

豪雨時の斜面崩壊における崩壊後挙動の予測

アイダン オメル^{1*}・渡嘉敷 直彦²

¹ 東海大学 海洋学部 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1)

² 琉球大学 工学部 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地)

*E-mail: aydan@scc.u-tokai.ac.jp

斜面崩壊による被害をできるだけ最小限に留めようとする減災、避災の立場から、地震や豪雨による岩盤斜面崩壊の解析モデルを提案し、斜面の安定条件の検討とともに斜面崩壊後の挙動について検討を行っている。本研究は、沖縄県中城村で発生した斜面崩壊の事例について、安定解析と提案した複合すべり面上の動的崩壊モデルによる斜面崩壊後挙動の動的解析を行い、斜面の安定条件ならびに崩壊岩塊の移動距離の推定について検討を行った。解析の結果、豪雨による斜面すべり面における間隙水圧の増加による摩擦抵抗の減少が斜面崩壊の誘因であることが明らかになり、また、予測された斜面崩壊後の崩壊岩塊の移動距離は、実際の斜面崩壊距離と近似しており、解析モデルの有効性が確認された。

Key Words : prediction of post-failure motion, landslide, bi-planar sliding model, travel distance, stability analysis

1. はじめに

近年、地震や豪雨により各地で多くの岩盤斜面の崩壊が発生している。これらの斜面崩壊により、多くの人的被害や構造物の被害が生じている。このような斜面災害について、減災、避災の立場から対応することが、重要な課題の一つになっている。筆者らは、斜面崩壊による被害をできるだけ最小限に留める立場から、地震や降雨による岩盤斜面崩壊の解析モデルを提案し、斜面の安定条件の検討とともに斜面崩壊後の挙動について評価を行っている^{1),2)}。

本研究は、平成 18 年 6 月 10 日、沖縄県中城村で発生した北上原斜面崩壊の事例について現地調査を行い、斜面の安定解析と提案した解析モデルによる斜面崩壊後の挙動を解析して、崩壊誘因および崩壊岩塊の崩壊後挙動について検討を行った。

ここでは、最初に岩盤斜面の崩壊後の挙動を評価する解析モデルについて述べ、つぎに北上原斜面崩壊の概要を示す。ついで、斜面の安定条件を解析し、斜面崩壊を発生させた誘因と考えられる間隙水圧の増加について検証を行ったあと、斜面崩壊後の予測モデルによる崩壊後の挙動を求めて、崩壊岩塊の移動距離の実測値と比較検討を行う。

2. 複合すべり面における岩塊の動的崩壊のモデル化

降雨による岩盤斜面崩壊後の動的挙動を予測するため、図-1 に示すような複合すべり面上の岩塊の動的崩壊モデルを提案する。すべり面上に横たわる岩塊は、二つの岩塊より構成されていると仮定する。また、すべり面は、岩塊の崩壊後も元の平面を保っていると考ええる。

図のように、二つの岩塊のスライス側面に作用する力がゼロと考える簡易分割法（フェレニウス法）に従うと、すべり岩塊の動的挙動はつぎのように与えられる。

$$\sum_{i=1}^2 (S_i - T_i) = \bar{m} \frac{d^2 s}{dt^2} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{m}$, s , t , S_i および T_i は、それぞれ岩塊の質量、移動距離、時間（秒）、せん断力およびせん断抵抗力である。

すべり面に作用するせん断力およびせん断抵抗力は、Bingham タイプの破壊条件（図-2）とともに、つぎのように与えられる。

$$S_i = W_i \sin \alpha_i \quad (2a)$$

$$T_i = c_i A_i + (N_i - U_i) \tan \phi_i + \eta W_i \left(\frac{ds_i}{dt} \right)^b \quad (2b)$$

ここで、 W_i 、 c_i 、 A_i 、 N_i 、 U_i 、 $\tan \phi_i$ および η は、それぞれ岩塊の重量、すべり面の粘着力、すべり面上の面積、垂直力、間隙水圧、すべり面の摩擦力および粘性係数である。

垂直力 N_i および間隙水圧 U_i が各岩塊の重量 W_i に関して表すとつぎのようになる。

$$N_i = W_i \cos \alpha_i \quad (3a)$$

$$U_i = r_u W_i \quad (3b)$$

式 (1) ～ 式 (3) より、すべり岩塊の運動方程式は、つぎのように表される。

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \eta \left(\frac{ds}{dt} \right)^b - B(t) = 0 \quad (4)$$

ここで、 $B(t)$ はつぎのように与えられる。

$$B(t) = \frac{g}{m} \left(\sum_{i=1}^2 m_i (\sin \alpha_i - (\cos \alpha_i - r_u) \tan \phi_i) + \frac{c_i A_i}{g} \right) \quad (5)$$

ここで、 g : 重力加速度である。

式 (4) において、各すべり岩塊のせん断面における粘性抵抗は、つぎのように全体の粘性抵抗で表される。

$$\eta \bar{m} g \left(\frac{ds}{dt} \right)^b = \sum_{i=1}^2 \eta m_i g \left(\frac{ds_i}{dt} \right)^b \quad (6)$$

すべり岩塊の運動方程式 (4) は、基盤岩のすべり面の幾何学的条件とともに、つぎの初期条件のもとで解が求められる。

$$t = t_0, s = s_0 \quad \text{および} \quad v = v_0 \quad (7)$$

図-3 に示すように、すべり面における構成則として、ひずみ硬化型、ひずみ軟化型、ぜい性破壊型が考えられるが、ここでは、最も単純な弾性-ぜい性破壊型のモデルを仮定する。この構成則を適用すると、岩塊が静止の状態では粘着力が働き、運動

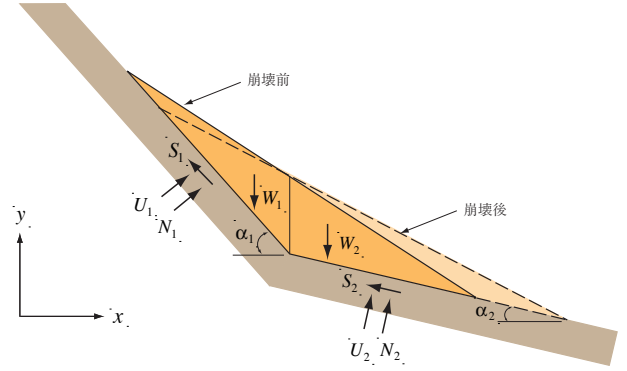


図-1 複合すべり面上の動的崩壊モデル

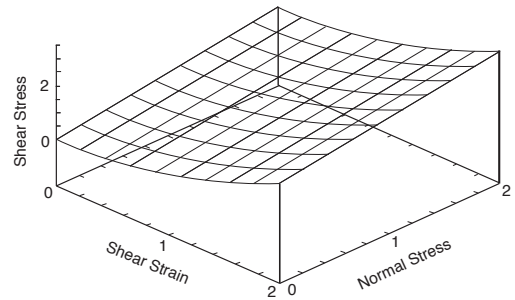


図-2 Bingham タイプの破壊条件

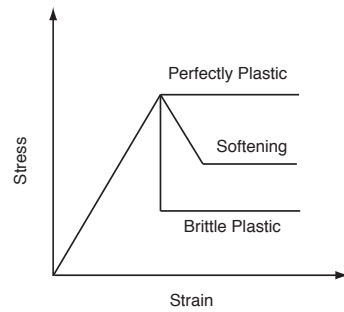


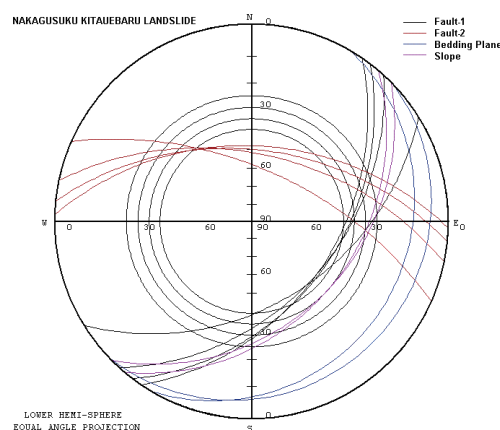
図-3 すべり面の構成則

開始と同時に粘着力がなくなる。したがって、式 (5) に導入されている粘着力成分は、運動開始後ゼロとなる。岩塊がすべり出した状態では、すべりに対するせん断抵抗は、主として摩擦力と粘性抵抗力となり、残留状態の物性値を利用することになる。

一般に、式 (4) を解く際には、破壊面の幾何学的形状と有効応力係数が時間と共に変化するもので、厳密解を求めることが困難であり、ここでは、差分法を用いて解を求めている。解析では、すべり面の幾何学的形状と抵抗力が時間増分ごとに算定さ



図－４ 北上原崩壊斜面周辺の地質図（日本地質調査所³⁾）



図－５ 断層面，層理面のステレオ投影図

れ，運動中にすべり岩塊の体積変化が起こらないとの仮定によって，運動方程式の不釣り合い力が同時に変化する．すべり岩塊の形状を再評価し，岩塊全体の加速度，速度および移動距離が計算され，速度がゼロになるまで計算が繰り返される．

3. 中城村北上原斜面崩壊の概要

(1) 地質状況

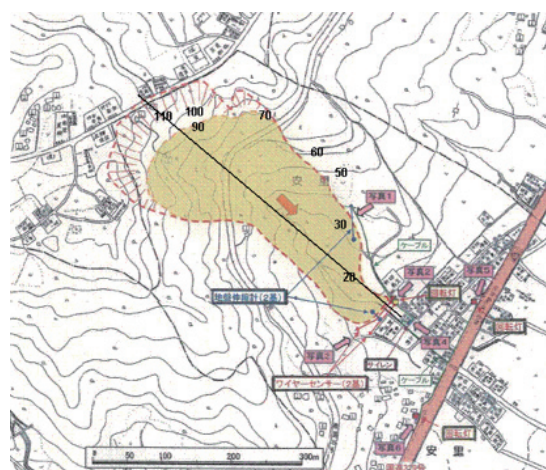
斜面崩壊が発生した場所は，沖縄本島中部に位置する丘陵の東斜面である．図－４に，崩壊した斜面周辺の地質図を示す．この地域の地質は，島尻層泥岩と呼ばれ比較的軟質な泥岩を主体としているが，砂岩層も含んでいる．斜面周辺丘陵部における一般走向は，NE-SWであり，走向NE-SW，傾斜SEの2つの共役断層が認められる．層理面の傾斜は，場所により異なっている．著者らによる斜面崩壊後の調査の結果，斜面中央部におけるすべり面の傾斜角は，SE/8°～12°であった．この結果は，宜保らの報告⁴⁾による傾斜角と多少異なっている．図－５に，斜面周辺における断層面，層理面などの不連続面のステレオ投影図を示す．島尻層泥岩は，乾湿を繰り返すと，スレーキングによる粘土化，給水膨張を伴う強度低下などを生じる．また，地殻変動を受けて，大小の断層，破碎帯などが形成され，地山に多くの弱面が存在している⁵⁾．

(2) 斜面崩壊状況

平成18年6月10日午後5時，中城村北上原地内で，梅雨期における長雨のなかで，丘陵部斜面の崩



図－６ 北上原斜面崩壊の状況（沖縄県提供）



図－７ 北上原斜面崩壊図（沖縄県提供）

壊が発生した．同日午前10時ごろ，冠頂部に亀裂の発生が確認されている⁴⁾．斜面のすべりの状態は，斜面上部の県道35号線が100m以上すべり落ちている．すべり面の主要部は，SE30-56/43-44の断層面と，

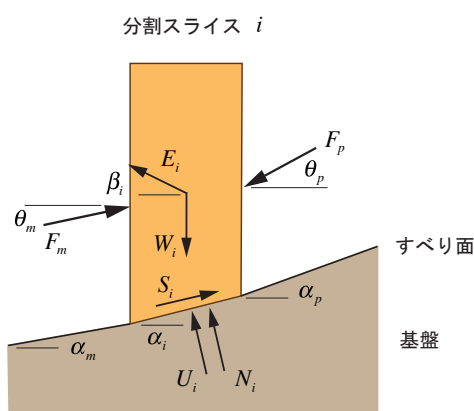
すべり域内にあるもう一つの NE2-12/48-52 の断層面で構成されている。6 月 12 日夜に発生した 2 次崩壊は、この断層面で起こっている。この時点における斜面崩壊の状況を図－6 および図－7 に示す。崩落した岩塊は、斜面上部の断層面（SE45/45）と図－8 に示す下部の層理面と考えられる破壊面から成るすべり面上に沿ってすべり落ちたものと推測される（図－9）。斜面崩壊現場から採取した乾燥状態の泥岩を用いて傾斜実験を行った結果、摩擦角は $34^{\circ} \sim 38^{\circ}$ であった。沖縄県土木建築部は、斜面の崩壊直後に、崩壊した岩塊の変動を観測するため、地下水位観測装置、地表変位を観測するワイヤーセンサーと内部の変形を観測する地中ひずみ計を設置した。しかしながら、観測装置設置後、崩壊岩塊に変動は見られず、安定を保っている。



図－8 岩塊のすべりを生じた層理面

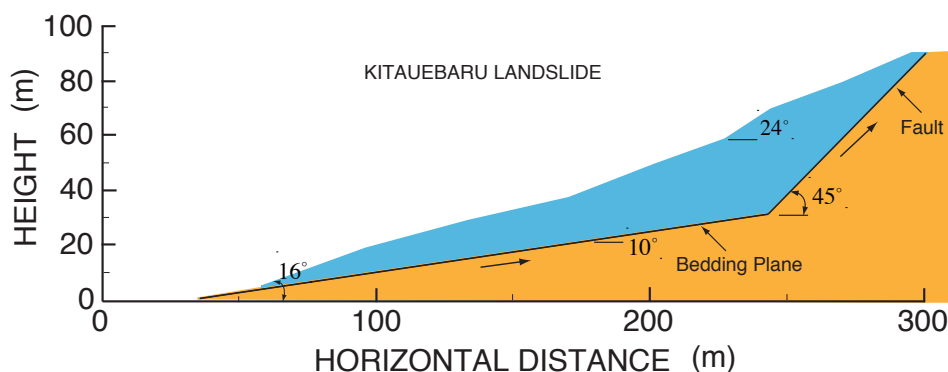
4. 安定解析

近隣の測候所が観測した斜面崩壊前 1 ヶ月間の降雨量は 533mm、最初の斜面崩壊が発生した 6 月 10 日から 2 次崩壊が生じた 6 月 12 日夜までの降雨量は 141mm であった⁴⁾。このように大量の降雨の後、斜面崩壊が発生していることから、斜面内への浸透水による間隙水圧の増加が、斜面崩壊を起こした要因の一つと考えられる。現場調査、宜保らの地すべり調査報告⁴⁾、沖縄県土木建築部および地質調査書の資料³⁾ から推定される崩壊前の斜面の地質断面図を図－9 に示す。図に示す層理面の摩擦角は、乾燥試料の実験室における傾斜実験から、 34° よりも大きいと思われる。島尻層泥岩の力学的特性は、含水比の増加にともなって減少する傾向にあり、摩擦角は含水比の増加によって小さくなり、また、間隙水圧の増加により有効応力が減少する。斜面のすべり

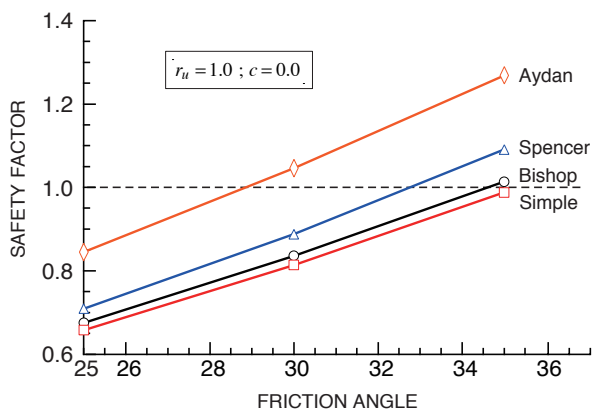


手 法	スライス間力の扱い
簡易法	無し
Bishop法	$\theta_m = \theta_p = 0$
Spencer法	$\theta_m = \theta_p = \phi$
Aydan法	$\theta_m = \alpha_m, \theta_p = \alpha_p$

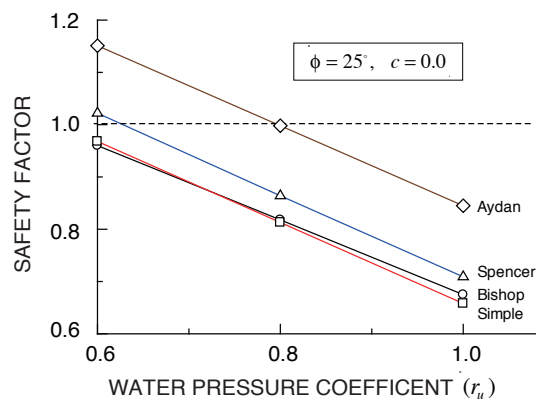
図－10 分割スライスに作用する力とスライス間力の仮定



図－9 崩壊斜面中央部における予想すべり断面図（図－7 指示線）



図－11 摩擦角の変化による安全率



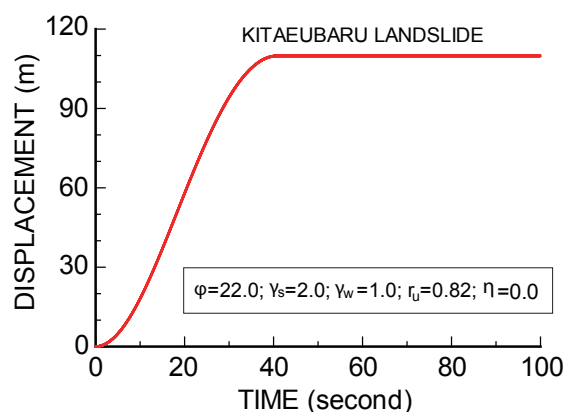
図－12 間隙水圧の変化による安全率

面における粘着力は、ほとんど無いと思われる。

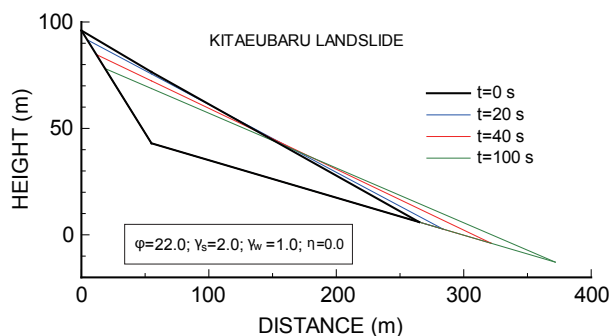
斜面の崩壊要因を調べるため、図－9に示す推定すべり面について、極限平衡法に基づく分割スライス法により安定解析を行った。すべり面上の分割スライスに作用する力を図－10に示す。ここで、 $U_i = \gamma_u W_i$ であり、間隙水圧を表す。また、 F_m 、 F_p は、スライス側面に作用するスライス間力を表す。このスライス間力について、従来用いられている簡便法、Bishop法、Spencer法および筆者が提案するAydan法による仮定が同図に示されている。Aydan法が仮定するスライス間力は、それぞれ、スライス左右のすべり面に平行に作用すると仮定している。これらの既往のスライス法とともに、Aydan法による安定解析を実施し、間隙水圧および摩擦角の変化にともなう安全率について比較を行った。

安定解析では、粘着力はゼロと仮定した。最初に、斜面内は飽和状態にあるとして、すべり面の摩擦角を 25° から 35° まで変化させ安全率を求めた。この安全率の算定結果を図－11に示す。簡便法およびBishop法が示す安全率は、乾燥状態における摩擦角ですでに極限状態にあることを示している。これに対し、Aydan法およびSpencer法が示す安全率は、すべり破壊を生じる摩擦角の値は乾燥状態の摩擦角よりも小さくなるべきであることを示している。

つぎに、すべり面における摩擦角を 25° として、間隙水圧を変化させ安全率を算定した。この安全率の算定結果を図－12に示す。簡便法およびBishop法が示す安全率の結果は、斜面のすべりが発生する間隙水圧係数は約0.57であることを示しているが、Aydan法による評価では、破壊時の間隙水圧係数は0.8であり、斜面崩壊前の9日間の降雨の状況を考慮すると、Aydan法による安全率の評価が最も妥当



図－13 すべり岩塊の重心点移動距離



図－14 時間経過にともなうすべり岩塊の移動

であると思われる。これらの結果を通しての推論となるが、すべり面における摩擦角の減少と斜面内の間隙水圧の増加が、今回の斜面崩壊の大きな誘因と推察される。

5. 斜面崩壊後の動的挙動

降雨による北上原斜面崩壊後の崩壊岩塊の移動距

離と崩壊後の移動状態を予測するため、提案した複合すべり面上の岩塊の動的崩壊モデルを用いて、動的解析を行った。この動的解析で用いた解析条件は、前章の安定解析により示された間隙水圧および内部摩擦角に基づいて設定した。

宜保らの報告⁴⁾によると、崩壊した岩塊は、およそ 110m すべり落ちており、また、崩壊後の現地調査の結果、崩壊岩塊は、断層面と層理面で構成されるすべり面上で止まっている。すべり落ちた斜面上部の岩塊が、下部の層理面の基盤の抵抗を受けて途中で止まったと思われる。図-13 は、動的解析によって得られたすべり発生後の時間経過にともなうすべり岩塊の重心点の移動距離を示している。この解析におけるせん断抵抗の摩擦角は 22° であり、すべった岩塊の移動距離は 108m を示しており、この結果は、宜保らの報告⁴⁾に示されている移動距離 110m にほぼ一致している。図-14 は、異なった経過時間におけるすべった岩塊の移動状態を表している。同図が示すすべり岩塊の漸進的な移動状態は、実際に生じた斜面崩壊の状況と近似していることが注目される。

6. 結論

沖縄県中城村で発生した北上原斜面崩壊について現地調査を行い、斜面の崩壊誘因を推定する安定解析と、斜面崩壊後の挙動を予測する解析モデルによる動的解析を行った。これらの調査、解析から明らかになった事項を示す。

- (1) 安定解析の結果、斜面崩壊の主な誘因は、長年にわたる多量の降雨により斜面内の間隙水圧が

増加し、すべり面における摩擦力が減少したことによると推察される。斜面を構成する島尻層泥岩は、含水比の影響を強く受け、粘着力や摩擦角の強度特性の低下も誘因の一つと思われる。

- (2) 斜面の崩壊面は、上部の断層面と下部の層理面で構成されると推察され、これらすべり面のせん断抵抗は、主として摩擦抵抗によると思われる。
- (3) すべり面における間隙水圧とすべり面の幾何学的形状の変化を考慮した動的解析を行い、斜面崩壊後の岩塊重心の移動距離および移動状態を求めた。すべり岩塊重心点の移動距離は 108m と予想され、また、岩塊の漸進的な移動状態は、実際の斜面崩壊の状況と近似しており、解析手法の有効性が確認された。

参考文献

- 1) アイダゲン オメル, 太田良巳, 渡嘉敷直彦, 赤木知之: 地震による岩盤斜面の崩壊後挙動の予測, 土木学会, 第 35 回岩盤力学シンポジウム, pp.103-108, 2006.
- 2) Aydan, Ö., Ulusay, R.: A back analysis of the failure of a highway embankment at Bakacak during the 1999 Düzce-Bolu earthquakes, *environmental Geology*, Vol.42, pp.621-631, 2006.
- 3) Japan Geological Survey: On the geological aspects of the landslide of Okinawa Prefecture, 2006.
- 4) 宜保清一, 周亜明, 佐々木慶三, 中村真也: 2006 (平成 18) 年 6 月 10 日沖縄県中城村で発生した北上原地すべりの調査報告, 日本地すべり学会誌, Vol.43, No.2(172), pp.44-47, July, 2006.
- 5) 山内豊聡監修: 九州沖縄の特殊土, pp.227-237, 土質工学会九州支部, 2006.

ESTIMATION OF POST-FAILURE MOTION OF LANDSLIDES CAUSED BY HEAVY RAINFALL

Ömer AYDAN and Naohiko TOKASHIKI

The estimation of post-failure motions of landslides is of great importance to investigate the regional landslide risk and its impact on structures. In this paper, an advanced sledge model considering bi-planar slip surface is proposed to estimate the travel distance of landslides and it is applied to an actual landslide problem at Kitauebaru in Okinawa Island with the use of limiting equilibrium analyses. The computational results show that this landslide was induced by the increase of pore water pressure and that the predicted post-failure motion of Kitauebaru landslide is very close to the actual post-failure travel distance and deformed configuration. Although the proposed method is simple, it is very effective for assessing the motion of landslides.