

◆特集：最近の地震災害と耐震技術◆

地震に起因する土砂災害対策の現状と課題

小山内信智* 栗原淳一** 藤澤和範*** 花岡正明****

1. はじめに

平成16年10月23日17:56頃、新潟県中越地方で最大震度7を観測する地震が発生した。この地震とその後の余震により、新潟県中越地方における土砂災害の発生箇所数は、土石流4カ所、地すべり131カ所、がけ崩れ90カ所に及び、これらの土砂災害により4名の方が犠牲となった(国土交通省砂防部平成16年12月31日まとめ)。

土砂災害を引き起こした地すべり・斜面崩壊等は、旧山古志村(現長岡市)を中心に数多く発生した。国土交通省北陸地方整備局湯沢砂防事務所の調査結果によれば、地震直後(平成16年10月24日)に撮影された空中写真から判読された地すべり・斜面崩壊は計3,791箇所へのぼり、その内、362箇所は崩壊幅50m以上の大規模な崩壊であった。また、崩壊土砂量が100万 m^3 を超えると推定される極めて大規模な地すべり・斜面崩壊も12箇所発生した^{1),2)}。

また、旧山古志村を南北に流れる信濃川水系魚野川右支川の芋川(流域面積38.4 km^2)では、発生した地すべり・斜面崩壊の一部が河道を閉塞した。芋川流域の河道閉塞の発生箇所数は52箇所へのぼった。河道閉塞発生地点の上流側には湛水が生じ、河道閉塞箇所のうち、規模の大きな東竹沢などで家屋の浸水被害が生じた。

そこで、本稿では、新潟県中越地震によって発生した砂防施設・雪崩対策施設の被災実態および崩壊・地すべりの実態と特徴を調査した結果を示すとともに、河道閉塞の要因となった地すべり・斜面崩壊の発生場に関する予測の試みと課題について整理する。

2. 砂防施設・雪崩対策施設の被害

2.1 砂防施設の被害

今回の地震により、被災箇所数は多くないものの、大きな地震力がえん堤に直接作用したり、地

すべりを誘発して砂防えん堤に被害が生じた。被災形態は以下のように2つに分類された。

①地震動による打継部での破損

今回の地震により被災したえん堤のうち、大半がえん堤の打継部を境にずれが生じたものである(写真-1)。えん堤の軸方向の打継部に沿ってクラックが入っているものが多く、数10cmのずれが生じているものもあった。いずれも水通し部の底部と同じレベルの打継部でずれが生じているのが特徴である。このタイプの破損の多くは昭和40年代以前に施工されたえん堤で生じていたが、平成になってから施工されたえん堤でもこのタイプの破損が若干みられた。詳しい検討はこれからであるが、このタイプの破損は施工品質に起因したものが多かったと考えられる。

②地すべりによるえん堤の破損

地震により地すべりが発生し、その地すべり土塊がえん堤に作用して破損したケースが見られた。①に比べて数は少ないものの、①の破損よりも被害の規模が大きいのが特徴である。

2.2 雪崩対策施設の被害

2.2.1 調査対象範囲・調査方法

これまで、地震による雪崩対策施設の被災実態はほとんど報告されていないこと、積雪期における被災地への影響を考慮し、土木研究所雪崩・地すべり研究センターでは実態把握を目的に、11月1日から降雪直前の12月24日にかけて現地調査を

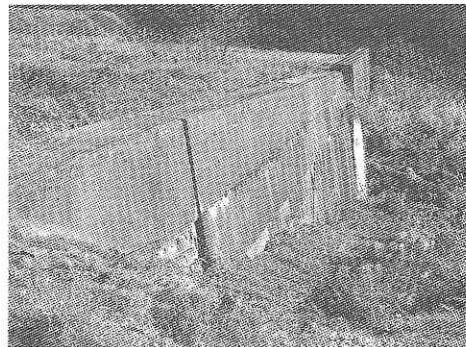


写真-1 打継部で下流方向へのずれが生じている水沢新田地区の小屋柄川第2号砂防えん堤



写真-2 斜面崩壊に伴う予防柵の落下状況
(新潟県小千谷市)

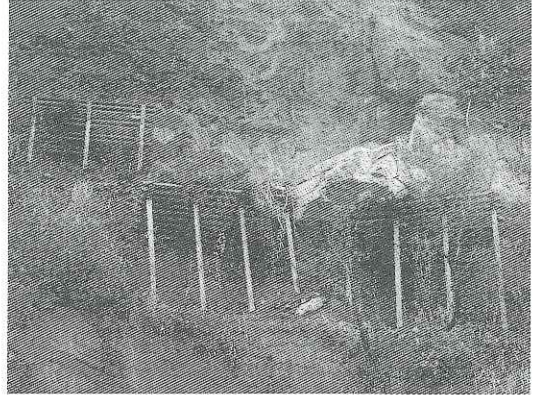


写真-3 予防柵への土石の落下・堆積状況
(新潟県十日町市)

行った。調査対象範囲は、中越地方を中心とした19市町村（平成16年11月1日現在；栃尾市、長岡市、小千谷市、十日町市、柏崎市、魚沼市（旧堀之内町、小出町、湯之谷村、広神村、守門村、入広瀬村）、南魚沼市（旧六日町、大和町）、川口町、越路町、小国町、川西町、高柳町、松代町、松之山町、津南町、山古志村、中里村、大島村、浦川原町）で、213箇所を調査した。そのうち雪崩予防工の設置箇所が207箇所（1箇所のみ吊柵）、雪崩防護工が6箇所である。

2.2.2 調査結果

全ての雪崩防護工と雪崩予防柵の143箇所では施設の被災は見られず、雪崩予防柵63箇所及び吊柵1箇所では施設が地震によって何らかの影響・破損を受けているのが確認された。これら予防工の地震による影響・破損は、小千谷市、川口町、山古志村で特に顕著に見られ、その周辺の栃尾市、長岡市、十日町市、小国町、魚沼市（旧広神村にあたる地域）でも数多く確認された。

被災は施設が位置する斜面上の落石や斜面崩壊に伴って生じたものが主であり、地震動が直接的に影響を与えたものではなかった。それらは、斜面の崩壊に伴い①予防工の基礎が露出している、②予防工が下部へ移動・落下している（写真-2）、③予防工に上部から落下してきた土石・樹木が堆積している（写真-3）の3つに大別できる。上述の64箇所について、①、②、③はそれぞれ9、35、64箇所見られた。

なお、②については、柵部と基礎が一体のまま移動・落下し破損している場合と、柵部と基礎が分離した形で移動・落下し破損している場合が見

られた。③については、予防工に変状が無く堆積物も少ないためこれを除去することにより機能の回復が可能な箇所から、大量の土砂や樹木が堆積し雪崩予防の効果が期待できない箇所まで程度は様々であった。

2.2.3 今後の課題

今回の調査により、数多くの雪崩予防工が何らかの影響・破損を受けたことが分かった。今後、調査結果の解析を行い、より適切な雪崩対策施設の計画・設計手法について検討していきたい。

3. 地震による斜面崩壊及び地すべりの特徴と発生場の予測

3.1 地震による斜面崩壊発生危険度評価

3.1.1 背景

国総研砂防研究室では兵庫県南部地震による六甲山地の崩壊事例を基に、一般的に入手可能な地形、地震動特性を説明変数とした地震時の山腹斜面を対象とした崩壊危険度評価式（式1：以下では「基礎式」と呼ぶ）を提案してきた³⁾。

$$F = 0.075I - 8.9c + 0.0056a - 3.2 \quad (1)$$

ここで、Fは判別得点で値が大きいほど斜面崩壊の危険度が高いことを示す、Iは斜面勾配（°）、cは斜面の平均曲率、aは最大加速度（cm/s²）である。さらに、基礎式を1997年の鹿児島県北西部の地震、2000年の神津島の地震に適用し、Fの増大にともない各得点の全メッシュ中に占める崩壊メッシュの割合は上昇することを確認した³⁾。

一方、新潟県中越地震では、これまで検討した3つの地震ではほとんど見られなかった崩壊土量

10⁶ m³以上の規模の大きい崩壊・地すべりが多発するとともに、崩壊面積率が大きかった¹⁾。そこで、崩壊が多発する地震・地域に対する同手法の有効性、大規模崩壊・地すべりに対する同手法の汎用性、有効性について検討した。

3.1.2 検討方法

本検討では、旧山古志村役場、東竹沢地区など芋川の河道閉塞箇所を含む4×5kmを対象とした。地形量は、地震後の10月28日にレーザー計測により得られたDEMより算出した。崩壊地分布に関しては、10月24日に撮影された空中写真(1:10000)を判読し、ポリゴンデータを作成し、検討に用いた。なお、判読の際に、概ね崩壊した土塊の50%以上が元の形状を保ったまま、崩壊発生域内に残っていて、かつ発生源の平均傾斜が30°未満のものを地すべり、それ以外のものを斜面崩壊として区分した。また、10mメッシュの中心が崩壊ポリゴン内にある場合、そのメッシュは崩壊メッシュとして扱うこととした。地震動の最大加速度算出に用いる震央の座標、断層の座標、マグニチュードは地震調査研究推進本部地震調査委員会が示した値を用いた。

斜面勾配、平均曲率、地震動の最大加速度の算出結果を基に、メッシュごとの判別得点(F)を基礎式より算出し、判別得点(F)と崩壊面積率(P:各判別得点の全メッシュに対する崩壊メッシュの割合)の関係を検討した。さらに、中越地震の崩壊地分布データに基づき、同様の判別分析を実施し、判別関数式を算出した。その結果、式(2)(以下、中越式と呼ぶ)が得られた。

$$F = 0.079I - 35c + 0.018a - 7.3 \quad (2)$$

3.1.3 検討結果

図-1には基礎式と中越式から算出したF-P関係を示した。図-1に示したように、基礎式及び中越式で算出したF-P関係はほとんど差が見られなかった。いずれの場合においても、Fの増大にともない、Pが急激に増大する傾向が見られた。このことから、基礎式及び中越式のいずれもが斜面崩壊発生危険度を相対的に評価できることが分かった。すなわち、中越地震の実績データが無くとも、基礎式により、斜面崩壊発生相対的危険度を表すことができることを示している。ただし、図-1に示したように、基礎式において求めたFでは、Fが負の領域においても崩壊面積率が

5%程度と比較的大きい。

次に、図-2に、基礎式で算出した各得点の全メッシュに占める斜面崩壊メッシュ及び地すべりメッシュの割合を算出した結果を示した。Fと地すべりメッシュが各得点の全メッシュに占める割合の間には顕著な相関が見られず、わずかではあるが点数が小さいほど地すべりメッシュのある割合が高くなった。一方、Fと斜面崩壊メッシュの割合の間には顕著な正の相関が見られた。

3.1.4 考察と課題

以上の結果、地震前においても、基礎式を用いることによって、経験的な手法で得られる最適に近い相対的な斜面崩壊危険度評価結果を得ることが可能であったと指摘できる。

一方で、基礎式では地すべり発生箇所を予測することはできないことが示された。このことから、地すべりが多発する地域では、基礎式と地震による地すべりの危険箇所を抽出する手法を組み合わせる必要があることがわかった。

3.2 地震により発生した地すべりの特徴

中越地震においては、多くの地すべり・崩壊が発生したが、地すべりと地震の関係については、これまで必ずしも明らかとはなっていない。さらに、前節でも検討したように地すべりの発生場の

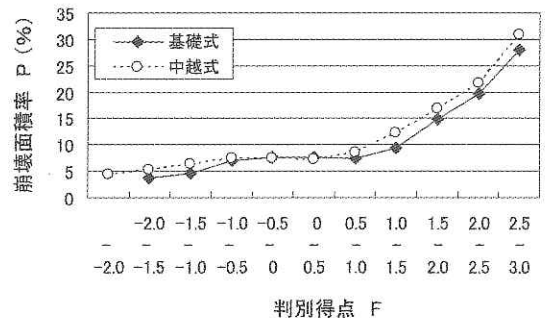


図-1 判別得点と崩壊面積率の関係

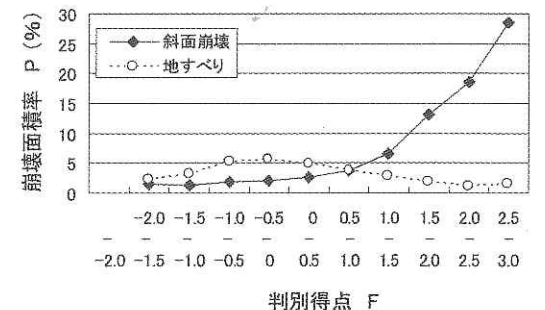


図-2 崩壊形態ごとの判別得点と崩壊面積率の関係

予測は斜面崩壊と同じ手法では困難であることが分かった。ここでは、地すべり発生箇所の地震動特性、地形的特徴と地すべり発生の関係を分析し、地震動が地すべり発生に及ぼす影響を調査した結果について述べる。

3.2.1 全般的な傾向

国土交通省による調査結果^{1),2)}によると、地すべり・崩壊の発生は、3,791箇所へのぼり、そのうち362箇所が崩壊幅50m以上の規模であった。崩壊幅50m以上の大規模な崩壊のうち約7割は震度6強以上の市町村で発生していたが、崩壊幅50m未満の崩壊における同様の割合は約5割であり、震度の大きな地域は、崩壊の規模が大きくなったことが窺われる。

3.2.2 震度、加速度との関連性

推計震度分布図⁴⁾に地すべり・崩壊発生箇所の分布図を重ねたものを図-3に示す。地すべり・崩壊発生箇所は推計震度6強以上に多く分布する傾向が認められた。しかしながら、推計震度7に更に集中するというような傾向は認められない。加速度の計測結果⁵⁾を用いて、合成、南北方向、東西方向、上下方向の成分毎に等加速度線を作成した。ここでは、図-4に合成成分の加速度分布図を、図-5に上下方向成分の加速度分布図を示す。図-4によると加速度の大きな範囲は芋川流域のやや南西よりであり、地すべり・崩壊が多発した芋川流域からずれている。一方、図-5の上下方向の加速度の大きな範囲は芋川流域内にあり、

地すべり・崩壊が多発した範囲と整合する傾向が認められた。

表-1に、過去の地震時に発生した大規模崩壊（明治時代以降の事例については崩壊土砂量が 10^5m^3 以上、江戸時代の事例については 10^6m^3 以上のもの）の断層最短距離（崩壊発生地点から直近の震源断層への水平最短距離）と、地震の規模（マグニチュード）から司・翠川の式によって求めた推定加速度値を示した表を示す。この表から、断層最短距離30km以内、そして、加速度値ではおよそ300ガル以上の範囲が、大規模崩壊の発生



図-4 加速度分布(合成)と地すべり・崩壊の分布の関係

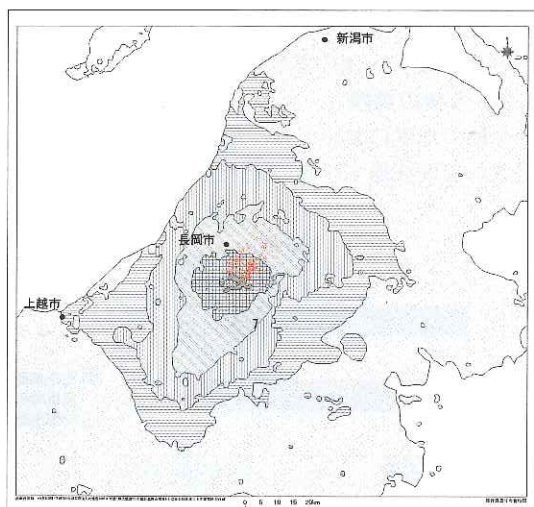


図-3 推計震度分布と地すべり・崩壊の分布の関係

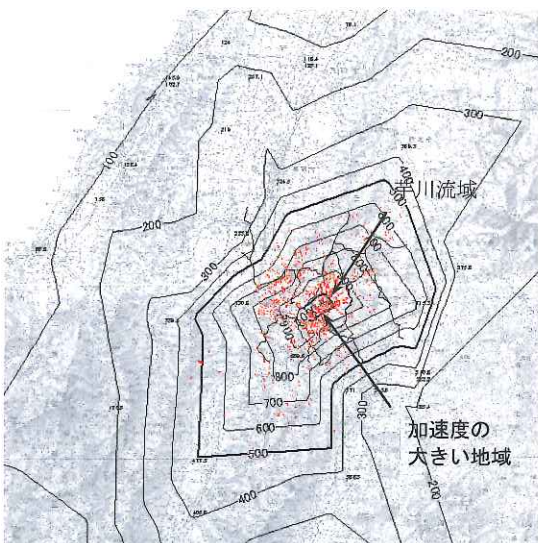


図-5 加速度分布(上下方向)と地すべり・崩壊の分布の関係

表-1 過去の地震時に発生した大規模崩壊

| 地震名 | 発生日 | 崩壊地 地区名 | 断層最短 距離 (km) | 最大加速 度 (gal) | 土砂量 (m^3) |
|-----------|------|------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 宝永東海 | 1707 | 大谷 | 29.4 | 463.1 | 120,000,000 |
| | | 白鳥山 | 14.2 | 616.8 | 5,000,000 |
| 安政東海 | 1854 | 白鳥山 | 14.2 | 616.8 | 600,000 |
| | | 七面山 | 29.7 | 461.1 | 66,000,000 |
| 関東 | 1923 | 大洞 | 9.2 | 663.3 | 1,000,000 |
| | | 根府川 | 10.0 | 649.9 | 3,400,000 |
| | | 震生湖 | 7.6 | 688.7 | 340,000 |
| | | 谷峨 | 14.1 | 592.5 | 420,000 |
| | | 玄倉 | 19.1 | 530.7 | 3,000,000 |
| | | 馬石 | 15.8 | 569.4 | 500,000 |
| 北伊豆 | 1930 | 山中新田 | 2.5 | 604.8 | 200,000 |
| | | 奥野山 | 2.4 | 615.8 | 200,000 |
| | | 大野 | 1.1 | 672.5 | 150,000 |
| 長野県 西部 | 1984 | 御岳崩れ | 5.7 | 415.0 | 34,000,000 |
| | | 滝越 | 6.7 | 382.3 | 500,000 |
| | | 松越 | 4.3 | 468.0 | 290,000 |

限界範囲として示すことが可能に思われる。一方、図-3に示したように、中越地震によって発生した大規模な崩壊の発生分布は、震源付近に限られており、その分布範囲は、上述の大規模崩壊の発生限界範囲（断層最短距離30km以内、または、加速度300ガル以上の範囲）に十分に含まれているといえる。このような発生限界範囲を定めることは、今後、東南海、南海地震時に発生する土砂災害への対応を考える場合の目安となるものと考えられる。

3.2.3 芋川流域における地すべりの特徴

さらに、芋川流域における地すべり・崩壊発生箇所として比較的規模の大きなもの140箇所を抽出し、3.1.2に述べたように地すべりと崩壊に分類

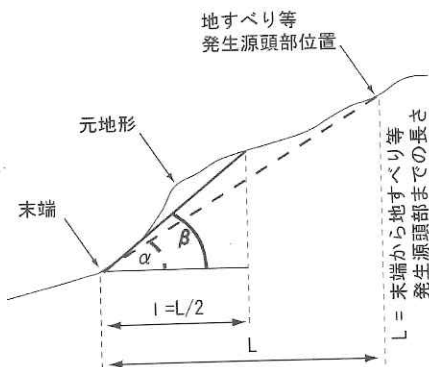


図-6 斜面形区分に用いた勾配 (α , β)

した。さらに、地すべりは、次の定義によりさらに2つに区分した。

① Aタイプ地すべり

地震発生前の地形図上で地すべり地形が認められない、あるいは不明瞭である斜面で発生した地すべりと、地すべり地形はみとめられるがその滑落崖以外を頭部として発生したもの。

② Bタイプ地すべり

地震発生前の地形図上で明瞭な地すべり地形が判読され、この範囲が滑動したもの。

その結果、地すべりは53箇所、崩壊は87箇所となった。さらに、Aタイプ地すべりとBタイプ地すべりに区分した結果、Aタイプ地すべりは34箇所、Bタイプ地すべりは19箇所となった。すなわち、64%は地震発生前の地形図上で地すべり地形が認められない、または不明瞭である斜面で発生した地すべりと地すべり地形においても既存の滑落崖以外を境界として発生した地すべりであった。

3.2.4 地すべり発生斜面の地形的特徴

地すべり・崩壊発生箇所の地すべり発生前の斜面末端部の形状が地すべり・崩壊の発生に及ぼす影響を調査するため、図-6に示す方法により勾配 (α , β) を求め、 $\beta - \alpha$ が正の場合には凸型斜面、零の場合には直線斜面、負の場合には凹形斜面と斜面形を区分した。図-7に示すように、崩壊は何れの斜面形においても同程度の割合で発生しているのに対して、いずれのタイプの地すべりも凸型斜面での発生が概ね70%を占めている。地すべり末端が凸型斜面であるものが多いことが、地震による地すべりの特徴とも考えられる。末端の勾配 (β) を調べたところ、崩壊は30~50°、地すべりは10~40°で多く発生していた。

3.2.5 今後の課題

今回の地震においては、地震前の地形図より想定される既往地すべりの範囲を境界とせず、新た

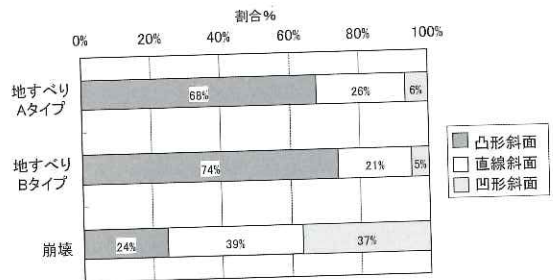


図-7 地すべり・崩壊発生箇所の斜面形

に地すべり地形を二分するように滑動した初生地すべりの発生が認められた。既往の地すべりが単に再滑動するのではなく、地すべり地形の凸型部分が地震動の影響を受けて不安定化するなど、新たな破壊面が形成されたことも考えられる。今後は、現地調査を実施してさらに詳細な分析を行い、地震により発生する地すべりの地形、地質の特徴とその発生機構を検討していく予定である。

3.3 大規模河道閉塞箇所の見手に関する検討

中越地震においては、芋川流域を中心に、複数の大規模河道閉塞が生じた¹⁾。一方で近年、レーザープロファイラ（以下、「LP」）を用いた空中測量の技術が急速に進歩してきた。そこで、地震直後にLPを用いて測定された地形データを用いて、大規模河道閉塞箇所の早期発見におけるLPの有効性について検討した。

図-8に2004年10月28日のLPを用いた芋川本川の縦断形の測定結果を示す。図示したように、東竹沢、寺野といったような大規模な河道閉塞箇所は、河道閉塞上流側で逆勾配になっており、容易に発見出来る。一方、十二平、榎木、南平の各箇所では、下流側に平均的な縦断勾配より急勾配な箇所が見られるものの、上流側に顕著な逆勾配な箇所が見られない。一方、これらの箇所の上流側にはほぼ水平な箇所が存在し、地震発生から5日後の28日には既に湛水が生じ、越流していた可能性が考えられる。以上の結果、LPを用いて、逆勾配の箇所、上流側がほぼ水平で下流側が急勾配な箇所を探索することで、河道閉塞箇所が発見できる可能性が示唆される。今後、LPの測定及びデータ解析に要する時間や実際の河道閉塞箇所とLPの測定結果から推定した河道閉塞箇所の整合性について検討していく予定である。

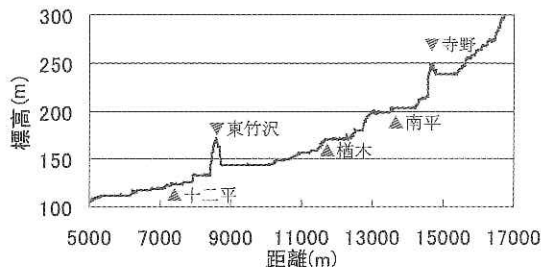


図-8 2004年10月28日のレーザープロファイラを用いた芋川本川の縦断形の測定結果
(横軸は魚野川との合流点から距離)

4. まとめ

以上本報告では、中越地震による河道閉塞を含む土砂災害および対策施設に関する被災の実態や特徴について述べた。今後、切迫した地震による被害を防止・軽減するため、それぞれの課題の解決に向けて調査・研究を進めて行きたい。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局砂防部保全課：平成16年新潟県中越地震に伴う斜面崩壊の発生状況について（続報）、<http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/05/050113.html>, 2005
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(独) 土木研究所、(独) 建築研究所：平成16年（2004年）新潟県中越地震被害に係わる現地調査概要, 2005.
- 3) 内田太郎・片岡正次郎・岩男忠明・松尾 修・寺田秀樹・中野泰雄・杉浦信男・小山内信智：地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究、国土技術政策総合研究所資料, 204号, 91p., 2004
- 4) 気象庁：2004年10月23日17時56分新潟県中越地方推計震度分布図、気象庁ホームページ, http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2004_10_23_niigata/event/map200410231756_suikei.html, 2004
- 5) 気象庁：「新潟県中越地震における最大加速度」、気象庁ホームページ, http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/jishin/041023_niigata/1756/nigata_main.htm, 2004

小山内信智*



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室長
Nobutomo OSANAI

栗原淳一**



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
Jun-ichi KURIHARA

藤澤和範***



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上席研究員
Kazunori FUJISAWA

花岡正明****



独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ雪崩・地すべり研究センター所長
Masaaki HANAOKA