プラスチック光ファイバの複合材料への超音波溶着
Ultrasonic welding of plastic optical fibers onto composite materials

東工大 [1], 東レ [2], 土木研 [3], 豊橋技科大 [4], 農工大 [5], 首都大 [6] ○島田 俊平 [1]　田中 宏樹 [1]　長谷部 和彦 [1]　林 寧生 [1]
越智 寛 [2]　松井 孝洋 [2]　西崎 到 [3]　松本 幸大 [4]　田中 洋介 [5]　中村 一史 [6]　水野 洋輔 [1]　中村 健太郎 [1]
Tokyo Tech[1], Toray[2], PWRI[3], TUT[4], TUAT[5], TMU[6] ○Shumpei Shimada[1], Hiroki Tanaka[1], Kazuhiko Hasebe[1], Neisei Hayashi[1], Yutaka Ochi[2], Takahiro Matsui[2], Itaru Nishizaki[3], Yukihiro Matsumoto[4], Yosuke Tanaka[5], Hitoshi Nakamura[6], Yosuke Mizuno[1], and Kentaro Nakamura[1]　E-mail: shimada@sonic.pi.titech.ac.jp

1. はじめに

近年、鋼構造物の経年劣化や地震による損傷が社会問題となっている。それらの効率的な補修・補強技術として、複合材料である炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を補強材として導入する手法が注目を集めている[1]。CFRP は軽量かつ高強度・高耐久性を有し、現場での取り扱いが比較的容易である。一方、補強箇所の健全性をモニタリングしたいという需要が高まっている。

モニタリング技術として期待されるのが、長距離に渡って歪の分布測定が可能な光ファイバセンシングである[2]。特に、コア径が大きく柔軟性に富むプラスチック光ファイバ（POF）を用いることで、現場での扱いが容易となり、断線の可能性も低減できると期待される[3]。従来、CFRP 表面に POF を固定する際は接着剤を用いていたが、接着剤が硬化するのに時間がかかる、CFRP の変形を接着剤層が吸収してしまう、などの問題点があった。

そこで本発表では、超音波溶着技術[4,5]を用いて POF を CFRP 表面に固定する手法を提案、実証したので報告する。実験の結果、短時間で POF を CFRP に固定することに成功した。溶着時間に対する POF の光伝搬損失の変化も調査した。

2. 原理と実験方法

超音波溶着では、2 つの熱可塑性プラスチックを重ね、予圧を加えた状態で数 10 kHz の超音波振動を印加する。このとき、プラスチック同士の接合面に振動による摩擦熱が生じ、互いに溶融し結合するといわれている[4]。約 100℃の比較的低いガラス転移温度を有する POF 独自の手法であり、ガラス光ファイバへの適用は困難である[5]。

今回用いた POF サンプル（コア径: 0.98 mm、クラッド径: 1.0 mm、650 nm 帯での伝搬損失: 0.25 dB/m）は、アクリル（PMMA; 熱可塑性）により構成される。一方、シート状 CFRP サンプル（厚さ：約 0.85 mm）は、母材が熱硬化性プラスチックであり CFRP 自体の溶融は困難である。しかし、適度な表面粗さを有する CFRP に対しては、溶融した POF が接着した。その際、CFRP の変形（歪・曲げ）に対して POF が追従することを確認した。熱可塑性プラスチックを母材とする CFRP を導入することで、接着強度は格段に向上すると考えられる。

POF の溶融に伴ってコアが変形するため、光伝搬損失が生じる。そこで、溶着時の透過光パワーの変化を実時間でモニタリングすることで、溶着時間（超音波振動を与えてからの経過時間）と光伝搬損失の関係を調査した。実験系を **Fig. 1** に示す。光源には波長 641 nm、出力 1.5 mW のレーザを用いた。振動子には、先端が平坦で円形のホーンを有するランジュバン型振動子（ホーン先端の直径: 30 mm、振動周波数: 29 kHz、振動振幅: 31 μm）を使用し、重量計により初期予圧を与えた状態で固定した。CFRP の下には振動を吸収するためのシリコーンゴムシートを設置した。また、高速カメラ（1000 fps）を用いて、溶着中の POF 断面の変化を観察した。

3. 実験結果

Fig. 2(a) に溶着時間に対する透過光パワーの変化を示す。初期予圧を 0.3、0.5、0.8、1.0、1.5、2.0 kgf と変化させ、光パワーは予圧をかけた状態における初期値で規格化した（縦軸は線形）。予圧が大きいほど POF の変形が顕著であるため、光パワーは急激に減少する傾向にあった。これを定量評価するため、透過光パワーが 0.8 に減少したときの溶着時間を各予圧に対してプロットしたのが **Fig. 2(b)** である。今回の実験条件では、予圧が 0.8 kgf を下回ると溶着時間が急激に増加することが分かった。また、**Fig. 2(a)** において、どの予圧に対しても最終的に光パワーは 0 になった。実験を繰り返し行うことにより、この原因は、POF が完全に潰れてしまうため（予圧が大きい場合）、および、POF が切断されてしまうため（予圧が小さい場合）、であることが明らかになった。後者は、POF の溶融が進むとホーンと POF との間にギャップが生じ、POF のたわみにより振動が局所的に印加されることが原因である。この機構は、予圧が小さい場合に、約 5 s 以降に見られる不安定な挙動の原因でもある。

次に、予圧を 0.8 kgf に固定し、高速カメラで溶着過程を観測した。光伝搬損失の溶着時間に対する変化（**Fig. 3(a)**）の 0, 0.3, 0.6, 1.0 s において、対応する POF の写真を **Fig. 3(b)-(e)** にそれぞれ示す。CFRP と接する面のみで溶融が進行する様子が分かる。これは、POF が滑らかなホーン先端部と接する箇所よりも POF と CFRP との境界で摩擦係数が大きく、より顕著に摩擦熱が生じているためと考えられる。この振る舞いは、不要な光伝搬損失を抑制する観点から好ましいといえる。

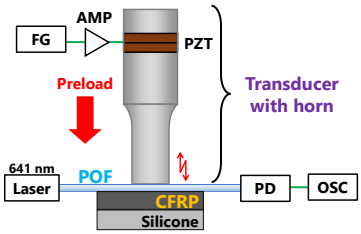

Fig. 1. Schematic of experimental setup. AMP: amplifier, CFRP: carbon-fiber-reinforced plastic, FG: function generator, OSC: oscilloscope, PD: photodiode, POF: plastic optical fiber, PZT: lead zirconate titanate.

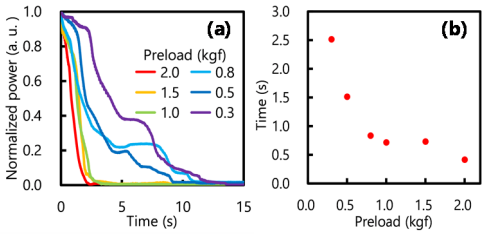

Fig. 2. (a) Temporal variations of normalized transmitted light power under different initial preloads. **(b)** Preload dependence of the time required until the normalized power decreases to 0.8.

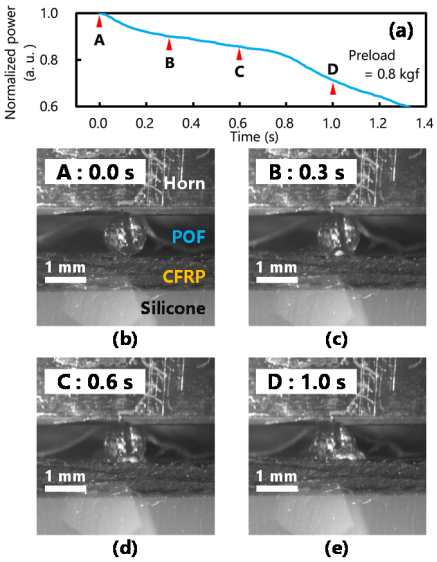

Fig. 3. (a) Temporal variation of normalized transmitted light power under a 0.8-kgf preload (magnified view of Fig. 2(a)). **(b-e)** High-speed micrographs of ultrasonically welded POF at 0.0, 0.3, 0.6, and 1.0 s, respectively.

以上より、POF と CFRP の超音波溶着を確認し、さらに溶着時間と光伝搬損失、予圧の関係を調査した。接着強度の定量評価を通じ、本手法を最適化するのが今後の課題である。本研究は平成 27 年度国土交通省建設技術研究開発助成制度の一部として行われた。

参考文献

[1] T. Hamouda, et al, *Comp. Part B: Eng.* **78**, 79 (2015).
[2] Y. Mizuno, et al, *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
[3] N. Hayashi, et al, *J. Lightwave Technol.* **32**, 3397 (2014).
[4] A. Benatar, *Power Ultrasonics*, eds. J. A. Gallego-Juárez and K. F. Graff (Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2015) p. 295.
[5] Y. Mizuno, et al, *Electron. Lett.* **50**, 1384 (2014).

© 2016年 応用物理学会