

# ファジィ理論を用いたのり面の崩壊要因および崩壊可能性の評価について

西 邦正\*・古川浩平\*\*・中川浩二\*\*\*

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的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、建設時と供用中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。そして、建設時のシステムにより供用中ののり面の崩壊形態を予測するとともに、予測を行う上で問題となる建設時と供用中における崩壊要因の性格の違いを明らかにした。

**Keywords :** *cot-off slope stability, prediction, fuzzy set, possibility linear system*

## 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<sup>1)</sup>。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、一般的な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・管理段階におけるのり面点検は、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ことにより事前に対策が行われている。

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<sup>2)</sup>」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、専門技術者の経験的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は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、専門技術者の経験的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、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、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。

本文では、変成岩（黒色片岩）で構成される地山での切土のり面工事を対象として、まず建設時におけるファジィシステム（崩壊形態の予測システム）を構築し、崩壊要因の性格を明らかにする。そして、このシステムを用いて供用中の切土のり面の崩壊形態について推定を試み、実際に発生した崩壊形態との比較より予測システムとしての適用性の評価を行う。次に、供用中ののり面についてもファジィシステムを構築し、両システムの比較から崩壊要因の相違についての考察を試みる。以上より、建設時と供用中におけるのり面の崩壊可能性（崩壊形態）を予測する上での留意点を明らかにする。

\* 正会員 工修 山口大学助手 工学部社会建設工学科  
(〒755 宇部市常盤台 2557)

\*\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

\*\*\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

## 2. 切土のり面の崩壊予知システムについて

切土のり面の崩壊要因として考えられる項目は数多くあり、それぞれは複雑に関連しあっている。したがって、地形・地質条件や施工条件によって異なる崩壊要因を個々ののり面について抽出し、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。たとえば、のり面崩壊に関連する支配的要因を構造化する手法としては主観的評価法である KJ 法<sup>3)</sup>に代表される手法があるが、列挙した要因を整理統合する評価過程は定量的かつ客観的に評価されていない。このことは、アンケート調査やブレインストーミング的検討による場合についても同様のことが言える。さらに、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<sup>4)</sup>があるが、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<sup>5), 6)</sup>。

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られる。

- 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 などのクリスプな値でなくて良い）。
- 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および供用中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

観的评价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メカニズムは、岩盤特性に依存するだけでなく個々ののり面によっても異なる。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、建設時および供用中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。そして、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。

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、著しく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。コア形状は棒状である。	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。コア形状は薄片状(不円形)である。	4. 概ね軟岩から土砂に分類される。コア形状は蕨状である。	5. 大部分が土砂に分類される。コア形状はなく砂状である。
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。粘土化も進行している。
	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. 受け盤であり、安定上有利である。	3. 緩い受け盤または水平であり、安定度は中くらいである。	4. 緩い流れ盤であり、安定上不利である。	5. 流れ盤であり、安定上非常に不利である。
要 因	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1m~3m)	4. 厚い状態である。(厚さ3m~5m)	5. 非常に厚い状態である。(厚さ5m以上)
	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。好天続きでも乾燥しない。	5. 湧水が多量に流出している。
土 工	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。
	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20m~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)
要 因	I のり勾配	1. のり勾配は非常に緩い。(1.0~1.5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)
	J のり面保護工	1. 土圧や滑動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。

#### 4. 外的基準の設定

一つの切土のり面に限って考える場合、「いつ」、「どのような規模」の崩壊が生じるかを予測することが重要である。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が、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。これに加えて筆者らは、供用中、降雨時に崩壊が生じたのり面について過去の気象データを検討した結果、降水量と崩壊が発生する可能性との間に明確な定量的関係は見受けられなかった。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。すなわち、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7)~11)を参考にし、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: のり面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項目に対し、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. ファジ回帰モデルの定式化

ファジ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<sup>12)</sup>。この理論におけるファジ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の主観で構成されるファジシステムであるとみなし、ファジ理論に基づくファジ回帰モデル<sup>13),14)</sup>を応用する。

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。

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

ここに、 $A_0$ : ファジ定数項

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

$X_A, \dots, X_J$ : 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

( $i=1, m$ :  $m$  はデータセット数)

そして、表-1 のり面評価表に示した切土のり面評価項目 ( $A, \dots, J$ ) のファジ係数は可能性分布関数と考え、ここでは対象な L-R ファジ数<sup>15)</sup>のうち式(2)で与えられる三角形ファジ数(図-1 参照)を採用する。

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

ここで、 $\beta_j$  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。

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

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。

ファジ回帰モデルでは観測値  $y_i$  がシステムの出力ファジ数に可能性の度合  $h$  ( $0 \leq h \leq 1$ ) 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)の様に表示することができる。

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

$$1 - |(y_i - X_j \beta_j) / (C_j |X_{ij}|)| \geq h \dots (5)$$

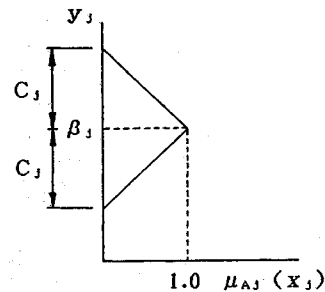


図-1 三角形ファジ数

ここに、 $y_i$ : 観測値

$X_i$ : 説明変数ベクトル

ただし、 $|X_i| = (|X_{i1}|, \dots, |X_{in}|)'$

$\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$

$C = (C_1, \dots, C_n)$

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数の揺らぎは、 $C'|X_i|$  が  $Y_i$  の幅を与えることから式(6)のように表せる。

$$S = \sum_{i=1}^m C'|X_i| \dots (6)$$

よって、ファジ係数  $A_j$  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。

$$\min_{\beta, C} \sum_{i=1}^m C'|X_i| \dots (7)$$

subject to

$$(1-h)C'|X_i| + X_j \beta_j \geq y_i$$

$$(1-h)C'|X_i| - X_j \beta_j \geq -y_i$$

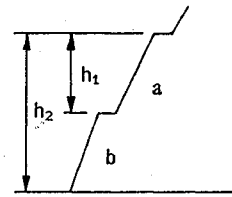
$$C' \geq 0, i=1, \dots, m$$

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<sup>16)</sup>。以上の線形計画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

切土のり面の設計は、各種調査結果に基づいて、経済性、施工性、地域性および維持管理面などを考慮した総合的な検討によって行われている。そして、作成された設計図書(切土横断図など)に従って切土が施工される。しかし、実際の地盤状況が調査結果と異なることも多く、その場合切土施工に伴って地質や湧水の状況をよく観察したうえでのり面調査(土砂・軟岩・硬岩判定試験、変状調査など)を実施し、場合によっては工法変更やのり面对策工について検討が行われる。これらについては、専門技術者により資料(報告書、検討書など)が作成されている。

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स्प集合である。そして、入力を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<sup>1)</sup>の考え方が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。



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

表-2 入力データ（建設時）

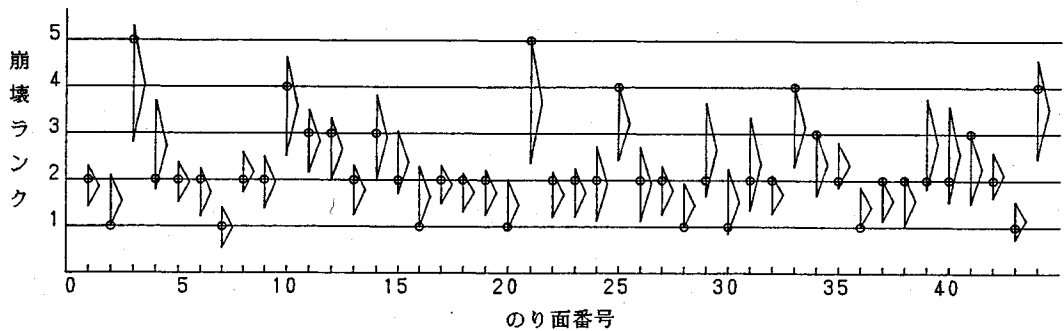
のり面号	評価ランク										崩壊ランク
	地質・地質要因							土工要因			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	3	3	3	2	3	2	3	1	2	2	2
2	4	4	3	2	2	2	3	1	1	5	1
3	5	5	5	3	4	2	1	4	5	2	5
4	3	3	3	2	3	2	1	3	3	2	2
5	3	2	3	4	3	2	1	1	2	2	2
6	4	3	3	3	3	2	1	1	1	5	2
7	2	2	1	2	1	1	1	1	1	3	1
8	4	3	4	4	3	2	3	1	2	1	2
9	4	3	4	3	3	2	3	1	1	5	2
10	4	4	4	5	4	4	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	2	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

なお、データ数については、確率・統計上標準誤差を小さくするためには多い方が良い。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る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。特に、ファジィシステムで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。このように考えると、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。

$$\begin{aligned}
 Y = & (0.21, 0.00)X_c + (0.05, 0.02)X_d \\
 & + (0.14, 0.00)X_e + (0.00, 0.02)X_f \\
 & + (0.36, 0.28)X_g + (0.17, 0.00)X_h \\
 & + (0.00, 0.04)X_j \dots \dots \dots (8)
 \end{aligned}$$

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(β+C)、中心値(β)、下限値(β-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<sub>3</sub>=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



図一三 建設時のシステム同定結果

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、崩壊誘因の発生に依存することになる。

式（8）のファジ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係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）のファジシステムに採用されていない項目のファジ係数はすべて（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. 建設時データで構築されたシステムによる供用中ののり面の崩壊形態の推定

建設時には工事の進捗に伴って種々の調査や試験が実施されるとともに、必要に応じて試験施工も行なわれる。したがって、切土中崩壊が生じた場合はのり勾配やのり面保護について設計変更がなされるため、一般に大きな被害が生じることは少ない。これに対し、供用中に変状や崩壊が発生した場合は、復旧対策に伴う施工性や経済性の問題だけでなく交通規制や人的被害など社会に与える影響が非常に大きくなると考えられる。

そこで、同じ岩種（変成岩）の地山に施工された切土のり面のうち供用中降雨によって崩壊が引き起こされたのり面と未崩壊であったのり面を対象として、建設時のデータで構築されたシステムにより供用中ののり面における崩壊形態の推定を試みる。そして、実際の崩壊形態との比較から同システムの予測精度および適用性について考察を行う。これは、建設時の段階で供用開始後における切土のり面の安定性の評価を試みるものであり、供用中の維持・補修などを見積もる上で非常に有効な判断基準を与えられる。なお、建設時のデータを収集した切土のり面は完成直後であり供用中の崩壊に関するデータが得られていないため、供用中のデータについては供用開始後10数年経過する間に変状が発生した近隣地山の切土のり面より収集した。本研究で用いたデータを表一三に示す。

建設時のデータで同定した式(8)のファジィシステムに表-3に示す供用中における評価ランクのデータを入力することにより得られた予測結果を図-4に示す。同図中の丸印は供用中実際に生じた崩壊形態であることを表している。この図によると、実際に生じた崩壊形態は唯一の例外(のり面番号22)を除いてすべて予測可能性の中に含まれており、建設時のデータで構築されたシステムが供用中ののり面の崩壊形態の推定に有用であるように見られる。

ここで、システムの予測性能評価のためには、予測結果が安全側か危険側かを判定するとともにその予測精度についても定量的評価を行う必要があるため、式(9)の評価関数( $G_0$ )を定義する。この評価関数は、三角形(可能性分布関数で表された予測出力の面積)の崩壊ランク(1, ..., 5で表された実際の崩壊形態)に関するモーメントとして求めている。

$$G_0 = \int_{A_i} l_i dA_i / A \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $A_i$ : データセット*i*における三角形の面積  
 $l_i$ : 実際に生じた崩壊ランクと三角形の重心位置の崩壊ランクとの差  
 ( $i=1, \dots, m$ :  $m$ はデータセット数)

すなわち、式(9)はいまいさの大きさを三角形ファジィ数の面積、予測値と実際値とのズレを三角形の重心と丸印とのランク差で表すことにより、これらの積で定義したものである。ここで、予測崩壊ランクが $5 \geq Y_i \geq 1$ の時 $1 \geq |G_0| \geq 0$ となり、数値が1に近いほど予測精度は低く、0に近いほど予測精度は高いことを意味する。そして、 $G_0 \geq 0$ の時は安全側の予測、 $G_0 < 0$ の時は危険側の予測となることを意味する。なお、解析上予測値が $Y_i > 5$ または $Y_i < 1$ の時 $|G_0| > 1$ の場合もあり得るが、これは予測精度は低い「極めて安全側」かまたは「極めて危険側」の予測結果を与える予測システムであると評価できる。各のり面における評価関数値を一覧表にまとめて表-4に示す。

この評価結果によれば、建設時のシステムによる供用中の崩壊形態の予測精度は「高い」と評価できる。表-4に示すように、23個ののり面のうち約70%ののり面については1ランク程度安全側の予測結果を与えている。すなわち、建設時のシステムは供用中の崩壊形態を若干大きく予測するシステムであり、供用中実際に生じた崩壊形態は小さかったことを意味している。これは、建設時における崩壊は地盤条件と設計条件との不一致や掘削時の応力解放に対する施工法などの影響を受けて発生しているのに対し、供用中については予測された崩壊がまだ発生していないか、あるいは施工時における専門技術者の経験的判断により各種の対策工が施工されたことにより崩壊規模が小さく抑制されているためと考え

表-3 入力データ (供用中)

のり面番号	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	4	4	5	5	4	2	3	2	2	2	2
2	4	4	5	5	4	2	3	1	2	2	2
3	3	3	3	5	4	2	2	2	2	4	2
4	3	3	3	5	4	2	2	1	2	4	2
5	2	2	2	5	4	3	3	2	3	3	3
6	2	2	2	4	1	1	2	2	1	2	1
7	2	2	3	3	3	4	2	4	3	2	2
8	3	3	3	4	3	5	2	4	3	2	2
9	4	3	4	3	4	5	2	3	4	4	4
10	4	4	3	4	4	5	2	5	4	3	5
11	3	3	3	3	3	5	2	4	3	2	3
12	3	3	3	3	3	5	1	3	2	3	2
13	3	3	3	4	4	3	2	2	2	2	2
14	4	4	4	4	4	4	1	2	2	1	2
15	3	3	3	4	3	4	1	3	1	2	2
16	3	3	3	4	2	4	4	2	3	2	2
17	5	5	5	2	3	5	4	4	5	2	5
18	4	4	4	2	2	4	3	3	4	2	3
19	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1
20	3	3	4	3	3	3	4	2	2	2	3
21	4	4	4	3	5	5	5	4	5	5	5
22	2	2	2	3	3	1	1	1	2	2	1
23	3	3	3	4	3	4	4	4	4	3	4

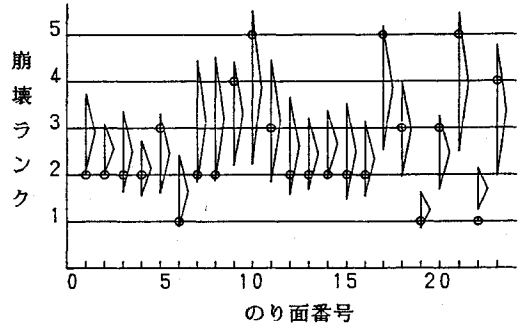


図-4 供用中の崩壊予測結果 (建設時のシステムによる)

られる。

一方、残りの約30%ののり面についても予測精度は高いと評価できるが、1ランク程度危険側の予測結果を与えている。これらはいずれもファジィ係数に可能性の幅を与える数値が現れたのり高さ(H)要因に対して高い評価ランクが与えられたのり面であり、実際に発生した崩壊形態は小規模(崩壊ランクは3)から大規模(崩壊ランクは5)であったことから、のり面保護工により崩壊の可能性が抑制されていた切土のり面が時間の経過により不安定化したため建設時のシステムで予測される崩壊形態よりも大きな規模まで崩壊が進行したためと考えられる。

以上より、建設時のデータに基づいて構築した予測システムは供用中の崩壊形態(崩壊の可能性)を精度良く

表一4 評価関数値一覧表

のり面 番号	評価関数 G <sub>0</sub>	評 価			予測精度の評価区分
		安全側	危険側	予測精度	
1	0.18	○		高い	G <sub>0</sub>   0 0.1 0.3 0.5 0.7 0.9 1.0 極めて低い
2	0.07	○		大変高い	
3	0.11	○		高い	
4	0.02	○		大変高い	
5	-0.11		○	高い	
6	0.12	○		高い	
7	0.37	○		やや高い	
8	0.40	○		やや高い	
9	-0.21		○	高い	
10	-0.52		○	やや低い	
11	0.05	○		大変高い	
12	0.16	○		高い	
13	0.09	○		大変高い	
14	0.12	○		高い	
15	0.13	○		高い	
16	0.07	○		大変高い	
17	-0.39		○	やや高い	
18	0.03	○		大変高い	
19	0.02	○		大変高い	
20	-0.10		○	高い	
21	-0.43		○	やや高い	
22	0.08	○		大変高い	
23	-0.25		○	高い	

1) G<sub>0</sub> ≥ 0の時  
安全側の予測  
2) G<sub>0</sub> < 0の時  
危険側の予測

予測することができる。そして、建設時に崩壊が発生したのり面は特に抜本的な対策が講じられない場合には、供用中にも同程度の規模で崩壊が発生する可能性が高いと評価できる。このように、建設時のデータにより将来ののり面の崩壊形態がある程度客観的・定量的に予測できることは、今後の切土のり面の維持・補修などを考える上での有用性は大きいと言える。

### 8. 建設時と供用中における崩壊要因の比較

建設時のデータで構築したファジシステムは供用中の崩壊形態を精度良く予測することができるが、崩壊規模の大きさによっては安全側または危険側の予測結果を与えるシステムであることが把握された。このことは、建設時と供用中におけるシステムの相違から生じるものであり、同一岩種で構成される地山でのり面崩壊であっても建設時のデータで構築されたシステムによる供用中ののり面の崩壊形態を予測することの限界と考えられる。そこで、供用中に崩壊が発生したのり面についてもシステムの同定を行い、建設時のシステムとの比較か

ら建設時と供用中におけるのり面崩壊要因の性格の違いについて明らかにする。そして、崩壊形態の予測をより合理的に行うためのシステムについて考察を行う。

#### (1) 供用中におけるのり面崩壊要因について

抽出したのり面数は計23個であり、これらはいずれも降雨によって崩壊が引き起こされたのり面である。表一3に示したデータを用いて行ったファジシステムの同定結果を式(10)に示す。

$$\begin{aligned}
 Y = & (0.14, 0.00)X_A + (0.11, 0.00)X_E \\
 & + (0.10, 0.00)X_F + (0.15, 0.00)X_G \\
 & + (0.30, 0.20)X_H + (0.10, 0.08)X_I \dots\dots\dots (10)
 \end{aligned}$$

また、図一5は式(10)による予測ファジ出力を各のり面ごとに図化した結果である。同図と図一4に示した建設時のシステムによる予測結果を比較すると、全体的に可能性の幅が小さくなっていることから、より適したシステムが構築できていることがわかる。

同定結果によれば、ファジ係数の中心値に大きな値が与えられた要因は、地山地質(A)、被覆層・風化層の厚さ(E)、地下水・湧水の状況(F)、降雨水の集中度(G)、のり高さ(H)、のり勾配(I)であった。したがって、のり高さが高く地山全体の風化が進んで被覆層・風化層が厚くなるほど、また降雨水の集中度が高いほど崩壊規模は大きくなると評価できる。一方、のり高さ(H)とのり勾配(I)については、のり高さが高くのり勾配が急なのり面であってものり面保護工が抗土圧型であれば崩壊規模は小さくなることから、この項目について可能性の幅を与えるファジ数が現れたと考えられる。これらの要因は、変成岩は地殻変動による影響を受けているため不連続面が多く発達していること、変成鉱物が風化変質した場合不連続面に沿った剥離が生じ易いこと、降雨や地下水の影響を受けると片理面に滑性が生じ易くなること、などを考慮すれば工学的にも十分理解できると考える。

#### (2) 建設時と供用中におけるシステムの比較

式(8)と式(10)に示した建設時および供用中のシステムでは、被覆層・風化層の厚さ(E)、のり高さ(H)およびのり勾配(I)の項目にそれぞれ同程度の大きさのファジ係数が与えられている。これは、両システムは同一岩種で構成される地山でのり面を対象としていることから、のり面の力学的・幾何学的安定性を支配すると思われるこれらの項目が採用されたと考えられる。そして、のり高さ(H)の中心と幅に比較的大きなファジ係数(建設時の場合β=0.36, C=0.28, 供用中の場合β=0.30, C=0.20)が与えられたのは、のり高さが高ければ高いほど大規模崩壊が発生し易くなるが、実際には大規模崩壊が発生したのり面は小規模崩壊も発生しているので、予測崩壊規模は大きくなるとともに崩壊



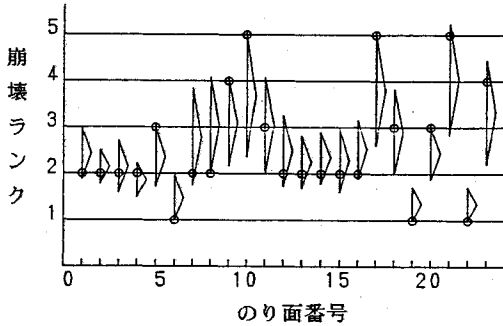


図-5 供用中のシステム同定結果

の可能性の幅も大きくなったことが理由として考えられる。

ところが、システムを構成するその他の項目について着目すると、建設時のシステムでは節理等の状態 (C) の項目に比較的大きなファジィ係数の中心値が与えられているのに対し、供用中のシステムでは地山地質 (A)、地下水・湧水の状況 (F) および降雨の集中度 (G) の項目にファジィ係数の中心値が与えられている。これは、建設時の崩壊誘因は地盤条件と設計条件の不一致や施工法などにあり、掘削の進捗に伴う地山の部分的な地質状況を評価する要因としてこの項目が建設時のシステムに採用されたと考えられる。これに対し、供用中ののり面は降雨により崩壊が引き起こされており、地山の全体的な地質状況を総合的に評価するとともに降雨との関連性を評価する要因としてこれらの項目が供用中のシステムに採用されたと考えられる。

以上より、これらのファジィシステムによるのり面評価過程は専門技術者の経験的主観に沿うものであり、建設時と供用中におけるのり面崩壊要因の性格の違いを明らかに表していると考えられる。すなわち、同一岩種で構成される地山において建設時のシステムを用いることにより供用中における崩壊形態を精度良く予測することができる。しかし、システムを構成するのり面評価要因の相違から、切土のり面における崩壊発生メカニズムは建設時と供用中とは異なると評価でき、このことは他の手法により崩壊形態を予測する上での工学的示唆を与えていると考えられる。ただし、これらの限界を知った上で建設時のデータを有効に利用すれば、供用開始後ののり面の安定性評価における利点は大きいと考えられる。

## 9. あとがき

本研究では、建設時および供用中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、入力のを

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。以下に、本研究で得られた結論を列記する。

1) 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。

2) 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方法として有効である。

3) 建設時のデータで構築したファジィシステムは、供用中の崩壊形態（崩壊の可能性）を客観的・定量的に精度良く予測することが可能である。

4) したがって、建設時のデータ（専門技術者による主観的・定性的資料）は将来ののり面の安定性を評価する上で有用である。

5) 建設時と供用中における崩壊発生メカニズムの相違は、それぞれのファジィシステムを構成するのり面評価要因の比較により明らかにできる。

6) このことは、他の評価手法により供用開始後の崩壊形態を予測する上で非常に有益な工学的示唆を与えている。

同定により得られた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。また、施工中データ数の少ない段階から、その現場に適応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、特に変成岩地山の切土のり面に限定して評価を行ったが、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崩壊要因の岩盤特性を明らかにできると考えられる。そして、崩壊時期の違いに対しても変成岩地山の場合と同様、統一的な評価を行うことができると考えられる。

ただし、崩壊の可能性が予測されたのり面が降雨時ほどの程度の危険度を有しているのかについては、の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様に、崩壊メカニズムや崩壊誘因が異なるの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、今後鋭意研究を進め

ていく所存である。

本研究を行うにあたり、日本道路公団広島建設局古前正徳氏をはじめとして多くの方々の助力を頂いた。また、(株)大林組 鈴木昌次氏から本研究の内容について助言を頂いた。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わします。

#### 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) 川喜多二郎：発想法，中央公論社，pp.65～114，1982.
- 4) 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.
- 5) 小橋澄治：斜面安定，鹿島出版会，pp.18～22，1977.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 土質工学会編：切土ノリ面，土質工学会，pp.16～34，1987.
- 10) 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.
- 11) 山田剛二・渡 亮正・小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の実態と対策，山海堂，pp.403～418，1983.
- 12) Zadeh, L.A. : Fuzzy Sets, Information and Control, Vol.8, pp.338～353, 1965.
- 13) 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.
- 14) 坂和正敏：ファジィ理論の基礎と応用，森北出版，pp.84～102，1990.
- 15) 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.
- 16) 白石成人・吉田 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.

(1991.7.8 受付)

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

Kunimasa NISHI, Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

The evaluation process of cut-off slope stability is an ambiguous system which is made up of ideas subjected to practical experiences of an expert. This evaluation system uses the possibility linear concept of fuzzy theory together with the basic data from actual cases of slope failures during and after construction. In this research the input data for evaluation ranking is obtained from the values of the slope-evaluation table showing the results of subjective and qualitative analyses of experts. The failure pattern is taken as an external mode of standard. And the slope failure after construction is predicted on the basis of the adopted system during construction. This fuzzy system clearly defines the problematic differences in nature upon prediction of slope-failure possibility factors during and after construction.