

3次元レーザースキャナーのトンネル施工管理への適用事例

塩崎 正人・安藤 文彦・岡本 隆

施工中のトンネル形状の3次元レーザースキャナー計測を実施し、これにより得た掘削形状データから覆工設計厚の過不足判定や打設コンクリート量を算定する「トンネル覆工設計厚管理システム」を開発・実用化した。このシステムを国道8号線敦賀バイパス鳩原トンネル工事の施工全線にわたる施工管理に適用した事例を報告する。

キーワード：3次元レーザースキャナー、トンネル、覆工設計厚、情報化施工、施工管理

1. はじめに

山岳トンネルの施工において、覆工コンクリートの設計厚を正確に管理することは、施工品質確保の観点から重要な項目といえる。しかし、山岳トンネルにおいては発破掘削が主たる掘削工法であり、掘削形状に大小の凹凸が発生し形状が一様とはならない。

現状の覆工設計厚管理は、断面の特定箇所について覆工設計厚の過不足を判定している^{1,2)}。すなわち2次元での管理であり、壁面形状を離散的な断面で捉えることはできても、連続的な立体として捉えることは困難である。

今回、短時間で360°全周の形状計測が可能な3次元レーザースキャナーを用いて、山岳トンネルにおける3次元形状計測を行った。また、覆工設計厚管理ソフトウェアを開発し、施工全線にわたっての連続的な覆工設計厚管理を行った。

この計測管理から、トンネル施工における3次元レーザースキャナーの有用性を確認することができたため、以下に報告する。

2. 計測機器

今回の計測に使用した3次元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)。この計測機器は水平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。また、レーザー光の反射を利用するため暗所での計測も可能である。



写真-1 RIEGL社製LMS-Z360i



写真-2 3次元レーザースキャナーでの計測状況

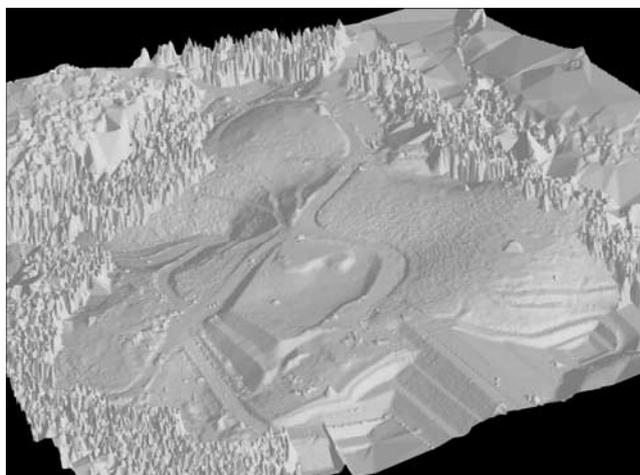


図-1 3次元レーザースキャナーでの計測例

3次元レーザースキャナーは、その特徴から大規模造成工事における土量計測³⁾（写真-2、図-1）や形状が複雑な崖面形状計測に活用されている。また、交通量の少ない夜間に交差点等で計測を実施し、道路区画線の抽出を行い、施工前の道路現況図を作成する業務にも活用されている。山岳トンネルでの壁面形状計測は、凹凸が多く表面形状が複雑であることから、3次元レーザースキャナーの特長を生かせる対象物であるといえる。

3. 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-3）を利用した基準点ターゲット測量から始める。基準点ターゲット測量は、レーザ計測での座標系（機械中心を原点とする座標系）から現地座標系（公共座標系等）へ座標変換するために行うものである。この際、反射ターゲットは、レーザ計測時にも

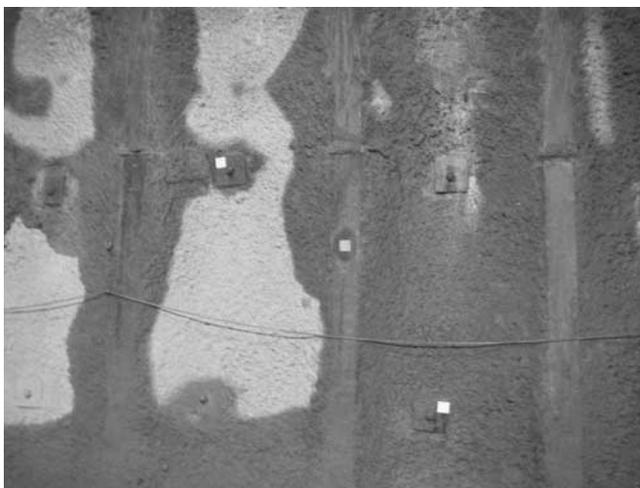


写真-3 画像合成・測量用反射ターゲット

取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形で、トンネル中心に機材を据える（写真-4）。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う（図-2）。2車線道路トンネルの場合、上下に80°計測できることから、1回の計測で約10m区間の計測が可能である。



写真-4 3次元レーザースキャナー設置状況（横向き配置）

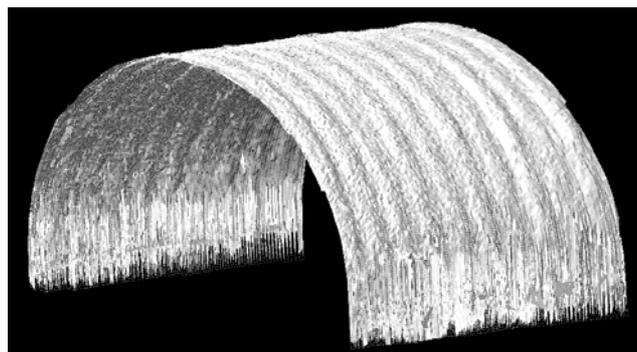


図-2 トンネル壁面の3次元データ（メッシュ化処理）

また、3次元レーザースキャナーでの測定誤差には、「機械誤差」と「距離に比例するビーム径の広がりによる誤差」があるが、レーザ計測では、点群データからメッシュ化処理を行うことが一般的であるため、平均化した値で精度を表す場合が多い。今回使用したLMS-Z360iの場合は精度6mm（1σ：メッシュ化処理後）である。

4. 覆工設計厚管理方法

3次元レーザースキャナーによる壁面形状計測の後、覆工設計厚の過不足判定を行う。覆工設計厚の判定は以下の要領で行う（図-3）。

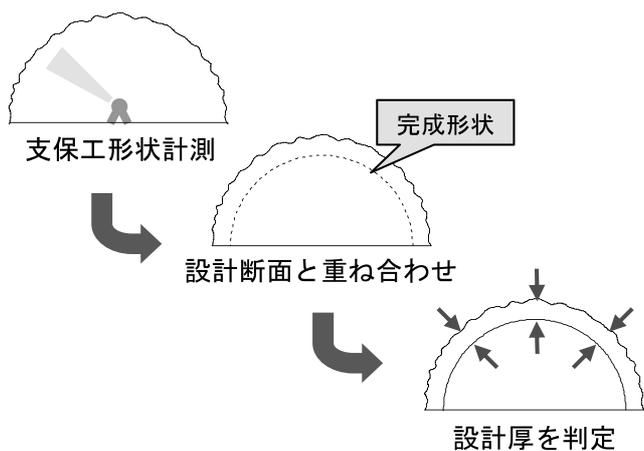


図-3 設計厚計測・判定の模式図

「設計断面と重ね合わせ」とは、現地座標系で計画されたトンネル線形に対して、機械中心を原点とする座標系を有する3次元レーザースキャナーで取得した形状データとの座標系を統一する工程にあたり、この合成のため基準点ターゲット測量を実施する。この測量精度は、覆工設計厚判定の精度に直結するため留意が必要である。

「設計厚を判定」とは、座標変換を行った計測データと設計データ（完成形状）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設計厚となる。

5. 管理ソフトウェアの開発

覆工設計厚の過不足については、計測（断面形状）と設計データ（完成形状）との差分から求めることが

可能であるが、設計厚判定を数値による確認だけでなく可視化するため設計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、設計厚判定を3種類の方法で表示・出力ができることにある（図-4）。

コンター図は、壁面を平面展開した表示方法で、視覚的に優れている。また、断面図と一覧表は、計測管理規定に従い、トンネル中心より左右22.5°ごとに計11箇所の設計厚について表示しているため、報告書等への転用が容易である。

ソフトウェア開発上で問題になったのは、坑内支障物の処理である。覆工設計厚管理は、壁面の形状を計測するものであるが、実際のトンネル坑内には風管等の資機材が設置されており、壁面だけを計測することは不可能といえる。このため、管理ソフトウェアでは、坑内の各種配管や設置機材を計測した3次元点群データ上で把握したのち、突出物を消去し、周辺データから補完する機能を設けている。

また、坑内の3次元形状データの利用により、正確な打設コンクリート量の算出が可能である。従来、数ヶ所の断面のデータから打設量を算出していたが、レーザー計測では5cm間隔で断面データを取得できるため、より正確な打設コンクリート量を算出することが可能となる。

トンネルにおいては、凹凸を考慮してあらかじめ打設コンクリート量を多めに注文するケースが一般的であることから、正確な打設コンクリート量を算出することは、逸失利益の防止という意味からも有効であるといえる。

6. 現地計測

今回、敦賀バイパス鳩原トンネル工事にて覆工コンクリート設計厚管理計測を実施した。工事概要を以下

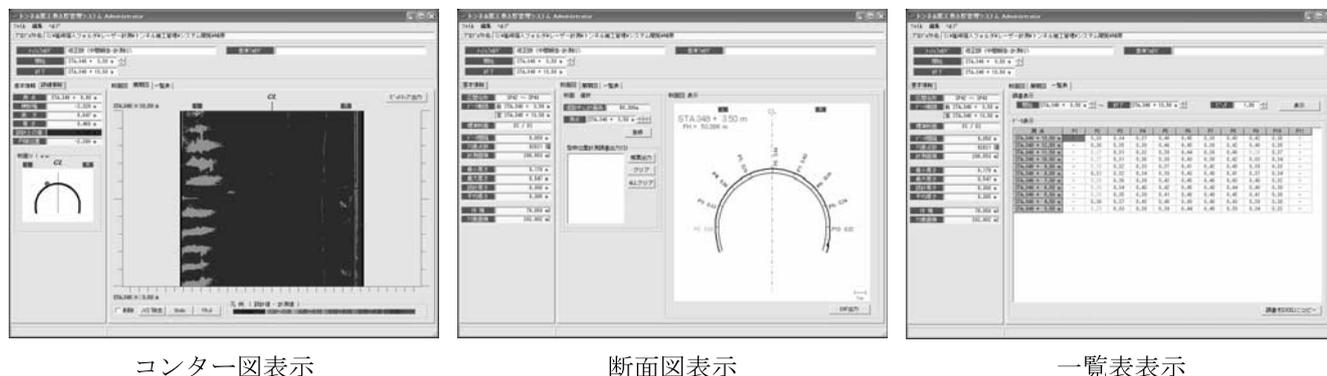


図-4 管理ソフトウェアでの覆工巻き厚判定の表示・出力方法

に示す。

- トンネル名：小河トンネル
- 工 事 名：敦賀 BP 鳩原トンネル工事
- 工 事 場 所：福井県敦賀市鳩原地先～小河口地先
- 延 長：768 m
- 工 法：NATM 工法
- 全 幅：10.0 m
- 有効幅員：7.0 m
- 構造規格：第3種第1級

本トンネルは、国道8号線と国道27号線との交差によって発生する敦賀市内の渋滞を解消するため、国道8号線バイパス道路建設工事の一環として施工された（図—5、写真—5）。

地質は、中生代白亜紀の江若花崗岩を基岩とする。



図—5 小河トンネル位置図



写真—5 敦賀バイパス小河トンネル

花崗岩体は硬質であるが、節理が発達し部分的に風化が進んでおり、掘削の進行に伴い強度の低い箇所が現れてきたため剛性の高い支保パターンへと設計変更を行っている。支保パターンは、CIIおよびDIが全体の80%を占める。

計測は、まず10mピッチで壁面に反射ターゲットを貼り付け、基準点ターゲット測量を実施した。反射ターゲットは、1回のレーザー計測範囲につき、端部に3枚以上認識されるよう貼り付け、座標変換および隣り合う計測データの合成に利用した。

3次元レーザースキャナーは、筒体中心を原点としたローカル座標系で動作しているため、施工管理に利用するグローバル座標系へと座標変換を行う必要がある。反射ターゲットの測量に続いて、3次元レーザースキャナーを用いて壁面の形状計測を行った。

ここで、機械設置の際、3次元レーザースキャナーを水平かつトンネル軸に対して平行に据えることが重要である。この設置精度が高い場合、レーザー光が壁面に均一に照射されるため、一様なデータを取得することができる。この精度は後のデータ合成の処理精度に繋がるため、機械設置には留意を払う必要がある。

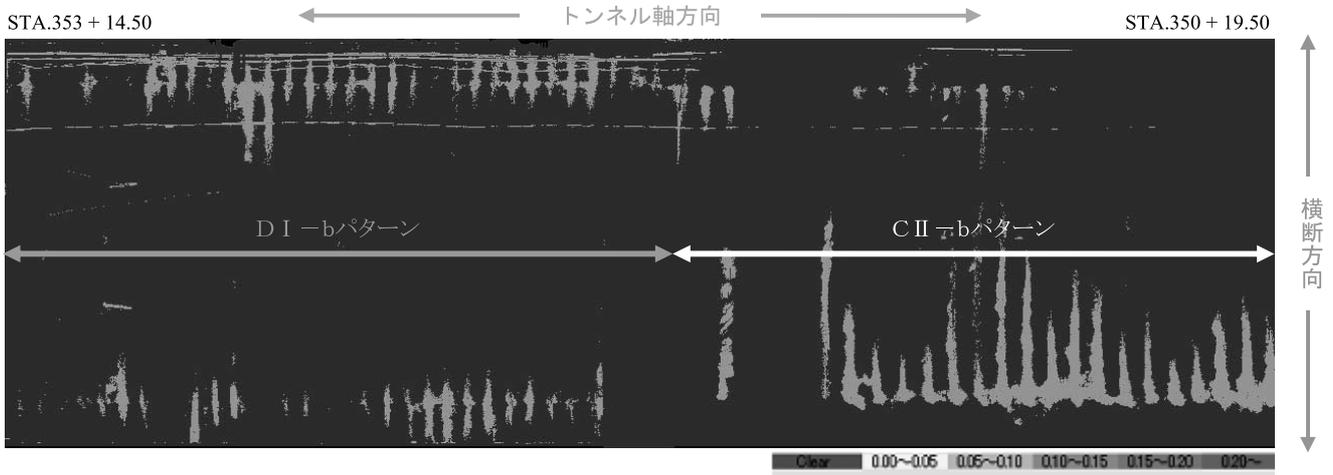
なお、ターゲット貼り付けからレーザー計測までの所要時間は、延長200mを計測した場合、約1.5日であった。

7. 計測結果

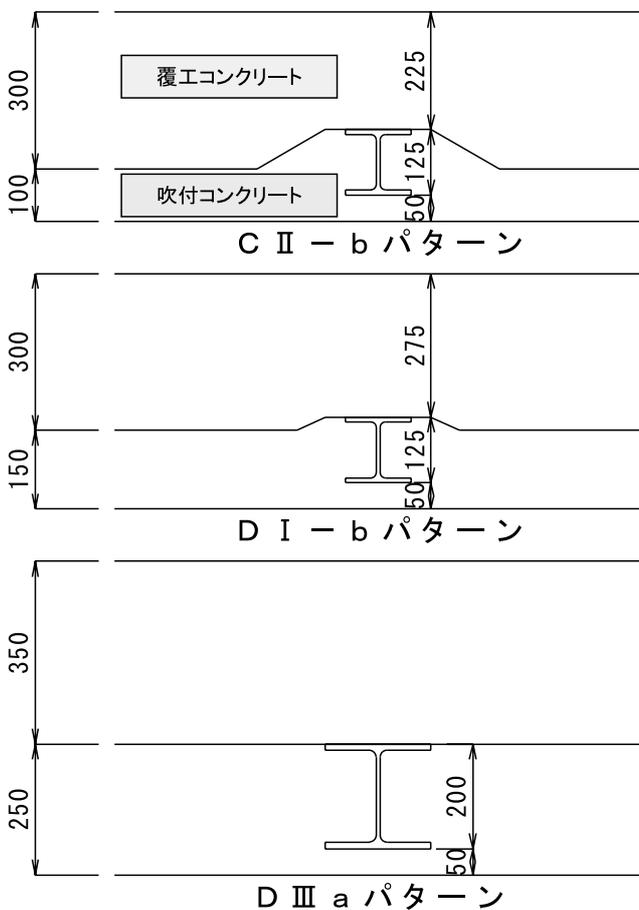
3次元レーザースキャナーで計測したデータは、個々のデータを合成することから処理を始める。また、坑内支障物を抽出しデータ補完を行う。これらの処理は施工全線について実施するが、結果から50m区間分を抜粋したものが図—6のコンター図となる。黒色の部分は設計厚が確保されていることを表す。ここで、棒状のグレーの部分は支保工（H型鋼）設置箇所での測定結果である。図—7に示すように、CII-b、DI-bパターンでは、支保工が覆工コンクリートの中に入っているためこのように表示されるが、設計厚は確保されている。表示方法は、今後改良する予定である。

コンター図に表示されている区間は、CII-bパターンからDI-bパターンへ変化する境目であるため、支保工の長さが異なり、DI-bパターンでは下半まで伸びていることがわかる。また、天端付近は余裕のある掘削施工がなされていることもコンター図から読み取ることができる。

コンター図および一覧表から、設計厚が確保されて



図一六 覆工設計厚解析結果 (抜粋) ※実際はカラーで表示・印刷できます



図一七 支保パターンの概略図

おり、掘削精度が確保されていることを確認した。解析によって算出した打設コンクリート量と実際の打設コンクリート量の誤差は2.2%であった。

なお、解析の所要時間は、基準点ターゲット測量データの座標変換からコンター図作成まで2日であった。

8. まとめ

今回、3次元レーザースキャナーを現場での覆工設計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次元トンネル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、覆工設計厚の不足箇所の把握が容易
- ④コンター図、断面図および一覧表で表示することで可視化された覆工設計厚管理が可能
- ⑤詳細なメッシュから打設予定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

まず、計測工程については、高速で形状計測が可能であるため、休工日等を利用して長大範囲を計測することで施工工程に影響を与えずに覆工設計厚管理が可能となる。掘進状況に合わせて計測を行うことで効率的な覆工設計厚管理が行えるものと期待する。反面、施工中に計測を行う場合は、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こととなる。計測方法については今後も検討していく必要がある。

次に、ソフトウェア開発に関しては、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よう機能の開発を進める必要がある。鳩原トンネルでの運用を進めるにつれて、機能の追加修正について現場側から多くの要望があった。実際に運用してみることができたため、ソフトウェアの改良に大いに役立った。

3番目として、打設コンクリート量の管理であるが、今回はトンネル全線のレーザー計測を実施したため、多くのデータを取得できた。覆工設計厚管理を主体と

してシステム開発を進めてきたが、正確な打設コンクリート量を把握できることは、逸失利益の防止に繋がるとは明白である。鳩原トンネルの場合、誤差が2.2%であったことから、ほとんどロスのないコンクリートの打設が可能となる。

今後は、解析時間の更なる短縮を進める予定である。特に、打設コンクリート量算出など、利益に直結する数量算出について支援体制を強化していきたいと考えている。

最後に、従来の2次元断面から3次元立体での施工品質管理の可能性に関して、本稿が参考となれば幸いである。

JICMA

《参考文献》

- 1) 国土交通省：近畿地方整備局 土木工事施工管理基準及び規格値（平成17年4月改訂），p.1-211，2005年4月
- 2) 日本道路公団：トンネル施工管理要領（平成9年12月），pp.54-55，1997年12月
- 3) 佐田達典，大津慎一：地上型レーザースキャナーを用いた地形計測システム，建設の機械化，No.625，pp.35-41，2002年3月

【筆者紹介】

塩崎 正人（しおざき まさんど）
三井住友建設㈱
技術研究所
土木研究開発部



安藤 文彦（あんどう ふみひこ）
三井住友建設㈱
大阪支店
土木部



岡本 隆（おかもと たかし）
国土交通省
近畿地方整備局
福井河川国道事務所
建設監督官



建設機械ポケットブック

＜除雪機械編＞

本書では、除雪機械について事故や故障を未然に防止するための主要な点検項目や点検時の留意点などを整理しました。日常点検や定期点検・整備における基礎資料として活用され、点検、整備および修理を的確かつ効率的に実施し、道路の維持除雪工事を安全で適正に施工するための一助となれば幸いです。

監修／国土交通省北海道開発局事業振興部機械課

発行／社団法人 日本建設機械化協会

目次

1. 整備点検のあらまし
2. 除雪トラック

3. 除雪グレーダ
4. 除雪ドーザ
5. ロータリ除雪車
6. 小形除雪車
7. 凍結防止剤散布車
8. 資料編

●パスポートサイズ／87ページ

●平成17年9月発刊

●定 価

1,000円（本体953円）送料250円

※送料は複数冊申込みの場合、又は他の図書と同時申込みの場合、割引となる場合があります。

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>