

# 側部先行型三連シールド機における土砂回収実験

## AN EXPERIMENT AND CONSIDERATION OF BRINGING IN OF SOIL OF TRIPLE MULTIFACE SHIELD

大門信之<sup>1)</sup>・藤木育雄<sup>2)</sup>・末富裕二<sup>2)</sup>、三浦政美<sup>3)</sup>・森章<sup>3)</sup>

Nobuyuki OKADO, Ikuo FUJIKI, Yuji SUETOMI, Masami MIURA, Akira MORI

KIYOSUMI-STATION located in the extension section of Eidan subway No.11 (the Hanzomon-Line) is about to be built by the triple multiface shield machine. This paper reports the result of our experiment which examined the slurry circulation in the chamber and the soil outgo from the chamber using the 1/6 model to ensure safe and steady excavation of that machine. The ground of the site consists of soft alluvial clay (N-value is 0~4), therefore careful investigations including this study are considered to be needed to avoid bad influence upon the surrounding ground and architecture

**Keywords:** Triple multiface shield, alluvial clay

### 1. はじめに

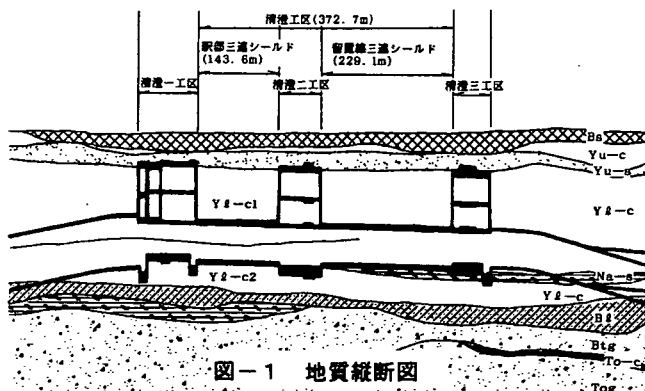
地下鉄 11 号線（半蔵門線）は、現在営業中の渋谷～水天宮前をさらに北東部へ延伸するもので、路線は、水天宮前駅から清澄駅、住吉駅、錦糸町駅を経て、押上駅（駅名はすべて仮称）に至る延長約 6 km で、将来は押上駅において、東武伊勢崎線と相互運転を行う予定である。本工事は、清澄駅・留置線を側部先行・中央揺動型三連シールド機で駅ホーム部 143.6m を掘進し、中間立坑内で 75.4m 移動した後、再発進して留置線部 229.1m の全長 448.1m を掘進するものである。

平面線形は直線、縦断勾配は下り 3‰であり、土被りは約 17m、地下水位は約 GL-2.0m である。なお、沿道の清洲橋通り両側には、各種のビルや民家が隙間なく立ち並んでいる。また、掘削地盤は N 値 0~4 の非常に軟らかい沖積粘性土（下部有楽町層 Y1c）である。

このような条件下で周辺地盤及び構造物への影響を最小限に抑え、安全かつ確実な掘進管理を行うため、側部先行・中央揺動型泥式三連シールド機における沖積粘性土層を対象とした掘削土砂の回収を目的とした実験を実施した。

### 2. 地質概要

施工場所は隅田川と荒川に挟まれた下町低地であり、掘削地盤は下部有楽町層 Y1c である。この地層は、N 値 0~4、単位体積重量 16.50~18.17kN/m<sup>3</sup>、粘着



| 地質名    | 記号   | 構成土質    |
|--------|------|---------|
| 埋土層    | BS   | 粘性土、砂質土 |
| 上部有楽町層 | Yu-c | 粘性土、腐食土 |
|        | Yu-s | 砂質土     |
| 下部有楽町層 | Y1-c | 粘性土、腐食土 |
| 掘削ローム層 | B1   | 粘性土     |

図-1 地質縦断図

- 1) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部長  
2) 正会員 帝都高速度交通営団 11 号線押上工事事務所  
3) 熊谷・前田・三井建設共同企業体

力  $29.4 \sim 39.2 \text{ kN/m}^2$ 、液性指数は、約 1.4 となっている。また、有楽町層での間隙水圧は、トンネル中心部において  $184.2 \text{ kN/m}^2$  である。今回の掘削地盤は、過去 3 例の三連シールドで実績のない非常に軟らかい粘性土である。地質縦断面を図-1に示す。

### 3. 三連シールド機の特徴

今回の三連シールド機は、面板の配置が側部先行・中央後方型であり、過去施工された 3 工事（営団 7 号線白金台二工区、大阪地下鉄 7 号線 OBP 工区、地下鉄 12 号線飯田橋駅工区）の三連シールド機が中央先行・側部後方型を採用したのに対してこの点が大きく異なる。本工事で使用する三連シールド機を図-2に示す。

掘削土砂の取り込みは、営団 7 号線白金台二工区、地下鉄 12 号線飯田橋駅工区同様、全断面一体型チャンパーで中央一系統排泥とした。複数系統排泥を採用した場合、切羽泥水圧管理が困難となり、掘削土の取り込み土量の偏りが生じることによる地山への悪影響が懸念される。今回の掘削において、この切羽泥水圧管理が施工管理上最も重要な要因であることから、中央一系統排泥方式を採用した。また、土砂の取り込みに関しては、側部先行・中央後方となることで中央のチャンパーが狭く、左右から中央へ土砂が集まりにくい形状となっている。このことから、本実験から得られたデータをシールド機に反映させることで対応することとした。

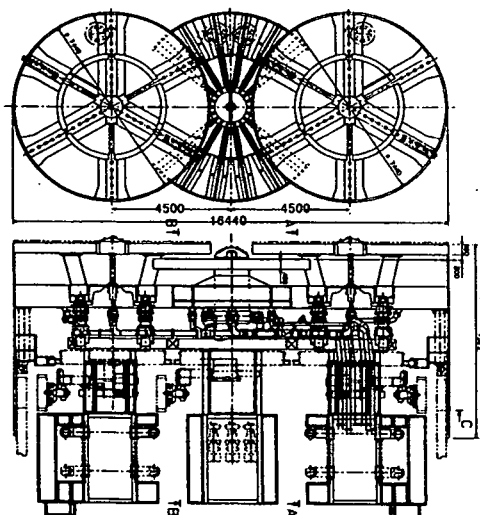


図-2 三連シールド機

#### <シールド機の特徴>

- ・側方先行（回転作動）、中央揺動型を採用
- ・側方面板の中間支持に干渉しないように中央面板の揺動角度を  $24^\circ$  に設定
- ・同一チャンパー方式を採用
- ・確実な排泥を得られるよう、左右チャンパー内にそれぞれ 2 ケ所（左右で 4 ケ所）の噴射機能を設置
- ・揺動部センターにコアカッターを配置

### 4. 三連シールド掘削土砂回収実験

#### 4-1 実験の目的

今回のシールド機形状による沖積粘性土の掘進時に、中央面板が左右から中央への土砂の流れに影響を与え、これらの土砂が中央面板下部の両側へ堆積及び付着し、土砂の取り込みが悪くなり、閉塞を起こすなど大きな影響を与えることが想定される。このため、還流噴射（両側の側円部に堆積した土砂を、中央上部の濃度のうすい泥水を吸い込み、側円部より土砂に向かって直接噴射し、中央へ移動させる流体の循環機構）の適切な配置・流量の設定等によって対応することとした。

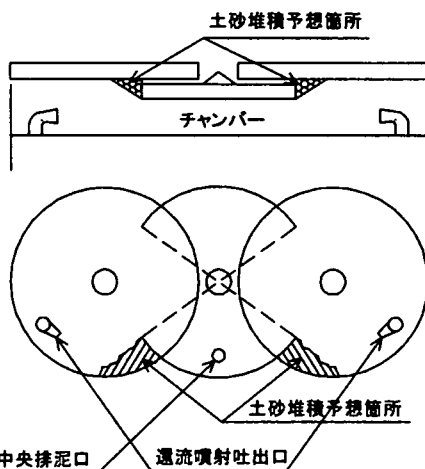


図-3 チャンパー内土砂堆積予想図

今回の土砂回収実験は、それらの選定のために、掘削土砂の回収を最も効率的に行える還流噴射のパターンを見出すことを目的として実施した。

#### 4-2 実験方法

実験は、過去の三連シールドにおける実績<sup>1),2)</sup>を踏まえ、実機のチャンバー部及び流体輸送系統を模擬した1/6の模型を用いた。(図-4)

実験方法は、所定量の粒状体を投入し、その後、流体を循環させた後に回収された粒状体の回収量を測定し回収率を求めた。流体輸送系統を図-5に示す。

回収率は、計算上左右のチャンバー内に粒状体の堆積が無い状態である70%を目標とした。これは、地下鉄12号線飯田橋駅工区の三連シールドにおいても、実験結果が70%程度の実験ケースを実施に採用し、問題なく施工している<sup>3)</sup>。なお、本実験における土砂回収率は次式により表す。

$$\text{土砂回収率 (\%)} = \frac{\text{粒状体回収重量 (単位時間取り込み土量)}}{\text{粒状体投入重量 (単位時間理論地山掘削土量)}} \times 100 (\%)$$

※ ( ) 内は、実験に相応する実施工での相応項目

なお、今回の実機と模型との力学的相似は、フルードの相似則を適用した。流体には、清水・粘性流体(ファンネル粘性25秒、30秒)及び泥水を使用し、また、粒状体には図-6に示すガラスビーズを採用した。

砂分をモデル化したガラスビーズは、比重2.5及び粒状体径1mmのビーズを使用した。粘性土分は、粘土塊を想定し、粒状体径4mmのガラスビーズを使用した。なお、本来の粘性土の比重は、1.5であるが、粘着力による土砂の動きにくさを表現するため2.5ものを使用した。

##### (1) 送泥分配比

送泥分配比は予備実験の結果より、左・中央・右の上部3箇所からそれぞれ  $S_s : S_c : S_s = 2:1:2 = 54.4:27.2:54.4 (l/min)$  とした。

##### (2) 還流噴射流量及び噴射角

掘削土砂の回収を効率的に行うため、チャンバー内の流体を中央上部  $F_u$  2箇所より吸込み、側円部  $F_L$  から中央部に向かって流体を噴射する流体の流れを還流噴射としている。(図-5)

今回の実験では、噴射角を3ケース(図-7)設定して実験を行った。

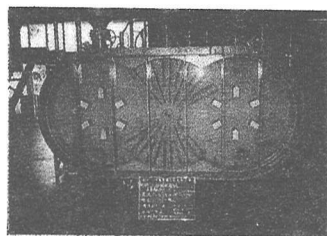
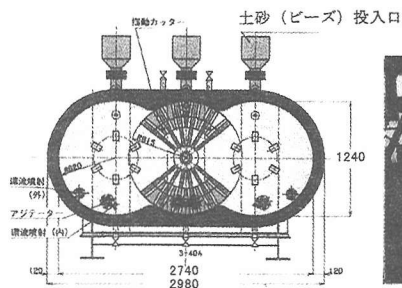


図-4 土砂回収実験模型

<フルードの相似則> 長さ  $\lambda = 6$   
 流量  $\lambda^{5/2} = 88$   
 速度  $\lambda^{1/2} = 2.45$

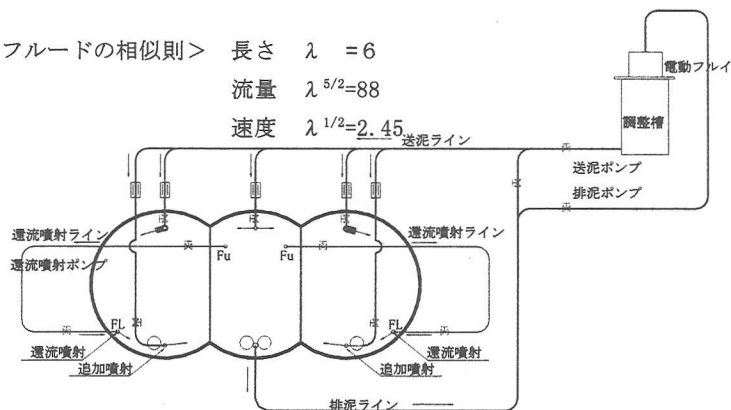


図-5 流体輸送系統図



図-6 チャンバー内掘削土砂組成図

### <還流噴射角>

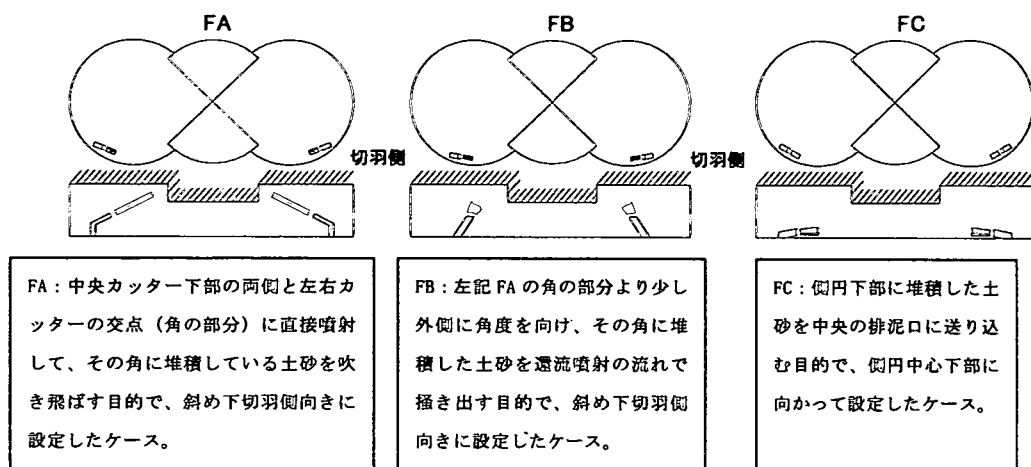


図-7 還流噴射の噴射角(3ケース)

### 4-3 実験結果

#### (1) 予備実験結果及び変更内容

予備実験として過去の事例を踏まえた当初計画(還流噴射流量 実機:  $5\text{ m}^3/\text{min}$ 、実験:  $56.7\text{ リットル}/\text{min}$ )を含む数ケースを清水により実施したが、噴流量  $100\text{ リットル}/\text{min}$  において回収率  $40\%$  へと急激に上昇したものの目標回収率  $70\%$  には及ばなかった。予備実験結果を図-8に示す。

そこで、予備実験による結果を基に下記変更を行い本実験を実施した。

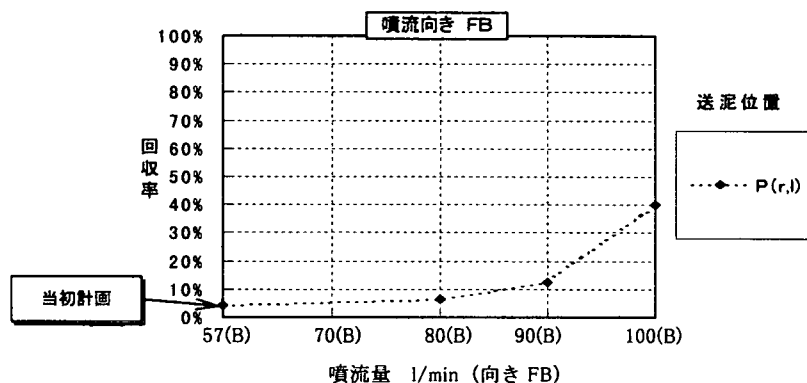


図-8 予備実験結果

#### <予備実験からの変更内容>

- ① 噴射口の追加(上部送泥  $P(r, l)$  を下部からの追加噴射として KA または KB に追加変更)
- ② 還流噴射流量の増大(当初計画  $56\text{ リットル}/\text{min}$  → 変更後  $70\text{ リットル}/\text{min}$ )
- ③ 噴射口の形状変更(円形→扁平形状で面積  $50\%$ )

なお、追加した噴射口は、図-9に示す2通りの向き(KA, KB)をパラメータとして実施した。

#### <追加噴射角>

KA : 中央カッターと側部カッター交点直上を水平向きに噴射したケース

KB : 側円の下部曲率に沿って平行に噴射したケース

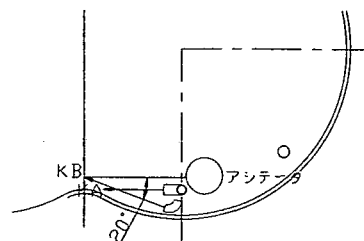


図-9 追加噴射の噴射角

## (2) 本実験結果

### ① 還流噴射角

還流噴射向き FA、FB、FC の相違は、FA は回収効果が小さく FB、FC とともに良好な回収効果が得られた。(図-10, 11, 12)

### ② 追加噴射角

追加噴射 KA と KB の相違は、噴射流量 80l/min 以上においては、ほぼ同程度で良好な回収率となった。一方、還流噴射 FC の 70l/min (図-12) で KB が KA に比べ約 25% 程度良好な回収効果が得られたため、KB パターンを選定した。(図-11, 12)

### ③ 還流噴射角 FB 及び FC

追加噴流を KB で固定し、環流噴射を FB 及び FC で行ったケースにおいては、環流噴射量 70l/min 以上の場合で、目標回収率 70% を超える結果が得られた。しかし、清水による実験の結果、環流噴射角 FB 及び FC による差違が見られなかった。(図-11, 12)

実機に反映させるため、粘性流体及び泥水での実験を実施した。

### ④ 泥水及び粘性流体による還流噴射角

清水と同様、還流噴射角 FB 及び FC の相違は見られなかった。

なお、流体の相違による回収率は、還流噴射量 70l/min とした場合、泥水を用いたケースが 75% と最も良い結果となった。

(図-13)

また、地山掘削前の泥水を想定したファンネル粘性 25 秒と、地山掘削後の泥水を想定したファンネル粘性 35 秒とを比較したケースにおいては、25 秒のケースが良い回収率となった。

### ⑤ 還流噴射角の選定

還流噴射角 FB 及び FC による回収効果の明確な差違は見られなかった。このため、施工上の要因から FC を採用した。これは、  
1) 地山に向かって噴射した場合、還流噴射角 FB は土砂の取り込みを阻害する可能性があること、  
2) 実機においては、スリット

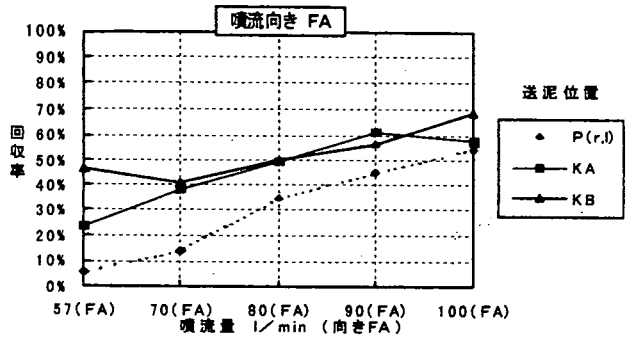


図-10 環流噴射 FA 本実験結果

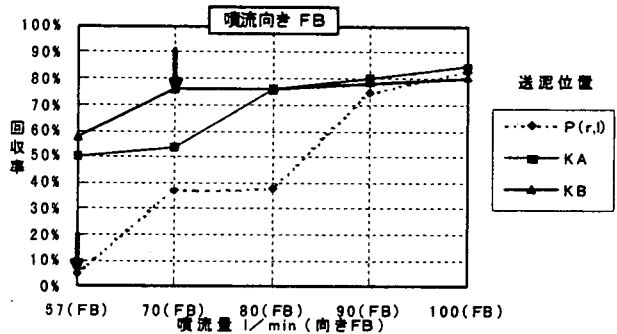


図-11 環流噴射 FB 本実験結果

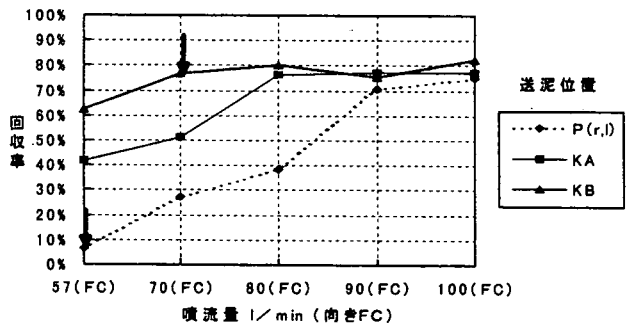


図-12 環流噴射 FC 本実験結果

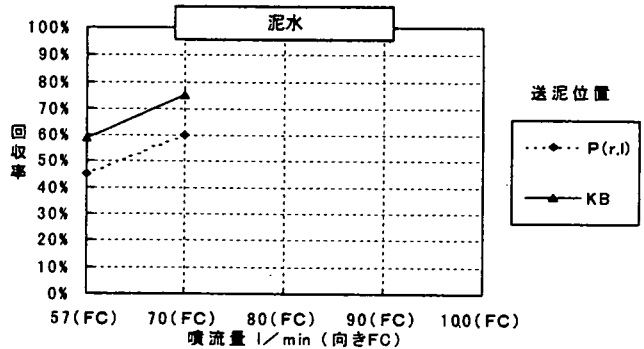
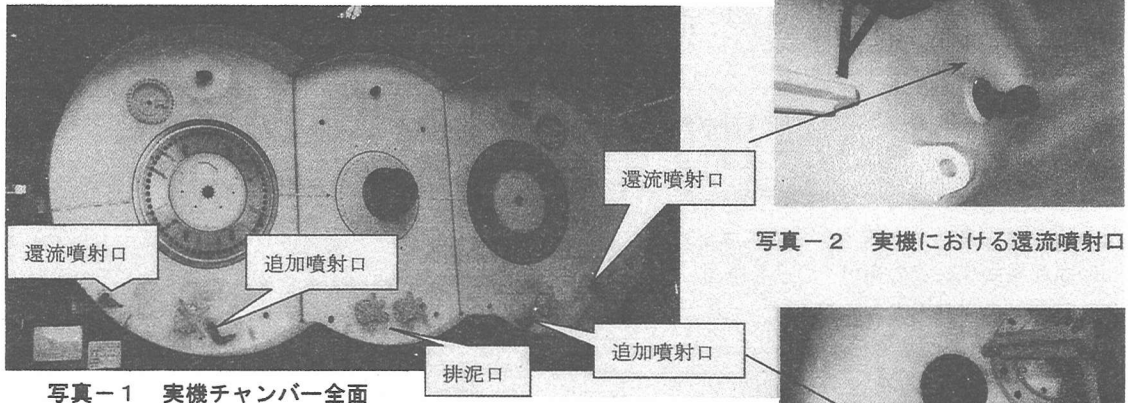


図-13 泥水による本実験結果

の凹凸により実験通りの回収結果とならない可能性があること等を考慮したためである。実機には、表－1に示すように還流噴射角度 FC 及び追加噴射角度 KB を反映させている。写真－1 に実機チャンパー全面を、写真－2、3 に実機における還流噴射口及び追加噴射口をそれぞれ示す。



表－1 最適噴射角評価表

| 噴射位置 | 予備実験 | 本実験 | 実機への反映 |
|------|------|-----|--------|
| 還流噴射 | FA   | ×   | ×      |
|      | FB   | ○   | ×      |
|      | FC   | ○   | ○      |
| 追加噴射 | KA   | 無考慮 | ×      |
|      | KB   | ○   | ○      |

## 5. 考察

本実験により得られた知見

- (1) 還流噴射流量を 70 リットル/min (実機 6 m<sup>3</sup> 相当)、吐出口の形状を円形から扁平形状 (面積比 50%) へと変更することにより流速が増大し、回収率が高まる。
- (2) 下部に流量 54 リットル/min (実機で 5 m<sup>3</sup> 相当) の噴射口を追加することで回収率が高まる。
- (3) 還流噴射角は FC、追加噴射角に KB において最適な回収効果が得られた。

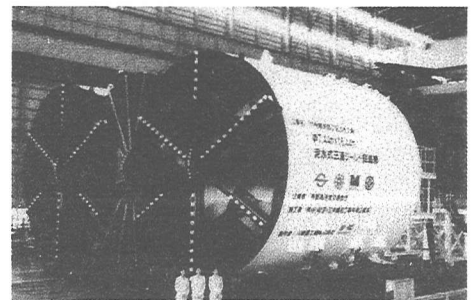
(還流噴射角 FC: 側円下部に堆積した土砂を中央排泥口に送る目的で、側円中心下部方向に設定したケース。

追加噴射角 KB: 側円下部の曲率に沿って平行に噴射したケース。)

- (4) 回収率は、比重が高くなれば上がり、粘性が高くなれば下がる。回収率の大小関係を示すと、  
泥水 (比重 1.2, 粘性 25 秒) > 清水 > 粘性 25 秒 (比重 1.0) > 粘性 35 秒 (比重 1.0) となる。

## 6. おわりに

これより、実機製作に当たっては、当初計画より還流噴射流量の増大及び追加噴射口を増設した。今後の施工に当たっては、実験結果を踏まえて掘進管理を行うこととしている。



写真－4 三連型シールド機

## 参考文献

- 1) 猪瀬, 西林, 藤木他: 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, 土木学会論文 No. 540/VI-31, 59-68, 1996. 06
- 2) 片山, 寺口, 直塚 他: 3連MFシールドマシンのチャンパ内土砂回収実験, 土木学会第 50 回年次学術講演会, VI, 1995. 09
- 3) 岩本, 開込 他: 3 心円泥水式駅シールドの掘進 (1), 土木学会第 53 回年次学術講演会, VI, 1998. 09
- 4) 藤木, 末富他: 側部先行型三連シールド機における沖積粘性土層を対象とした土砂回収実験と考察, 土木学会第 55 回年次講演会, VI- B, 2000. 09