

赤外線放射温度計による構造物に埋め込んだ光ファイバの破断点検出

Infrared-thermometer-based break-point detection of optical fibers embedded in structures

○萩原園子¹、李熙永¹、越智寛²、松井孝洋²、松本幸大³、田中洋介⁴、中村一史⁵、水野洋輔¹、中村健太郎¹

¹東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所、²東レ、³豊橋技科大、⁴農工大、⁵首都大

○S. Hagiwara¹, H. Lee¹, Y. Ochi², T. Matsui², Y. Matsumoto³, Y. Tanaka⁴, H. Nakamura⁵, Y. Mizuno¹, and K. Nakamura¹

¹FIRST, IIR, Tokyo Tech, ²Toray Industries, Inc., ³Toyohashi Univ. Tech., ⁴Tokyo Univ. Agr. Tech., ⁵Tokyo Metr. Univ.

E-mail: shagiwara@sonic.pi.titech.ac.jp

1. はじめに

近年、高度経済成長期に集中的に建造された構造物（建物・トンネル・橋梁・ダム・パイプラインなど）の地震による損傷や経年劣化が社会問題となっている。そこで、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の現場成形によって、損傷・劣化した箇所を補修する技術が注目を集めている。CFRP の現場成形法の一つとして、真空含浸法（VaRTM 成形）^[1]が知られている。これは、成形型の上に積層した強化繊維基材をプラスチックフィルムに封入して真空吸引した後、液状樹脂を注入・含浸して硬化させる成形法である。最近、我々は、VaRTM 成形の真空封入の前に予め光ファイバを配置しておくことで、CFRP 中の任意の位置にセンシング用の光ファイバを埋め込む技術を開発した。ここでは、万一 CFRP が補強対象（鋼材など）から剥離するなどで埋め込んだ光ファイバが破断した場合に、迅速に破断点を検出する手法について検討する。

従来、光ファイバの破断点を検出する手法として最も広く使われてきたのは、光パルス伝搬時間によって位置を分解する光時間領域反射計（OTDR）^[2]である。また、光周波数領域反射計（OFDR）^[3]や光相関領域反射計（OCDR）^[4]、多重フレネル反射に基づく干渉計^[5]も破断点検出に適用可能である。どの手法も数秒～数分程度の測定時間で精度よく破断点の位置を決定できる上、システムのコストも低下しつつある。しかし、光ファイバが埋め込まれた現場では、実用上大きな課題がある。それは、例えば「ここから 13.5 m 遠方で光ファイバが破断している」と判明しても、それが実際に構造物においてどの箇所なのか直には分からない、という問題である。

そこで本発表では、この問題を解決すべく、赤外線放射温度計（IRT）^[6, 7]を用いた光ファイバの破断点検出法を提案する。光ファイバの破断点では光のエネルギーが熱に変わり、周囲の温度が高くなるため、これを IRT で検出するという原理である。本手法は、光ファイバの破断点の位置を構造物のどの箇所なのかも含めて精度よく決定できる上、低コストかつリアルタイムに動作するため、現場応用に適しているといえる。以下の実験では、実際に CFRP に埋め込んだ光ファイバを破断させ、その位置を検出することで、本手法の有用性を示す。

2. 実験系

詳細は省略するが、VaRTM 成形により、各厚さ約 0.5 mm の CFRP 層をテーパ状に 7 層、厚さ 12 mm の鋼材の上に積層し、幅 39 mm の短冊状に切断した。その際、Fig. 1(a)のように最下層の CFRP と鋼材の境界に、3 本のシリカ単モード光ファイバ（SMF; コア径 8 μm 、クラッド径 125 μm 、外径 250 μm ）を平行に埋め込んだ。埋め込んだ箇所のファイバ長は 550 mm であった。この状態で、3 点曲げ試験を行い、CFRP が剥離し光ファイバが破断するまで、試験体の中央付近に上方から荷重を印加した（Fig. 1(b)）。本実験では、3 本の破断した SMF のうち、手前（中央から 9 mm 外側に寄っている）の 1 本の SMF を用いた（Fig. 1(c)）。

波長 1551 nm の半導体レーザの出力光を、エルビウム添加光ファイバ増幅器（EDFA）により任意のパワーまで増幅し、CFRP に埋め込んだ SMF に入射した。その後、SMF の破断箇所における CFRP 層表面の温度を IRT によって測定した。CFRP 表面の放射率は 0.85 とした。室温は約 26 $^{\circ}\text{C}$ であった。

3. 実験結果

まず、約 27 dBm (= 500 mW) の光を入射してから 180 秒経過後の IRT 画像を Fig. 1(d)に示す。破断点を中心に高温となり、高温部は光ファイバの長手方向に沿って楕円状に広がっていた。これは、CFRP の熱的異方性に起因していると考えられる（SMF と CFRP の熱伝導率の違いでは説明できない）。また、高温部が、埋め込んだ 3 本の SMF のうち手前の SMF の破断箇所に対応していることも確認できた。

次に、各入射パワーにおける、破断点付近の温度変化の時間

依存性を Fig. 2(a)に示す。入射パワーに関わらず、時間とともに温度変化は大きくなり、150 秒程度でほぼ一定となった。温度変化の収束値は、入射パワーが高いほど大きかった。一般に、隣接した高温物体と低温物体の温度差の時間変化は指数関数で与えられる。そこで、指数関数によるフィッティング曲線も表示したところ、測定値と良い一致を示した。

最後に、光を入射してから 180 秒後の温度変化の大きさを、入射光パワーに対してプロットしたのが Fig. 2(b)である。横軸の光パワーは、線形単位（mW）で表示した。入射光パワーが増加するにつれ、温度変化も線形に増加し、その依存係数は 9.7 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ であった。以上より、入射光パワーが高いほど、コントラストがより高い状態で破断点を検出できることが示された。

本実験で得られた定量的な数値（飽和時間・依存係数）は、SMF を埋め込む対象や状況によって変化すると考えられる。今後は、実用化に向けて、この点を明らかにしていく計画である。しかし、構造物に埋め込んだ光ファイバの破断点を低コストかつリアルタイムに検出する手法として、本手法が有用であるという結論に変わりはないといえる。

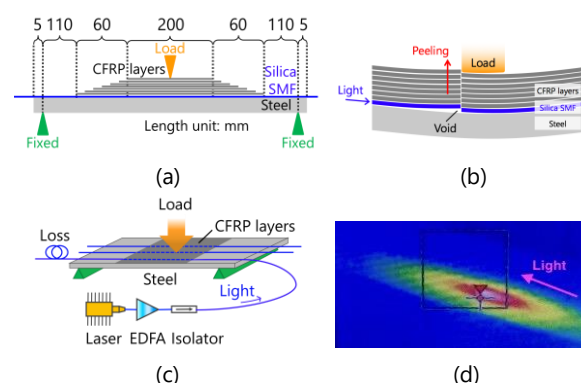


Fig. 1 (a) Sample geometry. (b) Schematic of fiber breakage caused by peeling of CFRP layers. (c) Experimental setup. (d) IRT image taken at 27-dBm power, 180 s after light injection.

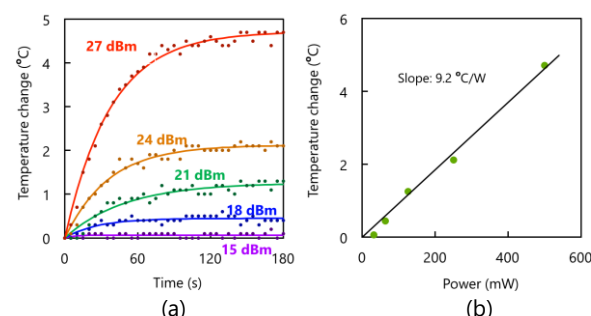


Fig. 2 (a) Temporal variations of temperature change at 5 different incident powers. (b) Temperature change (at 180 s after light injection) plotted as a function of incident power.

参考文献

- [1] D. Bender et al., Comp. Sci. Technol. **66**, 2265 (2006).
- [2] M. K. Barnoski and S. M. Jensen, Appl. Opt. **15**, 2112 (1976).
- [3] W. Eickhoff and R. Ulrich, Appl. Phys. Lett. **39**, 693 (1981).
- [4] Y. Mizuno et al., Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 072501 (2017).
- [5] Y. Mizuno et al., J. Lightw. Technol. **32**, 4132 (2014).
- [6] H. Krips, Stud. Hist. Philos. Sci. **17**, 43 (1986).
- [7] N. Hayashi et al., Appl. Phys. Express **6**, 076601 (2013).