

斜面崩壊に関するリスク評価とリスク軽減効果の推定

A Risk Assessment of Slope Failure and Estimation of Risk Mitigation Effect

白木渡*・井面仁志**・今井慈郎***・石川浩****

Wataru SHIRAKI, Hitoshi INOMO, Yoshiro IMAI and Hiroshi ISHIKAWA

*工博 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

**教修 香川大学助教授 工学部信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

****香川大学助教授 工学部信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

*****工博 香川大学教授 工学部信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

In this paper, characteristics of slope failure and actual conditions of slope disaster are investigated, and then the risk of slope failure is estimated. It is shown that the failure risk of slopes in a hazard zone exceeds an allowable level 10^{-1} /year proposed by Crouch & Wilson, and the physical loss is larger than loss of human life. Furthermore, for construction works for disaster prevention of slope failure the risk mitigation effect is estimated, and the effectiveness is certified.

Key Words: Risk assessment, Risk mitigation effect, Slope failure, Slope disaster

キーワード: リスク評価、リスク軽減効果、斜面崩壊、斜面災害

1. まえがき

阪神淡路大震災を契機として、わが国におけるリスクに関する認識が大いに変化した。その一つに、これまで加入者が少なかった地震保険への加入が大幅に増え、さらに火災保険、その他自然災害保険への加入者が増加したことが挙げられる。これは、大規模な災害では、国や地方公共団体がリスクをカバーしてくれる訳ではなく、大部分のリスクを自分自身で処理しなければならないことが明らかになったからであろう。しかし、阪神大震災の騒ぎが一段落した現在では、また少し状況が変わってきているように思われる。それは、災害が発生する頻度と発生したときに被る被害額の大きさを考えた上で、保険に加入するかどうかを決定し、加入する場合においてもいくらの保険料が妥当かを考えるようになってきていることである。リスクのもつ意味が理解されてきたということであろう。

最近、情報公開の要求が高まるに伴って、洪水や斜面崩壊に関するハザードマップが公開され、危険箇所に住んでいる人達への注意の呼びかけとともに、災害発生時への避難警告システムの整備等が行われるようになってきている¹⁾。このような情報が公開されるようになれば、次に要求されることはリスク軽減のための対策である²⁾。最近、公共事業においても費用対効果が強く要求される

ようになってきており、リスク軽減の対策を実施する場合においても当然軽減効果の評価が重要になる。しかし、これまでの研究ではリスクの評価及び対策について十分検討されるようになってきているが、その対策が投資に見合うリスクの軽減効果があるかについての検討はあまりなされていない^{1) - 5)}。

本研究では、斜面崩壊に関する問題を取り上げ、そのリスク評価並びにリスク軽減対策を実施した場合の効果の推定について検討する。ここでは、以下の手順に従って解析を行う。

- ① 斜面崩壊の発生確率を考慮した推定損害量の算定 (リスクの設定)
- ② リスクの金銭化
- ③ リスク軽減のための斜面崩壊対策防止工事のコスト及び軽減リスクの推定
- ④ ディスカウンティング及び不確実性の考慮
- ⑤ 斜面崩壊対策防止工事のコストとリスク及び軽減リスクの比較
- ⑥ リスク軽減効果の検討

2. リスク評価に関する基本概念

一般に、リスク評価の手法としてよく用いられるのが量的規模の比較である。居住環境におけるリスクを分析

対象とする場合は比較対象として人々が一般に生活する上で日常的に曝されているリスクを用いるのが望ましく、労働災害に含まれるリスクは比較対象から除外される。

人的な損害を示す尺度として、まず年間死亡率が上げられる。これは、次式により求められ、これを用いれば比較的簡単にリスクを評価することができる。

$$S_i = M_i / P \quad (1)$$

ここに S_i : 死因 i による年間死亡率

M_i : 死因 i による死亡数

P : 人口

しかし、この尺度には次の問題点が指摘されている⁶⁾。

- ①この評価法によって小規模とみなされるリスクであっても、同レベルのリスクが複数個集まることによって考慮すべき規模に達する可能性がある。
- ②リスクを軽減するための対策費用とリスク規模との関係を考慮していない。
- ③リスク軽減対策に要する費用に制限があることを考慮していない。

以上の視点から、リスクを総合的に評価するための基本概念を次に示す。

2.1 リスクの定義

一般に、リスクは、危険によってもたらされた障害度と危険をもたらす確率との積で表されることが多い。実用的には、「リスク＝危険をもたらす確率×人的影響、経済的影響、物理的影響」として用いられている。例えば原子力発電所におけるリスクの期待値を求めるには、次式が用いられている⁷⁾。

$$R = \sum_i \sum_j \sum_k f_j P_{jk} C_{jki} \quad (2)$$

ここで R : 単位時間あたりのリスクの期待値

f_j : 事故 (例えば炉心溶融) j の頻度

P_{jk} : 事故 j が発生した時の危険物 (例えば放射能) k を周囲に放出する条件付き確率

C_{jki} : 事故 j が発生した時の危険物 k による人的影響、経済的影響、物理的影響 i による被害損失コスト。

本研究では、斜面崩壊という自然災害によるリスクの評価を行うが、それを求めるために、式(2)をもとにして次のような式を定義する。

$$R = \sum_i \sum_j f_j P_{ji} C_{ji} \quad (3)$$

ここで R : 単位時間あたりのリスクの期待値

f_j : 災害 j の発生頻度

P_{ji} : 災害 j が発生した時、人的影響、経済的影響、物理的影響を及ぼす条件付き確率

C_{ji} : 災害 j が発生した時人的影響、経済的影響、物理的影響 i による被害損失コスト。

このようにしてリスクが求められるが、求められた値

の中には多くの不確実の要素が含まれている。この不確実性については2.4節において述べる。

2.2 潜在的利益と実際のコストの属性

(1) 潜在的利益に関する属性

対策によるリスク軽減効果を解析する前段階として、“潜在的利益”と“実際のコスト”に関連する属性を別々に量的な方法によって考慮する必要がある。

潜在的利益とは、公共の人的影響や様々な経済的影響を含む軽減リスク (避けられたリスク) であり、この属性は次の4つのグループに分けられる。

- ①現場上の利益: これらの利益は斜面崩壊対策によって避けられたコストであり軽減された計画コスト、軽減された公共の人的被害に関するコストがこれに含まれる。
- ②現場外の利益: 土地の立入り禁止、また、避難により、軽減された公共の人的被害に関するコスト、財産がこれに含まれる。
- ③結果的利益: この利益は、斜面崩壊の結果として、他の施設及び、構造物に関連して軽減されたコストがこれに含まれる。
- ④非量的利益: 知識の改善から、科学技術によって向上した公共の信頼まで、数々の利益がこれに関連する。

リスク評価に際しては、以上示した4つの属性において、その価値を定量化しなければならない。しかし、この定量化における主な問題点として、次の2点が挙げられる。第1に非量的利益の定量化の問題である。これは、人間の感覚には深い影響を与えるもので、定量化に際しては取扱いが難しい問題である。第2にコストに対してのリスク軽減効果を比較するために、人的被害に関するコストを金銭化しなければならない点である。

斜面崩壊を与える人的被害には死亡による被害と負傷による被害があり、死亡による被害がとりわけ重大である。

ここでは、死亡による損害を考える。一般に、死亡による損害は逸失利益と慰謝料の2要素から成り立っている。この逸失利益の計算法は「ホフマン式」が通例とされており、次の式で表される⁸⁾。

$$\frac{(I-S) \times n}{1+nr} \quad (4)$$

ここで、 I : 年収額

S : 死亡本人の生活費

n : 就労可能年数

r : 補正ディスカウント比 (利子率)

ディスカウント比とは、将来財を現在の価値に直すときに使用する率のことで、通常利子率を用いる。また、補正ディスカウント比 (利子率) とは将来の賃金のアップ率を考慮し、ディスカウント比 (利子率) から賃金変動率を差し引いた値とする。

(2) 実際のコストに関する属性

実際のコストとは、斜面崩壊対策に関するコストであり、これらのコストは設備コストと維持管理コストの2つの属性に分けることができる。設備のコストには労働力コスト、計画コスト、ハードウェアコスト（これはすべての機材を含む）といったものが挙げられる。また、維持管理コストは、リスク軽減対策によって施工された設備や構造物の寿命期間中に必要なコストである。これらの将来的コストは現在の価値の経済的割引を考慮する必要がある、これについては、次の2.3節において述べる。

2.3 投資コストのディスカунティング

将来発生する災害の結果を軽減し除去するために、毎年多くの金額を投じて災害防止のための対策がなされている。その災害防止対策によって、災害危険箇所に住む人々は、災害防止施設が対応できる年数の間、リスクを軽減されることとなる。式(3)においてリスクは1年あたりについて考えられることがほとんどであり、投資コストとこの（軽減）リスクとを比較するためには投資コストを1年あたりの金額にする必要がある。ここでは、この災害防止のために使われる投資コスト C_D を、ディスカウント比（利子率）を考慮したうえで1年あたりの金額に換算するために、次のような式を用いる。

$$C_D = C_0 \times \frac{(1+r)^n \times r}{(1+r)^n - 1} \quad (r \neq 0) \quad (5)$$

$$C_D = C_0 / n \quad (r = 0) \quad (6)$$

ここに、
 C_0 : 対策費用
 n : 対策実施年における残余償却年数
 r : ディスカウント比

2.4 リスク評価における不確実性とその取り扱い

(1) リスク評価における不確実性

リスクを評価することにおいて、現状ではきわめて大きく、かつ様々な不確実性が含まれ、得られたリスクの値に対しある種の不信があるのは当然のことである。従って、得られたリスクの値の信頼限界を十分に認識することなしに行われる評価、判断は、非科学的であるといえる⁷⁾。

一般的に考えられる不確実性を挙げてみると、

- ①破壊データなどの統計的なもの
- ②考慮されていない事象に関するもの
- ③デザインエラー、ヒューマンエラーによるもの
- ④避難などの災害後の処理に関するもの

があり、これらの中で確率統計学的に考慮し得るものは、①の不確実性だけであるといえる。

(2) 不確実性への対応

本論文においてリスク評価しようとしている斜面崩壊は自然災害であり、この自然災害自体不確実性要因によ

って発生しうると考えられる。ここでは、斜面崩壊のリスク評価における統計的な不確実性について考慮するために、次の式を用いて信頼限界 α_c でのリスク R^C を考える。

$$\alpha_c = \int_0^{R^C} P(R) dR = P_r(R < R^C) \quad (7)$$

ここで、 $P(R)$ はリスク R の確率密度関数を表す。

現在では、リスクの有する統計的不確実性に対してこのような考えで、ある信頼限界 α_c におけるリスクが評価されている。

2.5 リスク軽減に関する概念と軽減効果

(1) リスク軽減に関する概念

リスクを軽減するために様々な対策がなされるが、本研究のテーマである斜面崩壊に関してとられる対策は、崩壊防止工事、警戒避難体制の整備、家屋等の移転及び危険地区での建築制限といったものがある。

まず、崩壊防止工事によって軽減されたリスクを考えてみると。この対策により災害発生頻度 f_j を小さくすることができ、そのリスク軽減は次式で表される。

$$\Delta R = \sum_{i,j} \Delta f_j P_{ji} C_{ji} \quad (8)$$

次に、警戒避難体制の整備、家屋等の移転、建築制限等のリスク回避政策は、条件付き確率 P_{ji} を小さくすることができ、そのリスク軽減は、次式で表される。

$$\Delta R = \sum_{i,j} f_j \Delta P_{ji} C_{ji} \quad (9)$$

(2) リスク軽減効果に関する概念

各リスクの軽減効果を比較するためには、各々のリスクについて対策に要するコストとそれによって軽減されるリスクをそれぞれ算出し、コスト当りの軽減効果を各リスク間で比較する。この手法は「限られた財源の中で最大の効果をあげる」という目的には最も適した基準であると考えられる⁸⁾。

いま、総コスト ($\sum C_i$) = C_0 : 一定のもとで総軽減リスク ($\sum R_i$) を最大にする C_i の組が最適配分となる。これは、コスト C_i を投入した場合の軽減リスク R_i が微分可能な関数 ($f_i(C_i)$) の形で表現されるとき、次のラグランジュ関数 (L) の均衡点を求めることによって得られる。

$$L = \sum f_i(C_i) + \lambda(C_0 - \sum C_i) \quad (10)$$

これからコストに対する軽減リスクすなわちリスク軽減効果 $k (= \partial f_i(C_i) / \partial C_i)$ が各々のリスクについて等しい値 (λ) となるようにコストを配分したとき最適となる。実際には連続的なコストに応じた対策が存在することは稀であり、さらにリスクが死亡率の形で表現されるとすると、軽減効果 k を次式のように対策の対象となる人口 (P) 当たりの限界コスト (ΔC_i) に対する軽減死亡率 (Δr_i) によって表現することができる。

$$k = \frac{\Delta R_i}{\Delta C_i} = \frac{P \Delta r_i}{\Delta C_i} = \frac{\Delta r_i}{\Delta C_i / P} \quad (11)$$

3 斜面崩壊の実態とその対策

3.1 斜面崩壊の特徴と災害の実態

(1) 斜面崩壊の特徴

まず初めに斜面崩壊の特徴を知るため、昭和 50 年～昭和 52 年の 3 年間の急傾斜地の崩壊のうち、約 800 箇所⁹⁾のデータ⁹⁾を用いて特徴を調べた。ここで用いたデータは 20 数年前の古いデータであるが、このようにまとまって公表されているデータが少なく、最近も斜面崩壊の本質的な特徴は大幅に変化していないと考えられるので、リスク評価ならびにリスク軽減効果の方法、必要性を議論する上で問題ないと考えられる。

1) 崩壊の型

崩壊型別の発生頻度を計算すると、その結果は Table 1 に示すようになり、崩壊型の中では表土の滑落型の崩壊が極めて多く、全体に対する割合は、約 50%にのぼる。次いで崩積土の滑落、強風化岩の崩落、強風化岩の滑落、表土の崩落となり、これらだけで全体の 83%を占めている。

さらに、斜面構成土質別の分類を大別し、

- 表層土 : 表土、崖積土
- 地山(土状) : 火山砕屑物、段丘堆積物
- 地山(岩状) : 強風化岩、岩(I)、岩(II)

とすると、崩壊発生頻度は Table 2 に示される様になる。この結果では、表層土の崩壊が極めて多いことがわかる。表土、崩積土の表層土は、それ自体で斜面を構成してい

るのではなく、岩、段丘、火山砕屑物等の地山の上に乗っている。表土、崩積土の崩壊はすべての地域、地質のところで起こりうるものであり、地山自体が崩壊するものと区別される。表土、崩積土の崩壊の割合が多いのはこのためであり、一般的にいえることである。

一方、不安定土塊が落下する崩落型と、境界面沿いに滑り落ちる滑落型の崩壊を Table 3 において比較すると、滑落型の崩壊が極めて多く、76%を占めている。崩落に比べ滑落が多いのは表土の崩壊と関係がある。一般に表土の崩壊形式は、薄い部分の滑落であるといわれるが、この結果からもこれを裏付けることができる。

斜面構成土質別に、滑落、崩落別の割合を見ると、表土、崩積土は滑落が多く、その他は崩落の占める割合が多くなる。一般に、火山砕屑物、段丘堆積物、岩の斜面では傾斜が急であり、斜面上端部の不安定土塊が落下する形の崩壊が多い。また、地山の上に乗る表土、崩積土の崩壊は当然、地山との境界部が滑り面になることが多く、滑落型の崩壊が多くなる。

2) 地質区分の特徴

崩壊が発生した斜面の基岩を

- ・噴出岩類(安山岩、玄武岩、流紋岩)
- ・深成岩類(花崗岩、閃緑岩、英斑岩)
- ・火山砕屑物(集塊岩、凝灰岩)
- ・水成堆積岩類(頁岩、粘板岩)
- ・変成岩類(チャート、片岩)

Table1 崩壊型別崩壊発生頻度

記号	崩壊型	個数	構成率(%)
1-(1)	表土の崩落	60	7.71
1-(2)	表土の滑落	391	50.26
2-(1)	崖積土の崩落	2	0.26
2-(2)-1	崖積土の滑落(基盤境)	71	9.13
2-(2)-2	崖積土の崩落(不連続面)	15	1.93
3-(1)-1	火山砕屑物の崩落(シラス・ローム)	10	1.29
3-(1)-2	火山砕屑物の崩落(風化集塊岩等)	6	0.77
3-(2)	火山砕屑物の滑落(シラス・ローム)	8	1.03
4-(1)-1	段丘堆積物の崩落(不透水層)	8	1.03
4-(1)-2	段丘堆積物の崩落(礫の抜出し)	3	0.39
4-(2)	段丘堆積物の滑落	11	1.41
5-(1)	強風化岩の崩落	65	8.35
5-(2)-1	強風化岩の滑落(マサ)	61	7.84
5-(2)-2	強風化岩の滑落(温泉余土)	4	0.51
6-(1)-1	岩(I)の崩落(ブロック状)	14	1.8
6-(1)-2	岩(I)の崩落(互層)	1	0.13
6-(1)-3	岩(I)の崩落(下部が弱い)	3	0.39
6-(1)-4	岩(I)の崩落(溶岩)	1	0.13
6-(2)-1	岩(I)の滑落(境界面)	2	0.26
6-(2)-2	岩(I)の滑落(断層、割れ目)	18	2.31
6-(2)-3	岩(I)の滑落(礫岩、集塊岩)	2	0.26
7-(1)-1	岩(II)の崩落(互層)	0	0
7-(1)-2	岩(II)の崩落(第3紀層)	11	1.14
7-(2)-1	岩(II)の滑落(頁岩、層理面)	10	1.29
7-(2)-2	岩(II)の滑落(砂岩、頁岩の互層)	1	0.13
合計		778	100

Table 2 斜面構成土質別崩壊発生頻度

斜面構成土質	個数	構成率(%)
表層土	539	69.28
地山(土状のもの)	46	5.91
地山(岩状のもの)	193	24.80
合計	778	100.0

Table 3 崩壊様式別発生頻度

斜面構成土質	個数		構成率(%)	
	崩落	滑落	崩落	滑落
表土	60	391	13.3	86.7
崖積土	2	86	2.3	97.7
火山砕屑物	16	8	66.7	33.3
段丘堆積物	11	11	50.0	50.0
強風化岩	65	65	50.0	50.0
岩(I)	19	2	90.5	9.5
岩(II)	11	11	50.0	50.0
合計	184	594	23.6	76.4

Table 4 地質別発生頻度

地質区分	個数	構成率(%)
噴出岩類	164	20.92
深成岩類	170	21.68
火山砕屑物	84	10.72
水成堆積岩類	232	29.59
変成岩類	81	10.33
シラス	19	2.42
ローム	21	2.68
その他	13	1.66
合計	784	100.0

- ・シラス
- ・ローム
- ・その他

のように分類し、地質別の崩壊発生頻度をまとめると Table 4 のようになり、水成堆積岩類の地域で多く、次いで深成岩類、噴出岩類の地域が多い。

3) 崩壊の状態(崩土の状態)による特徴

崩壊が発生し、崩れ落ちた土砂の状態は斜面自体の地質、斜面土質、崩壊の形態、崩壊の原因等によって異なる。また、崩壊直後の崩土の含水の程度によって、崩壊の形態が変わってくる。崩土の状態を泥状、土塊状、砂状、岩塊状、その他と 5 個に分類し頻度を調べると Table 5 の様になり泥状と土塊状のものが多く、約 80%を占めている。

4) 崩壊の規模

崩壊の規模を Fig.1 のように、崩壊の高さ $H(m)$ 、崩壊の幅 $W(m)$ 、崩土の到達距離 $L(m)$ 、斜面の傾斜角 θ (度)、崩壊の厚さ $d(m)$ 、崩壊土量 $V(m^3)$ 、崩壊の斜面長 $S(m)$ で表し、これらの規模についての値を Table 6 で示す。

崩壊現象を考えると、その現象自体は複雑であり、その原因として地震、豪雨等が挙げられ、把握するのは困難であるが、以上のように特徴を分類すると、斜面崩壊データの定量化が可能である。

(2) 災害の実態

斜面崩壊と災害の関係をj知るために、同じく昭和 50 年～昭和 52 年までの約 800 個のデータ⁹⁾をもとにして、

Table 5 崩土の状態別発生頻度

崩土の状態	個数	構成率(%)
泥状	338	42.68
土塊状	304	38.38
砂状	79	9.97
岩塊状	68	8.59
その他	3	0.38
合 計	792	100.0

Table 6 崩壊規模

	H (m)	W (m)	L (m)	θ (度)	d (m)	V (m^3)	S (m)
平均値	16.5	20.5	12.5	46.8	2	464.7	21.9
中央値	10	12.5	4	43	1.1	65	13
90%信頼値	27	38	14.5	61	2.7	590	37
標準偏差	15.1	19.6	19.8	12.5	2.1	2051	26.7
個数	802	798	773	797	799	789	789
最小値	2.5	1	0	1	0.3	2	1.5
最大値	185	200	300	90	30	30000	300

Table 7 人的、家屋被害とその条件付き確率

	死亡	負傷	全壊	半壊	一部破損
人数、戸数	89	228	347	380	597
条件付き確率	5.6	9.1	31.1	35.6	53.4

人的被害、家屋被害と斜面崩壊との関係をまとめてみると Table 7 となる。斜面崩壊が発生する時の死亡者がでる条件付き確率は 5.6%と低い値であるが家屋の一部破損がおこる条件付き確率は 53.4%となり、人的被害につながる可能性を大いに秘めている。

洪水・土石流・地すべり、崖崩れによる死亡者、行方不明者数を昭和 33 年から昭和 61 年までの統計資料^{10), 11)}をもとに Fig.2 に棒グラフで示す。また、そのうち、土石流・地すべり、崖崩れといった土砂災害による割合を図中に折線グラフで示してある。これからわかるように、土砂災害による死亡者の比率は昭和 40 年代を境として 10%台から 50%台になり、顕著に増加している。その後、昭和 48 年以降、急傾斜地対策により崖崩れによる死亡者は減少しているが、山間部における宅地造成や異常気象等により毎年一定の死亡者が出ている。これは、大河川の改修が進んだことや台風予報の体制が整備され、洪水氾濫などによる死亡者が減少したことによる。一方、土砂災害による死亡者は著しく減少していないが、その原因として次の項目が挙げられ、対策が必要とされている¹¹⁾。

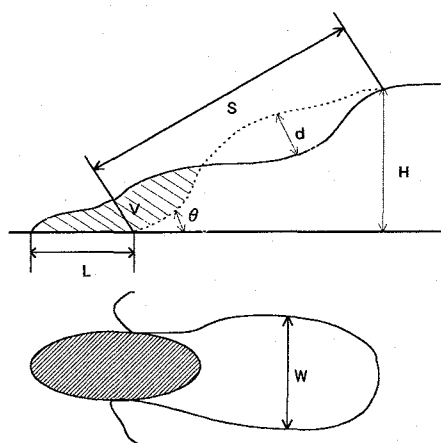


Fig. 1 斜面模式図

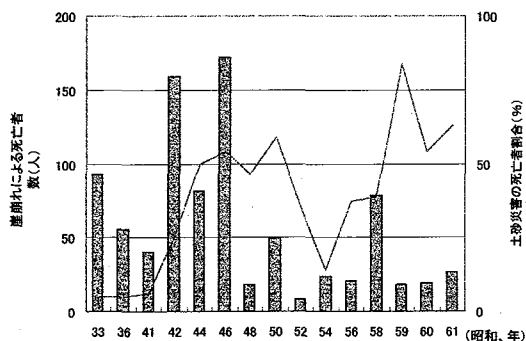


Fig. 2 崖崩れによる死亡者数と土砂災害による死亡者の割合

- ①土石流等の持っている性質
- ②土石流等の誘因となる現象とその発生との間の定量的因果関係推定の困難性
- ③家屋等の山麓、溪間への接近
- ④中小河川整備、砂防対策の遅れ

3.2 急傾斜地崩壊対策事業の実態と実施の現状

(1) 急傾斜地崩壊危険箇所の概況

崖崩れ対策の有効的な実施のためには、どのような斜面が危険であるかを知らなければならない。しかしながら、いかなる場合にどのようなけが崩壊を起こすかについての判断は非常に困難なことで、今後の調査及び研究を大いに促進する必要がある。

これまでの崖崩れ災害の中で、特に家屋が全壊あるいは半壊したり人命に損傷のあった事例を調査、分類すると、崖の高さが5m以上で、その傾斜角度が30度以上の場合が大半を占めていることから、これを最低条件として、それ以上の高さ、傾斜角度のある崖の周辺に人家がある場合には一応危険であると考え、建設省においては、昭和42年及び44年に都道府県の協力によって全国の危険な崖地の実態調査を実施し、保全人家個数5個以上(5個以下でも官公署、学校、病院、旅館、駅などの公共的建物のある場合を含む)に著しい被害を及ぼす恐れのある物に限定した範囲の調査があったが、その結果危険箇所は約13,000箇所あることが判明した。しかしながら、昭和47年、災害は全国的な記録破りの気象条件などから過去の調査でリストアップされた危険箇所以外においても災害が多発したため、7月災害の後直ちに都道府県の協力を得て危険箇所の総点検を実施した。これらの結果では危険箇所数が増加し、総数で6万箇所を越えることとなった¹²⁾。

(2) 急傾斜地崩壊対策の内容

先に述べたように、急傾斜地(崖)対策は重要な課題になってきている。ここで、対策についての考え方をまとめてみると、崖崩れによる災害を防止するためには、崖

崩れが発生しないようにすることと、発生しても人的・物的被害がないように回避する2つの方法がある¹³⁾。

1) 防止法

- ①崩壊防止工事
- ②水の放流、のり切り、工作物の設置、土石採取など崩壊の原因になる有害な行為の制限

2) 回避法

- ①警戒避難体制の整備
- ②崖崩れにより被害を受けるおそれのある家屋等の移転
- ③崖崩れ災害危険区域での必要な建築制限

ここで、崩壊防止工事の工法についてであるが、急傾斜地の崩壊自体が地形、地質および降雨、地震など、複雑な自然条件に左右され事前にその形態を予測することが難しい。本論文では、工法についての詳しい議論は要求されないので普通用いられる工法を列举するのみとする。

擁壁 法枠工 張工 支保工 植生工 排水工
土留工 斜面改造 谷止工 山腹工 落石保護工
なだれ保護工 杭工

(3) 急傾斜地崩壊対策事業実施の現状

先に述べた様に急傾斜地崩壊危険斜面に対して昭和42年度から急傾斜地崩壊対策事業が実施されている。また、昭和58年を初年度とし、急傾斜地崩壊対策事業5箇年計画が実施された。しかし、昭和58年度末の整備率14%、62年度末で20%、平成2年では、約25%にとどまっている。予算規模から考えると危険箇所全てに対し直ちに防災工事が実施されることは不可能であり、第一に、緊急時における警戒避難体制の整備が急務である。

4 斜面崩壊に関するリスク評価

4.1 他の死因別死亡率との比較

昭和50年から10年間の死因別死亡数^{10), 14)}を基に、次に示すA~Jの年間死亡率を式(1)により求め、Fig. 3に示した。

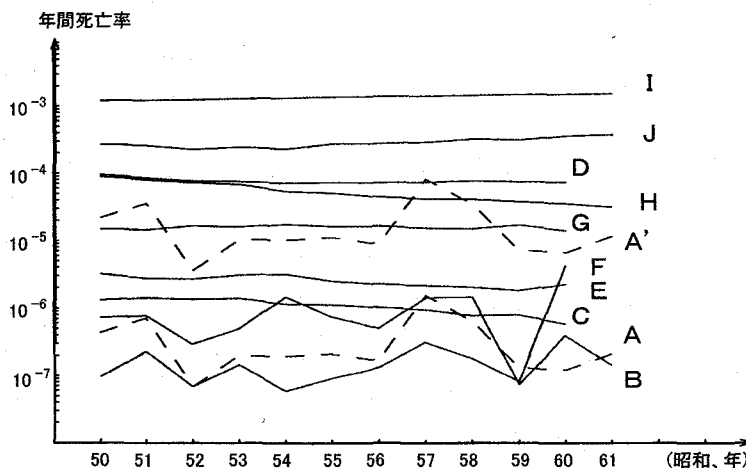


Fig. 3 年間死亡率

- A: 斜面崩壊 F: 航空事故
 B: 洪水 G: 火災
 C: ガス事故 H: 悪性新生物
 D: 道路交通事故 I: 呼吸器系の結核
 E: 海難事故 J: 肺炎

この結果によると、斜面崩壊による年間死亡率は年により変動が大きい、ほぼ航空事故による年間死亡率並みであり、一見許容範囲内であると思われる。しかし、斜面崩壊は局所的に発生するものであり、これらを一概に比較できるとは言えない、ここで P =保全対象人家戸数(110 万戸)×平均世帯構成人数(2 人)として算出した斜面崩壊による年間死亡率: A' を同じく Fig. 3 に示す。この年間死亡率については、1970 年代にアメリカ合衆国で発表された死亡率を基に、職業上のリスクに対しては 10^{-5} 、一般的な公共のリスクに対しては 10^{-6} 以下は無視してもよいオーダーであることを Crouch と Wilson が示しているが¹⁵⁾、 A' はこの値を上回り、斜面崩壊に関しての対策が必要であることがわかる。

4.2 斜面崩壊に関する総合的なリスク評価

昭和 50 年～昭和 52 年の 3 年間の斜面崩壊の中の 800 個のデータ⁹⁾をもとにして、1 年当りの斜面崩壊発生頻度 f を算出すると、 $f=266.7$ 箇所/年となる。また、斜面崩壊に関する被害を、人的被害(死亡、負傷)、家屋被害(全壊、半壊、一部損害)、財産被害(災害復旧事業費)と 6 項目に分けて、同様のデータを基にしてそれぞれの平均被害数 $C_{\bar{x}}$ および、斜面崩壊が発生した時それぞれの被害が出る条件付き確率 P を算出したものを Table 8 に示す。これらの値をもとに、式(3)を用いて平均リスク $R_{\bar{x}}$ を

算出し、この結果を同じく Table 8 に示す。また、式(7)より計算した 90%信頼度に対する被害数 C_{x90} をもとに、同様に算出した 90%信頼度に対するリスク R_{x90} を Table 9 に示す。ここで、災害復旧事業費に関しては、一例として地方の土木事務所で用いられている額として、崩壊土量 100m³ 当り 400 万円かかるとした。この結果を見ると、死亡人数は 29.9 人(90%信頼値:56.8 人)となりさほど大きい値ではないが、家屋被害については全壊、半壊、一部損害を合計すると 448.4 戸(589.6 戸)とかなり大きな被害であり、それにより人的被害を伴う可能性を大きく秘めていることが理解できる。

つぎに、これらのリスクを金銭化するために、変数を以下に示すように仮定し、死亡 1 人に対する損害金額を式(4)を用いて算出すると、約 1 億円となる。

$$I=500 \text{ 万円} \quad S=100 \text{ 万円} \quad n=25 \text{ 年}$$

$$r=r-r'=0.03-0.028=0.002$$

また、負傷 1 人に対する損害金額に関しては、入院費、治療費、休業損失および、後遺症害が出ることを考慮し、妥当であると考えられる金額 500 万円、全壊 1 戸に対する損害金額に関しては、建設統計による工事予定費を基に、妥当であると考えられる損害金額 2000 万円と仮定する。また、半壊 1 戸に対する損害金額、一部損害 1 戸に対する損害金額に関しては、全壊 1 戸に対する損害金額を基に 1000 万円、500 万円とし、それぞれのリスクの損害金額 $R_{\bar{x}}'$ 、 $R_{x'90}$ を算出し、Table 8 および、Table 9 に加えて示す。この結果によると、物的被害金額が多く全被害金額の約 65%～75%を占めており、人的被害に加えて物的被害も大いに考慮に入れる必要があると考えられる。

Table 8 斜面崩壊によるリスク(平均値)

	$C_{\bar{x}}$	P	$R_{\bar{x}} / \text{年}$	$R_{\bar{x}}' / \text{年(万円)}$
死亡	2.0 人	0.056	29.9 人	299000
負傷	3.1 人	0.091	75.2 人	37600
全壊	1.4 戸	0.311	116.1 戸	232000
半壊	1.4 戸	0.356	132.9 戸	133000
一部損害	1.4 戸	0.534	199.4 戸	39900
復旧費用	4.64×400 万円	1.000	495000 万円	495000
			合 計	1236000

Table 9 斜面崩壊によるリスク(90%信頼度)

	C_{x90}	P	$R_{x90} / \text{年}$	$R_{x'90} / \text{年(万円)}$
死亡	3.8 人	0.056	56.8 人	568000
負傷	2.7 人	0.091	65.5 人	32800
全壊	1.9 戸	0.311	157.6 戸	315000
半壊	1.7 戸	0.356	161.4 戸	161000
一部損害	1.9 戸	0.534	270.6 戸	54100
復旧費用	5.90×400 万円	1.000	629000 万円	629000
			合 計	1761000

4.3 斜面崩壊対策に関するコストとリスクの比較

ここでは、急傾斜地崩壊危険箇所に住む人々が被る推定リスクと斜面崩壊対策のコストを比較することによって、斜面崩壊対策の妥当性を検討する。

まず、1 斜面当りのリスクを求めるために年間崩壊頻度 f を急傾斜地崩壊危険箇所数で割り、1 斜面当りの崩壊発生頻度 f_0 を求めると、 $f_0=0.00445/\text{年} \cdot \text{箇所}$ となる。この値を用いて 1 斜面・1 箇所当りの平均リスク R_{x0}' と 90%信頼度に対するリスク $R_{x0.90}'$ を算出すると、Table 10、Table 11 に示すようになる。

また、斜面崩壊対策のためのモデル斜面として、3.1(1) で求めた崩壊規模の平均斜面(モデル-1)と 90%信頼度に対する斜面(モデル-2)において、土留工と法枠工が斜面崩壊対策として施工されたとする。ここで、施工費として治山台帳による施工額を基に、7.3 万円/m(土留工)、0.9 万円/m²(法枠工)と仮定すると、その対策費用 C_0 はそれぞれ次のようになる。

モデル-1 幅:20.54m, 斜面長' 21.86m

土留工:20.54×7.3≒150 万円

法枠工:20.54×21.86×0.9≒404 万円

$C_0=554$ 万円

モデル-2 幅:38.0m, 斜面長:37.0m

土留工:38.0×7.3≒277 万円

法枠工:38.0×37.0×0.9≒1265 万円

$C_0=1542$ 万円

この 2 個の斜面における対策費用をもとにして式(5)および(6)において、 $n=30, 35, 40$ 年、 $r=0.0 \sim 5.0$ と変

動させて 1 年当りのコスト C を算出する。

1 年当りのコスト C と先に算出された 1 斜面・1 年当りのリスク R_{x0}' 、 $R_{x0.90}'$ との比 C/R_{x0}' 、 $C/R_{x0.90}'$ を求め、その結果を Fig. 4、Fig. 5 に示す。この結果によると、モデル-1 での平均リスクとの比 C/R_{x0}' は残余償却年数 $n=30$ 年の場合、ディスカウント比 r が約 0.7 の時、 $C/R_{x0}'=1.0$ となり、ディスカウント比が大きい値 $r=5.0$ の時でさえ、 $C/R_{x0}'=2.0$ である。 $n=40$ 年の場合、 $r=2.0$ 付近で $C/R_{x0}'=1.0$ となる。また、90%信頼度における比 $C/R_{x0.90}'$ は、 $n=30, 35, 40$ とした場合、 $r=3.2, 3.9, 4.8$ で $C/R_{x0.90}'=1.0$ となり、ほとんどの場合において、災害額が防止工事費を上回ることがわかる。次に、モデル-2 では、 C/R_{x0}' 、 $C/R_{x0.90}'$ 共に 1.0 以下になることはないが、 $r=5.0$ の時でさえ、 $C/R_{x0}'=4.6$ 、 $C/R_{x0.90}'=3.4$ となり、災害額は防止工事費に見合う額であることがわかる。

4.4 リスク軽減効果の比較

4.3 節で述べた 2 つのモデル斜面に関する対策により、その土木構造物である土留壁、法枠が対応できる年数の間は斜面崩壊が防止できると仮定して、式(8)により軽減されたリスクをそれぞれ算出すると、その結果は死亡に関する軽減リスクは $\Delta R_x=4.98 \times 10^{-4}$ 人、 $\Delta R_{x90}=9.47 \times 10^{-4}$ 人、また、損害金額に関する軽減リスクは $\Delta R_x'=20.6$ 万円、 $\Delta R_{x90}'=29.4$ 万円となる。

これらの値及び、4.3 節で求めた対策コストから、式(11)を用いて死亡率に関するリスク軽減効果 k 、損害金額に関するリスク軽減効果 k' を算出し、歩行者交通安全

Table 10 1 斜面のリスク(平均値)

	C_x	P	$R_{x0} / \text{年}$	$R_{x0}' / \text{年(万円)}$
死亡	2.0 人	0.056	4.98×10^{-4} 人	49800
負傷	3.1 人	0.091	1.26×10^{-3} 人	6300
全壊	1.4 戸	0.311	1.94×10^{-3} 戸	38800
半壊	1.4 戸	0.356	2.22×10^{-3} 戸	22200
一部損害	1.4 戸	0.534	3.33×10^{-3} 戸	66600
復旧費用	4.64×400 万円	1.000	82600 円	82600
			合 計	206000

Table 11 1 斜面のリスク(90%信頼度)

	C_{x90}	P	$R_{x090} / \text{年}$	$R_{x090}' / \text{年(万円)}$
死亡	3.8 人	0.056	9.47×10^{-4} 人	94700
負傷	2.7 人	0.091	1.09×10^{-3} 人	5450
全壊	1.9 戸	0.311	2.63×10^{-3} 戸	52600
半壊	1.7 戸	0.356	2.69×10^{-3} 戸	26900
一部損害	1.9 戸	0.534	4.53×10^{-3} 戸	9060
復旧費用	5.90×400 万円	1.000	105000 円	105000
			合 計	294000

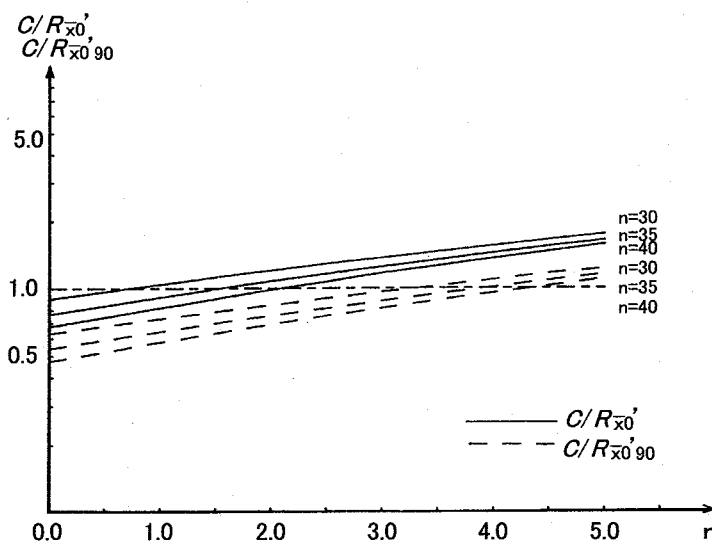


Fig. 4 年間当たりの比 C/R_{x0}' 、 $C/R_{x0}'_{90}$ (モデル 1)

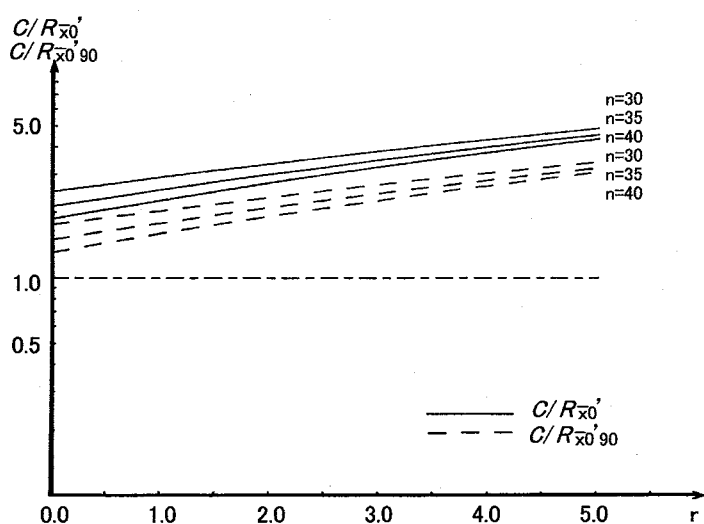


Fig. 5 年間当たりの比 C/R_{x0}' 、 $C/R_{x0}'_{90}$ (モデル 2)

Table 12 リスク軽減効果：k

リスク対策	死亡率による軽減効果；k	損害額による軽減効果；k'
モデル1	$1.36 \times 10^{-9} \sim 6.81 \times 10^{-9}$	$5.72 \times 10^{-1} \sim 2.16 \times 10^0$
モデル2	$4.97 \times 10^{-10} \sim 2.45 \times 10^{-9}$	$2.05 \times 10^{-1} \sim 7.26 \times 10^0$
歩行者安全対策	$6.7 \times 10^{-10} \sim 2.4 \times 10^{-9}$	$6.7 \times 10^{-2} \sim 2.4 \times 10^{-1}$
アスベスト対策	$2.7 \times 10^{-10} \sim 2.6 \times 10^{-8}$	$3.2 \times 10^{-2} \sim 3.1 \times 10^0$

対策および、アスベスト除去対策のそれ⁹⁾と比較したものを Table 12 に示す。これらの結果によると、斜面崩壊対策によるリスク軽減効果は、歩行者交通安全対策及びアスベスト除去対策と比較して年間死亡率で見てもほぼ同等かそれ以上のレベルであることが認められ、損害金額の軽減については、かなりの効果が期待できる。現在、歩行者の事故対策は公共的な資源を配分することが認め

られているが⁹⁾、限定された例題についての結果であり、一般的な結論とは言えないが、リスク軽減効果からみて斜面崩壊対策についても十分その価値が認められることを示している。

5 あとがき

本研究では、斜面崩壊の特徴と災害の実態を理解する

とともに、急傾斜地崩壊危険斜面において斜面崩壊が与えるリスクについて検討した。また、斜面崩壊対策防止工事の軽減効果の推定を行った。

本研究において得られた結果をまとめると、以下のようである。

- (1) 斜面崩壊における過去のデータを整理することによって、斜面崩壊の特徴を把握することができた。
- (2) 年間死亡率による斜面崩壊に関するリスクは、CrouchとWilsonにより与えられた許容範囲内(10^{-6} /年)であるが、急傾斜地崩壊危険地区においては、その許容レベルを上回っていることが示された。
- (3) 斜面崩壊に関する損害は、人的な損害以上に物理的損害の比率が大きいことが示され、この損害額は対策防止工事費に見合う範囲内であることが示された。
- (4) 斜面崩壊対策防止工事によるリスク軽減効果を歩行者道路交通安全対策のそれと比較することにより、公共投資の面から見てその価値が認められた。

以上得られた結果は設定したモデルに限定して示されたものであり、他の対策工法についても評価する必要がある。また、本論文では被害を回避するための政策については取り扱っていない。今後は、これらのことを考慮した、より実際の斜面についてのリスク評価及び、軽減効果の検討が望まれる。

なお、本研究で用いたデータは、著者らが過去に実施した斜面崩壊予測に関する研究^{15),16)}に使用したもので、古いものは20数年前のものもあり、現在の実態と異なった特徴を示している可能性がある。したがって、ここで得られた結論は現在の斜面崩壊のリスク解析に直接利用できない。しかし、崩壊防止対策が十分実施されてこなかった地域については、斜面崩壊に関する本質的な特徴の大幅な変化はないと考えられるので、ここで得られた結果は十分有効であると思われる。また、論文で強調したい第一の点は、これまで実施されてきた対処療法的な斜面崩壊防止工事ではなく、リスク評価とリスク軽減効果の推定をもとにした合理的な方法で実施すべきことを提案することにあるので、古いデータを用いた結果ではあるが本論文の目的は十分達成したものと考えている。

参考文献

- 1) 草野直幹：土木分野におけるリスクマネジメントの必要性、土木学会誌、Vol. 85, pp. 6-8, 2000.
- 2) 河合廣樹：リスクを緩和する：リスクミティゲーション、土木学会誌、Vol. 85, pp. 17-21, 2000.
- 3) 山下武典：工事契約とリスクマネジメント、土木学会誌、Vol. 85, pp. 27-30, 2000.
- 4) 花安繁郎：建設施工段階におけるリスクマネジメントの現状と問題点、土木学会誌、Vol. 85, pp. 31-34, 2000.
- 5) 島村誠：運用維持管理段階でのリスクマネジメント、土木学会誌、Vol. 85, pp. 34-37, 2000年7月.
- 6) 村山 武彦、原科 幸彦：居住環境汚染リスクの評価に関する一研究、日本リスク研究学会誌、Vol. 1, No. 1, pp. 75-83, 1989.
- 7) W.E.Kasterberg and L.Cave: Value / Impact Assessment for the Evaluation of Risk Reduction : Development of a Framework, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 28, pp. 205-227, 1990.
- 8) 今井久次郎：損害保険の理論と実際、時潮社, 1979.
- 9) 建設省土木研究所急傾斜地崩壊研究室編：急傾斜地崩壊の実態とその対策, 1978.
- 10) 建設省編：建設白書昭和 60, 62 年度版, 1985, 1987.
- 11) 高橋 保：自然災害の現状と問題点、土木学会誌、Vol. 68, pp. 33-35, 1983.
- 12) 行政資料調査会編：災害対策資料総覧, 1975.
- 13) 安江 朝当：急傾斜地崩壊対策の考え方、急傾斜地崩壊の実態とその対策、土木研究資料第 801 号, pp. 18-24, 1973.
- 14) 総務艦計局編：日本長期統計総覧, Vol. 1, Vol. 5, 1987.
- 15) R・Wilson and E.Crouch: Risk/Benefit Analysis Ballinge Publishing Company, 1982.
- 16) 白木 渡、松保 重之：ニューラルネットワークによる斜面崩壊予測に関する研究、第 3 回システム最適化に関するシンポジウム論文集、pp. 153-158, 1993.
- 17) 白木 渡、松保 重之：ニューラルネットワークによる斜面崩壊予測システムの開発、JCOSSAR' 95 論文集、Vol. 3, pp. 569-574, 1995.

(2000年9月14日受付)