

1 はじめに

近年、景観・環境への配慮から、がけ崩れ対策においても斜面上の植生の保全・復元を強く要請されるようになってきた。その一方で斜面上の植生は斜面の安定化・不安定化に対して様々な形で影響を及ぼしていると言われている。樹木のうち高木類は、重量が大きいという点と、樹冠部が大きいため風から大きな外力を受けた場合根返り・幹折れなどの被害が生じるという点で、草本や中低木類とは異なっている。平成3年の台風19号によって九州地方のスギ造林地が甚大な風倒被害を受けた。この平成3年の風倒被害域では斜面崩壊も同時に多発したとの報告がなされている^{1), 2)}。崩壊についての記述が少なく詳しいことは分からないが、このときの崩壊の形態として、以下の2形態が想定されよう。①斜面の広い範囲で一斉に根返りを起こし地盤との定着を失った何十本、何百本ものスギが、根系で抱え込んでいる土塊もとも一斉に落下するもの。②斜面の上方から下方に向けて吹き下ろす風から樹木が受けた力が、根系を介して、斜面のすべり方向にある大きさの力として土体に作用し、この力が誘因となって崩壊するもの。本検討では、後者の考え方に基づいて、樹木重量と樹木に対する風の作用を考慮した斜面安定計算を行い、その結果から斜面上の樹木が斜面不安定化に与える影響について考察した。

2 樹木重量および風の作用を考慮した斜面安定計算

2.1 斜面モデル、樹木の配置モデル、樹木の単木モデル

単純のため、斜面の縦断形状については勾配 θ で一定、横断形状については傾きはないものとした。この斜面を斜面に直交方向に見下ろしたときの状況を図-1に示す。樹木は、

横方向には a 間隔、縦方向には $a/\cos\theta$ 間隔で規則正しく配列している。スギ、広葉樹という2区分でそれぞれ大小2ケースの単木モデルを設定した(図-2)。樹冠形状については、スギは円錐形、広葉樹は楕円球形とした。

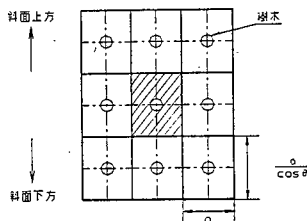


図-1 樹木の配置図

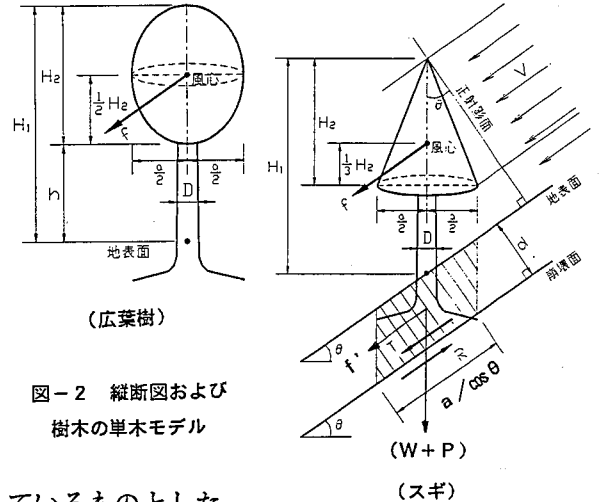


図-2 縦断図および樹木の単木モデル

2.2 樹木が風から受ける外力およびその力の土体への作用

本検討では、勾配 θ の斜面において、風速 V の風が上方から下方に向けて一様に斜面と平行に吹き下ろすものとする。この風が樹木に作用したとき、樹木が受ける外力の方向は、風と同じ方向(つまり斜面と平行)であるとし、その大きさ f は、文献3)を参考に以下のように表すものとした。後の計算に関係ないが、 f は図-2に示す位置に作用しているものとした。

$$f = 1/2 \cdot \rho \cdot C_d \cdot V^2 \cdot A \quad (\text{式1})$$

ここに、 ρ : 空気密度 (=0.125 kgf·s²/m⁴)、 C_d : 抵抗係数(文献3)に、風速20~30m/sのときスギ0.72、アカマツ0.58とあるのを参考とし、本検討では風速の大きさに関係なく、一律にスギ0.72、広葉樹0.58とした)、 A : 風向に対して直交する平面への樹冠投影面積

スギ、広葉樹の樹冠を、風向に対して直交する平面へ投影したときの形状(図-3)から、樹冠投影面積 A はそれぞれ以下のとおり表される。

$$\text{スギ: } A = \frac{a}{2} \left[H_2 \cdot \cos\theta + \frac{\pi \cdot a}{4} \cdot \sin\theta \right] \quad (\text{式2})$$

$$\text{広葉樹: } A = \frac{\pi \cdot a}{2} \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 \sin^2\theta + \left(\frac{H_2}{2}\right)^2 \cos^2\theta} \quad (\text{式3})$$

$$h_2 = H_2 \cdot \cos\theta$$

b_2 は式3のルート部分

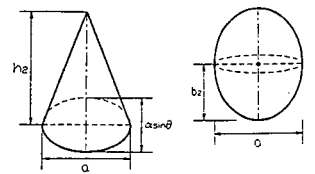


図-3 風向に対して直交する平面への樹冠投影形状

本検討では、斜面の上方から下方に向けて吹き下ろす風から樹木が受けた力 f が、根系を介して、斜面のすべり方向にある大きさの力 f' として土体に作用するものと仮定し、 f' を以下のように表した。

$$f' = \alpha \cdot f \quad (\text{式4}) \quad \text{ここに、} \alpha : \text{作用力低減率} (0 \leq \alpha \leq 1)$$

2.3 斜面安定計算式

図-1、図-2において斜線で示す部分を単位土体と設定し斜面安定計算を行う。斜面の上方から下方に向けて風が吹き下ろしているとき、単位土体に作用する滑動力 T 、抵抗力 R は以下のように表される。

$$T = (W+P) \sin\theta + f' \quad (\text{式5}) \quad R = c \cdot \frac{a^2}{\cos\theta} + (W+P) \cos\theta \cdot \tan\phi \quad (\text{式6})$$

ここに、 $W = \gamma \cdot a^2 \cdot d / \cos\theta$

式5、式6より、単位土体上の樹木の有無(無のとき $P=0$)、斜面上の風の有無(無のとき $f'=0$)別の安全率は、以下の3とおりに分けられる。

①樹木なしの安全率 F_1

$$F_1 = \frac{c}{\gamma \cdot d} \cdot \frac{1}{\sin \theta} + \frac{\tan \phi}{\tan \theta} \quad (\text{式7})$$

②樹木あり、風なしの安全率 F_2

$$F_2 = \frac{c}{\gamma \cdot d} \cdot \frac{1}{(1+P/W)\sin \theta} + \frac{\tan \phi}{\tan \theta} \quad (\text{式8})$$

③樹木あり、風ありの安全率 F_3

$$F_3 = \frac{(W+P)\sin \theta}{(W+P)\sin \theta + f'} \cdot F_2 \quad (\text{式9})$$

3 計算結果とその考察

3.1 計算条件の設定

崩壊土層の土質定数は、表-1のとおり設定した。樹木の諸元は、既往の現地調査報告書や各種資料を参考に、表-2のとおり設定した。スギは広葉樹に比べて密な配置となった。隣の樹木とは樹冠同士が接していると考えて、樹冠幅 a' は単位土体の横幅 a と等しいものとした。広葉樹の樹種については、大モデルをナラ、小モデルをサクラとした（樹種の違いは樹木重量の算出の際に関係する）。また、風速 V は25m/sと50m/s、作用力低減率 α は0.25、0.50、0.75、1.00を条件として与えた。

表-2 設定した樹木諸元

単位体積重量 γ (tf/m ³)	粘着力 c (tf/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
1.50	1.00	30.00

	胸高直径 D (cm)	樹高 H_1 (m)	枝下高 h (m)	立木密度 N (本/ha)	樹冠高 H_2 (m)	樹冠幅 a' (m)	樹木重量 P (tf)
スギ (小)	5.0 (7)	12.0 (7)	5.0 (7)	4,000 (7)	7.0	1.6	0.12 (9)
スギ (大)	35.0 (7)	24.0 (7)	10.0 (7)	1,000 (7)	14.0	3.2	0.90 (9)
サクラ	15.0 (7)	12.0 (9)	5.0 (4)	500 (9)	7.0	4.5	0.14 (9)
ナラ	25.0 (7)	20.0 (9)	7.0 (4)	250 (9)	13.0	6.3	1.00 (9)

3.2 樹木重量および風の作用を考慮したときの安全率の低下 (θ 、 d 固定)

3.1で設定した条件の下、 $\theta = 45^\circ$ 、 $d = 1.0\text{m}$ (ケース1) の組み合わせと $\theta = 30^\circ$ 、 $d = 2.0\text{m}$ (ケース2) の組み合わせの2ケース計算を行った。その結果を図-4に示す。ケース1、ケース2ともに、 F_2 および F_3 (α が同一なもの同士) の大小関係は、スギ (大) < スギ (小) < ナラ < サクラであることが分かる。

F_2 の大小関係は、樹木重量 P の大小関係 [スギ (小) < サクラ < スギ (大) < ナラ] の逆ではなく、 P/W の大小関係 [サクラ < ナラ < スギ (小) < スギ (大)] の逆となっている。これは式8から説明が付く。また、 F_3 の大小関係が F_2 と同じとなったのは、樹木タイプごとの $(W+P)\sin \theta / \{ (W+P)\sin \theta + f' \}$ の値に大きな差がないためである (大きな差があれば、 F_2 と F_3 の順序に違いが生じることもある)。

F_1 から F_2 への低下率 $\{ (F_1 - F_2) / F_1 \times 100 \}$ の値と F_1 から F_3 への低下率 $\{ (F_1 - F_3) / F_1 \times 100 \}$ の値を表-3に示す (ケース1のみ)。

なお、この低下率はケース1の方がケース2よりも大きいものであった。ケース1の F_1 から F_2 への低下率については、最も大きいスギ (大) でさえ2.5%であり、樹木重量のみを考慮した場合の影響は比較的小さいと言える。また、ケース1の F_1 から F_3 への低下率については、最も大きいスギ (大) の場合、 $V = 25\text{m/s}$ では3.4~5.9%、 $V = 50\text{m/s}$ では5.9~16.0%であり、特に $V = 50\text{m/s}$ の場合 α の違いにより、低下率に大きな差が生じていることが分かる。実際の現象において $\alpha = 1.0$ となるかどうかは分からないが、もし樹木から土体へのそのような力の作用が強風時に発生するならば、斜面安定に大きな影響を及ぼす結果になると言えよう。

4 おわりに
本検討では、斜面の上方から下方に向けて吹き下ろす風から樹木が受けた力 f が、根系を介して、斜面のすべり方向にある大きさ f' の力として土体に作用するものと仮定し、その関係を $f' = \alpha \cdot f$ と表現することで、風の影響を斜面安定計算に取り込んだ。本検討は一つの試算であるが、今後、強風時の斜面崩壊発生機構や樹木の揺れによる地盤強度低下機構 (この強度低下の影響と考えられる二次災害としての降雨による斜面崩壊発生も報告されている⁴⁾) を明らかにしていくことは、風倒木災害に強い斜面植生のあり方を考える上で参考になると考えられる。

参考文献

- 1) 宮本邦明ら：1991年台風19号による風倒木に関する調査、砂防学会誌、Vol. 45、No. 3、pp. 18~23、1992
- 2) 石川芳治：平成3年台風19号による風倒木の発生実態、河川、No. 547、pp. 41~44、1992
- 3) 刈住昇：樹木根系図説、誠文堂新光社、1979
- 4) 例えば村田重之ら：台風による風倒木の発生と斜面崩壊との関係、自然災害西部地区部会報・論文集、No. 18、pp. 7~16、1994

(7) 既往の現地調査報告書を参考に設定、(4) 推定値、(9) 各種資料等の計算式による

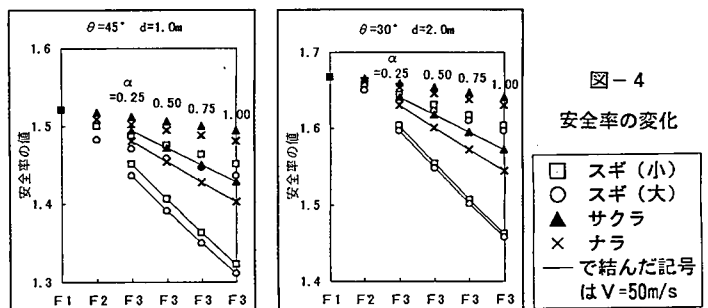


表-3 安全率の低下率 ($\theta = 45^\circ$ 、 $d = 1.0\text{m}$)

	$(F_1 - F_2) / F_1 \times 100$	$(F_1 - F_3) / F_1 \times 100$							
		$V = 25.0\text{m/s}$				$V = 50.0\text{m/s}$			
		$\alpha = 0.25$	$\alpha = 0.50$	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 1.00$	$\alpha = 0.25$	$\alpha = 0.50$	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 1.00$
スギ (小)	1.34	2.21	3.06	3.90	4.75	4.75	8.14	11.54	14.93
スギ (大)	2.47	3.37	4.21	5.06	5.90	5.90	9.27	12.63	16.00
サクラ	0.20	0.59	0.98	1.36	1.75	1.75	3.30	4.85	6.40
ナラ	0.73	1.21	1.69	2.17	2.65	2.65	4.56	6.48	8.39