光ファイバを用いた Al-引き抜き GFRP 接着接合部のはく離検出[†]

逢坂 勝彦* 福田 武人*
坂本 勝彦** 小林 満男***

Detection of the Debonding in Al-Pultruded GFRP Adhesively Bonded Joints with Optical Fibers

by

Katsuhiko OSAKA*, Takehito FUKUDA*, Katsuhiko SAKAMOTO**
and Mitsuo KOBAYASHI***

In the present study, methods in which the debonding is detected in the adhesively bonded joint constructed with aluminum and pultruded GFRP (PULGFRP) plates using an optical fiber have been investigated. The proposed detecting methods for the debonding in the bonded joints utilize the breakage of the embedded optical fiber caused by the damage such as cracks. In the present study, two detecting methods for the debonding in which the situations of the embedded optical fiber in the bonded joint were different were adopted, and their ability of detecting the debonding were examined. Further, the effects of embedding the optical fibers in the bonded joints on the strength of the joints were investigated, and the ability of the detection of the debonding in the joints whose adhesives were in undercure was also studied. From these results, the applicability of these detecting methods to the health-monitoring system were investigated. As the conclusions it was obtained that one of the two methods could be applied to the health-monitoring system as the detecting method for the debonding in the Al-PULGFRP adhesively bonded joints.

Key words: Pultruded GFRP, Optical fiber, Adhesively bonded joint, Health-monitoring, Adhesive

1 緒 言

引き抜き FRP を使って構造物を構築する場合には、接合法が不可欠であり重要となるが、引き抜き FRP が基本的に一方向強化材であることから、穿孔部を介して荷重を伝達する機械的接合法は好ましくなく、接着接合法が適していると考えられる。しかし、接着接合法は特に構造物の施工現場での接合作業を考えたとき、機械的接合法に対して信頼性が低く、現実にはあまり採用されていないのが現状である。そこで、工場で引き抜き FRP の両端に金属製の接合部品を接着接合し、その接合部品同士を施工現場で機械的に接合して構造物を構築する、2 種類の接合法を組み合わせた方法が、それぞれの欠点を補った引き抜き FRP に適した接合法と考えられる。しかし、引き抜き FRP の接合に関しては、ボルトによる機械的結合法に関する研究は行われているものの^{1), 2)} この組み合わせ接合法に関する研究は少ない。A. Pickett らが、両端に金属製のスリーブを接着した引き抜き GFRP パイプを、金属製の接合部品を介して結合し、スペース・フレームを構築することを目的として行った研究が発表されている程度である。³⁾ したがって、現在のところ信頼性を有する引き抜き FRP に適した接合法が確立されていないのが現状である。

接合部の信頼性を確保する方法としては、まず、接合部の強度特性を明らかにしておく必要があるが、他の方法として、最近注目を集めている損傷検出センサを構造部材に埋め込み、センサからの信号を常に監視して構造物の健全性を確保するヘルスマonitoring という手法が考えられる。特に FRP に対するヘルスマonitoring では、光ファイバがセンサとして適していると考えられている。⁴⁾ 光ファイバセンサによる損傷検出法としては、構造部材内部のひずみを測定してひずみ変化より内部の損傷状態を検出しようとする方法と、埋め込まれた光ファイバが構造部材のクラックなどの内部損傷により破断することで、損傷の発生を検出する方法が考えられる。ひずみ測定に関する研究では、高性能な光ファイバのひずみ測定システムの開発が現在のところ主である。^{5)~10)} 一方、光ファイバの破断による損傷検出については、光ファイバの埋め込み方法、光ファイバの表面処理などによる損傷検出能力の向上に関して検討が行われている。^{11)~13)} また、疲労損傷、衝撃損傷の検出についても検討されている。¹⁴⁾ ¹⁵⁾ ヘルスマonitoring の構造物への適用を考えたとき、以上の光ファイバを使用した損傷の検出手法に加えて、センサからの信号を構造物の健全性を示す指標に変換し、表示するシステムが必要である。ひずみ測定法ではひず

† 原稿受理 平成 10 年 8 月 6 日 Received Aug. 6, 1998

* 正会員 大阪市立大学工学部知的材料工学科 〒558-8585 大阪市住吉区杉本, Dept. of Intelligent Materials Eng., Osaka City Univ., Sumiyoshi-ku, Osaka, 558-8585

** ㈱日本触媒樹脂研究所 〒564-0034 吹田市西御旅町, Nippon Shokubai Co. Ltd., NishiOtabi-cho, Suita, 564-0034

*** 日本ポリエステル(㈱)三田工場 〒669-1339 三田市テクノパーク, Nippon Polyester Co., Ltd., Technopark, Sanda, 669-1339

み測定技術の確立が行われている段階であり, 実際に大型構造物に適用できる信頼性のあるシステムについてはほとんど検討されていない。一方, 光ファイバの破断による損傷の検出方法については, B. Hoffer が, CFRP を機体を使用したエアバスを想定して, エアバス全体に光ファイバを張り巡らし, コックピットでその機体全体の損傷状態をモニタできるシステムについて提案している¹⁶⁾。B. Hoffer の研究が示すように, エアバスのような巨大な構造物についても, 光ファイバの破断を損傷の検出に利用する方法であれば, コックピットに全機体の健全性を表示するヘルスマニタリング・システムの構築が可能であることがわかる。以上のことより, 引き抜き FRP 構造物への光ファイバを使ったヘルスマニタリングの適用においては, 損傷の検出手法として光ファイバの破断による方法が実現性が高いと考えられる。一方, 接合部の光ファイバによる損傷の検出については, ボルト接合部の変位を光ファイバにより測定し, 損傷状態を検出しようとする研究が行われている¹⁷⁾。しかし, 光ファイバの破断を利用した損傷検出については, 先に述べた B. Hoffer の研究で, 機体のスキンとフレームの接着接合部などに光ファイバを埋め込み, そののはく離などの損傷状態を光ファイバにより検出することが可能であることを示している程度であり, 詳細な検討が行われているわけではない。

そこで, 本研究では金属製の接合部品と引き抜き FRP の接着接合部のヘルスマニタリングを目的として Al-引き抜き GFRP 接着継手を取り上げ, その接着接合部について接合部に埋め込まれた光ファイバの破断を利用した, はく離検出法について検討した。実験では光ファイバの埋め込み方法が異なる 2 種類のはく離検出方法を取り上げ, そののはく離検出能力について調べた。また, 接着剤が硬化不良の状態におけるはく離検出能力および光ファイバを埋め込んだことによる接着継手強度への影響についても調べ, 2 種類のはく離検出方法について, そのヘルスマニタリングへの適応性を検討した。

2 光ファイバによるはく離検出

2・1 実験方法

2・1・1 被着材 実験にはアルミニウム合金平板と引き抜き GFRP 平板をエポキシ接着剤で接着した, Al-引き抜き GFRP 接着継手試験片を使用した。Fig. 1 に接着継手の被着材として使用した引き抜き GFRP (PULGFRP) の素材構成を示す。図に示すように, GFRP 材は 3 層のサンドイッチ構造をしている。引き抜き方向にガラスロービングにより強化された層 (Roving layer) がほぼ全体を占めており, その上下にコンティニユアスマットにより強化された層 (Mat layer) がある。このマット層は, 一方向強化ガラスロービング層の繊維と直交する方向の補強材となっている。GFRP 板全体としての板厚は 4mm, コンティニユアスマット層 1 層あたりの厚さは約 0.3mm である。この引き抜き GFRP 板の機械的性質を Table I に示す。なお, アルミニウム合金としてはジュラルミン A2017 を使用した。

2・1・2 光ファイバ 接着継手試験片のはく離検出

には石英光ファイバを使用した。その構成を Fig. 2 に示す。図に示すように, 光ファイバにはレーザ光を伝えるコア部, その外側にクラッド部があり, これが光ファイバのレーザ光を伝達する本来の機能を果たす部分である。これらは, 石英ガラス製である。そして, 保護のためにその外側をポリウレタン製の被覆材が覆っている。コア部直径が 8 ミクロン, クラッド部直径が 125 ミクロン, ポリウレタン部直径が 250 ミクロンである。

2・1・3 はく離検出法および接着継手試験片 本研究で接着部のはく離検出試験に用いた接着継手試験片の形状と寸法を Fig. 3 に示す。この試験片の接着部にはく離検出用の光ファイバを埋め込み実験を行うが, 先に述べたように, 本研究においては光ファイバによる接着部のはく離検出を, 光ファイバの切断により検出する方法を採用している。したがって, 光ファイバの接着部への埋め込み方法がはく離検出において重要となる。そこで,

Fig. 1. Structure of PULGFRP adherends.

Table I. Mechanical properties of PULGFRP.

Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Bending strength (MPa)	Bending modulus (GPa)	Glass content (wt%)
637	33.0	657	21.2	64

Fig. 2. Structure of optical fibers.

Fig. 3. Al-PULGFRP adhesively bonded joint specimen for monitoring experiments.

本研究では2種類の光ファイバの埋め込み方法を考案し、それぞれの埋め込み方法を採用したはく離検出法について検討した。埋め込み方法としてまず考えられるのは、接着層内に光ファイバを埋め込む方法である。そこで、この埋め込み方法を採用したはく離検出法をまず取り上げ、Aタイプと呼ぶことにする。実際の試験片への埋め込み方法を Fig. 4 に示す。図に示すように、接着部のはく離ではなく試験片の破断後の被着材の分離により光ファイバが破断することを防ぐため、光ファイバをU字形にして埋め込んでいる。また、光ファイバと接着剤の接着性をよくするため、接着部の端の部分（図中A部分）に当たる光ファイバの被覆材を除去して埋め込んでいる。この試験片を以下、Aタイプ試験片と呼ぶことにする。また、本来はAI-引き抜き GFRP 接着継手の接着部のはく離破壊モードに対応した、光ファイバの埋め込み方法を採用することが望ましいと考えられることから、接着継手のはく離破壊モードを考慮した光ファイバの埋め込み方法を採用したはく離検出法を次に取り上げて検討した。AI-引き抜き GFRP 接着継手においては、著者らが先に行った研究から、そのはく離破壊が GFRP の接着部における表面層の引きはがしによって起こることがわかっている。¹⁸⁾ そこで、Fig. 5 に示すように、接着部の引き抜き GFRP に光ファイバ埋め込み用の溝をつくり、溝部分に光ファイバを埋め込む方法を採用し、この埋め込み方法を採用したはく離検出法を G タイプと呼ぶことにする。Fig. 6 に、光ファイバ埋め込み用の溝の詳細図を示す。図中の L は接着部の長さを示している。光ファイバは接着部への埋め込み部分全体の被覆材を除去して埋め込んでいる。したがって、接着後には光ファイバは 0.3mm の深さの溝の中に完全に埋め込まれた状態になっている。以下、この試験片を G タイプ試験片と呼ぶ。試験片の接着においては、エポキシ・ポリアミド系の接着剤を使用し、接着後 60℃ 一定の恒温槽内で2日間保持した。

なお、本研究では接着剤の硬化不良状態における光ファイバによる接着部のはく離検出能力についても検討するため、硬化不良状態の接着継手試験片を製作しているが、その点については次に述べる。

2・1・4 試験方法 Fig. 7 に本実験に使用した測定システムの概略図を示す。光ファイバによる接着部のはく離検出能力を検証するため、AE 測定による接着部の損傷検出も同時に行った。実験に使用した AE 測定装置は 9502U-PLOT（株エヌネフ回路設計ブロック製）；AE センサには共振周波数 140kHz の共振型のものを使用した。光ファイバによるはく離検出システムはレーザー光発生部が温度コントロール治具付きレーザーダイオードとレーザードライバより構成され、レーザー光検出部はフォトダイオードおよびアンプよりなっている。実験において、AE 測定装置により検出されたイベントカウントは GP-IB により、また、フォトダイオードにより検出されたレーザー光の信号は負荷試験機からの荷重信号と同時に A/D 変換され、パーソナルコンピュータに取り込まれる。負

荷試験機には、インストロン型の試験機を使用し、引張速度 0.1mm/min で実験を行った。

一般に、接着接合においては、接着剤の硬化不良により接着部の強度が設計強度に比べて大きく低下し、低い荷重で破壊することが起こり得る。接着部において接着剤が硬化不良を起こした場合、完全硬化した場合のように光ファイバと接着剤の接着が完全ではないため、接着

Fig. 4. Situation of the embedded optical fiber at the bonded area of A type specimens.

Fig. 5. Situation of the embedded optical fiber at the bonded area of G type specimens.

Fig. 6. Dimensions of the groove for embedding optical fiber in G type specimens.

部の光ファイバによるはく離検出能力が低下する可能性が考えられる。そこで、完全硬化状態における場合と同様に、2種類のAI-引き抜きGFRP接着継手について接着剤が硬化不良状態の試験片を用意し、引張荷重下における光ファイバによる接着部のはく離検出実験を行った。実験で使用した接着剤の硬化状態を把握するため、まず、硬化過程における接着剤の誘電率の測定を行った。その測定には誘電率測定装置 (Micromet instruments 社製 Eumetric 100A) を使用した。内部の寸法が20mm × 40mm × 0.5mmの型を作製し、測定すべき接着剤をその型に充填した後、接着剤に誘電率測定センサを埋め込み恒温槽に入れ、硬化過程において誘電率の測定を行った。なお、硬化の進展を遅らせるため、恒温槽の温度は完全硬化接着の場合の60℃ではなく、45℃に設定した。測定した誘電率より得られたエポキシ接着剤のイオン粘度をFig. 8に示す。この測定結果に基づき本実験においては、硬化不良接着継手試験片を製作する場合の恒温槽における硬化時間を240分に設定した (図中A点)。したがって、本実験における硬化不良接着継手試験片の接着剤は、完全硬化の場合に比べて約80%程度のイオン粘度を示す硬化状態である。

2.2 実験結果

2.2.1 Aタイプ試験片 (接着剤が完全硬化状態)

Fig. 9にAタイプ試験片のはく離検出実験結果の一例を示す。図において、負荷時間に対する試験片に加えられた荷重、AEカウントおよび光ファイバからのレーザ光出力を下図および上図に分けて示している。横軸は負荷時間、下図の縦軸に荷重およびAEカウントを示し、上図の縦軸に光ファイバからのレーザ光出力を示している。図からわかるように、破壊の直前 (図中A点) からAEカウントが急増しており、この時点から接着継手の接着部に損傷が発生していることがわかる。一方、光ファイバからのレーザ光出力は、接着継手試験片がはく離破壊し、荷重が急激に減少すると同時に減少し、この時点で光ファイバが切断したことがわかる。この結果より、光ファイバではAE測定により感知できる損傷を検出することはできないものの、接着部のはく離は検出することがわかった。Fig. 10に接着継手試験片の接着部のはく離破壊モードの模式図を示す。図に示すように、接着継手は光ファイバを埋め込んだ接着層および引き抜きGFRPの接着部表面のマット層を引きはがして破壊している。したがって、この破壊モードより光ファイバによる接着部のはく離検出は、接着層に埋め込まれた光ファイバが接着端部の被覆材を除去した部分で切断することにより可能であることがわかった。

2.2.2 Gタイプ試験片 (接着剤が完全硬化状態)

Fig. 11にGタイプ試験片のはく離検出実験結果の一例を示す。図からわかるように、GタイプもAタイプと同様にAEカウントの結果より破壊の直前 (図中A点) から接着継手の接着部に損傷が発生していることがわかる。また、光ファイバからのレーザ光出力の結果より、Aタイプと同様、接着継手試験片のはく離破壊時に光ファイ

バが切断したことがわかる。これらの結果から、GタイプにおいてもAタイプと同様、光ファイバによって、AE測定により感知できる損傷を検出することはできないも

Fig. 7. Measurement system.

Fig. 8. Ion viscosity of adhesives used for bonding of joint specimens.

Fig. 9. Results of monitoring experiments for A type specimens (adhesives in cure).

の、接着部のはく離は検出できることがわかった。Fig. 12に接着継手試験片の接着部のはく離破壊モードの模式図を示す。図に示すように、Aタイプ試験片と同様、光ファイバを埋め込んだ接着層および引き抜きGFRPの接着部表面のマット層を引きはがして破壊している。したがって、この破壊モードより光ファイバによる接着部のはく離検出は、接着部の被着材に埋め込まれた光ファイバが接着部のはく離破壊時に被覆材とともに引きはがされ、切断することにより可能であることがわかった。

Fig. 10. Failure mode of A type specimens (adhesives in cure).

Fig. 11. Results of monitoring experiments for G type specimens (adhesives in cure).

Fig. 12. Failure mode of G type specimens (adhesives in cure).

2・2・3 Aタイプ試験片(接着剤が硬化不良状態)

Fig. 13にAタイプ試験片の実験結果の一例を示す。図において、横軸は負荷時間、縦軸には試験片に加えた荷重と光ファイバ出力を示している。図からわかるように光ファイバ出力は、接着継手試験片の破壊荷重の約70%の時点で0になっており、この時点で光ファイバが破断していることがわかる。Fig. 14にはく離破壊モードの模式図を示す。図より、接着層に埋め込まれた光ファイバはアルミニウム合金とともに、GFRPと接着層の接着界面から引きはがされて破断していることがわかる。これはく離破壊モードより、接着剤の硬化が不十分であるため接着層のヤング率がかなり小さく、完全硬化の場合に比べて負荷過程での接着層の変形が大きいいため、光ファイバが接着端部で比較的早く破断したことが予想される。したがって、完全接着の場合とは異なり、硬化不良状態では比較的早期に接着継手のはく離を検出できることがわかった。

2・2・4 Gタイプ試験片(接着剤が硬化不良状態)

Fig. 15にGタイプ試験片のはく離検出実験結果の一例を示す。この場合は、Aタイプ試験片の場合とは異なり、接着継手のはく離破壊の直前に光ファイバ出力が0になっている。Fig. 16にはく離破壊モードの模式図を示す。図より、GFRPの溝部分に接着剤とともに埋め込まれた光ファイバがAタイプ試験片と同様、アルミニウム合金とともに、GFRPと接着層の接着界面から引きはがされて破断していることがわかる。これは、後に述べるように2種類の試験片で接着層厚さがかなり異なっており、Gタイプでは接着層が薄く、Aタイプほど接着層が変形

Fig. 13. Results of monitoring experiments for A type specimens (adhesives in undercure).

Fig. 14. Failure mode of A type specimens (adhesives in undercure).

できないため、光ファイバの破断が接着継手のはく離破壊時に起こっているためであると考えられる。このはく離検出結果は破壊モードは異なるものの、完全接着試験片の場合と同様であり、はく離検出が可能であることがわかった。

3 光ファイバ埋め込みによる強度への影響

3.1 実験方法

光ファイバ埋め込みによる接着継手強度への影響を調べるために使用したAタイプ試験片の形状と寸法をFig. 17に示す。これははく離検出実験に使用した接着継手試験片とほぼ同じであるが、接着面積の影響を調べるため、接着部の長さLが20, 30, 40 mmの3種類の試験片を準備した。接着継手試験片の製作方法は、幅約250mmの引き抜きGFRPおよびアルミニウム板を接着剤で接着して幅広の接着継手を作製し、幅40mmに切り出して試験片とした。光ファイバを埋め込んだ試験片と埋め込んでいない試験片の接着条件の違いによる継手強度への影響を排除するため、250mm幅の接着継手製作時に、光ファイバを接着継手試験片幅である40mmの間隔を空けて埋め込み、光ファイバを埋め込んだ試験片と埋め込んでいない試験片が交互に位置するようにした。なお、Gタイプ試験片については、試験片の幅を20mmとした。強度測定はインストロン型試験機を使用し、引張速度3mm/minで行い、破壊時の荷重を測定した。

3.2 実験結果

Fig. 18にAタイプ試験片の強度測定結果を示す。接着継手強度は接着継手試験片の破壊荷重を接着面積で除

した接着部の平均せん断強度で評価した。図において、縦軸に継手強度、横軸にラップ長さをとり、光ファイバを埋め込んだ試験片(SAO)と埋め込んでいない試験片(SA)5本の強度の平均値および最大値から最小値までの変動幅をそれぞれ示している。また、この研究より先に行った同じ被着材を使用したAl-引き抜きGFRP接着継手試験片(SR)について行った強度測定結果¹⁸⁾を同時に示している。このSR試験片の強度値は、本研究で使用した試験片と全く同じ材料、接着方法により製作した接着継手試験片36本について測定した結果である。SA試験片には光ファイバが埋め込まれていないが、接着層厚さは後に述べるように光ファイバを埋め込んだSAO試験片と同じで、かなり厚くなっており、光ファイバを埋め込んでいない試験片と全く同一であるとはいえない。したがって、SR試験片の強度値を光ファイバを埋め込んでいない試験片の本来の値として比較を行った。ただし、SR試験片の幅は20mmである。図からラップ長さが30mmでは光ファイバを埋め込んだSAO試験片がSA試験片より少し高い値を示しているが、SR試験片の強度と比較したとき、いずれの強度もその変動幅に含まれていることから、光ファイバを埋め込むことによる強度へ影響があるとはいえない。一方、ラップ長さ20mmと40mmではSAO, SA試験片はほぼ同じ強度を示している。

Fig. 15. Results of monitoring experiments for G type specimens (adhesives in undercure).

Fig. 16. Failure mode of G type specimens (adhesives in undercure).

Fig. 17. A type specimen for comparing the strength of the joints with and without embedded optical fibers.

Fig. 18. Strength of A type specimens with and without embedded optical fibers.

しかし、SR 試験片の強度と比較したとき、強度の変動幅を考慮しても、SAO、SA 試験片いずれの強度も SR 試験片の強度より低い値を示していることがわかる。これらの結果から、A タイプ試験片では、光ファイバを埋め込むことにより継手強度を低下させる傾向があることがわかる。

Fig. 19 に G タイプ試験片について光ファイバを埋め込んだ場合と埋め込まない場合の接着継手試験片の強度測定結果を示す。図においては、光ファイバを埋め込んだ試験片 (SGO) と埋め込んでいない試験片 (SG) 12 本の強度の平均値および最大値から最小値までの変動幅を示している。また、比較のため Fig. 18 と同様、SR 試験片の結果も示している。図より、SGO、SG 試験片いずれも全てのラップ長さでほぼ同じ値を示している。一方、SR と比較した場合はラップ長さ 20mm の試験片では、強度の平均値では SGO、SG 試験片のいずれも SR 試験片より若干低い強度を示している。したがって、強度への影響がみられるが、その変動幅を考慮すると A タイプ試験片の 40mm の強度結果に比べると影響は小さいように見える。ラップ長さ 30mm、40mm では平均値がほぼ

同じ値を示しており、また、SGO、SG 試験片は SR 試験片の強度の変動の内に含まれることから、強度低下はみられないことがわかる。これらの結果から、実際にはラップ長さを 20mm 以下に設定するようなことはないため、実用的には G タイプ試験片では光ファイバ埋め込みの有無による強度への影響はみられないことがわかった。

次に A タイプの強度が低い値を示した原因を調べるため、2 種類の接着継手試験片について接着層厚さを測定した。Fig. 20 に A タイプおよび G タイプ試験片の測定結果を示す。A タイプ試験片 (SAO) では接着層厚さが約 300 ミクロンの値を示しているのに対して、G タイプ試験片 (SGO) では、約 50 ミクロンの値を示している。これらの結果より、A タイプ試験片が低い継手強度を示したのは、接着部に光ファイバを埋め込んだため接着層がかなり厚くなったことが原因であることがわかった。

以上の結果より、光ファイバを使った AI 一引き抜き GFRP 接着継手のはく離検出能力については A タイプと G タイプのいずれも、接着接合部のはく離破壊前の損傷は検出できないものの、はく離については検出可能であり、その検出能力についてはほぼ同等であることがわかった。しかし、光ファイバ埋め込みによる強度低下については A タイプ試験片で埋め込みによる強度低下がみられたのに対して、G タイプ試験片では実用的には埋め込みの影響がみられなかったことから、接着部のはく離検出方法としては G タイプの方が適していることがわかった。したがって、AI 一引き抜き GFRP 接着継手においては、本研究で行った G タイプのように、接着部の GFRP の表面に溝を作り光ファイバを埋め込んではく離を検出する方法が、接着部のはく離のモニタリングに適していることがわかった。

4 結 言

本研究では金属製の接合部品と引き抜き FRP の接着接合部のヘルスマニタリングを目的として AI 一引き抜き GFRP 接着継手を取り上げ、その接着接合部について接合部に埋め込まれた光ファイバの破断を利用したはく離検出法について検討した。本研究では接着層に光ファイバを埋め込む方法 (A タイプ) と、被着材の引き抜き GFRP の接着部に光ファイバを埋め込む方法 (G タイプ) を採用した 2 種類のはく離検出法を取り上げ、そのはく離検出能力について比較検討した。また、接着剤が硬化不良の状態におけるはく離検出能力および光ファイバを埋め込んだことによる接着継手強度への影響についても調べ、2 種類のはく離検出方法について、そのヘルスマニタリングへの適応性を検討した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 2 種類の検出方法はいずれも、接着接合部のはく離を検出できることがわかった。
- (2) 2 種類の検出方法はいずれも、接着剤が硬化不良状態においても、接着部のはく離を検出できることがわかった。
- (3) 光ファイバを埋め込んだことによる継手強度への影響では、A タイプでは強度低下がみられるのに対して、

Fig. 19. Strength of G type specimens with and without embedded optical fibers.

Fig. 20. Thickness of adhesive layers of A and G type specimens.

Gタイプでは実用上、強度への影響がないことがわかった。

(4) 光ファイバを接着部の引き抜き GFRP に埋め込む Gタイプのはく離検出法は、はく離検出能力、および強度への影響がないことから、AI-引き抜き GFRP 接着接合部におけるヘルスマニタリングに適していることがわかった。

最後に、本研究を行うに際して協力して頂いた、本学平成9年度卒業の加藤嘉記君に感謝申し上げます。また、実験を行うに際し、多大なる協力を頂いた石川島播磨重工業(株)北出真太郎氏に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) S. Ramakrishna, H. Hamada, T. Nishiwaki and Z. Maekawa, Proc. Int. SAMPE Symposium and Exhibition, **40**, 540 (1995).
- 2) R. Prabhakaran, Z. Razzaq and S. Devara, Composites, **B27**, 351 (1996).
- 3) A. Pickett, L. Hollaway and L. N. Phillips, Composites, p.257 (1982).
- 4) A. Mahoon, Composites, **18**, 229 (1988).
- 5) D. A. Jackson, J. Phys. E : Sci. Instrum., **18**, 981 (1985).
- 6) S. R. Waite, R. P. Tatam and A. Jackson, Composites, **19**, 435 (1988).
- 7) K. Kiu and R. M. Measures, J. Intell. Mater. Syst. and Struct., **3**, 432 (1992).
- 8) 福田武人, 逢坂勝彦, 北出真太郎, 材料, **42**, 269 (1993).
- 9) V. Bhatia, K. A. Murphy, R. O. Claus, T. A. Tran and J. A. Greene, Smart Mater, Struct. **4**, 245 (1995).
- 10) M. A. El-sherif and J. Radhakrishnan, J. Reinf. Plast. Compos., **16**, 144 (1997).
- 11) R. M. Crane and A. B. Macander, Naval Eng. J., p.52 (1984).
- 12) N. D. W. Glossop, S. Dubois, W. Tsaw, M. Leblanc, J. Lymer, R. M. Measures and R. C. Tennyson, Composites, **21**, 71 (1990).
- 13) 北出真太郎, 福田武人, 逢坂勝彦, 強化プラスチック, **40**, 54 (1994).
- 14) S. R. Waite, Composites, **21**, 148 (1990).
- 15) 北出真太郎, 福田武人, 逢坂勝彦, 材料, **44**, 1196 (1995).
- 16) B. Hoffer, Composites, **18**, 309 (1987).
- 17) 高橋 淳, 野村正人, 武田真一, 津田 浩, 剣持 潔, 福田 博, 日本材料学会第27回FRPシンポジウム講演論文集, p.255 (1998).
- 18) 逢坂勝彦, 福田武人, 坂本勝彦, 溶接学会溶接構造シンポジウム'97講演論文集, p.347 (1997).