平均・分散アプローチを活用した 最適落石災害対策計画

高木 朗義¹・倉内 文孝²・丸山 竜平³

¹正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail: a_takagi@gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail: kurauchi@gifu-u.ac.jp

³正会員 岐阜県県土整備部 (〒500-8570 岐阜市藪田南2-1-1)
E-mail: maruyama-ryuhei@pref.gifu.lg.jp

我が国の山間地域では常に落石災害の危険にさらされている一方で、対策に用いることができる予算は厳しく、優先順位を決めて落石災害対策を行う必要がある。このような際に、期待被害額のみによる便益は対策効果を過小評価していることが指摘されている。本研究では、平均・分散アプローチを採用することで、所与の予算制約の下で災害リスクと対策後の損失額の不確実性の重み付き和を最小化する最適対策戦略を決定する数理最適化問題を定式化する。斜面災害発生確率が独立と仮定した場合には、この問題は二値整数線形計画問題（BILP）となる。仮想データを用いて提案したモデルの挙動を確認すると共に、岐阜県飛騨圏域における落石災害対策計画に適用することで、提案した手法の有用性を検証した。

Key Words : risk management, mean-variance approach, rock-fall disaster

1. はじめに

高度に発展した現代社会では、ますます災害時の損失は大きくなっている。この理由は簡単でもあり難しくもあるのである；人間や社会がより脆弱になっているのである。人間はより脆弱な地域に集中し、自然の耐災力を低下させ、そして経済活動により環境破壊を進め、災害危険性を高めている。このような中、我々はリスクとともに生きていかなければならないことを認識し、より安全な社会の形成のために、リスクを認識、評価し、そしてそれを政策に活かしていくことが重要である¹⁾。

我が国の山間地域では、常に落石災害の危険にさらされている。岐阜県においても、いかに効率的に落石災害対策を進めていくかが大きな課題となっている。一方で、対策に用いることができる予算は多くなく、合理的に落石災害対策を行うことが求められている。このような際には、対策費用に対する効果、すなわち費用対効果に基づき対策箇所の優先順位決定が行われることが多い。さらに、その効果は落石災害の発生確率に災害発生時の損失を乗じた期待損失が、対策を講じることでどの程度軽減するかと定義することが多い。この際、災害が発生すれば甚大な被害が生じることがわかっていたとしてもそ

の災害発生確率が非常に小さく見積もられる場合、期待損失額としては小さくなってしまい、対策が後回しになることも考えられる。特に、災害発生後において、「ひとたび発生すれば被害が甚大であることがわかっているならなぜ対策を優先しなかったのか」といった批判がしばしば生じる。このような批判は、災害発生の頻度には言及しておらず、発生後の被害の大きさによるものといえるだろう。すなわち、災害発生確率を加味した期待損失だけでなく、その結果生じうる損失の大きさも加味した評価が必要と考えられる。

本研究では、ひとたび災害が発生すれば甚大な被害を生じる事象に対して優先性を付加するフレームワークを構築し、実務の現場においてしばしば生じる期待損失軽減による優先順位決定の課題を改善することを目的とする。そのために、平均・分散アプローチを適用することを提案し、損失額の期待値と分散をパラメータ α を介して結合することで、災害発生時の損失額の大きさを重視可能な方法論を構築する。所与の予算制約下での不確実性を考慮した最適対策箇所の組み合わせを決定する最適化モデルを構築するとともに、岐阜県飛騨圏域における落石災害対策計画に適用することで、提案した手法の有用性を確認する。

災害発生という不確実下でのプロジェクト便益において、被害軽減額の期待値を便益と捉えることには、Weisbrod²⁾、Bishop³⁾をはじめ多くの研究者が過小評価であることを指摘しており、不確実性下の便益定義をOption Priceとし、評価する方法が提案されている^{4,5)}。また、小林・横松⁶⁾は、期待被害額による便益評価は、家計が被った被害額が災害保険により完全にカバーされる場合を想定したものであり、自然災害のような巨大性・集合性を持つカストロフ・リスクの場合、社会全体で生じる被害を災害保険により担保できないことを指摘し、相互保険と状況依存的証券を組み合わせた災害保険によりパレート最適災害リスク配分を分権的に達成することが可能であることを示した上で、カストロフ・リスクの軽減便益の測定手法を提案している。ここで示した手法は、いずれも防災投資の前後での一般均衡理論に基づき等価的偏差としてオプション価格を推定しており、その推定においては一般均衡モデルを活用することが必須である。一方、道路管理者が数ある災害危険地点における防災投資を考えるにあたり、対策の有無やその組み合わせごとにそれぞれ一般均衡状態を求めることは現実的ではないと考える。対策の有無による効果が加法的に表現できる方法論の構築が必要と考え、本研究では平均・分散アプローチの適用を検討することとする。

土木計画分野における平均・分散アプローチの適用例として、まずは意思決定理論への適用を試みたものがあげられる。有馬⁷⁾は、経路選択決定において平均・分散モデルの適用を提案している。また、社会資本の資源配分方法に適用した例として、大堀・原田⁸⁾は、職員の業績率を確率変数と捉え、業績率の期待値と標準偏差に着目し、一定の期待業績率を確保しながらリスクを最小化する、あるいはリスクを一定値に抑えながら業績率を最大化する手法を提案しているものがある。本研究では、災害リスクを確率変数と捉え、その平均と分散を考慮した最適戦略を求める方法を提案する。

2. 平均・分散アプローチに基づく最適化モデルの構築

(1) 平均・分散アプローチの概要

本研究では、金融工学などで活用されているポートフォリオ最適化問題を援用する。株式や債券などの証券投資を行うとき、ポートフォリオ(複数の種類で構成される組み合わせ)を組んで投資を行うことが一般的である。そして、投資家にとって最適なポートフォリオを求める問題を一般的にポートフォリオ最適化問題と呼ぶ。ポートフォリオ最適化は、以下の3とおりのいずれかで定式化される⁹⁾。

a) 投資家が要求するリターン尺度がある一定値以上

のもとでリスクを最小化する問題を解く。

- b) 投資家が許容するリスク尺度の元でリターン尺度を最大化する問題を解く。
c) リターン尺度とリスク尺度を用いて定義された関数を最大化する問題を解く。

本研究では、この中のc)の中で特に一般的に用いられている平均・分散モデル¹⁰⁾を用いた落石対策計画策定のための手法を開発する。平均・分散モデルでは、リターン尺度とリスク尺度の重み付き和をもって評価を行う。なお、目的関数の形としては、ここで採用する平均・分散の重み付き和に限定されているわけではなく、リターン尺度とリスク尺度を個別に取り扱う多目的計画法とし、パレート最適解を求める方法¹¹⁾なども考えられるが、ここではモデルの簡便性を重視した。また、リターン尺度を対策による損失額の期待値の軽減分(以下期待値軽減)、リスク尺度を対策による損失額の分散の軽減分(以下分散軽減)とする。損失額の分散を考慮することで、損失額の組み合わせと各斜面を対策することによって軽減される損失額の総和のバラツキを表し、その損失額の分散を対策効果の不確実性として算出することが可能となる。

(2) 対策効果の定義

本研究では、ある被災が生じる確率と被災した場合の期待値軽減分と分散軽減分の重み付き和を目的関数として設定する。計算にあたっては、落石災害が発生する年確率は、斜面ごとに独立な事象としてとらえることとした。また、ある瞬間に同時に2つ以上の災害が発生しないものとし、1年に複数の斜面で被害が発生した場合の年間損失額は各斜面で定義される損失額の和で示されることとする。なお、現実には豪雨発生時などにおいて複数の落石が近辺で同時に発生することは多々あり、なおかつこの場合の損失額は単純に単一斜面において災害が発生したときの損失額の和とはならないため、これらの仮定が適切とはいえない。一方で、落石災害発生確率に相関性を考慮する場合、計算が非常に複雑になってしまう。そのため、ここでは相関性の考慮、あるいは独立性を確保するための工夫などに関しては今後の課題と位置づけることとし、各落石災害の発生は独立事象として取り扱うこととする。

今、斜面*i*における年落石災害発生確率を p_i 、斜面*i*における落石による社会経済的損失を d_i とする。このとき、落石災害年発生確率はベルヌーイ分布に従うと見なすことができ、それを用いて落石災害の年間損失額の平均 e_i および分散 v_i は次のように記述できる。

$$e_i = p_i d_i \quad (1)$$

$$v_i = p_i(1 - p_i)d_i^2 = p_i d_i^2 - (p_i d_i)^2 \quad (2)$$

また、斜面ごとの災害発生確率は独立であると仮定していることから、全ての斜面に対する現状の年間損失額の期待値 E_0 および分散 V_0 は各斜面に関する平均および分散の和として次のように記述できる。

$$E_0 = \sum_i e_i = \sum_i p_i d_i \quad (3)$$

$$V_0 = \sum_i v_i = \sum_i \{p_i d_i^2 - (p_i d_i)^2\} \quad (4)$$

今、ある年度における対策斜面の集合を要素数 N の二値変数ベクトル $\mathbf{x}$ ($= (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$, 斜面 i を対策するなら 1, しないなら 0) で表現するとしよう。ある年度の対策斜面が $\mathbf{x}$ で表現されるとき、年間損失額の期待値軽減分 $\Delta E[\mathbf{x}]$ および分散軽減分 $\Delta V[\mathbf{x}]$ は、次のように記述できる。

$$\begin{aligned} \Delta E[\mathbf{x}] &= \sum_i p_i d_i - \sum_i (1 - x_i) p_i d_i \\ &= \sum_i x_i p_i d_i \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta V[\mathbf{x}] &= \left\{ \sum_i p_i d_i^2 - \sum_i (p_i d_i)^2 \right\} \\ &\quad - \left\{ \sum_i (1 - x_i) p_i d_i^2 - \sum_i (1 - x_i) (p_i d_i)^2 \right\} \\ &= \sum_i x_i \{p_i d_i^2 - (p_i d_i)^2\} \end{aligned} \quad (6)$$

(3) 最適化問題の定式化

本研究では、所与の年予算制約の下で、損失額の平均と分散の重み付き和を最小化する問題を解くこととする。式(5)、(6)より、損失額の期待値および分散は対策ベクトル $\mathbf{x}$ の線形結合となっていることから、この問題は二値整数線形計画問題として次のように定式化できる。

$$\text{Max } z = \Delta E[\mathbf{x}] + \alpha \Delta V[\mathbf{x}] \quad (7)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^N c_i x_i \leq \text{Budget} \quad (8)$$

ここで、 c_i : 斜面 i の対策費用、 α : 分散の重みを表すパラメータ、 Budget : 年間の落石対策予算。

式(7)より、不確実性の価値を示すパラメータ α を介し、不確実性を考慮することとなる。この落石対策計画策定の最適化問題を解くことで、平均と分散の重みの付け方によって対策される斜面の変化にどのような特徴がみられるのかを分析することが可能である。

(4) 計算方法

本研究では、2.(3)で定式化された問題を繰り返し解くことで、年度ごとの最適対策箇所を決定することとする。対策年度 1 年目について、対策を行うべき全斜面を検討

対象として計算を行う。得られた結果から、対策年度 1 年目に対策する斜面を全斜面の中から取り除き、残った斜面で同様な計算を 2 年目、3 年目と続け、この計算を全ての斜面に対策が行われるまで繰り返し行う。また、求解にあたり、**Matlab** を用い、整数計画問題を解く高速アルゴリズムである **Gurobi**¹²⁾ を **Matlab** から呼び出すことにした。後述するケーススタディにおいては、1,607 カ所の斜面を対策候補地点として計算を行った場合でも、全斜面に対する最適対策の計算は 1 秒程度で行うことができる。

3. 仮想データを用いた挙動確認

提案したモデルの挙動を確認するために、斜面数 20 の仮想地域を想定し、モデルを適用した。ここで設定した斜面の災害発生確率 (p) および災害発生時の損失額 (d)、およびその積 ($p \times d$) で得られる損失額の期待値は表-1 のとおりである。なお、斜面の ID は損失額 d の小さい順に並べている。対策費用は全斜面一律 500 万円とし、1000 万円を予算制約とした。ここでは、損失額の期待値のみによる最適化 ($\alpha=0.0$) と損失額の分散が支配的になるケース ($\alpha=1000$) の計算過程を示し、その違いを考察する。図-1 に各ケースにおける対策年度と対策箇所の関係を、図-2 にそれぞれのケースにおける期待値および分散の変化を示す。図-2 における右上の点が初期状態であり、そこから毎年選択された対策を施すことで平均値及び分散値が減少していく様子を示している。この計算では、10 年分の計算を行うことのできる全ての斜面の対策を終え、損失額の期待値および分散はゼロとなる。図-1 より、損失額の期待値と分散を考慮した場合とでは、年度ごとに対策斜面に違いがあることがわかる。具体的には、期待値のみを考慮する場合には、損失額の期待値が大きな斜面 10, 11 を初年度に、その後もこの順位に従って対策を講じている。一方で、分散による最適化では、対策斜面の ID が大きい、すなわち損失額が比較的大きな斜面を優先する傾向にある。また、図-2 より、年を追うごとの期待値および分散の残存率も異なる。期待値のみを考慮する場合 (図中青線) には、1 年目でおおよそ 15% の期待値が減少するが、分散は 10% 強しか減少しない。一方で、分散を重視する場合 (図中緑線) には、1 年目に分散が 20% 程度減少されるが、期待値は 10% 程度である。このように、 α の設定によって、リターン尺度あるいはリスク尺度の重み付けが可能となっており、その結果として異なる対策戦略が策定されることが確認できる。

4. 岐阜県飛騨圏域における落石災害対策の評価と年次計画の策定

(1) 対象地域の概要

提案したモデルを、岐阜県飛騨圏域における斜面に適用した。岐阜県飛騨圏域には山間地域が多く、落石の危険がある斜面が 1,607 箇所と非常に多い。このような現状の中、落石災害対策を早急に行う必要があるが、国や他の自治体と同様に、岐阜県でも公共事業費の削減や県職員の削減などの影響により、全ての斜面に対して同時進行的に落石災害対策を講じることは困難な状況にあることから合理的な落石対策が求められている。

検討に用いる各斜面の災害発生確率および損失額については、先行研究である本城ら¹³⁾および小坂ら¹⁴⁾の成果のものである。

(2) 各斜面の優先順位の考察

式(7)の目的関数は、斜面对策実施の有無を表現する x_i で分離することが可能であるため、その目的関数に対する係数が大きければより対策優先度の高い斜面であると考えることができる。そのため、まずは各斜面に関する目的関数の係数を元に、パラメータ α の値ごとに斜面对策の優先順位を求めた。パラメータ α を変化させることで、損失額の期待値と分散の2つの評価尺度の比重を変えた場合の評価を行うことができる。 $\alpha=0.0$ ならば損失額の期待値のみの評価、 $\alpha=1000$ ならばほぼ損失額の分散のみを考慮した評価となる。図-3に、重みごとの対策優先順位の上位20斜面に関して、対策の優先順位の変化に同じような特徴を持つ斜面がいくつか存在した。それらの斜面をグループ分けしたものを示す。分析の結果より損失額の期待値で評価を行った場合と損失額の分散で評価を行った場合では、対策の優先順位が異なることがわかる。また、パラメータ α によって対策の優先順位が変化していくこともわかる。このことより、社会経済的損失の期待値と分散を考慮した評価によって、対策を行う斜面の優先順位が変化するといえる。次に、グループ分けされた斜面を、縦軸に落石の発生確率、横軸に落石によって生じる社会経済的損失（万円）を取ったグラフを図-4に示す。グラフには年間損失額の期待値が一定となる曲線（等損失期待値曲線）も併せて示す。

「常に対策優先度が高い斜面」と判断されたグループ1の斜面を見てみると、グラフの右側に点がプロットされており、なおかつ等損失期待値曲線と比較してもより右上の方向、つまり損失期待値も非常に大きいことがわかる。これより、災害発生時の損失額が他の斜面と比較して大きく、なおかつ期待損失額も大きい斜面であるため、社会経済的損失を計算過程に含む期待値・分散どちらの評価の場合でもこれらの斜面が常に上位となってい

表-1 災害発生確率と損失額

ID	p_i	d_i	$p \times d$	ID	p_i	d_i	$p \times d$
1	0.95	100	95	11	0.45	4100	1845
2	0.9	500	450	12	0.4	4500	1800
3	0.85	900	765	13	0.35	4900	1715
4	0.8	1300	1040	14	0.3	5300	1590
5	0.75	1700	1275	15	0.25	5700	1425
6	0.7	2100	1470	16	0.2	6100	1220
7	0.65	2500	1625	17	0.15	6500	975
8	0.6	2900	1740	18	0.1	6900	690
9	0.55	3300	1815	19	0.05	7300	365
10	0.5	3700	1850	20	0.025	7700	192.5

(a) 期待値による最適化 ($\alpha=0$)

(b) 分散による最適化 ($\alpha=1000$)

図-1 年ごとの対策箇所

図-2 パラメータ・の違いによる年間損失額の期待値および分散の軽減過程

るといえる。「期待値を重視すると対策優先度が高くなる斜面」であるグループ2の斜面は、グラフの左上側に位置しており、落石の発生確率が高いという共通点がある。グループ2の斜面は、分散を考慮していくに従い対策優先順位が低くなっていく。つまり、社会経済的損失はそれほど大きくないが、落石発生確率が高い斜面群であり、社会経済損失の期待値を重視するとこれらの斜面の対策も対象になる。一方、「分散を重視すると対策優先度が高くなる斜面」と判定されたグループ3の斜面に関しては、確率の値はそれほど大きくはないが、社会経済的損失の値が比較的大きな斜面であり、グループ2の

斜面とは逆の性質を示していることがわかる。グループ4の斜面に関しては、グループ2とグループ3の斜面のちょうど中間の性質をもった斜面であるといえる。グループ2～4に着目してみると、これらのグループは同じような等期待損失額曲線上にプロットされていることがわかる。つまり、グループ2～4の斜面は同じような損失額の期待値をとる。このような場合、分散を考慮していくことで損失額の大きい斜面が選択される傾向にある。最後に、グループ5は、等期待損失額曲線を見ればわかるように、期待損失額は他のグループと比較して小さい。しかしながら、社会経済的損失額が比較的大きいため、特に分散の値を大きくすると相対的に対策優先度が高くなる斜面といえる。以上から、提案したモデルでは、 α の値を変化させることによって、損失額の期待値だけでなく損失額の分散を考慮することができ、損失発生の不確実性も考慮した対策優先順位決定が可能であることが確認できた。

(3) 最適化計算結果の分析

制約条件とパラメータの値を与え、各年度における対策箇所の最適化を全斜面の対策が終了するまで行った。制約条件として与える年間の落石対策予算は、平成21年度の岐阜県の落石対策予算(1,769百万円)とする。各パラメータ α ごとに、本研究で提案した最適化モデルを用いて計算し、対策年度ごとに残存している期待値と分散を求めた。その結果得られた計算過程を図-5に示す。図-5は、図-2と同様に右上の点から対策を行うことで期待リスク及び分散が減少していく様子を示す。損失額の期待値のみによる最適化($\alpha=0.0$)と損失額の分散に基づく最適化($\alpha=1000$)では計算結果に違いが生じる。これは、仮想データで試算を行った結果と同様に、各ケースにおいて選択される斜面が異なることから、計算過程が評価尺度によって異なることを示している。また、 $\alpha=0.0001$ の場合には、その中間的な位置づけになっていることがわかる。なお、仮想データによる計算結果ほど、実データに基づく最適化では各尺度による差はみられなかった。この理由を探るために、各斜面についての災害発生時の損失額と災害発生確率をそれぞれ250(万円)および0.001刻みで集計し、その頻度を集計しコンター図として示したものを図-6に示す。図中紫で示されているところ(例えば(2250, 0.007))は、災害発生時の損失額が2250～2500(万円)、災害発生確率が0.007～0.008(／年)である斜面が30～40箇所あることを示している。この図をみても明らかなように、災害発生確率がおよそ0.007であり、災害発生時の損失額が250(万円)以下、1000(万円)程度、2250(万円)程度のあたりにデータが集中していることが確認できる。斜面ごとの落石発生確率の値や対策費用が類似した斜面

図-3 各斜面の対策優先順位の変移

図-4 各グループの特性比較

図-5 年間損失額の期待値および分散の軽減過程

が多く存在したため、期待値軽減分のみの評価と分散軽減分のみの評価において、大きな違いが生じなかったのではないかと推察される。

5. 実用化に向けての課題検討

(1) 斜面の被災確率の独立性に関して

2.(2)にも述べたとおり、本研究では各斜面の災害発生確率は独立と仮定して計算を進めた。独立性を仮定することで簡単な定式化が可能となり、対策箇所が多くとも高速に最適解が求められることが明らかとなった。一方で、現実には豪雨発生時などにおいて複数の落石が近辺で同時に発生することは多々あり、なおかつこの場合の損失額は単純に単一斜面において災害が発生したときの損失額の和とはならないため、これらの仮定が適切とはいえない。そのため、独立性が担保できるような工夫が必要といえるだろう。

その方法としては、例えば過去の被災履歴を用い、災害が同時発生する可能性が高い斜面群をグルーピングさせ、同一グループ内の斜面群の災害は同時生起を、グループ間の災害発生に関しては独立と仮定することなどが考えられる。岐阜県では、最近の斜面災害履歴は全てGIS上でデータベース化されている。このようなデータを活用することで、上記のようなグルーピングが可能ではないかと考えられる。

(2) パラメータ α の決定方法に関して

本研究では、被害発生の不確実性に着目し、平均・分散アプローチを用いることで災害発生確率が小さくとも発生時の被害額が大きい事象により重きをおいた対策が可能となる最適化モデルの構築を行っている。前章までの分析にて、モデルは想定通りの挙動を示していることが確認されたものの、本モデルを適用する際に重要な役割を果たす、平均と分散を結合するパラメータ α をどのように決定するかに関しては確たる基準はない。そのため、ここでは α を決定するための試案を検討する。

本研究では、各斜面の災害発生は独立事象であることを仮定している。この仮定により、災害発生の期待値および分散が式(3)、(4)のような簡単な式で示されることが明らかとなった。災害損失額の期待値および分散が明らかになっていることから、もしその分布形がわかれば、例えば $x\%$ の確率で生じる損失額をより小さくする、あるいは y 円以上の損失が生じる確率を最小にする、といった目的を元に最適な α を求めることも可能ではないだろうか。このために、さらに、「各斜面の災害発生確率はほぼ等しい」という仮定をおく。もちろん厳密には災害発生確率はばらばらにしているが、このように仮定することで中心極限定理を用いることが可能となり、損失額の分布は、災害損失額の期待値及び分散をそれぞれ平均、分散にもつ正規分布に従うといえる。次に、 α を決めるための基準として、「所与の損失額の発生確率が最小となる α 」を求めることを考える。そして所与の損失額と

図-6 災害発生時の損失額と災害発生確率

図-7 異なる α における対策前の期待損失以上の損失が生じる確率の推移

して、例えば「対策前の損失額の期待値」とし、これ以上の損失が発生する確率を最小にする α を求めることができるだろう。

計算例として、4.で示した斜面データについて、予算制約を300(百万円)とし、 α を0.00001から10倍ずつ1000まで変化させた場合と、 $\alpha=0$ の場合の合計10ケースについて、計算開始(0年目)から5年目までの対策前の損失額の期待値 E_0 より大きな被害が生じる確率を計算した結果を図-7に示す。なお、図中黒いプロットにしているのが各年において最小の確率をとった α の値を表している。この結果から、この計算例においては、 α が0.0001あるいは0.001の場合において対策前の期待損失以上の被災を生じる確率をより小さくすることができるようである。なお、この計算を進めていけば最終的にこの確率はゼロとなることから、本来ならば毎年最適な α を選択していく必要があるだろう。この点については今後の検討課題としたい。

さらに、正攻法としてこの問題を記述するのであれば、 $E(\mathbf{x})$ および $V(\mathbf{x})$ を介して未知変数 $\mathbf{x}$ の関数として位置づけられる、「平均 $E(\mathbf{x})$ 、分散 $V(\mathbf{x})$ に従う正規分布について、損失額が E_0 を上回る確率」を目的関数とする必要がある。この場合、目的関数が正規分布の累積分布関数となる。今回活用した高速な求解アルゴリズムを適用することが不可能となり、遺伝的アルゴリズムのようなヒューリスティック手法を用いる必要性があるといえる。これにつ

いても今後の検討課題に位置づけたい。

6. おわりに

本研究では、落石災害対策の対策計画策定を行うための指標を作成すること目的として、平均・分散アプローチを援用し、所与の予算制約の下で、災害リスクと対策後の損失額の不確実性の重み付き和を最小化する数理計画モデルを構築した。本研究で提案する手法の特徴は、各対策による分散低減効果を独立に取り扱うことが可能である点である。最適化問題は、二値整数線形計画問題として表現することができ、その最適化問題を解くツールとして、Matlab と Gurobi を活用することで高速に解を求めることができ、実用性が高いことを示した。まずは、提案した最適化モデルを斜面数 20 の仮想斜面データに適用し考察を加えた。その結果、損失額の期待値とその分散の重みによって対策優先順位が異なること、分散を考慮するとより被害額が大きな斜面の優先度が高まる傾向にあることが明らかとなった。また、岐阜県飛騨圏域への適用結果より、1,600 カ所程度であれば十分実用的なスピードで解を求めることが可能であることが確認された。さらに実用化に向けて、被災確率の独立性の担保のための工夫および期待値と分散をつなぐ重み α の設定方法についても検討を加えた。今後の課題としては、適用範囲の拡大や他の評価指標との組み合わせの検討、災害発生確率の独立性担保の検討、経年変化の考慮などがあげられる。

謝辞：本研究は、文部科学省特別教育研究経費「リスクに基づくアセット総合マネジメントによる社会基盤の戦略的整備意思決定に関する研究（平成21～23年）、研究代表者：本城勇介岐阜大学教授」および平成22年度科学研究費補助金（基盤研究(B)、課題番号：21360243、研究課題名：社会的費用を考慮した社会資本アセットマネジメントに基づく地域リスクガバナンス、研究代表者：高木朗義）の成果の一部である。ここに、RM研究プロジェクト研究会にて貴重な意見をいただいた関係者の

方々に感謝申し上げたい。

参考文献

- 1) UNISDR: Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives, 2004.
- 2) Weisbrod, B. A.: Collective-Consumption Services of Individual-Consumption Goods, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 78, pp. 471-477, 1964.
- 3) Bishop, R. C.: Option Value: an Exposition and Extension, *Land Economics*, Vol. 58, No. 1, pp. 1-15, 1982.
- 4) Graham, D. A.: Cost-Benefit Analysis Under Uncertainty, *American Economic Review*, Vol. 71, pp. 715-725, 1981.
- 5) 高木朗義, 森杉壽芳, 上田孝行, 西川幸雄, 佐藤尚：立地均衡モデルを用いた治水投資の便益評価手法に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 13, pp. 339-348, 1996.
- 6) 小林潔司, 横松宗太：カタストロフ・リスクと防災投資の経済評価, 土木学会論文集, No. 639/IV-46, pp. 39-52, 2000.1.
- 7) 有馬和輝, 安東直紀, 谷口栄一, 山田忠史：道路ネットワークにおける所要時間の平均と分散を考慮した最適経路決定手法に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 39, CD-ROM, 2009.
- 8) 大堀勝正, 原田邦彦：社会資本の経営資源配分手法に関する研究, (株)建設技術研究所 国土文化研究所, 2010年度年次報告, pp. 33-40, 2010.
- 9) 枇々木規雄, 田辺隆人：ポートフォリオ最適化と数理計画法, 4, 朝倉書店, 2005.
- 10) Markowitz, H.: Portfolio Selection, *The Journal of Finance*, Vol. 7, No.1, pp. 77-91, 1952.
- 11) 三澤勉, 有村幹治, 田村亨：道路ネットワークにおける維持管理支援モデルの構築, 土木計画学研究・講演集, Vol. 29, CD-ROM, 2004.
- 12) Gurobi Optimization ホームページ (<http://www.gurobi.com/>) 2013/3/14 アクセス.
- 13) 本城勇介, 町田裕樹, 森口周二, 原隆史, 沢田和秀, 八嶋厚：岐阜県飛騨圏域を対象とした道路斜面危険度評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 67, No. 3, pp. 299-309, 2011.
- 14) 小坂宏彰, 高木朗義, 倉内文孝, 北浦康嗣：道路途絶による社会経済損失を考慮した斜面災害リスク評価モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol. 41, CD-ROM, 2010.

(2013. 3. 27 受付)

OPTIMAL COUNTERMEASURE PLANNING AGAINST ROCK-FALL DISASTER USING MEAN-VARIANCE APPROACH

Akiyoshi TAKAGI, Fumitaka KURAUCHI and Ryuhei MARUYAMA

Mountainous areas in Japan has been exposed at the risk of rock-fall disaster. On the other hand, since the budget expensable for countermeasures against such disasters are limited, priority of the slopes at a risk of rock-fall should be discussed. In such situation, it is common to evaluate the priority of the site by cost-benefit-ratio and the benefit of the countermeasure is evaluated by the reduction of the expected economic loss. Much of researches however have pointed out the limitation of the evaluation only by the reduction of expected economic loss. This study formulates a mathematical programming problem to find an optimal strategies by minimising the weighted sum of the reductions of both expected economic loss reduction and the variance of the loss considering the budget constraints. We showed that the reduction of variance for each site is separable and the proposed model can be formulated as binary integer linear programming problem (BILP), if the occurrence probability of each slope is independent. The proposed model is first applied to the small network to see the performance, and then is applied to plan the optimal countermeasure planning of rock-fall disaster in Hida region of Gifu Prefecture. The result suggest the advantage of the proposed method.