

◆ 特集：土砂災害 ◆

光ファイバセンサの地すべり挙動調査への応用

丸山清輝* 吉田克美** 武士俊也***

1. まえがき

地すべりは、その移動にともない斜面に亀裂やひずみを生じながら幾つかの地すべりブロックに分化し、地すべりブロック相互が関連しながら移動する。そこで、地すべり防止工事を実施する際には、工法、工事量及び地すべり防止施設の配置などを決めるために、地すべりの範囲、地すべりブロックの形状とその分布、地すべりブロック相互の移動の関係を調査・把握する必要がある。このための地すべり挙動調査は、移動杭や伸縮計を設置して実施されている。しかしながら、移動杭はリアルタイムな観測ができない。一方、伸縮計は測線に沿った線的な観測が可能であるが、面的な観測を実施するためには数多くの伸縮計が必要になることやその管理が難しい。また、伸縮計には電気式信号変換器が用いられており、この変換器が落雷による電磁誘導の影響を受けて観測中に故障する場合がある。このような問題点を解消できるものとして、光ファイバセンサ（以下、光FSとする）が注目されている。光FSは、センサ自体がデータ伝送部も兼ねるため、データ伝送用ケーブルの数を格段に少なくでき、広範囲の観測を容易にできる。また、光FSは、リアルタイムな観測が可能であり、落雷による電磁誘導の影響を受けない。

本報では、このような利点を有する光FSを、地すべり挙動調査に応用するための現地試験を実施したので、その結果を報告する。

2. 光ファイバセンサによる地すべり挙動観測

2.1 地すべり挙動観測の目的と観測環境

地すべり挙動観測の目的には、地すべり防止工事計画策定のための地すべりの範囲、地すべりブロックの形状とその分布、地すべりブロック相互の移動の関係などの調査や地すべり移動の監視がある。これらの目的を達成するためには、センサを面的に配置し、地すべり斜面の挙動にともなう

土塊の引張・圧縮ひずみを連続的に観測する必要がある。また、積雪地域では、センサを地上に設置した場合、積雪の挙動（沈降や斜面下方への移動）が観測データに影響を与える可能性があるため、センサはこの影響がない地表面に設置する必要がある。

したがって、積雪地域における地すべり挙動調査に光FSを用いる場合は、光FSを地表面に面的に設置し、地すべり挙動により生じる土塊の引張・圧縮ひずみ量とそれらの発生位置を、光FS全長にわたって観測できるようにする必要がある。

2.2 光ファイバセンサによるひずみ計測方法

光FSによるひずみ計測方法には、B-OTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)、FBG (Fiber Bragg Grating)、光学ストランドなどがある¹⁾。この中で、B-OTDRは光FSに沿って生じるひずみ量とその発生位置を光FS全長にわたって計測できる方法であり、地すべり挙動調査に適している。ここでは、光FSにより地すべり斜面地表面の地すべりによるひずみとそのひずみ発生位置を計測するための計測法としてB-OTDRを用いる。

図-1には、B-OTDRによる光FSに生じるひずみ量とその発生位置の計測方法を示した。光FSには、本体に引張ひずみや曲げひずみが生じた場合、ガラスの光屈折率や密度のゆらぎが生じる。その際、光FSに入射させた光パルスの一部が反射光として後方に戻る。ひずみ量は、この反射光（ブリルアン後方散乱光）の波長分布のシフト量を計測することにより求めることができる。

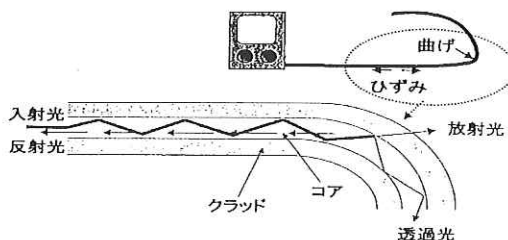


図-1 光ファイバセンサの計測原理

また、ひずみ発生位置は、光パルスを光 FS に入射させてから受光部でブリルアン後方散乱光が検出されるまでの時間差を計測することで求められる。

2.3 光ファイバセンサによる地すべり挙動調査のための基礎試験

光 FS を地すべり挙動調査に用いるための基礎試験が、光 FS のひずみに関する検出特性と光 FS 埋設方法について実施されている¹⁾。なお、基礎試験に用いた光 FS は、ステンレスの保護管に入ったシングルモードファイバであり、光ファイバは 1m 毎にカシメ（保護管とセンサを密着させたもの）でステンレス管中に固定され、約 0.1% のプレテンションが与えられている。

基礎試験では、以下に示す結果が得られている。

- (1) 光 FS を盛土中に埋設し、その盛土を変位させた時の光 FS のひずみとひずみの発生位置を B - OTDR により計測した。その結果、光 FS により盛土の変形量と変形した位置を計測できることが分かった。なお、計測精度は 0.01%、計測できる最大ひずみ量は 2%、ひずみ発生位置の分解能は 1m であった。
- (2) 光 FS の盛土中での固定方法として、①固定なし、②ピンによる固定、③蝶番金具による固定について試験した。その結果、①固定なしではひずみ量を正確に計測できなかつた。これは、光 FS と盛土の間ですべりが生じたためである。また、②ピンにより固定した場合は、ひずみ量及びひずみ発生位置を精度高く計測できたが、計測可能ひずみ量は光 FS 本来の計測可能ひずみ量より小さい値であった。これは、光 FS がピンで確実に固定されたため、ひずみの分散が生じなかつたためと考えられる。この他、③蝶番金具により固定した場合、ひずみ量及びひずみ発生位置が精度高く、且つ計測可能ひずみ量が試験した固定方法の中では一番大きな値となった。これは、光 FS が蝶番金具により固定されたものの、ある程度ひずみの分散が生じたためと考えられる。
- (3) 光 FS 埋設材料として、山砂と碎石について試験した。その結果、光 FS の固定方法をピンによる固定とした場合では、計測値には材料の違いによる影響はほとんど認められなかつた。しかしながら、蝶番金具による固定では、碎石より山砂の方がひずみが広範囲に分散する傾向が認められ、埋設材料により光 FS と埋設材料とのずれ特性が異なることが分かった。

(4) 埋設された光 FS に地表面から上載荷重を与えた場合の計測値に対する影響を調べるために、光 FS 埋設深度 20cm と 50cm について試験した。その結果、人間や小型重機程度の上載荷重では、各深度とも計測値に対する影響は認められなかつた。

3. 光ファイバセンサによる地すべり挙動観測現地試験^{2)、3)、4)}

3.1 現地試験地の概要

現地試験は、新潟県東頸城郡牧村の沖見地すべりで実施した。この付近は、東頸城丘陵と呼ばれる標高 200 ~ 350m の丘陵地であり、古くから多くの地すべりが発生している地すべり多発地帯である。地すべりの規模は、幅約 500m、長さ約 1,500m、高度差約 150m、面積約 70ha であり、地すべり地の基岩は新第三紀中新世の椎谷層相当層である。また、移動層は、地すべり滑動により風化が進んだ泥岩や崩積土から成る。この他、地すべり斜面は数多くの地すべりブロックに分かれ、年間移動量が 1m 前後に達する地すべりブロックもある。

3.2 試験方法

現地試験は、光 FS を積雪地域における地すべり挙動調査に用いる方法を検討するために、2.3 に示した基礎試験結果をもとに光 FS を地すべり斜面の地表面近くに埋設して、地すべり斜面に発生するひずみとひずみ発生位置を B - OTDR により計測する方法により実施した。

3.2.1 光ファイバセンサ

当初、光 FS は基礎試験に用いたステンレスを保護管とするものを用いる計画であった。しかしながら、ステンレスが地すべり斜面の土塊により腐食する可能性が高いことが判明し、耐腐食性が高いものを保護管とする光 FS に変更した。

図-2 は、現地試験に用いた光 FS の模式図である。光 FS は、シングルモード光ファイバ（コア径 0.01mm、クラッド径 0.125mm）を耐腐食性が高い金属管であるインコロイ管（φ 2.0mm）で保護したものを用いた。また、センサには保護管に 1m ピッチでカシメが設けられている。

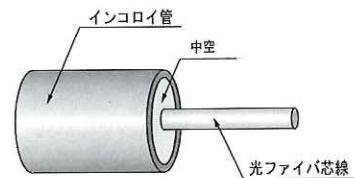


図-2 現地試験に用いた光 FS 模式図

間は中空であり、光FSには約0.4%のプレテンションがかけられている。この構造によりカシメ間で発生したひずみは、平均化されるとともに他の区間に分散しないようになっている。

3.2.2 光ファイバセンサの固定及び埋設

光FSの地中での固定方法は、基礎試験を実施した3種類（固定なし、ピンによる固定、蝶番金具による固定）の中の固定なし（以後、固定金具なしとする）と蝶番金具による固定（以後、固定金具ありとする）の2種類について試験することにした。なお、ピンによる固定は、計測可能ひずみ量が光FS本来の計測可能ひずみ量より小さい値となるという基礎試験結果が出ていることから除外した。

図-3には、光FSの固定に用いた蝶番金具を示した。蝶番金具（大きさ125mm×43mm）は、市販のステンレス製のものであり、光FSに1mピッチで設けられているカシメ部に光FSを挟みねじ止めし取り付けした。

図-4には、光FS敷設断面図を示した。光FSは、幅60cm、深さ50cmの溝を掘り、光FSを固定しないものと蝶番金具により固定したものを平

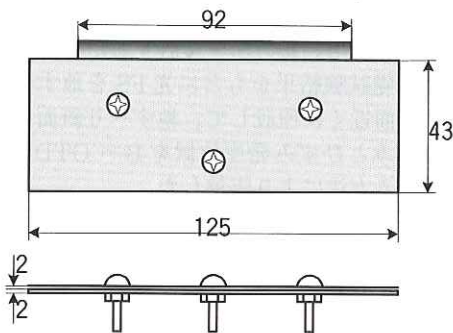


図-3 光FSの固定に用いた蝶番金具（単位:mm）

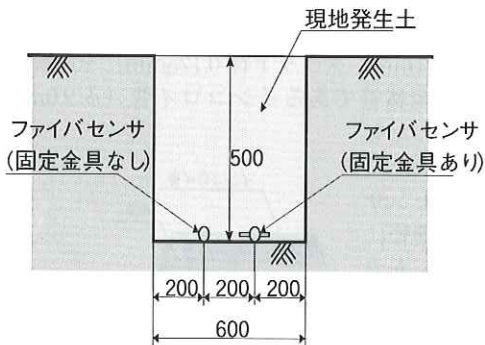


図-4 光ファイバセンサ敷設断面図（単位:mm）

行に埋設した。また、埋設深度は、基礎実験結果をもとに50cmとした。この他、光FSの埋設材料は、調査コストの縮減を考慮し、光FS埋設溝の掘削による現地発生土を用いた。この土砂は泥岩が風化した粘性土であり、光FSとの密着性は高い。

3.2.3 光ファイバセンサの平面的配置

光FSの平面的な配置方法としては、斜交配置法（V字形に敷設する方法）と直交配置法（格子状に配置する方法）の2種類がある。斜交配置法は、光FSの固定方法や地すべり移動方向・移動量の計測に関する試験⁵⁾・施工実績があり、その有効性が報告されている。この方法は、光FSを地表面上に配置し光FSの固定間隔を2～10m程度としており、光FSを地中に配置してB-OTDRの距離分解能である1m間隔でひずみ量及びひずみ発生位置を観測することは難しい。一方、直交配置法は施工実績はないが、光FSを地中に埋設し、1m間隔でのひずみ量及びひずみ発生位置を観測することが可能である。

地すべり挙動観測では、地すべりの範囲及び地すべりブロックの形状とその分布を調査・把握することが重要であり、地すべり移動による土塊のひずみ量及びひずみ発生位置をできるだけ詳細に観測する必要がある。このことから、今回の現地試験では、光FSの平面的な配置法として、ひずみ発生位置の特定精度が高い直交配置法を用いた。

図-5は、光FSの敷設平面図である。光FSを敷設した斜面は地すべりブロックの頭部に位置し、光FSは地すべりの移動方向に長さ90m、幅80mの格子状に敷設した。光FSは、原理的には1本を張り巡らすことで、光FS敷設範囲の観測が可能である。しかしながら、地すべり移動により光FSが断線した場合は、その断線位置より先の観測が不能になる。したがって、光FSは、地すべりの移動により断線した場合でも、欠測区間をできるだけ少なくできるように配置する必要がある。

表-1には、光FSの敷設系列を示した。今回の現地試験では、光FSを移動方向に4系列（I～IV）、幅方向に3系列（A～C）の7系列に分け、光FSの固定方法を2種類として、合計14本の光FSを敷設した。

3.3 現地試験結果

3.3.1 現地試験地の地すべり移動状況

図-6は、本報告に用いた観測データの採取期間における現地試験地の積雪深の変化と地すべり移動の状況を示したものである。なお、移動量は、

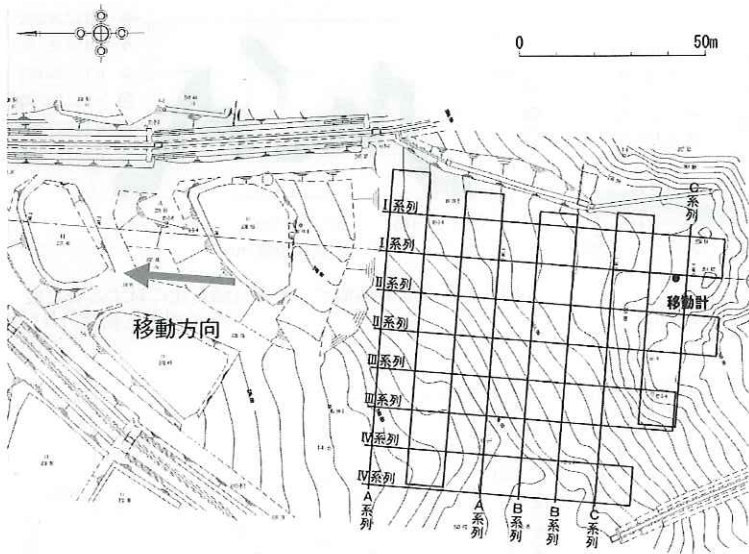


図-5 光ファイバセンサ敷設平面図

表-1 光ファイバセンサ敷設系列表

系列名	観測区間長(m)	信号伝送区間長(m)	計(m)	本数	総延長(m)
I 系列	194.47	20.00	214.17	2	428.94
II 系列	197.06	20.00	217.06	2	434.12
III 系列	176.15	20.00	196.15	2	392.30
IV 系列	154.68	20.00	174.68	2	349.36
A 系列	346.88	20.00	366.88	2	733.76
B 系列	157.85	20.00	177.85	2	355.70
C 系列	206.11	20.00	226.11	2	452.22
合計	1,433.20	140.00	1,573.20	2	3,146.40

現地試験地斜面内に設置された移動計（埋設型孔内傾斜計）により観測した（図-5に観測位置を示す）。積雪深は2月下旬に約3mに達し、3月中旬以降は積雪深の減少が始まり融雪期に入っている。また、移動は1月中旬から始まり、4月中旬以降は停止している。移動量は、3月中旬以降の融雪期では加速度的に大きくなり、累積移動量で約200mmに達している。

3.3.2 光ファイバセンサによる地すべり挙動観測結果

図-7には、図-5に示したII系列固定金具ありにおけるひずみ量とひずみ発生位置の観測結果を、ひずみ量と光FS延長距離との関係で示した。ひずみ量は経過時間とともに変化し、大きい区域と小さい区域が生じており、移動による斜面のひずみが捉えられていることが分かる。また、延長距離126～150mの区間及び300～320mでは、ひずみが徐々にマイナスになっており、地盤の圧縮が捉えられている。

縮が捉えられている。しかしながら、図-2に示した構造の光FSは、基本的に引張ひずみの計測を目的として設計されたものである。このため、地すべり斜面の挙動調査に必要な大きな圧縮ひずみの計測を如何に行うかが大きな課題となる。

図-8, 9は、固定金具の効果をII系列のデータで示したものである。図-8の固定金具ありの観測結果では、図-9の固定金具なしの観測結果に比べてひずみ量の変化がシャープになっており、固定金具を用いることによりひずみ量の分布を精度高く捉えられることが分かる。また、H.13.16のひずみ量分布形状が他の観測日のものと異な

っており、ひずみ量のピーク発生位置が延長距離の短い方へ移動していることが分かる。このことから、ひずみ発生位置を正確に捉えるためには、予

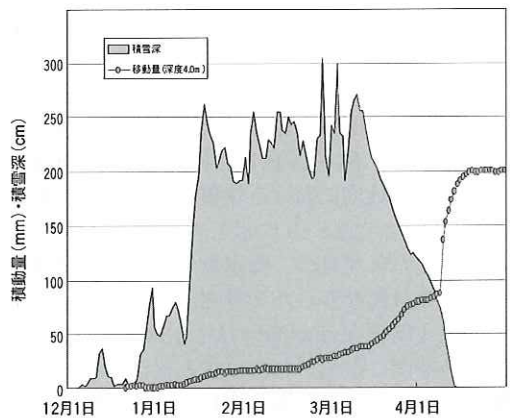


図-6 現地試験地における積雪深と移動量の各観測結果

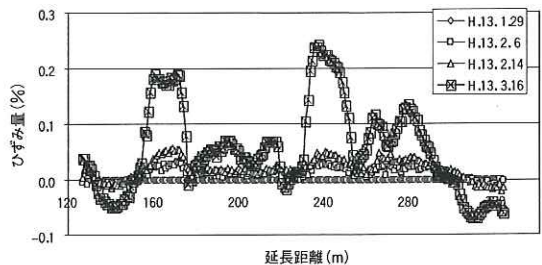


図-7 ひずみ観測結果(II系列固定金具あり)

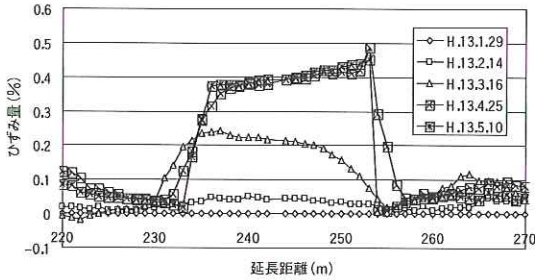


図-8 ひずみ観測結果(Ⅱ系列固定金具あり)

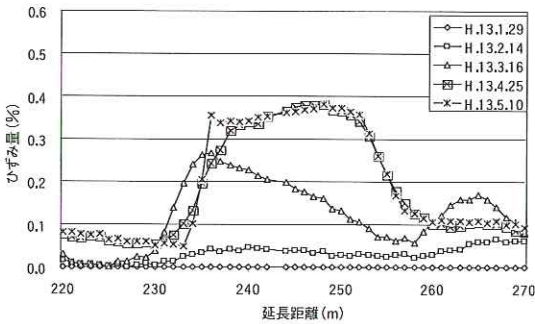


図-9 ひずみ観測結果(Ⅱ系列固定金具なし)

め距離を示すマーカーとなるひずみ等をセンサに加えておき、ひずみ発生位置の補正を必要があると考えられる。

図-10には、Ⅱ系列のデータにより光FSによるひずみ観測の気温変化に対する安定度について示した。なお、図-11には、図-10の観測期間の本地すべり地内における気象と地すべりの移動状況を示した。図-10に示した観測データは、移動が認められず且つ、降水量がひずみ観測期間とその前5日間なかった7月25～27日の気温が低い深夜1時と気温が高い日中13時のものである。この期間に観測されたひずみ量はほぼ一致した値となっており、気温の変化による影響は認められない。

このことから、地表面ひずみは、図-4に示した光FSの埋設方法を用いることにより、気温の変化の影響を受けず安定して観測できることが分かった。

図-12は、光FSが地すべり斜面の挙動により破断した時点の観測結果を示したものである。光FSは、引張りひずみが1.0～1.3%に達した時点で破断し、観測が不能となっている。このことから、図-2に示した光FSによる地すべり斜面の引張りひずみ量観測可能範囲は、1.0～1.3%程度であることが分かる。光FSを用いて地すべり斜面の挙

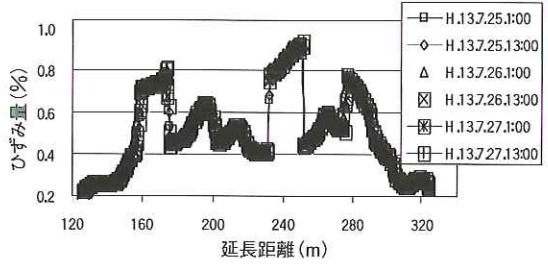


図-10 ひずみ観測データの気温変化に対する安定度(Ⅱ系列固定金具あり)

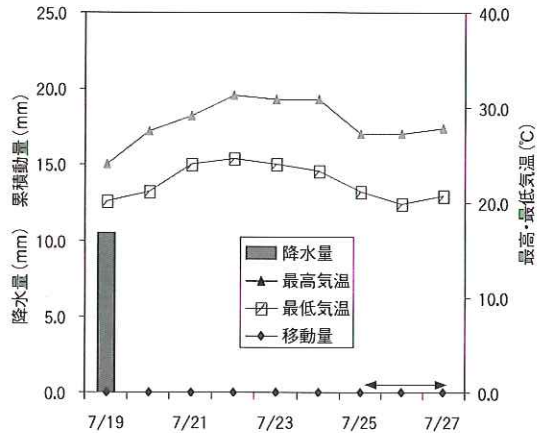


図-11 図-10の観測期間における気象及び地すべり移動状況

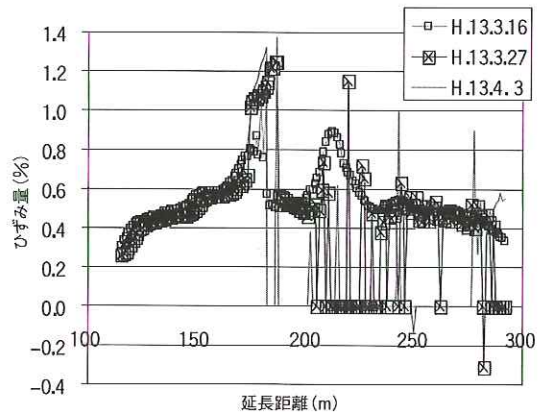


図-12 光ファイバセンサ破断時の観測結果(Ⅲ系統固定金具あり)

動を調査するためには、光FSの破断を防ぐために、更にひずみ量観測可能範囲を大きくする必要がある。

図-13には、光FSによる地すべり斜面のひずみ量観測結果(H.13.1.17～H.13.4.26の累積)に

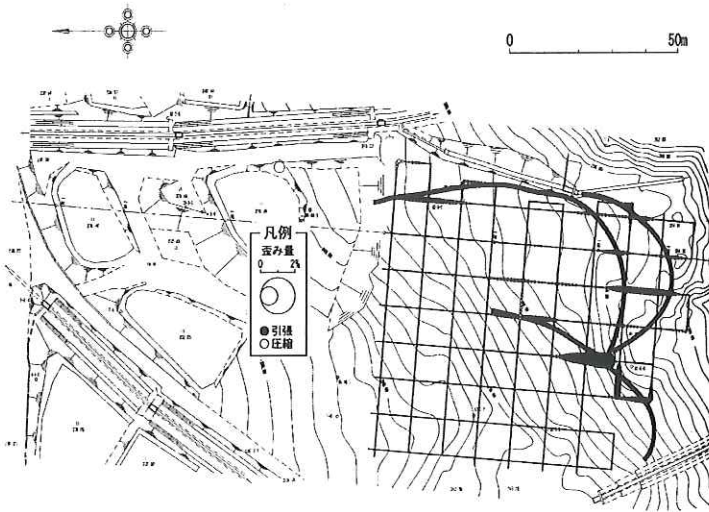


図-13 光ファイバセンサひずみ観測結果を用いた地すべりブロック区分(固定金具あり)

よる地すべりブロック（以下、ブロックとする）区分図を示した。ひずみは部分的に圧縮ひずみの発生が認められるが、大部分は引張ひずみとなっている。図中には、ひずみ量の分布をもとに、ブロック区分を実施した結果を示した。ブロックは、ひずみ量の分布状況から大別すると東側と西側に2つ存在している。また、東側ブロックの頭部は引張部が2重になっており、斜面下方が先行して移動したことが推定される。これらのことから、本報告で示した方法に基づいて光FSを用いることにより、地すべり斜面におけるブロックの形状とその分布及び、ブロック相互の移動関係の各状況を調査できることが分かった。

4. あとがき

光FSを地すべり挙動調査に応用するための現地試験を実施した。その結果、本報告で示した方法に基づいて光FSを用いることにより、地すべ

りの挙動を調査できることが分かった。ただし、今後の課題として、光FSの観測可能ひずみ量を大きくすること及び、圧縮ひずみ量を引張ひずみ量と同等に観測できるようにすることがある。現在、これらの課題の解決方法について検討中である。

最後に、本現地試験を実施するに際しては、新潟県土木部砂防課、安塚地区振興事務所、地元地権者の方々に御支援を頂いた。ここに記して各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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試験、地すべり Vol.38, No.1, pp.24～29、2001年
- 2) 吉田克美、井良沢道也、市ノ瀬榮彦、田村隆雅、月岡 浩、島津藤夫：光ファイバセンサを用いた調査・計測方法に関する検討（その1）、第40回日本地すべり学会研究発表会地すべり2001講演集、pp.287～290、2001年
- 3) 井良沢道也、吉田克美、菅沼 健、酒井利啓：光ファイバセンサを用いた調査・計測方法に関する検討（その2）、第40回日本地すべり学会研究発表会地すべり2001講演集、pp.291～294、2001年
- 4) 丸山清輝、吉田克美、武士俊也：光ファイバセンサを用いた地すべり移動計測方法に関する検討、平成14年度砂防学会研究発表会概要集、pp.216～217、平成14年
- 5) 楠見晴重、佐藤浩二、藤枝敬史、成田一真、西田一彦：光ひずみセンサによる岩盤斜面の動態観測に関する基礎的研究、第35回地盤工学研究発表会、pp.2493～2494、2000年

丸山清輝*



独立行政法人土木研究所
新潟試験所主任研究員
博士（学術）
Dr. Kiyoteru MARUYAMA

吉田克美**



独立行政法人土木研究所
新潟試験所主任研究員
katsumi YOSHIDA

武士俊也***



独立行政法人土木研究所
新潟試験所所長
Toshiya TAKESHI