

# 高水圧下・砂礫層を対象とする複合式シールド工法による長距離施工

## The Long Distance Excavation Using a Dual Mode Slurry/EPB TBM on the Gravel Ground Having High Water-head

三俣 和彦\*

Kazuhiko Mitsumata

大江 郁夫\*\*

Ikuo Oe

### 要 約

本工事は、丘陵山間部で静水圧 0.7 MPa の高水圧を通過すること、多摩川下横断部では玉石混じりの砂礫層を掘進することなど難施工条件下において、複合式シールド工法でセグメント外径  $\phi 2,356$  mm、掘進延長 2,367.1 m の水道配管 ( $\phi 1,500$  mm) 用シールドトンネルを築造するものである。

本工事の計画時点では丘陵山間部および多摩川横断部ではボーリング調査が行えず、砂礫層の透水係数が不明であった。原設計では高水圧下での施工を理由に泥水式シールド工法が選定されていたが、砂礫層の透水係数が大きいと逸泥により掘進に支障が生じること、多摩川横断直上の既設水管橋に地盤変状の影響を与えることが懸念された。

そこで、土質条件によって切羽を泥水式と土圧式に使い分けることが可能な複合式シールド工法を適用した。本報文では、複合式シールド工法による施工管理実績について報告する。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 路線および地形・地質の概要
- § 4. シールド機の選定
- § 5. 実施工結果
- § 6. おわりに

### § 1. はじめに

多摩丘陵幹線は、昭島市の拝島増圧ポンプ所から多摩市の聖ヶ丘給水所までの約 32.0 km を結ぶ送水幹線で、多摩西南部地域への送水能力の強化、給水の広域的なバックアップ機能の確保、更新を迎える既存送水幹線の補修および更新時の代替機能の確保を目的としている。

東京都は八王子市の鎌水小山給水所から聖ヶ丘給水所までの 12.6 km を第一次整備区間、拝島増圧ポンプ所から鎌水小山給水所までの 19.6 km を第二次整備区間として整備を進めている（図一1）。主な整備内容は、セグメント内径  $\phi 2,150$  mm のトンネルを築造し、そのトンネル内に  $\phi 1,500$  mm の送水管を布設することである。

受注工区は第二次整備区間にあたり、拝島増圧ポンプ所から八王子市丹木町までの 2.4 km 区間をシールド工法によりトンネルを築造する工事である。



図一1 事業計画図（第二次整備区間）

\* 関東（支）八王子シールド（出）

\*\* 土木設計部 設計課

## § 2. 工事概要

工 事 名： 拜島ポンプ所（仮称）から八王子市丹木町一丁目地先間送水管（1,500 mm）用立坑およびトンネル築造工事

工 事 場 所： 昭島市拜島五丁目七番地から八王子市丹木町一丁目地先間

発 注 者： 東京都水道局

施 工 者： 西松・鴻池建設共同企業体

施 工 期 間： 自 平成 18 年 8 月 1 日  
至 平成 21 年 3 月 30 日（650 日間）

工 事 内 容： トンネル築造工事

セグメント外径  $\phi o = 2,356 \text{ mm}$

セグメント内径  $\phi i = 2,150 \text{ mm}$

路線延長  $L = 2,367.1 \text{ m}$

ビット交換 2 回



図一2 路線系統図

## § 3. 路線および地形・地質の概要

### 3-1 路線概要

施工路線は八王子市丹木町の立坑を発進とし、発進後 20 m 程で急曲線（ $R = 20 \text{ m}$ ）に入り、通過後は直線部にて谷地川を横断、東京純心女子学園前から滝山街道（国道 411 号）下をとおり、途中右に曲がり、加住丘陵と呼ばれる丘陵山間部下を通過する。丘陵山間部通過中は 400 m 程の直線で、土被りが 80 m を超える区間もある。その後、既設水管橋直下を掘進しながら多摩川を横断する。続いて、曲線長の短い細かい曲線を掘進しながら住宅地や田園地帯を通過して、拜島ポンプ所内の到達立坑へ急曲線（ $R = 20 \text{ m}$ ）を曲がりながら到達する（図一2）。

### 3-2 地形・地質の概要

多摩川の両岸である八王子市と昭島市は沖積低地に属し、加住丘陵などの丘陵に囲まれている。これらの丘陵は河岸段丘が浸食を受け、丘陵地や台地を形成している。

シールド通過部の地層は、加住礫層上部層となっており、全域に広く分布している。礫種はチャート・砂岩・頁岩であり、マトリックスは黄褐色～灰褐色の泥質あるいは火山灰質の中～粗砂を主体とする。層厚は 100 m 以上と推定される。この加住礫層上層部は、事前の土質調査で次のように報告されている（図一3）。

#### ・礫層（Tg1）

黄褐～黄灰褐～茶褐を呈する粘土質～粘土混じりの砂礫層で、礫径は  $\phi 10 \sim 30 \text{ mm}$  の亜角礫～亜円礫～円礫を主体とし、最大礫径は  $\phi 70 \text{ mm}$  である。

礫種は砂岩、泥岩、チャートからなり、非常に硬い。N 値は  $N = 9 \sim 50$  以上と広範囲ではあるが、平均 N 値は 50 以上である。層厚は 25 m 以上と推定される。

#### ・粘性土層（Tg1-m）

Tg1 層中に挟まれる粘性土層であり、黄灰～青灰～灰

褐を呈する固結状のシルトで、全体に粘土分が混じり、無層理・塊状である。N 値は  $N = 20 \sim 50$  以上と広範囲ではあるが、平均 N 値は 50 以上を示した。層厚は 1.0 m～3.5 m 程度であると推定される。

#### ・粘性土層（Tg1-v）

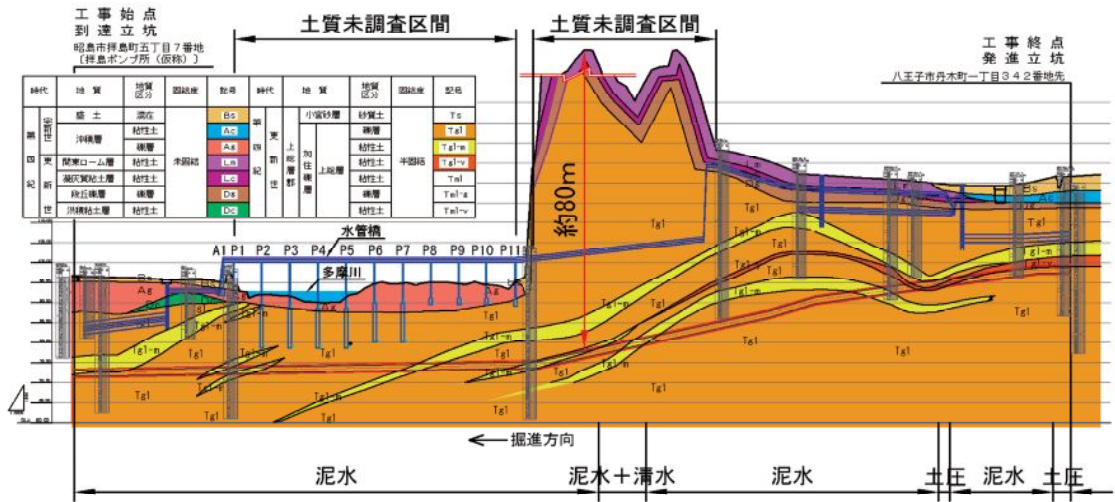
同じく Tg1 層中に挟まれる粘性土層で、細粒の軽石、火山灰を主体とする層であり、火山灰質シルト、軽石質シルトからなる。黄橙～黄褐帯桃灰を呈し、細粒で  $\phi 2 \text{ mm}$  以下の軽石を多く含む。N 値は全て 50 以上であり、平均 N 値も 50 以上であった。層厚は 0.1 m～1.9 m 程度であると推定される。

## § 4. シールド機の選定

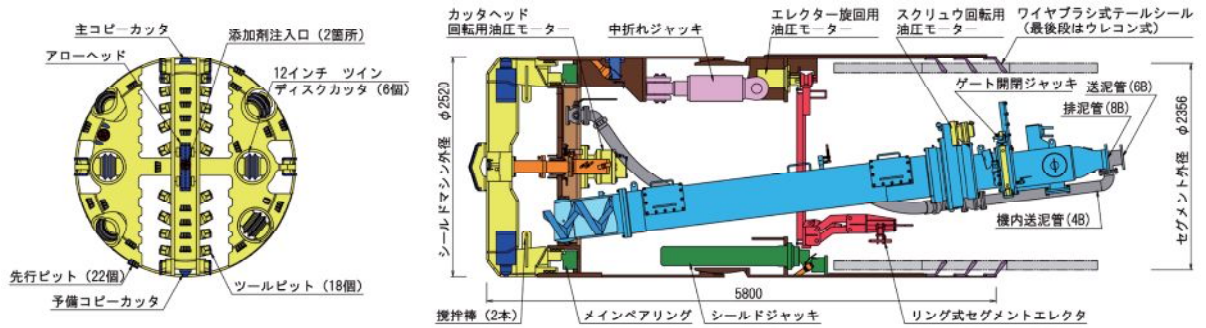
### 4-1 シールド機の選定に係る課題

当工事のシールド型式は、原設計では泥水式であったが、前述の土質条件の他に、丘陵山間区間および多摩川横断区間において土質調査が行えず、土質条件が不確定な区間が多かったため、シールド機の選定にあたって以下の課題が挙げられた。①丘陵山間部においては土被り 80 m を超えるため、高水圧下の通過が想定される。②河川横断部においては、玉石混じり砂礫層の掘進が想定されたが、透水係数が不明であることから、逸泥により掘進に支障をきたす懸念があることに加え、既設水管橋の直下を掘進することから地盤変状による影響を与える恐れがある。③ 2 km を超える長距離施工の上に、全路線の掘削対象土質のほとんどが玉石を含む砂礫層ということからカットビットの寿命を含めた対策が必要である。④曲線施工が多く、特に  $R = 20 \text{ m}$  の急曲線部が右 3 箇所、左 4 箇所、計 7 箇所ある。





図一3 地質縦断面図



図一4 シールド機概略構造図

4-2 シールド機の選定および工夫

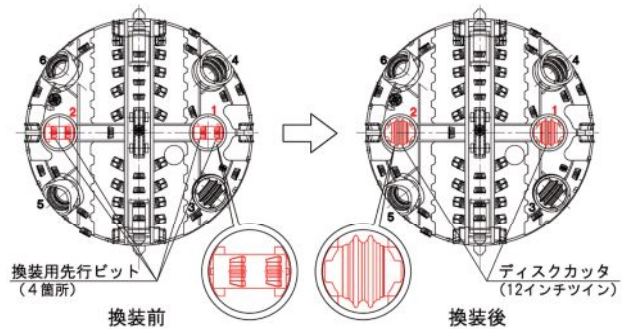
(1) 複合式シールド工法の採用

図一4に複合式シールド機を示す。本工法は、高水圧下では泥水式で掘進を行い、透水性が高く逸泥する様な砂礫層では土圧式により掘進を行うことができる。いずれの場合も切羽からスクリュウコンベアまでの切り替えであり、スクリュウコンベアから後方の排泥設備においては閉回路となるため、土圧式では噴発等が懸念される高水圧に対応しても適用可能である。

本シールド機の基本構造は泥土圧式であるが、ゲート後方には流体を合流させる配管を装備しており、掘削した土砂を泥水式同様に流体輸送し、地上にて処理を行う。また、シールド機内において流体送泥配管のチャンバーへの切替接続も可能で、泥水を直接切羽に送り込むことによって泥水式とすることもできる。面板、シールド機胴体前後およびスクリュウにも、各々加泥材注入孔を装備し、後続台車から地上の設備においても、加泥材作泥・注入および圧送設備を設けた。

(2) 玉石および礫への対応

玉石および礫への対応については、スクリュウコンベアで排出できる大きさ以下にスリット幅を調整し、ディスクカッタで破碎する。スクリュウコンベアは礫対応の



図一5 カッタ換装概要図

リボン式とし、スクリュウコンベア後部にはクラッシャーを配備し、流体輸送可能なサイズまで破碎する。スクリュウコンベアで排泥することにより、取込む破碎サイズを泥水式より大きくできるためカッタービットの寿命を延ばすことができる。当工事においてはスクリュウコンベアをφ300mmまでの礫を排出可能なサイズとした。また、カッタービットの寿命検討から、小径礫区間(前半)と大径礫区間(後半)に区分し、途中でカッタービットを取替える(換装)ことによりカッタ交換回数の低減を図った(図一5)。カッタ交換の第1回目までの区間を「呑み込み型」とし、その後到達までの区間を「破碎型」とするため、カッターヘッドはディスクカッタを装備可能な

構造とし、カッタの換装作業がカッタヘッドチャンバ内から可能なものとした（写真一）。

(3) 急曲線 (R=20 m) への対応

線形は R=20 m の急曲線が右 3 箇所、左 4 箇所、計 7 箇所と多いことから、曲線施工によるテールブラシの疲労を低減させるため、テールグリス自動給脂装置を装備した。また、最後段のブラシには裏込材の侵入固結や漏水を防止する目的でウレコンシールを充填した。

また、シールド機の基本性能として、装備中折れ角は急曲線 (R=20 m) 通過時の理論中折角 7.8° に施工余裕を加えた 9.0° とし、余掘り機構としてコピーカッターを 2 基 (主と予備) 装備し、装備ストロークを理論余掘り長 62 mm に施工余裕を加えた 100 mm とした。



写真一 複合式シールド機

§ 5. 実施工結果

5-1 掘進管理データ

(1) 掘進状況

実施工の結果、丘陵山間部や河川横断部の土質不確定

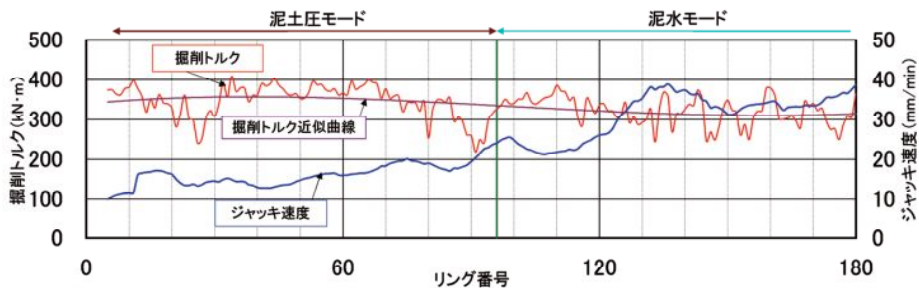
区間だけでなく、全線において粘性土層に砂礫層が細かく入り込んでいるような土質であり、想定していたよりも粘性土層の占める割合が多かったことだけでなく、逸泥や泥水性状の極端な変化が見られなかったこと、掘進速度が泥水式の方が速く進捗が向上したこと、加泥・充填材の添加が不要であるなどの経済的観点からも日々判断し、結果的には全路線のほとんどが泥水式での掘進となった。

土圧式と泥水式を切り替えたのは 2 回であり、土圧式と泥水式の掘進方法の違いによる掘進データを、1 回目の切り替えを行った初期掘進時と比較する。

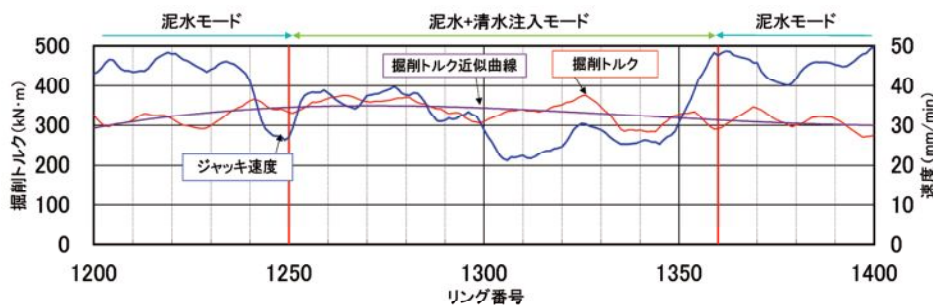
初期掘進時においては、土圧式で掘進すると、乾砂量は安定した値を示していたが、カッタトルクが若干高めでジャッキスピードが出なかった。泥水式に切り替えると、カッタトルクも下り、ジャッキスピードも早くすることができるようになった（図一6）。

次に、泥水式で掘削中に加泥ラインを使用したことについて述べる。泥水式で粘性土質を掘進中に、粘性が非常に高いためにカッタトルクが上昇し、掘進速度が極端に落ちた。泥水性状の極端な変更は、泥水輸送を長距離行わなければならないことや泥水処理設備の処理能力から不可能と判断し、試験的に加泥注入ラインを使ってシールド機前方より清水の注入を行った。その結果、カッタトルクの上昇を抑えることができ、進捗に影響を与えずに掘進を行うことができた（図一7）。土量管理および泥水管理においても土粒子が清水に溶け込むことでバランスが取れ、試行前後と大きな変化はなかった。

以上の対応をとることにより、砂礫はもとより、高い粘性を示す土質においても、泥水性状他の計測値を確認しながらではあるが掘進停止や進捗が極端に低下する様な状況を回避できるのではないかと考えられる。



図一六 初期掘進時計測データ



図一七 計測データ



5-2 カッタ摩耗

(1) カッタ摩耗検討および交換計画

摩耗検討の結果、ディスクカッタおよびスクレーパーカッタは1,336 m 地点で1回の交換が必要となり、また、ツールビットは到達手前(約1,800 m)で摩耗限界値を超えるが、到達まで先行ビットが健全であれば掘進に支障をきたさないと考えられるため交換しない計画とした。ディスクカッタとスクレーパーカッタのビット交換はチャンバー内で行うため、地盤改良を行う必要がある。路線上で地上部から地盤改良が行える箇所が多摩川の右岸および左岸のみであり、その位置は、追加距離で1,475 m 付近(右岸側)および2,018 m 付近(左岸側)であった。1,475 m 付近でも、前述の交換必要距離(1,336 m)を超えてしまうが、その他のビットが健全であれば掘進は可能と判断し、1,475 m 付近(右岸側)で交換作業を行うことにした。多摩川横断部においては、前述のとおり土質が不確定であり、玉石出現も懸念されるため、多摩川横断後の2,018 m 付近(左岸側)において、ビットの確認作業を行うこととした。

(2) 実績

交換地点(1,475 m)におけるカッタヘッドの累積回転数は表-1のように想定位置(1,336 m)における計画累積回転数と大差はなかった。ビットの摩耗検討では、スクレーパーカッタは9.9 mmの摩耗、ディスクカッタは母材で10.5 mm、超硬チップで6.4 mmの摩耗が予想されたが、交換時の確認ではチップ高さの摩耗はほとんど見られなかった(表-2、写真-2~3)。

多摩川横断後(2,018 m)のビット確認においても、横断中の掘削土質が想定よりも粘性の多い状況だったこともあり、ほとんど摩耗は見られなかった。

到達後の確認結果は、先行ビットに10 mm以上の摩耗が見られたが、許容摩耗量の半分以下であり、掘進に大きく影響する状況ではなかった。スクレーパーカッタについては、交換時と同様に角が丸くなる程度の摩耗であった。ディスクカッタについては、超硬チップおよび母材に摩耗は見られず、超硬チップの周囲(ロウ付け箇所)に摩耗が見られた。この箇所の摩耗が進むと歯が抜けるようにチップが欠落することが想定される。

玉石については粘性土層および砂礫層に関わらず出現し、スクリュウ後方の合流管部で閉塞することが多かった。しかし、回収された礫(写真-4)を確認すると長径が300 mmを超えるものの、大半は断面が欠けており、ディスクカッタにより破碎し、バランスよくスクリュウコンベアで取込むことができたと考えられる。

本工事では大半を泥水式シールドとして掘進したが、一般的な泥水式シールドと異なり、複合式シールドはスクリュウを用いて排土するため、玉石をうまく取り込むことができ、結果としてカッタビットの摩耗を減らすことができたと考えられる。

表-1 カッタヘッド累積回転数

		計 画	実施工
		1,336 m 地点	1,475 m 地点
カッタヘッド回転数	(回)	99,693	105,969
ディスクカッタ回転数	(回)	840,038	892,895
ディスクカッタ転送距離	(km)	805	856

表-2 カッタビット摩耗量

	許容摩耗量 (mm)	実測最大摩耗量 (mm)		
		交換時	河川横断後確認時	到達後
		1,475 m	2,018 m	2,367 m
先行ビット	35	—	—	20.0
ツールビット	15	—	—	7.2
スクレーパービット	10	角に丸み	同左	同左
ディスクカッタ	11	3.5	—	3.0



写真-2 スクレーパービット (交換時)



写真-3 ディスクカッタ (交換時)



写真-4 スクリュウ後方で採取された礫

5-3 水管橋への影響

図-8に最近接箇所である水管橋基礎(P5橋脚)と当該シールドトンネルの位置関係を示す。電子レベルで計測した各橋台、橋脚の計測結果を表-3に示す。

礫地盤であったが泥水圧変動が小さく(図-9)、また、乾砂量の計測結果も安定していた。その結果、地盤変位量は一次管理値以下となり良好な結果を得た。

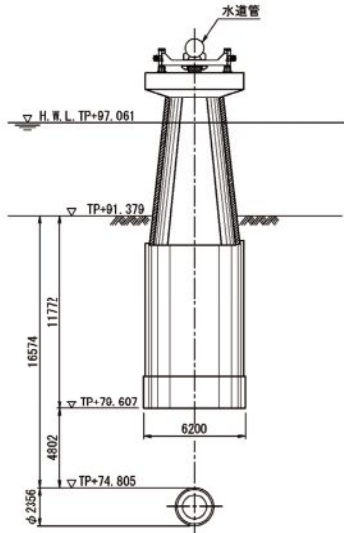


図-8 近接構造物概要図 (P5橋脚)

表-3 水管橋計測結果最大値のまとめ

	最大変位量 (mm)	管理値 (mm)	
		一次管理値	二次管理値
A1	+0.75	±3	±6
P1	-0.50		
P2	-1.35		
P3	-0.75		
P4	-0.40		
P5	-0.50		
P6	-1.80		
P7	-1.85		
P8	-0.95		
P9	-1.40		
P10	-0.40		
P11	-0.65		

注) 計測は、シールド通過後30日間の計測結果である。  
 なお、計測値の原点は通過日の午前0時とした。

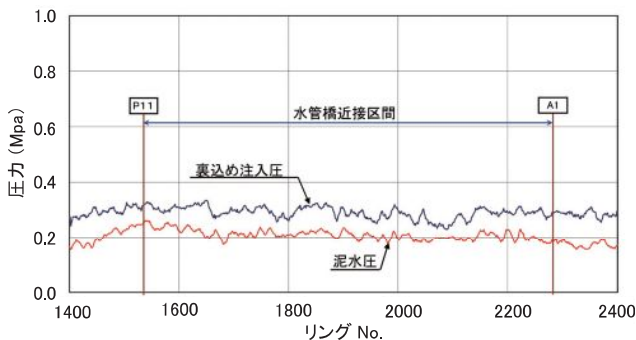


図-9 水管橋通過時の土圧・裏込め注入圧の実績

§6. おわりに

実施工の結果、丘陵山間部や河川横断部の土質不確定区間だけでなく全線において、想定していたよりも粘性土層の占める割合が多かったため、泥水式で掘進する区間が多くなったものの、詳細土質調査ができない中で泥水式、土圧式を切羽土質の状況に応じて選択できたこと、泥水式としてもスクリュウを用いた排土を行うことで礫層の取込みを円滑にし、ビットの摩耗を小さくできたことから、複合式シールド工法によって長距離掘進のリスクを小さくできたと考える。

当現場では粘土・シルト層、細砂・砂礫・礫層(φ300mm超の玉石)とあらゆる土質を対象に、しかも長距離を掘進したが、①複合式シールド工法の特徴を十分に発揮することで、②どの土質においても進捗をおとすことなく、③平均8.2リング/方の進行を確保できた。

当シールド機は平成20年8月21日に無事到達をした。最後になりましたが、当工事に対し、御指導、御支援をいただいた関係各位に深く感謝の意を表します。



写真-5 到達状況