

RBF ネットワークを用いた個別土砂災害危険箇所毎の発生危険基準線の設定手法について

倉本 和正¹・古川 浩平²

¹中電技術コンサルタント株式会社 河川部砂防グループ (〒734-8510 広島県南区出汐2丁目3-30)

²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)

1. はじめに

土砂災害の警戒避難基準として一般的に用いられている発生危険基準線は、従来から降雨要因のみで設定されており、土砂災害危険箇所（以下、危険箇所）毎に異なる地形特性が反映されていない。しかも、従来手法は、様々要因が絡み合って発生する複雑な現象を簡易な線形で表しているため、高い精度で土砂災害の発生を予測することは困難である。そこで、本研究ではそれらの問題点を同時に解消することを目的に、RBF ネットワーク（以下、RBFN）を用いて地形要因を考慮した危険箇所毎の非線形発生危険基準線（以下、個別非線形 CL）の設定を試みた。

2. RBFN の概要

RBFN は、入力層(素子数 n 個)、中間層(素子数 m 個)、出力層(素子数 1 個)の 3 層からなり、 j 番目の中間素子の出力関数として図-1 に示すガウス関数 $h_j(\mathbf{x}) = \exp(-\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_j\|^2 / r^2)$ を用いる。出力素子の出力は、中間層素子と結合係数 $w_j (j=1, \dots, m)$ との積の総和 $O(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^m w_j h_j(\mathbf{x})$ として表される。

RBFN の学習は、 p 個の学習データ $\mathbf{x}_i (i=1, \dots, p)$ と教師データ $y_i (i=1, \dots, p)$ 、ならびに m 個の基底関数を用いて教師値と出力値の差の 2 乗和を考え、それに結合係数

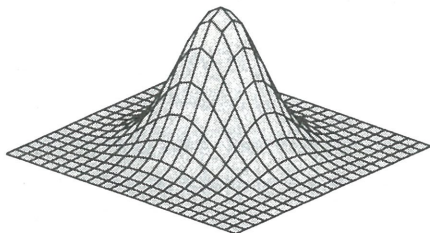


図-1 ガウス関数の形状

の抑制項を加えた式(1)が最小となるような w_j を求めることである。

$$E = \sum_{i=1}^p (y_i - O(\mathbf{x}_i))^2 + \sum_{j=1}^m \lambda_j w_j^2 \rightarrow \text{Min} \quad (1)$$

3. 対象地域および対象データの抽出

対象地域は、これまで多くのがけ崩れ災害に見舞われている下関市南部を選定した。対象とする危険箇所は、対象地域内で危険箇所に指定された自然斜面 (239 斜面) とした。対象とする危険箇所の中から、対象期間内 (1975 年～1998 年) にがけ崩れの発生が確認された斜面は発生斜面 (59 斜面)、対象期間内に一度もがけ崩れが確認されておらず、かつ現状でも未対策の斜面は非発生斜面 (180 斜面) とした。

対象降雨データには、対象期間中に下関気象台で観測されたアメダスデータを用いた。発生降雨はがけ崩れ発生推定時刻を含む一連降雨とし、解析に用いる発生降雨要因は、発生推定時刻から 3 時間以内の最大時間雨量およびその時刻における実効雨量 (半減期 72hr) とした。一方、非発生降雨要因については対象降雨から発生降雨を除いた全ての時間雨量およびその時刻の実効雨量 (半減期 72hr) (約 20 万個) とした。

4. 解析システムの構築

非線形 CL については、まず RBFN を用いて発生・非発生の判別境界面を構築し、その判別境界面の等高線を利用して設定する。その際、設定する判別境界面は実際の現象を再現できるような形状を呈することが要求されるが、効率的に再現性の高い判別境界面を設定するには、できる限り基底関数の数の軽減を図ることやデータの密度をある程度均等化することが重要である。それらを考慮し、本研究で用いる RBFN は図-2

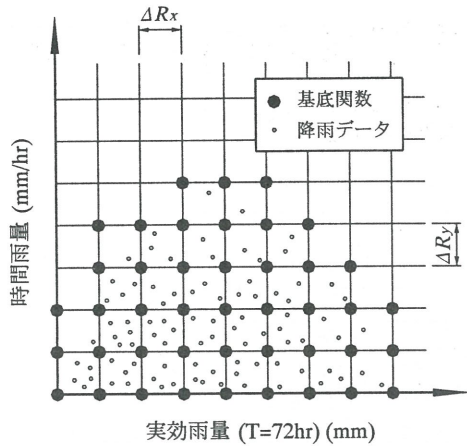


図-2 格子及び基底関数の設定

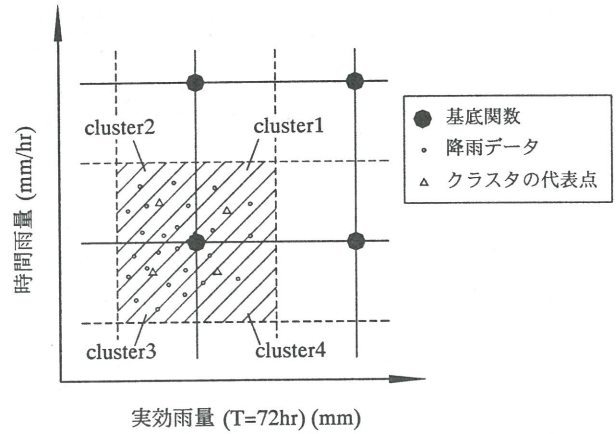


図-3 クラスタリングの概念図

に示すように降雨データの存在する範囲内に一定間隔の格子を設定し、設定した格子の中に降雨データが存在する場合に限り、その格子点上に基底関数を設定する。ここで、格子間隔 ΔR_x 、 ΔR_y は各降雨指標の原点から上限値(実効雨量 350mm, 時間雨量 70mm/hr)までを 60 等分して算出した。なお、ここでは $\Delta R_x \neq \Delta R_y$ であるため、基底関数には同心円状ではなく半径を r_x 、 r_y とする楕円形状を用いることとした。また、データ密度を均等化するために、図-3 の斜線で示す 4 領域では重心法を用いたクラスタリングを行い、各クラスタの代表点を設定した。基底関数はその周辺に含まれるデータ数によって信頼度が異なるが、それについては基底関数を中心とする 4 個のクラスタに含まれるデータ数 $count$ に応じて、式(2)の通り λ を変化させることでシステムに反映させた。

$$\lambda = \lambda_{\min} + \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{1 + count} \quad (2)$$

ここで、 λ_{\max} 、 λ_{\min} の値は $\lambda_{\max} \geq \lambda_{\min}$ の関係を満足し、かつ汎化能力の高い判別境界面の構築が可能な範囲内であれば任意に設定することができるが、ここではそれぞれ 100, 1 に固定した。このようにして構築したシステムを用いて RBFN による判別境界面の設定を行うが、その際必要となる基底関数の半径 r_x 、 r_y については ΔR_x 、 ΔR_y に対して 7 倍となるように与えた。

5. 個別非線形 CL の設定

個別非線形 CL は、図-4 に示す 4 段階により設定する。以下、図-4 の設定フローに従って段階毎に説明する。

(1) 斜面の崩壊危険度の算出および崩壊危険度毎のグループ化

個別非線形 CL の設定では、まず斜面毎の崩壊危険度を算出し、類似した崩壊危険度を有する斜面を集め

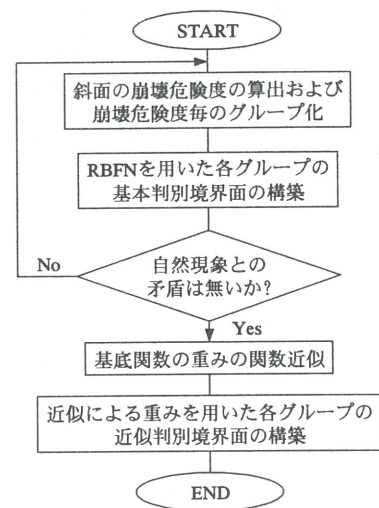


図-4 個別非線形 CL の設定フロー

て、幾つかのグループを構成する。本研究では点数制を用いて斜面の崩壊危険度を算出し、それを基に 5 グループに分類した。図-5 に崩壊危険度と斜面数の関係を示す。図中の折れ線は、各カテゴリーの発生率を示している。図より、発生率は算出した崩壊危険度の増加に伴い実際の現象と矛盾なく上昇する傾向を示していることがわかる。したがって、本研究では、この崩壊危険度に基づいて決定したグループ分類を以後の解析に用いることとした。

(2) RBFNを用いた各グループの基本判別境界面の構築

ここでは、上述したグループ内の発生、非発生降雨要因を用いて、グループ毎に判別境界面の構築を行う。なお、ここで構築する判別境界面は基本判別境界面と定義する。

構築した各グループの基本判別境界面の代表例を図-6 に示す。図中の白色、灰色の領域はそれぞれ安全、危険領域を示しており、白から灰色領域に近づくにつれ、徐々に危険度が増すことを示している。図より、

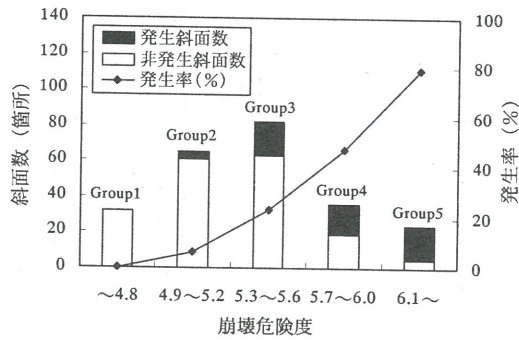


図-5 各グループの発生頻度および発生率

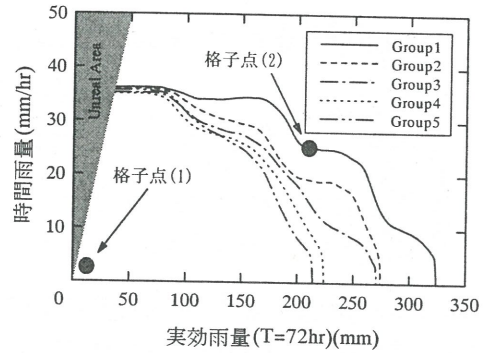


図-7 各グループの非線形 CL (基本判別境界面)

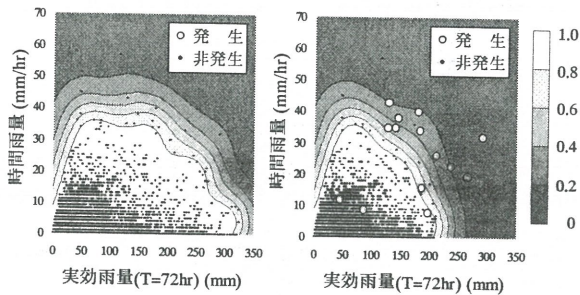


図-6 基本判別境界面の代表例

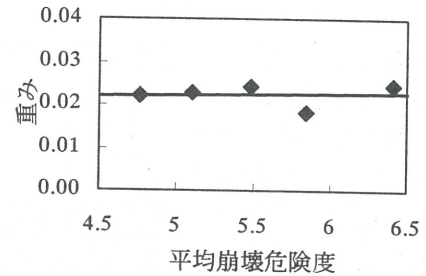
がけ崩れ発生の危険性が低い安全領域（出力値 0.8 以上の領域）は崩壊危険度の増加に伴い減少する傾向にあることが確認できる。図-7 に各グループにおける基本判別境界面に基づく非線形 CL (出力値 0.8 の等高線) (以下、基本非線形 CL) を示す。図より、グループ毎の安全領域については、崩壊危険度の増加に伴い減少する傾向は明らかであり、実際の現象を矛盾なく再現できている。したがって、次節以降では構築した基本判別境界面に基づいて個別非線形 CL の設定を試みる。

(3) 基底関数の重みの関数近似

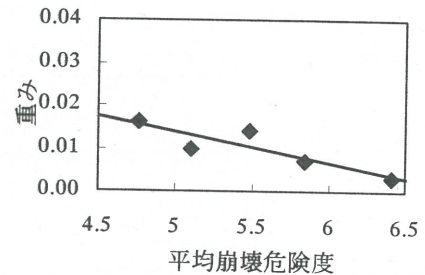
前節で構築したグループ毎の基本判別境界面を個別非線形 CL へ拡張するために、ここでは判別境界面を構成する基底関数の重みを崩壊危険度の関数として近似することを試みる。

基底関数の重みは、判別境界面の出力値に影響を与え、その値が小さければ、判別境界面の出力値は低下する。したがって、前節で得られた基本判別境界面のように、崩壊危険度の増加に伴って安全領域が減少するような場合、基底関数の重みは崩壊危険度の増加とともに減少することが予想される。そこで、すべての基底関数の重みをグループ毎に抽出し、その重みを各グループの平均崩壊危険度の関数として近似することを試みた。

図-8 に基底関数の重みと平均崩壊危険度の関係の一例を示す。なお、この関係は図-7 の(1), (2)点上に存在



(a) (1)点における重みの近似



(b) (2)点における重みの近似

図-8 基底関数の重みと平均崩壊危険度の関係

する基底関数についてである。また、図-8 の直線は、回帰分析によって求めたものである。

図-7 の(1)点周辺においては、いずれのグループにおいても発生が確認されておらず、非発生降雨しか存在していない。したがって、(1)点における重みと平均崩壊危険度の関係を表した図-8(a)では、グループ毎に重みが大きく変化する傾向はみられない。一方、(2)点については、崩壊危険度毎に基本判別境界面が大きく変化する領域であり、その地点における重みと平均崩壊危険度の関係を示した図-8(b)では、崩壊危険度の増加に伴い重みが減少する傾向が確認できる。また、それぞれの回帰直線を見ると、データの分布を概ね再現できており、判別境界面と崩壊危険度の関係に対しては矛盾のない傾向を示している。しかも、多少のばらつきのあるデータの分布を関数近似することで、各グループの判別境界面の平均化を行うことができ、局所的な形状変化を軽減させることが可能であると考えられる。

以上のことから、任意の崩壊危険度における各格子

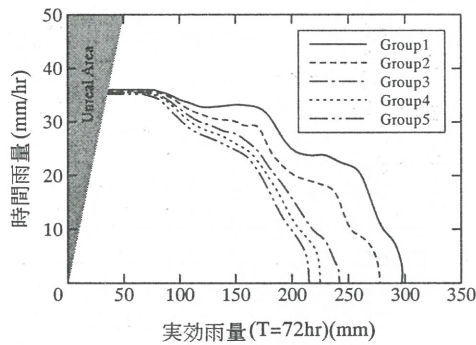


図-9 各グループの非線形 CL (近似判別境界面)

点上の重みについては、この近似を用いて算出しても問題ないと考えられる。これにより、任意の崩壊危険度を有する斜面に対しては、得られた関数に崩壊危険度を代入するだけで基底関数の重みを容易に算出することができる。

(4) 近似による重みを用いた各グループの近似判別境界面の構築

ここでは、近似によって得られた重みを用いて、各グループの判別境界面（以下、近似判別境界面）を構築し、それに基づく非線形 CL（以下、近似非線形 CL）を設定する。各グループの近似判別境界面は、前節で設定した回帰直線に、崩壊危険度を代入することで得られる重みを用いて構築した。図-9には各グループの近似非線形 CL を示す。図より、近似非線形 CL は、図-7 で示した基本非線形 CL とほぼ同様な形状となっている。ただし、図-7 では一部データの分布に対して過剰な反応を示し、局所的な形状変化がみられたが、近似非線形 CL ではその傾向はかなり弱められ、ある程度平均化された汎用性の高い形状とすることができた。

以上のことから、本研究で提案した手法においては、任意の崩壊危険度に対して、より再現性の高い判別境界面が構築できるだけでなく、構築の度に RBFN を用いて重みを算出する必要がないため、非常に簡易に構築できることとなった。

6. 予測精度の検証

設定した個別非線形 CL の有効性について検証するために、著者らが提案した2つの CL（地域毎の非線形 CL¹⁾、個別危険箇所毎の線形 CL²⁾）と予測精度の比較を行った。その結果、予測の対象として用いた発生データについてはすべての CL で同様の正判別率であった。したがって、ここでは非発生データの正判別率に着目することとした。表-1 に各 CL における正判別率の結果を示す。表より、設定した個別非線形 CL は他の CL に比べ7%以上高い正判別率を示し、実際の捕捉数では2,000件程度も多くの中させることができた。

表-1 各 CL における非発生データの正判別率

	正判別率(非発生)
個別非線形 CL	20,956/24,651
	85.0%
地域非線形 CL	19,153/24,651
	77.6%
個別線形 CL	19,001/24,651
	77.0%

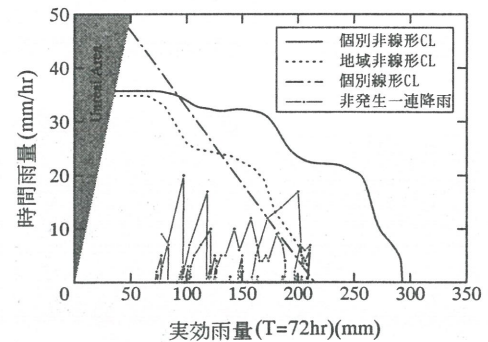


図-10 各 CL における非発生降雨の予測結果 (代表例)

図-10に各 CL における非発生データに対する予測例を示す。図より、個別非線形 CL 以外の CL ではこのような非発生の一連降雨があった場合、完全に空振りとなっているのに対し、個別非線形 CL では非発生を的中させることができています。

以上のことから、本研究で提案した個別非線形 CL については、これまでに提案した CL よりもかなり予測精度の高いものであると言える。

7. おわりに

本研究では、従来の CL の抱える問題点を同時に解消できるような個別非線形 CL の設定を試みた。その結果、斜面の崩壊危険度を用いるだけで簡易に精度の高い個別非線形 CL を設定することができた。

謝辞：本研究の一部は、平成13年度（財）砂防・地すべり技術センター研究開発助成を受けて行った。ここに、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 倉本和正, 鉄賀博己, 菊池英明, 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か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.
- 2) 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かけ崩れ発生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.