

光ファイバによる3次元地中変位計測技術 (Geo-NewROn) の開発

Development of 3D Underground Displacement Measurement Technology Using Optical Fiber (Geo-NewROn)

中島 拓巳 永谷 英基 那須 郁香
藤原 航太郎 今井 道男 川端 淳一¹⁾

要 約

シールド工事や開削工事において、地中変位の計測結果を施工管理にフィードバックできれば、地中変位に起因する事故発生を確実に防止する安全な施工が可能となる。本文で報告する光ファイバはひずみを計測することができ、得られたひずみから変位を算出することができる。さらに、レイリー散乱計測システムを用いることで高精度なひずみ計測が可能となる。そこで、筆者らは光ファイバを用いた地中変位計測法 (Geo-NewROn) の開発を進めている。従来は、光ファイバを棒状のガイド管に取り付けて地中に設置していた。このためガイド管が長くなればなるほど、地中への設置中にガイド管自体がねじれる可能性が高くなり、ひずみの発生方向を特定することが困難であった。この問題を解決するために、筆者らは新しい地中変位計測法 Geo-NewROn を開発した。本デバイスではフレキシブルなケーブルに6本の光ファイバを螺旋状に編み込んでおり、これらの光ファイバを同時に測定することで、地中に設置する際に発生するねじれを補正し、3次元変位を算出することができる。今回、シールド現場に長さ30mのGeo-NewROnを適用しシールド通過時の地中変位を計測できた。また、さらなる長距離区間での計測を目指し長さ170mのGeo-NewROnを用いて性能確認実験を行い、僅か1mmの変位を正確に算出できることを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. Geo-NewROn の性能確認実験
- III. 実現場での地中変位計測実験
- IV. 長尺 Geo-NewROn の性能確認実験
- V. おわりに

I. はじめに

1. 背 景

シールド工事や開削工事において、地中変位の計測結果を施工管理にフィードバックできれば、地中変位に起因する事故発生を確実に防止する安全な施工が可能となる。例えば、シールド工事では、掘進線形に沿って切羽直上で地中変位を計測し、沈下や陥没事象の予兆が把握できれば、予め適切な対策を講じることができる。そこで、筆者らはひずみ分布計測が可能で光ファイバを用いた新しい地中変位計測手法の開発^{1),2)}に取り組んでいる。光ファイバは、温度とひずみの

変化に反応する性質を持っており、温度変化がほとんどない地中であれば、ひずみの変化のみを計測できる。さらに、得られたひずみから算出される曲げ変形を固定点から積算することで、変位を算出することができる。また、今井ら³⁾はレイリー散乱計測システム⁴⁾を用いることで、計測分解能 $1.8\mu\epsilon$ ・空間分解能5cmでのリアルタイムひずみ分布計測が可能と報告している。従来、地中に光ファイバを設置する場合、剛性を有する棒状のガイド管に光ファイバを貼り付けて地中に設置していた。ただし、ガイド管が長くなるほど、地中への設置時にガイド管自身が捻じれてしまう可能性が高くなり、ひずみの発生方向を特定することが困難になる。この問題を解決するために、筆者らは地中に設置する際に発生するねじれを補正し、3次元変位量を算出できる新しい地中変位計測法 Geo-NewROn(Geo-Neuron with Real-time Optical novel multi shape sensing)の開発を進めている(Photo 1)。本報では Geo-NewROn の技術概要と、本技術の性能を評価することを目的に実施した実験の結果について報告する。また、

1) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

キーワード : 光ファイバセンサ, 分布型ひずみ計測, 3次元地中変位, シールド

Keywords : optical fiber sensor, distributed strain measurement, 3D underground displacement, shield tunnel

シールド現場に長さ 30m の Geo-NewROn を適用し、シールドマシン通過時の地中変位を計測したので、その結果について報告する。さらに、さらなる長距離区間での計測を目指し、長さ 170 m の Geo-NewROn を用いて性能確認実験を行ったので、その結果についても報告する。

2. 技術概要

Geo-NewROn は、フレキシブルなケーブルに螺旋状に編み込んだ光ファイバ6本(直径 12 mm の内層に3本,直径 15 mm の外層に3本)を使用している。内層・外層ともに光ファイバは中心から 120 度に円を三分割した位置にあり、3本とも同じ巻きピッチで編み込まれている。螺旋巻きの母材周方向は内側と外側で逆向きになっている。Geo-NewROn の内部構造を Fig.1 に示す。光ファイバで計測するひずみは、ファイバに生じる引張・曲げ・ねじれ変形によるものであるため、変位を算出するためにはそれぞれの変形によるひずみに分離する必要がある。そのためには複数本のファイバが必要で、またねじれによるひずみを算出するためには計算の過程上、逆向き螺旋のファイバが必要になる。よって、Geo-NewROn 内部の光ファイバで計測したひずみから、母材のねじれと3次元での曲げひずみを算出できる。これを母材片端の固定端から積分することで、母材のねじれと3次元の変位を算出できる。

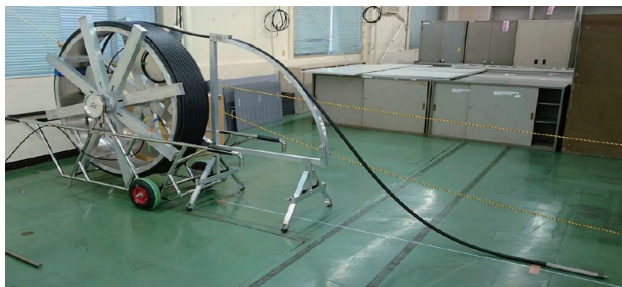


Photo 1 Geo-NewROn
(Appearance of Geo-NewROn)

II. Geo-NewROn の性能確認実験

1. 実験概要

Fig.2 に Geo-NewROn の性能を評価するために実施した実験の概要を示す。Geo-NewROn (全長約 4.5 m)の両端には融着点や終端処理部を保護するために 250 mm の金属キャップを取り付け、その金属キャップ両端を、50 mm の半円治具で上下を挟み込むように架台に固定した。Geo-NewROn の中心部には载荷のための治具を取り付けた。また、Geo-NewROn の変位を外部から計測できるように、レーザー変位計による計測点を等間隔で 15 点設けた。Geo-NewROn の中心部を下方に 2.5 mm ステップで 40 mm まで载荷し、各ステップでレーザー変位計による変位計測と光ファイバによるひずみ計測を行った。

2. 実験結果

Fig.3 に、Geo-NewROn の中心部を 5 mm と 40 mm まで変位させた時の外層 3 本の光ファイバによるひずみ計測結果を示す。5 mm までの変位時と 40 mm までの変位時では、どちらも 2.5 mm の変位増分に対する最大曲げひずみの増分が 100 $\mu\epsilon$ 程度となった。このことから、同じ変形量を与えた場合、同様のひずみが計測できていると考えられる。また、光ファイバは螺旋巻きとなっているため、ひずみの計測結果は周期のある計測結果となる。Fig.4 では、1本のひずみ計測結果の周期は巻きピッチと同様の長さになっていることを示しており、3本の最大ひずみ発生位置の間隔は巻きピッチの3分の1の長さになっていることを示している。これらの結果

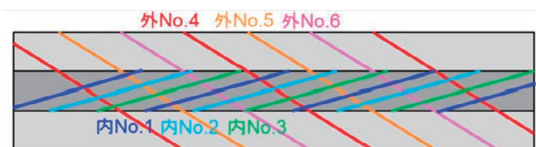


Fig.1 Geo-NewROn の内部構造
(Internal Structure of Geo-NewROn)

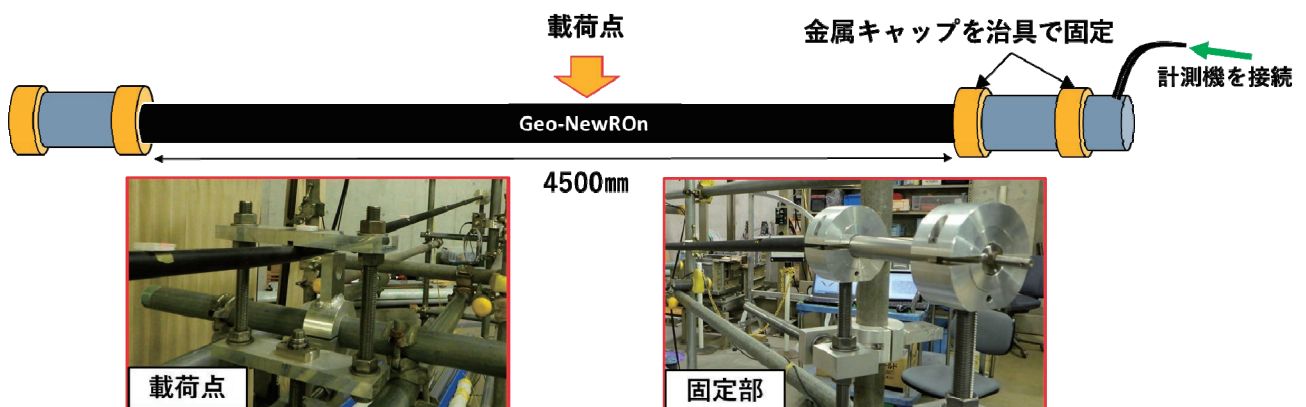


Fig.2 試験装置
(Test Equipment)

から Geo-NewROn は設計通りに 3 本のファイバが同様の長さの巻きピッチで製作できており、また荷重時による変形に追従しひずみ計測ができていいると考えられる。また、内部ファイバの計測結果も外部ファイバと同様の結果となった。Fig.5 にひずみからの変位算出値とレーザー変位計による実測値を示すが、変位算出値と実測値が概ね一致することを確認できた。Table 1 には最大の変位算出値ならびに実測値とその差分を示すが、差分は 1 mm 以内であり、現場で求められている ± 1 mm の精度で変位を算出ができることを確認した。

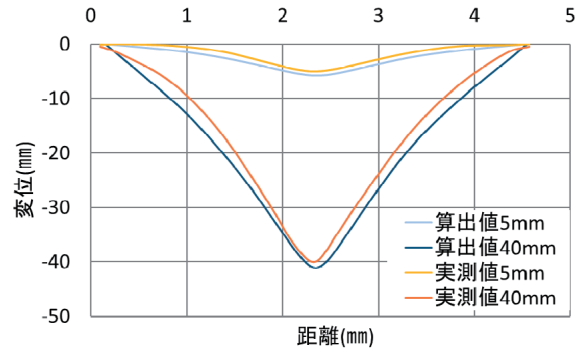


Fig.5 変位算出値
(Displacement Calculation Value)

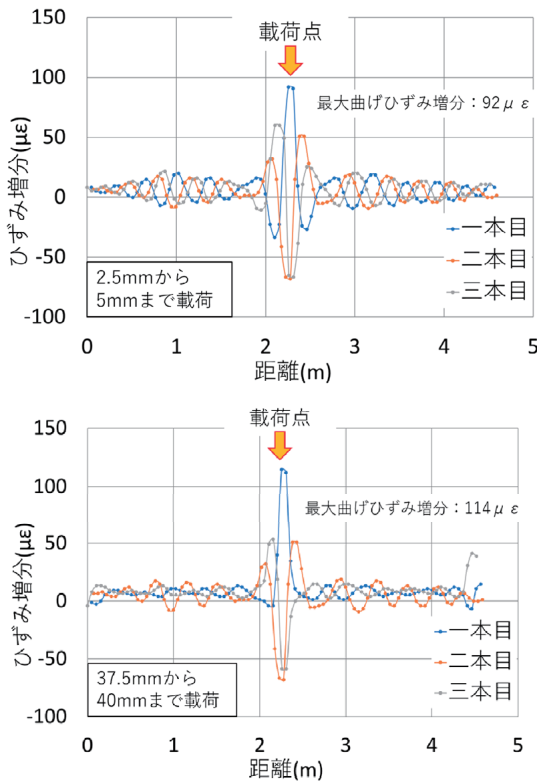


Fig.3 ひずみ増分の計測値
(Strain Measurement Value)

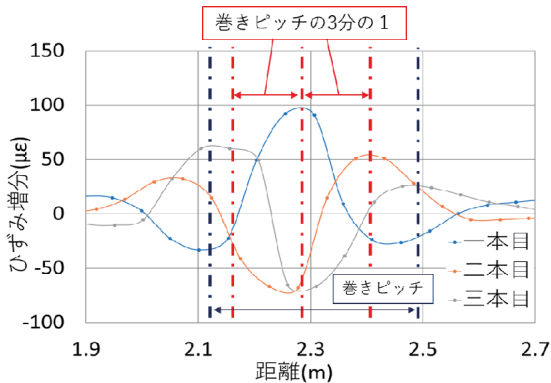


Fig.4 ひずみ増分の計測値 (拡大図)
(Strain Measurement Values (Magnified View))

Table 1 計測結果
(Measurement Result)

実測値(mm)	算出値(mm)	差分(mm)
-5.0	-5.8	0.80
-40	-41	1.0

III. 実現場での地中変位計測実験

1. 現場概要

あるシールド工事現場において、Geo-NewROn を適用した。本現場では立坑発進直後に国道や共同溝の直下を掘進する。Fig.6 に現場計測配置図を示す。シールド発進立坑から土被り 16.5 m の深度で高精度な水平ボーリングを行い、塩ビ管を挿入し、敷設した⁵⁾。延長 30 m の Geo-NewROn を塩ビ管内に挿入し、塩ビ管口元からの通信用光ファイバを配線し、地上の中央制御室に配置した光ファイバ計測機に接続する構成とした。Geo-NewROn の計測結果は、中央制御室にてリアルタイムに監視し、掘進管理にフィードバックできるようにした。

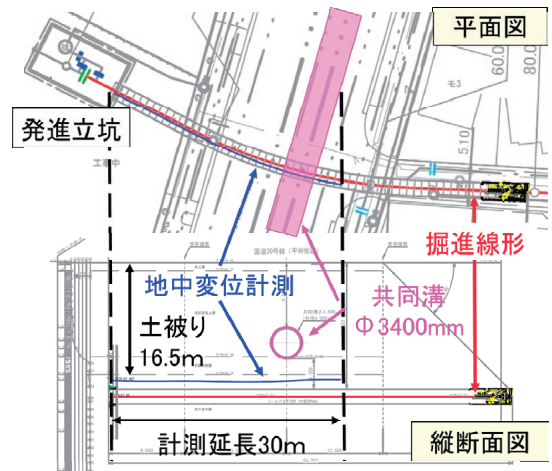


Fig.6 現場計測配置
(On-site Measurement Arrangement)

2. 挿入方法

Geo-NewROn は、木製ドラムに巻き付けた状態で立坑内に搬入した。塩ビ管口元はシールドマシン直上 1 m の深度にある腹起し直下の狭隘部に位置したが、人力で円滑に挿入することができた (Photo 3~5)。なお、本工事では、計測終了後の地盤内の残置物は撤去する必要があったため、塩ビ管全長にわたっての内部充填は行わず、Geo-NewROn の回収が可能な構造とした。また、変位演算に必要な不動点を作成するため、塩ビ管口元から数 10cm の区間のみ、Geo-NewROn と塩ビ管が一体化するようにシーラントを充填した。

3. 計測結果

計測掘進開始からの経過時間毎の鉛直方向の地中変位を Fig.7 に示す。塩ビ管口元は立坑の土留め芯材に固定されていることから計測始点としており、変位計算においては不動点としている。計測期間は、立坑発進直後から国道および共同溝直下を横断するまでの初期掘進期間である。推力を上げつつ、土砂を取り込み過ぎないように注意し、裏込め充填を確実にすることで沈下を防止することを施工管理の方針とし、マシン直上の地中変位をリアルタイムに監視した。掘進開始後、延長 15 m 付近まで徐々に隆起が前方に向かって進行し、最大 7 mm を計測した。その後、延長 20 m 地点から共同溝直下を通過することから、推力および裏込め注入の調整を行い、鉛直変位を極力抑制した結果、3 mm 程度の隆起で通過した (264 時間後)。また、残留沈下の影響もあり、最終的に 1 mm 程度の隆起で収まる結果となった。シールドマシン通過後、計測区間の地表面や共同溝内を測量したが、鉛直変位は確認できなかった。以上のように本現場では立坑発進直後に国道および共同溝の直下を掘進したが、地表面の沈下や共同溝に影響を全く与えることなく掘進することができた。また、Geo-NewROn で地中変位を計測することで、本現場でのシールド掘進による地盤変状を明らかにした。

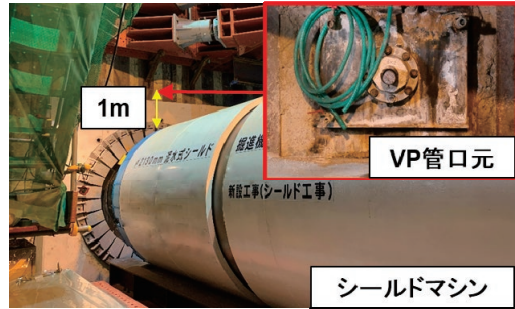


Photo 3 塩ビ管敷設位置
(Pipe Laying Position)



Photo 4 挿入作業
(Insertion Work)



Photo 5 坑内全景
(Panoramic View of Vertical Shaft)

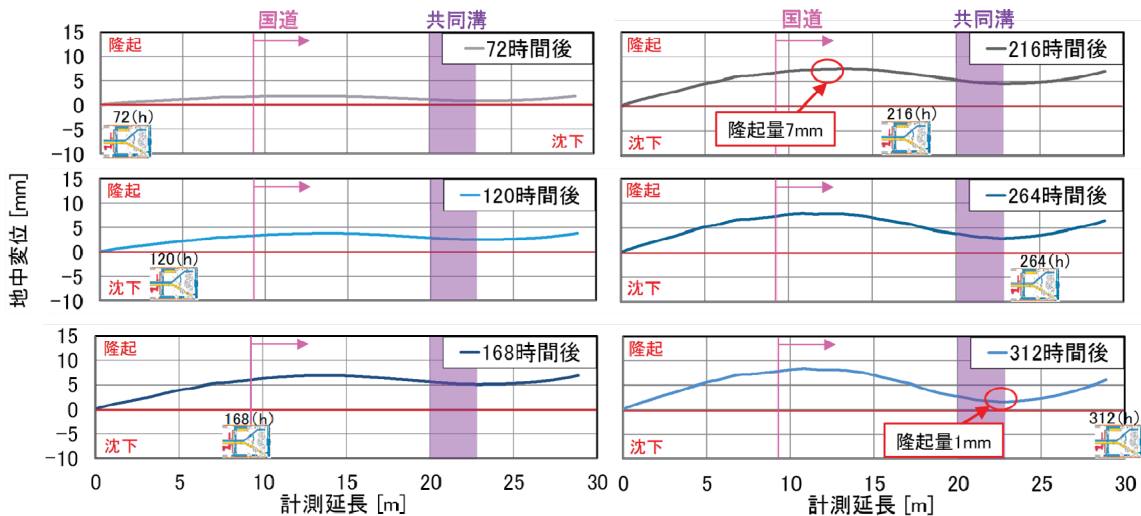


Fig.7 鉛直方向地中変位計測結果
(Vertical Ground Displacement Measurement Results)

IV. 長尺 Geo-NewROn の性能確認実験

1. 実験概要

上述の現場実績を発端に、長距離区間で Geo-NewROn を現場適用したいとの要望を受け、現場条件に合わせた長さ 170 m の Geo-NewROn の開発に取り組んだ。Photo 6, 7 に実験状況の写真を示す。長さ 170 m の Geo-NewROn をコンクリート平滑面へ直線状に設置し、5 m 置きに土嚢を乗せて固定した。また、ジャッキを用いた強制変位装置を製作し、任意の位置で Geo-NewROn に強制変位を与えられるようにした。さらに、レーザー変位計を搭載した計測装置を Geo-NewROn の横に設置したレール上で動かし、全長に渡り Geo-NewROn の鉛直変位を計測できるようにした。また Table 2 に示すとおり、強制変位装置による変位発生位置と発生変位量を変化させて実験を行った。また、強制変位を与えた後にレーザー変位計で強制変位位置前後 2 m の鉛直変位を 20 cm ピッチで実測した。並行して、強制変位位置前後で Geo-NewROn でひずみを計測し、ひずみ計測結果から変位を算出した。

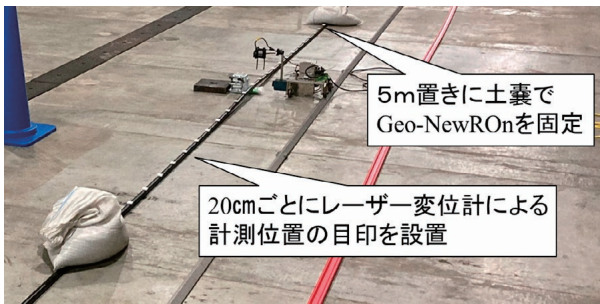


Photo 6 Geo-NewROn 設置状況
(Installation Situation of Geo-NewROn)

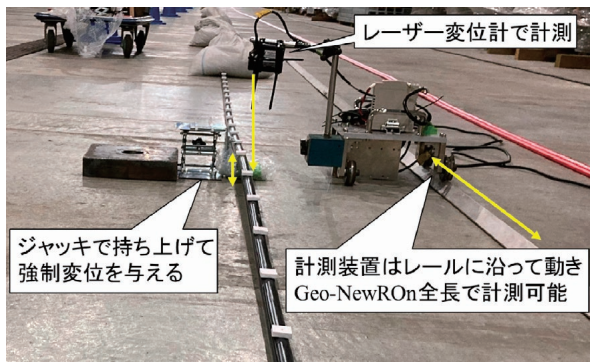


Photo 7 計測装置
(Measuring Device)

Table 2 実験ケース
(Experimental Case)

ケース番号	①	②	③	④	⑤	⑥
強制変位位置 (m)	85	85	85	165	165	165
強制変位量 (mm)	1	2	3	1	2	3

2. 実験結果

Fig.8 にレーザー変位計による鉛直方向の変位実測値と、Geo-NewROn による算出値を示す。全ての実験ケースにおいて、実測値と算出値が概ね一致していることを確認した。また、全ての実験ケースで Geo-NewROn による最大算出値、計測値と算出値の差分は 0.2mm 以内に収まった。II 章で説明した長さ 4.5 m の Geo-NewROn を用いた実験よりも精度が向上したのは、ある閾値を決めて計測誤差をカットするなど変位演算法についても改善を進めていることが要因の一つと考えられる。この結果から、長さ 170 m の Geo-NewROn で ±1 mm の 3 次元の変位を正確に算出できることを確認した。

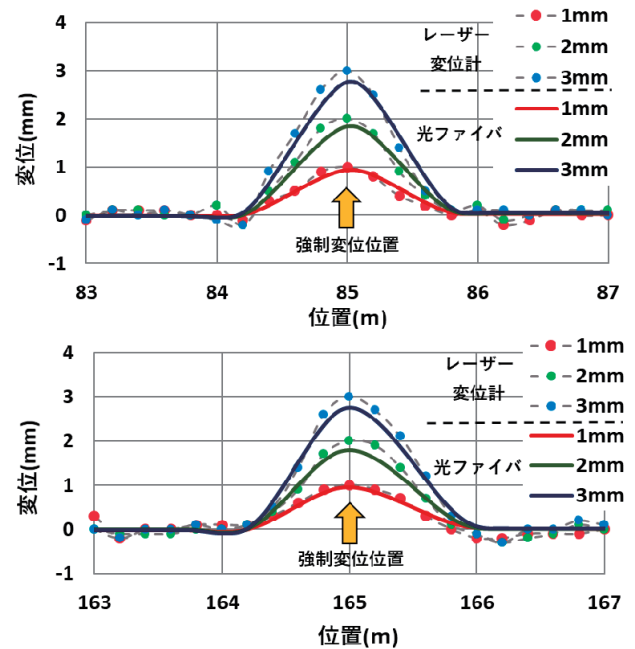


Fig.8 鉛直変位
(Vertical Displacement)

V. おわりに

地中に設置する際に発生するねじれを補正し、3次元変位量を算出できる新しい地中変位計測法 Geo-NewROn の開発に取り組んだ。今回、シールド現場に長さ 30m の Geo-NewROn を適用してマシン直上での地中変位をリアルタイムに計測し、掘進管理にフィードバックした。本現場では立坑発進直後に国道や共同溝の直下を掘進したが、地表面の沈下や共同溝に影響を全く与えることなく掘進することができた。Geo-NewROn で地中変位を計測することで、本現場でのシールド掘進による地盤変状を明らかにした。また、さらなる長距離区間での計測を目指し長さ 170 m の Geo-NewROn を用いて性能確認実験を行い、1 mm の変位を正確に算出できることを確認した。今後は様々な工事や工種に本技術を適用し、安全・安心な施工管理手法を展開していく所存である。

参考文献

- 1) 辻良祐, 今井道男, 永谷英基, 川端淳一, 久保田光太郎; 光ファイバセンサを用いた高精度な地中変位計測の実験的検証, 土木学会全国大会 第 75 回年次学術講演会, 2020.
- 2) 植田康平, 那須郁香, 永谷英基, 平石剛紀, 平陽兵, 今井道男, 川端淳一; 分布型光ファイバを用いた土留め背面の地中変位計測, 土木学会全国大会 第 76 回年次学術講演会, 2021.
- 3) 今井道男, 青鹿弘行, 吉村雄一, 川端淳一, 永谷英基, 新保弘, 新井淳一, 早坂洋太, 小柳津悠, 岸田欣増, 山内良昭; レイリー散乱光を用いた分布型光ファイバセンサの基礎検討, 土木学会全国大会 第 76 回年次学術講演会, 2021.
- 4) 岸田欣増, 李哲賢, 西口憲一, 山内良昭, グジク アーター; SMF におけるひずみと温度が識別できるハイブリッド分布測定システムの開発, 電子情報通信学会 信学技報, Vol.112, No.403, 2013, pp.37-42.
- 5) 吉迫和生, 岩端一也, 西嶋徹, 永谷英基, 釘本幹男, 小池遼太郎; シールド工事における地中変位リアルタイム可視化技術の適用事例—水平ボーリング削孔の施工実績—, 土木学会全国大会 第 76 回年次学術講演会, 2021.

Development of 3D Underground Displacement Measurement Technology Using Optical Fiber (Geo-NewROn)

Takumi Nakashima, Hideki Nagatani, Ayaka Nasu, Kotaro Fujiwara, Michio Imai and Junichi Kawabata¹⁾

If the measurement results for underground displacement can be fed back to construction management in shield and open-cut construction projects, safe construction work can be performed to ensure that accidents caused by underground displacement are prevented. In addition, optical fiber sensors can measure strain, and displacement can be calculated from the obtained strain. Furthermore, a Rayleigh scattering measurement system can be used to measure strain with high accuracy. Therefore, the authors are developing an underground displacement measurement method (Geo-NewROn) using an optical fiber sensor. Conventionally, optical fibers have been attached to a rod-shaped guide tube and installed underground. The longer the guide tube, the more likely it is that the guide tube itself will be twisted during installation in the ground, making it difficult to determine the direction of strain generation. To solve this problem, Geo-NewROn has six optical fibers spirally woven into a flexible cable, and by measuring these optical fibers simultaneously, the twisting that occurs during installation underground can be corrected, and 3D displacement can be calculated. This time, Geo-NewROn was applied to a shield site with a length of 30 m, and the displacement of the ground due to the passage of the shield was measured. In addition, we conducted a performance verification experiment using a 170-m Geo-NewROn to measure even longer distances, and we confirmed that it could accurately calculate displacements of 1 mm in length.