

トンネル施工中の変状可能性評価法に関する研究

山口大学工学部 正員 〇鈴木昌次
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

1. はじめに トンネル施工において変状発生予測は施工の安全、トンネル構造の安定性を考える上で非常に重要な問題である。現状では変状発生時の現場計測が困難であり、定量的なデータを得るのが困難である等の理由から、変状の予測は専門技術者の主観的判断に依存せざるをえない。日本道路公団では従来から坑内観察を行っている。この中で図-1に示す切羽観察記録¹⁾は切羽状況を具体的に説明し得る資料として重要である。さらに変状の発生した切羽の記録も多く残っていると考えられる。本研究は切羽観察記録を用いて変状可能性の定量的評価尺度を得るための方法論を考察したものである。なお、トンネル施工では多くの場合、切羽、鋼製支保、ロックボルト等の変状が複合的に発生すると考えられ外的基準を変状パターンに関し一意に分類することは不可能であると考えられる。また、切羽観察記録は技術者の目測による判定であるため主観に関わるあいまいさを有する。以上のことから、従来のクラスター分析にファジィ集合の概念を適用したファジィクラスタリング²⁾(以下、FC法と言う)を用い、変状の発生した切羽の観察記録を分類し、各クラスターに対する所属度を利用して変状可能性に関するメンバーシップ関数を構成した上で定量的評価値を算出しようとするものである。

2. 変状可能性の評価 FC法では図-2に示すようにクラスター境界付近の中間的な状態を許容し境界付近の個体が複数のクラスターに、ある程度の所属度をもって所属することができる。図中、楕円 $V_1 \sim V_3$ は、各クラスター中心ベクトル、円は個体ベクトルを示す。FC法は p 個の説明要素で記述される n 個体の集合を c 個のクラスターに分類するときクラスター内の非類似度関数として(1)式を定義し、これを最小化するアルゴリズムとして与えられている。

$$J_m(U, v) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^m (d_{ik})^2 \quad (1) \quad U = [u_{ik}], u_{ik} \in [0, 1], 1 \leq m < \infty, (d_{ik})^2 = \|x_k - v_i\|^2, x_k = [x_{jk}] \quad j=1, 2, \dots, p$$

u_{ik} は、 k 番目の個体がクラスター i に所属する度合を与える所属度関数値である。 m は所属度関数のあいまいさの程度を与える係数であり m が大きい程ファジィ性の高いクラスタリングとなる。 v はクラスター中心ベクトル、 d はクラスター中心と個体 x との距離に関するノルムである。以下に、変状を発生した n 個の切羽における切羽観察記録にFC法を適用し、 c 個のクラスターに対する所属度関数 U が求められたときの切羽の変状可能性を表現するメンバーシップ関数を作成する手順を示す。ファジィ集合論においてメンバーシップ関数は横軸に要素値、縦軸にグレード値をとって図-3のように構成される。まず、メンバーシップ関数の要素値を

① 切羽の状態	1. 安定	2. 斜面から岩塊が抜け落ちる	3. 斜面の押し出しが生じる	4. 斜面は自立せず崩れあるいは陥没
② 露出面の状態	1. 自立 (管棚不要)	2. 時間がたつと緩み肌落ちする (後管棚)	3. 自立困難露面後早期に支保する (先管棚)	4. 掘削に先行して山を受けておく必要がある
③ 圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 1000 \text{ kg/cm}^2$ ハンマー打撃は必要	2. $1000 > \sigma_c \geq 200$ ハンマー打撃で可	3. $200 > \sigma_c \geq 50$ 軽い打撃で可	4. $50 \text{ kg/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー打撃は不可
④ 風化雲質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って紫色、強度やや低下	3. 全体に紫色、強度相対に低下	4. 土砂状、粘土状、腐蝕、当初より未固結
⑤ 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
⑥ 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
⑦ 割れ目の形状	1. ランダム形状	2. 柱状	3. 層状、片状、板状	4. 土砂状、細片状、当初より未固結
⑧ 湧水	1. なし、湧水程度	2. 湧水程度	3. 集中湧水	4. 全面湧水
⑨ 水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・突出

図-1 切羽観察記録

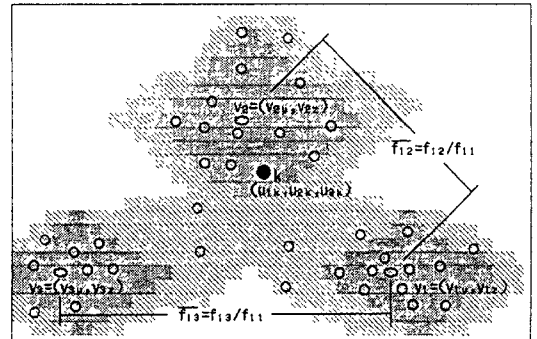


図-2 2次元空間でのクラスタイメージ

決定するために類似度行列を(2)、(3)式で定義する。

$$F(U) = (1/n)UU^T \quad (2) \quad f_{ij} = \sum_{k=1}^n u_{ik}u_{jk}/n \quad (3)$$

$F(U)$ は f_{ij} を要素とした $c \times c$ の対称行列である。 f_{ij} はクラスター i 、 j 間の類似度を表し、 f_{ii} はクラスター i 自身のまとまりの程度を表す。いま、クラスター i が、ある変状パターンを最も顕著に表すクラスターであるとする。このときクラスター i を中心とした類似度に関する順序列を構成すればメンバーシップ関数の要素値に置き換えることが可能となる。そこで、 $F(U)$ の i 行について f_{ij} を f_{ii} で正規化すれば、最も変状可能性の高いクラスター i の位置表示を1.0としたときの i 以外のクラスターの類似性に関する位置関係が明かになる。

$$\bar{f}_{ij} = f_{ij}/f_{ii}, j=1, c \quad (4)$$

図-2のクラスター間を結ぶ直線はクラスター i を中心としたときの各クラスター間の類似関係を示したものである。以上によって得られた $\bar{f}_{ij}$ の位置関係に従って各クラスターをメンバーシップ関数の横軸に配置する。さらに各クラスターの所属度をグ

レード値として対応させることによってメンバーシップ関数が完成する。例えば、図-2においてクラスター1を中心としたときの第 k 個体のメンバーシップ関数は図-3のようになる。なお、 c 、 m の設定値によって分類結果に関するあいまいさの程度が異なり、メンバーシップ関数の構成が困難になることも考えられるため、いくつかの組合せについてFC法の適用を試みる必要がある。このようにして、メンバーシップ関数作成のための規範ができると、解析に用いた以外の切羽に関する変状可能性評価を行う場合には各クラスターの中心ベクトルが既知であるので次式のように求めることができる。

$$u_{ik} = \frac{\|x_k - v_i\|^2}{\sum_{j=1}^c \|x_k - v_j\|^2} \quad (5)$$

以上より変状可能性を表現するメンバーシップ関数が構成されると、その重心値を算出し変状可能性評価値 H とする。ところで、得られた評価値のあいまいさの程度はメンバーシップ関数の形状で決定付けられる。例えば、各クラスターにほぼ同様な所属度を持つ場合は、算出された評価値もあいまいで確信度が低いと考えられる。これに対して、あるクラスターへの所属度が高く、その他のクラスターへの所属度が低い場合には確信度は高いと考えられる。これを数量的に評価するために各個体の所属度に関して次式のエントロピーを定義する。

$$h_k = \{-1/\log_a(1/c)\} \sum_{i=1}^c u_{ik} \log_a(u_{ik}) \quad (6)$$

(6)式によると個体が全てのクラスターに同程度の割合で所属するとき最もあいまいさが大きいとして $h=1.0$ となり、各クラスターへの所属度の差が大きい程あいまいさが小さいとして $h=0.0$ に近づく。すなわち、 h の値が小さい程評価値の確信度が大きいと言える。このことから、 m 、 c 決定の際の参考値および変状可能性評価値の確信度として用いることができる。

図-4は32個の切羽観察記録を用い、 $c=3$ としたときのメンバーシップ関数を3例示したものである。このときの評価値 H およびエントロピー h は表-1のようになる。

3. おわりに 本研究では、トンネル施工中の変状可能性の定量的評価法として、FC法を応用した方法を提案した。提案法はFC法によって得られた所属度関数を利用して変状可能性に対するメンバーシップ関数を決定し、変状可能性評価値を算定しようとするものである。また、メンバーシップ関数の確信度を与える数値としてエントロピーの概念を採用した。

参考文献 1)日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル、pp.34、1985.10 2)James C. Bezdek：Pattern Recognition With Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, 1981

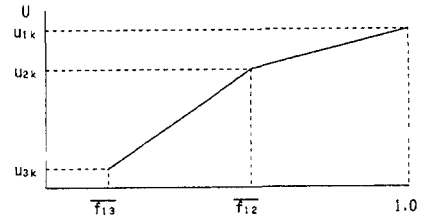


図-3 K個体のメンバーシップ関数

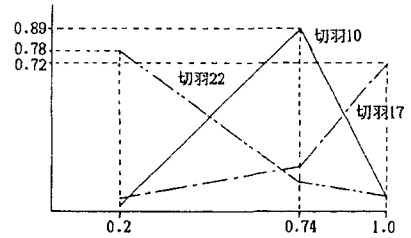


図-4 切羽のメンバーシップ関数

表-1 解析結果

FACE	h	H
10	0.75	0.31
17	0.9	0.67
22	0.34	0.61