

◆ 特集：道路斜面崩壊のリスクマネジメント技術 ◆

岩盤斜面モニタリング手法

浅井健一* 小山内信智**

1. はじめに

岩盤崩壊は表層崩壊に比べて発生頻度は低いものの、崩壊が発生した場合には甚大な被害が生じる。このような大規模な岩盤崩壊に対しては、構造物による抑止対策が困難な場合も多く、また迂回工事にも多くの費用と長い工期を要する。そのため、岩盤崩壊に対し道路利用者の安全を確保するためには、岩盤斜面のモニタリングによって崩壊発生の予兆を検知し事前に通行止めを行う必要がある。しかしながら、平成8年2月に発生した北海道豊浜トンネルにおける岩盤崩落災害は、従来の技術的知見では大規模な岩盤崩落は予測が極めて困難な現象であること、及び実際に岩盤崩壊を対象とした計測事例も極めて少ないことを改めて認識させることとなった。

これらの背景をもとに、本研究では、岩盤崩壊危険箇所の計測技術及び計測値の評価方法の向上を目的として、実際に岩盤斜面に計器を設置して挙動計測を行うとともに、計測結果をもとに岩盤モニタリングの現地適用可能性と限界、岩盤崩壊予測手法について検討を行った。

2. 研究方法

研究開始時において岩盤斜面の計測事例がなかったため、実際の岩盤斜面で計測を行いデータを蓄積することから始める必要があった。そのためには多くの岩盤斜面の計測が必要であり、

そのため、各地方建設局（当時）及び北海道開発局の協力のもとに全国計15箇所（地方建設局が独自に実施する試験フィールド地区2箇所を含む）の岩盤斜面の計測を行い、得られた計測結果をもとに、各種計測器の有効性の検討、計測値の解釈上問題となるノイズ、周期的変動等の検討、各種計測器の配置・設置方法の検討、崩壊の前兆現象の検知手法及び崩壊予測手法の検討を行った。

3. 岩盤斜面の計測

岩盤斜面の計測については、平成8年度に全国8箇所のモニタリング箇所を選定して計器を設置し、平成9年度に計測を開始した。平成10年度に

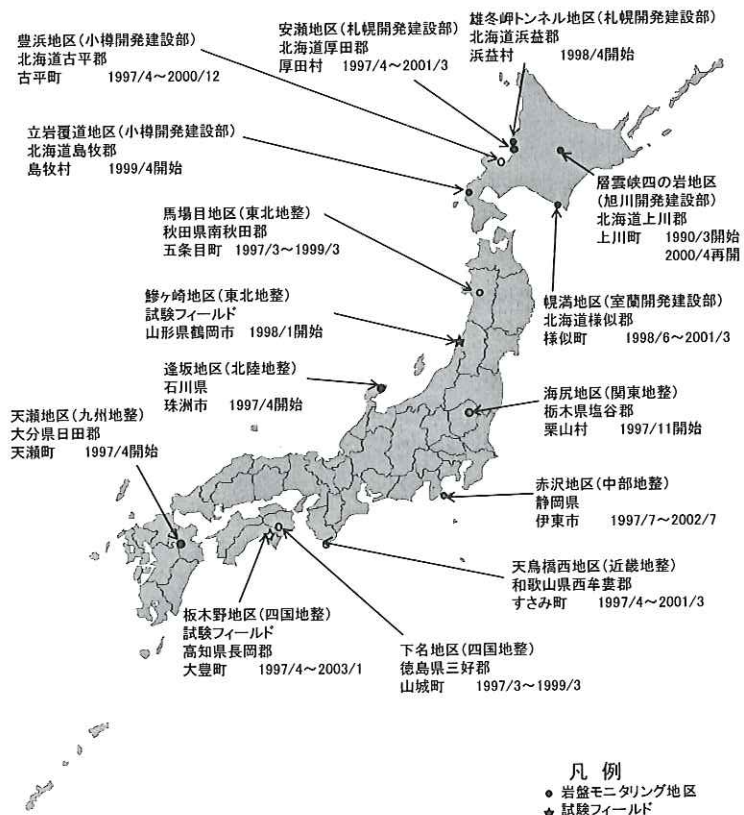


図-1 岩盤モニタリング実施箇所位置図

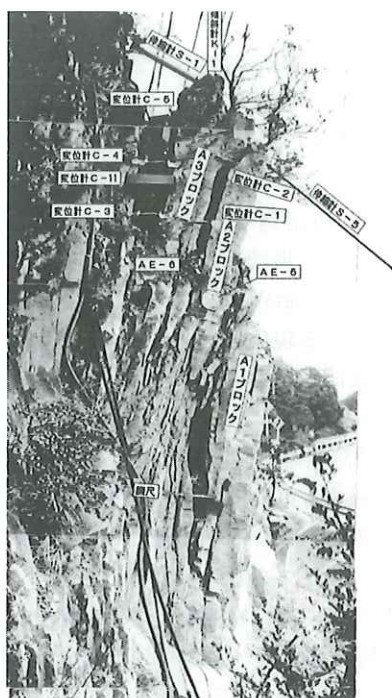
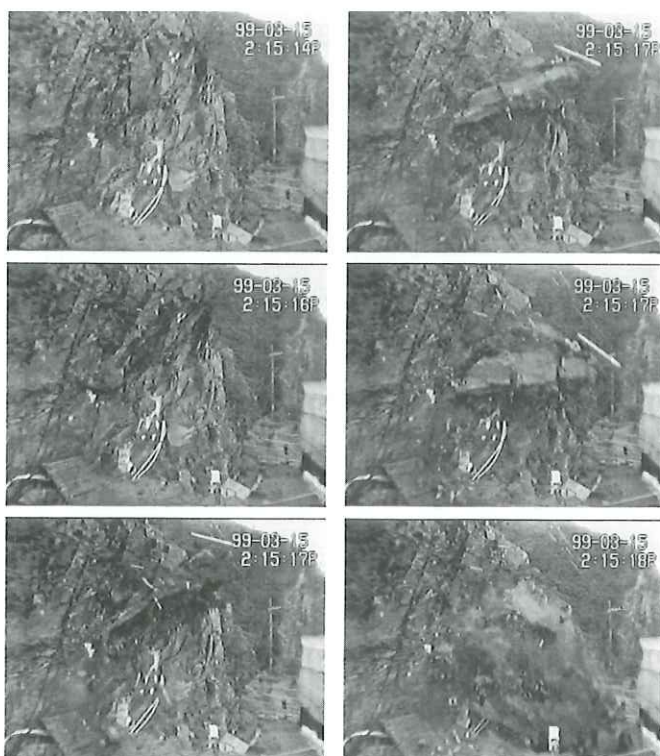


図-2 計測状況事例 (天鳥橋西地区)

図-3 天鳥橋西地区における転倒型の自然崩壊事例
(1999年3月15日、監視カメラによるビデオ画像)

は北海道開発局管内の5箇所の計測を追加した。また、これら以外に試験フィールド2箇所での測定データを平成12年度より活用し、計15箇所の計測データが得られた。これらの計測箇所の位置図を図-1に示す。これらの計測箇所のうち、平成10年度末に近畿地方建設局管内の天鳥橋西地区(図-2)において転倒型の自然崩壊が発生し(図-3)、この崩壊現象を計器及び画像で捕捉し貴重なデータが得られた¹⁾。

4. 研究結果

4.1 岩盤モニタリングの現地適用可能性と限界の検討

接触型計測器の計測値には周期的変動(日変動及び年変動)が見られることが多く、岩盤崩壊につながる累積挙動を抽出するためには、特に変位が小さい段階において周期的変動の影響を取り除く必要がある。図-4は計測値の日変動及び年変動の模式図である。これらの周期的変動は温度の影

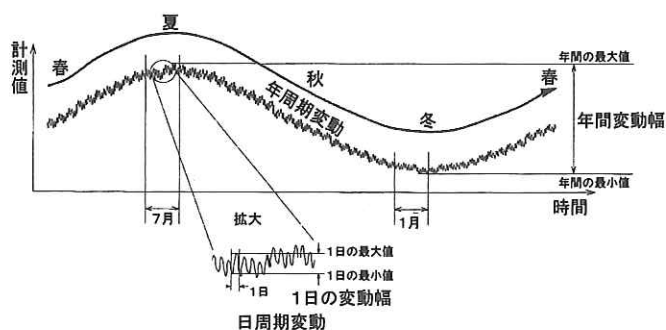


図-4 岩盤の日変動・年変動の様式図

響によって生じている。原因としては計測器自体の膨張収縮、取付治具の膨張収縮、設置位置付近の岩盤の膨張収縮等が考えられ、それらを総合しての周期的変動が生じていると考えられるが、現状ではそれぞれの影響を分離できていない。生じる変動幅及び計測値と温度との相関は個々の計測器によって異なり、また必ずしも相関がよいとは限らないが、温度相関が明確なものについては補正が可能である。図-5は赤沢地区における温度相関による補正の事例である。本事例では累積変位

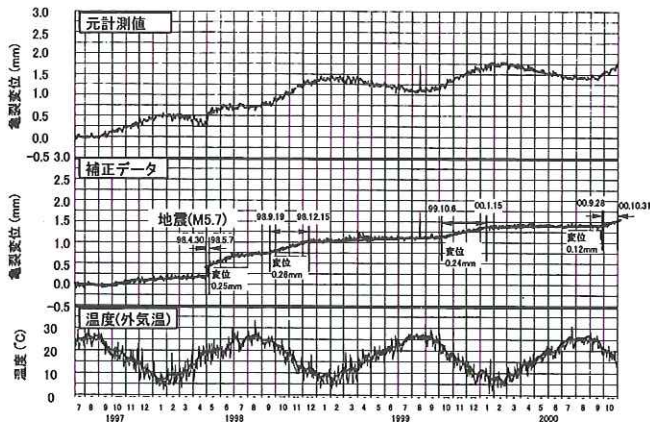


図-5 温度補正の事例

(赤沢地区におけるクラック変位計による岩盤挙動の検出)

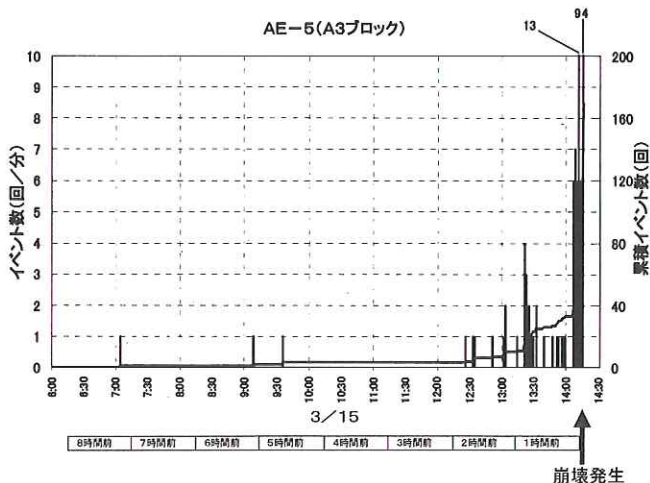


図-6 天鳥端地区における崩壊時のAE計測事例

が生じた時期と量を補正前よりも明確に示すことができ、それらのうち1回は計測箇所の近くで発生した地震時の挙動であった。

岩盤に直接計器を設置できない場合に有効となる非接触型計測手法として、天鳥橋西地区において画像計測による変位計測手法の検討を行った。これは、定期的に撮影した画像を用いて岩盤ブロックの変位を検出する手法である。詳細は既に文献²⁾で報告したので省略するが、天鳥橋西地区において岩盤ブロックから8mの距離にデジタルカメラ(撮像素子: 140万画素、理論的に3mmの分解能を持つ)を設置して時系列的に撮影を行い、得られた画像を用いて解析を行った結果、cmオーダーで岩盤の挙動をとらえることができた。

また、崩壊の前兆を直前に検知する手法として、岩盤内部の微小な破壊によって発生する弾性波動(acoustic emission: AE)を計測するAE計測技術の適用性の検討を行った。天鳥橋西地区での崩壊時におけるAE計測事例を図-6に示す。この事例では、崩壊約2時間前からAEの発生が目立ち始め、崩壊直前に発生数が急増している現象を捉えており、AE計測が崩壊前兆の検知に有効な手法であることが示された。

AE計測機器の設置方法としては、崩壊に関係する亀裂付近または亀裂の進展する付近にセンサーを設置する必要があるほか、ノイズを避ける必要がある。ノイズについては、岩盤の破壊に起因するAEと周波数特性が異なり、それによってノイズを識別出来る可能性が示されている^{3), 4), 5)}が、現状ではあらかじめノイズを計測しないような設置方法をとることが実用的である。そのためには、電気ノイズを避けるため絶縁型センサー⁶⁾を採用したり、降雨によるノイズを避けるために1.5m程度以上の深さにセンサーを埋設する必要がある⁷⁾。

岩盤崩壊モニタリングを行うための計測機器は、崩壊形態(崩落型、すべり型、転倒型、座屈型)を考慮した上で配置する必要がある。崩落型の場合は、崩壊直前までの累積変位量が小さいことが予想されることから、上部の引張亀裂等へ高精度の表面クラック変位計、地表面傾斜計、地表面伸縮計等の設置などが有効と考えられる。すべり型の場合は、すべり面及びすべり方向を考慮した上で、表面クラック変位計や地表面伸縮計、上部への地表面傾斜計の設置が有効と考えられる。転倒型の場合は、崩壊に至るまでの累積変位量が大きいために予想されることと岩体上部の方が変位量が大きくなることから、岩体上部への地表面傾斜計の設置、上部の亀裂に対して地表面伸縮計及び表面クラック変位計の設置が有効と考えられるが、いずれも測定レンジの大きなものとする必要がある。座屈型の場合は、

下部が転倒、上部が崩落またはすべりと考えられることから上記の考えを組み合わせる必要がある。また、いずれの場合もボーリングが可能な場合はAEセンサー、地中変位計、地中傾斜計等を設置するのが有効である。実際の崩壊形態は各形態の組み合わせであることも多いことから、事前調査を入念に行って崩壊形態を十分検討した上で計測機器の配置計画を立てる必要がある。

4.2 崩壊の前兆現象の検知手法及び崩壊予測手法の検討

崩壊の前兆現象の検知手法及び崩壊予測手法に関して、天鳥橋西地区における自然崩壊事例をもとに検討を行った。

本地区では計測開始当初から転倒型の累積挙動を示していて、計測開始から約2年後に、平成11年2月27日及び3月15日の2回にわたって崩壊が発生した。崩壊の前兆現象として、図-6に示すようにAE発生数の増加が計測され、前兆現象の検知手法としてAE計測が有効であることが示されたほか、図-7に示すように落石発生個数の増加が見られた。本事例では必ずしも単調な増加ではないものの崩壊の約2ヶ月前から落石個数が増加する傾向が示された。崩壊前の落石発生個数の増加は平成9年の第2白糸トンネル岩盤崩壊事例でも報告されており⁸⁾、崩壊の前兆を示す有効な情報であると考えられる。ただし、今回の現地計測において落石検知センサーは必ずしもすべての落石を的確に捉えていなかったことから、落石発生個数の増加を確実に捉えるためには日常点検や監視カメラなどによる目視観察が重要である。

本地区における崩壊発生までの累積挙動を見ると、ブロック頭部での最大変位量は2年間で約25cmであり、転

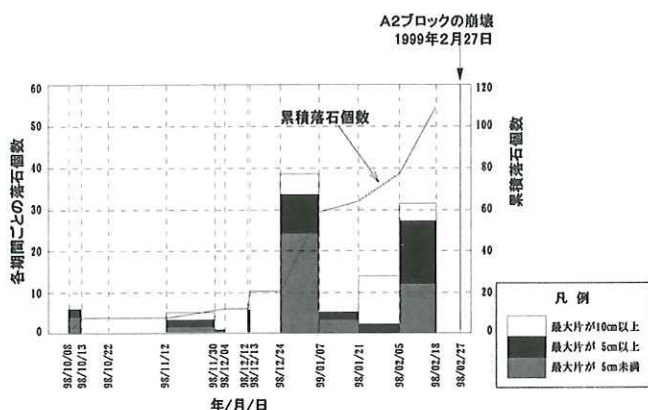


図-7 天鳥橋西地区における自然崩壊発生までの落石発生個数

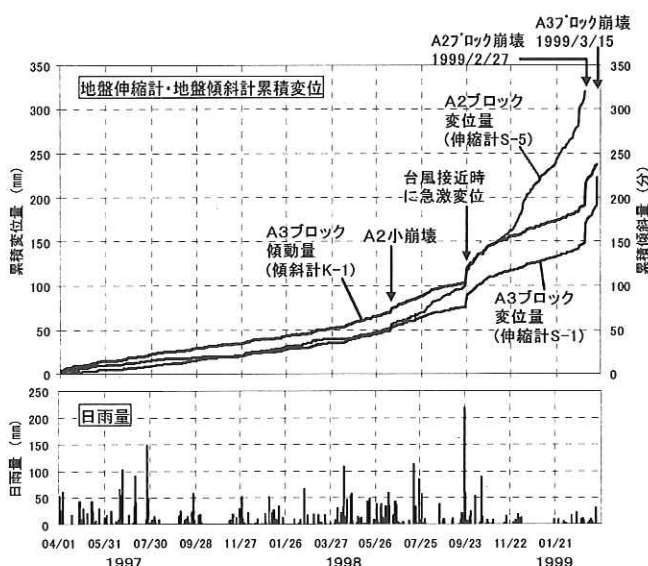


図-8 天鳥橋西地区における自然崩壊発生までの累積挙動

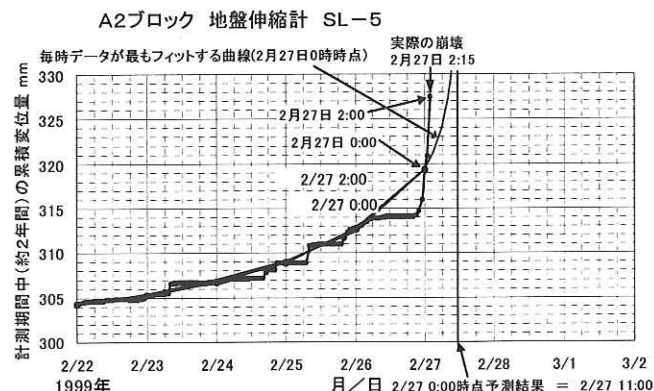


図-9 天鳥橋西地区におけるA2ブロック崩壊前の累積挙動及び崩壊予測事例

倒速度の推移パターンとして、緩急を繰り返しながら次第に加速していく状態が把握された(図-8)。また、崩壊直前においては、24時間毎のプロットでは斉藤(1968)⁹⁾の第3次クリープ破壊曲線にあてはめられる挙動を繰り返した後、崩壊したことが示された(図-9)。しかしながら、結果的に全体的な加速はあるものの、崩壊数時間前までに見られるように、スティックスリップ型の変位を示したため、加速していることを見落としやすい状況であり、崩壊時刻の予測も前後にばらつく結果となった。したがって、崩壊時期の大まかな予測は可能であるものの、管理基準値等の一律な設定は困難である。

4.3 岩盤崩壊モニタリング要領(案)

以上の成果は、実際に計測を実施する上での留意点等を含め、現場で岩盤崩壊モニタリングを実施するための技術マニュアルである「岩盤崩壊モニタリング要領(案)」としてとりまとめた。本要領(案)の目次構成を表-1に示す。第1章「総則」は、本要領(案)の目的と適用範囲、岩盤崩壊モニタリング全体の流れ及び道路維持管理上での位置づけ等について説明したものである。第2章「岩盤崩壊の種類と特徴」は、岩盤崩壊モニタリングを行う上で理解しておくべき、岩盤崩壊の形態、特徴及び要因(素因・誘因)について説明したものである。第3章「調査」は、モニタリングを行う岩盤斜面に対して実施すべき調査の手順、内容と計測計画を立てる上で重要な崩壊規模・形態の推定について説明したものである。第4章「計測計画」は、計測計画を立案する上で必要な検討項目(計測器の配置計画と選定、計測システム、計測期間及び頻度、計測体制等)と用いられる計測器について説明したものである。第5章「計測の実施」は、実際に計測を行うにあたっての計測器の設置と維持管理(点検頻度、点検項目等)、仮設計画等について説明したものである。第6章「計測データの整理及び分析」は、計測の各段階(キャリブレーション、通常計測、異常時計測)における計測データの整理・分析方法、異常データの検出及び変位の累積性の判断、通常計測から異常時計測への移行の目安などについて説明したものである。第7章「崩壊の前兆現象とその評価」は、

表-1 岩盤崩壊モニタリング要領(案) 目次構成(案)

はじめに
第1章 総 則
1-1 本要領(案)の目的及び適用範囲
1-2 岩盤崩壊モニタリングの対象となる岩盤斜面
1-3 道路維持管理における岩盤崩壊モニタリングの位置づけ
1-4 岩盤崩壊モニタリング実施地区
1-5 本要領(案)の内容
1-6 本要領(案)で用いる用語
1-7 通行規制について
第2章 岩盤崩壊の種類と特徴
2-1 岩盤崩壊の形態と特徴
2-2 岩盤崩壊を引き起こす要因：素因・誘因
第3章 調 査
3-1 調査の目的と手順
3-2 調査の内容
3-3 概査
3-4 精査
3-5 崩壊規模、崩壊形態の推定
第4章 計測計画
4-1 計測計画の考え方
4-2 計測器の配置計画と選定
4-3 岩盤崩壊モニタリングに利用できる計測器と手法
4-4 計測システム
4-5 計測期間及び計測頻度
4-6 計測体制の検討
第5章 計測の実施
5-1 仮設計画
5-2 計測器の設置及び維持管理
5-3 計測
5-4 計測期間中の安全管理と連絡体制
第6章 計測データの整理及び分析
6-1 計測データの整理
6-2 計測データの分析
第7章 崩壊の前兆現象とその評価
7-1 前兆現象
7-2 崩壊の予知・予測の可能性
7-3 崩壊の予知・予測の実例
第8章 安定解析
8-1 安定解析の位置づけ
8-2 数値解析
8-3 凍結深及び熱応力解析
第9章 岩盤崩壊モニタリングの課題
9-1 岩盤崩壊モニタリング実施上の課題
9-2 岩盤崩壊モニタリングに用いる計測器の課題
巻末資料-1 モニタリング実施箇所における「管理基準値」の設定状況
巻末資料-2 岩盤モニタリングにおけるAE計測マニュアル(案)

崩壊の前兆現象の項目、崩壊予測に用いられる手法及び予測を行った事例（天鳥橋西地区の事例及び文献事例）について説明したものである。第8章「安定解析」は、安定解析を崩壊形態の推定の際に経験工学的判断を補完するものと位置づけ、用いられる解析手法の種類と特徴、岩盤崩壊モニタリング箇所に対して実際に適用した事例について説明したものである。第9章「岩盤崩壊モニタリングの課題」は、岩盤崩壊モニタリング実施上の今後の課題、計測器についての今後の課題について説明したものである。また、管理基準値の一律な設定は困難であるものの、実際の管理の一助となるよう、これまでのモニタリング実施箇所における管理基準値の設定事例について巻末資料-1に紹介したほか、崩壊直前の前兆検知に有効なAE計測技術については特に、計測器の設置、計測・管理、評価方法等について「岩盤モニタリングにおけるAE計測マニュアル(案)」として巻末資料-2に示した。

5. まとめ

実際に岩盤斜面において挙動計測を行い、計測結果をもとに岩盤モニタリングの現地適用可能性と限界、岩盤崩壊予測及びモニタリング手法について検討を行った。その結果として、

- ①温度の影響を受ける計測データを補正し岩盤崩壊につながる累積変位を検出する手法
- ②画像解析による非接触での変位計測手法
- ③AE計測による崩壊前兆の検知手法
- ④崩壊形態別の計測機器配置方法

を提案することができた。また、これらに加えて計測上の留意点等を含め、研究成果を総合して「岩盤崩壊モニタリング要領(案)」を作成した。

なお、今後の課題としては、転倒型以外の崩壊に対する適用性の検証ができていないため、今後、現場での試行を行って崩壊時のデータを取得することにより、様々な崩壊形態に対する計測及び崩壊予測手法の適用性の検証を行っていくことが必要である。

参考文献

- 1) 門間敬一、小野田敏、落合達也、荒井健一、網木亮介、浅井健一：「岩盤崩壊モニタリング箇所での転倒崩壊に至るまでの変位挙動の実事例」、地すべり、第39巻第1号、pp.62-69, 2002.6.
- 2) 千田容嗣、門間敬一、浅井健一：「デジタルカメラ及びビデオ画像を用いた岩盤変位の簡易な測定方法」、土木技術資料、第44巻第3号、pp.46-51, 2002.3.
- 3) 千田容嗣、門間敬一、藤原鉄朗：「波形解析によるAEのノイズの分離手法に関する検討」、平成13年度砂防学会研究発表会概要集、pp.168-169, 2001.5.
- 4) 藤原鉄朗、金本康宏、千田容嗣、寺田秀樹、秩父顕美：「AE波形解析の岩盤モニタリングへの適用」、第40回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.587-590, 2001.8.
- 5) 千田容嗣、門間敬一、浅井健一：「AE波形解析の岩盤モニタリングへの適用に関する検討」、土木技術資料、第45巻第9号、2002.3（本特集号）.
- 6) 建設省土木研究所砂防部急傾斜地崩壊研究室・(財)砂防・地すべり技術センター・(株)エフエヌ回路設計ブロック・川崎地質(株)・(株)興和・佐藤工業(株)・飛鳥建設(株)・西松建設(株)・日本工営(株)・日本フィジカルアコースティック(株)・(株)間組・(株)フジタ(1999)：AEによる斜面動態計測システムに関する共同研究報告書、共同研究報告書第228号、建設省土木研究所、pp.190-192.
- 7) 浅井健一、小山内信智、千田容嗣、藤原鉄朗：「岩盤斜面でのAE計測による降雨ノイズ低減効果」、第41回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.413-416, 2002.8.
- 8) 神尾重雄、吉松弘行、網木亮介、脇坂安彦：「国道229号第2白糸トンネルにおける岩盤崩落」、土木技術資料、第39巻第11号、pp.2-5, 1997.11.
- 9) 斎藤迪孝：「第3次クリーブによる斜面崩壊時期の予知」、地すべり、第4巻第3号、pp.1-8, 1968.

浅井健一*



独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ地
すべりチーム主任研究員
Kenichi ASAI

小山内信智**



独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ火
山・土石流チーム上席研
究員(前 地すべりチ
ーム上席研究員)
Nobutomo OSANAI