

金融工学分野におけるリスク定義に基づく岩盤斜面の災害リ スク評価手法の一提案

A PROPOSAL ON RISK EVALUATION OF ROCK SLOPES BASED ON FINANCIAL ENGINEERING THEORY

大津宏康*・大西有三**・西山哲***

Hiroyasu OHTSU, Yuzo OHNISHI, Satoshi NISHIYAMA

This paper presents the basic methodology on risk evaluation of rock slopes based on financial engineering theory. Firstly, in order to make clear focal point presented in this paper, the difference of risk definition between reliability analysis and financial engineering theory is discussed. Secondly, the basic procedure to evaluate risk of rock slopes caused by earthquakes is presented. Finally, results of risk evaluation focusing on actual rock slope, point out that the proposed methodology based on financial engineering theory is very effective from a viewpoint of risk finance.

Key Words: rock slopes, risk, event tree, asset management, financial engineering

1. はじめに

道路に隣接する岩盤斜面のような道路構造物の維持管理という問題は、従来は防災という観点から検討されてきた。もちろん、この防災という観点からの議論は今後とも不可欠であるが、少子高齢化に伴う税収減少という課題に直面する成熟型社会においては、道路構造物の維持・補修・更新に対しては、従来の防災という観点に加えて、予算が制約される条件の下で補修を実施するための優先順位を客観的な指標に基づき設定するなどの、いわゆる維持補修問題の最適化という課題に対処する方策を立案することが必要になる。このような観点から、昨今土木構造物のアセットマネジメントという考え方が注目されるようになってきたものと推察される。

ここで、アセットマネジメントの基本概念とは、本質的には技術的な観点からの検討事項である構造物（資産）マネジメントシステムに、社会経済的な観点からの検討事項となる資産会計システムを連動させることが可能となる総合的なマネジメントシステムを構築するものと位置づけられるであろう。さらに、技術的な検討事項である構造物（資産）マネジメントシステムとは、以下のようなサブシステムにより構成されるであろう。

- ① 構造物の性能、機能水準の現在状態の規定
- ② 劣化あるいはハザードの到来に対する将来の状態の予測

*正会員 博士（工学） 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

**正会員 工学博士 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

***正会員 博士（工学） 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

③ 費用対効果の評価を含めた、適切な箇所およびタイミングでの維持・補修・更新のルール

ここで、前述のように、将来的には資産マネジメントシステムは、資産会計システムとリンクし、効率的な予算配分等に供する情報を提供する技術となることが期待されるため、上記の①～③の事項の内では、③の費用対効果の評価に基づく適切な補修・更新のルール化が、最上位の検討課題になるものと推察される。この課題について対処する上では、構造物の性状あるいは外力となるハザード等に関する様々な不確実性要因を考慮することが必要となる。このため、アセットマネジメントとしての構造物の補修・更新問題において、構造物に含まれる不確実性を的確に評価すると共に、その不確実性に起因するリスクを貨幣単位で評価し意思決定問題の判断指標とする、リスク工学という概念の適用性に関する検討がなされるに至っている。

なお、近年様々な分野においてリスク工学に適用性に関する研究が注目されつつあるが、リスクという概念が本来経済の分野から発生したものであるため、現状ではその定義が統一されていないのが現状である。その状況を要約すれば、リスクとは、1) 定性的な危険度、2) 損失期待値および 3) 標準偏差を表す用語として使用されることが多い。この内、損失期待値は、工学分野で用いられるリスクの定義であり、一方標準偏差は、金融工学分野で用いられるリスクの定義である。

筆者らは、これまでに道路に隣接する岩盤斜面を対象としたリスク評価手法を提案してきたが、これらの研究においてはリスクとして工学分野の定義に基づく損失期待値を用いてきた。ただし、この定義の下では、リスク評価後のリスク対応として、リスクコントロールの指標としては適用可能であるが、近年注目されているアセットマネジメントとしてのリスクファイナンスに適用することは不可である。

このような観点から、本研究では、斜面を対象としたリスク評価手法として、金融工学分野におけるリスク定義に基づく岩盤斜面リスク評価手法について提案するものである。

表-1 リスクの大分類

- 1) 主観的リスク (Subjective Risk)
 - ・ 半定量的な指標
 - ・ 経験・直感に基づき設定
(アンケート、ブレインストーム)
- 2) 客観的リスク (Objective Risk)
 - ・ 定量的な指標
 - ・ 過去の具体的なデータに基づき設定
(数学モデル/統計・確率モデル)

2. リスクの表現方法

リスクの表現方法は、一般的には表-1 に示すように、主観的リスク (Subjective Risk) と客観的リスク (Objective Risk) とに大別される。ここで、主観的リスクとは、多くの関係者の経験・直感等の主観に基づく定性的な判定結果を集めて、総合的に評価するものである。これに対して、客観的リスクは、実験結果あるいは過去の記録に基づき不確定量を統計・確率理論を用いてモデル化し、そのリスクを定量的に算定されるものである。例えば、及び金融工学¹⁾及び信頼性工学²⁾の分野で用いられるリスクがこれに相当する。本章では、以下に両工学分野において用いられるリスクの表現方法について概説する。

(1) 信頼性工学におけるリスクの表現方法

工学分野でのリスクの基本概念は、構造物が地震等の外力を受けて何らかの被害を受ける危険性を表現するものである。このためには、作用する外力レベルとその外力により構造物が被害を受ける危険性を明確に関連付ける必要がある。つまり、構造物の被害推定を行うことが必要となる。

もちろん、構造物の被害とは確定的に推定されるものではない。このため、工学分野でのリスクとは、被害が想定される事象に対して、その事象が発生する頻度（あるいは可能性）とその際の損失のレベルとを掛け合わせた損失期待値 (Expected Loss) として定義されることが一般的である³⁾。

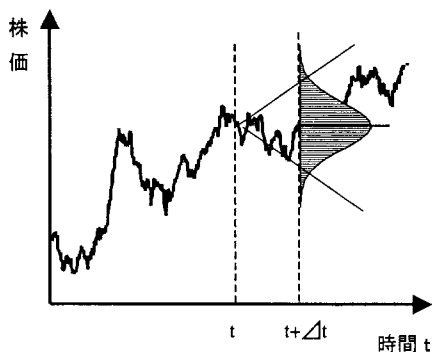


図-1 株価の推移に関するモデル化（模式図）

$$R = \sum_{i=1}^J P_i \times C_i \quad (1)$$

ここに、 R は損失期待値、 P_i は事象 i が発生する確率、 C_i は事象 i が発生する場合の損失を表す。

(2) 金融工学におけるリスクの表現方法

金融工学分野では、リスクは期待値からのはずれ量として定義されることが一般的である。具体的には、確率分布を表す指標である標準偏差 σ （分散 σ^2 ）、あるいは VaR^4 （バリューアットリスク）が用いられる。ここでは、以下にこの金融工学分野での定義に基づくリスクの評価方法について、簡易な事例を用いて説明を加えるものとする。

まず、金融工学におけるリスク評価の基本概念は、図-1 の模式図に示すように、複雑な変動を示す株価を対象として、時間 t から Δt だけ経過した時点の株価を予測した場合に、その変動幅が同図に示すような正規分布によりモデル化されると仮定するものである。

ここで、このリスク評価に関する簡易な事例として、A 社および B 社の株価の収益率が、それぞれ表-2 に示すように予測されたものと仮定する。この問題での関心は、いずれの会社の株が安定資産あるいは、危険資産であるかであり、その課題に対して、それぞれの株価の収益率に対するリターン μ （期待値）およびリスク σ （標準偏差）は、次式のように算定される。

$$\begin{aligned} \mu &= \sum_i p_i \times r_i \\ \sigma^2 &= \sum_i p_i \times r_i^2 - \left(\sum_i p_i \times r_i \right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 p_i は株価の変動がシナリオ i となる確率、 r_i はシナリオ i に対する収益率を表す。

したがって、A 社株および B 社株に対する、リターンおよびリスクは、それぞれ次式のように算定される。

1) A 社株のリターン μ_A および B 社株のリターン μ_B

$$\begin{aligned} \mu_A &= \sum_{i=1}^3 (p_A)_i \times (r_A)_i = 0.1 \times 7.0 + 0.8 \times 5.0 + 0.1 \times 3.0 = 5.0 \\ \mu_B &= \sum_{i=1}^3 (p_B)_i \times (r_B)_i = 0.3 \times 30.0 + 0.4 \times 10.0 + 0.3 \times (-10.0) = 10.0 \end{aligned} \quad (3)$$

2) A 社株のリスク σ_A および B 社株のリスク σ_B

表-2 2 社の株価の収益率の予測結果

(a) A 社株の収益率

シナリオ分類	確率 p	収益率 $r(\%)$	$p \times r$	$p \times r^2$
楽観的シナリオ	0.1	7.0	0.7	4.9
平均的シナリオ	0.8	5.0	4.0	20.0
悲観的シナリオ	0.1	3.0	0.3	0.9
Σ	1.0		5.0	25.8

(b) B 社株の収益率

シナリオ分類	確率 p	収益率 $r(\%)$	$p \times r$	$p \times r^2$
楽観的シナリオ	0.3	30.0	9.0	270.0
平均的シナリオ	0.4	10.0	4.0	40.0
悲観的シナリオ	0.3	-10.0	-3.0	30.0
Σ	1.0		10.0	340.0

$$\sigma_A = \sqrt{25.8 - (5.0)^2} = 0.89 \quad (4)$$

$$\sigma_B = \sqrt{340.0 - (10.0)^2} = 15.49$$

この算定結果を、リスク・期待値平面上にプロットした結果を図-2に示す。同図に示すように、この事例では、A社株はローリスク・ローリターンな商品、一方B社株はハイリスク・ハイリターンな商品と解釈されることになる。

なお、金融工学は、投資家が「at your own risk」で上記のようなモデル化により算定される投資に対する損失を、数学的根拠に基づき出来るだけ小さくすること（リスクヘッジ）を目的とした理論と位置付けられる。

前述のように、現状での工学分野でのリスクとは、損失期待値として定義されることが一般的である。これは、いうまでもなく工学分野におけるリスクに関する基本的な考え方が、金融工学と異なっていたことによるものである。すなわち、金融工学においては、金融商品の変動が期待値（リターン）の通りであるならば、誰にも損失は発生しないため、その期待値からのはずれ量がどの程度となるかが、そのリスク評価における最大の関心事である。これに対して、これまでの工学分野においては、現状の機能が損なわれた場合には、どの程度の損失が発生するかが、そのリスク評価における最大の関心事であったと位置付けられる。しかし、今後工学分野におけるリスク評価の精度についても議論していく上では、金融工学と同様に、従来の損失期待値に加えて、その期待値からのはずれ量についても検討を加えることが必要となるものと推察される。

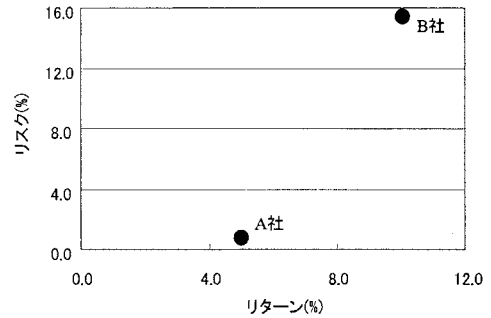


図-2 A社株およびB社株のリスク・期待値平面上へのプロット結果

3. 地盤工学分野におけるリスク評価事例

ここでは、図-3に示す斜面での落石に関するリスク評価モデルを用いて、従来の工学分野における損失期待値を用いたリスク評価と、2.に示した金融工学分野の定義に基づくリスク評価結果の関係について示す。

図-3に示すモデル斜面は、斜面とその下の道路、道路の外側の海からなるものとする⁵⁾。同図に示す対象斜面では、斜面の高さ約45mから70mにわたって不安定ブロックが6個存在することから、地震をハザードとした場合に様々な崩壊モードが想定される。そこで、本検討では斜面崩壊に伴いどのような被害が発生するかという観点から、被害シナリオの分類を行う。ここで、被害パターンを分類するための判定事項として、以下の3項目が想定される。

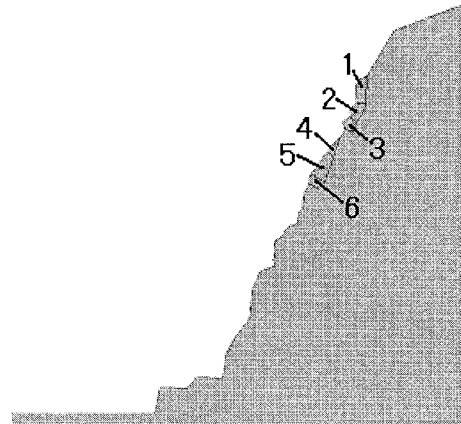


図-3 モデル斜面⁵⁾

- 1) フェーズ1: 落石が生じるか否か
- 2) フェーズ2: 落石の最長到達点
- 3) フェーズ3: 落石がどの領域に留まっているか

ここで、フェーズ2およびフェーズ3の判定項目を用いた理由は、以下のように要約される。

- ・岩盤ブロックが最長到達点に達するまでにその手前の斜面や道路上で必ず跳躍しているため、ブロック

の最長到達点が道路上または海である時には、道路を修復する必要がある。

- ・道路上のブロックの撤去または道路の修復に伴い、通行止めまたは片側交互通行にする必要がある。

以上の条件の下で、対象斜面の地震をハザードとした場合の被害シナリオは、イベントツリーを用いて図-3に示すように8パターンに分類される。

このような多様な被害シナリオが発生する状況は、不連続性体解析手法の一つである DDA 解析において、崩壊のトリガーになる強度パラメータ（粘着力と内部摩擦角）と、転落時の岩

盤ブロックのエネルギー損失を評価するパラメータ（影響粘性力）をそれぞれ確率変数としてモデル化し、地震力として所定の水平震度を作用させたモンテカルロシミュレーションにより算定可能となる。そのモンテカルロシミュレーションの結果の事例及び解析パラメータについては、参考文献5を参考にされたい。

モンテカルロシミュレーションの結果を整理することで、図-3のイベントツリーに示す各分岐確率および、各被害シナリオにおいて道路を復旧するために撤去すべき岩塊の個数(体積)を算定することが可能となる。その一事例として、水平震度 $k_h=0.10$ の場合の各分岐確率、被害シナリオの生起確率および、その被害シナリオに相当する損失額の算定結果を図-4に示す。なお、この事例での損失としては、以下の項目を評価している。

- ・事業者損失：復旧費、人的・物的補償費
- ・利用者損失：道路閉鎖期間の迂回走行時間損失

この各損失項目の具体的な評価方法については、参考文献5を参考にされたい。

ここで、図-4に示した各被害シナリオの生起確率と損失額の関係は、表-2に示した株価の収益率の予測結果に全く同様である。したがって、図-4に示す結果に対する、損失期待値 R およびリスク（標準偏差） σ は次式のように算定される。

$$R = \sum_i p_i \times r_i$$

$$\sigma^2 = \sum_i p_i \times r_i^2 - \left(\sum_i p_i \times r_i \right)^2 \quad (5)$$

すなわち、従来は工学分野においては、式(2)に示したように損失期待値 R をリスクとして評価してきたが、金融工学分野と同様に、損失期待値周りのはずれ量 σ をリスクとして評価することが可能となる。

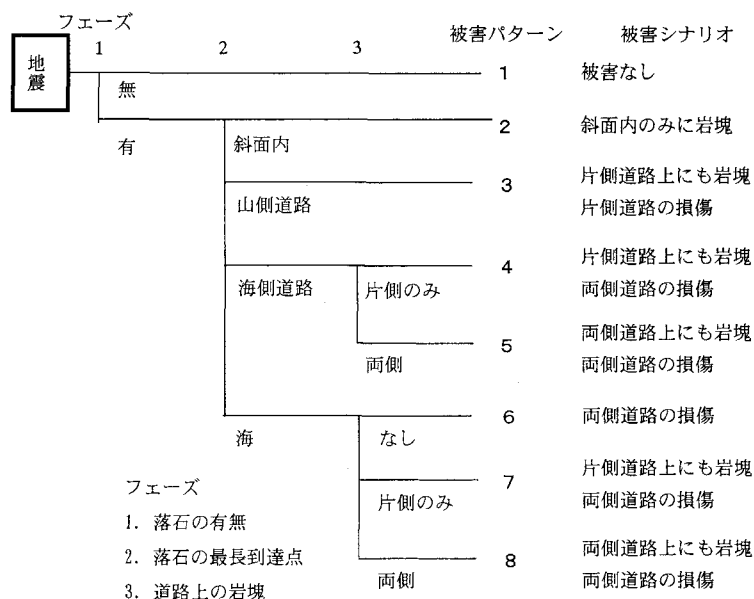


図-3 イベントツリーを用いた被害シナリオの設定

フェーズ			確率 P_i	事業者損失 (百万円)	利用者損失 (百万円)
1	2	3			
無: 0.73			0.73	0	1733
有: 0.27	斜面内: 0.00		0.00	0	1733
	山側道路: 0.19		0.05	109.8	4547
	海側道路: 0.33	片側: 1.00	0.09	315	6495
海: 0.48		両側: 0.00	0.00	200	7361
	なし: 0.92		0.12	358	5628
		片側: 0.08	0.01	203.6	6495
		両側: 0.00	0.00	200	7361

図-4 各分岐確率、被害シナリオの生起確率及び、その被害シナリオに相当する損失額の算定結果

各水平震度 k_h に対するモンテカルロシミュレーション結果に基づき、式(5)から算定される損失期待値 R およびリスク（標準偏差） σ をプロットした結果を図-5に示す。同図に示すように、損失期待値周りのはずれ量として表したリスクは、破壊確率が零以上となる水平震度 k_h が0.100の段階で最大値となる。これは、図-3に示したイベントツリーでの被害シナリオ分類の感度が高い、すなわち多様な破壊モードが想定されることに起因するものである。これに対して、水平震度 k_h が0.125以上では、ほぼ図-3に示したイベントツリーでの被害シナリオが一定、すなわち破壊モードが一定になることに起因するものである。

次に、式(5)に基づき算定された、損失期待値および、損失期待値土標準偏差と、水平震度 k_h の関係を図-6に示す。同図に示す結果の内、損失期待値と水平震度 k_h の関係は、従来の工学分野での表記ではロス関数と称されるものである。この結果から明らかなように、多様な破壊形態が想定される斜面崩壊（この事例では落石）に伴うリスクの評価精度を考える上では、従来の損失期待値を用いたロス関数を検討するだけでは不十分であり、その損失期待値周りのはずれ量を考慮することが不可欠となる。

4. まとめ

本研究においては、斜面を対象としたリスク評価手法として、金融工学分野におけるリスク定義に基づく岩盤斜面リスク評価手法について示した。この結果として、このような損失期待値周りのはずれ量を考慮した損失評価は、リスク評価の後の検討課題となる、リスク対応の内のリスクファイナンスという観点から不可欠となる。というのは、リスクファイナンスの代表的な方法は保険によるリスク転嫁である。例えば、地震に伴う損失に対する保険の料率設定を行うためには、損失期待値のみの議論では不十分であり、損失期待値に加えて、その値に対するはずれ量を評価することが重要な検討課題になることを明らかにした。

参考文献

- 1) 例えば、Milgrom, P. and Roberts, J.: 奥野正寛他訳：組織の経済学，NTT出版，1997。
- 2) Ang, A. H.-S. and Tang, W. H.著，伊藤學，亀田弘行，黒田勝彦，藤野陽三共訳：土木・建築のための確率・統計の応用，丸善，pp.357-468，1988。
- 3) Benjamin, J. R. and Cornell, A. A.. 1970. Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill, pp. 578-580.
- 4) 山下智志：市場リスクの計量化とVaR，朝倉書店，2000。
- 5) 大津宏康，大西有三，西山哲，竹山雄一郎：岩盤崩落による社会経済的損失を考慮したリスク評価に関する研究，土木学会論文集No.708/Ⅲ-59，pp.187-198，2002。

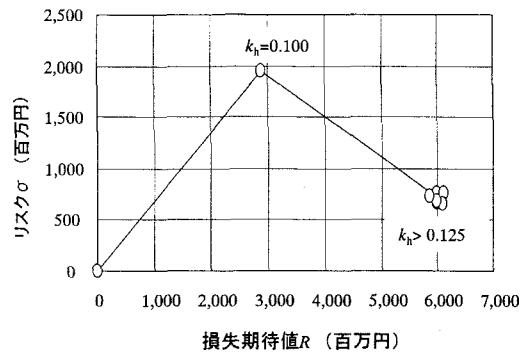


図-5 損失期待値 R とリスク σ の関係

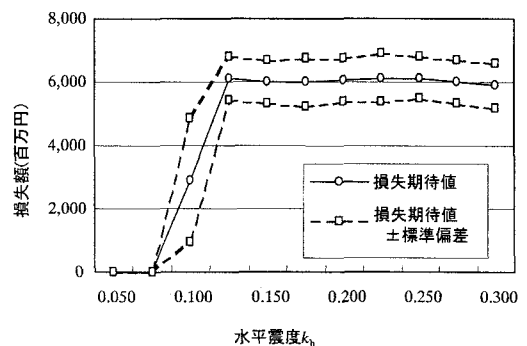


図-6 水平震度 k_h と損失の関係