

特集報文：頻発する大規模土砂災害に挑む

地上設置型合成開口レーダを用いた崩壊斜面監視手法の開発

松下一樹・遊佐直樹・林 真一郎・國友 優

1. はじめに

崩壊斜面下の人家が被災した場合や河道閉塞が発生した場合、捜索活動従事者や工事関係者の安全を崩壊斜面監視で確保しながら応急対応を実施しなければならない事態が想定される。崩壊斜面に立ち入ることはできないため、安全が確保された場所からリモートセンシングにより崩壊斜面監視を実施する必要がある。

平成25年に国土交通省中部地方整備局が地上設置型合成開口レーダ（以下「地上型SAR」という。）を用いて崩壊斜面監視を実施して一定の効果を挙げた¹⁾。この地上型SARを用いた崩壊斜面監視は手法が確立しておらず一般化していない。そこで、この事例から地上設置型SARを用いた崩壊斜面監視に必要な管理基準値を検討したので報告する。

2. 地上型SARの特徴

地上型SARは、観測対象に電磁波を送信し反射波を受信する動作を定期的に繰り返し、2動作間に生じた位相差から観測対象の変位を計測する機器である。表-1に中部地方整備局が使用した地上型SARの諸元を示し、図-1に地上型SARの設置状況と設置に際して留意した事項を示した。崩壊や地すべりを対象とした監視機器と観測条件を比較すると、計測範囲が面であること、天候の影響

表-1 地上型SARの諸元

レーダ送受信機	38cm×27cm× 12cm	約10kg
合成開口用レーラ	255cm×40cm× 52cm	約54kg
電源・制御部	80cm×60cm×100cm	約90kg
・中心周波数	17.175GHz	・帯域幅 140MHz
・計測可能範囲	-4.38mm～4.38mm	
・レーラ往復時間	5分で設定（5分以上で設定可能）	
空間分解能 【電磁波送信方向】	1.1m	
（斜面投影時高さ方向）	傾斜37.9°	0.73m～傾斜51.5° 1.07m
（斜面投影時奥行き方向）	傾斜37.9°	0.94m～傾斜51.5° 0.85m
空間分解能 【電磁波送信方向と直交する方向】		
（斜距離250m）	1.10m	
（斜距離400m）	1.75m	

Development of Secondary Collapse Monitoring Techniques Using Ground-based SAR Interferometry



図-1 地上型SARの設置状況と設置上の留意点

- ・斜面変位の方向と地上型SARの電磁波照射方向を合わせて設置することが望ましい
- ・風雨を防ぐためターフや小屋等の仮設が必要
- ・発動発電機（100V、12VA）などの電源が必要
- ・電磁波が樹冠部に散乱するため、植生部の地表変位計測はできない。

表-2 崩壊や地すべりの観測・監視に用いる機器

	現地立入	計測範囲	天候影響	分解能
地盤伸縮計	必要	線	小	0.1mm
GPS	必要	点	小	1 mm
トータルステーション	不要	点	大	1 mm
地上型SAR	不要	面	小	0.1mm

が小さいといった特徴を地上型SARは有しており、分解能は地盤伸縮計と同程度ある（表-2）。海外では鉱山等で斜面監視に用いられている。

3. 平成25年静岡県浜松市における地上型SARを用いた崩壊斜面監視

3.1 崩壊斜面監視の概要

平成25年4月23日に天竜川水系杉川に接する段丘崖（静岡県浜松市天竜区春野町杉地先）で崩壊が発生し河道に土砂が堆積した（写真-1）。拡大崩壊及び河道閉塞が懸念されたため警戒避難や仮排水路の掘削といった応急対応が必要となり、静岡県、浜松市並びに中部地方整備局による斜面監視が行われた^{1),2)}。拡大崩壊規模によっては河道閉塞が発生する可能性があったため、中部地方整備局は崩壊規模の予測を目的として、面的に地表変位の計測が可能な地上型SARを4月28日に設置した。崩壊前に静岡県が設置した地盤伸縮計は5月1日に破断し計測不能になったため、それ以降は目視と地上型SARにより斜面監視が行われた。

3.2 地上型SARによる崩壊発生予測の試み

地上型SARは写真-1に示した位置に設置した。この位置でモニターに累積変位分布及び変位速度変化を表示して崩壊斜面監視が実施された（写真

-2)。しかし、崩壊斜面を監視するための地上型SARによる管理基準値は無いため、崩壊範囲及び崩壊危険度について基準値に基づいた判定はできない。そのため、目視により得られる情報と合わせた技術者判断が行われた。崩壊範囲及び崩壊危険度の解釈について、5月1日21時20分崩壊前後での5分累積変位分布の変化を事例として示した(図-2)。なお、変位は電磁波送信方向を正としているため、負は地表面が地上型SARの設置箇所方向に近づくことを意味している。

図-2Aの右上に負の累積変位が現れており、図-2Eにかけて徐々に範囲が広がると共に5分累積変位量が増大した。しかし、図-2Fから図-2Hにかけてモザイク状に変位速度が低下し、5分累積変位が計測されなくなった21時20分頃に崩壊が発生した。この崩壊以降、負の累積変位が発生した範囲を崩壊範囲と解釈し、図-2で示した累積変位分布の変化を崩壊危険度の増大と解釈することで、地上型SARによる崩壊発生予測が試みられた。モザイク状に変位速度が低下する理由としては表-1に示した計測可能範囲を超えたことが疑われた。

4. 地上型SARに基づく管理基準値の検討

地盤伸縮計及び地上型SARは共に地表変位を計測する機器であり、地盤伸縮計と同様に地上型SARについても管理基準値が設定できると考えて検討を行なった。計測結果に対する信頼度の高いトータルステーション(ノンプリズム方式)(以下「TS」という。)及び地盤伸縮計による変位計測結果と地上型SARによる計測結果を比較し、崩壊発生までの地表変位を地上型SARが計測できているかを検証し、地上型SARの計測結果と崩壊発生時刻を対比し管理基準値を検討することとした。

4.1 TS及び地盤伸縮計による計測結果との比較

面的に地表変位を計測できる地上型SARの利点を活かして崩壊範囲を判定するためには、安定している斜面を無変位として測定できていることが基本となる。観測点を安定した箇所に設定し、5月12日から5月13日にかけてTSによる測量を行い地上型SARによる計測結果と比較した(図-3)。比較した観測点の概ねの位置は写真-1に示した。図-3のとおりTSで累積変位の増減が計測されていたが、TSから観測点まで最大約400mあり誤差

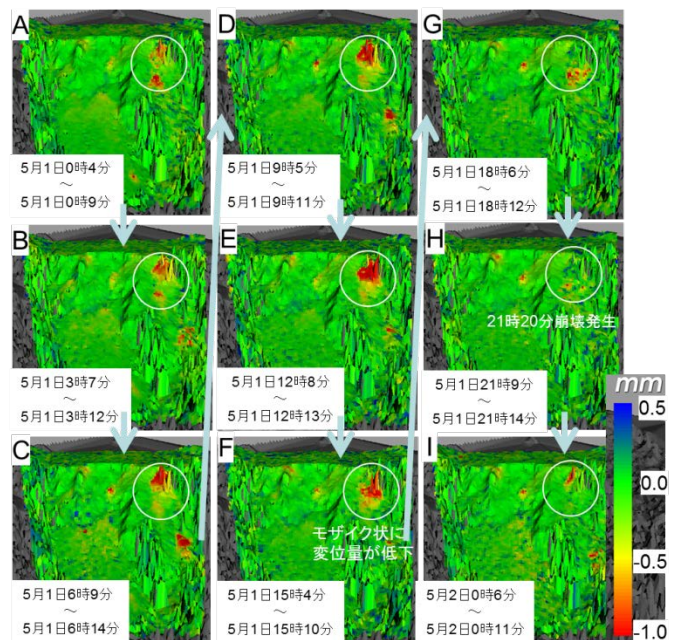
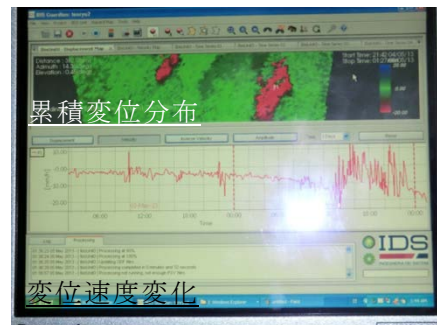
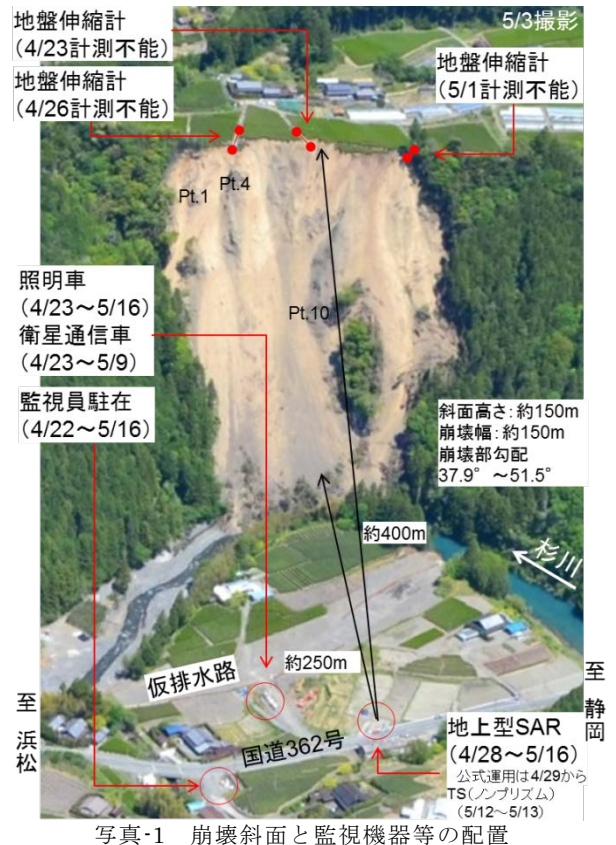


図-2 地上型SARによる5分累積変位分布の変化 (背景図: 地上レーザ計測成果(5/1計測))

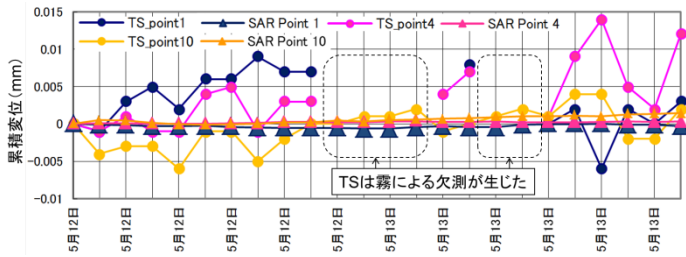


図-3 TSと地上型SARによる累積変位変化の比較

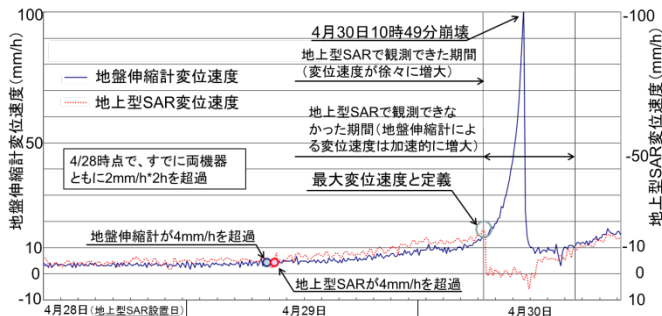


図-4 地盤伸縮計と地上型SARによる変位速度変化
(地盤伸縮計データは静岡県提供)

(現地の計測条件下で2~3cm程度)を考慮すると地表変位は無いと判断された。地上型SARによる計測結果は累積変位がほとんど無く、変化傾向は安定していた。さらに、図-3の計測期間中にTSは霧による欠測が生じたが、地上型SARは気象条件に左右されず観測できていた。

また、地盤伸縮計及び地上型SARで崩壊前後の地表変位が計測できていた4月28日から4月30日の期間について、変位速度変化の比較を行った(図-4)。図-4のとおり、地上型SARによる計測値は地盤伸縮計による計測値と同じ変化傾向を示し、崩壊前後の速度が徐々に増大する変位が計測できていた。一般的に地盤伸縮計では変位速度2mm/hが2時間継続(以下「2mm/h*2h」という。)あるいは変位速度4mm/hが、変位速度が増大し始めて崩壊する段階に到達したと判断する管理基準値³⁾として利用される。この管理基準値4mm/hについて、地上型SARによる変位速度変化から超過時点が判定できた。また、2mm/h*2hは地上型SAR設置時期の関係から図-4で超過時点を示せていないが、変位速度の変化傾向から計測できていたものと考えている。

面的な斜面監視に用いる機器として、地上型SARは地表変位の計測能力を十分に有しており、リモートセンシング機器であるTSと同等以上の正確さを有していた。また、直接計測している地盤伸縮計と同等の精度を有していると考えた。

ただし、加速的に変位速度が増大し崩壊に至

る変化を、地上型SARは計測できていなかった。そのため、崩壊が発生していないにも関わらず、変位速度が急激に低下する場合は、地表変位を観測できていないと判断する必要があった。この原因については計測可能範囲(-52.56mm/h:-4.38mm/5min×12)を超えた影響を疑ったが、最大変位速度が約20mm/h未満であり、別途検討が必要である。

なお、地盤伸縮計は崩壊の約27時間前から基準値を超過し、地上型SARは約26時間前から基準値を超過していた。過去の事例において基準超過から崩壊までの時間は19.20時間以上の時間が記録されており⁴⁾、本事例は既往事例と比較して一般的な崩壊事例と考えた。

4.2 地上型SARに基づく管理基準値の検討

崩壊地内に測線を設定し、測線上の観測点について変位速度の変化を示すとともに、10m×10m程度以上の崩壊について発生時刻を示した(図-5)。大きな崩壊を経験し、測線上の全観測点において変位速度が2mm/h以下に減少した期間を管理基準検討期間に設定した。図-6に管理基準検討期間における最大変位速度(図-3で定義)の分布及び写真から判読した崩壊範囲を示した。また、図-6上に図-5の測線及び観測点を示した。

計測期間を通し全観測点において、昼夜、天候に左右されず地上型SARで変位速度が計測できており、崩壊前には変位速度が徐々に増大する観測点群が必ず測線上に現れていた(図-5)。しかし、観測点群に含まれる観測点は崩壊毎に異なっていた。例えば、最上部の観測点は5月4日の崩壊以降は変位速度が安定していた。一方の変位速度変化が少ない観測点群に着目すると、変位速度は地盤伸縮計の基準値の2mm/h以下となっており、図-6において崩壊範囲外に分布していた。崩壊範囲外で変位速度2mm/hを超過する箇所は、崩壊土砂の流下経路もしくは崖錐部が該当していた。つまり、変位速度2mm/hを基準として崩壊しない範囲と崩壊可能性のある範囲に区分することが可能であり、地盤伸縮計では判定できない崩壊範囲の推定が可能だった。しかし、図-5の管理基準検討期間において各観測点の2mm/h*2h超過から崩壊前までの時間は、約64時間から約11時間の開きがあった。そのため、崩壊範囲は逐次判定する必要があり、崩壊危険度の判定は、いずれ

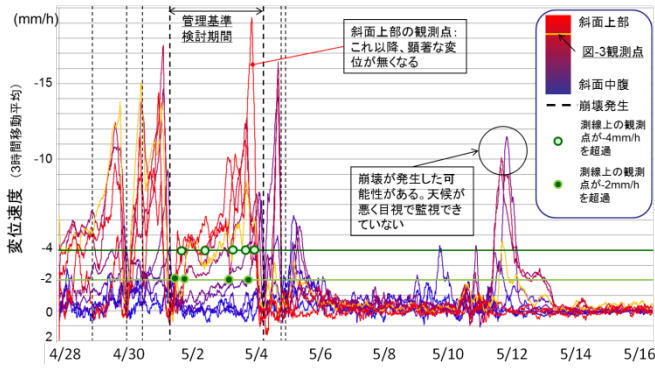


図-5 変位速度の時間変化 (3時間移動平均)

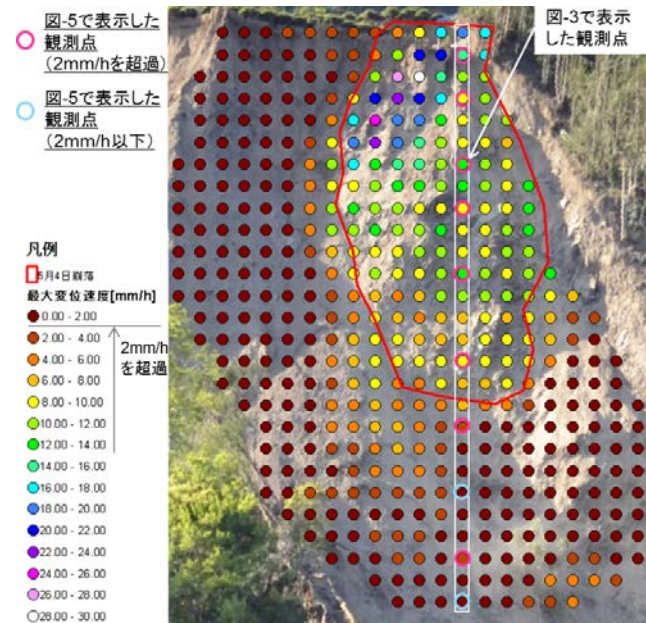


図-6 5月4日崩壊前の最大変位速度の分布

かの観測点における変位速度が管理基準値を超過した時点をもって判定する必要があると考えた。

以上より、変位速度の時間変化及び面的分布から安定斜面を特定し、安定斜面の変位速度を基準として管理基準値を設定することで、崩壊範囲や崩壊危険度を判定することが可能だった。

5. まとめ

平成25年に中部地方整備局が地上型SARを用

いて崩壊斜面監視を実施した事例から管理基準値の検討を行った。地上型SARは崩壊に伴う地表変位を地盤伸縮計と同様に計測できており、地上型SARによる変位速度計測結果に対して管理基準値を設定することで崩壊範囲や崩壊危険度を判定することができた。

地上型SARは崩壊斜面に近接した作業を実施せざるを得ない捜索活動従事者や工事関係者の安全を確保するための有効なツールとなると考えられた。ただし、この事例は対象までの距離や機器設置方向などの計測条件が良好だった。また、小規模崩壊や落石は今回の検討対象から外した。そのため、地上型SARの利用が可能な条件について整理が必要だと考えている。今後、事例を集めて地上型SARによる崩壊斜面監視手法をまとめることとしたい。

謝 辞

地盤伸縮計のデータをご提供頂いた静岡県に感謝します。

参考文献

- 1) 松下一樹、船戸総久、水谷直樹、川上哲広、杉澤文仁、堀内成郎、吉川和男、三五大輔、野田敦夫：静岡県浜松市天竜区春野町における地上設置型合成開口レーダーを用いた斜面監視について、平成26年度砂防学会研究発表会概要集A、pp.98～99、2014
- 2) 井上泰孝、渥美晃岳、大箸寛、田中義朗、亀田尚志、富田秀樹：地すべりの変状発見から災害発生までの初動対応の着目点ー平成25年4月に発生した門島地すべりの初動対応の事例よりー、平成26年度砂防学会研究発表会概要集B、pp.174～175、2014
- 3) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム：地すべり防止技術指針及び同解説(提案)、土木研究所資料第4077号、pp.79～82、2007
- 4) 木村隆俊、横山昇：4.監視と予測、日本地すべり学会誌、Vol.43、No.4、pp.49～53、2006

松下一樹



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部土砂災害研究室 主任
研究官
Kazuki MATSUSHITA

遊佐直樹



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部土砂災害研究室 交流
研究員
Naoki YUSA

林 真一郎



国土交通省中部地方整備
局河川部河川計画課課長
補佐
Shin-ichiro HAYASHI

國友 優



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部土砂災害研究室長
Masaru KUNITOMO