

V-7 先端的な道路斜面崩壊監視・安定度評価技術の開発

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平14～17

研究担当チーム：材料地盤研究グループ（土質）

研究担当者：小橋秀俊、加藤俊二、榎谷有吾

【要旨】

本研究は、光ファイバセンサを活用した線的あるいは面的な斜面崩壊モニタリングシステムの開発を行うとともに、表面変状および降雨浸透モニタリングによる内部応力の変化を考慮したリアルタイムでの斜面の安定度評価による総合的な斜面崩壊予測手法の開発を目標として実施するものである。

本研究では、実斜面に光ファイバセンサを設置して斜面表層崩壊の変状挙動を把握し、計測データに基づく表層崩壊の安定度評価の考え方について整理し、運用マニュアルおよび斜面表層崩壊モニタリング用標準ソフトウェアを開発した。また、降雨浸透モニタリングを併用し光ファイバセンサによる表層崩壊モニタリングでの崩壊予測を支援する考え方について提案した。

キーワード：光ファイバセンサ、表層崩壊、降雨浸透、モニタリング、安定度評価

1. はじめに

防災対策が必要、あるいは、当面、日常の監視などの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。また、降雨に起因する土砂系斜面の表層崩壊は、いつ、どこで発生するかの特が困難である。

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、表層崩壊の事前予測（予知）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。

現状の斜面崩壊の監視技術は、伸縮計や傾斜計等による点的な計測であるため、不特定域で発生する表層崩壊に対して適切な設置が難しいうえ、一般に電気式であるため落雷の影響により故障が発生しやすく、降雨時において崩壊を予測するために必要なデータが得られない場合がある。

一方、光ファイバセンサは電磁誘導の影響を受けないため雷の発生にかかわらず継続的な監視が可能である。さらに、線的・面的な設置が可能であり、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道路管理用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り、効率的なモニタリングが期待されるものである。

2. 研究概要

本研究は、光ファイバセンサを活用した線的あるいは

面的な斜面崩壊モニタリングシステムの開発を行うとともに、表面変状および降雨浸透モニタリングによる内部応力の変化を考慮したリアルタイムでの斜面の安定度評価による総合的な斜面崩壊予測手法の開発を目標としている。

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においては、国土交通省の4事務所の協力により、実斜面での試験モニタリングを実施して基礎データの収集・分析を行い、斜面の変状現象からの表層崩壊の予測と斜面防災管理上の運用方法について検討した。

また、降雨時の表面変状による崩壊予測を支援する手法として、降雨浸透モニタリングによる支援の考え方を検討した。

3. 研究結果

3.1 光ファイバセンサによる表層崩壊モニタリング

(1) 表層崩壊時の変状現象分析

これまでの研究では、平成13年度にFBG方式およびMDM方式の光ファイバセンサを高密度に設置した斜面において表層崩壊を捉えており、その事例から次の点を確認している。

- ① 崩壊前兆として急激な変位の変化が発生し、1.5～2時間程度で崩壊に至っている。
- ② 崩壊はセンサの上方あるいは側方で発生しており、センサをピンポイントで設置しなくとも同一斜面内であれば崩壊面の10～20m程度の範囲内で何ら

かの変化を捉えることが可能である。

- ③ 表層崩壊の崩壊時の変状量は 10mm 程度と非常に小さく、事前の踏査で目視により滑落崖を確認することは困難である。

このため、センサの設置密度をある程度小さくすることが可能であると考えられ、本研究で実施するフィールド試験ではセンサをW字に設置して、センサの上下で起こる変状現象を捉えることとし、W字の線的・面的な計測に適した B-OTDR 方式の光ファイバセンサを用いて、次の国土交通省地方建設局 4 事務所の協力により、試験計測を行った。

- 1) 長野国道事務所 (一般国道 19 号沿線)
- 2) 兵庫国道事務所 (一般国道 28 号沿線)
- 3) 紀南河川国道事務所 (一般国道 42 号沿線)
- 4) 宮崎河川国道事務所 (一般国道 220 号沿線)

平成 14 年度に一般国道 220 号 (以下、R220 号) 沿線の斜面で、また平成 16 年度には台風 23 号の影響によりフィールド試験を実施している一般国道 19 号 (以下、R19 号) および 28 号 (以下、R28 号) 沿線の斜面において崩壊が発生した。崩壊時はいずれも、事前通行規制中であり、計測地点で発生した崩壊規模は道路交通に影響を及ぼさない程度の小崩壊であった。

以下に、それぞれの計測結果を示す。

1) R19 号の事例

図-1 にセンサ配置図を示す。道路延長方向約 100m の区間に光ファイバセンサを設置している。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。崩壊はセンサの上方約 20m 付近で発生した。図-2 に計測開始から崩壊まで計測結果を示す。図中の上の折れ線が累積ひずみで下がひずみ速度である。台風 23 号による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 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、移動土砂に相当量の水分を含んでいたものと考えられる。

2) R28 号の事例

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。このため、斜面の広範囲にわたって下部が抜け落ちており、滑落崖周辺の崩落が懸念される斜面である。このため、図-3 に示すように、滑落崖に沿うようにセンサを設置

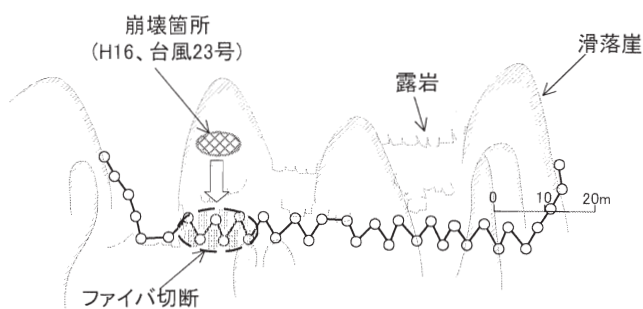


図-1 センサ配置図 (R19 号)

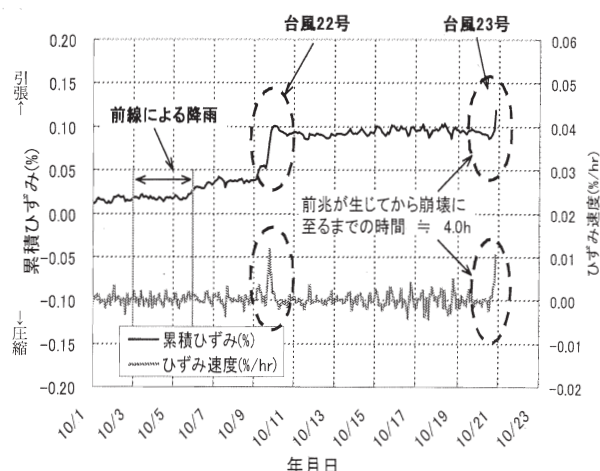


図-2 崩壊時における変位計測結果 (R19 号)

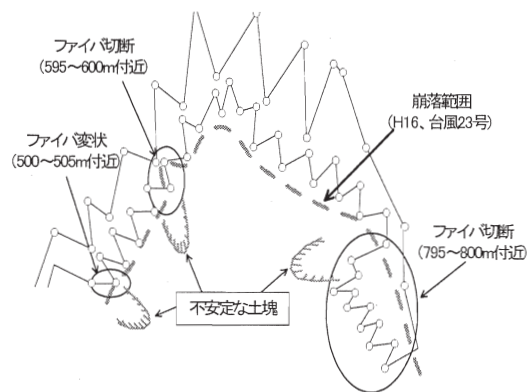


図-3 センサ配置図 (R28 号)

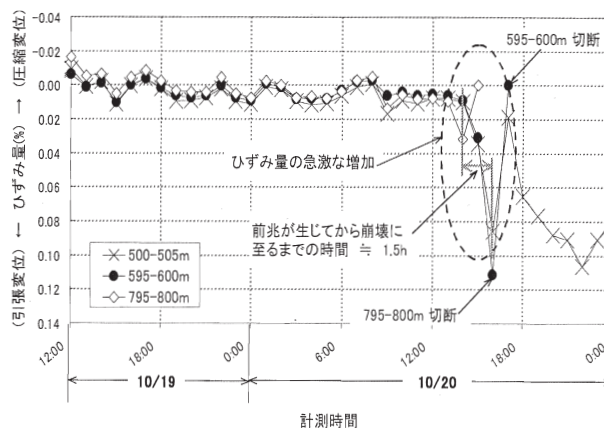


図-4 崩壊時における変位計測結果 (R28 号)

している。

平成16年10月の台風23号の影響で、広範囲の斜面崩壊が発生した。移動土砂層厚は最大3m程度であったが、擁壁工を飛び越える土砂は無かった。

図-4に崩壊時の変位計測結果図を示す。崩壊直前に急激なひずみの増加現象が発生し、崩壊に至るまでの前兆時間は約1.5時間程度であった。

いずれの事例でもMDM方式およびFBG方式と同様に崩壊時に急激なひずみの変化が見られた。前兆時間は、R28号沿線のフィールドでは約1.5時間程度と以前の事例とほぼ同等であったが、上記のようにR19号沿線のフィールドでは約4時間程度と若干長めであった。この時間差は、地質や地形条件、崩壊規模の違いもあるが、降雨に対する斜面崩壊の免疫性も影響すると考える。これまでの崩壊検知事例において梅雨や台風による大量の降水を降雨に対する斜面崩壊の免疫性が高い地区で、降雨量（降雨強度）の小さい場合には崩壊は発生せず、降雨量（降雨強度）が大きい場合に短時間での崩壊が発生している。R19号沿線の斜面は恒常的に降雨が少なく免疫性が低い地区である。

急激な変状を捉え崩壊を予測することは可能であることがわかった。しかし、いずれにしても崩壊の前兆時間は1.5～4時間程度と非常に短時間であるため、この短時間による崩壊予測は斜面管理上では最終手段であり、できる限り事前に崩壊域を特定して対策工を実施して崩壊を未然に防ぐことが重要である。

(2) 常時の表層崩壊危険性斜面の挙動分析

崩壊の予測は、「いつ」、「どこで」、「どの程度」を事前に予測することである。しかしながら前述のように、表層崩壊の崩壊時の前兆時間は非常に短いことから、「いつ」、「どこで」よりも、「どこで」、「どの程度」をできるだけ事前に予測して、早期に適切な対応を実施することが望ましい。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。このため、日常の計測データを

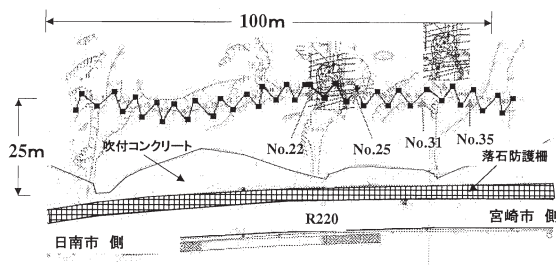


図-5 光ファイバセンサの配置図および崩壊箇所

分析することにより、斜面の変状が周辺と比して卓越しているところを抽出する方法が考えられる。

事例として、R220号沿線で捉えた崩壊について、変状の累積データを整理した結果を以下に示す。

現地状況は、図-5に示すように光ファイバセンサをW字に設置し、計測区間を39区間けて向かって左側からセンサのナンバリングをした。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-6に示すように、各センサ長を5mとして開口部は60度を基本とした。

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-7は、計測開始から崩壊直前までの各センサの月間の累積ひずみの状況である。マイナスは圧縮ひずみである。また、図-8は現地の降水状況である。ひずみ分布を見ると、まず毎月の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ヶ月程度の累積ではほぼ現状の傾向が表れている。この凹凸の分布では、①No. 3-6、②No. 7-10、③No. 11-16、④No. 19-26、⑤No. 30-35、⑥No. 36-39と圧縮累積で凸なおよそ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

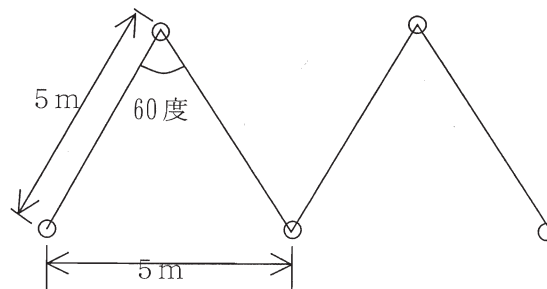


図-6 センサの設置パターン

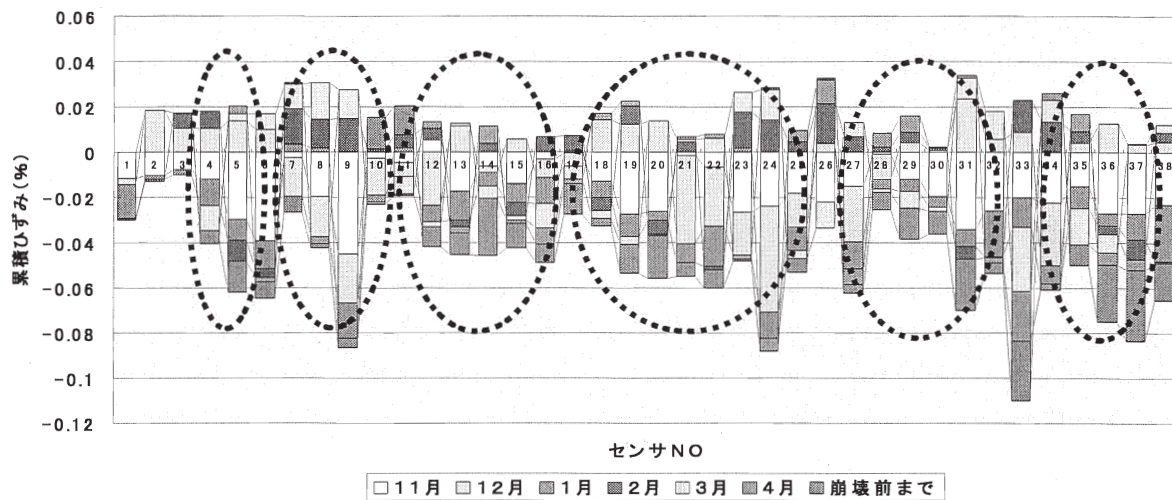


図-7 累積ひずみの分布 (ひずみ分布棒図)

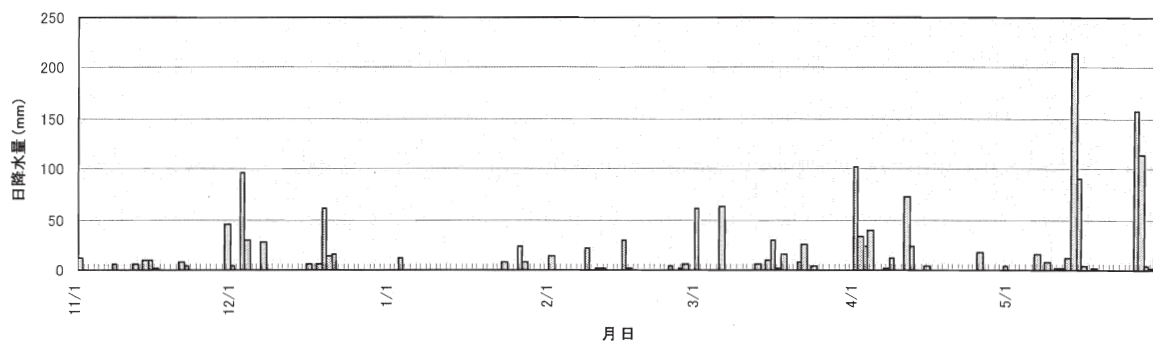


図-8 現地の降水状況

ば、各センサは頂点を共有するので上下端のどちらかを移動点として、移動ベクトルが算出できる。考え方は(3)にて述べる。ここで注目すべき点は、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. 7-10 のポイントで崩壊が起こる可能性が高いと予測することができる。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となる。

(3) 管理・運用の考え方

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。ただしこれは概略の最大値で、本当に崩壊する可能性のある箇所を効果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斜面モニタリングを実施し、「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あるいは安定しているか

を予測することで、効果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も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るような許容できると判断されるものや対策工を実施する際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果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再整理すると以下の通りである。

1) 日常管理 (累積変状の崩壊危険位置の事前抽出)

移動点の仮想軌跡等の日常の変状履歴による危険域の予測を行う。例えば図-9に示すようなひずみ軌跡図を作成し、2 測線ごとの上方の変状による圧縮ひずみと下方の変状による引張ひずみからの移動点の座標表示により変状箇所を事前抽出する。

2) 異常監視 (崩壊の事前予測)

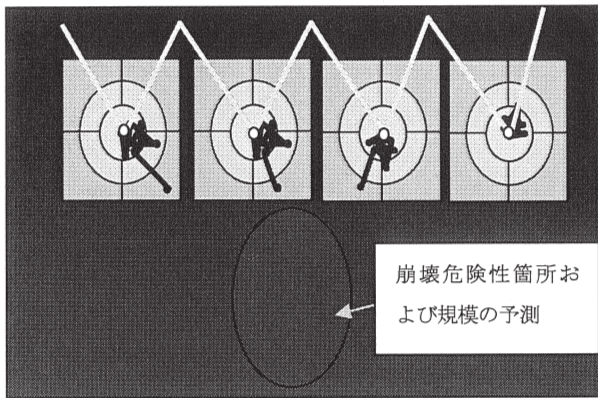


図-9 日常管理における予測

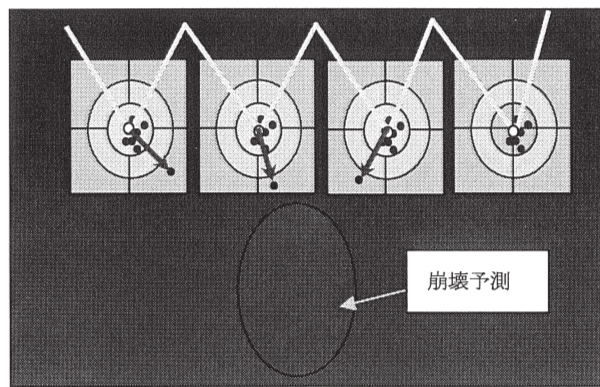


図-10 異常監視における予測

ひずみ速度（ベクトル）により管理基準値を設定した判定を行う。例えば図-10に示すような、管理円（通常域、注意域、異常域など）を設定し、向きと大きさ（上記軌跡の1回ごとの移動ベクトルの始点から終点までを抜き出す）から、崩壊を予測する。

これらの考え方を踏まえて、光ファイバセンサによるモニタリングの運用マニュアルおよび斜面表層崩壊モニタリング用標準ソフトウェアを作成した。

以下に、管理・運用の基本となるひずみ軌跡図およびひずみ速度図の考え方を示す。

①ひずみ軌跡図

ひずみは、平常時の地盤変位がない期間でも変化する。その要因としては、温度変化によるものが大きいことは前述したとおりであるが、温度のみの場合は一定方向の伸張である。ただし、ひずみは温度変化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樣でない。図-11は植物の根の成長の影響を受けている事例である。このように、表層崩壊の計測管理においては平常時のひずみ軌跡の特性を把握することが肝要である。

ひずみを長期間観測すると、降雨を経験するため図-11とは異なるひずみ軌跡を得ることがある。図-12は6ヶ月間計測したひずみ軌跡図とひずみ速度図である。降雨により崩壊に至るような大きなひずみ速度の変化はみられないが、ひずみ軌跡図では、不規則な軌跡をたどっており、降雨の影響による地盤の変状を捉えている。

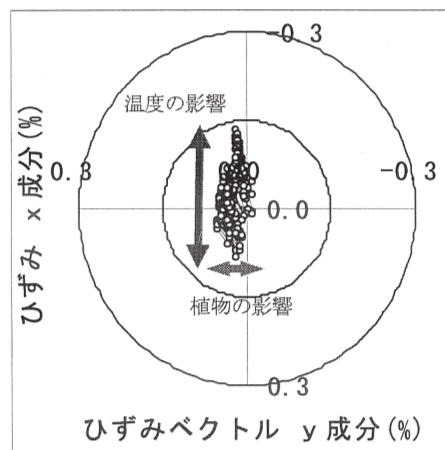


図-11 平常時ひずみ軌跡図の例

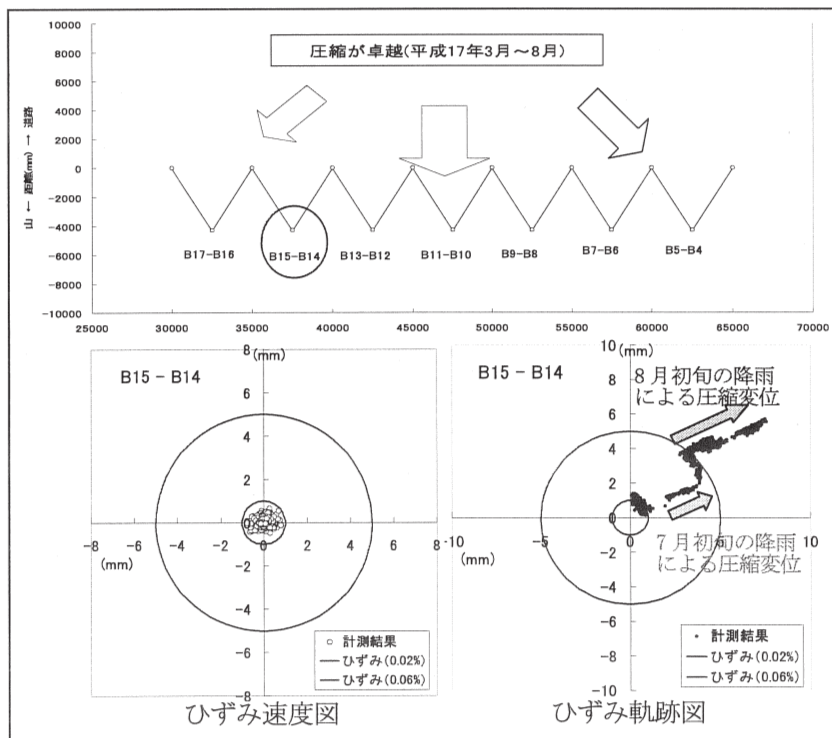


図-12 ひずみ軌跡図・ひずみ速度経時変化図の事例

②ひずみ速度図

地盤に変位が現れたら、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であるため、常に原点からの距離で表示される。図-13 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は、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。一方、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。

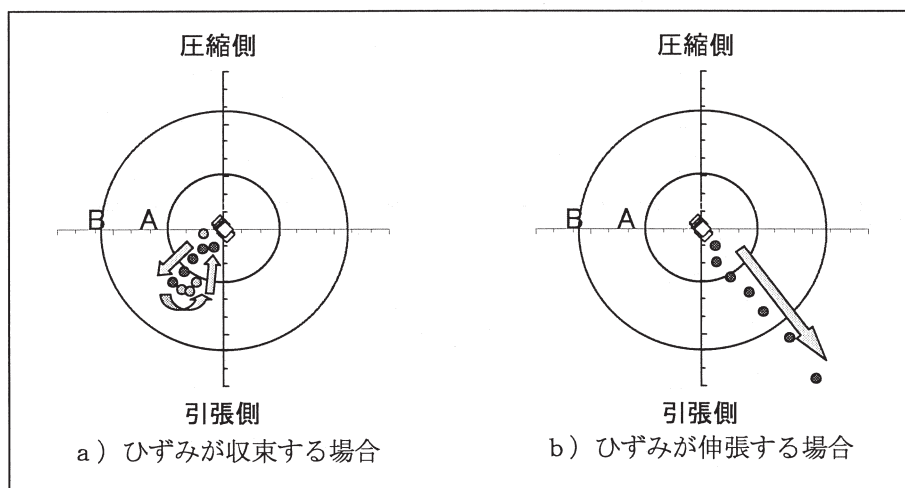


図-13 ひずみ速度図の見方

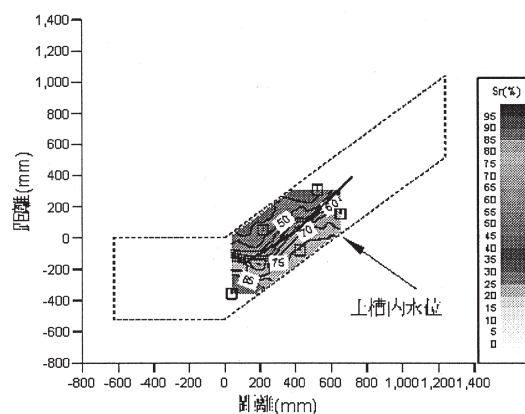


図-14 崩壊時の飽和度分布図

3.2 降雨浸透モニタリングによる予測支援の考え方

降雨時の土砂系斜面崩壊(特に表層崩壊)は、降雨により斜面表層地盤内の含水量上昇に伴う負の間隙水圧の低下に起因する強度定数 (c , ϕ) の低下が原因であると考えられており、これまでの研究の成果として、浸透流・安定解析により崩壊に至る降雨量を予測する手法について提案している。(参考文献1)

降雨時の斜面安定度評価に際して、上記の予測雨量と比較するために短時間降水量を活用が考えられるが、さらに降雨時における地盤中への浸透水の分布状況も併せてシミュレートすることで、モニタリングデータを活用したより精度の高い予測が可能となる。

一例として、まさ土斜面崩壊実験にて得られた、崩壊時における飽和土分布図を図-14 に示す。崩壊に達するまでの水分状態として、体積含水率が一旦定常状態を示し、崩壊直前に間隙水圧や体積含水率が急激に上昇する傾向が得られている。この崩壊前の定常状態を把握することで、光ファイバセンサで得られる変位やひずみによる崩壊予測の支援が可能となる。また、さらにこの浸透状態をモニタリングすることにより、事前にシミュレートした結果と比較した予測体制の構築も可能である。

4. まとめ

斜面の表層崩壊は、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、崩壊規模を予測することで適切な対応ができることがわかった。さらに、崩壊直前であっても、数時間以内ではあるが崩壊の前兆現象を捉えることができることもわかった。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が、やむを得ず計測を継続する場合には、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レベルを向上させるとともに、避難誘導や事前通行規制などの体制づくりが必要である。

また、今後の課題としては、計測システムの低コスト化とともに、光ファイバセンサの設置は急斜面で実施することから、できるだけ容易で移設や拡張性が高い設置方法の開発がある。

参考文献

- 1) 加藤、小橋、古谷：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
- 2) 加藤、小橋：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
- 3) 「降雨浸透による表層崩壊を対象としたのり面調査・モニタリング手法マニュアル」、建設省土木研究所土質研究室、土木研究所資料、1999.3