

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

鈴木 拓也¹・木梨 秀雄²・渡辺 淳³・藤岡 大輔⁴・萩野 知⁵

¹正会員 (株)大林組 生産技術本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)
E-mail:k.suzuki.takuya@obayashi.co.jp

²正会員 (株)大林組 生産技術本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)
E-mail:kinashi.hideo@obayashi.co.jp

³正会員 (株)大林組 生産技術本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)
E-mail:watanabe.atsushi@obayashi.co.jp

⁴正会員 (株)大林組 技術研究所 地盤技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)
E-mail:fujioka.daisuke@obayashi.co.jp

⁵正会員 (株)大林組 天ヶ瀬減勢池部JV工事事務所 (〒611-0015 京都府宇治市志津川南詰15)
E-mail:hagino.satoru@obayashi.co.jp

山岳トンネルの建設では、事前調査における地山情報の不確実性のため、施工時に現場計測を行い、得られたデータから地山の安定性を評価することが一般的である。測定は簡易かつ取得の確実性から変位計測を主として行い、トンネルの天端沈下量と内空変位量を求めるものである。しかし、これらはトンネル内部からの測定であり、切羽到達までの先行変位は測定できていない。そこで、筆者らは先行天端沈下計¹⁾を開発して、10 か所以上の現場に適用し、先行変位を含めた全変位量から地山の安定性を評価してきた。その結果から、地山の先行変位は岩種、掘削工法、補助工法等の条件により異なることが分かり、一定の成果が得られた。今回は、さらに側壁部の水平方向における先行変位に着目し、新たに水平・鉛直の二軸方向を計測可能とする先行変位計を開発した。本報では、先行天端沈下計の計測結果の分析および考察、並びに二軸先行変位計の開発について報告する。

Key Words : horizontal direction preceding displacement, tunnels stability, critical strain, critical shear strain

1. はじめに

山岳トンネル工法で標準とされる NATM は、周辺地山をその他支保部材と同様に材料であると考え、地山自身の支保機能を有効活用し、安定性を保つ工法である。しかし、多くの場合、その地山についての詳細な情報が得られるのは、掘削した後となる。そのため、事前調査における地山情報の不確実性から、設計と施工実態に乖離が生じることは少なくない。そこで、施工時に現場計測を行い、得られたデータから周辺地山の安定性を評価することが非常に重要となる。測定対象としては地山や支保の応力や変位が挙げられるが、応力の測定は信頼度が低く、労力に見合った結果は得られにくい。一方で、変位計測は簡易に実施でき、信頼度も高いため、日常の管理でも用いられる手法である。

周辺地山の安定性評価には桜井らの提案する『直接ひずみ評価法』²⁾が用いられることが多い。この手法は、計測で得られた変位を、トンネルの半径で除して求められ

るひずみと、供試体の一軸圧縮試験から求められる岩石が破壊する『限界ひずみ』を、比較することによってトンネルの安定性を評価するものである。その際、限界ひずみと対比する計測値は先行変位を含めた全変位である。

通常、トンネルの計測は切羽通過後にトンネル内部から壁面を計測するもので、地山の先行変位は含まれないため、何らかの方法で先行変位を定める必要がある³⁾。

従来は、収束に至るまでの全変位に対して先行変位は3～5割程度生じるものと仮定し⁴⁾、切羽通過後の計測値に合算し、全変位量としていた。しかし、先行変位量は地山条件や施工条件により異なるため、仮定した値が必ずしも適切であるとは限らず、全変位量に占める割合の大きさから、その不確実性は軽視できるものでなかった。

そこで、先行天端沈下計を開発し⁵⁾、10 か所以上の現場に適用することで、得られた結果から様々な条件における天端沈下の先行変位に関する知見を得た。

さらに、今回は側壁部の水平変位に着目し、水平方向も含めた二軸先行変位計を開発した。

2. 先行天端沈下計の概要

まず、開発済みの先行天端沈下計について概要を述べる。本計器は長尺先受け工の鋼管を保護管として内部に挿入し、保護管とともに地山挙動を追従して、変位を計測するものである。近年の先受け工はほとんどが無拡幅式であるため、切羽を 3m 進め、末端の鋼管を撤去した後に、本計器を図-1 のように設置し、計測を開始する。本計器は外径 27mm と小口径であり、注入工の妨げにもならない。挿入する計器は重力式加速度センサ(MEMS)を用いており、0.5m 区間毎に水平傾斜角 θ を測定するもので、リアルタイム計測も可能となっている。

また、計測工 A に合わせて本計器の天端開口部の変位を計測することで絶対変位も把握できる。

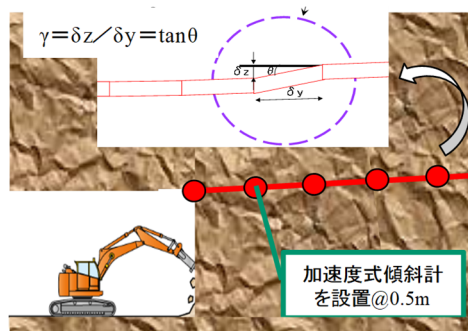


図-1 先行天端沈下計の概要

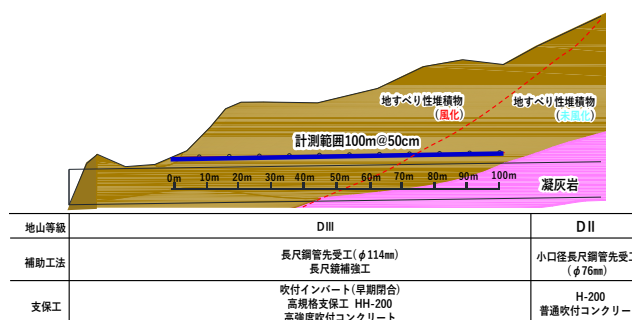


図-2 計測箇所概要

3. 先行天端沈下計の結果考察と地山評価

先行天端沈下計を 10 か所以上の複数現場に適用した。今回は坑口から延長 100m の水平コアボーリングを実施し、ボーリング孔に直接先行天端沈下計を設置した事例について報告する。

(1) 全変位の取得と周辺地山の安定性評価

本事例では、天端直上 2m 離れの位置に計器を設置し、先行変位を含めた全変位を 50cm 間隔で全て計測した。

図-2 に概要を示す

当該区間は土被り 1.5D 未満の小土被り区間であり、支保パターン・補助工法・掘削工法と全て同じ条件である。地質は地すべり性堆積物が分布しており、複雑かつ軟弱な地山のため、吹付インバートによる早期閉合や高規格支保工が設計されている。

先行天端沈下計による全変位の計測結果を図-3 に示す。先行変位は、ばらつきはあるが全変位に対して 2~5 割の値を示していることがわかる。全変位と先行変位率の相関は得られていない。全変位はボーリング深度 70m 付近にて最も大きくなり、その後、トンネルの進行に応じて変位量は小さくなっている。深度 70m 付近の変位の増大は天端部に分布したシルト層の風化帯が原因と考えられる。実際の切羽に現れた地質状況を図-4 に示す。その後は、未風化凝灰岩が広がり、周辺地山は安定化していった。

ここで実測値から 100m 区間の周辺地山の安定性を評価した。評価は直接ひずみ評価法²⁾を用い、全変位量と限界ひずみとの対比から周辺地山の安定性を確認した。図-5 に示す弾性係数と限界ひずみの関係³⁾に実測した全変位をひずみへ換算し、プロットした。実際は 50cm 毎の計測結果を得ているが、煩雑化するため 5m 毎の代表

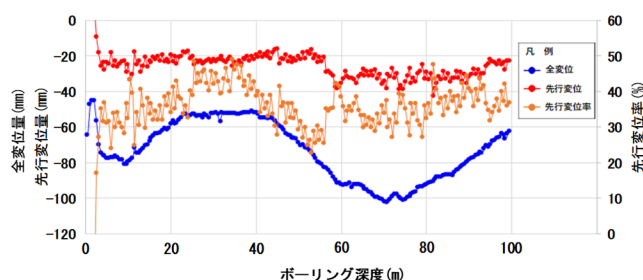


図-3 計測結果

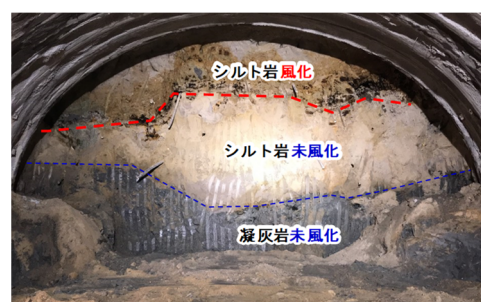


図-4 切羽状況

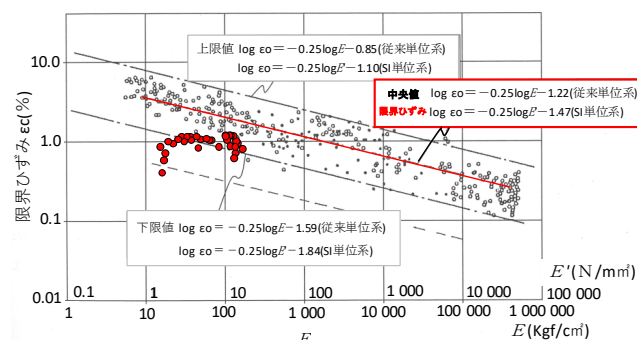


図-5 限界ひずみ図における計測値の評価⁵⁾に加筆

値をプロットしている。弾性係数については実測した変位量から式(1)、(2)の弾性理論解を用いて算出した⁹⁾。

$$E' = \frac{(1+\nu)\{2(1-\nu)-(1-2\nu)K_0\}\gamma HD}{U_t} \quad (1)$$

$$K_0 = \frac{1-\nu}{\nu} \quad (2)$$

ここで、 ν はポアソン比、 K_0 は側圧係数、 γH は土被り、 D はトンネル径、 U_t はトンネルの天端変位を表す。

図-5から、地山の変位は限界ひずみを超えてはいないものの半数以上が下限値を超えていることがわかる。

しかし、支保構築後、周辺地山の崩壊などには至っていない、変位も収束しているため、設計された支保は妥当であると考えられる。

(2) 地山の見かけの弾性係数と真の弾性係数

式(1)はトンネル変位計測結果から、弾性論により周辺地山の物性評価を簡便に求めるもので、得られる値は支保工の変位抑制効果を含めた見かけの弾性係数である。図-5は岩石の一軸圧縮試験から得られた弾性係数と限界ひずみの関係であり、周辺地山の安定性評価には地山の真の弾性係数が必要である。そこで、三次元解析により、素掘り状態でトンネルを掘り進めた場合と支保工を含めた状態とで2通りの弾性係数の解を求め、見かけの弾性係数をその比率で割り戻すことで地山の真の弾性係数を得た。解析の汎用的な解を得るためモデルはトンネル標準断面方書より2車線道路トンネルの標準断面例を採用し、地山物性値は、日本道路公団試験研究所、「技術資料第358号トンネル数値解析マニュアル」(平成10年10月)を引用した。図-6に解析結果を示す。

(3) 限界せん断ひずみと前方地山の安定性評価

切羽が崩壊する場合には、その前兆として前方地山のせん断ひずみが増大するものと考えられ、桜井らによって地山破壊の指標として『限界せん断ひずみ』⁹⁾が提案されている。先行天端沈下計は、地山の先行変位が計測できると同時に50cm区間毎の隣り合う測点の沈下量の差分から区間せん断ひずみをリアルタイムに求められる。この区間せん断ひずみと限界せん断ひずみを対比することで、切羽前方の安定性を評価した。

今回はせん断ひずみが最も大きな値を示したボーリング深度70m付近の結果を抜粋して報告する。図-7にせん断ひずみの計測結果を示す。切羽が深度70m地点を通過した際にせん断ひずみは1m前方で1.6%まで上昇し、その後、深度74m地点を通過時に再度、1m前方でせん断ひずみの上昇が見られた。切羽は深度74m地点通過時に天端部の風化シルト層において小崩落が生じたが、長尺先受け工のを採用し、慎重な掘削が行ったため大きな崩落には至っていない。切羽状況を図-8に示す。こ

で、図-9に示す桜井らの限界せん断ひずみの図表⁹⁾に図-7の赤枠で示す、せん断ひずみが大きく上昇した値をプロットした。結果、せん断ひずみが下限値ラインを超えて、切羽崩壊を示唆する、実現象に伴った結果が得られた。以上の結果より、先行天端沈下計による、天端崩落のモニタリングは有益であることが確認できた。

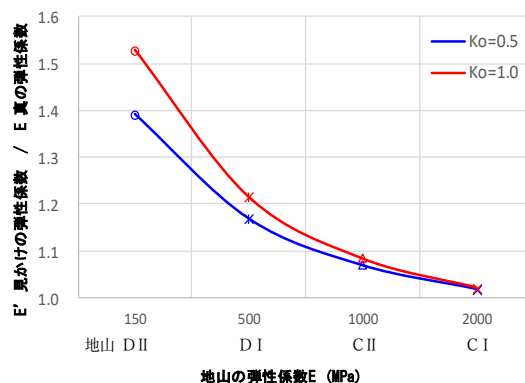


図-6 弾性係数比(解析結果)

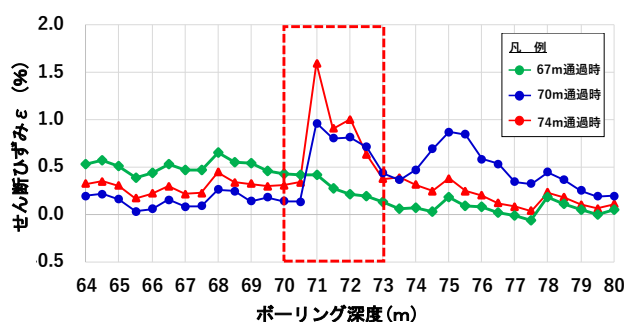


図-7 せん断ひずみ計測結果

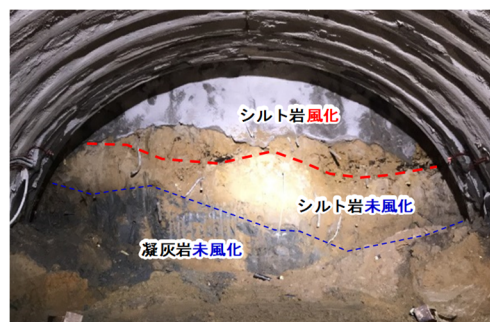


図-8 小崩落を生じた切羽状況

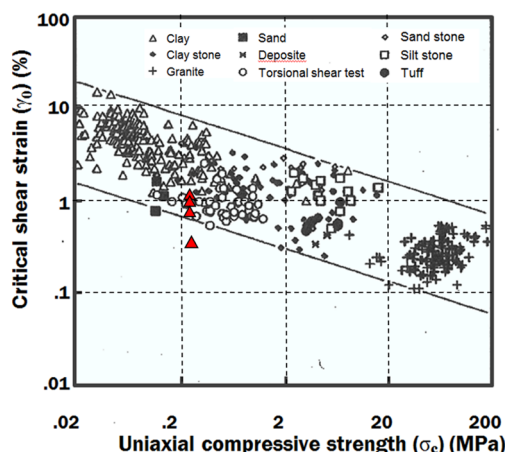


図-9 一軸圧縮強度と限界せん断ひずみの関係⁹⁾に加筆

5. 水平方向の先行変位計測の必要性

先行天端沈下計により、切羽進行に伴う天端部の先行変位とせん断ひずみを計測することが可能となり、様々な条件下における先行変位や切羽崩壊にいたる兆候のデータを蓄積することができた。しかし、先行天端沈下計は重力加速度式傾斜計(MEMS センサ)を採用しており、そのシステムの特長から重力方向(沈下方向)の変位のみが計測可能で、水平方向の変位を計測することはできない。トンネル現場では図-10 のように天端沈下と比較して側壁部の水平変位が卓越する現象がしばしば起こり得る⁵⁾。その際、側壁部の先行変位は天端部と同程度であるとは限らず、先行天端沈下計で得られた計測結果を用いることはできない。現状、側壁部に関してA計測は収束確認のみで、地山安定性評価をできていないのが実態である。さらに先受け工等の補助工法を採用した条件下では、天端沈下と側壁部の挙動は乖離する可能性もある。そのため、天端部とは別に側壁部の先行変位も把握し、地山を評価する必要があると考えた。

そこで新たに、水平および鉛直の二軸方向の計測が可能な先行変位計を開発するにいたった。

6. 二軸先行変位計測の概要

開発した二軸方向先行変位計について概要を述べる。本計器はロッドとジョイントで構成され、ジョイントは1.0m 毎に設けている。計器は先行天端沈下計と同様に、長尺先受け工などに用いられるφ76mm の先受け管を保護管とし、打設後、切羽を3m 進めた後に、内部に挿入するものとする。図-11 は先行天端沈下計および二軸先行変位計を設置したイメージである。ジョイント部は図-12 に示すような鉛直および水平方向に可動する自在継手を用いている。さらにそのジョイント部に起歪板を二軸方向に設置し、ひずみゲージを取り付けることで二成分の曲げひずみを測定できる機構としている。図-13 に設置時の内部イメージを示す。先受け管は地山の变形に追従できるよう剛性の低いGFRP管を想定している。

曲げひずみから変位を検出する手順を下記に示す。

- ① 各ロッドとジョイントを1セグメントとし、要素実験によりセグメント毎に曲げひずみと変位量の関係をあらかじめ取得する。
- ② 計測した各ジョイントの曲げひずみから実験で得られた関係式を用いて、セグメント毎の変位を求める。
- ③ セグメント毎の変位を積算する。

以上が、本計器の概要である。つぎに、本計器を現場に適用するにあたって実施した要素実験について述べる。

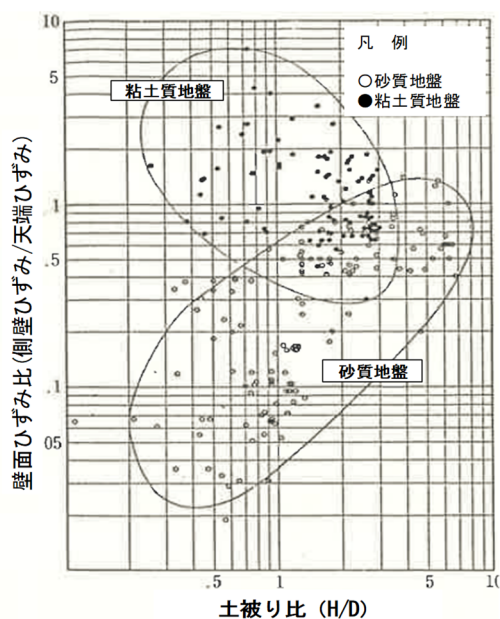


図-10 土被り比と壁面ひずみ比の関係⁵⁾

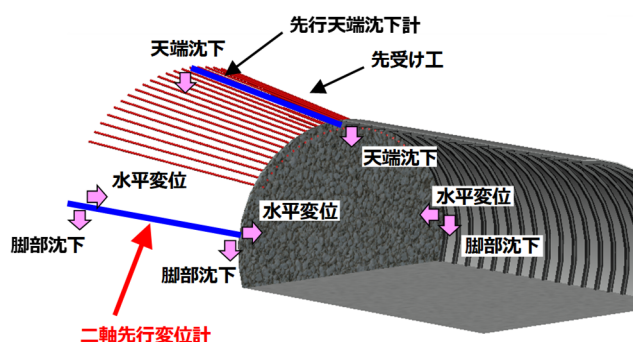


図-11 二軸先行変位計設置イメージ

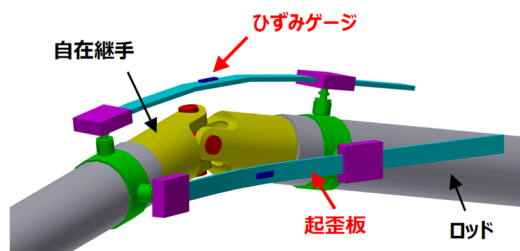


図-12 ジョイント部概要

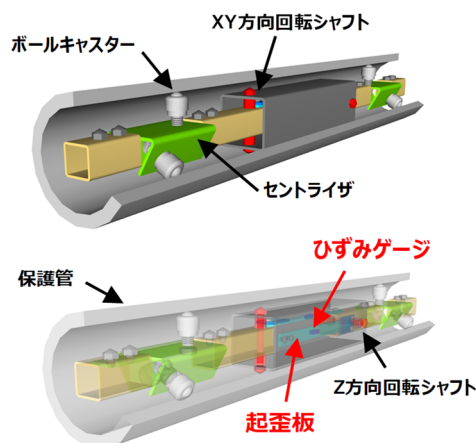


図-13 計器収納イメージ

7. 要素実験

本計器の精度検証とその他課題の抽出・改善を目的とし、要素実験を行った。内容を下記に記載する。

実用化にあたって目標とする精度は先行天端沈下計と同等とし、原点から 1m 地点において $\pm 0.2\text{mm}$ (1 セグメントの計測レンジ 20mm の 10%)、原点から 5m 先の地点で $\pm 1\text{mm}$ と設定した。

(1)変位計事前校正

セグメントのジョイント下に高さ調整用のジャッキを設け、強制的に変位を与えた。セグメント毎に変位と曲げひずみの関係を取得し、係数Cおよびその直線性を確認した。図-14 に事前校正の概要図を示す。変位計測はCDP(高感度変位計)、曲げひずみはひずみゲージを用いてそれぞれ測定した。

事前校正の結果、セグメント毎の変位と曲げひずみは変位量 $\pm 20\text{mm}$ の範囲内で全て図-15に示すような直線的な関係が得られた。

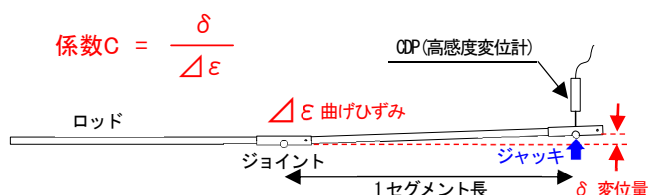


図-14 変位事前校正の概要

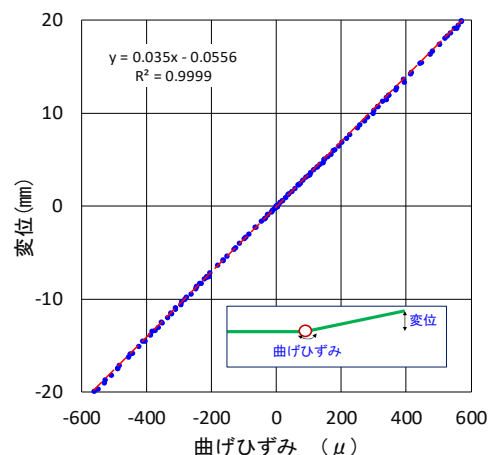


図-15 曲げひずみと変位の関係

(2)連続変位追従試験

5つのセグメントを連結し、ジョイント部に強制変位を与え、曲げひずみを測定した。事前校正で得られた関係式を用いて、各ジョイントの曲げひずみから変位を検出し、これらを積算した計算値とCDPから得られた実変位との関係性を確認した。図-16 に連続変位追従試験の概要を、写真-1 に実験状況を示す。

強制的に与える変位は、本計器が実際の地山挙動に追従できるよう、過去現場の先行天端沈下計から得られた結果(図-17)を模して、複数の変形パターンを用意した。

各々のパターンで精度を検証した結果、計測器を構成する部材の特性上、精度の低い変形パターンが存在したが、計器の改良を重ね、目標精度の確保に至った。

精度検証に用いた変形パターンおよび検証結果の代表例を表-1に示す。

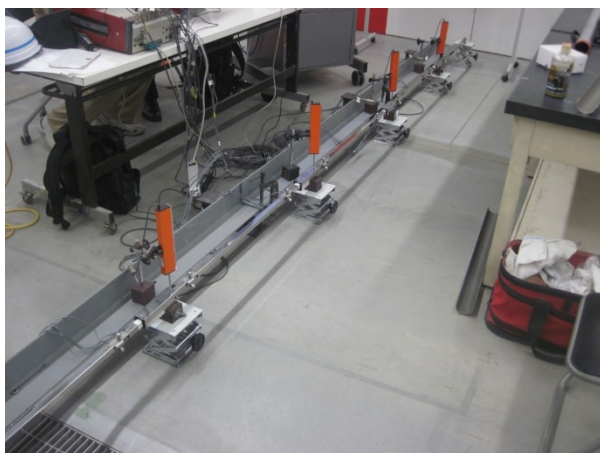


写真-1 要素実験状況

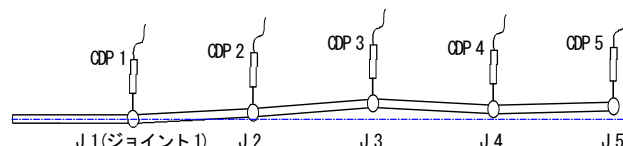


図-16 連続変位追従試験の概要

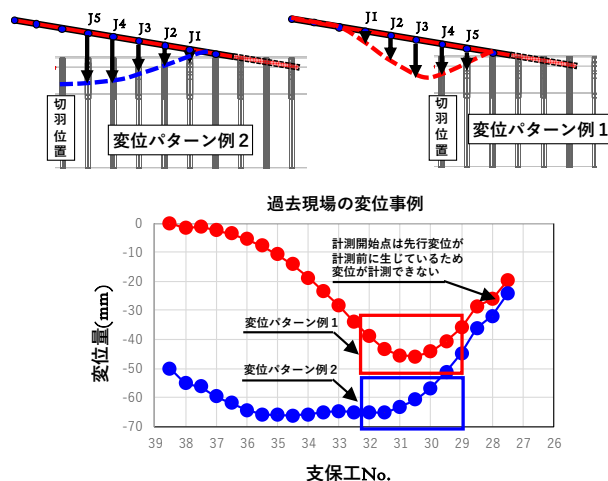


図-17 連続変位追従試験の概要

表-1 精度検証結果の概要

計測パターン		J1	J2	J3	J4	J5	可否
No.1	実変位(CDP)	0	1	2	3	5	○
	計測値(変位計)	0	0.9	1.9	2.4	4.7	
	差	0	-0.1	-0.1	-0.5	-0.3	
No.2	実変位(CDP)	0	0	0	-10	-20	○
	計測値(変位計)	0	-0.1	-0.5	-10.1	-19.2	
	差	0	0.1	0.5	0.1	-0.8	
No.3	実変位(CDP)	0	-15	-30	-25	-20	○
	計測値(変位計)	0	-15.1	-29.6	-24.5	-19.4	
	差	0	0.1	-0.4	-0.5	-0.6	
No.4	実変位(CDP)	0	-8	-6	-12	-20	○
	計測値(変位計)	0	-8.1	-6.2	-11.5	-19.2	
	差	0	0.1	0.2	-0.5	-0.8	

(3)模擬管内における変位追従試験

将来的な保護管を模した模擬管(内径 $\phi 60\text{mm}$ 透明塩ビ管)に本計器を挿入し、管とのなじみや構成部材の強度、挿入時・計測時に問題が生じないかを確認した。

現在、上記段階までの検証が完了した状態である。今後は、模擬管内において一軸追従試験および二軸追従試験を検証し、目標精度を達成でき次第、実施工適用による検証に進みたいと考えている。今後、更なる検討の余地が残るが、課題の抽出・改善に努め、次のステップへ進めていく次第である。

8. まとめ

本報では地山の安定性評価を目的として、先行天端沈下計の計測結果の分析と考察、および二軸先行変位計の開発について述べた。通常の計測管理では、先行変位率を仮定して限界ひずみとの照査を行っているが、先行天端沈下計により全変位が計測できたことで、精度の高い評価ができた。今後は側壁部でも同様に先行変位を計測し、地山の安定性を評価する必要がある。本計器の開発・現場適用は喫緊の責務である。今後、二軸先行変位計を実用化するにあたっては、以下の活用方法が望ましいと考えている。

① 地山の塑性化評価

水平方向の先行変位測定が可能となることで側壁部における全変位量と限界ひずみを対比し、地山の安定性を正しく評価できる。

② 管理の質を向上

先行変位量を把握し、正しい管理基準値を設定することで縫い返し等の変状リスクを低減する。

③ 解析に応用

先行変位率と解析で用いる切羽到達時の応力解放率の関係を明確にし、解析の入力データとして活用する。

二軸先行変位計は、要素実験の結果から、望ましい結果が得られており、今後は早い段階で実施工で検証し、現場適用事例の蓄積ができるよう努めていきたい。さらに先行天端沈下計の現場適用事例と併せて条件別にデータを蓄積することで、天端部と側壁部の先行変位の違いや、補助工法による先行変位の抑制効果について考察していきたい。

参考文献

- 1) 木梨秀雄, 木野村有亮, 奈良田恵佐, 伊藤哲: 切羽からの先行変位計測による地山の安定性評価, トンネル工学報告集, 第27巻, I-21, 2017.
- 2) 櫻井春輔: トンネル工事における変位計測結果の評価法, 土木学会論文集NO.317, pp.93-100, 1982
- 3) 櫻井春輔: NATMにおける現場計測と管理基準値, 土と基礎, Vol.34, No.2, 1986.
- 4) 土木学会: 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務, トンネルライブラリー第16号, p. 162, 2006.
- 5) 櫻井春輔, 足立紀尚: 都市トンネルにおけるNATM, pp.27-35, 1988.12.
- 6) 櫻井春輔, 川島幾夫, 大谷達彦, 松村真一朗: トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ, 土木学会論文集NO.493/III-27, pp.185-188, 1994.6

(2019. 8. 9 受付)

DEVELOPMENT OF TWO DIRECTION MEASURING DEVICE OF PRECEDING DISPLACEMENT FOR EVALUATION OF TUNNELS STABILITY

Takuya SUZUKI, Hideo KINASHI, Atsushi WATANABE, Daisuke FUJIOKA
and Satoru HAGINO

Previously authors developed preceding displacement meter installed foreword ground from the tunnel face for preventing the unexpected tunnel face collapse. Analysis of the displacement data measured at the site revealed that the preceding displacement rate was 10 to 50%. This time, a new device is development. This device is for measuring preceding displacement in two directions including the horizontal direction, it is measured with a strain gage. This makes it possible to evaluate the stability of the tunnel side. In the future, it will be applied to the tunnel sites through demonstration tests.