

高精度ロータリエンコーダを用いた二軸先行変位計の開発

株式会社大林組 トンネル技術部 正会員 ○藤岡大輔 渡辺淳 鈴木拓也 西村友宏 木梨秀雄
株式会社エス・ケー・ラボ 正会員 辻村幸治

1. はじめに

山岳トンネルの坑内変位計測では、限界ひずみに基づく管理基準値による支保の健全性と変位収束の確認が行われている。この際、先行変位および初期変位は、長尺先受け工の鋼管等に挿入した先行天端沈下計（以下、SAA）により計測している。SAAは、重力加速度式センサーを用いているため鉛直方向の変位が取得できる。

天端沈下に比べて内空変位が卓越する地山では、異方性や先受け工の効果により鉛直と水平方向の先行変位率は変化する。一方、近年、I期線や既設構造物の挙動監視が必要な近接施工が増えてきたが、地表から設置する傾斜計等では坑口部付近など土被りの小さい断面に限定されるため、複数地点において坑内から水平方向の地中変位を把握する必要性が高まってきている。このような背景から、筆者らは、水平と鉛直の二軸方向の計測が可能な先行変位計を開発してきた^{2,3)}（図1）。二軸先行変位計は、1mのロッドを連結して、ロッドを連結するヒンジの角度から変位を算出する。これまで、ヒンジ角度の取得するため、起歪板にひずみゲージを貼り付け、曲げひずみから角度を推定していたが、より精度良くヒンジ角度を取得するため、小型高精度ロータリエンコーダ（以下、エンコーダと記す）を採用することになった。本報告では、エンコーダを用いた二軸先行変位計の概要と精度検証結果について述べる。

2. エンコーダを用いた二軸先行変位計の概要

(1) エンコーダについて

エンコーダは、軸の回転数や回転角度を測定するセンサーである。近年、ロボット制御として使用する用途が増えたことから、高精度かつ小型で安価なものが製造されている。本開発で用いたエンコーダの仕様は以下の通りである。

- ・ シャフト形状：中空軸タイプ
- ・ 分解能：19bit（測定単位：0.000687度/1パルス）
- ・ 寸法と質量：直径30mm、高さ16.5mm、質量：30g
- ・ 耐衝撃：約50G
- ・ 使用温度/湿度：-10℃～+70℃/RH35～90%

電気信号（パルス）と角度の関係は工場出荷時に定まっ

ているので、角度を計算するためのキャリブレーションは不要である。機種は、トンネルの環境に耐えるものの中で寸法が最も小さく、分解能が最も高いものを選定した。理論上、ロッド長が1000mmの時、先端に生じた0.012mmの変位に伴う回転角を捉えることができる。

(2) エンコーダを用いた二軸先行変位計の概要

図2に二軸先行変位計の概要図を示す。1mのロッドとヒンジ部が1個のセグメントになっており、これに必要な長さまで連結する。ヒンジ部には、水平方向と鉛直方向に回転するエンコーダをできる限り近い位置に2個設置した。二軸先行変位計は、内径72mmのガイド管に入れた状態でAGF鋼管などに挿入し、鋼管とガイド管の間にセメント等を注入し定着させる。

3. 精度検証実験

角度センサーとしてのエンコーダの適用性を確認するために、二軸方向の精度検証実験を行った。先行変位計は両端の相対変位を計測するため、切羽側端部の変位をトータルステーションで計測し、相対変位と

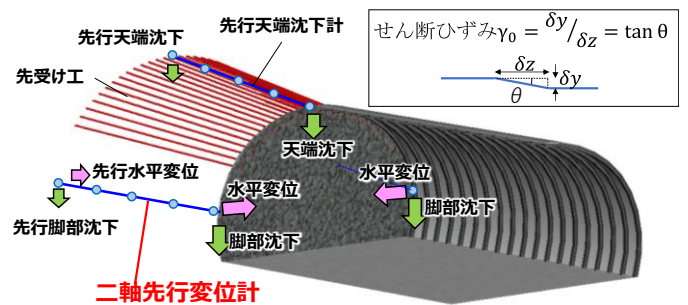


図1 二軸先行変位計の設置イメージ

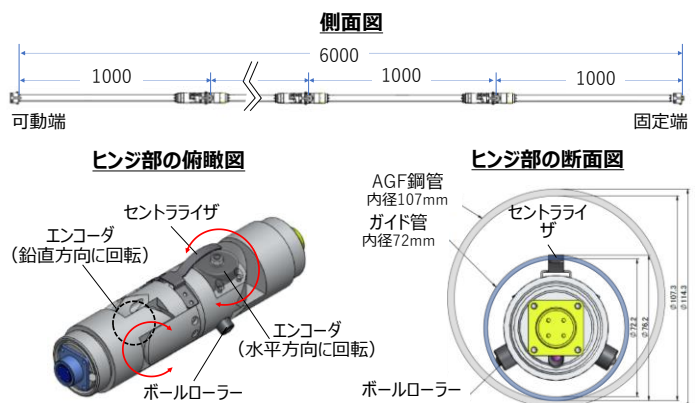


図2 二軸先行変位計の概要図

キーワード：山岳トンネル、先行変位計、先行変位、限界ひずみ、限界せん断ひずみ、ロータリエンコーダ
連絡先：〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 28F Tel：03-5769-1319

合わせることで絶対変位が得ることができる。そのため、二軸先行変位計の精度検証実験の目標精度はトータルステーションと同程度（±1mm）とした。

(1) 実験方法

図3に機器配置概要図を示す。全長 6m の先行変位計を入れたガイド管を水平に設置し、鉛直方向と水平方向に手動で強制変位を与えた。様々な変形モードにおいて、エンコーダが取得したヒンジの角度から変位を計算し、高感度変位計（精度：±0.01mm）の計測値と比較した。変位の符号は、沈下方向をマイナス、先端に向かって左を水平方向のプラスとした。

(2) 実験結果

表1に実験結果の抜粋を示す。高感度変位計の計測値を真値、先行変位計の計測値を出力値とし、その差を誤差とした。変形モードは、先端に向かうほど変位が大きくなるものと中央付近に凸形状を有するものである。いずれの計測点の誤差は±1.0mm以下であった。図5に真値と出力値の比較結果を示す。この図には、表1に示した変形モード以外に、先行変位計を大きく凹凸させるといった、様々な変形モードにおける全ての計測結果が含まれている。最大誤差は1.06mmであり概ね目標精度以内で計測することができた。誤差の標準偏差は0.40mm未満であり、SAAの精度（±0.5mm）を下回った。変位を大きくすると誤差が大きくなる傾向があった。原因の一つは、ガイド管が曲がりにより楕円に変形することでセンタライザがたわみ、先行変位計の中心とガイド管の中心がズレるためと考えられる。そのため、ヒンジ部に取り付けたセンタライザは、ガイド管から抜き差しが可能な範囲で剛性が高いものを選定することが重要である。

4. まとめ

角度センサーとしてエンコーダを用いることで、精度良く先行変位を計測できることがわかった。今後、実際の現場において適用し、検証する予定である。

参考文献

1) 櫻井春輔：NATMにおける現場計測と管理基準値(<小特集>NATMの理論と実際)，土と基礎，34-2, pp.5-10, 1986.2
2) 鈴木拓也，木梨秀雄，渡辺淳，藤岡大輔，萩野知：地山安定評価のための水平および鉛直二軸方向先行変位計の開発，トンネル工学報告集，第29巻，I-35，2019.11
3) 鈴木拓也，木梨秀雄，藤岡大輔，辻村幸治：切羽進行に伴う先行変位測定結果の分析と二軸先行変位計の開発，第15回岩の力学国内シンポジウム講演集，No.103，2021.1

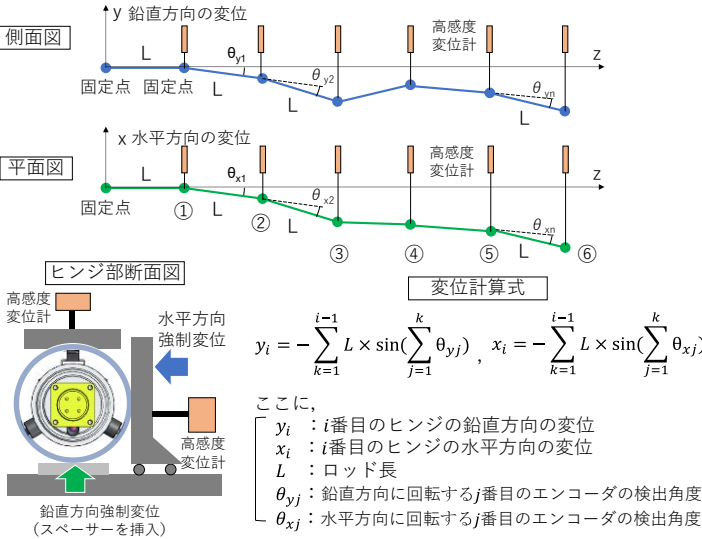


図3 精度検証実験の機器配置概要図

表1 代表的な実験結果

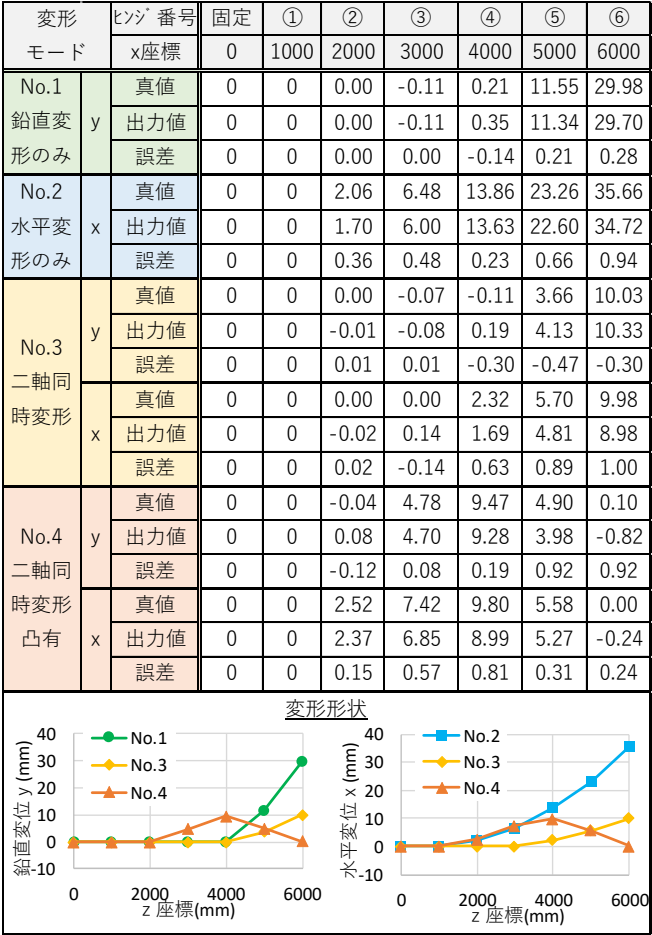


図5 先行変位計と高感度変位計の計測値の比較