

(24) ファジィ理論を用いたトンネル切羽の岩盤分類法

山口大学工学部 正員 鈴木昌次

山口大学工学部 正員 古川浩平

日本道路公団 正員 井上洋司

山口大学工学部 正員 中川浩二

A PROPOSAL OF ROCK MASS CLASSIFICATION FOR TUNNELS BY THE FUZZY SETS THEORY

Shoji SUZUKI, Yamaguchi University

Kohei FURUKAWA, Yamaguchi University

Yoji INOUE, J. H. P. C.

Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

In this paper, an attempt is made to apply the fuzzy sets theory to the rock mass classification of granite tunnels. By using the fuzzy regression analysis, it is possible to develop an objective and simplified equation to classify rock masses, which can be applied to a tunnel face under construction. Each classified region derived from the proposed equation has sectional and continuous values with possibility distribution. Discussions on the adequacy of the equation in rock engineering is mentioned.

1. はじめに

トンネルにおける岩盤分類は設計、施工に影響を与える岩盤の性質を等級に分類し、各々の岩盤に対応した合理的な設計、施工を行うことを目的とする¹⁾。岩盤分類法は、従来から多くの提案がなされ実用に供せられている²⁾が、岩盤の挙動が極めて多くの不確定な要因の相互作用に基づくため、分類基準は主として定性的な記述によらざるを得なかった。この結果、岩盤分類は判定を行う技術者の主観に多くを依存してきた。

日本道路公団では、従来からトンネル施工において坑内観察を統一様式で行っている。その中で、図-1に示す切羽観察記録表は、圧縮強度、風化変質等の切羽状況を示す9項目（以下、図-1に従い各項目を(A)～(I)と標記する）に対し、岩盤工学上良好な状態から不良な状態へ1～4段階の評価を行っている。また、岩盤等級はA～Eの5段階で定義している³⁾。実際の施工においては、切羽観察記録及びその他の状況を考慮して専門技術者が日本道路公団の定める地山分類に基づき岩盤等級を判定し、判定結果を岩質判定記録に記載している。以上のことから、本研究ではトンネル施工中の切羽における岩質判定は地山分類基準と技術者の経験に基づく主観を中心として構成されるファジィシステムであると考え、その上で実際の岩質判定結果から可能性線形回帰モデルにより上記システムを同定し、定量的な岩盤分類基準式を提案するものである。

2. 可能性線形回帰モデル

可能性線形システムは次式で表される⁴⁾。

$$Y_i = A_0 + A_1 X_{i1} + A_2 X_{i2} + A_3 X_{i3} + \cdots + A_n X_{in} \quad (1)$$

ここに、 X_{ij} は説明変数ベクトル*i*における*j*番目のデータである。係数 A_j は可能性分布関数であり、図-2、式(2)に与えられる対称な三角形ファジィ数を採用する。式(2)において、 β_j は中心、 C_j は可能性の幅を与

えるものである。 Y_i は出力ファジィ数であり、同様に式(3)で与えられる。

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

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

可能性線形システムはファジィ回帰モデルで同定できる。ファジィ回帰モデルでは観測値 y_i と式(1)の出力 Y_i との差を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 h ($0 \leq h \leq 1$) 以上で含まれるように A_j を決定する。 h は出力ファジィ数の幅を決定し、 h が大きい程、予測値の幅は広がりシステムのあいまい

さが大きくなる。従って、 h の値を自由に設定することによって、データ数の多少、データの信頼性等に対する判断を考慮できる。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次式で表せる。

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

式(1)の係数 A_j は、式(4)の条件下で、出力ファジィ数の幅 $C^+ |X_i|$ を最小にすることによって求められる。

3. 可能性線形システムの同定

岩盤の挙動は岩種によって異なり、(A)~(I)の各項目評価が岩質判定結果に及ぼす影響は同一ではないと考えられる。このため、ここでは広島型花崗岩地山に施工されたトンネルにおける切羽観察記録と岩質判定記録に基づいた可能性線形システムの同定を行った。入力を切羽観察記録、出力を予測岩盤等級とする可能性線形システムは、(5)式のように表せる。ここで、 $X_A, X_B, X_C, X_D, X_E, X_F, X_G, X_H, X_I$ は切羽観察項目(A)~(I)の評価点(1~4)、 Y_i は予測岩盤等級であり日本道路公団の標記A~Dを1~4の確定的な実数値に対応させている。

$$Y_i = A_0 + A_A X_A + A_B X_B + A_C X_C + A_D X_D + A_E X_E + A_F X_F + A_G X_G + A_H X_H + A_I X_I \quad (5)$$

(5)式のモデル化は次式の線形計画問題として与えられる。

$$\min_{A, C} \sum_{i=1}^n C^+ X_i \quad (6)$$

subject to

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

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

$$X_i = (X_A, X_B, X_C, X_D, X_E, X_F, X_G, X_H, X_I)^t$$

y_i : 専門技術者による観測岩盤等級

本研究で対象としたトンネルと切羽観察記録数はa、b、c、dの4トンネルについて各々39、29、12、17の計97切羽である。システムの同定は、1) a~dの各トンネル毎のデータのみを用いた場合、2) 全トンネルのデータを用いた場合の2通りを行った。尚、本研究においてはメンバーシップ関数が限界値を含めて正の値にあれば良いとして扱い $h=0$ とした。結果を以下に示す。

$$a \text{ トンネル: } Y = (.5, 0.)X_C + (.25, .083)X_D + (.167, 0.)X_E + (.292, .208)X_H \quad (7)$$

$$b \text{ トンネル: } Y = (1., 0.)X_D + (.25, .25)X_H \quad (8)$$

$$c \text{ トンネル: } Y = (.4, 0.)X_C + (.083, 0.)X_E + (.469, 0.)X_F + (.083, 0.)X_G + (.02, .159)X_H \quad (9)$$

$$d \text{ トンネル: } Y = (1., 0.)X_E + (.25, .25)X_G \quad (10)$$

$$\text{全トンネル: } Y = (1., 0.)X_D + (.25, .25)X_G + (0., .5)X_I \quad (11)$$

④ 切羽の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押し出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩れあるいは流出
⑤ 素掘面の状態	1. 自立 (普通不要)	2. 時間がたつと緩み肌落ちする (後普通)	3. 自立困難掘削後早期に支保する (先普通)	4. 掘削に先行して山を受けておく必要がある
⑥ 圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 1,000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃はね返る	2. $1,000 > \sigma_c \geq 200$ ハンマー打撃でくだける	3. $200 > \sigma_c \geq 50$ 軽い打撃でくだける	4. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー刃先くい込む
⑦ 風化変質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って変色、強度やや低下	3. 全体に変色、強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結
⑧ 割れ目の頻度	1. 間隔 $d \geq 1 \text{ m}$	2. $1 \text{ m} > d \geq 20 \text{ cm}$	3. $20 \text{ cm} > d \geq 5 \text{ cm}$	4. $5 \text{ cm} > d$ 破砕、当初より未固結
⑨ 割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土をはさむ、当初より未固結
⑩ 割れ目の形態	1. ランダム方形	2. 柱状	3. 層状、片状、板状	4. 土砂状、細片状、当初より未固結
⑪ 湧水	1. なし、滲水程度	2. 滴水程度	3. 集中湧水	4. 全面湧水
⑫ 水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出

図-1 切羽観察記録表

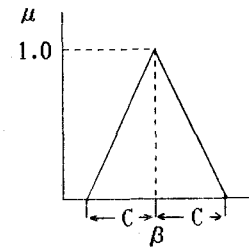
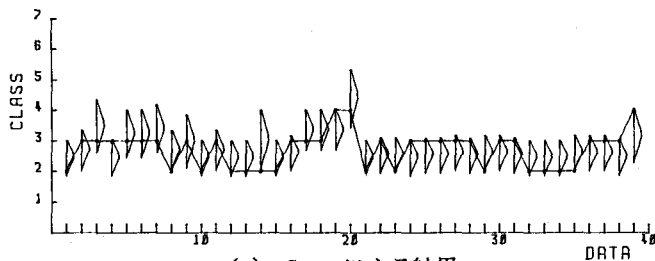
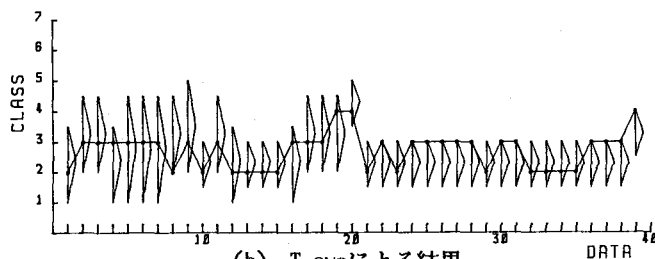


図-2 三角形ファジィ数

図-3～6は式(7)～(10) (以下、S.sysと総称する) と式(11) (以下、T.sysと言う) を用いたときの各トンネルにおける予測値である。また、図中の黒丸は専門技術者により判定された岩盤等級を示す。予測岩盤等級はファジィ数であるので、下限値、中心値、上限値で与えられる。例えば、図-5(b)の切羽データ番号10での予測値は下限値=1.5、中心値=2.25、上限値=3.0である。これは、日本道路公団の段階式等級に従って表現すれば「B等級からC等級の間であるが、B等級の可能性が大きい」という分類を与えている。ただし、前述のように、解析においては岩盤等級A～Dを1～4の数値に対応させている。このため、解析上は予測値の幅も含めて5以上の等級を与える事もある。日本道路公団の岩盤等級では、実際にE等級が定義されており³⁾、この対応関係によれば予測値Y=5はE等級、6はそれ以上となる。ところが、実際には分類等級Eは通常の

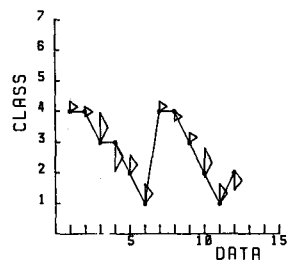


(a) S.sysによる結果

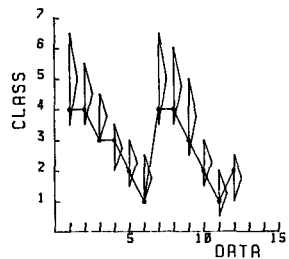


(b) T.sysによる結果

図-3 aトンネルにおける岩盤分類結果

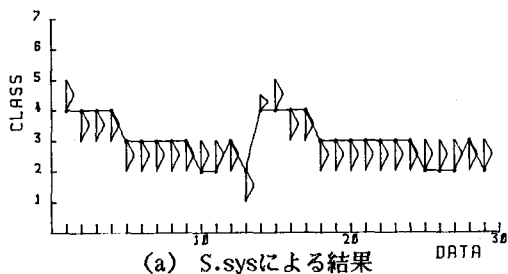


(a) S.sysによる結果

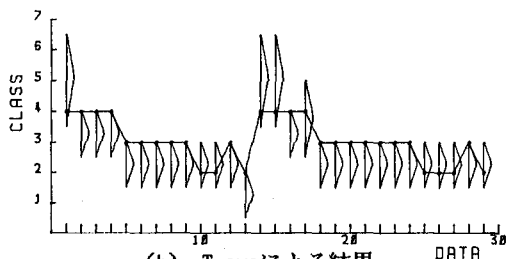


(b) T.sysによる結果

図-5 cトンネルにおける岩盤分類結果

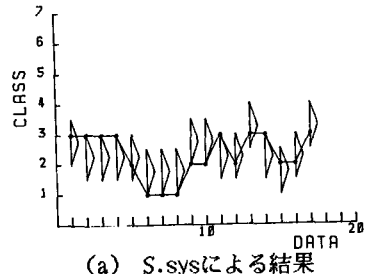


(a) S.sysによる結果

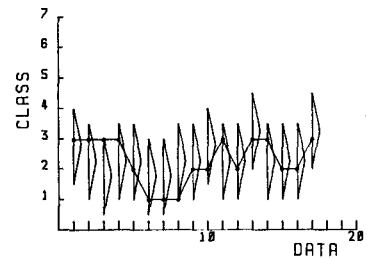


(b) T.sysによる結果

図-4 bトンネルにおける岩盤分類結果



(a) S.sysによる結果



(b) T.sysによる結果

図-6 dトンネルにおける岩盤分類結果

支保パターンでは問題のある特殊地山であると考えられ、A～D等級とは区別して扱う必要がある。この点では、専門技術者においても特殊地山を除きD等級を一つの水準値としてこれ以上は全てD等級に含める判定を行っている。従って、予測においても中心が4以上の場合は全てD等級を提示するものと判断して良い。

4. 可能性線形システムに対する考察

1) S.sys及びT.sysに採用された分類項目に着目すると、T.sysでは(D)、(G)、(I)項目のみが係数に含まれ、S.sysに含まれていたいくつかの項目が削除されている。この理由としてデータ数の多少も考えられるが、S.sysが各地山の特殊性を具体的に表現していると考えべきであろう。この点について、図-3～6よりT.sysによる予測値の幅がS.sysに比し大きくなっているのが分かる。本来、可能性線形システムの同定では可能性の幅を最小にする操作を行っている。そのため、S.sysに見られるようにデータが少なく、ばらつきが小さい場合には可能性幅が小さく、かつ技術者の判定結果は可能性の限界値にくる傾向になる。これに対してT.sysは異なる条件下のトンネルを合

めて多数のデータを用いているため幅は大きくなるが判定結果は比較的中心値に近くなる。このことは換言すればS.sysが個々のトンネルの特性を顕著に表しているためであると言うことができよう。そこで、S.sysとT.sysの特性を具体的に検討するために次の評価関数を用いる。

表-1 評価関数値

Tunnel	J _s	J _T	K _s	K _T	L _s	L _T
a	0.653	0.987	0.278	0.463	0.471	0.53
b	0.491	0.845	0.0	0.2	0.491	0.676
c	0.292	0.979	0.139	0.442	0.251	0.546
d	0.75	1.25	0.275	0.541	0.544	0.574
全	—	0.99	—	0.395	—	0.599

$$J = (1/N) \sum_{i=1}^N C_i X_i \quad (12) \quad K = (1/N) \sum_{i=1}^N \mu_{Y_i}(Y_i) \quad (13) \quad L = J(1-K) \quad (14) \quad N: \text{切羽数}$$

関数Jは予測値の平均幅であり、J値が小さいほどシステムのあいまいさが小さく、各地山の特性に適応していると考えられる。関数Kは観測値 y_i が予測値 V_i に含まれる度合の平均値であり、K値が大きいほど観測値が予測値の中心に近いことを示す。関数Lは(平均可能性幅)×(中心からの平均離れ)の和を考えたもので観測値と予測中心値との平均的な差を表現し、L値が小さいほどシステムの中心値は判定された結果に近いと言える。表-1に各関数の評価値を示す。表中、J、K、Lの下付き添え字S,Tは各々S.sys、T.sysによる評価値であることを示す。表-1の全てのトンネルにおいて $J_s < J_T$ であるのは前記の理由によるものである。同様に $K_s < K_T$ となっているのは、T.sysが可能性の幅を広げたために予測値のメンバーシップ関数値が高くなったためである。このようにS.sysの方が、T.sysより各々のトンネルの特性を具体的に表現していることが分かる。すでに述べたようにS.sys、T.sysは各々ファジィシステムとして個々あるいは全体から見た岩盤分類を表すものでありその優劣の評価は困難である。しかし、ここで参考のためにL値を見ると、 $L_s < L_T$ であり、個々のトンネルを対象に考える限りではS.sysの中心値が判定結果と近い値を与えるのはうなづけるところである。

2) 式(11)に採用された項目に着目すると、花崗岩トンネルの岩盤分類を支配する可能性線形システムは、風化変質(D)、割れ目の形態(G)、水による劣化(I)によって構成され、その他の項目は影響が小さいため現れてこない。これは、各項目が次のような従属関係にあると考えることで理解できる。

[風化変質(D) ∈ 圧縮強度(C)]

[割れ目の形態(G) ∈ 割れ目の頻度(E)、割れ目の状態(F)]

[水による劣化(I) ∈ 湧水状況(H)]

また、切羽の状態(A)、素堀面の状態(B)については他の項目の総合的結果として表されるものであろう。

3) 式(11)の係数については図-1の内容との検討を行うと、その意味が明解である。まず、(D)項目の係数 A_D の中心は1.0であり、トンネルにおける岩盤分類を支持力の観点から考えたとき、岩盤強度を表す代表項目の評価値で等級がほぼ決定されていると考えることは可能である。同様に(G)項目の係数 A_G が(0.25, 0.

25)となっているのは、割れ目は岩盤強度を表す重要な要因ではあるが、亀裂が発達していても岩盤自身が強固で十分な支持力を有する場合もあり、分類を決定的にするものではないことを示す。また、(1)項目は、岩盤そのものの工学的強度を表すものではないが岩盤の状況によっては支持力を左右する決定的な要因ともなり得る。このため比較的大きな可能性としてシステムに取り込むことは妥当であると考えられる。

4) 予測値の可能性はその幅で示される。予測値の持つ幅はデータによって異なるが、式の上からは(G)項目、(1)項目の評価点に起因するものである。これはまた施工性に直結した評価であるとも言える。すなわち、割れ目、湧水による施工性への影響である。割れ目の性状は、支保の軽重に大きな影響を与え、湧水は施工全般にわたって影響を及ぼす。例えば、図-4(b)の1、14、15切羽では特に幅が大きい、このとき(G)項目の評価点が4となっており、割れ目の性状が施工性に及ぼす可能性を評価したのと考えられる。

5. おわりに

本研究では、広島型花崗岩地山におけるトンネル施工時の岩盤分類法としてファジィ理論を基礎とした可能性線形システムの応用による分類式を提案した。また、分類式におけるファジィ係数の工学的意味を明らかにし、その有効性を示した。提案式は、切羽観察記録、岩質判定記録という専門技術者による信頼性の高い記録を分析することによって、技術者が行ってきた岩盤分類を次のように集約し、数量的に表現したものと考えることができる。

- 1) トンネルにおける岩盤分類は、基本的に岩盤の支持力(強度)に着目して行われている。
- 2) 岩盤の挙動を記述する要因を細かく検討すると多くの項目が挙げられるが、実際のトンネル岩盤分類においては、風化変質、割れ目の形態、湧水による劣化の3項目における状況判断で実用的に十分である。
- 3) 岩盤の支持力は主に風化変質の程度によって判定でき、割れ目の状況によって、ある程度推移する。また、湧水は二次的に影響するが、影響の度合は割れ目の状況に比し大きい。

以下に、本研究で得た結論と提案式の特徴を列記する。

- 1) 提案式に対する入力データが切羽観察項目における風化変質、割れ目の形態、湧水による劣化の3項目のみであるため、工学的意味付けが簡潔、明瞭に行え、切羽状態の把握が技術者の知識、経験によらず容易に行える。さらに、計算自体が非常に簡単であるため現場での適用性に優れる。
- 2) 岩盤等級は連続した区間値で与えられ、さらに区間値に対する重要度が数値で与えられるため、例えば支保工選定等、施工面への反映が広範囲に行える。

参考文献

- 1) 岩盤力学委員会第二分科会：トンネル岩盤分類の考え方、土木学会誌、Vol.64、No.11、pp.49~56、1979.11
- 2) 日本応用地質学会編：岩盤分類、日本応用地質学会、1984.
- 3) 日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル、pp.34、1985.10
- 4) 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.