平成16年新潟県中越地震における地すべり地形斜面の再滑動の実態と移動・堆積特性

Geomorphic analysis of the mobility and deposition characteristics of the old landslides reactivated by the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake

森脇 寛^{a)*}・佐々木良宜^{a)}

Hiromu MORIWAKI and Yoshinori SASAKI

Abstract

The 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake (M6.8) triggered a large number of landslides around the epicenter region. This region geologically consists of Neogene mudstone and sandstone, and is typical landslide-prone area. In this earthquake, many old landslides were reactivated and caused great damages. The initiation and the movement of these landslides were investigated by means of field survey and comparison of the landslide distribution maps, which were made before and after the earthquake. It was found that both old and new landslides were remarkably distributed on slopes facing to the west controlled by the geological structure in this region. Approximately half of the new landslides were occurred on the slopes of old landslides, but most of them were partial slides and only five percent of the new landslides was recognized as the reactivated slide of the entire old landslide masses. Topographic analysis on the entirely reactivated landslides showed that both the first slides (old landslides) and the second slides (reactivated ones) slid with less difference in their width and length. Equivalent coefficient of friction H/L (H : runout height; L : horizontal runout distance) for the second landslides was proportional to the slope of their source area as well as that of the first slides, even if the second landslides have higher mobility than the first ones.

Key words: old landslide, earthquake-induced landslide, reactivation, equivalent coefficient of friction, mobility

和文要旨

2004年10月23日に発生した平成16年新潟県中越地震 (M6.8) により、新潟県旧山古志村周辺では地すべり・崩壊が多発し、大きな被害を受けた。本地域は第三紀層地すべりと呼ばれる地すべりの多発地帯で、過去に滑動した痕跡を示す地すべり地形斜面の再滑動も多く見られた。その実態と運動特性を明らかにするために、旧山古志村を中心に現地調査ならびに地震発生前後の地すべり分布図を用いて地形解析を行った。その結果、地すべり地形斜面も今回の地震により発生した地すべり・崩壊も当地域の地質構造を反映して概して西向きの斜面に卓越していることがわかった。また、今回の地震で発生した地すべり・崩壊数の約半数近くは地すべり地形斜面で発生している。しかし、そのほとんどが部分的な再滑動で、地すべり土塊全体が再滑動した地すべりは地震で発生した地すべり・崩壊総数の約5%であった。さらに、この地すべり土塊全体が再滑動した地すべりを抽出し、その変動量と地すべり地形斜面形成時の変動量を比較検討したところ、両者とも移動方向、幅方向にはそれほど伸縮・拡散しないで移動したこと、ならびに地すべり土塊の流動性を示す等価摩擦係数 (最大移動高/最大水平移動距離) については、再滑動した地すべりのほうが地すべり地形斜面形成時の運動に比べて流動性が高いが、どちらも崩壊源の斜面勾配と比例関係にあることが明らかになった。

キーワード: 地すべり地形, 地震時地すべり, 再滑動, 等価摩擦係数, 流動性

1. はじめに

2004年10月23日17時56分、新潟県中越地方を中心にM_{JMA}6.8の地震 (平成16年新潟県中越地震) が発生した。そのため、旧山古志村 (2005年4月1日に中之島町、越路町、三島町、小国町とともに長岡市と合併し、長岡市となる)、小千谷市、長岡市、川口町では地すべりや斜面崩壊が多発し、甚大な被害を被った。とりわけ、旧山古志村では村の中心を南北に流れる芋川沿いの寺野地区や東竹沢地区などで大規模な地すべりが発生し、川の流れを堰止めたため、点在する集落が水没するなど二次的被害を受けた。著者らの現地調査によると、この芋川を堰止めた地すべりをはじめ、いくつかの比較的大きな地すべりは、過去に地すべり活動があった痕跡を地形的に示している斜面 (以下、地すべり地形斜面と呼ぶ) で発生していることが明らかになった。

地すべり地形斜面の再滑動による土砂災害が指摘されたのはこれが初めてではない。たとえば、1982年8月奈良県西吉野村和田地すべり (米谷ら, 1983) をはじめ、1997年5月秋田県鹿角市澄川地すべり (大八木・池田, 1998)、2001年7月秋田県五城目町富津地すべり、2005年4月石川県羽咋市福水地すべり (防災科学技術研究所, 2006a) などいくつか報告されている。これらの報告事例だけを見ると、地すべり地形斜面はすべて危険斜面として認識されがちであるが、必ずしもすべての地すべり地形斜面が不安定であるというわけではない。地すべり地形斜面は斜面土層の平衡が破壊して移動・停止した結果、形成された地形であるから、基本的には安定しているという考えもある。今回の地震で再滑動しなかった地すべり地形斜面も数多く存在する。

この地すべり地形斜面の安定問題については、これまで報告された再滑動事例が散発的に発生しているため、統計的あるいは定量的な解析による議論が十分になされてこなかった。地すべり地形斜面が非地すべり地形斜面

* 連絡著者 / corresponding author

a) 防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

〒305-0006 つくば市天王台3-1

Tennodai 3-1 Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0006, Japan

に比較して、再滑動の危険度が高いかどうかを結論付けるには、同一の地質分布地域でほぼ同じ強度を有する地震動や降雨条件下での発生頻度の検証が必要である。今回の地震により地すべり・崩壊が多発した旧山古志村はもともと「第三紀層地すべり」と呼ばれる地すべりの多発地帯で、地すべり地形斜面も密に分布しているところである。佐藤ら（2005）は今回の崩壊・地すべり発生箇所における第三紀層を構成する個々の岩質の有意性は見当たらないという報告をしており、地すべり地形斜面の再滑動率の評価を行うには条件的に都合が良い地域である。また、現実に芋川沿いでは全てではないにしても、いくつかの地すべり地形斜面が再滑動して被害をもたらしている。地すべり地形斜面の危険度評価とともに、再滑動した地すべり土塊（地すべり移動体）の移動・堆積範囲などの運動予測も重要な課題となっている。

本研究では上記の観点から現地調査および地震発生前後の地すべり分布図による地形解析により、今回の地震により発生した地すべり・崩壊に地すべり地形斜面がどの程度関与しているのか、その実態を明らかにするとともに、地すべり移動体が再滑動した場合、最初の地すべり地形斜面形成時の滑動と同じような運動特性を呈するのかどうかなどを検討した。

2. 調査地域の概要

調査地域を図-1に示す。本地域は、新潟県古志郡旧山古志村を中心に東西約12.8km、南北約10.7kmの矩形の範囲である。本研究では地すべり地形斜面の危険度評価を目的にしているため、調査範囲の選定については、今回の中越地震による地すべり・崩壊が多発していることに加えて、その対象となる地すべり地形斜面が数多く分布していることを条件とした。この調査地域に分布する地すべり地形斜面数は後述するように1,500箇所を超えている。図中の☆印は震央（緯度37.29，経度138.87，深さ13km）を表す。

図-2に調査地域の地質とその構造（柳沢ら，1986；小林ら，1991）を示す。調査地域に分布する地質は主に新生代新第三紀鮮新世の地質年代に位置し、下部から荒谷層（主に暗灰色塊状泥岩）、川口層下部（砂岩優勢砂岩泥岩互層，デイサイト質火山角礫岩）、川口層上部（泥岩優勢砂岩泥岩互層，砂岩）からなる。中越地方は活褶曲帯と呼ばれ、地殻運動の激しい地帯である。調査地域には北北東-南南西方向に西側から、東山背斜軸，金比羅向斜軸，峠背斜軸，梶金向斜軸，小松倉背斜軸が交互に存在するほか、北部中央付近にはこれらの背斜軸と平行に鋸山断層が走っている。

本地域をはじめ新潟県は国内でも有数の地すべり多発地帯として知られている。毎年、豪雨期や融雪期には地すべり活動が活発になり、多大な被害を被っている。県内の災害をもたらした地すべりの統計（南木ら，2002）によると、最近19年間の地すべり発生件数は1,387件で、

図-1 調査地域（☆印は震央）
Fig. 1 The survey area（☆：Epicenter）

図-2 中越地方の地質構造（柳沢ら，1986，小林ら，1991の図を修正，加筆）

Fig. 2 Geological structure in the Chuetsu region (after Yanagisawa et al., 1986 and Kobayashi et al., 1991)

そのうち82.8%が新第三紀の堆積岩層の地域で発生している。また、県内の地すべり平均幅は64.4m，平均長さは106.5m，地表傾斜は15°～20°と25°～30°に頻度分布

のピークがあり, 35° 以下での地すべりの発生が全体の90%を占めている。地すべりの誘因は降雨 (635件, 54.2%) と融雪 (752件, 45.8%) で二分され, 新潟県内では地震による地すべり・崩壊災害が発生したのは少なくともこの20年間で今回が初めてとなる。

図-3は調査地域内の地すべり地形斜面の分布状況を表している (防災科学技術研究所, 2004)。地すべり地形斜面は, 東部の一部 (白岩層) を除いてほぼ全山地域に分布し, 地すべり活動が地形発達の大いなる営力となっていることがうかがえる。特に図幅中央右付近から中央下部にかけての芋川沿いの寺野-東竹沢地区, ならびに図幅中央下部の木沢, 塩谷地区には規模の大きな地すべり地形が数多く存在する。

3. 平成16年新潟県中越地震により発生した地すべりの概要

今回の地震による中越地方の地すべり・崩壊の発生状況についてはすでに詳細な調査がいくつかなされている (千木良, 2004; 大八木ら, 2005; Sato et al., 2005; 石井ら, 2005; 関口・佐藤, 2006; 八木ら, 2006; 八木ら, 2007など)。本章では主にそれらの既往論文や著者らが調査した資料などをもとに, 本調査地域における地すべり・崩壊の特徴や誘因との関係を概観する。

3.1 地震発生後の地すべり分布と崩壊タイプ

図-4は八木ら (2006) が中越地震後に作成した新規の地すべり・崩壊の分布図から図-3と同じ調査範囲を切り出して表示したものである。関口・佐藤 (2006) が

指摘しているように芋川流域と東山背斜軸より西側の地域で密集していることがわかる。一方, 図幅の右上部, 右下部, 左上部付近は地すべり地形斜面が多い地域にもかかわらず (図-3), 今回の地震による地すべり・崩壊の発生は少ない。この一因として震央から遠いことが考えられる。Sato et al. (2005) は, 斜面崩壊分布は岩質の違いよりも褶曲構造を有する第三紀層の流れ盤構造に依存すると報告している。千木良 (2004) は地すべり・崩壊の形態を1) 大規模地すべり, 2) 風化物と崩積土の崩壊, 3) 谷埋め土石の流動化, 4) 表層崩壊の4つのタイプに分けてそれぞれ特徴を述べている。

3.2 地震動と地すべり発生との関係

防災科学技術研究所 (2006b) の小千谷観測点では, 当時, 1,500gal, 136cm/sという地震動が観測されている。石井ら (2005) は今回の地震による推計震度分布図と地すべり・崩壊箇所の分布図の重ね合わせを行っている。その結果, 地すべり・崩壊は推計震度6強以上の地域に多く分布する傾向が認められるが, 推計震度7以上の地域にさらに数多く集中する傾向は認められないこと, ならびに南北, 東西方向の加速度よりも, 上下成分の加速度の大きな地域で地すべり・崩壊が多発する傾向が見られたと報告している。

3.3 先行降雨の影響

今回の地震発生3日前の2004年10月20日に長岡市で日降水量102mmの豪雨を記録した (気象庁, 2005)。10月の地震発生前まで累積雨量は227mmに達している。気象庁 (2005) の統計情報 (1979-2000) によれば, 10月

図-3 調査地域内の地すべり地形斜面の分布 (地震発生前) (地すべり地形分布図「長岡・高田」の一部, 防災科学技術研究所, 2004に主な地名等を加筆)
図中の番号は表-2の地すべり番号, 灰色の領域は地すべり地形の範囲を示す。

Fig. 3 Distribution of old landslides in the survey area (after the landslide map "Nagaoka & Takada", NIED, 2004)
The numbers and the grayish colored areas refer to the landslides listed in Table 2.

図-4 平成16年新潟県中越地震による地すべり・崩壊分布図 (八木ら, 2006作成図の一部に補筆)
☆印は震央を表す。

Fig. 4 Distribution of new landslides triggered by the earthquake in the survey area (after Yagi et al., 2006).
☆: Epicenter.

の日降水量，月降水量の平年値はそれぞれ6－7 mm，195mmであるので，月降水量としてはそれほど多くないが，当日の日降水量はきわめて多いものであった。さらに遡って調べてみると，同年7月13日の日降水量は10月20日の日降水量のほぼ2倍に相当する225mmを記録している。その直前の4日間で7月10－13日の累積雨量は320mmに達しているが，この時点で地すべりや斜面崩壊が多発した報告はない。したがって，10月20日の降雨量は単独で崩壊発生を生じるほどの豪雨ではなかったと考えられる。しかし，大量の雨水が斜面土層のすべり面付近に到達し，飽和層を形成すれば間隙水圧の上昇により土層のせん断抵抗力は低下し，無降雨状態よりも崩壊しやすくなる。また，斜面土層が大量の水分を含んでいる場合は滑動とともに地すべり移動体そのものが流動化しやすくなるので，その拡散度などの変動量調査からある程度その影響を評価することができる。

4. 地震発生前後の地すべりの発生に関する地形解析

4.1 解析手順

まず，既往の地すべり地形分布図（図－3）から地震発生前の地すべり地形斜面を選び出し，その位置，発生数と移動方向の分布を調べた。次いで，地震発生後に作成された地すべり・崩壊分布図（図－4）を用いて同様の作業を行い，両者を統計的に比較検討した。解析にあたって，先述したように地質的要因による局在性を見出すのは難しいという報告（佐藤ら，2005）もあるので，本稿では地質区分による検討は除いた。

以下では記述をわかり易くするために，次の用語を用いる。

「旧地すべり」 Old landslide

地震発生前から存在する地すべり地形斜面で，地すべり地形分布図（図－3）に記載されているもの。発生誘因および発生年代は不明。

「新規地すべり」 New landslide

今回の中越地震により新たに発生した地すべり・崩壊。図－4に記載されているもの。

「再滑動地すべり」 Reactivated landslide

新規地すべりのうち，旧地すべり区域内で発生したもの。地すべり移動体全体が動いたものもあれば，その一部だけが滑ったものも含まれている。

ただし，ここで使っている「地すべり」という用語は，表層崩壊，岩盤崩落，山腹崩壊など空中写真から読み取れる斜面変動を包括し，すべり面の深さや運動形態などにに基づく仕分けは行っていない。また，「再滑動地すべり」を厳密に考えると，同じすべり面を有する地すべり土塊の再滑動を対象にしなければならない。しかし，地形図上からそれを確認することが困難であることと，本研究の主目的が地すべり地形斜面と判読されている「旧地すべり」の危険度を評価することにあるため，ここでは旧地すべり区域内で発生したものを「再滑動地すべり」とした。

とした。

4.2 旧地すべりおよび新規地すべりの発生状況の比較

4.2.1 発生箇所数

本調査地域内に分布する旧地すべり（地すべり地形斜面）は表－1に記載されているように，1,517箇所の斜面に存在する。今回の地震で新規に発生した地すべりは762箇所，そのうち，旧地すべりの全体，または一部が滑動した，再滑動地すべりは360箇所で見られた。これは新規地すべり総数の47.2%，同調査地域に分布する旧地すべり総数の23.7%にあたる。つまり，新規地すべりの約半数弱，旧地すべりの総数の約2割強が部分的な崩壊を含めて再滑動していることになる。しかし，次の4.2.2節でも述べているとおり，このうち，旧地すべりの地すべり移動体全体が再滑動している割合はさらに低くなっている（地すべり地形斜面総数の2.3%）。地すべり地形斜面総数に対する発生比率については調査区域の範囲設定によって左右される点を留意しなければならないが，この結果からみてもわかるように地すべり地形斜面の再滑動の発生頻度はそれほど高くなく，すべての地すべり地形斜面が潜在的に危険な斜面とはいえない。

4.2.2 再滑動した地すべり地形斜面の崩壊位置による分類と発生率

旧地すべり内で発生した，360箇所の再滑動地すべりは発生位置等により次の4タイプに分類できる。図－5はその分類の模式図と発生割合を示している。

- ① 全層崩壊 Full slide (36箇所，10.0%)
地すべり移動体のほぼ全体が滑動したもの。
- ② 上方崩壊 Scarp slide (51箇所，14.2%)
地すべり地形斜面の滑落崖もしくはその上方の未崩壊斜面が崩壊したもの。主に滑落崖斜面の崩壊が多い。
- ③ 末端崩壊 Toe slide (109箇所，30.3%)
地すべり移動体の末端の急崖が崩壊したもの。

表－1 調査区域内の中越地震前後の地すべり発生数の比較
Table 1 Comparison between the number of landslides before and after the earthquake

*The number includes partial slides occurred on the old landslides.

種 類 (Types)	箇所数 (Numbers)
A. 旧地すべり (A. Old landslides)	1,517
B. 新規地すべり (B. New landslides)	762
C. 再滑動地すべり (C. Reactivated landslides)	360*
新規地すべりに対する旧地すべりの再滑動率 C/B (Ratio of C to B)	47.2 %
全旧地すべりに対する再滑動地すべりの占める割合 C/A (Ratio of C to A)	23.7 %

*旧地すべり区域内で発生した部分的な崩壊も含む。

図－5 旧地すべり（地すべり地形斜面）の模式図と再滑動地すべりのタイプと発生割合

Fig. 5 Schematic figure of old landslide, type of reactivated landslides and their occurrence percentages

④ 部分崩壊 Partial slide (164箇所, 45.6%)

上記の①, ②, ③を除く, 地すべり移動体の一部が滑動したもの。広義の意味では②と③もこれに含まれる。

この結果から見ると, 再滑動した地すべりの約44.5%は, 地すべり地形斜面の滑落崖や末端で発生している小規模な崩壊である。どちらも急勾配を形成している斜面域である。残りの約45.6%は地すべり移動体内で発生した部分的なものである。地すべり移動体のほぼ全体が滑動した事例は再滑動地すべり総数の10%であった。この数字は今回の中越地震により発生した地すべり・崩壊総数(762箇所)の4.7%, 同地域に分布する地すべり地形斜面総数(1,517箇所)の2.3%に相当し, 再滑動率は低い。

地すべり移動体の滑動のしやすさは基本的にはその地すべり土塊が有する安全率で評価される。地すべり地形斜面はすべり面(脆弱面)が形成されているため, 安全率が低いという考え方もあるが, 第1章でも述べたようにもともと地すべり移動体は崩壊源から滑動して停止したもので, 崩壊後の平均斜面勾配は緩くなり, 安定度も高いという捉え方もできる。森脇(2001)は中越地方ではないが, 防災科学技術研究所発行の地すべり地形分布図「八幡平」図幅を用いて, 八幡平地域に分布する地すべり地形斜面の変動量を計測・解析した結果, いずれの地すべり地形斜面も崩壊前の前兆過程で停止している地すべり移動体は見られないと報告している。これは判読された地すべり地形斜面の大部分が崩壊を生じて滑動したのち安定勾配に達し, 停止したことを意味している。判読されている地すべり地形斜面は精度の問題もあり, ある程度, 変動量の大きなものに限定される点も考慮に入れなければならないが, 今回の地すべり移動体のほぼ全体が再滑動した割合の低さは, 一般に地すべり移動体の安定度が高いという考え方の優位性を示している。

4.2.3 地すべりの移動方向

図－6に旧地すべり, 新規地すべり, ならびに再滑動地すべり土塊の移動方向の分布を示す。旧地すべりは西

北－西南の方向にかけて集中している。その他の北－東－南の方向への移動は見られるものの, 西北－西南の方向に比較して半数に達していない。今回の地震で発生した新規地すべりも同じく西北－西南にかけて多く, 残りの方向への移動は少ない傾向が見られる。再滑動地すべりも当然ながら, 西北－西南にかけて多く分布し, 旧地すべり, 新規地すべりともほぼ一致した傾向を示している。

地すべりの発生箇所については, 地震動の影響は東西, 南北方向よりも上下動に依存するという報告(石井ら, 2005)や地質要因においても顕著な差異はないという報告(佐藤ら, 2005)を考慮すると, 特定の方向に地すべりが集中するのは地形的要因に依存するものと思われる。そこで, 地質構造と地形の関係からその要因を検討する。

図－7は762箇所の新規地すべりの移動方向, ならびに東山背斜軸を境に東西両地域に分けて新規地すべりの移動方向を調べたものである。西側の地域では西向き斜面が卓越しており, 東側の地域では東向きにも移動する地すべりも見られるが, 西向きに移動する地すべりの数が圧倒的に多い。同地域には図－2に示すように, 中央やや西よりの北北東－南南西方向に東山背斜軸が走っている。これを境に西側の地域では西側に傾斜する単斜構造を形成しており, 背斜軸と直角方向にあたる西方向(正確には西北西方向)に流下する流れ盤型地すべりが多く発生することが考えられる。一方, 東山背斜軸の東側地域では向斜軸と背斜軸が交互に走っており, 地形的には東西両方向(正確には西北西と東南東方向)に流れ盤型地すべりが多く存在すると推測できる。このように, 東西両地域における地すべり方向は総じて西方に移動する地すべりが多い結果になったものと考えられる。

5. 再滑動した地すべりの移動・堆積特性に関する検討

図－6 旧地すべり, 新規地すべりならびに再滑動地すべりの方向性

Fig. 6 Radar chart for the direction of old landslides, new landslides and reactivated landslides

本章では旧地すべりの地すべり移動体のほぼ全体が滑動した事例を対象としてその崩壊前後の地形変動解析から、地すべり土塊の拡散・伸縮度や等価摩擦係数について考察する。前述の全層崩壊タイプ36例から、地すべり移動体が単体で滑動し、隣接する地すべり移動体にその滑動が影響されていないものを抽出し（9例、表-2参照）、図-3、図-4を用いて計測した。計測項目は、旧地すべりおよび新規地すべりの地すべり移動体に関する各長さ、比高、幅である（図-8）。各発生域の脚部の位置（輪郭）は周辺の滑落崖や側方崖の形状から推定した。

以下では、地すべり運動を時系列的に区別するため、旧地すべり、すなわち地すべり地形斜面形成時の運動を一次すべり（First slide）、今回の地震により再滑動した地すべりの運動を二次すべり（Second slide）と呼ぶ。各記号の θ , H , L , の添字の1は一次すべり, 2は二次

すべりを表す。表-2中の緯度、経度は一次すべりの移動体の中央位置を表している。表-2で H_1/L_1 , H_2/L_2 （最大垂直高/最大水平移動距離）は、地すべり土塊の抵抗力が摩擦抵抗だけからなると仮定した場合、力学的にはその土塊の動摩擦係数に相当することから等価摩擦係数と呼ばれ、地すべり・崩壊土塊の流動性を示す指標として用いられている。この値が小さい場合は流動性が高いことを示す。Hsü（1975）やScheidegger（1973）らは、統計的に崩壊土量が大きくなるとその値は小さくなると報告している。

この再滑動地すべりは同じ斜面ではほぼ同じ規模で発生したものを対象としているが、一次すべりの地すべり移動体全体がそのまま正確に再滑動したわけではないので、一次すべり発生後の地すべり移動体の幅と長さは二次すべり発生前のそれらとはすべてが必ずしも一致していない。

5.1 地すべり移動体の崩壊による拡散・伸縮

図-9は、一次すべり、二次すべりについてそれぞれ崩壊前後の地すべり移動体の最大幅を計測し、その拡散の度合いを表したものである。図中の W_s は崩壊前の最大幅（水平幅）、 W_a は崩壊後の最大幅（水平幅）を示す。図の直線は $W_a = W_s$ の関係を示すもので、プロットがこの直線より上位に位置すれば、移動前の地すべり幅よりも広がったことになる。一次すべりでは幅0.46kmの地すべり1箇所、二次すべりでは、幅0.1km付近の地すべり2箇所に大きく拡散したのが見られる。地すべり移動体の拡散は土塊を構成する材料の物性的な性質と移動経路付近の地形形状に規定されるため、一義的には決定できないが、図-9に見られるように全般的には両地すべりとも横方向の拡散はそれほど激しくない。

一方、図-10は同じく崩壊前後の地すべり移動体の長さを計測し、その伸縮の度合いを表したものである。図中の L_s' は崩壊前の斜面長（斜面平行長さ）、 L_a' は崩壊後の斜面長（斜面平行長さ）を示す。図の直線は $L_a' = L_s'$ の関係を示すもので、図-9と同じくプロット

図-7 新規地すべりの全移動方向ならびに東山背斜軸を境界とする東西両地域に分布する地すべりの移動方向
Fig. 7 Radar chart for the direction of all new landslides, and the direction of new landslides on the western and eastern areas that categorized by a boundary along the Higashiyama anticlinal axis

表-2 解析に使用した再滑動地すべり（一次すべり、二次すべり）の諸元
Table 2 Data used for the analysis of old landslides and reactivated ones

No.	Place of landslides	Latitude of First slide (N37°)	Longitude of First slide (E138°)	Area of First slide (km ²)	$\tan \theta_1$ (First slide)	H_1/L_1 (First slide)	$\tan \theta_2$ (Second slide)	H_2/L_2 (Second slide)
01	旧山古志村中野	21'27"	54'55"	0.033	0.342	0.423	0.365	0.354
02	旧山古志村中野	21'24"	55'07"	0.008	0.425	0.401	0.342	0.341
03	旧山古志村寺野	20'31"	55'16"	0.061	0.288	0.314	0.289	0.228
04	旧山古志村竹沢	19'51"	53'10"	0.021	0.354	0.381	0.380	0.339
05	旧山古志村東竹沢	18'13"	54'22"	0.082	0.281	0.299	0.262	0.174
06	川口町木沢	17'45"	53'02"	0.048	0.284	0.323	0.526	0.403
07	川口町木沢	17'25"	53'14"	0.019	0.503	0.466	0.417	0.279
08	小千谷市塩谷	18'31"	53'25"	0.192	0.244	0.263	0.321	0.320
09	小千谷市塩谷	17'25"	54'21"	0.018	0.326	0.265	0.229	0.258

図-8 地すべり地形斜面の計測要素 (ハッチ部が地すべり移動体)

Fig.8 Measurement parameters of landslide mass (Hatch part: displaced landslide mass)

がこれより上位に位置すれば、崩壊前の斜面長よりも伸びたことになる。一次すべりでは斜面長の大きい地すべりでやや伸びた事例もあるが、おおむねほぼ伸縮もなく移動していることがわかる。二次すべりでは斜面長が0.3~0.4kmのもので少し伸びているものも見られるが、全体として大きな変化はほぼ見られない。むしろ、寺野地区では移動土塊が対岸まで到達して、長さ方向に縮小化したと報告されている(八木ら, 2007)。

図-9, 10から、本地域の地すべりは一次すべり、二次すべりとも概して地すべり移動体の長さ・幅を保ちながら移動している。つまり、地すべり土塊はひと塊の移動体として移動しているといえる。今回の東竹沢地区の現地調査では、地すべり移動体上の樹木が立木のまま移動している様相もみられている。上述の結果はこのような動きとも符合する。また、前述したように中越地震の発生3日前の10月20日に日降水量は102mm(最大時間雨量11mm/hr)、10月の地震発生前までの累積雨量は227mmに達しているが、地すべり土塊そのものが流動化(擾乱)するほどの大量の水分量は含んでいなかったと推測する。

5.2 地すべり移動体と等価摩擦係数

5.2.1 地すべり移動体の等価摩擦係数と斜面勾配

先述のHsü, (1975)やScheidegger (1973)らは、等価摩擦係数と崩壊土量との関係を明らかにしているが、事前に崩壊土量を見積もることは難しいという問題がある。これに対して、森脇(1987)は、地すべりや崩壊土塊の等価摩擦係数が崩壊源の平均斜面勾配に比例することを統計的に見出した。崩壊源の平均斜面勾配は事前に地形図上で判読できるので崩壊土量を指標とするよりも応用性がある。この関係式が誘因や地質などに関係なく成立することから、地すべりや崩壊土塊の流下距離の概

図-9 地すべり移動体幅の崩壊前後の比較

白丸印は一次すべり(旧地すべり)、黒丸印は二次すべり(再滑動地すべり)。

Fig.9 Ratio of the width of landslide mass before the slide to that after the slide

White circles: the first slides(old landslides), black circles: the second slides (reactivated landslides).

図-10 地すべり移動体長さの崩壊前後の比較

白丸印は一次すべり(旧地すべり)、黒丸印は二次すべり(再滑動地すべり)。

Fig.10 Ratio of the length of landslide mass before the slide to that after the slide

White circles: the first slides(old landslides), black circles: the second slides (reactivated landslides).

略予測手法を提唱している。また、森脇・八反地(2002)は第三紀層や第四紀火山体、破碎帯における地すべり地形斜面の等価摩擦係数を調べ、それぞれ係数は異なるものの、やはり崩壊源の平均斜面勾配に比例することを明らかにしている。今回は一次すべりと二次すべりとでは等価摩擦係数と平均斜面勾配との関係は異なるのかどうかを検討した。

5.2.2 一次すべり、二次すべりの等価摩擦係数

図-11は一次すべり(○印)、二次すべり(●印)における、それぞれ両者の関係を表したものである。本調査地域の一次すべり(○印)の場合も、等価摩擦係数は

(1)式で表されるように崩壊源の平均斜面勾配と比例関係にある (図-11の実線)。(1)式の R^2 は決定係数を表す。

$$H_1/L_1 = 0.76 \tan \theta + 0.09 \quad (R^2 = 0.716) \quad \cdots \cdots (1)$$

これは(2)式に示す山形県清川地すべりの第三紀層地すべりの関係式 (森脇・八反地, 2002) とほぼ同じ傾向を示している。

$$H/L = 0.76 \tan \theta + 0.03 \quad (R^2 = 0.730) \quad \cdots \cdots (2)$$

一方, 今回の中越地震により発生した二次すべりの分布 (●印) を見ると, 回帰直線 (図-11の一点鎖線) は一次すべりとほぼ同じ勾配を示すが, 流動性の高い地すべりも存在するため, 切片は一次すべりよりもさらに下方に位置し, 全体的に流動性は高くなっている。データの分散も一次すべりに比較して大きい。

$$H_2/L_2 = 0.60 \tan \theta + 0.09 \quad (R^2 = 0.573) \quad \cdots \cdots (3)$$

今後の地すべり対策などを考えれば, 最大移動距離が推定できる下限値を考慮したほうが良い。そこで, 図-11の下限に位置するNo.5, No.6, No.7から, (4)式で表される下限式 (図-11の破線) を求めた。

$$H_2/L_{2(Lower)} = 0.756 \tan \theta - 0.38 \quad \cdots \cdots (4)$$

上記の(1), (2), (3), (4)式はいずれも崩壊高さに対する移動距離の比は崩壊源の斜面勾配に比例する形で表されている。これらの式を用いて図式解法により崩壊源の平均斜面勾配からおよその移動距離を推定できる (森脇, 1987)。このように一次すべり, 二次すべりのいずれにしても, 統計的には有意な傾向を示しており, 本調査域の今後の地すべり地形斜面の再滑動にともなう被災域の予測について, ひとつの手がかりを得ることができた。特に二次すべりについては, (4)式で表される下限式を用いることによって地すべり対策上, より安全側の移動距離が推定できる。

5.2.3 流動性の高い地すべりの発生要因

二次すべりの中には山麓を流れる溪流まで移動した東竹沢地区 (No.5) や寺野地区 (No.3) などで流動性の高い地すべりが存在している (表-2)。これらの発生要因については現在までのところ決定的な説はないが, 地形的要因と土質力学特性の両面から合理的に考えられる。地形的要因については, 長年月にわたる河川の下刻作用による影響が挙げられる。今回再滑動した地すべりは溪流に面している流れ盤型地すべりが多い。河川水の流れにより地すべり地形斜面の下端が侵食され, 地すべり斜面全体の安全率が低くなっていたこと, ならびに対岸まで障害物がなかったことなどが考えられる。土質力学的な面については現地試料を採取して地震時リングセン断試験を行った佐々 (2007) らの研究がある。彼らによると, 両地区の地すべりともすべり面境界層である砂層のセン断に伴う土粒子の粉碎と過剰間隙水圧の上昇に

図-11 崩壊源の平均斜面勾配と等価摩擦係数

白丸印は一次すべり (旧地すべり), 黒丸印は二次すべり (再滑動地すべり) を表す。図中の黒丸印の番号は表-1, 図-3 参照。

Fig. 11 Relationship between the equivalent coefficient of friction and average slope on the source area

White circles: the first slides (old landslides), black circles: the second slides (reactivated landslides). The numbers on the black circles refer to Table 1 & Fig. 3.

よるすべり面液状化説を唱え, 流動性の高い地すべりであったことを指摘している。10月20日の先行降雨に加えて, 地震動, 土質的・地形的条件などの複合的な要因が相俟って流動性が高くなったものと考えられる。

6. まとめ

本稿では, 中越地震による地すべり地形斜面の再滑動に焦点をあてて, 新潟県旧山古志村を中心に調査地域を設定し, 地震発生前後の地すべり発生状況を比較検討した。その調査結果をまとめると, 以下ようになる。

- (1) 地すべり地形斜面および中越地震による地すべりの発生はおおむね西向き斜面に多く見られた。これは, 調査地域の東山背斜軸を境界とする西半分で西向きの単斜構造, 東半分では東西両方向の斜面が形成される褶曲構造を反映しているためであると考えられる。
- (2) 今回の地震により発生した地すべり・崩壊総数(762箇所)の47.2%が地すべり地形斜面区域内で発生している。その大半が部分的な崩壊で滑落崖や斜面末端の急斜面で発生しているものも多い。ほぼ全体が再滑動した箇所数は地震で発生した地すべり・崩壊総数の4.7%であった。この数字から見ると, 本調査地域では地すべり移動体全体が再滑動する確率はかなり低いといえる。
- (3) 地すべり移動体のほぼ全体が再滑動した地すべりについて新旧移動体の変動量を計測した結果, 地すべり地形斜面形成時 (一次すべり) も再滑動時 (二次すべり) のどちらも土塊の伸縮・拡散の割合は小さ

く、ひと塊の地すべり移動体として移動している。

- (4) 地すべり移動体のほぼ全体が再滑動した新旧地すべりの等価摩擦係数を調べた結果、一次すべりも二次すべりも崩壊源の平均斜面勾配と明瞭な比例関係にあることが明らかになった。この関係式を用いることにより、今後、当地域で滑動が想定される斜面の平均勾配からおよその土塊の移動距離を推測することができる。

7. おわりに

ここでは、地すべり地形斜面の再滑動の実態とその運動特性を明らかにするため、地震発生前後の地すべり土塊の変動量を計測・解析した。その結果、限られた範囲であるが地すべり地形斜面の再滑動率やその運動特性はある程度、数量的に評価することができた。現在、(独)防災科学技術研究所では地すべり地形分布図の全国網羅を目標に判読作業を進めている。その作成にとどまらず、次のステップとしてそれぞれ判読された地すべり地形斜面の危険度評価を行うことが防災対策に極めて重要であることを改めて痛感した。

また、今回の地震では、地すべり移動土塊が溪流を閉塞し、いくつかの集落が水没したほか、その地すべりダムの破壊による土石流化を懸念して下流の住民が避難を余儀なくされるなど、これまでに見られなかった地すべり災害の様相を呈した。これは個々の地すべり斜面のみを対象とした従来型の対策だけではなく、地すべりダムの形成・破壊も考慮に入れた、流域全体の土砂災害対策をたてねばならないことを示唆している。地すべり対策研究の新たな課題である。今後もデータを収集・解析し、地すべり地形斜面の危険度評価・運動予測を対象とした実用的な防災研究を進めたい。

謝辞

本解析にあたって、山形大学教授 八木浩司氏ならびに国土防災技術株式会社 山崎孝成氏には中越地震発後に作成された精緻な地すべり・斜面崩壊分布図の原図を快く使わせていただいた。心より御礼申し上げます。また、本稿をまとめるにあたって、(独)防災科学技術研究所 福岡輝旗氏ならびに元高知大学教授 日浦啓全氏には的確な助言をいただいた。京都大学防災研究所助教の王 功輝氏には英文校閲をお願いした。ここに記して皆様方に感謝の意を表します。

引用文献

- (独)防災科学技術研究所(2004):地すべり地形分布図 第17集「長岡・高田」,研究資料第244号。
 (独)防災科学技術研究所(2006a):地すべり地形分布図データベース, http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/jisuberi/jisuberi_mini/index.asp
 (独)防災科学技術研究所(2006b):近地地震動記録による新潟県中越地震の震源インバージョン, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/niigata041023/>.

- 千木良雅弘(2004):2004年中越地震による東山丘陵斜面災害について—地質・地形的特徴—,文部科学省科学技術振興調整費・平成16年(2004)年新潟県中越地震に関する緊急研究・テーマ2「地震時の土砂災害研究」グループ,(社)日本地すべり学会,(NPO)国際斜面災害研究機構,平成16年新潟県中越地震による斜面災害緊急シンポジウム講演集,pp.36-44。
 Hsu K.J.(1975):Catastrophic debris streams generated by rock-falls, Geological Society of America Bulletin, 86, pp. 129-140。
 石井靖雄・野村康裕・藤澤和範・西本晴男・鈴木常正(2005):平成16年(2004年)新潟県中越地震により発生した地すべりの特徴,第44回日本地すべり学会研究発表会講演集,pp.15-18。
 気象庁(2005):気象統計情報, <http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>。
 小林巖雄・立石雅昭・吉岡敏和・島津光夫(1991):5万分の1地質図幅「小千谷」,地質調査所。
 南木 均・池田則夫・高橋亮一・植野利康・寺尾 亮・高梨和行・渡部康弘・白村伸浩・坂井俊介・池田伸俊(2002):新潟県の地すべり災害実態による移動形態,第41回日本地すべり学会研究発表会講演集,pp.383-386。
 森脇 寛(1987):崩土の到達距離予測,地すべり, Vol. 24, No. 2, pp. 10-16。
 森脇 寛(2001):地表面移動量を指標とする地すべり斜面の崩壊危険度評価,地すべり, Vol. 38, No. 2, pp. 11-18。
 森脇 寛・八反地剛(2002):5万分の1地すべり地形分布図を用いた地すべり地形解析,地すべり, Vol. 39, No. 2, pp. 54-62。
 大八木規夫・井口 隆・藤田勝代(2005):2004年新潟県中越地震による地すべりの主なタイプ,第44回日本地すべり学会研究発表会講演集,pp.5-8。
 大八木規夫・池田浩子(1998):地すべり構造と広域場から見た澄川地すべり,地すべり, Vol. 35, No. 2, pp. 1-10。
 佐々恭二・福岡 浩・汪 発武・王 功輝(2007):平成16年新潟県中越地震により発生した再活動地すべり地における拘束地すべり発生・流動機構,日本地すべり学会誌, Vol. 44, No. 2, pp. 71-78。
 佐藤 浩・関口辰夫・小白井亮一・神谷 泉・長谷川裕之・鈴木義宜・飯田 誠(2005):中越地震による斜面災害状況図と雪崩のハザードマップ基礎情報図の作成,新潟県中越地震に関する緊急研究(文部科学省),研究成果の詳細報告,pp.1-14。
 Sato, H., Sekiguchi, T., Kojiro, R., Suzuki, Y. and Iida, M. (2005): Overlaying landslides distribution on the earthquake source, geological and topographical data, the Mid Niigata prefecture earthquake in 2004, Japan, *Landslides*, 2 (2), pp. 143-152。
 Scheidegger A. E. (1973): On the reach and velocity of catastrophic landslides, *Rock Mechanics*, 5, pp. 231-236。
 関口辰夫・佐藤 浩(2006):新潟県中越地震における斜面崩壊の特徴と分布,日本地すべり学会誌, Vol. 43, No. 3, pp. 14-26。
 柳沢幸夫・小林巖雄・竹内圭史・立石雅昭・茅原一也・加藤碩一(1986):5万分の1地質図幅「小千谷」,地質調査所。
 八木浩司・山崎孝成・守岩 勉・山科真一(2006):地すべり学会ホームページ,2004年新潟県中越地震にともなう地すべり・崩壊分布図—その特徴と詳細判読事例—(2006修正版), <http://japan.landslide-soc.org/>。
 八木浩司・山崎孝成・渥美賢拓(2007):2004年新潟県中越地震にともなう地すべり・崩壊発生場の地形・地質的特徴のGIS解析と土質特性の検討,日本地すべり学会誌, Vol. 43, No. 5, pp. 44-55。
 米谷恒春・森脇 寛・清水文健(1983):1982年台風第10号と直後の低気圧による三重県一志郡の土石流災害および奈良県西吉野村和田地すべり災害調査報告,国立防災科学技術センター(現防災科学技術研究所)主要災害調査,第22号,70p。
 (原稿受付2007年11月5日,原稿受理2008年9月5日)