

近年の強雨による斜面崩壊の発生メカニズムに関する一考察

A Study of Slope Failures due to Heavy Rainfall

鏡 原 聖 史 植 田 允 教 沖 村 孝
Satoshi Kagamihara Mitsunori Ueda Takashi Okimura

1. はじめに

近年、豪雨による自然斜面の崩壊を伴う土砂災害が数多く発生している。例えば、2011（平成 23）年の台風 12 号の豪雨による紀伊半島での大規模な土砂災害¹⁾、2012（平成 24）年 7 月には九州北部地方²⁾、2013（平成 25）年には台風 26 号の豪雨による伊豆大島³⁾、さらに 2014（平成 26）年 8 月広島市を襲った豪雨⁴⁾、など、毎年全国各地で土砂災害が多数箇所発生している。これらの近年の土砂災害は、2011 年を除いて、時間雨量 80mm/h を超える強雨に起因する場合が多い。

そこで、本報告は、近年の土砂災害の概要と降雨特性について述べるとともに、2014（平成 26）年 8 月に北六甲で短時間降雨強度の大きな豪雨により発生した崩壊地の発生場の条件を地形解析により整理して、短時間雨量の大きい降雨で発生した崩壊メカニズムを推定し、その特徴を述べる。

2. 近年の土砂災害の概要

近年の降雨特性、特に豪雨特性は、1) 80mm/h を超える非常に大きな降雨強度が、2) 2～4 時間の短時間の継続時間で、3) 空間的には局所的に出現する傾向が強く、土砂災害の原因となっていることが大きな特徴である。この特徴は、過去の集中豪雨が、50mm/h 前後の降雨強度が 10 時間前後で広域に降り続く現象とは大きく異なっている。ここでは、近年の降雨特性と土砂災害の概要について述べるとともに過去の降雨との比較を行う。

2. 1 近年の土砂災害と降雨特性

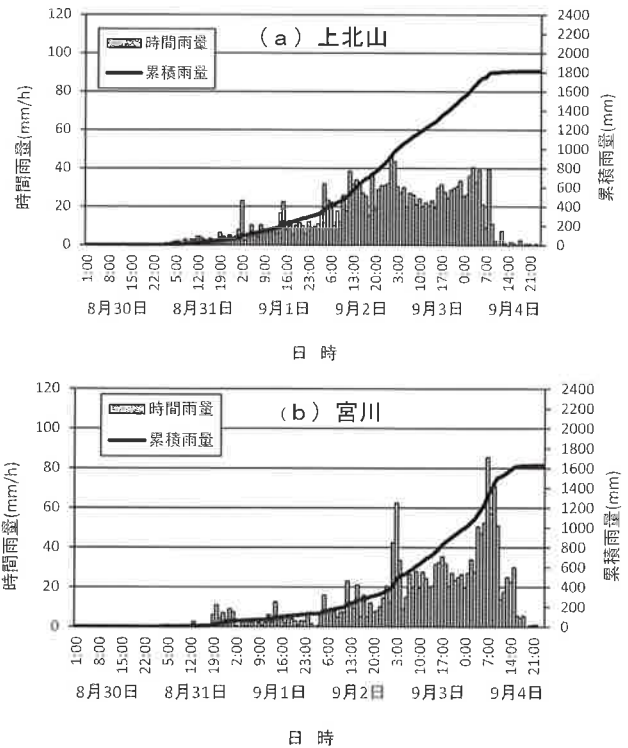
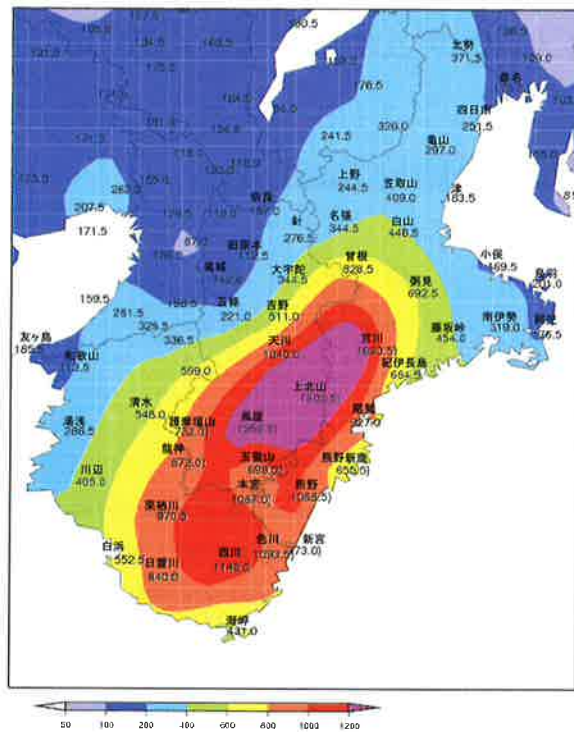
（1）2011（平成 23）年紀伊半島大水害¹⁾

8 月 30 日から 9 月 4 日にかけて、台風 12 号の停滞に伴って激しい雨が続き、奈良、和歌山、三重を中心とする紀伊半島全体に大きな被害をもたらした。3 県で死者 72 名、行方不明者：16 名、全壊家屋 369 棟、半壊家屋 2,901 棟、浸水家屋（床上、床下含む）7,531 棟という甚大な被害であった。

この台風による降雨の特徴として、気象庁の報告によると紀伊半島では、図-2. 1 に示すように 8 月 30 日 18 時からの総雨量は広い範囲で 1,000mm を超え、奈良県上北山村にあるアメダスでは 72 時間雨量が 1,652.5mm とこれまでの国内の最大観測記録である 1,322mm（宮崎県神門（みかど））を大幅に上回り、総雨量は 1,808.5mm に達し、一部の地域では解析雨量で 2,000mm を超えるなど、記録的な大雨となった。また、この図から奈良県南部、和歌山県南部および三重県南部の山間部で記録的な期間雨量があったことがわかる。

図-2. 2 に示すように、雨量観測所の時間雨量に着目すると上北山（図-2. 2（a））は時間雨量 20～30mm の降雨が継続して 1,800mm を記録していることが特徴である。一方、宮川（図-2. 2（b））では、時間雨量 20～30mm の雨量が継続し、かつ時間雨量 70～80mm と強い降雨を記録していることが特徴である。

この降雨によって紀伊半島では、大規模な斜面崩壊、その崩壊土砂による天然ダムの形成、土石流、洪水などの災害が広域で発生したのが特徴である。



上北山、宮川は9月4日18時から欠測

図-2. 1 平成23年8月30日18時～9月4日24時のアメダス期間雨量¹⁾

図-2. 2 奈良県南部と三重県の時間雨量推移¹⁾

(2) 2012(平成24)年北九州北部豪雨災害²⁾

7月1日から7日、ならびに11日～21日に九州北部を2度にわたり襲った梅雨前線性の豪雨は、特に後者におい

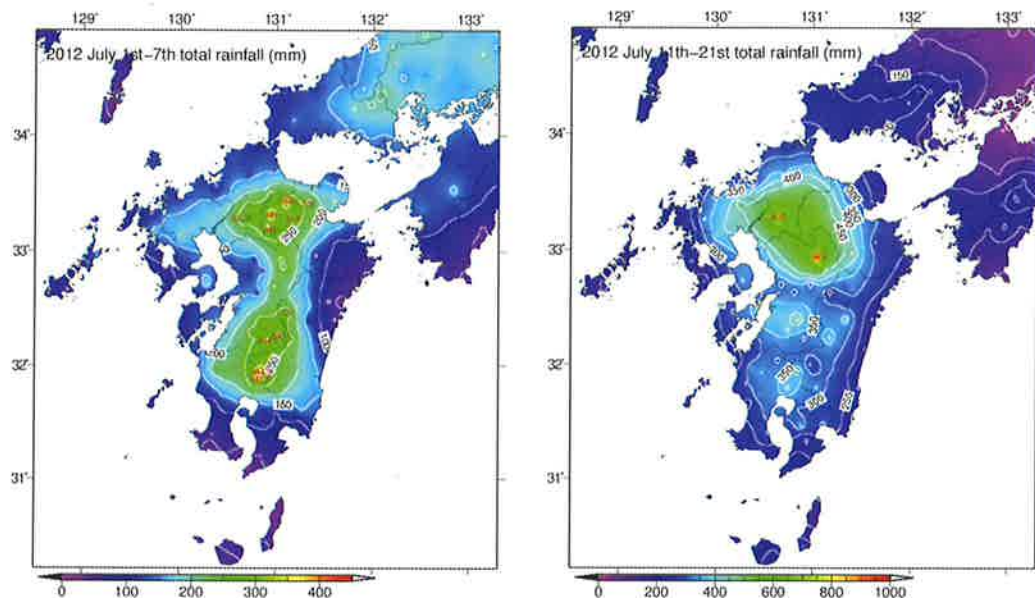


図-2. 3 2012年7月1～7日、11日～21日の累積雨量分布²⁾

て気象庁より国内で初めて「これまで経験したことのないような大雨」と表現され、甚大な河川災害を熊本・大分・福岡・佐賀県域を中心に九州北部にもたらした。一方で土砂災害は、福岡、熊本、大分で土石流 112 箇所、地すべり 13 箇所、がけ崩れ 58 箇所が発生した。

この豪雨により福岡、熊本、大分の 3 県で死者 31 名、行方不明者 3 名、住宅被害として全壊 362 棟、半壊 1,501 棟、浸水家屋（床上、床下含む）10,955 棟という甚大な被害があった。

この降雨の分布状況を図-2. 3に示す。この図に示すように 2012 年 7 月 1 日~7 日に九州南部と北部に期間雨量 300mm 程度のピークのある降雨を受けたのち、7 月 11 日~21 日にかけて九州北部を中心に 800mm を超える期間降雨を記録したことである。この降雨は、過去観測した最大時間雨量や日雨量を更新するところもあり、記録的な豪雨となった。また図-2. 4に阿蘇市乙姫地区の時間雨量と累積雨量を示した。この図に示すとおり 80mm/h の降雨が 4 時間継続していることが大きな特徴である。

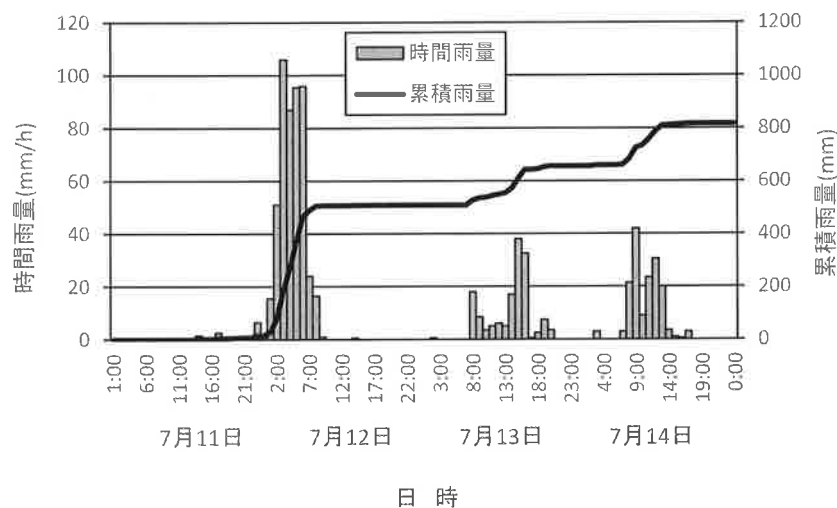


図-2. 4 九州北部豪雨による阿蘇市乙姫地区の雨量²⁾

(3) 2013 (平成 25) 年伊豆大島豪雨災害³⁾

10 月 16 日未明の台風 26 号による降雨は、東京都大島町で最大時間雨量 118.5 mm、24 時間雨量 824.0 mm を記録した。この豪雨による表層崩壊、泥流によって、死者 36 名、行方不明 3 名（平成 26 年 1 月 15 日現在）、全壊 71 棟、半壊 25 棟、一部損壊 92 棟の住宅被害が発生した。その被害は、大島町役場のある元町地区に集中していた。

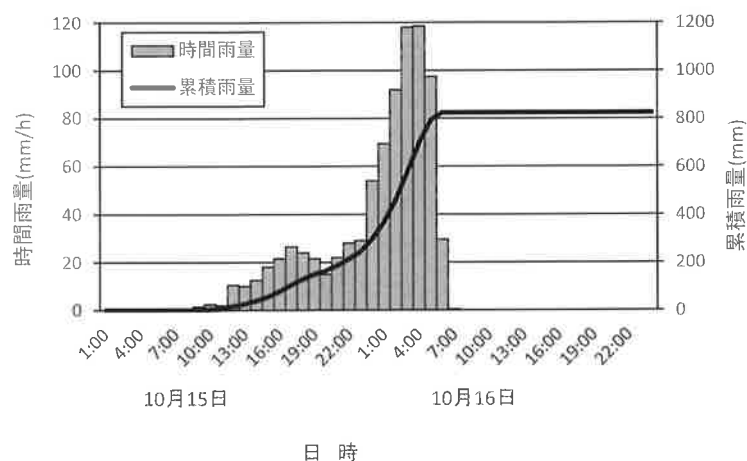


図-2. 5 伊豆大島大島地区で観測された雨量³⁾

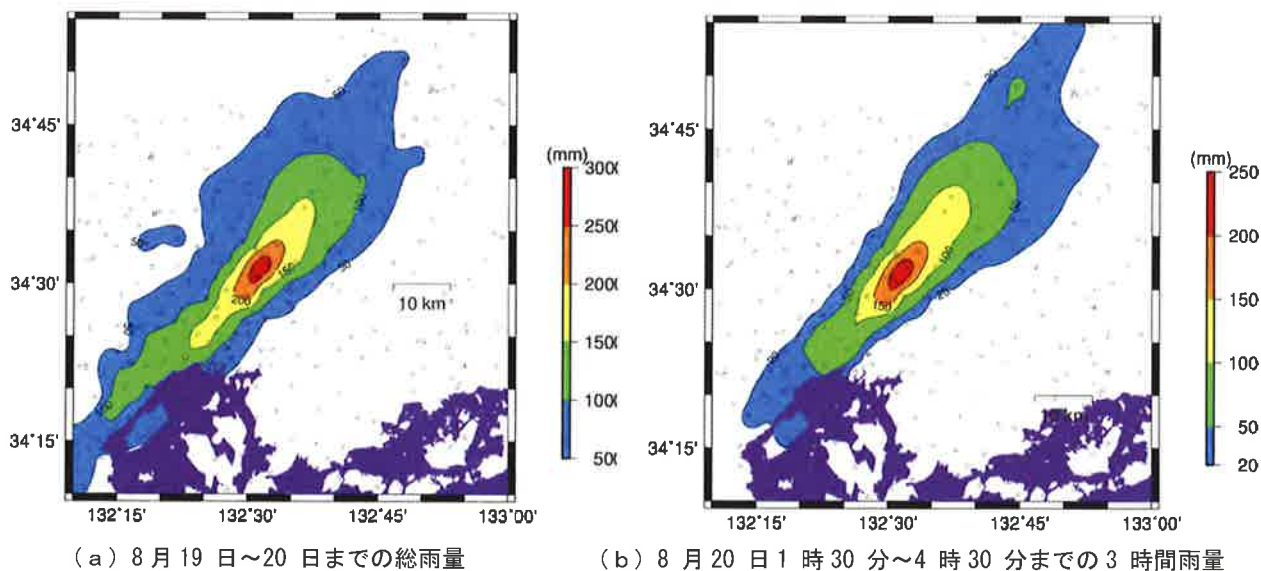
この豪雨は、観測期間が 10 年以上の観測地点のうち、最大 1 時間雨量で 2 地点、最大 3 時間雨量で 9 地点、最大 24 時間雨量で 14 地点が観測開始以来の観測史上 1 位を更新した。

図－2．5 に東京都大島町大島で観測された降雨記録を示した。この図より、120mm/h に近い時間降雨量が 2 時間も継続しており、80mm/h 以上では 4 時間継続していることがわかる。

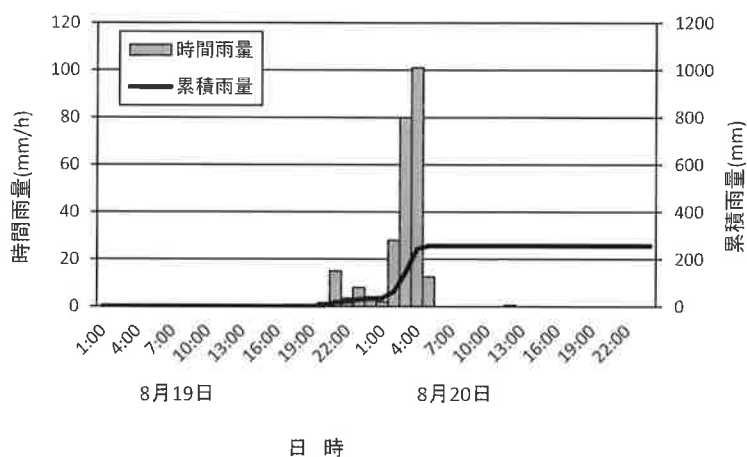
(4) 2014 (平成 26) 年 8 月豪雨災害 (広島) ⁴⁾

平成 26 年、日本には台風 12 号と台風 11 号が相次いで接近するとともに、前線が日本付近に停滞して、暖かく非常に湿った空気の流れ込みが継続した。これらの影響で日本各地で大雨が観測され、平成 26 年 7 月 30 日から 8 月 26 日までに各地で発生した豪雨は、気象庁により平成 26 年 8 月豪雨と命名された。

広島県広島市では、8 月 19 日夜から 20 日明け方にかけて猛烈な雨となり、1 時間雨量、3 時間雨量、24 時間雨量の値が観測史上 1 位の値を更新した。図－2．6 (a) に 8 月 19 日から 20 日の広島県内の雨量計で観測された総雨量の分布、図－2．6 (b) に 8 月 20 日 1 時 30 分から 4 時 30 分までの 3 時間雨量分布を示した。この 2 つの図から分かるように降雨は、南西から北東にかけて長軸幅約 60km、短軸幅約 10km の細長い帯に集中している。さらに、三入観測所の 8 月 19 日から 20 日までの雨量観測記録を図－2．7 に示した。この図から時間雨量 80 から 100mm/h が 2 時間も継続していることがわかる。



図－2．6 広島県内の雨量計で観測された雨量の分布 ⁴⁾



図－2．7 三入地区で観測された雨量 ⁴⁾

この豪雨によって、広島市安佐北区・安佐南区では、数多くの土石流を引き起こし、死者 74 名に及び、全壊 133 棟、半壊 122 棟、一部損壊 175 棟発生する災害がもたらされた。

(5) 2014 (平成 26) 年 8 月豪雨災害 (神戸)

台風 11 号は、神戸地方気象台⁵⁾によると 7 月 29 日にマリアナ諸島近海で発生した台風 11 号は、フィリピンの東海上を発達しながら強い勢力となって日本の南海上をゆっくりと北上し、8 月 10 日 6 時過ぎに高知県安芸市付近に上陸、その後四国地方をゆっくり北北東に進み、10 時過ぎに兵庫県赤穂市付近に再上陸、近畿地方を北北東進して 14 時前に日本海に抜けた。降り始めの 8 月 8 日 11 時から 11 日 2 時までの総雨量は、アメダスの洲本で 350.5mm、神戸空港で 309.5mm、西宮で 306.0mm と各地で大雨となった。図-2. 8 は、この台風による 8 月 8 日 11 時から 11 日 2 時までのアメダス期間雨量を示している。この図に示すように兵庫県、大阪府、京都府では、洲本、神戸空港、西宮、能勢観測所で降雨量 300mm 以上を観測し、期間雨量が多い範囲が淡路島から京都府中部にかけて分布していることがわかる。さらに、この台風による最大瞬間風速は、10 日 11 時 11 分にアメダスの神戸空港で南の風 40.6m/s を観測するなど各地で暴風が吹いたことも特徴である。

神戸市内で最大雨量を観測した有馬川観測所⁶⁾の 8 月 8 日から 8 月 10 日までの時間雨量と累積雨量の関係を図-2. 9 に示した。この図から最大時間雨量 88mm、累積雨量 526mm を記録していることがわかる。また、この台風による降雨は、8 月 8 日 15:00 から 9 日 13:00 までの降雨と 8 月 9 日 21:00 から 10 日 16:00 までの降雨の 2 つに別れている。前半の降雨は平均時間雨量 10.0mm、最大時間雨量 24mm が 23 時間継続し、累積雨量 230mm であった。つぎに 7 時間の無降雨の後に平均時間雨量 14.8mm、最大時間雨量 88mm、累積雨量 296mm の降雨が 20 時間継続している。このことから時間雨量も小さく、時間変化が少ない前期降雨を受けた後、急激に時間降雨が変化する後期降雨が降ったことが特徴である。この豪雨によって、六甲山系では崩壊や土石流が発生したものの、砂防堰堤などのハード対策の効果もあり、死者ゼロであった。

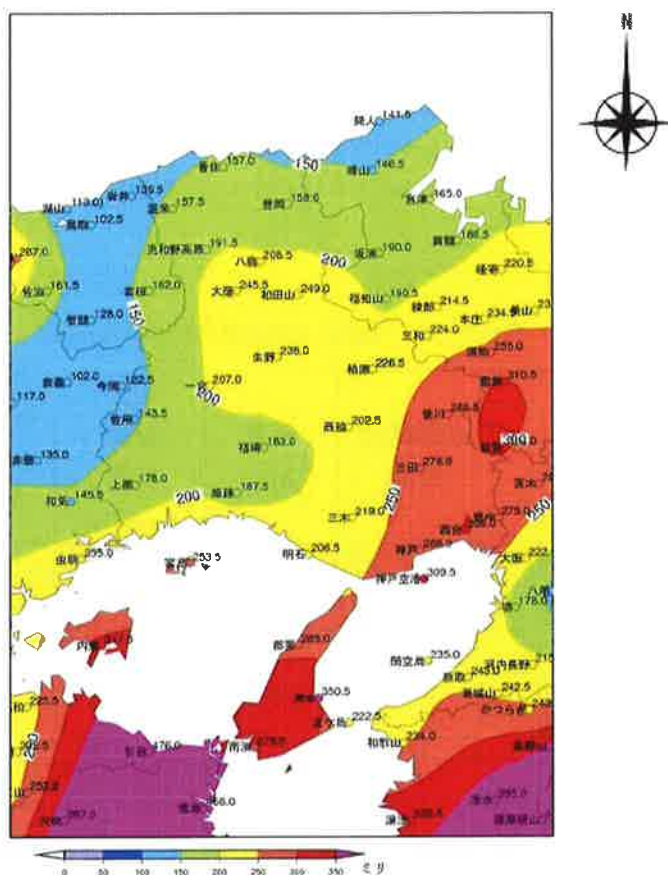
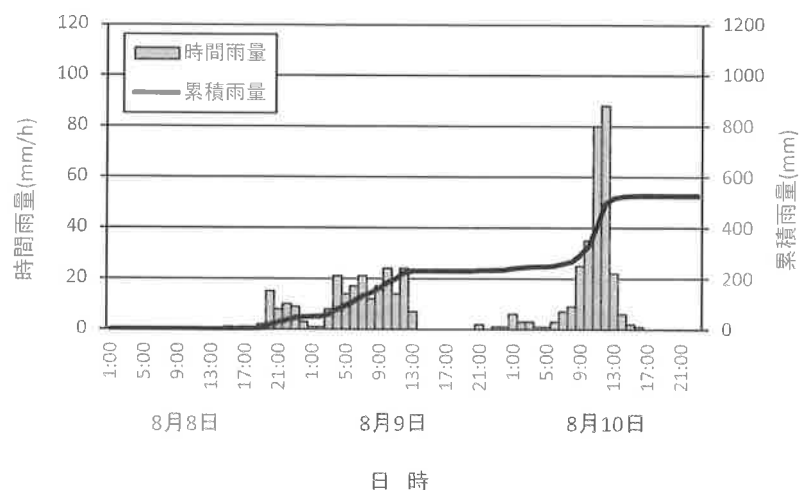


図-2. 8 8 月 8 日 11 時～11 日 2 時までの期間雨量⁵⁾

図－２．９ 有馬川地区で観測された雨量⁶⁾

２．２ 過去と近年の土砂災害と降雨特性の比較

表－２．１は、過去神戸市で発生した土砂災害時の降雨の特徴と 2011（平成 23）年以降に全国で発生した大きな土砂災害時の降雨の特徴を整理したものである。この表より、神戸市内で起きた 1938（昭和 13）年や 1967（昭和 42）年の豪雨に比して、近年の豪雨は 2011（平成 23）年紀伊半島大水害（上北山、宮川）を除き、時間雨量 80mm/h 以上を 2 から 4 時間うけて崩壊、土石流が発生していることがわかる。このことから、従来のように雨水は自然斜面表土層に浸透し、地下水面を形成し、この地下水面の上昇により斜面崩壊が発生するというメカニズムが、短時間雨量が大きい集中豪雨が自然斜面に降った場合でも起こりうるかどうか、あるいは全部浸透することなく、一部は表流水となって流下し、この表流水が浸食の原因となって崩壊するメカニズムも出現するかどうか、今後の調査、研究が必要になってきている。

そこで、2014（平成 26）年台風 11 号による神戸市域の崩壊に着目して、崩壊発生箇所の地形立地条件を整理することによって、短時間雨量の大きい豪雨時の崩壊場所の特徴を明らかにするとともに、その崩壊のメカニズムについて検討を行うこととした。

表－２．１ 過去と近年の豪雨における比較

発生年	場所	継続時間 (時間)	雨量 (mm)	最大 時間 雨量 (mm/h)	80mm/h 以上 の雨量計測 時間(時間)	備 考 (観測所)
1938(昭和 13)年	神戸市	11	246	60	0	神戸
1967(昭和 42)年	神戸市	8	270	76	0	神戸
2011(平成 23)年	上北山村	120	1812.5	46	0	上北山
2011(平成 23)年	伊勢市	117	1628.5	85.5	1	宮川
2012(平成 24)年	阿蘇市	76	816.5	106	4	阿蘇乙姫
2013(平成 25)年	大島町	23	824	118.5	4	大島
2014(平成 26)年	広島市	20	257	101	2	三入
2014(平成 26)年	神戸市	50	526	88	2	有馬川

台風 11 号の豪雨により発生した崩壊と発生箇所の地形的特徴の関係を求めるために、ArcGIS 10.2.2 を用いた。

解析に用いた崩壊地は、六甲砂防事務所発表の崩壊発生箇所数 269 箇所の内、崩壊前後の航空レーザ測量データが整っている神戸市内で発生した崩壊地 154 箇所を対象とした。つぎに、崩壊前の 2011（平成 23）年に実施された航空レーザ測量データを ArcGIS の数値地図データ変換ツールでポイントデータへ変換し、解像度 1m 標高モデルを作成した。その後、既往研究^{8, 9)}で用いられている解像度 10m 標高モデルを作成した。

1) 崩壊発生位置の定義

崩壊発生箇所の特徴を調べる上で崩壊発生位置の定義を行う必要がある。降雨による崩壊の場合は、地下水位の上昇によって斜面下端から土砂移動が発生するケースが多く、崩壊斜面の下端を見つけることが重要である。しかしながら、空中写真判読ではその場所を特定することが難しく、過去から崩壊発生箇所の滑落崖に着目をして地形解析を行っている例^{10, 11)}が多いのが実態である。そこで、本研究においても同様に、図-3. 2 に示すように崩壊地の滑落崖で最も標高が高い箇所のポイントを崩壊発生箇所として定義することとした。

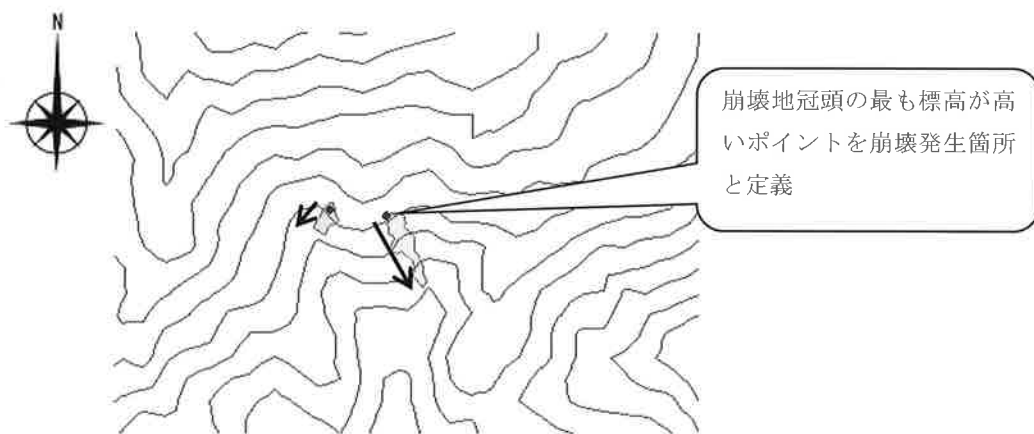


図-3. 2 崩壊発生箇所の定義

2) 斜面傾斜角

斜面傾斜角は、ArcGIS の Spatial Analyst ツールのラスターサーフェス機能¹²⁾を用いて算出した。具体的には、図-3. 3 に示す 10m×10m の標高モデルの中央値を用いて式 (3. 1) により算出した。得られた傾斜角を先に定義した崩壊地ポイントデータの位置情報を利用して、崩壊地が位置するセルの傾斜角とした。結果の整理は、崩壊発生箇所の傾斜角を 5 度毎で分類し、傾斜角と崩壊地の度数分布を求めた。

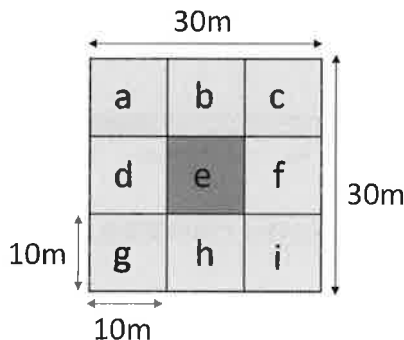


図-3. 3 崩壊地ポイントとセルの関係^{12)に一部加筆)}

$$Slope_{degree} = \tan^{-1}\left\{\left(\frac{dz}{dy}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \times \frac{180}{\pi} \quad (3.1)$$

$$\frac{dz}{dx} = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2b + c)}{8x}$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(g + 2h + i) - (a + 2b + c)}{8y}$$

ここで、 $slope_{degrees}$: 斜面傾斜角 (°)

$a \sim g$: セル $a \sim i$ の標高値 (m)

x : x 方向のセルのサイズ (10m)

y : y 方向のセルのサイズ (10m)

3) 傾斜方位

傾斜方位は図-3.3の中央セルから周辺の8つのセルに向かって下りの傾斜角が最大の方角を傾斜方向 *aspect* と定義する。傾斜方向は、0度（真北）～360度（真北）で右回りに式(3.2)により算出される。崩壊発生箇所が位置するセルの傾斜方向を求めた。

$$aspect = \begin{cases} 90 - \theta & (\text{ただし、} \frac{dz}{dx} = 0) \\ 450 - \theta & (\text{ただし、} \theta > 90) \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left\{\left(\frac{dz}{dy}\right) \div \left(-\frac{dz}{dx}\right)\right\} \times \frac{180}{\pi}$$

$$\frac{dz}{dx} = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2b + g)}{8}$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(g + 2h + i) - (a + 2b + c)}{8}$$

ここで、 $aspect$: 傾斜方位

$a \sim i$: セル $a \sim i$ の標高値 (m)

x : x 方向のセルのサイズ (10m)

y : y 方向のセルのサイズ (10m)

4) 曲率

斜面の曲率は、Spatial Analyst ツールのラスタサーフェス機能^{13, 14)}を用いて斜面の縦断面曲率と水平断面曲率を算出した。

曲率は、中央セルと周辺の8つのセルを対象として計算された地表面（4次多項式に近似した曲面）の曲率であり、地表面の2次導関数として算出される。地表面が凸面か凹面かを表している。曲率には、平面曲率と断面曲率の2種類があり、断面曲率は最大傾斜角方向の表面の曲率であり、平面曲率は最大傾斜角方向に対して直角方向の地表面の曲率である。これらは主に、水流や浸食による地形効果を解釈するために使用され、断面曲率は、浸食や堆積につながる流れの加速と減速に影響を与え、一方、平面曲率は、流れの収束と分岐に影響を与える指標といえ、式(3.3)より算出される。

$$PrC = \frac{2(AD^2 + BE^2 + CDE)}{(D^2 + E^2)} \quad (3.3)$$

$$PlC = \frac{-2(AE^2 + BD^2 - CDE)}{(D^2 + E^2)}$$

$$A = \frac{\{(d+f)/2-e\}}{X^2}$$

$$B = \frac{\{(b+h)/2-e\}}{Y^2}$$

$$C = \frac{(-a+c+g-i)}{2X^2 \times 2Y^2}$$

$$D = \frac{(-d+f)}{2X}$$

$$E = \frac{(b-h)}{2Y}$$

ここで、 PrC = 縦断面曲率、 PlC = 水平断面曲率

$a \sim i$: セル $a \sim i$ の標高値 (m)

x : x 方向のセルのサイズ (10m)

y : y 方向のセルのサイズ (10m)

断面曲率の場合、負の値は、地表面がそのセルで上方に凸状（凸型斜面）であることを示し、正の断面曲率は、地表面がそのセルで上方に凹状（凹型斜面）であることを示す。一方、平面曲率の場合、正の値は地表面がそのセルで上方に凸状（尾根型斜面）であることを示し、負の平面曲率は、地表面がそのセルで上方に凹状（谷型斜面）であることを示す。なお、丘陵地における曲率は-0.5~0.5、極端な起伏の持つ地形における曲率は-4~4が使用される場合が多いが、本研究では試行錯誤した結果、-1~1が最も当該箇所の地形を反映していると考えられたため、断面曲率が-1~1を直線型斜面、平面曲率が-1~1を平行型斜面とみなすことにした。

得られた曲率を用いて、9つの斜面の曲率の種類に分類した(図-3.4)。分類した地形的特徴に対して、崩壊発生箇所のポイントデータの頻度分布を求めることで、崩壊発生箇所の地形的特徴を求めた。

意味		最大傾斜の方向（落水線の方向）の変化状態		
分類基準	分類	水平断面形（等高線の平面形）による斜面分類		
		尾根型斜面 (r)	直線斜面 (s)	谷型斜面 (v)
		凸形尾根型斜面 (Xr)	凸形直線斜面 (Xs)	凸形谷型斜面 (Xv)
最大傾斜の大きさ（等高線距離）の変化状態	凸形斜面 (X)			
	等斉斜面 (R)			
	凹形斜面 (V)			
		凹形尾根型斜面 (Vr)	凹形直線斜面 (Vs)	凹形谷型斜面 (Vv)

図-3.4 斜面の凹凸データの分類¹⁵⁾

5) 崩壊と土石流の定義

台風 11 号の豪雨によって神戸市域では崩壊、土石流が 154 箇所が発生している。地形判読結果図では、土石流と判断されるような流動化が確認できる土石流が多く確認できたことから、崩壊と土石流を区分して地形的特徴を整理することとした。土石流と崩壊の区別は、崩壊土砂が長距離流動しているものを土石流、それ以外を崩壊とした。具体的な例を図-3. 5、図-3. 6に示した。図-3. 5は、崩壊土砂が法尻まで流下し、さらに谷底を長距離流動していることから土石流と判断した事例である。一方、図-3. 6は、崩壊土砂が法尻まで流下する程度で長距離流動していないことから崩壊と判断した事例である。

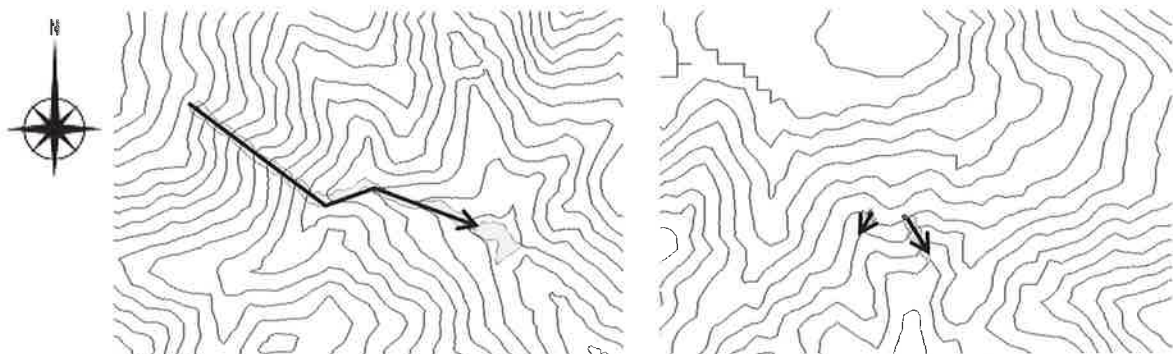


図-3. 5 土石流の事例（コンターは 10m 間隔） 図-3. 6 崩壊の事例（コンターは 10m 間隔）

(2) 崩壊発生箇所と地質の関係

崩壊発生箇所と地質の関係を図-3. 7、図-3. 8に示す。地質図はシームレス地質図（詳細版）¹⁶⁾を用い、おおよその地質と崩壊、土石流発生との関係を調べた。崩壊は丸印（青）、土石流は星印（赤）でそれぞれ示している。この図から六甲山の花崗岩地域（花崗岩、花崗閃緑岩、珧長質深成岩、苦鉄質深成岩類）で崩壊、土石流が集中していることがわかる。花崗岩以外の非アルカリ性珧長火山岩類、堆積岩においても崩壊、土石流が発生しているが、その数は花崗岩地域と比較すると少ない。崩壊発生箇所の詳細な地質やその構造が不明であるため、詳細な考察は出来ないが、花崗岩地域では、花崗岩が風化したマサ土が砂質土の性質を示すことから、崩壊によって流動化しやすく、土石流化したものが多かったものと推察される。一方、その他の地質では、崩壊土砂が細粒分や礫分が多くマサ土ほど流動化しなかったのではないかと考えられる。

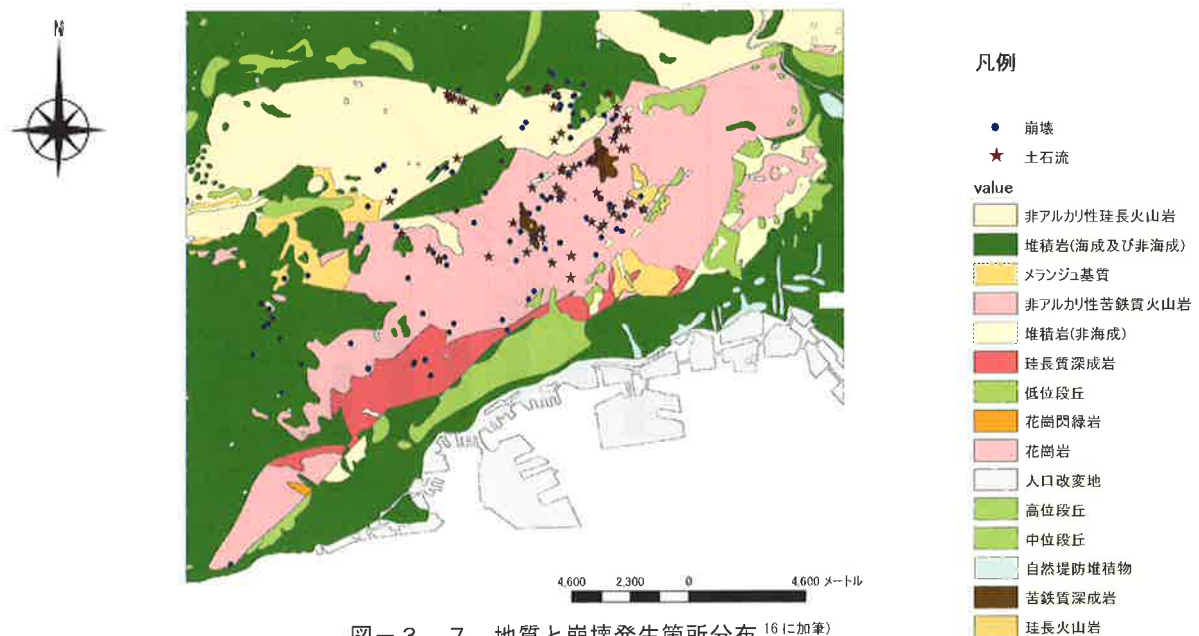


図-3. 7 地質と崩壊発生箇所分布 ^{16)に加筆)}

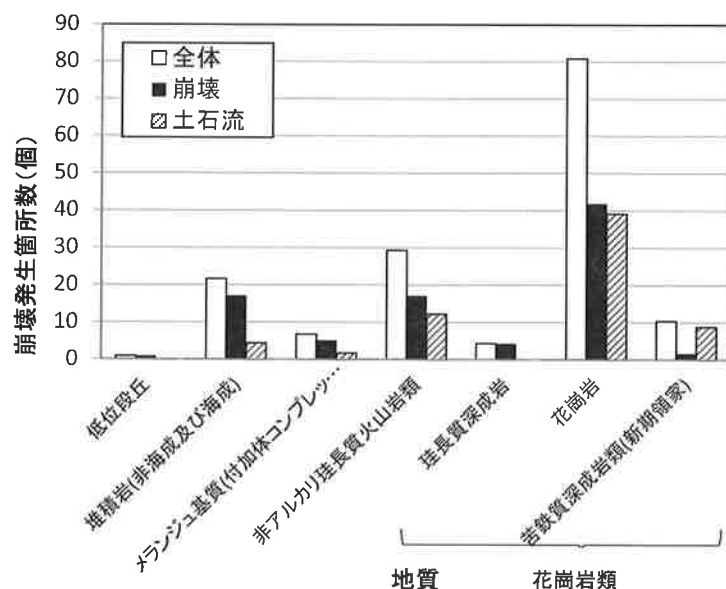


図-3. 8 崩壊発生箇所と地質

(3) 崩壊発生箇所の地形解析結果

崩壊の発生箇所の地形的特徴を調べるために行った地形解析の結果について述べる。

1) 斜面傾斜

台風 11 号により発生した崩壊発生箇所の傾斜角を図-3. 9 に示す。図に示したように全体では、傾斜角 30～45 度で多く発生している。崩壊は、傾斜角 30～35 度で最も多く発生している。一方、土石流は、30～35 度と 40～45 度で多く発生し、25 度以下での発生頻度が小さい特徴がある。このことから、30～35 度で崩壊は多く発生するが、40～45 度で発生した崩壊は、傾斜が急で崩壊時に土石流化しやすかったものと考えられる。

1967 (昭和 42) 年の豪雨によって六甲山系で発生した斜面崩壊は、30～45 度で多く発生しており、45 度を超えるものはほとんどない¹⁷⁾。このことから、過去の豪雨による崩壊と今回発生した崩壊が集中している傾斜角の範囲は一致しているが、今回の崩壊は、45 度以上の急傾斜地での崩壊が認められる点で過去と異なっていると言える。これは、前期降雨を受けた後に短時間雨量が大きい降雨を受けた降雨特性が影響を与えている可能性が示唆される。

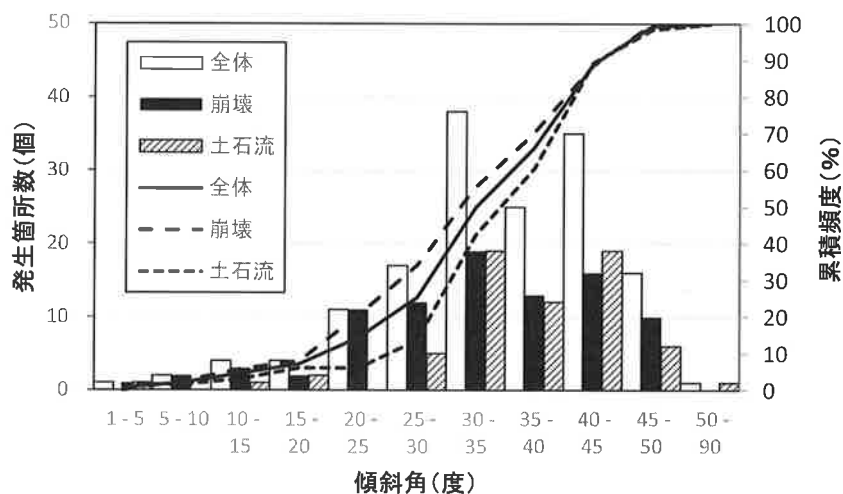


図-3. 9 崩壊発生箇所と傾斜角の関係

2) 斜面崩壊方位

台風 11 号により発生した崩壊発生箇所斜面崩壊方位を図-3. 10 に示す。図に示したように全体では、南西向きに崩壊した斜面が最も多く、南西から南東向きの斜面に多い特徴がある。この特徴は、崩壊、土石流ともに同様である。

アメダス観測所（神戸空港）の風向、風速¹⁸⁾を見ると台風の接近に伴って北東から 10m/s 以上が吹き続き、最大時間雨量観測時刻頃、風向が北東から南に変わり、風速が 20m/s 以上となっている。その後、台風の進行に伴って南から南西方向に風向が変化し、風速が徐々に小さくなっている。

このことから、後期降雨の最大時間雨量観測時刻頃に南から南西向きの斜面に降雨が吹き付けられ、多くの降雨を受けた南向きの斜面で崩壊が多くなったものと考えられる。

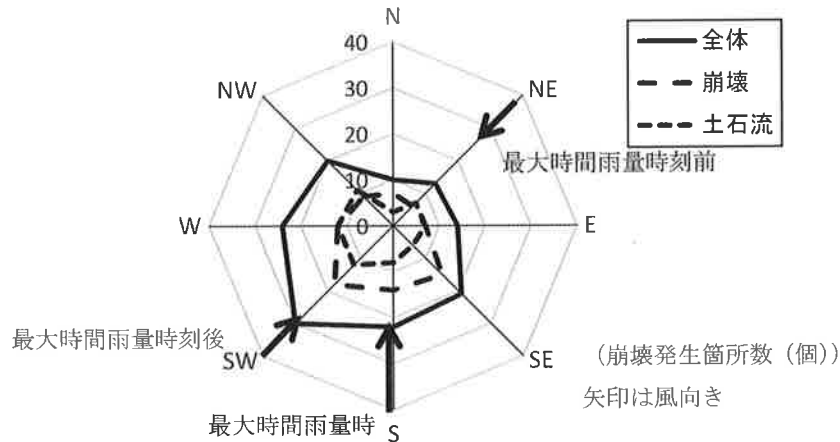


図-3. 10 崩壊発生箇所と方位の関係

3) 地形的特徴

台風 11 号により発生した崩壊発生箇所の地形的特徴を図-3. 11、図-3. 12、図-3. 13 に示す。図-3. 11 に示すように、崩壊地全体では、凹形谷型斜面が最も多く、ついで凸形尾根型斜面が多い。一般的に凹形谷型斜面は集水地形であるため崩壊が多いとされている¹⁹⁾。しかしながら、集水地形でない凸形尾根型斜面で崩壊が発生していることがわかる。個別に見てみると崩壊は、図-3. 12 に示すように凸形尾根型斜面、凹形谷型斜面の順で多い。一方、土石流は、図-3. 13 に示すように凸形尾根型斜面もあるものの、集水性の高い凹形谷型斜面が多いことがわかる。このことから崩壊は、一般的に雨水を集水しやすい凹形谷型斜面と集水性の低い凸形尾根型で多く発生したが、土石流は、より集水性の高い凹形谷型地形で多く発生したと言える。

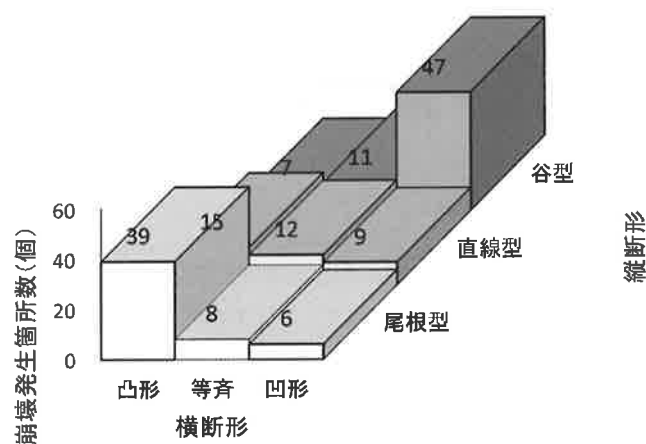


図-3. 11 全体の崩壊発生箇所の地形的特徴

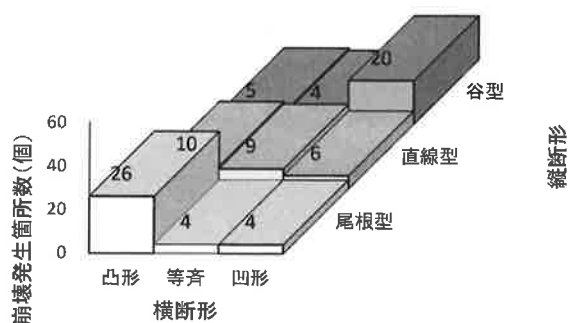


図-3. 12 崩壊発生箇所の地形的特徴

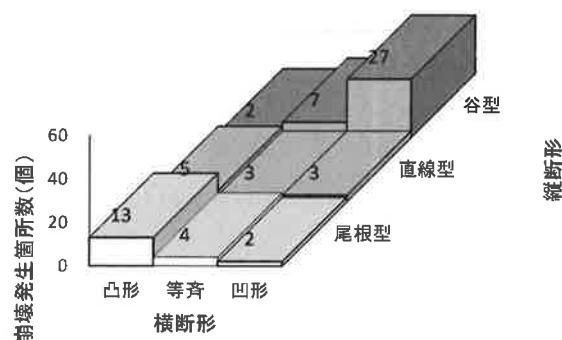


図-3. 13 土石流発生箇所の地形的特徴

つぎに、凸形尾根型斜面、凹形谷型斜面で多くの崩壊と土石流が発生した原因を分析するために崩壊発生箇所の傾斜角に着目して整理した。その結果を図-3. 14に示した。

崩壊は、30～35度の凹形谷型斜面と40～45度の凸形尾根型斜面で多く発生していることがわかる。これは、凸形尾根型斜面より集水性の高い凹形谷型斜面で地表面流や地下水が集まりやすいため、凸形尾根型斜面より緩い斜面で崩壊が多く発生したものと考えられる。一方、土石流は、凸形尾根型斜面、凹形谷型斜面ともに40～45度での発生が多い。このことは、崩壊と比較して急な斜面で発生した崩壊が、流下中に攪乱、流動化して土石流となったためであると考えられる。また、崩壊と同様に30～35度の凹形谷型斜面で土石流の発生が多いのは斜面の集水性に起因していると考えられる。

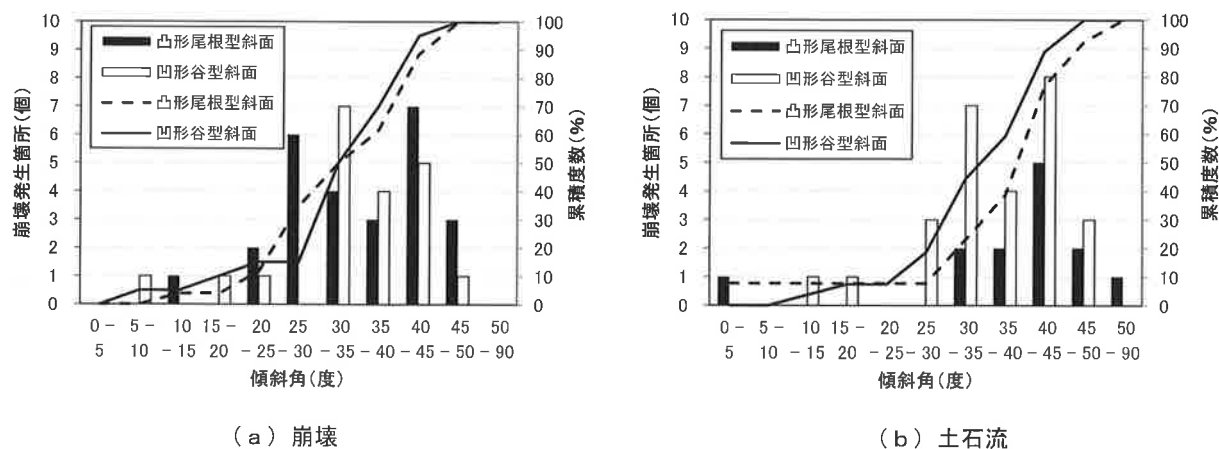


図-3. 14 崩壊と土石流の地形的特徴と傾斜角

3. 3 崩壊発生箇所の2次元断面での検討

崩壊地の地形的特徴を検討し、土石流では凹形谷型地形ならびに凸形尾根型地形で発生しているという特徴が認められた。そこで、凹形谷型地形ならびに凸形尾根型地形で発生した土石流について、代表的な箇所を抽出して、2次元断面による安定解析を行うことによって、両者の発生メカニズムの違いについて考察することとした。

(1) 検討方法

対象箇所は、現地において、調査や試験が実施できていないことから、崩壊前後の航空レーザ測量断面をもとに検討することとした。具体的には、崩壊前の地形と崩壊後の地形をすべり面（基盤）と仮定し地盤モデルを作成し、安定解析

の条件とした。地盤物性値は、過去の研究で得られた試験値を参考に机上で得られる情報をもとに設定した。

安定解析手法は、表層崩壊の崩壊位置を求める方法として、多く利用されている多平面安定解析手法^{20, 21)}を用いた。この解析手法は、以下の仮定のもとに n 個のブロックにより覆われている斜面のうち、最も危険となるすべり面を求める方法である。

- ・ 地表の土層のブロックの組み合わせによってすべり土塊が形成される。仮定すべり土塊の上端ではブロック間の境界に沿って鉛直方向にすべり面が現れるものとする。
- ・ すべり面下端部は、すべり地表面へ対角線に沿ってすべり面が現れる。
- ・ 上端、下端以外のすべり面は潜在すべり面に沿って現れる。

(2) 検討箇所の抽出

検討箇所は、今回の崩壊で特徴的な土石流の内、花崗岩地域の代表的な凹形谷型斜面、凸形尾根型斜面を2箇所ずつ抽出した。

(3) 検討断面モデルの一例と入力条件

多平面安定解析モデルを図-3. 15に示す方法で作成した。まず、崩壊前後に測量された航空レーザ測量データを用い、図-3. 15 (b) に示すように崩壊前の地形を地表面、崩壊後の地形を基盤とした。ここで、青線が崩壊前の地形で赤線が崩壊後の地形である。また、滑落崖頭部付近より上の基盤面は、崩壊前後の地形比較では設定できないため、崩壊前の地形(図-3. 15 (b) の①)を崩壊後の地形(図-3. 15 (b) の②)の位置に平行移動することによって推定した。つぎに設定した地表面と基盤に対して、多平面安定解析のブロック分割を行い解析モデルを作成した(図-3. 15 (c))に示した。

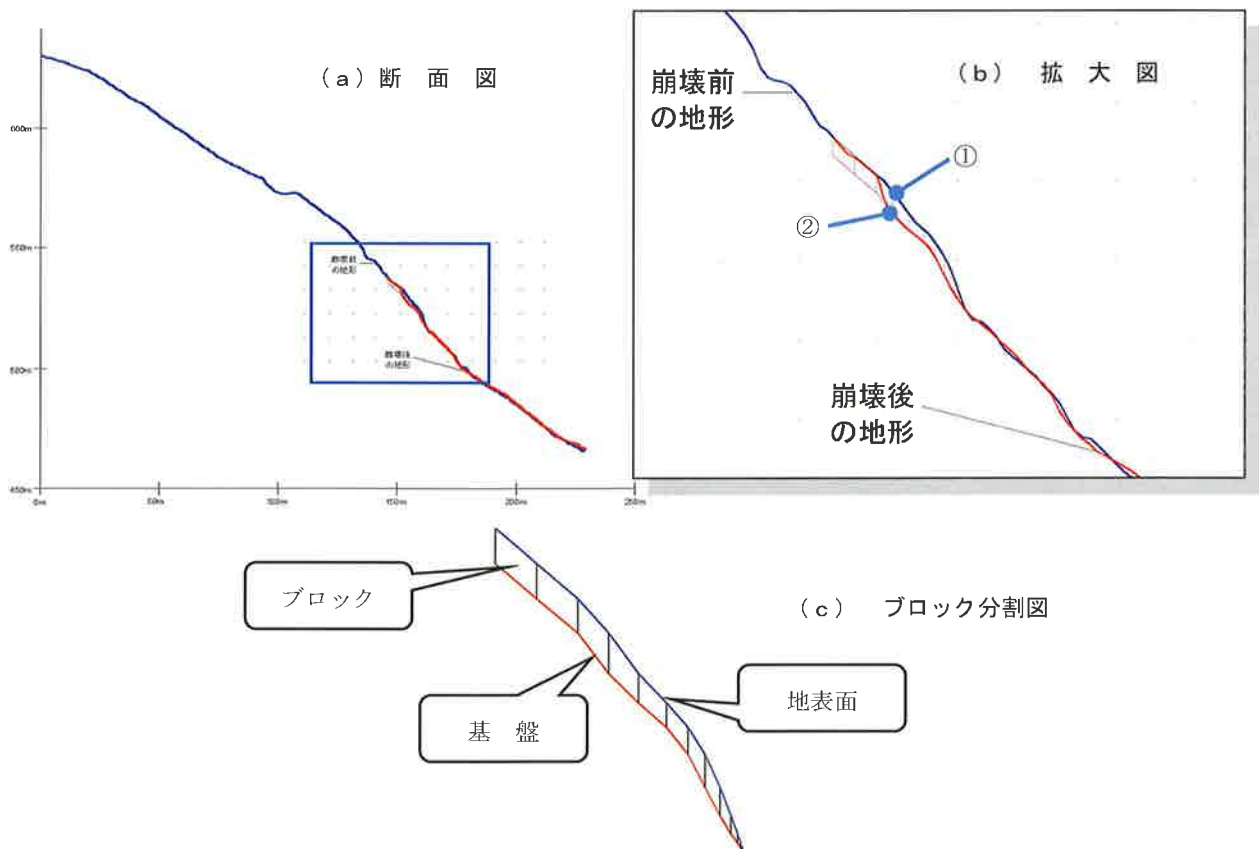


図-3. 15 多平面安定解析のモデル作成の一例(凸形尾根型斜面1)

地盤物性値は、本来、検討対象箇所の試料をサンプリングして、室内試験を用いて評価する必要があるが、両者の違いを概略的に評価することを目的として、ここでは検討対象地すべてが花崗岩の強風化部で崩壊したものと仮定した。

解析に用いた地盤物性値は、マサ土（強風化花崗岩）のなかで乱試料を用いた原位置一面せん断試験の結果²²⁾を参考にして、表－3. 1に示すように設定した。

表－3. 1 地盤物性値²²⁾

土の湿潤重量 γ_t (kN/m ³)	土の飽和重量 γ_{sat} (kN/m ³)	土の内部摩擦角 ϕ_d (度)	土の粘着力 c_d (kPa)	備 考
14	18	38	7	不かく乱試料

(4) 安定解析ケース

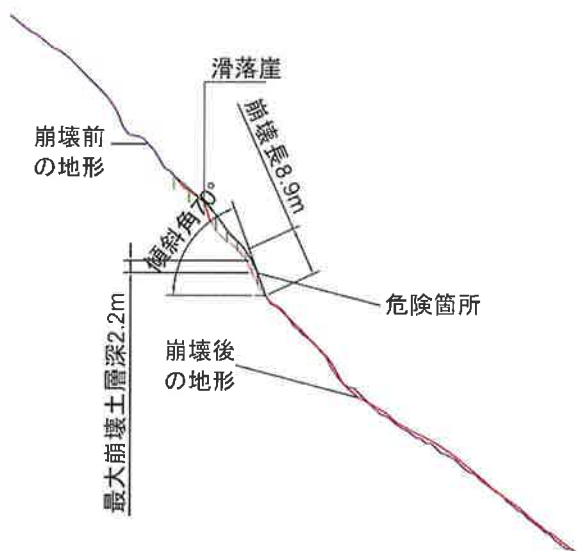
安定解析は、表－3. 2に示す状態を想定して実施した。ケース1（通常時）は、降雨のない状態、ケース2（豪雨時1）は、降雨によって土中内の飽和度が高まり、土の重量が飽和単位体積重量に近づいた状態を想定している。さらにケース3（豪雨時2）は、ケース2の状態ですらに強い降雨をうけ土層内に地下水位が発生した状態を想定し、最も不安定となる条件とした。なお、飽和化に伴いサクションが消失することによって、見かけの粘着力が低下する²³⁾ことも考えられるが、地盤物性値を現地材料から得ていないことから、本検討では考慮していない。

表－3. 2 計算ケース

ケース	状態	土の状態
1	通常時	湿潤状態
2	豪雨時1	飽和状態
3	豪雨時2	飽和状態＋地下水位発生（満水）

(5) 安定解析手法の結果と考察

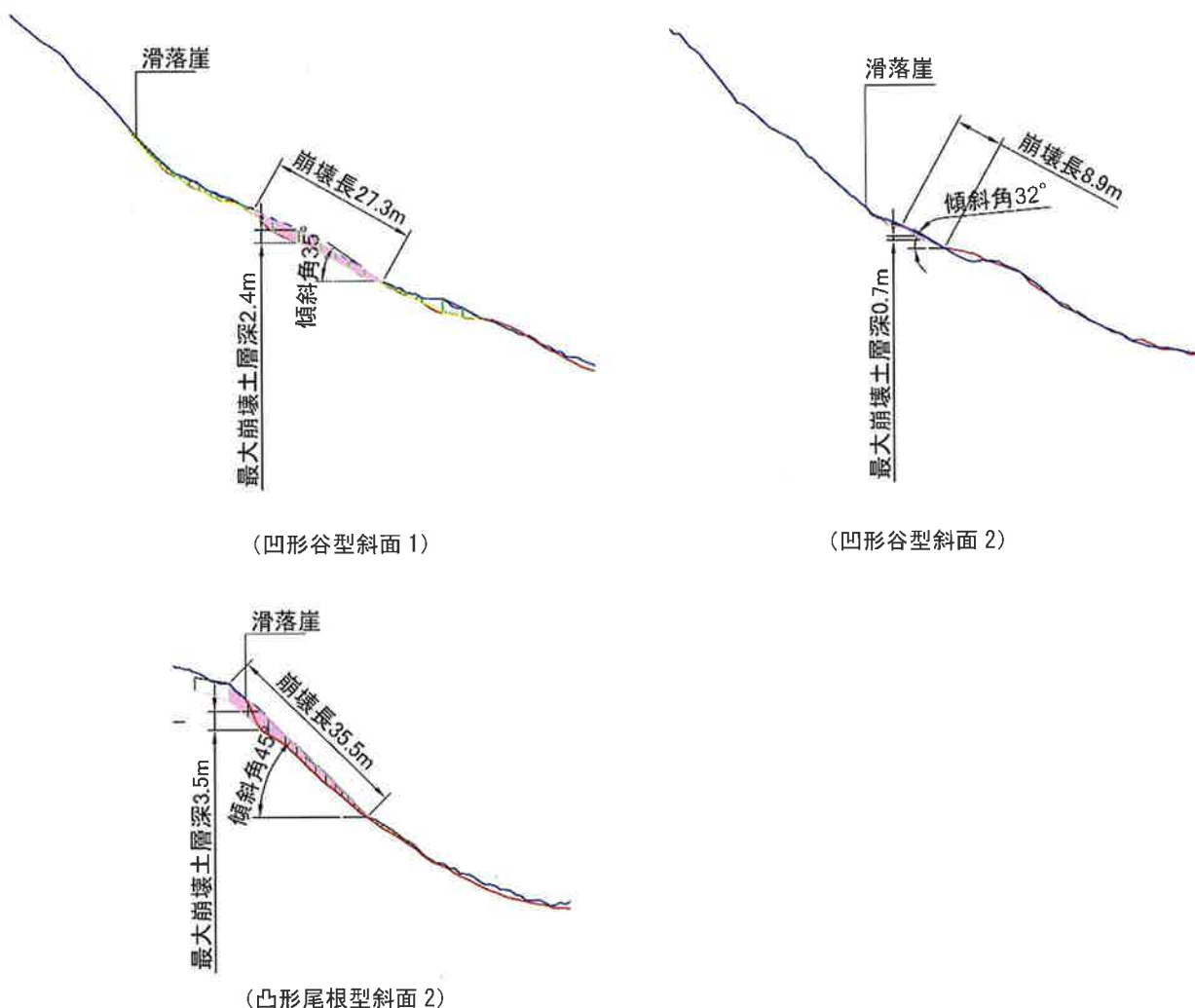
凸形尾根型斜面の崩壊地に対して多平面安定解析を実施した結果を図－3. 16に示した。この図における危険箇所は、安全率がもっとも小さくなるブロックの組合せを意味している。この危険箇所の位置をみると、遷急点直下が不安定化、崩壊して、さらに上部の斜面が不安定化、最終的な崩壊後の地形になったものと推察される。



図－3. 16 多平面安定解析の結果（凸形尾根型斜面1）の一例と整理方法

つぎに、凸形尾根型斜面や凹形谷型斜面の崩壊地に対して同様な手法で求めた危険箇所の特徴を調べるために、図－3. 16に示したように多平面安定解析で得られた危険箇所をもとに、崩壊長（斜面方向長さ）、最大崩壊土層深（鉛直方向の長さ）、崩壊末端の傾斜角（危険箇所末端における地表と水平とのなす角）を定義して、比較検討を行った。

各場所の危険箇所を図－3. 17、それぞれの崩壊長、傾斜角、最大崩壊土層深の状況を整理した結果を表－3. 3に示す。また、整理に当たって、凹形谷型斜面については、危険箇所の末端における集水面積を地形と等高線から求めて併記した。



図－3. 17 多平面安定解析の結果

表－3. 3に示すように崩壊長や最大崩壊土層深については、凹形谷型斜面や凸形尾根型斜面に明瞭な違いは認められないが、崩壊末端の傾斜角に着目すると凹形谷型斜面は、32～35度であるのに対して、凸形尾根型斜面は、45～70度と急であることが分かる。さらに安全率は、凹形谷型斜面ではいずれのケースにおいても1.0以上あるという結果が得られた。これに対して、凸形尾根型斜面1では、常時において安全率1.0以上あるものの、豪雨により土層が飽和状態に近づき、安全率1.0を下回り崩壊する結果が得られた。凸形尾根型斜面2は、飽和状態後、地下水が上昇することによって安全率が1.0を下回り崩壊するという結果が得られた。各ケースの安全率の変化から、凹形谷型斜面は、豪雨により土中内の飽和度が高くなり、土の単位体積重量が増加、集水された水によって、地下水位が上昇するものの安定しており崩壊には至らなかった。ただ、今回の台風では後期降雨によって短時間雨量の大きな降雨があり、その降雨によって地中に浸透しきれない降雨が地表面流となって、一気に斜面を流れ下り、凹形谷型斜面の斜面下部に集まった。この時、土層は飽和化しており、地下水位も上昇し、集水された水と相まって浸食が進み、結果的に、斜面下部から浸

食破壊が発生、上部斜面も不安定し、土石流となって流下したものと推察される。このようなメカニズムであるとする
と、凹形谷型斜面 1 より安全率が大きい凹形谷型斜面 2 が土石流化した誘因として、凹形谷型斜面 1 より集水面積が大
きく、より多くの地表面流を集水して、浸食が進んだためと考えることができる。

凸形尾根型斜面 1 は、もともと安全率が低く、豪雨により土中内の飽和度が高くなることで、土の単位体積重量が増
加して、崩壊したと考えられる。また、傾斜が急なこともあり崩壊する際に、水分の多い土砂がかく乱され流動化して、
土石流となったものと推察される。一方、凸形尾根型斜面 2 は、豪雨により土中内の飽和度が高くなることで、土の単
位体積重量が増加して不安定化するものの、なんとか安定していたが、短時間雨量の大きい降雨によって土中内に浸透、
地下水位が上昇し、最終的には崩壊したものと推察される。

以上、同じ地盤物性値を用いた検討ではあるが、凹形谷型斜面ならびに凸形尾根型斜面ではそれぞれ異なるメカニズ
ムで崩壊し、土石流化したものと考えられた。

表－ 3. 3 計算結果一覧

滑落崖から見た地 形区分	崩壊長 (m)	崩壊末端 の傾斜角 (°)	最大崩壊 土層深(m)	集水 面積(m ²)	安全率		
					ケース 1	ケース 2	ケース 3
凹形谷型斜面 1	27.3	35	2.4	292	2.25	2.00	1.26
凹形谷型斜面 2	9.0	32	0.7	918	4.17	3.61	2.73
凸形尾根型斜面 1	8.9	70	2.2		1.13	0.95	0.71
凸形尾根型斜面 2	35.5	45	3.5		1.41	1.31	0.79

4. おわりに

本報告で得られた知見を以下にまとめる。

近年の降雨による土砂災害の事例について整理を行い、過去の土砂災害発生降雨との比較を行った。その結果、神戸
市内で起きた 1938 (昭和 13) 年や 1967 (昭和 42) 年の豪雨に比して、近年の豪雨は 2011 (平成 23) 年紀伊半島大水
害を除き、80mm/h 以上の雨量 2 時間以上観測するような豪雨によって土砂災害が発生していた。

2014 (平成 26) 年台風 11 号による神戸市域の崩壊に着目して、崩壊発生箇所の地形立地条件を整理することによっ
て、短時間雨量の大きい豪雨時の崩壊場所の特徴を明らかにするとともに、その崩壊のメカニズムについて検討を行っ
た。台風 11 号の豪雨によって、六甲山系で 265 箇所の崩壊が発生していた。この発生箇所は期間降水量 250mm 以上
の範囲に集中していることが明らかになった。この台風によって崩壊が発生した 265 箇所の内 154 箇所の崩壊発生箇所
を対象にして、GIS を用いた地形解析を行った。その結果、花崗岩地域で崩壊、土石流が集中していることが明らかにな
った。つぎに、崩壊発生箇所の傾斜角の分布を調べた結果、傾斜角 30～45 度で多く発生していることが明らかにな
った。この結果は、過去の豪雨による崩壊と一致していたが、今回の崩壊が 45 度以上の急傾斜地でも多く認められる
点では過去と異なっていた。崩壊方位は、南西向きに崩壊した斜面が最も多く、南西から南東向きの斜面に多い特徴が
あった。この理由は、台風の強風が最大時間雨量観測時刻頃に南から南西向きの斜面に強く吹き付けていたため、強い
降雨が吹き付けた南向きの斜面で多く発生したと考えられる。

崩壊発生箇所の地形的特徴は、凹形谷型斜面が最も多く、ついで凸形尾根型斜面が多い結果となった。一般的に凹形
谷型斜面は集水地形であるため崩壊が多いとされているが、集水地形でない凸形尾根型斜面で崩壊が発生していること
が明らかになった。

凹形谷型斜面、凸形尾根型斜面で土石流が多かったことから、それぞれの崩壊メカニズムについて考察するため凸形
尾根型斜面や凹形谷型斜面で発生、土石流化した崩壊地について、多平面安定解析を用いて検討を行った。その結果、
凹形谷型斜面 1、2 では、豪雨により土中内の飽和度が高くなり、土の単位体積重量が増加、集水された水によって、地

地下水位が上昇するものの安定しており崩壊には至らなかった。ただ、今回の台風では後期降雨によって短時間雨量の大きな降雨があり、その降雨によって地中に浸透しきれない降雨が地表面流となって、一気に斜面を流れ下り、凹形谷型斜面の斜面下部に集まった。この時、土層は飽和化しており、地下水位も上昇し、集水された水と相まって浸食された。結果的に、斜面下部から浸食破壊が進み、上部斜面が不安定し、土石流となり流下したものと推察された。一方、凸形尾根型斜面 1 は、もともと安全率が低く、豪雨により土中内の飽和度が高くなることで、土の単位体積重量が増加して、崩壊すると考えられた。また、傾斜が急なこともあり崩壊する際に、水分の多い土砂がかく乱され流動化して、土石流となったものと推察された。凸形尾根型斜面 2 は、豪雨により土中内の飽和度が高くなることで、土の単位体積重量が増加して不安定化するものの、なんとか安定していたが、短時間雨量の大きい降雨によって土中内に浸透、地下水位が上昇し、最終的には崩壊したものと推察された。

以上、台風のよる強雨（期間雨量 250mm 以上）の範囲で、30 度以上、凹形谷型斜面、凸形尾根型斜面で崩壊、土石流が多く発生していた。また、この崩壊には台風の強風によって強雨が吹き付けられた斜面の崩壊が多い特徴が認められた。さらに、同じ台風による降雨であっても降雨の集水性が低い凸形尾根型斜面で、かつ斜面法尻の傾斜角 45～70 度と急な斜面では、飽和化による自重の増加、地下水位の上昇によって、すべり型の崩壊が発生し、土石流化したと推定されるもの、斜面法尻の傾斜角 32～35 度の凹形谷型斜面は、地下水位が上昇しても土塊は安定しているものの、降雨強度の短時間降雨によって地表面流が一気に集まって土塊を浸食し、浸食型の崩壊が発生、土石流化したと推定されるものがあつた。このことから、近年の土砂災害を発生させる降雨の特徴である 80mm/h 以上の雨量を 2 時間以上受ける場合、これまで崩壊しなかった箇所ですべり崩壊あるいは浸食に伴う崩壊が発生し、土石流化する恐れが高まっていると考えられる。

今後、短時間雨量 80mm 以上の降雨 2 時間以上受けることによって土石流化しやすい凹形谷型斜面の土砂の堆積状況や凸形尾根型斜面の安定度を評価し、ハザードの予測を行うことでソフト対策の充実を図ることが重要であると言える。加えて、保全対象への影響度を勘案しながらハード対策の整備を着実に進めていくことで地域総合防災力を高めることが望まれる。

最後に、本報告では多くの仮定に基づいて考察を加えた。今後、2014（平成 26）年台風 11 号によって凹形谷型斜面や凸形尾根型斜面で発生した崩壊のメカニズムを究明するために現地調査、室内試験をもとに飽和・不飽和浸透流解析と安定解析を用いてについて、さらに検討を進める必要がある。

【謝辞】

本研究を遂行するにあたり、神戸市、国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所、兵庫県から資料提供をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 公益社団法人地盤工学会・一般財団法人日本地質学会・一般財団法人日本応用地質学会・関西地質調査業協会・中部地質調査業協会：平成 23 年台風 12 号による紀伊半島における地盤災害調査報告書，2011.
- 2) 公益社団法人地盤工学会平成 24 年 7 月九州北部豪雨による地盤災害調査団：平成 24 年 7 月九州北部豪雨による地盤災害調査報告書，2013.
- 3) 公益社団法人土木学会・公益社団法人地盤工学会・一般社団法人日本応用地質学会・公益社団法人日本地すべり学会平成 25 年 10 月台風 26 号による伊豆大島豪雨災害緊急調査団：平成 25 年 10 月台風 26 号による伊豆大島豪雨災害調査報告書，2014.
- 4) 公益社団法人土木学会・公益社団法人地盤工学会 平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団：調査報告書，2014.
- 5) 気象庁神戸地方気象台 web：
<http://www.jma-net.go.jp/kobe-c/annai/items/20140811/20140811kisiousokuhou.pdf> (2014. 12. 19)
- 6) 国土交通省：水文水質データベース，

[http://www1.river.go.jp/cgi-](http://www1.river.go.jp/cgi-bin/StationList.do?pointX=135.24677089066839&pointY=34.79761526152640&systemVer=1441539302817)

[bin/StationList.do?pointX=135.24677089066839&pointY=34.79761526152640&systemVer=1441539302817](http://www1.river.go.jp/cgi-bin/StationList.do?pointX=135.24677089066839&pointY=34.79761526152640&systemVer=1441539302817)

(2015. 12. 19)

- 7) 国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所 web :
http://www.kkr.mlit.go.jp/rokko/disaster/history/h26/pdf/typhoon_20141009.pdf (2014. 10. 9)
- 8) 沖村孝・市川龍平：数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法，土木学会論文集，358，pp. 69-75，1985.
- 9) 浅野嘉文・川尻峻三・布川修・太田直之・杉山友康・渡邊諭：降雨時における斜面表層崩壊を再現する簡易解析モデルの提案，地盤工学ジャーナル，Vol. 8，No. 4，pp. 579-595，2013.
- 10) 沖村孝・鳥居宣之・永井久徳：地震後の降雨に伴う山腹斜面崩壊の地形立地解析，神戸大学都市安全研究センター研究報告，pp. 19-31，1998.
- 11) 公益社団法人地盤工学会関西支部・一般社団法人日本応用地質学会関西支部・一般社団法人関西地質調査業協会・中部地質調査業協会：「想定外」豪雨による地盤災害への対応を考える調査研究委員会，報告書，pp. 56-62，2015.
- 12) Burrough, P. A., and McDonnell, R. A. : Principles of Geographical Information Systems, *Oxford University Press*, New York, pp. 190, 1998.
- 13) Moore, I. D., R. B. Grayson, and A. R. Ladson. : Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. *Hydrological Processes* 5, pp. 3-30, 1991.
- 14) Zevenbergen, L. W., and C. R. Thorne. : Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms* 12, pp. 47-56, 1987.
- 15) 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門，古今書院，第1巻，p. 122，1997.
- 16) 産業技術総合研究所地質調査総合センター（編）：20万分の1日本シームレス地質図（DVD版），2009.
- 17) 沖村孝・杉本博：統計的手法による自然斜面崩壊の研究，土木学会論文集，第290号，pp. 89-97，1979.
- 18) 気象庁：台風第12号、第11号と前線による大雨と暴風，2014.
- 19) 塚本良則・小橋澄治：新砂防工学，朝倉書店，pp. 43-73，1991.
- 20) 沖村孝：潜在崩土層分布を利用した表層崩壊発生位置に関する研究，新砂防，35-1，pp. 9-18，1982.
- 21) 松村法行・高島甲八・鏡原聖史・高橋豪夫・炭谷雅昭・魚住誠司：兵庫県における風倒木に伴う山腹崩壊，日本応用地質学会平成19年度研究発表会講演論文集，pp. 173-174，2007.
- 22) 鳥居宣之：地震を起因とする盛土ならびに自然斜面の崩壊発生機構とその危険度評価に関する研究，神戸大学博士論文，pp. 167-171，2008.
- 23) 鏡原聖史・澁谷啓・鳥居宣之・金乗洙・川尻峻三：兵庫県北西部地域における2009年台風9号による山腹斜面崩壊の実態と発生メカニズムについて，地盤工学ジャーナル，Vol. 8，No. 3，pp. 489-504，2013.

著 者

鏡原 聖史	株式会社ダイヤコンサルタント，博士（工学），地盤工学
植田 允教	株式会社ダイヤコンサルタント，修士（都市情報学），空間情報学
沖村 孝	所員，理学博士，地盤工学