

(33)切土のり面の崩壊要因評価と岩種特性 に関する一考察

復建調査設計(株)技術研究所 正会員 西 邦正
山口大学工学部社会建設工学科 正会員 古川 浩平
日本道路公団広島建設局 正会員 小川 健
山口大学工学部社会建設工学科 正会員 中川 浩二

SLOPE-STABILITY EVALUATION FACTORS AND ROCK CHARACTERISTICS BASED ON FUZZY SET THEORY

Kunimasa NISHI, Fukken Co., Ltd.
Kohei FURUKAWA, Yamaguchi University
Tsuyoshi OGAWA, J. H. P. C.
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

As to the cut-off slope stability the technique of evaluating failure possibility and failure factors of metamorphic rock-slopes has been proposed by the authors using possibility linear system that is based on Fussy set theory. In the present research the technique is applied to existing slopes (different rock types) that fail due to rainfall and the slope-failure factors according to rock characteristics are presented. The relationship between the results of evaluation of slope-failure possibility and slope's service days is derived and the rock characteristics with respect to weathering in progress is presented.

1. はじめに

切土のり面の安定性を評価する際岩種により岩盤の工学的特性が大きく異なる^{1), 2)}ことから、本研究では前報³⁾の変成岩地山のり面に加え、堆積岩地山および火成岩地山に建設された切土のり面に対してファジィシステムを構築する。ここでは、のり面の安定性に対する評価過程を専門技術者の経験的主観で構成される「あいまい」システムであるとみなしている。このシステムを構成するのり面評価要因と各岩種の一般的な工学的特性との比較から、岩種別のファジィシステムの工学的妥当性を示す。さらに、システムによる予測結果に基づき、供用中のり面の崩壊可能性と岩種特性について述べる。なお、対象としたのり面は供用開始後10数年経過する間に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である。

2. ファジィシステムの構築

入力を「のり面評価表³⁾」による評価ランク、出力を「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 ($1, \dots, 5$)、 Y_i : 予測崩壊形態 ($i = 1, \dots, m$; m はデータセット数)

ここで、切土のり面評価要因は下記の通りであり、これらは、工学上「非常に良好な状態」(崩壊可能性は非常に低い)から「非常に不良な状態」(崩壊可能性は非常に高い)までを1, ..., 5のランクに設定している。

(I) 地形・地質要因

A: 地山地質、B: 土質分類、C: 節理等の状態、D: 節理等の傾斜、E: 被覆層・風化層の厚さ、
F: 地下水・湧水の状態、G: 降雨水の集中度

(II) 土工要因

H: のり高さ、I: のり勾配、J: のり面
保護工

また外的規準は崩壊形態であり、のり面評価ランクに対応して、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、に設定している。

ファジィ係数 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) は可能性分布関数であり、ここでは式(2)で表現される対称な三角形ファジィ数¹⁾を採用している。このとき、 β_j は中心、 C_j は可能性の幅を与え、出力 Y_i は式(3)で計算できる。

$$A_j = (\beta_j, C_j) \quad (2) \quad Y_i = \left(\sum_{j=1}^n \beta_j X_{ij}, \sum_{j=1}^n C_j |X_{ij}| \right) \quad (3)$$

詳しくは前報³⁾を参照されたい。

3. のり面データによる各岩種のファジィシステムの同定

崩壊可能性の評価を行うために使用した資料は、調査、設計、施工および管理に携わる専門技術者が、供用中の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・主観的表現によるのり面調査資料である。これらの資料に基づいてのり面評価表を作成し、ファジィシステムへの入力データとした。各岩種ごとのファジィシステムを構築するために抽出したのり面数は、変成岩(黒色片岩)地山: 23個、堆積岩(砂岩・頁岩)地山: 23個、火成岩(花崗岩)地山: 15個である。

なお、供用中における切土のり面の崩壊という特性上、地盤条件、設計条件、気象条件、崩壊状況および崩壊発生時期に関する情報がすべて揃ったデータを入手することには限界がある。これに対し、筆者らが提案するのり面評価表(参考文献3)に掲載)を用いれば、崩壊時の定量的・定性的データをのり面評価要因として数値化することができる。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適用する上での有利性があると考えられる。のり面評価表に基づいて作成した入力データの一例を表-1に示す。また、岩種別に構築したファジィシステムの同定結果を式(4)、式(5)、式(6)に示す。

① 変成岩(黒色片岩)地山³⁾

$$Y = (0.14, 0.00) X_A + (0.11, 0.00) X_E + (0.10, 0.00) X_F + (0.15, 0.00) X_G + (0.30, 0.20) X_H + (0.10, 0.08) X_I \quad (4)$$

② 堆積岩(砂岩・頁岩)地山

$$Y = (0.00, 0.07) X_C + (0.53, 0.00) X_E + (0.17, 0.00) X_G + (0.21, 0.18) X_I + (0.00, 0.03) X_J \quad (5)$$

③ 火成岩(花崗岩)地山

$$Y = (0.00, 0.16) X_A + (0.07, 0.00) X_E + (0.09, 0.00) X_F + (0.00, 0.09) X_G + (0.11, 0.00) X_I + (0.78, 0.00) X_J \quad (6)$$

上式の各システムによる予測結果を図-1~図-3にそれぞれ示す。同図の縦軸は1, ..., 5の崩壊ランク、横軸はのり面番号であり、予測出力値(Y)は上限値($\beta+C$)、中心値(β)、下限値($\beta-C$)からなる三角形ファジィ数で与えられている。そして、実際に生じた崩壊形態は丸印で示してある。たとえば、上限値=2.96、中心値=1.98、下限値=1.00であり観測値(実際値)が $y=2$ であった場合、予測結果は「のり面

表-1 入力データ例(堆積岩地山の場合)

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	3	3	3	2	4	3	1	2	2	3	3
2	3	3	3	2	4	3	1	2	1	3	3
3	5	5	5	2	5	4	2	2	4	3	5
4	4	4	4	2	4	4	1	2	2	3	2
5	4	4	4	3	4	4	2	1	4	2	4
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

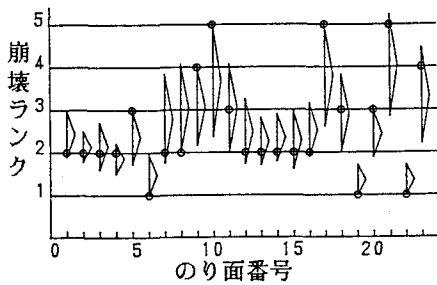


図-1 変成岩地山での予測結果³⁾

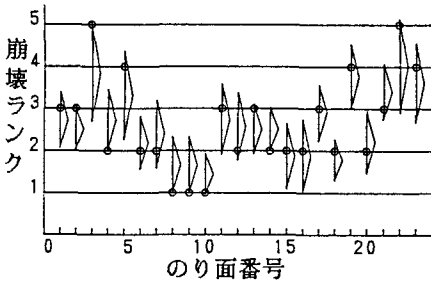


図-2 堆積岩地山での予測結果

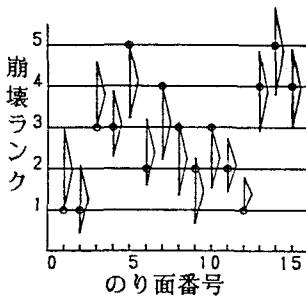


図-3 火成岩地山での予測結果

表-2 のり面評価要因と岩種特性

分類	岩 種 特 性	関連する地形・地質要因						
		A	B	C	D	E	F	G
変色片岩	片理面は良く発達し異方性、剝離性がある。			△		○		
	片理面、へき開面が密着している場合透水性は低い。			△			△	
	地下水の賦存量は少ない。						○	△
	比較的風化を受けにくい。	△	△					
	割れ目に沿って粘土化が進むと大きな崩壊が生じる。	○	△		△			
	割れ目に囲まれたブロックが降雨時に緩み崩壊する。			△	△			○
堆積岩	比較的良く層理面が発達している。	△				△		
	亀裂が少ないと透水性は少ない。			△			△	
	風化を受け易い。	△	△					
	物理的風化により平たい板状に破壊する傾向がある。	△	△		△			
	被覆層の下位にある岩盤に沿って崩壊が生じる。			△	△	○		
	透水性の異なる境界面で崩壊が生じる。				△		△	○
火成岩	比較的塊状の岩盤が多い。			△		△		
	透水性は高く地下水を多量に賦存することがある。						△	△
	粘土化すると透水性は低くなる。	△		△				
	風化の進行は著しい。	△	△					
	花崗岩のマサ化作用は深部まで及んでいる。	△	△			△		
	風化・変質が著しいと深く広範囲に及び崩壊する。		△		△	○		
備考	侵食や地下水の上昇によって崩壊が生じる。						○	△
	凡 例	○：システムに採用された要因，△：従属または関連する要因						

は全体として安定であるかまたは小規模な崩壊が生じる可能性があるが、どちらかと言えば表層剝離など小さなのり面崩壊が生じる可能性が高い」ことを表現しており、「実際の崩壊形態は表層剝離であった」ことを意味している。なお、各ファジィシステムを構成する要因として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の程度が非常に小さいことを意味している。

4. 崩壊要因の評価

式(4)、式(5)、式(6)に示したファジィシステムの同定結果に基づき、各システムを構成するのり面崩壊要因と各岩種の一般的な工学的特性との比較から、システムの妥当性について以下に述べる。

(1) 岩種特性について

表-2の岩種特性は、切土のり面の安定性評価を行う際の一般的な内容^{4) 6)}についてまとめたものである。そして、ファジィ係数の中心値に大きな数値が与えられたのり面評価表の地形・地質要因との対応関係を○印で示している。ファジィシステムに採用されていないが岩種特性と評価表の要因が対応するものについては、従属または関連する要因として別の記号 (△印) で示した。これより、表-2に示した工学的特性とのり面評価要因がすべて対応している訳ではない。しかし、同表より本研究で対象としたのり面の崩壊要因が、どのような工学的特性と結び付いて崩壊規模を決定付けているかが把握できる。そして、構築したシステム自体の構造は単純であることから、崩壊可能性の評価過程が容易に理解できる。岩種特性に関係しない土工要因については、以下に考察を行う。

(2) のり高さ (H) について

変成岩地山ののり面では、のり高さ（H）要因に対してファジィ係数の中心値に最も大きな数値（ $\beta = 0.30$ ）が与えられ、他の岩種では現れていない。変成岩を構成する結晶鉱物は他の岩種に比べて緻密で、片理面等は比較的密着している場合が多い。そのため、降雨水はのり面よりもむしろ地山背後から供給されることが考えられる。このことより、のり高さが高いのり面ほど地山の規模が大きく降雨水の集水面積も大きくなることから、本研究で対象とした変成岩地山では、崩壊規模を決定付ける要因としてのり高さ（H）要因がファジィシステムに採用されたものと考えられる。

一方、堆積岩地山および火成岩地山ののり面では、のり高さ（H）要因の影響の程度が非常に小さくシステムに採用されていない。この理由は、これらの岩種では降雨水は地山背後地よりもむしろのり面の表層部から供給され易いこと、風化はのり面の表層から深部に向かって進行し易い⁷⁾こと、その結果多段で施工されたのり面は高さによらずいずれの位置でも不安定化し易いこと、が考えられる。

(3) のり勾配（I）について

のり勾配のファジィ係数の中心値については、変成岩地山の場合： $\beta = 0.10$ 、堆積岩地山の場合： $\beta = 0.21$ 、火成岩地山の場合： $\beta = 0.11$ 、でありすべての岩種に比較的大きな数値が与えられている。ここで、のり勾配は単に岩石の強度や固結度のみで決まるものではなく、風化の程度、層理、節理、片理などの割れ目の程度とその方向などものり面の安定性を支配している。設計時においても、のり勾配は地盤を構成する地層の種類、状態および切土高に応じて決定されている。以上より、ファジィ係数の大きさは各岩種によって異なるものの、すべてのシステムにのり勾配（I）要因が採用されたと考えられる。

(4) のり面保護工（J）について

のり面保護工は主として、①表面侵食や凍上の防止、②部分的崩落の防止、③降雨水の浸透防止、④風化の進行防止、さらには、④ある程度の土圧に対抗でき地山の安定に寄与する、などを目的として施工される。3つの岩種のうち火成岩地山は、特に風化の進行が著しく不安定化し易い岩種である⁷⁾と言える。したがって、のり面の安定性はのり面保護工に大きく依存しているため、のり面保護工（J）が崩壊規模を決定付ける要因となり、この係数に支配的なファジィ数の中心値が与えられたものと考えられる。一方、他の岩種については火成岩のように風化進行の特殊性がないため、評価要因は風化の進行の度合いや降雨に関連した要因に分散して採用されているものと考えられる。

(5) 崩壊規模のあいまいさについて

変成岩地山ではのり高さ（H）とのり勾配（I）の要因、堆積岩地山ではのり勾配（I）と節理等の状態（C）の要因、火成岩地山では地山地質（A）と降雨水の集中度（G）の各要因のファジィ係数に可能性の幅を与える数値が現れている。この理由として次のことが考えられる。すなわち、のり高さが高いのり勾配が急なのり面、のり勾配が急で節理等が多く発達しているのり面、火成岩のように風化の進行が著しい岩種であれば、流水によって表面が侵食され易く降雨水は地山の深部まで浸透し易いので、降雨水の集中度の高いのり面で大規模崩壊が発生する可能性が高くなると考えられる。以上より、各岩種についてこれらの要因が大規模崩壊が発生する可能性を高めていると評価でき、可能性の幅を与える数値がそれぞれのファジィシステムに採用されたと考えられる。

5. 風化進行と岩種特性

各岩種別に構築したファジィシステムの予測性能評価は、式(7)の評価関数（ G_0 ）³⁾により行うことができる。

$$G_0 = \int_{A_i} l_i dA_i / 4 \quad (7)$$

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）

この評価関数は、あ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している。

風化進行と予測結果の関連性を見るために以下の整理を行った。図-4は縦軸に供用開始後から崩壊発生時までの経過日数、横軸に式(7)で求めた評価関数値の絶対値 ($|G_0|$) を用いて岩種別に図化したものである。多少バラツキはあるものの、図-4(a)の変成岩地山の場合に見られるように、経過日数の短いり面で予測精度が低く経過日数の長いり面で予測精度が高いということは、従来から言われているように掘削による応力解放の影響が大きく風化の影響が小さいことを意味している。また、図-4(b)および図-4(c)に見られるように、図-4(a)と逆の関係は、堆積岩地山と火成岩地山の場合は風化の影響が大きいことを意味していると考えられる。このように、本システムの予測結果を用いれば、時間経過に伴うり面の安定性の変化と風化進行の岩種特性との関係が表現できるようである。これらの結果は供用中のり面の安定性を評価する上で有用な示唆を与えるものであり、維持・管理段階における一つの判断基準を与えるものと考えられる。

6. あとがき

本研究では、供用中、降雨により変状が生じた切土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、岩種別に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各岩種のり面崩壊要因および崩壊可能性の評価を行った。以下に、得られた結論を列記する。

(1) 入力を「のり面評価表」の評価ランク、出力を予測崩壊形態崩壊ランクとして同定したファジィシステムは、のり面の崩壊要因および崩壊可能性を評価する上で有効である。

(2) のり面崩壊要因の岩種特性は、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。

(3) 崩壊規模の予測結果は、各岩種の工学的特性に対応して特徴付けられる。このことから、のり面の安定性は岩種特性を考慮して行う必要がある。

本研究で構築したファジィシステムを用いれば、ある切土のり面がどのような形態で崩壊するかを予測することができる。しかし、崩壊の可能性が予測されたのり面（崩壊ランクが2〜5であったのり面）が降雨時に崩壊するかどうかについては明らかでない。したがって、この点に関しては別途評価システムを構築する必要があると考える。

参考文献

- 1) 奥國誠之：切土斜面の設計から維持管理まで，鹿島出版会，1983。
- 2) 日本道路公団：設計要領第一集第1編土工，pp.96～110，1983.4。
- 3) 西 邦正・古川浩平・中川浩二：ファジィ理論を用いたのり面崩壊要因および崩壊可能性の評価について，土木学会論文集，第445号/Ⅲ-18，pp.109～118，1992.3。
- 4) 奥國誠之：岩盤分類-斜面安定における岩盤分類，日本応用地質学会，pp.83～89，1983。
- 5) 土質工学会編：切土ノリ面，土質工学会，1987。
- 6) 土質工学会：岩の工学的性質と設計・施工への応用，1977.7。
- 7) 多賀直春・奥國誠之・田山聡・八木沢孝哉：長期追跡調査による切土のり面の風化の進行と安定性，土と基礎，Vol.39.No.6，pp.41～47，1991.6。

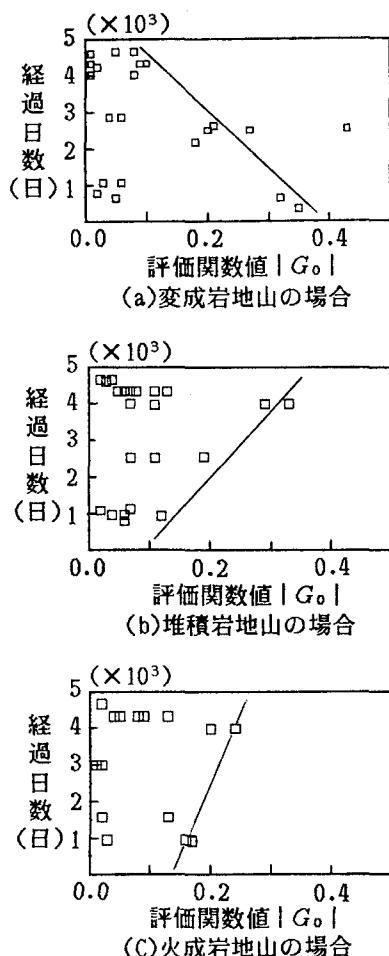


図-4 評価関数値～経過日数関係図