

連続分布型計測システムによる野外地下計測技術

Distributed Sensing and Monitoring System for Surveying Subsurface Phenomena

黒田 清一郎[†] 中里 裕 臣[†] 奥 山 武 彦[†] 長 束 勇[†]
(KURODA Seichiro) (NAKAZATO Hiroomi) (OKUYAMA Takehiko) (NATSUKA Isamu)

I. はじめに

通常のフィールドでの調査・研究においては、現地計測や観測が重要な位置を占める。しかし、気象変化や予期せぬアクシデントなどが起こり得る中で、野外で展開される自然現象を正確に、かつ包括的に捉えようとする場合、何らかの計測上の問題に直面することは少なくない。特に、地盤・地下水環境保全や地盤防災などを目的として地下深部を観測対象とする場合、地下計測特有の困難性が生じる。

たとえば、対象が地表であれば、コスト面で許容される限りのセンサ、観測機器を設置することができる。ところが、地下計測では通常ボーリングによる掘削によって設置された観測孔を利用して計測を行うことから、その直径数 cm の観測孔内という空間的制約によって、センサの数量も観測法そのものも制約を受ける。一般的には、地表を対象とした観測に比較して、地下深部を対象とした観測では時間的・空間的に連続した情報を得ることが困難である。もし、そのような情報を得られる観測手法があれば、「あかり」が無く視覚情報が得られない地下地盤において有効なものと考えられる。

一方、近年、構造物の維持管理を目的として、光ファイバなどのケーブル型センサを用いた連続分布型計測技術がみられる^{1),2)}。この技術の特長は、ケーブルセンサ

に沿った歪みや温度の連続的な空間分布を容易に計測できることであり、また連続測定や遠隔監視測定も容易であるため時間的変化の観測にも有効なことである。このような特長を有する技術を地下地盤における計測にも応用できれば、有効な技術として活用できるものと考えられる。本報では、野外の地下地盤計測の分野で適用され始めた、あるいは今後の利活用が期待される本連続分布型計測システムについて、その概要を述べるとともに、筆者らが実施している事例について紹介する。

II. ケーブルセンサと TDR に基づく連続分布型計測システムの原理

ケーブルセンサによる計測は、光ファイバ内の後方散乱光を用いるものと、金属系ケーブル内の電磁氣的信号を用いるものに大別される(図-1)。本報では、ケーブルセンサの TDR (Time Domain Reflectometry; 時間領域反射計測法) に基づき連続した測定値が得られる、連続分布型計測技術 (Distributed Sensing) を取上げる。

光ファイバ内をパルス光が伝播するとき、光ファイバ内では 3 種類の後方散乱光 (レイリー散乱光、ブリルアン散乱光、ラマン散乱光) が発生する。このうち、ブリルアン散乱光は光ファイバ内に生じる音波による屈折率ゆらぎによって生じる散乱光³⁾であり、入射光に比べ

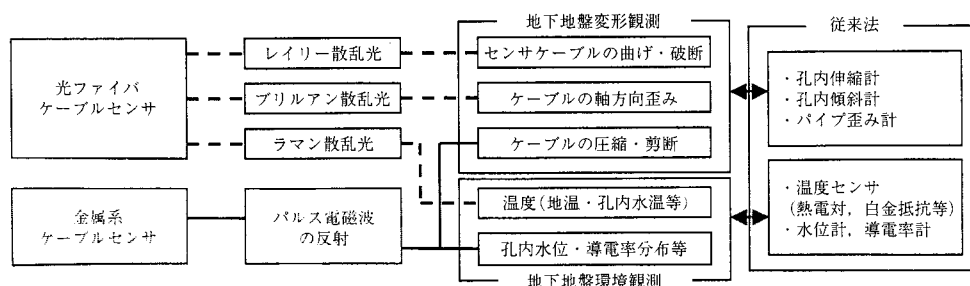


図-1 ケーブルセンサと TDR 法に基づく連続分布型観測 (特にボーリング孔を用いた地下計測に注目)

[†] (独) 農業工学研究所

リルアン周波数シフトと呼ばれる量 ν_B だけ周波数が異なる。この ν_B と歪み ε とは、概ね式(1)の関係がある。

$$\nu_B = \nu_B(0) + C \cdot \varepsilon \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\nu_B(0)$: $\varepsilon=0$ のときの ν_B , C : 定数

したがって、 ν_B を測定することによって光ファイバに生じた歪み量を定量的に測定できる。

また、パルス入力光のケーブル内での伝播によって生じた後方散乱光の時間変化を ns~ps (10^{-9} ~ 10^{-12} 秒) 単位の分解能を有する TDR で計測し、ケーブル中の伝播速度 V_p を用いて距離情報に変換することによって (図-2), 光ファイバ内の長軸方向の連続した歪み分布情報が得られる。この計測手法は、ブリルアン (Brillouin) 散乱光を用いる TDR であることから、BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) と呼ばれる。さらに、ラマン散乱光は光ファイバの分子運動による散乱光で温度依存性を有していることから、TDR 計測でこのストークス光 (入射パルス光に対し波長の長い光) と反ストークス光の強度比を求めることによって、ケーブルに沿った温度分布を把握することができる。近年、その精度はループ方式などの技術によって $\pm 0.1^\circ\text{C}$ が実現されており、通常では温度変化の少ない地下の地盤環境調査や地下水探査への適用も行われている⁴⁾。

一方、同軸ケーブルや平行線路など高周波電磁波伝送路のケーブルセンサと電磁波の TDR 計測 (Metallic-TDR) を組合わせたシステムでは、伝送路に沿った電磁インピーダンスの変化によって生じる反射波を測定することによって、その周辺の情報を得ることができ、地盤中の変形の観測や孔内水の導電率分布、水位の測定などに適用されている⁵⁾。たとえば同軸ケーブルの場合、そのインピーダンスはケーブルの形状に依存する。した

がって、同軸ケーブルをセンサとして地中に埋設した場合、ケーブルに生じる圧縮や剪断による変形から地盤変形を検知することができ、TDR により変形位置を特定できる。

III. 連続分布型計測による地下地盤変形観測システム

II. で述べた BOTDR による歪み分布測定は地すべり分野でも利用され始めており⁶⁾、ボーリング孔を利用した地下地盤変形計測の現地適用も試みられるようになった^{7)~9)}。しかし、複数の分布型計測を組合わせた事例は少ない。本節では、筆者らが実施している光ファイバと BOTDR 計測、並びに同軸ケーブルと Metallic-TDR 計測を組合わせた地すべり地における地下地盤変形観測システムについて述べる。

1. 観測システムの概要

新潟県の泥岩を基岩とする地すべり地に設置した観測システムを、図-3 に示す。この現地では、事前の調査によって比較的短期間に地盤中に大きな剪断変形が生じることが予想されたことから、孔内傾斜計による観測では早い時期に計器を挿入できなくなることが懸念された。そこで、1 点型の孔内伸縮計による計測が採用された。この観測法はワイヤで結ばれたボーリング孔底と地表の測定器間の距離を測定するもので、変位量は計測できるが、剪断変位が生じた深度の特定は不可能である。そこで、深度を計測する目的で連続分布型計測システムを導入し、孔内伸縮計と合わせて設置した。

観測システムは深度約 10 m のボーリング孔内に設置した。光ファイバセンサを貼付した全体長 10 m アルミケーシングを孔内に挿入しグラウチングによって固定した。またケーシング内側に半径や材質の異なる複数種の同軸ケーブルを挿入し固定した。なお、1 m 当たりの感度は、光ファイバが 0.1~0.2 mm 程度であるのに対し、同軸ケーブルは数 mm 以上である。また、複数種の同軸ケーブルを挿入した理由は、一般に太いものほど感度が鈍くなるが、完全な破断までの変位量は大きくなることから、感度、変位量の測定領域の異なるセンサを複合させるためである。

さらに、光ファイバセンサについては通常の通信用ケーブルではなく、変形追従性、野外での耐久性に優れた金属管外装型光ファイバセンサを採用し、軸方向に引張力を与えた引張状態で敷設 (張設) した。この張設は、圧縮変形が生じた場合であっても初期に与えた引張歪みの減少を計測することによって、圧縮側の変形も検知できるようにするためである。また、センサは、地中

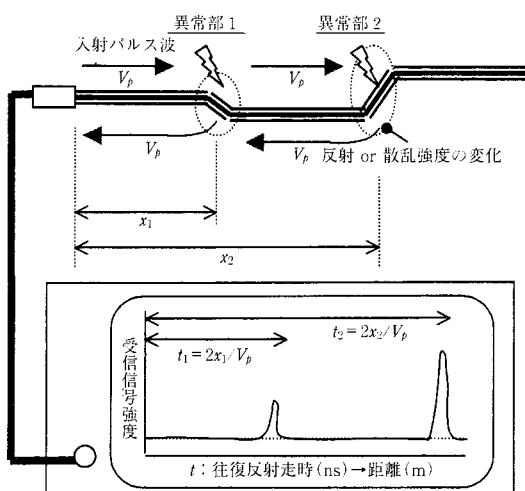


図-2 TDR 法に基づく連続分布計測の模式図

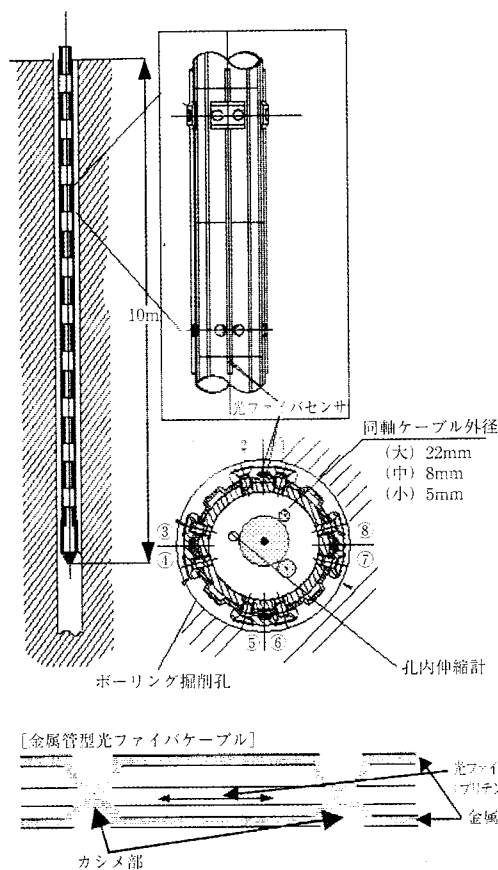


図-3 連続分布計測に基づく地下地盤変状観測システムとセンサの概要

に挿入した管に曲げ変形が生じた場合にも、その変形方向も検知することができるよう、管周の4分割点に2本ずつ貼付した。2本貼付したのは設置時の破断による測定不能となることを避けるため、また測定値の信頼性の向上のためである。なお、図-4は、上記の光ファイバを貼付したアルミケーシングの2mの試験片に室内での4点曲げ試験を実施した結果であり、载荷による曲げ変形による歪みを検出することができた。また異なる方向から载荷した結果、4分割点のセンサの歪みは曲げによる圧縮と引張の状況に対応している。このことから地盤の変形により孔中のケーシングに曲げモードの変形が生じた際には、その変形方向を推定することができる。

2. 観測結果例

ここでは、現在までに顕著な変化が計測されている光ファイバセンサの結果について述べる。計測は継続的に行っているが、ここでは計測初期（2000年7月）と2001年4月の歪みの差分値を示す（図-5）。横軸はボーリング孔内の深度、縦軸は図-3に示した観測システムの4分割点に2本ずつの計8本のセンサの歪みである。

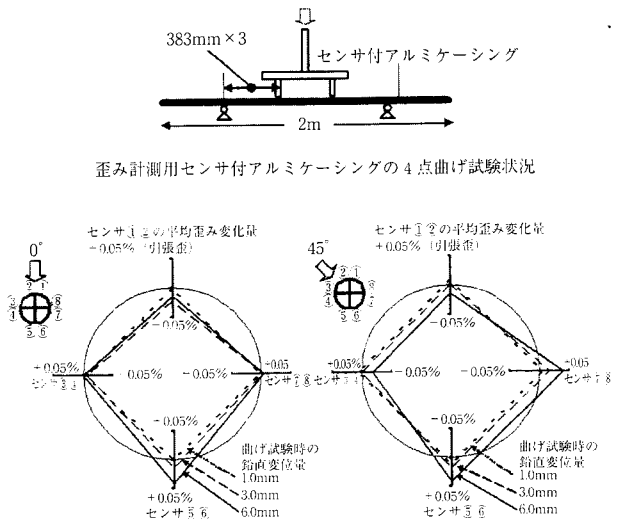


図-4 4点曲げ試験における各センサの歪み値

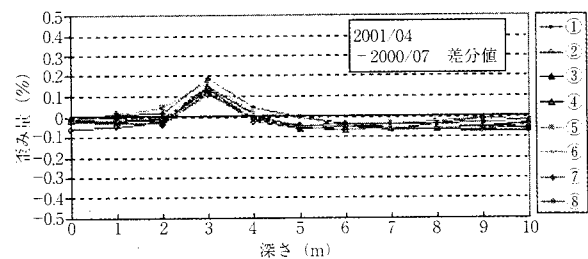


図-5 光ファイバセンサのBOTDRによる深度別歪み量の変化

これをみると、深度約3mに顕著な引張歪みが生じていることが分かる。近傍のボーリング孔調査では深度数m程度にすべり面の存在が想定されており、この引張歪みは地盤のすべり面における剪断変形を捉えたものと考えられる。本システムによってボーリング孔周辺の歪み量分布を定量的かつ空間的に連続的に捉えることができた。

3. ケーブルセンサを用いた地下地盤変形観測の特長

上述した事例での測定長は10mと短いものであるが、光ファイバケーブルセンサとBOTDRを用いた手法は同程度の精度を確保しながら、原理上約20kmまで延長できる。大規模な農地地すべりではすべり面深度が数10mから100mを超えるものもあるが、本手法の測定可能距離はこれに十分対応できる。また、その最大測定長の範囲であれば複数の離れた地点の計測を行うこともできる。この特長は、特に地下深部や大規模な地盤防災への適用の際に、スケールメリットとして発揮されるものと考えられる。

さらに、ボーリング孔を利用した地下地盤の変形計測における代表的な従来の計測法には、①パイプひずみ

計, ②孔内伸縮計, ③孔内傾斜計による方法があるが, ①に関しては, ボーリング孔という限られた内空とひずみゲージのケーブルの取り回しの関係から, 1 m 以下のピッチで数 10 m 以上の測定を行うことは困難である。②も複数のワイヤを用いて深度別の移動量を計測する多段式の方法もあるが, 細かいピッチでの測定は困難である。③は 50 cm~1 m ピッチで深部まで計測可能な方法であるが, 通常は手動による計測器の上下移動が必要で, 時間的に連続した情報を得ることは容易ではない。

これに比べて, 本事例で述べた方法はセンサの移動の必要はなく, 計測器本体で繰り返し測定を設定することによって連続観測を実施でき, その結果は電子情報として記録される。したがって本報で紹介した手法は, 空間分布だけではなく, 時間的にも連続した情報を容易に取得できることも特長といえる。

IV. おわりに

ケーブルセンサと TDR の組合わせによる連続分布型計測システムの特長は, 次のとおりである。

- ① センサを設置した範囲において, 空間的に連続した計測値が得られる。
- ② センサが低コストである。また, 単純な構造のため, 設置の際の施工性や耐久性に優れる。
- ③ 繰り返し測定による連続観測が可能であり, 時間的にも連続した情報が得られる。

①の特徴は, 従来の歪みゲージや熱電対などに代表されるポイント型計測にはない特長であり, センサ設置に制約がある地下計測においては利点と考えられる。

本報で示した計測結果の一部は, 農業工学研究所交流共同研究「TDR 技術を用いた地すべり地中変状監視技術の開発に関する研究」(第一高周波工業株式会社, 日鐵溶接工業株式会社との共同研究) で得られたものである。なお, 現地観測施設設置の際には, 上越農地保全事業所の御協力を賜った。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 倉嶋利雄・成瀬 央・増田順一: 光ファイバひずみ測定技術と構造物歪み分布測定への応用, OPTRONICS, No. 6, pp. 119~127 (1998)
- 2) 成瀬 央: BOTDR によるひずみ分布センシング, OPTRONICS, No. 3, pp. 144~148 (2000)
- 3) 大野博重・成瀬 央: BOTDR によるひずみ分布計測, 非破壊検査, 50 (9), pp. 583~586 (2001)
- 4) 永井哲夫・武富康浩: 高精度光ファイバ温度分布計測システムによる地下水挙動の評価, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2001 発表論文集, pp. 41~46 (2001)
- 5) K. M. O'Connor and C. H. Dowding: Geo-Measurements by Pulsing TDR Cables and Probes, pp. 235~265 (1999)
- 6) 網木亮介: 法面管理の最新動向, 日経コンストラクション, 8. 25, pp. 92~95 (2000)
- 7) 加藤俊典・神原規也・石田泰則・佐藤丈晴: 地すべり動態観測への光ファイバ適用の試みについて (2), 第 40 回日本地すべり学会研究発表会, pp. 283~284 (2001)
- 8) 山田洋正: 地すべり地での光ファイバを利用したひずみ測定, 地質と調査, 第 3 号, pp. 64~67 (2001)
- 9) 黒田清一郎・中里裕臣・奥山武彦・長束 勇: 複数のケーブルセンサと TDR 法による地中変状モニタリングの地すべり地への適用, 第 40 回日本地すべり学会研究発表会, pp. 283~284 (2001)

(2002. 8. 20. 受稿)

黒田清一郎



1992年 東京大学農学部卒業 (農業工学)
1997年 東京大学大学院博士課程修了 (生物・環境工学)
農林水産省入省 (構造改善局水利課農業用水対策室)
農業工学研究所土地質研究室配属
現在に至る

中里 裕臣



1963年 青森県に生まれる
1987年 千葉大学大学院理学研究科修士課程を修了
農林水産省入省
1994年 農業工学研究所
現在に至る

奥山 武彦



1955年 神奈川県に生まれる
1981年 東京農工大学大学院修了
農林水産省入省農業土木試験場
2001年 (独)農業工学研究所造構部土地質研究室長
現在に至る

長束 勇



1951年 滋賀県に生まれる
1974年 京都大学農学部卒業, 農林省入省
1980年 筑波大学大学院経営・政策科学研究科修了
1988年 構造改善局設計課設計審査班長
1989年 農工研土木材料, 土地質研究室長
2001年 (独)農工研施設機能研究室長
現在に至る