

퇴적암 기반 터널에서의 지질인자별 변위 영향도를 고려한 RMR 수정 제안

서용석^{1*} · 임성빈¹ · 나종화² · 박시현³

¹충북대학교 지구환경과학과, ²충북대학교 정보통계학과

³한국시설안전공단 지하시설실

Suggestion of a Modified RMR based on Effect of RMR Parameters on Tunnel Displacement in Sedimentary Rocks

Yong-Seok Seo^{1*}, Sung-Bin Yim¹, Jong-Hwa Na², and Si-Hyun Park³

¹Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

²Department of Information Statistics, Chungbuk National University

³Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, Underground Facility Dept.

보강효과 및 계측조건의 영향이 배제된 무보강 상태의 전변위는 터널 굴착에 따른 암반 거동의 정량적 지표가 될 수 있으며, 이러한 변위는 지질학적 특성에 의존한다. 본 연구는 암반 상태별로 굴착에 따른 암반의 거동 특성을 잘 반영할 수 있는 암반 평가법의 제안을 목적으로 한다. 이를 위해 퇴적암을 기반으로 하는 터널을 대상으로 형상, 굴진장 및 굴착 조건 등이 고려된 3차원 수치해석을 수행하였으며, 이를 통해 암반 상태에 따른 무보강 상태의 전변위를 산정하였다. 그리고 산정된 전변위를 외적기준으로 하고, 각 RMR 인자들을 설명변수로 하는 수량화분석을 수행하였다. 그 결과 각 RMR 인자의 변위 영향도를 결정하였으며, 최종적으로 수정된 RMR 배점 체계를 제안하였다.

주요어 : 수량화분석, RMR 분류법, 3차원 수치해석, 무보강 전변위

Total displacement under non-reinforcement is a quantitative index of rock mass behavior during tunnel excavation and depends widely upon geological characteristics. The primary purpose of this study is to suggest a rock mass evaluation method, well representing tunnel behavior during excavation, according to rock type. A 3-D numerical analysis was carried out, with consideration of the shape of tunnel section, excavation condition and so forth, in a sedimentary rock-based tunnel, and total displacements under non-reinforcement according to rock mass class were calculated. Finally, quantification analysis was carried out to assess correlation of the total displacement with RMR parameters. As the result, a modified RMR system for quantification of rock mass behavior during tunnel excavation is suggested.

Key words : quantification analysis, Rock Mass Rating system, 3-dimensional numerical analysis, total displacement under non-reinforcement

서 론

안정상태의 지반은 터널이 굴착됨에 따라 아칭현상에 의해 막장이 굴착되기 이전, 즉 막장 전방에서부터 변위가 발생되기 시작한다. 그리고 굴착 이후 지보재가 설치됨에 따라 지반은 점차 안정화되어 간다. 이러한 굴착에 따른 발생 전변위는 보강재의 종류, 보강시점 등에 따라

차이를 보이는데, 일상적으로 수행되는 A 계측에 의해서 전체 변위중의 일부만을 측정할 수 있다. 특히 A 계측에 의한 결과도 계측편 설치 위치 및 계측 시점 등에 따라 측정값이 달라진다. 일반적으로 터널 굴착에 따른 전변위의 측정을 위해서는 모형실험, 수치해석, 현장 실험을 이용한 방법 등이 사용된다(Cividini *et al.*, 1983; Sakurai and Takeuchi, 1983; Pelizza *et al.*, 1994;

*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

Shirakawa et al., 1999). 이들 대부분의 연구들은 보강재가 적용된 경우에 해당된다. 실제로 보강재에 의한 보강 효과 및 계층조건 등의 외부 요인이 제거된 환경인 무보강 상태의 전변위는 터널 굴착에 따른 암반의 변형 특성을 잘 반영할 수 있는 인자이며, 터널 거동의 정량적 지표가 될 수 있다. 암반의 변형 특성은 일반적으로 구성암종과 이들의 지질학적 특성에 의해 크게 의존한다. 최근에는 이러한 지질학적 특수성을 고려한 암반분류 연구가 활발히 이루어지고 있다(임성빈 등, 2007a; Moon et al., 2001; Yasar, 2001; Kim and Yang, 2004).

본 연구는 암반 상태에 따라 굴착에 따른 암반의 거동 특성을 잘 반영할 수 있는 암반 평가법의 제안을 목적으로 한다. 이를 위해 국내 막장 평가를 위해 가장 널리 사용되는 RMR 분류법의 배점 체계를 수정 제안하고자 한다. 각 RMR 항목의 배점 할당을 위해 무보강 암반의 거동특성을 외적기준으로 하고, 각 RMR 인자들을 설명변수로 하는 수량화 분석을 수행하였다. 수량화 분석 결과 산정된 각 인자들의 변위 영향도를 고려하여 RMR 인자의 배점을 할당하였다. 또한 각 인자들의 배점과 무보강 전변위간의 회귀식을 산정하였으며, 이를 통해 변위 특성이 잘 반영되도록 각 인자들의 급간 배점 간격을 조정하였다. 수량화 분석 시 외적기준으로 사용된 무보강 상태의 전변위는 3차원 수치해석을 통해 산정하였다. 또한 계층변위에 대한 역해석을 통해 RMR 등급별 지반 물성치의 범위를 산정하였으며, 터널의 형상, 굴진장, 굴착 패턴 등의 계층시의 조건을 재현한 해석모델을 작성하였으며, 그 결과 굴착 시 암반의 거동특성을 반영하는 무보강 상태의 전변위를 측정하였다.

현장개요

대상터널은 부산-울산간 고속도로의 일부구간에 해당되는 병설 3차로 터널이며, 상하행선 각각 1598 m, 1508 m의 연장을 가진다. 터널의 시공을 위해서 NATM 공법이 적용되었으며, 터널 시점부 토사 및 리핑암 구간에서는 기계굴착이 적용되었다. 특히 터널시점, 연약대, 암종경계 구간에 대해서는 지보패턴 보강 및 보조공법이 적용되었다.

지질개요

본 연구지역은 동측의 동래단층과 서측의 양산단층 사이에서 나타나는 해발고도 평균 200 m 정도의 중산악 지형을 이루고 있으며, 계곡들은 대부분 U자곡을 형성

하고 있어 만장년기의 지형에 해당된다. 산계는 주로 지질구조 및 암석분포의 영향을 받아 대부분 N20°E 방향으로 발달해 있으며, 동래단층의 영향으로 단층방향과 유사한 산계도 분포한다. 연구지역은 중생대 백악기 경상누층군 하양층군의 퇴적암류와 이를 관입 또는 분출한 화산암류, 그리고 기반암층을 관입한 불국사통의 화성암류로 구성된다. 풍화에 강한 화강암과 호운펠스가 높은 해발고도에 분포하고 있으며 백악기의 쇄설성 퇴적암류가 풍화에 의해 지형적으로 구릉지 내지 완만한 사면을 형성한다.

대상터널의 시점부 일부에서는 흑운모화강암과 호운펠스, 다른 지역에서는 사암, 이암, 셰일 등의 퇴적암류가 분포한다. 터널 시점부에서 확인되는 흑운모 화강암은 담회색을 띄며 중립질의 석영, 알카리 장석, 사장석 등이 등립입상 조적을 가진다. 시점부의 화강암 경계부에서 나타나는 암녹색 또는 녹회색 호운펠스는 치밀하며 견고한 비현정질의 형태를 가지며, 장석, 석영, 점토 입자를 주 구성성분으로 하며 녹니석, 녹염석, 방해석 등을 포함한다. 시점부를 제외한 전 구간에서 신출되는 퇴적암류는 세립질 사암과 셰일이 호층을 형성하며, 셰일층 사이에 박층으로 소량의 이암이 협재된다. 특히 퇴적암류 구간은 수평에 가까운 저각의 층리가 우세하게 발달해 있으며, 고각의 수직절리도 나타난다. 대상 터널 구간에는 동래단층의 직간접적인 영향으로 소규모 단층 및 파쇄대 등이 산재해 있다.

현장 RMR 평가 분석

일반적으로 터널의 설계 및 시공을 위해서는 시추조사, 물리탐사, 현장지질조사 등을 통한 암반 평가가 수행된다. 이 중 굴착 중 막장 지질조사와 병행하여 수행하는 암반 평가가 가장 객관적이며, 정확하고 연속적인 지질정보의 획득이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 막장 평가를 통해 획득된 RMR 인자에 대한 측정값들을 지질특성을 지시하는 지표로 활용하였다. 대상 터널 굴착 중 총 1,547개의 막장에 대한 지질조사 및 RMR 평가가 실시되었다. 그 결과 불연속면의 방향성 보정인자를 제외한 기초 RMR 값(RMR_b)은 II~V등급에 해당하는 16~79점으로 평가되었으며, 전체 구간의 평균 RMR은 약 51점으로 나타났다. III등급에 해당하는 막장이 774개소로 가장 많이 분포하며, V등급 막장이 24개소로 드물게 나타난다. Table 1은 대상 터널 구간 RMR 평가 등급 및 인자별 배점 빈도, 분포특성 및 통계적 특성을 요약한 것이다.

Table 1. Statistical characteristics of RMR factors.

Rock class	Factor	Data number	Mean rating	Median rating	Mode rating	Standard deviation	Range of rating
II	R1	408	13.1	13	14	0.82	6
	R2		13.8	15	15	2.15	9
	R3		13.9	15	15	2.14	10
	R4		16.9	16	16	2.81	15
	R5		11.6	10	10	2.41	11
	RMR _b		69.3	69	72	3.59	18
III	R1	774	11.5	12	12	1.25	8
	R2		11.7	12	10	2.70	12
	R3		10.1	10	10	1.80	7
	R4		10.1	10	10	2.09	13
	R5		9.3	10	10	1.70	15
	RMR _b		52.8	54	58	5.48	19
IV	R1	341	6.1	6	6	1.66	9
	R2		4.2	3	3	2.27	8
	R3		6.0	8	8	2.66	10
	R4		4.7	4	4	1.89	9
	R5		6.8	7	7	1.50	6
	RMR _b		27.8	28	21	6.45	19
V	R1	24	3.8	4	4	0.82	3
	R2		3.0	3	3	0.00	0
	R3		3.3	3	3	0.76	2
	R4		4.1	5	6	2.43	7
	R5		4.7	4	4	1.31	4
	RMR _b		18.9	10	20	1.67	4
Total	R1	1,547	10.6	12	12	2.96	13
	R2		10.5	11	3	4.40	15
	R3		10.1	10	10	3.56	20
	R4		10.6	10	10	4.88	23
	R5		9.3	10	10	2.56	16
	RMR _b		51.1	55	59	15.88	63

3차원 수치해석

일반적으로 굴착 중 발생하는 터널의 변위는 Fig. 1과 같이 굴착 전 선행변위(U_a), 굴착 후 미세측 변위(C_0) 그리고 계측변위(C_m)로 구분된다(Panet and Guenot, 1982). 이 중 A 계측에 의해 측정되는 계측변위는 계측 시점, 보강정도, 보강재 타설 시점 등에 의해 많은 차이를 보이기 때문에, 단순히 측정된 일상계측 결과만으로는 터널 거동의 객관적인 정량화가 불충분하다. 따라서 본 연구에서는 보강효과 및 계측시점 등의 영향이 배제된 무보강 상태의 전변위가 굴착에 따른 암반 거동의 정량적 지표가 될 수 있다고 판단하였다. 따라서 무보강 상태의 구현이 가능하고 다른 시공 조건 등을 실제와 유사하게 반영할 수 있으며, RMR 평가 결과에 따라 물

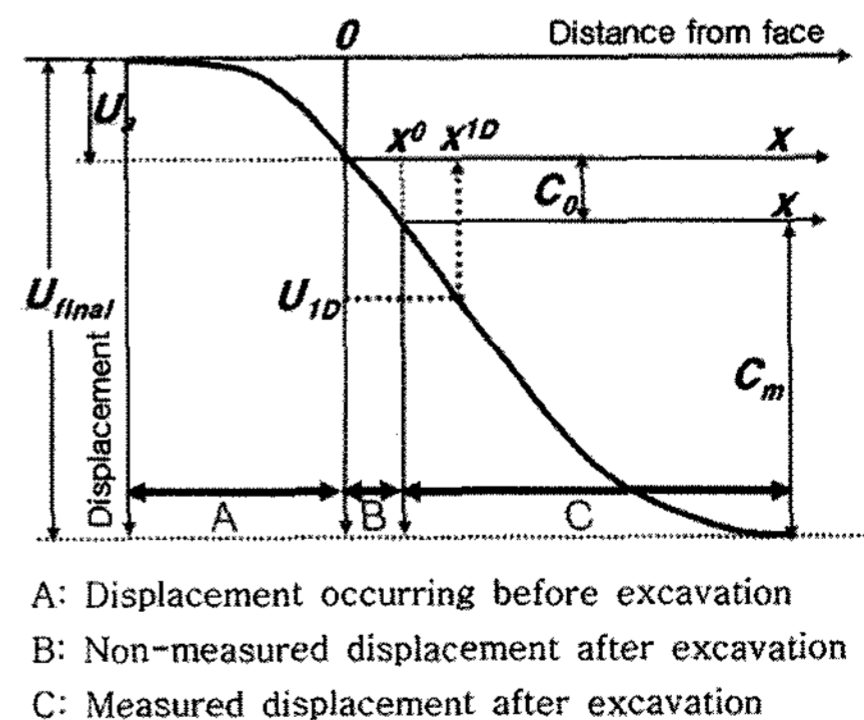


Fig. 1. Grouping of displacements due to excavation of tunnel.

성치의 차등 적용이 가능한 3차원 수치해석을 실시하여 전변위를 산정하였다.

해석모델 작성

연구 대상 터널의 형상, 굴착방법, 굴진장, 보강패턴 등을 재현한 3차원 수치해석은 임성빈 등(2007b)에 의해 수행된 바 있다. 본 연구에서는 임성빈 등(2007b)의 해석모델을 바탕으로 무보강 상태의 3차원 터널 상태를 가정하였다. 해석에는 지반 구조해석용 유한요소 해석 프로그램인 PENTAGON 3D가 사용되었다. 물성치는 김학준 등(2006)에 의해 제시된 퇴적암의 단위중량, 내부마찰각, 점착력을 적용하였으며, 계측변위의 역해석을 통해 각 RMR 등급별로 산정된 탄성계수를 해석에 사용하였다. 해석에 적용된 지반 물성치는 Table 2와 같다. 탄성계수는 RMR 등급별로 최대, 평균, 최소값으로 구분하여 그 범위를 설정하였다. 지반 등급별 및 적용 물성별로 총 15개의 해석모델을 작성하였으며, 80m 굴착을 재현하여 선행변위 30m, 굴착 후 발생변위 50m를 확인하였다.

무보강 상태의 전변위 산정

실제 시공현장에서의 계측은 총 199개소에서 수행되었으며, 이 중 VI등급에 해당하는 16개소를 제외하면 183개소이다. 각 등급별로 계측결과의 최대값, 최소값, 평균값을 설정하였으며, 그에 대응하는 보강 및 무보강 상태

의 전변위를 산정하였다. 15개 해석모델에 대한 수치해석 결과 산정된 전변위와 계측변위를 Table 3에 요약하였다.

보강하의 전변위를 보면, 암반등급에 따른 차이가 크게 보이지 않는다. 이는 각 등급별로 적절한 보강에 의해 변위가 일정한 수준으로 억제되었음을 의미한다. 하지만 무보강상태의 전변위는 불량한 암반 상태일수록 커짐을 알 수 있다. 등급 차이에 의한 변위 증가량은 불량한 암반상태로 향할수록 훨씬 커지며, 양호한 상태의 암반에서는 그 차이가 크지 않다. 평균 발생변위에서는 오히려 II등급보다 I등급 암반의 변위량이 더 크게 나타나는데, 이는 굴진장 등의 굴착방법의 영향으로 판단된다. 각 등급별 무보강 상태의 전변위는 암질이 불량할수록, 즉 V등급에 가까운 암반일수록 보강상태의 전변위와 그 차이가 커진다.

최대, 최소, 평균 계측변위 값을 가지는 구간 이외의 계측지점에 대한 무보강상태의 전변위는 계측변위간의 차와 전변위간 차 사이의 비례식을 이용하여 산정하였다.

수량화 분석

수량화 방법 I의 이론적 배경

수량화 이론(Quantification theory)은 정성적 요인에

Table 2. Geotechnical parameters of sedimentary rocks for 3-D numerical analysis.

Rock type		I	II	III	IV	V
Bulk modulus (tf/m ²)	Maximum	30800	16500	9300	8000	1800
	Mean	45000	33000	18000	13000	4100
	Minimum	80000	57000	65000	35000	8500
Shear modulus (tf/m ²)	Maximum	23100	11361	5850	4125	783
	Mean	33750	22721	11322	6703	1784
	Minimum	60000	39246	40887	18047	3698
Unit weight (tf/m ³)		2.66	2.55	2.44	2.27	2.04
Cohesion (tf/m ²)		542	293.9	149.9	61.6	26.4
Friction angle (°)		43	41.6	37.7	32.8	29.8

Table 3. Measured displacement (Cm) and total displacement under reinforcement and non-reinforcement.

Rock class		I	II	III	IV	V
Measured displacement (mm)	Maximum	6.9	7.6	7.6	5.7	7.1
	Mean	4.7	4.2	4.6	4.0	3.4
	Minimum	2.7	2.5	1.6	2.1	2.0
Total displacement under reinforcement by 3D analysis (mm)	Maximum	35.3	37.8	38.6	28.0	24.7
	Mean	24.4	20.0	22.3	19.6	16.5
	Minimum	13.9	12.0	7.0	9.0	11.5
Total displacement under non-reinforcement by 3D analysis (mm)	Maximum	36.8	43.6	52.4	48.9	129.8
	Mean	25.2	21.8	27.2	30.1	61.8
	Minimum	14.2	12.6	7.5	11.3	30.8

포함되는 성격이나 범주에 적당한 수치를 부여하여 정량적 변수와 함께 다변량 분석을 하고자 할 때 사용되는 이론이다. 이 이론은 일본의 林知己夫와 村山孝(1964)에 의해 체계적으로 전개된 이론으로 수량화방법 I과 II는 기존 통계학에서 종속변량이라고 하는 외적기준이 있는 경우에 적용되는 기법이다. 수량화 방법 I은 연속형 외적기준인 경우, 수량화 방법 II는 범주형 외적기준인 경우에 적용되는 기법이다. 수량화 방법 III과 IV는 다변량 자료가 외적기준을 포함하지 않는 경우 적용될 수 있는 수량화 기법이다. 이와 같은 수량화 이론의 각각의 특성을 고려하면 본 연구의 분석 목적에 적용할 수 있는 것은 수량화 방법 I이다. 외적기준으로 수치해석을 통해 산정된 무보강 상태 터널의 전변위(종속변수)를 채택하고 이에 영향을 미칠 것으로 판단되는 RMR의 구성 인자들을 정성적 요인(설명변수)로 선정하였다.

수량화 방법 I은 외적기준이 양적이고 설명변량이 질적인 경우 설명변량의 범주들을 수량화 한다. 수량화 방법의 목표는 외적기준과 가장 큰 상관(correlation)을 갖는 설명변량들의 선형결합을 찾는 것이다. 수량화 분석 시 설명변수로 사용 될 RMR 인자의 배점은 연속적이

지만, 현장 암반 평가 시에는 주로 등급을 구분하여 적용한다. 즉 RMR 인자 중 RQD 항목(R2)은 0~20점의 연속적인 배점을 가지지만, 일반적으로 현장에서의 편의성을 고려하여 RQD 범위에 따라 3, 8, 13, 17, 20점으로 구분 적용한다. 이렇게 설명변수가 범주형으로 취급되는 경우에는 원래의 코드값을 그대로 사용할 수 없으므로 0과 1의 값만을 취하는 변수, 즉 가변수(dummy variable)로 변환하여 선형결합하여야 한다.

일반적으로 k 개의 범주를 갖는 질적 변수 V 는 다음과 같이 $k-1$ 개의 가변수로 표현될 수 있다($k=2,3,4,\dots$).

$$V=1 \leftrightarrow dV_1=1 \text{ and } dV_2=\dots=dV_{k-1}=0 \quad (1)$$

$$V=k-1 \leftrightarrow dV_{k-1}=1 \text{ and } dV_1=\dots=dV_{k-2}=0,$$

$$V=k \leftrightarrow dV_1=dV_2=\dots=dV_{k-2}=dV_{k-1}=0.$$

이와 같은 준비하에서 수량화 방법 I은

$$\max \text{corr}(Y, \hat{Y}) \quad (2)$$

즉, Y 와 \hat{Y} 사이의 상관계수의 최대화로 정식화된다. 여기서 Y 는 모든 설명 가변수들의 선형결합이다. 식 (2)

Table 4. Results of quantification analysis I.

Explanatory variable	Category	Frequency	Original quantification value	Centralized quantification value	Range	Partial correlation (1)	Partial correlation (2)	RMR rating
Strength of intact rock (R1)	1	20	1.1677	-2.7983	5.8190 (8.05%)	0.1114 (9.31%)	0.0108 (5.38%)	15
	2	123	4.3839	0.4180				
	3	26	5.8190	7.8531				
	4	11	0.0000	-3.9660				
RQD (R2)	2	34	-18.2146	-0.6871	22.1677 (30.67%)	0.4877 (40.77%)	0.0834 (41.63%)	20
	3	62	-22.1677	-4.6403				
	4	55	-21.1136	-3.5862				
	5	29	0.0000	17.5275				
Spacing of discontinuities (R3)	1	1	-11.6390	-1.1698	15.9700 (22.10%)	0.2691 (22.49%)	0.0611 (30.52%)	20
	2	51	-11.8271	-1.3579				
	3	80	-9.6820	0.7872				
	4	31	-15.9700	-5.5008				
	5	17	0.0000	10.4692				
Condition of discontinuities (R4)	2	1	-8.3637	-6.1060	8.3637 (11.57%)	0.1105 (9.23%)	0.0057 (2.86%)	30
	3	41	-4.8325	-2.5748				
	4	118	-1.6940	0.5637				
	5	20	0.0000	2.2577				
Groundwater (R5)	1	17	-19.9515	-7.8801	19.9515 (27.61%)	0.2177 (18.20%)	0.0393 (19.61%)	15
	2	116	-11.8481	0.2232				
	3	36	-9.2290	2.8423				
	4	10	-12.7043	-0.6330				
	5	1	0.0000	12.0714				

는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\max \text{corr}(y, X\beta) \quad (3)$$

수량화의 목적인 식(2)와 식(3)은 허명희(1998)에 의해 최종적으로 다음 식 (3)과 같이 전통적인 선형모형론의 틀에 맞추어 진다.

$$\min \text{var}(Y-\hat{Y}) \quad (4)$$

즉, 잔차 제곱합의 최소화와 일치하게 된다. 그러므로 수량화 방법 I의 해는 최소제곱법(least squares method)을 적용하여 얻을 수 있다. 다시 말하면, 수량화 방법 I과 회귀분석 등 선형모형론의 기본은 동일하다고 할 수 있다.

수량화 분석 및 결과

본 연구에서는 RMR 분류인자인 일축압축강도(R1), RQD(R2), 절리 간격(R3), 절리면 상태(R4), 지하수 상태(R5)가 터널의 무보강시의 전변위, 즉 암반 변형에 미치는 영향도를 결정하기 위하여 수량화 방법 I을 적용하였다. 이를 위해 대상터널의 183개소의 계측편과 가장 가까운 막장의 RMR 분류 결과를 선택하여 분석에 사

용하였다. 통계 분석을 위해 계측결과를 근거로 수치해석을 통해 산정된 무보강 상태의 전변위량과 RMR 인자들을 각각 외적기준과 설명변수로 설정하였다. 설명변수는 특성치 구분에 따라 측정된 점수를 RMR 분류표에 근거하여 범주화 하였다.

SAS 프로그램을 이용하여 산정된 각 설명변수들의 수량화값은 Table 4와 같다. 가변수의 설정 시 마지막 범주를 사실상 제외시켰기 때문에, 각 설명변수의 마지막 범주의 수량화값은 모두 0이다. 설명변량의 수량화 값들의 합이 0이 되도록 중심화 하여 함께 표현하였다. 이때의 중심은 개별 범주의 주변 빈도들을 가중치로 한 가중평균이다. 범위(range)는 각 설명변량 범주들의 최대 수량화값과 최소 수량화값의 차이이다. 각각의 설명변량은 외적기준의 척도에서 수량화값의 범위만큼 차이를 벌리게 되므로, 범위가 큰 설명변량은 수량화에 있어서 상대적으로 기여도가 크다고 할 수 있다. 수량화 변량간의 편상관(Partial correlation)은 다른 변량들을 제외한 상태에서 해당변량과 외적기준간의 선형적 연관도를 나타낸다. 본 연구에서는 SAS 프로그램에 의한 편상관과 식 (5)를 이용하여 종속변량과 설명변량의 제곱편상관 계산에 의한 편상관을 각각 구하였다.

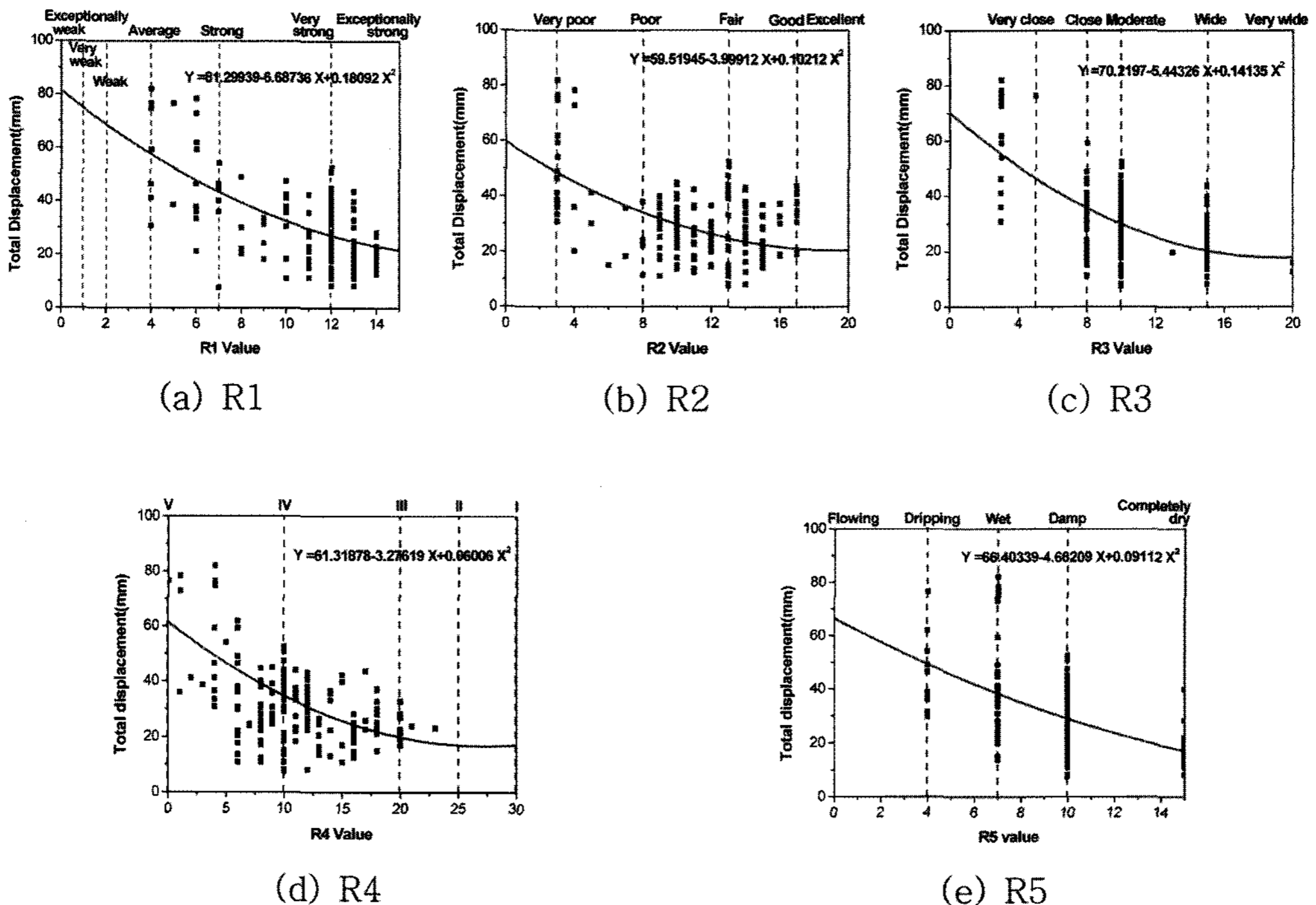


Fig. 2. Correlations between total displacement under non-reinforcement and each RMR parameter.

Table 5. Suggested rating of RMR parameters based on effect of RMR parameters on tunnel displacement in sedimentary rocks.

	Strength of intact rock (R1)	RQD (R2)	Spacing of discontinuities (R3)	Condition of discontinuities (R4)	Groundwater (R5)
Original RMR	15	20	20	30	15
Modified RMR	10	30	25	10	25

Table 6. Modified RMR system for sedimentary rocks.

Parameter		Range of values							
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	For this low range-uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
		Rating	10	9	6	4	2	1	0
2	Drill core quality(RQD)		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
		Rating	30	29	27	20	8		
3	Spacing of discontinuities		>2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	0.06-0.2 m	<0.06 m		
		Rating	25	24	19	16	11		
4	Condition of discontinuities		Very rough surface Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation<1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation<1 mm Highly weathered walls	Slickesided surface or Gouge<5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge>5 mm thick or Separation>5 mm Continuous		
		Rating	10	10	9	6	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	<10	10-25	25-125	>125		
		(Joint water pressure)/(Major principal σ)	None	<0.01	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		General condition	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
		Rating	25	19	14	9	0		

RMR 수정제안

$$Patial\ Corr^2(Y, R_k) = \frac{type\ III\ SS(R_k)}{type\ III\ SS(R_k) + ErrorSS} \quad (5)$$

따라서 수량화 분석의 목적인 암반의 변형(무보강 상태의 전변위)에 대한 설명변량(RMR 인자)의 중요도를 평가하기 위해서는 수량화 값의 범위 또는 수량화된 변수 사이의 편상관의 크기가 지표가 된다. 수량화 방법 I 을 통한 설명변수, 즉 RMR 인자들의 범주별 원수량화 값과 중심화된 수량화값, 그리고 이들을 통해 계산된 범위와 편상관계수를 Table 4에 정리하여 나타내었다.

RMR 배점 체계 수정

터널 굴착 시 암반 변형에 미치는 영향을 가장 잘 표현하는 각 RMR 인자의 배점 급간을 조정하기 위하여 무보강 상태의 전변위와 각 RMR 인자별 배점간의 2차 회귀식을 산정하였다(Fig. 2). 각 RMR 인자의 배점은 Bieniawski(1989)의 기준에 의해 구분하였으며, 횡축의 해당 배점 영역이 종축의 변위에 반영되는 크기 만큼을 새로운 배점 영역으로 하였다. 각 RMR 인자의 회귀식

이 모두 배점이 커질수록 변위의 감소 폭이 작아지는 경향을 보인다. 따라서 암반 상태가 양호한 경우 원래 RMR 인자의 급간배점보다 수정된 RMR 급간 배점의 차가 작아진다.

결과 및 토의

수치해석에 의해 산정된 무보강 터널 전변위와 막장 관찰결과를 이용한 수량화 분석 결과를 바탕으로 새로운 RMR 배점 체계를 Table 6과 같이 제시한다. 배점을 제외한 나머지 요소, 즉 항목과 인자별 급간 구분 기준 등은 기존의 RMR 배점 체계를 따랐다. 기존 RMR 배점과 비교하면, 무결암의 일축압축강도(R1)과 불연속면 상태(R4) 항목의 배점이 감소하였으며, RQD(R2), 불연속면 간격(R3), 지하수 상태(R5) 항목의 배점이 증가하였다. RQD(R2)와 불연속면 간격(R3)은 암반을 구성하는 블록의 크기와 관련이 있다. 대상 터널을 구성하는 암반이 주로 저각의 층리가 발달한 퇴적암임을 감안한다면, 터널 주변에 작용하는 응력 등의 영향에 의한 파쇄작용 등이 변위에 큰 영향을 주었거나, 사암 보다는 산출되는 블록의 크기가 작은 셰일 또는 이암 구간에서 더 큰 변위가 발생했음을 의미한다. 절리를 중심으로 비교적 균일하게 발달하는 퇴적암의 불연속면 특성상 일부 구간에서 산출되는 지하수도 변위에 많은 영향을 준 것으로 판단된다.

이전의 배점 기준에 비해 양호한 상태의 암반, 즉 높은 배점구간에서는 인자별 배점 차이가 크지 않다. 그러나 불량한 상태의 암반에서는 배점차가 크다. 기존 RMR 관점에서 양호한 I, II 등급 암반에서는 무보강 상태의 변형상태가 유사하며, IV, V 등급과 같은 불량한 암반에서는 작은 배점 차이라도 전변위의 차이가 크다. 따라서 터널 굴착에 따른 암반 거동을 잘 반영하기 위해서는 불량한 상태의 암반, 즉 낮은 배점구간에 대한 더 세밀한 구분이 필요하며 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

연구 대상 터널의 RMR 평가 결과를 Table 6의 수정 RMR 배점 체계로 변환한 기초 RMR값(RMRb)과 수치해석을 통해 산정된 무보강 상태의 전변위와의 관계는 Fig. 3과 같다. 이들은 대체로 선형관계를 가진다. 이러한 암반의 변형특성을 잘 반영할 수 있는 RMR 배점체계는 보강상태에서의 변위 특성 연구, 암반평가를 통한 발생변위 예측 그리고 암반등급 및 보강패턴별 보강효과 연구 등과 연계될 수 있다. 또한 대상터널 뿐만 아니라 다양한 터널의 데이터 분석을 통한 연구가 수행

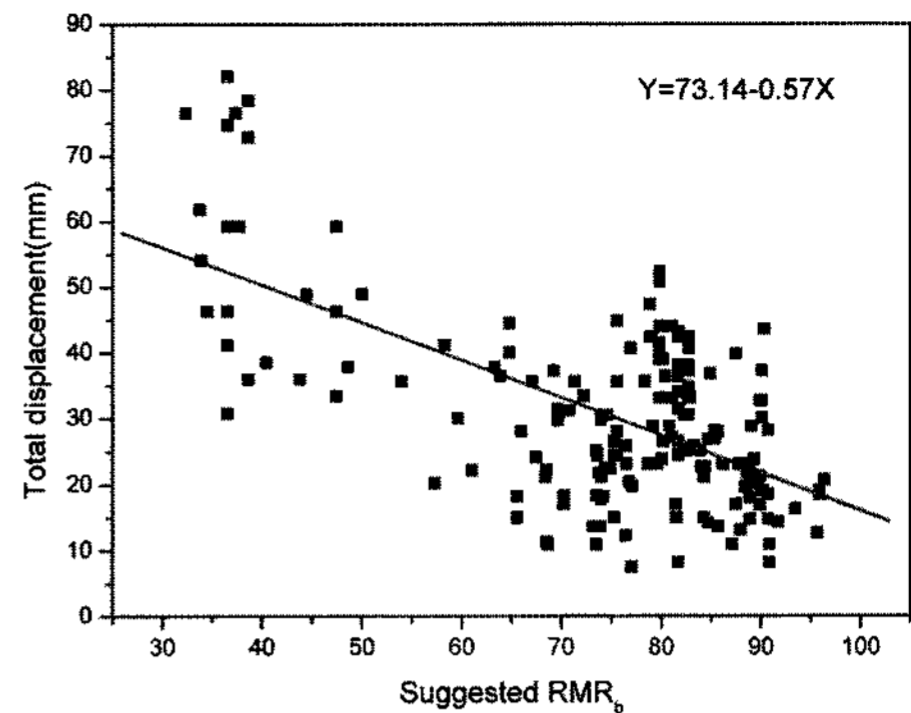


Fig. 3. Correlation between total displacement under non-reinforcement and suggested RMR_b.

된다면, 암종별 및 지질 특성별 암반 거동특성을 잘 반영하는 차별화된 RMR 배점체계의 제안이 가능할 것이다.

결론

본 연구를 통하여 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 3차원 수치해석 결과 산정된 I, II, III, IV, V등급 지반구간의 무보강 상태 전변위는 평균 25.2 mm, 21.8 mm, 27.2 mm, 30.1 mm, 61.8 mm이다. 보강된 상태의 변위는 보강효과에 의해 각 등급별로 일정한 크기로 억제되며, 불량한 상태의 암반일수록 보강효과에 의한 보강억제량이 크다.

(2) 수량화 방법 I을 이용한 수량화 분석 결과 수량화 값의 범위(range)를 기준으로 각 RMR 인자의 굴착에 따른 터널 변위 영향도는 R1, R2, R3, R4, R5별로 각각 8.05%, 30.67%, 22.10%, 11.57%, 27.61%이다. 수량화값의 범위, 편상관 그리고 RMR 사용의 편의성 등을 고려하여 산정된 터널 굴착에 따른 변위크기를 반영할 수 있는 RMR 인자의 할당 배점 크기는 R1, R2, R3, R4, R5에서 각각 10, 30, 25, 10, 25점이다.

(3) 터널 굴착에 따른 무보강 전변위를 반영한 RMR 각 인자의 수정된 급간 배점 체계는 양호한 암반 보다는 불량한 암반에서의 변별력이 더 크다. 즉 각 인자의 상태가 좋아질수록 배점의 증가폭은 감소한다.

(4) 수정 제안된 배점체계에 의한 RMR 값은 무보강 상태의 전변위와 선형관계를 나타낸다. 이는 수정 RMR이 터널 굴착에 따른 암반의 변형 특성을 잘 반영함을 의미한다. 이러한 연구결과는 보강상태의 변형특성 연구, 암반평가를 통한 발생변위 예측, 암반등급과 보강패턴에

따른 보강효과 연구 등으로 이어질 수 있다. 또한 다른 여러 터널의 데이터 분석을 통한 연구가 수행된다면, 암종 및 지질 특성별 굴착에 따른 터널 암반 거동 특성을 반영할 수 있는 RMR 배점체계의 제안이 가능할 것이다.

사 사

본 연구는 건설교통부의 2005년 건설핵심기술연구개발사업인 “IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널시공기술개발(과제번호:C105A1020001-05A0502-00240)” 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김학준, 이성호, 신휴성, 배규진, 2006, 국내 암반분류 사례를 통한 싱글셀 터널 지보량 산정 연구, 대한지질공학회지, 16(3), pp.283-291.
- 임성빈, 서용석, 김창용, 김광염, 2007, 수량화방법 I 을 이용한 퇴적암 터널의 지질 인자별 변위 영향도 분석, 대한지질공학회지, 17(2), pp.263-270.
- 임성빈, 윤현석, 서용석, 박시현, 2007, 3D 수치해석을 이용한 퇴적암 터널의 암반 등급별 전변위 산정, 대한지질공학회지, 17(2), pp.217-224.
- 허명희, 1998, 수량화방법 I - II - III - IV, 자유아카데미.
- Cividini, A., Majer, G. and Nappi, A., 1983, Parameter estimation of a ststic geotechnical model using a Bayes approach, International Sciences & Geomechanics Abstracts, pp.215-220.
- 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, pp.53-67.
- Panet, M. and Guenot, A., 1982, Analysis of convergence behind the face of tunnel, Tunnelling 82, IMM, Brighton, pp.197-204.
- Pelizza, S., Pelia, D. and Oreste, P. P., 1994, A new approach for ground reinforcing design in tunnelling, soil and rock reinforcements, Tunnelling and Ground Condition, Abdel Salem(ed), Balkema, pp.517-522.
- Sakurai, S. and Takeuchi, K., 1983, Back analysis of measured displacements of tunnel, Rock Mechanics and Rock Engineering, pp.173-175.
- Shirakawa, K., Aoki, T., Fujii, Y. and Nakao, T., 1999, Excavation through semicircular-shaped shell formed by umbrella method at fault zone beneath desely residential area, Proc. of the World Tunnel Cong. 99 on Challenge for the 21st Century, 1, pp.441-447.
- Yasar, E., 2001, A new rock mass classification for coal measures rocks, Engineering geology, 62, pp.293-300.
- 林知己夫, 村山孝喜, 1964, 市場調査の計劃と實際, 日刊工業新聞社

2008년 5월 19일 원고접수, 2008년 6월 16일 게재승인

서용석

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

임성빈

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: bins123@hanmail.net

나종화

충북대학교 정보통계학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2232
Fax: 043-273-5928
E-mail: cherin@cbu.ac.kr

박시현

한국시설안전공단 지하시설실
411-758, 경기도 고양시 일산서구 시민대로 1160
Tel: 031-910-4085
Fax: 031-910-4178
E-mail: parksh@kistec.or.kr