

◆ 特集：自然災害リスクの評価と軽減 ◆

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の開発

加藤俊二* 小橋秀俊** 古谷充史***

1. はじめに

日本の国土の約70%が山地部で、多くの集落や道路が斜面に隣接している。また、日本の年平均降水量は約1,700mmであるが、多いところでは年間2,000~3,000mmにも達する。降雨の大半は、6~10月にかけての梅雨・秋雨前線および台風による長雨や集中豪雨によるもので、年間降水量の約1/3を数日間の内に経験するケースもある。その結果、斜面が崩壊して集落や道路に土砂災害をもたらしている。土砂災害を低減する（無くしていく）ために、斜面の調査・点検を行い、適宜防災対策を実施しているが、防災対策を一気にまた全斜面に施すことは困難であり、モニタリングを併用しながら住民や道路利用者の安全を確保していく必要がある。災害のモニタリングでは安全の確保のために、「いつ」、「どこで」、「どのくらいのもの」が発生するのかを予知することが求められている。しかし、予知するためには多くのデータの蓄積と分析が必要であることから現状では困難であり、災害のモニタリングにおいて重要なのは、いかに適切にそれらを予測し事前に対策や対応をとることができるかである。

本報は、光ファイバセンサを活用した表層崩壊モニタリングシステムの開発を行ってきた結果を踏まえて、表層崩壊予測と斜面管理の考え方を提案するものである。

2. なぜ光ファイバセンサなのか

斜面モニタリングは、主に降雨時の崩壊前の状況を捉えることが目的であり、伸縮計などのセンサを用いて地盤の変状状態を計測している。斜面の表層崩壊は、起こりそうな範囲は現地調査である程度はわかるが、そのどこが、いつ、どのくらい崩壊するのがわからない。このため、点的な設置方法では崩壊を的確に捉えることができない

い可能性が高い。表層崩壊は、斜面の不特定域で発生すること、崩壊の速度が速いことが大きな特徴であり、崩壊を的確に捉えるためには線的あるいは面的な計測が必要である。従来型の伸縮計などのセンサは導線1本に対してセンサ1つがついており、それをデータロガーにつないで計測している。面的に計測するためにはセンサの数の増加に伴い導線の結線量が増加し、斜面上での作業が繁雑となるうえ、膨大な量の導線が斜面上を這うことになる。さらに、山間部の降雨は落雷を伴うことが多く、従来のセンサは電気式で、近年ずいぶん改善はされてきてはいるものの落雷による電磁誘導でセンサが故障することがある。これは、メンテナンスの面で問題となるうえ、肝心な時に計測できない可能性もある。このため、線的・面的な計測を実現するためには、導線の減少と落雷の影響への対応が必要である。

この2つの課題を解決するのに期待される技術としては、GPSによる計測も考えられる。しかしながら、1mm未満の地表変位を捉えることが困難であること、また人工衛星を利用することから見通しがよいことが必要であるが、山間地では植生や地形の影響で衛星が確認できない場合があり、現状では表層崩壊の計測に適用するには難しいものである。

また、ユビキタスで注目されているようなICチップを斜面に分散して配置し、チップ間の位置検出による変状モニタリングが有効であると考えている。しかしながら、現状では位置認識の精度が±10cmという大きな誤差がある。さらに、データ取得のための起電力として磁気誘導を用いていることなどから、ICチップの情報を取得するために必要な認識距離が10~20m程度と小さい。このようなデータ収集・通信上の課題があり、この技術については今後の発展に期待するものである。

一方、光ファイバセンサは、光ファイバ自体がセンサと導線の2つの機能を有し、線的・面的な設置・計測が従来型の伸縮計よりも容易であるこ

と、光ファイバの素材がガラスであり落雷による電磁誘導を受けないといった特徴があり、現状では表層崩壊モニタリングに最も適した技術と考えられる。

3. 計測事例と表層崩壊の特徴

独立行政法人土木研究所では、民間14社と「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、光ファイバセンサの適用性について検討を行ってきた。光ファイバセンサには、いろいろな計測原理があるが、ここでは代表的なものとしてB-OTDR方式、FBG方式、MDM方式の3つを用いた。なお、これらの方式の原理については、以前に本誌上で報告しているので詳細はそちらを参照して頂きたい¹⁾。

平成12年度から13年度にかけては、モニタリングにより表層崩壊発生時の「いつ」を予測することが可能であることを明確にすること、表層崩壊モニタリングにおけるセンサの配置方法を検討することを目的として、国土交通省の6事務所の協力により、表層崩壊の現象を的確に捉えるために光ファイバセンサを斜面に高密度に設置して試験計測を行った。その結果、MDM方式およびFBG方式を設置した2カ所の斜面で災害に至らない程度の崩壊が発生し、その状況を捉えることができ、表層崩壊のいくつかの特徴を確認できた²⁾。ここでは宮崎で実施したMDM方式での計測事例を用いて、その特徴を述べることにする。

図-1に光ファイバセンサの配置図を示す。この斜面は、小さな尾根部と谷部が道路の縦断方向に連続し、谷部の沢筋に沿って崩壊が発生しやすい特徴がある。このため、沢筋に沿って、1ライ

ンあたり計測長10mのセンサを5スパン設置した。崩壊は計測ライン3(図中L-3)の中央近傍で発生した。崩壊土量が約25m³の小規模な崩壊で、土砂はすべて落石防護柵で止まり道路には流出していない。

当時の降雨状況と変位の状況を図-2に示す。計測は平成13年4月より開始し、計測開始から崩壊当時までの変位量はほとんど無かった。この路線では連続雨量170mmで事前通行規制を行っており、崩壊前日昼過ぎまでに連続雨量181mmの降雨があり、翌日未明より再び60mmの雨が降り、崩壊に至っている。センサの状況を見ると、崩壊位置近傍のセンサNo.12では前日の降雨段階で微小な変位を記録しているが、0.2mm程度と崩壊の前兆現象と呼ぶには難しいもので、崩壊時の急激な変位を前兆現象と考えた方がよい。この状況は

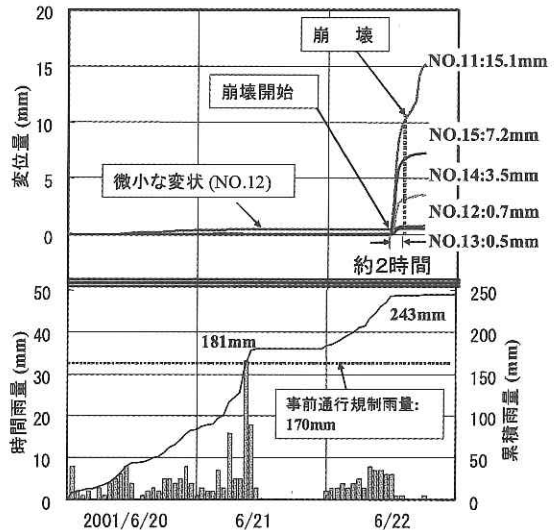


図-2 崩壊計測事例 (宮崎:MDM)

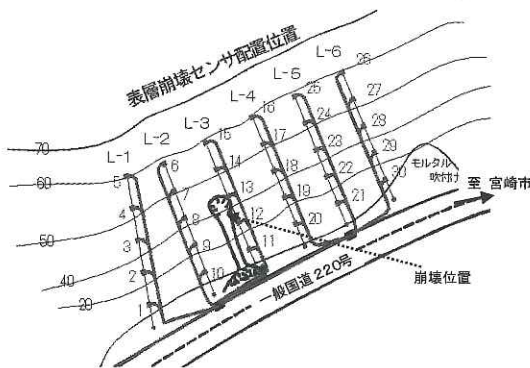


図-1 センサの配置図 (宮崎:MDM)

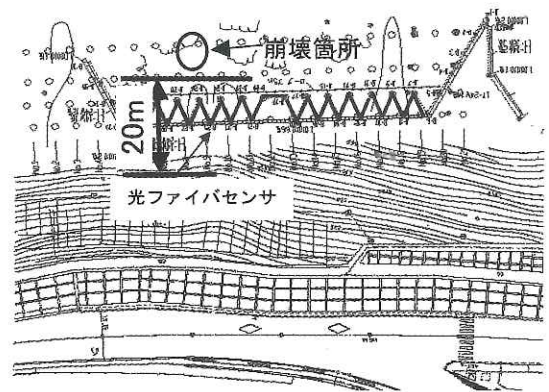


図-3 センサの配置図 (長野:B-OTDR)

他の計測事例でも同様である。

グラビアで紹介している長野での計測事例 (B-OTDR方式) で見ると、図-3に示すように平成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の付近で発生した。土砂量は30m³程度と見られ、落石防護柵の間から若干量の泥水が道路に流出したものの、大きな被害はなかった。

この斜面での計測は平成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。ひずみ計測結果 (グラビア参照) を見ると、崩壊直前に急激なひずみの増加が認められ、崩壊により破断した (ひずみ量が0.1%、ひずみ速度0.01%/hrであった)。前兆現象から崩壊に至るまでの時間は約4時間であった。なお、台風22号の際にも、崩壊時と同様な変状が発生しており、降雨の状況によってはその時点で崩壊していた可能性がある。

このように崩壊開始から崩壊までの所要時間に幅があり、計測事例では1.5~4時間程度であった。この時間差は、崩壊の規模、土質、植生等の条件によるもので、崩壊時間の明確化が難しく、温度等による日常的な微小変状からはずれないように急激な変状が継続してみられ、降雨も続いているようであれば短時間で崩壊が起こる可能性があると考えた方がよい。

またもう一つ注目すべき特徴があり、図-2に見られるように、小規模な崩壊であるにも関わらず、崩壊位置にかからない斜め上下方10~20m程度離れた位置のセンサが大きく反応し、側方近傍であるセンサの反応が小さいことである。これは崩壊が周辺地盤に及ぼす影響を示すもので、崩壊位置側方は横にスライドするため、縦断方向のひずみが小さく、崩壊の上部では地盤が引っ張られ下部では圧縮されるため、縦断方向の引張または圧縮ひずみが崩壊面側方より大きくなっていると考えられる。この特徴を考慮してセンサを斜面の横断方向にW字型に設置することで、センサ位置がピンポイントでなくとも上下方の動きを捉えて崩壊を捕捉できると考えられる (長野の事例でも上方で発生した崩壊にセンサが反応している)。

そこで平成14年度からは、国土交通省4事務所の協力によりW字型に光ファイバセンサを設置し、斜面の横断方向の全体の動きをみて、崩壊危険箇所と規模すなわち「どこで」、「どのくらいのもの」が崩壊するかを予測する方法の検討を行ってきた。

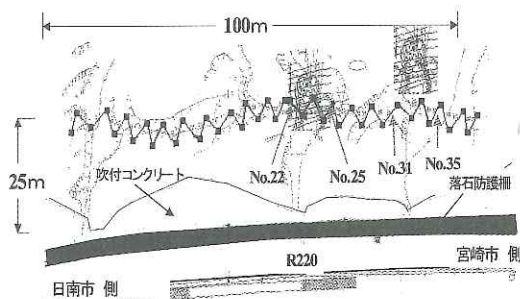


図-4 センサの配置図 (宮崎: B-OTDR)

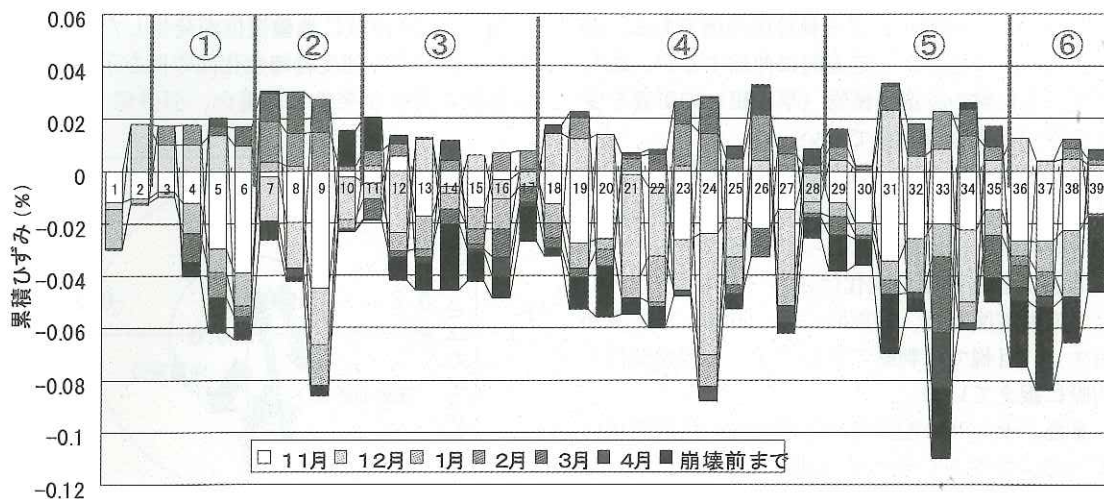
光ファイバセンサは、導線の結線や施工性を考慮してB-OTDR方式とした。これについては、先ほど長野の事例の一部を紹介しているが、計測開始から崩壊までの期間が短いため、ここでは、MDMの事例と同じ場所で行った検討事例を紹介する^{3), 4)}。

図-4に光ファイバセンサの配置図を示す。崩壊は2箇所発生しており、1箇所目はNo.22とNo.25の間で発生し、約25m³程度の小規模な表層崩壊である。このポイントでは前述の小崩壊が発生しており、遷移的に再度小規模の崩壊が発生することを予想していた箇所である。もう1箇所はセンサNo.31~35の上方で発生しており、崩壊規模は同様に約25m³程度であった。

図-5に各センサの計測開始から崩壊直前までの一ヶ月単位でのひずみの累積状況を整理した累積ひずみ分布棒図を示す。マイナスは圧縮ひずみである。図から、この斜面は全体的に変状しているのが確認できる。また、圧縮ひずみの累積が大きいことから、センサ部上方からの崩壊の可能性が高いことが予想される。さらに、ひずみ分布には凹凸が見られ、①No.3-6、②No.7-10、③No.11-17、④No.18-28、⑤No.29-35、⑥No.36-39とおおよそ6つのブロックが抽出できる。計測開始から約2ヶ月程度の累積でほぼ現状の傾向が表れ、崩壊規模の最大幅がここから推定できる。

ブロックをさらに細かく見れば、各センサは頂点を共有するので、土塊の移動方向 (ベクトル) が算出できるため、現地の地形状況などと合わせてより細分化ができる。

例えば崩壊が発生した④のブロックで見ると、No.19-20、No.21-22はほぼ下方、No.23-24は向かって右側、No.25-26は向かって左側に圧縮移動しておりさらに3分割できる。実際に、No.24



センサ NO
図-5 累積ひずみ分布棒図 (宮崎: B-OTDR)

と No.25 の間は谷地形であり、崩壊は No.23-24 を右側に押すように崩壊している。また、崩壊した 2 地点では圧縮方向のみではなく、引張方向のひずみも累積しており、上下の圧縮引張の繰り返しにより地盤のバランスが崩れたところで崩壊が発生していると考えられる。これを基にさらに分析して崩壊地点とのひずみの累積状況を比較すると、この斜面では今後、No.7-10 のポイントで崩壊が起こる可能性が高く、No.36-39 のポイントで引張挙動が確認された場合には注意が必要であることが予測できる。

4. 表層崩壊予測と斜面管理の考え方⁵⁾

対策工により崩壊を防止する場合、まずは現地調査により、崩壊しやすいと考えられる斜面を推定することになる。ただしこれは崩壊しやすいと推定される全範囲であり、本当に崩壊する可能性のある箇所を効率的に対策しているとは限らない。一方で、崩壊しやすいような箇所でもモニタリングし、「どこで」「どの程度」の崩壊が発生するかあるいは安定しているかを予測して、効率的に対策を行うことも考えられる。安定していれば当面は対策せず、モニタリングで日常点検を補完すればよい。崩壊規模が大きく、大規模災害につながると判断されるのであれば早急に対策工を検討する。小規模で例えば既設の防護柵で止まり許容できると判断されるものや対策工を実施するまでの準備期間については監視を続け、「いつ」の予測を行えばよい。どちらが経済的か効率的かは個別の事情に

より判断が左右されるが、上記の内容を踏まえて、モニタリングを活用した斜面の日常管理と異常監視での予測の考え方を整理すると以下の通りである。

4.1 日常計測 (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ひずみ分布棒図 (図-5 参照) や図-6、図-7 に示すようなひずみ軌跡図を用いて、変状の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して、規模や周辺状況を踏まえて対応を検討する。

センサには、温度変化や地盤の乾湿や植物 (草木根) の影響によりひずみが発生するため、表層崩壊の計測管理において、平常時のひずみ軌跡の特性を把握することも重要である。

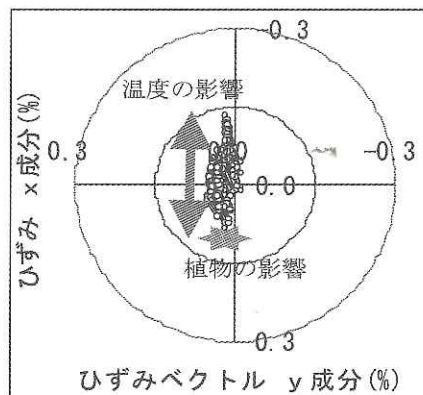


図-6 平常時のひずみ軌跡図の例

図-6は、平常時のひずみ軌跡図の例である。温度変化のみの場合、一定方向に伸縮するが、これ以外にも地盤の乾湿や植物（草木根）の影響を受けるのでその幅は一様でない。

また地盤変位では、温度変化等の影響による変化とは異なるひずみ軌跡が得られる。図-7に示す計測事例では、降雨によって崩壊に至るような顕著なひずみ速度の変化は認められなかったが、ひずみ軌跡図では、降雨時に同一方向へひずみが発生し、目視では判断できないような地盤変位を明瞭に捉えている。

また、センサの配置箇所と崩壊域の位置関係によって、ひずみの発生する形状が異なる。図-8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ある場合はひずみ速度は引張として捉え、上方にある場合は圧縮として捉えられ、崩壊域がどこにあるかが推定できる。ひずみ速度図をひずみ軌跡図に置き換えても同様の考え方ができる。

4.2 降雨時の異常監視（崩壊の事前予測）

降雨時の異常監視は、日常計測で崩壊域を確認した後の対応で、推定規模が小さく継続監視で対応する場合、対策工を実施するまでの期間の安全確保の場合、あるいは対策が困難な場合など管理上必要な場合に実施する。降雨時の斜面の異常監視の場合は、ひずみ速度により“管理しきい値”を設定して、図-9に示すような、管理円（通常域A、異常域B）を設けてひずみ速度の向きと大きさから崩壊を予測する。急激な変化が連続し崩壊が予想される場合は、周辺の安全確保に努めることになる。

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-9は、地盤の変位が収束する場合と変位が伸張した場合のひずみ速度の模式図である。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、常にひずみ速度が増大する。

図-10に平常時におけるひずみとひずみ速度の経時変化図の例を示す。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-11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図の例を示す。地盤に急激な変位が発生した場合、引張側（圧縮側）

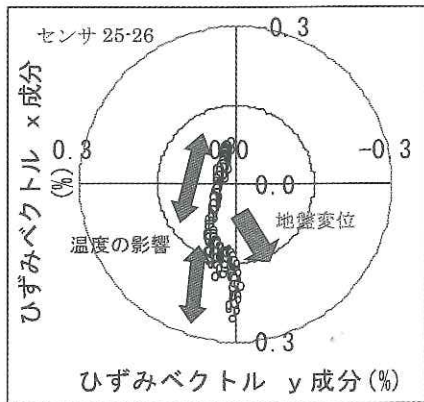


図-7 ひずみ軌跡図

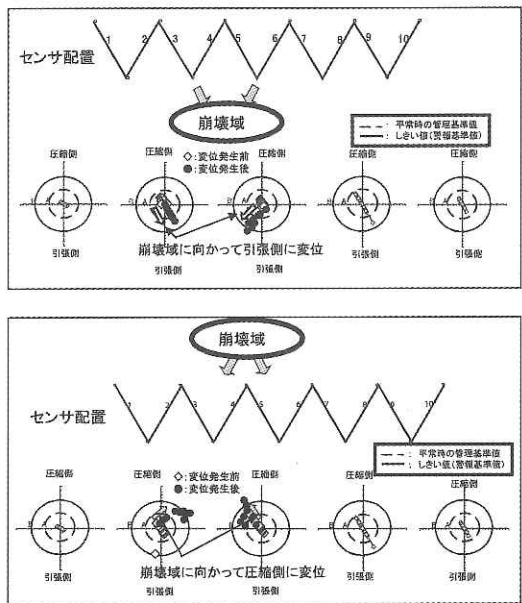


図-8 崩壊域が出現した場合の模式図

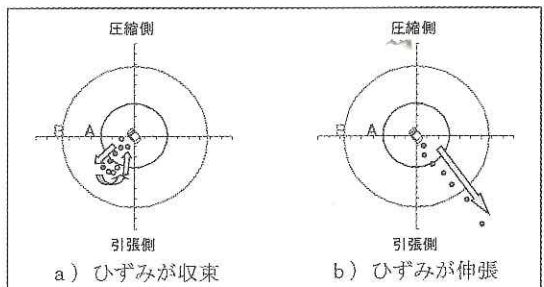


図-9 ひずみ速度図の見方

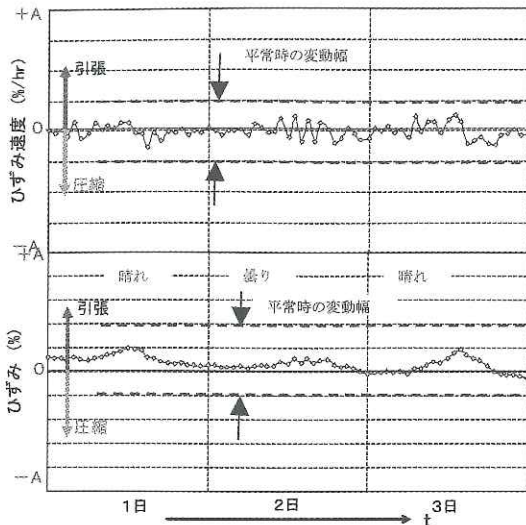


図-10 平常時のひずみの変化図の例

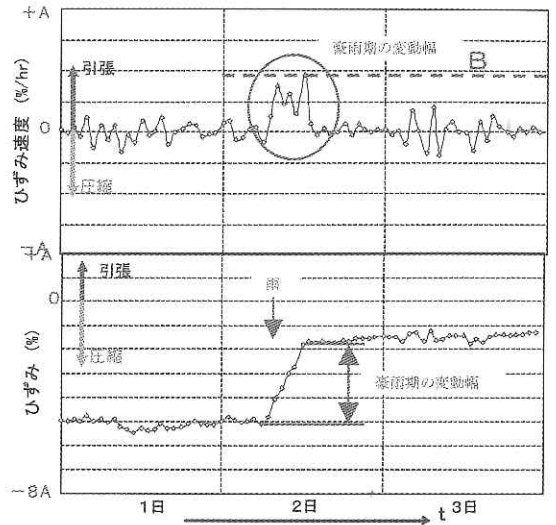


図-11 降雨時のひずみの変化図の例

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、監視斜面に適した“しきい値”の設定は難しいため、他の計測事例や既往の技術である地すべりの基準値を参考に設定を行い、降雨イベント毎の変位状況を把握して修正を行うのがよい。

6. おわりに

光ファイバセンサにより、これまで困難であった表層崩壊予測の考え方が整理することができ、マニュアルの作成や管理用標準ソフトウェアの開発を行っている。

一方、光ファイバセンサにはいろいろな種類があり、コスト面や設置・施工性、拡張性などそれぞれに得失がある。活用にあたっては、光ネットワークの有無、計測斜面の数や現地状況、経済性などを考慮して適切なものを慎重に選択する必

要がある。このため、今後これらの得失をすべて解決できる様なセンサ技術の開発が望まれる。

参考文献

- 1) 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, Vol.44 No.4, pp.44-49, 2002.4
- 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Ⅲ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Ⅲ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, pp.1-7, 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, pp.21-26, 地質と調査, 2005.9

加藤俊二*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所材料地盤研究グループ
土質チーム 研究員
Syunji KATO

小橋秀俊**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所材料地盤研究グループ
土質チーム 首席研究員, 工博
Hidetoshi KOHASHI

古谷充史***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所材料地盤研究グループ
土質チーム 交流研究員
Atsushi FURUYA