

論文 光ファイバを用いたひずみ測定手法に関する実験的検討

林 大介*¹・横関 康祐*²・末吉 隆信*³

要旨：本論文では、BOTDR(光ファイバの長さ方向のひずみを測定する装置)による鉄筋コンクリートのひずみ測定手法の確立を目的に、①光ファイバによるひずみの測定精度、②光ファイバの設置方法、③光ファイバの保護方法に関する検討を行った。その結果、光ファイバによるひずみ測定誤差は±30%程度であること、光ファイバの設置方法として、光ファイバを鉄筋に貼り付ける方法等が有効であることが分かった。

キーワード：光ファイバ、ひずみ測定、引張試験、曲げ載荷試験

1. はじめに

コンクリート構造物はメンテナンスフリーではなく、所要の機能を保持するためには維持管理を行わなければならないという考え方が広がりつつある。このような考えに基づき、様々な研究機関において、コンクリート構造物のリハビリテーションに係わる研究が進められている。コンクリート構造物に生じた変位やひずみを検知したり、震災後の被害状況を早期に把握するモニタリング手法の開発も、そうした研究における重要なテーマの一つである。

現在、コンクリート構造物のモニタリング手法の研究において、注目を集めている材料に光ファイバがある。光ファイバは、温度、ひずみ、変位、振動、圧力、電界、ガス濃度等、様々な物理・化学量を測定できることが報告されており、土木分野においては、コンクリートの温度計測等で多くの実績がある。光ファイバセンサによるコンクリート構造物の変位・ひずみ測定技術に関する研究例¹⁾は増加してきているものの、確立された手法が無いのが現状である。光ファイバをコンクリート構造物のモニタリング

手法として用いる際には、以下の条件を満たす光ファイバセンサが必要であると考えられる。

- ・光ファイバ自身をセンサとして用い、構造物を広い範囲で、連続的に監視することが可能なもの。
- ・測定原理が光ファイバの破断によらず、変形の初期の段階から構造物に生じたひずみを検知できる可能性があるもの。

現状では、上記を満足する計測手法は、BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer:光ファイバの長さ方向のひずみ分布を測定する装置)を用いたひずみ測定手法である²⁾。

本論文では、鉄筋コンクリートのひずみ測定手法としての確立を目的に、BOTDR を用いた場合の、

- ①光ファイバによるひずみの測定精度
- ②光ファイバの設置方法
- ③光ファイバの保護方法

に関する検討を行った結果について述べる。

*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 研究員(正会員)

*2 鹿島建設(株)技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 研究員(正会員)

*3 鹿島建設(株)横浜支店 桜木町出張所

2. 試験概要

2. 1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。

光ファイバは、センサとなるコア部分の外径が 0.125mm と細く、ガラス製であるため、各種の保護被覆が必要となる。ここでは市販されている 3 種類の光ファイバ（ナイロン、ステンレス管、エポキシ樹脂充填ステンレス管）を加工して用いた。

2. 2 使用機器

使用した機器（BOTDR）は、光ファイバひずみ／損失アナライザである。機器の仕様を表-2 に示す。機器のひずみ測定精度は、 $\pm 0.02\%$ である。

2. 3 測定原理

光ファイバは、温度やひずみ等による刺激を受けると光学的特性が変化する。BOTDR を用いたひずみ測定では、光ファイバ端部からパルス光を入射し、光ファイバ中で後方散乱されたブリルアン散乱光の周波数が、光ファイバに発生したひずみに比例して変化するという特性から、光ファイバのひずみの大きさを測定する。ひずみの発生位置は、パルス光を光ファイバに入射してから戻ってくるまでの時間差を測定することにより特定する。

2. 4 試験方法

(1) 鋼材の引張試験(実験 1)

光ファイバによるひずみ測定手法を鉄筋コンクリートに適用する前に、鋼材単体での測定精度を把握するための試験を行った。

試験概要図を図-1 に示す。光ファイバと鋼材は、エポキシ樹脂系接着剤で接着した。光ファイバは、全長 50m で、BOTDR（パルス光入射位置）より 35m の位置から鋼材に接着し、35～39m の 4m 区間を測定対象部とした。鋼材のひずみが 1.0×10^{-3} 程度になるまで载荷を行い、その後除荷を行った。

(2) RC 梁試験体の曲げ载荷試験(実験 2)

RC 梁試験体のひずみ測定に際し、設置位置
(①鉄筋貼付け、②コンクリート埋込み、③かぶ

表-1 使用材料

実験 1	鋼材	丸鋼 $\phi 28$	
	光ファイバ	シングルモード 単心光ファイバ	
	被覆	ナイロンによる被覆。外径 $0.9 \pm 0.1\text{mm}$	
	接着剤	エポキシ樹脂系接着剤	
実験 2	鋼材	主筋	D16 (SD295A)
		スタラップ	D10 (SD295A)
	コンクリート	セメント	普通ポルトランドセメント
		W/C	68.0 %
		試験材齢	21 日
		圧縮強度	21.6 N/mm^2
	光ファイバ	シングルモード 単心光ファイバ	
		ナイロン	ナイロンによる被覆。外径 $0.9 \pm 0.1\text{mm}$
		ナイロン (スプリング)	コンクリートとの付着を期待して、ナイロン被覆の外側に 500mm 間隔で、約 50mm のスプリングを巻付け、エポキシ樹脂系接着剤で固定。
		被覆 ステンレス管	光ファイバを保護するため、ステンレス製の管を使用し、内部をエポキシ樹脂で充填。外径 2.0mm
		ステンレス管 (スプリング)	ステンレス管被覆の外側に 500mm 間隔で、約 50mm のスプリングを巻付け、エポキシ樹脂系接着剤で固定。
		ステンレス管 (中空)	ステンレス製の管による被覆で、内部が中空。
	接着剤	エポキシ樹脂系接着剤	

表-2 機器の仕様

読み取り分解能 (最小)	距離	5cm
	ひずみ	0.001%
ひずみ測定範囲		3%
光源パルス幅		20ns
ダイナミックレンジ		8db
測定可能距離		約 25km
距離分解能		2m
ひずみ測定精度		$\pm 0.02\%$

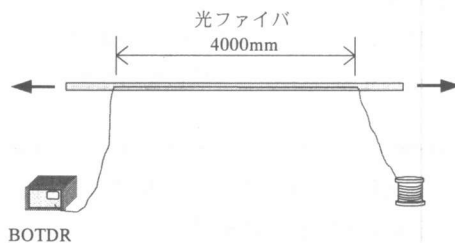
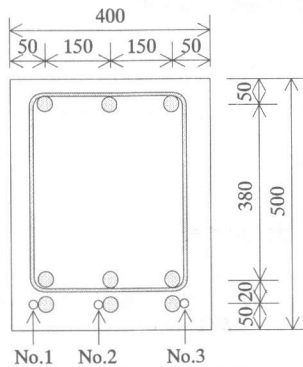
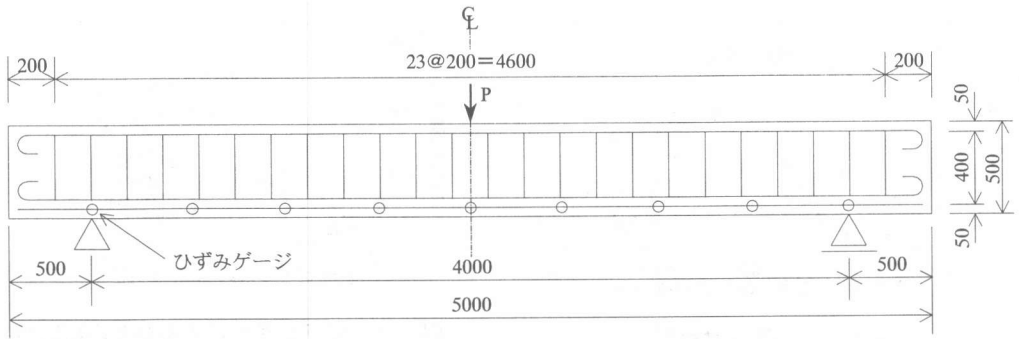
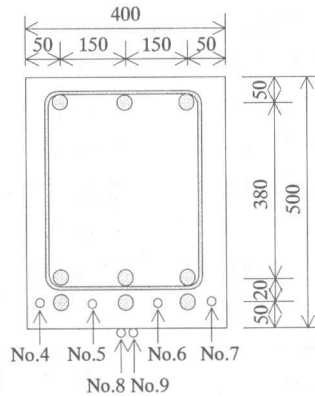


図-1 試験概要図



(a) 試験体1断面図



(b) 試験体2断面図

図-2 試験体形状

り表面貼付け)および光ファイバの種類をパラメータとして、施工性および測定精度の比較を行った。

試験体形状を図-2に示す。光ファイバと鉄筋およびコンクリートとの接着は、エポキシ樹脂系接着剤を用いた。光ファイバは、全長50mで、BOTDRより35mの位置から試験体に取り付けた。コンクリート中に埋め込んだ光ファイバは、たるまない程度に張力を与え、打設時にバイブレーターが触らないよう注意を払った。載荷位置は、スパン中央一点のみとし、鋼材のひずみが降伏点を越えたと判断した時点で試験を終了した。

3. 実験1の結果および考察

測定区間中央部における光ファイバの荷重-ひずみ曲線を図-3に示す。また、同図に、フックの法則より求めた鉄筋ひずみの理論値を示す。理論値の算定には、鋼材の弾性係数: 2.06

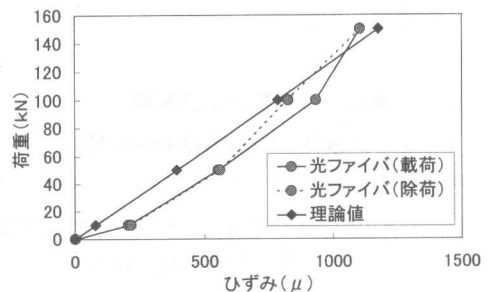
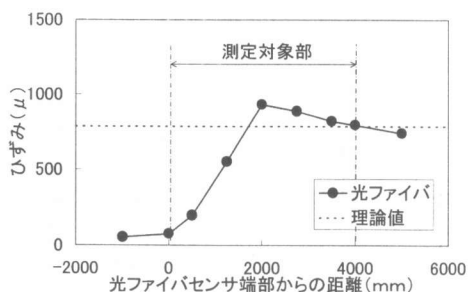


図-3 荷重-ひずみ曲線

$\times 10^{11}$ (Pa) と、実測径より算出した丸鋼の断面積を使用した。

光ファイバによるひずみ測定値は、ひずみの小さい範囲において理論値よりやや大きく測定される傾向があるものの、鉄筋ひずみ 1.0×10^{-3} 載荷後の除荷時のひずみも測定できることが確認された。

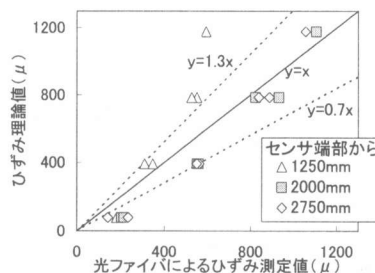
荷重 100kN における光ファイバのひずみ分布図を図-4に示す。光ファイバによるひずみ測定値は、センサ端部(0mm)から増加し、2000mm



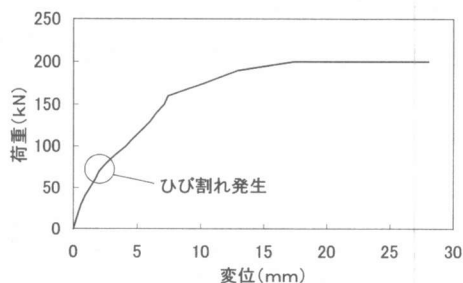
図－４ ひずみ分布図

において最大値となり、2000mm から4000mm ではやや減少した。測定区間においてパルス光入射側にあたるセンサ端部から2000mmの間のひずみの値は、理論値よりも全般的に小さく、2000mm から4000mmの間では理論値に近い値を示した。

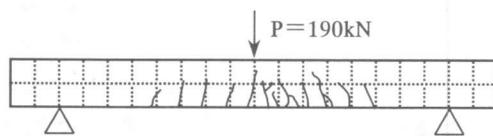
光ファイバセンサ端部からの距離1250mm、2000mm および2750mmを対象とした光ファイバによるひずみ測定値と理論値との比較を図－5に示す。上述した通り、1250mmの位置において、ひずみは小さく測定されているものの、今回の実験では、ひずみの測定誤差は、概ね±30%という結果であった。



図－５ 光ファイバによるひずみ測定値と理論値の比較



図－６ 荷重－変位曲線（試験体１）



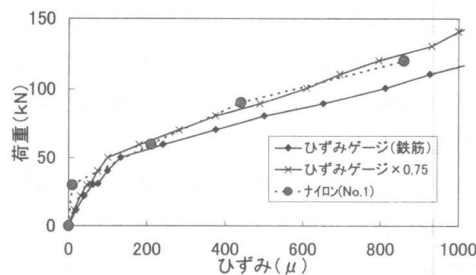
図－７ ひび割れ分布図（試験体１）

４． 実験２の結果および考察

４．１ 試験体１の結果および考察

試験体１では、ナイロン(No.1)、ステンレス管(中空)(No.2)およびステンレス管(No.3)で被覆した光ファイバを、鉄筋に貼り付けた。

曲げ載荷を行う前に、光ファイバNo.1～No.3の破断状況を確認したところ、全ての光ファイバが健全であった。しかしながら、ステンレス管(中空)(No.2)およびステンレス管(No.3)で被覆した光ファイバは、試験結果に大きなばらつきが見られ、参考となるデータを得られなかった。この原因は、今回の実験で使用したステンレス管の剛性が高く、径が大きいため、鉄筋への接着が十分でなかった、あるいは、ねじれ等が生じたことによるものと考えられる。今後、剛性が低く、作業性の良い材料の利用や施工方法について検討していく必要があるものと思わ



図－８ 荷重－ひずみ曲線（No.1）

れた。

試験体１の荷重－変位曲線を図－６に、ひび割れ分布図を図－７に示す。

スパン中央におけるひずみゲージとナイロン(No.1)で被覆した光ファイバの荷重－ひずみ曲線を図－８に示す。同図から、RC梁の鉄筋に貼り付けたひずみゲージと光ファイバの荷重－

ひずみ曲線には、同様の傾向があることが分かる。全般的に光ファイバによる値は、鉄筋ひずみゲージによる値よりも小さく測定されているが、光ファイバの値は、入射波の波長が2mであるので、計測位置前後1mの平均値を表すため、曲げ試験の場合、理論的には実際の中央部のひずみの75%と測定されるはずであり、鉄筋ひずみゲージの測定値の75%ラインとほぼ一致する。

4. 2 試験体2の結果および考察

試験体2では、ナイロン(No.4)、ナイロン(スプリング)(No.5)、ステンレス管(スプリング)(No.6)およびステンレス管(No.7)で被覆した光ファイバをコンクリート中に埋め込み、ナイロン(No.8)およびステンレス管(No.9)で被覆した光ファイバをかぶり表面に貼り付けた。

曲げ載荷試験を行う前に光ファイバ No.4~No.9の破断状況を確認したところ、全ての光ファイバが健全であった。しかし、光ファイバ No.5については、載荷前にひずみ分布が生じており、試験体に平行に設置されていないと考えられたため、データを無効とした。

試験体2の荷重-変位曲線を図-9に、ひび割れ分布図を図-10に示す。

(1) コンクリート内部に埋め込んだ光ファイバの結果および考察

スパン中央におけるひずみゲージとナイロン(No.4)、ステンレス管(スプリング)(No.6)およびステンレス管(No.7)で被覆した光ファイバの荷重-ひずみ曲線を図-11に、荷重60kN、120kNおよび165kNにおけるひずみゲージとナイロン(No.4)で被覆した光ファイバのひずみ分布図を図-12に示す。

今回の実験では、光ファイバの被覆によるひずみの値の違いは見られなかった。また、光ファイバのひずみの値は、ひずみゲージよりも小さく測定されていた。これは、図-12から明らかのように、ひずみゲージのひずみが三角形に分布しているのに対し、光ファイバのひずみは、値が小さく、台形に近い分布を示しており、試

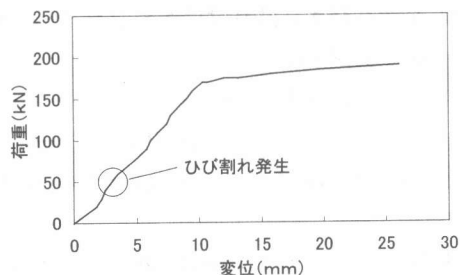


図-9 荷重-変位曲線(試験体2)

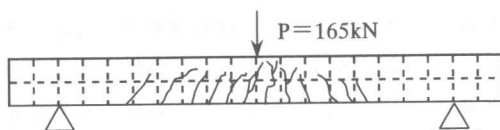


図-10 ひび割れ分布図(試験体2)

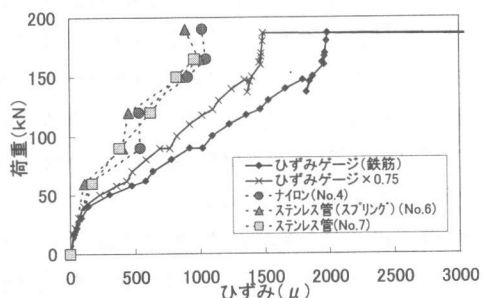


図-11 荷重-ひずみ曲線(No.4, No.6 および No.7)

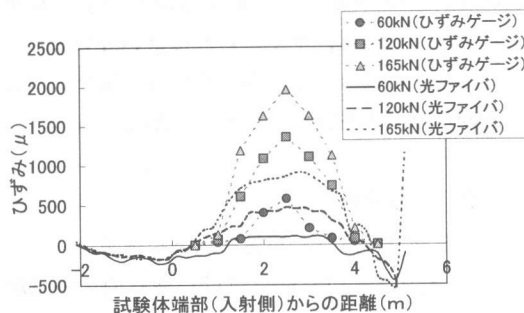


図-12 ひずみ分布図(No.4)

験体1と同様、光ファイバの測定値が、計測位置前後1mの平均を示していることを考慮しなければならない。ただし、鉄筋ひずみの75%としても全般的に光ファイバのひずみは小さく測定されている。従って、この影響以外に、コンクリートと光ファイバ、コンクリートと鉄筋の付着の違いが影響しているものと考えられた。

(2) かぶり表面に貼り付けた光ファイバの結果および考察

スパン中央におけるひずみゲージとナイロン (No. 8) およびステンレス管 (No. 9) で被覆した光ファイバの荷重-ひずみ曲線を図-13 に示す。

鉄筋のひずみゲージの値と、かぶり (50mm) 表面に貼り付けたナイロン (No. 8) で被覆した光ファイバの値はほぼ一致した。本来、測定位置が異なるため、かぶり表面のひずみの方が大きくなるはずであるが、光ファイバによるひずみ測定値は、中央部では実際のひずみの 75% を示すため、見かけ上鉄筋のひずみ測定値と一致したと考えられる。光ファイバをかぶり表面に貼り付けた場合、ステンレス管の方が、ナイロンで被覆した光ファイバよりひずみが小さく測定された。その理由として、コンクリート表面のひび割れや、ステンレス管の貼付けが十分でなかったこと等が考えられた。

荷重 60kN, 120kN および 165kN におけるひずみゲージとナイロン (No. 8) で被覆した光ファイバのひずみ分布図を、図-14 に示す。

荷重 60kN および 120kN の時には、図-12 と同様、ひずみ分布は台形に近かったが、荷重 165kN の時には、やや三角形に近い分布を示しており、降伏点に近い荷重を受けた場合には局所的なひずみを測定できることが分かった。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 光ファイバを貼り付けた鋼材の引張試験では、光ファイバのひずみ測定値は、ひずみが小さい範囲において、理論値よりも大きく測定される傾向があった。また、ひずみ測定誤差は、 $\pm 30\%$ 程度であった。
- (2) RC 梁の光ファイバの荷重-ひずみ曲線は、曲げ試験において、鉄筋に貼り付けたひずみゲージと同様の履歴を示し、スパン中央で比較すると、ひずみゲージの約 75% の値を示した。

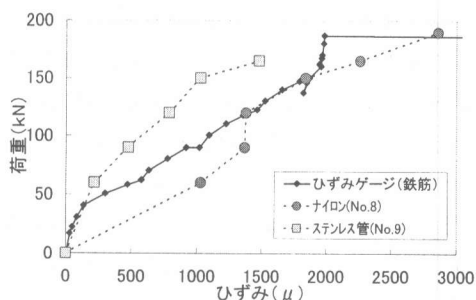


図-13 荷重-ひずみ曲線 (No.8 および No.9)

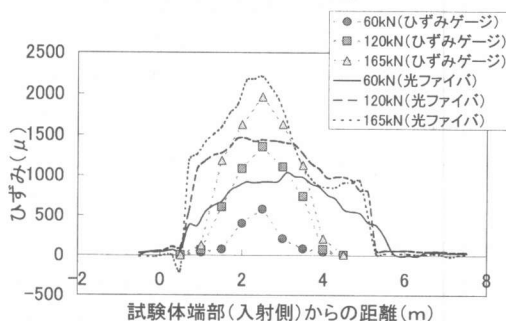


図-14 ひずみ分布図 (No.8)

- (3) RC 梁のコンクリート中に埋め込んだ光ファイバのひずみの値は、平均化され、鉄筋のひずみより小さく測定される以外に付着能力の違いにより、ひずみを過小評価している可能性があった。
- (4) RC 梁のかぶり表面に貼り付けた光ファイバのひずみの値は、かぶり 50mm の場合、鉄筋に貼り付けたひずみゲージの値とほぼ一致した。
- (5) 光ファイバの設置方法としては、光ファイバを鉄筋に貼り付ける、或いは、載荷方向が部材に垂直であれば、かぶり表面に貼り付ける方法が有効であると考えられた。

参考文献

- 1) 西田浩和：スマートストラクチャとしての光ファイバセンシングの動向，コンクリート工学，Vol. 35，No. 4，pp. 35-38，1997
- 2) 倉嶋利雄ほか：光ファイバセンサを用いた構造物歪分布評価方法，地震工学研究発表会講演論文集，Vol. 24，pp. 397-400，1997