이분적 터널 암반 분류를 위한 정성적 자료의 지구통계학적 연구－Ⅱ. 응 용

A Geostatistical Study Using Qualitative Information for Tunnel Rock Binary Classification－Ⅱ. Applcation

유 광 호*
You, Kwang－Ho

Abstract

In this paper, the application of the rock classification method based on indicator kriging and the cost of errors, which can incorporate qualitative data, was presented. In particular, the binary classification of rock masses was considered. To this end, a simplified RMR system was used. Since most of subjectivity in this analysis occur during the estimation of loss functions, a sensitivity analysis of loss functions was performed. Through this research, it was found out that an expected cost of errors could successfully be used as an indication for how well a sampling plan was designed. In certain conditions, qualitative data can be more economical than quantitative data in terms of expected costs of errors and sampling costs. Therefore, an additional sampling should be carefully determined depending upon the surrounding geologic conditions and its sampling cost. The application method shown in this paper can be useful for more systematic rock classifications.

요 지

본 논문에서는, 정성적 데이타를 체계적으로 이용할 수 있는, 지시크리깅(indicator kriging)과 오차에 대응하는 비용(cost of errors)에 근거한 암반분류 방법의 응용예에 관해 연구하였다. 특히, 암반의 이분적 분류(binary classification)가 고려되었으며, 이를 위해서, 간편화된 암반평가 시스템(rock mass rating system, RMR)이 사용되었다. 또한, 대부분의 주관성은 손실함수를 작성할 때 발생하기 때문에, 손실함수의 민감도 분석(sensitivity analysis)이 수행되었다. 본 연구를 통해, 오차에 대응하는 비용의 기대값이 암반조사를 위한 시추 방법이 잘 계획되었는지에 관한 평가척도로 이용될 수 있음을 알았다. 오차에 대응하는 비용의 기대값과 그 데이타를 샘플링 하는데 드는 비용을 감안할 때, 정성적 데이타가 정량적 데이타보다 경제적일 경우도 있으며, 이는 주위 지반상태와 시추에 드는 비용을 잘 고려하여 결정되어야 한다. 응용예를 통해서 제시된 방법은 보다 체계적인 암반 조사를 위해 크게 기여할 것으로 사료된다.

* 정회원, 삼성건설 기술연구소 선임연구원

1. 서 론

직접 측정한 정량적 데이타가 부족한, 터널 시공의 암반분류를 위해, 물리탐사나 전문가의 견해등의 정성적 데이타(또는 소프트데이타)를 효율적으로 이용할 수 있는 소프트크리깅(soft kriging)[1]의 근간이 되는 지시크리깅(indicator kriging)과 오차에 대응하는 비용(cost of errors)[5]에 근거한 방법론이 필자에 의하여 제안되었다[3] 본 논문에서는 계속하여 이 제안된 방법론이 어떻게 응용될 수 있는지를, 특정한 통계 특성을 만족하도록 만들어진 데이타(simulated data)를 사용하여 예시하였다.

한 설계 회사가 터널 설계를 위해 한 특정지역의 암반 상태를 분류하고자 한다. 하지만, 암반 상태가 단순할 것으로 예상되므로, Bieniawski에 의해 제안된 암반 평가시스템(rock mass rating system, RMR) (Hoek와 Brown[1], 1980, pp.23~27)을 단순화시킨 분류법에 따라 분류되었다. 단순화된 RMR 분류법은 암반을 특정한 RMR값을 기준으로 두개의 다른 등급(class)으로, 예를 들면, 등급1과 등급2로 분류하는데 사용되었다. 즉, 암반의 RMR 값이 50보다 크면 좋은 암반으로, 50 보다 작으면 나쁜 암반으로 분류되었다. 본 연구에서는 선택기준으로 오차에 대응하는 비용의 기대값이 사용되었다.

2. Simulated RMR 데이타

본 연구를 위해 길이 50미터의 일차원 (직선)터널이 사용되었다. 먼저, 터널의 중심선이 50개의 격자점에 의해 등간 격으로 세분되었고, 편의상, 각 점들은 점 1, 점 2, …, 점 50이라고 지칭하기로 한다. 각 점에서 RMR 값들은 이동 평균(moving average)기법을 사용하여 만들어졌다. 참고로, 이 기법은 특정한 구면 베리오그램(spherical variogram)을 만족하는 다변량 가우스 데이타(multivariate Gaussian data)를 산출하는데 유용한 기법중의 하나이다.[2]

본 연구를 위해 산출된 RMR 데이타들은 표 1에 나타난 바와 같으며, 다음과 같은 통계 특성을 갖는다.

최소값 : 12
최대값 : 99
평균값 : 47
분산값 : 382
Nugget : 0
Sill : 515
Range : 12m

3. 지시 베리오그램(Indicator Variogram)의 산정

지시크리깅(indicator kriging) 분석을 위해서, 표 1에 실린 RMR 데이타들($z(x_i)$)은 식(1)의 변환 규칙(transformation rule)에 의해 지시데이타(indicator data)로 변환되었다(유광호[3], 1993). 본 논문에서 사용되는 RMR값은 0에서 100 사이의 값을 취하기 때문에, 경계값으로 RMR 값 50을 택하였으며, 변환된 지시데이타들은 표 1에 나타낸 바와 같다.

$$i(x_i) = \begin{cases} 0, \text{ 만약 } z(x_i) > 50 \\ 1, \text{ 만약 } z(x_i) \leq 50 \end{cases} \quad (1)$$

하지만, 이 경계값은 0과 100사이의 어떠한 값이라도 무방하다.

50개의 변환된 지시데이타로부터 공간적 유사성 측정(spatial proximity measure) 방법의 하나인, nugget이 0.05, sill이 0.25, range가 12.0인 구면 베리오그램모델(spherical variogram model)이 유추되었으며, 그림 1에서 보는 바와 같다.

4. 실험 설계 및 비교

본 논문에서는 터널의 중간부가 높은 산 밑을

표1. Simulated RMR 데이타 및 변환된 지시데이타

점	RMR 값	변환된 지시데이타	점	RMR 값	변환된 지시데이타
1	27	1	26	35	1
2	28	1	27	19	1
3	30	1	28	44	1
4	35	1	29	44	1
5	37	1	30	37	1
6	32	1	31	40	1
7	28	1	32	30	1
8	64	0	33	18	1
9	79	0	34	12	1
10	72	0	35	20	1
11	83	0	36	20	1
12	97	0	37	27	1
13	77	0	38	32	1
14	73	0	39	39	1
15	72	0	40	43	1
16	69	0	41	35	1
17	81	0	42	51	0
18	42	1	43	56	0
19	43	1	44	66	0
20	61	0	45	63	0
21	57	0	46	47	1
22	47	1	47	61	0
23	50	1	48	59	0
24	42	1	49	46	1
25	28	1	50	35	1

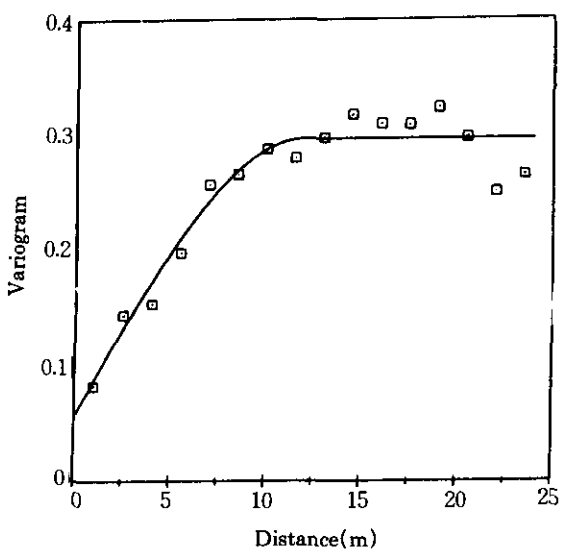

그림1 Variogram estimation for indicator data

통과한다고 가정되었고, 아래와 같이 3개의 다른 샘플링 방법이 오차에 대응하는 비용의 기대값과 분류된 등급들을 근거로 비교 검토되었다.

샘플링 방법 1

터널 중심선을 따라서, 가장 단순하게 등간격으로 점 5, 15, 25, 35, 45에서 5개의 하드데이타(예를 들면, 보오링 데이타)를 샘플링 한다. 이 5개의 하드데이타를 사용하여 나머지 45개 점의 RMR값들을 평가하였다.

샘플링 방법 2

터널 중간부가 산밑을 통과하기 때문에 이 부분에서 샘플링하는 것은 비용이 많이 소요되므로 경제적이지 못하다고 판단된다. 따라서 점 25를 제외한 점 5, 15, 35, 45에서 4개의 하

드데이타를 샘플링 한다. 나머지 46개의 점의 RMR 값들은 샘플링된 4개의 하드데이타를 사용하여 평가되었다.

샘플링 방법 3

샘플링 방법 2와 같이 점 5, 15, 35, 45에서 4개의 하드데이타를 샘플링하고, 점 25에서는 데이타의 질은 좀 떨어지지만, RMR값 20에서 60 사이에서 등분포한다는 소프트데이타가 샘플링 되었다고 가정되었다. 다시 말해, 점 25에서의 변환된 지시데이타는 0.75로써, 이 점이 등급 1에 속할 확률이 0.75라고 가정되었다. 참고로, 소프트데이타로부터 변환된 지시데이타는 하드데이타의 경우(0 아니면 1)와는 달리 0과 1 사이의 모든 값을 취할 수 있다.

각 점에서의 RMR값들은 2절에서 언급된 산출된 값들이 사용되었다. 또한, 이 값들은 각 점에서의 참값들로 가정되었으며, 본 논문에서 "샘플링 한다"는 것은 RMR값을 측정한다는 뜻으로, 표 1에 실린 값을 취하여 사용하였다. 본 해석을 위해 다음과 같은 손실함수(loss function), S_{ij}가 사용되었다.

$$S_{ij} = [S_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 0 \end{bmatrix} \qquad (2)$$

여기서 $[S_{ij}]$는 손실함수의 메트릭스식 표현을 위해 사용되었다. 위 손실함수의 숫자는 계산을 쉽게 하기 위해 임의로 선택되었다. 다만, S_{21}이 S_{12}의 두 배이다. 이것은 암반상태를 과대평가했을 때가 과소평가했을 때 보다 두 배의 손실을 초래한다는 것을 반영한 것이다.

샘플링되지 않은 점들의 등급들은 샘플링된 점들의 RMR 값들을 이용하여 보통 지시크리킹(ordinary indicator kriging) 기법을 사용하여 분류되었다. 이를 위해 오차에 대응하는 비용이 선택기준으로 사용되었으며, 터널 중심선을 따라 위치한 50개 점에서의 참 등급들과 평가된 등급들은 표 2에 나타난 바와 같다. 표 2에서 I과 II는 각각 등급 1과 2를 의미한다.

오차에 대응하는 비용의 참값은 식(2)의 손실함수를 사용하여 표 2의 참 등급과 평가된 등급을 비교하여 계산되었고, 오차에 대응하는 비용의 기대값은 50개점에서 최적의 등급에 상응하는 기대값을 각각 구하고, 이들 값을 모두 더함으로써 구하였다. 표 3은 오차에 대응하는 비용의 참값과 기대값 및 절대오차를 보여준다.

표2. 참 등급과 평가된 등급들

0: 하드데이타, +: 소프트데이타

격자점	참등급	각 시추방법으로부터 평가된 등급		
		시추방법1	시추방법2	시추방법3
1	I	I	I	I
2	I	I	I	I
3	I	I	I	I
4	I	I	I	I
5	I	I+	I+	I+
6	I	I	I	I
7	I	I	I	I
8	II	I	I	I
9	II	I	I	I
10	II	I	I	I
11	II	I	I	I
12	II	I	II	I
13	II	II	II	II
14	II	II	II	II
15	II	II+	II+	II+
16	II	II	II	II
17	II	II	II	II
18	I	I	II	II
19	I	I	II	I
20	II	I	II	I
21	II	I	I	I
22	I	I	I	I
23	I	I	I	I
24	I	I	I	I
25	I	I+	I+	I+
26	I	I	I	I
27	I	I	I	I

격자점	참등급	각 시추방법으로부터 평가된 등급		
		시추방법1	시추방법2	시추방법3
28	I	I	I	I
29	I	I	I	I
30	I	I	I	I
31	I	I	I	I
32	I	I	I	I
33	I	I	I	I
34	I	I	I	I
35	I	I	I	I
36	I	I	I	I
37	I	I	I	I
38	I	I	I	I
39	I	I	I	I
40	I	I	I	I
41	I	I	I	I
42	II	I	II	I
43	II	II	II	II
44	II	II	II	II
45	II	II	II	II
46	I	II	II	II
47	II	II	II	II
48	II	II	II	II
49	I	I	II	II
50	I	I	II	I

표3. 오차에 대응하는 비용의 참값과 기대값

시추방법	오차에 대응하는 비용		
	참값	기대값	절대오차
1	10.0	14.95	4.95
2	15.0	18.30	3.30
3	14.0	16.79	1.79

예를 들어, 손실함수의 단위가 각 점당 100이라면, 시추방법 1은 약 1,500, 시추방법 2는 약 1,800, 그리고 시추방법 3은 약 1,700의 오차에 대응하는 비용을 초래할 것으로 기대된다.

계산된 오차에 대응하는 비용의 기대값의 경향은 참값의 경향과 잘 일치하고 있다. 오차에 대응하는 비용의 참값과 기대값에 의하면, 시추방법 1이 3개의 방법 중 가장 좋다고 말할 수 있다. 그러나, 높은 산밑에 위치한 점 25를 시추하는데 많은 경비, 예를 들면 300이상의 시추비용이 든다면, 이 방법은 경제적이지 않다. 이 경우는 오히려 시추방법 2나 3이 더 경제적일 수 있다. 또한 시추방법 3은, 소프트데이타를 얻는데 드는 비용이 100보다 적게 든다면, 시추방법 2보다 경제적일 수 있다.

5. 손실함수의 민감도 분석(Sensitivity Analysis)

본 연구에 있어서, 대부분의 어려움은 손실함수를 작성하는 데 있다. 다시 말해, 암반을 등급 1이라 평가했지만, 실제 등급이 2인 경우, 이에 상응하는 비용($\$_{12}$)을 산정하는 것은 상당히 어렵기 때문이다. $\$_{21}$의 산정도 마찬가지다. 따라서, 손실함수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 그러나, $\$_{12}$와 $\$_{21}$의 비율이 같은 손실함수는 동일한 암반분류 결과를 준다. 다시 말해, 다음의 두 손실함수를 사용하였을 경우, 암반분류의 결과는 같게 되는데, 이는 오차에 대응하는 비용의 기대값이 손실함수의 선형함수이고, 암반분류는 이 기대값에 따라 결정되기 때문이다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 0 \end{bmatrix}, \qquad B = \begin{bmatrix} 0 & 10 \\ 20 & 0 \end{bmatrix}$$

또한, 위의 두 손실함수를 사용할 경우, B 손실함수의 오차에 대응하는 비용의 기대값은 A 손실함수의 오차에 대응하는 비용의 기대값에 10배(B의 $\$_{12}$와 A의 $\$_{21}$과의 비율)가 된다. 따라서, 민감도 분석을 위해 다음의 식(3), (4), (5)에 나타난 바와 같이 $\$_{12}$와 $\$_{21}$의 비율이 5/1, 1/1, 1/5인 손실함수가 사용되었으며, 편의상 각각은 손실함수 1, 2, 3이라고 불리운다.

$$\$_e = \$_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\$_e = \$_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\$_e = \$_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 5 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

표 4는 위의 손실함수 1, 2, 3을 사용하여 앞에서 설명된 시추방법 3에 의해 분류된 등급들을 보여준다. 표 5로부터, 암반분류가 과대 평가됨에 따라, 분류된 등급들이 낮게(나쁜 암반으로) 평가되는 경향을 알 수 있었고, 반면에 암반분류가 과소 평가될수록, 등급들이 높게(좋은 암반으로) 평가되는 경향이 있음을 알 수 있었다. 또한, 손실함수 2($\$_{12}/\$_{21}=1$)를 사용한 경우는 단순히 오차에 대응하는 비용을 고려하지 않았을 때의 암반분류 결과를 얻게 된다. 따라서 손실함수의 산정이 어렵고, $\$_{12}$와 $\$_{21}$의 비율도 알기 어려울 경우에는 손실함수 2와 같이 $\$_{12}$가 $\$_{21}$과 같은 손실함수를 사용하여 암반을 분류할 수 있다.

표4. 손실함수별 시추방법 3에 의해 평가된 등급들
0 : 하드데이타, + : 소프트데이타

격자점	참 등급	시추방법 3에 의해 평가된 등급들		
		손실함수1	손실함수2	손실함수3
1	I	II	I	I
2	I	II	I	I
3	I	I	I	I
4	I	I	I	I
5	I	I0	I0	I0
6	I	I	I	I
7	I	II	I	I
8	II	II	I	I
9	II	II	I	I
10	II	II	I	I
11	II	II	II	I
12	II	II	II	I
13	II	II	II	I
14	II	II	II	I
15	II	II0	II0	II0
16	II	II	II	II
17	II	II	II	I
18	I	II	II	I
19	I	II	II	I
20	II	II	II	I
21	II	II	II	I
22	I	II	I	I
23	I	II	I	I
24	I	II	I	I
25	I	II+	I+	I+
26	I	II	I	I
27	I	II	I	I
28	I	II	I	I
29	I	II	I	I
30	I	II	I	I
31	I	II	I	I
32	I	II	I	I
33	I	I	I	I
34	I	I	I	I
35	I	I0	I0	I0
36	I	I	I	I
37	I	II	I	I
38	I	II	I	I
39	I	II	I	I
40	I	II	I	I
41	I	II	II	I
42	II	II	II	I
43	II	II	II	I
44	II	II	II	I
45	II	II0	II0	II0
46	I	II	II	II
47	II	II	II	I
48	II	II	II	I
49	I	II	II	I
50	I	II	II	I

계산된 오차에 대응하는 비용의 참 값과 기대값들은 표 5와 같다. 각각의 다른 손실함수를 사용함으로써, 오차에 대응하는 비용의 참 값과 기대값에 의한 시추방법이 잘 계획되었는지에 관한 평가가 달라짐을 표 5로부터 알 수 있었다. 다시 말해 시추방법 1은 대부분의 경우는 3가지 시추방법 중 가장 좋은 방법이지

만, 손실함수 1을 사용할 때는 그렇지 않다. 따라서, 최적 시추방법은 손실함수에 의해서도 영향을 받기때문에 손실함수를 작성할 때에는 각별한 주의가 필요하다.

표5. 손실함수별 오차에 대응하는 비용의 참값과 기대값

	시추방법	오차에 대응하는 비용		
		참값	기대값	절대오차
손실함수 1	1	11.0	22.46	11.46
	2	13.0	22.27	9.27
	3	9.0	24.23	15.23
손실함수 2	1	15.0	11.16	3.84
	2	26.0	13.58	12.42
	3	24.0	12.70	11.30
손실함수 3	1	21.0	18.01	2.99
	2	18.0	22.62	4.62
	3	20.0	20.38	0.38

6. 결론 및 맺음말

본 논문에서는 이분적 분류에 의한 암반분류의 응용에 대해 살펴보았다. 본 논문에서는 3개의 다른 시추방법을 오차에 대응하는 비용(cost of errors)의 기대값에 의해 비교 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 오차에 대응하는 비용의 기대값은 터널공사의 암반분류를 위한 샘플링 방법이 얼마나 잘 되었는지를 나타내는 하나의 지표로써 사용될 수 있다. 즉, 계산된 기대값이 크면, 암반분류의 신뢰도를 높이기 위해 샘플링을 더 할 필요가 있으며, 기대값이 작다면, 더 이상의 시추는 필요치 않을 것이다.

2) 상황에 따라서는 소프트데이타(물리탐사나 전문가의 의견등)가 하드데이타(보오링 데이타) 보다 더 경제적일 수 있다. 따라서, 추가 시추방법은 주변 지반상태와 샘플링 비용을 잘 고려하여 결정되어야 한다.

3) 암반분류가 과대 평가됨에 따라, 분류된 등급들이 낮게(나쁜 암반으로) 평가되는 경향을 알 수 있었고, 반면에 암반분류가 과소 평가될수록, 등급들이 높게(좋은 암반으로) 평가되는 경향이 있음을 알 수 있었다. 이와같이, 손실함수는 암반분류의 결과에 영향을 미치므로, 손실함수의 추정시 세심한 고려가 요구된다.

앞으로의 연구는 보다 일반적인 암반분류를 위해 다분적 분류(multiple classification)에 관한 연구가 수행되어야 하겠다. 또한, 추가 샘플링이 필요할 경우를 위해, 어떠한 시추방법이 사용되어야 하는지에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1) Hoek, E. & Brown E.T., (1980), Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 527p.

2) 유광호, (1992), Infill Sampling Design for Tunnel Rock Classification using both Quantitative and Qualitative Information, Ph. D. Thesis, University of Minnesota, 276p.

3) 유광호, (1993), "정성적 데이타를 이용한 터널 암반 분류에 관한 연구 -I. 이론", 한국지반공학회지, 제9권 3호 pp.61~66

4) Journel, A.G. (1986), "Constrained Interpolation and Qualitative Information-The Soft Kriging Approach", Mathematical Geology, Vol. 18, No. 3, pp.269-286.

5) Aspie, D.(1989), The Cost of Classification Errors in Geologic Site Characterization, M. S. Thesis, University of Minnesota, 138p.

(접수일자 1993. 6. 17)