

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

STUDY ON THE MONITORING TECHNOLOGY FOR SLOPE FAILURE USING OPTICAL FIBER SENSOR

加藤俊二¹・小橋秀俊²・古谷充史³

Shunji KATO, Hidetoshi KOHASHI and Atsushi HURUYA

¹独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ土質チーム (〒305-8516 つくば市南原1番地6)

²独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ土質チーム (〒305-8516 つくば市南原1番地6)

³独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ土質チーム (〒305-8516 つくば市南原1番地6)

1. はじめに

土砂斜面の表層崩壊は、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。

従来の伸縮計等のセンサはほとんどが電気式で点的な計測であるため、広範囲に多点計測を行う場合には、結線が複雑であること、また落雷等の影響から維持運用面でも問題が生じることからあまり効率的ではない。

一方、光ファイバセンサは、それ自体がセンサと伝送の2つの機能を有すること、線的・面的に計測が可能であること、落雷による電磁誘導を受けないといった特徴があり、表層崩壊のモニタリングに適した技術と考えられる。

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ている。¹⁾本報ではその成果を交えながら斜面管理における運用や課題について考察することとする。

2. 光ファイバセンサの計測原理と適用性

光ファイバセンサには様々な計測原理があるが、ここでは、上記共同研究で検討している3つの計測原理(①B-OTDR方式、②FBG方式、③MDM方式)を用いたシステムの適用性について紹介する。²⁾

①B-OTDR方式

この方式は、光パルスが光ファイバ内を通過するときには発生するブリルアン後方散乱光を利用してひずみ量を

計測するものである。図-1に示すように、光ファイバにひずみが発生すると、ひずみ発生域におけるブリルアン後方散乱光の波長(周波数)分布がシフトする性質があり、このシフト量からひずみ量を求めるものである。またひずみ発生位置は、光パルスが光ファイバに入射してから受信部で後方散乱光が検出されるまでの時間差から発生位置までの距離を求めて特定することができる。この方式は1ラインで約20kmのひずみ分布を連続的に計測できることが特徴であり、広範囲での計測に適している。

一方で、計測器が高価であるため、イニシャルコストの面から小規模な斜面での導入には検討が必要である。また、1ライン当たり計測時間が10分程度必要であるため、リアルタイム性が若干劣るものである。

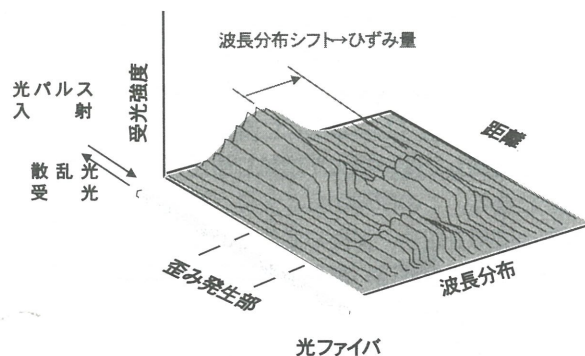


図-1 B-OTDR方式の計測原理

②FBG方式

光ファイバのコアの一部に紫外線等を照射すると、その部分の屈折率が高くなる。これを一定の間隔で形成した回折格子(グレーティング)を設け、回折格子により反射する光(Bragg波)の波長の変化を利用してひずみを計測するものである。図-2に示すように光ファイバ

にひずみが発生すると、回折格子の格子間隔 (Λ) が変化するため、それに伴い反射する Bragg 波の波長 (λ_B) も変化する。この波長の変化量からひずみ量を求めるものである。またひずみ発生位置は、従来型と同様にセンサ部(回折格子)の固定位置を確認することで特定する。この方式は、一言でいうと光式ひずみゲージであるが、1ラインに8個から10個のセンサを配置できるため、従来型と比べて結線の複雑さが少ない。また、計測精度が高いことと計測時間が短いことから、リアルタイムでの詳細モニタリングに適している。

一方で、広域での多点計測の場合には、計測ラインが増えるために線量の面で複雑になり、配置面での検討が必要である。

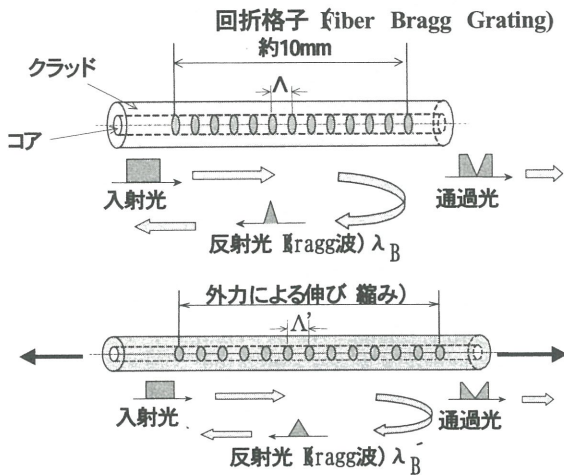


図-2 FBG方式の計測原理

③MDM方式

この方式は、光ファイバの屈曲率と透過光強度に一定の関係があることを利用している。図-3に示すように、ループ径 ϕ の円柱に予め光ファイバを長さ L だけ巻き付けておく。変位が発生すると円柱が回転してさらに巻付けられるかあるいは解放することにより、巻付き長が $(L + \Delta L)$ あるいは $(L - \Delta L)$ に変化する。このとき巻付き長に比例して曲げ損失が増減し透過光強度が増減することになる。この原理から、変位(巻付け量)と透過光強度の関係性を求め、斜面の変位を計測するものである。また変位発生位置は、従来型と同様にセンサ部(巻付け部)の固定位置で特定する。センサの方式が従来型と同様に1対1の関係にあるため、広範囲での多点計測の場合、結線の面で複雑となる。しかしながら、計測器が安価であるため、結線の複雑さを除けば、比較的導入しやすいシステムである。

表-1に、これら3つの方式の特徴を簡単に整理したものを示す。これは、あくまで現状の技術レベルでのものであり、今後の技術の進歩が考えられるので、留意が必要である。また、これら3つの他にも、いろいろな計測原理のセンサがあるので、その特徴を十分理解した上

で、目的と現地条件に合ったものを選択する必要がある。

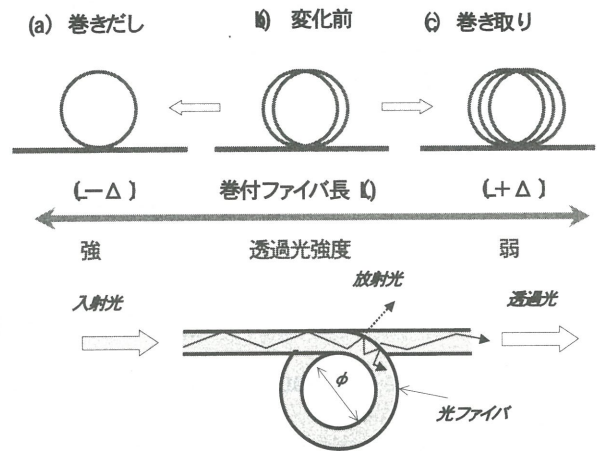


図-3 MDM方式の計測原理

表-1 各種計測原理の適用性

		B-OTDR	FBG	MDM
計測エリア	広	○	△	△
	狭	△	○	○
変状の程度	大	○	○	○
	小	○	○	○
変状位置		○	△	△
リアルタイム性		△	○	○

3. モニタリングによる表層崩壊の予測の可能性

土砂崩壊による災害を防止するためには、「①いつ」、「②どこで」、「③どの程度」の崩壊が発生するのかが知り(予知し)、その結果に基づいて適切な対応を取ることが必要であるが、現状では予知することは非常に困難である。このため、この①~③をいかに効率的に予測していくかが重要であり、以下に光ファイバセンサでのモニタリング結果をもとに表層崩壊の①~③の予測の可能性について述べる。

(1) 「いつ」の予測

「いつ」は、土砂崩壊の予測の世界では最も難しい課題である。防災上の体制により、何日前、何時間前・・・といった要求がつかまとうことになる。例えば、道路管理の場合には、連続雨量による事前通行規制を実施しており、当然のことながら変状のモニタリングにより崩壊が予測された場合には通行規制を実施することになる。規制を実施するためには道路交通状況を確認した上で実施するため、規制を実施する個所までの移動時間を考慮すると、最低1時間前には崩壊を予測できなければならない。これまでに実際に表層崩壊の変状を捉えた事例がないため、およそ〇時間後とは明確にできなかったが、

筆者らが実施しているフィールド実験において、いくつかの小崩壊を捉えることができたので、その一例を示しながら、「いつ」の予測の可能性について述べる。³⁾

写真-1に現地の全景を示す。現地は、幅100m×高さ50m程度で砂泥互層の流れ盤の斜面で勾配は約40度である。また、植生は竹が群生している。センサはMDM方式で、図-4に示すように現地は尾根と谷が連続していることから、センサの設置位置を谷に沿って6測線とし、1測線当たり10mピッチで5点設置した。崩壊の規模は20m³程度で、3測線目の中央部側方で発生した。なお、現地は連続雨量170mmで事前通行規制を行っている。図-5に3測線目における計測結果を示す。顕著な崩壊現象が現れてから崩壊に至るまでに2時間程度であった。崩壊の規模、土質、植生等の条件により若干の変動はあると考えるが、急激な変状が1時間以降も継続しているようであれば少なくとも約1時間後（崩壊規模が大きくなればもう少し長くなると考えられる）には土砂流出があると予測できると考える。降雨に伴いセンサNO.12に微小な変状が発生しているが、現状で崩壊を予測するには情報としては不十分である。

斜面崩壊をモニタリングする場合、崩壊予測のために管理者よりしきい値の設定が求められるが、地すべりのように源頭部を跨ぐようにセンサを設置できればしきい値を設定した管理もしやすいが、崩壊の源頭部が特定しにくい表層崩壊の場合には容易ではない。

事例の崩壊は斜面の中央部で計測線の側方で発生したものである。しかしながら、表層崩壊しやすい斜面では、崩壊地点の上部や下部でも変状が発生しているのがわかる。このため、ピンポイントで源頭部に設置できない表層崩壊の場合には、当面はしきい値を設けず各センサの日常の計測データから日常変動範囲および変状の勾配を把握し、まずはそれをはずれるような変状が認められ、かつ降雨が続くようであれば崩壊の危険性があると判断するのが適切と考える。

(2) 「どこで」、「どの程度」の予測

近い将来、対策工により崩壊を防止できるのであれば、まずは、「どこで」と「どの程度」が大まかに予測できれば十分である。これはモニタリングをしなくとも現地調査により、崩壊しやすいと考えられる斜面箇所やその規模はある程度推定することが可能である（ただし概略の最大値）。しかし、全ての斜面を同時に対策することはできないので、優先順位をつける必要があり、残った斜面ではモニタリング等を行い災害の発生に備える必要がある。そして複数の斜面を効率的にモニタリングし、まずは「どこで」「どの程度」の崩壊が発生する方向に向かっているのかを予測することが重要である。崩壊規模が大きく、大規模災害につながると判断されるものであれば早急に対策工を検討して手当をし、小規模で例えば既設の防護柵で止まるような許容できると判断されるもの

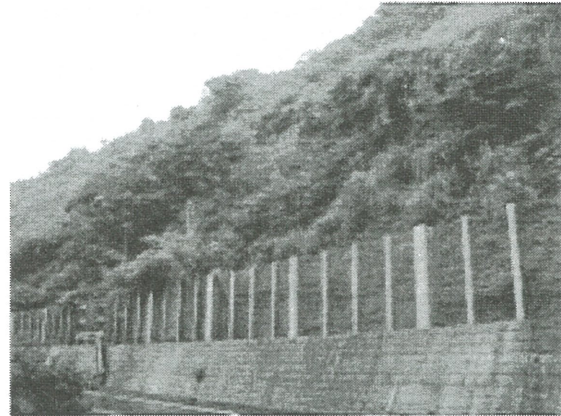


写真-1 現地全景

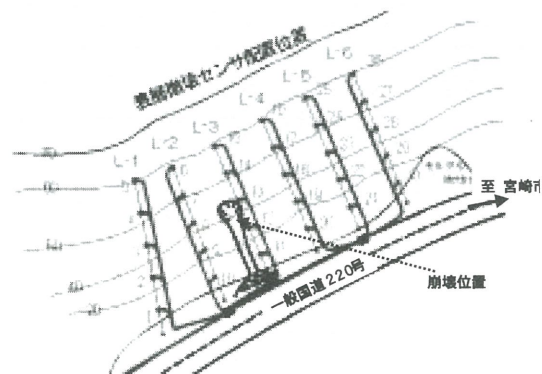


図-4 光ファイバセンサの設置状況と崩壊位置

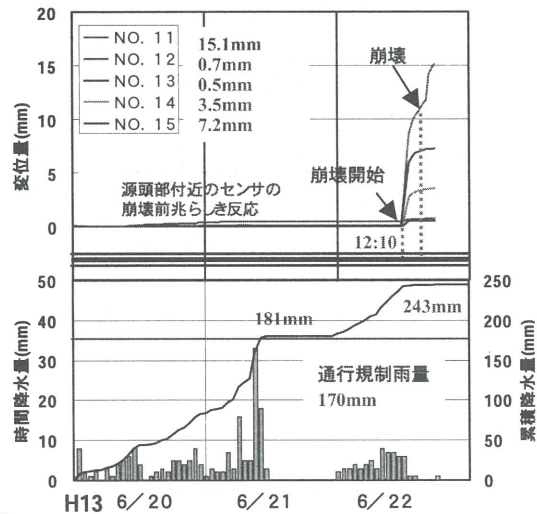


図-5 表層崩壊の計測結果の一例

であれば監視を続けて行けばよい。前述の「いつ」の予測はその次の話である。

以下に、筆者らの実斜面でのモニタリング結果の一例を示しながら、「どこで」「どの程度」の予測の可能性について述べる。⁴⁾

現地は、先ほどの事例と同じ場所である。光ファイバセンサはB-OTDR方式で、図-6に示すようにW字に設置

し、計測区間を 39 区間設けて、向かって左側からナンバリングした。センサの設置位置は、現地は斜面下部に落石防護柵がありかつ吹付コンクリートにより保護されているため、下方での崩壊は小規模崩壊で回避可能であると判断されることから、センサ位置より上方に源頭部があるような中規模以上の崩壊を捕捉できるように考慮して設置している。また、図-7 に示すように、センサ長は 5m で開口部は 60 度を基本とした。

崩壊は 2 個所で発生しており、1 個所目は 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個所である。もう 1 個所はセンサ 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-8 に計測開始から崩壊直前までのひずみの累積状況を示す。マイナスは圧縮ひずみである。また、図-9 に現地の降水状況を示す。ひずみ分布を見ると、まず降雨の大小に関わらず、この斜面は全体的に変状しているのが確認できる。また、全体的に圧縮ひずみの累計が大きいことから、センサ部上方からの崩壊の可能性が高いこ

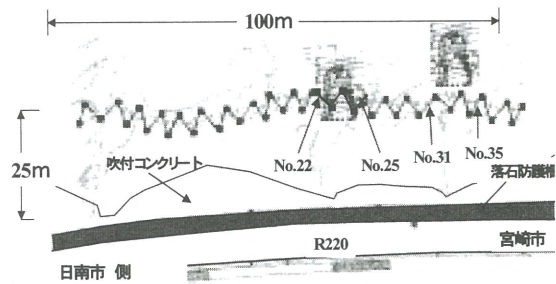


図-6 光ファイバセンサの設置概要と崩壊位置

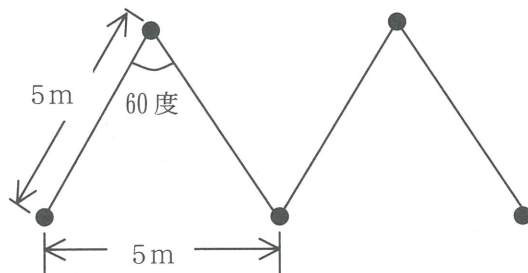


図-7 センサの設置パターン

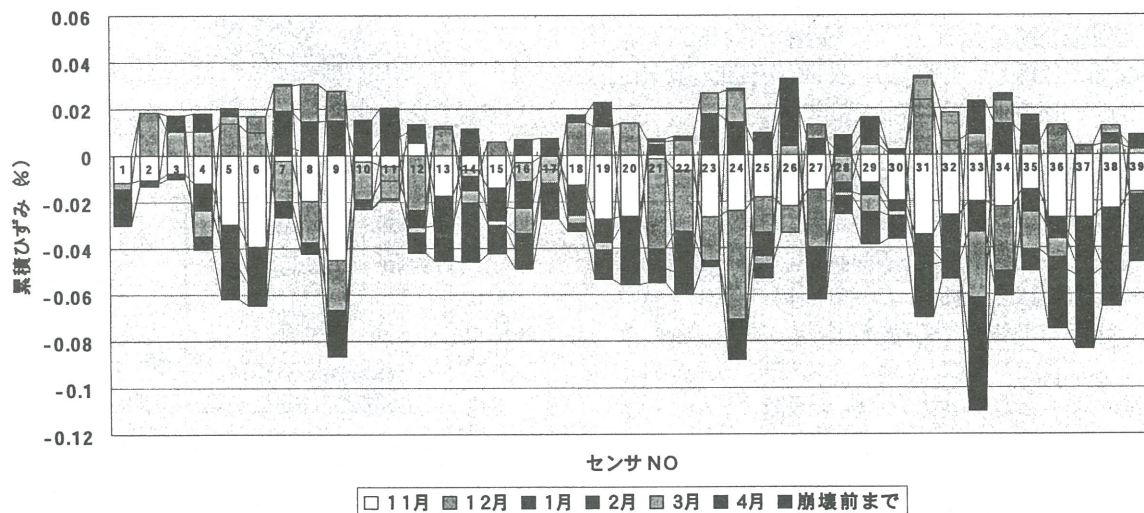


図-8 累積ひずみの分布

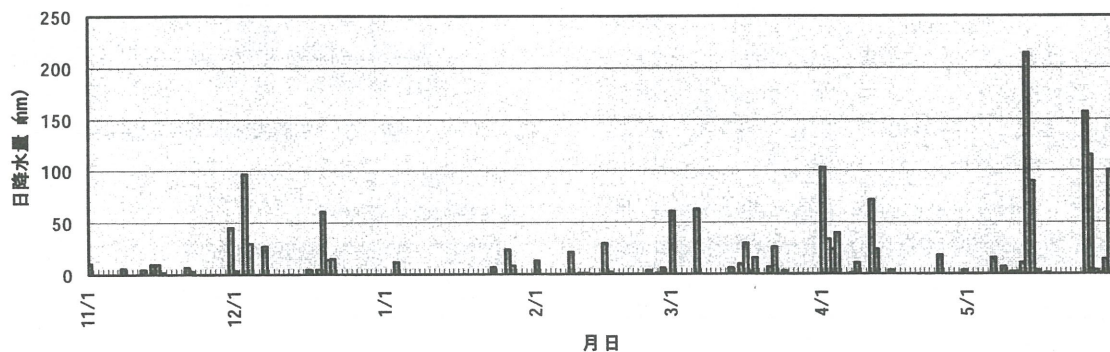


図-9 現地の降水状況

とが予想される。さらに、ひずみ分布には明確に凹凸が見られ、これは計測開始から約2ヶ月程度の累積でほぼ現状の傾向が表れている。この凹凸の分布により、①NO. 3-6、②NO. 7-10、③NO. 11-16、④NO. 19-26、⑤NO. 30-35、⑥NO. 36-39とおおよそ6つのブロックが抽出できる。そして想定される崩壊規模の最大値は、このブロックの持つ幅で推定することができる。さらに細かく見れば、各センサは頂点を共有するので、ベクトルが算出できる。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。そして注目すべき点として、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、上下の圧縮引張の累積により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をすると、この斜面では今後、NO. 3-6あるいはNO. 7-10のポイントで崩壊が起こる可能性が高いと予測される。このように、センサを連続的に設置することで、地形とひずみ分布を基に「どこで」「どの程度」を予測することが可能であると考えられる。

4. モニタリングによる管理・運用上の課題

表層崩壊の予測において、光ファイバセンサは有効であることは、多くの研究成果からわかってきている。一方で、光ファイバ等のセンサを用いた斜面崩壊の予測を、実際の斜面管理で運用する場合、その効率性を考慮すると解決すべき課題が多々残されている。筆者らは道路管理を目的として、モニタリングシステムの研究を行っていることから、ここでは道路管理を前提として述べることにする。

(1) 設置個所の選定

斜面崩壊をモニタリングするに当たり、一番問題となるのがどの斜面に設置するかである。道路管理においては、防災点検に基づき「要対策」、「カルテ対応」、「対策不要」とランク付けして斜面を管理している。要対策個所は今後対策を実施すべき個所であり、カルテ対応個所は、日常的に斜面の変状に注意しながらカルテ管理をするものである。予算等の問題から全ての要対策個所を対策できるわけではないので、当面はモニタリングの対象となることも考えられる。一方で、カルテ対応個所やそれ以外の個所からも崩壊は発生しており、これら全ての斜面をモニタリングすることも考えられるが、現在の設置・運用コストでは現実的ではない。このため、まずは効率的にモニタリングする個所を選定する方法が必要である。

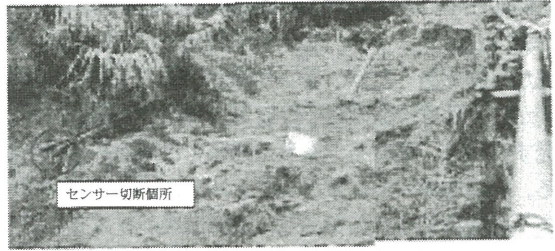


写真-2 崩壊個所の状況 (NO. 22-23 地点)

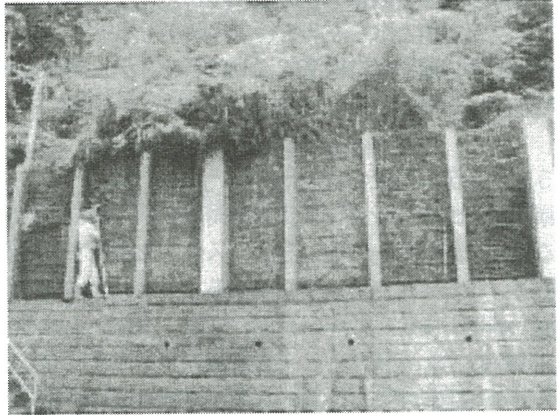


写真-3 落石防護柵に留まった崩土

(2) センサの設置位置と設置密度

線的・面的にセンサを設置する場合、どこまでの調査が必要かである。事例で示した斜面の規模であれば、前述したように連続的に設置すればおそらく厳密な調査は不要と考える。一方で、崩土を待受けられるポケットがないところでは、小さな崩壊でも土砂流出の可能性は高い。さらに斜面が高い場合には、さらに上方からの崩壊の可能性も考慮しなければならない。このため、表層崩壊の場合には「どこから」「どの程度」の規模の崩壊を対象としてモニタリングするのかを考えて設置する必要があり、技術者にその判断が求められる。

(3) 運用・判断方法

3. で述べたように、大まかではあるが表層崩壊の予測ができる可能性は確認された。一方で、実際に管理する側は、どの状態であれば対策するのか、モニタリングを継続するのか判断しなければならない。また、モニタリングを継続する場合には、道路管理であれば現行の事前通行規制の雨量のように、変状状況に応じた管理体制とリンクしたものとしなければならない。とくに、事前通行規制区間でモニタリングを行う場合には、雨量の判断指標がないため、変状の状況のみから何らかの判断をすることが必要となる。このため、管理者(利用者)と連携して、適切な運用方法を構築する必要がある。

(4) コスト低減

光ファイバセンサでモニタリングをするに当たり、

最も問題とされるのがコスト面である。現在、いろいろな計測方式の光ファイバセンサが開発されているが、計測器が高価であったり、センサ部分が高かったり、設置手間から人件費等が高かったりと、何らかの問題がある。開発する側は、測れるシステム開発を目的とする傾向がある。斜面崩壊のモニタリングシステムは、土砂崩壊のリスクを残存するものであり、土砂崩壊のリスクを限りなくゼロに近づける対策工と影で競争しているのである。限られた予算と自然環境の保全を考えると、将来はモニタリングが主流とならざるを得ない時がくると考える。このため、開発者は経済的に測れるシステム開発を目的にしていかなければならない。

(5) システム系統の統一化

様々なモニタリングシステムが開発されており、計測する対象に応じて、いろいろなシステムを選択する必要がある。しかしながら、斜面崩壊モニタリングにおける計測対象は、変位、傾斜、温度、雨量、水位、土壌水分量、間隙水圧等、状況に応じて複数選択することになる。

(4) とも連動するが、新たな計測対象を追加することで、別途システム構築が必要となるのであれば、不経済である。原理上難しいものもあるが、できる限り同一システムでできるように統一されることが望ましい。

5. おわりに

これまでの検討により、斜面モニタリングにおける光ファイバセンサの適用性と、変状モニタリングによる表層崩壊予測の可能性について確認された。一方で、システム運用に当たっては、行政的な課題と技術的な課題が複合しており、これらの課題を1つ1つ解決していく必要がある。このためには、今後もデータを蓄積していくとともに、産官の連携により実運用を目指したシステムの構築を行っていく必要がある。

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の導入・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) 加藤俊二・三木博史・恒岡伸幸・田中衛・小川鉄平: 光ファイバセンサを活用した表層崩壊モニタリングシステムの構築に関する取り組み, 豪雨時の斜面崩壊のメカニズムと予測に関する論文集, 地盤工学会四国支部, 2001.
- 3) 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.
- 4) 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.

(2004.6.18 受付)