

光ファイバーを配置した連続炭素繊維補強材の破壊予知センサー機能(1)

Self-Diagnosing Function of CFRP Reinforcement with Optical Fiber (1)

関 島 謙 蔵*・魚 本 健 人**

Kenzo SEKIJIMA and Taketo UOMOTO

1. はじめに

コンクリート構造物においては鉄筋やPC鋼材のような補強材が重要な役割を果たすので、構造物の健全性を判断するために補強材自体をモニターすることは極めて意義が大きいと考えられる。

連続繊維補強材の健全性を評価する方法としてひずみを測定する方法が一般的であり、伸び計または抵抗線ひずみ計(ワイヤーストレインゲージ)が使用されている¹⁾。また、非破壊検査方法として、アコースティック・エミッション(AE)を利用する方法も試みられている^{2,3)}。

最近では、コンクリートの補強材自体にセンサー機能を付加する方法が有望と期待されている。例えば、柳田らによって精力的に研究されてきたガラス繊維と炭素繊維を混合した連続繊維補強材は、破断ひずみが小さくしかも導電性の炭素繊維の電気抵抗の変化を測定することによって破壊予知が可能なインテリジェント材料の一種である⁴⁻⁷⁾。なお、この連続ガラス繊維・炭素繊維補強材は、炭素繊維の繊維体積混入率が極めて小さいので、力学的には連続ガラス繊維補強材とほぼ同様である。

一方、連続炭素繊維補強材はヤング係数が高く、しかも耐久性にも優れているので、年々その使用量が増大しつつある。しかし、連続炭素繊維補強材にセンサー機能を付加する場合には電気抵抗の変化を利用する方法が適用できないので、他の方法を考案する必要がある。

本研究では、近年注目されている光ファイバーを中心に配置して成形した角棒状の連続炭素繊維補強材の引張試験を行って、荷重やひずみと共に可視光線を光源として光ファイバーを通過する光量を測定し、連続炭素繊維補強材の破壊予知センサー機能について検討した^{8,9)}。

2. 試験の概要

(1) 使用材料

使用した連続炭素繊維補強材は、PAN系高強度炭素繊維にビニルエステル樹脂を含浸して、ほぼ長方形断面を有する棒状に成形したものである。筋番はC8であり、その仕様を表1に示す。この連続繊維補強材は交差部を持たないけれども、炭素繊維が一方向に引き揃えられている点や繊維体積混入率は、格子状連続繊維補強材とほぼ同様である。

一般に、光ファイバーとは、コアと呼ばれる高屈折率部をそれより低屈折率部のクラッドと呼ばれる部分で被覆した構造を有するガラス繊維である。このため、コアに入射された光は、コアとクラッドの境界で反射しながらコアの中を伝わっていくことになる^{10,11)}。

使用した光ファイバーはコアが石英ガラス、クラッドがフッ素樹脂から構成される複合光ファイバーであり、コア径は200 μm 、クラッド径は225 μm である。表面には保護被覆としてフッ素樹脂がコーティングされていて、外径は500 μm である。

(2) 供試体

光ファイバーは連続繊維補強材の断面のほぼ中心に配置してあり、両端の20mmの区間から光ファイバーが露出している(写真1参照)。なお、保護被覆を施した光ファイバーはビニルエステル樹脂との付着性がよくないので、これを埋設した連続繊維補強材に引張応力が負荷された場合、連続繊維補強材と光ファイバーとの間に滑りが生じる

表1 連続炭素繊維補強材の仕様

筋 番	繊 維	樹 脂	繊維体積混入率 V_f (%)	公称断面積 A (mm^2)
C8	PAN系高強度 炭素繊維	ビニルエステル 樹 脂	43	26.4

*倉測建設コンサルタント(株)東京支店

**東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

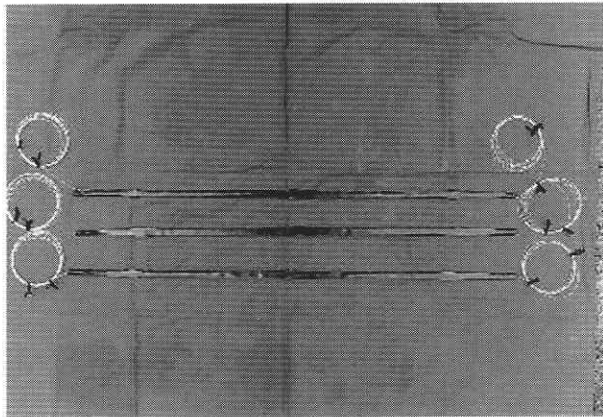


写真1 光ファイバーを配置した連続炭素繊維補強材

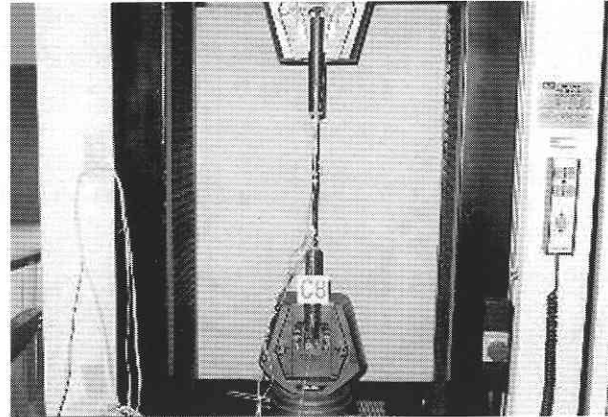


写真2 繰り返し引張試験状況

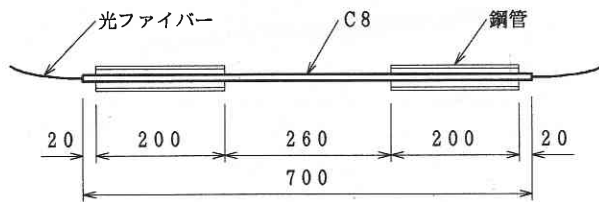


図1 供試体の寸法

可能性がある。そこで、連続繊維補強材の内部においては保護被覆を剥がしてビニルエステル樹脂との付着性を高め、一体化させた。

供試体の長さは700 mmとし、両端に長さ200 mmの鋼管を挿入した後、定着用膨張材を充填した¹²⁾。供試体の寸法を図1に示す。連続繊維補強材は鋼管の端部より約20 mmほど露出しているため、試験部の長さは260 mmとなる。なお、試験部の中央の表裏にひずみゲージを1枚ずつ貼り付けた。

(3) 試験方法

供試体の両端の鋼管を試験機のチャックで直接つかみ、供試体に引張力を加えた。引張試験においては、供試体が破壊するまで荷重とひずみを測定し、さらに、光パワーメータを用いて光ファイバーを通過する光量を測定した。光源には中心波長850 ± 15 nmの発光ダイオード(LED)を使用した。これは、いわゆる可視光線である。

引張試験は、単調引張試験3体(RO1～RO3)および繰り返し引張試験4体(RO4～RO7)について行った。繰り返し引張試験においては、各サイクルごとに上限荷重を4.9 kNずつ増加させた。写真2に繰り返し引張試験状況を示す。

3. 試験結果および考察

(1) 力学的性状

単調引張試験および繰り返し引張試験における力学的性状のまとめを表2に示す。繰り返し引張試験のヤング係数は、最終サイクルの荷重とひずみの関係を対象にして、土木学会規準「連続繊維補強材の引張試験方法」(JSCE-E531-1999)に従って、最大引張荷重の20%と60%の時の荷重とひずみを用いて計算した¹⁾。引張強度やヤング係数などの力学的性状は、繰り返し載荷によってもほとんど変わらなかった。

図2は繰り返し引張試験における荷重とひずみの関係の一例(RO7)を示したものである。荷重を0.98 kNまで除荷した時の残留ひずみはわずかであり、供試体の破断に至るまで荷重とひずみの関係はほぼ直線であった。

(2) 光学的性状

単調引張試験における各供試体の光ファイバーを通過する光量とひずみの関係を図3に示す。ひずみがある値を超えると光量が急激に減衰する現象が認められた。この時のひずみはばらつきが大きかったが、平均で1%前後であった。

光量の急激な減衰は光ファイバーの破断によるものと考えられる。光ファイバーが破断すると、光はコアの石英ガラス内部ではなく、破断面の間を進む際には全反射が起こらず、減衰が極めて大きくなるのである。なお、光ファイバー自体の引張試験は実施していないが、光ファイバーの径はEガラス繊維の径(8～12 μm)と比べて極めて大きいので、破断ひずみは小さいと推定される。以上の結果から、光ファイバーを通過する光量を測定することによって、連続繊維補強材が破断という致命的な損傷を受ける前に検知することが可能になった。

表2 引張試験における力学的性状のまとめ

引張試験方法	最大引張荷重 F_u (kN)	終局ひずみ ϵ_u (%)	引張剛性* EA (kN)	引張強度 f_u (N/mm ²)	ヤング係数* E (kN/mm ²)
単 調	38.5	1.43	2,680	1,460	102
繰り返し	38.0	1.41	2,700	1,440	102

* 最大引張荷重の20%と60%の時の荷重とひずみを用いて計算した。

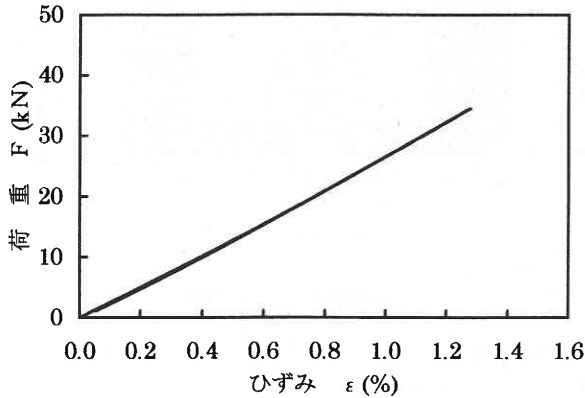


図2 荷重とひずみの関係 (RO7)

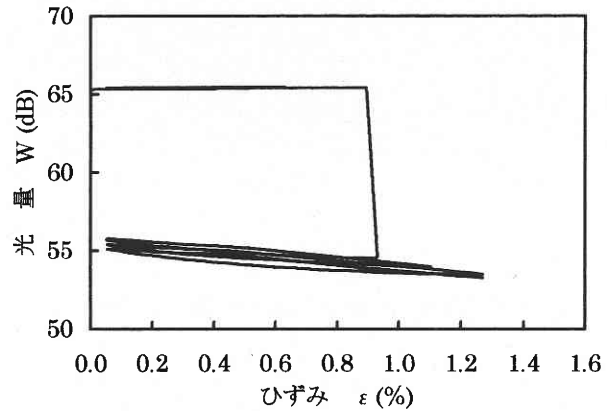


図4 光量とひずみの関係 (RO7)

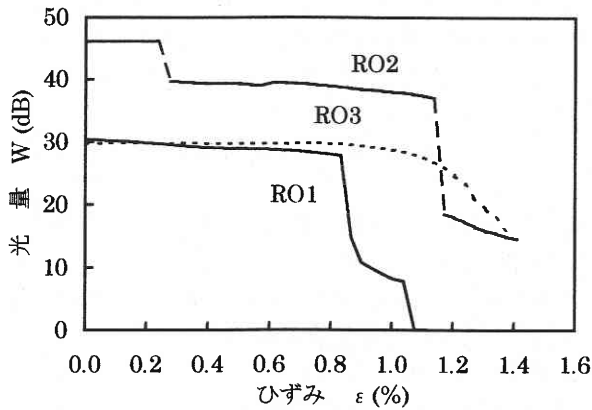


図3 光量とひずみの関係 (RO1 ~ RO3)

繰り返し引張試験における光量とひずみの関係の例を図4に示す。単調引張試験と同様に、ひずみがある値を超えると光ファイバーを通過する光量が急激に減衰した。その後、除荷しても光量はわずかにしか増加せず、著しい減衰はそのまま残った。すなわち、この現象は非可逆的であった。さらに荷重を増加すると、光量は少しずつ減衰した。単調引張試験と同様に、前者の現象は光ファイバーの破断によるものと考えられる。一方、後者の現象は光ファイバーの破断面の距離の増加であると考えられる。これらの現象から、光ファイバーを配置した連続炭素繊維補強材は、過去に受けた過大な荷重を記憶する能力を有すると言える。

4. ま と め

本研究から得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 繰り返し引張試験において除荷した時の残留ひずみはわずかであり、単調引張試験と同様に、荷重とひずみの関係は破断に至るまではほぼ直線であった。
- (2) 単調引張試験においては、連続繊維補強材のひずみがある値を超えると光量が急激に減衰した。この現象は光ファイバーの破断によるものと考えられるが、ひずみのばらつきは大きかった。
- (3) 繰り返し引張試験においても、連続繊維補強材のひずみがある値を超えると光ファイバーを通過する光量が急激に減衰した。その後、除荷しても光量はわずかにしか増加せず、著しい減衰はそのまま残った。さらに荷重を増加すると、光量は少しずつ減衰した。前者の現象は光ファイバーの破断によるものと考えられ、後者の現象は光ファイバーの破断面の距離の増加であると考えられる。
- (4) 光ファイバーを通過する光量を測定することによって、連続繊維補強材が破断という致命的な損傷を受ける前に検知することが可能になった。
- (5) 光ファイバーを配置した連続繊維補強材は、過去に受けた過大な荷重を記憶する能力を有すると言える。

謝 辞

本研究は、著者が清水建設株式会社技術研究所に在職中に行ったものであり、実験に協力していただいた旭硝子マテックス株式会社金野智広氏に感謝の意を表す。

(2002年9月9日受理)

参 考 文 献

- 1) 連続繊維補強材の引張試験方法 (JSCE-E 531-1999), 平成 11 年版コンクリート標準示方書 [規準編], 土木学会, pp. 244-246, 1999 年 11 月
- 2) 魚本健人, 西村次男, 加藤久男: AE 計測による FRP ロッドの引張特性の評価, 土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp. 420-421, 1988 年 10 月
- 3) 関島謙蔵, 中辻照幸, 武藤範雄, 柳田博明: CFGFRP ロッドの損傷検知方法に関する 2, 3 の考察, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp. 906-907, 1994 年 9 月
- 4) 武藤範雄, 柳田博明, 宮山 勝, 中辻照幸, 杉田 稔, 大塚 靖: CFGFRP 複合材料の電気抵抗測定による破壊予知, 日本複合材料学会誌, Vol. 18, No. 4, pp. 6-12, 1992 年 4 月
- 5) 武藤範雄, 柳田博明, 杉田 稔: CFGFRP 複合材料補強コンクリートの破壊予知, 第 46 回セメント技術大会講演集, pp. 842-847, 1992 年 5 月
- 6) 中辻照幸, 杉田 稔, 柳田博明, 武藤範雄: 超先進構造・材料としての知的材料 (9) - インテリジェント建設構造材料, 機械の研究, Vol. 45, No. 3, pp. 84-87, 1993 年 3 月
- 7) 柳田博明, 武藤範雄, 杉田 稔: インテリジェント・コンクリート, Gypsum & Lime, No. 246, pp. 52-61, 1993 年
- 8) 関島謙蔵, 大塚 靖, 金野智広: 光ファイバーを配置した連続炭素繊維補強材のセンサー機能に関する研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp. 690-691, 1999 年 9 月
- 9) Sekijima, K. and Konno, T., Self-Diagnosing Function of CFRP Reinforcement with Optical Fiber, Proceedings of the Fifth International Conference on Fibre-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures, Vol. 2, pp. 1065-1072, July 2001
- 10) 川瀬正明編: 光ファイバ実用マニュアル, 日本規格協会, pp. 13-14, 1994 年 1 月
- 11) 清水紀夫: ガラス繊維と光ファイバー, 技報堂出版, pp. 99-103, 1983 年 12 月
- 12) 定着用膨張材を用いた引張試験方法, コンクリート・ライブラリー第 88 号, 土木学会, pp. 337-341, 1996 年 9 月