

(16) 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

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

Study on Evaluation for the Factor of Cut Slope Slide by the Fuzzy Regression Model

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

Abstract

Prediction model is proposed on the fuzzy regression analysis. It is possible to develop on objective and simplified fuzzy system to evaluate cut slope failure. Primary factors associated with cut slope failure are extracted from past records of damaged slopes under construction, which were written by qualitative expression. A state of failure derived from the proposed fuzzy system has sectional and continuous values with possibility distribution.

1. はじめに

道路建設に伴う切土のり面の設計は、道路の計画、設計、建設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。しかし、施工段階や維持・管理段階において変状が発生し、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。日本道路公団では、「自然地盤の土質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強さは著しく異なる。従って、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」¹⁾との観点から、過去の施工実績や既設のり面の実態などを参考に設計がなされている。しかし、切土のり面の安定性を客観的かつ定量的に評価する手法は確立されておらず、担当技術者の主観的判断に多くを依存している。

本研究では、主として建設時に変状が生じた切土のり面を対象とし、その際専門技術者が定性的に記述した工事報告書などに基づいて「のり面評価表」を作成した。そして、のり面評価表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、実際ののり面崩壊事例より外的基準として設定した「崩壊形態」からファジィ回帰モデルによりシステムの同定を行った。これより、切土のり面崩壊要因の評価および崩壊可能性の評価について同システムの適用性を検討した。

2. のり面評価表について

のり面の崩壊要因は数多くあり、それぞれが複雑に関連しあっている。そして、崩壊発生メカニズムも、個々ののり面によって異なると考えられる。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、また、構築したモデルが正しいかどうかの評価及び判断が不可能となる。そこで、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)地質要因、(Ⅱ)地形要因、(Ⅲ)土工要因を考え、工事報告書や建設時の資料の中から容易に抽出できる要因として12項目を採用し、表-1に示す「のり面評価表」を作成した。そして、各要因は Very Low から Very High までの5つの評価ランクを

設定し、これらをクリスプ集合からなるファジィ回帰モデルへの入力データとして用いた。ここに、A～Gの地質要因については「非常に良い」から「非常に悪い」、例えば「風化を受けておらず新鮮である」から「著しく風化し鉱物組織は分解している」について、岩盤分類²⁾を参考に5つの評価ランクに分類した。また、H、Iの地形要因と土工要因のうちJ（のり高さ）については、本研究で収集した資料の中から最もの高さが高い数値を評価ランク5に設定し、以下これらを参考にして5つの評価ランクに分類した。K（のり勾配）については、設計要領¹⁾に示された標準のり勾配範囲を参考にして分類した。なお、同評価表に採用した12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工事記録（報告書）に残してきた主観的評価を行うための要因であり、採用していないその他の要因については12項目の中のいずれかの要因に分散して従属しているのものと考えられる。

表-1 のり面評価表

要 因		評 価 ラ ン ク				
		Very Low	Low	Medium	High	Very High
地 質 要 因	A 地山地質	1. 岩質は極めて新鮮であり、構成粒子はまったく風化実質を受けていない。	2. 岩質は概ね新鮮であるが、部分的に多少風化実質している。構成粒子の固結程度は堅固である。	3. 構成粒子はやや風化実質しているものが多い。固結程度はやや軟弱な感じを受ける。	4. 構成粒子は風化実質しており、固結程度は低く軟弱な感じを受ける。	5. 構成粒子は著しく風化実質し、岩組織が失われている。固結程度は極めて低い。
	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。コア形状はなく砂状である。
	C 風化の程度	1. 風化を受けておらず新鮮である。	2. 割れ目に沿って少し風化が進行している。	3. 地山内部の一部を除き風化が進行している。	4. 地山内部まで風化が進行しているが鉱物組織は残っている。	5. 著しく風化し、鉱物組織は分解している。
	D 節理の状態	1. 節理はほとんど分布せず、密着している。（間隔80cm未満）	2. 節理の分布はまばらで、一部開口している。（間隔50～150cm）	3. 節理は発達し、開口部の一部に粘土の層層や風化物質を挟んでいる。（間隔15～50cm）	4. 節理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50cm未満）	5. 節理の分布はむしろ不規則であり、土砂状で密着している。粘土化も進行している。
	E 節理の傾斜	1. 地質な地質であり、安定度は極めて高い。	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. 緩い受け壁であり、安定上不利である。	5. 流れ壁であり、安定上極めて不利である。
地 形 要 因	F 被覆層の厚さ	1. 被覆層はない。	2. 普通の状態である。（厚さ1m未満）	3. やや厚い状態である。（厚さ1m～3m）	4. かなり厚い状態である。（厚さ3m～5m）	5. 非常に厚い状態である。（厚さ5m以上）
	G 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、降雨時には少量の湧水がある。好天続きでも乾燥しない。	5. 湧水が多量に流出している。
	H 斜面の横断形状	1. 等高線が明瞭な谷部の斜面である。	2. 等高線が明瞭な尾根部の斜面である。	3. 等高線の出入りが少ない尾根部の斜面である。	4. 等高線の出入りが少ない谷部の斜面である。	5. 等高線の出入りがない直線型斜面である。
土 工 要 因	I 降雨水の集中度	1. 凸形等高線の散水斜面であり、集中度は極めて低い。	2. 凹形等高線の散水斜面であり、集中度は低い。	3. 凸形等高線の集水斜面であり、集中度は中くらいである。	4. 凹形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、集中度は極めて高い。
	J のり高さ	1. のり高は非常に低い。（高さ20m未満）	2. のり高は低い。（高さ20m～30m）	3. のり高は中くらいである。（高さ30m～40m）	4. のり高は高い。（高さ40m～50m）	5. のり高は非常に高い。（高さ50m以上）
土 工 要 因	K 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. のり勾配は普通である。（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）
	L 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。（擁壁工およびアンカー工など）	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（のり枠工など）	4. 表層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。（植生工およびネット工など）	5. 無処理または緑化対策などを主目的とした植生工のみによる保護工である。

3. 外的基準について

一般に、切土のり面の崩壊誘因としては降雨や地震などが考えられるが、建設時における崩壊発生メカニズムは、地盤条件と設計勾配との不一致や施工法などの影響を受けるため非常に複雑なものとなる。そして、これらの誘因は崩壊が発生する可能性を予測するための素因とは本質的に異なるため、のり面評価要因や外的基準とは独立して考慮すべきと考える。そこで、本研究ではのり面崩壊事例に基づき「崩壊形態」を外的基準として設定し、ファジィシステムの同定を行った。崩壊形態は文献^{3)～6)}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て次のように分類した。

評価ランク1：洗掘など局所的な崩壊のみであり、全体の安定度は高い。

評価ランク2：表層剝離など崩壊規模は小さい。（層厚0.3m未満）

評価ランク3 : 小規模なり面崩壊である。(層厚0.3~1.0m)

評価ランク4 : 中規模なり面崩壊である。(層厚1.0m以上)

評価ランク5 : のり肩を含む大規模な崩壊である。

4. ファジィ回帰モデル^{7), 8)}

入力を建設時の資料に基づいて作成したのり面評価表、出力を予測崩壊形態とすると、可能性線形システムは式(1)で表される。ファジィ係数 A_j ($j=1, 2, \dots, n$; 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、対称なL-Rファジィ数のうち式(2)で与えられる三角形ファジィ数(図-1参照)を採用する。ここに、 β_j は中心、 C_j は可能性の幅を与え、出力 Y_i の可能性分布は式(4)で計算できる。

ファジィ回帰モデルでは観測値 y_i と予測値 Y_i の差はシステム構造自体のあいまいさであると仮定し、線形システムの係数である可能性分布に依存すると考える。そこで、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い h ($0 \leq h \leq 1$) 以上で含まれるように A_j 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)で表すことができ、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、式(5)となる。したがって、ファジィ係数 A_j は式(4)の条件下で式(5)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(6)の線形計画問題に帰着できる。ここに、 X_i , 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、データがすべ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。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。

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

ここに、 A_0 : ファジィ定数項, Y_i : 予測崩壊形態 ($i=1, 2, \dots, m$; m はデータセット数)

$A_A, A_B, \dots, A_L$: 切土のり面評価要因 ($A \sim L$) のファジィ係数

$X_A, X_B, \dots, X_L$: 切土のり面評価要因 ($A \sim L$) の評価ランク (1~5)

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

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

$$1 - |(y_i - X_i^+ \beta)| / (C^+ |X_i|) \geq h \quad \dots (4)$$

$$S = \sum_{i=1}^m C^+ |X_i| \quad \dots (5)$$

$$\min_{\substack{A_j \\ C^+}} \sum_{i=1}^m C^+ |X_i| \quad \dots (6)$$

subject to

$$(1-h) C^+ |X_i| + X_i^+ \beta \geq y_i$$

$$(1-h) C^+ |X_i| - X_i^+ \beta \geq -y_i$$

$$C^+ \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, m$$

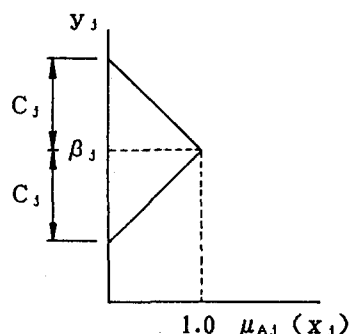
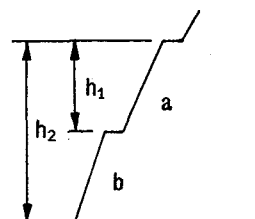


図-1 三角形ファジィ数

5. ファジィシステム同定結果によるのり面崩壊要因の評価

本研究は、山口県に広く分布する三郡変成岩(黒色片岩)における高速道路建設に伴う切土のり面工事を対象として実施した。抽出したのり面数は計36個であり、いずれも建設時に変状が生じたのり面である。なお、多段で施工されたのり面は、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。入力をのり面評価表における評価ランク、出力を崩壊形態の評価ランクとしたファジィシステムの同定結果を式(7)に示す。

$$Y = (0.05, 0.00) X_D + (0.09, 0.01) X_F + (0.13, 0.00) X_G + (0.36, 0.41) X_J + (0.37, 0.00) X_K + (0.10, 0.08) X_L \quad \dots (7)$$



h_1 : aのり面の切土高
 h_2 : bのり面の切土高

図-2 のり面の取り方

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。同図は縦軸が1～5の評価ランクに対応させた崩壊形態、横軸が36個ののり面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、中心値、下限値からなる三角形で与えられている。たとえば、のり面番号1の予測値は上限値=2.91, 中心値=2.14, 下限値=1.37, であり、観

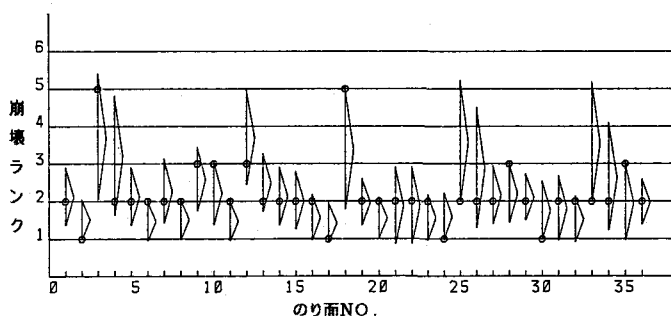


図-3 建設時のシステム同定結果

測値(実際値)は $y_1=2$ であった。これは、「全体の安定度は高いが、洗掘など局所的な崩壊が小規模ののり面崩壊が生じる可能性があるが、どちらかといえば表層剝離など小さい崩壊が生じる可能性が高い($\mu_y=0.82$)」という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。

式(7)のファジィシステムを構成する要因より、建設時におけるのり面の崩壊は、節理の状態(D)、被覆層の厚さ(F)、地下水・湧水の状態(G)、のり高さ(J)、のり勾配(K)、のり面保護工(L)の6項目に代表される要因に支配されている。特に、ファジィ係数の中心値はのり高さ(A_J)とのり勾配(A_K)が比較的大きいことから、これら2要因が崩壊規模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厚が厚いほど、また片理面の滑剤となる地下水・湧水が多いほど崩壊規模は大きくなると評価できる。さらに、のり面保護工については擁壁工などの抗土圧型保護工であれば崩壊規模は小さくなるが、植生工などの無処理型保護工では大きくなることを意味している。

予測値の可能性を示す幅は、被覆層の厚さ(F)、のり高さ(J)、のり面保護工(L)のファジィ係数に表れている。このうちのり高さについては、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崩壊しか生じないので、可能性の幅を与えるファジィ数が非常に大きく表れたものと解釈できる。なお、地山地質(A)など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については、採用された他のいずれかの要因に従属しているか、または、岩相が同じ片岩についてシステム同定を行ったため採用されなかったか、のいずれかの理由が考えられる。

6. 建設時におけるのり面崩壊と降雨との関連性

ファジィ回帰モデルによる予測値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。これらの崩壊発生の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値(図中の丸印(○)は実際に生じた崩壊形態を表す)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の累計値であり、5h~10h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。

前述のファジィシステム同定結果によれば、地下水、湧水の状態(G)のファジィ係数(A_G)の中心に値が表れているので、建設期間中における降水量や降雨に伴う地下水、湧水の状態は崩壊発生の可能性を高

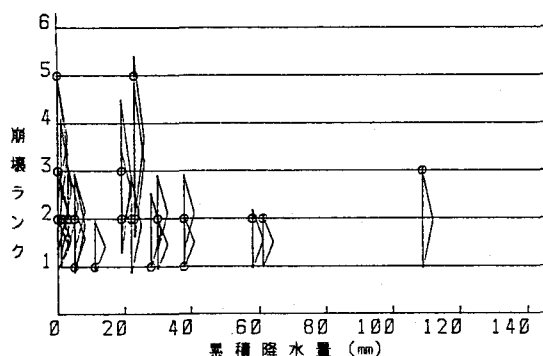


図-4 崩壊ランク～累積降水量関係図

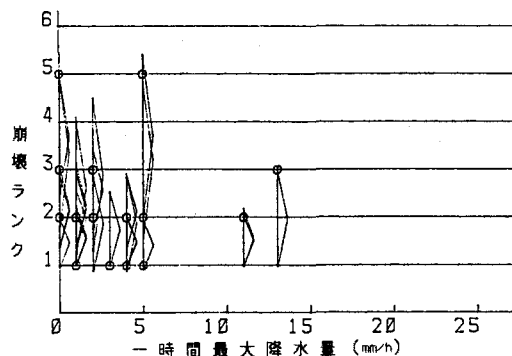


図-5 崩壊ランク～一時間最大降水量関係図

めるとともに、崩壊規模を大きくする要因になっていると評価できる。一般的にも、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。したがって、この場合は図-4,5において右上側であるほど小さな三角形が図化されるはずである。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。以上より、供用後におけるのり面崩壊は降雨中または降雨後の場合が大多数であり降雨が崩壊発生を引き金となっている場合が多いので、崩壊発生を引き金（誘因）を降雨に特定することが可能であるのに対して、建設時における崩壊誘因は応力開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の直接的誘因ではないと考えられる。

7. おわりに

本研究では、ファジィ回帰モデルによる可能性線形システムの同定は同一岩相について行うべきである⁹⁾との観点から、山口県に広く分布する三郡変成岩（黒色片岩）での切土のり面工事を対象として、入力を工事報告書などの資料に基づいて作成したのり面評価表、出力を実際に発生した崩壊形態の評価ランクとしたファジィシステムの同定を行った。その結果得られたファジィ係数より、建設時におけるのり面崩壊要因を明らかにした。さらに、崩壊可能性の予測値と崩壊時における降水量（累積降水量および一時間最大降水量）との関連性から、降雨量そのものは建設時における直接的崩壊誘因ではないことを示した。ただし、ファジィシステムによる予測結果はのり面崩壊が発生する可能性を与えるものであり、どのような誘因によって崩壊が発生するか、供用後におけるのり面崩壊要因および崩壊誘因との関連性はどうか、などについては今後の課題である。

参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領第一集第1編土工，道路厚生会，pp.96～110，1988.5.
- 2) 日本応用地質学会編：岩盤分類，日本応用地質学会，1983.
- 3) 奥園誠之：切土斜面の設計から維持管理まで，鹿島出版会，pp.1～8，1983.7.
- 4) 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.61～68，1986.5.
- 5) 土質工学会編：土砂災害の予知と対策，土質工学会，pp.155～162，1985.6.
- 6) 土質工学会編：切土ノリ面，土質工学会，pp.16～34，1987.12.
- 7) 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.67～81，1989.11.
- 8) 坂和正敏：ファジィ理論の基礎と応用，森北出版，pp.84～102，1990.2.
- 9) 鈴木昌次・古川浩平・井上洋司・中川浩二：ファジィ回帰モデルに基づくトンネル岩盤分類法の提案，土木学会論文集，第418号／Ⅲ-13，pp.181～190，1990.6.