

1999年集集台湾地震後の土砂災害の推移と地形変化 — 清水溪上流を例にして —

地頭 蘭 隆¹⁾・下川 悦郎¹⁾・車 張堅²⁾・王 文能³⁾

1) 鹿児島大学農学部生物環境学科

2) 鹿児島大学大学院連合農学研究科

3) 台湾工業技術研究院能源與資源研究所

Sediment Disaster and Topographic Changes in the Headwaters of the Chin-Shui River following the Chi-Chi Taiwan Earthquake on September 21, 1999

JITOUSONO Takashi¹⁾, SHIMOKAWA Etsuro¹⁾, SHA Choken²⁾ and WANG Wen-Neng³⁾

1) Department of Environmental Sciences and Technology, Faculty of Agriculture, Kagoshima University, 1-21-24, Korimoto, Kagoshima 890-0065

2) United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University, 1-21-24, Korimoto, Kagoshima 890-0065

3) Energy & Resources Laboratories, Industrial Technology Research Institute, Bldg. 24, 195-6 Sec. 4, Chung Hsing Rd., Chutung Hsinchu, Taiwan 310, R.O.C.

(平成14年11月14日 受理)

Summary

The Chi-Chi Taiwan Earthquake on September 21, 1999 killed many people and involved great property loss. Also, it triggered many slope failures and debris flows in the mountainous regions of central Taiwan. The resulting sediment movement caused sediment disasters at every heavy rain.

On the basis of field surveys and the interpretation of aerial photographs, the spatial and temporal distribution of erosion scars related to slope failures and debris flows caused by the earthquake and the subsequent rainfall was investigated. Also, sediment yield was estimated from the distribution map of erosion scars. The study areas are located in the headwaters of the Chin-Shui River which is a stream tributary to the Choshui River in central Taiwan. The results are summarized as follows:

- (1) More than 131 slope-failure scars have been identified through aerial photographic interpretation in the 10.76 km² area of the investigated basin. The slope-failure area is 1.35 km², representing 12.5 % of the basin area. When the depth of collapse is assumed to be 1 m, the sediment yield is about 130,000 m³/km².
- (2) The sediment from slope failures flows out to the lower reaches of the river at every heavy rain. Although debris flows had occurred about once per year in the study area before the earthquake, they occurred 20 times or more in 2000 after the earthquake. The outflow of the sediment changes the river topography at the same time as it causes sediment disasters.
- (3) Older and more recent debris-flow terraces are observed along the river in the study area. In Taiwan, severe earthquakes have occurred repeatedly in the past, and sediment movement resulting from earthquakes is considered to be the main cause of change in mountain and river topography.

Key words: 1999 Chi-Chi Taiwan Earthquake, sediment disaster, change of topography

キーワード: 1999年集集台湾地震, 土砂災害, 地形変化

1. はじめに

1999年9月21日台湾で発生した集集大地震 (Chi-Chi Earthquake) は、中部の台中 (Taichung) や南投 (Nantou) を中心に甚大な人的・物的被害をもたらした (水山ら, 2000)。この地震で急峻な地形を有する山地では大小多数の斜面崩壊が発生し、多量の土砂が生産された (池谷ら, 2001)。本震後も、斜面からの土砂の生産は余震や雨のたびに繰り返され、斜面の直下および谷の源頭部に不安定土砂が堆積している。これらの土砂は雨で侵食され土石流となって流出し、河道沿いの沖積錐に到達した後、さらに河川の作用で運搬され下流では河床の上昇を招いている。こうした一連の土砂移動は山間部の集落に大きな土砂災害をもたらす一方、斜面から谷さらに河道に至る斜面・河川地形を大きく変化させている。

ここでは、台湾中部の阿里山 (Alishan) 山脈北部に位置する清水溪 (Chin-Shui River) 上流の2小流域を対象に、地震前、地震直後、さらにその後の大雨後の崩壊・土石流発生状況と地形変化について、現地調査および空中写真判読を基に検討する。

2. 調査地の概況

調査地は、台湾中部を流れる濁水溪 (Choshui River) の支流である清水溪上流に位置する2小流域である (Fig. 1)。

石鼓盤溪 (Shi-Gu-Pan River) 流域内の豊山 (Fengshan) 集落の上流域 (以下、豊山調査地という) は、流域面積 10.76 km^2 、 $660 \sim 2030 \text{ m}$ の標高域に分布している。調査地下流の豊山 (石鼓盤) 集落の住民は主にタケノコの生産で生計をたてていたが、最近では野菜栽培や観光にも力を入れている。集落に入る道路は梅雨期の大雨によってしばしば不通となり、1カ月ぐらい孤立することもある。そのため梅雨前に自給できない米などの食料を確保しておくようである。土砂災害に関しては、最近では1996年に石鼓盤溪で土石流が発生して一人亡くなったことがある。

加走寮溪 (Chai-Jou-Liao River) 流域内の調査地 (以下、加走寮溪調査地という) は、流域面積 20.00 km^2 、 $1020 \sim 2060 \text{ m}$ の標高域に分布している。調査地下流には石井磯 (Shr-Jing Ji) などの集落があり、また周辺には清瀧 (Ching-Lung) 瀑布や森林公園などがあり、観光地となっている。

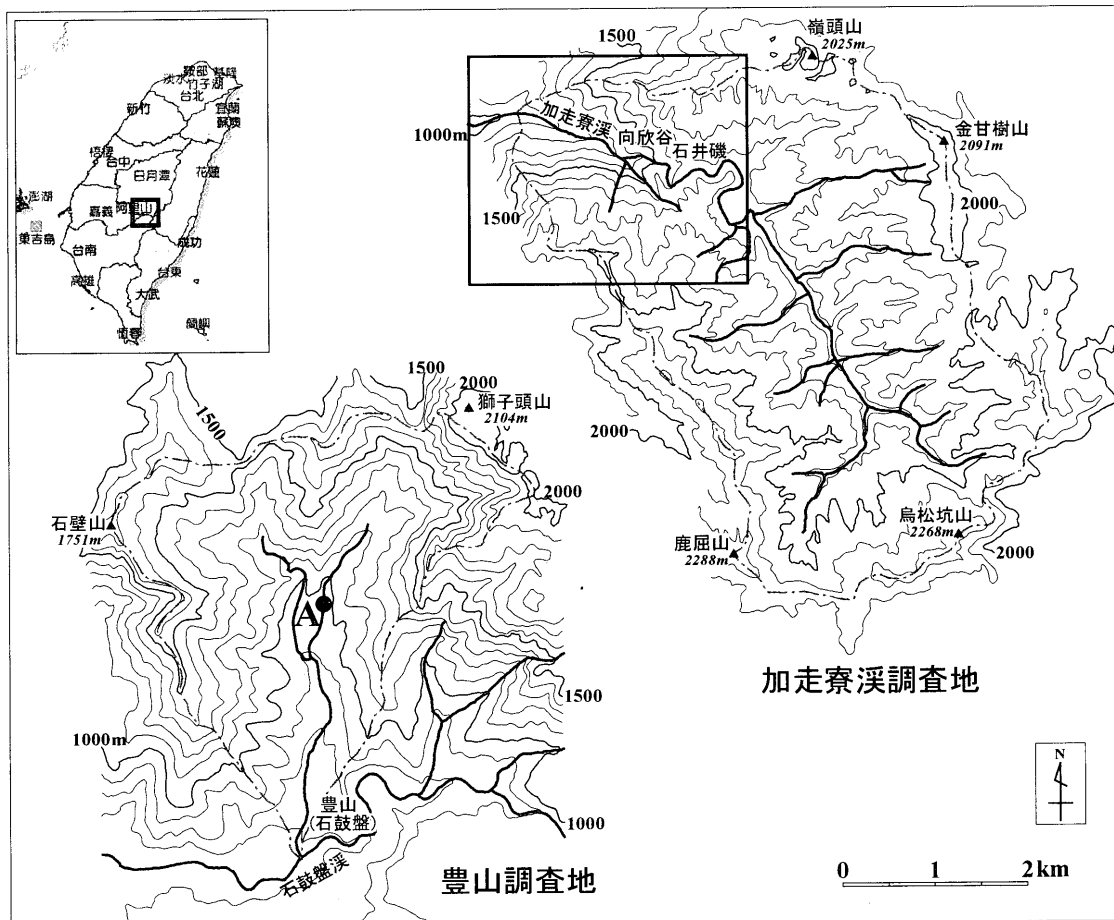


Fig.1 Location and topography of study area.

図1 調査地の位置と地形

3. 方 法

地震後およびその後の大雨後の崩壊・土石流発生状況や斜面・河道の地形変化に関する現地調査を2000年12月、2001年10月、2002年12月に実施した。現地調査の際は、調査地の集落住民から土砂災害状況や地震前、地震直後、さらにその後の大雨後の崩壊・土石流発生状況等に関して聞き取りを行った。また、2000年12月にはヘリコプターによる上空からの調査も行っている。

2001年12月には台湾工業技術研究院能源與資源研究所において、調査流域の崩壊地分布図を作成するために空中写真の判読を行った。使用した空中写真は、地震前の1998年6月中旬、地震直後の1999年9月下旬、さらにその後の大雨後の2001年8月上旬に撮影されたものである。

さらに、地震前後の降水状況を把握するために、調査地に最も近い台湾中央気象局の阿里山気象所（北緯23°30.62′，東経120°48.31′，標高2413.4 m）の日降水量資料を収集した。

4. 降雨状況

Fig. 2は、調査地から南東方向約10 km地点にある阿里山気象所（台湾中央気象局，1998～2002）の日降水量の分布である。年降水量を求めると、1998年4364 mm，1999年3075 mm，2000年3093 mm，2001年4017 mm，2002年2197 mmである。地震発生翌年の2000年に発生した大きな降雨は、6月13日229 mm，8月23日161 mm，4月28日122 mmである。2001年はしばしば台風に見舞われ、特に7月30日に台湾中部を直撃した桃芝（Toraji）台風では日降水量715 mmを記録し、さらに9月17日の娜莉（Nari）台風

では日降水量319 mmを記録している。2002年はそれほど大きな降雨はなく、7月10日の129 mmが最大であった。

5. 豊山調査地の崩壊・土石流発生と地形変化

5.1 崩壊・土石流の発生状況

2001年10月および2002年12月の現地調査の際に撮影した調査地の状況をPhoto.1に示す。

住民からの聞き取り調査によると、地震前は土石流が年に1回程度、梅雨時期の3、4月に発生していたようである。土石流は泥流タイプの場合が多く、含まれる土石は最大で1 m程度であったという。1999年9月の地震によって上流域では多数の崩壊が発生し、それに続く余震により崩壊は1週間程度継続した。その土砂は、後述するように、急斜面直下の崖錐斜面から最上流の谷底に厚く堆積した。崩壊土砂は本流の標高1000～1100 m付近まで達している（Fig. 3）。

この崩壊土砂は2000年4月頃から雨のたびに侵食され、土石流によって下流へ流出するようになった。土石流の発生には急斜面から集水した地表流が関与したと考えている。4月28日はこの年最初の大雨となり（Fig. 2）、調査地では規模の大きな土石流が発生している。この土石流には直径3～5 m程度の石塊が含まれていたそうである（Photo.1(3)）。土石流の流下に伴う地盤振動によって溪流から数十メートル離れた住家でも窓ガラスが音をたてたという。この時の土砂は石鼓盤溪本流と合流する標高660 m付近に多量に堆積した（Fig. 3）。2000年には20回以上の大小の土石流が発生したようである。

2001年には梅雨や台風の降雨によって10回程度の土石流

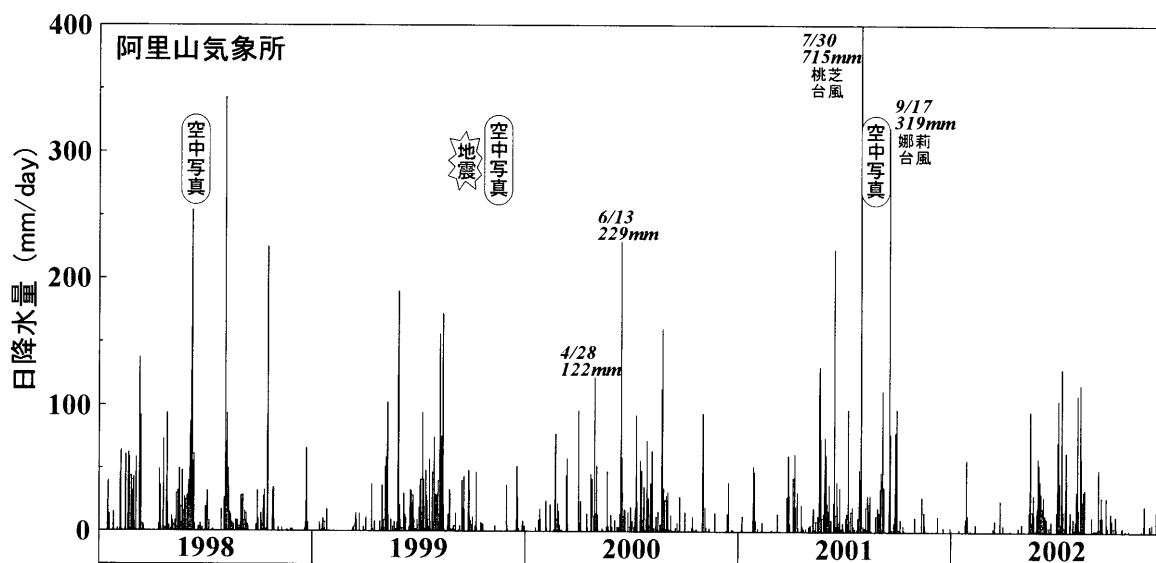


Fig.2 Daily rainfall during the period 1998 to 2002.

図2 1998～2002年の日降水量

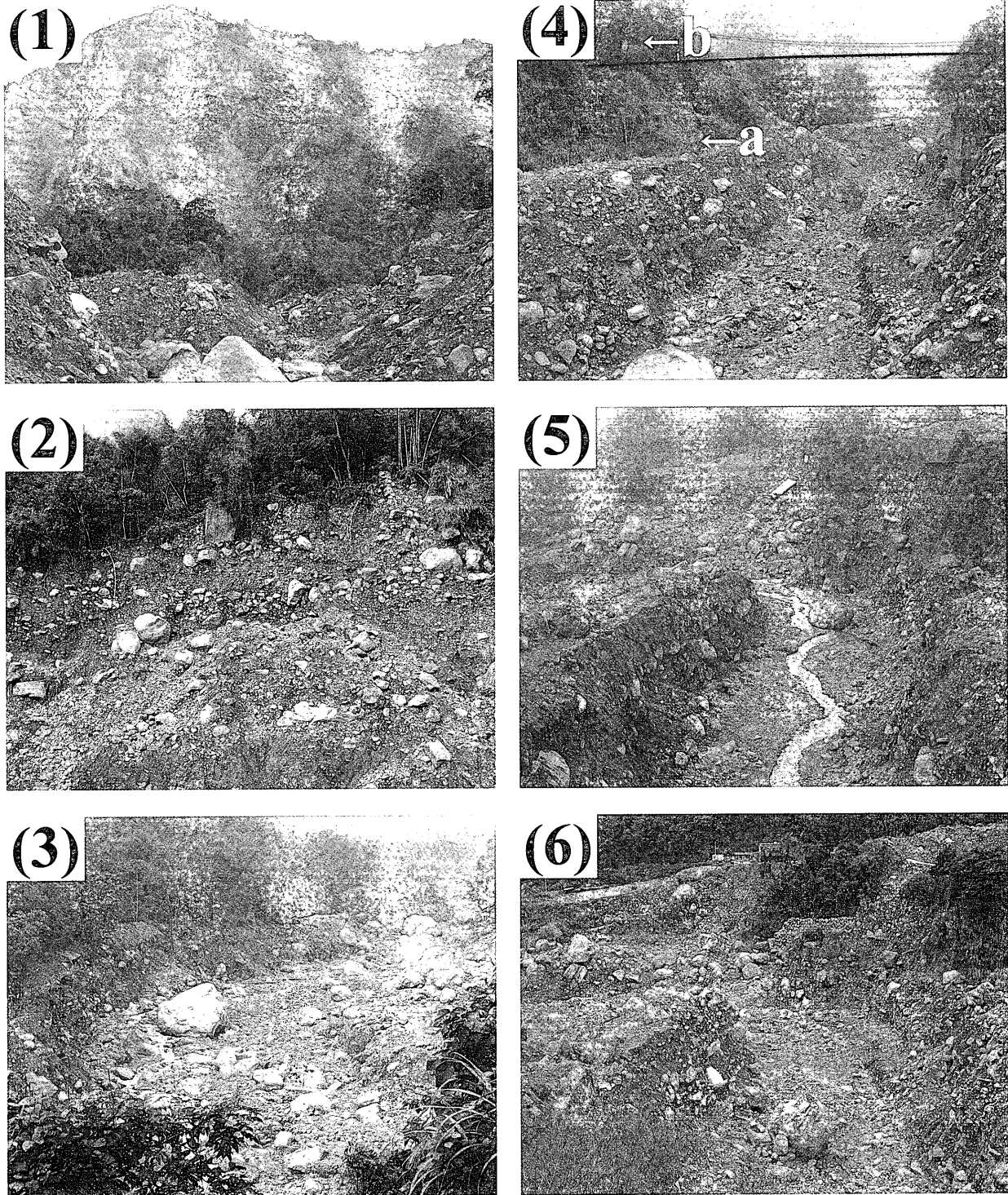


Photo.1 Damage in the upper reaches of Fengshan study area.

(1) Slope failures in headwaters (taken in December, 2002), (2) Older deposits of debris flows observed at 970 m above sea level (taken in October, 2001), (3) Devastated river at 920 m above sea level (taken in October, 2001), (4) Terrace deposits of debris flows at 900 m above sea level (taken in December, 2002), a: Low terrace, b: High terrace, (5) Devastated river at 900 m above sea level (taken in October, 2001), (6) Same point as the above-shown (taken in December, 2002)

写真1 豊山調査地上流の荒廃状況

(1) 上流域の斜面崩壊 (2002年12月撮影), (2) 標高970 m地点 (図1のA地点) で観察された古い土石流堆積物 (2001年10月撮影), (3) 標高920 m付近の荒廃した溪流状況 (2001年10月撮影), (4) 標高900 m付近の土石流段丘 (2002年12月撮影) a低位段丘 (新) b高位段丘 (古), (5) 標高900 m付近の溪流 (2001年10月撮影), (6) 前と同じ地点 (2002年12月撮影)

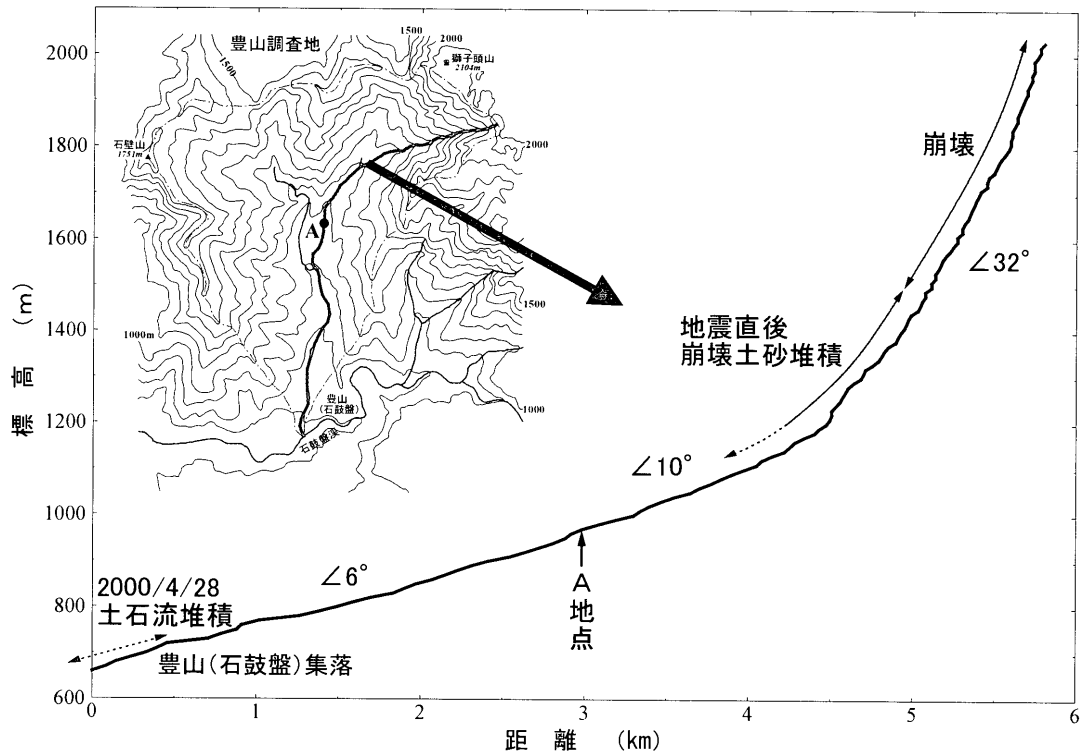


Fig.3 Longitudinal profile of Fengshan study area.
 図3 豊山調査地の河川縦断面図

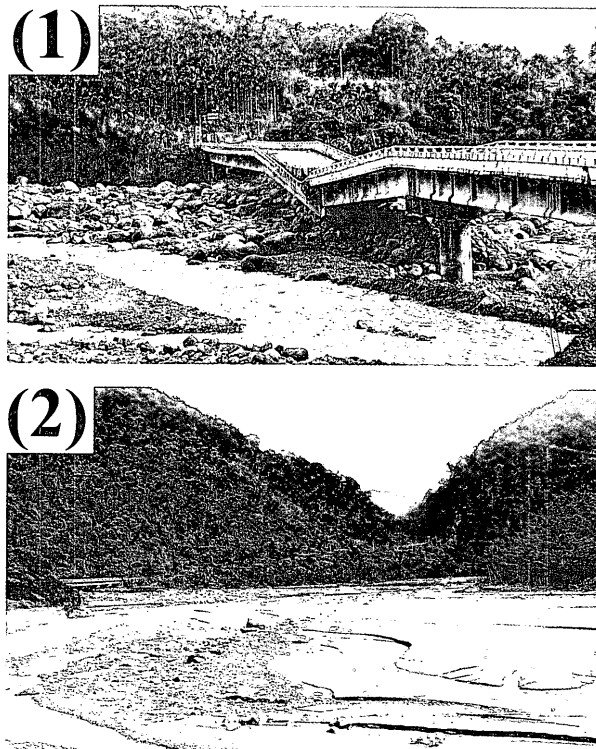


Photo.2 Damage to bridge and deposits of debris on riverbed in the Chin-Shui River.

(1) Damage to bridge at 560 m above sea level (taken in October, 2001), (2) Deposits of debris on riverbed at 520 m above sea level (taken in October, 2001)

写真2 橋梁の被害と河床の土砂堆積(清水溪)

(1) 標高560 m付近の橋梁被害(2001年10月撮影), (2) 標高520 m付近の土砂堆積(2001年10月撮影)

が発生している。前述した7月30日の桃芝台風および9月17日の娜莉台風に伴う大雨によって土石流が発生し、多量の土砂が流下して橋梁を破壊したり、清水溪の河床を上昇させる災害をもたらしている (Photo. 2)。

2002年は2001年ほど大きな降雨はなかったが (Fig. 2), 2001年10月と2002年12月の現地写真を比較すると2002年にも土砂流出が起こったと思われる (Photo. 1(5) (6))。

5.2 溪流横断面の変化

Fig. 4は、調査溪流の標高970 m付近 (Fig. 1およびFig. 2のA地点) における溪流横断面の時間的変化を模式的に示したものである。調査地の基盤地質は堆積岩 (シルト岩) であり、その上に複数回の土石流堆積物が堆積しており (Photo. 1(2)), 古い土石流段丘が観察されることから過去

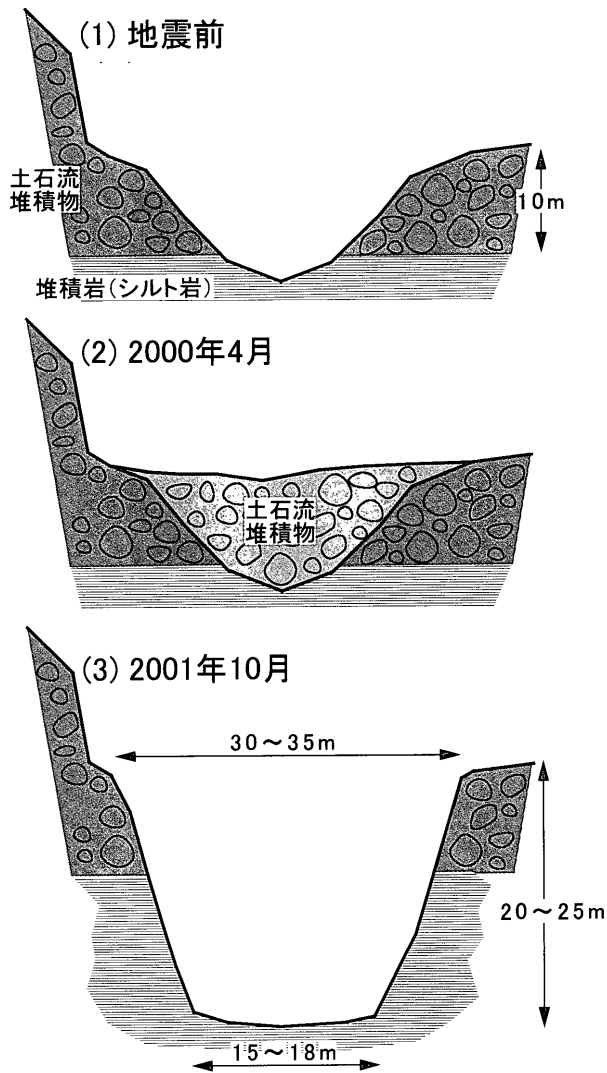


Fig.4 Change in cross section of river at 970 m above sea level in Fengshan study area.

図4 豊山調査地の標高970 m地点 (図1および図3のA地点) における河川横断面の時間的変化

にも規模の大きな土石流が発生したことがわかる (Photo. 1(4)b)。また今回の土石流によって新たな段丘が形成された (Photo. 1(4)a)。聞き取り調査によると、地震前はA地点の溪流は幅30 m程度、深さ10 m程度であった (Fig. 4(1))。地震によって斜面崩壊が多発し、上流の溪流内に土砂が堆積した (Fig. 3)。これらの土砂は2000年の梅雨期から降雨に伴って流下し、中下流の溪流内に多量に堆積した。A地点は2000年4月28日の土石流で満砂の状態になった (Fig. 4(2))。その後8月からは侵食がはじまり、谷を埋めた土砂は下流へ流出した。2001年10月の現地調査では、A地点は幅30~35 m程度、深さ20~25 m程度、溪床幅15~18 m程度と地震前より拡大し、土石流堆積物層より下層の基盤岩まで侵食されている (Fig. 4(3))。2002年12月の現地調査では溪床がさらに1~2 m低下していた。

5.3 空中写真判読による崩壊地の分布

今回の調査で入手できた調査地の空中写真は1999年9月地震直後に撮影されたもののみであった。この空中写真を判読して地震直後の調査地上流域の崩壊地分布図を作成した (Fig. 5)。本流最上流域の谷頭斜面はほぼ全面にわたって崩壊しており、その崩壊土砂は標高1200~1500 m付近の溪流に多量に堆積している。Photo. 1(1)は2002年12月に撮影した上流斜面の一部である。空中写真の精度の関係でひとつひとつの崩壊地境界を区別できないものがあり、正確な崩壊箇所数を求めることはできなかったが、調査流域には131箇所以上の崩壊地がある。地震による崩壊時には砂埃が発生したとみられ、崩壊が発生した周辺の森林は砂埃を被った様子が空中写真から読みとれる。

崩壊地分布図から崩壊地周囲の座標値をデジタイザで読み取り、崩壊面積を算出した。調査流域内の崩壊面積の合計は1.35 km²であり、崩壊面積を流域面積10.76 km²で割った崩壊面積率は12.5%であった。崩壊深を1 mと仮定すると1 km²あたりの生産土砂量は約13万m³/km²となる。

6. 加走寮溪調査地の崩壊・土石流発生と地形変化

6.1 崩壊・土石流の発生状況

加走寮溪調査地では下流部を中心に地震により大きな崩壊が発生した。2000年12月にヘリコプターで上空から調査を行ったが、現地調査は道路不通で実施できなかった。上空から撮影した崩壊地の状況をPhoto. 3(1)に示す。この一帯の地質は砂岩・頁岩からなる堆積岩である。右岸斜面の崩壊は、標高1750~1800 m付近から発生し、崩壊幅300~400 m、崩壊長400 m程度と推定される (Fig. 6)。崩壊前の空中写真や地形図によると崩壊した斜面は二つの谷に挟まれた小尾根型斜面であり、この部分が地震によって崩落した。崩壊後は岩盤が露出している。崩壊した土砂は溪流を

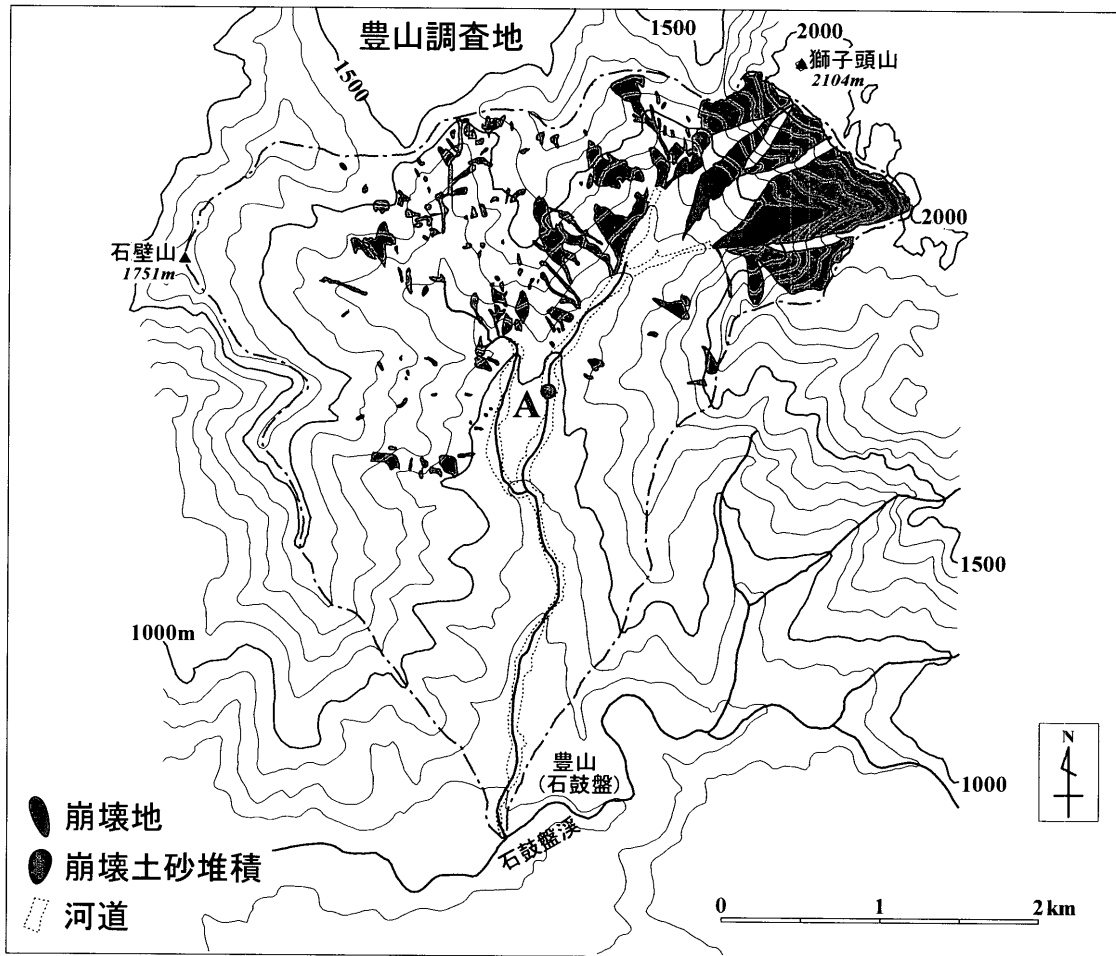


Fig.5 Spatial distribution of slope failures interpreted by aerial photographs taken after the earthquake on September 21, 1999 in Fengshan study area.

図5 1999年9月地震直後に撮影された空中写真判読による崩壊地分布（豊山調査地）

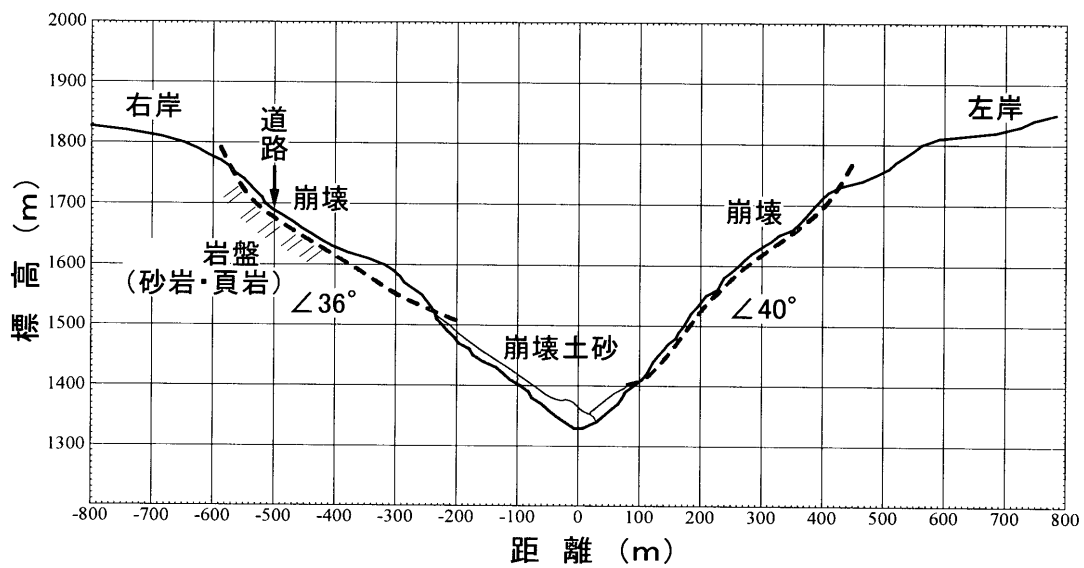


Fig.6 Cross section of river at the point of slope failure in the Chai-JouLiao River study area. Traverse line is shown in Fig.7(b).
 図6 加走寮溪調査地における崩壊地点の河川横断面図測線の位置は図7(b)に示される

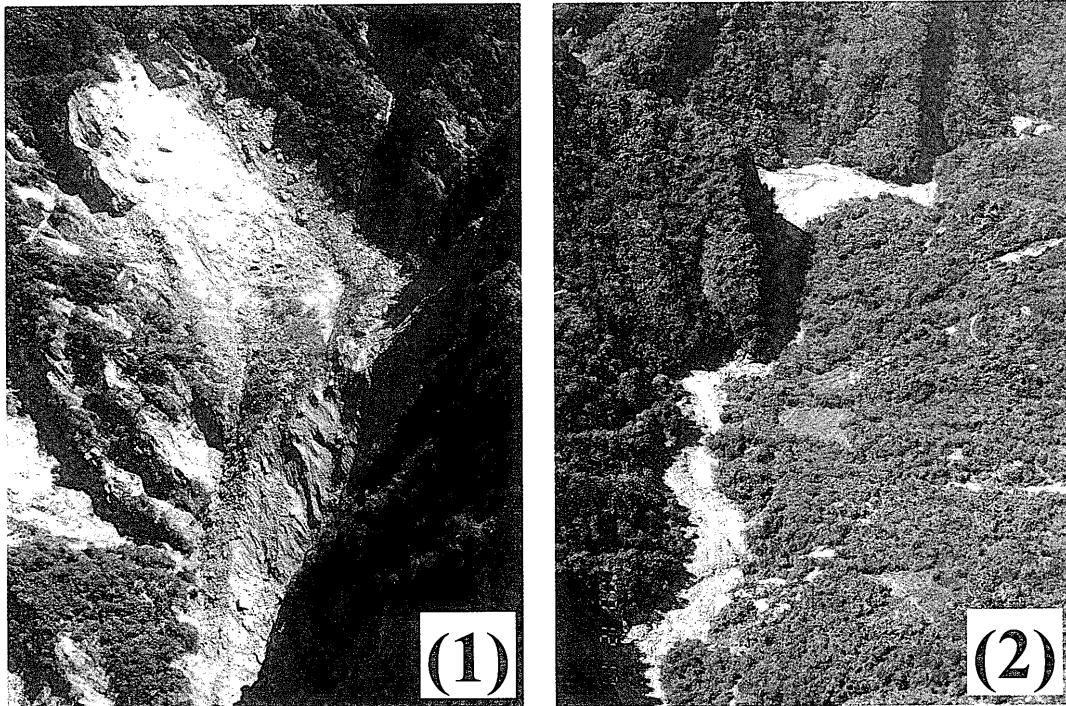


Photo.3 Slope failure and deposits of debris on riverbed in the Chai-JouLiao River study area.

(1) Slope failure at 1750 m above sea level (taken in December, 2000), (2) Deposits of debris on riverbed at 1000 m above sea level (taken in December, 2000)

写真3 加走寮溪調査地で発生した崩壊と下流の土砂堆積

(1) 標高1750 m付近の崩壊 (2000年12月撮影), (2) 標高1000 m付近の河川の土砂堆積 (2000年12月撮影)

埋めたが (Fig. 6), その後侵食され, 土石流となって下流し, 下流に多量に堆積している (Photo. 3(2))。土石流は, 谷を埋塞した土砂が渓流水の作用を受けて引き起こされたものである。

6.2 空中写真判読による崩壊地の履歴

大きな崩壊が発生した調査地の下流部 (Fig. 1内の□枠内) を撮影した3組の空中写真を判読して, 崩壊の履歴を調べた。

Fig. 7(1)は地震前の1998年6月中旬に撮影された空中写真の判読結果である。溪流沿いの斜面は35度以上の急傾斜となっており, 崩壊跡地と推定される滑落崖が左岸斜面を中心に確認された。

Fig. 7(2)は地震直後の1999年9月下旬に撮影された空中写真の判読結果である。右岸斜面の小尾根の崩落に伴う土砂は斜面下部に堆積し, 溪流の状況は大きく変化している。また, この崩壊の対岸でも崩壊が発生している。この左岸の崩壊は1998年写真判読で確認された旧崩壊地の上部斜面が拡大崩壊したものである。崩壊深は右岸ほど深くない。これらの崩壊以外にも多数の表層崩壊が判読される。

Fig. 7(3)は2001年8月上旬に撮影された空中写真の判読結果である。右岸の崩壊面はあまり変化していないが, 崩壊斜面下部に堆積して溪流の土砂は侵食されている。対岸

の崩壊地内には地震直後の写真では崩壊土砂が残留していたが, 2000~2001年の台風などの大雨によって流出し, 崩壊面には基盤岩が露出している。また, 周辺には新たに発生した崩壊もみられる。一方, 地震直後の写真で判読された崩壊地が植生回復で確認できなくなった箇所もみられる。

7. おわりに

台湾は, 1999年集集大地震によって大きな被害を受け, その後も雨のたびに土砂災害が繰り返されている。地震発生後3カ年にわたり地震による山地災害の実態調査を行ってきた。本論では, 阿里山山脈の北部に位置する清水溪上流の2小流域を対象にして, 地震前, 地震直後, さらにその後の大雨後の崩壊・土石流発生状況と地形変化について検討した。今後は, 地震後に土砂災害が繰り返し発生する原因の解明, 地震後の土砂災害が頻発する期間の推定, 地震後の斜面・河川地形の変化の予測などの研究を進め, 地震後の土砂災害防止のためのハード防災対策指針の提案, 警戒避難システムの構築などについて検討する予定である。

末筆であるが, 本研究の実施にあたっては三重大学の林拙郎教授に大変お世話になった。また現地での案内や通訳では蘇学波氏および江火獅氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

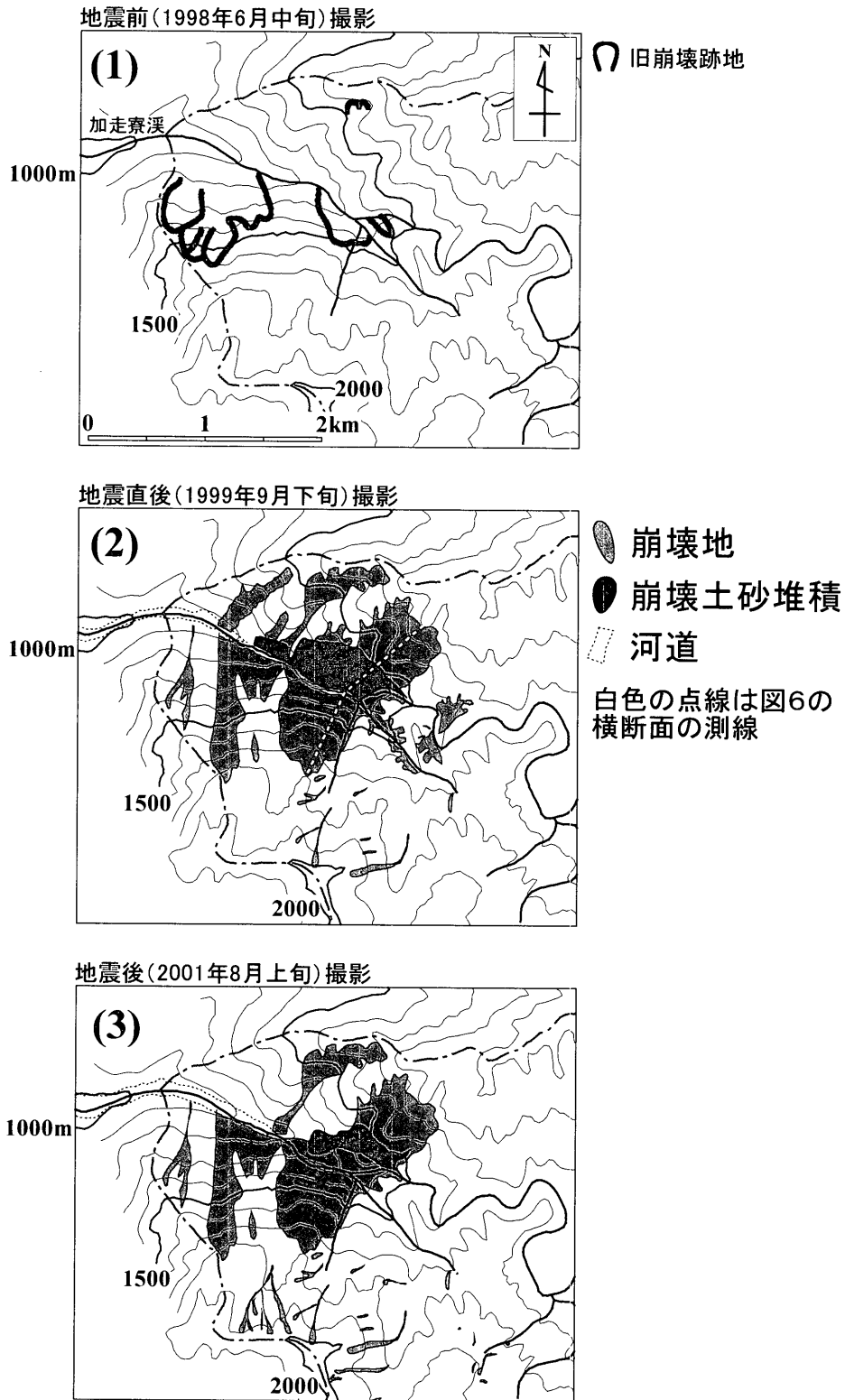


Fig.7 Spatial and temporal distribution of slope failures based on aerial photographic interpretation in the Chai-JouLiao River study area.

図7 空中写真判読による崩壊地分布とその時間的推移(加走寮溪調査地の下流部)

引用文献

- 池谷 浩・松村和樹・廣瀬隆浩 (2001)：台湾集集大地震 (1999) のその後の土砂移動状況，砂防学会誌，54(2)，p.89～92
- 水山高久・土屋 智・山田 孝 (2000)：台湾921集集大地震と斜面災害の概要 (速報)，砂防学会誌，52(5)，p.41～45
- 台湾中央気象局 (1998～2002)：阿里山気象所降水量データ

抄 録

1999年9月21日に発生した集集台湾地震は甚大な人的・物的被害をもたらした。同時に，台湾中央部の山地では多数の斜面崩壊・土石流が発生した。斜面崩壊や土石流により生産された土砂は大雨のたびに流出して土砂災害を引き起こしている。

本研究は，現地調査と空中写真判読に基づいて，地震とその後の降雨によって引き起こされた斜面崩壊・土石流の空間的・時間的分布と，それらによる生産土砂量について検討したものである。調査地は，台湾中央部の濁水溪支川の清水溪上流である。得られた結果をまとめると次の通りである。

- (1) 豊山調査地 (流域面積 10.76 km^2) には131箇所以上の斜面崩壊地が空中写真から判読された。調査流域内の崩壊面積の合計は 1.35 km^2 ，崩壊面積率は12.5%であった。崩壊深を1mと仮定すると比生産土砂量は約 $13 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ となる。
- (2) 生産された土砂は，大雨のたびに流出している。調査地では，地震前は土石流が年に1回程度発生していたが，地震後の2000年には20回以上の土石流が発生した。土砂の流出は，土砂災害を引き起こすと同時に河川地形を変化させている。
- (3) 調査地の河川沿いには新旧の土石流段丘が観察される。台湾では大きな地震が過去に繰り返し発生しており，地震による崩壊の発生は山地や河川の地形を変化させるおもな原因となっている。