

降雨による斜面崩壊発生確率の算定手法

杉山 友康* 布川 修* 太田 直之*

A Method to Calculate Probability of Rainfall-related Slope Failures

Tomoyasu SUGIYAMA Osamu NUNOKAWA Naoyuki OTA

Railway operators have invested for disaster prevention of rainfall-related slope failures to secure the safety of train operations. It is essential to evaluate a disaster risk of slope considering the probability and expenses required for slope failures to execute the investment in disaster prevention effectively. We developed a method to calculate the probability of slope failures due to intense rainfalls to evaluate the disaster risk of slope applying the risk assessment method. In this paper, we describe the developed method, and some calculating examples.

キーワード：降雨，斜面崩壊，発生確率，リスク，防災投資

1. はじめに

降雨時における盛土や切土（以下，斜面という）の崩壊から列車の安全・安定輸送を確保するために，崩壊する危険性が高い斜面にのり面防護工などの防災投資が行われている。こうした防災投資を効果的に実施するためには，斜面の耐雨性を評価して崩壊する危険性が高い斜面を抽出する必要がある。

このような背景を踏まえ，岡田ら^{1), 2)}，杉山ら^{3), 4)}は盛土や切土の各種条件から崩壊の可能性が高まる雨量（限界雨量）を算出する手法（限界雨量に基づく斜面の危険度評価手法）を開発した。この手法を用いることで斜面の耐雨性を評価することができるが，これに加えて対象とする斜面で想定される降雨頻度も考慮して斜面崩壊の頻度を確率的に求めることで，より定量的に耐雨性を評価することが可能となる。

また，筆者らは，リスク評価手法を用いて降雨時における斜面の危険度をリスクとして求め，この結果を利用した斜面災害に対する防災投資の順位を決定する手法の構築を進めている⁵⁾。降雨による斜面のリスクを求めるためには，斜面崩壊の頻度を確率的に算出する必要がある。

そこで，本稿では，限界雨量に基づく斜面の危険度評価手法により求められる斜面の耐雨性から斜面の崩壊発生確率を設定し，これと想定される降雨の頻度から斜面崩壊の頻度を確率的に求める手法について述べる。

2. 斜面崩壊発生確率の算定手法

2.1 限界雨量に基づく斜面の危険度評価手法^{1)~4)}

限界雨量に基づく斜面の危険度評価手法は，過去に降雨によって発生した盛土・切土の詳細な崩壊データを用いて，判別解析や数量化Ⅰ類解析など統計的な解析を実施した結果をもとに，対象とする盛土・切土箇所の各種条件から崩壊の可能性が高まる雨量（限界雨量）を求めるものである。具体的には，盛土・切土ごとに設定されている評価基準を用いて対象とする斜面の条件から限界雨量を算出し，鉄道の降雨時における運転規制で用いられている連続雨量 R （12時間以上降雨が中断しない場合における，降り始めからその時刻までの降雨量の累積値）と時間雨量 r を軸とした平面上に，求めた限界雨量を曲線で示すものである。

表1に例として盛土の限界雨量を求めるための評価基準を示す。評価基準には基本点と盛土条件ごとの点数が定められており，対象の盛土条件からこれらの点数を求めて加算することで限界雨量を算出する。切土の場合は，まず崩壊形態（表層崩壊と深層崩壊）を判別し，崩壊形態別に定められている評価基準を用いて限界雨量を算出する。なお，切土の条件から崩壊形態を判別する手法も提案されている³⁾。

図1に限界雨量曲線の例を示す。なお，限界雨量 L の値は基本点（盛土： $L=13.14$ ，切土（表層崩壊）： $L=45.16$ ，切土（深層崩壊）： $L=15.56$ ）と，盛土の基本点にプレキャスト格子枠を施工した場合の効果点を加えた値（ $L=17.40$ ）とした。限界雨量曲線は限界雨量 L から，以下の式で表される。

$$L = R^m \cdot r^n \quad (1)$$

* 防災技術研究部（地盤防災）

特集：防災技術

表1 盛土の限界雨量を求めるための評価基準⁶⁾

基本点		13.14	
条件		条件(上段)と評価点(下段)	
盛土の構造条件	盛土高さ H (m)	$P = -3.18 \times 10^{-3} H^2 - 7.09 \times 10^{-3} H + 7.87 \times 10^{-1}$	
	土質 S_g	粘性土	砂質土
		-1.05	0.07
	貫入強度 N_c	$P = -9.79 \times 10^{-3} N_c^2 + 4.75 \times 10^{-1} N_c - 2.24$	
基礎条件	表層地盤の地質 S_b	沖積地盤	その他
	地盤の傾斜角 θ	平坦	10度以上
		1.34	-1.10
集水・浸透条件	透水係数 k (cm/s)	$k < 10^{-4}$	$10^{-4} \leq k < 10^{-3}$
		-0.17	0.26
	集水地形 W_c	無し	対峙側
		0.52	-3.23
	縦断形態 T_v	切盛境界・露込勾配	平坦・単勾配
		-0.53	-0.30
	横断形態 T_h	純盛	片切片盛・覆付
		0.21	-0.16
経年雨量条件	経年雨量 R_a (mm)	$P = -1.06 \times 10^{-10} R_a^2 + 5.50 \times 10^{-5} R_a - 2.96$	
防護工 (効果率100%の場合)		防護工種類	効果点
		プレキャスト格子枠	4.26
		覆ブロック	3.35

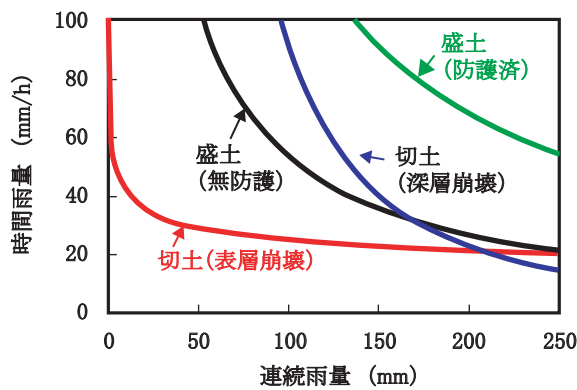


図1 限界雨量曲線の例

ここで、 m, n : 定数

なお、定数 m, n は、盛土の場合 $m = 0.3, n = 0.3$, 切土(表層崩壊)の場合 $m = 0.2, n = 0.9$, 切土(深層崩壊)の場合 $m = 0.4, n = 0.2$, である。限界雨量曲線は、この曲線を超える降雨が観測された場合に崩壊の可能性が高まることを示している。限界雨量が大きいほど図1の右上に曲線が示され、評価された斜面の耐雨性が高いことを意味する。また、斜面に格子枠等の防護工が施工された場合には表1に示す防護工の効果点を加算されるため、限界雨量 L は防護されていない場合よりも大きくなり、耐雨性が向上するものとして評価される。

2.2 限界雨量曲線の意味⁷⁾

限界雨量を求めるための評価基準は、過去の崩壊事例データを用いた数量化I類解析の結果から作成されたものである。盛土の場合を例として、図2にこれら崩壊事例データの条件から評価基準を用いて求められる限界雨量の予測値 y_i と実際に崩壊した時の値(実測値 Y_i) との関係を示す。この図には $y_i = Y_i$ の関係を直線で示したが、統計的な解析であるため、当然のことながら予測値と実測値には残差が生じる。なお、この場合の残差の標準偏差 σ は 1.73 である。

一般的に数量化I類解析による予測において、予測値

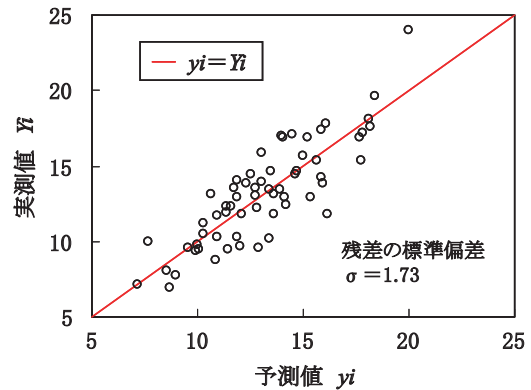


図2 限界雨量の予測値と実測値との関係(盛土)

y_i と実測値 Y_i の間には次の関係がある。

- ① 予測値 y_i と実測値 Y_i の残差 ε_i は、平均0, 分散 σ^2 の正規分布に従う
- ② 残差の平方和 $\sum \varepsilon_i^2$ が最小

評価基準を作成した解析のようにデータ数が多い場合は、上記①はほぼ満足される。したがって、残差は平均が0, 分散 σ^2 の正規分布に従い、 $y_i > Y_i$ となるものと $y_i \leq Y_i$ となるデータ数が同数となると考えてよい。

すなわち、評価基準を解析に使用していない別の斜面に適用した場合、求められる限界雨量の予測値は、実測値以上である確率が50%, 実測値以下である確率が50%となる。つまり、対象とする斜面の限界雨量の予測値は崩壊発生確率50%を示す値、限界雨量曲線は50%の崩壊発生確率曲線であるといえる。

2.3 斜面崩壊発生確率の算定手法

前節で評価基準により算定される限界雨量の予測値は、崩壊発生確率50%を示すこと、この予測値のばらつきは評価基準を作成した崩壊データを用いた予測値と実測値の残差と同じ正規分布と仮定できることを明らかにした。すなわち、盛土の場合、限界雨量の予測値と標準偏差 $\sigma = 1.73$ から、図3に示すとおり崩壊発生確率ごとの限界雨量を求めることができる。この図は評価基準により算定される限界雨量の予測値 $L = 13.14$ の場合のものであるが、崩壊発生確率50%の限界雨量は限界雨量の予測値と同じ値となる。

図3で求められる崩壊発生確率ごとの限界雨量から、崩壊発生確率ごとの限界雨量曲線を示すことができる。図4にこの例を示す。さらに、図4を三次元的に示した崩壊発生確率の分布を図5に示す。図5を用いることで、実際に観測された連続雨量と時間雨量から崩壊発生確率を算定することができる。

盛土の場合と同様の方法で作成した切土(表層崩壊)の崩壊発生確率分布の例を図6に示す。図1に示すとおり、盛土と切土の限界雨量曲線の形状が異なるため、盛土の場合と異なる崩壊発生確率分布となる。

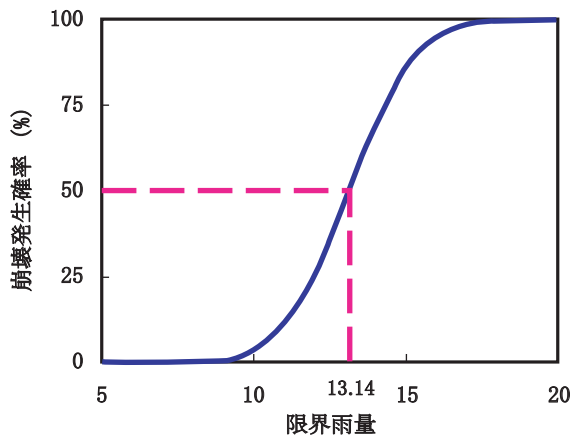


図3 限界雨量と崩壊発生確率との関係
(盛土, 限界雨量 $L = 13.14$)

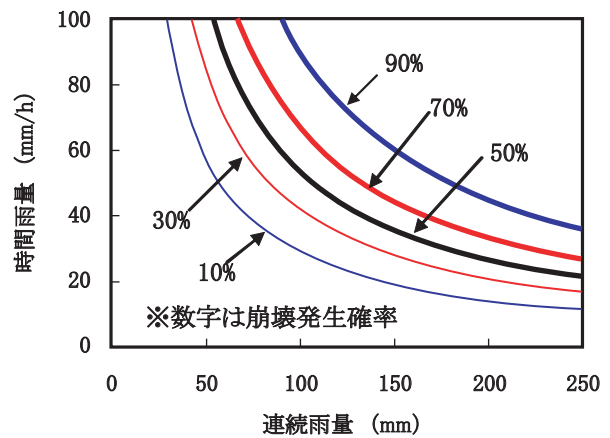


図4 崩壊発生確率ごとの限界雨量曲線
(盛土, 限界雨量 $L = 13.14$)

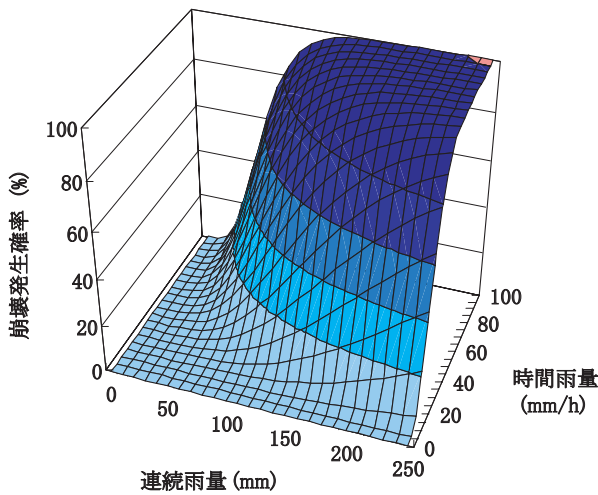


図5 崩壊発生確率の分布
(盛土, 限界雨量 $L = 13.14$)

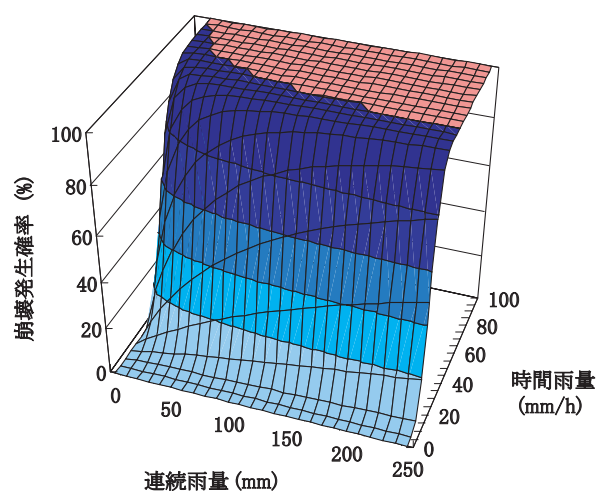


図6 崩壊発生確率の分布
(切土 (表層崩壊), 限界雨量 $L = 45.16$)

3. 斜面崩壊発生頻度期待値の算定手法

3.1 斜面崩壊発生頻度期待値の定義

降雨時における斜面リスクを算定するためには、斜面崩壊が発生する年間あたりの回数 (回/年)、すなわち頻度期待値を求める必要がある。斜面崩壊発生頻度期待値 M (回/年) は、以下の式で求められる。

$$M = \sum (N(R, r) \times P_a(R, r)) \quad (2)$$

ここで、

$N(R, r)$: 連続雨量 R 、時間雨量 r の場合における降雨頻度期待値 (回/年)

$P_a(R, r)$: 連続雨量 R 、時間雨量 r の場合における斜面崩壊発生確率

つまり、前章で連続雨量と時間雨量を軸とした斜面崩壊発生確率の分布を示したが、これと降雨頻度期待値の分布から、連続雨量 R 、時間雨量 r ごとに斜面の崩壊発生確率と降雨頻度期待値を求め、これらを乗じた値の合

計値が斜面崩壊発生頻度期待値となる。

3.2 降雨頻度期待値分布の作成

降雨頻度期待値分布は、斜面近傍のアメダスデータから30年程度の降雨履歴を解析して年間降雨頻度分布を求め、この分布を対数正規型の関数式で近似することで作成する。なお、年間降雨頻度は降り始めから連続雨量 $R=0$ となるまでを1降雨とし、1降雨において限界雨量曲線を表す式と同じ式を用いて求まる降雨指標 $S (= R^m \cdot r^n, m, n$ は係数) が最大となるときの連続雨量 R と時間雨量 r を1降雨の代表値とすることで求めた。

例として、東京気象台と札幌気象台の過去のアメダスデータを用い、降雨指標を盛土の限界雨量曲線を表す式 ($S = R^{0.3} \cdot r^{0.3}$) として作成した年間降雨頻度分布を図7、図8に示す。この例では、時間雨量20 (mm/h) 以下、連続雨量50 (mm) 以下、年間降雨頻度0.1 (回/年) 以下を示したが、頻度が少ない降雨量が多い領域において

特集：防災技術

ばらつきが見られることが分かる。また、東京気象台のデータと札幌気象台のデータを比較すると、明らかに東京気象台の年間降雨頻度が高いことが分かる。

年間降雨頻度の確率分布(降雨頻度期待値分布)は、図7、図8に示した年間降雨頻度分布を対数正規型の関数式で近似することで作成した。図9、図10にそれぞれ図7、図8のデータを用いて作成した降雨頻度期待値分布を示す。これらの図より、データのばらつきがなくなり、札幌気象台と比較して東京気象台の降雨頻度期待値の方が高い傾向も現れていることが分かる。したがって、前述した方法により、年間降雨頻度分布の特徴を表現した降雨頻度期待値分布が作成できると考える。

3.3 斜面崩壊発生頻度期待値の算出例

ここでは、式(2)を用いて求められる斜面崩壊発生頻度期待値の算出例をもとに、この結果の利用方法について検討する。

て検討する。

限界雨量 $L = 12, 13, 14, 15, 16$ とそれぞれ異なる5つの盛土を想定し、斜面崩壊発生頻度期待値を算出した例を図11に示す。なお、降雨頻度期待値分布は図9を用いた。この図より、限界雨量が大きいほど斜面崩壊発生頻度期待値は小さくなり、限界雨量 $L=12$ の場合は、限界雨量 $L=16$ の場合と比較して約6倍大きいことが分かる。

もう一つの例として、限界雨量 $L=12$ の盛土と限界雨量 $L=60$ (表層崩壊) の切土を想定して斜面崩壊発生頻度期待値を計算した結果を示す。図12にこれらの限界雨量曲線を示すが、この図ではどちらの耐雨性が高いかを判断するのは難しい。これらについて、図9に示した降雨頻度期待値分布を用いて斜面崩壊発生頻度期待値 M を求めると、盛土の場合は $M=0.60$ 、切土の場合は $M=0.55$ となる。したがって、わずかではあるが切土の耐雨性が高いと判断できる。

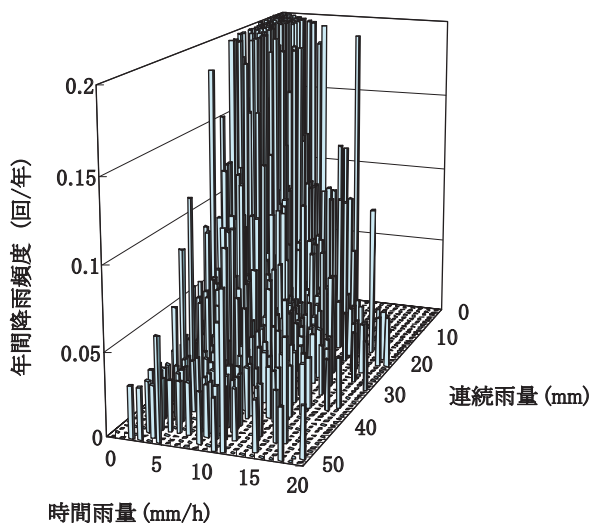


図7 年間降雨頻度分布(東京気象台のデータ)

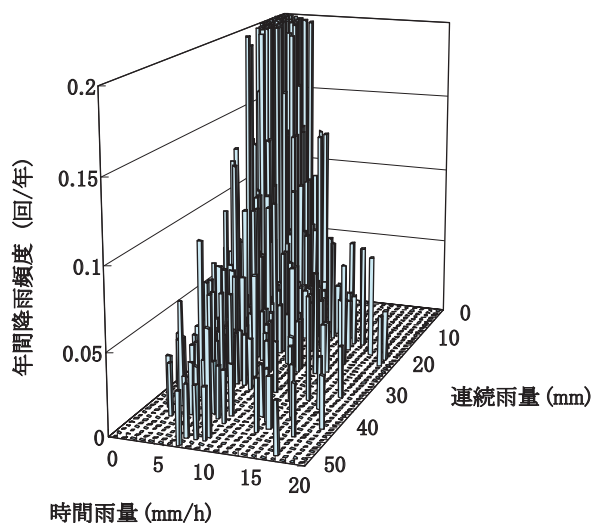


図8 年間降雨頻度分布(札幌気象台のデータ)

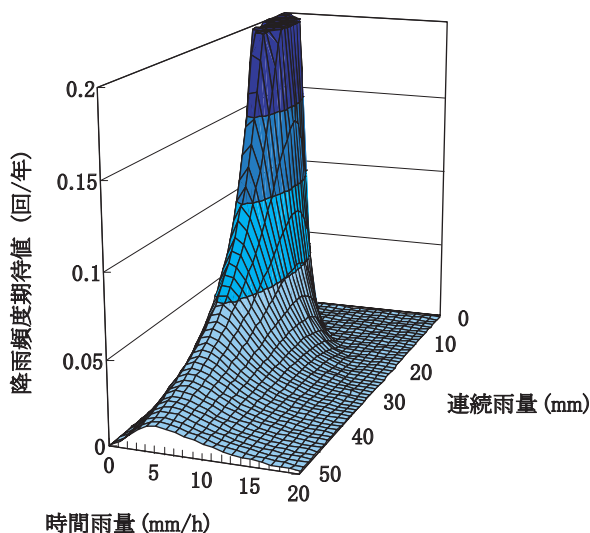


図9 降雨頻度期待値分布(東京気象台のデータ)

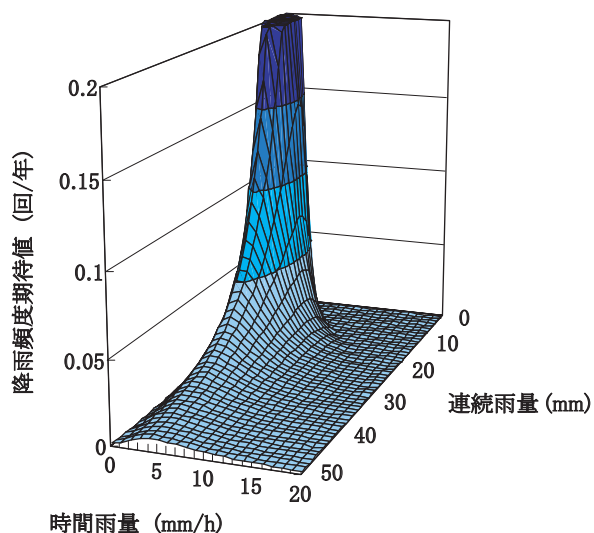


図10 降雨頻度期待値分布(札幌気象台のデータ)

このように、限界雨量のみで斜面の耐雨性を比較するよりも、斜面崩壊発生頻度期待値を用いた方がより定量的に耐雨性を評価することができると思われる。

3.4 規制の有無を考慮した頻度期待値の算出例

ここでは、運転規制の有無別に斜面崩壊発生頻度期待値を算出した例をもとに、この結果の利用方法について示す。運転規制の有無別の斜面崩壊発生頻度期待値は、式(2)において連続雨量 R と時間雨量 r の値から、運転規制の有無を判別することで求められる。なお、式(2)の連続雨量 R 、時間雨量 r の場合における斜面崩壊発生確率 $P_a(R, r)$ を、 $(100 - P_a(R, r))$ と置き換えて斜面の

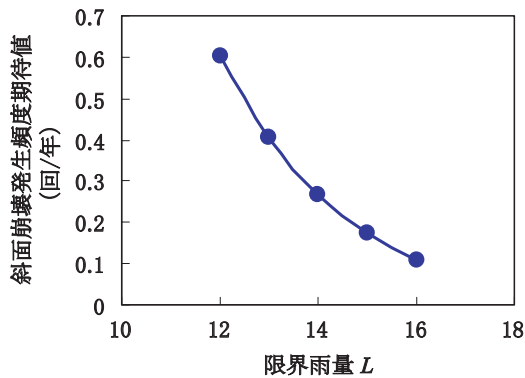


図11 限界雨量 L と斜面崩壊発生頻度期待値との関係の例

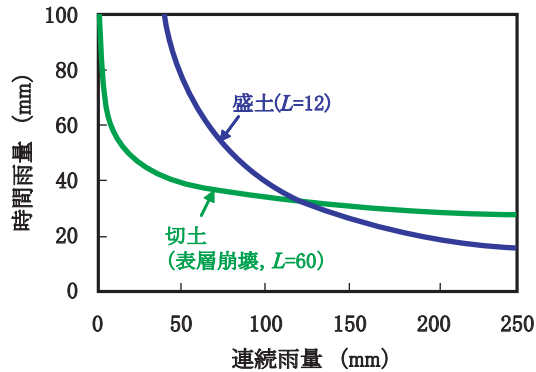


図12 想定した盛土と切土の限界雨量曲線

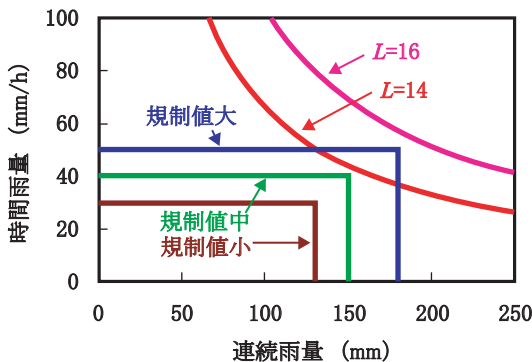


図13 想定した限界雨量曲線と運転規制

非崩壊発生頻度期待値を求めることで、斜面は崩壊しないが運転を規制した事象の発生頻度期待値も算出した。

限界雨量 $L = 14, 16$ とそれぞれ異なる2つの盛土と規制値が異なる3つの運転規制を想定する。図13にこの場合の限界雨量曲線と規制値との関係を示す。ここでは、現実的ではないが、連続雨量、時間雨量とも一つの値のみ定められている運転規制を設定した。運転規制の規制値が大きいほど列車運行を規制する回数は減り安定した輸送が確保できるが、列車運行が規制されていない時に斜面が崩壊する可能性が高くなる。

運転規制ごとの「崩壊なし、規制あり」と「崩壊あり、規制なし」の事象ごとの発生頻度期待値を、限界雨量 $L=14, 16$ の盛土それぞれについて、図14、図15に示す。なお、降雨頻度期待値分布は図9を用いた。これらの図より、「崩壊なし、規制あり」の発生頻度期待値は限界雨量が異なっても大きな差は認められないが、「崩壊あり、規制なし」の値は約10倍異なることが分かる。これは、「崩壊なし、規制あり」の発生頻度期待値が「崩壊あり、規制なし」と比較して大きく、限界雨量が異なることに伴う発生頻度期待値の変動の感度が小さいことによる。

ここで、「崩壊あり、規制なし」の発生頻度期待値が同

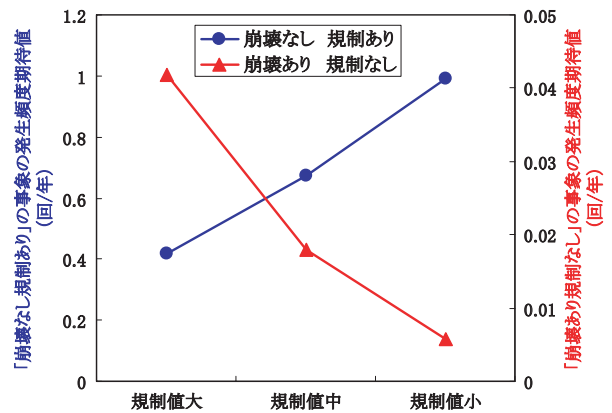


図14 運転規制ごとの事象別発生頻度期待値 (限界雨量 $L = 14$ の盛土)

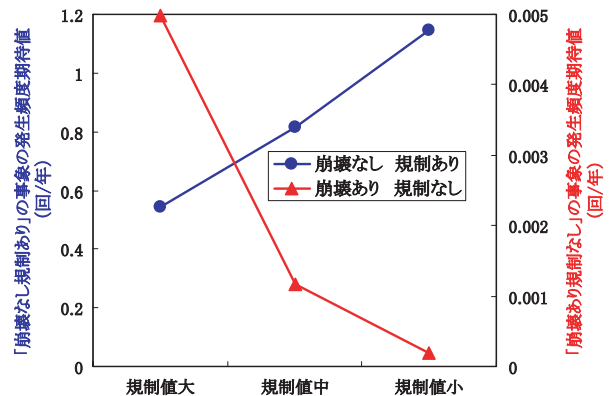


図15 運転規制ごとの事象別発生頻度期待値 (限界雨量 $L = 16$ の盛土)

特集：防災技術

程度になるように規制値を変更する場合を仮定すると、限界雨量 $L = 14$ の盛土では「規制値小」、限界雨量 $L = 16$ の盛土では「規制値大」となる。なお、この場合における「崩壊なし、規制あり」の発生頻度期待値は、限界雨量 $L = 14$ の盛土が限界雨量 $L = 16$ の盛土と比較して2倍程度大きくなる。このように、規制の有無別発生頻度期待値を算出することで、定量的に規制値を検討することができると思われる。

4. おわりに

本稿では、斜面の崩壊発生確率分布の作成方法と降雨頻度期待値分布の作成方法、およびこれらの結果を用いた斜面崩壊発生頻度期待値の算定手法を示した。さらに、この手法により算出される斜面崩壊発生頻度期待値を利用することで、より定量的に耐雨性を評価できることや運転規制の規制値を定量的に検討することができることを示唆した。

今後は、斜面崩壊発生頻度期待値に加えて降雨による斜面のリスクも利用した防災投資の意思決定支援手法について検討する予定である。

文献

- 1) 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
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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
- 5) 布川修, 杉山友康, 太田直之: 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, 鉄道総研報告, Vol.23, No.3, 2009
- 6) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説 (構造物編) 土構造物 (盛土・切土), 丸善, p.109, 2007
- 7) 杉山友康, 藤井昌隆, 秋山保行: 限界雨量による盛土災害危険度評価法の適用と信頼性, 鉄道総研報告, Vol.11, No.10, pp.17-22, 1997