

土木分野の現場適用へ向けた光ファイバ分布計測技術の新たな知見

ニューブレクス株式会社 正会員 ○岸田 欣増
非会員 山内 良昭 松田 公彦

1. はじめに

光ファイバを用いた分布計測（DFOS: Distributed Fiber Optic Sensing）は日本発祥の技術である。
当初は計測精度が不十分なため土木分野では普及が進まなかったが、計測精度が大きく向上したレイリー計測技術（Rayleigh Frequency Strain）の実用化に伴い、近年国内の産官学による数々の現場実証で再評価され、DFOS 技術は土木分野の計測ニーズを十分に満たすことが明らかになった¹⁾²⁾。
高齢化や社会インフラの老朽化に加え、コロナ禍や脱炭素など時代の新たな要請に直面する中で、DFOS 計測はこれらの問題を解決する手段として重要性が増大しており、特に日本における産官学の実証・評価活動は国際的にも先進的な地位にある。
最近の新たな実績と知見を踏まえて、土木分野への DFOS 技術の本格的な導入にあたり考慮すべき計測機器、センシングケーブル、および現場でのデータ処理について述べる。

2. 維持管理と施工管理

今まで DFOS 技術は長距離を網羅的に計測できる特徴が注目され、構造物の長期維持管理を目的とする健全性監視（SHM: Structural Health Monitoring）への適用が盛んに議論されてきた。しかし、実際には光ファイバセンサを施工後の構造物に後付けで設置することは予算の構造上難しく、技術的にも構造物の重要な部位に設置できないことが多いため、維持管理への適用は当初の期待ほど進展していない。
一方、施工管理段階で DFOS 技術を導入することによる品質向上やコスト削減の効果は実証され、採算面を含め事業化に十分な価値があることが明らかになった。施工管理段階で設置した光ファイバセンサは、施工完了後は維持管理用途のためにセンサ本体と重要な部位の初期ひずみ状態などの情報をそのまま活用することが可能である。これらの特徴により、光ファイバセンサは従来の電気式センサでは難しい長寿命を実現できる。

3. DFOS 技術へのニーズ

土木分野における施工管理や維持管理には、構造物のひずみレベルの管理が必要である。今まで十数年間の現場実証の結果、そのひずみ変化量は 20～30 $\mu \epsilon$ 程度であることが多く、DFOS の適用においてはひずみの計測精度 1 $\mu \epsilon$ 以下、空間分解能 10cm 以下の仕様が計測技術選定の目安となると考えられる。計測距離は 1km 以上あれば土木分野におけるほぼ全てのニーズを満たすことができる。

表－1 各計測技術の代表スペック

Parameter	Feature	TW-COTDR	PSP-BOTDR	PPP-BOTDA	BOTDA	BOTDR	OBR (OFDR)
Strain accuracy*, $\mu \epsilon$		0.1	6	10	20	50	1*
Spatial resolution, cm	max	2	10	2	100	100	<1
	TFR+	10	20	10	100	200	1
Distance range, km	max	25	25	25	25	25	0.07
	TFR+	6	6	6	6	6	0.03

*Accuracy is as provided by interrogator technical specifications.
+TFR, typical field request reviewed by authors

表－1 に DFOS の各計測技術の代表的な仕様をまとめた。先述の目安からは、ブリルアン方式（BOTDR・BOTDA 技術）や DAS（Distributed Acoustic Sensing）のみではなく、全ての計測方法を統合的に使うことで極めて有効な計測技術となるといえる。DAS や DTS（Distributed Temperature Sensing）は多くの計測

例が公表されているが、土木分野における施工管理や維持管理には、構造物の初期状態と変化の履歴を把握できるひずみ分布の計測が必須であると考えられる。

4. 計測用光ファイバケーブルとダークファイバ

通信用の光ファイバをそのまま各種の計測機器に接続することである程度の信号は得られるため、ダークファイバと呼ばれる通信用に設置された光ファイバを DFOS 技術に活用した事例が報告されている。

しかし、通信用の光ファイバは金属やプラスチックのパイプの中に余長を持った状態で置かれているため、振動に対しては光ファイバがある程度追従し DAS 計測には効果を発揮する可能性があるが、ひずみ計測においては光ファイバとパイプ間に滑りが生じて真のひずみ値が得られなくなり、初期ひずみ状態や長期間のひずみ変化履歴の情報を失うおそれがある。

図-1 に現場で実測されたひずみ値と滑りのモデルを仮定して補正した真のひずみ値の比較を示す。モデルによる補正の妥当性は議論の余地があるものの、時間経過とともに実測値と補正したひずみ値の乖離が大きくなることが観察される。

著者らは、再現性やひずみ精度を校正したひずみ計測専用の光ファイバセンサケーブルを開発し、真のひずみ値を取得できる光ファイバセンサとして市販している(図-2)。このような校正データで裏付けされた光ファイバセンサケーブルは稀なのが現状である。

5. 土木分野におけるデータ処理

DFOS 技術で得られた計測データを施工管理や維持管理に活用するには、計測機器が取得した光ファイバ中のひずみ分布情報を空間的、あるいは時系列的に解析することが必要である。また、光ファイバは温度やひずみの変化により伸縮するため高精度な距離補正が DFOS 技術を現場適用する上で欠かせない処理であることはあまり知られていない。著者らは、これらの計測データ処理および解析を実現するための専用データベースシステム(NEUBREGATE)を実用化しており、加えて現場計測のデータ処理機能に特化したソフトウェア(NEUBREGATE OnSite)を市販している。このソフトウェアにより、計測機器が取得した計測データを自動的に処理し、計測データを 4G インターネット回線でリアルタイム送信できるサイズまでコンパクト化することが可能になった。

6. まとめ

国内の産官学による実証活動により、DFOS 技術の土木分野への適用に必要な要素が明らかになりつつある。土木分野における施工管理や維持管理には、構造物の初期状態と変化の履歴を把握できるひずみ分布情報が必要であり、そのためには計測機器の精度だけではなく光ファイバセンサケーブルやデータ処理・解析も考慮することが重要である。これらの知見が DFOS 技術の普及に役立つことを期待する。

参考文献

- 1) Kishida, K., Imai, M., Kawabata, J., Guzik, A.: Distributed Optical Fiber Sensors for Monitoring of Civil Engineering Structures. Sensors 2022, 22, 4368., <https://doi.org/10.3390/s22124368>
- 2) 川端淳一, 今井道男, 永谷英基, 平陽兵: 革新的光ファイバ計測によるインフラモニタリング技術, 土木施工 7 月号

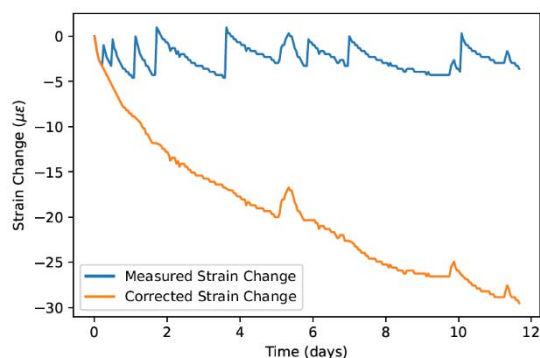


図-1 パイプ構造の中に置かれた通信用光ファイバのひずみ実測値と滑り補正例



図-2 ひずみ計測専用光ファイバセンサケーブルの例