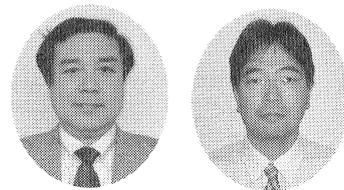


降雨による斜面災害の危険度評価のための雨量指標

Rainfall Index for Risk Estimation of Slope Failure Disaster

森脇武夫 Takeo MORIWAKI
中井真司 Shinji NAKAI

(呉工業高等専門学校)
(復建調査設計(株))



降雨による斜面災害の危険度を評価するために様々な雨量指標が提案され、警戒・避難に利用されている。本文では、これまでに提案されている雨量指標を紹介するとともに、警戒・避難のために筆者らが新たに提案している雨量指標 R_1 と R' の考え方、適用性を紹介する。さらに、この指標を用いて、強い地震動を受けた地域における斜面崩壊発生雨量の変化について検討した結果を紹介する。

キーワード：降雨，斜面崩壊，危険度評価，雨量指標，基準雨量（IGC：E06，B05）

1. はじめに

近年の土砂災害の発生状況は図-1に示すように毎年多数発生している¹⁾。これらの災害には融雪に起因するものも若干あるが、そのほとんどは降雨に起因している。特に、西日本一帯に広がるまさ土地帯では、降雨によるがけ崩れと土石流の頻度や規模が極めて大きく、斜面崩壊の予知・予測法と防止・軽減対策の確立が切望されている。

また、全国の土砂災害危険箇所は今後新たに住宅立地等が見込まれる箇所を含めると約53万箇所にも上る²⁾。しかし、砂防ダム等の防災施設の整備状況は満足できる状態にはなく、土砂災害による被害を防止・軽減するための防災施設の整備を一層進めていかなければならない。しかしながら、これらの整備には多大な経費と時間がかかり、短期間に被害の防止・軽減を行うことは困難である。そのため、少なくとも人的被害を出さないように土砂災害の発生危険度を事前に評価し、避難するシステムを構築することが重要である。

このような背景のもと、降雨による斜面崩壊の危険度を評価する研究は、これまでに各方面で多数行われ、降雨特性と斜面崩壊の関係が明らかにされ、警戒・避難のための様々な雨量指標が提案されている。本文では、これらの雨量指標の概要を紹介するとともに、雨量指標に関する最近の研究成果を紹介する。

2. 既往の雨量指標

降雨による斜面崩壊に対する警戒・避難システムを確立するために、斜面崩壊と降雨特性の関係が調べられている。それらは大別して、①雨量指標による統計的方法、②土中の水分量に着目した水文学的方法、③雨水浸透を考慮した斜面安定に基づく土質工学的的方法の3つに分類される³⁾。以下に各方法について概説する。

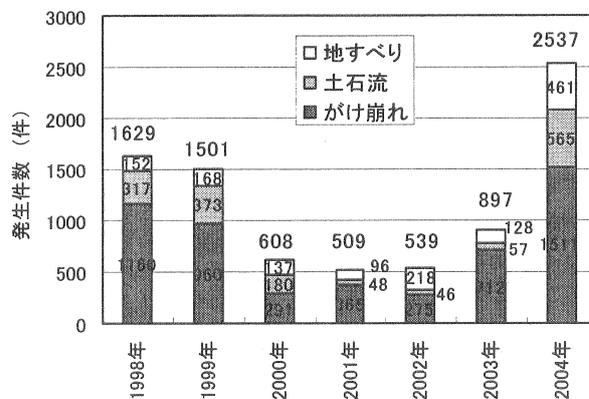


図-1 最近の土砂災害の発生件数

2.1 雨量指標による統計的方法

この方法は、どのような降雨によって斜面崩壊が起こるかを過去の事例から統計的に調べ、雨量がある基準値を超えると警戒・避難を開始しようとするものである。この基準値は通常、基準雨量と呼ばれ、様々な雨量指標によって表現されている。これら大別すれば、雨量の観測値をそのまま用いたものと、観測値に何らかの数学的演算を行って求めたものに分けられる。

観測値をそのまま用いた雨量指標は、一定時間内に降った雨の総量、すなわち累積雨量をそのまま用いるもので、累積する時間の長さの取り方によって、10分間雨量、1時間雨量、2時間雨量および3時間雨量、24時間雨量（任意の24時間の累積雨量）、日雨量（午前0時から24時までの24時間雨量）、1週間雨量、連続雨量（降雨の前後に一定時間以上の無降雨期間を有する一連の降雨の総雨量）、前期雨量（一連の降雨の降り始め時刻から1~2週間程度前までの降雨の総雨量）などがある。

数学的演算によって求めた雨量指標は、観測された雨量を基に、何らかの数学的な演算を施して求めたもので、有効雨量（ある時点までの一連の降雨の累積雨量から雨

が強くなり始めるまでの初期雨量を差し引いた雨量)、有効雨量強度(有効雨量をその期間で除した値で、降雨が強くなり初めてからの平均的な降雨の強さ)、実効雨量(前期降雨の影響を考慮するために、半減期という概念を用いて過去になるほど小さくなる減少係数を日雨量あるいは時間雨量に乗じて累積した雨量)などがある。

基準雨量の最も単純な設定方法は、以上で紹介した雨量指標をそれぞれ単独で用いるもので、設定値は地形、地質、防災の対象などによって異なり、10分間雨量で5~8mm、時間雨量で10~50mm、日雨量で100~300mm程度の値が用いられることが多い^{4)~11)}。一方、降雨による斜面崩壊の危険度は、累積雨量と降雨強度の両方に関係すると考えられるため、これら2つの要因を表す量を組み合わせて斜面崩壊発生の可能性が論じられている。代表的なものに、前日までの累積雨量と当日の日雨量からまさ土斜面における災害の発生を予測する限界雨量曲線を求めた網干・低引¹²⁾の方法、有効雨量と有効雨量強度から土石流災害の規模を予測する限界雨量曲線を求めた瀬尾・船崎¹³⁾の方法、土石流発生1時間前までの累積雨量に1日(24時間)単位で半減期を取った前期実効雨量を加算した実効雨量と時間雨量によって土石流発生危険度を評価する国土交通省(旧建設省)の方法(指針案)¹⁴⁾、半減期1.5時間の短期実効雨量と半減期72時間の長期実効雨量によって集中的に発生するがけ崩れに対する危険度を評価する国土交通省(旧建設省)の方法(提言案)¹⁵⁾などがある。また最近、国土交通省と気象庁が連携し、後述する土壌雨量指数と60分間積算雨量を組み合わせ、大量に存在する災害非発生降雨データから安全領域を評価しようとする方法(連携案)が検討されている。これ以外にも、降雨量に加えて地形・地質など土砂災害の発生に関わり深い要因を取り上げ、それぞれの要因が災害発生に関与する重みを統計的に評価・選別することで、土砂災害の発生・非発生の判別式を求める重判別分析による手法も提案されている¹⁶⁾。

2.2 土中の水分に着目した水文学的方法

この方法は、降雨による斜面崩壊は土中の水分量がある値に達したときに発生すると考えて、対象とする斜面または流域の限界貯留量を求めようとするものである。代表的なものに、斜面集水域を一つの貯水池と見なして超過保留量を水文学的に求めた大滝¹⁷⁾の方法、比較的広い流域を対象にタンクモデルによって限界貯留量を求めた道上ら¹⁸⁾の方法などがある。

タンクモデルとは、地上に降った雨が土壌中に浸透した後、流出する状況を表現したモデルで、もともとは河川水位予測のためにつくられたものである。しかしながら、降雨量から流出した水の量を差し引けば土壌に残っている水量(=土砂災害の起こりやすさ)となることから、土砂災害予測にも活用されている。土砂災害予測には、直列3段構成のタンクモデルが用いられるのが一般的であり、3段のタンクの貯留高はそれぞれ、地表付近

~地盤内~不透水層上面付近の水の状態を示している。道上ら¹⁸⁾は、呉では全タンクの貯留高が70mmを越えることがけ崩れの発生する危険性が生じること、小豆島では第1タンクの貯留高が80mm、第1タンクと第2タンクの合計貯留高が150mmをそれぞれ越え、第1タンクからの流出量が200mm/hrを越えると土石流の発生する危険性の高いことを報告している。

近年、気象庁では道上らと同タイプのタンクモデルを用いて、3つのタンクの貯留高の合計値を「土壌雨量指数」として、全国を対象に土砂災害の危険性の評価を行っている¹⁹⁾。指数値が高いほど山崩れ・がけ崩れの発生危険性が高いと解釈することになるが、同じ指数値であっても対象となる地域の降雨特性や地盤条件などで土砂災害の発生危険性は異なることになる。そこで、気象庁では、ある場所での過去の雨による指数値と比較して、現在の指数値がその場所で何番目の高さになったかということを示す履歴順位として表現している。現在は、履歴1位を更新した場合などには「過去数年間で最も土砂災害の危険性が高まっている」といった表現で土砂災害の危険度を公表している。

2.3 雨水浸透を考慮した斜面安定に基づく土質工学的な方法

この方法は、雨水が不飽和状態の斜面中に浸透し、地下水面が形成される過程を飽和・不飽和浸透解析を行って求め、その結果を考慮して斜面安定解析を行い、特定の斜面に対する降雨による安定性の変化を評価しようとする方法である。

斜面崩壊は三次元的に起こるので、飽和・不飽和浸透解析と安定解析も三次元問題として取り扱わなければならない。すなわち、飽和・不飽和浸透解析では集水効果を考慮できる三次元浸透解析を行う必要がある。また、安定解析では複合すべり面や側面の影響を考慮できる三次元Janbu法などを用いる必要があり、古川ら²⁰⁾は二次元解析では実際と一致しなかった平成11年6月29日の広島災害における崩壊時刻を三次元Janbu法によって精度良く解析できることを報告している。

一方、まさ土地帯での斜面崩壊は崩壊長に比べて崩壊厚が小さい表層崩壊型となる場合が多く、この場合は斜面を無限長斜面として取り扱うことも可能である。榎²¹⁾は、無限長斜面に対する検討結果より、総降雨量が同じでも、短期間の集中豪雨の場合は表層土の層厚が薄く透水係数が大きい斜面で危険性が高く、長期間の長雨の場合は表層土の層厚が厚く透水係数が小さい斜面で危険性が高いことを示している。

これらの方法は3つの方法の中で最も合理的であるが、対象となる斜面の集水特性、浸透特性、土質・地層特性および強度特性を事前に特定しておく必要がある。したがって、この手法によって地域および流域全体の警戒・避難の判断を下すためには、その地域を代表する斜面条件の設定が必要不可欠である。

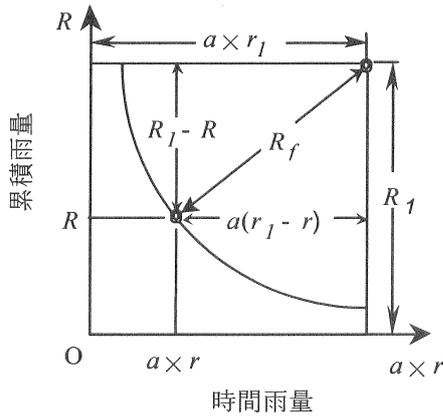


図-2 雨量指標 R_f の定義

3. 新しい雨量指標

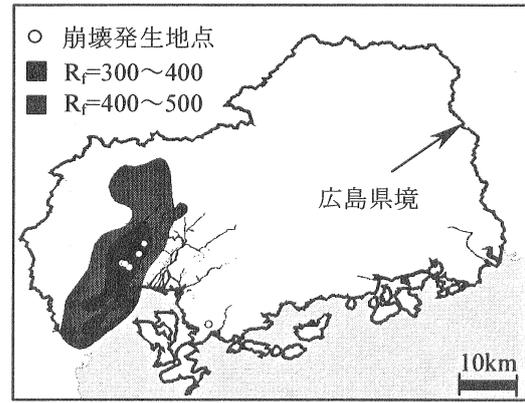
3.1 雨量指標 R_f

土砂災害に対する警戒・避難に用いられることの多い国土交通省の提言案では、前述したように横軸に半減期72時間の長期実効雨量、縦軸に半減期1.5時間の短期実効雨量を取り、この図上に避難の準備を行うための警戒基準雨量線(WL)、避難を終えるための避難基準雨量線(EL)、および土砂災害が発生する土石流発生危険基準線(CL)を引いて災害発生の危険度評価を行っている。この方法は、雨量観測点付近の危険度の時間的変化を表すには適しているが、災害発生の危険度を2つの物理量で表しているため、危険度の空間的分布やその時間的な移動を地図上に表すことができない。そこで、累積雨量と降雨強度の2つの物理量を1つの物理量で表し、これによって斜面崩壊の危険度評価を行う方法を紹介する²²⁾⁻²⁴⁾。この方法では瀬尾・船崎の考え方に準じ、累積雨量を表す量として1週間前からの累積雨量 R を用い、降雨強度を表す量として1時間毎の時間雨量 r を用いて、新たな雨量指標 R_f を次式で定義している²²⁾。

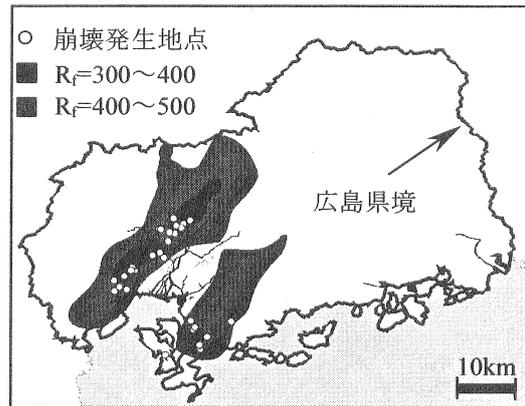
$$R_f = \sqrt{(R_1 - R)^2 + a^2(r_1 - r)^2} \quad (1)$$

ここに、 $R_1 = 600\text{mm}$ 、 $r_1 = 100\text{mm/h}$ 、 $a = 5$ である。

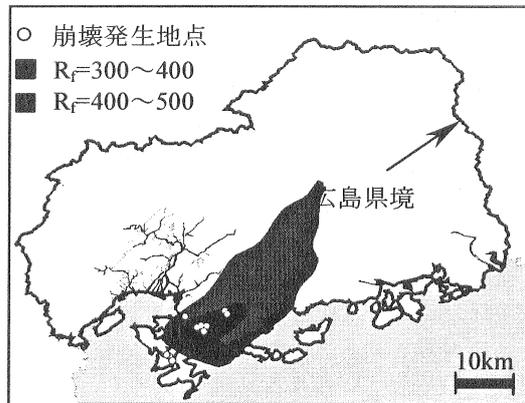
R_f の持つ意味は、瀬尾・船崎の限界降雨量曲線を円弧近似するための係数 a を導入し、 $a \times r \sim R$ 平面上の円弧の中心 $(a \times r_1, R_1)$ からの半径 R_f でその観測地点での観測時刻における降雨特性を表現したものであり(図-2参照)、 R_f が小さくなるほど崩壊危険度が大きくなる。なお、ここで設定した円弧の中心は、まさ土斜面の崩壊が多発する広島地域でこれを超えるような降雨状況をこれまでに経験していない点であり、この点を中心として瀬尾・船崎の限界降雨量曲線が最も円弧近似できるように係数 $a = 5$ が選ばれている。このような操作によって累積雨量と降雨強度の両者の影響を考慮して求めた R_f に対して、塩野ら²⁵⁾ が提案したコンターマップ描画の方法を適用すると R_f の地域分布図を描くことができる。図-3は1999年6月29日の広島災害において14:00~17:00



(a) 1999/6/29 14:00~15:00



(b) 1999/6/29 15:00~16:00



(c) 1999/6/29 16:00~17:00

図-3 R_f の地域分布図と崩壊地点の関係

の間の1時間毎の R_f の分布と、この時間帯における崩壊発生地点を比較したものである。この図で、 R_f の小さい地域と崩壊発生地点がよく一致しており、 R_f によって崩壊危険度を評価できることがわかる。

また、 R_f の経時変化の一例として、大規模な土石流が発生した広島市佐伯区古野川に近い魚切ダムにおける $R_f \sim t$ 関係を図-4に示す。この図には古野川で発生した崩壊発生時刻も併せて示してある。崩壊をもたらした R_f をどの時点のもので代表させるのがよいか判断に苦しむところであるが、多くの崩壊地点が比較的尾根に近いところで発生していることから、降水の流達時間は短いと判断し、 R_f の最小値である R_{fmin} を崩壊をもたらした雨量指標と考える。

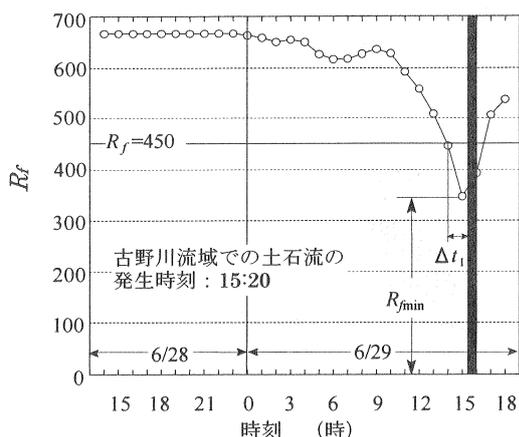


図-4 魚切ダムでの R_f の経時変化

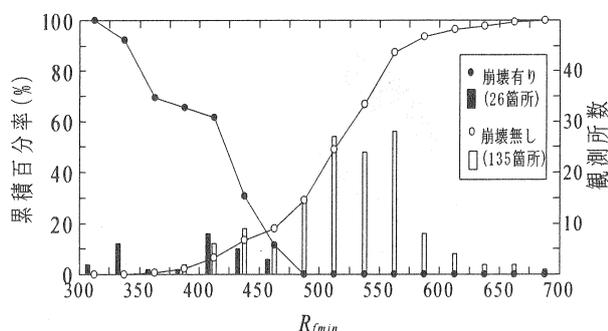


図-5 R_f の階級別の観測地点数

次に、 R_f が幾ら以下になると崩壊が発生するかを検討するため、降雨が観測された 161 箇所の降雨観測点のうち、周辺で斜面崩壊が発生した 26 箇所の降雨観測点とそうでない 135 箇所の降雨観測点の $R_{f,min}$ を比較すると図-5 のようになり、 $R_f = 450\text{mm}$ 以下になると斜面崩壊が発生していることが分かる。また $R_f = 450\text{mm}$ を斜面崩壊が発生する限界値と見なすと、図-4 の例では $R_f = 450\text{mm}$ となってから崩壊が起こるまでの時間差 Δt_f は $\Delta t_f = 75$ 分であることがわかる。崩壊発生時刻が特定されているその他の崩壊箇所でも同様に Δt_f を求めると $\Delta t_f = 15 \sim 75$ 分であり、 $R_f = 450\text{mm}$ が警戒・避難のための雨量指標として利用可能であることがわかる。

3.2 雨量指標 R_f の土質力学的意味

斜面の安定を検討する際には、斜面内に最も危険なすべり面を想定し、この面に沿ってすべりを起こさせようとする力（滑動力）とこれに抵抗する力（抵抗力）を求め、これらの大小関係によって安定性が評価される。その際、すべり面にどのような形状を想定するかで解析法は異なったものとなり、代表的なものに、直線すべりを仮定した無限長斜面の安定計算法、円弧すべりを仮定したフェレニウス法やビショップ法、非円形一般すべりを仮定したヤンプ法などがある。ここでは、前述したように 1999 年 6 月 29 日豪雨による斜面崩壊では崩壊深が 1.0 m 以下の表層すべり型が数多く見られたこと、モデル化

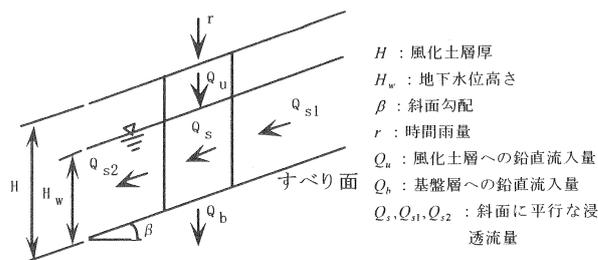


図-6 浸透流のある無限長斜面モデル

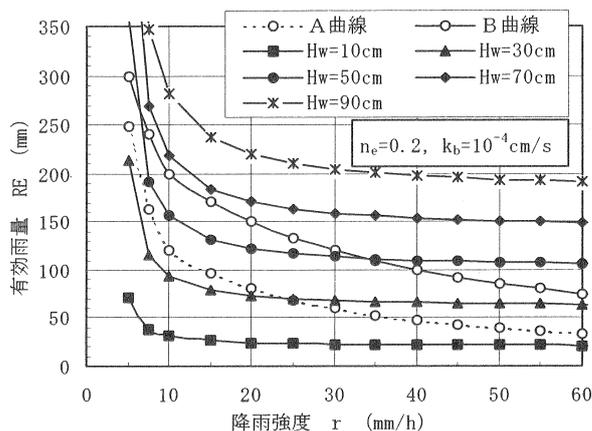


図-7 地下水位上昇をもたらす有効雨量と降雨強度の関係

が単純で各要因の影響が明確に表せること、雨水の浸透過程との関係が理解し易いことなどから、降雨時のまさ土斜面を定常浸透流のある無限長斜面とみなして安定性を検討する。

図-6 に示す定常浸透流のある無限長斜面で崩壊が起こる限界水位高さ $H_{w,c}$ は、次式で与えられる²³⁾。

$$H_{w,c} = \frac{\frac{c_d}{\cos^2 \beta} + \gamma_t \cdot H \cdot (\tan \phi_d - \tan \beta)}{(\gamma_t - \gamma') \cdot \tan \phi_d + (\gamma_{sat} - \gamma') \cdot \tan \beta} \quad (2)$$

ここに、 γ_t は浸透流水面以上での土の湿潤単位体積重量、 γ_{sat} は浸透流水面以下での土の飽和単位体積重量、 γ' は土の水中単位体積重量、 H は風化土層厚、 β は斜面勾配、 c_d と ϕ_d は風化土の粘着力と内部摩擦角である。この式を用いると、1999 年 6 月の広島県豪雨によって崩壊した代表的な斜面とみなせる $H = 1.0\text{m}$ 、 $\beta = 35^\circ$ 、 $c_d = 2.5\text{kN/m}^2$ 、 $\phi_d = 35^\circ$ の場合には、 $H_{w,c} \approx 53\text{cm}$ となる。

一方、降雨によって上昇する地下水位高さ H_w は、図-6 に示すような無限長斜面の降雨浸透モデルを考えると、次式で表すことができる²³⁾。

$$H_w = \frac{RE}{n_e} \left(1 - \frac{k_b}{r} \right) \quad (3)$$

ここに、 n_e は風化土層の有効間隙率、 k_b は基盤層の透水係数である。なお、このモデルでは、まさ土の透水係数は比較的大きいため、複²¹⁾の例にならって風化土層への鉛直流入量は $Q_u = r$ として問題を単純化するとともに、降雨開始時の地下水面は風化土層の下端面（すべり面）にあるとし、有効雨量を $RE = r \cdot t$ で与えている。ここで、

t は降雨開始からの経過時間である。また、鉛直浸透の場合は動水勾配が $i=1$ になるため、基盤層への流入量 Q_b は $Q_b = k_b$ として与えられる。式 (3) は、降雨によって上昇する地下水位高さ H_w が r と RE の両方に依存していることを意味している。そこで、 $k_b = 10^{-4}$ cm/s, $n_e = 0.2$ とした場合に、 $H_w = 10, 30, 50, 70, 90$ cm とする r と RE の関係を式 (3) を用いて求めたものが図-7 である。この図から先に示した $H=1.0$ m, $\beta=35^\circ$, $c_d = 2.5$ kN/m², $\phi_d = 35^\circ$ の斜面において崩壊が起こる $H_{w,c} \approx 53$ cm に対する r と RE の関係は、瀬尾・船崎¹³⁾ が示した限界降雨曲線の B 曲線と比較的良好に対応していることがわかる。

また、図-7 で求めた r と RE の関係から、式 (1) を用いて各 H_w に対応する R_f を求めると、 $R_f = 450$ mm は、広島地域の代表的な斜面 ($H=1.0$ m, $\beta=35^\circ$, $c_d = 2.5$ kN/m², $\phi_d = 35^\circ$, $k_b = 10^{-4}$ cm/s, $n_e = 0.15 \sim 0.2$) において、地下水位が $H_w \approx 40 \sim 60$ cm まで上昇するのに必要な降雨パターンを表しており²³⁾、前述の $H_{w,c} \approx 53$ cm と良く一致している。

4. 雨量指標の再吟味と改良

4.1 雨量指標 R_{fw} の提案と R' への変換

前述のように、雨量指標 R_f は時々刻々の累積雨量と降雨強度の両方を同時に評価でき、この値の空間的な分布とその時間的な移動を地図上に表示することができる。そのため、これまでの雨量指標では雨量観測地点、または流域全体での危険度しか評価できなかったが、 R_f を用いると、その分布図から雨量観測所から離れた地点の危険度を評価できるようになるとともに、危険域の時間的な移動から斜面崩壊の危険度を事前に評価し、避難の必要性と時期を判断することが可能である。しかし、 R_f には改善を要する次のような課題があった。

- (a) 基本となる雨量指標が累積雨量と時間雨量であるため、先行降雨による影響の時間的低減（排水効果）が考慮されていない。
- (b) R_f はその値が小さくなると危険度が増すという指標であるため、雨が降り続けると危険度が增大するという実感に反している。

そこで、(a) の課題に対処するため、実効雨量の概念を取り入れた雨量指標 R_{fw} が考案され、さらに (b) の課題に対処するため危険度とともに増大する新たな雨量指標 R' への変換が行われた^{26), 27)}。

先行降雨の時間的低減を考慮した雨量指標 R_{fw} は、 R_f に用いる R (1 週間前からの累積雨量) に代わる長期雨量指標として半減期 72 時間の長期実効雨量 R_w を、 r (1 時間雨量) に代わる短期雨量指標として半減期 1.5 時間の短期実効雨量 r_w を用いて、次式で算定される。

$$R_{fw} = \sqrt{(R_1 - R_w)^2 + a^2(r_1 - r_w)^2} \quad (4)$$

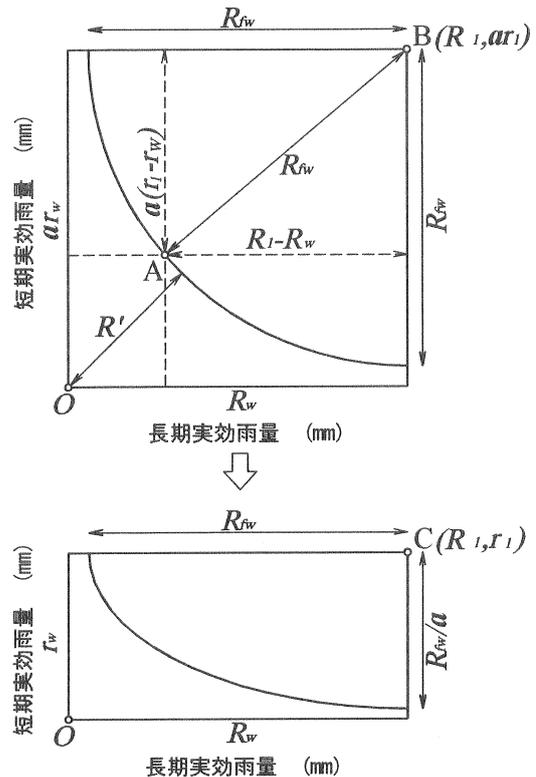


図-8 雨量指標 R_w の定義

ここに、 R_w は長期実効雨量 (mm), r_w は短期実効雨量 (mm), R_1 は座標上の横軸基準点, r_1 は座標上の縦軸基準点, a は重み係数である。

R_{fw} は R_f と同様の考え方で、図-8 に示すように横軸 R_w 、縦軸 ar_w の座標系において、任意の降雨状況を示す点 A (R_w, r_w) と基準点 B (R_1, r_1) との距離 (mm) を表したもので、同一の R_{fw} 値を持つ降雨状況は基準点 B (R_1, ar_1) を中心とした半径 R_{fw} の円弧で示される。なお、これを横軸 R_w 、縦軸 r_w の座標系に表示すると、同一の R_{fw} 値を持つ降雨状況は基準点 C (R_1, r_1) を中心とした長軸半径 R_{fw} 、短軸半径 R_{fw}/a の楕円弧で示される。 R_w と r_w は連続的に計算できる雨量指標であるため、時々刻々変化する降雨による土砂災害危険性をリアルタイムで表すことができる。

さらに、先行降雨の時間的低減を考慮した雨量指標 R_{fw} をもとに、危険度とともに値が上昇する雨量指標 R' を次式で定義する。

$$R' = R_{fw0} - R_{fw} \quad (5)$$

ここに、 R_{fw0} は原点 0 と基準点 B (R_1, ar_1) の距離である。

すなわち、短期、長期実効雨量がともに 0 mm のときの R_{fw} 値 (R_{fw0}) から、任意の点の R_{fw} の値を引くことによって、危険度が増大すれば大きくなる指標へ変換されている。また、広島県内のまさ土地帯で発生した災害事例による検証から、長期実効雨量 R_w は半減期 72 時間、短期実効雨量 r_w は半減期 1.5 時間、 $R_1=450$ mm, $r_1=150$ mm, $a=3$ とした場合に、 R' 値を示す楕円弧が最もよく災害の発生境界 (クリティカルライン) を表現できることが明らかにされている^{26), 27)}。

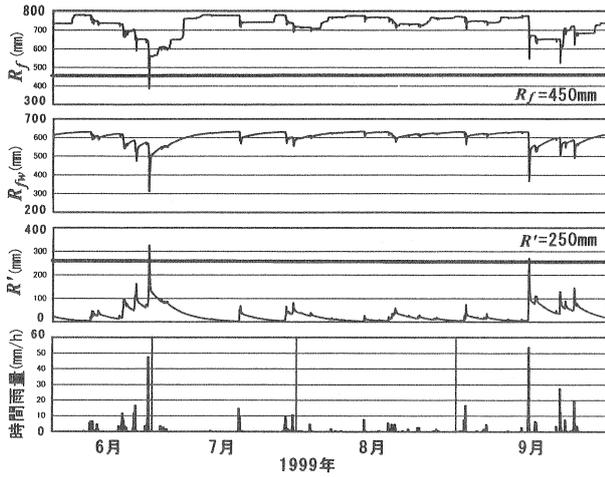


図-9 雨量指標 R_f , R_{fw} , R' の比較

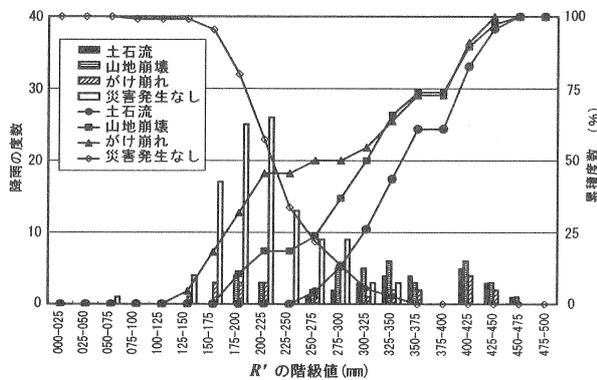


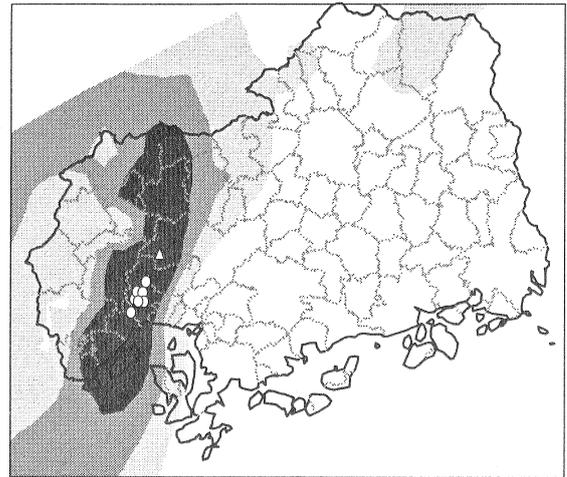
図-10 雨量指標 R' の度数分布

4.2 雨量指標 R' の適用性

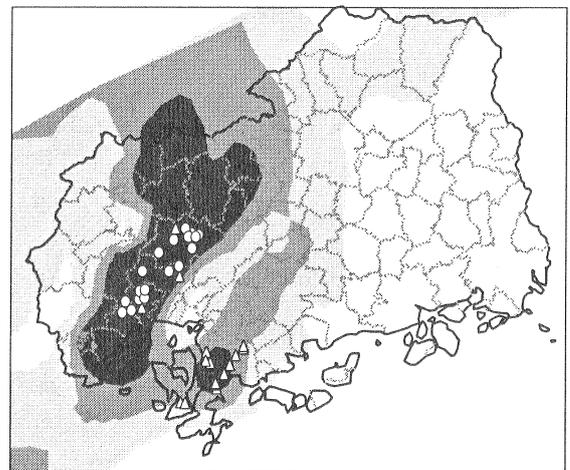
図-9は、1999年6月～9月の気象台東広島観測所における雨量データを用いて雨量指標 R_f , R_{fw} , R' を比較したものであり、この図から R' は降雨ピーク後に漸減的に危険度が低下していく傾向があり、 R_f では段階的に低下する傾向を示すことが読みとれる。また、東広島市では6月29日と9月15日の台風16号で2回の豪雨があり、そのいずれでも土石流災害が発生している。これを R_f で評価すると2度の土石流発生時の降雨状況は著しく異なり、危険度の目安として用いられる $R_f=450\text{mm}$ ²³⁾ で台風16号の土石流発生を表現できていない。これを R' で評価すると台風16号時も同様の危険度を有していたことが表現され、 $R'=250\text{mm}$ 程度の同じ指標を用いて土石流の発生を説明できる。

図-10は、1999年6月29日の広島災害における災害発生降雨と非発生降雨の R' の値を25mm毎に階級分けし、その発生度数と累積頻度を示したものである。この図から、住宅地などでのがけ崩れは $R'=125\text{mm}$ 程度の小さな降雨でも起こり、土石流の発生源とも考えられる山地崩壊については $R'=175\text{mm}$ 程度で発生し始め、 $R'=250\text{mm}$ 程度以上になるとこれが流動化し、土石流に発展すると評価できる。

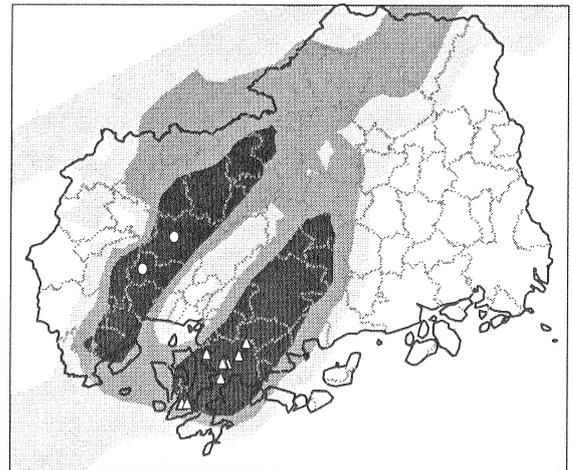
図-11に1999年6月29日の広島災害における雨量指



(a) 1999.6.29 14:00～15:00



(b) 1999.6.29 15:00～16:00

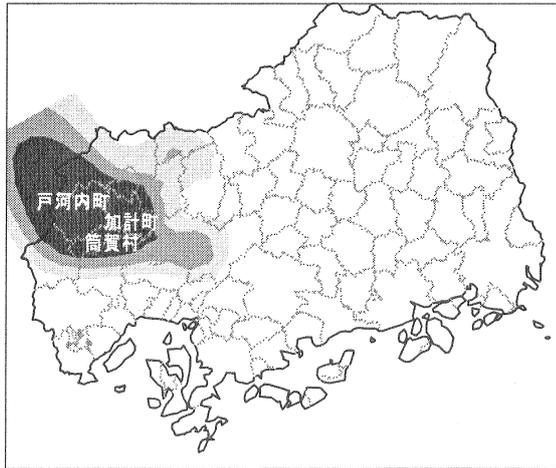


(c) 1999.6.29 16:00～17:00

- ：表示時間内に発生した土石流災害
 - △：表示時間内に発生したがけ崩れ災害
- ～ 150 200 250 ～

図-11 R' の地域分布図と崩壊地点の関係

標 R' の等値線図を示す。図中には発生時間帯が分かる土石流やがけ崩れ災害箇所を時間帯別に記載しているが、時間帯により危険度の高い (R' が大きい) エリアが推



~ 150 200 250 ~

図-12 R' の等値線図(1988.7.21 3:00~4:00 広島県)



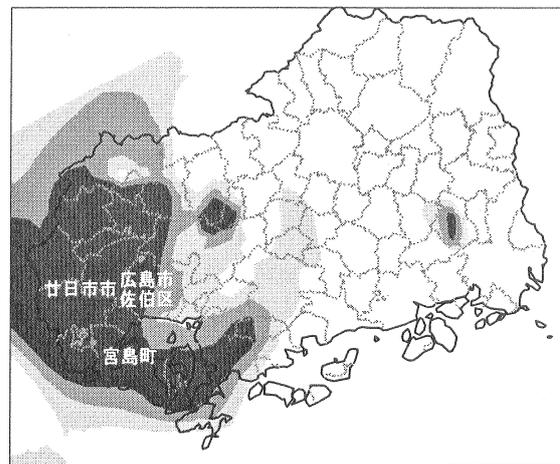
~ 150 200 250 ~

図-14 R' の等値線図(2004.10.20 14:00~15:00 岡山県)



~ 150 200 250 ~

図-13 R' の等値線図(1999.9.15 3:00~4:00 広島県)



~ 150 200 250 ~

図-15 R' の等値線図(2005.9.6 22:00~23:00 広島県)

移る様子がよく分かる。このエリアと災害発生地点がよく一致しており、 R' 指標で良好に危険度を評価することが可能であるといえる。特に、発生時間が特定できたものに関しては、土石流災害は全て $R'=250\text{mm}$ 以上のところで発生しており、がけ崩れ災害は $R'=200\text{mm}$ 以上のところで発生している。

1999年6月29日の広島災害以外で土石災害が発生した時の R' の分布を示したものが、図-12~15である。図-12は1988年7月21日に広島県北西部の加計町、戸河内町、筒賀村一帯で土石流災害が発生したとき、図-13は1999年9月15日の台風16号に伴う豪雨で広島県東広島市内の10溪流程度で土石流災害が発生したとき、図-14は2004年10月20日の台風23号に伴う豪雨によって岡山県玉野市で土石流を伴う土砂災害が発生したとき、および図-15は2005年9月6日の台風14号に伴う豪雨によって広島県西部の広島市佐伯区、廿日市市および宮島町などの10溪流以上で土石流が発生したとき

のものである。いずれの図においても、 $R'=250\text{mm}$ 以上のエリアと土石流災害発生領域とがよく対応しており、 $R'=250\text{mm}$ を「まさ土地帯」における土石流発生の指標とすることができるがわかる。

5. 地震被災による基準雨量の変化

強い地震動を受けるとそれまでより少ない降雨で斜面崩壊が起こることが知られており、大きな地震後は基準雨量を低下させている場合がある。しかし、どの程度基準雨量を低下させたら良いかについては明確な基準がなく、経験に頼っている。そこで、2001年3月24日に芸予地震によって石積み擁壁を中心に多くの斜面崩壊が起こる²⁸⁾とともに、地震によってダメージを受けた斜面がその後の降雨で崩壊した広島県呉市において、2001年芸予地震の前後で斜面崩壊をもたらす降雨特性がどのよう

表-1 呉市における1991年以降の斜面災害

No.	年	月日	崩壊箇所数(箇所)	最大1時間雨量(mm)	最大24時間雨量(mm)	最大1週間累積雨量(mm)
1	1991	7/1-7/5	95	21	119	249
2	1992	8/8	19	38	147	149
3	1993	6/30-7/4	19	13	101	251
4	1993	7/27-8/2	142	23	154	367
5	1995	7/2-7/6	211	38	155	345
6	1996	6/20-6/28	12	24	65	179
7	1997	7/8-7/13	49	38	121	281
8	1998	10/17	12	30	130	157
9	1999	6/24-6/27	22	26	107	208
10	1999	6/29	1,089	70	186	394
11	2001	6/19-6/24	41	17	112	216
12	2002	8/10-8/11	4	34	64	64
合計			1,715			

に変化したかを検討した事例を紹介する²⁹⁾。

5.1 呉市における降雨による斜面災害の特徴

近年に呉市で起こった降雨による土砂災害の実態を明らかにすることを目的として、1991年から2003年までに呉市で起こった土砂災害の発生時刻、発生場所、被害区分、被害種別、被害規模を呉市消防局の被害個表から調査した。調査対象は、一連の降雨によって10箇所以上の被害が報告されたものを1つの災害として、その災害の発生時刻、発生場所、被害形態をまとめた。表-1は今回の調査対象となった災害の概要をまとめたものである。なお、1999年6月の豪雨災害については、6月29日までにも多くの被害が報告されていたため、6月24日から27日に起こった災害と6月29日に起こった災害とを分けて整理してある。また、2001年の芸予地震以降は、一連の降雨によって複数の被害が報告された2002年8月の災害も含めて検討してある。

表-1に示すように、1991年以降の13年間で、一連の降雨によって10箇所以上の被害が報告された災害が11件、崩壊箇所が1,715箇所にも上っており、呉市では毎年のように降雨による斜面災害が繰り返されていることが分かる。また、崩壊箇所が4箇所であった2002年8月の災害を除いて、一連の降雨によって10箇所以上の被害が報告された災害が起こる降雨条件として、1時間雨量は13mm/h以上、24時間雨量は65mm以上、1週間雨量は149mm以上となっているが、単純に個々の条件だけでは被害の発生を予測できないことがわかる。

図-16は被害状況を示したものである。なお、この図で用いた分類は呉市消防局で使用されているもので、自然の山腹が崩壊したものを山崩れ、人工の斜面が崩壊したものを崖崩れとしている。また、崩壊した斜面の種類として、擁壁などがなく土砂で構成された斜面を土砂崖、石積み擁壁で構築された斜面を石崖、コンクリート擁壁で構築された斜面をコンクリート崖、ブロック積み擁壁で構築された斜面をブロック崖としている。図-16より、全体の70~80%の災害は土砂崖で崖崩れの形態となって発生していることが分かる。また、石崖での崩壊が20%

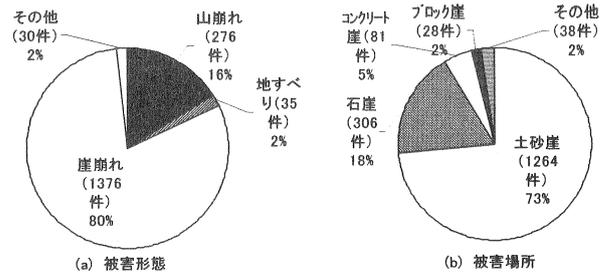


図-16 呉市における斜面災害の被害状況

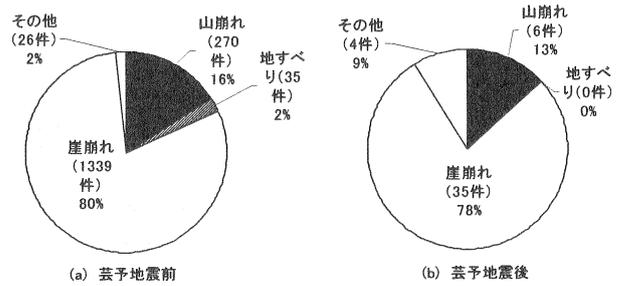


図-17 被害形態に及ぼす芸予地震の影響

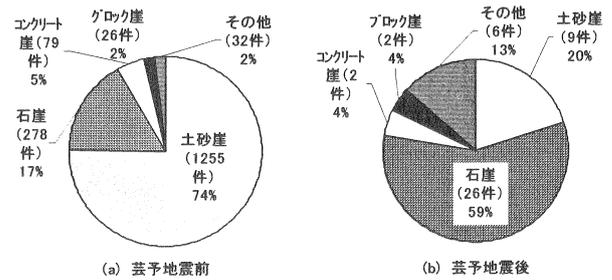


図-18 被害場所に及ぼす芸予地震の影響

近くあることも呉市における特徴のひとつである。なお、被害形態の中で地すべりとして35件が計上されているが、これは1999年6月29日災害において土石流的な崩壊による被害を地すべりとして計上したためである。

5.2 被害形態に及ぼす芸予地震の影響

図-17と図-18は、図-16に示した災害の被害形態と被害場所が芸予地震によってどのような影響を受けたかを表したものである。これらの図より、被害形態としては芸予地震前後を含めて崖くずれが大部分を占め、芸予地震の影響が現れていないことがわかる。一方、斜面崩壊が起こった場所としては、芸予地震までは土砂崖が約70%以上と大部分を占めていたが、芸予地震後は石崖が約60%以上を占め、芸予地震によって被害の起こる場所が変わったことを示している。これは、芸予地震によって斜面はダメージを受け、その影響は土砂崖より石崖に強く現れ、2002年にもその影響は残っていたものと考えられる。なお、表-1には示さなかったが、2003年3月から9月までの間に合計5件の斜面崩壊が起こり、そのうち4件は石崖であり、現在も芸予地震のダメージは石崖に残っているものと考えられる。

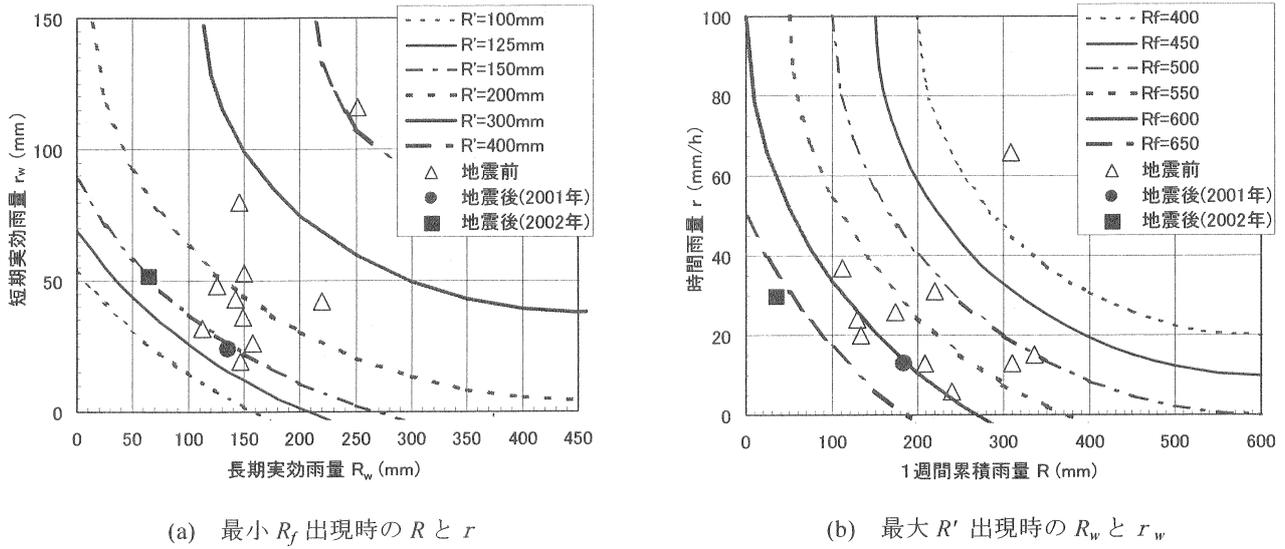


図-19 最小 R_f と最大 R' の出現時の降雨条件

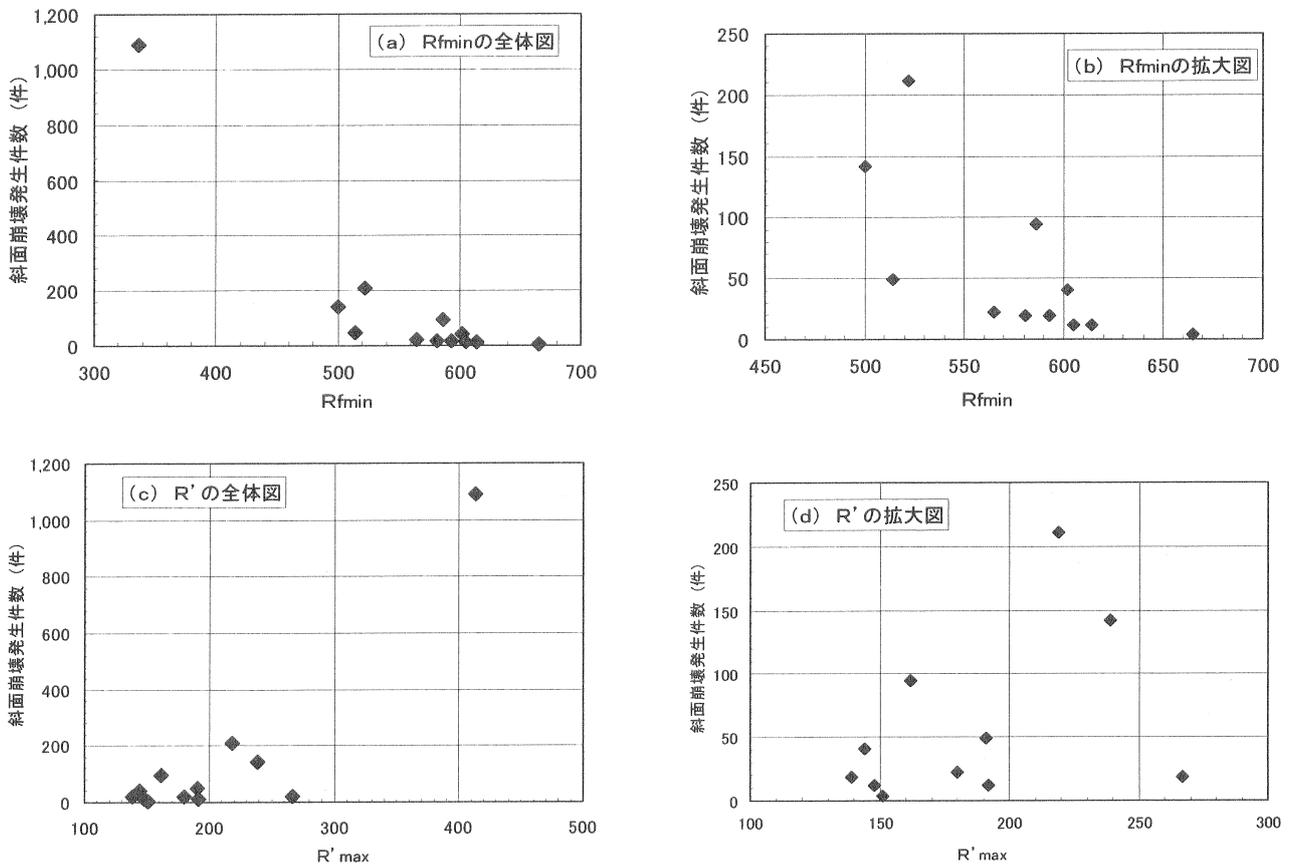


図-20 最小 R_f 値および最大 R' 値と斜面崩壊発生件数との関係

5.3 斜面崩壊をもたらす降雨条件

各災害が発生したときの降雨特性を前述の雨量指標 R_f と R' を用いて整理し、斜面崩壊をもたらす降雨条件について検討する。

図-19は、表-1で示した各災害における一連の降雨で R_f が最小になった時の時間雨量と1週間累積雨量の関係と、 R' が最大となった時の短期実効雨量と長期実効雨量の関係を示したものである。この図より、2002年

8月10日～11日災害では斜面崩壊発生件数が4であることを考慮すると、斜面崩壊が10箇所以上で起こるような降雨条件として、 $R_f < 600\text{mm}$ および $R' > 150\text{mm}$ が見出せる。なお、図-19は主として広島型花崗岩が分布する呉地域の斜面崩壊に対して得られた結果であり、地質や地形の異なる他の地域にこの結果をそのまま使うことはできない。

また、図-19は一連の降雨で R_f が最小または R' が

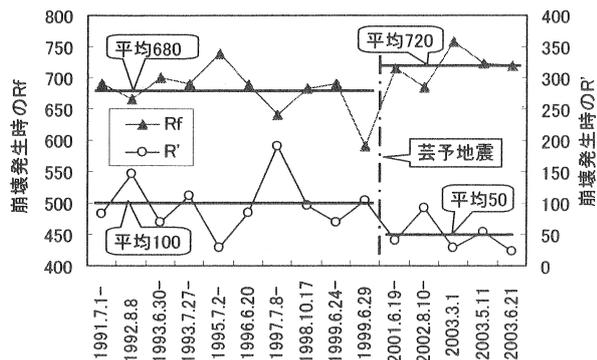
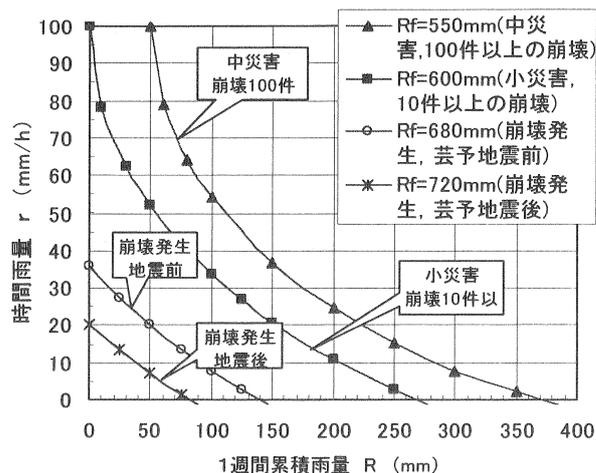


図-21 斜面崩壊発生時の R_f と R'

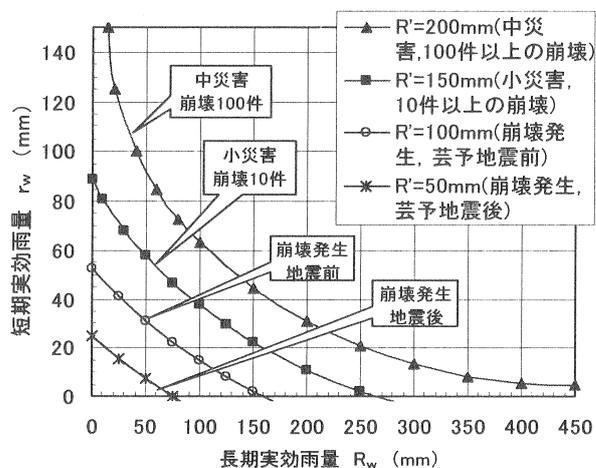
最大になったときの降雨条件を示したものであり、斜面崩壊が起こり始める時の降雨条件を表したのではなく、むしろ降雨の規模や程度を表したものであり、災害の規模と関係していると考えられる。そこで、 R_f の最小値 R_{fmin} および R' の最大値 R'_{max} と斜面崩壊発生件数との関係を表したものが図-20 である。この図から、 R_{fmin} が小さくなるほど、あるいは R'_{max} が大きくなるほど斜面崩壊発生件数の増える関係が認められ、 R_{fmin} が 550mm 以下または R'_{max} が 200mm 以上になると 100 箇所以上で斜面崩壊が発生する可能性の高いことが分かる。

図-21 に各災害において斜面崩壊が発生し始めた時刻の R_f と R' の値を示した。この図には 2003 年 3 月から 9 月の間に発生した斜面崩壊時の R_f と R' の値も示してある。斜面崩壊が発生し始めるときの R_f と R' は、1995 年 7 月 2 日～6 日災害を除き、芸予地震前には R_f が 700mm 以下または R' が 70～90mm 以上であるが、芸予地震後には R_f が 700mm 以上または R' が 70～90mm 以下になっており、芸予地震後は少ない降雨によって斜面崩壊が起っていることが分かる。なお、1995 年 7 月 2 日～6 日災害は、累積雨量と時間雨量の両方とも小さい状態で斜面崩壊が発生し始めており、呉市宝町の気象庁アメダス雨量観測局で観測された降雨状態が崩壊発生地の降雨状態を表していないことが考えられる。この点に関しては今後の検討が必要である。また、図-21 に示すように芸予地震前の斜面崩壊が発生するときの R_f の平均値は 680mm、 R' の平均値は 100mm で、芸予地震後は R_f が 720mm、 R' が 50mm であった。この R_f および R' の差は、式(1)および式(3)を利用して時間雨量に換算すると約 15mm/h、累積雨量に換算すると約 50mm に相当している。すなわち、芸予地震後は地震前より時間雨量で約 15mm/h、累積雨量で約 50mm ほど少ない降雨で斜面崩壊が起こるようになったと言える。

以上で検討した呉市における斜面崩壊と降雨条件の関係を雨量指標を用いてまとめると、斜面崩壊が起こり始める降雨条件として芸予地震前は $R_f = 680\text{mm}$ または $R' = 100\text{mm}$ 、芸予地震後は $R_f = 720\text{mm}$ または $R' = 50\text{mm}$ 、10 件以上の斜面崩壊が起こる降雨条件として $R_f = 600\text{mm}$ または $R' = 150\text{mm}$ 、100 件以上の斜面崩壊が起



(a) R_f による限界雨量曲線



(b) R' による限界雨量曲線

図-22 呉市における限界雨量曲線

る降雨条件として $R_f = 550\text{mm}$ または $R' = 200\text{mm}$ が得られる。これらの R_f および R' の値から式(1)および式(2)と(3)を用いて限界雨量曲線を求めると図-22 が得られ、これを呉市における警戒・避難の判断基準として利用することができると考えられる。

6. まとめ

降雨による斜面災害の危険度を定量的に評価し、警戒・避難に利用する雨量指標に関する最近の研究成果をまとめると以下ようになる。

6.1 雨量指標 R_f について

- 1) 時間雨量と1週間累積雨量の2つの物理量から導き出される雨量指数 R_f は、時々刻々の累積雨量と降雨強度の両方を同時に評価できるため、この値の空間的な分布とその移動状況から斜面崩壊の危険地域を判定することができる。
- 2) 風化花崗岩斜面では、1週間雨量と時間雨量から求めた $R_f = 450\text{mm}$ になると崩壊が発生する。また、 R_f が

450mmに達するとその後、約15分～75分後に崩壊が起きる可能性が大きくなる。このことを利用して被害が発生する前に近傍の観測所の雨量データから R_f を求め、警戒避難に活用できる。

- 3) 降雨のある無限長斜面の浸透解析および安定解析から、 R_f は地下水位がある高さまで上昇するに必要な降雨パターンを表している。例えば、1999年6月29日の被害が起こり始めた雨量指数 $R_f = 450\text{mm}$ は、基盤層の透水係数 $k_b = 10^{-4}\text{cm/s}$ 、風化層の有効間隙率 $n_e = 0.15 \sim 0.20$ の斜面で地下水位が $H_w = 40 \sim 60\text{cm}$ まで上昇するに必要な降雨パターンを表している。

6.2 雨量指標 R' について

- 1) 短期実効雨量と長期実効雨量の2つの物理量から導き出される1つの値 R' を等値線図に示すことにより空間的な斜面崩壊の危険度を表現することができる。
- 2) R_f を用いた場合には先行降雨の影響が過大に評価されるため、これを改善した雨量指標 R' の方がよりよく現象を表現できる。
- 3) 風化花崗岩斜面では、土石流の発生要因のひとつである山地崩壊は $R' = 175\text{mm}$ 程度で発生し、 $R' = 250\text{mm}$ を超えると土石流災害が発生しやすくなる。また、がけ崩れは散発的なものも含むと $R' = 125\text{mm}$ 程度から発生しているが、同時多発するがけ崩れ災害は $R' = 200\text{mm}$ 程度を目安にできる。

6.3 地震による基準雨量の変化について

- 1) 斜面崩壊が起こった場所としては、芸予地震までは土砂崖が約70%以上と大部分を占めていたが、芸予地震後は石崖が約60%以上を占め、被害の起こる場所が変化した。これは、芸予地震によって斜面はダメージを受け、その影響は土砂崖より石崖に強く現れ、現在も残っているためと考えられる。
- 2) 斜面崩壊が起こった場所としては、芸予地震までは土砂崖が約70%以上と大部分を占めていたが、芸予地震後は石崖が約60%以上を占め、被害の起こる場所が変化した。
- 3) 雨量指標 R_f が600mm以下(R' では150mm以上に相当)になると斜面崩壊が10箇所以上起こる災害になる可能性が強く、 R_f が550mm以下(R' では200mm以上に相当)になると斜面崩壊が100箇所以上起こる災害となる可能性が高い。
- 4) 芸予地震前に斜面崩壊が発生するときの R_f の平均値は680mm(R' では100mmに相当)で、芸予地震後は720mm(R' では50mmに相当)であった。この差は、時間雨量に換算して約15mm/h、累積雨量に換算して約50mmに相当し、芸予地震後は少ない降雨によって斜面崩壊が起っている。

謝辞

新しい雨量指標の提案者であり、一連の研究に対してご指導をいただきました広島大学の佐々木康名誉教授と、貴重なご意見をいただきました広島大学の海掘正博助教授に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省砂防部砂防情報室：土砂災害記録，<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/link1353.htm>，2005。
- 2) 国土交通省砂防部：砂防便覧(平成15年度)，pp. 655-668，2003。
- 3) 森脇武夫，寺田秀樹，谷茂，天野浄行：5. 豪雨時における斜面崩壊危険度予測(その1)，講座「豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測」，土と基礎，第51巻，第12号，pp. 92-pp. 97，2003。
- 4) 建設省松本砂防工事事務所：焼岳・浦川における土石流調査関係資料集Ⅱ，技術資料No.7，pp. 20，1977。
- 5) 山田剛二，渡正亮，小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の実態と対策，山海堂，p. 433，1971。
- 6) 芦田和男，高橋保，沢田豊明，江頭進治，澤井健二：小豆島の土砂災害について，昭和51年9月台風17号による災害の調査・研究総合報告，京都大学，pp. 109-115，1977。
- 7) 塩島由道，磯望，松原敏子，山川克己，米沢宏：岐阜県高原川流域における土砂災害と降雨特性，昭和53年度日本地理学会予稿集，pp. 80-81，1978。
- 8) 建設省九州地方建設局大隈工事事務所：土砂生産解析業務報告書，pp. 4-5，1978。
- 9) 鈴木雅一，福島義宏，武居有恒，小橋澄治：土石流災害発生の危険雨量，新砂防，Vol. 31，No. 3，pp. 1-7，1979。
- 10) 渡辺廠，徳山久仁夫，中山政一，二宮寿男，大八木俊治：土石流警戒避難基準雨量設定の一手法，新砂防，Vol. 31，No. 3，pp. 22-30，1979。
- 11) 青木祐久：過去に土石流等の災害をもたらした降雨の特徴，土木技術資料，Vol. 22，No. 2，pp. 15-20，1980。
- 12) 網干寿夫，低引洋隆：真砂土自然斜面の崩壊について，第7回土質工学研究発表会概要集，pp. 507-510，1972。
- 13) 瀬尾克美，船崎昌雄：土砂害(主に土石流的被害)と降雨量について，新砂防，Vol. 26，No. 2，pp. 22-28，1973。
- 14) 建設省河川局砂防部：土石流災害に関する警報の発令と避難指示のための降雨量設定指針(案)，1984。

- 15) 建設省河川局砂防部：総合土砂災害対策検討会における提言および検討結果，1993.
- 16) 荒木義則，古川浩平，松永悟，小笠原貴人，石川芳治，水山高久：土石流危険渓流における地形特性を考慮した土砂崩壊の発生限界線の設定に関する研究，土木学会論文集，No. 574/VI-36，pp. 33-47，1997.
- 17) 大滝俊夫：降雨によるがけくずれの水文学的研究，気象庁研究時報，Vol. 17，pp. 351-395，1965.
- 18) 道上正規，檜谷治：タンクモデルによる豪雨時の斜面崩壊予測例，第6回日本自然災害学会学術講演会要旨集，pp. 11-12，1987.
- 19) 牧原康隆，平沢正信：斜面崩壊危険度予測におけるタンクモデルの精度，気象庁研究時報，Vol. 45，No. 2，pp. 35-70，1993.
- 20) 古川智，笹井友司：降雨浸透を考慮した斜面崩壊の3次元評価，第36回地盤工学研究発表会概要集，pp. 2437-2438，2001.
- 21) 榎明潔：降雨時の斜面表層崩壊，土と基礎，第47巻，第5号，pp. 17-20，1999.
- 22) 佐々木康，白石芳樹，加納誠二：平成11年の斜面災害をもたらした広島県の豪雨特性，第34回地盤工学研究発表会講演概要集，pp. 2443-2444，2000.
- 23) 佐々木康，森脇武夫，加納誠二，白石芳樹：1999年の広島県斜面災害をもたらした降雨特性と警戒・避難のための雨量指標，土と基礎，第49巻，第7号，pp. 16-18，2001.
- 24) Sasaki, Y., Moriwaki, T., Kano, S. and Shiraishi, Y.: Rainfall index for warning against slope failure disaster, Proc. 15th ICSMGE, Istanbul, Vol. 2, pp. 1249-1252, 2001.
- 25) 塩野清治，升本眞二，弘原海清：BASICによるコンターマップ，I. 基礎編，共立出版，pp. 29-52，1988.
- 26) 中井真司・佐々木康・海堀正博・森脇武夫：警戒・避難のための雨量指標の改良（危険雨量指標 R_f の再吟味と R' の提案），広島大学工学研究科研究報告，第53巻，第1号，pp. 53-62，2004.
- 27) Nakai, S., Sasaki, Y., Kaibori, M. and Moriwaki, T.: Rainfall Index for Warning and Evacuation against Sediment-Related Disaster: Reexamination of the Rainfall Index R_f and a Proposal of R' , Soils and Foundations (in press).
- 28) 森脇武夫・佐々木康：2001年3月24日芸予地震被害調査報告「2. 土木施設および地盤関連」，地震工学ニュース，No. 179，pp. 7-15，2001.
- 29) 森脇武夫，小堀慈久，山田良子：呉市における降雨による斜面災害に及ぼす平成13年芸予地震の影響，第49回地盤工学シンポジウム平成16年度論文集，pp. 307-314，2004.

(2005年10月17日 受付)