

光ファイバーセンサーを用いた鉄筋コンクリート橋梁のヘルスマonitoring

羽田 匡彦 浅林 一成
小泉 健吾 村井 仁

我が国では、1950年代半ばから始まった高度経済成長期以降に整備された高速道路、橋梁(きょうりょう)、トンネルなどの社会インフラ構造物が、建設後40~50年を経過する。

今後これらの社会インフラ構造物は、老朽化による急速な劣化が懸念され、これらを継続的に監視し、適切な処置を実施することで社会インフラ構造物を健全に保つモニタリング技術の開発が喫緊の課題となっている。

モニタリング技術は、構造物の状態変化を客観的かつ定期的に把握する技術であり、最近ではITを導入したインフラモニタリングが注目を集めている。

そこでOKIは、OKI独自の光ファイバーセンシング技術(SDH-BOTDR方式¹⁾)の計測高速化により、ワンストップで鉄筋コンクリート(RC:Reinforced Concrete)橋梁のライフサイクル全般にわたり適用することが可能なヘルスマonitoring技術の開発に取り組んでいる²⁾。

ただし、本システムが実運用に適用するためには更に性能向上が必要であり、インフラ維持管理の効率化実現を目指す前田建設工業株式会社(以下、前田建設)と共同で、経年劣化過程で着目すべきモニタリングの指標の検討を重ね、求められる性能要件を挙げ、段階を踏んで性能向上を図っている。

また、性能向上の評価は、前田建設の保有する実験施設で評価している。

本稿では、RC橋梁のヘルスマonitoringに求められる最終の性能要件を挙げ、その性能要件を満たすために段階を踏んだ性能向上の取組みを報告する。

RC 橋梁のモニタリング性能要件

橋梁ヘルスマonitoringは、橋梁の健全度レベルに応じて対象を変えて測定するという考え方が示されている³⁾。図1はその概念を示したものである。橋梁の健全度レベルは大きく分けてI~IVの段階があり、それぞれの段階で測定すべき物理量が異なる。供用を開始したライフサイクルの初期の段階(健全度I,II)では、点検の補助として、主にひび割れのモニタリングを行う。中後期(健全度II~IV)にかけては、振動特性に応じて健全度を評価する。終盤(健全度IV)では、落橋などの緊急時に備え、たわみを常時監

視する。一般的には、歪みや振動、たわみといった異なる測定対象に対しては、それぞれ異なる計測装置が用いられる。このため、現状では、橋梁の健全度の段階に合せて、モニタリングシステムを逐次更新していく必要がある。

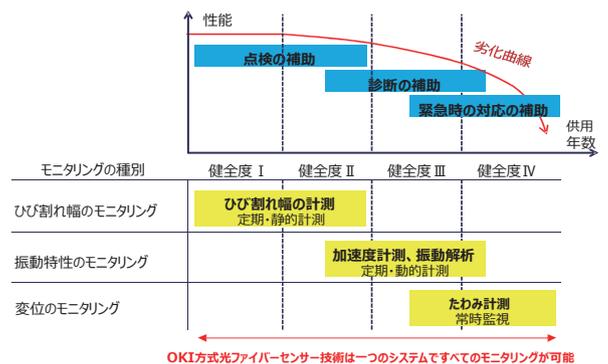


図1 RC 橋梁のヘルスマonitoringの概念

光ファイバーセンシング技術は、RC橋梁に取り付けた光ファイバーをセンサーヘッドとして、RC橋梁全体の歪みや温度変化、振動特性を分布的に捉えることを特長とする。この特長を活用すると、全ての健全度の段階に対応して最適な計測方法を選定することが可能であり、一度光ファイバーを設置すれば、ライフサイクル全般を通して大幅なシステム更新を必要としない、シームレスなモニタリングを実現可能と期待される。

ヘルスマonitoringでの各測定に対する性能要件は、前田建設で代表的なRC橋梁モデル(図2)を設定して検討した。その結果を表1に示す。

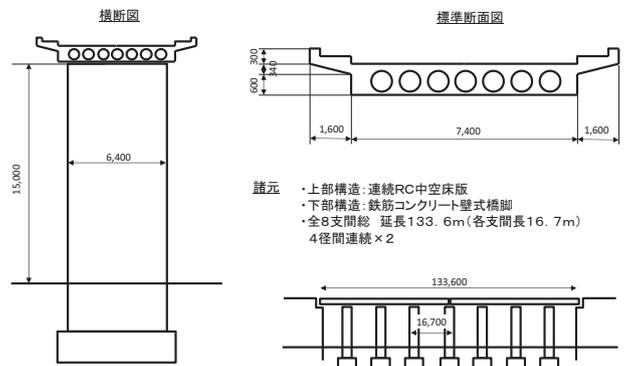


図2 性能要件を検討するためのRC 橋梁モデル

表1 RC橋梁のヘルスマモニタリングの性能要件

| 測定対象 | 適用健全度レベル | サンプリング周期 | 空間分解能※1 | 歪み精度 | 備考 |
|-------|----------|-----------|---------|----------|----------------------|
| ひび割れ幅 | I、II | 静的測定で可 | 10cm | 1~10μE※2 | ・ひび割れ間隔20~30cmを想定 |
| 振動特性 | II~IV | 100~200Hz | 1m | 1~10μE※2 | ・固有1次振動数10Hz程度を想定 |
| たわみ | III~IV | 1Hz | 1m | 1~10μE※2 | ・L=15mの例に対して算定誤差2%程度 |

※1 空間分解能とは、歪みの変化を捉える光ファイバーの測定単位長を表す。応答距離に相当する。
 ※2 μE(マイクロイブシオン)は、光ファイバーの長さに対する伸びの比率を表す。(μE=10⁻⁶)

OKIの光ファイバーセンシング技術

(1) OKI方式(SDH-BOTDR)の特長

OKIの光ファイバーセンシング方式(自己遅延ヘテロダインブリルアン光時間領域反射測定、SDH-BOTDR)の構成を図3に示す。本方式では、計測対象物に取り付けられた光ファイバー(FUT:Fiber Under Test)に光パルスを入力し、FUTで発生したブリルアン散乱光を自己遅延ヘテロダイン検波で読み取り、ブリルアン散乱光の位相シフト量から周波数シフト量を求める¹⁾。この周波数シフト量は、FUTで生じた歪み・温度変化に比例するので、周波数シフト量から歪み・温度変化を逆算可能である。歪みや温度変化の起きた場所は、入力した光パルスが散乱光として戻ってくるまでの時間を計測することにより特定する。従来の方式は、ブリルアン散乱光の周波数スペクトルを測定した後、周波数掃引によりシフト量を求めるため、測定時間が長いという問題があったが、自己遅延ヘテロダイン方式では、これらの処理プロセスが一切不要となるため高速測定が可能である。

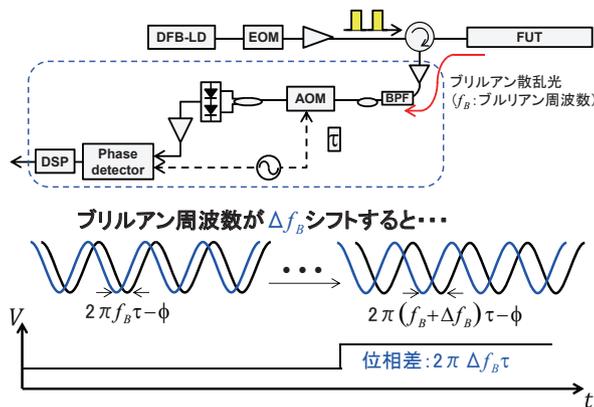


図3 OKIの光ファイバーセンシング方式

(2) OKI製品(WX1033A/B)の性能と橋梁ヘルスマモニタリングの課題

製品としてリリースしたSDH-BOTDR装置の性能を表2

に示す。既存BOTDR方式と比較して100倍以上の高速測定(測定時間1s)が可能となっている。現状性能と前田建設が挙げた橋梁のヘルスマモニタリング性能要件を比較すると、ひび割れ幅測定に必要な空間分解能10cm、固有振動計測に必要な100Hz超に対応するサンプリング周期、歪み精度が性能要件を満たしていない。この中で歪み精度は、FUTへの光パルス入力強度と検出信号の加算平均処理などを測定距離に応じて最適化することにより性能要件に近づけられると考える。従って、たわみ評価は、保証する仕様の適用外となるが現行の性能で対応可能と考えられる。

一方で、空間分解能とサンプリング周期(測定速度)は、現状製品のままでは実現が困難であり、更に技術開発が必要である。本開発では、橋梁健全度に応じた測定対象ごとに、満たすべき性能を実現するため段階的に課題解決を進めている。

以下次節で、個別の検討内容を述べる。

表2 現状製品(WX1033A/B)の性能

| 項目 | 仕様 | | 備考 |
|------|-----------|-----------------|---------|
| | WX1033A | WX1033B | |
| 測定方式 | SDH-BOTDR | | OKI独自方式 |
| 測定項目 | 分布歪み | | |
| 測定性能 | 距離 | 最大1 km 最大5 km | |
| | 時間※1 | 1 s | |
| | 空間分解能 | 1 m | |
| | 歪み範囲 | 0~7,500 μE | |
| | 歪み精度(σ) | ± 20 μE | |

※1 時間は、測定周期を表す。測定条件により応答時間と異なる場合がある。

空間分解能の向上に関する取組み

(1) SDH-BOTDR方式の空間分解能改善

ひび割れ幅測定は、静的測定が許容されているので、リアルタイム性を追求せずに、空間分解能を現行の1mから10cmまで改善することに軸足を置いて検討している。ここでは、図3に示す現行SDH-BOTDR方式をベースに、高分解能化を目的として、以下の改良した結果を述べる。

①送信ブロックでの光パルスの短パルス化

②受信ブロックでの周波数シフター追加及びDSPの高速化

①により、FUT内を伝搬する光パルスが誘起するブリルアン散乱光の空間的な広がりやを狭めることが可能となる。また、②により、ヘテロダイン干渉計における2本のアーム間光周波数差が従来比2倍となり、干渉計出力のビート信号周波数も2倍に高速化される。これをDSP経由で信号処理することによりブリルアン散乱光の位相シフト量の検知精度を改善することが可能となる。これらの改良方式を実装したBOTDR装置での空間分解能を評価した結果、図4

に示すように従来の1mから32cmまで改善させることが確認できた。なお、静的計測での歪みの計測精度は、 $\pm 10\mu\epsilon$ を満足している。

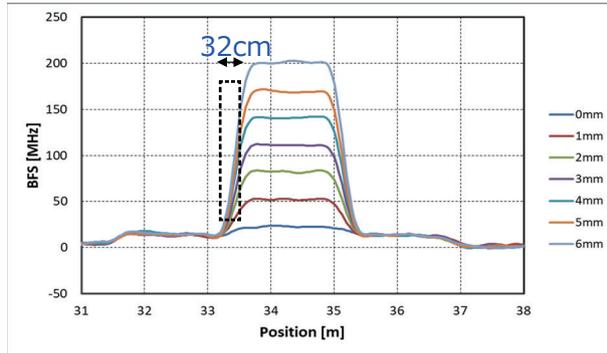


図4 空間分解能評価

(2) RC試験体の载荷実験による性能検証

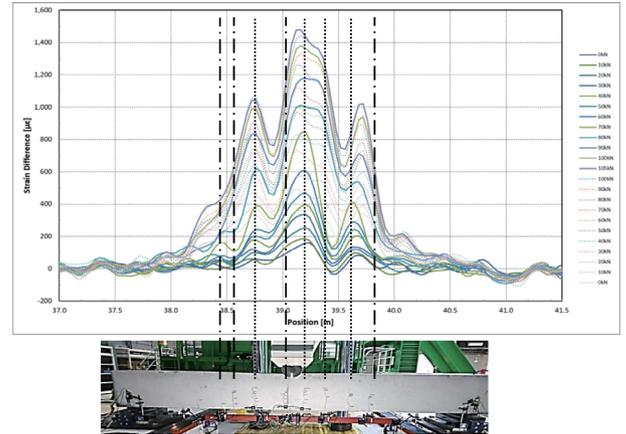
本装置を用いてRC試験体に载荷したときの歪み分布計測実験を行った。本実験は、あらかじめ微小なひび割れが発生しているRC試験体に対して、载荷量を変化させたときのひび割れ位置及びその拡がり具合の変化をどの程度検知可能かを確認することを目的とする。写真1に実験に使用した载荷実験装置(図上部:前田建設設備)とRC試験体(図下部)を示す。RC試験体(全長3.3m)下面には光ファイバーが取り付けられ、前後に余長の光ファイバーを追加して全50mで計測を行った。

歪み分布計測は载荷条件ごとにRC試験体に発生しているひび割れ発生状況を記録しながら行った。図5に载荷条件ごとの計測した歪み分布(図上部)とRC試験体上のひび割れを観測した結果(図下部)を示す。

図5では、空間分解能30cmではひび割れ位置に対応した歪みピークが観測できている場合(点線)と観測できていない場合(一点鎖線)が混在し、より正確なひび割れ判別・位置特定を実現するためには、更に空間分解能の改善が必要であることが示唆された。



写真1 载荷試験装置(前田建設)



点線:ひび割れと歪みピークが対応する位置
一点鎖線:ひび割れに対応する歪みピークが観測されない位置

図5 RC試験体のひび割れ発生と歪み分布

(3) 自己遅延ホモダイン方式による空間分解能10cmの可能性検討

ひび割れ検知に要求される空間分解能10cmを実現するためには、前節と同様に、まず送信ブロックにはFUTに入力する光パルスをもっと短パルス化する必要がある。具体的には、入力光パルスの時間幅を少なくとも1ns(空間分解能1mでは10ns)まで短くする必要があるが、これは光通信技術を転用することにより容易に実現可能である。受信ブロックも、前節と同様、ヘテロダイン干渉計の周波数シフト量を増やし1GHz以上にすれば、原理上10cmの空間分解能を達成可能であるが、1GHzの周波数シフトを生じさせる光学部品は現時点では入手困難であり現実的ではない。そこで、この制約を除去するために、周波数シフターを必要としない自己遅延ホモダイン干渉計を用いた受信ブロックを検討している⁴⁾。その構成を図6に示す。FUTの入力端部に戻ってくるブリルアン散乱光は、自己遅延ホモダイン干渉計に入力され、2分岐された信号の一方に適切な遅延(τ)が施された後、再び合波されホモダイン干渉信号として出力される。FUTの歪みや温度変化によるブリルアン散乱光の周波数シフトは、干渉信号の強度変化として現れるので、干渉信号の強度変化からブリルアン散乱光の周波数シフトを知ることが可能である。前節のヘテロダイン干渉型に比べ、光学部品に関する制約がない分実装は簡単となる。一方で、ブリルアン周波数シフトを算出する過程で、干渉信号の強度変化から位相変化を抽出する付加的な演算プロセスが加わるため、ここでの誤差累積をいかに最小化するかが開発のポイントとなる。

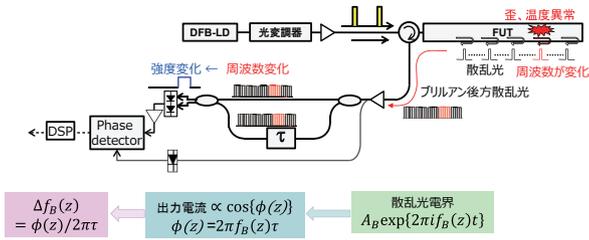


図6 自己遅延ホモダイン干渉計を用いたBOTDR装置構成

自己遅延ホモダイン干渉計を用いたBOTDR装置は、現在試作中であり、光ファイバーに部分的な模擬歪みを与えた基礎実験で20cmの空間分解能を実証している⁴⁾。2019年度中には空間分解能10cmも実現可能な見込みである。

振動測定の性能向上(>100Hz)への取組み

SDH-BOTDR方式は、リアルタイム性に優れた高速測定を特長としているが、空間分解能や測定距離レンジを限定したとしても、性能要件である100Hzの測定速度(サンプリング周期)には届かないことも考えられる。これに対しては、現在、橋梁に取り付けた光ファイバーをそのまま利用可能な、振動測定に特化した光ファイバーセンシング技術を開発中であり、SDH-BOTDRとの併用を視野に検討を進めている。

まとめ

本稿では、前田建設と進めているRC橋梁ヘルスマモニタリングの概要と、適用するOKIの光ファイバーセンシング技術の開発状況を述べた。供用の初期段階で実施するひび割れ幅測定に要求される10cmの空間分解能に対しては、SDH-BOTDR方式を改良することにより現行の1/3となる30cm空間分解能を実現した。また、前田建設と共同で実施したRC試験体の載荷実験では、完全ではないものの空間分解能向上によりひび割れ検出が可能となる見通しを得た。さらに、10cmの空間分解能実現に向け開発を進めている自己遅延ホモダイン検出方式の概要、並びに振動測定の性能向上に関する開発方針を述べた。

謝辞

本開発の橋梁モニタリング技術に関する情報提供及び共同実証実験で多大なるご協力を頂きました、前田建設工業殿に感謝いたします。 ◆◆

参考文献

- 1) 小泉健吾、村井仁:社会インフラモニタリング向け分布光ファイバーセンシング技術、OKIテクニカルレビュー第226号、Vol.82、No.2、pp.32-35、2015年12月
- 2) OKIプレスリリース OKIと前田建設、光ファイバーの計測高速化により橋梁モニタリングの適用範囲を拡大、2019年2月12日
<https://www.oki.com/jp/press/2019/02/z18084.html>
- 3) 石田雅博ほか:モニタリング技術の活用による橋梁維持管理の高度化・効率化、土木技術資料 59巻、1号、pp.18-21、2017
- 4) K. Koizumi and H. Murai: High-Speed and High-Spatial Resolution BOTDR Based-on Self-Delayed Detection Technique, 26th International Conference on Optical Fiber Sensors, TuE17, 2018

●筆者紹介

- 羽田匡彦:Tadahiko Haneda. 情報通信事業本部 社会インフラソリューション事業部 ソリューション開発部
浅林一成:Issei Asabayashi. 経営基盤本部 研究開発センター 先端基盤技術研究開発部
小泉健吾:Kengo Koizumi. 経営基盤本部 研究開発センター 先端基盤技術研究開発部
村井仁:Hitoshi Murai. 経営基盤本部 研究開発センター 先端基盤技術研究開発部

TIP 【基本用語解説】

BOTDR

(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry)

Brillouin光時間領域反射測定法は、光ファイバーに光パルスを入射したときに発生する後方散乱光の一つである「 Brillouin散乱光」の周波数が温度や歪みに比例して変化するという特性を利用した光ファイバーセンシング方式。