

三次元レーザースキャナを用いた トンネル変位計測技術の開発

湯本 健寛¹・河邊 信之²・黒台 昌弘³

¹正会員 ハザマ土木事業本部技術第三部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

E-mail:tyumoto@hazama.co.jp

²正会員 博士(工学) ハザマ土木事業本部技術第三部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

³正会員 博士(工学) ハザマ技術・環境本部技術研究第一部 (〒305-0822 つくば市荻間515-1)

山岳工法のトンネルにおいて、一般的には三次元測定システムを用いて切羽周辺の地山挙動を計測し、その安定性を評価している。標準的な計測方法は、計測断面をトンネル進行方向に所定の間隔で設置し、1断面3～5点の測点を設け、地山挙動を把握している。地山が脆弱で、掘削直後に大きな変位が予想されるトンネルでは、計測断面の間隔を小さくしたり、測点を増設することで、地山挙動を詳細に把握することに努めているものの、三次元的に連続した地山挙動の把握までには至っていない。

近年、トンネル壁面の形状を詳細に測定できる三次元レーザースキャナを用いた出来形測定が行われている。そこで、この三次元レーザースキャナをトンネル壁面の変位計測に応用した計測システムの開発を行い、トンネル壁面変位をより詳細に把握できる手法を検討した。

Key Words : displacement measurement, 3D laser scanner, measurement system, NATM

1. はじめに

山岳工法のトンネルを建設するにあたり、事前調査として地表面踏査や調査ボーリング、弾性波探査などが行われている。しかし、トンネルは地中に構築される線形構造物であり、調査期間や費用に限りがあるため、全線にわたり詳細な調査を行うことは難しい。したがって、施工段階において、観察・計測を行い、切羽の状況や掘削に伴うトンネル周辺地山の挙動を的確に把握し、設計や施工方法を修正することが重要となる。

山岳工法のトンネルの施工管理で実施する観察・計測に、天端沈下・脚部沈下および内空変位計測がある¹⁾。天端沈下・脚部沈下および内空変位計測は、土かぶりや地山等級、施工の段階に応じて10～30mの間隔で設けた計測断面で、1断面3～5測点を計測し、測点の沈下量や測点間(測線)の距離の変化量から、周辺地山の挙動や支保工の変形モードなどを把握する。図-1に標準的な測定位置の例を示す。坑口部付近や地山脆弱部など、大きな変位が予想される区間は、計測断面間隔の短縮や測点の増設などにより、詳細に変位を把握している。しかし、一般的に行われている計測方法は、計測断面における測点での計測であるため、三次元的に連続した地山挙動の把握まで至っていない。一方で、重要構造物や道路の直

下を小土かぶりで施工する場合においては、トンネルの沈下や変位が直接地上構造物に影響を及ぼす可能性が高いことから、より詳細にトンネル壁面の挙動を把握し、地上への影響を最小限に抑制した施工が求められる。今後、都市部山岳工法の適用が増加していくことを考えると、現在一般的に行われている計測方法より詳細に地山挙動を把握できる計測技術の確立が求められる。そこで、三次元レーザースキャナをトンネル壁面の変位計測に応用した計測システムの開発を行い、トンネル壁面の変位をより詳細に把握できる手法を考案した。

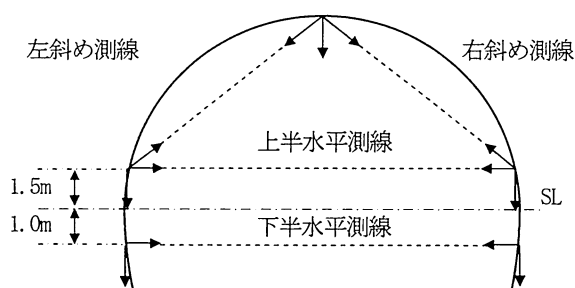


図-1 標準的な測定位置の例

2. 三次元レーザースキャナを用いたトンネル変位計測技術の概要

(1) 三次元レーザースキャナの概要

構造物や地形などの形状や位置を詳細に測定できる計測機器として三次元レーザースキャナが注目されている。三次元レーザースキャナは、短時間に対象物の形状を非接触で詳細に測定できるため、山岳工法のトンネルでは、これまで主に吹付けコンクリートや覆工コンクリートの内空断面形状を把握するために用いられてきた。図-2に三次元レーザースキャナで測定したトンネル坑内壁面の点群データを示す。近年では、掘削面や吹付け面、覆工面を測定した内空断面形状の差分から、吹付け厚や覆工厚を算出する方法²⁾も開発されている。

(2) 三次元レーザースキャナの変位計測技術への適用

一般的に山岳工法のトンネルで行われている天端沈下・脚部沈下および内空変位のうち、天端沈下と脚部沈下は測点の絶対変位で評価し、内空変位は測点間の相対変位で評価している。ただし、山岳トンネル設計施工標準・同解説³⁾では、「変位量が大きい場合、あるいは偏圧の傾向が顕著な場合には、絶対変位で評価を行う。」としていることから、今回開発したシステムでは、トンネル壁面の変位について、変位の方向と変位量を表すことができるベクトルで算出することにした。

三次元レーザースキャナによるトンネル掘削後の壁面形状の測定結果を変位計測技術に応用するにあたって、トンネル掘削の進行に伴い変化する内空断面形状を重ね合わせることで、トンネル壁面の変位として捉えることができると考えられる。しかし、単純にトンネル壁面形状を重ね合わせたても、トンネル壁面のある点が、どの方向に移動したかを把握することは難しい。

そこで、トンネル壁面に、変位を追跡するための基準となる点を設け、この基準点を基にトンネル壁面の変位を算出する方法を検討した。図-3に本システムの変位算出方法の概要を示す。三次元レーザースキャナ測定範囲内のトンネル側壁に反射シートやプリズムなどを用いて同一横断面に基準点を2点設置し、三次元レーザースキャナでトンネル壁面形状を測定する毎に、基準点の座標を三次元測定システムで測定する。そして、基準点を基に、三次元レーザースキャナで測定したトンネル壁面形状データを円周方向に等間隔で分割し、変位算出点を抽出する。トンネル掘削の進行に伴い変化する内空断面形状について、常に基準点を基に変位算出点を抽出し、対応する変位算出点を結ぶことでトンネル壁面の変位として捉えることができる。また、基準点を設置した断面以外の三次元レーザースキャナのデータについても、トンネル進行方向に隣り合う基準点を基に補正した。



図-2 三次元レーザースキャナで測定したトンネル坑内壁面の点群データ

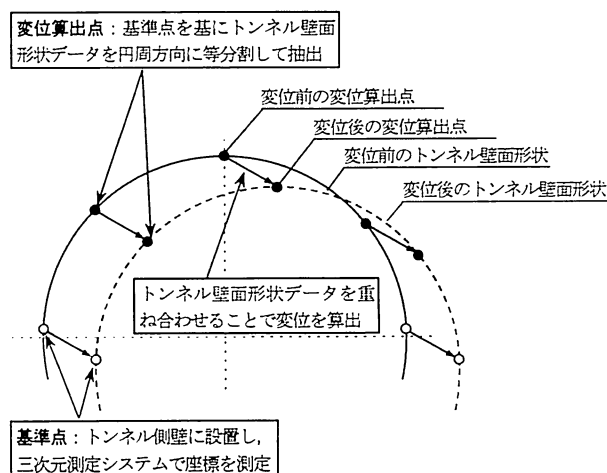


図-3 本システムの変位算出方法の概要

(3) 変位計測結果の表示

図-4～5に変位計測結果の表示例を示す。図-4は、トンネル横断面における変位のベクトル表示であり、任意の点で表示ができるようにした。トンネル横断面で変位の方角と大きさが詳細に把握できることで、変位に対してより的確な対応が可能となる。図-5は、トンネル壁面変位の三次元の分布表示であり、トンネル壁面変位量を三次元的に表示することができる。これにより、変位の大きい箇所の対策工の範囲の選定が容易となる。

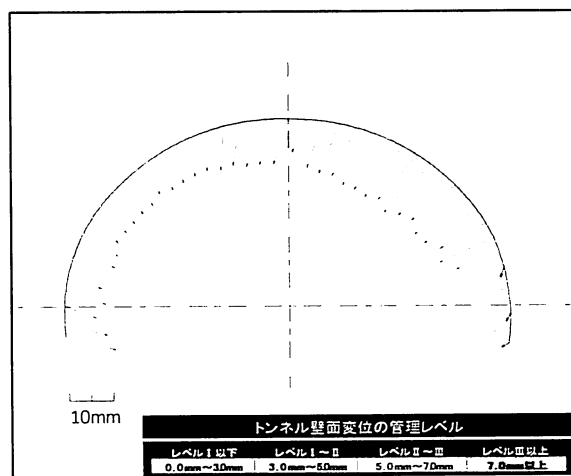


図-4 変位計測結果の表示例（横断面表示）

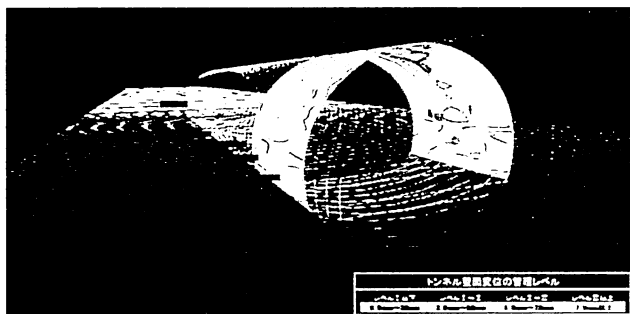


図-5 変位計測結果の出力例（三次元表示）

3. 変位計測精度の検証

本技術を山岳工法で施工するトンネルの計測技術として適用していくためには、本システムで算出した変位の精度を検証する必要がある。そこで、2車線道路トンネルにおいて適用実験を行い、本システムで算出した変位と一般的な三次元測定システムで計測した変位を比較し、変位の計測精度を検証した。

(1) 適用実験概要

トンネル進行方向8m区間を実験区間とし、本システムで変位計測を行った。変位計測精度を検証するために、

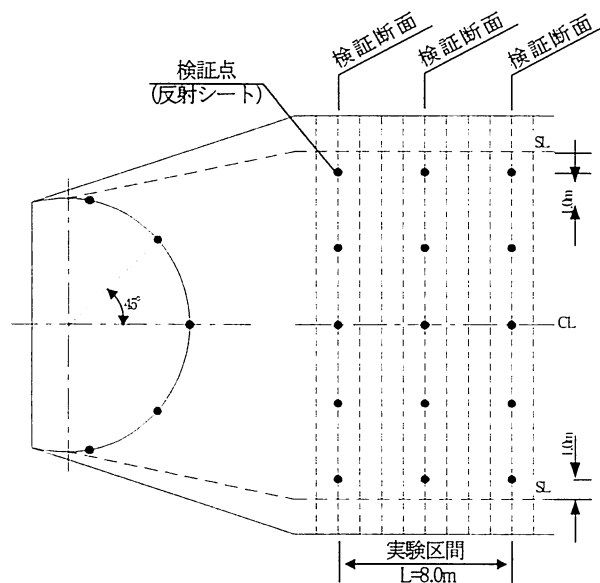


図-6 検証点の設置位置展開図

表-1 現場実験に用いた三次元レーザースキャナの諸元

測定方式	フェーズシフト回転ミラー
レーザー波長	685nm(赤色)
測定可能距離	器械点より 1.5m～30m
測定可能範囲	水平方向 360°，鉛直方向 270°
ノンプリズム測距精度	±1mm

実験区間にトンネル進行方向4m間隔で検証断面を3断面設定し、検証断面毎に5点の検証点をトンネル上半部に設置した。図-6に検証点の設置位置展開図を示す。検証点には反射シートを設置し、検証点の変位を三次元測定システムで計測し、本システムで算出した同位置での変位と比較した。なお、検証断面が切羽後方2mとなった時点で検証点を設置し、初期値の計測を行った。初期値の計測以降は1回/日、最初の検証断面設置後2週間、本システムによる計測を行った。表-1に現場実験に用いた三次元レーザースキャナの諸元を示す。三次元レーザースキャナの解像度は水平1/6度、鉛直1/24°とした。

(2) 変位算出精度の検証

図-7に三次元測定システムで計測した検証点の変位と本システムで算出した変位の絶対量の差を示す。変位の絶対量の差は、最大値8.8mm，最小値0.1mm，平均値2.6mm，標準偏差2.3mmであり、全体の66%が3mm未満であった。また、図-8に三次元測定システムで計測した

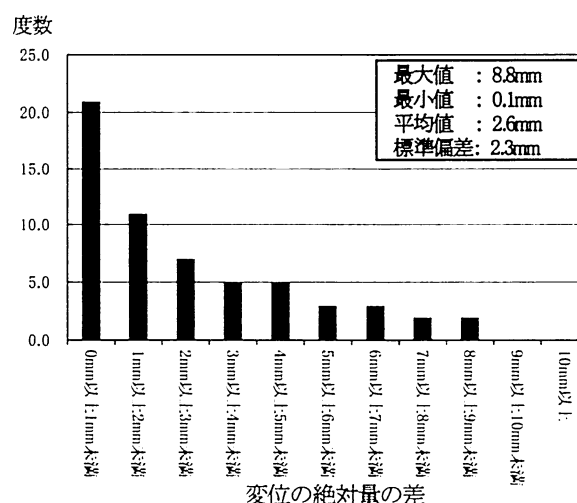


図-7 三次元測定システムで計測した検証点の変位と本システムで算出した変位の絶対量の差

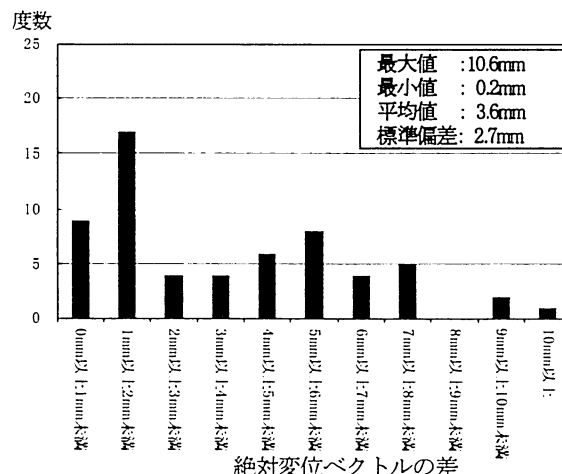


図-8 三次元測定システムで計測した検証点の変位ベクトルと本システムで算出した変位ベクトルの差

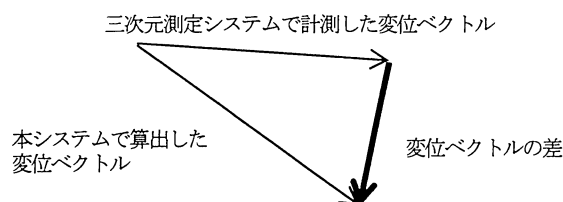


図9 変位ベクトルの差の概要

検証点の変位ベクトルと本システムで算出した変位ベクトルの差を示す。変位ベクトルの差については図-9に示す考え方で算出した。変位ベクトルの差は、最大値10.6mm、最小値0.2mm、平均値3.6mm、標準偏差2.7mmであり、全体の50%が3mm未満であった。変位量の絶対量の差および変位ベクトルの差の平均値は2~4mmであることから、変位の計測技術としては十分適用可能であると考えられる。ただし、発生した変位の絶対量の差および変位ベクトルの差を見ると、特に変位ベクトルの差でデータにばらつきが見られる。

三次元レーザースキャナの測点間隔は、器械からの距離とレーザ発射角度により定まるが、レーザの照射を開始する地点が常に同じ位置ではないため、測定毎に取得する位置が異なる。トンネル壁面は吹付けコンクリートや鋼製支保工の凹凸があるため、測定毎の若干のずれが、測定誤差に影響を与える。筆者らの三次元レーザースキャナの測定精度に関する研究で、器械位置を固定した状態でトンネル壁面を繰返し測定した場合の測定精度は、器械点からトンネル進行方向5m離れたトンネル壁面で平均1~2mm、最大3~4mm程度であることが確認されている⁴⁾。また、三次元測定システムで用いる器械の測距誤差は1mm程度あり、器械の設置位置や後視方法により、実際の計測においては、2~3mm程度の計測誤差が発生する。これらの要因により、変位ベクトルの差にばらつきが生じたと考えられる。

今回の実験では、三次元レーザースキャナの設置位置

が計測毎に異なっており、取得したトンネル壁面形状データの測定点の若干のずれが計測結果のばらつきを大きくした可能性がある。計測精度向上を目的とした測定方法の見直しについては今後の課題とし、検討を行ってきたい。

4. まとめ

三次元レーザースキャナで測定したトンネル壁面形状データと三次元測定システムで測定した基準点の座標を組み合わせ、トンネル壁面変位を変位ベクトルで算出するシステムを開発した。これにより、トンネル壁面の変位を三次元の分布として捉えることができた。精度に関しては、三次元測定システムと比較して、変位の絶対量の差および変位ベクトルの差は平均値で2~4mmであり、山岳工法のトンネルに適用可能であることを確認できた。今後、都市部山岳工法で施工するトンネルや地山が脆弱でトンネルの安定性が懸念されるトンネル、重要構造物と近接して施工するトンネルなどを中心に本計測技術の展開を考えている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，pp.31-33，2009.
- 2) 河邊信之，荻山直将，黒台昌弘：山岳トンネル分野における技術開発・工事一括発注方式への取組み，トンネル工学報告集，pp.143-146，土木学会，2011.
- 3) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工編〕・同解説，p.252，2006.
- 4) 湯本健寛，河邊信之，黒台昌弘：山岳トンネルにおける三次元レーザースキャナの適用について，土木学会第67回年次学術講演会講演概要集，VI-050，土木学会，2012.

(2012.9.3 受付)

Development of tunnel displacement measurement by 3D laser scanner

Takahiro YUMOTO, Nobuyuki KAWABE and Masahiro KURODAI

In the mountain tunnel, tunnel displacements have been measured using a three-dimensional measurement system to evaluate for the behavior of the ground near the face. However it is difficult to grasp the three dimensional behavior of the ground.

3D laser scanner can measure in detail the shape of the tunnel wall. Therefore, in recent years, 3D laser scanner has been used for progress control of working form. This paper describes the study of tunnel displacement measurement system by 3D laser scanner.