

# 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 (2)

Self-Diagnosing Function of CFRP Reinforcement with Optical Fiber (2)

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。

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<sup>1-4)</sup>。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はほぼ同様である。

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格子状連続炭素繊維補強材を引張側の主筋に使用したコンクリートはりの曲げ試験を行って、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、はりの曲げ性状と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<sup>5,6)</sup>。

## 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、格子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。また、引張試験における力学的性状のまとめを表2に示す<sup>6,7)</sup>。2本の主筋の間隔は90 mm、コンクリートとの付着を確保するための横筋の間隔は100 mmとした(写真1参照)。

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  $\mu\text{m}$ 、クラッド径は225  $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$ である。光ファイバーは主筋の断面のほぼ中心に

表1 連続繊維補強材の仕様

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

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 $\epsilon_u$ (%)	引張剛性* EA (kN)	引張強度 $f_u$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	ヤング係数* E ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )
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。

\*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

研 究 速 報

配置してあり、両端の 20 mm の区間から光ファイバーが露出している。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、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。

コンクリートは早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材の最大寸法は 20 mm とした。供試体の曲げ試験時に

おけるコンクリートの圧縮強度、引張強度およびヤング係数は、それぞれ  $48.0 \text{ N/mm}^2$ 、 $3.32 \text{ N/mm}^2$  および  $33.0 \text{ kN/mm}^2$  であった。

(2) 供試体

供試体は引張側と圧縮側の主筋に格子状連続炭素繊維補強材を使用したコンクリートはりであり、断面は幅 150 mm、高さ 150 mm、長さ 1,300 mm (BE 1)、1,500 mm

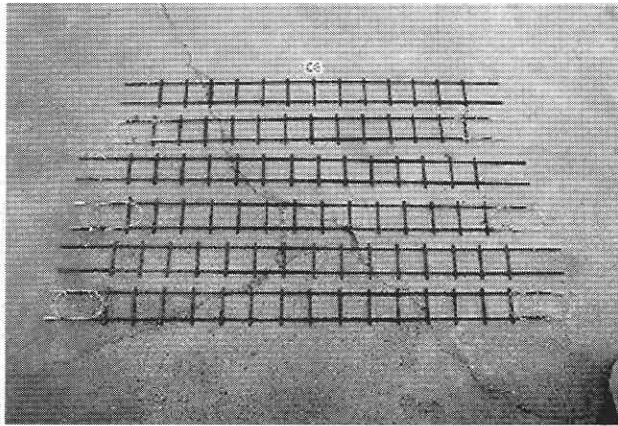


写真1 光ファイバーを配置した格子状連続炭素繊維補強材

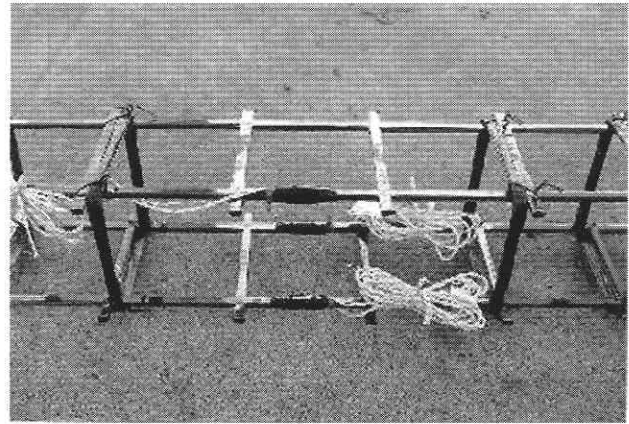


写真2 供試体の配筋 (BE2)

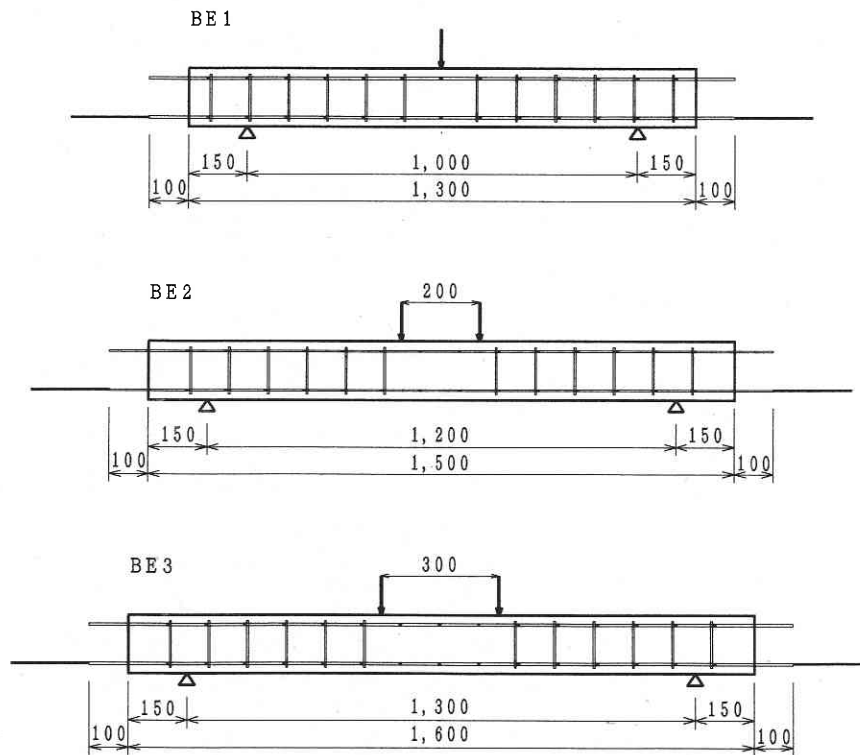


図1 供試体の寸法

(BE2) または 1,600 mm (BE3) の 3 体である。供試体の寸法を図 1 に示す。各供試体の引張側の連続繊維補強材の 2 本の主筋にのみ光ファイバーを配置した。なお、供試体のせん断破壊を防止するために、閉合スターラップも主筋と同じ仕様の連続繊維補強材を用いて、横筋間隔と等しい 100 mm 間隔に配置した (写真 2 参照)。

(3) 試験方法

荷重方法は、各供試体の荷重点と支点との距離 (せん断スパン) を 500 mm と一定とし、中央集中荷重 (BE1) または対称 2 点荷重 (BE2, BE3) として、荷重点間の距離 (等曲げモーメント区間) を 3 種類に変化させて曲げ試験を行った。これは、等曲げモーメント区間のコンクリートに生じるひび割れの本数を変化させることを目的としている。

曲げ試験は繰り返し荷重とし、各サイクルごとに上限荷重を 9.8 kN ずつ増加させた。なお、下限荷重は 0.98 kN とした。曲げ試験においては、供試体が破壊に至るまでの荷重、たわみ、ひずみおよびひび割れ幅を測定した。なお、ひび割れ幅は、引張側の主筋の位置におけるコンクリートの標点間距離 100 mm の長さの変化を  $\pi$  ゲージを用いて測定した。

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。

3. 試験結果および考察

(1) 力学的性状

試験結果を表 3 に示す。BE1 は荷重点の下に 1 本、BE2 と BE3 は等曲げモーメント区間に 1 本または 2 本の曲げひび割れが発生し、その後、引張側の主筋の連続繊維補強材が破断して破壊した (繊維破断型曲げ破壊)。この時の破壊荷重は、主筋が引張破断するとして計算した終局耐力にはほぼ等しかった<sup>8)</sup>。

BE1 は引張側の主筋の交差部が荷重点の真下にあるため、ひずみゲージを貼り付けた位置が荷重点よりも離れて

いた、引張側の主筋のひずみの測定値はコンクリートの引張応力を無視した弾性理論による計算値よりも若干小さかったが、位置のずれたことを考慮すれば比較的一致していたとみなすことができる。

BE2 と BE3 は、曲げひび割れ発生後まもなく引張側の主筋のひずみが測定不能となった。しかし、荷重方法が対称 2 点荷重であり、等曲げモーメント区間にひずみゲージを貼り付けたので、実験値と計算値は BE1 の場合よりも一致しているものと考えられる。

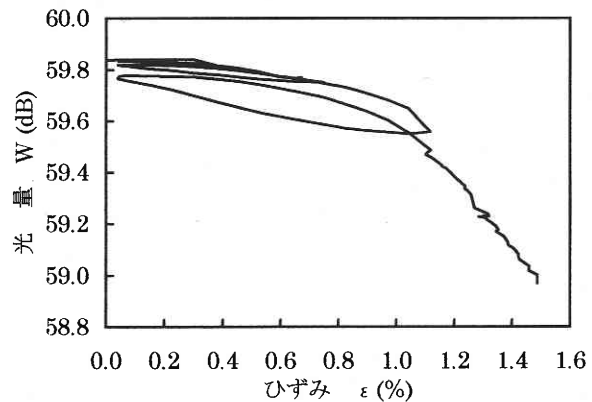


図 2 光量とひずみの関係 (BE1)

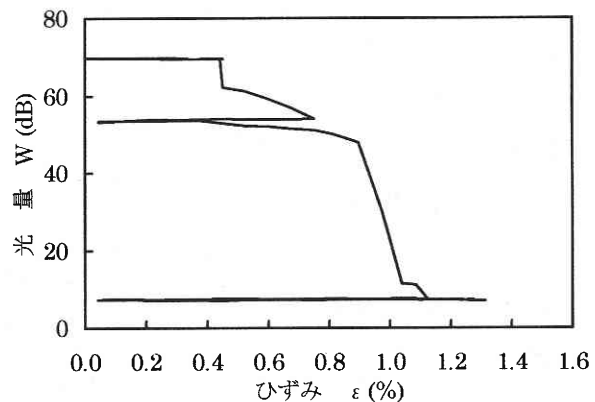


図 3 光量とひずみの関係 (BE2)

表 3 曲げ試験結果

供試体	曲げひび割れ発生荷重		破壊荷重 $P_u$ (kN)	破壊荷重 の計算値 $P_{u,cal}$ (kN)	$P_u / P_{u,cal}$	破壊形式
	1本目 $P_{cr1}$ (kN)	2本目 $P_{cr2}$ (kN)				
BE1	8.8	—	38.9	36.6	1.06	繊維破断型 曲げ破壊
BE2	6.9	—	34.3		0.94	
BE3	7.8	8.8	37.2		1.02	

## 研究速報

## (2) 光学的性状

BE1およびBE2の引張側の主筋に配置した光ファイバーを通過する光量と弾性理論によるひずみの計算値との関係を、それぞれ図2および図3に示す。BE1はひずみの増加に伴う光量の減衰が小さく、光ファイバーの破断は生じなかった。また、BE3も同様であった。一方、BE2は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。このことから、再現性を確保できるように成形方法を改良すれば、光ファイバーを通過する光量を測定することによって、コンクリートはり中においても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ると思われる。

その後、除荷しても光量の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。さらに荷重を増加したところ、前サイクルの上限荷重以内では光量の減衰は小さく、上限荷重を超えると光量の減衰は大きくなった。これらの現象は光ファイバーの破断および破断面の距離の増加によるものと考えられる。コンクリートはり中の連続繊維補強材に配置した光ファイバーを通過する光量とひずみの関係は、アコースティック・エミッション(AE)の分野におけるカイザー効果によく似ており、連続炭素繊維補強材は過去に受けた最大荷重を記憶する能力を有すると言える<sup>9)</sup>。

## 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になる。

- (1) すべての供試体は、載荷点の下または等曲げモーメント区間に曲げひび割れが発生し、その後、引張側の主筋の連続繊維補強材が破断して破壊した。
- (2) 1体の供試体のみ、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、その後、除荷しても光量の著しい減衰はそのまま残った。さらに荷重を増加したところ、前サイクルの上限荷重以内では光量の減衰は小さく、上限荷重を超えると光量の減衰は大きくなった。
- (3) 再現性を確保できるように成形方法を改良すれば、光ファイバーを通過する光量を測定することによって、コンクリートはり中においても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ると思われる。

- (4) コンクリートはり中の光ファイバーを配置した連続繊維補強材は、過去に受けた最大荷重を記憶する能力を有すると言える。

## 謝 辞

本研究は、著者の1名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26日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 関島謙蔵, 金野智広: 光ファイバーを配置した連続炭素繊維補強コンクリートはりの曲げ性状, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 1196-1197, 2000年9月
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案) [設計編], コンクリート・ライブラリー第88号, 土木学会, pp. 15-17, 1996年9月
- 9) 丹羽善次監修, 天津政康著: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, pp. 33, 1988年8月