

## I-83

コンクリート構造物を用いたOTDRによる  
ひずみ測定に関する基礎実験

計測技販 (株)	正員 須田 修司
計測技販 (株)	正員 後藤 雪夫
N T T アクセス網研究所	野引 敏
N T T アクセス網研究所	正員 倉嶋 利雄
北海道開発局 開発土木研究所	正員 中井 健司
北海道開発局 開発土木研究所	正員 日下部祐基

## 1.はじめに

コンクリート構造物が地震や経年劣化等による原因で、健全性・耐久性が損なわれた場合、その損傷場所およびその変状の程度を、早期に的確に捉える事が出来れば、補修または維持管理が早期に可能となり、構造物自身の安全性・信頼性を大きく向上させることができる。従来、コンクリート構造物の変状の程度・進展を監視するための手法として、ひずみゲージなどの電気的なセンサによる変状の計測が一般的であった。しかし、これらの技術を用いて構造物全体の変状を連続的に把握するためには、多くのセンサを必要とするため、現状では、比較的大きな変状が発生する位置を想定し、数点のひずみゲージなどの点在型センサを取り付け行っている。これらは、代表的な点であって、構造物全体の診断には至らず、広範囲で連続的な監視はきわめて困難であった。近年、ひずみゲージに替わる手法として、光ファイバ自体をセンサとしてひずみ・損失型OTDR(1)を用いる分布型光ファイバセンサが注目されている。この分布型光ファイバセンサは、長距離で連続的なひずみ計測が可能という利点がある。本論では、この利点を生かし、コンクリート構造物の連続的な監視手段として考え、基礎的な実験を行った結果を述べると共に、今後、コンクリート構造物の変状計測を行うまでの課題を述べる。

## 2. 分布型光ファイバセンサの測定原理と解析手法

ひずみ・損失統合型OTDR(1)は、光ファイバの長さ方向に発生したひずみを連続的に測定できる。従って、本測定器を利用することにより、構造物と光ファイバを一体化し、構造物に発生したひずみを光ファイバを介して測定できる。図1に、ひずみ・損失統合型OTDRの基本構成を示す。以下に本測定器の基本原理について簡単に説明する。ひずみ測定では、光ファイバ中のブリルアン散乱光の周波数が光ファイバの長さ方向のひずみに比例して変化するという特性を利用する。ブリルアン散乱光とは、物質に入射した光が物質中を伝搬する屈折率の周期的变化（音波）により散乱され、周波数がシフトする現象である。その散乱光のシフト量 $\nu_B$ が光ファイバに発生したひずみに大きく依存するため、光ファイバ $\nu_B$ がわかれば、ひずみ分布が求められる。

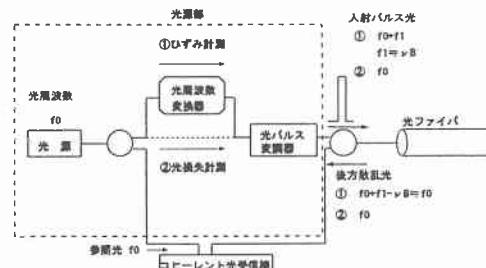


図1 歪み・損失統合型OTDRの基本構成

The Basis experiment about the strain measurements of OTDR which used concrete structure

by Shuji SUDA, Yukio GOTO, Atsushi NOBIKI, Tosio KURASIMA, Kenji NAKAI, and Yuki KUSAKABE

ブリルアン散乱光は、その発生過程で周波数が $\nu_B$ だけシフトするため、光源の周波数 $f_0$ を光周波数変換器を用いてあらかじめ $\nu_B$ に近い周波数 $+f_1$  ( $\approx \nu_B$ )だけシフトさせ、周波数 $f_0 + f_1$ の光パルスを光ファイバに入射する。光パルスの周波数を変化させる毎にブリルアン散乱光 ( $f_0 + f_1 - \nu_B \approx f_0$ ) を測定し、光ファイバの各位置で散乱光パワーが最大となる $\nu_B$ を求める。この $\nu_B$ は、位置毎のひずみに応じて値が異なるので、 $\nu_B$ の値を $\nu_B$ のひずみ係数を用いてひずみの値に換算して、光ファイバのひずみを求める。

### 3. 実験

コンクリート構造物の変状を、光ファイバ及びひずみ・損失統合型OTDRを利用した測定の実用性を検証するため、弾性変形領域における比較的微少なひずみ計測と、弾性変形領域外における比較的大きなひずみ計測とで定量的な評価を目的としたコンクリート梁試験を行ったので報告する。

#### 3. 1 実験方法

図2にコンクリート梁を用いた曲げ実験要領を、図3にコンクリート梁の断面図を示す。実験は、コンクリート梁（横 $0.4\text{ m} \times$ 高さ $0.5\text{ m} \times$ 長さ $10\text{ m}$ ）の表面の長さ方向に光ファイバを貼付し、コンクリート梁中央に重さ $4t$ 及び $12t$ の荷重を加えることにより、曲げを発生させ、そのときに梁に発生するひずみを梁に張付した光ファイバとひずみ・損失統合型OTDRを用いて測定するというものである。同時にひずみゲージを設置し、光ファイバで測定したひずみ値との比較を行つた。コンクリート梁実験方法は、図3に示すように、2点支持されたコンクリート梁の中央に、重さ $4t$ 及び $12t$ の重りを載せることにより行った。実験に使用した光ファイバは、光通信に使用されている4芯テープ心線と、ナイロン心線を鉄線と並行に被覆した光ファイバで行った。その光ファイバを、それぞれコンクリート梁の上面及び底面の長さ方向に貼付した。また、ひずみゲージは、コンクリート梁内の鉄筋に $1\text{ m}$ 間隔で貼付した。

#### 3. 2 実験結果と考察

コンクリート梁を用いた曲げ試験の試験結果の一例を挙げる。4心テープ心線の光ファイバによるひずみ測定結果を表1に示し、弾性変形領域内でのひずみ測定結果を図4に、弾性変形領域外でのひずみ測定結果を図5に示す。また、ナイロン心線鉄線入り被覆の光ファイバによるひずみ測定結果を表2に示し、弾性変形領域内でのひずみ測定結果を図6に、弾性変形領域外でのひずみ測定結果を図7に示す。

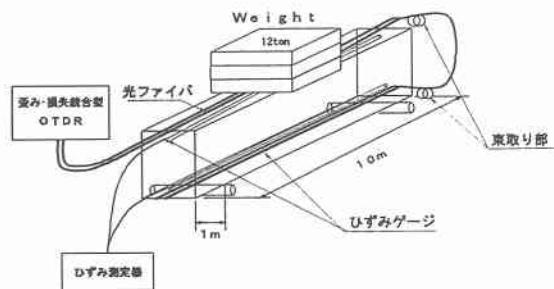


図2 コンクリート梁曲げ試験

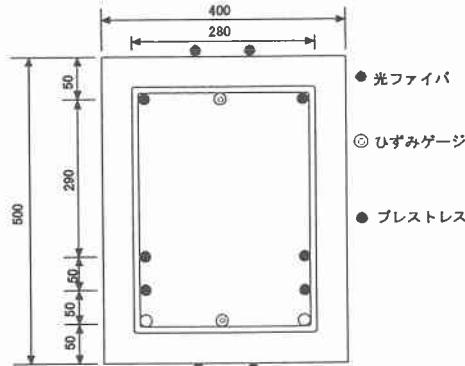


図3 コンクリート梁断面

表1 4心テープ芯線 測定結果表

載荷量	計器名	距離									単位 $\times 10^{-6}$
		1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	
荷重4t	光ファイバ	96	66	-114	-164	-264	-84	-104	-94	-104	
	鉄筋ひずみ	-1	-38	-75	-106	-106	-109	-75	-46	-3	
荷重4t	光ファイバ	106	86	56	-24	166	-4	-164	-74	-164	
	鉄筋ひずみ	9	41	79	118	146	112	79	42	10	
荷重12t	光ファイバ	34	-26	-266	-526	-776	-426	-286	-176	-126	
	鉄筋ひずみ	-17	-103	-205	-352	-415	-360	-202	-112	-17	
荷重12t	光ファイバ	34	84	144	344	594	84	-176	-126	-276	
	鉄筋ひずみ	0	83	177	818	1333	328	181	93	2	

表2 ナイロン芯線鉄線入り被覆 測定結果表

載荷量	計器名	距離									単位 $\times 10^{-6}$
		1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	
荷重4t	光ファイバ	62	-58	-8	-118	-238	-198	-118	-108	2	
	鉄筋ひずみ	-1	-38	-75	-106	-106	-109	-75	-46	-3	
荷重4t	光ファイバ	113	52	113	203	-48	2	-8	83	163	
	鉄筋ひずみ	9	41	79	118	146	112	79	42	10	
荷重12t	光ファイバ	187	17	-33	-213	-593	-543	-213	-113	27	
	鉄筋ひずみ	-17	-103	-205	-352	-415	-360	-202	-112	-17	
荷重12t	光ファイバ	7	127	147	417	987	457	197	87	-53	
	鉄筋ひずみ	0	83	177	818	1333	328	181	93	2	

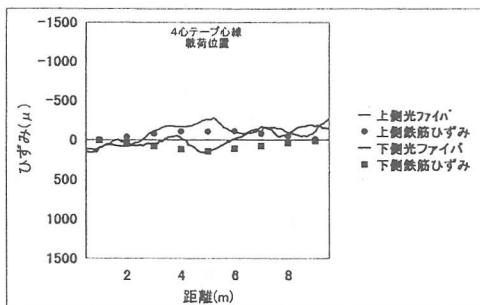


図4 弹性変形領域内(荷重4t)ひずみ分布図

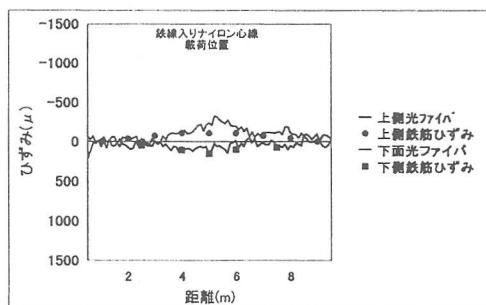


図6 弹性変形領域内(荷重4t)ひずみ分布図

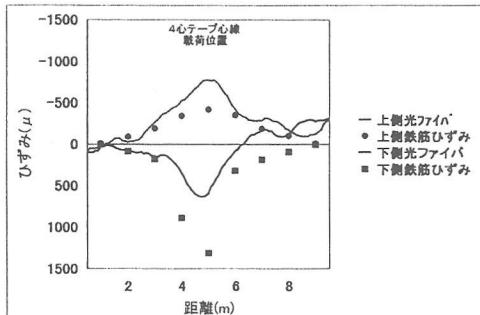


図5 弹性変形領域外(荷重12t)ひずみ分布図

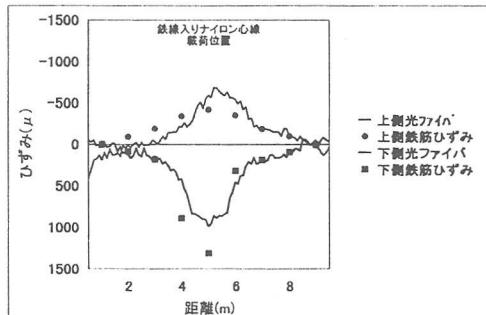


図7 弹性変形領域外(荷重12t)ひずみ分布図

■および●がコンクリート梁における下側(■)、および上側(●)の鉄筋に1m間隔で貼付したひずみゲージによる各ポイント毎のひずみの測定結果であり、点線および実線がコンクリート梁の上面および下面に貼付した光ファイバによるひずみ分布測定結果である。光ファイバとひずみゲージが貼付されている位置がコンクリート梁の高さ方向で0.05m離れているため、ひずみゲージにより測定されたひずみ値をコンクリート梁の上面および下面の位置のひずみに換算することにより、光ファイバおよびひずみゲージを用いて測定されたひずみの値の比較を行った。図4～7の結果より、光ファイバの連続的なひずみ分布の測定結果とひずみゲージの各位置での測定結果を比較すると、弹性変形領域内(図4、図6)、弹性変形領域外(図5、図7)、ともに、多少のバラツキはみられるが、ほぼ同様の分布傾向が確認できた。また、4心テープ心線の光ファイバとナイロン心線鉄線入り被覆の光ファイバの種類の違いによる、ひずみ追随性の違いは見られなかった。

#### 4.まとめ

ひずみ・損失統合型OTDRを用いた、コンクリート構造物変状監視のためのモデル実験として、コンクリート曲げ試験を行った。実験では、コンクリート梁内部の鉄筋に点在するひずみゲージの値と、コンクリート梁の長さ方向の表面に貼付した光ファイバのひずみ測定値を、ひずみ一覧表または、ひずみ分布図により比較を行った。また、実験には細絹の光ファイバ（4心テープ心線）と、被服が厚くさらに光ファイバ（ナイロン心線）と並行に鉄線が被覆内に入っている光ファイバとを同条件で測定を行いひずみ値の違いを比較した。その結果光ファイバの長さ方向のひずみ分布と、各点におけるひずみゲージのひずみ測定値には、同様な分布傾向があることがわかった。しかしながら、光ファイバの種類の違いによるひずみ測定値の違いはあまりみられなかった。

以上の事から、コンクリート構造物におけるひずみ分布測定の手法として、ひずみ・損失統合型OTDRを用いた光ファイバのひずみ分布測定が有効であることがわかる。

今後は、様々なコンクリート構造物に適応できる光ファイバの開発と施工方法の確立を目指し、研究開発を進めていき、ひずみ・損失統合型OTDRを用いた光ファイバによるひずみ測定を一つの手段として、ひずみゲージやその他の点在型センサとともに、互いの長所を生かしたコンクリート構造物変状監視システムの構築を目指していきたい。

#### 参考文献

- 1) 倉嶋利雄：片端から非破壊で光ファイバの歪み・損失を測定 NTT技術ジャーナル、1997.6
- 2) 倉嶋利雄、田中邦昭、薄 知規：光ファイバ歪みセンサを用いた構造物歪み測定法の提案、地盤工学会北海道支部技術報告集、第37号、P41～46、1997.2
- 3) 倉嶋利雄、佐藤昌志：光ファイバを用いた構造物のひずみ分布計測、土木学会誌、P18～20、1997.12
- 4) 倉嶋利雄、薄 知規、田中邦昭、佐藤昌志、加賀谷芳之：光ファイバセンサを用いたコンクリート構造物の歪み分布測定、応用物理学会、光波センシング技術学会、LTS19-4、P23～29、1997.5