

表層崩壊予測の自動化

(有) 秋山調査設計 秋山健一郎

1. はじめに

雨荷重により地層が不安定化して亀裂を生じると、応力（荷重／面積）は増大して変位は加速する。このとき樹木は、亀裂の発生を防止して斜面を保護していることになる。斜面の安定度に関する地形、地質、水文、植生の各量は既知なので、これらから雨による斜面の不安定度と、ヒズミとすべり面の強度低下割合などを推測して、一般斜面の崩壊予測ならびに予測の自動化が行えると考えた。

2. 斜面のしくみ

緩み層という表現を使った場合、地層としての一体性を失って各種の分離面により分断された地層ということになる。この場合、斜面の傾斜角 θ に応じて分離面に囲まれた土塊は不安定化する。地面が水平だと緩み厚 d が無限大でも不安定量はゼロなので不安定量は d と斜面傾斜角 θ の積になる。このとき雨は重心を上昇させて見かけの d を一時的に増加させる。 d の増加は植物にとって生育基盤が拡充であり植生量を λ と

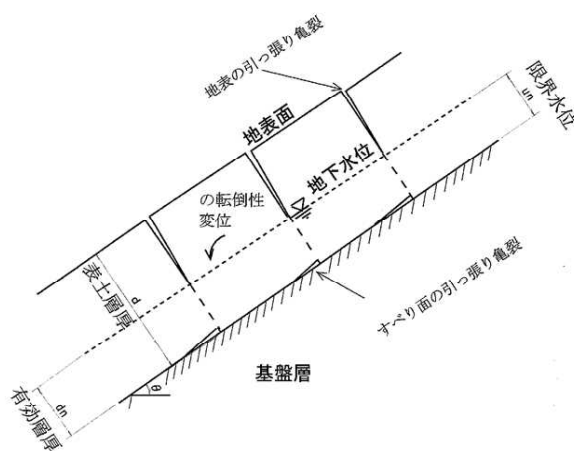


図1 亀裂に伴う有効層厚の減少

すると λ は緩みの進行に応じて大きくなり植生は、不安定度 K を $d \cdot \tan \theta - \lambda = K \div 0$ にするよう順応している。（※2）豪雨がこの均衡を崩し不安定度が+に転じると構造的な亀裂が発生する。亀裂は最小抵抗線上に生じるのでその結果、土塊は傾いた不安定（図1）な状態になる。そして土塊の重心が何らかの原因で上昇し転倒の安定が損なわれると底面の一部に引っ張り力を生じてすべり面が形成される。この土塊の形状を三角形にして重心を下げたのが石積みである。

一方、植物は別の方法で斜面に適応している。根を横に張ってノリ枠と同じように亀裂の成長を防いでいる。草から進化した竹は強い水平根を獲得した。地震の時は竹藪に逃げろなどの伝承があるくらい竹藪は斜面補強を効果的に行っている。竹は上からの崩土も遮り防災林として有用な植物である。昔、古老から竹は屋敷を守るために植えられたと聞いた。これを裏付ける資料として山口県で崩壊事例の研究（※2）がある。県内の3,500ヶ所の森林崩壊で竹林が直接崩壊したヶ所は皆無であった。

3. 斜面の強度

粘着力はさまざまな要素からなる複雑な力である。主に固結層がもつ正規の粘着力 C と、未固結層における一時的な見かけの粘着力 C' からなり、後者の多くは地下水上昇時に働く大気圧の負圧による成分である。緩み層他、未固結層では常時に働くのは ϕ のみであり、未固結層においてこれが安息角を成している。見かけの粘着力 C' は複雑な力であり、通気または透水係数に反比例し、地層が分断され連続性が失われ、亀裂等により通気性が高くなった場合に、見かけの粘着力 C' は低下する。

緩み層においても $\theta = \phi$ の斜面が形成され、雨などによる荷重の増加分は見かけの粘着力によって支えられている。安定を保つのに必要な見かけの粘着力 C' は土塊の含水重量の最大増加分の偏心力の $d \cdot \gamma_w \cdot \tan \theta$ である。この $C' = d \cdot \gamma_w \cdot \tan \theta$ の水の単位体積重量 γ_w を省略して式を変形すると、 $d = C' / \tan \theta$ なので、長方形の限界高さ $d_{\max} = L / \tan \theta$ の L は C' と同じで、転倒の安定とすべりの安定はほぼ同じであることがわかる。地下水位地表で $F_s = 1.0$ なので、これで逆算すると $\phi = \theta$ となる。 d は $1 / \tan \theta$ 、すなわち勾配の関数であり、地質係数 X を比例定数とし $d = X \cdot 1 / \tan \theta$ とする。

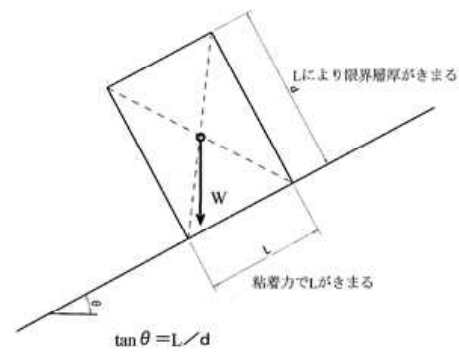


図2 転倒における物体の安定

4. 安定解析の自動化

そこで ϕ に θ を入れると簡便法の諸要素は打ち消しあって消滅したあとは、 $1 + (d - u) \tan \theta / W \cdot \sin \theta = F_s$ となる。 $\tan \theta$ と $W \cdot \sin \theta$ は既知なので、すべりに関する安全率は、 $d - u$ のみで決定される。水位が地表面以上に生じることはないので、表土層は原則として崩壊しない。亀裂を生じて d が n 割の d_n に低下したときで、 $d_n - u$ がマイナスの値になった時点で $F_s < 1.0$ となり緩み層はすべり破壊する。これまでの崩壊事例から $\varepsilon \div K^2$ として、 $n \div 1 - 0.03 \varepsilon$ と考えられる。

n が求まると、 u_n が決まるので、緩み層の透水係数と雨水流入量 Q から水理式で平衡水位 h を求め、 $h = u_n$ を崩壊発生条件として雨量と d の双方を地形補正して崩壊予測を自動で行う。このとき連続雨量からヒズミを決定し、時間降雨量から水位変化を決める。このようにして気象条件から数時間後の時間雨量を予測して一度に数千～数万ヶ所の崩壊予測をリアルタイムで行うのである。

5. 検討事例

平成25年10月15日から16日早朝にかけての台風26号襲来による伊豆大島元町の東側山腹において発生した土砂災害発生斜面であり、谷の深い北側のA区域、中央のなだらかなB区域、谷の深い南側のC区域の3区域とした。植生量は広葉樹幹20cmとし、地質係数A,Cを1.1、Bを1.2として、同年の春より崩壊までの雨量から崩壊直前のヒズミを算出したうえで、当日の降雨量に基づいて各

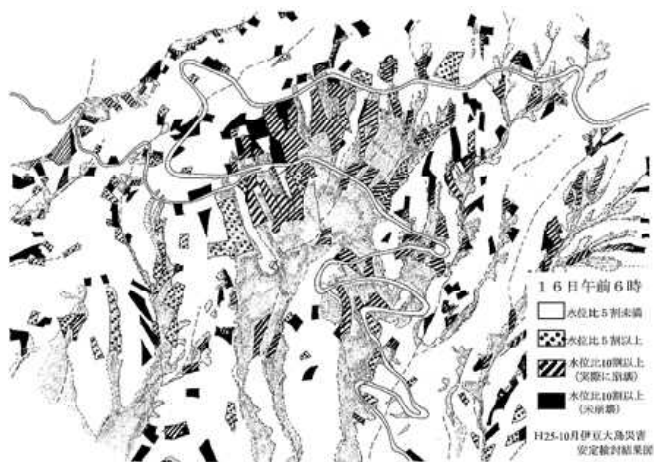


図3 16日6時の状況再現(上が東で道路は御神火スカイライン)

斜面において崩壊水位を超過した斜面を自動計算で求めた。ここで黒とハッチ部分が崩壊、点は崩壊水位の50%超過と判定された斜面である。灰色の部分は実際の崩壊域である。連続雨量と時間雨量との関係で0時では未崩壊であるが午前2時から急増する状況が正確に再現されている。

<参考文献>

※1：秋山健一郎「植生評価による崖崩れ予知と自主防災」平成23年度砂防学会研究発表会概要集

※2：佐渡靖紀「平成18年度研究年報森林保全 竹林と山地崩壊との関係究明」山口県林業指導センター