

都市部における超近接無導坑メガネトンネルの建設と新技術の導入 —名塩道路 八幡トンネル工事における検証結果—

Construction and Application of New Technologies for Twin-bore Tunnel in Urban Area

山田 浩幸*1 大槻 文彦*2 木村 圭吾*2
Hiroyuki Yamada Fumihiko Otsuki Keigo Kimura

要旨

名塩八幡トンネルは、交通渋滞の解消および交通の安全確保・周辺環境の改善などを目的として計画された一般国道176号名塩道路事業（全延長L=10.6km）のうち、先行して整備を進めた第一工区L=1.4km区間に位置する延長L=242m、上下線2本（4車線）の山岳トンネルである。

本トンネルは、都市部での施工のため、制約された用地の中で上下線の離隔が約1mの超近接メガネトンネルであり、無導坑方式により掘削を行った。また、トンネル全区間にわたり小土被り（最大土被りが22m）であり、起点側坑口は住宅密集地域で高速道路に近接し、中間部直上には神社が位置し、終点側では集合住宅（マンション）に約20mで近接しているなど、重要施設に近接した施工であったため、周辺環境の保全と確実な安全管理を実施する必要があった。

本報告では、都市部における超近接メガネトンネルという特殊断面のトンネルの施工と、より確実な安全管理や品質確保の目的で実施した新技術や技術開発に関する事例の紹介とその効果に関する検証結果について報告する。

キーワード：都市トンネル 山岳トンネル 近接施工 計測管理 情報化施工 計測結果見える化

1. はじめに

西宮市から宝塚市に至る国道176号は、歩道が未整備で異常気象時通行規制区間を有しながら、発展の著しい阪神北部地域と阪神都市圏を結ぶ役割を担っている。

名塩八幡トンネルは、名塩道路全延長L=10.6kmのうち、住宅密集地域を先行して整備する第一工区L=1.4km区間に位置する延長L=242mの山岳トンネルであり、用地の制約条件から超近接無導坑メガネトンネルとして建設された。

本報告では、名塩道路八幡トンネル工事において実施した施工上の課題を解決するために導入した新技術や技術開発の概要とその効果の検証結果について報告する。

2. 工事概要

2.1 工事概要

都市部で計画された名塩道路八幡トンネル工事は、トンネル北側は、起点側で住居密集地域、終点側で集合住宅（マンション）に近接し、トンネル南側には中国自動車道が並走しており、トンネル上部には西宮名塩八幡神社が位置しているという重要施設に挟まれた地理的制約のため、上下線の最小離隔が約1m（最小部分82cm）と近接した「超近接メガネトンネル」の構造で建設された（図1、写真1）。

トンネルの最大土被りは22mであり、全線にわたり土被

りが2D（Dは下り線のトンネル幅：約14m）以下と小さい。

また、トンネルの施工では、起点側では昼夜作業のために防音ハウスを設置し、上部に近接する重要構造物への影響（地表面沈下）を抑制する目的で早期閉合や補助工法の採用を行った。なお、上下線は切羽離れ100mで併進した。

表1に工事概要を示す。

表1 工事概要

工事名称	名塩道路 八幡トンネル工事	
工事場所	兵庫県西宮市塩瀬町名塩南之町地区～東之町地区	
工期	平成25年2月～平成27年6月	
発注者	国土交通省 近畿地方整備局	
施工者	株式会社 鴻池組	
工事内容	延長	L=288m（トンネル延長L=242m、上下線2本）
	断面	掘削断面積A=87㎡（上り線）、117㎡（下り線） 超近接無導坑メガネトンネル
	施工法	NATM
	掘削方式	機械掘削
	掘削工法	DIIIパターン（早期閉合） DIパターン（早期閉合）
補助工法	天端安定対策：多段式長尺鋼管フォアバイリング （φ114.3mm、L=13.5m、@900mm、14本、5m掘削毎） 注入式フォアボーリング （φ27.2mm、L=3.0m、@900、13本、1m掘削毎）	
	鏡面の安定対策：鏡吹付、鏡ボルト	
	脚部の安定対策：脚部補強工（フットパイル）	

*1 土木事業本部 技術部 *2 大阪本店 土木部

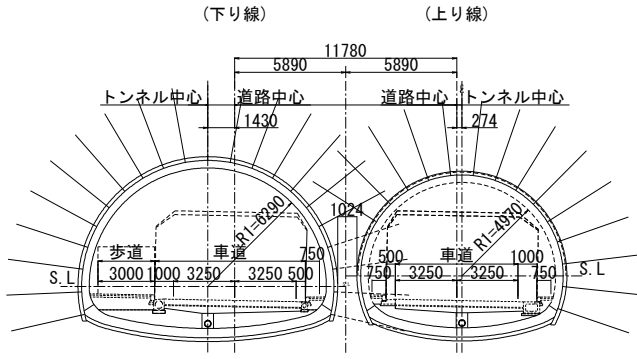


図1 トンネル標準断面¹⁾



写真1 上下線併進状況

2.2 地形・地質概要

トンネルの地質は、図2に示す地質平面・縦断図のとおり、神戸層群の砂岩・礫岩の互層で、設計では比較的良好な地山で、一軸圧縮強度はおおむね10~20 MN/m²、最大値が23.1 MN/m²であることから、インバート早期閉合時の施工性を考慮してツインヘッドによる機械掘削が計画されていた。しかしながら、実際の切羽は、写真2、3に示すように、砂岩、礫岩層内に人頭大から2mの硬質の玉石(100 MN/m²以上)を含んでおり、D I 区間においては、切羽全体が硬質な状態であった。

地形的には高速道路に近接した起点側坑口部は偏圧地形となっており、坑口から約30m付近に沢地形が見られた。なお、地層の傾斜は8~10°北落ちで高速道路から見るとすべり目の状況であった。

一方、終点側では、一部トンネルが露出する部分があり、ソイルセメントによる押え盛土を施工した。また、近接するマンション建設時の造成時の盛土上に公園が建設されており、複雑な地形となっていた。



写真2 切羽状況(上り線沢部通過時)



写真3 硬質玉石(上り線沢部通過時)

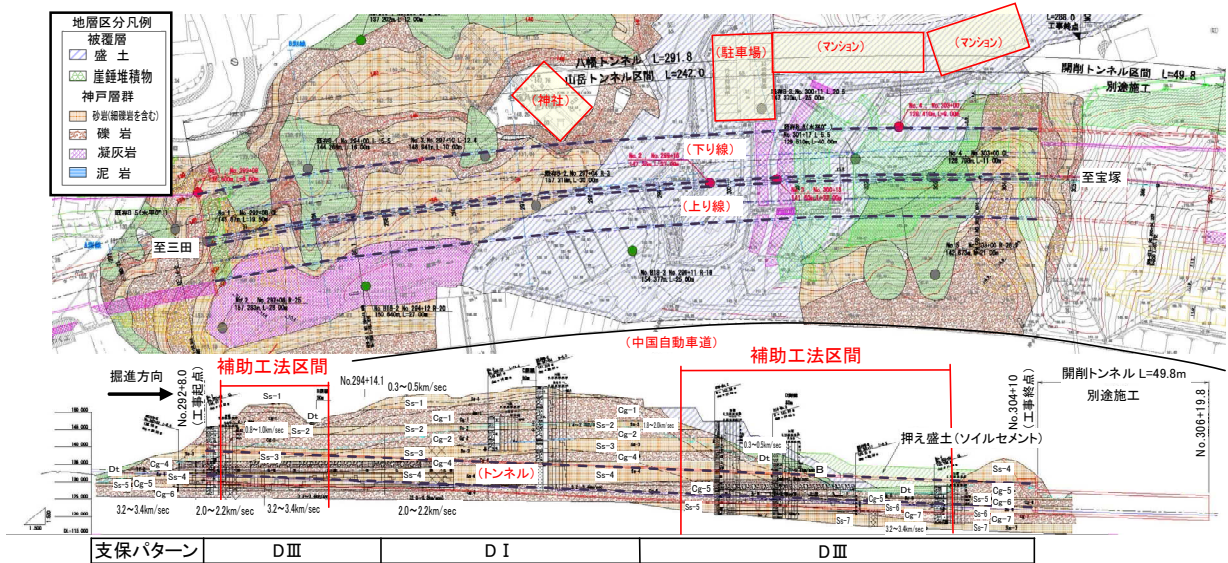


図2 地質平面・縦断図

3. トンネルの施工

トンネルの掘削は事前の数値解析結果を参考にして、断面の大きな下り線（宝塚行）を先進し、約 100m の切羽離れを確保して上り線（三田行）を併進させた。

また、全線にわたり小土被り（2D 以下：D は下り線トンネル幅：約 14m）であること、重要構造物に近接した施工であるため、地表面沈下抑制の目的でインバートストラットを用いた早期閉合による掘削を行った。施工手順を図 4 に示す。さらに、前述の硬質の玉石（一軸圧縮強度 100 MN/m² 以上）を含む地山状況の下で、当初設計のツインヘッドでは掘削が困難となったため、下り線では掘削機械として大型ブレーカ 2 台（3.0t 級、1.3t 級）を使用し、断面の小さな上り線では、岩盤破砕剤を併用した。

起点側坑口部および終点側盛土部分に関しては、地表面沈下対策として緩み抑制効果の高い多段式長尺鋼管フォアパイリング（φ114.3mm、L=13.5m、@900mm、14本、5m掘削毎打設）と注入式ポーリングにより地山変状（地表面沈下）の抑制を図った。なお、図 3 に示すメガネトンネル特有の課題である干渉部の補強に関しては、先進坑の切羽状況をふまえ、区間を限定して地盤改良（注入改良）により後進坑（上り線）が到達する前に先進坑（下り線）側から実施した（写真 4）。

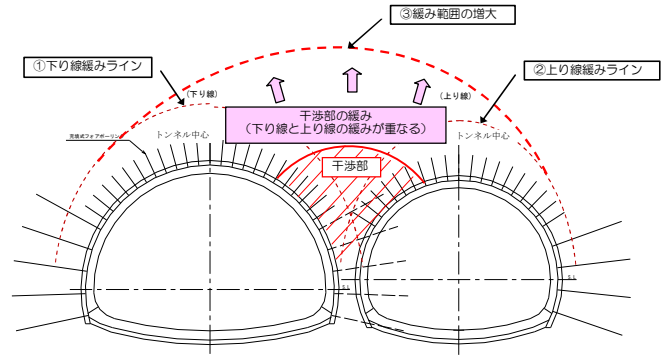


図 3 メガネトンネル緩みのメカニズム²⁾

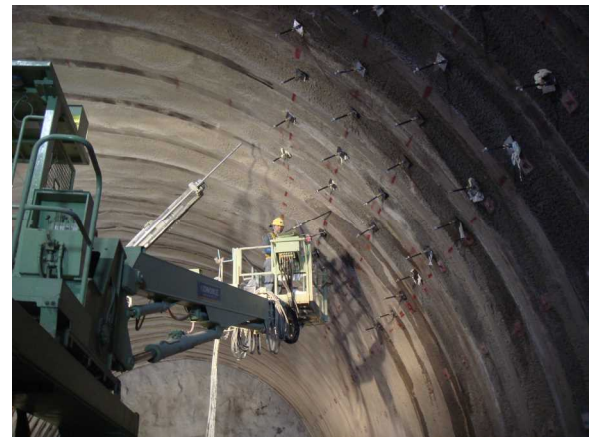
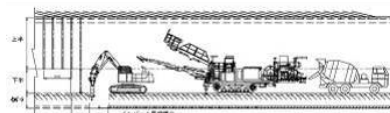


写真 4 干渉部補強工実施状況（下り線）



補助ベンチ付全断面工法（インバート早期閉合）
・トンネル構造体としての安定性を早期に確保
（内容変位・沈下の抑制+緩み領域の抑制）



先進坑掘削状況（D I パターン）



芯抜き状況（ガンサイザー使用）



後進坑掘削状況（D I パターン）

○施工ステップ（1サイクル）

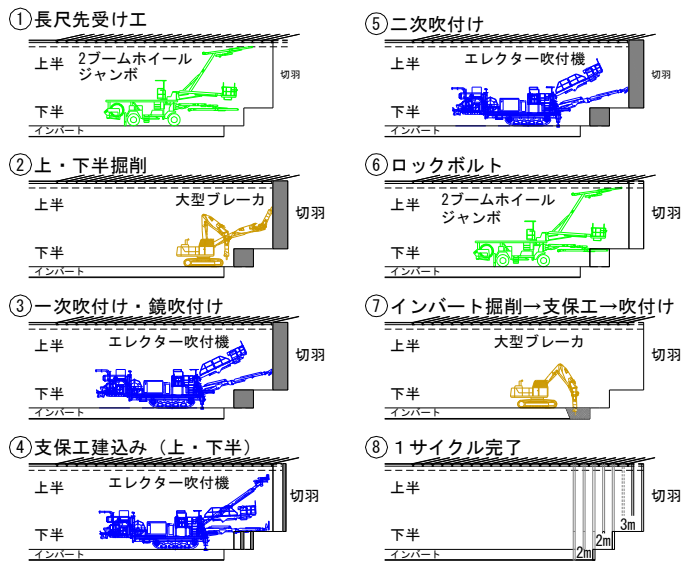


図 4 インバート早期閉合および掘削状況²⁾

4. 施工上の課題と技術開発

本トンネルの周辺環境条件および地形・地質状況を踏まえた上で、都市部における重要施設に近接したメガトンネル（特殊断面）を施工するにあたり、課題として以下の事項が懸念された。

- (1) 起点側坑口部における安全対策
- (2) 硬質玉石混じりの地山における切羽前方地山予測
- (3) 覆工コンクリートの品質確保

以下に課題を解決する目的で実施した技術開発について述べる。



写真5 起点側坑口切土時安全の見える化¹⁾

4.1 起点側坑口部における安全管理対策

中国道に近接する切土施工時の計測管理システムとして、写真5に示すとおり、切土作業時およびトンネル掘削時の中国道近傍斜面、坑口部斜面や中間部地山などの挙動をリアルタイムで監視し、中国道の通行車両や作業員の安全を確保する目的から、計測結果を現地で見える化できるよう工夫した。なお、作業員に対する安全研修において、計測値と表示色との関係に基づく安全性の確認方法を説明し、作業員自ら安全性を確認して作業できるよう指導した。

これらの計測結果の見える化技術の適用に関しては、2014年の技術研究所報告¹⁾に報告しているため、ここでは、計測結果の見える化のうち、電気をいわずに安全を確認する計測手法「M」と坑内での適用事例を述べる（写真6～8）。



写真6 「M」測点設置状況

4.1.1 電気を使わない安全の見える化「M」

「M」センサは電気を使わず、シンプルでメカニカルな動きだけで変位や傾斜を表現しようとする管理手法であり、徹底的なコストダウンとスマート設計によって工事現場や災害警戒区域での管理に利用することができる。

本現場では、トンネル掘削時に坑口上部法面への影響を監視する目的で「M」を現場に設置し、斜面の変位（伸縮）を測定し、他のデータとの相関等についての検証を行った。

「M」の仕組みは、伸縮計の表示部分の下に変位量に応じて三色（緑色、黄色、赤色）に色分けされた色フィルターを取り付け、このフィルターを通った太陽光が光ファイバーにより防音ハウス内の表示板に光の色として表示するものである。写真6、7に「M」および現場における設置状況を、写真8に防音ハウス内での表示状況を示す。

今回採用した「M」は太陽光を利用するため、夜間の監視はできないが、電気を使用せずセンサ自体が非常に安価であり、これまで法面の管理に用いている地すべり伸縮計と比較して、多くの測点を設置することができるため、地すべり兆候の把握などの面的管理に利用でき、地すべり監視



写真7 「M」センサおよび測定状況



写真8 「M」表示板（防音ハウス内に設置）

のツールとして活用することが可能である。

今回、起点側坑口で同時に測定していたトータルステーションの計測結果との比較により、トンネル掘削時の法面の変位との相関性を確認し、実用性に関する検証ができた。

4.1.2 トンネル坑内における安全の見える化

トンネル坑内変位（内空・天端）および地表面沈下の測定に関しては、リアルタイムかつ連続的なデータを収集する目的から自動計測システムを導入し、工事事務所にてリアルタイムに確認できる計測統合管理システムを構築した。トンネル掘削時は、メガネトンネルの特殊性から、上下線トンネル相互の影響度合いを確認しながら慎重な施工が必要となる。システム内では管理基準値の注意レベルⅠ～Ⅲをそれぞれ緑色、黄色、赤色に設定し、基準を超えた箇所と値がひと目で確認できるよう工夫した（図5）。

また、トンネル坑内では、中間地山（干渉部）の安定性を確認のため、光る変位計を設置し、壁面変位を作業員が現地でリアルタイムに確認できるように工夫した（写真9）。

4.2 CIMによる切羽前方地質予測

4.2.1 三次元地質モデル

前述の地質状況のもとでのトンネル掘削にあたり、安全管理および工程管理の上では、切羽前方地質予測が重要であった。本トンネルでは、①地層がほぼ水平（8～10度北落ち）であったこと、②トンネル設計のために比較的多くのボーリングデータがあったこと、③メガネトンネルであるため先進坑（下り線）の切羽データが後進坑（上り線）へ速やかにフィードバックできるといった理由からCIM（三次元地質モデル）の採用に至った。

まず、既存の地質データに基づき、既製のプログラム（GEORAMA）を用いて三次元地質モデルを作成した。

施工時には、先進坑（下り線）の切羽観察結果を用いてモデルの修正（当初想定地質の検証）を行い、トンネルの施工とともに精度を高め、後進坑（上り線）の施工に反映させた。図6に当初の三次元地質モデルを示す。

4.2.2 三次元地質モデルの活用

三次元地質モデルを用いた切羽前方予測の活用効果として、以下の事項が挙げられる。

- (1) 安全性の向上：地山崩落の可能性の判断（天端礫岩層の有無により小崩落の可能性を判定）
- (2) 現場管理の効率化：施工機械（掘削機械）、支保工他の材料手配の効率化
- (3) 設計変更の迅速化：補助工法の必要性、補助工法適用区間長の決定
- (4) 情報化施工への活用：計測結果との整合を図り、地山挙動の把握の高度化

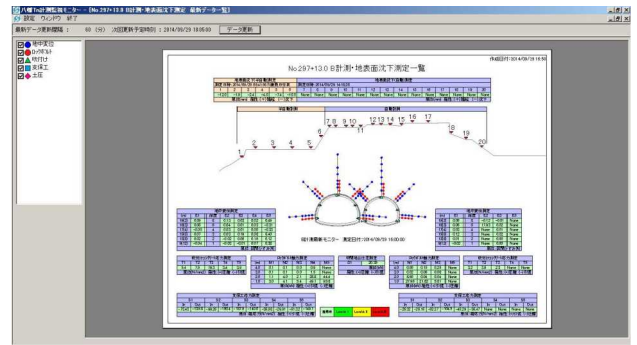


図5 計測管理統合システム（表示例）³⁾



写真9 光る変位計設置状況（下り線干渉部）³⁾



図6 三次元地質モデル³⁾

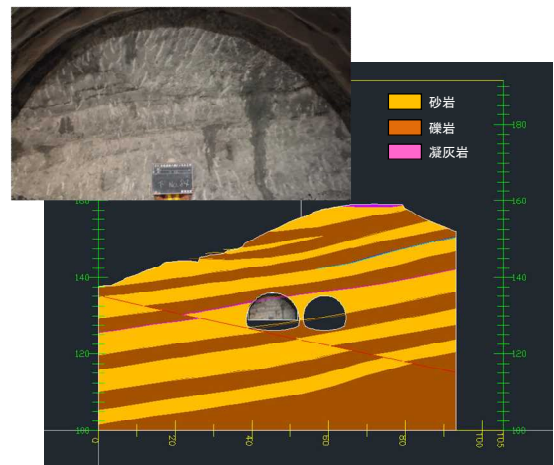


図7 三次元地質モデルによる断面図³⁾

(5) 施設管理の効率化・高度化：施工時のデータ（地質状況、計測結果、支保工等）保存

CIM（三次元地質モデル）は、図7に示す各切羽の断面図から地質縦断面図を修正し、岩判定時に前方切羽の地質予測を行うことで、切羽安定対策としての補助工法の適用範囲の判断に活用できた。また、天端に礫岩層が存在する場合には、肌落ちや小崩落が発生しやすいため、天端安定のための長尺鋼管フォアパイリング等の補助工法を採用することとした。なお、硬質の岩盤を掘削するための機械選定にも大いに参考になった。掘削時には、先進坑での計測結果の実績に基づき、後進坑での変位量の予測や先進坑への影響判定に活用した。

一方、終点側の既設盛土区間（マンション建設時に造成）では、存置された既設排水管が突然先進坑の切羽に出現した（写真10）。後進坑の掘削に先立ち、先進坑の出現位置に基づき図8に示すように、三次元地質モデルにより後進坑での出現箇所を推定し、緩み防止対策（干渉部補強工）を先進坑側から施工することができた。



写真10 既設排水管出現状況³⁾

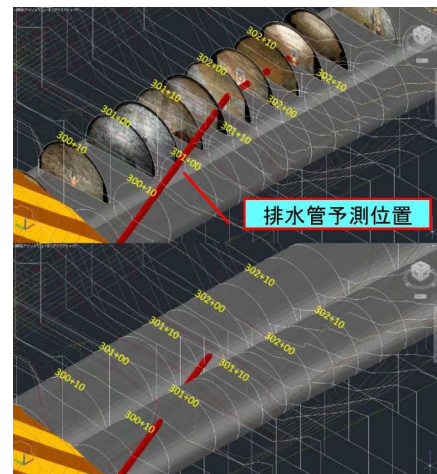


図8 三次元地質モデルによる予測³⁾

4.3 覆工コンクリートの品質確保

本トンネルは、超近接メガネトンネルという特殊断面であることから、覆工コンクリートの補強鉄筋が複鉄筋構造であった。また、工程の関係から覆工コンクリートの打設時期が冬季となった。

そこで、覆工コンクリートの更なる品質向上を目指して
 (1) 補強鉄筋にユニット鉄筋を採用
 (2) FRPセントルの採用
 (3) 覆工打設時の圧力管理
 といった新しい技術を導入した。

以下にそれぞれの技術の導入効果について示す。

4.3.1 ユニット鉄筋の採用

トンネル坑口部の長期安定性を図るために、坑口部の覆工コンクリートには、単鉄筋構造（φ19mm）で補強鉄筋が設計されることが一般的であるが、本トンネルでは、メガネトンネルという特殊断面であること、土被りが小さいことを考慮し、上下線の両坑口の覆工コンクリートの補強鉄筋が複鉄筋構造（φ22mm）で設計されていた。

この補強鉄筋の組立てにおいて工期短縮および品質の向上を図るために、工場で製作したユニット鉄筋による施工を行った（図9）。ユニット鉄筋の採用により、①工場生産のため高い品質が確保できる、②作業性が向上する、③現場検査の簡素化等の効果が期待できる。実際に適用した結果、ユニット鉄筋の採用により、補強鉄筋自体の施工精度（配筋ピッチ、形状等）の確保ができ、配筋検査の簡素化が図れた。



図9 ユニット鉄筋 工場製作状況



写真11 ユニット鉄筋 現場組立状況

なお、本トンネルの平面線形が曲線であったため、妻部では調整のため一部バラ鉄筋の組立てが必要となったが、現場での鉄筋組立作業においては、天端上向きの配筋作業という苦渋作業が軽減できた。

さらに、鉄筋組立の専門業者の人材確保が困難な状況の中、専用の把持装置を使用することにより、熟練作業員でなくとも配筋作業が可能であった（写真11）。

4.3.2 FRP セントルの使用

一般に、冬季にコンクリートを打設する場合、外気温が低い場合、打設後初期のコンクリート強度が十分に発現していない時期に、急激な温度降下に伴う引張り応力が発生し、ひび割れ発生の原因になる懸念がある。そのため、打設後に保温養生を行い、徐々に外気温まで下げていくことが重要となってくる。そこで以下の特長を有するFRPフォームを導入した。

- (1) 鋼製型枠と比較して熱伝導率（ $0.3\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ ：鋼製の $1/150$ ）が低く、保温効果があるため初期強度発現に有利となる。
- (2) 離型性に優れ、型枠ケレン作業時間が大幅に減少することとなり、工期短縮に寄与できる。
- (3) 透過性を有しているため、コンクリートの打設状況が目視確認でき、空洞の発生等を防止することができる。

導入による保温効果の確認のために温度計測を実施した。

図10にメタルフォームを使用した場合の内部温度履歴と本トンネルでの内部温度履歴を示す。なお、打設温度が異なるため、温度の差を補正している。

この図から、養生条件の違い等で多少の差異は考えられるが、型枠脱型後の覆工コンクリートの温度履歴がメタルフォームに比較して緩やかに低下していることが分かる。このことからFRPフォームの保温効果が検証できた。

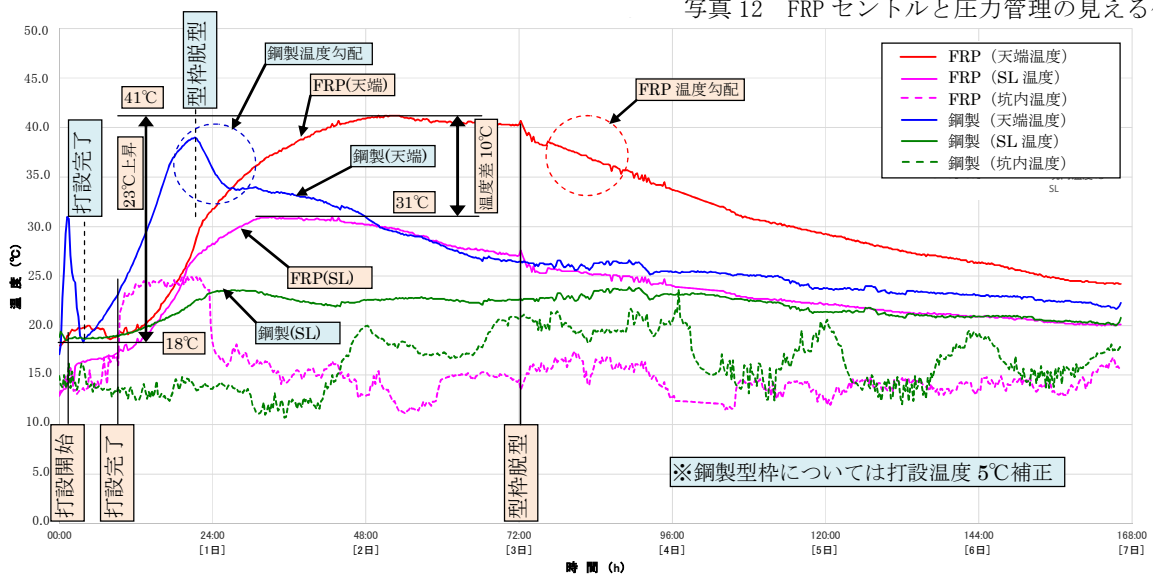


図10 覆工打設時温度測定結果（経時変化）

4.3.3 覆工打設時の圧力管理

覆工打設時にFRPセントルに過度の圧力が作用するとFRPフォームの破損の原因となるため、型枠に作用する圧力を管理する目的でLEC（光るデータコンバータ）を用いて作業員が容易に確認できる「計測結果の見える化技術」の適用を実施した。天端のコンクリート打設口付近に圧力計を設置し、打設圧に応じてLECの色を変化させた（写真12）。圧力の管理値と発光色は、FRPフォームの強度試験結果をふまえ、管理値（閾値）として $0\sim 4\text{kN}$ を緑色、 $4\sim 10\text{kN}$ を黄色、 10kN 以上を赤色で表示した。



写真13 覆工発生応力の見える化



写真12 FRP セントルと圧力管理の見える化

セントル圧力管理の見える化により、セントルに過度の圧力が作用することを防止でき、打設終了時期（充填管理）の判断にも有効に利用することができた。また、集合住宅（マンション）に最も近接する箇所（トンネル直上 10m 近接）では、後進坑施工時の影響を把握する目的で先進坑の覆工打設後も写真 13 に示すように覆工内に設置した鉄筋計により覆工応力を測定し、応力状態を LEC により表示し監視した。

以上のように、打設から打設後の監視まで一連の管理が可能であった。

5. おわりに

名塩八幡トンネルは、都市部で重要施設に近接するという厳しい施工条件の下、上下線が約 1m で近接する超近接無導坑メガネトンネルとして建設された（写真 14）。

トンネルの施工は硬質の玉石を含む地山において、断面の大きい下り線では大型ブレーカ 2 台（1.3 t 級、3.0 t 級）を使用し、通常断面の上り線では、岩盤破砕剤の併用により掘削効率を高めた。また、ともにインバート早期閉合を行い、地表面沈下を抑制しながら進めた。

現場の施工上の課題を解決するために新技術の導入や技術開発に取り組み、高速道路に近接した起点側坑口部では安全の見える化技術により、現地の変位状況を光の色の変化で表示して警告するシステムを取り入れた（2014 年の技術研究所報告参照）。

本報告では、都市部における超近接無導坑メガネトンネルの建設と新技術の導入とその検証結果を報告した。

安全の見える化の取り組みの一環として、電気を使わない管理手法「M」とトンネル坑内における取組みを紹介した。

「M」による斜面変位測定では、トータルステーションの測定結果に基づく挙動と比較することによりその実用性を検証することができた。また、トンネル干渉部壁面変位測定では、メガネトンネルの施工において懸念される上下線中間地山（干渉部）の挙動を把握することができた。

一方、トンネルの施工では、硬質の玉石が混在する特殊地山において、「CIM」による切羽前方地質予測を行うことで適切な補助工法の適用が可能となるとともに、切羽に予期せず出現した既設排水管に対する後進坑における事前対策を先進坑側から確実に実施することができた。さらに、覆工コンクリートの品質の向上確保といった観点から、複鉄筋（φ22mm）による補強に関してはユニット鉄筋を用いて作業の効率を高め、冬季打設に対する対策として保温性に優れる FRP セントルを導入することで更なる品質向上を図り、覆工圧力の見える化により確実な充填を確認できた。

本トンネルは、昭和 60 年に計画決定され、約 30 年の時を経て実現したものである。地域住民の悲願であった交通安全確保と渋滞緩和といった課題を解決するものであり、名塩八幡トンネルを含む第一工区の開通後は、地域の安全、生活環境は飛躍的に改善された（写真 15）。

今後、都市部での山岳トンネルの施工が増加し、種々の厳しい条件下でのトンネル掘削を強いられることが予想される。今回の報告が同種工事の参考となれば幸いである。



写真 14 トンネル完成写真



写真 15 トンネル供用状況

参考文献

- 1) 山田浩幸、大槻文彦、木村圭吾：計測結果の見える化技術の現場適用と検証—名塩道路 八幡トンネル工事の施工事例—、鴻池組技術研究報告 2014 年度、pp. 17-22、2014. 6
- 2) 谷口大樹、木村圭吾：名塩道路八幡トンネル～超近接無導坑メガネトンネルの施工について～、平成 27 年度近畿地方整備局研究発表会、施工・安全管理対策部門：No. 19、2015. 6.
- 3) 山田浩幸、大槻文彦、木村圭吾：都市部における超近接無導坑メガネトンネルの施工と新技術の適用に関する一考察、第 25 回トンネル工学研究発表会（2015）講演集、I -19、2015. 11