

【地下施設／山岳トンネル】

技 術 名	切羽ウォッチャー
番 号	No. 4. 2-12
発 注 者	三重県
施 設 名	三田坂トンネル
所 在 地	三重県伊賀市諏訪～伊賀市三田
工 事 名 称	一般国道 422 号三田坂バイパス道路改良(三田坂トンネル(仮称))工事
施 工 期 間	2012 年 12 月～2015 年 8 月
施 工 者	鹿島建設(株)
キーワード	3 方向レーザー変位計, 切羽崩落予測
<p>(1) 概 要</p> <p>山岳トンネル工事において、レーザー距離計で切羽の変動を常時観察し、切羽崩落の危険性を高精度に予測する「切羽ウォッチャー®」を 2012 年に開発したが、このほど、より高精度なレーザー変位計と、凹凸のある切羽においても安定して機能する反射塗料を新たに開発した。これにより、従来の 2 倍以上という長距離での測定が可能となり、盛替え回数的大幅な削減と切羽崩落予測の更なる高精度化を実現した。</p> <p>(2) 技術詳細</p> <p>2012 年に開発した「切羽ウォッチャー」は、高精度レーザー距離計を回転制御装置と組み合わせることで、1 台のレーザー距離計で切羽の複数点の変位を計測し、切羽崩落の可能性や崩落に到るまでの時間をリアルタイムに予測することができるシステムである。突発性崩落の可能性のある地山にも対応ができるため、これまで 6 箇所の現場に適用してきた。</p> <p>しかし、従来の「切羽ウォッチャー」の測定可能距離は約 40m であり、盛替え回数を減らすためには、より長距離測定が可能なシステムが必要であった。また、ターゲットとなる反射板を用いることで高精度に計測できるが、切羽に都度反射板を設置するのは手間がかかるとともに、切羽に接近して設置する行為は安全面にも課題が残ることから、より簡易かつ安全にターゲットを設置する方法も求められていた。</p> <p>今回開発した三方向レーザー変位計は、光量が多く、1 台で 3 方向にレーザーを照射できるため、従来必要だった回転制御装置なしで複数点の長距離計測が可能となる。また、ターゲットとして機能する塗料は、光が入射方向にそのまま反射する再帰性反射塗料と呼ばれるもので、レーザーに効率よく反射する輝度や、切羽に確実にとどまる粘度等の仕様を今回新たに決定した。この再帰性反射塗料を用いることで、計測された変位量のバラつきが抑えられる。</p> <p>光量の多い三方向レーザー変位計と再帰性反射塗料を組み合わせることで、計測可能距離も 100m と従来の 2 倍以上の長さに延長でき、盛替え回数を削減することができる。また、100m 離れた場合でも変位量の誤差が±0.3mm と高精度で計測できることを確認した。</p> <p>更に、切羽への安全な塗布方法も考案し、ローラ式なら 2m 以上、スプレー方式なら 5m 以上離れて塗布することが可能となった。</p>	

(3) 結果

従来システムに比べて、長距離計測を高精度に行える改良を加えた新しい「切羽ウォッチャー」を、現在施工中の三田坂トンネル（三重県伊賀市）において貫通 100m 手前の坑口部に適用した。その結果、高精度化を確認できたとともに、計測可能距離が従来の 2 倍以上を達成したことで、盛替え回数も従来システムに比べ半分以下に大幅に削減された。



写真-1 三方向レーザ変位計



写真-2 再帰性反射塗料の塗布状況（ローラ式）

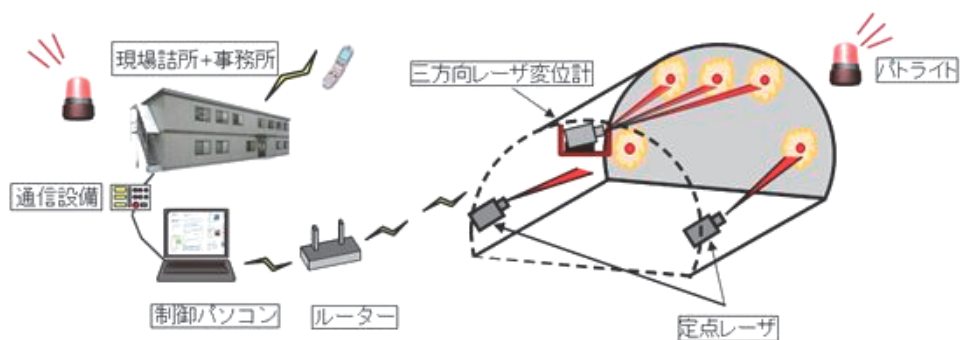


図-1 切羽ウォッチャー概念図

<p>参考文献</p>	<p>鹿島建設(株)、ホームページ、2014. 9. 4 http://www.kajima.co.jp/news/press/201409/4c1-j.htm</p>
<p>備考</p>	<p>—</p>

技術名	逆解析切羽前方予測システム
番号	No. 4. 2-13
発注者	国土交通省 近畿地方整備局
施設名	鍋谷峠トンネル
所在地	—
工事名称	鍋谷峠道路鍋谷峠トンネル工事
施工期間	2012年3月～2015年8月
施工者	佐藤工業(株)
キーワード	3次元計測、内空変位、3次元FEM解析

(1) 概要

1) 工事概要

工法：山岳工法

2) 技術概要

今回、新しく開発したシステムは、トンネル工事における施工管理（観察・計測）として一般的に行われている内空変位計測の変位データを用いて切羽前方地山の物性値を算出し、地山の性状を予測するもので、適切な頻度で内空変位計測を実施すれば、切羽前方地山の予測を日常的に行うことができる。

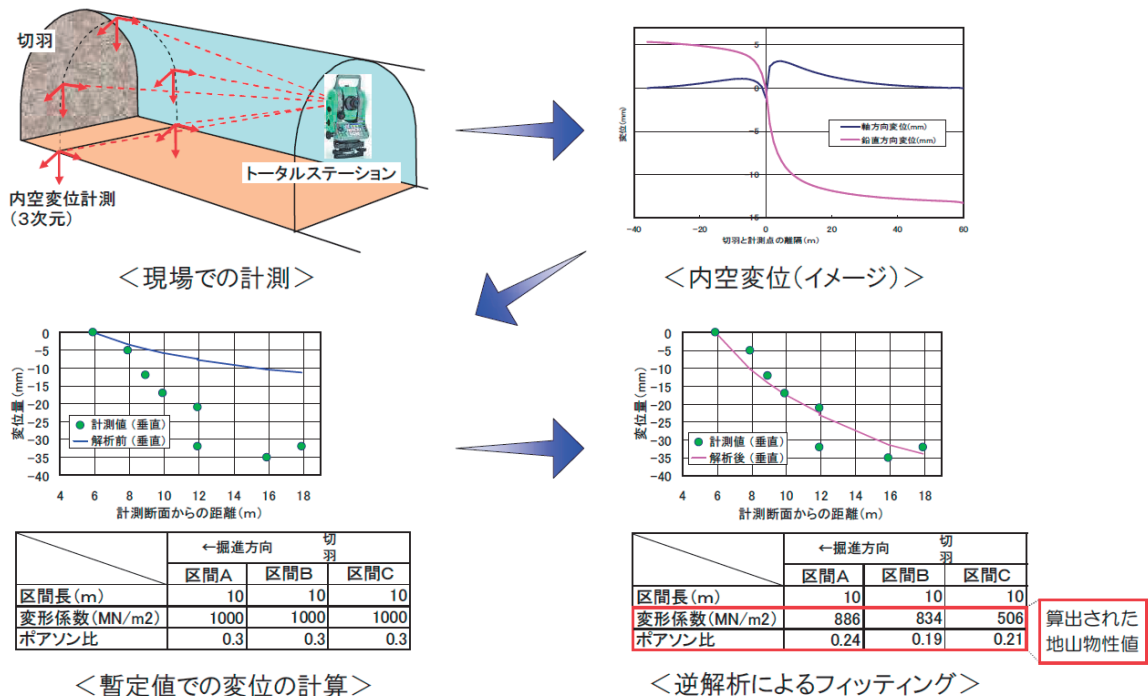


図-1 システムの概要図

(2) 技術詳細

本システムでは、まず掘削後、速やかに変位計測用のターゲットを設置し、三次元計測器にて初期値を計測する。その後、2回/日程度の頻度で数回変位の計測を行う。

一方、解析用ソフトにて、FEMモデルを作成する。FEMモデルは、入力された解析範囲、土被り、トンネル断面の形状などから自動的に断面が生成され、軸方向については支保パターンに基づく区間分けと計測管理データから読み取られた計測断面位置、切羽位置などの値に基づき節点位置が決定される。

次に作成したFEMモデル上で逆解析を実行する。逆解析では、入力された計測断面の変位計測値や指定された区間の掘削の実績に基づいてFEMモデルでの掘削のシミュレーションが実行され、観測された計測断面の変位に最も適合するような物性値が繰り返し計算により求められる。

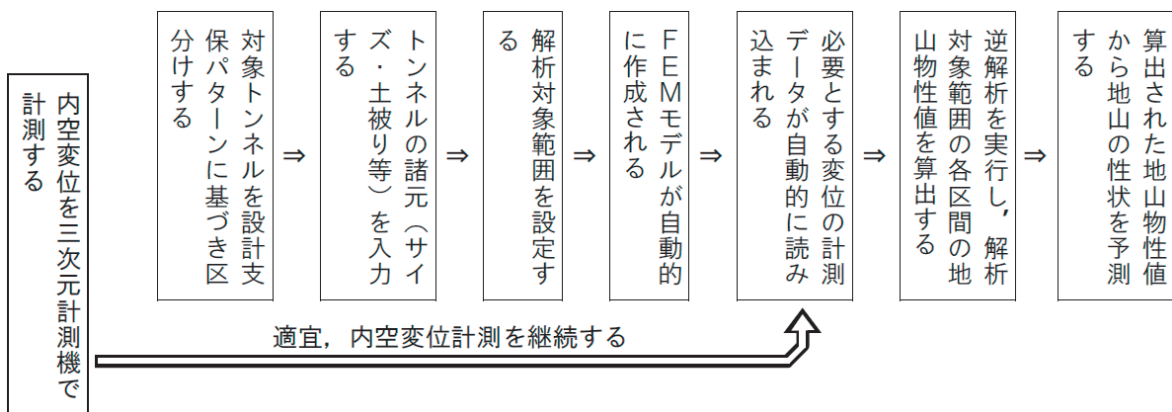


図-2 システムフロー図

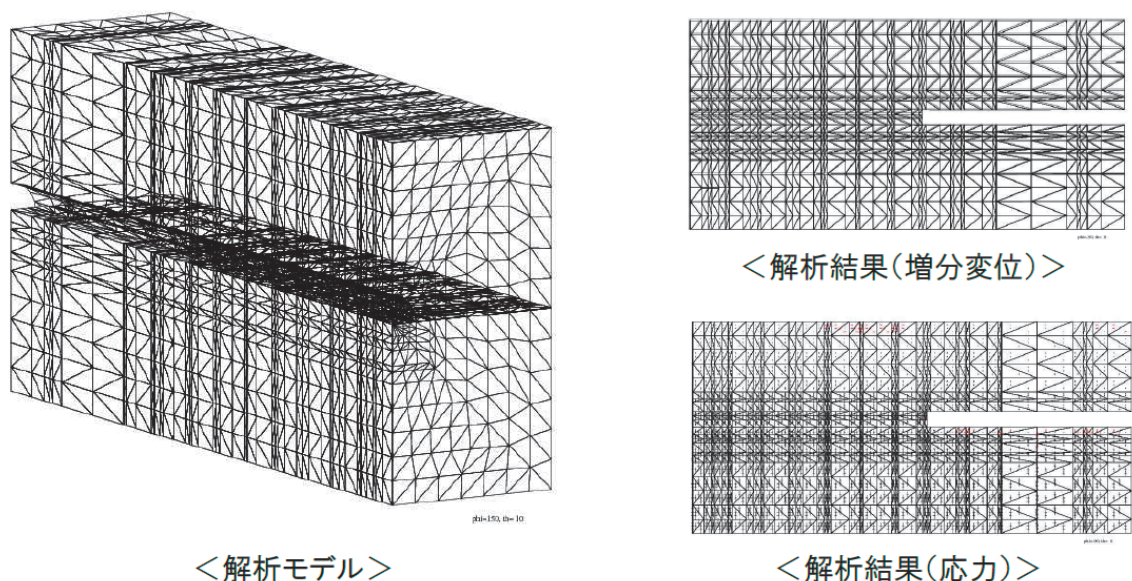


図-3 FEM解析モデル例

本システムは、トンネル工事における施工管理（観察・計測）の一環として一般的に行われている内空変位計測の鉛直方向変位、軸方向変位のデータを基にして逆解析を行うことで、切羽前方 1D 程度（約 10m）までの未掘削区間の性状を予測する。また、本システムの導入に当たって新規に必要な機材は解析用のパソコンだけであり、また、解析で用いるデータについては従来から実施している内空変位計測データをそのまま使用すればよいので、容易に導入することができる。

(3) 結果

図-4 に示すトンネルにおける実施例を示す。

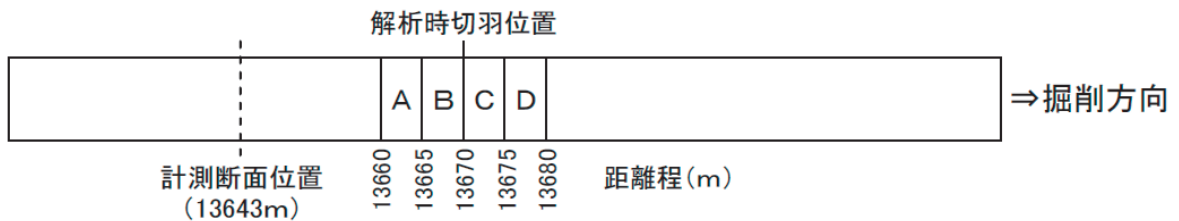


図-4 解析対象トンネル概略図

この実施例では、切羽の前後 10m ずつを解析範囲として設定し、区間長 5m ずつの区間に区分した。計測点は距離程 13643m に設置し、この点における変位計測の結果に基づき逆解析を行った。変位と逆解析によるフィッティングの結果を図-5~6、逆解析によって求められた地山の物性値を表-1 に示す。また、逆解析によって推定した地山の物性値と実際の地山の切羽評価点との比較を図-7~8 に示す。

図-7~8 によると、ヤング率については地山状況と整合性が高いが、ポアソン比については地山状況を反映しているとは言い難い。これは、軸方向変位の計測精度が鉛直方向変位の精度に比べて劣っているためと考えられるが、今後の検討が必要である。

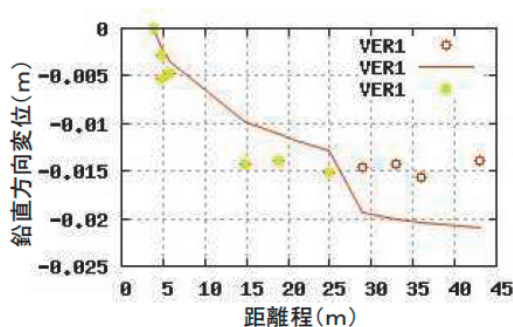


図-5 鉛直方向変位とフィッティング

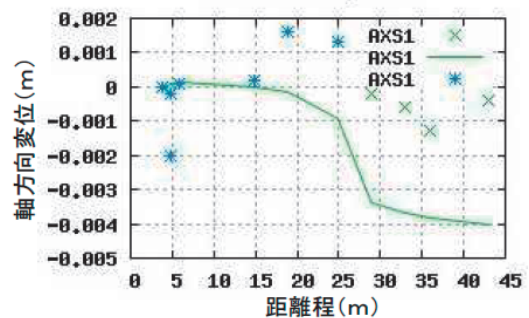


図-6 軸方向変位とフィッティング

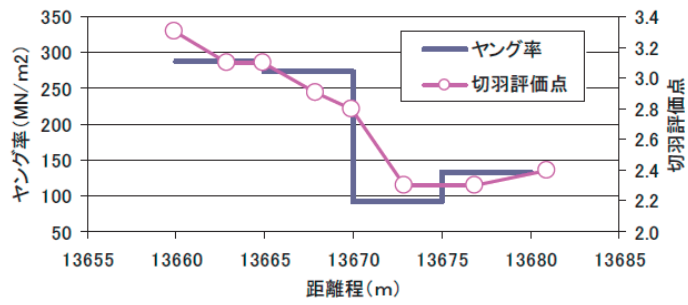


図-7 算出したヤング率と切羽評価点

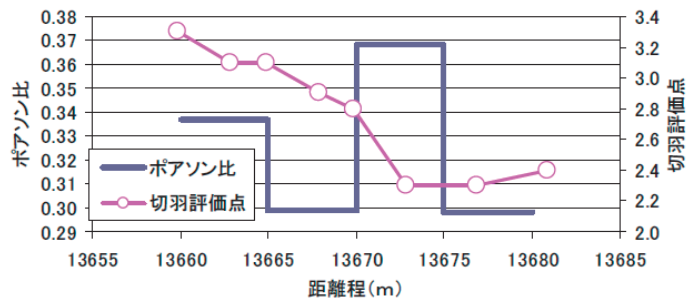


図-8 算出したポアソン比と切羽評価点

表-1 算出した地山物性値

区間	ヤング率 (MN/m ²)	ポアソン比
A	288.4	0.337
B	273.6	0.299
C	90.9	0.368
D	132.4	0.298

参考文献	土木学会第 70 回年次学術講演会：佐藤工業(株)、瀬谷正巳他、VI-692、P1383-1384、2015 年 9 月
備考	—

技術名	変位予測システム「4D-Super NATM」
番号	No. 4. 2-14
発注者	—
施設名	—
所在地	—
工事名称	—
施工期間	—
施工者	戸田建設(株)
キーワード	4次元変位量予測、3Dレーザースキャナ、3次元FEM解析

(1) 概要

NATM工法では、掘削により周辺地山の応力が解放されるため壁面の変位が発生する。一般的には切羽進行や時間経過に伴い応力が再配分され、変位量はある値に収束していく。しかし、支保工の持つ変形を抑える力が小さい場合には、変位量が収束せず増大していき、周辺地山やトンネル支保工の破壊に至る場合がある。このため、掘削の初期段階において、その後の変位量の変化を予測し、支保工の規格等を変更することで、安定した支保構造にすることが重要となる(図-1)。

一方、トンネルは3次元のチューブ構造であるため、変形挙動はトンネル断面方向の2次元管理のみでなく、トンネル軸方向も考慮した3次元で管理する方が合理的である。さらに、地形や地質はトンネル軸方向にも変化していくため、軸方向の断片的な計測のみでは、局所的な変形を見逃してしまう恐れがある。

このため、最近では3Dレーザースキャナにより、トンネル全壁面の変位量を3次元で管理する手法が研究されている(図-2)。

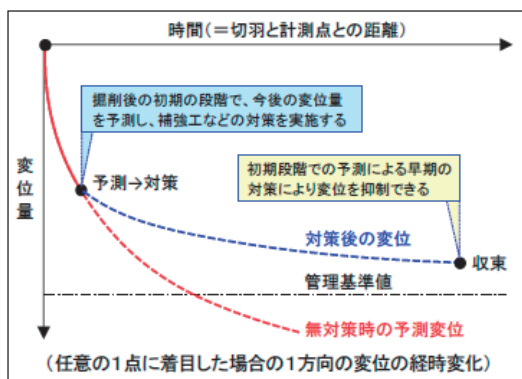


図-1 トンネル壁面の変位状況

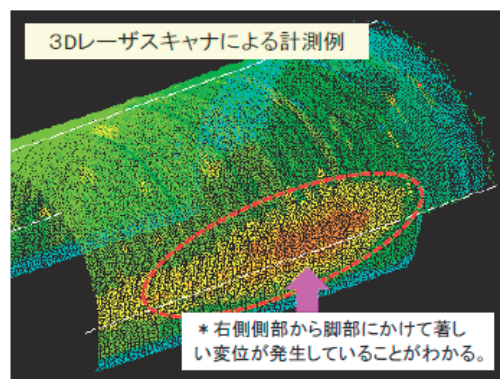


図-2 トンネル壁面の3次元変位

(2) 技術詳細

1) システムの概要

2-1-1 変位予測システム「4D-Super NATM」

『4D-Super NATM』は、3D レーザスキャナによる3次元データと、変形量を予測できる3次元FEM解析との両者を融合させた4次元変位予測システムである。本システムを適用すれば、初期段階で測定した3次元データを解析することで、現時点の変位量や変形モードだけでなく、任意時間後の変位量・変形モード等を3次元で可視化できる。これにより、補強対策や支保工の変更等の要否、対策の規模、対策の区間を合理的に判断できる。

2-1-2 計測管理手順

変位予測システムによる計測管理の手順は、下記の通りである。

- ① トンネルの線形・断面・支保パターン・地形等の各種の3次元情報を『4D-Super NATM』専用ソフトに入力。
- ② トンネル掘削を開始し、切羽や先進ボーリングコア等から地山の諸物性値とその変化予測情報を入力し、位置情報と共に専用ソフトに入力。
- ③ 初期値および一定の時間毎（概ね1回/日）の壁面位置を3Dレーザスキャナで測定し専用ソフトに入力後、自動で統計的データ処理を実施。
- ④ 変位予測を行いたい範囲および変位予測したい時間を指定し、自動で変位予測を実施。必要に応じて、変形モード図等を3次元可視画像として出力。
- ⑤ 変位の予測結果と事前に設定した管理基準値を比較することで、対策の要否・規模・範囲を判定。

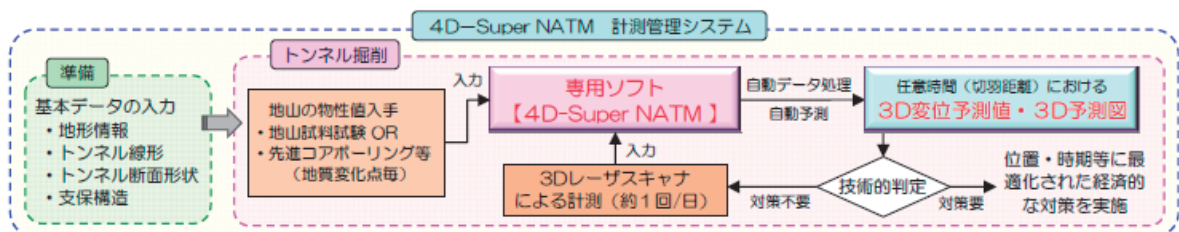


図-3 4D-Super NATM 計測管理システムの概要図

2) 現場へ導入したシステムの構成

2-2-1 3次元レーザスキャナによる断面計測

トンネル壁面の断面計測を掘削直後の切羽を含めた延長20m程度で実施し、三次元点群データを取得する（図-4）。計測精度の確保のため、データは測定メッシュ（10cm×10cm）を単位に1σ以内の平均値を算出して代表値とする。切羽進行に伴うデータ変化が断面各点の変位量となる。

2-2-2 3次元数値解析テーブル

トンネル掘削断面の変形は、どの地質でも弾性範囲内であれば地山の変形係数Eによって

規定されるため、掘削工法（補助ベンチ付全断面工法、ショートベンチカット工法）と設計等級による支保パターンの施工条件ごとに3次元 FEM 弾性解析（図-5）を実施し、変位の基準値となる3次元数値解析テーブルを作成している。

掘削工法と支保パターンが定めれば数値解析テーブルから基準変位曲線（切羽離隔に応じた変位曲線）が選定され、初期段階の実測変位と基準値の対比で実変形係数を評価し、着目点の変位曲線を特定する（図-6）。各測定メッシュで同様な処理を行うことで、トンネル壁面の変位分布、断面形状の変化を予測することができる。

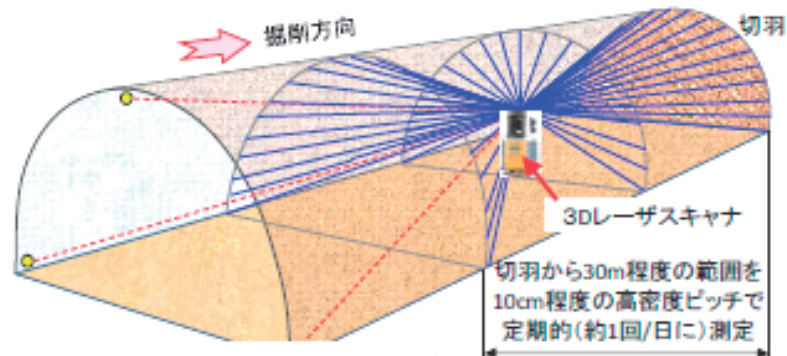


図-4 3次元レーザーキャナによる断面計測模式図

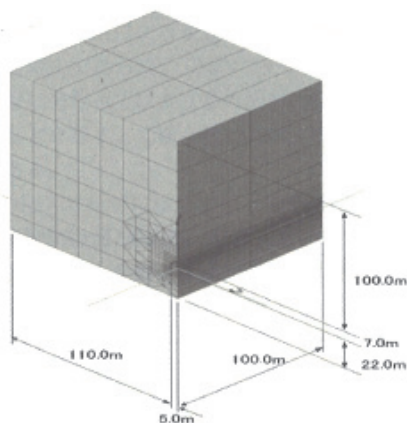


図-5 3次元 FEM 解析モデル図

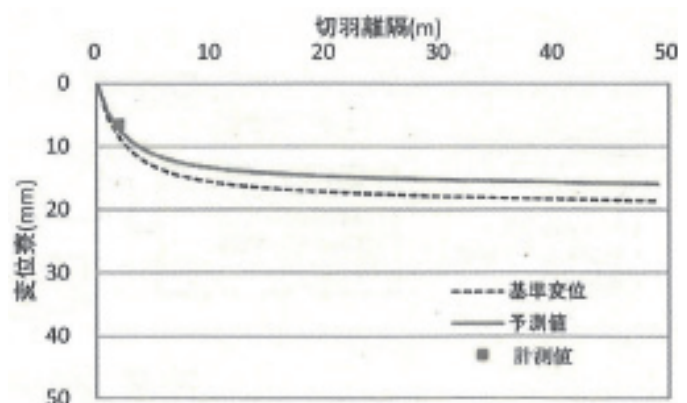


図-6 変位曲線(基準変位と予測値)

2-2-3 専用ソフト

専用ソフト（4D-Super NATM）は、断面計測データの一連の処理を自動的に行い、可視化する各種出力機能を有するもので、次の手順で運用される。

- ① 基礎データの入力：線形、掘削工法、支保パターンの割付等。
- ② データ変換：掘進データや計測データファイルの作成、3D数値解析テーブルの編集等。
- ③ 3D断面計測データの取得。
- ④ 計測データの処理：統計処理、変位量算定、変位量予測と各種ファイリング。
- ⑤ 着目区間のモニタリング出力：変位分布マトリクス（現状値、予測値）、変形モード図

等の3D可視画像。

- ⑥ 技術的評価：変位予測結果と管理値との対比および判定、掘削断面の出来形評価。
以上の手順で、③～⑥を順次繰り返して掘削を進めていくものである。

(3) 結果

1) 現場への適用事例

長野県発注「上高地トンネル」工事のCII区間において当システムを適用した。地質は新第三紀の砂岩、泥岩互層で一部、破碎帯、チャート層が挟在する地山条件であり、土被り高さは95m程度であった。掘削工法は発破による補助ベンチ付全断面工法であった。

切羽を含む20m区間を2サイクル進行(2.4m)ごとに3D断面計測を実施した。ここでの掘削工法とCIIパターンの条件で、地山の単位体積重量 22kN/m^3 、変形係数 420MPa の標準値に対する基準変位曲線が3D数値解析テーブルから設定され、天端沈下量の収束量は19mmと想定されていた。

今回の切羽進行2.4mでの初期天端沈下量、基準値 8.8mm と計測値 7.4mm の対比から、実変形係数 500MPa が得られ、天端沈下量の予測値は 16mm となった。全体的に大きな沈下量ではなかったが、3Dレーザースキャナによる実測の収束値は 18mm となり、予測値と大きな乖離はなく当システムによる変位予測手法の妥当性が確認された。

一方、着目断面内のトータルステーションによる実測の最終沈下量は 12mm であった。これは3D断面計測値より 6mm (約33%)少ない収束値であり、本手法によって掘削直後からの初期段階の変位量を確実に計測できることが証明された。

また、3D断面計測作業は切羽近傍で坑内を占有して実施されたが、1回あたりの計測時間は準備を含めて20分程度で、サイクル上大きな問題となるものではなかった。

2) 今後の課題・展開

今後は、4D-Super NATMをトンネル工事に本格的に採用し、専用ソフトの操作性の向上や変位の予測精度の向上を図っていく。また、CIM(Construction Information Modeling)との統合を念頭に、切羽写真や支保構造の品質管理データ等の属性データを取り込み、総合的な施工管理、維持管理資料のツールとして発展させたいと考えている。

なお、塑性地圧が発生して大きな変位を生じるような条件では弾性解析を基本とする当システムの適用は困難であり、条件に応じた非線形弾性解析等の採用が妥当と考えている。

参考文献	山岳トンネルの四次元計測管理システム=断面変位と形状変化を三次元で予測「4D-Super NATM」= 建設機械: 戸田建設(株) 岡村光政他 pp. 39-42 2015年7月 戸田建設(株) ホームページ: ニュースリリース(2014年7月8日) http://www.toda.co.jp/news/pdf/20140708.pdf
備考	—

【地下施設／山岳トンネル】

技 術 名	球面切羽計測システム
番 号	No. 4. 2-15
発 注 者	中日本高速道路(株) 東京支社
施 設 名	八之尻トンネル
所 在 地	山梨県西八代郡市川三郷町黒沢～山梨県南巨摩郡富士川町大柵
工 事 名 称	中部横断自動車道 八之尻トンネル工事
施 工 期 間	2009 年 12 月 15 日～2015 年 1 月 17 日
施 工 者	清水建設・岩田地崎建設共同企業体
キーワード	切羽形状計測、3Dレーザースキャナ、相対位置情報

(1) 概 要

1) 工事概要

工法：山岳工法

掘削延長：2,469m

掘削断面積：82m²

掘削方法：全断面掘削・補助ベンチ付全断面掘削，機械掘削（ブームヘッド RH-10J-SS）

2) 技術概要

八之尻トンネル工事では、機械掘削による全断面早期閉合工法の試験施工に発注者と共同で取り組んでおり、全断面掘削に伴う鏡面（切羽前面）の安定化対策として、球面（曲面）切羽を国内で初めて採用した。球面（曲面）切羽は鏡面を球面（曲面）形状に掘削することで、ドームアクションによる安定化効果を期待する方法である。



写真-1 3D スキャナによる計測状況

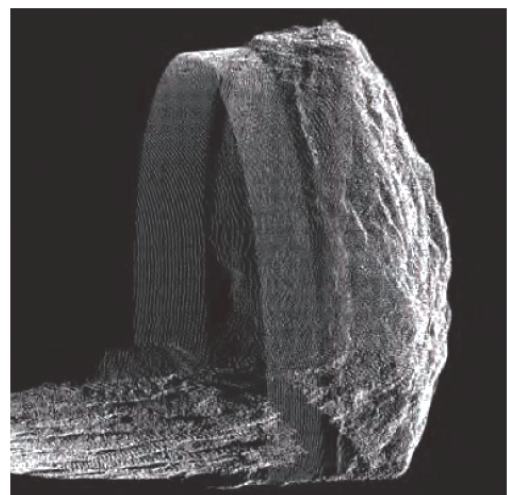


図-1 切羽形状計測結果

球面（曲面）切羽の効果を評価するに当たり、掘削形状を定量的に計測・記録し、分析に供することが必要である。そのためには、同工事の切盛土量管理で有用性を確認した、3Dス

キャナを用いた三次元形状計測が必要不可欠と判断した。

また同様に、トンネルの掘削出来形（当り/余掘り量）管理へ適用範囲を拡大することにより、当該作業の省力化、迅速化および高精度化を目指すこととした。

(2) 技術詳細

1) 3Dスキャナ

3Dスキャナは、指定した照射範囲・ピッチで連続的にノンプリズムでの測距測角を行うことで、物体の形状を三次元座標(X, Y, Z)を有する点の集まり(点群データ)として取得する測量機器である。1度に数百万点規模の連続計測が可能であり、測定誤差は測距30mで±4mm程度である。内蔵のCCDカメラを用いて、点群データに(R, G, B)の色情報を持たせることもできる。

なお今回採用した3DスキャナGLS-1500((株)トプコン製)は、操作にノートパソコンの接続が不要なスタンドアローン仕様であり、切羽での計測時間の短縮化と操作性の向上が図られている。計測データはスキャナ本体に装着したSDカードに保存する。

表-1 計測機器スペック

3Dスキャナ (GLS-1500)

■スキャニング部	
測距方式	パルス方式 (Time of Flight)
測定距離 (反射強度90%)	330m
単発測定精度	
距離精度	4mm (ρ) / 1~150m
角度精度	6"
スキャンスピード	30,000点/秒
スキャン分解能	
計測密度	最大1mm/20m
最大測点数	V×H: 100,000,000点
測定範囲	鉛直: ±35°, 水平360°
■カメラ部	
画角	約22° (V)×16.5° (H)
画素数	2メガピクセル(1600×1200)
■外観	
寸法	299(D)×240(W)×566(H)mm
機械高	410mm
質量	16kg

計測データ処理用PC

CPU	Intel®Core™5Duo CPU
クロックスピード	2.4GHz
メモリ	8GB
OS	Windows7
グラフィックメモリ	1GB

2) 3Dスキャナによる計測

切羽形状計測では1切羽当りの計測点数を約15万点とし、計測時間を5分程度に設定した。その他、機器の立ち上げとキャリブレーション、既知点の後視等を合わせた作業時間は15分程度となる。なお、3Dスキャナで計測した点群データは、この時点では相対位置情報のみであり、絶対座標データは持っていない。

3) ユーティリティソフトによるデータ処理

切羽で計測した点群データに、事務所にてユーティリティソフトを使って座標データと色データを持たせる。計測目的外(配管, 風管, 照明器具など)の不要データはこの時削除し、データ量を必要最低限にする。これらの処理を行った後、点群データ(X, Y, Z, R, G, B)をテキ

ストファイル、DXF 形式等で出力する。

4) 専用ソフトによるデータの視覚化

上記処理後の点群データは、三次元設計ソフトや CAD ソフトを使い、パソコン上で三次元的に表示することができる（図-2）。また、任意の断面で輪切りにした、断面図として表示させることも可能である（図-3）。3Dスキャナを用いた切羽形状計測結果の分析により、地質毎の鏡面の安定性と切羽形状との相関性が明らかとなるなど、球面（曲面）切羽の有効性の評価が可能となった。

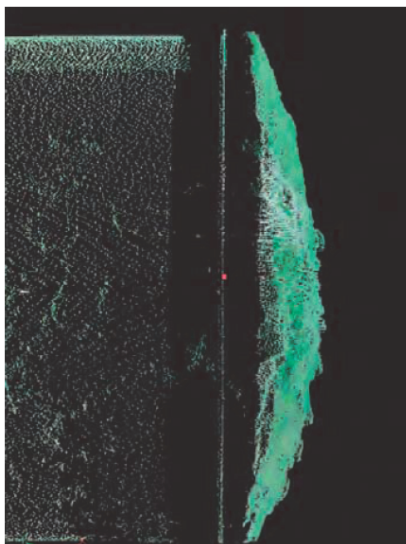
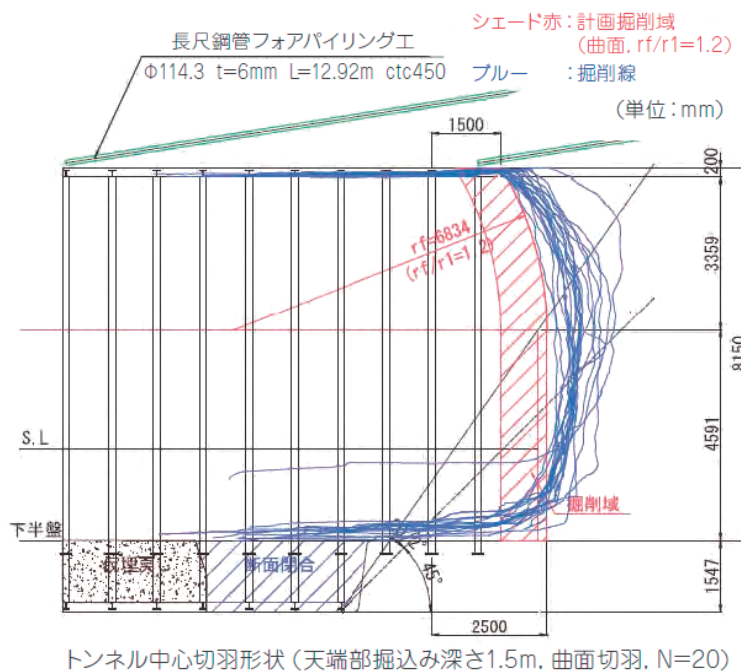


図-2 球面切羽形状計測結果



トンネル中心切羽形状（天端部掘込み深さ1.5m、曲面切羽、N=20）

図-3 切羽縦断面形状重ね合わせ図

5) 3D出来形管理システム

本システムは、トンネル坑内で計測した一次支保工（吹付けコンクリート）仕上がり面の3D点群データから、余掘り（当り）量や二次覆工打設数量をダイレクトに計算し、三次元コンター図や展開図、断面図として容易かつ迅速に結果を得ることを可能とした。また、初期設定で入力が必要なトンネル線形、断面形状などの設計データは、山岳トンネル現場で一般的に用いられる切羽レーザー照射システムとの共有化が可能で、3Dビューアを用いてトンネル設計形状を三次元的に表示し確認することができる（図-4）。

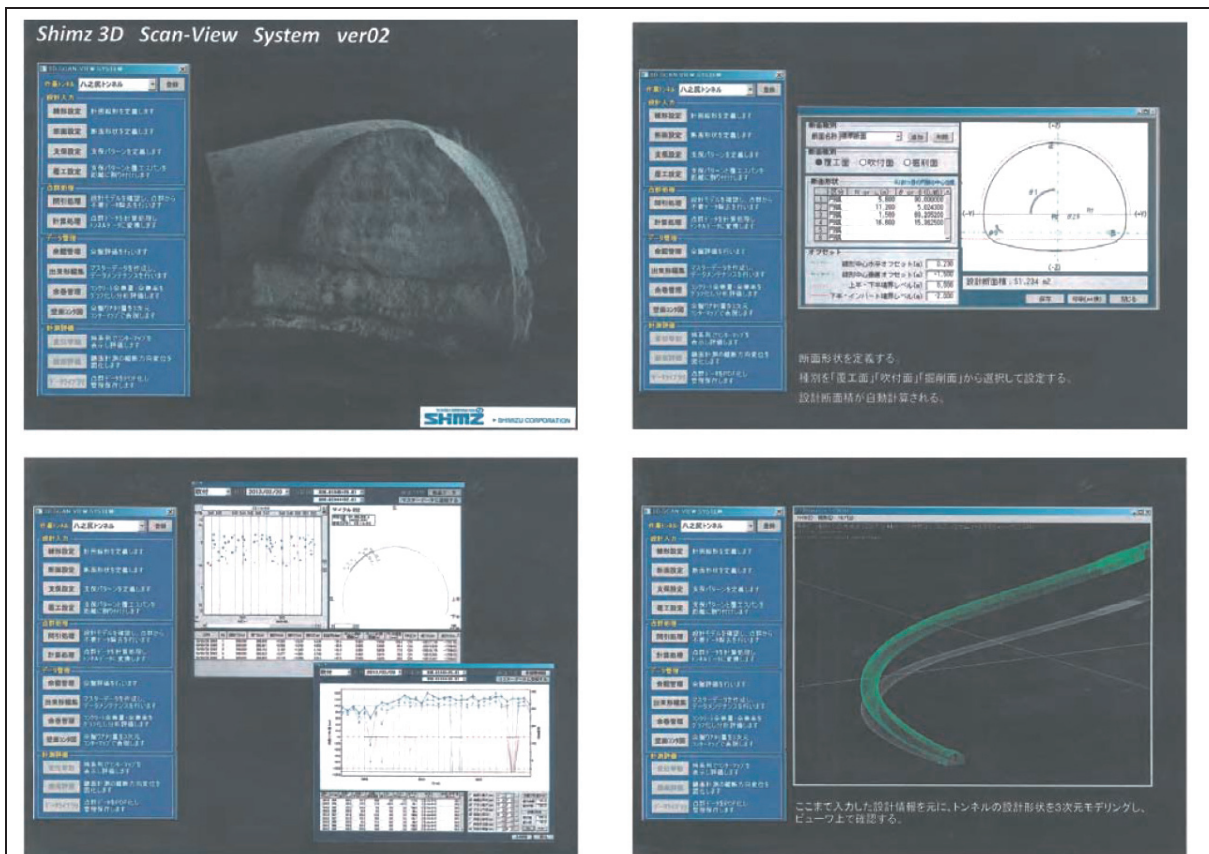


図-4 3D出来形管理システムの表示例

(3) 結果

八之尻トンネルでは当初より一貫して「3Dスキャナを用いた生産性向上」のテーマに取り組んできた。その効果をまずは明り工事の切盛土工で確認した後、トンネルの切羽形状計測へ展開し、球面（曲面）切羽の有効性の定量的評価を実現した。

次の段階では、トンネル3D出来形管理システムの開発により、当該作業の簡便化、汎用化にも成功した。一方、同システムによる品質、コスト面での改善効果については、当現場での施工データを更に蓄積することで検証していく。

今後は3Dスキャナ技術の他現場への水平展開を図ると共に、活用範囲をトンネルの変位計測へも広げることを目指す。最終的には、設計から納品、維持管理まで一貫した3D化によるCIMへの展開を図っていきたい。

参考文献	土木クォーターリー Vol. 179 : 清水建設(株)、P102-106、 2013年8月
備考	—