

Ⅲ - A 356

光ファイバ歪み・損失統合型 OTDR の高性能化に関する検討

NTTアクセス網研究所

会員 倉嶋利雄

同上

薄 知規

同上

田中郁昭

北海道開発局 開発土木研究所 会員 岩瀬 武

1. はじめに

重要な大型構造物が損傷を受けた場合、または防災対策上の監視が必要な地滑り・岩盤などの斜面の危険性が増した場合、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・斜面の致命的な崩壊、またはそれらの崩壊による災害を未然に防ぐことが可能となり、構造物自体の安全性を大きく向上させることができる。従来、構造物の損傷および斜面の危険性を評価するために、歪みゲージなどの電気的なセンサを用いて評価対象物の歪みや変位が計測されている。しかし、現在の技術では、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評価・監視は事実上不可能であった。

本論では、上記の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 (Optical time domain reflectometer) ⁽¹⁾ の紹介と歪み測定に関する高性能化について報告する。本測定器は、光ファイバに発生した歪みおよび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できるため、大型構造物および地盤変形の連続的な歪みセンシング技術としての応用が検討されている ⁽²⁾。

2. 歪み・損失統合型 OTDR の基本構成

図1に、歪み・損失統合型OTDRの基本構成を示す。歪み・損失統合型OTDR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歪み分布および損失分布を測定することができる。今回、歪み測定に関する高性能化について検討を行ったので、歪み分布測定について説明し、損失分布測定については省略する。

歪み測定では、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 ⁽³⁾ を利用する。ブリルアン散乱光は、入射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ゆらぎによる散乱光である。密度ゆらぎも光ファイバ中を伝搬するため、散乱光の周波数はドップラ効果により、約10GHz低周波数側にシフトする（光源波長が1.55 μm の場合）。微弱なブリルアン散乱光を低雑音・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 ）を光合分波器で分波し、1つをパルス光を作るための光源とし、他方をコヒーレント検波用の参照光とする。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低いので、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（ $f_0 + \sim 10\text{GHz}$ ）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（ $\sim f_0$ ）がほぼ等しくなり、コヒーレント検波を用いてブリルアン散乱光を高感度に検出することができる。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位置毎に散乱光の強度が最大となる周波数を測定する。各位置毎に測定した散乱光の周波数の値を、 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戻ってく

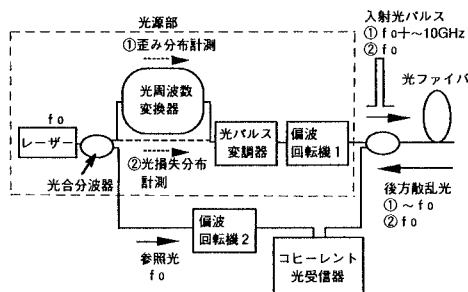


図1 歪み・損失統合型 OTDR の基本構成
（偏波回転機2は高性能化時に追加）

るまでの時間差を測定することにより特定する。距離分解能 δz はパルス光のパルス幅に依存する。

3. 歪み・損失統合型 OTDR の高性能化

3. 1 測定系

今回、改良した歪み・損失統合型 OTDR の構成を図 1 に示す。従来、コヒーレント受信感度の偏波依存性を要因とした受光信号波形のゆらぎを抑制する目的で、偏波回転機 1 (Faraday Rotator: FR1) を用いて光ファイバに入射するパルス光の偏波状態を平均化していた。しかし、パルス光の偏光方向を平均化した場合でも、後方散乱光が任意の偏波特性を有する場合、参照光の偏光方向に依存してコヒーレント検波の受信効率が変化することが考えられる。受信感度の偏波依存性を低減するため、新たに偏波回転機 2 (FR2) を光源とコヒーレント受信器の間に挿入して参照光の偏光状態を平均化した。その他の構成は、文献 1 で報告した内容と同一である。以下に、本測定器を用いた歪み分布測定に関する実験結果について述べる。

3. 2 実験結果・考察

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 (A, B) 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 $493 \text{ MHz/1} \times 10^{-2}$ (4) から換算すると、 $(1.01 \pm 0.02) \times 10^{-3}$ に相当する。

図 3 (a) に FR2 を用いて行った、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 (実験 1) を示す。 W で決まる δz は 1.2 m である。このときの信号の平均化回数は 2^{13} 回である。図 3 (a) より、 100 m 程度の短区間での歪み最大測定誤差 δe は $\pm 6 \times 10^{-5}$ であること、 2 m 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。 1 m 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 (5)。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同様の実験を行った。このときの測定結果 (実験 2) を図 3 (b) に示す。図 3 (b) より、 $\delta e = \pm 3 \times 10^{-5}$ であることが分かる。文献 1 で報告した $\delta e = \pm 1 \times 10^{-4}$ と比較すると、実験 1 (光ファイバ長 10 km) の場合には約 2 倍、実験 2 (光ファイバ長 100 m 程度) の場合には約 3 倍に向上できたことを確認した。

4 まとめ

- (1) 歪み・損失統合型 OTDR の歪み測定に関する基本構成を紹介した。
- (2) 歪み・損失統合型 OTDR を用いた歪み分布測定に関する高性能化について報告した。この中で、光ファイバに発生した歪みを歪み測定誤差 $\pm 3 \times 10^{-5}$ 、距離分解能 1.2 m で測定可能であることを示した。

参考文献

- (1) T. Kurashima, et al., TuD.3.7, ECOC'96, 1996.
- (2) 鈴木他、第 32 回地盤工学研究発表会、1997.
- (3) T. Horiguchi, et al., IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 1, No. 5, pp. 107-108, 1989.
- (4) T. Kurashima, et al., CLEO'91, CThN5, pp. 416-417, 1991.
- (5) 倉嶋他、電子情報通信学会秋季大会、B-852、1994.

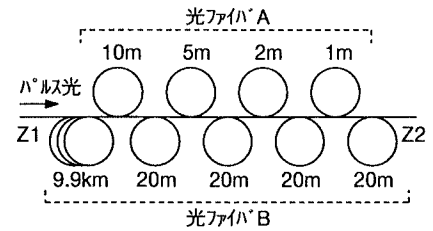


図 2 歪み分布測定用光ファイバ

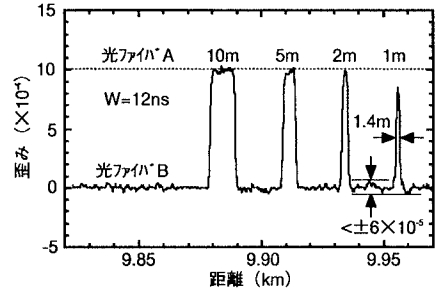


図 3 (a) 歪み分布測定結果 (実験 1)

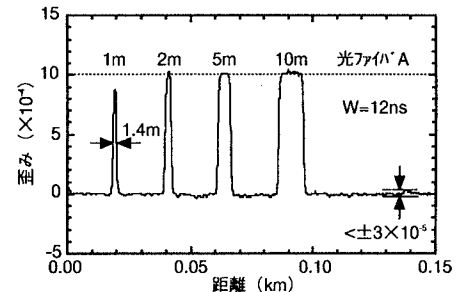


図 3 (b) 歪み分布測定結果 (実験 2)