施工管理における分布型光ファイバ計測技術の活用

鹿島建設(株)　正会員　○平　陽兵
鹿島建設(株)　正会員　永谷英基
鹿島建設(株)　正会員　今井道男
鹿島建設(株)　正会員　川端淳一

１．はじめに

インフラ構造物や地盤は内部が不可視であることから,それらの設計や施工では,目視による観察や変位計,ひずみゲージなどによる一部分の計測から全体の挙動や変状を推定していた．この場合，材料や地盤の不均質性に起因するばらつきが推定結果に含まれるため,設計では安全率を設定することでその影響が考慮されている．これに対し，構造物の挙動を広く定量的に把握し，評価するための方法として，数 km にわたる光ファイバの全長に沿って数 cm 間隔でひずみ，温度および振動の分布情報を得ることができる分布型光ファイバセンサが着目されている．分布型光ファイバセンサは，これまでにもコンクリートのひび割れ検知などに適用されていたが，計測における精度や空間分解能に制限があり，評価できる対象が限られていた．

近年，この分布型光ファイバセンサの性能，特に計測精度と計測速度が飛躍的に向上した結果，構造物の微小な挙動を広範囲にわたって把握できるようになり，さらに，計測データの処理能力が向上したことで得られたデータをリアルタイムに，かつ遠隔からも把握できるようになった．その結果，光ファイバセンサによる計測で構造物の状況を現場だけでなく遠隔地でも監視，共有できるため，従来よりも高度な施工時の安全，施工管理に活かせる可能性がある．

例えば,位置によって作用する外力が異なる地中構造物に光ファイバセンサを設置し,広範囲にわたるひずみ分布の変化を捉らえることで作用している外力の推定が可能となる．また，コンクリート構造物の内部に光ファイバセンサを埋め込むことで,外観からでは分からない内部の引張ひずみの増加やひび割れ発生の様子を位置とともに捉えることが可能となる．

本稿では,土木工事において主な計測対象となる鋼部材とコンクリート部材を対象とした分布型光ファイバセンサによる計測の精度の検証結果と，本計測技術を施工管理に用いた事例として，土留めの変位計測，ケーソンの沈設管理および既設構造物の近接工事時の動態観測について報告する．

２．分布型光ファイバ計測技術の概要

分布型光ファイバ計測は，通信用にも使われている光ファイバケーブルをセンサとして使用し，数 km にわたる光ファイバ全長のひずみ，温度，および振動の分布を数 cm 間隔で計測できるものである．この技術は光ファイバ内に光を入射した時に生じる後方散乱光を利用しており,計測方式は使用する後方散乱光の種類により**表-1** のように分類される．BOTDR（Brillouin Optical Time Domain Reflectometer）に代表されるブリルアン散乱光を用いた方式（以下，ブリルアン計測）は，これまでもインフラのモニタリングで多く使われてきた．一方，近年，レイリー散乱光を用いた計測方式（以下，レイリー計測）として TW-COTDR（Tunable-Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometer）が実用化されている[1)]．両計測方式とも 10km 程度までの長距離での計測が可能であるが，計測時間や計測精度に違いがあり，特にひずみ計測精度がレイリー計測では

表-1　分布型光ファイバ計測の方式による違い

計測方式 / 項目	BOTDR	TW-COTDR
散乱光の種類	ブリルアン	レイリー
計測時間	数分	数秒
計測精度（ひずみ）	±50μ	±1μ
計測可能距離	～10km 程度	～10km 程度

キーワード　分布型光ファイバセンサ，ひずみ計測，施工管理
連絡先　〒182-0036　東京都調布市飛田給 2-19-1　鹿島建設（株）技術研究所　ＴＥＬ042-485-1111

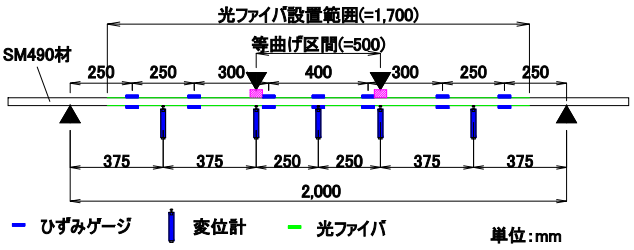


図-1　試験体形状と計測位置



写真-1　載荷実験状況

1μ以下と，電気式のひずみゲージと同等の精度を有する．これらの異なる計測方式でも使用する光ファイバセンサは同じものを使用でき，目的に応じて計測器を取り換えて計測することができる．

３．精度検証実験

土木工事において，主な計測対象となる鋼部材とコンクリート部材に分布型光ファイバセンサを適用するにあたり，室内実験でひずみ計測性能を確認した．

(1)　鋼部材の計測

鋼板の両面に光ファイバを接着して曲げ試験を実施し，レイリー計測のひずみ計測精度の検証を行った．**図-1** に試験体形状を示す．試験体は，長さ 2,500mm，幅 200mm，厚さ 32mm で，材質 SM490 材（降伏強度 352N/mm^2）の鋼板を使用した．載荷は，支間長 2,000mm，等曲げ区間 500mm の 4 点曲げ試験とし，鋼板の弾性範囲（約 1,600μ）まで単調増加で実施した（**写真-1**）．光ファイバとひずみゲージによりひずみを，変位計によりたわみを計測した．光ファイバは，鋼板両面に支間内の長さ 1,700mm の範囲に貼り付け，ひずみゲージは同じく鋼板両面の**図-1** に示す位置に貼り付けた．光ファイバによるひずみ計測は，空間分解能（ひずみゲージのゲージ長に相当）100mm，計測間隔 50mm でレイリー計測により実施した．たわみは**図-1** に示す位置と支点に変位計を設置し，支点沈下の補正を行った．

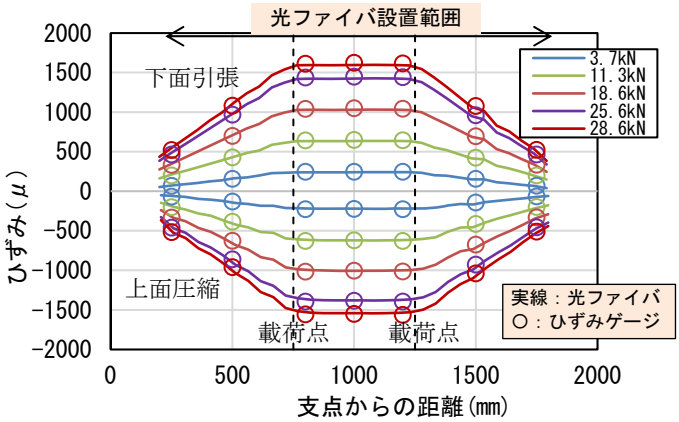


図-2　ひずみ分布図

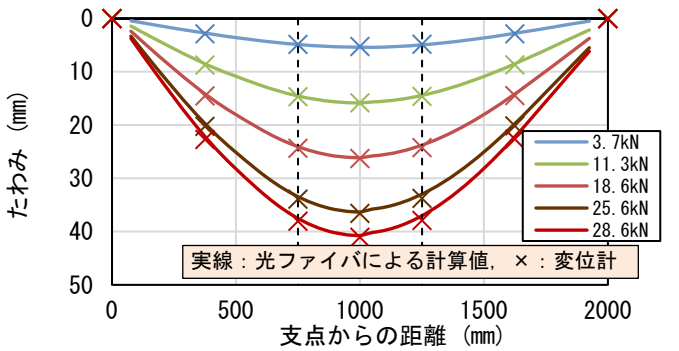


図-3　たわみ分布図

実験結果として，**図-2** に各荷重段階における光ファイバとひずみゲージのひずみ分布を示す．圧縮ひずみと引張ひずみは，同色の線が同じ荷重における結果である．光ファイバの結果は実線で示しているが，前述の通り，1,700mm の範囲を 50mm 間隔で計測しており，35 点の結果である．圧縮ひずみ，引張ひずみともに，ひずみ分布は等曲げ区間で最大値を示し，支点に向かって小さくなっており，4 点曲げの場合の曲げモーメント分布に対応した結果が得られた．また，ひずみゲージの計測位置でひずみゲージと光ファイバの差を比較したところ，両者の差は，最大で 2.8%，標準偏差 1.3%と小さく，分布型光ファイバセンサがひずみゲージと同等の精度を有していることを確認した．

次に，鋼板の両面に貼り付けた光ファイバによるひずみ結果から，曲げひずみを断面高さで除すことで曲率を算出し，これを支間方向に 2 階積分することでたわみを算出した．**図-3** に曲げひずみから算出したたわみ分布と変位計の値を示す．すべての荷重段階ならびに計測位置において，光ファイバによるたわみの算出値と

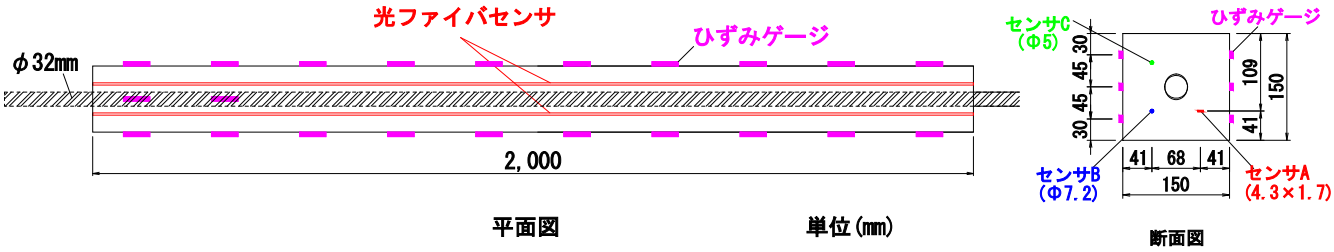


図-4　試験体の概要



写真-2　実験状況

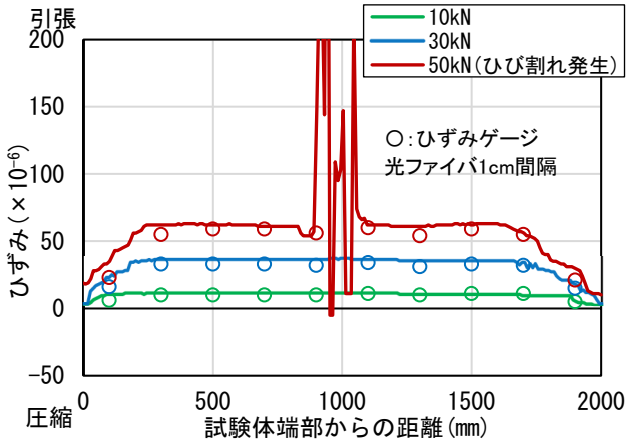


図-5　ひずみ分布（レイリー計測）

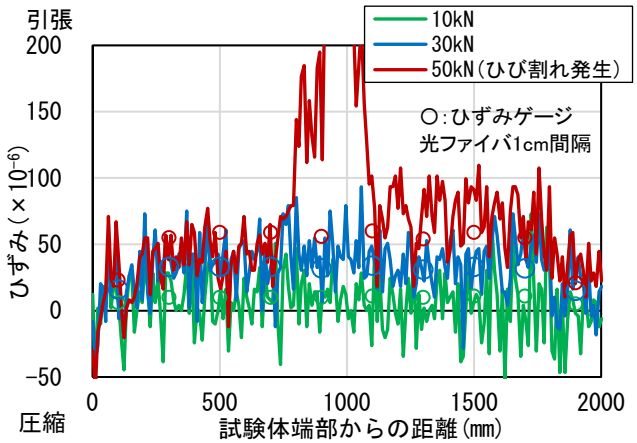


図-6　ひずみ分布（ブリルアン計測）

変位計とで同じ結果が得られ，最大荷重時における支間中央の光ファイバによるたわみの計算値と変位計の値の比は 0.99（=40.8/41.1）であった．

以上より，レイリー計測によって，鋼材に発生するひずみをひずみゲージと同等に計測できること，また，分布で計測できることから，曲げひずみを計測できるように複数の測線を設けることで，たわみ分布を連続的に，かつ高精度に評価できることを確認した．

(2)　コンクリート部材の計測

コンクリート部材の内部に光ファイバセンサを埋め込み，両引き試験を実施し，レイリー計測およびブリルアン計測のひずみ計測精度の検証を行った．

図-4 に試験体の概要を示す．試験体は断面 150mm×150mm，長さ 2,000mm のコンクリートの中心にφ32mm の異形 PC 鋼棒を配置したものとした．試験方法は両端から突出させた PC 鋼棒に引張力を導入する両引き試験であり，PC 鋼棒とコンクリートの付着によってコンクリートに引張応力を発生させた．**写真-2** に実験状況を示す．本実験では**図-4** の断面図に示すようにコンクリート内に 3 種類の光ファイバケーブル（センサ）を埋設した．センサ A は 4.3×1.7mm と扁平な形状，センサ B および C はそれぞれ直径が 7.2mm と 5mm の円形のものとした．また，比較用に試験体表面にひずみゲージを 200mm 間隔で貼り付けた．

図-5 と**図-6** に，センサ A のレイリー計測とブリルアン計測のひずみ分布を引張力ごとに色を変えて示す．また，ひずみゲージの結果を併せてプロットした．**図-5** のレイリー計測では，ひび割れ発生前までに着目すると，試験体の両端から 300mm までの範囲で PC 鋼棒からコンクリートへ応力が徐々に伝わりひずみが増加し

ている様子と，そのほかの範囲ではひずみが一定で荷重とともにひずみが増加する挙動を計測できた．また，ひずみゲージの値ともほぼ同じであった．一方，**図-6** に示すブリルアン計測では，データのばらつきが±数 10μと波形の結果であり，レイリー計測で把握できた試験体両端を含めたひずみ分布の形状や，荷重増加に伴うひずみ増分を判断するのは困難であった．50kN 時では，試験体の中央である 1,000mm の位置でひび割れが発生したが，両計測法ともその位置でひずみが局所的に変化しており，ひび割れ発生とその位置の特定が可能であることを確認した．

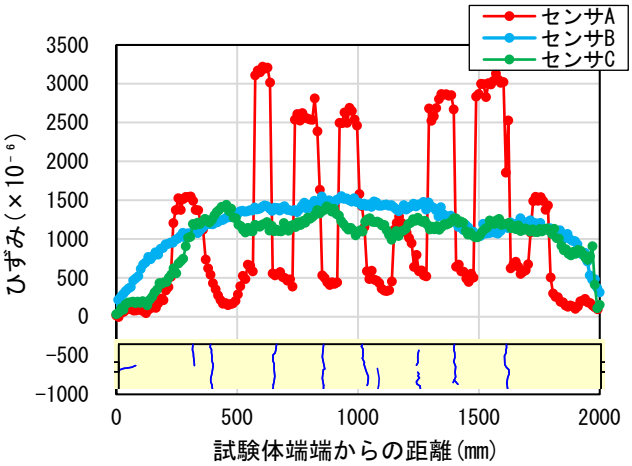


図-7　200kN 時のひずみ分布（ブリルアン計測）

図-7 に引張力 200kN 時の３種類のセンサのひずみ分布をひび割れ図と併せて示す．なお，計測方法はブリルアン計測である．センサの違いに着目すると，複数本発生したひび割れに対して，センサ A はひび割れ位置における局所的なひずみの増加を計測できた．一方，センサ B と C は，ひび割れ位置での局所的な増加は計測されず，試験体全長にわたってなだらかな形状のひずみ分布となった．これはセンサ B，C のコンクリートとの付着がセンサ A に比べて小さいためと考えられる．

以上より，レイリー計測ではコンクリートのひび割れ発生前の小さなひずみ増分ならびにひび割れの発生と位置を特定でき，ブリルアン計測では 10μ以下の小さな増分を判断することはできないが，ひび割れ発生などに伴う数 100μの変化を把握し，その位置を特定できることを実証した．また，ひび割れ発生以降の大きなひずみ変化に対しても計測が可能であるが，ひび割れ位置を明確に特定するためには想定されるひび割れ間隔に応じたセンサ種類の選定が重要であることを確認した．

３．施工時計測

(1) 土留めの挙動把握

土留め掘削工事では，安全管理のために変形や土留め鋼材の応力の計測を行う場合がある．さらに，施工途中段階で得られる計測データと解析から，各施工段階の土留めの断面力や変形を予測する情報化施工も行われている．本節では，鋼矢板のひずみを光ファイバセンサで計測し，鋼矢板の変形と断面力を把握した事例を示す．

土留め鋼材の変形や応力は深さ方向に変化するため，最大・最小値を把握するためにはセンサを連続的に配置して分布を捉える必要がある．しかしながら，傾斜計やひずみ計により分布を連続的に把握するためにはこれらを相当数配置する必要があり，設置手間やコストが必要となる．一方，光ファイバセンサを土留め鋼材に設置することで，深さ方向に 5cm 間隔でレイリー計測によりひずみ（応力）を連続的に把握できるとともに，複数の測線を設けて曲げひずみを計測することで変形や断面力の分布も把握できると考えた．

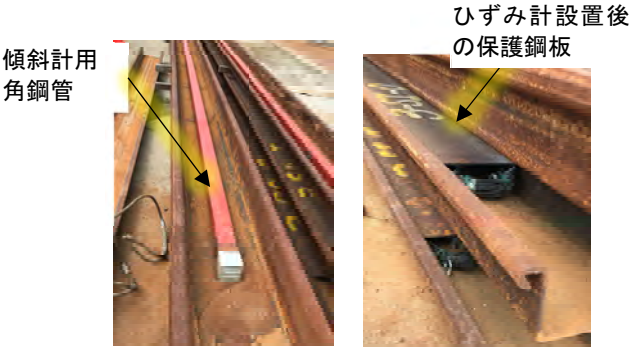


写真-3　従来計器の設置方法

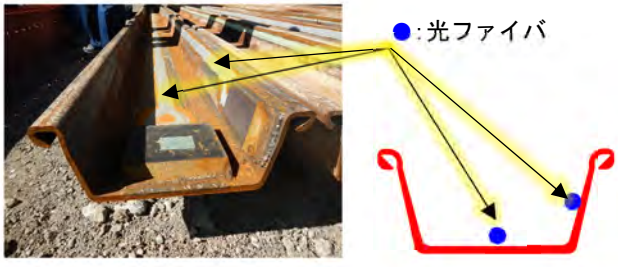


写真-4　光ファイバの設置方法

写真-3 に従来計器として，傾斜計およびひずみ計を鋼矢板に取り付けた場合の状況を示す．傾斜計を挿入するための角鋼管の取り付けやひずみ計が損傷しないように鋼矢板に蓋をするように保護鋼板を取り付ける必要があり，鋼矢板の表面に大きな突起物が設けられることとなる．

一方，**写真-4** に示すように光ファイバセンサの取り付けでは，鋼矢板を建て込む際に光ファイバを損傷させないように保護が必要であるが，大きな突起物は不要である．ここでは，鋼矢板先端部の光ファイバが損傷しないようにテーパー付き鋼板を溶接して光ファイバと地盤との摩擦の低減を図った．また，光ファイバは直径約 1mm と非常に細いものを使用したが，これをエポキシ系接着剤で鋼矢板に貼り付けた後，上からメッシュ状のシートと接着剤によって光ファイバの表面を保護した．

写真-5 に光ファイバセンサを取り付けた鋼矢板の打込み状況を示す．これまでに，ジェット併用油圧圧入工法およびジェット併用バイブロハンマー工法での打込み実績[2)]があり，いずれの場合も光ファイバセンサを損傷させることなく施工できることを確認した．



写真-5　鋼矢板の打込み状況

光ファイバの計測結果として，**図-8** に頭部固定二重土留め工法[3)]により掘削高 5.5m を無支保で施工した際の鋼矢板の計測結果を示す．本土留め工法は新たに開発したものであり，実際の挙動を把握して設計法の妥当性を検証するために実施した計測である．いずれの図も２つの測線のひずみ計測結果から曲率を算出し，水平変位と曲げモーメントを算出したものである．また，比較用に設置した傾斜計とひずみ計の結果を併せて示す．水平変位と曲げモーメントともに，光ファイバ計測の結果は傾斜計やひずみ計による結果と整合するような深さ方向の分布を捉えることができており，地中部も含めて土留め鋼材全体の挙動把握に有効であることを確認した．

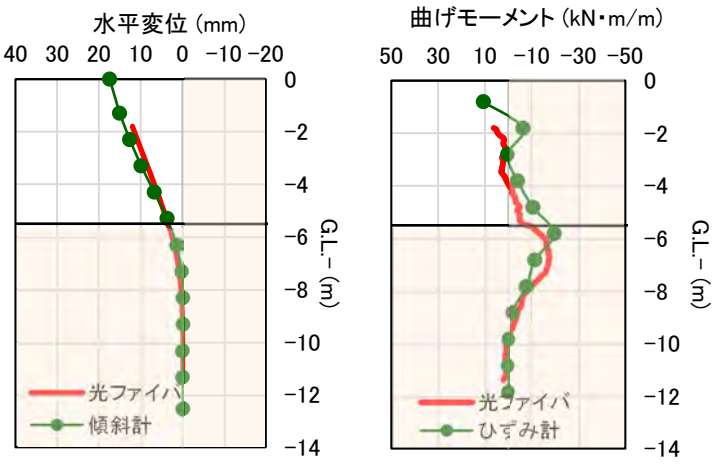


図-8　計測結果（分布図）

以上のように，鋼矢板の表面に光ファイバセンサを設置するだけで，土留めの挙動を簡易に計測することが可能である．

(2)　ケーソンの沈設管理

RC ケーソンを沈設する際，躯体と周辺地盤との摩擦により躯体が傾くあるいは周辺摩擦力が大きくなり胴締めといった沈設不能な状態になることが懸念される．これに対し，躯体の鉛直方向に光ファイバセンサを設置し，ひずみ分布を連続的に測定することで躯体の応力状況や躯体に部分的に大きな摩擦力が作用した際の挙動を検知できるなど，沈設状況を把握することが可能となる．

これまでにニューマチックケーソン工法[4)]で本計測技術を適用してきたが，本節では圧入式オープンケーソン工法に適用した事例を示す．

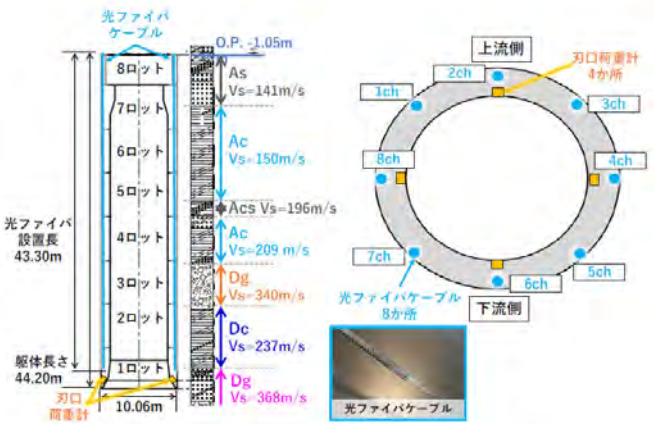


図-9　RC ケーソン躯体の概要

図-9 に適用した RC ケーソンの形状ならびに計測位置などの概要を示す．

躯体の形状は全長44.20 m，直径10.06 mであり，コンクリートを8ロットに分けて打ち込んだ．1ロット当たりの躯体高さは約5 mで，1ロットを構築するたびにクラムシェルによる地盤の掘削と計8台の油圧ジャッキによる圧入を繰り返して所定の深度まで沈設させた．

光ファイバセンサは円周方向 8 か所に深度方向全長にわたって，コンクリート内に埋め込んで設置した（図-9 中，1～8 ch）．ケーソン基礎の沈設開始直前に初期値を計測し，沈設中に生じる軸ひずみを計測間隔 5 cm で計測した．ケーソン沈設時の状況を施工管理に活用するために，計測した軸ひずみ分布を 3D コンターとしてリアルタイムに可視化し，油圧ジャッキ制御時に現場で確認できるようにした．

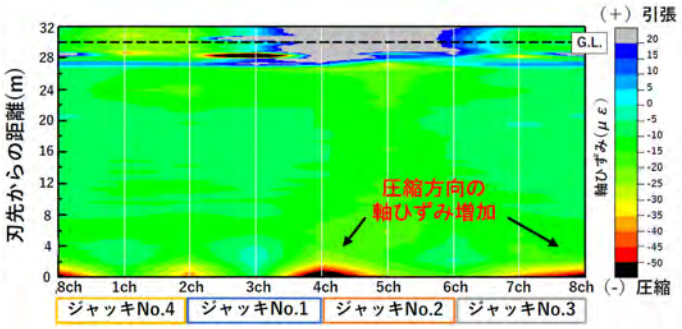


図-10　軸ひずみ計測結果

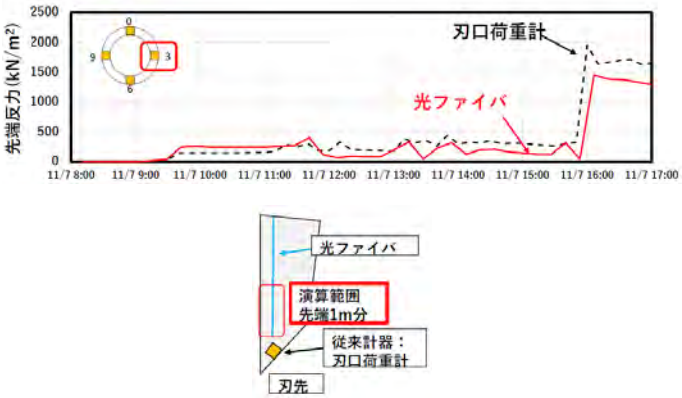


図-11　先端反力の時系列

計測結果として，図-10 に 6 ロット沈設中の軸ひずみの 2D コンター図を示す．縦軸が刃先からの計測距離で，横軸は円筒状のケーソンを円周方向に展開した際の計測チャンネル位置を示している．光ファイバの軸ひずみ分布より，沈設荷重による圧縮ひずみが躯体全体に作用し，特に躯体の刃先においては先端反力による圧縮方向の大きな軸ひずみの増加が確認できた．G.L.付近においては引張ひずみや局所的な圧縮ひずみが発生したが，これは 地表面上の日射による温度変化が影響していると推察され，胴締めなど周辺摩擦力が大きくなる現象は確認されなかった．

図-11 に，刃先の円周方向 4 か所に設置した刃先荷重計による先端反力の沈設時の時系列グラフを示す．先端反力は，刃口荷重計の結果と先端 1 m の光ファイバによる軸ひずみの平均値とコンクリートのヤング係数から求めたコンクリートの圧縮荷重の値である．両者を比較すると概ね同様の値を示しており，施工時の先端反力も光ファイバで把握できることを確認できた．

以上より，今回の適用事例では周面摩擦によるひずみ変化は確認されなかったが，施工管理に有効な情報となる先端反力を光ファイバセンサで把握できることを確認した．

(3)　近接施工時の動態観測

レイリー計測は，微小な動きを把握できるため，既設構造物の動態観測にも有効である．近年，既設構造物のリニューアル工事や供用中の構造物に近接して新設構造物を構築するケースが増えてきている．そのような場合，既設構造物の動態観測を行いながら施工する場合が多いが，特に，図-12 に示すように既設構造物と施工エリアとが広範囲にわたって近接する場合，観測する範囲も広くなる．このような場合に，長距離にわたりひずみを計測できる分布型光ファイバ計測が有効となる．本節では，既設コンクリート構造物に対する近接

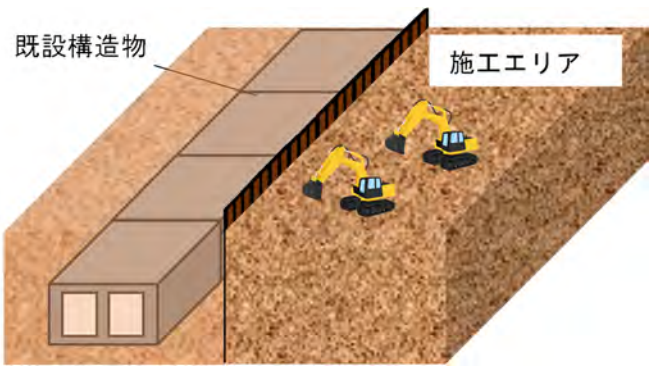


図-12　既設構造物の近接施工のイメージ

施工の影響把握を目的とした動態観測を想定した場合について示す．

既設コンクリート構造物に生じる事象としては，ひび割れの発生や変形などが挙げられる．これを従来の計測技術で検知して評価するためには，施工による影響が懸念される範囲にわたって，数多くのひずみゲージや変位計などのセンサを設置する必要があり，それらのセンサと計測器を繋ぐ配線作業も煩雑となる．特に，観測対象が地中構造物や上下水道構造物の場合，センサを水のある環境に設置することとなり，電気式のセンサでは保護や絶縁処理に多大な労力を要する．これに対して，光ファイバセンサの場合は，計測範囲を網羅するように1～複数本の光ファイバを既設構造物に設置することで，動態計測を行うことが可能であるとともに，目地や継手が設けられている場合には，これらの開きの計測も可能となる．

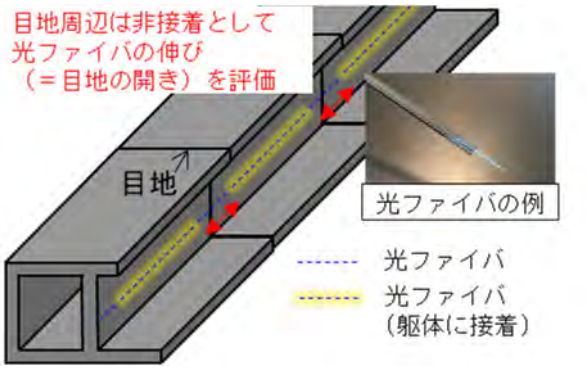


図-13　目地を有するRC躯体の光ファイバ計測

図-13に，既設コンクリート構造物のコンクリートひずみと目地部の開きを計測する場合の概要を示す．コンクリートには光ファイバセンサを接着してコンクリートのひずみを計測し，目地部では目地部を架橋するように非接着区間を設け，接着点間のひずみ分布を積分することで目地の開きを観測することが可能となる．また，光ファイバセンサは水中にあっても問題なく計測が可能であり，大きな保護設備を用いずに，広範囲にわたり連続的な計測が可能である．

４．まとめ

分布型光ファイバ計測の精度検証ならびに同計測技術を施工管理に用いた事例を示した．レイリー計測を用いることで，従来のブリルアン計測で困難であった微小な挙動や，挙動していないことを，光ファイバセンサの設置範囲において把握することが可能となる．

また，数 cm 間隔で計測されたひずみ分布から，変形や断面力を分布として評価することができる．

以上より，分布型光ファイバ計測は施工管理を目的としたモニタリングに有効な手法であると評価できる．また，電気式センサに比べて，水に強く高耐久であることから，施工管理に使用した光ファイバセンサを竣工後に残置して維持管理で活用することも期待できる．

５．参考文献

1)　今井道男ほか：高精度光ファイバセンサを用いたひずみ・変位計測の検証実験，土木学会第 75 回年次学術講演会，CS9-28，2020

2)　平陽兵ほか:分布型光ファイバセンサによる鋼矢板土留めの変形計測,土木学会第 76 回年次学術講演会，CS9-45，2021

3)　井上直史ほか：開削施工の合理化を目指す頭部固定式二重土留め工法の開発および施工実績，土木建設技術発表会，2022

4)　平陽兵ほか：ニューマチックケーソン沈設時における光ファイバを用いた RC 躯体のひずみ分布計測，土木学会第 75 回年次学術講演会，2020