

(71) トンネル施工における変状可能性の評価に関する一考察

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
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 社会建設工学科 正会員 中川浩二

A STUDY ON A QUANTITATIVE ESTIMATION FOR THE POSSIBILITY OF ACCIDENTS UNDER TUNNEL CONSTRUCTION

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

Abstract

In this paper, an attempt is made to apply the Fuzzy sets theory to a quantitative estimation for the possibility of accidents in a tunnel-face under construction. The method proposed here uses the degree of belonging and the similarity of Fuzzy clusters as the membership functions for the possibility of accidents. Results of a practical example analysis show the adequacy of proposed method.

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難いことや変状発生を説明付ける地山要素が明かでない等の理由から、変状の予測は専門技術者の主観的判断に依存せざるを得ない。トンネルにおける変状可能性評価は、掘削直後に予測し、それに対応した支保、対策工を適正に施工することが目的となる。このことから、変状可能性は掘削直後に容易に得られるデータを用いて、簡易な方法で予測することが必要と考えられる。本研究では、変状を含む施工実績と切羽および周辺地山の状況等の関係を分析することによって変状可能性の定量的評価尺度を得るための方法を考察した。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、用いるデータは技術者の観察による地山評価が主となると考えられ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ーリング¹⁾(以下、FC法と言う)を用い、変状の発生した切羽および周辺地山の状況を分類し、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。

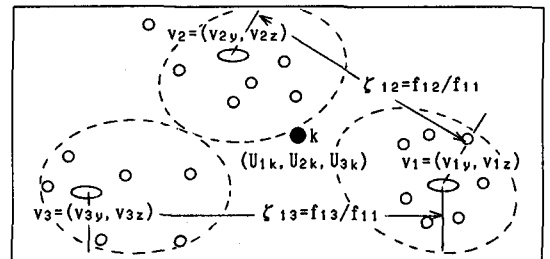


図-1 2次元空間でのクラスターイメージ

2. 変状可能性の評価

FC法では図-1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、各クラスターの中心ベクトル、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式(1)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¹⁾。

$$J_m(U, v) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^m (d_{ik})^2 \quad (1)$$

$$U = [u_{ik}], u_{ik} \in [0, 1] \quad 1 \leq m < \infty$$

$$(d_{ik})^2 = \|x_k - v_i\|^2 \quad x_k = [x_{jk}] \quad j=1, 2, \dots, p$$

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-2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決定するために類似度行列を式(2)、(3)で定義する。

$$F(U) = (1/n)UU^T \quad (2)$$

$$f_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n u_{ik}u_{jk}/n}{\sum_{k=1}^n u_{ik}u_{jk}/n} \quad (3)$$

$F(U)$ 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。

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

図-1のクラスター間を結ぶ直線はクラスター1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 ξ_{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-1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-2のようになる。なお、式(1)においては 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おこな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(5)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_k 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(6)のファジィエントロピーを定義する。

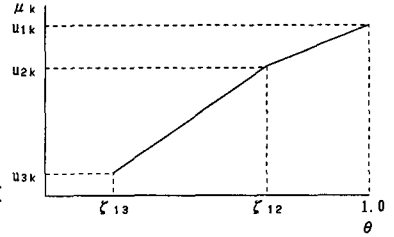


図-2 メンバーシップ 関数

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

式(6)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。

3. 解析例

ここでは、一例として花崗岩地山に施工されたトンネルの切羽について切羽観察記録を個体サンプルとしたFC法を適用し、その結果と施工実績との比較から各切羽の変状可能性の評価をおこなう。筆者らは変状に関するデータを入手しようと多くの試みをおこなったが、現在に至って未だ入手していない。提案法の本来の目的は発生した変状に関する分類に基づいたメンバーシップ関数の作成および評価にある。この意味で十分とは思われないが、施工時に採用された特殊施工は変状の発生がある程度予想された結果であると考え、特殊施工の実績のあるトンネルの施工記録をデータとして用いた。ここで、特殊施工とは日本道路公団の定める標準支保パターンに含まれない施工法を言う。解析に用いるデータ内容は前述のように掘削直後に得られ、かつ切羽の状態を具体的に記述しているものが良いと考えられる。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おこなっている。その中で図-3に示す切羽観察記録は切羽状況を表す(A)~(I)の9項目に対し岩盤工學上、良好な状態から不良な状態へ1~4ランクの評価をおこなっており、これは技術者の主観に依存するものの非常に信頼性の高いデータであると考えられる。以上より、切羽観察記録をFC法の入力データに採用するものである。

以下では全32切羽の切羽観察記録をデータとして用い、クラスター数4、パラメータ $m=1.9$ とした場合の解析例を示す。以下の記述で h_k 、 H_k の添え字 k は切羽番号を示す。表-1はFC法で求めた各切羽の所属度関数である。図-4は9次元の中心ベクトルを放射状に分解して描いたものである。本解析例では切羽観察記録のみを用いて変状可能性

(A)切羽の状態
(B)素掘面の状態
(C)圧縮強度
(D)風化変質
(E)割れ目の頻度
(F)割れ目の状態
(G)割れ目の形態
(H)湧水
(I)水による劣化

の評価をおこなっている。前述のように切羽観察記録においては各評価項目の評価ランクが高い程、切羽は工学的に不良な状態であることは明かであり、それに応じて特殊施工の数、種類も増加すると

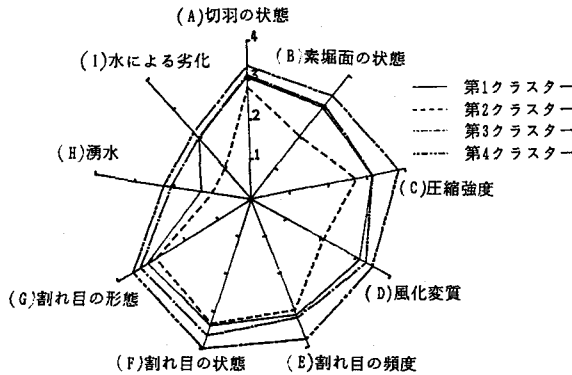


図-4 クラスター中心ベクトル

① 切羽の状態	1. 安定	2. 残面から岩塊が抜け落ちる	3. 残面の押出しを生じる	4. 残面は自立せず崩れあるいは流出
② 素掘面の状態	1. 自立 (管柱不要)	2. 時間がたつと緩み崩落する (後管柱)	3. 自立困難掘削後早期に支保する (先管柱)	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. $\sigma_c \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃は返る	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. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー打撃くい込む
④ 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
⑤ 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
⑥ 割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土をはき、当初より未固結
⑦ 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
⑧ 湧水	1. なし、湧水程度	2. 湧水程度	3. 基中湧水	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・流出
⑩ 掘削方向(切羽面をみて)	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. さし目 ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 4. 流れ目 ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 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)			
掘削方向(切羽面をみて)	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-3 切羽観察記録

表-1 各切羽の所属度関数

	U_{1k}	U_{2k}	U_{3k}	U_{4k}
1	.154	.051	.231	.564
2	.242	.068	.436	.253
3	.243	.046	.613	.097
4	.181	.052	.335	.432
5	.170	.076	.472	.282
6	.129	.046	.206	.620
7	.178	.056	.265	.501
8	.178	.056	.265	.501
9	.176	.068	.311	.446
10	.211	.025	.701	.063
11	.233	.032	.642	.094
12	.134	.018	.791	.057
13	.214	.044	.595	.148
14	.292	.075	.456	.177
15	.270	.044	.562	.125
16	.152	.060	.244	.545
17	.120	.046	.208	.626
18	.137	.041	.236	.585
19	.289	.036	.614	.061
20	.576	.136	.207	.081
21	.489	.101	.232	.178
22	.158	.671	.107	.064
23	.068	.869	.041	.022
24	.036	.931	.022	.011
25	.036	.931	.022	.011
26	.027	.948	.017	.009
27	.027	.948	.017	.009
28	.034	.935	.021	.011
29	.097	.818	.057	.028
30	.799	.059	.105	.037
31	.857	.036	.081	.026
32	.743	.060	.144	.052

考えられる。このようなことから、本解析例の場合には変状可能性に関するクラスター順位はクラスター中心ベクトルの大小関係のみから決定している。具体的には図において最も外周に位置する第4クラスターが最も変状可能性の高いクラスターであり、第3、第1、第2クラスターの順に変状可能性が小さくなると考えられる。そこで、表-1の所属度関数に対して式(2)を用いて類似度行列を算定すると式(7)を得る。次に、第4クラスターを基準とした類似度に関する順序列を構成し、グレード値に所属度関数値を対応させると各切羽の変状可能性に関するメンバーシップ関数が与えられる。要素値は式(7)の第4行に着目して、式(4)を適用すると式(8)のように計算できる。

$$F(U) = \begin{pmatrix} 0.104 & 0.026 & 0.07 & 0.04 \\ 0.026 & 0.199 & 0.022 & 0.016 \\ 0.07 & 0.022 & 0.135 & 0.063 \\ 0.04 & 0.016 & 0.063 & 0.091 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \zeta_{41} &= f_{41}/f_{44} = 0.44 & \zeta_{42} &= f_{42}/f_{44} = 0.17 \\ \zeta_{43} &= f_{43}/f_{44} = 0.69 & \zeta_{44} &= f_{44}/f_{44} = 1.0 \end{aligned} \quad (8)$$

図-5は第10、17、22切羽のメンバーシップ関数である。図の横軸は1に近いほど第4クラスターに近く危険な状態、逆に0に近いほど第4クラスターから遠く安全な状態であることを示す。変状可能性評価値は各々0.65、0.83、0.32である。

以下では、実際の施工状況との比較において評価値の妥当性を検討する。ただし、ここで算出した変状可能性評価値は[0, 1]の連続的な有限多値をとる。また、可能性に関する評価値であるので変状可能性の有無に関して[0, 1]中の一点で区別することは現実的ではない。したがって、あくまでも技術者が工学的判断をおこなう上での参考値であると考えられる。さらに、解析に用いたデータは一トンネルでの実績であることから数量的にも十分であるとは言えない。以上より、ここでの検討は解析に用いたデータ範囲内での特殊施工実績に対する相対的な考察をおこなうことになる。

1) 図-6は特殊施工数と変状可能性評価値を示したものである。図より第1～19切羽までは全て何等かの補助工法が施工されている。特に、第16～18切羽では施工時に極めて変状可能性が高いと判断されたと考えられる。これに対し、 H_k は第1～19切羽で $H_k \geq 0.6$ 、第20～32切羽で $H_k < 0.6$ であった。これより、 $H_k \geq 0.6$ の切羽は比較の変状可能性が高く、何等かの補助工法を必要とすると判定できる。特に、第16～18切羽では H_k が非常に高く、第17切羽では全切羽中で最大の変状可能性をとっていることから、実施工との対応が明かである。

2) 図-7は施工された支保パターンと変状可能性評価値を示したものである。施工された支保パター

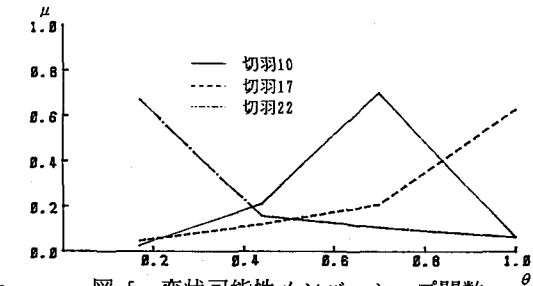


図-5 変状可能性メンバーシップ関数

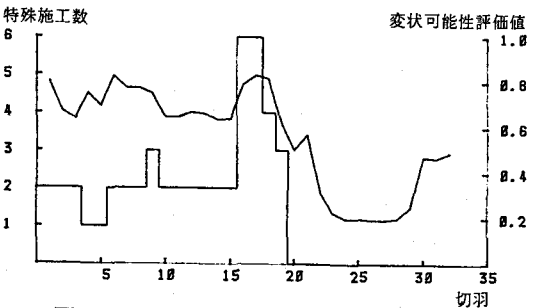


図-6 特殊施工数と変状可能性評価値

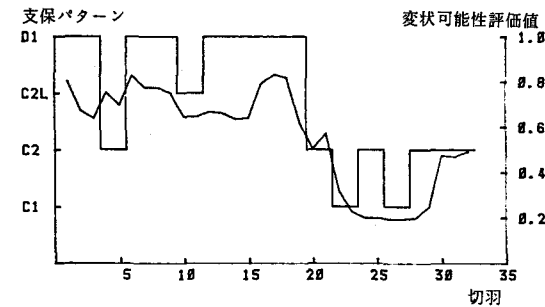


図-7 支保パターンと変状可能性評価値

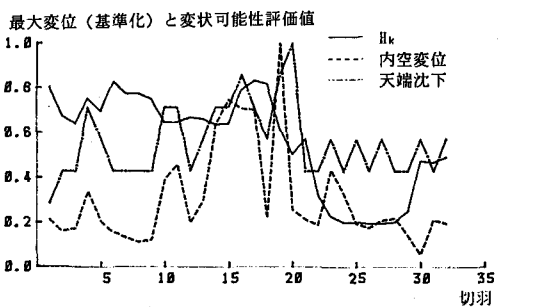


図-8 最大変位と変状可能性表価値

ンは $H_k < 0.6$ である第20切羽以降がC1またはC2パターンとなっている。 $H_k \geq 0.6$ の第1～19切羽では多くがD1パターンであるが第4、5、10、11切羽でC2またはC2Lを採用している。ここで、図-8は最大内空変位と最大天端沈下量および変状可能性評価値を示したものである。図中の変位量は各々の最大値で基準化しており、実際の最大値は内空変位37.7cm、天端沈下量7.0cmである。図より、第4、5、10、11切羽での最大内空変位、最大天端沈下量は比較的高い値を示している。これは支保パターンがC2、C2Lとなり、支保の剛性が低いいため変位が大きくなったと考えることも可能である。支保パターンの選択は切羽の良悪のみで決定されるとは限らず、また図-8に示された程度の変位量は直接変状に結び付くとは考えにくい。従って、上記のことから断定的に判断することはできないが他の切羽との相対的な関係においてD1パターンの採用が必ずしも否定的ではなかったと考えることはできよう。このようなことから採用したデータの範囲内では変状可能性0.6付近がCパターン支保の施工限界であったと考えても良いであろう。

3) 図-6より、第1,6切羽では変状可能性が0.8以上と比較的高く評価されている。ところが、特殊施工数の面から、実施工上は変状可能性が比較的低いと判断されたと推測できる。実際の施工時の地山挙動は、ここで扱ったデータ以外の多くの要因の相互作用によって構成されている。従って、ここで算定した変状可能性が全ての状況に適應すると考えることは困難である。しかしながら、1)、2)に述べたように切羽観察記録のみをデータとした解析において多くの場合に明確な対応関係が説明できることは、変状可能性評価方法としての有意性を損なうものではないと思われる。

以上より、ここで算定した変状可能性評価値は、実際の施工状況と明らかな対応を示しており、変状可能性評価法として実際の変状データを用いた場合への適用性が示されたと考える。なお、ここでは一例として切羽観察記録のみを用いた変状可能性の評価をおこなった。前述のように切羽観察記録においては各評価項目の評価ランクが高い程、切羽は工学的に不良な状態であることは明かであり、それに応じて特殊施工の数、種類も増加すると考えられる。このためクラスター中心ベクトルのみから変状可能性評価における基準クラスターを決定した。実際には変状の発生及び程度の大小に関与すると思われるデータを適宜採用した上で h_k が極度に高くないようクラスタリングをおこない、さらに変状の発生パターンとの対比において最も危険性を含むと考えられるクラスターを基準クラスターとして選択する判断が必要であろう。

4. おわりに

本研究では、トンネルにおける変状可能性の定量的評価法として、ファジィクラスタリングを応用した方法を提案した。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。さらに、手法を具体的に示すための例として日本道路公団の切羽観察記録を用いた切羽の相対的な評価を通して提案法の実験面での検討をおこない有効な結果を得た。以下に本研究で得られた結論を列記する。

1) ファジィクラスタリングの結果を用いてトンネル施工における変状可能性に関するメンバーシップ関数を構成することが可能であり、これによって定量的な変状可能性評価値の算定をおこなうことができる。

2) 切羽観察記録を用いた解析より、施工時の切羽における変状可能性評価値は実際の施工状況と良い対応を示し、提案法においては切羽観察記録が支保の施工以前に観測されるデータとして有効に利用できる。

なお、ファジィクラスタリングのアルゴリズムとしては本研究に採用した以外に多くのものが提案されており、形成するクラスターの形状に特徴を有する。例えば線形クラスター、平面クラスターに分類するためのアルゴリズム^{1,2)}も提案されているし、上記とは異なる観点からのアルゴリズム⁷⁾もある。この点について、トンネルにおける変状可能性を与えるクラスターの本来的な形状を知ることが不可能であるため、実際上はできるだけ多種類のアルゴリズムを用いて最も良い適合を示すクラスターを探索することが必要であると思われる。

参考文献: 1) James C. Bezdek: Pattern Recognition With Fuzzy Objective Function Algorithms,

Plenum Press, 1981 2) 大隅 昇: ファジィクラスタリング、数理科学、No. 191、pp. 34～41、1979. 5