

ファジィクラスタリングを用いたトンネルにおける 変状可能性の定量的評価法に関する提案

A PROPOSAL FOR A QUANTITATIVE ESTIMATION METHOD FOR THE POSSIBILITY OF ACCIDENTS UNDER TUNNEL CONSTRUCTION BY THE FUZZY CLUSTERING METHOD

鈴木昌次*・古川浩平**・井上洋司***・中川浩二****

By Shoji SUZUKI, Kohei FURUKAWA, Hiroshi INOUE and Koji NAKAGAWA

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. The proposed membership functions lead to a crisp value, namely "Possibility indicator". In addition, "Fuzzy distribution entropy" is defined so as to know the certainty of the clustering parameters and Possibility indicator which are used. In order to verify the applicability of the proposed method, a estimation sample is demonstrated.

Keywords : granite tunnel, accidents in tunnel under construction, fuzzy clustering, possibility indicator

1. はじめに

トンネル施工において変状発生を予測し、これに対する適正な支保パターン、対策工を施工することは施工の安全、トンネル構造自体の安定性を考えるうえで非常に重要な問題である。このためには掘削直後に変状の発生およびそのタイプを予測し得る定量的かつ客観的な評価尺度を定義しておくことが望ましいと考えられる。しかしながら、従来から変状の予測は専門技術者の主観的判断に多くを依存しており、定量的な変状可能性または信頼性の評価といった尺度はいまだ定義されるに至っていないようである。この理由として、1) 岩盤の挙動を予測するための定量的評価方法がなかった。2) 変状発生時には現場レベルでのデータの観測、記録が困難であり、その時点での状況を数量的に記述したデータを得るのは困難である。そのため変状に関するデータが一般に公表されるケースが非常に少ない、等が考えられる。

トンネルの変状に関する過去の研究例としては、頻度分布に基づき最大内空変位量と変状タイプの関係を調べた研究¹⁾、切羽観察記録、内空変位、天端沈下量をデータとして数量化理論Ⅱ類を用いた変状発生、タイプ予測を行った研究²⁾がある。上記は、トンネルにおける変状の発生を定量的に評価する意味において重要な研究である。しかしながら、下記の点において問題を有すると考えられる。

1) トンネルにおける変状可能性評価の主な目的は掘削直後に変状を予測し、それに対応した支保、対策工を適正に施工することである。このことを考慮すれば支保の施工後に、ある程度の時間をおいて得られる計測値、たとえば最大内空変位、天端沈下量等を用いることは現実的でないと考えられる。

2) トンネルの変状に関しては上述のように、一般にデータが公表されることが少なく、多くのトンネルから統計的に有意とするための十分なデータ数を得ることが困難である。そのため、従来の統計学的手法では現象を解明するために十分であるとはいいがたい。

3) 一般に判別分析、数量化理論等は具体的に記述された外的基準との明確な対応づけが可能である場合に適用することができる。しかしながら、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

* 正会員 山口大学助手 工学部建設工学科
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

** 正会員 工博 山口大学教授 工学部土木工学科 (同上)

*** 正会員 日本道路公団広島建設局 建設第二部
(〒730 広島市中区土橋町 7-1 中国新聞ビル 6F)

**** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

複合的に発生すると考えられ外的基準を変状の種類、程度等に関し一意的に分類することは不可能であると考えられる。したがって、基本的に変状可能性の評価は外的基準の存在しない問題であるといえよう。

4) 切羽観察記録は技術者が目視によって判定するものである。このため計測値と異なり、ある程度の主観にかかわるあいまいさを有する。このようなデータが、判別された群の境界付近に存在する場合には上記の解析手法では表現に無理がある。

一方、信頼性、健全度の評価、予測問題については従来から橋梁構造³⁾、耐震設計⁴⁾等の分野においてファジィ集合論を応用した研究例が多くみられる。これらは、専門技術者の主観を適切な言語変数の採用あるいはアンケートに基づく同定等の方法でメンバーシップ関数に置き換えファジィ積分、ファジィ数量化理論等を用いて評価したものである。ファジィ集合論は上記のように技術者の主観、データのあいまいさ等を具体的に解析できるため、評価問題等に関して非常に有効な方法であると思われる。特にトンネル施工においては地山の状態を定量的な数値で表現することはきわめて困難であり、多くの場合、観測者の主観に依存した定性的な記述に頼らざるを得ない。この点からもファジィ集合論を用いることにより上記1)、2)、4)への対応が可能と思われる。

しかしながら、一般に技術者の主観をファジィ集合論で必要となるメンバーシップ関数に置き換えるのは非常に困難である。特にトンネルにおける変状については構造材料が挙動に関する定量的評価のきわめて困難な岩盤であり、また湧水、偏圧等の外的条件との複雑な相互作用を伴うため一層の困難さを伴うことが予想される。そこで、本研究では技術者の経験的主観を直接扱うのではなく、技術者によって観測されたデータおよびその他の支保建て込み以前の計測値に対し、ファジィ集合論に基づく分析法を適用することで変状発生の可能性をメンバーシップ関数に表現することを考える。

ファジィ集合論に基づく観測データ処理の方法にはいくつかある^{5),6)}が、変状を生じた切羽にかかわるデータを十分に入手できたとしても、前記3)の問題点に対応するためには外的基準を設定することなくデータの特徴を抽出する必要がある。このため、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⁷⁾を用いる。つまり、変状にかかわるデータをファジィクラスタリングによってあいまいなクラスターに分類し、変状の発生パターンとクラスターの存在状況、データ群の各クラスターにおける所属度との関係を明らかにすることによって変状可能性に関するメンバーシップ関数を構成したうえで定量的評価値を算出しようとするものである。

すでに述べたように、トンネルの変状に関するデータの入手は非常に困難であり入手できたとしても、その多くは観測者の主観に依存した記録になると考えられる。このことを考慮し、さらに明確な外的基準を設定することの困難なトンネルの変状可能性を定量的に扱うにはファジィクラスタリングの考え方が最も適していると考えられる。

土木分野でのファジィクラスタリングの応用例には佐佐木、秋山の研究⁸⁾があるが、データに対する外的基準に予備情報がなく、あいまいである場合の分析方法として有効であることが示されている。

本文では、まずファジィクラスタリングについての説明を加えたくてトンネルの変状可能性を表現するメンバーシップ関数の構成方法を示す。次に、定量的な評価値の算定方法について述べる。さらに解析例を通して提案法の変状可能性評価方法としての有効性について考察を加える。ただし、実際の変状に関するデータは前述のように入手が非常に困難であり、著者らの努力した範囲内では入手が不可能であった。このため、本論文の例題として必ずしも十分に適切とはいえないが、提案法を具体的に示すため、一例として日本道路公団の行っている坑内観察の中から切羽観察記録をデータとして採用し、切羽の相対的な変状可能性の評価を試みる。なお、本研究では掘削直後の崩落、切羽の流出等を除く鋼製支保、ロックボルト等の設計支保における変状を対象とする。

2. ファジィクラスタリング

ファジィクラスタリングは従来から統計的手法として多方面で用いられているクラスタリング手法(以下、ハードクラスタリングという)にファジィ集合の概念を導入したものであり、Ruspini⁹⁾の提案以後、多くの研究がなされてきた。ファジィクラスタリングは、ハードクラスタリングがクラスター境界付近の個体についても明確にいずれかのクラスターに所属させるのに対し、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ように定式化したものである。したがって、ハードクラスタリングにおいてはクラスターに対する所属度が{0,1}の2値であったものが、ファジィクラスタリングでは[0,1]の多値に拡張されたことになる。

ファジィクラスタリングのアルゴリズムとしては従来から多くの提案がなされているが、ここでは、Bezdek, Dunn¹⁰⁾の「Fuzzy objective function algorithm」(以下、FOC法という)を採用した。FOC法は、分割最適化型の分類手法の1つと考えられ、クラスターの等価基準として、クラスター内平方和を採用し、これを目的関数

とした最小化を行うアルゴリズムである。

いま、個体数 n のサンプル集合 X を c 個のクラスターに分類することを考える。各個体サンプルは p 個の説明要素をもつベクトルで特徴付けられているものとする。このとき、 p 次元実数空間内での c 個のクラスター分類を考えることになる。そこで、非類似性の尺度としてクラスター中心と個体間の距離を用い、クラスター内平方和を用いた誤差関数を式 (1) で定義する。以下において添字 k は個体番号、 i はクラスター番号を示す。

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

$$U = [u_{ik}], \quad u_{ik} \in [0, 1]$$

$$1 \leq m < \infty$$

$$\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, \quad \text{for } k=1, 2, \dots, n \dots \dots \dots (2)$$

$$\sum_{k=1}^n u_{ik} > 0, \quad \text{for } i=1, 2, \dots, c \dots \dots \dots (3)$$

$$(d_{ik})^2 = \|x_k - v_i\|_A^2 = (x_k - v_i)^T A (x_k - v_i) \dots \dots \dots (4)$$

$$x_k = [x_{jk}] \quad j=1, 2, \dots, p$$

$$v_i = \left\{ \sum_{k=1}^n (u_{ik})^m x_k / \sum_{k=1}^n (u_{ik})^m \text{ for } i=1, 2, \dots, c \right. \\ \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 u_{ik} は k 番目の個体が第 i クラスターに所属する割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パラメーターである。 v_i は第 i クラスターの中心を与える p 次元のベクトルである。 d_{ik} はクラスター中心ベクトル v_i と個体ベクトル x_k との距離に関するノルムである。所属度関数 U は式 (2), (3) の条件下で式 (6), (7) を反復修正することによって式 (1) を最小化して求められる。

if $I_k = \phi$ then,

$$u_{ik} = 1 / \left[\sum_{j=1}^c (d_{ik} / d_{jk})^{2/(m-1)} \right] \dots \dots \dots (6)$$

$$1 < m < \infty$$

if $I_k \neq \phi$ then,

$$u_{ik} = 0 \quad \text{for } \forall i \in \bar{I}_k \quad \text{and} \quad \sum_{i \in I_k} u_{ik} = 1 \\ \dots \dots \dots (7)$$

$$I_k = \{i | 1 \leq i \leq c ; d_{ik} = \|x_k - v_i\|_A = 0\}$$

$$\bar{I}_k = \{1, 2, \dots, c\} - I_k$$

$$x_k = [x_{jk}] \quad j=1, 2, \dots, p$$

式 (6), (7) において I_k は第 k 個体ベクトルと同一の中心ベクトルを有するクラスターの集合であり、式 (6) における特異点を示すものである。このため反復修正時には特異点処理として式 (7) を適用する。なお、FOC 法の定式においては式 (6) に示されるように m

$\rightarrow 1$ のときハードクラスタリングに帰着する¹¹⁾。また、 $m \rightarrow \infty$ のとき u_{ik} はすべてのクラスターに対して $(1/c)$ となる。 $m \rightarrow \infty$ での状態はすべての個体がすべてのクラスターに同一の所属度を有することを示し、最もあいまいな状態であると考えられる。したがって m が大きいほどファジィ性の高いクラスタリングとなる。

式 (4) 中の A は、 $p \times p$ の次元をもつ任意の正定値実数行列であり、内積ノルムにおける重みを与える。重み行列 A のとり方で分類されるクラスターの形状が異なることが知られており、以下のものが提案されている¹⁰⁾

$$A_E = [I] \dots \dots \dots (8)$$

$$A_D = [\text{diag}(\sigma_j^2)]^{-1} \dots \dots \dots (9)$$

$$\sigma_j^2 = (1/n) \sum_{k=1}^n (x_{jk} - \bar{x}_j)^2$$

$$\bar{x}_j = (1/n) \sum_{k=1}^n x_{jk}$$

$$A_M = [\text{cov}(x)]^{-1} \dots \dots \dots (10)$$

$$\text{cov}(x)_{ij} = (1/n) \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)$$

式 (8) を用いた内積はユークリッドノルムを与え、超球面形状のクラスターを発生する。式 (9) は超楕円体のクラスターを発生する。式 (10) は Mahalanobis ノルムであり式 (9) と同様に超楕円体状のクラスターとなる。

3. トンネルにおける変状可能性の評価

ここでは、変状を生じたトンネル切羽のデータがある程度入手できたとして、FOC 法を用いたトンネル変状可能性の定量的な評価方法を説明する。前述のように、変状は切羽、鋼製支保、覆工等に複合的に発生すると考えられ、各種変状の程度を含めた組合せを事前に設定することは困難であると考えられる。そこで提案法では、まず変状が発生した切羽に関するデータ (複数の説明要素を含む) を外的基準を与えることなく同様な特徴を有するクラスターに分類する。次におのおののクラスターがどのような変状パターンを示すものかを判断する。さらにおのおののクラスターを中心としたときの他のクラスターとの類似関係を用いて該当する変状パターンの発生に対する可能性を表現するメンバーシップ関数を構成するものである。

なお、変状の発生状況は地山を構成する花崗岩、粘板岩等の岩種によって大きく異なると考えられる。したがって、提案法は岩種ごとのデータ群に対して適用するべきである。また、ここで扱うデータは上記のように切羽の状態を具体的に記述するものが中心となることから提案法は岩種ごとのトンネル切羽における変状可能性の評価法であるといえる。

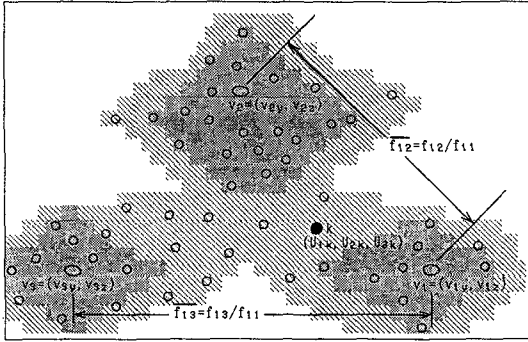


図-1 二次元空間におけるクラスターイメージ

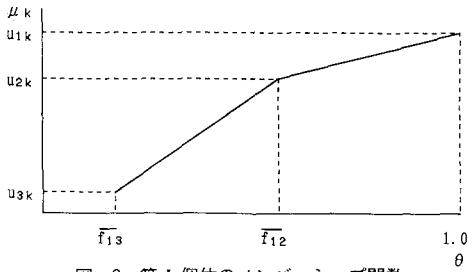


図-2 第k個体のメンバーシップ関数

いま、トンネル掘削直後に得られた切羽断面を記述できるデータが n 個の切羽について与えられており、各データは p 個の説明要素で特徴付けられているものとする。上記データを FOC 法に適用し、 c 個のクラスターに対する所属度関数 U が求められたとする。分類された各クラスターは p 次元空間内に超球形、もしくは超楕円体を呈して存在する。また、各切羽のデータは複数のクラスターに、ある割合で所属する。これを可視的に表わすと、たとえば (y, z) 座標で記述される二次元空間内で規定された任意の個体群を想定し、3 個のクラスターに分類した場合は図-1 のようになる。図中、楕円 $V_1 \sim V_3$ は各クラスターの中心ベクトル、円は個体ベクトルの平面内位置を示す。黒丸は以下の説明に用いる代表個体 k であり、1~3 の各クラスターに対し u_{1k} , u_{2k} , u_{3k} の所属度をもつ。

次に、FOC 法の結果として得られた所属度関数 U を用いて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 θ 、縦軸にグレード値 μ をとって図-2 のように構成される。ここでは、要素値にクラスター間の類似度、グレード値に各クラスターへの所属度を対応付けるものである。なお、類似度とは空間内でのクラスター中心ベクトル相互の位置的な関係をいい、相互の距離が大きいとき類似度が低く、小さいとき類似度が高いと考える。

1) メンバーシップ関数の要素値を決定するために、

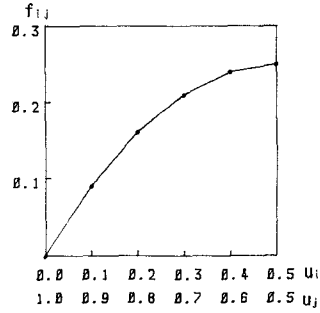


図-3 類似度関数値 ($n=1, c=2$)

分類されたクラスター自身およびクラスター間の類似度を与える類似度行列を下式で定義する⁷⁾。

$$F(U) = (1/n)UU^T \dots\dots\dots (11)$$

$$f_{ij} = \sum_{k=1}^n u_{ik}u_{jk}/n \dots\dots\dots (12)$$

$i=1, 2, \dots, c \quad j=1, 2, \dots, c$

$F(U)$ は $c \times c$ の対称行列であり、 f_{ij} は $F(U)$ の行列要素である。 f_{ij} はたとえば、 $n=1, c=2$ の場合に式(12)を適用すると u_1, u_2 の値の組合せに関して図-3 が得られる。これよりクラスター間の類似度が高くなると f_{ij} の値が大きくなるのがわかる。また $u_i=0.0, u_j=1.0$ のときは $f_{ij}=0.0$ となり類似度は低く、2 値理論に基づくハードクラスタリングに帰着することがわかる。このことから、 f_{ij} はクラスター i とクラスター j 間の類似度を表わすものと考えることができる。また f_{ii} は第 i クラスター自身のまとまりの程度を表わすとも考えられる。

2) いま、第 i クラスターが、ある変状パターンを最も多く含んだクラスターであるとする。このとき第 i クラスターが最も変状可能性を強く示すクラスターであると考えられる。これより、第 i クラスターを基準とした類似度に関する順序列を構成すれば変状可能性を表わす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、 $F(U)$ の第 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第 i クラスターの位置表示を 1.0 としたときの第 i クラスターに対するその他のクラスターの類似度に関する順序および位置関係が明らかになる。

$$\bar{f}_{ij} = f_{ij}/f_{ii} \quad j=1, 2, \dots, c \dots\dots\dots (13)$$

図-1 のクラスター間を結ぶ直線は第 1 クラスター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} の大小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。

3) 以上よりメンバーシップ関数の要素値が決定されると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。たとえ

ば、図一1において第1クラスター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一2のようになる。

以上の処理によって切羽の変状可能性を表現するメンバーシップ関数が構成されたが、このままでは変状可能性評価値としては扱いにくいので、最終的に決定された各切羽のメンバーシップ関数を1つの代表値に集約することが必要である。これにはいくつかの方法が考えられるが、最も一般的な方法としてメンバーシップ関数の重心を計算して代表値とすることができる。たとえば、図一2に示す第 k 個体のメンバーシップ関数については下式 (14) で定義される。

$$H_k = \int \theta \mu_k(\theta) d\theta / \int \mu_k(\theta) d\theta \dots\dots\dots(14)$$

式 (14) を各切羽のメンバーシップ関数に適用して得られた H_k の値が目的とする切羽の変状可能性評価値である。

なお、このようなメンバーシップ関数は着目するクラスターごとに作成されるので各切羽ごとに c 個のメンバーシップ関数が形成される。このため、 c 個のメンバーシップ関数の中から目的とする物理現象（ここでは、変状パターンの発生可能性、程度）を最も良く表現し得るものを選択する必要がある。 c 個のメンバーシップ関数から最適なものを選択する方法としては各クラスターの中心ベクトルとクラスターに含まれる切羽位置で発生した変状パターンとの比較において評価するのが最も簡潔であろう。このためには用いるデータを同一基準（たとえば、数値的に大きいほど悪条件であるというような）で整理しておくことが必要であろう。また、クラスター数 c 、マトリックス A 、係数 m の設定値によって分類結果が異なるため、いくつかの組合せについて FOC 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、式 (6) を用いて次式のように求めることができる。

$$u_{ik} = \|x_k - v_i\|_A^2 / \sum_{j=1}^c \|x_k - v_j\|_A^2 \dots\dots\dots(15)$$

ところで、評価値 H_k は式 (14) に示すようにメンバーシップ関数の形状で決定づけられる。たとえば、各クラスターにはほぼ同様な所属度をもつ場合は、算出された評価値もかなり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かなり高く、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。前述したように $m \rightarrow 1$ のとき FOC 法はハードクラスタリングに帰着することからもメンバーシップ関数は m の設定値に依存し、また c の設定

値にも依存する。そこで、評価値のあいまいさを判定する基準値を定義しておけば m 、 c の設定および評価値の利用において便利である。Bezdek らは分類されたクラスターのあいまいさを測る尺度として Shannon の確率的エントロピーの概念を応用した Partition entropy を次式で定義している¹⁰⁾。

$$P(U, c) = - \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ik} \log_a(u_{ik}/n) \dots\dots\dots(16)$$

$$a \in (1, \infty)$$

$$u_{ik} \log_a u_{ik} = 0 \text{ if } u_{ik} = 0$$

式 (16) はクラスタリングにおけるあいまいさを総合的に評価したものであるが、本研究においては各個体の所属度に関するエントロピーを評価する必要がある。このため式 (16) と同様の考え方に基いて次式を定義し、Fuzzy distribution entropy とよぶこととする。

$$h_k = |1/\log_a(1/c)| \sum_{i=1}^c u_{ik} \log_a(u_{ik}) \dots\dots\dots(17)$$

$$a \in (1, \infty)$$

$$u_{ik} \log_a u_{ik} = 0 \text{ if } u_{ik} = 0$$

式 (17) は第 k 個体の各クラスターへの所属度に関するあいまいさを総合的に評価したものと考えられ、第 k 個体がすべ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 $h_k = 1.0$ となり、各クラスターへの所属度の差が大きいほどあいまいさが小さいとして $h_k = 0.0$ に近づく。すなわち、 h_k の値が小さいほど評価値 H_k の確信度が大きいといえる。このことから、 h_k を m 、 c 決定の際の参考値および最終的に算出された変状可能性評価値の確信度として用いることができる。

4. 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 FOC 法を適用し、その結果と実施工のデータとの比較から各切羽の相対的な変状可能性の評価を行う。ただし、前記のように著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行ったが、現在に至ってはまだ入手していない。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いう。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行っている。その中で図-4に示す切羽観察記録は切羽状況を表わす①~⑩の9項目に対し岩盤工学上、良好な状態から不良な状態へ1~4段階の評価を行っており¹²⁾、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FOC法の入力データに採用するものである。

表-1は花崗岩地山に施工されたトンネルにおいて内

㉓	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
㉔	素掘面の状態	1.自 (普請不要)	2.時間かたつと硬み肌落ちする(後普請)	3.自立困難掘削後早期に支保する(先普請)	4.掘削に先行して山を安定しておく必要がある
㉕	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. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー対充くい込む
㉖	風化変質	1.なし・健全	2.岩面に沿って変色、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、砂砕、当初より未固結
㉗	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. $5\text{cm} > d$ 砂砕、当初より未固結
㉘	割れ目の状態	1.密 着	2.部分的に開口	3.間 隙	4.粘土をはさむ、当初より未固結
㉙	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
㉚	湧水	1.なし、滲水程度	2.滴水程度	3.集中湧水	4.全面湧水
㉛	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-4 切羽観察記録

空変位、天端沈下量の計測が実施された地点での切羽観察記録、採用された支保パターンおよび最大変位量、特殊施工を示したものである。表中、観察項目①~⑩の判定ランクに小数点以下の値があるのは同一項目中の2つ以上のランクにチェックがなされていた場合に、その平均値をとったためである。以下では表-1に示した切羽観察記録をデータとして用い、クラスター数を3とした場合(以下、モデル1という)と4とした場合(以下、モデル2という)の解析を行う。なお、重み行列には式(8)を採用した。以下の記述で h_k 、 H_k の添字 k は切羽番号を示す。

表-2はモデル1、2において、式(1)におけるパラメーター m の値を変化させたときの切羽数 n に関する h_k の平均値である。これより、 m 、 c の増加に従って h_k が増加していることがわかる。また、図-5はモ

表-2 m 、 c が変化した場合の h_k の平均値

m	MODEL1 ($c=3$)	MODEL2 ($c=4$)
1.5	0.3103	0.3281
1.8	0.5375	0.5761
1.9	0.5951	0.6389
2.0	0.8448	0.7229
2.5	0.8078	0.8493

表-1 花崗岩地山に施工されたトンネルにおける観測値および施工状況

切羽	切羽観察記録									支保パターン	最大変位mm		特殊施工*
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨		⑩	内空	
1	4	3	4	4	4	4	3	2	2	D1	7.9	2.0	①②
2	3	3	3	3	4	4	3	2	2	D1	5.9	3.0	①②
3	3	3	3	3	3	4	3	2	2	D1	6.4	3.0	①②
4	3	3	4	4	3	4	4	2	2	C2	12.7	5.0	①
5	3	3	3	3	3	4	4	3	2	C2	7.7	4.0	①
6	4	3	4	4	4	4	4	2	2	D1	5.8	3.0	①②
7	3	3	4	3	4	4	3	2	2	D1	4.9	3.0	①②
8	3	3	4	3	4	4	3	2	2	D1	4.1	3.0	①②
9	4	3	4	4	3	4	3	3	3	D1	4.5	3.0	①②③
10	3	3	3	3.5	3	3.5	3	2	2	C2L	14.7	5.0	①③
11	3.5	3	3	3.5	3	3.5	3	2	2	C2L	17.1	5.0	①②
12	3	3	3	3.5	3	3.5	3.5	2	2	D1	7.4	3.0	①②
13	3	3	3	3.5	3	3.5	4	2	2	D1	11.1	4.0	①②
14	3	3	3	3	3.5	3	4	2	2	D1	23.9	5.0	①②
15	3.5	3	3	3	3.5	3.5	3	2	2	D1	28.0	5.0	①②
16	3.5	4	4	3.5	4	4	3.5	3	3.5	D1	26.4	6.0	①②③④⑤⑥
17	3	4	4	3	4	4	4	2.5	2	D1	26.2	5.0	①②③④⑤⑥
18	3	4	3.5	3.5	4	4	4	2	2	D1	8.1	4.0	①②③⑤
19	3	3	3	3	3	3.5	3	2	2	D1	37.3	6.0	①②③
20	2.5	2.5	3	3.5	3	3	3	1	2	C2	9.6	7.0	
21	3	3	4	3	3.5	3	3.5	1	2	C2	8.0	3.0	
22	2	2	3	2	3	3.5	2	1	1	C1	7.0	3.0	
23	2.5	2	3	2	3	3	2.5	1	1	C1	16.3	4.0	
24	3	2	2.5	2	3	3	3	1	1	C2	12.2	3.0	
25	3	2	2.5	2	3	3	3	1	1	C2	7.3	4.0	
26	3	2	2.5	2	3	3.5	3	1	1	C1	6.5	3.0	
27	3	2	2.5	2	3	3.5	3	1	1	C1	7.7	4.0	
28	3	2	3	2	3	3.5	3	1	1	C2	8.1	3.0	
29	2.5	2	3	2.5	3	3.5	3	1	1	C2	5.2	3.0	
30	3	3	3	3	3	3	3	1	2	C2	2.0	4.0	
31	3	3	3	3	3	3.5	3	1	2	C2	7.9	3.0	
32	3.5	3	3	3	3	3.5	3	1	2	C2	7.3	4.0	

* ①：鏡吹き付け ②：リングカット ③：水抜きボーリング
④：鏡ボルト ⑤：縫地斜めボルト ⑥：薬液注入

デル2における第4切羽のメンバーシップ関数を異なる m に対して描いたものであるが、 m が増加するほど横軸で表わされる関数の要素値域が減少し、同時に縦軸で示されるグレード値の差も小さくなっていることがわかる。さらに、図-6はモデル2において $m=1.9, 2.5$ としたときの評価値を各切羽に対して描いたものであるが、第1~第20切羽の評価値について $m=2.5$ では評価値がほぼ直線に近くなっているのがわかる。以上のことから、 m の設定に関して以下のことがいえる。

1) h_k の増加はメンバーシップ関数の平滑化を示す。同時にクラスター間の類似性が高くなるため評価の差異

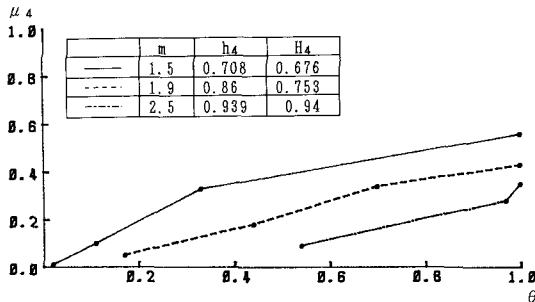


図-5 モデル2における第4切羽のメンバーシップ関数

表-3 各切羽の所屬度関数

切羽	モデル1			モデル2			
	U_{1k}	U_{2k}	U_{3k}	U_{1k}	U_{2k}	U_{3k}	U_{4k}
1	.678	.065	.257	.154	.051	.231	.564
2	.376	.094	.531	.242	.068	.436	.253
3	.143	.062	.796	.243	.046	.613	.097
4	.588	.068	.344	.181	.052	.335	.432
5	.425	.111	.464	.170	.076	.472	.282
6	.720	.059	.221	.129	.046	.206	.620
7	.650	.068	.282	.178	.056	.265	.501
8	.650	.068	.282	.178	.056	.265	.501
9	.571	.091	.338	.176	.068	.311	.446
10	.078	.028	.894	.211	.025	.701	.063
11	.130	.040	.829	.233	.032	.642	.094
12	.100	.028	.872	.134	.018	.791	.057
13	.250	.067	.683	.214	.044	.595	.148
14	.277	.108	.615	.292	.075	.456	.177
15	.175	.055	.770	.270	.044	.562	.125
16	.649	.080	.271	.152	.060	.244	.545
17	.723	.060	.217	.120	.046	.208	.626
18	.700	.054	.246	.137	.041	.236	.585
19	.064	.035	.901	.289	.036	.614	.061
20	.170	.279	.551	.576	.136	.207	.081
21	.331	.181	.488	.489	.101	.232	.178
22	.077	.783	.140	.158	.671	.107	.064
23	.024	.926	.050	.068	.869	.041	.022
24	.015	.952	.033	.036	.931	.022	.011
25	.015	.952	.033	.036	.931	.022	.011
26	.012	.962	.026	.027	.948	.017	.009
27	.012	.962	.026	.027	.948	.017	.009
28	.013	.961	.027	.034	.935	.021	.011
29	.029	.906	.065	.097	.818	.057	.028
30	.146	.230	.625	.799	.059	.105	.037
31	.139	.185	.676	.857	.036	.081	.026
32	.163	.179	.659	.743	.060	.144	.052

が小さくなり変状可能性の評価値としての機能を損なう。

2) h_k が低すぎるとハードクラスタリングの分類結果と同様に各クラスターの独立性が高くなり、クラスターの類似度が極端に小さくなる。このため式(12)において $f_{ij} \rightarrow 0$ となり切羽に対するメンバーシップ関数の形成が困難になる。

以上のことから、両モデルともメンバーシップ関数に極端なあいまいさが発生しない範囲内で同程度の h_k をとるように、ここでは $m=1.9$ を採用した。

表-3はFOC法で求めた各切羽の所屬度関数である。表-4はクラスター中心ベクトルであり、項目①~⑩は図-4の切羽観察記録の9つの項目に対応してい

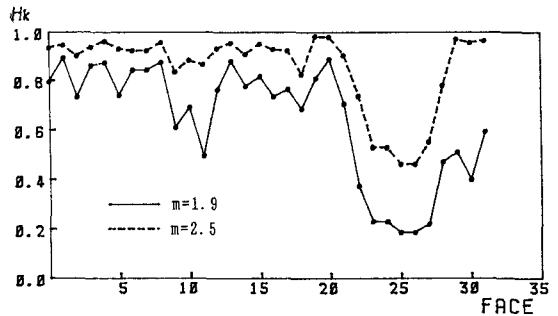


図-6 モデル2における切羽の危険度評価値

表-4 クラスタ中心ベクトル

項目	モデル1			モデル2			
	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3	V_4
①	3.32	2.80	3.12	3.07	2.82	3.13	3.36
②	3.29	2.05	3.00	2.95	2.02	3.03	3.34
③	3.80	2.76	3.12	3.14	2.73	3.16	3.84
④	3.46	2.12	3.23	3.11	2.08	3.30	3.49
⑤	3.74	3.01	3.17	3.14	3.01	3.21	3.80
⑥	3.92	3.31	3.53	3.37	3.31	3.63	3.96
⑦	3.52	2.87	3.23	3.11	2.87	3.32	3.55
⑧	2.20	1.02	1.83	1.29	1.01	2.06	2.25
⑨	2.20	1.06	2.03	2.01	1.02	2.04	2.22

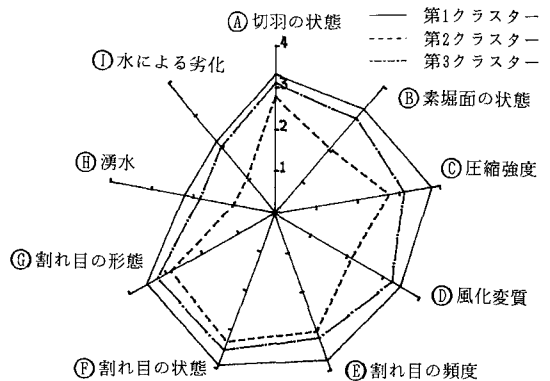


図-7 モデル1のクラスター中心ベクトル

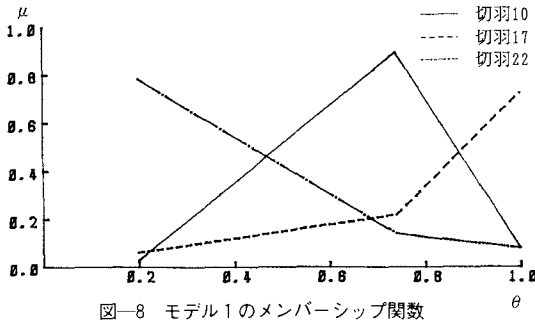


図-8 モデル1のメンバーシップ関数

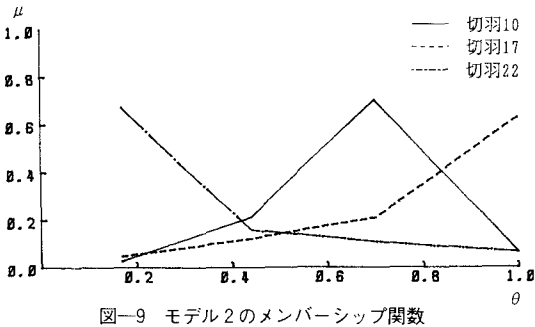


図-9 モデル2のメンバーシップ関数

る。また、図-7はモデル1について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の評価を行っている。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ほど、切羽は工学的に不良な状態であることは明らかであり、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。表-1に示したデータにおいてもこの傾向がみられる。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めることができると考えられる。具体的には図-7において最も外周に位置する第1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。同様にモデル2では図には示していないが第4、第3、第1、第2クラスターの順になる。そこで、たとえばモデル1の場合、表-3の所属度関数に対して式(11)を用いて類似度行列を算定すると次式を得る。

$$F(U) = \begin{bmatrix} 0.147 & 0.029 & 0.109 \\ 0.029 & 0.225 & 0.049 \\ 0.109 & 0.049 & 0.255 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

次に、式(13)を用いてモデル1では第1クラスター、モデル2では第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。たとえば、モデル1でのメンバーシップ関

表-5 各切羽ごとの h_k と H_k の計算結果

切羽	モデル 1		モデル 2	
	h_k	H_k	h_k	H_k
1	0.7200	0.8807	0.7942	0.8011
2	0.8428	0.7868	0.8917	0.6744
3	0.5744	0.7435	0.7307	0.6378
4	0.7854	0.8558	0.8597	0.7533
5	0.8773	0.7903	0.8720	0.6969
6	0.6712	0.8951	0.7405	0.8272
7	0.7463	0.8721	0.8414	0.7732
8	0.7463	0.8721	0.8414	0.7732
9	0.8232	0.8392	0.8738	0.7504
10	0.3645	0.7450	0.6084	0.6464
11	0.5009	0.7518	0.6895	0.6467
12	0.4089	0.7509	0.4967	0.6674
13	0.7172	0.7684	0.7633	0.6619
14	0.8146	0.7531	0.8783	0.6352
15	0.6063	0.7553	0.7748	0.6409
16	0.7619	0.8651	0.8150	0.7909
17	0.6694	0.8952	0.7329	0.8311
18	0.6842	0.8929	0.7637	0.8167
19	0.3514	0.7378	0.6831	0.6205
20	0.8970	0.6328	0.8068	0.5028
21	0.9331	0.7280	0.8854	0.5723
22	0.6052	0.3360	0.7033	0.3225
23	0.2836	0.2448	0.3744	0.2284
24	0.2022	0.2280	0.2311	0.2008
25	0.2022	0.2280	0.2311	0.2008
26	0.1691	0.2220	0.1851	0.1934
27	0.1691	0.2220	0.1851	0.1934
28	0.1738	0.2229	0.2207	0.1991
29	0.3370	0.2567	0.4722	0.2498
30	0.8306	0.6533	0.5083	0.4737
31	0.7746	0.6759	0.3978	0.4683
32	0.7996	0.6856	0.5941	0.4921

数の要素値は式(18)の第1行に着目して式(13)を適用すると次式のように計算できる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{f}_{11} &= f_{11}/f_{11} = 1.0, \quad \bar{f}_{12} = f_{12}/f_{11} = 0.2, \\ \bar{f}_{13} &= f_{13}/f_{11} = 0.74 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

図-8、9はモデル1、2における第10、17、22切羽のメンバーシップ関数である。たとえば、図-8では横軸は1に近いほど第1クラスターに近く危険な状態、逆に0に近いほど第1クラスターから遠く安全な状態であることを示す。

図より、モデル2ではモデル1に比し、クラスター数が増えた分だけメンバーシップ関数がなめらかになっているのがわかる。これは、前述のようにクラスター数を増加させるとメンバーシップ関数が平滑化される傾向にあることを示している。表-5は式(14)、(17)を用いた各切羽における変状可能性評価値 H_k と確信度を示す h_k の計算結果であるが上記の傾向は h_k の値からも明らかである。また、表-5の評価値 H_k においてモデル1とモデル2は同様な分布を示しているが、全般的にモデル2の評価値の方が低くなっているのも上記の理由による。

以上のことからモデル1ではモデル2に比し評価値の

うえからは安全側の評価となっていると考えられる。この意味でモデル1とモデル2の適否を工学的側面から述べることは、ここで得た変状可能性が解析データ範囲内の相対的な評価値であるので困難であるが、実際には鋼製支保、ロックボルト、覆工等について変状の程度までを含めて考えると変状パターンの種類は多数に上り、それらの組合せを考慮すれば設定するクラスター数はメンバーシップ関数の形成が可能な範囲内で多く取ることが望ましいと考えられる。本解析例では、表一2に示したようにモデル1とモデル2での h_k の平均値に大きな差がないため、以下ではモデル2を用いたときの変状可能性評価値を採用し、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行ううえ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1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いえない。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行うことになる。

1) 表一1より第1~19切羽まではすべて何らかの補助工法が施工されている。特に、第16~18切羽では縫地ボルト、薬液注入が施工されており施工時にきわ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、表一5に示す変状可能性 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、 $H_k \geq 0.6$ の切羽は比較的変状可能性が高く何ら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らかである。

2) 施工された支保パターンは $H_k < 0.6$ 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。ところが、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Cとなり、支保の剛性が低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、また表一1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。したがって、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) 表一5によると、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、表一1の最大変位量、特殊施工の両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。したがって、ここで算出した変状可能性がすべての状況に適応すると思われ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、ここで算出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行った。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ほど切羽は工学的に不良な状態であることは明らかであり、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およ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うえで h_k が極度に高くないようクラスタリングを行い、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。このためには採用するデータ、 m, c をパラメトリックに変化させた解析を多数行うことが必要である。

5. 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。提案法はファジィクラスタリングによって得られた所属度関数を利用して切羽における変状可能性に対するメンバーシップ関数を決定し、これをもとに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。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行い有効な結果を得た。

しかしながら、前述のように著者らの知る範囲内で変状に関するデータを収集することを試みたが、入手が不

可能であった。そのため、残念ながら切羽観察記録と特殊施工の実績という間接的な形で変状可能性の評価とした。今後とも変状に関するデータを入手する努力を傾け、これらのデータが入手できれば本研究で示した変状可能性評価法の有効性をより明らかにできるものと考えている。以下に本研究で得られた結論を列記する。

(1) Bezdek, Dunn の「Fuzzy objective function algorithm」による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行うことができる。

(2) 上記のファジィクラスタリングアルゴリズムにおいては、採用するクラスター数、あいまいさを与えるパラメーター値によって分類結果が異なるが、本研究で示した h_k の値によってメンバーシップ関数のあいまいさが具体的に評価でき、クラスター数、パラメーター m , c の設定のための指標とすることができる。さらに、得られた評価値を用いて工学的判断を下す場合の参考値とすることも可能である。

(3) 日本道路公団の行っている坑内観察記録から採用した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。たと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¹⁰⁾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¹¹⁾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は不可能であるため、実際上に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。

また、ここで形成されるメンバーシップ関数は施工中に観測されたデータに依存した変状可能性を表現したものである。これとは別に専門技術者の経験に基づく主観をメンバーシップ関数に置き換える工夫が従来から行われている^{13), 14)}。そこで、トンネル施工においても同様なメンバーシップ関数を作成することができれば両者の合成によって、さらに高度な変状可能性評価が可能になる

と考えられる。この意味においても提案法は変状可能性評価のための基礎的方法として応用性の広いものであると思われる。

本論文をまとめるにあたり、京都大学 古田 均助教、秋山孝正講師より多くのご助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本トンネル技術協会：地山評価のあり方に関する研究, 1985. 2.
- 2) 相川 明・樗木 武・倉原隆二：硬岩盤 NATM トンネルにおける地山変状の判別分析, 第 8 回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp. 75~82, 1987. 7.
- 3) 白石成人・古田 均：橋梁構造物の架設中の安全性評価に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 32A, pp. 529~537, 1986. 3.
- 4) 古川浩平・古田 均・山田善一・白石成人：満足度最大化を目的とする骨組構造の最適耐震設計, 日本建築学会論文報告集, 第 342 号, pp. 30~38, 1984. 8.
- 5) 田中英夫・和多田淳三・林 勲：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. 1051~1057, 1986.
- 6) 和多田淳三・田中英夫・浅居喜代治：ファジィ数量化理論第 II 類：行動計量学, 第 9 巻, 第 2 号, pp. 24~32, 1982.
- 7) 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.
- 8) Sasaki, T. and Akiyama, T. : An Analysis of Regional Difference in Inhabitant's Consciousness to the Road Construction by Fuzzy Clustering, Proc. of JSCE, No. 377/IV-6, pp. 107~115, January, 1987.
- 9) Ruspini, E. H. : A New Approach to Clustering, Information and Control, 15, 1969.
- 10) James C. Bezdek : Pattern Recognition With Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, 1981.
- 11) James C. Bezdek : Pattern Recognition With Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, pp. 69~71, 1981.
- 12) 日本道路公団：設計要領第三集第 9 編トンネル, pp. 34, 1985. 10.
- 13) 秋山孝正・佐佐木綱・宇野伸宏・有倉陽司：ファジィ理論を用いた交通経路選択に関する分析, 第 5 回ファジィシステムシンポジウム, pp. 325~330, 1989. 6.
- 14) 古川浩平・古田 均・仁多和英：一対比較法の最適耐震設計への応用に関する研究, 土木学会論文集, 第 368 号 / I-5, pp. 393~400, 1986. 4.

(1989. 12. 21・受付)