

(14)トンネル岩盤分類へのファジィモデルの応用と岩種特性

日本道路公団 広島建設局 正会員 井上洋司
山口大学工学部 建設工学科 (現・(株)大本組 技術研究所) 正会員 鈴木昌次
山口大学工学部 社会建設工学科 正会員 古川浩平
山口大学工学部 社会建設工学科 正会員 中川浩二

ROCK MASS CLASSIFICATION AND ROCK CHARACTERISTICS BASED ON FUZZY MODELING

J. H. P. C. Hiroshi Inoue
Ohmoto-Gumi Co. Ltd. Shoji Suzuki
Yamaguchi Univ. Kohei Furukawa
Yamaguchi Univ. Koji Nakagawa

Abstract

A rock mass classification using the fuzzy regression analysis has been proposed by the authors for granite tunnels. In the present paper, the same method was used for slate and schist tunnels. Proposed equations show that each tunnel face must be classified individually because of the dependency of physical characteristics of each rock.

1. はじめに

トンネルの施工中におこなわれる切羽の岩盤分類においては分類要素が主として切羽の状態や開削後の状態等となる。このため、適用する基準も定性的な記述が中心となり、岩質判定は従前の施工経験、切羽および切羽周辺の目視観察を主たる参考資料とした技術者の経験的判断に多くを依存している。

筆者らは施工中の岩質判定を技術者の経験的主観を中心に構成されるシステムであると考え、可能性線形システム¹⁾を用いて岩質判定の過程を定量的に表現することを試みた²⁾。そこでは、花崗岩地山に施工されたトンネル(以下、花崗岩トンネルと言う)での切羽観察記録と岩質判定結果を用いて可能性線形システムを同定し、このシステムがトンネル施工中の切羽における岩盤分類基準式として利用できることを示した。

本報では前報²⁾の花崗岩トンネルに加え、粘板岩、黒色片岩地山に施工されたトンネル(以下、粘板岩トンネル、片岩トンネルと言う)における岩盤分類基準式を同定し、それらの比較により各岩種の一般的な物理的性質との関連において、提案式の工学的な妥当性を検討するとともに、岩種ごとのトンネル切羽としての特性を明らかにするものである。

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 (普請不要)	2. 時間がたつと硬み肌落ちする (後普請)	3. 自立困難崩壊後早期に支保する (先普請)	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. $\sigma_c \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃はね返る	2. $1000 > \sigma_c \geq 200$ 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. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマーで先くい込む
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、強度相当地に低下	4. 土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結
⑧	割れ目の傾度	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

割れ目方向の傾度(°)をみて

1. 水平 ($10^\circ > \theta > 0^\circ$)	2. さし目 ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$, $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$)	3. 右から左へ ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$)	4. 左から右へ ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$)	5. 流れ目 ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$, $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$)	6. 垂直 ($\theta \geq 80^\circ$) (最大傾斜角をとる)
---	--	--	--	--	---

割れ目方向の傾度(°)をみて

1. 水平 ($10^\circ > \theta > 0^\circ$)	2. 右から左へ ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$, $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$)	3. 右から左へ ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$)	4. 左から右へ ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$)	5. 左から右へ ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$, $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$)	6. 垂直 ($\theta \geq 80^\circ$) (切羽面のみかけの傾斜角をとる)
---	--	--	--	--	---

図-1 切羽観察記録

2. 岩盤分類基準式の同定

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)で標記する）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³⁾。また、岩盤等級は通常A～Dの4段階で定義している³⁾。施工中は、切羽観察記録及びその他の状況を考慮して技術者が地山分類³⁾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。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、下式(1)のように表せる。

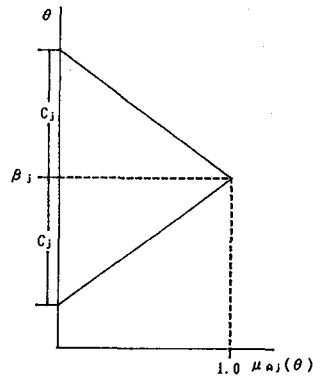


図-2 三角形ファジィ数

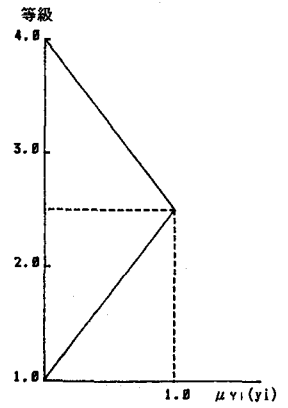


図-3 岩盤等級（可能性分布）

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

ここで、 $X_A, X_B, \dots, X_I$ は切羽観察項目(A)～(I)の評価ランク(1～4)である。係数 $A_0, A_A, \dots, A_I$ は可能性分布関数であり、図-2、式(2)で定義さ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。式(1)の Y_i は出力ファジィ数であり、同様に式(3)で与えられる。

$$A_j = (\beta_j, C_j) \quad (2) \quad Y_i = \left(\sum_{j=A}^I \beta_j^t X_{ij}, \sum_{j=A}^I C_j^t |X_{ij}| \right) \quad (3) \quad i=1, 2, \dots, N \quad N: \text{データ数}$$

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レベル 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 が大きい程システムのあいまいさが大きくなる。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式(4)で表せる。なお、 y_i は岩盤等級A～Dを1～4の実数値に対応させている。

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

$$X_i = (X_A, X_B, X_C, X_D, X_E, X_F, X_G, X_H, X_I)^t \quad y_i: \text{施工時の岩盤等級}$$

A_j は、式(4)の条件下で、出力ファジィ数の幅を最小化して求められ、次式の線形計画問題に帰着する。

$$\min_{\beta, C} \sum_{i=1}^N C^t X_i \quad \text{subject to} \quad (1-h)C^t X_i + X_i^t \beta \geq y_i, \quad (1-h)C^t X_i - X_i^t \beta \leq -y_i \quad (5)$$

前報²⁾では、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に及ぼす影響は同一ではないと考え、広島型花崗岩地山に施工されたトンネルに対する可能性線形システムを同定した。また、メンバーシップ関数は限界値を含めて正の値にあれば良いとして扱い $h=0$ としている。4トンネルにおける97切羽を用いた同定結果を下式(6)に示す。

$$Y = (1.0, 0.0)X_D + (0.25, 0.25)X_G + (0.0, 0.5)X_I \quad (6)$$

式(6)の演算はファジィ数の加法およびスカラー積として式(7)、式(8)を用いて実行できる。

$$(\beta_1, C_1) + (\beta_2, C_2) = (\beta_1 + \beta_2, C_1 + C_2) \quad (7) \quad \lambda \times (\beta, C) = (\lambda \beta, \lambda C) \quad \lambda: \text{正の実数} \quad (8)$$

例えば、ある切羽において(D)、(G)、(I)項目の評価ランクが2であるときの岩盤等級は(2.5, 1.5)となり、図-3に示すような可能性分布となる。

同様に粘板岩トンネル、片岩トンネルに対する岩盤分類基準式を同定した結果を式(9)、(10)に示す。

$$Y = (0.55, 0.0)X_C + (0.0, 0.38)X_D + (0.51, 0.0)X_E + (0.09, 0.02)X_H + (0.35, 0.0)X_I \quad (9)$$

$$Y = (0.15, 0.0) + (0.59, 0.0)X_E + (0.13, 0.0)X_F + (0.41, 0.0)X_G + (0.0, 0.38)X_H + (0.15, 0.0)X_I \quad (10)$$

同定に用いたデータは粘板岩トンネルで6トンネル210データ、片岩トンネルで3トンネル188データである。

図-4～6は式(6)、(9)、(10)を用いて岩盤等級を予測した例である。図中、縦軸は岩盤等級、横軸は対象切羽であり、切羽ごとに予測された等級の可能性分布を示している。黒丸は施工時の岩質判定結果を示す。ここで、施工時の判定等級は地山分類³⁾に準拠した段階的区分がなされている。したがって、判定等級はある程度の幅を有すると考えられるが、各等級が本来有する区間範囲を定量的に示すことは困難である。提案式の同定においても、岩盤等級を1～4の数値で線形に仮定した。このため、図-4～6においても現場判定結果を上記の数値に置き換えているが、各数値の区間を限定することができないことから、図では比較のための参考値として一点で示してある。なお、提案式による岩盤等級において5以上の可能性範囲を与えている場合がある。これは、D等級と判定される切羽の中でも特に劣悪な状態にあるものと解釈できる²⁾。

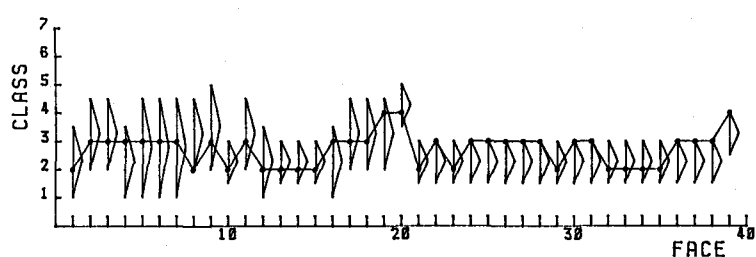


図-4 花崗岩トンネルにおける予測結果の一例¹⁾

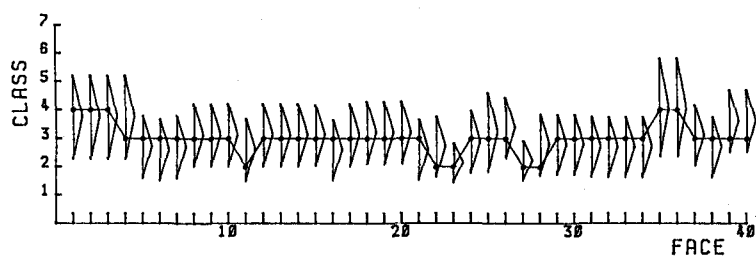


図-5 粘板岩トンネルにおける予測結果の一例

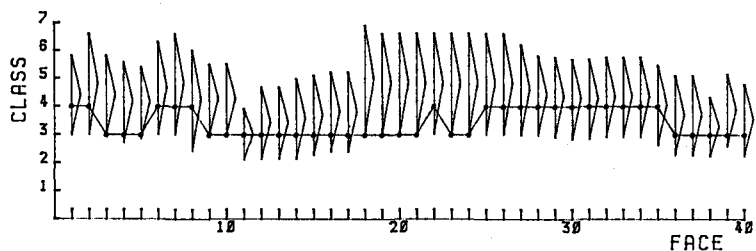


図-6 片岩トンネルにおける予測結果の一例

表-1 岩盤分類基準式のファジィ係数

項目	岩種		花崗岩		粘板岩		片岩	
			中心	幅	中心	幅	中心	幅
切羽の状態 (A)			0.	0.	0.	0.	0.	0.
素掘面の状態 (B)			0.	0.	0.	0.	0.	0.
圧縮強度 (C)			0.	0.	0.55	0.	0.	0.
風化変質 (D)			1.0	0.	0.	0.38	0.	0.
割れ目の頻度 (E)			0.	0.	0.51	0.	0.59	0.
割れ目の状態 (F)			0.	0.	0.	0.	0.13	0.
割れ目の形態 (G)			0.25	0.25	0.	0.	0.41	0.
湧水 (H)			0.	0.	0.09	0.02	0.	0.38
水による劣化 (I)			0.	0.5	0.35	0.	0.15	0.
定数項			0.	0.	0.	0.	0.15	0.

3. 提案分類式に関する考察

表-1は式(6)、(9)、(10)における各切羽観察項目に対するファジィ係数を示したものである。以下では表-1に従って、各岩種の一般的な物理的性質^{4, 5, 6, 7)}に基づいた考察をおこなう。まず、表より全岩種に共通して(A)、(B)項目が採用されていないこ

とが分かる。(A)項目は「切羽の状態」、(B)項目は「素掘面の状態」を総合的に評価する項目であり、その他の項目の総合として切羽の巨視的な挙動を評価するものであると考えられる。このため岩質の具体的な評価には用いられていないものであろう。そこで、以下においては(C)～(I)項目を考察の対象とする。

1) 圧縮強度、風化変質は切羽の岩盤強度を評価するものと考えられる。これについて、花崗岩トンネルでは(D)項目のファジィ係数に(1.0, 0.0)が与えられ、粘板岩トンネルでは(C)項目に(0.55, 0.0)、(D)項目に(0.0, 0.38)が与えられている。片岩トンネルでは(C)、(D)項目共に基準式に採用されていない。花崗岩は一般に塊状の組成構造であり、特に風化を受けやすく、風化作用による破砕状態への移行が他の岩種に比し早

い。このようなことから、花崗岩トンネルにおいて(D)項目に対するファジィ係数の中心値に1.0という支配的な数値が採用されたものと考えられる。これに対して、粘板岩は続成作用により固結度が連続的に変化するが、一般に泥質系堆積物の中で最も固結度の高い岩石であり、花崗岩類に比べ、ち密で風化を受け難い。このようなことから、粘板岩トンネルにおいては風化の進行状況よりも圧縮強度で岩盤強度に関する良好度を判断しているものと考えられる。黒色片岩は粘板岩が高圧の動力変成を受けて再結晶されたものであり、薄板状で結晶が一定方向に並び異方性が強く、また硬度が高いため風化を受けにくい。このようなことから片岩トンネルにおいては岩盤強度以外の項目を重視しているものと考えられる。

2) 割れ目の頻度、割れ目の状態、割れ目の形態等については花崗岩トンネルで(G)項目に(0.25, 0.25)、粘板岩トンネルで(E)項目に(0.51, 0.0)が与えられている。片岩トンネルでは(E)項目に(0.59, 0.0)、(F)項目に(0.13, 0.0)、(G)項目に(0.41, 0.0)と全ての項目にファジィ係数が与えられている。花崗岩では割れ目は一般に細かくランダムに存在し、頻度や開口状態等よりも柱状、片状と言った割れ目の巨視的な形態で判断した方が適正な評価ができるものと考えられる。粘板岩では、割れ目は多くの場合に層状を成すため割れ目の形態による評価では特に切羽ごとに差は生じず、頻度による評価が必要になるためと考えられる。片岩トンネルにおいては割れ目に関する全ての項目に対してファジィ係数が与えられている。しかも、全てのファジィ係数が中心値のみであり、数値的にも比較的大きい値をとる。また、結晶片岩類では微細な片理面やへき開面がよく発達しており、片理面における滑性を伴う。特に滑性についてはトンネル構造上の安定性もさることながら、施工上の安全面において大きな問題となる。このような性質により風化及び強度に関する評価の与える影響が小さく、割れ目の評価に強く依存していることは当然のことと考えられる。

3) 地下水に関する項目として湧水、水による劣化がある。これについては花崗岩で(I)項目に(0.0, 0.5)、粘板岩トンネルで(H)項目に(0.09, 0.02)、(I)項目に(0.35, 0.0)、片岩トンネルでは(H)項目に(0.0, 0.38)、(I)項目に(0.15, 0.0)が与えられている。(H)項目に関しては、粘板岩トンネルに対するファジィ係数に中心値が与えられているものの数値的に小さい。また、片岩トンネルでは幅のみが与えられている。これより、湧水は何れの岩種においても岩質判定における決定要因とはならず、施工性に与える影響を考慮した上での可能性として岩質判定に加味されているものと考えられる。また、(I)項目には粘板岩、片岩トンネルにおいて中心値が与えられているが、これら層状組織を有する岩盤においては掘削によって開口した割れ目が滑り面となり、さらに滑り面での水による滑性の増大を岩盤の良好度として考慮したものと考えられる。

なお、片岩トンネルについてのみ(0.15, 0.0)のファジィ定数項が現れる。これは花崗岩、粘板岩に比し黒色片岩がトンネル施工において基本的に不良であり、安全性に問題があることに関連するものと思われる。

以上より、同定された岩盤分類基準式は各岩種の特性を具体的に反映しており、施工時の岩質判定においても結果的には岩種の特性を考慮していると言える。また、岩質判定においては、判定に考慮する切羽観察項目、判断の基準等が岩種ごとに異なり、基準式を岩種ごとに同定する必要性が示されたと考えられる。

4. 岩盤分類基準式の評価

ここでは、提案式の精度および予測結果のあいまいさについて検討を加える。ただし、予測値は可能性分布関数で与えられている。また、現場判定結果も実際には幅を持った段階的な評価がなされているため精度面での具体的な評価は困難である。そこで、現場判定値は前述のように1~4の数値に対応させ、図-7に示すような可能性分布の幅 J_i および現場判定結果 y_i に対して予測値のとり可能性 K_i の切羽数 N に対する平均値で評価する²⁾。

$$J = (1/N) \sum_{i=1}^N C^i X_i \quad (11) \quad K = (1/N) \sum_{i=1}^N \mu_{y_i}(y_i) \quad (12)$$

$$L = J(1-K) \quad (13)$$

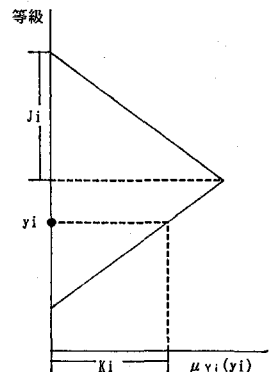


図-7 岩盤等級の評価関数

式(11)のJは予測値の平均幅であり、値が小さい程あいまいさが小さく、各地山の特性に適応していることを示す。式(12)のKは可能性の幅を考慮せず、中心値が現場での判定結果にどの程度近いかを評価するものであり、値が大きい程対応が良いことを示す。さらに式(13)のLは可能性分布の幅を考慮した上で現場判定結果と予測値の一致度を評価するもので、値が小さい程精度良く、あいまいさが少ないことを示す。なお、岩盤分類基準式による予測結果のあいまいさはファジィ係数の幅で決定される。すなわち、可能性分布の幅が狭いほど確実性が高く、あいまいさの少ない評価である。これを切羽状況から言い換えると、幅が狭く評価された切羽は施工現場での判定において、判定する技術者によらずほぼ同一の判定ができる状態であると言える。これに対して、可能性分布の幅が広い予測値は判定の範囲も広く、施工中の判定も地山によって変化が多いため評価の比較的困難な切羽であると考えられる。このようなことから可能性の幅は各岩種における地山ごとの地質的变化の大小、現場での評価の難易を数値的に表したものと考えられる。

表-2は各岩種をJ、K、L値について評価値の良好な順に並べたものである。J値より、花崗岩トンネルの岩盤分類基準式が最もあいまいさが小さいため、地山ごとの地質的变化が少なく、トンネルごとの施工中の判定結果も比較的ばらつきが少ないことが分かる。また、粘板岩トンネルの基準式が3岩種中最もあいまいであるが、K、L値においては最も施工中の判定結果に近いことから、地山ごとの変化は大きい、採用された観察項目で比較的良好的な判定がおこなえると考えられる。また、L値より片岩トンネルでは現場判定値と予測値との対応が最も悪いが、花崗岩トンネルと数値的に大きな差は無く、J値も粘板岩トンネルに比較的近いことから花崗岩、粘板岩トンネルの中間的な状況にあると考えられる。

表-2 評価関数値

J	花崗岩 (0.99)	片岩 (1.44)	粘板岩 (1.51)
K	粘板岩 (0.62)	片岩 (0.58)	花崗岩 (0.4)
L	粘板岩 (0.57)	花崗岩 (0.6)	片岩 (0.61)

5. おわりに

本研究では、既に筆者らの提案した方法²⁾を用い、花崗岩に加え、粘板岩、黒色片岩地山を対象とした岩盤分類基準式を同定するとともに岩種によるトンネル切羽としての特性を明らかにした。以下に結論を列記する。

- 1) 岩盤分類基準式は地山岩種別に定義する必要がある。
- 2) 岩盤分類における岩種ごとの影響要因を要約すると、3岩種とも地下水の影響は重要な評価要素であるが、花崗岩トンネルでは風化の状況、粘板岩トンネルでは圧縮強度と割れ目の頻度、片岩トンネルでは割れ目の状況全般であると考えられる。
- 3) 地山ごとの施工時岩質判定のばらつきは花崗岩トンネルで最も小さく、片岩、粘板岩トンネルの順に大きくなる。上記は花崗岩トンネルでの水による劣化と割れ目の形態、粘板岩トンネルでの風化変質、片岩トンネルでの湧水に対する評価の困難さに起因するものと考えられる。

参考文献：1) 田中英夫、和多田 淳三、林 薫：ファジィ線形回帰分析の三つの定式化、計測自動制御学会論文集、Vol. 22、No. 10、pp. 45～51、1986 2) 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 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) 土質工学会：岩の工学的性質と設計・施工への応用、1977.7 5) 小松田精吉・西尾潤四朗・忠岡志善・橋川邦武：わかりやすい岩盤調査の基礎知識、鹿島出版会、1985.3 6) 三木幸蔵：わかりやすい岩石と岩盤の知識、鹿島出版会、1984.5 7) 藤本治義：新地質学汎論、地人書館、1985.4