

中部支部設立10年記念講演

演題「地震による大規模斜面災害」

講演者　： 土屋　智　氏

土屋　智氏プロフィール

1978；国土防災技術（株）技術本部

1978；建設省土木研究所砂防部地すべり研究室部外研究員

1997～；静岡大学農学部教授

砂防学会・日本地すべり学会理事

（社）日本地すべり学会中部支部支部長

地震により発生する土砂災害

土屋 智（静岡大学農学部）

1. はじめに

規模の大きな地震が発生すると、その地震動により建物や橋梁、道路などの損壊が生じ時には数多くの死傷者をともなう。地震時には都市域のみならず山地域においても、斜面崩壊や地すべりなどが土石流化して住居を破壊し、人的被害を発生させる場合も少なくない。国土の7割が森林山地を占める日本では、地震に伴う斜面崩壊や地すべりにより生ずる被害は大きく、災害対策は重要な課題である。

過去の事例（表 1.1）によれば、九州島原では寛政4年4月1日（1792年5月21日）に発生した地震（雲仙岳、M6.4）で、眉山が大崩壊を起こし約3.4億 m^3 の土砂が有明海に突入し、九十九島としての奇観をつくった。さらには、この崩壊により巨大津波が発生し対岸の肥後・天草（熊本県）を襲い、返し波が島原半島の沿岸18町村へ再度来襲し死者約1万5千人を生じた。また、海溝型巨大地震である宝永地震（M8.4, 1707年10月28日）では、静岡市を貫流する安倍川の源流に崩壊土量約1.2億 m^3 を有する大谷崩が発生したとされ土石流となって約5kmを流下・堆積し大規模な土石流段丘を形成した（中村他, 2000）。近年では、1984年9月14日長野県西部地震（M6.8）により御岳南東山腹の標高2550m付近で生じた御岳崩れがあげられる。これは、崩壊土量約3,400万 m^3 の大規模崩壊で、伝上川を土石流となって高速流下するとともに王滝川との合流部に湛水池をつくった（中村他, 2000）。この時の土石流は、大規模であることや流下距離が長いこと（約15km）、しかも高速であることが注目を浴びた（田中, 1985）。直近では、2008年6月14日岩手・宮城内陸地震（M7.2）で栗駒山南東斜面山麓の荒砥沢ダム上流の大規模地すべり（荒砥沢地すべり）がある。その規模は幅約700m、斜面長約1000mを有し、移動土塊量も約6,700万 m^3 と莫大である。

このように地震規模が大きくなると、土砂災害を引き起こす土砂移動現象には大規模なものが含まれるようになり、森林山地域では甚大な土砂災害が生ずるようになる。ただし、経験的にも裏づけられるように、このような大規模地震は中規模の地震と比べると、発生頻度はそれほど大きくはないが、発生頻度が低くても社会資本が集中的に整備された現在にあっては、過去に比べれば極めてカストロフィックな災害を引き起こすことは否定できない。

表 1.1 地震起因により発生したとされる崩壊土量 10^7m^3 以上の大規模崩壊（中村他, 2000 から抜粋, 加筆）

発生年	呼名	M	崩壊名	現在位置	崩壊土量	地質
1586	天正	7.8±0.1	帰雲山	岐阜県大野郡白川村保木脇	2,500	火成岩
1611	会津	6.9	飯谷山	福島県耶麻郡西会津町	4,000	第三紀層
1704	羽後・津軽	7.0±1/4	大崩	青森県西津軽郡岩崎村松神	11,000	第三紀層
1707	宝永	8.4	大谷崩	静岡県静岡市梅ヶ島	12,000	第三紀層
1751	越後・越中	7.0-7.4	名立崩れ	新潟県西頸城郡名立町	4,700	第三紀層
1792	雲仙岳	6.4	眉山崩壊	長崎県島原市眉山	34,000	火成岩
1847	善光寺	7.4	岩倉山崩れ	長野県長野市信吏町涌池	3,000	第三紀層
1858	飛越	7.0-7.1	鷲山崩れ	富山県上新川郡大山町有峰	41,000	火成岩
1984	長野県西部	6.8	御岳崩壊	長野県木曽郡王滝村鈴ヶ沢	3,400	火成岩
2008	岩手・宮城内陸	7.2	荒砥沢地すべり	宮城県栗原市栗駒文字	6,700	火成岩

2. 地震による土砂災害概要

地震時における斜面上の土砂移動は、地震力 (seismic force)、地震発生域の地質、地形、地下水などの水理・水文などの各種因子の総合的な影響により、規模と発現頻度は異なる。地震時の地震加速度は、慣性力とともに斜面変位を生じ、地下水位や間隙水圧を上昇させ、土砂移動現象として、落石 (rock fall)、斜面崩壊 (slope failure)、地すべり (landslide) を生じ、時には土石流 (debris flow) をも生じさせる (図 2.1)。

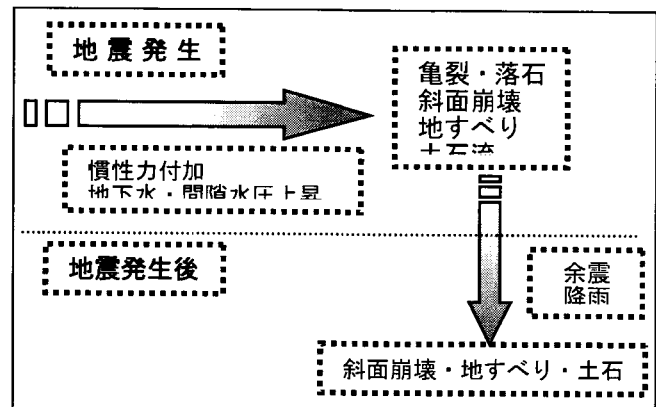


図 2.1 地震により発生する土砂移動

地震後には数多くの余震があり、これは本震によりダメージを受けた斜面や崩壊を生じた斜面の不安定土塊を崩落させるとともに、新たな斜面崩壊を発生させることも十分に予想される。また、豪雨は、斜面上に生じた亀裂を通して斜面内に容易に浸透し、地下水位や間隙水圧を上昇させ不安定土塊を崩落させる。地震後の影響がいつまで続くかについては明確にされておらず、その予測は難しい。現状では、幾度かの豪雨を経験し、活発な土砂移動現象を伴わなくなり安定化段階に至るまで、その影響があると判断する必要がある。このような事例には、兵庫県南部地震で小崩壊を生じた灘区鶴甲地区の斜面崩壊地をあげることができる。ここでは、地震発生直後から約 8 ヶ月間にわたり、降雨のたびに崩壊面積を拡大した (中村他, 2000)。

2.1 土砂移動現象概要

地震時において、発生頻度の高い土砂移動現象は、落石、表層崩壊 (surface slope failure) や岩盤崩落 (rock slide) などの斜面崩壊である。落石 (rockfall) は、地震により、岩盤、また斜面から岩塊や岩片、石礫が分離し独立して、跳躍 (saltation)、回転 (rotation)、滑動 (sliding)、自由落下 (falling) しながら移動する現象で、節理 (joint) の発達した固結度の弱い砂岩、礫岩、頁岩や凝灰岩地帯、残積土、破碎風化岩などで発生頻度が高いとされる。

表層崩壊は、地震により発生する土砂移動現象の典型的なタイプである。多くの場合、0.5~1.5m の厚さを有する土層が斜面上を滑落する現象で、表層に近い軟らかい土層とその下位のやや硬質な地層との境界や基盤岩面上を滑落する。また、表層崩壊よりもやや深所で発生する崩壊を浅層崩壊と呼ぶこともある。伊豆大島近海地震 (M7.0) では、静岡県河津町見高入谷および大池地区で、深さ 2~3m を有する浅層崩壊が発生した。これらの地区の斜面は、第四紀に堆積した火山灰 (volcanic ash) やパミス (pumice) で覆われるが、これらの層理面 (bedding plane) に沿ってすべり面 (sliding surface) が形成され、崩壊したものである。これらの浅層崩壊は、関東大地震で発生した根府川の土石流 (流速 13-19m/s) のように土石流化して大災害に至ることがある。岩盤崩壊は、節理、層理面や不連続面上で分離した岩塊や岩盤ブロックが崩れ落ちるものである。また崩壊の中で発生頻度は少ないが、岩屑なだれ (rockavalanche) 型の崩壊がある。このタイプの崩壊は崩壊土量が 10^6m^3 以上であり、崩壊を起こした地すべり岩塊は細分化され岩屑流 (debris avalanche) となり、高速

で数 km も流下するものである。これには、1792 年の雲仙眉山崩壊（崩壊土量 $3.4 \times 10^8 \text{m}^3$ ）などがあげられる。

日本では、地震を誘因とする地すべりの発生例は少ないとされてきた。地震時に発生する地すべりは崩壊を伴い多くの場合下流に拡大してその被害を大きくする。善光寺地震（M7.4, 1847 年 5 月 8 日）では、岩倉山の西南斜面で地すべり性崩壊が発生し、犀川を塞ぎ止め決壊し善光寺平のほぼ全域に氾濫し、大災害を引き起こした。兵庫県南部地震（M7.2, 1995 年 1 月 17 日）では、固結度の低い大阪層群内で発生した仁川地すべりにより 34 名が犠牲となった。

2.2 地盤環境と斜面崩壊

これまでの経験によれば、地震が発生した時、どのような地盤で斜面崩壊が多く発生するかについて次のような傾向が表れている。破碎帯（crush zone）を伴わず、節理や片理面なども発達していない塊状の岩盤斜面では、概して地震により落石や小崩壊が発生する程度である。一方、層理面や片理、節理が発達し、層状構造をもつ堆積岩や堆積岩起源の変成岩では、斜面崩壊や流れ盤タイプの地すべりが発生する場合がある。また、層状構造を持つ斜面（20-30cm 以下の互層の堆積岩や軟弱な層を細く挟んだ変成岩など）で、破碎帯などの影響により地層が切断されたような場所では、受盤タイプの地すべりを発生させることがある。

斜面を構成する地盤が、亀裂や節理の発達とともに著しく破碎され風化すると、斜面が小さくブロック化しやすく、このような所では地震により多数の亀裂、崩壊や地すべりのいずれもが発生する傾向がある。造構運動（tectonic movement）により、貫入岩（intrusive rock）や深成岩（plutonic rock）などで岩体が破碎されブロック化した斜面では、崩壊・落石が発生し、さらに破碎の程度が大きくなると地すべりを発生させる。一般に、固結度が高く硬い岩石より構成される斜面は、固結度が低く軟らかい岩石で構成される斜面よりも地すべりや斜面崩壊の発生率は低い。同じ地震動を受けても地盤の硬軟によって振動特性（最大加速度、振幅など）は異なり、軟らかい地盤ほど最大加速度や振幅が大きくなり、せん断変位量も増大するため固結度の低い軟らかい地盤のほうが地すべりや崩壊を発生しやすくなると考えられる。

図 2.2 は、地震によって引き起こされた大規模土砂移動（江戸時代は崩壊規模 10^6m^3 以上、明治以降は 10^5m^3 以上、全国で 105 箇所）について地質別にとりまとめたものである。これより、日本列島を構成する地質分布と比較してみると、地震による大規模土砂移動（斜面崩壊、地すべり）は、地質年代では第三紀で、火山噴出物の分布する地域で発生する頻度が高いといえる。火山噴出物の分布域には、スコリアやパミス凝灰岩層や熱水変

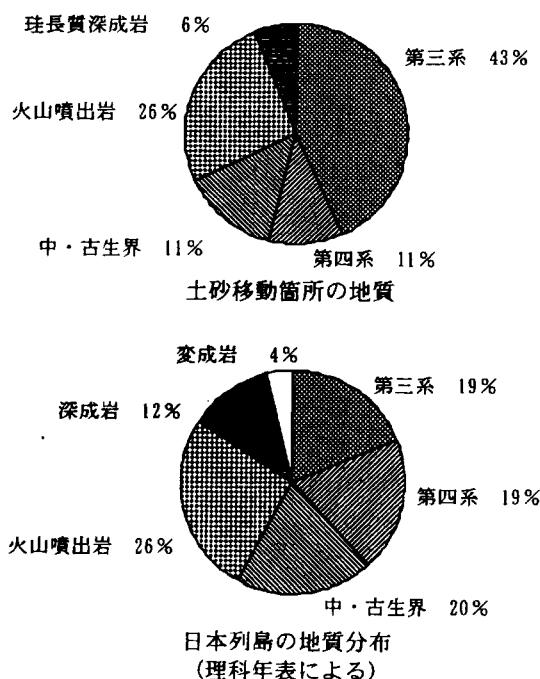


図 2.2 地震による大規模な土砂移動箇所の地質分類（中村他, 2000）

質 (hydrothermal alteration) を受け粘土化した層が分布する地域が含まれる。

地震を誘因とする地すべりと地質との関係で、注目すべきものに液状化があげられる。これは、水で飽和された砂やシルト層が地震動により液状化を起し、地すべりや土石流を発生させるもので、鋭敏比の高い粘土は砂層と同様に液状化しやすく地すべりを発生させる。

斜面崩壊や地すべりの発生に斜面の地形条件が与える影響には、河川や谷の密度、地形起伏量の他、重要な因子として勾配、斜面高 (比高) や斜面形がある。とくに斜面勾配と比高は重要で、一般には斜面形による影響よりもはるかに大きい。地震動は、斜面の高さによって変化するが、一般に地震動の垂直分力の影響よりも水平分力の影響は大きいとされる。また、斜面尾根部の震動は、谷部でのそれよりも大きく、変位量も増大すると判断される。尾根地形や凸地形において、地震動の増幅効果が認められることを地形効果 (topographic effect) と呼んでいる。このような地形効果は、地震動の工学的な評価手法である

地震応答解析 (seismic response analysis) によっても、同様な増幅結果が得られている。

地震による斜面崩壊や地すべりの発生と斜面傾斜の関係については、図 2.3 に示すように傾斜が 20 度以下と 60 度以上の斜面ではその発生は少ない。ほとんどの崩壊や地すべりは、傾斜 30～50 度の斜面に発生しており、傾斜 60 度以上の急斜面で崩壊が少ないことは、堅固な岩盤により構成され安定度が高いことやこのような急勾配斜面が少ないためと考えられる。

図 2.4 は、斜面の縦断面型を因子として凸型、凹型、平行型、複合型 (S 型) の 4 種類に区分し、新潟地震 (M7.5, 1964) と今市地震 (M6.4, 1949) の際に発生した斜面崩壊の発生頻度を示したものであるが、複合斜面や凸型斜面での崩壊発生率が高いことがうかがえる。地震の地すべりや崩壊の発生に地下水の存在がどのように影響するかをみると、地下水深度が浅く、飽和した砂層が存在する場合には、液状化地すべりが発生するようである。日本では新潟地震で、また中国では黄土地帯では多数の液状化地すべりが報告されている (郎, 1998)。また、地震時に斜面に発生した亀裂は震後の崩壊発生や地すべりの先駆現象 (precursor) とみなすことができる。地震により斜面変形が進行した場所では、地震後の雨が亀裂に進入し、崩壊の拡大や地すべりを活発化させる。

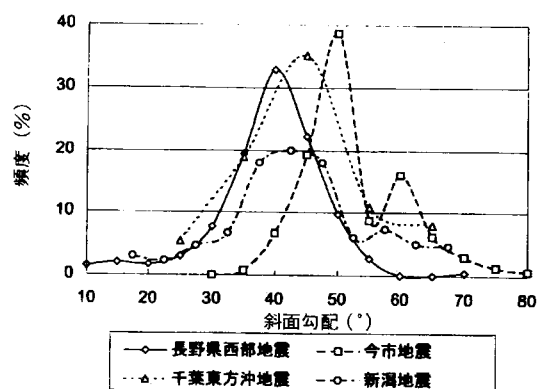


図 2.3 地震時に発生した斜面崩壊の勾配頻度分布 (郎, 1998)

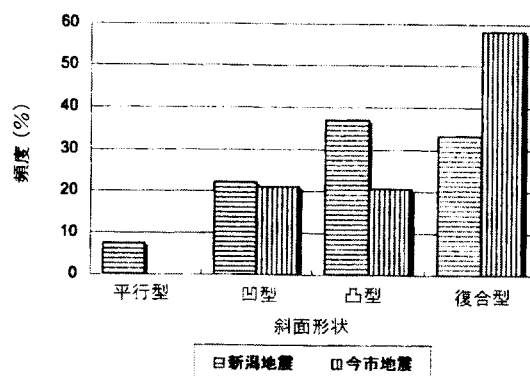


図 2.4 地震により発生した崩壊の斜面形状の分布 (郎, 1998)

3. 地震による土砂移動の事例

豪雨時に発生する斜面崩壊や土石流については、一般に山地斜面でも雨水が集まりやすい凹地形を呈した場所で斜面傾斜が大きく、しかも集水面積が大きい斜面で、発生危険度が高いと判定されてきた。しかし、地震時には、凹地形を呈する場所よりもむしろ凸地形の斜面や尾根に近い場所で、その傾斜が大きいことが、崩壊を生ずる大きな要因であることが明らかになってきた。つまり、降雨時に危険な斜面と地震時に危険な斜面は必ずしも同じではないことに留意しておく必要がある。このように凸地形の斜面が崩れやすいことは、地震応答解析によっても裏づけされ、先に述べたように地形効果と呼ばれている。

3.1 落石・岩盤崩壊

落石は、急崖や急勾配の斜面上に存在する石や岩盤の一部が地震動で落下したものである。落下には、もともと不安定な状態で斜面に存在していたものが地震動により、まとまって落下あるいは個々にずり落ちたりする。兵庫県南部地震や芸予地震（M6.4, 2001）でも、多数発生しており、本地震のみならず余震によっても発生する。多くの落石は、50～80cm程度のサイズであるが、大きいものは2m程度のものもあるので、その破壊力は甚大である。また、安定しているように見える岩盤が、地震時には崩落することがある。これは、地表からは容易には見えないクラック（亀裂）や岩盤中の発達した節理面などの弱線にそって崩落するものと判断される。



図3.1 国道432号を閉塞した落石群（芸予地震，2001年3月）

3.2 表層崩壊

森林山地斜面の表土層は、土壌が厚く堆積する場所で1.0～1.5m程度、多くは0.5～1m程度の厚さがあり、斜面上方で薄くなる傾向がある。豪雨時には、このような山地斜面で凹地形をなし雨水を集水しやすい場所では、表層土全体にわたり多量に水分を含み、その下にある基盤層を境として崩落する場合がある。崩壊した土壌深さが1m程度で、その幅と長さが20～30m程度のものを、一般

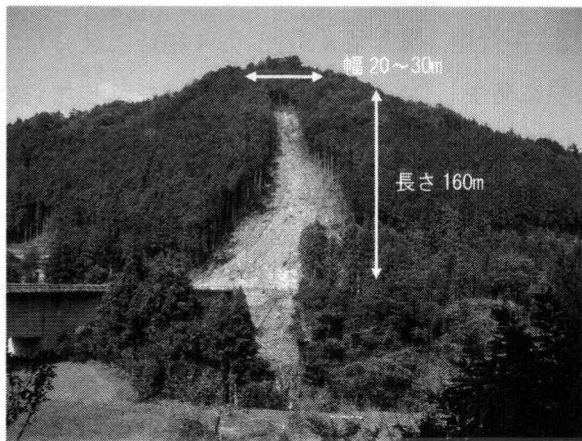


図3.2 豪雨による表層崩壊の事例（三重県宮川村，2004）

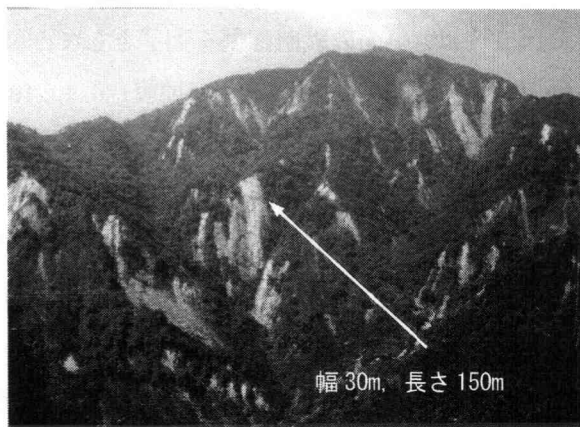


図3.3 地震により発生した表層崩壊の事例（台湾南投縣，1999）

的に表層崩壊と呼んでいる。崩壊した表層土が多量に含水している時には、崩落後流動化して土石流に転化して長距離を流動するケースもある。図 3.2 に示す事例は、台風 23 号(2004)に伴う豪雨により発生した斜面崩壊（表層崩壊型）である。これに示すように斜面上方で発生した斜面崩壊は、流動化して土石流となり、下方斜面の人工林をなぎ倒した。

一方、地震時に発生する表層崩壊は、表層土層のうち表面に近い部分が崩落する場合が多く、斜面上には樹木が残っていることもある。豪雨時のように個々の崩壊が点在するように発生するのではなく、図 3.3 に示すように崩壊群として、またそのほとんどは、斜面上方の尾根付近で生じている。崩落土砂は、豪雨時の斜面崩壊とは異なり流動性は高くないので、その多くは斜面直下の谷部付近で停止・堆積している。

3.3 日本における地震による大規模な斜面崩壊

(1) 御岳崩壊

長野県西部地震（1984 年 9 月 14 日、M6.8）では、御岳山の南東斜面で約 3400 万 m^3 の大規模崩壊（御岳大崩壊）が発生し、約 14km にわたり流下し、王滝川合流点で河川を閉塞し天然ダムをつかった（図 3.5）。このほか、松越、滝越、御岳高原で規模の大きな斜面崩壊が発生し、地震による直接被害とあわせて死者・行方不明者 29 人となる被害を生じた。崩壊を生じたすべり面は、5～6 年前に始まる新期火山活動後期に降下火山砕屑物として堆積した王滝累層中に存在する千本松軽石層であり（信州大学自然災害研究会、1985）、ここを境として急激に崩壊した。長野県西部地震による御岳大崩壊の発生による土砂移動については、崩壊規模が極めて大きいことや流下速度が大きいこと（尾根を乗り越えるほどの直進性と多くの倒木をともらったことからその流下速度は 20～30m/s と評価され、一般的な土石流 5～10m/s に比べ 3 倍ほど大きい）ことから岩屑流（粉体流）か、土石流かの議論が展開された。

現在でも御岳中腹と伝上川には、御岳大崩壊と土石流下した爪痕が生々しく残存している。しかし、下流域の濁川、鈴が沢、王滝川には災害直後から現在に至るまで、多くの治山構造物や砂防ダムが設置されており、規模の大きな土砂移動は発現していない。



図3.5 長距離にわたり流動化し王滝川に流出した崩壊土砂（1984、王滝村役場農林建設課提供）

(2) 東竹沢地すべり

2004年10月23日17時56分、全国有数の地すべり地帯である新潟県中越地方で深さ13kmを震源とするM6.8の地震（新潟県中越地震）が発生した。この地震は、川口町川口で震度7、最大加速度1722gal、山古志竹沢で震度6強、1131galを記録するなど、これまでに類を見ない激震をともなう地震動を生じた。このため、長岡市古志（旧山古志村）周辺一帯に多数の斜面崩壊・地すべりを生じ、道路などのライフラインを寸断し、旧山古志村では全村避難を強いられた。村内を流下する芋川は、地すべり土塊約130万 m^3 を有する東竹沢地区と約100万 m^3 の寺野地区に代表されるような大規模な河道閉塞が生じ、降雨時には閉塞土砂の決壊やこれに伴う土石流の発生を想定させられる状況があった。このため、越流に伴う地すべり土塊の決壊を防止するための緊急排水、仮排水路の整備が行われた。このような大規模な河道閉塞対策は、国内で初めての事例である。また当該域は山間域で

あり、上述の大規模な地すべり以外にも斜面崩壊が無数に発生した。芋川流域の支流域における谷底や山腹には、土砂災害の発生原因である不安定土砂が多量に存在しており、豪雨時の二次的な土砂移動も含め翌年の融雪期の土砂移動も十分留意する必要がある。

東竹沢地区、寺尾地区で発生した地すべりは、斜面長約350m、崩落土塊量100万 m^3 を超えているが、ともに河道閉塞区間の長さは上流側水深の10倍程度あり、地すべりダムが水圧やパイピングにより決壊する可能性は低いと判断された。しかしながら、芋川の水位上昇による越流が生じた場合には決壊の危険性があり、ポンプ排水等により水位を低下させる緊急排水が実施された。さらに、融雪期の流量も考慮した十分な断面を有する仮排水路も施工された。東竹沢地区では、地すべり土塊末端部でかなりの掘削が必要であり、地すべり土塊の不安定化を回避するため地すべり土塊頭部の荷重軽減を図る切土工が実施された（（社）砂防学会, 2005）。

(3) 荒砥沢ダム上流大規模崩壊

2008年6月14日、岩手県と宮城県の県境付近でM7.2規模の岩手・宮城内陸地震が発生した。この地震災害は、同じ規模の地震と比較し建物被害が少なく土砂災害が多いことが挙げられている。とりわけ荒砥沢ダム湖の上流端に位置する森林地内で発生した地すべりは、これまでの地震起因の地すべりとしては最大級の規模であった（図3.6）。すなわち、斜面長約1000m、幅約700mを有する

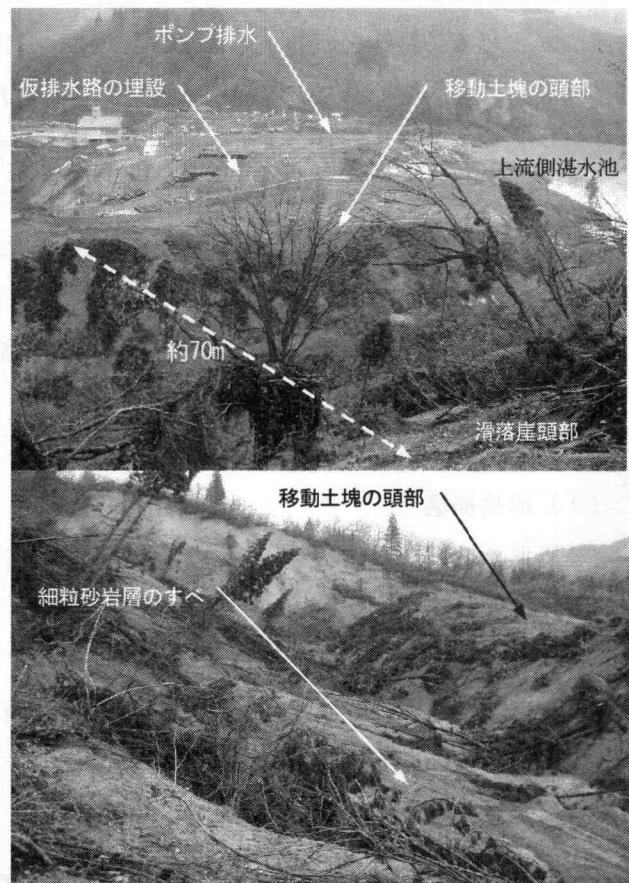


図3.5 東竹沢地すべりの滑落頭部とすべり面
（上：滑落頭部から撮影，下：滑落空間部，2004年11月25日）

大規模な地すべりであり、地すべり土塊の主体部は水平距離で 300m 以上も移動した。地すべりの末端部がダム左岸側山腹で停止したことで、ダム湖に流入した土塊は 150 万 m^3 程度に留まり、小規模な津波は発生したがダムの堤体を越えることはなく大事には至らなかった。

地すべりの滑落崖の高さは約 150m を有し、崩壊した土量は約 7,500 万 m^3 と推定される。この地すべり地の地震前の元地形と地震後の

地形を比べ、すべり面の位置を推定するとその角度は約 2° 前後であり、その勾配は著しく小さい（図 3.7）。なぜこのような大規模な地すべりを生じたか、またなぜ 300m も移動したのかについて大きな関心が寄せられるが、定量的な説明は今後のボーリング調査や土質試験結果等を待たねばならない。

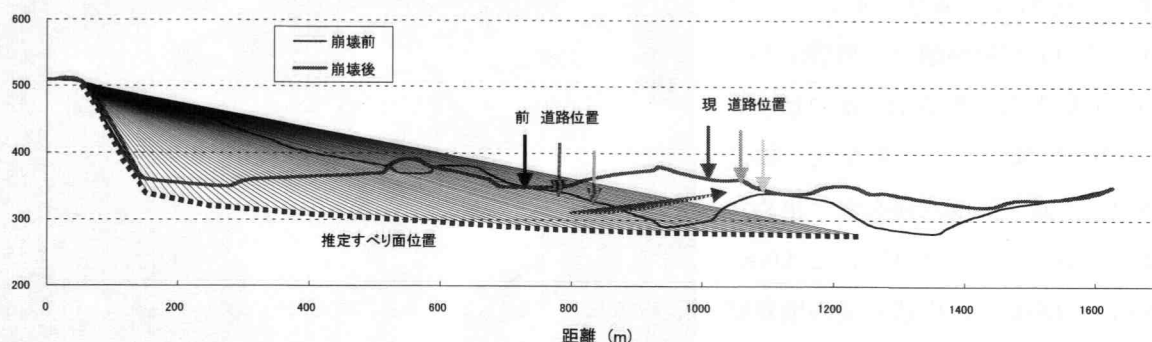


図 3.7 大規模地すべりの推定すべり位置

3.4 台湾、四川の地震による大規模崩壊

(1) 台湾 921 地震による大規模崩壊

台湾では、1999 年 9 月 21 日（現地時間午前 1 時 47 分）、南投縣集集市の東 10km 付近で台湾 921 地震（M7.3；台湾中央気象局，M7.6；USGS）が発生した。この地震では、都市部における人的物的な被害のほか、山間地では莫大数の斜面崩壊、地すべりが発生した。発生した土砂災害は、これまでに経験したことのない大規模なものであり、例えば、南投縣と

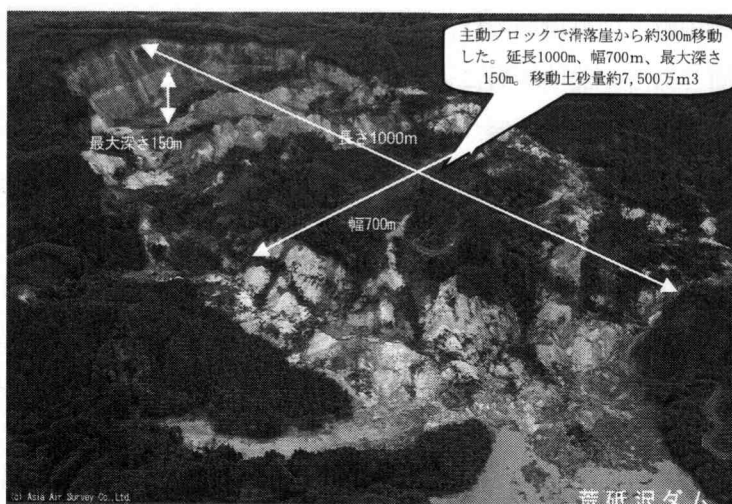


図 3.6 荒砥沢ダム上流端で発生した大規模地すべり（アジア航測撮影）



図 3.8 九分二山崩壊の斜め写真（左下にもう一つの湛水湖がある。堆積部は幅、長さ共に約 1,000m。2000 年 12 月撮影）

台中縣との県境域では、面積 30～50km² にわたり山頂部が禿げ山化した地域（九九峰）や、地震断層である車籠埔断層に近い台湾中部の山地域では、数万個におよぶ表層崩壊や平方 km オーダの面積を有する大規模崩壊が2箇所が発生した。一つは震央から約 10km 北の九分二山系で発生した九分二山崩壊であり、もう一つは車籠埔断層の南端に位置する清水溪（濁水溪支流）の中流で発生した草嶺山大崩壊である。

九分二山崩壊は、幅約 1,000m、斜面長約 1,600m、平均崩壊厚約 40～50m を有し（図 3.8）、その崩壊土量は地山換算で約 3,600 万 m³（台湾經濟部中央地質調査所、1999）と評価されている。ここを滑落した崩壊土砂は、そのまま最大約 2km を移動し韭菜湖溪谷を埋め、2 箇所に天然ダムをつかった。崩壊した当時は、その決壊が危惧されたが、その後、排水路が設置され、現在は安定化した様相を呈している。崩土の堆積深は、大きな場所で 150m、平均で約 50m に相当する規模で、堆積土量（堆積に伴う空隙をも含む）は全体で約 7,600 万 m³ と見積もられる（水山ら、2000）。当地区は、現在、行政院農業委員会水土保持局の管理下にあり、岩盤地すべりの移動に関する現地観測が続いている。

草嶺山（標高 1234m、地質は新第三紀層）では、九分二山崩壊の約 2.5 倍の規模で、大規模崩壊（草嶺山崩壊）が発生し清水溪を堰き止めた（写真 3.9）。この大規模崩壊は、草嶺山から向かって左方向にある 1163m のピークとの山嶺部に始まり（写真 3.9）、斜面傾斜沿って直下し清水溪を堰き止めた。崩壊した斜面の大きさは幅約 2,000m、長さ約 1,500m で、崩壊前後の地表標高の違いから算出した崩壊土量は 12,600 万 m³（台湾經濟部水利署第四河川局、1999）となる。崩壊土砂は清水



図 3.9 草嶺山崩壊地の全景（河道閉塞による上流湛水池のほか、流下・堆積地内にはオーバーフローによる湛水池ができた。2000 年 12 月 17 日撮影）

溪を、幅約 1,000m、長さ約 3,000m にわたり 100～150m の厚さで埋め、その下流端は標高 400m 地点まで流下した（土屋ら、2000）。なお、草嶺山では 1860 年代から 1979 年までに地震や豪雨により 3 回の大規模な崩壊が発生しており、特に 1951 年 5 月 10 日には、1942 年 8 月 10 日の豪雨によりできた塞止湖が決壊し、137 人が死亡する大災害が発生した。今回の大規模崩壊では、南斜面の不安定土塊が滑落したが、頂上付近には段差を伴った未崩壊部分が残留している。地震時に清水溪を塞き止め上流側にできた湛水池と流下・堆積域にできた湛水池は、2001 年 7 月に襲来した桃芝台風時の土砂流出で埋まり、現在にいたっている。

（2）四川地震による大規模崩壊

2008 年 5 月 12 日 14 時 28 分、中国四川省アパ・チベット族チャン族自治州汶川県映秀付近の深さ 19km を震源とする M8 の大規模地震が発生した（中国では汶川大地震と呼ぶ）。震源断層は、龍

門山断層と呼ばれる逆断層であり、断層長 285km、断層帯幅約 45km とされる。この地震によって道路や電力、水道、通信などライフラインが大規模に寸断された。2008 年 7 月 21 日現在、四川大地震の死者は 69,197 人、負傷者は 374,176 人、18,222 人が行方不明となっている。家屋の倒壊は 216,000 棟、損壊家屋は 4,150,000 棟で、避難人口は約 15,147,400 人、被災者は累計で 46,160,865 人となった。また都江堰を流れる岷江の上流にある紫坪埔ダムなど複数のダムに亀裂が生じたり、地すべり、斜面崩壊によって河道閉塞が生じ（代表的事例には唐家山地すべりダム）、ダムの緊急放流や下流域からの避難を含む対策が取られている。

①映秀鎮における斜面崩壊・土石流

震源に最も近い映秀では、市街地の北方を地震断層が走り約 1 万人の住民のうち半 7,700 人が犠牲（死者・行方不明）になったとされる。ここでは、岷江（汶川県を經由し都江堰を流下する）が市街地の図 3.12 東部から南北に流れ、北から流下する魚江溪（支川）が市街地南部で合流する。市街地は、魚江溪の面積約 0.75km² の扇状地上にあるため、住宅は密集し地震によりそのほとんどが全壊した。なかでも、岷江の左岸側の段丘（幅 250m、

長さ約 600m）に位置する集落では、比高 300～500m を有する背後斜面からの土砂崩壊により壊滅的な土砂災害を被った（写真 3.11）。山腹崩壊の規模は山腹斜面には、約 15 万 m³ と推定される崩壊土砂が多量に残存しており、建物を破壊している。映秀市街地付近の岷江の左岸側の斜面は、これ以外にも 2～5 万 m³ 程度の斜面崩壊が多数発生しており、滑落崖からは現在でも小規模な土砂崩落が続いている。

②百花郷牛圈沟の土石流

震央位置とされる汶川県映秀の約 2km 下流に位置する百花郷牛圈沟では、大規模な土石流が発生し 20 人以上が犠牲となった（写真 3.12）。百花郷牛圈沟の上流左岸の支流山腹で発生した大規模な崩壊は、合流部で対岸の約 30m 高に乗り上げた後約 1500m を土石流となって流下し、岷江に流れ込んだ。現在、溪床に堆積する土砂量は約 500 万 m³ と推定される。溪床に堆積する岩塊の多くは、径 20cm 以下の花崗岩類であるがメートルオーダーのも



図3.11 汶川県映秀における岷江の左岸側の斜面崩壊と建物破壊（2008 年8 月2 日撮影）



図3.12汶川県映秀鎮百花郷牛圈沟における岷江支流左岸側からの土石流痕跡（約200m 対岸から、2008 年8 月2 日撮影）

のも散見される。

③北川縣市街地における斜面崩壊

北川県では、市街地人口（約 1.2 万人）の約半数以上が土砂災害の犠牲となった。北川県の上流約 3.2 kmにある唐家山では、大規模な斜面崩壊が発生し崩土が河川を閉塞させ高さ約 80m、想定湛水量約 2.5 億 m³、大規模な天然ダムが形成された。このため、軍隊や多量の機材が投入されて、湛水地の水位を下げ被害を軽減するための排水路の掘削工事が行われた。これと平行して、下流の避難対象住民約 15 万人のうち約 7 万人が 5 月末までに避難した。6 月 7 日には掘削された排水路からの排水が始まり、6 月 10 日に排水路の急速な侵食があり湛水位は約 40m低下、湛水量は約 0.9 億 m³に低下した。これにより、北川県付近では流量は約 3,000m³/s に達したとされる。現在、北川県への立ち入りは禁止され、市街地入り口の高台から遠望するのみである。中心市街地の一部は唐家山の天然ダムの侵食時に流出した洪水と土砂により被害を河床は著しく上昇しており、市街地の一部は上流からの流出土砂の堆積により埋没していた。さらに地震により中心市街地の西側（図 3.12）と東側（図 3.13）において大規模な斜面崩壊が発生し崩土が市街地を襲い広い面積にわたり建物が破壊された。

④青川県における大規模崩壊

青川県の東河口では、大規模な斜面崩壊が発生し河川沿いにあった 2 集落が壊滅的な被害を受け約 300 名が犠牲となった。ここは、本川と支川の合流点に位置し大規模な崩壊による地すべりダムは本川と支川のそれぞれに形成された（図 3.14）。本川



図3.12 北川縣市街地と西側の斜面崩壊（平均勾配約35°、高さ約300m、土砂量約5,200,000m³、2008年7月27日撮影）



図3.13 北川縣市街地と東側の斜面崩壊（平均勾配約40°、高さ約300m、土砂量約3,200,000m³、2008年7月27日撮影）



図 3.14 青川県東河口における大規模斜面崩壊により形成された地すべりダム（推定崩土量約 20,000,000m³、2008 年 7 月 28 日撮影）

を堰き止めた地すべりダムの高さは推定約 20m, その後人工的に開削され, 調査時の水位は約 10m 程度に低下していた。

東河口地区の本川上流約 1.5km の位置にある石板溝では, 大規模な地すべり (図 3.15) が発生し集落が土塊により埋没して約 200 名が犠牲となった。地すべり土塊は, 本川を閉塞したために約 25 高の地すべりダムが形成された。その後, 人工開削され水位は約 10m 程度に低下していた。



図 3.15 青川県東河口上流石板溝における地すべり (推定崩土量約 10,000,000m³, 2008 年 7 月 28 日撮影)

4 地震後の土砂災害とその対応

地震の発生とともにその規模によっては, 森林山地斜面には亀裂 (クラック) などの斜面変状が起こる。亀裂の一部は余震で拡大し, その後の降雨で斜面変状を大きくし崩壊に至ることがある。地震時に発生した斜面崩壊の縁部は一般に不安定であり, 余震による崩落や降雨による侵食などで, 多く場合崩壊地は拡大する。また, 地震時に崩壊した土砂により河道が塞き止められると, 天然ダムが形成され, 満水後に越流すると急激な侵食が発生し, 決壊には至らずとも下流に洪水災害を引き起こすことがある。また, 塞き止めていた崩壊土砂が降雨時に土石流として流出することがある。さらには, 地震で不安定になっていた斜面が新たに崩壊し土石流となることもある。

4.1 地震後の崩壊地の拡大

兵庫県南部地震 (M7.2, 1995) の発生後, 神戸では 5 月に月間雨量 358mm を記録した。とくに 5 月 11 日～12 日にかけては, 神戸で 158mm の大雨となり六甲山系で斜面崩壊などが生じ, 被災住民が非難を余儀なくされた。さらに, 7 月 3 日～6 日では六甲山観測地点で 236mm に達する降雨を記録した。このため, 東灘区の一部には非難勧告が発令され, 新規斜面崩壊の発生や拡大がみられたものの被害拡大は生じなかった。六甲山系全域で斜面崩壊の拡大状況を調査したところ, 地震発生から 4 ヶ月で拡大した崩壊地は約 70 箇所及び, 地震直後には斜面崩壊が認められなかった斜面でも新たに多くの崩壊が発生していることが確認された (富田, 1996) このように地震時に発生した斜面崩壊地が, その後の降雨で拡大する事例は少なくない。図 4.1 にはこの事例として兵庫県南部地震 (M7.2, 1995) で発生した神戸市灘区鶴甲団地上流域の山腹崩壊があげられる。

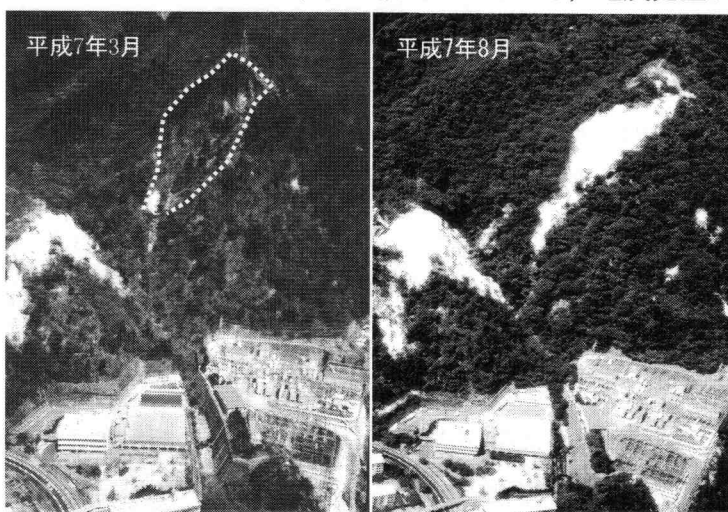


図4.1 地震後の降雨により拡大した崩壊 (兵庫県南部地震, 国土交通省六甲砂防工事事務所提供)

台湾 921 地震で清水溪を塞き止め

た草嶺では、堰き止め箇所の上流側に湛水量約 4,600 万 m^3 の天然ダムが形成された（水山, 2000）。ここでは、形成された天然ダムからの越流水を安全に流下させるため、現地石礫を用いた護岸による仮排水路が設置され、下流では侵食防止と流下する土砂を堆積させる目的で河道を開削し、流路固定を実施するとともに石積砂防堰堤を建設した（土屋, 2000）。しかしながら、2001 年 7 月 30 日に襲った桃芝台風による日雨量約 392mm の豪雨やその後納莉台風による同 504mm の豪雨のため上流側から多量の土砂流入があり、天然ダム湖はほとんど埋められ、越流し堆積地に流下した多量の泥水は、溪床に堆積した不安定土砂を侵食した。

4.2 広域的な土砂移動

台湾 921 地震では、都市部のほか、山間地においては多数の斜面崩壊や地すべりが発生した。この地震により生じた山地斜面での土砂移動は、①急傾斜斜面や台地の端部付近での表層崩壊、②地震断層付近の斜面崩壊と地すべり、③地質構造に素因を有する斜面の大規模地すべり、④地すべりの再活動の 4 型に区分されるようである（水山ら, 2000）。この地震から 2 年後、2001 年には 7 月 29 日から 30 日にかけて、桃芝台風（台風 8 号）が台湾中央を横断し、地震による斜面崩壊が多発した南投縣を中心に死者・行方不明者は 214 人にも達する大規模な土砂災害を引き起こした（中川ら, 2001；近藤ら, 2002）。台風による人的被害としては、死者・行方不明者 312 人を出した約 40 年前の葛樂禮台風（1963 年）の襲来以来、これに次ぐもので近年にない大災害であった。

地震後の降雨時には、斜面崩壊地の拡大崩壊や停留した土砂の再移動があり、不安定ポテンシャルが高まった斜面では、新規崩壊の発生が危惧される。地震後には、山地域で発生するであろう 2 次的な土砂移動現象に留意しなければならない。地震による斜面崩壊や地すべり等で生じた崩落土砂は、降雨による流動化がなければ、その下方山腹斜面あるいは溪流に不安定な状態で停留しているし、たとえ斜面崩壊の発生には至らずとも、亀裂を生じ崩壊発生のポテンシャルを高めた場所も少なくないと思われる。また、地震後には土砂移動発生場としての素因が活性化しており、より小さな降雨であっても土砂の下方移動が発生する可能性は高く、また同程度の降雨であってもその規模は大きくなる可能性がある。

5. おわりに

地震後には数多くの余震があり、本震によりダメージを受けた斜面や斜面崩壊を生じた斜面の不安定土塊を崩落させる。また新たな斜面崩壊を発生させることも十分に予想される。さらに地震後の豪雨は、斜面上に生じた亀裂を通して斜面内に浸透し、不安定土塊を崩落させる。このような地震後の影響がいつまで続くかについては明確ではなく、その予測は難しい。現状では、幾度かの豪雨を経験し、活発な土砂移動現象を伴わなくなり安定化段階に至るまで、その影響があると判断する必要がある。

このような事例には、兵庫県南部地震でも幾つかの事例があった。また、多数の斜面崩壊や地すべりが発生した台湾 921 地震では、2 年後に襲った桃芝台風により斜面崩壊が多発した南投縣を中心に死者・行方不明者は 214 人にも達する大規模な土砂災害を引き起こした。しかも豪雨時には現在でもこの地震で生じた不安定土砂の流出により、交通遮断や橋梁流出といった被害を生じている。地震の発生後には、ここで紹介したような山間域で発生する 2 次的な土砂移動現象に十分な留意が

必要である。地震後には、土砂移動発生場としての素因が活性化しており、より小さな降雨であっても土砂の下方移動が発生する可能性は高く、また同程度の降雨であってもその規模は大きくなる可能性があるからである。現段階では、その影響がいつまで続くかは、マクロ的な予測の域を越えない。今後とも、このような観点でのデータ蓄積を進める必要があると考えられる。

引用文献

- 安間 莊 (1987) : 事例から見た地震による大規模崩壊とその予測手法に関する研究, 東海大学海洋学部学位論文, 205pp.
- (社) 砂防学会 (2005) : 新潟県中越地震土砂災害調査研究委員会第一回資料,
<http://www.jsece.or.jp/survey/20041023/report1.pdf>, 23pp.
- 近藤観慈・王 文能・林 拙郎 (2002) 地震前後の降雨状況, 1999 年台湾の地震に伴って発生した山地災害の調査, (科研課題番号 12575021), p. 35-49
- 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), 41-45
- 中川 一・戸田圭一・牛山素行 (2001) : 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, 20(3), p. 353-360
- 中村浩之, 土屋 智, 井上公夫他 (2000) : 「地震砂防」, 古今書院, 190pp.
- 郎 煜華 (1998) : 地震による崩壊の特徴と崩土の拡散範囲の予測に関する研究, 東京農工大学学位論文, 136pp.
- 土 隆一他 (1992) : 静岡県地学のガイド, コロナ社, 182pp.
- 土屋 智 (2000) : 台湾 921 集集地震で発生した大規模崩壊, NDIC NEWS, No. 23, 26-28
- 田中耕平 (1985) : 長野県西部地震における斜面崩壊の特徴, 土と基礎, 33 (11), 1985, 5-11
- 富田陽子・桜井 亘・中庸 充 (1996) : 六甲山系における地震後の降雨による崩壊地の拡大について, 砂防学会誌, 49(6), 15-21
- 宇佐見達夫 (1996) : 新編日本被害地震総覧, 東大出版会, pp. 493
- 山越隆雄・渡 正昭 (2002) : 衛星画像から見た 2001 年桃芝台風による台湾中部山岳地帯の土砂移動現象発生状況, 土木技術資料, 44(6), p. 18-23.