

1. はじめに

我が国では、集中豪雨や地震に伴う土砂災害が毎年多数発生しており、その発生件数は依然として減少傾向にあるとはいえない。また、対策整備率は今なお低水準にある。この背景には、厳しい財政状況を受けて年々減少する砂防関係予算の影響がある。さらに近年、地球温暖化に伴い、世界レベルでの自然災害の増加が問題視されている。

一方、アセットマネジメント技術の拡大を受け、土構造物である斜面やトンネルをインフラ資産と捉え、予算制約下で、適切に維持管理するための研究が盛んになりつつある。

本研究では、これらの背景を受けて、土砂災害のうち、特に道路に面する斜面を対象に、斜面リスク定量化手法の構築を試みた。また、斜面リスクを活用し、斜面対策の初期投資額を検証するための手法を提案する。

2. 斜面リスクの定量化

2.1 リスクの定義

リスク R を定量的に表現するため、リスクを以下のように定義する。数学的には、損失額の期待値を表す。

$$R = p \times D \tag{1}$$

ここで、 p は崩壊確率、 D は崩壊時の損失額を表す。

2.2 斜面の崩壊確率の算定

斜面災害の発生誘因として降雨を想定し、ある降雨強度の年超過確率 $\psi(\alpha)$ と、その降雨強度における斜面の崩壊確率 p_f の積によって、斜面の崩壊確率 p_a を算定する。

降雨ハザードを、ガンベル分布に従うものとする、降雨強度 α での年超過確率 $\psi(\alpha)$ は次式となる。

$$\psi(\alpha) = 1 - \exp\{-e^{-a(\alpha-b)}\} \tag{2}$$

ここで、 a, b は過去の降雨履歴から求まる定数を表す。

続いて、崩壊モデルとして図1に示す直線すべりモデルを用いると、性能関数 Q は次式のように表される。

$$Q = \left(1 - \frac{\gamma_w H_w}{\gamma H}\right) \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \theta} + \frac{c}{\gamma H} \cdot \frac{1}{\sin \theta \cos \theta} - 1 \tag{3}$$

ここで γ_w は水の単位体積重量、 γ は土の単位体積重量、 H_w は地下水位、 H はすべり層厚、 θ は崩壊面の傾斜角、 c は土の粘着力、 ϕ は土の内部摩擦角を表す。

すなわち、 $Q > 0$ であれば安定を示し、 $Q < 0$ であれば、すべりが発生し、崩壊が起きると考える。ここで、 Q は H_w の関数であるため、 α と H_w を関連付ける必要が

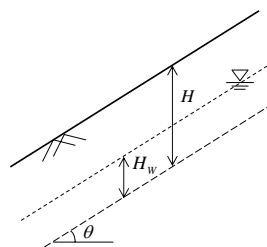


図1 直線すべりモデル

ある。本研究では、文献 11) に示す以下の関係式を用いて、関連付けることとする。

$$H_w(\alpha) = 0.1906 \times \ln \alpha - 0.0635 \tag{4}$$

次に、 Q に含まれる変数の内、土の粘着力 c および土の内部摩擦角 ϕ を確率変数とし、それぞれ以下のような正規分布に従うと仮定する。この結果、式(6)に示すように、 Q も平均 $\mu(\alpha)$ と標準偏差 $\sigma(\alpha)$ の正規分布に従う²⁾。

$$c \sim N(\mu_c, \sigma_c) \quad \tan \phi \sim N(\mu_{\tan \phi}, \sigma_{\tan \phi}) \tag{5}$$

$$Q \sim N(\mu(\alpha), \sigma(\alpha)) \tag{6}$$

これにより、降雨強度 α において崩壊する確率 p_f は、以下の関係式から求められる。

$$p_f(\alpha) = 1 - \Phi(\beta(\alpha)) \tag{7}$$

$$\Phi(\beta(\alpha)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta(\alpha)} \exp\left(-\frac{1}{2} s^2\right) ds \tag{8}$$

ここで、 $\Phi(\alpha)$ は変数 α に対する累積確率を表し、 $\beta(\alpha)$ は信頼性指標と呼ばれ、次式で表される。

$$\beta(\alpha) = \frac{\mu(\alpha)}{\sigma(\alpha)} \tag{9}$$

以上より、斜面の年間崩壊確率 p_a は、 $\psi(\alpha)$ と $p_f(\alpha)$ の積から次式のように算定される。

$$p_a = -\int_0^{\infty} p_f(\alpha) \frac{\partial \psi(\alpha)}{\partial \alpha} d\alpha \tag{10}$$

2.3 損失額の算定

本研究では、「道路斜面のリスク分析・マネジメント支援マニュアル(案)」³⁾ に示す算定方法にそって損失を定義し算定する。損失の算定項目は、D1：人身損失、

D2：道路復旧費、D3：迂回損失、D4：救急医療損失である。

損失算定にあたり、崩壊形態を図2のようにモデル化し、想定到達土砂量から片側車線ごとに各損失を求めた。

3. 事例計算の結果

以上の算定法に従い、10箇所モデル斜面において斜面リスクを算定した結果を表1に示す。なお、降雨確率には、高山気象台の1945～2006年の降雨履歴を用いた。

この結果から、従来重要視されてきた安定解析を用いた崩壊確率の結果と、斜面リスクとの間には必ずしも相関関係がないことが分かった。このように、「斜面リスク」という貨幣価値化された指標を用いることで、崩壊時の社会への影響度を適切に判断することができる。また、斜面对策の優先順位を客観的に評価できると考えられる。

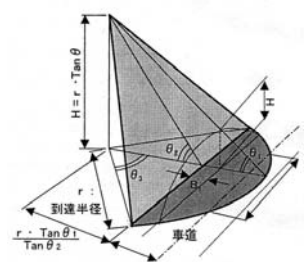


図2 円錐形土砂到達モデル³⁾

表1 モデル斜面における事例計算結果(万円)

モデル 斜面	年崩壊 確率 p_n	人身 損失D1	道路閉鎖 費D2	迂回 損失D3	全損失 D	斜面リスク R
斜面1	0.06208	1,461	2,157	31,196	34,814	2,161
斜面2	0.99595	34	617	3,931	4,582	4,564
斜面3	0.20006	736	906	6,673	8,315	1,664
斜面4	0.99351	169	906	17,874	18,949	18,826
斜面5	0.10407	1,229	1,580	33,513	36,322	3,780
斜面6	0.26583	221	2,061	23,092	25,374	6,745
斜面7	0.25023	330	1,387	6,978	8,696	2,176
斜面8	0.28050	1297	1,002	41,844	44,144	12,382
斜面9	0.17308	194	1,387	14,137	15,719	2,721
斜面10	0.88896	0	714	8,161	8,875	7,889

4 斜面对策の初期投資額の検討

4.1 斜面のLCC (Life Cycle Cost) の定義

以下、斜面6において初期投資額を検討した事例を紹介する。まず、年間単位で算定された斜面リスクを用いて、斜面のLCCを算定する必要がある。そこで、斜面リスクを社会全体のコストと捉え、斜面のLCCを以下のように定義する。

$$LCC_N = \sum_{i=0}^N R_i \left(\frac{1}{1+r} \right)^{i-1} + C_0 \quad (11)$$

ここで、 R_i は*i*年目の斜面リスク、 N は供用期間、 C_0 は初期投資額、 r は社会的割引率(4%)を表す。なお、 R_i の経年変化の要因として、交通需要の変化のみを考える。

4.2 初期投資額の検討

まず、初期投資を実施しない場合の LCC_{50} を求める。今、将来の交通量は予測できているものと仮定すると、図3のように $LCC_{50} = 180,739$ (万円)が求められる。

次に、 $LCC_{50} = 180,739$ を満たす初期投資 C_0 を逆算する。ただし、初期投資を実施した場合には、斜面リスクは低減を考慮しなければいけない。ここでは、低減率を80%と仮定する。その上で未知数である C_0 を求めると、図3に示す通り、 $C_0 = 144,591$ (万円)を求めることができる。

この C_0 は、初期投資を行った場合と、行なわない場合の LCC_{50} が完全に一致する場合の初期投資額を表している。そこで、この時の C_0 を「限界投資額 C_{sup} 」と呼ぶことにする。また、 C_{sup} を基に、任意の投資額での投資効率を判断するため指標として「投資効率 W 」を、以下のように新たに定義する。

$$W(\%) = \left(1 - C_0 / C_{sup} \right) \times 100 \quad (12)$$

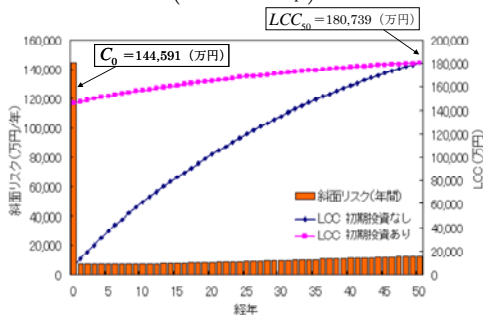


図3 LCCの算定結果(斜面6の場合)

ここで、 C_0 は初期投資額、 C_{sup} は限界投資額を表す。つまり、計画されている C_0 を用いて W を算定した場合、 W が正であれば事業を「採択」、負であれば事業を「採択すべきでない」という判断ができる。

なお、図5に示す縦軸に W 、横軸に C_0 とした場合に描ける直線を「投資効率関数 $W(C_0)$ 」と呼ぶことにする。

4.3 道路交通量の不確実性を考慮した投資検討

ここまで、将来の道路交通量が確実に予測できていると仮定した。しかし、実際には、将来の交通量には不確実性を含んでおり、その不確実性を考慮したうえでの投資額の検証が必要となる。

そこで、交通量の経年変動を、金融工学で用いられる「算術ブラウン運動」で表現し、モンテカルロシミュレーションを用いて、将来の不確実性を考慮したLCCの予測を行った。その結果を図4に示す。

LCC_{50} は正規分布となるため、分布の上下5%の累積密度の範囲を除外し、その上限値を LCC_{50}^{UpSide} 、下限値を $LCC_{50}^{DownSide}$ とする。これにより、3.2と同様に、投資効率関数 $W(C_0)$ を求めることができる。この結果、図5に示す通り、交通量の不確実性が無い場合の $W(C_0)$ に対して、ある幅を持つ直線を描けることが明らかとなった。このように、斜面对策の初期投資額を判断するためのツールとして、 $W(C_0)$ を活用できる可能性がある。

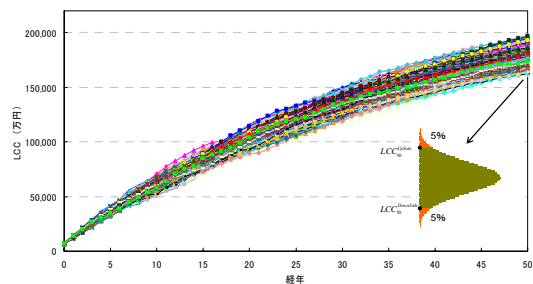


図4 LCCの算定結果(不確実性あり)

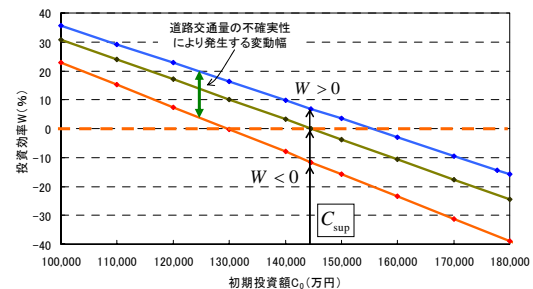


図5 投資効率関数 $W(C_0)$

5. まとめ

本研究では、斜面リスク定量化方法を明らかにした。また、斜面对策の投資額を検証するための指標として、投資効率 W が有効となりうることを明らかにした。

今後は、モデル条件の検証等を実施する必要がある。

参考文献

- 1) (社)建設コンサルタツ協会 近畿支部：斜面安定評価における劣化概念の導入
- 2) 大津 宏康：斜面对策工の性能低下過程の不確実性を考慮したLCC評価
- 3) 土木研究所：道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援マニュアル(案)