

アジア航測(株)(現砂防エンジニアリング(株)) ○鈴木 隆司
 (財)砂防・地すべり技術センター(現鳥取大学) 宮本 邦明
 (財)砂防・地すべり技術センター 大原 正則

1. はじめに

平成3年9月に発生した台風19号は、大分、熊本、福岡の各県に強風による風倒木被害を発生させた。風倒木地の実態調査¹⁾によると、

① 大多数の風倒木は立木の根返りの形態をとり、風倒木地斜面の表層土層は著しく擾乱を受けている。
 ② 風倒木斜面の縦断勾配のヒストグラムは30度を中心にほぼ正規分布をしているのに対して、風倒木と同時に崩壊が発生したと考えられる斜面の縦断勾配のヒストグラムは、33度を越えると急激に崩壊個数が増加する分布形をしている。かつ、33度以上での分布形は風倒木地の分布形と類似している。
 等が報告されている。これらのことから、風倒木地では斜面の安定度が低下しており、土砂生産の場としては容易に崩壊が発生する状況になっているため、降雨による風倒木地からの崩壊及び土石流・流木等に伴う二次災害発生の危険性が懸念されていた²⁾。風倒木発生後、しばらくの期間はまとまった降雨がなかったため大規模な土砂災害は発生しなかった。しかし、平成5年6月には13～16日の4日間で約300mm、18日には梅雨前線に伴う日雨量244mmの降雨があり、懸念されていた崩壊・土石流が発生し、大量の流木が流出した。崩壊は大分県上津江村、中津江村を中心に熊本、福岡両県の広範囲にわたって発生している³⁾。この時発生した崩壊はそのほとんどが表層崩壊で、この崩壊の発生が土石流発生の引き金になっているという特徴がある。

本研究では、風倒木が発生し表層土層が擾乱を受けた斜面(風倒木地)とそれ以外の斜面(非風倒木地)の崩壊が斜面勾配と降雨の大きさによりどのように異なるかについて検討を行ない、次いで、崩壊の発生を支配した降雨特性について検討した。調査は、風倒木地及び非風倒木地ごとに崩壊地の斜面勾配、面積、斜面上の位置、個数について、空中写真をもとに計測することにより行なった。調査範囲は風倒木の発生率が高く崩壊・土石流の多発した大分、熊本、福岡の3県に位置する3町5村(網掛け部分)であるが、大分県内の3流域(斜線部分、以下3流域と呼ぶ)については、雨域の中心部にあたり風倒木の発生率が高いため、調査範囲全体のデータと比較するため、別途集計した(図-1)。また、降雨については災害が発生した6月18日の一連の降雨と、風倒木発生前後の雨に対する斜面表層土層の抵抗力の変化を検討するための風倒木発生前の降雨について資料を収集した。

2. 風倒木地及び非風倒木地における崩壊地の特徴

風倒木地と非風倒木地における崩壊個数、面積等を集計した結果を表-1に、斜面勾配ごとの崩壊個数のヒストグラムをそれぞれ図-2、図-3に示す。各図表は調査範囲全体と3流域の雨量強度別に分けて作成されている。また、表-2及び3には風倒木発生前後の崩壊現象にどの程度の差があるかを比較する

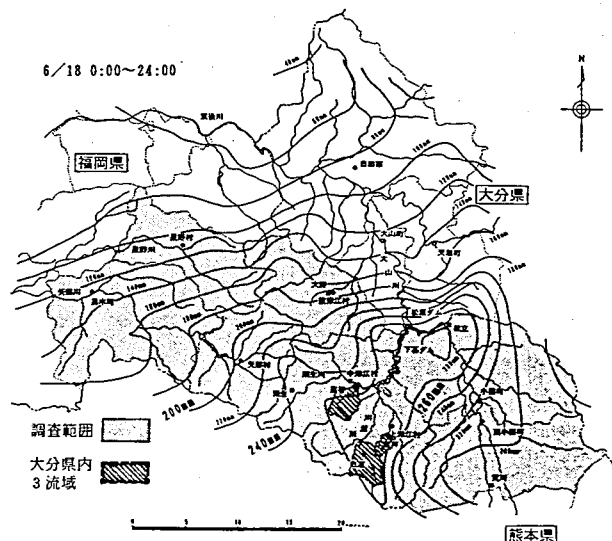


図-1 調査範囲と日雨量等高線図

ために3. で得られる「崩壊・土石流の発生支配降雨」の確率解析結果と降雨災害記録をまとめた。

表-1 から、降雨量の違いによる崩壊発生規模（単位面積1km²当たりの崩壊個数及び面積）は、以下の通りである。

表-1 風倒木地及び非風倒木地の崩壊状況

区 分	斜面面積 (ha) ①	崩壊個数		崩壊面積		崩壊発生土砂量		風倒木地 面積比率 (%)
		②	1km ² 当りの 個数 ②/①	(ha) ③	面積率 (%) ③/①	(10 ³ m ³) ④	1km ² 当りの 土砂量 (m ³ /ha) ④/①	
調査範囲全体	風倒木地	38.96	1,090	28.0	0.401	1.03	320.8	8,240
	非風倒木地	583.04	2,253	3.9	0.756	0.13	604.9	1,040
	合 計	619	3,343	5.4	1.157	0.19	925.7	1,500
大分県内3流域	風倒木地	3.05	240	78.7	0.0514	2.01	49.1	16,100
	非風倒木地	17.49	274	15.7	0.0541	0.31	43.3	2,480
	合 計	20.54	514	25.0	0.1154	0.56	92.4	4,500

表-2 支配降雨の確率評価（岩井法による）

観測所名：「鯛 生」

時間雨量	超 過 確 率 年						6.18.~19.の 一連降雨の 最大値(発生時刻)
	1/2	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100	
5時間	115.9	166.0	200.4	234.1	278.8	313.3	163.0 (6.18.~11:00)
9時間	165.4	208.9	234.2	256.7	283.8	303.0	225.0 (6.18.~13:00)

表-3 支配降雨と比較した過去の降雨記録と災害記録

降雨発生 年月日	鯛 生		対 応 す る 災 害	
	5hr	9hr	災害発生月日	災害概要
S28.06.25			05.25. ~06.29.	梅雨前線大雨 佐賀多発** 上津江村(73箇所)、中津江村(45箇所)、 前津江村(41箇所)
S37.07.03			07.03. ~07.08.	大 雨 日田、玖珠地方で集中豪雨 中津江村合瀬で崩壊、全壊(1戸) 上津江村川原で崩壊
	08.05.	156.1		
S44.06.28		218.5	06.28. ~07.01.	梅雨前線大雨 7/1 3:00~4:00に日田市で43mm/hrを記録 日田地方で崩壊(13箇所)**
S45.08.14	195.0	244.0		
S47.07.05	162.0			梅雨前線大雨
S48.07.27	159.9	213.6		
S54.06.28	150.5	211.5	06.28. ~06.30.	梅雨前線大雨 萩連岳で6/27 0:00~3:00 118mm/3hr 県下で崩壊(10箇所)、道路決壊(127箇所) 前津江村で崩壊**
S57.07.10	142.5	217.5		
S57.07.23	194.0	250.5	07.23. ~07.25.	梅雨前線豪雨 <長崎災害> 大分県の被害の中心は竹田市、久住町、天 瀬町 7/24 7:45 中津江村川原で崩壊 県内で崩壊(61箇所)**
S59.08.21	169.5	245.0		
S63.06.23	190.0	244.0		梅雨前線大雨 前津江村で土石流**
H.2.07.02	149.0	202.0	06.28. ~07.03.	梅雨前線大雨 <阿蘇の宮流木災害> 熊本県一の宮町、大分県竹田市を中心とし た災害 上津江村片仁田で7/2 13:30 土石流発生 県内で崩壊(84箇所)**
H.3.06.09	153.0			
	09.27.		台風19号	風倒木災害

1) 5時間及び9時間の雨量欄で空白のものは支配降雨に達しなかった場合(5時間150mm、9時間200mm)
2) *印は鯛生の観測値が欠測であったため、萩連岳の観測値を参照した
3) **印は具体的な災害発生時刻と場所が不明
4) 網掛け部の降雨発生年月日には前津江、中津江、上津江地方で災害が発生したことを表わす
<災害記録の出典> ・大分県災異誌(大分県地方気象台刊) ・大分合同新聞

① 調査範囲全体の林地面積に対する風倒木地面積の割合は1割に達していないが、風倒木地からの崩壊発生個数は全体の1/3を占めている。これを単位面積当たりの崩壊個数と崩壊面積率で評価すると、風倒木地は非風倒木地の約7倍の値をとる。

② 降雨に対する単位面積当たりの崩壊個数と崩壊面積率の違いについては、調査範囲全体と3流域を比較すると、風倒木地で約2~3倍、非風倒木地で約3~4倍になる。すなわち、雨量が大きくなると、風倒木地だけでなく非風倒木地も崩壊発生規模が大きくなる。

次に、図-2及び3から、非風倒木地との比較により風倒木地に発生した崩壊地の斜面勾配について以下のような特徴が挙げられる。

すなわち、風倒木地については、

① 発生した崩壊の斜面勾配の分布は風倒木地の斜面勾配分布に比べて急勾配である。

② 3流域においては、斜面勾配30度以上の崩壊個数は風倒木地の個数より多い。このことは、30度以上のほとんどの風倒木地において崩壊が発生していることを意味している。

③ 斜面勾配33度を境にそれ以上の斜面では非風倒木地に比べて崩壊が頻発している。

ところで、以上のような特徴をもった平成5年6月降雨によって風倒木地及び非風倒木地に発生した崩壊・土石流は、次の

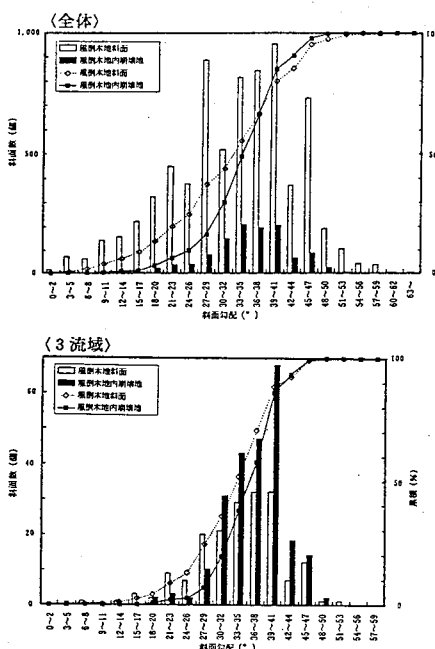


図-2 風倒木地及び非風倒木地内に発生した崩壊地の斜面勾配ヒストグラム

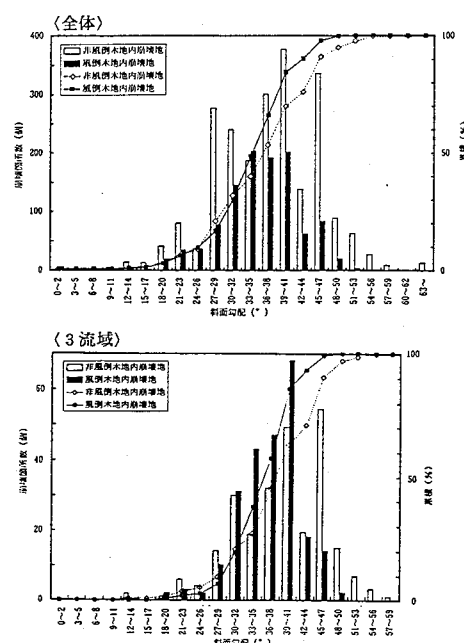


図-3 風倒木地内及び非風倒木地内に発生した崩壊地の斜面勾配ヒストグラム

3. で触れる「崩壊・土石流の発生支配降雨」の解析結果と大分県内の「鯛生」観測所（収集したデータの期間：S40～H 3）の降雨確率解析結果から判るように、過去30年間に5～6度生起しているような1/5年超過確率規模程度の比較的規模の小さい降雨量で生じている。しかし、この程度の雨では過去に 3,000箇所を越える崩壊が発生した事例はない（表-2 及び 3）。

3. 風倒林地及び非風倒林地における崩壊・土石流の発生支配降雨

表層土層が擾乱を受けている風倒林地では、擾乱を受けた層厚が立木の主根系の深さに規定されるため、崩壊を支配している地下水は図-4に示すように地表面にほぼ平行に発達していくと想定される。また、災害時には6月13～16日の間の降雨により表層土層内が十分に湿潤な状態にあったと推察されることから、平野⁴⁾により提案されている斜面の崩壊・土石流の発生条件の考え方が適用できる。平野は、地下水流の水深がある値になった時に崩壊・土石流が発生すると考え、降雨とその流出過程から次式を導びいている。

$$\ell = \frac{k \cdot \sin \theta}{\lambda} \cdot t \quad \cdots \cdots (\text{式 } 1) \quad \text{及び} \quad h = \frac{\cos \theta}{\lambda} \cdot \int_0^t (r-f) dt \quad \cdots \cdots (\text{式 } 2)$$

ここで、 λ ：空隙率、 k ：透水係数、 t ：ある地下水水深を形成するまでの時間、その他の式中の記号は図-4の模式図に示す通りとすると、崩壊の発生は(式2)で表される地下水水深 h が斜面に特有のある限界値 h_c を上回った時、 h_c に対応した斜面長 ℓ_c より下方の斜面のどこかで生じる。したがって、崩壊個数の距離 X に対する累加曲線は理論的には図-5中の実線で表される。ここで一般的には、斜面長 L は分布を持っており地表の水文流出環境にも違いがあるから、図-5中の a 、 b 両点の付近は滑らかな曲線になったり、とくに点 a については上流の斜面の条件に影響を受けてこの部分がなくなったりすることも想像される。解析の対象となる斜面長 L は有限であるから $\ell_c \leq L$ であり、したがって、(式1)より時間 t は有限な値 T をとる。崩壊が発生するためには斜面に特有なある有限な時間(T)内に地下水深が限界値 h_c を越えなければならないから、浸透水量を評価する係数を α とすれば、(式1)及び(式2)より崩壊の発生支配降雨は、

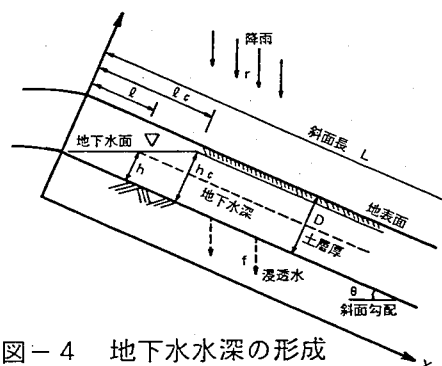


図-4 地下水水深の形成と崩壊発生の関係

$$\alpha \cdot R_T = \int_0^T (r-f) dt \geq \left(\frac{h_c}{\ell_c} \right) \cdot (k \cdot T) \cdot \tan \theta \quad \cdots \cdots (\text{式 } 3)$$

与えられる。すなわち、表層土層の崩壊を支配している降雨は、斜面に特有な時間(T)とその時間内の総雨量(R_T)で特徴づけられることになる。本災害の場合、土石流は18日11:00 ごろ発生していることが報告されており、 R_T としてこの時刻から遡った T 時間総雨量を用いる（図-6）。このように R_T を設定すると得られる支配降雨は崩壊が頻発し始める降雨ということができよう。 R_T の空間分布については、各観測所における観測値をもとに R_T の雨量コンターマップを作成して推定している。

崩壊発生推定時刻から遡った時間 T ごとに図-5の集計を行ない、図-7(a)のように整理して並べる。

もし有意な R_T が存在するとすれば（その時間を T_0 、そのときの R_T を R_{T_0} とすると、(式3)の性質から、

- ① 時間 T_0 で、 $R_T < R_{T_0}$ の領域では崩壊は少なく、 $R_T > R_{T_0}$ の領域で急増する。

- ② 時刻 $T < T_0$ で、 $R_T > R_{T_0}$ の領域で

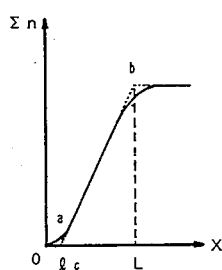


図-5 理論上の崩壊発生位置と崩壊個数の関係

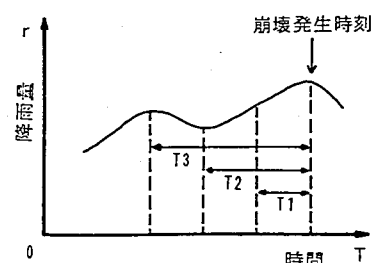


図-6 支配降雨の解析時間のとり方

は多くの崩壊が存在する。

③ その他の領域では目立った傾向がない。

となるはずである。図-7 (b) はそういう観点にたって風倒木地及び非風倒木地について整理したものである。この図からは、風倒木地における崩壊の支配降雨としては 5時間150mm 程度をみることができる。一方、非風倒木地については 9時間200mm 程度と推定されるが、この時の崩壊発生時刻までの降水継続時間は 9時間であるため、 T_0 は 9時間より長い可能性がある^{5, 6, 7)}。

4. おわりに

風倒木地に起因して発生した崩壊・土石流の実態調査から次の結論を得た。

- ① 単位面積当たりの崩壊の発生状況を評価した結果、風倒木地と非風倒木地を比べると、崩壊個数、面積率の値は風倒木地の方が大きい。このことは、風倒木地では表層土層が擾乱を受けたため非風倒木地に比べて崩壊が発生し易い状態になったことを示す一つの事実である。
- ② 雨量が大きい3流域と調査範囲全体を比較すると、単位面積当たりの崩壊個数、面積率の値は風倒木地だけでなく非風倒木地でも大きくなる。このことは、非風倒木地でも表層土層が擾乱を受けている可能性があるとして推定される。
- ③ 風倒木地及び非風倒木地別に崩壊・土石流の発生支配降雨を解析した結果、風倒木地では 5時間150mm 程度、非風倒木地については 9時間200mm 程度と推定された。また、この支配降雨量を確率規模で評価すると1/5年程度の降雨に相当する。
- ④ 単位面積当たりの崩壊個数や崩壊面積率の値が示すように、風倒木地は非風倒木地に比べて崩壊の発生頻度が高い。しかし、一方で砂防計画の立案という観点からは、非風倒木地は風倒木地の約15倍の面積を占めている。このため非風倒木地からの土砂生産については、防災対策上は決して無視することができないといえよう。

最後に、本研究は大分県、福岡県、熊本県の委託によって実施された業務の一部を各砂防担当部局のご了解を得て発表させて頂いた。関係各位には多大なご協力を賜ったことを記し、深謝の意を表する。

参考文献：1)宮本ら：1991年台風19号による風倒木に関する調査，新砂防，45-3, 18-23, 1992. 2)大分県土木建築部砂防課：「風倒木災害対策砂防－風倒木による二次災害防止のために－」，1994. 3)三重野ら：九州地方の風倒木域に発生した土石流と流木，砂防と治水，94, 82-86, 1993. 4)平野：土石流の発生予測と流出解析，土砂移動現象に関するソポゾウム論文集，23-38, 1992. 5)大分県土木建築部砂防課：平成5年度風倒木地災害実態調査報告書，平成6年3月. 6)熊本県土木部砂防課：平成5年度風倒木地災害実態調査報告書，平成6年3月. 7)福岡県八女土木事務所：風倒木地災害実態調査報告書，平成6年3月.

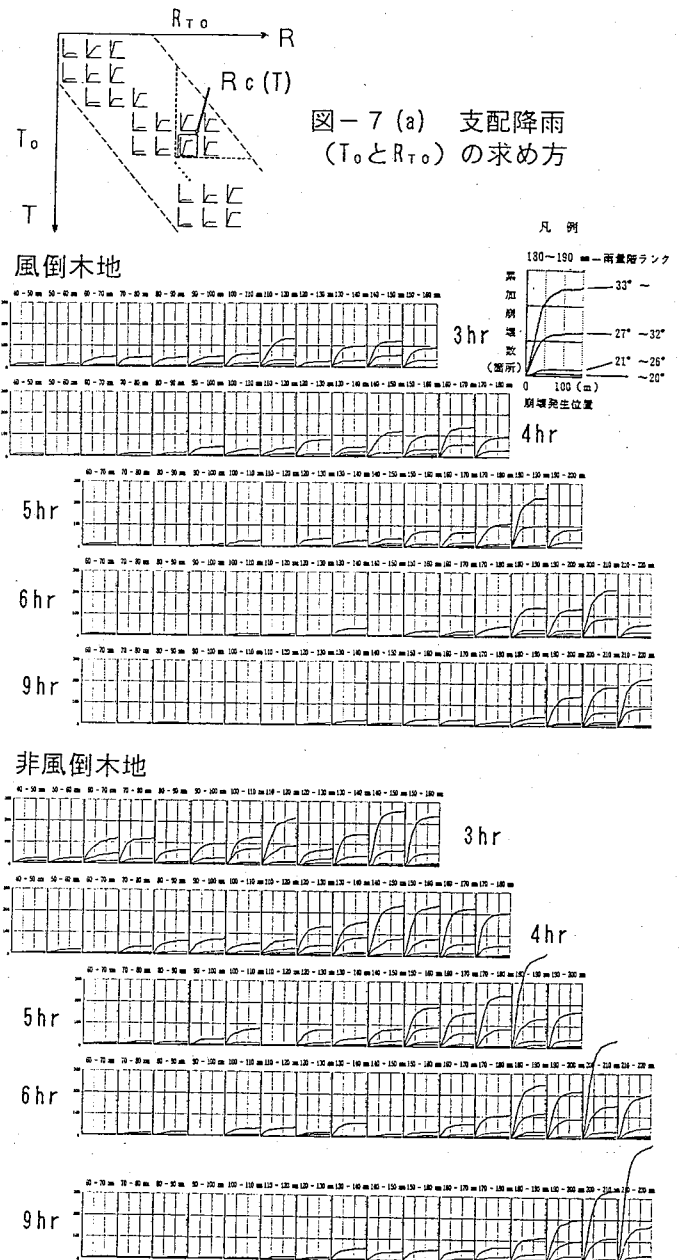


図-7 (b) 崩壊発生推定時刻から遡った時間(T)別の総雨量(R_T)ごとの崩壊発生位置と崩壊個数の関係