

# 武田尾トンネル駅部大断面 NATM の施工

## Excavation of Large Station Cavern by NATM—Takedao Tunnel

伊藤 利三\*  
Toshizo Ito

### 要 約

福知山線、武田尾トンネルにおいて施工した、駅部大断面についての報告である。  
本工事の特徴としては、通常の複線断面の2倍強の130m<sup>2</sup>の断面積を持つ、全幅19mの偏平な大断面トンネル駅の施工を、硬岩部分は NATM で、坑口付近の崖錐部分はパイプルーフ工法と地質の変化に応じて実施したことと、大断面の覆工コンクリート及びこの大断面坑口の直下を、現在線が運行されていること等が挙げられ、これらについて詳細に報告する。  
駅部である以上、普通のトンネルと異なり、多数の人々に見られるので、単に力学的な面だけでなく、美学的要素もとり入れられているのは、後掲の写真のとおりである。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 地形および地質の状況
- § 3. 駅部大断面区間施工概要
- § 4. あとがき

### § 1. はじめに

当工区は起点方を宝塚市武田尾駅、終点方を宝塚市と神戸市の市境である川下川とする延長1275m (第1武田尾トンネル 570m 内駅部大断面 124m、第2武田尾トンネル 705m) のトンネルである (Fig.1)。

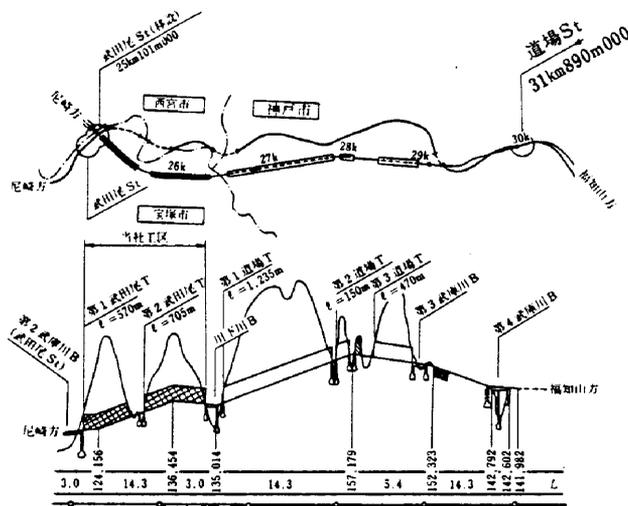


Fig.1 Plan and section of Takedao tunnel (from Takedao to Dojo)

\*関西(支)宝塚(出)所長

施工順序として、神戸市道場方の第2武田尾トンネルの終点方より掘削し、第1、第2武田尾間の明り部分(140m)を経て、第1武田尾トンネルを掘削し武庫川に達する片押しで施工した。

このうち第1武田尾トンネル入口部分と第2名塩トンネル出口との間に武庫川と現在線を跨いで橋梁を架設し全長 200m の武田尾駅が移設される。このうち 124m が全国でも珍しい坑内駅となる。

### § 2. 地形および地質の状況

武田尾トンネルの地質は、大部分が中世代白亜紀に生成された有馬層群の流紋石英安山岩で構成されており、弾性波速度 4.0~4.8km/s、一軸圧縮強度 800kgf/cm<sup>2</sup>~1700kgf/cm<sup>2</sup> (78.4~166.4MN/m<sup>2</sup>) の比較的良好な地質である (Fig.2)。

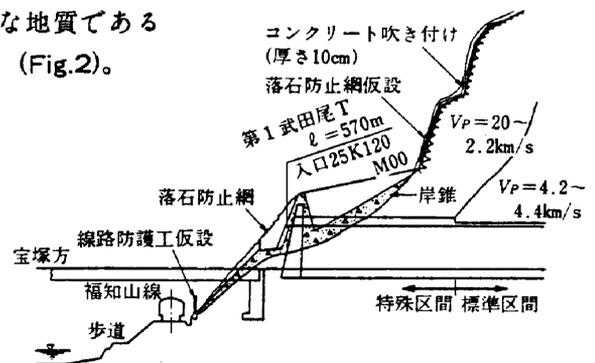


Fig.2 武田尾駅坑口部縦断面図  
Longitudinal section of Takedao st. at Entrance

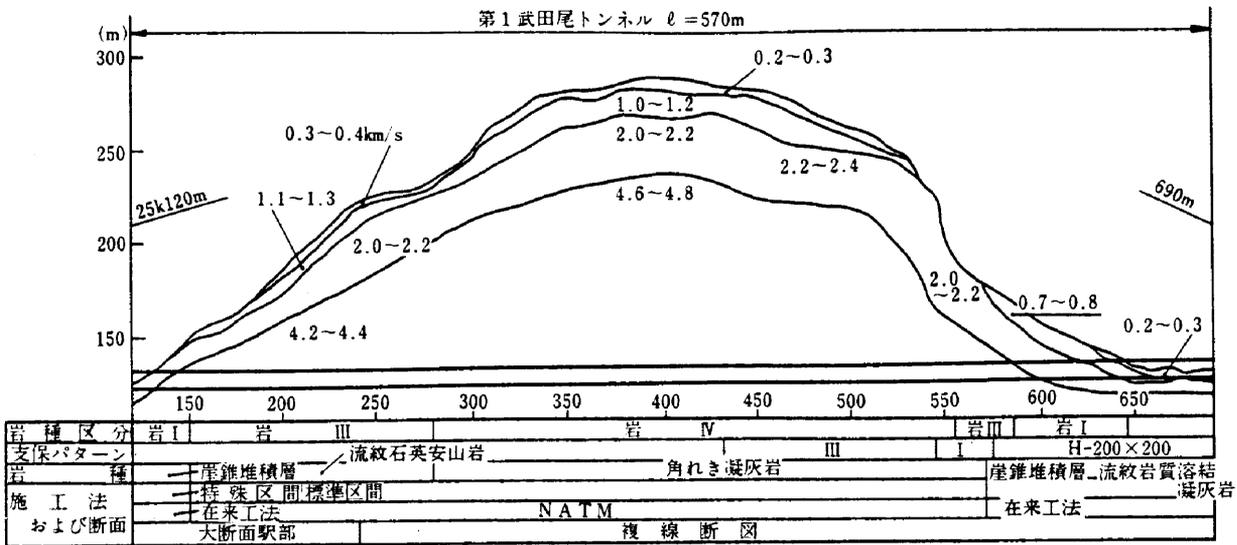


Fig.3 第1武田尾トンネル地質縦断面図  
Longitudinal soil profile of Takedao tunnel I

しかし、第1武田尾トンネル起点方大断面坑口付近は切り立った急峻な地形に浮石が多く点在するくずれやすい崖錐地山で、現在線の落石防護壁との間に一部崖錐が堆積しており、坑口より25m間は弾性波速度2.0~2.2km/sで雨水がストレートに地山を通過する節理が発達した不安定な地山である (Fig.3)。

§ 3. 駅部大断面区間施工概要

この大断面区間の断面積は、一般の複線鉄道トンネルの約60m<sup>2</sup>に対して2倍強の130m<sup>2</sup>もあり、線路の両側に幅5mのホームが設けられた鉄道ではめずらしい全幅19mの偏平断面の山岳トンネル駅である。

この区間は標準区間102mと坑口付近の特殊区間22mに分けて施工した。標準区間は中硬岩地山 (流紋石英安山岩、弾性波速度4.2~4.4km/s) であるためNATMで施工し、特殊区間は坑口付近の崖錐地山であるため補助工法としてパイプルーフを計画し施工した (Fig.4)。

3-1 掘削

Fig.2に示すように、坑口付近は急峻な地形で崖錐地山であり、直下を現在線が走っているため、トンネル掘削による地表の崩壊落石は許されない。また、被りか特殊区間において約0~25m、標準区間においても25~90m程度と最深部でトンネル掘削幅に対して約4.5倍程度となっている。このため地下発電所等のように地下深く施工されるのとは条件的に異なり、土被りの浅い箇所での大断面掘削には周辺地山をいためない細心の注意が必要であった。

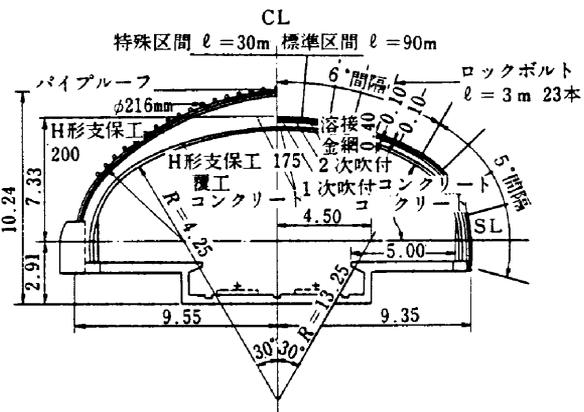


Fig.4 駅部大断面図  
Cross section showing large section of station parts

このため  
(イ)掘削手順の検討  
(ロ)スムーズプラスティングの採用  
(ハ)最少火薬量による掘削  
(ニ) NATMの適用 (標準区間)  
(ホ)パイプルーフの採用 (特殊区間)  
これらの事項を重要ポイントに計画し注意深く施工した。

(1) 標準区間

中硬岩 NATMでの卵形偏平断面の施工は国内では少なく、設計段階ではFEM粘弾性解析を用いて支保パターンの決定を行い施工方法について種々検討した結果、中央導坑先進上部切り上げ工法で施工することになった。

このため、標準区間の掘削は Fig.5に示す順序で行った。

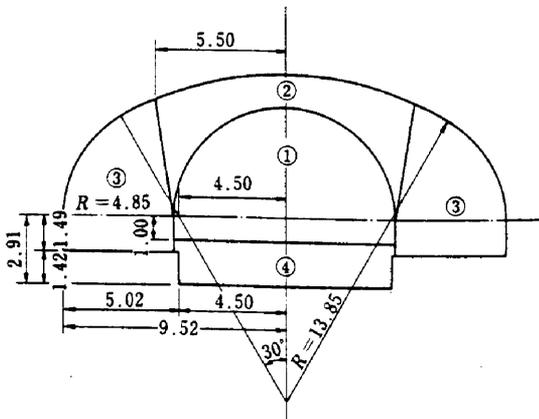


Fig.5 大断面標準区間の掘削順序図  
Excavation consequence at standard large section parts

①部分は、標準断面区間の上半部と同様に1発破掘進長2m、吹付コンクリート厚10cmで施工し、約40m進行した地点で発破振動値が規制値をオーバーしたので、以後削孔長を段階的に2mから0.8mまで短くして掘進した。①部分を先行させることにより、地質（節理亀裂）の確認と計測による地山状況の把握を行い、②③を掘削する際の地山挙動を推測することが可能となった。

②部分は天井部が掘削仕上げ面となるので、地山の損傷を極力防止するため削孔長を1mとし、外周孔の間隔を40cmで使用火薬量を最少限度に抑えて発破を行った結果、払い発破となったこともあり予想以上のスムーズな仕上がり面を得ることができた。途中2箇所天端に緩い傾斜で交叉する節理面があらわれ、肌落ちを防止するため斜めにロックボルトを打込み地山に縫いつけていった。

③部分は削孔長を1mとして、両サイドの切羽を揃えるため片側2発破ずつ交互に掘削し、一部で先打ち斜めロックボルトを採用しながら施工した（Photo 1）。



Photo1 大断面標準区間掘削状況  
View after excavation of standard large section parts

(2) 特殊区間

Fig.2に示すように坑口部は急峻で作業場所もなく、直下を現在線が走っているため坑外からの材料搬入、法面防護などの施工が不可能なため種々検討した結果、標準区間の①部分を完了した時点でFig.6の特殊区間の①部分の頂設導坑へと移行して貫通させた。この頂設導坑の貫通により地質の確認ができ、また、坑口への作業通路として使用できた。

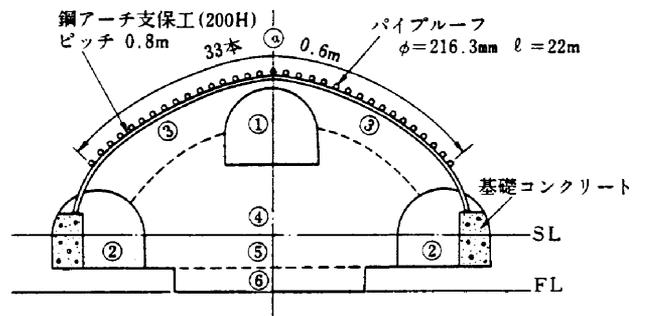


Fig.6 大断面特殊区間の施工順序図  
Construction consequence at specific large section parts

頂設導坑の貫通後、標準区間の②③部分の掘削を行うと共に、坑口と落石防護石積擁壁（大正時代築造）との間の切り取りを行い、パイプルーフ施工のための基地を作った。

このあと坑口上部の断崖への法面吹付コンクリート、落石防護のロックネットを施工し災害防止の措置を施した。

以上の坑外の防護措置が完了したのち、Fig.6の②以後を施工した。

②部分は、側壁用サイロットで支保工（H-125）を90cmピッチで建込み、上半鋼製支保工（H-200、4ピース）を載せるための側壁基礎コンクリートを打設した。

これと並行して、上半を掘削する際の地山防護対策として補助工法のパイプルーフを坑外より施工し、次段階の掘削に対する安全性を高め作業効率を向上させた。

次に③部分を地山をいためないように慎重にリングカットしながら、④部分を③より若干遅れて両側サイロットの天端付近まで掘削し、残した大背部分に上半鋼製支保工（H-200）建込み用トラック台車を載せて、80cmピッチでサイロット基礎コンクリート上に支保工を建込んだ。鋼製支保工と地山およびパイプルーフのブロッキングには土のう袋にコンクリートを詰めたものや、H形鋼等を使用した。また、特に落石等の危険箇所はキーストンプレートによる仮巻コンクリート等の防護措置を施した。

鋼製支保工建込み完了後、④⑤部分の大背を掘削し、⑥部分の下半は駅部大断面区間覆工完了後に施工した。

### 3-2 パイプルーフ

このトンネルの起点側坑口は、土被りが少なく崖錐の堆積もあり、上方の崖にも大きな節理がみられ、トンネル掘削によるゆるみで崩壊する可能性もあり、掘削は慎重に行わなければならなかった。また、頂設導坑掘削による地質調査においても天端附近には節理の発達を確認された (Fig.7)。

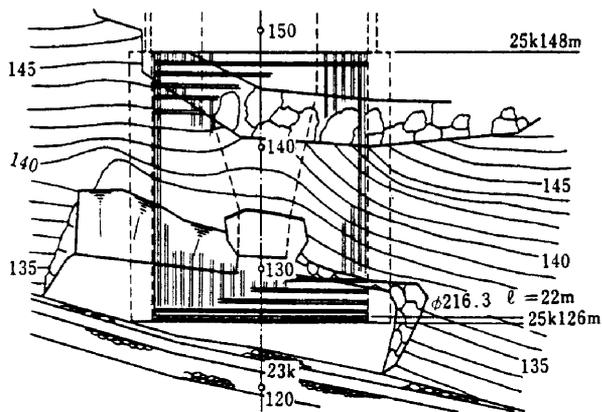


Fig.7 パイプルーフ平面図  
Plan showing pipe-roof arrangement

これらの状況を判断して上半鋼製支保工の検討を行ったが、支保工だけで土荷重を支えるためには H-200 の支保工を 30cm ピッチで建込まなければならず、施工不可能であった。

このため、何らかの補助工法を採用する必要がある、施工効果に確実性があるパイプルーフ工法を採用した。

#### (1) 施工数量

- 総延長 726m
- 施工ピッチ 600mm, 長さ22m×33本
- パイプルーフ材 構造用炭素鋼鋼管  
φ216.6mm, 厚8.2mm, 3m/本

#### (2) 施工

施工対象岩盤は節理の発達した中硬岩のため、削孔はエアハンマー (MS200H 型, MS350 型) 2台を用いて無水削孔とした。

##### イ) 作業足場

作業場所が狭くトラッククレーンによる作業が不可能なため、2.8tの門型クレーンを設置し、足場に切梁用の鋼材 (H-400) を井桁に組み、チャンネルなどを利用して削孔高を調整した。

##### ロ) 機械据付工

機械を施工位置に据付け、方向、高さを調整の後、固

定した。

##### ハ) 先行削孔

口元の崖錐部は崩壊性が高いため保護用として φ267mm の鋼管にメタルクラウンを溶接して、回転と推進により周辺地盤をゆるめないように留意し、地山岩着まで削孔した。

##### ニ) 岩削孔

削孔機に φ216mm のドリルパイプをセットし、これに φ220mm のビットを装着して、回転・推進・衝撃で岩盤を設計長まで削孔した。ドリルパイプは順次接続し、この間ドリルパイプの方向・レベル測定・先端パイプ位置のチェックを行い、ドリルパイプ位置が不適当であれば削孔を中止し、パイプを回収して削孔部分にセメントペーストを充填して、養生期間終了後再削孔した。

削孔速度は平均 0.7m/h であるが、水平削孔はビットの消耗が激しく、削孔速度はかなり変化した。ビット消耗率は鉛直方向掘削において 200m/本といわれていたが、水平削孔については実績がほとんどないため、当初これを参考に計画を立てた。実際には 30m/本程度となり、ビット消耗状況は先端部の摩耗が少なく、周辺部の摩耗が激しい片減りとなった。この原因は、水平削孔の場合、ビットおよび鋼管重量をビット周辺部が支持するために、周辺チップは水平方向打撃によって研磨されてしまうためと考えられる。これに対処するためロッド部に鉄板を溶接して鋼管重量を支えること、周辺チップの数を増やすこと、ビット摩耗状況をよく観察して早めに交換、研磨を行うなどの方策を講じた。このためビットの注文、研磨に相当の時間を費やした。

##### ホ) 鋼管挿入

削孔完了後ビットを引抜き、鋼管パイプを据え付け回転と推進で挿入した。鋼管の溶接は二重溶接とし、JIS 規格による超音波検査を行った。

##### ヘ) 鋼管内外の空隙充填

鋼管を挿入した後、空隙をセメントペースト (C : W = 2 : 1) で充填した。

#### (3) 測量および精度

孔曲りなどの測量は各孔当り 6~7 回行い、とくに据え付け時および初期の削孔時が精度上もっとも重要になるため回数を増やし確認、方向修正を行った。

測量方法は、管先端に発光体を取り付け、トランシット、レベルで測量する方法とビニールパイプを挿入してパイプに水を満たした水もりによる測定方法を用いた。

鉛直精度は当初 1/100 を見込んで設定し、全余裕長 (到達先端におけるの余裕量) を 200mm としたが最初に施工したパイプで 423mm の誤差を生じたため、全余

裕長を300mmに修正して施工し、パイプの勾配調整を行った結果平均130mmの誤差となった。

水平方向の誤差は、当初より十分な精度が見込まれていたが、施工結果も平均53mmと満足できる結果であった。

以上の施工結果から大口径パイプルーフを施工する場合、岩質、削孔長を考慮して、ビット形状の決定、消費率の予測等に注意して施工する必要があると考えられる (Photo 2)。



Photo2 パイプルーフ完了  
View showing completion of pipe-roof method

### 3-3 振動測定

大断面区間坑口部は急峻な地形に加えて直下を現在線が走っており、落石防護として大正時代に築造された石積擁壁がある。この石積擁壁がどのような構造で造られ、岩着であるのかどうかを確認することができないため、発破振動による石積への影響が心配され、また、崖部落石の誘因になることも考えられるので崖部の伐採を行い、しから防護柵を作り地表面の監視が容易にできるようにした。振動測定箇所は3箇所、坑口 25k140m に水平方向2測点と石積擁壁上に1測点設置して測定を行った (Fig.8)。

測定管理としては、当初振動速度の最大値を1kine以下にすることを目標とし、1kineを超えた時は掘削長を2.0~0.8mまで短かくし、なおかつ1kine以上が観測される場合は管理目標を3kineに変更し、発破ごとの地山観測と点検を行い、3kineを超える場合は掘削断面の縮小、心抜き部の装葉量の減少および空孔の削孔等で対処した。

### 3-4 計測

大断面区間に入った初めの段階で主計測点を設け、内空相対変位、地中相対変位、ボルト軸力測定を実施した。

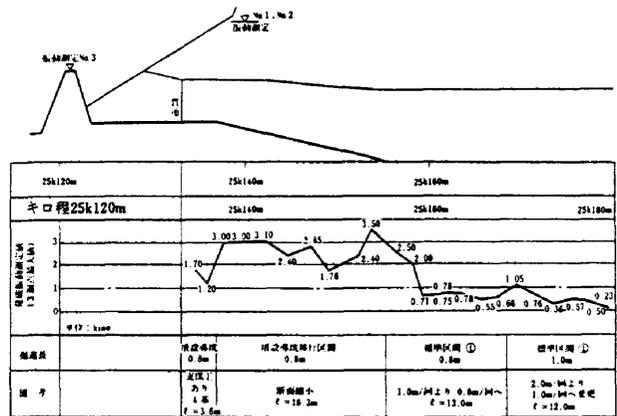


Fig.8 大断面掘削と振動測定  
Result of observing vibration by excavation

また、従来のようにデータの整理、図化を手作業で行うとデータ解析に多くの時間を要するので、マイクロコンピュータシステムを導入して短時間で解析し、地山状況の把握および対応を行った (Fig.9)。

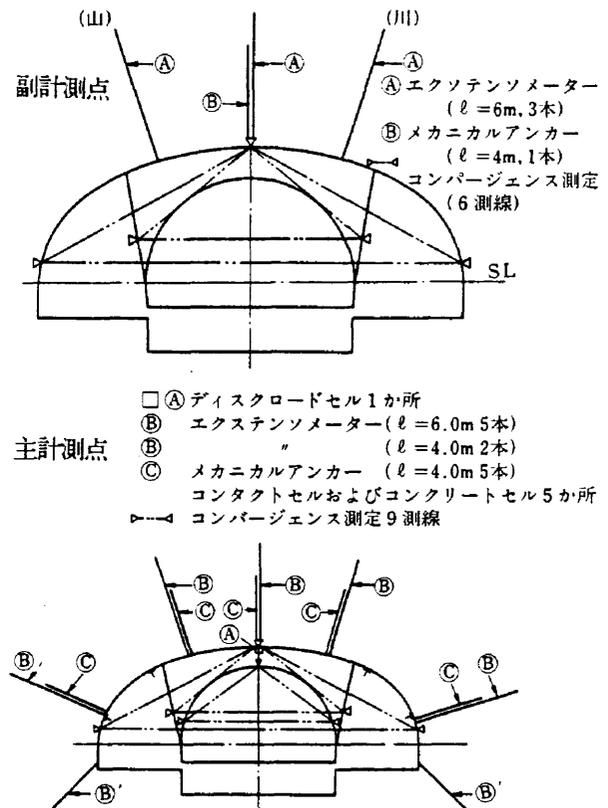


Fig.9 計測器配置図  
Arrangement of measuring instruments

#### (1) 内空相対変位

①②③部分の各々の掘削時に測定用ボルトを両側2点、天端1点設置し、3測線、3段階9測線の測定をコンバー

ジェンスメーターで実施した。

①部分掘削に伴い最大4mm程度の拡大が測定されたが、②③部分への掘削に際しては、特に大きな値は測定されなかった。

(2) 地中相対変位

6mの小型エクソテンソメーターを埋設して、6m点を不動点と考えて変位量を測定した

②部分掘削により、天端中央に圧縮歪、左右に引張歪が測定され、天端が押し上げられる傾向があるが、③部分の掘削により天端中央の圧縮歪が15日目には減少し、沈下の傾向に変化している。測定された地中変位から推定される軸力は2tf程度であり、ゆるみ範囲も3~4mで特に問題はなかった。

3-5 覆工コンクリート

大断面で短区間の覆工であるため従来のセントル方式では特殊な形状のセントルを製作しなければならず、転用性がなく高価なものとなるため、鋼製支保工(H-175, 4ピース)にデッキプレート(V50A, t=1.6mm)を張り付けて型枠とし、そのままコンクリートを打設して鉄骨コンクリートにする方法が採用された (Fig.10)。

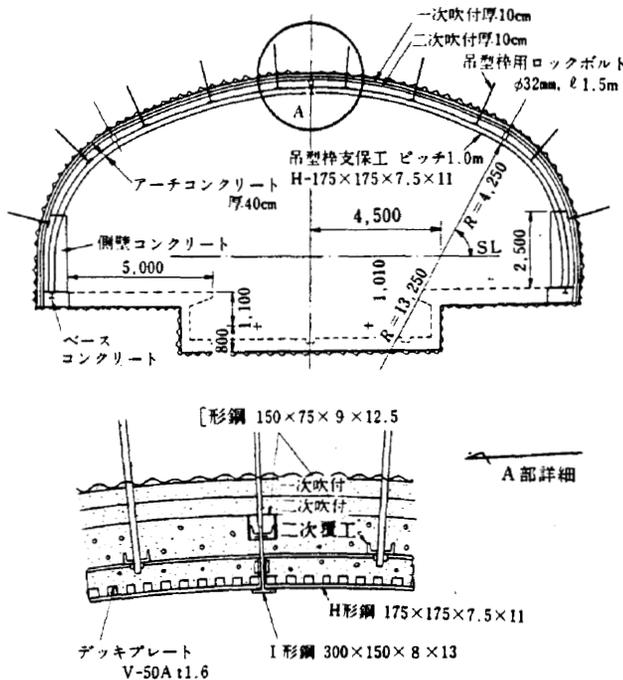


Fig.10 覆工コンクリート図  
Cross section of lining concrete

設計ではアーチ部打設時、左右で打設厚が20cm異なる場合を想定した荷重で打設速度1.5m/h以下として構造計算した結果、鋼製支保工変位5mm、デッキプレート変位3mm程度となり施工可能と判断された。

施工上の問題としては、支保工の建込み精度とコンクリート打設時の荷重をどのようにして支えるかで、まず支保工の建込み精度については天端部にアイビームを進行方向に通し、足部基礎部分にH形鋼を埋設して、高さ・方向を揃えることとした。次にコンクリート荷重を支える方法として、支保工建込み用台車を利用し、支保工の天端部と両肩部にジャーナルジャッキを取り付け、節理等による余掘が多い箇所および頂設導坑部等の打設数量が多い所では、天端部と両肩部との間にパイプサポートをセットして荷重を支える方法を取り問題を解決した。

施工順序としては、

- ①支保工の足部を固定するため両側にH形鋼を通して基礎コンクリートを打設した。
- ②天端部に支保工支持用のアイビームを通しロックボルト等により固定した。
- ③支保工を1mピッチで建込み、チャンネルを進行方向に通してロックボルトで固定して支保工の剛性を上げた。



Photo3 大断面型枠支保工  
Support for large concrete form

- ④側壁部コンクリートを2.5mの高さまで打設した。
- ⑤デッキプレート (t=885mm) を下部より通りを見ながら支保工に溶接して張っていった。
- ⑥デッキプレートの凸部にコンクリート流出防止用のこめ物としてサンペルカ(ポリウレタン、発泡倍率40倍)を詰めた。
- ⑦荷重支承のジャーナルジャッキおよびパイプサポートをセットした。
- ⑧コンクリートを支保工の両肩部分までは中間の検測用窓(デッキプレート1枚分)から流し込み、天端部は2箇所吹き上げ打設口より打設した。

上記の施工順序によりコンクリートの1打設施工スパンを10mとしたが、時に特殊区間において、頂設導坑部等の空隙は打設数量も設計の2倍以上となったため2回に分けて打設した (Photo 4)。



Photo4 覆工コンクリート打設完了  
Completion of placing lining concrete

### 3-6 石積擁壁の取り壊し

現在線の真上にあるこの石積擁壁の取り壊しに際しては現在線の安全運行を最重点に考えて、全て列車運行のない夜間作業とし、取り壊し前に設置した仮設の落石防護ネットにより落石を防護する。作業は全て人力によるブレイカー研りとした (Photo 5)。

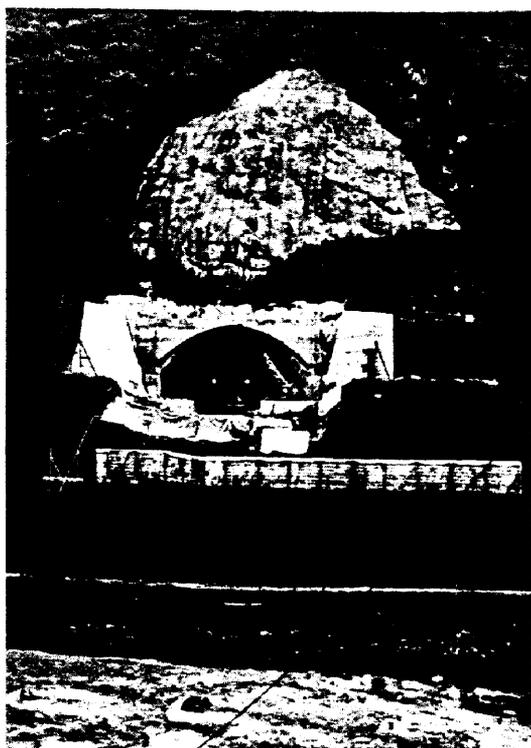


Photo5 大断面坑口全景  
Over all view of entrance

## §4. あとがき

当工事も坑門工、ホーム床版を終りあとは路盤工のみを残すだけとなっているが、掘削、覆工の施工結果はほぼ満足のいくものであり、初体験の施工も数多くこれを基に今後の施工技術向上の一助になれば幸いである。

最後に本工事の施工に当り、ご指導、ご協力をいただいた関係各位に深く感謝の意を表する。