

V-** 初生地すべりの計測評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 17～平 19

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：藤澤和範、笠井美青

【要旨】

本研究では、発達段階と活動状態の異なる地すべりの地形的特徴を表現する為のレーザープロファイラデータ解析手法について、2 地区を対象に検討を行った。その結果、地すべりの発達度や活性度は、レーザープロファイラデータの DEM を解析して得られた地すべり地の斜面勾配と固有値比の密度分布により表現できることを明らかに出来た。また周囲よりも勾配が 45 度以上の斜面が多く含まれている斜面ブロックは、初生地すべりの可能性があることも分かった。

キーワード：地すべり地形、地すべり発達、地すべり活性度、レーザープロファイラ、DEM 解析

1. はじめに

貯水池や道路等の施設周辺の地すべりの位置や大きさ、発達段階や活性度を把握することが出来れば、それらの施設の維持・建設計画に反映して、地すべり被害を最小限に抑えることが出来る。しかし森林下にある地すべりは、空中写真や大縮尺の地形図を用いた従来の手法では判読が困難である場合が多かった。一方で、近年発達してきたレーザープロファイラは、高密度かつ高精度の地表測量を植生が生育している場であっても可能にしてきており、森林地帯においても地すべり地に特徴的な亀裂や段差等の微地形を把握出来るようになってきている。すなわちレーザープロファイラを用いることで、今まで森林下にあって見落とされていた地すべりや、発生したばかりの初生地すべりの存在が明らかになると期待されている。

レーザープロファイラによるデータから作成される詳細な等高線図が地すべり判読に役立つことは勿論であるが、データを視覚化して得られる地形のイメージも、地すべり判読をより容易に進めることに貢献している。しかしそれでも、地形の判読には判読者の主観が入ることは避けられない。より

客観的な判読を行う為には、地すべり地形の特徴を数値で明らかにし、判読の際の判断材料に用いることも考えられる。地すべりに形成される微地形の様相は地すべりの活動や発達の度合いによって変化していくことから、レーザープロファイラデータを解析することにより得られる地形解析値は、地すべりの発達段階や活動度を示す指標にもなり得る^{1),2)}。

本研究では地すべり防災分野におけるレーザープロ

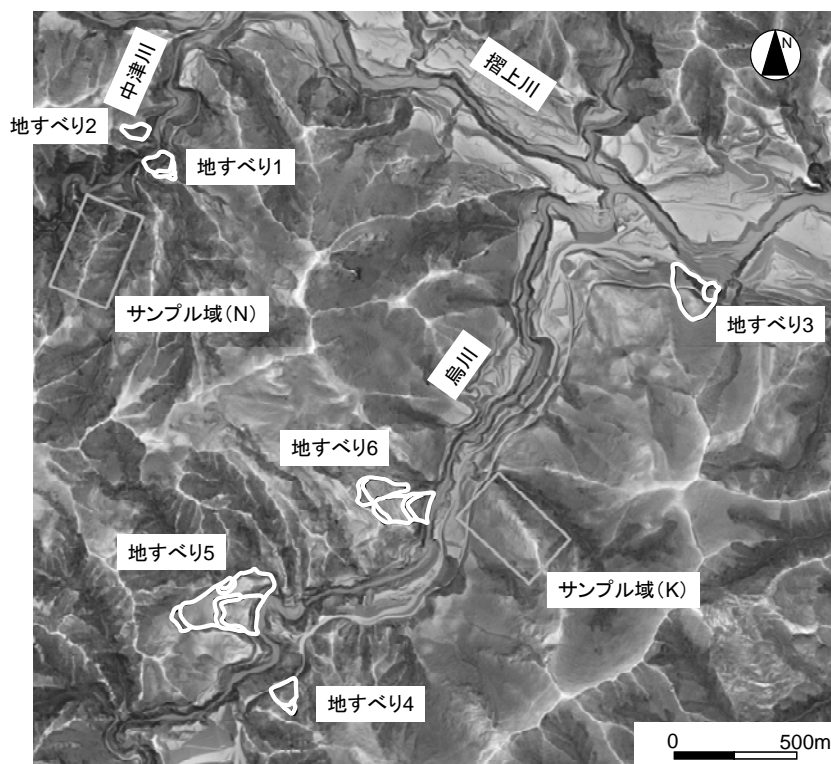


図-1 茂庭地区解析範囲

ロファイラデータの将来の有効利用に向けて、発達段階と活動状態の異なる地すべりの地形的特徴を表現するデータ解析手法について検討を行った。

2. 解析対象地

解析は2地区を対象に行われた。

2.1 茂庭地区

解析対象の6つの地すべりは、福島市茂庭地区にある摺上川ダム南側の斜面に位置する(図-1、表-1)。解析範囲近傍10 km²の平均斜面勾配は39度である。地質は摺上川沿いでは主に中新世の凝灰岩であるが、摺上川に流入する中津川の流域では合流点からおよそ1 km上流、烏川の流域ではおよそ1.5 km上流より中新世の安山岩と玄武岩からなる溶岩及び火山砕屑物が分布し、局所的には白亜紀の花崗岩類も見られる(東北建設協会、2006)³⁾。中津川沿いは烏川沿いに比べて地形が急で、小沢が発達している(図-1)。

調査地周辺では平成15年度の融雪期(5月)にレーザープロファイラによる測量が行われ、このデータから2 mグリッドのDEM(Digital Elevation Model)が作成された。このDEMを用いて、地形解析を行った。地すべり地の地形的特徴を明らかにするために、地すべり地の他、中津川沿いおよび烏川沿いにて地すべりの発生していない各0.1 km²の範囲(図-1:サンプル域、中津川沿いはN、烏川沿いはKと表す)においても同様の地形解析を行い、地すべり地の解

析値と比較した。

2.2 天ノ川沿い地区

奈良県天ノ川沿い地区では、地すべりを含む7斜面ブロックについて地形解析を行った(図-2、表-2)。地区を流れる天ノ川に沿っては、斜面勾配40度以上の急峻な斜面が連続している。この地区の地質は中生代白亜紀に形成された砂岩、頁岩、及び砂岩と頁岩の互層が主であり、チャートや緑色岩類を伴う。全般に風化の程度は弱い。



図-2 天ノ川沿い地区解析範囲

表-1 茂庭地区解析対象地すべり

地すべり番号	面積 (ha)	場所	主な母岩の種類*	備考
1	0.4	中津域	安山岩 玄武岩	2004年に緩み岩盤を確認(地すべり発生)
2	2.4	中津域	凝灰岩	古い地すべり地形
3	2.0	烏域	凝灰岩	顕著な活動の形跡なし
4	3.5	烏域	安山岩 玄武岩	顕著な活動の形跡はないが、過去に斜面下部のり面にて変状あり
5	5.4	烏域	安山岩 玄武岩	古い地すべり地形
6	2.9	烏域	花崗岩	近年の地すべり活動により形成された微地形が多い

* (社)東北建設協会(2006)による³⁾

表-2 天ノ川沿い地区解析対象斜面ブロック

斜面番号	面積 (ha)	備考
1	3.5	主に崩積土が堆積して安定
2	4.8	斜面上部で侵食が進む
3	4.0	主に崩積土が堆積して安定
4	7.5	地すべり地形(現在の活動の形跡なし)
5	5.3	岩盤の緩みが確認される
6	2.8	地すべりとして滑動している可能性高
7	7.1	開析の進んでいない山腹斜面

表-3 固有値比と地形要素（茂庭地区）

固有値比	観察された地形要素				
	崖などの露岩地	沢	遷急線 又は 遷緩線	崖錐 堆積物	起伏の 乏しい 緩斜面
0-1					
1-2	○	○			
2-3	○	○	○		
3-4	○	○	○	○	
4-5	○	○	○	○	○
5-6			○	○	○
6-7				○	○
7-8				○	○

この地域では平成17年3月にレーザープロファイラによる測量が行われ、1mグリッドのDEMが作成された。このDEMを用いて地形解析を行った。

3. 地形解析

3.1 解析方法

地形の特徴を表す解析要素として、斜面勾配と固有値比をDEMから求めた。そして解析値を現地踏査から得た地表の情報と照合した。

1) 斜面勾配

茂庭地区では、DEM上のある点における斜面勾配は、その点における水平面と、近傍8点からなる近似平面とがなす角として求められた。また天ノ川沿い地区のDEM上のある点における斜面勾配は、東西方向と南北方向の斜面勾配の平均値として求められた。この勾配を求めるにあたって、近傍の8点が計算に用いられた。どちらの求め方を用いるにしても、与えられる斜面勾配の値に大きな差は生じない。

2) 固有値比

固有値比は、各グリッドセル平面の法線ベクトルの方向について、隣接する3行3列のグリッドセル間におけるばらつきを表す値であり、地表面の粗さを表す指標である⁴⁾。活発な地表活動が起こっている場では地表面が粗くなり、値が小さくなる事が報告されている²⁾ため、地すべり地形を地すべりの発達段階や活動状態と関連して表す為に適している解析要素であると考えられた。

固有値比はWoodcock⁴⁾の手法に従い求められた。グリッドセル*i*における法線ベクトルを(x_i, y_i, z_i)とすると、法線ベクトルのOrientation Matrix, T は以下のとおりに示される。

$$T = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum y_i x_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum z_i x_i & \sum z_i y_i & \sum z_i^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

この T 行列の固有値（値の大きいものから順に、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ）を求め、それぞれを計算範囲の法線ベクトル数 n （ここでは9）で除算し、 S_1, S_2, S_3 を求めらる。

$$S_i = \lambda_i / n \quad (2)$$

S_1, S_2 より固有値比 γ は以下の式により求められる。

$$\gamma = \ln(S_1 / S_2) \quad (3)$$

3.2 解析結果

3.2.1 茂庭地区

現地で確認された地形要素と、その場の固有値比について表-3に示す。表-3中の「起伏の乏しい緩斜面」は、地すべりの活動で形成された陥没地の内部や湿地、平坦地等を指す。沢は下刻が進んで明瞭になるほど、固有値比の値は低くなった。また表-3には示してはいないが、尾根筋は、沢と同様の固有値比の範囲にあった。開析の進んでいない地山斜面では、主に固有値比が6以上であった。

地すべりの発達段階や活動状態と地形解析値との関係については、中津川沿いの範囲（以下、中津域：表-1）と烏川沿いと摺上川沿いの範囲（以下、烏域：表-1）でそれぞれ検討がなされた。斜面勾配と固有値比について各地すべり及び、地すべりの発生していないサンプル域内で密度分布を求め、累積グラフを作成したところ図-3から図-8に示す通りとなった。図-3から図-5について中津域と烏域の地すべり地で共通していたことは、地すべりの発生していない各サンプル域と比較して、35度以下の斜面が多く存在することであった。また地すべり地では固有値比4-6の階級における密度がサンプル域と比べて高いことも共通していた（図-6から図-8）。これらの特徴は、烏域でより顕著であった。

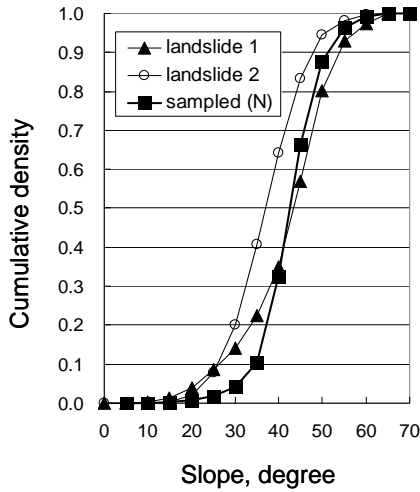


図-3 中津域斜面勾配累積密度(中津域のサンプル域及び地すべり1と2)

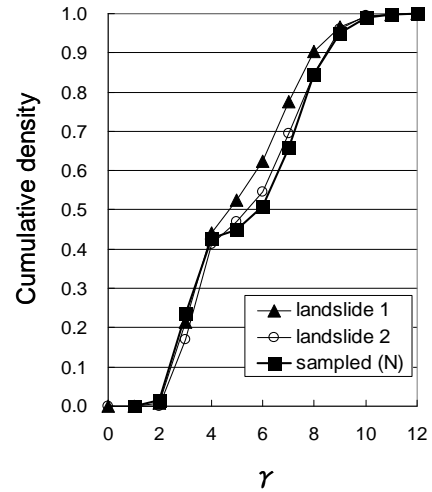


図-6 中津域固有値比累積密度(中津域のサンプル域及び地すべり1と2)

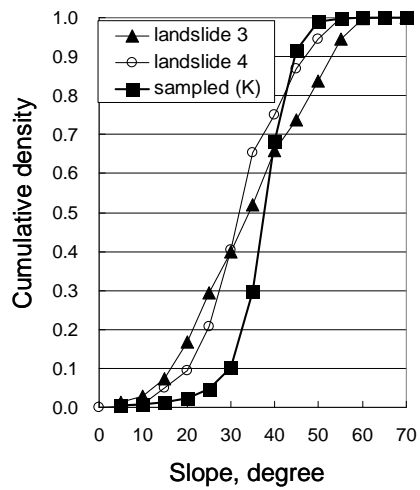


図-4 烏域斜面勾配累積密度(烏域のサンプル域及び地すべり3と4)

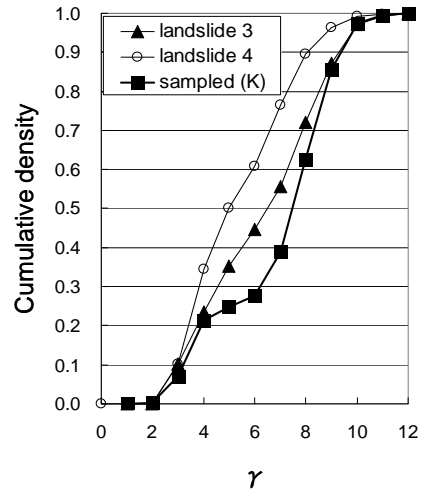


図-7 烏域固有値比累積密度(烏域のサンプル域及び地すべり3と4)

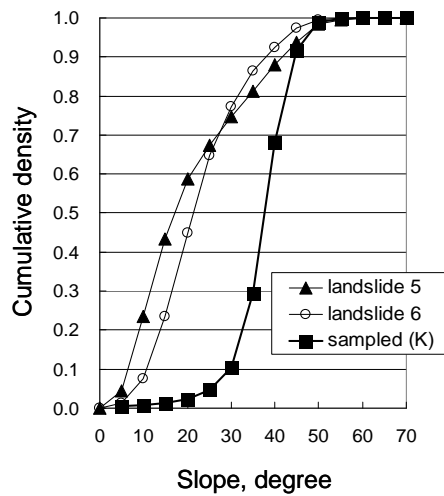


図-5 烏域斜面勾配累積密度(烏域のサンプル域及び地すべり5と6)

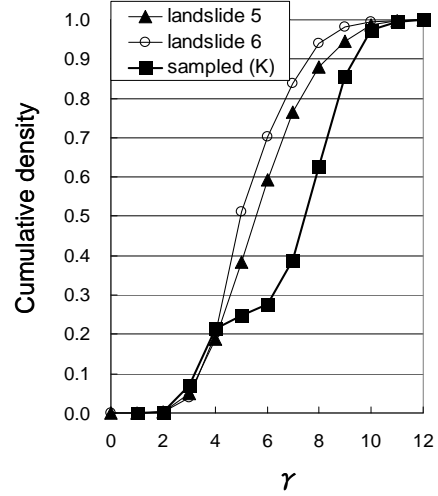


図-8 烏域固有値比累積密度(烏域のサンプル域及び地すべり5と6)

表-4 固有値と地形要素(天ノ川沿い地区)

固有値比	観察された地形要素				
	亀裂の 入った 岩盤	谷壁	緩んだ 岩盤	遷急線又 は 遷緩線	崖錐 堆積物
0-1	○	○			
1-2.25	○	○	○	○	
2.25-2.5		○	○	○	
2.5-2.75		○	○	○	○
2.75-3				○	○
3-4				○	○
4-5				○	○
5-6					○

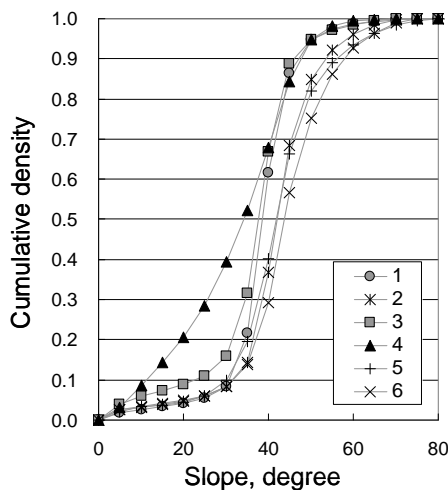


図-9 天ノ川沿い地区斜面ブロックの勾配累積密度

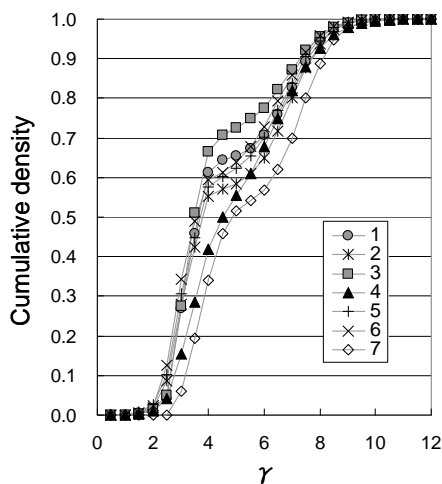


図-10 天ノ川沿い地区斜面ブロックの固有値比累積密度

中津域では表-1 に示すように、地すべり 1 が 2 に比べて若い事は明らかである。一方で鳥域の地すべりの発達段階については、非常に斜面勾配が緩やかな地すべり 5 と 6 が、地すべり 3 と 4 よりも発達の進んだ段階にあると考えられた (図-4 と図-5)。特に地すべり 5 は勾配が一番緩やかであると同時に、地すべりに対して向かって右側を流れる沢が地すべりに沿って変形しており (図-1)、最も発達した段階であると推察された。中津域の若い地すべり 1 (表-1) と、鳥域の比較的若い地すべり 3、4 に共通していた事は、45 度以上の斜面単位の割合もサンプル域より多いことであった (図-3 と図-4)。一方で固有値比と地すべりの発達の関係を見ると、鳥域では地すべりの発達とともに固有値比が 4-6 の階級の密度が増え続ける一方で、中津域では逆にその階級の密度が減った (図-6 から図-8)。

鳥域は中津域よりも勾配が概して緩やかであり (図-1、図-3 から図-5)、これは前者において岩質がより柔らかであることを反映していると考えられた。すなわち地すべり活動に伴う微地形の形成・発達への地質的な制限が、鳥域では中津域と比較して少ないために、上述した地すべり発達と解析値との関係の違いが現れたと考えられる。しかし中津域と鳥域で母岩の種類には大きな違いはなく (表-1)、岩の堅さの違いが生じた原因については不明である。また現在も緩慢に活動中の地すべり 6 では、固有値比 4-6 の階級の中でも、様々な地形要素が混在する 4-5 の階級 (表-3) の密度が特に高かった (図-8)。中津域の地すべり 1 でも、同階級の密度は地すべり 2 や同域のサンプル域に比べてやや高い (図-6)。すなわち岩質が同じであれば、この階級における密度を地すべり活性の指標とできる可能性も茂庭地区では示唆された。

3. 2. 2 天ノ川沿い地区

天ノ川沿い地区において観察された現場の地形要素と、その場の主な固有値比の範囲を表-4 に示す。この地区では、固有値比が 3 以上になると斜面は概ね安定していた。また摺上川ダム周辺域で見られたように、開析の進んでいない地山斜面では、主に固有値比が 6 以上あった。

解析対象の斜面ブロックについて (表-2) 斜面勾配と固有値比の密度を求め、それらを累積したグラフが図-9 と図-10 である。これらのブロックでも、茂庭地区の比較的若い地すべりやサンプル域で見られたように、固有値比 4-6 の階級の密度は低い (図

-10)。

図-9 から、不安定な斜面ブロック 2、5、6 では 45 度以上の斜面が 3 割以上を占め、他ブロックと比較して急勾配であることがわかる。またこれらの斜面ブロックでは固有値比が 2.5 以下である密度が約 0.1 あり、他の斜面の約 2 倍である。中でも活動している地すべりの可能性が高い斜面ブロック 6 では、45 度以上の斜面の密度が 0.4 以上、固有値比が 2.5 以下である密度が 0.13 と、斜面ブロック中で最も高かった。一方、現在活動の形跡は見られないが典型的な古い地すべり地形である斜面ブロック 4 は、勾配 35 度以下の斜面の割合が半分以上あり (図-9)、同域においてももっとも緩やかであった。固有値比 4-6 の階級の密度も他斜面ブロックと比較して高く、茂庭地区で見られた地すべりと類似した地形的特徴を示した。この地すべりは河川の攻撃を受けにくい場所に位置するために (図-2)、斜面全体が一度に崩れるような強い侵食を斜面脚部に余り受けず、地すべり地形が発達出来たと解釈できる。一方、崩積土が主に堆積している斜面ブロックの 1 と 3 では、表-4 から示唆されるように、固有値比が 2.5-4 である密度が高い。また 35-45 度の勾配である斜面単位が特に多く、この角度は崩積物の安息角に関係している事も考えられる。これらの特徴は、地すべり判読の際に崖錐斜面と地すべり斜面とを区別する材料として将来活用出来ることも考えられた。

4. まとめ

レーザープロファイラデータの DEM を解析して得た地形特性値と、地すべりの発達段階及び活性度との関係は以下の通りであった。

1) 茂庭地区では、若い地すべりでは勾配が 45 度以上の斜面が他斜面ブロックよりも多かった。一方、天ノ川沿い地区においては侵食の進んでいる斜面ブロック 2、5、6 では勾配が 45 度以上の斜面が他斜面ブロックよりも多かった。

2) 茂庭地区の全地すべりと、天ノ川沿い地区の発達が進んだ地すべりは、35 度以下の斜面の割合が多く緩やかであった。茂庭地区では、地すべりが発達するほど急斜面は減り、より緩かになると考えられた。岩質が柔らかいと考えられる鳥域では、この傾向が中津域より顕著であった。

3) 鳥域及び天ノ川沿い地区では、地すべりが発達するほど固有値比 4-6 の階級の密度が高くなったが、中津域では低くなる傾向にあった。岩質が固いと考

えられる中津域では、地すべり活動に伴う微地形の形成・発達への地質的な制限が大きいと考えられた。

4) 茂庭地区では、地すべりの活動に伴って形成される様々な微地形の為に、固有値比 4-5 の階級の密度が高い地すべりでは活性度が高かった。一方で、天ノ川沿い地区の斜面ブロックでは固有値比 2.5 以下の密度が活性度の指標になると考えられた。天ノ川沿い地区では地すべりが崩壊した跡は岩盤が露出する事が多く、崩壊後は地形が開析されにくくなる為、固有値比が 3 以上の場合は安定した崖錐斜面である事が多いと考えられた。

以上から、天ノ川沿い地区における侵食の進んでいる斜面ブロック 2、5、6 も若い地すべりとみなせば、両地区において 45 度以上の急勾配の斜面を多く含む斜面ブロックは、初生地すべりの可能性があることになる。また解析対象地域において、地域特有の地すべりの発達プロセスと固有値比の密度分布との関係を明らかに出来れば、固有値比も初生地すべり特定の材料に十分に活用できると考えられる。

今後は様々な地域において同様の研究を進め、解析値と地すべりの発達プロセス、また地すべりの活性度との関係、そしてそれらの地質・岩質条件による違いをより明らかにしていく予定である。また今後の解析では、固有値比と斜面勾配以外にも、地形の特徴を表す様々な指標を試していく予定である。

参考文献

- 1) Glenn, N.F., Streutker, D.R., Chadwick, D.J., Thackray, G.D. and Dorsch, S.J.: Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity, *Geomorphology*, Vol. 73, pp. 131-148, 2006.
- 2) McKean, J. and Roering, J. : Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry, *Geomorphology*, Vol. 57, pp. 331-351, 2004.
- 3) (社)東北建設協会:建設技術者のための東北地方の地質, 東北建設協会, 408p, 2006.
- 4) Woodcock, N.H. : Specification of fabric shapes using an eigenvalue method, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, Vol. 88, pp. 1231-1236, 1977.

Abstract

In this study LiDAR-derived DEMs were analyzed to characterize landslide geomorphic features associated with their evolution stage and activeness. Analysis was carried out for the 2 study sites by employing two geomorphic filters, slope and the eigenvalue ratio, to find the patterns of these changes as landslides evolve. While landslides at the early evolutionary stages commonly contain higher density of slope units above 45 degree than their surroundings for both the sites, the patterns basically differ between them probably due to the difference of underlying bedrock hardness. The eigenvalue ratios expressed the recent activeness of landslide mass well but in a different manner, reflecting dominant landslide processes peculiar to each site.

Keywords: landslide morphology, landslide evolution, landslide activeness, LiDAR, DEM analysis