

정준상관분석을 이용한 막장등급평가 수량화기법 연구

서용석^{*1)} · 김창용²⁾ · 김광염²⁾ · 이현우¹⁾

¹⁾충북대학교 지구환경과학과·기초과학연구소

²⁾한국건설기술연구원 지반연구부

Quantification Method of Tunnel Face Classification Using Canonical Correlation Analysis

Yong-Seok Seo^{*1)} · Chang-Yong Kim²⁾ · Kwang-Yeom Kim²⁾ · Hyun-Woo Lee¹⁾

¹⁾Dept. of Earth & Environmental Sci. & Institute for Basic Science Research,
Chungbuk National University

²⁾Korea Institute of Construction Technology, Dept. Geo-technical Engineering

국내에서 터널 설계 시 널리 사용되는 RMR 분류법과 Q-system은 모든 암종에 대해 동일한 배점 체계를 적용하기 때문에, 지역적인 지질학적 특성을 반영할 수 없으며 암반의 공학적 이방성을 충분히 표현하지 못한다. 본 연구에서는 암종별 지질학적 특성 차에 의한 각 RMR 항목의 중요도를 살펴보기 위하여, 퇴적암, 화강암, 천매암을 기반암으로 하는 터널을 대상으로 막장관찰자료에 대해 정준상관분석을 실시하였다. 분석결과에 의하면 암종의 변화에 따라 전체 RMR 배점에서 각 인자가 차지하는 영향은 서로 큰 차이를 보였다.

주요어: RMR 분류법, 정준상관분석, 수량화분석, 편상관계수, 막장등급분류

Because of using the same rating ranges for every rock types the RMR or the Q-system could not usually consider local geological characteristics . They also could not present sufficiently the engineering anisotropy of rocks. The canonical correlation analysis was carried out with 3 kinds of face mapping data obtained from granite, sedimentary rock and phyllite in order to clarify a discrepancy between rock types. According to analysis results, as a type of rocks changes, RMR factors have different influences on the total rating of RMR.

Key Words : RMR system, canonical correlation analysis, quantification analysis, partial correlation coefficient, tunnel face classification

*Corresponding author : ysseo@cbu.ac.kr

서 론

자연상태의 암반은 대부분의 경우 불연속면을 포함하며 이방성을 보인다. 이러한 이방성은 구조물 설계 시 암반평가의 중요한 요소로 취급된다. 특히 터널 굴착 중 수행되는 막장등급평가는 지질학적 불연속면의 영향을 크게 받는다. 화강암의 경우 미세균열의 발달이 강도 이방성을 지배하는 것으로 많은 연구자들에 의해 밝혀진 바 있다(Seo et al, 2002). 하지만 화강암이 공학적 대상으로 이용될 때 특수한 경우를 제외하고는 이방성을 고려하여 설계되는 경우는 거의 없다. 편마암은 특정방향의 엽리를 포함하고 있지만 엽리면의 전단강도가 현저히 높기 때문에 등방성 암석으로 취급된다. 이와는 달리 점판암, 천매암, 편암 및 셰일 등과 같이 암석 내부에 층리, 엽리 등 층상구조가 현저히 발달하면서 전단강도가 낮은 경우 공학적 설계 시 이방성 암석으로 취급되어야 한다.

터널 설계 시 암반평가법으로는 RMR 분류법 및 Q-system이 가장 널리 사용되고 있다. 하지만 이러한 암반 분류법은 평가 대상 암반의 지질학적 특성을 특별히 고려하지 않고, 모든 암종에 일률적으로 동일한 항목 배점을 하고 있으므로 암반의 공학적 이방성을 충분히 표현하지 못한다. 이는 터널 시공 시 지보패턴의 잦은 설계변경 요인으로 작용하며, 막장에서 붕괴사고의 원인이 되고 있다(Suzuki et al., 1991). 이와 같은 이유로 최근 지질학적 특성을 반영하여 암반분류를 새롭게 시도하고 있는 연구가 활발히 진행되고 있다(Moon et al., 2001; Yasar, 2001; Kim & Yang, 2004).

본 연구에서는 괴상의 화강암과 이방성의 천매암, 그리고 퇴적암에서 굴착된 터널의 막장관찰 자료를 이용하여 RMR 구성요소의 평가결과와 지보패턴과의 관계에 대한 정준상관분석을 실시하였으며, 이를 통하여 각 암종별 지질학적 특성 차에 의한 암반평가 결과의 차이와 특성을 분석하였다. 분석결과를 기초로 하여 각 지질조건별 RMR 구성요소의 점수배점 조정안을 제안하였다.

대상 터널의 지질학적 특성

본 연구에서는 국내에 널리 분포하는 암석인 퇴적암, 화강암, 천매암을 기반으로 하는 3개소의 터널을 분석 대상으로 하였다. 퇴적암을 기반으로 하는 A터널은 백악기 경상누층군의 하양층군에 속하며, 이들을 관입하는 불국사 관입암류로 구성된다. 주로 적색, 녹회색 및

암회색을 띠는 사암과 셰일이 서로 교호하며 층리가 잘 발달하고 있다. 또한 화강암의 관입으로 인한 접촉열변성작용으로 인해 혼펠스화 된 부분도 있다. B터널은 옥천대 백봉리층군의 운교리층에 해당되는 천매암으로 이루어져 있으며 엽리가 고각을 이루며 발달한다. C터널은 불국사 관입암류에 속하는 연양화강암으로 구성되어 있으며 절리의 발달이 미약한 괴상의 형태로 산출된다.

각 터널은 굴착이 거의 완료된 상태이며, 기본 자료는 한국건설기술연구원에서 운용 중인 터널 D/B 시스템의 입력 자료를 이용하였다. 본 연구에는 막장관찰자료 중 RMR 분류와 지보패턴 관련 자료를 사용하였으며, A, B, C터널 각각 1,540, 168, 311개 막장의 자료를 분석에 이용하였다.

정준상관분석 이론

정준상관분석은 두 변수집단 사이에 존재하는 상관구조를 설명하기 위한 통계적 분석기법의 일종이다. 정준상관분석은 여러 변수들을 두 변수집단인 종속변수집단과 독립변수집단으로 분류한 후, 두 변수집단 사이의 상관구조를 가장 잘 설명할 수 있는 변수들의 선형결합을 찾는 기법이다. 먼저 p 개의 확률변수로 구성된 종속변수집단을 확률벡터 $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_p)'$ 으로 표시하고, q 개의 확률변수로 구성된 독립변수집단을 확률벡터 $X=(X_1, X_2, \dots, X_q)'$ 으로 표시하기로 한다. 이때 n 개의 관측자료 행렬(observed data matrix) U 와 표본공분산 행렬(sample covariance matrix) S_{uu} 는 다음과 같이 표현된다.

$$U_{(p+q) \times n} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{p1} & y_{p2} & \cdots & y_{pn} \\ x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{q1} & x_{q2} & \cdots & x_{qn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$S_{uu} = \begin{bmatrix} S_{yy} & \vdots & S_{yx} \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ S_{xy} & \vdots & S_{xx} \end{bmatrix}$$

각 변수집단에서 다음의 선형결합식

$$\begin{aligned} W &= a'Y = a_1Y_1 + a_2Y_2 + \dots + a_pY_p \\ V &= b'X = b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_qX_q \end{aligned} \quad (2)$$

을 생각하면, 확률변수 W 와 V 의 단순상관계수 (simple correlation coefficient) $\rho = (W, V)$ 는

$$\begin{aligned} \rho(W, V) &= \frac{Cov(W, V)}{\{Var(W)Var(V)\}^{1/2}} \\ &= \frac{a'\Sigma_{yx}b}{\{(a'\Sigma_{yy}a)(b'\Sigma_{xx}b)\}^{1/2}} \end{aligned} \quad (3)$$

이 된다.

정준상관분석에서는 Y 와 X 의 많은 선형결합 W 와 V 중에서 위의 단순상관계수를 최대화시킬 수 있는 계수벡터 a 와 b 를 찾는 것이다. 단순상관계수 $\rho(W, V)$ 는 계수벡터 a 와 b 의 함수이며 척도의 불변성이 있기 때문에, W 와 V 의 분포를 다음 식

$$\begin{aligned} E(W) &= E(V) = 0, \\ Var(W) &= Var(V) = a'\Sigma_{yy}a = b'\Sigma_{xx}b = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

과 같이 평균이 0이고 분산이 1이 되도록 표준화 (standardize)시켜도 일반성을 잃지 않는다. 주어진 자료로부터 위의 단순상관계수를 최대화시키는 계수벡터 \hat{a} , \hat{b} 를 표본정준계수벡터라고 하고, 구해진 정준계수를 선형결합계수로 사용한 \hat{W} 와 \hat{V} 를 표본정준변수라고 한다. 먼저 제1 정준변수쌍이라 불리는 (\hat{W}_1, \hat{V}_1) 은 W 와 V 간의 단순상관계수를 최대화시키는 변수 집단 내의 선형결합으로 각각의 분산이 단위분산이 되도록 구성한다. 다음으로 제2 표본정준변수쌍 (\hat{W}_2, \hat{V}_2) 는 (\hat{W}_1, \hat{V}_1) 과는 독립이며 역시 단순상관계수가 최대가 되도록 하는 단위분산을 갖는 선형결합을 의미한다. 일반적으로 제 k 표본정준변수쌍 (\hat{W}_k, \hat{V}_k) 은 다음과 같이 추정된다.

$$\begin{aligned} \hat{W}_k &= \hat{a}_k'Y = \hat{e}_k'S_{yy}^{-1/2}Y, \\ \hat{V}_k &= \hat{b}_k'X = \hat{f}_k'S_{xx}^{-1/2}X \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 \hat{e}_k 와 \hat{f}_k 는 각각 다음 두개의 특성화 방정식

$$\begin{aligned} |S_{yy}^{-1/2}S_{yx}S_{xx}^{-1}S_{xy}S_{yy}^{-1/2} - \lambda I| &= 0 \quad \& \\ |S_{xx}^{-1/2}S_{xy}S_{yy}^{-1}S_{yx}S_{xx}^{-1/2} - \lambda I| &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

을 만족하는 근 가운데 k 번째 고유값 $\hat{\lambda}_k$ 에 대응되는 고유벡터이다. 이 때, \hat{W}_k 와 \hat{V}_k 간의 표본상관계수를 정준표본상관계수라고 부르고 $r(\hat{W}_k, \hat{V}_k) = \hat{\rho}_k$ 으로 나타낸다. 또한 정준표본상관계수의 제곱은 고유값이 된다. 즉 $\hat{\rho}_k = \sqrt{\hat{\lambda}_k}$ 이 성립된다. 만약 변수가 표준화되었다면 위의 전 과정에서 표본공분산행렬 S_{uu} 대신에 표본상관행렬 R_{uu} 을 사용하여 정준상관분석을 수행할 수 있다.

다음으로 위에서 구한 표본정준변수들이 원 변수집단의 전체분산을 얼마나 설명하는지에 대해 알아보자. 먼저 표준화된 종속변수집단과 독립변수집단을 각각 Y^* 와 X^* 로 표현한다. 이 때, 종속변수집단 Y^* 의 전체 표본분산 p 에 대한 그 집단의 i 번째 표본정준변수 \hat{W}_i 에 의하여 설명되어지는 비율은

$$R_i^2(Y^* | \hat{W}_i) = \sum_{k=1}^p r^2(\hat{W}_i, Y_k^*)/p \quad (7)$$

이 된다. 위 식의 분자는 표본정준변수 \hat{W}_i 와 그 집단의 표준화변수 Y_k^* 들 사이의 표본상관계수의 자승합인 정준적재 자승합을 의미한다. 따라서 종속변수집단의 전체분산 p 중 처음 m 개의 표본정준변수에 의하여 설명되어지는 누적비율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_i^2(Y^* | \hat{W}_1, \hat{W}_2, \dots, \hat{W}_m) \\ = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p r^2(\hat{W}_i, Y_k^*)/p. \end{aligned} \quad (8)$$

마찬가지로 독립변수집단 X^* 의 전체 표본분산에 대해서도 동일한 방식으로 누적비율을 정의할 수 있다.

막장등급평가 수량화 과정 및 결과

정준상관분석을 이용한 수량화 과정

정준상관분석 과정을 3개의 터널(A, B, C터널) 자료에 대해 적용하고, 이 결과로부터 각 터널별 막장등급평가 결과를 수량화하는 과정은 다음과 같다.

[단계1] 지보패턴을 반응변수로 하고, 이에 영향을 미치는 5개의 변수 즉, 암석강도, RQD, 절리간격, 절리상태, 지하수 변수를 설명변수로 설정한다.

[단계2] 이들 반응변수와 설명변수는 모두 RMR 분류법에 기초하여 5개의 등급으로 조사되었다. 모든 변수들이 범주형의 변수이므로 정준상관분석을 위해 모든 변수들을 가변수를 이용하여 나타낸다. 이 가운데 $p = (\text{지보패턴의등급수}-1)$ 개로 표현될 수 있는 반응변수의 가변수 그룹을 $Y = (Y_1, \dots, Y_p)'$ 로, 마찬가지로 5개의 모든 설명변수들의 가변수 그룹을 $X = (X_1, \dots, X_q)'$ 으로 한다.

[단계3] 정준상관분석을 실시하여 정준변수와 정준계수를 구한다. 즉, 다음의 선형결합식

$$W = a'Y = a_1Y_1 + a_2Y_2 + \dots + a_pY_p$$

$$V = b'X = b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_qX_q \tag{9}$$

에서, 제1 정준변수쌍이라 불리는 (\hat{W}_1, \hat{V}_1) 은 W 와 V 간의 단순상관계수를 최대화 시키는 변수집단내의 선형결합으로 각각의 분산이 단위분산이 되도록 구성한다. 다음으로 제2 표본정준변수쌍 (\hat{W}_2, \hat{V}_2) 는 (\hat{W}_1, \hat{V}_1) 과는 독립이며 역시 단순상관계수가 최대가 되도록 하는 단위분산을 갖는 선형결합을 구한다. 이 과정을 반복하여 제 k 표본 정준변수쌍 (\hat{W}_k, \hat{V}_k) 을 구하게 된다.

[단계4] 각 설명변수별로 정준계수의 범위(최대값-최소값)를 구하고, 이 값에 표본정준상관계수를 곱하여 1차 가중치를 부여한다. 이 과정은 정준상관이 클수록 정준계수의 비중을 크게 하기 위한 과정으로 생각할 수 있다.

[단계5] 1차 가중치가 부여된 정준계수에 2차 가중치 즉, $R_i^2(Y^*|\hat{W}_i)$ 값을 곱하여 각 설명변수별 정준계수

에 2차 가중치를 부여한다. 여기서 2차 가중치 $R_i^2(Y^*|\hat{W}_i)$ 는 종속변수집단의 전체 표본분산에 대해 i 번째 표본정준변수의 \hat{W}_i 가 가지는 설명력을 의미하며 식 7과 같이 구체적으로 정의된다.

[단계6] 각 변수별 수량화값을 다음의 식을 통해 구한다.

$$\begin{aligned} \text{수량화값} &= \{(\text{제 } i \text{ 정준계수 범위}) \times (\text{제 } i \text{ 정준상관})\} \\ &\times R_i^2(Y^*|\hat{W}_i) \\ &= \sum_{i=1} \{[\text{단계5}] \times [\text{단계6}]\} \end{aligned} \tag{10}$$

수량화값의 계산과정에서 정준계수의 범위(range)는 편상관(partial correlation coefficient)의 값으로 대체될 수 있다. 여기서 편상관은 수량화 결과로부터 모든 질적변량을 양적변량으로 대체한 후 다중회귀를 통해 구해진다.

[단계7] 계산된 각 변수별 수량화값을 상대적인 중요도 즉, 퍼센트(%)로 나타내어 최종의 수량화 값을 구한다.

이상을 요약하면 Fig. 1의 흐름도와 같다.

막장등급평가 수량화 결과

수량화 분석을 위해 각 터널별로 조사된 자료의 기초 분석 결과는 Table 1과 같으며, 이 중 B터널(n=168)의 경우 반응변수 그룹과 설명변수 그룹 간의 수량화 분석([단계1]~[단계3])의 결과는 Table 2와 같다.

Table 2로부터 B터널의 설명변수별 수량화값의 계산 결과([단계4]~[단계6])는 편상관이란 수량화 결과를 이용하여 모든 질적 변량을 양적으로 대체하여 구하게 되며, 편상관을 구하는 과정은 다음과 같다.

[단계1] Table 2의 제1 정준계수를 이용하여 질적 반응변수(지보패턴 종류)를 다음과 같이 양적 변량(y1)으로 바꾸어 준다. 즉, 양적 반응변수 y1은

$$\begin{aligned} y1 &= 1.568 \cdot \text{type2} + 0.343 \cdot \text{type3} \\ &\quad - 0.825 \cdot \text{type4} - 1.198 \cdot \text{type5} \\ &\quad - 1.143 \cdot \text{type6} \end{aligned} \tag{11}$$

으로 변환된다.

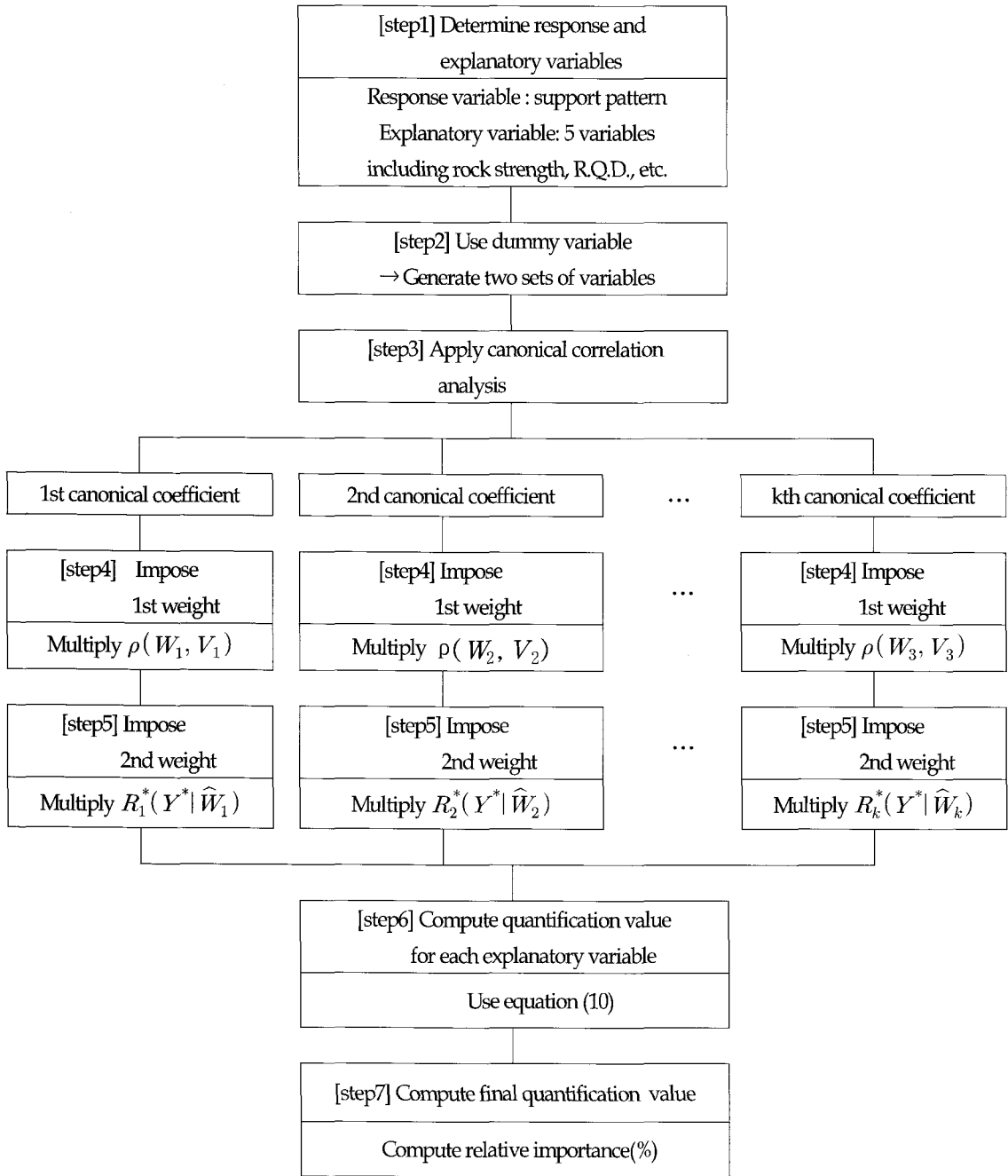


Fig. 1. Quantification process chart using canonical correlation analysis.

Table 1. Basic data of RMR factors and tunnel support patterns in 3 tunnels.

Dummy variable			A tunnel(<i>n</i> = 1540)		B tunnel(<i>n</i> = 168)		C tunnel(<i>n</i> = 311)	
			Frequency	Percentage	Frequency	Percentage	Frequency	Percentage
Tunnel support pattern	type	1	49	3.2	0	0.0	156	50.2
		2	261	17.0	37	22.0	18	5.8
		3	735	47.7	49	29.2	110	35.4
		4	238	15.5	62	36.9	20	6.4
		5	201	13.1	15	8.9	3	1.0
		6	56	3.6	5	3.0	4	1.3
Strength of intact rock	var1	1	384	24.9	0	0	103	33.1
		2	851	55.3	39	23.2	129	41.5
		3	209	13.6	119	70.8	56	18.0
		4	96	6.2	10	6.0	19	6.1
		5	0	0.0	0	0.0	4	1.3
R.Q.D	var2	1	1	0.1	18	10.7	56	18.0
		2	432	28.1	14	8.3	107	34.4
		3	709	46.0	52	31.0	95	30.6
		4	159	10.3	56	33.0	52	16.7
		5	239	15.5	28	16.7	1	0.3
Spacing of discontinuities	var3	1	4	0.3	0	0.0	95	30.6
		2	392	25.5	24	14.3	65	20.9
		3	658	42.7	50	29.8	127	40.8
		4	318	20.7	78	46.4	23	7.4
		5	168	10.9	16	9.5	1	0.3
Condition of discontinuities	var4	1	0	0.0	0	0.0	62	19.9
		2	44	2.9	24	14.3	159	51.1
		3	647	42.0	52	31.0	72	23.2
		4	845	54.9	74	44.1	17	5.5
		5	4	0.3	18	10.7	1	0.3
Groundwater	var5	1	141	9.2	0	0.0	67	21.5
		2	919	59.7	72	42.9	133	42.8
		3	381	24.7	55	32.7	49	15.8
		4	94	6.1	31	18.5	40	12.9
		5	5	0.3	10	6.0	22	7.1

Table 2. Results of canonical correlation analysis for B tunnel.

Dummy variable			1st canonical coefficient	2nd canonical coefficient	3rd canonical coefficient	4th canonical coefficient
Tunnel support pattern	type	2	1.568	-1.014	0.182	0.007
		3	0.343	1.414	-0.542	-0.063
		4	-0.825	-0.119	0.973	0.241
		5	-1.198	-1.304	-2.447	1.008
		6	-1.143	-0.960	-0.763	-5.440
Strength of intact rock	var1	2	0.102	-0.733	0.536	-0.033
		3	-0.033	0.215	-0.168	-0.285
		4	0.000	0.299	-0.087	3.525
R.Q.D	var2	1	0.315	-0.130	-0.045	0.401
		2	0.240	-0.361	0.250	0.546
		3	0.042	0.227	0.310	0.561
		4	-0.108	0.019	-0.279	0.644
		5	-0.186	-0.195	-0.115	-2.861
Spacing of discontinuities	var3	2	0.516	-0.875	0.016	-0.200
		3	0.107	0.483	-0.687	-0.353
		4	-0.195	-0.029	0.405	0.111
		5	-0.158	-0.052	0.147	0.864
Condition of discontinuities	var4	2	0.954	-0.489	-0.222	-0.232
		3	0.355	0.674	-0.435	-0.182
		4	-0.380	-0.030	0.851	0.139
		5	-0.735	-1.172	-1.946	0.266
Groundwater	var5	2	0.181	2.003	0.132	0.034
		3	-0.079	1.537	-0.032	0.059
		4	-0.257	1.214	-0.451	-0.309
		5	-0.074	1.800	0.625	0.389

[단계2] Table 2의 제1 정준계수를 이용하여 절적 설명변수를 다음과 같이 양적 변량으로 바꾸어 준다. 즉, 새로운 양적 설명변수는

$$\begin{aligned}
 x_{11} &= 0.102 \cdot var_{12} - 0.033 \cdot var_{13} \\
 x_{21} &= 0.315 \cdot var_{21} + 0.240 \cdot var_{22} \\
 &\quad + 0.042 \cdot var_{23} - 0.108 \cdot var_{24} \\
 &\quad - 0.186 \cdot var_{25} \\
 x_{31} &= 0.516 \cdot var_{32} + 0.107 \cdot var_{33} \\
 &\quad - 0.195 \cdot var_{34} - 0.158 \cdot var_{35} \quad (12) \\
 x_{41} &= 0.954 \cdot var_{42} + 0.355 \cdot var_{43} \\
 &\quad - 0.380 \cdot var_{44} - 0.735 \cdot var_{45} \\
 x_{51} &= 0.181 \cdot var_{52} - 0.079 \cdot var_{53} \\
 &\quad - 0.257 \cdot var_{54} - 0.074 \cdot var_{55}
 \end{aligned}$$

으로 주어진다.

[단계3] [단계1]~[단계2]에서 정의된 양적 반응변수 (y_1)와 양적 설명변수들($x_{11}, x_{21}, \dots, x_{51}$) 간의 중회귀분석을 실시한다.

[단계4] y_1 과 각 설명변수(var1~var5) 간의 편상관 계수의 제곱을 다음 식을 통해 구한다.

$$\begin{aligned}
 &Partial\ Corr^2(y_1, var\ i) \\
 &= \frac{Type\ 3\ SS(var\ i)}{Type\ 3\ SS(var\ i) + Error\ SS} \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$i = 1, \dots, 5$$

위 식에서 SS 는 제곱합(sum of square)을 의미한다.

[단계5] [단계1]~[단계4]의 과정을 제2, 제3, ...의 모든

Table 3. Calculation of quantification value of explanatory variables for A tunnel.

Parameter	1st canonical coefficient		2nd canonical coefficient		3rd canonical coefficient		4th canonical coefficient		5th canonical coefficient		quantification value	
	range	partial corr.	range	partial corr.	range	partial corr.	range	partial corr.	range	partial corr.	range	partial corr.
Strength of intact rock	0.812	0.464	0.897	0.346	1.339	0.321	2.401	0.305	0.979	0.055	0.790	0.270
R.Q.D.	1.240	0.542	1.304	0.398	1.339	0.342	1.371	0.394	2.483	0.230	0.995	0.310
Spacing of discontinuities	1.405	0.597	1.982	0.580	2.194	0.543	3.813	0.381	4.709	0.197	1.492	0.411
Condition of iscontinuities	0.495	0.049	0.495	0.220	0.580	0.087	1.767	0.138	1.205	0.127	0.428	0.083
Groundwater	0.560	0.108	0.561	0.189	0.391	0.124	2.858	0.194	1.677	0.180	0.433	0.103
Canonical correlation	0.957		0.802		0.680		0.379		0.360		total :4.139	total :1.177
$R_i^2(Y^* \widehat{W}_i)$	0.248		0.239		0.401		0.038		0.074		1.000	

Table 4. Calculation of quantification value of explanatory variables for B tunnel.

Parameter	1st canonical coefficient		2nd canonical coefficient		3rd canonical coefficient		4th canonical coefficient		quantification value	
	range	partial corr.	range	partial corr.	range	partial corr.	range	partial corr.	range	partial corr.
Strength of intact rock	0.135	0.012	1.032	0.128	0.704	0.041	3.811	0.007	0.539	0.180
R.Q.D.	0.501	0.046	0.588	0.050	0.589	0.046	3.505	0.068	0.499	0.182
Spacing of discontinuities	0.711	0.094	1.358	0.138	1.092	0.109	1.218	0.004	0.857	0.275
Condition of iscontinuities	1.689	0.512	1.846	0.381	2.797	0.492	0.499	0.585	1.697	0.566
Groundwater	0.439	0.132	0.789	0.110	1.076	0.063	0.698	0.224	0.616	0.269
Canonical correlation	0.955		0.846		0.741		0.369		total :4.206	total :1.472
$R_i^2(Y^* \widehat{W}_i)$	0.323		0.324		0.320		0.034		1.000	

정준계수에 대해 수행한다. 이 과정에서 범위 대신 편상관의 값으로 대체한 후, 나머지의 수량화 과정은 범위의 경우와 동일하게 수행한다.

위의 Table 2와 같은 결과로부터 범위를 이용하여 3개 터널의 각 설명변수의 수량화값을 계산한 결과는

Table 3 ~ 5와 같다.

Table 6은 각 터널의 수량화 값을 각 변수에 대해 상대적인 중요도(배점)으로 나타낸 것이다. 이 결과는 정준상관분석을 통한 각 설명변수에 대한 최종 수량화 값을 의미한다.

Table 5. Calculation of quantification value of explanatory variables for C tunnel.

Parameter	1st canonical coefficient		2nd canonical coefficient		3rd canonical coefficient		4th canonical coefficient		5th canonical coefficient		quantification value	
	range	partial corr.	range	partial corr.	range	partial corr.	range	partial corr.	range	partial corr.	range	partial corr.
Strength of intact rock	3.007	0.222	2.740	0.146	3.019	0.202	1.558	0.075	2.571	0.114	1.146	0.076
R.Q.D.	2.160	0.116	4.610	0.155	4.358	0.173	3.272	0.131	1.069	0.094	1.426	0.060
Spacing of discontinuities	0.509	0.133	1.494	0.125	1.476	0.162	0.800	0.047	0.548	0.056	0.441	0.054
Condition of iscontinuities	1.981	0.142	7.186	0.163	1.409	0.206	2.716	0.106	3.832	0.161	0.954	0.069
Groundwater	1.872	0.331	0.964	0.272	1.560	0.175	2.192	0.207	2.357	0.167	0.698	0.096
Canonical correlation	0.590		0.456		0.373		0.313		0.272		total :4.665	total :0.355
$R_i^2(Y^* \widehat{W}_i)$	0.206		0.079		0.505		0.158		0.053		1.000	

Table 6. Results of quantification analysis for 3 types of rock.

Parameter	A(Sedimentary) tunnel (n = 1540)		B(Phyllite) tunnel (n = 168)		C(Granite) tunnel (n = 311)		RMR Ratings
	Ratings	partial corr.	Ratings	partial corr.	Ratings	partial corr.	
Strength of intact rock	19	23	13	12	25	21	15
R.Q.D.	24	26	12	12	31	17	20
Spacing of discontinuities	36	35	21	19	9	15	20
Condition of discontinuities	10	7	40	38	20	20	30
Groundwater	10	9	15	18	15	27	15
Total	100	100	100	100	100	100	100

분석결과 토의

각 항목별로 RMR의 배점과 계산결과를 비교 검토하면 다음과 같다. 퇴적암 터널인 A터널의 계산결과를 보면 절리상태의 배점이 10점으로서 현저히 낮게 나타나며, 반면에 절리간격이 36점으로 높게 나타났다. 이는 터널건설지역이 대규모 단층대에 인접하여 위치하는 관계로 터널 구간 중 절리의 간격 변화가 심하여 변별력이 높게 나타났으며, 절리상태는 지표노

출이 없는 지하의 막장에서 비교적 신선한 절리상태를 유지하였으므로 전 구간에서 변화가 심하지 않았음을 나타내는 것이다.

천매암 터널인 B터널의 경우 다른 두 터널과 많이 다른 결과를 보여주고 있는데, 절리상태에서는 40점으로 RMR 배점인 30점에 비하여 높고, 암석강도는 13점으로 나타났다. 그 원인은 엽리가 매우 잘 발달하고 있는 암질이면서 단층이 잘 발달하는 변성대에서 절리상태의 변화가 상당히 심함을 알 수 있고, 암석강도는 대부분 신선함을 유지하기 때문에 변별력이 떨어

저 낮게 평가되었다.

화강암 터널인 C터널의 경우, 토파가 매우 깊은 괴상의 암반에 건설되어 절리의 발달이 심하지 않아 절리간격이 매우 낮은 수치인 9점을 보였고, 절리상태는 다소 낮은 20점을 보이고 있다.

이와 같이 지질학적 조건이 서로 다른 터널막장 관찰 결과의 분석에 의하면 RMR의 항목별 배점에서 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 지질학적 생성환경의 차이에서 기인하는 특징을 충분히 감안하여 암반평가를 수행하기 위해서는 RMR의 항목별 배점을 지질학적 환경이 변하는 영역마다 조정하는 것이 필요하다. 이는 Bieniawski(1989)가 RMR 분류법을 적용할 때 구조영역(structural region)을 고려해야 한다고 언급한 것과 동일한 개념이다. 기 건설지역의 자료를 이용하여 지질영역별 암반분류의 배점조정이 이루어지면 현재 문제가 되고 있는 암반평가자의 미숙 또는 개인차에서 비롯되는 부정확한 막장평가 문제를 해당현장에서 가장 변별력 있는 지질요소를 고려함으로써 다소나마 해결할 수 있을 것이다. 우리나라의 경우 터널 D/B의 지속적인 구축으로 자료가 축적되고, 지질공학적인 영역이 구분되면 매우 신뢰성 있는 RMR 배점이 각 영역마다 제시될 수 있을 것이다.

앞에서 제시한 결과는 암종별로 참고는 할 수 있을지 모르나 절대적인 것은 아니다. 왜냐하면 RMR 평가에 영향을 미치는 광역적 지질특성이 지역별로 차이가 크기 때문이다. 앞으로 터널 데이터에 대한 D/B가 더욱 축적되고 이들을 분석하면 지역별로 유의한 수준의 배점 조정안이 도출 될 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

서로 다른 지질조건, 즉 괴상의 화강암, 이방성의 천매암과 퇴적암을 기반으로 하는 국내 3개소 터널의 RMR 구성요소와 지보패턴과의 관계에 대한 정준상관 분석을 통해 지질학적 특성차에 의한 막장평가 결과의 차이를 분석하여 기존 RMR 분류의 각 항목별 배점과 비교분석하였다.

1. 퇴적암을 기반으로 하는 터널에서는 대규모 단층대에 인접하여 터널 구간 중 절리의 간격 변화가 심하며, 절리상태는 노출이 거의 없는 지하의 막장에서 신선한 절리상태를 거의 유지한다. 따라서 절리상태의 배점이 30점에서 10점으로 매우 낮아졌으며, 절리간격이 20점에서 36점으로 높은 변별력을 가진다.

2. 화강암을 기반으로 하는 터널에서는 토파가 매우 깊은 괴상의 암반에 건설되어 절리의 발달이 심하지 않기 때문에, 절리간격과 절리상태는 각각 20점과 30점에서 9점과 20점으로 매우 낮아진다.

3. 천매암을 기반으로 하는 터널에서는 고각의 엽리가 매우 잘 발달하며, 단층이 잘 발달하는 변성대에 해당되므로 절리상태의 변화가 심하며, 암석은 대부분 신선한 상태를 유지한다. 따라서 절리상태는 30점에서 40점으로 높아진 반면 암석의 강도는 15점에서 13점으로 변별력이 다소 떨어진다.

4. 서로 다른 지질조건에서의 막장관찰결과 분석에 의해 지보패턴에 영향을 주는 RMR의 항목별 배점은 차이가 있다. 따라서 RMR의 항목별 배점을 지질학적 환경이 변하는 영역마다 조정함으로써 현장에서 가장 변별력 있는 요소를 이용하여 암반평가를 수행할 수 있을 것이다.

5. 우리나라의 경우 터널 D/B의 구축으로 자료가 축적되고, 지질공학적인 영역이 구분된다면 매우 신뢰성 있는 RMR 배점이 각 영역마다 제시될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 산학연공동연구사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비를 지원해 준 건설교통부에 감사를 드립니다.

참고문헌

- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications., John Wiley & Sons, 52.
- Kim, B.H., and Yang, H.S., 2004, Suggestion of reformed RMR by multivariate analysis., SINOROCK2004, 3A03.
- Moon, V., Russel, G., and Stewart, M., 2001, The value of rock mass classification systems for weak rock masses: a case example from Huntly, New Zealand., Engineering Geology, 61, 53-67.
- Seo, Y.S., Jeong, G.C., Kim, J.S., and Ichikawa, Y., 2002. Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression., Engineering Geology, 63(3-4), 259-275.
- Suzuki, S., Furukawa, K., Inoue, H. and Nakagawa, K., 1991. A study on the evaluation for the preliminary design of supports based on the past records of tunnel construction by NATM., JSCE journal,

427(VI-14), 261-270.

Yasar, E., 2001, A new rock mass classification for coal measures rocks, Engineering geology, 62, 293-300.

투 고 일	2005년	11월	24일
심 사 일	2005년	11월	25일
심사완료일	2005년	12월	17일

김창용
 한국건설기술연구원 지반연구부
 411-712 경기도 고양시 일산구 대화동 2311
 Tel: 031-910-0224
 Fax: 031-910-0211
 E-mail: cykim@kict.re.kr

김광염
 한국건설기술연구원 지반연구부
 411-712 경기도 고양시 일산구 대화동 2311
 Tel: 031-910-0225
 Fax: 031-910-0211
 E-mail: kimky@kict.re.kr

서용석
 충북대학교 지구환경과학과
 361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 산48
 Tel: 043-261-2765
 Fax: 043-276-9645
 E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

이현우
 충북대학교 지구환경과학과
 361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 산48
 Tel: 043-261-2765
 Fax: 043-276-9645
 E-mail: leebeeyada@hanmail.net