

◆特集：土砂災害対策◆

滝坂地すべりにおける OTDR 方式光ファイバ変位検出センサの試験計測

浅井健一* 樋口佳意** 藤澤和範***

1. はじめに

伸縮計等の地すべりモニタリング技術は、電気式のセンサが一般的であるが、誘導雷や電磁ノイズ等の影響を受けやすいという欠点がある。これらの影響を受けないセンサとして、光ファイバを用いたセンサの研究開発が行われている。光ファイバによるセンシングは、曲げや歪みの状態に応じた透過光の変化を検出することにより行われるもので、様々な方式がある。現在土木研究所地すべりチームでは、経済的で汎用性のある OTDR 方式を用いた光ファイバによる地すべり変位検出センサを開発中で、滝坂地すべりを試験地として試験計測を実施している。そこで、本報文ではこの OTDR 方式光ファイバ変位検出センサの試験計測結果について報告する。なお、本研究は地すべりモニタリング技術に関するイタリアとの国際共同研究「水文地質学的リスクに関する文献、研究及び研修のための共同研究所」プロジェクトの1項目として実施しているものであり、プロジェクトの研究成果に関する論文等には、図-1に示すロゴマークを記すことにしている。

2. 滝坂地すべりの概要

滝坂地すべり(図-2)は、福島県西会津町に位置し、長さ約2,100m(南北)、幅約1,300m(東西)、面積約150ha、移動土塊量 $4.8 \times 10^7 m^3$ で、すべり面の最大深さは約140mに達する^{1),2)}。本地すべりは阿賀野川水系の治水上重要な地点に位置し、近年でも顕著な地すべり移動を生じていることから、1996年度より直轄地すべり対策事業化され北陸地方整備局阿賀野川河川事務所が調査・計測・対策を実施している。地質は、下位から基盤の先第三系花崗岩類、アルコース質砂岩、緑色凝灰岩、泥岩、最上位が段丘堆積物あるいは崩積土で構成され、すべり面はアルコース質砂岩と緑色凝灰岩の境界付近である。地すべり移動の誘因

は、融雪による地下水流入及び阿賀川の増水による河岸侵食と考えられている。

地すべり地は大きく北部ブロックと南部ブロックに分かれ、それぞれがさらに数ブロックに細分されている(図-3)。移動方向は、北部ブロックが概ね北から



図-1 日伊共同研究の成果であることを示すロゴマーク

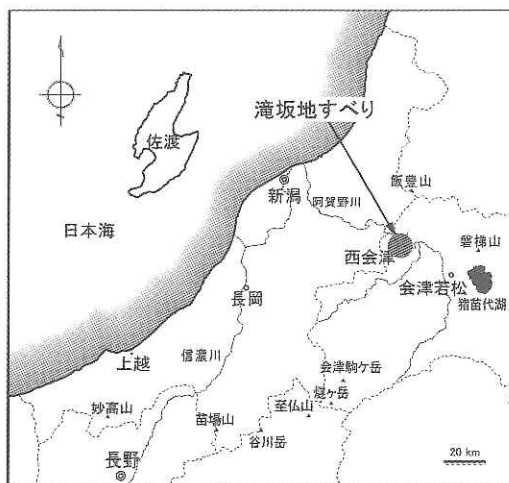


図-2 滝坂地すべり位置図

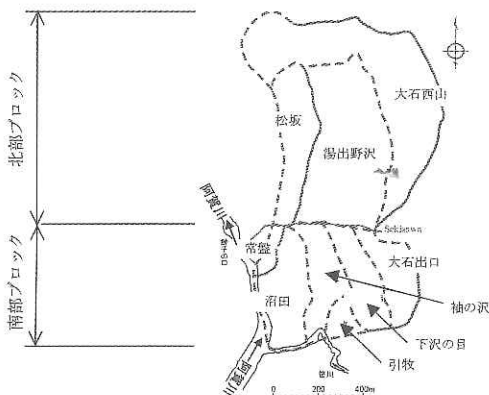


図-3 滝坂地すべりブロック区分図

Field Monitoring Test by Landslide Displacement Detection Sensor Using an Optical Fiber in the OTDR Method at Takisaka Landslide

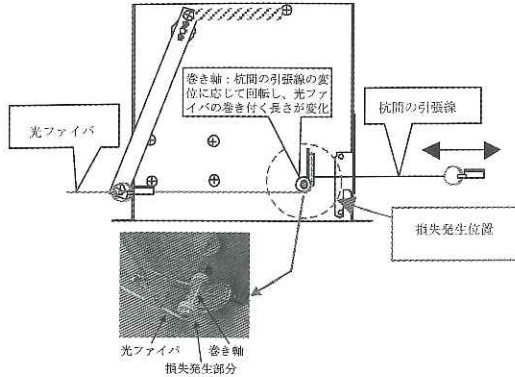


図-4 変位検出センサ図 (文献3) に加筆修正

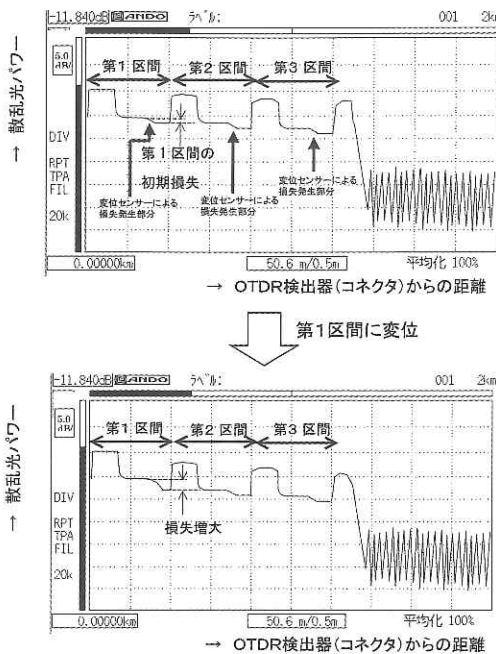


図-5 光の伝送損失による変位検出の模式図

OTDR測定器から光パルスを発射し、光ファイバの各部分から後方に散乱して戻ってくる光の強さ(散乱光パワー)を検出し、距離に応じて出力する。光ファイバの一部を曲げる機構を設けた変位センサを複数配置して計測した場合、ある変位センサにおいて変位が発生すると、その部分での光の伝送損失が増大するため、これを読みとることにより変位を計測する。

南に移動するのに対して、南部ブロックでは概ね東から西に移動する。

試験計測の対象は、阿賀川に面した南部ブロック末端部の沼田・常盤ブロックとした。沼田ブロックは、長さ約250m(東西)、幅約600m(南北)で阿賀川に向かって概ね東から西に移動する。また、常盤ブロックは、沼田ブロックの北西側に隣

表-1 光ファイバセンサの主要な方式及び伸縮計の特徴(文献5), 6), 7), 8) による)

方式	特徴
光ファイバセンサ B-OTDR	<ul style="list-style-type: none"> ・長距離の光ファイバに沿った引張りひずみの分布が計測可能(ひずみの変化による後方散乱光の波長の変化を検出、1本の光ファイバで20km程度まで可能) ・測定範囲は光ファイバの引張りひずみ量2%程度まで(光ファイバ長1mあたり2cm程度まで)、これを越えると破断あるいは計測不能 ・測定器が他の方式より高価
FBG	<ul style="list-style-type: none"> ・ひずみゲージと同様に局所的な微小ひずみが計測可能(光ファイバに設けた回折格子の間隔のひずみに応じた変化による反射光の波長の変化を検出) ・測定範囲0.05mm程度まで ・1本の光ファイバで10箇所程度まで計測可能
MDM	<ul style="list-style-type: none"> ・局所的な変位が計測可能(変位に応じたファイバの曲げによる透過光の損失を測定、測定範囲10mまで可能) ・1本の光ファイバで1台の変位、または1本の光ファイバに複数台設置した場合それらの変位の合計値しか計測できない
OTDR (本研究で開発中)	<ul style="list-style-type: none"> ・杭間の変位を1~2mmの精度で計測可能(変位に応じた光ファイバの曲げによる後方散乱光の損失を測定) ・1本の光ファイバで5台程度の計測が可能、この場合の計測範囲は1台あたり100mm程度まで(これを越える変位に対しては杭間の引張線のリセットで対応) ・測定器が上記各方式と比較して安価
伸縮計(電気式)	<ul style="list-style-type: none"> ・杭間の変位を0.2mm精度で計測可能 ・比較的安価 ・1測定区間ごとに1台ずつ必要

接し、長さ約200m、幅約50mで概ね北東から南西に移動する。両ブロックは、継続的に移動が認められているため、地すべり監視を目的として、各種機器による計測・調査等が阿賀野川河川事務所により実施されている。

3. OTDR方式光ファイバ変位検出センサの概要

表-1に光ファイバセンサの主要な方式及び伸縮計の特徴を簡単に示す。本研究で対象としているOTDR(Optical Time Domain Reflect-meter)方式は、光ファイバに入力された光から進行方向後方に戻ってくる後方散乱光を測定器で検出することにより、光の伝送損失量及びその位置を特定

するもので、光ファイバ回線の敷設・保守、光ファイバの製造・検査等で汎用的に使用されている。地すべり変位検出は、この光の伝送損失量及びその位置を特定できるという特長を利用し、光ファイバ線の途中で地すべり変位に応じて光ファイバの一部を曲げる機構を設け、光ファイバの曲がりによる後方散乱光の伝送損失をOTDR測定器で検出することにより、地すべり変位を計測しようとするものである³⁾(図-4)。上記の光ファイバを曲げるための機構である変位検出センサを開発し、これを1系統の光ファイバ線に直列で複数台設けることにより、複数区間の地すべり変位を同時に計測することも可能になる(図-5)。

本方式に用いるOTDR測定器は上述したとおり汎用的なものであり、光ファイバコードも同様に汎用的なものを使用するため、既存の計測技術(伸縮計等)と同等の経済性を有するとともに、1本の光ファイバに5台程度のセンサを設置して計測することが可能であることから、地すべりのような大変位が生じる斜面における面的な計測への適用性がある。変位検出精度は1~2mm程度が期待されており、1mm以下の微小な変位を正確

に計測するには不向きであるが、数mm以上の変位が生じる場合に、変位が生じている位置を特定するのに向いている。

4. 変位検出センサの設置及び計測システム

光ファイバセンサは図-6に示すように2測線を設け、計18台の変位検出センサを設置して計測を行った⁴⁾。計測システムの構成を図-7に示す。

2測線のうち長さ40mの測線No.1は、その一部が既設の伸縮計SH-29(長さ10m)に平行して設置されており、5m区間毎に各1台(計8台)の変位検出センサを設け、各5m区間毎の変位が求められる。長さ50mの測線No.2は、常盤ブロックの移動方向である北東-南西方向に設置されており、5m区間毎に各1台(計10台)の変位検出センサを設け、各5m区間毎の変位が求められる。各センサの変位検出部の光ファイバコードとセンサ間の光ファイバコードはいずれも屋外で汎用的に使用される直径2.8mmのものとし、センサ間の光ファイバコードは引張線(伸縮計の場合のインバー線に相当)を兼ねている。また、計測に使える伝送損失量の範囲と各センサで生じる伝送

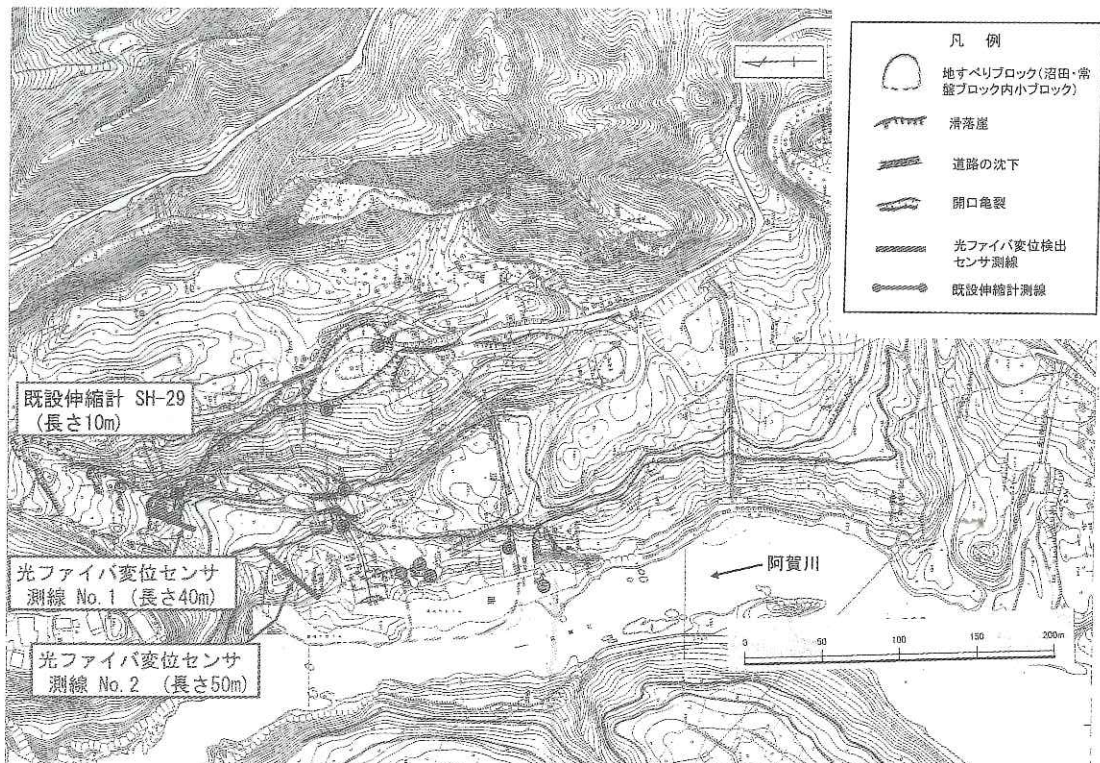


図-6 沼田・常盤ブロックにおける試験計測(測線)位置図

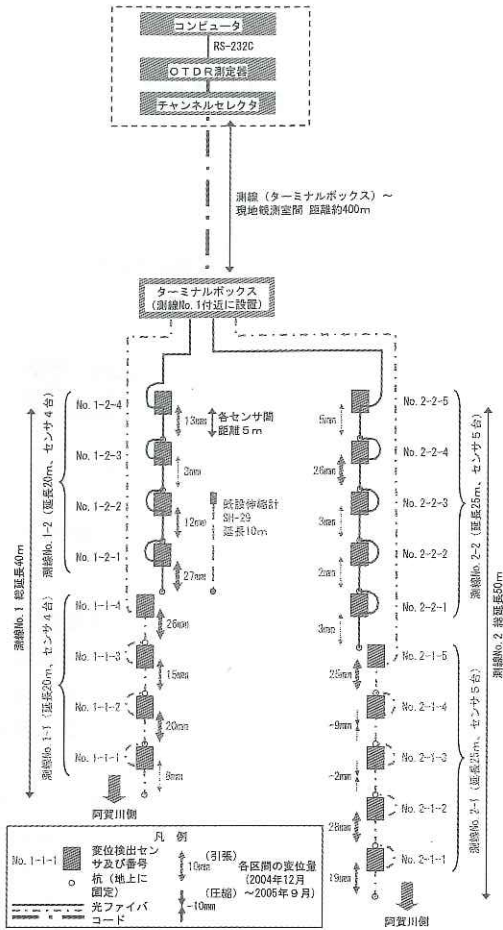


図-7 計測システム構成図

損失量の関係から、両測線とも光ファイバ系統を半分ずつ分けて計4系統の光ファイバとした。

計測は、OTDR測定器を現地に持ち込んでの手動計測を2004年12月16日及び25日に行った後、2005年2月3日からは、現地観測室にOTDR測定器およびパーソナルコンピュータを設置し、コンピュータ制御による1時間毎の計測に移行している。また、4系統を順次計測するためチャンネルセレクタも併せて設置している。

5. 計測結果

測線No.1及びNo.2の変位検出センサの2004年12月～2005年9月までの計測結果と同時期の降水量・積雪深を図-8及び図-9に示す。また、伸縮計SH-29の計測結果を図-8に示す。

測線No.1と平行している伸縮計の引張変位は、融雪期に相当する2～5月初めと、降雨量が多くなる7月以降が顕著であり、前者の期間で約10mm、

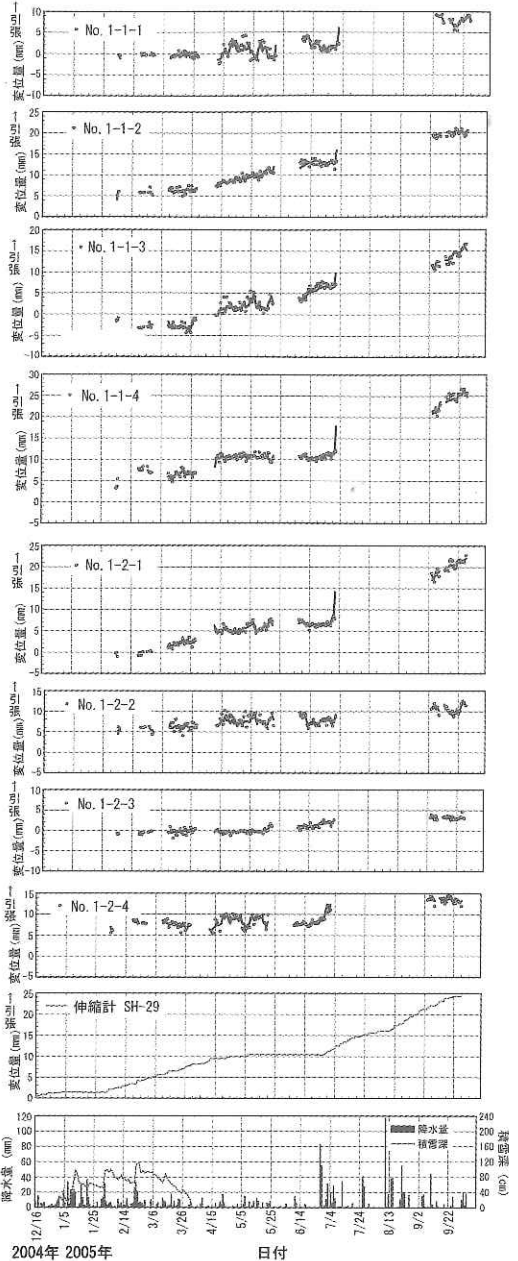


図-8 測線No.1の各センサの計測結果

後者の期間で約13mmの累積引張変位を生じている。一方で、測線No.1の光ファイバ変位検出センサによる計測結果は、各センサとも計測結果がばらつきながらも累積引張変位を生じている。しかしながら、変位量は2004年12月以降の累積変位量が20mm以上に達するものから5mm程度にとどまるものまでセンサによって異なり、センサNo.1-1-2～1-2-1の変位量が相対的に大きい。変位が計測されている期間も伸縮計の変位期間と調

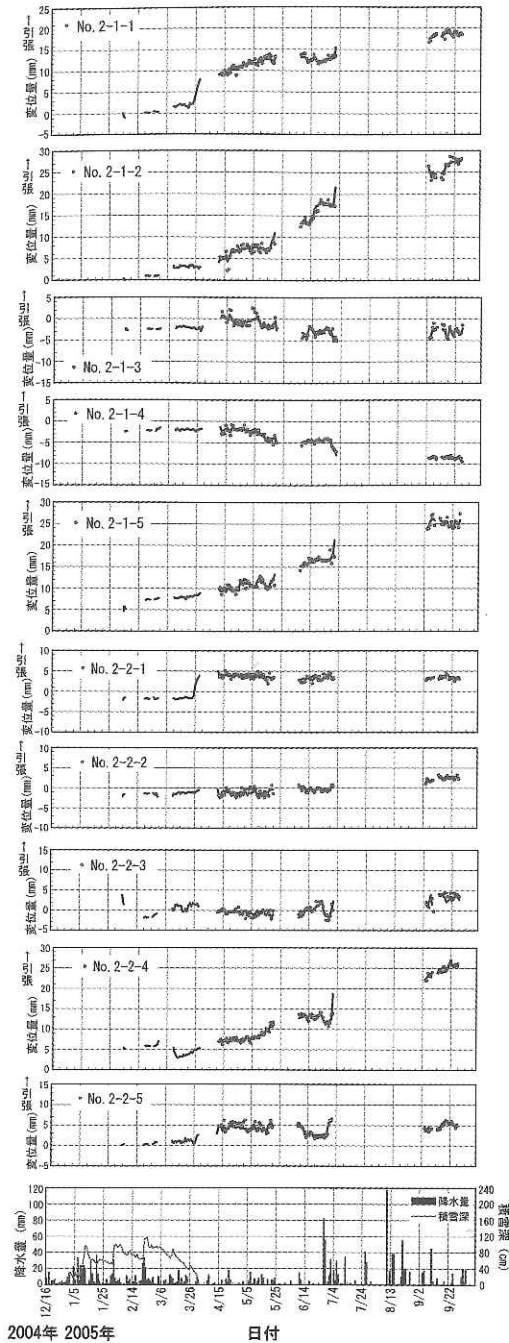


図-9 測線No.2の各センサの計測結果

和的なものとそうでないものが見られる。なお、測定器あるいはコンピュータに原因があると思われる欠測が多いが原因は特定されていない。

測線No.2の光ファイバ変位検出センサによる計測結果(図-9)は、測線No.1の場合と同じく、複数のセンサでばらつきながらも累積変位を生じており、センサNo.2-1-1、No.2-1-2、No.2-1-5、

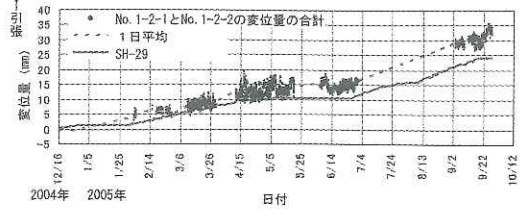


図-10 光ファイバ変位検出センサ(センサNo.1-2-1及びNo.1-2-2の変位量の合計)と伸縮計の計測結果の比較

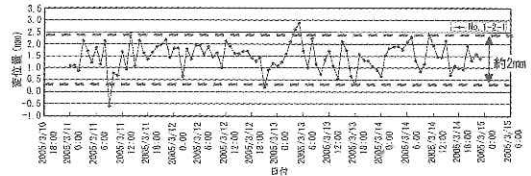


図-11 光ファイバ変位検出センサ計測結果の部分拡大⁴⁾(センサNo.1-2-1、2005年3月10～15日)

No.2-2-4の2004年12月以降の累積引張変位量がそれぞれ20mm程度あるいはそれ以上と相対的に大きい。一方で、センサNo.2-1-3、No.2-1-4では5～10mm程度の圧縮変位を生じている。変位の期間は4月以降に顕著になるものが多い。

伸縮計と平行している区間である測線No.1のセンサNo.1-2-1及び1-2-2の2004年12月～2005年9月までの計測結果(両センサの変位量の合計)を伸縮計の計測結果と比較して図-10に示す。光ファイバ変位検出センサにより計測された引張変位は伸縮計の引張変位と調和的である。

以上の計測結果は、OTDR方式光ファイバ変位検出センサによる地すべり変位計測の有効性を示している。また、各センサで計測された変位を各区間ごとに図示してみると(図-7)、測線上での引張区間および圧縮区間が明らかとなる。これは複数のセンサを直列に設けた計測によって地すべりのどの区間でどのような変位が生じているかをより詳細に特定できることを示し、ブロック境界の不明瞭な箇所での変位計測に活用することにより、地すべりの挙動のよりの確な把握とブロック境界の特定が可能であることを示している。

6. 課題と改良方法の検討

計測結果に見られるばらつきの問題は実用化に向けての課題の1つである。事例としてセンサNo.1-2-1の計測結果の一部(2005年3月10～15日)を拡大して図-11に示す。文献⁴⁾ですでに報告したとおり、光ファイバ変位検出センサに

よる計測結果は、1日の中でも約2mmの変動幅が見られる。また、1日平均の値でも伸縮計の計測結果に対して数mm程度ずれており、結果的に数mm～10mm程度の誤差を生じている。これらの誤差の要因と改善方法については、現在検討中である。要因の1つとして伝送損失変化量-変位の関係にヒステリシスが見られることが室内試験から判明しているが、これは光ファイバコードの被覆の影響と考えられている。そのため、対応策として変位検出部の光ファイバコードを直径2.8mmのものから被覆の薄い直径0.25mmものに変更した改良機を開発し³⁾、滝坂地すべりにおいては2005年12月に変位検出センサを改良機に交換して現地検証を開始したところである。

また、光ファイバコードがセンサ間の引張線を兼ねてもクリーブ的な累積の伸びが生じないことは確認済み³⁾であるが、これまでの敷設作業において光ファイバコードの引張線部分を弛みのないように敷設する作業が予想以上に面倒であったため、上記2005年12月のセンサの交換時には、敷設作業の容易さと確実性を考慮してセンサ間の引張線を伸縮計と同じくインバー線に変更した。

7. まとめ

地すべりモニタリング技術に関するイタリアとの国際共同研究の1項目として、経済的で汎用性のあるOTDR方式を用いた光ファイバによる地すべり変位検出センサの開発と滝坂地すべりにおける試験計測を実施し、本センサの有効性を示すことができた。しかしながら、実用化をめざす上で計測値のばらつきが問題となっており、改善方法を検討中である。

なお、イタリアとの国際共同研究の期間は2005年度で終了し、成果のとりまとめを行う予定であるが、土木研究所地すべりチームでは民間5社と

OTDR方式光ファイバ変位検出センサによる地すべり変位計測システムを実用化するための共同研究を2005年度より開始しており、その一環として引き続き滝坂地すべりにおいて改良されたセンサによる試験計測を行う予定である。

本研究の実施にあたり、試験地の提供及び観測をしていただいた国土交通省北陸地方整備局阿賀野川河川事務所の関係者に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) The Landslide Society, National Conference of Landslide Control: Landslides in Japan, The Fifth Revision, pp.31, 1996.4.
- 2) 相楽 渉・原 龍一・山邊康晴・宮島邦康: 滝坂地すべり地の現状と地すべり対策への課題、第43回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.217-220, 2004.8.
- 3) 樋口佳意・野村康裕・浅井健一・藤澤和範・Alessandro Pasuto・Gianluca Marcato・福岡文典・岩男忠明: OTDR方式による光ファイバーを用いた地すべり変位検出センサの開発、第44回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.315-318, 2005.8.
- 4) 浅井健一・藤澤和範・西本晴男・宮島邦康・野田智子・向井啓司・Alessandro Pasuto・Gianluca Marcato: 地すべりモニタリング技術に関する日伊共同研究、第44回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.361-364, 2005.8.
- 5) 独立行政法人土木研究所ほか: 光ファイバセンサを活用した道路斜面モニタリングに関する共同研究報告書、土木研究所共同研究報告書第292号、120p、2003.6.
- 6) 加藤俊二・三木博史・恒岡伸幸・田中 衛・小川鉄平: 光ファイバセンサによる道路斜面崩壊モニタリングに関する検討、土木技術資料、第44巻第4号、pp.44-49, 2002.4.
- 7) 杉本宏之・柳原幸希・浅野広樹・網木亮介: 光ファイバによる地すべり計測の基礎実験、地すべり、第38巻第1号、pp.24-29, 2001.6.
- 8) The Landslide Society, National Conference of Landslide Control: Landslides in Japan, The Sixth Revision, pp.19, 2002.4.

浅井健一*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所土砂管理研究グループ
地すべりチーム主任研究員
Ken-ichi ASAI

樋口佳意**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所土砂管理研究グループ
地すべりチーム交流研究員
Kei HIGUCHI

藤澤和範***



独立行政法人土木研究所つくば
中央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