

アンケートに基づくトンネル施工時の岩盤分類に関する研究

鈴木昌次*・古川浩平**・井上洋司***
・中川浩二****

NATM 施工時の岩盤分類における経験的技術と分類要素を明らかにすることを目的として、技術者に対する切羽の岩盤分類アンケートを実施した。この結果から、地質状況を示す資料による間接的な岩盤分類が可能であることを示した。さらに、技術者が岩盤分類をおこなう際に着目している分類要素とそれらの重要度および技術者の岩盤分類に関する主観的演算過程を明らかにした。

Keywords : NATM, questionnaire, rock mass classification, consistent system, empirical factors, decision making

1. はじめに

トンネル施工において切羽の岩質を適切に評価することは、施工の合理化、安全性の確認、さらにトンネル構造の信頼性の向上において非常に重要である。また、NATM を対象とした実績調査によれば、一般に現状の事前設計に対する信頼性は比較的低く、施工時に工法変更がなされる場合も少なくない¹⁾。このようなことから、施工時は常に地山の状態を適確に判断し、合理的な支保設計を心がける必要がある。

日本道路公団では設計施工を通じて適用できる岩盤分類を設けている²⁾が、その他の実務的な岩盤分類³⁾と同様に、施工時の岩盤分類基準では、その多くが定性的な表現となっている。このため、岩盤分類を実施する技術者の経験や、そこから生じる主観の相違により、必ずしも分類結果に一貫性が保証されるわけではない。このことから、施工時の地山に対する調査、観察に基づく客観的な岩盤評価システムを確立することによって、技術者の経験にかかわらず一貫した岩盤評価をおこなうことが必要と考えられる。

なお、現状において提案もしくは実用されている岩盤分類での分類要素は地質学、工学の両面における多くの研究⁴⁾⁻¹³⁾の結果として得られたものである。したがって、すでに上記両面からの岩盤分類要素に対する考察の余地は少ない。ところが、現状でのトンネル施工時の岩盤分類は技術者が切羽を直接に目視観察し、従来の施工実績、地山の全体的な状況等を踏まえた上で前述の岩盤分類基

準に準拠しておこなっている。このため、分類をおこなう技術者の経験に基づく主観に多くを依存していることは認めざるを得ない。

このことから、トンネル施工時の岩盤分類を客観的におこなうことができる一貫したシステムとして確立しようとする際には、従来からの地質学的要素と工学的要素に加え、トンネル施工に特有の経験的要素を取り入れることが必要と考えられる。ところが、このような経験的要素は一般に客観的な数値によって記録されることは少なく、多くの場合に文章や、簡易なスケッチの形で記録されている。このため、従来において研究の対象とされることは少なかった。

これに対して、筆者らは NATM によるトンネルの施工時に見られるような、定性的な岩盤分類基準と技術者の主観的判断によって構成される岩盤分類の過程を一つのファジィシステムと考え、トンネル施工時の岩盤分類基準式を提案した^{14),15)}。しかしながら、岩盤分類基準式の同定に用いた基礎データは、従来から分類要素に取り入れられていたものに限っている。

そこで、筆者らは文章、簡易スケッチ等の施工時資料を用いて技術者に対する岩盤分類アンケートを実施した。本研究では、このアンケート結果を基に、岩盤分類における経験的要素と総合評価における技術者の演算形態を明らかにすることを試みた。なお、施工時の岩盤評価は NATM に限らず、在来工法においても同様と考えられるが、本研究では、アンケート資料に NATM で施工されたトンネルでの実績を用いていることから、以下では NATM で掘削されるトンネルを対象とする。

本文では、まずアンケートの実施内容を示し、被験者の経験年数に着目した基礎的な分析をおこなう。次に、トンネル施工時の岩盤分類に取り入れるべき経験的要素を明らかにする。また、アンケートで用いた資料による間接的な岩盤分類が可能であることを示す。さらに、技

*正会員 山口大学助手 工学部建設工学科 (現・(株)大本組 技術研究所 研究員)
(〒755 岡山市内山下 1-1-13)

**正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

***正会員 日本道路公団広島建設局 建設第二部 調査役
(現・西宮北管理事務所 副所長)

****正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

術者が岩盤を分類する際におこなっている演算過程を示し、現状の岩盤分類を客観的かつ一貫した岩盤評価システムとすることへの可能性について論じる。

2. アンケート内容と実施方法

日本道路公団では岩盤等級を工学的な良好度の順に A, B, C, D, E の 5 等級に分類することとしている。この内、C 等級については C_I, C_{II}, D 等級については D_I, D_{II} 等級に細分している。施工時の分類結果（以下、施工時岩盤等級と言う。）および分類理由等は「岩質判定記録」に記載されている。アンケートは岩質判定記録から施工時岩盤等級を除く切羽観察記録、切羽スケッチ、地山状況を取り出し、さらに切羽写真を加えた参考資料を基に該当切羽の岩盤分類をおこなうものである。また、岩盤等級を回答するにあたって上記資料を考慮した程度（以下、考慮の程度と言う）の記入も求める。なお、トンネル切羽を対象とした岩盤分類では花崗岩、粘板岩、黒色片岩等の地山岩種ごとの特性を考慮することが必要と考えられる^{11),15)}。そこで、問題の複雑化を避けるため、アンケートでは広島型花崗岩地山における施工実績から対象切羽を採用した。

アンケートの対象者は日本道路公団、民間建設業に所属する技術者の内で岩盤分類の経験があることを条件としている。アンケートの配布は上記以外には無作為とした上で日本道路公団広島建設局から管内の各工事事務所を経由しておこなった。回収は無記名による郵送としており、40 サンプルを回収できた。このうち所属の不明な 1 サンプルを除いて被験者の内訳は日本道路公団に所属する技術者 14 名、民間建設業に所属する技術者 25 名であった。図-1 は横軸に経験年数、縦軸に人数を示したものである。

以下に、アンケートの具体的な内容を示す。

(1) アンケートでの提示資料

図-2 に示す切羽観察記録は圧縮強度、風化変質等の切羽状況を示す 9 項目（以下、図-2 に従い各項目を ㉠～㉩ と標記する）について、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たものである。また、トンネル縦断、横断方向に卓越する割れ目の方向性に関する 2 項目（以下、図-2 の各項目標記に従い ㉪、㉫ と標記する）については 6 種類の評価をおこなっている。

アンケートの対象とした切羽は 5 切羽である。切羽の選定においては、図-2 に示す切羽観察記録の ㉠、㉢ 項目の評価ランクが 1 か 2 であるものとした。また、施工時岩盤等級は B~D 等級であるものとした。これは、図-2 中の記述から ㉠、㉢ 項目に対する評価ランクが 3 以上の場合、明らかに D 等級もしくは、さらに劣悪な状態と推察されるためである。表-1 はアンケートに採

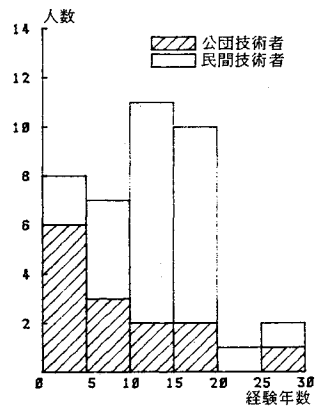


図-1 所属機関、経験年数による被験者分類

㉠	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
㉡	素掘面の状態 (普請不要)	1. 自立	2. 2時間たつと緩み肌滑りする (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受けておく必要がある
㉢	圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃はおおむね	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. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー万全くはく込む
㉣	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
㉤	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
㉥	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
㉦	割れ目の形態	1. ランダム形状	2. 柱状	3. 層状、片状、板状	4. 土砂状、紙片状、当初より未固結
㉧	湧水	1. なし、浄水程度	2. 湧水程度	3. 集中湧水	4. 全面湧水
㉨	水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出
㉪	縦断方向 (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)			
㉫	横断方向 (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-2 切羽観察記録

表-1 切羽観察記録のランクと岩盤等級

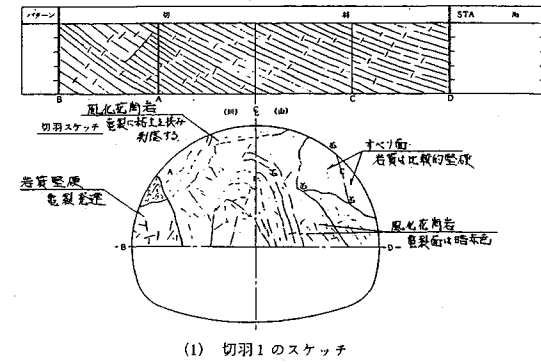
項目	切羽				
	1	2	3	4	5
㉠	2	1, 2	1	1	1
㉢	2	2	1	2	1
㉣	2, 3	2	2	3	2
㉤	2	2	2	3	2
㉥	2, 3	2, 3	2	3	2, 3
㉦	2	2	2	2	2
㉧	3	3	2	3	1
㉨	2, 3	2	1	1	2
㉪	2	1, 2	1	1	1
㉫	2	2	6	6	5
㉬	5	5	6	6	5
等級	D _I	C _{II}	C _I	C _{II}	B

用した 5 切羽について施工時岩盤等級と切羽観察記録に記入された観察結果を示したものである。表中の各数値は図-2 の各評価ランクを示し、2, 3 等の数値の記入が二つあるのは同一項目の 2, 3 ランクの両方に○印が記入されていたことを示す。

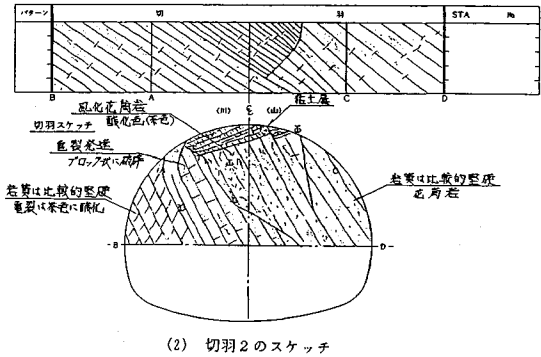
地山状況は地山の支配的な岩石名、該当地点の土被り厚および偏圧、流動性、重要構造物近接等の特殊条件を

表-2 地山状況資料

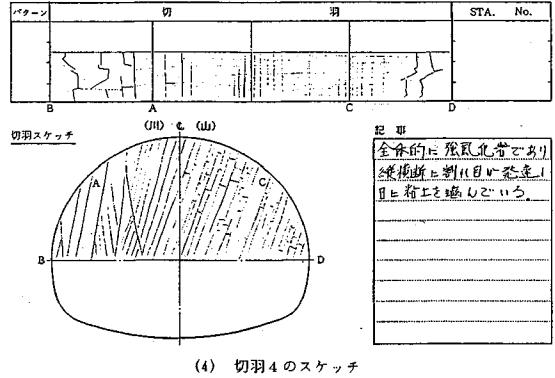
切羽	岩石名	土被り厚(m)
1	風化花崗岩	22.2
2	花崗岩	27.8
3	花崗岩	168.9
4	花崗岩	123.2
5	花崗閃緑岩	48.8



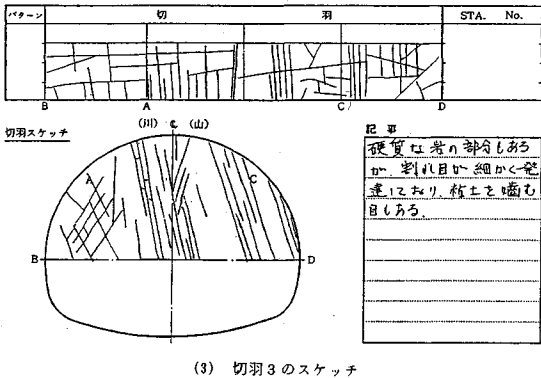
(1) 切羽1のスケッチ



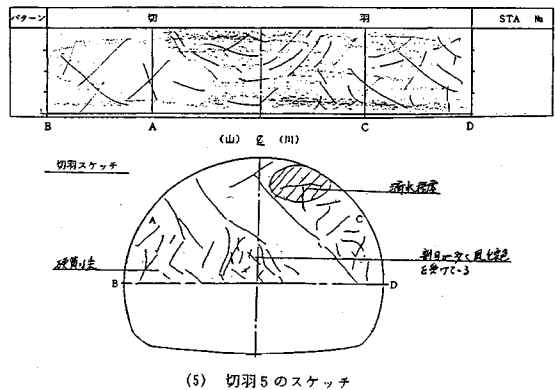
(2) 切羽2のスケッチ



(4) 切羽4のスケッチ



(3) 切羽3のスケッチ



(5) 切羽5のスケッチ

図-3 アンケート対象切羽の切羽スケッチ

記載したものである。表-2は地山状況の中で岩石名と土被り厚を示したものであるが、今回採用した資料では特殊条件の記録された切羽は用いなかった。

図-3にアンケートの対象とした切羽スケッチを示す。切羽スケッチは現場観察者が切羽をスケッチした上で特に必要と考えられる点について注釈を加えたものである。図-3の切羽1, 2, 5と切羽3, 4では記事に関する記入方法が異なっている。これは、現状において記事の記入様式が統一されていないためである。

なお、表-1に示されるように本アンケートでは切羽観察記録における①～⑩の各項目に対して1～4の評価ランクの組合せをすべて網羅しているわけではない。ま

た、地山を説明するその他の資料についても考えられるすべての状況を網羅していない。これは、現実と考えられるすべての状況をアンケートの対象とすることが事実上不可能であることによる。実際に、切羽観察記録の各項目における評価ランクの組合せのすべてをアンケートに取り入れるには、5切羽では不可能である。ところが、事実上、このようなアンケートに答えるに際して、被験者は多大の労力を必要とし、アンケート実施前の試行結果から5切羽程度が限度であると判断された。このため、切羽状況に対して欠損部分の存在することは否めないが、本研究の目的においては十分と考えた。

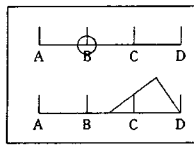


図-4 岩盤分類結果の記入例

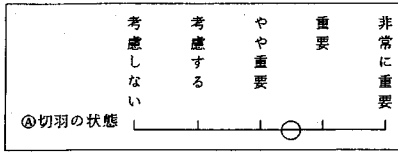


図-5 切羽観察記録の各項目に対する重要度記入例

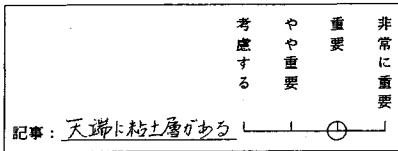


図-6 切羽状況図, 写真に対する重要度記入例

(2) 岩盤等級の記入方法

アンケートで分類する岩盤等級は日本道路公団の定める岩盤等級であるA~D等級を基準とした。ただし、明確にこれらの等級に分類することが困難な場合もあり、岩盤等級自体が本来段階的なものではなく連続的なものと考えられる¹⁴⁾ことから、明らかに何れかの区分に決定できる場合は図-4に示す軸線上の任意の位置に○印を記入し、ある程度あいまいさがある場合には三角の山を描くこととした。この場合には三角形の頂点が最も確かと思われる岩盤等級を、裾が可能性のある範囲を示す。

(3) 考慮の程度に対する記入方法

考慮の程度の記入方法として、切羽観察記録に対しては項目ごとの考慮の程度を図-5に示す軸線上に○印で記入する。図-5は記入例の一部を示したものであるが、考慮の程度を「非常に重要」から「考慮しない」までの5段階に分割している。また、記入位置を「重要」、「考慮する」といったあいまいな形容詞上に限定すると被験者自身の持つイメージにある程度の制約を与え、記入に際して抵抗感を持つ場合もあると考えられる。このため、縦の分割線は軸線上の位置に対する目安とし、これにこだわることなく任意の位置に記入できるものとした。

さらに、切羽スケッチ、切羽写真から判定材料を得た場合には、特記事項として図-6の記入例のように記事内容を簡単に記入した上で切羽観察記録と同様に考慮の程度を記入することとした。ただし、この場合には形容詞句の中で「考慮しない」を記入欄から除外してある。

3. アンケート結果の数量化

従来のアンケートではいくつかの形容詞句の中から適当と思われるものを選択する方法が多く採用されている。このアンケート結果の分析においては一般に形容詞句をカテゴリとした数量化理論が適用され、アンケート結果に対する事前の数量化をおこなうことなく分析が可能となる。これに対して本研究のように、軸線上の任意の位置に回答を記入する方法を採用した場合には回答に対する明確なカテゴリ化が困難となる。そこで、ファジィ集合論¹⁶⁾におけるメンバーシップ関数を用いた形容詞句の数量化を試みた。

メンバーシップ関数は全体集合 ω におけるファジィ部分集合 W について下式(1)で定義される。

$$\mu_W: \omega \rightarrow [0, 1] \dots\dots\dots (1)$$

$\mu_W(\theta)$ はファジィ部分集合 W における θ のグレードを表す。このとき $\mu_W(\theta)$ が1に近いほど W に属する度合が大きく、0に近いほど度合いが小さいことを示す。ここでは、考慮の程度をファジィ部分集合と考え、ファジィ数量化理論Ⅱ類¹⁷⁾を用いてメンバーシップ関数を推定する。従来の数量化理論Ⅱ類は、カテゴリおよび外的基準に反応するか否かを(0, 1)の2値で定義していた。これに対して、ファジィ数量化理論Ⅱ類は反応の程度をメンバーシップ関数で表現することによって [0, 1] の多値で定義可能としたものである。ファジィ数量化理論Ⅱ類では式(2)の線形式によって外的基準が最もよく判別できるようにカテゴリウエイトを決定することが目的となる。

$$Y(n) = \sum_{k=1}^K \lambda_k \mu_{n,k}(\theta) \quad n=1, 2, \dots, N \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 N : サンプル数 K : カテゴリ数
 λ_k : カテゴリウエイト $Y(n)$: 判別スコア
 $\mu_{n,k}(\theta)$: メンバーシップ関数

このとき、ファジィ分散比が大きいほど効果的な判別ができる¹⁷⁾。具体的には、 $\mu_{n,k}(\theta)$ に切羽観察記録の各項目に関する考慮の程度、外的基準に回答された岩盤等級(以下、回答岩盤等級と言う)を対応付ける。その上で、回答岩盤等級の判別分析をおこない、切羽ごとにファジィ分散比が最大となるときのメンバーシップ関数を決定する。ここでは、図-7に示すように各形容詞句を要素値として横軸に割り当てる。また、グレード値は「考慮しない」を0.0、「非常に重要」を1.0とし、「考慮する」、「やや重要」、「重要」のグレード値は未知数とする。このとき、要素間のグレード値は線形に仮定する。例えば被験者 n が切羽観察記録の k 項目に関する考慮の程度記入欄で図-7の位置に○を記入した場合、要素値は0.625となり、グレード値は下式(3)で与えられる。

$$\mu_{n,k}(\theta) = \mu_{n,k,2}(\theta) + 0.5(\mu_{n,k,3}(\theta) - \mu_{n,k,2}(\theta)) \dots (3)$$

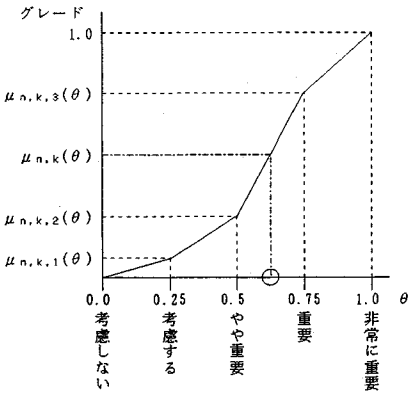


図-7 メンバースhip関数

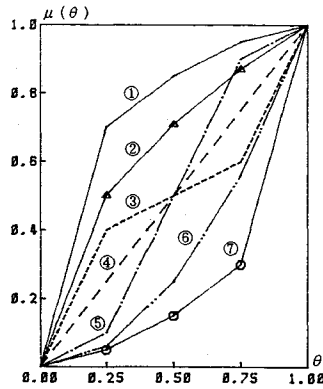


図-8 考慮の程度に関するメンバースhip関数

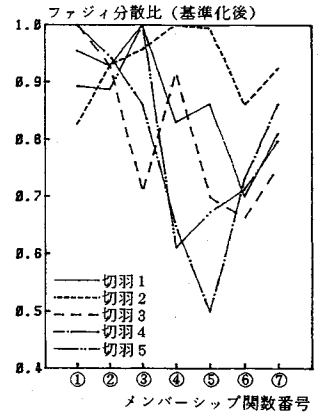


図-9 最大ファジィ分散比 (基準化後)

ここに、 $\mu_{n,k,2}(\theta)$: 「やや重要」のグレード値

$\mu_{n,k,3}(\theta)$: 「重要」のグレード値

次に、外的基準については日本道路公団の定める岩盤等級 A, B, C, D を考え、各岩盤等級に完全に所属する場合の所属度を 1.0、全く所属しない場合を 0.0 とし、各岩盤等級を中心としたときの式 (4) に示す距離関数をもって所属度 C_n とした。

$$C_n = 1.0 - L_n \dots\dots\dots (4)$$

$$C_n = 0.0 \quad \text{if } L_n > 1.0$$

ここに、 L_n は各岩盤等級の定義位置から回答位置までの無次元距離である。なお、三角形による回答については重心位置を用いた。

以上より、メンバースhip関数の推定は式 (5) に示すような形容詞句のグレード値を未知数としたときのファジィ分散比最大化問題に帰着する。

$$\max_g \{ \mu_{n,k}(\theta), C_n \} \quad (n=1, 2, \dots, N),$$

$$(k=1, 2, \dots, K) \dots\dots\dots (5)$$

$$\mu_{n,k}(\theta) = \mu_{n,k,1}(\theta) x / 0.25 \quad x \leq 0.25$$

$$\mu_{n,k}(\theta) = \mu_{n,k,1}(\theta) + \{ \mu_{n,k,2}(\theta) - \mu_{n,k,1}(\theta) \} \times (x - 0.25) / 0.25 \quad 0.25 < x \leq 0.5$$

$$\mu_{n,k}(\theta) = \mu_{n,k,2}(\theta) + \{ \mu_{n,k,3}(\theta) - \mu_{n,k,2}(\theta) \} \times (x - 0.5) / 0.25 \quad 0.5 < x \leq 0.75$$

$$\mu_{n,k}(\theta) = \mu_{n,k,3}(\theta) + \{ 1.0 - \mu_{n,k,3}(\theta) \} \times (x - 0.75) / 0.25 \quad 0.75 < x$$

subject to

$$0.0 < \mu_{n,k,1}(\theta) < \mu_{n,k,2}(\theta) < \mu_{n,k,3}(\theta) < 1.0$$

ここに、 x : 考慮の程度記入欄での記入位置 (要素値)

$g\{\cdot\}$: ファジィ最大分散比

式 (5) は制約条件付き非線形計画問題となるため、最適化サブルーチン COPES¹⁸⁾ を用いて解析した。ところが式 (5) は多数の局所最適解を有し、全域的最適解を得るのが困難であった。このため、図-8 に示す 7 種のメンバースhip関数を仮定し、切羽ごとにファジィ

分散比を求めた。本来、このような仮定は望ましくないが、図に示した 7 種の関数は考え得る関数形を網羅したものであって、実際の関数は、何れかの関数に近い分布を示すと思われる。図-9 の横軸は 7 種類のメンバースhip関数、縦軸は基準化後のファジィ分散比である。ファジィ分散比は、切羽ごとに 7 種のメンバースhip関数の内で最大のファジィ分散比を 1.0 に基準化している。図-9 より、関数①~③の凸型関数が関数⑤~⑦の凹形関数に比べて平均的に高いファジィ分散比を示しているのがわかる。さらに、凸型メンバースhip関数のうちでは関数②が全切羽に対して平均的に高くまとまった値を示していることから、考慮の程度に関するメンバースhip関数は関数②が適当と考えられる。以上より、次項からの分析における考慮の程度に関するメンバースhip関数には関数②を採用する。したがって、以下で考慮の程度とは、図-8 のメンバースhip関数②におけるアンケート回答に対する縦軸の値であるグレード値を指す。

4. アンケート結果の基本分析

前述のように、アンケート対象者は 2 種の業種に所属し、経験年数も異なっている。このため、経験年数によってアンケートの回答にどのような差異が現れるかを検討する。表-3 は切羽観察記録に対する考慮の程度について、経験年数を目的変数としたときの切羽観察項目に対する考慮の程度の偏相関係数を切羽ごとに示したものである。表より、切羽 1 の㉔、㉕項目、切羽 2 の㉑、切羽 3 の㉒、㉓項目等に若干の相関がみられるが全体にはほぼ無相関に近いと考えても良い。ただし、統計上の有意性は乏しいが、傾向としては㉑、㉒項目において、ほぼ一貫して負の相関、㉓項目では正の相関関係がみられるようである。ここで、正の相関は経験年数が多いほど切羽観察項目の評価ランクに対する重要性を高く考えて

表-3 経験年数に対する切羽観察項目の偏相関係数

項目	切 羽				
	1	2	3	4	5
Ⓐ	-0.145	-0.357	-0.232	-0.170	-0.116
Ⓑ	-0.243	-0.123	-0.051	-0.010	0.022
Ⓒ	0.405	0.036	-0.321	0.060	-0.172
Ⓓ	0.184	0.288	0.148	-0.002	0.107
Ⓔ	-0.105	0.033	0.258	-0.057	-0.179
Ⓕ	0.153	-0.095	0.058	0.118	-0.003
Ⓖ	-0.049	0.023	0.007	-0.038	0.274
Ⓗ	-0.327	0.244	-0.280	0.030	0.038
①	0.216	-0.090	0.112	-0.191	-0.164
②	-0.201	0.060	0.466	-0.100	0.061
Ⓚ	0.370	-0.228	-0.468	0.050	-0.110

表-4 特記事項の記入内容

切羽	記 事 内 容	数	平均	偏差
1	天端に粘土を挟む(記)	31	0.92	0.07
	土被りが浅い(地)	12	0.81	0.13
	天端に滑り面がある。(記)	9	0.82	0.15
	亀裂間の集中湧水(記)	10	0.87	0.06
2	天端付近の剝落性(記)	5	0.93	0.06
	風化花崗岩である(地、記)	7	0.88	0.02
	天端に粘土を挟む(記)	25	0.91	0.09
	土被りが浅い(地)	8	0.83	0.08
3	亀裂の破砕された部分有り(記)	7	0.83	0.06
	亀裂の破砕された部分有り(写)	7	0.83	0.11
4	亀裂の破砕された部分有り(写)	6	0.86	0.09
	風化花崗岩である(記)	12	0.88	0.05

いることを示す。このことから、傾向としては経験年数が多いほど、Ⓐ、Ⓑ項目の重要性を低く考え、Ⓓ項目の重要性を高く考えていると言えよう。

次に、特記事項の記載内容を用いて、切羽観察記録以外の切羽写真、切羽スケッチの見方についての経験年数による差異を調べる。表-4は特記事項に記入された内容で2例以上あったものをまとめたものである。表中、(記)は切羽スケッチ中の記事、(地)は地山状況、(写)は切羽写真から判断された内容であることを示す。なお、切羽5では特に集中した意見が無かったため表には示していない。ここでは、表-4に示すように特記事項記入数の多い、天端状況と土被り厚を切羽1、2に関して検討する。図-10は経験年数を横軸、のべ人数を縦軸にとった累積度数曲線である。図中、曲線①は経験年数についての全被験者の累積度数曲線である。曲線②、③は天端状況の記入者、曲線④、⑤は土被り厚の記入者に関する累積度数曲線である。また、表-5は図-10の75%、50%、25%点に該当する経験年数を示したものである。図-10、表-5より、天端状況に関しては切羽1、2とも全被験者とほぼ同様な累積度数を示しており、経験年数にかかわらず同様の指摘をしていると考えられる。土被り厚に関しては50%点以後で累積度数に伸びが見られず、16年以上の経験者による指摘が天端状況に比べて少ない。ここで採用した切羽での土被り厚は22~27m程度であるが、この範囲で見ると経験年数の多い技術者ほど土被り厚を岩盤分類に考慮しない傾向にある

表-5 累積度数曲線における%点年数

内容	切羽	経験年数		
		75%	50%	25%
全被験者	—	17.5	13.5	7
天端	1	17	13.5	5
天端	2	18	14	5
土被り厚	1	14	13	8
土被り厚	2	13.5	10	4

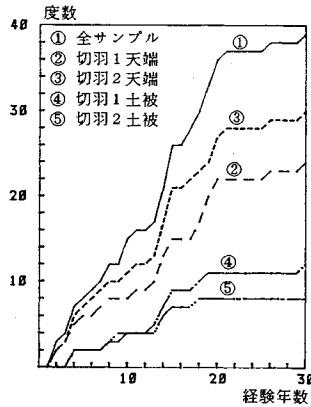


図-10 特記事項記入者に関する累積度数曲線

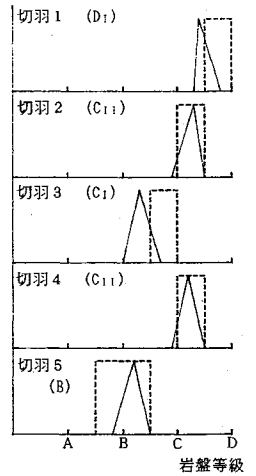


図-11 岩盤等級

と言えよう。

5. アンケートによる岩盤分類の有意性

施工時岩盤等級は、ある程度の幅を有する段階的な等級である。また、回答岩盤等級も可能性の幅を有する。このことから、回答岩盤等級と施工時岩盤等級との厳密な一致性について検討することは必ずしも妥当ではない。そこでアンケートにおける岩盤分類の妥当性を施工時岩盤等級に対する回答岩盤等級の所属割合によって検討する。図-11は回答岩盤等級の平均値を図示したものである。図中の三角形は回答岩盤等級、()内の記号は施工時岩盤等級である。四角で囲まれた範囲は施工時岩盤等級に対する推定範囲であり、C、D等級についてはC_I、C_{II}、D_I、D_{II}の支配範囲をC、D等級の半分ずつに仮定した。なお、回答岩盤等級については前記のように連続的な記入も認めている。これを定量的に表現するために岩盤等級A~Dを1~4の数値に対応させ、中間位置は線形に計量している。図-11より、切羽3を除いては、ほぼ施工時岩盤等級と同様な回答が得られていることがわかる。切羽3で岩盤等級に差が現れている理由としては、切羽3では図-3(3)に示すように切羽スケッチの記載が不明瞭であったことが挙げられる。具体的には、記事内容から割れ目の発達した部分、粘土を噛む部分の存在が記載されているにもかかわらず、その位置が特定できなかったためと考えられる。この点についてはアンケートの回答に同様な指摘もあり、他の切羽スケッチでは図上、もしくは記事に割れ目、風

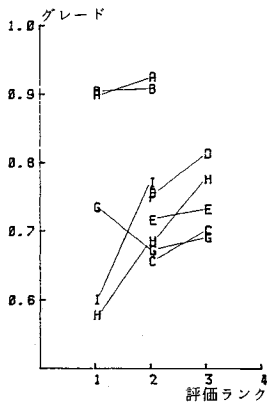


図-12 評価ランクに対する平均グレード値

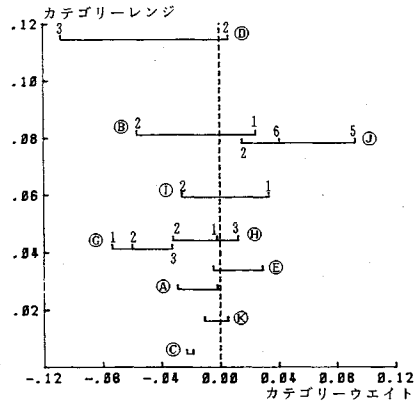


図-13 ファジィ数量化理論Ⅱ類の結果

化等の位置が明確に記されていることから理解できる。

さらに、表-4より天端付近の割れ目、風化状況等に関心が集中しており、考慮の程度もかなり高く、ばらつきも少ないことがわかる。したがって、岩盤分類においては切羽の割れ目、風化の発達した部分等の位置が重要であり、特に天端状況が問題になると言える。この点は、従来のトンネルを対象とした岩盤分類において明示されなかった事項であり、NATMの施工経験から生じた経験的分類要素として重要と考えられる。

以上より、資料による岩盤分類は切羽観察記録のみでは困難であるが、偏圧等の特殊条件が無い場合には、切羽スケッチ、切羽写真によって切羽の工学的に不良な部分の位置を特定できる限りにおいて施工時と同様な分類をおこなうことができると考えられる。これは、従来から一貫したシステム化が困難であったトンネル施工時の岩盤分類も必要な資料の供給によって実現可能であることを示唆するものである。

6. 岩盤分類における演算要素

ここでは、切羽観察記録に着目し、技術者が岩盤を分類する際に各項目をどのように取り扱っているかを具体的に示す。図-12は切羽観察項目の評価ランクに対する考慮の程度を5切羽に対して平均したものである。ただし、④～⑩項目と⑪、⑫項目では評価ランクの考え方が同一でないため⑪、⑫項目は除いてある。図より、切羽観察項目の評価ランクが高いほど、考慮の程度が高くなるのがわかる。すなわち、技術者は岩盤の工学的性質が悪くなるほど重要視する傾向にある。⑥項目については傾向が異なるが、花崗岩では柱状や層状、片状の割れ目形態を呈することが一般に少ないためと考えられる。ただし、ランク2以上については他の項目と同様であり、一般に不良と考えられる割れ目形態に準じて考慮の程度は高くなる。なお、④、⑫項目は他の項目に比べ

て高いグレード値を示している。④、⑫項目は他の項目の総合として切羽全体の状況を表すと考えられ、巨視的な切羽状況を知る上からは重要性が高いと評価されるためであろう。

次に、本文3.で用いたファジィ数量化理論Ⅱ類を適用し、対象とした5切羽について各切羽観察項目をアイテム、評価ランクをカテゴリーとした回答岩盤等級に対する判別分析をおこなう。なお、前述のようにアンケートで示した資料では各切羽観察項目に対して1~4の評価ランクのすべてが含まれていないため不完全な分析とならざるを得ない。したがって、算出されるカテゴリーウエイト（以下、ウエイトと言う）を含めて、分析結果に対する定量的な評価をおこなうことは困難である。このことから、ここでは技術者の切羽観察記録に対する考え方を総括的に把握することが目的となる。

図-13はファジィ数量化理論Ⅱ類によって得られたウエイトを横軸、カテゴリーレンジ（以下、レンジと言う）を縦軸に示したものである。図中、1, 2等の数値は切羽観察項目の評価ランクを示す。ただし、表-1にも示したように割れ目の状態⑩に関しては、すべての切羽で同一の評価ランクとなっているためレンジは算出できない。レンジは各アイテム内のウエイトの最大差をとったもので、レンジが大きいアイテムほど判別に与える影響が大きいと判断できる。すなわち、図-13において縦軸の上側に位置し、横軸の左右に偏るほど岩盤分類における決定要素として重要であり、縦軸の下側に位置し、横軸の中心付近にあるほど非決定要素に近づくことになる。また、縦軸の下側に位置していても横軸の左右に偏る場合には岩盤等級を決定付けるものではないが、岩盤等級を推移させる影響要素と考えられる。ここで影響要素とは、例えば図-4におけるA~Dの各等級の間であると回答する場合の位置、もしくは三角形で回答する場合の幅を決定する要素に該当すると考えてよいであろう。

図-1より、切羽観察項目は④、⑥項目による切羽全体状況、③、⑩項目による岩盤強度、⑤、⑦、⑧、⑪、⑫項目による割れ目状況、⑨、①項目による地下水の全4群に分類できる。この点を踏まえて結果を考察すると以下のようなのである。

1) 切羽全体状況では図-12に示したように④、⑥項目共に高いグレードを示す。これに対して、図-13では⑥項目の影響が高いものの④項目の影響は低く示されている。前述のように、④、⑥項目は切羽、素掘面の全体的な状態を表す項目である。ところが、これまでの結果から岩盤分類においては、風化や割れ目の具体的な位置、程度を知ることの必要性が明らかにされている。このことから、④、⑥項目は岩盤の局所的な状態の説明に関して具体性に欠け、評価ランクが2以下の場合においては岩盤分類に与える影響は少ないと考えられる。したがって、④項目は非決定要素として扱って良いと考えられる。また、⑥項目についても④項目と同様に考えられる。ところが、③項目は比較的大きなレンジを示しており、技術者は何等かの形で岩盤分類に利用していると考えられるため、決定要素に含めて考える方が妥当であろう。

2) 図-13より、⑩項目のウエイト、レンジがともに最も大きいことがわかる。したがって、明らかに決定要素であり、⑩項目による岩盤強度の評価が岩盤分類の中心的役割を果たしていると考えられる。

3) 割れ目に関しては⑫項目に対する分析が不可能であった。したがって、⑫項目についてはここで論ずることはできない。⑬項目はレンジとしては小さいにもかかわらず、個々のウエイトは⑨、①項目に比べて大きいことがわかる。これは⑬項目が評価ランクにかかわらず重要な要素として扱われているためであり、影響要素と考えられる。⑭、⑮項目については水平および $30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ のデータが欠損している。しかしながら、⑭項目はレンジ、ウエイトともに大きいことから決定要素と考えても良いであろう。これは、縦断方向に卓越する不連続面がさし目、流れ目を呈している場合に天端からの岩塊の抜け落ち、天端の緩みや崩落を考慮したものと考えられる。

4) 地下水に関する項目は①、②とも判定に対する影響度は低いものの、図-12に示したように評価ランクが2以上となったときの考慮の程度がかなり高くなる。このことから、決定要素とは考えにくい、影響要素としては比較的重要な位置にあると考えられる。

ところで、特記事項に記入された切羽状況については、これまでの考察から天端状況が決定要素であることは明らかであろう。土被り厚については指摘されたサンプル数も全体の10%程度と低く、表-4にも示すように考慮の程度も天端の状況に比べて低い。さらに、経験年数

が多いほど指摘する割合が低くなることから決定要素とするには条件不足であるため、影響要素として考える方が妥当であろう。以上より、施工時の岩盤分類における決定要素は天端状況、風化変質、素掘面の状態、縦断方向に卓越する不連続面であり、影響要素は土被り厚、割れ目の形態、水による劣化、湧水と考えられる。

7. 岩盤分類における演算形態

ここでは、技術者が岩盤等級を判定する際におこなっている演算の形態を明らかにすることを試みる。このために、技術者の意思決定をモデル化する際に従来から用いられている以下の各種演算¹⁹⁾を考える。

$$f_n = \max\{\mu_{n,k}(\theta) | k=1, 2, \dots, K\} \dots\dots\dots (6)$$

$$f_n = \min\{\mu_{n,k}(\theta) | k=1, 2, \dots, K\} \dots\dots\dots (7)$$

$$f_n = (1/K) \sum_{k=1}^K \mu_{n,k}(\theta) \dots\dots\dots (8)$$

$$f_n = (1/K) \left\{ \sum_{k=1}^K \mu_{n,k}^2(\theta) \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\mu_{n,k}(\theta)$ ：要素 k のメンバーシップ関数

f_n ：第 n サンプルの演算結果

K ：演算に用いる要素の数

式(6)は考慮する要素の内の最大グレード値で岩盤等級を決定する演算(演算1)である。式(7)は最少グレード値で決定する演算(演算2)である。式(8)はグレード値の算術平均(演算3)、式(9)は幾何平均(演算4)である。

ここでの目的は、上記の演算の中で岩盤分類における技術者の演算過程に最も近似するものを決定することにある。このため、演算結果と回答岩盤等級との比較をおこなうことが必要となる。ところが、技術者が岩盤分類をおこなう場合には、考察の結果をなんらかの形で変換した上で具体的な岩盤等級としてしていると考えられる。このことから、数値による演算結果と技術者の回答を直接比較することには問題があろう。そこで、演算結果に対する変換係数 α を導入し、式(6)~(9)で算定される数値 f_n と回答岩盤等級 y_n の関係に下式(10)を仮定する。なお、岩盤等級は本文5.と同様にA~D等級を1~4の数値に対応させている。また、三角形による回答では重心位置を用いた。

$$y_n = \alpha f_n + \varepsilon_n \quad n=1, 2, \dots, N \dots\dots\dots (10)$$

ε_n ：第 n サンプルにおける残差

N ：サンプル数

α は最小自乗法を用いて残差の自乗和を最小にすることによって式(11)のように容易に求めることができる。

$$\sum_{n=1}^N (y_n - \alpha f_n)^2 \rightarrow \min, \alpha = \frac{\sum_{n=1}^N y_n f_n}{\sum_{n=1}^N f_n^2} \dots\dots\dots (11)$$

以上より、演算による岩盤等級は式(12)で求められる。

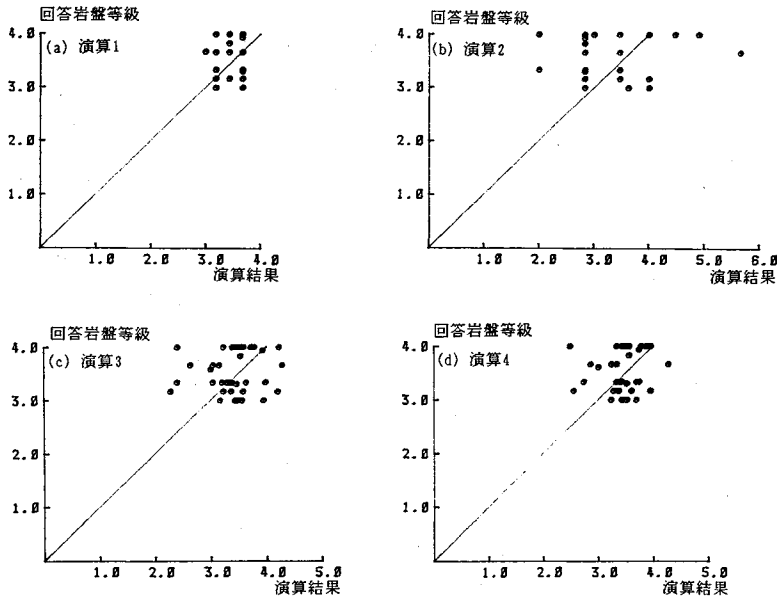


図-14 演算結果と回答岩盤等級の関係

表-6 演算結果と回答値の残差自乗平均

切羽	演算1	演算2	演算3	演算4
1	0.070	0.130	0.094	0.081
2	0.085	0.141	0.112	0.096
3	0.078	0.113	0.129	0.106
4	0.081	0.111	0.135	0.109
5	0.071	0.098	0.093	0.084

表-7 全項目を用いた場合の残差自乗平均

切羽	演算1	演算2	演算3	演算4
1	0.069	0.114	0.089	0.080
2	0.085	0.118	0.094	0.088
3	0.076	0.092	0.105	0.092
4	0.079	0.105	0.116	0.099
5	0.071	0.087	0.081	0.077

$$F_n = \alpha f_n \dots \dots \dots (12)$$

表-6は演算結果 F_n の回答岩盤等級 y_n に対する残差の自乗平均を示したものである。演算には本研究で既に明らかにした決定要素と影響要素を用いている。また、図-14は切羽1の演算結果と回答岩盤等級の関係を示したものである。この関係は切羽2~切羽5についても同様であったため、一例として切羽1を示した。図中、原点から引かれた直線は回答岩盤等級と演算結果が厳密に一致した場合の位置を示すものである。なお、図-14の演算1において黒丸の数が少ないのは同一位置に数サンプルが重なる場合があるためである。

図-14、表-6より、演算1を用いた場合と演算4を用いた場合に良く適合していることがわかる。特に、演算1が最も良い対応を示していることから、岩盤分類において技術者は、トンネル施工における岩盤の不良条件を主として考慮に入れて総合判定をおこなう傾向にあると言える。また、表-7は演算要素として切羽観察記録の全項目と天端状況、土被り厚を用いた場合の残差の自乗平均を示したものである。表-6、表-7より、演算要素を増やすと演算結果と回答岩盤等級の対応は若干良くなるようであるが、顕著な差は見られない。このこと

から、演算要素としては、決定要素と影響要素を用いれば十分といえよう。

8. おわりに

本研究ではトンネルにおける定性的な施工時岩盤データを被験者を介して具体的に検討し、資料による間接的な岩盤分類の可能性を検討した。また、従来の岩盤分類に明示されていない NATM 施工に関わる経験的な分類要素を明らかにすることを試みた。さらに、技術者が資料を基に岩盤分類をおこなう際の総合化の過程を明らかにした。以下に本研究で得られた結論を列記する。なお、以下の結論は、花崗岩地山に NATM で建設されるトンネルにおける施工時の岩盤分類の範囲に限定される。

- 1) 岩盤分類は切羽観察記録、切羽スケッチ、切羽写真等の切羽に関する観察データを用いることで、現場判定とほぼ同様におこなうことができる。
- 2) 岩盤分類においては風化、割れ目、湧水に関して切羽上の位置を具体的に評価できることが重要であり、今後の岩盤分類への導入が必要と考えられる。
- 3) 切羽観察記録の各項目における評価ランクは一般に不良であるほど考慮する程度は大きくなる。

4) 岩盤分類における主観的演算過程では、天端状況、風化変質、素掘面の状態、縦断方向に卓越する不連続面が決定要素であり、土被り厚、割れ目の形態、水による劣化、湧水が影響要素と考えられる。

5) 技術者はトンネル施工における岩盤の不良条件に着目した考察のもとに総合判断をおこなっている。

本研究では実施したアンケートの制約上、主観的演算過程を定量的に明らかにするには至らなかった。しかしながら、決定要素と影響要素に採用された分類要素に関しては、切羽観察記録のみを用いて同定した岩盤分類基準式¹⁴⁾と同様の結果を与えている。このことから、本研究で新たに明らかにされた経験的 분류要素を考慮することによって定量化された岩盤評価システムを実現することは可能と考えられる。

最後に、本研究をおこなうにあたり、貴重な時間をさいてアンケートに協力していただいた日本道路公団、諸民間建設業の技術者の方々に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木昌次・古川浩平・井上洋司・中川浩二：NATM 施工実績に基づく事前設計の評価に関する一考察，土木学会論文集，第 427 号／VI-14，pp. 261～270，1991. 3.
- 2) 日本道路公団：設計要領第三集第 9 編トンネル，pp. 34，1985. 10.
- 3) 日本国有鉄道編：NATM 設計施工指針（案），（社）日本鉄道施設協会，1983.
- 4) Terzaghi, K. : Rock defects and loads on tunnel supports, eds. R.V. Proctor and White, T., Commercial Shearing Co., Youngston, Ohio, pp.15～99, 1946.
- 5) Onodera, T. : Dynamic investigation of foundation rocks in-situ, Proc. 5th US Sympo. Rock Mechanics, Minesota, pp.517～533, 1963.
- 6) 田中治雄：土木技術者のための地質学入門，山海堂，pp. 28～36，1984.
- 7) 岡本隆一・安江朝光：ダムサイトにおける岩盤分類の試み，土木技術資料，Vol. 8, No. 9, pp. 423～432, 1966.
- 8) 池田和彦：トンネルの岩盤強度分類，鉄研報告，No. 695, 1969.
- 9) 土質工学会：岩の工学的性質と設計施工への応用，pp. 325～360, 1974.
- 10) Wickham, Q.E., Tiedemann, H.R. and Skinner, E.H. : Support determination based on geologic predictions, Proc. Rapid Excavation and Tunnelling Conference, ASME, pp.43～64, 1972.
- 11) Bieniawski, Z.T. : Geomechanics Classification of Rock Masses and Its Application in Tunneling, Proc. 3rd Int. Congress on Rock Mechanics, Vol. II -A, 1974.
- 12) Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. : Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mechanics, Vol.6, No.4, 1974.
- 13) 菊地宏吉・斉藤和雄・楠健一郎：ダム基礎岩盤の安定性に関する地質工学的総合評価について，大ダム，No.102, 1982.
- 14) 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.
- 15) 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と岩種特性，土木学会論文集，第 430 号／III-15, pp. 153～156, 1991. 6.
- 16) Zadeh, L.A. : Fuzzy Sets, Information and Control, Vol.8, 1965.
- 17) 和多田淳三・田中英夫・浅居喜代治：ファジィ数量化理論 II 類，行動計量学，第 9 巻第 2 号，pp. 24～32, 1982.
- 18) Madsen, L.E. and Vanderplaats, G.N. : COPES-A FORTRAN CONTROL PROGRAM FOR ENGINEERING SYNTHESIS, Users Manual, Naval Postgraduate School, Monterey, March, 1982.
- 19) 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.

(1991.1.7 受付)

STUDY OF ROCK MASS CLASSIFICATION BASED OF A QUESTIONNAIRE

Shoji SUZUKI, Kohei FURUKAWA, Hiroshi INOUE and Koji NAKAGAWA

Rock mass classification applied to a tunnel face under construction is composed of the engineering and geological factors of the rocks. Unfortunately, many of the classification factors are qualitatively described. At the present stage, an engineer's subjective judgments play an important role in rock evaluation. The present study aims to show the details of the above subjective system. Much of the data used to evaluate the rocks under construction are documents, sketches and so forth. In this study, questionnaires using the above qualitative data are distributed among experienced engineers. Results of these questionnaires are collected and analyzed by using the fuzzy sets theory. By numerical examples, we make empirical factors and the manner of decision making of an engineer clear.