

# 鈴蘭台汚水幹線工事における TBM による掘削工事

—TBM による急勾配下水道トンネル掘削—

中村 優一・神谷 弘孝・吉田 和睦

鈴蘭台汚水幹線付替工事は近接河川のダム建設に伴う湛水の影響を避けるための下水道汚水幹線移設工事であったが、180%及び133%という急勾配を含む縦断線形であったため、急勾配対策を駆使したφ3.1mのTBM工法で対応した。

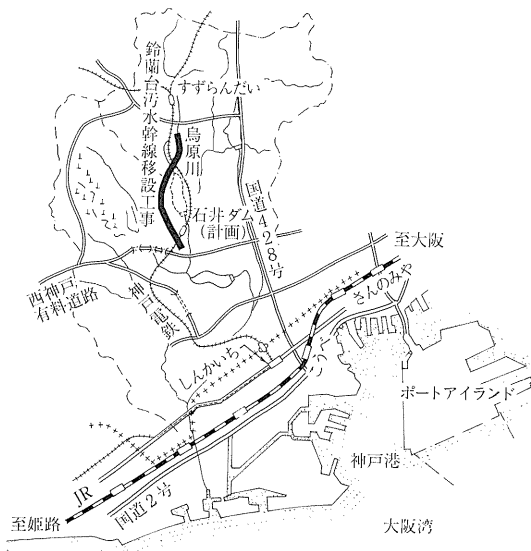
TBM機本体の急勾配対策、崩壊性地山対策、ずり排出用アプト式電車、自動測量・方向制御システム等が主な対策であったが、水平掘進方式のTBMでは日本で最急勾配であり、また、下水道工事に日本で初めてオープンタイプTBMを採用した。

急勾配に対する安全性を重視した設備延伸方法も盛込んだ施工であったが、平均月進215mを達成できた。

キーワード：急勾配対応 TBM、アプト式電車、崩壊性地山対策、線形保持

## 1. はじめに

鈴蘭台汚水幹線は、神戸市北区の住宅地である鈴蘭台地区と兵庫区に位置する処理場を結ぶ下水トンネルであり、昭和40年度から昭和42年度にかけて当時としては長距離の約2kmを山岳トンネル工法（発破掘削）によって施工されたものである（図—1参照）。



図—1 鈴蘭台汚水幹線位置図

今回、汚水幹線に近接した烏原川に石井ダムの建設が計画されたことにより、ダム湛水による汚水幹線への影響が避けられないことから、当該汚水幹線の付替え工事をする事となった。

トンネルルートは、ダム湛水に影響を及ぼさないことが必要であるため、処理場からダムサイトまでの短い水平距離間でダム湛水位の標高付近まで急勾配で施工しなければならなかった。

このため掘削径φ3.1mのTBMにより、最大上り勾配180%を含む路線を一方向掘進で行ったのでその施工実績について報告する。

## 2. 工事概要

TBM工法で用いたTBM機の仕様及び工区の概要は下記のとおりである。

・TBM掘削：外径φ3.1m	延長	2,079 m
	勾配部上り 133%	899 m
	上り 180%	89 m
	水平部	1,391 m

## 3. 地質概要

地質は中生代白亜紀～古第三生紀の花崗岩（布引花崗閃緑岩，六甲花崗岩）からなり、発進坑口

から約 1.0 km が布引花崗閃緑岩，残りの 1.1 km が六甲花崗岩である。

また，岩質は地山分類上の中硬岩 (CM)～硬岩 (CH) に分類される比較的良好な岩盤である。

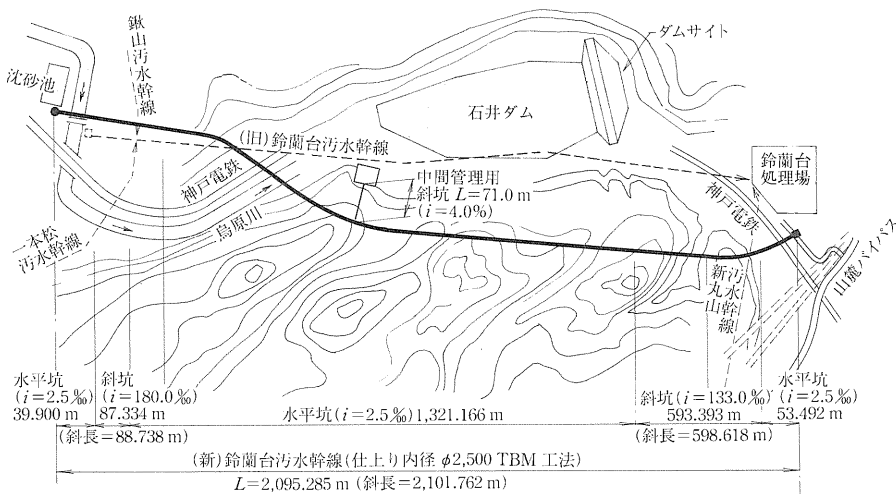
トンネル計画深さでの弾性波速度は 3.8～4.5 km/sec であり，低土被り部で 2.0～2.5 km/sec である。一軸圧縮強度は 35～200 MPa と推察された。弾性波探査で確認された低速度帯は 8 箇所あり，土被りが 5.9～16.6 m の沢部が 3 箇所，6.0～8.3 m の河川横断部が 2 箇所ある。

#### 4. 施工条件

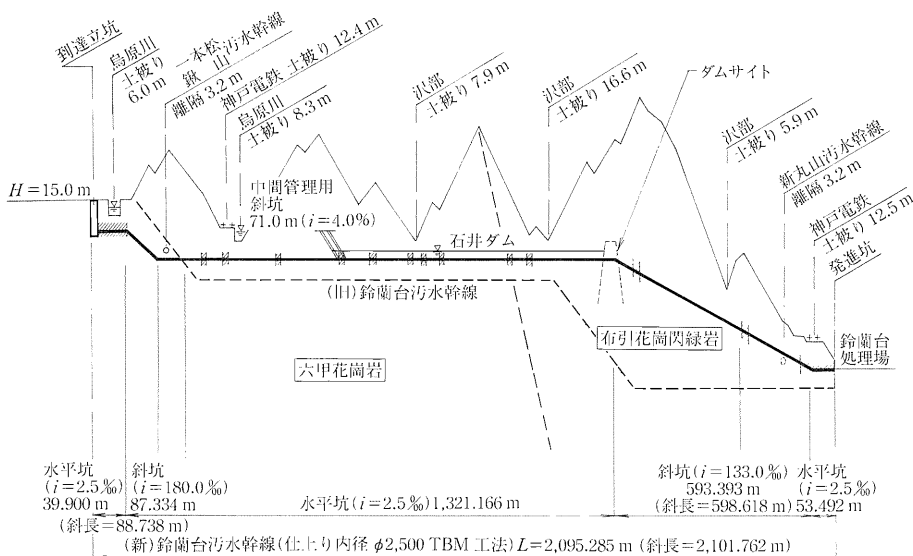
##### (1) トンネル線形

トンネル線形は次に示す条件で決定されたが，急勾配縦断線形の中に平面線形が含まれることとなり，施工管理上難易度の高いものとなった (図一2，図一3 参照)。

- ① 起点 (処理場) に近い所で神戸電鉄を横断する。この離隔を 10 m 以上確保する必要があることから，起点側 50 m 間は水平を保ち，



図一2 トンネル平面図



図一3 トンネル縦断面図

その後ダムサイトまでの間にダム湛水位付近の標高まで上げる必要があることから、この区間の勾配が130%となった。

- ② ダムサイトから上流部についてはダムに影響を与えないようにダム湛水位付近の標高を確保する。土被りの浅い箇所を横断する場合は2D(約6m)以上確保するように平面・縦断線形を決定した。
- ③ 烏原川と神戸電鉄軌道を横断する箇所があり、影響を極力小さくするため、直角に交差する。
- ④ 既設污水幹線(一本松污水幹線, 鋤山污水幹線)との地中接合を行うため、連絡しやすい位置とする。ただし、幹線との離隔を1D(約3m)確保する。
- ④ 到達立坑を浅くするため鋤山污水幹線の直下3mを通過した後、立坑手前の烏原直下で6m確保するように縦断勾配を決めると180%となった。

(2) 掘削工法の選択

小断面トンネルにおいてTBM工法は、ある程度の延長があり、マシンの取出しが可能であ

ば、NATM工法や矢板工法より経済的である。また、

- ① 掘削速度が速く工期の短縮が図れること、
- ② 発破工法に比べ地山の緩みが少なく近接構造物に対して安全であること、
- ③ 振動も少ないことから環境への影響においても優れていること、

などの利点があり、当工事ではTBMを採用した。また、本工事では硬岩部が多く、比較的安定した地山と判断されたため、経済的なオープン型TBMを選定した(写真-1, 表-1, 図-4 参照)。

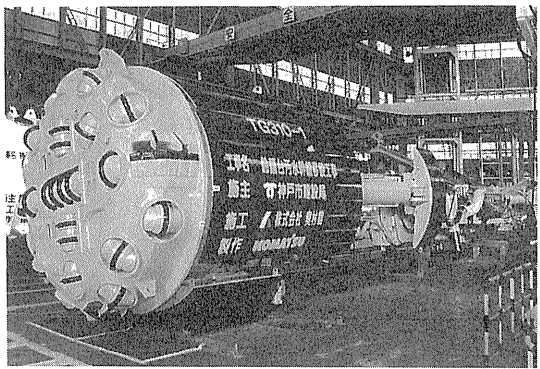


写真-1 オープン型TBM(φ3,100mm)

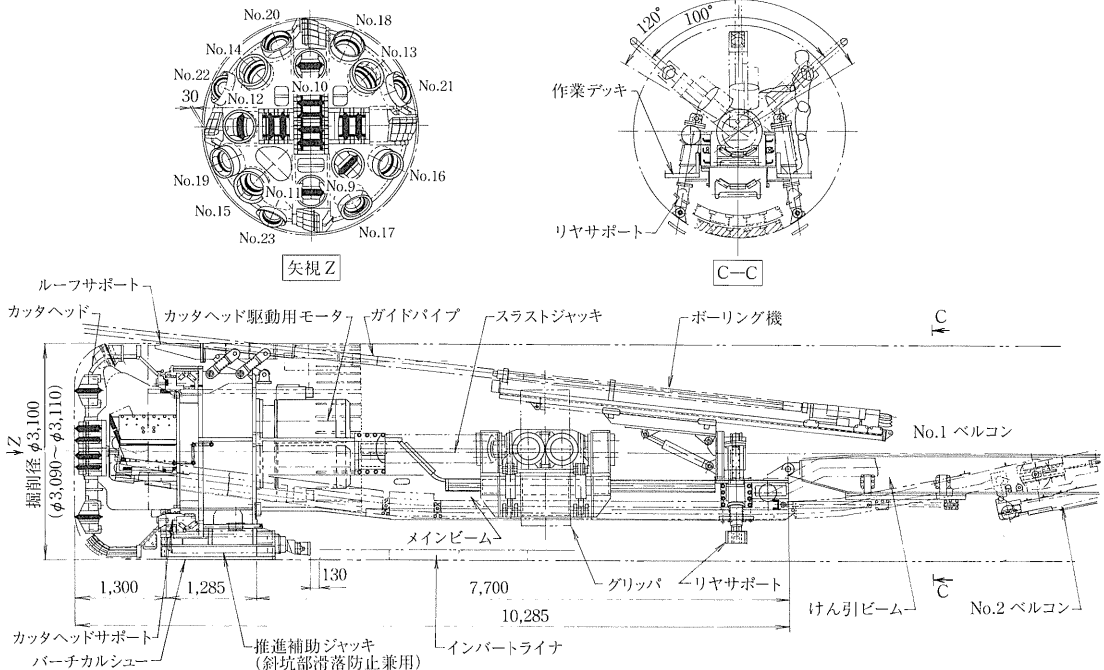


図-4 TBM本体図

表一 TBM仕様

掘削機	径	φ3.1 m	カッタ電動機	125 kW×4台
	長	10.3m	カッタトルク	451 kN・m
全長		101 m	カッタ回転数	4.5~13.5 rpm
重量		152 t	カッタ径	394 mm
出力		700 kW	カッタ数	23個
推力		2,450 kN×2	後続台数	11台
グリップ押付力		9,800 kN	ベルトコンベヤ	500 mm×107 m <sup>2</sup> /h

### 5. 急勾配 TBM 対策

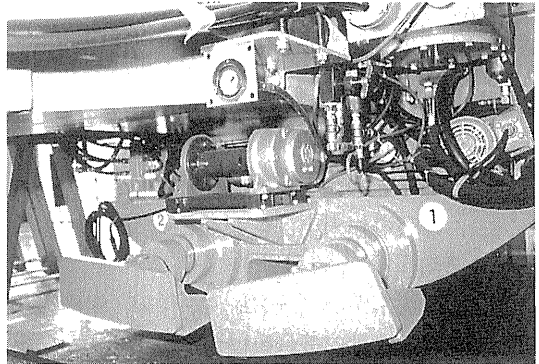
急勾配を施工するに当り次の事項を考慮した。

#### (1) 補助推進ジャッキ

上りの急勾配の場合、グリップを地山から開放した静止状態で、マシン本体と後続台車の自重による摩擦抵抗力とルーフ、サイドサポートの摩擦抵抗力を加えた力が傾斜により滑落しようとする力を上回らなければならない。この場合、抵抗力として鉄と岩の摩擦係数が大きく影響するため、地山の劣化や湧水により地山が洗われ摩擦係数が期待できない場合を想定し、安全のため補助推進ジャッキを装備し、滑落防止を図った。

また、軟弱層ではグリップの反力が十分とれない場合でも利用できる。補助推進ジャッキはインバートライナを反力として作用できる構造とし、

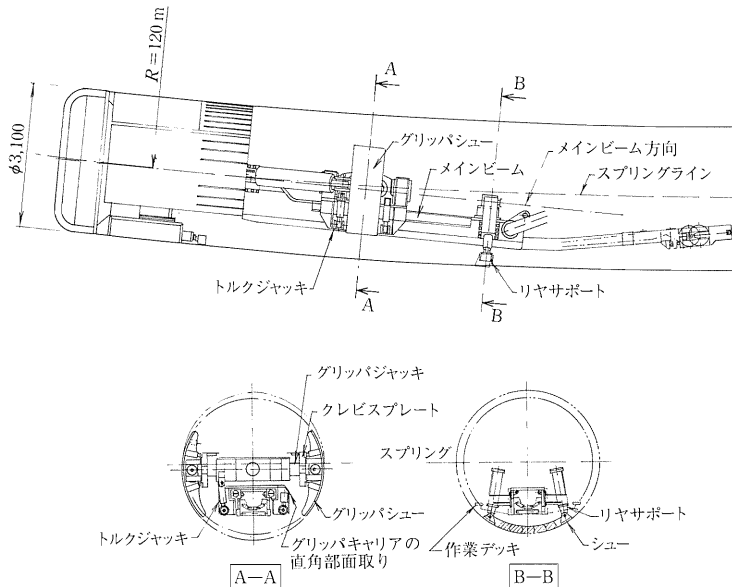
インバートライナは地山にロックボルトを打設して固定できるように計画した（写真一2 参照）。



写真一2 補助推進ジャッキ

#### (2) グリップ部等の構造

水平区間から急勾配に移るバーチカルカーブ区間においては、TBMがメインビーム方式であるため、進行方向に向けられたメインビームと掘削されたカーブのトンネル線形とは一致しないため従来の構造では問題が生じることが明らかとなった（図一5 参照）。この検討課題に対し表一2の急勾配対応 TBM の構造に示すような事前対策を行った。



図一5 急勾配掘進時の TBM

表一 急勾配対応 TBM の構造

検討課題	事前対策
<ul style="list-style-type: none"> <li>グリップジャッキ全縮でチルティング、ローリング補正のためのトルクジャッキを操作すると、グリップジャッキのクレビスプレートとグリップキャリアが干渉する。これはトルクジャッキの操作量が大きいためである。</li> </ul>	図-5のA断面に示すようにグリップキャリアの干渉が予想される直角部の面取りを行った。
<ul style="list-style-type: none"> <li>水平掘進TBMではトルクジャッキの油量調整は左右のみであるが、本TBMではトルクジャッキ操作量が大きいため、前後が連動しない恐れがある。</li> </ul>	油圧回路の中に左右だけでなく、前後にも調整できる流量調整弁を取付けた。
<ul style="list-style-type: none"> <li>リアサポートがストローク伸縮量の範囲内でカバーできない恐れがある。水平から上り勾配移行時全縮で掘削底盤に接触し、逆に上り勾配から水平に移行する時、ストローク不足になることが予想された。</li> </ul>	リアサポートのストローク長を伸ばすのにも限界があり、リアサポートの取付け位置をずらせるように取付けプレートを作成した。

(3) 資材乗せ替え用ラック式電動トロッ

坑外から搬入されてきた材料台車から TBM 台車内の搬入台車への乗せ替えにラック式の電動トロッロリを採用し、安全を図った。

(4) 急勾配線形保持対策

複雑な線形に対応できるように図-6に示すような自動測量・方向制御システムを採用した。ジャイロ、レベルセンサ、自動追尾トータルステーションを装備し、これらの情報をパソコンで集中管理することにより、常時 TBM の位置と姿勢を把握することができ、設計ラインと対応させて施工精度の向上を図るようにした。

6. ずり搬出、資材搬入設備

急勾配アプト式電車 (12t) の採用により対応した。アプト式とは電車に取付けられた歯車 (ピニオン) と 2 本のレールの中央に敷設された歯軌条 (ラックレール) を噛合せて確実に昇り降りするシステムで、ここではずり搬出と資材搬入に使用した (図-7 参照)。

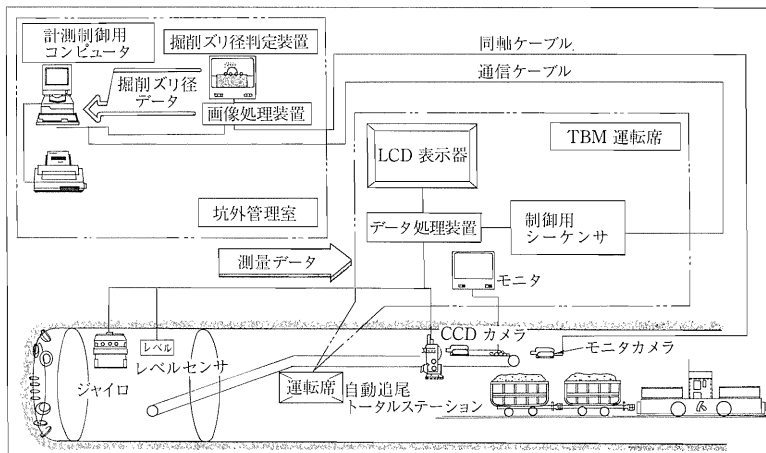


図-6 測量・方向制御システム全体図

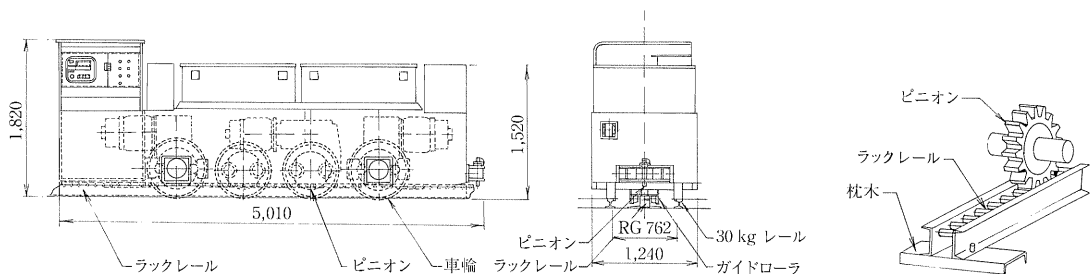
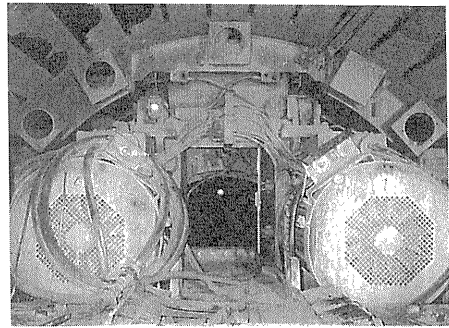


図-7 急勾配用アプト電車 (12t)

### 7. 崩壊性地山対策

土被りの少ないところを多く通過するため、崩壊性地山対策として長尺先受け用削岩機をメインブームに搭載した（写真—3参照）。特にルーフサポートに専用の削孔用ガイドパイプ設け、ルーフサポートジャッキ等と干渉しないよう、かつ地山との削孔角度を保持できるように考案した（写真—4参照）。また、削岩機を使用しない時はグリッパキャリアと連動してブームを後退できるようにし、かつ長いガイドセルはブームから引抜き、第一ベルトコンベヤの架台に仮置きできるようにし、通常の掘進に支障とならないようにした。



写真—4 ガイドパイプ（上：内側，下：外側）



写真—3 油圧削岩機 (HD 150)

ずり搬出をアプト式電車で行ったため急勾配部の133%区間では荷重制限のため、6 m<sup>3</sup>ずり鋼車は2両連結が限界であった。また、速度制限は3 km/hrであったため、ずり搬出に制約を受ける形となった。1掘進長は支保パターンに関係なく約1.0 mであり、これはずり鋼車2両の積載量から制限を受けた結果である。

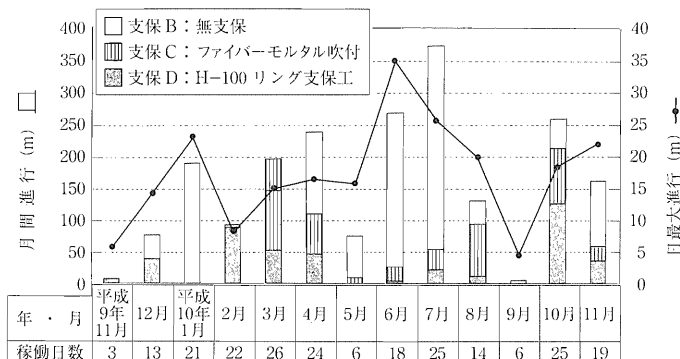
### 8. 施工結果

#### (1) 進 行

TBM 進行グラフを図—8 に示す。全体の平均月進は約215 m、平均日進は約9.8 mである。水平部掘進時の最大月進は374 m、最大日進は34.8 mである。

#### (2) サイクルタイム

無支保区間の急勾配部と水平部のサイクルタイムの対比を図—9 に示す。この区間の急勾配部と水平部の平均進行は急勾配部で10 m/日、水平部で13 m/日であった。TBM の稼働率は急勾配部



図—8 TBM 進行グラフ

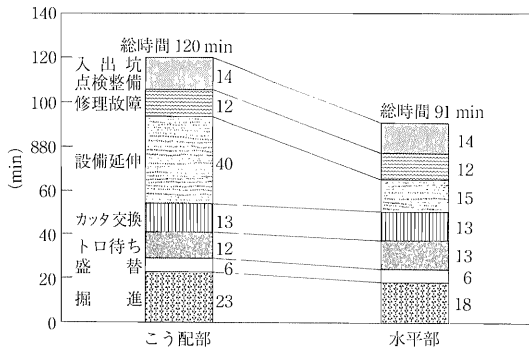


図-9 水平・勾配別サイクルタイム (1サイクル長1.0m)

で30%、水平部で36%である。これは勾配部におけるラックレール敷設の設備延伸時間が長くなっているためであり、特に地山軟弱部では枕木の沈下防止のため、ロックボルト打設、枕木連絡等の補強を行ったためである。

(3) 急勾配掘進対策

バッチカルカーブ掘進時のTBMのメインビームはカーブの接線方向に向かうが、TBM全体が位置する箇所は既に掘削されたトンネルのカーブ区間にあるため、グリッパ位置がトンネルスプリング位置から大きくずれる。例えば上り勾配への移行時はグリッパシューが下にくる。よって、水平方向に張り出したグリッパジャッキに対しグリッパシューからの反力が直角とならず斜め方向となり、グリッパジャッキとクレビスプレートの取付けボルトに無理が生じることになる。このため運転時にはグリッパシューのスプリング位置からのずれ量を20cm以内に押さえて掘進することにした。そのためバッチカル区間では1スト

ロックを50cm以内に押さえて盛替えることとなった。

(4) 掘削精度

図-10に133%勾配部での蛇行量グラフを示す。この区間における最大線形誤差は平面で21mm、縦断で13mmであった。路線全体の最大誤差は平面40mm、縦断13mmとなり許容値内に収めることができた。

(5) 急勾配アプト式電車の運行

急勾配電車の安全装置は加速度検出装置、逸走防止のためのサーボブレーキ、油圧ディスクブレーキ、電磁ブレーキの三重のブレーキ装置を備えている。また、アプト式電車は下部にピニオンがあるため、通常のレールポイントではクロスするレールに乗り上げ通過できない。このためクロス部を軸心とする可動レールを採用することにより、この問題を解決した。ポイントの構造を図-11に設置状況を写真-5に示す。また、ポイントは電車の運転手が降車することなく、電車の走行

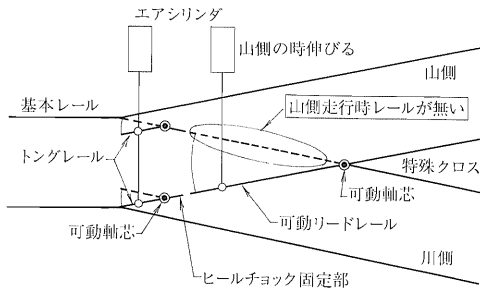


図-11 アプト式電車用ポイント

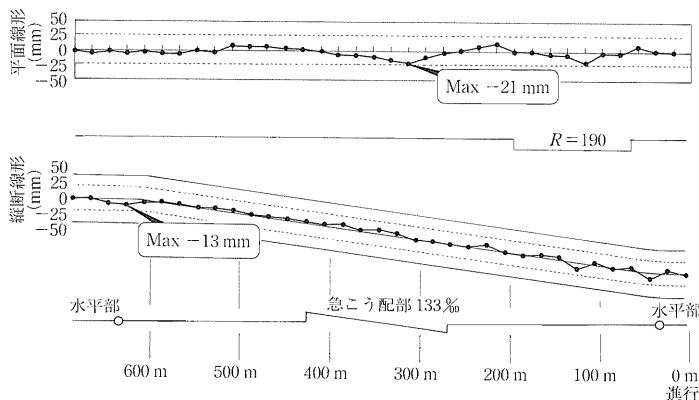


図-10 急勾配部掘削線形

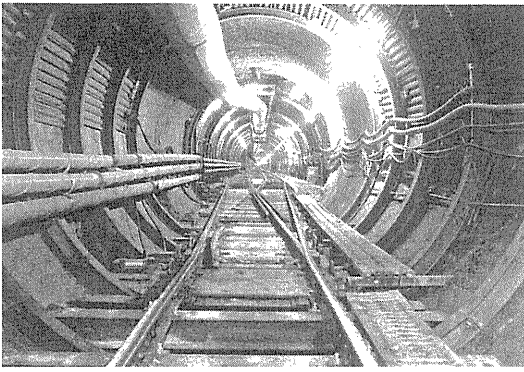


写真-5 アプト式電車対応ポイント設置

方向を検知して自動的に切り替わるようにした。さらにポイントに連動して信号機、回転灯を作動させるとともに、坑内放送により電車の走行区間、進行方向が坑内作業員に分かるように放送した。この設備は狭い坑内での電車の円滑かつ安全な走行に役立つものであった。

## 9. あとがき

今回の工事では次の点が今後の課題としてあげられる。

- ① 今後の縦断線形は縦曲線  $R=120\text{ m}$  を採用した。この曲線をさらに小さくする場合にはトルクジャッキ、リアサポート等のストローク余裕を含んだ TBM の設計が必要である。
- ② アプト式急勾配電車によるずり搬出において、積載量、速度制限が TBM の掘進に影響を与えたことから、アプト式電車の牽引力、速度の向上に対する検討が必要である。また、軟弱地山におけるラックレール敷設の効率的な施工も求められる。

一方、次の点が成果として挙げられる。

従来、急勾配を含むトンネルを発破工法で行った場合は急勾配付近に別途作業横坑を要し、ずり出し用特殊設備を設ける必要がある。また、小断面の NATM 工法では削孔、発破、ずり出し、支保とその都度施工機械を入替える必要があるため掘進速度が低下する。

今回の工事では TBM によりトンネル途中で急勾配に変化する線形を一方向からの掘進で行うことができ、平均月進も 200 m 以上を確保できた。このことは TBM における線形の自由度を増し、かつ経済的に施工できることを実証したものである。

最後に当工事の進め方や実施工に当たりご協力頂いた関係各位に紙面を借りて御礼申し上げる次第である。

J C M A

### 【筆者紹介】

中村 優一 (なかむら ゆういち)  
株式会社奥村組  
関西支社  
機械部  
機械課長



神谷 弘孝 (かみや ひろたか)  
株式会社奥村組  
関西支社  
機械部  
機械係長



吉田 和睦 (よしだ かずちか)  
株式会社奥村組  
九州支店

