

レーザー距離計を用いた 簡易な三次元変位計測と現場適用

熊谷 幸樹¹・塩満 剛治²・柳森 豊³・仮屋 謙一⁴

¹正会員 飛鳥建設 建設事業本部 (〒213-0012神奈川県川崎市高津区坂戸3-2-1 KSP R&D棟2F)

E-mail:koki_kumagai@tobishima.co.jp

²飛鳥建設 建設事業本部 (〒213-0012神奈川県川崎市高津区坂戸3-2-1 KSP R&D棟2F)

E-mail:gouji_shiomitsu@tobishima.co.jp

³正会員 飛鳥建設 九州支店 土木部 (〒810-0022福岡県福岡市中央区薬院1-1-1 薬院BG 6F)

E-mail:yutaka_yanagimori@tobishima.co.jp

⁴飛鳥建設 九州支店 土木部 (〒810-0022福岡県福岡市中央区薬院1-1-1 薬院BG 6F)

E-mail:kenichi_kariya@tobishima.co.jp

NATMでは、周辺地山の安定性や支保工の作用効果を評価するため、切羽観察や坑内変位計測が実施される。坑内変位計測は、掘削後できるだけ早く初期値を測定することとなっているが、最初の変位が判明するまで少なくとも半日を要するのが現状である。そのため、最も変位速度の大きい掘削直後の地山変位が計測されないまま、この間の変位を推定して全地山変位を算定しているという課題があった。

本論文では、掘削直後からの地山変位をできる限り正確に測定し、周辺地山の安定性を的確に評価することを目的として、1台のレーザー距離計により地山の3次元変位を計測するための方法を示し、計測精度に関する室内試験結果からその計測精度が1mm以下であることを示すとともに、現場試行の結果について報告する。

Key Words : tunnel, 3-D Displacement Measurement, laser distance meter, field observation

1. はじめに

山岳トンネルの施工では、周辺地山の安定性や支保工の作用効果を評価するため、切羽観察や坑内変位計測が実施される。このうち、坑内変位計測は、掘削後できるだけ早く初期値を測定し実施することとされている¹⁾²⁾。しかしながら、測定点の設置時期がまちまちであったり、設置した測定点が破損したりして信頼性のある計測値を得ることは容易ではない。そのため、変位速度の最も大きい掘削直後の地山変位が正確に計測されないまま、全変位に対する計測可能な変位の比率を仮定し、全変位を推定しているのが現状である。また、切羽挙動は地質性状、土被り、地下水条件等の複数の要因に左右されるが、その変位挙動の計測評価が不十分であると、写真-1に示すような地表面陥没に至る場合もある。

そこで、本論文では、同一のタイミングで測定した初期値に基づき、支保設置直後からの地山変位を正確に把握することを目的として考案した、1台のレーザー距離計による地山の3次元変位を計測する手法を示すとともに、本計測手法の測定精度に関する室内試験結果、および現場試行について報告する。



写真-1 切羽崩壊に起因した地表面陥没の例

2. レーザー距離計による3次元変位計測の概要

(1) 計測の目的

NATMの計測Aでは、例えば図-1に示す測定点を吹付けコンクリート硬化後に設置し、天端沈下や内空変位の計測を行う。1掘進の掘削、ずり出し後、吹付けコンク

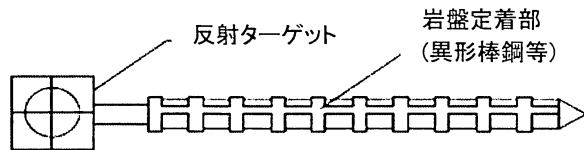
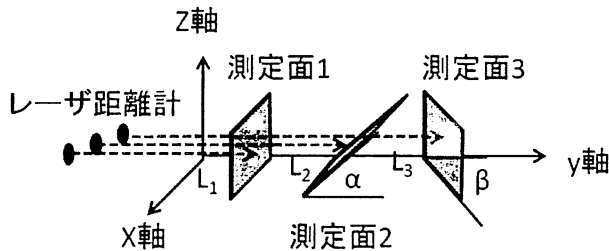


図-1 計測Aの測定点の一例



※図は便宜上光軸をずらして図示しているが、測定時は同じ光軸上の各測定面に対する距離を L_1 、 L_2 、 L_3 とする。

図-2 3次元変位計測の変位測定方法

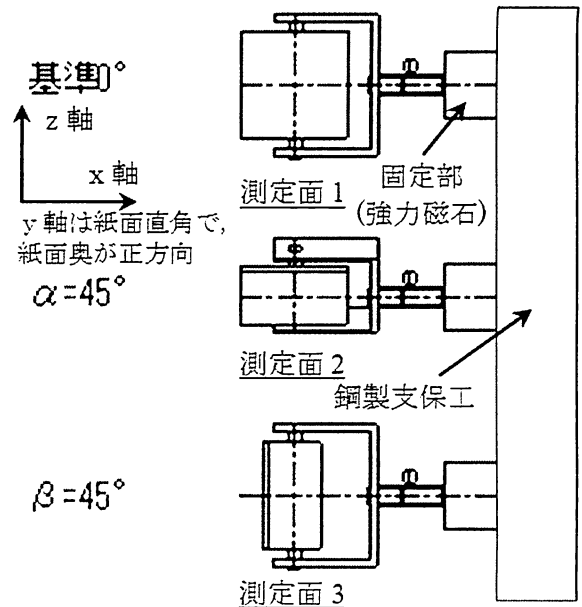


図-3 3次元変位計測の測定点の一例

リートの施工が完了するまでの時間は、DIパターンの2車線道路トンネルでは約2.5時間かかるため、初期値測定は掘削後3時間以内には可能である。しかしながら、切羽近傍に設置した測定点は重機の接触や発破の飛石による損傷を受けやすく、信頼性のある初期値を得ることは容易ではない。一方、初期値測定までの間に脚部沈下や押し出しなどの変形が発生する不良地山では、ずり出し完了直後に初期値を測定して地山変位をリアルタイムに把握することは、地山の安定性評価のために重要となる。そこで、本計測の目的は、不良地山で鋼製支保工が設置される支保パターンを想定し、図-2、図-3に示す3種類の測定面から成る、強力磁石などで鋼製支保工に容易に着脱できる測定点の3次元変位を、切羽後方の不動点に設置した1台のレーザー距離計を用いて支保工設置直後から連続的に計測することとした。

(2) 3次元変位計測手法の概要

図-2に示す3つの測定面の図心はすべて、当該測定点の同一座標にあり、測定面1はzx平面に平行に、測定面2はxy平面となす角 α で、測定面3はyz平面となす角 β でそれぞれ設置されているものとする（図-3参照）。1台のレーザー距離計の光軸をy軸正方向の各測定面の図心に向けて照射、測定した距離を L_1 、 L_2 、 L_3 とすると、時刻 t における測定点の初期(時刻 $t = t_0$)からの3次元変位は式(1)～(3)で表される。

$$\Delta x(t) = -(L_3(t) - L_3(t_0) - \Delta y(t)) \cdot \tan \beta \quad (1)$$

$$\Delta y(t) = L_1(t) - L_1(t_0) \quad (2)$$

$$\Delta z(t) = -(L_2(t) - L_2(t_0) - \Delta y(t)) \cdot \tan \alpha \quad (3)$$

ここで、 $\Delta x(t)$ 、 $\Delta y(t)$ 、 $\Delta z(t)$ ：それぞれ測定点の時刻 t におけるx軸、y軸、z軸方向の変位、 $L_1(t)$ 、 $L_2(t)$ 、 $L_3(t)$ ：

それぞれ時刻 t での各測定面までの水平距離、 $L_1(t_0)$ 、 $L_2(t_0)$ 、 $L_3(t_0)$ ：それぞれ初期値とした時刻 t_0 での各測定面までの水平距離、 α ：測定面2がxy平面となす角で、x軸の時計回りが正、 β ：測定面3がyz平面となす角で、z軸の反時計回りが正とする。

1台のレーザー距離計で測定点の3次元変位を測定するには、図-3に示す3種類の測定面の水平距離を手動もしくは自動で順次測定する。このため、測定点の時刻 t における変位を求めるには、数秒から数十秒の時間を要する。よって、本計測では、地山変位が漸次変化するような静的な変位挙動が計測対象となる。

3. 室内精度試験の概要と結果

(1) 室内精度試験の概要

変位測定において、測定面の傾斜が測定精度に及ぼす影響を把握するため、測定面を水平面に対して鉛直(90°)、60°、45°に固定し、水平変位もしくは鉛直変位を付与して接触式変位計(東京測器研究所、SDP-100R、分解能： 100×10^{-6} mm)による測定値と比較した。使用したレーザー距離計は、Leica製DISTO D8(公称精度 ± 1.0 mm以内)である。変位は水平、鉛直とも0mm～50mm程度の範囲で2.5mmピッチで付与した。レーザー距離計と測定面の距離は、5m、10m、15mの3ケースとした。なお、測定面は灰色に着色されたプラスチック板である。写真-2、写真-3に、それぞれ測定面と2軸変位付与装置、レーザー距離計の設置状況を示す。

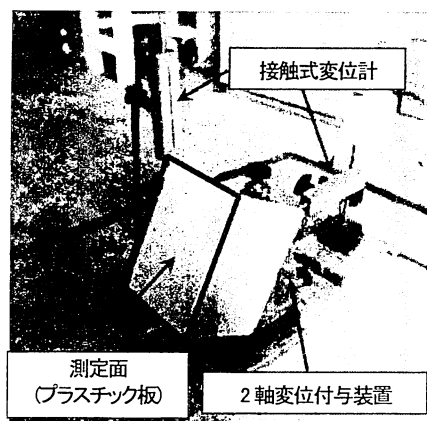


写真-2 測定面と変位付与装置

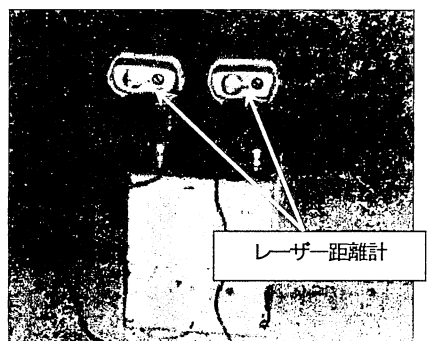


写真-3 レーザー距離計による測定状況

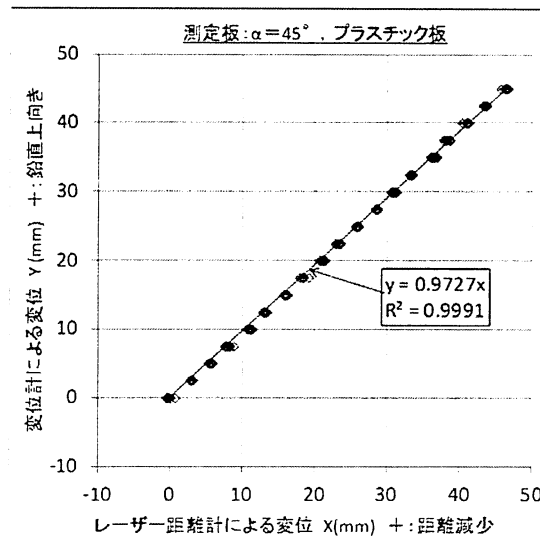


図-4 測定面が 45° の場合の試験結果

表-1 室内精度試験の相関係数

		測定面の傾斜角		
		90°	60°	45°
測定 距離 (m)	5	0.9997	0.9987	0.9994
	10	0.9993	0.9981	0.9995
	15	0.9995	0.9976	0.9995

(2) 試験結果とその考察

実験結果のうち、測定距離 15m で、測定面が 45° の場合の試験結果を図-4 に示す。なお、各測定値は5個のデータをプロットとした。また、表-1 に、全ケースのレーザー距離計と接触式変位計による測定値間の相関係数を示す。

図-4、表-1 より以下のことが分かる。

- ①測定面が 45° の場合、接触式変位計に対しレーザー距離計の測定値のばらつきは、標準偏差 σ で 0.4mm 以内であるが⁴⁾、相関係数 r は 0.9995 と高いことから、 45° 傾斜した測定面でもレーザー距離計により公称精度 $\pm 1\text{mm}$ 以内で水平距離を測定できる。
- ②測定面が 60° の場合も、 45° と同等の相関係数($r=0.9976$) が得られていることから、測定面の傾斜が 60° でも測定精度の点で問題はない。
- ③測定距離 15m 以内で、測定面の傾斜角が 45° から 90° では、測定点の傾斜が水平距離の測定精度に及ぼす影響は認められない。このことから、式(1)～(3)により測定点の3次元変位を公称 1mm 以内の精度で測定できる。

4. 現場試行

本計測手法の計測Aへの適用性を検証するため、島尻

泥岩を土被り2-3D(D:トンネル掘削幅=約12m)で掘削中である、平成23年度豊見城トンネル(下り線)工事で試験的に適用した。写真-4に試行時の測定点設置状況、写真-5に切羽状況を示す。また、図-5に、計測で得られた測定結果を示す。

測定した切羽の土被りは約20mで、島尻泥岩で占められていた。湧水はなく、切羽安定対策のため長尺先受け工と鏡ボルト工を実施している。計測は切羽直近の鋼製支保工の初期沈下とし、磁石で着脱可能な大きさ15cm角の、傾斜角 $\alpha=45^\circ$ の測定面を鋼製支保工に固定してレーザー距離間の2点間距離を連続的に測定した。

図-5より、測定値は2mm程度のばらつきを示しながら、計測期間中で6mm程度の伸びを示していることが分かる。今回は測定面が鉛直の場合の計測をしていないため、押出し量と鉛直変位との区別はできないが、鋼製支保工に容易に着脱可能な測定により、鋼製支保工設置直後からの初期変位を計測できる可能性が見出せたと考えている。

5. まとめ

本論文では、山岳トンネルの計測Aにおいて、1台のレーザー距離計により地山の3次元変位を把握するための簡易な計測手法を示すとともに、室内精度試験結果に基づき3次元変位を精度良く測定できる可能性、および

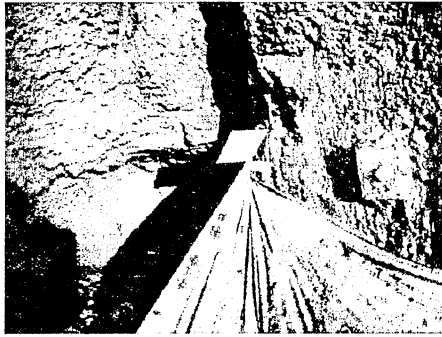


写真-4 測定面の設置状況



写真-5 計測箇所の切羽状況

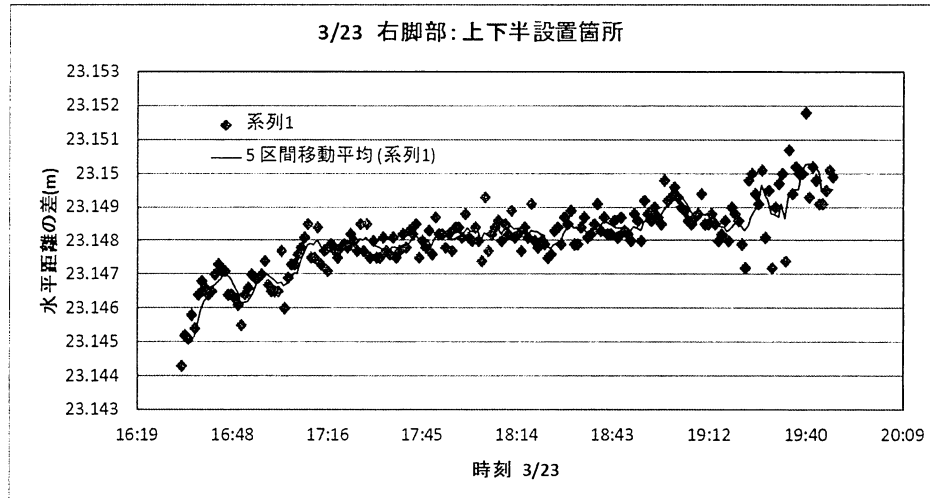


図-5 測定結果の一例

現場計測への適用可能性を示した。今後は、大きな初期変位が発生すると想定される実トンネルの計測管理や切羽の安全管理に適用し、簡易な地盤の3次元変位計測手法として実用化を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針(平成 21 年改定版), pp.30-36, 2009.
- 2) 地盤工学会：地盤工学会基準(案), JGS3711 岩盤の

内空変位・天端沈下測定方法, 2011.

- 3) 熊谷幸樹, 澤井茂, 森脇丈滋, 塩満剛治, 寺島佳宏：レーザー距離計を用いたトンネルの 3 次元変位計測に関する基礎実験, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp.1269-1270, 2012.
- 4) 寺島佳宏, 小川勲, 熊谷幸樹, 松田浩朗, 檜岡民幸：多点同時変位計測による切羽安全監視システムの開発と不良地山における試験適用, トンネル工学報告集第 20 巻, pp.219-223, 2010. .

(2012.9.3 受付)

SIMPLIFIED MEASURING METHOD FOR THREE DIMENSIONAL DISPLACEMENT IN TUNNELS BY MEANS OF A SINGLE LASER DISTANCE METER AND CASE STUDY IN TOMIGUSUKU TUNNEL

Koki KUMAGAI, Gouji SHIOMITSU, Yutaka YANAGIMORI
and Kenichi KARIYA

The geological structure of Japan is considered highly complicated and consists of many inherent weak zones. It is therefore important to monitor continuously the deformation of the entire tunnel and evaluate its stability in the construction of mountain tunnel. The purpose is to measure the total deformation, so that appropriate countermeasure can be carried out and the safety of excavation work can be improved. The authors have developed a simplified measuring method for three dimensional displacement in tunnels by means of a single laser distance meter. This paper reports on the outline of the monitoring system and the result of a case study on poor ground.