

DEA を用いたがけ崩れにおける 警戒避難基準雨量の設定

佐藤 丈晴¹・荒川 雅生²・中山 弘隆³・鉄賀 博己⁴・古川 浩平⁵

¹正会員 修(理) 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

²正会員 博(工) 香川大学助教授 工学部信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

³工博 甲南大学教授 理工学部情報システム工学科 (〒658-8501 兵庫県神戸市東灘区岡本 8-9-1)

⁴山口県 土木建築部砂防課傾斜地保全係長 (〒753-8501 山口県山口市滝町 1-1)

⁵正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

降雨によるがけ崩れ発生予測としてがけ崩れ発生限界雨量線 (CL) の設定手法が提案されている。しかしながら、従来のがけ崩れ発生限界雨量線はほとんどが線形で示されており複雑な自然現象を再現しているとは言い難い。またその的中精度が低い問題がある。そこで本研究では、従来のがけ崩れ発生限界雨量線の問題を解決するために、包絡分析法 (DEA) を応用して警戒避難基準雨量の設定を試みた。本手法では降雨データの分布のみから、最適な警戒避難基準雨量の設定ができる。そして、がけ崩れの予測に関する検討を行い従来のがけ崩れ発生限界雨量線と比較して精度の向上を確認した。さらに警戒基準雨量、避難基準雨量の設定を試み、従来手法との比較を行いその有用性を検証した。

Key Words: Data Envelopment Analysis, slope failure, critical line

1. はじめに

温暖湿潤な気候に恵まれている日本の国土にとって、梅雨や台風などによる豪雨は、毎年のように起こるごく自然な現象である。山地・丘陵地が 8 割以上を占める日本列島の地形は、至る所で土砂災害が発生する素因を保有しており、それにより多くの人命や施設が失われてきている。さらに、近年の住宅開発によって都市周辺部の山地が切り開かれるなど、急傾斜地は年々増加する傾向にある。ハード対策の整備率が平成 9 年度末で約 25%¹⁾ という状況を鑑みると、すべての急傾斜地においてハード対策を行うことは、要する期間・予算も計り知れないので現実的にはほぼ不可能である。また、既存の対策施設の老朽化もあり、対策が実施されている箇所でも絶対に安全であるとは言い難い。

このことから、豪雨現象が頻繁に起こる我が国土では、土砂災害を完全に抑えることはほぼ不可能であると言っても過言ではない。このような土砂災害対策として、近年ソフト対策が重要視されている。国土交通省では、1984 年に土石流発生危険基準線の設定²⁾を行い、以後詳細な検討^{3), 4)}を重ね、一部で実用化されている。がけ崩れに対してもがけ崩れ発生限界雨量線

(CL : Critical Line ; 以下 CL と記述する) が設定される等、警戒避難体制の整備が図られている⁵⁾。しかしながら、実用化されている CL (以下従来 CL と記述する) はほとんどが線形で示されており複雑な自然現象をうまく再現できているかということと、的中精度に若干の不安があることが指摘⁶⁾されている。

これに対して、倉本ら⁶⁾は RBF ネットワークを用いて非線形な CL を設定した。この論文中で倉本らは、従来 CL との精度検討を行っており、非常に精度が向上していることが確認された。しかしながら、この非線形 CL を設定するためにはいくつかのパラメーター (λ , r 等) を適切に定めることが必要であり、その最適値を決定する手法が確立されておらず、試行錯誤による検討が必要⁶⁾となった。また CL が非常に複雑な形状を示しているため、多地域にわたってこれを利用するには、パソコン処理上問題があると考えられる。

そこで、本研究では近年経営の効率性の判断に用いられている包絡分析法 (DEA : Data Envelopment Analysis; 以下 DEA と記述する)⁷⁾を用いて警戒避難基準雨量の設定を試みた。この手法はパラメーターの設定が必要でなく、降雨のデータのみで最適な警戒避難基準雨量の設定が可能であり、設定者の主観が入らず

客観的に設定できる。さらに、CLが難解な関数ではなく折れ線（線分）で示されるため、パソコンによって多地域のCLを同時に処理することが可能であり、危険かどうか容易に判定できることから実用化が容易である。このDEAを用いて設定した警戒避難基準雨量の有効性を示すために従来CLと比較検討を行った。また、将来の降雨に対して精度良くかけ崩れの発生を予測できるか検証した。さらに、警戒避難の目安となる警戒基準雨量²⁾及び避難基準雨量²⁾を設定し、その有用性を検討した。

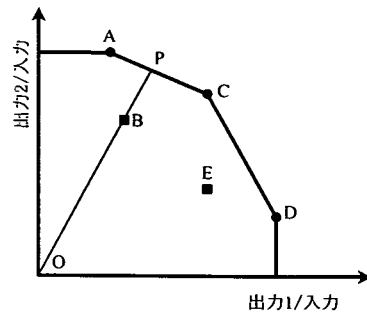


図-1 DEAの概要図

2. DEAの概要

包絡分析法 (DEA) とは、意思決定体 (DMU=Decision Making Unit, 以下DMUと記す) が行う活動の効率性を、投資 (入力値) を効果 (出力値) に変換する過程として表し、その変換過程の効率性を測定するための手法として、Charnes, Cooper, Rhodes によって開発された³⁾。したがって、入力値は小さいほど良く、出力値は大きいことが望ましいものとする。そのとき、次のような効果に対する投資の比率尺度を用いて、変換過程の効率性の面からDMUを評価する。

$$\text{比率尺度} = \frac{\text{効果}}{\text{投資}} \quad (1)$$

式(1)では、この比率尺度が大きくなるほど効率性が高まっていることを示している。

いま、DMU^oの入力項目の値を $x_k^o (x_1^o, x_2^o, \dots, x_h^o)$ 、出力項目の値を $y_i^o (y_1^o, y_2^o, \dots, y_i^o)$ とする。そして事業体ごとの入出力データ x_k^o, y_i^o に、それぞれ未知のウエイト v_k, u_i をかけて加えることにより、仮想的入力、仮想的出力をつくる。このDMU^oの比率尺度 (式 (1)) を θ とすると、式 (2) となる。

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^l u_i y_i^o}{\sum_{k=1}^h v_k x_k^o} \quad (2)$$

θ : 比率尺度
 v_k, u_i : ウエイト

ここで問題となるのは、ウエイトをどう決定するかであるが、DEAではこのウエイトの決め方をDMUごとに変えることができ、DEAがDMU^oにとって最適なウエイトを決定するので「可変ウエイト」と言われている。このように、DEAでは外生的なウエイトの決定を必要としない。

DMU^oの比率尺度を最大にするようにウエイト v_k, u_i の値を決定するには次のように分数計画問題を考える。

$$\text{目的関数} \quad \max_{u, v} \theta^o = \frac{\sum_{i=1}^l u_i y_i^o}{\sum_{k=1}^h v_k x_k^o} \quad (3)$$

$$\text{制約式} \quad \frac{\sum_{i=1}^l u_i y_i^j}{\sum_{k=1}^h v_k x_k^j} \leq 1 \quad (j=1, \dots, n) \quad (4)$$

$$v_1, v_2, \dots, v_h \geq 0 \quad (5)$$

$$u_1, u_2, \dots, u_i \geq 0 \quad (6)$$

最適解を (v^*, u^*) とし、そのときの目的関数を θ^* とする。そのとき、最適値 $\theta^*=1$ ならば対象となるDMU^oは「D効率的」であるといい、また $\theta^*<1$ ならば「D非効率的」であるという。D非効率的なDMUに対しては、そのDMUよりもD効率的な優位データ (優位集合) が存在することを意味している。

図-1は1入力2出力の場合を例にとって示している。AからEまでのDMUでD効率的なDMUはA, C, Dであり、これらのDMUの比率尺度は1である。このようなDMUを結んだ線を効率的フロンティア (図-1中のA, C, Dを含む凸状の折れ線) という。すべてのDMUは、効率的フロンティアに内包される位置関係となり、B, EについてはD非効率的であり、効率的フロンティア上に存在しない。例えばOBを延長し、効率的フロンティアと交わるPを用いるとBの比率尺度はOB/OPと表される。したがって、BがD効率的になるには、Pを目標とすればよいこととなる。目標を達成すれば (BがPに移動できれば) BがD効率的になることができる。このように、DEAはD非効率的なDMUに対して、改善項目と目標設定ができる。

表-1 非発生限界線と発生下限線の定義

基準線名	定 義
非発生限界線	過去にこの基準線を越える非発生降雨はない。この基準線を越えると極めてがけ崩れが発生しやすい。
発生下限線	過去にこの基準線以下の発生降雨はない。(散発的に発生するがけ崩れは除く。)

3. 対象データの検討

本研究では分析の対象として、山口県の下関市を扱った。山口県の急傾斜地崩壊危険箇所数は3436箇所(全国5位)¹⁾と、全国的に見ても非常にがけ崩れの危険性の高い地域である。そのうち、下関市には922箇所⁹⁾が集中しており山口県内でも最も急傾斜地崩壊危険箇所が多いことからこの地域を対象とした。

分析に用いる降雨データは、下関市南部に位置する下関気象台において1976年から1999年までに観測されたアメダスデータすべて(無降雨も含む)とする。下関一帯で警戒避難基準雨量を設定する場合、現状では下関気象台のデータは、欠測が極めて少ない上に1976年からの長期にわたる精度の高い時間雨量を得ることができるため適当であると判断した。

本研究で扱う一連降雨は、前後に24時間以上の無降雨期間があるひとまとまりの降雨と定義した。発生降雨及び非発生降雨は一連降雨中にがけ崩れが発生した場合を発生降雨とし、それ以外を非発生降雨とした。非発生降雨については、時間雨量20mm/h以上または累積雨量(一連降雨の降り始めからの降雨を累加した雨量)が80mm以上の降雨を対象とした²⁾。

がけ崩れの発生は、発生時以前の降雨が大きく影響していると考えられている。従来CLでは実効雨量(半減期1.5時間と半減期72時間)の組み合わせを採用している。倉本ら¹⁰⁾では本研究と同じ山口県下関市で降雨の組み合わせについて検討した結果、時間雨量と実効雨量(半減期72時間)の組み合わせが最適な降雨の組み合わせであると結論づけた。本研究では倉本ら¹⁰⁾の最良な組み合わせを用いて以後の検討を行う。また、従来CLとの比較を行うために、従来CLも時間雨量と実効雨量(半減期72時間)の組み合わせを用いて検討することとした。また、本研究で用いた実効雨量(半減期72時間)は、ある時点から14日前までの各時間雨量に減少係数(0.5^{t/T}; Tは半減期(時間), tはがけ崩れが発生するまでの時間)をかけたものの和と定義した。

また、災害報告書における発生時刻は災害が報告された時刻が記載されているなど、曖昧な点が多く信頼性の高い時刻とは言い難い。倉本ら¹⁰⁾は、山口県下関

市の災害発生時刻について調査を行ったところ、明け方のがけ崩れが多発していることが確認された。しかしながら、夜間に発生したがけ崩れについては翌朝に見られることが多いことから、その信憑性に疑問が残るとして、明け方に発見された災害については夜間中に起こった最大時間雨量時に発生したと推定を行ったところ、がけ崩れ発生頻度と豪雨経験が同様の傾向を示したことから、明け方に発生したがけ崩れに対しては、この推定時刻を用いた方が良いと報告している。本研究でもこれにならってがけ崩れ発生時刻の推定を行い解析に用いた。

また、がけ崩れは突発的に発生し、非常に降雨の小さい場合でも発生することがあり、すべてのがけ崩れを予測することはほぼ不可能である。国土交通省³⁾ではすべてのがけ崩れを散発的に発生するがけ崩れと集中的に発生するがけ崩れとに分類し、集中的に発生するがけ崩れに対して予測を行っており、本研究でもそれにならって予測を行った。

4. DEAを用いた警戒避難基準雨量の設定法

本研究では発生降雨と非発生降雨から表-1に定義した2本の基準線(非発生限界線、発生下限線)を設定する。本研究では、この2本の基準線をまとめて警戒避難基準雨量と定義する。

対象のデータは前章で示した降雨データである。解析するにあたって、第2章で示した出力項目として時間雨量及び実効雨量(半減期72時間)の2要因を用いる。入力項目にあたるデータは存在しないことから、全ての降雨データについて式(3)、(4)の分母=1とし、フロンティアを設定する。

図-2に本研究で提案する警戒避難基準雨量の設定フローを示す。以下フローに沿って提案する警戒避難基準雨量の設定法について詳述する。

(1) 非発生限界線の設定

最初に非発生降雨から基準線を設定する。非発生降雨から求める基準線は、これより右上の領域に入る降雨は経験上必ずがけ崩れが発生するという基準であり、時間雨量と実効雨量(半減期72時間)がともに大きい値を示すデータが必要となる。しかしながら実際のデータは、時間雨量と実効雨量(半減期72時間)が非常に小さい非発生降雨が多量に存在し、分析に多くの時間が必要となる。したがって、まず多量にある非発生降雨をすべて分析することは非効率であることから、必要のない余分なデータを削除する。そこで、膨大なデータの中から時間雨量が同一のものは、実効雨量が

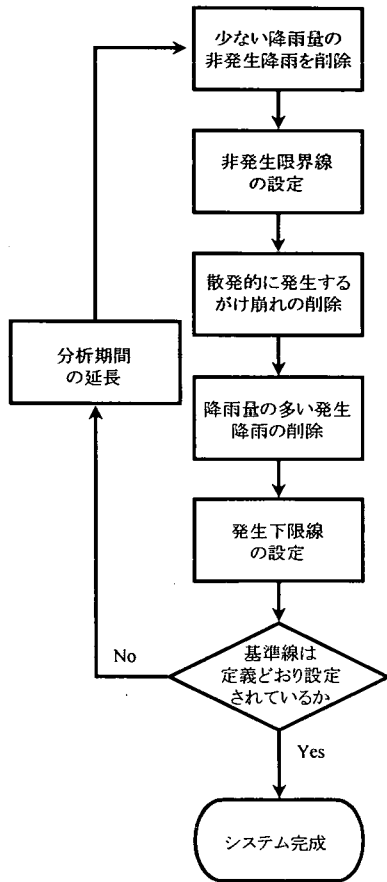


図-2 警戒避難基準雨量設定フロー

最大になるデータのみを抽出して、残りのデータをすべて削除する。この作業を行うことで非発生データを削減することができ、分析の効率化を図る。

抽出された非発生降雨から DEA を用いて、基準線を設定する。この基準線より右上の領域には非発生降雨が存在しないことから、この基準線を非発生限界線と定義する。

(2) 発生降雨の分類

がけ崩れは予測が不可能な小降雨で発生する場合（散発的に発生するがけ崩れ）がある。これらの発生降雨も考慮に入ると、降雨があれば即避難ということにもなりかねない。したがって、これらの発生降雨は見逃さざるを得ない状況にある。以下、本研究では集中的に発生するがけ崩れを対象として議論する。

本節では、以下に示す方法で散発的に発生するがけ崩れを定義し削除することとした。

- ① 非発生降雨から非発生限界線を設定する。このとき、式(4)～式(6)の条件を満たす u 、 v の組合

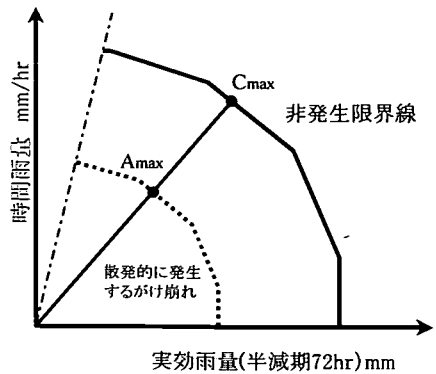


図-3 散発的に発生するがけ崩れの領域

せにおいて比率尺度が最も大きくなる（式(3)）ような u 、 v を求める。そして比率尺度が最大 (=1) である降雨データを抽出し、フロンティア（図-3の非発生限界線）を算定する。また、フロンティアを構成する降雨データを抽出するために DEA を用いることから、抽出された降雨データの比率尺度が問題となるのであって、 u 、 v については特に意味を持たない。また、図中の一点鎖線は $y=x$ のグラフであり、横軸に実効雨量、縦軸に時間雨量をとると、これより左上の領域には降雨データが存在しないことを示す。

- ② 発生降雨のうち、崩壊時以前に時間雨量 20 mm/hr 未満かつ累積雨量 80 mm 未満の発生降雨を散発的に発生するがけ崩れと仮定する。条件に累積雨量を用いたのは、発生降雨に対しても前章で記述した非発生降雨と同一条件²⁾で検討するためである。また、累積雨量は一連降雨開始時点では常に 0 で始まるのに対して、実効雨量は一連降雨開始以前の降雨状況の影響が関係するため、一連降雨開始時から非常に大きな値をとる場合があり、わずかな雨量の一連降雨でも基準を越える。このような降雨を議論に用いることは不適切と考え、本研究では累積雨量を基準に用いることとした。
- ③ 発生降雨を時間雨量-実効雨量のグラフにプロットする。前作業で散発的に発生するがけ崩れと仮定された発生降雨のうち、発生した時刻における比率尺度の最大値 ($0A_{max}/0C_{max}$) を求める。
- ④ グラフの左下を原点として、非発生限界線 ($0A_{max}/0C_{max}$) 倍に縮小した包絡線を求める（図-3の破線）。この包絡線に内包される領域にある発生降雨を予測不可能ながけ崩れとして削除する。本研究ではここで削除されたすべて

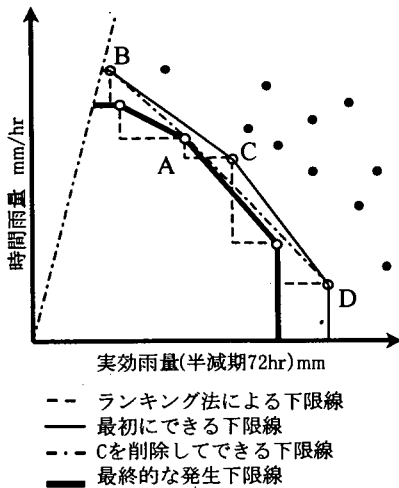


図-4 発生降雨の抽出の概念図

のがけ崩れを散発的に発生するがけ崩れとする。

上記手順に従って、散発的に発生するがけ崩れを削除し、残存した集中的に発生するがけ崩れから発生下限線を算定する。

(3) 発生下限線の設定

前節で抽出された、発生降雨から基準線を設定する。ここで設定する基準線は、これを越えるとがけ崩れが発生する恐れがあることを意味し、時間雨量、実効雨量(半減期 72 時間)がともに小さい発生降雨が必要となる。しかしながら、発生降雨は時間雨量、実効雨量(半減期 72 時間)がともに大きいデータが多いことから、分析の効率化を考慮して、不必要なデータを削除した後、DEA を用いて分析を行う。本節ではその削除法及び基準線の設定について説明する。

発生降雨の最小値に関する基準線を引くためのデータを抽出する。この際第 2 章で示した式を用いると凸性の仮定に反するために、必要なデータを自動的に取り出すことは出来ない。尹ら^{11),12)}が提案した GDEA は、このような非凸の効率的フロンティアを求めるために開発された方法である。しかしながら、非凸の効率的フロンティアを求めるためには、その具合を調整するためのパラメーターの設定が必要であり、本研究で利用する雨のデータから自動的に必要なデータを抽出することは出来ない。そこで、本研究では、ランキング法 (GDEA ではパラメーターが無限大) を用いて発生降雨の下限データとなりうるデータ (図-4 中の白点) を抽出し、それ以外のデータ (図-4 中の黒点) をすべて削除する。

表-2 安全領域、警戒領域、発生領域の定義

領域名	定義
安全領域	発生下限線の原点側、がけ崩れが極めて発生しにくい領域。(散発的に発生するがけ崩れは除く。)
警戒領域	発生下限線と非発生限界線の間領域。発生・非発生が混在している警戒が必要な領域。
発生領域	非発生限界線より危険側(グラフの右上側)。過去にすべての降雨でがけ崩れが発生した危険な領域。

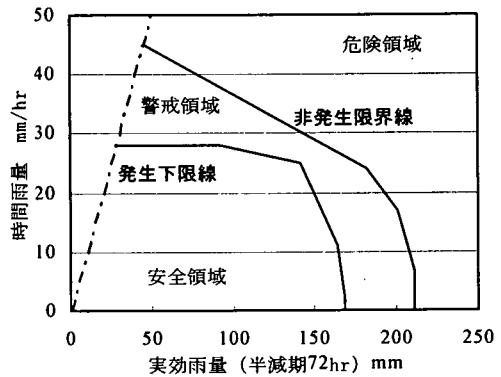


図-5 提案する警戒避難基準雨量の概要

抽出した発生降雨の降雨データから式(3)~(6)を用いてフロンティアを設定すると BCD が求められる (図-4 中の実線)。内包される発生降雨のうち比率尺度が最も大きい点 A を求め、A に最も近接した包絡線上の発生降雨 C を削除し、再計算を行うと、BAD の基準線が得られる。同様にしてグラフ上に残っている発生降雨がすべて基準線上に分布するまで繰り返し再計算を行い、基準線に内包される発生降雨が存在しないときの基準線 (図-4 中の太線) を発生下限線と定義する。

(4) DEA を用いた警戒避難基準雨量の完成

2本の基準線で分割された3つの領域(安全領域、警戒領域、危険領域)について表-2にその定義を示す。図-5に2つの基準線を1つのグラフに示した。この図より、提案する基準線は線分が結合してできた非常に簡易な形状を示すことから、危険か安全かの判定が容易である。つまり、多地域(あるいは個別の斜面)でCLを設定する場合、パソコンによる処理速度の低下が問題視される。したがって、非常に複雑な形状を示すことなく線分で構成されており、簡易な形状であることから、多数のCLの判定を迅速に処理することができる。

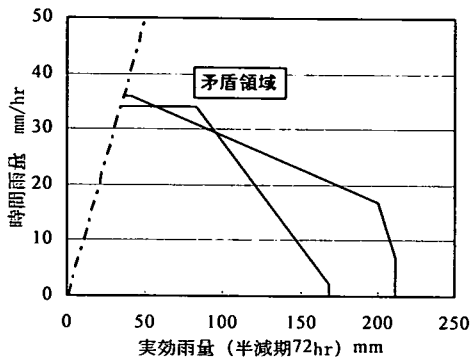


図-6 1976～1980年までの警戒避難基準雨量

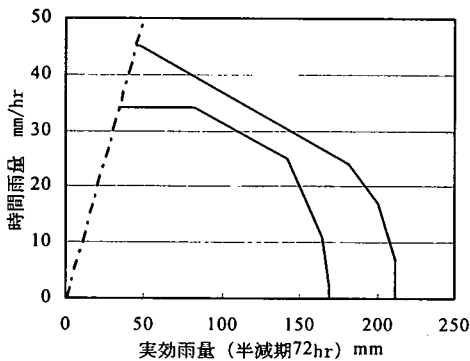


図-7 1976～1990年までの警戒避難基準雨量

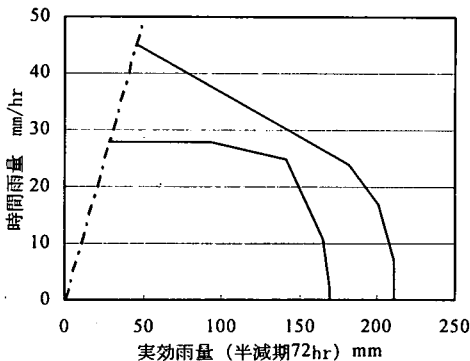


図-8 1976～1998年までの警戒避難基準雨量

5. 設定に要する分析期間

2つの基準線は雨量データのみから設定できパラメータ等の設定は不要である。したがって、警戒避難基準線構築者の主観が入りにくい特徴を持っているが、一方で警戒避難基準雨量を構築する上で多量のデータが必要となる。そこで、何年の分析データが必要であるかを検討する。そのために1976年～1998年までの発生・非発生降雨データを1年ごとに分析させて、年ごとの基

表-3 警戒領域内にある非発生降雨と警戒領域で
がけ崩れが発生した発生降雨の一連降雨数の割合

一連降雨数	
非発生降雨	26
発生降雨	7

表-4 領域別がけ崩れ発生回数

	発生回数	発生率(%)
危険領域	65	76.5
警戒領域	20	23.5

準線の変化を検討した。

まず、1976年から1980年まで5年間の降雨データから求められた、発生下限線・非発生限界線を図-6に示す。5年間の降雨データの期間では、降雨データ数が少ないので、発生下限線が非発生限界線を越えることから矛盾領域が出来る。このため、警戒領域が分断され、表-1、表-2で示した2つの基準線、3領域の定義に合わない。

次に、1976年から1990年まで15年間の降雨データを分析させて、発生下限線・非発生限界線を作成したグラフを図-7に示す。発生下限線が非発生限界線を越えることがなく、警戒領域が存在し、図-5で示されたような3領域に分割された。この前年までは、図-6のように2つの基準線が交わっていたが、1990年まで分析させることで、定義に合致した警戒避難基準雨量を設定できる。

よって、今回使用した下関観測所の降雨データを用いてDEAによって斜面崩壊予測を行う場合は、最低15年間のデータを分析させることで、供用可能な警戒避難基準雨量が構築できる。しかし、より信頼度の高い発生予測を行うためにはできる限り長い期間の発生・非発生データを分析させて、非発生限界線・発生下限線を決定することが望まれる。

以上のことより、本研究ではデジタル雨量データが存在する1976年から1998年までの23年間のデータを分析させて、警戒避難基準雨量を作成した。その結果を図-8に示す。

6. がけ崩れの危険度評価

発生下限線を越えるとがけ崩れが発生する恐れがあることは上述したとおりである。発生下限線を越えた警戒領域ではどの程度危険であるか非発生限界線を越

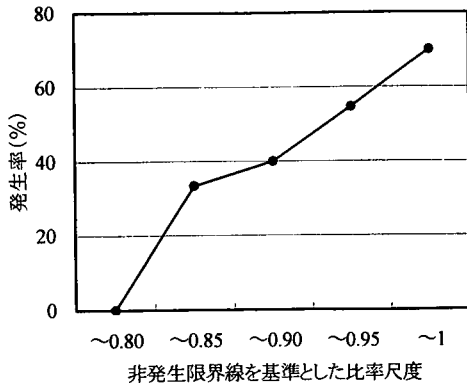


図-9 非発生限界線を基準とした比率尺度と警戒領域に含まれるがけ崩れ発生との関係

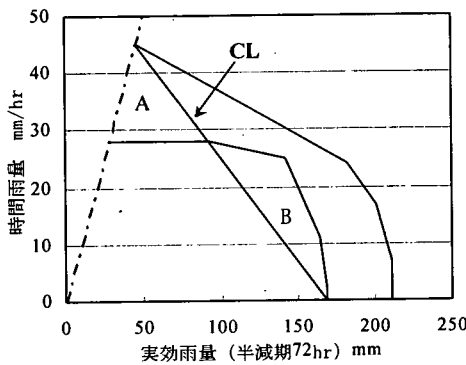


図-10 提案する警戒避難基準雨量と従来CLとの比較図

えた危険領域の場合と比較して検討する。

発生下限線を越えた警戒領域には発生降雨と非発生降雨が混在している。そのため、警戒領域内にある非発生降雨がどの程度存在するかで、その危険度を表現できる。表-3 に本調査地域において、発生下限線を越えて警戒領域内でがけ崩れが発生した発生降雨と警戒領域内にある非発生降雨の件数を示す。非発生降雨が圧倒的に多く、がけ崩れの発生率は 21.2% ($=7/(7+26)$) であることから、警戒領域で発生する確率はそれほど高くないといえる。これに対して、非発生限界線を越える降雨は過去いずれも災害が発生している (100%) ことから、非常に危険な状態であることがわかる。また、がけ崩れの発生件数について表-4 に示しているように警戒領域と比較して危険領域に入ってからのがけ崩れ発生件数は格段に増加している。

さらに、警戒領域のどの付近でがけ崩れが発生しているかを図-9 に示す。非発生限界線を基準とした比率尺度を用いて発生率の変移を表している。比率尺度が 0.80 付近に発生下限線が存在するため 0.80 以下の

表-5 非発生降雨の的中率

	非発生降雨	基準を満たす降雨	的中率 (%)
DEA	98	79	80.6
従来CL	98	76	77.6

表-6 発生降雨の経路

発生降雨数	A 領域を通った後に発生した降雨数	B 領域を通った後に発生した降雨数
	13	2

発生率は 0% である。この図から、比率尺度が増加するにつれて、がけ崩れの発生率が高くなっていることがわかる。このように比率尺度を用いることでがけ崩れの危険度を推定することもできる。

つまり発生下限線はがけ崩れ発生の可能性を示す基準となり、従来 CL と類似しており、CL として設定するのが妥当であろう。これに対して、非発生限界線を越えた場合は必ずがけ崩れを引き起こすため、避難が完了している必要があると言える。従来の警戒避難基準雨量については、非発生限界線に相当する基準は存在しなかったが、発生の可能性のある基準と、必ず発生している基準の 2 つが示されることは、現地住民にとって非常に有意な情報であり、警戒避難の基準として示すべき情報であると考えられる。

7. 従来 CL との比較

前章で発生下限線を CL として設定することを提案した。したがって、DEA を用いた警戒避難基準雨量が有用であるかどうかは、発生下限線が従来 CL より精度が向上しているか否かに依存している。本章では、従来 CL と発生下限線における非発生降雨に関する的中率 (非発生降雨が従来 CL 及び発生下限線を越えない確率) を求め、従来 CL と比較して改善されているかを検討する。

本研究で提案する警戒避難基準雨量に従来 CL を重ねた図を図-10 に示す。比較を行う従来 CL の設定については、従来 CL の安全領域に発生降雨が入らないように、時間雨量と実効雨量 (半減期 72 時間) がともに小さい降雨で発生した 2 点の発生降雨を結んだ。つまり、最も安全領域が広くなるように設定している。この従来 CL と発生下限線について、的中率を比較した結果が表-5 (表中では提案する警戒避難基準雨量を DEA と表記する) である。今回の非発生降雨に関する的中率は最も安全領域が広くなるように設定した従来 CL より

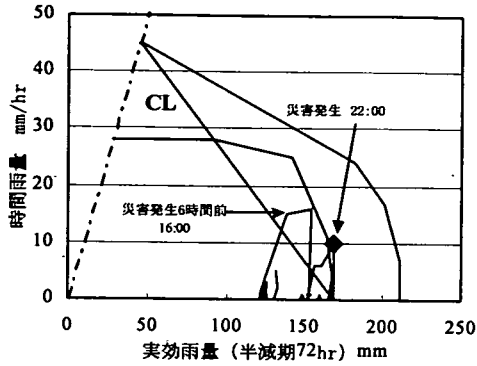


図-11 1999年の降雨に対するがけ崩れの予測

表-7 時間毎の比率尺度の変移

時刻	時間雨量	発生下限線を基準とした比率尺度	非発生限界線を基準とした比率尺度
10:00	0	0.734	0.588
11:00	0	0.727	0.582
12:00	0	0.720	0.576
13:00	1	0.719	0.575
14:00	2	0.726	0.579
15:00	4	0.748	0.592
16:00	15	0.897	0.729
17:00	16	0.986	0.799
18:00	1	0.906	0.725
19:00	0	0.897	0.717
20:00	6	0.936	0.743
21:00	6	0.962	0.763
22:00	10	1.024	0.822
23:00	1	0.996	0.797
0:00	0	0.986	0.789
1:00	0	0.977	0.781
2:00	4	0.997	0.793
3:00	1	0.988	0.790
4:00	2	0.990	0.792
5:00	1	0.986	0.789
6:00	0	0.976	0.781
7:00	0	0.967	0.774
8:00	0	0.958	0.766
9:00	0	0.949	0.759

も DEA のほうが若干高い。

発生下限線と従来 CL の違いは安全領域の位置(図中の A, B)にある。A 領域については、従来 CL を用いた場合にのみ安全な領域と定義されている部分であり、これは降雨が始まって急に大きな時間雨量になった場合の降雨である。B 領域については、発生下限線を用いた場合にのみ安全な領域として定義されている領域であり、弱い長雨が続く場合である。降り始めから急に大きな時間雨量になるのはごくまれであること、降り始めの実効雨量が必ずしも 0 ではなく数 10mm である場合もあることを考慮すると、A 領域に含まれる非発生降雨の数は B 領域内にある非発生降雨数より一般的に少ないと考えられる。

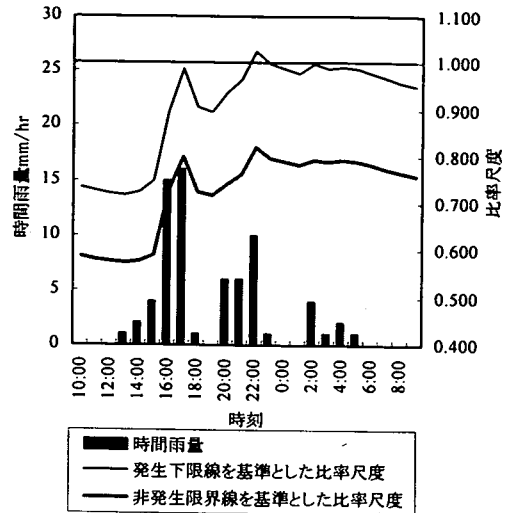


図-12 比率尺度を用いたがけ崩れ危険度の推移

また、このことは発生降雨の推移からも説明できる。表-6 は発生降雨がどの領域を通過して発生下限線を越えるかを示したものである。発生降雨では A 領域を通過した後に発生したものと比較して B 領域を通過してから発生した降雨の方が格段に多い。

すなわち、降雨は図-10 の A 領域周辺より B 領域周辺に多いと考えられるが、従来 CL では B 領域を安全領域に含むことができない。その違いが的中率の差に表れていると考えられる。

以上のように、本研究で扱った下関のデータでは的中率は若干の違いであったが、安全領域の相違の側面からも、発生下限線を用いた非発生降雨の的中率のほうが、従来 CL と比較して精度が向上していると考えられる。

8. がけ崩れ発生の予測精度

警戒避難基準雨量を設定するにあたり、将来の降雨に対して有効に機能するかどうかは非常に重要である。本章では提案する警戒避難基準雨量に対して、将来の降雨データを用いてその妥当性を検証した。

1976 年から 1998 年まで 23 年間分析させた警戒避難基準雨量を用いて 1999 年の予測を試みた。図-11 に 1999 年の発生降雨を示す。従来 CL、発生下限線共に発生を予測しているが、従来 CL の場合、発生から 6 時間前に既に CL を越えている。これに対して発生下限線は越えた直後に発生を予測しており、予測精度が非常に高い。この差は、図-10 で示された安全領域の違い(図中 B 領域)にあり、発生下限線は従来 CL よりも正確に

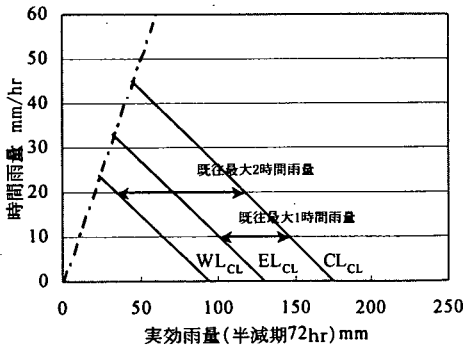


図-13 従来 CL における WL, EL の設定

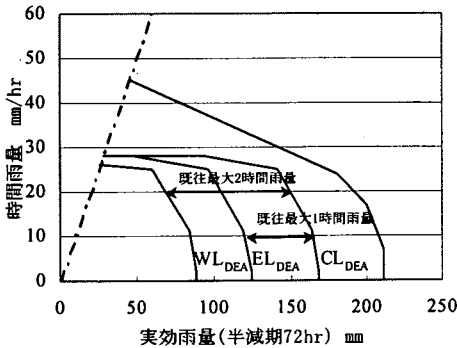


図-14 提案する警戒避難基準雨量における WL, EL の設定

発生予測が行えることは明らかである。予測に関しても B 領域の差は明確に表れている。

図-11 の発生降雨で時間毎の比率尺度の変移を表-7 に示した。表中の 22 時で災害が発生している。それぞれの比率尺度が 1 を越えると発生下限線及び非発生限界線を越えることを示すことから、危険度の推移を数字で具体的に確認できる。これを図で表示すると、図-12 となる。横軸に時間をとり、時間雨量を棒グラフにすることで、降雨によってどの程度危険度が上昇しているか、また降雨後どの程度安全になっているかを時系列的に表示することができる。

9. 警戒避難基準の設定

国土交通省では、従来 CL 設定の際、警戒基準雨量 (WL)、避難基準雨量 (EL) の設定を行っている。また避難にかかる時間に関する調査¹³⁾によると、避難勧告を受けてから、避難場所までの移動を考慮すると約 1 時間前に発令することが望ましいと報告されている。そこで、本研究においては、既往最大 1, 2 時間雨量を

表-8 がけ崩れ発生 1 時間前の雨量状況

	WL-EL	EL-CL	CL-
従来 CL	5/85 5.88%	17/85 20.00%	63/85 74.12%
DEA	6/85 7.06%	32/85 37.65%	47/85 55.29%

表-9 非発生降雨の空振り率の比較

	WL	EL	CL
従来 CL	97/98 98.98%	53/98 54.08%	22/98 22.45%
DEA	70/98 71.43%	35/98 35.71%	19/98 19.39%

用いて WL, EL を設定する。図-13 に従来 CL の WL_{CL}, EL_{CL} の設定例を、図-14 に提案する警戒避難基準雨量における WL_{DEA}, EL_{DEA} の設定例を示す。図中の CL_{DEA} は発生下限線を意味する。本調査地域の場合、既往最大 1, 2 時間雨量は 45mm/hr, 81mm/2hr である。

表-8 にかげ崩れ発生 1 時間前にどの領域に降雨が存在したかを示す。表中の WL-EL は、降雨が WL と EL に挟まれた領域にある場合を指し、EL-CL は EL と CL (提案する警戒避難基準雨量の場合は EL と発生下限線) に挟まれた領域にあることを示す。CL-とは従来 CL の場合 CL を越えたときを指し、提案する警戒避難基準雨量の場合では発生下限線を越えた領域を指す。さらに、非発生降雨に関する空振り率を表-9 に示す。空振り率とは全非発生降雨中、各基準線 (WL, EL, CL) を越えた非発生降雨を除いた割合である。

表-8 より発生 1 時間前に EL-CL の領域にある確率は提案する警戒避難基準雨量の場合 (表中では DEA と表す。表-9 も同様) 37.65% で最も高く、従来 CL の場合の 20.00% を大きく上回っており 1 時間後にがけ崩れが発生する確率は大幅に改善されている。

表-9 より発生下限線は従来 CL と比較して空振り率は、いずれも大きく減少している。EL に関しては 54.08% から 35.71% まで空振り率が減少している。これを一年間で何回空振りがあるかの指標である空振り頻度を用いて表現すると 35.71% の空振り頻度は 1.5 回/年 (35 回/23 年) となり、従来 CL の 2.3 回/年 (53 回/23 年) よりもかなり低くなり、従来 CL よりも信頼性が高いことが確認できる。

10. おわりに

本研究では DEA を用いて警戒避難基準雨量を設定し、従来 CL よりも精度の向上が確認された。以下に主な結論を示す。

1. DEA を用いて発生降雨及び非発生降雨から 2 本の包絡線からなる警戒避難基準雨量を設定できた。また、この基準は線分が結合してできた非常に簡易な形状を示すため、危険か安全かの判定が容易であり、パソコンによって多数の CL の判定を迅速に処理することができる。
2. 分析する期間においては、山口県下関市の場合最低 15 年のデータが必要であった。DEA で設定される基準雨量は雨量データのみから得られるものであり、パラメーターなどの設定がない。したがって分析する雨量データが多いほど、より信頼性の高い警戒避難基準雨量を求めることができるので、できるだけ分析期間を長く取ることが望ましい。
3. 発生の可能性のある基準（発生下限線）と、必ず発生している基準（非発生限界線）の 2 つの基準が示されることは、現地住民にとって有意であり、警戒避難の基準として必要な情報であると考えられる。
4. DEA の発生下限線は設定の方法から従来 CL と同様の意味を持つ。従来 CL と DEA の発生下限線の比較を行ったところ、DEA がより高い的中率を達成している。
5. 将来の発生予測において発生下限線は従来 CL と比較して、正確に発生時刻を予測できた。これは安全領域の差によるものである。また、比率尺度を用いることで、発生の危険度を数字で具体的に示すことができる。
6. がけ崩れ発生 1 時間前の雨量、非発生降雨に対する空振り率を考慮したとき、DEA を用いて設定した WL_{DEA} 、 EL_{DEA} が従来の CL で設定した WL_{CL} 、 EL_{CL} より精度が高く、大幅に改善されている。

本研究では、下関南部を対象として警戒避難基準雨量を設定しており、地域特性が表れているものと思われることから、他地域では再度警戒避難基準雨量の設定の必要があると考えられる。さらに、すべての斜面を同様の斜面として扱っており、斜面の危険度の相違を評価していない。したがって、今後は斜面崩壊の素因である地形地質を考慮した警戒避難基準雨量の設定について検討することが課題として挙げられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、中電技術コンサルタント(株)倉本和正氏には本研究の内容について多くの助言

を頂いた。また、香川大学工学部助手尹禮分博士には DEA に関する多くの知識を賜った。データの整理、分析には山口大学学生中山律子さんの協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省砂防部：砂防便覧（平成 11 年度版）、2000。
- 2) 建設省河川局砂防部：土砂災害に関する警報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針（案）、1984。
- 3) 建設省土木研究所砂防部砂防研究室：土石流の警戒避難基準雨量の設定に関する研究（Ⅱ）、1986。
- 4) 建設省土木研究所砂防部砂防研究室：土石流の警戒避難基準雨量の設定に関する研究（Ⅲ）、1988。
- 5) 社団法人全国治水砂防協会：砂防関係法令例規集、2001。
- 6) 倉本和正、鉄賀博己、東寛和、荒川雅生、中山弘隆、古川浩平：RBF ネットワークを用いた非線形がけ崩れ限界雨量線の設定に関する研究、土木学会論文集、No. 672/VI-50, pp. 117-132, 2001。
- 7) 刀根薫：経営効率性の測定と改善、日科技連、1998。
- 8) Charnes, A., Coopers W. W. and Rhodes, E.: Measuring the Efficiency of Decision Making Units, European Journal of Operational Research, 2, 429-444, 1978。
- 9) 山口県土木建築部砂防課：山口県の砂防（パンフレット）、2001。
- 10) 倉本和正、鉄賀博己、菊地英明、守川倫、門間敬一、古川浩平：急傾斜地における斜面要因を考慮したがけ崩れ発生限界雨量線の設定手法に関する研究、土木学会論文集、No. 658/VI-48, pp. 207-220, 2000。
- 11) 尹禮分、中山弘隆、谷野哲三、荒川雅生：一般化包絡分析法と遺伝アルゴリズムによる多目的最適化の一手法、システム制御情報学会論文誌、Vol. 13, No. 4, pp. 179-185, 2000。
- 12) 尹禮分、中山弘隆、谷野哲三：包絡分析法（DEA）モデルの一般化、計測自動制御学会論文集、Vol. 35, No. 8, pp. 1813-1818, 1999。
- 13) 瀬尾克美、森俊勇、丸山泰正、黒川興及：平成 5 年土砂災害警戒避難体制実態調査とその分析、砂防学会誌、Vol. 49, No. 4, pp. 28-33, 1996。

(2001. 8. 8 受付)

A STUDY ON SETTING A CRITICAL RAINFALL FOR THE WARNING AND EVACUATION BASED ON DATA ENVELOPMENT ANALYSIS

Takeharu SATO, Masao ARAKAWA, Hirotaka NAKAYAMA,
Hiromi TETSUGA and Kohei FURUKAWA

There are many studies on setting a critical line for prediction of slope failure caused by rainfall. However, because of the complexity of nature, it is difficult to distinguish the rainfall causing slope failure by a linear critical line. In this study, we set up a critical rainfall for the warning and evacuation for prediction of slope failure by using Data Envelopment Analysis. We compare the result with that in case using conventional Critical Line and showed effectiveness of the proposed method. We examine prediction of slope failure by proposed method. Warning Line and Evacuation Line are also determined based on Data Envelopment Analysis, and that effectiveness is studied.