

◆特集：道路斜面崩壊のリスクマネジメント技術◆

光ファイバセンサによる斜面崩壊モニタリング手法

加藤俊二* 恒岡伸幸** 小橋秀俊*** 室山拓生****

1. はじめに

日本の国土の約7割が山岳地である。このため、私たちの生活基盤を形成する道路の大半が山々に接するかたちで建設され、平野部を除く道路には自然の斜面や切土のり面（以下、道路斜面と呼ぶ）などの多くの斜面が存在する。これら道路斜面では、梅雨や秋雨時の長雨や台風などにより、周辺の地形や地質・土質条件によっては土砂崩壊等が発生し、場合によっては道路交通に支障を来すような大きな災害が発生することがある。降雨による崩壊の可能性があると考えられている個所の道路斜面は、順次対策工が実施されてきている。しかしながら、防災対策が必要と考えられる個所、当面日常の監視等により管理していく個所は、依然として10万個所以上存在しているという状況にある。さらに、近年の災害の傾向では、集中豪雨や長期的な降雨の影響により、このような個所以外での災害も多く見られ、潜在的な崩壊危険個所も多数存在していると考えられる。

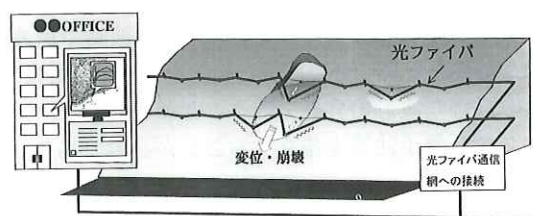
限られた財源、管理体制の下では、それらの個所すべてに抜本的な対策工を早期に実施することはできないため、これらの危険個所の崩壊による道路災害から、道路利用者の安全を確保することが、道路管理上の課題となっている。

2. 斜面崩壊モニタリングの現状

道路利用者の安全性を確保するため、連続雨量（連続的に降った雨の総量）による事前通行規制や、斜面変状の検知により斜面崩壊の監視（モニタリング）を実施している。現在、斜面崩壊モニタリングに使用されている伸縮計や傾斜計等のセンサ（以下、従来型センサと呼ぶ）は、ほとんどが電気式であり、落雷による電磁誘導の影響を受けて計測期間中に故障する可能性が高く、実際に斜面の安全管理に支障を来している例が見られる。

また、センサを設置する際には、斜面の調査を行った上で変状の発生地点をある程度予測して設置するが、点・線的な設置となるために計測範囲の連続性が低く、また実際の変状は必ずしも予測位置に発生するとは限らないことから、斜面の変状を捉えにくいといった問題もある。

一方、光ファイバセンサ（以下、光FSと呼ぶ）は、センサ部には電氣を利用しないので電磁誘導の影響を受けない。また、線的・面的な設置が可能で計測範囲の連続性が高くなり、狭～広域のエリアを効率的にモニタリングができるようになる。さらに、国土交通省で整備している国道沿いの光ファイバ通信網を活用することにより、遠隔地にある事務所・出張所等から複数の斜面を一括してモニタリングすることも可能となる（図-1）。このように、光FSを利用することにより、従来型センサの弱点を解消し、さらに効率的なモニタリングが期待されるものである。



光ファイバ通信網を活用した斜面変状リアルタイムモニタリングの実施

図-1 光FS斜面モニタリングシステムのイメージ

3. 光FSによる斜面崩壊モニタリング

光FSによる斜面崩壊モニタリングシステムの開発は、平成12年3月より民間14社との共同研究により、全国6個所のフィールド試験で、光FSの適用性を検討するとともに、設置方法やセンサの改良、実用化に向けた運用方法の検討などを実施してきた^{1)~4)}。その結果、2個所で崩壊を検知することができ、崩壊予測につながる貴重なデータを得ることができた。ここでは、そのうちの1事

例を用いて、斜面崩壊予測による通行規制の可能性について述べる。なお、ここで示す事例は、既に本誌において報告しているが¹⁾、その後別の個所で捉えた崩壊の計測結果⁴⁾等を検討することにより、前報では不明確であった表層崩壊の前兆変位の考え方が明らかとなったため、今回も同じ事例でそれを示すこととする。

図-2に光FSの設置図を、図-3に斜面崩壊の計測結果を示す。降雨による斜面表層の変状は、植生や土質・地質等の斜面特性によりその程度は異なるが、降雨を経験する毎に緩やかに変位していき、図-3に示すように崩壊の約2～3時間程度前に急激に変化して、崩壊に至ることがわかった。

この前兆時間は、計測データでの変位の急増確認により、現地確認および通行規制の実施が可能である時間と考えられる。このため、本事例のような連続雨量での事前通行規制に入る前や規制解除後の見逃し災害に対しては、モニタリングを併用することより対応できるものと考えられる。

また、斜面崩壊の発生位置は、左から3測線目の中央部のセンサNo.12およびNo.13の側方であるが、測線内の全てのセンサ部で同時に変位が急増しているのがわかる。このように斜面崩壊の前兆変状は、その大きさは異なるが崩壊位置の上・下部近傍でも同時に発生するため、センサの設置については、斜面に落石防護策などの待ち受け対策工が施されている場合には、ポケット部の容量等から許容崩壊規模を設定して下方のセンサを省略し、センサ上部の崩壊や許容規模以上の崩壊に的を絞った合理的なモニタリングが可能であると考えられる。

4. 道路斜面管理における光FSの役割

①事前通行規制の補完

3. でも述べたように、斜面変状のモニタリングは、事前通行規制を補完し、見逃し災害を軽減するために利用することが考えられる。

前兆現象の変位量を事前通行規制の管理基準に

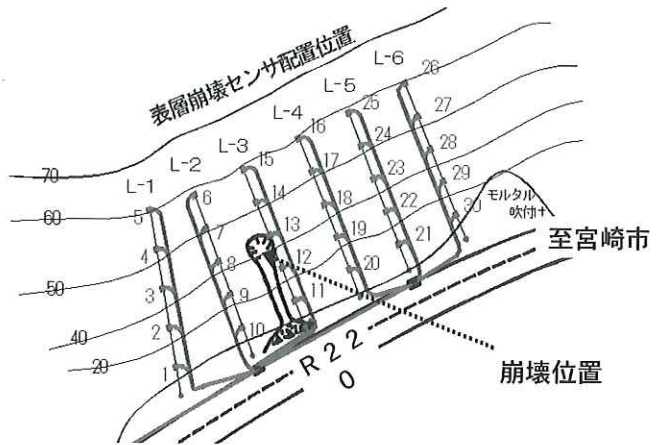


図-2 光FSの設置図

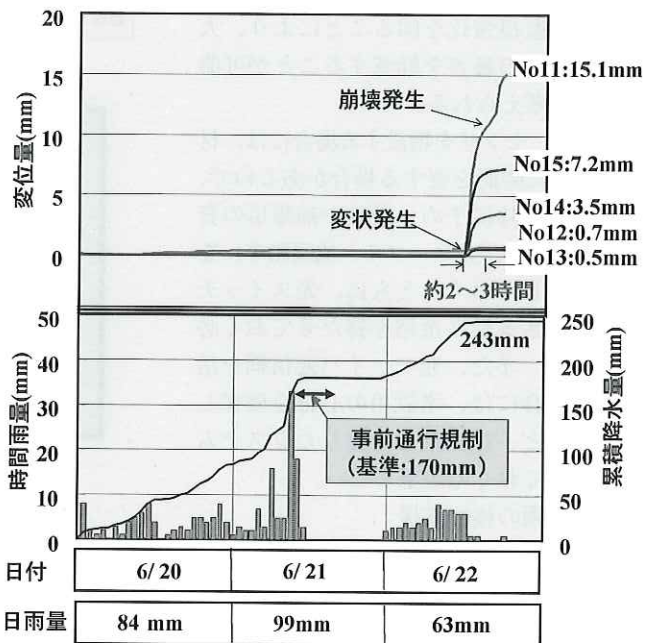


図-3 光FSによる斜面崩壊計測事例

用いるためには、無降雨時や小降雨時のその地域における日常変動や変位の傾向を知る必要がある。このためには、計測実績の蓄積が必要であり、現段階では降雨時に、計測データに前兆変位と考えられる急激な変位増加を確認した際には、直ちに現地確認および通行規制を実施するのがよい。

②異常値確認後の現地支援

計測データは道路パトロールや目視点検の補完機能も持つ。異常値を確認した場合には、CCTV画像による現地状況の確認と併せて、道路パトロールにおいて現地確認等の迅速な対応が可能と

なる。特に崩壊が発生し、崩土が道路に到達した場合でも、道路情報板で崩壊情報を流すとともに通行止め標識等を迅速に設置することができるため、二次災害（崩土への通行車両の突入等）の軽減あるいは防止することが可能であると考えられる。

③大規模崩壊の被害軽減あるいは防止支援

大規模崩壊は、長期の通行止めを伴うなど社会的影響が大きく、その前兆の早期発見が重要であり、これにより早期対策を実施し大規模崩壊を未然に防止できると考えられる。また、崩壊抑止が困難な場合や、大規模崩壊につながる可能性がある小規模崩壊を捕捉した場合には、現地調査に基づきセンサを増設して監視強化を図ることにより、大規模崩壊時の被害を軽減することが可能であると考えられる。

ただし、センサを増設する場合には、材料の調達に時間を要する場合があるので、初期の設置時に予め、増設や補修用の資材（固定治具、光ケーブル、成端箱等）をストックしておくとともに、光スイッチのチャンネル数に余裕を持たせておく必要がある。また、光ファイバ通信網を活用する場合には、増設用の心線を確保しておくなど、拡張性を考慮したシステム設計をしておくのが望ましい。

④防災計画の検討支援

ハード対策の優先度・実施時期の判断に、計測結果を用いることができる。路線全体の斜面を線的に監視し、降雨による変位の増加傾向が大きく見られる個所から適宜対策工や監視強化の検討を実施するなど、対策実施計画の調整が可能となる。

また、計測により変状を確認した個所に、CCTVや道路情報板等を整備するといった、防災の観点からの道路管理施設の配置検討をより合理的に行うことが可能となる。

5. 光FSによる斜面崩壊モニタリングの導入・運用の要点

3. および4. で、光FSによるモニタリングの適用性およびその役割について述べてきた。ここ

では、実際にモニタリングシステムを導入・運用していく際の要点について述べることにする。

5.1 光FSによる斜面崩壊モニタリングシステムの導入

図-4に光FS斜面崩壊モニタリングシステムの導入から運用までの流れを示す。路線・区間や個別斜面のモニタリングに関わらず、効率的かつ適正に運用していくためには、システム設計が重要であり、図中に示す①～⑤の流れに沿ってそのポイントを示す。

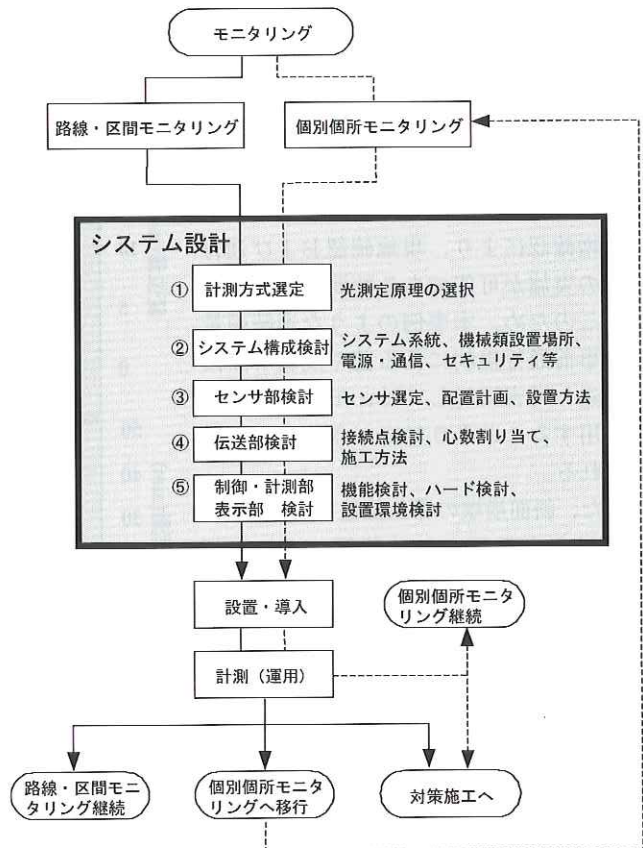


図-4 光FS斜面崩壊モニタリングシステム導入・運用の流れ

(1) 計測方式の選定

光FSの計測方式は数種類あり、計測目的や現地状況に応じた計測方式を選定する必要がある。

表-1に、現在の光センシング技術の状況から、一般的と思われる適用性を示す。これについては、センサ構造の工夫あるいは配置方法・固定方法の工夫と今後の技術の進展が考えられるので留意が必要である。

表-1 計測方式(※6)の適用性(計測性能)

	計測エリア		変状の程度		リアルタイム性	変状位置
	広	狭	大	小		
BOTDR	○	△(※1)	○	○	△(※2)	○
FBG	△(※3)	○	○	○	○	△(※4)
MDM	△(※5)	○	○	○	○	△(※4)

○：適、△：要検討

(※1) 計測器が高価なため、適切な計測エリアの検討が必要である。

(※2) 計測器による分析時間が最低でも1測線当り5～10分程度必要であるため、崩壊速度が速いと微少な変状過程を捉えきれない場合がある。

(※3) 光ファイバケーブル1ラインに取り付け可能なセンサ数は最多で12個までのため、広範囲(多点計測)になる場合、線量の面で煩雑になる。

(※4) センサを設置した位置より、変状発生位置を確認する。

(※5) 計測器1台に対するセンサ数は16個であるため、広範囲(多点計測)となる場合、結線の面で煩雑になる

(※6) 光ファイバセンサの計測方式には、表の他にも変位計測用のOTDR方式や破断検知用の透過光計測、温度計測用のラマン散乱光方式があり、使用目的に応じて適宜選択する。

(2) システム構成の検討

図-5に示すように、システム構成は、主にセンサ部、伝送部、制御・計測部、表示部からなる。

センサ部は道路管理用光ファイバ通信網に接続できる場合には、現地に計測器を置く必要が無く、最寄りの事務所・出張所等に設置することができる。一方、光ファイバ通信網に接続できない場合には、現地に計測局舎を設けて、そこに計測器を設置し、計測データは電話回線により伝送することとなる。この際には、電源の確保や計測局舎のセキュリティ等の検討が必要となる。

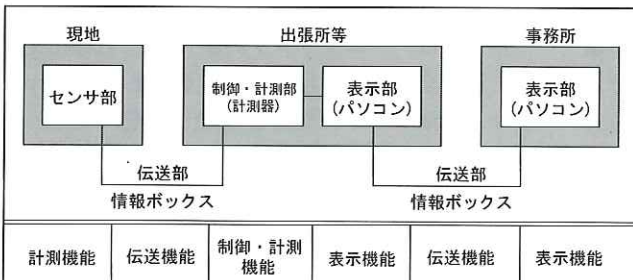


図-5 システム構成の概念図

(3) センサ部の検討

① センサの種類

光FSの種類には、斜面変位計、亀裂変位計、水位計など数種類ある。計測対象により、必要とする計測項目や計測レンジが定まるので、設置する斜面の地盤工学的な特性とセンサの特徴・留意点を踏まえて選択する必要がある。

② センサ設計

センサ設計では、センサの技術的条件(固定長や温度補正など)、施工上の制約(作業性や固定の可否)や動植物や落石などの現地状況、気象条件(積雪等)等を考慮して、センサの保護や布設方法を決定する必要がある。

③ センサ配置計画

光FSは、線的・面的に配置できることが大きな特徴であり、この特徴を活かすために以下の点に留意して検討するとともにセンサ配置と密接な関連を持つ設置方法や保護策も検討する必要がある。

・計測区間長(ライン長)

防災カルテ等を参考に計測対象斜面を決める。一方、計測条件(伝送路やセンサ部での光の損失)から計測区間長(ライン長)に制限があるため、計測可能なライン長を考慮しつつ、配置計画を検討する必要がある。

・センサ配置位置

センサ配置は、斜面条件(災害形態の想定(防災カルテ等を参照)、災害の素因・誘因と計測すべき項目、道路との位置関係、既往対策工、地元の立入等)を考慮して検討する必要がある。

・センサ固定間隔(その1:災害特性の観点)

固定間隔は、変状が捕捉できるように、前述の斜面条件を総合的に判断して決定し、想定規模以下の小崩壊に対しては、検知の必要性についても検討するのがよい。

・センサ固定間隔(その2:計測条件の観点)

センサ固定間隔(計測スパン長)と計測区間長(ライン長)および計測器の最大サンプリング数により計測ポイント数を決定する。通常、計測スパン長=空間分解能(異常位置の特定精度)である。

また、光が減衰するタイプのセンサでは、計測可能なセンサ数が比較的少ないので、効率的な固定間隔の検討が必要で

ある。

・ライン分割

光FSでは、その特徴から1ライン（一筆書き）での計測が可能であるが、断線リスクの軽減のため、適宜ラインを分割したり、ループ接続にして両端から計測したりする。計測ライン数と計測時間は相反する関係にあるため、最適な設定を検討する必要がある。また、道路管理用光ファイバ通信網を利用する場合、計測器（あるいはライン切替器）の設置位置によっては、伝送路の占用心線数が制約条件になる場合があり、調整が必要である。

(4) 伝送部の検討

光FSは、センサ先端部と計測器が10km程度離れていても計測が可能であり、情報ボックスを伝送部として利用し、事務所・出張所等で計測できる。

光ファイバ通信網が整備されていない道路は、光ファイバケーブルを出張所等まで配線するか、電話回線を伝送部として利用することができる。ただし、電話回線を利用する場合には、計測個所に計測器が必要になり、計測局舎・電源等を確保する必要がある。

光ファイバ通信網の利用方法は、現地状況や占用心数等を考慮して決定する。接続する場合は、事前に伝送路の品質試験を行い、計測可能な範囲の損失量であるか確認し、試験の結果次第では、計測器設置点を見直す必要がある。

(5) 制御・計測部、表示部の検討

制御・計測部は計測器、周辺機器（光スイッチ、通信装置等）、制御およびデータ処理を行うパソコンから構成される。パソコンに表示部のソフトが一体となって組み込まれることが多い。

制御機器・計測器の設置場所は、現地局舎の場合と、事務所・出張所等の場合がある。それぞれの計測条件や周辺環境に応じてシステム設計を行う必要がある。

一方、表示部では、常時、計測データを自動監視し、異常が生じた時には必要に応じて警報を自動発信する。現在の斜面崩壊予知・予測技術レベルでは、地すべり以外では計測による管理基準値

が確立していないため、管理基準値を定めずに運用する場合も多いが、将来的に管理基準を定める場合を想定しておくのがよい。

5.2 光FSによる斜面崩壊モニタリングシステムの運用

図-6に管理・運用のフローチャートを示す。斜面崩壊モニタリングシステムの運用は、主に日常管理時と降雨時の2つに分かれる。以下に、それぞれの運用と監視強化の考え方について述べる。

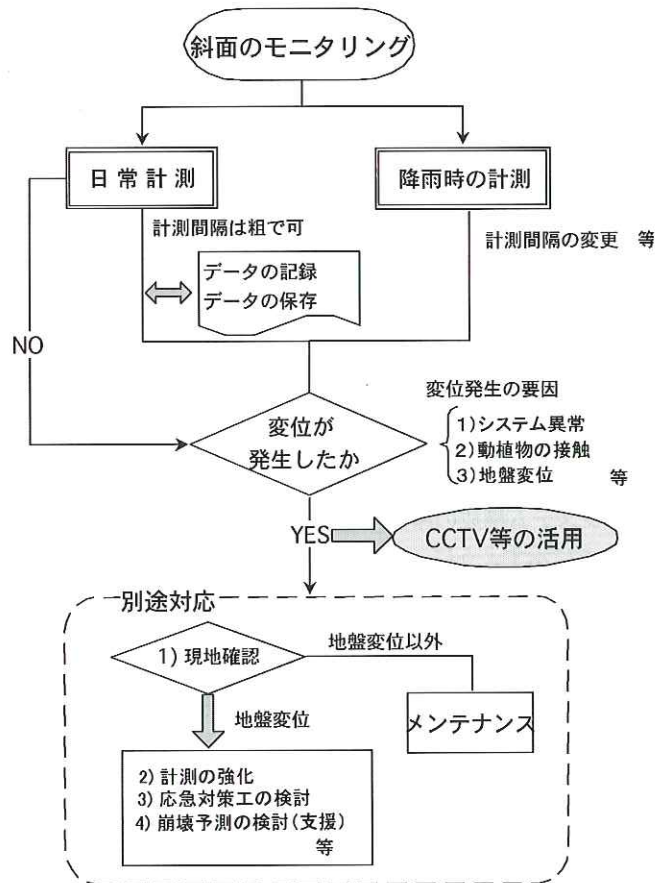


図-6 管理・運用のフローチャート

(1) 日常管理での運用

平常時は、モニタリングの動作確認を適宜実施して日常変位範囲を把握する必要がある。これにより、計測データに異常を確認した際に地盤の変位によるものか否かを判断することができる。変位の種類としては①システム異常によるもの、②動植物の接触によるもの、③地盤の変位によるもの等があるが、地盤の変位以外は、降雨に無関係に前兆（微小）変位がなく突如として発生するの

が通例である。

(2) 降雨時の運用

降雨時は、雨量状況に応じて計測間隔を短くし、計測体制を強化する。計測データに変位を確認した場合はCCTVなども利用し、対象斜面を監視するとともに、現地確認を必ず行うことが重要である。特に、一定規模以上の斜面の変状が現れた場合には、現地調査－現地踏査・詳細ボーリング・土壌水分計測等－を行い、センサを増設した詳細監視あるいは対策工の必要性を検討しなければならない。

詳細監視によって崩壊予測をする場合は、変位量・変位速度等での監視体制の強化が考えられる。また、抜本的対策を行う場合は、施工時の安全管理の観点から対策工完了まで監視するのがよい。

(3) 管理基準値の設定および運用

変位量には、地盤変位のほか温度の影響によるものもある。また、4. ①でも述べたように、地盤変位には地域特性や物性・強度などによる固有特性もあり、斜面毎にその変化量は異なる。このため、日常の計測データから日常変位範囲を把握する必要がある。よって、管理基準値はモニタリング当初より決定することは難しく、初期段階では暫定値を与え、その後運用しながら決定するのがよい。

6. まとめ

光FSによる斜面崩壊モニタリングシステムの開発に当たっては、全国6個所のフィールド試験を実施し、2個所において小規模の崩壊を捉え、表層崩壊における前兆と判断される変位（崩壊の約2時間前から発生）を計測することができた。

また、他のフィールド試験実施個所においても

崩壊には至っていないが斜面の変状と思われるデータ、気温変動、動植物等の降雨による地盤変位以外の変位など、計測データにより斜面管理を行うための有意義なデータを得ることもできた。

これらの設置検討・施工・試験モニタリングの結果や現地での実際の対応等を踏まえ、「光ファイバセンサによる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）」の作成を行っている。今後、このマニュアル（案）を活用することにより、光FSによるモニタリングシステムが現場に導入され、効率的な道路斜面管理が実施されることを期待するものである。

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) 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」，地盤工学会四国支部，豪雨時の斜面崩壊のメカニズムと予測に関する論文集，pp.67～74，2001.8
- 3) 山辺晋、恒岡伸幸、中野稔治、加藤俊二、森啓年：「光ファイバセンサを用いた表層崩壊モニタリングシステムに関するフィールド試験」，第56回土木学会年次学術講演会，2001.10
- 4) 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，2002.9

加藤俊二*



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研究員
Shunji KATO

恒岡伸幸**



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路研究官（前 土質チーム上席研究員）
Nobuyuki TSUNEOKA

小橋秀俊***



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上席研究員
Hidetoshi KOHASHI

室山拓生****



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交流研究員
Takuo MUROYAMA