ＩＳＳＮ　　0386—5878

土木研究所資料第3926号

土 木 研 究 所 資 料

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)

平成16年２月

独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ土質チーム

Copyright © (2004) by P.W.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所資料
第3926号 2004年2月

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)

独立行政法人土木研究所　土質チーム　上席研究員　小橋秀俊
〃　〃　主任研究員　金嘉章
〃　〃　研究員　加藤俊二
元上席研究員　恒岡伸幸※1
元主任研究員　中野穣治※2
元研究員　田中衛※3

要旨

本書は、道路斜面防災対策を「リスクマネジメント(説明責任)」の側面から支援することを目的として、損害保険の分野で先行しているハザードやリスクの数量化手法、提示手法を参考にしながら、「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)」としてとりまとめたものである。

キーワード：道路斜面、防災対策、リスクマネジメント、支援マニュアル

※1　現　国土交通省国土技術政策総合研究所
※2　現　国土交通省道路局
※3　現　国土交通省四国地方整備局徳島河川国道事務所

はじめに

道路の斜面災害に対しては，昭和 43 年の飛騨川バス転落事故を契機として、以後、概ね5年ごとに全国一斉の道路防災点検が実施され、緊急性が高い個所から対策工が順次実施されてきた。また、同事故等の司法判断を踏まえ、以後、危険な路線区間に対しては、道路利用者の安全確保の観点から、事前通行規制区間に設定し、異常気象時には通行規制を実施するなどの運用が図られてきた。その結果、道路斜面災害の発生件数については大幅な減少をみた。

しかしながら、依然、予算の制約などから沿道斜面すべてに十分な対策を実施するのは困難な状況にあり、膨大な数の不安定斜面が残存している。また逆に、対策が概成した区間において、通行規制の合理的な見直しの必要性が指摘されている。その結果、沿道住民や利用者のなかに、規制による利便性低下に対する不満や、対策事業効果に対する疑念が生じつつある。

このようなことから、道路管理者には限られた財源や管理体制の下で、効率的かつ効果的な防災管理を行うとともに、道路利用者等に対して斜面災害リスクの実態や防災対策の投資効果を明示し、説明責任を果たすことが求められている.

国土交通省では、平成 10 年度から 14 年度の 5 年間で、新道路技術五ヵ年計画の重点項目の一つとして、「岩盤・斜面崩壊のリスクマネジメント技術の開発」を実施してきた。そのなかでは、道路斜面防災対策を「①ハザード評価技術（抽出)」「②影響軽減技術（管理)」「③予知技術（監視)」「④リスクマネジメント技術（説明責任)」の４つの側面から捉え、防災点検等のハザード把握、カルテ等での日常管理、崩壊予知、事前通行規制、対策実施、手段選定の妥当性に関する説明支援、適用実績のフィードバックを一元的に運用できる道路斜面防災支援システムの構築を目指している。

本書は「④リスクマネジメント技術（説明責任)」の側面から、損害保険の分野で先行しているハザードやリスクの数量化手法、提示手法を参考にしながら、道路斜面防災管理のリスクマネジメント技術の開発を進め、「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)」としてとりまとめたものである。

本マニュアル案については、今後、現場ニーズにあった結果提示ならびに数量化に必要な情報収集体制などを勘案し、実用性の高いものにしていくことが検討課題として残されている。そのためにも今般、現時点での研究成果として公表し、本書を関係者に見ていただくことによって、さらなる改善に役立てることとした。

平成１６年２月

３－５　救急医療損失D_4 3-26
３－５－１　基本的な考え方 3-26
３－５－２　算定手順 3-27
３－５－３　必要なデータ 3-27
３－５－４　迂回による影響人口の算定 3-28
３－５－５　迂回時の生存率の算定 3-29
３－５－６　救急医療損失（D_4）の算定 3-30

第４章　道路斜面災害のリスク算定 4-1
４－１　道路斜面災害のリスクの定義 4-1
４－２　リスク算定とリスクの表示方法の基本的考え方 4-2
４－２－１　リスク算定 4-2
４－２－２　イベントプロット 4-3
４－２－３　リスクカーブ 4-4
４－３　斜面災害の年発生確率と想定災害規模の予測 4-7
４－４　既往災害履歴の統計処理によるリスク算定方法（生起確率法） 4-10
４－４－１　基本的な考え方 4-10
４－４－２　リスク算定に用いるデータ 4-10
４－４－３　リスク算定 4-11
４－４－４　イベントプロット 4-11
４－４－５　リスクカーブ 4-12
４－５　既往災害履歴の統計処理による簡易予測法（降雨・災害履歴分析法） ... 4-14
４－５－１　基本的な考え方 4-14
４－５－２　予測手順 4-15
４－５－３　必要なデータ 4-16
４－５－４　路線区間の到達土量の算定 4-17
４－５－５　降雨の年発生確率の算定 4-21
４－５－６　リスクの算定 4-22
４－５－７　イベントプロット 4-23
４－５－８　リスクカーブ 4-24
４－６　斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測法 4-31
４－６－１　基本的な考え方 4-31
４－６－２　予測手順 4-32
４－６－３　必要なデータ 4-35
４－６－４　誘因（降雨）の年超過確率の算定 4-37
４－６－５　誘因（降雨）に対する斜面の崩壊率の算定 4-37
４－６－６　誘因が不明確な斜面の崩壊率の算定 4-41
４－６－７　到達土量の算定 4-42
４－６－８　リスクの算定 4-43
４－６－９　イベントプロット 4-44
４－６－10　リスクカーブ 4-45

第５章　道路斜面防災対策の費用便益分析 5-1
５－１　道路斜面防災対策の費用便益分析の方法 5-1
５－１－１　基本的な考え方 5-1

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）
目次

はじめに

第１章　総説 1-1
１－１　マニュアルの目的 1-1
１－２　構成 1-1
１－３　用語の定義 1-3

第２章　道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援の基本的枠組み 2-1
２－１　適用範囲と位置づけ 2-1
２－２　道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援の流れ 2-4

第３章　道路斜面災害の被害額算定 3-1
３－１　災害被害額算定の基本的考え方 3-1
３－１－１　基本的な考え方 3-1
３－１－２　被害額算定と実際の被害額の確率分布 3-2
３－１－３　被害額の評価項目 3-3
３－２　人身損失D_1 3-4
３－２－１　基本的な考え方 3-4
３－２－２　算定手順 3-6
３－２－３　必要なデータ 3-8
３－２－４　被災形態別延長の想定 3-8
３－２－５　被災形態別被災者数の算定 3-9
３－２－６　換算被災者数：M[人]の算定 3-10
３－２－７　人身損失D_1の算定 3-10
３－３　復旧費用D_2 3-14
３－３－１　基本的な考え方 3-14
３－３－２　算定手順 3-14
３－３－３　必要なデータ 3-14
３－３－４　復旧費用D_2の算定 3-15
３－４　迂回損失D_3 3-16
３－４－１　基本的な考え方 3-16
３－４－２　算定手順 3-16
３－４－３　迂回路の選定 3-17
３－４－４　必要なデータ 3-18
３－４－５　復旧日数の推定 3-18
３－４－６　道路交通の一般化費用の算定 3-19
３－４－７　迂回損失D_3 3-21

５－１－２　適用範囲 5-1
５－１－３　対象期間 5-2
５－１－４　費用便益分析の手順 5-2
５－１－５　便益の考え方 5-3
５－１－６　費用の考え方 5-4
５－２　道路斜面対策の便益と費用の算定 5-4
５－２－１　待ち受け対策工法 5-4
５－２－２　発生源対策工法 5-5
５－２－３　事前通行規制 5-5
５－２－４　バイパス整備事業 5-6

第６章　リスク分析に基づくマネジメント支援技術 6-1
６－１　リスクマネジメント支援の基本的考え方 6-1
６－１－１　説明支援 6-1
６－１－２　施策・意思決定支援 6-2
６－２　防災対策の評価 6-5
６－２－１　安全性の確保 6-5
６－２－２　信頼性の向上 6-8
６－３　事前通行規制の評価 6-11
６－３－１　効率性の向上 6-11
６－３－２　公平性の確保 6-13

第７章　リスク評価における不確定性の取り扱い 7-1
７－１　基本的な考え方 7-1
７－２　不確定性の要因の抽出と数量化 7-4
７－３　不確定性を考慮した被害額分布の算定 7-6
７－４　不確定性を踏まえたリスク評価 7-7

第１章　総説

１－１　マニュアルの目的

本マニュアル（案）は、道路斜面災害分野におけるリスク分析、リスクマネジメント支援に関わる技術や手法について、留意すべき必要な事項をとりまとめ、道路斜面防災管理の効率的な実施のための参考とするものである。

【解説】

道路斜面防災管理の分野において、膨大な数にのぼる道路斜面を限られた財源や管理体制の下で効率的に管理していく観点から、防災対策の投資効果を明確にし、防災管理業務のアカウンタビリティを向上させることが求められてきている。これまで、道路防災管理における斜面災害の危険度評価は、主に、斜面の安定度や崩壊危険箇所の数といった指標により行われてきた。ここでは、道路斜面災害に対してこれに近接する道路が有するリスクを適切に予測、数量化し、防災対策の効率性の視点を加味した合理的なリスクマネジメントの実現を支援する目的から、主に以下の４つの手法や技術について開発を行い、各道路管理者等の参考にするためにマニュアル（案）としてとりまとめた。

①道路斜面災害による被害額算定手法
②道路斜面災害のリスク算定手法
③道路斜面防災対策の費用便益分析手法
④リスク分析・マネジメント支援技術

１－２　構成

本マニュアル（案）の構成は以下のとおりである。

・第１章　総説
・第２章　道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援の基本的な枠組み
・第３章　道路斜面災害の被害額算定
・第４章　道路斜面災害のリスク算定
・第５章　道路斜面防災対策の費用便益分析
・第６章　リスク分析・マネジメント支援技術
・第７章　リスク評価における不確定性の取り扱い

【解説】

第２章ではまず、様々な側面から捉えうる道路斜面災害のリスクについて、本マニュアル（案）を適用する範囲と位置づけを述べるとともに、リスク算定の結果作成するリスクカーブによりどのようなリスク分析・リスクマネジメントが可能になるか、防災対策の費用便益分析も取り込んだ基本的な枠組みを提示する。

第３章においては、斜面災害による社会的損失を被害額として定量化する手法について提示する。

第４章では、斜面災害の年発生確率と想定災害規模を予測し、これからリスクを算定す

る手法を提示する。

第５章では、４章で算定される道路斜面災害のリスクの現状に対して、防災対策工や事前通行規制などの各種道路斜面防災対策を実施した場合のリスク低減量に基づいた費用便益分析手法について解説する。

第６章では、実際の道路防災管理の効率化や高度化を図るにあたり、３章～５章に示す手法を用いて予測された道路斜面災害のリスクに関する情報をどのように活用し、反映することができるかについて、リスク分析・マネジメント支援の観点からその基本的な考え方を紹介している。

第７章では、リスク算定の過程で発生する不確定性について、その表現法とリスク分析・マネジメント支援への反映法について記述する。不確定性を踏まえたリスク評価・マネジメントは難しい課題ではあるが、道路管理担当者等が意思決定を行う際の重要な情報であり、本章において現時点での知見をとりまとめている。

各項において、原則的な事項は枠書きとし、これに対する具体的な説明や標準的な算定方法等を【解説】として記述している。ここでは、道路斜面災害のリスクマネジメントを行うこと自体が、道路管理者の大きな負担にならないよう、比較的簡易な手法を主体として記述した。【解説】の内容について理解を深めるために必要と考えられる事項、詳細な検討手法、まだ技術的に確立されていない手法等は＜参考＞として記載した。

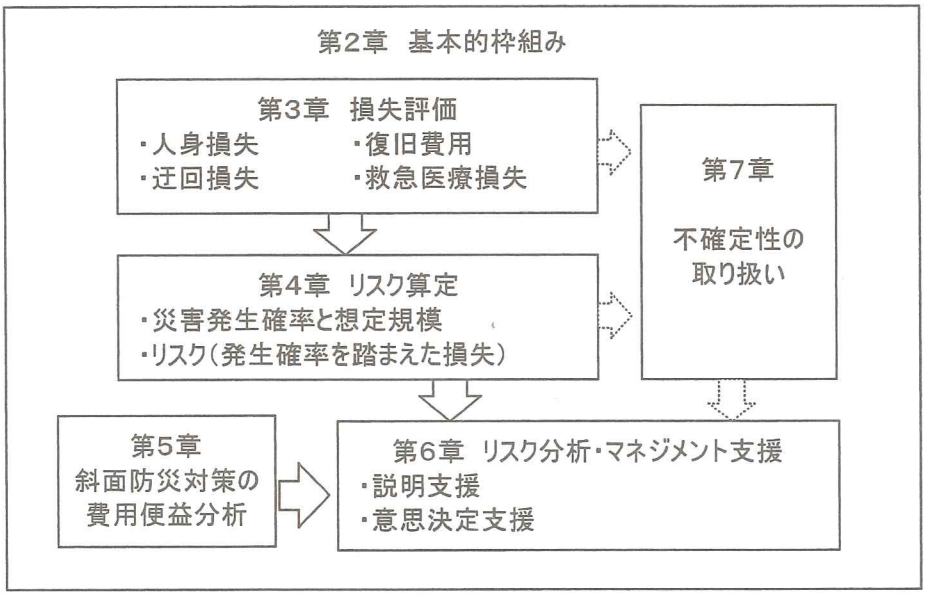


図-1.1　本マニュアルの構成

１－３　用語の定義

このマニュアル（案）中で用いる用語の定義は下記のとおりとする。

全体

- **道路斜面災害**：道路に近接するのり面や斜面の崩壊や崩落に伴い、道路施設や道路利用者等が被る災害
- **道路斜面災害のリスク**：道路斜面災害のリスクとは、狭義には道路斜面災害の発生に伴い想定される社会的損失の年平均値（年平均損失）、広義には社会的損失の年間確率分布のことをいう。本マニュアルでは、原則として社会的損失の年平均値をリスクと呼ぶこととする。
- **同リスク分析**：道路斜面災害のリスク算定の結果をもとに、評価対象路線区間が抱えているリスクの大きさや特性を把握すること。
- **同リスクマネジメント**：分析された現状のリスクに対し、防災対策の費用便益分析を用いて、優先対策箇所を抽出、防災対策を選定等、リスクの取り扱いの方針や効率的な低減方策を検討すること。また、リスク低減方策を実施すること。
- **斜面災害の形態**：「落石・崩壊」「岩石崩壊」「地すべり」「土石流」など。各項目の定義については「平成８年度道路防災総点検要領（（財）道路保全技術センター）」を参照のこと。
- **斜面の崩壊率（フラジリティ）**：複数の斜面の内、降雨等の一定の大きさの外力に対して崩壊する可能性のある斜面の割合。
- **イベントプロット**：イベントとは、災害あるいは降雨を指し、横軸にイベント１回あたりの被害額、縦軸にその年超過確率をとったグラフであり、任意の年に検討対象路線区間や検討対象斜面で想定されるイベント１回あたりの被害額の分布を表したもの。
- **リスクカーブ**：横軸に年間合計被害額を、縦軸にその年超過確率をとったグラフであり、任意の年に発生する合計被害額の分布を表したもの。リスクカーブで囲まれた面積が、その路線区間（斜面）の被害額の年平均値となる。
- **モンテカルロ法**：モンテカルロシミュレーションとは、不確定な要素に対してランダムな数値を当てはめたシミュレーションを多数回行うことにより、不確定性を確率的に判断しようとする手法で、マニュアルではこれを単にモンテカルロ法と称する。

第２章

- **オプションプライス**：移動する場合に道路を利用する選択肢があることのもたらす価値（オプション価値）を含めた道路の価値であり、消費者余剰で計測されない部分。

第３章

- **崩壊の到達幅**：崩壊の道路に到達した場合の幅、道路中心線で計測する。災害に巻き込まれる被災者の人数に影響する。単位［m］。
- **被災形態**：災害の被災者が崩壊により被災する形態。崩壊の到達幅を走行中の場合と制動しきれずに崩落土に衝突する場合のいずれかに分類される。
- **制動停止距離**：運転者が車輌を停止させようとしてから停止するまでに移動する距離。空走距離と制動距離の和。単位［m］。速度により決まる。
- **一般化費用**：移動の費用を一般化したもの。車輌ごとの平均的な移動のコスト。単位[¥]。

- **時間価値原単位**：１台の車輌が移動する際の時間あたりの費用。車種ごとに異なる。乗用車では、平休日に差がある。単位［¥／台・分］。
- **走行経費原単位**：１台の車輌が移動する際の距離あたりの費用。車種・速度ごとに異なる。単位[¥／台・km]。
- **救急医療施設**：心臓停止・呼吸停止・多量出血の症状に対して、救急医療が行える施設選定は、救急指定・24 時間対応・当番制などの選定条件を付記することが重要。
- **安全搬送範囲**：心臓停止・呼吸停止・多量出血の症状に対して、医療機関に安全な時間内に搬送される範囲。
- **限界搬送範囲**：心臓停止・呼吸停止・多量出血の症状に対して、医療機関に搬送しても救急処置が間に合わない範囲の内側を意味する。

第４章

- **崩壊土量**：斜面災害が起こった時に発生する土砂量。
- **到達土量**：斜面災害が起こった時に道路に到達する土砂量。崩壊土量のうち、待ち受け対策工や道路路肩を乗り越え道路に到達した土砂量を指す。
- **フラジリティカーブ**：横軸に誘因の大きさを取り、縦軸に斜面の崩壊率を取るグラフ上での両者の相関曲線。
- **誘因**：降雨や地震など、斜面災害の直接的な原因。
- **年超過確率**：１年間に、確率事象（降雨量、到達土量、被害額等）が、着目する大きさを超える確率。
- **雨量指標**：降雨量の大きさを表わす指標。時間雨量、連続雨量、換算連続雨量（実行雨量）、土壌雨量指数等。
- **降雨量階級**：降雨量の大きさで区分した降雨の階級。
- **斜面特性**：斜面の素因である斜面高さ、斜面延長、および斜面勾配等の斜面の規模や、斜面の各地層の強度特性、透水性、滞水性等といった、斜面の崩壊に関わる特性。

第５章

- **発生源対策工**：崩壊形態に対して発生源で崩壊を防止する目的で実施される対策工法。予防工・個別対策工法。
- **待ち受け対策工**：崩壊が道路に到達しないように防護する対策工法。防護工。主に、現道脇に設置される。
- **規制雨量**：通行規制を行う場合に、規制を行う基準となる雨量。計測する指標は、積算雨量（時間雨量・24 時間雨量）、連続雨量、換算連続雨量（実効雨量）などで、複数の指標を用いた通行規制区間もある。

第６章

- **目標水準**：対象路線区間の安全性や信頼性に対して、道路管理者が道路斜面防災管理業務において目標とする水準。

第７章

- **リスクプレミアム**：期待額と確実同値額の差
- **確実同値額**：期待効用と同一の効用水準をもたらす確定的な金額

第２章　道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援の基本的枠組み

２－１　適用範囲と位置づけ

（１）マニュアル（案）の適用範囲と位置づけ
本マニュアル（案）は、道路管理者が道路斜面災害のリスクマネジメントを実施するための支援ツールであり、斜面災害の年発生確率と想定災害規模の予測、リスクの算定、斜面防災対策の費用便益分析、リスク分析までを取り扱う。
（２）対象とする災害
本マニュアル（案）で主に取り扱う災害は、道路が主たる被害となる斜面災害とする。
（３）対象とするリスク
道路斜面災害のリスクは、災害発生により道路利用者や道路施設が直接被る損失（直接損失）と道路機能の不全が社会全体に及ぼす経済的損失（間接損失）を対象とする。

【解説】
（１）マニュアル（案）の適用範囲と位置づけ
道路斜面災害のリスクマネジメントは、災害危険箇所の抽出から対策の実施まで幅広い内容を含んでおり、道路管理者が行政的判断のもと実施していくものである。本マニュアル（案）は、道路管理者が道路斜面災害のリスクマネジメントを実施するための支援ツールであり、道路斜面災害のリスクを定量化するための災害の年発生確率と想定災害規模の予測、リスクの算定、道路斜面防災対策の費用便益分析、リスク分析までを取り扱う（図-2.1 参照）。
リスクを定量化することにより、評価対象路線区間（或いは個別斜面）が抱えているリスクの現状を他の路線区間等と比較したり、防災対策の効率性を費用便益分析に基づき評価したりするなど、リスクマネジメントの支援が可能となる。こうしたリスク分析に基づくリスクマネジメントは、原子力発電所などのエネルギー開発や化学プラント建設などの分野で比較的よく確立された技術であり、斜面災害についても一部の国における鉱山開発の分野で同様の概念が導入されている。また、最近では、国民の財産の自然災害等に対するリスクマネジメントの観点から、行政の分野での適用例も幾つかみられる。
なお、本マニュアル（案）では道路斜面災害に対するリスクの観点から、防災対策箇所の優先順位の決定や対策メニューの選定する考え方を記述しているが、これらは、道路斜面災害のリスクの観点からだけではなく、他の要素（様々な政治的、社会的な要因）を加味して道路管理者が行政的に総合判断するものである。また、バイパス整備等、その効果が道路斜面防災対策にとどまらないような場合には、「道路投資の評価に関する指針(案)」を参考に、道路事業として総合的に評価していく必要がある。
また、本マニュアル（案）の中には、まだ議論の余地が残されているものも多く、引き続き検討を行っていく必要があるが、現在の知見においては、道路斜面災害のリスクマネジメントを行うにあたり、最適な手法であると考える。

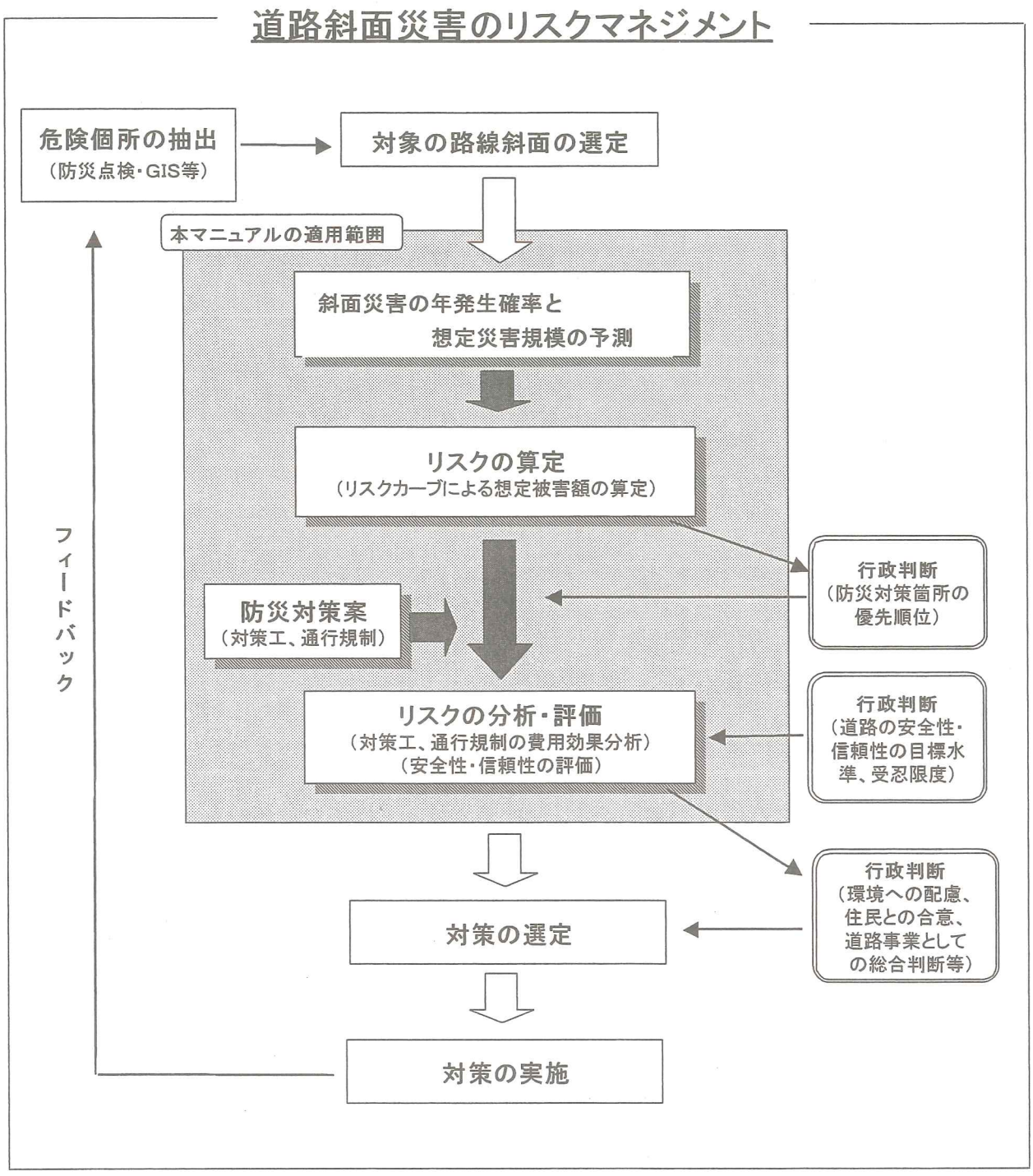


図-2.1　道路斜面災害のリスクマネジメントと本マニュアルの適用範囲

（２）対象とする災害

道路斜面災害の種類としては、落石・崩壊、岩盤崩壊、地すべり、土石流などがあるが、本マニュアル（案）では、道路利用者が被災したり、道路が閉塞して通行止めになる等、道路に関連する被害が主となる規模の斜面災害を対象とする。

なお、影響範囲が道路を超え、民間の家屋や財産に及ぶような大規模な斜面災害の場合には、道路管理者等が、道路施設や道路利用者等に限って災害の影響分析やマネジメント手法の検討を行うには限界がある。このような場合には、本マニュアルに加え、「地すべり対策事業の費用便益分析マニュアル（案）（建設省河川局砂防部）」等を使用し、検討する必要がある。

（３）対象とするリスク

日常語化したリスクは、自然災害、事故、犯罪、訴訟、革命、戦争などあらゆる分野で広範囲に使用されており、一般的に危険事象を指して用いられる場合が多い。本マニュアル（案）で扱う道路斜面災害のリスクとは、狭義には道路斜面災害の発生に伴い想定される社会的損失の年平均値（年平均損失）、広義には社会的損失の年間確率分布のことをいうが、原則として社会的損失の年平均値をリスクと呼ぶこととする。

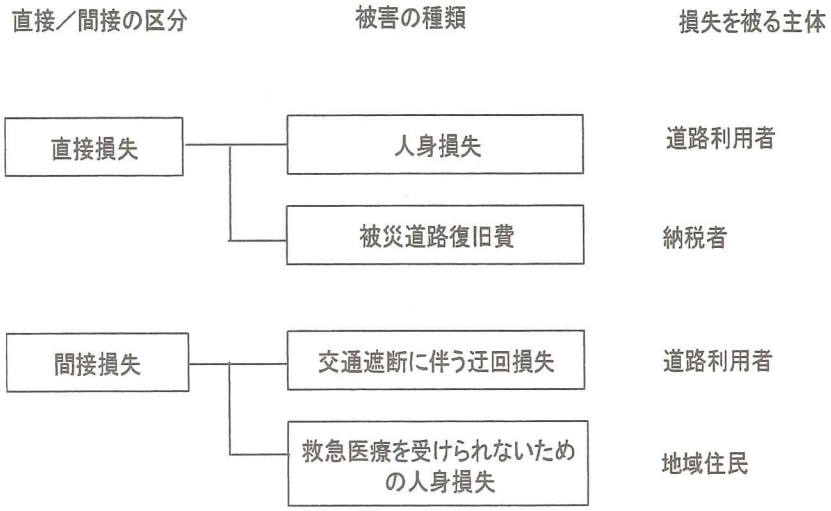


図-2.2 道路斜面災害のリスク

道路斜面災害が及ぼす社会的損失として、道路利用者や道路施設が被る損失（直接損失）と、道路の寸断が社会全体に及ぼす経済的損失（間接損失）を考慮する。具体的な算出項目は、人身損失、被災道路復旧費、交通遮断に伴う迂回損失、救急医療を受けられないための人身損失の４つである（図-2.2 参照、３章にて詳述）。

なお、これ以外に、道路斜面災害が地域経済・住民生活等に及ぼす影響として、通行止めによる沿道事業所の営業損失、道路利用者の不安感・不信感、周辺土地利用の抑制、人口の流出、地価の低下等が考えられるが、現在の知見ではこれらの影響を簡単に定量化し貨幣価値に換算することは難しく、また道路斜面災害の影響だけで判断することができないので、本マニュアル（案）では対象とはしない。もちろん、「道路投資の評価に関する指針（案）第２編　総合評価」（道路投資の評価に関する指針検討委員会編）に示されたアンケート等の手法に従って、非市場的価値をオプションプライスとして算定することは妨げないが、オプションプライスは、主観的で個人差の大きい不確実性を持った価値であること、また、ほかの計測した項目とダブルカウントになる可能性があること等を考慮し、取り扱いには充分な注意を払う必要がある。

これら、非市場的あるいは非貨幣的な影響を無視することは、道路斜面災害を過小評価することにつながるので、今後の知見が蓄積された時点で、評価の対象に入れていく必要がある。

２－２　道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援の流れ

検討対象となる道路が、斜面災害に対して抱えている潜在的な社会的損失を、道路斜面災害リスクとして定量的に評価した結果を用いることにより、道路斜面防災対策の投資効果の明確にし、斜面防災管理のアカウンタビリティを向上させるマネジメントを効果的に進めることができる。

【解説】

本マニュアル（案）における道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援の枠組みは、図-2.3のような流れになっている。

リスク算定は、斜面災害の発生確率と想定災害規模を予測し、想定災害規模から求められた被害額と合わせて、斜面災害に対して抱えている潜在的な社会的損失を定量化することである。また、算定されたリスクから斜面防災対策工の費用便益分析が実施できる。

これらの結果を分析することで、道路斜面防災対策の投資効果を明確にし、斜面防災管理のアカウンタビリティを向上させる合理的なリスクマネジメントの実現を支援することができると考えられる。

この際、リスク算定に含まれるさまざまな不確定性を踏まえた意思決定を行う必要があり、ある被害額とその被害額以上の災害が発生する確率の関係をイベントプロットやリスクカーブとして表示しておくことが望ましい。

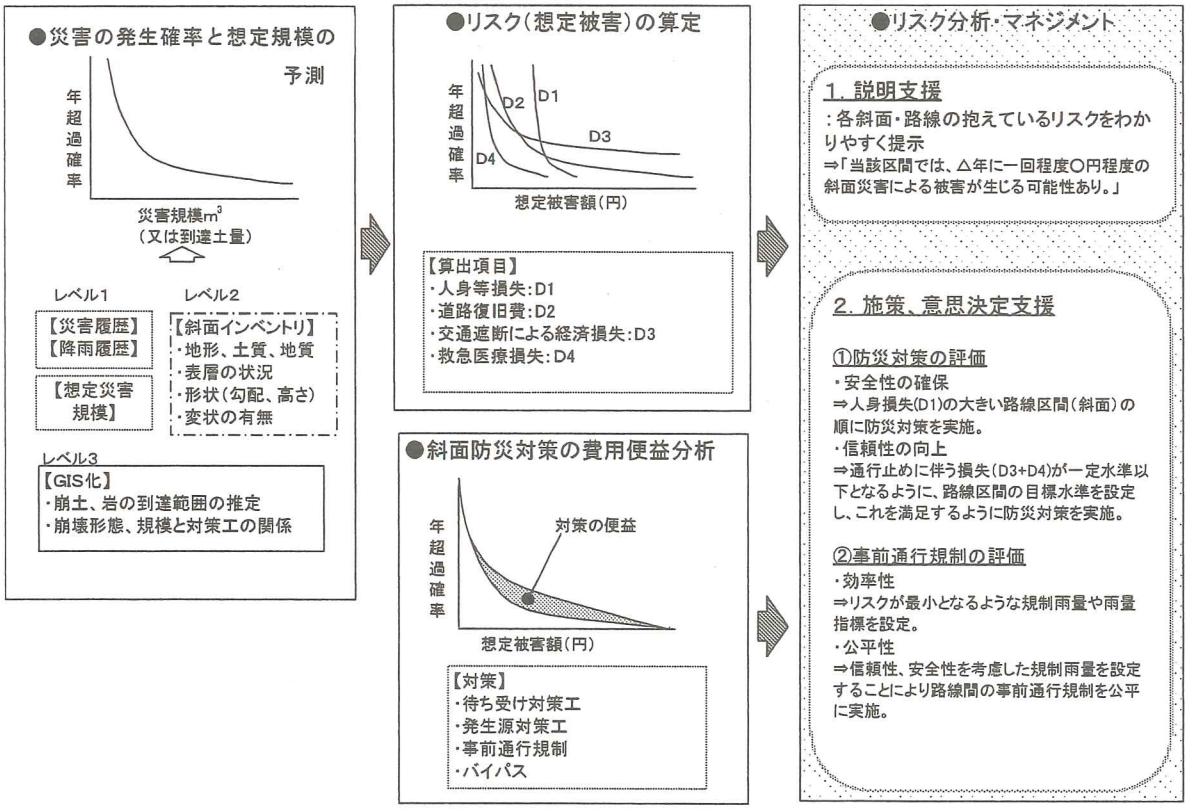


図-2.3　道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援の流れ

第３章　道路斜面災害の被害額算定

３―１　災害被害額算定の基本的考え方

３－１－１　基本的な考え方

災害を、リスク評価するためには、以下の評価が必要である。
(1) 災害の被害額　：災害が発生した場合の社会的損失の評価
(2) 発生確率　　：災害の発生し易さを定量化した評価

【解説】

災害を評価する場合には、災害が発生した際の社会的損失と発生し易さを評価する必要がある。さらに、定量化して評価するためには、災害の社会的損失を被害額，発生し易さを確率として評価するリスク評価を用いる必要がある。

リスク評価と比較される評価手法にハザード評価があり、ハザード評価とリスク評価の相違は、**図-3.1** のイメージに表される。

ハザード評価では、災害が発生した場合の社会的損失を災害の形態･規模で評価している場合が多い。一方で、災害の発生し易さの評価は、＜不安定⇔安定＞，＜発生しやすい⇔滅多に発生しない＞ といった定性的な表現が用いられる場合が多い。

本マニュアルでは、災害が発生した場合の社会的損失を被害額として定量化する方法を 第３章、災害の発生し易さを確率として評価する方法を 第４章 に整理した。

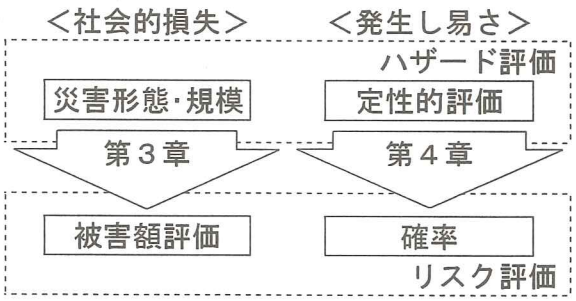


図-3.1 災害の評価手法の比較

評価の相違について例を示す。交通量が異なる道路に想定される形態･規模･発生し易さが等しい道路災害は、ハザード評価では等しい評価となり、リスク評価では、交通量の大きい道路に想定される災害の評価が重くなる。これは、災害の被災者数と交通遮断の影響を受ける道路利用者の増加が見込まれるためで、この章で扱う社会的損失の金額化は、このような重み付けを行うことを目的とする。

社会的損失を計測する場合には、災害を被る立場の相違により、損失の評価項目を設定する。本マニュアルでは、道路災害の社会的損失を、３－１－３ で後述する４種類の評価項目に代表されると考えた。それぞれの評価項目は評価方法が異なるため、各損失の大きさを合計･比較するには、損失の「単一指標」が必要となる。

リスク評価手法は、それぞれの評価項目の「被害額」を、損失の「単一指標」として採用している。この結果、防災事業の効果を被害額の減少として評価することが可能になり、防災事業の便益算定が可能となる。そのため、第５章 以降で後述するように、防災事業の費用便益分析が可能になる。これは、リスク評価の長所と考えてよい。

選定した評価項目には、人身損失のように、一般的に金額化が適当ではないと考えられている評価項目も含まれている。しかし、損失として無視できないと考えられる評価項目であり、リスク評価の長所を失わない目的で、現時点において最善と考えられる評価方法を提示することに努めた。

３－１－２　被害額算定と実際の被害額の確率分布

災害の規模に対する被害額は、本マニュアルの手法により求めた被害額を用いることができる。

【解説】

ハザードとして特定された災害の被害額は、乖離(バラツキ)がある。この原因として、１年間の日交通量の季節変化、１日の時間交通量の変化があり、走行速度が等しい場合、交通量が多い時に災害の被害額が大きく見込まれる。

こうしたことを考えると、災害履歴に記載されている実際の被害額は偶然に発生した金額であり、同様の災害が再発した場合の被害額とは直接の関係はない。また、実際の被害額には、交通量以外の偶然も、数多く含まれると考えるのが妥当である。

そのため、本マニュアルでは、被害額を４種類の評価項目別に積算する方法によって、リスク評価に用いる被害額を算定する手法を提案した。これは、実際の災害件数が少ないことから、統計的な処理により平均被害額を算定するのは困難と考えたためである。

平均被害額を算定するためには、平均的なデータを用いることが望ましいが、このようなデータは容易に入手できない場合も多い。例えば、走行速度･交通量でさえ、厳密には平均的なデータの入手は難しい。

交通の走行速度は、道路交通センサスの混雑時旅行速度、地点間の移動時間と区間距離を示した道路時刻表より求めることが可能である。道路時刻表は高規格道路と国道、道路交通センサスはこれらに加えて主要な地域の幹線道路を扱っていて、これらの道路を対象としたリスク評価を行う場合には、データ取得が容易に可能である。しかし、得られる走行速度は、どちらの場合も走行速度の平均値とは若干の相違が認められる。

交通量は、道路交通センサスからデータ取得が可能であるが、主要な幹線道路を除いては 12 時間交通量のデータしか得られない難点がある。

こうしたことから、厳密に平均的なデータを得るためには、新たな調査が必要と考えられる。しかし、調査を行った場合にも誤差の発生が想定され、精度を上げる目的に対して相当な費用が見込まれる。そのため、本マニュアルでは、算定に用いるデータの入手が容易な場合、これらを活用する方針を採用した。

ただし、平均的なデータを作成するためには、データの条件を十分把握した上で必要に応じて元データを修正することが望ましい。

例えば、走行速度について、道路交通センサスと道路時刻表の双方からデータ取得が可能な場合では、通常時の走行速度については双方の平均を用い、交通集中の想定される迂回路の走行速度については道路交通センサスの混雑時旅行速度を用いるのが、最善の対応と考えられる。

交通量に関しても、24 時間交通量の記述がない場合、12 時間交通量に昼夜率を考慮することが適切な対応と考えられる。

特に、リスク評価の目的で調査を行う場合には、平均的な値を求めるように留意することが望ましい。

３－１－３　被害額の評価項目

被害額算定の対象は、被害額として定量的に計算できる以下の４項目とし、予測される災害の形態･規模にもとづき被害額を算定する。

D_1 ：人身損失
D_2 ：道路復旧費
D_3 ：迂回損失
D_4 ：救急医療損失

【解説】

本マニュアル（案）では、道路斜面災害が及ぼす社会経済的損失として、２－１(3) で前述した経緯により、客観的に算定可能な４つの項目を選定した。（表-3.1）

表-3.1　対象とする災害被害額の内容

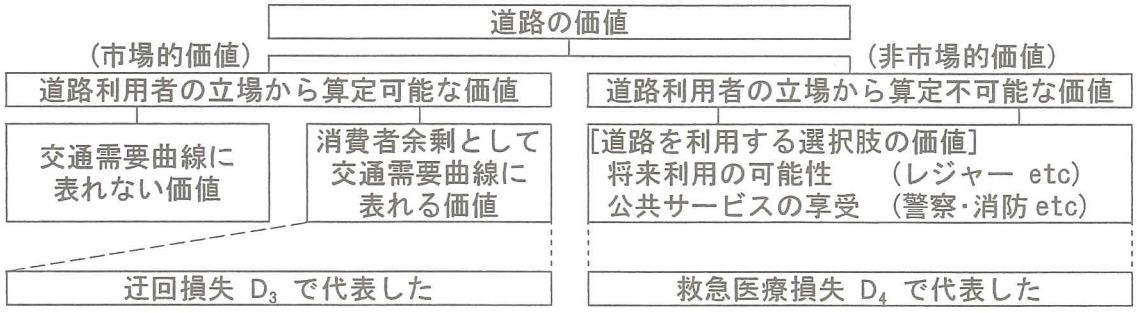
損失の名称	損失負担者	損失の内容
D_1：人身損失	被災者	被災した道路利用者の人身損失と物的損失
D_2：道路復旧費	納税者	税金から支出される道路復旧に要する費用
D_3：迂回損失	道路利用者	災害時の迂回による交通コストの増分
D_4：救急医療損失	地域住民	迂回により、公共サービスが享受できないことで発生する損失の代表

迂回損失 D_3 と救急医療損失 D_4 は、道路が通行できなくなることで発生する損失である。迂回損失 D_3 は、道路利用者の立場から計測した消費者余剰であり、交通需要曲線により表現される市場的価値である。一方で、救急医療損失 D_4 は、道路を利用していない近隣の地域住民の立場から計測した非市場的価値である。＜参考-3.1.＞

＜参考-3.1＞リスクの計測対象

一般に、道路の価値は、道路利用者の立場から計測可能な市場的価値と、実際には道路を利用していない住民などの立場で計測される非市場的価値に分類される。

本マニュアルでは、交通需要曲線の縦軸に用いられる一般化費用により、消費者余剰の考え方を用いて市場的価値を算定した。現在では、道路利用者の所得水準が一定ではないことなどにより、消費者余剰と市場的価値との誤差が指摘されているが、このような誤差は交通需要曲線の算定誤差に比べてわずかなものと考えた。



一方、非市場的価値は、道路を利用する選択肢の価値と考えられていて、レジャーなどの将来利用の可能性と警察･消防など公共サービスの享受の可能性で説明されることが多い。このマニュアルでは、救急医療が必要な状態で道路利用により救われる生命の価値が、このような価値の大部分を占めると考え、救急医療損失の名称で整理した。

3－2　人身損失 D_I

3－2－1　基本的な考え方

人身損失 D_I［円］は、崩壊してきた土砂（落石）が車輌を直撃する、あるいは、道路に到達した土砂（落石）に車輌が制動できず衝突することによって、死亡、重傷、軽傷、物損を被る災害被災者の被害額として算定する。

【解説】

人身損失が発生する被災形態には、車輌が崩壊（落石）の到達地点にいる被災形態と、道路に到達した土砂（落石）に車輌が制動しきれず衝突する被災形態があり、この結果、災害被災者は、死亡、重傷、軽傷を被り、車輌の物損も発生する。ここでは、これらの人身損失を以下の要因を考慮して算定する。

・到達土量（落石の大きさ）
・被災する台数（交通量・旅行速度･衝突時の車輌速度）
・被災した車輌の被災形態の内訳（埋没被災、衝突被災など）

人身損失の算定においては、同程度の崩壊(落石)に対して、交通量が多い場合に被災者数が増加すると考えた。一方、以下のような被災状況の変化を想定した。

◆ 到達土砂から遠くなるにつれ、**死亡→重傷→軽傷→物損**と被災状況が軽くなる。
◆ 到達土量：V_o［m³］が小さいほど、**死亡→重傷→軽傷→物損**と被災状況が軽くなる。

本マニュアル刊行にあたっては、国内外の被災状況の分析事例を調査したが、海外の文献（ Finlay et al ：1999）に「車両の埋没以外の被災形態では死亡災害の発生を想定しがたい」という記述があった。本マニュアルでは、この考え方をふまえ、小型車の土砂災害の被災形態を、**図-3.1** のモデルに分類した。ここで、被災形態別被災者数は各被災形態の範囲を走行中の交通量を算出することで求めることが可能である。

A) 埋没被災　：到達土砂に車輌が埋没する。
B) 端部被災　：土砂をかぶるが埋没はしない。
C) 衝突被災　：制動しきれずに到達土砂に衝突する。

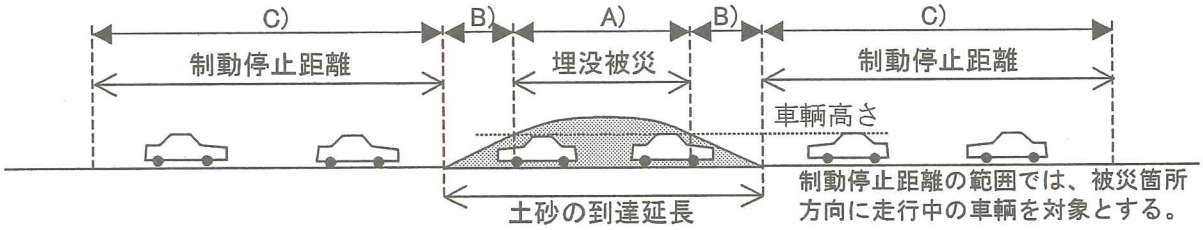


図-3.1 小型車の土砂災害における被災形態の平面的分布のイメージ

A) の埋没被災は、堆積高さが車輌高さとなる土量 V_{DS}［m³］を越える到達土量で発生し、交通量が一定の場合、到達土量に対する被災状況･被災者数は、**表-3.2** に想定できる。

表-3.2 到達土量に対する被災状況･被災者数の変化

到達土量［m³］	被災形態	0	V_{DS}	∞
被災状況	A) 埋没被災	―		死亡で一定である
	B) 端部被災	到達土量増加→悪化		ほとんど変化しない
	C) 衝突被災	到達土量増加→悪化		ほとんど変化しない
被災者数［人］	A) 埋没被災	発生しない		到達土量増加→増加
	B) 端部被災	到達土量増加→増加		ほとんど変化しない
	C) 衝突被災	土量と関係なく被災者数は一定である		

表-3.2 の整理により、$V_{DS} \leqq V_0$ の場合は、A) 埋没被災の被災者数の変化が主体であり、$0 < V_0 < V_{DS}$ の場合に比較して被災状況の変化は想定しやすいと考えられた。

図-3.2 は、$V_{DS} \leqq V_0$ の土砂災害において、被災者の位置と被災者１人あたりの人身損失額を表したもので、既知な部分は、死亡の扱いを受ける A) の被災形態の範囲と、到達土砂から制動停止距離だけ離れている被災しない範囲である。

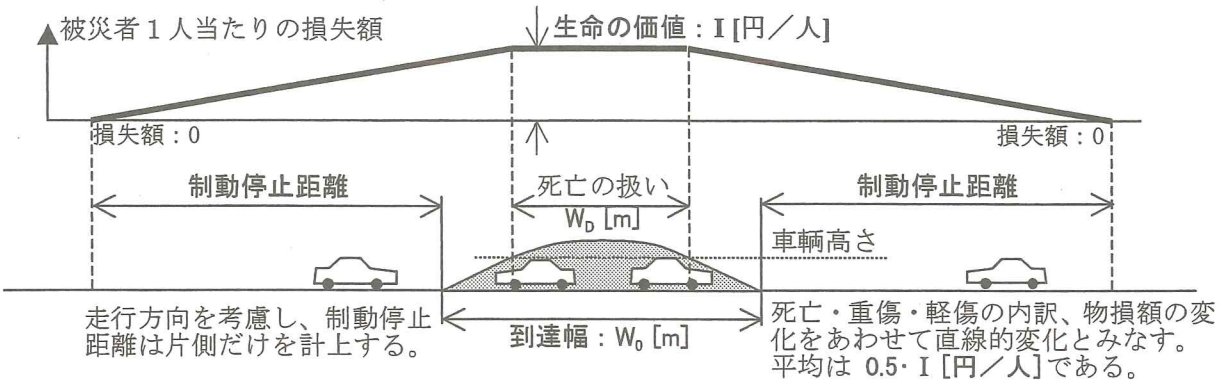


図-3.2 被災者１人あたりの人身損失額の分布モデル

本マニュアルでは、$V_{DS} \leqq V_0$ の場合の人的損失と物的損失を含めた被災者１人あたりの人身損失額が、図-3.2 のような台形配分で遷移すると考えた。このモデルにより、埋没被災者の一人あたり損失額は死亡の損失額、端部被災と衝突被災における被災者一人あたりの損失額の平均は、死亡の損失額の半額と設定した。

ここで、埋没被災者１人を 1.0 [人]、端部被災と衝突被災の被災者は 0.5 [人] として合計した人数が、換算被災者数であり、人身損失は、[換算被災者数]×[死亡時の１人あたりの損失額] として算定可能となる。

一方、大型車は、小型車が埋没する到達土量では埋没しない。そのため、小型車の埋没被災の発生する最小到達土量 V_{DS} [m^3] と同様に、大型車の埋没被災の発生する最小到達土量 V_{DL} [m^3] を定義して、同じ考え方で車種別に換算被災者数を算定することとした。

これより小規模な場合（$V_{DL} \geqq V_0$ の場合の大型車、$V_{DS} \geqq V_0$ の場合の小型車）の換算被災者数は、到達土量が少なくなるほど減少し、車道に到達しない土砂崩壊で 0 になると考えて、車道端部の到達土砂堆積高さ：H_1 [m] に比例する設定とした。

便宜上、H_1 [m] を、路側堆積高と呼ぶ。

ここで、大型車の場合は、$V_{DL} = V_0$ の場合の路側堆積高：$H_1 = H_{DL}$ で、このときの大型車の換算被災者数を M_{DL} [人] と整理する。

同様に、小型車の場合には、$V_{DS} = V_0$ の場合の路側堆積高：$H_1 = H_{DS}$ で、このときの小型車の換算被災者数を M_{DS} [人] と整理すると、路側堆積高と換算被災者数の関係は、図-3.3. に整理される。

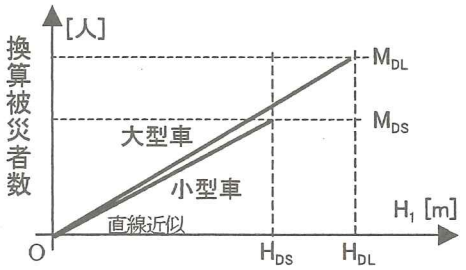


図-3.3. 小規模災害の人身損失額

したがって、規模によらず、小型車と大型車の換算被災者数の合計：$M = M_L + M_S$ [人] と、死亡時の１人あたりの損失額：I [円／人] の積として、人身損失額を算定可能となる。

落石の場合、直径：H_R [m] の落石の被害額が、路側堆積高：H_1 [m] = H_R [m] の土砂崩壊の被害額と等しいと設定した。

このような取り扱いは、現時点における最善の方法であるが、今後の研究で詳細な設定が可能になるまでの暫定的処置と考えている。

３－２－２　算定手順

人身損失 D_I［円］は、車種別に以下の手順で算定することができる。
① 制動時に、到達土砂（落石）に衝突する人数:M_C［人］の算定
② 埋没被災の想定される場合、到達土量 V_O［m^3］、その他の場合、埋没被災の想定される最小到達土量 V_D［m^3］、の堆積形状、被災形態別延長の想定
③ 被災状況別被災者数の算定
④ 換算被災者数 M［人］の算定
⑤ 人身損失：D_I［円］の算定

【解説】
使用する記号は以下のとおりである。

V_O	［m^3］	：到達土量、土砂災害の場合の道路に到達する崩壊土砂の土量
V_{DL}	［m^3］	：大型車埋没の想定される最小到達土量
V_{DS}	［m^3］	：小型車埋没の想定される最小到達土量
M	［人］	：換算被災者数、被災形態別被災者数を重み付けして合計した値。
M_L	［人］	：M［人］のうち、大型車に乗車している換算被災者数
M_S	［人］	：M［人］のうち、小型車に乗車している換算被災者数
M_A	［人］	：埋没被災者数、到達土砂に埋没する被災者数
M_{AL}	［人］	：M_A［人］のうち、大型車に乗車している埋没被災者数（ $V_{DL} < V_O$ ）
M_{AS}	［人］	：M_A［人］のうち、小型車に乗車している埋没被災者数（ $V_{SL} < V_O$ ）
M_B	［人］	：端部被災者数、到達土砂の直撃を受けるが埋没はしない車輌の被災者数
M_{BL}	［人］	：M_B［人］のうち、大型車に乗車している端部被災者数
M_{BS}	［人］	：M_B［人］のうち、小型車に乗車している端部被災者数
M_C	［人］	：衝突被災者数、到達土砂（落石）に制動時に衝突する車輌の被災者数
M_{CL}	［人］	：M_C［人］のうち、大型車に乗車している衝突被災者数
M_{CS}	［人］	：M_C［人］のうち、小型車に乗車している衝突被災者数
W_{AL}	［m］	：埋没被災が想定される場合の大型車の被災者が埋没被災する延長
W_{AS}	［m］	：埋没被災が想定される場合の小型車の被災者が埋没被災する延長
W_{BL}	［m］	：埋没被災が想定される場合の大型車の被災者が端部被災する延長
W_{BS}	［m］	：埋没被災が想定される場合の小型車の被災者が端部被災する延長
W_C	［m］	：衝突被災する延長、制動停止距離に等しい。（ $= W_{CL} = W_{CS}$［m］）
W_{DL}	［m］	：V_{DL}［m^3］による到達土砂の中心線到達延長。
W_{DS}	［m］	：V_{DS}［m^3］による到達土砂の中心線到達延長。
H_R	［m］	：災害が落石の場合、落石の直径。球形でない場合、平均値を用いてよい。
H_L	［m］	：大型車の車輌高さ。道路構造例の記述を用いてよい。
H_S	［m］	：小型車の車輌高さ。道路構造例の記述を用いてよい。
H_0	［m］	：災害が土砂崩壊の場合の中心線での堆積高さ。
H_I	［m］	：路側堆積高。災害が土砂崩壊の場合の車道斜面側端部での堆積高さ。
H_{DL}	［m］	：V_{DL}［m^3］による路側堆積高。
H_{DS}	［m］	：V_{DS}［m^3］による路側堆積高。
I［円／人］		：被災者が死亡した場合の１人あたりの人身損失額(≒生命の価値)

基本的な算定手順は、落石・土砂災害の２種類であり、埋没被災の想定されない土砂災害は、路側堆積高と等しい直径の落石の算定手順により算定される。

3-5 ページ、図-3.2 の被災者１人あたりの人身損失額のモデルでは、A) の被災形態の被災状況は死亡と考えられ、被災者１人あたりの人身損失額は I [円／人] であり、B), C) の被災形態における被災者１人あたりの人身損失額の平均値は、I／2 [円／人] である。換算被災者数 M [人] は、被災形態別被災者数にこの重み付けをし、合計した人数である。

効率的な算定手順として、図-3.4 を推奨する。

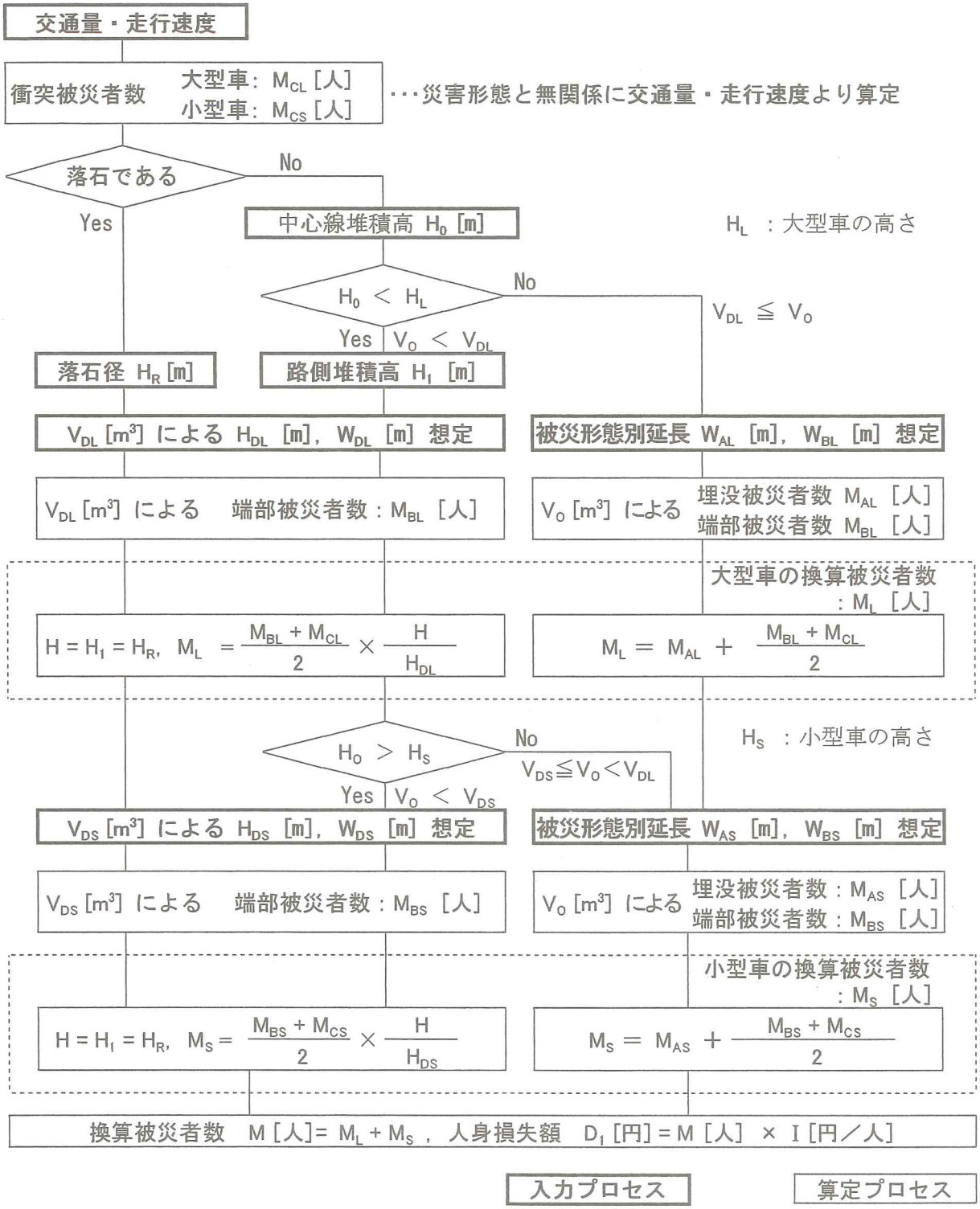


図-3.4 人身損失額：D_1 [円] の算定手順

３－２－３　必要なデータ

人身損失 D_1 の算定では、以下のデータを収集する必要がある。
- 落石の場合，落石径、土砂災害の場合，土量条件により変化する堆積土砂形状
- 交通量
- 走行速度と対応する制動停止距離
- 平均乗車人数
- 死亡の場合の人身損失額

【解説】

交通量、車輌の走行速度は、公表されている道路交通センサスに記載されている。制動停止距離は、**＜参考-3.2＞**に示した「道路構造令」の制動停止視距を用いてよい。平均乗車人数のデータ入手が不可能な場合は**＜参考-3.3＞**を参照されたい。

３－２－４　　被災形態別延長の想定

人身損失の算定は、以下の災害形態別に、**表-3.3** に示す必要な道路中心線における被災状況別延長を想定する必要がある。

(a)　　$V_{DL} < V_O$　(大型車にも埋没被災が想定される到達土量の土砂災害)
(b)　$V_{DS} \leqq V_O < V_{DL}$　(小型車には埋没被災が想定される到達土量の土砂災害)
(c)　$V_O \leqq V_{DS}$　　(小型車にも埋没被災が想定されない到達土量の土砂災害，落石)

埋没被災が想定される場合、埋没被災する延長は、大型車に対して W_{AL} [m]、小型車に対して W_{AS} [m] と表し、端部被災する延長は、大型車に対して W_{BL} [m]、小型車に対して W_{BS} [m] と表す。

落石を含め、埋没被災が想定されない災害では、埋没被災の想定される最小到達土量：V_{DL} ，V_{DS} [m³] により発生する中心線到達幅を想定する必要があり、これらを W_{DL} [m]，W_{DS} [m] と表す。

衝突被災する延長は制動停止距離であり、被災条件と無関係に車輌の走行速度に対して一定の値を示す。

表-3.3 被災状況別延長

災害形態		(a)	(b)	(c)
被災状況別延長	W_{DL} [m]	―	○	○
	W_{DS} [m]	―	―	○
	W_{AL} [m]	○	(0)	(0)
	W_{AS} [m]	○	○	(0)
	W_{BL} [m]	○	―	―
	W_{BS} [m]	○	○	―
	W_{CL} [m]	制動停止距離		
	W_{CS} [m]	：$W_{CL} = W_{CS}$		

○：想定する必要がある

【解説】

3-4 ページ、**図-3.1** の被災形態の平面的分布を延長に表したものである。

ここで、埋没被災は、中心線堆積高 H_0 [m] (道路中心線における到達土砂の堆積高さ)が、車輌高さより高くなる範囲に発生すると考えることが可能で、車輌の高さは、**表-3.4** に示す**日本道路協会「道路構造令の解説と運用」(昭和 58 年)** に記載された数値を用いることができる。

表-3.4 車輌の大きさ

	全長 [m]	高さ [m]
小型自動車	4.7	2.0
大型自動車	12.0	3.8

埋没被災が発生する最低土量は、中心線堆積高 H_0 [m] の最大値が、大型車の高さとなる到達土量が V_{DL} [m³]、小型車の高さとなる到達土量が V_{DS} [m³] と考えてよい。

被災状況別延長は、災害の形態･規模が特定できる場合、災害の到達形態を推定して求めることが望ましいが、崩壊形態･到達形態の推定が難しい場合、あるいは、崩壊位置を特定できない路線区間での統計分析を用いる場合、埋没被災の想定される最小到達土量を求める場合には、**＜参考-3.4＞**の円錐型土砂到達モデルを用いて求めることができる。

３－２－５　　被災形態別被災者数の算定

(1) 埋没被災が想定される災害形態の場合、埋没被災者数 M_A [人] は、大型車：M_{AL} [人]、小型車：M_{AS} [人] の合計として、以下の式により算定することが可能である。

$$M_{AL} = \frac{[\text{大型車の車種別時間交通量}]}{1000 \times \text{走行速度 [km／h]}} \times [\text{大型車の車種別平均乗車人数}] \times W_{AL} \quad \cdots \text{式-3.1}$$

$$M_{AS} = \frac{[\text{小型車の車種別時間交通量}]}{1000 \times \text{走行速度 [km／h]}} \times [\text{小型車の車種別平均乗車人数}] \times W_{AS} \quad \cdots \text{式-3.2}$$

(2) 端部被災者数 M_B [人] は、大型車：M_{BL} [人]、小型車：M_{BS} [人] の合計として、以下の式により算定することが可能である。

a)埋没被災が想定される災害形態の場合

$$M_{BL} = \frac{[\text{大型車の車種別時間交通量}]}{1000 \times \text{走行速度 [km／h]}} \times [\text{大型車の車種別平均乗車人数}] \times W_{BL} \quad \cdots \text{式-3.3}$$

$$M_{AS} = \frac{[\text{小型車の車種別時間交通量}]}{1000 \times \text{走行速度 [km／h]}} \times [\text{小型車の車種別平均乗車人数}] \times W_{BS} \quad \cdots \text{式-3.4}$$

b)埋没被災が想定されない災害形態の場合

$$M_{BL} = \frac{[\text{大型車の車種別時間交通量}]}{1000 \times \text{走行速度 [km／h]}} \times [\text{大型車の車種別平均乗車人数}] \times W_{DL} \quad \cdots \text{式-3.5}$$

$$M_{AS} = \frac{[\text{小型車の車種別時間交通量}]}{1000 \times \text{走行速度 [km／h]}} \times [\text{小型車の車種別平均乗車人数}] \times W_{DS} \quad \cdots \text{式-3.6}$$

(3) 衝突被災者数 M_C [人] は、大型車：M_{CL} [人]、小型車：M_{CS} [人] の合計として、以下の式により算定することが可能である。

$$M_{CL} = \frac{[\text{大型車の車種別時間交通量}]}{1000 \times \text{走行速度 [km／h]}} \times [\text{大型車の車種別平均乗車人数}] \times W_C \quad \cdots \text{式-3.7}$$

$$M_{CS} = \frac{[\text{小型車の車種別時間交通量}]}{1000 \times \text{走行速度 [km／h]}} \times [\text{小型車の車種別平均乗車人数}] \times W_C \quad \cdots \text{式-3.8}$$

【解説】

埋没被災者数 M_A [人] は、小型車の埋没被災が想定されない場合、$M_{AL} = M_{AS} = 0$，大型車の埋没被災が想定されない場合、$M_{AL} = 0$ と考えてよい。

端部被災者数 M_B [人]は、埋没被災が想定されない災害では、便宜上、埋没被災の想定される最小到達土量 V_{DL} ，V_{DS} [m^3] に対する数値を算定する。この結果、この範囲の被災形態ごとの被災者数は一定な数値となるが、３－２－６　換算被災者数：M [人] の算定 の段階で人身損失額に重み付けを行う。

衝突被災者数 M_C [人] は、災害の形態･規模によらず一定である。

そのため、端部被災者数 M_B [人] の場合と同様に、埋没被災が想定されない災害では、３－２－６　換算被災者数 M [人] の算定 の段階で人身損失額に重み付けを行う。

埋没被災が想定される災害の場合は、衝突被災者数 M_C [人] に人数･被災状況の変化がないことは、3-4 ページ、図-3.1 の被災形態の平面的分布により想定できる。

これは、3-4 ページ 表-3.2 に示したように、埋没被災が想定されない災害の場合、災害規模による人身損失の変化は、被災状況別延長の変化に伴う被災者数の変化に限らず、**死亡→重傷→軽傷→物損** といった 被災者１人あたりの被災状況の変化を伴うためで、本マニュアルでは、これらを包括的に処理する算定方法を採用している。

３－２－６　　換算被災者数：M［人］の算定

換算被災者数 M［人］は、災害に遭遇する被災者数として、人身損失を表した数値であり、以下の式により算定することができる。埋没被災が想定されない災害については、路側堆積高 H_1［m］，落石の直径 H_R［m］により重み付けする必要がある。

$M[人] = M_L + M_S$

$H = H_1 = H_R\,[m]$

大型車の換算被災者数：M_L［人］
小型車の換算被災者数：M_S［人］

$$M_L = M_{AL} + \frac{M_{BL} + M_{CL}}{2} \quad (V_{DL} \leqq V_O)$$

$$= \frac{M_{BL} + M_{CL}}{2} \times \frac{H}{H_{DL}} \quad (V_O < V_{DL}) \cdots 式\text{-}3.9$$

$$M_S = M_{AS} + \frac{M_{BS} + M_{CS}}{2} \quad (V_{DS} \leqq V_O)$$

$$= \frac{M_{BS} + M_{CS}}{2} \times \frac{H}{H_{DS}} \quad (V_O < V_{DS}) \cdots 式\text{-}3.10$$

【解説】

換算被災者数 M［人］は、被災者の物的損失を含んだ人身損失額 D_1［円］を、被災者１人あたりの人身損失額 I［円／人］で除算した値となる。

３－２－７　　人身損失 D_1 の算定

人身損失 D_1 は、死亡時の１人あたりの人身損失額 I［円］を用いて、**式-3.11**により被害額として算定することができる。

$D_1 = M[人] \times I[円／人]$　　……式-3.11

【解説】

死亡時の１人あたりの人身損失額 I［円］は、「人間の生命の価値」の算定であり、全世界で算定手法が複数紹介されているので＜参考-3.5＞に示す。これらは、算定の根拠が全く異なり、算定額も 3000 万円～ 3 億円と大きな差を伴うものである。

本マニュアルは、多くを参考にした「道路投資の評価に関する指針（案）」が採用した算定事例：I＝32,971（千円）を標準とした。

表-3.5 に算定の内訳を示す。この算定事例は、総務庁が平成５年価格を用いて平成 9 年に算定したものであるが、＜参考 3-5＞に示した世界の算定事例と比較し、生命の価値が低く、重傷の損失は高く評価されている。

表-3.5 人身損失の内容［千円］

種別	人的損失額	物的損失額	事業主体損失額	合計額
物損	0	392	0	392
軽傷	644	392	57	1,093
重傷	9,374	392	242	10,008
死亡	31,533	392	1,046	32,971

平成５年価格

これは、損害認定額の考え方を算定根拠とし、被害者の治療関係費・慰謝料・休業損失・逸失利益の合計額であるためで、損害保険の支払額に生命の存在意義を考慮しない結果と考えられる。海外では、こうした算定手法を用いていない。

このことから、I＝32,971（千円）は、死亡時の人身損失を過小評価しているという意見も多く出されており、引き続き検討が必要であると考えられる。なお、＜参考-3.6＞に、その他の「生命の価値」の算定方法を示したので参照されたい。

＜参考-3.2＞制動停止距離

日本道路協会「道路構造令の解説と運用」（昭和 58 年）256 ページより

走行速度/設計速度 の設定	設計速度 [km]	走行速度 [km]	摩擦係数 f	制動停止視距:[m] 算定値	基準値
85 %	120	102	0.29	212.0	210
	100	85	0.30	153.7	160
	80	68	0.31	105.8	110
90 %	60	54	0.33	72.2	75
	50	45	0.35	54.0	55
	40	36	0.38	38.3	40
100 %	30	30	0.44	29.9	30
	20	20	0.44	17.8	20

＜参考-3.3＞平均乗車人員

平均乗車人員は、地域差と平休日差が見込まれ、パーソントリップ・交通量調査などと併行して調査したデータが入手可能な場合は、調査に基づくデータを用いるのが望ましい。しかし、有効な調査が行われていない場合には、暫定的に、表-A. に記載された全国の平均乗車人員を用いてもよいこととした。

(1)・(2)・(3) は、自動車輸送統計年報の平成 13 年のデータである。計測年度が異なる場合も、昭和 35 年以降のデータが国土交通省のホームページから抽出可能であるため、ここに記載した方法で、平均乗車人員を算定することが可能である。

表-A. 平均乗車人員

	乗用車			バス			貨物車	
	自家用	営業用	軽	自家用	営業用 乗合	営業用 貸切	登録車	軽
(1) 輸送人数 [人／台・日]	3.64	29.25	3.53	55.36	257.06	36.52	1.63	2.49
(2) 輸送回数 [回／台・日]	2.66	20.90	2.67	4.61	11.87	1.37	1.13	1.99
(3) 走行距離 [十億台・km／年]	432.75	16.09	77.58	2.19	2.92	1.65	114.88	68.80
(4) 平均乗車人員 (1)÷(2) [人／回]	1.37	1.40	1.32	12.01	21.66	26.66	1.44	1.25
(5) (3)×(4)	592.19	22.52	102.56	26.27	63.32	43.96	165.71	86.09
(6) Σ(5)÷Σ(3) [人／回]			1.36			19.75		1.37

表中、(6) は、**走行距離 [台・km]** を用いた重み付けにより、乗用車・バス・貨物車のカテゴリ分類に (4) の平均乗車人員を再配分した結果である。地域差・平休日差が考慮されていないことが課題であるが、出典が明確なことから現状の最善値と考えられる。

乗用車の平均乗車人員は、**「道路投資の評価に関する指針(案)」**に、平日 1.44 [人／台]、休日 2.01 [人／台] と記載されている。この本の初版が平成 10 年であることから、乗用車の平均乗車人員は減少傾向にあると考えられる。

乗用車・バスの平均乗車人員に平休日の重み付けを行いたい場合には、この数値の比を用いた以下の算式により、平均乗車人員を再配分することができる。なお、貨物車の場合には、平休日比は考慮しないのが妥当な処理である。

平日平均乗車人員：$\dfrac{(6)\times 1.44\times 7}{1.44\times 5 + 2.01\times 2}$，**休日平均乗車人員**：$\dfrac{(6)\times 2.01\times 7}{1.44\times 5 + 2.01\times 2}$

＜参考-3.4＞被災形態別延長を求める土砂到達モデル

災害の形態･規模の分析された崩壊災害のリスク分析では、到達土砂の被災形態別延長を推定することが望ましい。しかし、区間の履歴による分析では、対象区間のどこで災害が発生するか特定できないため、モデルにより被災形態別延長を設定する必要がある。これは、実際には崩壊形態の存在しない埋没被災の発生する最小到達土量に対しても同様である。

そのため、参考として、崩落土砂の堆積勾配：θ_1 [deg]が一定と考えた円錐型土砂到達モデルによる被災形態別延長の設定例を示す。(図-A)

堆積勾配：θ_1 [deg] は、いわゆる安息角であり内部摩擦角に近似していると考えられる。近辺の崖錘の堆積勾配を用いることが望ましいが、実際の災害の堆積勾配は、含水状態などの影響で変化するため、θ ＝10～30° を用いて設定してもよい。

対象区間の代表的な斜面（法面）勾配：θ_2 [deg] を設定すると、θ_3 [deg] が算定可能である。

$$\mathrm{Cos}\ \theta_3 = \frac{\mathrm{Tan}\,\theta_1}{\mathrm{Tan}\,\theta_2}$$

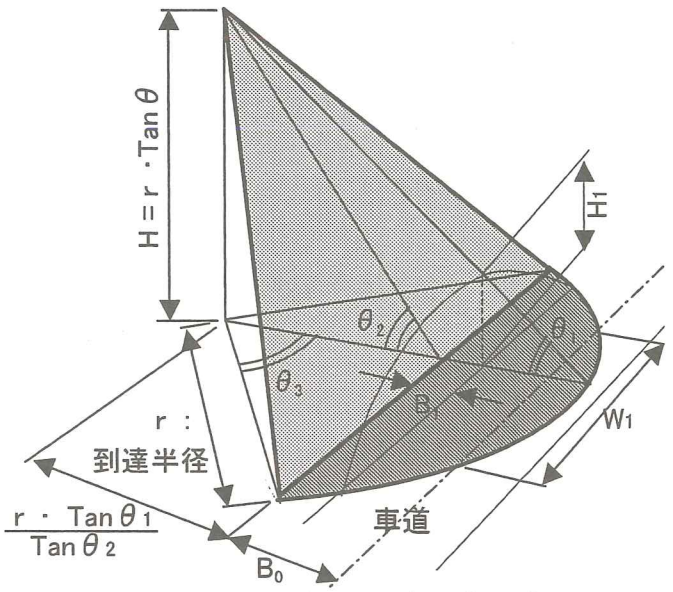


図-A. 円錐型土砂到達モデル

ここで、路肩幅：B_1 [m]、路肩を含めた片側道路幅員：B_0 [m] を考慮した、到達土量：V_0 [m³] に対する堆積形状が、以下の算式により算定される。

到達半径 ：r [m] $= \left\{ \dfrac{3 \cdot V_0}{\mathrm{Tan}\,\theta_1 \cdot \{\ \theta_3 \cdot (\pi \div 180) - \mathrm{Sin}\,\theta_3 \cdot \mathrm{Cos}\,\theta_3\ \}} \right\}^{1/3}$

中心線到達幅 ：W_0 [m] $= 2 \cdot \sqrt{r^2 - (\ r \cdot \mathrm{Cos}\,\theta_3 + B_0\ )^2}$

中心線堆積高 ：H_0 [m] $= \mathrm{Tan}\,\theta_1 \cdot \{\ r - (\ r \cdot \mathrm{Cos}\,\theta_3 + B_0\ )\ \}$

路側堆積高 ：H_1 [m] $= \mathrm{Tan}\,\theta_1 \cdot \{\ r - (\ r \cdot \mathrm{Cos}\,\theta_3 + B_1\ )\ \}$

以下の場合、中心線到達幅：W_1 [m]，中心線堆積高：H_0 [m] の解を得られないのは、土砂が中心線に到達しないためである。

$$r < r \cdot \mathrm{Cos}\,\theta_3 + \frac{B}{2}$$

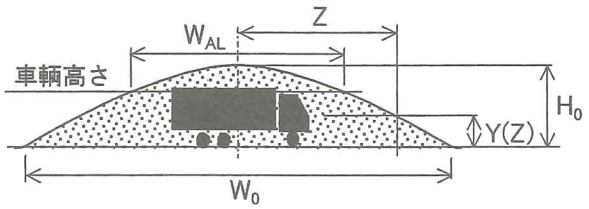


図-B. 中心線堆積断面

中心線に到達した到達土砂の堆積形状は、図-B.、式-A に表すことができる。

$$Y(z) = \mathrm{Tan}\,\theta_1 \cdot \left[\ r - \sqrt{Z^2 + (\ r \cdot \mathrm{Cos}\,\theta_3 + B_0\ )^2}\ \right] \quad \cdots\cdot \text{式-A}$$

埋没被災の延長：W_{AL}，W_{AS} [m] は、この式と 3-6 ページ 表-3.4. の車輌の大きさにより算定することができ、$W_{BL} = W_0 - W_{AL}$ ，$W_{BS} = W_0 - W_{AS}$ と考えてよい。

なお、このモデルの算定において、崩壊規模が判明しているが、到達土量が不明確な場合には、土量変化率を考慮した「ほぐした土量」を、到達土量と考えてよい。

＜参考-3.5＞人身損失額の算定事例

	算定額	備考	調査者
事例１	死亡： 3153 万円 重傷： 937 万円	事例２をもとに補正を加えた平成５年価格、我が国の代表的な算定事例	総務庁資料 （平成９年）
事例２	死亡： 2943 万円 重傷： 1039 万円	損害保険の算定方法による家族の立場での市場価値、重傷の場合は世界最高額(平成５年価格)	(社)日本損害保険協会 （平成７年）
事例３	死亡：11680 万円 重傷： 511 万円		ドイツ EWS (1997)
事例４	死亡：23100 万円 重傷： 241 万円		イギリス、COBA. (1995)
事例５	死亡： 8780 万円 重傷： 736 万円	National Highway Traffic Safety Administration	アメリカ (1990)
事例６	死亡：27500 万円 重傷： 713 万円	The full costs and benefit of transportation	アメリカ (1997)
事例７	死亡： 5581 万円 重傷： 840 万円	オーストラリア輸送・通信局資料	オーストラリア (1992)
事例８	死亡：24000 万円		ニュージーランド
事例９	$2,431,000～3,757,000 (2.65～4.1 億円) (1982 年価格：死亡)	交通事故死の確率を減らすシナリオに対する支払意思額から推定した仮想市場法（C.V.M.） （109 円 = 1 ドル = 1.7 ポンド換算)	Jones-Lee, M.W.,Hammerton,and Philips,P.R.（1985）

※ 事例１～８、「道路投資の評価に対する指針(案)」より
※ 事例９:仮想市場法（C.V.M.）

＜参考-3.6＞標準算定以外の死亡時における１人あたりの人身損失額：I［円］の算

(1) ([GNP]÷[総人口])×([平均寿命]÷2)：国民１人あたり生涯総支出の近似値

簡易に入手可能な指標により算定可能であるが、算定根拠の明確な手法である。この手法では、時期・国別の人身価値評価を容易に実施することが可能である。

([GNP]÷[総人口])は国民１人の総支出、([平均寿命]÷２）は平均余命の近似値を示している。平成７年の 名目 GNP（約 493 億円）、総人口（１億 2557 万人）を用いると、平均寿命を 80 歳として、１人あたりの人身損失額：I＝ １億 5704 万円 が得られる。

(2) 仮想市場法（C.V.M.）：利用者の支払い意志額調査による統計的生命の価値

仮想市場法（C.V.M.）により統計的生命の価値を求めるには、以下の算定式を用いる。

$$\text{統計的生命の価値} = \frac{\text{死亡災害がなくなることへの支払意思額}}{\text{現状の死亡災害発生確率}}$$

…アンケート等により調査
…減少する確率の大きさ

この手法により統計的生命の価値を求めるには、実際に道路利用者に対してアンケートを行う必要があるが、質問文、シナリオなどアンケート手法が非常に重要になる。

詳細については、道路投資の評価に関する指針検討委員会 編「道路投資の評価に関する指針（案）第２編 総合評価」（平成 12 年１月）に記載されているので参照されたい。

道路において死亡するシナリオに対する算定例としては、1985 年、イギリスにおいて、交通事故死の確率を減らすシナリオに対する支払意思額から、統計的生命の価値を算定している。その結果によると、統計的生命の価値は 50 万ポンド（約 9200 万円）を下回ることはないとされ、同国の交通政策では、統計的生命の価値を決める最も重要な指標となっている。

このように、確率を用いて重み付けする方法は、リスクリベンジ法と呼ばれている。

これらの算定結果は、物的損失が計上されていない純粋な「生命の価値」であるが、本マニュアルの標準算定方法の算定結果を上回る金額となる。そのため、これらの算定結果を用いる場合には、物的損失を加算することが望ましい。（表-3.5.）

3—3　復旧費用 D_2

3－3－1　基本的な考え方

> 復旧費用 D_2 は、災害で使用不能となった道路を再び供用するまでの、復旧工事費と到達土砂の運搬処分費を算定する。再発防止のための防災工事費は含まない。

【解説】

復旧費用 D_2 は、交通遮断の回復までに要した費用が対象となり、災害発生に伴う恒久対策工事の費用は含まない。これらは、税金から支出されるため納税者が負担する。

道路管理者の人件費は、復旧費用 D_2 として計上しない。

3－3－2　算定手順

> 土砂の処分方法、運搬経路など復旧工事の内容の想定が可能な場合には、想定した復旧工事を積算して、復旧費用を求める。ただし、復旧工事の想定が困難な場合には、過去の実績から復旧費用を想定することができる。

【解説】

復旧費用は日常的な危機発生に対する準備を評価する項目であるが、いままでの検討事例において、リスクの中で占める割合が小さく、検討結果に大きな影響が表れないことがわかった。そのため、復旧工事の内容が想定できない場合には、過去の実績により求めてよいこととした。

しかし、間接損失の発生日数となる復旧日数は非常に重要な評価項目となるため、復旧工事を想定した検討を実施することが望ましい。復旧工事の想定を行った場合には、積算を行うことにより精度の高い復旧費用を比較的容易に算出可能となる。

3－3－3　必要なデータ

> 復旧費用 D_2 の算定では、以下のデータを収集する必要がある。
> ・到達土量
> （以下、復旧工事の想定により積算を行う場合）
> ・共通単価（土木工事積算基準マニュアル）
> ・建設機械等損料算定表（土木工事積算基準マニュアル）

【解説】

復旧費用の算定に必要なデータは、復旧工事の想定を行う場合と、過去の実績による場合とで異なるが、共通して到達土量を用いる。これは、到達土量を、復旧工事で処分する土量とみなすためである。

復旧工事を想定する場合には、「土木工事積算基準マニュアル」（建設大臣官房技術調査室監修）に記載されている共通単価・建設機械損料算定表を用いる。なお、「土木工事積算基準マニュアル」の参考文献として「積算のための施工計画」が添付されているので、それを参考に復旧工事を想定することもできる。（<参考-3.7>）

３－３－４　復旧費用 D_2 の算定

復旧費用は、復旧工事が想定可能な場合には、「土木工事積算基準マニュアル」に基づいて積算する。復旧工事を想定できない場合には、過去の実績から求めた **式-3.12** の到達土量との相関式より求めることができる。

D_2 [千円] = 9.6246・V_0+ 1361.1　　V_0：到達土量 [m^3]　・・・・・・・・・・**式-3.12**

【解説】

この式は、平成６～10 年の５年間に、北海道・沖縄を含む直轄国道の道路災害復旧事例22 件をもとに、到達土量：V_0 [m^3] と復旧費用：D_2 [千円] の相関から求めたものである。

＜参考-3.7＞ 復旧工事の積算

復旧費用は、道路災害のリスクに占める比率が小さく、現在までの検討事例では、復旧工事費の積算自体はさほど重要ではない。しかし、日常的な危機発生に対する準備を評価する必要性が感じられたため、算定の対象とした。いわば、危機管理(crisis control)の能力を評価する項目である。

復旧費用は、危機に備えた作業基地(出張所)・建設機械・人員・残土仮置き場などの準備が整備されていることで低減する。そのため、これらの項目が算定に影響する目的で、積算による手法を基本的考え方とした。

積算は、面倒な作業であるが、積算による復旧工事の想定を基本的考え方としたのは、もうひとつ、大きな理由がある。

復旧費用の大きさが総損失に占める割合が小さいものの、復旧日数の大きさは、迂回損失 D_3，救急医療損失 D_4 の発生日数であり、総損失の算定結果を左右する。そのため、復旧日数を算定する場合、危機管理(crisis control)の能力を評価したうえで復旧作業の内容を想定して、復旧日数を評価することが望ましい。ここで、復旧費用が積算により求められている場合、復旧日数を評価する作業は、さほど困難ではない。これが、積算を行う理由である。

実際の道路管理の現場では、交通量の大きい道路で、危機管理の能力が日常的に高められている。また、災害が発生した場合も、交通量の大きくなる時間帯を意識した復旧作業が行われているのが一般的である。このような行政サービスの正当性は、交通量の大きさに対して、大きな迂回損失 D_3 が見込まれることで説明可能である。

しかし、こうした危機管理能力の準備にも費用が発生する。リスク評価手法を用いた場合には、こうした費用のもたらす復旧日数低減効果を金額化して評価することで、この費用が正当な投資であるか判定することが可能である。

3－4　迂回損失 D_3

3－4－1　基本的な考え方

迂回損失 D_3 は、斜面災害で路線区間が通行止めになることにより発生する道路利用者の迂回費用を算定する。

【解説】

迂回損失 D_3 とは、道路利用者に発生する社会的損失であり、平常時と災害時における一般化費用の差を、車種別に合計した金額に復旧日数（通行止め日数）を乗じて求める。

3－4－2　算定手順

迂回損失 D_3 は、以下の手順で算定することができる。
(1) 復旧日数（通行止め日数）の推定
(2) 迂回路の選定
(3) 車種別の平常時、ならびに災害時の一般化費用の算定。
(4) １日あたりの迂回損失と営業損失の算定

【解説】

迂回損失(D_3) は、車種ごとに算出した１日あたりの迂回損失額(D_3')の全車種の合計額（１日あたりの迂回損失額）と、復旧日数：T［日］との積として、**式-3.13** により算定するものとした。

$$D_3\,[円\cdot台] = T \times \sum_{車種} D_3' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 式\text{-}3.13$$

T：3-4-4 で求められる復旧日数［日］、D_3'：車種ごとの１日あたりの迂回損失額

$$D_3' = [車種別交通量] \times ([災害時の一般化費用] - [平常時の一般化費用])$$

一般化費用とは、車種ごとに求められる車両１台あたりの移動コストであり、多くの場合、災害時には、迂回することによる増加が見込まれる。

迂回路の選定にあたっては、走行車輌を始終点ごとに配分して、それぞれの迂回路を想定することが望ましい。これは、始終点ごとに迂回経路が異なることが想定されるためで、一般に、移動の始終点が交通遮断地点に近接するほど、迂回損失が大きい。道路利用者の移動に関して始終点のデータがない場合の迂回路の選定は、**＜参考-3.8＞**を参照されたい。

迂回路を有料道路に想定した場合には、通行料金を一般化費用に加算することを基本とするが、このとき、移動時間短縮効果が原因で、迂回損失が負値を取る場合がある。このような場合、通行料金を嫌う道路利用者が、迂回損失を負値とする選択肢が存在する状況でも、あえて一般化費用の高い一般道路の迂回路を選定することが確認されている。

本マニュアルでは、迂回路として迂回損失が負値を取る有料道路がある場合には、迂回損失＝0［円］と扱うことを基本的措置とした。**＜参考-3.9＞**には、移動の起終点が等しい交通量が迂回措置をとる場合に、有料道路と一般道路の交通量配分を実施した事例を紹介したうえで、この考え方について解説を加えた。

３－４－３　迂回路の選定

迂回路としては、基本的に対象区間と同程度の規格以上の道路を選定する必要がある。

【解説】

迂回路は、基本的に対象区間と同程度の規格以上の道路を選定する必要がある。

この理由は、交通量に対して対応可能な規格を有している必要があることと、迂回路として利用可能な信頼性を有している必要があるためである。

例えば、事前通行規制の規制基準雨量の場合、一定の地域では、高規格道路≫一般国道指定区間≫一般国道指定区間外≫地方道の順に、規制基準雨量が小さくなることが多いが、これは、対象区間と同程度の規格以上の道路でなければ、事前通行規制時に通行不能であることを示している。

多くの場合、交通量もこの順に大きく、対象区間と同程度の規格を持たない道路を迂回路として選定した場合、交通の円滑は得られないおそれがある。

実際の災害では、対象区間と同程度の規格を持たない道路を迂回路としている場合も多く、公共施設の用地など道路以外の施設を迂回路とした事例も見られる。ただし、有効な迂回路が無く、このような想定を行う場合、交通集中による渋滞･混雑を考慮して、迂回経路の移動時間を設定することが望ましい。

一方で、事前通行規制区間の検討において、検討対象区間の迂回路として、事前通行規制区間を選定する妥当性は、対象区間と迂回路の降雨量のデータを整理することで検討可能である。双方で同時に規制基準雨量に達することが多い場合には、このような事前通行規制区間を迂回路として選定するのは妥当ではない。

したがって、事前通行規制による迂回路の選定は、災害による迂回路と異なる検討手順で行うことが望ましい。以下の検討方法は、難易度の順に整理したものであるが、迂回経路が大きなルート変更になる場合などは、必要に応じて、これらの検討方法を選定し対応することが可能である。

(1) 迂回路として使用可能な事前通行規制区間を選定する

迂回路として使用可能な事前通行規制区間を選定して、それ以外の事前通行規制区間は迂回路として想定しない方法がある。選定根拠を明確にしたい場合には、規制基準雨量の大小、降雨量の記録などにより、同時に規制基準雨量になるかを検討する必要がある。

(2) 事前通行規制区間の使用可能な確率を設定する

事前通行規制区間が、迂回路として使用可能な確率を設定する方法である。選定根拠を明確にしたい場合には、規制基準雨量の大小、降雨量の記録などにより、同時に規制基準雨量になる確率を検討する必要がある。

検討対象区間の規制基準雨量を検討する場合には、同時に規制基準雨量になる確率を、検討対象区間の降雨量に対する関数として求めることが可能であり、この方法については**＜参考-3.8＞**に、検討方法を紹介するので参照されたい。

実際の迂回路は、始終点（OD ペア）の相違のため、すべての車両の迂回経路が一定ではない場合が多い。そのため、本来なら OD ペアごとに車両の迂回損失を求めることが望ましいが、この作業は、データが得られない場合もあり容易ではない。

そのため、使用できる道路規格を限定したネットワークで、通常時の全利用者の OD が、災害発生区間の両端点の外側にあり、災害発生区間の両端点の外側では、移動経路を変えないという仮定で、迂回路を設定することを基本的な考え方とする。

３－４－４　必要なデータ

迂回損失 D_3 を求めるには、以下のデータが必要である。
(1) 復旧日数：T [日] を求めるためのデータ
・想定される復旧工事の日数
(2) 車種別の１日あたり一般化費用を求めるためのデータ
・平日・休日交通量 [台／日]（平日は車種別）
・旅行速度 [km／h]
・拠点間の移動距離 [km]
・時間価値原単位 [円／台・分]（乗用車類は平日・休日別）
・走行経費原単位 [円／台・km]

【解説】

１日あたりの道路交通遮断による損失は、交通量・ネットワーク・迂回路の有無などを考慮した道路の重要性の指標と考えることが可能で、以下のような道路で大きい。

・交通量が大きい道路
・迂回路の移動コストが現道の移動コストより大きい道路

迂回道路が全くない場合も同様で、このような道路を扱う場合には、道路交通遮断による損失は、経済的損失のほとんどを占めるようになる。

交通量調査結果としては、道路交通センサスが一般的であるが、このほかにも、移動時間を直接求めることができる道路時刻表など、便利な刊行物が知られている。

以下に記載した出典は参考のためであり、データの出典は特に限定しない。

◆「道路交通センサス」に記載されているもの
・平日・休日交通量 [台／日]（平日は車種別）
・混雑時旅行速度 [km／h]
・拠点間の移動距離 [km]（道路時刻表、道路地図などでもよい）
◆「道路投資の評価に関する指針」に記載されているもの
・時間価値原単位 [円／台・分]（乗用車類は平日・休日別）
・走行経費原単位 [円／第・km]

３－４－５　復旧日数の推定

復旧日数 T [日] は、道路を閉塞する障害の除去と道路の受けた被害の修復を行い、道路を供用するまでの日数と考えることが可能であり、推定する必要がある。

土砂災害の場合、到達土量を、想定した１日あたりの土砂搬出土量で除算して算定することができる。

【解説】

土砂災害の復旧日数を求める場合には、到達土量を復旧土量とみなすことができる。

復旧日数は、災害に備えた作業基地(出張所)・建設機械・人員・残土仮置き場などの準備により低減することを考慮することが可能であり、土砂の処分方法・運搬経路などの復旧工事の内容を想定した場合、３－３ の復旧費用を想定復旧工事の積算により求めた場合には、この復旧日数を用いることが望ましい。

３－４－６　　道路交通の一般化費用の算定

道路交通の一般化費用 C [円／台] は、平常時と災害時について、車種ごとに 式-3.14 によって求める。

C [円／台] = ＜所要時間 [分]＞× α ＋ ＜移動距離 [km]＞× β ・・・・・・式-3.14

α ：交通の時間価値原単位 [円／台･分]　　β ：交通の走行費用原単位 [円／台･km]

【解説】

交通の一般化費用は、車種ごとに、平常時：C_0 [円／台]・災害時 C_1 [円／台] の２種類に分けて求める必要がある。

一般化費用算出に用いる原単位は、時間価値原単位：α [円／台･分] と、走行経費原単位：β [円／台･km] の２種類である。本来、平日交通量と休日交通量は、時間価値原単位の算出に無関係であるが、休日と平日の時間価値原単位が乗用車で異なるため、時間価値原単位の平均値を求めるために、平日交通量と休日交通量を用いている。

一般化費用：C [円／台] = ＜所要時間＞ × α ＋ ＜移動距離＞ × β ・・・・・・・・式-3.3

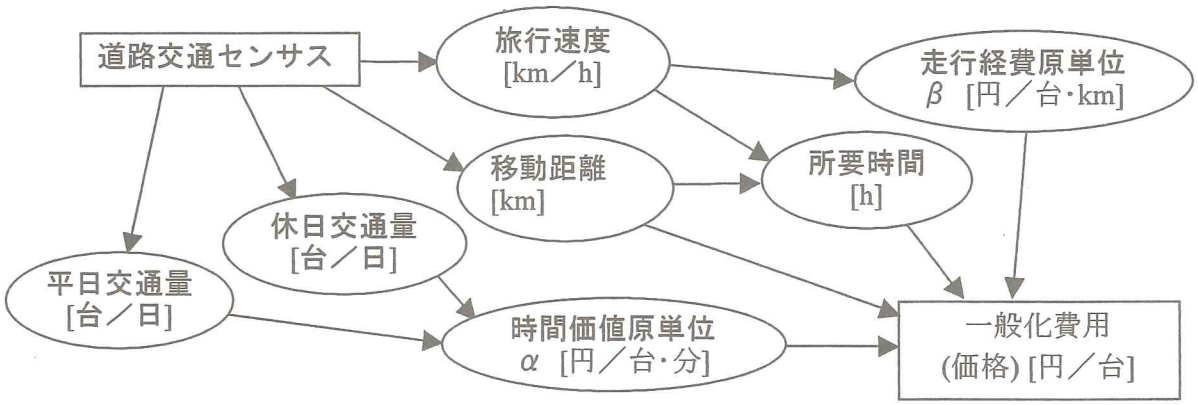


図-3.5　一般化費用（１台あたりの移動コスト）の算出手順(例)

一般化費用の算定に用いるデータは、「道路交通センサス」と「道路投資の評価に関する指針（案）」（道路投資の評価に関する指針検討委員会：平成 11 年、第２版）に記載された原単位を用いてよい。

「道路交通センサス」と「道路投資の評価に関する指針（案）」では、用いている車種区分が異なるため、ここでは、これらの資料を用いる場合には、表-3.6 の車種区分に従って対応させることができることとした。

表-3.6 車種区分の対応

	道路投資の評価に関する指針	道路交通センサスによる交通量
乗用車類	乗用車	軽乗用車
		乗用車
	バス	バス
貨物車類	小型貨物車	軽貨物車
		小型貨物車
		貨客車
	普通貨物車	普通貨物車
		特殊車輌

どちらも、平日・休日別に扱っている。

(1) **交通の時間価値原単位：** α [円／台･分]

時間価値原単位は、乗用車類の場合には、平日・休日の値を区分して求める。大型車の場合には、平日・休日の区分はない。（**表-3.7**）

これは、乗用車類の場合には、休日に時間価値割り増しが見込めること、平均乗車人数が平日で 1.44 [人／台]、休日で 2.01 [人／台] と増えることが原因である。

詳しいことは、「道路投資の評価に関する指針（案）」（道路投資の評価に関する指針検討委員会）に記載があるので参照されたい。

表-3.7 時間価値原単位

車種分類		α [円／台･分] 平日	α [円／台･分] 休日
	乗用車	56	84
	バス	496	744
乗用車類		67	101
小型貨物車		90	90
貨物自動車		101	101

「道路投資の評価に関する指針」より（平成 11 年価格）

この結果、乗用車類の場合、平日・休日別に時間原単位が求められるが、リスク算定に用いる時間原単位は、**式-3.15** によって求められる平日・休日の平均値を用いることができる。これは、災害の発生と、曜日とは相関がないと想定されるためで、式中の 122 は 年間休日日数であり、243 は 年間平日日数である。数値は、「道路投資に関する指針(案)」に準じた。

$$\alpha(\text{乗用車}) = \frac{122\times[\text{休日交通量}]\times 84 + 243\times[\text{平日交通量}]\times 56}{122\times[\text{休日交通量}] + 243\times[\text{平日交通量}]} \quad [\text{円／台･分}] \cdots \text{式-3.15}$$

(2) **交通の走行費用原単位：** β [円／台･km]

走行費用原単位：β [円／台･km] は、車種・道路種別ごとに、走行速度に対する原単位が設定されている。走行速度は、道路交通センサスの混雑時平均旅行速度を対応させてもよいと考えた。（ **表-3.8** ）

車種は、時間原単位と同様に区分されていて、乗用車類２種、貨物車類２種に分かれている。これらは、**表-3.6** により道路交通センサスに対応させてよいこととした。

道路種別は、一般道路（市街地）、一般道路（平地）、一般道路（山地）、高規格・地域高規格道路の４種類に分かれている。

表-3.8 走行経費原単位：β [円／台･km]

一般道路（市街地）						一般道路（平地）					
速度	乗用車類		小型貨物	普通貨物		速度	乗用車類		小型貨物	普通貨物	
Km/h	乗用車	バス				km/h	乗用車	バス			
10	27	81	28	42	55	10	19	56	20	27	38
20	20	71	21	35	43	20	14	49	15	22	30
30	17	67	18	32	39	30	12	46	13	21	27
40	16	66	18	31	38	40	11	45	12	20	26
50	16	66	18	32	38	50	11	44	12	20	26
60	17	66	18	33	39	60	11	45	12	21	26
一般道路（山地）						高規格・地域高規格道路					
速度	乗用車類		小型貨物	普通貨物		速度	乗用車類		小型貨物	普通貨物	
km/h	乗用車	バス				km/h	乗用車	バス			
10	18	52	18	25	35	30	8	30	8	12	18
20	13	45	14	20	28	40	7	29	8	12	17
30	11	43	12	19	25	50	7	29	8	12	16
40	10	41	11	18	24	60	7	28	7	12	16
50	10	41	11	19	24	70	7	29	8	12	17
60	10	41	11	19	24	80	7	30	8	13	18
						90	8	31	9	14	19

「道路投資の評価に関する指針」より（平成 11 年価格）

３－４－７　　迂回損失 D_3

車種ごとの１日あたりの迂回損失額（D_3'）は、**式-3.16** で、一般化費用の等しい車種ごとに算定することができる。これを、すべての車種について合計し復旧日数を乗じれば、迂回損失（D_3）を求めることができる。

$$D_3' = Q_0 \times (C_1 - C_0)\ [円／日] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{式-3.16}$$

Q_0　：平常時の交通量 [台／日]（道路交通センサスによって求める）
C_0　：平常時の道路交通の一般化費用 [円／台]
C_1　：災害時の迂回路交通の一般化費用 [円／台]

【解説】

(1) 車種ごとの１日あたり損失の算定

迂回損失（D_3）は、災害による交通遮断により道路利用者が迂回することの社会的損失である。本マニュアルでは、短期間の交通遮断であれば交通量は減少しないと考え、平常時の交通量が迂回処置をとると考えて、**式-3.16** の計算式とした。この計算は、一般化費用が等しい車種ごとに実施する必要がある。

なお、交通遮断が長期にわたる場合には、**＜参考-3.9＞** に紹介する交通需要曲線で説明されるように、移動の一般化費用の増加による交通量の減少を考慮して迂回損失を算定することが考えられる。また、民間資本の価値の変化、物価・収入の変化が生じるほど交通遮断が長期化した場合には、**＜参考-3.10＞** の方法により、沿線事業所の営業損失を考慮することが考えられる。ただし、これらの算定には交通需要曲線を作成する必要があり、本マニュアルでは、＜参考＞の記述にとどめた。

有効な迂回路がない場合、**＜参考-3.11＞** の算定方法により求めた待機損失を迂回損失と考えることができる。待機損失は、小規模の災害・事前通行規制などの場合で、交通遮断の回復までの待機時間が、想定される迂回時間を下回る場合にも算定に用いてよい。

事前通行規制の交通遮断の場合には、交通量の減少が明確に認められる。この場合、道路利用者が移動を取り止める原因は、通行規制による一般化費用の増加とは無関係で、豪雨によりレジャー･観光などを主体に移動の便益が減少するためと考えられる。そのため、交通需要曲線で説明することは困難であり、**＜参考-3.12＞** に紹介する算定手法を用いることが考えられる。

(2) 平常時の交通量：Q_0 の算定

車種ごとの平常時の交通量：Q_0 は、道路交通センサスに記載されている交通量（平日・休日）を用いて算定することができる。

ここで、リスク算定に用いる交通量は、**式-3.17** によって求められる平日・休日の平均交通量を用いてよい。これは、災害の発生と、曜日とは相関がないと想定されるためである。

$$[\text{平均交通量}] = \frac{122 \times [\text{休日交通量}] + 243 \times [\text{平日交通量}]}{365}\ [台／日] \cdots \text{式-3.17}$$

式中の 122 は 年間休日日数であり、243 は 年間平日日数である。数値は、「道路投資に関する指針(案)」に準じた。

＜参考-3.8＞事前通行規制の迂回路が事前通行規制区間の場合

事前通行規制が行われるような豪雨の場合、周辺の道路も事前通行規制がかかる場合が多く、迂回路として使用可能な経路は限定されると考えてよい。

そのため、事前通行規制の規制基準雨量を検討する場合には、検討対象区間の降雨量：R [mm] に対する関数として、周辺の事前通行規制区間の通行可能である確率：q(R) を算定し、複数の経路に交通量配分して迂回損失を算定することが望ましい。

(1) 事前通行規制に無関係な経路の選定

事前通行規制の場合には、移動の達成のために、以下の方法で発生する損失を受け入れる選択肢が存在する。

a)事前通行規制の開放まで待機した場合の通常経路での移動

また、以下のいずれかの条件を満足する経路での移動は、検討対象区間が事前通行規制の場合にも確実に移動が可能と考える。

b)事前通行規制区間を含まない経路での移動

c)検討対象区間と同時に事前通行規制されていない経路での移動

そのため、これらの移動手段のうち、最短時間で移動可能な経路を「確実移動経路」として選定し、「確実移動経路」以上の迂回損失は道路利用者に発生しないと考える。

(2) 交通量配分の対象となる経路の抽出

交通量配分の対象とする迂回経路は、前項の「確実移動経路」より移動時間の短い経路を対象とする。これらの経路は、「確実移動経路」でないことから、検討対象区間の降雨量に対して通行可能である確率：q(R) を、算定可能である。

(3) 通行可能である確率：q(R)

事前通行規制区間の迂回路が通行可能な確率：q(R) は、検討対象区間の降雨量：R [mm] の超過時間(降雨量：R [mm] を越えている時間)により、この超過時間のうち迂回路が通行可能な時間（迂回路の規制基準雨量を超えてない時間）を除算して求める。

確率：q(R) は、降雨量の変化に対して円滑な数値が求められない場合、回帰計算を行うことが望ましい。

$$\text{迂回路が通行可能な確率：} q(R) = \frac{\text{分母のうち迂回路が通行可能な時間 [hr]}}{\text{検討対象区間の降雨量 R [mm] の超過時間 [hr]}}$$

(4) 迂回経路の交通量配分

表-A. のように、迂回路の移動時間が短い順番に、検討対象区間の交通量：Q_I [台] を迂回路に配分する。この作業は、検討対象区間における規制基準雨量の全ての検討対象雨量に対して行う必要がある。

表-A. 迂回路の交通量配分

経路 (移動時間順)	使用可能率 q [%]	配分する交通量 [台]
経路 A	$q_A(R)$	$Q_A = q_A(R) \cdot Q_I$
経路 B	$q_B(R)$	$Q_B = q_B(R) \cdot (Q_I - Q_A)$
経路 C	$q_C(R)$	$Q_C = q_C(R) \cdot (Q_I - Q_A - Q_B)$
……	……	……
確実移動経路	1.0	$Q_W = Q_I - Q_A - Q_B - \cdots$

なお、＜参考-3.12＞ に示す「事前通行規制時の移動の取り止め率」を考慮する場合には、$Q_I = (1.0 - \lambda) \times Q_0$ （ Q_0：通常時の交通量 [台]）としてから、交通量配分を行うことができる。

＜参考-3.9＞交通需要曲線による長期の交通遮断の迂回損失

特定の区間で、任意の車種１台ごとの移動に対する付加価値を、図-A のように大きい方から並べて書くことで交通需要曲線が得られる。この付加価値は移動によって授かる満足感を含めた「効用」を金銭化した道路利用者の移動に対する支払意志額である。

ここで、この車種の移動費用を一般化費用：C_0 [円／台] として一定と考えた場合、支払意志額から一般化費用を差し引いた金額は、消費者余剰と呼ばれ、移動の**「便益－費用」**と考えられる。消費者余剰が負値の場合、移動しないと割り切って考えた場合には、交通量は $Q_0 = 50$ [台] と考えられる。

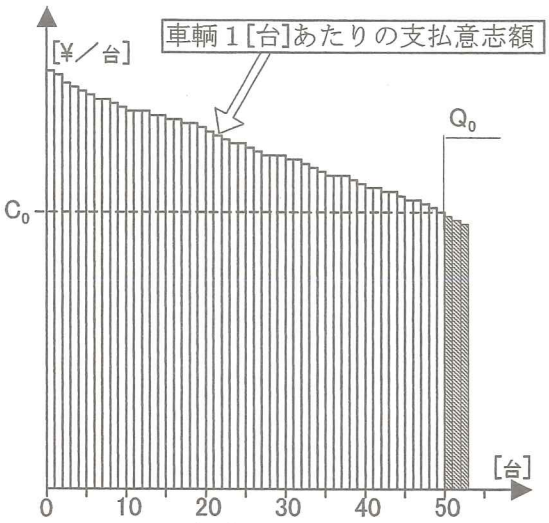


図-A 通常時の交通需要曲線

災害が原因で、最短経路が交通遮断したと仮定し、迂回によりこの起終点の一般化費用が C_1 [円／台] になったと仮定する。この結果、通常時の交通量：$Q_0 = 50$ [台] のうち 15 [台] は消費者余剰が負値となる。

本マニュアルでは、我が国の道路利用者の意志選択を想定し、こうした状況が、短期間であれば移動を取り止めるとは考え難いが、長期間継続すれば移動を取り止めるという想定をもとに算定方法を設定した。

長期間の迂回損失の場合、迂回しても消費者余剰が正値の交通量：$Q_1 = 35$ [台] は、$C_1 - C_0$ [円／台] の損失を被りながらも移動を継続すると想定し、迂回損失合計の大きさは 図-B の斜線部分にあたる。

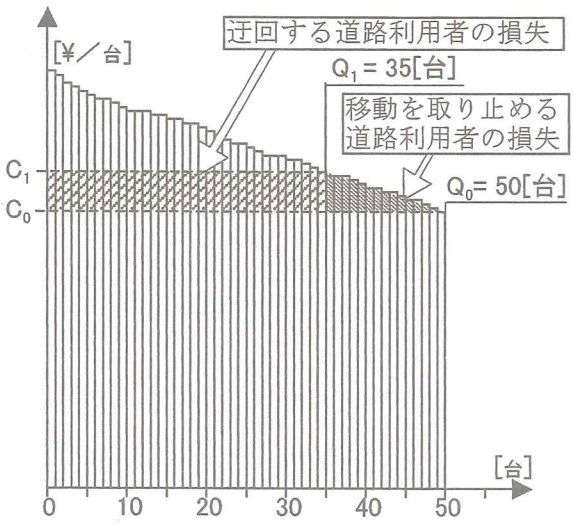


図-B 迂回を伴う交通需要曲線

移動を取り止める交通量：$Q = 15$ [台] は、通常時に授かる消費者余剰を失うと考えることが可能で、迂回損失合計の大きさは 図-B の着色部分と考えることができる。これらの道路利用者は、それまで移動していた時間を別の経済活動に移行する可能性が高いが、本マニュアルでは、純粋にこの大きさだけを損失として評価する方針とした。

交通需要曲線の作成は、かなり面倒な作業である。そのため、本マニュアルでは暫定的に「計算することが望ましい。」という記述にとどめ、＜参考＞にとどめている。そのうえで、長期にわたる迂回損失の算定式として、図-B の着色部分を三角形と考えることにより、以下を示すものである。

長期にわたる交通遮断の１日あたり迂回損失（車種別）：

$$D_3' = \frac{Q_0 + Q_1}{2} \times (C_1 - C_0)$$

Q_0 ：通常時の交通量
Q_1 ：長期化した交通遮断による取り止めを考慮した交通量
C_0 ：通常時の一般化費用
C_1 ：迂回時の一般化費用

＜参考-3.10 交通遮断の長期化がもたらす営業損失

交通遮断が長期にわたる場合は、民間資本の価値の変化、物価・収入の変化が発生する。交通遮断の影響が、これまで大きくなると、交通需要曲線に変化が現れる。

この変化は、交通需要の減少により交通量が減少することがほとんどで、迂回損失額は減額される。この場合、新たに、営業損失を考慮することが望ましい。

この損失額は、付図の三角形 ABC の面積として捉えれば、過大評価にならずに算定可能であり、沿線事業者が被る営業損失を考慮に入れた損失額も、＜参考-3.9＞同様の算定式を用いることが可能である。

これは、経済行為の計測が、消費側と収益側で等しいことを利用した算定方法である。

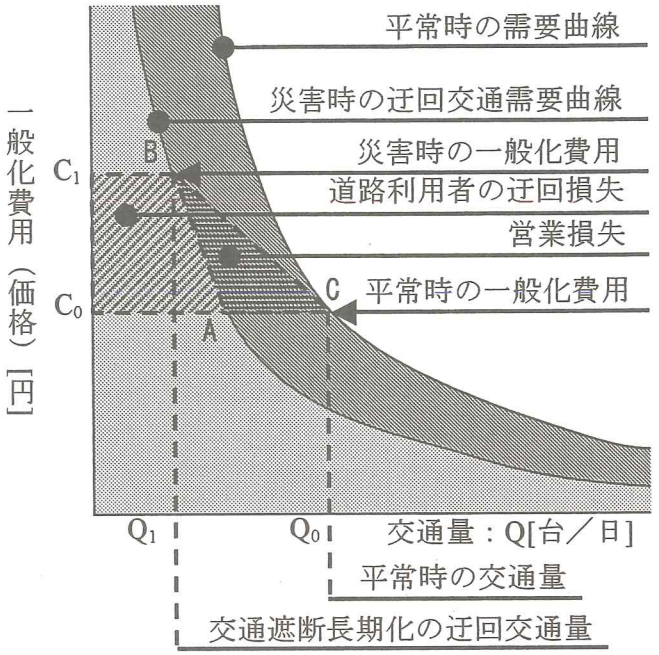


図-3.5. 交通遮断が長期化した場合の交通需要曲線

交通遮断が長期化していない場合にも、沿線事業者の売り上げは減少することが推定可能であるが、これは、迂回路の事業者の売り上げ増に転換していると考えられるため、営業損失として取り上げてはならない。

なお、この考え方を＜参考＞にとどめたのは、＜参考-3.9＞同様に、現在の交通需要曲線を作成する必要があることと、民間資本の価値の変化、物価・収入の変化が発生した場合の交通需要曲線を作成するのは、それ以上に煩雑なためである。

＜参考-3.11＞待機損失

以下の状況では、迂回による一般化費用の増分で迂回損失を説明するには無理がある。

a) 迂回路が全くない場合、いわゆる「孤立」
b) 交通遮断回復まで待機する方が、迂回処置より損失が少ない場合

b) の状況は、小規模の災害・事前通行規制の場合を主体に、実際に道路利用者が待機することが知られていて、これらの状況に共通しているのは有効な迂回路がないことである。このような場合の迂回損失は、以下の待機損失の算定方法が説明しやすい。

$$[\text{待機損失}] = \frac{[\text{日交通量}] \times [\text{交通遮断時間}]}{24} \times \frac{[\text{交通遮断時間}]}{2} \times [\text{時間価値原単位}] \times 60$$

ここで、第１項は 影響台数、第２項は「規制直後から待機する車輌～開放直前に待機を開始した車輌」の待機時間の平均値を説明したものである。待機の場合には、純粋な移動の一般化費用の増加はないと考えることが可能で、時間価値原単位の等しい車種ごとに、式-3.5 のかわりに、この算式を用いる。

この考え方でも、「孤立」の損失を充分に評価するとは考えがたいが、「孤立」の損失は、後述する救急医療損失でも評価できるため、暫定的な最善策として、この算定評価を採用したものである。

＜参考-3.12＞事前通行規制時の移動の取り止め率

事前通行規制が行われるような状況では、実際に交通量の減少が認められる。

一方で、こうした損失を、事前通行規制の損失と考えるのは妥当ではないことから、移動の取り止め率：λ（ 0 ≦λ≦ 1 ）を用いて、以下の計算式で迂回損失を求めることが望ましい。

事前通行規制時の迂回交通量　：Q_1　　＝（ 1.0 － λ ）× Q_0

事前通行規制の迂回損失　　：D_3'　　＝Q_1 ×（C_1 － C_0）[円･台／日]

転換率：λ（ 0 ≦λ≦ 1 ）は、以下のような性格を示すと推定された。

a) **迂回時の通行時間**　：迂回路の通行時間が平常時の通行時間と変わらない場合、取りやめはほとんど起こらない。
b) **交通の目的別分布**：観光道路では取りやめが大きく、産業道路では小さい。
c) **代替目的地の有無**：買い物などの移動は、代替目的地に遷移することがある。

このような転換率の性格の分析は、多くの事例を集めることで可能と考えられたが、a）については、有効な迂回路があることで１台あたりの迂回損失が減少することで評価されるため、分析の必要性は低いと考えた。

一方、b），c）に関する移動の取りやめは、乗用車類では大きく貨物車類では小さいと推定可能であり、車種別に推定することで転換率の性格の分析に意義が感じられた。そのため、本マニュアルに紹介する目的で、２箇所の事前通行規制区間で通行規制時の交通量の変化により、事前通行規制時の移動の転換率：λ（ 0 ≦λ≦ 1 ）の計測を試みた。

この試みでは、道路の性格と転換率に何らかの関係があると考えて、**大型車混入率**：K_L 、**休平日比**：K_H 、**昼夜率**：K_N と転換率の相関を分析した。参考までに、結果を紹介する。

- 休日の大型車の取り止め率 [%] ：$\lambda_{SHL} = \mu + 0.409 \cdot H_D - 7.923$
  区間定数：$\mu = -0.063 \cdot K_L + 6.666 \cdot K_H + 0.500 \cdot K_N$　　H_D ：**１日の規制時間** [hr]
- 休日の普通車の取り止め率 [%] ：$\lambda_{SHM} = \lambda_{SHL} + 10.513$
- 平日の大型車の取り止め率 [%] ：$\lambda_{SWL} = \lambda_{SHL} - 5.142$
- 平日の普通車の取り止め率 [%] ：$\lambda_{SWM} = \lambda_{SHL} - 5.142 + 10.513$

このように、転換率：λ は、**大型車混入率**：K_L の小さい道路、**休平日比**：K_H の大きい道路、**昼夜率**：K_N の大きい道路で大きいことも確認された。

計測箇所が少なく、大型車･普通車の差、平休日の差を関数化できずに、定数で示したが、転換率推定の参考になれば幸いである。

また、近傍の事前通行規制区間と無関係な路線の交通量の減少も同程度であったことから、この取り止めのほとんどは、事前通行規制の交通遮断がもたらしたものではなく、豪雨によるものと考えられる。

3－5　救急医療損失 D_4

3－5－1　基本的な考え方

救急医療損失：D_4 は、斜面災害で路線区間が通行止めになることにより救急医療の享受の機会を失って生じる死亡者が発生するという住民の被る被害を算定する。

【解説】

救急医療損失：D_4 は、「孤立」の場合を含めて、地域住民の行政サービスを享受する公平性を正確に評価する目的で算出する必要があると考えたものである。

本来は、救急医療だけでなく、消防・警察・通勤・通学といった場合にも、地域住民の被る損失は存在する。しかし、通勤・通学の場合には、迂回することにより目的が達成できることから、迂回損失：D_3 と重複して計上されることとなる。

このため、災害により医療を享受するまでの時間がかかることで発生する間接的な損失に限り、迂回損失：D_3 では評価できない損失として計上することとした。

この考えで損失額を算出した場合、大部分を「迂回することによって死亡する」損失額が占めると考えられ、迂回によって生じる傷害の症状が悪化した程度の損失額増分、警察・消防に関わる損失額は無視できる範囲にあると想定される。

そのため、救急医療損失：D_4 は、通行止めの影響で救急医療の享受の機会を失い死亡した場合の人身損失によって、近似してもよいこととした。

救急医療を必要とする症状には、救急医療を受ければ 100 % 助かる時間の目安と、救急医療を受けられなければ生存が絶望的な時間の目安がある。これを以下に定義する。

- 100 % 救護境界時間　：救急医療を受ければ 100 % 助かる時間の目安
- 100 % 死亡境界時間　：救急医療を受けられなければ生存が絶望的な時間の目安

これらの時間には、それぞれ地域的な広がりがある。これを以下に定義する。

- 安全搬送範囲　：100 % 救護境界時間内に救急医療を受けられる地域
- 限界搬送範囲　：100 % 死亡境界時間内に救急医療を受けられる地域

図-3.6 は、影響人口の模式図であるが、限界搬送範囲内の災害に伴って搬送ルートが変化する人口：N' は、災害に伴う迂回によって救急医療を享受するまでの時間が変化し、生存率が変化する。そのほかの人口は生存率の変化がないため、この人口が影響人口となる。

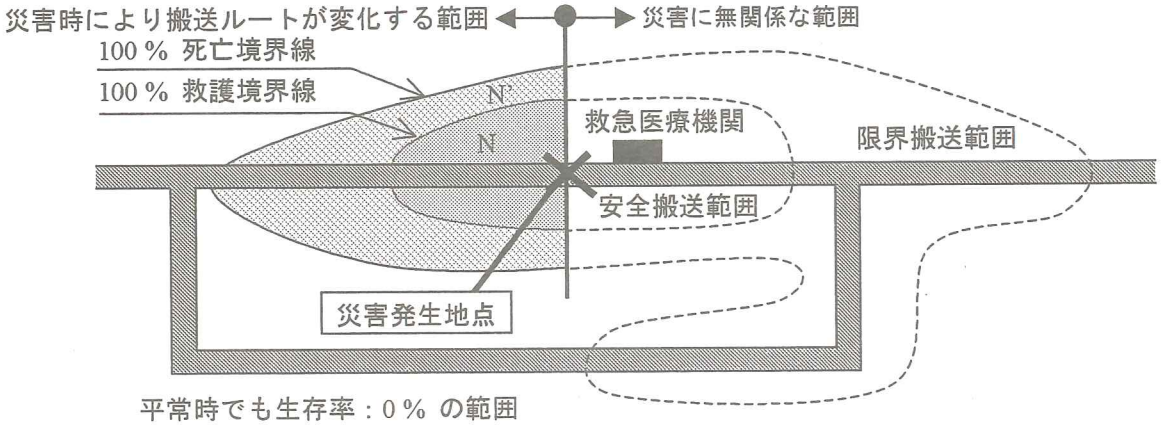


図-3.6 影響人口の模式図

3－5－2　算定手順

救急医療損失：D_4 は、心臓停止・呼吸停止・多量出血の３つの症状ごとに、以下の手順で算定することができる。

① 平常時安全搬送範囲内の迂回による影響人口の算出
② 平常時限界搬送範囲内の迂回による影響人口の算出
③ 平常時限界搬送範囲内の迂回による影響人口の迂回時の生存率

【解説】

算定は、以下の算定手法で実施し、心臓停止・呼吸停止・多量出血の３症状を扱う。

① 常時に安全搬送範囲外で限界搬送範囲内の影響人口の計算

$$\frac{T}{365} \times (N'_1 - N_1) \times P_{E1} \times (0.5 - P_{D1}) \times I$$

$\frac{T}{365}$	$(N'_1 - N_1)$	P_{E1}	$(0.5 - P_{D1})$	I
交通遮断の年間確率	安全搬送範囲外で限界搬送範囲内の影響人口	心臓停止の１年間の発生確率		
交通遮断の日には	安全搬送範囲外で限界搬送範囲内における年間の心臓停止件数	は	生存率が $0.5 \rightarrow P_{D1}$ に変化する	生命の価値

② 常時に安全搬送範囲内の影響人口の計算

$$\frac{T}{365} \times N_1 \times P_{E1} \times (1 - P_{D1}) \times I$$

$\frac{T}{365}$	N_1	P_{E1}	$(1 - P_{D1})$	I
交通遮断の年間確率	安全搬送範囲内の影響人口	心臓停止の１年間の発生確率		
交通遮断の日には	安全搬送範囲内における年間の心臓停止件数	は	生存率が $1 \rightarrow P_{D1}$ に変化する	生命の価値

3－5－3　必要なデータ

救急医療損失：D_4 の算定では、以下のデータを収集する必要がある。

・救急医療施設の位置
・対象路線区間（斜面）周辺の人口の分布
・対象路線区間の交通網

【解説】

救急医療に対して、症状ごとにそれぞれ異なる影響人口を算出する必要があるが、もとのデータとしては、救急医療施設周辺の人口の分布と交通網が判明していればよい。

３－５－４　迂回による影響人口の算定

心臓停止、呼吸停止、多量出血の３つの症状ごとに、斜面災害で路線区間が通行止めになることにより救急医療施設への収容時間が変化し、生存率に変化がある人口を算定する。

・平常時には安全搬送範囲内の迂回による影響人口
・平常時には限界搬送範囲内の迂回による影響人口

【解説】

救急医療損失：D_4 の算定に用いる症状は、**表-3.9** の３種類とし、それぞれ、表中の発生確率と影響人口の算出に用いる境界時間を用いることができる。

表-3.9 算定に用いる症状と算定諸元

算定に用いる症状	１人あたりの発生確率 P_E [件／年・人]	影響人口の算出に用いる境界時間 [分]	
		100％ 救護境界	100％ 死亡境界
心臓停止	P_{E1} : 0.00064	t_{L1} : 1 分	t_{D1} : 7 分
呼吸停止	P_{E2} : 0.00145	t_{L2} : 3 分	t_{D2} : 20 分
多量出血	P_{E3} : 0.00116	t_{L3} : 10 分	t_{D3} : 60 分

表-3.9 は、**表-3.10** に示す救急医療の実態から算定根拠を作成した。

表-3.10 人命に関わる症状の算定根拠：出典 消防白書（平成 12 年）

平成 10 年実績	応急処置を受けた人数 [人／年]					
	合計	止血	気道確保	人工呼吸	心肺蘇生	心臓蘇生
急病	1,693,188	9,074	120,056	6,398	55,660	1,084
交通事故	511,112	60,860	10,798	849	4,999	161
一般負傷	351,709	48,024	10,961	676	5,703	120
その他	389,239	21,655	21,942	2,101	8,852	219
合計	2,945,248	139,613	163,757	10,024	75,214	1,584

救急医療の現場で、応急処置を受けた人を人命に関わる状態であったと考えると、応急処置の種類ごとに応急処置を受けた人数が、表-3.10 から読みとれる。

表-3.11 は、心臓停止・呼吸停止・多量出血の各症状と 表-3.10 に示された応急処置を対応させて、症状ごとの応急処置の年間総件数を、救急医療の対象である日本の総人口に対して求めてみたものである。数値：P_E は、各症状の１人あたり年間発生確率 [件／年・人] とみなすことができる。

表-3.11 対象とする症状の発生確率と生死境界時間

対象とする症状	心臓停止	呼吸停止	多量出血
発生件数の推定根拠として対応させた応急処置の内容	心肺蘇生 心臓蘇生	気道確保 人工呼吸	止血
応急処置の享受人数 [人／年]	76,798	173,781	139,613
全人口に対する件数：P_E	0.064 ％	0.145 ％	0.116 ％

（注）　日本の総人口を１億２千万人とした。

図-3.7 は、「西ドイツ 死者半減」カラー博士（フランス）に示された症状別死亡率の経時変化グラフである。表-3.12 に記された 100％ 救護境界時間と 100％ 死亡境界時間はこのグラフから読みとった。

ここで、医者の常駐している２次医療機関か３次医療機関を対象に、医療施設への搬送時間が人命を左右するものとして考える。

平常時に限界搬送範囲外の人口は、災害のない場合でも、100％ 死亡境界時間内に救急医療機関に搬送できないため、症状発症時の死亡率の変化がないため影響人口と考えない。また、安全搬送範囲の内側の人口は、100％ 発症しても生存可能である。

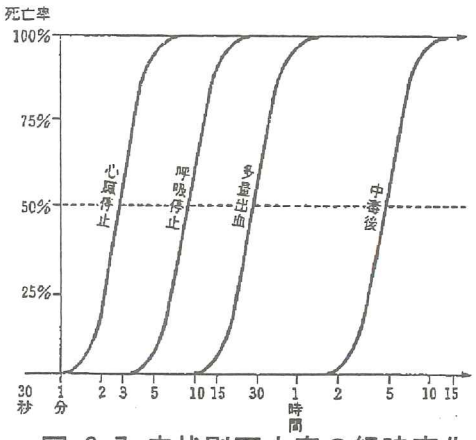


図-3.7 症状別死亡率の経時変化

ここで、限界搬送範囲の内側で安全搬送範囲の外側の人口に関しては、平常時の傷病者生存率は、0～100％ の平均値をとって 50％ と考えてよいこととした。

これらの、限界搬送範囲内の人口は、斜面災害により医療機関に搬送される時間が変化する場合がある。これらを影響人口として、表-3.12 の記号で区分する。

表-3.12 影響人口の区分

平常時の収容所用時間	範囲の名称	影響人口 [人]		
		心臓停止	呼吸停止	多量出血
100％ 救護境界時間：t_L 以内	安全搬送範囲	N_1	N_2	N_3
100％ 死亡境界時間：t_D 以内	限界搬送範囲	N'_1	N'_2	N'_3

３－５－５ 迂回時の生存率の算定

影響人口は、災害時の迂回を伴う救急医療施設への収容所要時間を求め、心臓停止、呼吸停止、多量出血の３つの症状ごとに、生存率を算定する。

【解説】

災害時の迂回を見込んだ収容所用時間：t_E [分]は、限界搬送範囲の地区を区分して、それぞれの影響人口と災害時の収容所用時間を求め、症状ごとに全限界搬送範囲人口の収容所要時間の平均値を算出する。災害時の迂回を見込んだ収容所用時間：t_E [分]に対する生存率：P_D は、症状ごとに 図-3.7 により求める必要がある。

表-3.13 平常時と災害による迂回を伴う場合の傷病者生存率の変化

		傷病者の生存率	
		平常時	迂回を伴う場合
搬送時間が災害により変化する傷病者	N：安全搬送範囲内の人口	100％	P_D
	N'：限界搬送範囲内の人口	50％	
	限界搬送範囲外の人口	0％	0％
搬送時間が災害に無関係な傷病者		変化しない	

表-3.14 影響人口の症状別記号

	心臓停止	呼吸停止	多量出血
災害時収容所用時間	t_{E1}	t_{E2}	t_{E3}
災害時傷病者生存率	P_{D1}	P_{D2}	P_{D3}

3－5－6　救急医療損失（ D_4）の算定

救急医療損失（D_4）は、心臓停止、呼吸停止、多量出血の３つの症状ごとに次式により求め、合計して算出できる。

$$d = \{(N' - N) \times (0.5 - P_D) + N \times (1 - P_D)\} \times P_E \times \frac{T}{365} \times I \quad \cdots\text{式-3.18}$$

I：死亡の人身損失額 [円]、T：復旧日数 [日]

【解説】

救急医療損失（D_4）は、式-3.19 に示すことができる。

救急医療損失：$D_4 = d_1 + d_2 + d_3$ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・式-3.19

心臓停止：$d_1 = \{(N'_1 - N_1) \times (0.5 - P_{D1}) + N_1 \times (1 - P_{D1})\} \times P_{E1} \times \frac{T}{365} \times I$

呼吸停止：$d_2 = \{(N'_2 - N_2) \times (0.5 - P_{D2}) + N_2 \times (1 - P_{D2})\} \times P_{E2} \times \frac{T}{365} \times I$

多量出血：$d_3 = \{(N'_3 - N_3) \times (0.5 - P_{D3}) + N_2 \times (1 - P_{D3})\} \times P_{E3} \times \frac{T}{365} \times I$

I：死亡の人身損失額 [円]、T：復旧日数 [日]

心臓停止を用いて説明する。算定式は以下に示す２種類の算式の合計である

- 常時に安全搬送範囲外で限界搬送範囲内の影響人口の救急医療損失

$$d_1 = (N'_1 - N_1) \times P_{E1} \times (0.5 - P_{D1}) \times \frac{T}{365} \times I$$

- 常時に安全搬送範囲内の影響人口の救急医療損失

$$d_1 = N_1 \times P_{E1} \times (1 - P_{D1}) \times \frac{T}{365} \times I$$

第１項の　$(N'_1 - N_1)$　　N_1　　はそれぞれ影響人口を示し、
第２項の　$\times P_{E1}$　　により、年間の症状の発生件数が求められる
第３項の　$(0.5 - P_{D1})$　$(1 - P_{D1})$　は災害時と常時の生存率の差であり
これらの積は、１年を通して災害時迂回をした場合の死亡者の増分を示す
これに、想定される災害時迂回日数の比率と死亡の人身損失額を乗算して、
救急医療損失が求められる。

第４章　道路斜面災害のリスク算定

４－１　道路斜面災害のリスクの定義

道路斜面災害のリスクとは、狭義には道路斜面災害の発生に伴い想定される社会的損失の年平均値（年平均損失）、広義には社会的損失の年間確率分布のことをいう。
本マニュアルでは、原則として社会的損失の年平均値をリスクと呼ぶこととする。

【解説】

リスクという言葉は、分野や対象によって、1)損失の可能性、2)損失の確率、3)損失の原因（ペリル）、4)危険な状態（ハザード）、5)損害や損失にさらされている財産・人、6)潜在的損失、7)実際の損失と予想した損失との変動といったさまざま意味で使われている。

本マニュアルでは、道路斜面災害による社会的損失をリスクとして定量化しさまざまなマネジメントに利用することを目的としている。

災害による社会的損失を定量化することは、「治水経済調査マニュアル（案）」等の各種防災事業の事業評価指針においても規定されており、これらでは災害の発生頻度と損失の大きさを掛け合わせた年平均値を指標としている。損失の年平均値（年期待値）をリスクとして評価することは、工学分野では一般的に行われている。一方、金融工学の分野では、上述の7)、すなわちリスクは結果が予測値から乖離する大きさとして定義されることが一般的である。これは、工学分野においては、現状の機能が損なわれた場合にどの程度の損失が発生するかが最大の関心であるが、金融工学の分野では金融商品の変動が予測の通りであるならば、誰にも損失は発生しないため、予測値からの乖離量がどの程度になるかが最大の関心であるといったリスクの考え方の相違によるものである。

しかし、道路等のインフラストラクチャーは、本来国民の資産（アセット）であり、これを合理的にマネジメントするためには、従来の年平均損失による評価に加え、金融工学で用いられているマネジメントの考え方を導入する必要があると考えられることから、損失の期待値（平均値）からの乖離の程度を把握することが望ましい。

このようなことから、本マニュアルではリスクを、狭義には社会的損失の年平均値、広義には社会損失の年間確率分布として定義することにするが、原則として社会的損失の年平均値をリスクと呼ぶこととする。

ただし、社会資本のマネジメントにおける社会損失の分布の活用方法には十分な合意形成がなされていないこともあり、本マニュアルでも詳細には記述できていない今後の課題である。

社会的損失の大きさは、第３章に記述したように道路への到達土量を、D_1：人身損失、D_2：道路復旧費、D_3：迂回損失、D_4：救急医療損失として貨幣価値で評価することができる。本マニュアルでは、社会的損失を貨幣価値で定量化しリスクを評価することを原則とする。ただし、このように貨幣価値換算されたリスクは、道路防災事業の経済的な便益や費用対効果を計測する上での指標である。第６章に記述するように、道路防災事業は経済的な評価のみでなく、安全性、信頼性といった観点での評価も合わせて行う必要がある。この場合、損失を無理に貨幣価値に換算する必要はなく、むしろ道路利用者にリスク情報を開示するためには、「崩壊土砂に埋没・衝突する車両台数や人数」、「年間の通行規制時間」といった指標の方が適している場合もある。従って、リスクとして表現する損失は、損失額のみでなく、マネジメントの目的に応じ適宜選択することが望ましい。

４－２　リスク算定とリスクの表示方法の基本的考え方

リスクは、斜面災害の年発生確率と想定災害規模ごとの被害額から算定される年平均被害額として表す。
さらに、予想される被害額が、平均値からどの程度乖離して発生する可能性があるかを、イベントプロットやリスクカーブを用いて把握することが望ましい。

【解説】

リスクは、原則として年平均被害額として定量化する。しかし、検討対象路線区間や検討対象斜面には、様々な規模の斜面災害が発生する可能性があり、年平均被害額はその平均値を示しているにすぎない。このため、ある被害額とその被害額以上の災害が発生する確率の関係を、横軸を被害額、縦軸にその年超過確率を表したイベントプロットやリスクカーブとして表示することにより、被害額の年平均被害額からの乖離の程度を把握することが望ましい。

４－２－１　リスク算定

リスクは、斜面災害の年発生確率と想定災害規模ごとの被害額の積として算定する。

【解説】

リスクを算定するためには、斜面災害の年発生確率と想定災害規模を予測する必要がある。想定災害規模として道路への到達土量が予想されれば、第３章に基づき災害ごとの被害額を求め、災害の年発生確率を乗じることによりリスクを求めることができる。

ある災害ｉの年発生確率をp_i、被害額をd_iとすると、年平均被害額R_iは式-4.1により算定できる。

$$R_i = p_i \times d_i \quad \cdots\cdots \text{式-4.1}$$

検討対象路線区間や検討対象斜面には、複数の斜面災害危険箇所が存在する。それぞれの斜面災害の年発生確率p_iと、その災害が発生した場合の被害額d_iが予測されていれば、検討対象路線区間や検討対象斜面の年平均被害額は、それぞれの災害の年平均被害額を合計することで求められる。

$$R = \sum_{i=1}^{N} R_i = \sum_{i=1}^{N} p_i \times d_i \quad （N：災害件数） \quad \cdots\cdots \text{式-4.2}$$

４－２－２　イベントプロット

イベントプロットは、横軸に災害１回あたりの被害額、縦軸にその年超過確率をとったグラフであり、任意の年に検討対象路線区間や検討対象斜面で想定される災害１回あたりの被害額の分布を表したものである。

【解説】

イベントプロットは、任意の年に検討対象路線区間や検討対象斜面で想定される災害１回あたりの被害額の分布を表現したものであり、以下の手順で作成する。

① 検討対象路線区間や検討対象斜面で想定されるＮ件の災害の被害額を大きい順に並べる。

② 被害額の大きい順に、式-4.3により損失の年超過確率（累積確率）を求める。

$$
\begin{aligned}
P_1 &= p_1 \\
P_2 &= 1-(1-P_1)(1-p_2) \\
P_3 &= 1-(1-P_2)(1-p_3) \qquad \cdots\cdots \text{式-4.3} \\
&\cdots\cdots \\
P_N &= 1-(1-P_{N-1})(1-p_N)
\end{aligned}
$$

ここで、P_i：ｉ番目の災害（イベント）の年超過確率

p_i：ｉ番目の災害（イベント）の年発生確率

イベントとは、個々の斜面災害であり、年超過確率は、それ以上の被害額が起こる確率を意味する。例えば、3番目の斜面災害で算出した年超過確率は、1番目,2 番目,3 番目のいずれか一つの斜面災害により被害額が発生する確率を意味する。年超過確率については、＜参考-4.2＞に解説を示す。

③ 縦軸に年超過確率、横軸に被害額としたグラフ上にプロットする。

図-4.1にイベントプロットの例を示す。

ここで、イベントカーブは、１年間に複数の災害が発生する場合の年間合計被害額の分布を示したものではない点に注意が必要である。

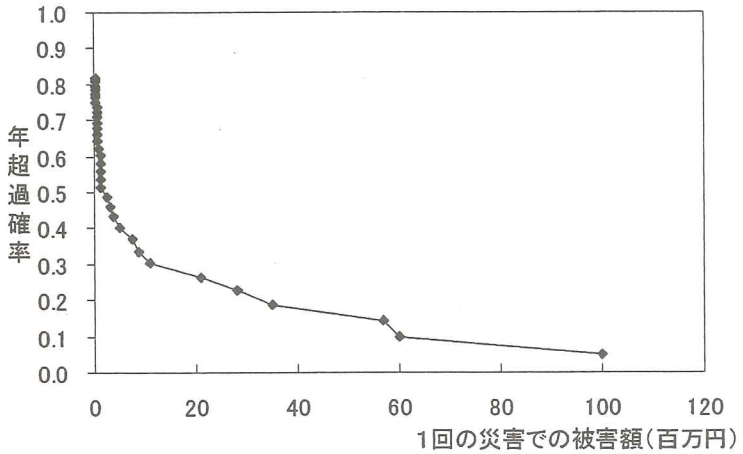


図-4.1　イベントプロットの例

４－２－３　リスクカーブ

リスクカーブは、横軸に年間合計被害額を、縦軸にその年超過確率をとったグラフであり、任意の年に検討対象路線区間や検討対象斜面で想定される災害の年間合計被害額の分布を表したものである。

【解説】

狭義のリスクである年平均被害額は、１年間に発生する可能性がある全ての災害を考慮した年間合計被害額の平均値であり、リスクカーブは、実際に発生する年間合計被害額が、この年平均被害額からどの程度乖離して発生する可能性があるのかを示すためのものである。リスクカーブは、横軸に年間合計被害額を、縦軸にその年超過確率で表し、ある年間合計被害額以上となる確率を表示したグラフである。

リスクカーブは、想定される斜面災害をランダムに発生させるモンテカルロ法等を行うことで、年間合計被害額の確率密度分布を求め、これを積分することで作成できる。

図-4.2にリスクカーブの例を示す。

リスクカーブで囲まれた面積は、狭義のリスクである年平均被害額を表している。このため、年平均被害額の大きさとともに、任意の年にどの程度の損失がどの程度の確率で発生するかを図示しており、マネジメントに有効な情報である。一方、リスクカーブの縦軸は年間損失の年超過確率であり、災害規模の年超過確率を表していないため、災害と被害額の関係を読み取ることはできない欠点がある。

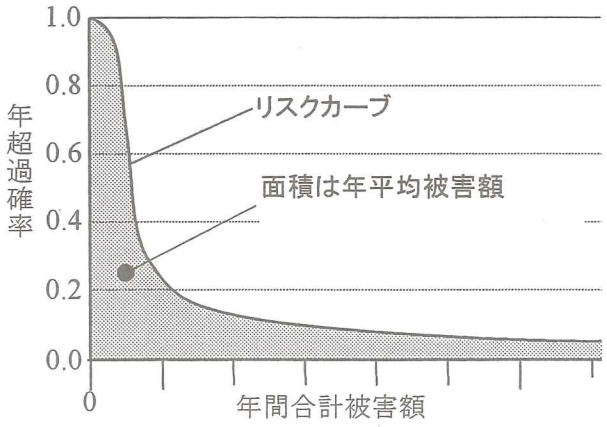


図-4.2　リスクカーブの例

＜参考-4.1＞年超過確率について

イベントプロットの縦軸のプロットポジションの算定方法（年超過確率の算定方法）について、説明の容易な生起確率法を用いて解説する。

この＜参考＞では便宜的に以下の記述を用いるが、順位は被害額の順位である。

- １位の被害額を超える災害の発生確率　　：１位の超過確率
- ２位の被害額を超える災害の発生確率　　：２位の超過確率
- １位の被害額の災害の発生確率　　：１位の発生確率
- ２位の被害額の災害の発生確率　　：２位の発生確率

イベントプロットは、任意の年にある被害額を超える災害が発生する確率を示していて、その年超過確率の算定方法は、右に表記した方法である。

$$P_1 = p_1$$
$$P_2 = 1-(1-P_1)\cdot(1-p_2)$$
$$P_3 = 1-(1-P_2)\cdot(1-p_3)$$
$$\cdots\cdots$$
$$P_m = 1-(1-P_{m-1})\cdot(1-p_m)$$

P_i ：ｉ番目の大きさの被害額の災害の年超過確率

p_i ：ｉ番目の大きさの被害額の災害の年発生確率

ここで、１位の超過確率が１位の発生確率であることは、問題なく理解できよう。

しかし、１位と２位の超過確率の差は２位の発生確率とは異なり、この算定方法では、１位の災害が発生してない条件で、２位の災害が発生する確率に修正されている。

前述したように、災害の発生確率は独立であるため、以下の記述が可能である。

- １位の被害額の災害と２位の被害額の災害が、両方発生する確率 ：　$p_1 \cdot p_2$
- １位の被害額の災害が発生しない条件付きの２位の発生確率　　：$(1-p_1)\cdot p_2$

これらの確率の合計が、２位の発生確率になっていることに注目しておいてほしい。

一方で、算定方法の１位と２位の超過確率の差を計算すると、

$$P_2 - P_1 = 1-(1-P_1)\cdot(1-p_2)-P_1 = 1-P_1-(1-P_1)\cdot(1-p_2) = (1-P_1)\cdot p_2$$

と、１位の被害額の災害が発生しない条件付きの２位の発生確率と一致する。

同様に、(j＋1)位の超過確率と　j　位の超過確率の差は、　j　位以下の順位の災害が発生しない条件付きの(j＋1)位の発生確率に修正されていて、(j＋1)位の超過確率の算定式は、直接的には以下のような構造をしている。

$$1-(1-P_J)\cdot(1-p_J) = 1-P_J-(1-P_J)\cdot(1-p_{J+1})+P_J$$
$$= (\ 1\ -\ P_J\ )\cdot(\ 1-1+p_{J+1}\ )\ +\ P_J$$

j 位の非超過確率　／　(j+1)位の発生確率　／　j 位の超過確率

j 位以下の順位の災害が発生しない条件で、(j＋1)位の災害が発生する確率

これを、プロットポジションで説明したものが、図-１である。

イベントプロットの縦方向の間隔は、１個のイベントの発生確率と誤解されやすいが、そのイベントが年間の最大値となる確率を示したものである。このため、被害額が小さくなるほどプロットの間隔が小さくなっている。

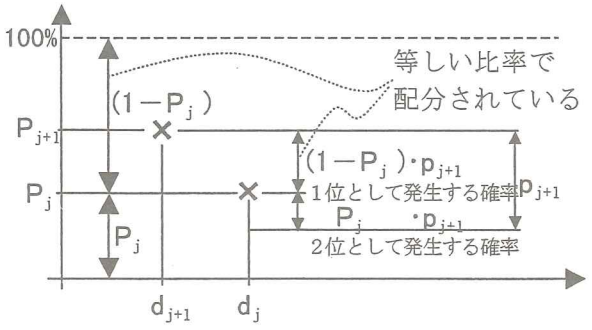


図-1　超過確率のプロットポジション

＜参考-4.2＞イベントプロット・リスクカーブの形状

イベントプロット、リスクカーブの形状からは、路線区間や斜面の抱えている潜在的な被害の大きさ、程度、特性を知ることができる。

例えば、図-1 に示すイベントプロットの場合、Bルートで想定される１回の災害は、軽微な損失は起こりやすいが、大規模な損失は起こりにくいと想定されるので、費用がかかる対策工でなく、日常の道路管理で対応することが望ましいと考えられる。反対に、Cルートの場合は、普段は損失が起きないが、まれに大きな損失が起きると想定されるので、その斜面を対象とした斜面対策工を行うこと望ましいと考えられる。

リスクカーブの形状からも、同様な考察を行うことができる。ただし、リスクカーブの場合は、横軸が年間合計被害額であるため、個々の災害の特性ではなく、着目する路線、斜面の年間に発生する被害額の合計値の特性に対して考察を行うことになる。例えば、損失を１年間に災害に巻き込まれる合計人数としたリスクカーブからは、１年間に○人以上が巻き込まれる確率といった情報を読み取ることができ、マネジメントに役立てることができると考えられる。

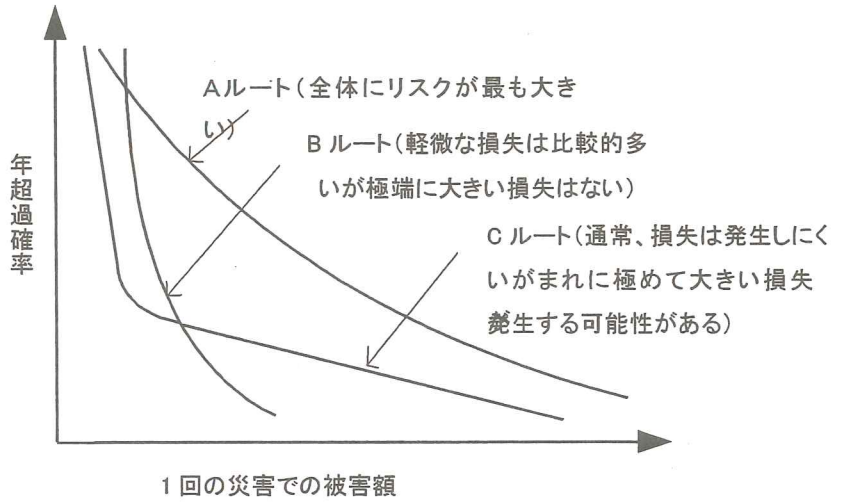


図-1　イベントプロットとリスクの特性

４－３　斜面災害の年発生確率と想定災害規模の予測

リスクを算定するためには、斜面災害の年発生確率と想定災害規模を、既往の災害や降雨の履歴、地形・地質等の斜面の特性等に基づき予測する必要がある。

斜面災害の年発生確率と想定災害規模の予測手法は、入手可能な情報、予測の精度、リスク分析の目的等に応じて以下のように大きく３つのレベルに分類することができる。

・レベル１：災害履歴の統計処理による簡易予測法
・レベル２：斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測法
・レベル３：ＧＩＳ技術を活用した予測法

【解説】

リスクを算定するために必要となる斜面災害の予測(年発生確率と想定災害規模の予測)は、入手可能な情報、予測の精度、リスク分析の目的等により大きく３つのレベルに分類される（図-4.3、表-4.1）。

最も簡易な予測法としては、検討対象の路線区間の災害履歴を統計処理する生起確率法と降雨・災害履歴分析法がある。生起確率法は、過去の斜面災害の履歴観測個数とその災害規模（到達土量）を用いて、到達土量と年発生確率を求める方法である。降雨・災害履歴分析法は、降雨と斜面崩壊の相関が高いと予想される路線区間を対象に、過去の災害履歴と降雨履歴の相関関係を分析し、到達土量と年超過確率を求める方法である。これらの方法は、斜面災害を対象路線区間で予想するため、区間内のどの斜面が崩壊するかまで予測することはできない。従って、個々の斜面の特性や、既設対策工の効果を具体的に考慮できないが、比較的簡単に路線区間の斜面災害を予測できる方法であるので、路線区間の抱えているリスクの現状把握や路線間のリスクの比較を分析の目的としている場合には有効である。

斜面特性（崩壊パターンや地形・地質特性等）に基づくフラジリティ（崩壊しやすさ）を反映した予測法は、災害履歴・降雨履歴に加え、地形・地質・土質・形状等の斜面データを使い、斜面のフラジリティを求め、斜面ごとの崩壊率を予測する方法である。崩壊土量については、斜面高さ等の斜面特性から予測し、既設の待ち受け対策工の効果を考慮して、道路への到達土量を予測する。予測は斜面単位に災害危険箇所を仮定して行うため、同一斜面に存在する複数の災害危険箇所に対する個別の評価はできないが、個別の斜面の特性を考慮した上で優先対策斜面の抽出、対策工の選定等、多様なリスク分析を行うことができる。

ＧＩＳ技術を活用した予測法は、現在開発中の道路斜面防災ＧＩＳを活用するものである。ここでは、ＧＩＳの特徴を用い、標高データ等の地形データや地質データを面的に分析し、微地形なども考慮して災害発生源危険箇所を分析し、道路への土砂や岩塊の到達範囲までを予測しハザードマップとして表示する取り組みがなされており、これまでの開発成果は「道路斜面ハザードマップ作成要領（案）」として取りまとめられている。このハザードマップでは、ロックネットや根固め工等の発生源対策を行う個別の危険箇所を具体的にＧＩＳ上で評価しており、より詳細なリスク分析に応用できると考えられる。ただし、現時点では、災害の発生確率の評価手法が確立されておらず、リスクを定量的に算定するレベルには達していないが、レベル１、レベル２の手法を応用した評価が可能であると考えられる。また、将来的にはＧＩＳシステムには、リスク算定のために必要となる、既往災害履歴、降雨履歴、防災点検結果等のデータベースが組み込む予定であり、データ入力等のシステム導入時の初期費用はかかるが、導入後には、日常の管理業務においてリスク情報を容易に出力することができると考えられる。

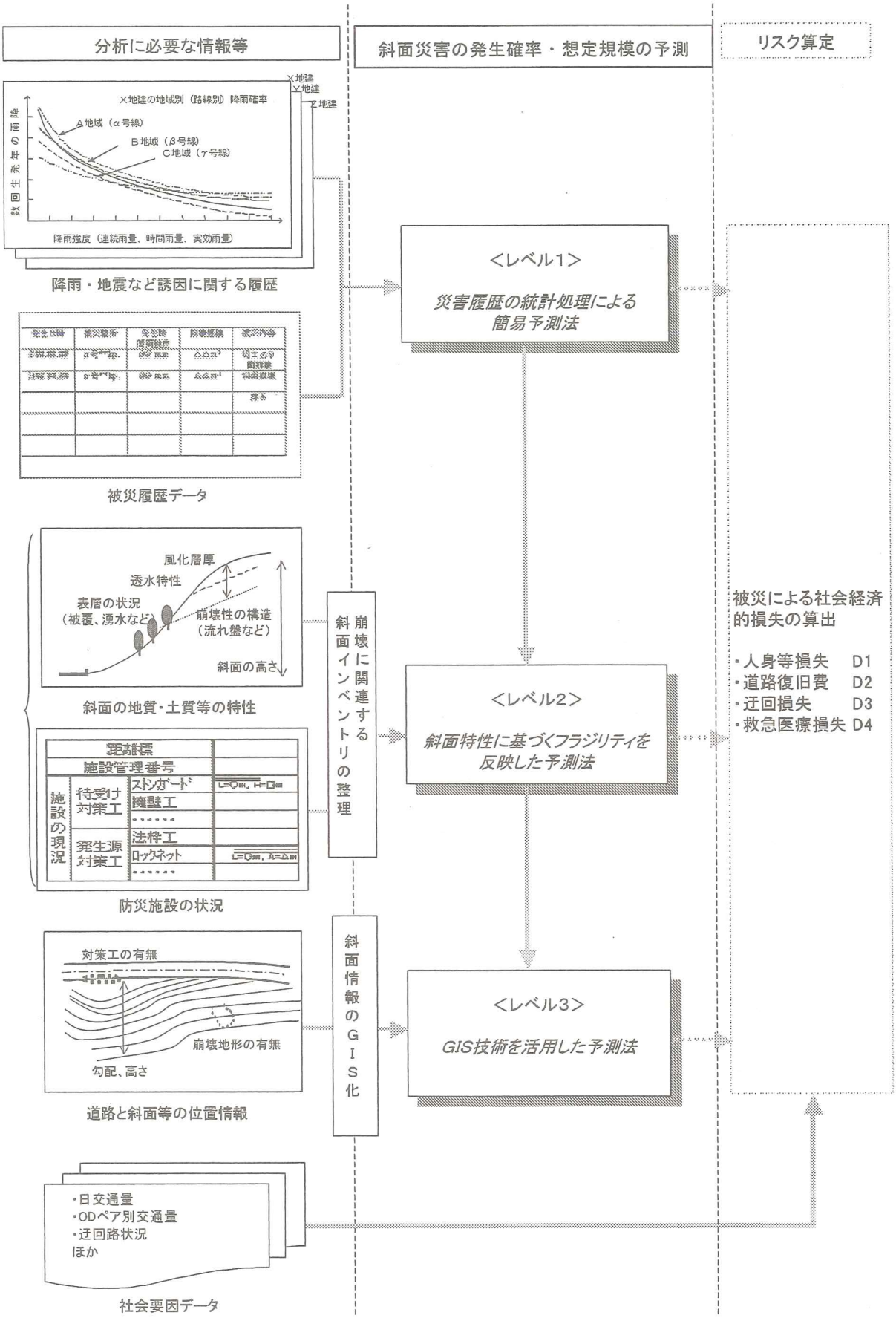


図-4.3　道路斜面災害の予測の流れ

表-4.1　道路斜面災害の予測手法

レベル	予測手法の種類	概要	必要となるデータの種類	予測対象	精度	難易度	リスク分析の範囲
1	災害履歴の統計処理による簡易予測法	a) 生起確率法：災害履歴を統計処理して予測	・災害履歴（日時、箇所、災害規模）	路線区間	低	易	路線区間のリスクの現状把握、路線間リスク比較等のリスク分析に限定
		b) 降雨・災害履歴法：降雨との相関が高い斜面崩壊の履歴について、降雨強度を外力として予測	・災害履歴 ・降雨履歴	路線区間	低	易	路線区間のリスクの現状把握、路線間リスク比較等のリスク分析に限定
2	斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測法	・崩壊形態や地質等の斜面特性をもとに、数量化理論等を用いて斜面の崩壊しやすさを予測 ・崩壊しやすさに応じて斜面を分類し災害履歴の統計処理によるフラジリティカーブ（崩壊率曲線）を作成 ・既設対策工の効果を見込んだ到達土量を算定	・災害履歴 ・降雨等の誘因履歴 ・斜面特性データ（地形、土質・地質、形状等） ・既設対策工の状況	個別斜面及び路線区間	中	やや難	防災対策箇所、防災対策工の選定等、様々なリスク分析が可能
3	ＧＩＳ技術を活用した予測法	・地形データ、地質データを面的に分析し、ＧＩＳ上で表現されたハザードマップから、レベル１，２の予測手法の考え方を応用	・災害履歴 ・降雨等の誘因履歴 ・斜面特性データ ・既設対策工の状況 ・道路周辺の地形、地質データ	個別斜面及び路線区間	やや高	難	防災対策箇所、防災対策工の選定等、様々なリスク分析がＧＩＳシステムの中で可能

４―４　既往災害履歴の統計処理によるリスク算定方法（生起確率法）

４－４－１　基本的な考え方

過去の災害履歴を用いた生起確率法によるリスク算定では、その計測期間 N 年に発生した全ての災害の年発生確率 P は、**式-4.4** により算定される。

$$P = \frac{1}{N} \quad \cdots\cdots \text{式-4.4}$$

N:計測年数、データ収集の対象年数

【解説】

過去の災害履歴を用いた生起確率法によるリスク算定では、計測年数 N 年間に発生した個々の災害の年発生確率は等しく、**式-4.4** により算定可能である。これは、災害発生が、確率的に独立な事象と考えられるためである。

確率的に独立とは、ある災害が発生したことがほかの災害の発生確率を変化させないと言う意味である。災害に対して、こうした考え方の真偽は今後の課題と考えた。

一方で、過去の履歴により評価した災害発生確率を、現状の災害発生の潜在的確率に反映することが可能かという議論も、今後の課題と考えた。

水文統計では、過去の履歴により評価した降雨発生確率が、現状の降雨発生の潜在的確率を評価するという立場をとっていると考えられるが、これは、気象現象に「再現性」が認められるためである。

このような「再現性」が、災害に関して存在するのかという議論は、古くから行われているが、結論は明確ではない。ここでは、少なくとも、災害履歴の計測期間におけるリスク算定を行う方法として、生起確率法を示すものである。

４－４－２　リスク算定に用いるデータ

過去の災害履歴を用いた生起確率法によるリスク算定は、以下のデータを必要とする。

N ：計測年数，データ収集の対象年数
m ：N 年間の災害件数
d_i ：計測年数 N 年間における順位 i 位の大きさの災害被害額（$1 \leqq i \leqq m$）

【解説】

実際の災害被害額には、多くの偶然が作用しているため、災害被害額は 第３章 により求めた標準化した値を用いる必要がある。このとき、生起確率法のデータ整理では、区間を評価対象とし、区間内の２箇所で同時に発生した災害については、迂回損失等を双方で計上すると過大評価となるため、ひとつの災害として扱う必要がある。

生起確率法によるリスク算定では、このほかに、以下の数値を算定する必要がある。

P_i ：イベントプロットにおける d_i に対する縦軸プロットポジション（年超過確率）
D(j)：組み合わせによる年合計被害額のうち、j 番目に大きい値
X(j)：D(j) に含まれる災害の件数（$1 \leqq X(j) \leqq m$）
p(j)：D(j) の年発生確率
P(j)：リスクカーブにおける D(j) に対する縦軸プロットポジション（年超過確率）

４－４－３　リスク算定

過去の災害履歴を用いた生起確率法によるリスク算定では、個々の災害の年発生確率が等しいため、これを求める必要はなく、リスク Ｒは、**式-4.5** により算定される。

$$R\ [¥/年] = \frac{\sum_{i=1}^{m} d_i}{N} \quad \cdots\cdots \text{式-4.5}$$

N：計測年数，データ収集の対象年数
m：N 年間の災害件数
d_i ：計測年数 N 年間における順位 i 位の大きさの災害被害額（$1 \leqq i \leqq m$）

【解説】

過去の災害履歴を用いた生起確率法によるリスク算定では、計測年数 N 年間に、m [件] の災害が発生している場合、その計測期間のリスク R [¥／年] は、**式-4.5** により、年平均被害額 [¥／年] として算定可能である。このように、生起確率法の計算手法では、個々の災害の発生確率を求めないでよい場合が多いが、これは、個々の災害の発生確率が等しいと考えるためである。

４－４－４　イベントプロット

過去の災害履歴を用いた生起確率法によるリスク算定のイベントプロットにおいて、横軸：計測年数 N 年間における i 位の大きさの災害被害額 d_i に対する縦軸(年超過確率)のプロットポジション $P_1, P_2, P_3 \cdots P_m$ は、**式-4.6** により算定される。

$$P_1 = \frac{1}{N}$$

$$P_2 = 1 - (1 - P_1)\cdot\left(1 - \frac{1}{N}\right)$$

$$P_3 = 1 - (1 - P_2)\cdot\left(1 - \frac{1}{N}\right)$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$P_m = 1 - (1 - P_{m-1})\cdot\left(1 - \frac{1}{N}\right) \quad \cdots\cdots \text{式-4.6}$$

N　：計測年数，データ収集の対象年数
m　：N 年間の災害件数
P_i　：d_i に対する縦軸プロットポジション

【解説】

イベントプロットは、任意の年に、ある被害額を超える災害が発生する確率分布を示すものである。そのため、災害が発生した年の既往災害より小さな災害は、イベントプロットの分析結果に反映されない。これは、このような災害が、年間順位２位以下になる結果、超過確率に影響しないためである。Ｘという指標で評価された事象の超過確率は、任意の年にＸの数値を超える事象が発生する確率を示す。

４－４－５　リスクカーブ

過去の災害履歴を用いた生起確率法によるリスク算定において、リスクカーブを作成する場合、計測年数の災害を組み合わせた全組み合わせに対して、合計被害額を算定し、それぞれの年発生確率と対応させることを原則とする。

リスクカーブは、こうして求めた年合計被害額の j 番目に大きい値 D(j) を横軸として、対応する年超過確率を縦軸にプロットしたもので、D(j) に対応する年超過確率 P(j) は、**式-4.7** により求めることができる。

$$P(j)=\sum_{j=1}^{j} p(j), \qquad p(j)=\left(\frac{1}{N}\right)^{X(j)}\cdot\left(\frac{N-1}{N}\right)^{m-X(j)} \qquad \cdots\cdots\cdots \text{式-4.7}$$

N　：計測年数，データ収集の対象年数
m　：N 年間の災害件数
D(j)：組み合わせによる年合計被害額のうち、j 番目に大きい値
X(j)：D(j) に含まれる災害の件数（1 ≦ X ≦ m）
p(j)：D(j) の年発生確率

【解説】

計測年数 N 年間の災害件数 m [件] の組み合わせの大きさは 2^m 通り存在する。過去の災害履歴を用いた生起確率法によるリスク算定では、これらの全組み合わせについて、１年間に発生する確率を計算し、組み合わせの合計被害額と対応させる。

そのため、組み合わせの合計被害額の最大値 D(1) は、全ての災害が同じ年に発生する組み合わせ ${}_mC_m = 1$ [件] に含まれる X(j) = m [件] の被害額の合計であり、最小値 D(m) は、１年間全く災害が発生しない組み合わせ ${}_mC_0 = 1$ [件] に含まれる X(j) = 0 [件] の被害額の合計で 0 [¥] である。

任意の年に X(j) [件]の災害が発生する確率を表した式は２項分布と呼ばれ、**表-4.3** の構造をもつ。

この構造は、X(j) が等しい組み合わせは、${}_mC_{X(j)}$ 通り存在することと、それぞれの発生確率が等しいことを示している。

ここでは、組み合わせに含まれる災害の件数 X(j) が大きいことで必ずしも年合計被害額が大きいとは限らないことから、年合計被害額の大きな順番に並べ直して、この考え方を利用している。

表-4.3　２項分布の構造

X(j)	組み合わせ数：${}_mC_X$	各組み合わせの発生確率
0	$\frac{m!}{0!\cdot m!}=1$	$\left(\frac{N-1}{N}\right)^{m}$
1	$\frac{m!}{1!\cdot(m-1)!}=m$	$\left(\frac{1}{n}\right)^{1}\cdot\left(\frac{N-1}{N}\right)^{m-1}$
2	$\frac{m!}{2!\cdot(m-2)!}$	$\left(\frac{1}{n}\right)^{2}\cdot\left(\frac{N-1}{N}\right)^{m-2}$
·····	·····	·····
m-2	$\frac{m!}{(m-2)!\cdot 2!}$	$\left(\frac{1}{n}\right)^{m-2}\cdot\left(\frac{N-1}{N}\right)^{2}$
m-1	$\frac{m!}{(m-1)!\cdot 1!}=m$	$\left(\frac{1}{n}\right)^{m-1}\cdot\left(\frac{N-1}{N}\right)^{1}$
m	$\frac{m!}{m!\cdot 0!}=1$	$\left(\frac{1}{n}\right)^{m}$

生起確率法によるリスク算定では、合計被害額とそれぞれの発生確率を 2^m 通り算定する必要があり、災害件数 m が大きくなると容易な作業ではない。そのため、この方法を原則としたうえで、モンテカルロシュミレーションによる方法を、**＜参考-4.3＞** に紹介した。

生起確率法におけるモンテカルロシュミレーションは、個々の要素の発生確率が等しいため、一般の場合より容易に可能である。

<参考-4.3>生起確率法による簡易モンテカルロシミュレーション

リスクカーブは、合計被害額とそれぞれの発生確率を 2^m 通り算定する必要があり、災害件数 m が大きくなると容易な作業ではない。そのため、モンテカルロシミュレーションによる方法を紹介する。しかし、2^m をこえる行数でモンテカルロシミュレーションを行うよりは、**式-4.4.** の方法を推奨する。なお、ここで紹介する手法は、生起確率法の処理の目的で、実際の手法より簡便化している。

シミュレーションを行うには、反復回数 K を設定し、行数 K･N, 列数 m のワークシートを作成する。(図-A.)

ここで、各列に K 個の 1 と K･(N−1) 個の 0 をランダムに配置する。

各行は等しい確率で発生する組み合わせをシミュレーションしていて、各行ごとの合計被害額 ΣD は、1 が配置された列の被害額を合計して求めることができる。各行の発生確率 p は、以下の式で表される。

$$p = \frac{1}{K \cdot N}$$

図-A. シミュレーションのワークシート

	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	…	D_m	ΣD
1	0	0	0	0	1		0	D_5+…
2	0	1	0	0	0		0	D_2+…
3	1	0	0	0	0		0	D_1+…
4	0	0	0	1	0		0	D_4+…
5	0	0	1	0	0		1	D_3+…D_m
6	0	1	0	0	0		0	D_2+…
7	0	0	0	0	0		0	…
8	0	0	1	0	0		0	D_3+…
9	0	0	0	0	0		1	…D_m
…								
K･N	0	0	1	0	0		0	D_3+…
Σ	K	K	K	K	K		K	

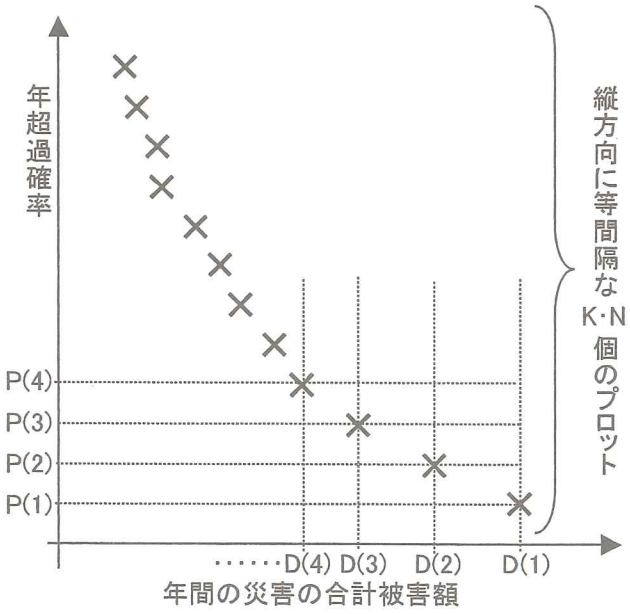
このようにして求めた K･N 個の ΣD を大きい方から並べて、j 番目に大きい合計被害額を D(j) とすると、D(j) の年超過確率 P(j) は以下のように表される。

$$P(j) = \frac{j}{K \cdot N}$$

このように求めた (D(j), P(j)) をプロットすることでリスクカーブを書くことが可能である。ここでは、プロットとカーブの面積を等しくするために、縦軸のプロットポジションを以下の算式によることも可能である。

$$P(j) = \frac{2 \cdot j - 1}{2 \cdot K \cdot N}$$

反復回数 K を大きく設定することにより、よりなめらかなリスクカーブを得ることが可能であるが、多くの場合、時間の制約･電算能力の限界などにより、再現回数 K には、常識の範囲に上限があると考えてよい。



なお、1, 0 により表記するのは、便宜上、電算のコマンドに対応しやすいためである。

行数 K･N に対して、各列に K 個の 1 を配置したのは、生起確率法において年発生確率が [1／N] で同様に求められるためであり、本来のモンテカルロシミュレーションでは、発生確率の異なる事象も 1 の数を増減させる方法で対応可能である。ここで、年発生確率が列ごとに異なる場合、 発生確率 q の事象の列には、q･K･N 個の 1 を配置すればよい。

４－５　既往災害履歴の統計処理による簡易予測法（降雨･災害履歴分析法）

４－５－１　基本的な考え方

降雨・災害履歴分析法とは、降雨が誘因となる斜面災害について、路線区間を対象に、降雨履歴と災害履歴から、降雨強度ごとに損失を予想しリスクを求める手法である。

【解説】

「がけ崩れ災害の実態」土木研究所資料第 3651 号では、表層土の崩壊が 74.5%、地山の崩壊が 25.5%の割合になっており、表層土の崩壊が極めて多くなっている。表層土は降雨に伴う飽和度の上昇で土の重量が増加することとサクション力が低下して土の見かけの粘着力が低下することで不安定になることが知られており、表層土の崩壊は降雨が誘因となる場合が多い。また、複数の斜面を含む路線区間を考えた場合には、一般に降雨強度が高いほど、崩壊土量の大きい斜面が崩壊したり、複数の斜面が崩壊する等、降雨強度と道路への到達土量にも相関があると考えられる。

降雨が誘因となる斜面災害に対しても、４－４に示した生起確率法によるリスク算定手法を適用することは可能であるが、降雨を誘引とする斜面崩壊に対しては、事前通行規制等の降雨強度を指標とした管理が行われることが多い。このため、斜面災害の年発生確率と想定災害規模を、降雨強度と関係づけて分析することは有効である。

そこで、本節では、降雨・災害履歴法では、斜面災害の発生確率 p を降雨の年発生確率 p_{Ri} と、降雨強度に対する斜面の崩壊率 r_R（ある降雨強度の降雨発生下での条件付斜面崩壊確率）に分解し、降雨強度と対応したリスクを算定する手法について示す。

４－５－２　予測手順

降雨・災害履歴分析法では、以下の手順で到達土量とその発生率、および誘引となる降雨の年発生確率を求めリスクを算定する。

(1)　地形・地質状況、災害履歴、降雨履歴等を収集する。また、必要に応じて路線区間をいくつかの検討区間に区分する。

(2)　災害時の降雨強度と到達土量の相関を求める。この時の降雨強度を表す雨量指標は、時間雨量、連続雨量、換算連続雨量などについて検討し、最も到達土量と相関の高い雨量指標を用いる。

(3)　降雨強度を降雨量階級に整理し、降雨量階級に対応した斜面の崩壊率を求める。

(4)　検討区間における降雨履歴から、降雨の年発生確率を求める。

(5)　(2)で算定した到達土量を用いて損失を計算した後、損失と(3)で得られる崩壊率の積を求め、降雨強度に対する損失の期待値を求める。

(6)　(4)および(5)からリスクを算定する。

【解説】

図-4.4に降雨・災害履歴分析法によるリスク算定のフローを示す。

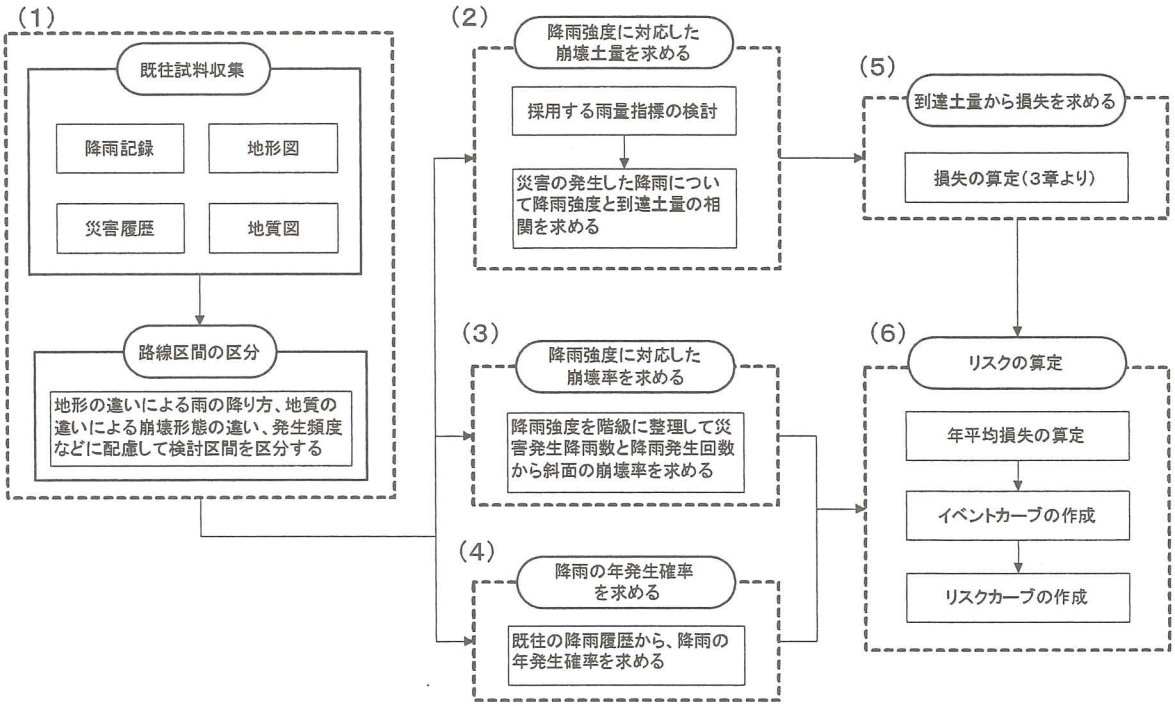


図-4.4　降雨・災害履歴分析法のフロー図

４－５－３　必要なデータ

降雨・災害履歴分析法では、以下のデータを収集する必要がある。
- 路線区間の既往降雨記録（降雨履歴）
- 災害発生時刻や到達土量等の災害に関する記録（災害履歴）
- 地形図、地質図、既往ハザードマップなど

【解説】

降雨・災害履歴分析法では以下の資料を収集する。

(1)路線区間の降雨履歴
- 路線区間の既往降雨記録
- 災害時の降雨記録

既往の降雨記録から将来の降雨の年発生確率を推定するため、できるだけ長期間（できれば 20 年間程度、最低でも 10 年程度）の降雨記録が必要となる。災害箇所近傍のテレメーターがある場合にはそのデータを、ない場合には近傍のアメダスのデータを使用する。なお、アメダスのデータを用いる際には、災害箇所の地形や降雨の降り方を再現できそうなアメダスポイントを慎重に選定する必要がある。なお、テレメーターとアメダスを併用して使用してはならない。

(2)路線区間の災害履歴
- 災害発生時刻
- 到達土量

降雨・災害履歴分析法では、降雨強度と到達土量の相関を求めるため、災害の発生時刻、その時の降雨、道路に到達した土砂量の記録が必要となる。

(3)地形、地質、既往ハザードマップなど

斜面災害の起こりやすさは、路線区間の地形・地質状況など地域特性や、降雨特性の違いにより、大きな差が生じる場合がある。災害の起こりやすさに大きな差が生じると判断される場合には、路線区間を地域特性や降雨特性に基づいていくつかの検討区間に区分する必要がある。そのための資料として路線区間の地形図、地質図、既往ハザードマップ等を収集する。

４－５－４　路線区間の到達土量の算定

（１）路線区間の区分

地形・地質、災害履歴、降雨履歴等から、路線区間内で崩壊形態、頻度に大きな差異があると考えられる場合は、必要に応じて、検討路線をいくつかの検討区間に分割する。

【解説】

一般に崩壊の起こりやすさは、路線区間内においても、地形条件や地質、および地質構造などといった地域特性や降雨特性によって大きく異なることが予想される。極端な場合には斜面の向きによっても崩壊の起こりやすさが異なる場合がある。そこで、降雨記録、災害記録、地形図、地質図、既往ハザードマップを参考にして、路線区間内が同じような崩壊形態、頻度であるかを検討し、必要に応じ、路線区間を検討区間に区分する。

（２）災害時の降雨強度と到達土量の相関の推定

災害履歴をもとに、災害時の降雨強度と到達土量の相関を求める。降雨強度を表現する雨量指標は、時間雨量、連続雨量、換算連続雨量などのうち、災害時の降雨強度と到達土量との間で最も相関関係の良いものを選択し、その相関式を求める。

【解説】

国土交通省では、降雨による事前通行規制は連続雨量を雨量指標として管理を行っている。また、地盤に残存する降雨の影響を反映できる雨量指標として換算連続雨量（実効雨量、＜参考-4.4＞参照）という雨量指標も検討されている。

そこで、災害時の時間雨量、連続雨量、換算連続雨量について降雨強度と到達土量の相関を求め、最も相関の高い雨量指標を採用する。換算連続雨量については到達土量との相関が高くなるように半減期を設定する。

次に、災害時の降雨強度と到達土量の相関式を求める（図-4.5 参照）。

なお、災害時の降雨強度と到達土量に相関がみられない場合には、降雨強度にかかわらず、災害時の到達土量は一定であるとみなし、その平均値を用いる。

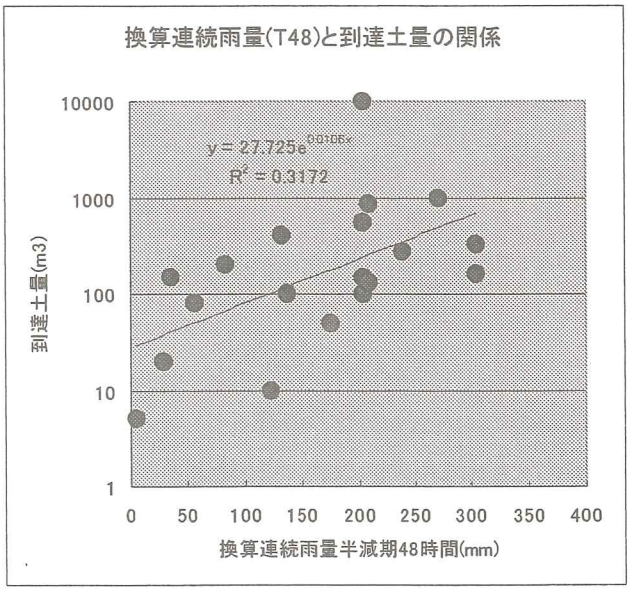


図-4.5　降雨強度と到達土量の関係の整理例

（換算連続雨量半減期 48 時間で計算した災害発生時の雨量値（その降雨期間の中の最大値）と到達土量を比較して相関を求めた例）

次に、災害時の降雨強度と到達土量の相関式を求める（図-4.5 参照）。

なお、災害時の降雨強度と到達土量に相関がみられない場合には、降雨強度にかかわらず、災害時の到達土量は一定であるとみなし、その平均値を用いる。

（3）降雨量階級ごとの崩壊率の算定

過去の降雨記録から災害発生時の降雨強度を適当な降雨量階級にまとめ、降雨量階級ごとに該当する降雨数と、その中で災害の発生した降雨数を求める。この比をとり降雨強度に対応した崩壊率 r_R を求める。

【解説】

①降雨量階級ごとの崩壊率 r_R の算出

降雨強度を 10[mm]、20[mm]、30[mm]など適当な降雨量階級の幅をとって、その降雨量階級ごとに過去に発生した降雨数とその中で災害が発生した降雨数を整理し、降雨量階級ごとの崩壊率を求める。

r_R ＝ある降雨階級で災害が発生した降雨数／ある降雨階級の全ての降雨数

降雨量階級の幅は路線区間の災害発生頻度に応じて決める必要がある。降雨量階級の幅を小さくしすぎると、降雨強度は大きいが災害が発生しない降雨量階級ができてしまうことが多いので、適当な降雨量階級の幅をとり、降雨強度が大きくなるにしたがって災害の発生頻度が大きくなるような階級幅を設定する。

換算連続雨量の降雨量階級を 50[mm]幅にとり、降雨量階級ごとの崩壊率を求めた例を表-4.5 に示す。降雨の数え方は＜参考-4.5＞に示す。

表-4.5　降雨強度に対する崩壊率の例

降雨階級	全降雨数	災害発生数	災害発生率
50	1403	3	0.002
100	533	2	0.004
150	156	3	0.019
200	33	1	0.030
250	19	7	0.368
300	2	1	0.500
350	2	2	1.000
400	2	0	0.000

降雨量階級の幅を 50[mm]として検討期間内に発生した降雨強度と数を求める。またそのときの降雨で災害が発生したものの数を求める

②降雨強度と崩壊率の関係式の算定

上記で求めた降雨量階級ごとの崩壊率から、降雨強度と崩壊率の関係式を求める。関係式は、近似式でも良いし、折れ線でも良いが相関係数が高いものを用いる。

例として、図-4.6(a)および(b)に、表-4.5 の換算連続雨量（半減期 48 時間）で表した降雨強度と崩壊率との関係を近似式として求めたものを示す。

図-4.6 (a)はデータ全体を曲線（指数関数）で近似したもので図-4.6(b)は降雨強度 250mm 付近を境に崩壊率が急に大きくなることに注目して、降雨強度 250[mm]以下と 250[mm]以上に分けてそれぞれ直線で近似したものである。この場合は、相関係数が高い前者を用いることが望ましい。

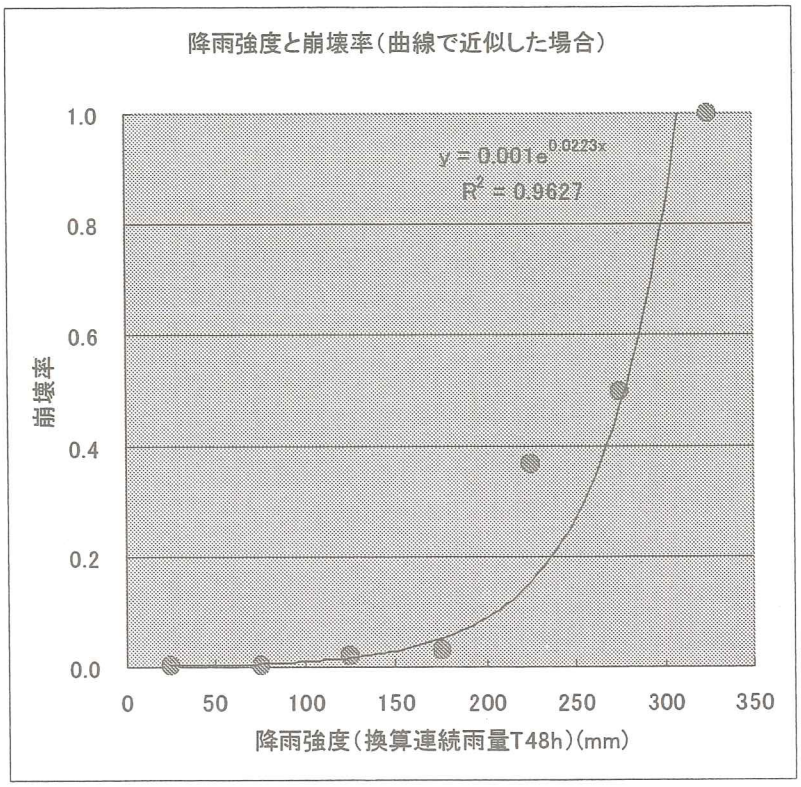


図-4.6(a)　降雨強度と崩壊率（曲線近似）

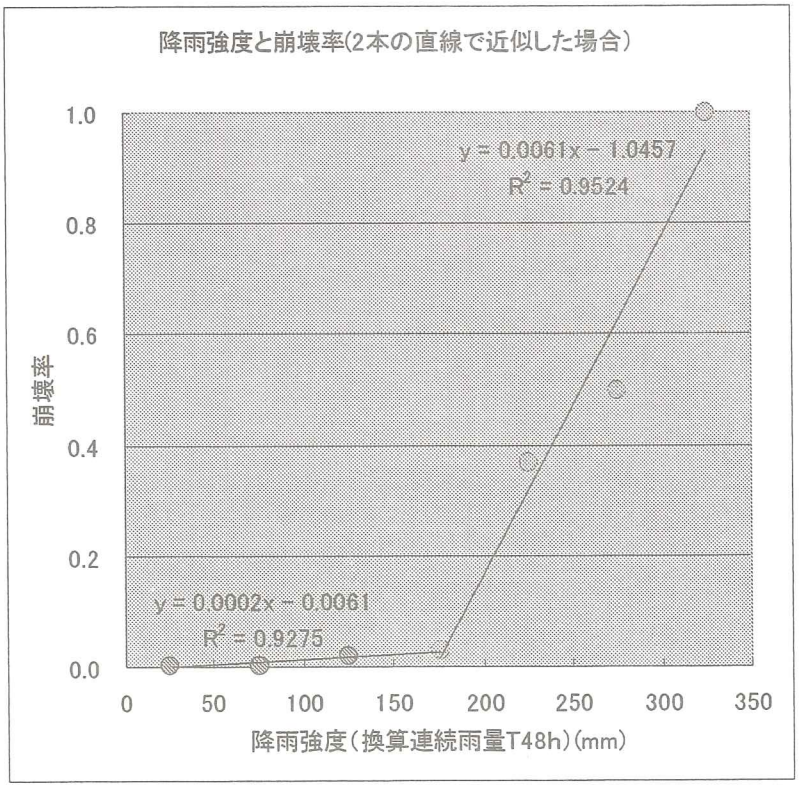


図-4.6(b)　降雨強度と崩壊率（直線近似）

４－５－５　降雨の年発生確率の算定

損失を予測する降雨は、十分に長い試料年の降雨記録での降雨が、今後も同様に発生すると仮定する。
降雨の年発生確率は、試料年をＮとすると p_R=１／Ｎとする。

【解説】

一般に降雨の生起確率を評価する場合、１年間にある降雨強度以上の降雨がある確率、すなわち年超過確率、あるいは年超過確率の逆数である確率年を用いることが多い。降雨強度の年超過確率の算出方法は、過去の降雨記録を統計処理し分布関数にモデル化する手法が取られる。

しかし、分布関数を用いて降雨強度の年超過確率を評価した場合、１年間に降る雨の回数が表現されないため、年間合計被害額の評価に使うことができない。

そこで、本マニュアルでは降雨の生起状況を確率モデルで評価することはやめ、過去の降雨記録での降雨が今後も同様に発生すると仮定し、過去Ｎ年間の全ての降雨に対して、それぞれの年発生確率を p_R =１／Ｎとして将来の降雨の年発生確率を評価することとした。例えば、20 年間に 300 回の降雨の記録がある場合、それぞれの降雨は全て 20 年間に 1 回発生しており、年発生確率は p_R =1/20=0.05 とする。これは、過去 20 年間にあった 300 回の降雨のそれぞれが、任意の年にそれぞれ 1/20 の確率で発生する可能性があるとして、将来の降雨の生起確率を評価しようとしたものである。

これは、降雨を雨量強度の大きい順に並べ、各降雨の年発生確率 p_R から式-4.3 により年超過確率を求めると、図-4.7 のような降雨強度と年超過確率の関係を読み取ることができ、一般に行われる降雨強度の年超過確率の評価と同等の評価が行われていると考えられる。

ただし、このような仮定では、降雨記録はできるだけ長期間のものを用いる必要があり、できれば 20 年間程度、最低でも 10 年間程度のデータが必要である。また、通常用いられる岩井法では、毎年の最大降雨量のデータ（極値データ）のみを収集すればよいが、本手法では、資料年数Ｎに記録された全ての降雨のデータを収集する必要がある。

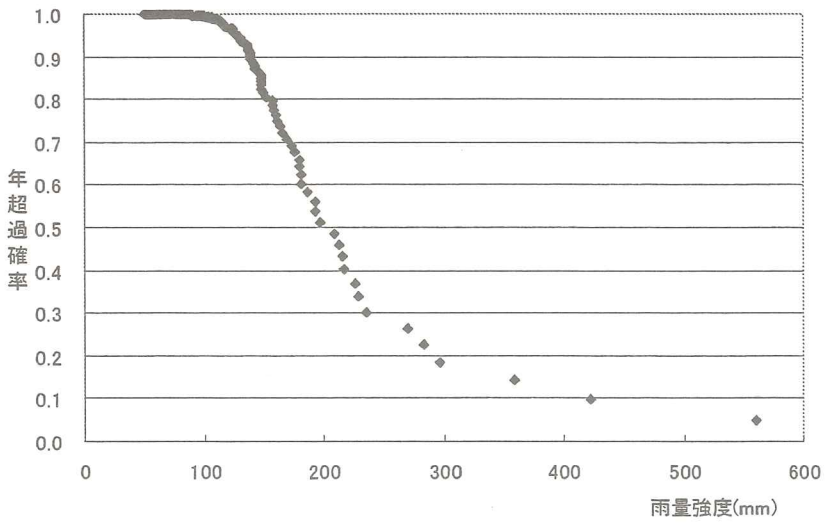


図-4.7　雨量強度の年超過確率

４－５－６　リスクの算定

降雨が誘因となる斜面災害の年平均被害額は、任意の年に予想される降雨の年発生確率、その降雨の降雨強度に対応した崩壊率と、到達土量から算定される損失から算定する。

【解説】

降雨を誘因とする斜面災害の年発生確率と災害規模は、任意の年に発生する可能性のある降雨の数Mとそれぞれの降雨の年発生確率p_{Ri}、および降雨強度ごとの崩壊率r_Rと到達土量の予測を行うことで求める。

任意の年に発生する可能性のある降雨の数Mは、４－５－５で示したように、過去N年間に発生した降雨の数とし、それぞれの降雨の年発生確率p_{Ri}は１／Ｎとする。

降雨・災害履歴法で予測する災害規模は、1 回の降雨で着目路線区間全体の道路への到達土量であり、これを１箇所の斜面災害により生じたものと仮定することで、３章に示した方法により路線区間の損失を算定する。このような損失をM個の降雨それぞれに対して求めることができる。この損失は雨量強度に応じた崩壊率r_Rで発生すると考える。

以上のことから、降雨が誘因となる斜面災害の年平均損失は式-4.8 で算定する。

これは、**式-4. 2** の年平均損失における災害の発生確率p_iを、降雨の年発生確率p_{Ri}と降雨強度に対する斜面の崩壊率r_Rに分解したものであると考えることができる。

$$R=\sum_{i=1}^{M}R_i=\sum_{i=1}^{M}p_{Ri}\times r_{Ri}\times d_i \quad \cdots\cdots \text{式-4. 8}$$

ここに、Ｒ：年平均被害額

R_i：ある降雨ｉの年間平均被害額

p_{Ri}：ある降雨ｉの年発生確率（＝１／Ｎ）

r_{Ri}：ある降雨ｉの降雨強度に応じた崩壊率

d_i：ある降雨ｉの降雨強度に応じた到達土量から算定される被害額

Ｍ：任意の年に発生する可能性がある降雨の数

（Ｎ年間に観測された降雨数）

４－５－７　イベントプロット

降雨が誘因となる斜面災害のイベントプロットは、災害をイベントとしたものと、降雨をイベントとしたものの２通りの表し方ができる。

【解説】

降雨を誘因とする斜面災害のイベントプロットには、以下の２通りの表し方がある。

(1) 災害をイベントとしたイベントプロット

災害をイベントとしたイベントプロットは、縦軸を斜面災害の年発生確率 $p_{Ri} \times r_{Ri}$ から算定される年超過確率、横軸を災害が発生した場合の被害額 d_i をとし、N年間に観測されたM回の降雨すべてをプロットすることで作成できる。

この災害をイベントとしたイベントプロットは、生起確率法で作成するイベントプロットと同等のものである。

図-4.8 に降雨下で発生する災害をイベントとしたイベントプロットの例を示す。

図-4.8 では年超過確率 0.25 程度で損失が 0 となっている。これは、降雨があった場合必ず損失が発生するわけではなく、0.75 程度の確率で無被害である可能性があることを表している。

(2) 降雨をイベントとしたイベントプロット

降雨をイベントとしたイベントプロットは、縦軸を降雨の年超過確率 P_{Ri}、横軸をその降雨発生下で予想される期待被害額 $r_{Ri} \times d_i$ とし、N年間に観測されたM回の降雨すべてをプロットすることで作成できる。

図-4.9 に降雨をイベントとしたイベントプロットの例を示す。

このイベントプロットは図-4.7 に示したグラフの横軸である雨量強度を、対応する被害額に変換したものであると言える。

この降雨をイベントとしたイベントカーブを人身損失 D_1 に対して作成した場合、例えば年超過確率 0.5 の降雨強度（2 年降雨）で事前通行規制を行うと、1 回の降雨で図-4.10 に示すハッチング部分の人身損失が回避されることを表現することができる。このように、降雨をイベントとしたイベントプロットからは、降雨強度を指標とした管理に有益な情報を示すことができる。

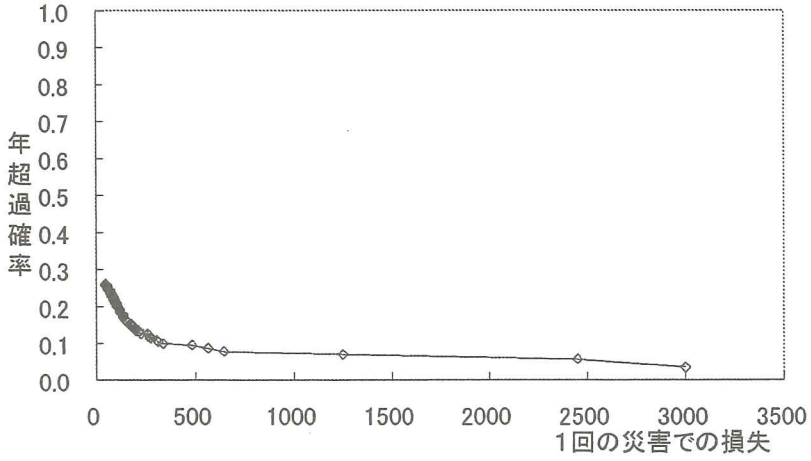


図-4.8　斜面災害をイベントとしたイベントプロットの例

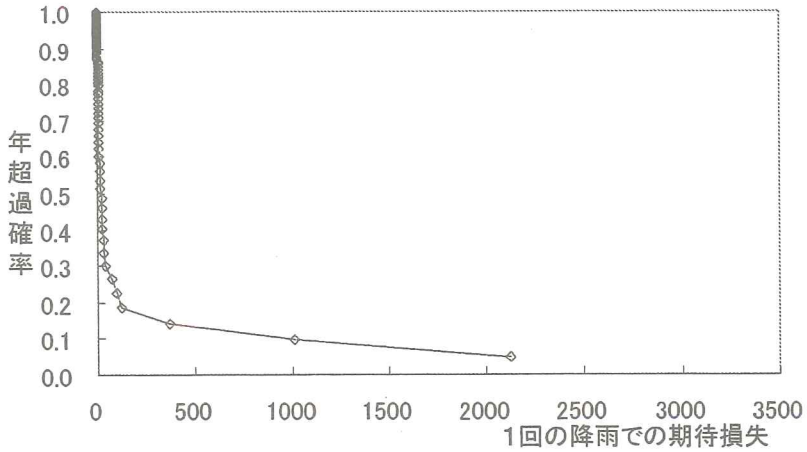


図-4.9　降雨をイベントとしたイベントプロットの例

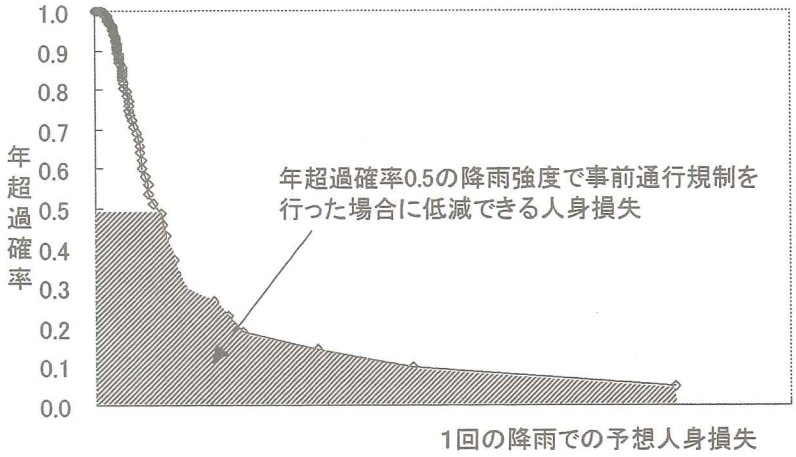


図-4.10　降雨をイベントとしたイベントプロットで表される事前通行規制の効果

4－5－8　リスクカーブ

降雨が誘因となる斜面災害のリスクカーブは、年間に複数個の災害（イベント）が発生する可能性を考慮し、各イベントの発生の全組み合わせに対して年間合計被害額を算定し、年間合計被害額の確率密度分布を評価して作成することができる。

【解説】

年間合計被害額について分析を行うためには、年間に複数個の災害（イベント）が発生する可能性を考慮し、年間合計被害額の確率密度分布を求める必要がある。年間合計被害額の分布を求めるには、斜面災害をランダムに発生させるモンテカルロ法等を行う必要がある。モンテカルロ法の計算のイメージを＜参考-4.6＞に示す。

年間合計被害額の確率密度分布が評価されれば、これから横軸に年間合計被害額を、縦軸にその年超過確率で表し、ある年間合計被害額以上となる確率を表示したリスクカーブを作成することができる。この際、７章に示す各種の不確定性を合わせて考慮することが望ましい。

しかし、リスクカーブは、年間損失合計の分布を確率で表現したものであるが、その算定は煩雑である。降雨を誘因とする斜面災害の場合、年間損失合計の分布を確率で表現しなくても、降雨強度階級ごとに分布を示すだけでもマネジメントに有効な情報を提供することができる。この一例を＜参考-4.7＞に示す。

＜参考-4.4＞換算連続雨量（＝実効雨量）について

現在の連続雨量が 2 時間程度の無降雨期間に挟まれる一連降雨の累加雨量であるのに対して、換算連続雨量は、連続して換算雨量を求める方法であり、降雨の中断がある場合でも、先行降雨の影響が反映する事ができる。換算連続雨量は、一般には実効雨量と呼ばれる。

連続雨量と換算連続雨量を算出式で比較すると以下のようになる。

連続雨量　　$Rc = \Sigma Ri$（ただし、通常は 2～3 時間程度の無降雨あるいは 2[mm] 程度の小雨の間隔が開いた場合には 0 リセット）

換算連続雨量　$Rw = \Sigma ai \cdot Ri$

ここで、Ri ：i 時間前の 1 時間雨量

ai ：i 時間前の減少係数で、次式による

$$ai = 0.5^{i/T}$$　（Tは半減期）

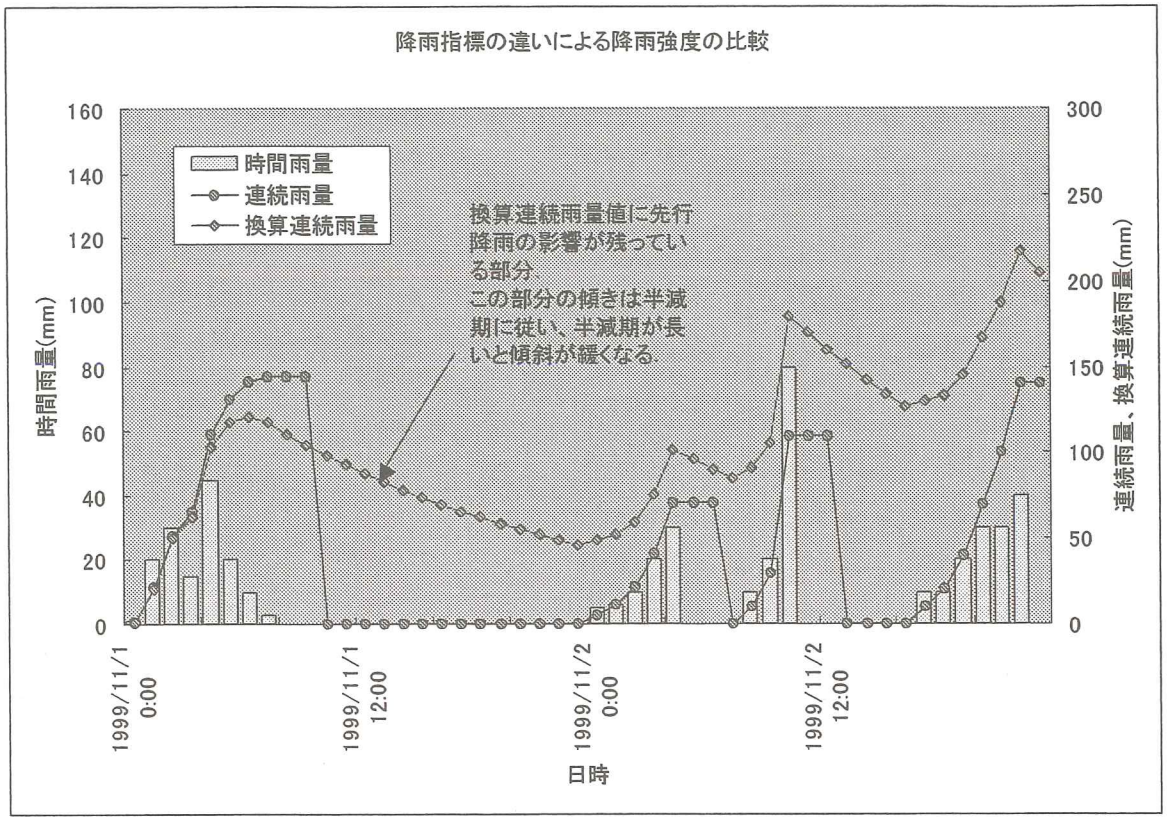
この計算式に基づいた計算例を以下に示す。表－１に示すように、日雨量を設定して連続雨量と換算連続雨量を算出した。

表－１　降雨のモデル（時間雨量を設定し連続雨量と換算連続雨量を算出）

日　時	時間雨量	連続雨量	換算連続雨量	日　時	時間雨量	連続雨量	換算連続雨量
1999/11/1 0:00	1	1	1	1999/11/2 0:00	5	5	49
1999/11/1 1:00	20	21	21	1999/11/2 1:00	6	11	52
1999/11/1 2:00	30	51	50	1999/11/2 2:00	10	21	59
1999/11/1 3:00	15	66	62	1999/11/2 3:00	20	41	76
1999/11/1 4:00	45	111	103	1999/11/2 4:00	30	71	102
1999/11/1 5:00	20	131	118	1999/11/2 5:00		71	96
1999/11/1 6:00	10	141	121	1999/11/2 6:00		71	91
1999/11/1 7:00	3	144	117	1999/11/2 7:00		0	85
1999/11/1 8:00		144	111	1999/11/2 8:00	10	0	81
1999/11/1 9:00		144	104	1999/11/2 9:00	20	20	96
1999/11/1 10:00		0	99	1999/11/2 10:00	80	100	171
1999/11/1 11:00		0	93	1999/11/2 11:00		120	181
1999/11/1 12:00		0	88	1999/11/2 12:00		130	181
1999/11/1 13:00		0	83	1999/11/2 13:00		140	181
1999/11/1 14:00		0	78	1999/11/2 14:00		140	171
1999/11/1 15:00		0	74	1999/11/2 15:00		140	161
1999/11/1 16:00		0	70	1999/11/2 16:00		0	152
1999/11/1 17:00		0	66	1999/11/2 17:00	10	10	154
1999/11/1 18:00		0	62	1999/11/2 18:00	10	20	155
1999/11/1 19:00		0	59	1999/11/2 19:00	20	40	166
1999/11/1 20:00		0	55	1999/11/2 20:00	30	70	187
1999/11/1 21:00		0	52	1999/11/2 21:00	30	100	206
1999/11/1 22:00		0	49	1999/11/2 22:00	40	140	235
1999/11/1 23:00		0	47	1999/11/2 23:00		140	222

表－１の計算結果をグラフで表現すると図－１のようになる。換算連続雨量は降雨終了後から次の降雨まで徐々に低下する。この部分の傾きは半減期応じて変化する。半減期が短ければ傾きは大きく、降雨後先行降雨の影響の残り方は少ない。逆に半減期が長いと傾きは緩くなり、先行降雨の影響が長く持続する。

次の降雨で連続雨量も換算連続雨量も増加するが、換算連続雨量値は先行降雨の影響が残っているため、連続雨量よりも高い雨量値を示す。



図－１　降雨に伴う時間雨量、連続雨量および換算連続雨量の雨量値の変化の比較

このように、換算連続雨量は先行降雨の影響を反映するため、断続的な降雨や梅雨時期末期の集中豪雨といったケースで、連続雨量値は低くても換算連続雨量は高い値を示す事がある。

換算連続雨量の半減期の意味は、例えば半減期 12 時間とした場合、12 時間前の先行降雨の 1 時間雨量を a[mm]とすると、12 時間後に地盤に残っている先行降雨の影響は a/2[mm]と換算できるという事である。すなわち半減期は、地盤中の水の排水のされやすさの程度を表し、保水性の良い地盤では半減期は長くなり、排水性の良い地盤では半減期は短くなる。

半減期を設定する場合には、地盤の地質や地盤の傾斜、植生などを考慮する必要がある。ただし、半減期の値は、2 倍とか 1/2 倍というオーダーで変化させないと、換算連続雨量のグラフに有意な差は生じない。

＜参考-4.5＞**降雨の数え方の例**

（１）連続雨量を基本にした降雨の数え方

国道の事前通行規制区間では規制雨量値は連続雨量の強度で設定されている場合が多い。連続雨量は降雨が降り始めたときから毎正時の時間雨量を加算して求め、無降雨または1～2[mm／h]程度の少雨期間が2～3時間程度続いた段階で0[mm]にリセットされる。リセットされる基準は各地方整備局単位で決められている。

降雨強度と崩壊土量の関係は、必ずしも明瞭な正の相関は得られないが、第1次近似的には降雨強度が高いほど崩壊土量も多くなると考えられる。例えば同じ連続雨量200[mm]の降雨があっても、斜面が崩れる場合と崩れない場合がある。めったに大きな降雨が発生しないところではたまに降雨強度の大きな降雨が発生すると斜面崩壊が起こる割合は大きくなるであろうし、いつも大きな雨を経験しているところでは、大きな雨の回数が多くなればそれに応じて斜面崩壊が起こる回数も多くなると考えられる。
そこで、検討期間中にどの程度の強度の雨が何回発生しており、その中で斜面崩壊を伴った降雨の割合はどの程度かを求めることで、検討区間の降雨に対する斜面の脆さを求めることができる。

この時の降雨の数え方は、降雨・災害履歴法においては、1連続降雨を1降雨として数えることを基本として以下のように定義した。

連続雨量	1連続雨量を1降雨とし、連続雨量の最大値を降雨強度として採用
時間雨量	1連続雨量を1降雨とし、1連続雨量期間中の時間最大雨量を降雨強度として採用
換算連続雨量	1連続雨量を1降雨とし、1連続降雨期間中の換算連続雨量値の最大値を降雨強度として採用

（２）換算連続雨量に着目した降雨の数え方

換算連続雨量は＜参考-4.4＞に示したように、計算上は降雨停止後の経過時間が長くなっても0[mm]なる事はない。したがって、降雨の開始・終了の定義を明確にしないと、降雨回数が数えなれない。上記（１）では連続雨量をもとにして換算連続雨量の最大値を採用した。雨量観測記録から、実効雨量とともに連続雨量を整理することは煩雑であるため、実効雨量の時刻歴図から、降雨の開始・終了の定義を適宜決めてもよいこととした。

図－１は、ある期間の実効雨量の時刻歴図の例である。

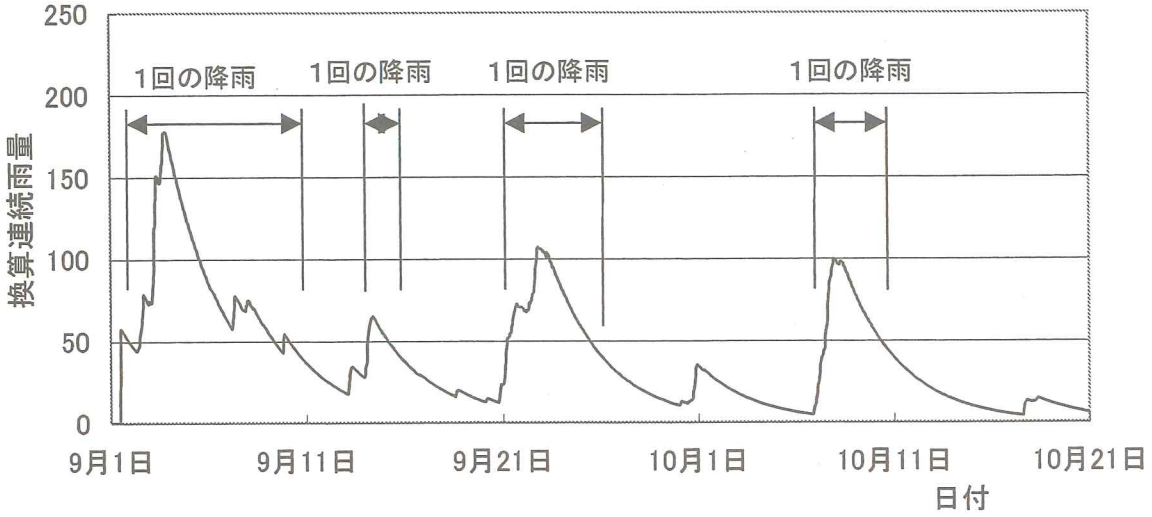
実効雨量には幾つかのピークがあるが、以下の手順を踏むことにより、１回の降雨として同図に示すような区分とすることができる。

STEP1：実効雨量曲線が減少過程から増加に転じる現象を降雨と定義する。（実効雨量が増加しない雨は降雨にカウントしない。）

STEP2：実効雨量のピーク値が50[mm]以下の降雨は、降雨とみなさない。（実効雨量が50[mm]以下の場合の斜面崩壊は、降雨と無関係とみなす。）

STEP3：実効雨量の経時変化で、ピーク値を経過後、雨量の低下時に、ピーク値の50%まで低下しない時点で雨量が再上昇した場合は、継続降雨とみなす。逆に、50%以下に低下した場合は、再度雨量が上昇する時点、もしくは50[mm]以下に低下した時点で、降雨の終了とみなす。

STEP4:降雨中、雨量がピーク値の 50%以下に低下し、雨量が再上昇する場合でも、その増分雨量が 20[mm]以下の場合は、降雨の終了とはみなさず、直前の降雨が継続している状態と見なす。（STEP3 では、感覚的に連続降雨とみなしたい降雨が、別降雨に扱われるため調整した。）



図－1　換算連続雨量に着目した降雨の数え方の例（半減期 48 時間で計算）

表－１に、以上のように設定した降雨の開始・終了の定義を改めて示す。

表－１　換算連続雨量の降雨開始と降雨修了の定義の例

降雨の開始	降雨が終了している状態、もしくは、実効雨量がピーク値の 50%以下に低下した状態から、20[mm]以上の増加に転じた状態で実効雨量が 50[mm]以上に増加する時点
降雨の終了	当該降雨に連続し次の降雨が開始した時点、もしくは、実効雨量が 50[mm]以下に減少する時点。
実効雨量値	1 降雨期間中の実効雨量値の最大値を降雨用度として採用

ただし、この方法によって換算連続雨量の降雨の回数を求める場合には検討区間の降雨の降り方をあらかじめ調査して、下限値が 50[mm]でよいかどうかを判断する必要がある。下限値を高く設定すると降雨数が減るが、小さな降雨強度で崩壊した事例を再現できなくなるので注意が必要である。

従って、下限値は地域の降雨量に応じて決定する必要がある。

＜参考-4.6＞モンテカルロ法のイメージ

降雨災害履歴法において、モンテカルロシミュレーションによりリスクカーブを作成する例を以下に示す。

資料年数N年間に、300 回の降雨が観測されたとする。すなわち、災害のイベント数は300 個とする。

各イベントの年発生確率 p_i は以下となる。

$$p_i = p_{Ri} \times r_{Ri}$$

p_{Ri}：ある降雨 i の年発生確率（＝１／N）

r_{Ri}：ある降雨 i の降雨強度に応じた崩壊率

また、各イベントの被害額を d_i とする。

モンテカルロシミュレーションは、図-1 に示すイメージで行う。すなわち、任意の年に各イベントは年発生確率 p_i で独立で発生すると考えると、年によっては複数のイベントが発生する可能性がある。このため、モンテカルロ法では、各イベントが所定の年発生確率となる十分な回数として、ここでは10000 回の乱数(崩壊する／崩壊しない)を発生する。

それぞれのケースで、崩壊が発生したイベントの被害額の集計値が、年間合計被害額の標本値となる。すなわち、10000 年間分の年間合計被害額の標本を計算する。

この 10000 年間分の年間合計被害額の標本値のヒストグラムは、任意の年に複数個の災害が発生するかもしれない不確定性を表わしており、このヒストグラムを全標本数で除すことで密度関数が得られる。

この密度関数を積分することで、年間合計被害額と、その年超過確率の関係、すなわち、リスクカーブを求めることができる。

ケース	ｲﾍﾞﾝﾄ1 d_1=2000 万円 p_1=0.01	ｲﾍﾞﾝﾄ2 d_2=1000 万円 p_2=0.02	……	ｲﾍﾞﾝﾄ299 d_{149}=200 万円 p_{299}=0.01	ｲﾍﾞﾝﾄ300 d_{150}=100 万円 p_{300}=0.02	年間合計 被害額
1	○	×	……	○	○	1000 万円
2	○	○	……	○	○	0 万円
3	○	○	……	×	○	200 万円
:	:	:	:	:	:	:
9998	×	○	……	○	○	2200 万円
9999	○	○	……	○	×	100 万円
10000	○	○	……	○	○	0 万円

ここに、d_i：災害時被害額、p_i：災害発生確率＝$p_{Ri} \times r_{Ri}$、○：崩壊なし、×：崩壊あり

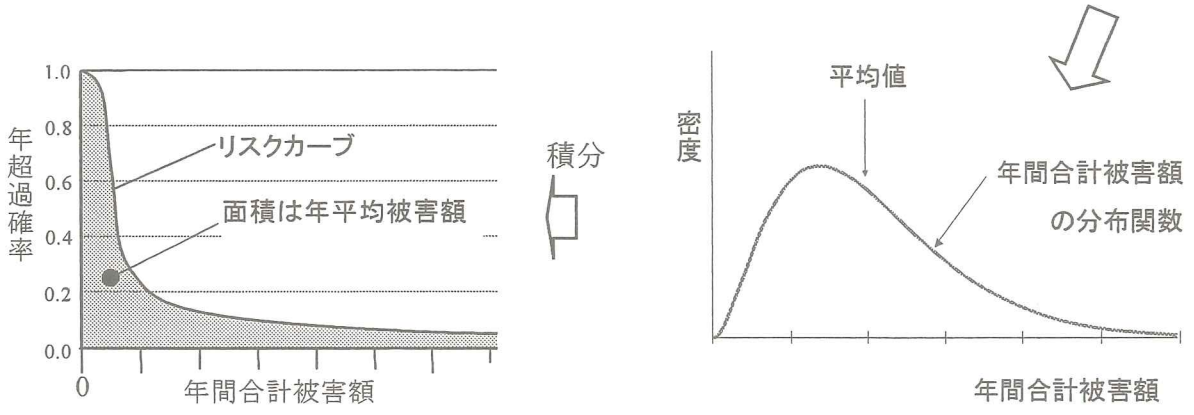


図-1　モンテカルロ法のイメージ

＜参考-4.7＞年間損失合計の降雨強度階級ごとの分布

年平均損失の算定を行うために、任意の年に発生する可能性のあるM個の降雨それぞれに対し、年間平均損失$p_R \times r_R \times d$の算定を行っている。

このM個の年間平均損失を、降雨階級ごとに集計すると図-1 が得られる。各降雨階級の損失を合計したものは狭義のリスクである年間合計被害額の平均値であり、図-1 は年間合計被害額の降雨強度階級ごとの分布を表している。

降雨をイベントとしたイベントカーブでは年超過確率が大きい降雨強度の小さい降雨で発生する損失は小さいが、降雨の数が多いため、図-1 のようなリスクの表し方をすると、年間合計被害額の平均値には大きな影響を与えていることが判る。このような場合は、降雨強度が大きい降雨に着目した事前通行規制だけでなく、発生源対策、待受対策といった対策工の整備を一層進める必要があると判断される。

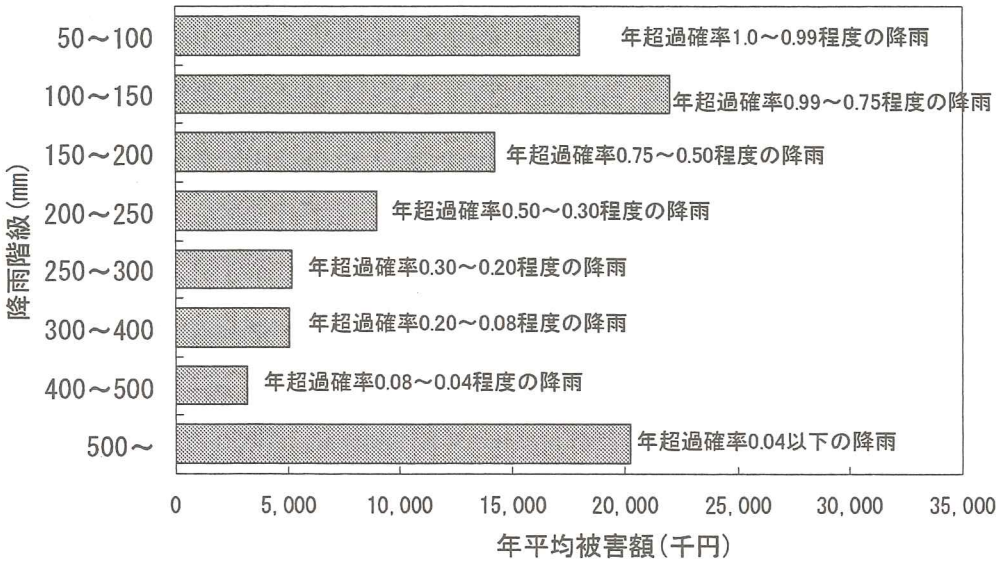


図-1　降雨階級ごとの年平均損失

４－６　斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測法

４－６－１　基本的な考え方

斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測法とは、斜面の崩壊形態および斜面特性に基づいて分類した斜面群ごとに、誘因の大きさに対する斜面の崩壊率を設定して、これを斜面災害の予測に適用する手法である。ここで、斜面災害の年発生確率は誘因の年発生確率と崩壊率の積で、到達土量は、個々の斜面について斜面特性に基づき推定し、これに待ち受け対策工等の効果を考慮して求める。

本予測法では、路線区間全体のリスクのみならず、個々の斜面のリスクを予測できる点に特徴がある。

【解説】

斜面災害は、降雨や地震等が誘因となり発生することが多いが、誘因とともに、路線の地形や地質、地質構造といった地域特性と個々の斜面構造による崩壊形態の違い、および個々の斜面の傾斜や高さ、斜面の被覆状況などの斜面特性が素因として関係している。したがって、誘因の大きさに対する斜面の崩壊しやすさ(フラジリティ)、および斜面の崩壊土砂が道路に到達して道路機能に影響を及ぼす到達土量は、地域特性や個々の斜面の斜面構造および斜面特性の違いを反映して予測することが適切である。

この点、「４－４生起確率法」では、斜面の崩壊と誘因との関係が明確にされておらず、また個々の斜面の斜面特性に応じた崩壊性の違いが評価されていない。また、「４－５降雨・災害履歴分析法」では、誘因として降雨を対象としているが、「４－４生起確率法」と同様に個々の斜面の斜面特性に応じた崩壊性の違いが評価されていない。「４－６斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測法」はこれらの簡易法に比較して予測手順が煩雑となるが、個々の斜面のリスクに着目できる点に特徴がある。

「斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測法」では、まず対象とする斜面群を斜面の崩壊形態により複数の斜面群に大きく分類し、さらに斜面特性に応じた斜面の崩壊性に応じて分類を行った後に、各分類ごとのフラジリティカーブを求める。ここで、フラジリティカーブとは、誘因の大きさと斜面の崩壊率との関係式として定義されるものである。また、到達土量は、個々の斜面の斜面特性に基づき崩壊土量を推定し、これに待ち受け対策工等の効果を考慮して算定する。「斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測法」では、このような方法で個々の斜面の斜面構造および斜面特性を考慮するため、個々の斜面の災害が予想でき、路線区間のリスクの現状把握、路線間のリスク比較等だけでなく、防災対策箇所、防災対策工法の選定等、様々なリスク分析が可能となる。なお、路線区間のリスクは、個々の斜面のリスクを組み合わせることにより求める。

なお、ここでは誘因として主に降雨に着目した方法を記述しているが、地震等についても同様の手法が適用できる。

降雨を誘因とする場合には、降雨の年発生確率は「４－５降雨・災害履歴分析法」と同様に４－５－５節に示す方法で行う。

４－６－２　予測手順

斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測法では、以下の手順で「誘因の年発生確率」、「斜面の崩壊率」および「到達土量」を求め、リスクを算定する。

(1)　必要なデータの収集
(2)　誘因の年超過確率の算定
　①　降雨や地震などの誘因の年発生確率の算定
(3)　誘因に対する斜面の崩壊率の算定
　①　斜面の崩壊形態による分類
　②　斜面の崩壊に影響する斜面特性の分析および斜面特性による斜面の分類
　③　斜面分類ごとのフラジリティカーブの作成
(4)　誘因が不明確な斜面の崩壊率の算定
(5)　到達土量の算定
　①　斜面特性に応じた斜面の崩壊土量の推定
　②　待ち受け対策工等を考慮した到達土量の算定
(6)　リスクの算定

【解説】

(1)　必要なデータの収集

分析に必要なデータを収集する。

(2)　誘因の年超過確率の算定

降雨や地震など、対象とする誘因について年発生確率を算定する。

降雨の場合、４－５－５節に示す方法に示す方法を準用する。

地震の場合は、様々なシナリオ地震を想定する必要があるが、本マニュアルでは説明を省略する。

(3)　誘因に対する斜面の崩壊率の算定

① 斜面の崩壊形態による分類

対象とする路線区間内の斜面について、地域特性、降雨特性および斜面構造による崩壊形態の違いがある場合には、複数の斜面群に分類する。

② 斜面の崩壊に影響する斜面特性の分析および斜面特性による斜面の分類

各誘因ごとに、斜面の崩壊に対する各斜面特性の影響度を分析し、①で分類した斜面群をさらに斜面の崩壊性により分類する。

③ 斜面分類ごとのフラジリティカーブの作成

①での崩壊形態および②での斜面特性により分類された個々の斜面群は、誘因に対する斜面の崩壊率を同等とみなし、各分類ごとにフラジリティカーブを作成する。

(4)　誘因が不明確な斜面の崩壊率の算定

誘因との相関を明確にできない斜面の崩壊率を算定する。

(5)　到達土量の算定

① 斜面特性に応じた崩壊土量の推定

崩壊土量は、個々の斜面について傾斜や高さ、風化の進行状況等の斜面特性に応じた

斜面の崩壊形状を想定して推定する。

② 待ち受け対策工等を考慮した到達土量の算定

崩壊土量の内、道路へ到達し道路機能に障害を及ぼす到達土量については、待ち受け対策工等の効果を考慮して予測する。

(6) リスク算定

誘因の年発生確率、斜面の崩壊率、および到達土量から、年平均被害額を算定する。また、必要に応じてイベントカーブ、リスクカーブを算定する。

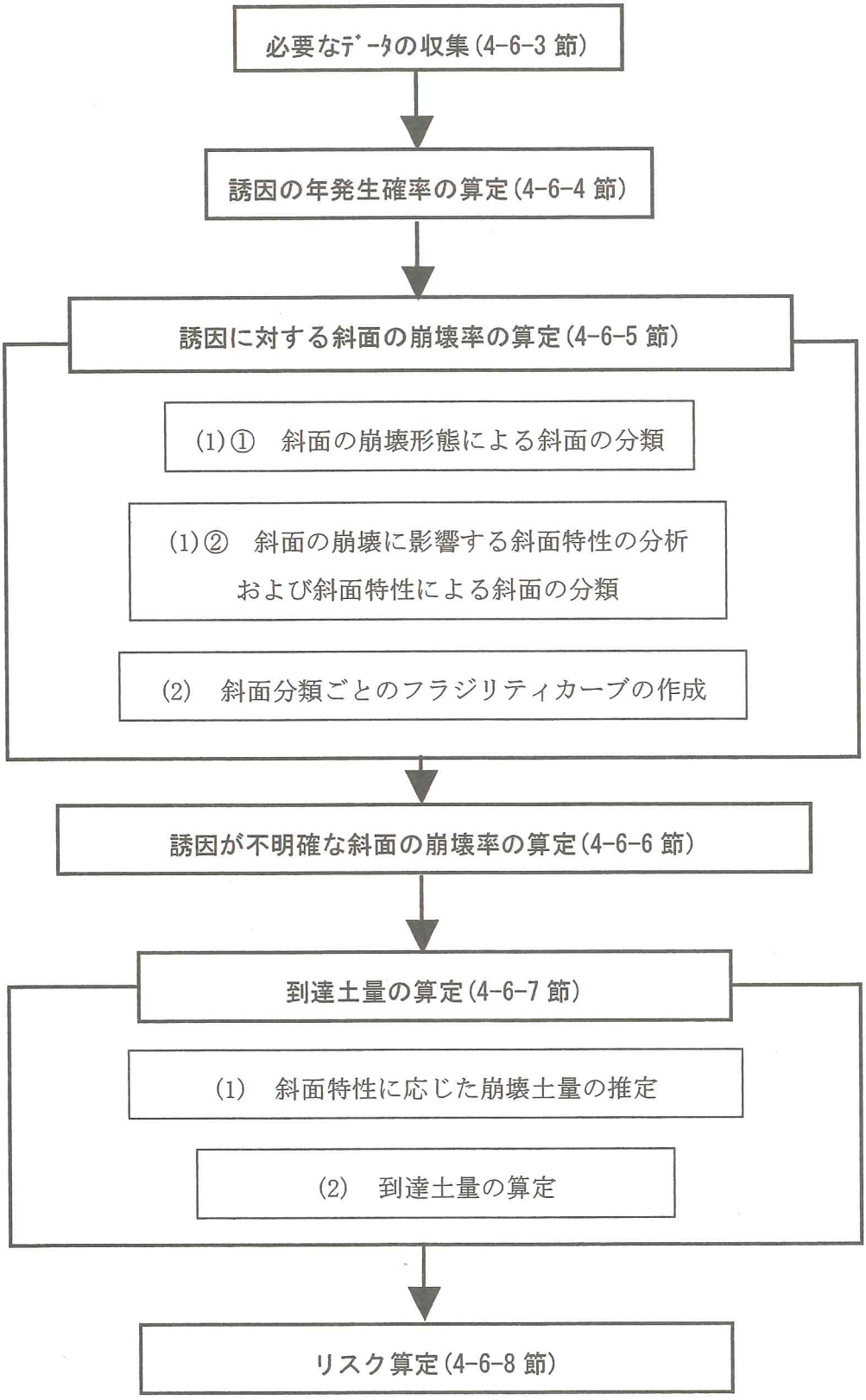


図-4.11　予測手順の流れ

４－６－３　必要なデータ

斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測法では、以下のデータを収集する必要がある。

① 災害履歴
② 地形図、地質図、および既往ハザードマップ
③ 誘因に関するデータ
④ 斜面構造および斜面特性に関するデータ
⑤ 防災対策工に関するデータ

【解説】

① 災害履歴

崩壊した斜面の位置、災害の発生時刻、崩壊土量、到達土量、災害の発生時の誘因の大きさ等、路線区間内の既往の災害履歴を個々の斜面について収集する。

② 地形図、地質図、既往ハザードマップ

路線区間内で、斜面災害の起こりやすさに地域特性による大きな差があると判断される場合には、それらの斜面を分類する必要があるため、路線区間の地質図、地形図、および既往ハザードマップ等を収集する。

③ 誘因に関するデータ

路線区間内の災害履歴より、降雨や地震等、斜面災害に影響している誘因を抽出し、各誘因の履歴を収集する。

降雨の場合は、降雨・災害履歴分析法における「４－５－３必要なデータ」に準拠して降雨履歴に関するデータを収集する。

地震の場合は、斜面災害時の斜面位置での地震動の大きさ、および歴史地震資料や活断層資料等を収集する。

④ 斜面構造および斜面特性に関するデータ

自然斜面やのり面といった斜面構造、および斜面の崩壊に影響する個々の斜面特性として地形、地質等の条件や、斜面の傾斜、高さ、表面の被覆状況等を収集する。

「平成８年度道路防災総点検要領〔豪雨・豪雪〕」[1)] では、個々の斜面の点検項目について調査票を定めている。＜参考-4.8＞に例を示すが、落石・崩壊といった斜面の各崩壊形態ごとに斜面特性の調査項目が掲げられており、各項目に対しては、自然斜面やのり面といった斜面構造ごとに対応する選択肢が設定されている。この点検表による調査記録が、個々の斜面の斜面特性として身近に入手できるデータとなる。

その他、この調査票に掲げられていない斜面特性には、崩壊土量に影響する因子として斜面延長等が、また崩壊土砂の道路への到達しやすさへの因子として道路路肩と斜面法尻の離間距離等が挙げられる。「土木研究所資料：がけ崩れ災害の実態」[2)] の内容等を参照して、個々の斜面の状況により必要に応じて追加項目を検討することが望ましい。

これらの斜面特性に関するデータは、斜面の崩壊との因果関係を分析するための統計デー

タとして、災害履歴のある斜面だけでなく災害履歴の無い斜面のデータも重要であり、路線区間の全ての斜面を対象として収集する。

また、災害履歴のある斜面では斜面の崩壊により斜面特性が変化しているので、斜面の崩壊に対する各斜面特性の影響度を分析するためには、現状での斜面特性のデータに加え、斜面の崩壊以前のデータを収集する必要がある。

⑤　防災対策工に関するデータ

防災対策工の効果を評価するために、その種類、機能、施工時期等を収集する必要がある。斜面に施工される防災対策工は、発生源対策工と待ち受け対策工に大別される。発生源対策工は、その有無により斜面の崩壊率が変化するため、斜面特性の一つとして扱う必要がある。待ち受け対策工は、斜面の崩壊率には影響を与えないが、到達土量(崩壊土量の内、道路へ到達し道路機能に障害を及ぼす土量)に影響を与える。

４－６－４　誘因(降雨)の年超過確率の算定

「４－５　既往災害履歴の統計処理による簡易予測法（降雨・災害履歴分析法）」と同様に、降雨量の年発生確率を算出する。

【解説】

任意の年に予想される降雨の年発生確率を算定する。算定方法は「４－５　既往災害履歴の統計処理による簡易予測法（降雨・災害履歴分析法）」と同様に４－５－４に示す方法を準用する。算定方法の主な留意点を以下に列挙する。

①　斜面の崩壊との相関が高い適切な雨量指標を選定する(連続雨量、換算連続雨量、等)。

②　降雨数を適切に評価する。

４－６－５　誘因（降雨）に対する斜面の崩壊率の算定

「土木研究所資料：がけ崩れ災害の実態」[2)]では、表層土の崩壊が 74.5%、地山の崩壊が 25.5%となっており、表層土の崩壊が極めて多い。表層土の崩壊は降雨が誘因となり発生することが多いと考えられ、ここでは降雨を誘因とする斜面の崩壊についてのフラジリティカーブの作成方法を示す。地震等、降雨以外を誘因とする場合でも、斜面の崩壊に対するフラジリティカーブは、基本的に降雨を誘因とする場合と同様の手順で作成することができる。

なお、誘因を特定できない場合のフラジリティの算定方法については４－６－６に示す。

（１）斜面の崩壊に影響する斜面特性の分析および斜面の分類

斜面の崩壊形態および斜面特性を分析し、個々の斜面を誘因に対する斜面の崩壊率が類似となる斜面群に分類する。

①　斜面の崩壊形態による分類

②　斜面特性による分類

【解説】

(1)　斜面の分類の考え方

フラジリティカーブは、誘因の大きさと斜面の崩壊率との関係式として定義されるが、斜面の崩壊の起こりやすさは、地域特性や降雨特性、斜面構造による崩壊形態および個々の斜面特性の違いによっても当然異なる。このため、路線区間の全斜面を、それぞれ同一のフラジリティを適用する複数の斜面群に分類する。

(2)　斜面の崩壊形態による分類

斜面災害の起こりやすさは、特徴的な地形や地質、地質構造といった地域特性、地域の降雨特性、および自然斜面やのり面といった斜面構造による崩壊形態の違いで大きく異なる場合がある。このため、降雨履歴、災害履歴、地形図、地質図および既往のハザードマップ等を参考にして、路線区間内の斜面の崩壊形態が類似であるか否かを検討し、必要に応じて対象とする路線区間内の斜面群を複数の斜面群に分類する。

(3)　斜面の崩壊に影響する斜面特性の分析および斜面特性による斜面の分類

斜面の崩壊形態により分類されたそれぞれの斜面群の中でも、斜面の崩壊の起こりやすさは、個々の斜面の傾斜や高さ、斜面の被覆状況などの斜面特性が素因として関係するために変化する。そこで、降雨や地震の大きさなどの誘因ごとに、統計分析手法を用いて斜面の崩壊に対する各斜面特性の影響度を分析し、斜面特性を集約した指標として斜面の崩壊性を設定する。そして、斜面の崩壊性により個々の斜面を分類する。

このような統計分析手法として数量化理論第Ⅱ類[3)]がある。数量化理論第Ⅱ類を用いて、斜面特性(既知数)を説明変数とし、既往の災害履歴(既知数)を目的変数として、斜面の崩壊の起りやすさを表わすノーマライズドスコア（未知数）を求める統計分析を行う。個々の斜面の斜面特性に応じて、この分析で得られたノーマライズドスコアを集計することで、個々の斜面の崩壊のしやすさを数量化した斜面スコアが得られる。斜面スコアの大きさを基に、①の崩壊形態で分類した各斜面群をさらに斜面の崩壊性で分類できる。斜面の崩壊性はたとえば[大] [中] [小]といった階級で与え、その階級の選別を斜面スコアの大きさで行う。

斜面の崩壊性は、建築物の地震被害リスク評価において、建築物を構造形式により分類することと同様の考え方を適用したものである。建築物では、木造、RC、SRC といった構造形式ごとに被害率が異なるため、構造形式ごとにフラジリティカーブを作成するのが一般的である。ただし、斜面の崩壊の場合には、建築物の構造形式のように斜面の崩壊性を特徴付ける特性が不明確なため、斜面特性を組み合わせて斜面スコアとして数量化し、斜面の崩壊性を分類することとしたものである。

なお、数量化理論第Ⅱ類では、斜面特性が斜面の崩壊と一定の関係を有していることが前提となるため、地域特性や斜面構造の違いで崩壊形態が異なり、同じ斜面特性でも斜面の崩壊に対する斜面特性の働きが異なるような場合には、良い分析結果を得ることができない。「①斜面の崩壊形態による分類」を「②斜面特性による分類」に先立って行うのはこのためである。

＜参考-4.9＞に、数量化理論第Ⅱ類を用いた斜面の崩壊に影響する斜面特性の分析および斜面特性による斜面の分類事例を示す。

（2）斜面分類ごとのフラジリティカーブの作成

フラジリティカーブに適切な分布関数を設定し、(1)において斜面の崩壊形態および斜面特性により分類した斜面群ごとに、以下のいずれかの方法で降雨を誘因とするフラジリティカーブを作成する。

方法１　災害履歴を基に、各降雨階級ごとに斜面の崩壊率を求め、これらを回帰してフラジリティカーブを作成する。

・手順１　降雨履歴を降雨階級で整理し、各降雨階級ごとの斜面の崩壊率 r_R[%／降雨]を算定する。

・手順２　各降雨階級ごとの斜面の崩壊率 r_R を回帰し、フラジリティカーブを作成する。

方法２　既往の各降雨量に対する個々の斜面の災害履歴を基に、最尤法によりフラジリティカーブを作成する。

【解説】

降雨を誘因とした斜面の崩壊のフラジリティカーブは「横軸：降雨強度」に対する「縦軸：降雨１回あたりの斜面の崩壊率 r_R[%／降雨]の関係を表す曲線であり、(1)において斜面の崩壊形態および斜面特性に基づく斜面の崩壊性で分類した斜面群ごとに作成する。

フラジリティカーブの分布関数としては、誘因である降雨量が正値であることから、一般に対数正規分布を用いている。

フラジリティカーブの作成方法には２種類を掲げている。

方法１による場合、斜面の崩壊率 r_R は適当な降雨階級ごとに下式で算定する。（降雨数の数え方、降雨階級の設定方法は「４－５　既往災害履歴の統計処理による簡易予測法(降雨・災害履歴分析法)」の４－５－４を参照。）この各降雨階級の斜面の崩壊率の算定結果を、分布関数で回帰することでフラジリティカーブが得られる。

$$\text{ある降雨階級の崩壊率 } r_R = \frac{\text{（降雨階級に対応する降雨での斜面の崩壊回数）}}{\text{（全斜面数×降雨階級に対応するすべての降雨数）}}$$

このように、方法１では各降雨量に対応した斜面の崩壊率を求めた後、これを回帰して分布関数のパラメータを設定するため、作成したフラジリティカーブに含まれる不確定性を視覚的に把握できる利点がある。しかし、降雨階級の設定方法により斜面の崩壊率が変化する欠点もある。

一方、方法２では最尤法[4)]によりフラジリティカーブを作成する。最尤法の計算方法は、＜参考-4.10＞に示すように降雨階級を設定する必要が無く、各降雨履歴に対する個々の斜面の災害履歴をそのまま使用し、最適な分布関数パラメータを設定できる利点がある。ただし、分布関数に含まれる不確定性を視覚的に把握することは困難となる。

フラジリティカーブの作成方法は、これら２種類の方法の特徴に鑑み適切な方法を選択するか、あるいは両方法を併用して、分布関数の設定には方法２を適用し分布関数の不確定性の把握には方法１を適用する等の方法が考えられる。

＜参考-4.11＞にフラジィティカーブの算定例を示す。

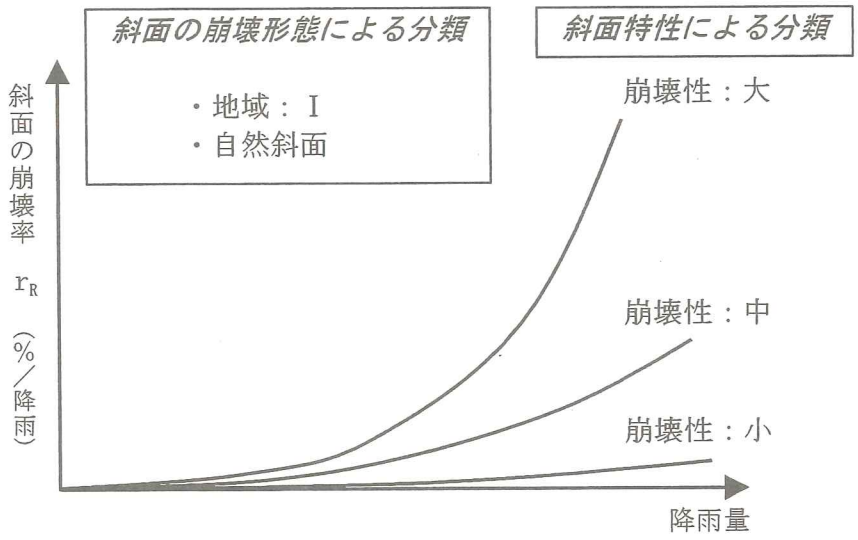


図-4.12 降雨量を誘因とするフラジリティカーブのイメー

４－６－６　誘因が不明確な斜面の崩壊率の算定

誘因との相関を明確にできない斜面の崩壊については、４－６－５とは別に、斜面の崩壊率を年平均崩壊率 r_0[%／年]として設定する。

【解説】

斜面の災害履歴には、降雨や地震等の誘因との相関が無いデータ、あるいは収集できるデータが不十分なため誘因との相関を明確にできないデータも含まれている。

しかし、そうした災害履歴がある以上無視することはできないため、ここでは年平均崩壊率 r_0[%／年]を算定し、誘因が明確でない斜面災害のリスクを別途算定する。

具体的に、４－６－５(2)において降雨量が極めて少ない時点に発生している斜面の崩壊は、降雨以外の誘因により発生したものと考えるのが自然である。降雨以外の誘因が明らかな場合には、その誘因に対しフラジリティカーブを作成すればよいが、一般には誘因が明らかでない場合が多い。また、４－６－５(1)で分類した斜面群の内、災害履歴がほとんど無い斜面群についても、斜面の崩壊と誘因との相関を明確にすることは困難である。これらの誘因との相関が無いデータ、あるいは災害履歴が少ないため誘因との相関を明確にできないデータについては、年平均崩壊率 r_0（%／年）を下式により算定する。

降雨を誘因とする斜面の崩壊率 r_R と、誘因との相関を明確にできない斜面の年平均崩壊率 r_0 の概念を図-4.13 に、また＜参考-4.11＞に算定事例を示す。

$$r_0 = \frac{\text{（降雨以外の誘因にする斜面の年平均崩壊回数）}}{\text{（全斜面数）}}$$

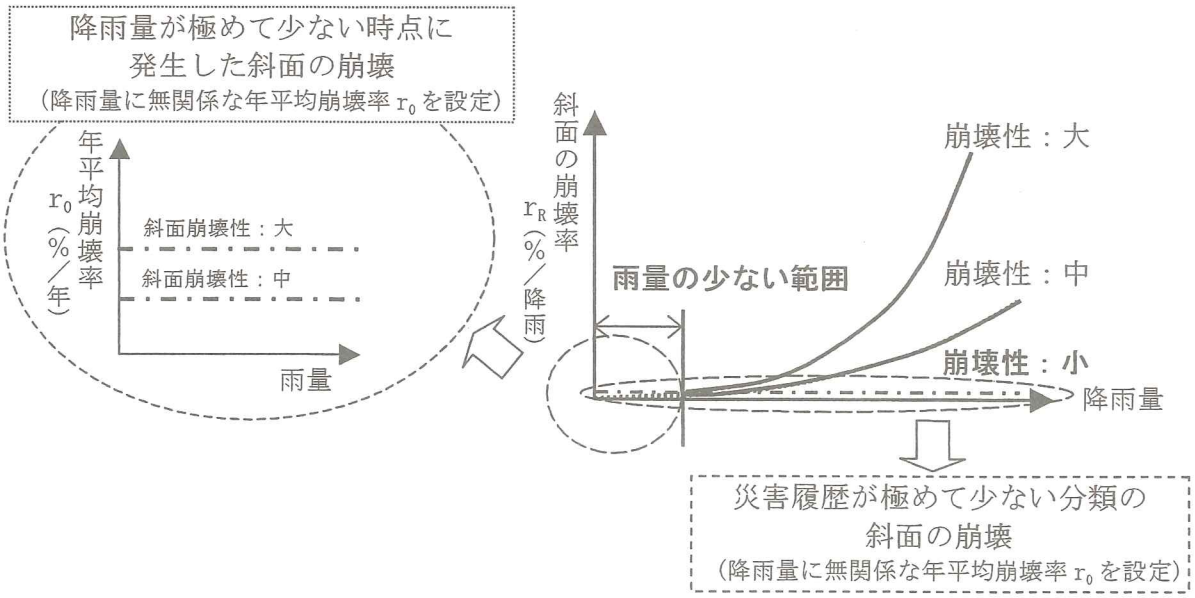


図-4.13 誘因との相関を明確にできない斜面の崩壊の年平均崩壊率 r_0 の概念

４－６－７　到達土量の算定

（１）斜面特性に応じた崩壊土量の推定

崩壊土量は、原則として現地調査により、個々の斜面の斜面特性に基づき推定する。

【解説】

降雨や地震等の誘因の大きさは、斜面の崩壊が発生するか否かには影響するが、個々の斜面の崩壊土量には必ずしも大きくは影響しないと考えられる。崩壊土量には、むしろ斜面の素因である斜面高さ、斜面延長、および斜面勾配等の斜面の規模や、斜面の各地層の強度特性、透水性、滞水性等といった、斜面の崩壊形状に関わる斜面特性が大きく影響すると考えられる。そこで、崩壊土量は、原則としてこれらを現地調査により確認し、工学的に推定することとする。

ただし、現地調査に基づく個々の斜面の崩壊土量の推定が困難な場合には、既存の災害履歴データを基に、崩壊土量を当該斜面の斜面特性により回帰分析して、斜面特性に基づく崩壊土量の推定式を作成する。

この推定式は、事例検討として、道路防災総点検記録に示される斜面特性の内、斜面高さによって回帰分析を行った結果では、斜面高さの増加と共に崩壊土量が加速度的に増大する下記の指数回帰式が、比較的適用性が良いようである。

$$V = 10^{(\alpha H + \beta)}$$

ここで、Ｖ　：崩壊土量
　　Ｈ　：斜面高さ
　　α、β　：回帰分析により決定する定数

（２）到達土量の算定

(1)で推定した斜面の崩壊土量に、待ち受け対策工の効果および道路路肩と斜面法尻の離間距離等を考慮して、到達土量を予測する。

【解説】

崩壊土量の内、道路へ到達し、道路機能に障害を及ぼす到達土量は、崩壊土量から待ち受け対策工のポケット土量、および道路の路肩と斜面の法尻との離間に堆積する土量等を控除して算定する。

また、道路状況により道路の斜面と反対側に土砂を残置したまま交通開放する場合がある。このような場合には、道路に到達した土量から残置土量を控除して復旧費用や復旧日数を算定する。

４－６－８　リスクの算定

リスクの算定は、以下の手順により斜面災害を予測した個々の斜面単位に行う。路線区間のリスクはこれを重ね合わせることにより算定する。

(a) 個々の斜面のリスク算定

a-1 誘因が明確な斜面災害の場合

誘因が明確な斜面災害の年平均被害額は、任意の年に予想される降雨の年発生確率と、その降雨の降雨強度に対応した崩壊率 r_R[%／降雨]、到達土量から算定される損失から算定する。

a-2 誘因が不明確な斜面災害の場合

誘因が不明確な斜面災害の年平均被害額は、斜面の崩壊率を年平均崩壊率 r_0[%／年]と、到達土量から算定される損失から算定する。

(b) 路線区間のリスク算定

路線区間の年平均損失は、(a)で求めた路線区間内の個々の斜面の年平均被害額を合計することで算定する。

【解説】

(a) 個々の斜面のリスク算定

降雨を誘因とした個別斜面の年平均被害額は、基本的に４－５－６に示した降雨・災害履歴法と同様下式で算定される。異なる点は、着目する単位が路線区間から個別の斜面になったことと、これに伴い、着目する斜面では崩壊土量が降雨量によらず一定であることから、被害額ｄが一定の値であることである。

$$R_R^j = \sum_{i=1}^{M} R_i^j = \sum_{i=1}^{M} p_{Ri} \times r_{Ri}^j \times d^j \quad \cdots\cdots \text{式-4.9}$$

ここに、R_R^j：斜面ｊの降雨を誘因とした災害の年平均被害額

R_i^j：斜面ｊの降雨ｉの年平均被害額

p_{Ri}：降雨ｉの年発生確率（＝１／N, N：降雨履歴の資料年数）

r_{Ri}^j：斜面ｊの降雨ｉの降雨強度に応じた崩壊率

d^j：斜面ｊの到達土量から算定される被害額

M：任意の年に発生する可能性がある降雨の数

（N年間に観測された降雨数）

誘因が不明確な斜面災害の年平均被害額は、年平均崩壊率 r_0（%／年）と到達土量から算定される損失 d_j から算定する。

$$R_0^j = r_0^j \times d^j \quad \cdots\cdots \text{式-4.10}$$

ここに、R_0^j：斜面ｊの降雨と無関係な災害の年平均被害額

r_0^j：斜面ｊの降雨と無関係な年平均崩壊率

d^j：斜面ｊの到達土量から算定される損失

着目する斜面ｊの降雨を誘因とした災害と無関係な災害を合わせた年平均被害額は下式となる。

$$R^j = R_R{}^j + R_0{}^j \quad \cdots\cdots \text{式-4.11}$$

ここに、R^j：斜面ｊの年平均被害額

(b)路線区間のリスク算定

路線区間の年平均被害額は、(a)で求めた路線区間内の個々の斜面の年平均被害額を合計し下式で算定できる。

$$R = \sum_{j=1}^{L} R^j = \sum_{j=1}^{L} \left(R_R{}^j + R_0{}^j \right) \quad \cdots\cdots \text{式-4.12}$$

ここに、Ｒ：路線区間の年平均被害額
Ｌ：路線区間に含まれる斜面数

４－６－９　イベントプロット

路線区間に対して、災害をイベントとしたイベントプロットと、降雨をイベントとしたイベントプロットを作成することができる。

【解説】

イベントプロットは、任意の年に想定される災害１回あたりの被害額の分布を表したものである。路線区間では、どの斜面が崩壊するかが不確定であり被害額は分布する。このため、災害１回あたりの被害額の分布をイベントプロットとして表すことが有効である。

イベントプロットには、以下の２通りの表し方がある。

(1) 災害をイベントとしたイベントプロット

斜面ごとに発生する災害をイベントとして、イベントプロットを行う。

個々の災害の年発生確率ｐは、降雨を誘因とするものと無関係なものとの合計として、下式で表される。

$$p^j = r_0{}^j + \sum_{i=1}^{M} p_{Ri} \times r_{Ri}{}^j \cdots\cdots \text{式-4.13}$$

ここに、p^j：斜面ｊの災害の年発生確率
$r_0{}^j$：斜面ｊの降雨と無関係な年平均崩壊率
p_{Ri}：降雨ｉの年発生確率
$r_{Ri}{}^j$：斜面ｊの降雨ｉの降雨強度に応じた崩壊率
Ｍ：任意の年に発生する可能性がある降雨の数

イベントプロットは、斜面ごとの想定被害額 d^j が大きい順に、式-4.3により損失の年超過確率を求め、その結果をプロットすることで求めることができる。

(2) 降雨をイベントとしたイベントプロット

降雨をイベントとしたイベントプロットの場合、イベントの年発生確率を降雨の年発生確率 p_{Ri} から算定する。また、その降雨発生下で予想される被害額を下式で算定しプロットすることで求めることができる。

$$D_i = \sum_{j=1}^{L} r_{Ri}^{\ j} \times d^j \cdots\cdots \text{式-4.14}$$

ここに、D_i：降雨ｉのときの路線区間の被害額

$r_{Ri}^{\ j}$：斜面ｊの降雨ｉの降雨強度に応じた崩壊率

d^j：斜面ｊの到達土量から算定される被害額

Ｌ：路線区間に含まれる斜面数

４－６－１０　リスクカーブ

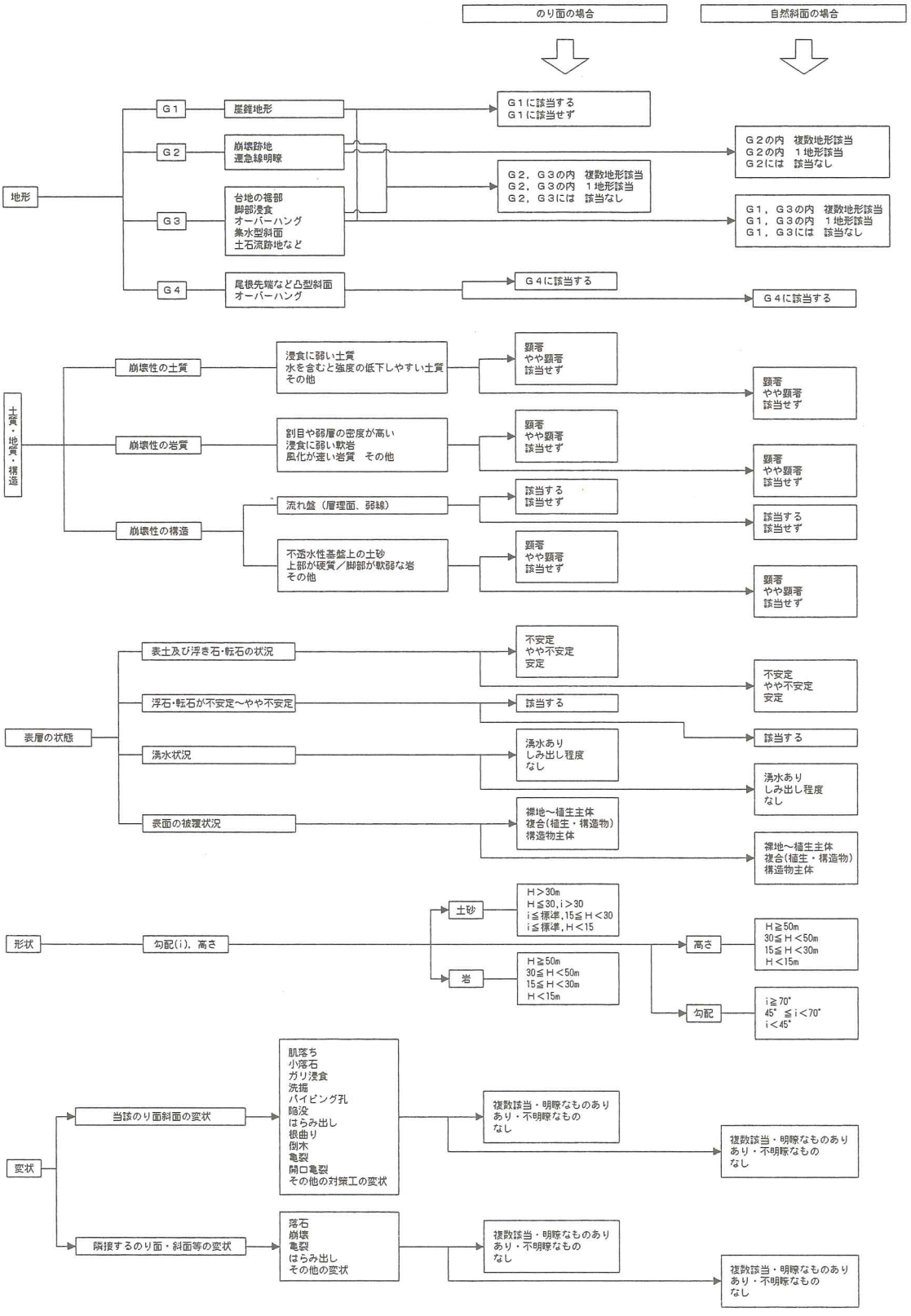
リスクカーブは、年間に複数個の災害（イベント）が発生する可能性を考慮し、各イベントの発生の全組み合わせに対して年間合計被害額を算定し、年間合計被害額の確率密度分布を評価して作成することができる。

【解説】

「４－５降雨・災害履歴分析法」と同様、災害をランダムに発生させるモンテカルロ法等を行って、路線区間全体の年間損失合計の確率密度分布を評価しリスクカーブを作成する。この際、７章に示す各種の不確定性を合わせて考慮することが望ましい。

＜参考-4.8＞　斜面特性の例

「平成８年度道路防災総点検要領〔豪雨・豪雪〕（(財)道路保全センター）の落石・崩壊の調査票では以下に示す斜面特性の調査が規定されている。



＜参考-4.9：数量化理論第Ⅱ類による分析例＞

対象区間の斜面数を全データ数（93斜面）とする。

収集した斜面特性を説明変数、斜面の崩壊の有無を目的変数とした分析を行い、斜面の崩壊しやすさを数量化したノーマライズドスコアを求める。そして個々の斜面の斜面特性に応じてノーマライズドスコアを集計した斜面スコアを求め、その大きさにより斜面の分類を行う。

なお、アイテム、カテゴリ等の数量化理論第Ⅱ類で用いる用語は、表-8で解説している。

① アイテム・カテゴリの選別・調整

表-1は、収集した斜面特性データの例であり、13アイテム･37カテゴリで構成される。ここで、各アイテムのカテゴリ分類ごとの崩壊斜面数に変化がない場合には適切な統計分類ができない。また、各アイテムのカテゴリに対する斜面の崩壊率（＝崩壊斜面数÷全斜面数）が、工学的に判断して矛盾している場合がある。これらの観点で、表-1に示すようにアイテム･カテゴリの選別、集約、あるいはアイテムの削除を行う。

アイテム･カテゴリ選別・調整した場合の崩壊率を表-2に示す。

② 数量化理論第Ⅱ類による分析

表-3は、①で選別・調整したアイテム･カテゴリを用いて数量化理論第Ⅱ類を適用した結果である。分析の結果、”2.崩壊性地形”ではノーマライズドスコアが工学的に判断して逆の傾向を示している。

このようなアイテムを削除して再度分析を行う必要がある。

再度、分析を行った結果を表-4に示す。ノーマライズドスコアは、いずれも工学的に判断して整合性が取れている。

また、スコアレンジの大きさによるアイテム順位は表-5となっており、”湧水状況”、”斜面勾配・高さ”が斜面の崩壊しやすさに影響する大きな要因となっていることが判る。

③ 斜面の崩壊しやすさに応じた斜面の分類

数量化理論第Ⅱ類では、各カテゴリの斜面の崩壊に対する影響度がノーマライズドスコアの大きさとして得られる。ここに、ノーマライズドスコアは全アイテム間で同一の重みを持つ尺度として正規化されており、対象斜面について全アイテムの該当カテゴリのスコアを合計した斜面スコアは、当該斜面の崩壊しやすさを表す総合的な指標となる。言い換えれば、斜面スコアは、崩壊しやすさに影響する斜面特性を数量化したものである。

そこで、斜面スコアの大きさにより、斜面を崩壊性大、中、小の３つに分類する。

検討対象区間の全斜面について斜面スコアを求め､斜面スコアの大きさを20階層に分割し、各階層ごとに求めた崩壊／無崩壊の度数分布、及び、斜面の崩壊率を表-6に示す。概ね、斜面スコアが小さい部分では斜面の崩壊が無く、斜面スコアが大きいほど斜面の崩壊率が大きくなる傾向が見て取れる。この結果から、ここでは表-7に示すように３つの斜面分類を考えることとした。

表-1　斜面特性データと崩壊率

アイテム・カテゴリ			崩壊無	崩壊	崩壊率(%)
1. 崖錘地形 TINORI1	該当せず	採用	65	18	21.687
	該当する		7	3	30.000
2. 崩壊性地形 TINORI3	該当なし	集約	6	0	0.000
	1地形該当		18	6	25.000
	複数地形該当		48	15	23.810
3. ｵｰﾊﾞｰﾊﾝｸﾞ等 TINORI6	該当せず	採用	41	9	18.000
	該当する		31	12	27.907
4. 崩壊性土質 DONORI1	該当せず	不採用	35	15	30.000
	やや顕著		28	6	17.647
	顕著		9	0	0.000
5. 崩壊性岩質 DONORI2	該当せず	不採用	4	2	33.333
	やや顕著		49	17	25.758
	顕著		19	2	9.524
6. 流れ盤 DONORI3	該当せず	採用	41	8	16.327
	該当する		31	13	29.545
7. 不透水性基盤等 DONORI4	該当せず	不採用	58	17	22.667
	やや顕著		11	4	26.667
	顕著		3	0	0.000
8. 表土・浮石・転石 HYNORI1	安定	不採用	34	12	26.087
	やや不安定		30	8	21.053
	不安定		8	1	11.111
9. 湧水状況 HYNORI3	なし	採用	24	2	7.692
	しみ出し程度		34	10	22.727
	湧水あり		14	9	39.130
10. 表面の被覆 HYNORI4	構造物主体	不採用	49	17	25.758
	複合		17	3	15.000
	裸地～植生主体		6	1	14.286
11. 勾配・高さ KENORI1	岩(H<15)	採用	36	5	12.195
	岩(15<=H<30)		18	5	21.739
	岩(30<=H<50)		8	4	33.333
	岩(50<=H)		10	7	41.176
12. 当該斜面の変状 HENORI1	なし	集約	31	13	29.545
	あり・不明瞭なもの		27	3	10.000
	複数該当・明瞭なものあり		14	5	26.316
13. 隣接斜面の変状 HENORI2	なし	不採用	13	7	35.000
	あり・不明瞭なもの		31	7	18.421
	複数該当・明瞭なものあり		28	7	20.000

度数分布

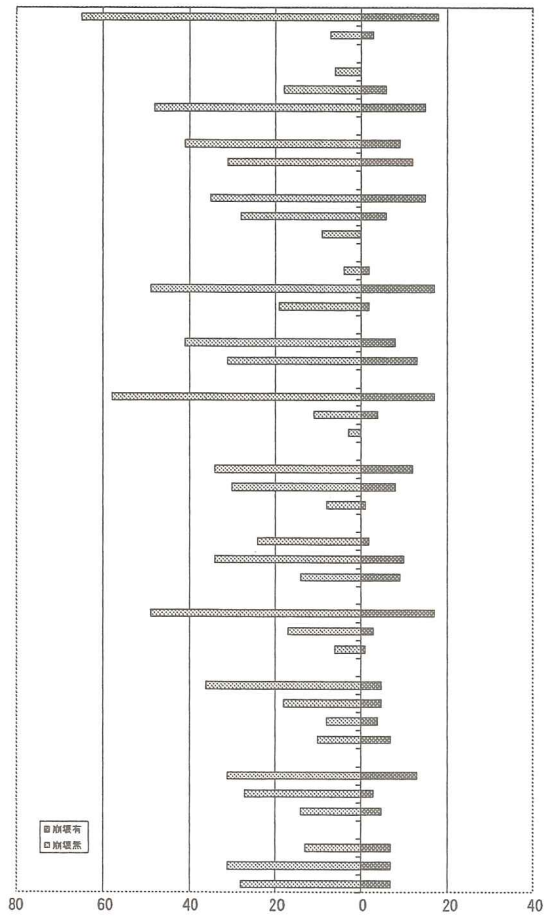


表-2 アイテム・カテゴリを選別・調整した崩壊率

アイテム・カテゴリ		崩壊無	崩壊	崩壊率(%)
1. 崖錘地形 TINORI1	該当せず	65	18	21.687
	該当する	7	3	30.000
2. 崩壊性地形 TINORI3	該当なし・1地形該当	24	6	20.000
	複数地形該当	48	15	23.810
3. ｵｰﾊﾞｰﾊﾝｸﾞ等 TINORI6	該当せず	41	9	18.000
	該当する	31	12	27.907
6. 流れ盤 DONORI3	該当せず	41	8	16.327
	該当する	31	13	29.545
9. 湧水状況 HYNORI3	なし	24	2	7.692
	しみ出し程度	34	10	22.727
	湧水あり	14	9	39.130
11. 勾配・高さ KENORI1	岩(H<15)	36	5	12.195
	岩(15<=H<30)	18	5	21.739
	岩(30<=H<50)	8	4	33.333
	岩(50<=H)	10	7	41.176
12. 当該斜面の変状 HENORI1	なし・あり・不明瞭なもの	58	16	21.622
	複数該当・明瞭なものあり	14	5	26.316

度数分布

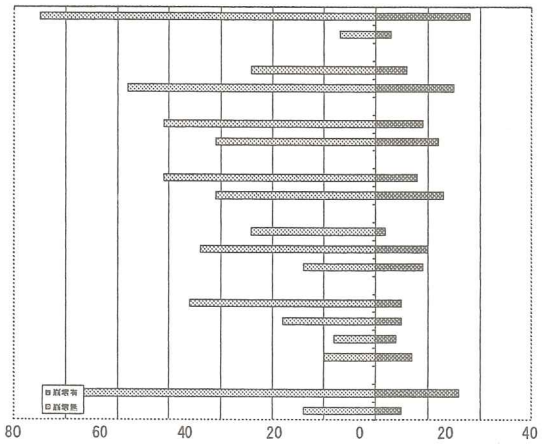


表-3　数量化理論第Ⅱ類による分析結果

アイテム・カテゴリ			数量化Ⅱ類　分析結果	
			ｻﾝﾌﾟﾙ数	ﾉｰﾏﾗｲｽﾞﾄﾞｽｺｱ
1. 崖錐地形 TINORI1	該当せず	採用	83	0.05542488
	該当する		10	-0.4600265
2. 崩壊性地形 TINORI3	該当なし・1地形該当	不採用	30	-0.281531365
	複数地形該当		63	0.134062555
3. ｵｰﾊﾞｰﾊﾝｸﾞ等 TINORI6	該当せず	採用	50	0.186235834
	該当する		43	-0.216553296
6. 流れ盤 DONORI3	該当せず	採用	49	0.165563006
	該当する		44	-0.184376984
9. 湧水状況 HYNORI3	なし	採用	26	0.73200744
	しみ出し程度		44	-0.11686081
	湧水あり		23	-0.60392686
11. 勾配・高さ KENORI1	岩(H<15)	採用	41	0.268754779
	岩(15<=H<30)		23	0.232078959
	岩(30<=H<50)		12	-0.477873681
	岩(50<=H)		17	-0.624839871
12. 当該斜面の変状 HENORI1	なし・あり・不明瞭なもの	採用	74	0.050145488
	複数該当・明瞭なものあり		19	-0.195303482

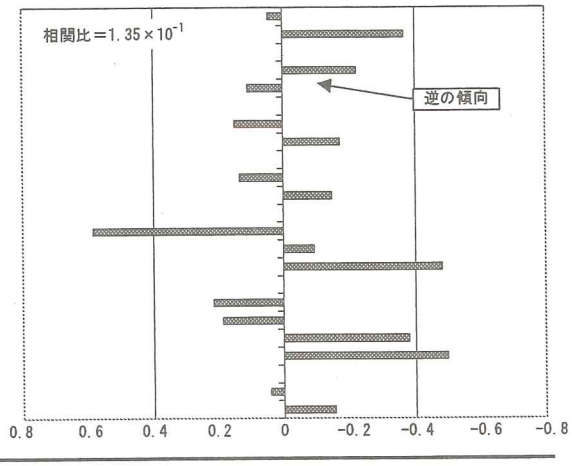


表-4　崩壊性地形のアイテムを削除した数量化理論第Ⅱ類による再分析結果

アイテム・カテゴリ		数量化Ⅱ類　分析結果		
		ｻﾝﾌﾟﾙ数	ﾉｰﾏﾗｲｽﾞﾄﾞｽｺｱ	ﾚﾝｼﾞ
1. 崖錐地形 TINORI1	該当せず	83	-0.045910959	
	該当する	10	0.381060961	0.42697
3. ｵｰﾊﾞｰﾊﾝｸﾞ等 TINORI6	該当せず	50	-0.203181029	
	該当する	43	0.236257011	0.43944
6. 流れ盤 DONORI3	該当せず	49	-0.175903574	
	該当する	44	0.195892616	0.37180
9. 湧水状況 HYNORI3	なし	26	-0.726689761	
	しみ出し程度	44	0.069127609	
	湧水あり	23	0.689231259	1.41592
11. 勾配・高さ KENORI1	岩(H<15)	41	-0.275798698	
	岩(15<=H<30)	23	-0.219282138	
	岩(30<=H<50)	12	0.471898522	
	岩(50<=H)	17	0.628732562	0.90453
12. 当該斜面の変状 HENORI1	なし・あり・不明瞭なもの	74	-0.043710123	
	複数該当・明瞭なものあり	19	0.170239427	0.21395

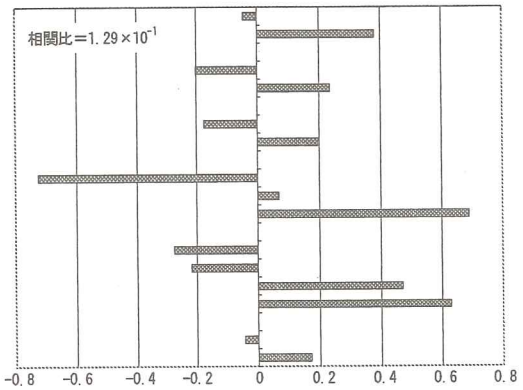


表-5　スコアレンジの大きさによるアイテム順位

スコア順位	アイテム	スコアレンジ
1	9. 湧水状況	1.42
2	11. 勾配・高さ	0.90
3	3. オーバハング等	0.44
4	1. 崖錐地形	0.43
5	6. 流れ盤	0.37
6	12. 当該斜面の変状	0.21

表-6　斜面スコアの分割区間ごとの崩壊率

	斜面スコア分類区間		崩壊無	崩壊	崩壊率(%)
崩壊性:小	-1.4712	-1.3146	5	0	0.00
	-1.3146	-1.1580	1	0	0.00
	-1.1580	-1.0014	2	1	33.33
	-1.0014	-0.8449	4	0	0.00
-0.7	-0.8449	-0.6883	4	0	0.00
	-0.6883	-0.5317	12	2	14.29
	-0.5317	-0.3751	1	1	50.00
	-0.3751	-0.2185	13	2	13.33
	-0.2185	-0.0619	2	1	33.33
崩壊性:中	-0.0619	0.0946	4	0	0.00
	0.0946	0.2512	4	1	20.00
	0.2512	0.4078	7	0	0.00
	0.4078	0.5644	0	1	100.00
	0.5644	0.7210	1	0	0.00
	0.7210	0.8776	2	2	50.00
1.0	0.8776	1.0342	0	0	1.03
	1.0342	1.1907	7	2	22.22
	1.1907	1.3473	0	5	100.00
崩壊性:大	1.3473	1.5039	1	2	66.67
	1.5039	1.6605	2	1	33.33
			72	21	

表-7　斜面分類の考え方

崩壊性	斜面スコア区分	斜面スコア区分の考え方
大	1.0 ～	崩壊件数が等しくなるように、2分割する。
中	-0.7 ～ 1.0	
小	～ -0.7	基本的に崩壊件数が0の範囲

表-8　数量化理論第Ⅱ類での用語の説明

用語	定義
アイテム	斜面特性
カテゴリ	各アイテムの分類項目
ノーマライズドスコア	数量化理論第Ⅱ類による分析結果で、ノーマライズドスコアが大きいほど斜面の崩壊が発生しやすい。ノーマライズドスコアは、全アイテム間で同一の重みをもつよう正規化された値である。
斜面スコア	対象斜面について、全アイテムの該当カテゴリのノーマライズドスコアを集計した値。斜面スコアは、当該斜面の崩壊のしやすさを表す総合的な指標となる。
スコアレンジ	各アイテムの最大ノーマライズドスコアと最小ノーマライズドスコアの差。レンジが大きいアイテムは、該当するカテゴリの差で斜面スコアに大きな差が出るため、斜面崩壊の有無に大きく影響するアイテムとみなせる。

＜参考-4.10：最尤法＞

最尤法は、推定されたモデルがデータを生み出す確率を最大化するようパラメータを決定する方法である。

全データの発生する確率(joint probability)は、データ同士が独立とみなせる場合、各要素の積として展開できる。

$$P[D_1, D_2, \ldots\ldots, D_n, X_1 = x_1, X_2 = x_2, \ldots\ldots\ldots, X_n = x_n, \theta]$$
$$= P[D_1, X_1 = x_1, \theta] * P[D_2, X_2 = x_2, \theta] * \ldots\ldots * P[D_n X_n = x_n, \theta]$$
$$= \prod_{i=1}^{n} P[D_i, X = x_i, \theta]$$

n：データ数

D_i：崩壊もしくは非崩壊

x_i：降雨量データ(mm)

θ：関数のパラメータ（未知数）

最尤法では、上記関数を尤度関数とし、それを最大化させるパラメータを求める。

推定するフラジリティカーブを累積対数正規関数とすると、各データの発生確率は以下のようになる。

$$P[D_i \mid X = x_i, C_m, \zeta] = \left\{ \phi\left(\frac{\ln x_i - \ln C_m}{\zeta}\right) \right\}^{q^i} \left\{ 1 - \phi\left(\frac{\ln x_i - \ln C_m}{\zeta}\right) \right\}^{1-q^i}$$

x_i：降雨量(mm)

q^i：　崩壊に関する２価関数

D_i＝崩壊のとき、$q^i = 1$

D_i＝非崩壊のとき、$q^i = 0$

C_m：対数正規分布の中央値（未知数）

ζ　：対数正規分布の対数標準偏差（未知数）

$\phi()$：標準正規分布の累積関数

従って、フラジリティカーブの尤度関数Ｌは、

$$L(x; C_m, \zeta) = \prod_{i=1}^{n} P[D_i \mid X = x_i, C_m, \zeta] = \prod_{i=1}^{n} \left\{ \phi\left(\frac{\ln x_i - \ln C_m}{\zeta}\right) \right\}^{q^i} \left\{ 1 - \phi\left(\frac{\ln x_i - \ln C_m}{\zeta}\right) \right\}^{1-q^i}$$

n：全データ数

となり、尤度関数を最大化させるパラメータを求めるには、各未知数によって偏微分した尤度方程式を解けばよい。

$$\frac{\partial L(x; C_m, \zeta)}{\partial C_m} = 0, \quad \frac{\partial L(x; C_m, \zeta)}{\partial \zeta} = 0$$

＜参考-4.11：フラジリティカーブの作成例＞

ある検討対象区間を対象に、フラジリティカーブの分布関数を対数正規分布とし、最尤法を適用してフラジリティカーブを作成した例を示す。

ここで、［崩壊性：小］に分類される斜面では、降雨による斜面の崩壊回数が極めて少ないため、降雨によるフラジリティカーブは作成せず、誘因が不明確な斜面の崩壊として扱い年平均崩壊率 r_0（%／年）を算定する。また、［崩壊性：中］［崩壊性：大］の斜面についても、降雨量が 50mm 以下で発生した斜面の崩壊は、誘因が不明確な斜面の崩壊として扱う。

(1)降雨を誘因とするフラジリティカーブの作成

崩壊性：中、小の斜面を対象に、50mm 以上の降雨量に対応する災害履歴に基づくフラジリティカーブの作成を行う。

降雨量を 50mm 区間ごとの階級に分割し、降雨階級ごとの斜面の崩壊率 r_R（%／降雨）を算定した結果を表-1 に示す。

表-1　崩壊率算定結果

降雨量（実効雨量）(mm)	崩壊性：中			崩壊性：大		
	崩壊無	崩壊	崩壊率 r_R	崩壊無	崩壊	崩壊率 r_R
50～100	11641	2	0.017	2750	0	0.000
100～150	3888	1	0.026	846	0	0.000
150～200	1429	1	0.070	332	1	0.300
200～250	575	0	0.000	129	2	1.527
250～300	122	0	0.000	26	0	0.000
300～350	104	0	0.000	23	1	4.167
350～400	51	1	1.923	12	0	0.000
400～450	0	0	0.000	0	0	0.000
450～450	0	0	0.000	0	0	0.000
500～	18	0	0.000	1	1	50.000
合計	17828	5		4119	5	

表-1 では、降雨量が大きくなるに従い概ね斜面の崩壊率が増大する傾向があるが、斜面の崩壊が無い降雨階級も存在している。方法１で対数正規分布のパラメータを決定するためには、このような斜面の崩壊が無い降雨階級がなくなるよう適切な降雨階級への見通しが必要となる。

一方、最尤法を適用する場合には、個々の降雨に対する崩壊斜面数と無崩壊斜面数をそのまま使用するため、降雨階級の検討・調整は不要である。

ここでは、個々の斜面のデータをそのまま用いる方法でフラジリティカーブを算定する。

最尤法で得られたパラメータを表-2 に、得られたフラジリティカーブを図-1 に示す。

表-2　最尤法で求めたパラメータ

	崩壊性：大	崩壊性：中
中央値：Cm	900	147800
対数標準偏差：ζ	0.6	2.1

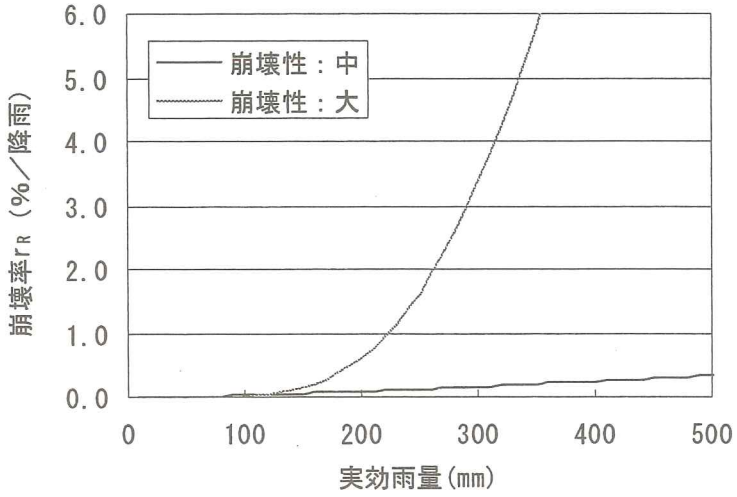


図-1　算定されたフラジリティカーブ

(2) 誘因が不明確な斜面の年平均崩壊率の算定

崩壊性：小の斜面および崩壊性：中大の斜面で 50mm 以下の降雨量に対応する災害履歴に基づく斜面の年平均崩壊率を算定する。

・崩壊性小の斜面の崩壊

20 年間に、全 12 斜面での斜面の崩壊が 1 件であった。

r_0＝（1/20）／12＝0.417　（%／年）

・崩壊性中の斜面で降雨量 50mm 以下の斜面の崩壊

20 年間に、全 53 斜面で降雨量 50mm 以下で発生した斜面の崩壊が 5 件であった。

r_0＝（5/20）／53＝0.472　（%／年）

・崩壊性大の斜面で降雨量 50mm 以下の斜面の崩壊

20 年間に、全 14 斜面で降雨量 50mm 以下で発生した斜面の崩壊が 1 件であった。

r_0＝（1/20）／14＝0.357　（%／年）

ここで、崩壊性：中と大の斜面における降雨量 50mm 以下の年平均崩壊率が逆転しているが（崩壊性：大の方が崩壊率が小さい）これは、降雨量 50mm 以下での斜面の崩壊データ数が、統計分析する上で不十分であることが原因と考えられる。したがって、ここでは崩壊性：中と大は併せて以下のように評価することとする。

・崩壊性：大と中の降雨量 50mm 以下での斜面の崩壊

20 年間に、全 67 斜面での実効雨量強度 50mm 以下の崩壊が 6 件であった。

r_0＝（6/20）／67＝0.448　（%／年）

＜参考文献＞

1) (財)道路保全技術センター：平成 8 年度道路防災総点検要領〔豪雨・豪雪〕
2) 建設省河川局砂防部傾斜地保全課, 建設省土木研究所砂防部急傾斜地崩壊研究室：がけ崩れ災害の実態, 土木研究所資料第 3651 号, ISSN 0386-5878, 平成 11 年 7 月
3) 例えば、小林龍一：数量化理論入門, 日科技連, 1981. 6
4) 例えば、中村孝明他：統計手法による地震時斜面崩壊確率に関する研究, 土木学会論文集 No. 570／Ⅰ-40, 73-82, 1997. 7

５章　道路斜面防災対策の費用便益分析

５―１　道路斜面防災対策の費用便益分析の方法

５－１－１　基本的な考え方

道路斜面防災対策による年間平均損失額の変化から、道路斜面防災対策の便益を計算することにより、対策の費用便益分析を行うことができる。

【解説】

道路斜面防災対策を行うことにより、年間平均損失額は減少すると考えられる。ここで、減少の大きさを道路斜面防災対策の便益と考えることが可能で、対策の費用との比較により、費用便益分析が可能となる。

基本的に、道路斜面防災対策の費用便益分析としては、[便益]－[費用] により考える。

５－１－２　適用範囲

本章で扱う費用便益分析は、道路に関連する被害が主となる斜面災害が及ぼすリスクを対象に、道路斜面防災対策の便益と費用を対象とする。

【解説】

本章で扱う費用便益分析は、道路に関連する被害が主となる斜面災害のリスク低減を、道路斜面防災対策の便益の対象とする。

道路を越えて、民間の財産に影響が及ぶような大規模な斜面災害の場合は、「費用便益マニュアル」（国土交通省河川局砂防課）等に、評価項目に応じて評価方法が規定されているので、これらに準じて災害が発生した場合の損失を評価する必要がある。

また、斜面災害のリスクを対象としているので、防災バイパス整備のように斜面災害防止以外の波及効果がある場合には、「道路投資の評価に関わる指針（案）」等を使用し検討する必要がある。

５－１－３　対象期間

費用便益分析の対象期間は、対策の整備期間＋４０年間とする。なお、信頼性の保証期間として耐用年数が定められた工法の場合には、便益の対象期間を耐用年数とする必要がある。社会的割引率は４％とする。

【解説】

費用便益分析の対象期間は、「道路投資の評価に関する指針（案）」に準じ、対策の整備期間＋４０年間とし、社会的割引率４％とする。これを用いて、現在価値算定を行う。長期の費用、便益を過去からさかのぼって分析する必要がある場合には、同様の手法を用いて過去時点の現在価値算定を行うことができる。この場合、対策工法は、老朽化を考慮して現在価値算定する必要がある。

なお、信頼性の保証期間として耐用年数が定められた工法の場合には、便益の対象期間を耐用年数とする必要がある。

５－１－４　費用便益分析の手順

費用便益分析は、以下の手順によって実施する。

① 対策にかかる年次別費用を求める。

② 対策による年平均損失額の減少額を年次別便益として算出する。

③ 現在価値算定を実施して、[便益]－[費用]を算出する。

【解説】

費用便益分析は、道路斜面防災対策に関して、年次別に対策の費用と便益を求め、現在価値算定したうえで[便益]－[費用]を算出する。便益については、年平均のリスク低減量を年次別の便益とする。

５－１－５　便益の考え方

道路斜面防災対策による便益は、対策前後のリスク（年平均被害額）の低減量の年次別便益を現在価値算定して算出する。

【解説】

(1) 対策の効果

対策の実施により、災害の発生確率・災害の被害額は、双方同時、または、いずれかが減少すると考えられ、このことによってリスクは減少する。ここで、リスク低減の大きさは、対策の便益と考えることができる。

このため、対策の便益を求めるためには、対策前後の年平均損失額を年次別便益として算定する必要がある。

対策によって得られる年次別便益は、対策前後を比較したリスクカーブでは、面積の減少量（対策前後における年平均損失額の減少量）として表現される。

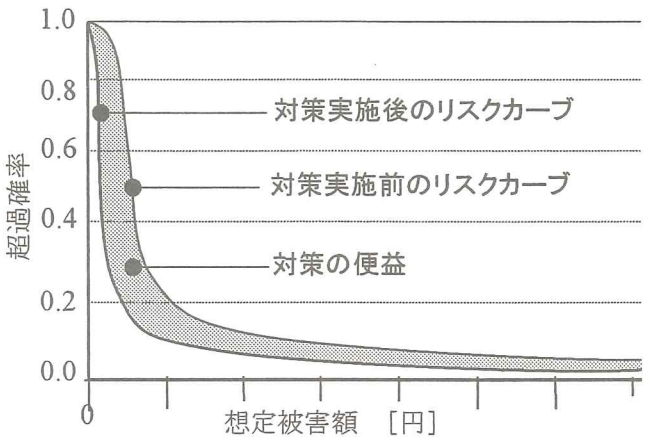


図-5.2 リスクカーブと対策の効果

(2) 道路斜面防災対策の種類

対策としては、通行規制・待ち受け対策工・発生源対策工・バイパス整備が考えられる。

① 待ち受け斜面対策工　：対策の実施により、複数の崩壊形態による損失額を低減できるため、全ての損失項目に対して低減効果が期待できる。しかし、大きな到達エネルギーの崩壊形態には効果が得られない。

② 発生源対策工法　：対策された崩壊形態の損失額の発生確率を低減できるため、全ての損失項目に対して低減効果が期待できる。

③ 通行規制　：人身損失の低減効果があるが、迂回損失、救急医療損失が間接損失として発生する。

④ バイパス整備　：バイパスにより廃道となる区間の持つリスクは消滅する。よって、対策実施後のリスクは、バイパス区間のリスクとなる。多くの場合、リスクのあるバイパス整備は行われないため、バイパス整備によって、リスクは消滅すると考えられる。

表-5.1 損失・対策の分類

経済的損失区分	被害者	対策の分類			
		待ち受け対策	発生源対策	通行規制	バイパス整備
D1:人身損失	道路利用者	○	○	○	◎
D2:復旧費用	納税者	○	○	×	◎
D3:迂回損失	道路利用者	○	○	×	◎
D4:救急医療損失	近隣住民	○	○	×	◎

◎:損失消滅　;バイパス整備事業では、旧道のリスクは消滅する
○:損失減少　;リスクが低減する
×:コスト増加　;通行規制による経済的損失はコストとして扱う

５－１－６　費用の考え方

道路斜面防災対策の費用として、以下の項目を年次別費用として算定する。
① 対策整備費用
② 計画費用・設計費用
③ 維持管理費

【解説】

道路斜面防災対策の費用として、対策整備費用、計画費用・設計費用、維持管理費を対象期間にわたり年次別費用として算定する。

なお、維持管理費については、対策により低減することもあるので注意が必要である。

５―２　道路斜面対策の便益と費用の算定

５－２－１　待ち受け対策工法

待ち受け対策工法による便益は、待ち受け対策工法が対応可能な規模までの斜面災害の被害が防止されることによる年平均損失の低減量を算定する。

待ち受け対策工法の費用は、その計画、設計、整備、維持管理の費用である。

【解説】

待ち受け対策工法の設計手法は工法ごとに異なるが、ハザードに対して対応可能かを照査するためには、そのハザードを設計外力として実際に設計を行って判定する必要がある。

斜面に複数の崩壊形態がある場合には、崩壊形態ごとに設計を行い、対応可能な崩壊形態と対応不可能な崩壊形態に分類し、対応可能な崩壊形態のリスクの大きさだけリスクが低減する。これにより、対策後のリスクカーブが変形するので、その変形量、すなわち年平均損失額の低減量を待ち受け対策工法の便益とする。

費用は、対策工の計画、設計、整備、維持管理の費用であり、便益との差を求めることで費用便益分析することができる。

待ち受け対策工法の場合は、被害額の小さい崩壊形態に有効なため、図-5.3 に示すようにリスクカーブの上部の変形が大きい。

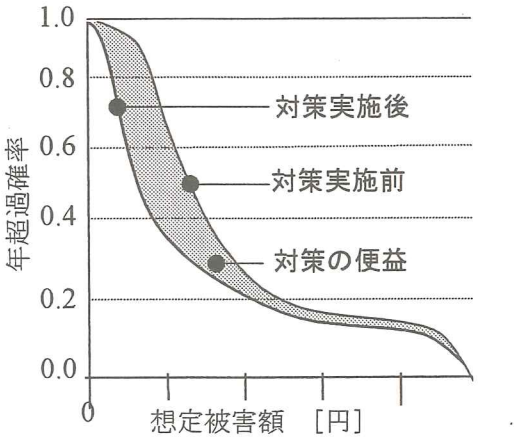


図-5.3 待ち受け対策工法の評価イメージ

５－２－２　発生源対策工法

発生源対策工法による便益は、発生源対策工によって、対象とする斜面災害の発生が防止されることによる年平均損失の低減量を算定する。
発生源対策工法の費用は、その計画、設計、整備、維持管理の費用である。

【解説】

発生源対策工法の便益は、対策が対象とした斜面災害が防止されることにより、その発生源のリスクが消滅し、対策後のリスクカーブが変形するので、その変形量、すなわち年平均損失額の低減量を待ち受け対策工法の便益とする。対策工法にかかる費用が、対策の費用であり、便益との差を求めることで費用便益分析することができる。

発生源対策工法は、被害額の大きい崩壊形態に用いられることが多いため、図-5.4 のようにリスクカーブの下部の変形が大きい。

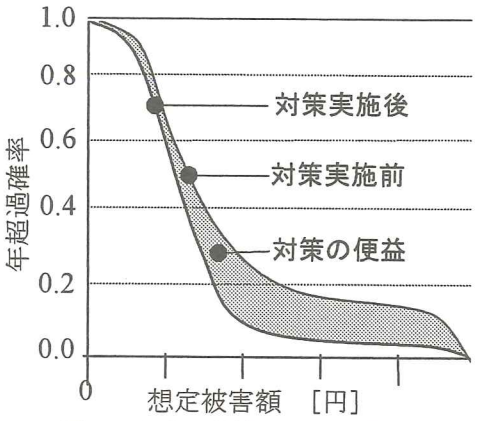


図-5.4 発生源対策工法の評価イメージ

５－２－３　事前通行規制

事前通行規制の便益は、規制基準雨量に対する事前通行規制を実施することで回避できる人身損失から、事前通行規制により発生する迂回損失・救急医療損失を差し引いたもの算定する。
事前通行規制の費用は、設備費・管理費の費用とする。

【解説】

事前通行規制を行うことにより、人身損失の回避することができるが、斜面災害が発生しないの通行規制を行えば、迂回損失・救急医療損失が増加することになる。そこで、事前通行規制の便益は、規制基準雨量に対する事前通行規制を実施することで回避できる人身損失から、事前通行規制により発生する迂回損失・救急医療損失を差し引いたもの算定する。

事前通行規制による迂回損失・救急医療損失は、本マニュアル ４－４ で扱った災害による交通遮断の場合と同じであるが、交通遮断日数：T [日]を、年間の通行規制延べ日数：T' [日] と置き換える必要がある。算出に用いる事前通行規制の延べ時間（延べ日数）は水門統計により推定してよい。ただし、事前通行規制区間において、現在の規制雨量による分析を実施する場合には、事前通行規制の延べ時間（延べ日数）の実績値を用いてよい。

事前通行規制の費用は、実際の事前通行規制の費用を用いて、設備費・管理費などの直接経費を加えて求めることとした。また、管理に携わった人員の人件費・労務費も、費用として計上することとした。

５－２－４　バイパス整備事業

バイパス整備の便益は、旧道部分のリスクが全て消滅すると考え、旧道のリスクを便益とする。なお、バイパスにリスクが発生する場合には、その分のリスクを便益から差し引く。

バイパス整備の費用は、その計画、設計、整備、維持管理の費用である。

【解説】

バイパス整備によって、旧道部分のリスクが全て消滅すると考えることができる。このリスクの大きさを便益と考えてよい。

ここで、バイパス整備後のリスクの大きさはバイパスのリスクの大きさとなるが、新設されるバイパスにリスクはほとんどないと考えられる場合、旧道のリスクの大きさをバイパス整備の便益と考えてよい。

バイパス事業の場合は、斜面災害の防止効果以外にも、交通ネットワークに影響を与え、波及効果があるため、「道路投資の評価に関わる指針」（案）に基づく総合評価を行う必要がある。

第６章　リスク分析に基づくマネジメント支援技術

６－１　リスクマネジメント支援の基本的考え方

６－１－１　説明支援

リスクカーブの形状により、対象路線区間（或いは斜面）の抱えているリスクの大きさ、程度、特性を提示することができる。また、対策によりリスクがどのように軽減するかをリスクカーブの変形により、わかりやすく明示することができる。

【解説】

道路斜面防災対策のアカウンタビリティを向上させるには、現時点で路線区間（或いは斜面）が抱えているリスクを示すとともに、対策による効果を明示する必要がある。ハザード予測・リスク分析により算出したリスクカーブは、その形状から路線区間（或いは斜面）の抱えているリスクの大きさ、程度、特性を知ることができる。例えば、図-6.１のＢルートの場合は、軽微な損害は起こりやすが、大規模な損害は起こりにくいと想定されるので、費用のかかる対策工でなく、日常の道路管理で対応することが望ましいと考えられる。反対に、Ｃルートの場合は、普段は損害が起きないが、まれに大きな損害が起きると想定されるので、その斜面を対象とした斜面対策工を行うこと望ましいと考えられる。このように、リスクカーブの形状からも、最適な対策をわかりやすく説明することが可能となる。

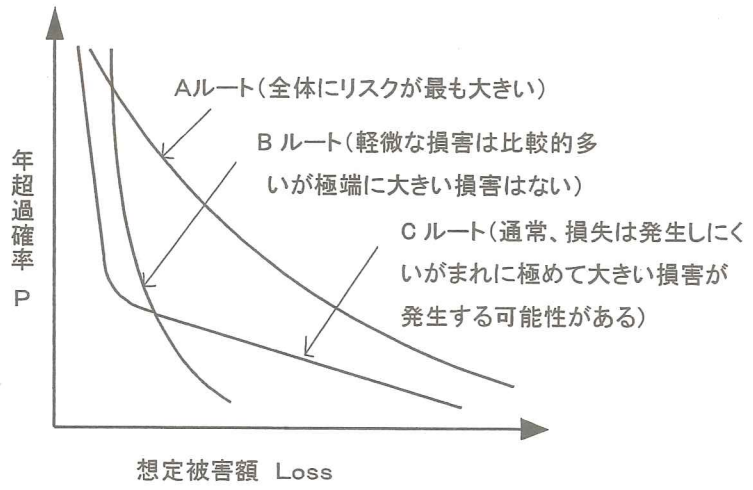


図-6.１　リスクカーブとリスクの特性

また、通行規制・斜面対策工・バイパス整備等の対策の実施等によりリスクカーブは変形するので、その変形量（リスクの低減量）で対策の効果（便益）を明示できる。（図-6.２）。例えば、「現時点のリスクは、リスクカーブにより、何年に一回、いくら程度の社会的損失が生じる可能性あり、１年間の想定平均被害額はいくらであるが、対策を講じることにより、１年間の想定平均被害額はいくら減少する。」という説明が可能となる。

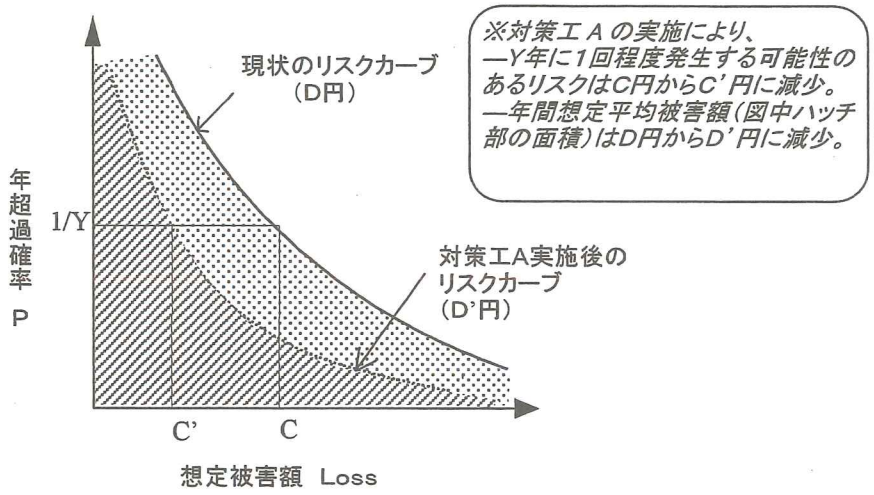


図-6.2　対策工の効果とリスクカーブ

６－１－２　施策・意志決定支援

リスクカーブを利用することにより、斜面災害に対する安全性・信頼性を考慮した優先対策箇所の決定や各種防災対策の合理的な選定を行うことができる。また、安全性・信頼性の目標水準を設定することができれば、目標水準を満たす対策を合理的に選定することもできる。

【解説】

斜面災害に対する安全性や信頼性を高めるには防災対策を行う必要があるが、斜面災害を完全になくすことができない以上、限られた費用のなかで、公平的かつ効果的に防災対策を実施していく必要がある。

優先対策箇所を決めるためには、まず、安全性あるいは信頼性からみた各路線のリスクカーブを策定し、現状のリスクのレベルを算出する必要がある。例えば、安全性を確保するためには、人身損失（Ｄ１）に着目したリスクカーブを策定し、各対象路線区間のリスクを比較し、リスクの大きいところから実施するのが公平であると考えられる。同じように、信頼性を確保するためには、通行止めによる二次損失（Ｄ３，Ｄ４）に着目したリスクカーブを策定し、リスクの大きいところから優先的に防災対策を実施することが公平性に適っている（図-6.3）。

対策箇所を決定したあとは、実施可能な各種防災対策を検討し、それぞれ防災対策が実施された場合のリスクカーブを策定してリスクの低減量（防災対策の便益）を求め、費用便益効果の高い防災対策を選定することにより効率性な防災対策を実施することができる。

防災対策をどこまで実施するか（目標水準）について、社会的合意、効率性、公平性等から総合的に判断して道路管理者が策定することができれば、より合理的な対策を効率的に選定することができる。

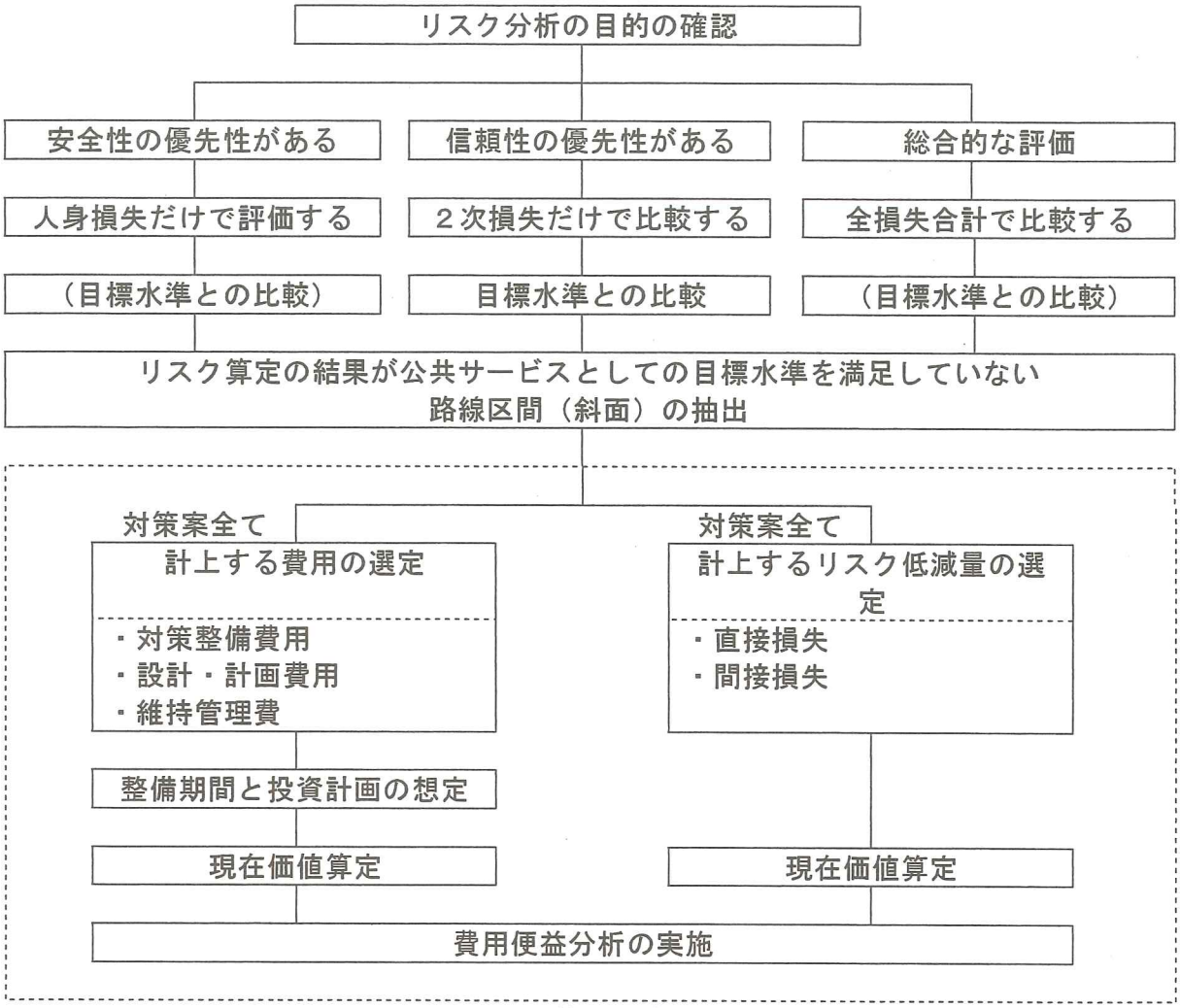


図-6.3　対策の選定フロー

例として図-6.4にリスクカーブを用いた対策の選定方法を示す。各種防災対策によりリスクカーブは変形し、残存リスクは減少する。費用便益の差からは対策Ｂがもっとも効果があると考えられる。

仮に目標水準が定められれば、対策Ｂは費用と便益の差が一番大きいが、依然水準を満たしていない。対策Ａ、対策Ｃは、ともに水準を満たすが、対策Ａの方が、費用と便益の差が大きいので、この場合は対策Ａを選定することが、目標水準と費用便益効果から照らし合わせ、合理的であることになる。

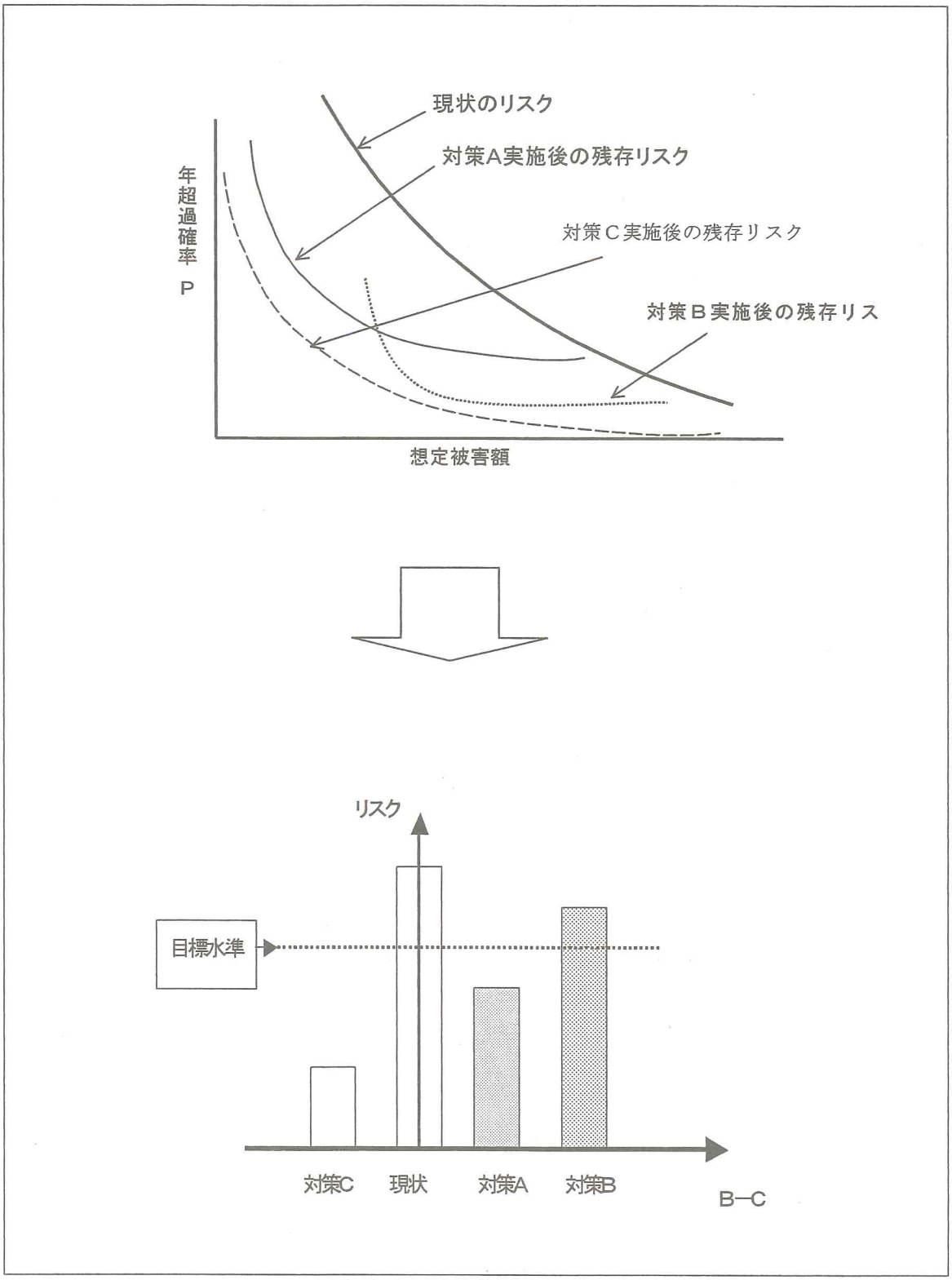


図-6.4　対策選定のイメージ

６－２　防災対策の評価

６－２－１　安全性の確保

道路斜面災害に対する安全性の確保は以下の手順で検討することができる。
①現状の人身損失の算定による優先対策箇所の選定
②複数の対策案によるリスクの算定
③対策の選定

【解説】

（１）現状の人身損失の算定による優先対策箇所の選定

現状で路線区間（或いは斜面）が抱えている年平均の人身損失は、人身損失に着目したリスクカーブを作成し、リスクカーブに囲まれる面積で表すことができる。すべての路線区間（或いは斜面）について、人身損失を防災対策によりゼロにすることが望ましいが、実際には不可能である。そこで、人身損失のリスクが高い斜面から順に対策を実施するのが、公平な安全性の確保となる。複数の路線区間（或いは斜面）間を検討する場合には、図-6.5のように路線区間（或いは斜面）間の人身損失のリスクを比較し、リスクの高いところ（路線Ｂ）から優先して対策を実施することが考えられる。

なお、どこまで対策により人身損失のリスクを低減するか（残存リスクをどこまでにするか：目標水準）を定めることができれば、さらに的確に、優先対策箇所の選定や防災対策案をさらに的確に行うことができる。目標水準については、道路管理者が社会的合意、経済性、公平性等を総合的に判断して策定することがのぞましい。

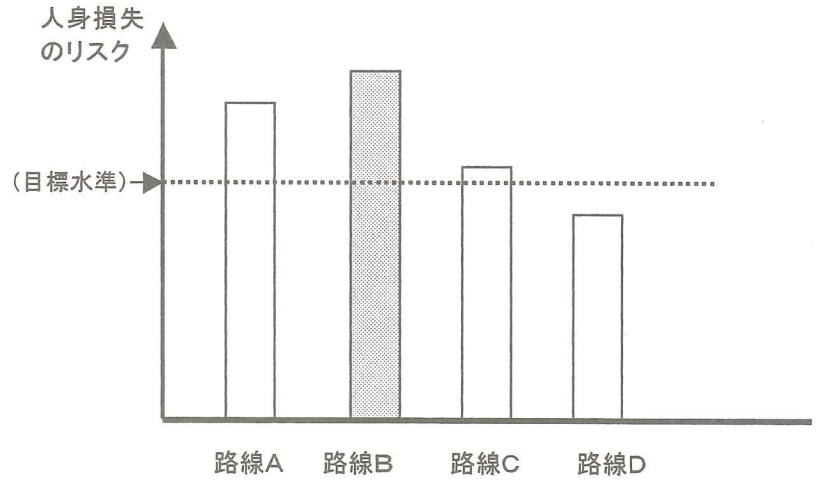


図-6.5　路線ごとの人身損失の比較

（２）複数の対策案によるリスクの算定

選定した路線区間（或いは斜面）対し、安全性を確保するためには複数の防災対策が考えられる。対策の選定にあたっては、対策の費用と便益を計算する必要がある。便益については、Ｄ１からＤ４を足したトータルリスクを、費用については、対策工事費用・維持管理費用等の合計を現在価値にして算出する。

対策の便益はリスクカーブの変形量から算出することができる。例えば、図-6.6のよう

なになった場合、網掛け部分は待ち受け対策工のリスク低減量を現しており、バイパスの整備が一番リスクの低減量が大きく、崩壊モニタリングの導入はリスクの低減量が少ない対策となっていることがわかる。

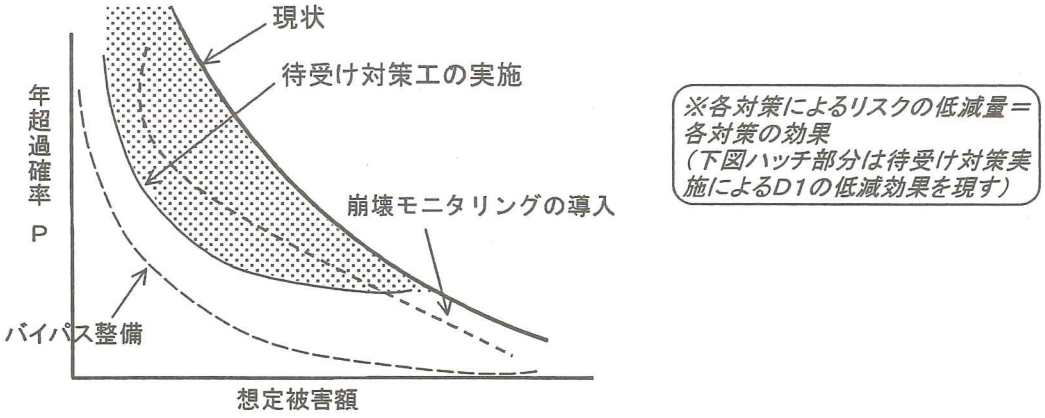


図-6.6　人身損失に着目したリスクカーブ

（4）対策の選定

それぞれの対策の便益と費用の差（Ｂ－Ｃ）を比較することにより、効率的な対策の選定を行うことができる。図-6.7に各種防災対策のＢ－Ｃを例示する。この例では、便益と費用の差が一番多いモニタリングがもっとも効率的な対策案となる。

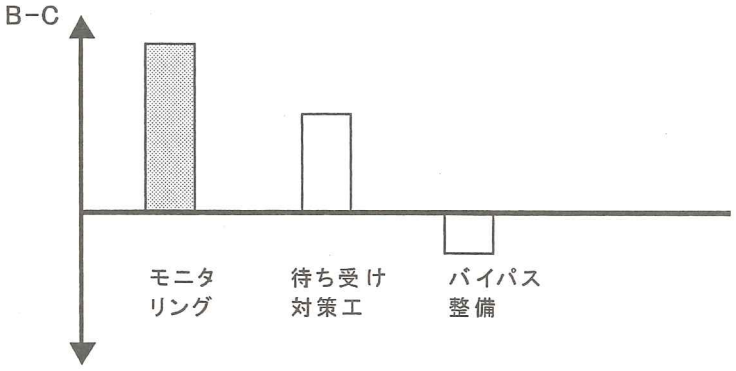


図-6.7　複数対策案の費用便益の比較

もし、道路管理者が目標水準を定めた場合には、目標水準と比較して対策を選定することもできる。目標水準の設定方法は、本マニュアルの範囲外であるが、道路管理者が、目標水準として、年間の死者数を何人以下、つまり斜面災害による人身損失をどの程度までに抑えるという目標水準を設定した場合を想定する。図-6.8に各種防災対策後の残存リスクを例示する。現状の人身損失は目標水準を超過しており、Ｂ－Ｃの一番大きいモニタリングを導入しても依然水準を満たしていない。待ち受け対策工、バイパス整備は、ともに水準を満たすが、待ち受け対策工の方が、Ｂ－Ｃが大きいので、この場合は待ち受け対策工を選定することが、目標水準を照らし合わせと、合理的であることになる。

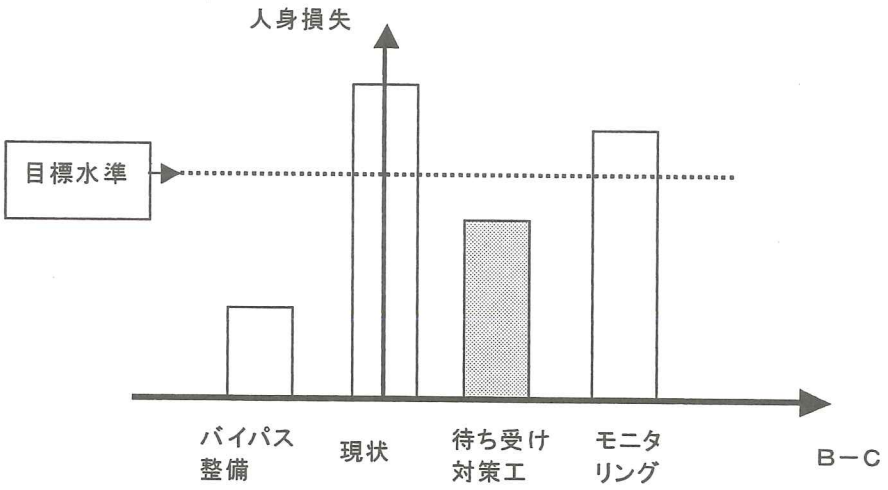


図-6.8　複数対策案と目標水準

６－２－２　信頼性の向上

道路斜面災害に対する信頼性の向上は以下の手順で検討することができる。
①信頼性目標水準の選定
②現状の通行止めにより社会損失の算定と優先対策箇所の選定
③複数の対策案によるリスクの算定
④対策の選定

【解説】

（１）信頼性目標水準の選定

斜面災害や事前通行規制による通行止めは、道路利用者が直接不利益を被るだけでなく、周辺地域の産業や、地域住民の緊急医療サービス等に支障をきたすこともある。道路の信頼性を向上させるためには通行止め時間は少ない方が良いが、限られた財源のなかで、すべての斜面を完全に対策することはできない。どの程度の信頼性を道路に持たせればよいか（信頼性目標水準）は、その道路の交通量、迂回路の有無等、重要性によって変わってくる。目標水準の設定方法は、本マニュアルの範囲外であるが、道路管理者が目標を設定すれば本マニュアルにより効率的な対策を選定することができる。本マニュアルでは、道路管理者が、許容目標水準として、年間の通行可能日数を何日以上、つまり通行止めに伴う損失額をいくらに抑えるという信頼性目標水準を設定した場合を想定する。

（２）現状の通行止めにより社会損失の算定と優先対策箇所の選定

現状で路線区間（或いは斜面）が抱えている年間の通行止めによる損失額は、通行止めにより社会損失（Ｄ３＋Ｄ４）に着目したリスクカーブを作成し、リスクカーブに囲まれる面積で表すことができる。複数の路線区間（或いは斜面）間を検討する場合には、図-6.9のように路線区間（或いは斜面）間の通行止めにより社会損失を比較し、損失の高いところ（路線Ｂ）から優先して対策を実施することが考えられる。

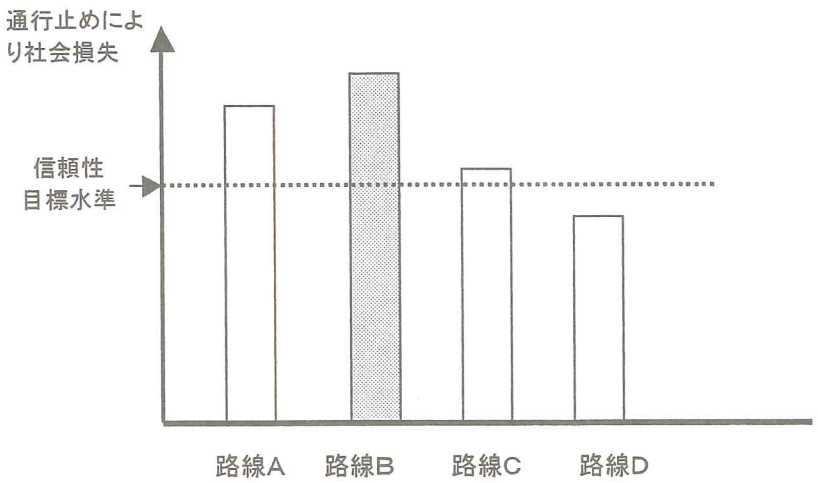


図-6.9　路線ごとの通行止めの社会損失と信頼性目標水準

（3）複数の対策案によるリスクの算定

６－２－１（２）と同様に、対策の費用と便益を計算する。

（4）対策の選定

それぞれの防災対策実施後に残存するリスクと信頼性目標水準と比較することにより、効率的な対策の選定を行うことができる。図-6.10 に許容目標水準と各種防災対策後のリスクを例示する。現状の通行止めによる社会損失は信頼性目標水準を超過しており、Ｂ－Ｃの一番大きい待ち受け対策工を導入しても依然水準を満たしていない。発生源対策工、バイパス整備は、ともに水準を満たすが、発生源対策工の方が、Ｂ－Ｃが大きいので、この場合は発生源対策工を選定することが、信頼性目標水準を照らし合わせと、合理的であることになる。

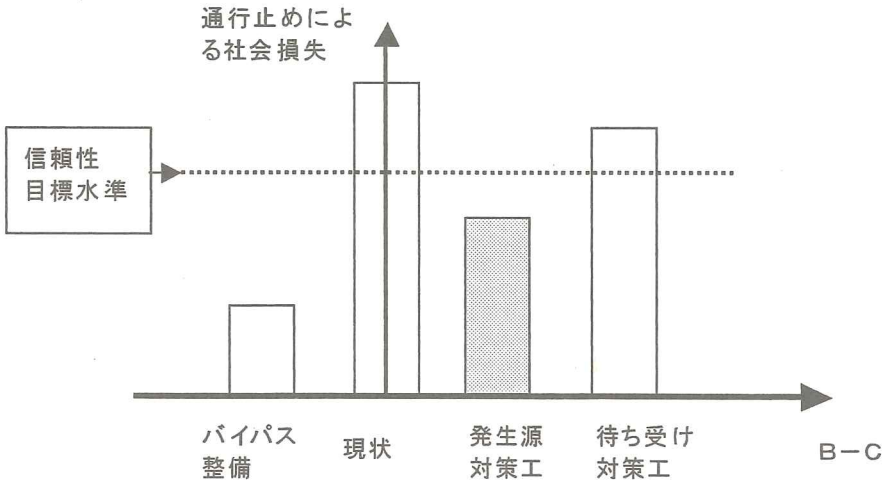


図 6.10　複数対策案と信頼性目標水準

＜参考-6.1＞　複数の斜面における対策の選定方法

対象の路線区間に複数の要対策斜面が点在する場合には、区間の信頼性の目標水準を満足するために、複数の対策案を検討することになる。例として、以下の４つの案における選定作業を示す。

①対象区間を全線バイパスする案
②斜面対策工を実施せず部分的にバイパスする案
③バイパスはせず、斜面対策工だけを実施する案
④バイパス・斜面対策工併用案

対策選定の作業フローを以下の図の通りである。

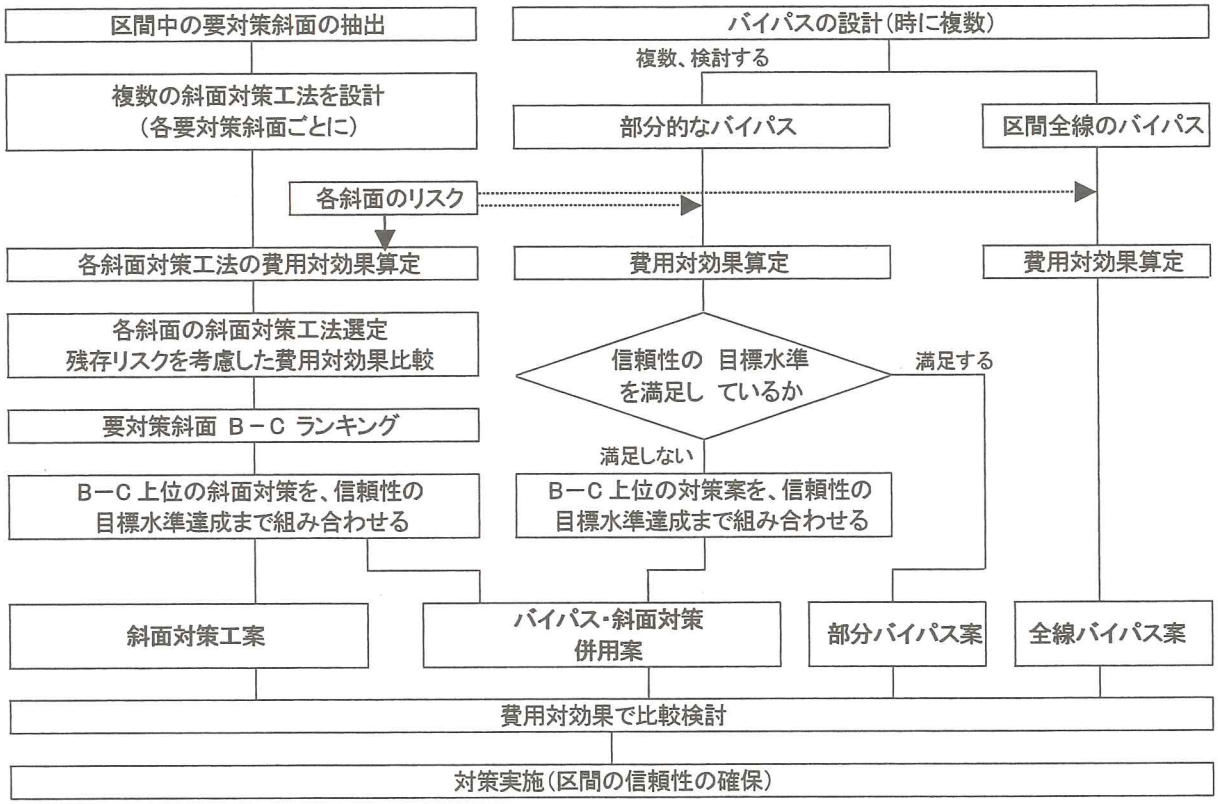


図　路線信頼性向上のための対策選定フロー例

６－３　事前通行規制の評価

６－３－１　効率性の向上

リスクが最小になるような規制雨量や雨量指標を検討することにより、事前通行規制を効率的に実施するための参考とすることができる。

【解説】

事前通行規制は規制雨量を低くとると、年間の通行規制時間が長くなり、迂回などの経済的損失が大きくなるが、災害の捕捉率も上がり、想定される人身損失の低減も大きくなる。逆に、規制雨量を高くとると迂回等による経済損失が少なくなる代わりに人身損失の低減が少なくなる。そこで、想定される人身損失と経済損失を合わせたリスクの合計が最小となるように規制雨量を検討することにより、事前通行規制を効率的に実施することができる（図-6.11）。

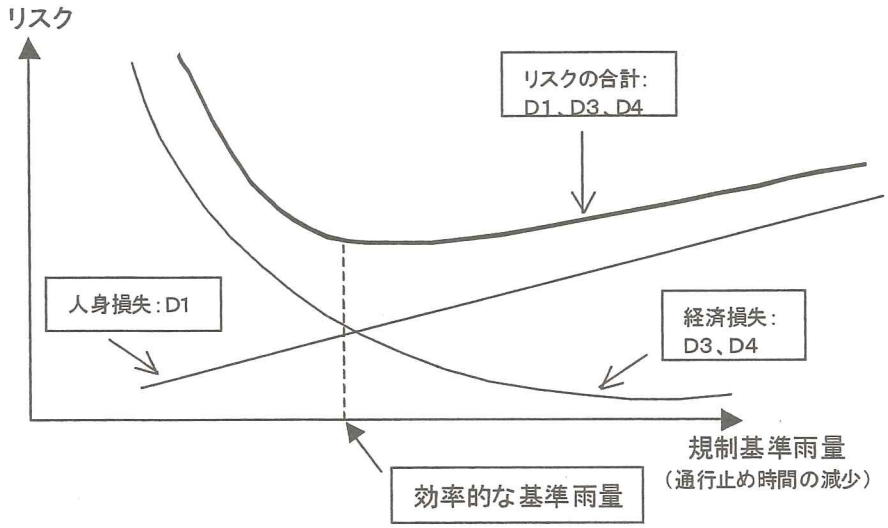


図-6.11　損失と便益にからみた事前通行規制の基準雨量

防災対策実施による基準雨量の緩和についても、同様に検討できる。対策工を実施することに伴い、基準雨量に対する人身損失（D1）は減少するが、通行止め時間は変わらないので経済損失は変化しない。これにより、リスクの合計を最小にする基準雨量は大きくなるので、効率的な事前通行規制を実施するには、基準雨量を緩和することになる。さらに、対策が進むにつれ、人身損失のリスクが経済損失を下回るようになった場合には、通行規制による効果が得られなくなるので、通行規制そのものを解除するかどうか検討することとなる（図-6.12）。

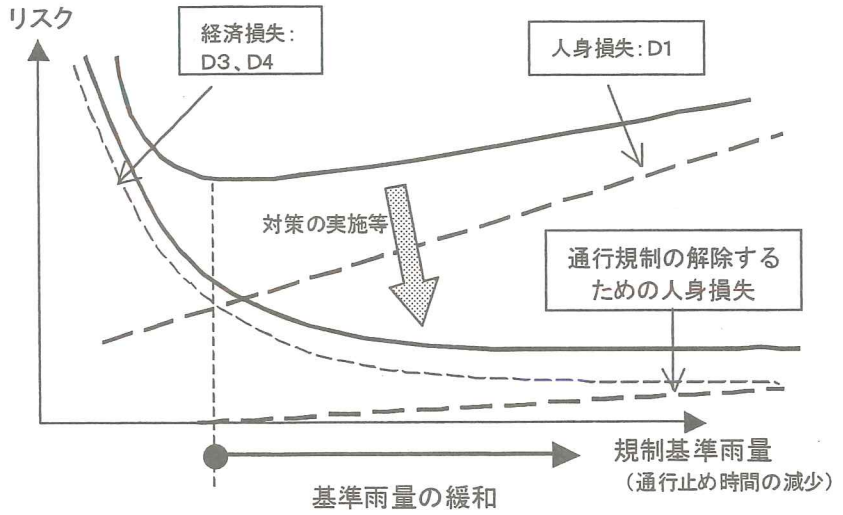


図-6.12　対策の効果と通行規制の解除

事前通行規制で採用する雨量指標としては、連続雨量と実効雨量が考えられるが、どちらを採用した方が効率的かどうかについても、同様に検討できる。例えば、対象路線区間（或いは斜面）において、同じ規制発生確率年（通行止め時間）の規制雨量では実効雨量法の方が災害捕捉率が高いと仮定する（図-6.13）。その結果、実効雨量法の方が人身損失が低減するので、少ない通行止め時間かつ小さいリスクで事前通行規制を実施することができる。

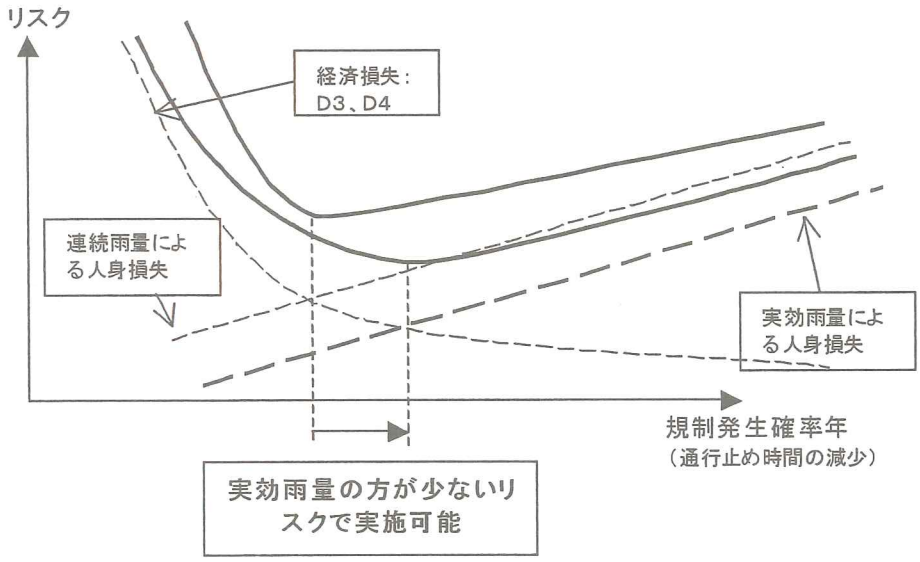


図-6.13　規制基準雨量と雨量指標

６－３－２　公平性の確保

道路管理者が道路斜面の安全性や信頼性について目標水準を定めた場合には、目標水準に合わせた事前通行規制を検討することにより、事前通行規制を公平に実施するための参考とすることができる。

＜解説＞

事前通行規制を全国で公平に実施すべきであり、一部の区間で厳しい通行規制を実施すればその周辺地域が過剰な経済損失を被ることとなる。そこで、道路管理者が道路斜面の安全性や信頼性について目標水準を定めた場合には、目標水準を合わせ、全国で公平に事前通行規制を実施することができる。なお、目標水準の設定方法は、本マニュアルの範囲外である。

ここでは、仮に道路管理者が安全性の目標水準として、年間の死者数を何人以下、つまり斜面災害による人身損失をどの程度までに抑えるという目標水準を全国統一的に設定した場合を想定する。その場合には図-6.14 のように、路線ごとに基準雨量はことなってくるが、全国的には安全性の目標水準と照らし合わせ公平性な通行規制を行うことになる。そして、この例の場合は、路線Ａから対策を実施していくことにより、路線間の規制発生確率は同じレベルに近づくととなる。

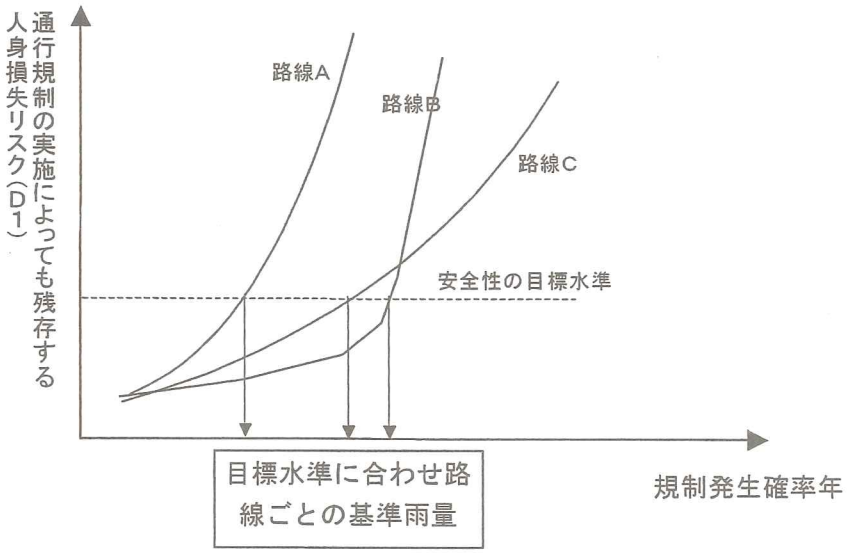


図-6.14　安全性の目標水準に合わせた路線ごとの基準雨量

対策工を実施したことにより、人身損失が低減した場合には、同様に目標水準に照らし合わせ、通行規制を解除するかどうか検討することができる。図-6.15 の場合、対策により人身損失が大きく低減し、想定される雨量の範囲では通行規制をしなくても目標水準を満たしている。このような場合には規制の解除を検討する必要がある。

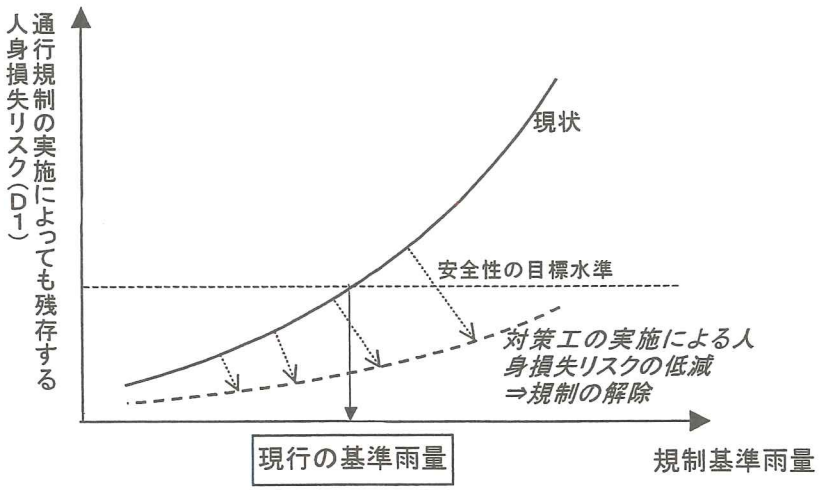


図-6.15　対策を実施した場合の規制の解除

第７章　リスク評価における不確定性の取り扱い

７－１　基本的な考え方

リスクは、将来発生し得る斜面災害の被害額を予測したものであり、予測された結果には不確定性が含まれている。対策工の費用効果分析、安全性・信頼性の評価等のリスク分析では、リスクに含まれる不確定性を定量化し考慮する必要がある。

不確定性の評価は、以下の手順で行う。

① 不確定性の要因の抽出と数量化
② 不確定性を考慮した被害額分布の算定
③ 不確定性の定量化

【解説】

本マニュアルで算定する想定被害額は、将来発生しえる斜面災害の被害額を予測したものであり不確定なものである。したがって、対策前後の年間平均被害額の差として算定する対策工の便益（Ｂ）も不確定な値である。また、防災対策費用(Ｃ)も、建設物価・天候等により変動する不確定な値と考えられる。

こうした不確定性を有する値を平均的な値だけを用いて評価することは不十分であり、本来は、リスクおよび費用の評価において不確定性を定量化し、不確定性を踏まえた意思決定を行う必要がある。

例えば、６章に示す安全性や信頼性の観点で斜面の現状のリスクや対策後の残存リスクを評価する場合、道路管理者は、年間平均被害額が同じであっても、不確定性の大きな斜面のリスクを大きく、不確定性が小さい斜面のリスクを小さいと認識して危険回避の意思決定をすると考えられる。すなわち、リスクは、想定被害額の平均値である年間平均被害額ではなく、それにリスクプレミアムを考慮した想定被害額の確実同値額で評価する必要がある。

また、５章に示す防災対策工の費用便益分析でも、道路管理者は、平均値から算定したＢ－Ｃの大きさだけをみて判断するのではなく、Ｂ－Ｃが正となる超過確率は●％であるといった情報から、不確定性を踏まえ投資効果を判断することが重要である。

４章では、こうした観点から、リスクを年間平均被害額だけでなく、イベントプロットやリスクカーブを用いて、被害額の分布を評価することを推奨している。４章で記述したイベントプロットは、次に発生する災害の規模や、降雨量が不確定であることを踏まえ、災害１回あたりの被害額の分布を表したものであり、リスクカーブは、更に、年間に複数個の災害が発生するかもしれない不確定性をも考慮し、年間合計被害額の分布を表したものである。

しかし、４章で扱った不確定以外にも、リスクを算定する過程には様々な不確定性が内在しており、これらを出来るだけ定量化して考慮することが望ましい。本章では、これら不確定性の定量化手法について記述する。ただし、このような不確定性を考慮した

リスクマネジメントの手法は、未だ不明確な部分が多く、マニュアルでは手法の試案を示すにとどめる。

＜参考-7.1：リスクプレミアム＞

(http://www.geocities.co.jp/WallStreet-Bull/6161/econ004.html に加筆修正)

いま確実に 50 万円当たるギャンブルと、 1/2 の確率で 0 万円、 1/2 の確率で 100 万円当たるギャンブルがあったらどっちを選びますか？ これは多くの人が「確実に 50 万円をもらえるほう」を選ぶとおもいます。 このように 通常、人はリスク回避的であるといえます。 またこのとき、前者のギャンブルを高く評価していることになります。では 確実に 10 万円当たるギャンブルと、 1/2 の確率で 0 万円、 1/2 の確率で 100 万円当たるギャンブル ではどうでしょう。これはひょっとしたら後者のギャンブルを選ぶかもしれません。 このとき、前者のギャンブルと後者のギャンブルを同じぐらいに評価しているということになります。確実な 50 万円を少しずつ減らしていって、どこまで減らしたときに 後者のギャンブルをやってもいいかということを考えます。ある人は 20 万円ぐらいまで減らさないと後者のギャンブルをやらないとしましょう。このとき、この 20 万円を確実同値額といいます。 そして後者のギャンブルの期待値 50 万円から確実同値額 20 万円を引いた 30 万円をリスクプレミアムといいます。

リスクプレミアム ＝ 期待値 と 確実同値額 の差

道路斜面災害のリスク評価でも想定被害額に対する考え方は同様です。道路管理者は、想定被害額の平均値である期待被害額ではなく、それに安全率を考慮した想定被害額でリスクを評価すると考えられます。つまり、被害を生じた際の諸々の不確定要因に対する予備費を確保しておく感覚です。リスクプレミアムはこの予備費に相当し、期待被害額に予備費を加算した金額が確実同値額に相当します。

＜参考-7.2＞事業費用のリスクプレミアム＞

事業計画を比較する場合、一般に事業費用を予測して比較する。ここで、最終的な事業費は予測に対してバラツキを持つが、道路管理者の立場では、この最終事業費の予測に対するバラツキが少ない事業が好まれる。

ここで、図-1 のように、A 地点の不安定斜面を避けるために、トンネルルートと橋梁ルートによる防災バイパスが計画された場合を考えてみる。

一般に、地質の影響の大きいトンネル工事は、上部工の費用がほとんどである橋梁

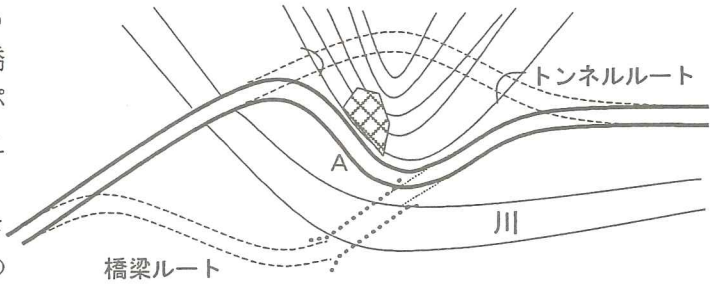


図-1 防災バイパス比較検討

工事より、最終工事費のバラツキが大きいものである。

その結果、図-2 のように、確率分布を伴う事業費が想定されたとする。この場合、トンネルルートと橋梁ルートで、事業費が８億円を超える確率は、50 [%] と等しく、事業費のバラツキはトンネルルートのほうが大きい。我が国では、このような確率分布を伴う事業費予測が行われることが少なく、一般に、100パーセンタイル値が工事入札価格で、その後の事業費用の増分を設計変更で補償する形態で事業が行われる。

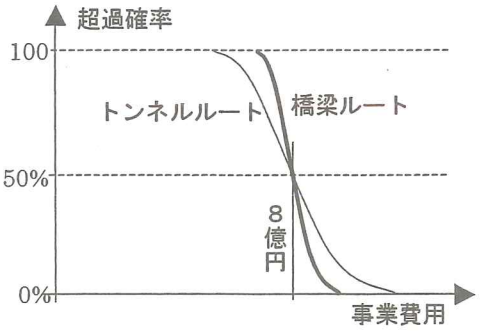


図-2　防災バイパス事業費用比較

その結果、トンネルルートの場合、入札価格に対して最終事業費が増加する確率が高いと言える。

一方で、入札価格は、当初の事業費予測に用いられることが多く、この結果、事業費予測が大きな誤差を持った場合に、情報公開の説得力も失うこととなりやすい。これは、予測のバラツキの大きさが大きいことが好まれないことを示す代表的な事例である。

7－2　不確定性の要因の抽出と数量化

３章に示す災害規模から被害額を算定する過程と、４章に示す斜面災害の年発生確率と想定災害規模を予測する過程には様々な不確定性が含まれている。この中から、大きな不確定性を生ずる要因となる項目を抽出し、各項目ごとの不確定性を適切な分布関数で表すことで数量化する。

【解説】

３章に示す災害規模から被害額を算定する過程と、４章に示す斜面災害の年発生確率と想定災害規模を予測する過程には様々な不確定性が含まれている。

災害規模から被害額を算定する過程には、例えば、以下に示す各種項目に不確定性がある他、項目から被害額を導く算定手法自体の不確定性（モデル化の不確定性）がある。

(1) 人身損失(D_1)　：交通量、走行速度、平均乗車人数、被災形態
(2) 道路復旧費(D_2)　：復旧土砂量、復旧時の施工条件
(3) 迂回損失(D_3)　：迂回路の状況、交通量、取りやめ率、迂回所要時間
(4) 救急医療損失(D_4)　：症状の発生率、症状別死亡率

また、斜面災害の年発生確率と想定災害規模を予測する過程には、以下に例を示す各種項目の不確定性がある。

(1) 降雨・災害履歴法
- 降雨量からの到達土量の算定
- 降雨量からの斜面の崩壊率の算定

(2) 斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測法
- 誘因に対する斜面の崩壊率の算定
- 誘因が不明確な斜面の年平均崩壊率の算定
- 災害時土量の算定

この中から不確定性の大きいと推定される要因を抽出し、過去の実績データを統計的に分析し、不確定性の分布関数を求める。不確定性を表わす分布関数は、原則としては理論的根拠を持つ適切な関数形を設定することが望ましいが、不確定性を、最小値、最大値、平均値といった道路管理者が比較的感覚的に設定できるパラメータを用い三角形分布で設定する考え方もある。

＜参考-7.2：不確定性を表す分布関数＞

不確定性を表す分布関数の例として、対数正規分布と三角形分布を図-1に示す。

対数正規分布は、下限値を０とすることができ、降雨量や崩壊率、崩壊土量、被害額等、全て正の値をとる変数の分布を表すのに都合が良い。また、関数のパラメータが、平均値と分散の２つであり参照データから比較的容易に求められる。

三角形分布は、設定しなければならないパラメータが３つ（最小値、最大値、平均値）と対数正規分布よりも多いこと、また、分布の上限値を規定してしまうことから、不確定性を表す分布関数として適切でないとの考えもある。しかし、最小値、最大値、平均値は、参照できるデータが少ない場合であっても、道路管理者が感覚的に設定できる利点がある。その他、参照とするデータの分布を一切考慮しないブーツストラップ法、ジャックナイフ法等、ノンパラメトリックな方法により不確定性を数量化する方法もある。

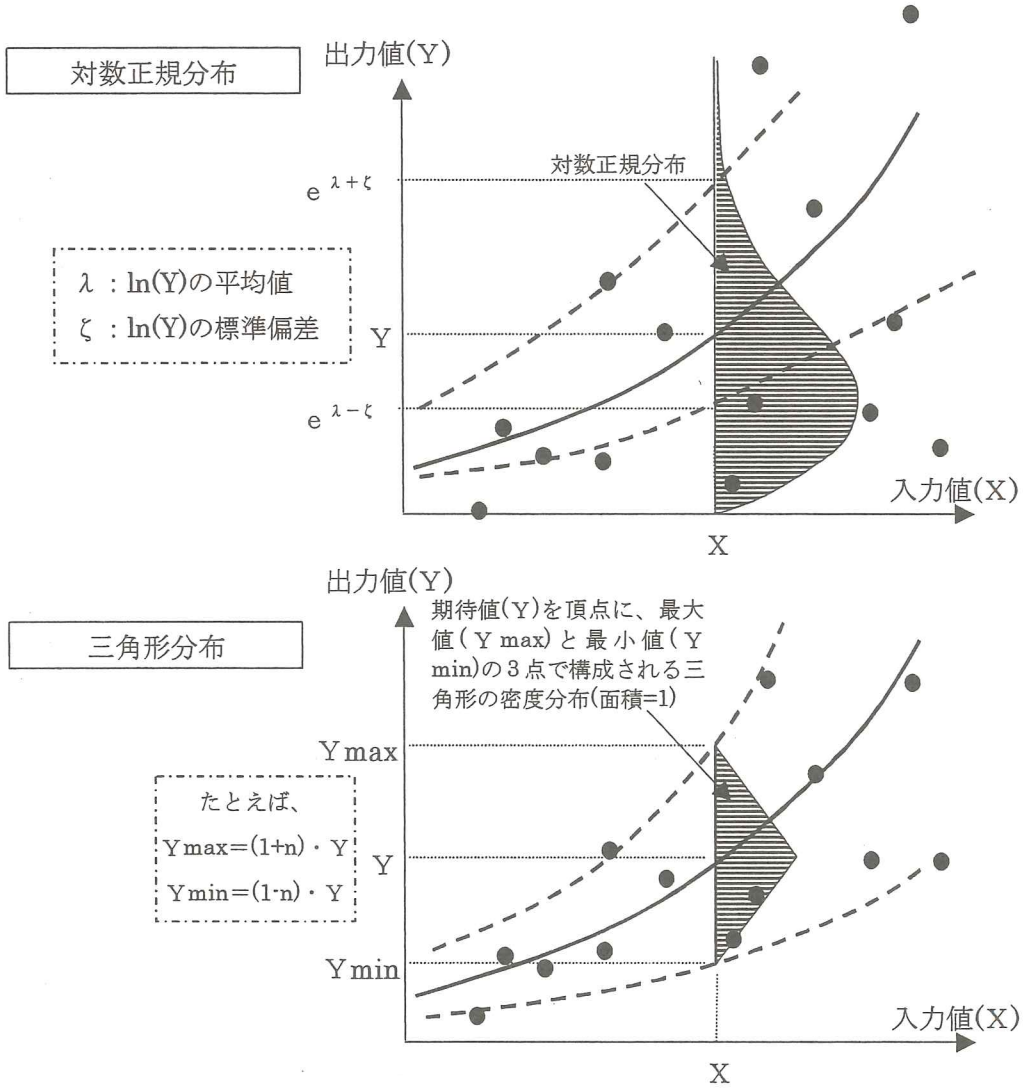


図-1　不確定性を数量化した分布関数の例

７－３　不確定性を考慮した被害額分布の算定

７－２で抽出・設定した不確定性要因の数量化結果を基に、被害額の不確定性の分布を算定する。
算定方法はモンテカルロ法によるのが良い。

【解説】

被害額は、斜面災害（イベント）ごとに算定する。被害額の不確定性は、図-7.2 に示すようにイベントプロット上の被害額の分布として表される。ここで、４章で記述したイベントプロットは、被害額の分布の平均値を結んだカーブに相当する。

この不確定性は、７－２で抽出・設定した不確定性要因の定量化結果を基に、原則としてモンテカルロシミュレーションにより算定する。

モンテカルロシミュレーションとは、不確定な要素に対して、ランダムな数値を当てはめ、モデルの結果を確率的に判断しようとする手法で、このマニュアルではこれを単にモンテカルロ法と称している。具体的には、不確定性を有する要因に関し、入力値としてその不確定性の分布関数に適合する乱数を与え、出力値を求める処理を十分な回数繰り返し、得られた複数の出力値を標本値として、出力値の不確定性を評価する方法である。したがって、計算量は多くなるが、確定値についての計算手続きのみで、出力値の不確定性を定量化することができる。

不確定性の要因が複数になる場合、これらを数式で理論的に組み合わせることは困難であるが、モンテカルロ法では、３章および４章での算定手続きをそのまま踏まえることで、不確定性を組み合わせることが可能である。

また、４章では年間に複数個の災害（イベント）が発生する可能性を考慮し、年間合計被害額の分布をモンテカルロ法で求める方法を示した。本節で示すモンテカルロ法は、この４章の手順と同時に扱うことが可能であり、これにより、様々な不確定性を考慮した年間合計被害額のリスクカーブを求めることができる。

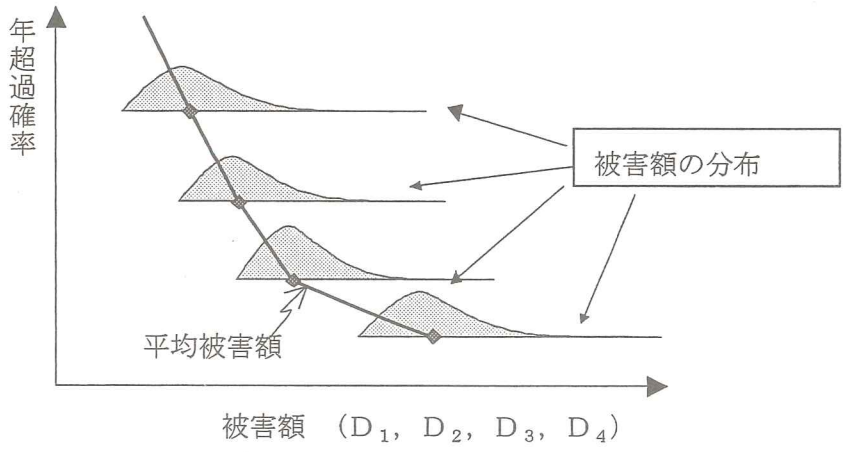


図-7.2　イベントプロット上に表される被害額の分布

７－４　不確定性を踏まえたリスク評価

７－３で算定した被害額の分布から、リスクマネジメントの目的に応じて、以下のような指標を用いることにより、不確定性を踏まえたリスク評価ができる。

- リスクプレミアムを評価した被害額の確実同値額
- Ｂ－Ｃが正となる超過確率

【解説】

本マニュアルでは、リスクを年間平均損失額として評価している。しかし、様々な不確定性があるため、実際に発生する年間合計被害額は、予想した年間平均被害額からばらつく。安全性や信頼性の観点で、現状のリスクや対策後の残存リスクを評価する場合、この年間平均被害額からどの程度乖離して発生する可能性があるのかを評価した上で意思決定を行うことが望ましく、年間平均被害額にリスクプレミアムを考慮した確実同値額を指標として意思決定を行うことが考えられる。

リスクプレミアムをどの程度考慮するかは、例えば人身損失と道路復旧費であれば事象に対する危険回避の姿勢が異なるように、リスクマネジメントの目的に応じて適切に設定する必要があり、また、この判断は社会的に受け入れられる必要がある。道路管理者は、このような判断を行う必要がある。

防災対策工費用便益分析では、平均値から算定したＢ－Ｃの大きさを示すのみでは不確定性が評価されないため、Ｂ－Ｃが正となる超過確率（Pr(B-C>0)）を算定し、その大きさから投資効果を判断することが重要である。

便益Ｂは、５章に示すように対策前後のリスクカーブの変化から求めるが、その際、対策前後のリスクカーブのそれぞれに対して被害額の分布が算定されていれば、Ｂの分布を求めることができる。費用Ｃは、大きな不確定性が特に見込まれない場合には確定値として扱い、不確定性を考慮しなくてもよい。

「リスクプレミアムをどの程度考慮すべきか」、あるいは「Ｂ－Ｃが正となる超過確率がどの程度の値であれば妥当な投資であると判断するのか」は、非常に難しい問題であり、本マニュアルの適用範囲を超えるため言及しないが、参考にできる事例として、「治水経済調査マニュアル（案）」では、リスクプレミアムを考慮した事業評価として、昭和 62 年度から平成 8 年度の 10 年間の損害保険における保険金／保険料が 53.75%であることから、治水事業の便益（被害額の低減量）を概ね２倍にして事業評価を行うことができるとの考え方が示されていること付記する。