

#### ①側円から中央円への土砂移動効果

側円から中央円に土砂を移動させる役目をするものとして、側円部アジテータ、噴流・還流があり、以下にそれぞれの効果を土砂移動率をパラメータとして示す。なお、土砂移動率とは、両側円シールドに投入した粒状体重量とその粒状体が中央円シールドに移動した重量との割合である。

図-11にアジテータによる土砂移動効果を示す。アジテータ正転での回転数240rpm、120rpmのケースでは、側円部に投入した粒状体は全て中央円に移動させることが可能である。正転の60rpmでは、土砂移動率は約50%に半減する。またアジテータ240rpmで逆転させたケースでは、土砂移動率は約70%に減少する。

噴流は水の流れにより土砂を移動させようとするものであることから、その噴流角度により土砂移動率に影響を与える。噴流角度(鉛直方向下向きを基準として)を15~45°まで5°ピッチで実験した結果、30~40°が最適であった。

図-12に噴流による土砂移動効果を示す。噴流量33 l/minと66 l/minの土砂移動率はそれぞれ2.3%と100%で、移動率の違いが顕著に表れており、噴流量33 l/minでは粒状体を移動させるだけの流れの力はない。一方噴流量66 l/minではすべての粒状体を中央円に移動させることが可能で、この流量においてはアジテータ120rpm以上と同様の効果が期待できる。

図-13に還流による土砂移動効果を示す。還流量33 l/minと66 l/minの土砂移動率はそれぞれ9.1%と19.2%で、両ケースとも、移動率が悪く顕著な差がでない。これは側円部は中央円に比べて断面が小さく有効スペースが少ないことから、アジテータ等との取り合いの関係から、計画した還流吸込口が若干高い位置となり、粒状体をあまり吸引しなかったことに起因するものと考えられる。

#### ②中央円の土砂回収効果

中央円については従来の円形シールドと同様に、排泥口付近に土砂を集めるための機構としては、アジテータのみである。ここではアジテータによる中央円からの土砂回収率について示す。なお、ここでいう土砂回収率とは、中央円シールドに投入した粒状体および側円部から移動した粒状体重量の和と、中央円シールドから回収された粒状体重量との割合である。

図-14に中央円アジテータによる土砂回収効果を示す。アジテータ回転数が大きくなるに従い、土砂回収率も大きくなり、アジテータ回転数が120rpm



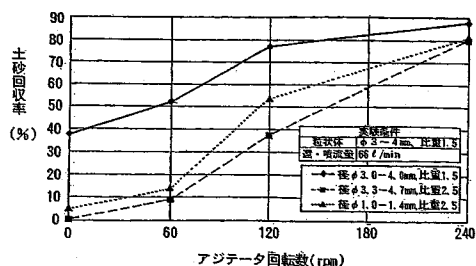


図-15 粒状体比重・径の相違による効果

で75%程度、240rpmで90%程度の回収率となる。これは単円シールド実験での土砂回収率とほぼ同様な傾向である。

また、アジテータを240rpmで逆転した場合は、回収率が70%程度となり、正転120rpmのケースよりも小さくなる。

#### ii) 粒状体の相違による回収効果

ここでは、3種類の粒状体を用いたときの土砂回収率の違いについて示す。

図-15に粒状体の相違による土砂回収効果を示す。なお、この図の選・噴流量は、最も土砂回収に効果のある66ℓ/minとした。

粒状体の比重が大きく粒径も大きいほど、回収率は低下する傾向を示す。

掘削外径φ10mのシールドの一般的な装備アジテータ回転数である48rpmを模擬した回転数120rpmでは比重が2.5の粒状体では回収率が35～55%程度となり、十分な回収効果があるとはいえない。しかしながら、アジテータ回転数を240rpm(実機96rpm)まで上昇させることにより、土砂回収率を80%程度まで向上させることが可能である。この結果は、比重が2.5の粒状体においてもアジテータ回転や選流・噴流により、側円部に堆積しようとする粒状体をすべて中央円に移動させることが可能であることを示している。

## 5. 結論

今回、三円形泥水式シールドにおける効率的な土砂回収が可能で、切羽の安定が保持できる流体輸送機構(送・排泥機構、噴流機構、選流機構)やアジテータ機構を把握し、実機の設計にあたっての基礎資料とすることを目的として模型を用いた実験を実施した。

今回の実験から明らかになった事項を示す。

(1) 今回の実験条件では中央円上部・側円上部の3箇所からの送泥がチャンパ内に滞留ゾーンを形成させず最適である。

(2) アジテータ機構は、中央円に4ヶ所、側円部には中央円より羽根径の大きなアジテータを各1ヶ所に装備すること、および、回転数を実機で96rpmまでの能力を装備することにより、土質にかかわらず、側円部の土砂を100%中央円に移動でき、また中央円の土砂を80%以上回収することが可能である。

(3) 噴流機構は、吐出角度を鉛直下向きを基準として中央円方向に30～40°とすること、および、送排泥機構とは別系統として実機流量6m<sup>3</sup>/minとすることにより、今回想定した土質ではいずれも、側円部の土砂を100%中央円に移動させることが可能である。

(4) 選流機構は、計画した吸入口の位置が若干高いことにより、土砂回収効果は小さい結果となった。しかし、実機では吸入口の位置を再検討することによりその効果は期待でき、またこの吸入口を予備排泥管として併用することも可能である。

以上のことから、偏平形状な本シールドにおいても一体型チャンパ・1系統排泥で効率的な土砂回収が可能であることが確認され、この結果を実機の設計に反映させることとした。

現在、本工事は準備段階であるが、今後の実施工においてこの実験結果を確認し、土砂回収方策を確立していく予定である。

謝辞： 本工法の開発と実験にあたってご指導・協力をいただいた帝都高速度交通営団「シールドトンネル調査委員会」の委員各位および熊谷・青木建設工事共同企業体の皆様に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 清水 満, 佐藤武志: 世界初のMFシールドの施工 京葉線京橋トンネル, トンネルと地下, vol. 20, No1, pp. 15-22, 1989. 1.
- 2) 尾田俊雄, 米井勇雄: 超大断面DOTの施工計画 臨海副都心共同溝, トンネルと地下, vol. 24, No4, pp. 39-46, 1993. 4.
- 3) 葛野恒夫, 高崎 肇, 柴田 裕, 白石和雄, 西田昭二: 3連型泥水式マルチフェイスシールド機の実用化, 建設の機械化, No538, pp. 47-53, 1994. 12.
- 4) 今井京平: 特殊工法を駆使する南北線の施工計画, トンネルと地下, vol. 24, No4, pp. 15-21, 1993. 4.
- 5) 助川 禎: 駅間シールド機を使用した着脱式泥水三連型駅シールド工法の開発, 土木学会論文集, No. 498, pp. 49-55, 1994. 9.
- 6) 助川 禎, 中島 信, 藤木育雄, 中村信義, 佐古井耕三: 泥水式シールドの揺動掘進に関する実験的研究,

- トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第3巻, pp. 225-232, 1993. 11.
- 7) 助川 禎, 中島 信, 藤木育雄, 荻野竹敏, 小泉 淳: 3心円形駅シールドトンネルの設計法に関する研究, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第3巻, pp. 111-118, 1993. 11.
- 8) 小山幸則, 北原陽一, 井原俊一, 勝川藤太: 3円形シールドマシンチャンバ内泥水還流実験, トンネルと地下, vol. 25, No6, pp. 67-72, 1994. 6.
- 9) 榑崎邦男, 竹田 宏, 山下幸夫, 河村良之: シールドチャンバ内の泥土・泥水の流動解析, トンネルと地下, vol. 25, No8, pp. 35-39, 1994年8月.
- 10) 江守一郎, Dieterch J. Schuring: 模型実験の理論と応用, 技報堂出版, pp. 180-190, 1979.
- 11) 水理公式集, 土木学会, pp. 221-225, 416-418, 1985.

(1996. 4. 23 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECTIVE MUCKING OUT OPERATION OF THE THREE-CENTERED SLURRY SHIELD MACHINE

Jiro INOSE, Masatake NISHIBAYASHI, Ikuo FUJIKI  
and Yoshitake HASHIMOTO

The "slurry type removal three-centered shield" has been specially developed to cater for excavating a double track railway station space. The shield is formed by attaching outer shield machines to both sides of a larger central shield which is designed to excavate a double track running tunnel between stations. Research and studies were in progress with the objective of solving mechanical and constructional problems. The viability of the three-centered shield machine is much dependent on developing an effective way for removing excavated materials. The study involves model testing of various alternatives in order to determine the most effective system and mechanism of slurry transportation and agitation. The results of the tests will be reflected in the design of the actual machine.