

# 三次元レーザースキャナを用いた トンネル変位計測における精度向上について

湯本 健寛<sup>1</sup>・河邊 信之<sup>2</sup>・黒台 昌弘<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 安藤ハザマ 土木事業本部技術第三部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)

E-mail:yumoto.takahiro@ad-hzm.co.jp

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 安藤ハザマ 土木事業本部技術第三部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)

<sup>3</sup>正会員 博士(工学) 安藤ハザマ 技術本部先端技術研究部 (〒305-0822 つくば市荻間515-1)

近年、三次元レーザースキャナは短時間に対象物の形状を詳細に測定できる技術として土木工事における適用が増えてきている。筆者らはこれまで、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、三次元レーザースキャナで測定したトンネル断面形状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ることで、トンネル壁面変位をより詳細に把握できるシステムを開発してきた。本システムは、これまでも実際のトンネル現場に適用し、計測精度の確認に取り組んできたが、従来の報告では、計測精度の確認について、基準点を設置した横断面内の測点にとどまっていた。今回、基準点を設置していない区間について、壁面変位を算出する手法を確立し、現場試験により算出した変位の精度を確認した。

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

## 1. はじめに

近年、三次元レーザースキャナは、短時間に対象物の形状を詳細に測定できる技術として土木工事での適用が増えている。たとえば、盛土前後の形状を三次元レーザースキャナで測定することで、盛土量を詳細に把握することができる。山岳トンネルにおいては、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出来形形状を把握するために用いられてきた。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<sup>1)</sup>も開発されている。また、切羽鏡面の安定性の確保を目的とした曲面切羽の形状を評価するために三次元レーザースキャナを使用した例<sup>2)</sup>も報告されている。

トンネルを建設するにあたり事前の調査段階においては、地上よりボーリング調査等が実施されるが、トンネルは延長が長く、地下に建設されるため、地質状況等を詳細に調査することは経済的ではない。そのため、施工段階における切羽の状況やトンネル壁面の変位の発生状況から、現状に即した設計に修正することが重要となる。とくに、重要構造物と近接してトンネルを掘削する場合には、トンネル壁面の変位の発生状況を詳細に把握、管理し、近接する構造物への影響を最小限に抑える必要が

ある。

現在、一般的に行われている計測手法は、トンネル進行方向に設けた10～30mごとの断面のトンネル壁面に3～5箇所の計測点を設置する。そして、所定の頻度にもとづき三次元測定システムで計測点の座標を測定し、座標値の差分により変位を把握する。これに対し、筆者らは、トンネル掘削の進捗によって変化する同一地点のトンネル内空断面形状を三次元レーザースキャナで測定し、重ね合わせることで、従来の計測手法より多くの壁面位置で内空変位量を把握できる計測システムの開発に取り組んできた。本システムについては、実際のトンネル現場に適用し、計測精度の確認に取り組んできたが、これまでの研究<sup>3)</sup>における計測精度の確認は、三次元レーザースキャナによる断面形状を重ね合わせるために必要な基準点を設置した横断面(以下、基準断面と記述)にとどまっていた。したがって、今回、基準点を設置していない区間について、壁面変位を算出する手法を確立し、現場試験を行うことで、その精度を確認した。

## 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) 基準点を設置した断面における変位の算出方法

基準断面における変位の算出方法の概要を以下に示す。詳細については既報告<sup>3)</sup>を参照していただきたい。

図-1に基準断面における変位の算出方法の概要を示す。本システムでは、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ごとに、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、常に基準点をもと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。

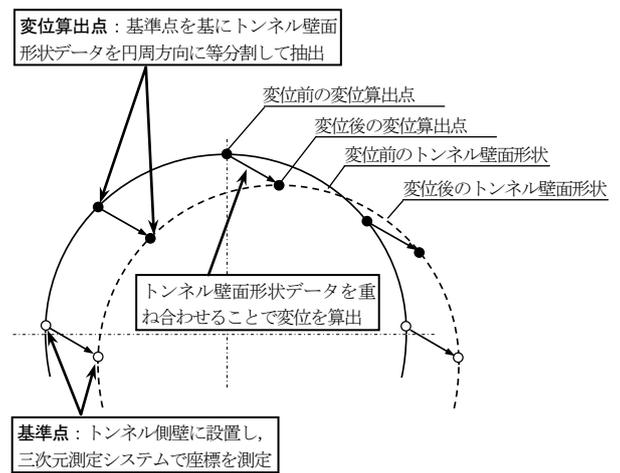


図-1 基準断面における変位の算出方法の概要

### (2) 基準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は、三次元レーザースキャナで測定した内空断面形状を単純に重ね合わせても、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、基準点を設置していない区間では、基準断面のデータをもとに変位を算出することとし、二つの補間方法を考案した。

#### a) 補間方法Ⅰ（比例配分による変位の算出）

図-2に補間方法Ⅰ（比例配分による変位の算出）による変位算出方法を示す。一つ目の補間方法は、隣り合う二つの基準断面において、算出した変位を単純にトンネル縦断方向の距離に応じて比例配分する方法である。この方法は、基準断面以外の三次元レーザースキャナによる壁面形状データを変位算出に反映することができないが、単純な比例計算のみであるため、比較的短時間で変位の補間計算を行うことができる。

#### b) 補間方法Ⅱ（仮想基準点にもとづく変位の算出）

二つ目の補間方法は、基準断面内の基準点座標を比例配分し、基準点を設置していない区間について仮想の基準点を算出する方法である。図-3に補間方法Ⅱ（仮想基準点にもとづく変位算出）の変位算出方法を示す。トンネル縦断方向に隣り合う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。仮想基準点をもとに、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間隔で分割し、変位算出点を抽出する。そして、2.(1)と同様に、変位を算出する。この方法は、基準断面以外についても三次元レーザースキャナで測定したトンネル壁面形状を反映することができる。

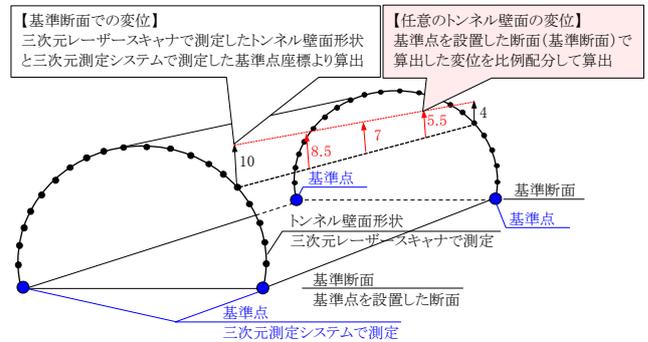


図-2 補間方法Ⅰ（比例配分による変位の算出）による変位算出方法

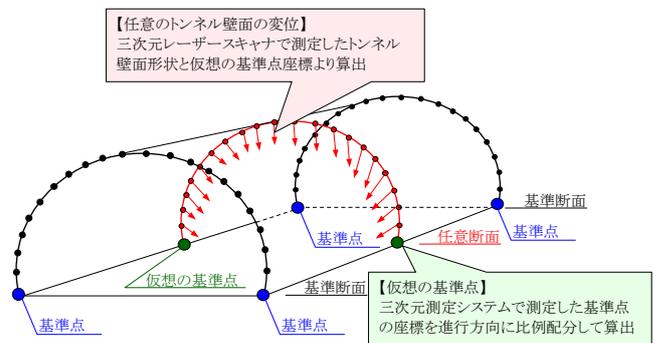


図-3 補間方法Ⅱ（仮想基準点にもとづく変位の算出）による変位算出方法

## 3. 変位計測精度の検証

二つの補間方法の変位算出精度を検証するために、2車線道路トンネルにおいて実証試験を行い、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、変位算出精度を検証した。

### (1) 適用試験概要

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-4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箇所にて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箇所にて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。表-1に現場試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度とした。

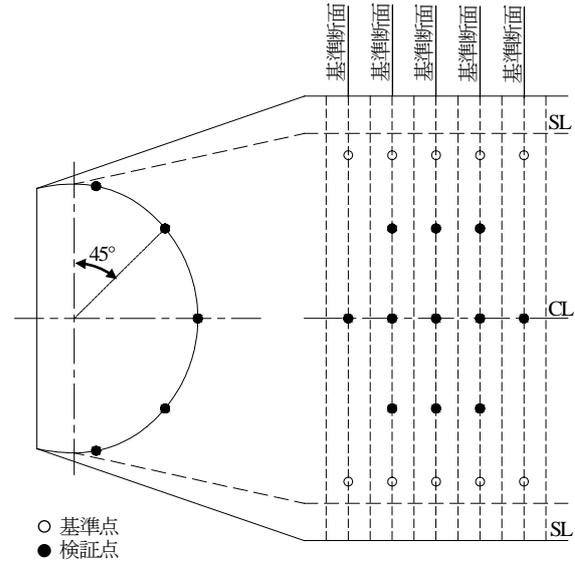


図-5 基準点および検証点の配置

### (2) 試験データの妥当性の確認

いずれの補間方法においても、基準断面のデータをもとに変位を補間する。そのため、補間精度の検証に先立

ち、本試験において計測したデータの妥当性を確認するため、断面A～Eをそれぞれ基準断面として変位を算出し、精度を検証した。図-5に基準点および検証点の配置を示す。各断面のSL上1.0mの左右2箇所に設置したターゲットを基準点として扱い、基準点の座標およびトンネル壁面形状データからターゲットを設置した位置での変位を算出した。そして、三次元測定システムで計測した検証点の変位と比較した。

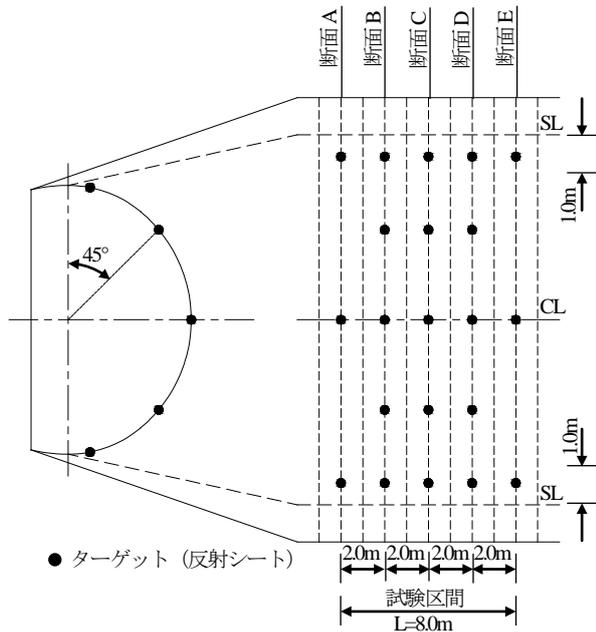


図-4 試験区間およびターゲットの配置図

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

図-6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6.8mm、最小値0mm、平均値1.7mm、標準偏差1.7mmであり、全体の66%が2mm未満であった。また、図-7に示した三次元測定システムで計

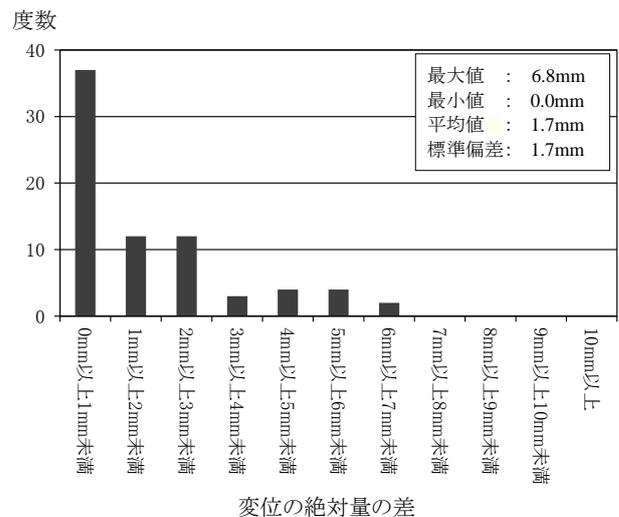


図-6 三次元測定システムで計測した検証点の変位と本システムで算出した変位の絶対量の差

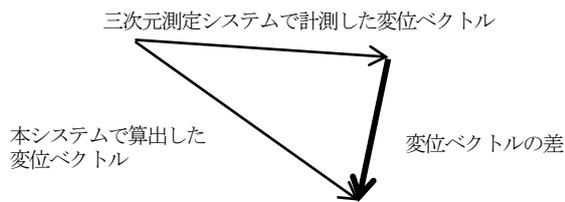


図-7 変位ベクトルの差の概要

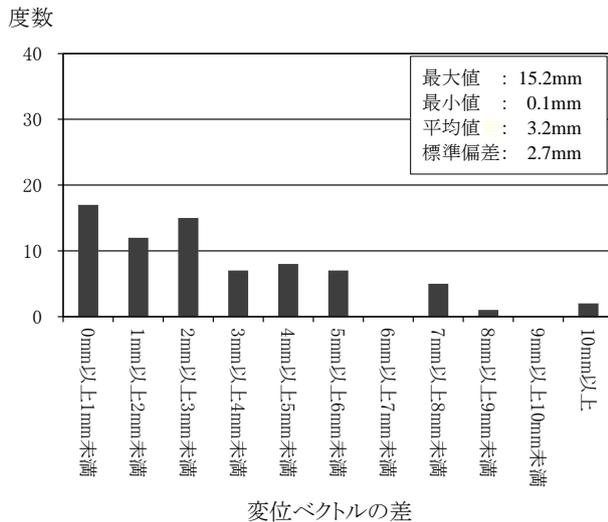


図-8 三次元測定システムで計測した検証点の変位ベクトルと本システムで算出した変位ベクトルの差

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でも検証した。図-8に変位ベクトルの差を示す。変位ベクトルの差は、最大値15.2mm、最小値0.1mm、平均値3.2mm、標準偏差2.7mmであり、全体の約59%が3mm未満であった。変位の絶対量の差および変位ベクトルの差の平均は2~3mmであり、既報告<sup>3)</sup>と同等の精度であることから、本試験で計測したデータが信頼性のあるものと判断した。

### (3) 基準断面以外での補間精度の検証

補間方法 I および補間方法 II のいずれも、基準断面の変位または基準点座標を距離に応じて比例配分する。したがって、いずれの場合も、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た。そのため、本試験では基準断面の間隔を4m、6m、8mとして計測精度を検証した。

図-9に基準断面の間隔を4mとしたときの検証断面の位置を示す。断面AとCを基準断面とした場合は断面Bを、断面BとDを基準断面とした場合は断面Cを、断面CとEを基準断面とした場合は断面Dを検証断面として、トンネル変位を補間計算で算出した。



図-9 基準断面および検証断面 (基準点間隔4m)

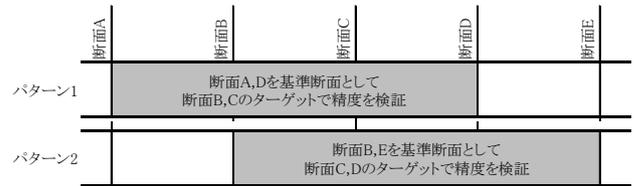


図-10 基準断面および検証断面 (基準点間隔6m)

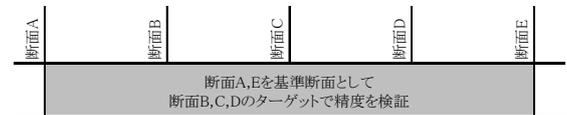


図-11 基準断面および検証断面 (基準点間隔8m)

図-10に基準断面の間隔を6mとしたときの検証断面の位置を示す。断面AとDを基準断面とした場合は断面Bと断面Cを、断面BとEを基準断面とした場合は断面Cと断面Dを検証断面としてトンネル変位を補間計算で算出した。

図-11に基準断面の間隔を8mとしたときの検証断面の位置を示す。断面AとEを基準断面とし、断面B、断面C、断面Dを検証断面としてトンネル変位を補間計算で算出した。

#### a) 補間方法 I による変位の算出精度

表-2に補間方法 I による変位の絶対量および変位ベクトルの差を示す。変位の絶対量の差の平均値は、基準断面の間隔が4m、6m、8mの場合には、それぞれ2.7mm、4.2mm、3.9mmであった。また、変位ベクトルの差の平均値は、基準断面の間隔が4m、6m、8mの場合には、それぞれ4.0mm、6.0mm、5.2mmであった。変位の絶対量の

表-2 補間方法 I によ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)			
	4m	6m	8m	補間なし(参考)	4m	6m	8m	補間なし(参考)
平均値	2.7	4.2	3.9	1.9	4.0	6.0	5.2	3.4
標準偏差	2.1	2.5	2.5	2.2	2.0	3.4	2.7	3.2
最大値	7.6	9.6	9.2	11.3	8.3	17.3	10.2	15.9
最小値	0.3	0.1	0.0	0.0	0.7	0.1	0.4	0.1

表-3 補間方法Ⅱによ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)			
	4m	6m	8m	補間なし (参考)	4m	6m	8m	補間なし (参考)
基準断面 間 隔	4m	6m	8m	補間なし (参考)	4m	6m	8m	補間なし (参考)
平均 値	25	30	30	19	39	41	41	34
標準偏差	19	19	18	22	23	22	21	32
最大 値	79	89	78	113	99	101	102	159
最小 値	0.0	0.2	0.2	0.0	0.6	0.3	0.4	0.1

差および変位ベクトルの差の両方で、基準断面の間隔が4mの場合に最も精度がよい結果となった。

b) 補間方法Ⅱによる変位の算出精度

表-3に補間方法Ⅱによる変位の絶対量および変位ベクトルの差を示す。変位の絶対量の差の平均値は、基準断面の間隔が4m, 6m, 8mの場合には、それぞれ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、基準断面の間隔が4m, 6m, 8mの場合には、それぞれ3.9mm, 4.1mm, 4.1mmであった。変位の絶対量の差および変位ベクトルの差の両方で、基準断面の間隔が4mの場合に最も精度がよい結果となった。

c) 補間方法の違いによる計測精度の検証

図-12に基準断面間隔と補間方法の違いによる計測精度の関係を示す。計測精度を補間方法の違いで見てみると、いずれの場合についても補間方法Ⅱで算出した変位は補間方法Ⅰで算出した変位より精度がよい結果となった。

また、補間方法Ⅰで算出した変位では、基準断面の間隔が長くなるにつれ、計測精度が低下する傾向が見られた。これに対し、補間方法Ⅱで算出した変位では、基準

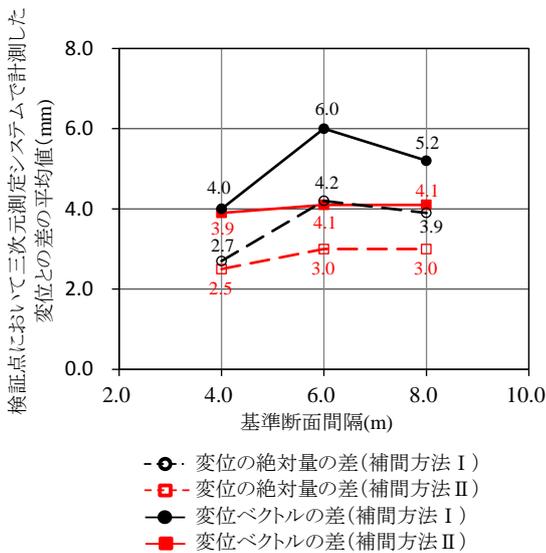


図-12 基準断面間隔と補間方法の違いによる計測精度

断面の間隔を長くしても、計測精度が大きく低下することとはなかった。これは、補間方法Ⅰでは基準断面以外の変位算出にあたっては、三次元レーザースキャナで測定した断面形状データを反映させず、単純に基準断面の変位を縦断方向に比例配分することで算出するため、補間する距離に影響を受けたと考えられる。補間方法Ⅱでは基準断面以外の区間においてもトンネル壁面の形状の変化を変位の算出に反映できるため、補間する距離が長くなっても一定の精度を確保できたと考えられる。補間方法Ⅱの場合、変位の絶対量および変位ベクトルの差の平均値は3mm前後であることから、山岳工法のトンネルにおける変位の計測技術としては十分に適用可能であると考えられる。

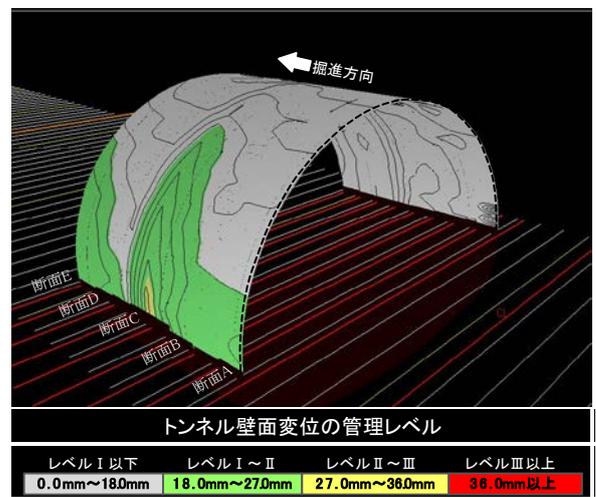


図-13 試験区間における変位量の三次元表示

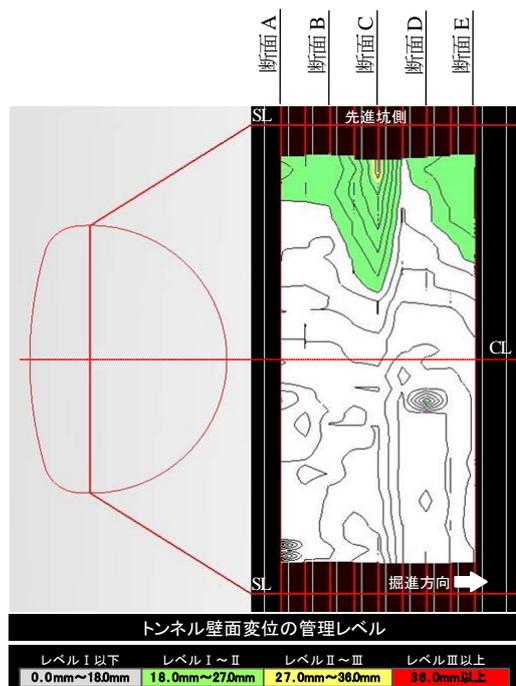


図-14 試験区間における変位量の展開表示

一方で、基準断面の間隔が最も短い4mの場合、変位の絶対量の差および変位ベクトルの差の両方において、補間方法の違いによる変位量の差はみられなかった。基準断面の間隔を短くした場合は、補間方法の違いによる計測精度に大きな差が生じにくいと考えられる。したがって、補間方法Ⅰを適用する場合については、補間距離を短くして使用することが望ましい。

#### D) 試験区間の変位発生状況

図-13に試験区間における変位量の三次元表示を、図-14に試験区間における変位量の展開表示を示す。現場試験を行った区間は、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ことが分かる。

## 7. 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レーザースキャナで測定した基準点の座標を組み合わせてトンネル壁面変位を算出する手法のうち、基準断面以外の区間において変位を補間する二つの手法を提案した。そして、現場試験により、二つの補間方法

で算出した変位を一般的に行われている変位計測方法による変位と比較、検証すること以下の知見を得た。

- 補間方法Ⅱ（仮想基準点にもとづく変位算出）により算出した変位は、補間方法Ⅰ（比例配分による変位算出）により算出した変位より計測精度が良い。ただし、基準断面の間隔が短い場合には、補間方法による計測精度の差は少ない。
- 補間方法Ⅱで算出した変位の絶対量および変位ベクトルの差の平均値は3mm前後であることから、山岳トンネルの変位計測技術としては十分に適用可能であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 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り組み, トンネル工学報告集, pp.143-146, 土木学会, 2011.
- 2) 佐藤淳ら: 曲面切羽で低強度地山の全断面掘削に挑戦, トンネルと地下, vol.44, no.7, pp.535-544, 日本トンネル技術協会, 2013.
- 3) 湯本建寛, 河邊信之, 黒台昌弘: 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, トンネル工学報告集, pp.205-208, 土木学会, 2012.

(2013. 9. 2 受付)

## A STUDY OF DISPLACEMENT MEASUREMENT SYSTEM IN TUNNEL BY 3D LASER SCANNER

Takahiro YUMOTO, Nobuyuki KAWABE and Masahiro KURODAI

The authors applied 3D laser scanner to the displacement measurement of the tunnel and developed the system which could grasp displacement in the tunnel in detail. This system was applied to tunnel sites, and the measurement accuracy has been confirmed. However, in the previous study, the measurement accuracy was only confirmed in measuring points in the specific cross section.

In this study, the system to calculate the displacement in all tunnel wall was established, and the measurement accuracy calculated by the system was confirmed by site examination.