

# 光ファイバセンサを活用した斜面監視と 表層崩壊予測手法の提案

## A PROPOSAL ON MONITORING OF SLOPE INSTABILITY AND PREDICION OF SHALLOW SLOPE FAILURE USING AN OPTICAL-FIBER SENSING

古谷充史<sup>1</sup>・小橋 秀俊<sup>2</sup>・加藤 俊二<sup>3</sup>

Atsushi Furuya, Hidetoshi Kohashi and Syunji Kato

<sup>1</sup>独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 材料地盤グループ 土質チーム(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

<sup>2</sup>独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 材料地盤グループ 土質チーム(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

<sup>3</sup>独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 材料地盤グループ 土質チーム(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

*Key Words: optical fiber sensor, surface failure, monitoring, failure prediction*

### 1. はじめに

防災対策が必要,あるいは,日常の監視管理が必要な道路のり面・斜面は10万箇所以上存在しているが,このような斜面での崩壊発生時期を特定することは,地形・地質条件や植生条件の違いにより崩壊形態が様々なため,非常に困難である.このため,監視・管理業務の効率化・高度化とともに,崩壊の監視技術と斜面安定度の評価技術とを融合させ,事前予測につながる効率的な斜面の監視・管理技術の確立が必要である.

本報では,光ファイバセンサ(B-OTDR方式)によるフィールド試験において検知した表層崩壊の計測データを紹介するとともに,その結果から,斜面管理の考え方や表層崩壊予測手法に関する検討を行った.

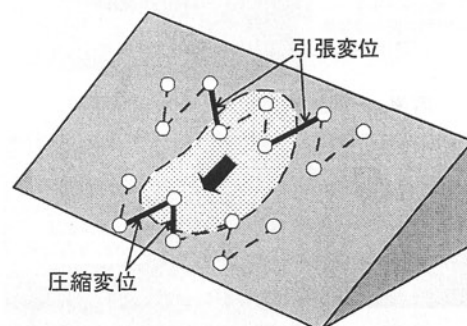
### 2. 概要

光ファイバセンサは線的・面的な設置が可能であり,狭〜広域のエリアの効率的な監視には,光ファイバセンサ(B-OTDR方式)が有効である(図-1参照).さらに,国土交通省で整備している光ファイバ通信網へ接続することにより,遠隔地にある事務所・出張所等から複数斜面の一括管理が可能となる.このため,独立行政法人土木研究所では,民間14社との「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」(平成12~17年度)を実施し,その適用性について検討を行った.<sup>1)</sup>

### 3. フィールド試験結果(崩壊検知状況)

「どこで」「どの程度」の崩壊が起こる可能性があるか予測するためには,斜面特性やセンサの設置方法等のいろいろなケースでのデータ収集と,斜面全体での長期的な挙動を把握しなければならない.

そこで,平成13年度より1)兵庫県(R28沿線),2)和歌山県(R42沿線),3)宮崎県(R220沿線),平成16年度より4)長野県(R19沿線)の4路線を対象に,斜面の伸縮を継続観測している.なお,不特定域で発生しかつ崩壊規模の推定が難しい表層崩壊を検知するために,図-1のようにセンサーを斜面に設置した.



移動土塊とセンサの位置関係により,引張および圧縮が観測される.

図-1 光ファイバセンサー計測概略図  
(B-OTDR方式)

平成16年10月に発生した「台風23号」の影響により各地で洪水や斜面崩壊等による災害が発生し、フィールド試験実施箇所である1)R28沿線、4)R19沿線で事前通行規制中に小崩壊が発生した(表-1参照)。平成13年度からの光ファイバセンサを用いたフィールド試験で得られた表層崩壊の変位データ(FBG方式、MDM方式)では、急激な変位が発生し、その後1.5~2.0時間程度で崩壊に至っている。今回、B-OTDR方式においても、同様な変位発生現象を捉えることができた。以下、1)兵庫県(R28沿線)、4)長野県(R19沿線)で発生した表層崩壊時の計測結果を報告する。

表-1 崩壊箇所の基本データ(H16 台風23号)

	(1) R28沿線	(4) R19沿線
規制基準雨量	160mm	130mm
地形	海食崖	河川浸食崖
地質	白亜紀花崗岩類	新第三紀中新世砂岩泥岩互層
崩壊の形態	表層崩壊	表層崩壊
崩壊時の日降雨量	10/19:63mm 10/20:309mm	10/19:10mm 10/20:153mm
崩壊までの前兆時間	1.5~5.0時間程度	4時間程度

(1) 一般国道28号(兵庫県), その1

当該地は、平成7年7月、平成11年6月の2回に渡り、斜面の上部で崩落した土砂が、斜面下部の道路擁壁付近まで流下した被災履歴を持つ斜面である。そして、平成16年10月の台風23号の影響により、広範囲の斜面崩壊が発生していた。移動土砂層厚は最大3m

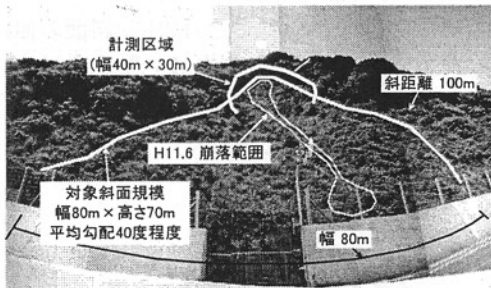


写真-1 計測斜面全景(R28), 崩壊前

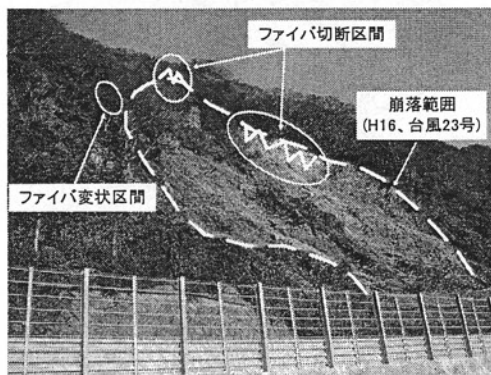


写真-2 崩壊後(H16.10, 台風23号)

程度と見られ、擁壁工を飛び越える土砂は無かったが、崩壊範囲は広く斜面風景は一変した(写真-1~2参照)

図-2にセンサ設置状況、図-4にH13.6~H15.12までの累積ひずみ量分布を示す。この結果、ひずみ分布は、センサ部上部の土砂移動によって発生する「圧縮ひずみ」が卓越し、概ね均一に分布しているが、今回の崩壊でセンサ部に大きな損害の発生した3箇所(図-3参照)では、「引張ひずみ」が卓越していることで、この部分に不安定な土塊が存在していたことがわかる。図-4の変位計測結果に示すように、崩壊直前に急激なひずみの増加現象が発生し、この現象が発生してから崩壊に至るまでの時間は約1.5時間程度であった。

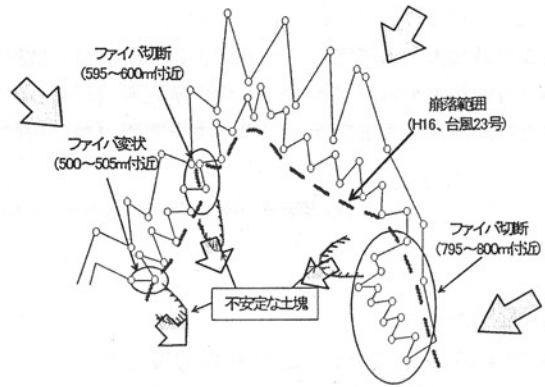


図-2 光ファイバセンサー計測概略図(B-OTDR)および台風23号による崩壊範囲

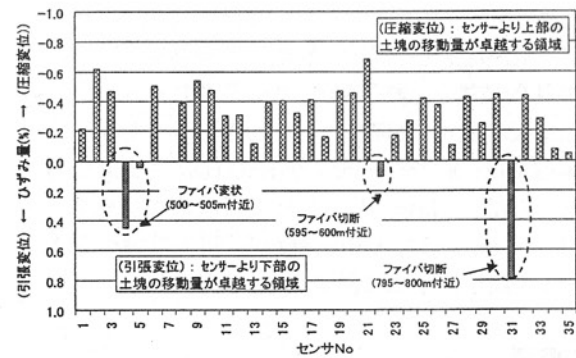


図-3 各計測部での累積ひずみ量(H13.6~H15.12)

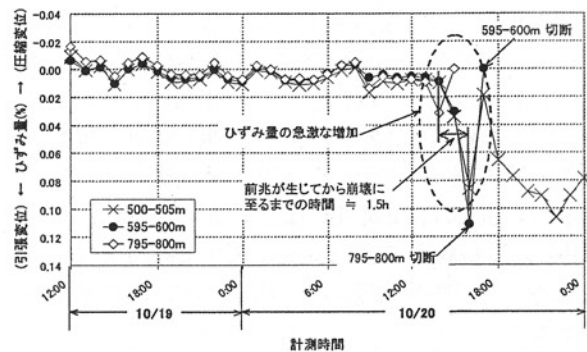


図-4 崩壊時における変位計測結果(H16, 台風23号)

(2) 一般国道 28 号 (兵庫県), その 2

平成 16 年 10 月の台風 23 号の影響により, 広範囲にわたって斜面崩壊が発生し, 光ファイバセンサ設置区間においても 2 箇所崩壊が確認された. 移動土砂層厚は最大 3m 程度と見られ, 落石防護柵を飛び越える土砂は無かったものの, 大きく変形した.

この区間では斜面上段ファイバ, 落石防護柵下方に下段ファイバが設置しており, 両者ともに切断が確認された. この切断時間に 1 時間の時間差が確認されたが, 図-6 に示すように, 1 次崩壊発生時に下段ファイバが切断され, これに引っ張られるように 2 次崩壊へと拡大し, 上段ファイバが切断したものと考えられる.

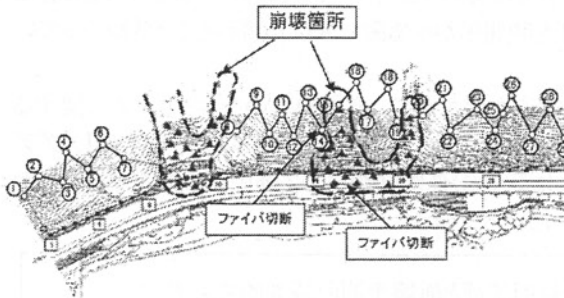


図-5 光ファイバセンサ配置図

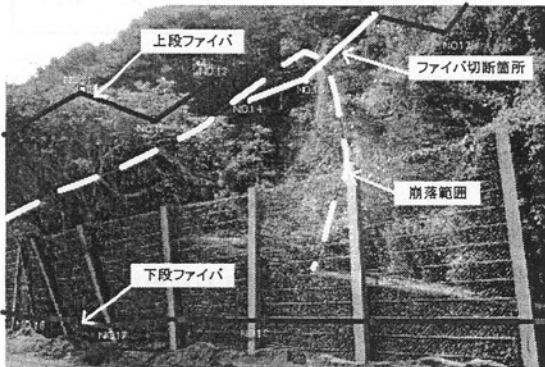


写真-3 崩壊箇所のセンサの状況

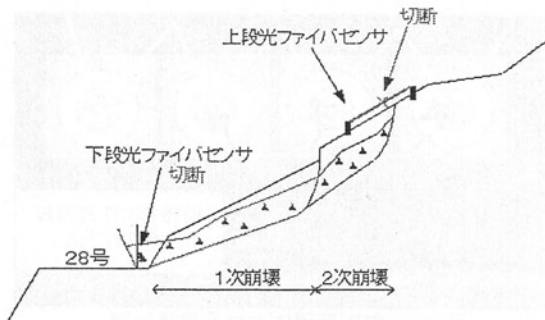


図-6 崩壊発生形状

図-7 の変位計測結果図に示すように, 崩壊発生前の歪量変化をとらえることができた.

崩壊直前に急激なひずみの増加が認められ, ひずみ量が 0.4%(ひずみ速度 0.2%/hr)を越えた時点で破断した. 前兆現象が認められてから崩壊に至るまでの時間は約 5.0 時間程度であった.

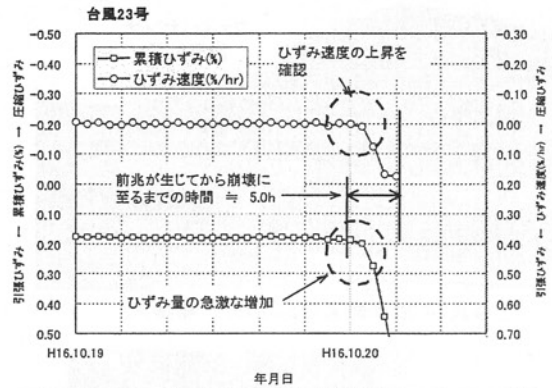


図-7 崩壊時における変位計測結果 (H16, 台風 23 号)

(3) 一般国道 19 号 (長野県)

当該斜面では平成 16 年 10 月の台風 23 号の影響により, センサ設置位置から上方約 20m の付近で表層崩壊が発生した. 移動土砂層厚は最大 2m 程度と見られ, 落石防護柵の間から若干量土砂が道路に流出したものの, 大きな被害はなかった. 現地では光ファイバセンサを図-2 に示すように, 道路延長方向約 100m の区間に連続して設置していたが, 崩壊によってセンサが切断されていた. 計測は平成 16 年 9 月末より開始したが, 直後の 10 月 9 日に台風 22 号, 10 月 20 日に台風 23 号と立て続けに大きな雨を受けた.

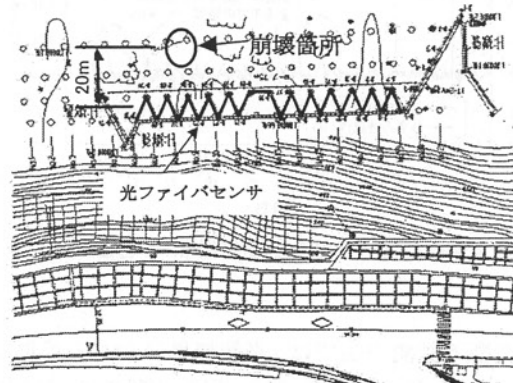


図-8 光ファイバセンサ配置図

図-11 の変位計測結果に示すように, 崩壊直前に急激なひずみの増加が認められ, ひずみ量が 0.1%(ひずみ速度 0.01%/hr)を越えた時点で破断した. 前兆現象が認められてから崩壊に至るまでの時間は約 4.0 時間程度であった. また, 台風 23 号の 10 日ほど前に発生した

台風 22 号の際に、変形が崩壊直前と同等程度発生しており、移動土砂には相当量の水分を含んでいたものと考えられる。

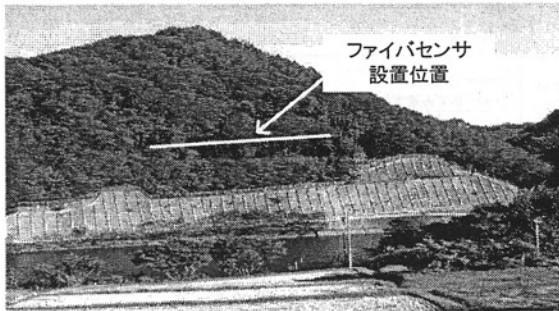


写真-4 計測斜面全景 (R18), 崩壊前



写真-5 崩壊箇所のセンサの状況

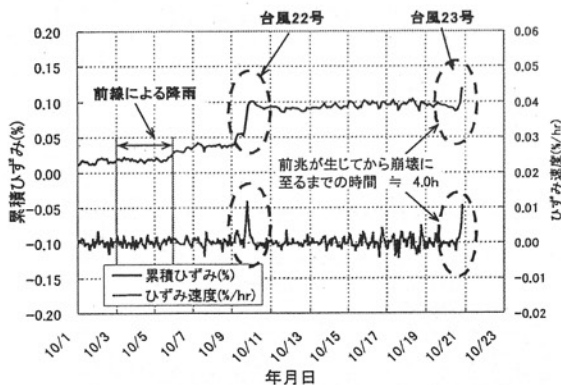


図-9 崩壊時における変位計測結果 (H16, 台風 23 号)

従来型の計測方法では、表層崩壊に対する管理が困難であったが、光ファイバセンサ(B-OTDR 方式)を採用し W 字状に設置することで、崩壊範囲の推定や崩壊の前兆現象を観測することが可能と考える。ただし、前兆現象が生じてから崩壊に至るまでの時間が大変短いため、表層崩壊に対する安定性評価を行う際には、降雨予測や浸透モニタリングによる安定度評価等を併用した複合的な安定度評価が必要と考える。

#### 4. 斜面管理の考え方と崩壊予測手法の検討

表層崩壊は、不特定域で発生し、崩壊前兆から崩壊までの猶予時間が地形で異なるが、非常に短時間である。このため表層崩壊危険性斜面の管理・監視は、まずどこでどの程度の崩壊が起こる危険性があるかをできるだけ早期に推定し、適切な対応を行うことが望ましい。しかしながら、通常の点検や調査では、表層崩壊の起こる箇所をピンポイントで抽出することは困難である。

一方、筆者らのこれまでの研究成果では、センサをW字に設置することで降雨や気温変動による日常的な挙動を2次元的にベクトル表示し、崩壊危険域を推定することが可能であること、異常時においては少なくとも崩壊の1.5時間前から急激な変位が現れることがわかっている。

これらを踏まえて、表層崩壊のモニタリングに関する考え方を次のように整理した。ここでは、モニタリングデータによる「①日常計測」と「②降雨時の異常監視」の考え方について示す。

##### 斜面管理と崩壊予測の基本的考え方

- ①日常計測は → 日常計測
- ②降雨時の監視計測 → 降雨時の異常監視

##### ①日常管理（崩壊危険位置の事前抽出）

日常計測では、崩壊危険箇所を抽出し、対応策の検討を行う。

- 面的・線的に設置したセンサの計測結果より、地盤の伸縮が卓越している箇所を抽出し、そのひずみ分布形態から崩壊予想範囲を推定する。
- 崩壊予想範囲を推定した後は、運用管理体制に従い、今後の対応を検討する。

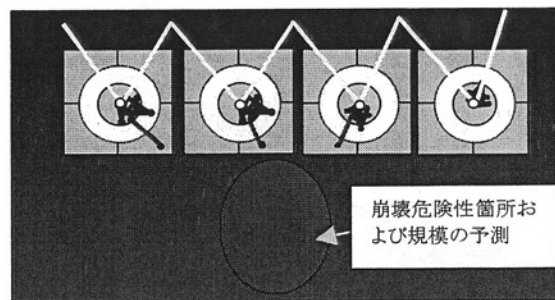


図-10 斜面管理における崩壊予測

なお、各センサの計測結果は、以下のように整理する。

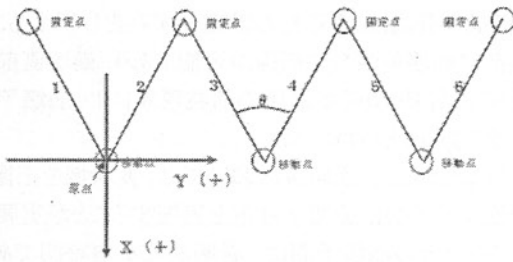


図-11 計測結果の整理方法

センサ1

$$X_1 = (\text{ひずみ}_1) \times \cos(\theta/2)$$

$$Y_1 = -(\text{ひずみ}_1) \times \sin(\theta/2)$$

センサ2

$$X_2 = (\text{ひずみ}_2) \times \cos(\theta/2)$$

$$Y_2 = (\text{ひずみ}_2) \times \sin(\theta/2)$$

センサ1・2(合成)

$$X = X_1 + X_2$$

$$Y = Y_1 + Y_2$$

センサの配置箇所と崩壊域によって、ひずみの発生する形状が異なる。図-12 は崩壊域とひずみ速度の関係を示したものである。崩壊域がセンサの下方に出現した場合はひずみ速度は引張として捉え、上方に出現した場合は圧縮として捉える。

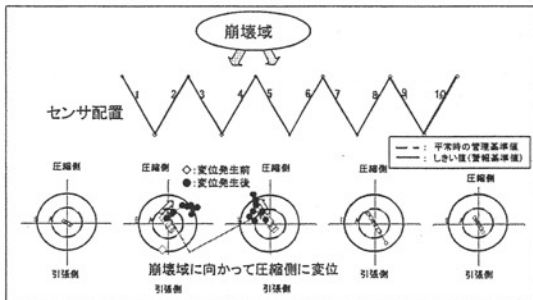
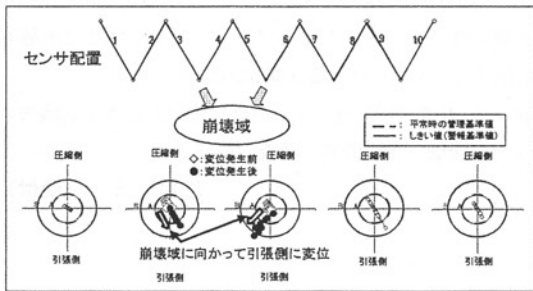


図-12 崩壊域が出現した場合の模式図

## ② 降雨時の異常監視 (崩壊の事前予測)

降雨時の計測・管理は、対策工を実施するまでの期間、あるいは管理上対策が困難な場合に実施する。

- 管理上計測によって斜面を監視する場合は、ひずみ速度により“管理しきい値”を設定しておく必要がある。
- 地盤の急激な変化から崩壊が予想される場合は、運用管理体制に従い、斜面周辺の安全確保に努める。

管理基準値としてひずみ速度を用いた危険度の判定を行う。図-13 に示すような、管理円(通常域, 異常域)を設定し、向きと大きさから崩壊を予測する。なお、通常域は日常の変動幅, 異常域は降雨時など地盤に急激な変位が発生した際に得られる最大ひずみ速度を用いて設定する。

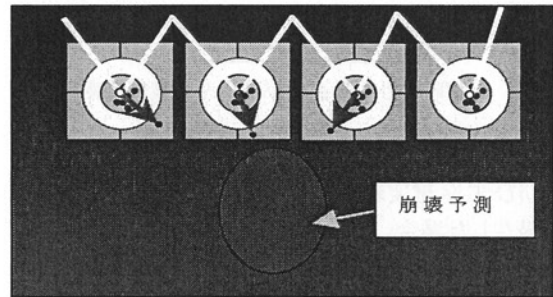


図-13 斜面管理における崩壊予測

地盤変位が発生した場合、ひずみ速度は降雨とともに増大する。ひずみ速度は測定間隔毎のひずみの差より算出するため、常に原点からの距離で表示される。図-14 に地盤の変位が収束する場合と変位が伸張した場合の模式図を示す。地盤変位が収束する場合、一定期間ではひずみ速度は増大するが伸びがなくなり、原点に戻る。また、斜面崩壊が生じるような場合は、ひずみ速度が単調に増大する。

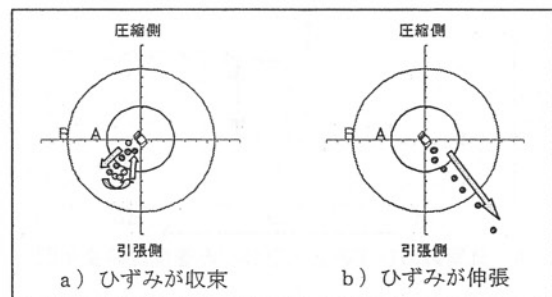


図-14 ひずみ速度図の見方

図-15に平常時におけるひずみおよびひずみ速度経時変化を示す。ひずみ速度は温度変化による影響が少なく、圧縮および引張方向にほぼ同等の変動幅を示すことから、この変動幅を平常時の管理基準値し、管理円(通常域)として設定する。

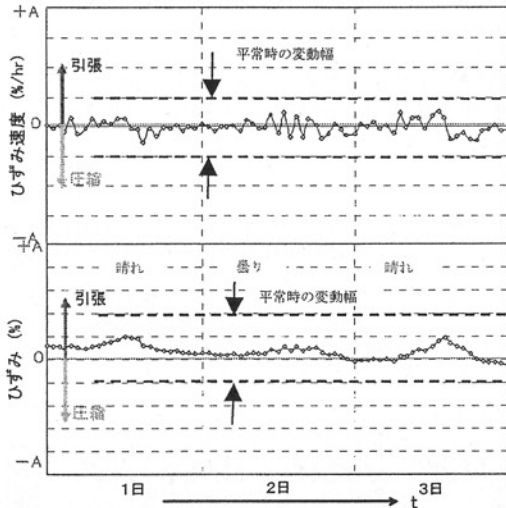


図-15 平常時のひずみおよびひずみ速度経時変化図

図-16に降雨時に地盤変位が発生した際のひずみおよびひずみ速度経時変化を示す。地盤に急激な変位が発生した場合、引張側(圧縮側)の一方に卓越した変化が認められる。これが“しきい値”(警報基準値)の基礎となる。計測開始当初は、監視斜面での真の“しきい値”の設定は難しいため、計測事例や既往の技術である地すべりの基準値をもって設定を行い、降雨イベント毎の変位状況を把握し修正を行う。

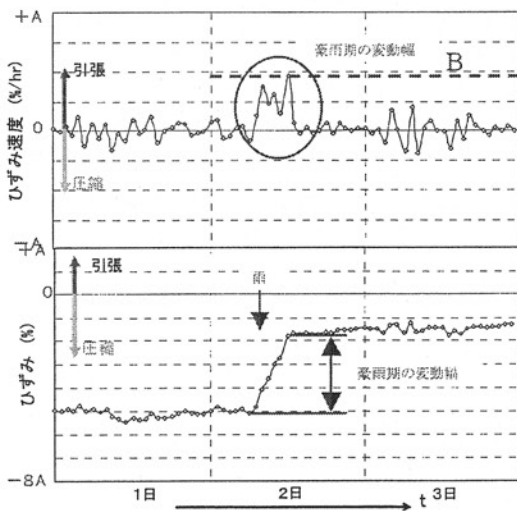


図-16 降雨時のひずみおよびひずみ速度経時変化図

## 5. おわりに

斜面の表層崩壊は、光ファイバセンサを活用して線的、面的な計測により日常の累積ひずみを分析することで事前に崩壊危険域の把握が可能であり、崩壊直前の数時間以内ではあるが崩壊の前兆現象により崩壊予測も可能であることがわかった。

しかしながら、斜面防災においては、変状域を把握して崩壊に至る前に適切な対策を実施することが重要である。降雨時の崩壊予測は、崩壊前兆が短時間であることからやむを得ず計測を継続する場合に行うもので、その際にはセンサ配置の高密度化や降雨予測値や降雨浸透モニタリングを併用するなど崩壊予測のレベルを向上させることを検討するとともに、避難誘導や事前通行規制などの管理体制づくりが必要である。

## 参考文献

- 1)「光ファイバセンサを活用した斜面崩壊モニタリングシステム導入・運用マニュアル(案)」, 土木研究所共同研究報告書, 第292号, 2004.6
- 2)小川鉄平・恒岡伸幸・加藤俊二・田中衛:光ファイバセンサによる表層崩壊検知結果及びその考察, 第57回土木学会年次学術講演会・第三部門, 2002.
- 3)加藤俊二・恒岡伸幸・室山拓生:B-OTDRによる道路斜面崩壊危険個所のスクリーニング技術の検討, 第58回土木学会年次学術講演会・第三部門, 2003.
- 4)加藤俊二・小橋秀俊・古谷充史:光ファイバセンサによる斜面表層崩壊モニタリング技術に関する検討, 第2回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 2004.8
- 5)加藤俊二, 小橋秀俊:光ファイバセンサによる斜面崩壊モニタリングと崩壊予測, 地質と調査, 2005.9

(2006. 5. 19 受付)