

1. はじめに

国際委員による IAEG Bulletin 紹介も二巡目に入り，ここでは，日本を対象にした論文を紹介したい．今回紹介する論文は「Geological characteristics of landslides triggered by the 2016 Kumamoto earthquake in Mt. Aso volcano, Japan」¹⁾である．筆頭著者の Kun Song は中国の Three Gorges University 所属であり，共著者に日本人が含まれている．内容的には，原著論文というよりは，報告的な内容であり，比較的執筆しやすい内容と思われる．近年，日本応用地質学会では，災害調査団報告書が立て続けに出版されているが，得られた成果は国内での発信に留まっていると思われる．本論文のように，得られた成果を海外に向けても積極的に発信して頂くことを期待したい．

2. 紹介論文の概要

2-1. Abstract

2016 年 4 月 16 日に M_w 7.0 の地震が熊本市を襲った．この地震により，阿蘇大橋と京都大学火山研究所の 2 箇所で大きな地すべりが発生した．これらの地すべりを対象に，無人航空機(unmanned aerial vehicle: UAV)と可搬型動的コーン貫入試験(portable dynamic cone penetration test: PPT)により，地形・地質的条件と動的特徴(motion feature)の調査を行った．阿蘇大橋地点での地すべりは，標高 385~725 m で発生し，地すべり土塊の体積は 1,980,000 m^3 であり，ラピリ~ブロックサイズの岩塊を伴う粘性土で構成されていた．火山研究所では，標高 483~582 m で，体積 81,000 m^3 ，平均の厚さ 4.5 m の土塊（草千里ヶ浜軽石層）が地すべりを起こした．2 箇所ともに，地すべり土塊の粘着性が低く，せん断破壊が容易に進行した．地すべりのすべり距離(sliding distance)・速度は，阿蘇大橋では，長くかつ高速であり，すべり方向に変化はなかったが，火山研究所では，短くかつ低速であり，すべりの方向は北から北西に変化した．

2-2. Introduction

2016 年熊本地震では，阿蘇地域で，少なくとも 97 箇所で地すべりが発生した²⁾．そのうち，阿蘇大橋と京都大学火山研究所の 2 箇所で大きな地すべりが発生した（図-1）．



図-1 阿蘇大橋地すべりと火山研究所地すべりの位置．Google Earth に加筆した．

地震が誘因の地すべりは山岳地帯では重要な二次災害であり³⁾，近年では，1999 年 M_w 7.6 Chi-Chi earthquake⁴⁾，2005 年 M_w 7.6 Kashmir earthquake⁵⁾，2008 年 M_w 7.9 Wenchuan earthquake⁶⁾などの例がある．

地震を誘因とする地すべりに関しては，特に巨大なもの（米国の 1959 年 Madison Canyon landslide⁷⁾，台湾の 1999 年 Chiufengershan and Tsaoling landslides^{8),9)}，2004 年新潟県中越地震を誘因とした地すべり¹⁰⁾，中国の 2008 年 Daguangbao landslide¹¹⁾など）を除くと，地質学的な調査は十分には行われていない．

著者たちは，本震発生約 1 ヶ月後の 5 月 18 ~21 日に上記 2 箇所の地すべり調査を実施した．その際に，UAV と PPT 調査を実施し，地質・土質と地すべりの動的特徴について検討した．

2-3. 阿蘇大橋地すべりの地質的特徴

阿蘇大橋地すべりは平面的には舌状の形をしており，前面には深さ 80 m の黒川の溪谷が位置する．地すべりは，標高 385~725 m の傾斜 23° の斜面で発生し，長さ約 705 m，幅約 195 m，厚さは推定で約 15 m である．地すべ

り面は円弧状である．132,000 m² の範囲ですべり，地すべり土塊の体積は1,980,000 m³と推定した．地すべり方向はS61° Eである．図-2に地形平面図を，図-3に地すべり方向に沿った地形断面図を示す．

地すべり土塊は，風化した火山由来の軟質な粘性土からなり，ラピリ～ブロックサイズの岩塊を伴う．この土塊は多孔質で緩く(loose)，粘着力が小さいため，地震の揺れで崩れやすい．PPT 試験を行った PB-5 地点（図-2）近くにある露頭（原著の Fig. 6）では，地すべり土塊の上面から下面を観察できる．より小さいサイズの岩塊を含む褐色の粘性土，（岩塊を含まない）黒色の粘性土，より大きな岩塊を主体とした褐色の礫層などの互層が観察される．地すべり土塊の下位には，中期更新世の安山岩溶岩と火砕岩が分布する．

PPT 試験を6箇所で行ったところ（図-2），地表から深度1.5mまでは，概ね N_d (blow count)値が10以下であった．但し，N_d 値がより大きな値を示す部分もあり，ラピリを含んでいるためと判断された．

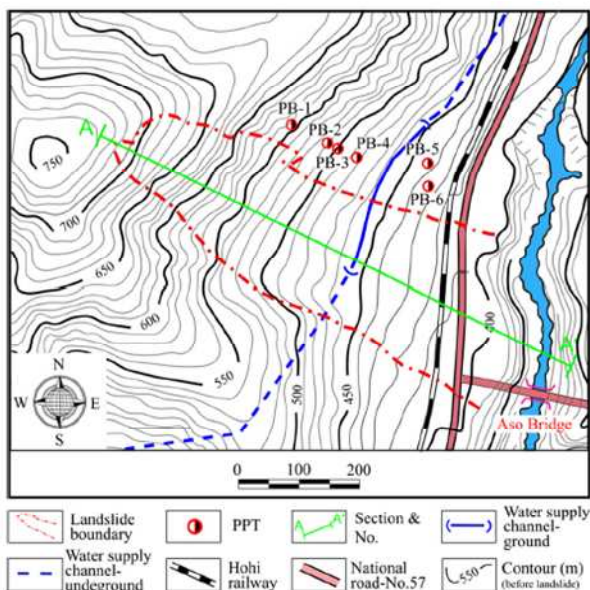


図-2 阿蘇大橋地すべりの地形図¹⁾（訳者注：原文は地質図と書かれているが訂正した）．可搬型動的コーン貫入試験(PPT)の位置を表示．

Reprinted by permission from Springer Nature, License Number 4633900808595.

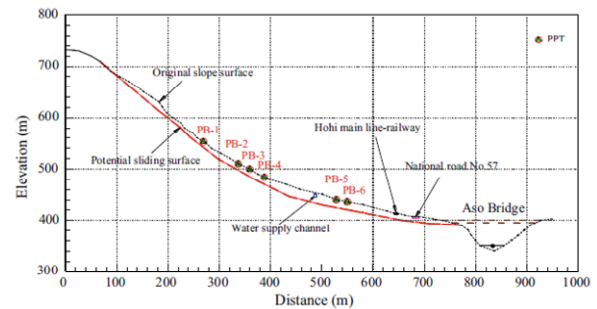


図-3 阿蘇大橋地すべりのすべり方向の中心線(central longitudinal section)の地形断面図¹⁾．PPT と阿蘇大橋の位置は垂直に投影した．

Reprinted by permission from Springer Nature, License Number 4633900808595.

2-4. 火山研究所地すべりの地質的特徴

本地すべりは，阿蘇大橋地すべりの東約2kmの標高483～582mで発生し，凡そ，面積18,000m²，長さ206m，幅101mであった．体積は約81,000m³，平均の厚さは約4.5mと推定した．

本地すべりの主体は，草千里ヶ浜軽石層であり，左側面に，すべり面に平行に2条の明瞭な土層がある（図-4）．これらを上位からLayer-1，Layer-2とすると，Layer-1は厚さ2.5mの褐色の粘性土で，地表下20cmまでは草の根が見られた．Layer-2は黒色の粘性土であり，Layer-1よりも細粒で緻密(dense)である．地すべり面は，Layer-2内で発生した．地すべり面は，草千里ヶ浜軽石層の底部で発生し，その下位には後期更新世のデイサイト～流紋岩の溶岩や火砕岩が分布する．

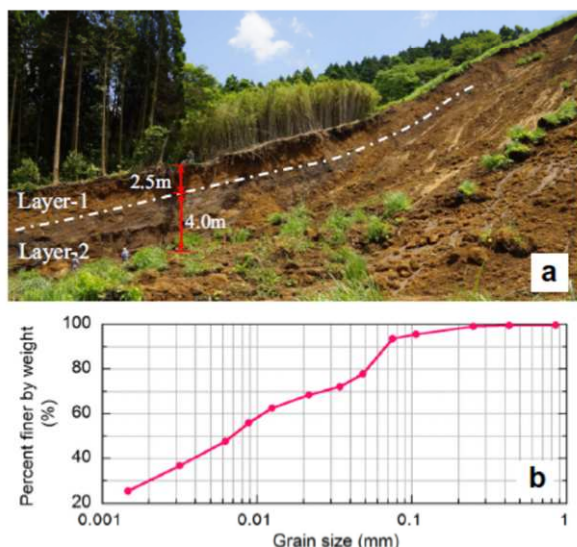


図-4 火山研究所地すべり発生箇所の左側面の土層断面(a)と Layer-2 の粒度分布(b)¹⁾

Reprinted by permission from Springer Nature, License Number 4633900808595.

5 箇所（2 箇所は地すべり地外，3 箇所は地すべり地内）で PPT 試験を実施したところ，地すべり面付近で N_d 値が小さくなる傾向が見られた．また，風化と地すべり土塊の除荷により，地すべり面の表層付近では N_d 値が 5 以下であり，深さ 0.5m では 20 近くの値を示した．従って，風化と除荷の影響を除くと，地すべり面付近の N_d 値は約 20 である．

本地すべりでは，3 軒の家屋が地すべり土塊と一緒に， $N40^\circ W \sim N43^\circ W$ 方向に，55～68m 滑ったが，これらは倒壊を免れた．地すべりの右側面では，地すべりによる傷(scratch)が多く見られ，それらの傾斜は 21° である．脚部では多くの膨らみ(swelling)が見られ，そのために家屋の前面のコンクリートの地面(ground)が破壊された．また，場所により末端部の膨らみの高さは約 2.5m に達した．地すべりの移動距離は，明瞭なマーカー無しに正確に測定することは困難だが，背面(rear)で長く，前面(front)に向かい徐々に短くなる．すべり方向も変化し，背面(rearもしくはscarp)で N 方向，前面(frontもしくはtoe)で NW 方向である．このすべり方向の変化は，地すべり地の外側の地形の高まりに規制されている．地すべりは前面で放射状に広がっているが，これは，元の地形が平坦な宅地であったためである．

2-5. 議論

今回取り上げた 2 つの地すべりは，同じ南阿蘇地域で，2016 年熊本地震の本震で発生し

た地すべりであるが，いくつかの点で相違がある．

- (1) 発生場(terrane)が明らかに異なる．阿蘇大橋地すべりは，火山研究所地すべりに比べ，標高で 3.4 倍高く，平均の傾斜も 2 倍急である．空いた空間(free space)の条件も異なり，前者には溪谷(gorge)があり，後者には北北東の隅に丘がある．前者は地すべりには好条件で，すべり距離が長い．
- (2) 地すべり土塊の構成物が異なる．但し，両者ともに粘着力が小さく，小さいせん断強度ですべりが発生する．構成物から判断して，阿蘇大橋地すべりの方が，移動中に土塊が緩くなり(loosen)やすい．
- (3) 地すべりが及ぼしたダメージ(damage)が異なる．阿蘇大橋地点での破局的な(catastrophic)地すべりにより，阿蘇大橋が落橋し，道路，鉄道，水道施設などが破壊された．火山研究所地すべりでは，家屋 3 棟と道路 1 本が平均 62m 移動したが，家屋は倒壊を免れた．
- (4) 動的特徴にもいくつかの相違がある．阿蘇大橋地すべりは，すべり距離が長く，恐らく 700m 以上あり，すべり方向($S61^\circ E$)はほとんど変化していないが，火山研究所地すべりは，すべり距離が 110m 以下と短く，方向は北から北西に変化した．

阿蘇大橋地すべりは，火山研究所地すべりに比べ，高度差がより大きく，傾斜がより急であり，位置エネルギーの動的エネルギーへの変換がより大きかった．移動方向が変わらず，移動先に空いた空間があったため，地すべりは高速化した．

2-6. 結論

5 日間の現地調査により，阿蘇大橋地すべりと火山研究所地すべりの基本的な地質・土質的特徴と構造物の破壊状況，動的特徴を明らかにした．それにより，2 つの地すべりの相違点を明らかにした．

3. 終わりに

本紹介記事を読み，どのような感想を持たれたでしょうか？自分でも書けそうだけど，英語にするのは大変と思われたかも知れません．最近では，英語論文文化をサポートする，

(それほど高額でない?) Web サイトなどもあるので、海外学術誌への投稿のハードルは低くなっていると思います。本論文 pdf では、Discussion の部分に単語の区切りがない箇所があり、一部で非常に読みにくくなっています。折角受理された論文なので、このようなミスがないよう、著者校正段階で、しっかりチェックすることも大事だと思います。Good luck!

引用文献

- 1) Song, K., Wang, F., Dai, Z., Iio, A., Osaka, O. and Sakata, S. (2019): Geological characteristics of landslides triggered by the 2016 Kumamoto earthquake in Mt. Aso volcano, Japan. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 78, pp. 167–176.
- 2) Dang, K., Sassa, K., Fukuoka, H., Sakai, N., Sato, Y., Takara, K., Quang, L.H., Loi, D.H., Van Tien, P. and Ha, N.D. (2016): Mechanism of two rapid and long runout landslides in the 16 April 2016 Kumamoto earthquake using a ring-shear apparatus and computer simulation (LS-RAPID). *Landslides*, Vol. 13, pp. 1525–1534.
- 3) Keefer, D.K. (1994): The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions. *Geomorphology*, Vol. 10, pp. 265–284.
- 4) Liao, H.W. and Lee, C.T. (2000): Landslides triggered by the Chi-Chi earthquake. In: *Proceedings of the 21st Asian Conference on Remote Sensing*, Taipei, Taiwan, December 2000, 1–2, pp. 383–388.
- 5) Owen, L.A., Kamp, U., Khattak, G.A., Harp, E.L., Keefer, D.K. and Bauer, M.A. (2008): Landslides triggered by the 8 October 2005 Kashmir earthquake. *Geomorphology*, Vol. 94, pp. 1–9.
- 6) Wang, F.W., Cheng, Q.G., Highland, L., Miyajima, M., Wang, H.B. and Yan, C.G. (2009): Preliminary investigation of some large landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan Province, China. *Landslides*, Vol. 6, pp. 47–54.
- 7) Hadley, J.B. (1964): Landslides and related phenomena accompanying the Hebgen Lake earthquake of August 17, 1959. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, Vol. 435, pp. 107–138.
- 8) Shou, K.J. and Wang, C.F. (2003): Analysis of the Chiufengershan landslide triggered by the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. *Engineering Geology*, Vol. 68, pp. 237–250.
- 9) Chigira, M., Wang, W.N., Furuya, T. and Kamai, T. (2003): Geological causes and geomorphological precursors of the Tsaoling landslide triggered by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Engineering Geology*, Vol. 68, pp. 259–273.
- 10) Chigira, M. and Yagi, H. (2006): Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake in Japan. *Engineering Geology*, Vol. 82, pp. 202–221.
- 11) Huang, R.Q., Pei, X.J., Fan, X.M., Zhang, W.F., Li, S.G. and Li, B.L. (2012): The characteristics and failure mechanism of the largest landslide triggered by the Wenchuan earthquake, May 12, 2008, China. *Landslides*, Vol. 9, pp. 131–142.