

ファジィ理論を用いたのり面崩壊要因の評価法について

AN EVALUATION SYSTEM FOR SLOPE-FAILURE POSSIBILITY FACTORS USING FUZZY SET THEORY

西 邦正* (Kunimasa Nishi)
古川浩平** (Kohei Furukawa)
古前正徳*** (Masanori Komae)
中川浩二**** (Koji Nakagawa)

切土のり面における崩壊要因や崩壊可能性の評価は、客観的にのり面の安定性を評価することが難しいばかりか判断に個人差を伴っているのが現状であり、これらを考慮に入れた定量的な評価手法はいまだ確立されていないと言える。本研究では、切土のり面の安定性に関する評価過程は専門技術者の経験の主観で構成されるあいまいなシステムであると考え、評価にファジィ理論を応用した可能性線形システムを適用し、建設時ののり面崩壊事例に基づいて安定性評価システムを構築した。これより、建設時における崩壊要因の性格を明らかにした。さらに、のり面崩壊の可能性（予測ファジィ出力）と崩壊誘因である降雨との関連性について評価を行い、降雨量そのものは崩壊発生の直接的誘因ではないことを示した。

キーワード：切取り斜面、斜面安定、ファジィ理論、可能性線形システム G6/E6/H9

1. はじめに

自然地盤は極めて不均一であり、風化の程度、成層状態、割れ目などにより地盤の特性は著しく異なる。したがって、その状態を定量的指標で正確に評価することは困難であることから、切土のり面における安定性評価は過去の施工実績や既設のり面の実態などを参考に行われているのが実状である¹⁾。そして、土質や岩質に問題がある場合や地質構造に問題がある場合は、崩壊性要因をもつのり面として土質調査または地質調査を行ってのり面勾配を検討し、必要に応じて安定性についての対策が取られている。これに対し一般的に地質部であれば、のり面勾配は、地山の土質の種類、状態および切土高に応じた標準値の範囲の中から総合的に判断して決定されている。また、原則として安定勾配で施工したのり面に対し、表層変状など小規模なりのり面変状の防止を目的としたのり面保護工が採用されている。一方、維持・管理段階では、経年変化によるのり面保護工などの強度の低下状況およびクラックやはらみなど崩壊に結びつく危険箇所を把握するためののり面点検が実施され、必要に応じて対策工が施工されている。

このように、切土のり面の計画、設計、施工の各段階で積極的な調査を実施し設計を行ってはいるが、施工段階や維持・管理段階においてしばしば変状が発生し、場合によってはのり面保護工の変更や切直しなど対策工の施工を余儀なくされているのが実状である。そして、切土は「切ってみないとわからないから、とにかく常識的な線で切ってみて、その結果崩壊したらそこだけを手直しする」²⁾というのが一般的である。すなわち、切土のり面における崩壊要因や崩壊可能性の評価は、専門技術者の経験の主観による定性的な判断に多くを依存しているため、客観的にのり面の安定性を評価することが難しいばかりか判断に個人差を伴っているのが現状であり、これらを考慮に入れた定量的な評価手法はいまだ確立されていないと言える。したがって、土木構造物としてのり面の特殊性を考慮するとともに、専門技術者の経験の主観を定量的かつ客観的に取り入れてのり面の安定性を評

* 山口大学工学部社会建設工学科 助手, ** 山口大学工学部社会建設工学科 教授,
*** 日本道路公団 広島建設局 工務課長, **** 山口大学工学部社会建設工学科 教授

価できるシステムの構築が望まれるところである。

以上の観点から本研究では、ある地域の變成岩（黒色片岩）地山での切土のり面工事を対象として、まず調査、設計、施工および管理に携わる専門技術者がのり面に変状が生じた際の現地調査結果に基づいて記述した定性的・主観的表現による工事報告書やのり面調査報告書などの資料を参考にして「のり面評価表」を作成する。そして、のり面の安定性に対する評価過程は専門技術者の経験的主観で構成されるあいまいなシステムであるとみなし、実際ののり面崩壊事例より「崩壊形態」を外的基準に設定してシステムの同定を行う。ここで、あいまいシステムとしては線形システムの係数がファジィ数によって定義された可能性線形システムを適用し、得られたファジィ係数およびファジィシステムの出力結果より、建設時における切土のり面の崩壊要因の評価および崩壊可能性の評価を行う。

2. 切土のり面の崩壊予知システムについて

危険のり面（不健全のり面）を抽出するために従来から行われている方法として、調査項目に評価点を付けその合計点から危険性の程度を評価する判定方法³⁾がある。しかし、評価点の設定方法に客観性がなく厳密さに欠ける上、のり面勾配など定量的な評価項目と湧水・集水の状況など定性的な評価項目を統一的に評価する尺度の設定基準が不明確である。一方、重回帰分析や数量化理論などの統計的手法では、解析により得られた回帰係数や基準カテゴリーウェイトの数値に対し、工学的解釈が困難な場合や工学的に不合理な関係を与える場合が多い^{4), 5)}。

これらのことを考え合わせると、切土のり面における崩壊要因や崩壊可能性の評価を行う上で、専門技術者の経験的主観を定量的かつ客観的に評価する過程は、次の条件を備えるべきであると考ええる。

- ① 要因の抽出を客観的かつ定量的に行うことができる。
(必ずしも1,2,3などの数値で構成されるクリスプ集合でなくて良い。)
- ② 定量的な項目と定性的な項目を統一して扱える。
- ③ 岩盤特性や崩壊時期との時間的關係に対し統一的な評価を行うことができる。
- ④ 評価過程を構成するシステムについて、工学的に適切な説明を行うことができる。
- ⑤ システム（評価過程）自体の構造が単純である。

しかし、上述したこれらの手法では、いずれもこれらの条件を満たすことができない。そこで、本研究では切土のり面における崩壊要因の評価過程を1つの「あいまいな」線形システムであるとみなし、その係数がファジィ数で与えられる可能性線形システムとして定義する。そして、このシステムの同定は建設時に発生したのり面崩壊事例を用いて行う。システムへの入力は、専門技術者による定性的・定量的判断資料から得られたデータである。その出力は区間連続値となり、区間内の数値に対してはファジィ数により可能性の分布として与えられる。このシステムでは、以下に述べるように評価過程の客観的評価や工学的意義付けを容易に行うことができると考えられる。そして、その評価結果が専門技術者の主観に沿うものであれば、既に述べた評価過程が備えるべき条件を満足したシステムになると考えられる。

3. のり面評価表の作成

切土のり面における崩壊発生のメカニズムは個々ののり面によって異なり、岩盤特性など多くの要因に依存している。さらに、調査段階から維持・管理段階に至るまでの流れの中で、のり面の安定性評価は得られる情報の量や質および専門技術者の主観的判断によって異なってくる。一方、道路建設に伴う切土のり面の設計は、過去の施工実績や既設のり面の実態などを参考にするとともに、道路の計画、設計、施工の各段階で効果的な調査を実施したうえで行われている。それにもかかわらず、施工段階のみならず維持・管理段階においても変状が発生し、場合によってはのり面保護工の設計変更や切直しなど対策工の施工を余儀なくされているのが実状である。したがって、のり面の崩壊要因は非常に数多くあり、それぞれは複雑に関連しあっていると考えられる。

これに対し、すべての崩壊要因を抽出し、それらの構造化および定量的評価を行うことは非常に困難である。特に、抽出する要因の数が多ければ多いほど、どの要因がどの程度影響を与えるのか不明確である。また、各要因は相互に関連性があるため、感度や重要度を客観的に判断することができない。そして、構築したモデルが正

しいかどうかの評価および判断が不可能となる。そこで、これらの問題点を克服するにはファジィ理論に基づく可能性線形システムを導入することが有効であり、これにより人間が工学的に判断できると考えられる10項目前後のり面評価要因をデータとして用いることが可能になるとと思われる。なお、採用しないその他の諸要因は採用した要因に分散して従属すると考える。

本研究では、地山およびのり面が本質的に有する崩壊可能性の素因として（Ⅰ）地質・地形要因、（Ⅱ）土工要因を考え、建設時に作成された報告書や調査・検討資料の中から容易に抽出できる要因として10項目を採用し、表-1に示す「のり面評価表」を作成した。この評価表に採用した項目は、これまで切土のり面工事に従事してきた専門技術者が特に重要であると判断して記録に残してきたものであり、主観的評価を伴う要因である。各要因は、工学上 Very Low（「非常に良好な状態」であり崩壊可能性は非常に低い）から Very High（「非常に不良な状態」であり崩壊可能性は非常に高い）までを1, …, 5の評価ランクとして設定している。5段階の評価ランクについては、あいまいな判断をできるだけ避けるとともに比較的容易にデータが作成できるよう配慮して決定した。

4. 外的基準の設定

切土のり面崩壊は、のり面自体が潜在的に有する崩壊可能性の要因によって支配されるだけでなく、岩種や崩壊時期（建設時か供用中か）によってもそのメカニズムが異なる。この崩壊を引き起す代表的崩壊誘因としては降雨が挙げられる。しかし、後述するように特に建設時においては地盤条件と設計条件の不一致や施工法など他の影響も受けるため、必ずしも降雨の量が崩壊発生の決定的誘因になるとは限らないと考えられる。そこで筆者らは、崩壊が発生する可能性を予測する要因と崩壊を引き起こす誘因とは本質的に異なり、これらは独立して取扱うべきであろうと考えた。そして、本研究では降雨は崩壊発生の引き金であるとし、自然現象である降雨がい

表-1 のり面評価表

要 因		評 価 ラ ン ク				
		Very Low	Low	Medium	High	Very High
地 形	A 地山地質	1. 岩質は非常に新鮮であり、構成粒子はまったく風化変質を受けていない。構成粒子の固結程度は非常に堅固である。	2. 岩質は概ね新鮮であるが、割れ目に沿って多少風化変質している。構成粒子の固結程度は堅固である。	3. 岩質はやや軟質であり、地山内部の一部を除き風化変質が進行している。構成粒子の固結程度はやや低い。	4. 岩質は軟質であり、地山内部まで風化変質が進行している。構成粒子の固結程度は低い。	5. 岩質は非常に軟質であり、若しくは風化変質が進行している。構成粒子の組織は分解し固結程度は非常に低い。
	B 土質分類	1. 大部分が硬岩に分類される。コア形状は塊状である。	2. 概ね硬岩から軟岩に分類される。コア形状は短柱状である。	3. 大部分が軟岩に分類される。コア形状は岩片状（不円形）である。	4. 概ね軟岩から土砂に分類される。コア形状は破片状である。	5. 大部分が土砂に分類される。コア形状は全く砂状である。
地 質	C 節理等の状態	1. 節理等はほとんど分布せず、密着している。（間隔50cm未満）	2. 節理等の分布はまばらで、一部開口している。（間隔50～15cm）	3. 節理等は発達し、開口部の一部に粘土の薄層や風化物質を挟んでいる。（間隔15～5cm）	4. 節理等はかなり多く発達し、開口部には粘土層や風化物質が著しく挟んでいる。（間隔5cm未満）	5. 節理等の分布はむしろ不明瞭であり、土砂状で密着している。粘土も進行している。
	D 節理等の傾斜	1. 均質な地質であり、安定度は非常に高い。	2. 受け壁であり、安定上有利である。	3. 緩い受け壁または水平であり、安定度は中くらいである。	4. 緩い流れ壁であり、安定上不利である。	5. 流れ壁であり、安定上非常に不利である。
	E 被覆層・風化層の厚さ	1. 被覆層・風化層はない。	2. 薄い状態である。（厚さ1m未満）	3. やや厚い状態である。（厚さ1～3m）	4. 厚い状態である。（厚さ3～5m）	5. 非常に厚い状態である。（厚さ5m以上）
要 因	F 地下水・湧水の状況	1. しみ出しがなく、のり面は乾燥していることが多い。	2. のり面は常時湿潤状態にあるが、しみ出しはほとんどない。	3. 降雨時のみしみ出しがある。	4. 常時しみ出しがあり、降雨時には湧水がある。好天焼きでも乾燥しない。	5. 湧水が多量に流出している。
	G 降雨水の集中度	1. 凸型等高線の散水斜面であり、集中度は非常に低い。	2. 凹型等高線の散水斜面であり、集中度は低い。	3. 凸型等高線の集水斜面であり、集中度は中くらいである。	4. 凹型等高線の集水斜面であり、集中度は高い。	5. 直線型斜面であり、集中度は非常に高い。
土	H のり高さ	1. のり高さは非常に低い。（高さ20m未満）	2. のり高さは低い。（高さ20～30m）	3. のり高さは中くらいである。（高さ30m～40m）	4. のり高さは高い。（高さ40m～50m）	5. のり高さは非常に高い。（高さ50m以上）
工	I のり勾配	1. のり勾配は非常に緩い。（1.2～1.5以上）	2. のり勾配は緩い。（1.0～1.2）	3. のり勾配は中くらいである。（0.8～1.0）	4. のり勾配は急である。（0.5～0.8）	5. のり勾配は非常に急である。（0.5未満）
要 因	J のり面保護工	1. 土圧や滑動力に抵抗するための抗土圧型保護工である。（擁壁工、アンカー工など）	2. 乾燥繰り返しによる風化を抑制するための密閉型保護工である。（コンクリート吹き付け工など）	3. 湧水による侵食防止を主目的とした開放型保護工である。（のり砕工など）	4. 表面侵食や凍上剝離の抑制を主目的とした無処理型保護工である。（植生工、ネット工など）	5. 無処理または緑化対策などを主目的とした保護工である。

つ発生するのかを予測することは事実上難しいため、のり面評価要因による評価ランクをファジィシステムに入力して得られる出力は発生する崩壊の規模、すなわち崩壊形態が妥当であろうと考えた。

このような考えから、本研究では「崩壊形態」を外的基準（統計解析における目的関数を意味する）として設定する。崩壊形態は文献（たとえば6）～9）を参考にして、前述ののり面評価表の評価ランクに対応させ、以下に示すように5段階で分類する。

- 崩壊ランク1：洗掘など局所的な崩壊のみであり全体として安定である。
- 崩壊ランク2：表層剝離など崩壊規模は小さい。（層厚0.3m未満）
- 崩壊ランク3：小規模なのり面崩壊である。（層厚0.3～1.0m）
- 崩壊ランク4：中規模なのり面崩壊である。（層厚1.0m以上）
- 崩壊ランク5：のり肩を含む大規模な崩壊である。

すなわち、のり面評価表が地質・地形要因および土工要因で構成される10項目について、岩盤工學上 Very Low（「非常に良好な状態」であり崩壊可能性は非常に低い）からVery High（「非常に不良な状態」であり崩壊可能性は非常に高い）までを5段階で評価しているに対して、崩壊形態は「全体として安定である」状態から「大規模崩壊」までを5段階で分類している。

5. ファジィ回帰モデルの定式化

ファジィ理論は人間の主観的な思考や判断のあいまいさを定量的に扱う数学理論であり、1965年にZadehにより提案された¹⁰⁾。この理論におけるファジィ性は確率論におけるランダム性と対比するものであり、人間の主観に依存する不確かさであると定義している。ここでは、切土のり面の安定性に対する評価過程は専門技術者の経験的主観で構成されるファジィシステムであるとみなし、ファジィ理論に基づくファジィ回帰モデル^{11), 12)}を適用する。

入力を建設時の資料に基づいて作成したのり面評価表による評価ランク、出力を予測崩壊形態の崩壊ランクとすると、可能性線形システムは式(1)で表される。

$$Y_i = A_0 + A_A X_A + A_B X_B + A_C X_C + A_D X_D + A_E X_E + A_F X_F + A_G X_G + A_H X_H + A_I X_I + A_J X_J \quad (1)$$

ここに、 A_0 ：ファジィ定数項

A_A, \dots, A_J ：切土のり面評価要因 (A, \dots, J) のファジィ係数

X_A, \dots, X_J ：切土のり面評価要因 (A, \dots, J) の評価ランク (1, ..., 5)

Y_i ：予測崩壊形態 ($i=1, \dots, m$; m はデータセット数)

そして、表-1ののり面評価表に示した切土のり面評価項目 (A, \dots, J) のファジィ係数は可能性分布関数と考え、ここでは対称なL-Rファジィ数¹³⁾のうち式(2)で与えられる三角形ファジィ数（図-1参照）を採用する。

$$A_j = (\beta_j, C_j) \quad (2)$$

ここで、 β_j は中心、 C_j は可能性の幅を与え、出力 Y_i の可能性分布関数は式(3)で計算できる。

$$Y_i = \left(\sum_{j=1}^n \beta_j X_{ij}, \sum_{j=1}^n C_j |X_{ij}| \right) \quad (3)$$

このとき、 Y_i の中心は $\sum_{j=1}^n \beta_j X_{ij}$ 、幅は $\sum_{j=1}^n C_j |X_{ij}|$ である。

ファジィ回帰モデルでは観測値 y_i がシステムの出力ファジィ数に可能性の度合 h ($0 \leq h \leq 1$) 以上で含まれるように A_j ($j=1, \dots, n$; n はデータセットに含まれる評価要因の個数)を決定する。すなわち、レベル h での予測ファジィ数 Y_i のメンバーシップ関数は式(4)であるので式(5)の様に表すことができる。

$$\mu_{Y_i}(y_i) \geq h \quad (4)$$

$$1 - |(y_i - X_i^* \beta) / (C^* |X_i|)| \geq h \quad (5)$$

ここに、 y_i ：観測値

X_i ：説明変数ベクトル

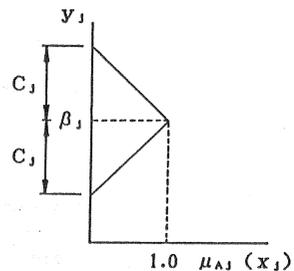


図-1 三角形ファジィ数

ただし、 $|X_i| = (|X_{i1}|, \dots, |X_{in}|)^t$ 、 $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$ 、 $C = (C_1, \dots, C_n)$ である。そして、この条件下での可能性線形システムによって得られる予測ファジィ数の揺らぎは、 $C^t |X_i|$ が Y_i の幅を与えることから式(6)のように表せる。

$$S = \sum_{i=1}^m C^t |X_i| \tag{6}$$

よって、ファジィ係数 A_i は式(5)の条件下で式(6)の目的関数を最小にすることによって求められ、この問題は式(7)の線形計画問題に帰着できる。

$$\begin{aligned} \min_{\theta} & \sum_{i=1}^m C^t |X_i| \\ \text{subject to} & \\ (1-h)C^t |X_i| + X_i \beta & \geq y_i \\ (1-h)C^t |X_i| - X_i \beta & \leq -y_i \\ C^t & \geq 0, i=1, \dots, m \end{aligned} \tag{7}$$

ここに、 X_i と Y_i は 1, ..., 5 の数値で構成されるクリスプ集合である。なお、度合い h についてはデータが全ての可能性を含んでいるものと考え $h=0$ として最適解を求めた¹⁴⁾。以上の線形問題は改訂シンプレックス法により解いた。

6. 建設時におけるのり面崩壊要因の評価

本研究では、まず変成岩（黒色片岩）地山での道路建設において切土時に変状が生じたのり面と変状が生じなかったのり面を対象とし、建設時に専門技術者が記録に残した資料を「のり面評価表」に基づいてファジィシステムへの入力データとして数値化した。そして、崩壊形態についても、評価ランクに対応した崩壊ランクとして数値化した。これらは、1, ..., 5 の数値で構成されるクリスプ集合である。そして、入力ののり面評価表における評価ランク、出力を崩壊形態の崩壊ランクとしてファジィシステム（可能性線形システム）の同定を行った。抽出したのり面数は計44個であり、多段で施工されたのり面については、図-2に示す設計要領¹⁾の考え方にしたがって各のり面をそれぞれ単一のり面として取り扱った。

なお、データ数については、確率・統計上標本誤差を小さくするためには多い方がよい。しかし、切土のり面が有する多くの問題から推測されるように、母集団が性質の異なった複数の集団から構成されている場合には、地盤条件や施工条件など種々の条件によって母集団を区分し、これから標本を抽出する必要があると考えられる。特に、ファジィシステムを構築する際には性質の異なる標本が増えれば増えるほどあいまいさは大きくなるため、精度の高い予測システムが得られなくなる。したがって、ある工事区域内で得られたデータであればシステムを構築するうえであいまいさは小さくなり、さらにデータ数が少なくてもシステムを構築できる点にファジィ理論を応用するうえでの有利性があると考えられる。本研究で用いた入力データを表-2に示す。

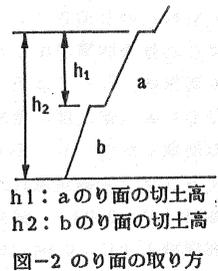
式(8)は式(7)の最適化問題を解くことにより得られたファジィシステムの同定結果である。

$$Y = (0.21, 0.00) X_c + (0.05, 0.02) X_b + (0.14, 0.00) X_e + (0.00, 0.02) X_g + (0.36, 0.28) X_h + (0.17, 0.00) X_i + (0.00, 0.04) X_j \tag{8}$$

また、図-3は式(8)による予測ファジィ出力を各のり面ごとに図化した結果である。

同図は縦軸が1, ..., 5の崩壊ランク、横軸が44個ののり面の番号を示したものであり、

実際に生じた崩壊形態を丸印で示した。すなわち、予測出力値はファジィ数であるので、上限値 ($\beta + C$)、中心値 (β)、下限値 ($\beta - C$) からなる三角形で与えられている。たとえば、のり面番号3の予測値は上限値 = 5.30、中心値 = 4.05、下限値 = 2.80 であり、観測値（実際値）は $y_3 = 5$ であった。これは、「小規模な崩壊からのり面を含む大規模な崩壊が生じる可能性があるが、どちらかと言えば中規模なりのり面崩壊が生じる可能性が高い」ということを表現しており、「実際の崩壊形態は大規模な崩壊であった」ことを意味している。なお、安定のり面については小さな三角形が崩壊ランク1の近くに出力されることで評価できる。そして、崩壊の可能性があると



h1: aのり面の切土高
h2: bのり面の切土高
図-2 のり面の取り方

予測されたのり面（崩壊ランク2～5）が崩壊するかどうかについては、崩壊誘因である降雨が生じたかどうかによって依存することになる。

式(8)のファジィシステムに採用された要因より、建設時におけるのり面の崩壊は、節理等の状態（C）、節理等の傾斜（D）、被覆層・風化層の厚さ（E）、降雨水の集中度（G）のり高さ（H）、のり勾配（I）、のり面保護工（J）の7項目に代表される要因に支配されていると評価できる。特に、崩壊形態はこれらの評価ランクの大きさによって予測されるが、ファジィ係数の中心値は節理等の状態（ $\beta=0.21$ ）、被覆層・風化層の厚さ（ $\beta=0.14$ ）、のり高さ（ $\beta=0.36$ ）およびのり勾配（ $\beta=0.17$ ）が他の要因と比較して大きいことから、これら4要因が崩壊形態を決定付けていると評価できる。これは、のり面の幾何学的安定性や掘削時の応力解放に伴う影響を考えれば工学的にも十分理解できる。そして、節理が発達し被覆層・風化層厚が厚いほど、また、のり高さが高くのり勾配が急であるほど崩壊規模は大きくなることを意味している。この結果より、建設時の安定性を高めるためにはできる限り被覆層・風化層を除去するとともにのり高さが高いのり面ほどのり勾配を緩くする必要があると判断でき、このことは専門技術者の主観に沿う結果であると考えられる。

予測値の可能性を示す幅は、節理等の傾斜（D）、降雨水の集中度（G）、のり高さ（H）、のり面保護工（J）の4項目のファジィ係数に現れている。このうち特に大きな係数が与えられたのり高さ（ $C=0.28$ ）については、高くなればなるほど大規模崩壊が生じる可能性が大きくなるが、この場合のり面保護工としては抗土圧型か密閉型が採用されるため実際はのり面の安定度が極めて高いかまたは表層剝離など小規模な崩壊しか生じないので、この項目に可能性の幅を大きく与えるファジィ数が現れたものと解釈できる。一方、節理等の傾斜（ $C=0.02$ ）、降雨水の集中度（ $C=0.02$ ）およびのり面保護工（ $C=0.04$ ）については、施工時の崩壊に対しては専門技術者の判断による人為的な配慮がなされていること

表-2 入力データ

の 番 り 面 号	評価ランク										崩 壊 ラ ン ク
	地形・地質要因						土工要因				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	3	3	3	2	3	2	3	1	2	2	2
2	4	4	3	2	2	2	3	1	1	5	1
3	5	5	5	3	4	2	1	4	5	2	5
4	3	3	3	2	3	2	1	3	3	2	2
5	3	2	3	4	3	2	1	1	2	2	2
6	4	3	3	3	3	2	1	1	1	5	2
7	2	2	1	2	1	1	1	1	1	3	1
8	4	3	4	4	3	2	3	1	2	1	2
9	4	3	4	3	3	2	3	1	1	5	2
10	4	4	4	5	4	4	4	3	5	2	4
11	3	3	4	4	4	2	1	2	3	1	3
12	3	3	4	4	4	2	1	2	2	1	3
13	3	3	3	4	3	2	1	1	1	5	2
14	3	3	3	3	3	5	1	3	4	1	3
15	3	3	3	2	3	2	1	2	3	2	2
16	1	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
17	3	3	3	3	3	2	1	1	2	2	2
18	3	3	3	3	3	4	1	1	1	2	2
19	3	3	3	3	3	2	1	1	1	4	2
20	2	3	2	2	3	2	3	1	1	5	1
21	3	3	3	5	5	3	1	4	4	3	5
22	2	2	2	3	3	2	1	1	2	4	2
23	3	3	3	3	3	2	1	1	1	5	2
24	2	2	2	4	3	2	2	2	1	4	2
25	5	5	5	4	4	3	3	2	4	3	4
26	2	2	2	4	3	2	2	2	1	4	2
27	3	3	3	4	3	2	2	1	1	4	2
28	3	3	2	2	3	2	1	1	1	4	1
29	2	2	2	2	4	4	3	3	3	2	2
30	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	1
31	2	2	2	2	3	2	3	3	2	2	2
32	2	2	2	3	3	2	1	1	2	2	2
33	3	3	3	5	5	3	4	2	5	4	4
34	3	3	3	2	4	2	1	2	2	2	3
35	5	4	5	3	3	2	1	1	2	4	2
36	3	3	2	4	2	2	1	1	1	2	1
37	2	2	2	4	3	2	3	1	1	1	2
38	2	2	2	4	3	2	3	1	1	4	2
39	2	3	3	3	3	2	1	3	3	2	2
40	3	3	3	2	3	2	1	3	2	4	2
41	4	3	4	2	3	2	1	2	1	4	3
42	4	3	4	3	3	2	1	1	2	4	2
43	3	3	2	1	1	1	2	1	1	2	1
44	4	4	4	4	4	5	3	3	5	3	4

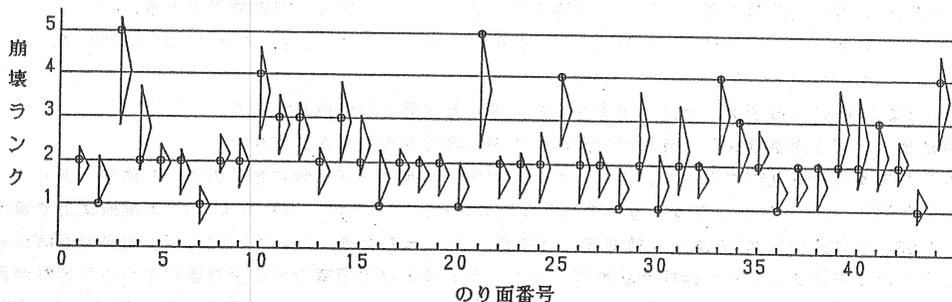


図-3 建設時のシステム同定結果

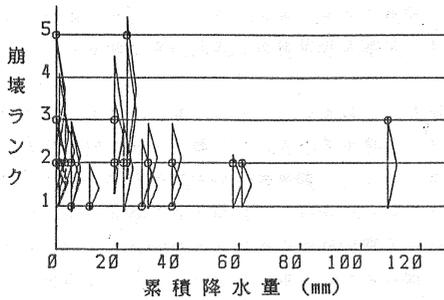


図-4 累積降水量～崩壊ランク関係図

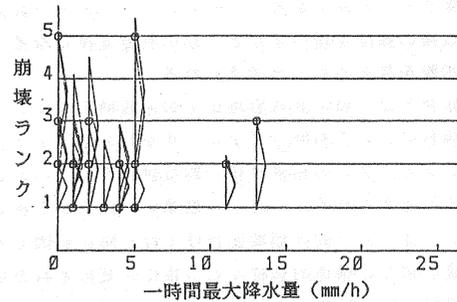


図-5 一時間最大降水量～崩壊ランク関係図

から、変成岩の岩種特性として可能性の幅を与えるファジィ係数が現れたものと考えられる。しかし、その値は小さく影響は限られているものと考えられる。

なお、式(8)のファジィシステムに採用されていない項目のファジィ係数はすべて(0.00,0.00)であり、崩壊要因として影響が小さくなっている。これは、岩層が同じ変成岩についてシステム同定を行ったためであり、採用された項目に対して地山地質(A)と土質分類(B)は節理等の状態(C)に含まれ、地下水・湧水の状態(F)は降雨水の集中度(G)に含まれるという従属関係にあると考えられる。

7. 建設時におけるのり面崩壊と降雨との関連性について

ファジィシステムによる予測出力は三角形ファジィ数で表され、その幅は5つに分類した評価ランクに対応する崩壊可能性の予測結果として出力されている。これらの崩壊発生誘因は種々考えられるが、ここでは降雨量との関連性について以下に述べる。

図-4は、図-3に示した各のり面における予測ファジィ出力を崩壊発生時の累積降水量ごとに図化した結果である。同様に、図-5は、崩壊発生時の一時間最大降水量ごとに図化した結果である。なお、降雨データは当該工事区域に最も近い観測所での観測結果(地域気象観測毎時降水量日報)を用いた。ここで、累積降水量は雨の降り始めから崩壊発生時までの降水量であり、5時間以上の無降雨期間がない降水量とした。また、一時間最大降水量は累積降水量の中で最大の一時間降水量とした。

一般的には、累積降水量と一時間最大降水量が多いほど、大規模崩壊が発生し易くなると考えられる。ところが、実際の崩壊形態および予測値はこれらの降水量と関連性がなく、少ない降水量でもランク1～5で評価される崩壊形態が様々な可能性(幅)の中で発生している。そして、前述のファジィシステムの同定結果によれば、地下水・湧水の状態(F)と降雨水の集中度(G)の「水」に関連する2項目については崩壊要因として影響が非常に小さくなっている。以上のことから、建設時における崩壊誘因は応力解放や施工法による影響など他にあり、降雨量そのものは崩壊発生直接的誘因ではないと考えられる。

8. 結論

本研究では、建設時に変状が生じたのり面についてファジィ理論に基づく可能性線形システムを適用し、得られたファジィ係数およびファジィシステムの出力結果からのり面崩壊要因の評価および崩壊可能性の評価を行った。このファジィシステムでは、入力をのり面評価表による評価ランク、出力を崩壊形態としており、のり面の安定に関する評価過程は専門技術者の経験的主観で構成されるあいまいシステムであると見なしている。

のり面に変状が生じた際、専門技術者が主観的判断により記録に残した資料に基づいて作成した「のり面評価表」は、崩壊形態の評価要因を決定するうえで有効である。さらに、ファジィ理論を応用したファジィ回帰モデルは、切土のり面の崩壊要因および崩壊の可能性を評価する手法として有効である。このファジィシステムは、崩壊形態の予測式として利用できる。したがって、経験や知識が少ない技術者であっても容易にのり面の安定性を評価することができると考えられる。また、施工中データ数の少ない段階から、その現場に適應したシステム

を構築することができる。これらのシステムは、設計・施工段階では要注意箇所であるか否か、維持・管理段階では点検の頻度を増やすかどうかの判断基準となる。そして、詳細な地質調査や高度な数値解析を行う上での工学的示唆を与えるものと考えられる。

本研究では、特に変成岩地山での建設時の切土のり面に限定して評価を行ったが、供用中のり面や岩種が異なる場合についても同じアプローチを行えばファジィシステムを構成する要因の比較から建設時と供用中の崩壊発生メカニズムの相違や統一的な評価を行うことができる。そして、崩壊要因の岩盤特性についても明らかにできると考えられる。ただし、崩壊の可能性が予測されたり面が降雨時にどの程度の危険度を有しているのかについては、り面評価要因だけでなく降雨要因も考慮した上で他の評価手法により検討する必要がある。また、断層破砕帯など構造的弱線をもつ地山に建設された切土のり面のように、崩壊メカニズムや崩壊誘因が異なるり面について評価する場合には別の評価システムを構築する必要がある。これらの残された問題に関しても、今後研究を進めていく所存である。

本研究をまとめるにあたり、(株)大本組 鈴木昌次氏から多くの助言を頂いた。また、降雨の観測結果(地域気象観測毎時降水量日報)については下関地方気象台 立石昭二氏から御提供頂いた。データ整理や図面作成には山口大学学生 佐伯隆之君の助力を得た。記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領第一集第1編土工，pp.96～110，1983.4.
- 2) 奥園誠之：切土斜面の設計から維持管理まで，鹿島出版会，1983.
- 3) 藤田守広：高速道路における法面の維持管理，基礎工，Vol.18，No.4，pp.56～65，1990.
- 4) 小橋澄治：斜面安定，鹿島出版会，pp.18～22，1977.
- 5) 土質工学会編：土砂災害の予知と対策，土質工学会，pp.163～171，1985.
- 6) 日本材料学会土質安定材料委員会編：新稿斜面安定工法，鹿島出版会，pp.61～68，1986.
- 7) 土質工学会編：土砂災害の予知と対策，土質工学会，pp.155～162，1985.
- 8) 土質工学会編：切土ノリ面，土質工学会，pp.16～34，1987.
- 9) 渡亮正・小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の予知と対策，山海堂，pp.187～211，1988.
- 10) Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets, Information and Control, Vol.8, pp.338～353, 1965.
- 11) 寺野寿郎・浅居喜代治・菅野道夫：ファジィシステム入門，オーム社，pp.67～81，1989.
- 12) 坂和正敏：ファジィ理論の基礎と応用，森北出版，pp.84～102，1990.
- 13) 田中英夫：可能性モデルとその応用，システムと制御，Vol.28，No.7，pp.447～451，1984.
- 14) 白石成人・古田均・尾崎美伸：構造物の疲労解析へのファジィ理論の応用，第2回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.44～49，1986.6.