

터널 설계 입문(Ⅱ)

암반분류

임재승 / 토목기술부 대리

I. 터널 조사 · 계획

II. 암반분류

- 공학적인 목적에서의 암반분류
- 일반적인 토목공사의 암반분류
- 터널공사를 위한 암반분류
- 맺음말

연재 순서

를 따라 평행 또는 방사상으로 할렬되는 경향을 가진 면을 벽개(Cleavage), 변성암의 변성과정에서 발달된 편상 구조를 편리(Schistosity)라 한다. 불연속면을 형성 또는 형태로 구분하면, 절리면이 완전히 분리된 상태를 균열(Fissure), 특히 절리면이 상대적으로 이동한 이력이 있는 면을 단층(Fault), 층리면이 완전히 분리된 상태를 성층, 단층면을 따라 암석이 파쇄되어 풍화된 두꺼운 띠를 형성한 것을 파쇄대, 지각의 구조운동에 의하여 광역에 걸쳐 형성된 단층선을 구조선, 층상구조의 암반이 지각운동으로 소성유동을 일으켜 파상으로 변형된 구조를 습곡(Fold)이라 한다.

공학적인 목적에서의 암석분류 방법

1. 암석서술방법

암석의 공학적인 성질은 암석의 종류 뿐만 아니라 암석의 풍화정도, 암석자체의 구조 및 입도 등에 의해서 영향을 받는다. 일반적으로 암석서술 방법은 「풍화정도, 암석의 구조, 색깔, 입도, 압축강도, 암석이름」과 같이 6단계로 나타낸다. 예를 들면 보통 풍화, 층리, 회색, 중립질, 연암, 사암으로 표현한다.

2. 암석분류방법

1) 압축강도에 의한 분류

등급	암석 상태	압축강도 (kg/cm ²)	건설 표준품셈에 의한 분류
E	Very Low Strength	< 280	풍화암
D	Low Strength	280~560	
C	Medium Strength	560~1125	연암
B	High Strength	1,125~2,250	
A	Very High Strength	> 2,250	보통암 및 경암 극경암

암 이라 함은 암석과 암반을 총칭하는 용어이다. 암석(Rock)의 공학적 의미는 암반을 구성하는 소재로서, 일반적으로 다소의 잠재적인 균열은 함유하고 있지만 지질적 불연속면을 함유하지 않는 암편이다. 주로 암반영역 또는 보링코아에서 채취되는 시험편을 가리키는 경우가 많은데 특히 이러한 암석을 손상되지 않은 또는 신선한 암석(Intact Rock)이라 하며, 고결 또는 풍화, 변질된 정도에 따라 연암 및 경암으로 구분한다. 암반(Rock Mass)의 공학적 의미는 토목공사의 대상이 될 정도의 공간적 크기를 갖는 자연의 암석집합체로서, 일반적으로 지질적 분리면 또는 암반 불연속면을 갖는 불균질성 및 이방성의 암체이다.

암반은 지각을 형성하는 암석의 집합체로서, 지반변동에 의한 압축 및 인장, 기상작용에 의한 퇴적 및 침식, 지열에 의한 가열팽창 및 냉각수축 등에 의한 다양한 불연속면을 갖고 있으며, 이러한 면은 구조상 매우 취약한 면이 되므로 약층(Weak Plane)이라고 한다. 불연속면의 구조요소를 성인에 따라 구분하면, 암반에 작용한 응력으로 형성된 분리면을 절리(Joint), 퇴적암의 단위퇴적경계면을 층리(Bedding), 지층의 변형작용으로 퇴적암의 층리

암석의 강도특성을 나타내는 가장 대표적인 값은 일축압축강도이다. 이 값으로 암반의 강도특성을 나타낼 수 없는 이유는 일반적으로 암반에서는 불연속면의 크기와 방향에 따라 강도의 측정이 무의미한 경우가 많기 때문이다. 다음 표는 세계적으로 제일 많이 이용하는 일축강도에 의한 암석분류방법이다. (Deere & Miller, 1966)

2) 압축강도와 탄성계수에 의한 분류(Deere & Miller, 1966)

등급	암석상태	E_{50}/q_u
H	High Modulus Ratio	> 500
M	Medium Modulus Ratio	200~500
L	Low Modulus Ratio	< 200

3) 풍화정도에 의한 분류

암석강도는 암석의 풍화상태에 따라서 변화하므로 육안으로 비교적 쉽게 인지되는 암석의 풍화정도를 파악하여 암석강도를 추정할 수 있다.

일반적인 토목공사를 위한 암반분류방법

암반분류의 목적은 암반의 역학적인 특성에서 차이가 있는 몇가지의 등급으로 암반을 분류하여 지금까지 국내 외에 널리 알려진 시공경험을 바탕으로 경험적으로 설계하는 기초 자료로 사용하는 것이고, 또한 수치해석적으로 설계하는 경우에도 수치해석에 필요한 경험적인 입력자료를 제공하려는 것으로 모든 토목설계의 기본이 된다.

1) 풍화단면에 의한 분류

2) 절리발달빈도에 의한 분류

절리발달빈도의 지표(Index)를 나타내는 RQD% (Deere, 1966)방법은 일반 시추조사 시에 비교적 간단하고 신속하게 수행될 수 있는 방법으로서 보편적으로 사용되며, 암반 지지력 산정, 암반변형계수 추정, 터널의 지보 방법결정 등에도 널리 활용되고 있다.

3) 절리발달빈도+암석강도(풍화상태)에 의한 분류

국내의 각종 토목공사에서 널리 사용되는 여러 암반분류도 이 분류에 근거한 것이다. 「절리빈도+암석강도」에 의한 분류방법은 굴착난이도 결정에 보다 합리적으로 적용되는 기준으로 현장 탄성파속도와 같은 개념이다.

터널공사를 위한 암반분류방법

기존의 터널을 위한 암반 분류는 크게 정성적 분류와 정량적 분류로 구분된다.

정성적 분류는 Terzaghi, Lauffer 등이 시도한 초기의 방법이고 정량적 분류는 Deere, Wickham, Bieniawski, Barton 등이 제안한 후기의 방법이다. 오늘날 많이 사용되는 분류방법으로는 Bieniawski의 RMR(CSIR)과 Barton의 Q-SYSTEM(NGI)이 있으며 터널설계에 주로 적용되고 있다. 가능하다면 두 방법을 다 적용하여 결과를 비교 검토하여 최종 터널설계의 판단자료로 사용하는 것이 이상적이다.

1. RQD% 분류방법(Deere, 1966)

RQD는 절리의 발달간격을 나타내는 지수이므로 일반적인 목적에서 암반의 특성을 판단하는데는 중요한 판단요소로서 사용되지만 근래에는 터널설계에 RQD만 고려하지는 않는다. 터널굴착이나 지보시에 중요한 요소인 암석강도, 전단강도 지수, 지하수 등의 요소들이 충분히 반영되지 않았기 때문이다.

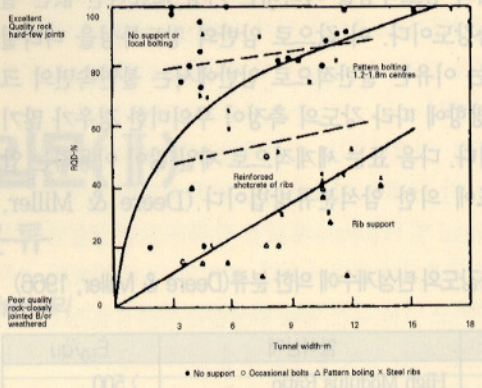
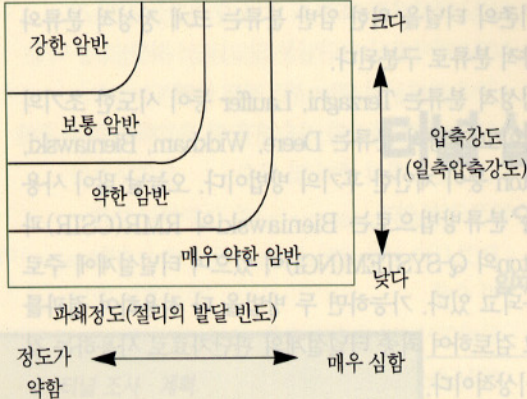
$$RQD = \frac{10\text{cm이상되는 코어의 길이의 합계}}{\text{보링공의 길이}} \times 100$$

RQD (%)	Description of rock quality
0~25	Very poor
25~50	Poor
50~75	Good
75~90	Fair
90~100	Excellent

RQD 지수와 암질 사이의 관계

Description	Joint Spacing	Rock-Mass Designation
Very wide	> 3.0m	Solid
Wide	1.0~3.0m	Massive
Moderately	30cm~1.0m	Blocky/Seamy
Close	5~30cm	Fractured
Very close	< 5cm	Crushed

절리간격의 분류(Deere, 1976)

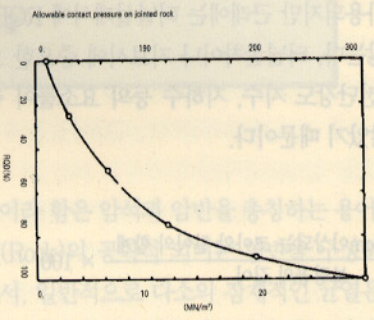


RQD를 이용한 경험적인 터널의 지보방법(Merrit, 1972)

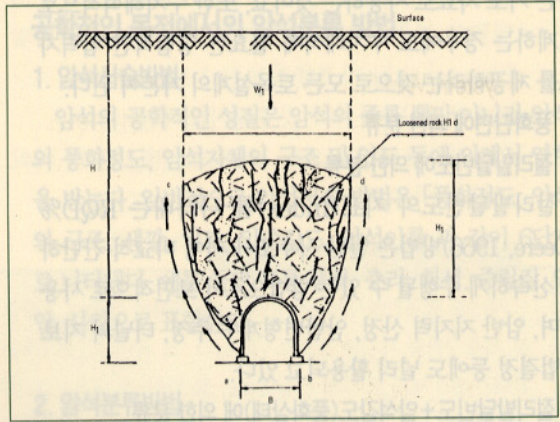
암석강도 + 절리빈도에 의한 암반 분류법

2. Rock Load Classification

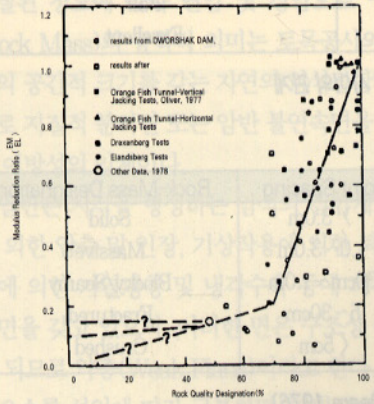
Arching Effect와 Terzaghi(1945)의 경험에 근거한 분류 방법으로서 가해지는 암반하중을 고려하여 몇가지의 암반으로 분류하고 이에 상응하는 보강대책을 서술적으로 제시하는 방법인데, 초기의 대표적인 터널 암반분류 방법이다. 암반분류가 정성적이고 보강재로 Steel Rib만 이용하며 현재 널리 쓰이는 Rock Bolt나 Shotcrete는 영구 보강구조물로서 고려치 않으므로 현재에는 널리 사용되지 않으나 매우 불량한 연약층의 터널 설계시에는 본 방법이 사용되곤 한다.



RQD를 이용한 암반의 지지력(Peck et al., 1974)



터널에 작용하는 암반하중(Terzaghi, 1946)



RQD를 이용한 암반의 탄성계수 추정

3. Miller & Hofmann 분류방법(1970)

암석강도와 절리발달빈도로 암반을 분류하는 방법으로 국내에서는 지보의 목적보다도 터널의 굴착이 주 목적인 암반분류법이다.

Rock Condition	RQD	Rock Load Hp ft(m) +	Remarks
1. Hard and intact	95~100	Zero	Light lining, required only if spalling or popping occurs.
2. Hard stratified or schistose	90~99	0 to 0.5B	Light support, mainly for protection against spalls.
3. Massive, moderately jointed	85~95	0 to 0.25B	Load may change erratically from point to point.
4. Moderately blocky and seamy	75~85	* 0.25 B to 0.20(B+Ht) · 0.25 B to 0.35(B+Ht)	No side pressure.
5. Very blocky and seamy	30~75	* 0.20 B to 0.60(B+Ht) · 0.35 B to 1.10(B+Ht)	Littler or no side pressure.
6. Completely crushed and chemically intact	3~30	* 0.60 B to 1.10(B+Ht)	Considerable side pressure. Softening effects of seepage towards requires either continuous support for lower ends of ribs or circular ribs.
6a. Sand and gravel	0~3	* 0.10 B to 1.40(B+Ht)	
7. Squeezing rock, moderate depth	Not applic.	· 1.10 B to 2.10(B+Ht)	Heavy side pressure. invert struts required. Circular ribs are recommended
8. Squeezing rock, great depth	Not applic.	· 2.10 B to 4.50(B+Ht)	
9. Swelling rock	Not applic.	Up to 250R(75m) irrespective of value of (B+Ht)	Circular ribs are required. In extreme cases use yielding support.

+ Rock load hp is in ft(m) of rock on rock support(see Fig. 2.1 23) in tunnel with width B ft(m) and height Ht ft(m) at depth of more than 1.5(B+Ht)
* Modification by Rose (1982), Hp values for condition 4, 5 and 6 are reduced by 50% considering no effect of water table.

Rose에 의해 수정된 Terzaghi의 암반분류표

4. Lauffer 분류방법(1958)

터널굴착시에 암반상태에 따른 Active(Unsupported Rock) Span과 자립시간(Stand up Time)의 개념을 고려한 보강방법과 보강물량계산을 제안하였는데 터널의 단면이 커지면 암반의 자립시간이 크게 감소됨을 나타낸다.

5. RSR-system(Wickham, 1972)

① 암석종류와 습곡 및 단층상태, ② 터널굴진 방향과 절리발달 방향과의 관계 및 절리발달 빈도, ③ 지하수 유입상태의 3요소를 각각 점수화하고 그 값들을 더하여 암반을 정량적으로 분류하는 방법으로 터널단면의 크기와

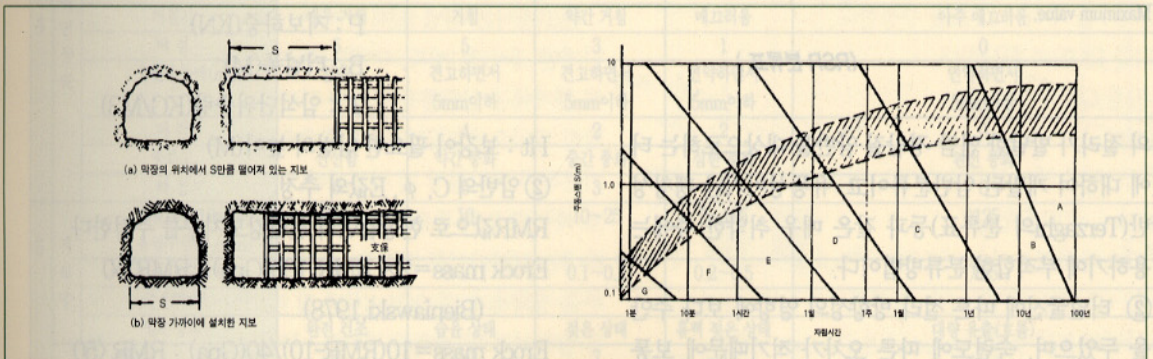
관계없이 각 암반등급에 따른 보강기준을 제시한다. RSR은 터널단면의 크기와 관계없이 25~100범위로 27이하는 많은 보강이 필요하고, 77이상은 보강이 불필요한 것으로 간주하며 중간은 아래 그림과 같이 보강한다.

이 보강방안은 발파에 의한 터널시공시의 보강지침이므로 TBM으로 시공할 때에는 발파때보다 지보량이 적으므로 보정지수를 계산하여 RSR값을 수정한 후에 적용한다.

6. RMR-system(CSIR기준에 의한 암반분류)

• 특징

① RMR분류방법은 원래 비교적 천부인 얇은 지역에



Active Span과 터널 자립시간과의 관계(Lauffer, 1958)

RSR -요소A : General Area Geology

Basic Rock Type					Geological Structure			
	Hard	Med.	Soft	Decomp.	Massive	Slightly Faulted or Folded	Moderately Faulted or Folded	Intensely Faulted or Folded
Igneous	1	2	3	4				
Metamorphic	1	2	3	4				
Sedimentary	2	3	4	4				
Type 1					30+	22	15	9
Type 2					27	20	13	8
Type 3					24	18	12	7
Type 4					19	15	10	6

+ Maximum value

RSR -요소B : Joint Pattern, Direction of drive

	Strike perpendicular to axis					Strike parallel to axis		
	Direction of drive							
	both with dip				against dip			
	dip of prominent joints				dip of prominent joints			
	flat	dipping	vert.	dipping	vert.	flat	dipping	vert.
1. Very Closely jointed	9	11	13	10	12	9	9	7
2. Closely jointed	12	16	19	15	17	14	14	11
3. Moderately jointed	23	24	28	19	22	23	23	19
4. Moderate to blocky	30	32	36	25	28	30	28	24
5. Blocky to massive	36	38	40	33	35	36	34	28
6. Massive	40	43	45+	37	40	40	38	34

Notes : Flat=0-20° : Dipping=20-50° : Vertical=50-90° , + Maximum value

RSR -요소C : Ground Water, Joint Condition

Anticipated Water Inflow (gpm/1000ft)	Sum of Parameters A+B					
	13 - 14			45 - 75		
	Joint Condition *					
	Good	Fair	Poor	Good	Fair	Poor
None 22	18	12	25+	22	18	
Slight (< 200gpm)	19	15	9	23	19	14
Moderate (200 - 1000 gpm)	15	11	7	21	16	12
Heavy (> 1000 gpm)	10	8	6	18	14	10

* Joint condition : goo = tight or cemented ; fair = slightly weathered or altered ; poor = severely weathered, altered, or poen.

+ Maximum value.

(RSR 분류표)

서의 절리가 발달한 연암-경암질 암반을 대상으로하는 터널에 대하여 개발된 암반분류이고, 유동성이거난 팽창성 암반(Terzaghi의 분류표)등과 같은 매우 취약한 층에는 적용하기에 부적합한 분류방법이다.

② 터널굴진에 따른 절리 방향성의 영향에 보다 주안점을 두었으며, 숙련도에 따른 오차가 적기때문에 보통 터널의 표준설계의 기본이 되는 암반분류방법으로서 보

편적으로 많이 통용되고 있다.

③ 보강방법이 개략적으로 제시되는 것이 단점이다.

• 분류방법

① 암석의 일축압축강도, 절리 발달 간격, 절리 상태, 지하수 조건, RQD, 절리 방향의 6가지 요소를 조사하고 각 요소가 터널시공에 미치는 중요도에 따라 평가점수를 할당하고 그것을 합산하여 RMR값을 산정하여 암반을 분류한다.

② 무지보 유지시간과 터널의 최대 안전폭을 산정할 수 있다.

③ 이 RMR값은 발파에 의한 터널 시공시의 보강지침이므로 TBM으로 시공할 때에는 발파때보다도 지보량이 적으므로 Lauffer(1988)가 제안한 그림으로 보정하거나 아래와 같은 방법으로 보정한다. (Rutledge & Preston 1978)

RMR을 RSR로 환산한다.

$$RSR = 0.77RMR + 12.4$$

(표준편차 : 8.9)

보정지수를 구하여 RSR를 수정한다.

RSR을 RMR로 환산한다.

• 활용방안

① 지보하중의 계산(UNAL, 1983)

$$P = ((100 - RMR) / 100) \times \gamma \cdot B = \gamma \cdot Ht$$

P : 지보하중(KN)

B : 터널폭(M)

γ : 암석단위중량(KG/M3)

Ht : 보강이 필요한 암반의 높이(M)

② 암반의 C, ϕ , E값의 추정

RMR값으로 현장암반의 전단강도지수를 추정한다.

$$\text{Erock mass} = 2 \times RMR - 100(\text{Gpa}) : RMR/50$$

(Bieniawski, 1978)

$$\text{Erock mass} = 10(RMR - 10) / 40(\text{Gpa}) : RMR < 50$$

(Pereira, 1983)

7. Q-system (NGI분류법 Barton,

1974 · 1993)

•특성

① 현장의 전단강도에 보다 주관점을 둔 암반분류이고 현장응력도 고려하고 있다.

② 절리의 방향성은 고려 안함(거칠기와 개수 등을 고려)

③ 대단면 터널에 적합하고 유동성이거나 팽창성 암반등과 같은 매우 취약한 층에 적합한 분류법이다.

④ 세밀한 암반분류에 따라서 보다 구체적이고 체계적인 보강방안이 제시된다.

⑤ 일반적인 시추조사만으로는 6요소를 신뢰성 있게 판단하기 곤란하기 때문에 숙련도에 따라 오차가 크다.

•분류방법

① RQD, 절리계의 수, 절리의 거친 정도, 절리의 변질정도, 지하수 영향

RMR분류 점수에 의한 암반구분

배점	81~100	61~80	41~60	21~40	≤ 20
등급 번호	I	II	III	IV	V
상태	매우 양호	양호	보통	불량	매우 불량

절리상태에 따른 점수 보정

절리의 주향/경사	매우 견실	양호	보통	불량	매우 불량
배점	터널	0	-2	-5	-10
	기초	0	-2	-7	-15
	사면	0	-5	-25	-50

터널에서의 암반 주향과 경사의 영향

절리면의 주향이 터널 굴진방향과 수직				터널축 평행 주향		주향과 무관
내림 경사방향 굴진		오름 경사방향 굴진				
Dip 45~90°	Dip 20~45°	Dip 45~90°	Dip 20~45°	Dip 45~90°	Dip 20~45°	Dip 0~20°
매우 유리	유리	양호	불리	매우 불리	양호	양호

암반분류 평균치

분류 번호	I	II	III	IV	V
평균자립시간	15m연장에 10년	8m연장에 6개월	5m연장에 1주일	2.5m연장에 10시간	1m연장에 30분
암반의 점착성	>400KPa	300~400 KPa	200~300 KPa	100~200 KPa	<100 MPa
암반의 마찰각	>45°	35~45°	25~35°	15~25°	< 15°

구 분		가중 평가							
1	건설 암반의 강도	점하중	>10MPa	4~10MPa	2~4MPa	1~2MPa	암축강도		
		일축압축강도	<250MPa	100~250MPa	50~100MPa	25~50MPa	5~25MPa	1~5MPa	<1MPa
2	RQD(%)	배점	15	12	7	4	2	1	0
		배점	20	15	13	8	<25		
3	절리간격	배점	>2m	0.6~2.0m	200~600mm	60~200mm	<60mm		
		배점	20	15	10	8	5	>20m	
4	절리 면 상태	연장길이	<1m	1~3m	3~10m	10~20m	>20m		
		배 점	6	4	2	1	0		
		분리폭(mm)	밀착	<0.1mm	0.1~1.0mm	1.0~5.0mm	>5.0mm		
		배 점	6	5	4	1	0		
		거칠기	매우 거칠	거칠	약간 거칠	매끄러움	아주 매끄러움		
		배 점	6	5	3	1	0		
		충진물두께(mm)	없음	견고하면서 5mm이하	견고하면서 5mm이하	연약하면서 5mm이하	연약하면서 5mm이상		
		배 점	6	4	2	2	0		
풍화도	신선함	약간 풍화	중간 풍화	심한 풍화	완전 풍화				
배 점	6	5	3	1	0				
5	지하수	터널연장 10m당 유입수량(l/min)	없음	10	10~25	5~125	>125		
		절리간 수압비	0	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	>0.5		
		주용력비							
		일반상태	완전 건조	습윤 상태	젖은 상태	흙벽 젖은 상태	대량 유출(흐름)		
배점	15	10	7	4	0				

RMR을 이용한 암반의 분류방법(Bieniawski, 1989)

및 응력감소요인 등의 파라미터를 이용하여 Q값을 산정한다(상세한 점수화 방법은 생략).

$$Q = RQD/J_n \times J_r / J_a \times J_w / SRF$$

= 암파의 크기 × 암파내의 전단력(현장관찰이나 Tilt test 또는 Profile gauge) × 활성응력(깊이에 따라 추정)

J_n : 절리계의 수(우세한 절리군만 고려)

J_r : 절리의 거칠기 정도

J_a : 절리면 변질계수

J_w : 절리 간극수에 의한 저감계수

SRF : 응력저감 계수

② Q값에 의한 지보방법은 터널의 유효크기(De)에 따라 결정된다.

③ 최근에 Grimstad & Barton(1993)가 1050개의 새로운 터널사례로부터 근래에 사용되기 시작한 Fibre Reinforced Shotcrete의 적용을 고려하면서 9단계의 보강방법을 새롭게 제시하고 있다. 임시적인 보강방법을 고려하려면 Q값을 5Q로 대입하거나 또는 ESR을 1.5ESR로 증가시켜 대입하여 적용한다.

$$De = \frac{B \text{ (터널 굴진장, 직경 또는 높이)}}{ESR \text{ (Excavation Support Ratio : 굴착지보율)}}$$

④ 이 Q값은 발파에 의한 터널시공시의 보강지침이며 TBM으로 시공할 때에는 발파때보다도 지보량이 적으므로 아래와 같은 방법으로 보정한다.

Q값을 RMR로 환산한다.

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \text{ (Bieniawski, 1976)}$$

$$RMR = 10.5 \ln Q + 42 \text{ (Abad et al., 1983)}$$

RMR을 RSR로 환산한다.

$$RSR = 0.77RMR + 12.4 \text{ (표준편차 : 8.9)}$$

보정지수를 구하여 RSR를 수정한다.

RSR를 RMR로 환산한다.

RMR를 Q로 환산한다.

• 활용방법

① 보강하지 않고 굴착할 수 있는 최대 무지보 굴진장은 $SPAN_{max} = 2(ESR)Q^{0.4}$

② 필요한 록볼트의 길이(L)은

$$L = (2 + 0.15B) / ESR : B \text{ 는 굴착폭}$$

③ 암반의 E값 추정(Grimstad & Barton, 1993)

$$E = 25 \log_{10} Q \text{ (Gpa)}$$

④ 영구 지보압력(Proof)

$$P_{Proof} = (2.0/J_r)Q^{1/3} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

한편 Joint Set의 수가 3보다 작으면 영구지보압력(P_{Proof})은

$$P_{Proof} = (2/3)(J_n)^{1/2}(J_r)^{-1}Q^{1/3} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

굴착작업의 종류		ESR	사례의 수
일시적인 채굴공동		3~5	2
수갱	원형단면	2.	-
	사각단면	2.0	-
영구적인 채굴공동, 수력발전을 위한 수로터널(고압의 수로터널제외), 시험공동, 대규모 채굴의 수평갱		1.6	83
지장용 공동, 지하수 제어용 시설, 도로 및 철도의 터널, 접근 공동, 터널의 교차부분		1.3	25
발전소, 주요 고속도로 및 철도의 터널, 민방위용 방공호, 입구공동, 터널의 교차부분		1.0	73
지하의 핵발전소, 지하철도 및 역, 지하공장		0.8	2

굴착작업의 종류와 요구되는 안전도에 따른 ESR

맺음말

일반적으로 설계라 하면 수치해석에 의해 시공성과 안정성을 사전에 평가하여 최적의 구조물을 도면화하는 작업이지만 터널설계는 굴착하는 지반이 암반이기 때문에 굴착전에 지층을 정확하게 모델링한다는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 터널의 경우 사전에 이루어지는 수치해석은 다른 구조물에 비해 중요도 및 정확도가 상당히 떨어진다. 터널설계는 시공 및 계측의 결과를 이용한 역해석법으로 시공중에 재검토를 하는 것이 무엇보다 중요하며 이는 터널 설계의 주요한 특징중의 하나이다.

본고에서는 터널 설계의 이론적인 면보다는 사전준비 단계인 조사 및 계획, 암반분류방법 등을 설명하였다. 특히 과거에는 암반분류에 의한 방법으로 설계된 터널이 상당히 많았으며 지금도 사전단계에서는 이런 방법에 의해 기본적인 터널형상 및 지보패턴, 굴착방법을 선정할 정도로 매우 중요한 부분이며 반면에 터널설계의 낙후성을 나타내는 일면이기도 하다. 그러므로 향후 설계단계에서 암반을 정확하게 평가하는 기법 및 장비개발이 이루어짐과 동시에 시공 및 계측의 결과를 이용한 역해석기법의 개발이 무엇보다도 중요하다. **SS**