

# 困難な条件下での岩盤対応型泥水式シールドによる 道路トンネルの施工 ROAD TUNNEL CONSTRUCTION UNDER SEVERE CONSTRUCTION CONDITIONS APPLYING A SLURRY SHIELD

足立 幸郎<sup>1</sup>・高磯 徹<sup>2</sup>・東出 明宏<sup>3</sup>  
Yukio ADACHI・Toru TAKAISO・Akihiro HIGASHIDE

**ABSTRACT:** Fushimi tunnel is a pair of the two lane traffic road tunnel constructing by slurry shield method. The length of the tunnel is about 855m each. The geological condition of this tunnel varies from soil to intermediate hard rock including crashing zone. Therefore, the shield machine should be designed to excavate in soil like as a slurry shield machine and to excavate in rock like as a TBM. After launching, this tunnel should be crossed two main railways (JR Nara Line and Keihan Railway Line) and water supply canal (Lake Biwa Canal) with thin cover depth, and excavated under high density residential area. This paper summarized the innovative technologies employed for the construction of this tunnel.

*Key Words :* large diameter shield tunnel, rock excavation, turn around of shield machine, neighboring construction, liquefied stabilized soil

## 1. 工事概要

京都市道高速道路1号線(新十条通)は京都市伏見区と同市山科区を結ぶ全長2.8kmの自動車専用道路であり、そのうち約2.5kmがトンネル構造で東行き線と西行き線の2つのトンネルからなっている。既に山科側からの約1.5km区間はNATM工法により完成しており、伏見側についても約300m区間が開削工法により施工済みとなっており、その間の約855mのシールドトンネル区間を残すのみとなっている。平面図を図-1に示す。

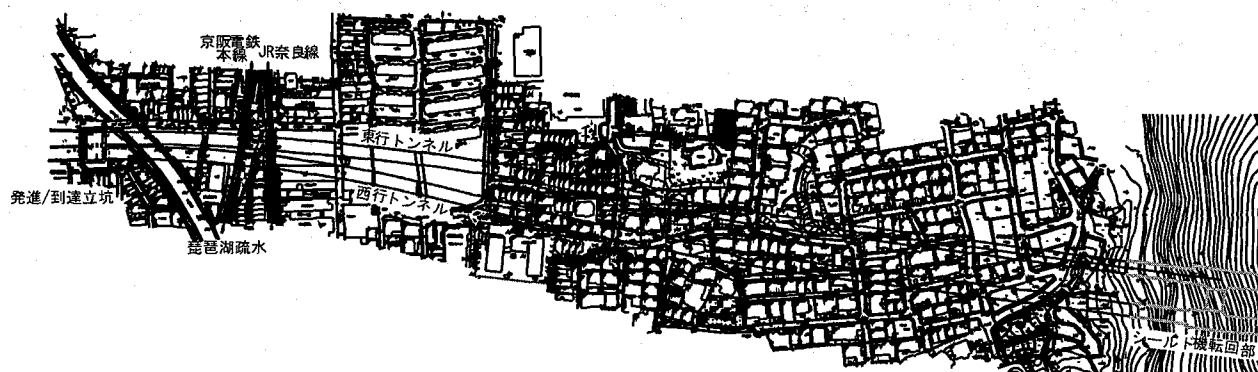


図-1 計画路線平面図

キーワード：大断面シールド，岩盤掘削，シールド機転回，近接施工，流動化処理土

<sup>1</sup>正会員 阪神高速道路株式会社京都建設部 調査設計・審査グループ アシスタントマネージャ

<sup>2</sup>非会員 阪神高速道路株式会社京都建設部 伏見工事事務所 チーフ

<sup>3</sup>正会員 大林・佐藤・西武建設工事共同企業体 所長

シールド機は伏見側の発進立坑より山科側に向かって掘進し、稲荷山の岩盤部に築造された転回部でUターンして発進立坑に戻ってくる計画であり、約 500m 区間にわたり民家密集地帯の直下をシールド工法により施工することとなっている。工事概要を表-1 に記す。

表-1 工事概要

|            |                                                       |
|------------|-------------------------------------------------------|
| 工 事 名      | 伏見工区トンネル工事                                            |
| 発 注 者      | 阪神高速道路株式会社                                            |
| 工 事 場 所    | 京都市伏見区深草相深町～同区稲荷山                                     |
| 仕上り内径・掘削延長 | φ10.1m, 約 855m×2                                      |
| シールド機      | φ10.82m 岩盤対応型泥水式シールド機                                 |
| セグメント      | 合成セグメント（嵌合方式, NMセグメント）<br>外径：φ10.6m, 厚さ：250mm, 幅：1.5m |

## 2. 地質概要

計画路線の想定地質縦断面図を図-2 に示す。シールド機の掘進する地質は、発進立坑から約 160m 区間は硬質の洪積粘性土層と洪積砂礫層の互層、その後の約 570m 区間は大阪層群の砂礫層、粘性土層の互層となっているが、残りの 120m 区間は頁岩とチャート主体の破碎帯を含む丹波層群である。なお、岩盤部の一軸圧縮強度は原位置でボーリングにより採取したコアを用いて行った圧縮強度試験により最大  $80\text{N/mm}^2$  と設定して、以降のシールド機的设计等に採用した。

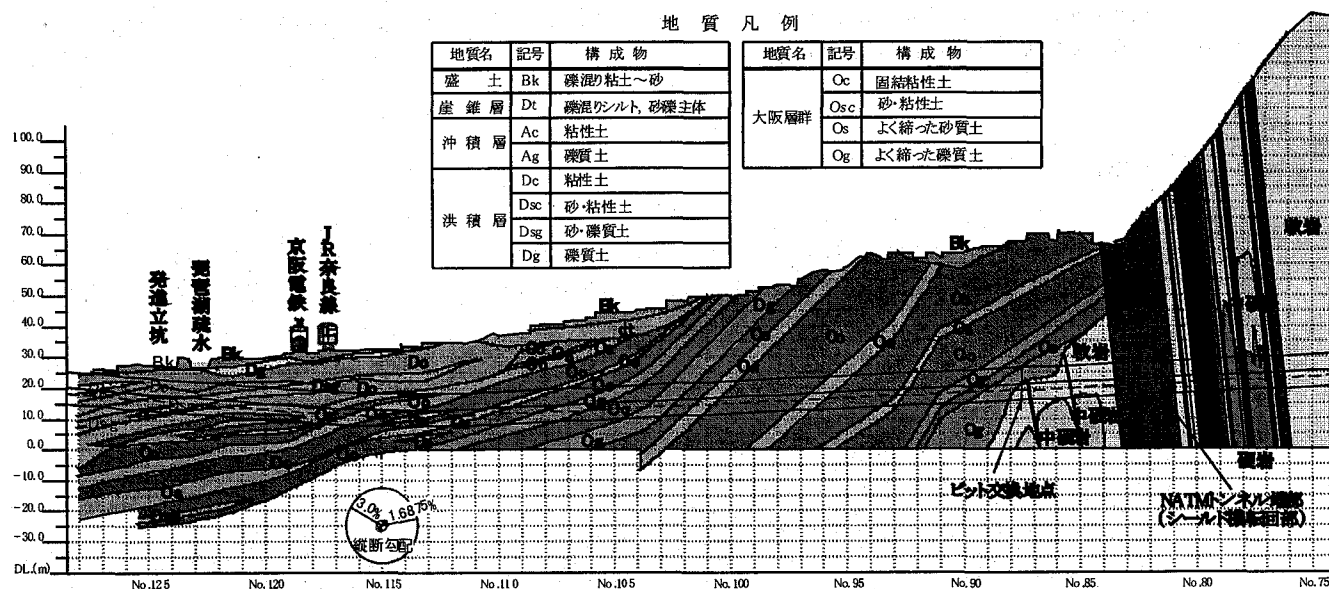


図-2 想定地質縦断面図

## 3. シールド機

今回の岩盤対応型シールド機の構造図と仕様を図-3、表-2 に示す。

1 台のシールド機で硬質の土砂地盤から破碎帯を含む中硬岩までを掘進するために、設計段階からさまざまな検討を行い、結果として土砂掘削用のシールド機と岩盤掘削用の TBM の両方の長所を併せ持つ高機能の掘削機とした。主な特徴は以下のとおり。

①セミドーム型カッターヘッドの採用、②土砂用の強化型先行ビットから 68 個の 17" ディスクカッターへのチャンバー内での交換構造、③岩盤部余掘り用にリーマカッター 3 基を装備、④岩盤掘削を考慮してインバー

タ制御電動機（75kW×18台）によりカッタ回転速度を可変（0.5～1.9min<sup>-1</sup>）構造、⑤岩盤部の礫破碎用にシールド機内と後方台車に水中クラッシャーを各1台装備、⑥岩盤部での姿勢安定のためグリッパを前胴と後胴に各8基装備。

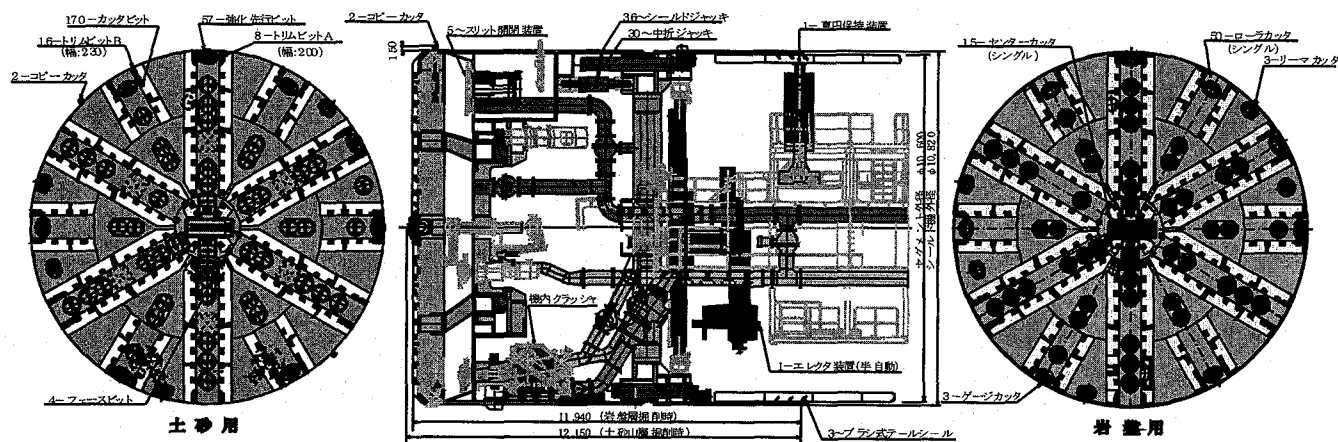


図-3 岩盤対応型泥水式シールド機構造図

表-2 岩盤対応型泥水式シールド機仕様一覧表

|          |                                                                               |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|
| シールド機外径  | φ10,820mm（掘削外径φ10,850mm）                                                      |
| シールド機機長  | 12,150mm（土砂用）、11,940mm（岩盤用）                                                   |
| 総推力      | 108,000kN：3,000kN×1,700st～2,200st×36本                                         |
| カッタ回転数   | 0.5min <sup>-1</sup> （土砂用、周速17.0m/min） 1.9min <sup>-1</sup> （岩盤用、周速64.6m/min） |
| カッタトルク   | 18,542kN・m（土砂用、α=14.6）、6,755kN・m（岩盤用、α=5.3）                                   |
| ディスクカッタ  | 17" ディスクカッタ 68個（岩盤強度80N/mm <sup>2</sup> 対応、土砂用の先行ビットと交換）                      |
| 中折れ装置    | 上下左右各1度（3,500kN×320st×30本）                                                    |
| 姿勢制御装置   | フロントグリッパ：8基、リアグリッパ：8基                                                         |
| 余掘り装置    | コピーカッタ：2基（150st）、リーマカッタ（岩盤余掘り用）：3基（108st）                                     |
| 機内クラッシャー | 1基（750mm幅）                                                                    |

#### 4. 近接施工

##### （1）琵琶湖疏水横断

発進部での土被りはわずか4.8m（0.4D）の低土被りであり、また発進直後に琵琶湖疏水（流量14t/secの水路）の直下を離隔約4.4mで通過する計画となっていた。これに対する発進・到達防護工と琵琶湖疏水防護工を図-4に示す。発進・到達防護工としてRJP工法と二重管ダブルパッカー注入工法、また双設トンネルの南北にはCJG工法による影響遮断壁を施工した。

このような低土被り部においては、泥水の地上への噴発に配慮した切羽泥水压の設定が重要であり、しかも発進してすぐに重要構造物の琵琶湖疏水直下を横断することから、疏水管理者との協議の結果、疏水本体の計測（水盛式沈下計及び傾斜計）を実施するとともにシールドの掘進に伴う地中の変位等を把握するトライアル計測を行うこととなった。

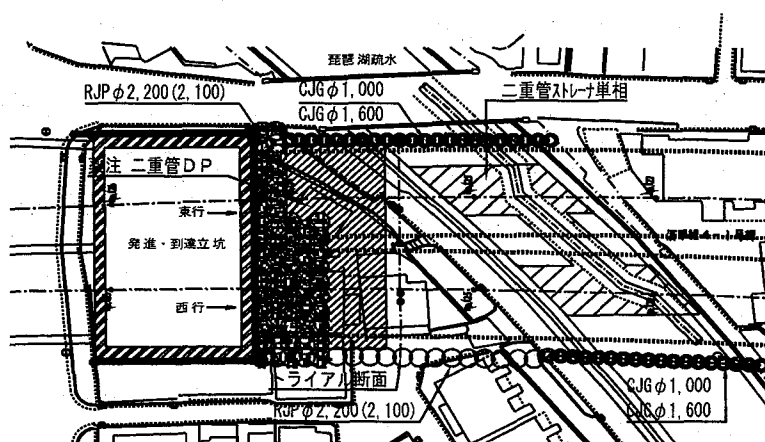


図-4 防護工平面図

掘進に際しては、トライアル計測の結果をフィードバックして切羽泥水圧等の掘進条件を設定した。掘進の結果、琵琶湖疏水（河床版及び護岸）では、掘削による沈下と裏込め注入による隆起を繰り返したが、いずれも一次管理値（ $\pm 12\text{ mm}$ ）よりもはるかに微小な沈下量に抑えることができた。

## （２）鉄道横断

発進部より約 110～140m 地点で京阪電鉄本線と J R 奈良線の 2 つの鉄道直下を横断した。横断部での土被りは約 12.2～13.6m（約 1.2 D）であり、事前に行った FEM 解析の結果では予想沈下量は約 10 mm で、京阪電鉄本線部（一次管理値 3 mm）、J R 奈良線部（一次管理値 8 mm）ともに一次管理値を超えることとなった。しかし、元的地盤が硬質なため、薬液注入等の防護工が沈下抑制にほとんど寄与しないことが明らかとなったため、計測管理を行いながら防護工無しで掘進することとした。このため、琵琶湖疏水と同様にトライアル計測を実施し、琵琶湖疏水での掘進実績も参考にして計測結果を掘進管理にフィードバックさせた結果、京阪電鉄本線、J R 奈良線ともに一次管理値以内の沈下量に抑えることができた。

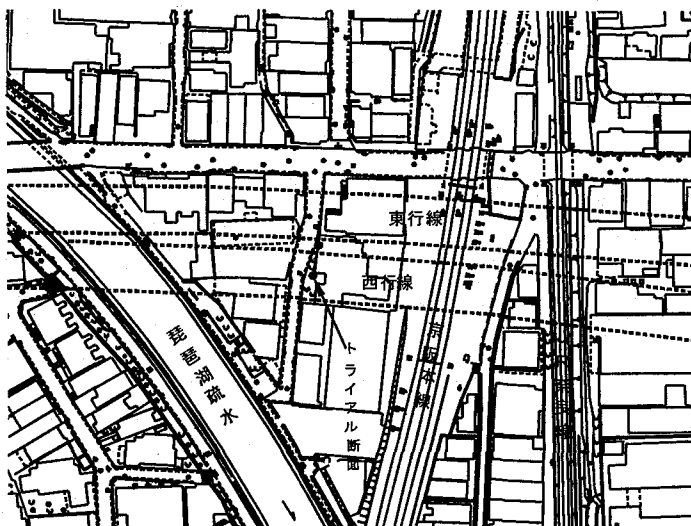


図-5 鉄道横断部平面図

## 5. ビット交換工と岩盤部掘進

シールド機の掘削対象地質は、伏見側発進立坑から約 730m が大阪層群主体の土砂部で、残りの約 120m が頁岩とチャート主体の岩盤層となっている。このため、1 台のシールド機で施工するには、土砂部から岩盤部になるところでシールド機に装備したカットビットを土砂用ビットから岩盤用のローラカットに交換する必要がある。このビット交換作業は作業員がシールド機のチャンバー内に行くため、交換地点の地山を薬液注入工等により防護する必要となる。当工事では地上部が民家密集部で施工場所が確保できないため、到達側である既設 NATM トンネルの端部から水平注入用の導坑を推進工法により築造する工法を採用した。さらに、導坑の設置位置がシールド掘削予定断面内であったため、注入作業終了後、シールド機の掘削に支障とならないように導坑として設置した推進管を引き抜いた。

### （１）導坑推進

図-6 に導坑の基本計画図を示す。

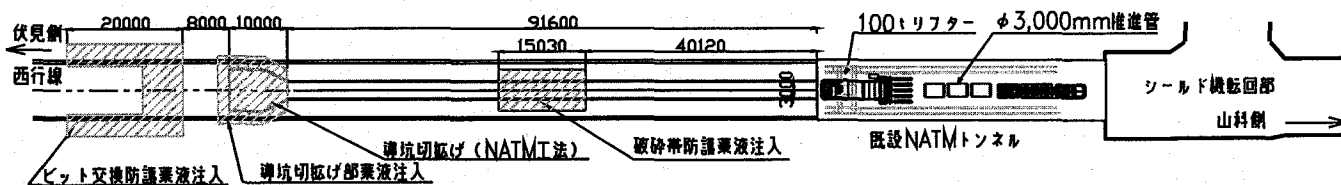


図-6 注入用導坑基本計画図

導坑の内径は  $\phi 3,000\text{ mm}$  で、推進工法により約 92m 推進した後、NATM 工法により切掘を行って注入作業用の空間を確保した。推進工法に用いた岩盤対応型推進機を写真-1 に示す。推進機は外径  $\phi 3,520\text{ mm}$  の大口径推進機で 15.5 インチのディスクカッタを 22 基装備している。また、計画総推力 5,377kN に対して、元押し設備として 2,000kN ジャッキを 4 台設置し、さらに中押し設備を 4 段配置した。

今回の工事では、推進管設置のおよそ半年後にビット交換防護工が終了して推進管の引き抜きが予定さ

れていたため、滑材については以下の点に留意して選定した。

- ・約 100mの長距離推進を可能とする材料であること。
- ・長時間放置しても劣化や脱水をおこさず、硬化もしないこと。
- ・万一、劣化や脱水が起こっても再注入により置き換え、充填が可能なこと。

今回選定した滑材（可塑状粘土）は特殊粘土スラリー（A液）と珪酸（B液）からなる2液型の材料であり、推進速度に同調させながら推進管上部の注入孔より注入圧力と注入量を管理して注入を行った。

推進完了後、推進機を解体し、NATM 工法（吹付けコンクリートとファイバー製ロックボルト）により前方 10m区間の切掘りを行ってビット交換防護工用の作業スペースを確保した。

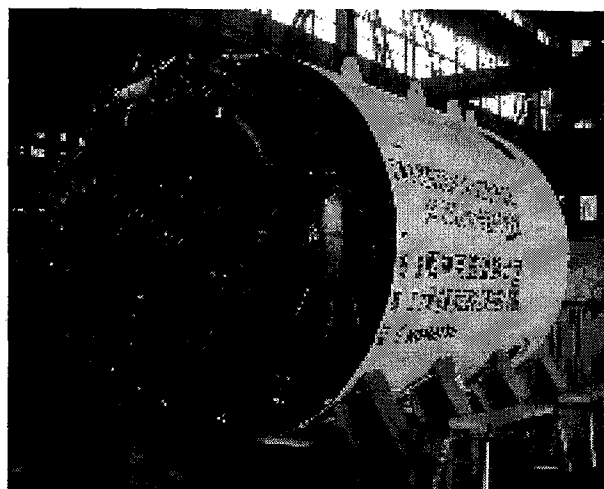


写真-1 岩盤対応型推進機

## (2) ビット交換部防護

防護工の改良範囲については、止水を主目的とした「ソフトゾーン」と地盤強化と止水の両面を目的とした「ハードゾーン」に分けて設定した。ソフトゾーンはシールド機のスクリンプレート部からチャンバー内への地下水の流入を防ぐことを目的とし、ハードゾーンはチャンバー内でのビット交換作業を行うことから切羽の地盤の自立確保および止水を目的としている。

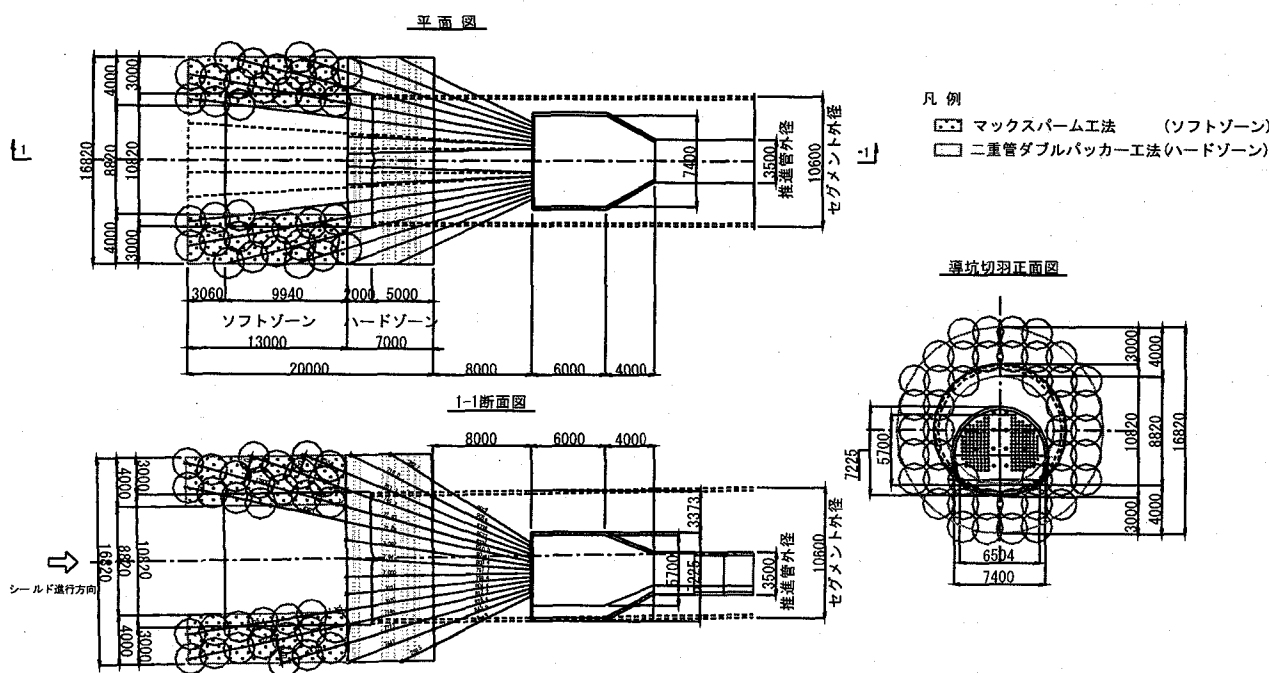


図-7 ビット交換防護工計画図

## (3) ビット交換

ビット交換予定地点に到達した時点でシールド機を停止し、チャンバー内の泥水を抜いてビット交換を行った。内訳は土砂用の強化先行ビット 57 個とフィッシュテールを取り外し、17 インチ・ディスクカッタ 68 個に交換した。ビット交換地点の手前でチャート層が掘削断面の一部に出現したため、土砂用の強化先行ビットの磨耗、損耗は面板外周部にいくほど激しく、復路での再使用が可能なものは皆無であった。

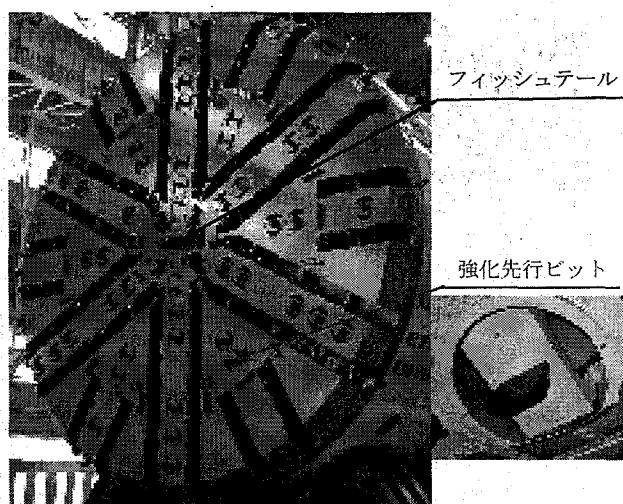


写真-2 土砂用カッタ配置状況

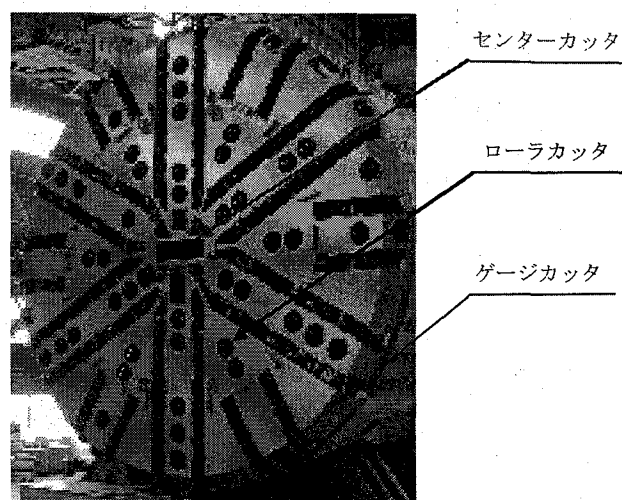


写真-3 岩盤用カッタ配置状況

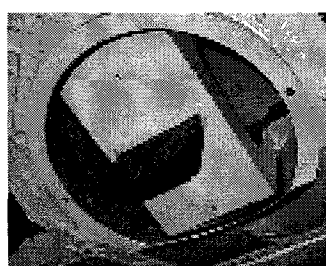


写真-4, 5 磨耗前の強化先行ビット



写真-6, 7 磨耗後の強化先行ビット

#### (4) 岩盤掘進

ビット交換終了後、シールド掘進を再開し、無事、既設の NATM トンネル端部に到達した。ビット交換以前の土砂部での掘進データと、ビット交換以降の岩盤部での掘進データの平均値の主なものを表-3 に示す。岩盤部においては、礫破碎用のクラッシャー（機内、後方台車の計 2 基）を作動させながら、配管閉塞に特に留意しながら掘削を行った。掘削時の総推力の上昇（約 20%）に伴い、掘進速度は約 35%低下したが、掘進において特に問題となることはなく、順調に到達することができた。

表-3 土砂部と岩盤部での掘進データ比較表

|              | 平均総推力<br>(kN) | 平均カッタトルク<br>(kN・m) | 平均掘進速度<br>(mm/min) | 平均裏込注入率<br>(%) |
|--------------|---------------|--------------------|--------------------|----------------|
| 土砂部（ビット交換以前） | 38,844        | 3,116              | 36.9               | 130.7          |
| 岩盤部（ビット交換以降） | 46,949        | 3,001              | 24.3               | 131.4          |

#### 6. シールド機転回工

西行き線トンネルを貫通したシールド機を、東行き線トンネルの発進位置まで転回、移動する工法として「ボールスライダー工法」を採用した。ボールスライダーは、図-8 に示すようにφ90 mmの鋼球 60 個をキャタピラのように 2 列配置したボール式重量物移送装置で、これをシールド機受台の下に取付けることにより摩擦力を軽減し、牽引力を小さくできるものである。

ボールスライダー工法では、ボールスライダーを取付けたシールド機受台（ボールスライダー架台）が通過するところには鉄板を敷設し、移動、転回の反力は鉄板上に設置した横ぶれ防止用のガイドレールに設置する反力ブラケットに取る。そして、反力ブラケットとボールスライダー架台に取付けたセンターホールジャッキを PC 鋼棒で繋いで牽引力を得る。図-9 にボールスライダー架台の断面図を示す。

また、転回工の模式図を図-10 に示す。

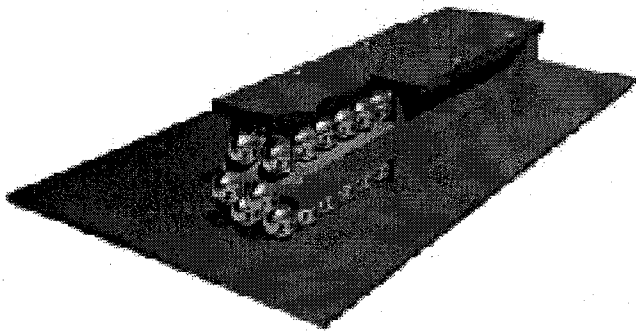


図-8 ボールスライダー

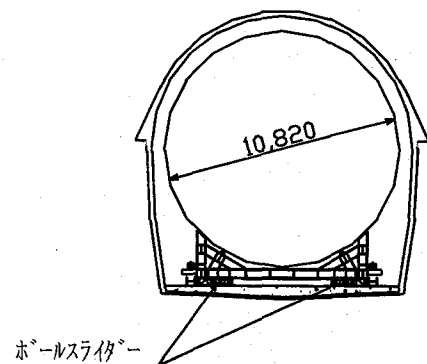


図-9 ボールスライダー架台断面図

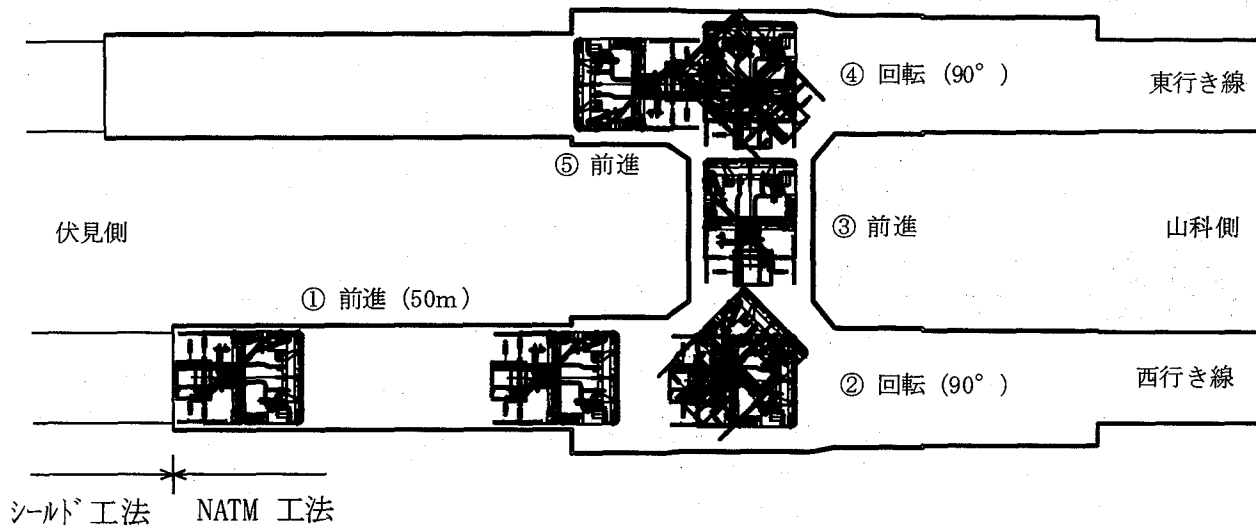


図-10 転回工模式図

ボールスライダーにより摩擦係数が大幅に減少し、直進時、回転時ともわずか 30～70 t 程度の牽引力で 1,600 t もの重量物の移動が容易に、かつ安全に行えた。

## 7. 路床材への流動化処理土の適用

路床材に流動化処理土を適用する場合の基本要求性能として満足する必要がある項目は次の通り。

### ①路床として必要な強度

長期安定性確保のための  $CBR=20$  に相当する一軸圧縮強度 ( $q_u=0.4N/mm^2$ ) に安全率  $F_s=3.0$  を乗じた値以上を設計基準強度とする。

### ②交通荷重に対し必要な強度

舗装、路盤等の死荷重と活荷重  $qu_2$  の和に長期的な安定を考慮した安全率  $F_s=3.0$  を乗じた強度以上とする。

### ③上部層施工時に必要な荷重

舗装、路盤部の施工時に作用する工事用車両（ダンプトラック）の接地荷重に、施工時の安全率  $F_s=1.0$  を乗じた強度以上とする。

### ④耐久性から必要な強度

「鉄道構造物に用いる流動化処理土の設計施工法マニュアル（案）」に示されるトンネルインバート部に用いる流動化処理土の繰り返し载荷の実験結果より決定される。

以上より、路床材としての流動化処理土への要求性能をまとめたものが表-4 である。

表-4 要求性能のまとめ

|               |                        |
|---------------|------------------------|
| ①路床として必要な強度   | 1.2 N/mm <sup>2</sup>  |
| ②交通荷重に対し必要な強度 | 0.33 N/mm <sup>2</sup> |
| ③上部層施工時に必要な強度 | 0.66 N/mm <sup>2</sup> |
| ④耐久性から必要な強度   | 2.0 N/mm <sup>2</sup>  |

これに型枠脱型時の必要強度を考慮し、流動化処理土に求める強度特性を以下のように設定した。

- ・設計強度 :  $\sigma_{28} \geq 2.0 \text{ N/mm}^2$
- ・型枠脱型時の必要強度 :  $\sigma_{16h} \geq 0.04 \text{ N/mm}^2$

流動化処理土の施工フロー図を図-11に示す。当工事では、坑内に中継ポンプを設置することなく流動化処理土の長距離圧送（1km）を可能とするため、泥水と固化液を2系統で別々に圧送し、打設場所で混合装置により混練する2液施工方式を採用した。

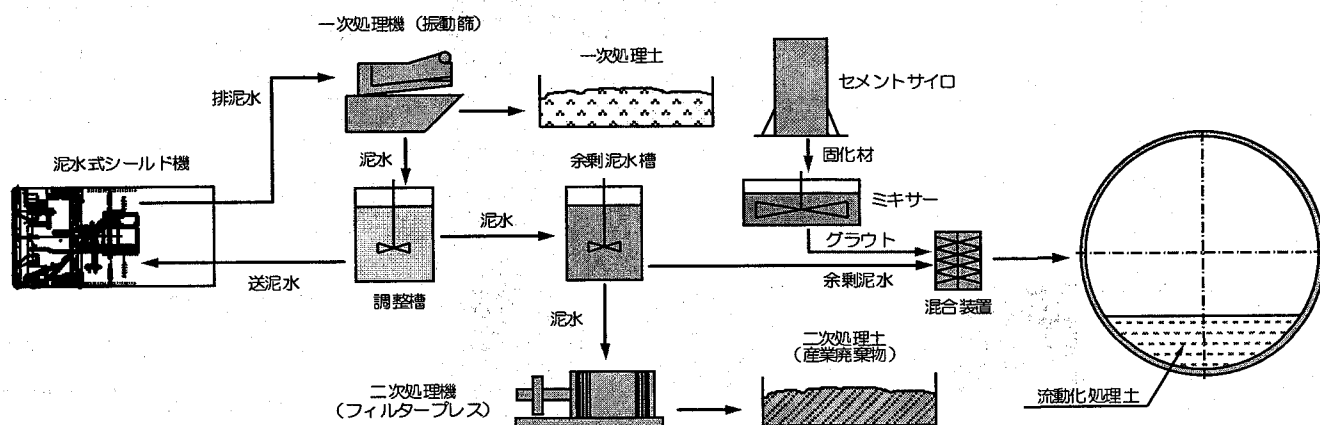


図-11 流動化処理土施工フロー図

施工に際しては、現場で採取した泥水を用いて配合試験を行い、強度特性およびブリージング率1%未満（極めて精度の高い充填性が要求される場合や車道下に用いる場合に相当）を満足する配合の中から最も経済的な配合として表-5に示す配合を決定した。なお、現地発生土を使用した流動化処理土の場合、原料土の性状が大幅に変動することが予想され、強度等の性状におよぼす影響も大きくなることが予想される。これらのことより、強度の変動係数を5～10%程度になると仮定し、設計強度2.0 N/mm<sup>2</sup>に対して割り増し係数1.15を乗じ、配合強度を2.3 N/mm<sup>2</sup>とした。

表-5 流動化処理土配合

| 流動化処理土 1 m <sup>3</sup> あたり |     |      |             |     |              |
|-----------------------------|-----|------|-------------|-----|--------------|
| A液（固化液）                     |     |      | B液（泥水）      |     | 流動化処理土<br>比重 |
| 固化材（高炉B種）                   | 水   | 混和剤  | 泥水（比重 1.20） | 増粘剤 |              |
| 325                         | 163 | 1.63 | 866         | 20  | 1.38         |

実施工においては、自走式の移動型枠をセットし、1日当たり9～12m区間（約130～180 m<sup>3</sup>）の打設を行った。今回の流動化処理土の適用により、全体の処理泥水量の約7%の産業廃棄物の減量化が達成される予定である。

## 8. まとめ

日本でほとんど例のない大断面シールド機での岩盤掘削作業であったが、ビット交換を経て無事、到達することができた。また、シールド掘進作業との同時並行作業で流動化処理土による路床工や耐火工も施工したが、このような傾向は工期短縮の観点から今後、ますます増加していくものと考えられる。今回の工事には、関係各位の皆様方からの多くの貴重なご意見をいただいたことをここに記して、感謝する次第である。