

土石流危険渓流における崩壊規模の 評価に関する研究

荒木義則¹・鈴木真次²・石川芳治³・水山高久⁴・古川浩平⁵

¹正会員 工修 中電技術研究所(株)水工部(元山口大学助手) (〒734 広島市南区出汐2-3-30)

²正会員 工修 防衛大学校研究員 土木工学教室(〒239 横須賀市走水一丁目10-20)

³正会員 農博 建設省土木研究所 砂防部 砂防研究室長(〒305 茨城県つくば市大字旭一番地)

⁴正会員 農博 京都大学助教授 農学部林学科(〒606-01 京都市左京区北白川)

⁵正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

土石流危険渓流における渓流調査は、全国的に実施され渓流の危険度が評価されている。しかし、この調査の後に多くの渓流で土石流が発生したが、その妥当性の検証は十分であるとは言い難い。本研究では、昭和57年7月に長崎地方で発生した土石流災害のうち、最も被害の大きかった長崎市東部地方を対象とし、現行の渓流危険度評価の検証を行うと共に素因である地形要因を用いて谷頭崩壊や土石流の発生状況に基づいた渓流の崩壊規模を評価する方法を提案した。

Key Words : debris flow, torrent stability, hazard evaluation, linear multiple regression model

1. はじめに

自然災害のうち、土石流をはじめ地滑りや崖崩れなどの土砂災害は毎年全国各地で発生しており、尊い人命が失われ、貴重な財産が破壊されている。土砂災害の中でも最も多量の土砂を生産し、破壊力の最も大きな現象が土石流災害である。また、地滑りや崖崩れは、土砂の移動が崩壊開始点およびその近傍であり被害は局所的で集中的なものとなるのに対して、土石流は、土砂の移動距離が長く、流下に伴い溪床に堆積している不安定土砂を取り込むために流出する土砂量は莫大なものとなり、その被害は下流域まで広範囲にわたるといって特徴をもっている¹⁾。

このような土石流災害に対して建設省は、昭和42年度から全国的に土石流危険渓流調査を行っており、平成2~4年度の調査結果によると約7万9千もの危険渓流があることが報告され、昭和61年度の調査結果よりも増加傾向にあることが指摘されている²⁾。

これは、近年の土地利用の高度化に伴い山間渓流部の宅地開発等が進んでいるからであり、我が国の国土事情における生活と社会・経済条件による制約を考えると、今後さらに危険渓流が増えるものと考えられる。

土石流の発生は、いわゆる素因としての地形・地質条件に、ある限界以上の誘因(外力)となる条件

が加わることによって引き起こされる。ここで、誘因には、豪雨、融雪、火山活動、地震等が考えられるが、本研究では最も被害の多発している豪雨による土石流を対象としている。この豪雨に起因する土石流の発生予測に関しては、数量化Ⅱ類による判別解析手法を用いた研究が行われている³⁾。また、建設省でも素因である地形・地質の観点から渓流の危険度評価の研究が行われ、それらが実用化されて土石流危険渓流調査となって全国的に実施されている⁴⁾。この調査の後も多くの渓流で土石流が発生したが、現行の危険度評価方法の検証およびその改良に関する研究はほとんど行われていない。また、誘因については累積雨量、実効雨量、直前降雨強度の関係、タンクモデルによる予測、ハイトグラフによる予測等^{5)~7)}があるが降雨そのものを予測することは非常に困難であり多くの問題点も含まれている。さらに、素因と誘因を考えた物理モデルで評価する手法⁸⁾もあるが、現実にこのモデルによる解析を全国的に適用するのは大変な労力を必要とし、より簡単な調査に基づいた予測を検討する必要がある。この様に土石流発生のメカニズムは理想化された物理モデルにおいてはある程度解明されているものの、自然渓流には素因が多く、それらが渓流毎に多様に変化しているため、単純化したモデルに基づいた解析だけでは、実際の土石流発生予測は困難であり、

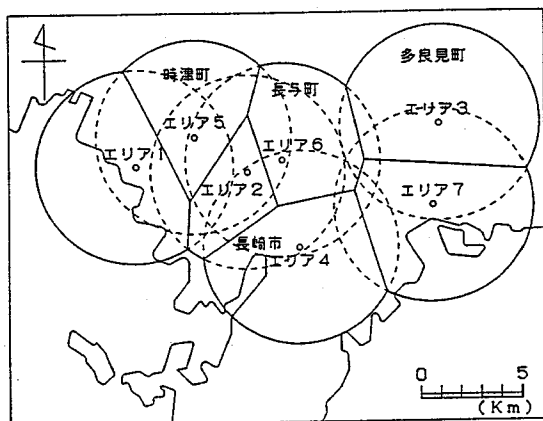


図-1 降雨による地域区分

表-1 降雨による地域区分と土石流発生率

| 地域区分 | 降雨量(mm/h) | | | 土石流発生率(%) (発生数/渓流数) |
|------|-----------|-------|--------|------------------------|
| | 最大1時間 | 最大3時間 | 最大10分間 | |
| エリア1 | 118 | 257 | 25 | 0(0/23) |
| エリア2 | 122 | 256 | 35 | 2(1/44) |
| エリア3 | 128 | 333 | 40 | 33(10/30) |
| エリア4 | 142 | 335 | 34 | 8(2/25) |
| エリア5 | 152 | 327 | 36 | 4(2/49) |
| エリア6 | 155 | 300 | 37 | 11(6/55) |
| エリア7 | 161 | 366 | 38 | 34(27/80) |

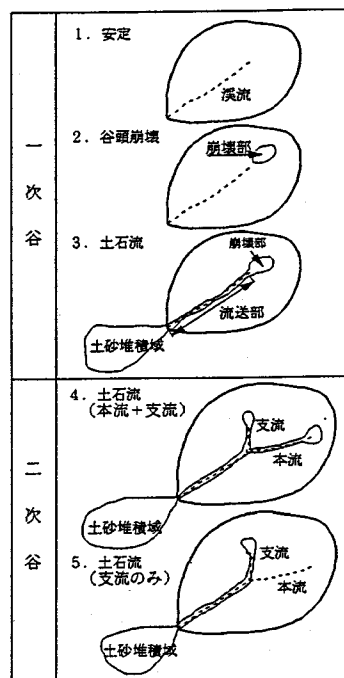


図-2 発生現象の模式図

土石流の危険性や被害の激甚さを考えると予測手法の信頼性や精度の向上が早期に望まれるところである。

そこで本研究では、昭和57年7月に長崎地方で発生した土石流災害のうち、土石流危険渓流を対象とし、最も土石流被害の大きかった長崎市東部において、現行の渓流危険度評価の検証を行うと共に渓流の素因である地形要因を用いて谷頭崩壊や土石流の発生状況に基づいた渓流の崩壊規模を評価する方法を提案した。渓流の崩壊規模の評価において説明変数には、主として災害発生前(昭和55年度)の土石流危険渓流調査結果と著者らの考えたその他の地形要因を用いた。そして目的変数には、谷頭崩壊や土石流が発生した場合の崩壊規模を崩壊ランクとして設定し、目的変数と説明変数の関係式を求め、必要な変数の選択やその影響の程度を評価し、それに基づいた予測を行うために重回帰分析を用いて、土石流危険渓流における崩壊規模を評価した。

2. 降雨量と土石流被害による地域区分

昭和57年7月23日～24日にかけて長崎県は、日本観測史上最大の集中豪雨に見舞われ、特に長崎市周辺に極めて多い降雨が観測された。長崎県南部地方で、今回の豪雨を記録した雨量観測機関は、官民合

せて約100箇所にはぼっている。これらの観測記録を基に、降雨量の大きさから、半径5km以内で7つのブロックに分割した。また、重複したエリアの土石流危険渓流は、最も近い雨量観測所のエリアに含めた。その雨量による地域区分を図-1に示す。また、各エリアでの降雨量を表-1に示す。ここで、降雨量の観測方法は、すべて転倒ます型の自記雨量計によるものであった。表-1より、最大時間雨量が150mmを越し、最大10分間雨量が40mmを越す豪雨が記録されている地域もあり、長崎豪雨は、短時間雨量が非常に大きいという特徴がある⁹⁾。また、西彼杵郡長与町役場では、観測史上最高の最大時間雨量187mm/hが観測されているが、当地域には、地質が沖積層のものが多く、土砂害も崖崩れが多発した地域であるため本研究の対象外としている。

一方、表-1より土石流危険渓流において渓流侵食を引き起こしたものを土石流とすると、土石流の発生は、エリア1地域では0%、エリア2, 4, 5地域では10%以下、エリア6地域で10%程度、エリア3, 7地区では、土石流の発生が30%を越えており、降雨量が大きくなるに従って土石流の発生も多くなっていることがわかる。そこで本研究では、エリア3, 7地区を雨量大の地域とし、この地域では、土石流が発生するための誘因となる降雨は必要条件を満たしていると考え、素因となる地形要因のみから谷頭崩壊や土石流の発生状況を検討し、その崩壊規模を

評価する。

3. 谷頭崩壊・土石流発生の実態区分

土石流の発生原因には、山腹崩壊が起因となるもの、溪床堆積物の移動によるもの、天然ダムの決壊によるもの、火山爆発によるもの等が考えられる¹⁰⁾。中でも豪雨による山腹崩壊がそのまま土石流となる場合が非常に多いのが実情であり、本研究で使用した土石流データも、山腹崩壊型の土石流を扱った。

山腹崩壊型の土石流の発生形態は、溪流内の山腹斜面で発生した崩壊が原因となり、溪床に堆積している不安定土砂を巻き込んで、量、勢力を増しながら流下するという特徴を持っており、崩壊が必ずしも大規模でなくても溪床勾配や溪床堆積物の状況等の溪流の地形要因によって流下しながら大型化する例が多い。従って、溪流には崩壊につながる山腹斜面や溪床堆積物の存在とその多少及びそれを移動させるための地形要因が溪流の崩壊規模を左右する要因として考えられる。ここで、溪流に発生した現象の模式図を図-2に示した。図-2より、谷頭崩壊に伴う土石流は、谷頭崩壊のみの現象に比べて、その崩壊規模は大きく、素因として流域に内在する不安定土砂が多いものほど崩壊規模は大きく、それを引き起こすだけの降雨が十分に加われば、溪流は安定から谷頭崩壊、そして土石流へとその形態を変化させると考えられる。一方、崩壊規模の小さい溪流では、同様の降雨においても土石流は発生せず、溪流は安定状態を保っていたり、谷頭崩壊のみに留まってしまうことが考えられる。また溪流は、ストレーラーの谷次数解析に基づく谷の次数評価¹¹⁾により、一次谷であればその崩壊形態は安定・崩壊・土石流の3つの基本的なパターンに分類することができる。しかしながら、二次谷以上になると同一流域内にある一次谷よりは内在する不安定土砂が多くなり、谷頭崩壊に伴う土石流の発生が、本流だけでなく支流からも発生する場合や支流から発生して本流に流入する場合もあり、土石流の発生を予測する上で不確定要素が多くなり過ぎるといった問題が生じてくる。

4. 従来の土石流危険度評価の検証

土石流発生に関する溪流調査は、土石流危険溪流調査として昭和42年度から建設省により全国的に実

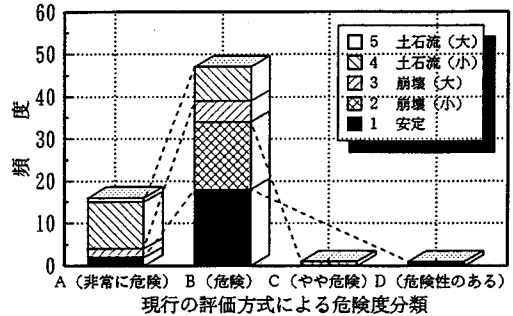


図-3 現行の危険度区分の溪流に発生した現象

施されており、平成元年度にはその見直しがなされ現在に至っている。土石流危険溪流調査とは、土石流発生の危険がある溪流を抽出する調査であり、土石流発生に関係する要因として溪床勾配、溪床堆積物の有無、地質、流域面積、粒径、溪流幅、降雨量等を調査し土石流発生の危険度を判定する調査となっている¹²⁾。調査の対象となる溪流は、保全対象が人家5戸以上または官公署、学校、病院、駅、旅館、発電所等の重要施設に流入する場合であり、保全対象物の位置によって一次谷や二次谷以上の溪流となる。また、この調査は、本流を中心として調査が行われるため二次谷以上の溪流については支流に対する調査が十分には行われていないのが現状である。また土石流は、前述の発生現象による区分で述べたように、本流だけでなく支流からも発生する場合があります。土石流の発生につながる要因や土石流の発生場所を推定するには、溪流を一次谷に流域分割し、一次谷の溪流を用いて検討する必要があると考えられる。

この調査結果を基に土石流の危険度評価が行われている。現行の危険度評価は土石流の発生しやすさを評価しており、それによると溪流はA~Dの4ランクに分類される¹³⁾。ここでA~Dのランクは、A(非常に危険な溪流)、B(危険な溪流)、C(やや危険な溪流)、D(危険性のある溪流)を表している。

そこで、本研究で対象としたエリアの各溪流についてこの危険度評価と発生した現象との関係を比較したものを図-3に示す。図-3より、溪流が各ランクに分類された割合はB(危険)と評価された溪流が最も多く、次がA(非常に危険)であり、C(やや危険)やD(危険性のある)は非常に少ないことがわかる。特に、A(非常に危険)の溪流では実際に土石流の発生頻度が高く、B(危険)の溪流になると安定や谷頭崩壊のみの頻度が土石流の頻度よりも高くなっている。このように、現行の危険度評価は土石流の発生危険度を予測する上では有用であるが、当然ながら発生規模の予測に関しては十分ではないと考えられ

表-2 地形要因一覧表

| 要因 | 採 | 用 | 理 | 由 |
|------|---|------------------------|--|---------------------|
| 地形要因 | A | 水系模様 | 流水の流下形態(最短渓流長/渓流長) | 「すべり台」としての土石の流下しやすさ |
| | B | 流域平均勾配(°) | 渓床移動(30mコンダで計測) | |
| | C | 最急渓床勾配(°) | 流水の流下距離 | |
| | D | 主溪流長(km) | 集水の大小 | |
| | E | 流域面積(km ²) | 流水の流下形態 | |
| | F | 溪流幅(m) | 土石流の発生・発達規模 | |
| | G | 渓床堆積厚さ(m) | 土石流発生場の大小 | |
| 形要因 | H | 0次谷の数 | 斜面崩壊の発生・非発生(30mコンダで計測) | |
| | I | 流域最大傾斜(°) | | |
| 流域要因 | J | 渓床危険度評価 | 建設省方式による評価 ランク1: 渓床勾配 $\theta \leq 10^\circ$ ランク2: $10^\circ < \theta < 15^\circ$ ランク3: $\theta \geq 15^\circ$, 流域面積A < 5 ha ランク4: $\theta \geq 15^\circ$, 流域面積A ≥ 5 ha | |
| | K | 渓床堆積厚評価 | 建設省方式による評価 渓床勾配10°以上の最深堆積土砂厚の平均値 ランク1: 渓床堆積厚h < 0.3m, 少ない ランク2: 渓床堆積厚0.3m \leq h < 2m, 中 ランク3: 渓床堆積厚h ≥ 2 m, 多い | |
| | L | 降雨集中度評価 | 流域形状と谷の発達状況から降雨の集中度を評価(ランク1~5: 図-5参照) | |

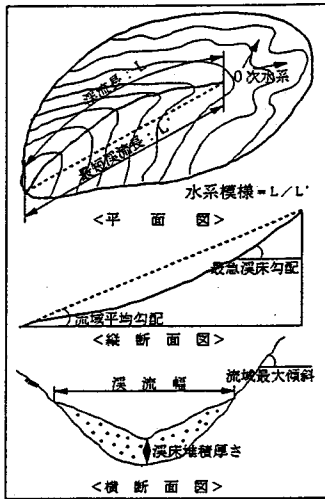


図-4 地形要因模式図

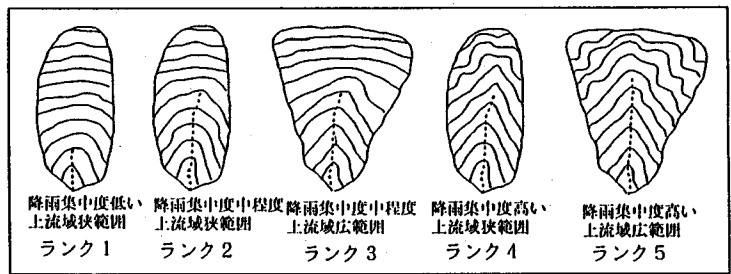


図-5 降雨集中度評価

る。

そこで著者らは、土石流の発生しやすさである発生危険度よりも、発生した場合の規模の方がより重要であると考え、溪流の被災実態に基づき、安定した溪流、谷頭崩壊の発生した溪流、谷頭崩壊に伴う土石流の発生した溪流についてそれぞれの発生規模を評価することを試みた。

5. 地形要因の設定

土石流の発生やその規模は、素因である地形・地質条件の影響を受けると言われており、特に地質特性によって土石流の発生率が異なることが指摘^{1,2)}されているため、本研究では対象とした土石流危険溪流の中で8割以上を占めている安山岩を中心とした火山噴出岩からなる地質のみを取り扱った。

次に、著者らは地形要因として図-4に示すような項目を考えた。これらの項目は、建設省の行っている土石流危険溪流調査の方法を基本としており、その他の要因として土石流や山腹崩壊に関係があると考えられ、しかも地形図(1/5,000)から読み取ることのできる項目¹¹⁾を加えたもので、表-2に地形要因一覧表としてまとめた。この表で、最急渓

床勾配(要因:C)、主溪流長(要因:D)、流域面積(要因:E)、溪流幅(要因:F)、渓床堆積厚さ(要因:G)、渓床危険度評価(要因:J)、渓床堆積厚評価(要因:K)は、土石流危険溪流の調査項目である。その他の要因として溪流要因には水系模様(要因:A)、流域平均勾配(要因:B)、斜面要因には0次谷の数(要因:H)、流域最大傾斜(要因:I)、流域評価要因には降雨集中度評価(要因:L)を考えた。ここで0次谷とは、一次谷の上流域における斜面の等高線が谷型形状をしているものを言う。また、降雨集中度評価とは、図-5に示すように流域の平面形状と谷の発達状況から降雨の集中度をランク1~5まで区分し、ランクが高くなるほど降雨集中度は高くなり危険になると評価したものである。具体的にこの評価ランクの設定では、一つの目安として、まず流域の横幅/縦幅の比が0.5以上であればランク3, 5, 0.5未満であればランク1, 2, 4に分類する。次に、ランク1, 2, 4のうち溪流長/縦幅が0.5以上であればランク2, 4とし、0.5未満であればランク1とする。最後に、上流域の等高線形状の凹凸が大きければランク4または5, 小さければランク2または3となり、ランク1~5に分類することができる。これらの調査項目のうち、現地調査を必要とする項目は、渓床堆積厚さ(要因:G)のみであり、その他の項目は、全て地形図より読み

表-3 土砂量別崩壊ランク

| ランク | 流出土砂量(Q) |
|-----|-------------------------------------|
| 1 | $Q = 0.0 \text{ m}^3$ |
| 2 | $0.0 < Q \leq 2,500 \text{ m}^3$ |
| 3 | $2,500 < Q \leq 5,000 \text{ m}^3$ |
| 4 | $5,000 < Q \leq 10,000 \text{ m}^3$ |
| 5 | $10,000 \text{ m}^3 < Q$ |

表-4 被災形態別崩壊ランク

| ランク | 崩壊形態 |
|-----|-------------------------------------|
| 1 | 安定 |
| 2 | 崩壊 (崩壊面積 $< 1,000 \text{ m}^2$) |
| 3 | 崩壊 (崩壊面積 $\geq 1,000 \text{ m}^2$) |
| 4 | 土石流 (侵食路長 $< 0.5 \text{ km}$) |
| 5 | 土石流 (侵食路長 $\geq 0.5 \text{ km}$) |

取ることができる。

6. 崩壊規模の設定

溪流の谷頭崩壊や土石流の発生規模は、流出土砂量と関係が強いと考えられる。しかしながら緊急を要する災害復旧において流出土砂量の調査は、災害前の詳細な地形データも少なく、災害後に詳細な測量をする時間的な余裕もないため、流出土砂量の調査は専門技術者の目測により行われているのが現状である。また、航空写真を用いれば、侵食や堆積地域の面積は精度よく求められるものの、侵食深さや堆積厚さは、平均的な値を想定せざるを得ないことが多く、流出土砂量の精度は低くなるといった問題点がある。そこで、流出土砂量をそのまま目的変数にするのではなく、流出土砂量を基に区分した土砂量別崩壊ランクを表-3のように設定した。表-3より、ランク1は流出土砂量 0.0 m^3 の溪流であり、その中には安定な溪流や流域の一部が小規模の崩壊を起こしているが谷の出口より下流には土砂が流出していない溪流も含まれている。ランク2, 3, 4, 5は谷の出口より流出した土砂量により区分した。

一方、図-2による溪流の被災現象を基に形態分類を行い、崩壊ランクとして1~5ランクの被災形態別に整理したものを表-4に示す。表-4より、ランク1は安定した溪流、ランク2, 3は谷頭崩壊の発生した溪流、ランク4, 5は土石流の発生した溪流を表す。また土石流の発生規模は侵食路長で、谷頭崩壊の発生規模は崩壊面積でランクを細分化した。侵食路長や崩壊面積であれば、災害直後の溪流被災状況を航空写真から簡単に計測することができ、観測者の主観の入らない比較的精度の高いデータを得ることができると考えられる。

以上のことから溪流の崩壊規模には、土砂量別崩壊ランクと被災形態別崩壊ランクの2通りについて検討を行うことにする。

7. 重回帰分析による予測モデルの構築

(1) 分析手法と手順

本研究で用いた説明変数のうち溪流要因や斜面要因は、地形図や現地調査から直接計測されるデータであるのに対し、流域評価要因は専門技術者の経験に基づき設定した定性的ではあるが自然溪流の崩壊規模に関係する定量的なデータである。また、目的変数には崩壊規模として土砂量別崩壊ランクや被災形態別崩壊ランクを設定しており、ランクが高いものほど崩壊規模が大きいと考えられる。さらに、これらは自然溪流の崩壊規模を評価する上において比較的精度良く求められるデータであり、これらも同様に定量的なデータとして取り扱った。これらの定量的なデータに対して重回帰分析を適用した。

重回帰分析では、一般的に用いられている変数増減法(ステップワイズ法)を採用した。ステップワイズ法は、変数を取り込むときに、取り込んだ変数が有意となるかどうかあらかじめ検定し、有意であると検定されたときはじめて取り込まれる。また変数が取り込まれると既に取り込まれている変数も変化し、有意でなくなる場合もある。よって新しい変数が取り込まれる度に既に回帰式に取り込まれている変数全てにF検定を行い、有意でなくなっている変数は回帰式から除去される。よって必ずしも全ての変数が回帰式に取り込まれるのではない。また、分析により得られる線形重回帰モデルでは、説明変数の中に互いに相関の高い変数が含まれる場合には、分散共分散行列の行列式がほとんどゼロとなるため、逆行列の要素の値が大きく数値計算的にも不安定となり、回帰係数の推定値の推定精度が悪くなる場合がある。これは多重共線性の問題¹³⁾と言われており、これを避けるためには、説明変数間の相関行列をみて相関係数が1に近い説明変数が存在する場合には、そのどちらかの変数を棄却する必要がある。そこで説明変数間の単相関係数を考慮し、事前の変数選択を行った上で予測モデルを構築する。

(2) 計算ケース

本研究の対象とした地域には、危険溪流が全部で110溪流あり、流域内の主な地質別に見ると、94溪

表-5 計算ケース

| 計算ケース | 説明変数 | 目的変数 |
|-------|--------------------------|------------|
| ケース1 | 地形図から読み取れる要因 | 土砂量別崩壊ランク |
| ケース2 | 地形図から読み取れる要因 + 現地調査による要因 | 被災形態別崩壊ランク |
| ケース3 | 地形図から読み取れる要因 | 土砂量別崩壊ランク |
| ケース4 | 地形図から読み取れる要因 + 現地調査による要因 | 被災形態別崩壊ランク |

表-6 地形要因と崩壊ランクの単相関行列

| 項目 | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | ソウ |
|----|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| A | 1 | | | | | | | | | | | | |
| B | 0.03 | 1 | | | | | | | | | | | |
| C | 0.28 | 0.82 | 1 | | | | | | | | | | |
| D | 0.44 | 0.01 | 0.26 | 1 | | | | | | | | | |
| E | 0.11 | -0.13 | 0.00 | 0.76 | 1 | | | | | | | | |
| F | -0.01 | 0.37 | 0.30 | 0.33 | 0.22 | 1 | | | | | | | |
| G | -0.09 | 0.02 | 0.09 | 0.14 | 0.55 | 0.21 | 1 | | | | | | |
| H | 0.28 | 0.08 | 0.14 | 0.48 | 0.57 | 0.15 | 0.07 | 1 | | | | | |
| I | 0.06 | 0.37 | 0.33 | 0.39 | 0.24 | 0.44 | 0.16 | 0.22 | 1 | | | | |
| J | 0.19 | 0.41 | 0.33 | 0.39 | 0.38 | 0.38 | 0.16 | 0.64 | 0.25 | 1 | | | |
| K | 0.08 | 0.16 | 0.05 | 0.31 | 0.29 | 0.20 | 0.18 | 0.47 | 0.09 | 0.08 | 1 | | |
| L | 0.19 | -0.11 | 0.04 | 0.62 | 0.63 | 0.20 | 0.18 | 0.16 | 0.16 | 0.38 | 0.14 | 1 | |
| ソウ | 0.15 | -0.02 | -0.03 | 0.47 | 0.48 | 0.29 | 0.37 | 0.50 | 0.23 | 0.52 | 0.21 | 0.74 | 1 |

表-7 各ケース毎の計算結果

| 計算ケース | 採択変数 | 偏回帰係数 | 標準偏回帰係数 | 精 度 |
|-------|-------------|--------|---------|----------------------------------|
| ケース1 | 溪床危険度評価 (J) | 0.326 | 0.185 | 重相関係数 0.591 |
| | 降雨集中度評価 (L) | 0.463 | 0.494 | 寄与率 34.89% |
| | (定数項) | -0.562 | | 分散比 15.01 > F ₀ =3.16 |
| ケース2 | 溪床危険度評価 (J) | 0.527 | 0.289 | 重相関係数 0.789 |
| | 降雨集中度評価 (L) | 0.611 | 0.638 | 寄与率 62.18% |
| | (定数項) | -0.938 | | 分散比 50.97 > F ₀ =3.14 |
| ケース3 | 溪床堆積厚さ (G) | 0.876 | 0.350 | 重相関係数 0.682 |
| | 溪床危険度評価 (J) | 0.271 | 0.154 | 寄与率 46.47% |
| | 降雨集中度評価 (L) | 0.403 | 0.431 | 分散比 15.91 > F ₀ =2.76 |
| | (定数項) | -1.113 | | |
| ケース4 | 溪床堆積厚さ (G) | 0.544 | 0.209 | 重相関係数 0.815 |
| | 溪床危険度評価 (J) | 0.480 | 0.263 | 寄与率 66.35% |
| | 降雨集中度評価 (L) | 0.583 | 0.608 | 分散比 40.09 > F ₀ =2.75 |
| | (定数項) | -1.281 | | |

流が火山噴出岩で残りの16溪流が第三紀層であった。そこで、地質による影響を取り除くため全溪流の8割以上を占めている火山噴出岩からなる溪流を対象とした。また、流域内の一部が宅地や道路として開発されている場合は、溪流の崩壊が開発地点の影響を受けていることが考えられるため本研究の対象外とし、道路や宅地等の人為的開発の行われていない自然溪流である80溪流のみを対象とした。そのうち一次谷は65溪流、二次谷以上は15溪流であった。

溪流の崩壊規模を予測する線形重回帰モデルでは、著者らの考えた地形要因が溪流全体の崩壊規模を表していると考えられる一次谷の溪流を用いて構築することとし、二次谷以上の溪流については別途取り扱うものとする。また、線形重回帰モデルの構築にあたり、説明変数である地形要因には地形図だけで読み取れる要因と現地調査を必要とする要因があること、そして目的変数となる溪流の崩壊規模には、流出土砂量と被災形態を基に設定したそれぞれの崩壊ランクが考えられるため、表-5に示すような4

通りのケースについて分析を行った。

(3) 分析結果

分析にあたり多重共線性の問題を避けるため、説明変数間の相関行列による変数選択を行う。分析を行う一次谷において、目的変数が被災形態の場合は、65溪流すべてデータとして用いることができるのに対し、流出土砂量を目的変数とする場合は、流出土砂量の調査が行われているのは59溪流であり、使用データ数は若干少なくなるものの、その影響は少ないと判断し、変数選択では、65溪流の全データを用いる。表-6に説明変数(A~L:12要因)と目的変数(被災形態別崩壊ランク)の単相関行列を示した。表-6より、説明変数である流域平均勾配(要因:B)と最急溪床勾配(要因:C)の単相関係数が0.82と高い相関を持っていることと、使用したデータには溪床移動に伴い発生した土石流のデータは含まれていないことから、溪床移動型の土石流に関係すると考えられる要因である最急溪床勾配(要因:C)を説明

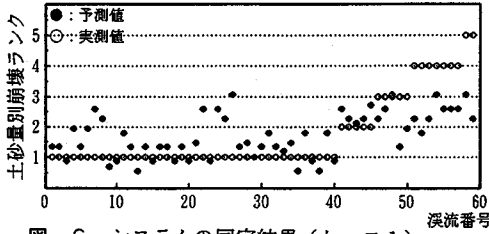


図-6 システムの同定結果(ケース1)

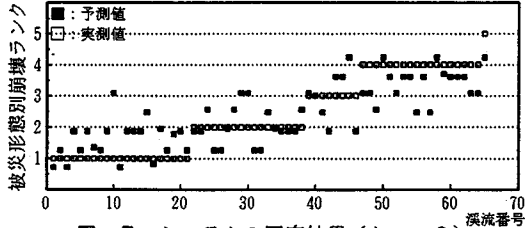


図-7 システムの同定結果(ケース2)

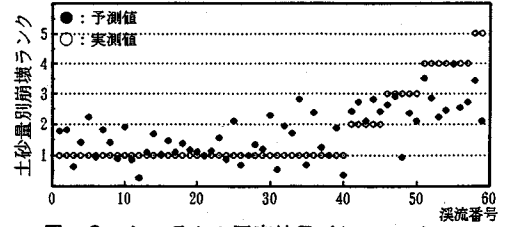


図-8 システムの同定結果(ケース3)

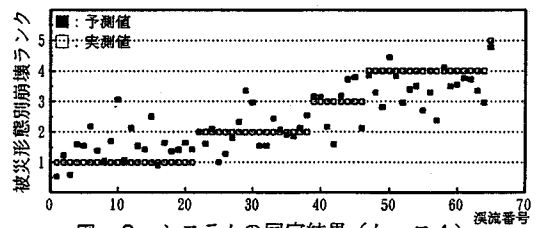


図-9 システムの同定結果(ケース4)

変数から取り除いた。また主溪流長(要因:D)は、流域面積(要因:E)と降雨集中度評価(要因:L)との相関が高く、単相関係数がそれぞれ0.76、0.65であることから、同様に主溪流長(要因:D)を説明変数から取り除いた。従って、重回帰分析に用いた説明変数は、最急渓床勾配(要因:C)、主溪流長(要因:D)を除く10変数である。これらの説明変数を用いて各計算ケース毎に重回帰分析を行った。重回帰分析では、ステップワイズ法を用いているため必ずしも全ての変数が回帰式に取り込まれるのではなく、式(1)~(4)の重回帰式が得られた。

$$Y_1 = -0.562 + 0.326 X_J + 0.462 X_L \quad (1)$$

$$Y_2 = -0.938 + 0.527 X_J + 0.611 X_L \quad (2)$$

$$Y'_1 = -1.113 + 0.876 X_G + 0.271 X_J + 0.403 X_L \quad (3)$$

$$Y'_2 = -1.281 + 0.544 X_G + 0.480 X_J + 0.583 X_L \quad (4)$$

ここで、 Y_1, Y'_1 : 土砂量別崩壊ランク
 Y_2, Y'_2 : 被災形態別崩壊ランク
 X_J : 渓床危険度評価
 X_L : 降雨集中度評価
 X_G : 渓床堆積厚さ

また、重回帰式の予測精度として、重相関係数と寄与率を表-7に示した。ケース1とケース2は、説明変数に地形図から読み取れる要因のみを用いた場合であり、式(1)、(2)から、重回帰式に採択された説明変数は、どちらも渓床危険度評価(要因:J)と降雨集中度評価(要因:L)の2項目となっている。また、表-7より予測式の精度は、ケース1もケース2も分散比からすると、予測式としては成り立つものの、

ケース2はケース1よりも予測精度が高く、ケース2の精度は、重相関係数0.789、寄与率62.18%、分散比50.97となり5%有意水準 $F_0=3.14$ を十分に上回っており、予測式として十分利用できるものである。

同様にケース3とケース4は、説明変数に地形図から読み取れる要因に現地調査により得られる要因である渓床堆積厚さ(要因:G)を加えた場合であり、採択された説明変数は、両ケースとも渓床堆積厚さ(要因:G)と渓床危険度評価(要因:J)と降雨集中度評価(要因:L)の3項目となっている。この結果は、ケース1、2で採択された説明変数に渓床堆積厚さ(要因:G)を加えた形となっており、重回帰式の予測精度も、全体的にケース1、2よりも高くなった。全ケースのなかで最も精度が高くなったのはケース4の場合で、その予測精度は、重相関係数0.815、寄与率66.35%、分散比40.09となり5%有意水準 $F_0=2.75$ を十分に上回っている。

次に、重回帰分析による予測式(1)~(4)を用いて実測値と比較したものを図-6~9に示す。図-6、8は、目的変数を流出土砂量とし流出土砂量別に分類した崩壊ランクを用いた場合であり、●印は予測値を○印は実測値を示している。図-6のケース1では、実測した崩壊ランクの低い1、2、3では予測値が比較的良好一致を示しているものの、崩壊ランクの高い4や5に対する予測値は実測値とかけ離れてしまい低い崩壊ランク予測を示した。それに対して図-8のケース3では、ケース1に比べて実測した崩壊ランクの高い4や5に対する予測値が実測値に近づいており、堆積土砂厚さの要因は崩壊規模の大きい溪流に対して有効に働いているといえる。一方、図-7、9は、目的変数を土砂災害の被災形態別に分

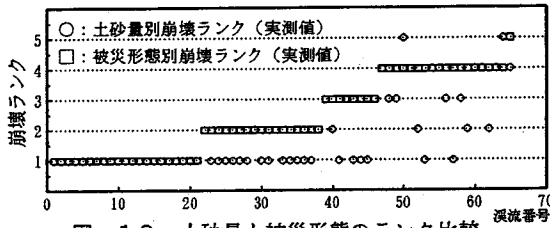


図-10 土砂量と被災形態のランク比較

類した崩壊ランクであり、■印は予測値を□印は実測値を示している。図-7のケース2では、実測の崩壊ランクが1である安定した溪流に対して予測値は崩壊ランクが1~2のやや大きめ値をとり、崩壊ランクの高い4や5の土石流に対しては予測値が崩壊ランク3~4のやや小さめの値を示す傾向が見られるものの、全体としては非常に良く一致していると言える。また図-9のケース4では、ケース2と比較してそれほど精度の向上は見られないものの、ケース4の方がケース2と比べて若干ではあるが全体的に崩壊ランクの予測値が実測値に近づいており、その分布幅も若干であるが狭まっていることがわかる。なお、本研究で扱った溪流は降雨が非常に集中した地域を対象とし、雨量要因を一定と考えていることに対する実際のばらつきを考慮すると、全体として見れば比較的精度の高い同定結果を示していることが伺える。

8. 予測モデルの比較検討

流出土砂量別に設定した崩壊ランクを目的変数として用いたケース1及びケース3の検討の結果、分析により得られた重回帰式は、両ケースとも予測式として利用できるものの、被災形態別に設定した崩壊ランクによるケース2及びケース4に比べて、その予測精度は劣ることが明かになった。両者の相違をより明確にするため、土砂量と被災形態別に設定した崩壊ランクに基づいた実測値同士を比較したものを図-10に示した。ここで、□印は被災形態、○印は土砂量別の崩壊ランクの実測値をそれぞれ示している。図-10より、被災形態ランクが1及び2においては、土砂量ランクは、ほとんど1となり、小規模の谷頭崩壊では谷の出口より下流に流出する流出土砂量がほとんどゼロであることを表している。一方、被災形態ランクが3以上になると、土砂量別崩壊ランクは、1~5までばらついており、流出土砂量は土石流によってかなり異なった値を取ることがわかる。また、被災形態ランクは、土砂量ランクより

も全体的に上位のランクを示しており、被災形態ランクを用いれば土砂量ランクよりも安全側の評価が行えると考えられる。このことから、溪流の崩壊規模の評価には、溪流の被災形態による崩壊ランクを用いるのが望ましいと言える。

また、予測式に採択された説明変数は、ケース1と2及びケース3と4のそれぞれにおいて同一項目となり、地形図から読み取れる要因には、渓床危険度評価(要因:J)と降雨集中度評価(要因:L)、さらに現地調査において求められる渓床堆積厚さ(要因:G)の合計3要因が重要であるといえる。さらに予測式は、地形図から読み取れる要因のみを用いた予測よりも現地調査による要因を加えた場合の予測精度の方が高くなった。このことから、実際の溪流評価への適用に当たっては、地形図からの要因により、土石流危険溪流の一次選定を行い、予測崩壊ランクが高くなった溪流に対して現地調査を行えば、土石流危険溪流の崩壊規模の予測精度は、さらに高まるものと考えられる。

9. 二次谷以上の溪流に対する崩壊規模の予測

二次谷以上の溪流は、一次谷の集合であることから、一次谷に比べて谷頭崩壊や土石流の発生に関係する地形要因も複雑となる場合が多い。図-2に示した溪流の被災実態からも明らかのように、その発生要因は複雑となり、二次谷以上の溪流をそのまま用いて土石流発生の予測に適用することは、地形要因を複雑にするだけで本質的な要因を押し隠すことにもなりかねないと考えられる。また、土石流危険溪流調査は、おもに本流を中心とした溪流調査であり、支流の調査はあまり重要視されていない。そこで、二次谷以上の溪流を一次谷に流域分割を行い、分割後の一次谷の溪流に対して、構築した予測モデル式(3)、(4)を用いて崩壊規模の予測を行った。また、比較のために分割前の二次谷以上の溪流をそのまま1つの流域として扱った場合についても同様の予測を試みた。ここで、予測式に採択されている地形要因のうち地形図から読み取ることのできる渓床危険度(要因:J)や降雨集中度評価(要因:L)については地形図から直接求めた。しかしながら、現地踏査を必要とする項目である渓床堆積厚さ(要因:G)については、全ての一次谷を調査することは大きな費用と多大な時間を必要とし、現実的でないと考えられるため、本流においてサンプリング調査を行い、支流については、多少の精度低下はあるものの、その結果を代用することにした。

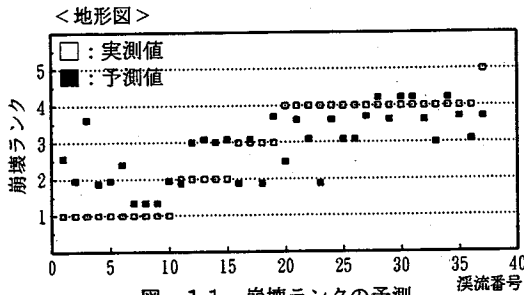


図-11 崩壊ランクの予測

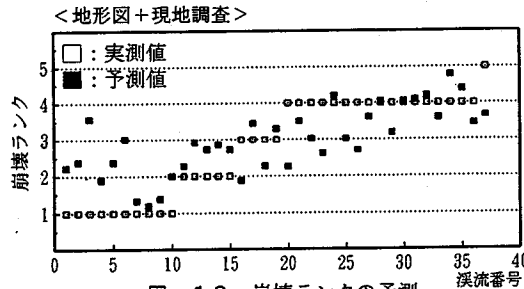


図-12 崩壊ランクの予測

崩壊ランクの予測は、地形図から求まる地形要因のみを用いて式(3)を適用した場合と、現地調査におけるサンプリング調査の結果を加えた要因を用いて式(4)を適用した場合、さらに、二次谷以上の溪流を1つの流域として扱い、地形図による要因に現地調査要因を加えて式(4)を適用した場合の3通りについて行った。

地形図から求まる要因を用いた予測の結果を図-11に示す。図-11より、□印は崩壊ランクの実測値、■印はその予測値を示している。実測値の崩壊ランクが1である安定溪流については、予測値の崩壊ランクが2のあたりで小規模崩壊となることを示しており、予測値が実測値よりやや大きくなった。また、崩壊ランクが3, 4, 5となるような規模の大きな谷頭崩壊や土石流を引き起こした溪流に対しては、予測値がややばらついているものの、実測値と良く一致していることがわかる。

また、地形図による要因に現地調査要因を加えた場合の予測結果を図-12に示す。図-12より、崩壊ランクの予測値は、実測値に近い値を示しており、図-11に示した予測値よりもさらに実際の崩壊形態をうまく再現しているといえる。

次に、二次谷以上の溪流を1つの流域として扱った場合の予測結果を図-13に示す。図-13より、△印は崩壊ランクの実測値、▲印はその予測値を示している。崩壊ランクの予測値は、どれも高く危険であることを示し、そのほとんどが崩壊ランク4の土石流発生溪流を示した。予測値は実測値と比較

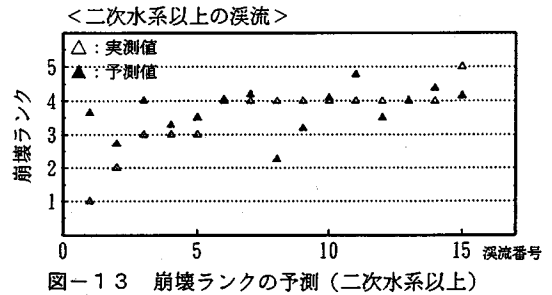


図-13 崩壊ランクの予測(二次水系以上)

的一致しているものの、二次谷以上の流域では、溪流本来のもつ崩壊規模を純粋に評価することにはならず、二次谷以上の溪流を構成する一次谷においてどの溪流が危険であるのかを判断することも出来ない。従って、二次谷以上の溪流は一次谷に分割し、個々の溪流について崩壊規模を評価すべきであると云える。

10. あとがき

本研究では、昭和57年7月の長崎豪雨を対象とし、土石流危険溪流における現行の危険度評価を実際の土石流被災実態から検証した。そして、実態に即した崩壊規模を評価する方法として、素因となる地形要因を用いて、谷頭崩壊や土石流が発生した場合の被災形態に基づいて分類した崩壊ランクで評価することを提案した。以下に本研究で得られた結論を列記する。

1) 山腹崩壊型の土石流の発生に重要な地形要因は、渓床堆積厚さと渓床危険度評価、さらに降雨集中度評価の3要因である。

2) 地形図のみから読み取れる要因だけを用いた場合の崩壊規模予測において、渓床危険度評価と降雨集中度評価からなる予測式の精度は、重相関係数で0.789、寄与率で62.18%と比較的高い予測精度が得られた。このことから、非常に簡単な地形図だけの調査でもかなりの予測精度が得られる。

3) 地形図から求められる要因に現地調査要因である渓床堆積厚さを加えた場合の予測式の精度は、重相関係数で0.815、寄与率で66.35%となり地形図のみの場合よりもさらに高い予測精度が得られた。このことから、特に重要度の高い溪流については、現場において渓床堆積厚さの調査を行えば、溪流の崩壊規模の予測精度を高めることができる。

4) 著者らの設定した崩壊ランクは、流出土砂量で評価するよりも被災形態に基づいた評価の方が予

測精度は高くなることが明らかになった。このことから被災形態に基づく崩壊ランクは、溪流の崩壊規模を評価するための一つの指標となることが示された。また従来の危険度評価方法では、土石流の発生しやすさのみを評価しているのに対して、本研究で提案した手法は、溪流の安定度だけでなく谷頭崩壊や土石流が発生した場合の規模を評価することができる。

5) 構築した予測モデル式は、地質が安山岩を中心とした火山噴出岩であれば、豪雨による溪流の崩壊規模を評価する手法として有効であることが示された。特に、溪床堆積厚さの要因が採択されたことは、溪床の不安定土砂量の多少によって土石流の規模は左右されると言った一般的な考え方と一致しており、溪床の不安定土砂を巻き込みながら流下するという実際の土石流現象をうまく表現している。

6) 二次谷以上の溪流は、それを構成する一次谷の流域単位で扱うのが望ましく、二次谷以上の溪流については、一次谷に流域を分割する必要がある。また、地形要因のうち現地調査を必要とする溪床堆積厚さ(要因:G)については、本流のサンプリング調査を行い、その調査結果を支流に対して代用させることにより、崩壊規模の予測精度の向上につながることを示された。

なお本研究では、溪流内の地質は安山岩を中心とする火山噴出岩を扱っているため、他の地質については再度システムを構築する必要があると考えられる。また、自然溪流を対象とした山腹崩壊に伴う砂礫型の土石流タイプを対象としているため溪床移動型や泥流型等のその他の土石流タイプについては別途検討する必要がある。さらに、重要な地形要因の一つである溪床堆積土砂厚さや降雨集中度評価は、専門技術者の主観にある程度依存している項目であり、客観的な調査方法の確立が望まれるところである。これらについても今後研究を進めていきたいと考えている。

最後に、本研究を行うにあたり、八千代エンジニ

ヤリング(株)下田義文氏から本研究の内容について多くの助言を頂いた。また、降雨資料については、長崎大学 荒生公雄氏の協力を頂いた。データの整理については山口大学 学生 池田直樹君の助力を得た。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺正幸:土石流(1),土石流と災害,土木技術資料,Vol.23-6,pp.331-340,1981.
- 2) 森山裕二,星野和彦:土石流危険渓流および地すべり危険箇所の調査結果まとまる,砂防と治水,Vol.26, No.2,1993.6.
- 3) 足立勝治,徳山久仁夫,中筋章人,中山政一,二宮寿男,大八木俊治:土石流発生危険度の判定について,新砂防,Vol.106,pp.7-16,1977.12.
- 4) 建設省河川局砂防部砂防課:土石流危険渓流および土石流危険区域調査要領(案),1989.10.
- 5) 池谷 浩:降雨強度比による土砂害からの避難規準に関する一私案,新砂防,Vol.94,pp.7-11,1974.12.
- 6) 鈴木雅一,福嶋義宏,武居有恒,小橋澄治:土砂災害発生の危険雨量,新砂防,Vol.110,pp.1-7,1979.2.
- 7) 渡辺 蔽,徳山久仁夫,中山政一,二宮寿男,大八木俊治:土石流警戒避難規準雨量設定の一手法,新砂防,Vol.110,pp.22-30,1979.2.
- 8) 平松晋也,水山高久,奥山清一:崩壊モデルを用いた各種崩壊要因の影響度評価,新砂防,Vol.43, No.5(172),pp.11-18,1991.1.
- 9) 荒生公雄:2.気象,昭和57年7月長崎豪雨による災害の調査報告書,長崎大学学術調査団,pp.2~13.
- 10) 芦田和男:土石流概論<講座:土石流-1>,新砂防,Vol.44, No.6(179),pp.41-47,1992.3.
- 11) 松村和樹,中筋章人,井上公夫:土砂災害調査マニュアル,鹿島出版会,pp.11~31,1988.
- 12) 山下祐一,石川芳治,草野慎一:土石流発生源の崩壊地の土質特性,新砂防,Vol.44, No.5(178),pp.19-25,1992.1.
- 13) 田中豊,垂水共之,脇本和昌:パソコン統計解析ハンドブックⅡ多変量解析編,pp.16-19,共立出版,1989.7.

(1994.9.2 受付)

STUDY ON THE EVALUATION METHOD OF DEBRIS FLOW AND THE HILLSIDE LANDSLIDE SCALE OF DEBRIS FLOW IN HAZARDOUS TORRENT

Yoshinori ARAKI, Shinji SUZUKI, Yoshiharu ISHIKAWA, Takahisa MIZUYAMA and Kohei FURUKAWA

An investigation of debris flow in hazardous torrent was conducted all over the country which estimated the degree of risk in debris flow. From the investigation, debris flow was evident in a lot of mountain torrents. In this study, the present evaluation on the degree of risk in debris flow was examined and the evaluation method of debris flow and hillside landslide scale which was used land as the only factor, for example, the east area of Nagasaki City that was mostly damaged by debris flow in July, 1982, were proposed.