

論文 光ファイバと複合繊維を用いた混合センサによる損傷検知

呉 智深*1・高橋 貴蔵*2

要旨:インフラ構造物のヘルスマonitoringに B-OTDR のような分布型光ファイバセンサが用いられている。このセンサでは構造物に存在している損傷分布を検出するのに非常に有効である。一方、炭素繊維の導電性状を利用した構造物ヘルスマonitoring用のインテリジェント炭素繊維センサも提案され注目を集めている。本研究ではまず異なる特性の炭素繊維をハイブリッド化した複合繊維センサを提案した。また、複合繊維センサの中に光ファイバセンサを埋め込んだ混合センサを用いて炭素繊維補強筋により補強されたコンクリート梁の損傷モニタリングも行ったのでここで報告する。

キーワード: 光ファイバ, ブリルアン散乱光, 電気抵抗, ヘルスマonitoring

1. はじめに

筆者らはこれまで B-OTDR 法を用いた光ファイバセンシングによるヘルスマonitoringに関する研究を続けてきた。しかしながら、①現在の B-OTDR 法はひずみ計測の距離分解能が最小で 1m であるため、非常に局在されている局所的な損傷を正確に測定できない可能性がある、②光ファイバをインフラ構造物内部に敷設する際、コンクリートの打設時に破断する恐れが考えられ保護材を必要とする、といった問題も明らかにされた^{1) 2)}。

そこで、光ファイバセンサの問題点を解消するために簡便安価な方法であり、かつ材料自らが破壊に対して自己診断機能を持つインテリジェント材料に着目した。この目的に対して炭素繊維センサが破壊を自己診断でき光ファイバの保護材として用いられる有望なインテリジェント材料になり得る可能性を有している。これは導電性繊維である炭素繊維 (CF) を用いることで、CF の変形に伴うひずみの増加や破断に伴う損傷の進行に対して CF の電気抵抗増加で損傷を検知する方法である。本研究では電気抵抗変化を明確にし、長期利用可能な炭素繊維センサ作成のために、複数の破断ひずみを有する炭素繊維をハイブリッド化した複合繊維センサを

提案した。

また、光ファイバセンサを複合繊維センサ内に通すことで、2 つのセンサを同時に用いる混合センサの利用に対する検討も行った。この混合センサは構造物内部をモニタリングすることを目的としているために、センサの役割の他にコンクリート補強筋 (FRP 筋) としての役割を持たせることでコンクリート内部に埋設する。

混合センサの目的としては i) 光ファイバセンサでは FRP 筋の軸方向の変位量やひび割れ幅の計測を行い、損傷箇所の特定を行う。ii) 複合繊維センサでは光ファイバセンサで過小評価される可能性のあるひび割れといった局所損傷、またはそれによる構造物の変状の検知と光ファイバの保護を行う。

2. 分布型光ファイバセンシング

2.1 光ファイバの概要

はじめに本実験で用いた光ファイバの仕様について説明する。本実験ではシングルモードファイバ (品名: SM・10/125・0.5) を用いた。この光ファイバは軟質プラスチックとポリアミド樹脂で被覆されたものである。光ファイバの仕様を表-1 に示す。

*1 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科 工博 (正会員)

*2 茨城大学大学院 理工学研究科都市システム工学専攻

表-1 光ファイバの仕様

シングルモードファイバ	コア径	クラッド径	伝送損失
	9.5 μm	12.5 μm	0.5 dB/km
	質量	許容曲げ半径	被覆
	0.7 kg/km	30 mm以上	軟質プラスチック ポリアミド樹脂

2.2 B-OTDR の概要

本実験において、光ファイバセンサのひずみ測定にはひずみ損失アナライザである B-OTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) を用いた。B-OTDR の仕様を表-2 に示す。実験では B-OTDR の加算回数を 2^{14} 、測定周波数掃引間隔 10MHz で計測を行なった。

B-OTDR は光ファイバの長さ方向に発生したひずみを連続的に測定する装置である。従って構造物と光ファイバを一体化し、構造物に発生したひずみを光ファイバを介して計測することで、構造物に発生した変状をモニタリングすることが可能になると期待されている。

表-2 B-OTDR の仕様

読み取り分解能	距離	Min. 5cm
	ひずみ	0.0001%
ひずみ測定範囲		約-1.5~+1.5%
パルス幅		10ns
距離分解能		1m
ダイナミックレンジ		2dB
ひずみ測定制度		$\pm 0.004\%$
再現性		$< 0.04\%$
距離測定確度		$\pm (2.0 \times 10^{-5} \times \text{測定距離(m)} + 0.2 \times \text{サンプル分解能(m)})$

2.3 B-OTDR のひずみ測定基本原理

B-OTDR に接続されている光ファイバの片端からレーザーパルス光を入射すると、図-1 に示すような後方散乱光が発生し、入射端の計測器に戻ってくる。光ファイバにひずみが生じるとブリルアン散乱光強度が最大になる周波数はシフトする。B-OTDR はこの周波数シフト量が光ファイバの長さ方向のひずみに比例して変化するという特性を利用して実現できたものである (図-2 参照)。

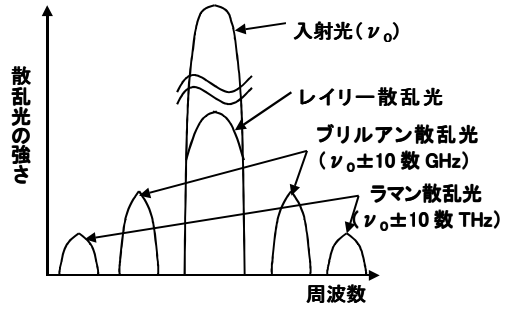


図-1 光ファイバに発生する散乱光

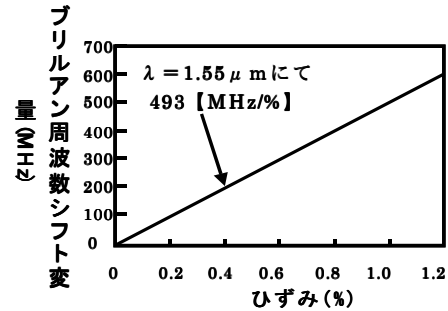


図-2 ブリルアン周波数のひずみ依存性

また、ひずみの発生位置の特定は、光ファイバ内に光を入射してからブリルアン後方散乱光が受信部で計測されるまでの到達時間 (ひずみ発生位置までの距離 $\times 2$ / 入射パルスの速度) から求めている¹⁾²⁾³⁾。

3. 複合繊維センサの概要

以下に複合繊維センサの概要を示す (図-3 参照)。連続した炭素繊維を強化材とする複合材料に、電気抵抗の変化を測定しながら引張荷重を加えていくと、低い荷重の間は電気抵抗の増加は少ないが、最大荷重の 50~80% の荷重を超えると電気抵抗に大きな増加が生じるようになる。これは、荷重の低い間は、導電性である炭素繊維が伸びることで小さな電気抵抗の増加が生じているだけであるが、荷重が高くなるにつれて、炭素繊維が徐々に切れ始めるために大きな電気抵抗の増加が生じるためである。このような状態にでも、破断伸び率の異なる炭素繊維をハイブリッドすることで、構造物としての機能を保持することができ、また電気抵抗変化を明確にすることができる。これを利用すれば、電気抵抗の変化を測定するだけで、致命的な破

壊に至る前に危険予知できることになる。また、急激に電気抵抗が増加するひずみ値は、炭素繊維の種類によって異なるため、破壊予知の感度レベルの調整を行うことが可能である⁴⁾。

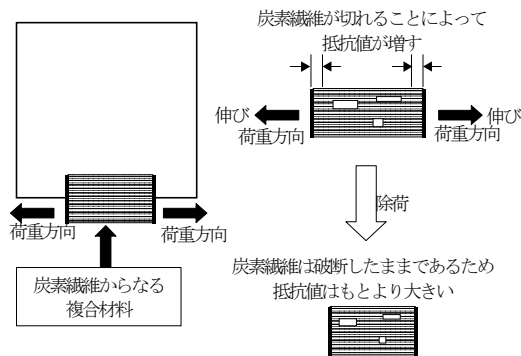


図-3 複合繊維センサの破壊予知の原理

4. 複合繊維センサの引張試験

4.1 引張試験の実験概要

図-4 に試験体を示す。試験体の長さを1250mmとし、両端に導電性接着剤（ドータイト）で電極を設け、電気抵抗測定用端子を半田で接着する。引張試験機では、両端300mmずつチャック補強し、万能試験機を用いて約2kN/minのクロスヘッド速度で加力し負荷・除荷繰り返し載荷試験を行う。試験体のチャック部分は金属製パイプ内に試験片をいれてブライスター（膨張性モルタル）で固定したあとに、パイプごと引張試験機の治具に取りつける。

ひずみの測定は、試験片表側と裏側（両端と中央）に貼りつけた電気抵抗ひずみゲージを用いて行う。また、同時に試験体に一定電流を通电して電圧変化を測定することによって電気抵抗変化を求める。

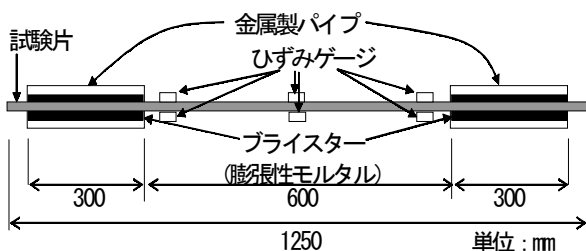


図-4 引張試験体

4.2 試験体に用いる繊維の概要

試験体には非導電性であるアラミドと、導電性である C1, C5, C8 を用いてハイブリッド化した。繊維の特性を表-3に示す。

本実験で用いる複合繊維センサ（ロッド）の積層数と断面積を表-4に示す。また、積層順を図-5に示す。積層の順番としては弾性率の高いものから順に中央に配置した。最も中央に位置する部分にはアラミドを2層配置した。

表-3 繊維の特性（補償値）

	F(kN/mm ²)	E(kN/mm ²)	設計厚さmm	ε
C1	4.9	230	0.0833	0.0213
C5	2.75	392	0.1105	0.0070
C8	3.53	590	0.1179	0.0060
アラミド	2.8	103	0.1121	0.0272

表-4 積層数

	C8	C5	C1	アラミド	合計
積層数	2	2	2	40	46
断面積(mm ²)	0.236	0.221	0.167	4.484	5.108

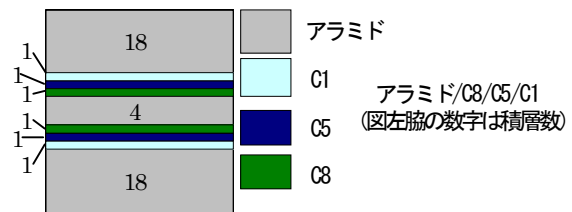


図-5 繊維の積層断面図

4.3 引張試験の実験結果

引張試験の実験結果をグラフにしたものを図-6、初期状態の拡大図を図-7に示す。縦軸に荷重、横軸（上）に複合繊維センサの電気抵抗変化率、横軸（下）に全ひずみゲージの平均値をとっている。ここで抵抗変化率は電気抵抗値の変化量を初期抵抗値で割った値であり、%で表示してある。実験では高弾性炭素繊維であるC8が破断する前（20kN）、C8・C5が破断した後（36kN）、C1が破断した後（50kN）に10kNまで除荷し、その後破断するまでに荷重を加えた。

図-6からはC8・C5の破断と思われる30kN付近（4700μ）、C1の破断と思われる55kN付近（9700μ）で大幅な抵抗変化率の増加を確認する事が出来た。C1だけでは計測が困難とされる

領域においてもハイブリッド化することで明確に電気抵抗変化を示すことが可能となった。

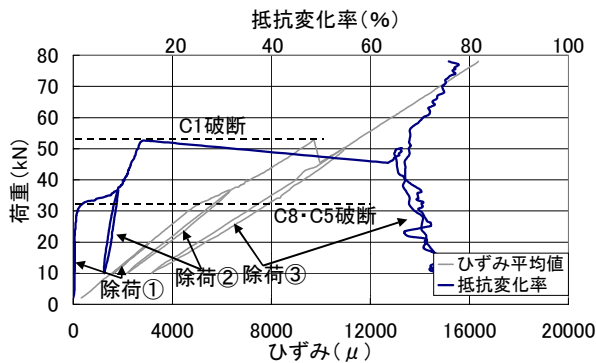


図-6 荷重-ひずみ・抵抗変化率関係

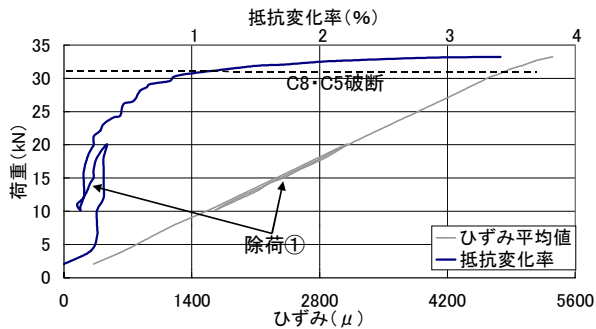


図-7 ひずみ・抵抗変化率関係 (拡大図)

また、図-7では20kN前で負荷・除荷を行ってもほぼ直線的にしか抵抗変化率は変化しなかったが、20kN(ひずみ：3000 μ)以降は徐々に増加傾向を示していることが確認された。このことから、完全にC8が破断しなくても抵抗の変化を示す事ができるといえる。これは、繊維の変形と微視的な破断が進行したことによるものと考えられ、将来的には構造物に加わる载荷状況を同定することにつながると期待される。すなわち、より高弾性のものをセンサとしてハイブリッドに用いれば更に低ひずみ領域での抵抗変化を捉えることができると期待される。以上のことからハイブリッドに用いる炭素繊維を目的に合わせて選択することで、必要とされるセンサを作成する事ができると期待される。

また、除荷後に注目すると抵抗変化率が元の値までは戻れずに、炭素繊維の破断による残留を確認する事が出来た。

5. 光ファイバセンサと複合繊維センサの コンクリート梁内部のモニタリング実験

5.1 コンクリート梁供試体の概要

図-8に供試体概要を示す。複合繊維センサ機能を有したロッドは梁供試体内部に補強筋として埋設し、光ファイバセンサはロッド内に全面接着する。複合繊維センサに関してハイブリッドの種類から計測法まで第4章の引張試験と同様である。光ファイバセンサは2本のロッドの中と比較用にコンクリート供試体側面に1本敷設する。それぞれ別に検討するため光ファイバセンサの間にはあそびを1500mm設ける。

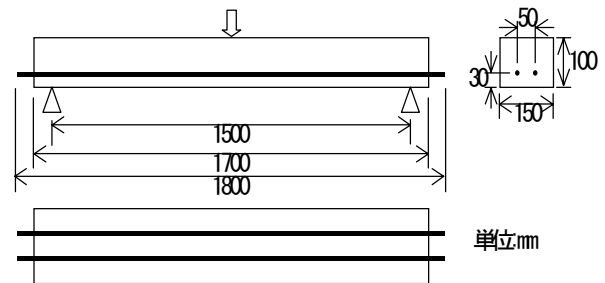


図-8 供試体概要

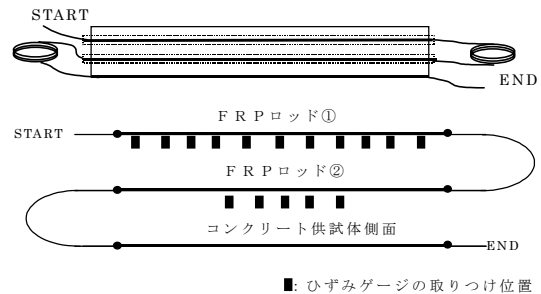


図-9 敷設状況と敷設順番

光ファイバセンサでは一定ひずみ領域においては精度の高い測定ができることが分かっている。本実験では局部にひずみが集中することを目的とするために、载荷方法は3点曲げ試験とする。荷重は供試体が破壊するまで単調に増加させる。ただし、光ファイバで計測している間は荷重を一定に保つ。

光ファイバセンサを図-9に示すように敷設する。側面に敷設している光ファイバは補強筋と同位置の高さに敷設してある。START 点に

近い光ファイバセンサを FRP ロッド①, 遠いほうを②とし, 最後にコンクリート供試体側面とする。

ロッドには比較のためにひずみゲージを FRP ロッド 1 の方には 10cm 間隔で 11 ヶ所, ②の方には 10cm 間隔で 5 ヶ所取りつけた。

5.2 曲げ試験の実験結果

(1) 複合繊維センサ

ロッド①, ②の電気抵抗変化率とロッド中央のひずみ値, そしてロッド①に取り付けた全てのひずみゲージの平均の比較グラフを図-10 に, その拡大図を図-11 示す。

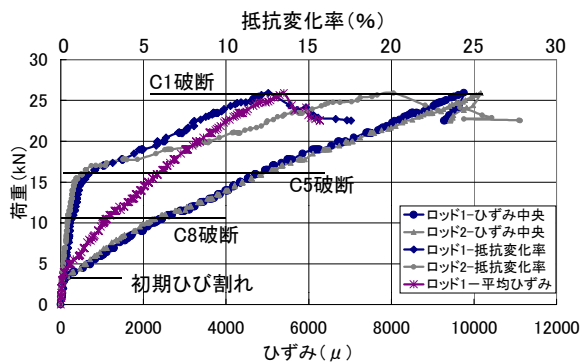


図-10 複合繊維センサの実験結果

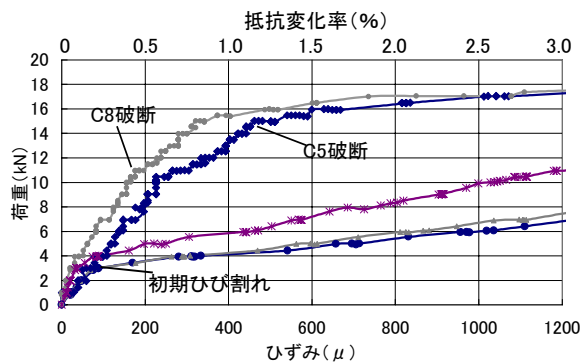


図-11 複合繊維センサの拡大図

電気抵抗の変化率はロッド全長に生じるひずみと破断によって増加する, すなわち軸方向変位量により増加する。したがって, 本来ならばロッドの変位量を用いて検討を行う必要があるが, ここでは変位量をロッド全長で平均した値である, ひずみの平均値を用いて検討を行う。

コンクリート内部の複合繊維センサでは平均ひずみが 1000, 2300 μ 付近で増加に変化が見られた。これらの増加は C8, C5 の破断によるものと考えられる。材料学の観点から引張試験では繊維はワイブル分布に基づいて破断するが, 曲げ試験の場合はひび割れ等の損傷が局所に集中したことでひずみの平均値が微小な領域でも電気抵抗変化率に変化が生じたと考えられる。

引張試験ではひずみが 4700 μ 付近で抵抗変化率の増加に大きな変化が現れた。ロッド①の中で最も大きなひずみが生じた中央の値に着目すると, C5 破断時において 4700 μ となっている。この値は引張試験の値と等しく, 先に電気抵抗の変化はロッド全長の変位量の影響を受けると記述したが, この結果からは最もひずみが大きく生じた場所が電気抵抗の変化に影響を及ぼしていると考えられ, 局所的な損傷検知センサとして期待が持てる。

(2) 光ファイバセンサ

B-OTDR での計測は光ファイバ全長のひずみを 10cm ピッチで計測する。B-OTDR で計測されたひずみ分布を図-12 に示す。

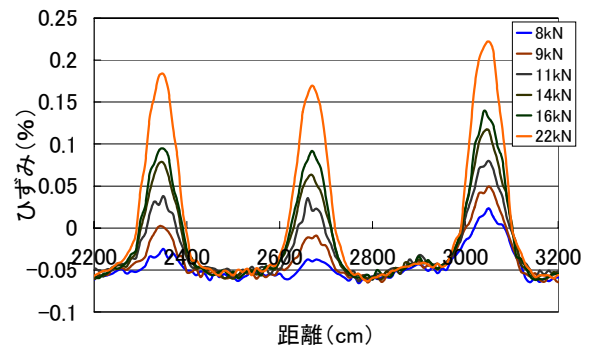


図-12 B-OTDR によるひずみ分布

光ファイバセンサでは距離分解能 100cm 内に発生するひび割れのトータル幅を計測する為に, 各光ファイバセンサに発生しているひずみの中で最大となるひずみを用いてひび割れ幅に換算する。ひずみをひび割れ幅に換算する場合, 以下の式 (1) を用いる。

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{a} = \frac{\Delta_{cr} + \Delta_c}{a} \quad (1)$$

Δ_{cr} = コンクリートのひび割れ幅, Δ_c = コンクリートの弾性変形, a = ゲージ長 (距離分解能)

通常コンクリートの引張領域において, 弾性変形はひび割れの変形に比べて非常に小さい関係にあるため, $\Delta_c = 0$ と近似すれば, $\Delta_{cr} = a\varepsilon$ としてひび割れ幅とする。

光ファイバセンサで計測されたひび割れ幅は補強筋と同じ高さのコンクリート供試体側面に固定されたパイ型変位計とロッド①に付けたひずみゲージの値から求めたロッドの軸方向変位とで比較する。そのグラフを図-13に示す。

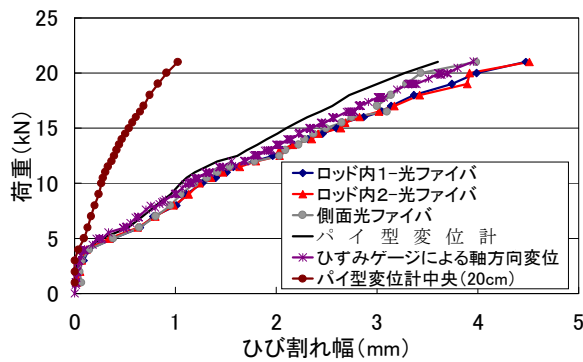


図-13 光ファイバセンサによるひび割れ計測

ロッド内とコンクリート供試体側面に敷設された光ファイバセンサは距離分解能 100cm 内に発生したひび割れのトータル幅を精度よく計測している事がわかる。ゲージ長 20cm のパイ型変位計と比較すると分かるように, 光ファイバでの計測はトータルひび割れ幅である為, 一つ一つのひび割れに対するひび割れ幅の検討を行う事は出来ない。しかし, ロッド1に取り付けた全てのひずみゲージから求めたロッドの軸方向変位量は光ファイバセンサと近い値を示していることから, コンクリート内部という検査が難しい場所において補強筋に発生しているひずみを精度よく計測する事ができるといえる。

また, ひび割れ等に伴うひずみの発生位置は図-12のひずみ分布から特定する事ができる。

6. まとめ

(1) 複合繊維センサでは弾性率や破断ひずみの異なる炭素繊維をハイブリッドすることで, 低ひずみ領域における複合繊維センサの変形を電気抵抗変化率で捉えることに成功した。しかし, 電圧計の精度から荷重と電気抵抗変化率との線形関係を見出すことは出来なかった。しかしながら構造体の荷重状態の同定を行うことが出来るようになると期待される。

(2) 複合繊維センサでは弾性率や破断ひずみの異なる炭素繊維をハイブリッドすることで, 炭素繊維の逐次破断により荷重状況に対する複合繊維センサの電気抵抗変化率の変化が非常に明確にすることが出来た。そして, このことより構造体の損傷モニタリングを行うことができる可能性を見出した。しかしながら, 損傷の発生場所を特定する事は出来なかった。

(3) 複合繊維センサで局所的な損傷を計測することができる可能性を見出した。

(4) 補強材内部に敷設した光ファイバセンサにより補強材に発生しているひずみ分布を連続的に計測することに成功した。また, コンクリートひび割れなどの不連続性状による光ファイバケーブルの折り曲げや過大な局所変形を避けることができた。

参考文献

- 1) 呉智深, 高橋貴蔵他: 光ファイバセンサによるコンクリート曲げ部材のひび割れモニタリングに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp. 409~414, 2000. 6
- 2) 石井豪, 呉智深: 歪モニタリング用光ファイバセンサの測定長特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, 2001. 6
- 3) 倉嶋利雄, 佐藤昌志: 光ファイバを用いた構造物のひずみ分布計測, JSCE, Vol. 82, pp. 18~20, 1997. 12
- 4) 武藤範雄他: CFGFRP 複合材料の電気抵抗測定による損傷検知, 日本機会学会論文集 (A 編), Vol. 60, No. 576, pp. 1721~1728, 1994. 8