

1999年集集地震による山地災害とその後

千木良 雅 弘*

Mountain hazards induced by the 1999 Chi-Chi earthquake and their change after the earthquake

Masahiro CHIGIRA *

Abstract

1999 Chi-Chi earthquake induced more than 10,000 landslides in an area of 2,400 km² in the mountain areas of Taiwan, and also increased the susceptibility level of the area against rainstorms after the earthquake, which has been shown by more than 5 typhoons that hit the affected areas of the earthquake: Typhoons Toraji, Nari, and others induced many landslides and debris flows. Tsaoling slide, which repeated several times retrogressively at least from 1862, seems to end its major activity by the movement during the Chi-Chi earthquake. Chiu-fen-erh-shan slide, on the other hand, has been active even after the earthquake; buckling and failure of beds has been occurring repeatedly.

キーワード：1999年集集地震，地すべり，崩壊，台風

Key words：1999 Chi-Chi earthquake, landslide, slope failure, typhoon

1. はじめに

集集地震は、1999年9月21日午前1：47に発生し、約100kmにおよぶ地震断層の出現とともに、都市部で2,000人を超える死者を含む甚大な災害を引き起こしただけでなく、山地の2,400km²以上の範囲に1万以上の斜面災害を引き起こした(Wang et al., 2003)¹⁾。中には、九分二山や草嶺

のように、5,000万立方メートル以上の崩壊体積を持つ巨大なものも含まれていた。

集集地震の概要は次のとおりである。

震央：北緯23.85°，東経120.81°

マグニチュード：Mw 7.6

地震断層：約100kmの東傾斜低角逆断層

死者：2,321人（ウィキペディアによる）

* 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

本稿に対する討論は平成22年2月末日まで受け付ける。

断層の変位は、最大で水平11.1m、鉛直で7.5mであった(Lin et al., 2001)²⁾。地震断層は、地震災害を忘れず、その理解に資するために、台中県の九二一地震教育園区に保存されている。断層は、東の丘陵地と西の平地の境界付近を通過しており、それに沿う橋梁、道路、家屋、ダムに被害が発生するとともに、東側の丘陵地から山岳地にかけて広域にわたって、数多くの地すべり・崩壊が発生した。さらに、集集地震の被災地は、その後、2001年台風Toraji、台風Nari、2004年台風Mindulleの来襲を受けた。中でも2001年の台風Torajiの影響は大きかった。

集集地震は、地元では921地震と呼ばれ、今年、地震発生から10年にあたり、各種の記念行事や学術シンポジウムが計画されている。筆者は、地震後、2000年2月、11月、2002年3月、2007年11月に地震被災地を調査することができた。本稿では、特に山地での災害に焦点を絞り、集集地震、およびその後の状況について概観したい。

2. 地震後の台風

1999年集集地震の後に台湾に来襲して大きな災害をもたらした台風には、つぎのようなものがある(主としてアジア防災センター³⁾による)。

2001年台風Toraji(台風8号)

7月30日に台湾北部と中部に被害を発生。

死者69人、負傷者34人、行方不明者140人。

2001年台風Nari(台風16号)

9月16日に台湾北東部に上陸。記録的豪雨による河川の氾濫などで、23人死亡、6人が行方不明、69人が負傷。

2004年台風Mindulle(台風7号)

6月30日、台湾中南部に被害を発生。死者23人、行方不明者13人。

2004年台風Aere(台風17号)

8月24日、台湾北部に被害。

2005年台風Haitang(台風5号)

7月19日、台湾北部と東部に被害を発生。

死者4人、負傷者29人。

2001年7月30日には台風Toraji(桃芝)が台湾中央部を通過し、日雨量200-700mmの降雨をも

たらした(中川他, 2003)⁴⁾。その結果、10,000か所以上の崩壊が発生し、230人の死亡者が発生した¹⁾。崩壊の65%は集集地震の被災地で発生し、地震の影響の上に降雨が加わった結果と考えられている。また、2004年の台風Mindulleは、台中東方の大甲川を中心として最大2,000mm以上の降雨をもたらした。地震以降の崩壊を一層増やした。大甲川周辺では、地震前の1996年の台風Herbによって多くの崩壊が発生したが、1999年の集集地震時、さらに引き続き台風によって崩壊が増加したことが報告されている(Lin et al., 2008)⁵⁾。

このように、1999年の集集地震は、地震時に崩壊を多数発生させただけでなく、その後も降雨による崩壊発生に強い影響を残した。

3. 斜面崩壊の地震後とその後の降雨による状況

3.1 表層崩壊

地震によって被害が発生した地域には、古第三紀から新第三紀の堆積岩と変成岩が分布し、それらの年代と硬さは東に向かって大きくなっている。崩壊の分布は、Wang et al. (2003)¹⁾によって詳しく判読されている。それによれば、2,400km²の範囲に10,000の崩壊が判読されており、加速度が東西200gal、上下100galを超えたあたりから発生し、加速度の増加とともに増加していた。中でも、第四紀の礫層(礫岩)からなる九十九峰と始新世の珪質砂岩と粘板岩の互層からなる大甲川とで崩壊密度は特に高かった(図1)。

九十九峰

九十九峰は、標高500-700mで比高100-200m程度の、低いが急峻な山稜をなし、第四紀の礫層(礫岩)からなっている。この礫層は強く圧縮を受け、いたるところに礫相互の衝突による破断とその後の癒着が認められ、岩石としては弱固結の礫岩といえる。これらの癒着が表層部で失われ、ゆるんだ部分が地震によって崩壊した。

2001年の台風Torajiの時の土砂流出は著しく、2002年3月でもその様子が十分に認められた(図2)。しかしながら、現在は植生がかなり回復

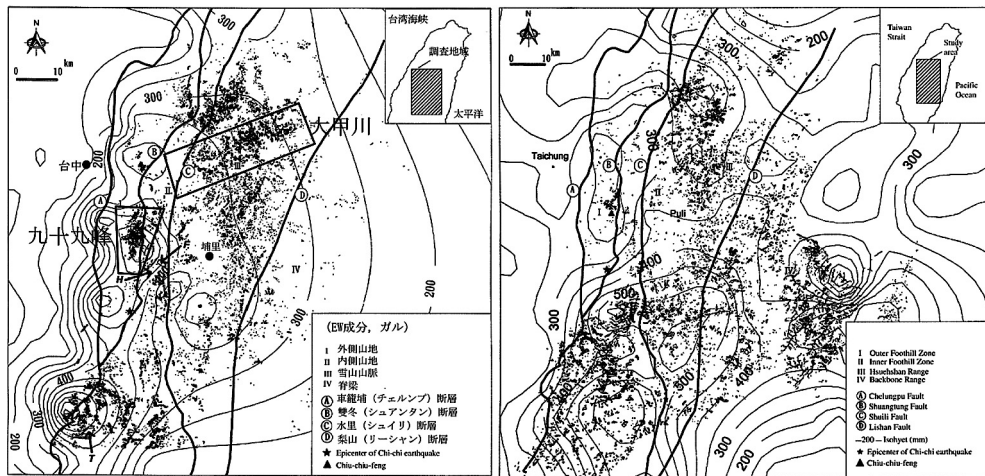


図1 1999年集集地震による崩壊分布 (左) とその後の台風 Toraji による崩壊分布 (右)。F: 九分二山, T: 草嶺。Wang et al. (2003)¹⁾による。

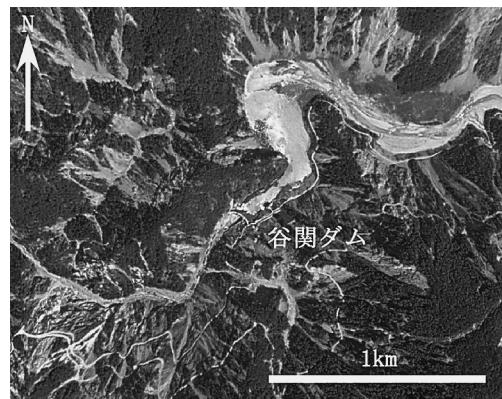


図2 九十九峰の崩壊と土砂流出。

しており、また、緩んだ部分が剥落した斜面では、次の緩み層が形成されるまでは地震によっても崩壊は発生しないと思われる。むしろ、集集地震の時に崩れずに残った部分が次の崩壊場所である。

大甲川

大甲川流域は、台中の東方にあり、始新世の珪質砂岩と粘板岩の互層からなる。この流域では、集集地震時に崩壊が多数発生しただけでなく、その後の2001年台風 Toraji, 2004年台風 Mindulle によって数多くの崩壊が発生した(図3)。この崩壊



上: 2002年8月29日撮影 (Google earth)
下: 2007年11月29日撮影。中央は谷関ダム。

図3 大甲川流域の崩壊の状況。

の状況の推移は、Petley (2008)⁶⁾に示されている。これらの地層は、非常に硬質な珪質砂岩と相対的に弱い粘板岩との互層からなり、露頭では、至るところにトッピングタイプやその他のタイプの岩盤クリープが認められた。おそらく地震時に、珪質砂岩の岩片が相互に衝突しあって岩盤の緩みを増し、それが後の降雨による崩壊の原因になったように思える。

3.2 大規模崩壊

九分二山

九分二山の崩壊は、中新世の砂岩と泥岩の斜面に発生した。地層はほぼ斜面に平行であり、地震の前に重力によってわずかにすべり、座屈変形していたことがわかっている (Wang et al., 2003)⁷⁾。また、この座屈は複数個所で生じており、地震の後にも進行していることがわかった。図4は、地震後の2000年11月14日の写真と2002年3月14日の写真である。2000年には平滑であった地層が2002年には座屈していることがわかる。さらに、2007年には、斜面全体に草が生い茂るようになったが、やはり変形は進行しているようであった。このように座屈変形が終息しないことの大きな原因は、ここの地層が上に凸な形態になっており、また、泥岩が風化しやすいために、重力による変形が起こりやすいためであると考えられる。また、九分二山の場合、崩壊斜面の上方には、まだ不安定な地塊が残存していた。

九分二山の崩壊は2つの川を堰き止め、湖を形成した。その後排水の水路が掘削されたが、出水時には侵食が進んだ。図5は、侵食が進んだ2002年3月14日の写真と対策工事が施された後の2007年11月29日の写真である。両者の間で河道に大きな変化はなく、スリット型の堰堤が良く機能しているようである。この土砂ダムは、現在、地震を記録するための記念公園になっている。

草嶺

草嶺の崩壊は、鮮新世の砂岩と泥岩、頁岩からなる斜面で発生し、濁水溪の2番目に長い支流である清水溪を堰き止め、4,200万 m³の池を形成し



図4 九分二山の崩壊にみられた地層の座屈。上：2000年11月14日撮影。下：2002年3月14日撮影。矢印が座屈を示す。下の写真では座屈部分の突出が明瞭になっている。



図5 九分二山の土砂ダムの侵食状況(上、2002年3月14日撮影)と対策状況(下、2007年11月29日撮影、スリット型ダム)。

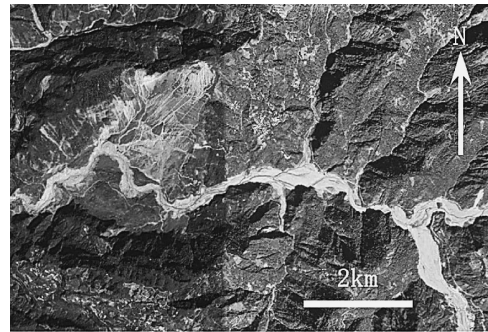
た (Hsu & Hsu, 2008)⁸⁾。崩壊発生前には、集集地震で崩壊した部分の上限を限るようにV字型の溝が認められており、そこから下方がわずかに動いていたことが推定されている (Chigira et al., 2003)⁹⁾。崩壊地内では地層は非常に平面的で、傾斜は14度であった。

草嶺では、記録に残っている限りでも1862年から何回も崩壊を繰り返してきた。それは、斜面下部から上部に向けて後退するように発生してきたものである。そして、集集地震によって上述の溝から下方部分はほとんどすべてすべり落ちた。この溝はほぼ山頂部にあり、この部分よりも上方は狭い尾根となり、また、崩壊の前兆的な動きを示す地形もない。したがって、草嶺では大規模な崩壊は終息したとみなすことができる。しかしながら、草嶺の崩壊面に露出した頁岩は風化しやすく、地震後にも表層部が層理面に平行にわずかにすべり、高さ10-30cm程度の座屈褶曲を形成していた。ただ、このような風化や表層の動きも次第におさまっていくように思える。

草嶺の土砂ダムと湖の経過は、Hsu & Hsu (2008)⁸⁾によって報告されている。土砂ダムは、体積1億2,000万 m^3 で、上下流方向約4.8km、高さ50mのダムとして清水溪を堰き止めた。草嶺湖は、地震の後の2001年台風 Toraji, 台風 Nari の降雨による土砂流出によって埋め立てられ、2004年にはほぼすべて堆砂で埋められた。図6の写真は2001年台風 Toraji の後の2002年のものと、湖が完全に埋められた2005年のものである。ダム内の河道の横方向移動は2000年から2001年の間に起こり、また下刻もこの期間に最も大きく起こり、河床は下流側では35m低下した。2001年以降はダムの下流部では堆積が起こった。

4. おわりに

1999年集集地震時に発生した表層崩壊多発域と大規模崩壊の九分二山と草嶺について、地震直後から現在までの変化についてとりまとめた。地震時に崩壊が多発した地域では、その後も何度も台風の襲来を受けており、豪雨による崩壊危険度は地震前に比べて未だに高いようである。草嶺にお



2005年2月17日撮影 (Google earth)



2002年3月16日撮影 (遠方に堆砂が見える)

図6 草嶺湖の変化。下：2002年。上：2005年撮影。

いては、集集地震の時に崩壊したのは、それ以前の移動が地形的に認められた範囲であり、大規模な崩壊はすでに終息したと考えられる。九分二山においては、徐々にではあるが、未だに座屈が進んでいるようである。これは、地層が上に凸に湾曲するように褶曲していることに起因していると思われる。

謝辞

1999年集集地震後に関連した調査では、元台湾工業技術研究院能源興資源研究所の王文能氏に常にお世話になり、様々なことを教えていただいた。台風の後の大甲川には台湾の中興大学陳樹群氏に案内していただいた。ここに謝意を表する。

引用文献

- 1) Wang, W.N., H.L. Wu, H. Nakamura, S.C. Wu, S. Ouyang and M.F. Yu: Mass movements caused by recent tectonic activity: The 1999 Chi-Chi earthquake in central Taiwan. *The Island Arc*, Vol.12, pp.325-334, 2003.
- 2) Lin, A., T. Ouchi, A. Chen and T. Maruyama: Co-seismic displacements, folding and shortening structures along the Chelungpu surface rupture zone occurred during the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake. *Tectonophysics*, Vol.330, pp.225-244, 2001.
- 3) アジア防災センター http://www.adrc.asia/nationinformation_j.php?NationCode=158&Lang=jp&Mode=country (2009年8月18日アクセス)
- 4) 中川 一, 戸田圭一, 牛山素行: 2001年台風0108号「桃芝」による台湾での土砂災害. *自然災害科学*, Vol. 20-3, pp. 353-360, 2001.
- 5) Lin, G., N. Tsou and H. Chen: Impact of Geomaterial Properties and Rainfall on Landslides in Central Taiwan. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2008*, abstract#H51F-0889, 2008.
- 6) Petley, D: Earthquake induced landslides: lessons from Taiwan and Pakistan.
http://www.authorstream.com/Presentation/Dr_Dave-84099-earthquake-induced-landslides-landslide-08-nz-seminar-2scm-science-technology-ppt-powerpoint/
(accessed on August, 18, 2009)
- 7) Wang W-N., T. Furuya and M. Chigira: Geological and Geomorphological Precursors of the Chiu-fen-erh-shan Landslide Triggered by the Chi-chi Earthquake in Central Taiwan. *Engineering Geology*, Vol.69, pp.1-13. 2003.
- 8) Hsu, Y.H. and Y.S. Hsu: Impacts of the 921 Ji-Ji earthquake, Taiwan, on channel morphology and channel evolution. *Sediment Dynamics in Changing Environments, Proceedings of a symposium held in Christchurch, New Zealand, IAHS Publ. 325*, pp.462-465, 2008.
- 9) Chigira, M., W-N. Wang T. Furuya and T. Kamai: Geological causes and geomorphological precursors of the Tsaoiling landslide triggered by the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taiwan. *Engineering Geology*, Vol.68, pp.259-273, 2003.

(投稿受理：平成21年8月24日)