4.3 地震動による山地流域の安全度評価手法に関する研究

研究予算:運営費交付金(一般勘定)

- 研究期間:平18~平21
- 担当チーム:土砂管理研究グループ(火山・土石流)

研究担当者:田村圭司、山越隆雄、内田太郎、 武澤永純、松本直樹

【要旨】

平成 20 年度は、地震のマグニチュードから、発生し得る大規模斜面崩壊の規模を推定する手法と、地震後の 降雨、融雪による土砂生産・流出の経年変化の把握を平成 19 年度に引き続き行うとともに、その変化要因の検 討を行った。その結果以下のことが明らかになった。①司・翠川の距離減衰式を用いて地震動の最大加速度を推 定した結果から、崩壊土砂量を概ね推定することが可能な回帰式を提案した。②平成 16 年に発生した中越地震 後の芋川流域においては、地震後約2年で、土砂生産・流出量は大きく減少し、新規崩壊よりも拡大および再崩 壊が土砂生産源として卓越したこと、そして、地震後の新規崩壊した斜面の形状は、地震前に発生した斜面崩壊 の斜面形状と類似した傾向を示すこと等をレーザー計測データに基づき定量的に示した。

キーワード:大規模崩壊、地震動、芋川、土砂生産、航空レーザー計測

1. はじめに

本研究は、地震時、または、地震後に発生する様々な 土砂災害の防止・軽減に資する技術の研究開発を行うも のである。

平成20年度は、地震のマグニチュードから、その地 震により発生し得る大規模斜面崩壊の規模を推定する手 法を検討するとともに、地震後の降雨、融雪による土砂 生産・流出の経年変化の把握を平成19年度に引き続き 行うとともに、その変化要因の検討を行った。

2. 地震に起因した大規模崩壊の崩壊土砂量と最大加速 度との関係

2.1 概要

2004 年新潟県中越地震,2008 年岩手・宮城内陸地震で 発生した大規模崩壊は,天然ダムの形成や,崩壊土砂の 土石流化など被害を拡大させる危険性が高い。このよう な地震時の大規模な土砂崩壊対策を検討していく場合, 場所と規模の予測が重要である。後者については,過去 に発生した大規模崩壊における最大加速度を,震央から の距離減衰を考慮する Cornell の式を用いて整理してい る¹⁾。過去の事例を用い,最大加速度と崩壊土砂量の関 係を評価することが出来れば,地震によって発生する土 砂災害の予測に有用であると考えられる。なお、距離減 衰に関しては,近年,震央からの距離減衰式以外に,断 層面からの距離減衰式も提案されており,その代表的な 式のひとつに、実務の加速度推定に良く用いられる司・ 翠川の式がある²。

そこで、本研究では、司・翠川の式と Cornell の式を 用い、過去の崩壊事例について、両式を用いた崩壊土砂 量予測式を作成し、最大加速度推定に対する両式の特性 と、両式による最大加速度と崩壊土砂量について考察を 行った。

2.2 最大加速度の距離減衰式

本研究では、上記 Cornell 式と、最近の地震工学の分 野でよく用いられている司・翠川の式を用いて検討する。 式(1)に Cornell の式を示す。この式は、地震力の発生 源を点震源としてモデル化し、震央からの距離を基準と した距離減衰式である³³。

$$\alpha = \frac{2000e^{0.8M}}{D_1^2 + H^2 + 400} \qquad \cdots (1)$$

- a:地盤上の最大加速度(gal)
- M:マグニチュード(表-1のMと同様)
- D: 震央からの距離(km)
- H: 震源の深さ (km)

式(2)に司・翠川の式を示す。この式は、地震工学の 分野では一般的な加速度推定式のひとつである。司らは、 断層最短距離の式、等価震源距離の式の2種類を提案し ているが、ここでは、定義が簡単な断層最短距離の式を 用いる²⁰。

表-1 対象とする地震データ

					マグニチュー	モーメント		Cornellの式			司・翠川の式			崩壊ナ功量
番号	地震名	種別	地震発生日	崩壊地名	۲	マグニチュード	地質	震源深さ	震央からの距離	最大加速度	震源深さ	断層最短距離	最大加速度	朋敬工钞里
					м	Mw		km	km	gal	km	km	gal	m ³
1-1	関東	海溝型	1923.09.01	白糸川上流·大洞	7.9	7.5	火山岩	1.5	18	1535	1.5	2.3	706.2	1.00E+06
1-2	関東	海溝型	1923.09.01	根府川駅西側斜面	7.9	7.5	火山岩	1.5	15	1778	1.5	2.3	707.5	7.50E+06
1-3	関東	海溝型	1923.09.01	震生湖	7.9	7.5	第四紀層	1.5	19	1460	1.5	10.1	545.5	3.40E+05
2-1	北伊豆	直下型	1930.11.26	三島市山中新田の来光寺右岸	7.3	6.7	火山岩	0.0	6	1577	0.0	2.2	612.8	2.00E+05
2-2	北伊豆	直下型	1930.11.26	大仁町大野旭山	7.3	6.7	火山岩	0.0	11	1320	0.0	0.3	720.3	1.50E+05
2-3	北伊豆	直下型	1930.11.26	天城湯ケ島町奥野山	7.3	6.7	第三紀層	0.0	18	950	0.0	1.2	668.0	4.00E+05
2-4	北伊豆	直下型	1930.11.26	箱根町大明神川上流渓町山斜面	7.3	6.7	火山岩	0.0	10	1375	0.0	4.9	505.9	2.00E+05
3-1	西埼玉	直下型	1931.09.21	秩父郡太田村八人峠	6.9	6.5	中古生層	0.0	24	512	1.0	18.1	229.3	2.50E+04
4-1	男鹿	直下型	1939.05.01	男鹿市北浦1	6.8	6.8	火山岩	0.0	28	389	0.0	5.8	492.8	9.10E+04
4-2	男鹿	直下型	1939.05.01	男鹿市北浦2	6.8	6.8	第三紀層	0.0	30	355	0.0	6.0	487.8	1.80E+06
4-3	男鹿	直下型	1939.05.01	男鹿市北浦3	6.8	6.8	第三紀層	0.0	30	355	0.0	6.3	480.1	4.30E+06
4-4	男鹿	直下型	1939.05.01	男鹿市船川港	6.8	6.8	第三紀層	0.0	38	250	0.0	8.8	418.3	2.80E+04
4-5	男鹿	直下型	1939.05.01	五里合安田	6.8	6.8	第三紀層	0.0	33	310	0.0	8.8	417.6	5.30E+05
5-1	福井	直下型	1948.06.28	北潟村浜坂1	7.1	6.9	第四紀層	0.0	14	983	0.0	3.8	576.7	2.00E+05
5-2	福井	直下型	1948.06.28	北潟村浜坂2	7.1	6.9	第四紀層	0.0	14	983	0.0	3.7	580.6	2.70E+05
6-1	長野県西部	直下型	1984.09.14	御獄山(伝上崩れ)	6.8	6.2	火山岩	2.0	7	1017	2.0	8.6	318.9	3.40E+07
6-2	長野県西部	直下型	1984.09.14	滝越	6.8	6.2	火山岩	2.0	9	950	2.0	3.6	482.4	5.00E+05
6-3	長野県西部	直下型	1984.09.14	松越	6.8	6.2	火山岩	2.0	3	1116	2.0	1.2	632.5	2.90E+05
7-1	兵庫県南部	直下型	1995.01.17	西宮市仁川	7.2	6.9	珪長質深成岩	20.0	37	293	20.0	2.0	788.7	1.10E+05
8-1	新潟県中越	直下型	2004.10.23	長岡市中潟町	6.8	6.7	第三紀層	13.0	8.5	719	13.0	6.6	523.6	2.40E+06
8-2	新潟県中越	直下型	2004.10.23	小千谷市小栗山	6.8	6.7	第三紀層	13.0	7.4	739	13.0	5.3	566.3	1.13E+06
8-3	新潟県中越	直下型	2004.10.23	小千谷市浦柄	6.8	6.7	第三紀層	13.0	7.4	739	13.0	6.3	533.0	2.19E+06
8-4	新潟県中越	直下型	2004.10.23	小千谷市東吉谷	6.8	6.7	第三紀層	13.0	11.9	649	13.0	8.5	469.3	6.75E+06
8-5	新潟県中越	直下型	2004.10.23	小千谷市岩沢	6.8	6.7	第三紀層	13.0	8.8	713	13.0	4.3	606.3	3.00E+06
8-6	新潟県中越	直下型	2004.10.23	小千谷市塩谷 東武沢	6.8	6.7	第三紀層	13.0	3	797	13.0	2.5	689.2	1.09E+06
8-7	新潟県中越	直下型	2004.10.23	小千谷市塩谷	6.8	6.7	第三紀層	13.0	3.1	797	13.0	2.3	697.8	5.57E+06
8-8	新潟県中越	直下型	2004.10.23	山古志村東武沢 梶金	6.8	6.7	第三紀層	13.0	3.3	795	13.0	2.3	699.1	5.50E+06
8-9	新潟県中越	直下型	2004.10.23	山古志村南平	6.8	6.7	第三紀層	13.0	6.1	760	13.0	2.2	704.1	1.25E+06
8-10	新潟県中越	直下型	2004.10.23	山古志村種芋原 寺野	6.8	6.7	第三紀層	13.0	7.3	741	13.0	2.1	709.5	1.25E+06

 $\log PGA = 0.50M_{W} + 0.0043D + 0.61 + d$ $-\log(X + 0.0055 \times 10^{0.50M_{W}}) - 0.003X \quad \dots (2)$

PGA: 地盤上の最大加速度 (gal) M_w: モーメントマグニチュード D: 震源の深さ (km) X: 断層最短距離 (km) (想定断層面から) d: 地震の種別によるパラメータ (地殻内地震: 0.00, プ レート間地震: 0.01, プレート内地震: 0.22)

地震規模を表す指標として, Cornell の式ではマグニ チュードが, 司・翠川の式ではモーメントマグニチュー ドが用いられる。そこで, 両式の最大加速度の比較を行 うため, 地震モーメントとマグニチュードの関係式 (式 (3))と, 地震モーメントとモーメントマグニチュード の関係式 (式 (4))から, マグニチュードをモーメント マグニチュードに換算した (式 (5))。

 $\log M_{o} = 1.17M + 10.72 \cdots (3)$ $\log M_{o} = 1.5M_{w} + 9.1 \cdots (4)$ $M_{w} = 0.78M + 1.08 \cdots (5)$ $M_{o} : 地震モーメント$

2.3 対象とする大規模崩壊のデータ

土木研究所の既往の研究³⁾では、地震による大規模な 土砂崩壊として、以下のものを対象に、37 地震、105 地 点の事例を収集している。 ○地震を直接及び間接の誘因として発生したもの ○少なくとも2万5千分の1の地形図上で、発生地点が 特定できるもの

更に、本検討では、これらの中から以下の条件を追加 して、精度が高いと思われる事例を絞り込んだ。 ①大正時代(1912年)以降の地震であること ②崩壊土砂量が1万m³以上のもの ③誘因に降雨を含まないもの ④断層モデルが定義されており、司・翠川の式による最 大加速度の推定が可能であるもの^{4,5}

この結果,7地震19地点(表-1:1-1~7-1)の土砂崩 壊事例を抽出した。また、この事例に加え、新潟県中越 地震によって発生した10地点の事例(表-1:8-1~8-10, 国土交通省http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha04/05/ 05-1101_2_.html)を検討対象データとした。

これら大規模な崩壊の発生した地点における震央から の距離と Cornell の式による最大加速度を図-1 に、断層 最短距離と司・翠川の式による最大加速度を図-2 に示す。 それぞれ、直下型と海溝型に分けて表示している。

大規模な崩壊が発生した比較的震源に近い地点におい て、司・翠川の式は、Cornellの式に比べ、震源深さ、 マグニチュードに関わらず、距離に対して線形的であり、 両式の特性の違いが表れている。そして、これらの図か ら、大規模な崩壊は、震央距離で40km以下、断層最短距 離では20km以下の地点で発生していることが分かる。ま た、これを加速度で評価すると、Cornellの式では250gal、 司・翠川の式では230gal以上の最大加速度が生じると大 規模な崩壊が発生していることになる。



図-1 断層最短距離と最大加速度の関係(Cornell)



図-2 断層最短距離と最大加速度の関係(司・翠川)

2.4 推定最大加速度と崩壊土砂量の関係

崩壊発生位置における最大加速度と崩壊土砂量の関係 性について検討を行う。なお、震源近傍における Cornell の式と司・翠川の式の傾向の違いを考慮し、断層最短距 離 5km 以下を震源近傍とし、震源近傍とそれ以外のもの に分けて整理した。

また,長野県西部地震による御岳山(表-1:6-1)の崩 壊は,この地震の発生以前に大規模な崩壊が発生した形 跡があり,これが誘引となって,非常に大規模な土石流 となったとの指摘がある⁶⁰ため,今回のデータ整理から 除外することとした。

図-3 に震央距離・断層最短距離5km以下の地点を,図 -4 に断層最短距離5km以上の地点のデータを示す。先ず, 断層最短距離5km以下のデータにおいて, Cornellの式 では,最大加速度推定に大きな違いが生じ,崩壊土砂量 との相関性が明瞭でない結果となっている。特に,最大



図-3 最大加速度と崩壊土砂量の関係(震央距離・ 断層最短距離5km以下)



図-4 最大加速度と崩壊土砂量の関係(震央距離・ 断層最短距離5km以上)

加速度の増大に対し、崩壊土砂量は、増加傾向を示して いない。一方、司・翠川の式では、推定加速度範囲が狭 く相関性は低いが、崩壊土砂量との相関性がより高くな っている。

次に、断層最短距離5km以上のデータでは、両式での 最大加速度と崩壊土砂量との関係の差異は減少するが、 5km以下のデータと同様に、司・翠川の式の最大加速度 と崩壊土砂量との相関性が、Cornellの式より高くなっ ている。ただし、その原因は、図中に示した地点(表-1: 1-3、関東地震震生湖)での推定加速度に大きな差があ ったためで、このデータを除けば、断層最短距離5km以 上では、両式は同程度の崩壊土砂量の推定性能を有する と考えられる。

以上のことから、今回のデータでは、Cornellの式に 比べ、司・翠川の式の方が、最大加速度と崩壊土砂量と の相関性が相対的に高く、後者の式を用いて最大加速度 を推定すれば、最大加速度から崩壊土砂量を概ね推定で きることが分かった。これは、両式の最大加速度推定の 特性の違いによるもと思われる。ただし、どちらも、相 関性はさほど高くなく、特に、断層最短距離5km以下で は、5km以上のものと比べて相関性が低い点に注意が必 要であり、今後、データを集積し、さらなる検討が必要 である。また、司・翠川の式で、計算に用いる断層モデ ルの多くは、実際に複雑な形状を持つ断層を2次元の矩 形断面で近似したもので、震源断層近傍では、断層最短 距離の算定に誤差を生じやすい点にも注意が必要である。

以上,司・翠川の距離減衰式を用いて最大加速度を求 め,図-3,図-4に示す相関式により崩壊土砂量を概ね推 定することが可能であり,大規模地震発生を対象とした 防災業務での活用などが期待される。なお,この相関式 より求められる崩壊土砂量は、比較的規模の大きな崩壊 が発生した場合における崩壊量である。

新潟県中越地震後の芋川流域における土砂動態変化 1 概要

平成16年(2004年)10月23日,新潟県中越地方で M6.8,最大震度7の地震が発生した。地震後も最大震度 6以上の余震が4回観測されるなど余震活動が活発であ った。この本震と余震により中越地方では多数の斜面崩 壊や地すべりが発生し,特に震源に近い芋川流域では崩 壊や地すべりに伴う多量の土砂が河道に堆積した。さら に,地震後に実施した航空レーザ測量および空中写真判 読から,その後の豪雨や豪雪後の融雪に伴い,多くの斜 面崩壊が発生し,活発な土砂生産が継続していることが 明らかにされている⁷。

ここでは、2006年11月に実施した航空レーザ測量結 果を加え、地震後活発であった芋川流域内の土砂生産に 変化が認められる結果が得られたので、その土砂動態変 化の要因の検討を含めて報告する。

3.2 研究方法

3.2.1 使用データと解析方法

ここでは、中越地震後に計測された4時期の航空レー ザデータおよび空中写真を用いた(表-2)。解析手順は、 まず各時期に撮影された空中写真を用いて、崩壊地およ び河道を判読した。次に、各時期の航空レーザデータを もとに数値地形モデルを作成し、それぞれの時期におい て標高の差分処理を行い、3期間(期間I:地震直後~ 2005年春、期間II:2005年春~2006年春、期間III:2006 年春~2006年秋)における各崩壊地および河道部の変動 量を求めた。なお、本解析では積雪や人工改変、天然ダ ムなどによる湛水地の影響は極力除外した。

3.2.2 流出土砂量の算出方法

各期間における流域全体の土砂移動実態を検討するため、土砂収支図を作成した。流域内を斜面部と河道部に2分し、斜面部では崩壊土砂量および河道への流出土砂量を、河道部では河床変動量を算出し、その差し引きにより小流域ごとの流出土砂量を求めた。なお、河道への流出土砂量を算定する際には、斜面部で発生した崩壊土砂のうち、河道部へ流出した土砂の割合を示すSDR(sediment delivery ratio)を設定した。期間 I の SDR は、2005年5月の空中写真に基づいて崩土堆積部を判読し、各崩壊地の崩土堆積部全体の面積と、河道部に流出した崩土堆積部の面積割合として算出した。期間 II および期間 III の SDR については、期間 I と大きく変わらないものとして、期間 I の流出率を小流域ごとに平均した値を用いた。

表-2 使用データー覧

データ	取得時期	計測日
航空レーザ	地震直後 2005 年春 2006 年春 2006 年秋	2004年10月28日 2005年5月11,17日 2006年5月15,16日 2006年10月28日, 11月2日
空中写真	地震直後 2005 年春 2006 年春 2006 年秋	2004年10月24,28日 2005年5月11日 2006年6月21~23日 2006年11月2日

3.3 結果と考察

3.3.1 流域全体の生産土砂量と流出土砂量の経年変化

図-5 に芋川流域全体における各期間の土砂動態を示 す。横軸は地震からの経過年月日を示し、中図の縦軸は 年間の生産土砂量および流出土砂量を示す。この図より 土砂量でみると地震後 1 年半経過した時点まで土砂生 産・流出量が何十万m³レベルで継続していることが確認 できる。ただし、この地域では地震直後の冬および翌年 の冬には記録的な豪雪が、また 2005 年夏には既往最大日 雨量を記録した梅雨前線豪雨が相次いだ。このため、降 水量に対する影響を軽減するために図-5 の下図に降水 量 1mm 当たりに換算した比生産土砂量を示す。この図で みると、地震直後に比べ、地震後 1 年半および 2 年経過 した時点で、生産および流出土砂量は大きく減少してい ることが明らかとなった。

3.4 新規崩壊の斜面形状の変化

次に、地震前後の新規崩壊の斜面形状に着目して、地



図-5 芋川流域の土砂動態の経年変化

震時の影響が地震後どの程度左右しているかを検討した。 斜面の横断形状別に整理した例が図-6 であり,新規崩壊 を谷,直線,尾根の3つに分類し,その構成比を示した ものである。なお,地震前については3時期の崩壊地 (1975年,1982年,1998年)を一括して分類した。

地震時の崩壊では、尾根地形の占める割合が高い傾向 を示している。この傾向と比較して2006年5月の地点で は谷地形で崩壊する割合が高くなり、むしろ地震前の構 成比に戻ったように読み取れる。なお、2005年5月の時 点で尾根地形の構成比が高い理由としては、主に地震時 の地盤の緩みによる崩壊の影響と融雪による崩壊の二つ が考えられる。両者を明確に分離するデータをここでは 持ち合わせていないが、2006年5月の新規崩壊は地震前 の構成比に戻っていることを考慮すると、新規崩壊だけ に着目した場合、地震による影響が大きく寄与している は2005年5月ぐらいまで(地震後半年程度)と考えうる 一つの証拠と思われる。なお、縦断形状で分類しても同 様の傾向が認められた。

3.5 地震後の土砂生産源となりうる崩壊

地震後の崩壊には新規崩壊のほかにも既崩壊地の縁辺 で発生する拡大崩壊,あるいは内部で発生する再崩壊が 存在する。図-5で示した崩壊土砂量はこれらを全てまと



図-6 中越地震前後における横断形状別新規崩壊 の構成比

めたグラフであるが、これを新規崩壊とそれ以外の崩壊 (拡大・再崩壊)に分けて経年的に示したものが図-7 で ある。横軸は地震からの日数、縦軸は年間当たりの崩壊 土砂量に換算した数値を示しており、これによると新規 崩壊土砂量は2005 年5 月以降、急激な減少傾向を示す。 一方、拡大および再崩壊はその後も土砂生産源として継 続しており、2006 年 10 月時点では生産土砂量そのもの は5 分の1 程度に減少しているが、この時期に発生した 生産土砂量全体の90%以上占めている。このことは、地 震後しばらく経過したのちは、新規崩壊による土砂流出 よりも、むしろ既崩壊地(崩壊裸地斜面)やその縁辺部 で発生する拡大崩壊からの土砂流出に留意する必要があ ることを示唆していると考えられる。



図-7 崩壊土砂量の経年変化(地震時を除く)

4. まとめ

平成20年度は以下の成果を得た。

司・翠川の距離減衰式を用いて地震動の最大加速度を 推定した結果から,崩壊土砂量を概ね推定することが可 能な回帰式を提案した。本式によって、震源断層からの 距離に応じた崩壊規模の推定が可能となり、地震発生直 後の迅速かつ適切な初動対応に資するものと考えられる。

一方、大地震後の土砂生産・流出量の経年変化実態と その経年変化要因の検討を、平成16年に発生した中越地 震後の芋川流域を対象にして、複数時期の航空レーザ測 量の差分処理解析により検討した。その結果、次のこと が明らかになった。

- 地震から約2年経過した時点で、地震後の土砂生 産・流出量は大きく減少した。また、地震後約1年 半以降で土砂生産源となっているは、新規崩壊以外 の拡大および再崩壊であることが明らかになった。
- ② 地震後の新規崩壊の斜面形状は、少なくとも地震後約1年半経過した時点では、地震前に崩壊した斜面形状と類似した傾向を示していることが認められた。

なお,ここで発表した数値は,現時点の暫定的な数値 であり,今後のデータの見直し等により修正することが ある。

参考文献

- 中村浩之・土屋智・井上公夫・石川芳治編:地震砂防, 古今書院, p.102-106, p.136-155, 2000
- 2) 司宏俊・翠川三郎:断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文報告集、No.523、p. 63-70、1999
- 3) 建設省土木研究所:地震による大規模土砂移動現象と
 土砂災害の実態に関する研究報告書,土木研究所資料
 第 3501 号, p.65-215, 1997
- 佐藤良輔編著:日本の地震断層パラメター・ハンドブ ック, p.47-65, 1987
- 5) 今給黎哲郎:新潟県中越地震に関連した地殻変動観測 結果(速報),日本地震学会ニュースレターvol.16 No.5, p.29-33,2005
- 約倉克幹・安田進・榊祐介:長野県西部地震での被災 事例にもとづいた斜面崩壊予測手法の検討,土と基礎 vol.33 No.11, p.41-46, 1985
- 松岡 暁・山越隆雄・田村圭司・長井義樹・丸山準、 小竹利明・小川紀一朗・田方智:LiDAR データの差分 処理による流域土砂動態把握の試み、砂防学会誌、 2009(印刷中)

STUDY ON THE METHOD TO EVALUATE THE RISKS OF THE POST SEISMIC SEDIM ENT-RELATED DISASTERS IN MOUNTAINOUS CATCHMENTS

Abstract : In the F.Y.2008, the authors have investigated the simple method to evaluate the volume of massive landslide from given magnitude of earthquake and the post-seismic sediment yield processes in the Imo River Basin where many landslides had occurred at the time of the Chuetsu Earthquake in 2004. As a result, the following are clarified. 1) A regression equation is proposed that enables a rough estimation of possible landslide volume triggered by earthquake. 2) According to the multi-temporal aerial LiDAR surveys, the sediment yield in the Imo River basin substantially decreases in the second year after the earthquake and seems to be back to pre-seismic condition.

Key words : massive landslide, magnitude of earthquake, the Imo river, sediment yield, aerial LiDAR