

光ファイバセンサを用いたインフラ維持管理

今井道男・曾我部直樹・新井崇裕

光ファイバセンサでは、光ファイバに沿って全長で情報を得ることができるため、従来の電気式センサなど“点”での点検から、“線”での網羅的な監視が可能となる。こうした特長を活かし、実際の構造物における維持管理での実績も増えてきた。本稿では、橋梁における実績として、RC床版の抜け落ち監視・プレストレストコンクリートケーブルの張力管理・ひび割れ検知を、法面における実績として、グラウンドアンカーの張力管理をそれぞれ紹介する。また、近年登場した新たな計測技術の概要と、それによるインフラ維持管理の革新について概観する。

キーワード：光ファイバセンサ、ひずみ測定、モニタリング

1. はじめに

インフラ構造物の高経年化が進み、また維持管理の担い手と予算が不足する中で、膨大な数の構造物の維持管理を実現するために、発展著しいセンシング技術への期待が高い。センサやデジタル技術の革新によれば、特に近接目視に代表される従来技術と比べて、点検作業の効率化が期待できる。例えば、ドローンなどで簡単に網羅的な情報をとらえられれば、重点的に確認すべき箇所を絞るスクリーニング技術として大いに有用である。こうした点検作業の効率化に留まらず、これまで把握できなかった構造状態が見える化できれば、維持管理の高度化などが実現できる。光ファイバ全長にわたって連続で網羅的な情報を得られること、小型軽量で構造物内部へ埋込容易であること、などの特長を有する光ファイバセンサは、維持管理の効率化と高度化を実現できる手段として期待できる。

これまでも筆者らは、光ファイバセンサの特長を活かし、建設分野、特に橋梁への適用を進めてきた¹⁾。本稿では、橋梁に加えて法面など様々な長期での実績が蓄積されてきたことから、その概要を紹介する。また、近年性能が革新的に向上した新たな計測技術について合わせて紹介する。

2. 橋梁での事例

(1) RC床版の抜け落ちモニタリング

本事例は、光ファイバ内を透過する光の量を全長に

わたって計測可能な技術（Optical Time Domain Reflectometer: OTDR方式）を利用したものである。交通量の増大や車両の大型化に伴い、鉄筋コンクリート床版に格子状のひび割れが増加、進展し、コンクリート片が剥離したり抜け落ちたりする損傷事例が報告されている。こうした床版抜け落ちの兆候のひとつであるひび割れ段差の発生を、光ファイバ内を透過する光の量の変化（あるいは損失する光の量の変化）として検知する仕組みである（図-1）。床版下面に光ケーブルを接着剤などで全長固定しておけば、ひび割れ部の段差発生によって、光ファイバに曲げや破断が生じるためである。室内実験において、段差の大きさの増加に応じて、光の損失が増えることを確認している。曲げや破断による透過量や損失量は、段差の大きさだけでなく設置する光ケーブルの種類に依存するが、ある細径の光ケーブルでは段差1mmで光ファイバが切

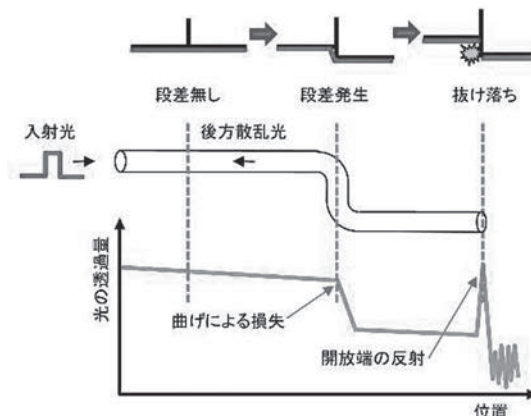


図-1 抜け落ちモニタリングのイメージ

断することを事前に確認している。ターゲットとなるひび割れ段差に応じて光ケーブルを選択することで、適切な検知感度を有する抜け落ちモニタリングが可能である。

疲労が進んだ鉄筋コンクリート床版に対して、適切な光ケーブルを網羅的に固定してOTDR方式で常時モニタリングを行えば、ひび割れ段差の発生やコンクリート片の落下などをリアルタイムで監視することができ、万が一の場合の迅速な対処が可能な維持管理を行うことができる。実構造物においても3年以上にわたった運用がなされており、リアルタイムでアラートの発報などの機能を現地で確認済みである²⁾。また、光ケーブルの接着固定作業の簡略化、接着品質の安定性向上などのために、光ファイバケーブルが予め組み込まれたテープ型光ファイバが開発されている³⁾。維持管理を効率的に実現するためには、計測技術や評価技術だけでなく、対象構造物と光ファイバを固定させる実装技術が揃い、その手間を削減する必要がある。

(2) PCケーブル張力管理

本事例は、光ファイバ全長にわたるひずみの分布状態を計測可能な技術(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer: BOTDR方式)を利用したものである。プレストレストコンクリート(PC)では、コンクリートにあらかじめケーブルなどを用いて圧縮力を加え、荷重を受けた際にコンクリートに引張応力が発生しないよう設計されている。PC構造物の品質と耐久性を確保するためには、施工時にPCケーブルへ必要な張力が確実に導入され、供用中の変動が想定以内であることが重要である。筆者らは、光ファイバをPC鋼より線表面の凹部に収まるように固定した光ファイバ組込み式PCケーブルを開発した(図-2)⁴⁾。これにより、PCケーブル全長でのひずみ分布、またその結果をもとにした張力分布の計測、評価が可能となった。PCケーブルの外径や表面の性状はこれまで

と同様であり、通常と同様の手順で施工することができる。また、光ファイバの組込みはPCケーブルの製造工場で行うため、現場における光ファイバの設置作業を大幅に省略できるとともに、張力計測の精度を確保するうえで重要な光ファイバとPCケーブルの均質な一体化を可能にしている。

実際のPC箱桁橋の柱頭部を対象に、光ファイバ組込み式PCケーブルを適用した。光ファイバ組込み式を含むPCケーブルを一括して通常と同じ方法でシーす内に挿入した後、定着具と緊張ジャッキを設置し、緊張作業および計測を行った(図-3)⁵⁾。緊張終了後、光ファイバを残してPCケーブルの余長を切断し、グラウトキャップを設置した。なお、維持管理中の再計測を可能とするため、孔加工をしたグラウトキャップに光ファイバを通し、光ファイバ端部を人が立ち入ることができるまで延長して、計測器を接続できるようにした。最終緊張時、定着後、さらに緊張後26か月経過後の張力分布を、設計緊張力と併せて図-4に示す。長期的にも張力分布が計測可能で、全

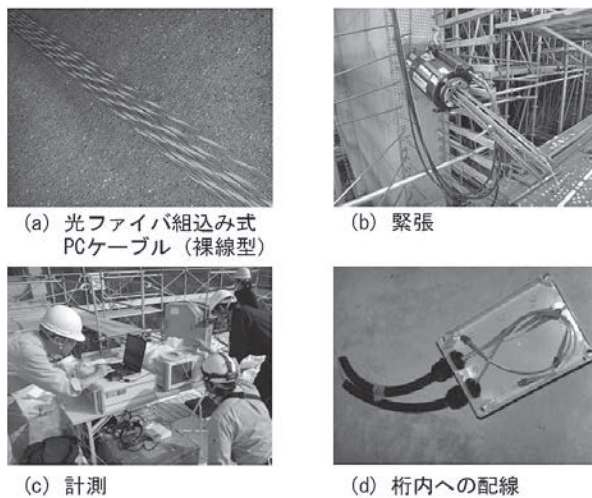


図-3 適用状況

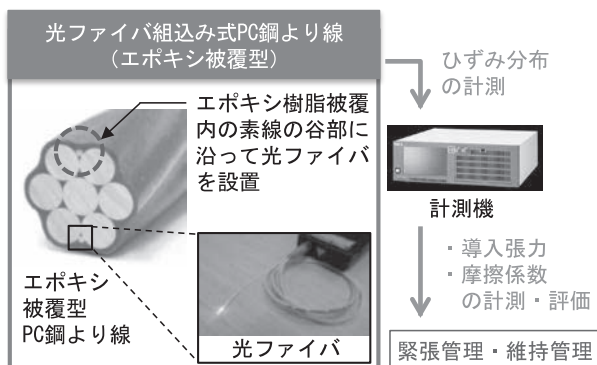


図-2 光ファイバ組込み式PCケーブル

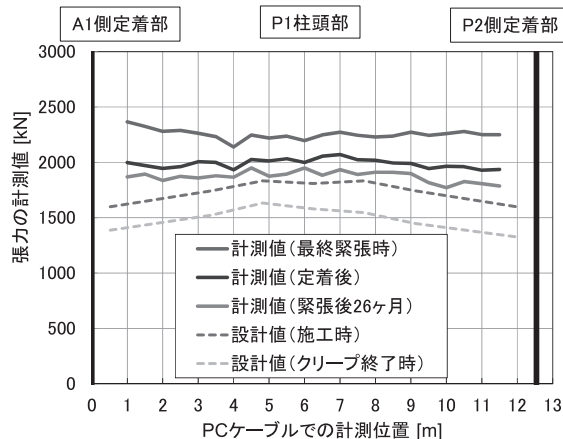


図-4 緊張力分布の測定結果

長にわたって設計緊張力以上の張力が適切に導入、保持されていることが確認できた。また、緊張時には端部から中央部に向かって張力が減少し、定着後は逆に中央部の張力が残存する傾向が確認された。これは、曲げ配置されている PC ケーブルにおける摩擦によるものであり、本計測によってその影響を評価できることが分かった。なお、長さが 190 m の外ケーブルに適用した光ファイバ組込み式 PC ケーブルについても、同様の結果を得ることができている。

従来の PC ケーブルの施工管理では、油圧ポンプの圧力値と PC ケーブルの伸びから導入張力を間接的に評価していたが、緊張後における導入張力の変動計測は想定されておらず、その確認手段はなかった。光ファイバを組込み式 PC ケーブルによれば、全長にわたる張力分布の計測を施工中だけでなく、供用中の維持管理にも活用できる。引き続きデータを蓄積していき、その長期適用性を評価する予定である。

(3) 主桁のひび割れモニタリング

本事例も、光ファイバ全長にわたるひずみの分布状態を計測可能な技術を利用したものである。コンクリート表面に生じるひび割れは、剛性を低下させるだけでなく、劣化因子の侵入経路となることから耐久性を低下させる要因となる。現行の維持管理のための点検作業の多くは、ひび割れ状況やその進展を把握することである。しかし、コンクリートは不均質材料であるうえ、ひび割れの発生機構は複雑で、その発生位置をあらかじめ知ることは困難である。発生位置の分からない現象を検知するためには、近接目視などに頼らざるを得ず、従来の“点”での電気式センサではその発生を捉えることはできない。一方、光ファイバセンサであれば、“線”で網羅的に情報を把握できるため、ひび割れ検知に向いている。

光ファイバが固定されたコンクリートにひび割れが入った場合、ひび割れと交差する光ファイバには無限大のひずみがかかることとなる。しかし、多くの場合、光ファイバの被覆などによってひび割れによる変形は緩和されるため、光ファイバは破断せず、ひび割れ部を極大値とする局所的なひずみ変化が生じる。光ファイバセンサにより、こうしたひずみ変化を捉えることができれば、ひび割れの位置とその幅（開口変位量）をモニタリングできる。既往研究によれば、目視レベル以下の $20\ \mu\text{m}$ 幅のひび割れが生じた場合には、約 300×10^{-6} の局所的な引張ひずみが光ファイバセンサで観測できることがわかっている⁶⁾。

橋長 30.5 m の 3 径間連続 PC ラーメン橋を対象に、

光ファイバセンサによるひび割れモニタリングを実施した（図-5）。本橋は、上部工材料に超高強度繊維補強コンクリートを使用した外ケーブル構造の歩道橋で、全体で 5 分割されたプレキャスト部材を支保工上に設置し、現地で目地部の打設後、PC ケーブルを緊張している。主桁の架設が終了した 2007 年の 8 月に、中央支間（26 m）の主桁下端面に光ファイバをエポキシ樹脂により全面固定（固定長約 24 m）した。なお、光ファイバの端部を延伸して橋脚側面に取り付けた端子箱内に収納し、計測器を接続できるようにした。

供用開始から 15 年間にわたって、定期的に光ファイバセンサでひずみ分布を計測した結果を図-6 に示す。すべての計測は、橋面上に歩行者のいない夜間に実施した。また、主桁の表面温度に応じて温度補正 ($20 \times 10^{-6}/\text{C}$) を行い、主桁の長さ方向に対して温度分布に偏りは無いものと仮定した。併記する $20\ \mu\text{m}$ 幅のひび割れが生じた場合のひずみ分布モデルと比較し、それに相当する局所的ひずみ変化がないことから、少なくとも $20\ \mu\text{m}$ を超える幅のひび割れは生じていないと言える。ひずみ分布が不連続な箇所が 17 m や 21 m 付近に見られるが、これは施工方法がその一因と考えられる。つまり、これらの位置がプレキャスト部材のあいだの間詰め箇所に対応することから、



図-5 ひび割れ検知対象の歩道橋

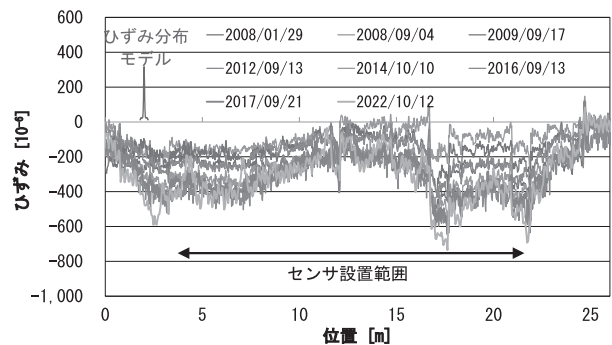


図-6 計測結果

材料物性のわずかな違いや光ファイバと構造物間の接着力などの差によるものと推察できるが、明確なところは定かではない。継続したモニタリングのなかで、注視していきたい。なお、敷設した光ファイバには剥がれや接着剤のひび割れといった外観上の変化は見られなかった。ひずみ分布計測結果と併せ、実環境下において15年間の耐久性を有することを確認した。

3. 法面での事例

本事例も、光ファイバ全長にわたるひずみの分布状態を計測可能な技術と前述の光ファイバ組込み式PCケーブルを利用して、グラウンドアンカーに適用したものである。グラウンドアンカーのテンドンに適用することで、アンカー体を含めたテンドン全長にわたる張力分布を評価する。テンドンの張力分布は、図-7に示すように地山の変化、外力の作用などによるすべり面の発生や、アンカー体周辺の変状によって変化することが考えられる⁷⁾。これまでは、ロードセルやリフトオフ試験などによって、アンカー頭部での“点”での張力評価だけであった。本技術によればテンドン全長での“線”での張力分布を光ファイバセンサで把握できるため、グラウンドアンカーの健全性を評価するだけでなく、変状が生じた際の要因の特定や対策工の選定、設計にも活用できることとなる。

法面補強グラウンドアンカーの一部を対象に、光ファイバ組込み式PCケーブルを適用した（延長：11.5～18.1 m、アンカー体長さ：4.0 m）。施工時には、グラウンドアンカーの緊張・定着終了後、防錆キャッ

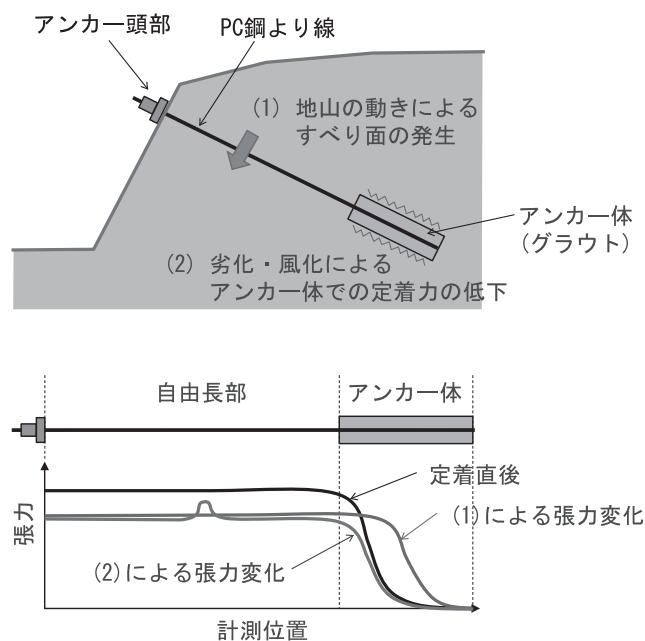


図-7 グラウンドアンカーの変状

プに設けた取出し孔から光ファイバを取り出し、計測器を接続できる場所まで延伸して端子箱内に収納した。ひずみ計測は2017年6～7月に緊張・定着された時点初期値として、施工から半年後（2017年12月）、1年半後（2018年12月）、4年半後（2021年12月）にそれぞれ実施した。テンドンの張力分布計測結果の一例を図-8に示す。なお、同図には、「健全な状態」と判定されるアンカー頭部の引張力の範囲（上限値：設計アンカー力、下限値：定着直後の引張力の80%値）についても併記している。定着直後から4年半経過した時点においても、全長にわたる張力分布を光ファイバで計測できることが確認できた⁸⁾。張力分布の変化については、2017年12月までの約半年の間に自由長部で増減が見られるが、いずれも健全な状態と判定される範囲内であり、2017年12月以降には大きな変動が生じていない。一方、2018年12月の時点でアンカー体部の先端付近の張力分布に若干の変動が見られることから、同部分における定着力が変化している可能性が示唆された。ただし、変動量は小さくアンカー体の範囲内で引張力が地山に伝達されていること、2018年12月以降の3年間では同部分の張力分布に有意な変化が生じていないことから、十分な定着性能が確保されている状況であると判断できる。今後、グラウンドアンカーや補強された斜面の維持管理での活用を目的として、本技術の活用を図っていく。

4. 新たな計測技術

ここまで紹介した光ファイバセンサは、光ファイバ内を光が透過するとき生じる散乱光を利用した技術である。散乱光はすべての箇所が生じることから、入射した光が散乱光として帰還する時間からその場所を、散乱光を分析することでその場所のひずみなどの変化を、それぞれ算出している。図-9に示すよう

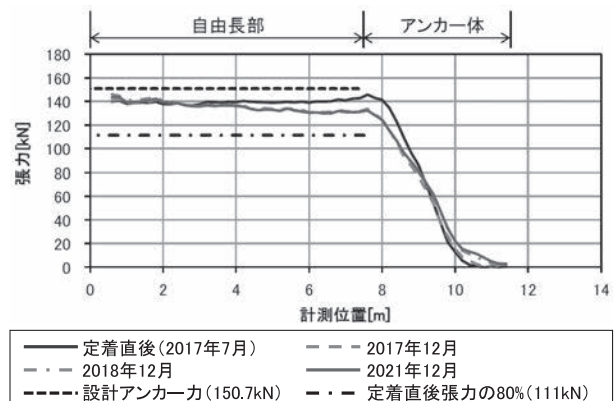


図-8 グラウンドアンカー計測結果

に散乱光にはいくつかの種類があり、そのうちブリルアン散乱光は入射光により発生・伝播する音響波による散乱現象で、入射した光はドップラーシフトを受け音響波の振動数に応じて波長がシフトする。このシフト量が発生位置のひずみに依存することが知られており、光ファイバに沿ってすべての位置でひずみ情報を得られる光ファイバセンサを実現する。本稿でも紹介したように、これまでに建設分野においても多くの適用が試みられてきた。

近年、レイリー散乱と呼ばれる散乱光を用いたひずみ技術の進歩が著しい⁹⁾。これまでは、光の透過損失量などの計測には用いられてきたが、光学部品的高度化（レーザ光源の狭線幅化、受光器の高解像度化など）ならびに信号処理プログラムの進歩によって、ひずみや温度の高性能なセンシング技術として製品化も進んできた。ブリルアン散乱などの従来技術と比べて圧倒的に散乱光の強さが大きいことから、計測時間の短縮が可能となる。また、ひずみなどによる感度が非常に高く、従来技術の数10倍以上の計測精度を有する。コンクリート構造物の表面に張り付けた際に得られた従来技術との精度比較結果を図-10に示す。これまでは、ひび割れなどによる大きなひずみ変化を捉えていたが、これからは、レイリー散乱を用いてひび割れが発生する前の応力集中の段階からその挙動を得られるため、その後の対策を施すことが可能である。このように、光ファイバセンサを用いた維持管理によ

て、これまでとは異なる価値あるデータを提供できる可能性がある。

5. おわりに

維持管理におけるインフラの構造状態を把握する手段として、これまでは近接目視を中心に、また必要に応じて変位計や傾斜計などの電気式のポイント型センサが用いられてきた。それに対して、光ファイバセンサは構造物内部などの見えない箇所を網羅的に見える化することができる。つまり、“点”での点検から、“線”での網羅的な監視が可能となる。実際に供用中のインフラ構造物への光ファイバセンサの適用を通じ、橋梁や法面などで最大15年間にもわたるモニタリングの実績が蓄積されつつある。今後も引き続き、長期実績を蓄積するとともに、維持管理の効率化と高度化に向けた取組みを進める。

また近年、光学技術やコンピュータ技術の進歩に伴い、レイリー散乱光を用いた新しい光ファイバセンサによって、計測精度と速度が大幅に改善された。その結果、これまで以上に早く詳細なインフラ構造物の見える化が実現された。今までの光ファイバセンサでは異状などを“事後検知”していたが、これからは異常の“予兆検知”が当たり前になるかもしれない。

わが国では、通信用光ファイバネットワークが国土を広く網羅している。本稿で紹介したセンシング用光ファイバは、通信用光ファイバと同じ種類のものを使用しているため、両者を直接繋ぐことが可能である。通信用光ファイバケーブルは通常多芯であり、通信で使用していない空き芯は光が透過していないため“ダークファイバ”と呼ばれる。センシング用光ファイバとダークファイバを接続すれば、遠隔から複数のインフラ構造物を高頻度で見守り続けると言ったこれまでにない維持管理のかたちが実現される。特に、遠隔から迅速にインフラ構造物の健全性を判断できることから、震災時などにおけるBCP対策としても寄与できる。光ファイバと言う一本の神経を通すことによって、インフラ構造物の効率的で高度な維持管理を通じて、安全・安心な社会の構築を目指したい。

JICMA

【参考文献】

- 1) 今井道男・早坂洋太：光ファイバセンサによる維持管理のためのモニタリング技術、建設機械施工、70(9)、pp.42-46、2018。
- 2) 植田ら：光ファイバセンサーを用いたRC床版のひび割れモニタリング技術について、令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会、CS9-45、2022。
- 3) 泉ら：光ファイバ組込み式テーブ材によるコンクリート部材のひび割れ幅計測、令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会、CS9-42、2022。

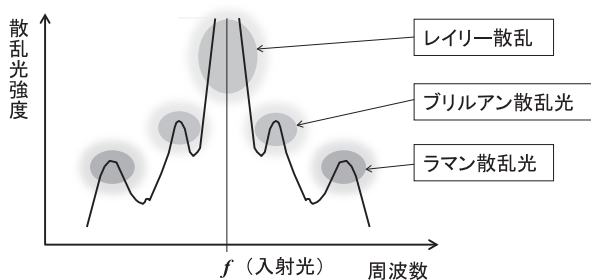


図-9 様々な散乱光

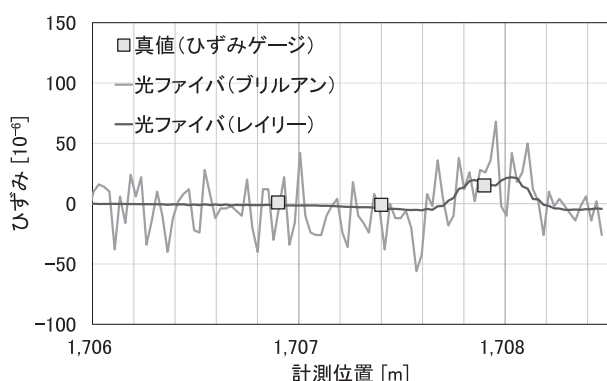


図-10 ひずみ分布計測結果の比較

- 4) 大窪一正・今井道男・中上晋志・早川道洋：エポキシ被覆型光ファイバ組込み式 PC 鋼より線の開発と適用，第 26 回シンポジウム論文集，プレストレストコンクリート工学会，pp.217-222，2017.
- 5) 大窪一正，今井道男，曾我部直樹，中上晋志，千桐一芳， & 二羽淳一郎．(2020)．緊張管理・維持管理に適用可能な光ファイバを用いた PC 張力分布計測技術の開発．土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，76 (1)，41-54.
- 6) 今井道男，一宮利通，露木健一郎，早坂洋太， & 太田伸之．(2019)．光ファイバセンサによる 10 年間の PC 橋梁ひび割れモニタリング．土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，75 (1)，17-25.
- 7) 大窪一正，今井道男，曾我部直樹，戸邊勇人，中上晋志，早川道洋， & 二羽淳一郎．(2020)．光ファイバを用いた引張り力分布計測技術のグラウンドアンカーへの適用．土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，76 (1)，126-138.
- 8) 江口健治，大窪一正，曾我部直樹，今井道男，松本健太郎：光ファイバによるグラウンドアンカー tendon の引張り力分布の計測，土木学会全国大会 2022.
- 9) 今井道男，川端淳一，平陽兵， & 永谷英基．(2022)．革新的光ファイバセンサによるインフラモニタリング～高速・高精度な分布型光ファイバ計測のインフラへの活用～．電子情報通信学会技術研究報告；信学技報，121 (332)，17-20.

[筆者紹介]

今井 道男 (いまい みちお)
鹿島建設㈱
技術研究所 先端・メカトロニクスグループ
上席研究員



曾我部 直樹 (そがべ なおき)
鹿島建設㈱
技術研究所 土木構造グループ
グループ長



新井 崇裕 (あらい たかひろ)
鹿島建設㈱
土木管理本部 土木技術部 リニューアルグループ
グループ長

