

(89) 建設時と供用時におけるのり面崩壊要因の比較

山口大学工学部 正会員 西 邦正
山口大学工学部 正会員 古川 浩平
日本道路公団 正会員 古前 正徳
山口大学工学部 正会員 中川 浩二

A COMPARISON BETWEEN DURING AND AFTER CONSTRUCTION IN SLOPE-FAILURE POSSIBILITY FACTORS USING FUZZY SET THEORY

Kunimasa NISHI, Yamaguchi University
Kohei FURUKAWA, Yamaguchi University
Masanori KOMAE, J.H.P.C.
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

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 used the possibility linear concept of fuzzy theory together with the basic data from actual cases of slope failures during and after construction. 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.

1. はじめに

筆者ら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「あいまいな」システムであるとみなし、変成岩で構成される地山での切土のり面に限定した上で、建設時におけるのり面の崩壊要因および崩壊可能性の評価を試みた。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ている。その結果、建設時における崩壊は地盤条件と設計条件^{1)・2)}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ことを明らかにした³⁾。

本研究では、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ると考えられる。

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。

2. ファジィシステムの概要

入力を建設時の資料に基づいて作成した「のり面評価表³⁾」による評価ランク、出力を「崩壊形態³⁾」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、切土のり面評価項目 ($A, \dots, J$) のファジィ係数 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 (図-1参照) 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。そして、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。式(1)に示したシステムの同定方法については前報³⁾を参照されたい。

$$A_j = (\beta_j, C_j) \quad (2) \quad Y_i = \left(\sum_{j=1}^n \beta_j X_{ij}, \sum_{j=1}^n C_j |X_{ij}| \right) \quad (3) \quad \mu_{Y_i}(y_i) \geq h \quad (4)$$

ここで、「のり面評価表」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資料として記録に残してきたのり面評価要因であり、地山およびのり面が本質的に有する崩壊可能性の素因である。そして、外的基準は「崩壊形態」であり、これらは工学上 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 のランクに設定している。

式(5)は建設時のデータで構築したファジィシステムである。ただし、のり面評価表の項目については、前報³⁾の一部を修正し10項目としている。

$$Y = (0.21, 0.00) X_C + (0.05, 0.02) X_D + (0.14, 0.00) X_E + (0.00, 0.02) X_G + (0.36, 0.28) X_H + (0.17, 0.00) X_I + (0.00, 0.04) X_J \quad (5)$$

ここで、 Y は予測崩壊形態、 $X_A, \dots, X_J$ は切土のり面評価要因の評価ランク (1, ..., 5) であり、この係数は中心と幅からなるファジィ係数である。そして、 $A, \dots, J$ はのり面評価項目であり、それぞれ 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、 H : のり高さ、 I : のり勾配、 J : のり面保護工である。このファジィシステムに採用された要因のうち中心値が与えられた項目は「崩壊規模を決定付ける要因」であり、可能性の幅が与えられた項目は「専門技術者の判断による人為的な配慮がなされている要因」として評価できる。そして、各ファジィ数の大きさは影響の程度を表している。なお、式(5)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非常に小さいことを意味している。以上より、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^{4), 5), 6)}を容易に行うことができる。

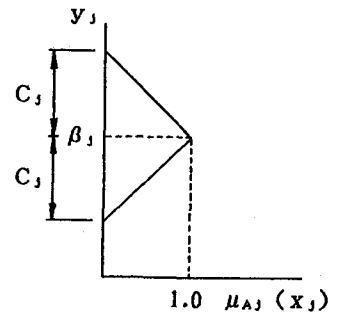


図-1 三角形ファジィ数

3. 建設時データで構築されたシステムによる供用中のり面の崩壊形態の推定

建設時のデータで同定した式(5)のファジィシステムに表-1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-2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、実際の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(6)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。

$$G_0 = \int_{A_i} l_i dA_i / 4 \quad (6)$$

ここに、 A_i はデータセット i における三角形の面積であり、 l_i は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) である。すなわち、式(6)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。各のり面の評価関数値を一覧表にまとめて表-2に示す。ここで、予測崩壊ランクが $5 \geq Y_1 \geq 1$ 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 $Y_1 > 5$ または $Y_1 < 1$ の時 $|G_0| > 1$ の場合もあり得るが、これは予測精度は低いが「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。

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。そして、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^{1), 2)}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い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られる。

一方、残りの約30%ののり面については、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る。そして、実際に発生した崩壊形態は小規模 (崩壊ランク3) から大規模 (崩壊ランク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。

表-1 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	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

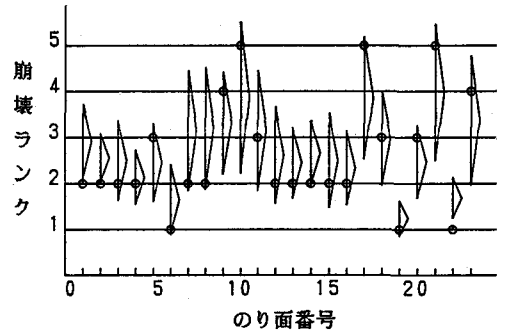


図-2 供用中の崩壊予測結果
(建設時のシステムによる)

4. 建設時と供用中における崩壊要因の比較

建設時のデータに基づいて構築したファジィシステムは、供用中の崩壊形態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-2に示したデータを用いて行ったファジィシステムの同定結果を式(7)に示す。

$$Y = (0.14, 0.00) X_A + (0.11, 0.00) X_E \\ + (0.10, 0.00) X_F + (0.15, 0.00) X_G \\ + (0.30, 0.20) X_H + (0.10, 0.08) X_I \quad (7)$$

また、図-3は式(7)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。同図と図-2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。

(2) 建設時と供用中におけるシステムの比較

式(5)と式(7)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ィ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ィ係数(建設時の場合 $\beta=0.36$, $C=0.28$ 、供用中の場合 $\beta=0.30$, $C=0.20$)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が大きくなるとともに崩壊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。

表-2 評価関数値一覧表

のり面 番号	評価関数 G_0	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	1) $G_0 \geq 0$ の時 安全側の予測 2) $G_0 < 0$ の時 危険側の予測
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	1) $G_0 \geq 0$ の時 安全側の予測 2) $G_0 < 0$ の時 危険側の予測
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	

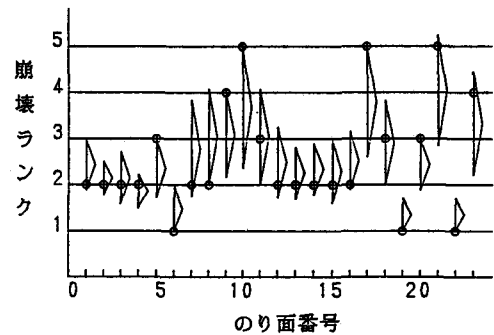


図-3 供用中のシステム同定結果

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。

5. 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。そして、同一岩種で構成される地山において建設時のデータで構築した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。

なお、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、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考えられる。さらに、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、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、崩壊の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。

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) 西邦正・古川浩平・古前正徳・中川浩二：ファジィ回帰モデルによるのり面崩壊要因の評価に関する研究，第23回岩盤力学シンポジウム講演論文集，pp.76～80，1991.2.
- 4) 土質工学会編：土砂災害の予知と対策，土質工学会，pp.160～163，1985.
- 5) 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.
- 6) 土質工学会編：切土ノリ面，土質工学会，pp.11～57，1987.