

(79) エキスパートシステムを用いた岩盤分類

清水建設(株) 正会員 ○ 今津 雅紀
 同 上 正会員 水谷 文俊
 同 上 正会員 泉谷 泰志
 同 上 正会員 高崎 英邦

1. はじめに

トンネルなどの岩盤構造物を設計する際、岩盤の工学的特性を特徴づける岩盤分類に従ってロックボルトの配置、吹き付けコンクリートの厚さなどの標準施工パターンを決めることが多く、岩盤分類は、岩盤構造物の設計施工において欠くことのできない重要なものである。

しかし、岩盤分類は、定性的あるいは定量的な判断基準に基づいて数段階の等級が決められていて、最終的な岩盤等級を決定するまでの過程が明示されない場合が多い。そこで、トンネルを対象とした地山分類の中から、一つの例として日本道路公団の地山分類を取り上げ、専門家の評価手順に従って項目を細分化するとともに、確信度という概念を用いることによって、専門家の主観性を取り入れた岩盤分類に関するエキスパートシステム(Expert System 以下 ES と略す)のプロトタイプを開発したので、その概要について報告する。

2. 対象とした岩盤分類

現在国内では、政府関係機関その他により十数種類の岩盤分類¹⁾が作成・使用されており、その分類要素や表示方法などは、対象構造物に合わせて各々異なっている。今回は、これら岩盤分類のうちのトンネルを対象とした地山分類の ES 化を目標とし、なかでも地山が本来持つ強度を有効に利用することから、岩盤評価が設計施工にとって非常に重要となる NATM を対象とした地山分類に注目して、その内容を検討した。

NATM を対象として作成された地山分類としては、国鉄の『トンネルの地山分類』と道路公団の『トンネルの地山分類』がある。このうち、国鉄における地山分類は、主として岩石の種類、地山の弾性波速度、地山強度比の3項目を評価対象とし、これらの組み合わせで一義的に地山分類が定められるようになっているため、判定に際して専門家の判断が入る余地が少なく、ES 化によるメリットは多くないと考えられる。

道路公団の地山分類²⁾は、地山の弾性波速度やボーリングコアの RQD といった定量的な項目に加えて、風化の程度や割れ目の状況など、定性的な項目も含まれており、ES 化に適していると考えられる。地山分類には、計画段階と掘削段階のものがあるが、岩盤分類の ES 化の試みの第一ステップとして、計画段階における地山分類を対象とした。道路公団の地山分類は、岩石の種類の判別から始まり、各評価項目が地山分類表の形で示されている。そこで、ES 化にあたっては、地山分類表の内容をさらに細分化し、設計要領本文中の注意事項も合わせて検討を加え、各評価項目ごとに図-1(一例)に示すような質問内容に整理した。質問項目については、表-1 に示している。

Q01 岩石の種類は何ですか?	
変成岩・深成岩(塩基性)	1
古生層・中生層	2
火山岩・脈岩・深成岩(酸性)	3
第三紀層・下部洪積層($\alpha_c \geq 200 \text{ kgf/cm}^2$)	4
第三紀層・下部洪積層($\alpha_c < 200 \text{ kgf/cm}^2$)	5
上部洪積層・沖積層	6
データがないのでわからない	7

図-1 質問項目の一例

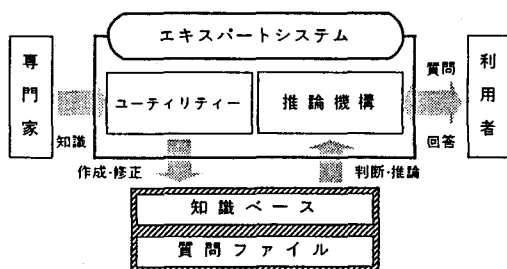


図-2 基本構造

3. エキスパートシステム

本ESは、推論エンジンとして、プロダクションルールに基づく市販の開発支援ツールを用いている。本ESにおいて、専門家に相当するものが、道路公団の地山分類表および地質の専門家であり、知識ベースは、この地山分類表に専門家の主観を加えて、IF-THEN型式の知識表現として蓄えてある。図-2は、ESの基本構造を示したもので、プログラムに起動をかけると、端末を通して質問項目が表示され、利用者の回答によって、知識ベースの知識をもとに推論機構が作動して判断・推論する。そして、その結果(地山分類)を確信度とともに利用者に示すものである。

一般に、専門家の知識を知識ベースに入力する時、専門家の主観というあいまいさをどのように取り扱うかが問題になる。本ESでは、MYCINにおいてBayes確率で定義されるCF(Certainty Factor)と名付けられた確信度によって、不確実性を取り扱っている³⁾。CFは、 $[-1, 1]$ 間の値をとり、 -1 は絶対的否定、 1 は絶対的肯定を表す。IF-THEN型式には、①X and YならばA(AND関係)、②X or YならばA(OR関係)、③XならばA, YならばA, …のようにゴールが2つ以上の証拠によって独立に支持される関係(COMB関係)の3種類の関係があり、本ESでは、③が多用されている。①, ②においては、 $\min, \max$ 演算で、③においては、次の(1)~(3)式で確信度が計算されている。

$$-1 \leq CF_{I_1, \dots, i} \leq 0 \quad CF_M = (1 + CF_{I_1}) \cdots (1 + CF_{I_i}) - 1 \quad (1)$$

$$0 \leq CF_{I_1, \dots, j} \leq 1 \quad CF_N = 1 - (1 - CF_{I_1}) \cdots (1 - CF_{I_j}) \quad (2)$$

$$CF_T = CF_M + CF_N \quad (3)$$

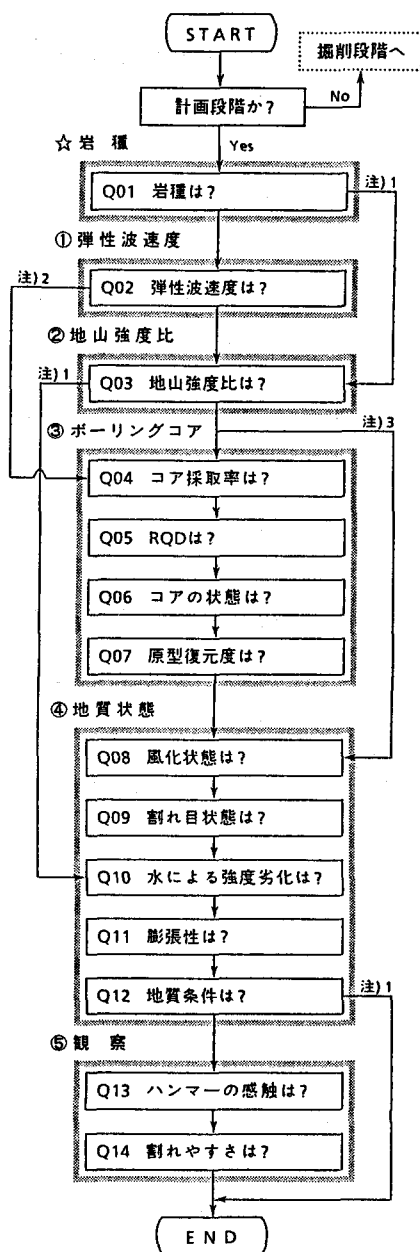
ここで、 $CF_{I_1, \dots, i}, CF_{I_1, \dots, j}$: 各項目の確信度

CF_T : 地山分類に対する確信度

4. 質問項目

質問は、地山分類表における岩種および①弾性波速度、②地山強度比、③ボーリングコア、④地質状態、⑤観察の5つの評価項目をさらに14の項目に分け、図-3に示すフローに従って、質問されるようになっている。道路公団の地山分類においては、岩種によって、評価項目や内容が異なるので、①弾性波速度や②地山強度比では、質問内容を変える一方、岩種eについては、スキップする質問項目がかなり存在している。表-1は、各々の質問項目に対応した確信度を示したものである。表-1における確信度は、最大5段階に分類され、およそ以下の評価基準で採点した。①○: 明らかに相関がある場合、②○: 相関がある可能性のある場合、③: 無相関の場合あるいはunknownの場合、④▲: 相関の可能性がない場合あるいはunknownの場合、⑤●: 明らかに無相関の場合。

各々の質問項目が、結果として得られる地山分類に与える影響度が異なると考えられるので、表-2に示すような各項目ごとの評価基準に対する確信度値を仮定した。



注1 e岩種
注2 a, b岩種 ≥ 3.2 km以上 or
c, d岩種 ≥ 3.0 km以上
注3 地山強度比が1以下

図-3 ESの質問フロー

表-1 確信度マトリックス

*1 岩種 d₁, d₂ に対してのみ適用

*2 岩種 a, b, c, d に対して適用

*3 解説より設定

項 目	地山分類	A	B	C	D		E
					I	II	
① 弾性波速度	a b 実生成層・深中生成層	1) 弾性波速度が 5.0km/sec 以上	○	○	▲	●	
		2) 弾性波速度が 3.8~5.0km/sec	○	○	○	▲	
		3) 弾性波速度が 3.2~3.8km/sec		○	○	○	
		4) 弾性波速度が 2.5~3.2km/sec	▲		○	○	
		5) 弾性波速度が 2.5km/sec 以下	●	▲	○	○	
		6) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	
	c 火山岩など	1) 弾性波速度が 4.8km/sec 以上	○	○	▲	●	
		2) 弾性波速度が 3.5~4.8km/sec	○	○	○	▲	
		3) 弾性波速度が 3.0~3.5km/sec		○	○	○	
		4) 弾性波速度が 2.5~3.0km/sec	▲		○	○	
		5) 弾性波速度が 2.5km/sec 以下	●	▲	○	○	
		6) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	
② 地山強度比	d ₁ 第三紀層など	1) 弾性波速度が 3.5km/sec 以上	○	○	▲	●	
		2) 弾性波速度が 3.0~3.5km/sec	○	○	○	▲	
		3) 弾性波速度が 2.0~3.0km/sec		○	○	○	
		4) 弾性波速度が 1.5~3.0km/sec	▲		○	○	
		5) 弾性波速度が 1.5km/sec 以下	●	▲	○	○	
		6) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	
	d ₂ 第三紀層など	1) 弾性波速度が 1.5km/sec 以上		○	○	○	
		2) 弾性波速度が 1.5~3.0km/sec			○	○	
		3) 弾性波速度が 1.5km/sec 以下			○	○	
		4) データがないのでわからない		▲	▲	▲	
	a b c d ₁ d ₂ 層	1) 地山強度比は 4 以上*1)			○	●	
		2) 地山強度比は 4~2			○		
		3) 地山強度比は 2~1				○	
		4) 地山強度比は 1 以下		●		○	
		5) データがないのでわからない		▲	▲	▲	
	e 層	1) 地山強度比は 2 以上			○	●	
		2) 地山強度比は 2~1				○	
		3) 地山強度比は 1 以下			●	○	
		4) データがないのでわからない		▲	▲	▲	

表-2 各項目の確信度一覧

項 目		確信度		◎	○		▲	●
① 弾性波速度		0.6	0.3	0.0	-0.3	-0.6		
② 地山強度		0.4		0.0	-0.1	-0.4		
③ ボー リン グ コ ア	㊦ コア採取率	0.2		0.0	-0.1	-0.2		
	㊦ R.Q.D.	0.2		0.0	-0.1	-0.2		
	㊦ コアの状態	0.2		0.0	-0.1	-0.2		
	㊦ 原型復元	0.1		0.0	-0.1			
④ 地 質 状 態	㊦ 風化状態	0.2		0.0	-0.1	-0.2		
	㊦ 割れ目状態	0.2		0.0	-0.1	-0.2		
	㊦ 水による強度劣化	0.2		0.0	-0.1	-0.2		
	㊦ 膨張性	0.6		0.0	-0.1	-0.6		
	㊦ 地質条件	0.2		0.0	-0.1	-0.2		
⑤ 観 察	㊦ 叩いた感触	0.1		0.0				
	㊦ 割れやすさ、割れ方	0.4	0.2	0.0	-0.1	-0.4		

項 目	地山分類	A	B	C	D		E
					I	II	
③ ボーリングコア	A コア採取率	1) 90% 以上	○		●	●	
		2) 70~90%		○			
		3) 40~90%					
		4) 40% 以下	●		○	○	
		5) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	
	B R.Q.D.	1) 90 以上	○		●	●	
		2) 70~90		○			
		3) 10~70			○		
		4) 10 以下	▲	▲	▲	▲	
		5) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	
	C コアの状態	1) 20cm 以上で、細片含まない	○	●	●	●	
		2) 10~20cm で、大岩片から棒状		○	●	●	
		3) 亀裂多く 5cm 以下の細片多量	●		○		
		4) 全体に細片状で砂 or 粘土状	●	●		○	
		5) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	
	D 原型復元	1) はば原型に近く復元できる					
		2) 困難だが復元できる部分ある		○			
		3) 不可能である					
		4) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	
④ 地質状態	A 風化状態	1) 非常に堅硬新鮮、風化影響なし	○	●	●	●	
		2) かなり堅硬、風化で多少変質			●	●	
		3) 風化で変質、多少軟らかい	●		○		
		4) 著しい風化作用、軟質で脆い	●	●		○	
		5) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	
	B 割れ目状態	1) 大塊状で割れ目なく安定	○	●	●	●	
		2) 割れ目少なく間隔 70~30cm		○	●	●	
		3) 割れ目細かく間隔 50cm 以下	●		○		
		4) 割れ目・層理片理極めて多い	●	●		○	
		5) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	
	C 水による強度劣化	1) 劣化はない	○	○	●	●	
		2) 劣化は少ない			○	●	
		3) 軟弱化する	●	●	●	○	
		4) 著しく軟弱化する	●	●	●	○	
		5) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	
	D 膨張性	1) 膨張性が明確に認められる	●	●	●	○	
		2) 膨張する可能性がある					
		3) 膨張性はない					
		4) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	
	E 地質条件	1) 岩盤で断層・破砕帯は少ない	○	○	○		
		2) 粘土化あまり進まない破砕帯			○	○	
		3) 粘土化著しい断層破砕帯	●	●	●	○	
		4) 土砂地山である	●	●	●	○	
		5) 産錐地帯である	●	●	●	○	
		6) 大きな産錐地帯である	●	●	●	○	
		7) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	
⑤ 観察	A 叩いた感触	1) ハンマーが跳ね返る	○				
		2) (キンキン~カンカン)		○			
		3) (コンコン~ドンドン)			○		
		4) (ボンソンドスドス)				○	
		5) (土砂~粘性土状)					
		6) データがないのでわからない					
	B 割れやすさ、割れ方	1) 強打の繰返しで多少割れる	○	○		▲	
		2) 強く叩けば割れる	○	○	○	▲	
		3) 容易に割れる		○	○	○	
		4) 指先で割ることができる	▲		○	○	
		5) わずかな打撃で崩れる	●	▲		○	
		6) 既に岩片~塵状~粘土状	●	▲		○	
		7) データがないのでわからない	▲	▲	▲	▲	

5. エキスパートシステムによる実施例

構築されたESによって地山分類した結果が、設計に用いた地山分類をどの程度評価できるかを検討した。その結果を表-3に示す。対象トンネルは、施工済あるいは施工中のトンネルで前述した地山分類に必要となる項目が多い7地点をとりあげている。ESによる評価の精度を考察するため、以下に示す3段階の適中率に分類した。即ち、

①○：設計に用いた地山分類が、ESにおいて得られる確信度の最も高い地山分類と一致する場合、②△：設計に用いた地山分類が、ESの2番目に高い確信度を持つ地山分類と一致する場合、③×：①、②以外の場合

表-3からわかるように、7トンネルの事例のうち4トンネルが設計に用いた地山分類と一致し、2トンネルの事例が2番目に高い確信度でもって設計に用いた地山分類と一致することがわかる。このことより、本ESを使用してある程度信頼性の高い地山分類が可能であると言える。しかし、地山分類が、A,Bの境界領域に存在すると考えられるようなAトンネル,Kトンネル(2)の場合には、必ずしも設計値と一致しない。

次に、各地山分類の等級と確信度の関係について考察する。表-4に、ESによって得られた結果としての地山分類の確信度とその確信度に影響を与えた項目の確信度を示す。この結果より地山分類の等級が低くなるにつれ、全体の確信度が低くなっていることがわかる。これは、ESを構築する際に弾性波速度に高い確信度を与え、この項目である程度判断できるとしたためで、弾性波速度を評価項目としない土砂地山(地山分類E)であるI,Nトンネルの場合は、全体の確信度が相対的に低くなる。

6. 今後の課題

道路公団の計画段階における地山分類をES化したのが、トンネルの計画段階においては、既知の情報も少なく、地山分類表に記載されていない項目から専門家が判断を下さなければならないが、今後はその点を知識ベース化していかなければならない。一方、地質変化に伴って、評価が変わる切羽断面における地山分類が、設計変更などの判断基準になることも多く、施工段階での地山分類が必要不可欠であり利用頻度が高いと考えられる。そこで、施工段階の地山分類が、地質の専門家でなくとも施工現場で即座に得られるようなESが本来と求められるであろう。本ESにおいては、14項目の評価要素が独立で地山分類の確信度に影響を与える形をとっているが、実際は評価項目間で深いかかわりを持っているので、その影響を考慮しなくてはならない。また、各項目ごとに仮定した確信度の吟味とともに、各質問に対する回答の信頼度についても評価していかなければならない。さらに、岩種がわかれば、評価を下す情報がない場合にも、岩盤物性データバンクなどを用いてある程度の推測をたてることができると考えられるので、このデータバンクから情報を得るようなシステムにしていく必要があろう。その他、今後の課題を箇条書きにすると、1) 実用タイプへの展開方法、2) 専門家からの主観的知識の獲得方法、3) 知識ベースへの入力方法、4) あいまいさの取扱い方法などがあげられる。最後に、本研究に貴重な助言と御協力を頂いた情報システム部 伊藤健司氏ほか関連部署の諸氏に感謝の意を表します。

参考文献 1) 日本応用地質学会編：岩盤分類 応用地質特別号, 1984.8, p.188. 2) 日本道路公団編：設計要領 第三集 トンネル, 1985.10, pp.26~39. 3) 石塚満：不確かな知識の取り扱い, 計測と制御, vol.22, No.9, 1983.9, pp.30~35.

表-3 設計に用いた地山分類とESによる地山分類の比較

トンネル名	設計に用いた地山分類	ESによる地山分類	確信度	適中率
Iトンネル	E	E	0.52	○
		D-II	0.20	
Sトンネル	C-II	C-I	0.62	○
		C-II	0.62	
Aトンネル	B	A	0.95	△
		B	0.68	
Kトンネル(1)	D-II	D-II	0.84	○
		D-I	0.72	
Kトンネル(2)	B	A	0.92	△
		B	0.80	
Nトンネル	E	E	0.52	○
		D-II	0.20	
Oトンネル	D-I	C-I	0.60	×
		C-II	0.60	

表-4 全体の確信度と影響項目

トンネル名	ESによる地山分類と確信度	影響項目(確信度)
Iトンネル	E 0.52	地山強度比(0.4) 水による劣化(0.2)
Sトンネル	C-I,II 0.62	地山強度比(0.4) 割れやすさ(0.4)
Aトンネル	A 0.95	地山強度比(0.6) 割れやすさ(0.4)
Kトンネル(1)	D-II 0.84	弾性波速度(0.6) 割れやすさ(0.4)
Kトンネル(2)	A 0.92	割れやすさ(0.4) 弾性波速度(0.3)
Nトンネル	E 0.52	地山強度比(0.4) 水による劣化(0.2)
Oトンネル	C-I,II 0.60	弾性波速度(0.6) 地山強度比(0.4)

(79) ROCK CLASSIFICATION BY EXPERT SYSTEM

by M. Imazu

F. Mizutani

Y. Izumiya

H. Takasaki

(Shimizu Construction Co., Ltd.)

In relation to designing and constructing tunnels in rock ground, we have to decide the standard design of rock bolt, invert and second lining by using rock classification which characterizes the engineering quality of rock mass. Rock classification is a very important tool for the design of rock structures. And it is divided into several rock grades according to the classification table showing abstract standards, from the subjective judgment of geologists. For this reason, in general it is difficult for us to understand the process to the final decision of rock grade.

After hearing the process from experts, we collected the knowlege of experts and made the knowledge base based on production rules. Using it, we have made an expert system for rock classification. Features of this system are as follows.

1. Selected the rock classification for NATM made in Japan Highway Public Corporation.
2. Subdivided the item according to estimated procedures of experts.
3. Induced the subjectivity of experts by using the certainty factor.
4. Developed the trial type of expert system for rock classification.