光ファイバケーブルセンサによる山岳トンネルの切羽前方変位計測手法

大成建設(株)　正会員　○坂井　一雄
大成建設(株)　正会員　赤木　俊文

１．はじめに

脆弱な地山条件下でのトンネル工事や、都市部で周辺構造物や地表面に対する影響監視が求められるトンネル工事では、切羽到達前の地山挙動を計測して、できるだけ早期に対策を講ずることが必要になる場合がある。この目的で、しばしばトンネル坑内から計測器械を設置する方法で、切羽前方変位計測が実施される。例えば、坂井ら[1)]は施工箇所の上部が道路や既存構造物で占有された都市部における地下駅建設工事において、トンネル全線で切羽先行沈下と切羽押出し変位を計測し、事前に実施した予測解析結果と比較することで、切羽前方の地山安定性を確認した事例を報告した。Schneider ら[2)]は Brenner Base Tunnel において、支保設計における変位特性曲線の妥当性を検証する目的で、2 地点で断面拡幅部（Cavern）から調査坑道（exploratory tunnel）を施工する際に断面変化点の前方に長さ 40m の連続式傾斜計（chain inclinometer）を設置して切羽先行沈下を計測した事例を報告した。この他にも傾斜センサを用いた切羽先行沈下計測の事例は複数報告されている[例えば 3)]。

ここで、従来手法の課題の一つとして、計測器械として傾斜センサを使用するため鉛直方向の沈下や隆起だけが計測対象であったことが挙げられる。大土被りトンネルで、鉛直方向応力よりも水平方向応力が卓越する場合[4)]や、岩盤物性の異方性が顕著で、トンネル横断方向の剛性が小さい場合には、切羽通過後変位と同様に切羽前方変位も、沈下よりも水平方向変位が支配的になる場合がある。このような事例に対応することを目的に、多点でケーブル延長方向のひずみを計測することが可能な複数の光ファイバケーブルセンサ（All Grating Fiber、以下 AGF）と高い位置分解能を達成できる Optical Frequency Domain Reflectometry（以下 OFDR）測定方式を採用することで、計測器械先端からの鉛直および水平変位量を同時に評価できる計測手法を開発した。本計測手法では、光ファイバケーブルセンサを切羽から前方に補助工法として打設される鋼管の内部にパッカー装置を使って固定されるが、計測完了後には、センサは回収することができ、次計測断面に転用できることが特徴である。本論文では、開発した切羽前方変位計測器械の構成、光ファイバ測定方式、および計測レイアウトについて概説する。また、これまでに実施した室内要素試験の結果、および施工中のトンネル現場における現場計測試験の結果について示す。

２．光ファイバケーブルセンサを用いた切羽前方変位計測手法

(1) 光ファイバケーブルセンサと測定手法

代表的な光ファイバセンサの一つである FBG（Fiber Bragg Grating）センサは、ひずみを精度良く測定できるセンサとして橋梁のひずみモニタリング等、土木分野で広く適用されている[5)]。一般的に用いられる WDM (Wavelength Division Multiplexing) や TDM (Time Division Multiplexing) 方式は、FBG センサ部だけの単点の測定技術であり、得られる測定値は従来のひずみゲージと同様にゲージ長の平均的な値である。一方で、1mm 以下の高い空間分解能を達成できる OFDR 測定方式が開発されてき

表-1　OFDR 方式の特徴と切羽前方変位計測への適用性

	FBG	BOTDR	OFDR (AGF利用)
	単点型計測	分布型計測	
計測精度(ひずみ)	±1με	±20με	±1με
計測レンジ	±10000με	±7500με	±10000με
空間分解能	既知点での計測を対象	1m	1mm以下
計測時間	瞬時	5～10分程度	瞬時
計測可能長	1点	5km	~20m程度
切羽先行変位計測への適用性	局所的な位置におけるひずみ計測であるため、変位評価が困難	空間分解能の課題があり、微小区間のひずみを累積して変位評価する事が困難	通常施工される長尺鋼管先受け工長さであれば、高い精度と空間分解能を達成できるため、切羽前方変位の評価可能

キーワード　山岳トンネル，切羽前方変位計測，光ファイバ，FBG，OFDR
連絡先　〒245-0051　神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1　大成建設㈱技術センター　ＴＥＬ045-814-7221

た[6]。また、光ファイバケーブル全長に渡ってグレーティングが施された、すなわちケーブル自身を FBG センサとして利用することのできる AGF も実用化され、一般的に利用することができるようになってきた[7]。これらを利用すれば、従来の分布型光ファイバ計測手法の代表例である BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) を用いた手法と比較して(**表-1**)、計測可能長は限定的であるもののケーブル全長にわたり、高分解能・高精度でのひずみを測定することができる。したがって、mm 単位での評価が必要な山岳トンネルの切羽前方変位計測にも適用することができると考えた。

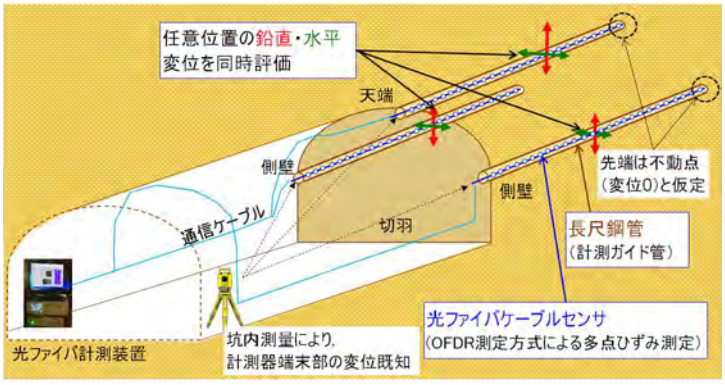


図-1　切羽前方変位計測の概念図

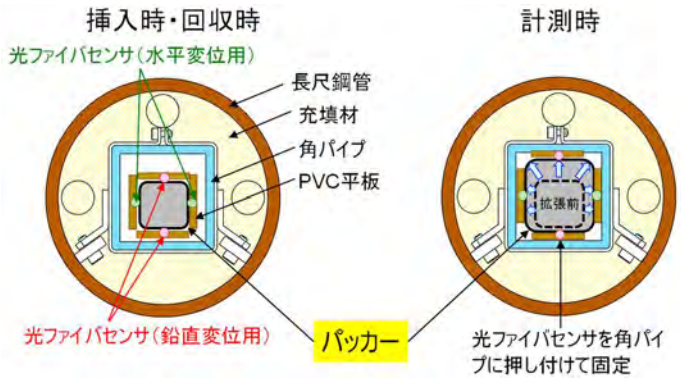


図-2　光ファイバ計測器械の構成

(2) 計測器械の構成

計測器械は切羽から前方に打設した長尺鋼管内に設置することを想定した（**図-1**）。AGF は全長にわたってグレーティングが施されるため、BOTDR などの分布型計測に用いられる光ファイバケーブルよりも高価である。そこで、鋼管内に設置した AGF を回収でき、再計測が可能な設置形態を考案した。**図-2** に計測器械断面図を示す。AGF を貼り付けた PVC 平板を 4 組準備し、それらを角パイプの内側よりパッカーと一緒に挿入する。計測時にはパッカーを窒素ガスにより加圧拡張させることで、光ファイバを角パイプ側に押し付ける。トンネル掘削による地盤の変形は、鋼管の長手方向の形状を変化させ、それに対応して角パイプも同様にたわみを生じる。角パイプ側壁間と上下間のファイバ軸方向のひずみ差によって、それぞれ水平方向および鉛直方向の曲率を式(1)によって計算することができる。

$$1/\rho_v = (\varepsilon_t - \varepsilon_b)/H, \qquad 1/\rho_h = (\varepsilon_l - \varepsilon_r)/W \tag{1}$$

ここで $1/\rho_v$ と $1/\rho_h$ は鉛直および水平方向の曲率である。ε_t、ε_b、ε_l と ε_r は角パイプ内側の上部、下部、左側壁および右側壁に設置された光ファイバケーブルセンサの長手方向のひずみである。H と W は鉛直および水平方向の光ファイバケーブルセンサの離隔である。水平方向と鉛直方向のたわみ曲線は、ファイバの先端から端末までの曲率を 2 回積分することにより算出することができる。切羽前方変位計測の目的では、**図-1** に記載するように、計測器械の先端部の変位を不変、また計測器械端末部の変位は坑内測量により既知であるとし、初期値取得時からの AGF のたわみ量変化を変位として評価することとした。

計測完了後には、パッカーを減圧することで、角パイプ内のパッカーおよび平板を回収し、他の計測孔において再利用することが可能である。このため、トンネル掘進方向に監視範囲の延長が長い場合にも、少数のセンサを繰り返し挿入して計測することで、切羽前方変位計測に掛かるコストの抑制を図ることが可能である。

3．室内曲げ変位測定試験

図-2 に示す計測器械のうち、長尺鋼管および充填材を除く、延長 9m の試作機を製作し、曲げ変位測定試験を実施した[8]。運搬や設置施工性を考慮して、角パイプおよびパッカーは 3m の部材をそれぞれ鋼製ソケットとジョイントで接続した。長さ 9m で厚さ 3mm の PVC 平板には光ファイバケーブルセンサ貼付け用に深さ 0.5mm の溝を施工した。その後、光ファイバは工場にてエポキシ樹脂を用いて平板上に固定した。PVC 平板は運搬の際には、概ね 1m 程度の円形状にまとめて、挿入前にパッカーと共に地組みを行って、角パイプ内に挿入した。

図-3 に試験レイアウトを示す。曲げ変位測定試験では、図-3 の左端部を切羽前方変位計測における先端部とみなし H 鋼により固定して、複数個所のパイプサポートによる支点部に、鉛直方向および水平方向に変位を与えた。図-4 は中間部（変位モード A）、図-5 は端末部（変位モード B）に鉛直および水平方向に同時に 10mm ずつ 50mm まで変位を付与した時の結果である。なお、変位モードの検証用として、鉛直および水平方向ともに 6 台の接触式高感度変位計（容量 100mm、計測精度 0.1mm）を用いて、角パイプ外側より変位量を計測した。

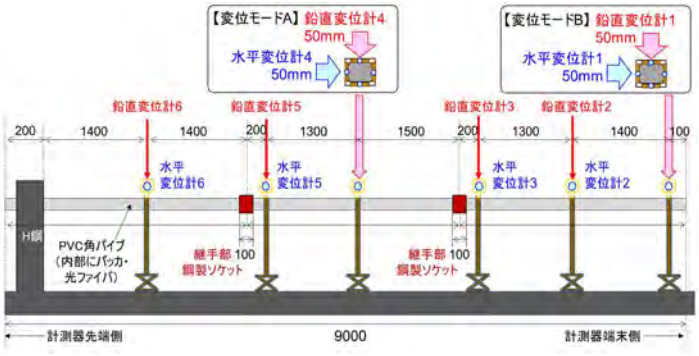


図-3　室内曲げ変位測定試験レイアウト

光ファイバによる変位量は H 鋼により把持した計測器械先端部から 200mm の地点を不動点、端末側は角パイプの端末から 100mm の位置で計測される鉛直変位計 1 と水平変位計 1 の値が既知であると考えて計算した。光ファイバによる変位の測定間隔（空間分解能）は試行的に 6mm（9m で 1500 点の計測）とした。両図に示すように光ファイバの測定結果は両変位モード共に、外部変位計で計測された各点の計測結果と整合的である。ただし、変位モード A では、鉛直方向で変位計 2～5 にかけて全体的に値が小さく、変位計 4 の位置で最大 5mm の乖離が見られた。試験後の観察結果から、パッカー挿入時の位置合わせの不足によって、鉛直方向に向かい合う 2 枚の PVC 平板が水平方向の 2 枚よりも断面内でずれが大きく、正しく角パイプの曲率を評価できなかったことが乖離の原因の一つであると推察された。このように、最大でも 10% 程度ではあるが、パイプ内のファイバ位置の計測器械断面内のずれが計測誤差の大きさに有意な影響を与えることが明らかとなった。

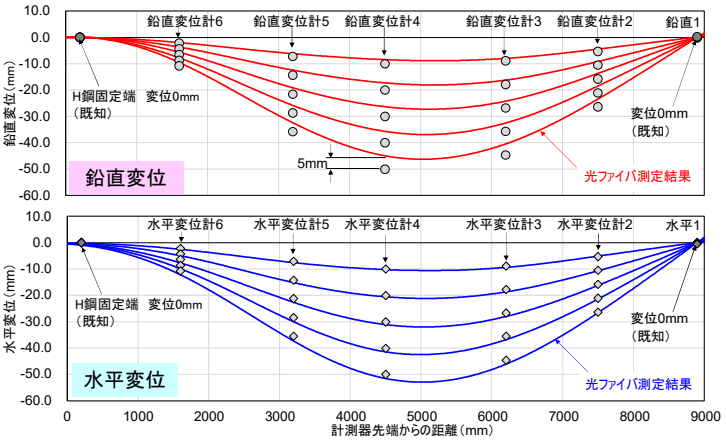


図-4　計測結果（変位モード A）

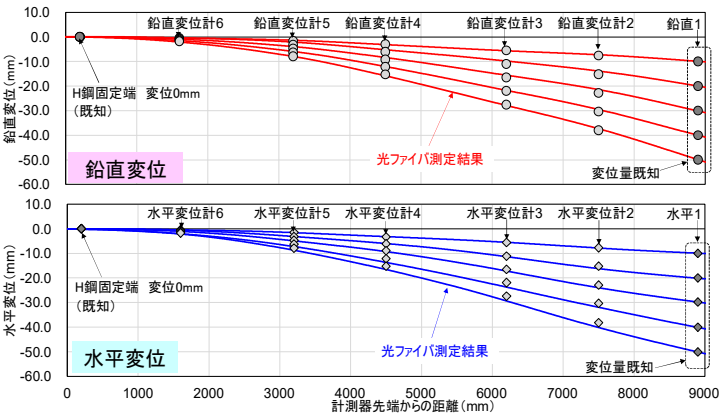


図-5　計測結果（変位モード B）

4．現場計測試験

室内曲げ試験の結果、開発した切羽前方変位計測器械によって、最大でも 10%程度（50mm の変位を与えて 5mm 程度）の誤差で変位の評価が可能であることを確認した。そこで、次段階の検証として、トンネル現場で実測データを取得すること、また設置施工性を確認することを目的に現場計測試験を実施した [9),10)]。

(1) 計測条件

現場計測試験は、熊本 57 号滝室坂トンネル東新設（二期）工事にて実施した。同工事では全長 4.8km（東工区では約 2.1km）、標準内空断面積 90m^2（仕上り内径）の 2 車線道路トンネルを構築する。計測区間周辺の地質は阿蘇山の噴火に起因する火砕流が熱と重量で溶結した塊状の凝灰岩である。計測器械設置断面（鋼管打設時の切羽位置）は TD1930.7m（1889 基）および TD1946.2m（1905 基）の 2 断面とし、上半作業盤より 1.3m 上方の左右側壁に打設された長尺鋼管の中に計測器械を挿入、設置するものとした（図-6）。長尺鋼管の管口

は計測器械を挿入または回収するため、計測期間中は坑内に露出される必要性があり、計測器械設置断面より1基手前を片側600mmずつ拡幅した。また、長尺鋼管は断面拡幅形状と削岩機械の側壁への干渉を考慮して、トンネル進行方向から外側に向かって 6° の角度で削孔した（図-7）。

計測器械は掘削作業の中断を伴う切羽近傍での作業時間をできるだけ短縮することを目的に、事前に角パイプ内の装置を組み立てることとした。具体的には、切羽後方の作業場所にて、光ファイバケーブルセンサをパッカーと共に角パイプに挿入して、パッカーを窒素ガスにより拡張することで角パイプ内に固定した状態で切羽まで運搬して、鋼管内に挿入する手順をとった。鋼管内に光ファイバケーブルセンサを内蔵した角パイプを挿入した後に、角パイプと鋼管内を固定するために、シリカレジンを充填した。シリカレジンは硬化時に発熱するため、事前試験結果では、角パイプ内側では60℃近くまで上昇し、光ファイバケーブルセンサのひずみ測定結果に温度影響があることが懸念された。そこで、シリカレジン充填後、1 掘削サイクルの施工が完了し（切羽が 1890 基位置）、十分温度が低下した時点で計測初期値を取得するものとした。図-8 に計測器械設置完了時点の状況を示す。図-8 に示されるレギュレータボックス内には、光ファイバの通信ケーブルおよびパッカー圧を一定に保つ制御装置を内蔵されている。

（2）計測結果

図-9 は初期値取得後、4 サイクル（4m）切羽が進行した時点における左右側壁の変位分布測定結果である。これらの結果は、計測器械先端を変位 0 とした不動点で、端末部を測量結果によって光ファイバのたわみ量を変位量に変換したものである。計測区間では、塊状かつ中硬質な凝灰角礫岩が分布していたため、変位量は小さく、水平変位量および鉛直変位量の絶対値は最大でも 6mm 程度であった。切羽前方では、左側壁の沈下量が最も大きいが、それでも 4mm 程度であった。したがって、切羽前方の地山挙動は概ね安定的であったと考察される。一方、こ

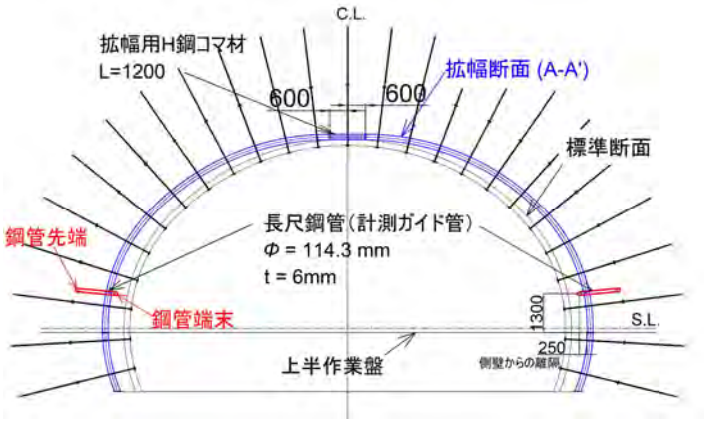


図-6　拡幅断面図（1888 基：第 1 回計測時）

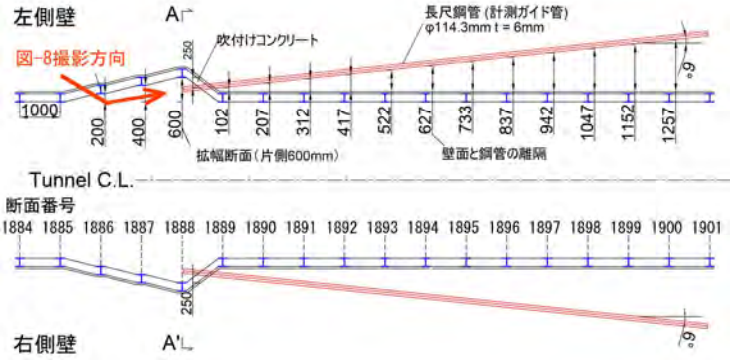


図-7　計測区間平面図（第 1 回計測時）



図-8　計測器設置完了状況（左側壁）

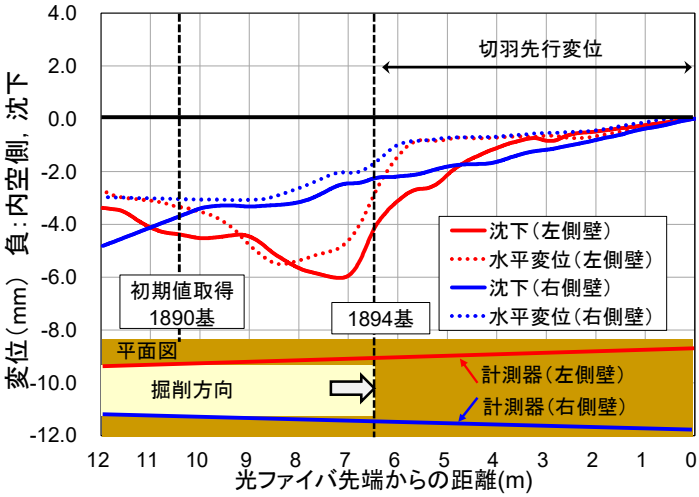


図-9　計測結果（初期値取得後 4m 掘削時点）

のような微小な変位量であっても、切羽近傍での応力解放に伴って、変位量が顕著に増加するという一般的なトンネル掘削に伴う地山挙動を捉えることができた。端末部における変位量が中間部に比べて小さくなる原因は、初期値測定時において、既に端末部周辺の岩盤が掘削に伴う影響を受けているため、測定結果には切羽前方変位が含まれていないことであると考えられる。

図-10 には 1896 基断面における変位特性曲線を示した。1896 基断面でも切羽通過前後において顕著な変位量増加がないことから、周辺地山が安定的であったと確認される。なお、切羽離れ 2m 以降において、沈下および水平変位が増加に転じているが、これは不動点と仮定している先端部に切羽が近づき、変位を生じていることが原因であると考えられる。上記考察の通り、本計測試験では顕著な変位を記録しなかったが、変位特性曲線は前方変位の発生領域や全変位に対する割合を評価できるため、支保や補助工法の設計的な検討条件の検証に活用することができると考えられる。

図-11 は計測器械の回収状況である。パッカーを減圧することにより、角パイプ内の PVC 平板の固定が解かれ、人力で角パイプと PVC 平板の回収を実現することができた。また、回収した計測器械を第 2 回目の計測（1905 基）に用いて、同様な計測結果を取得することができた。

５．まとめ

本研究では、岩盤物性の異方性や初期地圧の影響で沈下よりもトンネル横断面内における水平方向の変位が卓越する場合でも有意な切羽前方計測を実現するために、光ファイバケーブルセンサを用いた切羽前方変位計測器械の開発を行った。光ファイバケーブルセンサは、FBG がケーブル全長に施された AGF を採用し、測定方式として高い精度と空間分解能を実現できる OFDR を用いた。9m の試作機を用いた室内曲げ試験では、光ファイバケーブルセンサ端部の変位量が既知の場合、50mm までの変位量を最大でも 10%程度の誤差で計測できることを確認した。現場計測試験では、一連の設置手順と回収手順を実施することにより、施工性を確認するとともに、本計測器械の特徴である再利用できる点を確認すること

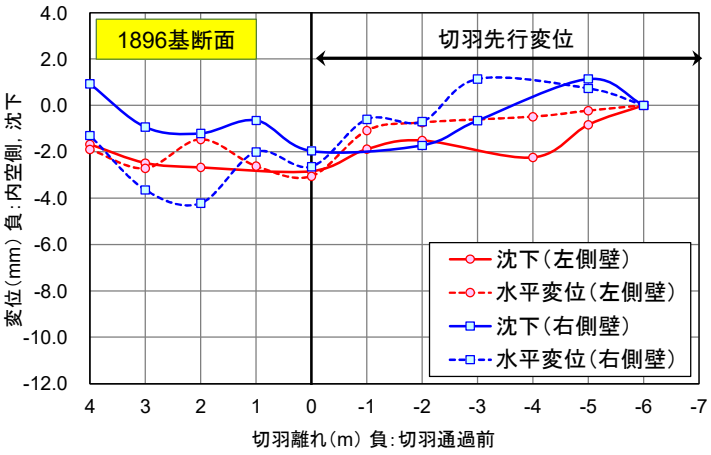


図-10　1896 基断面の変位特性曲線（TD1930.7m）



図-11　計測区間平面図（第 1 回計測時）

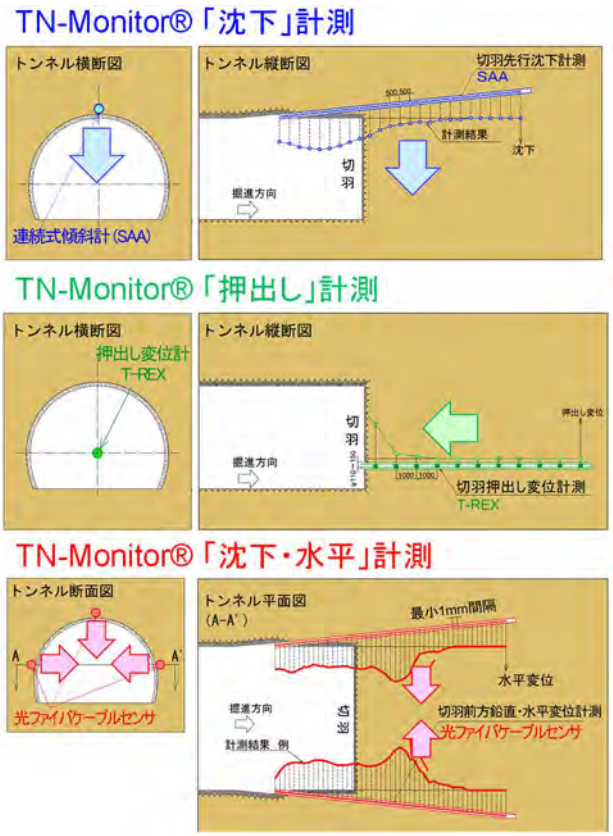


図-12　切羽前方変位計測手法（TN-Monitor®）

ができた。また、変位量は小さい結果であったが、トンネル切羽周辺の地山挙動として妥当な沈下・水平変位分布を観測することができ、坑内変位計測結果とも整合的な計測結果を得ることができた。本計測手法の開発により、既開発の挿入式変位計による切羽前方押出し変位計測手法と組み合わせることで、必要に応じて 3 次元的な切羽前方の地山挙動を評価できるようになった（**図-12**）。今後は計測事例を積み重ねることにより計測手法の信頼性向上を果たし、同手法を用いて綿密な計測管理が求められる都市部山岳トンネルや大土被りトンネルにおける施工管理に貢献したいと考えている。

参考文献

1) 坂井他：都市部山岳トンネルにおける切羽先行変位を用いた計測管理手法－福岡市地下鉄七隈線博多駅（仮称）工事での事例－，第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，17，2016.
2) Schneider, B. et al.: Validation of longitudinal displacement profiles by measurement at the Brenner Base Tunnel, *Geomechanics and Tunnelling*, Vol.11, No.5 pp. 566-574.
3) 木梨他：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，Vol. 27，I-21，2017.
4) 佐藤他：大土被りトンネル掘削時の変位挙動に対する異方性を持つ初期地圧の影響，土木学会論文集 F1（トンネル工学），Vol. 48，No. 1，pp.55-73，2022.
5) 特定非営利活動法人 光ファイバセンシング振興協会：ポイント型光ファイバセンサ建設分野向けマニュアル，pp.57-73，2022.
6) 田仲他：OFDR 方式を用いた FBG センサによる高位置分解能計測の適用性の検討，土木学会第 56 回年次学術講演会，VI-182，pp.363-364，2010.
7) Linder, E. et al.: Draw tower fiber Bragg gratings and their use in sensing technology, Proc. of SPIE (Fiber Optic Sensors and Applications VIII), Vol. 8028, 80280C, 2011.
8) 坂井他：光ファイバケーブルセンサによる切羽先行変位計測の基礎実験，土木学会第 77 回年次学術講演会，III-151，2022.
9) 坂井他：光ファイバケーブルセンサによる切羽先行変位計測の現場実験，土木学会第 78 回年次学術講演会，2023（投稿中）.
10) Sakai, K. et al.: Development of tunnel pre-displacement measurement method by fiber optic sensing, *Proc. of ISRM Congress 2023*, 2023（投稿中）.