

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656084

研究課題名(和文)自己修復機能を持つ高強度かつ実用性が高いスマートFRPの研究開発

研究課題名(英文)The development of methods for self-healing of CFRP using optical fibers

研究代表者

鮑 力民 (BAO, Limin)

信州大学・学術研究院繊維学系・教授

研究者番号：10262700

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)： 複合材料の一種であるFRPは、比強度・比剛性に優れるため、幅広い分野で使用されている。FRPの多くは積層板として成形されて使用されているので、層間剥離やき裂が発生しやすい。材料の信頼性・安全性のために、光伝達機能を持つ光ファイバと修復剤として光硬化樹脂を用い、外部から連続的に修復剤を注入できる機構を持ったCFRPの自己修復システムを提案した。自己修復構造を持つCFRPを成形し、光ファイバと修復剤としてUV樹脂を用いて、き裂に対する自己修復を試みる。また、力学特性を調べることで、修復率に影響する因子を解明した。方法の拡充として、GTRPにおける低コストの自己修復システムも実現できた。

研究成果の概要(英文)： Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP), a composite material, is used in a wide range of fields because of its excellent specific strength and specific rigidity. Much CFRP is molded into laminated plates. CFRP is strong in each layer, particularly in the fiber direction; however, it is slightly weaker between layers and, therefore, it will experience degradation over time or develop delamination and cracks when it receives any external shock. To resolve this problem, we proposed a self-healing system for CFRP using optical fibers and UV-curable resin. In this study, self-healing CFRP samples were prepared and the effectiveness of repairing the inter-laminar fractures was confirmed by using optical fibers and UV-curable resin. In addition, we have also clarified the factors that affect the repair rate by determining the bonding strength of epoxy resin and UV-curable resin. From the experiment results, we were able to confirm the feasibility of the proposed self-healing system.

研究分野： 複合材料工学

キーワード： 自己修復 スマート材料 FRP

### 1. 研究開始当初の背景

複合材料の一種である繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastic : CFRP)は、比強度・比剛性に優れるため、幅広い分野で使用されている。CFRP の多くは積層板として成形されて使用されている。CFRP 積層板の層内は強いが層間ではやや弱く、経年劣化や外部からの衝撃を受けた場合、層間剥離やき裂が発生する。剥離やき裂が進展していくと、CFRP 全体で荷重を負荷することができず、健全材に比べて低い荷重で破壊に至る。CFRP 構造部品の運用中に剥離やき裂が発生することは非常に危険であるため、その材料の信頼性・安全性を向上する必要がある。

一方、生物体は傷口の自己修復機構を持っている。生物のように、材料自身が損傷を修復できれば、致命的な破壊への進展を防ぐことができる。すなわち、構造材料に自己修復機能を持たせることができれば、構造物の信頼性向上に貢献できると考え、剥離やき裂を自動的に修復できる自己修復 CFRP の研究が注目されている。

FRP の自己修復方法として、White らと本研究室などをはじめ、多くの研究が行われてきたが、修復率や実用性などで問題がまた多くあった。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、安全・安心社会の構築と省資源・省エネルギー社会の実現するために、高比弾性と比強度かつ自己修復性をもつ FRP の実現を試みる。人体の修復システムを模倣し、光伝達機能を持つ光ファイバと修復剤として光硬化樹脂を用い、外部から連続的に修復剤を注入できる機構を持った FRP の自己修復システムを提案する。自己修復機能をもつ FRP とシステムを試作し、その有用性と実用性を確認する。また、母材の樹脂と修復剤の力学特性を調べることで、修復率に影響する因子を解明する。

### 3. 研究の方法

光ファイバを用いた CFRP の自己修復方法  
本研究で提案した自己修復システムの概要を Fig.1 に示す。

CFRP 内に光ファイバを埋め込み、修復剤注入用の機構を組み込む。光ファイバには赤外線を通し、損傷有無のセンシングを行う。

CFRP に損傷が発生すると、光ファイバが破断しその情報を赤外線受光センサーが感知する。センサーの情報を基にポンプを起動させ、損傷部に修復剤を連続的に注入する。同時に赤外線から樹脂の硬化に対応した光に切り替えることで、光ファイバが破断した先から光が照射される。

損傷部に注入された修復剤は、光によって硬化し、損傷を修復する。

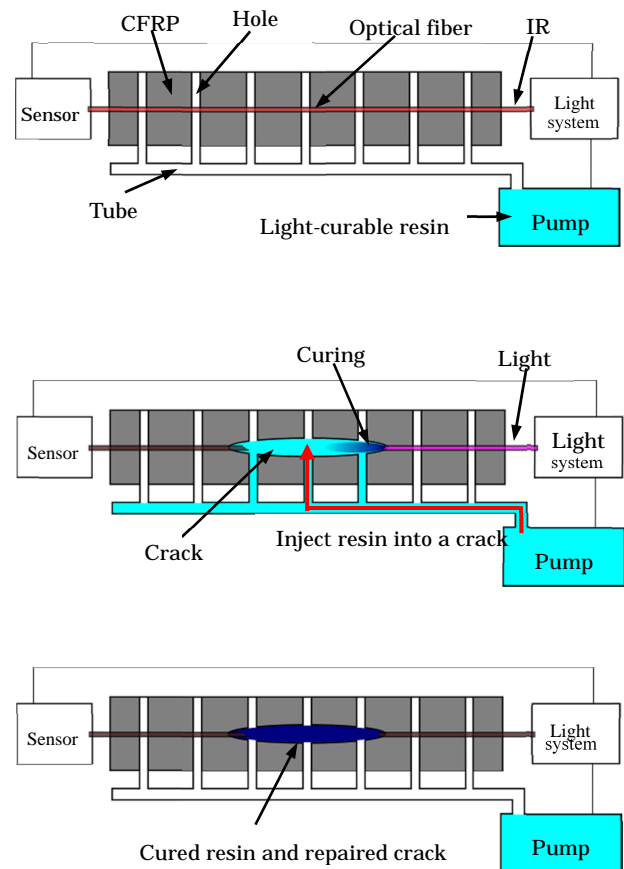


Fig.1 Repairing image of self-hearing system.

提案した自己修復システムは、光ファイバによる損傷のセンシングと、それに応じた光の照射によって損傷の発生後すぐに修復が開始される。さらに、光硬化樹脂は短時間で硬化し、アフターキュアが必要でないため修復も短時間で完了する。外部から連続的に修復剤を注入することで、損傷修復に十分な量の修復剤の注入が可能となる。

#### 4. 研究成果

##### (1) CFRP における新自己修復方法の影響要素と結果考察

自己修復構造を持つ CFRP は、炭素繊維クロス材(トレカクロス CO6343, 東レ(株))とエポキシ樹脂を用い、成形は VaRTM 法で行う。プラスチック製光ファイバ(エスカ:三菱レイヨン(株))を各試験片に埋め込む。樹脂注入用の微細穴は、強化繊維破断を発生させずに CFRP 成形時に導入した JIS K 7086 に準拠し、DCB 試験によってき裂を導入する。DCB 試験後の試験片に対して、チューブを介して修復剤(UV 硬化樹脂)をき裂に注入し、紫外線 LED を接続した光ファイバの外側に紫外線を導入し、修復を行った。修復後の試験片で再度 DCB 試験を行った。修復後 DCB 試験の Load-COD 線図を Fig.2 に示す。修復部分が破壊した時の荷重を  $P_{repair}[N]$  とする。  $P_{normal}$  (修復前の荷重) と  $P_{repair}$  を用いて式 から修復率  $\eta[%]$  を算出し、修復の有効性を評価した。

$$\eta = \frac{P_{repair}}{P_{normal}}$$

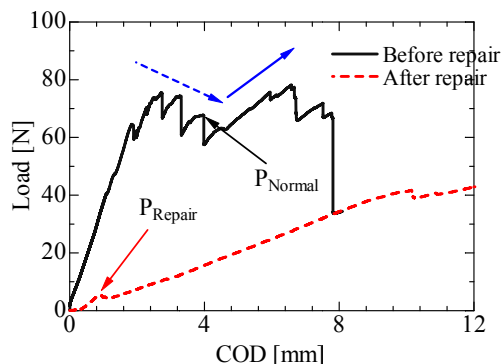


Fig.2 Load - COD curves of DCB test and DCB test after repair.

修復後 DCB 試験を行った試験片の修復部分の観察を行い、修復部分の幅と試験片幅から修復された範囲の割合を求めた。修復範囲のイメージ図を Fig.3 に示す。また、修復範囲  $B'$  [%] は式 から算出した。

$$B' = \frac{B_1 + B_2 + B_3}{B}$$

$B'$ : 修復範囲[%],  $B$ : 試験片幅,  $B_{1-3}$ : 修復部分幅

試験片の修復部分の表面写真の一例を Fig.4 に示す。Fig.4 上の丸が破断した光ファイバの先端を、線で囲まれた範囲が修復された部分を示している。調べた結果、CFRP の修復率は修復範囲と大きく影響していることが分かった。

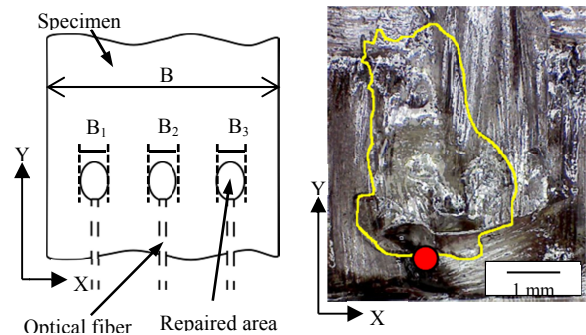


Fig.3 Schematic of repaired

Fig.4 Surface of repaired

CFRP の修復率は母材の樹脂および修復剤の接着強度と修復範囲に依存すると考え、本研究で使用した市販 UV 効果樹脂の修復剤は、母材のエポキシ樹脂と比較して接着強度は低く、母材の 35.5%であった。メーカーを依頼して、新型の修復材を開発し、光ファイバの設置位置及び数を調整して、Fig.5 に示したように修復率を 80%まで実現し、提案した方法の有効性を確認した。

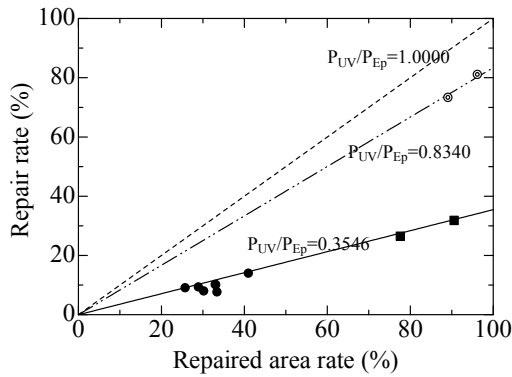


Fig.5 Relationship between repaired area rate and repair rate

(2) 光ファイバを用いた CFRP の自己修復システム

提案した自己修復機能を持つ CFRP 材料の実現可能性を確認するために、光ファイバを用いた CFRP の自己修復システムを構築した。

き裂が発生したとき、すべての材料に修復材を伝送する場合、き裂のない部分にも伝送してしまい、修復材の無駄になり、修復時間もかかる。そこで、Fig.6 に示すように、ひとつの大きな CFRP 構造材を多数の小さな材料ユニットに分けて、小さな材料ユニットによって構成する。小さな材料ユニットには、自己修復機構があり、損傷が発生した材料ユニットだけに修復材を伝送し、そのユニットのみ修復する。これによって、修復材と注入時間が節約できる。

Fig.7 には自己修復システム全体の構成を示す。全体は三つの分に構成する。制御ユニット（黄色破線で囲まれた部分）。この部分ではマイクロポンプ、赤外線 LED、紫外線 LED の制御と赤外線センサーの信号の受信と通信ユニットへの発信機能を実現する。通信ユニット（赤い破線で囲まれた部分）。ここですべての制御ユニットの発信信号を受信してコンピューターが識別できる信号に変換し、監視用のコンピューターへ転送する。コンピューター・監視用のアプリケーションプログラムで通信ユニットの信号を

解析し、CFRP の情報を把握し、修復履歴などの記録を表示する。

作成した CFRP の自己修復システムについてそれらの機能をテストし、実現できることが確認された

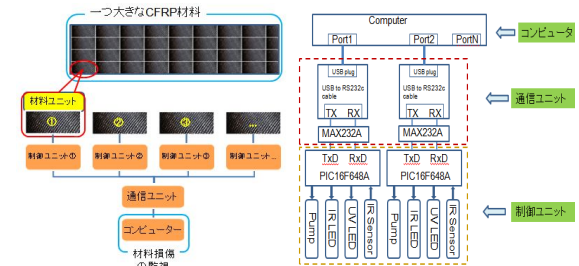


Fig.6 自己修復 CFRP システムの構造 Fig.7 システム全体の構成

(4) 低コストの GFRP の自己修復方法の開発

GFRP は、使用する繊維や樹脂がある条件を満たしたとき、一部紫外線光が透過できる。そのため、材料外部から直接紫外線を照射することができ、一度に多くの範囲を硬化させることが可能である。それにより埋め込む光ファイバの本数を減らすことができ、光ファイバ埋め込みによる材料の力学特性の低下の防止が見込める。外部からの照射により、大きい紫外線照度をもつ紫外線照射装置を用いることが出来るため、修復剤の硬化時間を短縮することができる。システムのコスト低減とつながる。提案した紫外線ランプを用いた GFRP 修復システムの概要図を Fig. 8 に示す。

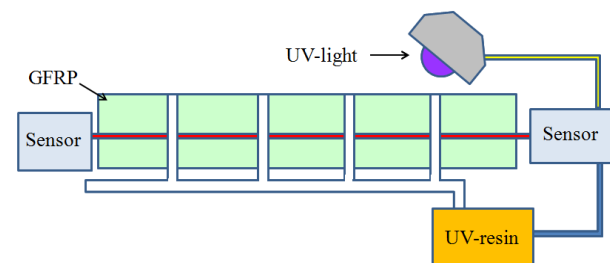


Fig. 8 Schematic of proposed self-healing system of GFRP

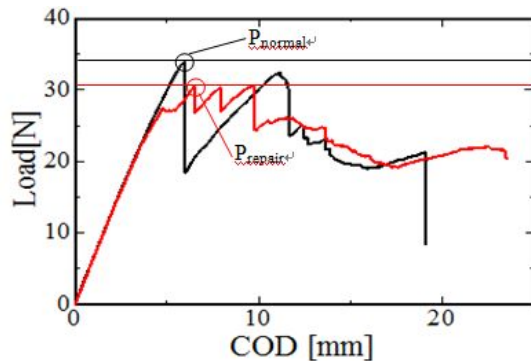


Fig.9 Load-COD curve of DCB test and DCB test after repair

修復剤注入用の機構を組み込む GFRP を試作し、DCB 試験によってき裂を導入し、チューブを介して修復剤をき裂に注入し、GFRP の外部からの紫外線照射により、修復を行った。その結果は Fig.9 に示し、きれいに修復できることが確認できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 7 件)

L. Bao, M. Musadiq, T. Kijima, and K. Kenmochi: Influence of Fibers on the Dust Dislodgement Efficiency of Bag Filters, Textile Research Journal, 84, 764-771 (2014).

Fangtao Ruan and Limin Bao, Mechanical Enhancement of UHMWPE Fibers by Coating with Carbon Nanoparticles, Fibers and Polymers, Vol.15, No.4, 723-728(2014).

Chika Uchijo, Yuki Kuroda, Kiyoshi KEMMOCHI and Limin BAO, Research on FRP composite structures with self-healing function, Advanced Materials Research, Vols. 332-334, PP31-34(2013)

Anchang Xu, Limin Bao, Mitsuo Nishida, Atsuhiko Yamanaka, Molding of PBO fabric reinforced thermoplastic composite to achieve high fiber volume fraction, Polymer

Composite,34,953-958(2013)

鮑力民, 徐安長, 藤井拓郎, 剣持潔, 西田光生, FRP なみの繊維含有率を持つ連続繊維強化 FRTP の成形法の開発, 強化プラスチック, 59,12,483-441(2013).

鮑力民, 黒田勇貴, 徐安長, 剣持潔, FRP 層間破壊靱性に充てん中空ファイラーが及ぼす影響, 日本複合材料学会誌, 38,(3)101-106(2012).

Limin Bao, Kenichi Akahane & Kiyoshi Kemmochi, An FRP erosion prediction system and the effect on mechanical characteristics of FRP by optical fiber, Advanced Composite Materials, 21,133-145(2012).

〔学会発表〕(計 6 件)

1. Takuya Okazawa, Kiyoshi Kemmochi and Limin Bao. Development of a self-healing method for glass fiber-reinforced plastic. ISF2014. (International Symposium on Fiber Science and Technology), Poster. September 28th-October 1st 2014. Tokyo, Japan.
2. Limin BAO, Development of molding method of continuous fiber-reinforced thermoplastics (FRTP) to achieve a high fiber volume fraction with high mechanical properties, 2014 China Textile Academic Conference, 45-47,22-23 Oct.(2014), In China
3. Li-Min Bao, Ming-Ming Yu, Takamasa Kishima, Kiyoshi Kemmochi. Improving Fiber Bag Cleaning Efficiency Using Multiple Jet Pulses. Textile Bioengineering and Informatics Symposium Proceedings, P267-275. August 9-11, 2012. Ueda, Nagano, Japan.

4. Limin BAO and Danna QIAN, Solid particle erosion resistance of the super fiber reinforced plastic, 2012 China Textile Academic Conference, 40-46,23-24 Oct.(2012), In China
5. 内城千翔、鮑力民、劔持潔 . 光ファイバと光硬化樹脂を用いたCFRPの自己修復方法の開発 . 第4回日本複合材料合同会議, 2C-08, 2013 March 7-9(2013)
6. A.XU, L. BAO, PBO fabric reinforced thermoplastic composite manufactured by solution impregnation method, the 19th International Conference on Composite Materials (ICCM19), July 28 to August 2, 2013 in Montreal, Canada.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称 : CFRP 構造体及び CFRP 構造体の修復装置

発明者 : 鮑 力民

権利者 : 信州大学

種類 : 特許

番号 : 特願2013-042598

出願年月日 : 2013.3.5

国内外の別 : 国内

#### 6 . 研究組織

##### (1)研究代表者

鮑 力民 (BAO Limin)

信州大学・学術研究院繊維学系・教授

研究者番号 : 10262700

##### (2) 研究分担者

夏木 俊明 (Natuki Tosiaki)

信州大学・学術研究院繊維学系・准教授

研究者番号 : 10432171

飯塚 浩二郎 (Yiyituka Kojirou)

州大学・学術研究院繊維学系・准教授

研究者番号 : 10453672