2008年岩手・宮城内陸地震後の降雨により崩壊が発生した 山地斜面の地形的特徴

Geomorphological characteristics of mountain slopes with landslides induced by rainfalls after the Iwate-Miyagi nairiku earthquake in 2008

村上 亘^{a)}*, 大丸裕武^{a)}, 金子守男^{b)}

Wataru MURAKAMI, Hiromu DAIMARU and Morio KANEKO

Abstract

Here, we investigated the topographic characteristics of slopes where a rainfall-induced landslide had occurred after the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake on June 14, 2008. We compared shaded relief maps, contour maps, and cross sections from LiDAR data measured immediately and 3 months after the earthquake. The landslides were caused by rainfall less than those observed in usual rainfall-induced landslide occurrences. From a comparison of the maps, we observed that prior to landslide occurrence, oval or horseshoe-shaped gentle slopes had formed on the slope after the earthquake and cracks had appeared on these slopes. Similar micro-topographies were observed and checked by field survey on neighborhood slopes without landslide occurrences. From the results of a dynamic cone penetrometer and soil cross section, we determined that the weathering layer of the base rocks (Nc value of 10–30) was relatively thick on the slopes where the cracks had appeared. Further, it became clear that a weak layer (Nc value below 5) had formed in the weathering layer or near the border with the lower hard layer (Nc value over 40). Therefore, we consider that the weak layer became a slip plane and subsequently, landslide occurred despite lesser rainfall than that normally observed after an earthquake.

Key words: LiDAR, landslide, gentle slope, crack, the Iwate-Miyagi nairiku earthquake in 2008

和文要旨

2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震の直後、および3ヶ月後の9月に計測された航空レーザー測量データより作成した陰影図、等高線図、断面図を比較し、地震後の降雨により崩壊が発生した斜面の崩壊前の地形的な特徴を調査するとともに、調査結果をもとに同様な地形的特徴を持つ斜面を抽出し、現地を確認した。地震後の崩壊は通常より少ない降雨で発生していた。崩壊が発生した斜面では、崩壊発生前は楕円あるいは馬蹄形の緩斜面が存在し、そこに地震によって亀裂が発生していたと判断された。この地形的な特徴は、近傍の崩壊が発生していない斜面において同様な地形を判読し、現地調査から複数の斜面で亀裂の発生を確認したことで確かめられた。亀裂が発生している斜面では、貫入試験と土層断面調査の結果からNc値が10~30の風化層が比較的厚く、風化層内あるいは下層のNc値が40以上の硬い層との境界付近にNc値が5以下の軟弱な層が形成されており、地震後に崩壊が発生した斜面ではそれらをすべり面としてその後の降雨によって崩壊が発生したことが推測された。

キーワード: 航空レーザー測量, 崩壊, 緩斜面, 亀裂, 2008年岩手・宮城内陸地震

1. はじめに

地震にともなう山地斜面の崩壊現象については多くの調査研究が報告されている(川邊, 1987; 横山・菊山, 1997など)。また, 1995年の阪神淡路大震災(M7.3)以降, 地震後の降雨などによる2次災害の危険性も指摘され, 注意を促す報告も多くみられる(田結庄・藤田, 1996; 富田ほか, 1996; 沖村ほか, 1998; 西村・海堀, 2002など)。これらの調査報告は地震発生後, 数ヶ月から1, 2年までに発生した事例にとどまるが, これは発生した崩壊と地震との因果関係が地震から時間が経過するにしたがいはっきりしなくなるためと思われる。しかし, 崩壊地を調査すると, 以前の地震の際に発生したと判断される亀裂の存在が確認される等, 地震によって脆弱化した斜面が数年後の降雨により崩壊する可能性が指摘されている(小山ほか2009; 村上ほか, 2009; 村上ほか, 2013a)。このため, 地震により脆弱化した斜面を速やか

に抽出し評価することが, 防災の面から必要であると考え

える。近年, 航空レーザー測量の発達により, 従来よりも高精度な地形データをえることが可能となってきた(秋山, 1997)。そして, 複数の時期に計測された航空レーザー測量データを比較することにより, 地震による亀裂の発生のような斜面内の微地形の形成, あるいは斜面全体の変形を捉える事が可能となってきた(村上ほか, 2013b)。

本研究では2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震(M7.2)の際に, 多くの斜面崩壊が発生した岩手県一関市槻木平地区において, 地震直後と3ヶ月後に計測された航空レーザー測量データを比較し, 地震から3ヶ月後までに新たに崩壊が発生した斜面の地震直後, すなわち崩壊前の地形的特徴について報告する。あわせて, 検討結果を基に今後, 崩壊の発生する危険性の高い斜面を推測し, 現地を確認した結果についても報告する。

2. 調査地の概要

調査地である岩手県一関市槻木平地区は2008年岩手・

* 連絡著者 / corresponding author

a) 国立研究開発法人森林総合研究所森林防災研究領域
Forestry and Forest Products Research Institute
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1
1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, Japan.

b) 林野庁東北森林管理局
Forestry Agency, Tohoku Regional Forest Office

宮城内陸地震の震央より1 kmほど南に位置し、地震で崩落した祭時大橋より北東に約500m離れた場所に位置する(図-1)。調査地付近の地質は第三紀中新世後期の海成層(シルト岩, 砂岩および凝灰岩)である(栗駒山地熱地質グループ, 1986)。調査地およびその周辺には地震にともなう崩壊が多数確認される。調査地付近の地震直後と地震から3ヶ月経過した空中写真(オルソ画像)を図-2に示す。村上ほか(2013a)は調査地周辺でおこなった写真判読から、地震から3ヶ月経過した時点で、崩壊地の拡大や新たな崩壊の発生により崩壊地は地震直後より13.4ha増加し、このうちの31%が新規崩壊であったことを報告している。この間の調査地域周辺の降雨量としてAMeDAS臨時観測点「厳美」の降雨データを図-3に示す。期間中の降雨は日降雨量で最大84.5mm(8月24日観測, 時間最大雨量: 8 mm), 時間最大雨量は

32mm(7月12日観測)であった。調査地近傍のAMeDAS観測点「祭時」および臨時観測点「厳美」の観測開始から現在までの降雨データの解析から、日雨量はこの地域において年1回程度の確率降雨, 時間最大雨量は2年以上5年以下の確率降雨であった。調査地周辺で土砂災害が発生した最近の豪雨は、2002年7月9日~12日の台風6号にともなうもの(牛山, 2002)だが、その際の雨量はAMeDAS観測点「一関」において172mm(24時間最大, 「祭時」では160mm)であり、本調査期間中の降雨量はこの時の半分程度であった。また、野口ほか(2012)は先行土湿指数(ASI30)の算出結果より、地震直後から3ヶ月間のASI30は過去に記録した多雨・多雪年時には至っていないことを報告している。以上のことから、地震後に新たに確認された崩壊は従来この地域では崩壊が発生してこなかった雨量で崩壊が発生したことを示すものと考えられる。

3. 研究方法

本調査では、林野庁東北森林管理局より提供していただいた地震直後と地震3ヶ月後の2008年9月に実施した航空レーザ測量よりえられた2時期の地形データ, および測量と同時に撮影され、オルソ化された空中写真画像(解像度: 72dpi)を使用した。航空レーザ測量データは樹木等を除去(フィルタリング処理)したランダムなグラウンドデータを解析に使用した。まず、空中写真画像の比較から、地震後に新たに崩壊が発生した箇所を判読した。判読された崩壊斜面のうち、図-4に示す地震後に新たに崩壊が発生した斜面4ヶ所(A1-C; それぞれの位置は図-1を参照)について、崩壊前の地形的特徴を2時期の地形データの比較, および現地調査から明らかにした。地形データはArcGIS10.2において上記のグラウンドデータから1m解像度のDEMをそれぞれ作成し、それらを基に陰影図(光源方位: 315°, 光源高度: 45°), 等高線図(1m間隔)および断面図を作成

図-1 調査地位置
Fig. 1 Study Area

図-2 地震直後の崩壊の分布と3ヶ月後の新規崩壊の発生。空中写真(オルソ画像)は2008年6月14日の地震直後および3ヶ月後の2008年9月に林野庁により撮影された。撮影範囲は図-1に示す。

Fig. 2 Distribution of landslides immediately after the earthquake, and the occurrence of new landslides within 3 months of the earthquake. Aerophotographs (ortho images) were taken by the Forestry Agency in June (immediately after the earthquake) and September (3 months after the earthquake). The geographical range of the photos is shown in Fig. 1.

図-3 地震発生以降の降雨量(観測地点: AMeDAS臨時観測点「厳美」)

Fig. 3 Precipitation during the 3 months after the earthquake

白破線枠：地震3ヶ月後の崩壊範囲

図-4 地震後に崩壊が発生した斜面（左写真：地震直後（崩壊前），右写真：地震3か月後（崩壊後））。写真内のA1～Cで示した箇所において，地震後に崩壊が発生した。

Fig. 4 Photos of slopes on which landslides occurred after the earthquake. Left: immediately after the earthquake (prior to landslide occurrence). Right: 3 months after the earthquake (after landslide occurrence). On the area A1, A2, B and C in the slopes, landslides occurred after the earthquake.

して比較した。

調査結果を基に，崩壊が発生していない斜面において崩壊発生日点と同じ地形的特徴をもつ領域を判読し，現況を調査するために現地を踏査した。現地では土層構造の特徴を調べるために，簡易貫入試験を行うとともに，掘削して土層構造を調査した。

4. 調査結果

4.1 地震後に崩壊が発生した斜面の地形的な特徴

地震後に崩壊が発生した複数の斜面における地震発生直後，すなわち崩壊が発生する前の等高線図および崩壊前後の断面図を図-5および6に示す。対象斜面において地震後に崩壊が発生した場所では，図-5の等高線図でみると崩壊前はほぼ直線型の斜面形の中に幅，長さが10～20m程度の半月または馬蹄形の局所的な緩斜面，図

図-5a 地震後に崩壊した斜面の崩壊前後の等高線図(その1)
Fig. 5a Counter maps before and after landslide occurrence (Part 1)

図-5b 地震後に崩壊した斜面の崩壊前後の等高線図(その2)
Fig. 5b Counter maps before and after landslide occurrence (Part 2)

-6で示す縦断面図でみるとやや凸型となる微地形の存在が認められた。現地踏査から，地震後に崩壊が発生した斜面の崩壊頭部付近には，亀裂の発生が確認されることが多かった（写真-1）。

図-6 地震後に崩壊した斜面の崩壊前後の縦断面図。矢印は崩壊源頭部を示す。崩壊前は緩斜面であったことが判断された。

Fig. 6 Slope profiles before and after landslide occurrence. Arrows show the source of the landslide. Source slope of the landslide determined to be gentle.

4.2 崩壊が発生していない斜面における斜面崩壊の兆候の検出と確認

上述した微地形について、まだ崩壊が発生していない斜面での存在を等高線図から判読したところ、崩壊が認められない複数の斜面でも認められた。判読された緩斜面のうち、図-1に示すDの領域において現地を踏査し、現況を確認した(図-7)。図-7aは領域Dの実体視空中写真、図-7bは2006年9月の航空レーザー測量データから作成した1m間隔の等高線図に上述した微地形が確認される箇所を点線枠で示した図である。図-7cは現地を調査し、存在を確認した亀裂の実際の位置を示している。対象とした領域では空中写真、あるいはDEMより作成した陰影図から亀裂そのものは判読することができなかったが、等高線図から9か所の緩斜面が判読され(図-7b)、このうち8か所で亀裂の発生が確認された(図-7c)。亀裂は大きいものでも幅1.5m、比高は1m以下であった(図-7d1)。亀裂が確認された斜面では、亀裂より下側の斜面が下方に移動し、その下端で斜面がせり出している場所も認められた(図-7d2)。緩斜面と判読されなかった場所で亀裂が発生していたのは、1ヶ所のみであった(図-7c、図-9b: 縦断面B-B'付近)。

4.3 変形が認められる斜面における土質状況

現地で亀裂を確認した斜面のうち、図-7cで示した亀裂とその近傍の斜面において簡易貫入試験を行った。試験を行った斜面の縦断面図とその結果を図-8および9に示す。図-8で示す亀裂より上方の斜面(P1およびP5)では、表層より50~80cmの深さまではNc値が5以下の軟弱な層がつづき、それより深くなるとNc値が40以上の硬い層となる。一方で亀裂より下方の斜面では、

写真-1 A1の崩壊斜面源頭部で確認した亀裂。2009年6月26日撮影。写真の撮影位置は図-5aに示す。

Photo 1 Crack found near the top of the landslide (A1). The photo was taken on July 26, 2009, from the position shown in Fig. 5a.

表層より50~80cmの深さまではNc値が5以下であるが、それより深くなるとNc値が大きくなり10~30程度の範囲を示す層が100~250cmぐらいまでつづく。またこの深さのNc値は深さによって値の変動が比較的ばらつくのが特徴である。その層内にNc値が5以下の軟弱な層が深さ150~250cmの間に10cm以下の層厚で現れ、その後40以上の硬い層が現れた。

図-9では同じ斜面において亀裂が存在する場所(図-9b: 縦断面B-B'付近)と隣接する亀裂が存在しない場所(図-9b: 縦断面C-C'付近)を比較した。図-9で示す斜面は等高線図からは緩斜面の存在が認識できなかったが、縦断面図(図-9c)を比較すると、亀裂が存在する縦断面B-B'では、亀裂より下方斜面が亀裂の存在しない縦断面C-C'に比べ凸型の形状となっていた。縦断面B-B'の亀裂付近(P6, P7)および亀裂より下方のP8では表層より50~80cmの深さまではNc値が5以下であるが、それより深くなるとNc値が大きくなり10~30程度の範囲を示す層が100~200cmぐらいまでつづき、その層内にP6とP7ではNc値が5以下、P8でもNc値が10以下の層が10cm以下の厚さで現れ、その後Nc値が40以上の硬い層が現れる構造となっていた。亀裂のある斜面の一番下方、せり出しよりも下方のP9は表層から60cmからNc値が大きくなり80cm付近からNc値が40以上の硬い層となっていた。亀裂の存在しない縦断面C-C'では、表層より50~80cmの深さまではNc値が5以下の層がつづき、その後徐々に硬くなるが、Nc値が10~30の層はP11で30cm、P12で20cm程度の層厚であり、P10とP13ではほとんど認められなかった。また、Nc値が5以下の層はP11で認められるものの、他の地点では認められず、100cmより深くなるとNc値が40以上の硬い層となる構造であった。

土層構造を確認するために図-8に示す地点において

図一7 斜面変形を確認した斜面。a: 実体視空中写真(国土地理院撮影(CTO-2008-5 C20-3,4,5))。b: 地震3ヶ月後の航空レーザー測量データより作成した1m間隔の等高線図。点線で囲った領域は判読した緩斜面。c: 現地調査で確認した亀裂の位置。d1: 亀裂の写真。d2: 亀裂(点線)よりその下方斜面(写真奥)が下流側(赤矢印)に変形し、写真左下のポール付近(白破線枠)でせり出しが認められる。

Fig. 7 Position of the transformation slope, as determined by LiDAR data analysis. a: Aerophotograph for stereoscopy. b: 1 m counter map using LiDAR data. Dotted line circle areas shows the gentle slopes based on LiDAR data analysis. c: Position of cracks determined by field survey. d1: Crack. d2: Crack (dotted line). The far side of the crack in the photo moved downward (arrow), and was overhanging near the pole (dashed line circle).

図一8 簡易貫入試験結果（その1）。調査した斜面の位置は図一7cに示す。a：陰影図（光源方位315°，光源高度45°）および等高線図（1m間隔）。b：図一8aに亀裂および貫入試験調査地点と土層断面調査地点，ラインA-A'の縦断面位置を示した図。c：ラインA-A'の縦断面図。d：調査位置ごとの貫入試験結果。

Fig. 8 Test results by dynamic cone penetrometer (part 1) of the surveyed slope shown in Fig. 7c. a: Hillshade (Azimuth: 315°, Altitude: 45°) and 1 m contour map. b: Map overlaid cracks, surveyed points and profile line A-A' on Fig. 8a. c: Slope profile on line A-A'. d: Test results by dynamic cone penetrometer on each point.

図-9 簡易貫入試験結果 (その2)。調査した斜面の位置は図-7cに示す。a: 陰影図 (光源方位315°, 光源高度45°) および等高線図 (1 m間隔)。b: 図-9aに亀裂および貫入試験調査地点, ラインB-B'およびC-C'の縦断面位置を示した図。c: ラインB-B'およびC-C'の縦断面図。d: 調査位置ごとの貫入試験結果。

Fig. 9 Test results by dynamic cone penetrometer (part 2) from the surveyed slope shown in Fig. 7c. a: Hillshade (Azimuth : 315°, Altitude : 45°) and 1m contour map. b: Map overlaid cracks, surveyed points and profile lines of B-B' and C-C' on Fig. 9a. c: Slope profiles on line B-B' and C-C'. d: Test results by dynamic cone penetrometer on each point.

図-10 土層断面調査結果。調査位置は図-8bに示す。
Fig. 10 Soil profile of the surveyed position shown in Fig. 8b.

掘削調査を行った。結果を図-10に示す。調査の結果、Nc値が10~30程度に該当する層は風化が激しい岩盤で、多くの割れ目が見られた。この割れた岩盤の硬さは場所によって差が大きく、やわらかいものは手で割れる程度の硬さしかなかった。図-8で示したNc値が5以下の軟弱な層と推定される場所はこの風化が激しい岩盤の層内あるいは風化が進んでいない岩盤との境に挟在しており、確認した場所では最大でも10cm程度の層厚しかなかった。土質はシルトあるいは泥からなっていた。

5. 考察

地震後の降雨により崩壊が発生した斜面には、緩傾斜で楕円あるいは馬蹄形の微地形が存在していたことが地震直後（崩壊発生前）のデータと崩壊後のデータの比較から推測された。小山ほか（2009）は2007年の集中豪雨により鳥取県西部で発生した崩壊について、2000年に発生した鳥取県西部地震（M7.3）によって斜面に形成された亀裂を頭部として崩壊が発生した可能性を指摘しているが、本調査地においても崩壊斜面の頭部周辺を現地調査すると亀裂が存在することから、緩傾斜な地形上には亀裂が発生していたことが推測され、この亀裂が弱線となってその後の降雨により崩壊が発生したことが推測された。

この推測を確認するため、崩壊が発生していない斜面において同様の地形が存在する場所を判読し、現地で亀裂等の斜面の変形の痕跡を確認した。その結果、複数の場所で亀裂の存在を確認することができた（図-7c）。現地で確認した緩斜面では、その多くで亀裂が発生していることから、今回の地震により亀裂が発生することに伴って形成されたものと推測された。一方で、亀裂が発

図-11 調査地における地震直後からその後に崩壊に至るまでの模式図

Fig. 11 Schematic diagram from immediately after the earthquake to landslide occurrence after the earthquake in the study area.

生していないものの、緩斜面の形成が認められる斜面も存在した。このため、地震前に形成されていた緩斜面に亀裂が発生した可能性もある。いずれにせよ地震後の降雨によって崩壊した斜面には、地震によって亀裂が発生した緩斜面が存在し、それらを頭部として崩壊が発生したことが判断された。これらの亀裂は多くが空中写真、あるいはDEMより作成した陰影図から判読することができなかった。これらの亀裂は幅が大きなものでも1.5 m以下、比高も1 m以下であったことから、今回使用したDEMの解像度では判読が困難であったと考える。しかし、今回の調査手法のように等高線図および断面図を作成し、緩傾斜で楕円あるいは馬蹄形、縦断面図では凸

型の微地形を判読することにより、亀裂の存在する斜面位置をある程度特定することは可能であると考え。なお、調査地では稜線部にも多数の亀裂が存在するが、今回の手法で特定することは難しかった。稜線付近はもとも緩傾斜であり、今回報告する直線形の斜面の中から半月または馬蹄形の局所的な緩傾斜の斜面を特定するような手法で亀裂を捉えることは難しいと考える。稜線部における亀裂の発生位置の特定については、村上ほか(2013b)が地震前後の航空レーザー測量データを比較することにより稜線部の亀裂を特定したように、地震前後のデータを比較することによって可能となると考える。

亀裂の発生した斜面の土質状況を調査するために簡易貫入試験および土層断面調査を行った。試験結果から、斜面に亀裂がある場所では、亀裂より下流の斜面(図-8:P2~P4;図-9:P7~P8)では、地表より50~80cmの深さから100~250cmまでの深さにかけてNc値が10~30のやや硬い層が存在し、その中あるいは下層のNc値が40以上の硬い層との間にNc値が5以下の軟弱な層の挟在が認められた。土層断面調査から、Nc値が10~30のやや硬い層は風化が激しく、破碎が進んだ岩盤層であり、Nc値が5以下の軟弱な層がすべり面となっていることが推察された。すべり面のNc値については地質ごとに差が見られるが、既往の調査から新第三紀の地質では多くは5~10以下であることが報告されている(小山内ほか, 2005)ことから、本調査で確認されたNc値が5以下の層はすべり面であると判断された。小山内ほか(2005)は崩壊した斜面周辺の岩盤風化層のNc値は10~20であることも報告しており、今回の調査結果は既往の結果を裏付けたものといえる。軟弱な層は、風化し破碎が進んだ岩盤層内、あるいは下層の風化が進んでいない岩盤層との境界付近に存在していることから、地震前から存在していた風化した岩盤層が、地震などによって破碎が進み、層内に軟弱な層が形成されたことが推察される。すべり面は今回の地震以前に形成されていた可能性もあるが、少なくとも今回の地震によって亀裂の形成および崩壊の発生につながったことは確かであろうと考える。一方で、亀裂より上部(図-8:P1, 図-9:P6)およびせり出しより下部(図-9:P9)あるいは亀裂がない場所(図-8:P5;図-9:P10~P13)ではP6を除くとNc値が10~30のやや硬い層は相対的に薄く、挟在するNc値が5以下の軟弱な層もP6とP11以外は確認されなかった。このことから、斜面内において風化が進んだ層が薄い場所では地震の際に緩斜面の形成および亀裂の発生が起らず、結果として崩壊が発生しなかったことが考えられる。

以上の結果を模式的に示した図を図-11に示す。今回の地震後に発生した崩壊は、斜面内の風化が進んだ層が比較的厚い場所において、地震の際に亀裂およびすべり面が形成され、そこを弱線としてその後の降雨によって崩壊が発生したことが推測された。地震直後およびその

後の崩壊発生に至るまでには、このような風化層の脆弱化・変形のプロセスが考えられる。

6. まとめ

本報告では2008年岩手・宮城内陸地震直後および3ヶ月後の2008年9月に計測された航空レーザー測量データを比較し、地震後の降雨によって崩壊が発生した斜面の地形的特徴を明らかにした。今回の調査から、地震後に崩壊が発生した斜面では崩壊発生前には楕円あるいは馬蹄形の緩斜面が存在し、亀裂が発生していたと判断された。このことは崩壊が発生していない斜面において上記の微地形が形成されている箇所を特定し、現地調査を行うことで確かめられた。亀裂が発生している緩斜面ではNc値が10~30の風化層内、および下層のNc値が40以上の硬い層との境界付近にNc値が5以下のより軟弱な層が形成されていたことから、地震後の降雨によって崩壊が発生した斜面では、それらをすべり面として崩壊が発生したことが推定された。西村・海堀(2002)は2001年の芸予地震(M6.7)の影響を受けた地域では地震前の斜面崩壊に必要な雨量の6~8割程度の降雨量で斜面崩壊が発生する可能性を報告している。今回の調査によって亀裂の発生している斜面では軟弱な層が形成されていることが確認されていることから、今後、従来よりも小さい降雨強度で崩壊が発生する可能性が考えられる。

調査地では地震前に航空レーザー測量が実施されていないこともあり、今回の調査によって確認された斜面内の楕円あるいは馬蹄形の緩斜面といった微地形が地震前から存在したかどうかは確認することができなかった。また、今回の調査結果は斜面中腹に形成された緩斜面における地震にともなう亀裂の形成とその後の崩壊発生プロセスを報告するものであり、稜線部に発生した亀裂については、今回報告する手法での特定は難しいことから、これについては崩壊発生プロセスも含め今後の検討課題とした。これらのことは地震等の災害前後に航空レーザー測量が実施された斜面において確認する必要があると考えている。複数時期の航空レーザー測量データを比較し、斜面の変形箇所を抽出することは、地震等の災害によって斜面内で崩壊の危険性が高まった地点をより正確に特定するとともに、今後の降雨にともなう崩壊発生の危険性を評価するうえで有効であると考え。

謝 辞

現地調査に際しては岩手県および林野庁東北森林管理局の関係各位より多大な協力をいただいた。弘前大学の檜垣大助教授、森林総研関西支所の多田泰之氏からは現地調査に協力していただくとともに多くの助言をいただいた。記して感謝申し上げます。なお、この研究はJSPS科研費 JP24658146およびJP15K01272に基づいて行われた成果の一部である。

引用文献

- 秋山幸秀（1997）：空中レーザー高密度計測の治山事業における活用方法，第37回治山研究発表会論文集，pp. 343－350.
- 川邊 洋（1987）：地震による斜面崩壊の研究（Ⅰ），（Ⅱ），東京大学農学部演習林報告，77，pp. 49－142.
- 栗駒山地熱地質グループ（1986）：1/10万栗駒地熱地質図説明書．特殊地質図（21－3），地質調査所，26p.
- 小山 敢・藤田亮・前田雄・多田泰之・落合博貴・三森利昭・大丸裕武・村上 亘・河合隆行・岩村尚樹（2009）：2007年9月4日の集中豪雨により鳥取県琴浦町で生じた斜面崩壊の特徴，砂防学会誌，Vol. 62，No. 1，pp. 52－59.
- 村上 亘・大丸裕武・小川泰浩・黒川 潮・多田泰之・三森利昭・安田正次・斎藤 仁（2009）：岩手宮城内陸地震において崩壊斜面背後の山地稜線部に形成された亀裂，2009年春季学術大会日本地理学会発表要旨集，217.
- 村上 亘・大丸裕武・江坂文寿（2013a）：2008年岩手・宮城内陸地震後に発生した2次的な斜面崩壊の地形・地質の特徴，森林総合研究所研究報告，Vol. 12，No. 1，pp. 23－40.
- 村上 亘・大丸裕武・向山 栄・川浪亜紀子（2013b）：2008年岩手・宮城内陸地震にともなう線状凹地の拡大と斜面の重力変形，地形，Vol. 34，No. 1，pp. 55－67.
- 西村 賢・海堀正博（2002）：地震動の影響を受けた地域における降雨と斜面崩壊発生との関係について，広島大学総合科学部紀用Ⅳ理系編，28，pp. 35－47.
- 野口正二・安田幸生・多田泰之・三森利昭（2012）：2008年岩手・宮城内陸地震災害地周辺の先行土湿野季節変動，森林総合研究所研究報告，Vol. 11，No. 3，pp. 151－160.
- 沖村 孝・鳥居宣之・永井久徳（1998）：地震後の降雨により発生した斜面崩壊メカニズムの一考察，建設工学研究所論文報告集，40－B，pp. 97－114.
- 小山内信智・内田太郎・曾我部匡敏・寺田秀樹・近藤浩一（2005）：簡易貫入試験を用いた崩壊の恐れのある層厚推定に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，261，46p.
- 田結庄良昭・藤田智子（1996）：兵庫県南部地震とその後の降雨による斜面崩壊，応用地質，Vol. 37，No. 3，pp. 174－184.
- 富田陽子・桜井 亘・中 庸充（1996）：六甲山系における地震後の降雨による崩壊地の拡大について，新砂防，Vol. 48，No. 6，pp. 15－21.
- 牛山素行（2002）：2002年7月9日～12日の台風6号による豪雨災害の特徴，自然災害科学，Vol. 21，No. 3，pp. 285－297.
- 横山俊治・菊山浩喜（1997）：1995年兵庫県南部地震時に発生した六甲花崗岩地域の斜面崩壊の運動様式と機構，地すべり，Vol. 34，No. 3，pp. 17－24.
- （原稿受付2016年9月2日，原稿受理2016年12月21日）