

光ファイバ歪みセンサを用いた構造物歪み分布評価法

倉嶋利雄¹・薄 知規²・田中郁昭²・佐藤昌志³

¹正会員 工博 NTTアクセス網研究所 探査センシングプロジェクトグループ (〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 162)

²NTTアクセス網研究所 光加入者ケーブルシステム研究部 (〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 162)

³正会員 工博 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室 (〒062 札幌市豊平区平岸 1条3丁目)

構造物の安全性・信頼性の評価を行う上で、構造物自体の損傷の程度を的確に捉えることは重要である。従来実施されている構造物の損傷の発生・進展の程度を調べるための評価手段は、歪みゲージなどの電気的なセンサを用いた方法であり、構造物の変状を連続的に調査するために多くのセンサを用いなければならないだけでなく、センサ毎に電力・信号ケーブルを必要とするなど設置および維持管理上問題点が多かった。本論では、これらの問題点を解消するための手段として期待されている、光ファイバ歪み・損失統合型OTDRを用いた構造物の変状計測手法について検討を行った。モデル実験として、コンクリート単純梁の曲げ試験を行い、コンクリート構造物の弾性変形限界約100 μ mの歪みを光ファイバを用いて測定可能であることを実験的に確認し、本手法が構造物の歪み分布を測定する手段として有効であることを明らかにした。

Key Words : Optical fiber, Strain measurement, Brillouin scattering

1. はじめに

地震や経年劣化などが原因で、土木構造物が損傷を受けた場合、その発生場所およびその程度を早期に知ることができれば、構造物自体の安全性・信頼性を大きく向上させることができる。従来、構造物の損傷の発生および進展を監視するために、電気式の歪みゲージを用いて構造物の変位が計測されている。しかし、これらの技術を用いて構造物の変状を連続的に監視するためには、多くのセンサを必要とし、さらに各々のセンサに電源を供給するためのケーブルおよび信号ケーブルが必要となることから、センサの設置や継続的監視の際の維持管理の面からも問題点が多い。また、これらの技術ではセンサによって検知される情報が、「点の情報」にならざるを得ず、「線」もしくは「面」としての広範囲にわたる連続的な監視は事実上不可能であった。そこで、近年、構造物の連続的な監視手段^{1)・3)}、または構造物のインテリジェント化のためのセンサ^{4)・6)}として、光ファイバ自体をセンサとして用いる分布型光ファイバセンサが注目を浴びている。しかし、これらセンサの大半は、構造物と一体化された光ファイバの破断から構造物の損傷位置をOTDR (Optical time domain reflectometer)⁷⁾を用いて検出するものであり、構造物が破壊する前にその位置・規模を検出することは難しい。

本論では、従来の構造物監視用光ファイバセンサの課題、上記課題を解決するための手段として期待されているNTTアクセス網研究所が開発した歪み・損失統合型OTDR^{8)・9)}の原理・性能、および本測定器を用いたコンクリート構造物変状監視モデル実験について述べる。

2. 従来の構造物監視用光ファイバセンサの問題点

光ファイバ自体をセンサとして用いる分布型光ファイバセンサは、光ファイバ長さ方向の任意の点がそれぞれ外的要因に対してセンサ機能を持つため、光ファイバに沿った被測定物理量を連続的に計測可能である。分布型光ファイバセンサの大部分は、OTDRの測定手法を利用している。OTDRは、入射されたパルス光が光ファイバを伝搬中に各種の光散乱要因により後方散乱された光(後方散乱光)を時間分解測定するものである。従って、後方散乱光の特性が被測定物理量により変化するならば、OTDRを用いて被測定物理量の分布計測が可能となる。すなわち、後方散乱光の特性変化量から被測定物理量の変化量を求め、パルス光の光ファイバ内伝搬遅延時間差から被測定物理量が変化している位置を特定する。

これまでに提案されている構造物の損傷を連続的に監視する手法においても、OTDRを用いた光ファイバセンサが積極的に利用されている^{1)・2)・4)・6)}。具体的には、センサ用光ファイバの曲げによる光損失増加および光ファイバの破断によるフレネル反射光の発生から構造物の変状を評価している。以下に本手法の利点を挙げる。

- 1) 構造物とセンサ用光ファイバを一体化することで、構造物の損傷を連続監視できること、
- 2) 光ファイバの光損失増加位置またはフレネル反射光の発生位置から構造物の損傷位置を特定できること、
- 3) 光ファイバの片端にOTDRを配置することにより、構造物から離れた位置で遠隔監視できること。

一方、欠点としては、以下の内容が挙げられる。

- 4) 光ファイバの破断が光損失増加を伴わない張力、あるいは瞬時的な変形を原因とする場合、破断に至る過程の現象を捉えることが困難であり、構造物の損傷予知・損傷に対する適切な対処が難しいこと、
- 5) 光ファイバの曲げによる光損失増加を構造物の損傷発生として検知する場合、曲げが発生しやすい光ファイバの敷設を施すことが必要となり、光ファイバの長期信頼性を低下させる要因となること。さらに、光損失増加が発生した位置より以遠の光損失評価が難しくなること。

ここで特に問題となる点は、本手法が構造物の損傷を、光損失増加を伴わない光ファイバの破断から検出しているために、構造物自体の安全性および信頼性を確保する上で必要な損傷発生過程の現象を的確に捉えられない可能性があることである。この課題を解決するための一手法として、構造物が損傷に至る過程で発生する歪みの大きさとその発生位置を検出することが極めて有効である。歪み・損失統合型 OTDR は、光ファイバの長さ方向に発生した歪みの大きさとその発生位置を測定することが可能である。従って、構造物と光ファイバを一体化することができれば、歪み・損失統合型 OTDR を用いて、構造物に発生した歪み分布を連続的に測定することが可能になる。

3. 歪み・損失統合型 OTDR

歪み・損失統合型 OTDR は、光ファイバの長さ方向に発生した歪みおよび光損失の大きさとその発生位置を光ファイバの片端から非破壊で測定することができる。また、従来の歪みゲージを用いた測定形態とは異なり、本測定器と光ファイバを分離して管理できること、かつ、光ファイバに発生した歪みが保持されることから定期的に歪み量の変化を測定することにより歪みの経時変化を評価できること、が可能になるため、構造物の損傷位置を早期に効率良く発見し適切な対処を実施できるようになる。既に地盤変形の連続的な歪みセンシング技術としての基礎検討が行われている¹⁰⁾。

3.1 動作原理

図1に、歪み・損失統合型 OTDR の基本的な構成を示す。本測定器は、測定モードを切り替えることにより、光ファイバの長さ方向の①歪み分布測定器 (BOTDR : Brillouin OTDR)、および、②光損失分布測定器 (COTDR : Coherent OTDR)、として機能することができる。以下に、本測定器を用いた歪み分布測定原理についてのみ簡単に説明する。

歪み分布測定では、光ファイバ中のブリルアン散乱光の周波数 (ブリルアン周波数シフト : ν_B) が光ファイバに発生した歪みに比例して変化するという特性を

利用する¹¹⁾。ブリルアン散乱光は非常に微弱であるため、散乱光を高感度に検出することができるコヒーレント検波器が必要となる。ブリルアン散乱光は、光ファイバに入射された光が光ファイバ中を伝搬する過程で引き起こす、周期的な光ファイバガラスの密度のゆらぎ (超音波) による散乱光である。この密度ゆらぎも光ファイバ中を伝搬するために、散乱光の周波数はドップラー効果により、光通信に使用される光ファイバでは、約 10GHz 低周波数側にシフトする (光源波長が 1.55 μm の場合)。微弱な散乱光を低雑音・高感度検出するための手順を以下に示す。図1の①に示すように、レーザーからの出力光 (光周波数 : f_0) を光合分波器で2つに分波し、1つを光周波数変換器を介してパルス光を作るための光源とする。他の1つをコヒーレント検波に使用するための参照光とする。パルス光は光合分波器を介して光ファイバに入射され、光ファイバ中で発生する後方ブリルアン散乱光を光合分波器を介してコヒーレント光受信器で受信する。前述したように、ブリルアン散乱光の周波数は入射パルス光の周波数に比べ約 10GHz 低いいため、ブリルアン散乱光と参照光の周波数差がほぼ等しくなるように、光周波数変換器を用いてあらかじめ約 10GHz 高周波数側にシフトさせたパルス光 (光周波数 : $f_0 + \sim 10\text{GHz}$) を光ファイバに入射する。このような工夫を施すことにより、散乱光と参照光の周波数 (光周波数 : $\sim f_0$) がほぼ等しくなり、コヒーレント検波 (ホモダイン検波) を用いてブリルアン散乱光を高感度に検出する。光周波数変換器を用いてパルス光の周波数を変化させる毎にブリルアン散乱光を測定し、光ファイバの長さ方向の各場所毎に散乱光の強度が最大となる周波数 ν_B を測定する。各場所毎に測定した ν_B の値を、 ν_B の歪み係数を用いて歪みの値に換算することにより、光ファイバ長さ方向の歪み分布を求める。歪みの発生位置は、パルス光を光ファイバに入射してから後方散乱光が受信部で検出されるまでの遅延時間差を測定することによ

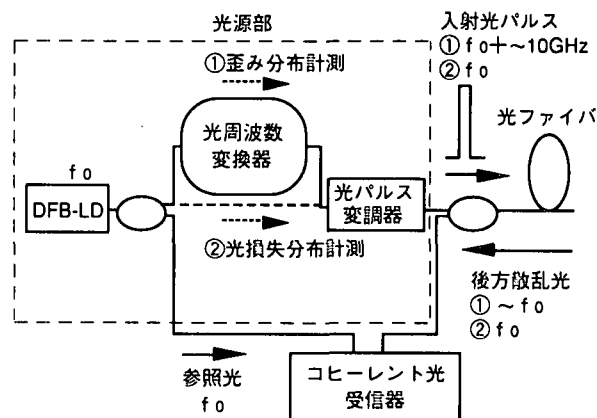


図1 歪み・損失統合型 OTDR の基本構成

り特定する。距離分解能 δz はパルス光のパルス幅 W に依存する。

3.2 性能

被測定光ファイバには、歪み分布を模擬するため、 V_B が $50 \pm 1\text{MHz}$ だけ異なる2種類の光ファイバを接続した光ファイバを用いた。その構成を図2に示す。 V_B の差は V_B の歪み係数 $493\text{MHz}/10^2$ から換算すると、 $(1.01 \pm 0.02) \times 10^3$ に相当する。

図3(a)に、パルス幅 $W=12\text{ns}$ としたときの被測定光ファイバの歪み分布測定結果を示す。 W で決まる距離分解能 δz は 1.2m である。信号の平均化回数は 2^{13} 回である。光ファイバに入射するパルス光のピークパワーは 20dBm である。図3(a)より、歪み最大測定誤差 $\delta\epsilon$ は $\pm 6 \times 10^5$ であること、 2m 以上の光ファイバAの歪み分布が正確に測定されていることが分かる。 1m の光ファイバAの歪みが正確に測定されていない理由は、歪み模擬区間が δz より短いためである¹²⁾。光ファイバ長が短い(光ファイバ損失の影響が小さい)ときの歪み測定精度を調べるため、他端(Z2)からパルス光を入射することにより上記と同様の実験を行った。このときの測定結果を図3(b)に示す。図3(b)より、 $\delta\epsilon = \pm 3 \times 10^5$ で光ファイバ長さ方向の歪み分布が測定されていることが分かる。

4. 実験

コンクリート単純梁の変形状態を、歪み・損失統合型OTDRを用いて測定するための基礎的なモデル実験について、北海道開発局開発土木研究所と共同で行ったので報告する。

4.1 実験方法

図4(a)にコンクリート単純梁を用いた曲げ実験系、図4(b)にコンクリート単純梁の断面図を示す。

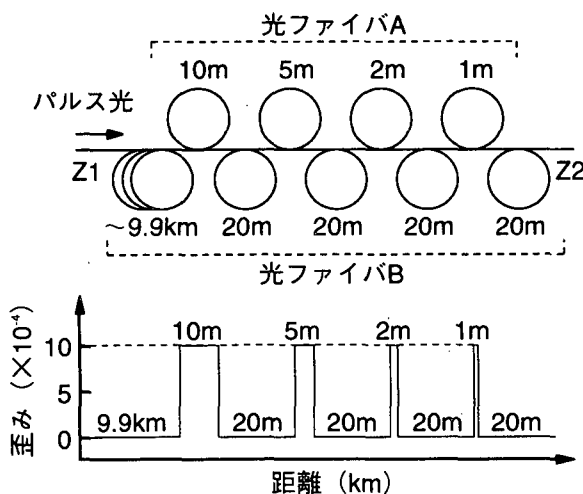


図2 被測定光ファイバ

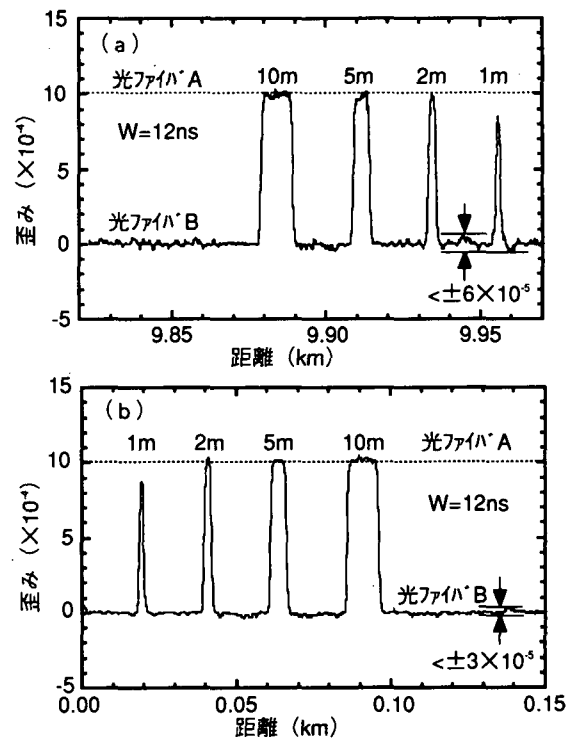


図3 歪み分布測定結果

モデル実験は、コンクリート単純梁(横 0.4m ×高さ 0.5m ×長さ 10m)の表面の長さ方向に光ファイバを貼付し、単純梁の中央に重さ 5t の荷重を加えることにより曲げを発生させ、そのときに単純梁に発生する歪みを単純梁に貼付した光ファイバと歪み・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、歪みゲージを設置し、光ファイバを用いて測定した歪みの値との比較を行った。

コンクリート単純梁の変形方法は、図4(a)に示すように2点支持されたコンクリート単純梁の中央に、重さ 5t の重り(長さ 1.5m ×幅 1.5m ×高さ 0.2m)を載せることにより行った。モデル実験に使用した光ファイバは、通信用光ファイバであり、コンクリート単純梁の上面および底面の長さ方向に貼付した。また、歪みゲージは、コンクリート単純梁内の鉄筋に 1m 間隔で貼付した。

4.2 実験結果と考察

コンクリート単純梁を用いた曲げ試験の試験結果の一例を図5に示す。■、および、●がコンクリート単純梁における下側、および、上側の鉄筋に 1m 間隔で貼付した歪みゲージによる各ポイント毎の歪みの測定結果であり、点線、および、実線がコンクリート単純梁の上面、および、下面に貼付した光ファイバによる歪み分布測定結果である。光ファイバと歪みゲージが貼付されている位置がコンクリート単純梁の高さ方向で 0.05m だけ離れているため、歪みゲージにより測定された歪みの値をコンクリート単純梁の上面および底面

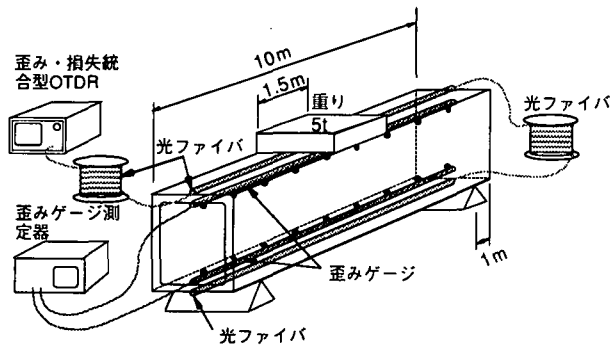


図4 (a) コンクリート単純梁の曲げ試験系

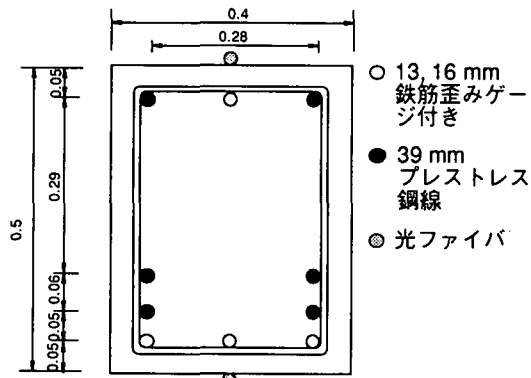


図4 (b) コンクリート単純梁の断面図：単位m

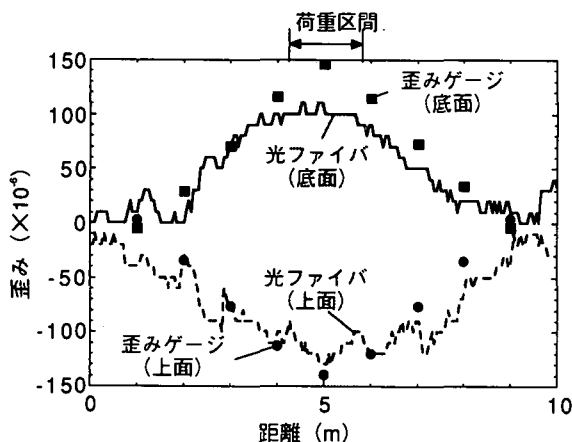


図5 コンクリート単純梁の歪み分布測定結果

の位置の歪みに換算することにより、光ファイバおよび歪みゲージを用いて測定された歪みの値の比較を行った。図5から、光ファイバの長さ方向の連続的な歪み分布測定結果と歪みゲージによる各ポイント毎の歪みの測定結果が、歪み・損失統合型OTDRの測定性能（歪み測定精度 $\pm 30 \times 10^{-6}$ ）でほぼ同様な値を示していることが分かった。

5. まとめ

歪み・損失統合型OTDRを用いた構造物変状監視のためのモデル実験として、コンクリート単純梁の中央部に荷重を加えることによる、コンクリート単純梁の曲げ試験を行った。実験では、コンクリート単純梁の

長さ方向の表面に光ファイバを貼付することにより、コンクリート単純梁に生じた歪みを光ファイバで測定し、かつ、同時に設置した歪みゲージで測定した歪みの値と比較を行った。その結果、光ファイバの長さ方向に発生した歪み分布と歪みゲージにより測定した各ポイント毎の歪み測定値の間には、同様な傾向があることが分かった。以上のことから、コンクリート構造物に発生した歪み分布を測定する手段として、歪み・損失統合型OTDRを用いた光ファイバの歪み分布測定が有効であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 石川、草野、安江：光ファイバを用いたのり面・斜面変状検知システム、土木技術資料、34-12、pp.46-51、1992。
- 2) 岡、小林：光ファイバを用いた土砂崩壊検知システム、光アライアンス、OA12-08、pp. 32-34、1995。
- 3) 倉嶋、立田：光ファイバ歪みセンサを用いた構造物歪み分布評価法の提案、土木学会、第23回地震工学研究発表会、190、pp.683-686、1995。
- 4) 座古、裏垣、小館：光ファイバによる構造物のインテリジェント化に関する研究、日本機械学会、第71期通常総会講演会講演論文集(II)、No.940-10、pp.645-647、1994。
- 5) 北出：光ファイバセンサを用いたスマート複合材料、日本複合材料学会誌、21、2、p.46、1995。
- 6) 影山、金原、鈴木、大沢、島村：スマートストラクチャ概念の船体構造への適用に関する基礎研究(第1報、光ファイバによる変位と損傷の検出方法の検討)、日本造船学会論文集、Vol.178、pp.583-591、1995。
- 7) M. K. Barnoski and S. M. Jensen : Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics, *Appl. Opt.*, Vol. 15, No. 9, pp. 2212-2215, 1976.
- 8) T. Kurashima, M. Tateda, K. Shimizu, T. Horiguchi, and Y. Koyamada : A high performance OTDR for measuring distributed strain and optical loss, *TuD.3.7, ECOC'96*, 1996.
- 9) T. Kurashima, M. Tateda, T. Horiguchi, and Y. Koyamada : Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and optical loss measurement by randomizing the reference light polarization state, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 9, No. 3, pp.360-362, 1997.
- 10) 倉嶋、田中、薄：光ファイバを用いた歪み分布計測、土木学会、岩盤力学に関するシンポジウム、72、pp.378-382、1997。
- 11) T. Horiguchi, T. Kurashima and M. Tateda : Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 1, No. 5, pp. 107-108, 1989.
- 12) 倉嶋、堀口、小山田：高距離分解能BOTDA(2)、電子情報通信学会秋季大会、B852、1994。