

名塩道路八幡トンネル～都市部山岳トンネル 工事における安全の見える化技術について～

山田 浩幸¹・大槻 文彦²

¹株式会社 鴻池組 大阪本店 名塩道路八幡トンネル工事（〒669-1141 兵庫県西宮市塩瀬町名塩）

²株式会社 鴻池組 大阪本店 名塩道路八幡トンネル工事（〒669-1141 兵庫県西宮市塩瀬町名塩）

名塩道路八幡トンネルは、上下線の離隔が約1mで近接する超近接メガネトンネル構造であり、無導坑方式で掘削を行った。都市部で重要施設に近接するため、周辺環境の保全と安全管理を確実に実施する必要があった。

高速道路に近接した起点側坑口部の施工では「計測結果の見える化技術」を採用し、作業の安全性の向上を図った。また、トンネルの施工では、CIM（Construction Information Modeling）を導入し、前方切羽を精度良く予測しながら、適切な補助工法を採用することができた。

本論文では、現場における最新技術の適用の紹介とその効果について得られた知見を述べる。

キーワード 山岳トンネル、近接施工、安全管理、メガネトンネル、新技術

1. はじめに

西宮市から宝塚市へ至る国道 176 号の改良工事のうち、名塩道路八幡トンネル工事は、先行して整備を進める第一工区（L=1.4km）、西宮市名塩南之町～東之町に至る延長 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の構造で計画された。

施工では、都市部での施工ということもあり、周辺環境の保全と安全管理を確実に実施する目的から最新技術の導入を行った。

本論文では、八幡トンネル工事の現場で適用した新技術の紹介と効果の検証結果について述べる。

2. 工事の概要

当工事は、表-1 に示すとおり、名塩道路に計画された延長 L=242m の山岳トンネル工事である。八幡トンネルの構造は、上下線の最小離隔距離が約 1m（最小部分 82cm）で近接した、超近接無導坑メガネトンネル構造であった（図-1）。

周辺制約条件として、南側に中国自動車道、上部に神社、北側にマンションが近接した施工となり、最大土被りが 22mで、全線にわたり土被りが 2D 以下と小さい。

起点側坑口付けにあたっては、供用中の中国自動車道

の既設法面を一部掘削する必要があり、切土工事による本線への影響が懸念されたため、より慎重な計測管理が必要となった。また、事前の水平ボーリングの結果から起点側坑口より 32m 区間（沢部あり）は、未固結な状況であり、数値解析の結果により対策工が必要となった。

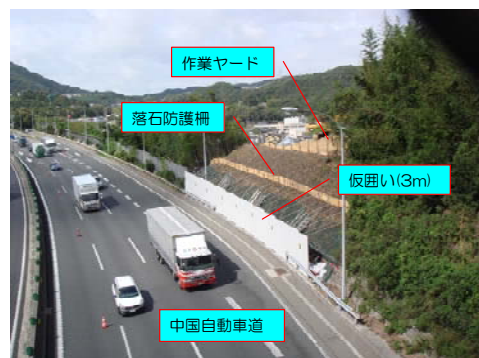


写真-1 起点側坑口近接部分落石対策



写真-2 トンネル施工状況

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)
	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ハターン (早期閉合) DⅠハターン (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 注入式フィアボリング
	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)

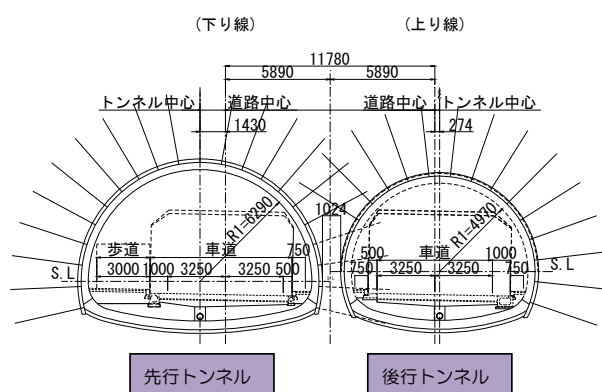


図-1 トンネル標準断面

トンネルの地質は、神戸層群の砂岩・礫岩の互層であり、設計では、比較的良好な地山でトンネル区間の新鮮なCM層の一軸圧縮強度は、概ね10～20MN/㎡であり、最高値が23.1 MN/㎡と比較的軟弱な地山が想定され、トンネルが重要施設に近接しているため、早期閉合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-3、4に示すように砂岩、礫岩層に人頭大から1mの硬質の玉石を含んでいる状況であった。

掘削手順は、大断面で法尻側に位置する土被りの小さい下り線を先行させ、比較的土被りの大きい上り線を切羽離れ約100mで併進した。

写真-5に下り線の掘削状況を示す。

上記のような地質条件の下でのトンネル掘削にあたり、安全管理と施工性の確保のため、計測結果を現地でリアルタイムに表示する「計測結果の見える化技術」及び「切羽前方予測」の必要性があった。

当工事では、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ことから、切羽前方予測にCIM (三次元地質モデル) を採用した。



写真-3 トンネル切羽状況 (沢部通過時)



写真-4 硬質の玉石出現状況 (沢部通過時)



写真-5 掘削状況 (下り線 DI 区間)

3. 現場における新技術の適用と検証

当工事では、新技術の導入を積極的に行ったが、ここではその内、「計測結果の見える化技術」と「CIM (Construction Information Modeling) に関して概要を述べるとともに、現場適用による効果について得られた知見を以下に示す。

(1) 計測結果見える化技術

a) 計測管理の概要

中国道に近接する切土施工時の計測システムとして、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、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より、計測値とその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。

図-2 に計測位置平面図を示し、写真-6 に計測器設置状況を示した。なお、計測手法の概要は以下のとおりである。

①斜面変位測定（トータルステーション：TS）

斜面上に設置したターゲット（プリズム）の座標の変化を三次元測距儀により測定（自動測定）することにより、三次元的な斜面の変形挙動を計測する。

②地表面伸縮測定（地すべり伸縮計、光る変位計）

斜面に温度の影響を受けにくいインバール線を張り、2点間の距離の伸縮を計測することにより地すべりの監視を行う。計測値と管理値の関係を光の色の変化で表示する。見える化技術として、光る変位計（変位量により測線端部が光る）とデータ集積が可能な LEC（光るデータコンバータ）を採用した。

③非接触地表面伸縮測定（DD センサー）

DD センサーはレーザー測距儀により 1 回/1 秒の測定を連続して実施することで、ターゲットまでの距離の変化を連続計測する。設置・撤去が容易であり、測定したい箇所に移動して施工途中の変位を容易に測定することができる。なお、DD センサーの計測値と管理値の関係をパトライトにより光の色の変化で表示した。

④斜面変位測定（SOP：Single Observation Point）

斜面のすべり挙動を鏡と光源を用いて、ある限定され

た観測点（SOP）から計測を行う。SOP ライトの光源が見える位置にターゲット（鏡）を設置し、観測を行い、鏡の位置（斜面）が動くと観測点から光源が見えなくなることを利用して斜面のすべりの兆候を確認する（TS にて検証）。

なお、鏡に工夫（寸法が明確な同芯円やゼブラシール貼付）することで mm 単位の変位確認を目指している。

⑤地中側方変位測定（地中傾斜計）

重力加速度計（MEMS センサー）を 3 軸に設置し、地中傾斜計の区間変位（50cm ピッチ）を測定し、地中の側方変位の分布を計測することにより、すべり面の有無を確認する。

区間変位速度の計測値と管理値の関係を LEC により光の色の变化で表示するとともに、地中変位分布を遠隔監視可能なタブレット PC により現位置に表示する。



写真-6 計測結果の見える化実施状況

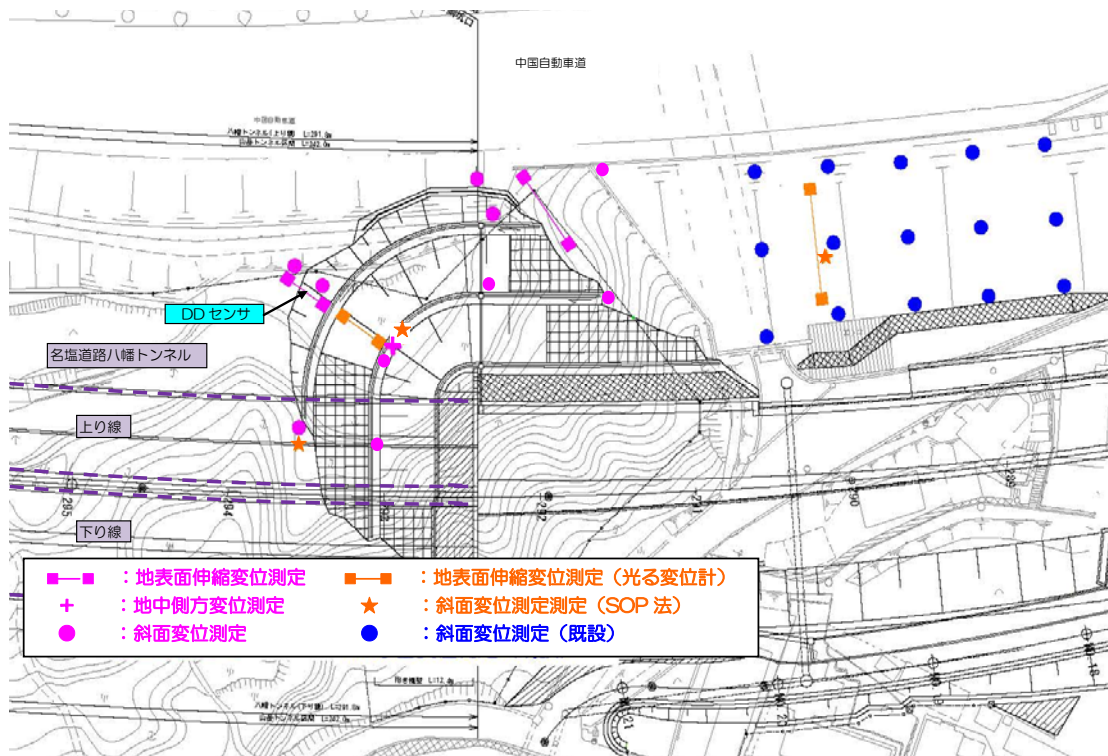


図-2 起点側坑口部 計測位置平面図

b) 計測結果の考察と見える化技術の検証

以下に当工事で採用した「計測結果の見える化技術」による計測結果の一例を示し、結果に対する考察を述べる。

①斜面変位測定結果

図-3にTSによる測定結果の一例を示す。

結果的には、多少のばらつきはあるものの、切土作業を通して管理値である5mm/10日の範囲で収まっており、法面の安定性は確保されていた。

計測結果の見える化技術の適用により、現場作業員自ら安全状態を確認して作業を行うことができた。

②地表面伸縮測定結果

図-4に示すとおり、地すべり伸縮計のデータについても管理値(5mm/10日)以内で収まった。

計測結果が光の色で表示されるため、作業員の聞き取り結果でも作業時の安全管理に有効であることが検証できた。切土時には結果的には緑色(安定)からの変化はなかったが、斜面に近接する上り線掘削時には一番上部の伸縮計が赤色(3mm伸び)、盛土部の伸縮計が水色(3mm圧縮)に変化した。

③非接触地表面伸縮測定(DDセンサー)測定結果

図-5に示す非接触連続変位に関しても他の結果同様、変位の変化は見られなかった。DDセンサーは、計器の設置、移動が容易であり、切土作業という日々計測対象

の法面が変化するような作業においては、適用性に優れているといえる。

④鏡による斜面変位測定

SOP法による測定結果からは、TS同様地すべりの兆候は見られなかった。光る変位計が誰にでも確認されることに対して、SOP法では、ある特定の位置に限定して確認できるということで、計測結果の取り扱いといった面で管理者としては有意なものと考えられる。

⑤地中傾斜計測定結果

図-6に示すように、地中側方変位に関しては、切土作業に伴い、3mm~4mm程度の変位は見られたが、管理値(5mm/10日)内で収まっており、目立ったすべり面(変化点)も観察されていないことから安定性に問題はなかった。

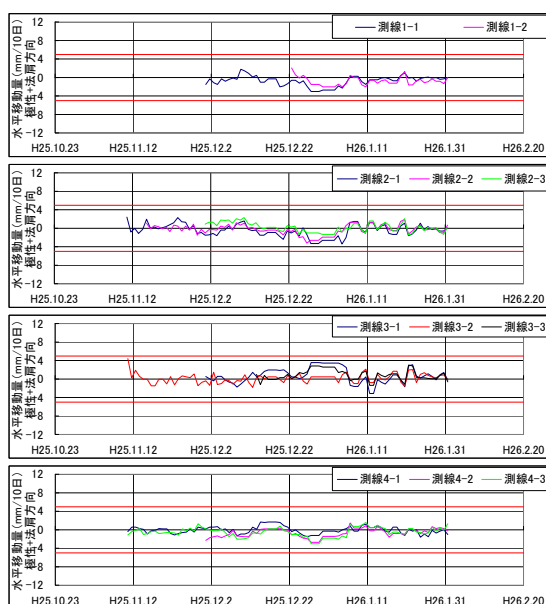


図-3 TSによる測定結果

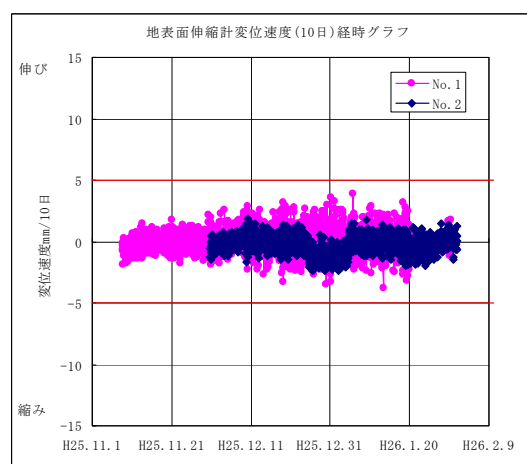


図-4 伸縮計測定結果

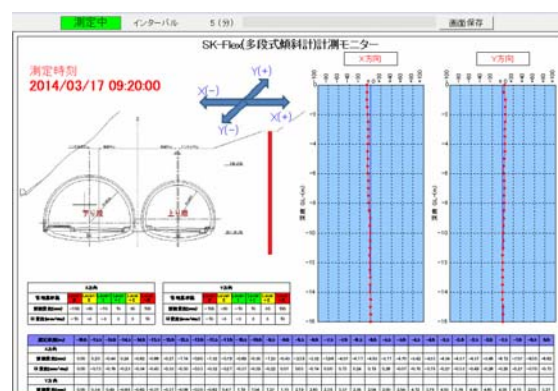


図-6 地中傾斜計測定結果(現地タブレットPC)

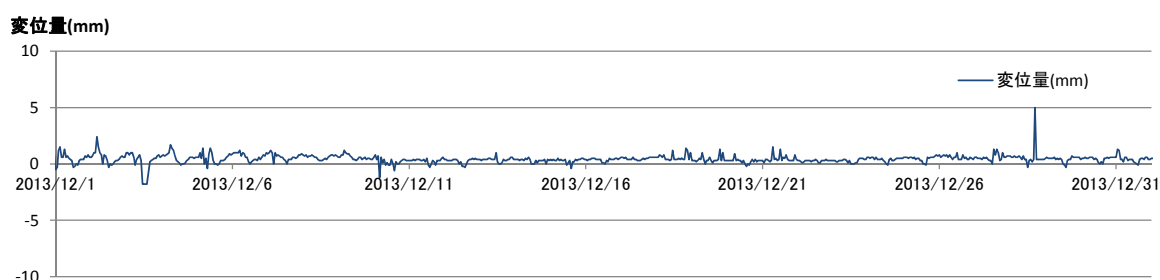


図-5 DDセンサー測定結果

(2) CIM（三次元地質モデル）の適用

CIM とは建築分野で適用がすすむ BIM を土木分野にも広げ、公共事業の一連の過程で、ICT ツールと三次元データモデルの導入・活用により、建設事業全体の生産性向上を図ろうとする取り組みのことである。

a) 三次元地質モデルの作成

トンネル断面が超近接メガネトンネルという特殊断面であり、トンネルの支保構造や補助工法の設計および近接する重要施設への影響度合いの把握という目的で数値解析に基づく設計がなされていた。そのため、多くのボーリングデータがあったことに加え、先進坑である下り線において事前の追加水平ボーリングにより連続的な地質データを取得することができたことからこれら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た。

図-7 に当初の三次元地質モデルを示し、図-8 に施工時の三次元地質モデルの修正状況を示す。

b) 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

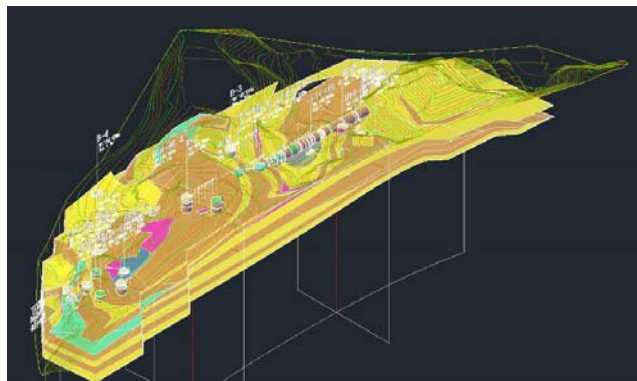


図-7 三次元地質モデル

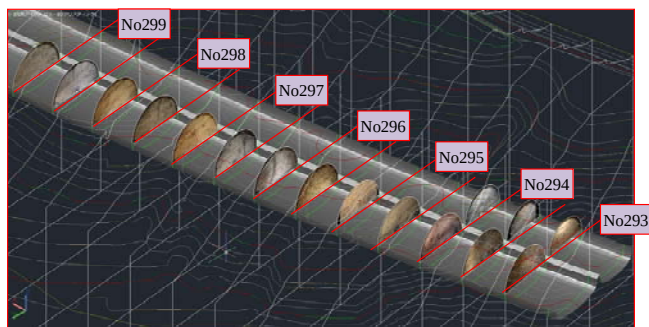


図-8 先進坑切羽観察結果に基づくモデルの修正

③設計変更の効率化：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

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

当工事においては、CIM（三次元地質モデル）の活用としては、まず、図-9 に示す断面図を作成し、岩判定時に前方の切羽予測を用いて、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。当工事の地山の特性から、天端部分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。

また、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。

さらに、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および先進坑への影響判定に活用した。

終点側の既設盛土区間（マンション建設時に造成）においては、既設盛土施工時に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-7）。後進坑の掘削に先立って、図-10 に示すように、先進坑の出現位置に基づき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。

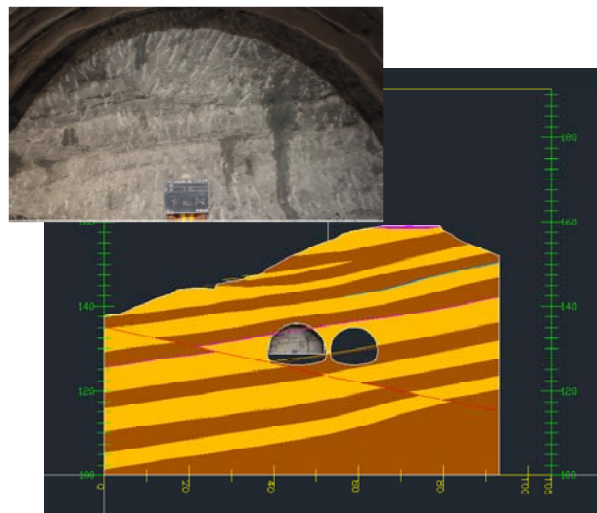


図-9 三次元地質モデルによる断面図作成

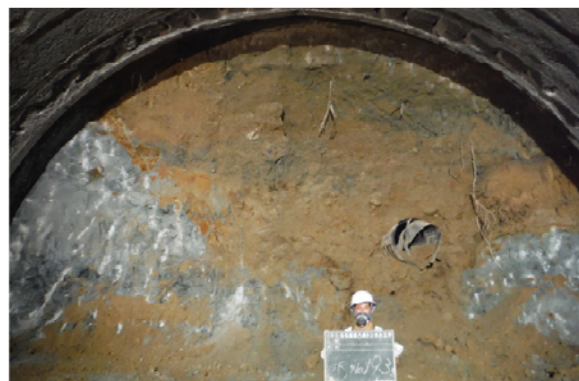


写真-7 既設排水管出現状況

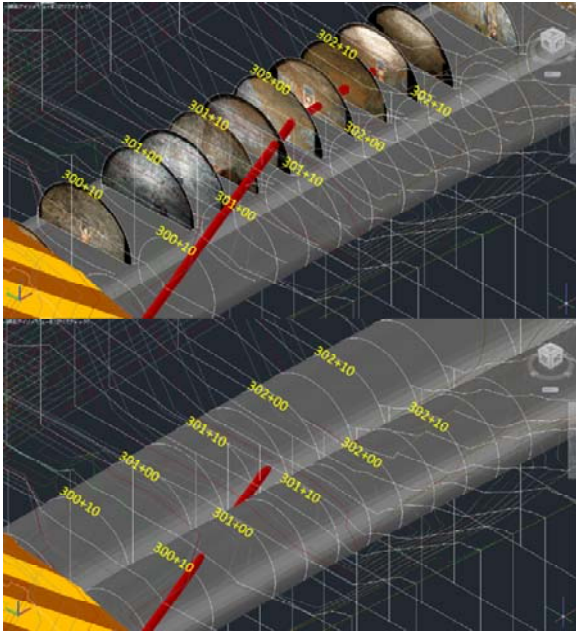


図-10 既設排水管出現予測（上り線施工時）

4. おわりに

名塩道路八幡トンネル工事で採用した最新技術のうち、中国自動車道に近接した起点側坑口付けのための切土法面に対する計測管理で採用した「計測結果の見える化技術」の効果と検証結果を示した。

また、切羽前方予測として活用した CIM（三次元地質モデル）に関しての適用効果について述べた。

切土法面の施工では、神戸層群の長期安定性を確保する目的から、土砂部に関しては法面補強対策を施し、軟岩の部分に関しては厚層基材吹付けを施工した。

一方、トンネルの施工に関しては、2014年2月から坑口付けを行い、FEM 解析結果に基づき、切羽の安定と近接する中国自動車道への影響を最小限に抑える目的で補助工法（多段式長尺フォアパイリング及び注入式フォアポーリング）を併用して掘削を行った。

補助工法の採用により、トンネル掘削時には特に大きな変位や地すべりの兆候も見られず、中国道の切土法面に関しては影響はなかったものと考えられる。

CIM に関しては、三次元地質モデルと合わせて、3D スキャナによる測量を実施しており、超近接メガネトンネルの挙動把握や品質管理としての活用が期待できる。

今後、データの整理を実施して別の機会に報告したい。

計測結果の見える化技術の現場適用にあたっては、「安全の見える化」として、従来の計測管理における課題の1つであった計測から警告の発信までのタイムラグの発生を防止し、リアルタイムに光の色の変化で危険度を評価できるため、作業員自らが安全を意識しながら作業できるというメリットがあり、現場における安全性の向上と変状に対しての早期の対策が期待できる。今後とも情報化施工の実施により、安全施工に努めていく所存である。

また、CIM（三次元地質モデル）は言わば、地質の見える化であり、現場管理や対策工の適用の合理化にも寄与したものと考えられる。

今後、3D スキャナのデータの整理や計測データと合わせて、本トンネルの維持管理の参考資料となるようまとめる所存である。

本論文が、まだまだ施工実績の少ない無導坑メガネトンネルの設計・施工において参考になれば幸いである。

謝辞：最後に、計測結果の見える化技術の現場適用にあたっては、神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 芥川真一教授はじめ OSV 研究会の関係者の方々に貴重なご意見を頂きましたこと深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 芥川真一，高野晃佑，森翔矢，金子勝，高木加乃：光る変位計の開発とその岩盤工学における適用の可能性について，第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp. 427-432，2008. 1
- 2) 芥川真一，森翔矢，大村修一，山田浩幸：トンネル掘削工事の安全管理における光る変位計の適用例，トンネル工学研究論文，pp. 23-28，2009. 11
- 3) 芥川真一，野村貢，山田浩幸，片山辰雄：On Site Data Visualization の概念と岩盤工学における適用可能性について，岩盤力学に関するシンポジウム，pp. 151-156，2010. 1
- 4) 山田浩幸，芥川真一：山岳トンネル工事現場における計測結果見える化技術の適用とその効果，平成 23 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. 04，pp. 1-6，2011. 6
- 5) 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設計と施工に関する一考察，I-15，pp. 1-8，2014. 12