

2008年汶川地震による山地災害と地震地表断層

千木良雅弘・巫 錫勇*・井口 隆**・王 功輝

* 中国西南交通大学

** (独) 防災科学技術研究所

要 旨

2008年汶川地震 (Mw7.9) は、四川盆地西方の山岳地に膨大な数の崩壊を発生し、近年では最悪の山地災害を引き起こした。崩壊は、断層沿いの上盤および眠江沿いの谷中谷の急斜面に特に多く発生した。崩壊の方向は、断層に直交が卓越し、このことは地震動の指向性を示唆している。最も多く発生したのは炭酸塩岩に生じたもので、これは、炭酸塩岩が容易に地下水に溶解し割れ目沿いの接触面積を減らしてせん断抵抗を低下しやすきことと関係している。非火山では歴史上最大の崩壊が発生し、これは事前に山上凹地を伴う重力変形をこうむっていたことがわかった。谷埋め堆積物の流動化が36か所で発生し、これはおそらく間隙水圧上昇によるものである。

キーワード: 四川, 汶川地震, 崩壊, 地すべり, 山地災害

1. はじめに

汶川地震は、現地時間5月12日午後2:28分 (UTC6:23) に、四川盆地の西端近くで発生し、Mwは7.9、その震源は、30.986°N, 103.364°E (USGS, 2008)、深さ19kmであった。その最も大きな特徴は、約270kmの地表地震断層を伴い(Burchfiel et al., 2008, Li, H. et al., 2008)、非常に広い山間地に甚大な災害をもたらしたことである。これは、近年の台湾集集地震 (Wang, et al., 2003)、2004年新潟県中越地震 (Chigira and Yagi, 2005)、2005年パキスタン北部地震 (Sato et al., 2007) と比較してもはるかに広い範囲であった。それは、非常に多くの崩壊を引き起こし、20世紀と21世紀を通じて最大の山地災害を発生させ、6万9千人以上の人的被害を発生した。崩壊によって30以上の天然ダムが形成された。本震の加速度は、震央から18 km 西北西のWolongで最大を記録した: 957.7 Gal (EW), 652.9 Gal (NS), 948.1 Gal (上下) (Fig. 1, Li, X. et al., 2008)。次に大きな加速度は、Qingping (清平) で記録された: 824.1 Gal (EW), 802.7 Gal (NS), 622.9 Gal (上下)。

本報告では、崩壊の分布と特徴、地震断層との関係について述べる。

2. 方法

地震後、独立行政法人 宇宙航空研究開発機構の衛星「だいち」によって撮影された画像 (AVNIR-2, PRISM) を用いて崩壊の分布を調べた。それぞれの解像度は、AVNIR-2が10m, PRISMが2.5mである。ただし、PRISMの画像が撮影されたのは限られた範囲であったので、広域の判読には6月4日に撮影されたAVNIR-2の画像を用い、PRISMの画像は5月18日と6月4日とに撮影されたものを特定地域に用いた。

地震前の状況は、Google Earthによって提供されている画像—主に3m解像度のSPOT画像と2mまたは8m解像度のFORMOSAT II画像によって把握した。

崩壊の分布、方向、規模の解析にはArcGISを用いた。また、約3週間の現地調査を行った。

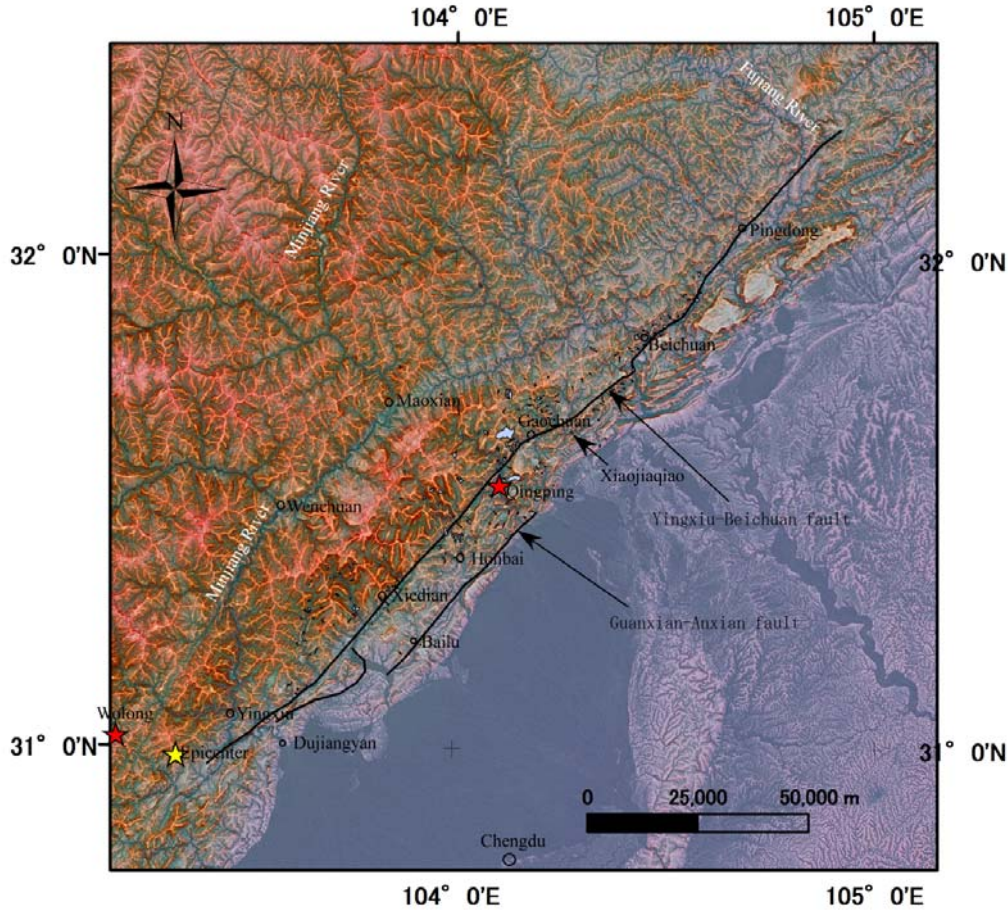


Fig. 1 Red-3D image around the earthquake surface fault, which has been made from SRTM data by the Asia Air Survey Company. The fault trace was drawn according to Li et al (2008) and our observations. Landslide distribution was interpreted from the ALOS/AVNIR-2 images.

3. 地質および地形的枠組み

地震の影響を受けた範囲は、四川盆地西方の標高1000mから4500mの山岳地である (Fig. 1)。四川盆地の標高はこの山岳地近傍で約700mである。山間地の山稜や谷は一般的に北東方向に伸び、これは地質構造に沿っている。また、眠江 (Minjiang) などの大きな河川は北または北西から南または南東に流れている。この山岳地はチベット高原の東縁とその東の四川盆地との間にあり、この境界に沿って竜門山断層帯が通っている (He and Tsukuda, 2003)。基盤岩は、先カンブリア紀から白亜紀にかけての岩石からなり、玄武岩、花崗岩、千枚岩、白雲岩、石灰岩、砂岩泥岩互層などからなっている (Fig. 2, Geologic map of China)。

4. 地表地震断層

地表地震断層は、竜門山断層帯に沿って出現した (Fig. 1, 2)。竜門山断層は、3つの断層からなる：映秀—北川 (Yingxiu-Beichuan) 断層、灌県—安県 (Guanxian-Anxian) 断層、茂—汶 (Mao-Wen) 断層である。地表地震断層は、これらの内映秀—北川断層に主に発生し、次に灌県—安県断層に生じ、茂—汶には地表のずれは生じなかった (Li, H. et al., 2008)。我々の調査では、映秀から平通まで180kmにわたって地震断層を観察した。多くはNE方向であったが、あるものはNWあるいはN方向であった。NE方向の断層では、北西側 (上盤側) が上昇し右横ずれを伴っていた。最も大きな隔離は鉛直11m、右横ずれ隔離12mと報告されているが (Li H. et al., 2008)、必ずしも地震前の地形が明確になっていない場合もあるようである。我々の観察した最大の隔離は、虹口で鉛直隔離4.5mであった。ただし、ここでは横ずれの特定はできなかった。次に大きな隔離は、清平で、鉛直隔離3.5m、右横ずれ隔離1.6mであった。ここでは、地表断層を隣接する岩盤内部の断層に追跡すること

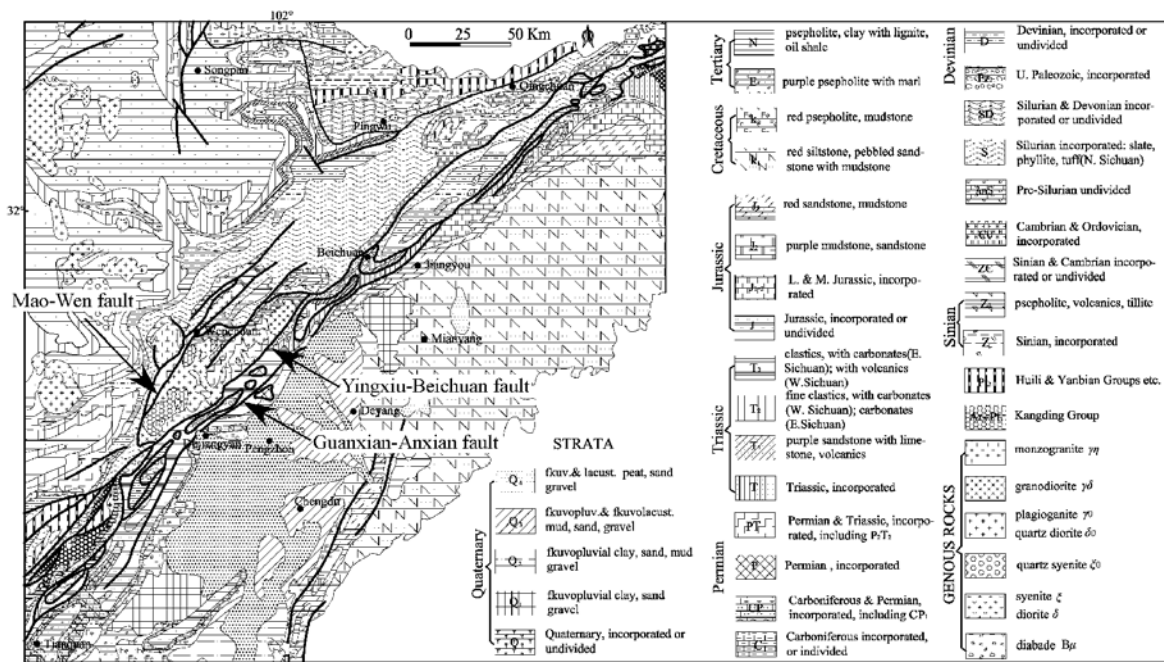


Fig.2 Geologic map around the Longmenshan Fault zone, made from the geologic map of China.

が可能であり、岩盤内部の断層は50度NWに傾斜していた。灌県—安県断層は30—40kmの長さに出現し、最大の鉛直隔離は4mであった (Li H. et al., 2008)。

5. 崩壊のタイプ

崩壊では、小規模な表層崩壊、落石、岩屑すべり、深層すべり、土石流などが発生した。表層岩盤すべり、落石、岩屑すべりが最も普通で、凸型斜面や山頂に見られた。被災地に近づいていくと、最初に出現したのはこのタイプの崩壊であり、最も目立ったのは孤立峰の崩壊であった (Fig.3A)。ここは地震動が増幅すると考えられている (Pederson et al., 1994)。炭酸塩岩からなる斜面と花崗岩斜面で最も崩壊密度が高かった (Huang, 2008)。これらの岩石は一般的に硬質で、岩片が相互に衝突してはじきあって、斜面から離れることが起こったようである。三疊紀の砂岩泥岩の互層も、震央近くの映秀など、地震断層近傍で多く崩壊した。

急崖の落石も多く発生し、落下した岩は転動しながら下方の崖錐上に留まった。崖錐は普通このような過程で成長する。

5.1 キャップロック構造の崩壊

キャップロック構造の斜面—炭酸塩岩や砂岩などのコンピテントな岩石が尾根上部を占めて頁岩や千枚岩のようにいんコンピテントな岩石の上に乗る構

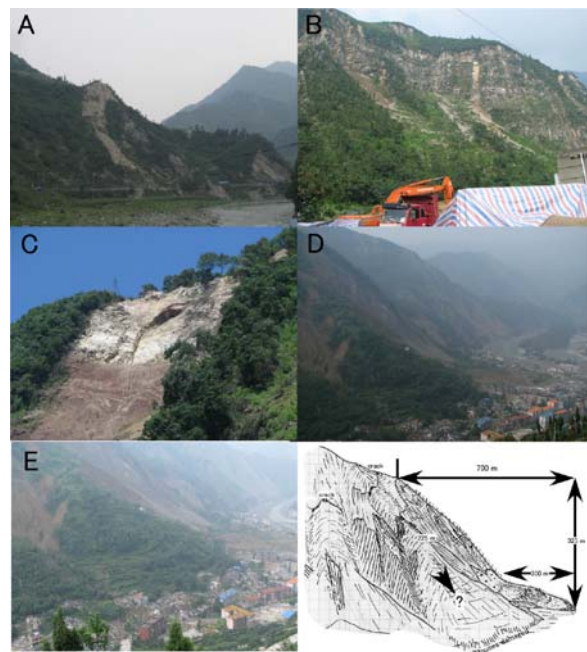


Fig. 3 Landslide photographs. A: Failure of an isolated ridge-top; B: Rockfall and a talus; C: Failure of a cap rock of sandstone overlying shale; D, E, and F: Landslide of weathered phyllite in Beichuan.

造一では比較的規模の大きな崩壊が発生した。これは、地震動が山稜上部で増幅されたことを示唆している。

5.2 炭酸塩岩の岩盤すべり（白雲岩，白雲岩質石灰岩，石灰岩，泥灰岩）

炭酸塩岩—白雲岩，白雲岩質石灰岩，石灰岩が主体—で多くの岩盤すべりが発生した。炭酸塩岩の深層の岩盤すべりは普通流れ盤斜面で発生し，浅層の岩盤すべりや落石は受け盤斜面で発生した(Fig.4A)。受け盤斜面は一般的に流れ盤斜面よりも急傾斜で，表層の岩盤は流れ盤斜面におけるよりも，重力によって容易に緩む傾向が認められた。炭酸塩岩は地下水によって容易に溶けるため，もともと面接触していた岩盤の割れ目も，地下水が流れ続けると接触面積を減少して点接触となる。このことが，岩盤すべりが炭酸塩岩に生じた岩盤すべりの重要な素因であったようである。実際，炭酸塩岩のすべり面の多くは，岩石の溶解によって形成されるえくぼ状のくぼみを持つ粗な表面を示していた(Fig.4B,C)。割れ目に沿うせん断あるいは引張抵抗は，このように溶解によって減少するが，一方で透水性は大きくなる。そのため，間隙水の圧力上昇は起こりにくい。それに対して，地震動は，接触部を破壊して急激な斜面崩壊を起こすのに最も効果的な誘因となりうる。北川で発生した岩盤崩壊の一つも炭酸塩岩のおそらく層理面に沿うすべりとして発生した。

肖家橋 (Xiaojiaqiao) すべりも炭酸塩岩に発生したが，このすべり面は層理面に平行な断層に沿っていた。

5.3 風化千枚岩の岩盤すべり

北川西側のすべりは風化した千枚岩に発生し，それには重力変形が先行していたと推定される (Fig.3D,E,F)。双眼鏡観察によると，それは受け盤斜面であり，表層部は風化褐色化し，トップリングタイプの岩盤クリープが認められた (Chigira, 1992)。地震に続いて発生した降雨によって崩壊堆積物と残留していた風化物が洗い流されて土石流となった。

北川の唐家山地すべりは，千枚岩の流れ盤斜面に発生し，本地震による最大の地すべりダムを形成した。Google earthに掲載されたFormosat IIとSPOTとの画像によると，地震前の当該斜面には上方に凸を向けた尾根横断凹地が認められ，すでに重力変形が生じていたことがわかる (Chigira, 1992)。

5.4 谷堆積物の土石流

ALOS画像には，ローブ状の崩壊が認められた。1つは，謝家店(Xiejiadian)地すべりで，都江堰から34km北東にあり，推定地震断層を横断していた (Fig. 5)。この崩壊は，長さ1.5km，最大幅250m，見かけの摩擦角22度であった。この崩壊の最上部は先カンブリ

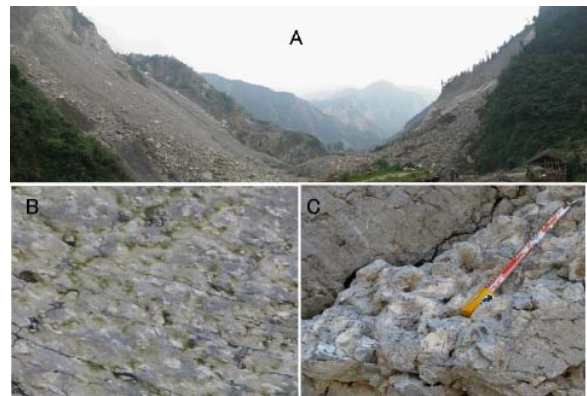


Fig. 4 Rockslide of carbonate rock and surface features of the discontinuities of carbonate. A: Rockslide of carbonate rocks (left: failure of an anacinal slope; right: sliding on an cataclinal slope); B: Dimple-like depressions and fractured “ridge-tops” on a detachment surface of a slope failure; C: Rough surfaces and cavities in carbonate rock by dissolution. The width of the photograph B is 3 m.

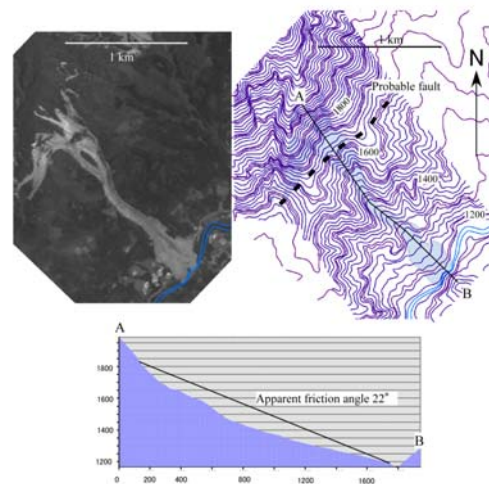


Fig. 5 Long lobate landslide (Xiejiadian landslide, PRISM image, contour map, and a cross section made from the PRISM data).

ア紀の花崗岩の急崖で、その下方は小さな谷になっていた。この崩壊の体積は、堆積物の体積に比べて大変少なかった。この谷底には、崩壊堆積物の底に三疊紀の砂岩泥岩互層がところどころに露出していた。前述の花崗岩と砂岩泥岩互層とは、おそらく映秀—北川断層である断層で接している。基盤岩は青灰色で粘土質で飽和した岩屑におおわれ、それはさらに飽和して角礫を含む黄褐色の岩屑からなる崩壊堆積物におおわれていた。堆積物の表面には皺があり、また、同色の岩片の帯状の縞や土塊の帯状の縞が認められた。さらに、末端部の堆積物の断面には、逆級化層理が認められ、上部には最大径5mの大岩塊が密集していた (Fig. 6)。これらの特徴は、谷を埋めていた堆積物が地震による間隙水圧上昇あるいは液状化によって流動化して谷を流下したことを示している。最上部の崩壊は、この流動のきっかけとなった可能性がある。

長いローブ状の堆積物は、AVNIR-2画像で他の35か所でも認められた。それらは同様の謝家店地すべりと同様の携帯を示していた。それらの長さは600mから2830m、平均1160mであった (Fig. 7)。

5.5 最大の崩壊

非常に大規模な崩壊が6月4日に撮影されたAVNIR-2画像にとらえられ、国土地理院によって報告された (Fig. 8)。それは、大光包 (Daguangbao) 地すべりと呼ばれ、清平 (Qingping) 近くの地表地震断層から2km北西の山間地に発生した (Fig. 1, Huang et al., 2008)。この崩壊は、PRISM画像から面積 $7.353 \times 10^6 \text{m}^2$ 、PRISM画像とSRTM—DEMデータ (90mメッシュ) との比較から体積 $0.837 \times 10^9 \text{m}^3$ と推定される。地震後のALOS画像と地震前のSPOT画像との比較から、この崩壊の最上部は情報に凸を向けた山上凹地あるいは線状凹地 (Tabor, 1971; Chigira, 1992)—長さ2km—であったことが明確に認められた。これは、この崩壊に先立って重力性の変形が生じていたことを示している。崩壊した斜面の下部は、発生前には比較的なめらかな斜面であった。上記と同様のV字型の線状凹地は、1999年台湾集集地震で発生した草嶺の崩壊でも認められた。

大光包地すべりは、北に $35-38^\circ$ 傾斜する層理面を持つ炭酸塩岩の崩壊であり、移動方向は東北東で層理面の傾斜方向とは斜交していた (Huang et al., 2008)。PRISM画像から作成した地形図と、Huang et al. (2008) の示す写真から、崩壊面の南半分は平滑な層理面であることがわかる。また、興味深いことに、この平面の下部には水平な筋が複数見られ、これらはおそらく座屈によってできた破断である。これと同様の座屈は、1999年集集地震時に発生した九



Fig. 6 Reverse grading observed in the deposits of the Xiejiadian landslide.

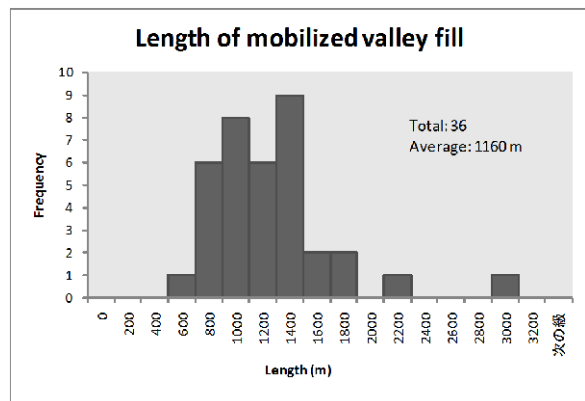


Fig. 7 Length of the mobilized valley fill.

分二山の崩壊でも認められた。この推定座屈がおそらく山上凹地を形成した重力変形であると考えられる。

5.6 2番目に大きな崩壊

2番目に大きな銀杏溝地すべりが、清平の地震地表断層から4km南東の炭酸塩岩斜面で発生した (Fig. 10)。これは、長さ4km、幅1kmで、面積3百万 m^2 であった。我々は、その中間程度まで登り、崩壊源は遠望したのみであるが、そこには平滑な層理面が明瞭に認められた (Fig. 10)。移動土塊は、谷を流れ下り、その曲がりの外側で高くまで登っていたことから、その移動は岩屑流れであったことがわかる。崩壊は、西向き斜面に発生し、地震前のSPOT画像によれば、それはガリーのない平滑な流れ盤斜面であったため、表面流出がなく、岩盤が高透水性であることが推定される。実際、堆積物に含まれる最大10mの大岩塊の表面には溶解の痕跡がたいてい認められた。この斜面には、重力変形の痕跡は認められないが、斜面下部が切断されていたことが認められた。岩盤の溶解によるせん断抵抗の現象と下部切断とがこの

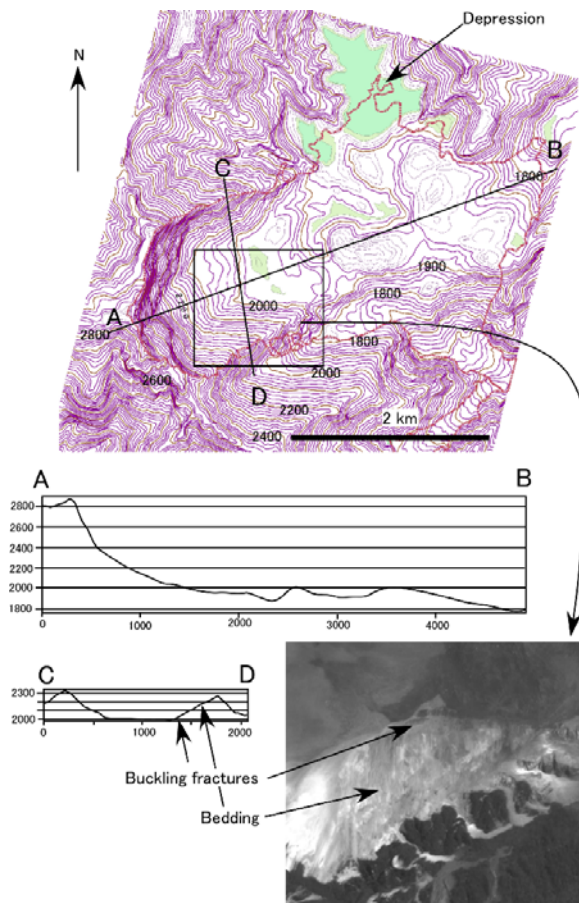


Fig. 8 Topographic map and cross sections of Daguangbao landslide made from PRISM images.

発生の重要な素因であった。

6. 崩壊の分布、方向、および規模

断層周辺の崩壊は、長さ270km以上、竜門山断層中央部で最大幅30kmの範囲にわたって分布していた (Fig. 1)。この分布範囲は、断層の中央部と南西部で広く、北東に向かって狭くなっていた。崩壊の密集範囲は、眠江沿いの急斜面を除くと、中国の震度階IXあるいはそれ以上の範囲に対応していた (Li, X. et al., 2008)。これは、MMスケールのIXかそれ以上、気象庁震度階のVIかそれ以上に対応する。眠江に沿う急斜面で映秀から汶川を通過して茂県に至る範囲では多数の崩壊が発生し、震度IXの範囲にあったが、一方、汶川から茂県に至る間の眠江と映秀—北川断層との間の北西半分には崩壊は少なかった。崩壊密度は、ある場合には地震の震央からの距離によって説明されることもあるが (Meunier, et al., 2008), 汶川地震による崩壊は、次に述べるように、地表地震断層からの距離、および谷中谷を形成するような

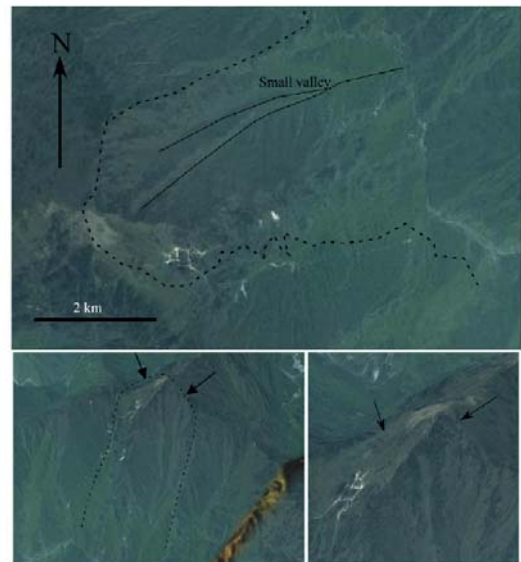


Fig. 9 Outline of Daguangbao landslide and linear depressions (arrows) at the top of the landslide area before the slide (Google Earth). Lower two photographs are oblique views of the linear depressions looked from NE.

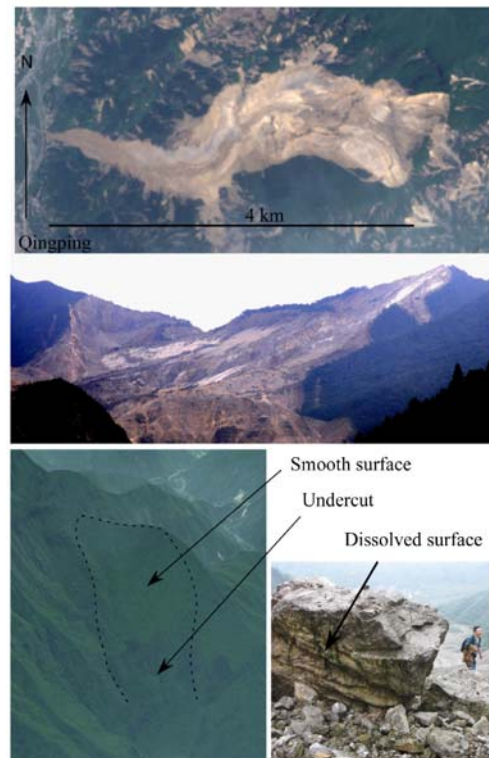


Fig. 10 Yixinggou landslide in an AVNIR-2 image (top), source area with distinct bedding slip surfaces (middle), a smooth surface before the event (lower left, Google Earth), and a rock block with dissolved surfaces (lower right).

地形形成過程により強く支配されていた。

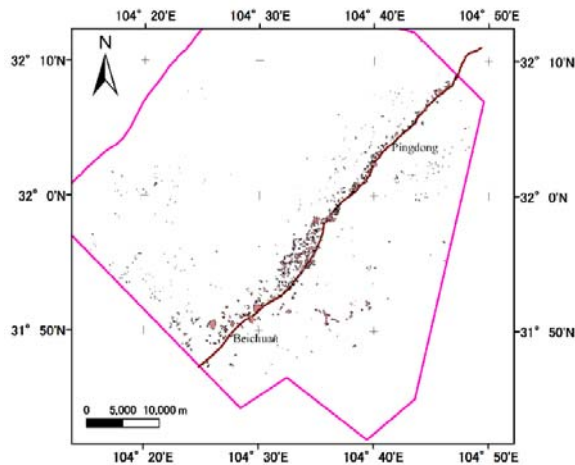


Fig. 11 Landslide distribution between Beichuan and Pingdong identified from PRISM images.

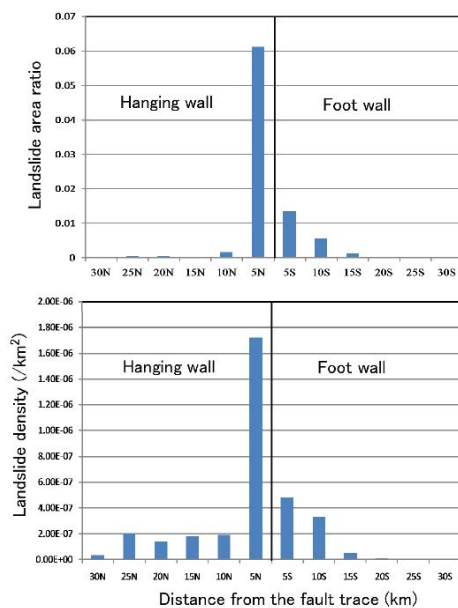


Fig. 12 Landslide distribution histogram according to the distance from the fault surface rupture between Beichuan and Pingdong.

6.1 崩壊と地表地震断層

崩壊は、北東部、特に北川以北では、映秀—北川断層の地表断層の上盤側数kmに集中していた (Fig. 11)。この集中ゾーンの外側には、山頂の崩壊が散点していた (Fig.3A)。上盤に比較して下盤側では崩壊ははるかに少なかった。両側の岩盤は、北東に

傾斜する風化千枚岩であった。平通(Pingdong)では断層近傍の上盤と下盤との間には建物の被害にも大きな差が認められ、上盤の家屋は完全に破壊されていたのに対して、下盤の家には亀裂が入った程度であった。

平通から北川の間では、断層のトレースは湾曲しており、左ステップを示していた (Fig. 11)。この左ステップ部分は、断層に右横ずれ成分があるので、圧縮場である。この部分では崩壊の分布域が周囲よりも広く、これは、圧縮場であったことと関係しているように考えられる。

断層のトレースからの距離に応じた崩壊密度を Fig. 11の範囲について Fig.12に示す。同図から読み取れるように、崩壊は上盤に集中し、崩壊面積率は、断層トレースから5km以内の上盤で6%と高いのに対して、その外側では0.2%と急減している。

北川よりも南西の地域では、AVNIR-2画像によって大規模な崩壊をプロットした (Fig. 1)。これらの崩壊は、後に述べるようにおおむね40000m²以上である。崩壊分布域は北川から紅白 (Honbai) に向けて広がっており、肖家橋 (Xiaojiaqiao) から紅白にかけて、崩壊は映秀—北川断層の上盤側の15km、下盤側の13kmに分布していた。ただし、この下盤は灌県—安県断層の上盤でもある。この範囲に広く分布しているのは、三疊紀と先カンブリア紀の炭酸塩岩であった。紅白よりも南西側では、崩壊は映秀—北川断層の上盤側で断層地表トレースから16kmと広く、下盤側では4km以下と狭かった。灌県—安県断層は白鹿 (Bailu) で認められ、そこでは上盤側に載る学校校舎がほとんど無傷で2m上昇していた。このことと、近傍の山地に崩壊が少なかったこととは同様の原因があるように思われる。映秀—北川断層の上盤側の基盤岩は、先カンブリア紀の花崗岩とホルンフェルスとを主体としている。限られた露頭観察では、これらの岩石にはせん断割れ目が発達していた。

6.2 崩壊の規模

崩壊の規模は様々で、その増加とともに急激に数を減少していた (Fig. 13)。AVNIR-2画像から判読した崩壊の累積頻度と崩壊規模との間には、 $N(x) = 10_a 10^{-bx}$ 、または $\log_{10}N(x) = a - bx$ の直線関係があることがわかった (Fig. 13)。ここに、 $N(x)$ は x よりも規模の大きな崩壊の数であり、 x は $\log_{10}A$ 、 A は崩壊の面積 (m²)、 a と b は定数である。 $2 * 10^5$ m²よりも小さな崩壊は、上述の直線から離れているが、これは、小規模な崩壊は非常に数多く、これらすべてをサンプリングしていないことによる。Fig. 13は、大規模な部分でこの直線から離れている2つの崩壊があることを示している。これらは、前述した銀杏

溝と大光包の崩壊である。

上記のような崩壊の数と規模との関係は、羽田野 (1968) によって発見され、その後 Hirano and Ohmori(1989), Sugai et al. (1994), Hovius et al. (1997)によって報告されている。しかしながら、彼らの報告は、雨によって発生した崩壊、あるいは原因が明確にされていないものである。

崩壊の数と規模との関係を、Fig. 11 の範囲について2.5m解像度のPRISM画像を用いて調べたところ、上記と同様の直線関係が得られた。ただし、この直線は、AVNIR-2の広範囲の画像から得られた直線関係よりも左にあり、平通近くの崩壊は、中央部や南西部のものに比べて小さいことを示している。それにしても、両者はほぼ平行であり、このことは、どちらも同じ地震を誘因としていることと関係していると考えられる。

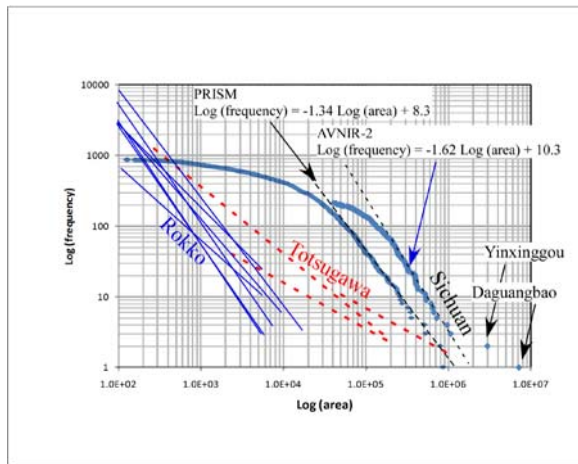


Fig. 13 Cumulative landslide frequency and the landslide size. Data of Rokko and Totsugawa are from Hirano and Ohmori (1989). Rokko and Totsugawa is a granite and Cretaceous sedimentary rock area, respectively.

6.3 崩壊の方向

AVNIR-2画像から判読された崩壊の方向の分布を Fig. 14 に示す。これら全体の方角をみると、WNW-ESEからNW-SE方向のものが多く、これらの方向は、断層の走向にほぼ直交しており、地震波の指向性を示唆している(Bolt and Abrahamson, 2003)。Meunier et al. (2008)は、地震で発生する崩壊は震央から離れる方向に向かうものが多いと報告し、その原因を地震波が山体に入ってから挙動に求めたが、本地震の場合にはそうではなかった。

ローブ状の崩壊の場合、他の崩壊と異なる方向を示し、NEまたはNWに向かう崩壊が多かった (Fig. 14)。その内、映秀—北川断層の北西側ではNE方向

が卓越し、その南東側ではNW方向が卓越していた。前者は、断層のトレースに平行で、後者は直交してである。長く狭い谷の堆積物は、地震動に対して、自由面である斜面とは異なる応答をするものと考えられる。2004年新潟県中越地震の時にも同様に断層の走向に平行方向の谷堆積物流動化が生じた (Chigira and Yagi, 2005)。

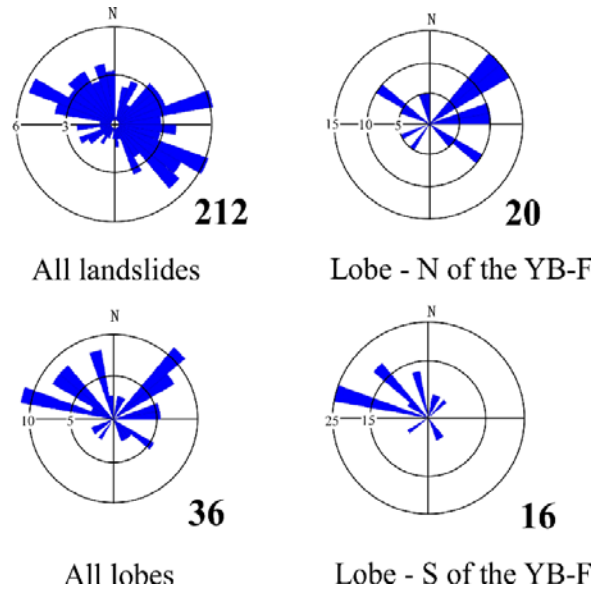


Fig. 14 Rose diagrams showing the landslide directions for all landslides and lobe-shaped landslides by the mobilization of valley fills. N of the YB-F indicates an area to the north of the Yingxiu-Beichuan Fault. Numbers are data numbers.

6.4 谷中谷

映秀から汶川、茂県にかけての眠江では、その両側の急斜面に崩壊が数多く発生した。これらの急斜面は、衛星画像から、Kelsey(1998)の報告した谷中谷であることがわかる。谷中谷は、テクトニックな隆起あるいは海水準低下による侵食の加速によって形成され、谷壁斜面の不安定化と崩壊につながるものが多い (Kelsey, 1998; Chigira, in press)。

地震前のGoogle earth画像によると、眠江に沿う汶川下流に典型的な谷中谷を見ることができる。谷底の標高は1155mから1250mであり、その谷壁は平均傾斜36度の急斜面となっていて、標高1750mから1900mに凸型傾斜変換線がある。特に右岸側ではこの傾斜変換線が顕著であり、その上に緩斜面、さらにその上方は再び急斜面となっている。

Google earth画像では、主要道路は眠江谷底を通過していることが読み取れ、その部分が崩壊によって

壊滅的な被害を受けた。このことが、都江堰から汶川、茂県に至る道路が半年以上にわたって閉鎖された大きな理由であると考えられる。



Fig.15 Inner valley between Wenchuan and Yingxiu (Google Earth). Looking to the south. Inner valley slopes on the right bank are as high as 500 to 700 m.

7. 地すべりダム

今回の地震によって30以上の地すべりダムが形成され、その安定性が大きく懸念され、地震直後から開削などの工事が進められた。それらの安定性は、ダムの構成物質に依存しているようであった。炭酸塩岩や砂岩などの大きな岩塊を主体とする場合には浸透や越流に対して安定で、風化泥岩や千枚岩のような細粒物からなる場合には不安定であるように見受けられた。唐家山地すべりダムは最大規模で、6km以上の長さの池を形成し、その写真や周辺地質からすると、それは風化千枚岩からなり、細粒物質に富んでいた。2番目に大きな地すべりダムは、平通から55km北東の石板村 (Subantsun) 地すべりであり、これは千枚岩の上の炭酸塩岩のすべりであった。このダムは、最大径5mの炭酸塩岩塊を大量に含んでおり、安定のように見えた。これらの他に、北川から紅白の間に多くの地すべりダムが形成され、中には炭酸塩岩の大岩塊からなり、外見上安定なものも多かった。しかしながら、泥灰岩分布域のものは、風化泥灰岩の粘土質物質を大量に含んでいて、浸透や越流に弱いようであった。

8. 結論

2008年汶川地震によって、多くの斜面移動が、地表地震断層沿いおよび眠江沿いに発生した。これらは、竜門山断層帯の地震断層の上盤、および眠江の谷中谷に集中して発生した。炭酸塩岩の崩壊が最も多く、それはおそらく炭酸塩岩が地下水によって容易に溶解し、せん断抵抗を減少するためである。炭

酸塩岩の崩壊の分離面は、発生前に点接触であったことを示していた。崩壊の方向には、断層のトレースに直交方向が卓越しており、これは地震動の指向性の効果を示唆している。崩壊の累積頻度と規模との関係は、 $N(x) = 10_a 10^{-bx}$ 、または $\log_{10} N(x) = a - bx$ の直線関係があることがわかった (Fig. 13)。ここに、 $N(x)$ は x よりも規模の大きな崩壊の数であり、 x は $\log_{10} A$ で、 A は崩壊の面積 (m^2)、 a と b は定数である。歴史上最大の非火山の崩壊が、炭酸塩岩の流れ盤斜面で発生し、その面積は $7.353 \times 10^6 m^2$ 、体積 $0.837 \times 10^9 m^3$ と推定された。これは、発生前に山上凹地を伴っており、事前に重力変形があったことがわかった。2番目に大きな崩壊は、面積 $3 \times 10^6 m^2$ で、炭酸塩岩の流れ盤斜面で発生し、その斜面はガリーを伴わずに平滑で、下部切断されていた。谷埋め堆積物が、おそらく間隙水圧上昇によって36か所で流動化し、長いローブ状の堆積物を形成した。

謝辞

本研究は、文部科学省の科学研究費 (特別研究推進費 (20900002, 研究代表者小長井一男) の援助を受けた。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) からは、ALOSの画像の提供を受けた。西南科学技術大学の朱宝竜、京都大学防災研究所の釜井俊孝、汪發武、東京大学の小長井一男、静岡大学の土屋智、石川芳治各氏との議論は有益であった。京都大学防災研究所のツォウチンイン氏には、衛星画像の処理を手伝っていただいた。国土地理院の佐藤浩氏には、衛星画像について有用な情報をいただいた。アジア航測株式会社の千葉達朗氏には、赤色立体画像を提供いただいた。同社の内田修氏には、PRISMとSRTMデータの比較から、大光包の体積見積もりをしていただいた。

引用文献

- Bolt, B.A. and Abrahamson, N.A., 2003. Estimation of strong seismic ground motions. *International handbook of earthquake and engineering seismology*, 81B: 983-1001.
- Burchfiel, B.C., Royden, L.H., Vander Gilst, R.D., Hager, B.H., Chen, Z., King, R.W., Li, C., Lu, J., Yao, H., Kirby, E. 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's republic of China. *GSA TODAY* 18-7, 4-11.
- Chigira, M., 1992. Long-term gravitational deformation of rocks by mass rock creep. *Engineering Geology*,

- 32, 157-184.
- Chigira M., in press. September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan. *Engineering Geology*
- Chigira, M., Yagi, H., 2005. Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture Earthquake in Japan. *Engineering Geology*, 82, 202-221.
- 羽田野誠一, 1968.地すべり性大規模崩壊と地形条件—和歌山県有田川上流の事例—. 第5回災害科学総合シンポジウム, 東京, 24-25.
- He, H.L., Tsukuda, E., 2003. Recent progresses of active fault research in China. *Journal of Geography*, 112, 489-520.
- Hirano, M., Ohmori, H., 1989. Magnitude-frequency distribution for rapid mass movements and its geomorphological implications. *Transactions of the Japanese Geomorphological Union*, 10-2: 95-111.
- Hovius, N., Stark, C. P., Allen, P. A., 1997. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping. *Geology*, 25-3, 231-234.
- Huang, R., Li, W. 2008., Development and distribution of geohazards triggered by 5.12 Wenchuan earthquake in China. *Science in China, Series-E Technical Science*, 52, 810-819.
- Huang, R., Pei, X., Li, T., 2008. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Daguangbao occurred during the Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 730-741.
- Kelsey, H. M., 1988. Formation of inner gorges. *Catena* 15, 433-458.
- Li, H.B, Fu, X.F., J. Van Der Woerd, Si, Ji.L., Wang, Z.X., Hou L.W., Qiu, Z.L., Li, N., Wu F.Y., Xu Z.Q., Tapponnier P., 2008. Co-seismic surface rupture and dextral-slip oblique thrusting of the Ms 8.9 Wenchuan Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 82, 1623-1643.
- Li, X.J., Zhou, Z.H., Yu, H.Y., Wen, R.Z., Lu, D.W., Huang M., Zhou, Y.N., and Cu, J.W., 2008. Strong motion observations and recordings from the great Wenchuan Earthquake. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 7, 235-246.
- Pedersen, H., Brun, B.L., Hatzfeld, D., Campillo, M. and Bard, P.Y., 1994. Ground-Motion amplitude across ridges. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84-6, 1786-1800.
- Sato, P. H., Hasegawa, H., Fujiwara, S., Tobita, M., Koarai, M., Une, H., Iwahashi, J., 2007. Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT 5 imagery. *Landslides*, 4, 113-122.
- Sugai, T., Ohmori H, Hirano, M., 1994. Rock control on magnitude-frequency distribution of landslide. *Transactions of the Japanese Geomorphological Union*, 15-3: 233-251.
- Tabor, R. W., 1971. Origin of ridge-top depressions by large-scale creep in the Olympic Mountains, Washington. *Geological Society of America Bulletin*, 82, 1811-1822.
- United States of America Geological Survey, 2008. web site (<http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/recenteqsww/Quakes/us2008ryan.php>) last accessed on 1 September, 2008.
- Wang, W.-N., Furuya, T., Chigira, M., 2003. Geomorphological Precursors of the Chiu-fen-erh-shan Landslide Triggered by the Chi-chi Earthquake in Central Taiwan. *Engineering Geology* 69, 1-13.

Features and the Distribution of Landslides Induced by the 2008 Wenchuan Earthquake, Sichuan, China

Masahiro CHIGIRA, Xiyong WU*, Takashi INOKUCHI**, and Gonghui WANG

* Southwest Jiaotong University, China

** National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Synopsis

The 2008 Sichuan earthquake with a magnitude of Mw 7.9 induced numerous slope movements on the hanging walls of fault surface ruptures and on steep inner valleys along the Minjiang River. Landslide directions showed preferred orientations normal to the fault ruptures, indicating the effect of the directivity of the seismic wave. The most common landslides were of carbonate rocks, which are easily dissolved and decrease the contact surfaces. The largest non-volcanic landslide in history was induced by the earthquake, and was preceded by gravitational deformation with ridge-top depressions. Valley fill materials were mobilized at 36 locations, probably by pore water pressure build up.

Key Words: Wenchuan Earthquake, landslides, fault surface rupture, inner valley

付録

Table 1. Localities and the separations of fault surface ruptures that we observed.							
No.	Locality	Longitude	Latitude	Trend	Vertical separation	Horizontal separation	Note
1	Baiwindin (白雲頂) tunnel	E103 27.243	N30 59.254	N60E	15 cm (NW up)	20 cm (right lateral)	Fault trace runs along the northwestern foot of ridges.
2	Hontsu (竜池) tunnel	E103 33.445	N31 03.376	N60E	1 m (NW up)	10 cm (right lateral)	
3	West of Hankou (虹口西)	N31 05	N31 08.717	N45E	6 m? (NW up)	4 m? (right lateral)	Original topography can not be specified
4	Hankou (虹口)	E103 41.512	N31 08.717	N60E	4.5 m (NW up)	?	Displacement of a terrace. The surface seemed to be inclined before the earthquake, so the separation may not be precise.
5	Qingpin (清平)	E104 06.585	N31 34.216	N20E-60W (N30E/50NW, fault in the bedrock)	3.6 m (NW up)	1.5 m (right)	Displacement of a road and the row of a masonry wall. Fault could be traced in to the bedrock.
6	Gaochuan (高川)	E104 10.450	N31 37.747	N50E-74E	3.5 m (NW up)	1.4 m (right)	Displacement of a horizontal surface and the row of a masonry wall
7	Dalongtang (大竜潭)	E103 52.781	N31 20.653	N60E	2m (NW up)	?	Small fall of a river in front of a granite cliff
8	Beichuan (北川)	E104 26.882	N31 48.999	N32E	2 m? (NW up)	?	
9	Suyentsun Itui (石崖村一隊)	E104 25.354	N31 46.756	N72W	2 m (SW up)	1.3 m (right lateral)	Large landslide occurred on the hanging wall and covered the surface rupture.
10	Pingdong (平通)	E104 41.325	N32 03.813	N50E	2 m (NW up)	1 m (right lateral)	Houses are destroyed and landslides distributed on the hanging wall
11	Xiaoyudong (小漁洞)	E103 46.031	N31 11.149	N40W	1 m (SW up)	1 m (left lateral)	
12	Bailu (白鹿)	E103 54.756	N31 12.682	N45E	2m (NW up)	34 cm (left)	Nine-year compulsory education school of Bailul town
13	Hanwang (漢汪)	E104 09.941	N31 27.697	N60E	1.6 m (NW up)	30 cm (right)	The road is deformed, so the separations are not precise.



No.4. Hankou (Looking NW).



No.5. Qingping. Top: Looking to NW. The fault runs beyond the two persons, then crosses the river with a small fall, then climbs up to the cliff in the right. Lower left: The fault is indicated by arrows. Lower right: On the right of the lower left figure; the surface is displaced with thrust up of the left side.



No. 6. Gaochuan. Left: Looking to N. Right: Looking to W.

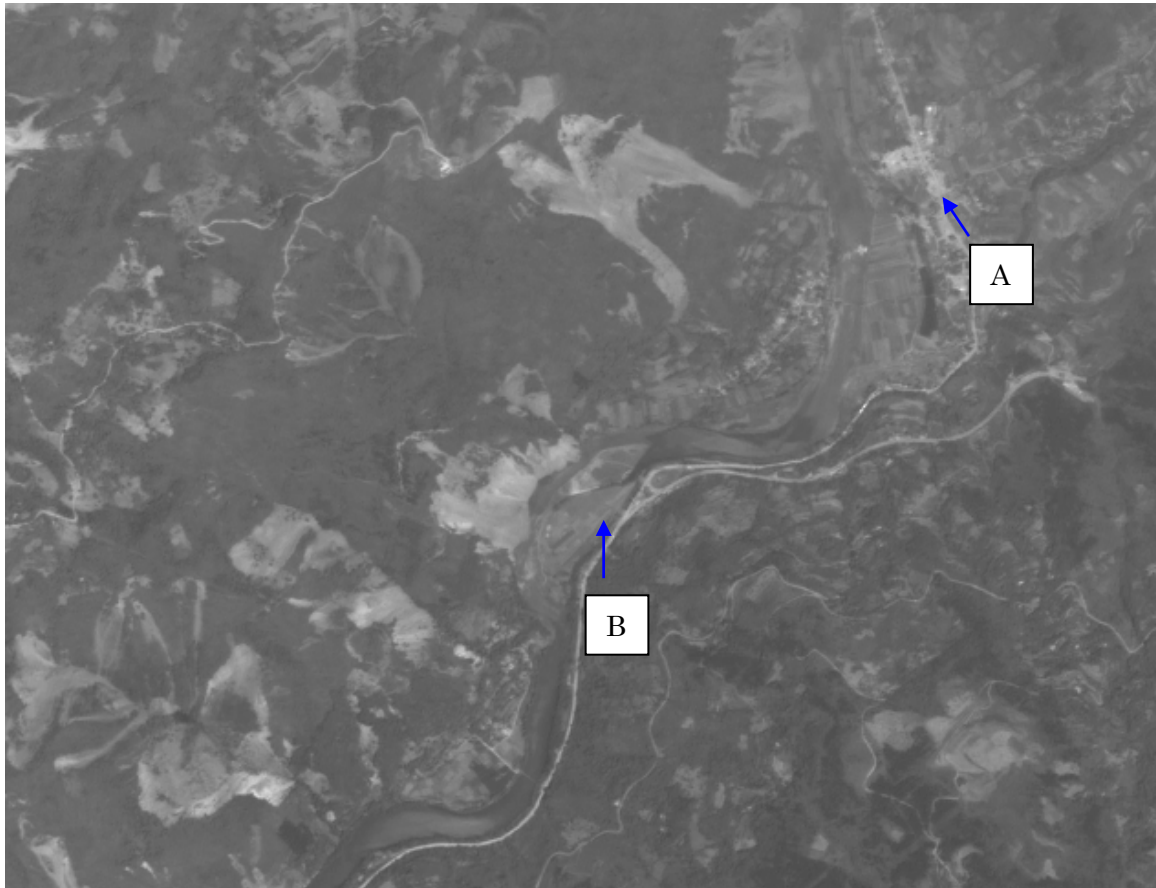


No. 7. Dalongtang (Looking NW).



No.9 Suyentsun Itui. Left is a displaced lower terrace (looking ESE). Right side upheaved 2 m. Right: A trenched cross section.





No. 10 Pingdong. Upper left: A in the lower PRISM image. Upper right: B in the lower.



No. 11 Xiaoyudong (Looking to NE).



No.12 Bailu (Looking NE). Left side upheaved 2 m.