

# 第二東名高速道路 桃園トンネル工事 — 洪積層における大断面トンネル掘削 —

Construction of Momozono Tunnel on the Second Tomei Expressway: Excavation of a large-section tunnel in a deluvial deposit

安永 礼三<sup>\*1</sup> 山本 茂夫<sup>\*1</sup> 森脇 丈滋<sup>\*2</sup>  
Reizou Yasunaga Shigeo Yamamoto Takeshi Moriwaki

## 【要旨】

第二東名に建設されるトンネルは、掘削幅が約19m、掘削断面積は190m<sup>2</sup>を超え、道路トンネルとしては過去に例のない扁平大断面で計画されている。桃園トンネルでは、上半盤から上部にN値6程度のローム質土層と、土砂状を呈する強風化凝灰角礫岩を主体とした洪積層地山が出現することに加えて、最大土被り20m程度の低土被り区間が連続する。これらの難条件下での扁平大断面（掘削断面積194m<sup>2</sup>）トンネル施工となることから、切羽と天端付近の安定確保を目的として、上半中壁工法による掘削が採用された。

現在、このような条件下での中壁分割工法の設計・計画においては、その手法も確立されていないことが多く、施工性にも問題を有するため、大規模な補助工法の採用などの、さまざまな施工面での対応がとられている。

本報告では、難条件下における中壁分割工法による掘削の設計・施工方法の検討と、施工結果をとりまとめたものである。

【キーワード】 第二東名高速道路 中壁工法 大断面 都市NATM 未固結地山 補助工法

## 1. はじめに

本工事は、第二東名高速道路の一部として、富士の裾野、愛鷹山の東麓、静岡県裾野市に拡大三車線断面のトンネル上下線（トンネル延長上り295m+下り302m）を上半先進中壁工法（機械掘削）にて新設する工事である。

第二東名高速道路は、設計速度140km/hでの走行が可能な高規格道路として計画されており、トンネル部においても、路肩幅員の縮小のないフルショルダーとなる車線構成で計画されているため、道路トンネルとしては国内でも例のない、扁平超大断面トンネルとなる。

そのため、高強度・高規格材料を使用した最新の支保パターンが設計に採用されている。

また、桃園トンネルは、第二東名で建設されるトンネルの中でも、地形・地質条件が最も厳しい区間に施工されることから、施工前段階からの詳細な計画および設計、試験施工による検証を行いながら、隣接する他工区に先駆けた施工を行っており、良好な結果を得た。

本稿は、その施工結果ならびに、中壁分割工法による掘削の計画・施工方法とその効果について報告するものである。

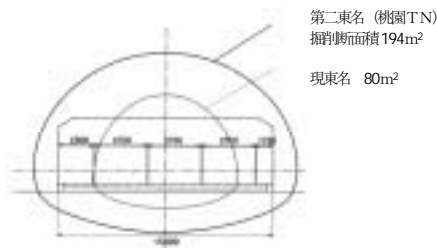


図-1 トンネル断面比較

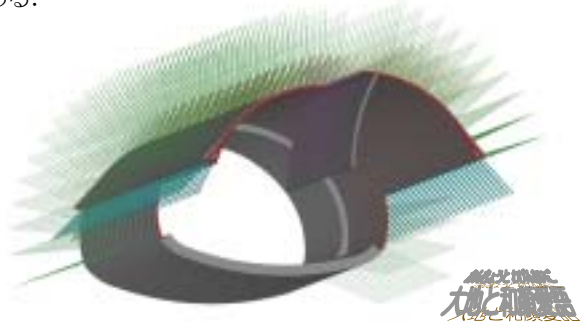


図-2 桃園トンネルイメージ図

## 2. 工事概要

### 2.1 工事内容

工事名：第二東名高速道路

桃園トンネル工事

工事場所：静岡県 裾野市 桃園～大畑

発注者：日本道路公団 静岡建設局

工期：H13年1月～H16年9月

工事内容：

総延長 L=450m（下り線）

トンネル延長 下り線 L=302m

上り線 L=295m

内空断面積 A=133m<sup>2</sup>

掘削断面積 A=191～194m<sup>2</sup>

トンネル施工方法

掘削方式：機械掘削

掘削工法：NATM 上半中壁分割工法

ずり運搬方式：タイヤ方式

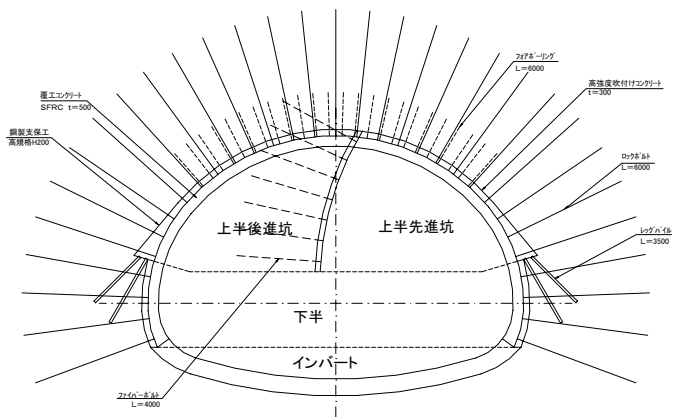


図-3 支保パターン図(DIIIa-W-F-K)

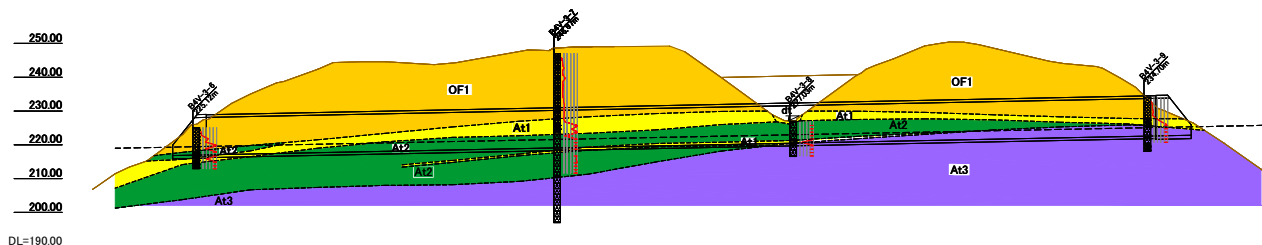
開析された急斜面・急崖，現河床面などで構成される。

トンネル周辺の環境は，建設地直上が不二聖心女子学院の所有地であり，建設に際して周辺環境への配慮が求められた。

愛鷹山山麓には主に火山噴出物が堆積している。火山噴出物の構成は上位から火山灰（ローム，粘性土），愛鷹山溶岩（軟岩～中硬岩），愛鷹火山噴出物の凝灰角礫岩・火山角礫岩・火山礫凝灰岩等である。また，急崖や急傾斜直下・谷筋等には火山噴出物が浸食作用により二次的に堆積した崖錐堆積物（粘性～礫質土），現河床堆積物（砂質～礫質土）が分布する。トンネル建設地では図-4および表-1に示すとおりである。

### 2.2 地形地質概要

桃園トンネル計画地は愛鷹火山山麓東縁部に位置し，明瞭なV字谷の沢が発達する。トンネル計画地付近の山麓地形は主に切土工からなる造成地（山麓端部の緩斜面），



地山等級区分	DIIIa-w-F-K		D		DIII(A)-w-F-K		DIII(A)-w-F-K		DIIIa-w-F-K	
設計パターン	掘り巻	掘り巻	掘り巻	掘り巻	掘り巻	掘り巻	掘り巻	掘り巻	掘り巻	掘り巻
延長(m)	10	5	15	146	17	79.5	14	5	10.5	
地質名	第四紀更新世 愛鷹火山砕屑物 凝灰角礫岩(強～弱風化)									

図-4 地質縦断面図

表-1 地質区分

地層名	記号	掘削実績による地質状況	
古富士火山 噴出物	Of1	トンネル天端～上半部でみられた。 上部は構造がほとんどみられない程度に風化（土壌化）が進んだ脆弱な粘性土である。 下部は，風化したφ5cm以下の岩塊（安山岩や玄武岩）や軽石およびスコリアを含む比較的固結したローム層である。 調査ボーリングでのN値は10以下を示している。	
愛鷹火山 砕屑物	凝灰角礫岩	At1	トンネル上半～下半にみられた。土砂状の強風化凝灰角礫岩。 調査ボーリングでのN値は15～35を示している。
		At2	トンネル上半脚部～インバート面にみられた。弱風化凝灰角礫岩。暗灰色～青灰色で，最大径1m程度の岩塊を含んでいる。 調査ボーリングでのN値は50以上を示している。

## 2.3 桃園トンネル工事の特徴および問題点

本工事の特徴および問題点を以下に示す。

- 扁平超大断面のトンネルを低土被り、低地山強度の条件下で掘削する。
- 全線にわたり上半中壁分割工法で天端安定対策工、脚部補強工などの補助工法を行いながら掘削する。
- 中間沢部および東側坑口部においてトンネル断面の一部が地表面に露出するため、掘削に先行して人工地山の造成を補強盛土で行う。
- ゴルフ場に隣接し、貴重植物が自生している不二聖心女学院の敷地内での工事となる。

## 3. 中壁分割掘削方法の計画

### 3.1 検討項目と検討方法

大断面トンネル掘削において、上半中壁分割による掘削は切羽自立性に優れた工法であるとともに、天端沈下等の抑制効果があることも過去の実績から明らかになっているが、本トンネルへの適用に当たり、利点と問題点を整理すると、以下のとおりとなる。

#### 【利点】

- ① 加背を小さくすることで、切羽の安定性が向上する。
- ② 後進坑側は、先進坑中壁からのロックボルトにより土砂地山でも切羽安定性が向上する。
- ③ 天端沈下、地表面沈下の抑制効果がある。
- ④ 地質確認、水抜き効果が期待できる。

#### 【問題点】

- ① 中壁および後進坑の支保工建込みの作業性が悪い。
- ② 上半脚部および後進坑天端付近のロックボルトの

打設角度が壁面に対し直角とならない。

- ③ 中壁存置区間長が長いと施工機械の入れ替え、ウイングリブ部掘削等の施工性が悪化する。また、路盤の悪化対策や換気設備の追加を行う必要がある。
- ④ 中壁撤去時の地山安定性評価と撤去時期の判断基準が難しい。

そこで、施工に先立ち、上記問題点を多方面から検討したが、ここでは主に施工実績とFEM解析により検討した以下の項目について述べる。

- ◆ 先進坑切羽と後進坑切羽の離隔について
- ◆ 中壁撤去時期の判断基準の設定について

### 3.2 先進坑と後進坑の離隔について

#### (1) 検討上の留意点

先進坑・後進坑の切羽距離を検討にあたり、①後進坑掘削による先進坑への影響、②周辺地山への影響、③施工性と安全性、について留意し、以下に述べる。

#### \*先進切羽と後進切羽の距離が短い場合

- ・ 掘削後の安定を待つと中壁撤去時期が遅れ、中壁存置区間長は、後進切羽の離隔が長い場合と同程度になり、施工性が変わらない場合もある。
- ・ 切羽距離が近接すると、相互の切羽安定性を損ない、先進坑掘削後の発生応力と後進坑掘削で発生する応力が先行緩みの段階から干渉し、トンネル全体の安定性が懸念される。

#### \*先進切羽と後進切羽の距離が長い場合

- ・ 先進坑掘削後の安定が確保でき、後進坑掘削による相互干渉による影響も少ないと考えられる。

表一 2 中壁分割施工による主な施工実績

トンネル名	工法	掘削断面積 (m <sup>2</sup> )	地形・地質	工法対象区間 (m)	先・後進坑切羽の離隔 (m)	中壁撤去判断基準と実績
望洋台T	6分割中壁	129	未固結土砂、地滑り地形	401	上半切羽35m	加背割り閉合後長い区間存置 1回の中壁撤去10m/日
天野山T	4分割中壁 (横割)	145	軟岩、低土被り	214(計画)	20	
武岡T	6分割中壁	幅11.5m	シラス、低土被り		25	20m
宮が瀬ダム青山T	上半中壁	幅15.2m	軟岩、偏土圧	坑口部60	10	0m(後進坑切羽にて中壁撤去、天端沈下10m後方で収束)
月寒T	6分割中壁	90	砂礫、シルト、低土被り	638	30	・全断面閉合後5m以上存置 ・全断面閉合後3日以上
鳥手山T (東名高速)	4分割中壁、上半中壁	133	泥岩・砂岩の互層、風化作用	422	4分割中壁:25m 上半中壁:15m	4分割中壁:16m以上 上半中壁:1m
久保ヶ谷T	4分割中壁 (横割)	150	ローム、粘土質細砂	38		軸力減少後撤去
第二山郷発電所水圧T	上半中壁	160	凝灰岩(D~CL級)、膨張性	30	10	中壁区間上半全区間完了後撤去
松井T	上半中壁	76	礫混り土砂	154	6	9m
静岡第二T (第二東名)	上半中壁	190	砂岩・泥岩の互層	160	20	D I :20m C II :後進坑切羽
沼津T (第二東名)	4分割中壁、上半中壁	190	軟岩(凝灰岩)、ローム	4分割中壁:60 上半中壁:537	4分割中壁:40m 上半中壁:(30m)	30m以上、または天端沈下2mm/週以下

- ・ 施工機械の入れ替えでロスが生じ、工程が延びる。
- ・ 電気、換気、配管等の設備が2系統必要となる。

(2) 施工実績調査による切羽離隔の実態

表-2に示す中壁分割工法によるトンネル施工実績では、先進坑と後進坑の切羽離隔は、下半まで中壁で分割した場合も含め、6~40mとして施工されている。(第二東名静岡第二トンネルでは20m程度、沼津トンネルでは30m程度を目安としている)

同程度断面の掘削となる第二東名での実績に着目した場合、先進坑と後進坑の切羽間離隔は20m程度を目安として計画することが妥当であると考えられた。

(3) FEM 解析による検証

上半中壁工法によるトンネル掘削では、先進坑と後進坑の影響および支保・中壁の3次元的效果、各切羽の応力解放率の設定など、2次元解析では的確に表現できない点が多いため、逐次掘削モデルとした3次元FEM解析による検討を行うことで、適正な切羽間離隔を検証することとした。解析ステップは施工順序を反映させ、1m毎の先進・後進の掘削、支保設置(切羽近傍での吹付けコンクリートは初期強度相当)とした。

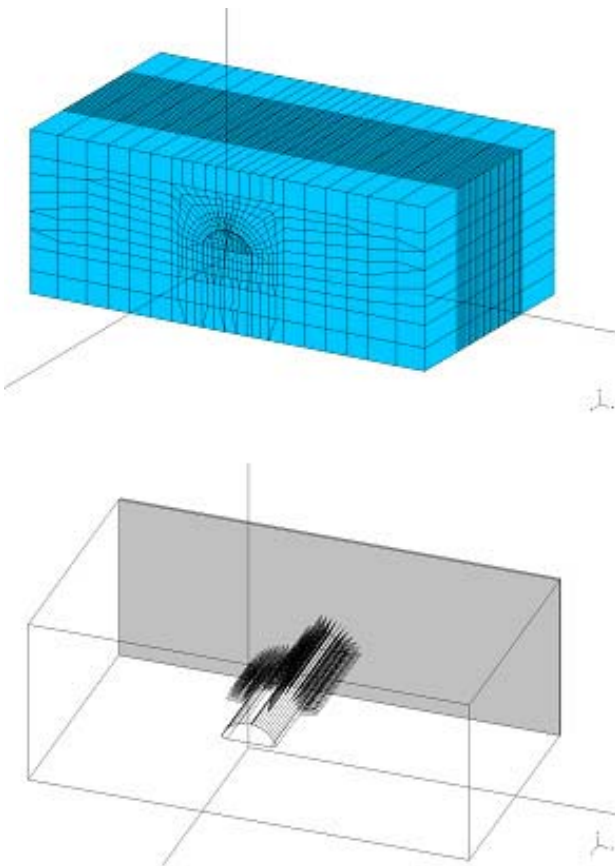


図-5 解析モデル図

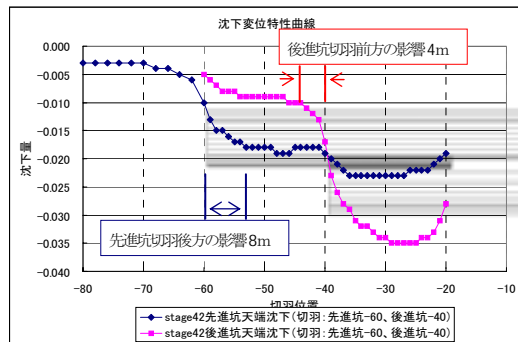
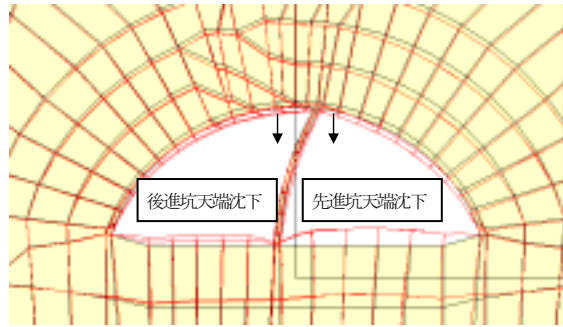


図-6 解析結果天端沈下グラフ

(先進坑・後進坑切羽離隔20m, 中壁存置20m)

解析結果から、図-6に示すように先進坑変位が後進坑切羽到達前に収束する切羽からの離れと、後進坑の先行変位が発生する切羽からの離れを考慮すると、切羽間離隔を12m以上確保することが、トンネル施工の安定性において重要であることが確認できた。

これは、先進坑の変位が約8m(分割したトンネルの約1Dとなる)で収束傾向を示すのに対し、後進坑の先行変位(4m)が比較的小さいことがわかる。また、中壁撤去前の安全率図からも後進坑切羽は比較的安定しており、中壁分割施工の効果により、先進坑と後進坑の干渉による安全率が低下する範囲は小さいことが解った。

以上より、先進坑と後進坑の切羽の離隔は、トンネル手前側でのトンネルの安定状況と計測結果を分析することを前提として、施工実績より20m程度をまずは確保し、実施工上では最低でも切羽間離隔を12m以上確保することとして計画した。

3.3 中壁撤去時期の判断基準について

(1) 上半中壁の役割について

一般に中壁分割工法は、上半のみに中壁を設ける上半中壁分割工法と下半およびインバートまで分割する中壁分割工法がある。

上半中壁分割工法と中壁分割工法では、地表面沈下や

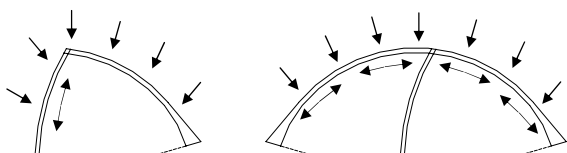
天端沈下の抑制では中壁分割工法が優れているとされている。これは、中壁撤去前にトンネル断面を支保で閉合できることから変位制御効果が現れ、実績でも中壁撤去時に大きな変位が生じないことが確認されている。しかし、上半中壁工法では、中壁撤去時に変位が発生したとの報告もあり、中壁の撤去には十分な配慮が要求される。

しかし、本トンネルでは、下半には比較的健全な凝灰角礫岩層が分布しており、地質調査結果や周辺の岩露頭の観察などから、この層の支持力を期待して、上半中壁分割工法での施工が可能であると判断した。

本トンネルにおいて中壁の役割として主に期待するのは、

- ① 加背割りを小さくすることによる鏡面安定効果と、先進坑側壁の地山を後進坑掘削まで支保する。
  - ② 後進坑の支保耐力が十分に発現し、上半アーチ全体のシェル構造となるまで、上半アーチを支保する。
- の2点である。

また、中壁形状はR=14m程度の曲線を付けているが、施工性の問題に加え、アーチ効果や支保部材の発生応力がより優位となることを目的としており、前述の役割②においても外周支保工への応力伝達が、直壁形状よりもスムーズになると考えられる。



図一七 支保応力再配分模式図

(2) 実績による中壁撤去の判断基準の設定

本トンネルでは、全線で上半中壁分割工法が採用されることから、施工サイクルでは切羽を進めながら中壁を撤去することとなる。

過去の施工実績では、中壁撤去時期は以下の3とおり

を判断基準としている事例がほとんどである。

① 試験施工により設定する場合

坑口（または中壁区間の中壁1基目）から20基程度の中壁を残し、撤去時の計測により荷重の伝達状況や変位を確認し、撤去可能な時期を設定する。

② 計測データから適正な撤去時期を判断する場合

中壁支保の軸力が減少した後、撤去する。  
天端沈下、内空変位の収束から撤去する。

③ 施工性・安全性を考慮して設定する場合

このうち、②においては、下半まで分割する中壁分割工法では下半やインバートの構築により、中壁の軸力が減少するが、本トンネルの様に上半中壁分割とした場合は、外周の支保剛性が十分発現した後、中壁撤去に伴い上半アーチに随時荷重が伝達して、アーチを完成させることになると考えられる。

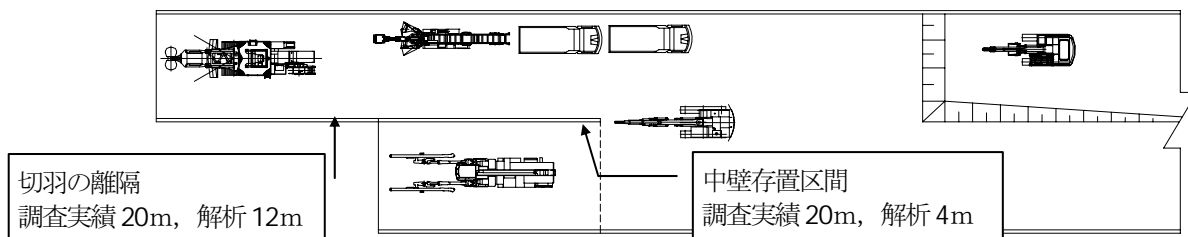
これらの判断基準に基づき実施されている中壁撤去時期は、後進坑切羽で「掘削と同時」～「切羽後方6m」で撤去するケースと、「20m以上の距離を残して」撤去するケースに大別される。これは、地形・地質条件により撤去時期の判断基準が左右されており、本トンネルの地質では「20m以上の距離を残す」ケースに該当する。

(3) 解析結果から考えられる中壁撤去時期の判断基準

三次元FEM解析では、撤去時期を判断するために、吹付けコンクリートが18N/mm<sup>2</sup>程度に強度発現した段階で撤去するものと仮定し、中壁を後進坑切羽後方20mの位置から2m毎に随時撤去して、その影響を比較した。

解析結果から先進坑切羽直前まで撤去した場合、後進坑の切羽に大きな影響がでるが、4mを残した状態ではほとんど影響がないと判断された。

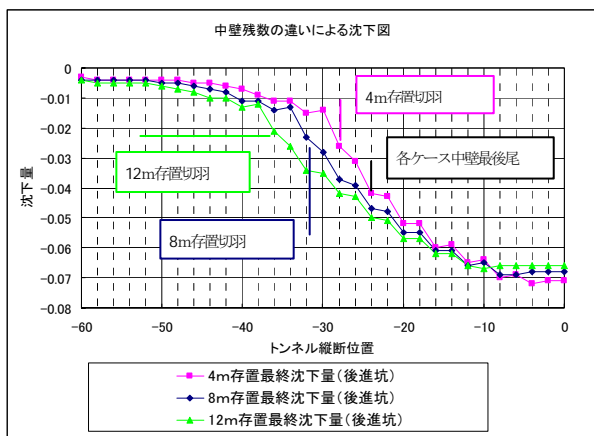
また、中壁存置区間を12m、8m、4mとしたモデルでも逐次掘削解析したが、上記3ケースで比較すると、各ケースにおいて、先行地山への影響や、後進坑切羽、最



図一八 施工計画平面図

終沈下量（図－8）ともに大きな違いは見られず、中壁存置距離を12mから4mにした場合、5%程度の沈下増加と、僅かな範囲で地山安全率が0.2程度低下するに留まった。

以上より、中壁撤去時期は、当概地質条件では、実績からでは20m程度となるが、解析結果より切羽から4m以上離すことにより、大きな影響はでないと考えられることから、上半アーチの吹付けコンクリートとロックボルトの支保効果が発現する時期と位置を把握し、試験施工で計測結果を分析して撤去時期を設定することとした。



図－9 解析結果中壁残数の違いによる天端沈下

#### 4. 中壁分割方法による掘削状況

##### (1) 中壁撤去の試験施工

実施工では、中壁区間を長く存置した場合、後進坑の施工性の他にも中壁の吹付けコンクリートやファイバーボルトプレートの剥離・落下の危険性や、路盤の泥濘化、重機との接触、下半施工が遅れるためにベンチ長が長くなるなど、多数の問題点があり、これらの解決策として中壁存置区間の短縮が望まれた。

中壁撤去の試験施工は、坑口から30m後進坑の掘削が完了した時点で、1基毎に中壁を撤去して、4mピッチで設置した坑内計測を行った。その後、中壁存置区間を10mとして、トンネル掘削を再開し、切羽進行による影響も確認することとした。

中壁撤去時の判断基準（管理基準値）の設定は、坑内A計測の初期変位速度（撤去直後の増分）と坑内変位の管理基準値内（レベルI）とした。

その結果、中壁撤去時の初期変位は、僅かな値となり、部分的に、撤去直後に隆起する現象が見られた。（後進坑

アーチ支保に応力がスムーズに伝達され、中壁の自重が除荷されたことで浮き上がったものと思われる）

また、切羽進行に伴う試験施工結果においても、中壁存置20～30m区間と10mとした箇所の後進坑到達前、到達直後、通過後の経時変化の比較で、有意な差は現れない結果となった。

そこで、試験施工結果に基づき、坑口部を除いては、事前解析結果より中壁存置区間を4.0mとする施工が可能であると判断した。

##### (2) 中壁存置4.0mとした施工結果

中壁の存置区間を4.0mとしたが、坑内変位は管理基準値内であり、撤去後に急激な変位速度も示さず、支保変状も見られないことから、中壁工法の問題点を大きく改善できた。



写真－1 中壁撤去状況（左専用エリクター、右ブローカー）

##### (3) 先進坑・後進坑切羽の離隔

当初、離隔20mとして掘削を行っていたが、後進坑側掘削時に、存置した中壁側のロックボルト頭部や、吹付けコンクリートが剥離するため、結果的に安全な離隔（26m）以上を確保して先進坑と後進坑の併進施工を行っている。



写真－2 上半切羽（斜路ロードマット使用）

## 5. その他の施工での取り組み

### (1) 補強盛土工法

上り線終点側坑口と下り線中間沢部において、掘削ズリを使用して約 20,000m<sup>3</sup>の改良盛土を実施した。改良盛土は低粉じん・低騒音を目的として自走式改良機(リテラ)を採用した。また、不二聖心女子学院で自然環境調査より、さまざまな生物や貴重植物が生息していることが判明し、ビオトープ植生吹付けや貴重植物の移植を改良盛土完了後実施した。

### (2) スラリーショットシステムの採用

第二東名高速道路では高強度吹付けコンクリート ( $\sigma_{28}=36\text{N/mm}^2$ ) が設計されているが、通常のトンネルと比較して、吹付け厚・面積ともに多く、また単位セメント量および急結剤添加量も多いことから、ガイドラインに示されている粉塵濃度の目標レベル (3mg/m<sup>3</sup>) を超える可能性が考えられた。ここで安全な作業環境を確保するための対策を事前に検討し、粉じん・リバウンド量低減を目的としたスラリーショットシステムを採用した。その結果、粉塵の発生量そのものを制御することで、作業環境の改善と集塵機の省略化を実施した。



写真-3 スラリーショット吹付けロボット

### (3) 補助工法

- ① 天端安定対策として、両坑口部において AGF による先受けと AGF 区間を除き、全線に L=6.0mの充填定



写真4 上り線西側坑口

着式フォアポーリングを行った。起点側坑口部では、1シフトの延長が 20mとなる AGF を採用した。

- ② 脚部沈下対策として、全線ウイングリブ付鋼製支保工とレッグパイル (AGP) を採用している。AGP はトンネル側方と前方方向にアーチ 4 本/基つつ打設した。
- ③ 路盤保持のため NJD 工法(泡穿孔)を採用した。ロックボルトの他、フォアパイ、AGP、L=20mの AGF にも採用した。

## 6. おわりに

桃園トンネルは、工事着手後に埋蔵文化財の全面調査となった土捨て場、工所用道路、仮設ヤード予定地等から縄文中期 (およそ 3000~30000 年前) の貴重な遺跡が発見され、トンネル着工が予定より大幅に遅れた。

平成 14 年 7 月より上下線の坑口付けを行い、施工を開始したが、詳細な計画・試験施工および計測管理によりトンネルの安定性や周辺環境へ重大な影響を与えることなく無事掘削を終了し、平成 16 年 9 月に竣功することができた。

また、本トンネル施工以降に着手した第二東名高速の周辺トンネル工事では、本工事での施工実績をモデルとした設計から計画・施工が行われており、確実にフィードバックされていることが伺える。

最後に、本工事の計画から施工に至るまで、多大なご支援をいただいた本社土木本部、技術研究所の関係各位に対して紙面を借りて、厚くお礼を申しあげる次第である。



写真5 下り線西側坑口