

【地下施設／山岳トンネル】

技術名	三次元形状計測システム「RaVi」
番号	No. 4. 2-16
発注者	国土交通省中国地方整備局三次河川国道事務所
施設名	下本谷トンネル
所在地	広島県庄原市口和町向泉～竹地谷地内
工事名称	尾道松江自動車道下本谷トンネル工事（試験導入）
施工期間	2011年6月14日～2012年9月30日
施工者	東急建設(株)
キーワード	3次元レーザー計測、自動追尾トータルステーション、リアルタイム評価

(1) 概要

1) 工事概要

工法：山岳工法

延長：394m

内空断面積：61.8～68.3m²

掘削方法：発破掘削・補助ベンチ付全断面掘削

2) 技術概要

一般に普及し、建設現場で用いられている3次元スキャナは三脚上に設置して計測する定置式のもがほとんどである。そのため、トンネル等の細長い閉鎖空間では、計測点の間隔が一定にはならず、計測効率を向上させるためには、計測精度に悪影響を及ぼす等の問題があった。3次元形状計測システム「RaVi」は、自動追尾トータルステーションで計測機本体の位置をリアルタイムで追尾することで、移動しながら3次元計測が可能となっている。そのため、トータルステーションの計測可能範囲内ではシステムの盛替えが必要なく、トンネル等の細長い閉鎖空間では、定置式と比較してシステムの盛替え回数を極端に減らすことが可能となった。

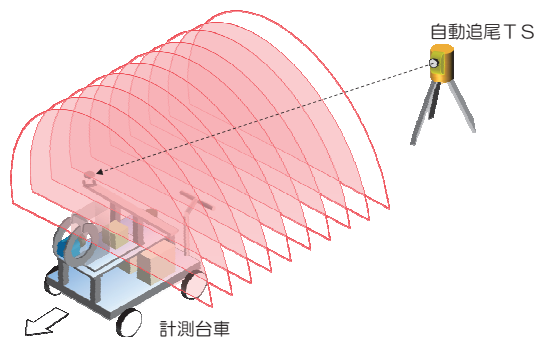


図-1 計測概念図

さらに、レーザスキャナの計測方向は、常にトンネル断面方向に向けることができ、移動速度を一定にすることで計測精度を一定に保つことが可能となっている。

3次元形状計測システム「RaVi」のもう一つの特徴は、計測対象物の設計データをあらかじめ入力しておくことで、計測と同時に設計と計測データの差異を算出し、差異の大きさによりデータ表示色を変化させて、計測結果の評価を直感的に行うことができる点にある。

(2) 技術詳細

1) 移動計測型の三次元形状計測機

三次元形状計測システム「RaVi」の計測原理は、まず2次元レーザスキャナを計測台車上に上下2台搭載し、断面方向の形状データを取得する。次に、台車を連続的に前進させることで、周辺構造物の3次元形状を取得する。さらに、レーザスキャナの位置及び台車の傾きは、自動追尾トータルステーション及びジャイロで計測し、形状データに反映する。

これにより、自動追尾トータルステーションで設定した座標系で計測データが出力され、設計形状との対比を容易にしている。また、移動しながらの計測が可能となるため、400m程度のトンネルであれば、1時間程度で全線計測が可能となっている。



写真-1 台車搭載タイプ



写真-2 背負子搭載タイプ



写真-3 小型台車搭載タイプ



写真-4 軽便トロ搭載タイプ

2) リアルタイム評価システム

三次元形状計測システム「RaVi」のもう一つの特徴は、計測と同時に設計との対比が可能である。PCの画面上には計測結果が逐次表示される仕様になっており、計測と同時にその結果を鳥瞰図・平面図・断面図等の形式で確認することができる。さらに、計測対象物の設計データをあらかじめ入力しておくことで、計測と同時に設計と計測データの差異を算出し、差異の大きさによりデータ表示色を変化させるため、計測結果の評価を直感的に行うことができる。

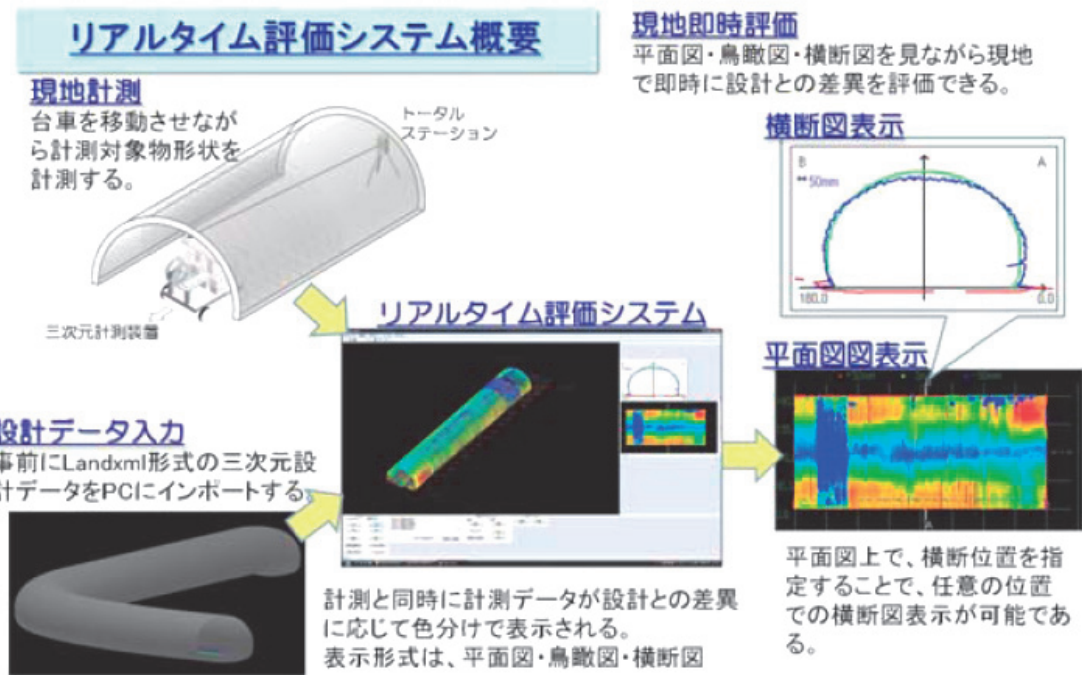


図-2 リアルタイム評価システム概要図

(3) 結果

下本谷トンネルでは出来形管理に試験導入し、トンネル一次覆工面と二次覆工面を計測し、各管理断面図の覆工厚を確認した。

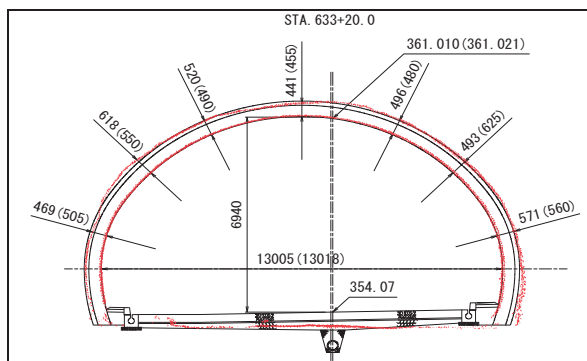


図-3 トンネル計測結果の表示例



写真-5 システム説明状況

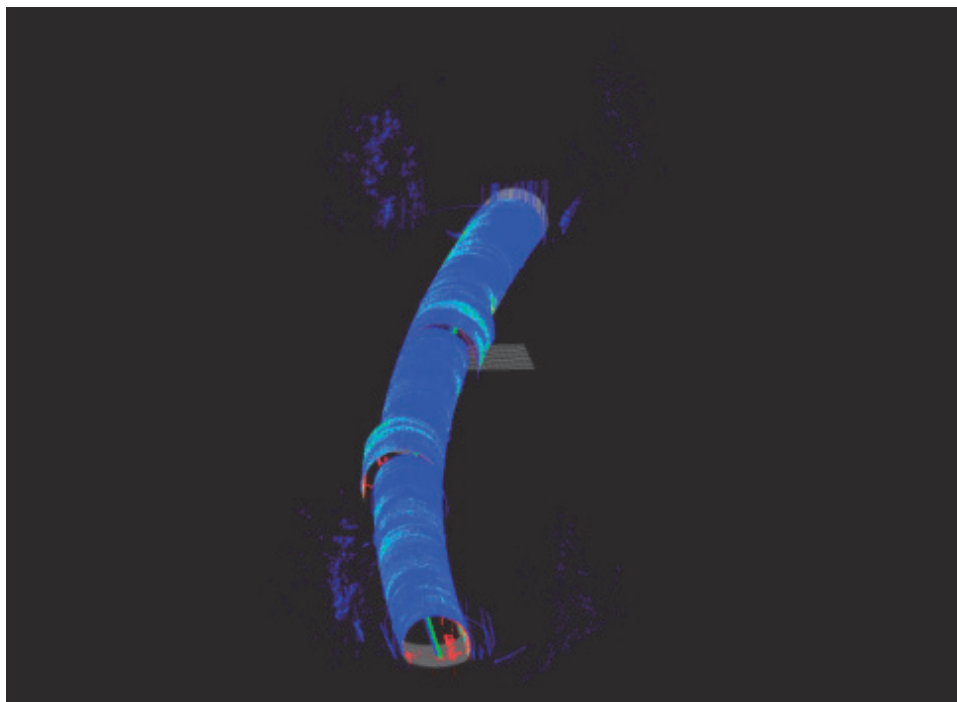


図-4 トンネル計測結果の表示例

参考文献	No. 368 電力土木：東急建設(株) 池田直広他、P135-137、 2013年11月
備考	—

【地下施設／山岳トンネル】

技術名	自由断面掘削機の自動化システム
番号	No. 4. 2-17
発注者	日本鉄道建設公団
施設名	金田一トンネル（南工区）
所在地	岩手県二戸市
工事名称	—
施工期間	—
施工者	戸田建設・大豊建設・福田組共同企業体
キーワード	自由断面掘削機、自動掘削システム、自動測量システム

(1) 概要

トンネル掘削工事において、作業者の面では従事者の高齢化と熟練技能者の不足、施工の面では安全性、掘削品質（路線管理含む）、及び効率向上の必要性が問われている。また、早期併合が必要なインバート掘削においては必要断面を確保できたかの確認に多大な工数を必要とし効率が悪かった。

本技術は自由断面トンネル掘削機の掘削作業を自動化することにより、掘削前測量・掘削目印や掘削進行長確認の作業を大幅に低減した。オペレータの熟練度によらず、設定したトンネル線形を簡単な操作で高能率・高精度に自動掘削できるようにした。

切羽位置計測と掘削姿勢検知に情報化施工技術を取り入れ、余掘り量を抑えた高精度な自動掘削システム搭載の自由断面掘削機（写真-1、図-1, 2）。

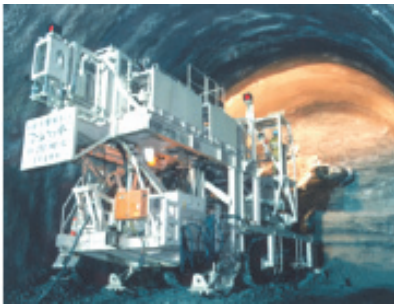


写真-1 自動掘削運転状況

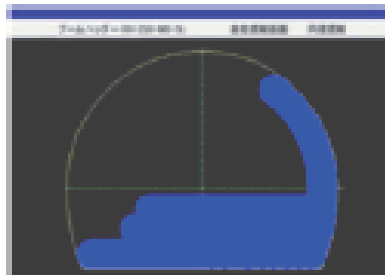


図-1 自動掘削断面

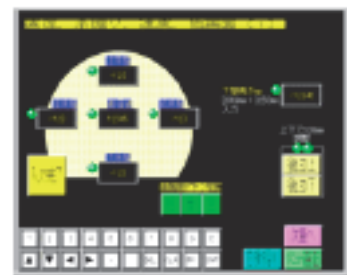


図-2 自動制御パラメータ画面

(2) 技術詳細

1) システムの概要

トンネル線形に対する掘削機本体の位置・姿勢角を自動測量するシステムと本体の位置検出器と制御用 CPU 装置等により、掘削装置を自動制御するシステムから構成され、この2つのシステムは常時連携している。自動測量システムは、掘削機本体に搭載した LED ターゲットを後方に設置した CCD カメラ付トータルステーションで捕捉し、光波測距結果を画像処理することにより、機体の位置姿勢を常時リアルタイムで計測する（図-3）。

2) 現場へ導入したシステムの構成

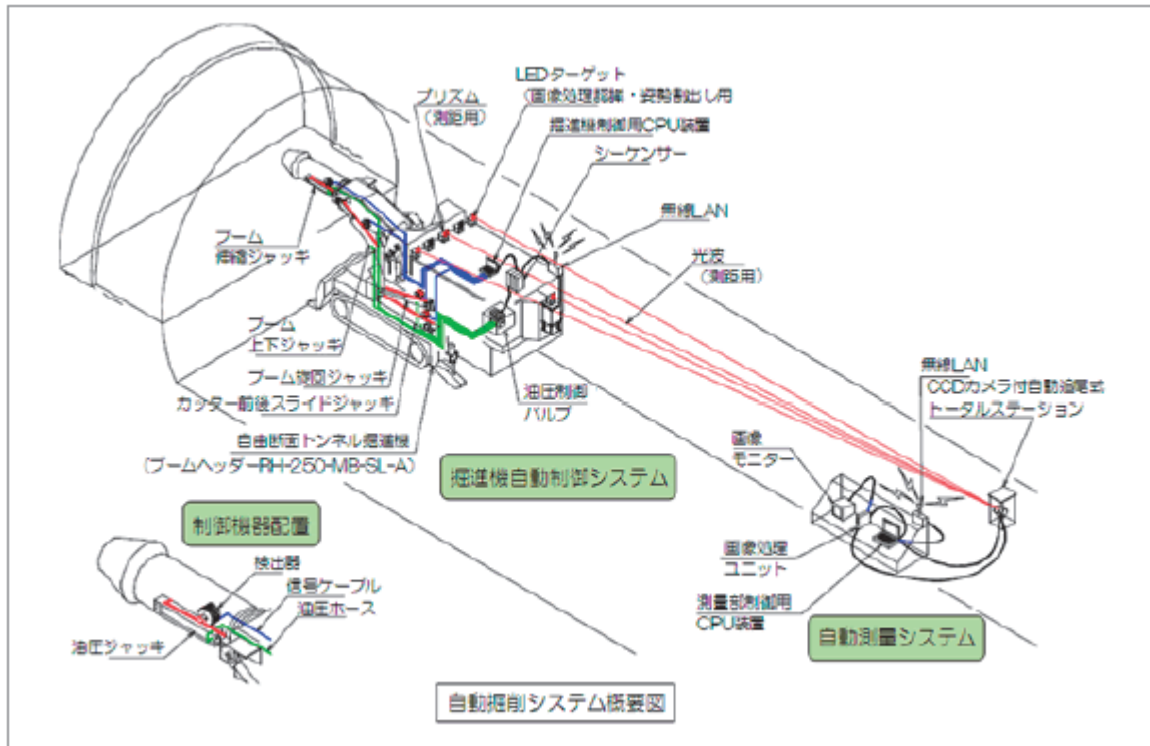


図-3 自動掘削システム概要図

(3) 結果

1) 現場での判定結果

実施工で±50 mmの精度を確認でき、手動掘削からの改善を達成できた。また、掘削中の機体の位置変動も確認されており、その状況下で、上記精度を確保しており、機体位置変動の影響を受けないことも証明できている。

2) 今後の課題・展開

現状システムは無人化施工が可能であり、機会があれば提案していきたい。

参考文献	戸田建設(株) カタログ資料 (http://www.toda.co.jp/tech/infra/infra_16.html)
備考	—

【地下施設／山岳トンネル】

技術名	高速施工のための自由断面掘削機用「自動掘削制御システム」
番号	No. 4. 2-18
発注者	(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部北陸新幹線建設局
施設名	北陸新幹線 峰山トンネル
所在地	新潟県糸魚川市大字中野口地内
工事名称	北幹, 峰山T(西)他1・他2
施工期間	2001年10月1日～2007年7月17日
施工者	清水建設(株)
キーワード	高速掘進、自由断面掘削機、自動測量システム、余掘り、高精度掘削

(1) 概要

1) 工事概要

工法：山岳工法

掘削工法：補助ベンチ付き全断面掘削工法

掘削方式：機械掘削

ずり出し：タイヤ方式

作業用横坑：延長 376m、掘削断面積 33m²

本坑：延長 3,742m、掘削断面積 72m²

2) 技術概要

峰山トンネル（西）工事においては、発注者より高速掘進の技術開発が課題として与えられていた。昭和 56～57 年に調査坑の施工が行われ、可燃性ガスを胚胎するものの、湧水量も少なく、機械掘削に適当な強度を有する泥岩が分布していることがわかった。そこで、「初期高強度吹付けコンクリート」の採用を前提として、月進 250～300m を目標とした（通常山岳トンネル掘削は月進 60～100m 程度）。

掘削サイクルタイムの試算より、掘削機械には 1 時間当たり 150m³ の掘削能力が必要であったため、国内最大級となる 350kW 級ロードヘッド（SLB-350S）を開発するとともに、作業の効率化、作業時間の短縮などを図るため、自由断面掘削機に自動掘削制御システムを搭載した。

自動掘削制御システムは、掘削機の切削ドラムの三次元座標をリアルタイムに管理するものであり、オペレータの熟練度に左右されず、設定断面を計画線形通り高精度に掘削できるシステムである。



写真-1 高速掘進工法での掘削状況



全長	24.3m
全高	4.8m
全幅	3.4m
全装備重量	120ton
切削能力	150m ³ /hr
切削電動機	350/350kw-4/6P 空冷2速切換式
油圧電動機	110kw-4P
下盤下深さ	1.7m
最大切削高	9.2m
最大切削幅	11.0m
クローラ幅	800mm
ドラム方式	シングルドラム
ドラム伸縮長	0.85m
ドラム回転数	高速 46/55min ⁻¹ 低速 31/37min ⁻¹
接地圧	0.15MPa
供給電圧 (50/60Hz)	400/440V

写真-2 ロードヘッダ SLB-350S 型

(2) 技術詳細

自動掘削制御システムは、掘削機の後方に配置した換気架台上に2台の追尾装置を設置し、これらからのレーザー光が掘削機の位置、向きを常時測定し、その他の測定値と合わせて掘削

機の切削ドラムの三次元座標をリアルタイムに管理するものであり、以下の特徴を有する。

- ・ 自動測量による余掘りの低減および高精度掘削の実現
- ・ 掘削断面の確認測量の簡便化
- ・ 掘削断面の外周線のマーキング時間および測量時間の削減によるサイクルタイムの短縮
- ・ 切羽直近での測量・マーキングなどが不要となり安全性が向上

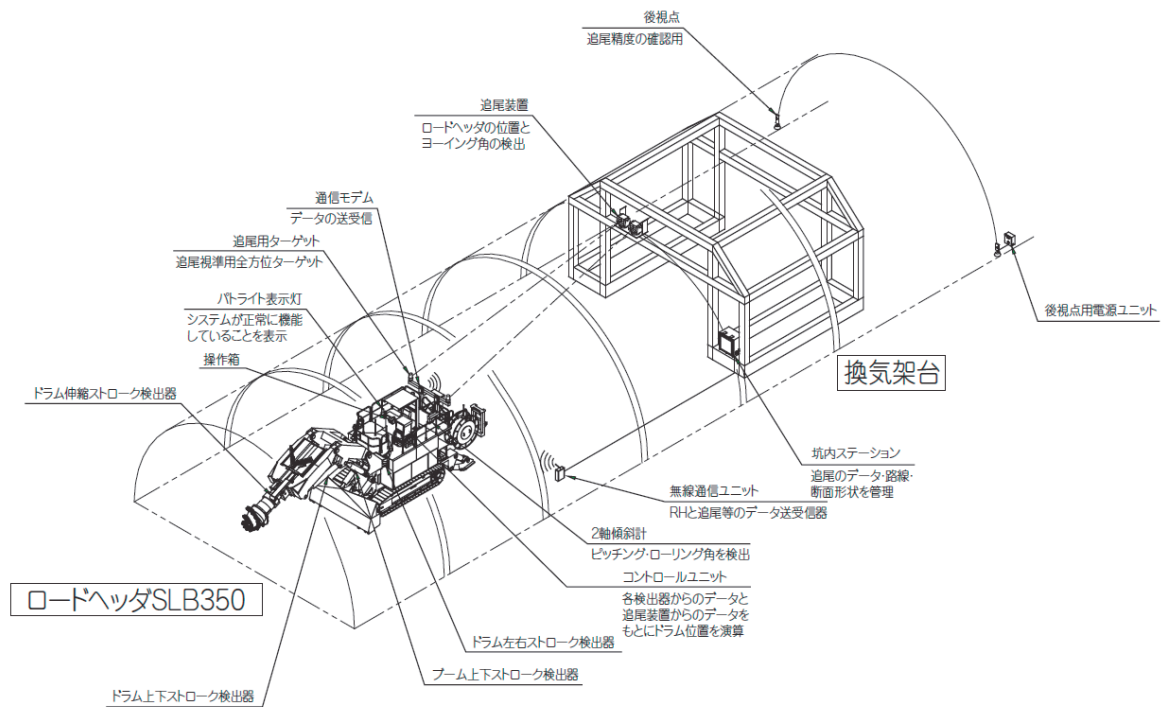


図-1 自動掘削制御システム

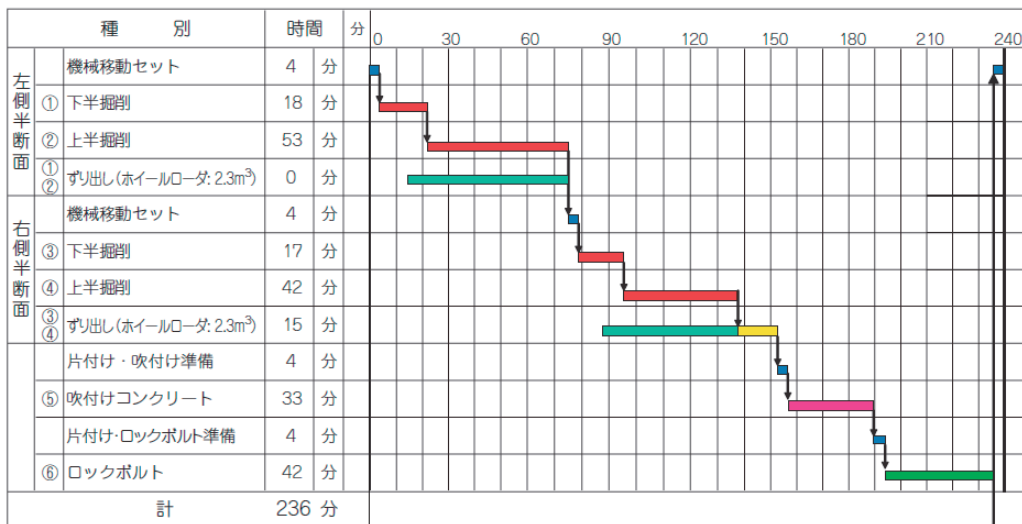
(3) 結果

新支保パターンで施工した区間の平均日進は 8.8mであった。表-1 に新支保工パターンにおける平均的な掘削サイクルタイムを示す。実施工においては、進行長を計画の 1.5mから 1.7m程度に延ばした。1 回の掘削土量が増加してサイクルタイムは延びるが、切羽での機械の入れ替え、各作業の準備片付け回数などの時間ロスを考慮した場合に施工サイクル回数を減らすほうが高速掘進に有利と実施工の中で判ってきたためである。掘削・ずり出しについては高速掘進のために計画した並行作業を実現し、掘削サイクルタイムの短縮に大きく寄与した。

掘削においては、自動掘削制御システムが高速掘進に大きな効果を発揮したと考える。従来の掘削では、余掘りを最小にするためにオペレータが断面外周の掘削に細かな注意を払い、掘削を完了する前に機械を停止させて外周線を確認するなど時間を要していた。この自動掘削制御システムは、計画線形から定まる断面外周の三次元座標が演算されており、同時に掘削中のドラム先端の座標をリアルタイムに測定していて、ドラムが断面の外周から外れようとするとき制御がかかる。その為、オペレータは切削ドラムの操作を連続してスムーズに行え、掘削時間を短縮することができた。また、余掘り量も低減され、円滑な仕上がり面で施工することがで

きた。写真-3に吹付けコンクリート施工後の坑壁の状況を示す。

表-1 新支保工パターンでの平均的掘削サイクルタイム（実績）



1 サイクル 236分

5.08サイクル/日

$600分 \times 2方 \div 236分 = 5.08$ サイクル/日

$5.08 \text{ サイクル/日} \times 1.73\text{m} = 8.8 \text{ m/日}$



写真-3 掘削吹付け仕上がり状況

参考文献	土木クォータリー Vol. 153 : 清水建設(株)、P22-49、2007年2月
備考	—

【地下施設／山岳トンネル】

技術名	トンネル覆工巻き厚管理システム
番号	No. 4. 2-19
発注者	国土交通省近畿地方整備局
施設名	別所トンネル
所在地	兵庫県朝来市地内
工事名称	和田山八鹿道路別所トンネル工事
施工期間	2008年2月～2011年3月
施工者	三井住友建設(株)
キーワード	覆工コンクリート、3次元レーザー計測

(1) 概要

山岳トンネルなどで掘削を行う場合、発破掘削や地山の変状によって壁面に凹凸が発生してしまい、覆工巻き厚に過不足が生じ易いという課題があった。また、トンネルの施工管理基準については国土交通省などで規定されているが、壁コンクリートの巻き厚については5～10mごとに断面数ヶ所を計測するものであるため計測されない範囲が存在していた。

本システムは、3次元レーザースキャナーの技術を利用することで、従来の計測手法では捉えることのできなかつた3次元形状計測を行うことで、5cm間隔で巻き厚の計測を行い、評価・判定可能なシステムとして開発したものである。

図-1にレーザー計測の流れを示す。

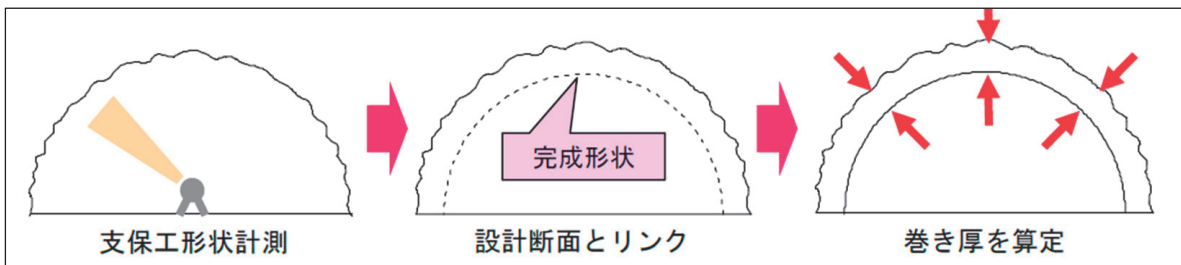


図-1 レーザー計測の流れ

(2) 技術詳細

1) 計測機器

計測に使用するレーザースキャナーは、オーストリア RIEGL 社製 LMS-Z360i である(写真-1)。本機は水平 360°、上下 80° の範囲を1回で計測することができ、塔体が回転しながら 12,000 点/秒、最長 200m までの 3次元形状計測を行う。

2) 計測方法

計測は、壁面に貼った 5cm 四方の反射ターゲット(写真-2)を利用した基準点ターゲット測量から開始する。基準点ターゲット測量は機械中心を原点とする座標系から公共座標系へ座標変換するために行うものである。

反射ターゲットはレーザー計測時にも写り込む位置に設置し、このターゲットを基準とし

て隣り合うレーザーデータの合成への変換にも利用する。次に3次元レーザースキャナーを設置する。設置の際には、3次元レーザースキャナーの回転軸方向とトンネル軸方向を合わせる向きでトンネル中心に機材を据える（写真-3）。3次元レーザースキャナーを横向きに固定することで、壁面までの距離が一定となり、データの集散を最小限に抑えることができる。

この状態で壁面を計測し、メッシュ化処理を行ったものが図-2である。片側2車線の道路トンネルの場合、1回の計測で約10m区間の計測が可能である。



写真-1 RIEGL 社製
LMS-Z360i



写真-2 画像合成・測量用
反射ターゲット

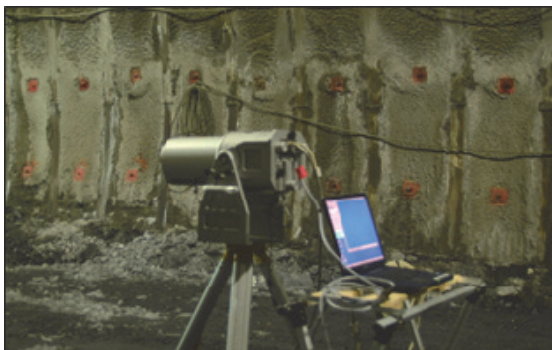


写真-3 レーザー設置方法（横向き配置）

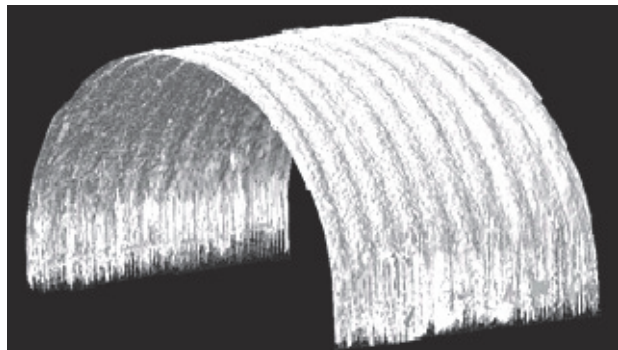


図-2 トンネル壁面の3次元データ

3) 巻き厚管理方法

3次元レーザースキャナーによる壁面形状計測の後、覆工巻き厚の過不足判定を行う。覆工巻き厚の判定は図-1 に示した要領で行う。「巻き厚の判定」とは、座標変換を行った計測データと設計データとの差分を求めるもので、この差分が覆工コンクリートの巻き厚である。

4) 管理ソフトウェア

覆工巻き厚の過不足については、計測形状（断面形状）と設計断面との差分から求めることが可能であるが、巻き厚判定は数値による確認だけでなく可視化するため覆工巻き厚管理

ソフトウェアを開発した。このソフトウェアの最大の特徴は、巻き厚判定を3種類の方法で表示・出力ができることである（図-3、4、5）。

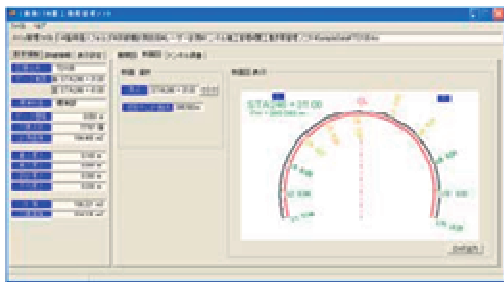


図-3 断面図
(トンネル施工管理要領準拠)

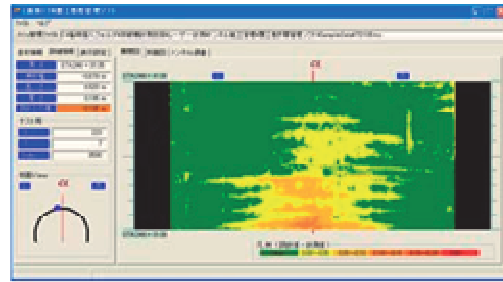


図-4 平面展開図 (コンター図)

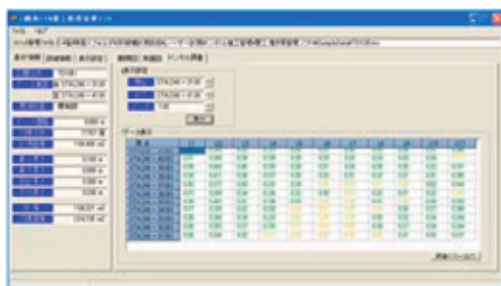


図-5 数量表
(覆工巻き厚過不足の出力図表)

(3) 結果

1) 現場での確認結果

本システムを現場の覆工巻き厚管理に用いたことで、以下の知見を得ることができた。

- ① 高速で3次元形状を把握することが可能
- ② 暗所においても精度良く形状計測が可能
- ③ 連続的な立体として形状を捉えるため、覆工巻き厚の不足箇所の把握が容易
- ④ コンター図、断面図及び一覧表で表示することで可視化された覆工巻き厚管理が可能
- ⑤ 詳細なメッシュから打設コンクリート量を算出することで、高精度な数量管理が可能
- ⑥ 高速で形状計測が可能であるため、施工工程に影響を与えずに覆工巻き厚管理が可能

2) 今後の課題・展開

- ① 施工中に計測を行う場合、トンネルの中心に機材を据える必要があるため、工事車両の通行を阻害する。そのため、計測方法については今後も検討を続ける必要がある。
- ② ソフトウェアの開発に関して、開発者側のニーズだけでなく、運用者側のニーズにも応えられる機能の開発を進める必要がある。

<p>参 考 文 献</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3次元レーザースキャナーを用いたトンネル覆工巻き厚管理の現場適用 (土木情報利用技術講演集 31) : 小西昭裕(近畿地方整備局 福井河川国 道事務所)、小田重一(三井住友建設(株))、櫻井雄二郎(同)、塩崎正人 (同)、佐田達典(同)、 pp. 61-64、 2006 ・ プレス発表資料 ・ ホームページ : http://www.smcon.co.jp/service/tunnel_hukukoumaki/ (2016年7月5日現在)
<p>備 考</p>	<p>—</p>

技術名	コンラップ監視システム
番号	No. 4. 2-20
発注者	長野県建設部
施設名	(仮称)上高地トンネル
所在地	長野県松本市安曇
工事名称	平成 25 年度防災・安全交付金(道路) 工事
施工期間	2013 年 12 月 6 日～2016 年 4 月 20 日
施工者	戸田建設・金多屋建設共同企業体
キーワード	セントル、覆工コンクリート、ひび割れ防止、レーザー変位計

(1) 概要

当該工事は、NATM 工法による延長 588.0m、幅員 6.0m のトンネル掘削工事である。

山岳トンネルの覆工コンクリート施工における課題に対して情報化技術を用いて対応したものである。

山岳トンネルの覆工コンクリートは、一般的に 2 日に 1 回の頻度でコンクリート打設を行う。このとき、既打設の若材齢の覆工コンクリートにセントルをラップさせてセットするが、以下の要因でひび割れや端部の角欠けが発生する課題があった。

- ① セントルのセット時に、確認不足や電動油圧ジャッキの誤操作により、既打設コンクリートにセントルを過度に押し付けてしまう (図-1)。
- ② コンクリート打設時に、コンクリートの側圧がセントルに作用し横方向に移動しようとし、ラップ部で既打設コンクリートを過度に押し付けてしまう (図-2)。

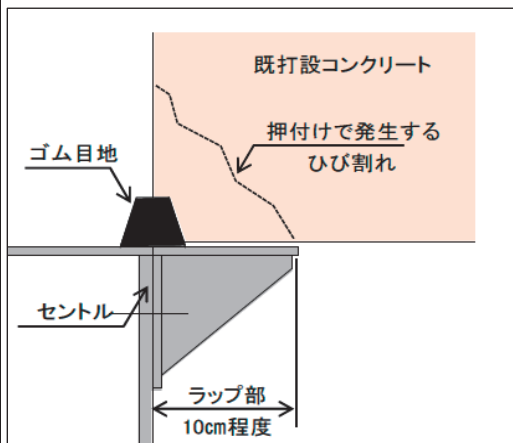


図-1 ラップ部ひび割れ 概念図

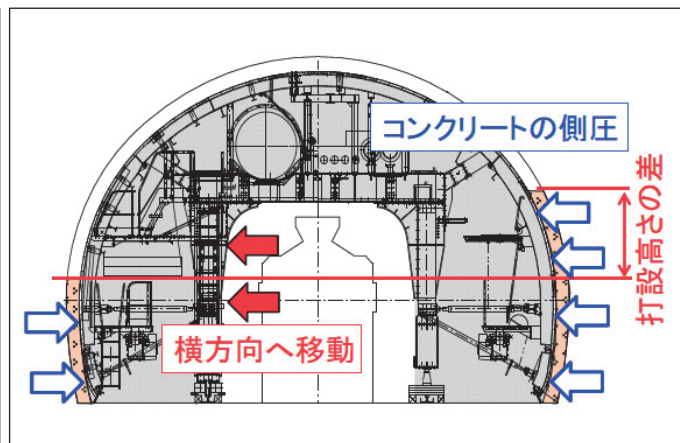


図-2 コンクリート側圧 概念図

- ③ セントル脱枠時に作業手順の認識不足や機械故障により、妻側の電動油圧ジャッキだけを下降させてしまい、既打設コンクリートのラップ部を押し付けてしまう（図-3）。

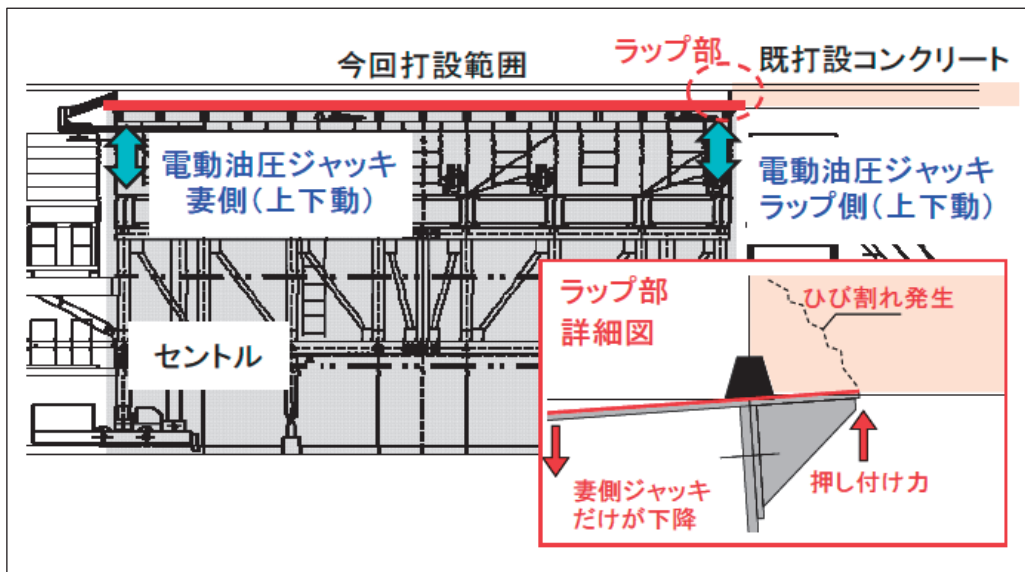


図-3 脱枠時の押し付け 概念図

(2) 技術詳細

1) 機器の配置と機能

「コンラップ監視システム」は、既打設コンクリートとセントルラップ部の隙間を側壁部、肩部、天端部の5ヶ所に配置した超高速・高精度レーザー変位計で既打設コンクリートとセントルとの離隔を常時計測し、事前に設定した管理基準値を超えた場合、ブザーと回転灯で警報を発令するとともに、電動油圧ジャッキの上下動を強制的に停止させる施工管理システムである（図-4、5）。

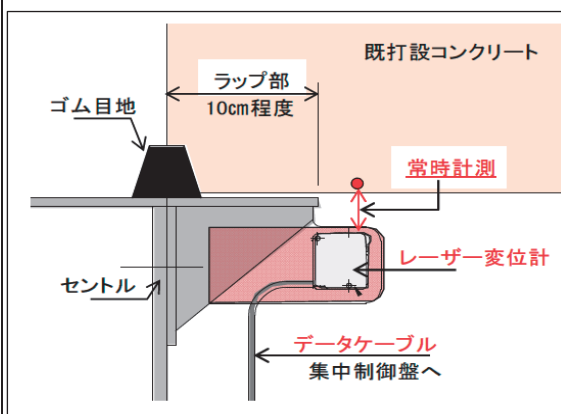


図-4 コンラップ監視システムの概念図



図-5 レーザー変位計による計測状況

2) 監視モードと機能

本システムは、各作業工程に合わせたモードによって、警報の発令や電動油圧ジャッキ動作を選定できる。また選定したモードによってセントルのセットからコンクリート打設、セントル脱型まで全ての作業工程に適用が可能である（表-1）。

表-1 監視システムのモードと機能

	「コンラップ監視システム」で選定するモード	「コンラップ監視システム」の機能	備考
セントルセット時	セットモード	既打設コンクリートとセントルの離隔が3 cm*となった時、警報を発令し電動油圧ジャッキを強制停止	セントルセットの微調整は、目視確認を行いながらジャッキ操作を実施
コンクリート打設中	打設中モード	打設開始前のラップ部隙間間隔から、±3 mm*の変位を感知した時、警報を発令	警報発令後は、原因の究明、対策を講じた後、打設を再開
セントル脱枠時	脱枠モード	打設完了後のラップ部隙間間隔から、マイナス方向の変位を感知した時、警報を発令し電動油圧ジャッキを強制停止	作業手順の再確認

※離隔距離・間隔等は任意に設定が可能です。

(3) 結果

1) 現場での確認結果

本システムを採用することで、ラップ部の隙間間隔を1 mm 単位の精度で常時監視でき、変位量に対応した管理が行えるため、既打設コンクリートへのセントルの接触を未然に防止できることを確認した。

2) 今後の課題・展開

トンネル工事において適用を進めとともに、トンネル以外のコンクリート構造物に対しても適用の可能性を検証する。

参考文献	ホームページ： http://www.toda.co.jp/news/pdf/20150625.pdf 戸田建設ニュースリリース 2015年6月25日（2016年11月25日現在）
備考	—

【地下施設／山岳トンネル】

技 術 名	IC タグ車両運行管理システム
番 号	No. 4. 2-21
発 注 者	東日本高速道路(株) 新潟支社
施 設 名	さみずトンネル
所 在 地	長野県上水内郡飯綱町地内
工 事 名 称	上信越自動車道さみずトンネル工事
施 工 期 間	2008 年
施 工 者	三井住友建設(株)
キーワード	IC タグ、車両運行管理、無線 LAN

(1) 概 要

延長 1420mの高速道路のトンネル工事で供用中の高速道路本線を利用して掘削土を搬出するという特殊条件下において、一般車両への安全対策を主眼として電池式 IC タグを用いた車両運行管理システムの構築を行ったものである。

当該工事では工事車両用に仮インター入口、出口を設置して運行を行ったが、特にインター出口で一般車両が誤進入することのないよう、的確な誘導が求められた。しかし、出口直前に長大なトンネル（延長約 2.4km）があり、車両がトンネルから出てくるまで誘導員からの見通しが効かない状況であった。そこで、トンネル内での車両位置をリアルタイムで的確に把握し、誘導員に知らせるシステムが求められた。タクシー等業務車両の運行管理システムには GNSS（全地球測位システム）を用いたシステムが汎用的に用いられている。しかし、GNSS 衛星からの電波受信が長時間中断する長大なトンネル内では、システムを有効に利用することが難しい。また、車両の位置を基地局へ送信する手段がない。

そこで、本件では IC タグを利用した車両検知とトンネル内に設置した LAN によって、誘導員にトンネル内の車両運行状況を知らせるシステムを採用した。

(2) 技術詳細

1) システム構成

電池内臓の IC タグを工事用車両の運転席に装着し、車両番号を識別する情報を載せた電波を常時一定間隔で発信する。トンネル内の路側部に受信装置としてアンテナ・リーダーを設置し、IC タグを装着した工事用車両がアンテナ設置部を通過するときに、電波を検知して車両番号を識別する。検知した情報は有線及び無線 LAN 等を介してモニター用のパソコンに伝送され、誘導用画面によって工事用車両の接近情報を確認することができる（図-1）。

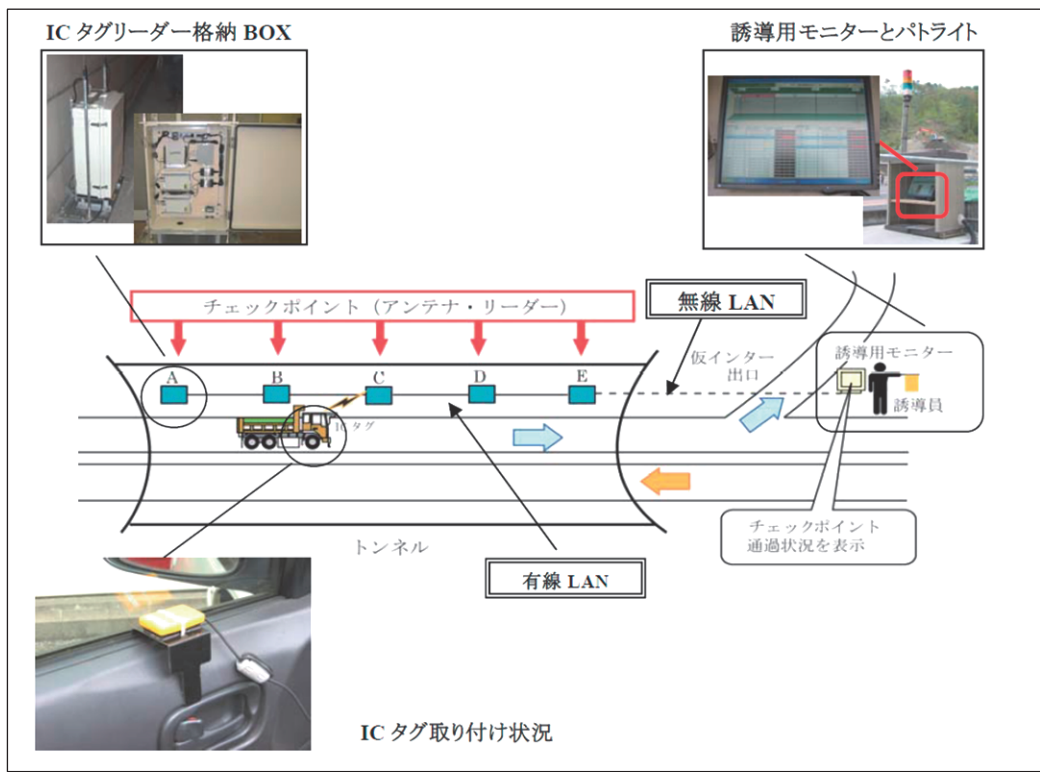


図-1 システム構成

2) IC タグとリーダー・アンテナ

IC タグとリーダーの関係を図-2 に示す。今回使用するシステムは IC タグに電池が内蔵されるタイプであり、IC タグから電波を発信しリーダーで受信して ID を読み取る。



図-2 電池内蔵 IC タグとリーダー

3) 実施例

誘導員用の車両位置表示画面例を図-3に示す。各車両の状況はモニターに表示されるが、パトライトやブザーと連動することで車両の接近を通知できるため、モニターを注視することなく的確な誘導が可能となる（図-4）。

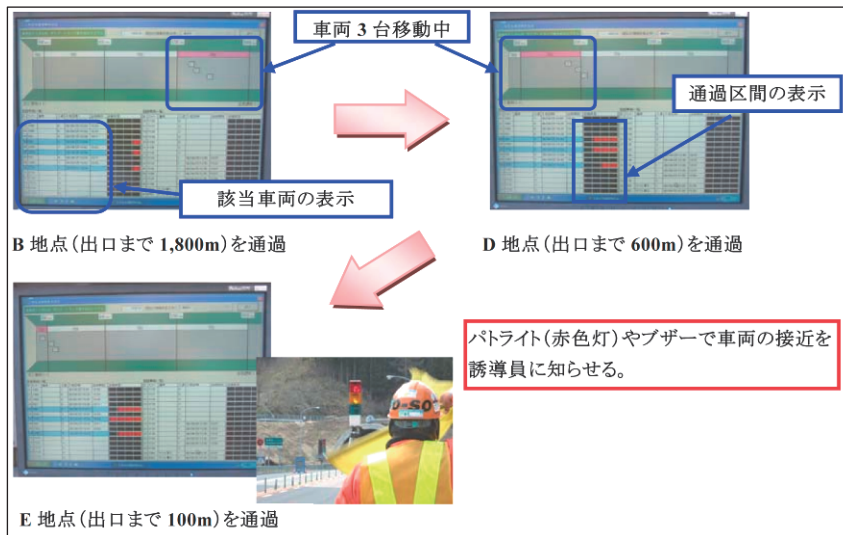


図-3 車両位置表示画面（例）



図-4 パトライトの連動(例)

(3) 結果

本システム導入の効果は以下の通りであった。

- ① ダンプトラックの接近状況がリアルタイムにわかるため、誘導員は余裕をもって準備し、的確な誘導ができる。
- ② ダンプトラック及びペースカー^(※)の位置情報が把握でき、緊急時は状況に応じた誘導ができる。
- ③ 電池式のICタグを車両に付けるだけなので、車両の追加・変更等は現場でも容易に行える。

(※) ペースカー

ダンプトラックの後方を走行し、ダンプトラックと後続する一般車両の間隔を十分にとることで、一般車両が誤って仮設出口に進入しないよう誘導する車両。

参 考 文 献	・ 社内技術研究報告書 ・ ホームページ : http://www.smcon.co.jp/2007/0725892/ プレス発表資料 (2016年11月25日現在)
備 考	—