

II-12 光ファイバセンサによる地すべり挙動調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平14～平17

担当チーム：雪崩・地すべり研究センター

研究担当者：花岡正明、丸山清輝、小嶋伸一

【要旨】

地すべり災害を防止・軽減するために重要な地すべり挙動の把握において、現在最も有効な地表面の亀裂・ひずみを計測する伸縮計には、①挙動が顕著でない時点で適切な伸縮計配置が難しい、②積雪期の地表面計測が困難等の重大な課題がある。これに対し光ファイバセンサを活用した地すべりの面的挙動調査手法等の開発について研究してきたが、①に対し直交配置法による光ファイバ直接埋設方式により、②に対しては光ファイバと機械的メカニズムを組み合わせた伸縮計を開発し、現場への導入が可能となる有効な成果を得ることができた。

キーワード：光ファイバ伸縮計、地すべり挙動調査

1. はじめに

地すべり現象は他の土砂移動現象とは異なり、初期において移動速度が遅く地表面に亀裂やひずみを生じ徐々に変形してゆくため、これらを経時的に計測することにより、対策工事の実施や人命など被害を軽減することが可能である。しかし規模の大きな地すべりが多数分布する新第三紀層地帯などでは、地すべり斜面全体の変状や地すべりの挙動を把握するためには多数の伸縮計など計測機器を設置する必要が生じる。他方、積雪地域に多数の活動的な地すべり地が集中するが、伸縮計は積雪のある時期には計測ができず、融雪期など、地すべり現象が特に活発化する時期に対処できない。また、地すべりの挙動が顕著に表れている時点では、伸縮計の適切な配置ができない。

光ファイバは長距離区間を大量のデータを変質させることなく伝送する特性をもつが、内部に生じる引張及び曲げひずみが反射光となって戻ってくることを利用して、ひずみ量やひずみの発生した地点を計測することができる。このため、1本の光ファイバ上にセンサと長距離データ伝送の機能をあわせもち、かつ複数地点の連続的計測が可能である。

この特性を活用し、積雪地域の地すべり斜面を

モニタリングする際の課題を解決できる調査法の開発を目指した。

平成14～17年度の4カ年計画で積雪地帯における地すべりの面的挙動調査法と、その調査法に用いる光ファイバ伸縮計について研究を実施してきた。14年度は、観測データをもとに光ファイバセンサ（以後光FSとする）を地すべり挙動調査に用いた場合の解決すべき課題について検討し、光ファイバ伸縮計を考案した¹⁾。15年度は、実用化のための基礎試験を実施し²⁾、16年度はより弾性係数の小さい光ファイバを用いて伸縮計の変位測定性能の向上化を図り、現地試験を実施した。17年度は開発した伸縮計の改良と、あらたにFBGを用いた伸縮計の開発を実施した。本文では、4年間の研究成果をまとめて示す。

2. 調査目的

地すべり防止工事を実施する際には、まず地すべりの範囲、地すべりブロックの分布と形状、相互の移動関係を、地すべりによる斜面の亀裂や移動状況から面的に把握する必要がある。また地域住民の安全を確保するためにも、地すべり挙動の監視が重要であるが、積雪地帯における前述の課題を解決するためには、地中に設置した伸縮計を

用い広範囲にわたって連続して計測できる、光FSを活用した地すべり挙動調査手法が有効と考えられ、そのための小さい光ファイバを用いた伸縮計の開発と現地への導入を目指した。

3. 光ファイバ伸縮計による地すべり挙動観測

3.1 積雪地域における観測条件

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が、積雪地域では、伸縮計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、伸縮計はこの影響がない地表面下に設置する必要がある。

3.2 光FSによるひずみ測定方法

光FSによるひずみ測定方法には、B-OTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)、FBG (Fiber Bragg Grating)、光学ストランドなどがある¹⁾。

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測定方法を示した。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全長にわたって測定できる方

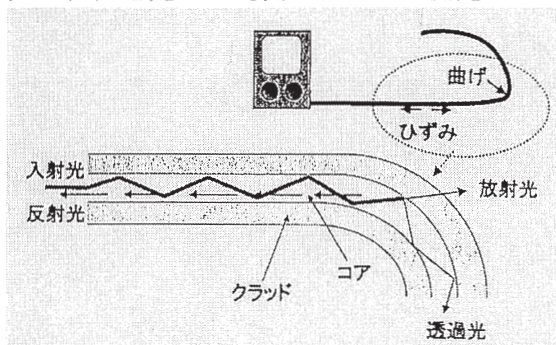


図-1 B-OTDRによる光FSの測定原理法である。光FSには、本体に引張ひずみや曲げひずみが生じた場合、ガラスの光屈折率や密度のゆらぎが生じる。その際、光FSに入射させた光パルスの一部が反射光として後方に戻る。ひずみ量は、この反射光（ブリルアン後方散乱光）の波長分布のシフト量を測定することにより求めることができる。また、ひずみ発生位置は、光パルスを光FSに入射させてから受光部でブリルアン後方散乱光が検出されるまでの時間差を測定することで求められる。

図-2は、FBGによる光FSに生じるひずみ量

の測定方法を示したものである。FBGは、光ファイバに回折格子を所々に作りセンサ化したものである。また、光FSに生じるひずみ量は、回折格子から反射するブラッグ光の波長が光FSに生じるひずみ量の大きさに比例してシフトすることで求めることができる。本調査では、光FSにより地すべり斜面地表面付近の地すべりによるひずみとそのひずみ発生位置を測定するために、B-OTDRとFBGを用いた。

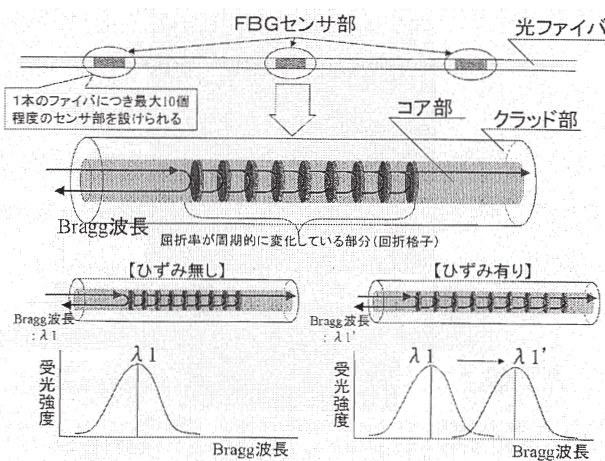


図-2 FBGによる光FSの測定原理

3.3 光ファイバ直接埋設方式伸縮計の開発

光ファイバ直接埋設方式伸縮計は、光FSを地すべり斜面に埋設し、地すべり斜面の挙動を観測するものである。

図-3は、光ファイバ直接埋設方式伸縮計に用いた光FSの模式図を示したものである。光FS

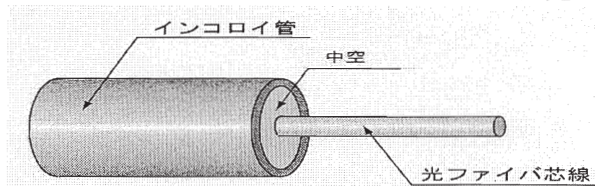


図-3 光FS模式図

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イル管（φ2.0mm）で保護したものをを用いた。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。なお、カシメ間は中空であり、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。

3.3.1 現地試験^{2), 3), 4)}

光ファイバ直接埋設方式伸縮計の開発は、現地試験を実施しながら進められた。現地試験は、新潟県上越市牧区の沖見地すべりで実施した。地すべりの規模は、幅約 500 m、長さ約 1,500 m、高度差約 150 m、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。また、現地試験では、光 F S 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、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 により測定する方法により実施した。

(1) 光ファバセンサの固定及び埋設

光 F S の地中での固定方法は、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 種類について試験した。

図-4には、光 F S 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 F S に 1 m ピッチで設けられているカシメ部に光 F S を挟みねじ止めし取り付けした。

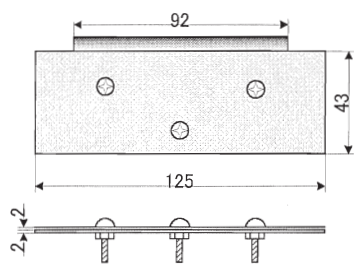


図-4 光 F S の固定に用いた蝶番金具（単位:mm）

図-5には、光 F S 敷設断面図を示した。光 F S は、幅 60cm、深さ 50cm の溝を掘り、光 F S を固定しないものと蝶番金具により固定したものを平行に埋設した。また、埋設深度は、基礎試験結果¹⁾をもとに 50cm とした。この他、光 F S の埋設材料は、調査コス

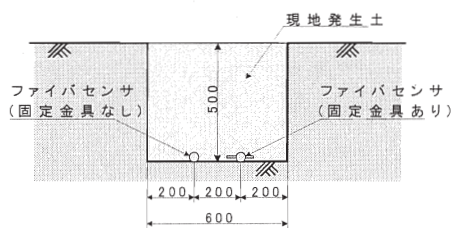


図-5 光 F S 敷設断面図（単位:mm）

トの縮減を考慮し、光 F S 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 F S との密着性は高い。

(2) 光ファバセンサの平面的配置

光 F S 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 F S の固定方法や地すべり移動方向・移動量の測定に関する試験³⁾及び施工実績があり、その有効性が報告されている。この方法は、光 F S を地表面上に配置し光 F S の固定間隔を 2 ~ 10 m 程度としており、光 F S を地中に配置して B-OTDR の距離分解能である 1 m 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 F S を地中に埋設し、1 m 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 F S 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-6は、光 F S の敷設平面図である。光 F S

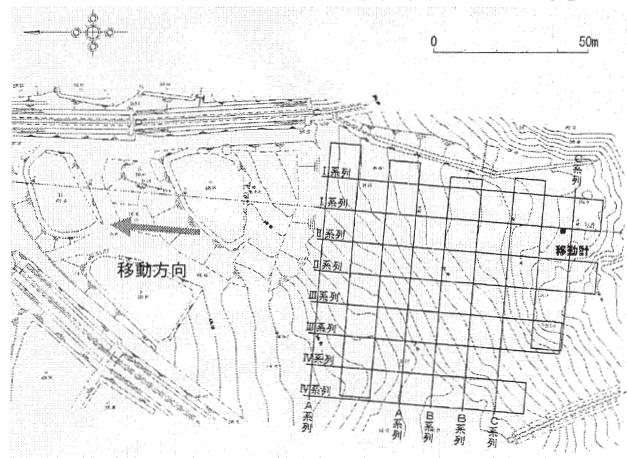


図-6 光 F S 敷設平面図

を敷設した斜面は地すべりブロックの頭部に位置し、光 F S は地すべりの移動方向に長さ 90 m、幅 80 m の格子状に敷設した。光 F S は、原理的には 1 本を張り巡らすことで、光 F S 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F S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F S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F Sの敷設系列を示した。今回の現地試験では、光F S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F Sの固定方法を2種類として、合計14本の光F Sを敷設した。

表-1 光F S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	214.47	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	14	3,146.40

(3) 現地試験結果

1) 現地試験地の地すべり移動状況

図-7は、本文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、現地試験地斜面内に設置された移動計（埋設

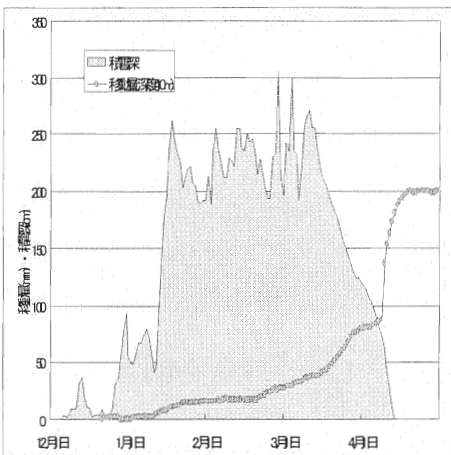


図-7 現地試験地における積雪

深と移動量の各観測結果型孔内傾斜計により観測した（図-6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。

2) 光ファイバ直接埋設方式伸縮計による

地すべり挙動観測結果

図-8には、図-6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F S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、

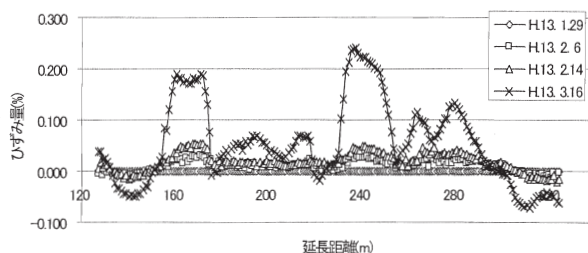


図-8 ひずみ観測結果（II系列固定金具あり）ひずみが徐々にマイナスになっており、地盤の圧縮が捉えられている。

図-9、10は、固定金具の効果をもII系列のデータで示したものである。図-9の固定金具ありの観測結果では、図-10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、

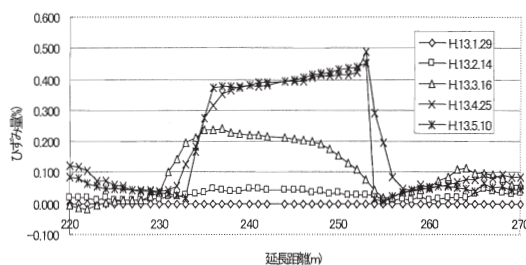


図-9 ひずみ観測結果（II系列固定金具あり）

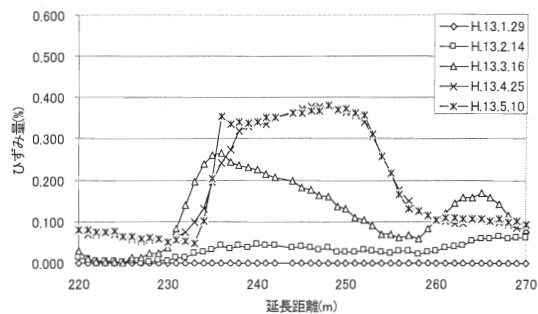


図-10 ひずみ観測結果（II系列固定金具なし）固定金具を用いることによりひずみ量の分布を精度高く捉えられることが分かる。また、H.13.3.16のひずみ量分布形状が他の観測日のものと異なっており、ひずみ量のピーク発生位置が延長距離の短い方へ移動していることが分かる。このことか

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する必要があると考える。

図-11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

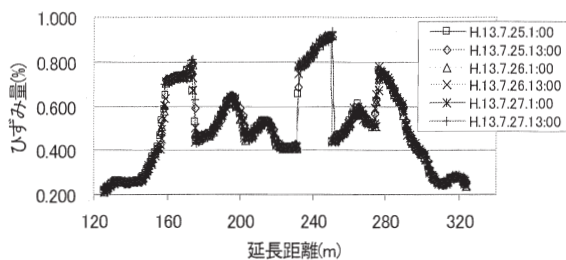


図-11 ひずみ観測データの気温変化に対する安定度 (II系列固定金具あり)

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-5に示した光FSの埋設方法を用いることにより、日較差程度の気温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、

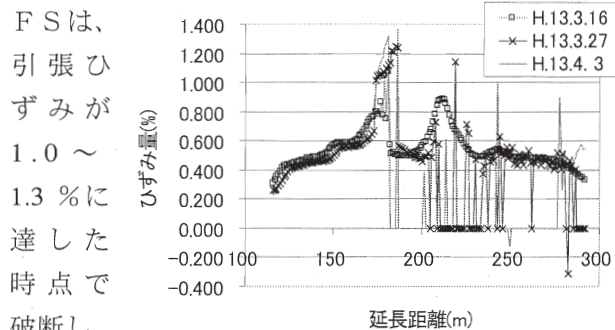


図-12 光FS破断時の観測結果 (III系統固定金具あり)

引張ひずみが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、光ファイバ直接埋設方式伸縮計による地すべり斜面の引張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った。

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

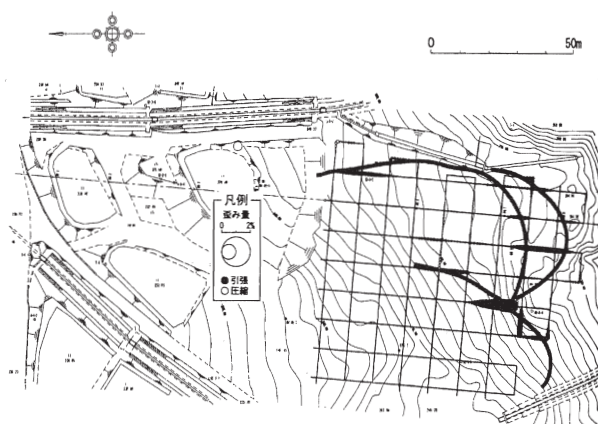


図-13 光ファイバセンサひずみ観測結果を用いた地すべりブロック区分 (固定金具あり)

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、本文で示した方法に基づいて光ファイバ伸縮計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示された。

3.4 光ファイバ伸縮計の開発

光FSは、地すべりの挙動が大きい場合には光FSの引張ひずみ量観測可能範囲が1.0～1.3%程度であるため破断する。そこで、±100mm程度の伸縮量が観測できる光ファイバ伸縮計として、地すべり斜面の引張ひずみ量が大きい場合でも光FSが断線することなく、また、圧縮ひずみ量も観測可能な光ファイバ伸縮計をB-OTDRを用いるものと、FBGを用いるものについて考案した。

3.4.1 B-OTDR方式光ファイバ伸縮計の開発^{6), 7)}

図-14には、考案したB-OTDR方式の光ファイバ伸縮計 (特許第3653549号) の模式図を示した。地すべり斜面の伸縮は、コイルバネ2の伸縮として捉え、さらにコイルバネ2の伸縮は光ファイバ1のひずみに変換される。この構造により、本伸縮計は、光ファイバ直接埋設方式伸縮計に比

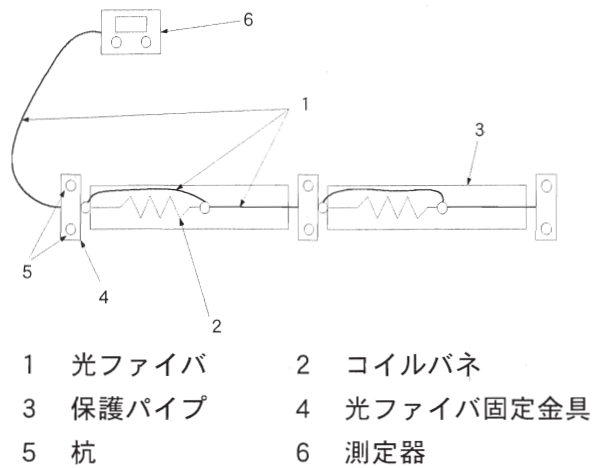


図-14 B-OTDR 方式光ファイバ伸縮計概要図
 べて、格段に大きな地すべり斜面の伸縮量を観測できる。なお、圧縮量は、伸縮計設置時に予め伸縮計を引張させておき、その戻りにより観測する。なお、本伸縮計は、3.3で示した光ファイバ直接埋設方式伸縮計と同様に地すべり斜面に深さ 50cm の溝を掘り、直線上に連ねて設置する。

(1) 伸縮計の変位量-ひずみ量特性試験

伸縮計に使用した光ファイバは、住友電工(株)製の6芯ユニット型光FSケーブル名称ABF光ファイバユニットの一番外側の2次被覆を剥がしたものをを用いた。

図-15には、B-OTDR方式光ファイバ伸縮計の構成図を示した。ひずみ量を測定する光ファイバの長さは1,500mmとした。これは、測定器の性能を考慮して決めた。また、伸縮計全体の長さは2,000mmとした。この他、引張バネは、地すべり

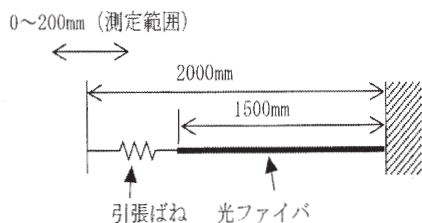


図-15 B-OTDR 方式光ファイバ伸縮計構成図
 移動の測定範囲を引張・圧縮各 100mm として、光ファイバの弾性係数をもとにバネ定数 0.291N/mm、長さ 190mm のものをを用いた。

図-16は、試験装置を示したものである。試験は、伸縮計を光ファイバに長さ 3m の無負荷区間を設けて(各伸縮計の光FSに生じるひずみを明確に分離するため)3基連ねて設置し、2番目の伸

縮計に試験装置により変位を与えた。試験は、伸縮計にネジ式の変位発生装置により引張変位を与え、変位はノギス、力は荷重計、光ファイバのひずみ量は B-OTDR により各々測定し行った。

図-17には、光ファイバと引張バネ及び荷重計

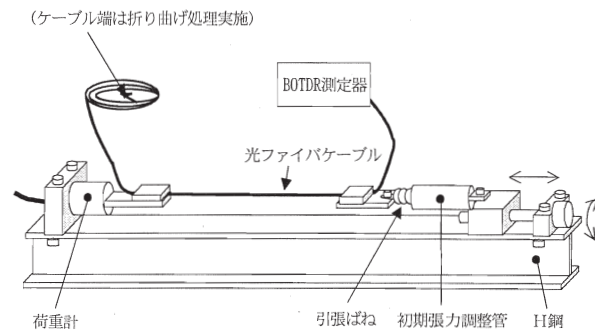
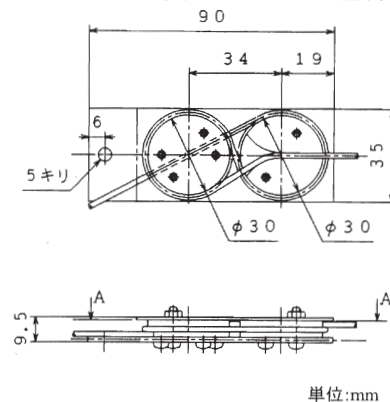


図-16 B-OTDR 方式光ファイバ伸縮計の変位-ひずみ量特性試験装置



単位:mm

図-17 光ファイバと引張バネ及び荷重計との接続に用いた治具との接続に用いた治具を示した。光ファイバは、高い圧力による締め付けや急激な曲げにより、破断や光ファイバ内を通る光の損失を生じるため、他のものと接続する際にはこれらはできない。そこで、光ファイバと引張バネ及び荷重計との接続は、直径 30mm の円形を2個並べた形状の治具を作成し、これらの円に光ファイバを8の字状に巻き付け行った。

図-18には、本光FSの引張収縮時の変位量(0.0 → 200.0mm 変位時)とひずみ量との関係を示した。引張時のひずみ量は、変位量が 200.0mm まで変位量とほぼ線形関係にある。また、収縮時のひずみ量は、変位量 200.0 → 0.0mm まで引張時とほぼ同じ値を示している。これらのことから、本光FSの測定変位量と出力であるひずみ量との

関係を、測定変位置量 0.0 ~ 200.0mm の間においてほぼ線形関係にできたことが分かる。

図-19 は、本光 F S の引張収縮時の変位置量 (0.0 → 200.0mm 変位時) と引張力との関係を示したものである。本光 F S を変位させるために必要な引張力は、100mm の場合約 40 N であり、200mm の場合約 70 N である。前者は、本光 F S 設置時に 100mm 引張変位させるために必要な引張力である。

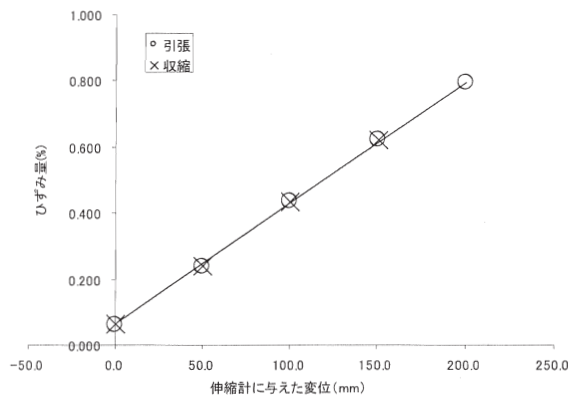


図-18 地すべり挙動調査用光 F S 引張収縮時の変位置量とひずみ量との関係

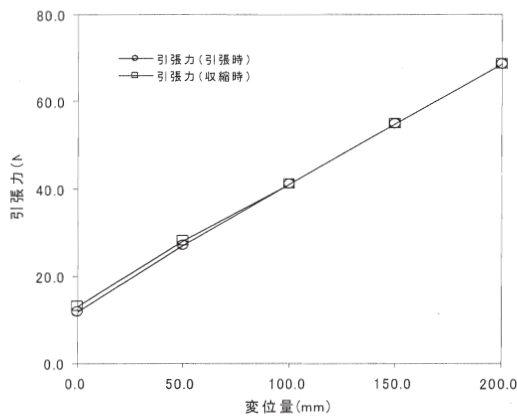


図-19 地すべり挙動調査用光 F S 引張収縮時の変位置量と引張力との関係

(2) 伸縮計の温度特性試験

恒温室に本伸縮計を設置し、伸縮計の温度変化に対する測定値の変動特性を求めた。

図-20 には、光ファイバの配線図を示した。伸縮計は 3 基接続し、伸縮計と伸縮計の間には長さ 3m の無負荷状態の光ファイバを束ねた区間 (余長区間) を設けた。余長区間は、測定データの中で伸縮計の位置を明確にすることと、測定値の温

度補正用のデータを得るために設けた。試験では、No. 1、3 の伸縮計に 100mm、No. 2 の伸縮計に 200mm の変位を各々与えておき、恒温室の温度を 0、15、30、45 °C に変化させ、伸縮計に生じるひずみ量を B-OTDR で測定した。

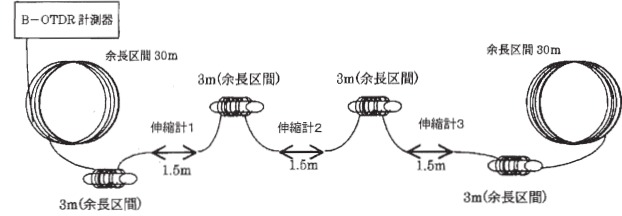


図-20 光ファイバの配線図

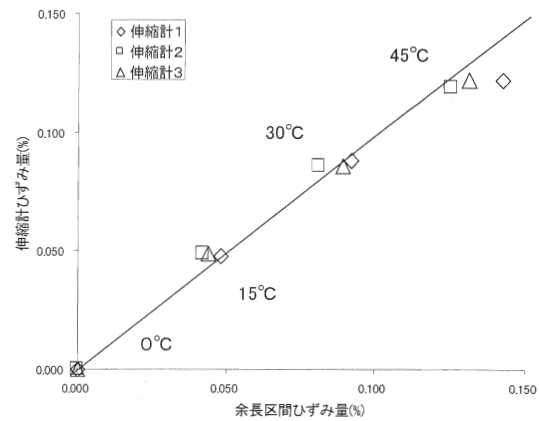


図-21 温度変化時の余長区間と伸縮計の各ひずみ量との関係

図-21 は、温度による余長区間ひずみ量と伸縮計ひずみ量との関係 (設定温度 0 °C を初期値とする) を示したものである。余長区間ひずみ量と伸縮計ひずみ量との関係は、ほぼ伸縮計の変位置量に影響されることなく 1 : 1 の線形関係にあることが分かる。このことから、伸縮計の温度変化に対するひずみ変化量は、伸縮計のひずみ量から余長区間のひずみ量を差し引くことにより補正できると考える。

図-22 には、温度変化に対する温度補正後の伸縮計ひずみ量を示した。温度補正後の伸縮計による測定値の誤差は、0 ~ 45 °C の温度変化に対して ± 0.02 % 以内となっていることが分かる。

(3) 光ファイバ伸縮計の現地試験

現地試験は、沖見地すべり試験地で行った。

図-23 には、現地に設置した光ファイバ伸縮計の全体図を示した。本光ファイバ伸縮計は、支持金具、支持杭、内側及び外側伸縮パイプから構成

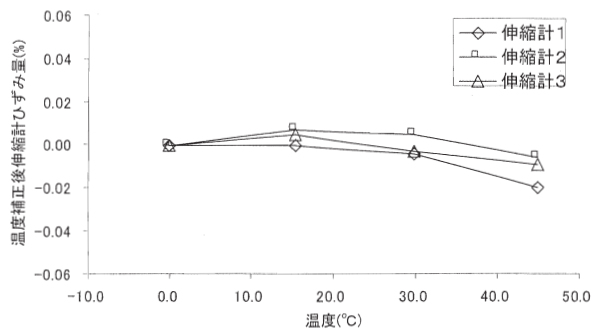


図-22 温度変化に対する温度補正後の伸縮計ひずみ量

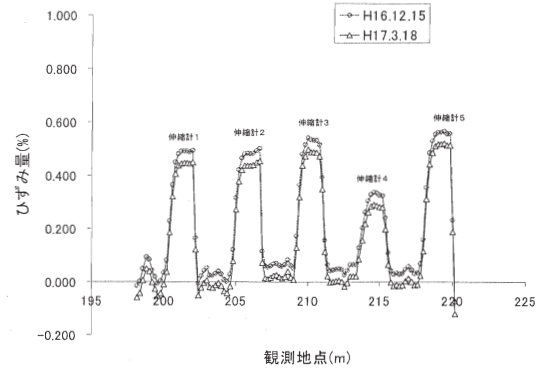


図-25 光ファイバ伸縮計の現地試験結果を示している。これは、温度変化により生じたものである。

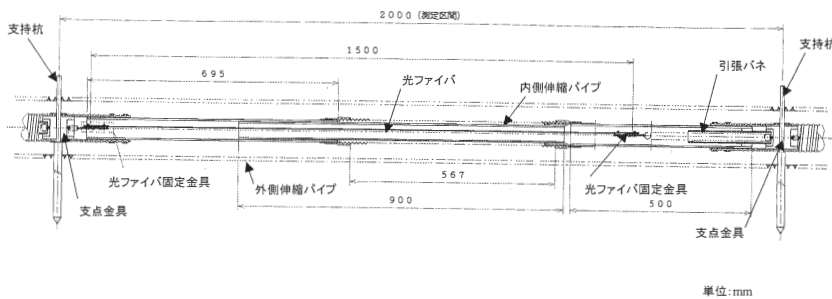


図-23 B-OTDR方式光ファイバ伸縮計全体図



図-24 光ファイバセンサ部の機能別区間配置図

されている。なお、伸縮計は、幅 70cm、深さ 60cm の溝を掘り、50cm 打設した支持杭に固定し深度 50cm に 5 基埋設した。

図-24 は、本光ファイバ伸縮計の光 F S 部における機能別区間の配置を示したものである。測定区間は地盤の伸縮量をひずみ量に変換する区間であり、非測定区間は測定区間の間にひずみ加わらない区間を設け、測定区間を識別するために設けたものである。また、各伸縮計の温度補正は、測定区間のひずみ量から非測定区間のひずみ量を差し引いて行う。

図-25 には、光ファイバ伸縮計の現地試験結果を示した。伸縮計は、約 100mm 引張した状態で設置されている。図において、ひずみ量が大きくなっている区間が光 F S の測定区間であり、ひずみ量が小さくなっている区間が非測定区間である。非測定区間のひずみ量は、各観測日で異なった値

図-26 は、温度補正後の光ファイバ伸縮計現地試験結果を示したものである。なお、温度補正は、伸縮計ひずみ量から各観測日における非測定区間ひずみ量を差し引いて行った。H17.3.18 の観測ひずみ量は、H16.12.15 の観測値に比べて小さくなっており、地すべり斜面に圧縮ひずみが生じたことが分かる。

以上のことから、測定範囲 ± 100mm、温度変化 0 ~ 45 °C に対する測定誤差 ± 0.02 % 以内の性能を有する B-OTDR 方式の光ファイバ伸縮計を開発することができた。なお、本伸縮計は、図-23 では杭間距

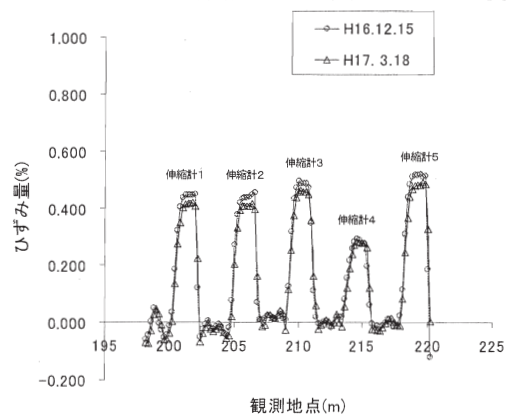


図-26 温度補正後の光ファイバ伸縮計現地試験結果。観測地点を 2m としているが、インバー線の長さを長くすることで最大 10m にすることができる。

3.4.2 FBG方式光ファイバ伸縮計の開発

B-OTDR を用いた伸縮計では、ひずみを測定するために高価な B-OTDR アナライザー（H17 現在約 13,000,000 円/台）が必要であり、調査費用が高額になる。このことから、ひずみ測定器の価格が安い（H17 現在約 4,500,000 円/台）FBG を用いた伸縮計についても開発を実施した。

図-27 は、FBG を用いた光ファイバ伸縮計（測定範囲 0～200mm）の機構を示したものである。伸縮計は地表面下に埋設するため、小型で防水性能が高いものにする必要があることから、以下に示す機構を考案した。地すべり斜面の伸縮は、プーリーに巻かれたインバー線により回転運動に変換され、さらに歯車とカム、板バネにより上下運

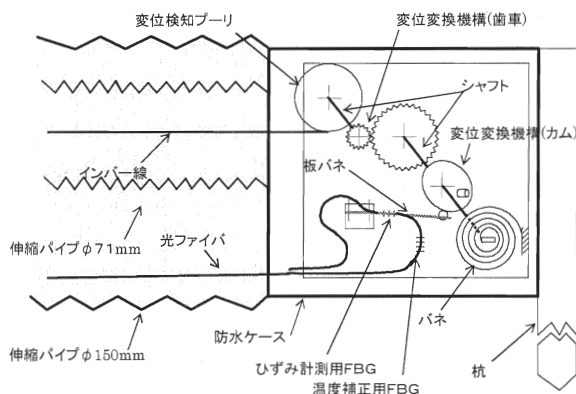


図-27 FBG を用いた光ファイバ伸縮計の機構
(測定範囲 0～200mm)

動に変換される。板バネには FBG が接着されており、板バネの上下運動は FBG によりひずみ量の変化に変換される。なお、地すべり斜面の伸縮量をひずみ量に変換する際には、FBG に生じるひずみ量を均等化し、伸縮量とひずみ量との関係を線形関係にする必要がある。ちなみに、板バネの形状を単純な長方形にした場合には、FBG に生じるひずみ量が不均一になり伸縮量とひずみ量との関係は一定の関係にならない。このことについては、三角形の形状の板バネを採用することで解決した。また、FBG は温度により測定されるひずみ量変動することから、温度補正をするために温度変化のみによるひずみ量の変化を測定するための FBG をひずみ測定用 FBG の近くに配置している。

写真-1 には、開発した伸縮計を示した。伸縮計の寸法は、高さ 66mm、長さ 230mm、奥行き 55mm

である。

(1) 伸縮計の変位量-ひずみ量特性試験

図-28 には、伸縮計に与えた変位量（以後、真値とする）と FBG により測定されたひずみ量との関係を示した。なお、伸縮計に与えた変位量は 0

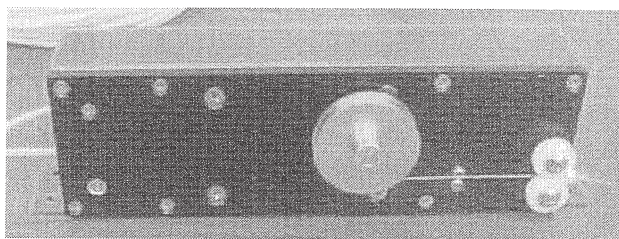


写真-1 開発した伸縮計

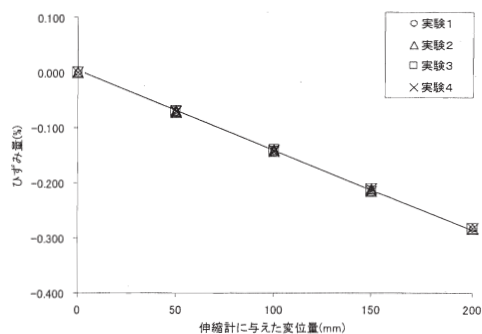


図-28 変位量-ひずみ量の関係

→50→100→150→200→150→100→50→0 (mm) の順であり、試験は 4 回実施している。真値と FBG により測定されたひずみ量との関係は、変位量 0 から 200mm の間で設計通り線形関係を示していることが分かる。

(2) 温度変化に対する伸縮計の

変位量-ひずみ量特性試験

試験は、伸縮計を恒温槽内に設置し、恒温槽内の温度を変化させて実施した。

図-29 には、真値を 100mm に固定し、恒温槽

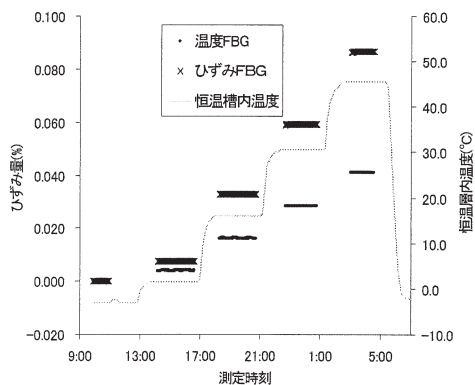


図-29 温度変化に対するひずみ測定用 FBG 及び温度補正用 FBG の各変化 (伸縮計変位 100mm 時)

内温度を-5 ～ 45℃まで変化させた場合のひずみ測定用 FBG 及び温度補正用 FBG の各ひずみ変化量 (-5℃を基準値とする) を示した。ひずみ測定用 FBG 及び温度補正用 FBG の各ひずみ変化量は、恒温槽内の温度変化に伴い変化している。また、各 FBG の温度に対するひずみ変化量は異なっており、ひずみ測定用 FBG の方が大きくなっている。

図-30には、伸縮計変位量を100mm及び200mmに各々固定した場合における温度変化時のひずみ測定用 FBG と温度補正用 FBG の各ひずみ量 (-5℃を基準値とする) との関係を示した。両者の関係は、伸縮計の変位量に影響されることな

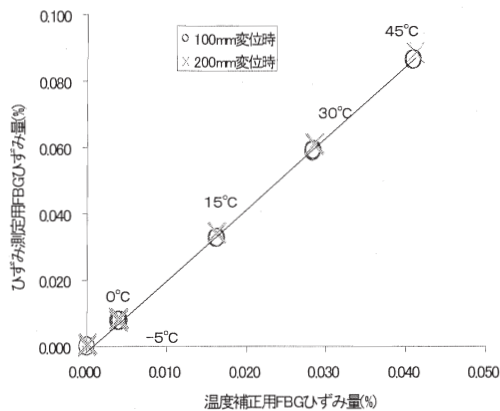


図-30 温度変化時のひずみ測定用 FBG と温度補正用 FBG の各ひずみ量との関係

く線形関係を示している。

図-31、32は、真値100mm及び200mmに対する恒温槽内温度変化時における温度補正後の伸縮計による測定変位量を示したものである。なお、温度補正後の伸縮計による測定値は、線形回帰式から導いた(1)式により求めた。

$$D_R = -704.916 \Delta \lambda + 0.193 \quad (1)$$

ここで、 D_R : 温度補正後の伸縮計による測定変位量 (mm)

$\Delta \lambda$: $\Delta \lambda_s - 2.124 \Delta \lambda_t$ (%)

$\Delta \lambda_s$: ひずみ測定用 FBG ひずみ変化量 (%)

$\Delta \lambda_t$: 温度補正用 FBG ひずみ変化量

温度補正後の伸縮計による測定値の誤差は、恒温槽内における-5 ～ 45℃の温度変化に対して±1mm以内となっていることが分かる。

以上のことから、測定範囲0～200mm、温度変

化-5 ～ 45℃に対する測定誤差±2.5mm以内の性能を有するFBGを用いた光ファイバ伸縮計を開発することができた。

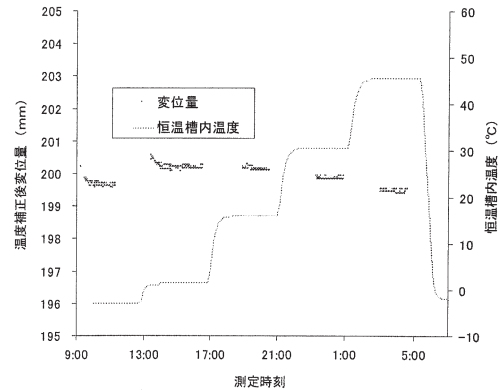


図-31 温度補正後の伸縮計測定変位量

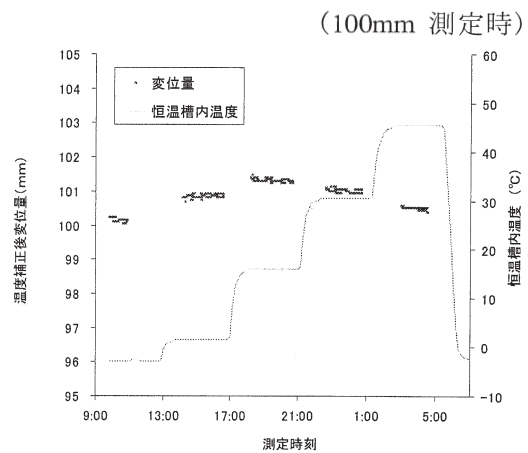


図-32 温度補正後の伸縮計測定変位量 (100mm 測定時)

(3) 伸縮計の設置方法

図-33は、本伸縮計の現場設置時の全体図を示したものである。伸縮計は、幅70cm、深さ60cmの溝を掘り、その中に連結して設置する。斜面の伸縮量は、伸縮計本体を杭に固定し、伸縮計と次の杭をインバー線で結び測定する。なお、伸縮計とインバー線は、伸縮計保護部、連結用塩ビ管及び伸縮部で保護する。また、連結用塩ビ管及び伸縮部が斜面と一体となって伸縮できるように、これらを伸縮可能な保護パイプで覆う。その他、杭間距離は2mとしているが、インバー線の長さを長くすることで最大10mにすることができる。

4. 光ファイバ伸縮計による地すべりの面的挙動調査法の提案

表-2には、地すべりの面的挙動を調査するた

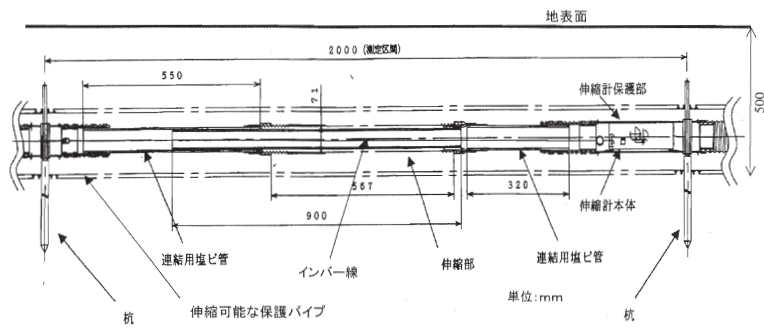


図-33 伸縮計の現場設置時全体図

表-2 開発した光ファイバ伸縮計

名称	用いた光ファイバセンサ名	特徴	仕様
B-OTDR方式光ファイバ伸縮計	ブリルアン散乱光応用センサ	光ファイバセンサとコイルバネを組み合わせ、大きな変位の伸縮量を観測可能にしている。	測定範囲 ±100mm 測定精度 ±4.0mm 距離分解能 1m 計測器 B-OTDR ひずみ計
FBG方式光ファイバ伸縮計	ファイバグレーティング光応用センサ	FBGセンサを三角板バネに貼付した機構により、高精度で大きな変位の伸縮量を観測可能にしている。	測定範囲 ±100mm 測定精度 ±1.0mm 計測器 FBGひずみ計
光ファイバ直接埋設方式伸縮計	ブリルアン散乱光応用センサ	光ファイバセンサを直接斜面内に埋設し、小さな地すべり挙動を観測可能にしている。	測定範囲 5mm 測定精度 0.1mm 距離分解能 1m 計測器 B-OTDR ひずみ計

めに開発した光ファイバ伸縮計を示した。開発した伸縮計には、光ファイバを地すべり斜面に直接埋設して地すべり斜面の小さな挙動を観測するもの（光ファイバ直接埋設方式伸縮計）と、光ファイバと機械的メカニズムを組み合わせ地すべり斜面の大きな挙動を観測するもの（B-OTDR方式、FBG方式）がある。いずれの伸縮計も、積雪地帯に使用できるように積雪の影響を除くため伸縮計を地表面下に埋設するようにしてある。

地すべり斜面の面的調査法については、伸縮計の配置方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、図-5に示した深さ50cm、幅60cmの溝を図-6に示した格子状に掘削し、開発した光ファイバ伸縮計を埋設することにより地すべり斜面の挙動を面的に調査することができる。なお、図-5に示した断面で光ファイバ伸縮計を埋設することにより、地表面に人間や小型重機程度の上乗荷重が加わっても測定値に影響はない。

これらのことから、光ファイバ伸縮計による地すべりの面的調査法として、調査目的に合わせ表

-2に示した光ファイバ伸縮計を選択し、伸縮計を直交配置する方法を提案する。

表-3は、従来型伸縮計と開発した光ファイバ伸縮計の現場設置工事費の概算額を示したものである。なお、概算額は、従来型、B-OTDR、FBG方式については伸縮計を地すべり斜面主測線上の長さ400mに10m間隔で設置した場合であり、直接埋設方式については地すべり斜面主測線上長さ400mに設置した場合である。概算額は、従来型伸縮計に比べて光ファイバ伸縮計の方が安くなっており、本調査法により調査コストが縮減できることが分かる。これは、従来型伸縮計では伸縮計毎に信号伝送用のケーブルが必要であり、その配線のために多額の費用が必要になるためである。この差は、観測測線が長くなるほど大きくなり、光ファイバ伸縮計を用いる大きなメリットになる。

表-3 伸縮計現場設置費概算額

名称	現場設置工事費概算金額(千円)	備考
従来型伸縮計	42,000	測線長400m、伸縮計を10m間隔で設置した場合
B-OTDR方式光ファイバ伸縮計	41,000	
FBG方式光ファイバ伸縮計	39,000	
光ファイバ直接埋設方式伸縮計	30,000	測線長400mに設置した場合

5. まとめ

地すべり災害を防止・軽減するために重要な地すべり挙動の把握において、現在最も有効な地表面の亀裂・ひずみを計測する伸縮計には、①挙動が顕著でない時点で適切な伸縮計配置が難しい、②積雪期の地表面計測が困難等の重大な課題がある。これに対し光ファイバは長距離区間を大量のデータを伝送する機能とともに、ひずみ量やひずみの発生した地点の計測が可能で、この光FSを活用した地すべり挙動を監視するシステムの開発について研究した。

①に対し直交配置法による光ファイバ直接埋設

方式を考案し、深さ50cmの地中に格子状に光FSを埋設し現地観測を実施した。その結果地すべり斜面の面的挙動を、移動杭測量に比較し迅速に把握することができ、ブロック区分も可能であった。しかしこの光FSは引張ひずみが1%を越えると破断してしまうため、大きな地すべり挙動や圧縮ひずみに対応できるB-OTDR方式光ファイバ伸縮計、FBG方式光ファイバ伸縮計の開発を行った。

光ファイバとコイルバネ及び板バネの機械的メカニズムを組み合わせたこれら伸縮計は、②に対して使用できるように積雪の影響を除くため地表面に埋設するように改良を重ね、伸縮及び圧縮量100mmまで観測が可能となった。現場への導入においてひずみを測定するアナライザーが高価なためコスト面に課題があったが、FBG方式はこれが大幅に安価となり、多数の伸縮計を連続して設置する場合、従来型伸縮計との現場設置コストにおいても優位となった。

また、光ファイバセンサは落雷による機器への障害がないことから、本伸縮計は落雷の多い地域の地すべり挙動観測に適している。

今後は、開発した光ファイバ伸縮計及び監視システムの耐久性など検証しつつ、現場に普及させてゆきたい。

参考文献

- 1) 杉本宏之、柳原幸希、浅野広樹、綱木亮介：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FS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

- 6) 丸山清輝、武士俊也、長友聖二：大変位伸縮量観測可能光FSの開発、平成16年度砂防学会研究発表会概要集、pp.22-23、平成16年5月
- 7) 丸山清輝、花岡正明、長友聖二：大変位伸縮量観測可能光FSの開発（その2）、平成17年度砂防学会研究発表会概要集、pp.142-143、平成17年5月