

2016年熊本地震による地すべり及び崩壊に関する一考察

A Study on landslide and collapse due to the 2016 Kumamoto Earthquake

本田尚正*1

Naomasa HONDA*1

* 1 東京農業大学地域環境科学部

Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

要旨: 地震起因の地すべり・崩壊の発生メカニズムは降雨起因の場合と大きく異なり、地震動による繰返し荷重の作用とそれによる過剰間隙水圧の発生により、すべり面付近のせん断強度が低下して安定性が失われ、崩壊等の発生に至る。ここでは2016年熊本地震による地すべりと崩壊について、降雨時及び地震時の地下水位上昇に着目して斜面安定解析を行った。その結果、地震動によるせん断強度の低下を適切に見積もることにより、これまで雨では崩れなかった山腹斜面であっても土砂移動の発生を説明できることがわかった。さらに地震の規模によっては土砂移動が発生しなかった可能性もあることから、2016年熊本地震は未曾有の規模であったといえる。

キーワード: 地震起因の斜面災害、地下水位上昇、せん断強度の低下、斜面安定解析

Abstract: The occurrence mechanism for landslides and collapses due to earthquakes is greatly different from rainy cases. Earthquakes cause a repeated load and generate excess pore water pressure, and since they reduce shear strength near the sliding surface, the mountain slope loses stability and collapses. We discuss the landslide and the collapse caused by the 2016 Kumamoto Earthquake in Japan based on a stability analysis. We set both the rainfall and earthquake calculation conditions for a semi-infinite slope and conducted slope stability analyses that focused on the groundwater level rising. According to the analytical results, if we could appropriately estimate reduction of the shear strength caused by the earthquake, we could explain a mass movement occurrence on a mountain slope that doesn't collapse due to rainfall. In addition, depending on the earthquake's scale, the mass movement might not occur. Our result suggests that the 2016 Kumamoto Earthquake was an unprecedented huge scale.

Key-word: slope disaster due to earthquake, groundwater level rising, lowering shear strength, slope stability analysis

I はじめに

2016年4月の熊本地震では、人命・家屋・公共施設に甚大な被害が生じ、地すべり・崩壊等の斜面災害も多発した。九州地方は雨が多く、台風常襲地域でもあることから、土砂災害に対する住民の警戒意識は全国的にもきわめて高かったといえる。その一方、今回のような最大震度7の大規模地震の経験は近年ほとんどなく、これまで雨では崩れることのなかった斜面が地震によって瞬時に被災したことは、住民にとって大きな衝撃であった。

地震起因の斜面災害は、降雨起因の場合と大きく異なり、地震動による繰返し荷重の作用とそれによる過剰間隙水圧の発生により、すべり面付近のせん断強度が低下して安定性が失われ、崩壊等に至ることが指摘されている(4, 7)。ここでは熊本地震による地すべりと崩壊について、地震時及び降雨時の地下水位上昇に着目して斜面安定解析を行い、斜面災害の発生要因を考察する。

II 熊本地震の概要

熊本県では2016年4月14日21時26分頃に、熊本地方(32° 44.5' N, 130° 48.5' E)を震央(震源の深さ約11km)とするM=6.5の地震が発生し、益城町宮園で震度7を記録したほか、震央周辺の多くの地点で震度6弱を記録した(6)。余震への警戒が続けられる中、4月16日1時25分頃に再び熊本地方(32° 45.2' N, 130° 45.7' E)を震央(震源の深さ約12km)とするM=7.3の地震が発生し、益城町宮園と西原村小森で震度7を記録したほか、熊本県内の広い範囲と大分県別府市、由布市で震度6弱以上が観測された。気象庁は14日に発生した地震を平成28年(2016年)熊本地震と名付けたが、その後、14日の地震を前震、16日の地震を本震とした。

この地震により各地で家屋倒壊、路面陥没、列車脱線などの被害が相次いだ。土砂災害も地震断層に近い地域に集中して発生し、6月7日までに熊本県下で計190件(土石流57件、地すべり10件、がけ崩れ133件)を数え

た。人的被害は14日の前震と16日の本震によって発生し、この2日間で計50名の人命が失われた。そのうちの10名が土砂災害(一次災害)によるものである。さらに熊本県下では6月下旬の梅雨前線による豪雨によっても土砂災害(二次災害)が発生し、計5名が亡くなった。

III 検討方法及び計算条件

1. 地震動によるせん断強度低下に関する先行研究

大原・山本(4)は、阿蘇の黒ボク土に対して動的三軸試験機を用いて繰返し荷重を負荷させる実験を行った。その結果、黒ボク土の粘着力はほぼ失われること、動的せん断抵抗角(内部摩擦角)は静的せん断抵抗角のほぼ1/2すなわち11~15°であることを明らかにした。

佐々・福岡・汪(7)は、粒子破碎とそれに伴う体積減少しやすい性質をもつ土質材料が非排水載荷・非排水せん断を受けると、間隙水圧の上昇による見かけの摩擦角の低下(すべり面液状化)により、緩勾配であっても高速かつ長距離の地すべりが発生することを指摘した。

2. 検討対象斜面の概要

ここでは、熊本地震で発生した次の2つの斜面災害を検討対象とする。

Case 1 : 高野台地区(京都大学火山研究センター周辺)の地すべり(6)

- ・斜面の位置：中央火口丘群南西側の緩斜面
- ・地すべりの規模：最急勾配10°，最大侵食幅150m，最大侵食深10m，侵食量約15.3万m³
- ・土層構成：上位から草本，表層黒ボク土層，ローム・黒ボクの互層，草千里ヶ丘軽石層，埋没黒ボク土層で構成されていた。
- ・すべり面：埋没黒ボク土層の上面と考えられる。

Case 2 : 火の鳥温泉地区「ログ山荘火の鳥」北西側の斜面崩壊(6)

- ・斜面の位置：中央火口丘群西側の急斜面
- ・崩壊の規模：源頭部の勾配35°，崩壊長100m，最大崩壊幅50m，最大崩壊深5m
- ・源頭部の状況：非常に高含水で脆弱な物性を示す強変質した火砕物が存在し，それらが崩壊の素因になったと推測される。
- ・地形の特徴：やや凹地形のため，周辺に比べて土中の水分が高い状態にあったと考えられ，本震の強振動によって地中にあった特定の土層に過剰間隙水圧が発生し，せん断強度の低下を招いたと推察される。

3. 斜面安定解析 図-1のような半無限傾斜面及び直線すべり面を仮定し，Fellenius法により地震時及び降雨時における斜面安定解析を行う。

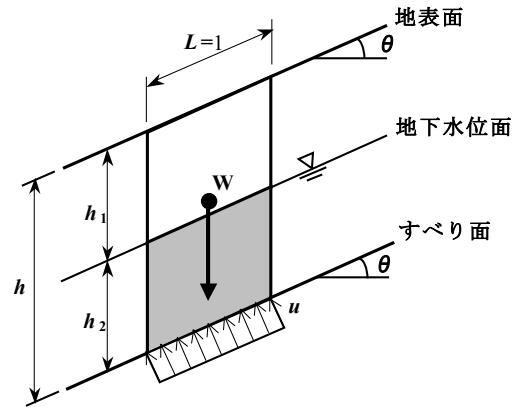


図-1 半無限長斜面の安定解析
Fig.1 Stability analysis of semi-infinity slope

$$F_s = \frac{C' + (W \cos \theta - k_h W \sin \theta - u) \tan \phi'}{W(\sin \theta + k_h \cos \theta)} \quad (1)$$

$$W = \gamma h \cos \theta \quad (2)$$

$$u = \gamma_w h_2 L \quad (3)$$

ここに F_s は安全率， C' は土の粘着力， W は土塊重量， k_h は水平震度， θ は傾斜角， u は間隙水圧， ϕ' は土の内部摩擦角， γ は土の単位体積重量， h は崩壊深， h_1 は地下水位より上部の土層厚， h_2 は地下水位からすべり面までの土層厚(=すべり面から測った地下水位の高さ)， γ_w は水の単位体積重量($\gamma_w = 9.8 \text{ kN/m}^3$)， L は単位斜面長である。

なお，式(1)において $k_h = 0.00$ とすると，次式を得る。

$$F_s = \frac{C' + (W \cos \theta - u) \tan \phi'}{W \sin \theta} \quad (4)$$

式(4)によれば，降雨時($k_h = 0.00$)に $W \cos \theta = u$ となる h_2 のとき(土塊重量の斜面直角方向の成分と間隙水圧の大きさが等しくなるような地下水位のとき)， F_s の決定は ϕ' の大きさに関係なく， C' に支配されることがわかる。

4. 計算条件

ここでは降雨時及び地震時における ϕ' 及び C' と F_s の関係を調べる。計算条件は，詳細値が不明な γ ， C' を含めて次のとおり設定する。

Case 1 :

- ・ $\theta = 10^\circ$ ， $h = 10 \text{ m}$ ， $h_2 = h$ (降雨時)， $h_2 = 0$ (地震時)
- ・ γ は，太田(5)の成果を参考に，黒ボク土の標準値である $\gamma = 11.76 \text{ kN/m}^3 (1.20 \text{ tf/m}^3)$ とする。
- ・ C' は，大原・山本(4)の成果を参考に， $C' = 14.7 \text{ kN/m}^2 (0.15 \text{ kgf/cm}^2)$ を上限値とする。

Case 2 :

- ・ $\theta = 35^\circ$ ， $h = 5 \text{ m}$ ， $h_2 = h$ (降雨時)， $h_2 = 0$ (地震時)

- γ は福富ら(1)の成果を参考に、阿蘇火砕流堆積物の標準値である $\gamma = 15.68 \text{ kN/m}^3 (1.60 \text{ tf/m}^3)$ とする。
- C' は、福富ら(1)を参考に、一軸圧縮強度 $q_u = 29.4 \sim 117.6 \text{ kN/m}^2 (0.3 \sim 1.2 \text{ kgf/cm}^2)$ より、 $C' = 14.7 \sim 58.8 \text{ kN/m}^2 (0.15 \sim 0.6 \text{ kgf/cm}^2)$ の範囲を想定する。
- k_h は Case 1, 2 に共通して $k_h = 0.00$ (降雨時), 0.10 (震度 5 弱), 0.20 (震度 5 強), 0.30 (震度 6 弱~6 強) (2, 3) を想定する。

IV 結果及び考察

1. Case 1 (高野台地区の地すべり) 図-2 (a) は、式(1)で $F_s = 1.0$ (平衡状態)としたときの降雨時($h_2 = 10 \text{ m}$)及び地震時($h_2 = 0 \text{ m}$)における ϕ' と C' の関係を示す。同図(b)は地震動によって $C' = 0$ となり、 ϕ' も半減した条件下で、 k_h の違いによる F_s の変化を示す。

図-2 (a) より、 $C' = 14.7 \text{ kN/m}^2$ が保持されている条件下では、降雨によって地下水位が地表面に達した場合でも、 $\phi' = 20^\circ$ 程度で斜面は平衡状態であることがわかる。このことから当該斜面の地すべりに対する安全度は、降雨に対しては高かったといえる。

図-2 (a)において地震時では、 $k_h = 0.30$ の場合、 $h_2 = 0 \text{ m}$ で地下水位による間隙水圧の影響がない状態では、 $\phi' = 20^\circ$ 程度で斜面は平衡状態であることがわかる。それに対して、同図(b)では $k_h = 0.30$ の場合、地震動によって $C' = 0$ となり、 ϕ' も半減した条件下では、平常時の ϕ' が 45° だったとしても $F_s < 1.0$ であり、斜面は不安定である。一方、 $k_h = 0.20$ 及び 0.10 の場合では、平常時の ϕ' がそれぞれ 42° 程度及び 32° 程度であれば、いずれも $F_s = 1.0$ であり、斜面は平衡状態である。

以上より、当該斜面はこれまで雨では崩れなかったが、

静的なせん断特性に対して地震動によるせん断強度の低下を適切に見積もることにより、地震時の土砂移動の発生を説明できることがわかった。さらに、地震の規模によっては土砂移動が発生しなかった可能性もあることから、今回の熊本地震は未曾有の規模であったといえる。

2. Case 2 (火の鳥温泉地区の斜面崩壊) 当該斜面の条件下で式(4)中の $W \cos \theta - u = 0$ となる h_2 を逆算すると、 $h_2 = 4.7 \text{ m}$ であり、そのとき $F_s = 1.0$ となる C' は、 $C' = 32.3 \text{ kN/m}^2 (0.33 \text{ kgf/cm}^2)$ である。

この C' の値は、当該斜面が降雨によって地表面($h_2 = 5.0 \text{ m}$)付近にまで地下水位が上昇したとしても、崩壊には至らない条件の一つと考えられる。さらに、本研究で想定した C' の範囲内でもあることから、以下では $C' = 32.3 \text{ kN/m}^2$ をもとに検討を進める。

図-3 (a)は式(1)で $F_s = 1.0$, $C' = 32.3 \text{ kN/m}^2$ とし、降雨時($k_h = 0.00$)及び地震時($k_h = 0.10 \sim 0.30$)における ϕ' と h_2 との関係を示す。同図より、地震時でも平常時の $C' = 32.3 \text{ kN/m}^2$ が保持されている条件下では、 $k_h = 0.30$ の場合、 $\phi' = 30 \sim 35^\circ$ 程度であれば、 $h_2 = 1.3 \sim 1.6 \text{ m}$ 程度の地下水位に対して斜面は平衡状態であることがわかる。また、 $k_h = 0.20$ 及び 0.10 の場合には、 $\phi' = 30 \sim 35^\circ$ 程度であれば $h_2 = 2.4 \sim 2.7 \text{ m}$ 程度及び $3.5 \sim 3.7 \text{ m}$ の地下水位に対して斜面は平衡状態である。

Case 2 のすべり面付近の土質について、Case 1 の阿蘇黒ボク土のような動的せん断特性に関する知見は見当たらない。その一方で、地震動によってせん断強度の低下が Case 1 と同様に発生したことは容易に推察できる。

そこでここでは試みに、地震時に ϕ' は平常時の値が維持され、 C' が半減した($C' = 16.2 \text{ kN/m}^2$)条件を想定してみた。その場合、式(1)で $F_s = 1.0$ として降雨時($k_h = 0.00$)

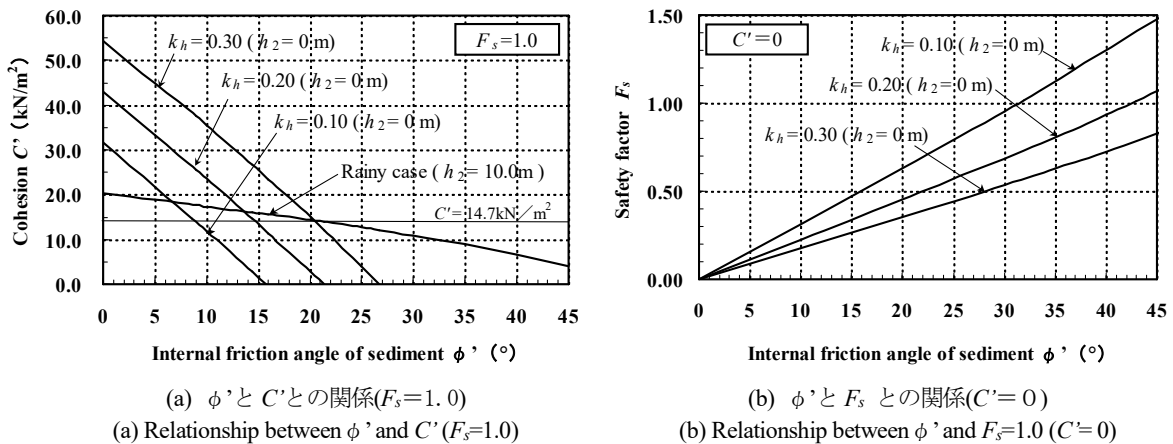
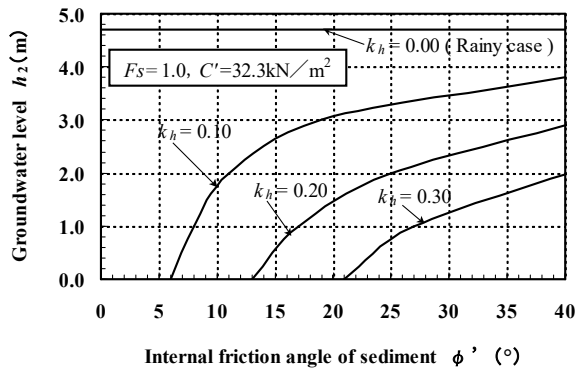
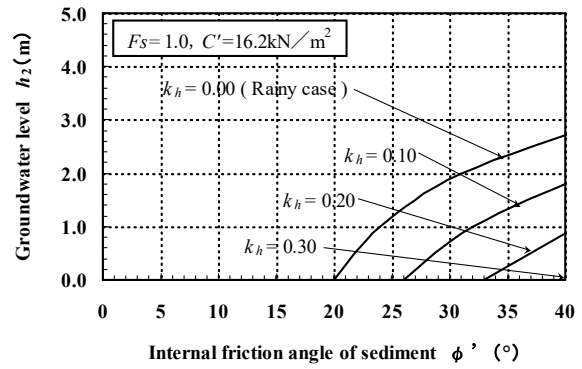


図-2. 斜面安定解析の結果(Case 1)
 Fig.2 Results of stability analysis (Case 1)



(a) ϕ' と h_2 との関係($F_s=1.0$, $C'=32.3\text{kN/m}^2$)
 (a) Relationship between ϕ' and h_2
 ($F_s=1.0$, $C'=32.3\text{kN/m}^2$)



(b) ϕ' と h_2 との関係($F_s=1.0$, $C'=16.2\text{kN/m}^2$)
 (b) Relationship between ϕ' and h_2
 ($F_s=1.0$, $C'=16.2\text{kN/m}^2$)

図-3. 斜面安定解析の結果(Case 2)
 Fig.3 Results of stability analysis (Case 2)

及び地震時($k_h=0.10, 0.20, 0.30$)における ϕ' と h_2 との関係を示すと、それは図-3 (b)のようになる。

同図より $k_h=0.30$ の場合、 $\phi'=40^\circ$ のとき $F_s=1.0$ を満たす h_2 は0mである。たとえば、 $h_2<1.0\text{m}$ のような僅かな値であっても地下水位が存在すれば、強震動によって $F_s<1.0$ となり、斜面は不安定となる。一方、 $k_h=0.20$ 及び0.10の場合には、斜面の安定性が平衡状態を保たれている地下水位の上限は図-3 (a)のときと比べて小さいものの、地下水位の程度によっては崩壊が発生しない可能性もある。

前述のとおり、当該斜面はやや凹地形であったため、周辺に比べて土中の水分が高い状態にあったと考えられ、本震の強振動によって地中にあった特定の土層に過剰間隙水圧が発生し、せん断強度の低下を招いたと推察されている(3)。それに対して図-3 (b)は、強震動が加わると地下水位の存在によって、過剰間隙水圧の有無に関わらず $F_s<1.0$ となり、斜面は不安定になることを示している。

当該斜面での地震動による ϕ' 及び C' の低下の詳細は不明であるが、図-3 (b)の「 ϕ' は平常時の値を維持、 C' は半減」よりもさらに厳しい強度低下が発生したことは、Case 1の検討結果からも想像に難くない。

以上より、当該斜面はこれまで雨では崩れなかったが、少なくとも震度6弱($k_h=0.30$)に相当する強い地震動によって土層のせん断強度が著しく低下し、崩壊の発生に至ったと結論付けられる。さらに、Case 1と同じく、地震の規模によっては土砂移動が発生しなかった可能性もあることから、今回の熊本地震は未曾有の規模であったといえる。

V おわりに

今回の熊本地震における土砂災害は地震断層に近い地域に集中して発生し、そこは降雨起因の土砂災害履歴を有する地域とは異なっていた。地震は土砂移動を引き起こす誘因であると同時に、土砂災害自体の素因でもあることをあらためて強く認識する必要がある。

謝辞：本研究の実施にあたっては、東京農業大学「大学戦略研究プロジェクト」から研究費の補助を受けた。ここに記して深謝いたします。

引用文献

- (1) 福富幹男・金光勝明・江頭義昭・田中 弘 (1979) 九州地方における火砕流の工学的性質と問題点. 応用地質調査事務所年報(1) : 173-209
- (2) 気象庁 (1949) (旧)震度階級.
- (3) 気象庁 (1996) 震度階級関連解説表.
- (4) 大原資生・山本哲朗 (1980) 阿蘇火山灰土の動的せん断特性について. 山口大学工学部研究報告 30(2) : 27-33
- (5) 太田弘毅 (1983) 主要な特殊土の理工学的性質—九州における畑の造成整備—. 農業土木学会誌 51(10) : 17-27
- (6) 砂防学会 (2016) 平成 28 年熊本地震による土砂災害に関する緊急調査報告書. 砂防学会, 東京 : 81pp
- (7) 佐々恭二・福岡浩・汪発武 (1998) 秋田県澄川地すべり, 鹿児島県針原川土石流における高速長距離土塊移動のメカニズムについて. 地すべり 35(2) : 29-37