

光ファイバ技術を用いた 地震防災モニタリングシステム

中野雅弘*1 山崎弘*2 奥野正富*3

*1 大阪産業大学工学部土木工学科 教授
(〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)

nakano@ce.osaka-sandai.ac.jp

*2 アイレック技建株式会社西日本営業部 第一営業部長
(〒550-0002 大阪府大阪市西区江戸堀1-2-2-7)

yamazaki@airec.co.jp

*3 NTTインフラネット株式会社関西支店事業開発本部 開発企画担当部長
大阪市中央区久太郎町2-4-11

okuno@ksi.nttinf.co.jp

【抄録】近年、光ファイバを土木構造物の歪みや地盤の変状および温度等を計測するセンサとして利用する試みが行われており、現在、道路構造物をはじめトンネル、河川、切り土斜面等への土木構造物に設置され計測が行われている。この光ファイバセンシング技術は線状の連続的な位置でのひずみ計測ができるという大きな特長を有しており、これを地震前後の土構造物のリアルタイムモニタリングシステムに活用すれば地震による被害の大きさ、範囲等を即座に特定することができ、道路等の各種施設管理者をはじめ地域住民にとっても有益なシステムとなる。ここでは、光ファイバセンシング技術の概要と計測事例、過去の地震による被害事例を紹介するとともに、耐震対策としての光ファイバを用いた土構造物の地震防災モニタリングシステムについて述べる。

Key Words : 光ファイバ、センシング、リアルタイム、BOTDR、モニタリング

1. はじめに

光ファイバは、大容量通信が可能な伝送媒体として広く用いられているが、通信機能の他に光ファイバ内で発生する後方散乱光を利用し、光ファイバ長手方向に発生する歪みを測定することができる。光ファイバセンサ(以下BOTDR)の特徴としては次のことが挙げられる。

- ① 従来の電気ひずみ計が点計測の離散的な情報にならざるをえないのに対し、光ファイバ自体をセンサとして用いるBOTDRでは長手方向に沿った連続的なデータ取得が可能であり、その配線形態によっては面的広範囲な計測が可能である。
- ② センサへの電力供給が不要であり、雷・高圧線等の電氣的誘導を受けない。
- ③ 光ファイバの低損失特性により計測対象箇所からの遠隔監視が可能である。
- ④ 計測対象箇所にて光ファイバセンサが損傷した

場合、部分的な取替えが可能である。

現在、危険箇所あるいは地震発生時等の社会基盤設備の健全性・被災状況は、その大半を現地での目視確認やITVカメラ等による映像監視に頼っているが以下の問題点が挙げられる。

- ① 点検対象施設・構造物の常時監視が困難である。
- ② 定量的な健全性の判断が困難である。
- ③ 災害発生の事前予知が難しい。
- ④ 危険作業が伴う。
- ⑤ 広域災害時の情報収集が困難である。

本論文は線的・面的に大規模な常時観測が可能なセンシング技術として期待されるBOTDRの適用例について紹介するとともに、耐震対策としての光ファイバを用いた土構造物のリアルタイムモニタリングシステムについて述べる。

2. BOTDRの原理

光ファイバに入射された光は、光ファイバ中を伝播する過程で、ガラスの微小な密度や組成のゆらぎにより散乱される。光ファイバに光パルスを入射すると光ファイバ内で発生するブリルアン散乱光は、ある特定のパワースペクトル（周波数分布）を有し、光ファイバ長手方向の伸縮（歪み）に比例しそのパワースペクトルがシフトする。この周波数シフト量を検出することにより相対的な歪み量を算出する。歪みの発生位置は、光ファイバにパルスを入射してから散乱光が戻ってくるまでの時間により特定される。従って、光ファイバケーブルをセンサとして計測対象箇所に設置することにより計測箇所の変状（歪み）を連続データとして取得することが可能である。（図 - 1）

3. 地形と土構造物に関する地震被害例

地形や土構造物は大規模な地震によりさまざまな被害を受けている。ここでは最近の地震による被害の事例について写真等を交え紹介する。

1) 地すべり

兵庫県南部地震

1995年の兵庫県南部地震では、西宮市の仁川に面した右岸斜面が地震時に急速な地すべりを起こし、死者34名、埋没家屋8戸の大災害となった。（図 2）このとき、大量の土砂が仁川を堰止め、小規模な天然ダムができ、ダムの決壊による土石流の懸念があったため、河道内の土砂は速やかに排土された。これは、都市河川の地震被害例で、地域住民への被害や都市基盤施設への影響が多く発生した事例である。

2) 斜面崩壊

芸予地震

2001年の芸予地震では愛媛県内の多くの箇所では被害が発生し、斜面崩壊もあいついだ。

図 3は岩盤崩壊の状況であり、愛媛県上浮穴郡面河村の村道大成線沿いの被災状況を示す。崩壊規模は高さ40m、幅20m、奥行き3mで、崩壊土量は推定で1,000m³となる。周辺には割れ目沿いに緩んだ岩盤も存在する。

河川堤防崩壊

兵庫県南部地震

1975年の兵庫県南部地震では、軟弱地盤の下流域の堤防に被害が集中した。なかでも、左岸下流域の西島地区は最も大きな被害を受けた箇所、延長約2kmにわたり堤防が最大3mも大きく沈下した。また、高見地区では天端から川裏側のり面が被災し、天端中央部に縦断亀裂

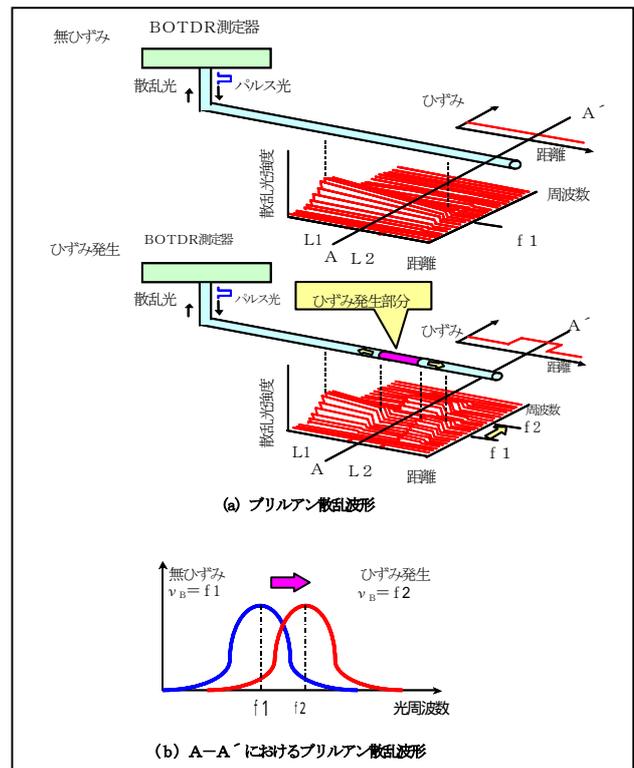


図 - 1 BOTDR計測による歪み測定原理



図 2 西宮市仁川で起きた地すべりの状況



図 3 愛媛県上浮穴郡面河村の村道大成線沿いの状況

が入ったほか、天端が約20cm沈下した。

右岸では、西島地区に被害が集中し、天端中央か川裏側のり面が被災し、天端では最大開口幅1.2m 最大段差1.2mの縦断亀裂が認められた。(図-4)

これは、都市河川が本格的な被害を受けた事例で、河川堤防下の軟弱地盤のゆるみにより堤防の崩壊がもたらされたものである。この被害により周辺地域への河川の浸水が発生すれば、都市生活に与える影響は甚大なものがあつたと想定される。



図 4 西島川表護岸の被災状況

4. 土木構造物の計測事例

地すべりや斜面崩壊のような地形崩壊及び土木構造物についてBOTDRを用いた土木構造物の挙動計測事例について紹介する。

1) 地すべり

山間部の斜面等のすべりやすい地盤に対して光ファイバが貼付されたパイプ(光パイプ歪計)を地盤に挿入しその動きをBOTDRにより計測している事例がある。(図-5)従来の歪みゲージを用いたパイプ歪計では設置数量の制約により正確なすべり面の特定は困難であったが、光ファイバをセンサとすることにより連続データの取得が可能となり正確なすべり面特定が可能となっている。(図-6)

2) 斜面崩壊

崩壊しやすい岩盤地ののり面で、落石検知を光ファイバ

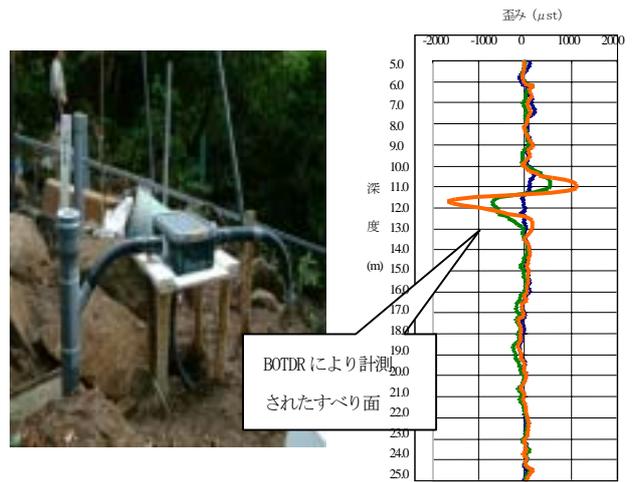


図-5 光パイプ歪計設置状況

図-6 光パイプ歪計計測状況

センサで検知した例がある。この落石検知システムは図-7のとおりであり、このシステムではBOTDRによるひずみ計測ではなく、OTDRといわれる光ファイバセンサの曲げ損失を検知する方式が採用されている。

3) 河川堤防

集中豪雨・地震等による河川堤防の崩壊や不等沈下を監視するため堤防軸方向に光ファイバを敷設し堤体の動きをBOTDRにより計測している。これもBOTDRの長手方向計測が連続的に可能であるという特徴を生かしたものである。(図-8)

堤防崩壊は河川水・降雨の浸透による堤体土の飽和度上昇が土のせん断強度の低下を招くことが要因と考えられる。侵食は法尻から始まり法崩れが生じ、しだいに崩壊土砂は法面下方に移動しその後破堤に至る。したがって光ファイバセンサを堤体土の移動方向と同一方向に設置し堤防変状を高精度に検出可能な形態としている。模擬堤防による実験では法面の崩壊が目視により確認される以前から光センサにより歪みが計測されており、光センサが堤防崩壊の予兆検知に使用できる可能性が高いことが確認されている。(図-9)

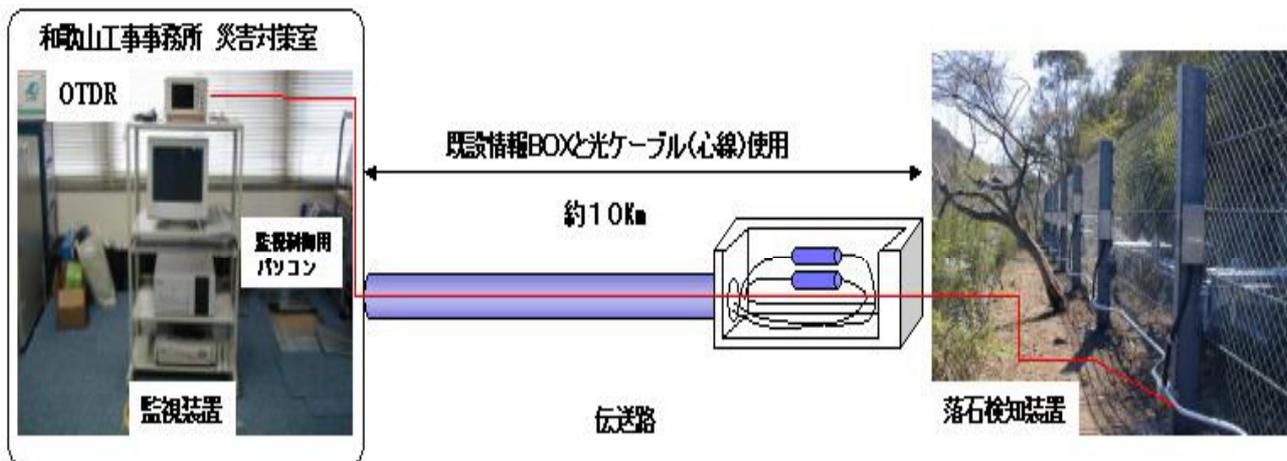


図 7 OTDRによる落石検知システム



図 - 8 光ファイバセンサ設置状況

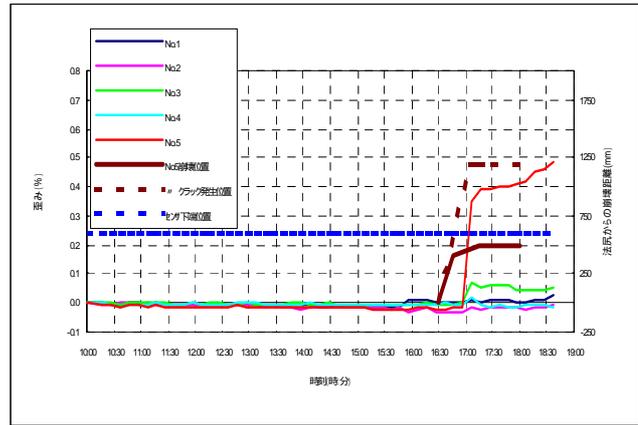


図 - 9 監視画面

5 . 今後の検討の方向性

以上、述べてきたように地形や土構造物は地震により被害を受けることが多く、これらを事前に防止するには多くの費用と期間を要する。このような土構造物への耐震対策としては、事前のリアルタイムな状態監視が現実的かつ効率的な方法である。事前のリアルタイムな状態となり、広範囲かつ連続性を有したデータを収集するこ

とは極めて困難である。これまで紹介したBOTDRを用いたリアルタイムな監視が可能なモニタリングシステムを構築すれば、線的、面的に連続性を持ったデータ収集が即座に可能となり、地域震災モニタリングシステムをより即時的なシステムとして充分期待できる。光ファイバセンシング技術を用いた土構造物を含むライフライン施設等へのリアルタイムモニタリングのシステムの例を図 10に示す。(2003.10.08 受付)

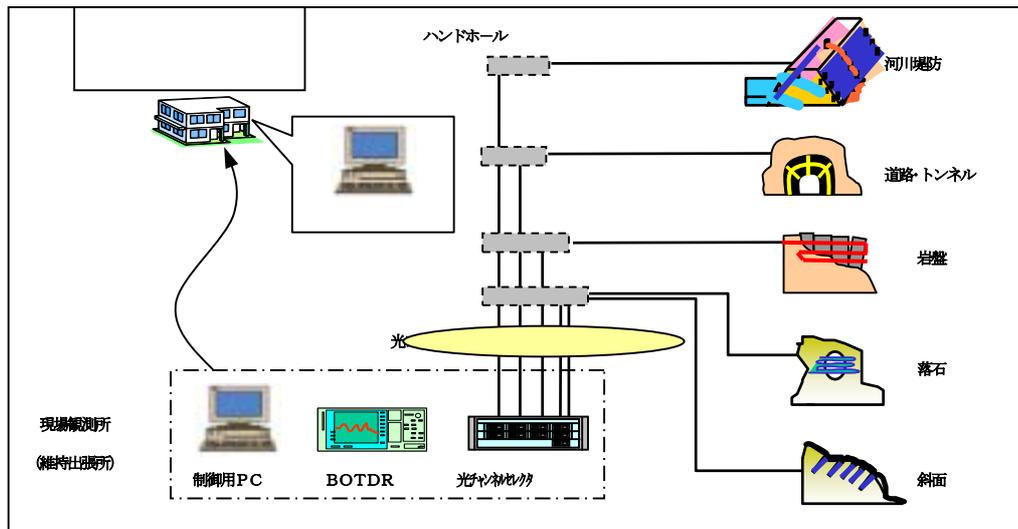


図 - 10 ネットワーク技術を用いた土木構造物光ファイバモニタリングシステム

The earthquake disaster prevention monitoring system using optical fiber technology

In recent years, the trial which uses an optical fiber as a sensor which measures distortion of an engineering-works structure, the shape of strange, temperature of the foundation, etc. is performed, it is installed in the engineering-works structure to a tunnel, a river, an end ground slope, etc. including a road structure, and measurement is performed now. This optical fiber sensing technology has the big feature that distortion measurement in a linear continuous position can be performed, if this is utilized for the real-time monitoring system of the ground structure before and behind an earthquake, can specify the size of the damage by the earthquake, the range, etc. immediately, and will serve as a system useful also for a local resident including various facility management persons, such as a road. Here, while introducing the outline of optical fiber sensing technology, a measurement example, and the damage example by the past earthquake, the earthquake disaster prevention monitoring system of the ground structure using the optical fiber as an earthquake-proof measure is stated.