

II-10 地すべり対策工の計画・設計・施工方法に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 13～平 14

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：小山内信智（上席）、森下淳

【要旨】

本調査では、地すべり地における線的な地盤変位計測をより低コストに実施するために、光ファイバを用いた地盤変位検出センサの開発を試みた。光ファイバに発生したマイクロベンディングがレイリー後方散乱光の強度を減ずる事を利用するため、地盤に発生した変位を光ファイバに曲げとして付加する機構を2タイプ検討した。室内試験により地盤変位と伝送損失量の関係を検討した結果、5mm程度の地盤変位を検出できることが確認された。さらに、実際の地すべり地における適用性の検証を行なった結果、変位と伝送損失量の関係に一定の傾向が認められ、光ファイバセンサによる地すべり地の地盤変位検出の可能性が示された。

キーワード：地すべり、光ファイバ、マイクロバンド損失、OTDR、変位検出センサ

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図られる。適切な地すべり対策を講じるためには迅速かつ適確にブロックを区分する必要がある。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、伸縮計または移動杭測量によるところが多い。しかし、これらの変位量計測手法は、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ないという問題点がある。また、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こととなる。

一方で、光ファイバ自体を通信媒体でなくセンサとして利用する研究が進められており¹⁾、橋梁などの構造物や河川堤防においては、歪分布センサ等として実際に利用されている²⁾。光ファイバは伝送による減衰が小さいという特徴を有しており³⁾、長距離間における計測を可能としている。あわせて、光ファイバの延長方向に対し連続的に情報を得られることから、広範囲にわたる線的、面的な計測が可能である⁴⁾。また、電気的絶縁性が優れており電磁的ノイズに強く、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の日変動、季節変動などの影響を受けづらいという特徴を持っている。

これまでにも光ファイバの特性を利用した変位検出センサ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延長方向歪に依存するという特性を利用したものが多かった⁵⁾。しかし、ブリルアン散乱光を検出するB-OTDR検出器や使用する光ファイバ自体が高額であるため、大規模地すべりなどにおいて広範囲にわたる計測を行なう時には多額の費用を要することとなる。

本調査では、ブリルアン散乱光を利用した計測に比較して検出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を開発し、特に大規模地すべりに対してより低コストでかつ光ファイバの特徴を生かした線的な変位検出手法を提案することを目的とする。

2. 光ファイバセンサの基本原則

光ファイバは、優れた通信媒体として主に通信用の回線として利用されるのが一般的である。一方、光の散乱現象とファイバ内で発生する散乱光の物理的特性などを応用し、各種計測センサとしてもその利用が進められている。以下に光ファイバの基本構造、センサとして利用される光ファイバの特徴、基本原則などについて概説する。

2.1 光ファイバの構造

光ファイバの基本構造を図-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とし、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。さらにその外側は、ナイロン樹脂とケブラー繊維及びビニールシース加工によりコーティングされているのが一般的である。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が、両

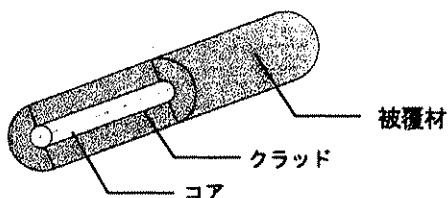


図-1 光ファイバ基本構造図

者の境界で全反射しながら伝播されていく³⁾。

2.2 マイクロバンド損失

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ことになる。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の方へ透過してしまう。このため、曲げを与えられた箇所を光が通過するとその光強度が減じられる（図-2）。このような曲げによる光強度の損失をマイクロバンド損失と呼び、後方散乱光など、ファイバ内を通過するすべての光に対して発生する。

2.3 レイリー散乱

ファイバ内を通過する光は、ファイバ内部において光が入射端方向へ逆戻りをするように反射する後方散乱現象と呼ばれる反射特性を示す。光ファイバの後方散乱にはレイリー散乱、ラマン散乱、ブリルアン散乱などが知られており、それぞれ光ファイバに与えられた物理的変化に依存してその強度や波長を変化させる特徴を持つ。このうち、レイリー散乱とは、光ファイバに入射した光パルスの波長と同じ波長の光が入射端側で観測される後方散乱現象であり、マイクロベンディングに依存してその強度を減衰させる特徴を有している⁶⁾。

2.4 光ファイバによる変位計測の基本原則

光ファイバ線におけるマイクロベンディングの発生がレイリー散乱光を減衰させることを利用すると、レイリー散乱光の連続的測定からマイクロベンディングの発生位置を特定することが可能である。よって、地盤の変状に伴い光ファイバにマイクロベンディングを発生させるような機構を工夫することにより、レイリー散乱光における伝送損失の増加から地盤変位箇所を特定することが可能となる。伝送損失の測定には OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) と呼ばれる測定器が使われる。OTDR 測定器の基本構成を図-3 に示す。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、

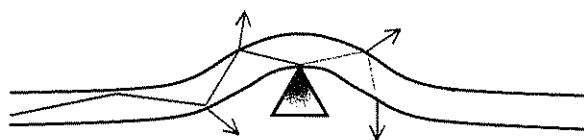


図-2 マイクロバンド損失

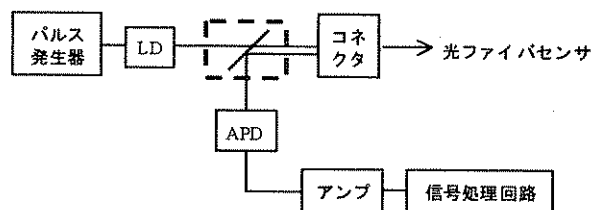


図-3 OTDR の基本構成

以下の式を用いてマイクロバンド損失発生位置を特定することができる。

$$Z = tV / 2$$

Z : 入射端からマイクロバンド損失発生位置までの距離

t : 入射から散乱光計測までの時間

V : 光ファイバ内における光の伝播速度

3. 伝送損失基礎実験

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の開発に先立ち、光ファイバ線に生じるマイクロベンディングの形状（曲げ径、曲げ角度）と発生する伝送損失の関係を把握することを目的とした室内基礎実験を行なった。

3.1 実験方法

実験は、支持体となる丸棒（曲げ軸）の径及び張力の条件を変えながら行なった。張力の条件を変えるのは、張力がマイクロベンディングと伝送損失の関係に与える影響を検討するためである。光ファイバの一端を固定し、他端を所定の張力で引張る。この状態のまま図-4 に示すとおり丸棒を支持体として光ファイバに曲げを生じさせる。丸棒の径については $\phi 3\text{mm}$ 、 $\phi 4\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 6\text{mm}$ 、 $\phi 8\text{mm}$ の 5 ケースとした。曲げ角度は 20° 間隔で段階的に変化させ、その都度 OTDR により伝送損失量を計測した。また、各ケースについて張力を 200gf、400gf、600gf、800gf と変えて実験を行なった。光ファイバ線はシングルモード光ファイバを使用した。なお、これ以降すべての試験においても同様にシングルモード光ファイバを使用している。

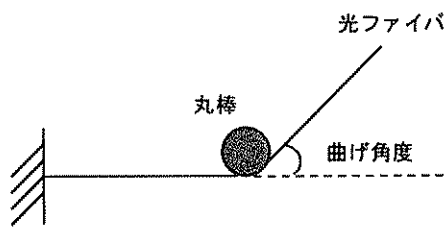


図-4 伝送損失基礎実験

3. 2 実験結果

初期張力を 200gf とした時の、曲げ径をパラメータとした伝送損失増加量と曲げ角度の関係を図-5 に示す。初期状態での伝送損失量を 0 としているため、本報告でいう伝送損失増加量とは初期状態からの累積増加量を表している。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。この傾向は他の初期張力でも同様に認められた。また、曲げ径が小さいほど同一曲げ角度での増加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⁷⁾と同様の傾向を示している。

曲げ径が $\phi 3\text{mm}$ の時と $\phi 8\text{mm}$ の時の、初期緊張力をパラメータとした伝送損失増加量と曲げ角度の関係を図-6、7 に示す。図-6 から、曲げ径が小さい時 ($\phi 3\text{mm}$) には初期緊張力による伝送損失増加量のばらつきが大きく、緊張力が大きいほど増加量も大きい傾向が見られる。これに対し、図-7 からは、曲げ径が大きい時 ($\phi 8\text{mm}$) には初期緊張力によるばらつきはほとんどないことが分かる。なお、図-5、6 においてすべての値が 6dB 付近で収束するような結果となっているのは、本試験で用いた光ファイバの性質上、計測範囲が 6dB 程度までであったためである。本実験において、これらの制約を受けていないと考えられるのは、曲げ径が 8mm のケースのみであった。

4. 変位検出機構の検討

地盤の変位発生箇所を光ファイバの伝送損失をもって検出するためには、実際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。本調査では、基礎実験の結果を踏まえ 2 種類 (A タイプ、B タイプ) の基本構造を考案した。A タイプセンサは既存の伸縮計と同様にインバー線を使用することにより、地盤変位に対する追従性を高めていることが特徴である。B タイプセンサは、光ファイバ自らを地表面に敷設することによりセンサ自体の価格、及び設置にかかる手間を大幅に削減し、より簡易に地盤変位を検出できるという

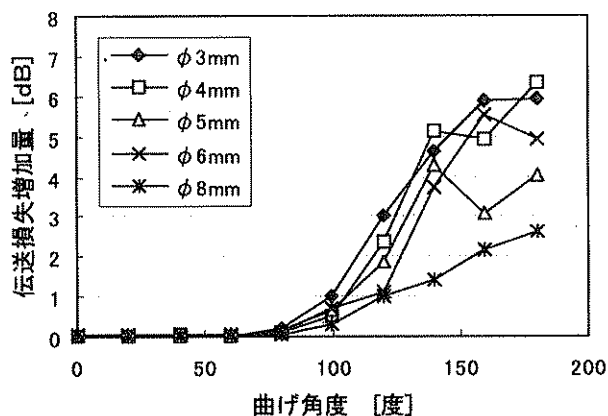


図-5 伝送損失増加量と曲げ角度
(初期緊張 200gf)

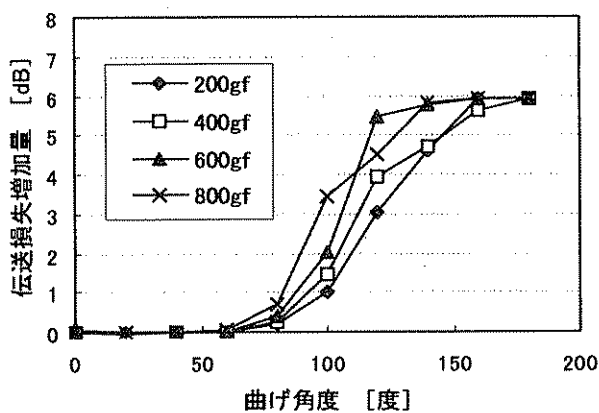


図-6 伝送損失増加量と曲げ角度
(曲げ径 3mm)

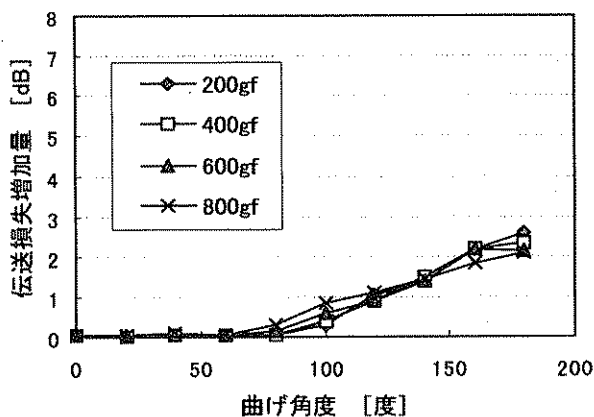


図-7 伝送損失増加量と曲げ角度
(曲げ径 8mm)

特徴を有している。

4. 1 A タイプ光ファイバ変位検出センサ

4. 1. 1 基本構造と検出原理

A タイプの基本構造図を図-8 に示す。検出部は主

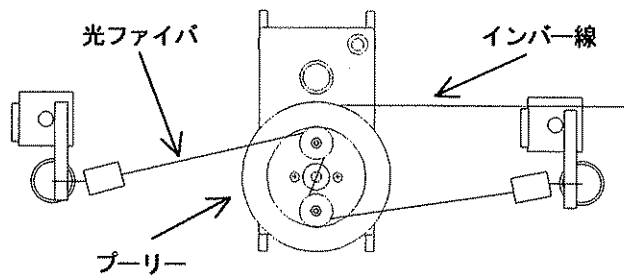


図-8 Aタイプ基本構造物

に、1) 地盤の変状を検出部に伝えるインバー線、2) インバー線における引張変位を回転変位へ変換するプーリー、3) 光ファイバに曲げを生じさせるための2本の曲げ軸、4) 検出部本体となる光ファイバからなっている。本機構における地盤変状の検出原理は以下のとおりである。

- 1) 2地点間に地盤の伸びが発生すると、その間に張ってあるインバー線が変位し、プーリーが回転する。
- 2) プーリーが回転することにより、プーリー上の2本の曲げ軸にかけられた光ファイバに曲げが発生する。
- 3) 光ファイバに生じた曲げ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を特定する。

インバー線により地盤変位を捉える方法については現行の伸縮計と同様であるが、変位検出部に光ファイバを利用しているため、本センサを連続して設置し検出用の光ファイバで結ぶことにより、線的に連続した変位検出が1箇所（光ファイバの端部）から行なえるようになる。この際、光ファイバはインバー線と一緒に保護管に収められることになる。

4. 1. 2 検出部モデルによる実験

はじめに、本機構における計測範囲及び適切な曲げ軸径を検討するために検出部モデルによる実験を行なった。基礎実験の結果より、曲げ径が $\phi 8\text{mm}$ よりも小さい場合には、曲げ角度 180° で光ファイバの計測可能範囲である 6dB の損失が発生してしまい、その後変化しない事が分かっている。この結果から、曲げ径を 8mm 未満とすると、連続的な計測においていずれか1箇所のセンサでこのような変位が発生した場合、そのセンサ以降のセンサにおける伝送損失が計測不可能となることが分かる。本センサは数台を連続的に配置し、線的な計測を簡易に行なうことを目的としているため、ここでは1箇所のセンサにおいて簡単に 6dB を越えることがないよう曲げ軸径には $\phi 8\text{mm}$ 以上を選択するも

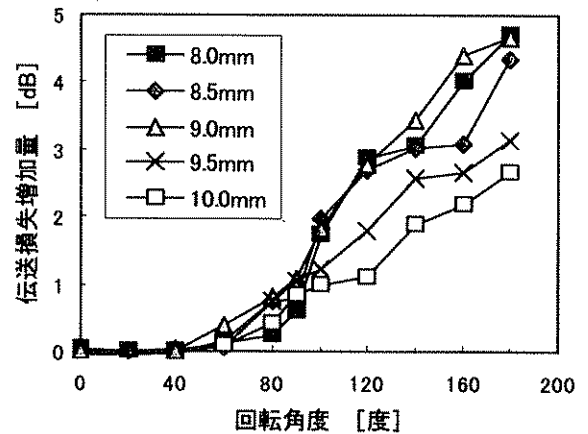


図-9 伝送損失増加量とプーリー回転角度

のとした。実験では曲げ軸径を $\phi 8.0\text{mm}$ 、 $\phi 8.5\text{mm}$ 、 $\phi 9.0\text{mm}$ 、 $\phi 9.5\text{mm}$ 、 $\phi 10.0\text{mm}$ とした5ケースについて検討を行った。それぞれの曲げ軸径について、回転盤上に2軸を 3cm の間隔で設置した検出部モデルを作成し、回転盤の回転角度と伝送損失量を計測した。初期状態での張力は 250gf とした。

回転角度と伝送損失増加量の関係を図-9に示す。回転角度は、光ファイバが直線状態である時を 0° と定義した。実験結果より、今回のケースでは曲げ軸径 $\phi 9\text{mm}$ としたケースが微小変位（回転角度 60° 付近）での応答がよく、かつ2変数が直線関係にあることが分かった。よって、本機構における曲げ軸の径は $\phi 9\text{mm}$ を採用することとした。また、回転角度が 0° から 60° までは伝送損失が増加していないため、回転盤を 60° 以上回転させた状態を初期状態として、計測を開始する必要のあることが分かった。

4. 1. 3 実機による感度確認試験

実機を用いてインバー線の引張変位に対する応答性を検証した。回転盤の直径は 34mm と 78mm の2種類を用意し、それぞれについて試験を行なった。本試験では、人為的に引張変位を発生させた上で、その時の変位量と発生した伝送損失量を計測した。測定は、光ファイバ線を 1m づつずらしながら3箇所の曲げ発生箇所で行ない、1箇所につき5回計測した。曲げ発生箇所をかえるのは、繰返し曲げを生じさせることにより光ファイバ線に癖がついてしまうのを防ぐためである。変位は、回転盤の径が 34mm の時は 3mm 間隔で、 78mm の時は 5mm 間隔で段階的に与えた。また、構造上 160° 以上回転盤が回転するとファイバコードがセンサ内の他の部材と干渉してしまうため、変位のフルスケールを回転盤の径が 34mm の時は 3cm 、 78mm の時は 7cm とした。但し、初期状態における回転盤角度は 60° とした。

初期状態での張力は100gfとした。

伝送損失増加量の平均値と変位量の関係を図-10、11に示す。図-10が回転盤径34mmの場合を、図-11が回転盤径78mmの場合を示している。図中のバーは計測値の最大値と最小値を表している。回転盤径34mmのケースでは、インバー線が5mm以上変位しないと損失量が増加しない結果となった。同様に回転盤径78mmのケースでは、インバー線が10mm以上変位しないと損失量が増加しない結果となった。これらの変位量は回転角度で約15°に相当し、4.1.2 検出部モデルによる実験で述べた回転盤が60°回転した状態から損失が増加するという実験結果に相反する。本試験では現場適用性を向上させるため光ファイバを新しいものに変更しており、そのため曲げにたいする反応が若干変化したため、このような結果になったと考えられる。地盤変位を適確に検出するためには、損失量が増加を示し始めるところまで事前に回転盤を回転させておく必要がある。よって、実際の現場に設置する際には、初期状態における回転盤の回転角度を、試験時の60°に対し40°増加させた100°とする。これは、40°の回転を変位量に換算すると、回転盤径が34mmの場合には約12mm、78mmの場合には約27mmとなり、損失量の増加が明確に確認される変位と一致するためである(図-10、11)。

図-10によると回転盤径34mmのケースでは、変位量が10mmから30mmの範囲で損失量がほぼ直線的に増加しており、インバー線の5mmの変位に対し、約0.2dBの伝送損失増加が確認された。また、本試験における15回の計測より得られた値の最大値と最小値の差は、およそ0.1dBから0.2dB程度となっており、本ケースでは計測値に約0.2dB程度の誤差が含まれていることがわかる。これらのことより、回転盤径34mm

を用いた場合には5mm以上の地盤変位を伝送損失の増加として検出することが可能であると言える。また、変位量と損失量の関係が比較的直線状で表されているため、損失量から変位量を逆算出来る可能性も示唆された。但し、誤差率は±3mm程度となり、伸縮計に比較しかなり劣る結果となった。

同様に図-11によると、回転盤径78mmのケースでは、変位量が20mmから70mmの範囲で損失量がほぼ直線的に増加しており、10mmの変位に対し約0.2dBの伝送損失増加が確認された。計測値の最大値と最小値の差はおよそ0.2dBから0.4dB程度となり、本ケースでは計測値に約0.4dB程度の誤差が含まれていることが分かる。これらのことより、回転盤径78mmを用いた場合には10mmから20mm以上の地盤変位が現れないと伝送損失の増加として検出することが困難であると言える。

以上の結果より、回転盤径34mmを使用した場合、本センサが地盤の変位を5mm程度の精度で検出できることが確認された。しかし、この場合には1箇所につき3cm以上の地盤変位には対応できない。一時期に多くの変位が予想される場合には、精度は若干落ちるが回転盤径を78mmへ変更することで対応が可能である。なお、実際のセンサには2種類の回転盤を装備し、現場で簡単に変更できるような構造とした(図-8)。

4.2 Bタイプ光ファイバ変位検出センサ

4.2.1 基本構造と検出原理

Bタイプの基本構造概念図を図-12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、2) 光ファイバ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。本機構における検出原理は以下のとおりである。

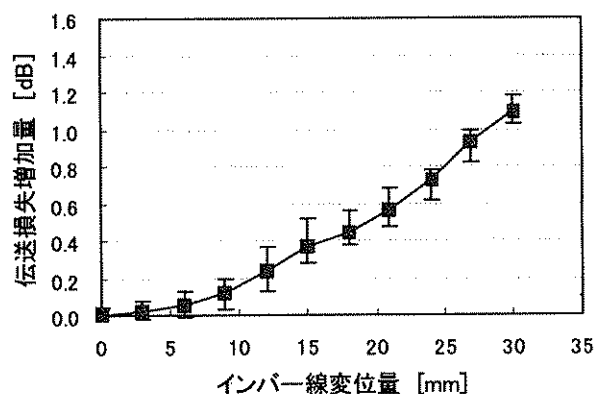


図-10 伝送損失増加量とインバー線変位量
(回転盤径 34mm)

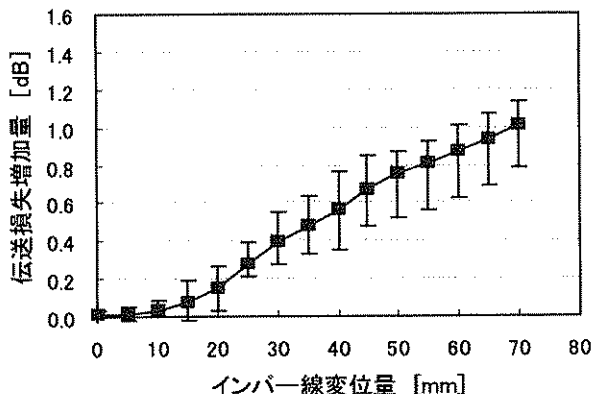


図-11 伝送損失増加量とインバー線変位量
(回転盤径 78mm)

- 1) 2 地点間で引張変位が発生すると、その間の光ファイバが引張方向に変位する。
- 2) あらかじめ巻きつけ軸に巻いてある光ファイバの巻きつけ半径が縮小し、軸の角においてマイクロベンディングが発生する。
- 3) 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状位置を特定する。

数台の検出部を連続的に配置し、変位を検出するための引張線を兼ねた光ファイバで連結することにより、Aタイプ同様線に沿った連続的な観測が可能である。また、インバー線のかわりに光ファイバを使用しているため、より低コストで変位検出が行なえる。さらに、引張線を兼ねた光ファイバは屈曲性のある保護管に収められ、地表面上へ直接敷設されるため、Aタイプと比較し現場での設置作業に労力を要しない。但し、検出部間において高張力で光ファイバを張ることができないため、インバー線に比べ地盤変位に対する追従性に欠ける。

4. 2. 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を使用した場合に、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ために、追従性確認試験を行なった。光ファイバを保護管に通し、約 2kgf の張力で引張った上で両端を固定した。敷設区間長は 20m とした。一方の端部に検出部を設置した上で、人為的に他方の端部において光ファイバに引張変位を与えた。この時に検出部において発生する光ファイバの変位量を観測した。引張変位は 1mm 間隔で与え、最高 13mm まで引張った。また、図-13 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 のところで 25cm 落とし込み、さらにそこから 10m のところで 25cm 盛り上げた形状とした。

人為的に与えた引張変位を横軸、その時に検出部で発生した光ファイバの変位を縦軸にしたグラフを図-14 に示す。本来なら同値になるはずだが、保護管内壁と光ファイバの摩擦、光ファイバ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。このことから、5mm 程度の地盤変位を検出するためには、検出部における光ファイバの 1mm 程度の変位を検出し得る構造が必要となる事が分かる。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

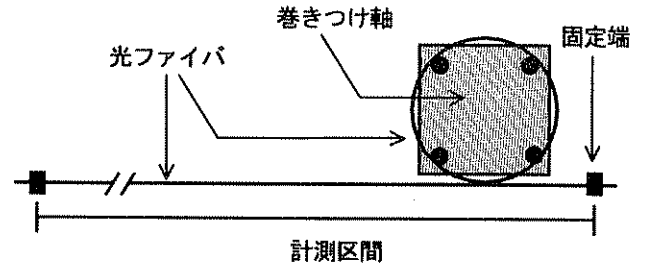


図-12 Bタイプ基本概念図

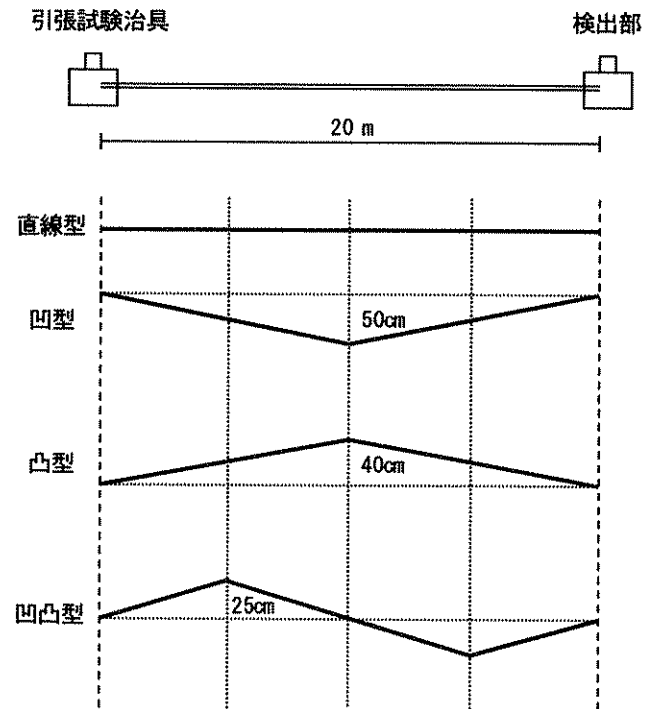


図-13 追従性試験における保護管敷設形状

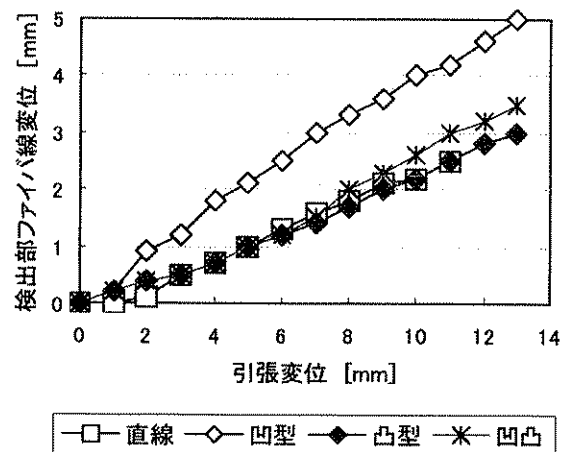


図-14 地盤変位に対する追従性試験

型の場合に追従性のよい事が分かったが、その他については顕著な違いは見られなかった。

4. 2. 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-15）、それぞれについて感度確認試験を行なった。また、図-15にあるとおりの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。

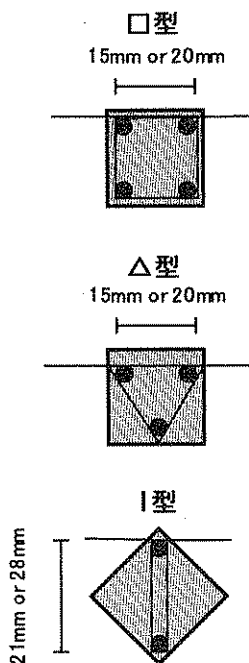


図-15 巻きつけ軸形状

(1) 予備試験

光ファイバに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計測しておく。一方の端において光ファイバに1mmの引張変位を与え、その後4mmまで引張る。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とは、初期損失からの増加量を表している。前述のとおり、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の1mmの変位を検出する必要がある。計測値のばらつきは約0.2dBから0.3dBであるため、1mmの変位発生時には0.3dB以上伝送損失が増加する必要がある。今回の試験結果より、□型（辺長15mm）以外はこの条件を満たしていることが確認された。しかし、△型（辺長20mm）においては、光ファイバを4mm変位させた時に12dB以上損失が増加し、測定器上の制約から計測不能となった。よって、これら2ケースを除いた4ケースで感度確認試験を行った。

(2) 感度確認試験

基本的には予備試験と同様に行うが、初期緊張力を200gfとした場合を5回、300gfとした場合を5回の計10回計測を行った。また、引張変位は1mmから5mmま

表-1 巻きつけ軸形状検討のための予備試験

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

で1mm間隔で段階的に変化させ、伝送損失量を計測した。

それぞれの形状について、光ファイバ線の変位と伝送損失増加量の関係を図-16～19に示す。これらの図では10回の計測における伝送損失増加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を表している。□型（辺長20mm）では、光ファイバ線が1mm変位した時の損失量が0.05dBと一番少なく、十分な検出を行えないという結果となった。△型（辺長15mm）では、光ファイバ線が1mm変位した時の伝送損失量が他と比べて大きく、最も感度のよい形状であることが分かった。但し、計測値のばらつきが4つの形状の中で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きいと、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本の光ファイバケーブルに対し測定可能である伝送損失の幅のことを言い、計測器の特性から入射光の各パルス幅毎に決定されるものである。そのため、光ファイバのある1地点においてダイナミックレンジを越えるような損失が発生すると、それ以降の損失（本センサにおいてはそれ以降の変位）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能となってしまったため、その場合は4mm変位時までを記述している。I型（辺長28mm）では、光ファイバ線が1mm変位した時の伝送損失増加量は△型（辺長15mm）ほど高くはないが、その値は0.49dBとなり、測定誤差0.3dBを考慮しても十分変位を検出しうると言える。また、計測値のばらつきが少なく、大きく変位した時にもそれほど損失量が増大しないため、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、辺長28mmの場合と比較し、光ファイバ線1mm変位時の伝送損失増加量が小さく、全体的な数値のばらつきも大きいと言う結果となった。

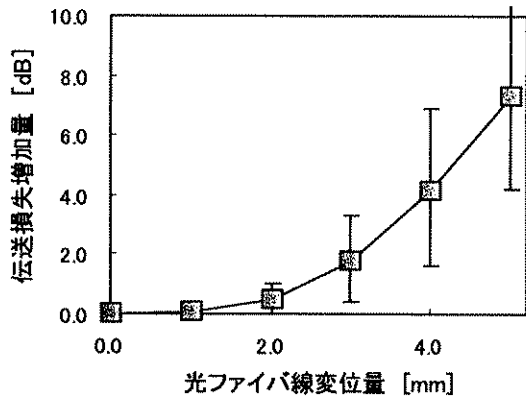


図-16 光ファイバ線変位置と伝送損失増加量
(□型 辺長 20mm)

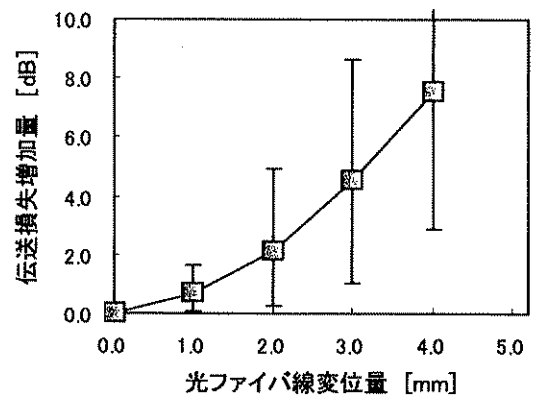


図-17 光ファイバ線変位置と伝送損失増加量
(△型 辺長 15mm)

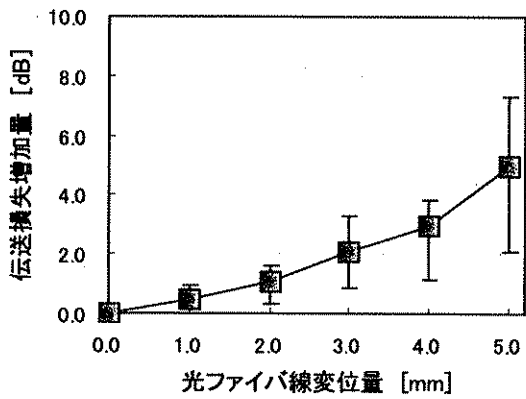


図-18 光ファイバ線変位置と伝送損失増加量
(I型 辺長 28mm)

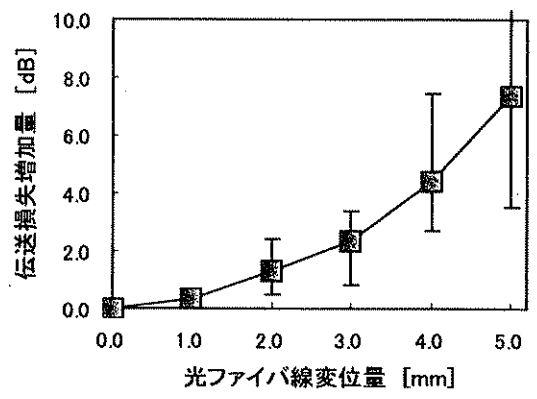


図-19 光ファイバ線変位置と伝送損失増加量
(I型 辺長 21mm)

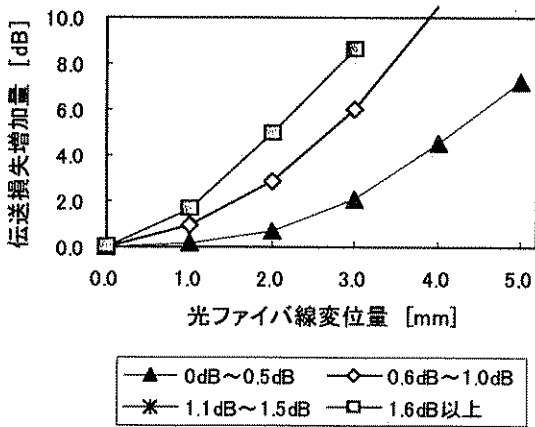


図-20 初期損失量をパラメータとした
光ファイバ線変位置と伝送損失増加量
(△型 辺長 15mm)

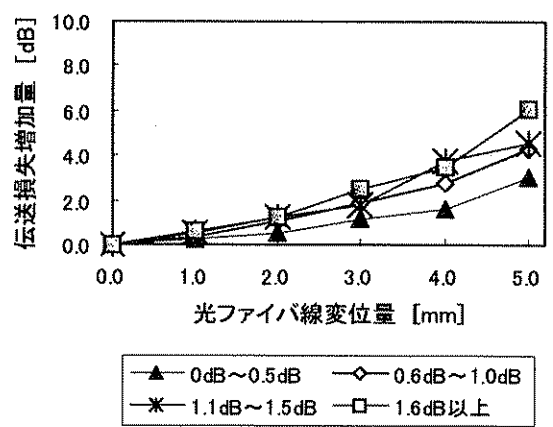


図-21 初期損失量をパラメータとした
光ファイバ線変位置と伝送損失増加量
(I型 辺長 28mm)

次に、△型 (辺長 15mm) および I 型 (辺長 28mm) について、初期損失量が変位と損失量の関係に及ぼす影響を把握するため、一定範囲の初期損失量毎に伝送

損失増加量と変位の関係を図-20、21に示す。これらの結果から、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。初期損失量は巻きつけ軸形状が同じであっても設置する技術者により微妙にその値がかわってしまうため、現地設置の際には初期状態における損失量を適正に管理する必要がある。これにより、計測値のばらつきを抑え、感度を向上させることが可能である。

以上の結果より、△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光ファイバの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、初期損失量によるばらつきが大きく、初期状態での伝送損失量を適正に管理する必要のあることも分かった。なお、実際の変位検出センサは、現場での簡単な作業で巻きつけ軸の形状を変更できるような構造とした。

5. 現場適用性の検証

現場での適用性を検証するため、室内試験により検討したA,B両タイプの光ファイバ変位検出センサを地すべりに設置し、実際に地盤の変位検出を試みた。

5.1 試験地の概要

本試験は高知県の西部に位置する谷の内地すべり(図-22)において行なった。谷の内地すべりは、秩父中古生層に属する破碎帯地すべりであり、全域が末端の一部に向かって収束するように滑動するボトルネック型の大規模地すべりである。基盤岩はチャートと緑色凝灰岩を挟む泥岩優勢の砂岩泥岩互層からなり、斜面全体が20°から30°程度の流れ盤構造を示している。地すべりの主要移動ブロックはAからEの5ブロックに分けられ、今回光ファイバ変位検出センサを設置したAブロックは長さ1,100m、幅450m、平均すべり層厚70mの地すべりブロックである。

5.2 試験方法

谷の内地すべりAブロックの頭部に、A,B両タイプのセンサをそれぞれ10台ずつ設置した(図-23)。Aタイプの回転盤径は34mmを使用した。Bタイプの巻きつけ軸形状はI型とし、辺長は28mmとした。また、初期状態について

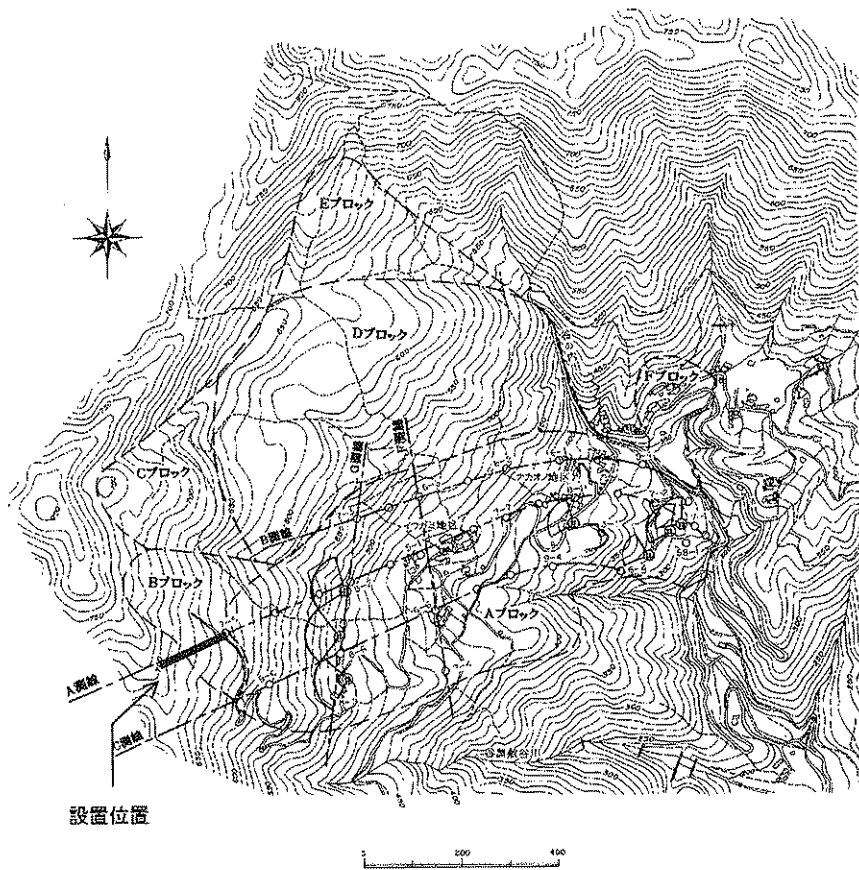


図-22 試験地平面図

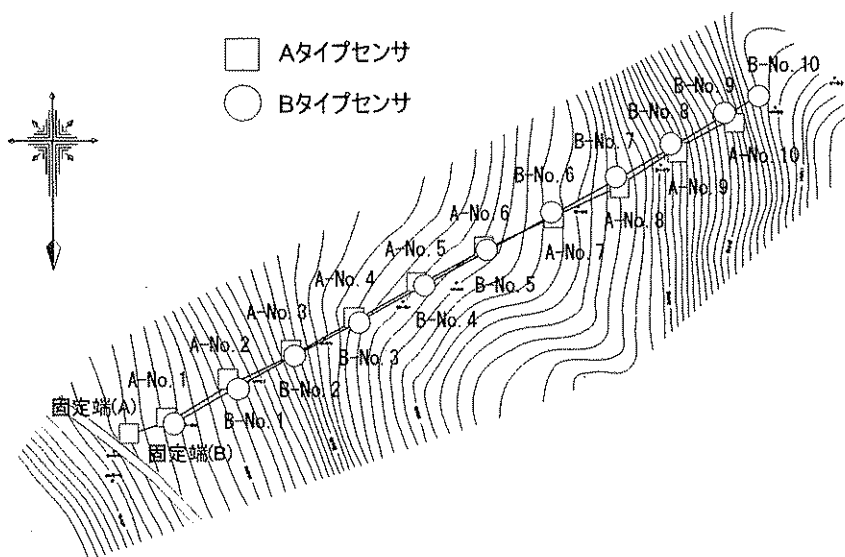


図-23 光ファイバ変位検出センサ設置平面図

は、Aタイプは回転盤の回転角度で管理し、100° 回転させたところを初期状態とした。Bタイプは初期損失量により管理し、初期損失量を1.6dBから2.0dBとした。伝送損失の計測は2~3週間おきに行い、3回計測した値の平均値をそのセンサの伝送損失量とした。また、伝送損失の計測とともに引張線（Aタイプではインバー線、Bタイプでは光ファイバ線）の変位量もあわせて計測した。計測にはセンサ本体に設置されたスケールを用いた。また、Bタイプについては引張線を兼ねる光ファイバ線の地盤変位に対する追従性を検証するため、センサ間の絶対変位もあわせて計測した。計測はセンサ固定用単管杭の頭部に設置された測量ピンを移動杭測量することにより行なった。Aタイプの計測は平成14年5月2日から平成15年3月6日までの期間にあわせて17回行った。また、Bタイプについては、平成14年12月16日から平成15年2月6日までの期間あわせて5回の計測を行った。但し、移動杭測量は平成14年12月16日と平成15年2月6日の2回実施した。

5.3 試験結果 (Aタイプ)

計測期間中、すべての箇所、すべての計測時期においてAタイプセンサの検出可能変位としている5mmを超えるようなインバー線変位は確認されなかった。したがって、それぞれの計測時期におけるインバー線変位と伝送損失を比較するのではなく、1年間における変位と伝送損失の累積量を比較することにより、本センサの現場適用性を検証する。

本試験区間におけるインバー線累積変位量の最大値は3mmであり、No.5センサ（No.4~No.5）およびNo.6センサ（No.5~No.6）において計測された。これらの2つのセンサにおけるインバー線変位と伝送損失増加量の計測結果を図-24、25に示す。変位量が小さいため損失量の増加もかなり少ないが、インバー線の変位と同調するような増減を見せている。本試験における伝送損失の増減範囲は、室内試験において誤差範囲と考えられた0.2dB以内であるため、本結果により現場での適用性が十分証明されたとは言いがたいが、一応の傾向は示されたと言える。しかし、他の累積変

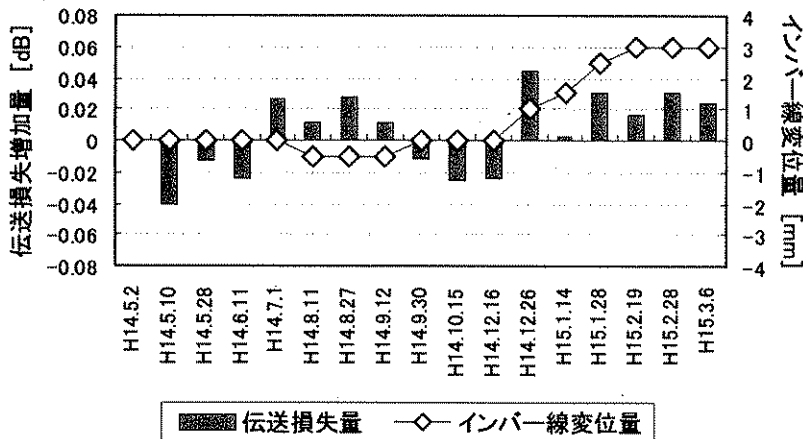


図-24 インバー線変位量と伝送損失増加量 (センサNo.5)

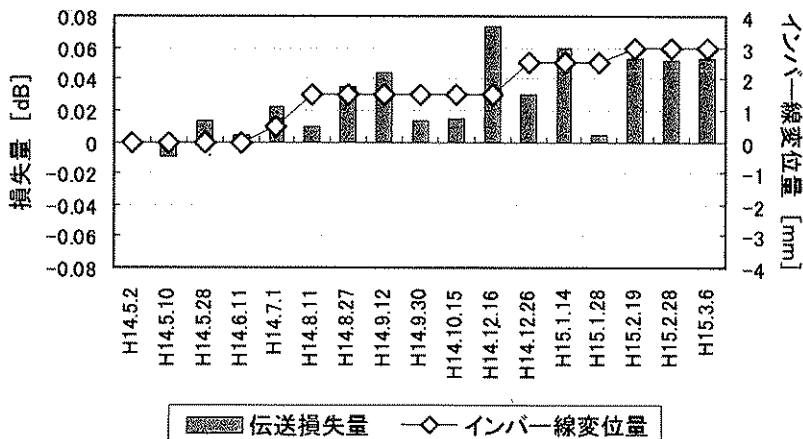


図-25 インバー線変位量と伝送損失増加量 (センサNo.6)

位を示さなかったセンサにおいても同様に損失量の増加がみられるケースもあり（例えばNo.2センサ）、誤って地盤変位が検出される可能性も示唆された。但し、前述の理由により、これをもって直ちに本センサでは誤って検出される可能性が高いとは言えない。なお、No.5、No.6付近は地すべり性の線状凹地部分にあたり（図-23）、本試験の結果は当該箇所を頭部とする2次的地すべりの存在を示唆していると言える。

5.4 試験結果 (Bタイプ)

本試験では、計測期間中1台のセンサにつき4期間の伝送損失量変化及び光ファイバ線変位が得られている。これら1つ1つの計測時期について、光ファイバ線変位と伝送損失量を比較することにより、本センサの現場適用性を検証する。

全ケース（4期間×10台=40ケース）を光ファイバ線の変位が引張方向であったケース、圧縮方向であったケース、変位がなかつ

表-2 変位と伝送損失量増減

変位方向	伝送損失			合計
	増加	減少	変化なし	
引張変位	—	—	12	12
圧縮変位	3	3	6	12
変位なし	—	2	14	16

たケースに分け、それぞれその時の伝送損失量の増加、減少、不変を表-2に集計した。引張方向に1mm以上の変位を受けたのは40ケースのうち12ケースとなったが、この12ケースのうちすべてにおいて伝送損失量が変化しない結果となった。また、圧縮方向へ同じく1mm以上の変位を受けた12ケースでは、伝送損失量が増加したケースが3ケース、減少したケースが3ケース、変化しなかったケースが6ケースであった。変位を受けなかった残りの16ケースでは、伝送損失量が減少したケースが2ケース、変化しなかったケースが14ケースとなった。ここで、伝送損失量の変化については、計測値のばらつきを考慮し0.3dB以上の増減が発生したときを変化ありとした。これらの結果より、実際に変位のない場合、もしくは今回検出の対象としていない圧縮方向の変位が発生した場合に、誤って引張変位が確認されるような伝送損失量の増加が認められたケースは5ケースと少なく、変位発生箇所を誤判定する可能性は低いと言える。しかし、一方で変位が検出されるべき引張方向に変位したケースにおいて、それを示すように伝送損失量が増加したケースは1つもなく、今回の設置方法では本センサの現場への適用には問題があると言わざるを得ない。

ところで、これらの引張変位を受けた12ケースのうち、9ケースにおいては引張変位を受ける前にその変位量と同等もしくはそれ以上の圧縮変位を受けていた。このことから、圧縮変位を受けた際にファイバに微小なたるみが発生し、その後引張変位を受けた時にはこれらのたるんだ部分が引張られたため、巻きつけ軸において光ファイバに十分な緊張が与えられなかったと予想される。このため、必要なマイクロベンディングが発生せず、このような結果になったと考えられる。地すべり地内では引張

方向だけでなく圧縮方向に変位するケースも多いことから、Bタイプセンサを現場へ適用するためには、圧縮方向の変位が検出機構に与える影響を精査し、圧縮方向の変位が検出機構に影響を与えないような構造を付加する必要があると言える。

次に地盤変位と引張線変位を比較することにより、地盤変位に対する追従性について検討する。計測期間の最初と最後に実施した移動杭測量結果の差分をとることにより、計測期間中における各センサ間長の変位を算出した。また、全計測期間における光ファイバ線変位量を合計することにより、計測期間中におけるトータルの光ファイバ線変位量を算出した。各センサ間における地盤変位量及び光ファイバ線変位量を図-26に示す。なお、ここでは引張方向を正としている。本センサにより検出可能となる5mmを超える地盤の引張方向の変位を示した箇所はセンサNo.2とNo.3の間1箇所のみであった。このときの光ファイバ線変位は1mmとなり、前述の追従性試験結果と同様の結果を得た。しかし、この箇所以外に試験期間中5mm以上の変位が確認された箇所がなかったため、十分に現場での追従性を確認するにはいたらなかった。また、移動杭測量結果と光ファイバ線変位計測結果の間に不整合な点もみとめられた。例えば、センサNo.1とNo.2の間では地盤が圧縮方向へ5mm変位しているのに対し、光ファイバ線変位は引張方向へ1mm変位した結果となっている。また、センサNo.5とNo.6、No.6とNo.7、No.7とNo.8の間では地盤の変位がほとんど確認されていないにもかかわらず、光ファイバ線は圧縮方向へ1~2mm程度の変位を表している。このような結果は、光ファイバを地表面に直接敷設しているため、地表面の微小な高さ変位などの影響を受けたことが原因と考えられる。

光ファイバ線変位の地盤変位に対する追従性が低

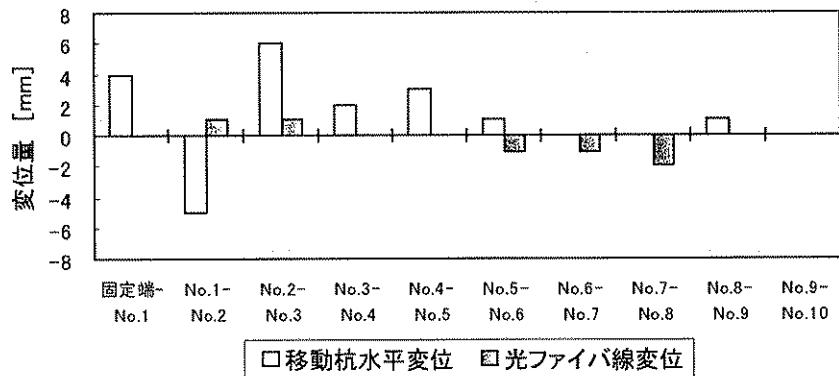


図-26 地盤変位と光ファイバ線変位

下すると、実際に地盤に変位が発生した際にも検出できないケースが多くなると考えられる。今後更に現場での適用性試験を繰り返し、追従性の確認、追従性向上のための改良を検討していく必要がある。

6. まとめ

6.1 まとめ

本調査では、光ファイバを用いた地すべり地における地盤変位を検出するためのセンサをA、B2タイプ開発した。室内試験においてその実用性を確認し、さらに実際の地すべり地において現場適用性試験を行なった。両タイプセンサにおける試験結果を以下にまとめる。

・Aタイプセンサ

室内試験の結果、5mm程度の精度で変位を検出できることが分かった。また、変位と伝送損失増加量の間に比例関係が認められ、伝送損失量から地盤変位の絶対量算出の可能性が示唆された。しかし、計測された伝送損失量のばらつきが大きいため、実際に変位量自体を本センサで測定するには更なる改良が必要であると考えられる。実際の地すべり地における現場適用性試験では、試験期間中の地盤変位が小さく現場適用性の十分な検証はかなわなかったが、インバー線の累積変位と累積損失量が同調する傾向が見られた。

・Bタイプセンサ

実内試験の結果、本センサにより1mm程度の引張線変位を検出できることが確認された。しかし、引張線となる光ファイバの地盤変位に対する追従性試験の結果、地盤の5mm程度の変位が検出部内の光ファイバ線における1mm変位に対応することが分かった。これより、BタイプセンサにおいてもAタイプセンサと同様に地盤の5mm程度の変位発生を検出できることが確認された。しかし、現場での適用性試験においては、圧縮方向に変位を受けた際にその後の引張方向の変位に対する反応が著しく鈍くなる結果となり、室内試験において確認されたような変位と伝送損失量の良好な関係は確認できなかった。

6.2 今後の課題

本調査においては、室内実験においては良好な結果を得られたものの、現場での適用性について課題を残すところとなった。特にBタイプセンサにおいては、圧縮方向の変位による初期状態の変化がセンサ感度に与える影響を把握するとともに、これを原因とする誤作動を排除するような改良を加えていく必要がある。また、今回Aタイプセンサの検出精度は5mm程度であ

ったが、この検出機構を改良しBタイプセンサと同様に1mm程度から検出可能となる機構を開発することにより、地盤変位に対する追従性が高いAタイプセンサの長所とあわせ、より優れた検出機構を開発しうる可能性がある。今後はこのようなAタイプ、Bタイプの長所をあわせもつような機構を新たに考案していくべきであると考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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、pp16-18, pp22-24, 1994
- 4) 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」、船木春仁「テクノロジー・ストーミングー技術頭脳集団NTT-ATの挑戦」、ダイヤモンド社、pp141-161, 2000
- 5) 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, pp37-40, 2000
- 6) 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、pp15-28, 1997
- 7) 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, pp46-51, 1992