

(66) 建設分野への分布型光ファイバひずみセンサの展開に向けた導入マニュアルの作成

今井 道男¹・町島 祐一²・足立 正二³・小松 康俊⁴・吉村 雄一⁵

¹正会員 鹿島建設株式会社（〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1），光ファイバセンシング振興協会
E-mail: michio@kajima.com

²正会員 株式会社レーザック（〒124-0002 東京都葛飾区西亀有 1-5-3），光ファイバセンシング振興協会
E-mail: machijima@lazoc.jp

³光ファイバセンシング振興協会（〒104-0061 東京都中央区銀座 6-13-16）
E-mail: adachi@phosc.jp

⁴光ファイバセンシング振興協会（〒104-0061 東京都中央区銀座 6-13-16）
E-mail: komatsu@phosc.jp

⁵正会員 鹿島建設株式会社（〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1），光ファイバセンシング振興協会
E-mail: yoshyuic@kajima.com

分布型光ファイバひずみセンサは、光ファイバそのものがセンサとして機能し、光ファイバに沿ってひずみの情報を全長で得られることから、建設分野における構造モニタリング手段のひとつとして期待されてきた。しかし、その展開は限られたアプリケーションなどに留まっていた。これまでにない同センサの特長とともに、特有の留意事項が十分に理解されていないことが、その大きな原因のひとつと考えられる。そこで、建設分野における導入マニュアルを作成し、分布型光ファイバひずみセンシング技術の適用を容易にすることを目的とした。本マニュアルを通じて、同センサの概要とともに、その利点や留意事項、また活用方法を事例として紹介することで、導入を進めるための一助としたい。

Key Words: optical fiber sensor, distribued measurement, strain measurement

1. はじめに

光ファイバセンサの有する特長（小型軽量、長寿命、耐雷性、防爆性など）は建設分野との親和性が高く、なかでも分布型光ファイバセンサはその稀有な特長から大型構造物の挙動把握手段として長く期待されてきた。特に、ひずみセンサは構造評価の観点から期待が高い。しかし、同センサの開発から四半世紀以上過ぎた現下、広く社会に浸透しているとは言い難い。温度センサと比べてセンサ設置に手間や労力がかかる点、単純なひずみデータのみではその価値を見出しづらい点などが原因として挙げられる。後者については、特にデータの解釈・活用という点でユーザ側の積極的な関与が必要だが、その展開の障害のひとつは、分布型ひずみセンサに対するユーザの理解が十分得られていないことである。

一方、建設分野における分布型ひずみセンサの適用例のなかでは、いくつか社会実装が進みつつあるものもあ

るが、これらは分野内における一部のアプリケーションに過ぎない¹⁾²⁾。関連するガイドラインや報告書のなかで、分布型光ファイバセンサの基本的事項に触れたものもあり³⁾、ユーザの理解を促すものと思われるが、その他への展開可能性を加速するとは言い難い。

展開を進めるひとつの手段としては、技術標準などの整備が必要である。センサ技術の標準化の一般的な流れとしては、IECによる国際標準から、JIS化への流れが考えられる。分布型光ファイバセンサのうち、温度センサについてはIEC規格文書が発行されているものの⁴⁾、ひずみセンサに関する標準化に向けた工程は今のところ明確でなく、何らかの技術的拠り所が必要である。

そこで、建設分野における分布型光ファイバひずみセンサの社会実装の更なる促進を目指し、ユーザ視点において同センサの導入を手助けするための「建設分野における分布型ひずみセンサ導入のためのマニュアル」を作成、発行したので、本稿でその概要を報告する。

2. マニュアル作成 WG 活動の概要

(1) WG 概要

マニュアル作成にあたり、特定非営利活動法人光ファイバセンシング振興協会内の「資格・認定・標準化委員会」のもと、「建設分野における分布型ひずみセンサ導入のためのマニュアル作成 WG」を設置した。同協会は、光ファイバセンサの普及・啓発および推進などを目的とした機関で、企業などの団体会員および個人会員から構成される。筆者らを事務局として有志の WG メンバーを募り、計 13 機関からの 28 名で活動した。メンバーは主に測定器やケーブルメーカーなどのサプライヤー側からの参加者が中心であるが、建設コンサルタントやゼネコンなどのユーザー側からの参加者も含まれる。

(2) WG 活動

2020 年 6 月のキックオフ以降、リモートでの打合せを概ね毎月開催し、20 名程度の参加の下、マニュアル記載内容の検討や読み合わせなどを行った。打合せでの討議内容を踏まえて、メンバーがそれぞれの担当箇所を執筆した。打合せ毎に合本したマニュアルを確認しながら、随時ブラッシュアップしながら進めた。WG 活動の履歴を主な討議内容とともに表-1 に示す。下表以外に、光ファイバセンサケーブルの校正方法と語句の定義に関する議論を、メーカー側とユーザー側に分けてサブ WG として意見交換（2020 年 10 月 8 日）を行い、その結果をマニュアルに反映した。

3. 導入マニュアルの構成

(1) 全体構成

本マニュアルの章立ては、初学者でも分布型光ファイバひずみセンサを適切に導入できることを目指した。目次を図-1 に示す。第 1 章は同センサの概説とし、第 2 章

では導入するためのフローを示した。ここまでで、目的に応じた計測方式・光ファイバセンサケーブルを選択して、同センサを導入できるよう意図したものである。第 2 章では同センサに特有の留意事項も付記した。第 3～4 章では適用事例を紹介した。第 5 章では語句の定義とともに、付記すべきと考えられる事項を記載した。合わせて、マニュアル記載技術の問い合わせ先と、参考資料を巻末にまとめた。

(2) 1 章「はじめに」について

本章は、マニュアルの目的と、分布型光ファイバひずみセンサの概説から構成した。後者については、光ファイバの特長や種類、分布型センサを実現する散乱光など、初学者向け資料として必要な事項についてコンパクトにまとめた。さらに、実務上必要な最低限の事項として、光ファイバコネクタの種類や、コネクタ脱着の際の留意事項（端面の清掃など）について記載した。

(3) 2 章「導入手順」について

本マニュアルの中心として、本章だけで同センサの導入ができるような内容を目指した。こうした点を考慮のうへ、導入するための手順に沿って、計測方式（2.2 節）や光ファイバセンサケーブル（2.3 節）の中から、最適なものを選択できるよう記載した。さらに、同センサ特有の留意事項について記載した（2.4 節）。

a) 導入フロー

分布型光ファイバひずみセンサを導入するにあたっては、目的に応じて適切な計測方式や光ファイバセンサケーブルなどを選択することが重要である。例えば、施工管理においてはその結果をフィードバックするために短

表-1 WG 打合せの開催と主な討議内容

	開催日	主な討議内容
1	2020 年 6 月 23 日	WG 主旨や類似標準例の確認 目次案と作業工程の討議
2	2020 年 8 月 5 日	マニュアル記載内容全体の討議
3	2020 年 9 月 9 日	ケーブルの校正の討議
4	2020 年 10 月 13 日	校正と試験方法の討議
5	2020 年 11 月 12 日	校正に関する既往研究例の紹介、温度補償法の討議
6	2020 年 12 月 15 日	校正方法と語句の討議
7	2021 年 1 月 14 日	マニュアル 2 章と語句の確認
8	2021 年 2 月 26 日	マニュアル 3～4 章の確認
9	2021 年 3 月 29 日	マニュアル全体の確認

1	はじめに	1
1.1	本マニュアルの目的	1
1.2	分布型光ファイバひずみセンサの概説	2
2	分布型光ファイバひずみセンサの導入手順	6
2.1	導入フロー	6
2.2	計測方式	13
2.3	光ファイバセンサケーブル	28
2.4	その他留意事項	36
3	コンクリートへの適用例	48
3.1	ひび割れ検知	48
3.2	ひずみモニタリング	50
3.3	PC ケーブルの張力監視	53
4	土工構造への適用例	56
4.1	補強土の安定性モニタリング	56
4.2	道路舗装への適用	61
4.3	グラウンドアンカーの張力監視	64
5	その他	67
5.1	語句の定義	67
5.2	レーザーの安全性	69
5.3	ひずみゲージとの違い	70
5.4	屈折率の確認	71
5.5	性能検証試験	72
	問い合わせ先一覧	73
	参考資料	74

図-1 マニュアルの目次構成

い測定時間の計測方式が求められること、維持管理においては長期耐久性を有する光ファイバセンサケーブルと設置方法が求められることなど、計測目的によって要求性能が明確化できる。

そこで、与条件に基づき、図-2に示すフローで同センサを導入することを推奨している。はじめに、計測の目的をはっきりさせることが重要である。その対象や要求性能をもとに、光ファイバセンサに求められる仕様や適用期間などが決められる。次に、目的に応じた計測方式と光ファイバセンサケーブル、さらには実施体制などを決定する。また、必要に応じて、システム化や性能検証を行う。そして、決定されたシステムをもとに、光ファイバセンサケーブルを敷設し、測定、評価を行う。

b) 計測方式

分布型光ファイバひずみセンサには、ブリルアンあるいはレイリーと散乱光が異なったり、散乱光の位置特定方法が異なったりと、特徴が異なる計測方式が数多くある。2.2 節では、計測方式の簡単な原理とともに、図-3に示す代表的な測定器の仕様などについて記載した。

c) 光ファイバセンサケーブル

測定目的や対象構造物、期間などによって、最適な光ファイバセンサケーブルを選択する必要がある。2.3 節では、図-4に示す代表的な光ファイバセンサケーブルの仕様などについて記載した。

d) その他留意事項

2.4 項では、同センサ適用の際に留意すべき事項について、下記の通り記載している。

分布型光ファイバひずみセンサの計測方式は、ブリル

アン散乱光またはレイリー散乱光を用いるふたつに大別できる。光ファイバ中の SiO_2 の分子振動にもとづくブリルアン散乱光は、入射光に対する波長変化がひずみに依存することを利用しており、また、光ファイバ中のガラス組成の不均質性にもとづくレイリー散乱光は、ひずみ発生前後でのランダムな波形の周波数成分の変化がひずみに依存することを、それぞれ利用している。その原理の違いは、本センサの特性を理解するうえで重要である。

測定器から得られるデータは散乱光の周波数変化であり、係数を乗じてひずみを算出する。ひずみ係数は光ファイバセンサケーブルによって異なり、その試験方法について記載している。本マニュアルでは図-5に示す引張試験を推奨しているが、現在のところ、規格などでひずみ係数取得方法は決められておらず、大きな課題である。

光ファイバを設置した段階では、現場での位置と光ファイバ上の位置の関係性がはっきりしていない。そのため、俗にマッピングと呼ばれる位置確認作業が必要である。光ファイバセンサケーブル部の任意位置を加温するなどの変化を与え、現場での位置と測定器を原点とする光ファイバ上の位置の関係性を確認する必要がある。

本センサは、ひずみだけでなく温度の影響も受ける。ひずみ変化だけを測定するためには、温度補償が必要である。そのため、温度用光ケーブルを併設する方法が一般的であり、その方法を記している。

計測目的によって、測定器を常設して連続計測する場合や、定期的に測定器を搬入して計測する場合などがある。特に常設の場合、電源や使用環境などに留意しなくてはならない。計測する頻度や期間に応じ、無停電電源装置や空調、また大量のデータを記録するためにハード

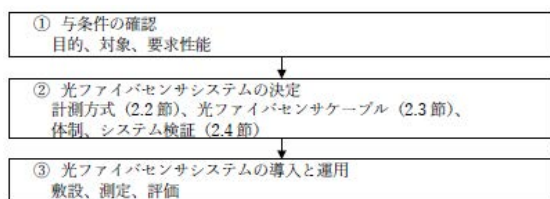


図-2 導入のフロー



図-3 計測方式の例

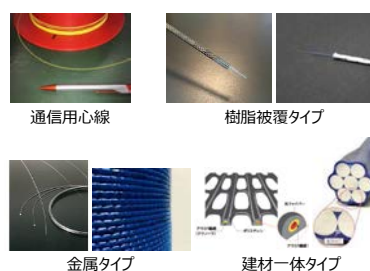


図-4 光ファイバセンサケーブルの例

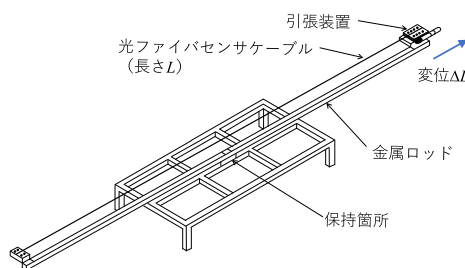


図-5 引張試験の例

ディスクなどの併設を検討する必要がある。

特に高頻度で計測する場合には、大量のデータをネットワーク経由で取得するか、オフラインで手動で取得するか、その手段を確保する必要がある。

測定器をより有効に活用するために、光スイッチで複数の光ファイバセンサケーブルを測定したり、アプリケーションサーバを併設して遠隔から監視したりすることも考えられる。データの加工や表示をシステム化し、分かり易いかたちでデータを示すことが重要である。

(4) 3～4章「適用例」について

コンクリートへの適用例として、ひび割れ検知⁵⁾、ひずみモニタリング⁶⁾、PCケーブルの張力監視⁷⁾の三例を記載している。また、土工構造への適用例として、補強土の安定性モニタリング⁸⁾、道路舗装⁹⁾、グラウンドアンカーの張力監視¹⁰⁾の三例を記載している。第2章に示した導入フローに沿ったかたちでの記載とすることで、類似事例導入の際に参考となるよう努めた。

(5) 5章「その他」について

類似事例などを参考に語句の定義を記すとともに、レーザーの安全性、ひずみゲージとの違い、光ファイバの屈折率の確認について説明を加えた。さらに、光ファイバセンサケーブルの敷設方法も含めた性能検証試験について、参考となる既往研究例を引用した。

4. おわりに

分布型光ファイバひずみセンサは、安全で高品質な施工管理、あるいは効率的な維持管理、さらにはスマートシティを具現化する手段のひとつとして、建設分野において広く展開が期待できる技術である。これまでのセンサとは異なる特徴、適用する際の留意点などをとりまとめて、導入の手助けとなるマニュアルに仕上げた。

本マニュアルの発刊は展開に向けたスタートと位置付け、継続して更新できる体制を光ファイバセンシング振興協会内で整備している。これを契機に様々な導入事例

が増え、それらを取り込んでさらに本マニュアルを充実させることで、建設分野でのさらなる展開を目指したい。

謝辞

本マニュアルの発行にあたっては、東京大学村山英晶教授、筑波大学西尾真由子准教授には大変有益なご助言頂きました。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 住友電気工業株式会社：「SmART ストランド™張力センサ技術研究会」が発足，<https://sei.co.jp/company/press/2020/09/prs091.html>，(2021.6.12)
- 2) 土木構造物のためのモニタリングシステム活用のためのガイドライン（案），モニタリングシステム技術研究組合，2019.
- 3) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度 低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業 地下空洞型処分施設機能確認試験報告書，pp.1-1-1-4，2018.
- 4) Fibre optic sensors -Part 2-2: Temperature measurement - Distributed sensing, IEC 61757-2-2, 2016.
- 5) 今井道男，一宮利通，露木健一郎，早坂洋太，太田伸之：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 A1，75(1)，pp. 17-25，2019.
- 6) Horch, C., HuSfer, J. and Schäfer, F. : Distributed Fiber Optical Sensing Inside the Foundation Slab of a High-Rise Building, In AMA Conferences, pp. 531-535, 2015.
- 7) 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：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 E2，76(1)，pp. 41-54，2020.
- 8) 伊藤修二，辻慎一郎，久保哲也，廣田慎司：熊本地震による補強土壁の被災調査結果，ジオシンセティックス論文集，31，pp. 227-234，2016.
- 9) 村田芳信，荻谷敬三，八嶋厚，岡村拓朗，伊藤修二，辻慎一郎，横田善弘：道路舗装長寿命化に向けたジオシンセティックスを用いた路盤改良の試み（2）－試験施工の概要と効果確認の試み－，ジオシンセティックス論文集，34，pp. 69-74，2019.
- 10) 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：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 A1，76(1)，pp. 126-138，2020.