

I-84

OTDRを用いた岩盤変位測定の可能性に関する課題

計測技販 (株)	正員 猪又 秀一
NTT アクセス網研究所	野引 敦
NTT 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

大規模岩盤崩落のような災害を未然に防ぐには、危険箇所の特定・防災対策工事・点検方法の改善はもとより、地盤や構造物の変状を的確に捉え、その発生場所およびその程度を早期に知ることが重要である。また、予兆を早期に知ることが可能になれば、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、周辺地域の安全性を大きく向上させることができると考えられる。

今日、構造物や地盤の変状を常時監視し、異常が確認された場合に即時に対応するためのモニタリングシステムの構築が強く望まれている。従来、構造物の変状を監視するために、歪ゲージ式の電気的なセンサを用いて計測されているがこれら各センサを用いて構造物全体の変状を連続的に計測するためには、多くのセンサが必要であり、さらに各センサには電力及び信号ケーブルが必要なことから、センサの設置や計測時の維持管理の面からも問題点が多い。また、現在の技術では「点の情報」にならざるを得ず、「線」もしくは「面」としての連続的な計測は不可能であった。

近年、歪ゲージに変わる手法として、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されている。分布型光ファイバセンサは、光ファイバの長さ方向の任意の点が外的要因（ひずみ、温度など）に対してセンサ機能をもつため、光ファイバに沿った物理量を連続的に計測することができる。本稿では、歪み・損失統合型OTDR⁽¹⁾の基本構成、動作原理、モデル実験例^(2~4)を紹介すると共に、岩盤変位計測を行う上での今後の課題を述べる。

2.歪み・損失統合型OTDR⁽¹⁾

歪み・損失統合型OTDRは、従来のOTDRが持つ光損失分布測定機能（COTDR）に加え、光ファイバの長さ方向に発生した歪み量（BOTDR）および発生位置を連続的に測定することができる。図-1に歪み・損失統合型OTDRの基本構成を示す。本測定器では、統合型OTDRを効率よく構成するために、光周波数変換回路（BOTDR）・電気ヘテロダイン受信器（COTDR）以外の光学系・電気系を共有化し、測定モードを切り替える事により、光ファイバの長さ方向の①ひずみ測定器、あるいは②光損失測定器として機能する。以下

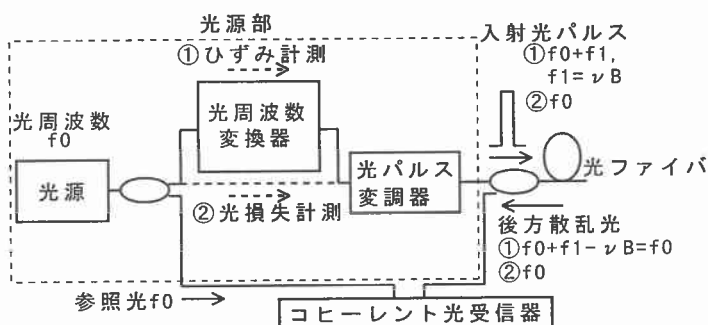


図-1 歪み・損失統合型OTDRの基本構成

The problem about the possible-ness the rock displacement the measurement of which used OTDR by Syuichi Inomata, Atsushi Nobiki, Toshio Kurashima and Yuuki Kusakabe

に、歪み・損失統合型OTDRを用いた光ファイバの歪みおよび光損失の測定原理について説明する。

2-1.歪み分布測定

図-2に光ファイバの計測概念図を示す。光ファイバの片端からパルス光を入射すると、そのパルス光はファイバ内部で散乱し入射した端に戻ってくる。この散乱光の一つにブリルアン散乱光があり、光ファイバの長さ方向の歪みに比例して周波数が変化するという特性を利用するものである。ブリルアン散乱とは、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屈折率の周期的変化（音波）により散乱され、その周波数がシフトする現象である。歪み・損失統合型OTDRでは、ブリルアン散乱光を効率よく検出するために、光受信器の中でも高感度測定が可能なコヒーレント光受信器を使用する。歪み測定では、入射光パルスの光周波数を変化させることにより、光ファイバ各位置でのブリルアン散乱光のパワーが最大となる光周波数を求めている。

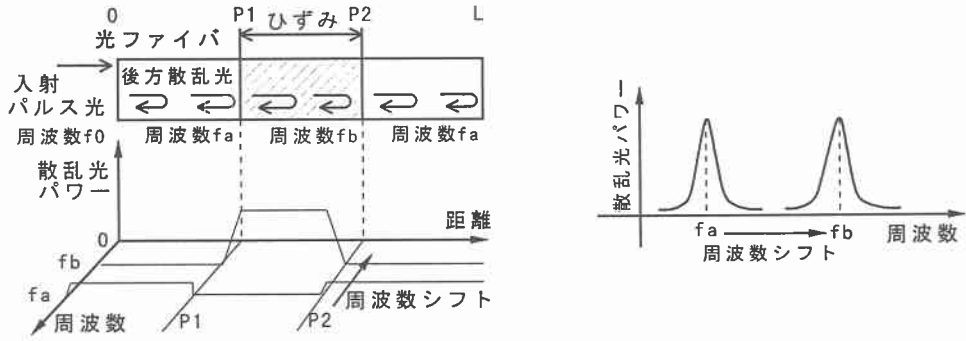


図-2 計測概念図

2-2.光損失分布測定

光損失測定では、光ファイバ中で発生するレイリー散乱光の強度が光損失により変化するという特性を利用している。レイリー散乱光は、光ファイバ中で発生する散乱光の中で最も強い散乱光で、光ファイバガラスに本質的に存在する屈折率の揺らぎにより発生するものでブリルアン散乱光のような光の周波数シフトを伴わない。したがって、光周波数変換器を使用せずにパルス光（光周波数 f_0 ）を光ファイバに入射し、光ファイバ中のレイリー散乱光をコヒーレント受信し、レイリー散乱光の強度変化から光損失を求めることができる。

歪みおよび光損失の発生位置は、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ことができる。なお、距離分解能はパルス光のパルス幅に依存する。

3.OTDRを用いた実験例

本システムの実用性を検証するためコンクリート梁の荷重試験⁽²⁾や、アルミパイプ曲げ試験⁽³⁾など各種試験を実施した結果、ひずみゲージによる測定結果と定量的に一致していることが確認されている。ここでは、地盤の変形状態を、光ファイバを用いて測定するための基礎的な実験⁽⁴⁾を紹介する。モデル実験では、図-3に示したように、地盤の変形を模擬するために、

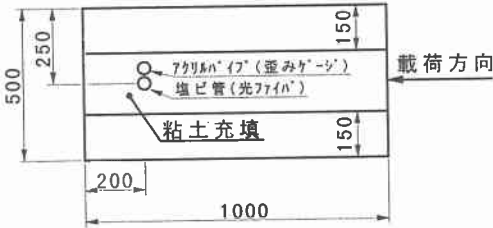


図-3 粘土ブロック断面図

型枠の上下をH150mm, W1000mm で仕切られた鋼製型枠(W500mm×L1000mm×H1000mm)を18個並べ、外径0.9mmのナイロン被覆光ファイバを貼り付けた長さ18mの塩ビ管(φ30)とひずみゲージを両端から500mm 離して1mごとに貼り付けた長さ18mのアクリルパイプ(φ30)を型枠内に設置し、型枠内に粘土を充填したブロックに変形を与え、歪み・損失統合型OTDRを用いて光ファイバに生じた歪みと、ひずみゲージによる歪みとの比較を行った。各粘土ブロック列の移動量は、図-4に示すように、ジャッキで測定器側から10番目(9~10mの位置)のブロックを最大40mm移動させ、その前後のブロックを10mmずつ階段状に減少させた状態にした(移動範囲は、7~13番目のブロック)。

粘土ブロックを用いた変形試験の試験結果の一例を図-5に示す。●印がひずみゲージによる各位置の歪みの測定結果であり、○印が各ブロックでの光ファイバによる歪み分布測定結果の平均値を表している。図-5から、光ファイバの長さ方向の歪み分布測定結果とひずみゲージによる各位置ごとの測定結果が、ほぼ同様な傾向を示していることが分かり、歪み・損失統合型OTDRが、測定対象物に発生した歪みを連続的に計測できることが判明した。また、このことにより、光ファイバを用いて、岩盤変位測定を行う上で「線」または「面」による計測管理が可能になると考えられる。

4. 岩盤変位計測を行う上での今後の課題

近年、地震や岩盤崩落などが発生する度に重要な構造物が損壊しているが、現状の防災点検、監視技術では災害の予知・予測は極めて困難である。各種モデル実験で光ファイバセンサが、従来のひずみゲージ式センサに比べ、変状の程度を連続的に計測できることが明らかになったが、重要構造物や岩盤などに設置し、防災を目的とした監視システムを構築するためには、次に上げるような課題が残る。

1. 現在、各種実証試験では、各メーカーから市販されている光ファイバケーブルを使用している。今後、急崖斜面等条件が厳しい場所に設置する場合に、各現場・用途に適したセンサ用光ファイバケーブルの開発が必要である。
2. 光ファイバで岩盤の変位を「線」もしくは「面」で連続的に計測する場合、光ファイバを測定対象物と一体化する設置が望ましいが、実際には、急崖斜面やオーバーハングなど、人が容易に近づけない場所が多い。今後、このような場所への光ファイバの設置および配線方法の確立が必要である。

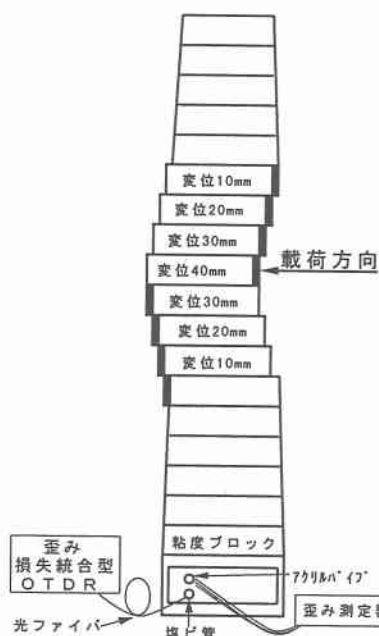


図-4 粘土ブロック変形試験

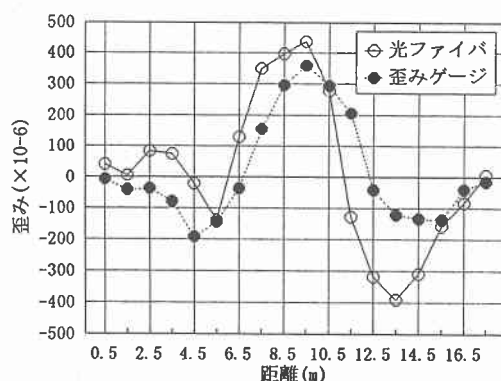


図-5 測定結果

3. 岩盤に光ファイバを配線または設置し、長期間安定したデータを得るための、固定剤（接着剤）等を選定する必要がある。
4. 気象条件による、光ファイバの経年変化、および、データの長期安定性を調べることが重要である。

本稿では、歪み・損失統合型OTDRおよび、本測定器を用いた地盤変形模擬実験について紹介した。さらに、これまでの実験結果を基に、岩盤変位計測を行う上での課題について検討した。

今後、模擬岩体を使用した破壊試験や、実際の岩盤での長期フィールド試験を行い、上記の課題を解決していきたい。また、光ファイバを用いた計測技術の限界を明確にし、有効な摘要分野を調べるとともに、歪み・損失統合型OTDRを用いた歪み計測技術を、岩盤および構造物の変状を計測するためのセンサとして発展させ、今後、岩盤崩落の予兆を知る上での新たな計測手段として、光ファイバを用いた岩盤変位計測の手法を確立していきたい。

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，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，PP23～29，1997. 5
 - 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，PP18～20，1997. 12
 - 4) 倉嶋利雄，田中郁昭，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，PP41～46，1997. 2
- 鈴木哲也，岩淵 武，加賀谷芳之，倉嶋利雄：光ファイバを利用した斜面変状監視のためのモデル実験 第32回地盤工学研究発表会，平成9年度発表講演集，PP2639～2642，1997. 7