

다변량분석을 이용한 터널에서의 간편 RMR에 관한 연구

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

위용곤¹⁾, Yong-Gon Wye, 노상림²⁾, Sang-Lim No, 윤지선³⁾, Ji-son Yoon,

¹⁾ 인하대학교 공과대학 지구환경공학부 석사과정, Graduate Student, Div. of Environmental and Geosystem Engineering, Univ. of Inha

²⁾ 인하대학교 공과대학 지구환경공학부 박사과정, Graduate Student, Div. of Environmental and Geosystem Engineering, Univ. of Inha

³⁾ 인하대학교 공과대학 지구환경공학부 교수, Professor, Div. of Environmental and Geosystem Engineering, Univ. of Inha

SYNOPSIS : 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 to make out because it is difficult to estimate each valuation items through all kind of field situations and items of RMR have interdependence. So the experts of tunnel assessment have problems with rating rock mass.

In this study, using multivariate analysis based on domestic data(1011EA) of water conveyance tunnel, we presented rock mass rating system which is objective and easy to use.

The constituents of RMR are decided to RQD, condition of discontinuities, groundwater conditions, orientation of discontinuities, intact rock strength, spacing of discontinuities in important order. In each step, we proposed the best multiple regression model for RMR system. And using data which have been collected at other site, we examined that presented multiple regression model was useful.

Key word : Rock Mass Rating, Tunnel, Multivariate analysis, Multiple regression model

1. 서론

최근 국내에서는 산업발달과 인구증가에 따라 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 터널 암반분류에 가장 보편적으로 적용되고 있는 RMR의 항목을 다변량 분석을 통하여 객관적이고 사용하기 간편한 암반분류법을 제시하였다.

2. 입력자료와 RMR 평가의 신뢰도

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

전자의 지질조사 결과는 국부적인 정보나 관측치에 기술적인 판단을 더하여 상정한 것이며 지질구조가 단조로운 지반과 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 파악하는 것은 어렵다. 터널은 선상의 긴 구조물이기 때문에 설계단계에서의 암반분류가 정확하여 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 발생하는 문제이다.

본 연구에서는 이와 같은 차이를 검증하기 위하여 도수로터널의 1011개소의 시공전의 암반분류와 시공중의 암반분류를 상호비교 검토하였다.(표 1. 그림 1.)

표 1. 시공전·시공중 암반분류 교차표

			시공중 TYPE							Total(빈도수) (적중율%)
			A	B	C	D	E	F	G	
시공전 TYPE	A	빈도	4	17	11	1	0	0	0	33
		%	12	52	33	3	0	0	0	12
	B	빈도	8	54	24	24	1	0	1	112
		%	7	48	21	21	1	0	1	48
	C	빈도	6	28	287	45	16	1	0	383
		%	2	7	75	12	4	0	0	75
	D	빈도	0	14	74	171	13	3	0	275
		%	0	5	27	62	5	1	0	62
	E	빈도	0	8	72	60	40	3	0	183
		%	0	4	39	33	22	3	0	22

전체적중율(%) = $\frac{\text{시공전과 시공중이 일치하는 경우의 빈도수의 합}}{\text{전체 빈도수}} \times 100(\%) = 56.4\%$

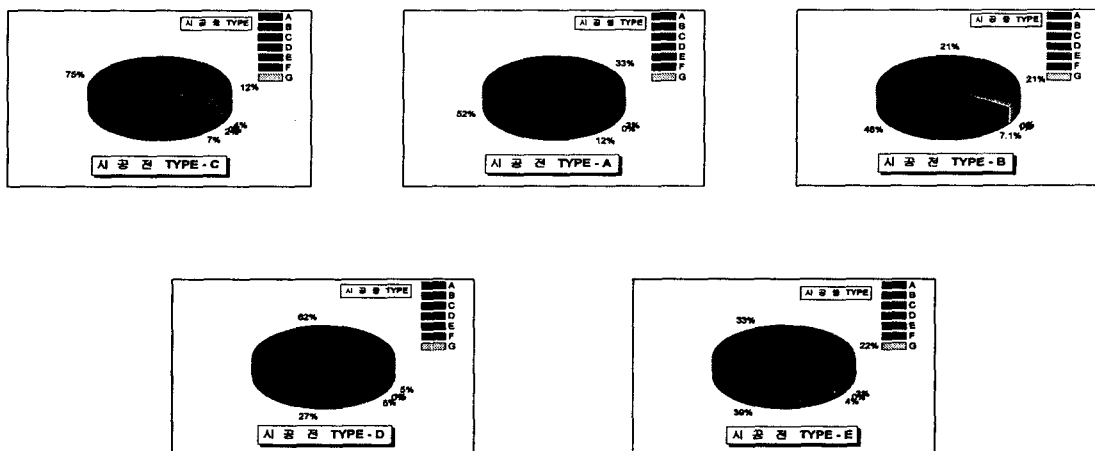


그림 1. 암반분류 적중률 분포차트

표 1과 그림 1에서 볼 수 있듯이 시공전의 암반분류와 시공후의 암반분류는 상당한 괴리를 가지고 있다. C, D TYPE의 경우에는 각각 75%, 65%로 비교적 높은 적중률을 보였지만 A, B, E TYPE의 경우에는 각각 12%, 48%, 22%로 낮은 적중률을 보였으며 전체 적중률은 56.4%로 나타났다. 상기에서 언급했듯이 경·연암이 교차하는 지역의 경우 또는 연장이 길어질수록 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 시공 실적의 기록, 양자의 대비 분석을 행하는 것이 중요하다.

본 연구에 사용된 자료는 국내 도수로터널로 총 연장 약 26km, 직경3m의 마이크로터널 막장관찰 RMR평가 자료(총 1011개소)이다. 제 1, 2, 3, 4의 4개구간으로 나누어져 있으며 제 1구간은 연장 7.3km의 TBM구간이며(335개소) 주로 석영반암으로 이루어져 있다. 제 2구간은 NATM구간(445개소)이며 총 연장 7.4km로 주로 퇴적암으로 이루어져 있으며, 제 3구간은 재래식구간(57개소)이며 총 연장 7.5km로 주로 퇴적암과 응회암으로 이루어져있으며 제 4구간은 TBM구간(174개소)이며 총 연장 3.9km로 주요 암종은 화강암으로 이루어져있다.

3. 암반분류를 위한 다변량분석

3. 1 다변량분석의 목적 및 종류

다변량분석은, 두 개 이상의 변수(항목)들 간의 상호관련성을 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 2에서 간단히 정리하였다.

표 2. 다변량분석 의 종류

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

3. 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 천단침하 등을 수치적으로 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. 이 때문에, 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.

3. 3 다중회귀분석을 이용한 암반분류

본 연구에서는 암반분류의 요소들을 통계적으로 분석하고자 시공중인 도수로 터널의 막장관찰과 조사 정보를 수집하여 다변량 분석을 통해 분석하였다. 총 연장 약 26km 1011개소의 RMR 자료를 이용하여 다변량분석 중 다중회귀분석을 이용하여 암반분류 시 중요 요소를 추출하고 이를 통한 간편 암반평가 방법에 대한 연구를 수행하였다.

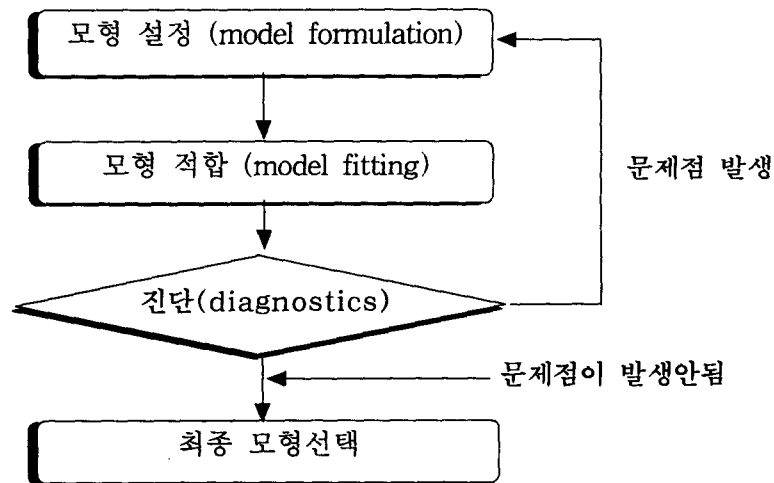


그림 2. 회귀모형을 구하는 순서도

다중회귀분석이란, 종속변수의 변화를 설명하기 위하여 두 개 이상의 독립변수가 사용되는 다중선형 회귀모형을 말한다. 이러한 다중회귀분석을 실시하기 위하여, 다중회귀모형의 설정, 최적회귀 방정식의 선택, 다중회귀분석에 관한 추론, 회귀모형의 진단 및 처방의 일련의 과정을 거쳐 설명력이 있는 다중회귀모형을 도출하게 되며 그 흐름도는 그림 2와 같다.

4. 다중회귀분석 결과 및 고찰

본 연구에서는 국내 도수로터널의 암반평가(1011개소, 연장 26km) 자료를 이용하여 다중회귀분석을 실시하여 다중회귀 모형을 도출하였다.

1단계로 모형을 설정하기 위하여 변수선택을 하였다. 다중회귀모형은 예측모형을 선택함에 있어서 간단한 모형을 선호하는 모형간편화의 원칙(principle of parsimony)에 따라, 모든 가능한 회귀(all possible regression)중에서 가장 좋은 회귀방정식의 선택기준을 사용하여 분석하였다(표 3). 다중회귀 모형의 선택기준으로는 MSE 기준, 수정결정계수 기준, C_p 기준, $PRESS_p$ 기준, AIC_p 기준을 사용하였다. 이러한 방법의 단점으로는 서로 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 사용하여 일련의 과정에서 얻어진 과정을 상호비교 분석하여 좋은(good)모형들 중에 최적(best)의 모형을 찾고자 하였다.

표 3. 모든 가능한 회귀의 변수선택

Number	R^2	Adjusted R^2	AIC	MSE	Variables
1	0.81121	0.81102	3791	42.41	RQD
1	0.70250	0.70220	4250	66.83	DS
			중략		
1	0.55108	0.55063	4666	100.85	GW
1	0.08433	0.08342	5387	205.70	SD
2	0.92792	0.92777	2819	16.21	RQD DC
2	0.89882	0.89862	3162	22.75	RQD GW
			중략		
2	0.68613	0.68551	4307	70.58	DC SD
2	0.59442	0.59362	4566	91.20	GW SD
3	0.95091	0.95076	2433	11.05	RQD DC GW
3	0.94921	0.94906	2467	11.43	RQD DC SD
			중략		
3	0.84241	0.84195	3612	35.47	SC DS SD
3	0.76572	0.76502	4013	52.73	DC GW SD
4	0.97208	0.97197	1864	6.29	RQD DC GW SD
4	0.97071	0.97060	1913	6.60	SC RQD DC GW
			중략		
4	0.92572	0.92543	2853	16.74	DS DC GW SD
4	0.89750	0.89709	3179	23.10	SC RQD DS SD
5	0.99081	0.99077	743	2.07	RQD DC GW SD SC
5	0.98525	0.98518	1221	3.33	RQD DS DC GW SD

변수를 강도(SC), RQD, 절리면 간격(DS), 절리면 상태(DC), 지하수(GW), 불연속면 방향성 보정(SD)로 두고 변수선택을 실시하였으며 모든 가능한 회귀의 변수선택 뿐만 아니라 전진, 후진, 단계별 변수선택을 실시하였는데 같은 결과를 얻을 수 있었다.

이러한 변수 중 설명력이 높은 변수들 선택을 하자면, RQD, 절리면 상태(DC), 지하수(GW), 보정(SD), 강도(SC), 절리 간격(DS)의 순서대로 선택되었다. 따라서 이러한 변수들을 이용하여 회귀분석을 실시하였다.

또한, 선택된 회귀모형의 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 실시하였다. (표 4.)

표 4. 분산분석표

Model		Sum of Square	Degree of Freedom	Mean of Square	F	Significance Probability
1	선형회귀분석	183871	1	183871	4336	0.0001
	잔차	42791	1009	42.41		
2	선형회귀분석	210324	2	105162	6488	0.0001
	잔차	16339	1008	16.21		
3	선형회귀분석	215536	3	71845	6502	0.0001
	잔차	11127	1007	11.05		
4	선형회귀분석	220335	4	55084	8758	0.0001
	잔차	6328	1006	6.29		
5	선형회귀분석	224580	5	44916	21676	0.0001
	잔차	2083	1005	2.07		

표 5에서의 모형은 1(RQD), 2(RQD, 절리상태), 3(RQD, 절리상태, 지하수), 4(RQD, 절리상태, 지하수, 보정계수), 5(RQD, 절리상태, 지하수, 보정계수, 일축압축강도)로 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. 다중공선성(multicollinearity)이란 설명변수들 사이의 선형종속(linear dependency)의 관계를 말하며 다중공선성이 있는 경우, 다른 설명변수들의 선형결합으로 표현될 수 있는 설명변수는 추가적인 정보를 제공하지 못하게되어 제 역할을 하지 못한다. 이런 경우, 일부 회귀계수들의 추정치의 분산이 지나치게 커지게 되어 회귀계수들의 추정치가 불안정하게 되며 추정 오차가 심각하게 커지므로 통계적 추론이 별로 의미가 없게 된다.

우선, 설정된 모형의 다중공선성의 존재여부를 확인하고자 상태지수(condition index), 분산비율 등을 검토하였다. 검토결과 지하수, 일축압축강도, 보정계수, 절리간격 등이 포함된 모형에서는 지하수, 일축압축강도, 보정계수, 절리간격이 다중공선성의 영향을 약하게 받고 있었다. 다중공선성의 문제에 대처방안으로는 서로 관계를 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 제거하면서 결정계수가 0.9이상인 다중회귀모형을 설정하였다.

또한, 이상치 중에 영향력이 큰 데이터를 검출하기 위하여 영향력분석(influence analysis)를 실시하여 이러한 데이터를 제거한 후에 다중회귀분석을 실시하였다. 최종적으로 얻은 각 단계에서의 최적의 다중회귀모형은 표 5와 같으며 그 중에서 결정계수가 0.9이상이며 다중공선성의 영향을 받은 변수를 제거한 최적의 회귀모형은 다음과 같다.

$$RMR = 1.74 + 2.05 \cdot RQD + 1.69 \cdot \text{절리상태} \quad (1)$$

(adjusted R² : 0.93)

$$RMR = 1.27 + 1.89 \cdot RQD + 1.28 \cdot \text{절리상태} + 0.97 \cdot \text{지하수} \quad (2)$$

(adjusted R² : 0.95)

수정된 결정계수의 경우 변수를 증가시킴에 따라 0.811에서 0.99까지 설명력이 증가하였다.

제외된 변수들인, 강도, 절리간격, 절리 방향성에 대한 보정 등은 그 중요성이 약한 것이 아니지만 절리간격과 강도와 절리상태의 경우는 서로간의 다중공선성에 영향을 미치므로 이 부분에 대한 통계학적인 검토가 요구된다. 각 회귀모형의 회귀계수와 회귀모형의 결정계수를 표 5와 6에 나타내었다.

표 5. 모형의 회귀계수

Model	Parameter Estimate	Standard Error	t	Significance Probability	95% confidence interval		
					Lower	Upper	
1	(상수)	14.32	0.49	29.38	0.0001	13.37	15.28
	RQD	2.86	0.04	65.85	0.0001	2.78	2.95
2	(상수)	1.74	0.43	4.01	0.0001	0.89	2.59
	RQD	2.05	0.03	61.19	0.0001	1.99	2.12
	절리상태	1.69	0.04	40.40	0.0001	1.61	1.77
3	(상수)	1.27	0.36	3.53	0.0001	0.56	1.97
	RQD	1.89	0.03	65.67	0.0001	1.83	1.94
	절리상태	1.28	0.04	32.69	0.0001	1.21	1.36
	지하수	0.97	0.04	21.72	0.0001	0.88	1.05
4	(상수)	7.75	0.36	21.64	0.0001	7.04	8.45
	RQD	1.87	0.02	86.24	0.0001	1.83	1.91
	절리상태	1.20	0.03	40.41	0.0001	1.15	1.26
	지하수	0.96	0.03	28.71	0.0001	0.90	1.03
	보정계수	1.08	0.04	27.62	0.0001	1.01	1.16
5	(상수)	4.06	0.22	18.35	0.0001	3.62	4.49
	RQD	1.34	0.02	78.05	0.0001	1.30	1.37
	절리상태	1.07	0.02	61.89	0.0001	1.04	1.11
	지하수	1.00	0.02	51.86	0.0001	0.96	1.04
	보정계수	1.05	0.02	46.89	0.0001	1.01	1.10
	일축압축강도	1.12	0.03	45.26	0.0001	1.07	1.16

표 6. 모형의 결정계수

Model	R	R ²	Adjusted R ²	Standard Error	R ² increment	F Increment
1	0.901	0.811	0.811	6.51	0.811	4336
2	0.963	0.928	0.928	4.02	0.117	1632
3	0.975	0.951	0.951	3.32	0.023	472
4	0.986	0.972	0.972	2.50	0.021	763
5	0.995	0.991	0.991	1.44	0.019	2049

5. 최적 모형식에 대한 적용성 평가

본 연구에서 얻은 다중회귀식의 유용성을 검증하기 위하여 타지역의 지반조사자료(206개소)와 상기의 각 구간별 데이터를 이용하여 실측 RMR 값과 회귀식을 이용한 예측 RMR 값을 단순회귀분석에서 얻어지는 결정계수를 이용하여 상호 비교하였다.(표 7.)

표 7. 각 모형에 따른 실측RMR과 예측RMR의 사이의 결정계수

모형	선택된 변수	제 1 구간	제 2 구간	제 3 구간	제 4 구간	타지역 지반조사 자료
1	RQD	0.881	0.671	0.831	0.856	0.703
2	RQD DC	0.961	0.874	0.903	0.936	0.932
3	RQD DC GW	0.971	0.920	0.962	0.963	0.936
4	RQD DC GW SD	0.980	0.943	0.982	0.979	0.942
5	RQD DC GW SD SC	0.993	0.990	0.990	0.990	0.967

그 결과 RQD, 절리상태가 변수로 선택된 모형(식 1)에서는 결정계수가 0.87~0.96의 값을 나타내었고 RQD, 절리상태, 지하수가 변수로 선택된 모형(식 2)은 결정계수가 0.92~0.97로 매우 높은 상관성이 있었다. 그림 3에 제 4구간 데이터와 타지역의 지반조사데이터를 단순회귀분석을 실시한 결과를 나타내었다.

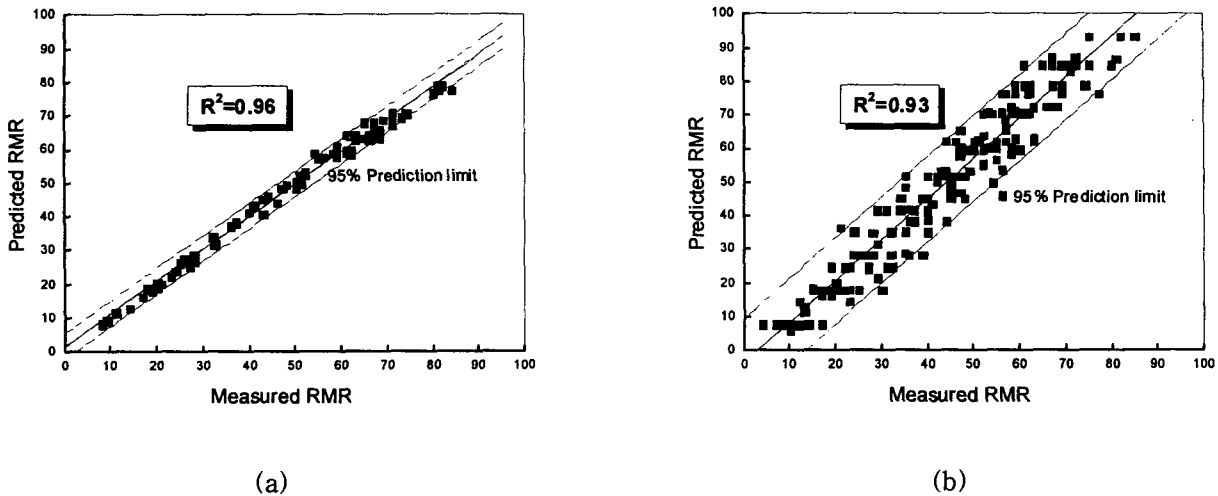


그림 3. 실측 RMR과 예측 RMR의 관계 (a ; 제4구간 데이터, b ; 타지역 지반조사자료)

6. 결론

시공전의 암반분류와 시공중의 암반분류는 비교분석 결과 상당한 차이가 있는 것으로 확인되었으며 시공중의 지질조사가 합리적인 시공을 위하여 중요하다.

분석결과 RMR 평가요소는 RQD, 절리상태, 지하수, 보정, 일축압축강도의 순으로 중요도가 결정되었으며 변수 상호간에 다중공선성의 문제를 발생시키지 않는 모형으로서 RQD, 절리상태, 지하수에 관한 다음의 두 가지 다중회귀모형을 제시하였다.

$$RMR = 1.74 + 2.05 \cdot RQD + 1.69 \cdot \text{절리상태}$$

$$RMR = 1.27 + 1.89 \cdot RQD + 1.28 \cdot \text{절리상태} + 0.97 \cdot \text{지하수}$$

제시된 모형의 수정결정계수는 각각 0.93, 0.95로 원자료를 잘 설명함을 확인하였다. 또한 모형의 유용성을 검증하기 위하여 타지역의 지반조사자료(206개소)의 데이터와 각 구간별 데이터를 이용하여 실측 RMR 값과 회귀식을 이용한 예측 RMR값을 단순회귀분석을 실시한 결과 RQD, 절리상태가 변수로 선택된 모형과 RQD, 절리상태, 지하수상태가 변수로 선택된 모형에서 결정계수가 각각 표7과 같이 결정계수가 대부분 0.9이상으로 매우 높은 설명력을 가지고 있음을 확인하였으며 제시된 모형의 유용성을 검증하였다.

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