

◆特集：災害の軽減をめざして◆

光ファイバを用いた地すべり変位検出センサの開発

森下 淳* 小山内信智** 藤澤和範***

1. はじめに

地すべり対策を実施する際には、地すべりブロックを単位としてその計画が策定される。そのため、適切な地すべり対策を講じるためには迅速かつ精度よくブロック区分を行なう必要がある。ブロック区分は主に地形図、空中写真の判読、現地踏査、地盤の変位量計測などの結果を総合的に判断して行なわれる。このうち地表面の変位量計測については、現在、地盤伸縮計または移動杭測量などの計測手法によるところが多い。しかし、これらの変位量計測手法では、面的な広がりをもつ地すべり地に対し点的な情報しか得ることができず、特に大規模な地すべり地を対象とした場合、多数の機器の設置が必要となり、多くの費用と労力を要する。

一方で、光ファイバ自体を通信媒体ではなくセンサとして利用する研究が進められており¹⁾、歪分布センサ等としての利用が図られている²⁾。光ファイバは伝送による光エネルギーの減衰が小さいため³⁾、長距離の区間における歪等の計測が可能であり、また、延長方向に連続的に情報を得られることから、広範囲を線的、面的に計測するのに適している⁴⁾。さらに、電気的絶縁性が優れており、電磁的ノイズや温度変化が伝送特性に与える影響も小さいため³⁾、野外に長期間設置した場合にも落雷や気温変動などの影響を受けにくい。

これまでも光ファイバの特性を利用した変位計測器の開発が進められているが、その多くは主にブリルアン散乱光の周波数シフトが光ファイバの引張歪に依存するという特性を利用したものであった⁵⁾。しかし、これらのセンサでは、散乱光を計測する測定器(B-OTDR)や使用する光ファイバケーブル自体が高額であるため、広範囲にわたって計測を行なう場合には多額の費用を要する。

本報告では、ブリルアン散乱光を利用した計測に比較して計測器の安価なレイリー散乱光を利用した光ファイバセンサの開発と、その適用性について報告する。

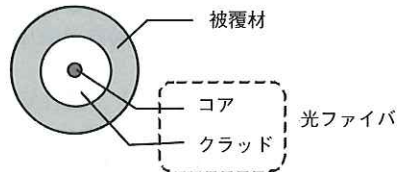


図-1 光ファイバケーブル基本構造図

2. 光ファイバセンサの基本原理

光ファイバは、通信媒体として主に通信回線として利用されるのが一般的であるが、一方、その物理的特性を応用し、各種計測センサとしての利用が進められている。以下に光ファイバの基本構造と本研究で対象としているレイリー散乱光を利用したセンサの基本原理について概説する。

2.1 光ファイバの構造

光ファイバケーブルの基本構造を図-1に示す。光ファイバはコアと呼ばれる高屈折率部分を中心に持ち、その周りをクラッドと呼ばれる低屈折率部分が覆う構造となっている。コアとクラッドはガラスで出来ており、屈折率の高いコア内に進入した光は、両者の境界で全反射しながら伝播される³⁾。

2.2 マイクロベンド損失

光ファイバに微小な曲げ(マイクロベンディング)が発生すると、コア内部を通過している光がコアとクラッドの境界に通常よりも高角度で入射する箇所ができる。コアとクラッドの屈折率の差は極めて小さいため、このように高角度で入射した光の一部は境界で反射せずにコアからクラッドへ透過する。このため、曲げられた箇所を光が通過するとその光強度が減じられる。このような光強度の損失をマイクロベンド損失と言う。

2.3 レイリー散乱光

光ファイバ内を通過する光は、入射端からもう一方の端部に向かって進行しながら常に進行方向と逆方向へ向かう散乱光を発生させている。光ファイバにおけるこのような反射特性を後方散乱と言う。後方散乱のひとつであるレイリー散乱は、光ファイバに入射した光パルスの波長と同波長の

光が入射端側で観測される現象である。この光をレイリー散乱光といい、この光もマイクロバンド損失を受ける。

2.4 変位位置検出原理

レイリー散乱光の測定には OTDR (Optical Time Domain Reflectmeter) と呼ばれる測定器が使われる。OTDR では、散乱光の強度とともに光の入射から散乱光が計測されるまでの時間が記録されるため、光の伝播速度からマイクロバンド損失の発生位置を明らかにすることができる。そのため、地盤の変位をマイクロバンド損失が発生するような光ファイバの曲げに変換することにより、その位置を特定することが可能となる。

3. 伝送損失基礎実験

マイクロバンド損失は、光ファイバに発生した曲げの形状などに影響を受ける。そのため、レイリー散乱光のマイクロバンド損失を利用した変位検出センサを開発するには、光ファイバケーブルに生じる曲げ形状とそれに伴って発生する伝送損失の関係を実験により確認しておく必要がある。

3.1 実験方法

光ファイバケーブルの一端を固定し、他端を 200kgf の張力で引張った状態で図-2 に示すとおり丸棒を支持体として光ファイバケーブルを曲げて伝送損失量を測定した。丸棒の径は $\phi 3\text{mm}$ 、 $\phi 4\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 6\text{mm}$ 、 $\phi 8\text{mm}$ の 5 ケースとし、曲げ角度は 20° 間隔で段階的に変化させた。

3.2 実験結果

曲げ径毎の伝送損失量と曲げ角度の関係を図-3 に示す。但し、初期状態での伝送損失量を 0 としている。曲げ径に関わらず、曲げ角度が約 60° となるところから伝送損失が増加している。また、曲げ径が小さいほど同じ曲げ角度であっても伝送損失量が大きくなる傾向にあり、曲げ角度が大きくなるほどこの傾向が顕著に表れている。この結果は石川らの結果⁶⁾と同様の傾向を示している。

基礎実験の結果、以下のことが確認された。

- (1) 曲げに対応した伝送損失を得るためには、あらかじめ一定以上の曲げを光ファイバに与えて

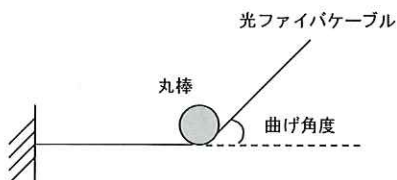


図-2 伝送損失基礎実験

おく必要がある。

- (2) 曲げ径が小さいほど同じ曲げ角度に対して発生する伝送損失量が多い。

4. 変位検出機構の検討

地盤の変位発生箇所をレイリー散乱光の伝送損失発生位置から特定するためには、地盤の変位を光ファイバに曲げとして与える機構が必要となる。本研究では、光ファイバケーブルを地表面に敷設することによりセンサ自体の価格及び設置にかかる作業量を削減し、より低コストかつ簡易に地盤変位を検出できる機構を考案した。

4.1 基本構造と検出原理

本センサは、数台の検出部を連続的に配置し、引張線を兼ねた光ファイバケーブルにより連結することで連続的な観測を可能としている。検出部の基本構造概念図と連続設置のイメージを図-4 に示す。検出部は主に、①地盤変位を検出部に伝える引張線を兼ねた光ファイバケーブル、②光ファイバケーブルが巻きつくことにより曲げを発生させる巻きつけ軸、③次の検出部に対する固定端からなっている。本センサは、①インバー線のかわりに光ファイバケーブルを使用しているため変位検出にかかるコストが低い、②光ファイバを屈とう性のある保護管に収めて地表面に直接敷設するため現場での設置作業が容易、などの特徴を有している。

本機構における検出原理は以下のとおりである。

- (1) 2 地点（固定端）間で引張変位が発生すると、あらかじめ巻きつけ軸に巻いてある光ファイバに引張変位による張力が働き、巻きつけ軸上の支点を中心に光ファイバの巻きつけ半径が縮小するため、それぞれの支点においてマイクロベンディングが発生する。
- (2) マイクロベンディングにより伝送損失が発生し、これを OTDR で計測することにより変位発生位置（変位の発生した計測区間）を特定する。

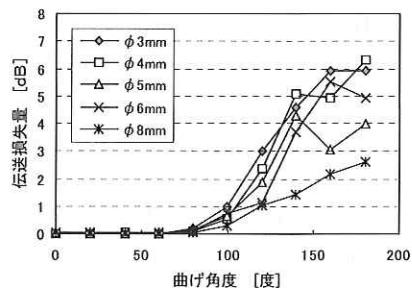


図-3 伝送損失量と曲げ角度

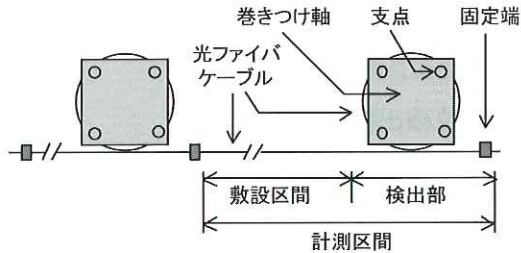


図-4 基本概念図

4.2 地盤変位に対する追従性確認試験

引張線として光ファイバケーブルを使用した場合、高張力で敷設することができないため、計測区間における変位が検出部内における光ファイバケーブルの変位と一致しない可能性が考えられる。そこで、光ファイバケーブルが地盤の変位をどの程度の精度で検出部に伝えられるか把握することを目的とし、地盤変位に対する追従性確認試験を行なった。

光ファイバケーブルを保護管に通し、約2kgfの張力を与えて敷設した。敷設区間長は20mとした。一方の端部に検出部を設置し、検出部内の固定端で固定した上で、他方の端部を引張方向に変位させた。この時検出部における光ファイバケーブルの変位量を観測した。引張変位は1mm間隔で段階的に与え、最高13mmまで変位させた。また、試験は図-5に示すとおり4通りの保護管の敷設形状で行なった。直線型は20m区間において凹凸のない直線形状、凹型は区間中央で50cm落ち込んだ形状、反対に凸型は区間中央で40cm盛り上げた形状、凹凸型は検出部端から5mのところまで25cm落とし込み、さらにそこから10mのところまで25cm盛り上げた形状とした。

端部における引張変位を横軸、その時の検出部における光ファイバケーブルの変位を縦軸にしたグラフを図-6に示す。本来なら2つの値が同値になるはずだが、保護管内壁と光ファイバケーブルの摩擦、光ファイバケーブル自体の伸びなどの理由により、端部における5mmの変位に対し検出部では1mmから2mm程度しか変位しないという結果となった。これから、計測区間を約20mとした場合には、検出部における光ファイバケーブルの1mm程度の変位を検出できれば、地盤の5mm程度の変位を検出する事が可能であることが分かる。

また、敷設形状による追従性の差については、他と比較し凹型の場合に追従性がよい以外に特に顕著な違いは見られなかった。

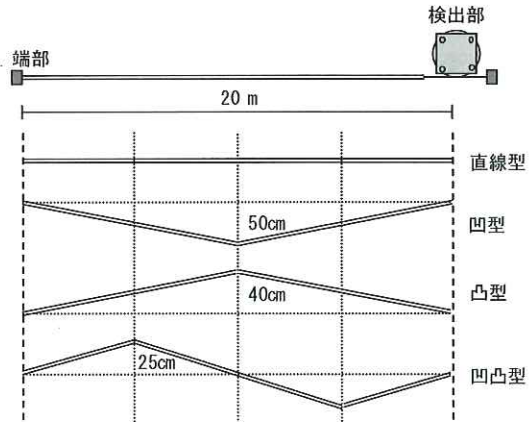


図-5 追従性試験における保護管敷設形状

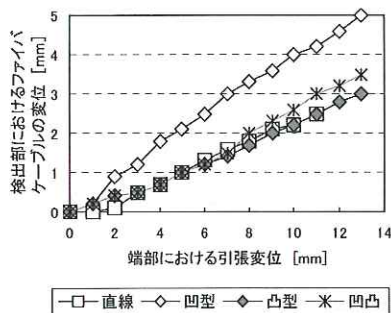


図-6 地盤変位に対する追従性試験

4.3 巻きつけ軸形状の検討

巻きつけ軸形状の違いがセンサの感度に与える影響を把握するために、軸の形状を四角形（以下□型という）、三角形（以下△型という）、直線形（以下I型という）とし（図-7）、それぞれの形状について感度確認試験を行なった。また、図-7にあるとおり1辺の長さを□型、△型では15mmと20mm、I型では21mmと28mmに変化させ、計6種類の形状にて比較検討を行なった。なお、巻きつけ軸上の支点となるピンの径は2.3mmとした。

4.3.1 予備試験

光ファイバケーブルに200gfの張力を与えて巻きつけ軸に巻きつけ、両端を固定する。このとき初期状態での伝送損失をOTDRで計測しておく。次に、一方の端において光ファイバケーブルに1mmの引張変位を与え、その後4mmまで変位させる。1mm、4mmそれぞれの変位時における伝送損失量をOTDRにより計測する。計測結果を表-1に示す。なお、ここでいう伝送損失量は初期損失からの増加量を表している。

追従性確認試験の結果、地盤の5mmの変位を検出するためには検出部における光ファイバケーブルの1mmの変位を検出する必要があるが、□型(辺長15mm)では光ファイバケーブルを1mm変位した時の伝送損失が0.09dBと非常に低い値であった。また、△型(辺長20mm)においては、光ファイバケーブルを4mm変位させた時に12dB以上損失が増加し、測定器の制約から計測不能となった。よって、これらの理由によりこの2ケースを以後の感度確認試験の対象から除くものとする。

4.3.2 感度確認試験

予備試験の結果より□型(辺長15mm)と△型(辺長20mm)を除いた4ケースにより感度確認試験を行った。基本的には予備試験と同様に行うが、初期損失量が感度に与える影響を検討するため、初期緊張力を200gfとした場合を5回、300gfとした場合を5回と計10回の計測を行った。また、引張変位は1mmから5mmまで1mm間隔で段階的に変化させ、その都度伝送損失量を計測した。

それぞれの形状について、光ファイバケーブルの変位と伝送損失量の関係を図-8～11に示す。これらの図では10回の計測における伝送損失量の平均値を示しており、図中のバーは計測値の最大値と最小値の幅を表している。

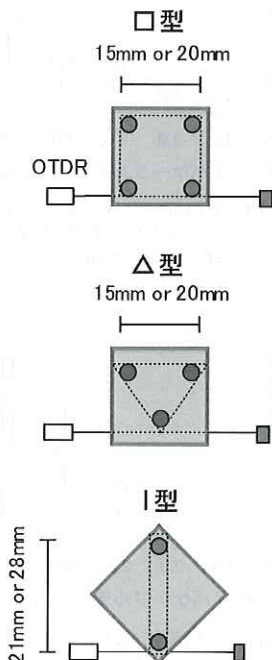


図-7 巻きつけ軸形状

表-1 巻きつけ軸形状検討のための予備試験
(変位は検出部における光ファイバケーブルの変位を表す)

形状	辺長	伝送損失 [dB]	
		1mm 変位	4mm 変位
□型	20mm	0.44	8.95
	15mm	0.09	4.95
△型	20mm	2.24	12 以上
	15mm	0.77	10.23
I 型	28mm	0.34	2.71
	21mm	0.56	7.68

□型(辺長20mm)では、光ファイバケーブルが1mm変位した時の損失量が平均0.05dBと少なく、検出を行うには不十分という結果となった。

△型(辺長15mm)は、最も感度のよい形状であったが、計測値のばらつきが4ケース中一番大きいという結果となった。また、全体的に伝送損失量が大いため、ダイナミックレンジによる制約を受けやすいと考えられる。ダイナミックレンジとは、1本の光ファイバに対し測定可能である伝送損失の幅のことを言い、1本の光ファイバの累積損失量がダイナミックレンジを越えるとその地点以降の損失(本センサにおいてはその地点以降の変位)を検出することが不可能となる。なお、本形状における一部の計測において4mm変位時にOTDRで測定しうる伝送損失量を越え測定不可能となったため、図-9では4mm変位時までを記載している。

I型(辺長28mm)では、光ファイバケーブルが1mm変位した時の伝送損失増加量は△型(辺長15mm)ほど高くないが、その値は0.49dBとなり、十分変位を検出しうる結果となった。また、計測値のばらつきが少なく、光ファイバケーブル変位量が多い場合にも損失量が過剰に増加しないため、ダイナミックレンジによる制約を受けづらと考えられる。

I型(辺長21mm)では、I型(辺長28mm)と比較し光ファイバケーブルが1mm変位した時の伝送損失増加量が小さく、また、光ファイバケーブル変位量の全領域にわたって伝送損失増加量のばらつきが大きい結果となった。

次に、初期損失量が変位と損失量の関係に及ぼす影響を検討するため、△型(辺長15mm)およびI型(辺長28mm)について初期損失量毎に伝送損失量と変位の関係を調べた。図-12、13はそれぞれ図-9、図-10を一定範囲の初期損失量毎の平均値に書き換えたものである。図より、初期損失量の増加により本センサの感度が向上してお

り、初期損失 1.6dB 以上のケースで一番感度のよいことが分かる。また、△型（辺長 15mm）では初期損失量毎に伝送損失量の差が明確であり、値のばらつきの原因が初期損失量であったことが示唆される。これらのことから、実際に計測を行う際には初期損失量を適正に管理することにより、測定値のばらつきを抑えセンサの測定精度を高く保てることが分かる。

以上の結果より、計測区間を約 20m とした場合、△型（辺長 15mm）もしくは I 型（辺長 28mm）の形状を採用することにより検出部における光ファイバケーブルの 1mm 変位を検出することが可能であり、前述の追従性確認試験の結果とあわせ、地盤の 5mm 以上の変位を検出することが可能であることが分かった。また、初期状態の損失量を適正に管理することにより、計測値のばらつきを押さえられることが分かった。但し、△型（辺長 15mm）では大きく変位した時の伝送損失増加量が大きいので、ダイナミックレンジによる制約を受けやすいと言える。そのため、大きな変位が見込まれる地すべりでは、変位に対する伝送損失量の増分が比較的小さい I 型（辺長 28mm）を採用し、逆に小さな変位が見込まれる地すべりでは、検出部における光ファイバケーブルが 1mm 変位した時の伝送損失増加量が大きい△型（辺長 15mm）を採用することにより安定した計測が可能になると言える。

5. まとめ

本研究では、光ファイバを用いた地すべり変位検出センサを考案し、地盤変位に対する追従性試験、巻きつけ軸形状の検討などを通し、その実用性について検証を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) インパー線の代わりに光ファイバケーブルを敷設し、引張変位を巻きつけ軸によるマイクロベンドに変換する機構を考案できた。
- (2) 室内基礎実験の結果、伝送損失量の増加は一定の曲げ角度を超えてから生じ、その増加量は曲げ軸の径が小さく、緊張力が大きいほど大きな値となる。
- (3) 計測区間を約 20m とした場合、今回検討した巻きつけ軸形状のうち、大きな変位（20mm 程度以上）が見込まれる地すべりでは I 型（辺長 28mm）、小さな変位（10mm 程度以下）が見込まれる地すべりでは△型（辺長 15mm）がそれぞれ適していた。
- (4) 考案された上記のセンサを用いることにより、検出部内におけるファイバケーブルの 1mm 変

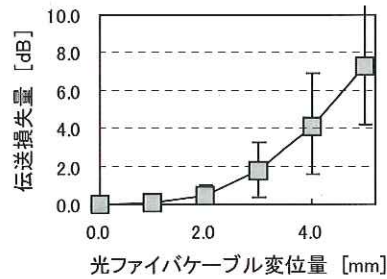


図-8 検出部における光ファイバケーブル変位量と伝送損失量の関係 (□型 辺長 20mm)

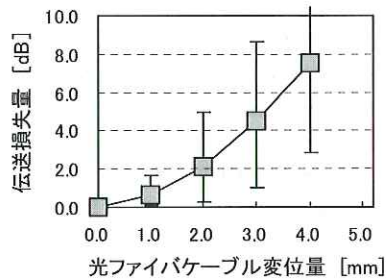


図-9 検出部における光ファイバケーブル変位量と伝送損失量の関係 (△型 辺長 15mm)

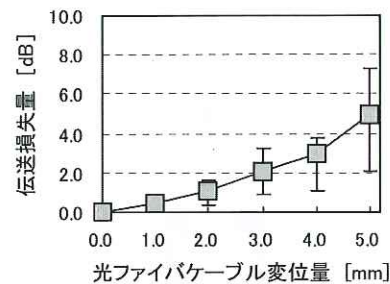


図-10 検出部における光ファイバケーブル変位量と伝送損失量の関係 (I型 辺長 28mm)

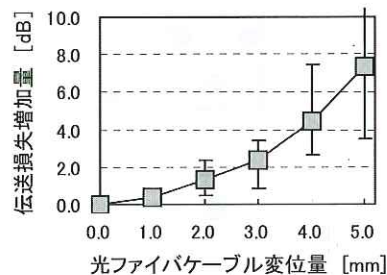
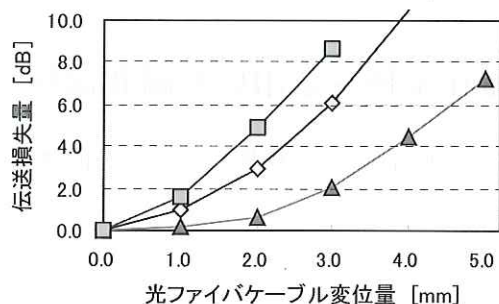


図-11 検出部における光ファイバケーブル変位量と伝送損失量の関係 (I型 辺長 21mm)



初期損失量

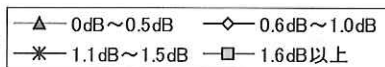
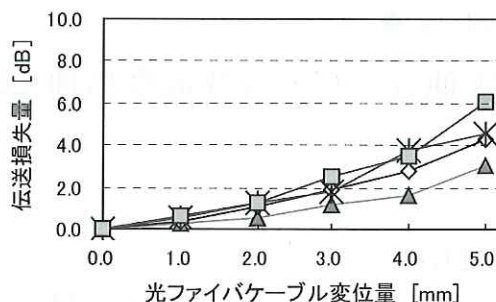


図-12 初期損失量をパラメータとした光ファイバケーブル変位量と伝送損失量の関係 (Δ型 辺長 15mm)



初期損失量

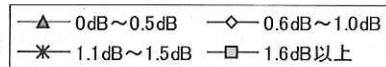


図-13 初期損失量をパラメータとした光ファイバケーブル変位量と伝送損失量の関係 (I型 辺長 28mm)

位 (引張方向) を検出することが可能であり、追従性試験の結果とあわせると、地盤の 5mm 程度の変位を検出することが可能であると考えられる。

6. 今後の課題

今後は、実際の変位計測を通して本センサの現場適用性を検証する必要がある。また、今回開発した機構では引張変位にのみ対応しており、圧縮変位は検出できない。しかし、実際の地すべり斜面では引張方向とともに圧縮方向やせん断方向へ変位する場合も考えられるため、これらの変位にも対応できるよう改良を加える必要がある。

参考文献

- 例えば、倉嶋利雄、薄知規、田中郁昭、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分布測定，Proceedings of 19th Meeting on Lightwave Sensing Technology, LST19-4, pp.23-30, 1997 年 5 月
- 成瀬央：光ファイバーひずみ計測技術(B-OTDR)の土木計測への応用，土と基礎，Vol.47 No.7, pp.42, 1999年7月
- 福富秀雄：光ファイバネットワーク-実現への歩み，社団法人電気通信協会，pp.16-18, pp.22-24, 1994 年 5 月
- 吉田幸司、吉富崇晴：物言わぬ物体とのコミュニケーション，「テクノロジー・ストーミング-技術頭脳集団 NTT-AT の挑戦-」，ダイヤモンド社，pp.141-161, 2000 年 2 月
- 例えば、杉本宏之：光ファイバーセンサを用いた地すべり移動量測定技術の開発，第 39 回土木研究所研究発表会論文集，土木研究所資料，Vol.3760, pp.37-40, 2000.126) 山崎宣悦：光ファイバーを用いた地すべり観測，シンポジウム 地すべり調査・観測の新しい展開，pp.15-28, 1997 年 11 月
- 石川芳治、草野慎一、安江朝光：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，Vol.34 No.12, pp.46-51, 1992 年 12 月

森下 淳*



独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ地
すべりチーム研究員
Atsushi MORISHITA

小山内信智**



独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ火
山・土石流チーム上席研
究員 (前地すべりチーム
上席研究員)，農博
Dr. Nobutomo OSANAI

藤澤和範***



独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ地
すべりチーム上席研究員
Kazunori FUJISAWA