

降雨による斜面災害に対する防災投資の意思決定支援手法

布川 修* 杉山 友康* 太田 直之*

A Method of Determining Priorities for Investment in Disaster Prevention for Rainfall-related Slope Failures

Osamu NUNOKAWA Tomoyasu SUGIYAMA Naoyuki OTA

Slope failures frequently occur due to heavy rainfalls over railway lines. It is therefore essential to minimize the slope failures over the railway lines and to maintain safe and punctual train operations. It is also necessary to evaluate a disaster risk of slope considering the probability and expenditures required for rainfall-related slope failures. We developed a method to evaluate a disaster risk of slope collapse using risk assessment method. In this paper, we describe a method to determine priorities for investment to prevent the slope failures due to intense rainfalls applying the developed method.

キーワード：降雨，斜面崩壊，防災投資，リスク

1. はじめに

鉄道沿線に存在する盛土や切土（以下，斜面という）が降雨によって崩壊し，列車の運行を阻害する災害が発生することがある。こうした斜面災害から列車の安全・安定輸送を確保するためには，崩壊する危険性が高いすべての斜面にのり面防護工などの防災投資を行い，斜面の耐雨性を高めるのが理想である。一方，鉄道沿線には数多くの斜面が存在するため，実際には斜面災害に対する防災投資を順次行くとともに，ある雨量値を越えたときに列車運行の規制等を実施することで安全を確保している。

斜面災害に対する防災投資を効果的に実施するためには，斜面の耐雨性だけでなく災害の発生確率や発生時の損失なども考慮して，斜面災害に対する危険度を定量的に評価することが望ましい。しかしながら，こうした評価手法は確立されていないため，斜面の耐雨性と線区の重要度などから経験的に防災投資の順位を決定しているのが現状である。

そこで，本稿では，リスク評価手法を適用することで，降雨時に発生する斜面災害の発生確率や発生時の損失を考慮した斜面災害に対する危険度をリスクとして定量的に評価し，防災投資の意思決定支援にこの評価結果を利用する手法について述べる。

2. リスクの定義

図1に示すように，旅客数や斜面の耐雨性が異なるA，B，C線区を想定した場合，旅客数や斜面の耐雨性が個別に定量化されていても別々の指標であるため，斜面災害に対する防災投資順位を定量的に決定することは難しい。そこで，これらを一緒に考慮して評価できるリスク評価手法を用いて，降雨による斜面リスクを算出する方法を検討した。

一般的にリスク R_{isk} は，外力の作用（例えば降雨）により生じる年間あたりの損失（円/年）と定義され，以

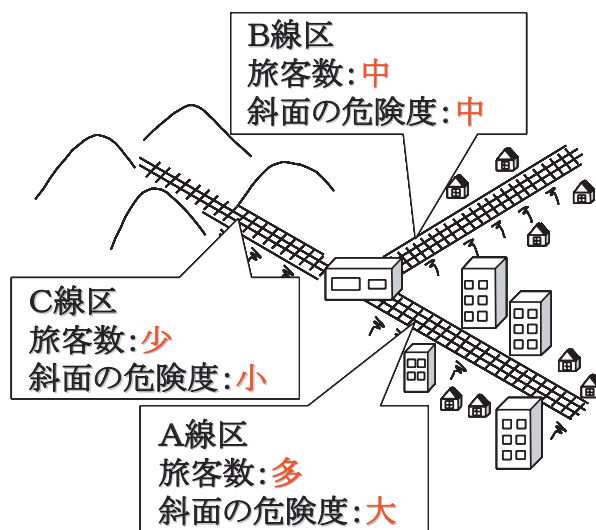


図1 異なる線区に斜面が存在する場合の例

* 防災技術研究部（地盤防災）

特集：防災技術

下の式で求められる。

$$R_{isk} = P \times C \quad (1)$$

ここで、

P ：被害が発生する確率（頻度期待値）（回/年）

C ：被害が生じたときの損失（円/回）

つまり、被害発生確率 P は斜面の耐雨性などに関連し、損失 C は旅客数などに関連していることから、式(1)を基本として降雨による斜面リスクを算出することで、斜面の耐雨性などと旅客数などを一緒に考慮した評価を可能とする。

式(1)で示した降雨時に発生する被害は、斜面が崩壊したときに列車運行が中止されているか否かにより異なることが考えられる。つまり、降雨による斜面リスクを算出するためには、降雨時に想定される事象を設定し、この事象ごとの発生確率と損失を求める必要がある。本稿では、図2に示すとおり、斜面崩壊の有無、運転規制（列車運行の中止）の有無、斜面崩壊の発生時間帯（斜面崩壊が運転時間帯に発生するか否か）、車両等の被害の有無、により降雨時に想定される事象を8つの事象に分類した。

これにより、降雨による斜面リスク R_{isk} （円/年）は以下の式で求められる。

$$R_{isk} = \sum_{i=1}^8 (P_i \times C_i) \quad (i=1 \sim 8) \quad (2)$$

ここで、 P_i ：各事象の発生確率（回/年）

C_i ：各事象が生じたときの損失（円/回）

つまり、各事象のリスクをすべて足し合わせることで、降雨による斜面リスクを算出する。なお、各事象の発生確率 P_i は、図2より、以下の式で求める。

$$P_i = N_i \times P_{ai} \times P_{bi} \times P_{ci} \times P_{di} \quad (i=1 \sim 8) \quad (3)$$

ここで、

N_i ：降雨の発生頻度期待値（回/年）

P_{ai} ：斜面の崩壊発生確率

P_{bi} ：運転規制の有無

P_{ci} ：斜面崩壊が運転時間帯に発生する確率

P_{di} ：車両等への被害発生確率

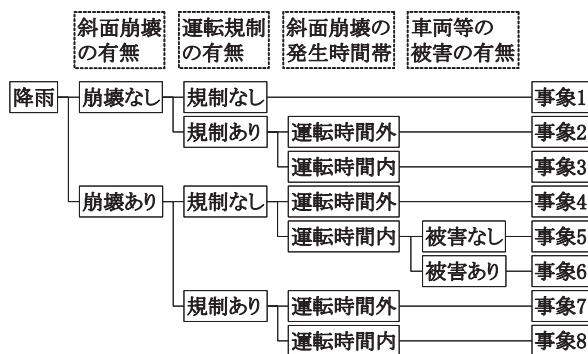


図2 降雨時に想定される事象

3. リスクの算出方法

3.1 斜面の崩壊発生確率⁵⁾

斜面の崩壊発生確率を求めるためには、斜面の耐雨性を評価する必要がある。そこで、本稿では、鉄道総研で開発した限界雨量に基づく斜面の危険度評価手法^{1)~4)}を用いて、斜面の耐雨性を限界雨量として求める。この手法を用いることで、図3に示すように、鉄道の降雨時における運転規制で用いられている雨量指標である連続雨量と時間雨量を軸とした平面上に、斜面の耐雨性（限界雨量）を曲線で示すことができる。

限界雨量に基づく斜面の危険度評価手法は、過去の崩壊事例データを統計的に分析した結果を用いて、斜面崩壊の可能性が高まる雨量（限界雨量）を算出するものである。つまり、図3に示した限界雨量曲線は、この曲線を越える降雨を観測した場合の崩壊発生確率が50%であることを意味する。そこで、限界雨量のばらつきが、評価手法作成時に用いたデータの実績値と予測値との残差と同じばらつきをもつ正規分布であると仮定すると、崩壊発生確率分布（フラジリティ分布）は図4に示すように求められる。斜面の崩壊発生確率は、このようなフラジリティ分布を用いて算出する。

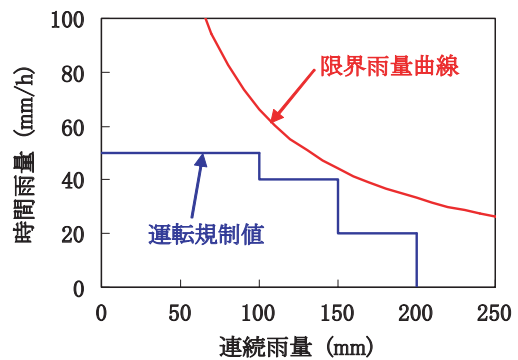


図3 運転規制値と限界雨量曲線の例

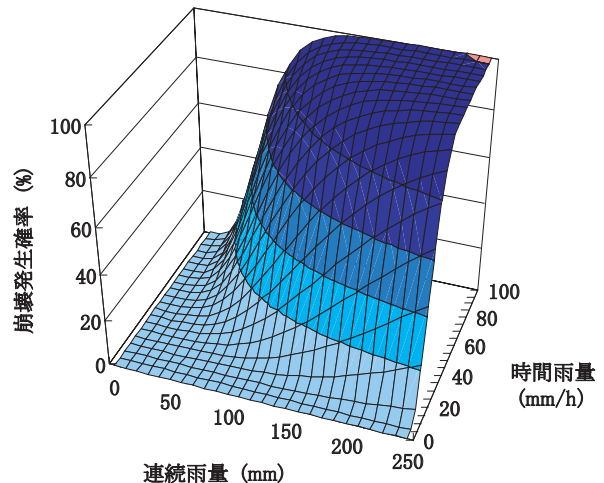


図4 フラジリティ分布の例

なお、斜面の崩壊発生確率の詳細な算出方法については、文献5)による。

3.2 降雨の発生頻度期待値⁵⁾

降雨の発生頻度期待値を求めるためには、斜面の耐雨性と運転規制が連続雨量と時間雨量を軸とした平面上に示されていることから、同じ平面上に降雨頻度を示す必要がある。具体的な算出方法は、①斜面近傍のアメダスデータから得られる30年程度の降雨履歴を解析し、年間降雨頻度分布を作成する、②作成した年間降雨頻度分布を対数正規型の関数式で近似し、この結果を用いて、降雨頻度期待値分布(降雨ハザード分布)を作成する、③上記②で作成した降雨頻度期待値分布から降雨の発生頻度期待値を算出する、手順とした。なお、降雨頻度分布

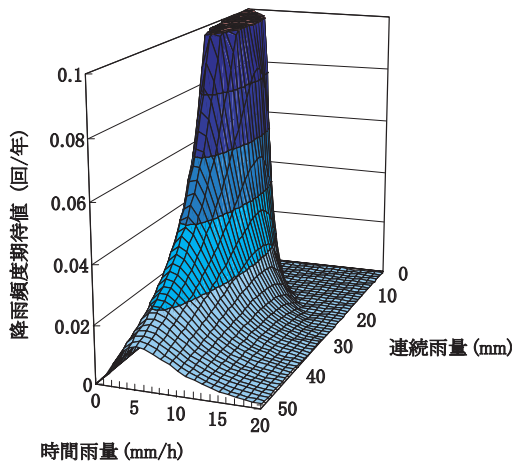


図5 降雨ハザード分布の例

事象No.	損失項目						損失(回/年)(合計)
	人的被害額	車両被害額	応急費用	復旧費用	代行輸送費用	営業損失費用	
事象1	—	—	—	—	—	—	C ₁
事象2	—	—	—	—	—	—	C ₂
事象3	—	—	—	—	—	○	C ₃
事象4	—	—	○	○	△	○	C ₄
事象5	—	—	○	○	△	○	C ₅
事象6	△	○	○	○	△	○	C ₆
事象7	—	—	○	○	△	○	C ₇
事象8	—	—	○	○	△	○	C ₈

※被害発生時の損失を設定する必要がある場合に○印を付けている(△印は必要により設定)

図6 損失項目の設定例

を近似した理由は、①で作成した降雨頻度分布が時間雨量や連続雨量が大きい範囲においてばらついた分布となるためである。図5に降雨ハザード分布の例を示す。

3.3 その他の発生確率

運転規制の有無は、図3に示したように、連続雨量と時間雨量を軸とした平面上において定められている階段状の規制値から求める。

斜面崩壊が運転時間帯に発生する確率は、対象とする斜面を通過する始発列車から最終列車までの時間を算出して1日におけるその割合を求めることなどで算出できる。

車両等への被害発生確率は、斜面崩壊の形状や規模、線路脇の対策工の有無、線路の線形(直線あるいはカーブ区間)などにより決定されると考えられる。したがって、筆者らがすでに提案している手法^{6), 7)}を用いて斜面崩壊の形状や規模等を予測し、その結果等を考慮して決定する。

3.4 損失項目の設定

降雨時に想定される各事象が生じたときの損失を求めるためには、損失として考えるべき項目を設定する必要がある。これらは、評価対象の斜面が存在する線区の特徴などにより異なると考えられるため、実際の評価の都度、設定する必要がある。本稿では、例として損失項目を図6に示すように①人的被害額、②車両被害額、③斜面崩壊時の応急費用、④復旧費用、⑤代行輸送費用、⑥営業損失費用、の6項目を設定し、事象ごとに設定する必要がある損失項目を整理した。なお、営業損失費用は、斜面崩壊が発生した場合と、斜面崩壊が発生していないが運転を規制した場合とは異なる。これら損失項目の具体的な費用は、斜面の崩壊規模を予測^{6), 7)}した結果や斜面が位置する線区の営業収入などから求められる。

3.5 リスクの算出方法

3章で示した内容をまとめた降雨による斜面リスク算出フローを図7に示す。図に示すとおり、降雨ハザード分布、フラジリティ分布、運転規制や運転時間帯、車両被害を考慮した発生確率、および、損失から降雨時に

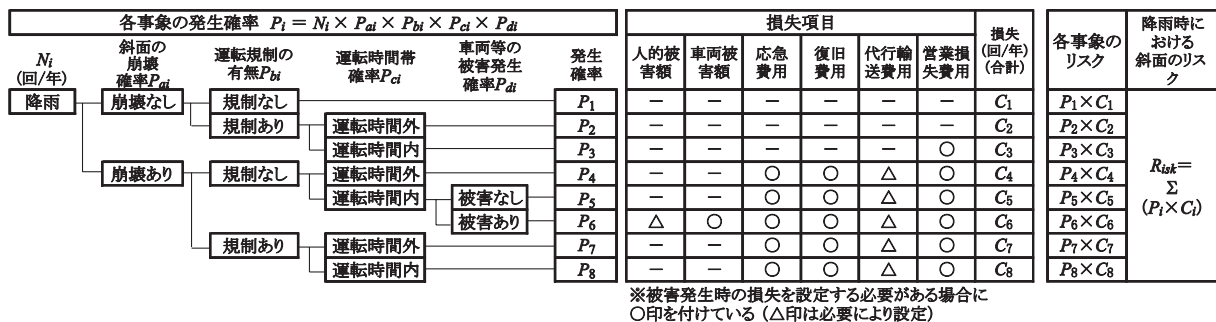


図7 リスクの算出フロー

特集：防災技術

想定される各事象のリスクを求め、これらを足し合わせることで降雨による斜面リスクを算出する。

4. リスクを用いた防災投資の意思決定支援

4.1 ケーススタディの条件

この章では、3章で示したリスク算出方法を利用した防災投資の意思決定支援を概略的に説明するため、現実に即した例ではないが、図8に示すように複数の路線に存在する盛土を仮定し、これらに対して評価した例を示す。図に示すとおり、設定した盛土（以下、Ma, Mb, Mc盛土という）は耐雨性（限界雨量）と営業収入、盛土の大きさが異なり、この条件のみで防災投資の順位を決定することは難しいと思われる。

ケーススタディの条件は次に示すとおりとした。

(a) 各事象の発生確率の算出について

図9に設定した各盛土の限界雨量曲線と運転規制値を示す。斜面の崩壊発生確率は、図9に示した限界雨量の値からフラジリティー分布を作成して算出した。運転規制値は、図9に示したとおり、連続雨量 R と時間雨量 r とで設定されているものとした。

降雨ハザード分布は各盛土とも図5に示したものとし、これから降雨の発生頻度期待値を算出した。斜面崩壊の発生時間帯は、列車運行している時間帯が1日のうちの7割と仮定して算出した。車両等への被害は、各盛土とも発生しないものとした。

表1に各事象の発生確率を求めるための条件を示す。

(b) 各事象の損失について

人的被害額と車両被害額については、今回の検討では車両等への被害が発生しないものと仮定した。また、代行輸送についても行わないものと仮定した。

Ma, Mb盛土（盛土の大きさ：大）の応急費用は、崩壊したときの規模を $100m^3$ と仮定し、 $1m^3$ あたり10万円の費用がかかる、すなわち、1000万円とした。復旧費用は、復旧すべき面積を $100m^2$ と仮定し、 $1m^2$ あたり10万円の費用がかかる、すなわち、1000万円とした。Mc盛土（盛土の大きさ：小）では、崩壊したときの規模と復旧すべき面積をMa, Mbの場合の半分と仮定、すなわち応急費用、復旧費用とも500万円とした。

営業損失は、図8に示した各路線の1日あたりの営業収入から算出した。盛土崩壊は発生していないが運転規制を実施した場合（事象3）における営業損失は、1日あたりの営業収入の1割と仮定した。また、盛土崩壊発生時の営業損失は、2日程度運転を支障する、すなわち、2日の営業収入と仮定した。なお、盛土崩壊が運転時間帯に発生した場合には、さらに2割損失が増すものとした。

表2に盛土ごとに設定した降雨時に想定される事象ごとの損失費用を示す。

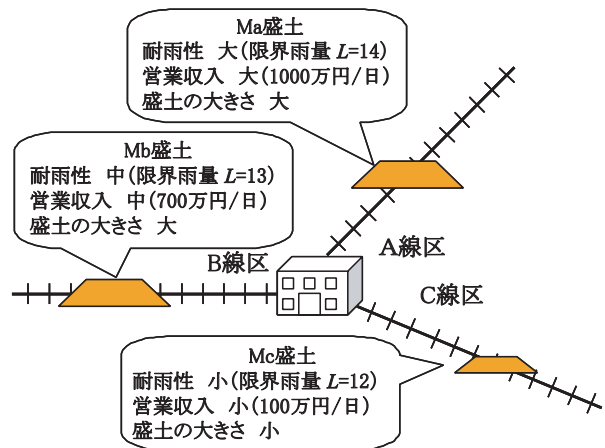


図8 ケーススタディにおける対象盛土

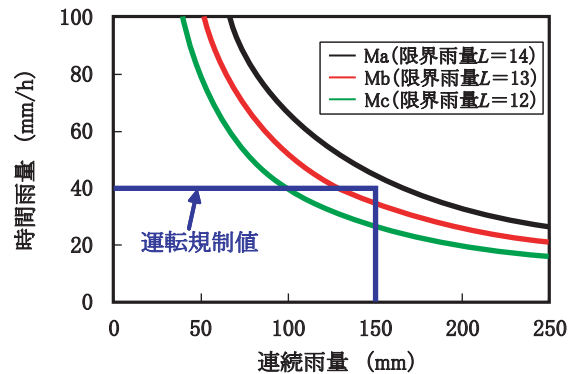


図9 各盛土の限界雨量曲線と運転規制値

表1 各事象の発生確率を求めるための条件

盛土名称	Ma	Mb	Mc
限界雨量 (L)	14	13	12
運転規制値	連続雨量 150mm 時間雨量 40mm		
降雨ハザード分布	図5による		
斜面崩壊の時間帯	運転時間内 0.7 運転時間外 0.3		
車両等への被害	なし		

表2 盛土ごとに設定した各事象の損失

斜面崩壊の有無	運転規制の有無	崩壊時間帯	車両被害の有無	事象	損失 (万円/回)		
					Ma	Mb	Mc
崩壊なし	規制なし			事象1	0	0	0
崩壊なし	規制あり	時間外		事象2	0	0	0
		時間内		事象3	100	70	10
崩壊あり	規制なし	時間外		事象4	4000	3400	1200
		時間内	被害なし	事象5	4400	3680	1240
		時間内	被害あり	事象6	4400	3680	1240
崩壊あり	規制あり	時間外		事象7	4000	3400	1200
		時間内		事象8	4400	3680	1240

4.2 現状リスクの評価

表3～表5に盛土ごとに算出した降雨時に想定される事象ごとの発生確率とリスク、およびリスクの合計値を示す。

これらの表より、崩壊の発生確率（事象4～8の発生確率合計値）は、Maが0.268（回/年）、Mbが0.405（回/

年), M_c が 0.605 (回/年) となり, 当然の結果ではあるが, 降雨ハザード分布が同じ場合には限界雨量の値が大きいほど, 発生確率が小さくなっている。

また, どの盛土でも事象3のリスクがリスク合計にしめる割合は小さく, 事象4~事象8までのリスク合計, すなわち崩壊によるリスクがリスク合計のほとんどであることが分かる。これは, 事象3の発生確率は比較的高いことから, 今回設定した崩壊しないときに運転を規制した場合の損失が, 崩壊した場合の損失と比較して明らかに小さいためである。すなわち, こうした場合のリスクは, 崩壊によるリスクに依存するといえる。

リスク合計は, M_b が一番大きく, 次いで M_a , M_c となり, この結果のみで防災投資順位を決定する場合には, M_b , M_a , M_c の順となる。このように, 現状のリスク評価結果のみを用いても, 定量的に防災投資順位を決定できる。

なお, 本稿では車両等の被害は各盛土とも発生しないと仮定したため事象6の発生確率は0である。ここで, 車両等の被害ありの発生確率を0.5, 被害なしを0.5とする

と, 事象5の半分の発生確率が事象6の発生確率となる。この仮定の場合における事象6の発生確率は, M_a が約 0.007 (回/年), M_b が 0.019 (回/年), M_c が 0.048 (回/年) となり, M_c の値が M_a の約7倍と高い確率となっていることが分かる。これは, 限界雨量は異なるが運転規制は同じと設定したためであり, M_c を M_a と同じような発生確率とするためには, 運転規制の値を低くする必要があることが定量的に分かる。

4.3 対策後リスクの評価

ここでは, 防災投資の効果を定量的に明らかにするため, ケーススタディの盛土にのり面防護工を施工した場合におけるリスクを評価した結果を示す。

のり面防護工としてプレキャスト格子枠工を施工した場合, 限界雨量は現状よりも4.26点(防護効果100%の場合)増加する⁴⁾。本稿では, 表1に示した盛土ごとの限界雨量にこの点数を加算し, その他の条件は変更せずに事象ごとの発生確率を算出した。また, M_a , M_b の対策費用は1500万円, M_c は750万円とし, 損失は対策後の復旧費用のみ現状よりも1.5倍増加するものとした。

表6~表8に対策後のリスク評価結果を示す。これらの表より, 対策後のリスク合計は表3~表5に示した現状のリスク合計と比較して, 明らかに小さくなることが分かる。これは, 崩壊の発生確率(事象4~8の発生確率の合計値)が, M_a の場合0.031, M_b の場合0.056, M_c の場合0.095となり, 限界雨量の値が大きくなることにより, これらの値が現状よりも小さくなるためである。

さらに, リスクが経年とともに累積されるものとする, M_a 盛土の現状と対策後の累積リスクは図10のように示される。なお, 対策後の累積リスクは対策費用を損失と考えて初期値に加算した。図10より, 現状と対策後の累積リスクを比較すると, 約1.5年後に対策後の値が現状の値を下回ることが分かる。このように, 対策後の値が現状の値を下回る年数 X (以下, 投資効果発生年数という)を求め, 各盛土で比較することで, 投資効率を考慮した防災投資順位も検討することが可能となる。なお, 投資効果発生年数 X は, 以下の式で求められる。

$$X = C_T / \Delta R_{isk} \tag{4}$$

ここで,

C_T : 対策費用 (万円)

ΔR_{isk} : 現状リスクと対策後リスクとの差 (万円/年)

表9に対策後リスク評価結果のまとめを示す。今回のケーススタディでは, リスク低減量は M_b 盛土の値が大きい, 投資効果発生年数はほぼ同じように小さい値, すなわち, 対策による効果がすぐに現れる結果となった。

表3 M_a 盛土の現状リスク評価結果

事象	事象ごとの発生確率 (回/年)	事象ごとのリスク (万円/年)	リスク合計 (万円/年)
事象1	69.093	0	1194
事象2	0.202	0	
事象3	0.472	47	
事象4	0.005	21	
事象5	0.013	55	
事象6	0.000	0	
事象7	0.075	300	
事象8	0.175	770	

表4 M_b 盛土の現状リスク評価結果

事象	事象ごとの発生確率 (回/年)	事象ごとのリスク (万円/年)	リスク合計 (万円/年)
事象1	69.057	0	1485
事象2	0.172	0	
事象3	0.400	28	
事象4	0.016	54	
事象5	0.037	137	
事象6	0.000	0	
事象7	0.106	359	
事象8	0.246	907	

表5 M_c 盛土の現状リスク評価結果

事象	事象ごとの発生確率 (回/年)	事象ごとのリスク (万円/年)	リスク合計 (万円/年)
事象1	68.973	0	746
事象2	0.137	0	
事象3	0.319	3	
事象4	0.041	49	
事象5	0.096	119	
事象6	0.000	0	
事象7	0.140	169	
事象8	0.328	406	

特集：防災技術

表6 Ma 盛土の対策後リスク評価結果

事象	事象ごとの発生確率 (回/年)	事象ごとのリスク (万円/年)	リスク合計 (万円/年)
事象1	69.110	0	208
事象2	0.268	0	
事象3	0.625	63	
事象4	0.000	0	
事象5	0.000	0	
事象6	0.000	0	
事象7	0.009	41	
事象8	0.021	105	

表7 Mb 盛土の対策後リスク評価結果

事象	事象ごとの発生確率 (回/年)	事象ごとのリスク (万円/年)	リスク合計 (万円/年)
事象1	69.110	0	271
事象2	0.260	0	
事象3	0.608	43	
事象4	0.000	0	
事象5	0.000	0	
事象6	0.000	0	
事象7	0.017	65	
事象8	0.039	163	

表8 Mc 盛土の対策後リスク評価結果

事象	事象ごとの発生確率 (回/年)	事象ごとのリスク (万円/年)	リスク合計 (万円/年)
事象1	69.110	0	146
事象2	0.249	0	
事象3	0.581	6	
事象4	0.000	0	
事象5	0.001	1	
事象6	0.000	0	
事象7	0.028	41	
事象8	0.066	98	

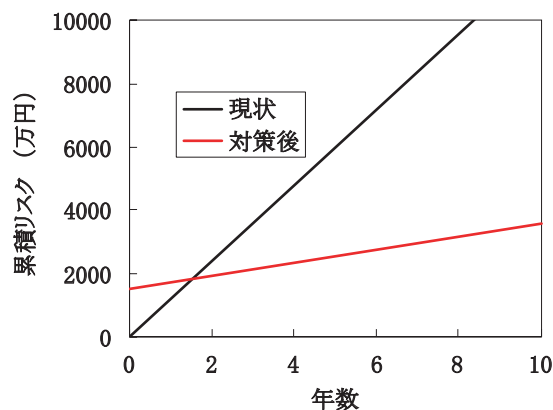


図10 現状と対策後の累積リスク (Ma 盛土)

表9 対策後リスク評価結果のまとめ

対象箇所	Ma	Mb	Mc
対策費用 C_T (万円)	1500	1500	750
限界雨量 L	18.26	17.26	16.26
リスク R_{ok} (万円/年)	208	271	146
リスク低減量 ΔR_{ok} (万円/年) (現状リスク-対策後リスク)	986	1215	600
$C_T / \Delta R_{ok}$ (年)	1.5	1.2	1.2

5. おわりに

本稿では、斜面の耐雨性と降雨の発生頻度、崩壊時の損失などを考慮して、降雨による斜面リスクを算出する方法を示した。さらに、この算出方法を用いて現状のリスクと対策後のリスク結果から防災投資の順位を定量的に決定できることを示した。

ここで示した手法では、降雨時に斜面が個々に崩壊することを前提としている。実際には、同一降雨時に複数の斜面がほぼ同時に崩壊することもあるため、今後、こうした場合も考慮した線区あるいは地域単位のリスク算出方法を検討する予定である。

文 献

- 岡田勝也, 杉山友康, 村石尚, 野口達雄: 統計的手法による鉄道盛土の降雨災害危険度の評価手法, 土木学会論文集, No.448/ III -19, pp.25-34, 1992
- K. Okada, T. Sugiyama, H. Muraishi, T. Noguchi, M. Samizo : Statistical Risk Estimating Method for Rainfall on Surface Collapse of A Cut Slope, Soils and Foundations, Vol. 34, No. 3, pp.49-58, 1994.
- T. Sugiyama, K. Okada, H. Muraishi, T. Noguchi, M. Samizo : Statistical Rainfall Risk Estimating Method for A Deep Collapse of A Cut Slope, Soils and Foundations, Vol. 35, No. 4, pp.37-48, 1995.
- 杉山友康, 岡田勝也, 秋山保行, 村石尚, 奈良利孝: 鉄道盛土の限界雨量に及ぼす防護工の効果, 土木学会論文集, No.644/ IV -46, pp.161-171, 2000
- 杉山友康, 布川修, 太田直之: 降雨による斜面崩壊発生確率の算定手法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.3, 2009
- 布川修, 杉山友康, 小林徹: 斜面崩壊規模の予測手法と崩土の衝撃力特性, 鉄道総研報告, Vol.19, No.10, pp.33-38, 2005
- 杉山友康, 森泰樹, 布川修, 太田直之: 降雨による盛土崩壊の形態と規模に関する統計的予測手法, 鉄道総研報告, Vol.22, No.1, pp.17-22, 2008