

다변량분석을 이용한 터널에서의 효율적인 암반분류에 관한 연구

A Study of Efficient Rock Mass Rating for Tunnel Using Multivariate Analysis



위 용 곤*
Wye, Yong-Gon



노 상 림*
No, Sang-Lim



윤 지 선*
Yoon, Ji-Son

Abstract

Rock Mass Rating has been widely applied to the underground tunnel excavation and many other practical problems in rock engineering. However, Rock Mass Rating is hard, even by the experts of tunnel assessment owing to lack of investigation system. In this study, using multivariate analysis we presented rock mass rating system that is objective and easy to use. The constituents of RMR are decided to RQD, condition of discontinuities, groundwater conditions, intact rock strength, orientation of discontinuities, spacing of discontinuities in important order. In each step, we proposed the best multiple regression model for RMR system.

Keywords : Rock Mass Rating, Tunnel, Multivariate analysis, Multiple regression model

요 지

지하 터널 굴착 등의 암반 공학적 문제에 있어서 암반분류가 널리 적용되고 있다. 하지만, 조사 방법이 체계화되어 있지 않아서 터널 지질 전문가라 할지라도 암반분류에 어려움이 많은 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 다변량분석을 이용하여 객관적이고 사용하기 간편한 암반분류법을 제시하였다. RMR 요소는 RQD, 절리상태, 지하수, 강도, 보정, 절리간격 순으로 중요도가 결정되었으며, 각각의 단계에서 RMR에 관한 최적의 다중회귀모형을 제시하였다.

주요어 : 암반분류, 터널, 다변량분석, 다중회귀모형

*1 인하대학교 지구환경공학부 석사과정

*2 인하대학교 지구환경공학부 박사과정

*3 정회원, 인하대학교 지구환경공학부 교수

1. 서론

최근 국내에서는 산업발달과 인구증가에 따라 파생되는 사회, 경제적인 문제를 해결하기 위해, 대도시 지하철 건설, 경부고속철도 건설 및 도시고속도로 건설 등, 대규모 건설사업들이 추진되고 있으며, 이러한 일련의 과정에서 크고 작은 터널들이 전국적으로 많이 건설되고 있다.

터널은 지반에 건설되는 선형구조물로서, 시공 전에 얻은 지반의 정보가 충분히 반영되어야 하지만 터널 전구간에 걸쳐 정밀도를 높여 정확히 예측한다는 것은 현실적으로 어려움이 많다. 따라서, 굴착공법의 선정, 지보공과 복공의 설계에 있어서는 시공중의 암반분류에 의하여 추가적인 보강을 행하는 것이 일반적이다.

그러나, 현재 터널 시공 시 터널지질 조사 방법이 체계화 되어있지 않으며 기관마다 조사방법 및 표현방식이 상이하고, 일부 기관에서는 터널지질 조사자료를 안정성 분석에 활용하고 있으나 지질 전문가의 경험적인 판단에 의존하고 있어 객관성 및 효율성이 떨어진다는 문제점들을 가지고 있다. 또한 현장의 상황에 적합한 각각의 특성에 따른 조사에 대한 보강 대책을 필요로 하지만 이러한 문제에 대한 체계적인 조사방법 및 조사자료에 관한 활용방안 연구가 불충분한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 현재 터

널 암반분류에 가장 보편적으로 적용되고 있는 RMR의 항목을 다변량 분석을 통한 해석을 실시하여 주관적인 판단을 제거할 수 있는 객관적이고 사용하기 간편한 암반분류법을 제시하였다.

2. RMR 분류

RMR 분류는 1972~1973년에 Bieniawski(1973)에 의해 제안되었으며 Lauffer(1959)와 Wickham(1972)의 분류법을 기초로 개발되었다. RMR 분류는 최초에는 터널을 대상으로 개발되었으나 다양한 응용을 통하여 사면, 댐의 기초, 경암의 광산, 석탄광, 지반 절취도 평가까지 그 적용범위가 넓어졌다. 표 1.은 현재 적용되고 있는 주요한 암반분류이다 (Bieniawski, 1984).

RMR분류의 분류요소 기본적으로 신선암의 강도, RQD, 평균불연속면 간격, 불연속면의 상태, 지하수의 상태 등이며, 불연속면의 방향성과 구조물의 형태에 따른 보정값으로 적용된다. 이들 요소를 기본적으로 합한 값이 RMR 값이 된다. RMR 분류는 조사 암반에 대한 암반의 등급뿐만 아니라 터널의 유지시간, 반압, 터널 최대 폭, 암반의 변형계수, 암반의 점착력과 내부마찰각등 암반의 물리적 성질의 값도 경험식에 의해 유도될 수 있다. 터널,

표 1. 주요암반분류

Name of classification	Originator and date	Country of origin	Applications
Rock loads	Terzaghi, 1946	USA	Tunnels with steel supports
Stand-up time	Lauffer, 1958	Austria	Tunneling
RQD	Deer, 1964	USA	Core logging, tunneling
Intact rock strength	Deere & Millier, 1966	USA	Communication
RSR concept	Wickham, et al. 1972	USA	Tunneling
RMR system	Bieniawski, 1973	S. Africa & USA	Tunnels, mines, foundations
Q-system	Barton, et al. 1974	Norway	Tunneling, large chambers
Strength/block size	Franklin, 1975	Canada	Tunneling
BGD	ISRM, 1981	International	General

지하공간, 광산의 경우에 그림 1과 같이 RMR 값에 따른 최대의 안전폭과 터널 자립시간을 산출할 수 있다.

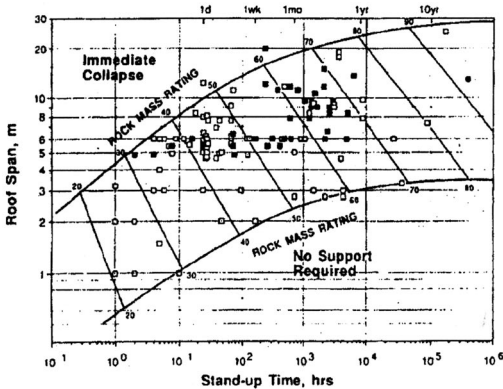


그림 1. 여러 가지 암반등급에 따른 최대안전폭과 터널자립시간의 관계

RMR 분류의 장·단점은 다음과 같다. 우선 장점은 여러 분야에 사용되어 그 적용성이 높고, 각 요소들에 대한 평가가 비교적 쉽다. 또한 터널의 유지시간, 최대 가

능폭 및 최대 무지보 폭과 암반의 물리적 성질 등의 예측이 가능하다. 반면, 단점으로는 지보량의 결정에 있어서 분류 요소의 영향이 Q-system처럼 세밀하지 않고, 불연속면 간격 평가에 있어서 불연속면의 군이 3개 이하인 경우는 보수적인 평가가 되며, 지압 25Mpa 이하 직경 10m, 천공발파식의 마제형 터널에 대한 지보량을 결정하는 데만 적용범위를 결정하고 있다는 것을 들 수 있다.

3. RMR 평가의 신뢰도

설계단계의 암반분류에 기초한 설계·시공계획과 시공단계에서의 암반분류에서 얻은 결과는 어느 정도의 차이가 발생하는 것이 일반적이다. 그 차이를 발생시키는 원인은 지질조사 결과의 정밀도와 암반분류 자체에서 내포하고 있는 문제라고 생각할 수 있다.

전자의 지질조사 결과는 국부적인 확인정보나 관측치의 해석성고에 기술적인 판단을 더하여 종합적으로 상정

표 2. 시공전· 시공중 암반분류 교차표

			시공중 TYPE						
			A	B	C	D	E	F	G
시공전 TYPE	A	빈도	15	25	11	2	0	0	0
		%	50	44	3	1	0	0	0
	B	빈도	3	10	50	51	1	0	1
		%	10	18	16	30	3	0	100
	C	빈도	9	12	184	78	25	1	0
		%	30	21	58	45	64	17	0
	D	빈도	3	4	58	34	6	2	0
		%	10	7	18	20	15	33	0
	E	빈도	0	6	12	7	7	3	0
		%	0	10	4	4	18	50	0
전체 적중율	빈도	30	57	315	172	39	100	0	
	%	100	100	100	100	6.3	100	100	
	적중율 ($\frac{\text{시공중}}{\text{시공전}}$)	50%	18%	58%	20%	18%	0	0	
		40.3%							

한 것이며 지질구조가 단조로운 신기의 지층으로 이루어진 지반과 입지조건부터 고밀도의 조사가 실시될 수 있는 구릉지나 평지에서는 비교적 실태를 정확하게 파악할 수 있지만, 경·연암이 불규칙하게 혼재하는 지반에서는 터널위치에서 수평보링을 하는 것 이외에는 시공위치에서의 정확한 실태를 시공단계에서 파악하는 것은 어렵다. 현실적으로 터널은 선상의 긴 구조물이기 때문에 설계단계에서의 암반분류가 지역조건(local condition)을 정확히 표현하여 적절한 지보패턴을 수립한다는 것이 많은 어려움이 있다.

후자에 대해서는 개별적인 차이가 크고 그 상태에 변화도 규칙성 없이 단속적이지 않은 암반을 지표에서 경계치를 설정 또는 표준적인 상태로 등급 구분을 하기 때문에 발생되는 문제이다.

본 연구에서는 이와 같은 차이를 검증하기 위하여 도수로터널의 220개소의 시공전의 암반분류와 시공중의 암반분류를 상호비교 검토하였다.(표 2)

표 2에서 볼 수 있듯이 시공전의 암반분류와 시공후의 암반분류는 상당한 괴리를 가지고 있다. 상기에서 언급했듯이 경·연암이 교차하는 지역의 경우 또는 연장이 길어 질수록 이러한 현상은 심화 될 것이다. 따라서 선상의 구조물인 터널에서의 시공 중 지질조사가 합리적인 시공을 위하여 중요하다.

그러나, 시공단계에서의 암반평가가 굴착 후 지반의 거동에 가장 적합한 평가방법이지만 정량적인 평가에 많은 어려움을 내포하고 있다.

확실히 시공단계에서의 암반평가는 막장의 관찰, 각종의 계측을 통해서 계획이 적당한지 아닌지를 판정하고 실태에 적합한 설계·시공을 하면 가장 적절하게 목적을 달성할 수 있다. 따라서 기성의 암반분류나 표준패턴의 수정, 막장 전방의 미시공 구간의 설계·시공계획을 사전에 수정하기 위한 검토 등을 위해 시공단계에서의 암반분류는 의의가 있기 때문에 막장에 있는 암반의 암반분류에 의한 평가와 시공실적의 기록, 양자의 대비 분석을 행하

는 것이 중요하다.

4. 암반분류를 위한 다변량분석

4.1 다변량분석의 목적 및 종류

다변량분석이란, 두 개 이상의 변수(항목)들 간의 상호 관련성을 통계적으로 분석하여 복잡한 현상을 요약하여 간결하게 표현하고, 복잡한 현상의 배후에 숨어있는 구조를 발견하며, 관심 있는 변수들을 다른 변수들로부터 예측하고자 하는데 그 분석의 의의와 목적이 있다.

다변량분석의 종류를 표 3.에서 간단히 정리하였다.

표 3. 다변량분석의 종류

목적	종류	분석 방법
예측식(관계식)의 발견 양의 추정		다중회귀분석
표본의 분류 질의 추정		판별분석
다변량의 종합정리 변수의 분류, 대표변수의 선정		주성분분석 인자분석 군집분석
분석의 검정		분산분석

4.2 다변량분석의 암반분류에 대한 적용

비교적 긴 터널이나 이와 유사한 터널군에서는, 막장 관찰 결과에 근거한 원지반의 거동이나 지보 패턴의 타당성을 정량적으로 평가하는 목적으로, 이미 시공 구간에서 축적된 데이터를 사용한 다변량분석이 유용하다.

현실적으로 얻을 수 있는 수치상의 분석방법으로는 다중회귀분석과 판별분석을 들 수 있다. 다중회귀분석을 통하여 암반분류 외에도 내공변위나 천단침하등을 수치

적으로 예측할 수 있고, 판별분석에서는 막장관찰 기록 데이터를 근거로 하여 지보패턴 혹은 낙반 또는 터널의 변상의 유무 등을 추정하는데 적용할 수 있다.

다변량분석의 특징은, 한눈으로 보기 어려운 복잡하고 광대한 데이터를, 어느 분석 목적의 관점에서 보기 쉬운 형태로 정리하는 것이다.

또한 본 해석법은 통계학의 일부이며 수학적 모델이므로, 전제나 가정에 근거한 데이터를 요약하는 것이다. 이때문에, 전제 등이 만족하지 않으면 모델 그 자체가 무너져, 결과는 무의미한 것밖에 얻을 수 없다.

따라서, 현실과 어느 정도 대응하는지가 중요한 문제이며, 얻어진 결과를 과거의 경험과 지식에 의해 상식적인 것으로 수정될 필요가 있다.

4.3 다중회귀분석을 이용한 암반분류

본 연구에서는 암반분류의 요소들을 통계적으로 분석하고자 시공중인 도수로 터널의 막장관찰과 조사정보를 수집하여 다변량 분석을 통해 분석하였다. 자료중 제2구간 NATM터널(총 연장 3,780m)의 222개소의 RMR 자료를 다중회귀를 이용하여 암반분류 시 중요 요소를 추출하고 이를 통한 간편 암반평가 방법에 대한 연구를 수행하였다.

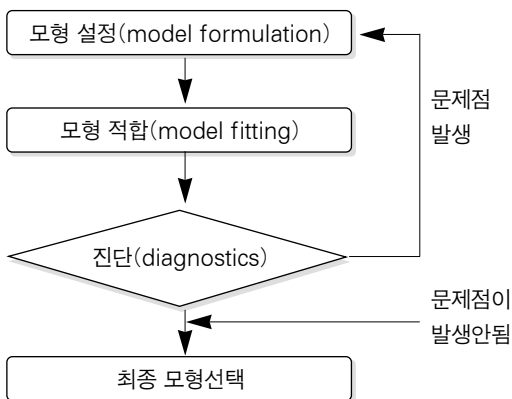


그림 2. 회귀모형을 구하는 순서도

다중회귀분석이란, 종속변수의 변화를 설명하기 위하여 두 개이상의 독립변수가 사용되는 중선형회귀모형을 말한다. 이러한 다중회귀분석을 실시하기 위하여, 다중회귀모형의 설정, 최적회귀 방정식의 선택, 다중회귀분석에 관한 추론, 회귀모형의 진단 및 처방의 일련의 과정을 거쳐 설명력이 있는 다중회귀모형을 도출하게 된다.(그림 2.)

5. 다중회귀분석 결과 및 고찰

본 연구에서는 1단계로 모형을 설정하기 위하여 변수 선택을 하였다. 이런 예측모형을 선택함에 있어서 간단한 모형을 선호하는 모형간편화의 원칙(principle of parsimony)에 따라, 모든 가능한 회귀(all possible regression)중에서 가장 높은 회귀방정식의 선택기준을 사용하여 분석하였다. 이러한 분석방법으로는 MSE 기준, 수정결정계수 기준, C_p 기준, $PRESS_p$ 기준, AIC_p 기준을 사용하였다. 이러한 방법의 단점으로는 서고 다른 기준에 따른 최적회귀방정식이 상이하여 판단에 어려움이 따른다는 것을 들 수 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 자동적으로 한 개의 최종모형을 선택해주는 알고리즘을 가지고 있는 변수제거법, 변수선택법, 단계적방법 등을 사용하였다. 이러한 일련의 과정에서 얻어진 과정을 상호비교 분석하여 좋은(good)모형들 중에 최적(best)의 모형을 찾도록 하였다.

변수를 강도(SCA), RQD, 절리면 간격(DSA), 절리면 상태(DCA), 지하수(GWA), 불연속면 방향성 보정(SDA), 절리군수(NUM)로 두고 변수선택을 실시하였다. 변수중 절리군수의 경우 RMR평가 요소에는 들어가지 않지만 절리군의 수를 고려하지 않음으로 해서 적은 수의 절리군에서는 불연속면의 간격이 보수적으로 평가된다는 의견이 있어서 요소로 선정하여 분석하였다.

모든 가능한 회귀의 변수선택 뿐만 아니라 전진, 후진,

표 4. 모든 가능한 회귀의 변수선택

Number	R ²	Adjusted R ²	C(p)	AIC	Variables
3	0.92559	0.92455	6208	476.49963	RQD DCA GWA
3	0.92502	0.92398	6257	478.15746	SCA RQD DCA
중략					
3	0.50242	0.49551	42716	894.52463	GWA SDA NUM
3	0.42241	0.41439	49619	927.32989	DSA SDA NUM
4	0.96499	0.96434	2810	312.61291	SCA RQD DCA GWA
4	0.95028	0.94935	4080	389.80629	SCA RQD GWA SDA
중략					
4	0.72182	0.71665	23790	768.59621	DSA GWA SDA NUM
4	0.71789	0.71265	24128	771.68141	SCA DSA SDA NUM
5	0.98981	0.98958	670	43.02389	SCA RQD DCA GWA DSA
5	0.96957	0.96886	2417	283.74326	SCA RQD DCA GWA SDA

표 5. 분산분석표

Model		Sum of Square	Degree of Freedom	Mean of Square	F	Significance Probability
1	선형회귀분석	18786	1	18786	645	0.0001
	잔차	6377	219	29		
2	선형회귀분석	22719	2	11359	1012	0.0001
	잔차	2444	218	11		
3	선형회귀분석	23503	3	7834	1024	0.0001
	잔차	1659	217	7		

단계별 변수선택을 실시하였는데 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

우선, 종속변수를 RMR로 두고 RMR요소와 절리군의 수를 독립변수로 두었기 때문에 모든 요소를 사용하는 경우에 결정계수의 값이 1로 나와 완전한 모형이 되었다. 이것은 당연한 결과로 판단된다. 하지만 이러한 변수 중 설명력이 높은 변수들 선택을 하자면, RQD, 절리면 상태(DCA), 지하수(GWA), 강도(SCA), 보정(SDA), 절리 간격(DSA)의 순서대로 선택되었다. 따라서 이러한 변수들을 이용하여 회귀분석을 실시하였다.

또한, 선택된 회귀모형의 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 실시하였다. (표 5)

표 5에서의 모형은 1(RQD), 2(RQD, 절리상태),

3(RQD, 절리상태, 지하수)으로 구성하였으며, 회귀방정식의 모형은 모두 유의함을 알 수 있다

또한, 회귀진단과 처방을 통하여 최적의 다중회귀식을 얻고자 잔차분석과 특이점(outlier)의 검출 및 다중공선성(multicollinearity)의 검토를 하였다.

우선, 설정된 모형의 다중공선성의 존재여부를 확인하고자 상태지수(condition index), 분산비율 등을 검토하였다. 검토결과 RQD, 절리상태, 지하수, 강도, 절리간격 등이 포함된 모형에서는 절리상태, 강도, 절리간격 등이 다중공선성의 영향을 받고 있었으며 이중 변수선택 시 설명력이 가장 적은 절리간격을 제외한 상태에서 분석을 한 결과 절리 상태와 강도 사이에 다중공선성이 존재함을 알 수 있었다. 다중공선성의 문제에 대처방안으로는 서로 관

계를 가진 설명변수의 일부를 제거하는 것이 가장 일반적인 방법이고, 주성분회귀법 등을 이용하여 다중공선성을 약하게 하는 변수를 추가하는 방법이 있다. 본 연구에서는 모형간편화의 원칙에 의거하여 이러한 변수를 제거한 다중회귀모형을 설정하였다.

또한, 이상치 중에 영향력이 큰 데이터를 검출하기 위하여 영향력분석(influence analysis)를 실시하여 이러한 데이터를 제거한 후에 다중회귀분석을 실시하였다. 최종적으로 얻은 최적의 다중회귀모형은 다음과 같다.(표 6.)

각각의 변수에 관한 최적의 회귀모형은 다음과 같다.

$$RMR = 13.07 + 2.75 \cdot RQD \quad (1)$$

(adjusted R² : 0.75)

$$RMR = 4.04 + 1.87 \cdot RQD + 1.62 \cdot \text{절리상태} \quad (2)$$

(adjusted R² : 0.90)

$$RMR = 2.76 + 1.74 \cdot RQD + 1.34 \cdot \text{절리상태} + 0.76 \cdot \text{지하수} \quad (3)$$

(adjusted R² : 0.93)

이상의 결과(식 1, 2, 3)에서 볼 수 있듯이 각각의 변수 중 최적의 회귀모형을 구하였다. 수정된 결정계수의 경우 변수를 증가시키에 따라 0.75에서 0.93까지 설명력이 증가하였다.

제외된 변수들인, 강도, 절리간격, 절리 방향성에 대한 보정, 절리군의 수에 대한 보정의 경우 그 중요성이 약한 것이 아니지만 절리간격과 강도와 절리상태의 경우는 서로간의 다중공선성에 지대한 영향을 미치므로 이 부분에 대한 통계학적인 검토가 요구된다. 절리 방향성에 대한 보정의 경우에는 일반적으로 절리의 주향경사와 터널의 방향과의 관계를 개별적인 절리군으로 파악하여 보정에 임하므로 전체적인 암반평가에 미치는 영향이 크다고 볼 수 없다.

표 6. 모형의 회귀계수

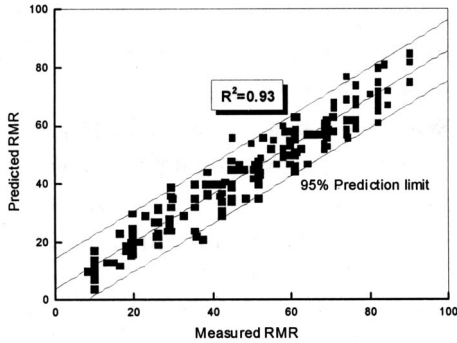
Model	Parameter Estimate	Standard Error	t	Significance Probability	95% confidence interval		
					Lower	Upper	
1	(상수)	13.073	1.195	10.943	0.000	10.718	15.427
	RQD	2.754	0.108	25.400	0.000	2.540	2.968
2	(상수)	4.044	0.884	4.573	0.000	2.302	5.787
	RQD	1.868	0.082	22.710	0.000	1.706	2.030
	절리상태	1.619	0.086	18.726	0.000	1.449	1.789
3	(상수)	2.735	0.742	3.687	0.000	1.273	4.197
	RQD	1.743	0.069	25.237	0.000	1.607	1.879
	절리상태	1.339	0.077	17.497	0.000	1.189	1.490
	지하수	0.764	0.075	10.128	0.000	0.616	0.913

표 7. 모형의 결정계수

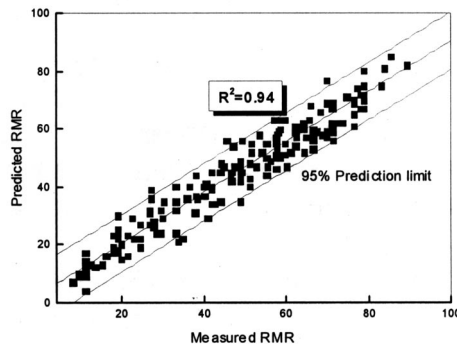
Model	R	R ²	Adjusted R ²	Standard Error	R ² increment	F Increment
1	0.86	0.75	0.75	5.40	0.747	645
2	0.95	0.90	0.90	3.35	0.156	350
3	0.97	0.93	0.93	2.77	0.031	102

6. 타지역 자료에 대한 적용성 평가

본 연구에서 얻은 다중회귀식의 유용성을 검증하기 위하여 타지역의 지반조사자료(206개소)를 이용하여 실측 RMR 값과 회귀식을 이용한 예측 RMR값을 상호 비교하였다. 그 결과 RQD, 절리상태가 변수로 선택된 모형(식 2)과 RQD, 절리상태, 지하수상태가 변수로 선택된 모형(식 3)에서 결정계수가 각각 0.93, 0.94로 매우 높은 상관이 있었다.(그림 3)



(a)



(b)

그림 3. 실측 RMR과 예측 RMR의 관계
(a ; RQD, 절리상태, b ; RQD, 절리상태, 지하수)

7. 결론

시공전의 암반분류와 시공중의 암반분류는 상당한 괴리가 있는 것으로 확인되었으며 시공중의 지질조사가 합리적인 시공을 위하여 중요하다.

분석결과 RMR 평가요소는 RQD, 절리상태, 지하수, 강도, 보정의 순으로 중요도가 결정되었으며 변수 상호간에 다중공선성의 문제를 발생시키지 않는 모형으로서 RQD, 절리상태, 지하수에 관한 다음의 세 가지 다중회귀 모형을 제시하였다.

$$RMR = 13.07 + 2.75 \cdot RQD$$

$$RMR = 4.04 + 1.87 \cdot RQD + 1.62 \cdot \text{절리상태}$$

$$RMR = 2.76 + 1.74 \cdot RQD + 1.34 \cdot \text{절리상태} + 0.76 \cdot \text{지하수}$$

제시된 모형의 수정결정계수는 각각 0.75, 0.90, 0.93으로 원자료를 잘 설명함을 확인하였다. 또한 모형의 유용성을 검증하기 위하여 타지역의 지반조사자료(206개소)의 데이터를 입력하여 실측 RMR과 예측 RMR을 단순회귀분석을 실시한 결과 RQD, 절리상태가 변수로 선택된 모형과 RQD, 절리상태, 지하수상태가 변수로 선택된 모형에서 결정계수가 각각 0.93, 0.94로 매우 높은 설명력을 가지고 있음을 확인하였으며 제시된 모형의 유용성을 검증하였다.

감사의 글

본 연구의 수행을 위하여 연구비 지원과 자료수집에 도움을 주신 (주)쌍용건설 관계자 여러분께 심심한 감사를 드린다.

참고문헌

1. 신희순, 선우 춘, 이두화(1999), "토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류", 구미서관, pp. 221~238
2. 김관영, 이승수(1995), "多變量統計解釋法", 자유아카데미, pp. 20~54
3. 강병서(1997), "多變量統計分析", 學現社, pp. 255~311
4. 日本道路協會(1993), "道路トンネル觀察・計測指針", 日本道路協會, pp.192~203
5. 吉中龍之進, 櫻井春輔, 菊地宏吉(1989), "岩盤分類と その適用", 土木工學社, pp.66~89
6. Bieniawski,Z.T(1984), "Rock Mechanics Design In Mining and Tunneling", Balkema, pp. 112~120
7. Hoek, E. & Brown, E.T.(1980), "Underground excavation in rock", The Institution of mining and metallurgy, London, pp. 22~27