

터널 붕괴 위험도에 따른 RMR 연구

장형두, 양형식^{1)*}

A Study of RMR in Tunnel with Risk Factor of Collapse

Hyong-Doo Jang, Hyung-Sik Yang

Abstract RMR is most strongly adopted rock classification method to scheme support system in domestic tunnel. However the RMR, which is based on geological survey during design stage of tunnel, can't present the real ground accurately. In this study, authors suggested Weighted-RMR (W-RMR) which is considered weighted value of risk factors of collapse due to prevent collapse and roof falls during tunneling. According to the application of W-RMR to Bye-Gye tunnel, we could change support type flexibly by the risk factors on a face of tunnel.

Key words Tunnel, RMR, Risk factor of collapse, W-RMR

초 록 RMR은 국내터널의 지보재 설계를 위해 가장 빈번하게 사용되는 암반분류 방법이다. 그러나 설계당시의 검토된 지반조사를 통한 RMR값은 지반을 정확하게 대변할 수 없다. 터널 시공시 발생하는 붕괴 및 낙반사고를 사전에 예방하고 효율적인 지보 설계를 위해 붕괴위험도에 따라 기존 RMR 점수에 가중치를 적용한 Weighted-RMR(W-RMR)을 제안하고 터널에 적용하였다. 비재터널 현장에 W-RMR을 적용한 결과 막장 붕괴의 위험도에 따라 지보 설계를 탄력적으로 변경할 수 있었다.

핵심어 터널, RMR, 붕괴위험도, W-RMR

1. 서 론

국내의 철도, 도로터널 등 개설 심도가 깊지 않은 대다수 터널의 지보재 설계를 위한 암반분류는 RMR⁽¹⁾을 적용하고 있으며, RMR값에 따라 5등급으로 암반을 분류하는 것을 원칙으로 하고 터널의 크기, 용도 및 지역 특성을 이용하여 5등급 이상으로 세분되기도 한다.⁽²⁾ 그러나 터널 설계시 검토된 지반 조사 및 RMR로 인한 지보재 설계는 추정된 결과이므로 시공시 관찰 및 계측을 통해 안정성을 확인해야 한다. W-RMR은 터널 막장 중 붕괴에 가장 직접적으로 관여하고 자중에 의해 붕괴할 수 있는 막장 상단부에 높은 가중치를 두고 전체의 RMR을 결정한다. 따라서 기존의 RMR에 비해 탄력적이고 효과적인 지보재설계를 가능하게 한다.

2. 국내 터널 붕괴의 유형

국내 46개소 터널 현장 데이터를 기반으로 조사한 터널 붕괴의 유형을 살펴보면 막장면 낙반과 낙반 등에 따른 지표함몰을 동반하는 복합 붕괴의 형태가 전체 붕괴사고의 73.5%로 나타났으며 붕괴 원인으로는 지하수 등의 수리환경에 의한 파쇄대, 심한 풍화 및 불연속면의 환경에 의한 붕괴가 약 40%로 나타났다.⁽³⁾ Figure 1은 붕괴 유형별, 원인별 분류를 도식화한 것이다.

Figure 1의 자료를 통해 알 수 있듯이 국내에서 집계된 터널 붕괴의 약 80% 이상이 막장면 중 하부에 비해 상대적으로 붕괴를 유발할 수 있는 요인이 다수 포함된 상부 암반의 역학적, 지질학적 특성과 수리적 특성에 의해 발생된다는 것을 알 수 있다.

3. RMR에 의한 터널 설계와 W-RMR에 의한 시공

3.1 RMR에 의한 터널 설계

RMR은 지중응력이 크지 않은 저심도(지하 500 m이 내에 위치하여 지압의 영향이 거의 무시되고, 압축응력

¹⁾ 전남대학교 에너지자원공학과

* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2011년 *월 *일

심사 완료일 : 2011년 *월 *일

게재 확정일 : 2011년 *월 *일

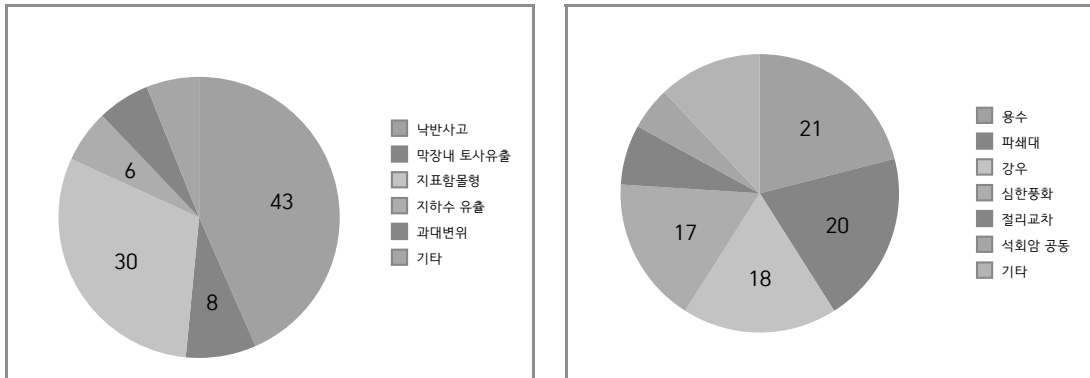


Fig. 1. Type and cause of tunnel face collapse

이 크게 발달되지 않아 주로 지질학적 요인들에 의해 영향을 받는 지역)⁽⁴⁾터널의 지보재 설계에 효과적인 암반분류로 Q-System과 함께 널리 이용된다. RMR의 항목은 6가지이며 이중 RQD, 암반강도, 절리간격, 절리상태, 지하수상태 등 5가지 항목의 점수를 합한 것을 RMR_{basic}이라고 하고 여기에 절리 방향성에 대한 보정을 통해 터널, 기초 및 사면의 암반등급을 정하게 된다. 0부터 100점까지 20점 단위로 총 5개 등급으로 분류되는 RMR을 통해 터널의 유지시간, 반압, 터널의 최대 폭, 변형계수, 암반의 점착력과 내부마찰각을 추정할 수 있다. 또한 각 등급에 적합한 굴착방법과 1회 발파 당 굴진장은 물론 주 지보재인 슛크리트, 락볼트, 강지보의 두께 시공간격, 설치유무 등을 제안하고 있다.

RMR에 의한 지보패턴은 Q-System에 비해 세분화되어 있지 않으며, 개별요소의 영향이 전체의 평점에 민감하지 않고, 대개의 암반이 3개 이상의 절리군을 갖는다는 가정으로 그 이하의 절리군을 갖는 암반은 보수적인 평가를 하게 된다는 결점이 있다. 그러나 평가가 비교적 쉽고 간단하며 암반에 대한 물성값 추측이 가능하고 시공사례가 많아 폭 10 m 정도의 마제형 NATM공법을 적용한 도로나 철도터널 표준지보패턴으로 이용되고 있다. 만약 시공 중 설계된 허용변위 이상의 변위가 생기거나 갑작스런 용수 등 예상치 못한 지반 상황에 대해서는 슛크리트, 락볼트 강지보 추가 시공 및 물빼기 시추, forepoling, grouting methods, well-point 등 상황에 적합한 보조공법을 선정하여 터널의 안정성을 확보하며 시공하여야 한다.

3.2 W-RMR의 제안

3.2.1 W-RMR의 필요성

터널이 개설될 지역의 환경조사, 지반조사 및 실험실

실험과 유사한 터널의 시공사례를 통한 자료들을 바탕으로 RMR에 의한 암반분류를 실시하여 각 구간별 지보재량을 결정한 터널 설계는 상당부분 추정에 의한 설계이므로 시공과정에서 계측과 막장관찰을 통해 주벽 및 막장의 이상변위 유무와 RMR값을 조사하고 각 station별로 그 설계의 타당성을 검증하여야 한다. 현장 RMR 측정에 대한 객관성과 타당성을 높이려는 연구는 계속해서 진행되고 있다. 막장의 면적을 6등분하여 RMR을 측정하고 각 위치에서 구해진 RMR 측정치를 산술 평균하는 6등분법과 불균질한 단면의 막장을 풍화정도 및 절리상태 등을 기준으로 구분하여 면적을 나누고 영역별 RMR 측정치에 영역별 면적비율을 적용하는 암질 분할법이 소개되었다.⁽⁵⁾ 그러나 터널이 막장면의 국부적인 강도열화와 지하수의 영향으로도 붕괴될 수 있음을 감안할 때 6등분법 및 암질분할법을 이용한 RMR 결정법은 기존의 RMR 평가에 비해 막장 상태를 좀 더 자세하게 분류할 수는 있으나 그 차이가 5점 내외로 지보 패턴의 변경은 어려워 막장 붕괴를 예방하는 능동적인 대처방법이라고 할 수는 없을 것이다.

터널 시공 중 막장의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 천단부의 지반이 연약하고 지하수의 영향이 있을 때 터널은 국부적으로 붕락 가능성이 가장 크다고 알려져 있다. 특히 응력의 영향보다 암반의 지질 구조 특성 및 발파로 인한 이완영역의 크기가 터널 안정성과 관련이 깊은 저심도에 개설되는 도심지 터널의 경우 천단의 안정성은 전체 터널의 안정성을 대변한다고 할 만큼 중요하다.

3.2.2 W-RMR 결정 방법

터널 시공 중 현장 기술자에 의한 RMR분류는 대부분 막장면 전체에 대한 평가가 이뤄지고 있으며 상대적으로 붕괴 유발 인자를 많이 포함하는 천단부에 대한

고려가 부족하다. 지하 구조물 구축을 위한 지반의 관찰은 가장 열악한 환경을 중심으로 관찰되어야 함으로 하반에 비해 상대적으로 붕괴에 민감한 천단부에 대한 영향의 고려가 적었던 기존 막장면에서 실시되어 온 현장 RMR은 개선되어야 한다.

W-RMR은 터널 시공시 자중에 의한 붕괴 가능성이 있는 터널 어깨 이상 부위 중 취약부분과 다른 막장면을 구분하여 RMR을 계산한다. 또한 터널의 천단과 하부를 나누어 RMR의 가중치를 적용하는 것은 지보패턴의 변화가 되도록 결정되어야 하며 일반 막장면의 RMR값에 비해 천단 중 취약부분과 하부의 비율을 80:20로 적용한 W-RMR은 지보패턴을 능동적으로 변화할 수 있게 한다. Figure 2는 터널 천단부와 하부의 가중치에 따른 W-RMR의 변화를 보여주며 천단의 가중치가 80%로 결정된 이유는 터널 붕락의 발생에 천단부의 변화가 결정적인 요인임과 능동적인 RMR값의 변화로 지보 패턴이 변경되도록 하는 데 그 이유가 있다.

이로서 막장 하부의 암반이 균질하다 하더라도 상부가 취약하다면 W-RMR은 낮게 나타나고 붕괴의 위험성이 높은 것으로 판단하여 지보재를 늘려 붕괴에 대한 안정성 확보가 가능하며, 하반이 취약하다라도 상반이

견고한 암반이라면 기존 RMR평가보다 높은 W-RMR값으로 결정되어 과지보를 막고 굴착효율을 높이는 탄력적인 지보 설계를 가능하게 한다. W-RMR은 터널 하부 암반의 강도에 낮은 가중치를 두고 심도에 따른 지압의 영향을 고려하지 않은 것으로 광산 및 깊은 심도의 터널에의 적용은 부적당할 것으로 판단된다. 그러므로 W-RMR의 적용범위는 굴착심도가 깊지 않은 철도 및 도로터널로 한정할 수 있으며, 터널의 설계 단계가 아닌 시공시 막장관찰을 통한 현장 RMR을 결정할 때 적용 가능할 것으로 보인다. 또한 이러한 방법은 국내와 같이 암질 변화가 심한 곳의 터널에는 그 적용성이 높다고 할 수 있다. 그러나 편암이 발생하는 지역이나 습곡지역에서 발생하는 측압 및 측벽의 지질, 지하수의 영향으로 인해 측벽에서의 붕괴가 발생할 수 있는 지역에서의 W-RMR 결정은 관찰자에 의해 측벽의 안정성이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

4. W-RMR 분류 적용 사례

4.1 대상 터널 현황

W-RMR의 분류를 적용한 비재터널 현장은 백악기의

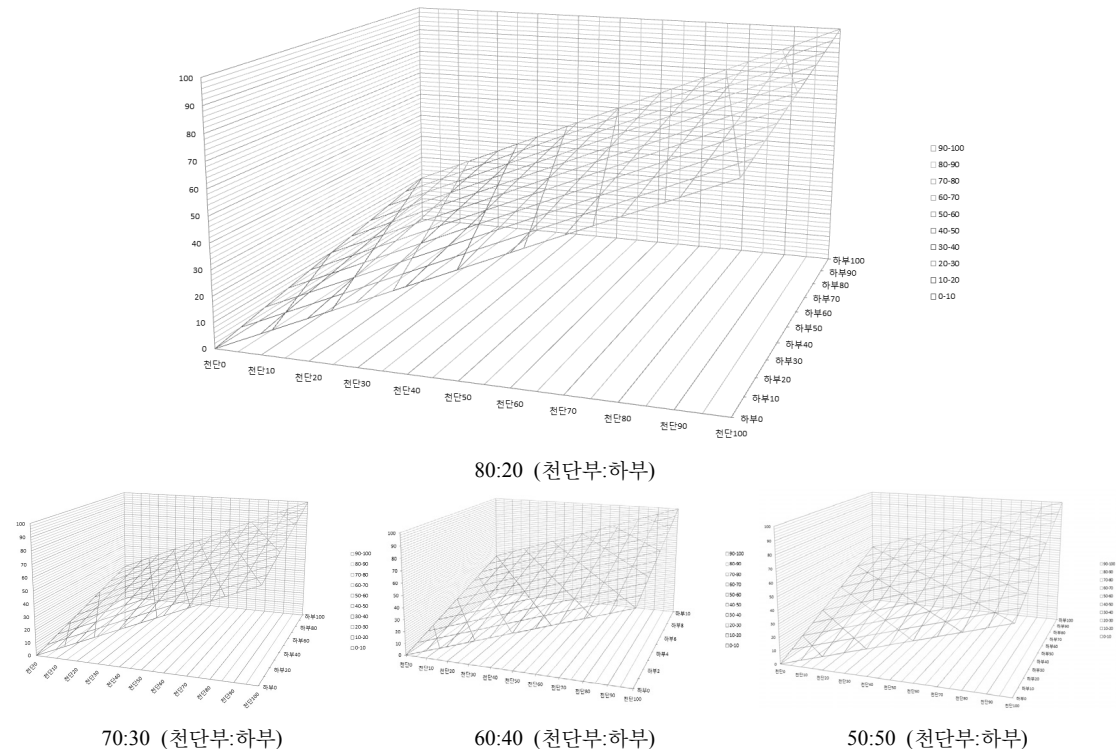


Fig. 2. 천단부와 하부의 Weighting에 따른 W-RMR의 변화

낙동층인 하부 만경산층과 상부 만경산층이 분포하는 지역으로 시점부에는 역질사암 및 사암이 주를 이루고 시점 이후는 사암, 역질사암 그리고 녹회색 내지 암회색 셰일이 주를 이루고 있다.

지반조사 및 시추조사와 전기비저항탐사 결과 지하에 발달되어 있는 지질구조대 및 연약대는 일반적으로 파쇄 되어 있어 공극율이 크며, 지하수 함유율이 대단히

높은 것으로 나타났다. 전반적으로 전기비저항 값은 비교적 낮은 값을 보이고 있으며, 지형 상 예상구조대 및 육안관찰에 의한 지표 지질조사 결과 파쇄대 및 구조대의 영향으로 사료되는 전기저항대가 터널 입출구측에 나타났다. 터널의 일반사항은 Table 1과 같다. Figure 3은 전기비저항시험 결과를 보여주며 Table 2는 조사를 통한 터널 연장 별 지반등급을 나타낸 것이다.⁽⁶⁾

Table 1. Conditions of Bye-gye tunnel

구분		내용	구분	내용
위치	터널 시점	STA. 0+680	평면 선형	R=300m
	NATM 시점	STA. 0+684	종단 경사	(±) 3%
	NATM 종점	STA. 0+951	평균 표고	130m
	터널 종점	STA. 0+955	내공 단면적	74.65m ²
연장	총 연장	267 m	대표 직경	8.61m
	NATM 연장	275 m	터널 폭	12.079m

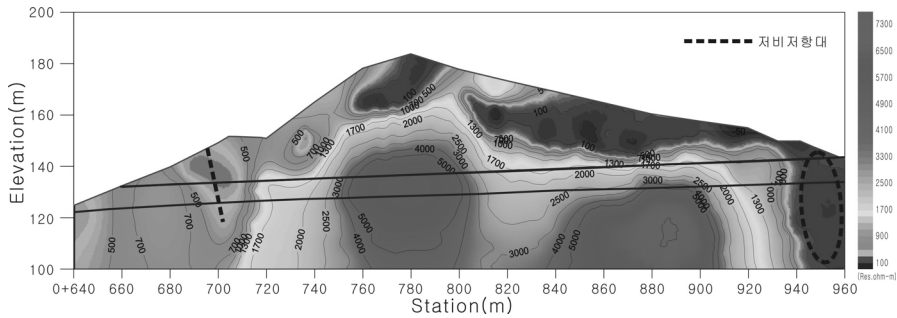


Fig. 3. The result of resistivity survey on Bye-gye tunnel

Table 2. Rock classification of Bye-gye tunnel

위 치(STA. km+m)	겉보기 비저항(Ohm-m)	RMR	지반등급	연 장(m)
0+640 ~ 0+655	<475	<20	V	15
0+655 ~ 0+666	475 ~ 733	20~40	IV	11
0+666 ~ 0+684	733 ~ 1,091	40~60	III	18
0+684 ~ 0+690	475 ~ 733	20~40	IV	6
0+690 ~ 0+710	<475	<20	V	20
0+710 ~ 0+712	475 ~ 733	20~40	IV	2
0+712 ~ 0+714	733 ~ 1,091	40~60	III	2
0+714 ~ 0+720	1,091 ~ 1,671	60~80	II	6
0+720 ~ 0+908	>1,671	80~100	I	188
0+908 ~ 0+927	1,091 ~ 1,671	60~80	II	19
0+927 ~ 0+933	733 ~ 1,091	40~60	III	6
0+933 ~ 0+936	475 ~ 733	20~40	IV	3
0+936 ~ 0+960	<475	<20	V	24

4.2 고찰 사항

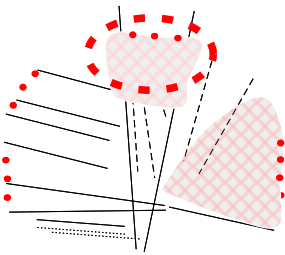
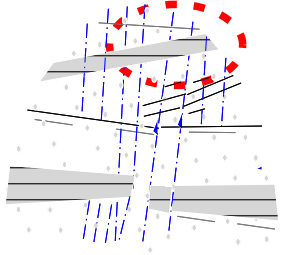
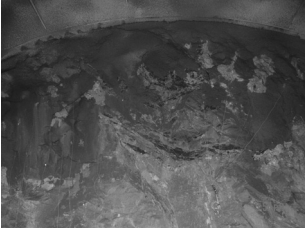

사전조사 결과 터널 구간 중 약 60%에 해당하는 STA 0+720~STA 0+908은 RMR이 80~100이며 I등급으로 분류되었다. 그러나 터널 시공시 막장관찰을 통해 본 지반상황은 조사 결과와는 매우 상이하게 나타났으며 설계된 지반등급에 따른 지보패턴 변경이 불가피 하였다. 시공 중 mapping을 통해 RMR과 W-RMR을 구하였으며 상부의 HCF(Half cast factor: 터널 외곽공의 천공장

대비 발파 후 남은 천공 흔적의 비) 및 여굴 발생량을 조사하였다. 또한 현장에 수평하게 발달한 연약대의 거동에 따른 RMR과 W-RMR의 비교하고 W-RMR의 적용으로 탄력적인 지보패턴의 변경이 가능하고 붕괴를 능동적으로 예방할 수 있음을 확인하였다.

4.2.1 Mapping을 통한 비교

Table 3은 터널 시공 중 W-RMR 평가에 의해 지보

Table 3. W-RMR applications

Station	0+725		0+780			
설계 RMR	80~100		80~100			
설계 지보 Type	I		I			
Mapping						
현장 RMR	44	Sc	7	68	Sc	12
		RQD	13		RQD	17
		Js	10		Js	12
		Ja	13		Ja	22
		Jw	6		Jw	10
천단 연약대 RMR	24	Orient	-5	43	Orient	-5
		Sc	2		Sc	12
		RQD	8		RQD	8
		Js	5		Js	8
		Ja	8		Ja	13
W-RMR	28		48			
	천단 HCF		50%			
천단 여굴	50 cm		20 cm			
시공 지보 Type	IV		III			
사진대지						

Type을 변경한 STA 0+725, 0+780막장에서 설계 RMR, 현장 RMR 및 W-RMR을 비교한 것이다.

STA 0+725

막장면 상부와 우측면에 풍화가 매우 심하고 물에 의해 고결성이 떨어지는 매우 연약한 층이 나타났으며 연약층의 RMR은 전체 막장의 RMR에 비해 20이 낮은 24로 결정되었다. 붕괴 위험에 따른 가중치를 적용한 W-RMR은 28로 결정되어 발파설계와 지보재의 시공은 IVType으로 하였다. 발파 후 조사한 천단 연약대 부분의 여굴은 50 cm 이상으로 매우 불량하게 관찰되었다.

STA 0+780

막장에서 관찰되는 주된 압중은 100 MPa이 넘는 사암으로 관찰된다. 수평절리와 50~70 cm두께의 심하게

풍화된 영역이 수평하게 발달해 있으며 막장의 RMR은 68로 결정되었으나 상단 연약층의 RMR은 43으로 연약대에 80%의 가중치를 둔 W-RMR은 48로 결정되어 IIIType의 발파설계와 지보재 시공을 하였다. 발파 후 상단의 수평절리에 의한 붕락현상이 관찰되었다. 붕락으로 인한 여굴은 약 20 cm, 천단의 HCF는 50%로 관찰되었다.

4.2.2 수평으로 발달한 연약대에 대한 W-RMR 적용 사례

STA 0+720부터 188 m는 IType으로 설계되었다. 그러나 실측한 RMR값은 평균 70정도의 II등급으로 매 발파시 3.5 m씩 굴진하였으며 Figure 4 및 Figure 5와 같이 STA 0+838 막장 하부에 RMR이 25~30사이의 연약대가 발견되었다.

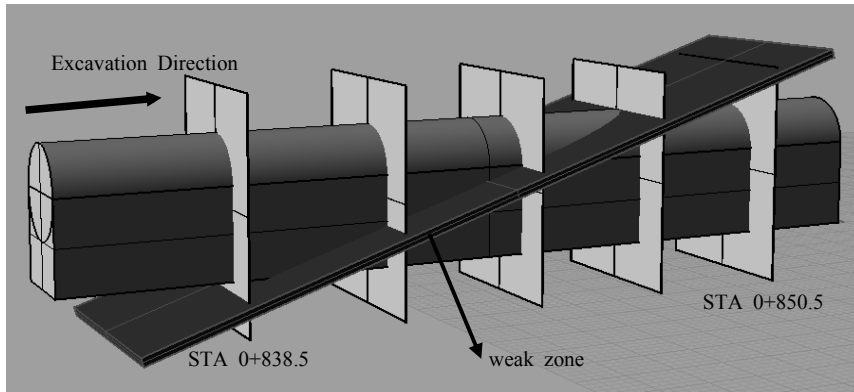


Fig. 4. A description of a weak zone



(a) Weak zone at the face



(b) Weak zone at the left wall

Fig. 5. Weak zone at STA 0+838.5

Table 4. W-RMR application by movement of a weak zone

막장	Station	일시	연약대 상황	사전조사 RMR	설계 Type	막장면 RMR	W-RMR	시공 Type
A	0+838.5	3월 25일 오전	막장면 하부 2m 두께의 연약대 발견	80~100	I	53	67.8	II
B	0+842	3월 25일 오후	연약대 이동 하부로부터 3m		I	53	67.8	II
C	0+845.5	3월 26일 오전	연약대 이동 하부로부터 4.5m		I	53	37.2	IV
D	0+848	3월 26일 오후	연약대 이동 막장면 상부		I	53	37.2	IV
E	0+850.5	3월 27일	연약대 이동 예측 터널 상부 1m 이내		I	78	43	IV

연약대의 두께는 20~50 cm 두께로 20°~25°의 경사를 갖고 터널 굴진 역방향의 경사방향을 가진 사암층 내에 호층구조로 형성된 셰일층으로 판단된다. 견고한 사암은 지하 구조물 공사시 큰 문제를 일으킨 사례는 적지만 다만 급격한 응력해방이 생기면 강도의 저하, 흡수율의 증대 및 석영성분으로 교착된 면의 이완으로 전단강도의 감소 및 붕락의 위험도 있으며, 사암에 비해 비교적 강도가 낮고 수평한 층리가 잘 발달된 셰일층의 경우 주 활동면으로 작용할 개연성이 충분하다 할 수 있다.⁽⁷⁾ 수평한 연약대는 3.5 m 당 약 1.5 m 씩 막장 상부로 이동하였으며 C막장에서 연약대에 위치가 붕락의 위험이 있는 막장 상부에 위치함에 따라 연약대의 RMR값에 80%의 가중치를 부여하는 W-RMR을 적용하였다. 그 결과 C, D 막장의 W-RMR값은 37.2로 지보패턴을 IIType에서 IVType으로 설계 변경 시공하였다. 또한 E 막장은 연약대가 천단 상부 1 m 이내에 위치할 것이 확실함에 따라 IVType 지보패턴을 유지하여 천단 안정성을 높였다. Table 4는 연약대의 이동에 따른 RMR과 W-RMR을 비교한 것이다.

Mapping을 통한 막장의 RMR값은 연약대가 통과하는 A부터 D까지 동일하게 53으로 IIIType의 발파설계와 지보패턴이나 W-RMR을 적용함으로써 연약대가 하부에 존재하는 A, B는 67.8로 IIType으로 지보량을 줄일 수 있었으며 상부 붕락의 위험이 높은 C, D막장은 IVType으로 지보량을 늘려 막장의 천단의 안정성을 높여 붕괴위험도에 따른 탄력적인 지보량 결정을 가능하게 하였다.

5. 결론

지하 구조물 구축을 위한 지반의 관찰은 가장 열악한 환경을 중심으로 관찰되어야 하나 현장에서 실시되는

RMR분류는 막장면 전체에 대한 평가가 이뤄지고 있으며 상대적으로 붕괴 유발 인자를 많이 포함하는 천단부에 대한 고려가 부족하다. 이러한 기존 막장면에서 실시되던 현장 RMR을 개선할 목적으로 개발된 W-RMR은 터널 시공시 자중에 의한 붕괴 가능성이 있는 터널 어깨 이상 부위 중 취약부분과 다른 막장면을 구분한 후 상하반부에 80:20의 가중치를 주어 RMR을 결정한다. 본 연구에서는 이러한 가중치를 적용한 W-RMR을 제안하고 비재터널의 시공 중 붕괴 위험이 있는 곳에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 비재터널 현장 중 상부 연약대로 인한 붕괴 및 수평 암판의 탈락이 예상되는 STA 0+725 및 STA 0+780에서 전체 막장면에 대한 기존 현장에서 방법대로 결정한 RMR값이 44 및 68로 결정된 반면 동일 막장의 상부 연약대에 가중치를 주고 결정한 W-RMR은 28 및 48로 결정되어 발파설계를 변경 후 시공한 결과 천단에서 수평절리에 의한 붕락과 여굴이 발생하였으나 W-RMR에 의한 탄력적인 지보패턴의 결정으로 시공의 안정성을 확보할 수 있었다.
2. STA 0+838.5부터 STA 0+850.5사이에서 발견된 연약대는 터널의 주향과 직각의 경사방향을 갖으며 연약대가 막장의 상부로 이동함에 따라 붕락 및 붕괴의 위험이 증대되는 가운데 W-RMR을 적용하였고 그 결과 연약대의 이동에 따라 탄력적인 W-RMR값의 변화로 지보를 변경하여 천단의 안정성을 확보할 수 있었다.

참고문헌

1. Bieniawski, Z. T., 1973, Engineering classification of

- jointed rock masses. Trans. S. Afr. Ints. Civ. Eng. 15, pp. 335-344.
2. 배규진 등, 2007, 건설교통부 제정 터널설계기준, 도서출판 씨아이알, p. 35.
 3. 배규진 등, 2010, 터널 붕괴 사례집, 도서출판 씨아이알, pp. 377-383.
 4. 이정인 등, 1997, 암석역학을 이용한 터널설계, 구미서관, pp. 44-45.
 5. 김평진, 박성훈, 허열, 2009. 12, NATM 터널 불균질 단면의 RMR 평가방안, 건설기술논문집, 제28권 제2호, pp. 11-19.
 6. 구미시, 2009, OO도로 선형개선사업 기본 및 실시설계 종합보고서, pp. 111-112.
 7. 문종규, 2001, 암석의 일축압축강도와 점하중강도의 상관관계에 관한 연구: 울산지역의 세일과 사암을 중심으로, 울산대학교 대학원, pp. 10-11.



장형두

2003 목포대학교 공과대학 물리학과 학사
2011 전남대학교 대학원 에너지자원공학과 석사

Tel: 062-530-0824
E-mail: hdjang75@gmail.com
현재 전남대학교 대학원 에너지자원공학과 박사과정



양형식

1979 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사
1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사
1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724
E-mail: hsyang@chonnam.ac.kr
현재 전남대학교 에너지자원공학과 교수