

### (13) アンケートに基づく岩質判定に関する一考察

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 建設工学科(現・(株)大本組 技術研究所) 正会員 鈴木昌次  
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 ROCK MASS CLASSIFICATION BASED ON A QUESTIONNAIRE

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

#### Abstract

To find experienced elements of rock mass classification applied to a tunnel face under construction. Questionnaires were distributed among experienced engineers. Results of these questionnaire are collected and analyzed by using the fuzzy sets theory. By numerical examples, we made experienced elements and form of engineer's decision making clear.

#### 1. はじめに

日本道路公団では設計施工に一貫して適用できる地山分類<sup>1)</sup>を設けているが、施工中の岩質判定ではその多くが定性的な表現に依存している。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。しかしながら、現状でのトンネル施工中の岩質判定は技術者が切羽を直接に目視観察し、従前の施工実績、地山の全体的な状況等を踏まえた上で前述の地山分類に準拠しておこなっている。このため、判定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。

筆者らは、従来から工学的分析に用いられることの少なかった切羽観察、簡易スケッチ等の施工時資料を用いて岩質判定アンケートを実施した。本研究は、このアンケート結果を用いて岩質判定における経験的分類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ものである。

#### 2. アンケート内容と実施方法

日本道路公団では地山の岩質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おり<sup>1)</sup>、現場判定の結果および判定理由等は岩質判定記録に記載されている。アンケートは広島型花崗岩地山での岩質判定記録から判定結果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岩質判定をおこなうものである。また、岩質を回答するにあたって上記資料を考慮した程度の記入も求める。アンケートの対象者は日本道路公団、民間建設業に所属し、岩質判定の経験を有する技術者としており、40の有効回答を得た。

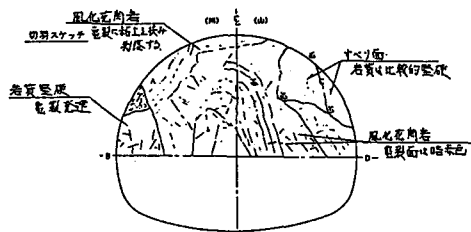
アンケートの対象とした切羽は5切羽である。切羽の選定においては図-1に示すように切羽観察記録(以下、項目名を(A)~(I)と記す。卓越する不連続面は縦断方向を(J)、横断方向を(K)と記す)の(A)、(B)項目に対

する評価ランクが3以上の場合は明らかにD等級、もしくはさらに劣悪な状態と判定できると思われることから、(A)、(B)項目の評価ランクが1か2であり、施工時の岩質判定がB〜D等級であるものとした。地山状況は、地山の支配的な岩石名、該地点の土被り厚、特殊条件を記載したものである。なお、今回の資料では特殊条件の記録された切羽は用いなかった。図-2に示す切羽スケッチは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。切羽1、2、5と切羽3、4では注釈の記入方法が異なるが、これは、現時点において記入様式が統一されていないためである。

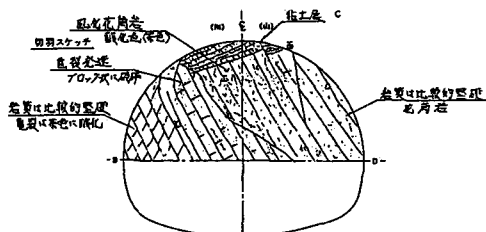
アンケートで判定する岩質等級は日本道路公団の定める岩質区分であるA〜D等級を基準とした。ただし、明確にこれらの区分に判定することが困難な場合もあり、岩質区分自体が本来段階的なものではなく連続的なものと考えられる<sup>2)</sup>ことから、明らかに何れかの区分に決定できる場合は図-3に示す軸線上の任意の位置に○印を記入し、ある程度あいまいさがある場合には三角の山を描くこととした。この場合には三角形の頂点が最も確かと思われる判定を、裾が可能性のある範囲を示す。考慮の程度の記入方法として、切羽観察記録に対しては項目ごとに図-4の軸線上に○印で記入する。また、記入位置を「重要」、「考慮する」と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、縦の分割線は目安とし、任意の位置に記入できるものとした。さらに、切羽ス

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                           |                                          |                                               |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| ① 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                            |
| ② 素地面の状態   | 1. 自立 (普通請不要)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2. 時間がたつと緩み肌落ちする (後普通請)                   | 3. 自立困難掘削後早期に支保する (先普通請)                 | 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. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー刀先く込む |
| ④ 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、破碎、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. $5 \text{ cm} > d$ 破碎、当初より未固結              |
| ⑥ 割れ目の状態   | 1. 密                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 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、海水程度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 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・流出                                      |
| 割断面の傾斜角(°) | 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)               |                                           |                                          |                                               |
| 割断面の傾斜角(°) | 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) |                                           |                                          |                                               |

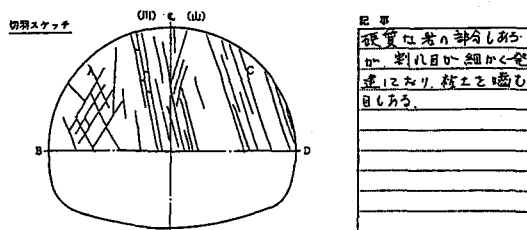
図-1 切羽観察記録



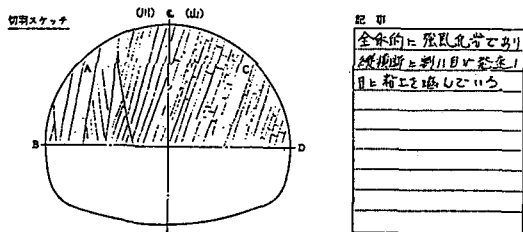
(1) 切羽1のスケッチ



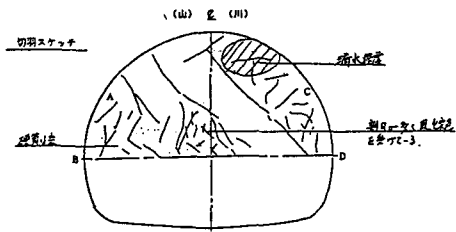
(2) 切羽2のスケッチ



(3) 切羽3のスケッチ



(4) 切羽4のスケッチ



(5) 切羽5のスケッチ

図-2 アンケート対象切羽の切羽スケッチ

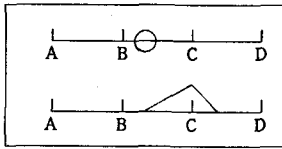


図-4 岩質判定結果記入欄

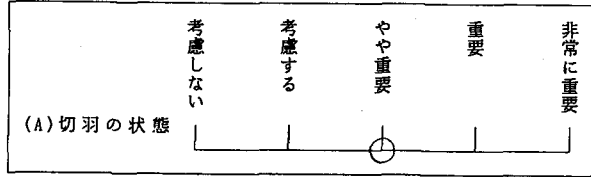


図-5 切羽観察記録の各項目に対する重要度記入欄

ケッチ、切羽写真から判定材料を得た場合には、特記事項として記入欄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。

### 3. アンケート結果の数量化

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ー化が困難となる。そこで、ファジィ集合論におけるメンバーシップ関数を用いて軸線上の形容詞句を数量化することを試みた。メンバーシップ関数は全体集合 $\omega$ におけるファジィ部分集合 $W$ について $\mu_W: \omega \rightarrow [0, 1]$ で定義される。 $\mu_W(\theta)$ は $W$ における $\theta$ のグレードを表し、 $\mu_W(\theta)$ が1に近いほど $W$ に属する割合が大きく、0に近いほど割合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<sup>3)</sup>を用いてメンバーシップ関数を推定する。ファジィ数量化理論Ⅱ類では式(1)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ーウエイトを決定することが目的となり、ファジィ分散比が大きいほど効果的な判別ができる<sup>3)</sup>。

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

ここに、 $\lambda_k$ はカテゴリーウエイト、 $\mu_{n,k}(\theta)$ はサンプル $n$ のカテゴリー $k$ に対するメンバーシップ関数、 $N$ はサンプル数、 $K$ はカテゴリー数、 $Y(n)$ は判別スコアである。ここでは、 $\mu_{n,k}(\theta)$ に切羽観察記録の各項目に対する考慮の程度、外的基準に岩質判定回答を対応付けた上で、切羽ごとにファジィ分散比が最大となるときに $\mu_{n,k}(\theta)$ を決定する。解析の結果、 $\mu_{n,k}(\theta)$ に図-5の曲線を採用した場合に、全切羽に対して平均的に高い分散比を得た。このため、考慮の程度に関するメンバーシップ関数には図-5の曲線を採用する。以下で考慮の程度とはアンケート回答に対する $\mu_{n,k}(\theta)$ の値を指す。図-6は切羽観察記録に対する $\mu_{n,k}(\theta)$ を5切羽に対して平均したものである。ただし、(A)～(I)項目と(J)、(K)項目では評価ランクの考え方が同一でないため(J)、(K)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く、岩盤の状態が悪くなるほど考慮の程度が高くなる傾向にあることがわかる。(G)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。(A)、(B)項目は他の項目に比し、高いグレード値を示している。(A)、(B)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。

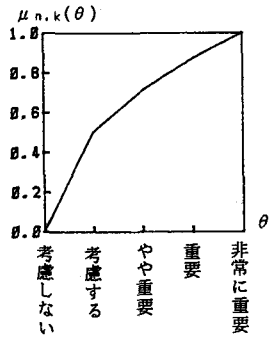


図-5 メンバーシップ関数

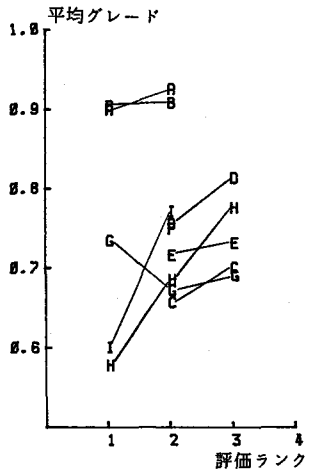


図-6 観察項目の平均グレード

### 4. アンケートによる岩質判定の有意性

現状の現場判定は、ある程度の幅を有する段階的な分類であり、岩質判定回答も可能性の幅を有する。こ

のため、岩質判定回答の妥当性は現場判定に対する所属度合によって検討する。図-7の( )内は現場判定、点線はその推定範囲、実線は岩質判定回答の平均範囲である。なお、岩質判定回答については岩質等級A~Dを1~4の数値に線形対応させている。図-7より、切羽3を除いては、ほぼ現場判定と同様な回答が得られていると考えることができよう。切羽3で岩質判定に差が現れている理由としては、図-2(3)に示すように切羽スケッチの記載が不明瞭で、さらに記事内容から割れ目の発達した部分、粘土を噛む部分の位置が特定できなかったためと思われる。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、風化等の位置が明確に記されていることから理解できる。ここで、表-1は特記事項の回答で2例以上あったものを示してある。表中、(記)は切羽スケッチの記事、(地)は地山状況、(写)は切羽写真から判断されたことを示す。また、表-2には土被り厚を示してある。表-1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、岩質判定においては切羽の割れ目、風化の発達した部分の位置が重要であり、特に天端付近の状況が問題になることが言える。この点は、従来のト

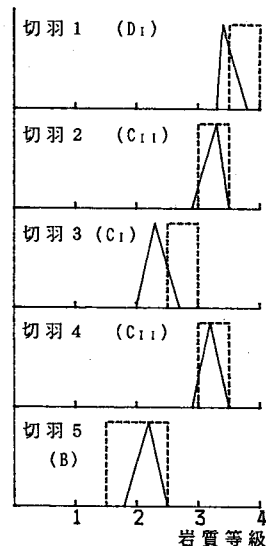


図-7 岩質判定結果

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类要素として重要であると考えられる。

表-2 地山状況資料

| 切羽 | 土被厚(m) |
|----|--------|
| 1  | 22.2   |
| 2  | 27.8   |
| 3  | 168.9  |
| 4  | 123.2  |
| 5  | 48.8   |

## 5. 岩質判定における演算形態

ここでは、技術者が岩質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演算<sup>4)</sup>を考える。

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

$$f_n = (1/K) \sum_{k=1}^K \mu_{n,k}(\theta) \quad (4)$$

表-1 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 |
|    | 天端の滑り面。(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(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  | 亀裂破碎部分有り(記) | 7  | 0.83 | 0.06 |
|    | 亀裂破碎部分有り(記) | 7  | 0.83 | 0.11 |
| 4  | 亀裂破碎部分有り(写) | 6  | 0.86 | 0.09 |
|    | 風化花崗岩である(記) | 12 | 0.88 | 0.05 |

$$f_n = \min\{\mu_{n,k}(\theta) \mid k=1, 2, \dots, K\} \quad (3)$$

$$f_n = (1/K) \sqrt{\sum_{k=1}^K \mu_{n,k}^2(\theta)} \quad (5)$$

ここに、Kは演算に用いる要素数である。式(2)は演算要素の最大グレード値で岩質を決定する演算(演算1)である。式(3)は最少グレード値で決定する演算(演算2)である。式(4)はグレード値の算術平均(演算3)、式(5)は幾何平均(演算4)である。次に、技術者が岩質判定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質等級としてしていると考えられる。そこで、演算結果に対する変換係数 $\alpha$ を導入し、式(2)~(5)で算定される数値 $f_n$ と岩質判定回答値 $y_n$ の係に下式(6)を仮定する。なお、岩質判定値は本文4.と同様にA~D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。

$$y_n = \alpha f_n + \varepsilon_n \quad n=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

ここに、 $\varepsilon_n$ は第nサンプルにおける残差である。 $\alpha$ 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

表-3 全項目を用いた場合の残差ノルム

| 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 |

よって容易に求めることができ、演算による岩質判定値は式(9)で求められる。

$$\sum_{n=1}^N (y_n - \alpha f_n)^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

$$F_n = f_n \frac{\sum_{n=1}^N y_n f_n}{\sum_{n=1}^N f_n^2} \quad (9)$$

以下に演算結果を示す。演算には切羽観察記録と天端付近の状況および土被り厚を要素として用いている。表-3は演算結果 $F_n$ の岩質判定回答値 $y_n$ に対する残差ノルムを示したものである。また、図-8は一例として切羽1の演算結果と岩質判定回答値の関係を示したものである。図中、原点から引かれた直線は岩質判定結果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-8の演算1,2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-8、表-3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

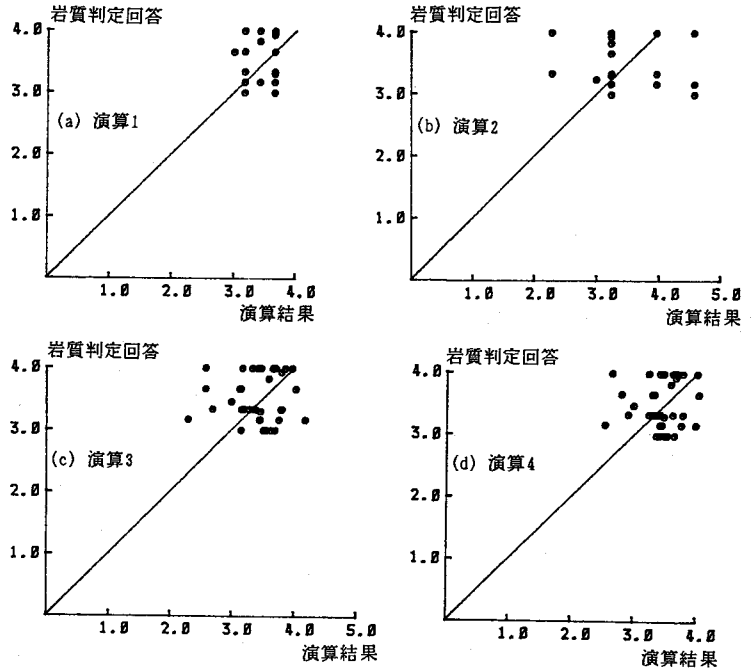


図-8 切羽1に関する演算結果と岩質判定回答値の関係

から、技術者はトンネル施工における岩盤の不良条件を採用した考察のもとに総合判定をおこなう傾向にあると言えよう。これと同様の結果は、橋梁の耐震設計に携わる技術者へのアンケート結果の分析例<sup>4)</sup>においても指摘されており、トンネル施工、耐震設計に関わらず、一般に技術者のおこなう工学的評価においては危険性の高い因子を考察の中心的位置にしているものと考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、日本道路公団が実施している施工中の岩質判定を基にしたアンケートを実施し、以下の結論を得た。1)岩質判定は切羽観察記録、切羽スケッチ、切羽写真等の切羽に関する巨視的な観察データによって現場判定と同様におこなうことができる。2)岩質判定においては風化、割れ目等に関する切羽天端付近の状況を具体的に評価することが重要であると考えられることから、今後の岩質判定基準には、この点を盛り込むことが必要と考えられる。3)技術者はトンネル施工における岩盤の不良条件を採用した考察のもとに総合判断をおこなっており、これは工学的評価における共通の指向であると考えられる。

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)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)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)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 4)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