

光ファイバーセンサーを用いた土木構造物モニタリングシステムの開発

Development of Monitoring System Using Optical-Fiber Sensor for Civil Engineering Field

(株) K G E	○正員	只野 暁 (Satoshi Tadano)
(独) 開発土木研究所	正員	畑山 朗 (Akira Hatakeyama)
室蘭工業大学	正員	岸 徳光 (Norimitsu kishi)
(株) 共和電業		上杉 太郎 (Taro Uesugi)

1. はじめに

近年、トンネルや橋梁等の土木構造物を維持管理する上で、危険箇所の特定期間・補修工事・点検方法の改善を行うとともに、経時変化によって生じる挙動を的確に捉えるために、構造物に対する長期的な挙動計測を行う事が重要である。

現在、構造物の挙動には比較的長期安定性に優れているひずみゲージ型変換器を用いたシステムが多く用いられている。しかしながら、ひずみゲージ型変換器を用いる場合には、1) 絶縁性能の低下すること、2) 落雷等の電氣的な障害に弱いこと、3) 外部の電気によってノイズを拾う可能性があること、4) センサー部からデータ処理器までにケーブルの配線が必要となること、等の問題点が指摘される。

これに対して、光ファイバーセンサーはこのような問題点を軽減できることから、その応用に関する研究が盛んに行われている。

本研究では、光ファイバーセンサーの中でも多点計測が可能な屈曲型光ファイバー式ひずみ変換器を用いたモニタリングシステムを開発し、実規模橋梁模型を用いた静載荷実験計測に適用することによってその妥当性を検討した。

本稿では、屈曲型光ファイバー式ひずみ変換器の基本構成、測定原理を述べるとともに、実際の計測結果から今後の実用性にむけての課題を述べる。

2. 光ファイバーセンサーの概要

2.1 光ファイバーセンサーの特徴

光ファイバーを用いたセンサーにおける最大の特徴は光ファイバー自体が絶縁体であるために強電、電磁ノイズの影響を受けづらく、落雷対策が不要であるという点が挙げられる。また、電氣的な絶縁低下による測定値の変動も生じない。

光ファイバーを用いたひずみ計測手法としては、光干渉法・光偏光法・光伝播損失法がある。ファブリ・ペロー干渉計、ブラッググレーティング型ファイバーセンサー等の光干渉法・光偏光法は精度的に優れているが、装置が複雑で高価であるという問題がある。

光伝播損失法のうち分布型光ファイバーセンサーと呼ばれるものは、光ファイバー全体をセンサーとして使用し、ブリルアン散乱光によってひずみを「線」または「面」で測定するセンサーであるが、測定器自体が高価であり、ファイバー全体を測定対象物に密着させなければならない

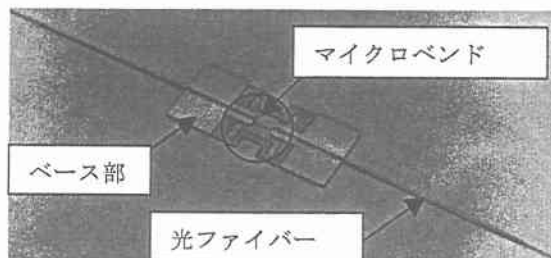


写真1 光ファイバー素子部分

いため既存の構造物に対して測定を行うには不利な点が多い。

光伝播損失法の一つである屈曲型光ファイバーセンサーの素子部は、ファイバーに曲げを与えたマイクロバンド部とそれを保持するベース部分より構成されている。

写真1は光ファイバーセンサー素子部を表している。

原理的には、屈曲型光ファイバーセンサーを変換器の受感部分（起歪部）に取付け、起歪部に発生するひずみによるマイクロバンド部分の変形で生じる光の損失量から物理量を求めるものである。

構造が簡易であるため、低コスト化が可能となる。また、従来のひずみゲージ式変換器と同様な外観をとることによって設置も容易であり、より高精度な測定が可能となる。また測定器に市販のOTDR試験器を用いることでシステムの低コスト化を図っている。

2.2 屈曲型光ファイバーセンサーの原理

はじめに、ファイバーに光損失が生じる原理について述べる。^{1) 2)}

光ファイバーに曲げ（屈曲）を与えると、光ファイバー中の光波の光伝搬モードが変化し、導波モードが一部放射モードになり、光波が光ファイバー内から外へ放射され、曲げによる損失が生じる。

図1に光ファイバー内の光伝播の模式図を示す。

光ファイバー中の光線は、コア（光が伝搬する光ファイバー中心部）とクラッド（コアの外部にある部分で屈折率はコアより若干低い）の境界で全反射しながら光ファイバー中を伝播しているが、光ファイバーに曲がりを持たせることにより、コアとクラッドの境界部分において光線の入射角が全反射の臨界角を越え、その光線はコアとクラッドの境界で屈折しクラッド層へ透過して光損失が生じる。

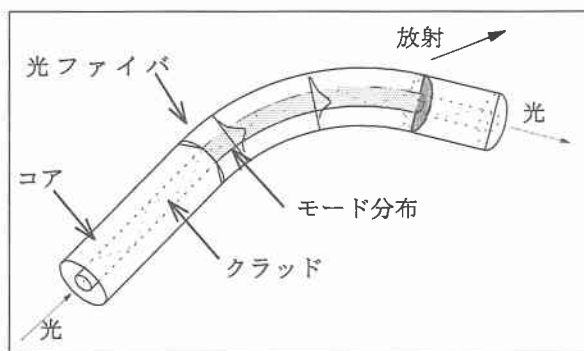


図-1 光伝播模式図

2. 3 計測方法およびひずみ評価法

本研究では光損失量を、光強度の変化を利用して測定する方法の一種である、OTDR法(Optical Time Domain Reflectometry: 光時間領域反射測定法)を用いることとした。

OTDR法は、本来光通信用ファイバーケーブルの破断点の位置や伝送損失を測定するために開発された測定方法であり、光ファイバーケーブル敷設時点検、光ネットワークの保守などの目的で実用化され、現在広く使用されている。

OTDR試験器は、接続された光ファイバに光パルスを送り返し入射させ、その光パルスが光ファイバ中を伝播する際に、光ファイバの長手方向の各点で散乱あるいは反射しOTDR試験器に戻ってくる後方散乱光の光強度およびその位置を測定するものである。

散乱し入射側に戻ってくる光強度は、その場所での伝播光の光強度に比例することより、後方散乱光の光強度を測定することによって、光ファイバ内の光損失の測定が可能となる。

図-2に、OTDR測定信号の模式図を示す。

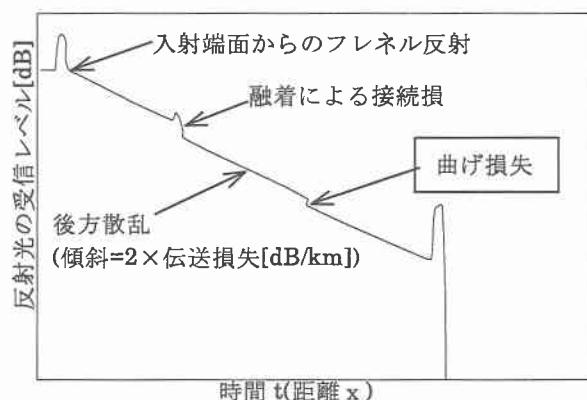


図-2 OTDR信号の模式図

図において、光ファイバ中また、コネクタ接続点、破断点など屈折率の不連続点があると、さらに光ファイバに屈曲部がある場合にはその点でフレネル反射が生じるため、光が入射端(OTDR側)に戻ってくる。

前述したように光放射損失を生じ伝播光が急激に低下しそれに比例して後方散乱光も急激に低下する。

屈曲型光ファイバーによる計測はこの光ファイバーの屈曲部における光損失をOTDRによって測定し、損失の始点と終点の段差部分の値から、ひずみ値を求めるものである。

2. 4 屈曲型光ファイバーセンサーの較正方法

屈曲型光ファイバーセンサーの曲げによる光損失量から実際の物理量を求めるためには、基準となる変動量を与え、その値を他の基準となるセンサーで読みとり、OTDR試験器で測定された光損失量との相関から、較正係数を求める必要がある。較正式は測定値の精度を求めるために、5次式で近似曲線を描き評価している。

2. 5 多点計測システムの仕組み

屈曲型光ファイバーセンサーは、光の損失量からひずみ値を求める方式であることから、センサーを直列に繋ぐことにより、多点を一本の光ファイバーのライン上で計測することが可能である。なお、測定可能な点数は、全体的な光損失量によって影響されるため最大5点が限度である。

また、OTDR試験器と光ファイバーセンサー間に光チャンネルセレクターを設けることにより、最大16本の光ファイバーを順次切り替えて計測する事を可能とし、本システムでは1台のOTDRに対して最大5台×16本=80点のセンサーを測定することが可能である。

図-3に多点計測システムの概略図を示す。

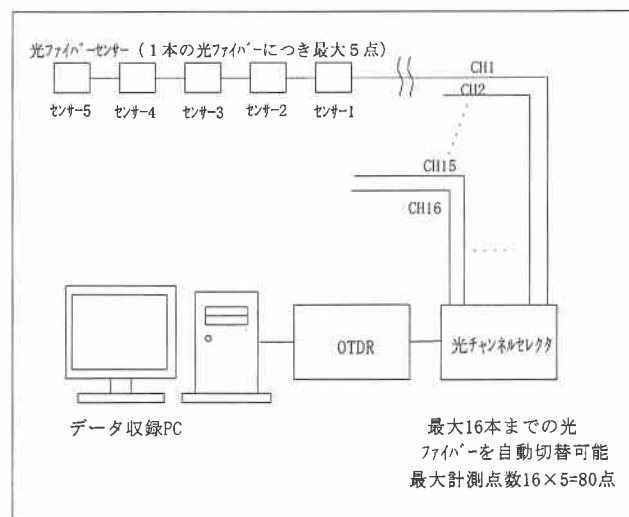


図-3 多点計測システム概略図

1点当りの測定・処理時間は最小4秒で、光チャンネルセレクターによるチャンネルの切替は1秒である。

測定は任意の時間間隔で行い、データ収録コンピュータの画面上にそれぞれのセンサーの時系列グラフと、現在の値が表示することができる。収録データは順次コンピュータに取り込まれ保存されるシステムとなっている。

3. 実規模橋梁模型を用いた光ファイバーセンサーの計測システムの妥当性検討

3. 1 測定概要

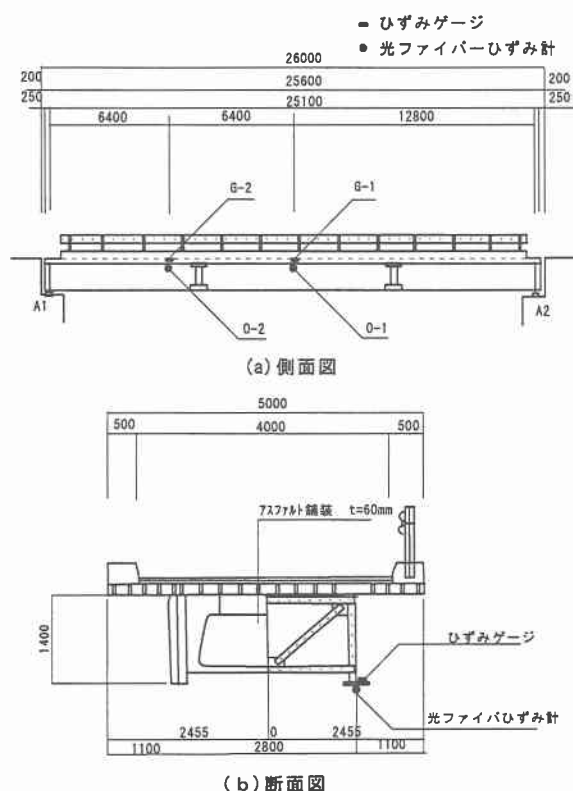
光ファイバーセンサーを用いた計測システムの妥当性を検討することを目的に、江別市角山の北海道開発局実験場内に製作されている単純支持鋼合成サンドイッチ床版を用いた実規模橋梁模型を用いた静載荷実験を実施した。

写真－2には橋梁模型の全景を、図－4には概略図およびセンサー設置位置を示している。

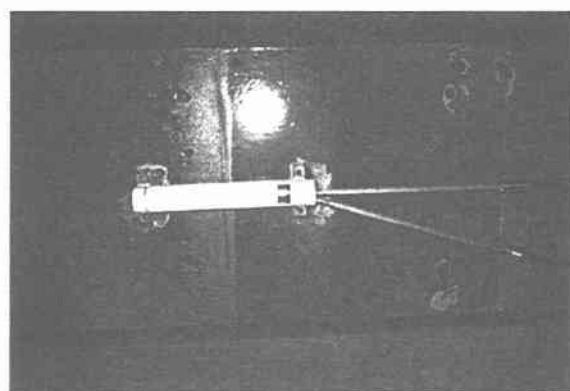
図に示されているように、センサーはスパン中央部およびL/4点の主桁下フランジ部にベンチマークとしてひずみゲージは上面に、光ファイバーセンサーは下面に設置している。写真－3は光ファイバーひずみ計の設置状況を示している。



写真－2 橋梁模型全景



図－4 概略図およびセンサー設置位置図



写真－3 光ファイバーひずみ計設置状況

光ファイバーセンサーは複数のセンサーを1本の光ファイバーのケーブルで計測するために、各々のセンサー間を融着接続器によって接続し、接続損失を低減した。

3. 2 実験方法

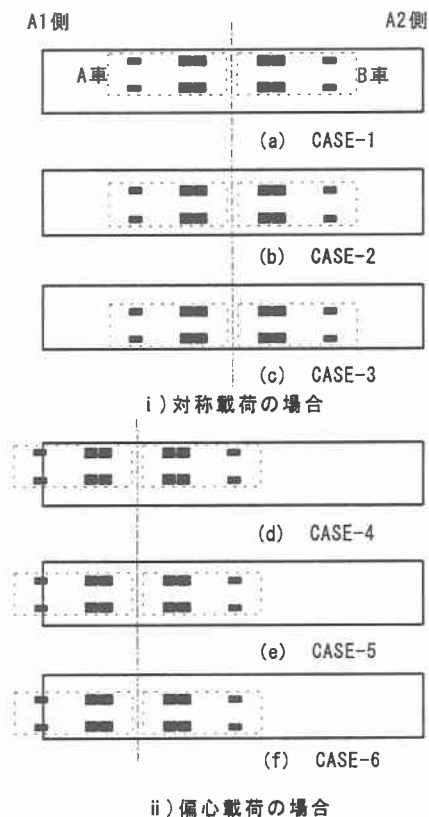
本研究では橋梁の静的挙動を測定するためにダンプトラックを用いた静載荷試験を実施した。

荷重は2台の11トンドンプトラックに土砂を積載して総重量を20トンに調整し載荷することとした。

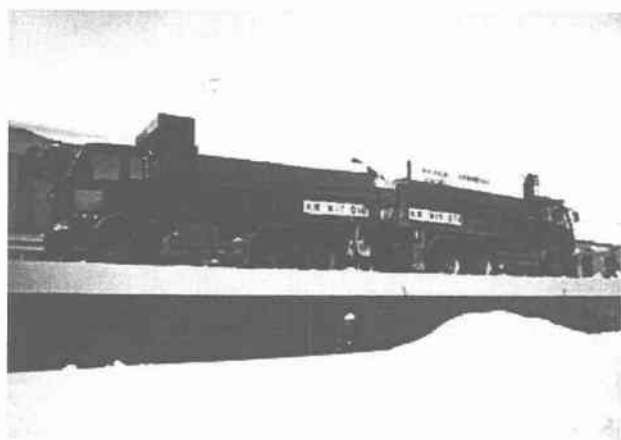
図－5には、載荷ケース及び載荷位置を示している。

写真－4には実験状況を示している。

ひずみ計およびひずみゲージの設置位置を中心にダンプトラックを停止させ、各ひずみを測定することとした。



図－5 静的載荷試験ケース



写真—4 試験状況

3. 3 静的載荷試験結果

表—1 にはひずみゲージおよび光ファイバーセンサーから得られた測定結果の一覧、および光ファイバーセンサーのひずみゲージセンサー出力に対する誤差を示している。

なお、光ファイバーセンサーの出力はひずみの線形変化を仮定してひずみゲージ添付位置からの値に換算したものである。

表—1 静的載荷試験結果

CASE	位置	ひずみゲージ ($\mu\epsilon$)	光ファイバー ($\mu\epsilon$)	誤差 (%)
1	1/4L	138	139	0.72
	1/2L	203	196	3.45
2	1/4L	122	120	1.64
	1/2L	169	169	0.00
3	1/4L	134	130	2.99
	1/2L	136	141	3.68
4	1/4L	113	117	3.54
	1/2L	118	116	1.69
5	1/4L	107	109	1.87
	1/2L	143	142	0.70
6	1/4L	94	90	4.26
	1/2L	97	99	2.06

表より各実験ケースの光ファイバーの測定結果とひずみゲージから得られた測定結果は誤差が CASE6 を除いて最大 4 % 程度であり、CASE6 において 4.3 % 程度となっている。これより本研究で提案した光ファイバーセンサーを用いた計測システムは、ひずみゲージ出力と類似の値を示し、実務で十分応用可能であると判断できる。

4. まとめ

本研究では光ファイバーセンサーを用いた土木構造物モニタリングシステムの開発を目的として、実規模橋梁模型に光ファイバーセンサーの設置を行い、静載荷試験を実施し、その妥当性を検討した。

光ファイバーひずみ計から得られた値はひずみゲージのしめす値と類似した値を示したことから、光ファイバーひずみ計は土木構造物のモニタリングを行うセンサーとして、使用する事が可能である。

5. 今後の課題

光ファイバーひずみ計が設置されている対象部材の材質および形状、取付方法によってひずみの発生状況が異なることから、それぞれの部材・取付方法に応じたひずみ計の較正を行う必要がある。

さらに対象構造物に発生する応力の状況はねじれ・曲げ・せん断等多様であることから、それぞれの状況を想定した試験を行い、光ファイバセンサーの値が実挙動に対応しているかを検証する必要がある。

また、現在、光ファイバー変位計・光ファイバー傾斜計を作成し、それらについても同様に設置を行いデータの蓄積を行っている。今後これらのセンサーについても実用化に向けて検証を行っていく予定である。

6. 参考文献

- 1) 末松安晴、伊賀健一：光ファイバ通信入門、pp206、1989
- 2) 大越孝敬、岡本勝就 保立和夫：光ファイバ、pp324、1983