

兵庫県豊岡市で発生した 2004 年台風 23 号による土砂災害

Characteristics of sediment disasters caused by Typhoon No.0423 in Toyooka City, Hyogo Prefecture, Japan

草野高志¹・井上善夫²・高田卓也³

Takashi Kusano¹, Yoshio Inoue² and Takuya Takata³

¹ 株式会社蒜山地質年代学研究所生駒分室

Ikoma Branch, Hiruzen Institute for Geology and Chronology, Co. Ltd., 4-9 Higashi-Matsugaoka, Ikoma, Nara 630-0244, Japan
Kusano@geohiruzen.co.jp

² 株式会社蒜山地質年代学研究所

Hiruzen Institute for Geology and Chronology, Co. Ltd., 161-1 Sai, Okayama 703-8248, Japan
inoue@geohiruzen.co.jp

³ 株式会社蒜山地質年代学研究所

Hiruzen Institute for Geology and Chronology, Co. Ltd., 161-1 Sai, Okayama 703-8248, Japan
takata@geohiruzen.co.jp

1. はじめに

2004 年 10 月 20 日に襲来した台風 23 号 (国際名 Tokage) は, 近畿地方各地に洪水や崖崩れなど多くの災害をもたらした. この台風によって兵庫県豊岡市^{*1}では山山川堤防の決壊による市街地の浸水, および斜面崩壊や土石流によって約 4,600 世帯もの家屋に被害があった. 折しもその当時我々は, 豊岡市内において土砂災害防止法 (平成 13 年施行: 国土交通省, 2001) に基づく基礎調査を実施していた. 調査は地形図上で高さや傾斜から抽出された斜面について, 現地の地質と斜面形状を確認するものであった. この業務におけるトピックスは, 従来のように高さや傾斜のみの地形データだけでなく, 地質情報も考慮に入れて急傾斜地の土砂災害警戒区域あるいは土砂災害特別警戒区域を選定しようというものである. この調査の最中に台風 23 号が襲来したことで, 調査地域において数多くの土砂災害を目の当たりにすることとなった.

台風 23 号の通過後, 我々は災害復旧を目的とした現地

調査員として豊岡市の災害状況調査に急遽参加することになった. また, 台風 23 号によって数千箇所の土砂災害が発生した兵庫県淡路島北中部でも調査する機会を得ることとなり, 期せずして台風 23 号の被害を受けた 2 つの地域において, ささまざまな規模の斜面崩壊や土石流による被害を間近で観察することができた.

両地域における斜面崩壊の崩壊形態をみると, 淡路島北中部地域ではため池の決壊に伴う土石流の他は, 表層崩壊と扇状地上に作られた田畑の地すべり状の崩壊など比較的小規模なものが多かった. これに対し, 豊岡市ではその崩壊形態も多種多様であった. 両地域の地質構成をみると, 兵庫県北部に位置する豊岡市周辺は, 花崗岩類, 新三系の堆積岩類, 第四紀火山岩類, 段丘堆積物など多様な地質が分布する (図 1). 一方, 兵庫県南部の淡路島北中部に分布する地質のほとんどが花崗岩類とそれを起源とする段丘堆積物および扇状地堆積物である.

福田ほか (2005) は, 表層崩壊の崩土到達範囲確率予測手法を議論する際に, 異なる地質の分布する地域で 1,000 箇所程度の表層崩壊を空中写真で判読し, 地質及び地形の違いで表層崩壊の崩壊高と崩土到達距離の関係に差が生じることを認めており, 豊岡市と洲本市における崩壊形態の違

^{*1} 現在の豊岡市は, 平成 17 年 4 月 1 日に豊岡市・城崎町・竹野町・日高町・出石町・但東町の合併により誕生した. 本論における豊岡市は, 合併前の豊岡市地域の記述である.

いは、そのような地質構成の違いを反映したものと考えられる。

このように、地質の違いによって斜面崩壊の発生メカニズム・流走メカニズムは異なるのが自然であり、それによって地域における危険範囲も異なるものとなる。それを考慮してか、土砂災害防止法では、崩壊危険箇所と氾濫危険区域を設定するにあたって全国一律の地形条件を基本設定としつつ、その運用は、各地方自治体が土砂災害

防止法に基づく基礎調査マニュアル（案）を作成しこれに当たっている。実際に台風 23 号による豊岡市の斜面崩壊では、地質の違いによって崩壊頻度や崩壊土砂の到達距離に違いが認められた。本稿では豊岡市災害箇所緊急点検の際に得られた斜面崩壊の特徴を、発生頻度と崩壊土砂の到達距離が、地質及び地形の違いでどのような差異を示すのかを取りまとめる。

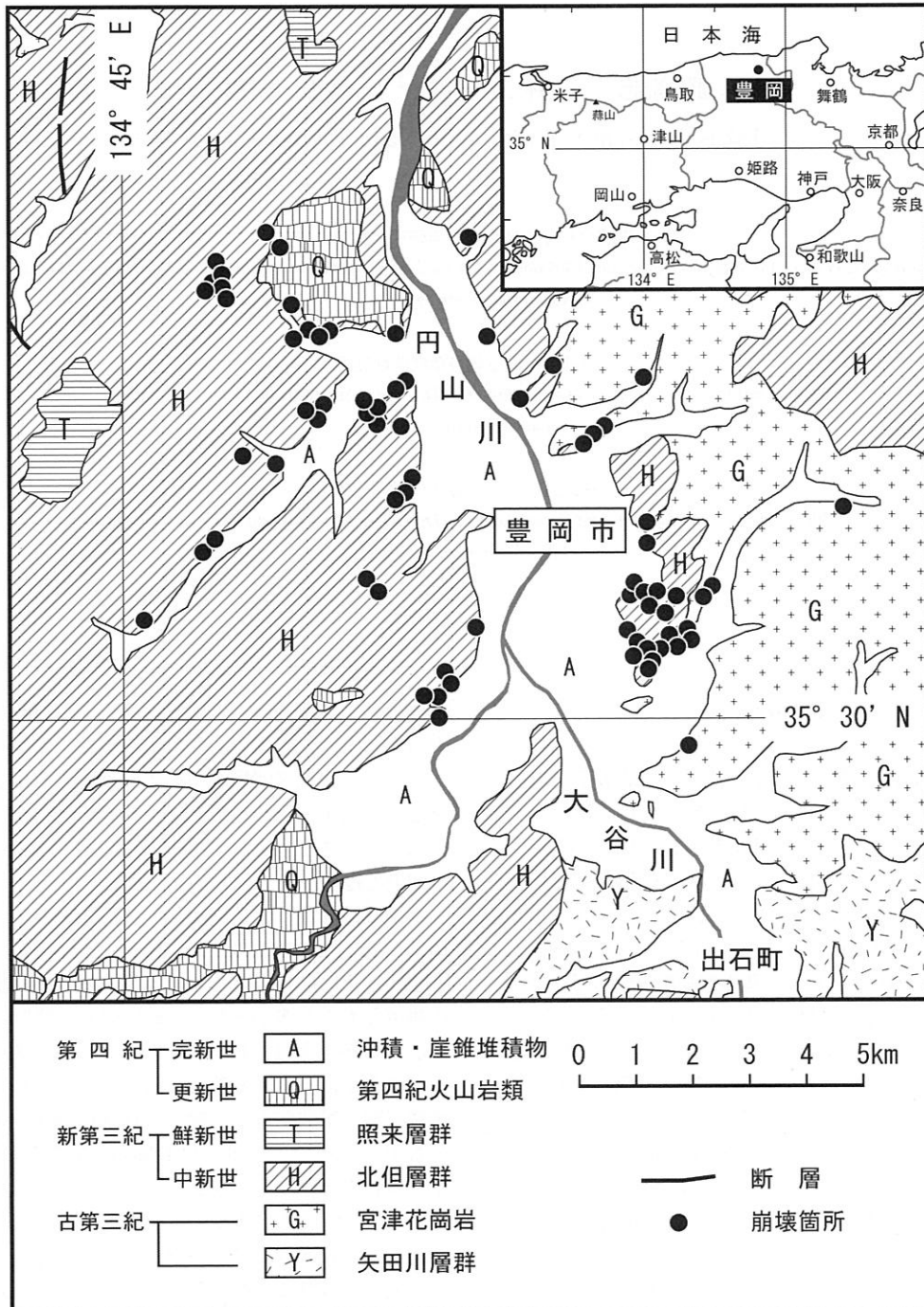


図1. 豊岡市周辺の地質概略図と崩壊箇所（●印）の位置。地質区分は、兵庫県（1996）に基づいて簡略化。

表 1. 調査を実施した 72 箇所の災害のタイプ, 発生斜面の地形, 地質および規模.

箇所番号	災害のタイプ	地形	地質	崩壊高H (m)	到達距離L (m)	崩壊幅W (m)	崩壊深D (m)
NE-01	斜面崩壊	非集水	花崗岩類	25	30	15	—
NE-02	斜面崩壊	非集水	花崗岩類	15	15	—	—
NE-03	斜面崩壊	非集水	花崗岩類	25	25	20	—
NE-04	斜面崩壊	非集水	北但層群	5	5	10	—
NE-05	土石流	集水	北但層群	15	70	10	—
NE-06	土石流	集水	崖錐堆積物	75	—	—	—
NE-07	土石流	集水	北但層群	30	100	15	—
NE-08	斜面崩壊	非集水	北但層群	25	50	20	—
NE-09	斜面崩壊	非集水	北但層群	—	10	5	—
NW-01	地すべり	集水	北但層群	—	—	8	—
NW-02	斜面崩壊	非集水	北但層群	5	6	5	—
NW-03	斜面崩壊	非集水	北但層群	7	14	16	—
NW-04	斜面崩壊	集水	北但層群	—	—	—	—
NW-05	土石流	集水	北但層群	40	190	40	—
NW-06	斜面崩壊	集水	北但層群	24	40	—	—
NW-07	斜面崩壊	集水	北但層群	—	—	—	—
NW-08	斜面崩壊	非集水	北但層群	10	14	6	—
NW-09	斜面崩壊	非集水	北但層群	9	—	12	—
NW-10	地すべり	集水	北但層群	—	—	30	—
NW-11	斜面崩壊	集水	崖錐堆積物	4	8	4	—
NW-12	斜面崩壊	非集水	北但層群	6	—	25	—
NW-13	斜面崩壊	非集水	北但層群	10	8	—	—
NW-14	斜面崩壊	非集水	北但層群	18	—	10	1
NW-15	斜面崩壊	非集水	北但層群	15	70	38	—
NW-16	斜面崩壊	非集水	扇状地堆積物	5	—	15	—
NW-17	斜面崩壊	集水	北但層群	5.5	7	5	2
NW-18	斜面崩壊	集水	北但層群	5	8	8.1	—
NW-19	斜面崩壊	非集水	北但層群	5	—	17	—
NW-20	斜面崩壊	非集水	扇状地堆積物	1.6	2	4.5	—
NW-21	斜面崩壊	非集水	崖錐堆積物	4	3	4	—
NW-22	斜面崩壊	非集水	崖錐堆積物	5	—	35	—
NW-23	斜面崩壊	非集水	崖錐堆積物	5	7	6	—
NW-24	斜面崩壊	非集水	崖錐堆積物	3	3	—	—
NW-25	土石流	集水	北但層群	26	600	62	—
SE-01	土石流	集水	花崗岩類	40	120	—	—
SE-02	地すべり	集水	扇状地堆積物	5	—	—	—
SE-03	斜面崩壊	集水	扇状地堆積物	12	—	—	—
SE-04	斜面崩壊	集水	扇状地堆積物	3	4.7	2	—
SE-05	斜面崩壊	集水	花崗岩類	4	6	4	—
SE-06	斜面崩壊	非集水	花崗岩類	5	10	4	—
SE-07	斜面崩壊	集水	扇状地堆積物	1.5	1.6	—	—
SE-08	斜面崩壊	集水	扇状地堆積物	3.4	5.2	—	—
SE-09	土石流	集水	北但層群	10	—	10	—
SE-10	斜面崩壊	非集水	花崗岩類	7	4.5	13	—
SE-11	斜面崩壊	集水	北但層群	5	8	6	—
SE-12	土石流	集水	北但層群	20	—	20	—
SE-13	斜面崩壊	集水	北但層群	—	—	—	—
SE-14	斜面崩壊	集水	花崗岩類	6	8.5	8	—
SE-15	斜面崩壊	集水	花崗岩類	7	18.2	4	—
SE-16	斜面崩壊	集水	崖錐堆積物	—	—	—	—
SE-17	斜面崩壊	集水	北但層群	20	40	12	—
SE-18	斜面崩壊	非集水	北但層群	—	—	—	—
SE-19	斜面崩壊	集水	北但層群	25	27	40	—
SE-20	斜面崩壊	集水	北但層群	7	16	12	—
SE-21	斜面崩壊	非集水	北但層群	—	—	—	—
SW-01	土石流	集水	北但層群	25	20	—	—
SW-02	地すべり	集水	北但層群	7	15	—	—
SW-03	斜面崩壊	非集水	崖錐堆積物	5.5	5	—	—
SW-04	斜面崩壊	非集水	崖錐堆積物	2	—	—	—
SW-05	斜面崩壊	非集水	北但層群	10	20	20	—
SW-06	地すべり	集水	北但層群	25	100	34	10
SW-07	地すべり	集水	北但層群	10	25	—	25
SW-08	斜面崩壊	非集水	北但層群	5	—	10	—
SW-09	斜面崩壊	非集水	北但層群	8	—	15	—
SW-10	斜面崩壊	集水	北但層群	20	—	30	—
SW-11	土石流	集水	北但層群	25	—	15	—
SW-12	斜面崩壊	非集水	北但層群	10	—	20	—
SW-13	土石流	集水	北但層群	65	200	—	—
SW-14	斜面崩壊	非集水	北但層群	—	—	—	—
SW-15	斜面崩壊	集水	北但層群	—	—	—	—
SW-16	斜面崩壊	非集水	北但層群	26	40	10	—
SW-19	土石流	集水	北但層群	—	—	—	—

2. 豊岡市の地質概要

兵庫県北部に位置する豊岡市は, 中国山地北側斜面より発し, 南方から北方へ流れる円山川と, 南東方から流下する大谷川の合流点に形成された沖積盆地(豊岡盆地)を中心として, 周囲を標高 500m 程度の山地に囲まれている. 本地域は地帯構造区分の上では舞鶴帯に属するが, 古第三紀に貫入した宮津花崗岩類と, それを被覆する新第三紀中新世の北但層群および第四紀の火山岩類と段丘堆積物, 沖積層が分布する(図 1). 市の中心部を南北に流れる円山川を境として, 東部には主に中粒花崗岩からなる宮津花崗岩

が分布し, 西部には主に安山岩から流紋岩質の溶岩・凝灰岩からなる北但層群が分布する. 北但層群は著しく熱水変質や風化を受けており, 軟弱な岩相を示すことが多い. 段丘堆積物は主に円礫層からなり, 各河川に沿って局所的に分布している. 豊岡市の中心部には沖積層が盆地上に分布する. 豊岡市に分布する地質の中では, 北但層群が最も広い範囲を占めている.

3. 災害箇所緊急点検による現地観察結果

平成 16 年 10 月 20 に近畿地方を襲った台風 23 号は, 京都府北部・兵庫県北部をはじめとする全国 30 箇所を過去 25 年間における 24 時間降水量の最大値を更新するほどの豪雨と大風を伴って中部~南西部日本に甚大な土砂災害および洪水災害をもたらした(牛山, 2005). 豊岡市内では増水した円山川の河川堤防が破堤し, 市街地を中心とした盆地部は水浸しとなった. また, 山地部や丘陵地において多数の斜面崩壊, 地すべり, 土石流が発生し, 多数の民家が損害を被った. 豊岡市を含む但馬地方において発生した土砂災害は数百箇所に達した.

豊岡市における台風 23 号災害箇所緊急点検が行なわれた期間は, 災害発生後 5 日経過した 10 月 25 日から一週間程であった. 調査の目的は各崩壊箇所の規模や斜面の現況を把握し, 緊急に対策を要する地域を抽出してゆくことであった. 豊岡市内で発生した土砂災害のうち人的被害に直結する可能性のあるものを中心に延べ 72 箇所の緊急点検を行なった(表 1). 個々の災害現場ではスケッチと現況写真の撮影, 災害の規模を示すべく崩壊地の高さや幅, 崩壊土砂の到達距離, 地形および地質の状況, 被災家屋および 2 次災害対象家屋の有無などを調査して回ったが, 緊急に調査すべき崩壊箇所が多数存在し, 個々の崩壊地での調査時間に限りがあったためデータの内容にむらが生じてしまった. 各崩壊箇所の地質の情報について, 現地での緊急点検において確認できなかったものは, 点検後に記録写真を参考にして既存の地質図に照らし合わせてデータとして加えた.

土砂災害は谷部などの集水地形, 尾根部などの非集水地形を問わず認められた(図 2A). 現場で観察した土砂災害の形態は, 表土が剥がれ落ちた表層崩壊や比較的深い崩壊深をもつ地すべりなどの斜面崩壊, 溪流から放出された土石流などであった. またこれらの形態が組み合わさった土砂災害も認められた. その他, 変位過程にある地すべり地塊の末端部で発生した表層崩壊, 溪流側斜面の表層崩壊から土石流へ移行したもの, 地すべりから土石流へ変化したものなど多種多様であった. 調査を行なった災害箇所に分布する地質は, 新第三紀中新世の北但層群が全体の 65%を占め, 次いで古第三紀の宮津花崗岩が 12.5%, 崖錐堆積物が同じく 12.5%, そして扇状地堆積物が 10%であった(図 2B).

豊岡市東部に分布する花崗岩類分布域では急傾斜地の表層崩壊が圧倒的に多かった. 花崗岩類分布域で発生した土砂災害現場では, 崩壊後露頭になった風化程度の低い花崗

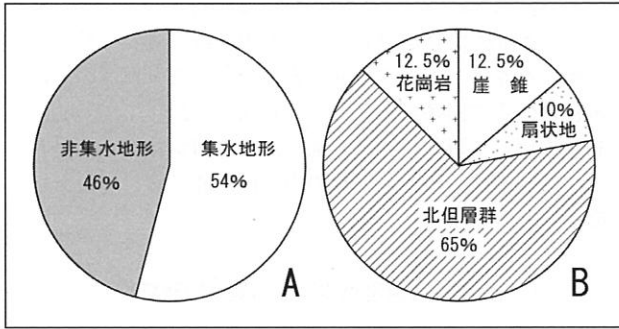


図 2. 地形区分および分布地質ごとの土砂災害の発生頻度. A: 非集水地形および集水地形の違いによる土砂災害の発生頻度には差が見られない. B: 北但層群が全体の約 65% を占め, 花崗岩 12.5%, 崖錐 12.5%, 扇状地 10% であった.

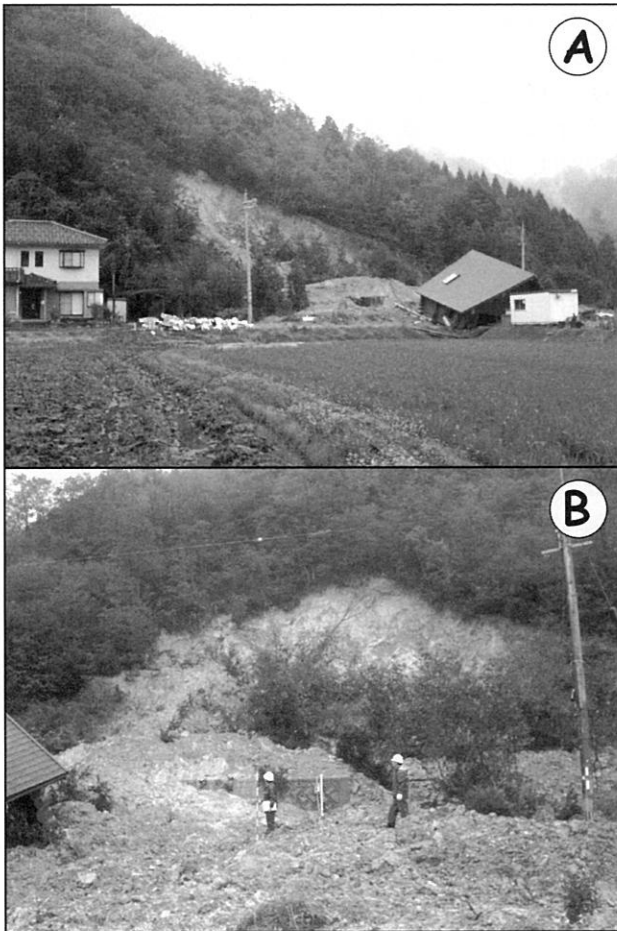


図 3. 斜面崩壊箇所の例 (NW-15 地点). A: 崩壊地の全景. B: 崩壊地内部の状況. 崩壊地は非集水地形にあり, 北但層群の流紋岩質凝灰岩が分布する. 崩壊斜面の幅は 38m で, 崩壊高 (H) は 15m, 崩土到達距離 (L) は 70m に達する. 大量の崩壊土砂によって民家が押し流されている. 崩壊土砂は変質の著しい粘土分に富んでおり, 崩壊跡地の下部からは多量の湧水が認められた. 崩壊前の基礎調査では, 非集水地形であったにもかかわらず切土法面から地下水の浸み出しが確認されていた.

岩体と, マサおよび風化残留礫で構成された砂礫に富む移動土砂が特徴的に認められる.

豊岡市の西部から北部にかけて広く分布する北但層群では表層崩壊のほか地すべり, 土石流とそれらの複合した土砂災害が多数認められ, 変化に富んだ崩壊形態が存在する. 崩壊現場で認められた北但層群は風化・変質が著しく, 崩壊土砂は粘土成分に富んでおり, 水分を多量に保持している状態のものが多かった. 他の地質と比べて流動性に富む崩壊土砂を発生させやすいのが北但層群の崩壊の特徴である. 箇所番号 NW-15 の被災地 (図 3) では, 比較的規模の大きな崩壊 (地すべり) が発生した. 民家が基礎ごと崩壊土砂によって約 30m も押し流されている. 崩壊跡地の下部では多量の地下水が湧出し, 崩壊土砂は変質の著しい粘土分に富んだ流紋岩質凝灰岩であった. この箇所は崩壊以前に基礎調査を行なった箇所であり, 非集水地形であったにもかかわらず切土法面から水が浸み出していた現場であった.

扇状地堆積物の崩壊現場は民家裏の畑地や墓地などに多かった. 緩やかに傾斜した扇状地地形は古くから水田や畑, 宅地に利用されている. 古い宅地などの裏には高さ 5m 以下の低い切土があり, 石積で保護されているか植生があるくらいで殆ど未対策と言っても良い. 崩壊高は 5m 以下ではあるものの, 切土により民家裏と斜面までの距離が近接しているため, 小規模ながら一度崩壊すると屋内にまで土砂が流入するなど, 損壊を被った民家が認められた. 台風 23 号の襲来前に行なった基礎調査では, こういった扇状地堆積物の分布する地域が調査対象斜面として抽出されているケースは少なく, 今後の課題として提起されるべきであろう.

崖錐堆積物に発生した崩壊も, 扇状地堆積物でのケースと同様に民家裏の小規模な切土法面で認められることが多い. しかし, 溪流上流部などに堆積していた崖錐堆積物が崩壊を起こし, 溪流部に供給された土砂が土石流となって流下した箇所もある (箇所番号 NE-6). 崖錐堆積物起源の崩壊土砂は粘性土を比較的多く含んだ礫混じり砂であることが多い.

4. 崩壊高と崩土到達距離

崩壊斜面において, 崩壊頭部から崩土到達末端までの高さを崩壊高 (H) と呼び, 同じくその延長を崩土到達距離 (L) と呼んでいる (福田ほか, 2005). Scheidegger (1973) は, 崩壊高/崩土到達距離 (H/L) が斜面と移動物質との間の動摩擦係数に等しくなることを示し, その係数を平均摩擦係数と定義した. この H/L は斜面崩壊のみならず, 火山学において火砕流や火砕サージなど火砕物重力流の流動モデルを議論する際にも頻繁に使われる指標である. また, 福田ほか (2005) は, 過去の崩壊事例から崩壊高 (H) と崩土到達距離 (L) を統計解析し, 将来発生する斜面崩壊の崩土到達距離の予測手法を検討した.

豊岡市において発生した土砂災害について, その崩壊の特徴を把握するために, 個々の崩壊斜面における崩壊高

(H) と崩土到達距離 (L) を抽出し, 平均摩擦係数 (H/L) を求めた. なお, 現地緊急点検の際に崩壊高 (H) や崩土到達距離 (L) を測定している箇所もあるが, そうでない箇所に関しては地形図上に示された崩壊地点と被災範囲やスケッチ, および状況写真から可能な限りそれらを読み取れることを試みた. その結果, 緊急点検を行なった 72 箇所のうち, 43 箇所について平均摩擦係数 (H/L) を地形・地質ごとに割り出すことができた. ただし, 今回の崩壊事例においては, 崩壊土砂が斜面下部に設置されたコンクリート擁壁やストーンガードあるいは民家などで堰止められているものもあるため, 今回示した平均摩擦係数 (H/L) によって将来発生する斜面崩壊の崩土到達距離を厳密に予測することは難しい.

図 4 は, 豊岡市において発生した斜面崩壊の崩壊高 (H) と崩土到達距離 (L) を集水地形と非集水地形に分けてプロットしたものである. 図 4A には, 表層崩壊, 地すべり, 土石流を含めた全ての土砂災害の崩壊高 (H) と崩土到達距離 (L) をプロットし, 図 4B には溪流部を除いた, つまり土石流を除いた土砂災害の崩壊高 (H) と崩土到達距離 (L) をプロットした. 全ての土砂災害を対象とした場合, 集水地形に溪流を含めているため, 土石流による土砂の到達距離が反映され, 集水地形における崩壊土砂の到達距離が大きく示されている (図 4A). 一方, 土石流を除いた土砂災害を対象とした場合は, 急傾斜地における集水地形と非集水地形の間に崩土到達距離の顕著な違いは認められない.

図 5A は表層崩壊, 地すべり, 土石流を含めた土砂災害の崩壊高 (H) と崩土到達距離 (L) を地質別にプロットしたものである. 北但層群が崩壊源となる場合に, 崩壊土砂の到達距離が花崗岩類の場合に比べて大きく, 北但層群の崩壊高が花崗岩類やその他の地質の崩壊高と同じでも, 土砂の到達距離は大きくなる傾向がある.

次に, 図 5B は土石流を除いた場合の斜面崩壊について地質ごとに崩壊高 (H) と崩土到達距離 (L) プロットしたものである. 通常の斜面崩壊の場合でも北但層群で斜面崩壊が起こった場合, 他の地質に比べてより遠距離まで崩壊土砂が到達していることがわかる. 北但層群の土石流では最大 600m, 斜面崩壊でも給源から 70m 移動している. 特に北但層群で発生する斜面崩壊の崩壊高が 10m よりも高くなると, 崩壊土砂到達距離が極端に伸びる傾向がある. 北但層群で崩壊が起こった場合の平均摩擦係数 (H/L) は 0.3-1.3 (平均値 0.6) となり, 花崗岩類由来の崩壊土砂がもつ平均摩擦係数 (0.4-1.6, 平均 0.8) よりも低いことがわかる. 扇状地堆積物や崖錐堆積物などの崩壊規模は小さく, 崩壊土砂の流動性を示す平均摩擦係数 (H/L) も 0.5~1.1 で平均 0.9 程度である.

5. 結論とまとめ

集水地形あるいは非集水地形での崩壊土砂到達距離は, 集水地形に溪流部を含めると集水地形の場合の崩壊土砂到達距離が大きくなる. 崩壊土砂と多量の雨水が混合し, 内

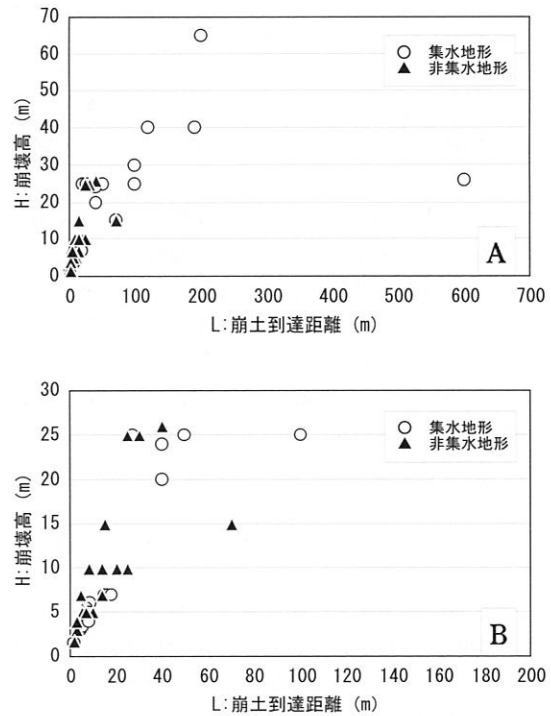


図 4. 集水および非集水地形における土砂災害の崩壊高 (H) と崩土到達距離 (L) の関係. A : 土砂災害の全てのデータ. B : 土石流を除いた土砂災害のデータ.

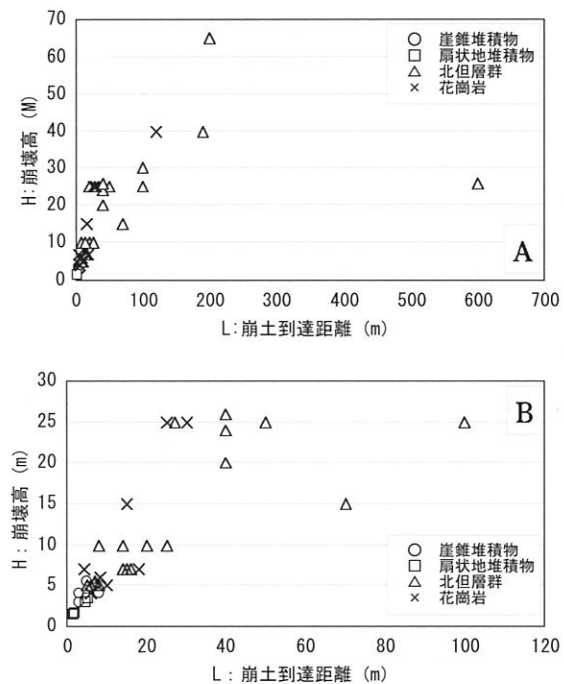


図 5. 地質ごとの土砂災害の崩壊高 (H) と崩土到達距離 (L) の関係. A : 土砂災害の全てのデータ. B : 土石流を除いた土砂災害のデータ.

部摩擦角が小さくなることで土石流のような流体がより遠くに運ばれやすくなることを意味している。溪流部を除いた場合、集水地形および非集水地形で発生する斜面崩壊による土砂の運搬距離に有意な差は無く、通常の急傾斜地において斜面の地形はさほど崩壊土砂の到達距離には影響を与えないと考えられる。

一方、地質の異なる場合、崩壊高と崩壊土砂到達距離の関係に大きな違いが現れた。中でも北但層群の場合では、土石流でも斜面崩壊の場合でも他の地質と比べて崩壊土砂の移動距離が大きくなり、斜面を移動する崩壊土砂の平均摩擦係数 (H/L) が小さくなる傾向がある。北但層群の分布域における土砂災害は、崩壊高の 2 倍以上の距離を崩壊土砂が移動する場合があり、土砂災害防止法に基づく急傾斜地崩壊の危険区域の設定値 (崖下は高さの 2 倍か 50m 以内までの範囲) を上回っているものもあった。北但層群は熱水変質を著しく受けた凝灰岩である場合が多く、風化した花崗岩が砂分を主体としているのに対して粘土分に富んでいる。また花崗岩類などに比べると、表層の風化だけでなく岩盤の深度まで軟化しており、台風 23 号の豪雨のような大きなイベントによって多量の水が供給されると比較的規模の大きな崩壊が生じやすくなると考えられる。崩壊の規模が大きくなることで崩壊土砂量が増加し、慣性力によって崩壊土砂の移動距離が伸びやすくなると考えられる。また、変質した北但層群に含まれる粘土成分に多量の水が加わることで崩壊土砂の流動性を高め、崩壊土砂の到達距

離に影響を与えているとも考えられる。

土砂災害の発生は降雨、地形、地質の条件に加えて地下水の挙動も重要な発生要因となり、それらが複雑に絡み合うことも発生の予測を困難にする原因である。急傾斜地が発達し、斜面崩壊の起因となる台風や地震の多発する日本の地質技術者にとって、斜面崩壊および土石流の発生と分布する地質との関連性に重点を置き、土砂災害の発生メカニズムを考察することは、従来の対策工法の選定をはじめとするハード面による防災への取り組みにとどまらず、精度の高いハザードマップ作成などのソフト面の充実による防災への取り組みにもつながると考える。

文 献

- 兵庫県 (1996) 兵庫の地質. 兵庫県土木地質図編纂委員会 (編), 10 万分の 1 兵庫県地質図及び解説書・地質編, 361p.
- 福田徹也・佐々木靖人・脇坂安彦 (2005) 表層崩壊による崩土到達範囲確率予測手法の開発. 応用地質, **46**, 265-279.
- 国土交通省 (2001) 土砂災害防止法解説. 国土交通省河川局砂防部監修, 大成出版社, 139p.
- Schidegger, A.E. (1973) On the prediction of the reach and velocity of Catastrophic landslides. *Rock Mechanics*, **5**, 231-236.
- 牛山素行 (2005) 2004 年 10 月 20~21 日の台風 23 号による豪雨災害の特徴. 自然災害科学, **22**, 373-385.