

逆解析手法による根系土質強度補強効果の推定

○執印康裕（宇都宮大学），堀田紀文（筑波大学），松英恵吾（宇都宮大学）
有賀一広（宇都宮大学），田坂聡明（宇都宮大学）

1. はじめに

森林による表層崩壊防止機能は土質力学的には樹木根系による土質強度定数の粘着力増分にあることが、せん断試験や根の引き抜き試験等を用いた既往研究によって確認されている。さらに粘着力増分の範囲は樹種によってことなるものの、木材生産を主体とする人工林においては、伐採と新規植栽による根の腐朽と生長の影響を受け、林齢によって土質強度補強効果が異なることが明らかになっている。しかしながら、樹木根系による土質強度補強効果は、土砂災害に関連する警戒避難情報の中には組み込まれていない。これは、警戒避難情報等が要求する広域の空間範囲を対象とした場合に、実際の粘着力増分の定量的な評価が困難であることに起因していると考えられる。すなわち、せん断試験や根の引き抜き試験等の直接的な手法によって得られる情報は、空間的には限定的なものであり、その結果をそのまま広域（少なくとも数平方 km 以上）に対してある程度の信頼性をもって適用することは極めて難しい。本論ではこの点に着目し、広域における根系土質強度補強効果の推定可能性について地形の影響を取り込んだプロセスモデルを用いて検討した。

2. 研究対象地及び手法について

解析対象地として宇都宮大学農学部附属船生演習林内のヒノキ人工林分を設定した。本演習林は、高原山系に連なる南北に走る細長い山塊の西斜面に位置しており（およそ北緯 36 度 45 分 - 48 分，東経 139 度 47 分 - 50 分），標高は 260 - 600 m の範囲にある。年平均気温は約 12 °C，年平均降水量はおよそ 1,700 mm である。1 月から 3 月にかけて降雪があるが積雪量は少なく，降水量の大部分が降雨による。演習林の総面積およそ 5.3 km² のうち，ヒノキ人工林分は 3.1 km² を占めている。

本演習林内のヒノキ人工林分を解析対象地として選定した理由は，1) 森林管理のための基本情報である森林簿が整備されていること，2) 1998 年の 8 月末の台風 4 号による集中豪雨によって解析対象地を中心に 36 箇所の複数地点で表層崩壊が記録されており，森林簿情報と照合可能な状態で整備されていること，3) 分布型崩壊モデルの適用に最低限必要な数値標高地図が 10 m グリッドで整備されていること，以上の 3 点による。

降雨データとして船生演習林近傍に設置されている気象庁塩谷アメダス観測点（北緯 36 度 45 分，東経 139 度 50 分，標高 225 m）の 1998 年の時間雨量データを使用した。1998 年の 8 月末の台風 4 号によって発生した解析対象地内のグリッドベースでの崩壊面積はおよそ，3.1×10⁻² km² であり，対象面積に対して崩壊面積率は約 1 % である。崩壊地の林齢－面積関係は全体の分布と比較して，若齢林側にシフトしている。地形の影響を取り込んだプロセスモデルは Okimura and Ichikawa(1985)によって提示されたモデルを基本としたものであり，数値地形モデルの各セルにおいて，降雨による地下水位計算および無限長斜面安定解析式による安全率値を算出することが可能な構造を有している。崩壊発生基準は，(1)式に示す無限長斜面安定解析によって判断し，安全率 1 を下回る 10m グリッドで構成されるセルを計算崩壊斜面と定義した。

表 1 モデル計算基本パラメーター一覧

計算設定諸元	記号	単位	設定値
水の単位体積重量	γ_w	(kN/m ³)	9.81
湿潤土の単位体積重量	γ	(kN/m ³)	17.66
有効間隙率	λ	—	0.35
有効飽和透水係数	k	(m/hr)	1.8
有効土層厚	Z	(m)	1.0
有効内部摩擦角	ϕ	(degree)	30.0
有効粘着力	C_{eff}	(kPa)	—

$$F = \frac{(\gamma Z - \gamma_w h) \cos^2 \alpha \tan \phi + C_{eff}}{\gamma Z \cos \alpha \sin \alpha} \tag{1}$$

但し F : 安全率， γ : 土の湿潤単位体積重量 (kN/m³)， γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m³)， α : 基盤層勾配 (degree)， Z : 有効土層厚さ (m)， h : 基盤層からの地下水位 (m)， ϕ : 有効内部摩擦角 (degree)， C_{eff} : 有効粘着力 (kPa) である。表 1 に使用した基本モデルパラメータの一覧を示す。有効粘着力 C_{eff} の設定については，森林施業にともなう伐採・植栽の林齢による影響を組み込んだ以下の(2)，(3)，(4)式を与えている。

$$C_{eff} = C_{soil} + \Delta C_{rev} + \Delta C_{rot} \tag{2} \quad \Delta C_{rev} = \frac{\Delta C_{veg}}{1 + \mu \exp(-\nu \cdot t)} \tag{3} \quad \Delta C_{rot} = \Delta C_{veg} \cdot \exp(-\beta \cdot t) \tag{4}$$

但し、 C_{soil} ：土の粘着力（kPa）、 ΔC_{veg} ：伐採時の根系による粘着力増分（kPa）、 ΔC_{rev} ：植栽後の根の生長による粘着力変化（kPa）、 ΔC_{rot} ：伐採後の根の腐朽による粘着力変化（kPa）、 β ：根系の腐朽による経年変化パラメータ（ year^{-1} ）、 μ ：苗木の初期値パラメータ、 ν ：根系の生長による経年変化パラメータ（ year^{-1} ）
 t ：伐採・新規植栽後の年数（year）である。

手法としては崩壊を発生させた1998年8月末豪雨を入力降雨として与え、逆解析によってモデル出力値の計算崩壊面積と実崩壊面積が出来る限り一致するように有効粘着力を与えて検討した。検討にあたって、式(2)-(4)に示した有効粘着力の林齢による影響を考慮した場合（Case A）と考慮しない場合（Case B）の2種類を設定し、得られた計算崩壊セルの空間分布と実崩壊の空間分布について比較検討した。

3. 結果及び考察

計算崩壊面積がヒノキ林崩壊地の林齢－面積関係を再現するように(2)から(4)式のパラメータを逆解析によって調整した結果(Case A)、及び逆解析によって得られた計算崩壊面積とほぼ同じ面積となるように、有効粘着力の空間分布を均一に与えて調整した場合の結果（Case B）について示す。図-1 にモデル逆解析によるヒノキ林齢と有効粘着力関係を、図-2 に逆解析によって再現した崩壊地の林齢－面積関係を、表-2 に得られたモデルパラメータ一覧を示す。両ケースの計算崩壊面積は約 $6.0 \times 10^{-2} \text{ km}^2$ であり、実際の崩壊面積（約 $3.1 \times 10^{-2} \text{ km}^2$ ）と比較して大きめの値を示す結果となったが、崩壊面積の単位は同じオーダーにある。有効粘着力に林齢の影響を考慮した条件（Case A）では計算崩壊面積のピークは20年となり比較的良好に実崩壊の林齢－面積関係を再現しているのに対して、考慮しない条件(Case B)では、計算崩壊面積のピークは40年生付近にあり、ヒノキ林全体の林齢－面積関係に近く、実際の崩壊地の林齢－面積関係を再現し得ないことがわかる。林齢による影響を考慮した有効粘着力の範囲は4.3 kPa から6.6 kPa の範囲にあり、考慮しない条件（有効粘着力 5.2 kPa）との最小及び最大差は-0.9 kPa から1.4 kPa である。また逆解析によって得られた林齢－粘着力関係を組み合わせることで、崩壊発生空間分布的中率（実崩壊面積／計算崩壊面積）は低いものの、林齢による影響を考慮しないケースBの場合と比較して2.9 から16.9%へと向上していることが確認された。以上の結果は、崩壊発生記録と森林簿に記載されている林齢情報を本研究による手法で解析することによって、広域を対象として森林の粘着力の定量的な評価がある程度まで可能であることを示唆していると考ええる。

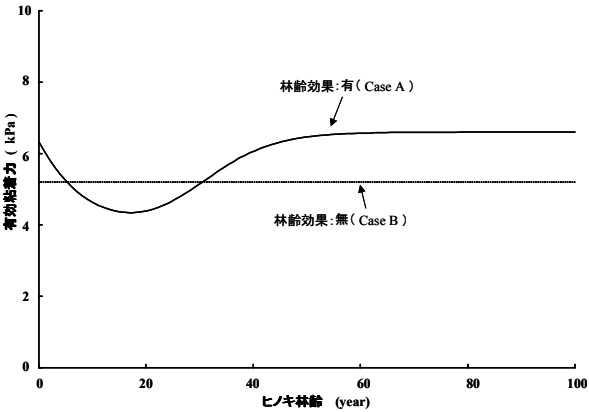


図-1 モデル逆解析によるヒノキ林齢と有効粘着力の関係

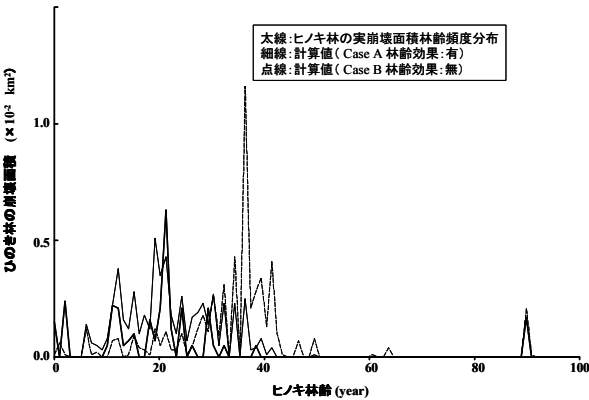


図-2 崩壊地の林齢－面積関係とモデル計算値の比較

表-2 逆解析によるモデルパラメータ一覧

設定モデルパラメータ	記号	単位	Case A	Case B
			林齢効果:有	林齢効果:無
有効粘着力	C_{eff}	(kPa)	-	5.2(const.)
土の粘着力	C_{soil}	(kPa)	3.4	-
伐採時の根系粘着力増分	ΔC_{veg}	(kPa)	3.2	-
根系の腐朽パラメータ	β	(year^{-1})	0.1	-
根系の生長パラメータ	ν	(year^{-1})	0.15	-
苗木の初期値パラメータ	μ	-	100	-

引用文献：Okimura, T., Ichikawa, R.(1985)：A prediction method for surface failures by movements of infiltrated water in a surface soil layer, Natural Disaster Sci., Vol.11, 41-51