

光ファイバと弾性体（天然ゴム）を用いた地山変位計測システムの開発

B-OTDR 弾性体 地盤変位計測

中日本高速道路株式会社 正会員 馬場 弘二
(財)地域地盤環境研究所 正会員 橋本 正 ○水原 勝由
エヌ・ティ・ティ・インフラネット(株) 正会員 鳥越 寿彦 青木 俊朗
ブリヂストン・ケー・ビー・ジー(株) 清水 潔 静内 均

1. はじめに

現在の B-OTDR 方式で開発適用された光ファイバ計測システムは、主に地表面や構造物に生じるひずみや変位を計測するものである。地山内の鉛直・水平変位の計測は、FBG 方式等を用いた各種計測器の開発によって可能となっているが、光ファイバ計測の広域を連続的（線的）に計測が可能という最大の特徴を活用したものでないと考えられる。そうした現状から、筆者らは、B-OTDR 方式による地山変位を広域かつ連続的に計測できるシステムを開発することとした。開発中の光ファイバゴムセンサ（以下、ゴムセンサという。）は、光ファイバを敷設した弾性体（天然ゴム棒）を地山に埋設することで地山と弾性体を一体化させ、地山に追従して変形する弾性体の連続したひずみを計測するものである。本稿は、室内実験を通じ、地山変位計測への適用性の検討結果を報告する。

2. ゴムセンサの概要

光ファイバ自体は、非常に細いガラス線であるため、それ自体を単体で地山と一体になるように敷設することは困難である。ゴムセンサは、下記の①および②に示す B-OTDR 方式光ファイバ計測および天然ゴム弾性体の特性を相互に活用したものであり、地山と同程度の強度を持つ天然ゴム棒（以下、ゴム棒という。）に光ファイバを敷設（図-1 参照）し、地山に埋設することで地山とゴム棒を一体化させ、地山に追従して変位するゴム棒の連続した鉛直方向（軸ひずみ）と水平方向（曲げひずみ）のひずみを同時に計測するものである。ゴムセンサの断面および構造等については、表-1 の検討によって決定したものである。ゴムセンサの基本長は、4mとしているが、これは、現場運搬および将来の製作ライン化を考慮したためである。現場計測に必要な長さは、複数のゴムセンサを連結接続することとしている。

①光ファイバ計測（B-OTDR）：光ファイバに光を通すと、散乱光と呼ばれる微弱な光が戻ってくる性質がある。その中の1つであるブリルアン散乱光は、光ファイバにひずみが生じると、そのひずみ量に比例してピーク周波数が変化する性質がある。この性質を用いて、周波数分布を測定・解析することにより光ファイバの長さ方向の連続ひずみ（光ファイバの伸縮）が測定できるとともに、入力から光が戻ってくるまでの時間を測定することで、ひずみの発生位置を検出できるものである。

②弾性体（天然ゴム）：天然ゴムは、物理的性質および初期性能の維持に必要な圧縮永久歪・反発弾性特性が最も良好であり、通常気温内におけるヤング係数変化が最も変化が少なく、生成段階で地山と同程度の強度を持つ弾性体材料に調整製作が可能であるという有利特性を持っている。さらに、様々な環境下で長期耐久性に優れていることは、タイヤやケーブル被服等のような一般的利用状況からも明らかであると言える。

3. 室内試験

ゴムセンサは、①弾性体と地山が一体となって変形すること、②弾性体に敷設した光ファイバが弾性体の変形に追従することが基本条件となる。室内試験は、基本条件となる②の弾性体に敷設した光ファイバが弾性体と一体となって変形し、これにตอบสนองしたひずみが検出することを確認するために、表-2 に示す試験を実施した。なお、①の弾性体と地山の一体化については、現場実証実験によって確認することとした。

4. 室内試験結果

①基礎実験：基礎実験では、ゴムセンサ製作時に強制的に与えた光ファイバのひずみ（引張）の状態やゴムセンサ部で損失する光のロス量、ゴ

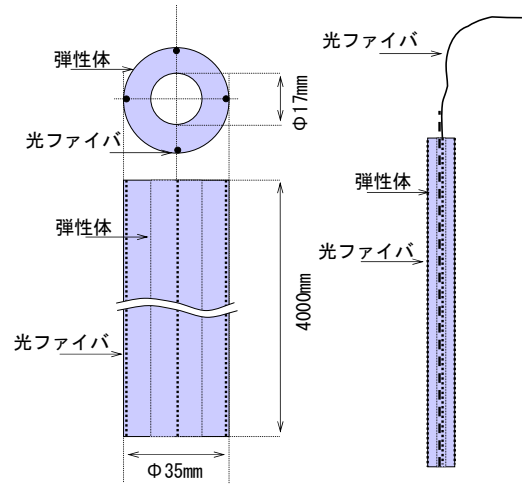


図-1 ゴムセンサの基本構造

表-1 ゴムセンサの構造検討

検討項目	検討内容	構造
光ファイバ敷設	・全方向のひずみ計測が可能であること	4方向
断面形状	・光ファイバの敷設条件より ・地山内に設置（ボーリング掘削孔径φ66～86mm）	円形 φ35mm
地山内設置	・地山内挿入方法（挿入ロッド等の使用可） ・設置後の孔内充填方法（注入ホースとして使用可）	中空
コスト	・材料コスト	
センサ長	・現場搬入（ワゴン車程度で輸送可能な長さ） ・真直ぐに伸ばした状態で輸送	4m

表-2 室内試験項目

	試験項目
基礎実験	①ゴムセンサ初期ひずみ計測
	②光の通過ロス量計測
	③自重による伸張ひずみ計測
一軸引張試験	①一軸引張試験
せん断試験	①せん断試験 ・せん断位置との関係 ・せん断方向との関係 ・せん断変位量との関係
	②測定範囲(限界量)の確認

Development of ground deformation measurement system using Optical Fiber Sensor and Elasticity Object. Kouji BABA(Central Nippon Expressway Company Limited), Katsuyoshi MIZUHARA(Geo-Research Institute), Toshihiko TORIGOE, Toshiro AOKI(NTT infrastructure Network Corporation), Kiyoshi SHIMIZU, Hitoshi SHIZUUCHI(BRIDGESTONE KBG CO.,LTD)

ムセンサの自重による伸び量について計測を行った。結果、基本的な製作精度や自重による影響は少なく、計測システム、B-OTDRの基本性能に対して支障とならないことを確認した。

②一軸引張試験：一軸引張試験では、ゴムセンサを吊下げた状態で、軸方向（センサ長手方向）に10Nから85Nまでの荷重を段階的な荷重と除荷を繰り返して与え、ゴムセンサの伸縮量とひずみ分布の計測を行った。結果、ゴムセンサ長間で、ほぼ様な軸ひずみ分布を示し、荷重によるゴムセンサの理論ひずみ量と実測のひずみ量がほぼ一致することを確認した。

③せん断試験：せん断試験では、表-3に示す試験条件により、任意の位置にせん断変位を与え、せん断位置、方向、変位量が検出できるかについて試験を行った。せん断試験装置は、ゴムセンサを地山中に設置した状態に模擬するため、せん断変位位置以外については、軸およびせん断方向に変位が生じないように拘束している。

せん断に伴うゴムセンサのひずみ分布は、せん断方向によって異なり、大きく図-2の模式図に示すような分布パターンを示すと考えられる。図-3(a)は試験条件①ケース1（Line-1,3方向にせん断）での実測ひずみ分布を示す。また、図-3(b)は試験条件①ケース2（45度回転した状態でせん断）での実測ひずみ分布を示したものである。

せん断に伴うゴムセンサのひずみ分布は、せん断方向によって異なり、大きく図-2の模式図に示すような分布パターンを示すと考えられる。図-3(a)は試験条件①ケース1（Line-1,3方向にせん断）での実測ひずみ分布を示す。また、図-3(b)は試験条件①ケース2（45度回転した状態でせん断）での実測ひずみ分布を示したものである。

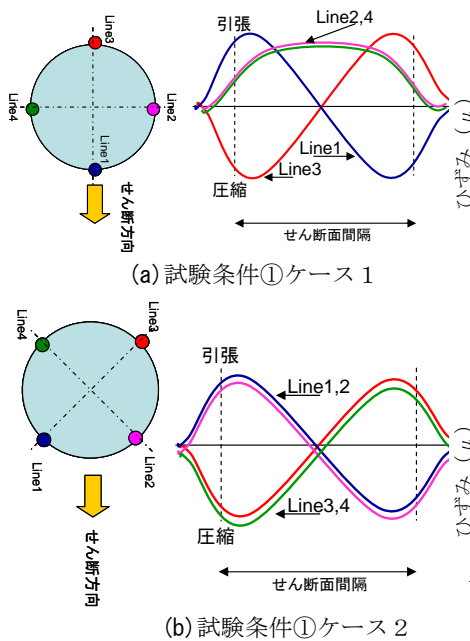
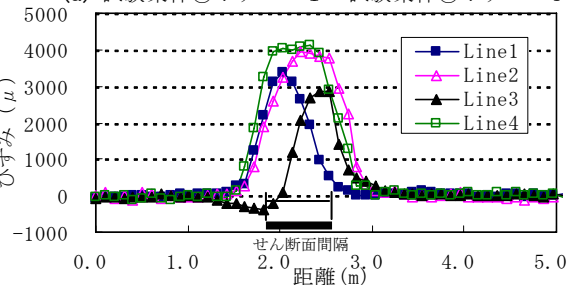


図-2 せん断部に発生するひずみ模式図

表-3 せん断試験の試験条件

試験条件① 光ファイバ敷設軸に対するせん断方向	試験条件② せん断面間隔
ケース1 ケース2	ケース1 ケース2 ケース3 ケース4
光ファイバゴムセンサにせん断変形を与える (0mm～光ファイバセンサの測定限界まで)	せん断面間隔と光ファイバセンサの測定値の関係を把握
ファイバ敷設軸に対し、 直角方向のせん断変形	ファイバ敷設軸に対し、 45度方向のせん断変形
①曲げ・せん断位置との対応 ②曲げ・せん断方向との対応 ③曲げ・せん断変位量との対応	

(a) 試験条件①：ケース1 試験条件②：ケース4



(b) 試験条件①：ケース2 試験条件②：ケース4

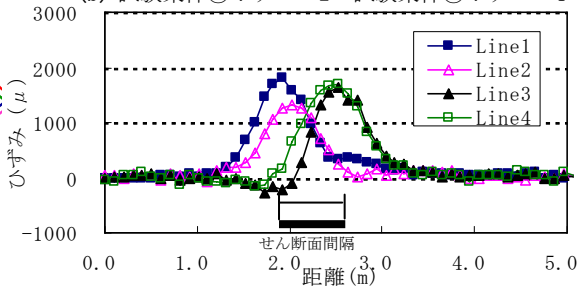


図-3 せん断変位に伴うひずみ分布

ものである。試験結果より、せん断位置およびせん断方向に対して、ひずみ模式図と同じ傾向のひずみ分布を示し、ゴムセンサがせん断位置および方向を検出できることが確認できた。なお、変位量については、ひずみ量を2回積分することで得られるが、今回の試験結果では実変位量に対し、mm単位の精度で対応するものではなかった。

5. 適用の可能性

開発を進めているゴムセンサの特徴は、長期的に安定した3軸方向（長軸方向、横断面2方向）の変形状態を、線のかつ広域に計測できることである。適用については、①トンネル施工時の地盤変位、②山岳トンネルにおける切羽近傍法線方向の変位やインパルト部の変位、③斜面や堤体、護岸等の長期モニタリング、④構造物の変位、など幅広い適用が考えられる。特に、広域防災に対する長期モニタリングシステムとして有効と考える。

6. まとめ

最大の課題は変位量に対する測定精度向上である。変位量の測定精度は、ひずみ測定そのものの空間分解能、精度、位置同定精度など測定方式に依存する要因や測定ひずみから変位への換算手法など多くの要因に影響される。今後は、B-OTDRに加え、近年研究開発が進められているBOCDA¹⁾方式やPPP-BOTDA²⁾方式の適用検討や解析処理手法の検討開発などにより精度向上を図る必要があると考える。なお、現場実証実験はすでに終え、現在、詳細なデータの分析中である。この結果については、別途、報告したいと考えている。

参考文献

- 1) 今井道男, 名見耶: BOCDA方式光ファイバセンサ高度化技術の実証実験, 土木学会第60回年次学術講演会, pp283-284 2005.9
- 2) 若城英朗, 岡田敬一: 高分解能光ファイバ分布ひずみセンサ(PPP-BOTDA)によるガス導管ひずみ計測への適用試験, 土木学会第60回年次学術講演会, pp257-258 2005.9