三次元レーザースキャナによる トンネル壁面変位計測技術の開発

河邊 信之¹·米田 新²

¹安藤・間 土木事業本部 技術第三部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)
²安藤・間 土木事業本部 技術第三部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)

山岳工法のトンネルにおいては、一般的にはトンネル壁面の変位を三次元測定システムで計測し、周辺 地山の安定性を評価している.標準的な計測方法では、計測断面を進行方向10~30mの間隔で設置し、1 断面あたり数カ所の測点を設けている.この手法では、測点を設置した箇所の変位しか把握できず、三次 元的に連続した変位の把握にまで至っていない.そこで、近年、山岳工法のトンネルにおいて適用事例が 増えている三次元レーザースキャナを用いて、トンネル壁面に発生する変位をより詳細に計測する技術を 開発した.

キーワード 坑内変位計測,三次元レーザースキャナ,計測システム,NATM

1. はじめに

トンネルの建設が計画されると、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、施工中に出現した切羽の状況や 掘削に伴うトンネル周辺地山の挙動を的確に把握し、現 状に合せて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 には、天端沈下・脚部沈下および内空変位計測¹⁾がある. 天端沈下・脚部沈下および内空変位計測では、土被りや 地山等級、施工の段階に応じて10~30mの間隔で1断面 あたり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. 坑口付近や地山脆弱部など, 大きな変位が予測 される区間では、計測断面の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、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被りで施工する場合、よ り詳細にトンネル壁面の挙動を把握し、周辺構造物への 影響を最小限に抑制した施工が求められる、そこで、短 時間に対象物の形状を詳細測定できる三次元レーザース キャナの特徴に着目し、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 った.

2. 三次元レーザースキャナのトンネル変位計測 技術への適用

(1) 三次元レーザースキャナの概要

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.図-2に三次元レーザースキ ャナを示す.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エ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-3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の 例を示す.

(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計測のうち,天端沈下と脚 部沈下については測点の絶対変位で評価し,内空変位に ついて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変位を算出することにした.

(3) 三次元レーザースキャナを変位計測技術へ適用する にあたっての課題

三次元レーザースキャナで測定したトンネル壁面形 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 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、三次元レーザースキャナで の測定は、光波測距儀のように定点の移動を追跡できな い.そのため、単純にトンネル壁面形状データを重ね合 せたとしても、トンネル壁面のある点が、どの点に移動 したかを把握することは難しい.

3. 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) 基準点を設置した断面における変位の算出方法

2.(3)で示した課題を解決する手法として、三次元レー ザースキャナの測定範囲内のトンネル側壁に、三次元測 定システムで用いる反射シートやプリズムなどを用いて 基準点を設けた.この基準点の挙動を基に三次元レーザ ースキャナのデータをトンネル壁面の変位として捉える 方法を考案した.図4に本システムの変位算出方法の概 要を示す.また、以下に基準点を設置した断面における 本システムの変位算出までの手順を示す.

①三次元レーザースキャナでトンネル壁面形状を測定するごとに、基準点の座標を三次元測定システムで測定

する.

- ②基準点をもとに、三次元レーザースキャナで測定した 同一横断面内のトンネル壁面形状データを円周方向に 等分割し、変位算出点を抽出する。
- ③変位前と変位後の対応する変位算出点を結ぶことでト ンネル壁面の変位を算出する.

(2) 基準点を設置した断面以外での変位の算出方法

基準点を設置していない区間についても、トンネル壁 面のある点が、どの点に移動したかを把握することは難 しい.そのため、基準断面同様、変位を算出するための 基準となる点を設ける必要がある.そこで、基準点を設 置していない区間について基準断面内の基準点座標を比 例配分し、仮想の基準点を算出することで変位を補間計 算する方法を検討した.図-5に基準断面以外の断面にお ける変位の算出方法の概要を示す.以下に基準断面以外 の断面における変位算出までの手順を示す.

- ①トンネル横断方向に隣り合う2つの基準点の座標を基準点からの距離に応じて比例配分して求めた座標を仮想の基準点とする.
- ②仮想の基準点をもとに、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分割し、変位算出点を抽出する.
- ③変位前と変位後の対応する変位算出点を結ぶことでト ンネル壁面の変位を算出する.

(3) 変位計測結果の表示

図-6~8に変位計測結果の表示例を示す.図-6は、トンネル横断面における変位のベクトル表示であり、任意の点で表示できるようにした.トンネル横断面で変位の方向と大きさが詳細に把握できることにより、変位が卓越した場合に的確な対応が可能となる.図-7は、トンネル壁面変位量の三次元の分布表示であり、変位の大きい箇所の対策工の範囲の選定が容易となる.これ以外の表



図-2 三次元レーザースキャナ



図−3 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の例



図4 本システムの変位算出方法の概要 (基準点を設置した断面)



図-5 基準断面以外の断面における変位の算出方法の概要



図-6 トンネル横断面における変位のベクトル表示

示機能として、トンネル壁面変位量の展開表示(図-8)、 変位量の経時変化の表示が可能である

4. 変位の算出精度の検証

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、変位の精度を検証する必要が



図-7 トンネル壁面変位量の三次元分布表示



図-8 トンネル変面変位量の展開表示

ある.そこで、2車線道路トンネルにおいて、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)基準断面における変位の算出精度の検証a)検証の概要

トンネル進行方向8m区間を試験区間とし、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、 試験区間進行方向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-9に検証点の設置位置を示す.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、鉛直1/24°とした.

b)変位算出精度の検証

図-10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-11に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 クトルの差を示す.変位ベクトルの差については,図 -12に示す考え方で算出した.変位ベクトルの差は,最 大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



図-9 検証点の設置位置

試験に用いた三次テレーザーフキャナの詳テ

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	± 1 mm				





図-10 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

の絶対量の差および変位ベクトルの差の平均値は3mm程 度であることから、基準断面においては変位の計測技術 として十分適用可能であると考えられる.

(2)基準断面以外での変位の算出精度

a) 検証の概要

トンネル進行方向8m区間を試験区間とし、本システ ムで変位計測を行った. 図-13に試験区間における基準 点、変位の精度を確認する検証点となるターゲットの配 置図を示す.試験区間両端の断面AおよびEは,SL上 1.0mの左右2箇所と天端1箇所の合計3箇所にターゲット を設置した.また、2mごとの3断面(断面B~D)に、 SL上1.0mの左右2箇所、トンネル中心より45°方向の左右 2箇所、天端部1箇所の合計5箇所に反射シートを用いて ターゲットを設置した. 試験区間の掘削開始より, 三次 元レーザースキャナを用いて1日1回試験区間のトンネル 壁面形状を測定するとともに、ターゲットの座標を三次 元測定システムで測定した. なお、ターゲットは切羽後 方2mとなった時点で設置し、初期値の計測を行った. 現場試験に用いた三次元レーザースキャナは前節の実験 で使用した器械と同様であり(表-1参照),解像度も同 様に水平1/6°, 鉛直1/24°とした.

基準断面以外の区間では、基準断面からの距離に応じ



図-11 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





て比例配分して仮想の基準点を設けるため、補間した変 位の精度は、基準断面からの距離に影響を受けることが 想定される.そのため、本試験では基準断面間隔を4m、 6m、8mとして基準断面の間隔が計測精度に及ぼす影響 を検証した.

図-14~16に基準断面および検証断面の配置を示す. 基準点間隔4mの場合のパターン1では、断面A、Cを基 準断面とし、断面Bを検証断面として断面Bにおける変 位の絶対量と変位ベクトルを算出し、基準断面以外の区 間における変位算出精度の検証とした.基準点間隔4m のパターン2では、断面B、Dを基準断面、断面Cを検 証断面とし、パターン3では、断面C、Eを基準断面、 断面Dを検証断面とした.基準点間隔6mのパターン1で は、断面A、Dを基準断面、断面B、Cを検証断面とし、 パターン2では断面B、Eを基準断面、断面C、Dを検 証断面とした.基準点間隔8mでは、断面A、Eを基準 断面、断面B~Dを検証断面とした.

b)変位算出精度の検証

表-2に基準断面以外における変位の絶対量および変位 ベクトルの差を、図-17に基準断面間隔と計測精度の平 均値を示す.変位の絶対量の差の平均値は、基準断面間 隔が4m, 6m, 8mの場合には2.5mm, 3.0mm, 3.0mmであ った.また、変位ベクトルの差の平均値は、基準断面間 隔が4m, 6m, 8mの場合には、それぞれ3.9mm, 4.1mm, 4.1mmであった.基準断面間隔を8mとしても変位の絶対 量の差および変位ベクトルの差において、平均値で3mm 程度であることから、山岳工法のトンネルにおける計測 技術としては十分に適用可能であると考えられる.









図-15 基準断面および検証断面(基準断面間隔6m)



図-16 基準断面および検証断面(基準断面間隔8m)

表-2 基準断面以外における変位の絶対量および変位ベク トルの差

補間方法	変位の絶対量の差 (mm)			変位ベクトルの差 (mm)		
基準断面 間 隔	4m	6m	8m	4m	6m	8m
平均值	2.5	3.0	3.0	3.9	4.1	4.1
標準偏差	1.9	1.9	1.8	2.3	2.2	2.1
最大値	7.9	8.9	7.8	9.9	10.1	10.2
最小值	0.0	0.2	0.2	0.6	0.3	0.4



5. 山岳トンネルにおける適用事例

図-18 に山岳トンネルにおける変位量の三次元表示を, 図-19 に変位量の展開表示を示す.適用を行った区間は, トンネル壁面間の離隔が約 18m(約 1.5D)の併設トン ネルの後進坑であった.掘進方向の左側側壁部(先進坑 側)に集中して変位が発生している状況が詳細に表現で きている.

6. まとめ

短時間に対象物の形状を詳細に測定できる三次元レー ザースキャナの特徴に着目し、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.これにより,トン ネル壁面に発生する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,基準断面における変位の 算出精度と基準断面以外における変位の算出精度を検証 した.その結果,変位量の絶対量の差および変位ベクト ルの差の平均値で3mm程度であり,山岳工法のトンネ ルに十分適用可能であることを確認した.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 安定が懸念されるトンネル,重要構造物と近接するトン ネルなどを中心に,本技術の展開を考えている.

参考文献

- 社団法人 日本道路協会:道路トンネル観察・計測指針, pp.31-33, 2009.
- 2) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構:山岳ト ンネル設計施工標準・同解説, p.276, 2011.



図-18 変位量の三次元表示



図-19 変位量の展開表示