特集≫≫ 維持管理,長寿命化,リニューアル

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

今 井 道 男·早 坂 洋 太

光ファイバセンサは,光ファイバそのものがセンサとして機能するため,位置的に連続するひずみの分 布を得ることができる。こうした特長を活かした,構造物の維持管理に資するモニタリング技術の事例を 紹介する。一例目はひび割れ検知技術であり,長期間,供用された橋梁床版などの疲労程度をモニタリン グ可能で,10年間,橋梁の維持管理で適用されている事例がある。二例目はプレストレストコンクリー トケーブルの張力管理であり,施工管理から維持管理まで光ファイバセンサを用いて張力分布をモニタリ ングした事例である。

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

社会基盤構造物の高経年化が進むなか,適切な維持 管理のための点検技術,診断技術が望まれている。人 と予算が不足する環境下で膨大な数の構造物の点検診 断を実現するために,発展著しいセンシング技術によ る維持管理の効率化・高度化への期待が叫ばれて久し い。

維持管理分野へのセンシング技術の貢献のかたち は、ふたつに大別される。ひとつめは、従来技術、特 に近接目視を代替するような技術によって、点検作業 を効率化するものである。スクリーニングなどはこれ に類するものと言える。ふたつめは、これまでにない 技術によって、点検診断を高度化するものである。現 下、ドローンによる画像取得技術、AIによる画像か らのひび割れ抽出技術など、前者、つまり効率化に寄 与する技術開発が盛んである。一方、後者は、近接目 視を中心とした現行の維持管理を高度化するだけに留 まらず、高度なデータ化社会のための要素技術として の色合いも濃く、Society5.0¹¹で提唱されるサイバー 空間構築の文脈に位置付けられるものとも言える。

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。本稿では、点 検の効率化としてのひび割れモニタリングと、点検の 高度化としてのプレストレストコンクリートケーブル の緊張力モニタリングの事例を紹介する。

2. 分布型光ファイバセンサ

光ファイバセンサは、小型軽量で長寿命、センサ部 に給電不要などの特長をもつ点から、建設分野との親 和性が高いと考えられる。特に、光ファイバそのもの がセンサとして機能する分布型光ファイバセンサは、 光ファイバ全長に沿って位置的に連続するひずみの分 布を得られる稀有なセンシング技術である²⁰。光ファ イバ内で生じる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(図-1)。この散乱は光ファイバ内の至るところ で発生し、散乱光の波長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分布型光ファイバセンサ を実現する。光ファイバの片端からの入射光による「自



然ブリルアン散乱光」を用いたセンシング技術²⁾は, これまでに建設分野においても多くの適用が試みられ ている。一方,光ファイバの両端からふたつの光を対 向させることによる「誘導ブリルアン散乱光」を用い たセンシング技術³⁾の開発も盛んで,その強い光強 度によって高い空間分解能などの特長を有する。自然・ 誘導ブリルアン散乱を利用したセンシング技術の代表 例を**表**—1に,それぞれの発生の概念を図—2に示 す。適用にあたっては,モニタリングの目的と両者の 特長を充分考慮する必要がある。

	BOTDR	BOCDA	
ブリルアン散乱	自然ブリルアン	誘導ブリルアン	
光ファイバ構成	片端接続	両端接続	
空間分解能	1 m ~	数 cm ~	
計測範囲	数 km	200 m	
計測時間	数分	数分	

表—1 BOTDR と BOCDA の比較

Brillouin Optical Time Domain Reflectometer



Brillouin Optical Correlation Domain Analysis



3. コンクリートひび割れ検知

(1) 概要

コンクリート表面に生じるひび割れは,美観を低下 させるだけでなく,水や酸素などの劣化因子の侵入経 路となることから耐久性を低下させる要因となる。そ のため,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。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。このように発生位置の分からない現象を検知する うえでは,分布型光ファイバセンサのように網羅的に 情報を把握できるセンシング技術が向いている。

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量 は緩和され、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。分布型光 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)をモニタリングすることができる(図-3)。既 往研究によれば、光ファイバ素線に直交する 20μm 幅のひび割れ発生時に約 300×10⁻⁶の局所的な引張 ひずみが生じることがわかっており⁵⁾、誘導ブリルア ン散乱を利用した計測技術によれば、微細な開口変位 を検知することができる。



(2) 床版ひび割れモニタリング

道路橋のうち鉄筋コンクリート床版(以下 RC 床版) については大型車による疲労の影響を受けやすく,過 大な輪荷重走行の繰返し作用によるひび割れの発生・ 進展から,最終的には抜け落ちに至る。そのため,損 傷状態はひび割れの進行過程によって説明できる。そ こで,光ファイバセンサによるひび割れ検知技術の, RC 床版疲労モニタリングへの適用検討を目的に,輪 荷重走行試験を実施した⁶⁾。試験体(**写真**—1:幅 2,200,長さ4,000,厚さ190 mm)の下面に,**図**—4 に示す配置で光ファイバを全線にわたって接着固定し た。およそ50日間の走行試験期間のあいだ定期的に 光ファイバセンサによるひずみ分布を計測し,評価指 標を算出,目視によるひび割れ観察をもとにした試験 体の損傷程度評価との比較を試みた。



写真-1 輪荷重走行試験体



光ファイバセンサによる評価指標の処理フローを図 一5に示す。得られたひずみ分布をもとにデータを 内挿し,センサ設置領域近傍のひずみコンターを得 る。その後、300×10⁻⁶を超えるひずみの領域をひび 割れと判断し、細線化処理を経てひび割れマップを作 成する。ひび割れマップ上のひび割れ長さをすべて累 積し、当該領域の設置光ファイバ長で除して正規化し た値を"ひび割れ延長"、ひずみコンターのうち 300 ×10⁻⁶を超えるひずみの領域が全領域に占める割合 を"ひび割れ割合"とした。ひずみ分布計測結果をも とに、"ひび割れ延長"と"ひび割れ割合"を累積走 行回数に応じて算出した結果を図一6に示す。図に は、目視によるひび割れ観察から算出したひび割れ密 度(右軸)と損傷程度区分 a ~ e(図上部に区分記載) を併記する。

"ひび割れ延長"と"ひび割れ割合"は、損傷程度 dまで同様の傾向を示した。つまり、試験開始直後に



図-5 評価指標の処理フロー





(b) ひび割れ延長図-6 損傷評価結果

表-2 損傷程度の比較

		損傷程度の評価					
		а	b	с	d	е	
目視	ひび割れ	なし	一方向	一または	一または	部分的な	
	状況		のみ	二方向	二方向	角落ち	
光ファ イバ	ひび割れ 延長	急增	增加	增加	大きな 変化なし	大きな 変化なし	
	ひび割れ 割合	急増	增加	增加	大きな 変化なし	漸増	

新たなひび割れの発生によって大きく増加(a), 徐々 に増える段階を経て(b~c), その後, ばらつきは あるもののほぼ一定に推移した(d)。さらに, 89 kN から 100 kN に走行荷重を上げた 15,000 回以降, "ひ び割れ延長"に大きな変化はみられないのに対して, "ひび割れ割合"は増加し続けた(e)。新たなひび割 れの進展よりも, 既設ひび割れ幅の増大が支配的な段 階と推察される。ふたつの指標を組み合わせること で, 床版全体の損傷程度を評価できる可能性を得た(**表** -2)。

4. PC ケーブル緊張力管理

(1) 概要

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かけ, 荷重を受けた際にコンクリートに引張応力が発生しな いように設計されている。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 緊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。これまで、施工管理において は油圧ポンプの圧力値とPCケーブルの伸びから緊張 力を間接的に評価しているが、緊張終了後における導 入力の変動計測は想定されていなかった。そこで、光 ファイバを組み込んだPC 鋼より線を製作し、分布型 光ファイバセンサによって全長にわたる緊張力分布を 直接計測する技術を開発した⁷⁾。本技術は、PC 構造 物の施工中の緊張力管理だけでなく、供用中の維持管 理にも活用できることが期待される。

光ファイバ組込み式 PC ケーブルについては,通常 の PC 鋼より線に光ファイバを設置するタイプ(裸線 型)と,エポキシ被覆型 PC 鋼より線のエポキシ被覆 内に光ファイバを埋設するタイプ(ECF 型)の2種 類を開発した(図-7)。両者とも光ファイバは,よ り線表面の凹部に収まるように設置されている。その ため,PC 鋼より線の外径や表面の性状は変わらず, 運搬・挿入時の接触や定着用ウェッジとの干渉による 損傷が生じないため,通常の PC ケーブルと同様の施 工手順で計測を行うことが可能である。また,光ファ イバの設置を PC 鋼より線の製造工場で行うため,細 く,折損しやすい光ファイバの現場における設置作業 を大幅に省略することができる。自然ブリルアン散乱 を利用した計測技術によれば,片端からの入射光によ り広い範囲での分布計測が可能である。



(2) 緊張力モニタリング

ポストテンション PC ケーブルへの実導入緊張力の 計測,評価を目的として,PC 箱桁橋の柱頭部のウェ ブ(図-8)を対象に,光ファイバ組込み式 PC ケー ブル(裸線型)を適用し,PC 緊張力分布の計測を行っ た。作業手順を写真-2に示す。工場で製作された 光ファイバ組込み式 PC ケーブルを含む 12S15.2 を, 一括してシース内に挿入した後,通常と同じ方法で定



P1柱頭部 図-8 柱頭部のケーブル配置



着具,緊張ジャッキを設置し,緊張作業および計測を 行った。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,緊張力の再計測を可能とするため,光ファイバ端 部の計測用コネクタを桁内まで延長し,計測機器を接 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 の緊張力分布を,設計緊張力と併せて図一9に示す。 長期的にも緊張力の分布が計測できており,各断面に おいて設計緊張力以上の緊張力が適切に導入,保持さ



れていることが確認できる。また、曲げ角度が大きな ウェブケーブルでは、緊張時には中央部に向かって緊 張力が減少し、定着後は逆に中央部の緊張力が残存す る傾向が示されており、緊張力に対する摩擦の影響が 計測、評価できることが分かる。なお、約190 m 長 の外ケーブルに適用した ECF 型についても、同様の 結果を得ることができた⁸⁾。

5. おわりに

"痛みの分かる構造物"を実現する神経網として, 光ファイバによるセンシング技術は期待されている。 通信媒体としての光ファイバの性能(低損失化)は成 熟しつつあるものの,散乱光を利用した計測技術は発 展を続けており,今後の研究開発によってさらに詳細 な状態をモニタリングできる可能性がある。つまり, 光ファイバを設置してさえおけば,本稿に記した維持 管理の効率化・高度化だけでなく,設計~施工段階も 含めたライフサイクルの生産性向上や,適切なマネジ メントサイクルなどに資するインフラインフォマティ クスを具現化する手段となり得ると言える。

謝 辞

コンクリートひび割れに関する研究は、モニタリン グシステム技術研究組合(RAIMS)が実施した研究 であり、内閣府の「SIPインフラ維持管理・更新・マ ネジメント技術」の一環として国土交通省が実施する 「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関 する技術研究開発」委託事業研究の、また緊張力管理 に関する研究は、住友電工スチールワイヤー(株)とヒエ ン電工㈱との共同研究の, それぞれ成果である。ここ に記して謝意を示す。

JCMA

《参 考 文 献》

- 1) 内閣府の Society5.0 に関する HP, http://www8.cao.go.jp/cstp/ society5_0/index.html
- Hartog, A. H. (2017). An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. CRC Press.
- Kurashima, T., Horiguchi, T., Izumita, H., Furukawa, S. I., and Koyamada, Y. (1993). Brillouin optical-fiber time domain reflectometry. IEICE transactions on communications, 76 (4), 382-390.
- 4) Song, K. Y., He, Z., and Hotate, K. (2006, October). Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis and beat lock-in detection scheme. In Optical Fiber Sensors (p. ThC2). Optical Society of America.
- 5) 今井道男・一宮利通・河野哲也・三浦悟:光ファイバーセンサーを用 いた PC 構造物のひび割れ検知技術、プレストレストコンクリート、 51 (3), pp.78-83, 2009.
- 6) 今井道男・新井崇裕・岩井稔・古市耕輔:輪荷重走行試験による RC 床版の疲労劣化に関するモニタリング技術の検討(その4)光ファイ バーセンサによるひび割れ検知, CS7-039, 土木学会, 2017.
- 7) 横田祐起ほか:光ファイバーを用いた PC 鋼より線の緊張力計測, 5-160, 土木学会, 2015.
- 8) 大窪一正・今井道男・中上晋志・早川道洋:エボキシ被覆型光ファイバー組込み式 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.

[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 主任研究員

0

主杳

早坂 洋太 (はやさか ようた) リテック・エンジニアリング㈱ 技術本部